

國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝暨景觀學系

碩士論文

Department of Horticulture and Landscape Architecture

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis



鎳與尿素對水耕‘桃園一號’蕹菜生長、要素及  
硝酸鹽含量之影響

Effects of Nickel and Urea on Growth, Nutrient and Nitrate  
Content of Hydroponic-cultivated Water Spinach  
(*Ipomoea aquatica* cv. Taoyuan No. 1)

謝博中

Po-Chung Hsieh

指導教授：陳右人 博士

Advisor: Iou-Zen Chen, Ph.D.

中華民國 109 年 2 月

Feb, 2020

## 致謝

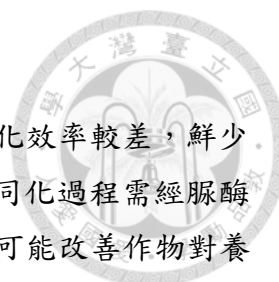
本論文得以完成，首先感謝業師陳右人教授自大學時期以來的悉心指導，奠定了頗為前瞻的方向，使本題目於大學專題課程時即有初步成果；且在後續的試驗設計規畫方面，也讓我有一定程度的發揮空間，因此進一步擴展而成本論文的落實。陳老師不僅於百忙之中對拙著內容的不斷斧正，常常在本研究遇到困難時指點迷津與協助鼓勵；其身教言教更讓我在日常生活、為人處事以及研究能力上獲益良多。

試驗進行的過程當中，也得到許多人的幫忙：特別是來交流的鍾鳳林老師，除了給予寶貴的試驗規畫思維，也提示要注意薤菜材料的特性；還在我出國的時候為水耕箱補水，使開頭的試驗得以順利完成。另得感謝在多次的研究室 meeting 中，阮素芬老師及林書妍老師於試驗各階段報告的指正以及建議。還有在初期階段，我對植體營養分析不甚熟悉，幸蒙美玲姐以及懷慶學長的耐心教導，以及茶業改良場研究人員戴佳如、李建漢的協助操作分析，遂得以一一克服難關。

再者，還得感謝研究室黃翔及俊陵學長的愛護，同窗十方三年來常交換經驗資訊，一起從錯誤中學習、解決問題以及過程的互相鼓勵。並有 Billy、亭瑋共同處理擔任課程助教的大小事，珮淳以及瑞娟、雙君的鼎力協助，還有曾玲蓉阿姨的照顧。由於本研究室成員總是甘苦與共，共同克服了許多難題，也一起經歷了很多充實快樂的時光；歷歷在目的回憶不僅充滿感激，也覺得有參與的榮譽感，因為我是其中的一份子。

最後，在碩士路途的尾聲，感謝口試委員李金龍教授、林慧玲教授等五位老師，撥冗精密審查論文，惠賜寶貴修改意見。另外，還要感謝父母的養育之恩，因為家人無微不至的照顧與精神上的支持，始終是我的堅強後盾，使我能專心致志於學業上的精進。

謹以此論文研究成果獻給所有關懷我的師長、父母、家人以及朋友，更期望能將所有感恩之心，化做日後貢獻所學的動力。



## 摘要

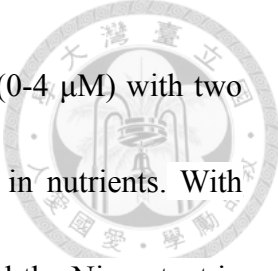
尿素雖為農業主要施用之氮肥，但因尿素用於水耕時氮同化效率較差，鮮少作為水耕氮源，此可能與配方未考慮鎳添加有關。作物對尿素同化過程需經脲酶(urease)水解成銨態氮後得以利用。鎳為脲酶之中心離子，故鎳可能改善作物對養液尿素的同化效率。以尿素取代養液部分硝酸氮源，可降低生產蔬菜之硝酸鹽含量，避免其過量攝入之風險。本研究特別以鎳之添加，重新評估含尿素蔬菜水耕養液配方之開發，期望運用此配方生產低硝酸鹽蔬菜。‘桃園一號’蕹菜(*Ipomoea aquatica*)以湛水式水耕系統進行栽培，養液參考 Hoagland 配方。總氮維持不變，以尿素取代部分硝酸鹽並輔以鎳之添加，探究含尿素水耕配方對蕹菜之生長、要素含量以及硝酸鹽含量之影響。本研究共分為四個試驗，試驗一為 7 mM 尿素態氮搭配 0 至 85.3  $\mu\text{M}$  共六鎳變級之鎳毒害試驗。水耕液過量鎳( $> 8.6 \mu\text{M}$ )抑制蕹菜生長，產生新葉黃化徵狀，蕹菜葉片鐵含量較低，顯示過量鎳除本身造成毒害，可能阻礙蕹菜對鐵之吸收，並占據以鐵為中心之酵素，造成類似缺鐵之徵狀。試驗二則改以 0 至 4  $\mu\text{M}$  共五個鎳變級與兩個尿素變級(0, 8 mM)以求得適宜鎳添加範圍。0.5、1  $\mu\text{M}$  鎳之添加，可改善含尿素水耕蕹菜的生長，且尿素的存在，使蕹菜有較高根部鎳累積。試驗三則以 0 至 10 mM 共七個尿素變級及適量鎳之添加(0、1  $\mu\text{M}$ )，來探討尿素取代硝酸態氮的程度對蕹菜之反應。高尿素濃度下，蕹菜仍可正常生長。適量鎳添加可提升 6、8 mM 尿素組之生長，且蕹菜地上部硝酸鹽含量較無尿素對照下降 21%。高尿素下蕹菜鈣、鐵及鋅含量較低，但錳含量則較高。其中蕹菜根部鐵含量於高尿素下，降低幅度較大，此應為蕹菜應用於含尿素養液與傳統養液栽培之間的差異。於相同適量鎳下(1  $\mu\text{M}$ )，蕹菜根部鎳含量與養液尿素濃度成正相關，與試驗二之結果呼應。試驗四則以三個尿素變級(2、4、10 mM)與鎳添加(0、1  $\mu\text{M}$ )來探討蕹菜，吸收尿素態氮、銨態氮及硝酸態氮之情形。鎳添加可提升蕹菜對養液尿素態氮之吸收速率，並降低銨態氮之吸收速率，鎳添加則僅降低第一週蕹菜對硝酸態氮之吸收速率。蕹菜於高尿素養液下仍能正常生長，且所生產的蕹菜硝酸鹽含量顯著較低，表示含尿素水耕配方具一定應用潛力，蕹菜對鎳需求與尿素之存在有關，並適量鎳可改善 6、8 mM 尿素組下之生長，增進蕹菜對養液中尿素的吸收，顯示含尿素水耕配方之開發，鎳為配方中扮演不可或缺之必要關鍵成分。

關鍵字: 尿素、蕹菜、水耕氮源、脲酶、尿素同化

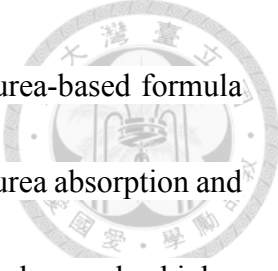
## Abstract



Urea is the most widely used and low-cost nitrogen fertilizer in agriculture. However, it is seldom used as a nitrogen source in hydroponic culture due to its poor nitrogen use efficiency. These results could be related to the loss of Ni supplement. Plants utilize urea via urease to hydrolyze it into ammonia for further assimilation process. Ni is of importance for activation of urease and hence for promoting plants to utilize urea in urea-based nutrients. Partially replacing nitrate with urea in hydroponic culture could reduce nitrate content in vegetable crops and reduce the risk of excessive nitrate intake. Therefore, the objective of this study was to develop urea-containing nutrient formula especially in view of Ni addition. We hope this nutrient formula could be applied on low-nitrate vegetable crops production. In order to investigate the effect of Ni on urea-based solution on plant growth, nitrate and nutrient content, water spinach (*Ipomoea aquatica* cv. Taoyuan No. 1) were grown in deep flow technique system (DFT) with nutrient based on Hoagland solution.  $\text{NO}_3\text{-N}$  were partially replaced with urea-N, while the total-N were the same. The research was divided into four experiments. In the 1<sup>st</sup> experiment, we used six Ni concentrations (0-85.3  $\mu\text{M}$ ) with 7 mM urea-N to observe the Ni toxic effect on water spinach. Excess Ni ( $> 8.6 \mu\text{M}$ ) inhibited plant growth. Young leaves had chlorosis or necrosis symptoms and Fe content in leaf was also decreased. Ni might affect Fe uptake and occupy Fe-related enzyme, and cause symptoms that similar



to Fe deficiency. Then in the 2<sup>nd</sup> experiment, five Ni concentration (0-4  $\mu\text{M}$ ) with two urea-N level (0, 8 mM) were used to find the suitable Ni dosage in nutrients. With appropriate Ni addition (0.5, 1  $\mu\text{M}$ ), plant growth were improved and the Ni content in roots were higher in the presence of urea. In the 3<sup>rd</sup> experiment, seven urea levels (0-10 mM) combined with suitable Ni dosage (0, 1  $\mu\text{M}$ ) to evaluate the degree of substitution urea for nitrate on plants response. Water spinach could growth well under high urea-N dosage (10 mM). Ni addition could increase water spinach growth under 6, 8 mM urea-N and decreased nitrate content 21% compared to no urea control. The content of Ca in whole plant, Fe and Zn in root decreased under high urea dosage, while Mn in roots increased under high urea dosage. Among these nutrients, root Fe content significantly declined as urea dosage increased, which showed the distinct difference compared to traditional no-urea formula. Under the same 1  $\mu\text{M}$  Ni addition, root Ni content in plants were positively correlated to urea concentration in nutrients. These trend were in agreement with the result of the 2<sup>nd</sup> experiment. The 4<sup>th</sup> experiment was to monitor the absorption of urea-N,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  from nutrients. Nutrients contained three levels of urea-N (2, 4, 10 mM) and two levels of Ni (0, 1  $\mu\text{M}$ ). Ni addition significantly increased water spinach urea-N uptake rate and decreased  $\text{NH}_4\text{-N}$  uptake rate. While Ni addition only decreased  $\text{NO}_3\text{-N}$  uptake rate in the first week under Ni addition. Water spinach could grow well and effectively reduce nitrate content in shoots under high urea-N



dosage. These advantages provided some potential of applying this urea-based formula on water spinach. Appropriate addition of Ni promoted water spinach urea absorption and improve growth in 6, 8 mM urea-N. The demand of Ni for water spinach was also higher in the existence of urea. These evidences demonstrated the essentiality of Ni on designing a urea-based hydroponic culture system.

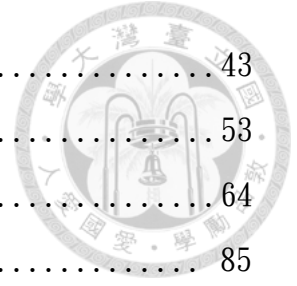
Key word: urea, water spinach, hydroponic nitrogen source, urease, urea assimilation.

## 目錄



前言 .....	1
前人研究 .....	3
一、尿素氮肥於農業上之重要性 .....	3
二、植物對尿素吸收及同化 .....	4
三、鎳對以尿素栽培的作物之重要性 .....	5
四、植物對鎳與鐵鋅吸收之影響 .....	7
五、鎳毒害對作物外觀生長及要素含量之影響 .....	8
六、其他氮源對尿素吸收之影響 .....	10
七、尿素取代硝酸鹽配方之開發與低硝酸鹽蔬菜之生產 .....	11
八、以熱帶作物蕹菜評估含尿素及鎳之水耕養液配方可行性 .....	13
材料與方法 .....	15
一、植物材料、水耕系統及養液配方 .....	15
二、試驗方法與調查項目 .....	15
三、分析方法 .....	17
四、統計分析 .....	22
結果 .....	23
一、鎳毒害對‘桃園一號’蕹菜生長與要素含量之影響(試驗一).....	23
二、適宜鎳對含尿素水耕‘桃園一號’蕹菜生長及要素含量之影響 (試驗二).....	25
三、尿素濃度與鎳添加對水耕‘桃園一號’蕹菜生長及要素含量之影響 (試驗三).....	29
四、尿素濃度與適量鎳對水耕‘桃園一號’蕹菜氮源與巨量要素吸收之影響 (試驗四).....	31
討論 .....	34
一、蕹菜鎳毒害病徵與鎳累積 .....	34
二、適量鎳添加之必要性 .....	36
三、含尿素及鎳養液配方對蕹菜要素含量之影響 .....	37
四、含尿素養液配方評估與建立 .....	38
結論 .....	41

參考文獻 .....	43
圖 .....	53
表 .....	64
附錄 .....	85







## 圖目錄

圖 1、養液 85.3 $\mu\text{M}$ Ni 濃度處理對薤菜鎳毒害徵狀 .....	53
圖 2、鎳毒害對薤菜生長及葉片外觀之影響 .....	54
圖 3、養液鎳濃度與水耕薤菜葉片鎳含量之相關性 .....	55
圖 4、養液鎳與尿素對水耕薤菜根部鎳含量相關性 .....	56
圖 5、養液尿素與鎳對水耕薤菜株高之影響 .....	57
圖 6、養液尿素鎳添加對水耕薤菜莖部鮮重之影響 .....	58
圖 7、養液尿素與鎳處理對水耕薤菜莖部鮮重迴歸分析 .....	59
圖 8、養液尿素與鎳對水耕薤菜地上部硝酸鹽含量之影響 .....	60
圖 9、養液尿素與鎳對水耕薤菜根部鎳累積之影響 .....	61
圖 10、尿素與鎳添加養液配方對水耕薤菜株高之影響 .....	62
圖 11、尿素與鎳添加對養液校正前 pH 值之影響 .....	63

表目錄



表 1、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕薤菜葉片葉綠素濃度、葉長及莖徑之影響 .....	64
表 2、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕薤菜株高之影響 .....	65
表 3、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕薤菜株高、莖徑及乾鮮重之影響(26 天) .	66
表 4、鎳對以尿素佔 46.6%氮源水耕薤菜根莖葉乾鮮重之影響 .....	67
表 5、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕薤菜葉片要素含量之影響(26 天) .....	68
表 6、養液中鎳濃度與尿素對水耕薤菜葉綠素濃度與生長之影響 .....	69
表 7、養液中鎳濃度與尿素濃度對水耕薤菜乾鮮重單因子分析 .....	70
表 8、養液中鎳濃度與尿素對水耕薤菜乾鮮重之複因子分析 .....	71
表 9、養液中鎳濃度與尿素對水耕薤菜單株要素含量之影響 .....	72
表 10、養液中鎳與尿素濃度對薤菜葉片要素含量之影響 .....	73
表 11、養液中鎳與尿素濃度對薤菜莖部要素含量之影響 .....	74
表 12、養液中鎳與尿素濃度對薤菜根部要素含量之影響 .....	75
表 13、養液尿素濃度與鎳添加對水耕薤菜葉綠素濃度、株高、莖徑以及根長之影響 .....	76
表 14、養液尿素濃度與鎳添加對薤菜乾鮮重之影響 .....	77
表 15、養液尿素濃度與鎳添加對薤菜單株要素含量之影響 .....	78
表 16、養液尿素濃度與鎳添加對薤菜葉片要素含量之影響 .....	79
表 17、養液尿素濃度與鎳添加對薤菜莖要素含量之影響 .....	80
表 18、養液尿素濃度與鎳添加對薤菜根要素含量之影響 .....	81
表 19、尿素與鎳對水耕薤菜乾鮮重之影響 .....	82
表 20、尿素與鎳對水耕薤菜氮肥吸收量之影響 .....	83
表 21、尿素與鎳對水耕薤菜巨量要素吸收量之影響 .....	84

## 前言




尿素是目前最廣為使用的氮肥，占整體全世界氮肥消耗量的一半 (<http://faostat.org>)。尿素價格相對便宜、易溶於水且方便施用，含氮量高(46.6%)，較硝酸態氮肥便於運輸且較無爆炸風險(Glibert *et al.*, 2006)。尿素施於土壤被視為緩效型有機態氮肥，施於土壤後需經土壤微生物脲酶(urease)作用分解成銨態氮，才得以被植物及微生物利用；但是尿素施於土壤被水解成銨態氮過程中，會使土壤 pH 值升高，而銨態氮於此高 pH 值的鹼性環境下，就容易轉變回氨氣揮發逸失(ammonia volatilization) (Ernst and Massey, 1960)。此氨氣揮發逸失之現象，若在只將尿素灑施於表土、未混拌入土壤中，或者將尿素施用於鹼性土壤等狀況下會更加劇，其流失率可達 3 成以上，造成施用上的浪費損失(Silva *et al.*, 2017)。

尿素不只是應用於土施氮肥，也可用於水耕養液，作為傳統配方中，硝酸態氮以及銨態氮之外的第三種氮肥來源。養液氮源以尿素取代硝酸鹽的使用，可以降低水耕蔬菜之硝酸鹽含量(Khan *et al.*, 1999)，此為含尿素水耕養液之優點。由於蔬菜於栽培上，常有硝酸鹽的累積問題，且蔬菜占飲食硝酸鹽攝入的 50%至 70% (Habermeyer *et al.*, 2015)；因此降低蔬菜硝酸鹽含量，即可解決大部分硝酸鹽之攝取風險。歐盟根據季節、品種與栽培方法，曾訂定不同蔬菜硝酸鹽含量之上限規定，其中針對嬰兒有特別低的硝酸鹽含量上限(EC No 466/2001)。

降低蔬菜硝酸鹽的累積問題，除了選擇低硝酸鹽累積品種、改善栽培環境之外，也可以從改變氮肥種類組成來達成(Anjana *et al.*, 2007)。若以尿素取代養液硝酸鹽的使用，應該具有生產低硝酸鹽水耕蔬菜之潛力，加上尿素用於養液配方養液 pH 值調整容易，可將 pH 值保持於 5.5-6.0 之間，與施用於土壤方式相比較，就較無氨氣逸失問題。

相當多研究將尿素作為水耕氮源，但大多成果認為尿素並非理想水耕氮源，造成尿素鮮少用於水耕養液。於水耕環境以尿素作為氮肥，與硝酸態氮及銨態氮相



比，番茄對尿素吸收及同化效率較低，植株生長也不佳(Ikeda and Tan, 1998)；玉米與小麥同樣以硝酸銨有較高的氮肥施用效率(nitrogen use efficiency)，而尿素則較低(Merigout *et al.*, 2008)。其原因應該是植物對尿素代謝路徑受阻。由於尿素經由水耕養液吸收至植物體內，需以存在於細胞質的脲酶(urease)將尿素分解成銨態氮及二氧化碳；銨態氮進一步被植物所利用，同化為胺基酸以供植物所需(Witte, 2011)。因此，脲酶的存在與否及活性，即為尿素利用效率之關鍵。

鎳為植物第十七個必要元素，目前唯一之機能是作為脲酶的中心離子，可將精胺酸(arginine)代謝過程所產生的內生尿素順利水解成銨態氮，進而形成胺基酸(Eskew *et al.*, 1983)。所以在含尿素的水耕養液系統加入鎳，可改善含尿素水耕栽培作物之生長(Gerendas *et al.*, 1998； Khan *et al.*, 1999)。

鎳可改善植物對尿素代謝之功能研究雖得到肯定，但由於大家已受限於早先尿素作為水耕氮源效率不彰的說法，所以現今大多仍沿用舊有未含鎳與尿素之養液配方；且作物種子內所含的鎳足以提供未含尿素配方所需，最終造成鎳添加的必要性被遺忘。本研究以鎳之添加，重新評估尿素作為水耕氮源之可能性，並期望藉此研究能再次彰顯鎳於水耕配方中的必要性，並藉由適當控制鎳添加之濃度，使所栽培之蔬菜鎳累積含量既符合食品安全之要求，又可免除硝酸鹽過量累積於蔬菜對人體健康之風險。

本研究使用萵菜作為試驗材料，養液配方以尿素取代部分硝酸鹽，並加入適當濃度的鎳，在總氮濃度不變的方式下來評估對萵菜生長、必要元素及硝酸鹽含量之影響。期望求得水耕環境最適萵菜的尿素及鎳濃度，以及鎳添加於此系統所扮演的角色，並透過結果可作為實際應用策略上之參考。



### 一、尿素氮肥於農業上之重要性

尿素化學式為 $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ，分子量 60.0。產業上尿素的製程是以哈伯法製氨 (Haber-Bosch process) 取得液氨，通入二氧化碳即得尿素；液氨進一步可生產硫酸銨及硝酸態氮肥。其中，硝酸態肥料則主要以奧士華-哈伯法 (Haber-Ostwald) 製成，製程上較尿素成本高 (Barnum, 2003)。尿素為農業用氮肥中含氮量最高者 (46.6%)，在施用相同氮素下，尿素所需重量較其他氮肥少。於肥料儲藏及運輸上尿素也較方便安全，硝酸態氮肥如硝酸銨則有儲藏環境不良產生塵爆之風險 (Glibert *et al.*, 2006)。尿素極易溶於水，在  $20^\circ\text{C}$  下溶解度為  $108 \text{ g}\cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ ，除了施用於土壤，也方便配製成液肥以及應用於葉面施肥。以上特點使尿素成為現今之主流氮肥。

尿素被視為緩效型有機態氮肥，施於土壤後需經土壤微生物脲酶 (urease) 分解成銨態氮後得以被植物及微生物利用，然而於土壤分解產生的銨態氮則易於轉變為氨氣揮發逸失 (ammonia volatilization)；尿素施於土壤後，經土壤微生物脲酶的作用，水解成兩分子的氨及一分子之二氧化碳，而氨氣則與土壤溶液中氫離子作用轉換成銨離子，此步驟會造成土壤 pH 值的升高，而銨態氮於鹼性土壤環境則易行逆反應轉變回氨氣揮發損失 (Jones, 2013)。溫度、土壤含水量、土壤 pH 值、施用深度，皆影響到土施尿素轉變成氨氮佚失之程度；環境溫度越高，適中的土壤含水量、土壤 pH 值越高，以及尿素施用深度越淺，皆加速尿素於土壤中水解，並轉變成氨氣逸失 (Ernst and Massey, 1960)。施用尿素後充足的降雨，則可將尿素淋溶至土壤深層，降低氨氣揮發 (Black *et al.*, 1987)。土施尿素於在鹼性土壤或施用於表土後，如無灌溉淋溶入土壤深處，易被分解成氨氣逸失，可高達 3 成以上 (Silva *et al.*, 2017)。市售尿素氮肥以添加脲酶抑制劑 (*N*-(*n*-butyl) thiophosphoric triamide; NBPT)，來延緩尿素施於土壤之揮發氨氮 (AGROTAIN<sup>®</sup>)。脲酶抑制劑因與尿素結構類似，是以占據脲酶與尿素反應部位來抑制脲酶活性，屬競爭型抑制 (competitive inhibition) (Mazzei *et al.*, 2017)。脲酶抑制劑 NBPT 與尿素混合於土壤可顯著降低


由尿素造成的氮氣逸失；但脲酶抑制劑也可被作物吸收體內，影響作物對尿素的吸收與同化，對作物生長有不良影響(Cruchaga *et al.*, 2011; Krogmeier *et al.*, 1989)。

## 二、植物對尿素吸收及同化

尿素分子量小且為非電解質，早期認為尿素是以擴散方式通過植物細胞膜進入細胞(Gallucci *et al.*, 1971)。Wilson 等(1988)以 <sup>14</sup> 碳標定尿素搭配 ATPase 抑制劑，來探討綠藻對尿素吸收，發現跨膜氫離子濃度梯度的存在，可促進尿素吸收，顯示植物可利用主動運輸方式調控尿素之吸收。植物對尿素吸收與外界尿素濃度有關，依照外界尿素濃度的高低可分為高親和性運輸系統(high affinity transport system)及低親和性運輸系統(low affinity transport system)兩種不同途徑進入細胞。

阿拉伯芥中的 AtDUR3 被認為是專一性高的尿素主動運輸蛋白，在 ATPase 參與造成細胞膜內外氫離子濃度梯度差下，產生質子動力勢 (proton motive force)，而後尿素與氫離子得以透過運輸蛋白協同運輸(cotransport)進入植物細胞，K<sub>m</sub> 值為 3-4 μM (Liu *et al.*, 2003a)。阿拉伯芥於缺氮環境下，於根部表皮細胞大量表現 AtDUR3 運輸蛋白以獲取外界低濃度尿素，AtDUR3 運輸蛋白也表現於根部木質部及地上部，將尿素從根部經維管束運輸至地上部(Kojima *et al.*, 2007)。當外界尿素濃度較高時，尿素的吸收則為 LAT 路徑；尿素除了經由運輸蛋白行主動運輸，也可經水通道蛋白(aquaporins)、TIP (tonoplast intrinsic proteins) 及 PIP (plasmamembrane intrinsic proteins)等通道蛋白，行低親和性之運輸，將外源尿素吸收至根部細胞或將細胞質內的尿素運輸至液胞中儲存(Liu *et al.*, 2003b)。

尿素除了可從外界環境獲得，尿素本身也為植物次級氮素代謝—鳥胺酸循環(ornithine cycle)的中間產物；鳥胺酸循環中，精胺酸(arginine)於粒線體基質中因精胺酸分解酶(arginase)作用而產生鳥胺酸以及內生尿素，內生尿素則運輸至細胞質，並由存在於胞質的脲酶(urease)分解成銨態氮以及二氧化碳(附圖 1)。而銨態氮則進一步透過於胞質及葉綠體中的麩醯胺酸合成酶(glutamine synthetase)合成麩醯胺酸(glutamine)，麩醯胺酸可作為主要運移用氨基酸，或藉由一系列轉氨酶，將有機酸



加上氨基轉變成天門冬醯胺(asparagine)運移，並隨後可同化為不同的胺基酸，作為植物合成所需蛋白質之原料(附圖 2)。內生尿素及脲酶廣泛存在於植物各部位之細胞中，鳥胺酸循環更是生物體不可或缺的代謝途徑，外源尿素同樣是以此路徑代謝尿素，其中存在於胞質的脲酶則扮演關鍵角色(Merigout *et al.*, 2008)。

尿素可於根部進行同化，以 5 mM 尿素栽培之大豆根部銨態氮含量為地上部銨態氮的 10 倍左右，添加 NBPT 脲酶抑制劑抑制大豆根部及地上部脲酶活性，但銨態氮含量只有根部受抑制，地上部則無，顯示大豆應主要於根部而非地上部同化尿素(Cruchaga *et al.*, 2011)。尿素也可隨蒸散流運輸至地上部進行同化，番茄幼苗期吸收之尿素可於 24 小時內迅速運移到地上部葉片進行同化，占總吸收 94%；尿素同化能力也與生長階段有關，番茄生殖生長期尿素於 24 小時內葉片同化能力(30%)較幼苗期(6%)高(Tan *et al.*, 2000)。

尿素施用過多易造成累積毒害，葉尖及葉緣焦枯為尿素累積毒害常見徵狀，尿素混合脲酶抑制劑施用會使作物葉緣產生壞疽情形，壞疽組織具高含量尿素，顯示此壞疽為尿素累積所造成的毒害病徵(Krogmeier *et al.*, 1989)。欲降低尿素於栽培中毒害之情形，可從尿素於植物氮同化過程窺知，脲酶為代謝尿素之關鍵酵素，如提升脲酶活性，應可改善以尿素氮肥栽培作物之生長。

### 三、鎳對以尿素栽培的作物之重要性

尿素被植物吸收後同化成胺基酸之過程，需要脲酶的參與，將其分解為氮及二氧化碳。Dixon 等(1975)將白刀豆(*Canavalia ensiformis*)之脲酶純化後進行吸收光譜分析，推測脲酶內含有鎳離子。Brown 等(1987)指出經缺鎳培養三個世代之大麥種子，在無鎳養液下發芽受抑制，適當鎳可活化脲酶，種子儲存之精胺酸於發芽時可順利同化成銨態氮供發芽所需；脲酶為精胺酸代謝過程必要酵素，如無鎳活化脲酶，精胺酸代謝產生的內生尿素無法順利同化而使大豆發芽受阻。大豆種子主要以精胺酸的形式將氮儲存於種子，約佔種子氮含量的 17.3% (van Etten *et al.*, 1967)。大豆種子發芽時添加鎳，可增加 25%的產量(Kutman *et al.*, 2014)。大豆於無鎳 2.5%

尿素養液產生葉尖焦枯徵狀為尿素代謝受阻之故，鎳可活化脲酶之功能使得鎳被認為是植物第 17 個必需元素(Eskew *et al.*, 1983)。

鎳除了活化脲酶，也可活化與植物共生根瘤菌之鎳鐵氫化酶([NiFe] hydrogenase)，鎳添加不只增進大豆脲酶活性，也提高其共生固氮菌(*Rhizobium japonicum* 122 DES)氫化酶之活性(Klucas *et al.*, 1983)。根瘤菌固氮過程中，每一分子 N<sub>2</sub> 透過固氮酶(Nitrogenase)，加上 8 個氫離子及 8 個電子，產生 2 分子 NH<sub>3</sub> 以及 1 分子 H<sub>2</sub>，鎳鐵氫化酶可將固氮後多產生氫氣加以回收，並獲得能量，加速根瘤菌固氮效率(Phillips, 1980)。

適量鎳之添加可活化脲酶，在水耕的狀態下，可改善以給予尿素之作物的生長。養液添加 0.5 μM 鎳可提升水稻脲酶活性，在有外源尿素(6 mM)下，鎳可提高稻米的地上部及地下部之乾鮮重，不含尿素之硝酸銨組則無此改善效果(Gerendas *et al.*, 1998)。尿素占總氮供給量 20%之狀況下，0.05 mg·L<sup>-1</sup> 鎳添加，使水耕菠菜有較佳乾鮮重及葉長(Khan *et al.*, 1999)。水耕萵苣於三種尿素濃度(5、10、20 mM)配合鎳添加皆提升脲酶活性，使尿素被吸收後得以順利代謝，改善尿素組葉片鮮重及葉片總氮含量；而硝酸銨組添加鎳，較無提升總氮含量之效果(Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2011)。

傳統養液配方因發展時期較早，如 Hoagland 養液配方於二戰後即提出(Hoagland and Arnon, 1950)，故配方中微量元素部分並未考慮到鎳添加。而隨後各種修正配方，如 Steiner 配方加強除硼外之微量元素濃度，主要改變為巨量元素之組成，以及鐵螯合劑之種類(Steiner, 1961)。鎳於 1980 年代以後才被加入必要元素的行列(Brown *et al.*, 1987)，時間晚於傳統養液配方建立時期，所以未考慮到鎳添加，養液組成也只有銨態氮及硝酸態氮兩種。而由於鎳需求很低，水體及植體所含的鎳，已能滿足代謝內生尿素所需，故水耕作物絕大多數均能正常生長。近年來水耕蔬菜硝酸鹽含量備受重視，本研究欲以尿素取代硝酸鹽使用，以降低食用風險，因此鎳之添加可能是成功之關鍵因子。





#### 四、植物對鎳與鐵鋅吸收之影響

鐵、鋅、與鎳於週期表上同為過渡金屬，因電子組態牽涉 d 軌域，從原子半徑可得知  $\text{Fe}^{2+}$  (82 pm)、 $\text{Zn}^{2+}$  (83 pm)、 $\text{Ni}^{2+}$  (78 pm) 三者十分相近(Emsley, 1991)，根部吸收上可能有共用運輸蛋白之情形。金屬離子進入根部後，雖可經由共質體運輸 (symplast)、質外體運輸 (apoplast) 以及跨膜運輸 (transmembrane) 的方式，逐漸往根部維管束組織運送，但以質外體運輸為主，因卡氏帶 (Casparian strip) 限制金屬離子只以共質體運輸方式通過，因此質外體運輸要轉為共質體運輸，並需要經過跨膜運輸 (Kim and Guerinot, 2007)。跨膜運輸需經細胞膜上的運輸蛋白，在金屬離子的吸收調控上扮演重要角色。

ZIP family (ZRT、IRT-like Protein) 為與鐵及鋅運輸蛋白相似的運輸蛋白家族。蛋白質結構預測顯示 ZIP family 在膜上有 8 個跨膜結構域 (transmembrane domain)，其中第 3 及第 4 跨膜結構域之間的變異區胺基酸序列，與該運輸蛋白之專一性有關 (Guerinot, 2000)。ZIP family 中的 IRT1 鐵運輸蛋白存在於阿拉伯芥根部之皮層細胞及內皮細胞，IRT1 所屬基因於缺鐵時，表現於根部外圍組織以及根毛。IRT1 鐵運輸蛋白的功能為在缺鐵環境下，將鐵主動運輸至細胞內的鐵運輸蛋白；然而 IRT1 的專一性不高，在缺鐵的環境下，如果環境有其他過渡金屬離子如鎳、鋅、錳及鈷，也會於細胞內有相對高的累積量，表示這些金屬離子也可經 IRT1 主動運輸進入細胞，造成最終累積的情形 (Vert *et al.*, 2002)。鎳二價離子同樣也可經由 IRT1 進入根部細胞；以 (dimethylglyoxime；DMG) 藥劑染色，在缺鐵與添加鎳之處理，阿拉伯芥野生型的根部有大量鎳累積，可高達 200 ppm，約為鐵充足下的 4 倍累積量，而 IRT1 突變株則無此現象 (Nishida *et al.*, 2011)。鎳與鐵之吸收因鐵運輸蛋白專一性不高，可能共用鐵運輸蛋白進出細胞，而使兩元素在吸收上會互相影響。

鎳可於阿拉伯芥根部細胞累積大量濃度，與液泡運輸蛋白有關。AtIREG2 運輸蛋白 mRNA 同樣於缺鐵環境表現於根部，並透過綠螢光蛋白報導基因 GFP 標記顯示 AtIREG2 位於阿拉伯芥根部細胞液胞上。AtIREG2 過量表現株可在高鎳環境 (200  $\mu\text{M}$ ) 下保有較高鮮重，過量表現株相較於野生株的鎳累積也較高，而野生型則無法在此高濃度鎳下良好生長；於缺鐵下添加鎳，過量表現株較野生株生長良好，而 AtIREG2 突變株則根部及地上部生長皆受抑制。AtIREG2 為位於液胞上可以調節細胞質鎳濃度的動態平衡，進而與鎳的耐受性有關 (Schaaf *et al.*, 2006)。專一性


不高的鐵運輸蛋白，搭配 AtIREG2，可將缺鐵時過量吸收的鎳，從細胞質主動運輸至液胞儲存，進而減低細胞質內過高鎳濃度的傷害，並造成鎳會於缺鐵下累積於根部細胞的結果。

鎳可經由 IRT1 鐵運輸蛋白進入細胞，但 IRT1 突變株仍有鎳累積，應有獨立於 IRT1 的運輸蛋白參與鎳之運輸。ZIP1、ZIP2 與 ZIP3 與鋅有關運輸蛋白與 IRT1 結構相近(Grotz *et al.*, 1998)，且皆同屬 ZIP family 成員，這些運輸蛋白也可能為鎳吸收之管道。阿拉伯芥於缺鋅環境下，與缺鐵狀況相似，同樣於根部有累積鎳的現象，同位素  $^{63}\text{Ni}$  添加於缺鋅的阿拉伯芥植株，配合缺鋅養液處理，於短時間有明顯較高同位素  $^{63}\text{Ni}$  累積量；IRT1 突變株於缺鋅下，雖然相較於野生型於缺鋅下有較低之鎳累積，但仍相較於鋅充足的處理有較高鎳累積，代表有獨立於 IRT1 之運輸蛋白會於缺鋅下，將鎳主動運輸至根部細胞內，造成鎳累積之結果(Nishida *et al.*, 2015)。鎳可不只經鐵運輸蛋白進出細胞，也可能有其他 ZIP family 運輸蛋白參與，進而影響到其他原子半徑相似之元素吸收。

#### 五、鎳毒害對作物外觀生長及要素含量之影響

鎳為地殼前 20 豐富之元素，土壤鎳含量從 10-1000  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  不等，其中以蛇紋岩化育之土壤含有較高鎳含量(Gasser and Dahlgren, 1994)。一般土壤環境較不會有鎳缺乏問題。鎳添加於養液常見方法為添加七結晶水硫酸鎳，提供植物吸收有效性佳的二價鎳。鎳添加不可造成作物過度鎳累積，以免造成食品安全疑慮。鎳為對人體有害之重金屬，我國法規《飲用水水質標準》(民國 106 年 1 月修訂)訂定飲用水所含的鎳最大限值為 0.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。美國環境保護署(U.S. EPA)建議，飲用水鎳濃度應不超過 0.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，每日容許攝取量(Tolerable Daily Intake; TDI)為 0.02  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ ，每人每日攝入低於此量，則終身無受毒害之虞，以 60 公斤重成人為例，每日鎳可容許攝取量為 1.2 mg。

鎳以二價離子形式被根吸收，除了如生長於南非蛇紋岩土壤上 *Berkheya coddii* 鎳超累積植物可將大量鎳蓄積於地上部之外(Robinson *et al.*, 1997)，一般作物如玉米、黑麥(Yang *et al.*, 1997)、大豆(Dalton *et al.*, 1985)、萵苣及番茄(Poulik, 1999)等，多將鎳累積於根。運移進維管束的鎳可被有機酸或胺基酸螯合，促進鎳於植物體內



的運輸(Cataldo *et al.*, 1988)。少量鎳可進入維管束而輸送至地上部，根與地上部之鎳濃度可相差近 70 倍；組胺酸(histidine)可與鎳形成 1:1 錯合物，在水耕液搭配鎳施用增加小麥鎳根共質體運輸之比例(Symplastic Ni /Apoplastic Ni)，並使小麥木質部鎳含量增加，促進鎳從根傳輸到地上部(Dalir and Khoshgoftarmanesh, 2014)。鎳經維管束傳輸到地上部後，會累積於新生部位，大豆在含鎳栽培下，新葉比老葉的濃度高 6 至 12 倍(Kutman *et al.*, 2014)。番茄將鎳吸收至地上部，有 67.0-77.3% 分佈至植株頂端(Poulik, 1999)。如欲食用含鎳蔬菜，應去除根部以減少攝取在根部累積的鎳。

一般作物利用將鎳限制於根部，減少運移至地上部的方式，來忍受鎳含量較高之環境(Seregin and Kozhevnikova, 2006)，當環境鎳含量高於一定閾值，地上部鎳含量即開始上升，大豆地上部鎳含量於養液鎳超過 50  $\mu\text{M}$  後迅速增加(Cataldo *et al.*, 1978)，而一般作物地上部鎳含量高於 20-50  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}\text{D.W.}$  門檻濃度，即開始產生鎳毒害徵狀(Davis *et al.*, 1978; Macnicol and Beckett, 1985)。

鎳如同其他重金屬具有和酵素蛋白質上巰基結合能力(SH-group binding)可抑制許多酵素活性，且可干擾電子傳遞鏈，產生氧化逆境以及自由基，對細胞造成傷害(Toppi and Gabbrielli, 1999)。200  $\mu\text{M}$  過量鎳處理之小麥超氧歧化酶SOD及過氧化氫酶CAT活性升高，過氧化物酶POD及穀胱甘肽轉移酶GST等過氧化物清除酵素活性下降，使植株處於氧化逆境，進而抑制地上部生長以及造成葉綠素含量下降(Gajewska *et al.*, 2006)。鎳離子也可能取代其他酵素中金屬離子之位置，特別是與鎳離子大小相似之金屬離子，導致該酵素功能喪失。鎳可取代葉綠素中的鎂離子，以及Rubisco酵素之鎂輔因子，影響光合作用量以及速率(Yusuf *et al.*, 2011)。芥菜於 100  $\mu\text{M}$  鎳下根長受抑制33% (Alam *et al.*, 2007)，大麥於0.1  $\text{mM}$  鎳處理14天也產生葉片黃化壞疽現象(Rahman *et al.*, 2005)。鎳毒害所造成的葉片黃化壞疽徵狀即可能為鎳取代光合作用相關酵素中金屬輔因子所造成，而使得此徵狀與缺鐵、缺鋅、缺鎂類似。



## 六、其他氮源對尿素吸收之影響

尿素、銨態氮、硝酸態氮為三種常用肥料氮源，然而其同化路徑並不相同。尿素同化路徑與銨態氮較類似，尿素經細胞質脲酶轉換成銨態氮後，則後應與銨態氮同化路徑相似，可直接合成胺基酸；而硝酸態氮則需先經兩階段還原成銨態氮，分別經硝酸還原酶(nitrate reductase)以及亞硝酸還原酶(nitrite reductase)，而亞硝酸還原酶則存在於色素體(plastid)，因此硝酸鹽同化過程必須經色素體參與，才能將硝酸態氮順利還原成銨態氮，並隨後透過位於色素體之 GS/GOGAT(glutamine synthetase/glutamine oxoglutarate aminotransferase)進一步合成胺基酸(Merigout *et al.*, 2008; Witte, 2011)。

尿素不適合單獨作為養液氮源，如同傳統養液氮源所包含的銨態氮及硝酸態氮。單獨使用尿素之水耕番茄生長較差，而以尿素配合硝酸態氮或銨態氮，可提高番茄乾重及總氮含量(Ikeda and Tan, 1998)。水耕液同時含有硝酸態氮及尿素，可使小麥幼苗對尿素吸收速率提升，而銨態氮則無提升尿素吸收速率；硝酸態氮及尿素共存組小麥地上部有較高銨態氮含量而有較低尿素含量，水耕養液硝酸鹽的存在，可以提升小麥幼苗對尿素之吸收，且尿素較快同化成銨態氮之速率(Garnica *et al.*, 2009)。

Zanin 等(2015a)指出，硝酸鹽及尿素共存處理相對於其個別之處理，玉米幼苗根部側根有較好發育；以 Real-time RT-PCR 觀察氮同化相關基因之表達，在硝酸鹽及尿素共存處理下，細胞質之 GS 基因 ZmGln1-5 以及色素體 GS2 基因 ZmGln2 表達量提高，而與硝酸鹽同化相關基因如硝酸還原酶基因 ZmNR 及亞硝酸還原酶基因 ZmNiR 也較單獨硝酸鹽處理組上升，顯示尿素與硝酸鹽共存處理具較佳氮同化能力，存在於細胞質及色素體的兩種與氮素同化相關酵素皆上調，可增進尿素同化效率。

色素體 GS 酵素可將光合產物與亞硝酸還原後產生的銨離子反應產生麩醯胺酸(glutamine)，經 GOGAT 產生麩胺酸(glutamate)，麩胺酸則可運移至細胞質，透




過存在於細胞質的 GS，作為其反應之受質，將尿素同化過程產生的銨離子整合產生麩醯胺酸，而最終可同時提高尿素與硝酸鹽同化效率(Zanin *et al.*, 2015b)。

#### 七、尿素取代硝酸鹽配方之開發與低硝酸鹽蔬菜之生產

人體攝入硝酸鹽來源主要有肉製品、水及蔬菜，其中蔬菜占飲食硝酸鹽攝入的 85% (Güneş *et al.*, 1994)。水耕蔬菜常有硝酸鹽含量過高問題，極易超過世界衛生組織所訂定之每日攝取安全容許量(0-3.7 mg/Kg body weight/day)。嬰兒攝食超過 1-8.3 mg NaNO<sub>3</sub> 易產生高鐵血紅蛋白血症(methemoglobinaemia)，或稱為藍嬰症(blue baby syndrome)。

硝酸鹽在一定含量下本身沒有毒性，其為害主要是轉為亞硝酸鹽而表現；大約 25%攝入之硝酸鹽會經唾腺再分泌回口腔，而經口腔細菌還原成亞硝酸鹽，約 6-7%攝入的硝酸鹽經此循環轉換成亞硝酸鹽被攝入 (Habermeyer *et al.*, 2015)。亞硝酸鹽與亞硝基前驅物作用後，可在人體中產生內生性氮-亞硝基化合物 (N-nitroso compounds)，經動物實驗證明為強烈致癌物。歐盟根據不同季節、品種、栽培方法訂定不同蔬菜硝酸鹽含量之上限，其中針對嬰兒有特別低之硝酸鹽含量上限(附表 1)。

降低蔬菜硝酸鹽含量，即可解決大部分硝酸鹽之攝取風險。降低蔬菜硝酸鹽的累積問題除了選擇低硝酸鹽累積品種、改善栽培環境，也可以從改變氮肥種類組成來達成(Anjana and Iqbal, 2007)。在菠菜上，尖葉菠菜較圓葉菠菜有較高之硝酸鹽累積量(Maynard *et al.*, 1976)。800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  光照環境下，可有效降低硝酸鹽含量(Proietti *et al.*, 2004)。以尿素取代養液 20%硝酸鹽可降低 ‘Zaobao’ 及 ‘Lvbao’ 芥藍之硝酸鹽含量(Zhu *et al.*, 2018)，以尿素取代養液 20%硝酸鹽分別降低 ‘Berlo’ 及 ‘Kirsten’ 萵苣 14%及 11%硝酸鹽含量(Güneş *et al.*, 1994)。以 50%以及 20%尿素取代硝酸鹽使用可分別降低菠菜 41%以及 26% 硝酸鹽含量(Khan *et al.*, 1999)。顯示水耕蔬菜以尿素取代硝酸鹽使用，可有效降低蔬菜硝酸鹽含量，並且取代比例越高，蔬菜硝酸鹽含量越低。




養液以尿素取代硝酸鹽，也影響作物生長以及必要元素之含量，尿素取代比例因每種作物對尿素耐受性程度不一而不同。Luo 等(1993)以薤菜、萵苣以及青梗白菜分別在全尿素、尿素及硝酸鹽各半，以及全硝酸鹽三種處理下，來評估尿素對此三種蔬菜之耐受性以及應用潛力；結果顯示薤菜於此三種氮源處理皆有良好生長，而萵苣以及青梗白菜則於尿素及硝酸鹽各半處理即可觀察到植株發育不良，且有些許根系褐化，全尿素組則有根系黑化壞疽死亡之徵狀，三種蔬菜之尿素耐受性為薤菜>青梗白菜>萵苣。於 20%尿素取代硝酸鹽相較於 50%尿素組菠菜有較高乾重，並且有較高鈣含量，其他要素含量則無顯著差異(Khan *et al.*, 1999)。

養液以尿素取代硝酸鹽對作物之影響除了尿素本身，配方中其他要素組成也會改變。第一為硝酸鹽濃度降低，雖有生產低硝酸鹽蔬菜之優點，但硝酸鹽濃度降低，可能使作物有缺氮之情形。養液銨態氮濃度保持不變，硝銨比也因硝酸鹽濃度減少而下降。

硝銨比與養液 pH 值之變化有密切關係，作物在吸收硝酸態氮以及銨態氮，為了保持植物體內電中性，必須進行離子交換來平衡體內陰陽離子(Kirkby, 1968)。硝酸態氮常伴隨陽離子(cotransport)一起被根部細胞吸收，使養液 pH 值上升，而銨態氮吸收過程則是會將根部細胞內的氫離子置換至養液(antiport)，使養液 pH 值降低，因此養液配方硝銨比可決定於栽培中 pH 值變動之方向(Bernardo *et al.*, 1984)。

氮源吸收速率也因作物而有差異。以硝酸態氮及銨態氮相等養液處理，草莓及菠菜對銨態氮吸收速率較高，養液 pH 值下降快，而萵苣及豌豆則是對硝酸態氮吸收速率較高，養液 pH 值較無變動(Ikeda and Osawa, 1981)。尿素於土壤水解成銨態氮的過程，會使土壤 pH 值升高，因土壤富含微生物之脲酶之故(Cabrera *et al.*, 1991)。

尿素用於養液環境，尿素可被作物根部直接吸收，或者是於養液水解成銨態氮而吸收，因養液仍不可避免有微生物參與尿素的水解。環境溫度越高，尿素於養液水解速度越快，尿素於養液中，依然可能先經水解成銨態氮，再被作物吸收。



養液 pH 值的變動與土施尿素可能略有不同，單獨以尿素作為水耕氮源栽培三種蔬菜，養液 pH 皆下降(Luo *et al.*, 1993)。尿素為非電解質，但養液其他要素則為陽離子或陰離子，養液中陰陽離子總當量是相等的。本研究是探討以尿素取代硝酸鹽陰離子的使用，硝酸鹽陰離子減少，為了兼顧養液陰陽離子當量相等，養液配製設計中，可直接減少硝酸鉀用量，或者如欲保持鉀濃度不變，需以硫酸鉀或者以氯化鉀來補償養液中的陰離子，本試驗以硫酸鉀取代硝酸鉀來保持鉀濃度之一致，而養液中硫酸根的加入可能也會影響作物對要素之吸收。

#### 八、以熱帶作物蕹菜評估含尿素及鎳之水耕養液配方可行性

蕹菜(*Ipomoea aquatic* Forsk)為旋花科(Convolvulaceae)半水生蔓性蔬菜。原產於中國中南部，於旱地及水田皆能有良好生長，蕹菜莖部中空而可利於半水生環境之生長，故又俗稱空心菜、甕菜。台灣蕹菜種植面積約為 2000 公頃，年產量約 3500 公噸，其中雲林縣為蕹菜生產大縣，占約一半(106 年農業統計年報)。除以旱地種植，於宜蘭縣礁溪鄉，臺中縣大里市、霧峰鄉，南投縣名間鄉、竹山鎮等地區則是以水田生產蕹菜。蕹菜可耐 35-40°C 高溫，為夏季蔬菜供應的重要來源，蕹菜與其同一科之甘藷葉營養價值類似，因為病蟲害少，不僅農民喜愛栽培，也深受消費者歡迎(謝，2009)。

蕹菜栽培期短，夏季播種至採收約 15-26 天，生產穩定，可紓解夏季蔬菜短缺問題以及於夏季颱風侵襲後迅速供應市場(陳，2001)。目前最主要品種為行政院農業委員會桃園區農業改良場，於民國 84 年從竹葉種選出之桃園 1 號；植株屬直立性，葉色濃綠、葉柄短、節間較短、葉數多、莖部刺瘤少等特徵；本品種為生長快速，全年約可採收 6~8 次，扦插再生能力強，以及具有播種後以宿根方式採收二次後，其葉片仍可保持狹長等優良特性(范等，1996)。

沈與許(1991)以蕹菜作為目標作物，研究熱帶性作物適合之培養液組成，蕹菜為好鉀作物，養液鉀比鈣為 7:3 養液 pH 及 EC 值變化較穩定，養液 EC 值以 2.0 mS/cm 有較高產量；硝酸態氮與銨態氮之比例於夏季為 6:4 為宜，而秋冬季由於光

照不足則以 4:6 為宜。薤菜相對於萵苣以及青梗白菜有較高尿素耐受性(Luo *et al.*, 1993)，華南農大薤菜專用配方也有尿素之添加(2.5 mM)。

本研究探討鎳與尿素對‘桃園一號’薤菜生長及要素含量之影響，特別以鎳添加來評估含尿素水耕養液應用之可行性。使用湛水式水耕系統進行栽培，配方養液總氮濃度不變，以尿素取代硝酸鹽進行試驗。薤菜應具有應用含尿素水耕養液之潛力，並在養液配方設計需考慮較高鉀添加。期望藉由含尿素水耕養液的開發，除了尿素取代硝酸鹽氮肥可降低氮肥成本，可能還具有低硝酸鹽累積之優點。



## 材料與方法



### 一、植物材料、水耕系統及養液配方

植物材料為‘桃園一號’蕹菜實生苗，種子購自農友種苗，栽培環境為臺灣大學園藝系具破風網之簡易設施。水耕系統為湛水式水耕(deep flow technique; DFT)，植株以泡棉固定於保麗龍板穴上，由其下容器提供養液，並以空氣加壓管線與氣泡石提供養液足夠氧氣。蕹菜種子經次氯酸鈉消毒並用自來水洗淨，浸種一日後，播種於洗淨珍珠石介質，待發芽子葉完全展開後，取出幼苗洗淨根部，上板定植，以幼苗用要素減半養液配方使幼苗適應水耕環境(附表 2)，約半週後才更換為不同的養液試驗配方。養液容積於試驗一及試驗四為 9 升，試驗二為 14 升，試驗三為 12 升，使用自來水來配製及補充養液。行株距為 4×4 公分，每箱初始約種植 40 株，並於試驗取樣而逐漸減少，最終加大至 5.6×5.6 公分。養液 pH 值每半週校正，維持於 6.0 左右，每週更新。養液配方參考 Hoagland 與 Arnon (1950)，微量元素於各試驗除鎳之外皆一致，各試驗之鎳變級是以直接於養液添加 1 mM 七水硫酸鎳 ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Nickel(II) sulfate heptahydrate, Sigma, EP grade) 母液達成。尿素變級則是以尿素取代原傳統養液中之硝酸鹽，並保持總氮濃度不變(附表 2)。

### 二、試驗方法與調查項目

#### 試驗一 鎳毒害對水耕‘桃園一號’蕹菜生長與要素含量之影響

本試驗為 6 個鎳變級之單因子試驗，6 個鎳變級為 0, 0.85, 1.7, 8.5, 17.0, 85.3  $\mu\text{M}$ ，即養液鎳濃度為 0, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。養液總氮濃度為 15 mM， $\text{NH}_4\text{-N}:\text{Urea-N}:\text{NO}_3\text{-N}=1:7:7$ ，其餘巨量要素濃度 P、K、Ca、Mg 分別為 2, 6, 4, 2 mM (附表 2)。

自 2016 年 8 月 19 日起至 9 月 14 日結束，共持續 26 天，每處理標記 8 株測量株高、葉綠素 SPAD 值、莖徑及葉長，視為 8 重複。而乾鮮重則於 26 日結束時取樣，將植株根莖葉分開後，每三株合併視為 1 重複測量乾鮮重，共 3 重複。



## 試驗二 ‘桃園一號’ 蕓菜在含尿素水耕液栽培下之鎳適宜濃度

本試驗為 5 個鎳變級搭配 2 個尿素變級之複因子試驗，5 個鎳變級為 0, 0.5, 1, 2, 4  $\mu\text{M}$ 。尿素變級為 0 及 8 mM，即 0% 與 50%。養液總氮濃度為 16 mM，其餘巨量要素濃度 P、K、Ca、Mg 分別為 2, 8, 3, 1 mM (附表 2)。

自 2017 年 8 月 16 日起至 8 月 30 日結束，共持續 14 天，每處理標記 10 株，於試驗第 7 日第 14 日測量株高、莖徑、根長及葉綠素 SPAD 值，視為 10 重複。而乾鮮重則將植株根、莖、葉分開後，每 5 株合併視為 1 重複，測量乾鮮重，共 4 重複，並將烘乾後的樣品進行要素分析。

## 試驗三 尿素濃度與適量鎳添加對水耕‘桃園一號’蕓菜生長及要素含量之影響

本試驗為 7 個尿素鎳變級搭配 2 個鎳變級之複因子試驗，7 個尿素態氮變級為 1, 2, 4, 6, 8, 10 mM (以下尿素態氮皆簡稱為尿素)，鎳變級為(0, 1  $\mu\text{M}$ )。養液總氮濃度為 14 mM，其餘巨量要素濃度 P、K、Ca、Mg 分別為 1, 8, 3, 1 mM (附表 2)。

自 2018 年 3 月 20 日起 4 月 10 日結束，共持續 21 天，每處理標記 10 株測量株高、莖徑，視為 10 重複。而乾鮮重則將植株根、莖、葉分開後，每 6 株合併視為 1 重複，測量乾鮮重，共 3 重複，並將烘乾後的樣品進行要素分析。

## 試驗四 尿素濃度與鎳添加對水耕‘桃園一號’蕓菜氮源與巨量要素吸收之影響

本試驗為 3 個尿素鎳變級搭配 2 個鎳變級之複因子試驗，試驗配方與試驗三相同，將 7 個尿素變級縮減為 3 個尿素變級(2, 4, 10 mM)，鎳變級為(0, 1  $\mu\text{M}$ )。養液總氮濃度為 14 mM，其餘巨量要素濃度 P、K、Ca、Mg 分別為 1, 8, 3, 1, mM (附表 2)。

自 2018 年 10 月 21 日起至 11 月 12 日結束，共持續 22 天，每處理標記 10 株測量株高，視為 10 重複。而乾鮮重則將植株根、莖、葉分開後，每 6 株合併視為



1 重複，測量乾鮮重，共 3 重複。每週於更換養液前後獲取水樣，而薤菜對尿素態氮、銨態氮、硝酸態氮與巨量要素吸收速率，是以養液每週各要素濃度差，再除以水耕箱上所種植薤菜株數所得。

### 三、分析方法

#### (一)、葉綠素含量

為量測薤菜新葉黃化之現象，以葉綠素計(SPAD-502，Konica Minolta)測量葉綠素相對含量，測量頂端第一片完全展開葉之葉中段之左右兩側，並將兩側數據平均而得到該觀察值。

#### (二)、養液 pH 值及 EC 值

以手持型 pH 儀(Janco，6010M)以及手持型 EC 儀(Janco，3010M)測量養液 pH 及 EC 值。

#### (三)、植體樣品乾燥與磨粉

參考 Cataldo 等(1975)之樣品前處理。

植體各部位經二次水洗淨後以紙巾拭乾，以 70°C 烘乾 48 小時或至恆重，再經磨粉機均質後至可通過 40 mesh 篩網之顆粒大小，均質樣品置於塑膠樣品盒於乾燥環境保存，待後續進行元素與硝酸鹽含量分析。於分析稱重前，置於乾燥皿中一日以去除吸溼水分。


#### (四)、植體硝酸鹽樣品製備

參考 Miner and Queiruga (1995)植體硝酸鹽熱水萃取法。

精秤 0.4 g 樣品於塑膠離心管中，以 80°C 熱水加至約 40 毫升後，以 80°C 水浴 30 分鐘，水浴結束後趁熱通過 ADVENTEC 1 號濾紙，以熱水潤洗濾紙三次，待溶液冷卻後以去離子水定量至 50 mL，即完成為植體硝酸鹽樣品製備。

#### (五)、植體礦物元素樣品製備(乾灰化法)

參考 Clegg 等(1981)針對微量元素分析之乾灰化法。



精秤 0.2 g 磨粉樣品，製於陶瓷坩鍋中，以灰化爐加熱至 450 度 $^{\circ}\text{C}$ 灰化，至樣品為灰白色為止。降溫後取出坩鍋，加入 5 mL 1.2 N HCl (Merck, GR grade)，混合均勻後通過 ADVENTEC 1 號濾紙，以熱水潤洗濾紙三次後，待溶液冷卻後以去離子水定量至 50 mL，即完成為礦物元素樣品製備。此灰化法製備樣品溶液可於後續以鉬藍法測磷，以及用來測量鉀、鈣、鎂、鐵、錳、鋅、鎳等要素含量。

(六)、磷：

參考 King (1932)之鉬藍法。

1.反應藥劑配製：

(1) P-B solution (Acid molybdate stock solution): 37.63 g  $(\text{NH}_4)\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (Merck, GR grade)加熱溶於 250 mL 去離子水，冷卻至室溫後加入 750 mL 37.5% HCl (Merck, GR grade)並定量至 1000 mL，加入  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (Kanto, EP grade) 直至飽和沉澱。溶液存放於褐色血清瓶，冷藏 4 $^{\circ}\text{C}$  保存。

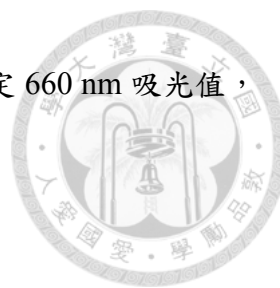
(2) P-C powder (Drying reducing agent): 1.25 g 1-amino-2-naphthol-4-sulfonic acid + 2.5 g  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (Sodium sulfite) (Merck, GR grade) + 73.125 g  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  (Sodium pyrosulfite) (PanReac, ACS grade) 均勻混合，密封並遮光，可存放 6 個月。

(3) P-C solution (Dilute reducing agent): 取 3.2 g P-C powder 加熱溶於 20 mL 水後冷卻至室溫，全程以不透光之錫箔紙包覆，需現配現用。

(4) 標準液配製: 精秤 0.4394 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (Merck, GR grade)，以去離子水定量至 1000 mL，為 1000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之標準溶液，將標準溶液稀釋至 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  得工作母液，以工作母液配製 1, 3, 5, 7, 9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之標準液用於檢量線製作。

2.試驗流程：

於玻璃式管中依序加入 0.25 mL P-B solution、5 mL 適當稀釋之礦物元素樣品、0.25 mL P-C solution，同時以 1, 3, 5, 7, 9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之操作標準液製作標準曲線、以及以 5 mL 去離子水製作空白樣本，震盪混合均勻，靜置 40 分鐘反應後，以微量盤



分光光度計(Microplate Spectrophotometer, Epoch 2, BioTek)測定 660 nm 吸光值，並根據檢量線以內插法求得樣品磷濃度。

#### (七)、全氮-凱式氮(Kjeldahl nitrogen)

參考(Kirk, 1950)之含硒催化劑凱氏氮法，再以擴散法與反滴定回推樣品之全氮含量。

##### 1. 氮消化液製備：

烘乾磨粉後之樣品精秤 0.2 g，加入等重之催化劑(Selenium mixture,  $K_2SO_4:CuSO_4:Selenium=100:10:1$ ) (Merck, GR grade)，以秤藥紙完全包覆後置入 50 mL 氮分解管(digestion tube)中，加入 5 mL 濃硫酸(Merck, GR grade)，以加熱板加熱至 400°C 約 6-8 小時，至氮分解管內液體呈透明無色，冷卻後以去離子水定量至 50 mL，即製成氮消化液，裝入塑膠樣品瓶後於乾燥陰涼環境下保存，並可隨後以擴散法收集氮氣，並以反滴定求得氮消化液內含的銨態氮含量，而最終回推樣品全氮含量。

##### 2. 擴散法：

(1) 指示劑(bromophenol blue):取 0.2 g bromophenol blue 溶於 100 mL 95% 乙醇並以 1 N NaOH 調整 pH 至 5.0 左右。

(2) 氮吸收劑:混合指示劑之硼酸溶液:以 1000 mL 4%  $H_3BO_3$  (Kanto, EP grade) 溶液:5 mL 指示劑之比例混合。

##### (3) 操作流程:

取適當稀釋之氮消化液 10 mL 置於 90 mm 玻璃培養皿中，並於培養皿中央放至含有 4 mL 混合指示劑之硼酸溶液之小擴散皿，以分注器加入 10 mL 10 N NaOH (第一化工，工業級) 與氮消化液反應後，立即蓋上玻璃培養皿上蓋並以膠帶密封，並稍微搖動使液體均勻混合使氮氣可順利擴散至中央小擴散皿中，常溫下放置 48 小時後開蓋取出小擴散皿，以 0.01 N 標準酸  $H_2SO_4$  (Merck,



Titrisol®)以反滴定方式滴定至原先指示劑之黃色，紀錄滴定至當量點所需之容積，每樣品做兩套重複，誤差需小於 5%，最後取兩組平均為最終滴定量。

### 3. 氮含量計算

$$\text{氮含量 (mg}\cdot\text{g}^{-1}) = (\text{平均滴定量(mL)} + 0.05) \times 14 \times 0.01 \times \text{稀釋倍率} \times 0.96 / \text{取樣量(g)}$$

0.05: 空白試驗所需毫升數      稀釋倍率: 取樣 5 mL 定量至 50 mL

0.96: 回收率 96%    0.01: 滴定用硫酸當量濃度    14: N 原子量

### (八)、尿素(二乙醯一肟呈色法)

參考(Kyllingsbæk, 1975)之二乙醯一肟呈色法(Diacetyl monoxime assay)。

#### 1. 反應藥劑配製：

(1) DAM-KNO<sub>3</sub>: 2.5 g diacetyl monoxime (Sigma, EP grade) 與 2.0 g potassium nitrate 溶於二水，定量至 100 mL。

(2) TSC: 0.25 g thiosemicarbazide (Sigma, EP grade) 溶於二次水，定量至 100 mL。

(3) Acid solution: 取 175 mL 37% hydrochloric acid (Merck, GR grade) 與 100 mL 85% phosphoric acid (Kanto, EP grade)，以二次水定量至 500 mL。

(4) Color reagent: 使用前配製，將 30 mL DAM-KNO<sub>3</sub> 溶液、12 mL TSC 溶液和 450 mL acid solution 均勻混和。

#### 2. 標準液配製：

精秤 0.3005 g 尿素(Sigma, EP grade)，以去離子水定量至 500 mL，為 10 mM 之尿素標準溶液並以標準溶液配製 50, 100, 150, 200, 250 μM 之標準液用於檢量線製作。

#### 3. 試驗流程：

以微量塑膠離心管加入 0.2 mL 之適當稀釋樣品或標準品，加入 0.6 mL color reagent，以 80°C 乾浴 30 分鐘，冷卻後以微量盤分光光度計測定 527 nm 吸光值，並根據檢量線以內插法求得樣品尿素濃度。

### (九)、硝酸鹽(水楊酸呈色法)



參考 Cataldo 等(1975)之水楊酸呈色法。

1.反應藥劑配製：

(1) Salicylic acid-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5% (w/v): 5 g Salicylic acid (Merck GR grade)溶於 100 mL 濃硫酸，以棕色血清瓶於室溫下可存放一週。

(2) 10N NaOH: 400.0 g NaOH(第一化工，工業級)以二次水定量至 1 L。

2.標準液配製：

精秤 0.5055 g KNO<sub>3</sub>(Nihon Shiyaku，EP grade)，以去離子水定量至 50 mL，為 100 mM 之標準溶液，並以標準溶液配製 1, 3, 5, 7, 9 mM 標準液用於檢量線製作。

3.試驗流程：

於平底試管中加入適當稀釋之樣品溶或標準液 0.2 mL，再加入 0.8 mL 5% Salicylic acid-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，混合均勻，於室溫下靜置反應 20 分鐘，加入 5 mL 二次水，再加入 5 mL 10N NaOH，混合均勻，水浴冷卻至室溫後，以微量盤分光光度計測定 410 nm 吸光值，並根據檢量線以內插法求得樣品硝酸態氮濃度。

(十)、銨態氮(納氏比色法)

參考 Jeong 等(2013)改良之納氏比色法(modified Nesslerization)。

1.反應藥劑配製：

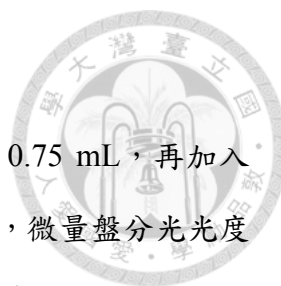
(1) 檸檬酸鈉-酒石酸鉀鈉溶液(MS)

將 300 g KNaC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> (Hanawa，EP grade)與 250 g Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> (Nacalai，EP grade)溶於 900 mL 二次水，加入 1.35 g PVA，定量至 1 L，以 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 與 NaOH 校正 pH 至 7.0。

(2) 納氏反應劑 (Nessler's reagent):購自 MERCK 公司。

2.標準液配製：

精秤 0.4002 g NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (Merck，EP grade)，以去離子水定量至 500 mL，為 10 mM 之 stock solution。並以標準溶液配製 25, 50, 100, 200, 250 μM 標準液用於檢量線製作。



### (3) 試驗流程：

以塑膠微量離心管加入適當稀釋樣品溶液樣品或標準溶液 0.75 mL，再加入 0.25 mL Nessler's reagent，混合均勻，於室溫下靜置反應 20 分鐘，微量盤分光光度計測定 425 nm 吸光值，並根據檢量線以內插法求得樣品銨態氮濃度。

### (十一)其他礦物元素(K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Ni)之測定：

試驗一之薤菜葉片樣品委由行政院農委會茶業改良場茶作技術課土壤肥力實驗室，以感應偶合電漿原子吸收光譜儀(ICP-OES, PerkinElmer, Optima 2100 DV) 測量鉀、鈣、鎂、鐵、錳、鋅、鎳等元素，其餘試驗二至試驗四的礦物元素分析則以火焰式原子吸收光譜測鉀、鈣、鎂、鐵、錳、鋅、鎳等元素。

#### 1.標準液配製：

使用 MERCK 之  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之鉀、鈣、鎂、鐵、錳、鋅、鎳標準液，稀釋為  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的儲備溶液，再將其稀釋為操作標準液以製作標準曲線。

#### 2.原子吸收光譜儀分析：

以火焰式原子吸收光譜儀 (atomic absorption spectrophotometer, Shimadzu, AA-6300) (後續討論簡稱為 AA) 及鹵素燈管 (Hamamatsu Photonics K. K., Japan)，測定鉀、鈣、鎂、鐵、錳、鋅、鎳，空氣分壓  $5 \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，乙炔分壓  $1 \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

### 四、統計分析

試驗數據利用 CoStat 6.4 (CoHort Software, Monterey, CA, USA) 進行變方分析 (analysis of variance, ANOVA)，以最小顯著差異 (least significant difference test, LSD) 比較 5% 差異顯著性。以 SigmaPlot 14.0 (Systat Software, San Jose, CA, USA) 進行圖表繪製及迴歸分析。



## 結果



### 一、鎳毒害對‘桃園一號’蕹菜生長與要素含量之影響(試驗一)

本試驗為求得於蕹菜於水耕環境中，對鎳之適宜與毒害濃度範圍，因此試驗一之鎳濃度範圍較廣，共有 6 個鎳濃度變級(0 至 85.3  $\mu\text{M}$ )，養液氮源以尿素取代 46.6% 氮源(以下簡稱半尿素)來判斷於半尿素環境中，概略之鎳毒害與鎳適宜濃度，作為後續試驗參考依據，並探討鎳於蕹菜吸收後累積於地上部之情形。

#### (一)、蕹菜於高鎳環境產生之毒害病徵

試驗從定植上板開始至結束共持續 26 天。蕹菜經 85.3  $\mu\text{M}$  最高鎳濃度處理第 4 天後，子葉以上新生部位開始黃化；於第 5 天莖部倒伏並產生水浸狀斑塊，且新葉可觀察到捲曲皺縮、部分焦枯之徵狀；第 6 天子葉以上新生部位則完全焦枯。蕹菜子葉以上部位對 85.3  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理反應迅速，於 6 天內即可使蕹菜地上部焦枯，而至實驗後期，地上部因完全嚴重影響蕹菜生長，而無後續新生長(圖 1)。

相較於子葉以上部位，根部以及宿存子葉對高鎳環境反應較緩慢。處理第 6 天雖地上部完全焦枯，但宿存子葉以及根部仍無明顯病徵。處理第 8 天至第 10 天，根部支根開始壞死並脫落。宿存子葉從試驗開始至 14 天外觀則幾無變化(圖 1)。

鎳濃度次高之兩處理(8.5  $\mu\text{M}$ 、17.0  $\mu\text{M}$ )則於試驗中期，植株株高較低鎳處理低(圖 2A)。8.5  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理使蕹菜新葉黃化，且新葉缺乏蠟質，與未加鎳對照相比除葉片體積較小，表面也較無光澤(圖 2B)。17.0  $\mu\text{M}$  除了新葉黃化，少部分新葉葉緣則有壞疽及皺縮之徵狀(圖 2B)。8.5  $\mu\text{M}$  及 17.0  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理，新葉葉綠素 SPAD 值於第 7 天及第 10 天較其他低鎳組別低；但此新葉黃化之徵狀於試驗後期則減輕，新葉 SPAD 值在所有鎳處理皆無顯著差異(表 1)。

#### (二)、植株生長

鎳濃度處理間之株高差異於試驗前期(第 4 天及第 6 天)不顯著，於試驗中期之後各組間之株高則開始有差異(表 2)。處理第 10 天之蕹菜株高與莖徑，於 8.5  $\mu\text{M}$  及 17.0  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理下顯著較細，但葉長於各組間仍無差異；第 14 天蕹菜株高、



莖徑以及葉長，於 8.5  $\mu\text{M}$  及 17.0  $\mu\text{M}$  鎳濃度下較低。8.5  $\mu\text{M}$  及 17.0  $\mu\text{M}$  對薺菜而言，應為偏高的鎳添加濃度(表 1, 表 2)。

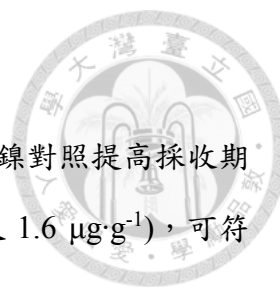
0  $\mu\text{M}$ 、0.85  $\mu\text{M}$ 、1.7  $\mu\text{M}$  三個處理間之生長至 14 天後開始有差異。0.85 及 1.7  $\mu\text{M}$  鎳較無鎳之對照，植株有較大的株高以及莖徑(表 1, 表 2)。至試驗末期第 26 天之薺菜已具有基部新生之側枝。綜觀株高、主幹莖徑、側枝莖徑及全株乾鮮重，0.85  $\mu\text{M}$  及 1.7  $\mu\text{M}$  鎳處理者為較適宜之鎳添加範圍(表 3)。

較高劑量之 8.5  $\mu\text{M}$  及 17.0  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理使薺菜的根莖葉乾鮮重皆下降，於此高鎳環境下，抑制全株各部位薺菜之生長(表 4)。較低劑量之 0.85  $\mu\text{M}$  及 1.7  $\mu\text{M}$  鎳處理為水耕環境中較適宜的添加劑量，薺菜葉之乾鮮重與未含鎳對照相比無顯著差異，然而莖及根部鮮重於此適宜劑量則較無鎳對照高(表 4)。

### (三)、要素含量及鎳累積

薺菜葉片磷含量於適量鎳 0.85  $\mu\text{M}$  及 1.7  $\mu\text{M}$  處理較高，可能與此鎳濃度處理下有較良好生長有關；薺菜葉片鐵含量則於 1.7  $\mu\text{M}$  以上之鎳濃度處理較低(表 5)。鎳也可經根部吸收，而於地上部葉片檢測到鎳之含量；薺菜養液鎳濃度越高，則薺菜葉片累積之鎳含量也越高，養液鎳濃度與薺菜葉片鎳含量，以線性迴歸分析結果  $R^2$  值為 0.9988， $p$  值 $<0.001$ ，顯示為極顯著正相關(圖 3)。鎳的每日容許攝取量(Tolerable Daily Intake；TDI)為  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ ，以 60 公斤重成人為例，每日鎳可容許攝取量為 1.2 mg。17.0  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理之薺菜葉片鎳含量為  $25.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ，以薺菜乾物重百分比約為 10%換算，每人每日需食用約 460 g 鮮重之薺菜才會超過鎳的每日容許攝取量，因此以 17.0  $\mu\text{M}$  鎳濃度所栽培薺菜而言，鎳含量稍高，故具食用風險。

以整體生長及葉片鎳累積作評估，8.5  $\mu\text{M}$  及 17.0  $\mu\text{M}$  為過量鎳濃度範圍，此過量鎳抑制半尿素水耕薺菜之生長，早期有新葉黃化之現象，使葉片葉綠素 SPAD 值較低，雖於後期恢復，但薺菜前期因鎳所造成的徵狀，導致最終整體產量下降。薺菜不適合於此鎳濃度範圍下生長，而葉片鎳累積之含量也稍高，以鎳累積角度來



判斷也不建議食用。

0.85  $\mu\text{M}$  及 1.7  $\mu\text{M}$  應為較適當的鎳添加範圍，可相較於無鎳對照提高採收期薺菜的株高以及莖與根之乾鮮重。葉片則只有微量鎳含量(0.5 及 1.6  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )，可符合食用上低鎳含量之要求。

## 二、適宜鎳對含尿素水耕‘桃園一號’薺菜生長及要素含量之影響 (試驗二)

試驗一結果顯示 8.5  $\mu\text{M}$  以上為鎳過量之範圍，因此試驗二排除 8.5  $\mu\text{M}$  以上之鎳添加濃度，進一步在 0 至 4  $\mu\text{M}$  之間，共 5 個鎳濃度變級範圍，探究最適之區間。氮源部分以兩個尿素變級 0, 8 mM，也就是 0%、50%的尿素比例(以下簡稱無尿素組與尿素組)，比較尿素之存在，與適量鎳添加範圍，對所栽培的薺菜生長與要素含量的差異。

### (一)、外觀與生長

生長前期(第 7 天)以及生長後期(第 14 天)，薺菜株高以 0.5  $\mu\text{M}$ 、1  $\mu\text{M}$  兩組鎳處理較其他鎳處理組高，尿素變級間則在株高無顯著影響(表 6)。薺菜新葉葉綠素 SPAD 值僅於生長前期有差異，新葉葉綠素 SPAD 值尿素組較無尿素組低，而鎳處理中 2  $\mu\text{M}$  及 4  $\mu\text{M}$  鎳濃度下新葉葉綠素 SPAD 值相較其他鎳濃度低(表 6)。薺菜生長後期之新葉葉綠素 SPAD 值則於尿素或鎳變級下皆無顯著差異(表 6)。

生長前期薺菜之莖徑於鎳變級中以 2  $\mu\text{M}$  鎳處理最細，而尿素組的莖徑則較無尿素組細(表 6)。莖徑與新葉 SPAD 值有相似之趨勢，2  $\mu\text{M}$  鎳可能抑制薺菜的前期外觀生長。生長後期(第 14 天)葉綠素濃度及莖徑於各組間皆無顯著差異(表 6)。生長前期與後期薺菜根長皆以無尿素組較尿素組較大，而鎳濃度對薺菜根長影響較不顯著。

### (二)、乾鮮重

將生長後期(第 14 天)薺菜各部位乾鮮重以單因子分析顯示，薺菜葉與莖部之乾鮮重於 0.5、1  $\mu\text{M}$  鎳處理下較高，且在無尿素組與尿素組皆有相同趨勢(表 7)。薺菜根部對鎳處理的影響則依尿素的在與否有差異。養液 0.5、1  $\mu\text{M}$  鎳處理僅於



尿素組下，薤菜根部乾鮮重較高，而無尿素對照組添加鎳，則未有提升薤菜根部乾鮮重的趨勢(表 7)。

鎳與尿素對薤菜各部位與地上部經濟產量(葉與莖相加)複因子分析中，乾鮮重與株高趨勢相近；薤菜地上部葉與莖之乾鮮重同樣以 0.5  $\mu\text{M}$ 、1  $\mu\text{M}$  兩組鎳處理較其他鎳處理組高，在較高之鎳濃度(2  $\mu\text{M}$ 、4  $\mu\text{M}$ )則比 0.5、1  $\mu\text{M}$  鎳濃度低，而尿素變級間則無顯著影響 (表 8)。


薤菜地下部根之乾鮮重僅無鎳對照有較低之根長，其他鎳添加濃度之根乾鮮重皆高於無鎳對照，並鎳濃度添加多寡(0.5  $\mu\text{M}$  至 4  $\mu\text{M}$ )對薤菜根之乾鮮重則較無顯著差異，而根部之乾重於尿素組比無尿素組高(表 8)。薤菜地上部和地下部對鎳濃度的反應不同，水耕環境於 0  $\mu\text{M}$  至 4  $\mu\text{M}$  區段，地上部的生長在此濃度區段，大致於各部位 0.5  $\mu\text{M}$  及 1  $\mu\text{M}$  兩鎳處理有較高的乾鮮重(表 8)。

根據養液鎳及尿素對薤菜乾鮮重的複因子分析可大致推估，0.5  $\mu\text{M}$  及 1  $\mu\text{M}$  鎳濃度應為較適宜之鎳添加濃度，而且尿素變級與鎳變級之間無交感顯著(表 8)。但於單因子分析中，雖於統計上未達 5% 差異水準，最適鎳濃度可能因尿素存在而有差別(表 7)。薤菜莖與葉之鮮重於無尿素組是以 0.5  $\mu\text{M}$  鎳濃度較高，尿素組則是以 1  $\mu\text{M}$  鎳濃度較大(表 7)。養液如有尿素可能相較無尿素對照，有較高的最適鎳添加濃度。

### (三)、巨量元素含量

薤菜氮、磷、鉀、鈣及鎂之單株元素含量(含量乘以單株重量)，於適量鎳 0.5  $\mu\text{M}$ 、1  $\mu\text{M}$  相較於無鎳處理高，顯示適量鎳添加可提升薤菜單株之巨量元素含量(表 9)。葉片鈣含量於無鎳組較高，鎂含量則於 2  $\mu\text{M}$  鎳組較高，磷與鉀則於各鎳變級下無顯著差異(表 10)。莖部於 0.5  $\mu\text{M}$  鎳處理下則有最高之磷、鉀、鈣及鎂含量，而 1  $\mu\text{M}$  鎳則較 0.5  $\mu\text{M}$  鎳略低(表 11)。薤菜根部磷、鉀及鈣元素含量於無鎳對照較高(表 12)。

無鎳組薤菜根部巨量元素含量雖較高，但無鎳組之薤菜根部乾鮮重較低，此



情形可能為生長較緩慢而導致(表 8, 表 12)。1  $\mu\text{M}$  鎳下, 薤菜葉、莖、根之鈣與鎂含量皆較其他鎳處理較低; 莖之磷與鉀含量以 0.5  $\mu\text{M}$  鎳處理較高, 而 1  $\mu\text{M}$  鎳則略低(表 10, 表 11, 表 12)。然而, 1  $\mu\text{M}$  鎳下薤菜磷、鉀、鈣及鎂含量較低或略低之趨勢, 並未於單株要素含量見得(表 9)。單株要素含量為要素含量乘以單株總乾重而得, 因此 1  $\mu\text{M}$  鎳下磷、鉀、鈣及鎂於各部位含量較低, 實為快速生長所造成含量稀釋效應之故。

兩尿素變級間對薤菜外觀生長與乾鮮重較無顯著差異, 但要素含量則有顯著差異。尿素變級對薤菜氮、磷、鈣於根莖葉各部位含量影響的趨勢皆相同。薤菜葉片與莖部於尿素組相較無尿素組有較高全氮含量, 而葉片、莖部及根部磷含量於也是皆於尿素組較高; 鈣含量則相反, 是於無尿素組於葉片、莖部及根部皆較高(表 10, 表 11, 表 12)。

尿素變級對鉀與鎂含量影響因薤菜部位而異。葉於無尿素組有較高鉀含量, 莖與根則是無尿素組有較低鉀含量; 根於尿素組有較高鎂含量, 莖與葉則是於尿素組有較低鎂含量(表 10, 表 11, 表 12)。兩尿素變級對單株要素含量之趨勢與莖部要素含量趨勢接近, 因莖占全株乾重比例較大之故(表 9)。

#### (四)、微量元素含量與鎳累積

鐵、錳、鋅及鎳於薤菜各部位之含量差異大。鐵、鋅與鎳於薤菜根部含量最高, 根部鐵含量約是莖及葉含量的 10 倍、根部鎳含量也約為葉片鎳含量之 10 倍, 莖部鎳含量則低於 AA 之儀器檢測極限( $< 5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ), 而根部鋅含量約為地上部的 2 倍。錳含量非在根部含量最高, 而是以葉片含量最高, 約是莖部及根部含量的 2 倍(表 10, 表 11, 表 12)。

尿素變級對薤菜錳與鋅含量於根莖葉趨勢皆一致, 皆是尿素組較無尿素組高其中錳含量的差異幅度較大, 莖部高尿素組錳含量約是無尿素組的 4 倍(表 11)。鐵含量僅莖部於尿素組下較高, 葉與根部則無顯著差異。

鎳變級也影響薤菜其他微量元素鐵、錳、鋅之含量。鋅含量於無鎳組下較高,

添加鎳處理從 0.5  $\mu\text{M}$  至 4  $\mu\text{M}$ ，皆使根莖葉鎳含量降低(表 10, 表 11, 表 12)。蕹菜鐵及錳於根莖葉各部位於 1  $\mu\text{M}$  鎳下，相較鄰近鎳濃度處理(0.5  $\mu\text{M}$ 、2  $\mu\text{M}$ )較低，而且無法用快速生長造成的稀釋作用來解釋。此因鐵與錳含量較低之情形，於單株鐵及錳總量(單株乾重乘以含量)也有相同趨勢，表示 1  $\mu\text{M}$  鎳可使蕹菜吸收鐵及錳的能力下降。在 1  $\mu\text{M}$  鎳下，鐵與錳的吸收可能與鎳互相影響(表 9, 表 10, 表 11, 表 12)。

養液鎳濃度 0 至 4  $\mu\text{M}$  之範圍內，養液鎳濃度與蕹菜根部鎳含量之關係於內符合 S 型曲線之迴歸模型，R 值高達 0.995 以上，迴歸模型之 P 值 $<0.001.11$  為極顯著，尿素組於不同鎳濃度下蕹菜根部鎳含量皆比無尿素組高，使得該迴歸曲線分成兩條線，而此結果顯示養液尿素的存在使蕹菜於根部有較高鎳累積(圖 4)。鎳添加與養液中，蕹菜除了傾向於將鎳累積於根部之外，鎳於蕹菜根部累積含量的情形與養液存在尿素與否有關。

根據迴歸模型之公式可得知，尿素組與無尿素組兩組 S 型曲線之反曲點所在的鎳處理濃度為 1.16  $\mu\text{M}$  與 1.18  $\mu\text{M}$ ，與 1  $\mu\text{M}$  鎳濃度處理相近，S 型曲線反曲點斜率為最大值，即可能意謂 1  $\mu\text{M}$  鎳左右，是蕹菜根部快速累積鎳的外源鎳門檻濃度，也可能意謂著此處理蕹菜有較大的鎳需求(圖 4)。而前述之蕹菜根部鐵與錳含量於 1  $\mu\text{M}$  濃度下較其他鎳處理也有較低情形(表 12)，推估鐵、錳與鎳在吸收上可能有互相競爭之情形，1  $\mu\text{M}$  濃度範圍蕹菜根部對鎳吸收提升，而影響到對鐵與錳之吸收。

依照養液鎳濃度與蕹菜根部鎳累積之 S 型曲線，蕹菜根部鎳含量於 1  $\mu\text{M}$  鎳處理範圍增加幅度較快，至 2  $\mu\text{M}$  及 4  $\mu\text{M}$  鎳處理範圍蕹菜根部鎳累積則趨緩(圖 4)，顯示蕹菜於 2 及 4  $\mu\text{M}$  鎳濃度區間，可對養液鎳的吸收進行調節，避免將過多鎳累積於根部。葉片鎳含量雖隨著養液鎳濃度提高而增加，但尿素的存在並未影響到蕹菜於地上部葉片之鎳含量(表 10)。

根據蕹菜之外觀生長以及乾鮮重之結果可得之，0.5、1  $\mu\text{M}$  鎳濃度應為較適

宜之鎳添加濃度，進一步以要素含量來看，1  $\mu\text{M}$  鎳處理者鈣與鎂有因快速生長而造成含量稀釋降低之現象，最後以鎳於根部累積之情形判斷，1  $\mu\text{M}$  鎳濃度約是 S 曲線迴歸模型的反曲點。三者指標指出 1  $\mu\text{M}$  應為適量且為關鍵的濃度，因此將後續試驗三之兩個鎳變級濃度，設為 1  $\mu\text{M}$  及無鎳對照。

### 三、尿素濃度與鎳添加對水耕‘桃園一號’蕓菜生長及要素含量之影響 (試驗三)

本試驗利用試驗二之結果，以七個尿素變級(0 mM 至 10 mM)與兩變級鎳(0  $\mu\text{M}$ 、1  $\mu\text{M}$  以下簡稱無鎳組、有鎳組)，來探討尿素取代硝酸鹽使用之程度，與水耕環境鎳之添加，對蕓菜生長及要素含量之影響。

#### (一)、外觀生長與乾鮮重

第 7 天開始尿素變級即對所栽培之蕓菜株高產生影響，4 mM 尿素組下蕓菜株高最低，而 10 mM 尿素組下株高最高，此趨勢維持至第 21 天試驗結束(表 13)。第 15 天後添加鎳 1  $\mu\text{M}$  者之株高較未添加鎳高，並持續致試驗結束，而尿素變級對蕓菜莖徑之影響與株高趨勢相近，但鎳變級間對莖徑皆無顯著差異(表 13)。

尿素變級也顯著影響蕓菜各部位之乾鮮重，同樣各部位乾鮮重於 4 mM 尿素下最低，而 10 mM 尿素下各部位乾鮮重最高，與株高及莖徑趨勢一致(表 14)。然而株高、莖徑、與各部位之乾鮮重，皆顯示尿素變級與鎳變級的交感效應為極顯著，鎳之存在與否可能影響蕓菜在不同尿素變級下的生長之反應。

1  $\mu\text{M}$  鎳添加可顯著提升 2、6、8 mM 尿素組蕓菜之株高與莖鮮重，但鎳添加降低 0 與 10 mM 尿素組的株高及鮮重(圖 5、圖 6)。將尿素變級最低之 0 mM，以及最高 10 mM 組別去除後，對蕓菜莖部鮮重進行迴歸分析，無鎳組於 X 軸座標(即尿素態氮濃度)取  $\log_2$  對數後較符合二次曲線之趨勢(圖 7)。

#### (二)、硝酸鹽含量與巨量要素含量

養液尿素變級越高，蕓菜地上部硝酸鹽含量越低，含尿素水耕配方可有效降低地上部之硝酸鹽含量；10 mM 尿素組下蕓菜地上部硝酸鹽含量為無尿素組的

0.73 倍；鎳變級則對薤菜地上部硝酸鹽含量無顯著差異(圖 8)。薤菜單株要素含量(含量乘以乾重)於試驗三中，與乾重的趨勢相近，各元素單株含量於 2 mM、4 mM 尿素組別普遍較低(表 15)。

尿素變級雖於統計上，對薤菜葉與莖之全氮含量有顯著影響，但全氮含量差別幅度並不大。薤菜葉片磷含量於 6、8、10 mM 之高尿素組別較 0、1、2、4 mM 之低尿素組高，而根部則相反，薤菜根部磷含量於低尿素組(0、1、2 mM)較高尿素(8、10 mM)高；尿素變級對薤菜莖部磷含量則無顯著差異(表 16, 表 17, 表 18)。尿素變級對葉片鉀含量無顯著差異，但於莖及根部鉀含量則隨著尿素變級越高，於 2、4 mM 尿素組較無尿素莖及根部鉀含量較低，而在 6mM 至 10 mM 尿素組莖及根部鉀含量則升高，與乾重趨勢相似。

尿素對薤菜鈣與鎂含量的趨勢相似，葉、莖、根部之鈣與鎂含量於高尿素組(6 mM 至 10 mM)普遍較低，但此趨勢卻未見於鈣與鎂的單株含量(表 15, 表 16, 表 17, 表 18)，高尿素下鈣與鎂的單株含量仍高，是因高尿素下乾重較高之故；高尿素下造成薤菜鈣與鎂含量較低，應為快速生長之稀釋效應所造成(表 15)。

### (三)、微量元素與鎳累積

薤菜根部鐵含量遠高於葉片及莖部，尿素也大幅影響薤菜根部鐵含量，薤菜根部鐵含量於無尿素組最高，隨著養液尿素增高而遞減，10 mM 尿素組根部鐵含量約為無尿素組含量一半。薤菜根部鋅含量於無尿素組最高，其他較高尿素組別(1 mM 至 10 mM)則較低，但降低幅度不若鐵含量大。錳含量之趨勢則與鐵和鋅相反，高尿素組(8、10 mM)錳含量於葉、莖及根部較其他低尿素組別高(表 16, 表 17, 表 18)。

養液添加鎳 1  $\mu\text{M}$  於地上部莖及葉的鎳含量皆低於 AA 之儀器檢測極限( $< 5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )，僅於根部可測得數值，於相同 1 $\mu\text{M}$  鎳添加下，根部鎳含量於 8、10 mM 尿素組較高(圖 9)，養液尿素的存在可能使薤菜對鎳需求上升，此結果與試驗二一致(圖 4, 圖 9)。於適量鎳 1  $\mu\text{M}$  下，雖然於高尿素養液薤菜會有較高鎳累積，但其





提高的程度較輕微，且地上部也無過量鎳之檢出，因此不需擔心蕹菜於高尿素下，食用部位鎳含量會有過量累積之疑慮。

#### 四、尿素濃度與適量鎳對水耕‘桃園一號’蕹菜氮源與巨量要素吸收之影響 (試驗四)

依據試驗三之結果顯示尿素態氮對蕹菜植株全氮含量影響並不明確，但其他要素可依尿素濃度之高低而有差異，因此挑選兩個低尿素之變級(2、4 mM)，以及最高尿素變級(10 mM)，配合二個鎳濃度變級(0、1  $\mu$ M)進行複因子試驗。試驗四則主要分析養液水樣尿素態氮、銨態氮及硝酸態氮三種氮源，而非蕹菜地上部全氮含量，來探討蕹菜於三週之試驗期間，對三種氮源以及巨量要素吸收之情形。


##### (一)、生長與養液 pH 值變化

本試驗共持續 22 天，於第 14 天至第 18 天株高上升較緩，並與試驗期間全天空日射量相互對照，第 14 天至第 18 天生長趨緩之現象，可能為第 12 天至第 17 天全天空日射量(臺北測站；466920)較低所導致，第 14 天至第 22 天 10 mM 尿素組較 2、4 mM 尿素組蕹菜株高較大，然而鎳添加對株高並無顯著差異(圖 10)。尿素變級間對葉、莖及全株乾鮮重皆無顯著差異，僅根之乾鮮重於 2 mM 尿素組較其他組高(表 19)。

養液每 3 至 4 天校正回 pH=6.0，而於校正前測量之 pH 如(圖 11)所示，校正前養液 pH 值大多數落在 pH=6.0 以上，表示含尿素養液配方皆使養液 pH 值上升，僅第 11 天至第 15 天養液 pH 值下降，該區間與第 14 天至第 18 天生長趨緩之現象可能有關，養液 pH 值下降可能來自於植株生長趨緩，或因第 11 天至第 15 天全天空日射量較低而導致(圖 12)。

##### (二)、氮源吸收量

本試驗雖處理間外觀生長無明顯差異，然而蕹菜對尿素態氮、銨態氮及硝酸態氮三種氮源吸收量則有差異。於第一週至第三週，蕹菜對尿素態氮吸收量與尿素變級呈正相關，而適量鎳 1  $\mu$ M 添加於第二週及第三週提高蕹菜對尿素態氮之吸收，鎳添加組尿素吸收量約為無鎳組的 1.5 倍。銨態氮吸收速率趨勢則與尿素態氮



相反，於第一週及第三週，10 mM 之高尿素組薤菜對銨態氮吸收量較 2 mM、4 mM 之低尿素組低，並且適量鎳 1  $\mu$ M 添加使薤菜對銨態氮吸收速率下降，第二週則於各處理間無顯著差異。於第一週及第二週薤菜對硝酸態氮吸收速率以 2 mM、4 mM 低尿素組者較高，而 10 mM 高尿素組者對硝酸態氮吸收量則較低，適量鎳 1  $\mu$ M 添加僅降低第一週薤菜對硝酸態氮之吸收量，而第二週及第三週於各處理間皆無顯著差異(表 20)。

### (三)、巨量要素吸收量

鎳添加對薤菜巨量元素吸收量皆無顯著差異，尿素變級則影響鉀、鈣、鎂之吸收量。鉀吸收量則於 2 mM 尿素組較低。鈣與鎂趨勢類似，皆是於第三週 10 mM 尿素組有較高鈣與鎂吸收量。薤菜第二週鈣之吸收量為負值，此原因可能為該週薤菜吸收極少的鈣，並因補水時自來水中鈣的補充，使得該週養液鈣濃度不減反增(表 21)。除了自來水含有鈣之外，植物根部也可能分泌鈣回養液中；以分根技術(split-root technique)搭配同位素追蹤，玉米分根 4-25%吸收的鈣可經維管束運移並釋出至另一分根之土壤中(Fedorovski, 1958)。所以也不能排除薤菜根可能分泌釋出鈣，使養液鈣含量不減反增，並使最後計算出的吸收量為負值。

綜觀三種氮源與各巨量要素於三週之吸收量，同一要素於第二週吸收量皆較低，與試驗期間株高及養液校正前 pH 值相互對照可發現，第二週試驗期間全天空日射量較低，並於第 14 天至第 18 天生長趨緩，pH 值變化也於此時期下降而非上升，顯示第二週可能因光照較低，因而影響到薤菜對各要素之吸收量，並隨後使第三週初期株高的成長趨緩。

薤菜雖於養液高濃度尿素有較高的尿素吸收，但其吸收之量仍是三種氮源中最低者，即使尿素於養液已達 10 mM，但吸收量僅為硝酸態氮吸收量的十分之一左右，顯示於此養液配方薤菜仍以吸收硝酸態氮為主(表 20)。薤菜除了對硝酸態氮吸收效率高，對鉀之吸收量也高，於第三週鉀為吸收量最高之元素(表 21)。

尿素雖吸收量相較銨態氮及硝酸氮而言不佳，但添加鎳可顯著提升薤菜對尿

素的吸收，適量鎳添加雖於試驗二或試驗三中，對薤菜全氮含量影響幅度不大，但試驗四結果顯示，鎳添加可增加養液尿素的吸收，並減少銨態氮的吸收，因此鎳的存在可能改變薤菜對三種氮源吸收傾向之程度，進而改善含尿素水耕配方所栽培作物之生長。






### 一、蕹菜鎳毒害病徵與鎳累積

過量鎳濃度  $17.0 \mu\text{M}$  則使蕹菜於生長前期葉片葉綠素濃度下降，並抑制生長(圖 1)。以養液鎳添加  $8.5 \mu\text{M}$  所栽培之蕹菜地上部鎳含量約為  $12.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$  可造成生長抑制及前期新葉黃化現象(表 5)。作物對鎳逆境耐受性可藉由產生鎳毒害徵狀時，作物葉片的鎳門檻濃度進行分類， $< 10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$  為鎳敏感型(sensitive)、 $>50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$  為適中耐受型(moderate tolerant)、 $> 1000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$  則為超累積型(hyperaccumulator) (Yusuf *et al.*, 2011)。以鎳毒害試驗一結果判斷，蕹菜對鎳之耐受性應介於鎳敏感型與適中耐受型之間。蕹菜將鎳限制於根部而減少將吸收的鎳分配至地上部，根部與地上部鎳濃度差距可達 10 倍。過量鎳濃度  $8.5 \mu\text{M}$  雖使蕹菜生長前期產生輕微黃化之毒害徵狀，但此徵狀於生長後期徵狀消失(表 2)，顯示蕹菜於生長後期可能因其於生長快速，鎳累積速率小於生長速率所致，或有其他機制適應或克服高鎳逆境。

養液如存在超量鎳  $85.3 \mu\text{M}$  可使蕹菜產生毒害徵狀，毒害徵狀為新生部位失水倒伏，並隨後於 6 天內即焦枯(圖 2)，小麥於鎳超量處理第三天其抗氧化酵素活性即有劇烈變化(Gajewska *et al.*, 2006) 顯示作物對鎳逆境反應迅速。鎳被植物吸收後，是以二價離子型態( $\text{Ni}^{2+}$ )於植物體內運移，可隨蒸散流迅速運移至頂端新生部位，而鎳運移速度與鋅相似，並較其他重金屬如鎘、鈷、錳來的快(Riesen and Feller, 2005; Sajwani *et al.*, 1996) 。因此過量鎳使新生部位迅速產生毒害徵狀，是因鎳於植體內運移速度快，以及隨蒸散流運移至新生部位所致。蕹菜宿存子葉較不受鎳濃度影響，可能與鎳隨蒸散流運移有關。

鎳毒害病徵與其他重金屬毒害病徵相似，重金屬對作物之毒害大致可分為，干擾電子傳遞鏈而產生自由基，或占據酵素活性區域，或取代酵素中心金屬離子來抑制酵素之活性等(Yusuf *et al.*, 2011)。鎳毒害最明顯的徵狀，為葉片黃化以及壞疽斑點，葉片黃化徵狀，可能為重金屬破壞抑制光合作用相關酵素有關。




鎳過量也使作物對其他要素吸收造成影響，鎳、鐵、錳、鋅原子半徑相似，而這些過渡金屬離子也可共用相同的運輸蛋白進出細胞。薤菜於過量鎳下葉片鐵含量較低，即可能為鎳與鐵在吸收或運移上，因共用運輸蛋白而互相競爭之結果(Schaaf *et al.*, 2006)。

鎳毒害之新葉黃化徵狀與缺鐵相似，試驗一薤菜鐵含量於過量鎳下較低，此徵狀是否為鎳過量下，鎳所誘導之鐵缺乏則有待探討。無鎳對照葉片鐵含量( $96.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )，與過量鎳下葉片鐵含量( $81.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )相比下降幅度不高(表 6)，然而鎳有可能於運移上與鐵競爭，並藉由佔據以鐵為中心之酵素活性，而產生出類似鐵缺乏之徵狀。

林與李 (1991)指出，鎘處理使薤菜嫩葉黃化、嚴重時出現壞疽之徵狀，此結果與本試驗相近；缺鐵與鎘處理均能干擾基粒體之形成，雖兩者干擾基質體之型態改變不盡相同，但鎘處理於根部加鐵後可導致某種程度恢復，但仍未能完全恢復正常，表示鎘處理毒害徵狀不全是鎘誘導之鐵缺乏所造成。薤菜於過量鎳及過量鎘下皆降低鐵的吸收與運移，但新葉黃化的徵狀應亦非完全由鐵缺乏導致，而可能是鎳及鎘抑制鐵運移至地上部，鎳與鎘佔據葉肉組織中，以鐵為中心的光合酵素所致，加上鎳與鎘本身也可對電子傳遞鏈進行干擾，而得到類似缺鐵黃化，以及壞疽之徵狀。

養液鎳濃度與作物吸收鎳之模式，可因養液鎳濃度區段不同而有差異。以大豆為例，大豆對養液吸收鎳的速率，也與養液鎳濃度呈正比，但可從大豆鎳吸收速率曲線得知，養液鎳  $1 \mu\text{M}$  附近也有鎳吸收速率趨緩之現象，而養液鎳大於  $1 \mu\text{M}$  之區段則即隨著養液鎳濃度上升而使大豆對鎳吸收速率隨之上升(Cataldo *et al.*, 1978)(附圖 3)。大豆對鎳吸收速率以養液  $1 \mu\text{M}$  鎳前後為界，應於兩區段有不同的鎳吸收模式，以植物根部吸收陽離子機制推估，養液鎳  $< 1 \mu\text{M}$  區段大豆可能以高親和性(high affinity)吸收模式吸收鎳，而  $> 1 \mu\text{M}$  則可能為低親和性(low affinity)之吸收模式(附圖 4)。



試驗一養液鎳濃度(0-86.3  $\mu\text{M}$ )與薤菜根部鎳含量之迴歸分析結果符合一次線性模型(圖 3)，試驗二剔除鎳毒害範圍( $> 8.6 \mu\text{M}$ )，養液鎳濃度(0-4  $\mu\text{M}$ )與薤菜根部鎳累積之關係則符合 S 型曲線模型(圖 4)。薤菜於養液 1  $\mu\text{M}$  至 2  $\mu\text{M}$  根部鎳含量上升幅度趨緩，顯示於此區段薤菜可限制對養液鎳之吸收，或可能為高親和性吸收模式趨近飽和之區段，但此高親和性吸收模式範圍可能較窄，而僅於試驗二可見，在試驗一中因鎳變級範圍較廣而無法彰顯。

鎳雖為對人體有害之重金屬，但應用於含尿素水耕養液則較無鎳食用安全問題，造成食用疑慮之養液鎳濃度為 8.6  $\mu\text{M}$  以上，但同時此濃度會造成生長抑制，不利於生產，於此鎳劑量下薤菜之生長前期，會有新葉黃化毒害之警示徵狀並可加以排除。適量鎳下僅薤菜根部則會有少許鎳累積，但一般國人食用薤菜皆去除根部後在加以烹調，故較無須擔心食用上之風險。

## 二、適量鎳添加之必要性

適量鎳之添加，可以改善以單獨尿素作為氮源的水耕萵苣之生長，以及半尿素水耕菠菜之生長(Khan *et al.*, 1999; Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2011)。而於本研究以含尿素養液與適量鎳添加也可改善水耕薤菜生長，試驗二之結果將適量鎳定於 1  $\mu\text{M}$ ，而此鎳濃度也落在試驗一較佳生長之鎳濃度範圍，試驗一及試驗二之結果一致(表 3, 表 8)。

薤菜對鎳之需求與養液尿素之濃度呈正比，試驗二薤菜於 8 mM 尿素根部鎳含量較 0 mM 尿素組高，初步顯示養液存在尿素會使薤菜有較高鎳含量(表 13)。於試驗三以相同 1  $\mu\text{M}$  鎳添加處理下，養液尿素濃度越高，薤菜根部鎳含量也越高(表 19)。試驗二及試驗三可能指出薤菜鎳之需求與養液尿素的存在以及濃度多寡有關。試驗四則進一步以三種氮素吸收的角度來評估鎳添加所造成的影響，1  $\mu\text{M}$  鎳添加可顯著提高薤菜對尿素的吸收(表 20)。

以適量鎳添加改善薤菜生長，以及尿素存在影響薤菜對鎳之需求，加上鎳添加可提高薤菜對尿素的吸收，此三點皆凸顯了含尿素水耕養液鎳添加之必要性。並



1  $\mu\text{M}$  鎳添加濃度與其他微量要素建議添加濃度相似(鋅與錳)，此低濃度的鎳添加就連鎳含量最高的蕹菜根部也僅約  $20 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ，地上部蕹菜則皆低於 AA 儀器檢測極限  $< 5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ，可安心食用。

### 三、含尿素及鎳養液配方對蕹菜要素含量之影響

鎳僅於毒害範圍降低蕹菜地上部鐵含量，適量鎳則對微量元素影響不大(表 5)。巨量元素於  $0.5 \mu\text{M}$ 、 $1 \mu\text{M}$  有較高含量，應是此適宜鎳改善蕹菜生長，並提升蕹菜對巨量元素吸收之故。試驗中尿素變級則對蕹菜要素含量影響較大，蕹菜於高尿素下鈣含量較低與小白菜相符(Zhu *et al.*, 1997)，菠菜鈣含量於  $8 \text{ mM}$  尿素下也較無尿素對照低(Khan *et al.*, 1999)。鉀含量於試驗二及試驗三趨勢較不明顯，但可從試驗四得知，蕹菜於高尿素下對鉀於第一週及第二週吸收速率較高，而第三週則無顯著差異(表 22)。

微量元素除錳累積於葉外，其它要素鐵、鋅、鎳皆累積於蕹菜根部，處理對蕹菜微量元素的影響也以根部較明顯(表 12, 表 18)。養液尿素濃度越高，蕹菜於根部鎳及錳含量越高，蕹菜根部鐵及鋅含量則越低，但鐵較鋅下降程度大(表 18)。養液尿素濃度對與菠菜地上部微量元素含量影響相似，但菠菜地上部錳含量趨勢則相反，高尿素下菠菜地上部錳含量較低(Khan *et al.*, 1999)。

本研究以尿素取代硝酸鹽，維持總氮濃度不變之方式來達成各尿素變級，然而處理間之差異不僅為尿素濃度的改變。尿素濃度的升高必定伴隨著硝酸態氮濃度的下降，並且由於養液陰陽離子總當量固定，減少的硝酸鹽是以硫酸根作補償。因此試驗三之七尿素變級間，除了尿素濃度的改變，硝酸態氮濃度、硫酸根濃度、硝銨比皆會變動。本試驗中蕹菜要素含量差異可能源自於尿素濃度之外，處理間硝銨比及硝酸態氮的差異也可影響蕹菜要素含量。高尿素組銨態氮濃度不變，但因硝酸鹽被尿素取代而使硝銨比降低，進而影響植物對其他陽離子之吸收。硝銨比低之處理下菜豆、甜瓜、玉米之鈣含量皆降低，但鎂含量則較不受硝銨比影響(Errebhi

and Wilcox, 1990), 草莓於低硝銨比鈣含量也較低, 進而影響到儲架壽命(Tabatabaei *et al.*, 2006), 薺菜於高尿素下鈣含量較低, 而鎂含量較不受影響, 除了由尿素濃度造成, 也有可能是受到處理間硝銨比之影響。




#### 四、含尿素養液配方評估與建立

試驗一與試驗二尿素濃度分別為 7 mM 及 8 mM, 此尿素濃度以適量鎳添加可改善薺菜生長, 與試驗三鎳添加可提升薺菜生長之尿素濃度區間符合。添加適量鎳未能提升從 0 mM 至 10 mM 尿素每一尿素變級薺菜之生長。適量鎳僅提升 6mM、8 mM 尿素組薺菜之生長, 但適量鎳反而使 0 mM、1 mM、10 mM 組薺菜生長降低(圖 5, 圖 6), 此原因可能與配方組成中, 其他干擾因素如硝銨比、硝酸態氮濃度及硫酸根濃度有關。

試驗三最高尿素組別(10 mM), 薺菜仍可正常生長, 甚至較低尿素組生長較佳, 其原因可能來自於薺菜之特性, 以及養液配方中硝酸鹽之影響。薺菜於 10 mM 尿素依然無尿素毒害之徵狀, 表示薺菜可耐受此高劑量之尿素。以尿素作為單獨氮源(8 mM), 薺菜依然可以正常生長, 也無尿素毒害徵狀; 而萵苣與青梗白菜則於 8 mM 尿素下則有尿素毒害之徵狀, 並嚴重影響萵苣與青梗白菜之生長(Luo *et al.*, 1993)。以礫耕方式, 薺菜於養液尿素濃度約為 7.8 mM 處理則同樣仍有正常生長(Luyen and Preston, 2004)。薺菜相較於其他葉菜類應對尿素耐受性較高, 而使得在較高尿素劑量仍不會有生長抑制之情形。

除薺菜本身對尿素之耐受性, 也可能是本研究硝酸鹽供應過於充足有關, 以尿素取代硝酸鹽之相關研究中, 也有尿素組較無尿素對照生長較佳之情形。2.68 mM 尿素(總氮濃度 13.4 mM)栽培之萵苣生長較無尿素對照佳, 萵苣硝酸鹽含量於 20% 尿素組(3761 mg·Kg<sup>-1</sup> FW)較無尿素對照低(4579 mg·Kg<sup>-1</sup> FW)(Güneş *et al.*, 1994), 萵苣硝酸鹽含量仍高, 尿素雖取代硝酸鹽 20%, 但實際上萵苣可能仍以吸收及同化硝酸態氮為主。





Khan 等 (2000)指出，8 mM 尿素(總氮濃度 16 mM)栽培之菠菜也較無尿素對照佳，菠菜硝酸鹽含量於 8 mM 尿素組(400 mg·Kg<sup>-1</sup> FW)較無尿素對照低(645 mg·Kg<sup>-1</sup> FW)，但雖然尿素占總氮的 50%，以同位素 <sup>14</sup>N 標定追蹤結果顯示菠菜植體同化之尿素態氮僅為硝酸態氮的 2 成左右。

植體於含尿素養液下，所同化之氮素是經由吸收尿素的程度遠小於硝酸鹽，此現象也出現於本試驗，試驗四 10 mM 尿素組硝酸態氮濃度為 3 mM，但尿素態氮的吸收速率為硝酸態氮的一成左右(表 20)，表示薤菜於此養液配方仍以吸收硝酸態氮為主，又因試驗需求養液更新頻繁，使高尿素配方之硝酸態氮濃度雖稍低，但因養液每週更新而供應相當充足。於試驗三薤菜地上部硝酸鹽含量也可得知，10 mM 尿素組為(4.50 g·Kg<sup>-1</sup> FW)，而無尿素對照則為(6.15 g·Kg<sup>-1</sup> FW)，雖高尿素組可降低薤菜地上部硝酸鹽，但下降程度有限，薤菜仍累積高硝酸鹽含量。因此，無尿素組硝酸氮源應過於充足，而高尿素組的硝酸態氮濃度則可能較為適中，並加上高尿素組尿素氮源的存在，使得薤菜於高尿素組生長較無尿素組生長來的佳。

除了上述更換養液頻繁之原因，硝酸鹽的吸收也與植物於根部吸收離子的方式有關。為了保持植物體內的電中性，植物根部必須進行離子交換來平衡體內陰陽離子。硝酸態氮常伴隨陽離子一起被根部細胞吸收(Bernardo *et al.*, 1984)，特別是養液配方中陽離子濃度最高的鉀離子，因此鉀離子與硝酸根離子可能以協同運輸(cotransport)的方式一併被根部吸收。

大麥幼苗傾向於將硝酸根離子與鉀離子共同吸收，而氯離子與鉀離子共同吸收速率則較低，硝酸鹽於大麥地上部同化後，減少的陰離子則以有機酸補償，使植體內陰陽離子平衡(Blevins *et al.*, 1978)。於硝酸態氮越高的處理，番茄對陽離子的吸收也越高，其中鉀吸收於硝酸態氮處理間可相差約 1.4 倍，但處理間鉀吸收占總陽離子吸收比例約 50%，並未受硝酸態氮處理之影響(Kirkby and Knight, 1977)。

試驗四薤菜吸收硝酸鹽及鉀離子的速率也相似，並兩者的吸收速率遠高於養液其他陰陽離子(表 20, 表 21)；試驗二以 8 mM 鉀栽培薤菜葉片鉀含量則為 69.3-

74.5 mg·g<sup>-1</sup>DW 莖部則為 72.8-97.9 mg·g<sup>-1</sup>DW，遠高於薤菜其他要素之含量(表 21)。鉀離子與硝酸根離子為薤菜最主要吸收的陽離子與陰離子，兩者的吸收亦可能互相影響，高尿素組薤菜硝酸鹽含量仍高可能也因薤菜吸收較高的鉀離子有關。

薤菜於 10 mM 尿素濃度下仍可正常生長，薤菜可於高劑量尿素下有良好生長，並適量鎳 1M 添加可改善 6、8 mM 尿素組薤菜之生長，並與無尿素對照相比薤菜硝酸鹽含量較低，而雖於此配方下硝酸態氮吸收仍高，但適量鎳之添加確實可提高薤菜對尿素態氮之吸收速率，顯示添加鎳之必要性並提高含尿素水耕配方之可行性。

本試驗之含尿素養液配方參考 Hoagland 養液配方，巨量元素部分加以修改而來，主要將鉀離子的濃度提升至 8 mM，也相對提升了硝酸鹽於養液中的比例，根據試驗結果顯示，含尿素養液 pH 值於試驗中皆升高，硝酸態氮吸收可能較多，因植物吸收銨態氮及尿素態氮會使養液 pH 下降，吸收硝酸態氮則使養液 pH 上升 (Kirkby and Mengel, 1967)，試驗四的結果也證明 10 mM 尿素組硝酸態氮吸收速率為銨態氮及尿素態氮吸收速率相加的 2 倍以上。因此導致試驗三高尿素組所栽培的薤菜硝酸鹽雖有降低但仍偏高。本試驗配方鉀離子與硝酸根離子應皆有降低之空間，應可使薤菜硝酸鹽含量進一步降低，並期望尿素可因比例相對提升，而使薤菜尿素吸收速率提升，更能達到以尿素取代養液水耕硝酸態氮的目的。

## 結論

尿素隨著其工業化製程的革新與改進大幅降低生產成本，而其含氮量高且易溶於水特性，使尿素用於農業氮肥應用越來越廣泛，至今占農業氮肥消耗量一半以上，往後尿素的重要性應仍會持續提高。尿素應用於土壤被視為緩效性有機氮肥，需經土壤微生物參與氨化作用而轉為銨態氮以供植物利用，但其過程可因土壤溫度、pH 值、灌溉而造成氨氣逸失。有鑑於尿素施用於土壤之缺點，尿素也被用於養液栽培，以利於植物直接吸收尿素並同化利用，並尿素用於水耕環境較無氨氣逸失問題，且可降低水耕蔬菜硝酸鹽累積的食用風險。

然而大多研究成果則認為尿素用於養液栽培時吸收及同化效率不若傳統養液配方中的銨態氮及硝酸態氮。回顧近期尿素於植物的同化效率與生化路徑相關研究，其中鳥胺酸循環分解精胺酸產生的內生尿素，需經脲酶將內生尿素分解成銨態氮，將之回收循環或進入合成胺基酸的路徑，此路徑也是植物代謝外源尿素之方式。

鎳為脲酶之中心離子，參與脲酶活性之功能即為尿素利用效率之關鍵，然而鎳與脲酶之研究晚於傳統水耕養液之發展，未含鎳之配方延用至今，前人以未含鎳之配方來評估尿素作為水耕氮源，認為尿素應用可行性低之結果應重新探討，鎳之添加可能為尿素應用於養液成功之關鍵因子。

本研究以鎳之添加，重新評估含尿素及鎳之水耕養液配方之可行性。選用臺灣夏季常見熱帶作物‘桃園一號’蘆菜作為試驗材料，以尿素取代部分硝酸態氮，而總氮濃度保持不變來達成不同的尿素變級。鎳添加 8.6  $\mu\text{M}$  以上使蘆菜產生新葉黃化鎳毒害徵狀，並使葉片鐵含量下降，鎳可能阻礙蘆菜對鐵之吸收，並占據以鐵為中心之光合酵素，造成類似缺鐵之徵狀，此過量鎳同時抑制生長，所生產之蘆菜也因過高鎳累積而不建議食用。

蘆菜於水耕養液適合之鎳添加濃度為 1  $\mu\text{M}$ ，相較無鎳添加可改善生長，1  $\mu\text{M}$  鎳添加也可提高蘆菜對養液尿素的吸收速率。養液尿素濃度也與蘆菜對鎳於根部

含量成正相關，鎳可改善含尿素養液蕹菜之生長，提升對尿素吸收速率，以及尿素之存在提升蕹菜對鎳的需求，此三點皆顯現鎳添加之必要性，以及提高了尿素應用於養液之可行性。

養液以尿素取代硝酸態氮，相較傳統無尿素對照，蕹菜鈣、鐵、鋅含量下降，但錳含量則上升，其中鐵含量變動幅度較大，為含尿素配方與傳統配方生產的蕹菜要素含量差異所在。1  $\mu\text{M}$  鎳可提升養液尿素於 6 mM、8 mM 下蕹菜之生長，故尿素濃度應可設於此範圍，並再對養液配方中其他要素進行調整，使此配方能更符合實際應用的需求。

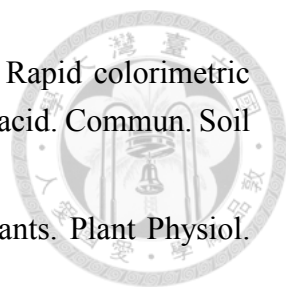
尿素雖於本試驗添加鎳後吸收速率仍不若硝酸態氮及銨態氮，但由於蕹菜於高濃度尿素下仍可正常生長，應可進一步調整氮源比例及巨量要素濃度來使尿素利用效率再提升。高尿素取代硝酸鹽組蕹菜雖有降低但仍高，蕹菜鉀含量也偏高，此為蕹菜好鉀及養液鉀含量也較高之故。因此本配方硝酸鉀之用量應可再進一步降低，使蕹菜避免因吸收鉀而造成伴隨硝酸鹽的累積。

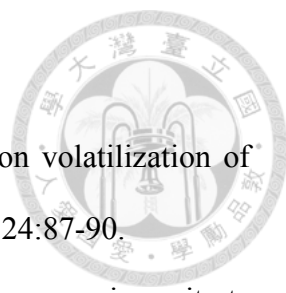
鎳可確實改善含尿素養液栽培作物之生長，並增加此配方的可行性。鎳本該加入水耕配方微量元素行列，但因其功能發現較晚，加上尿素仍非主流水耕氮肥，使其重要性被遺忘。現今研究仍有多數與尿素有關之試驗，於材料方法中未見鎳之添加。本研究鎳之添加確實影響蕹菜對尿素吸收，因此前人與尿素有關但未加鎳研究應可再重新探討，也寄望本研究可以重新喚起學界與產業界對鎳之注意，並特別是與尿素的相關研究或栽培，將鎳之添加視為雖簡單、但卻不可或缺之重要成分。

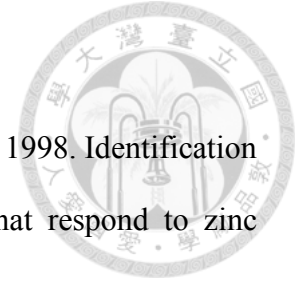
## 參考文獻



- 沈再發、許焱焱. 1991. 蕹菜水耕之養液試驗. 中華農業研究 40 (4):407-416.
- 林慧玲、李國權. 1991. 鎘處理對蕹菜微觀結構之影響. 臺灣園藝 37 (4):219-225.
- 范淑貞、張祭如、李聯興. 1996. 蕹菜新品種「桃園一號」之選育. 桃園區農業改良場研究彙報(24):1-18.
- 陳榮輝. 2001. 蕹菜品種水生栽培. 桃園區農業專訊 37:12-13.
- 謝明憲、劉依昌、許涵鈞、黃圓滿、林棟樑、王仕賢. 2009. 設施蕹菜週年栽培 臺南區農業專訊 67:10-12.
- Alam, M.M., S. Hayat, B. Ali, and A. Ahmad. 2007. Effect of 28-homobrassinolide treatment on nickel toxicity in *Brassica juncea*. Photosynthetica 45:139-142.
- Anjana, S.U. and M. Iqbal. 2007. Nitrate accumulation in plants, factors affecting the process, and human health implications:A review. Agron. Sustain. Dev. 27:45-57.
- Barnum, D.W. 2003. Some history of nitrates. J. Chem. Educ. 80:1393.
- Bernardo, L.M., R.B. Clark, and J.W. Maranville. 1984. Nitrate/ammonium ratio effects on nutrient solution pH, dry matter yield, and nitrogen uptake of sorghum. J. Plant Nutr. 7:1389-1400.
- Black, A.S., R.R. Sherlock, and N.P. Smith. 1987. Effect of timing of simulated rainfall on ammonia volatilization from urea, applied to soil of varying moisture content. J. Soil Sci. 38:679-687.
- Blevins, D.G., N.M. Barnett, and W.B. Frost. 1978. Role of potassium and malate in nitrate uptake and translocation by wheat seedlings. Plant Physiol. 62:784.
- Brown, P.H., R.M. Welch, and E.E. Cary. 1987. Nickel: A micronutrient essential for higher plants. Plant Physiol. 85:801.
- Cabrera, M.L., D.E. Kissel, and B.R. Bock. 1991. Urea hydrolysis in soil: Effects of urea concentration and soil pH. Soil Biol. Biochem. 23:1121-1124.

- 
- Cataldo, D.A., M. Maroon, L.E. Schrader, and V.L. Youngs. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6:71-80.
- Cataldo, D.A., T.R. Garland, and R.E. Wildung. 1978. Nickel in plants. *Plant Physiol.* 62:563.
- Cataldo, D.A., K.M. Mcfadden, T.R. Garland, and R.E. Wildung. 1988. Organic constituents and complexation of nickel(ii), iron(iii), cadmium(ii), and plutonium(iv) in soybean xylem exudates. *Plant Physiol.* 86:734.
- Clegg, M.S., C.L. Keen, B. Lönnnerdal, and L.S. Hurley. 1981. Influence of ashing techniques on the analysis of trace elements in biological samples. *Biol. Trace Elem. Res.* 3:237.
- Cruchaga, S., E. Artola, B. Lasa, I. Ariz, I. Irigoyen, J.F. Moran, and P.M. Aparicio-Tejo. 2011. Short term physiological implications of nbpt application on the N metabolism of *Pisum sativum* and *Spinacea oleracea*. *J. Plant Physiol.* 168:329-336.
- Dalton, D.A., H.J. Evans, and F.J. Hanus. 1985. Stimulation by nickel of soil microbial urease activity and urease and hydrogenase activities in soybeans grown in a low-nickel soil. *Plant Soil* 88:245-258.
- Dalir N., and A.H. Khoshgoftarmanesh. 2014. Symplastic and apoplastic uptake and root to shoot translocation of nickel in wheat as affected by exogenous amino acids. *J. Plant Physiol.*, 171:531-536
- Davis, R.D., P.H.T. Beckett, and E. Wollan. 1978. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. *Plant Soil* 49:395-408.
- Dixon, N.E., C. Gazzola, R.L. Blakeley, and B. Zerner. 1975. Jack bean urease (EC 3.5.1.5). Metalloenzyme. Simple biological role for nickel. *J. Amer. Chem. Soc.* 97:4131-4133.

- 
- Emsley, J. 1991. *The Elements*, 2nd ed. Oxford: Clarendon Press.
- Ernst, J.W. and H.F. Massey. 1960. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *J. Amer. Chem. Soc.* 24:87-90.
- Errebhi, M. and G.E. Wilcox. 1990. Plant species response to ammonium-nitrate concentration ratios. *J. Plant Nutr.* 13:1017-1029.
- Eskew, D.L., R.M. Welch, and E.E. Cary. 1983. Nickel: An essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science* 222:621.
- van Etten C.H., W.F Kwolek., J.E. Peters, and A.S. Barclay. Plant seeds as protein sources for food or feed. *J. Agri. Food Chem.* 1967;15:1077–1085.
- Fedorovski, D. V. 1958. Excretion of labelled phosphorus and calcium by roots into the soil at nutrition of plants through roots. *Pochvovdenie.* 3:17-23.
- Gajewska, E., M. Skłodowska, M. Słaba, and J. Mazur. 2006. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biol. Plantarum.* 50:653-659.
- Gallucci, E., S. Micelli, and C. Lippe. 1971. Non-electrolyte permeability across thin lipid membranes. *Arch. Int. Physiol. Biochim.* 79:881-887.
- Garnica, M., F. Houdusse, J.C. Yvin, and J.M. Garcia-Mina. 2009. Nitrate modifies urea root uptake and assimilation in wheat seedlings. *J. Sci. Food Agric.* 89:55-62.
- Gasser, U.G. and R.A. Dahlgren. 1994. Solid-phase speciation and surface association of metals in serpentinitic soils. *Soil Sci.* 158:409-420.
- Gerendas, J., Z. Zhu, and B. Sattelmacher. 1998. Influence of N and Ni supply on nitrogen metabolism and urease activity in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Exp. Bot.* 49:1545-1554.
- Glibert, P.M., J. Harrison, C. Heil, and S. Seitzinger. 2006. Escalating worldwide use of urea-a global change contributing to coastal eutrophication. *Biogeochemistry*



77:441-463.

Grotz, N., T. Fox, E. Connolly, W. Park, M.L. Guerinot, and D. Eide. 1998. Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95:7220-7224.

Guerinot, M.L. 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochim. Biophys. Acta. Biomembr.* 1465:190-198.

Güneş, A., W.N.K. Post, E.A. Kirkby, and M. Aktas. 1994. Influence of partial replacement of nitrate by amino acid nitrogen or urea in the nutrient medium on nitrate accumulation in nft grown winter lettuce. *J. Plant Nutri.* 17:1929-1938.

Habermeyer, M., A. Roth, S. Guth, P. Diel, K.H. Engel, B. Epe, P. Fürst, V. Heinz, H.U. Humpf, H.G. Joost, D. Knorr, T. De Kok, S. Kulling, A. Lampen, D. Marko, G. Rechkemmer, I. Rietjens, R.H. Stadler, S. Vieths, R. Vogel, P. Steinberg, and G. Eisenbrand. 2015. Nitrate and nitrite in the diet: How to assess their benefit and risk for human health. *Mol. Nutr. Food Res.* 59 (1):106-128.

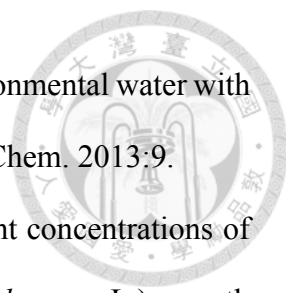
Hoagland, D.R. and D.I. Arnon. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California Agricultural Experiment Station* 347:32

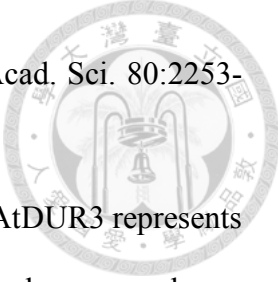
Ikeda, H. and T. Osawa. 1981. Nitrate-N and ammonium-N absorption by vegetables from nutrient solution containing ammonium nitrate and the resultant change of solution pH. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 50:225-230.

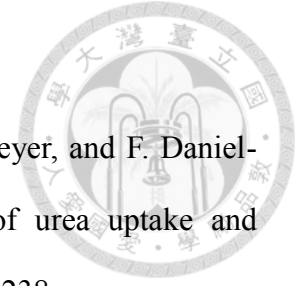
Ikeda, H. and X. Tan. 1998. Urea as an organic nitrogen source for hydroponically grown tomatoes in comparison with inorganic nitrogen sources. *Soil Sci. Plant Nutri.* 44:609-615.

Jones, C., B.D. Brown, R. Engel, D. Horneck, and K. Olson-Rutz. 2013. Factors Affecting Nitrogen Fertilizer Volatilization. Extension bulletin, Montana State University. (Accessed 29 June 2019).

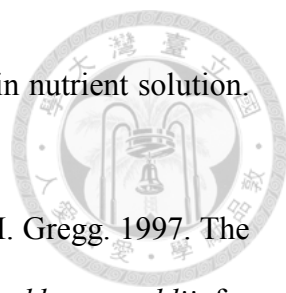


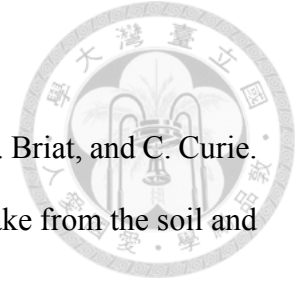
- 
- Jeong, H., J. Park, and H. Kim. 2013. Determination of  $\text{NH}_4^+$  in environmental water with interfering substances using the modified nessler method. *J. Chem.* 2013:9.
- Khan, N.K., M. Watanabe, and Y. Watanabe. 1999. Effect of different concentrations of urea with or without nickel addition on spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth under hydroponic culture. *Soil Sci. Plant Nutri.* 45:569-575.
- Khan, N.K., M. Watanabe, and Y. Watanabe. 2000. Effect of partial urea application on nutrient absorption by hydroponically grown spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Soil Sci. Plant Nutri.* 46:199-208.
- Khoshgoftarmanesh, A.H., F. Hosseini, and M. Afyuni. 2011. Nickel supplementation effect on the growth, urease activity and urea and nitrate concentrations in lettuce supplied with different nitrogen sources. *Scientia Hort.* 130:381-385.
- Kim, S.A. and M.L. Guerinot. 2007. Mining iron: Iron uptake and transport in plants. *FEBS Letters* 581:2273-2280.
- King, E.J. 1932. The colorimetric determination of phosphorus. *Biochem. J.* 26:292-297.
- Kirk, P.L. 1950. Kjeldahl method for total nitrogen. *Anal. Chem.* 22:354-358.
- Kirkby, E.A. 1968. Influence of ammonium and nitrate nutrition on the cation-anion balance and nitrogen and carbohydrate metabolism of white mustard plants grown in dilute nutrient solutions. *Soil Sci.* 105:133-141.
- Kirkby, E.A. and A.H. Knight. 1977. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation, and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiol.* 60:349.
- Kirkby, E.A. and K. Mengel. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition. *Plant Physiol.* 42:6.
- Klucas, R.V., F.J. Hanus, S.A. Russell, and H.J. Evans. 1983. Nickel: A micronutrient element for hydrogen-dependent growth of *Rhizobium japonicum* and for

- 
- expression of urease activity in soybean leaves. Proc. Natl. Acad. Sci. 80:2253-2257.
- Kojima, S., A. Bohner, B. Gassert, L. Yuan, and N. Von Wiren. 2007. AtDUR3 represents the major transporter for high-affinity urea transport across the plasma membrane of nitrogen-deficient Arabidopsis roots. Plant Journal 52:30-40.
- Krogmeier, M.J., G.W. Mccarty, and J.M. Bremner. 1989. Phytotoxicity of foliar-applied urea. Proc. Natl. Acad. Sci. 86:8189-8191.
- Kutman, B.Y., U.B. Kutman, and I. Cakmak. 2014. Effects of seed nickel reserves or externally supplied nickel on the growth, nitrogen metabolites and nitrogen use efficiency of urea- or nitrate-fed soybean. Plant and Soil 376:261-276.
- Kyllingsbæk, A. 1975. Extraction and colorimetric determination of urea in plants. Acta. Agric. Scand. 25:109-112.
- Liu, L.H., U. Ludewig, W.B. Frommer, and N. Von Wirén. 2003a. AtDUR3 encodes a new type of high-affinity urea/H<sup>+</sup> symporter in Arabidopsis. Plant cell 15:790-800.
- Liu, L.H., U. Ludewig, B. Gassert, W.B. Frommer, and N. Von Wirén. 2003b. Urea transport by nitrogen-regulated tonoplast intrinsic proteins in Arabidopsis. Plant physiol. 133:1220-1228.
- Luo, J., Z. Lian, and X. Yan. 1993. Urea transformation and the adaptability of three leafy vegetables to urea as a source of nitrogen in hydroponic culture. J. Plant Nutri. 16:797-812.
- Luyen, L.T. and T. Preston. 2004. Effect of level of urea fertilizer on biomass production of water spinach (*Ipomoea aquatica*) grown in soil and in water. Livest Res. Rural Dev. 16:81
- Macnicol, R.D. and P.H.T. Beckett. 1985. Critical tissue concentrations of potentially



- toxic elements. *Plant Soil* 85:107-129.
- Merigout, P., M. Lelandais, F. Bitton, J.P. Renou, X. Briand, C. Meyer, and F. Daniel-Vedele. 2008. Physiological and transcriptomic aspects of urea uptake and assimilation in *Arabidopsis* plants. *Plant Physiol.* 147:1225-1238.
- Maynard, D.N., A.V. Barker, P.L. Minotti, and N.H. Peck. 1976. Nitrate accumulation in vegetables, *Advances in agronomy*. Academic Press. p. 71-118.
- Mazzei, L., M. Cianci, U. Contaldo, F. Musiani, and S. Ciurli. 2017. Urease inhibition in the presence of N-(*n*-butyl)thiophosphoric triamide, a suicide substrate: Structure and kinetics. *Biochem.* 56:5391-5404.
- Miner, J. A., & Queiruga, E. S. 1995. Comparative Study on Nitrate Determination in Plant Material. In. *Contaminated Soil'95*. Springer. p. 599-600.
- Nishida, S., A. Kato, C. Tsuzuki, J. Yoshida, and T. Mizuno. 2015. Induction of nickel accumulation in response to zinc deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *International J. Mol. Sci.*16:9420-9430.
- Nishida, S., C. Tsuzuki, A. Kato, A. Aisu, J. Yoshida, and T. Mizuno. 2011. AtIRT1, the primary iron uptake transporter in the root, mediates excess nickel accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol.* 52:1433-1442.
- Phillips, D.A. 1980. Efficiency of symbiotic nitrogen fixation in legumes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31:29-49.
- Poulik, Z. 1999. Influence of nickel contaminated soils on lettuce and tomatoes. *Scientia Hort.* 81:243-250.
- Proietti, S., S. Moscatello, G. Colla, and Y. Battistelli. 2004. The effect of growing spinach (*Spinacia oleracea* L.) at two light intensities on the amounts of oxalate, ascorbate and nitrate in their leaves. *J.Hort. Sci. Biotech.* 79:606-609.
- Rahman, H., S. Sabreen, S. Alam, and S. Kawai. 2005. Effects of nickel on growth and

- 
- composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. J. Plant Nutri.28:393-404.
- Robinson, B.H., R.R. Brooks, A.W. Howes, J.H. Kirkman, and P.E.H. Gregg. 1997. The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytoremediation and phytomining. J. Geochem. Explor. 60:115-126.
- Riesen, O. and U. Feller. 2005. Redistribution of nickel, cobalt, manganese, zinc and cadmium via the phloem in young and in maturing wheat. J. Plant Nutri. 28: 421–430.
- Schaaf, G., A. Honsbein, A.R. Meda, S. Kirchner, D. Wipf, and N. Von Wirén. 2006. AtIREG2 encodes a tonoplast transport protein involved in iron-dependent nickel detoxification in *Arabidopsis thaliana* roots. J. Biol. Chem. 281:25532-25540.
- Seregin, I.V. and A.D. Kozhevnikova. 2006. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. Russ. J. Plant Physiol. 53:257-277.
- Silva, A.G.B., C.H. Sequeira, R.A. Sermarini, and R. Otto. 2017. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis. Agron. J. 109:1-13.
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant Soil 15:134-154.
- Tabatabaei, S.J., L.S. Fatemi, and E. Fallahi. 2006. Effect of ammonium: Nitrate ratio on yield, calcium concentration, and photosynthesis rate in strawberry. J. Plant Nutri. 29:1273-1285.
- Tan, X.W., H. Ikeda, and M. Oda. 2000. The absorption, translocation, and assimilation of urea, nitrate or ammonium in tomato plants at different plant growth stages in hydroponic culture. Scientia Hort. 84:275-283.
- Toppi, L. and R. Gabbrielli. 1999. Response to cadmium in higher plants. Environ. Exp.



- Bot. 41:105-130.
- Vert, G., N. Grotz, F. Dedaldechamp, F. Gaymard, M.L. Guerinot, J.F. Briat, and C. Curie. 2002. IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *Plant Cell* 14:1223-1233.
- Wilson, M.R., S.I. O'donohue, and N.A. Walker. 1988. The transport and metabolism of urea in *Chara australis*: I. Two specific transport systems. *J. Exp. Bot.* 39:763-774.
- Witte, C.P. 2011. Urea metabolism in plants. *Plant Sci.* 180:431-438.
- Yang, X.E., V.C. Baligar, J.C. Foster, and D.C. Martens. 1997. Accumulation and transport of nickel in relation to organic acids in ryegrass and maize grown with different nickel levels. *Plant Soil* 196:271-276.
- Yusuf, M., Q. Fariduddin, S. Hayat, and A. Ahmad. 2011. Nickel: An overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 86:1-17.
- Zanin, L., N. Tomasi, A. Zamboni, Z. Varanini, and R. Pinton. 2015a. The urease inhibitor NBPT negatively affects DUR3-mediated uptake and assimilation of urea in maize roots. *Front. Plant Sci.* 6(1007):12.
- Zanin, L., A. Zamboni, R. Monte, N. Tomasi, Z. Varanini, S. Cesco, and R. Pinton. 2015b. Transcriptomic analysis highlights reciprocal interactions of urea and nitrate for nitrogen acquisition by maize roots. *Plant . Cell Physiol.* 56:532-548.
- Zhu, Y., G. Li, H. Liu, G. Sun, R. Chen, and S. Song. 2018. Effects of partial replacement of nitrate with different nitrogen forms on the yield, quality and nitrate content of chinese kale. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 49:1384-1393.
- Zhu Z., Gerendas J., Sattelmacher B. 1997. Effects of replacing of nitrate with urea or chloride on the growth and nitrate accumulation in pak-choi in the hydroponics. In: Ando T., Fujita K., Mae T., Matsumoto H., Mori S., Sekiya J. (eds) *Plant*

Nutrition for Sustainable Food Production and Environment. *Developments in Plant and Soil Sciences*. vol. 78. Springer. p. 963-964.





圖

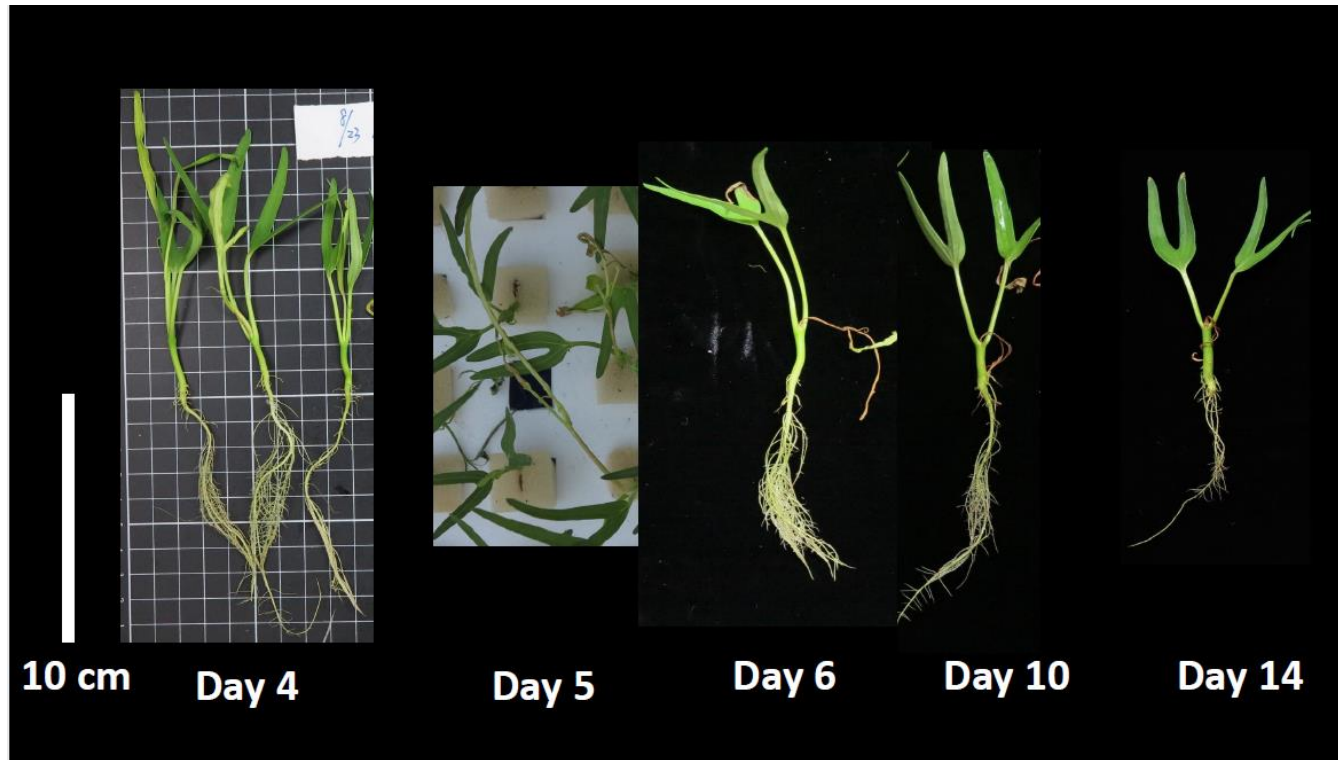


圖 1、養液 85.3  $\mu\text{M}$  Ni 濃度處理對蕹菜鎳毒害徵狀

Fig. 1. Nickel toxicity symptoms on water spinach in 85.3  $\mu\text{M}$  Ni nutrient solution

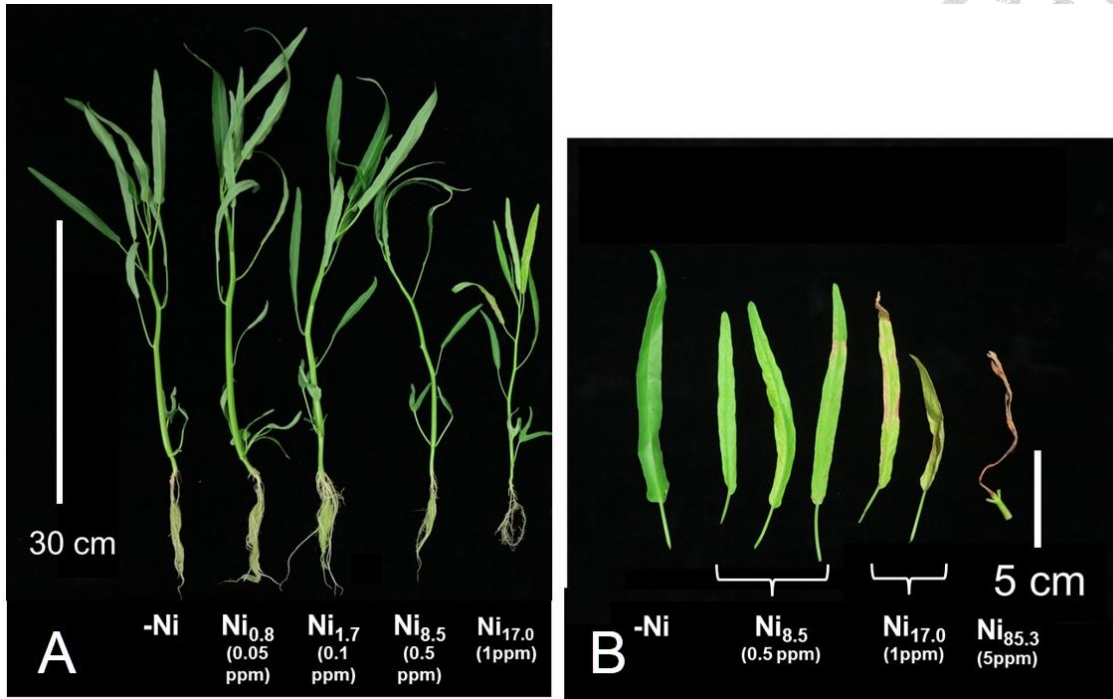


圖 2、鎳毒害對蕹菜生長及葉片外觀之影響

(A)全株(B)新生全展開葉。-Ni:養液 0  $\mu\text{M}$  鎳、 $\text{Ni}_{0.85}$ :養液 0.85  $\mu\text{M}$  鎳、 $\text{Ni}_{1.7}$ :養液 17.0  $\mu\text{M}$  鎳、 $\text{Ni}_{8.5}$ :養液 8.5  $\mu\text{M}$  鎳、 $\text{Ni}_{17.0}$ :養液 17.0  $\mu\text{M}$  鎳、 $\text{Ni}_{85.3}$ :養液 85.3  $\mu\text{M}$  鎳。

Fig. 2. Nickel toxicity symptoms on water spinach growth and leaf appearance

(A)Whole plant (B)Full expand young leaf. -Ni: nutrient contain 0  $\mu\text{M}$  Ni,  $\text{Ni}_{0.85}$ : 0.85  $\mu\text{M}$  Ni、 $\text{Ni}_{1.7}$ : 17.0  $\mu\text{M}$  Ni、 $\text{Ni}_{8.5}$ : 8.5  $\mu\text{M}$  Ni、 $\text{Ni}_{17.0}$ : 17.0  $\mu\text{M}$  Ni,  $\text{Ni}_{85.3}$ : 85.3  $\mu\text{M}$  Ni.



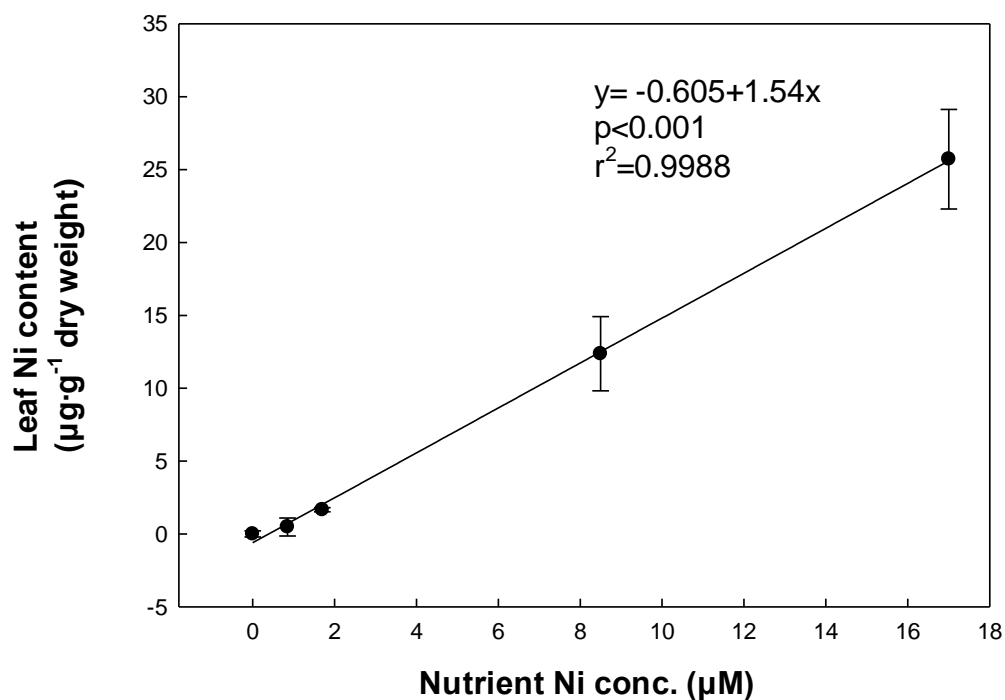


圖 3、養液鎳濃度與水耕蕹菜葉片鎳含量之相關性

養液鎳濃度為: 0、0.85、1.70、8.5、17.0 µM。每筆資料為三重複之平均，誤差線(I)為標準差。

Fig. 3. Regression analysis of nutrient Ni concentrations on hydroponic water spinach and leaf Ni content

Ni treatments are 0, 0.85, 1.70, 8.5, 17.0 µM. n=3, error bars are standard error of replicates.

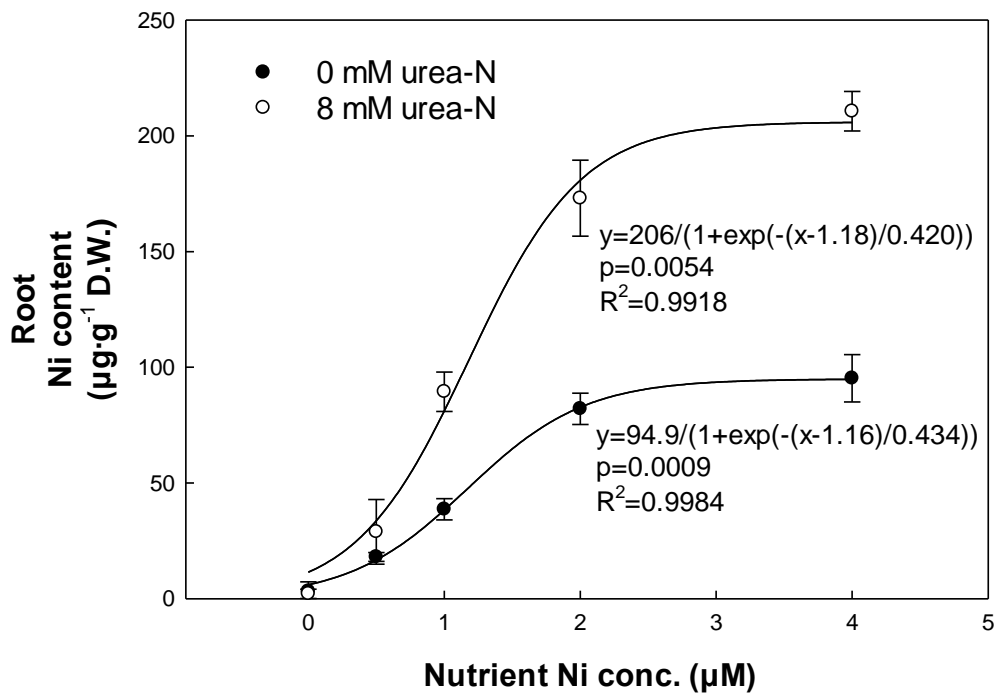


圖 4、養液鎳與尿素對水耕蕹菜根部鎳含量相關性

水耕養液鎳濃度為: 0、0.5、1、2、4  $\mu\text{M}$ 。每筆資料為三重複之平均，誤差線(I)為標準差。

Fig. 4. Regression analysis of Ni supplement and urea-N dosage in nutrients on the root Ni content of hydroponic water spinach plants

Ni treatments are 0, 0.5, 1, 2, 4  $\mu\text{M}$ . n=3, error bars are standard error of replicates.

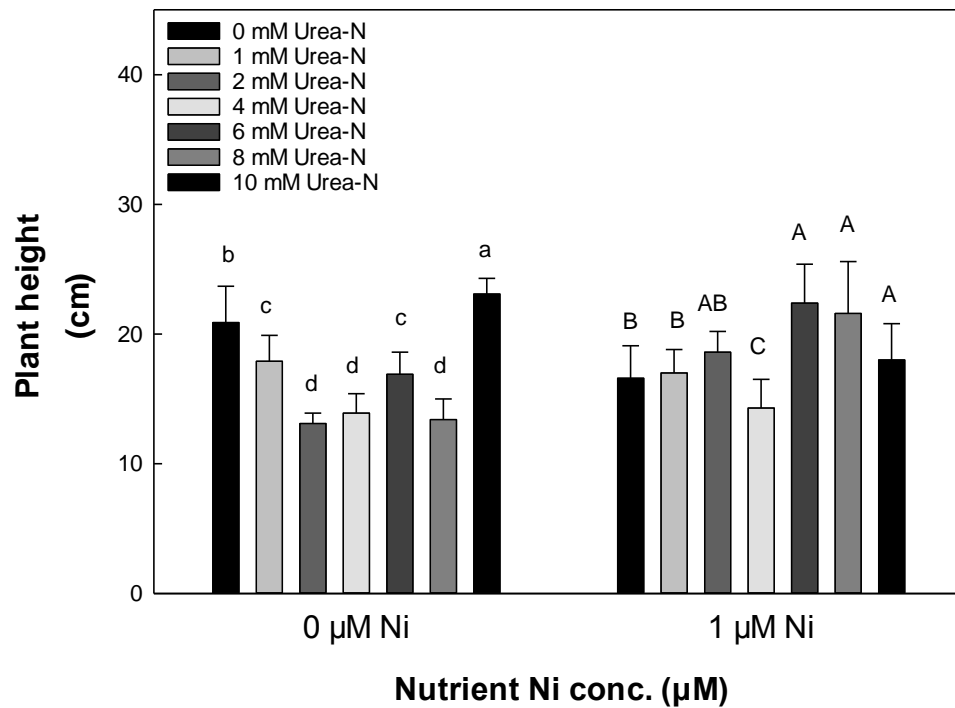


圖 5、養液尿素與鎳對水耕菠菜株高之影響

每筆資料為十重複之平均，誤差線(I)為標準差，英文字母不同者表示達 LSD 5%顯著差異水準。

Fig. 5. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on plant height of water spinach

Error bars are standard error of 10 replicates. Different letter indicate significant difference by LSD ( $P < 0.05$ ).

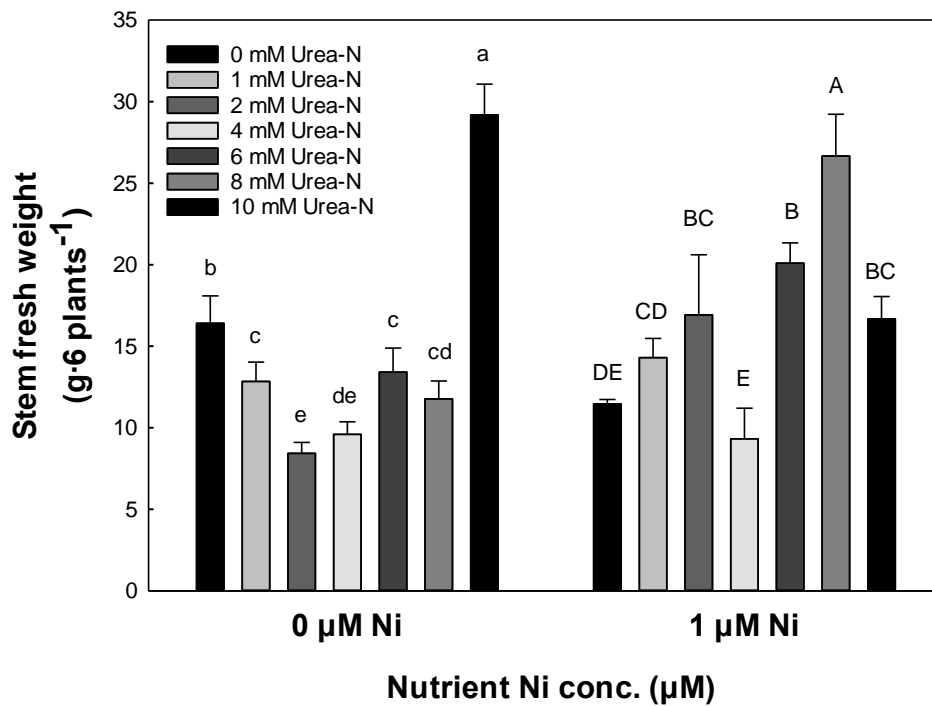


圖 6、養液尿素鎳添加對水耕蕹菜莖部鮮重之影響

每筆資料為三重複之平均，誤差線(I)為標準差，英文字母不同者表示達 LSD 5%顯著差異水準。

Fig. 6. Effect of urea-N dosage and Ni supplements in nutrients on stem fresh weight of water spinach

Error bars are standard error of 3 replicates. Different letter indicate significant difference by LSD ( $P < 0.05$ ).

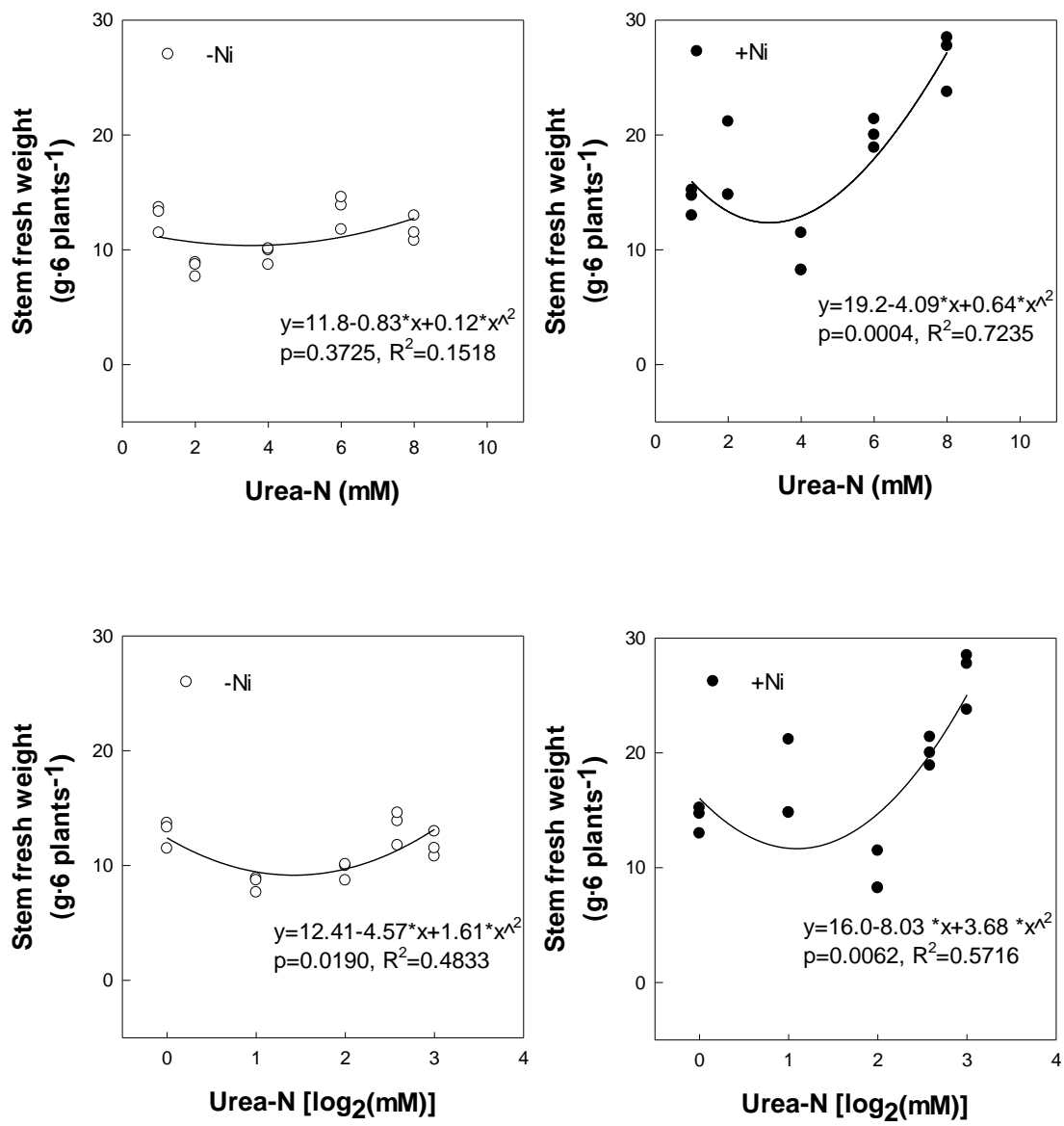


圖 7、養液尿素與鎳處理對水耕蕹菜莖部鮮重回歸分析

(A 與 C)-Ni: 養液添加 0 μM , (B 與 D)+Ni: 養液添加 1 μM 。  
 養液尿素態氮為: 0、0.5、1、2、4、8、10 mM 。

Fig. 7. Regression analysis of urea-N dosage and Ni addition in nutrients on stem fresh weight of water spinach  
 (A and C) -Ni: 0 μM Ni, (B and D) +Ni: 1 μM Ni.  
 Urea-N treatments are 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10 mM.

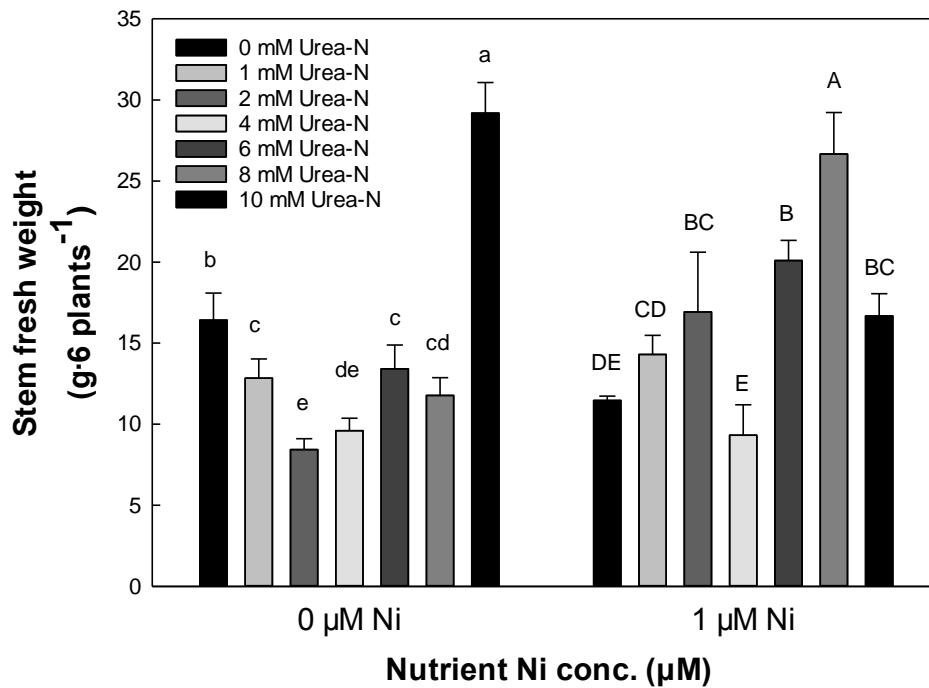


圖 8、養液尿素與鎳對水耕菠菜地上部硝酸鹽含量之影響

每筆資料為三重複之平均，誤差線(I)為標準差，英文字母不同者表示達 LSD 5%顯著差異水準。

Fig. 8. Effect of urea-N dosage and Ni supplements in nutrients on shoot nitrate content of hydroponic water spinach  
Error bars are standard error of 3 replicates. Different letter indicate significant difference by LSD (P<0.05).

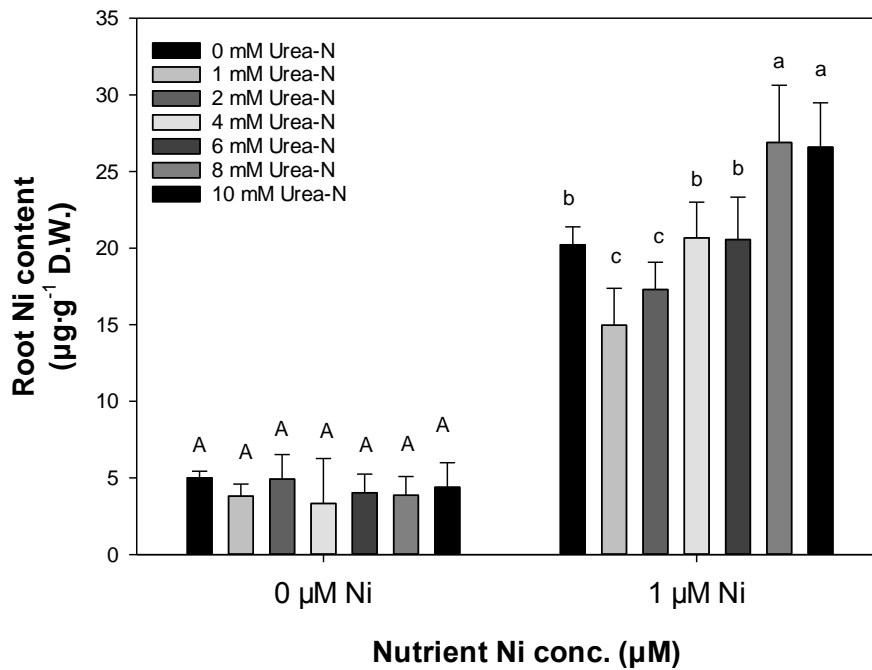


圖 9、養液尿素與鎳對水耕蕹菜根部鎳累積之影響

每筆資料為三重複之平均，誤差線(I)為標準差，英文字母不同者表示達 LSD 5%顯著差異水準。

Fig. 9. Effect of urea-N dosage and Ni supplements in nutrients on root Ni content of hydroponic water spinach.

Error bars are standard error of 3 replicates. Different letter indicate significant difference by LSD ( $P < 0.05$ ).

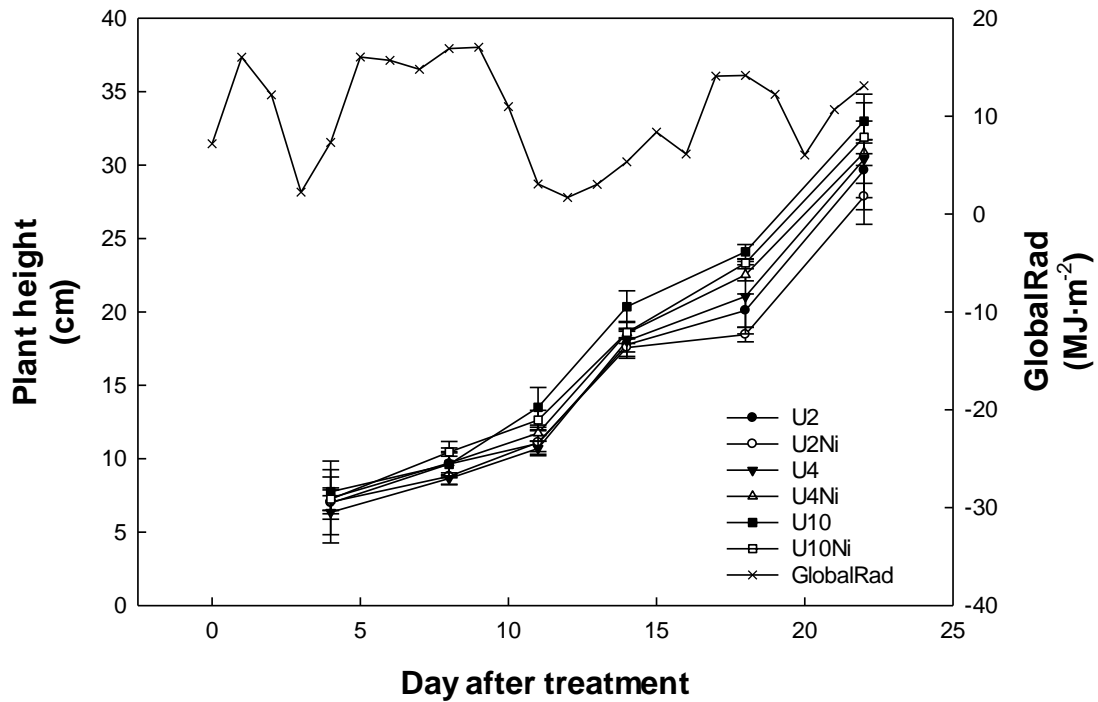
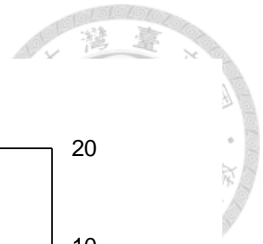


圖 10、尿素與鎳添加養液配方對水耕蕹菜株高之影響

U2: 養液含 2 mM urea-N、U2Ni: 2 mM urea-N 與 1 $\mu$ M 鎳

U4: 2 mM urea-N、U4Ni: 4 mM urea-N 並加 1 $\mu$ M 鎳

U10: 10 mM urea-N、U10Ni: 10 mM urea-N 並加 1 $\mu$ M 鎳

GlobRad: 全天空日射量( $W\cdot m^{-2}$ )

每筆資料為十重複之平均，誤差線(I)為標準差

Fig. 10. Effect of three urea-N dosage and two Ni concentration nutrient solution on

hydroponic water spinach plant height

U2: Nutrient contain 2 mM urea-N, U2Ni: 2 mM urea-N with 1  $\mu$ M Ni

U4: 4 mM urea-N, U4Ni: 4 mM urea-N with 1  $\mu$ M Ni

U10: 10 mM urea-N, U10Ni: 10 mM urea-N with 1  $\mu$ M Ni

GlobRad: global solar radiation ( $W\cdot m^{-2}$ )

Error bars are standard error of 3 replicates.



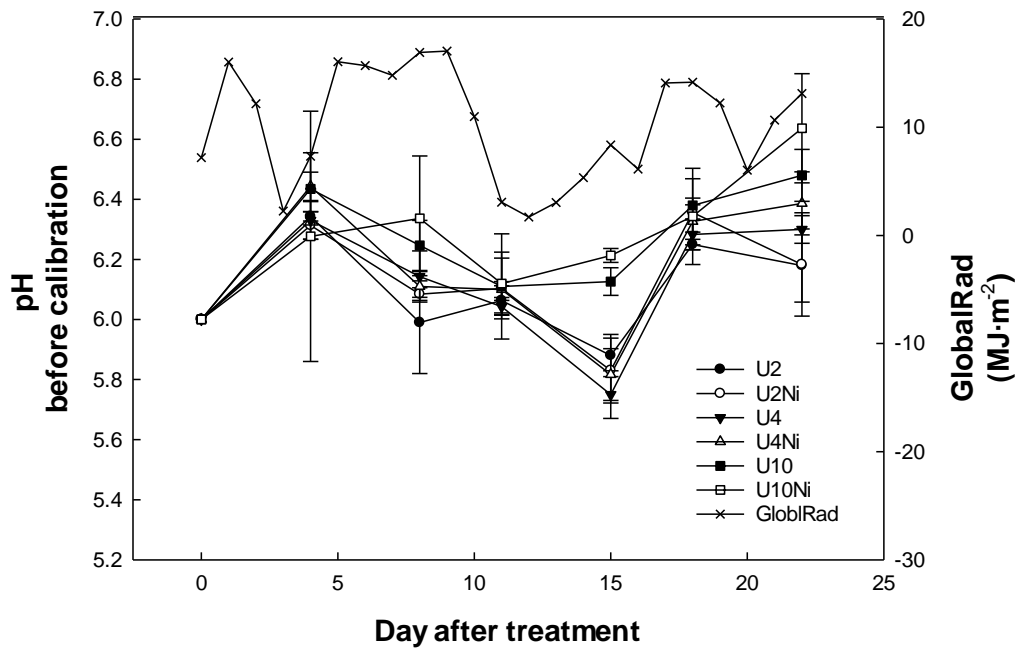
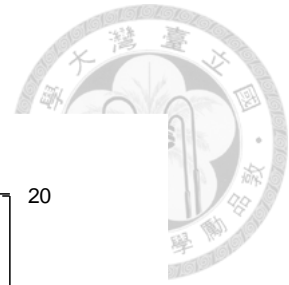


圖 11、尿素與鎳添加對養液校正前 pH 值之影響

U2: 養液含 2 mM urea-N、U2Ni: 2 mM urea-N 與 1 $\mu$ M 鎳

U4: 2 mM urea-N、U4Ni: 4 mM urea-N 並加 1 $\mu$ M 鎳

U10: 10 mM urea-N、U10Ni: 10 mM urea-N 並加 1 $\mu$ M 鎳

GlobRad: 全天空日射量( $W\cdot m^{-2}$ )

每筆資料為三重複之平均，測量後重新校正至 pH=6.0，誤差線(I)為標準差

Fig. 11. Effect of urea-N dosage and Ni supplements on nutrient pH before calibration

U2: Nutrient contain 2 mM urea-N, U2Ni: 2 mM urea-N with 1  $\mu$ MNi

U4: 4 mM urea-N, U4Ni: 4 mM urea-N with 1  $\mu$ MNi

U10: 10 mM urea-N, U10Ni: 10 mM urea-N with 1  $\mu$ MNi

GlobRad: global solar radiation ( $W\cdot m^{-2}$ )

Error bars are standard error of 3 replicates, solution were calibrated to pH=6.0 after measurement.



表

表 1、鎳對以尿素佔 46.6% 氮源之水耕蕹菜葉片葉綠素濃度、葉長及莖徑之影響

Table 1. Effect of Ni on hydroponic water spinach leaf chlorophyll content, leaf length and stem diameter under 46.6% of nutrient solution N is urea

Treatments	7 day	10 day	10 day	10 day	14 day	14 day	14 day
	Chlorophyll <sup>z</sup> content (SPAD)	Chlorophyll content (SPAD)	Stem diameter (mm)	Leaf length (cm)	Chlorophyll content (SPAD)	Stem diameter (mm)	Leaf length (cm)
Ni conc. ( $\mu\text{M}$ )						0	
0	40.8 <sup>a</sup>	38.6 <sup>a</sup>	4.39 <sup>abc</sup>	11.9	37.9 <sup>a</sup>	5.95 <sup>bc</sup>	15.3 <sup>ab</sup>
0.85	37.8 <sup>a</sup>	37.4 <sup>a</sup>	4.83 <sup>a</sup>	13.7	40.8 <sup>a</sup>	6.07 <sup>b</sup>	16.3 <sup>a</sup>
1.7	37.8 <sup>a</sup>	36.4 <sup>a</sup>	4.62 <sup>ab</sup>	12.6	39.9 <sup>a</sup>	6.81 <sup>a</sup>	16.9 <sup>a</sup>
8.5	26.8 <sup>b</sup>	28.5 <sup>b</sup>	3.85 <sup>bc</sup>	11.5	41.3 <sup>a</sup>	5.47 <sup>bc</sup>	16.0 <sup>a</sup>
17.0	23.2 <sup>b</sup>	27.4 <sup>b</sup>	3.77 <sup>c</sup>	11.8	38.0 <sup>a</sup>	5.26 <sup>c</sup>	13.8 <sup>b</sup>
Significant analysis (P-value)	<0.001	0.029	<0.001	0.113	0.174	<0.001	0.008

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level.



表 2、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕蕹菜株高之影響

Table 2. Effect of Ni on hydroponic water spinach plant height under 46.6% of nutrient solution N is urea

Treatments	Plant height(cm) <sup>z</sup>				
	4 day	6 day	10 day	14 day	26 day
Ni conc. (μM)					
0	5.1	8.3	19.2 <sup>ab</sup>	27.3 <sup>b</sup>	57.3 <sup>bc</sup>
0.85	5.1	7.4	21.0 <sup>a</sup>	29.3 <sup>a</sup>	59.7 <sup>ab</sup>
1.7	4.1	8.0	21.7 <sup>a</sup>	31.4 <sup>a</sup>	64.3 <sup>a</sup>
8.5	4.1	6.9	18.2 <sup>b</sup>	28.1 <sup>b</sup>	61.0 <sup>bc</sup>
17.0	4.4	7.9	17.7 <sup>b</sup>	26.6 <sup>b</sup>	56.5 <sup>c</sup>
Significant analysis (P-value)					
	0.088	0.382	0.013	<0.001	0.004

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level.

ns= no significant difference



表 3、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕蕹菜株高、莖徑及乾鮮重之影響(26 天)

Table 3. Effect of Ni on hydroponic water spinach plant height, stem diameter, 2<sup>nd</sup> Stem diameter and total plant yield under 46.6% of nutrient solution N is urea (26 day)

treatments	Plant height <sup>z</sup> (cm)	Stem diameter (mm)	2 <sup>nd</sup> Stem diameter (mm)	Total fresh weight (g·3 plant <sup>-1</sup> )	Total dry weight (g·3 plant <sup>-1</sup> )
Ni conc. (μM)					
0	57.3 <sup>bc</sup>	7.90 <sup>ab</sup>	6.02 <sup>ab</sup>	40.1ab	2.83a
0.85	59.7 <sup>ab</sup>	8.28 <sup>a</sup>	6.77 <sup>a</sup>	45.2a	3.10a
1.7	64.3 <sup>a</sup>	8.25 <sup>a</sup>	5.93 <sup>ab</sup>	41.1a	2.78a
8.5	61.0 <sup>bc</sup>	7.49 <sup>b</sup>	4.96 <sup>b</sup>	32.9bc	2.32b
17.0	56.5 <sup>c</sup>	7.97 <sup>ab</sup>	6.02 <sup>ab</sup>	31.2c	2.18b
Significant analysis (P-value)	0.004	0.028	<0.001	0.011	0.005

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 26 days after transplant.

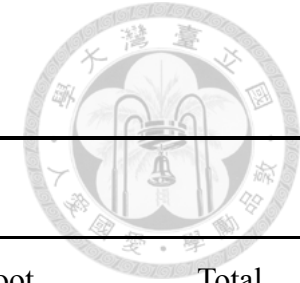


表 4、鎳對以尿素佔 46.6%氮源水耕蕹菜根莖葉乾鮮重之影響

Table 4. Effect of Ni on hydroponic water spinach leaf, stem and root fresh and dry weight

Treatments	Fresh weight (g·plant <sup>-1</sup> )				Dry weight (g·plant <sup>-1</sup> )			
	Leaf	Stem	Root	Total	Leaf	Stem	Root	Total
Ni conc. (μM) <sup>z</sup>								
0	15.15 <sup>a</sup>	22.93 <sup>bc</sup>	2.05 <sup>bc</sup>	40.1 <sup>ab</sup>	1.31 <sup>a</sup>	1.22 <sup>ab</sup>	0.294 <sup>ab</sup>	2.82 <sup>a</sup>
0.85	16.50 <sup>a</sup>	28.72 <sup>a</sup>	2.26 <sup>a</sup>	45.2 <sup>a</sup>	1.43 <sup>a</sup>	1.38 <sup>a</sup>	0.297 <sup>a</sup>	3.10 <sup>a</sup>
1.7	14.99 <sup>a</sup>	23.95 <sup>ab</sup>	2.18 <sup>ab</sup>	41.1 <sup>a</sup>	1.28 <sup>ab</sup>	1.22 <sup>ab</sup>	0.267 <sup>bc</sup>	2.78 <sup>a</sup>
8.5	11.51 <sup>b</sup>	19.86 <sup>bc</sup>	1.96 <sup>c</sup>	32.9 <sup>bc</sup>	1.06 <sup>bc</sup>	1.03 <sup>b</sup>	0.240 <sup>cd</sup>	2.32 <sup>b</sup>
17.0	10.71 <sup>b</sup>	18.51 <sup>c</sup>	1.56 <sup>d</sup>	31.1 <sup>c</sup>	0.98 <sup>c</sup>	0.97 <sup>b</sup>	0.219 <sup>d</sup>	2.17 <sup>b</sup>
Significant analysis (P-value)	0.004	0.016	<0.001	0.011	0.006	0.044	<0.001	0.005

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 14 days after transplant, n=3.



表 5、鎳對以尿素佔 46.6%氮源之水耕蕹菜葉片要素含量之影響(26 天)

Table 5. Effect of Ni on hydroponic water spinach leaf nutrient content. (26 day)

Treatments	Macronutrient content of leaf <sup>z</sup> (mg·g <sup>-1</sup> dry weight)					Micronutrient content of leaf (μg·g <sup>-1</sup> dry weight)			
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Ni conc. (μM)									
0	53.9	21.2 <sup>c</sup>	98.3	4.79	2.22	96.7 <sup>a</sup>	45.6 <sup>ab</sup>	41.0	nd
0.85	56.7	23.0 <sup>ab</sup>	97.7	4.76	2.18	96.2 <sup>a</sup>	37.6	42.1	0.5 <sup>c</sup>
1.7	54.4	23.9 <sup>a</sup>	97.2	4.73	2.08	81.8 <sup>b</sup>	44.8	46.6	1.6 <sup>c</sup>
8.5	52.9	21.7 <sup>bc</sup>	98.0	4.77	2.14	82.3 <sup>b</sup>	48.1	51.0	12.4 <sup>b</sup>
17.0	58.2	21.4 <sup>bc</sup>	104.6	5.11	2.29	81.3 <sup>b</sup>	50.9	44.9	25.9 <sup>a</sup>
Significant analysis									
(P-value)	0.053	0.039	0.115	0.114	0.296	0.018	0.246	0.356	<0.001

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 26 days after transplant, n=3.

nd= Not detectable

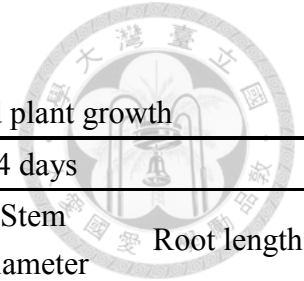


表 6、養液中鎳濃度與尿素對水耕蕹菜葉綠素濃度與生長之影響

Table 6. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on hydroponic water spinach chlorophyll content and plant growth

Treatments	After treated 7 days				After treated 14 days			
	Chlorophyll <sup>z</sup> content	Plant height	Stem diameter	Root length	Chlorophyll content	Plant height	Stem diameter	Root length
	(SPAD)	(cm)	(mm)	(cm)	(SPAD)	(cm)	(mm)	(cm)
Ni conc. ( μM)								
0	31.7 <sup>ab</sup>	19.7 <sup>c</sup>	4.35 <sup>ab</sup>	10.7	36.3	46.8 <sup>c</sup>	6.40	17.0
0.5	32.3 <sup>a</sup>	22.3 <sup>ab</sup>	4.58 <sup>a</sup>	10.3	36.1	51.9 <sup>ab</sup>	6.99	18.1
1	30.1 <sup>b</sup>	24.1 <sup>a</sup>	4.62 <sup>a</sup>	10.7	35.7	53.7 <sup>a</sup>	7.01	18.3
2	28.5 <sup>c</sup>	21.9 <sup>bc</sup>	4.23 <sup>b</sup>	10.3	35.3	50.7 <sup>bc</sup>	6.96	19.8
4	28.1 <sup>c</sup>	23.8 <sup>a</sup>	4.60 <sup>a</sup>	10.9	35.8	51.6 <sup>c</sup>	6.71	19.4
Urea-N dosage (mM)								
0	33.7 <sup>a</sup>	22.7	4.74 <sup>a</sup>	10.5	35.9	50.0	6.80	19.7 <sup>a</sup>
8	26.5 <sup>b</sup>	22.0	4.21 <sup>b</sup>	10.7	35.8	51.4	6.83	17.3 <sup>b</sup>
Significant analysis								
Main effect								
Ni conc. (Ni)	**	**	*	ns	ns	**	ns	ns
Urea-N (U)	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	**
Interaction								
Ni×U	**	*	ns	*	ns	*	ns	ns

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level, ns= no significant difference



表 7、養液中鎳濃度與尿素濃度對水耕菠菜乾鮮重單因子分析

Table 7. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on hydroponic water spinach fresh and dry weight

Treatment	Urea-N 0 mM						Urea-N 8 mM					
	Fresh weight (g·5 plant <sup>-1</sup> ) <sup>z</sup>			Dry weight(g·5 plant <sup>-1</sup> )			Fresh weight (g·5 plant <sup>-1</sup> )			Dry weight(g·5 plant <sup>-1</sup> )		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Ni conc. (μM)												
0	25.0 <sup>c</sup>	43.3 <sup>c</sup>	9.19	2.00	2.02 <sup>c</sup>	0.67	25.1 <sup>b</sup>	46.9 <sup>c</sup>	7.72 <sup>c</sup>	1.86	1.94 <sup>c</sup>	0.51 <sup>b</sup>
0.5	36.0 <sup>a</sup>	59.9 <sup>a</sup>	10.94	2.68	2.81 <sup>ab</sup>	0.78	33.6 <sup>a</sup>	59.2 <sup>ab</sup>	10.25 <sup>b</sup>	2.59	2.48 <sup>ab</sup>	0.71 <sup>a</sup>
1	32.3 <sup>ab</sup>	59.0 <sup>a</sup>	9.13	2.42	2.61 <sup>a</sup>	0.69	34.0 <sup>a</sup>	64.5 <sup>a</sup>	11.33 <sup>ab</sup>	2.30	2.71 <sup>a</sup>	0.73 <sup>a</sup>
2	29.2 <sup>bc</sup>	48.8 <sup>bc</sup>	11.82	2.28	2.3 <sup>b</sup>	0.81	29.0 <sup>ab</sup>	55.2 <sup>bc</sup>	10.19 <sup>b</sup>	2.17	2.32 <sup>b</sup>	0.69 <sup>a</sup>
4	29.1 <sup>bc</sup>	54.1 <sup>ab</sup>	10.70	2.39	2.76 <sup>ab</sup>	0.83	28.9 <sup>ab</sup>	57.1 <sup>ab</sup>	12.76 <sup>a</sup>	2.18	2.42 <sup>ab</sup>	0.75 <sup>a</sup>
Significant analysis (P-value)												
	0.036*	0.007**	0.198 <sup>ns</sup>	0.144 <sup>ns</sup>	0.003**	0.298 <sup>ns</sup>	0.017*	0.009**	0.006**	0.183 <sup>ns</sup>	0.005**	0.009**

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 14 days after transplant, n=4.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns= no significant difference



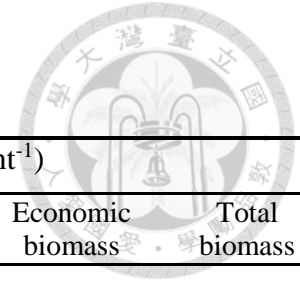


表 8、養液中鎳濃度與尿素對水耕蕹菜乾鮮重之複因子分析

Table 8. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on hydroponic water spinach fresh and dry weight

Treatments	Fresh weight (g·5 plant <sup>-1</sup> ) <sup>z</sup>					Dry weight(g·5 plant <sup>-1</sup> )				
	Leaf	Stem	Root	Economic biomass <sup>y</sup>	Total biomass	Leaf	Stem	Root	Economic biomass	Total biomass
Ni conc. ( μM)										
0	25.1 <sup>b</sup>	45.1 <sup>d</sup>	8.46 <sup>b</sup>	70.2 <sup>d</sup>	78.7 <sup>c</sup>	1.93 <sup>c</sup>	1.98 <sup>c</sup>	0.59 <sup>b</sup>	3.91 <sup>c</sup>	4.51 <sup>c</sup>
0.5	34.8 <sup>a</sup>	59.5 <sup>ab</sup>	10.60 <sup>a</sup>	94.3 <sup>ab</sup>	104.9 <sup>a</sup>	2.63 <sup>a</sup>	2.64 <sup>a</sup>	0.75 <sup>a</sup>	5.28 <sup>a</sup>	6.03 <sup>a</sup>
1	33.2 <sup>a</sup>	61.8 <sup>a</sup>	10.23 <sup>a</sup>	95.0 <sup>a</sup>	105.2 <sup>a</sup>	2.36 <sup>ab</sup>	2.66 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	5.02 <sup>ab</sup>	5.73 <sup>ab</sup>
2	29.1 <sup>b</sup>	52.0 <sup>c</sup>	11.00 <sup>a</sup>	81.1 <sup>c</sup>	92.1 <sup>b</sup>	2.23 <sup>bc</sup>	2.31 <sup>b</sup>	0.75 <sup>a</sup>	4.54 <sup>b</sup>	5.29 <sup>b</sup>
4	29.0 <sup>b</sup>	55.6 <sup>bc</sup>	11.73 <sup>a</sup>	84.6 <sup>bc</sup>	96.3 <sup>ab</sup>	2.28 <sup>abc</sup>	2.59 <sup>a</sup>	0.79 <sup>a</sup>	4.87 <sup>ab</sup>	5.66 <sup>c</sup>
Urea-N dosage (mM)										
0	30.3	53.0	10.36	83.4	93.7	2.36	2.50	0.76 <sup>a</sup>	4.85	5.61
8	30.1	56.6	10.45	86.7	97.8	2.22	2.37	0.68 <sup>b</sup>	4.59	5.84
Significant analysis										
Main effect										
Ni conc. (Ni)	**	**	**	**	**	*	**	*	**	**
Urea-N (U)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
Interaction										
Ni×U	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level.

<sup>y</sup>: Economic biomass = Leaf+Stem.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level, ns= no significant difference.

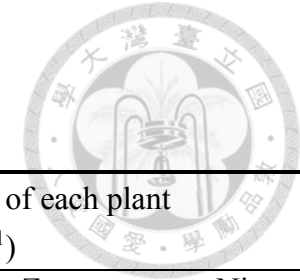


表 9、養液中鎳濃度與尿素對水耕蕹菜單株要素含量之影響

Table 9. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on water spinach nutrient content of each plant

Treatments	Macronutrient content of each plant <sup>y</sup> (mg·plant <sup>-1</sup> )					Micronutrient content of each plant (μg·plant <sup>-1</sup> )			
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Ni conc.( μM)									
0	29.1 <sup>c</sup>	8.8 <sup>c</sup>	63.1 <sup>c</sup>	6.60 <sup>b</sup>	2.23 <sup>b</sup>	232 <sup>c</sup>	85.0 <sup>b</sup>	34.5	1.1 <sup>e</sup>
0.5	40.3 <sup>a</sup>	12.2 <sup>a</sup>	98.6 <sup>a</sup>	7.75 <sup>a</sup>	2.77 <sup>a</sup>	286 <sup>ab</sup>	105.6 <sup>a</sup>	39.8	7.2 <sup>d</sup>
1	39.8 <sup>a</sup>	11.4 <sup>ab</sup>	91.6 <sup>ab</sup>	7.69 <sup>a</sup>	2.58 <sup>a</sup>	236 <sup>c</sup>	82.0 <sup>b</sup>	36.3	11.9 <sup>c</sup>
2	34.7 <sup>b</sup>	10.0 <sup>bc</sup>	85.1 <sup>ab</sup>	7.41 <sup>ab</sup>	2.63 <sup>a</sup>	309 <sup>a</sup>	102.4 <sup>a</sup>	34.3	22.5 <sup>b</sup>
4	36.3 <sup>ab</sup>	11.8 <sup>a</sup>	83.3 <sup>b</sup>	7.80 <sup>a</sup>	2.57 <sup>a</sup>	267 <sup>bc</sup>	89.7 <sup>b</sup>	37.6	29.6 <sup>a</sup>
Urea-N dosage (mM)									
0	35.0	8.9 <sup>b</sup>	85.2	8.16 <sup>a</sup>	2.72 <sup>a</sup>	274	68.8 <sup>b</sup>	34.4 <sup>b</sup>	11.0 <sup>b</sup>
8	37.1	12.7 <sup>a</sup>	85.7	6.78 <sup>b</sup>	2.42 <sup>b</sup>	258	119.8 <sup>a</sup>	38.7 <sup>a</sup>	18.5 <sup>a</sup>
Significant analysis									
Main effect									
Ni conc. (Ni)	**	**	**	*	*	**	**	ns	**
Urea-N (U)	ns	**	ns	**	**	ns	**	**	**
Interaction									
Ni×U	ns	ns	ns	ns	*	**	**	ns	**

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 14 days after transplant, n=4.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant.

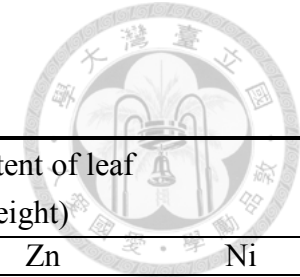


表 10、養液中鎳與尿素濃度對蕹菜葉片要素含量之影響

Table 10. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on water spinach leaf nutrient content

Treatments	Macornutrient content of leaf <sup>y</sup> (mg·g <sup>-1</sup> dry weight)					Micronutrient content of leaf (μg·g <sup>-1</sup> dry weight)				
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni	
Ni conc.( μM)										
0	49.1	15.2	69.3	9.3 <sup>a</sup>	2.8 <sup>b</sup>	127 <sup>c</sup>	145 <sup>a</sup>	46.2 <sup>a</sup>	nd	
0.5	50.3	15.1	73.6	8.0 <sup>c</sup>	2.5 <sup>c</sup>	124 <sup>ab</sup>	129 <sup>b</sup>	40.4 <sup>b</sup>	7.8 <sup>b</sup>	
1	50.1	14.9	74.5	8.5 <sup>bc</sup>	2.7 <sup>c</sup>	126 <sup>c</sup>	120 <sup>c</sup>	42.4 <sup>b</sup>	8.0 <sup>c</sup>	
2	50.3	14.6	68.3	9.6 <sup>ab</sup>	2.9 <sup>a</sup>	129 <sup>ab</sup>	123 <sup>ab</sup>	38.8 <sup>b</sup>	7.0 <sup>b</sup>	
4	49.9	16.6	69.8	8.9 <sup>ab</sup>	2.6 <sup>c</sup>	130 <sup>bc</sup>	120 <sup>bc</sup>	39.7 <sup>b</sup>	12.1 <sup>a</sup>	
Urea-N dosage (mM)										
0	47.4 <sup>b</sup>	11.9 <sup>b</sup>	73.3 <sup>a</sup>	9.5 <sup>a</sup>	2.9 <sup>a</sup>	130	114 <sup>b</sup>	40.4 <sup>b</sup>	7.5	
8	52.3 <sup>a</sup>	18.3 <sup>a</sup>	67.8 <sup>b</sup>	8.2 <sup>b</sup>	2.5 <sup>b</sup>	124	142 <sup>a</sup>	42.0 <sup>a</sup>	6.9	
Significant analysis										
Main effect										
Ni conc. (Ni)	ns	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**
Urea-N (U)	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	ns
Interaction										
Ni×U	**	ns	**	**	**	*	**	**	**	**

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 14 days after transplant, n=4.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant, nd=no detectable

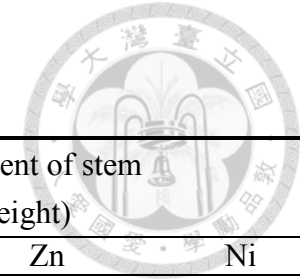


表 11、養液中鎳與尿素濃度對蕹菜莖部要素含量之影響

Table 11. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on water spinach stem nutrient content

Treatments	Macronutrient content of stem <sup>y</sup> (mg·g <sup>-1</sup> dry weight)					Micronutrient content of stem (μg·g <sup>-1</sup> dry weight)				
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni	
Ni conc.( μM)										
0	25.7 <sup>c</sup>	5.87 <sup>ab</sup>	72.8 <sup>c</sup>	6.56 <sup>a</sup>	2.31 <sup>a</sup>	79.7 <sup>c</sup>	56.6 <sup>a</sup>	21.8 <sup>a</sup>	nd	
0.5	26.2 <sup>bc</sup>	6.08 <sup>a</sup>	97.9 <sup>a</sup>	6.21 <sup>a</sup>	2.35 <sup>a</sup>	95.4 <sup>a</sup>	61.6 <sup>a</sup>	19.7 <sup>b</sup>	nd	
1	27.3 <sup>ab</sup>	5.59 <sup>b</sup>	91.6 <sup>b</sup>	5.65 <sup>b</sup>	2.09 <sup>b</sup>	87.6 <sup>b</sup>	43.7 <sup>b</sup>	18.6 <sup>c</sup>	nd	
2	28.0 <sup>a</sup>	5.74 <sup>ab</sup>	95.2 <sup>ab</sup>	6.51 <sup>a</sup>	2.41 <sup>a</sup>	92.6 <sup>ab</sup>	58.7 <sup>a</sup>	18.5 <sup>c</sup>	nd	
4	26.4 <sup>bc</sup>	5.85 <sup>ab</sup>	95.4 <sup>ab</sup>	6.59 <sup>a</sup>	2.32 <sup>a</sup>	78.7 <sup>c</sup>	56.8 <sup>a</sup>	20.0 <sup>b</sup>	nd	
Urea-N dosage (mM)										
0	25.4 <sup>b</sup>	4.85 <sup>b</sup>	87.1 <sup>b</sup>	6.67 <sup>a</sup>	2.40 <sup>a</sup>	70.9 <sup>b</sup>	22.5 <sup>b</sup>	17.3 <sup>b</sup>	nd	
8	28.0 <sup>a</sup>	6.76 <sup>a</sup>	95.1 <sup>a</sup>	5.93 <sup>b</sup>	2.19 <sup>b</sup>	104.9 <sup>a</sup>	92.6 <sup>a</sup>	22.0 <sup>a</sup>	nd	
Significant analysis										
Main effect										
Ni conc. (Ni)	**	*	**	**	**	**	**	**	**	n/a
Urea-N (U)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	n/a
Interaction										
Ni×U	*	**	**	**	**	**	**	ns	**	n/a

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 14 days after transplant, n=4.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant n/a= not available, nd=no detectable

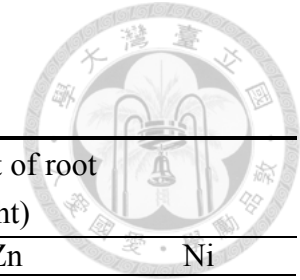


表 12、養液中鎳與尿素濃度對蕹菜根部要素含量之影響

Table 12. Effect of Ni concentration and urea-N dosage in nutrients on water spinach root nutrient content

Treatments	Macronutrient content of root <sup>y</sup> (mg·g <sup>-1</sup> dry weight)					Micronutrient content of root (μg·g <sup>-1</sup> dry weight)			
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Ni conc.( μM)									
0	n/a	7.36 <sup>a</sup>	56.5 <sup>a</sup>	2.12 <sup>a</sup>	1.35 <sup>a</sup>	1,167 <sup>b</sup>	48.8 <sup>b</sup>	70.3 <sup>a</sup>	nd
0.5	n/a	6.91 <sup>b</sup>	56.0 <sup>ab</sup>	1.97 <sup>b</sup>	1.36 <sup>a</sup>	1,179 <sup>b</sup>	59.3 <sup>a</sup>	55.7 <sup>bc</sup>	26 <sup>d</sup>
1	n/a	6.54 <sup>c</sup>	55.2 <sup>b</sup>	1.80 <sup>c</sup>	1.23 <sup>b</sup>	943 <sup>c</sup>	45.7 <sup>b</sup>	51.4 <sup>c</sup>	64 <sup>c</sup>
2	n/a	7.06 <sup>ab</sup>	51.2 <sup>c</sup>	2.00 <sup>ab</sup>	1.24 <sup>b</sup>	1,362 <sup>a</sup>	56.9 <sup>a</sup>	59.8 <sup>b</sup>	128 <sup>b</sup>
4	n/a	6.77 <sup>bc</sup>	53.6 <sup>b</sup>	1.97 <sup>b</sup>	1.27 <sup>b</sup>	1,077 <sup>b</sup>	49.5 <sup>b</sup>	60.1 <sup>b</sup>	153 <sup>a</sup>
Urea-N dosage (mM)									
0	n/a	5.88 <sup>b</sup>	48.6 <sup>b</sup>	2.04 <sup>a</sup>	1.15 <sup>b</sup>	1,174	28.5 <sup>b</sup>	51.9 <sup>b</sup>	47 <sup>b</sup>
8	n/a	8.01 <sup>a</sup>	60.6 <sup>a</sup>	1.90 <sup>b</sup>	1.43 <sup>a</sup>	1,118	75.5 <sup>a</sup>	65.7 <sup>a</sup>	106 <sup>a</sup>
Significant analysis									
Main effect									
Ni conc. (Ni)	n/a	**	**	**	**	**	**	**	**
Urea-N (U)	n/a	**	**	**	**	ns	**	**	**
Interaction									
Ni×U	n/a	**	*	ns	**	**	**	**	**

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 14 days after transplant, n=4.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant n/a= not available, nd=no detectable

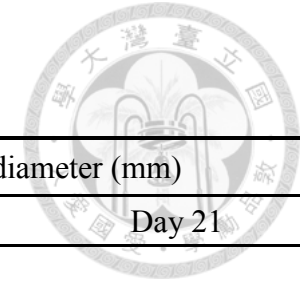


表 13、養液尿素濃度與鎳添加對水耕菠菜葉綠素濃度、株高、莖徑以及根長之影響

Table 13. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on water spinach plant height and stem diameter

Treatments	Plant height (cm)					Stem diameter (mm)	
	Day 7	Day 11	Day 15	Day 18	Day 21	Day 15	Day 21
Urea-N dosage (mM)							
0	3.7 <sup>b</sup>	6.2 <sup>bc</sup>	11.7 <sup>b</sup>	16.5 <sup>b</sup>	18.7 <sup>bc</sup>	3.7 <sup>de</sup>	4.5 <sup>bc</sup>
1	3.7 <sup>b</sup>	6.1 <sup>bc</sup>	11.6 <sup>b</sup>	16.5 <sup>b</sup>	17.5 <sup>d</sup>	4.0 <sup>cd</sup>	4.9 <sup>b</sup>
2	3.9 <sup>ab</sup>	5.8 <sup>c</sup>	10.8 <sup>b</sup>	15.0 <sup>c</sup>	15.9 <sup>e</sup>	3.9 <sup>cde</sup>	4.4 <sup>c</sup>
4	3.8 <sup>b</sup>	4.9 <sup>d</sup>	9.2 <sup>c</sup>	13.3 <sup>d</sup>	14.1 <sup>f</sup>	3.6 <sup>e</sup>	4.0 <sup>d</sup>
6	4.0 <sup>ab</sup>	6.7 <sup>b</sup>	13.6 <sup>a</sup>	18.8 <sup>a</sup>	20.1 <sup>ab</sup>	4.4 <sup>b</sup>	5.6 <sup>a</sup>
8	3.5 <sup>b</sup>	5.6 <sup>cd</sup>	11.5 <sup>b</sup>	16.2 <sup>bc</sup>	18.5 <sup>cd</sup>	4.2 <sup>bc</sup>	4.9 <sup>bc</sup>
10	4.5 <sup>a</sup>	8.0 <sup>a</sup>	14.2 <sup>a</sup>	19.6 <sup>a</sup>	20.6 <sup>a</sup>	5.0 <sup>a</sup>	5.6 <sup>a</sup>
Ni conc. (μM)							
0	3.8	6.2	11.2 <sup>b</sup>	15.7 <sup>b</sup>	17.1 <sup>b</sup>	4.1	4.7
1	4.0	6.1	12.4 <sup>a</sup>	17.4 <sup>a</sup>	18.7 <sup>a</sup>	4.2	4.9
Significant analysis							
Main effect							
Urea-N (U)	*	**	**	**	**	**	**
Ni conc. (Ni)	ns	ns	**	**	**	ns	ns
Interaction							
U×Ni	**	**	**	**	**	**	**

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level, ns= no significant difference.

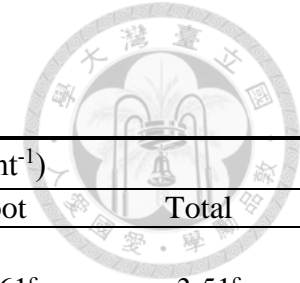


表 14、養液尿素濃度與鎳添加對蕹菜乾鮮重之影響

Table 14. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on water spinach fresh and dry weight

Treatments	Fresh weight <sup>z</sup> (g·6 plant <sup>-1</sup> )				Dry weight (g·6 plant <sup>-1</sup> )			
	Leaf	Stem	Root	Total	Leaf	Stem	Root	Total
Urea-N dosage (mM)								
0	15.8 <sup>c</sup>	13.9 <sup>d</sup>	7.3 <sup>bc</sup>	37.0 <sup>c</sup>	1.80 <sup>cd</sup>	1.09 <sup>c</sup>	0.61 <sup>c</sup>	3.51 <sup>c</sup>
1	15.5 <sup>cd</sup>	13.6 <sup>d</sup>	6.8 <sup>bcd</sup>	35.9 <sup>c</sup>	1.74 <sup>de</sup>	1.05 <sup>c</sup>	0.60 <sup>c</sup>	3.39 <sup>c</sup>
2	15.3 <sup>cd</sup>	12.7 <sup>d</sup>	5.9 <sup>cd</sup>	31.5 <sup>c</sup>	1.69 <sup>de</sup>	1.02 <sup>c</sup>	0.62 <sup>c</sup>	3.34 <sup>cd</sup>
4	13.0 <sup>d</sup>	9.5 <sup>e</sup>	5.4 <sup>d</sup>	27.8 <sup>d</sup>	1.46 <sup>e</sup>	0.78 <sup>d</sup>	0.58 <sup>c</sup>	2.82 <sup>d</sup>
6	18.8 <sup>b</sup>	16.8 <sup>c</sup>	7.3 <sup>b</sup>	42.8 <sup>b</sup>	2.07 <sup>bc</sup>	1.30 <sup>b</sup>	0.78 <sup>ab</sup>	4.15 <sup>b</sup>
8	19.9 <sup>b</sup>	19.2 <sup>b</sup>	7.5 <sup>ab</sup>	46.7 <sup>b</sup>	2.14 <sup>b</sup>	1.38 <sup>b</sup>	0.77 <sup>b</sup>	4.30 <sup>b</sup>
10	23.3 <sup>a</sup>	22.9 <sup>a</sup>	8.9 <sup>a</sup>	55.1 <sup>a</sup>	2.62 <sup>a</sup>	1.73 <sup>a</sup>	0.90 <sup>a</sup>	5.25 <sup>a</sup>
Ni conc. (μM)								
0	17.0	14.5 <sup>b</sup>	6.9	38.4	1.87	1.12 <sup>b</sup>	0.66 <sup>b</sup>	3.64 <sup>b</sup>
1	17.8	16.5 <sup>a</sup>	7.1	40.7	2.00	1.27 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	4.01 <sup>a</sup>
Significant analysis								
Main effect								
Urea-N (U)	**	**	**	**	**	**	**	**
Ni conc. (Ni)	ns	**	ns	ns	ns	**	*	*
Interaction								
U×Ni	**	**	**	**	**	**	**	**

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 21 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant, n/a= not available, nd=no detectable

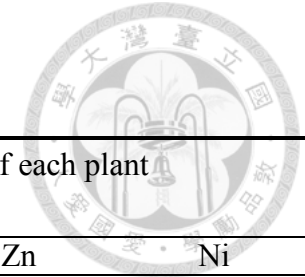


表 15、養液尿素濃度與鎳添加對蕹菜單株要素含量之影響

Table 15. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on water spinach nutrient content of each plant

Treatments	Macronutrient content of each plant <sup>y</sup> (mg·plant <sup>-1</sup> )					Micronutrient content of each plant (μg·plant <sup>-1</sup> )			
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Urea-N dosage (mM)									
0	21.7 <sup>c</sup>	4.04 <sup>cd</sup>	34.3 <sup>c</sup>	3.12 <sup>bc</sup>	1.16 <sup>cd</sup>	266 <sup>ab</sup>	42.9 <sup>c</sup>	34.3 <sup>bc</sup>	n/a
1	21.2 <sup>c</sup>	4.00 <sup>cd</sup>	32.4 <sup>c</sup>	3.21 <sup>b</sup>	1.16 <sup>cd</sup>	258 <sup>ab</sup>	36.3 <sup>c</sup>	30.2 <sup>c</sup>	n/a
2	20.4 <sup>c</sup>	3.78 <sup>d</sup>	32.2 <sup>c</sup>	2.59 <sup>c</sup>	1.26 <sup>bc</sup>	250 <sup>bc</sup>	36.6 <sup>c</sup>	30.2 <sup>c</sup>	n/a
4	17.1 <sup>d</sup>	3.34 <sup>d</sup>	25.8 <sup>d</sup>	2.63 <sup>c</sup>	0.99 <sup>d</sup>	209 <sup>c</sup>	36.3 <sup>c</sup>	24.5 <sup>d</sup>	n/a
6	26.3 <sup>b</sup>	4.64 <sup>bc</sup>	42.5 <sup>b</sup>	3.48 <sup>b</sup>	1.41 <sup>b</sup>	298 <sup>a</sup>	51.6 <sup>b</sup>	37.2 <sup>b</sup>	n/a
8	27.5 <sup>b</sup>	5.40 <sup>ab</sup>	43.5 <sup>b</sup>	3.61 <sup>b</sup>	1.36 <sup>bc</sup>	248 <sup>bc</sup>	58.9 <sup>b</sup>	35.6 <sup>b</sup>	n/a
10	34.2 <sup>a</sup>	5.82 <sup>a</sup>	53.1 <sup>a</sup>	4.70 <sup>a</sup>	1.67 <sup>a</sup>	258 <sup>ab</sup>	72.5 <sup>a</sup>	43.2 <sup>a</sup>	n/a
Ni conc. (μM)									
0	22.9 <sup>b</sup>	4.07 <sup>b</sup>	36.0	3.33	1.25	246	45.4 <sup>b</sup>	31.5	n/a
1	24.8 <sup>a</sup>	4.90 <sup>a</sup>	39.1	3.38	1.31	264	50.4 <sup>a</sup>	34.9	n/a
Significant analysis									
Main effect									
Urea-N (U)	**	**	**	**	**	**	**	**	n/a
Ni conc. (Ni)	*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	n/a
Interaction									
U×Ni	**	**	**	**	**	ns	**	**	n/a

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 21 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant, n/a= not available, nd=no detectable





表 16、養液尿素濃度與鎳添加對蕹菜葉片要素含量之影響

Table 16. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on water spinach leaf nutrient content

Treatments	Macronutrient content of leaf <sup>y</sup> (mg·g <sup>-1</sup> )					Micronutrient content of leaf (μg·g <sup>-1</sup> )			
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Urea-N dosage (mM)									
0	44.4 <sup>c</sup>	6.11 <sup>d</sup>	52.8	5.71 <sup>ab</sup>	2.13 <sup>b</sup>	109 <sup>c</sup>	91 <sup>cd</sup>	51.6	nd
1	46.7 <sup>b</sup>	6.59 <sup>bc</sup>	52.1	5.65 <sup>b</sup>	2.13 <sup>b</sup>	111 <sup>c</sup>	79 <sup>e</sup>	50.5	nd
2	46.5 <sup>b</sup>	6.64 <sup>bc</sup>	54.1	5.87 <sup>b</sup>	2.39 <sup>a</sup>	139 <sup>a</sup>	85 <sup>de</sup>	54.4	nd
4	46.4 <sup>b</sup>	6.41 <sup>cd</sup>	52.1	6.13 <sup>a</sup>	2.33 <sup>a</sup>	132 <sup>b</sup>	97 <sup>bc</sup>	49.4	nd
6	48.5 <sup>a</sup>	6.83 <sup>ab</sup>	54.8	4.93 <sup>c</sup>	2.01 <sup>bc</sup>	139 <sup>a</sup>	94 <sup>bc</sup>	52.4	nd
8	48.7 <sup>a</sup>	7.13 <sup>a</sup>	54.9	4.94 <sup>c</sup>	1.93 <sup>c</sup>	130 <sup>b</sup>	101 <sup>ab</sup>	49.1	nd
10	47.0 <sup>b</sup>	6.69 <sup>bc</sup>	53.1	4.94 <sup>c</sup>	1.83 <sup>c</sup>	133 <sup>b</sup>	107 <sup>a</sup>	49.9	nd
Ni conc. (μM)									
0	47.1	6.47 <sup>b</sup>	54.0	5.62 <sup>a</sup>	2.18 <sup>a</sup>	129 <sup>a</sup>	93	50.5	nd
1	46.7	6.83 <sup>a</sup>	52.8	5.25 <sup>b</sup>	2.02 <sup>b</sup>	126 <sup>b</sup>	93	51.4	nd
<b>Significant analysis</b>									
<b>Main effect</b>									
Urea-N (U)	**	**	ns	**	**	**	**	ns	n/a
Ni conc. (Ni)	ns	*	ns	**	**	**	ns	ns	n/a
<b>Interaction</b>									
U×Ni	*	**	**	**	ns	**	ns	ns	n/a

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 21 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant, n/a= not available, nd=no detectable

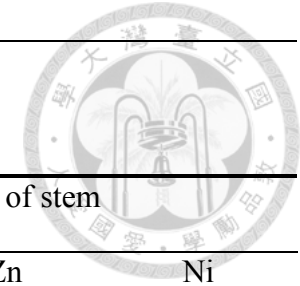


表 17、養液尿素濃度與鎳添加對蕹菜莖要素含量之影響

Table 17. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on water spinach stem nutrient content

Treatments	Macronutrient content of stem <sup>y</sup> (mg·g <sup>-1</sup> )					Micronutrient content of stem (μg·g <sup>-1</sup> )			
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Urea-N dosage (mM)									
0	42.9 <sup>bc</sup>	7.88	68.8 <sup>bc</sup>	7.29 <sup>bc</sup>	2.27 <sup>c</sup>	46.9 <sup>b</sup>	45.7 <sup>b</sup>	37.5 <sup>a</sup>	nd
1	44.2 <sup>ab</sup>	8.05	67.1 <sup>cd</sup>	7.73 <sup>a</sup>	2.56 <sup>a</sup>	47.4 <sup>b</sup>	39.9 <sup>cd</sup>	35.0 <sup>b</sup>	nd
2	43.1 <sup>bc</sup>	7.82	67.2 <sup>cd</sup>	7.29 <sup>bc</sup>	2.52 <sup>a</sup>	51.6 <sup>ab</sup>	36.9 <sup>d</sup>	31.6 <sup>c</sup>	nd
4	44.8 <sup>a</sup>	8.08	64.0 <sup>d</sup>	7.10 <sup>cd</sup>	2.52 <sup>a</sup>	47.3 <sup>b</sup>	42.6 <sup>bc</sup>	31.3 <sup>c</sup>	nd
6	44.1 <sup>ab</sup>	8.12	67.8 <sup>c</sup>	7.02 <sup>d</sup>	2.49 <sup>ab</sup>	49.4 <sup>b</sup>	44.9 <sup>b</sup>	32.7 <sup>bc</sup>	nd
8	45.0 <sup>bc</sup>	8.35	72.0 <sup>ab</sup>	6.88 <sup>d</sup>	2.34 <sup>bc</sup>	56.9 <sup>a</sup>	55.5 <sup>a</sup>	32.6 <sup>bc</sup>	nd
10	42.6 <sup>c</sup>	7.94	72.7 <sup>a</sup>	7.42 <sup>b</sup>	2.47 <sup>ab</sup>	49.9 <sup>b</sup>	52.5 <sup>a</sup>	31.8 <sup>c</sup>	nd
Ni conc. (μM)									
0	44.5 <sup>a</sup>	8.19 <sup>a</sup>	68.0	7.30	2.46	49.77	45.41	33.5	nd
1	43.2 <sup>b</sup>	7.88 <sup>b</sup>	69.1	7.20	2.45	50.08	45.42	33.0	nd
Significant analysis									
Main effect									
Urea-N (U)	**	ns	**	**	**	*	**	**	n/a
Ni conc. (Ni)	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	n/a
Interaction									
U×Ni	ns	**	*	*	**	**	*	**	n/a

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 21 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant, n/a= not available, nd=no detectable

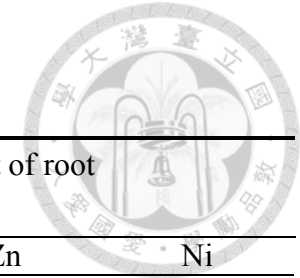


表 18、養液尿素濃度與鎳添加對蕹菜根要素含量之影響

Table 18. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on water spinach root nutrient content

Treatments	Macronutrient content of root <sup>y</sup> (mg·g <sup>-1</sup> )					Micronutrient content of root (μg·g <sup>-1</sup> )			
	N <sup>z</sup>	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni
Urea-N dosage (mM)									
0	n/a	7.48 <sup>a</sup>	56.1 <sup>ab</sup>	2.34 <sup>a</sup>	1.05 <sup>a</sup>	2,248 <sup>a</sup>	71.7 <sup>bc</sup>	114.4 <sup>a</sup>	12.6 <sup>b</sup>
1	n/a	7.28 <sup>ab</sup>	56.4 <sup>a</sup>	2.24 <sup>b</sup>	0.99 <sup>ab</sup>	2,161 <sup>ab</sup>	66.3 <sup>cd</sup>	95.6 <sup>b</sup>	9.4 <sup>c</sup>
2	n/a	7.13 <sup>bc</sup>	51.5 <sup>c</sup>	2.34 <sup>a</sup>	1.01 <sup>ab</sup>	2,137 <sup>ab</sup>	55.9 <sup>d</sup>	92.1 <sup>bc</sup>	11.1 <sup>bc</sup>
4	n/a	6.97 <sup>bcd</sup>	50.2 <sup>c</sup>	2.22 <sup>b</sup>	0.97 <sup>bc</sup>	1,761 <sup>cd</sup>	72.4 <sup>b</sup>	86.8 <sup>c</sup>	12.0 <sup>b</sup>
6	n/a	7.16 <sup>abc</sup>	55.4 <sup>ab</sup>	2.26 <sup>ab</sup>	1.04 <sup>a</sup>	1,924 <sup>bc</sup>	73.5 <sup>bc</sup>	88.4 <sup>bc</sup>	12.3 <sup>b</sup>
8	n/a	6.71 <sup>d</sup>	52.7 <sup>bc</sup>	2.22 <sup>b</sup>	0.96 <sup>bc</sup>	1,538 <sup>d</sup>	81.1 <sup>a</sup>	87.3 <sup>c</sup>	15.4 <sup>a</sup>
10	n/a	6.96 <sup>cd</sup>	55.7 <sup>ab</sup>	2.10 <sup>c</sup>	0.92 <sup>c</sup>	1,276 <sup>e</sup>	78.0 <sup>ab</sup>	91.8 <sup>bc</sup>	15.5 <sup>a</sup>
Ni conc. (μM)									
0	n/a	7.27 <sup>a</sup>	55.1 <sup>a</sup>	2.30 <sup>a</sup>	0.99	1,915	68.0	97.1 <sup>a</sup>	4.20 <sup>b</sup>
1	n/a	6.91 <sup>b</sup>	52.9 <sup>b</sup>	2.19 <sup>b</sup>	0.99	1,812	74.5	90.7 <sup>b</sup>	21.03 <sup>a</sup>
Significant analysis									
Main effect									
Urea-N (U)	n/a	**	**	**	**	**	**	**	**
Ni conc. (Ni)	n/a	**	*	**	ns	ns	ns	**	**
Interaction									
U×Ni	n/a	**	**	**	**	*	*	**	**

<sup>z</sup>: Nitrogen content was analyzed by Kjeldahl method.

<sup>y</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 21 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level. ns=no significant, n/a= not available, nd=no detectable

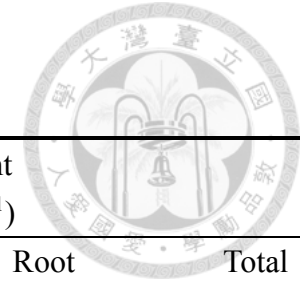


表 19、尿素與鎳對水耕菠菜乾鮮重之影響

Table 19. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on hydroponic water spinach fresh and dry weight

Treatments	Fresh weight <sup>z</sup> (g·6 plant <sup>-1</sup> )				Dry weight (g·6 plant <sup>-1</sup> )			
	Leaf	Stem	Root	Total	Leaf	Stem	Root	Total
Urea-N dosage (mM)								
2	26.1	31.9	16.2a	74.2	1.88	1.62	0.93 <sup>a</sup>	4.42
4	23.6	30.7	12.2b	66.4	1.72	1.55	0.79 <sup>ab</sup>	4.06
10	26.2	33.3	13.3b	72.8	1.9	1.67	0.74 <sup>b</sup>	4.31
Ni conc. (μM)								
0	24.5	30.9	13.3	68.7	1.76	1.54	0.77	4.08
1	26.1	32.9	14.5	73.5	1.91	1.68	0.87	4.45
Significant analysis								
Main effect								
Urea-N (U)	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns
Ni conc. (Ni)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Interaction								
U×Ni	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 22 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level, ns= no significant difference.

表 20、尿素與鎳對水耕蕹菜氮肥吸收量之影響

Table 20. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on hydroponic water spinach nitrogen fertilizer uptake

Treatments	Nitrogens uptake <sup>z</sup> ( $\mu\text{M}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{week}^{-1}$ )											
	Urea-N			NH <sub>4</sub> -N			NO <sub>3</sub> -N			Total-N		
	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk
Urea-N dosage (mM)												
2	1.67 <sup>c</sup>	1.85 <sup>b</sup>	3.7 <sup>c</sup>	20.4 <sup>a</sup>	11.0	50.1 <sup>a</sup>	107 <sup>a</sup>	65 <sup>a</sup>	99	128 <sup>a</sup>	67	111
4	2.98 <sup>b</sup>	3.07 <sup>ab</sup>	9.0 <sup>b</sup>	21.2 <sup>a</sup>	11.5	22.6 <sup>b</sup>	129 <sup>a</sup>	58 <sup>ab</sup>	111	153 <sup>a</sup>	62	139
10	7.56 <sup>a</sup>	3.97 <sup>a</sup>	11.8 <sup>a</sup>	10.8 <sup>b</sup>	10.9	13.0 <sup>b</sup>	56 <sup>b</sup>	39 <sup>b</sup>	100	65 <sup>b</sup>	52	117
Ni conc. ( $\mu\text{M}$ )												
0	4.17	2.18 <sup>b</sup>	6.3 <sup>b</sup>	19.8 <sup>a</sup>	12.2	35.4 <sup>a</sup>	120 <sup>a</sup>	60	100	144 <sup>a</sup>	67	124
1	4.26	3.55 <sup>a</sup>	9.8 <sup>a</sup>	15.2 <sup>b</sup>	9.9	20.8 <sup>b</sup>	76 <sup>b</sup>	46	108	87 <sup>b</sup>	54	122
Significant analysis												
Main effect												
Urea-N (U)	**	*	**	**	ns	**	**	*	ns	**	ns	ns
Ni conc.(Ni)	ns	*	**	*	ns	*	*	ns	ns	**	ns	ns
Interaction												
U×Ni	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 22 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level, ns= no significant difference.

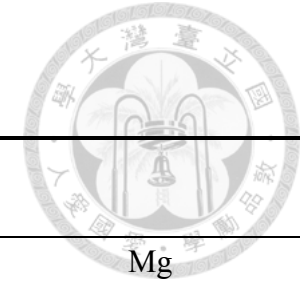


表 21、尿素與鎳對水耕蕹菜巨量要素吸收量之影響

Table 21. Effect of urea-N dosage and Ni supplement in nutrients on hydroponic water spinach macro nutrient uptake

Treatments	Nutrients uptake <sup>z</sup> ( $\mu\text{M}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{week}^{-1}$ )											
	P			K			Ca			Mg		
	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk	1 <sup>st</sup> wk	2 <sup>nd</sup> wk	3 <sup>th</sup> wk
Urea-N dosage (mM)												
2	8.16	7.16	15.6	80 <sup>b</sup>	19 <sup>b</sup>	154	7.26	-1.79	0.7 <sup>b</sup>	10.7	0.62	3.7 <sup>b</sup>
4	9.18	8.21	17.8	132 <sup>a</sup>	36 <sup>ab</sup>	151	8.06	-0.73	13.9 <sup>ab</sup>	10.7	1.64	11.1 <sup>b</sup>
10	9.30	8.22	20.5	111 <sup>ab</sup>	61 <sup>a</sup>	187	7.19	1.36	24.9 <sup>a</sup>	9.8	5.14	23.0 <sup>a</sup>
Ni conc. ( $\mu\text{M}$ )												
0	9.53	8.2	16.91	119	40	166	8.96	-1.81	13.7	11.6	3.44	14.9
1	8.23	7.53	19.01	96	35	164	6.05	0.92	12.7	9.0	1.48	10.1
Significant analysis												
Main effect												
Urea-N (U)	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	*
Ni conc. (Ni)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Interaction												
U×Ni	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>: Mean separation within column by LSD test, 5% level, harvest 22 days after transplant, n=3.

\*, \*\*: statistic significant at the 5% and 1% level, ns= no significant difference.



## 附錄

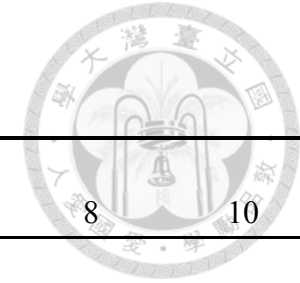
附表 1、歐盟發規委員會於 2005 修訂作物硝酸鹽含量上限 No.1822

Appendix Table 1. Summary of the maximum levels in European Commission (EC) Regulation No. 1822/2005.

Product	Harvest Period	Maximum level (mg NO <sub>3</sub> /kg)
Fresh spinach <sup>1</sup> ( <i>Spinacia oleracea</i> )	1 October to 31 March	3000
	1 April to 31 September	2500
Preserved, deep-frozen or frozen spinach		2000
Fresh lettuce ( <i>Lactuca sativa</i> L.) (protected and open-grown lettuce) excluding 'iceberg'-type lettuce	1 October to 31 March	
	– grown under cover	4500
	– grown in open air	4000
	1 April to 30 September	
	– grown under cover	3500
	– grown in open air	2500
'Iceberg'-type lettuces	Lettuce grown under cover	2500
	Lettuce grown in the open air	2000
Baby foods and processed cereal-based foods for infants and young children <sup>2</sup>		200

<sup>1</sup> The maximum levels for fresh spinach do not apply to fresh spinach to be subjected to processing and which is directly transported in bulk from the field to the processing plant.

<sup>2</sup> The maximum levels apply to the products as proposed ready for consumption or as reconstituted according to the instructions of the manufacturers.

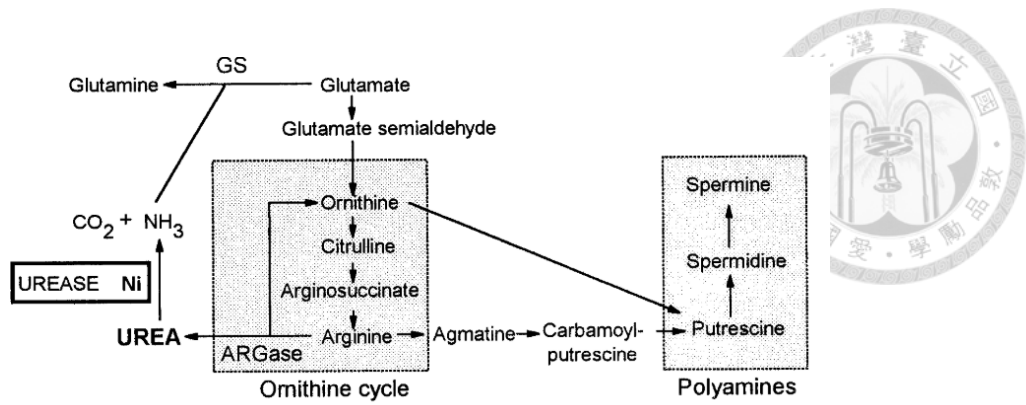


附表 2、試驗一至試驗四與幼苗期養液配方要素濃度

Appendix table 2. Nutrient formula used in experiment 1 to experiment 4 and seedling pretreatment

Urea-N (mM)	幼苗期	試驗一	試驗二		試驗三與四						
	0	7	0	8	0	1	2	4	6	8	10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
K <sup>+</sup>	4	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Ca <sup>2+</sup>	2	4	3	3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Mg <sup>2+</sup>	0.5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0	5	1	5	1	1.5	2	3	4	5	6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8	7	14	6	13	12	11	9	7	5	3
Total-N (mM)	9	15	16	16	14	14	14	14	14	14	14
微量元素	Na	Cl	B		Mn	Zn	Cu	Mo	Fe		
藥品	NaCl	NaCl	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>		MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	EDTA-FeNa·3H <sub>2</sub> O		
養液濃度(μM)	50	50	25		2	2	0.5	0.5	50		

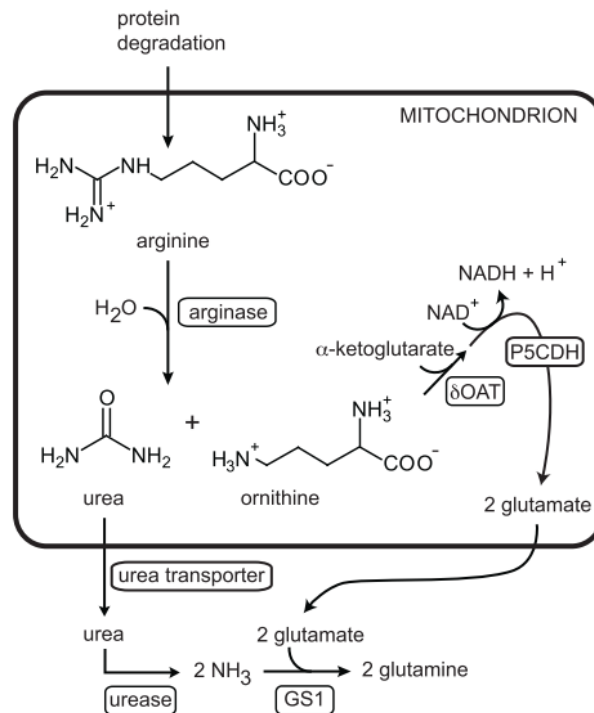




附圖 1、植物內生尿素產生與轉變

Appendix fig. 1. The production and conversion of urea in plants. GS: Glutamine synthetase, ARGase: Arginase. Modified from Marschner (1995) and Walker et al. (1985)

(Gerendas *et al.*, 1998)



附圖 2、植物精胺酸代謝

Appendix fig. 2. Arginine catabolism. Arginine is hydrolysed in the mitochondria by arginase to urea and ornithine. Urea leaves the mitochondria is hydrolysed by cytosolic urease and the released ammonia re-assimilated by cytosolic glutamine synthetase (GS1). Mitochondrial  $\delta$ -ornithine aminotransferase ( $\delta\text{OAT}$ ) transfers the side chain amino group of ornithine to  $\alpha$ -ketoglutarate generating one molecule of glutamate and pyrroline-5-carboxylate which is oxidized to a second molecule of glutamate by pyrroline-5-carboxylate dehydrogenase (P5CDH). Glutamate can be exported from the mitochondria and serve as substrate for the cytosolic GS1-reaction. In total, all four nitrogen atoms of arginine are incorporated into glutamine. Urease is required to mobilize half of the arginine nitrogen.

(Witte, 2011)

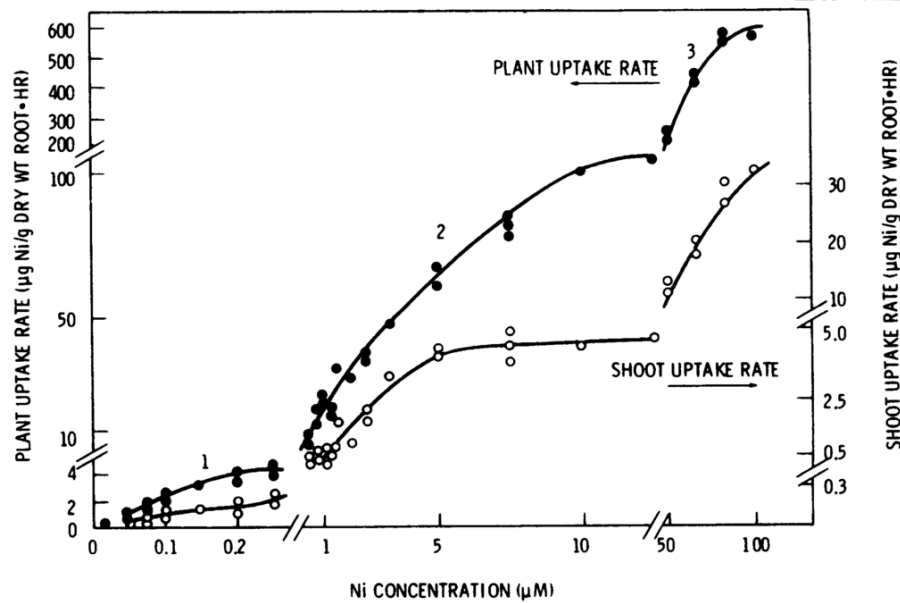
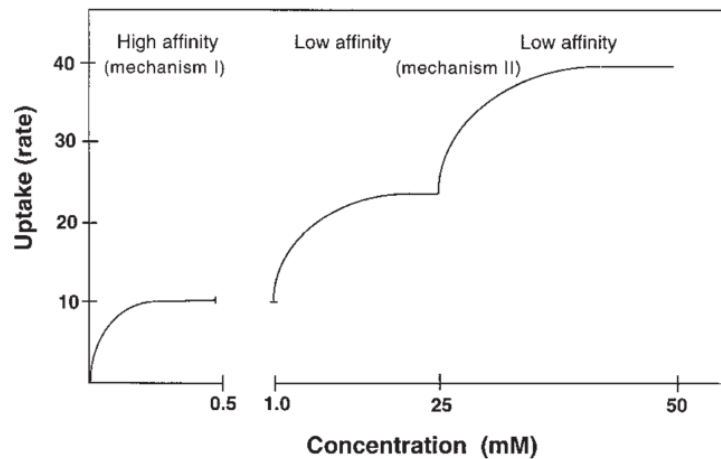


FIG. 2. Effect of nickel concentration on uptake by 21-day-old intact soybeans. Isotherms represent uptake rate for whole plant and rate for transfer from root to shoot.

附圖 3、養液鎳濃度對 21 天大豆幼苗鎳吸收之影響

Appendix fig. 3. Effect of nickel concentration on uptake by 21-day-old intact soybeans. Isotherms represent uptake rate for whole plant and rate for transfer from root to shoot.

(Cataldo *et al.*, 1978)



附圖 4、跨膜陽離子吸收模式示意圖

Appendix fig. 4. Generalized Diagram of the Rate of Absorption of a Cation as a Function of Its Concentration. The three curves represent postulated uptake systems with different affinities for the cation. The work of E. Epstein and collaborators showed that many plant nutrients have absorption isotherms of this nature.

(Chrispeels *et al.*, 1999)