

國立臺灣大學生農學院生物環境系統工程學系

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

以土壤特性評估蔬菜鎘含量

Evaluation of Cadmium Content Level in Vegetables by
Soil Characteristics

馮彧

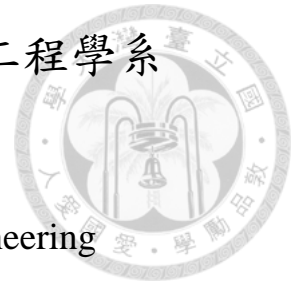
Yu Feng

指導教授：張尊國 博士

Advisor: Tsun-Kuo Chang, Ph.D.

中華民國 104 年 7 月

July, 2015








誌謝

對於從小作文不好，遇到作文就頭痛，腹笥甚窘的我來說，這本論文的完成，讓我感到不可置信，當然，這一路上要謝謝許多人。首先謝謝我的指導教授張尊國老師，張老師學養豐富、思維敏捷，常常對於我的研究提出我想都沒想過的好點子，讓我做研究的過程更為順暢而且老師有個機能方便空間超大的研究室，讓我在這裡待得很舒適。謝謝研究室守護神阿姊，這個 GIS 神手讓我在有想法卻沒有手法實現之際，不出幾分鐘就可以找出解答，把我的想法轉換成實際可行的東西。謝謝聖淇學長，對於只懂得操作 GS⁺卻對其原理不盡理解的我給予指點，讓我在操作時更有感覺，更明白自己在做什麼。謝謝佩萱學姊，學姊自身也要博班畢業了，卻時常關心我們小學弟妹的學習情況，關心我們的論文進度，在自己也要口試以及修改論文之際，更是屢次幫我修改我的論文，讓我的論文邏輯還有文字更加順暢。謝謝蝦米，在我煩惱農工研討會該投什麼時，神來一筆找到了相關資料，讓我得以成功投稿農工研討會，更是促成了這本論文。謝謝修銘，修銘總是很有朝氣與活力，容易感染他人，而且有著許多超搞笑的口頭禪，心情再不好遇到他都會好起來！謝謝政萱，在要寫論文的碩二下這段時間，她默默接下了聯絡咪挺之類的重責大任，讓我們無用煩惱，更是在我 word 有操作問題時出手解決，在我口試前幾天還要瘋狂重新填資料之際也幫我填了許多，讓我省了 2 天的功夫。謝謝韋智，雖然你已經退伍了在校唸書拚研究所，但是我一句救命你就趕來幫助我填了辦大資料，並且發揮機械系的專長，幫我找到如何更有效率完成工作，真的太棒了！謝謝機械系羽的好朋友們，在我碩一時還讓我繼續跟著你們一起練球、一起打球長達一年的時光，從大學時期就建立的革命情感我不會忘記。謝謝小丑羽球團的大家，在機械系羽的好朋友各自勞燕分飛之時，讓我一個一個慢慢認識，重新建立歸屬感，繼續課餘我最愛的運動，讓我的研究所生活更精彩。謝謝我的女朋友家均，自從認識妳以來，我的生活中充滿了歡喜，妳常常關心我的學習狀況，提醒我的論文進度，也不時跟我分享妳的所學。就算暑假妳在深圳

辛苦實習，在我口試前還是幫我搞定論文的格式問題，幫我美化我的 PPT，更在我口試前一天陪我練習講稿，幫助我講得更順，練到我熟了為止，有妳真的好棒！最後謝謝我的媽媽，一個人撐起這個家，在臺北有家真的是很幸福的事，一回家就有滿桌的飯菜可以吃，不用煩惱洗衣服的事，還有自己的房間自己的床可以睡，這是大部分住宿身無法享有的福利！

摘要




本研究依據前人研究提出之蔬菜鎘含量預測模式，整合雲林縣農地土壤特性參數等相關資料，推估雲林縣農地種植不同蔬菜的鎘含量，並配合國人蔬菜消耗量檢視國人食用這些蔬菜的安全性；亦對蔬菜鎘含量預測模式的係數進行敏感度分析，探討影響預測模式中蔬菜鎘含量的主要因子。研究結果發現，平均鎘濃度推估最高的 5 種蔬菜為福壽/翠花萵苣、菠菜、尖葉萵苣、圓葉萵苣及莧菜。由於蔬菜的重金屬鎘限量標準規範依不同種類而異，歸納出比較容易超標的蔬菜種類是半結球類、瓜菜及果菜類及大蒜。因為國人對葉菜類需求較其他類別蔬菜高，葉菜類之中的小葉菜類蔬菜鎘濃度整體來說比較高，所以葉菜類攝食成為鎘進入人體的主要途徑。最後經由敏感度分析得知，蔬菜鎘含量預測模式中 γ 絕對值大的蔬菜，在土壤 CEC 低時會致使蔬菜鎘含量顯著增加； δ 絕對值大的蔬菜，種在土壤 pH 值低的地方，其鎘含量會比種在高土壤鎘濃度情況下為高。根據以上結果，建議有關單位可以參考本研究結果選擇蔬菜適栽地點，並且留意小葉菜類蔬菜的鎘含量，以減少產出含鎘超標蔬菜。

關鍵詞：鎘、蔬菜、農地、重金屬、雲林



Abstract



Based on the predictive model for Cd content levels in vegetables proposed by Taiwan Agricultural Research Institute in a former research, this study integrated soil characteristics parameters needed for the model to predict Cd content of 31 vegetables cultured in Yunlin County. The vegetable consumption is one of the major pathways of Cd uptake in Taiwan residents. If we can understand the Cd content in vegetables, then we can manage health risk better. The aim of this study is to estimate Cd content level in various vegetables to be planted in Yunlin County, which is the most important production area in Taiwan. This study further conducted sensitivity analysis of coefficients in the predictive model for Cd content levels in vegetable to find out the main factors affecting Cd content in vegetables. The model predicted that there could be 5 vegetables with the highest Cd content level, including iceberg lettuce, spinach, two kinds of leaf lettuce and amaranth. This study also found some classes of vegetables that could be easier to exceed their regulatory standards for Cd content, including head vegetables, melon vegetables and fruit vegetables and garlic. In addition, this study predicted that leafy vegetables could have higher Cd content and may become a main pathway of Cd uptake because Taiwan residents currently eat more leafy vegetables than other vegetables. Finally, the model sensitivity analysis showed that vegetables with higher γ would gain more Cd content when planted in the soil with lower CEC; vegetables with higher δ would gain more Cd content when planted in the soil with lower pH than in the soil with high level of Cd content. This study suggested agricultural authorities can use the results of this study to guide farmers to choose planting suitable vegetables in right locations, to pay attention to cadmium content in leafy vegetables, and to reduce the production of vegetables with high Cd content.

Key words : Cadmium, vegetable, farmland, heavy metals, Yunlin County



目錄



| | |
|------------------------------|-----|
| 誌謝 | I |
| 摘要 | III |
| Abstract..... | V |
| 目錄 | VII |
| 圖目錄 | IX |
| 表目錄 | XII |
| 第一章 前言 | 1 |
| 1.1 研究動機 | 1 |
| 1.2 研究目的 | 2 |
| 1.3 研究架構 | 2 |
| 第二章 文獻回顧 | 5 |
| 2.1 鎘 | 5 |
| 2.1.1 鎘之來源 | 5 |
| 2.1.2 食物中的鎘 | 6 |
| 2.1.3 鎘之危害與標準 | 10 |
| 2.2 臺灣農地重金屬污染狀況 | 14 |
| 2.2.1 臺灣土壤重金屬調查概述 | 14 |
| 2.2.2 臺灣農地土壤鎘污染管制概況 | 16 |
| 2.3 蔬菜鎘含量 | 18 |
| 2.3.1 蔬菜監測與管制 | 18 |
| 2.3.2 蔬菜吸收土壤中鎘之機制 | 21 |
| 2.3.3 蔬菜鎘含量預測模式之建構 | 25 |
| 2.4 地理統計應用 | 27 |
| 第三章 材料與方法 | 31 |

| | | |
|-------|-----------------------------|----|
| 3.1 | 研究流程 | 31 |
| 3.2 | 研究材料 | 33 |
| 3.2.1 | 土壤調查資料 | 33 |
| 3.2.2 | 蔬菜鎘含量預測模式暨其參數 | 35 |
| 3.2.3 | 國土利用調查成果引入 | 39 |
| 3.2.4 | 蔬菜消費量 | 43 |
| 3.3 | 研究方法 | 44 |
| 3.3.1 | 推估雲林縣農地蔬菜鎘含量 | 44 |
| 3.3.2 | 國人蔬菜攝食安全評析 | 44 |
| 3.3.3 | 蔬菜鎘含量預測模式中各種係數的敏感度分析 | 45 |
| 第四章 | 結果與討論 | 47 |
| 4.1 | 雲林縣土壤參數與推估結果之統計 | 47 |
| 4.1.1 | 農試所土壤調查資料之分析 | 47 |
| 4.1.2 | 經克利金推估之農地土壤參數之統計 | 50 |
| 4.2 | 檢視雲林縣農地蔬菜鎘含量推估結果 | 53 |
| 4.2.1 | 檢視雲林縣農地蔬菜鎘含量推估結果 | 53 |
| 4.2.2 | 以限量標準評析雲林縣農地蔬菜鎘含量推估結果 | 72 |
| 4.3 | 國人蔬菜攝食安全評析 | 75 |
| 4.3.1 | 國人近五年之平均蔬菜攝食量 | 75 |
| 4.3.2 | 國人蔬菜攝食安全評析 | 77 |
| 4.4 | 蔬菜鎘含量預測模式中各種係數的敏感度分析 | 80 |
| 第五章 | 結論與建議 | 87 |
| 5.1 | 結論 | 87 |
| 5.2 | 建議 | 88 |
| | 參考文獻 | 89 |

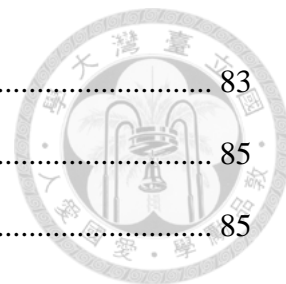
圖目錄



| | |
|---------------------------------|----|
| 圖 1.1 研究架構圖 | 3 |
| 圖 2.1 農試所土壤採樣調查佈點示意 | 15 |
| 圖 3.1 研究流程 | 32 |
| 圖 3.2 農試所土壤調查雲林縣表土採樣點分佈圖 | 34 |
| 圖 3.3 雲林縣土地利用分布圖 | 40 |
| 圖 3.3 雲林縣土地利用分布圖（續） | 41 |
| 圖 4.1 農試所土壤調查鎘濃度 | 48 |
| 圖 4.2 農試所土壤調查 CEC（含增添資料） | 48 |
| 圖 4.3 農試所土壤調查酸鹼值 | 49 |
| 圖 4.4 克利金推估雲林旱地土壤鎘濃度分佈 | 51 |
| 圖 4.5 克利金推估雲林旱地土壤 CEC 分佈 | 52 |
| 圖 4.6 克利金推估雲林旱地土壤酸鹼值分佈 | 52 |
| 圖 4.7 雲林旱地種植葉用甘藷鎘濃度推估分佈圖 | 55 |
| 圖 4.8 雲林旱地種植蕹菜鎘濃度推估分佈圖 | 56 |
| 圖 4.9 雲林旱地種植莧菜鎘濃度推估分佈圖 | 56 |
| 圖 4.10 雲林旱地種植落葵鎘濃度推估分佈圖 | 57 |
| 圖 4.11 雲林旱地種植韭菜鎘濃度推估分佈圖 | 57 |
| 圖 4.12 雲林旱地種植紅鳳菜鎘濃度推估分佈圖 | 58 |
| 圖 4.13 雲林旱地種植菠菜鎘濃度推估分佈圖 | 58 |
| 圖 4.14 雲林旱地種植茼蒿鎘濃度推估分佈圖 | 59 |
| 圖 4.15 雲林旱地種植青蔥鎘濃度推估分佈圖 | 59 |
| 圖 4.16 雲林旱地種植尖葉茼蒿鎘濃度推估分佈圖 | 60 |
| 圖 4.17 雲林旱地種植圓葉茼蒿鎘濃度推估分佈圖 | 60 |
| 圖 4.18 雲林旱地種植小白菜鎘濃度推估分佈圖 | 61 |

| | |
|--|----|
| 圖 4.19 雲林旱地種植青梗白菜鎘濃度推估分佈圖 | 61 |
| 圖 4.20 雲林旱地種植芹菜鎘濃度推估分佈圖 | 62 |
| 圖 4.21 雲林旱地種植結球白菜鎘濃度推估分佈圖 | 62 |
| 圖 4.22 雲林旱地種植花椰菜鎘濃度推估分佈圖 | 63 |
| 圖 4.23 雲林旱地種植甘藍鎘濃度推估分佈圖 | 63 |
| 圖 4.24 雲林旱地種植明泉/健壽萵苣鎘濃度推估分佈圖 | 64 |
| 圖 4.25 雲林旱地種植福壽/翠花萵苣鎘濃度推估分佈圖 | 64 |
| 圖 4.26 雲林旱地種植青花菜鎘濃度推估分佈圖 | 65 |
| 圖 4.27 雲林旱地種植蘿蔔鎘濃度推估分佈圖 | 65 |
| 圖 4.28 雲林旱地種植胡蘿蔔鎘濃度推估分佈圖 | 66 |
| 圖 4.29 雲林旱地種植玉米鎘濃度推估分佈圖 | 66 |
| 圖 4.30 雲林旱地種植番茄鎘濃度推估分佈圖 | 67 |
| 圖 4.31 雲林旱地種植甜椒鎘濃度推估分佈圖 | 67 |
| 圖 4.32 雲林旱地種植茄子鎘濃度推估分佈圖 | 68 |
| 圖 4.33 雲林旱地種植胡瓜鎘濃度推估分佈圖 | 68 |
| 圖 4.34 雲林旱地種植絲瓜鎘濃度推估分佈圖 | 69 |
| 圖 4.35 雲林旱地種植秋葵鎘濃度推估分佈圖 | 69 |
| 圖 4.36 雲林旱地種植大蒜鎘濃度推估分佈圖 | 70 |
| 圖 4.37 雲林旱地種植菜豆鎘濃度推估分佈圖 | 70 |
| 圖 4.38 限量標準為 0.2 mg kg^{-1} 之蔬菜推估鎘濃度盒型圖 | 73 |
| 圖 4.39 限量標準為 0.1 mg kg^{-1} 之蔬菜推估鎘濃度盒型圖 | 74 |
| 圖 4.40 限量標準為 0.05 mg kg^{-1} 之蔬菜推估鎘濃度盒型圖 | 74 |
| 圖 4.41 紅鳳菜蜘蛛網圖（聚焦尺度） | 82 |
| 圖 4.42 尖葉萵苣蜘蛛網圖（聚焦尺度） | 82 |
| 圖 4.43 秋葵蜘蛛網圖（聚焦尺度） | 83 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 圖 4.44 韭菜蜘蛛網圖（聚焦尺度） | 83 |
| 圖 4.45 紅鳳菜蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數） | 85 |
| 圖 4.46 尖葉萵苣蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數） | 85 |
| 圖 4.47 秋葵蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數） | 86 |
| 圖 4.48 韭菜蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數） | 86 |

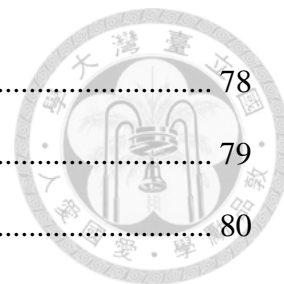


表目錄



| | |
|---|----|
| 表 2.1 世界各國食品鎘含量 | 7 |
| 表 2.2 各海產鎘濃度 | 8 |
| 表 2.3 蔬菜類重金屬鎘限量標準 | 12 |
| 表 2.4 臺灣民眾每日蔬菜食用量 | 13 |
| 表 2.5 農試所調查全臺表土重金屬濃度統計 | 15 |
| 表 2.6 全臺各縣市農地鎘污染列管場址統計表 | 17 |
| 表 2.7 農作物重金屬限量標準 | 19 |
| 表 2.8 不同作物其對鎘的植物吸收係數 | 22 |
| 表 2.9 作物吸收土壤鎘的因素 | 24 |
| 表 3.1 八德、大甲、虎尾試驗區之土壤鎘含量統計 | 35 |
| 表 3.2 八德、大甲、虎尾試驗區之 pH、CEC 統計 | 35 |
| 表 3.3 民國 101 年度計畫預測蔬菜鎘含量之參數表 | 37 |
| 表 3.4 民國 103 年度計畫預測蔬菜鎘含量之參數表 | 38 |
| 表 3.5 國土利用調查之第一級土地利用面積及比例 | 42 |
| 表 3.6 農業用地之第二級土地利用面積及比例 | 42 |
| 表 3.7 農作地之第三級土地利用面積及比例 | 42 |
| 表 4.1 雲林縣土壤調查資料統計 | 47 |
| 表 4.2 克利金推估半變異元函數參數表 | 50 |
| 表 4.3 克利金推估土壤鎘濃度、CEC 及 pH 數據之統計 | 51 |
| 表 4.4 雲林縣蔬菜推估鎘濃度之統計 | 54 |
| 表 4.5 我國民眾平均蔬菜攝食量 | 75 |
| 表 4.6 農委會與衛福部蔬菜分類與鎘限量標準 | 76 |
| 表 4.7 以推估蔬菜平均鎘濃度計算我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量 | 77 |
| 表 4.8 以推估蔬菜鎘濃度 90 % 計算我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量 | 78 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 表 4.9 以蔬菜鎘限量標準計算我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量 | 78 |
| 表 4.10 統整我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量 (mg/年) | 79 |
| 表 4.11 進行敏感度分析之蔬菜其截距和係數 | 80 |
| 表 4.12 敏感度分析之控制變動項目與範圍 | 80 |





第一章 前言



1.1 研究動機

鎘被國際癌症研究所 (IARC) 列為第一類致癌物質，進入人體後，主要會累積在腎臟和肝臟中，鎘對人體造成的健康危害包括嘔吐、噁心、腹痛、糖尿、蛋白尿、軟骨症、骨質疏鬆症，甚至是痛痛病。雲林縣是臺灣的蔬菜出產重鎮，蔬菜產量長年勇冠全國，統計資料顯示民國 102 年雲林縣的蔬菜產量約為全臺灣產量的 29%，遠比第二名的彰化縣 (12%) 和第三名的臺南市 (10%) 高 (行政院農業委員會，2013)。國人飲食習慣是以穀類、蔬菜與澱粉根類為主要攝取飲食，穀類、蔬菜與澱粉根類成為人體內鎘的主要來源，尤其是我國民眾攝食蔬菜普遍比稻米攝取量高，近 5 年以來，平均每位臺灣民眾每年可以攝食約 105 公斤的蔬菜，遠比稻米攝食量 (約 46 公斤) 大 (行政院農業委員會，2013)，所以，對於蔬菜食用安全管理應當審慎，減少受到污染的蔬菜被產出更是必要。

雲林縣土壤鎘含量並不高，最大值也未達土壤鎘濃度監測標準 (5 mg kg^{-1})；但是，蔬菜是對重金屬鎘比較敏感的作物，也就是說，即使某塊土地其鎘濃度不高，仍有可能在這塊土地種出超過蔬菜重金屬鎘限量標準的蔬菜，因此，選拔出不易吸附重金屬鎘的蔬菜種類以及適合栽種之處，儼然成為重要的目標。本研究藉由行政院環境保護署 (以下簡稱環保署) 和農業委員會農業試驗所 (以下簡稱農試所) 合作所發展的蔬菜鎘含量預測模式 (林等，2014)，配合農試所之雲林縣土壤品質調查資料，經地理資訊系統 (GIS) 彙整資料分析運算，以顏色分布呈現蔬菜鎘含量在空間中的變化，並且將各種蔬菜鎘濃度推估結果與國人蔬菜需求量做計算檢視我國民眾食用蔬菜安全，最後藉由對鎘含量預測模式係數做敏感度分析，找出導致蔬菜鎘含量變高的因子，期能據以採取對策，避免受鎘污染的蔬菜產出，為國民的食品安全增添一份保障。



1.2 研究目的

1. 將雲林縣農地土壤調查資料經過克利金推估法推估至全雲林縣境內，代入蔬菜鎘含量預測公式推估成雲林縣蔬菜鎘含量，再與國土利用調查資料中的旱作地套疊，輔以地理資訊系統，檢視雲林縣農地中不同蔬菜的推估鎘含量分佈情形。
2. 利用蔬菜的推估平均鎘濃度和農委會的糧食供需年報所提供國人每年各大類蔬菜攝食量，計算出食用所推估蔬菜吃進人體內的鎘，與 WHO 所建議的每人每月鎘攝取量做比較，檢視所推估蔬菜的食用安全性。
3. 藉由對蔬菜鎘含量預測模式中的係數進行敏感度分析，找出導致不同預測模式形式的蔬菜鎘含量變高的因子，進一步對不同預測模式形式的蔬菜的種植策略提出建議，避免含鎘超標蔬菜的產出。

1.3 研究架構

根據前述之研究動機與目的，本研究的研究架構如圖 1.1 所示：

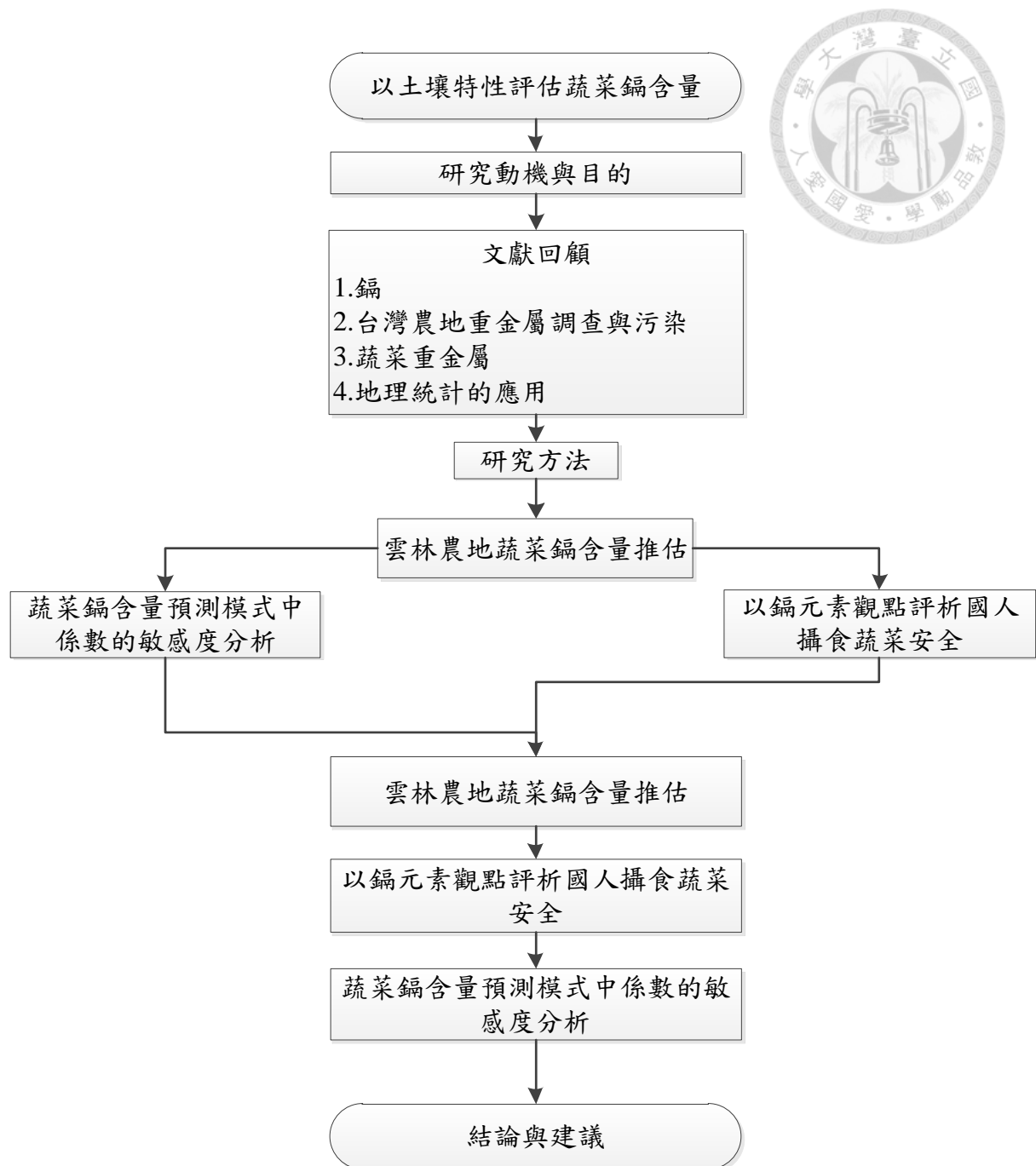


圖 1.1 研究架構圖



第二章 文獻回顧



2.1 鎘

2.1.1 鎘之來源

鎘 (Cd) 存在於大自然各處，岩石、土壤裡的鎘通常是跟其他元素結合成化合物或離子型態存在，大氣裡也有元素態的鎘存在。鎘於自然背景含量相當低，土壤中的鎘含量約為 $0.07-1.1 \text{ mg kg}^{-1}$ (行政院環保署，2003)。地殼中的鎘以兩種方式釋放到環境中：

1. 自然現象

陸地上或海底的火山爆發、岩石風化等均會造成如硫鎘礦、磷鎘礦等含鎘礦物釋放鎘到環境中。

2. 人類行為


十八世紀開始因為工業的興起，大量含鎘礦物因採礦、冶煉金屬、電鍍、電池製造、塑膠製造、磷肥製造等過程，快速釋放鎘至環境中。1817 年，Friedrich 發現加熱碳酸鋅會產生黃色光芒，經多次實驗才發現係因為碳酸鋅摻雜了鎘所致，自此鎘常被用作色料。二十世紀後，由於鎘氧化物不易溶於水且耐酸蝕，鎘被大量使用於電鍍業之中，為航海、航空及無線電子產品等零件之電鍍材料，但電鍍後剩下的含鎘電鍍廢液，通常未經妥善處理而直接傾倒入河流中污染水質，成為環境殺手。另外，農業上大量施用含鎘磷酸鹽肥料與含鎘污泥於農田之中 (Chang et al., 1983)，造成農田土壤累積高含量鎘，一般認定當土壤鎘濃度超過 0.5 mg kg^{-1} 時 (王，1997)，已是遭受人為污染之影響。

2.1.2 食物中的鎘

隨著國民生活品質提高，國人對食安問題日益關切。砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅均為工業、農業中常見之重金屬元素，因重金屬在環境中降解速率慢，若處理不當，則容易經由作物吸收至其食用部位，再隨著食物鏈傳遞方向，累積於人體中，久而久之導致慢性中毒。存在於環境中的鎘可經由呼吸或是攝食進入人體內，研究報告指出人體內的鎘大約有 83.9 % 是藉由飲食所累積的 (Tripathi et al., 2000)。環境中的鎘容易被水中生物或是農作物吸收，整理過去的文獻可以發現，魚類、貝類等水生生物體中含有高含量的鎘，而穀類、蔬菜與澱粉根類等農作物也易吸收鎘累積於食用部位，但是整體而言，水生生物鎘含量仍大於農作物 (表 2.1)，但人類飲食習慣是以穀類、蔬菜與澱粉根類為主要攝取飲食，因此穀類、蔬菜與澱粉根類反而成為人體內鎘的主要來源。

根據林等 (1992) 發表之全臺農作物共 687 個樣本重金屬含量調查，臺灣地區米類、蔬菜類、果菜類及根菜類中平均鎘濃度分別為 0.06、0.02、0.02、0.04 mg kg⁻¹。於臺灣水生生物鎘含量調查當中，貝類、甲殼類、頭足類、遠洋魚類、近海及養殖魚類、其他魚類的平均鎘濃度分別為 0.21、0.06、0.21、0.015、0.001、0.009 mg kg⁻¹ (施等, 2013)，可以看出除了魚類之外，臺灣水產生物的平均鎘含量較穀類、蔬菜類等農作物來的高。將上述生物的平均鎘含量整理如下表 2.2。

表 2.1 世界各國食品鎘含量



| 種類 | 名稱 | 鎘濃度 (mg kg ⁻¹) | 地區 | 來源 |
|----|-----|----------------------------|-----|------------------------|
| 海產 | 螃蟹 | 0.020-0.106 | 西班牙 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 龍蝦 | 0.019-0.082 | 丹麥 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 龍蝦 | 0.10-0.23 | 瑞典 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 牡蠣 | 0.5-1.0 | 瑞典 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 蝦類 | 0.039-0.11 | 瑞典 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 蝦類 | 0.003-0.12 | 荷蘭 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 蝦類 | 0.003-0.26 | 丹麥 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 胎貝類 | 0.069-0.26 | 瑞典 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 胎貝類 | 0.08-0.46 | 荷蘭 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 胎貝類 | 0.15-0.35 | 丹麥 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 鮭魚 | 0.0004-0.0036 | 德國 | Tavonen (1996) |
| 海產 | 鮭魚 | 0.002-0.005 | 芬蘭 | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 玉米 | 0.012 | | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 玉米 | 0.01 | 澳洲 | Jinadasa et al. (1997) |
| 穀物 | 大麥 | 0.004-0.027 | | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 燕麥 | 0.026-0.050 | | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 稻米 | 0.006-0.099 | | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 黑麥 | 0.008-0.040 | | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 小麥 | 0.003-0.067 | | Tavonen (1996) |
| 穀物 | 穀類 | 0.002-0.100 | 中國 | Zhang et al. (1998) |
| 穀物 | 豆類 | 0.007-0.381 | 中國 | Zhang et al. (1998) |
| 穀物 | 花生 | 0.010-0.588 | 美國 | Tinggi (1998) |
| 穀物 | 花生 | 0.015-0.064 | 澳洲 | Tinggi (1998) |
| 穀物 | 馬鈴薯 | 0.02 | 澳洲 | Jinadasa et al. (1997) |
| 穀物 | 馬鈴薯 | 0.010-0.031 | | Tavonen (1996) |
| 蔬菜 | 萵苣 | 0.05-0.34 | | Jinadasa et al. (1997) |
| 蔬菜 | 甘藍 | 0.01-0.56 | | Jinadasa et al. (1997) |
| 蔬菜 | 白菜 | 0.05 | | Jinadasa et al. (1997) |
| 蔬菜 | 菠菜 | 0.022-0.158 | | Tavonen (1996) |
| 蔬菜 | 蘿蔔 | 0.008-0.022 | | Tavonen (1996) |

(林等, 2006)

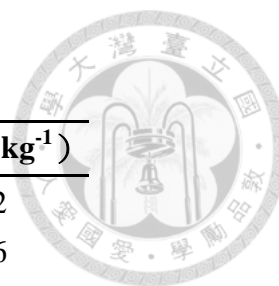
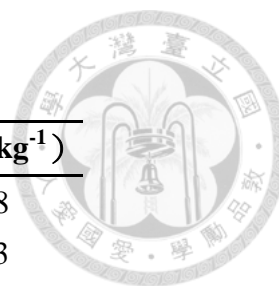


表 2.2 各海產鎘濃度

| 類別 | 魚種 | 件數 | 鎘濃度 (mg kg ⁻¹) |
|---------|-----|----|----------------------------|
| 遠洋魚類 | 旗魚 | 7 | 0.006-0.052 |
| | 鯊魚 | 3 | 0.005-0.006 |
| | 鮪魚 | 1 | N.D. |
| 近海及養殖魚類 | 鱸魚 | 23 | N.D.-0.002 |
| | 鱒魚 | 15 | N.D.-0.002 |
| | 鮭魚 | 13 | N.D.-0.002 |
| | 虱目魚 | 13 | N.D.-0.001 |
| | 白帶魚 | 11 | N.D.-0.002 |
| | 吳郭魚 | 11 | N.D. |
| | 黃魚 | 11 | N.D.-0.001 |
| | 香魚 | 9 | N.D.-0.008 |
| | 石斑 | 8 | N.D.-0.001 |
| | 肉魚 | 8 | N.D.-0.009 |
| | 鯧 | 7 | N.D.-0.006 |
| | 草魚 | 4 | N.D. |
| | 鯛魚 | 4 | N.D. |
| | 赤鯨 | 3 | N.D. |
| | 鯉魚 | 2 | N.D. |
| | 比目魚 | 2 | N.D. |
| | 土魷 | 2 | N.D.-0.007 |
| | 魴魚 | 2 | N.D. |
| | 吻仔魚 | 2 | N.D.-0.012 |
| | 紅甘 | 2 | N.D. |
| | 柳葉魚 | 2 | N.D.-0.018 |
| | 梭子魚 | 1 | N.D. |
| | 鯖魚 | 1 | 0.006 |
| | 鮠魚 | 1 | N.D. |
| | 煙仔魚 | 1 | N.D. |
| | 紅目鯰 | 1 | N.D. |
| | 金線魚 | 1 | N.D. |

表 2.2 各海產鎘濃度 (續)

| 類別 | 魚種 | 件數 | 鎘濃度 (mg kg ⁻¹) |
|------|-----|----|----------------------------|
| 其他魚類 | 秋刀魚 | 9 | N.D.-0.088 |
| | 雪斑魚 | 4 | N.D.-0.003 |
| | 馬頭魚 | 2 | N.D. |
| | 午仔魚 | 1 | N.D. |
| | 赤翅 | 1 | N.D. |
| | 海鱸 | 1 | N.D. |
| 甲殼類 | 蟹類 | 11 | N.D.-0.177 |
| | 蝦類 | 7 | N.D.-0.275 |
| | 龍蝦 | 3 | 0.033-0.261 |
| 貝類 | 干貝 | 7 | 0.049-0.849 |
| | 蚵仔 | 4 | 0.110-0.257 |
| | 帆立貝 | 2 | 0.013-0.544 |
| | 牡蠣 | 2 | 0.067-0.263 |
| | 扇貝 | 2 | 0.099-0.772 |
| | 海瓜子 | 2 | 0.177-0.219 |
| | 淡菜 | 2 | 0.172-0.333 |
| | 鮑魚 | 2 | 0.059-0.073 |
| | 蛤蜊 | 2 | 0.098-0.132 |
| | 螺 | 1 | 0.116 |
| 頭足類 | 透抽 | 9 | 0.006-0.331 |
| | 小捲 | 2 | 0.192-1.110 |
| | 花枝 | 2 | 0.097-0.255 |
| | 小管 | 1 | 0.044 |






2.1.3 鎘之危害與標準

鎘並非人體維持生命必要元素，對人體健康來說，是累積性劇毒元素。鎘已經被世界衛生組織國際癌症研究中心（International Agency for Research on Cancer, IARC）定義為一級致癌物質（IARC, 1993），目前已有大量研究數據指出長期暴露在高鎘含量環境下，會導致肺部病變，罹患肺癌（WHO, 2010）。人類透過攝食、吸菸或是吸入工業廢氣，接觸到環境中的鎘。鎘一旦進入人體，經由腸道內運鐵蛋白（the apical divalent metal transporter, DMT1; the basolateral ferroportin 1）運載進入體內，隨後又與一低分子蛋白質（metallothionein）結合，累積於腎臟與肝臟之中，很難被排出體外。鎘中毒的現象，有分為急性鎘中毒，如：引用鎘含量 16 mg L^{-1} 的水，會造成嚴重嘔吐、噁心和腹痛；與慢性鎘中毒，如：累積於腎臟、肝臟的鎘，會破壞腎小管之功用，導致蛋白質、胺基酸及醣類吸收不良，引發糖尿、蛋白尿等症狀，且腎小管之衰敗造成鐵、鈣再吸收不良，而導致軟骨症與骨質疏鬆症，另外，近來研究發現鎘在體內累積也會影響生育力、損害免疫系統（Musa and Abbullahi, 2013）。1950 年代，在日本九州富山縣神通川流域的居民長期食用鎘污染之稻米與水，罹患骨質疏鬆症而且變得容易骨折，稱之「痛痛病」，好發於婦女身上。

Chaney（1980）曾研究污泥所含元素進入食物鏈後，提出「土壤-植物障礙（soil-plant barrier）」論述，將元素分為四群，第 1 群元素在土體溶解度低，作物極少吸收至植體內，屬於低風險的元素；如果有第 1 群元素高濃度存在植體內的情況，一般是因為土壤或粉塵直接污染所致。第 2 群元素在土體牢固地被土壤膠體所吸附，就算被吸收，也只會保存於根部，而不會立即轉運至食用部位，所以其影響動物及人類健康風險也小。第 3 群元素可以立即被植物吸收，但造成植物的毒害濃度時，還不致影響動物和人體健康，所以危害動物和人類健康的風險低。鎘屬於第 4 群元素，第 4 群元素則是在造成動物或人類健康危害的濃度時，還不致造成作物的毒害，所以此群元素對動物或人類的健康危害風險最大。



由於植物吸收重金屬鎘缺乏土壤-植物障礙，為保障人類食品安全，聯合國國際農糧組織與世界衛生組織（FAO/WHO）過去已投入大量研究於鎘對人體健康風險危害之研究，並於 2010 年經專家委員根據新研究數據與風險評估後，將人體對鎘可容許攝取標準做修改，從之前的每人每周可容許攝取量（Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI） $7 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}^{-1}$ ，更新成每人每月可容許攝取量（Provisional Tolerable Monthly Intake, PTMI） $25 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}^{-1}$ ，將人體可攝取鎘含量調降至更嚴格的標準（FAO/WHO, 2010），依我國民眾平均體重 65 kg 換算，每人每天可攝取鎘含量為大約 $54 \mu\text{g}$ 。我國衛生福利部（以下簡稱衛福部）為保護民眾食用蔬菜安全，公布蔬果植物類重金屬鎘限量標準（表 2.3），行政院農業委員會（以下簡稱農委會）記錄了歷年我國民眾的蔬菜攝取量，但是因為農委會對於蔬菜的分類方式與衛福部不相同，也沒有更細的各種蔬菜的食用量資料，所以直接計算我國民眾因為攝食蔬菜獲取的鎘會不會超過 FAO/WHO 建議的每人每天可攝取鎘含量。林等（1992）研究發現，我國民眾每人每天透過攝取之作物、麵食、魚貝類等食物鎘含量約 $30.7 \mu\text{g}$ ，低於 FAO/WHO 的建議量。

表 2.3 蔬菜類重金屬鎘限量標準

| 類別 | 鎘 (mg kg ⁻¹) | 作物名稱 |
|---------------|--------------------------|--|
| 小葉菜類 | 0.2 | 小白菜、菠菜、芥菜、萵苣、蕹菜、莧菜、甜菜葉、羽衣甘藍、茴香、芥藍、青梗白菜(青江菜)、油菜、紅鳳菜、白鳳菜、葉用甘薯、芋葉柄、皇宮菜(落葵)、川七、紫蘇、茼蒿、韭菜、蕎麥、山蘇、過溝蕨菜(過貓)、甘藍芽、芹菜、梨瓜(佛手瓜)嫩梢、葉用豌豆、豌豆苗、葉用蘿蔔、葉用枸杞、青蔥、青蒜、蒜苗等 |
| (半)結球類及花菜類等蔬菜 | 0.05 | 甘藍、抱子甘藍、結球萵苣、半結球萵苣、結球白菜、結球芥菜、花椰菜、青花菜、金針菜等 |
| 根莖菜類(不含鱗莖類) | 0.1 | 蘿蔔、胡蘿蔔、山葵、木薯、山藥、甘藷、菊芋(雪蓮)、蘆筍、竹筍、朝鮮薊、球莖甘藍(結頭菜)、茭白筍、芋、牛蒡、馬鈴薯、豆薯、嫩莖萵苣、蓮藕、芋薺、茭薺、燕薺、薑、甜菜根等 |
| 瓜菜及果菜類 | 0.05 | 苦瓜、胡瓜(黃瓜)、絲瓜、南瓜、冬瓜、梨瓜(佛手瓜)、扁蒲、越瓜、蛇瓜、菱角、茄子、甜椒、番茄、黃秋葵、玉米等 |
| 豆類及豆菜類 | 0.2 | 藍莓、山桑子(越橘)、黑莓、醋栗、葡萄、桑椹、樹莓(覆盆子)、草莓、蔓越莓、山楂、枸杞等 |

(衛福部，2013)

表 2.4 臺灣民眾每日蔬菜食用量

| 年度 | 蔬菜類 (g) | 葉菜類 (g) | 根菜類 (g) | 莖菜類(g) | 花果菜類(g) |
|-----|---------|---------|---------|--------|---------|
| 98 | 283.86 | 100.15 | 26.21 | 86.40 | 66.56 |
| 99 | 287.36 | 94.85 | 26.25 | 91.44 | 69.85 |
| 100 | 293.35 | 105.38 | 24.43 | 88.47 | 69.16 |
| 101 | 281.53 | 104.07 | 23.31 | 83.81 | 64.32 |
| 102 | 285.29 | 100.28 | 27.48 | 81.71 | 69.61 |
| 平均 | 286.28 | 100.95 | 25.54 | 86.36 | 67.90 |

(農委會統計資料，2013)



2.2 臺灣農地重金屬污染狀況

2.2.1 臺灣土壤重金屬調查概述

行政院農業委員會農業試驗所（以下簡稱農委會農試所）為了瞭解臺灣農地土壤品質及生產力，自民國 81 年起與全臺各地區農業改良場等單位合作，至民國 97 年底已完成全台約 78 萬公頃之農地土壤採樣調查工作。調查方式以間隔 250 公尺為單位，採集土壤剖面，進行網格式土壤採樣，圖 2.1 農試所土壤採樣調查佈點示意圖以雲林縣二崙鄉定安村、西螺鎮福田里為樣本範例。在全臺採總樣本數共 13 多萬筆表土調查資料及 11 多萬筆裏土調查資料；調查土壤性質包含鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅等 6 種重金屬濃度、土壤陽離子交換容量（CEC）、土壤 pH 與土壤有機質含量(OMU)，其中重金屬檢測方法以 0.1M HCl 萃取法測得(表 2.5)。

以下為農試所例年農地土壤調查之主要目的：

1. 掌握全臺土壤肥力、沃度、質地等性質與重金屬含量。
2. 分析目前耕作方式對土壤之影響，增進農田地力，以改善農田土壤性質。
3. 建立農地土系基本資料，以提升田間試驗之實用範圍。
4. 提供定量化之地區農地資源評估，因應社會之需求。

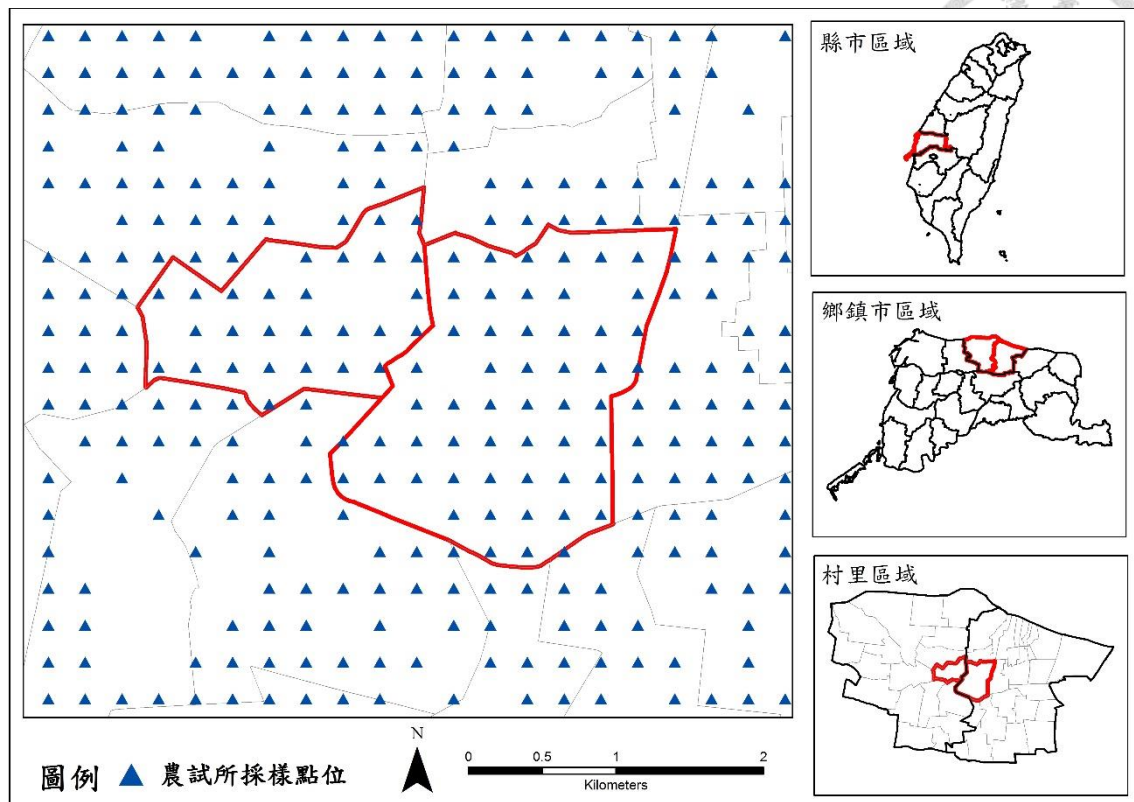


圖 2.1 農試所土壤採樣調查佈點示意

表 2.5 農試所調查全臺表土重金屬濃度統計

| 項目 | 鎘 | 鉻 | 銅 | 鎳 | 鉛 | 鋅 | CEC | pH |
|----------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|------|
| 平均值 | 0.17 | 0.39 | 6.83 | 1.60 | 5.96 | 15.8 | 8.21 | 6.10 |
| 中位數 | 0.12 | 0.25 | 4.06 | 1.14 | 4.53 | 5.85 | 7.23 | 6.17 |
| 第 1 四分位數 | 0.06 | 0.15 | 2.31 | 0.69 | 2.80 | 3.54 | 5.34 | 5.03 |
| 第 3 四分位數 | 0.22 | 0.41 | 6.89 | 1.76 | 6.86 | 9.60 | 9.67 | 7.23 |
| 標準差 | 0.58 | 1.88 | 42.10 | 6.79 | 49.20 | 825.40 | 44.83 | 1.28 |

備註：1.重金屬檢測方法：0.1M HCl 萃取，重金屬濃度單位： mg kg^{-1} 。

2.總樣本數：130,484 筆。


3.CEC 單位： cmol kg^{-1} 。

2.2.2 臺灣農地土壤鎘污染管制概況

臺灣最早的農地鎘污染事件是發生在 1980 年代，桃園縣觀音鄉大潭村及桃園縣蘆竹鄉中福村各自因為高銀化工以及基力化工排放高鎘含量的廢水至灌溉渠道中，導致農民取用到被鎘污染到的水來灌溉農田，農地受鎘污染嚴重而衍生出鎘米事件，也引起了政府對農地重金屬污染的重視，開始一連串土壤重金屬含量調查，確保農產品食用安全。

各縣市歷年針對受污染之農地土壤辦理後續場址調查、列管、復育、驗證與解除列管等工作。截至民國 103 年 4 月，由環保署公告各縣市農地鎘污染列管廠址情形整理如表 2.6，表中資料顯示，全臺農地累計鎘污染列管面積約 135.56 公頃，多集中於桃園縣、新竹縣（市）及彰化縣，其中又以桃園縣為最多，共有 245 筆公告場址，約 64.11 公頃。經長期整治復育後，全臺受鎘污染農地仍有 56.47 公頃，多集中於桃園縣、彰化縣及雲林縣，其中又以桃園縣剩餘污染面積為最多，約 48.05 公頃。

表 2.6 全臺各縣市農地鎘污染列管場址統計表



| 縣市別 | 累計場址 | | 解除場址 | | 目前列管場址 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 公告列管筆數 | 列管面積 | 解除列管筆數 | 解除列管面積 | 剩餘筆數 | 剩餘面積 |
| 宜蘭縣 | 2 | 0.03 | 1 | 0.02 | 1 | 0.02 |
| 基隆市 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 臺北市 | 21 | 4.36 | 21 | 4.36 | 0 | 0.00 |
| 新北市 | 1 | 0.15 | 1 | 0.15 | 0 | 0.00 |
| 桃園縣 | 245 | 64.11 | 62 | 16.06 | 183 | 48.05 |
| 新竹縣（市） | 180 | 33.86 | 178 | 33.27 | 2 | 0.59 |
| 苗栗縣 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 臺中市 | 36 | 6.50 | 35 | 6.44 | 1 | 0.06 |
| 彰化縣 | 103 | 19.09 | 66 | 15.20 | 37 | 3.89 |
| 南投縣 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 雲林縣 | 24 | 5.49 | 11 | 2.64 | 13 | 2.85 |
| 嘉義縣（市） | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 臺南市 | 30 | 1.45 | 9 | 0.44 | 21 | 1.01 |
| 高雄市 | 3 | 0.52 | 3 | 0.52 | 0 | 0.00 |
| 屏東縣 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 花蓮縣 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 臺東縣 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 全臺 | 645 | 135.56 | 387 | 79.09 | 258 | 56.47 |

註：面積單位為公頃（資料來源：行政院環保署土壤及地下水管理資訊系統 統計至民國 103 年 4 月）



2.3 蔬菜鎘含量

2.3.1 蔬菜監測與管制

(一) 農政機關作為

因應民眾對食品安全日趨重視，並為解決作物受重金屬污染之疑慮，行政院農業委員會農糧署自民國 93 年起，每年皆編列預算執行「農作物重金屬污染監測管制」計畫，對農地土壤重金屬高污染風險區所栽種之農作物重金屬含量進行監測與管制，特別針對鎘、汞、鉛等易被水稻及部分根菜類吸收蓄積、產生濃縮作用之金屬，依照衛福部訂定之農作物重金屬限量標準進行篩選監測（表 2.7）。

於每年執行「農作物重金屬污染監測管制」計畫中，監測之農田係由各地縣市政府依照下列規則，選定農田進行監測：

- (1) 針對環保署調查之 319 公頃污染農田中，土壤遭受鎘、汞污染達 $3.00-4.99 \text{ mg kg}^{-1}$ ，接近管制值 5 mg kg^{-1} ，及受鉛污染達 $400-499 \text{ mg kg}^{-1}$ ，接近管制值 500 mg kg^{-1} ，種植水稻、根菜類、豆類與豆菜類之農田。
- (2) 過去受鎘、汞、鉛污染之農地，完成整治且解除管制者，經地力回復後，恢復耕作且種植水稻、根菜類、豆類與豆菜類之農田者。
- (3) 過去檢測水稻、根菜類、豆類與豆菜類之鎘、汞、鉛含量不合格，未休耕仍繼續種植水稻、根菜類、豆類與豆菜類之農田。
- (4) 種植水稻、根菜類、豆類與豆菜類之農田，土壤鎘、汞或鉛濃度達污染監測標準者。
- (5) 灌溉水質經農委會農田水利處檢測鎘、汞或鉛不合格之灌區，種植水稻、根菜類、豆類與豆菜類之農田。
- (6) 水稻、根菜類、豆類與豆菜類之農田或其灌溉溝渠，鄰近工業區或高污染風險事業單位（工廠）者。
- (7) 以上農田之相比鄰農田者。
- (8) 其他疑受到鎘、汞或鉛污染之農田。

各地縣市政府就選定農田進行採樣，送農委會農業藥物毒物試驗所（以下簡稱藥毒所）進行檢驗，於3至5日將檢驗結果通知縣市政府及農糧署。檢驗結果如發現食米中鎘、汞、鉛含量超過「食米重金屬限量標準」者，藥毒所先以電話通知，再行文函通知縣市政府及農糧署；縣市政府接獲通知後，立即進行農作物剷除、銷燬作業，並給付農民補償費，同時報請該縣環保局進行農地污染查證，依照土污法管理土壤重金屬含量達管制標準者，最後再由環保署進行後續之土壤污染整治及農地復育（中華土壤肥料學會，2010；翁，2006）。

表 2.7 農作物重金屬限量標準


| 作物類別 | 重金屬項目 | 限量標準 (mg kg ⁻¹) |
|--------|--------|-----------------------------|
| 食米 | 鎘 (Cd) | 0.4 |
| | 汞 (Hg) | 0.05 |
| | 鉛 (Pb) | 0.2 |
| 植物可食性根 | 鉛 (Pb) | 0.3 |
| 豆類及豆菜類 | 鉛 (Pb) | 0.2 |
| | 鎘 (Cd) | 0.2 |

（衛福部，2007）

依據「農作物重金屬污染監測管制」計畫農田選定規則可知，農糧署僅針對土壤鎘含量達管制、監測標準做為調查對象，進行監測管制。

（二）衛生機關作為

統計農委會資料可知，我國民眾一年攝食蔬菜量遠大於稻米的攝食量。民國86年時，有鑑於之前許多鎘污染農田導致鎘米產出的事件，為了瞭解市售蔬果受環境重金屬負荷污染之情形，當時的行政院衛生署食品衛生處，由臺灣中部地區8個縣市之傳統市場、超市及果菜中心採集檢體，檢驗其重金屬（鉛、鎘）含量，結果顯示109件蔬菜檢體中，其鎘含量皆未達到最低檢出量（0.01 mg kg⁻¹）；民國96年時，行政院衛生署食品衛生處（現在的行政院衛生福利部食品藥物管理署）



為了解國內市售蔬菜類重金屬含量之背景資料，及配合行政院衛生署逐年訂定國人食用農作物中重金屬限量標準之需求，建立蔬菜類中重金屬之分析方法，於民國96年3月至10月間，自台北地區各生鮮超市及傳統市場採購市售蔬菜類檢體130件，進行重金屬含量背景值之檢驗分析（施等，2008）。其中鎘、鉛之檢驗結果均符合聯合國糧農組織/世界衛生組織之食品標準委員會（FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, Codex）及歐盟法規委員會（European Regulation Commission）對蔬菜類中鎘、鉛之限量標準；此後，我國衛生單位為避免人民因日常攝食攝食而攝入過多的潛在性有毒金屬元素，對於蔬菜蔬菜的衛生規範訂有「蔬果植物類重金屬限量標準」。

2.3.2 蔬菜吸收土壤中鎘之機制

對於不同蔬菜吸收重金屬鎘的能力，有研究認為，萵苣、菠菜、芹菜和甘藍能吸收高量的鎘，馬鈴薯塊根、玉米、法國豆及豌豆僅吸收少量的鎘(Davis and Calton-Smith, 1980)，另外有研究指出，當不同作物種植於條件相同的土壤中，鎘累積量的順序為：葉菜類蔬菜>根莖類蔬菜>豆類作物，另外有研究對珠江三角洲附近的5個蔬菜種植地中11個主要蔬菜進行重金屬（鎘、銅、鉛、鋅）風險評估，發現達污染標準的蔬菜大多為莖/葉類型蔬菜（Hu et al., 2013）。Lin et al. (2012) 調查臺灣地區主要蔬菜產區各類蔬菜共1900個樣品，指出平均鎘濃度（濕基）分別為葉菜類ND-0.151 mg kg⁻¹、(半)結球菜類ND-0.080 mg kg⁻¹、根莖菜類ND-0.116 mg kg⁻¹、瓜菜及果菜類ND-0.115 mg kg⁻¹，與上述兩者研究相符合。Chen et al.(2009) 提出植物吸收係數（Plant Uptake Factor, PUF）的概念，代表穩定狀況下，重金屬由土壤轉換到植物組織內的比例，計算式如下：

$$PUF = \frac{C_{plant}}{C_{soil}} \quad (式1)$$

其中C_{plant}代表植體中之重金屬含量，C_{soil}代表土壤中重金屬含量。文中亦統計出一些植物的PUF值如下表 2.8，由表可以看出根類作物和蔬菜作物的平均PUF值是最高的，遠高於穀類作物的PUF值；也可以看出花生、番茄、萵苣的PUF值偏高，說明這三種作物是比較容易吸收土壤重金屬的。



表 2.8 不同作物其對鎘的植物吸收係數

| 作物 | 對鎘的植物吸收係數值 | | |
|------|------------|-------------|------|
| | 平均 | 範圍 | 數目 |
| 馬鈴薯 | 1.05 | 0.029-6.28 | 305 |
| 花生 | 2.41 | 0.13-32.00 | 320 |
| 洋蔥 | 0.27 | 0.23-2.22 | 255 |
| 番茄 | 1.76 | 0.17-32.00 | 182 |
| 甘藍 | 0.77 | 0.028-5.38 | 206 |
| 萵苣 | 1.55 | 0.061-12.54 | 145 |
| 甜玉米 | 0.088 | 0.004-1.18 | 244 |
| 黃豆 | 0.39 | 0.046-7.5 | 339 |
| 小麥 | 0.21 | 0.014-1.38 | 315 |
| 玉米 | 0.15 | 0.003-4.20 | 256 |
| 米 | 0.13 | 0.003-3.40 | 142 |
| 根類作物 | 1.32 | 0.029-32.00 | 880 |
| 蔬菜作物 | 1.32 | 0.028-32.00 | 533 |
| 穀類作物 | 0.21 | 0.003-7.50 | 1296 |

(Chen et al., 2009)

林等 (2014) 表示，農作物吸收重金屬之影響因素常包括重金屬的種類與濃度、植物的種類、土壤pH值及氣候...等因素。根部自土壤吸收元素的主要機制有：根部陽離子交換、藉由螯合劑或其他載體在細胞內傳輸、根圈效應 (Kabata-Pendias and Pendias, 2001)。有許多因素會影響植物對土壤中重金屬的吸收，大致上可以分為四類：

(1) 重金屬本身性質：

- 重金屬在土壤溶液的濃度和型態
- 重金屬從土壤吸附位置到根部表面之間的移動能力
- 重金屬從根表面到根內部的運輸過程
- 重金屬由根部運輸到地上部的作用
- 不同植物在不同土壤中對重金屬離子有不同的吸收與積聚作業，農作物在土壤中吸收重金屬的程度分別為：鎘 > 鋅 > 汞 > 銅 > 鉛 > 砷 > 鉻



(2) 土壤因素：

- a. 土壤質地
- b. 栽培管理方式與環境變化
- c. 重金屬之含量
- d. 土壤pH值
- e. 有機質含量
- f. 陽離子交換能量
- g. 鐵鋁錳氧化物含量
- h. 氧化還原電位元
- i. 其他元素的影響
- j. 天然或合成的錯合劑存在與否

(3) 氮肥的效應：的整理報告指出隨著氮肥的增加，會增加小麥穀粒與莖的鎘濃度，可歸因於土壤pH值降低與離子濃度的增加（Mench, 1998）。土壤因素（pH與離子濃度）與植物因素（生質量與蒸散作用）的交互作用，會增加土壤溶液及植體中的鎘濃度。增加氮肥能促進植物的生長，增加蒸散作用與生質量的累積，較高的氮用量，植物根系統較廣，直流速率較快，從土壤溶液中吸收的鎘與其他元素也較多。

(4) 植物因素：

- a. 基因型態
- b. 根圈土壤pH的改變
- c. 植物根的分泌物

Australian Government（2005）將Chaney and Hornick（1978）總結作物吸收土壤鎘的因素整理如下表 2.9：

表 2.9 作物吸收土壤鎘的因素

| 因子 | | 作物吸收鎘之影響效果 |
|------|-----------------|----------------|
| 土壤因子 | 1.pH | 隨 pH 降低而吸收量增加 |
| | 2.土壤鹽分 | 隨土壤鹽分增加而吸收量增加 |
| | 3.土壤鎘濃度 | 隨濃度增加而吸收量增加 |
| | 4.土壤吸附重金屬能力 | 隨吸附力增加而吸收量降低 |
| | a.有機質 | 高含量土壤有機質會降低吸收量 |
| | b.陽離子交換能量 | 高 CEC 會減低吸收量 |
| | c.黏粒、鐵及錳氧化物 | 黏粒、鐵及錳氧化物會降低吸收 |
| | 5.微量元素：如鋅 | 隨土壤鋅濃度減少而增加吸收量 |
| 作物因子 | 6.大量元素：如銨、磷酸根、鉀 | 可能會增加或降低吸收量 |
| | 7.溫度 | 高溫會增加吸收量 |
| | 8.通氣狀態，如：浸水狀態 | 減低吸收量 |
| | 1.物種及品種 | 葉菜類>根菜類>穀類>水果類 |
| | 2.植物組織 | 葉>穀，果實及食用根 |
| | 3.葉齡 | 老葉>新葉 |
| | 4.元素的交互作用 | 若土壤存有鋅時會降低鎘的吸收 |

2.3.3 蔬菜鎘含量預測模式之建構

之前的研究指出，因為土壤容易中重金屬較容易被植物吸收利用，所以預測作物吸收土壤重金屬皆以土壤溶液重金屬含量作為預測考量。利用土壤重金屬含量與土壤性質推估土壤溶液中重金屬含量，建立一土壤溶液重金屬含量預測模式（Römkens et al., 2004），如下：

$$\log(\text{Metal}_{\text{soil solution}}) = \alpha_1 + \beta_1 \times \log(\text{Metal}_{\text{soil}}) + \gamma_1 \times \log(\text{OM}) + \delta_1 \times \log(\text{clay}) + \epsilon_1 \times \text{pH} \quad (\text{式2})$$

其中， $\text{Metal}_{\text{soil solution}}$ 為土壤溶液中重金屬濃度， $\text{Metal}_{\text{soil}}$ 為土壤中重金屬含量，OM為土壤有機質含量，clay為土壤黏粒含量，pH為土壤的酸鹼值。由於土壤溶液中的重金屬為植物最容易吸收利用之型態，所以假設土壤溶液重金屬含量即為水稻吸收之鎘含量，則如式2：

$$\log(\text{Metal}_{\text{rice}}) = \alpha_2 + \beta_2 \times \log(\text{Metal}_{\text{soil}}) + \gamma_2 \times \log(\text{OM}) + \delta_2 \times \log(\text{clay}) + \epsilon_2 \times \text{pH} \quad (\text{式3})$$

其中 $\text{Metal}_{\text{rice}}$ 為糙米重金屬含量。

郭等（2009）研究發現，土壤陽離子交換容量（CEC）與有機質含量相關性極高，兩參數可能因共線性干擾水稻糙米鎘含量之預測，因此參考Römkens et al.（2009）研究，建議以土壤陽離子交換容量（CEC）、土壤鎘含量與土壤pH作為預測參數，建立之水稻重金屬預測模式，如式3：

$$\log(\text{Metal}_{\text{rice}}) = \alpha_3 + \beta_3 \times \log(\text{Metal}_{\text{soil}}) + \gamma_3 \times \log(\text{CEC}) + \delta_3 \times \text{pH} \quad (\text{式4})$$

其中 $\text{Metal}_{\text{rice}}$ 為糙米重金屬含量， $\text{Metal}_{\text{soil}}$ 為土壤中重金屬含量，CEC為土壤陽離子交換容量，pH則為土壤酸鹼值。利用歷年田間試驗數據，可回歸出各參數係數，應用於推估水稻糙米重金屬含量（Römkens et al., 2009；郭等，2009）。

林等（2014）為瞭解不同蔬菜栽培品種間吸收能力之差異，並探討土壤性質對蔬菜鎘吸收量之影響，參考了郭等（2009）研究，建立蔬菜含鎘量的預測模式，如式4：

$$\log(\text{Cd}_{\text{veg}}) = \alpha_4 + \beta_4 \times \log(\text{Cd}_{\text{soil}}) + \gamma_4 \times \log(\text{CEC}) + \delta_4 \times \text{pH} \quad (\text{式5})$$

其中 Cd_{veg} 為蔬菜鎘含量， Cd_{soil} 為土壤中鎘含量，CEC 為土壤陽離子交換容量，pH 則為土壤酸鹼值。並利用田間試驗數據，回歸出各參數係數，應用於推估蔬菜鎘含量（郭等，2009；林等，2014）。公式 5 為本研究之依據。



2.4 地理統計應用

地理統計發展最初是在1951年，南非的礦業工程師D.G. Krige為了探勘礦脈的分佈而提出，其主要目的是在依區域內，以少數觀測樣本資料，依據資料的空間變異結構，推估區域內變數分部之特性。1963年時，法國數學家Georges Matheron延續了Krige的研究論文基礎，發展地理統計的應用性，並於1971年提出區域化變數理論（Theory of Regionalized Variable），成為現在地理統計的理論基礎，為了紀念Krige，將此地理統計方法稱作「克利金（Kriging）」估計法。

地理統計以區域化變數理論為基礎，利用變異圖（Variogram）進行資料結構分析而得到區域化變數的空間相依性，在滿足最佳線性無偏估計（Best Linear Unbiased Estimate，簡稱BLUE）的條件，以克利金法（Kriging Method）推估未採樣位置的數值。

克利金法和其他內插估計方法的差別，在於可由部分觀測值的分析結果來獲得其他未採樣點的估計變方，因而估計值可在以之信賴區間內來表示，故地理統計可用來設計有效率的取樣原則（Burgess and Webster, 1980；Webster and Oliver, 1989）。

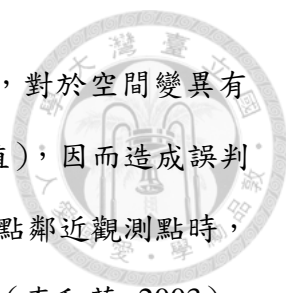
現代地理統計的應用領域無所不包，包含水文、氣象、地下水、礦脈、環境地質、大氣污染、環境監測、空氣品質等，當然，也有不少地理統計之克利金推估方法應用於土壤或土壤污染之研究，利用現有採樣資料的空間屬性推估未採樣地區之精確度（Burgess and Webster, 1980；Cooper and Istok, 1988）。

有研究是以美國夏威夷共80個表土及裏土樣本以地理統計分析土壤化學性質，由變異圖中發現在裏土的Ca、Mg、K有較大的交換變量，建議所得之變異圖，可作為土壤管理及土壤分類之參考（Yost et al., 1982）。Warrick et al.（1986）利用地理統計探討土壤物理性質在空間分佈之變異，且應用地理統計假說於復育決策是近年發展之研究方法。Jeffery et al.（1993）利用多變量指標克利金來評價土壤品

質，更整合多個土壤變量成單一變量，並製作土壤品質圖。更有人開始利用地理統計於土壤的營養物質如總氮、磷等之空間分佈分析 (Debusk, 1994)。

國內最早應用地理統計於土壤方面研究為鄭森源和萬鑫森 (1992) 針對桃園縣蘆竹鄉土壤進行重金屬污染調查，並以區塊克利金法 (Block Kriging) 推估其空間分佈。張等 (1996) 針對全省土壤重金屬調查結果，利用一般克利金法及土壤品質基準，鑑識全省各地區監測與管制監測分布。張等 (1997) 以彰化中樣區土壤為例，以因子分析方法抽取出四個主要影響污染因子，並將分析結果，利用一般克利金推估因子得分在空間之分佈。徐等 (1999) 以彰化調查土壤重金屬資料，利用因子分析法及一般與多變量指標克利金篩選共同因子，以全距與標準差最大的重金屬為變數，應用界定污染範圍及土壤復育；並且以環保署土壤重金屬含量調查資料，應用最小平方法模擬建立指數變異模式推估克利金網格值，判斷土壤重金屬含量空間分佈與母質關聯，對污染來源進行追蹤 (徐等, 2001)。江等 (2006) 利用地理資訊系統評估臺南安順污染廠址周圍之土壤污染，藉由不同克利金空間插值法分析該地區之土壤及魚塭底泥採樣資料，預測臺南安順廠區附近戴奧辛及汞的污染範圍及嚴重程度。江 (2009) 以克利金法推估土壤重金屬鎳之值與口腔癌病患居住地進行套疊，佐證土壤重金屬鎳含量與口腔癌關係相當密切，在公共衛生研究上是一個重要的貢獻。楊等 (2012) 以地理統計作空間推估將XRF讀值資料經關係模式換算成對應於王水/AA法的估算值，應用於推估土壤銅濃度的空間分佈，提供界定污染危害範圍。Cheng et al. (2013) 利用地理統計及多變量統計探討重金屬在農地中時空及空間變化，污染分佈和灌溉系統呈現正相關性及鉻、銅、鎳和鋅的濃度和灌溉渠道的規模成負相關。

因為地理統計在空間分析上具有特殊優勢，近來被應用於污染場址的調查與範圍界定，(李和莊, 2003)。但是污染物分佈的變異性大，且來源不易掌握，尤其土壤屬於異質性，變異性更加顯著，不是普通統計技術即能解析的。地理統計分析空間變異的基本概念在於變異大小與相對距離遠近的關係。



克利金推估法的推估值距最佳化特性，然而這種內插方法，對於空間變異有平滑之作用，即較小值容易被高估而較大值容易被低估（去極值），因而造成誤判（陳，2013）。另一個缺點是平滑作用在整個區域並不均勻，推估點鄰近觀測點時，平滑作用最小，相反的，推估點遠離觀測點時，平滑作用則會增加（李和莊，2003）。



第三章 材料與方法



3.1 研究流程

本研究利用農試所於雲林縣之農地土壤調查資料，項目包含土壤鎘濃度、CEC 及土壤 pH，經過克利金推估法，再代入農試所蔬菜鎘含量預測模式進行推估，接著跟國土利用調查資料中的旱作地資料疊合，最後輔以地理資訊系統，將推估結果以不同顏色表示推估的不同蔬菜鎘含量多寡，再利用國人蔬菜需求量資料評析食用此 31 種蔬菜之安全性，最後藉由敏感度分析找出影響預測模式中蔬菜鎘含量的主要因子。綜合以上結果，對當地的蔬菜耕種策略提出種植建議。

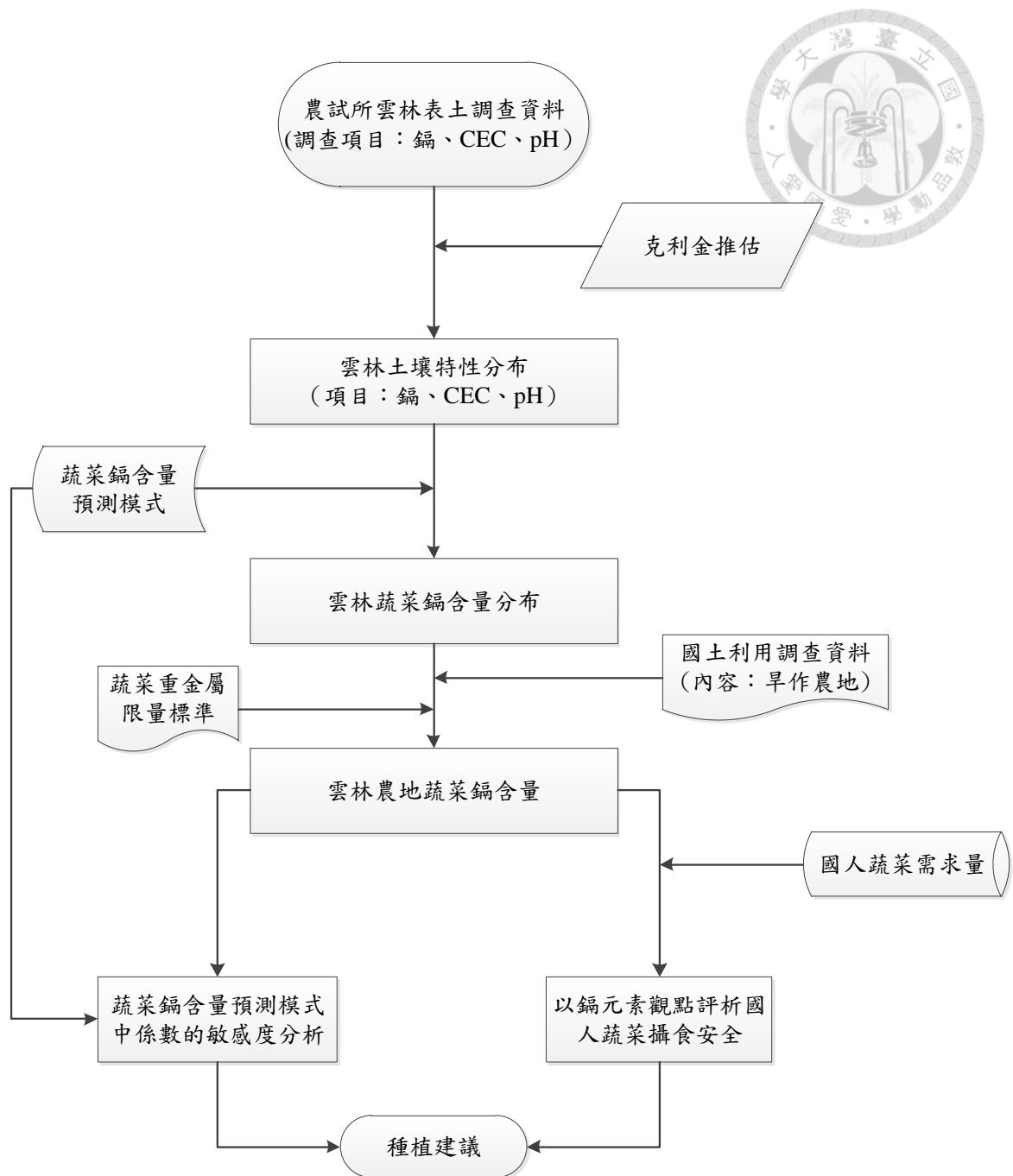


圖 3.1 研究流程



3.2 研究材料

3.2.1 土壤調查資料

為維持農地品質資料完備，農試所自民國 81 年至民國 97 年底為止，已經完成全臺灣總共大約 78 萬公頃的農地土壤採樣調查。進行以間隔 250 公尺為單位的網格式土壤採樣。全臺灣總樣本數共有 13 萬多筆表土及 11 萬多筆裏土調查資料；調查項目包括了鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅等 6 種重金屬濃度、土壤陽離子交換容量(CEC)及土壤 pH 值，6 種重金屬濃度的檢測方法是以 0.1M HCl 萃取法測得。

本研究取用 14272 筆位於雲林縣境內表土數據，範圍聚焦雲林縣大約 7 萬公頃農地。檢視各項資料，土壤鎘濃度及土壤 pH 值沒有缺漏，但 CEC 則不然，刪除缺少 CEC 紀錄之點位共 7228 筆，但此動作會使雲林縣西部的麥寮鄉、臺西鄉、東勢鄉、四湖鄉及口湖鄉等 5 個鄉鎮境內擁有陽離子交換容量資料的點位變得極度稀少，甚至沒有，因此，本研究引用了農委會 94 年度計畫「畜牧場已處理水採土壤利用對環境及作物影響之研究」中，於雲林縣西部 5 鄉鎮的第二次農地採樣取得之 CEC 值共 48 筆，併入農試所 7044 筆 CEC 資料中，以彌補農試所土壤調查部分地區資料之缺漏。

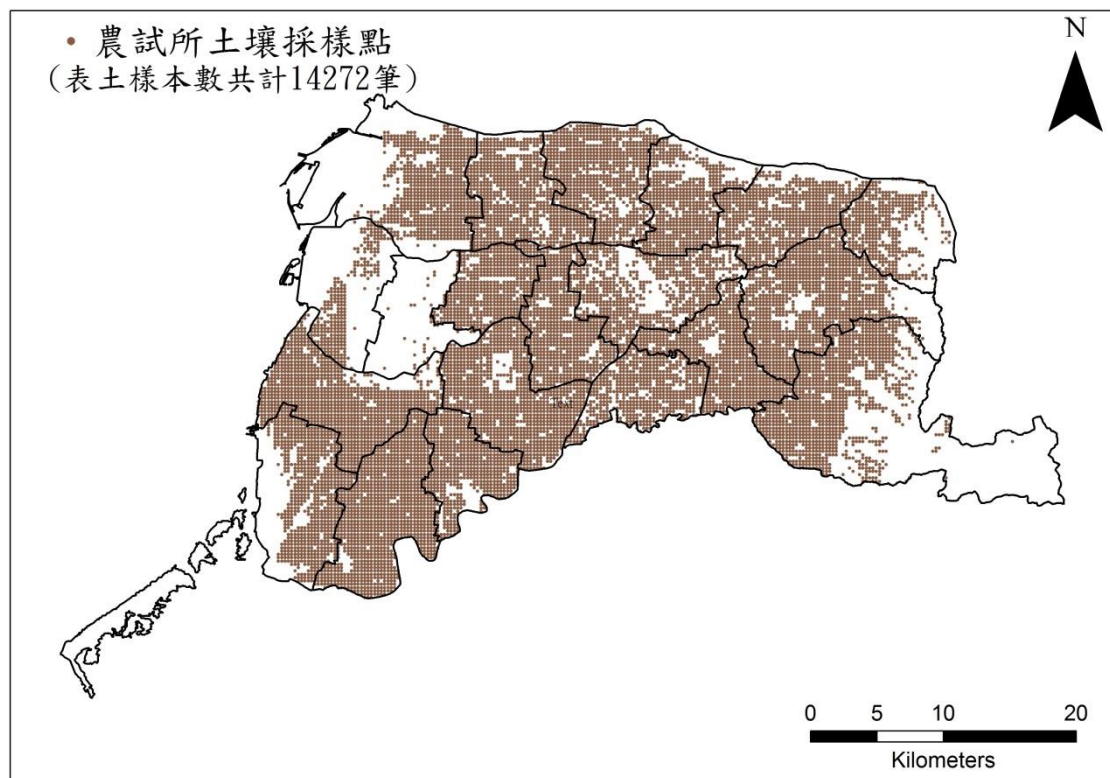


圖 3.2 農試所土壤調查雲林縣表土採樣點分佈圖



3.2.2 蔬菜鎘含量預測模式暨其參數

行政院環保署與農委會農試所合作之 101 年度計畫「蔬菜吸收金屬含量之研究及農地新興工業污染金屬元素之含量調查」中，延續了環保署與農試所的 99 年度計畫「作物（水稻）吸收土壤重金屬機制與農產品安全之影響探討（4）」中部份研究工作，進行蔬菜鎘、鉛吸收能力的研究，並探討土壤性質對蔬菜鎘吸收量之影響，於桃園八德試驗區、臺中大甲試驗區及雲林虎尾試驗區種植了 29 種蔬菜，共 5747 個樣品，選了其中 27 種蔬菜建立了蔬菜鎘含量預測模式。經試驗指出蔬菜鎘含量與土壤鎘濃度、陽離子交換容量（CEC）及土壤 pH 值有關，計畫中整理了有關八德、大甲及虎尾三個試驗區的土壤參數資料統計如下表 3.1 及表 3.2：

表 3.1 八德、大甲、虎尾試驗區之土壤鎘含量統計

| 試驗區 | 樣品數 | 最小值 (mg kg ⁻¹) | 最大值 (mg kg ⁻¹) | 平均值 (mg kg ⁻¹) | 標準差 (mg kg ⁻¹) |
|-----|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 八德 | 81 | 1.93 | 16.84 | 7.19 | 3.98 |
| 大甲 | 90 | 0.48 | 3.89 | 1.63 | 0.84 |
| 虎尾 | 14 | 0.26 | 1.67 | 0.66 | 0.45 |

(林等, 2013)

表 3.2 八德、大甲、虎尾試驗區之 pH、CEC 統計

| 試驗區 | Ph | | CEC | |
|-----|------|------|------------------------------|------------------------------|
| | 平均值 | 標準差 | 平均值 (cmol kg ⁻¹) | 標準差 (cmol kg ⁻¹) |
| 八德 | 4.91 | 0.25 | 11.1 | 0.61 |
| 大甲 | 6.74 | 0.41 | 8.36 | 0.86 |
| 虎尾 | 6.63 | 0.25 | 7.61 | 0.35 |

(林等, 2013)

利用土壤鎘濃度、CEC、pH 等 3 個因子建立蔬菜鎘含量的預測公式：

$$\log([Cd]_{veg}) = \alpha + \beta \times \log([Cd]_{soil,AR}) + \gamma \times \log(CEC) + \delta \times pH \quad (\text{式 6})$$

其中， $[Cd]_{veg}$ 代表蔬菜中推估鎘濃度 ($mg\ kg^{-1}$)， $[Cd]_{soil,AR}$ 代表土壤王水消化鎘濃度 ($mg\ kg^{-1}$)，CEC 為土壤陽離子交換容量 ($cmol\ kg^{-1}$)，pH 為土壤酸鹼值，常數項 α 是方程式的截距，常數項 β 、 γ 、 δ 分別是 $\log([Cd]_{soil,AR})$ 、 $\log(CEC)$ 、pH 的係數。計畫中各種蔬菜對應之方程式的截距與係數數值如表 3.3，研究中表示，當 CEC 值高時，會降低蔬菜對鎘的吸收，因為土壤中的黏粒和腐植酸對於重金屬離子有很強的吸附能力，CEC 高代表土壤中黏粒和腐植酸多，限制了重金屬離子在土壤中的活性。另外， $Cd(OH)_2$ 的溶解度積為 2.3×10^{-14} ，屬於難溶性化合物，所以鎘在鹼性土壤中溶解度降低，對植物毒性減小，相反的，鎘在酸性土壤中溶解度會增加，會增加對植物的毒性，所以 pH 值的升高會降低蔬菜對鎘的吸收。

行政院環保署與農委會農試所合作之 103 年度計畫「鎘污染潛在危害農地蔬菜安全性調查」中，為了瞭解鎘污染潛在風險農田蔬菜之安全性，並且評估全台農地不同蔬菜鎘污染潛在危害風險，進行鎘污染潛在危害農地適栽蔬菜種類規劃，將 101 年度計畫之中 $[Cd]_{soil,AR}$ 因子改成 $[Cd]_{soil,HCl}$ ，為了配合因子的改變，將各種蔬菜的截距以及係數作了修正，並另外加入其他 4 種蔬菜的截距以及係數。新的蔬菜鎘含量預測模式如下：

$$\log([Cd]_{veg}) = \alpha + \beta \times \log([Cd]_{soil,HCl}) + \gamma \times \log(CEC) + \delta \times pH \quad (\text{式 7})$$

其中 $[Cd]_{soil,HCl}$ 代表以 0.1M HCl 萃取出土壤鎘濃度 ($mg\ kg^{-1}$)，各蔬菜對應之方程式的截距與係數數值如表 3.4 所列。本研究取用了 101 年度計畫中的鎘含量預測模式及其中的莧菜、小白菜、甘藍等 3 種蔬菜其截距與係數，取代 103 年度計畫中莧菜、小白菜、甘藍的係數數據，也取用了 103 年度計畫中的蔬菜鎘含量預測模式及其餘 28 條蔬菜的截距和係數。

表 3.3 民國 101 年度計畫預測蔬菜鎘含量之參數表

| 蔬菜類別 | 項目 | 樣本數 | α | β | γ | δ | R^2 |
|----------------------|---------|-----|----------|---------|----------|----------|--------|
| 小葉菜類 | 葉用甘藷 | 141 | -0.5275 | 0.8200 | - | -0.1316 | 0.8353 |
| | 薤菜 | 273 | 0.1061 | 1.0832 | -0.4313 | -0.0758 | 0.9122 |
| | 莧菜 | 270 | 2.6336 | 1.1630 | -1.4235 | -0.2754 | 0.8999 |
| | 落葵 | 74 | 0.4526 | 1.1218 | - | -0.1785 | 0.9007 |
| | 韭菜 | 57 | 0.7889 | 0.8829 | - | -0.3161 | 0.9366 |
| | 紅鳳菜 | 65 | 0.5165 | 1.0537 | - | -0.1882 | 0.9330 |
| | 菠菜 | 176 | 0.5762 | 0.8970 | - | -0.1683 | 0.8999 |
| | 茼蒿 | 147 | 0.7842 | 1.0051 | - | -0.2557 | 0.9212 |
| | 青蔥 | 196 | 0.1031 | 0.8844 | - | -0.1669 | 0.8980 |
| | 尖葉萵苣 | 60 | 1.4171 | 0.8611 | -1.5737 | -0.1028 | 0.9383 |
| | 圓葉萵苣 | 60 | 0.5380 | 0.7575 | - | -0.1682 | 0.8845 |
| | 小白菜 | 98 | -0.1901 | 0.9808 | -0.5555 | -0.0499 | 0.9126 |
| | 青梗白菜 | 79 | -0.2826 | 0.9604 | -0.2600 | -0.0905 | 0.9533 |
| (半)結球 及花菜類等 蔬菜 | 結球白菜 | 273 | -0.8196 | 0.9093 | - | -0.0649 | 0.8627 |
| | 花椰菜 | 67 | -1.2332 | 0.6799 | - | -0.0635 | 0.8559 |
| | 甘藍 | 191 | -0.9384 | 0.6966 | - | -0.1186 | 0.9111 |
| | 明泉/健壽萵苣 | 73 | -0.6450 | 0.8020 | - | -0.0399 | 0.7859 |
| 根莖菜類 | 福壽/翠花萵苣 | 60 | 2.1587 | 0.7401 | -1.0655 | -0.2598 | 0.8984 |
| | 蘿蔔 | 193 | -0.7991 | 0.5425 | -0.1768 | -0.0863 | 0.7632 |
| | 胡蘿蔔 | 218 | -0.4414 | 0.5580 | - | -0.1788 | 0.9301 |
| 瓜菜及果菜 類 | 玉米 | 108 | -0.2655 | 0.5078 | - | -0.2048 | 0.7126 |
| | 番茄 | 160 | -0.6132 | 0.5247 | -0.4790 | -0.0465 | 0.8545 |
| | 甜椒 | 73 | -0.4332 | 0.5436 | -0.7706 | -0.0765 | 0.9181 |
| | 茄子 | 91 | -0.4675 | 1.0663 | - | -0.0686 | 0.8758 |
| | 胡瓜 | 48 | -0.6218 | 0.6284 | - | -0.2431 | 0.8025 |
| | 秋葵 | 84 | -0.0007 | 0.7502 | - | -0.1074 | 0.9318 |
| 豆類及豆菜 類 | 菜豆 | 78 | 2.2195 | 0.9571 | -2.8311 | -0.1713 | 0.6621 |

備註：1. “-”表該參數不顯著，未納入蔬菜鎘含量預測模式中

2. “ α ”是方程式的截距，“ β ”是 $\log([Cd]_{\text{soil,AR}})$ 的係數、“ γ ”是 $\log(\text{CEC})$ 的係數、“ δ ”是 pH 的係數

(林等，2014)

表 3.4 民國 103 年度計畫預測蔬菜鎘含量之參數表

| 蔬菜類別 | 項目 | 樣本數 | α | β | γ | δ | R^2 |
|-------------------|---------|-----|----------|---------|----------|----------|--------|
| 小葉菜類 | 葉用甘藷 | 141 | -0.3430 | 0.7881 | - | -0.1408 | 0.8122 |
| | 薤菜 | 142 | -0.1845 | 0.9316 | - | -0.0605 | 0.8981 |
| | 莧菜 | 251 | 3.0994 | 1.0559 | -0.2650 | -1.6439 | 0.8838 |
| | 落葵 | 60 | 1.0627 | 1.0746 | - | -0.2544 | 0.8402 |
| | 韭菜 | 57 | 0.8795 | 0.8690 | - | -0.3095 | 0.9383 |
| | 紅鳳菜 | 53 | 1.6443 | 1.0073 | -0.7475 | -0.2082 | 0.9189 |
| | 菠菜 | 190 | 1.1814 | 0.7278 | - | -0.2314 | 0.8582 |
| | 茼蒿 | 137 | 0.9189 | 1.0644 | - | -0.2646 | 0.8881 |
| | 青蔥 | 76 | 0.9838 | 0.7701 | - | -0.3022 | 0.8866 |
| | 尖葉萵苣 | 60 | 1.5405 | 0.8614 | -1.6078 | -0.1005 | 0.8890 |
| | 圓葉萵苣 | 60 | 0.5681 | 0.7834 | - | -0.1600 | 0.8531 |
| | 小白菜 | 56 | 0.5527 | 0.8828 | -1.3693 | * | 0.9350 |
| | 青梗白菜 | 42 | -0.1910 | 0.7872 | - | -0.1161 | 0.9548 |
| | 芹菜 | 132 | -0.2801 | 0.7687 | - | -0.0719 | 0.8610 |
| (半)結球類 及花菜類等蔬菜 | 結球白菜 | 228 | -0.5931 | 0.7940 | - | -0.0712 | 0.8339 |
| | 花椰菜 | 47 | 0.0296 | 0.6751 | -1.1503 | -0.0635 | 0.8459 |
| | 甘藍 | 102 | -0.3852 | 0.4883 | * | 0.1870 | 0.7628 |
| | 明泉/健壽萵苣 | 74 | -0.7972 | 0.8026 | - | - | 0.7119 |
| | 福壽/翠花萵苣 | 60 | 2.3474 | 0.7556 | -1.1811 | -0.2608 | 0.9000 |
| | 青花菜 | 50 | -1.5574 | 0.9639 | - | - | 0.9252 |
| 根莖菜類 | 蘿蔔 | 73 | -0.6770 | 0.5905 | - | -0.1305 | 0.8376 |
| | 胡蘿蔔 | 91 | -0.1981 | 0.5795 | - | -0.1105 | 0.9058 |
| 瓜菜及果菜類 | 玉米 | 79 | -0.3485 | 0.3881 | - | -0.1674 | 0.6252 |
| | 番茄 | 152 | -0.3689 | 0.4394 | -0.5548 | -0.0566 | 0.8291 |
| | 甜椒 | 53 | -1.4514 | 0.3849 | - | - | 0.9258 |
| | 茄子 | 103 | -0.7912 | 0.8660 | - | - | 0.8664 |
| | 秋葵 | 101 | 0.1866 | 0.8085 | - | -0.1285 | 0.9242 |
| | 胡瓜 | 87 | -1.0877 | 0.8110 | - | -0.1683 | 0.9269 |
| | 絲瓜 | 86 | -1.8735 | 0.8246 | - | - | 0.8959 |
| 鱗莖類 | 大蒜 | 20 | -0.6572 | 0.8188 | - | - | 0.6718 |
| 豆類及豆菜類 | 菜豆 | 69 | 1.7753 | 0.9239 | -2.2035 | -0.1833 | 0.6587 |

備註：1. “-”表該參數不顯著，未納入蔬菜鎘含量預測模式中，“*”表未明載

2. “ α ”是方程式的截距，“ β ”是 $\log([Cd]_{soil,HCl})$ 的係數、“ γ ”是 $\log(CEC)$ 的係數、“ δ ”是 pH 的係數
(林等, 2014)

3.2.3 國土利用調查成果引入

民國 84 年時，內政部結合中央及地方地政、戶政及稅捐等機關的力量，進行了一次全國性的土地利用調查作業，利用地面調查方式取得當時已登記土地的使用狀況，做為土地管制作業的依據。但是隨著全球經濟的蓬勃發展，土地利用的變化加速而且利用方式越趨複雜，導致先前的土地利用資料不敷使用、準確性不足，因此，民國 95 年度起辦理了第二次的全國性土地使用分類調查，主要目標是使所生產國土利用調查成果的資料規格與品質能滿足國土計畫及其他相關決策分析與應用研究之需求（國土利用調查成果資訊網，2015）。本研究將取用第二次國土利用調查成果做為本研究的材料，由內政部執行的第二次國土利用調查結果，根據使用的目的，將第一級土地利用分為 9 大類，分別是：農業用地、森林用地、交通用地、水利用地、建築用地、公共用地、遊憩用地、礦鹽用地、及其他用地，每個大類的土地利用下面還會細分成數類（第二級），每個小類下面又會再細分成數類（第三級），以本研究要選取地土地使用類別為例：第一級的農業用地這一類土地利用可以再往下細分為第二級的農作、水產養殖、畜牧和農業附帶設施等 4 類土地利用方式，其中，第二級的農作地可以再細分為第三級的稻作、旱作、果樹及廢耕地等 4 類使用情況。因為本研究欲研究範圍是雲林縣種植蔬菜的農地，所以決定在第一級選取農業用地，第二級選擇農作地，最後第三級選擇旱作地作為研究農地範圍。

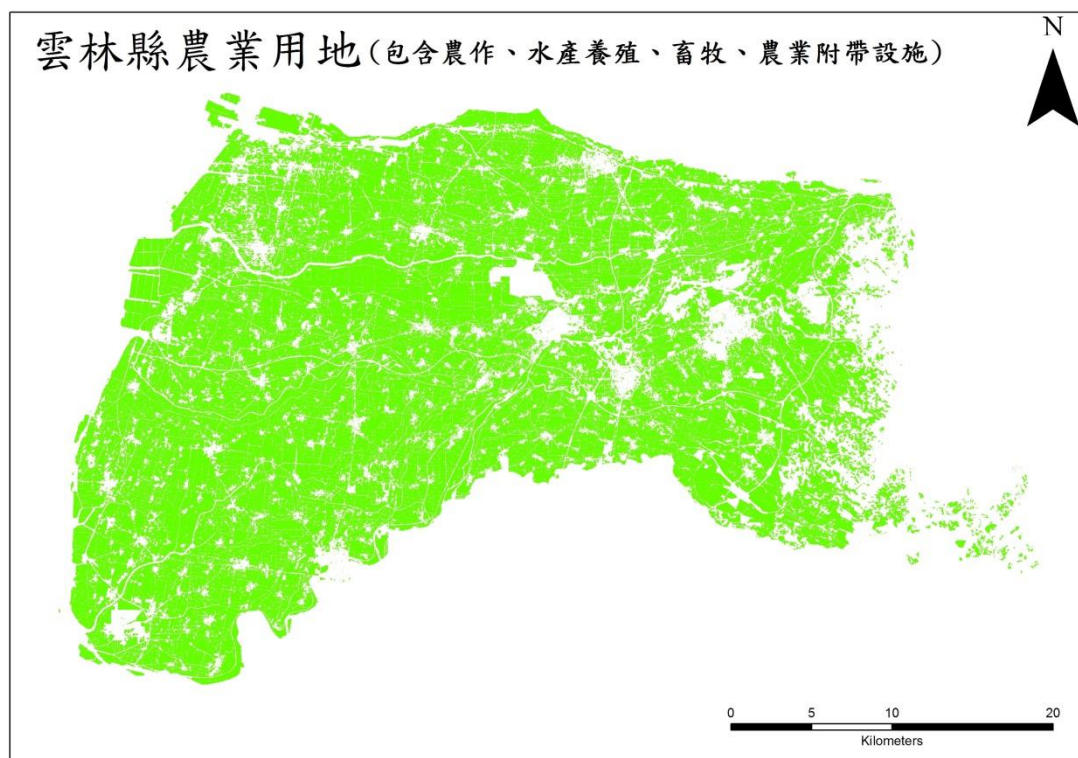
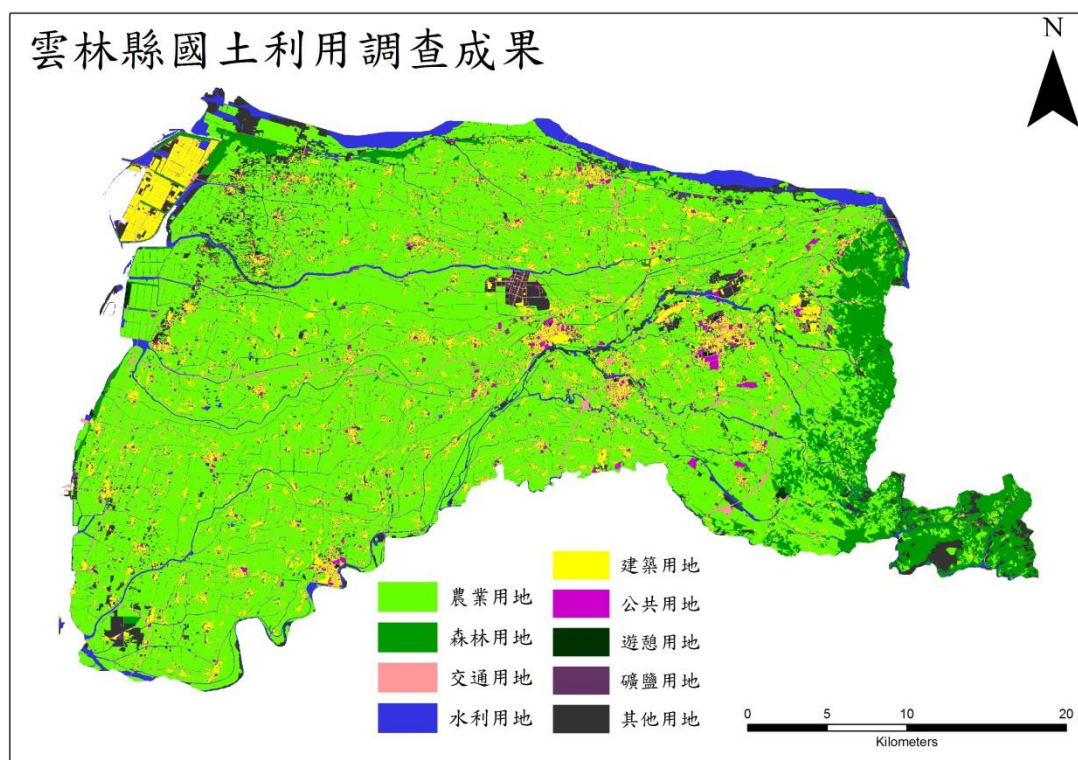
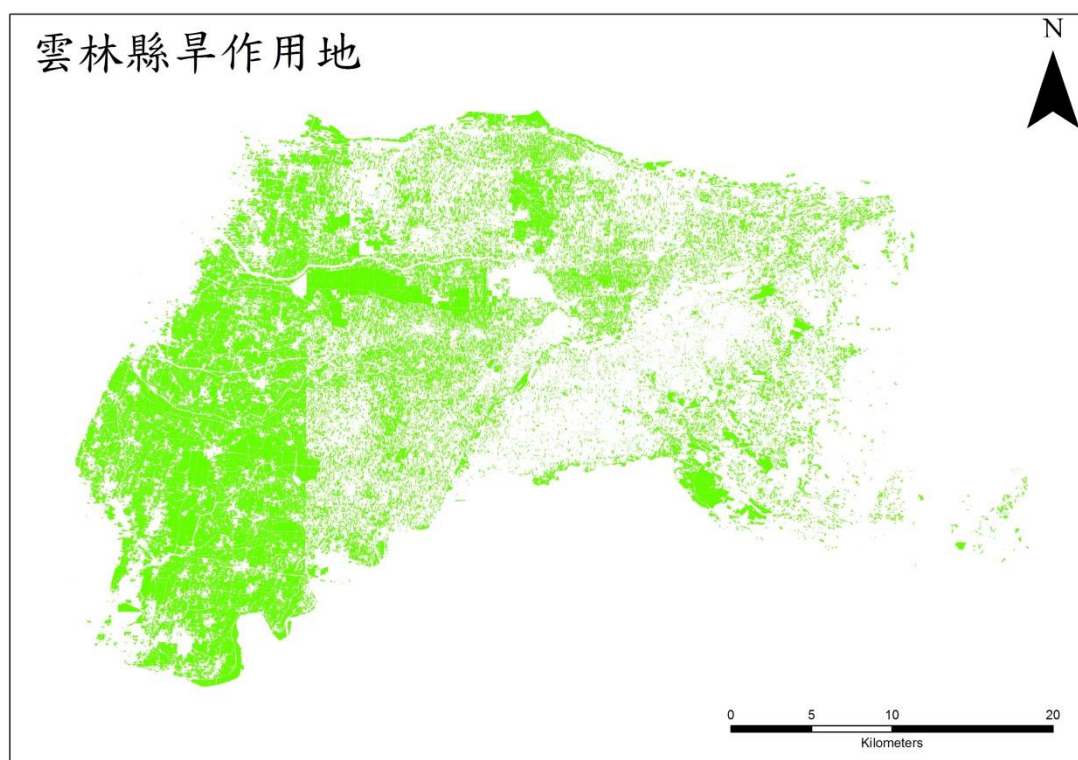
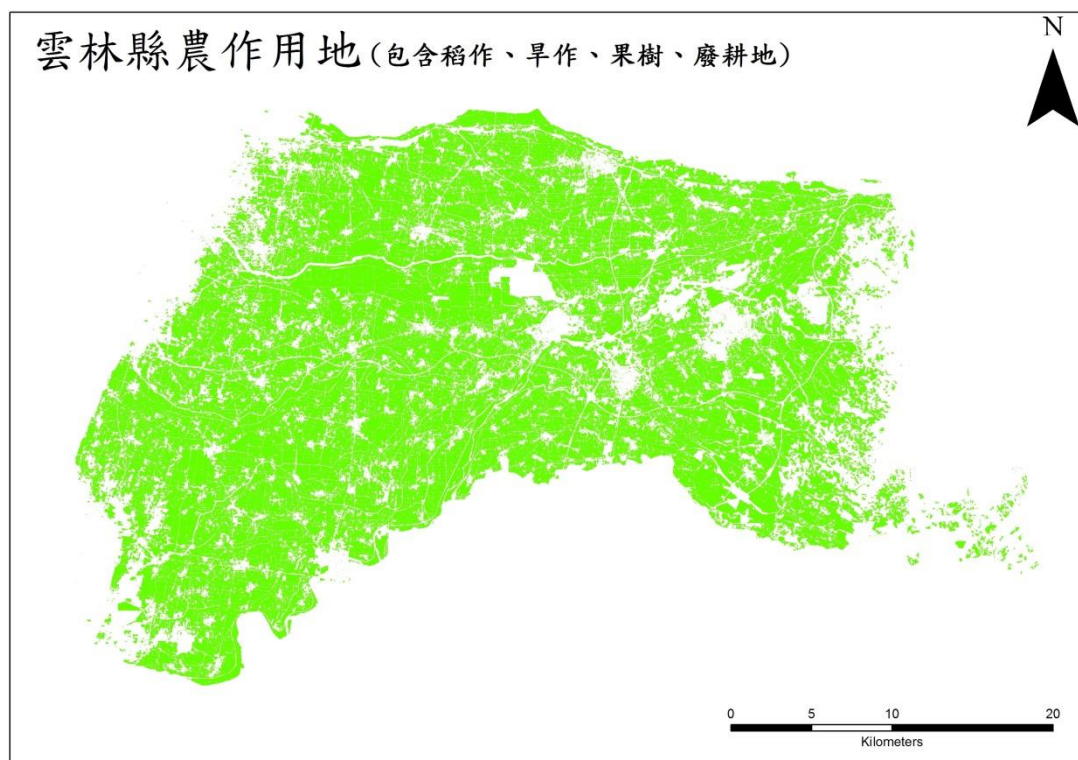


圖 3.3 雲林縣土地利用分布圖



(內政部國土測繪中心，2007)

圖 3.3 雲林縣土地利用分布圖 (續)

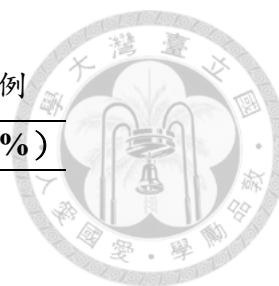


表 3.5 國土利用調查之第一級土地利用面積及比例

| 土地利用情況 | 使用面積（公頃） | 使用比例（%） |
|--------|----------|---------|
| 農業用地 | 87840.90 | 63.45 |
| 森林用地 | 10354.19 | 7.48 |
| 交通用地 | 8075.35 | 5.83 |
| 水利用地 | 11132.43 | 8.04 |
| 建築用地 | 10318.10 | 7.45 |
| 公共用地 | 1129.24 | 0.82 |
| 遊憩用地 | 355.11 | 0.26 |
| 礦岩用地 | 165.48 | 0.12 |
| 其他用地 | 9060.74 | 6.55 |

（內政部國土測繪中心，2007）

表 3.6 農業用地之第二級土地利用面積及比例

| 土地利用情況 | 使用面積（公頃） | 使用比例（%） |
|--------|-------------|---------|
| 農作 | 77342.18463 | 88.05 |
| 水產養殖 | 7799.1672 | 8.88 |
| 畜牧 | 1991.077 | 2.27 |
| 農業附帶設施 | 710.17615 | 0.81 |

（內政部國土測繪中心，2007）

表 3.7 農作地之第三級土地利用面積及比例

| 土地利用情況 | 使用面積（公頃） | 使用比例（%） |
|--------|-------------|---------|
| 稻作 | 22563.15628 | 29.17 |
| 旱作 | 44111.83245 | 57.03 |
| 果樹 | 9339.449174 | 12.08 |
| 廢耕地 | 1327.746728 | 1.72 |

（內政部國土測繪中心，2007）

3.2.4 蔬菜消費量

農委會官方網站中提供了各種農業統計資料查詢及下載的服務，包含民國 97 年至民國 102 年，共 6 年份之糧食供需年報，每一年份的糧食供需年報中紀載了國內糧食生產量、糧食進口量、糧食出口量、國內糧食供給量、糧食毛供給量、每人每年糧食供給量、每人每日糧食供給量、每人每日熱量供給量、每人每日蛋白質供給量、每人每日脂肪供給量，在每人每年糧食供給量這部分中，記錄了當年度及過去 9 年份的各類別糧食供給量，包括穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類、蔬菜類、果品類、肉類、蛋類、水產類、乳品類、油脂類及酒類，在穀類中可以細分為米、小麥、玉米、高粱、其他等 5 類，在蔬菜類中又可再細分為葉菜類、根菜類、莖菜類、花果菜類及菇類等 5 類。本研究取用了民國 102 年份的糧食供需年報，參考了民國 98 年至 102 年間的玉米、葉菜類、根菜類、花果菜類的每人每年糧食供給量作為研究使用的材料。



3.3 研究方法

3.3.1 推估雲林縣農地蔬菜鎘含量

將農試所在雲林縣境內，以間隔 250 公尺為單位網格式土壤調查的 14272 筆調查資料（包含土壤鎘濃度、土壤 pH）以克利金法推估成在雲林縣境內，間隔 50 公尺的網格式 53 萬多個點（只有土壤 CEC 值的方面，本研究使用了有土壤 CEC 資料的 7044 點資料加上農委會 94 年度計畫「畜牧場已處理水採土壤利用對環境及作物影響之研究」中位於雲林縣西部的 48 筆資料作克利金推估），再將 53 萬多個點套入邊長為 50 公尺、組成雲林形狀的面之中，使每個面都擁有土壤鎘濃度、CEC、土壤 pH 等 3 個參數，再將上述 3 個參數代入環保署與農試所合作建立的蔬菜鎘含量推估模式，以推估雲林縣不同蔬菜鎘含量，最後將土地利用中的旱作地面資料套疊上去，即可進行雲林縣旱地蔬菜鎘濃度的推估，輔以地理資訊系統，用不同的顏色表示推估的蔬菜鎘濃度的高低，清楚地呈現高蔬菜鎘濃度的範圍。

3.3.2 國人蔬菜攝食安全評析

本研究經由推估得到了 31 種蔬菜的推估平均鎘濃度，欲以此推估結果大致檢視國人食用這些蔬菜的健康安全性，首先將民國 102 年度的糧食供需年報中，從民國 98 年度到民國 102 年度，共 5 年的各大類蔬菜食用量取平均值，並依照研究需要將不同蔬菜的推估鎘濃度與各大類蔬菜食用量依照下列式子計算：

$$\text{食用蔬菜獲取的鎘} = \text{蔬菜鎘濃度} \times \text{蔬菜食用量} \quad (\text{式 8})$$

即可算出人體經由食用蔬菜得到的鎘，將計算出來的值經過單位的轉換和 WHO 訂定的人體攝取鎘標準做比較，檢視食用 31 種蔬菜的安全性。

3.3.3 蔬菜鎘含量預測模式中各種係數的敏感度分析

有關鎘含量預測模式中 β ($\log([Cd]_{soil,AR})$ 的係數)、 γ ($\log(CEC)$ 的係數)、 δ (pH 的係數) 三者中何者對於蔬菜中的鎘影響最大，本研究經由蜘蛛網圖 (Spider Plot) 做分析，以土壤參數變動量為橫軸 (單位：%)，將推估在雲林縣旱地的土壤鎘濃度、CEC、pH 等土壤資料，各別取最大值、最小值以及兩者之間算過適當距離取的若干個數值點，將土壤鎘濃度、CEC、pH 依照一樣的規則在這些數值點中找出一個固定點，計算其他數值點相對固定點的變動量，首先將 CEC、pH 固定在固定點，將土壤鎘濃度值以固定點為起點，移動至之前選好的若干個數值點，並且將該數值點與固定的 CEC、pH 代入某種蔬菜的鎘含量預測模式，看在 CEC、pH 固定情況下，土壤鎘濃度的變化對於蔬菜鎘含量 (縱軸，單位： $mg\ kg^{-1}$) 的影響；同理，接著看土壤鎘濃度及 pH 固定在固定點的情況下，CEC 的變化對於蔬菜鎘含量的影響；最後，看土壤鎘濃度及 CEC 固定在固定點的情況下，pH 的變化對於蔬菜鎘含量的影響。

本研究選的固定點為土壤鎘濃度、CEC、pH 的中位數。本研究選用四種蔬菜的鎘含量預測模式互相比較敏感度分析的結果，第一種是蔬菜鎘含量預測模式中有 β 、 γ 、 δ 、 R^2 高且 γ 不高的蔬菜，以紅鳳菜為例；第二種是蔬菜鎘含量預測模式中有 β 、 γ 、 δ 、 R^2 高且 γ 比較高的蔬菜，以尖葉萵苣為例，主要在比較 γ 的高低對於 CEC 變動時對蔬菜鎘含量的影響；第三種是蔬菜鎘含量預測模式中缺少 γ 、 R^2 高且 δ 不高的蔬菜，以秋葵為例；第四種是蔬菜鎘含量預測模式中缺少 γ 、 R^2 高且 δ 比較高的蔬菜，以韭菜為例，主要在比較 δ 的高低對於 pH 變動時對蔬菜鎘含量的影響。



第四章 結果與討論



4.1 雲林縣土壤參數與推估結果之統計

4.1.1 農試所土壤調查資料之分析

本研究將農試所在雲林縣境內表土調查數據整理如表 4.1，以 0.1M HCl 萃取測得土壤鎘濃度資料 14272 筆當中，測得最大值約為 2.36 mg kg^{-1} ，次高者約為 2.05 mg kg^{-1} ，但雲林縣境內土壤鎘濃度大於 2 mg kg^{-1} 者僅此 2 筆，土壤鎘濃度絕大部分集中在最小值的 0.04 mg kg^{-1} 到 0.20 mg kg^{-1} 之間，平均值為 0.17 mg kg^{-1} ，中位數為 0.13 mg kg^{-1} ，代表雲林縣的土壤鎘濃度普遍是偏低的。在雲林縣境內測得土壤 pH 值 14272 筆當中，有 8000 多筆測得土壤屬於鹼性，其餘 5000 多筆屬於酸性，但酸性土壤中 pH 值大於 6 者有 2600 餘筆，表示雲林縣土壤總體來說不會很酸，屬於偏鹼性的土壤，不過看圖可以發現雲林縣境內的 pH 值有東酸西鹼的趨勢。在雲林縣境內測得 CEC 值 7044 筆外加農委會 94 年度計畫「畜牧場已處理水採土壤利用對環境及作物影響之研究」中，雲林縣西部採樣之 CEC 值 48 筆當中，CEC 值數據範圍非常廣，最大值為 $31.29 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，最小值則低到 $0.57 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，有 4300 餘筆數據集中在大約 $3.5\text{-}7.5 \text{ cmol kg}^{-1}$ 之間，絕大多數集中在大約 $1.0\text{-}12.0 \text{ cmol kg}^{-1}$ 之間。

表 4.1 雲林縣土壤調查資料統計

| | Cd (mg kg^{-1}) | pH | CEC (cmol kg^{-1}) |
|-----|----------------------------|-------|-------------------------------|
| 平均值 | 0.17 | 6.80 | 6.38 |
| 標準差 | 0.144 | 1.26 | 2.66 |
| 最大值 | 2.36 | 9.41 | 31.29 |
| 最小值 | 0.044 | 2.68 | 0.57 |
| 中位數 | 0.13 | 7.27 | 5.94 |
| 樣本數 | 14272 | 14272 | 7092 |

(資料來源：農試所)

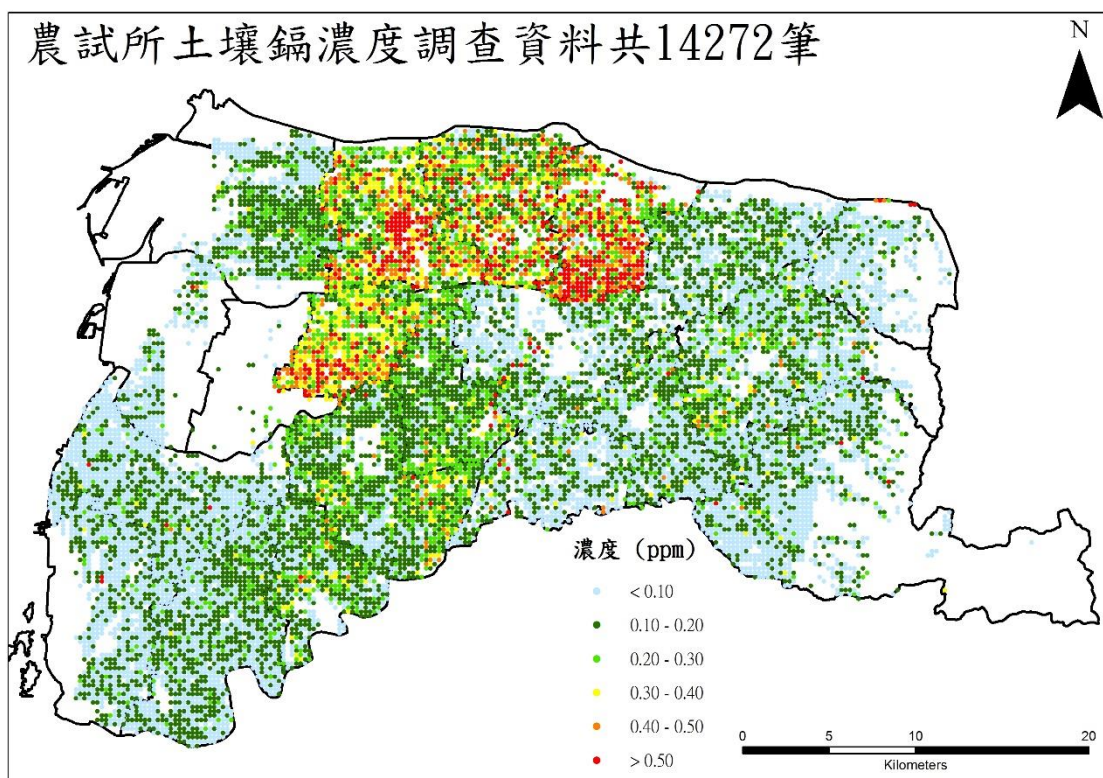


圖 4.1 農試所土壤調查鎘濃度

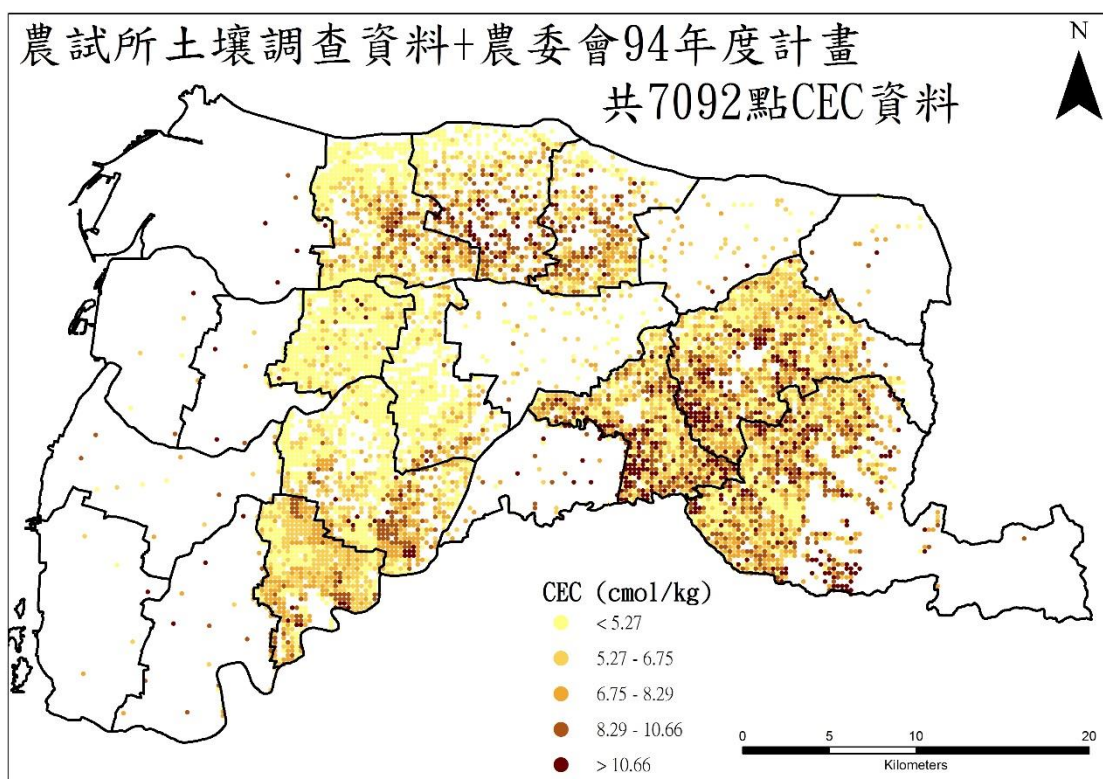


圖 4.2 農試所土壤調查 CEC (含增添資料)

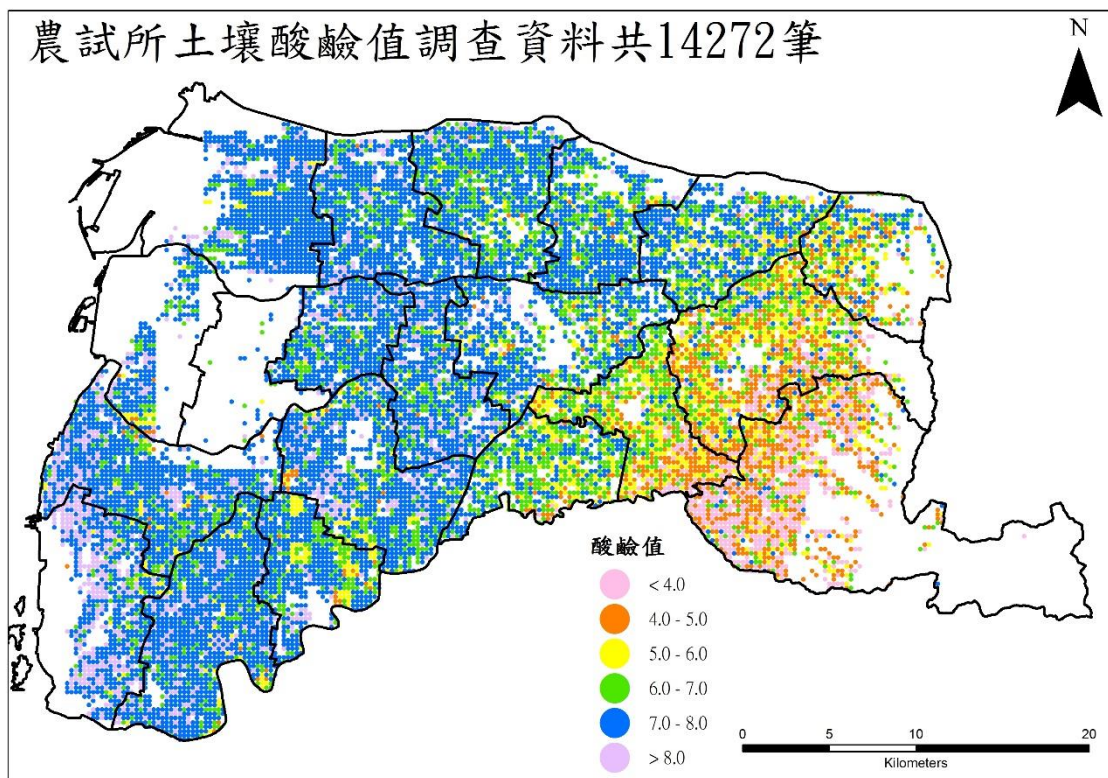


圖 4.3 農試所土壤調查酸鹼值



4.1.2 經克利金推估之農地土壤參數之統計

(一) 半變異元函數值

利用 GS⁺軟體推估土壤鎘濃度、CEC、pH 的半變異元參數如下表 4.2：

表 4.2 克利金推估半變異元函數參數表

| | 土壤鎘濃度 | CEC | pH |
|-----------------------------|-------------|-------------|------------|
| Active lag distance | 20000 | 23000 | 23000 |
| Lag class distance interval | 2000 | 2000 | 2200 |
| Type | Exponential | Exponential | gaussian |
| C ₀ | 0.00967 | 3.7 | 0.64 |
| Range | 30900 | 10650 | 30743.9018 |
| Residual SS | 1.641E-07 | 0.81 | 0.001808 |
| R ² | 0.999 | 0.894 | 0.998 |
| C/(C+C ₀) | 0.649 | 0.5 | 0.65 |

(二) 經克利金推估之農地土壤參數圖

經過克利金推估之後的土壤鎘濃度，其濃度較高的地方變得比較聚集在某幾個區塊，且鎘濃度的極值經過削減，最大值由 2.36 mg kg⁻¹ 變成 0.71 mg kg⁻¹，但是整體土壤鎘濃度分布特性沒變，主要仍是分布在 0.05 mg kg⁻¹ 到 0.20 mg kg⁻¹ 之間，平均值則略升到 0.172 mg kg⁻¹ 左右，中位數仍是 0.13 mg kg⁻¹，表示雲林縣境內整體鎘濃度還是低的。土壤 pH 經過克利金推估後，在雲林縣農地表現出來則是明顯鹼性土壤比較多，大約有將近 7 成的 pH 值資料大於 7，其中資料大多集中在 pH7-8 的區間，中位數落在 7.28。雲林縣農地 pH 值的分佈，明顯是東半部農地 pH 值偏酸，西半部農地偏向鹼性。經克利金推估之後的 CEC 跟土壤鎘濃度有些相似，CEC 高的地方也有小塊聚集的現象，且其最大值經過削減變成 15.85 cmol kg⁻¹，最小值也被拉升到 2.32 cmol kg⁻¹，有將近 8 成的數據集中在 4.5-8.5 cmol kg⁻¹ 之間，在這區間之外的 CEC 極高值則是很稀少。將克利金推估後之土壤鎘濃度、CEC 及 pH 數據統計如表 4.3：

表 4.3 克利金推估土壤鎘濃度、CEC 及 pH 數據之統計

| | 樣本數 | 平均值 | 標準差 | 最小值 | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 最大值 |
|-----|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Cd | 409551 | 0.172 | 0.103 | 0.02 | 0.08 | 0.10 | 0.13 | 0.21 | 0.34 | 0.71 |
| CEC | 409551 | 6.587 | 1.722 | 2.32 | 4.49 | 5.37 | 6.45 | 7.64 | 8.72 | 15.85 |
| pH | 409551 | 6.950 | 0.901 | 3.61 | 5.39 | 6.82 | 7.28 | 7.51 | 7.66 | 8.39 |

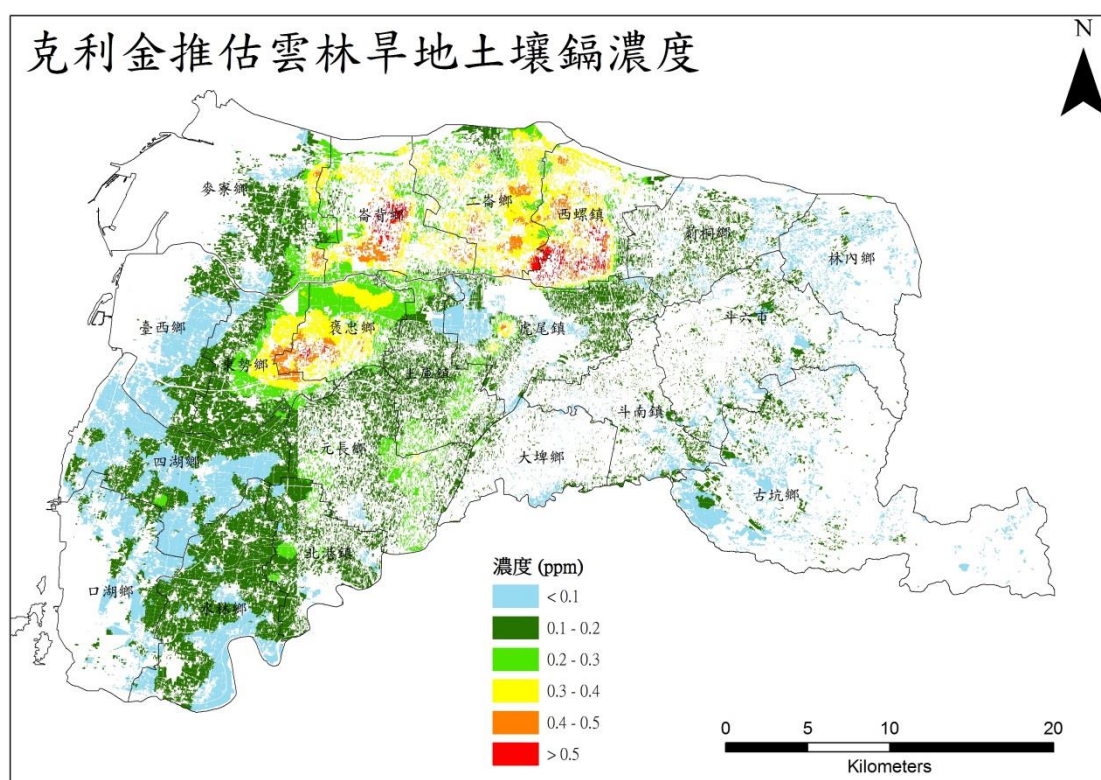


圖 4.4 克利金推估雲林旱地土壤鎘濃度分佈

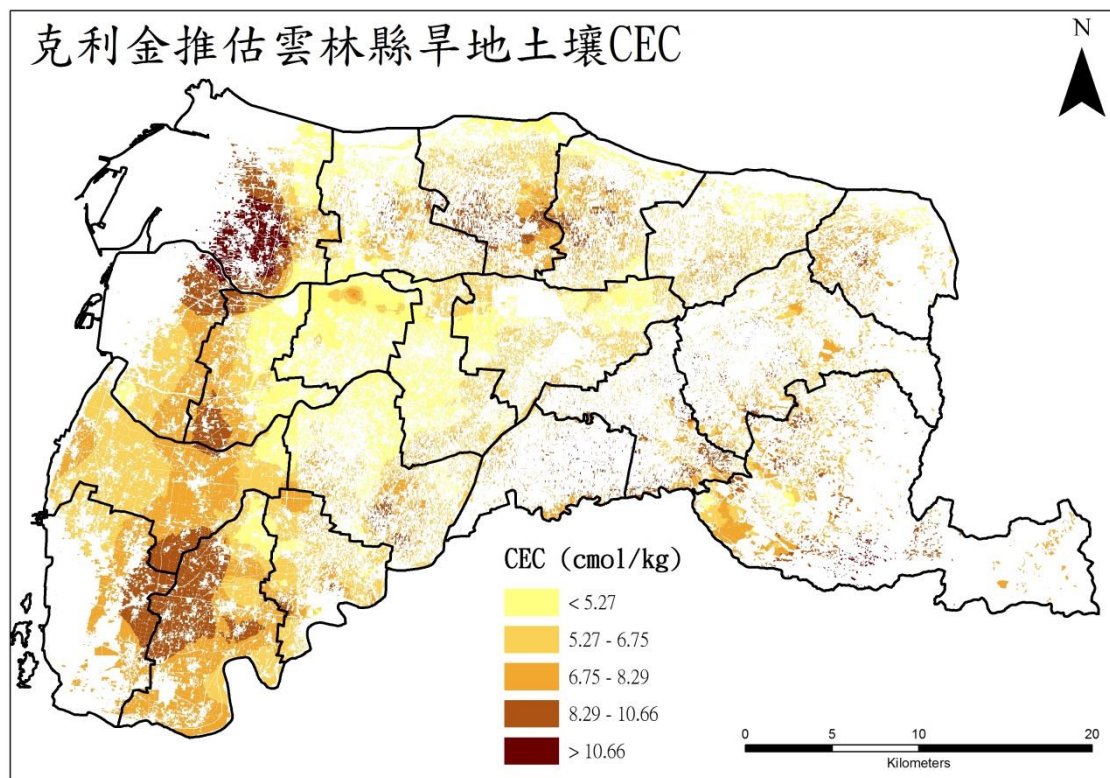


圖 4.5 克利金推估雲林旱地土壤 CEC 分佈

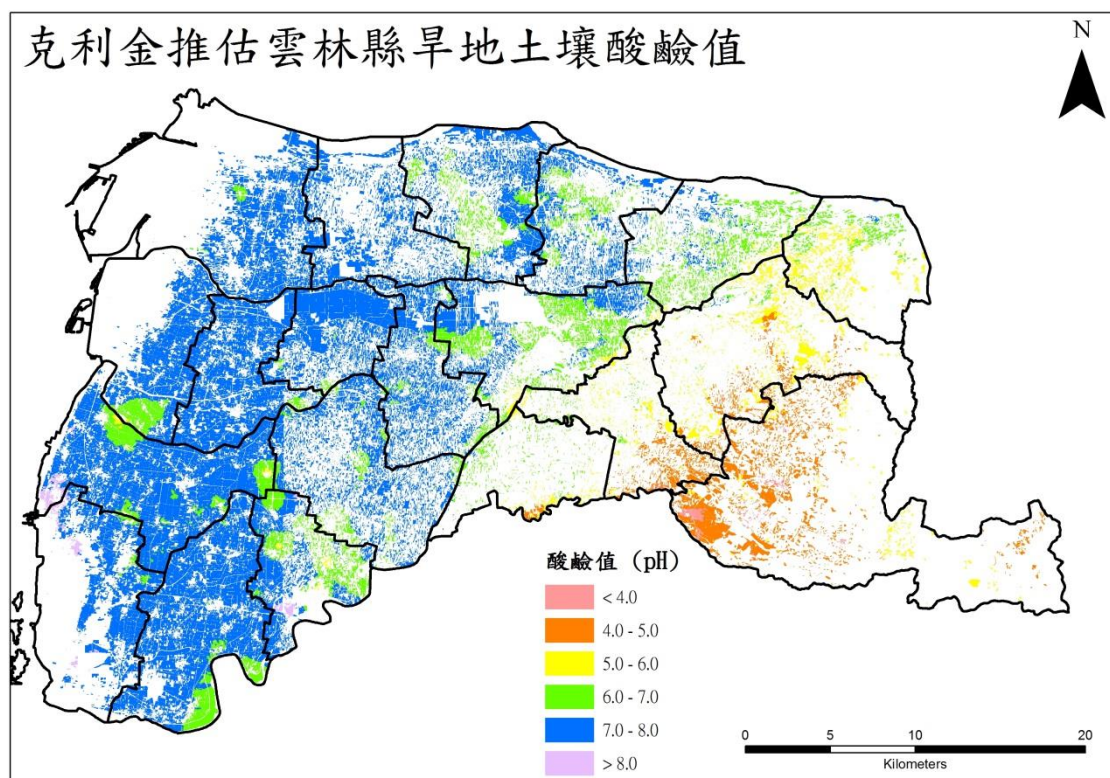


圖 4.6 克利金推估雲林旱地土壤酸鹼值分佈




4.2 檢視雲林縣農地蔬菜鎘含量推估結果

4.2.1 檢視雲林縣農地蔬菜鎘含量推估結果

(一) 推估各種蔬菜的平均鎘濃度

各種蔬菜鎘濃度推估彙整如表 4.4，藉由表分析，雲林縣農地推估之 31 種蔬菜平均鎘濃度由高至低的排序為：福壽/翠花萵苣>菠菜>尖葉萵苣>圓葉萵苣>莧菜>紅鳳菜>大蒜>秋葵>芹菜>明泉/健壽萵苣>胡蘿蔔>茄子>落葵>番茄>青梗白菜>小白菜>青蔥>茼蒿>結球白菜>甜椒>玉米>花椰菜>蘿菜>韭菜>菜豆>葉用甘藷>蘿蔔>甘藍>青花菜>絲瓜>胡瓜。本研究發現蔬菜推估平均鎘濃度前 5 高者其平均鎘濃度分別約為 0.110 mg kg^{-1} 、 0.107 mg kg^{-1} 、 0.085 mg kg^{-1} ， 0.071 mg kg^{-1} 和 0.070 mg kg^{-1} ，由表中推估蔬菜鎘濃度分佈來看，推估平均鎘濃度最高的福壽/翠花萵苣整體的推估鎘濃度會普遍高於其他所有蔬菜。兩種推估平均鎘濃度差不多的蔬菜，如圓葉萵苣和莧菜，雖然前者推估平均鎘濃度比較高，但推估平均鎘濃度稍低的莧菜其標準差較大，使得莧菜的推估鎘濃度範圍比圓葉萵苣大，意即其推估鎘濃度比較低的區段會比圓葉萵苣低，但是推估鎘濃度比較高的區段更會比圓葉萵苣高，因此推估平均鎘濃度比較低的蔬菜也可能會出現高推估鎘濃度的情況，本研究發現類似的情況也可以從蘿菜、韭菜、菜豆的之間推估鎘濃度比較中找到。另外，本研究發現蔬菜推估鎘濃度最低 5 者其平均鎘濃度分別約為 0.001 mg kg^{-1} 、 0.003 mg kg^{-1} 、 0.005 mg kg^{-1} ， 0.006 mg kg^{-1} 和 0.009 mg kg^{-1} 。

表 4.4 雲林縣蔬菜推估鎘濃度之統計



| 蔬菜 | 平均 | 標準差 | 最小值 | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 最大值 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 福壽/翠花萵苣 | 0.110 | 0.068 | 0.013 | 0.037 | 0.054 | 0.097 | 0.147 | 0.202 | 0.586 |
| 菠菜 | 0.107 | 0.062 | 0.020 | 0.051 | 0.064 | 0.088 | 0.131 | 0.189 | 0.512 |
| 尖葉萵苣 | 0.085 | 0.060 | 0.008 | 0.030 | 0.041 | 0.067 | 0.109 | 0.166 | 0.534 |
| 圓葉萵苣 | 0.071 | 0.032 | 0.015 | 0.037 | 0.046 | 0.062 | 0.089 | 0.119 | 0.234 |
| 莧菜 | 0.070 | 0.052 | 0.004 | 0.017 | 0.027 | 0.056 | 0.099 | 0.142 | 0.388 |
| 紅鳳菜 | 0.069 | 0.041 | 0.008 | 0.025 | 0.035 | 0.059 | 0.094 | 0.130 | 0.258 |
| 大蒜 | 0.051 | 0.025 | 0.009 | 0.028 | 0.033 | 0.041 | 0.061 | 0.091 | 0.166 |
| 秋葵 | 0.046 | 0.020 | 0.011 | 0.025 | 0.030 | 0.041 | 0.057 | 0.077 | 0.155 |
| 芹菜 | 0.041 | 0.017 | 0.011 | 0.024 | 0.029 | 0.037 | 0.049 | 0.068 | 0.127 |
| 明泉/健壽萵苣 | 0.038 | 0.018 | 0.007 | 0.021 | 0.025 | 0.031 | 0.046 | 0.067 | 0.121 |
| 胡蘿蔔 | 0.038 | 0.012 | 0.013 | 0.024 | 0.028 | 0.035 | 0.046 | 0.056 | 0.093 |
| 茄子 | 0.035 | 0.018 | 0.005 | 0.018 | 0.022 | 0.028 | 0.042 | 0.064 | 0.120 |
| 落葵 | 0.031 | 0.021 | 0.003 | 0.011 | 0.016 | 0.024 | 0.041 | 0.062 | 0.174 |
| 番茄 | 0.028 | 0.008 | 0.011 | 0.018 | 0.021 | 0.027 | 0.033 | 0.039 | 0.060 |
| 青梗白菜 | 0.024 | 0.010 | 0.006 | 0.013 | 0.016 | 0.022 | 0.030 | 0.040 | 0.079 |
| 小白菜 | 0.023 | 0.014 | 0.003 | 0.010 | 0.013 | 0.018 | 0.029 | 0.045 | 0.085 |
| 青蔥 | 0.022 | 0.018 | 0.003 | 0.009 | 0.011 | 0.016 | 0.025 | 0.041 | 0.164 |
| 茼蒿 | 0.019 | 0.014 | 0.002 | 0.007 | 0.010 | 0.015 | 0.025 | 0.039 | 0.115 |
| 結球白菜 | 0.019 | 0.008 | 0.005 | 0.011 | 0.013 | 0.017 | 0.023 | 0.032 | 0.062 |
| 甜椒 | 0.017 | 0.004 | 0.008 | 0.013 | 0.015 | 0.016 | 0.019 | 0.023 | 0.031 |
| 玉米 | 0.016 | 0.006 | 0.006 | 0.010 | 0.012 | 0.014 | 0.018 | 0.023 | 0.051 |
| 花椰菜 | 0.014 | 0.008 | 0.003 | 0.007 | 0.009 | 0.012 | 0.018 | 0.025 | 0.058 |
| 薤菜 | 0.013 | 0.007 | 0.002 | 0.006 | 0.008 | 0.011 | 0.016 | 0.023 | 0.052 |
| 韭菜 | 0.013 | 0.011 | 0.001 | 0.005 | 0.006 | 0.009 | 0.015 | 0.025 | 0.100 |
| 菜豆 | 0.013 | 0.011 | 0.001 | 0.003 | 0.005 | 0.010 | 0.016 | 0.026 | 0.128 |
| 葉用甘藷 | 0.012 | 0.005 | 0.003 | 0.006 | 0.008 | 0.010 | 0.015 | 0.019 | 0.038 |
| 蘿蔔 | 0.009 | 0.003 | 0.003 | 0.006 | 0.007 | 0.008 | 0.011 | 0.014 | 0.023 |
| 甘藍 | 0.006 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.007 | 0.009 | 0.016 |
| 青花菜 | 0.005 | 0.003 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.006 | 0.010 | 0.020 |
| 絲瓜 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.004 | 0.005 | 0.010 |
| 胡瓜 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.004 |

註：鎘濃度單位為 mg kg^{-1} 。

(二) 各種蔬菜鎘濃度推估分佈圖

將農試所在雲林縣境內，以間隔 250 公尺為單位網格式土壤調查的調查資料（包含土壤鎘濃度、CEC、土壤 pH）以克利金法推估成 53 萬多個邊長為 50 公尺、組成雲林形狀的面之中，再將 3 個參數代入蔬菜鎘含量推估模式，以推估雲林縣不同蔬菜鎘含量，最後將旱作地資料套疊上去，形成雲林縣旱地蔬菜鎘濃度的推估，將推估出來的蔬菜濃度以五種不同顏色在空間中呈現，利用顏色在空間上的變化可以明顯看出雲林縣農地蔬菜鎘含量分布情形。

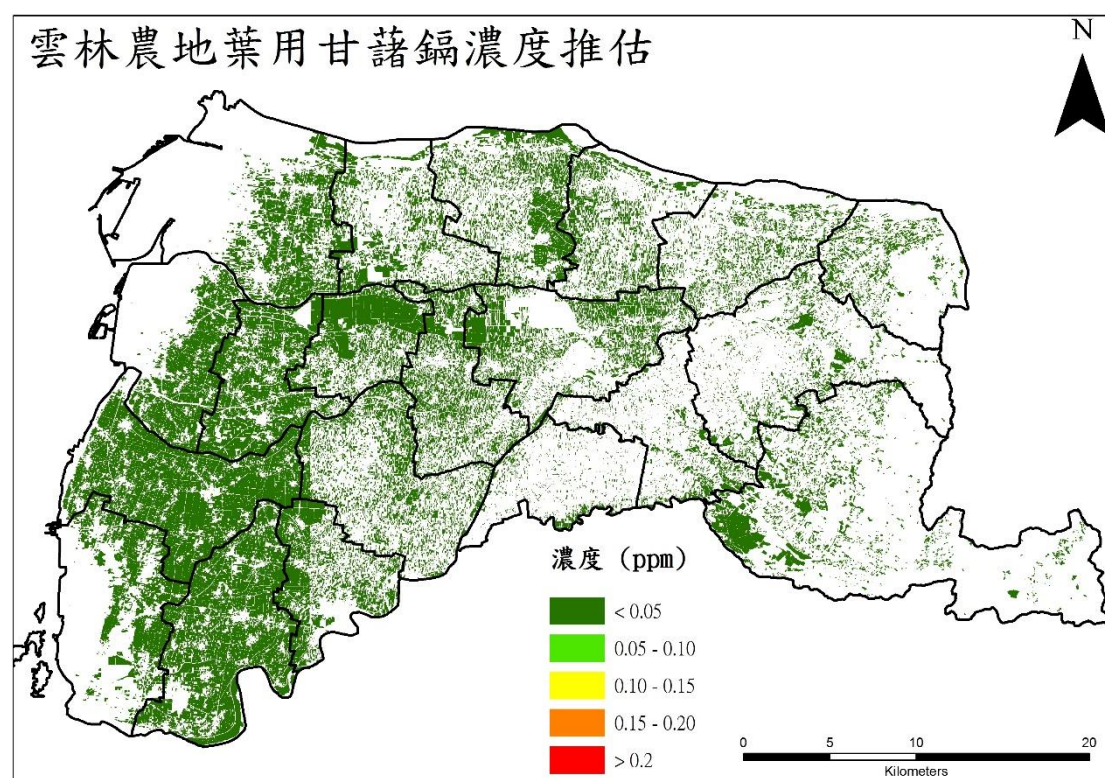


圖 4.7 雲林旱地種植葉用甘藷鎘濃度推估分佈圖

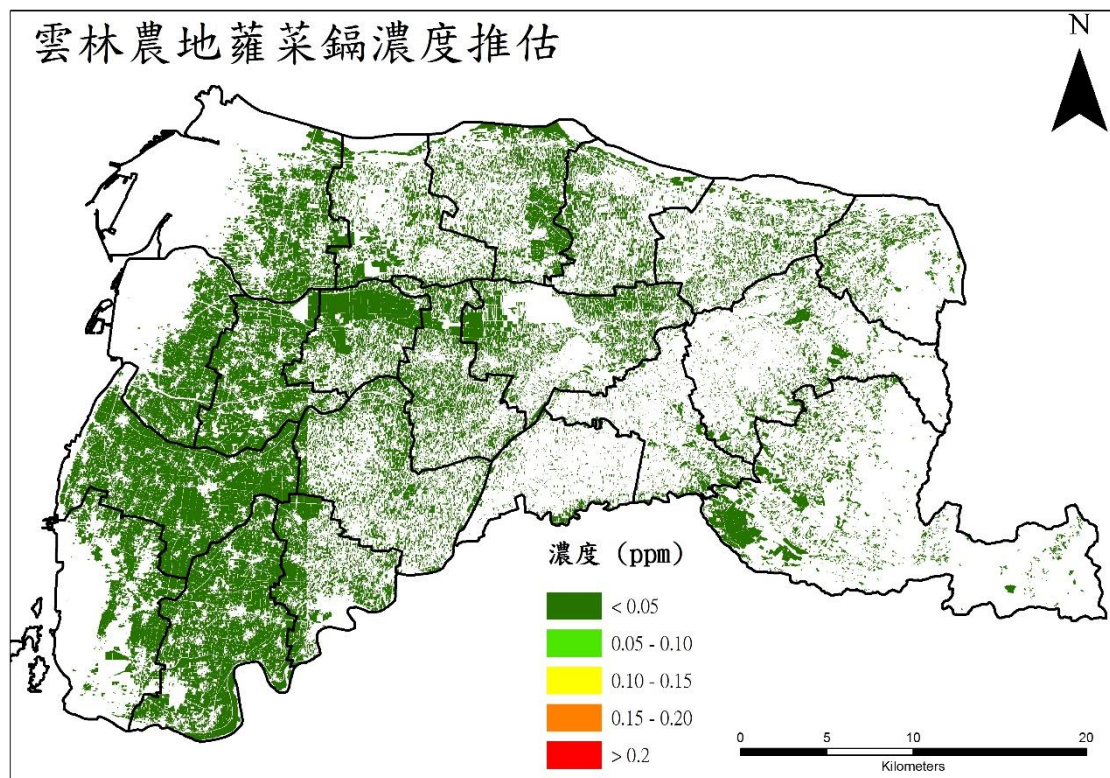


圖 4.8 雲林旱地種植蕹菜鎘濃度推估分佈圖

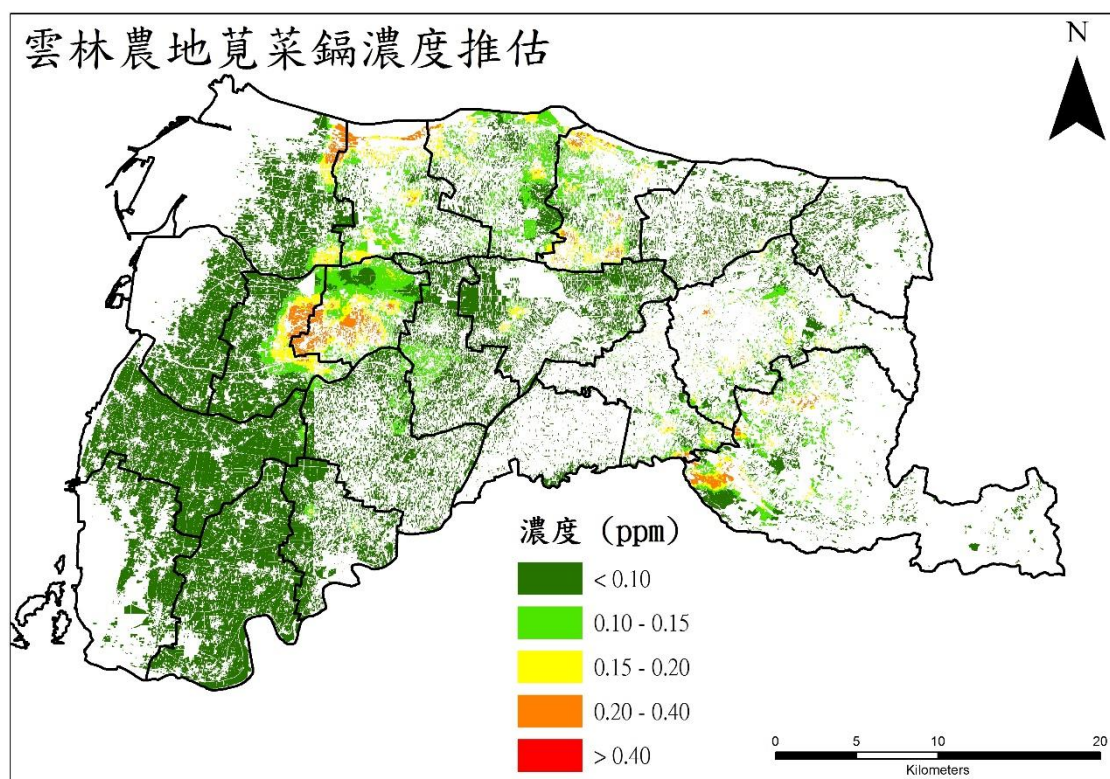


圖 4.9 雲林旱地種植莧菜鎘濃度推估分佈圖

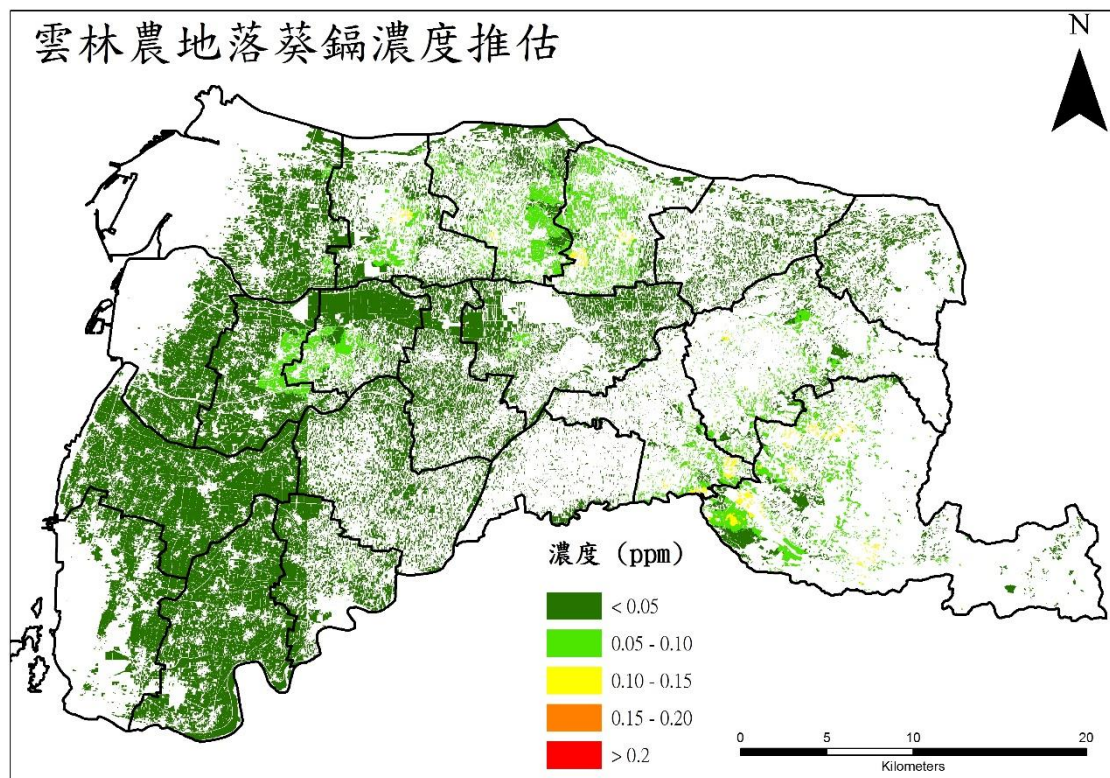


圖 4.10 雲林旱地種植落葵鎘濃度推估分佈圖

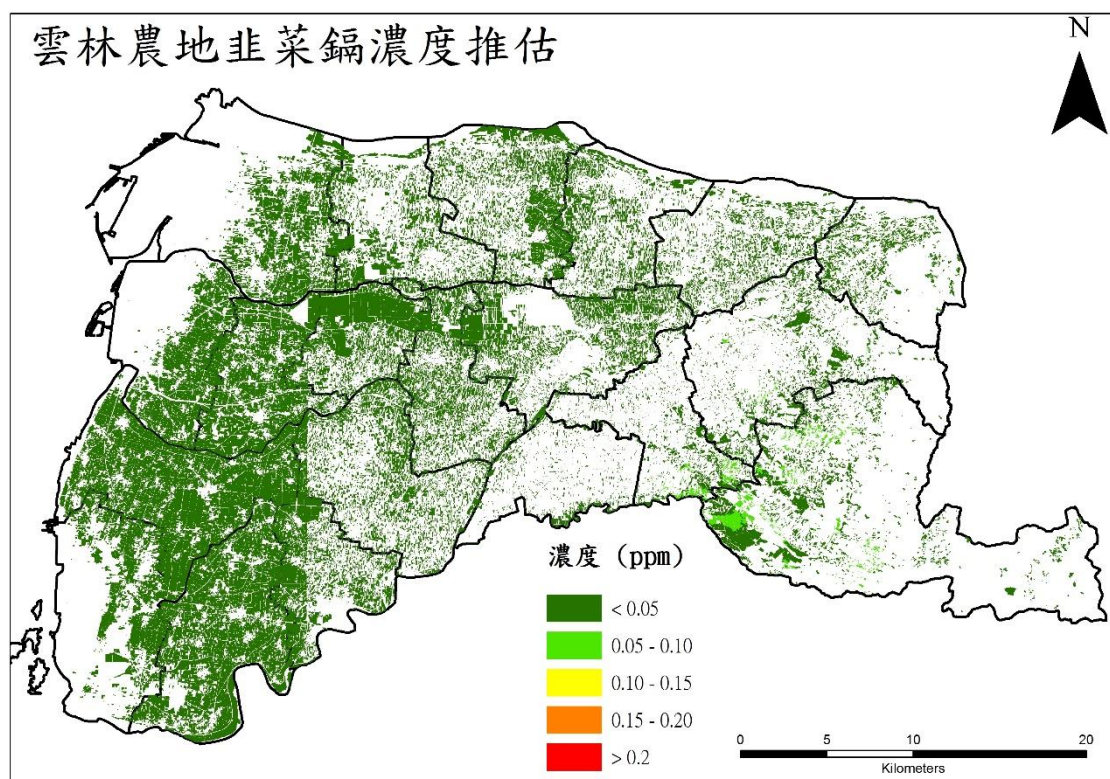


圖 4.11 雲林旱地種植韭菜鎘濃度推估分佈圖

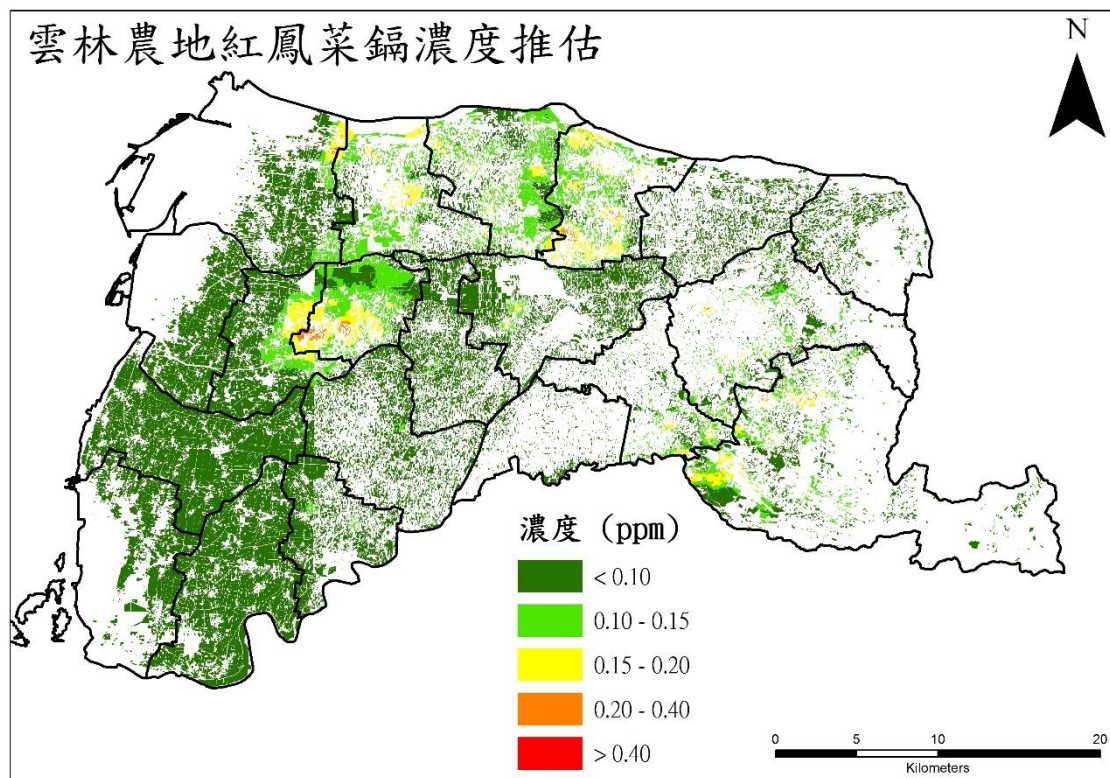


圖 4.12 雲林旱地種植紅鳳菜鎘濃度推估分佈圖

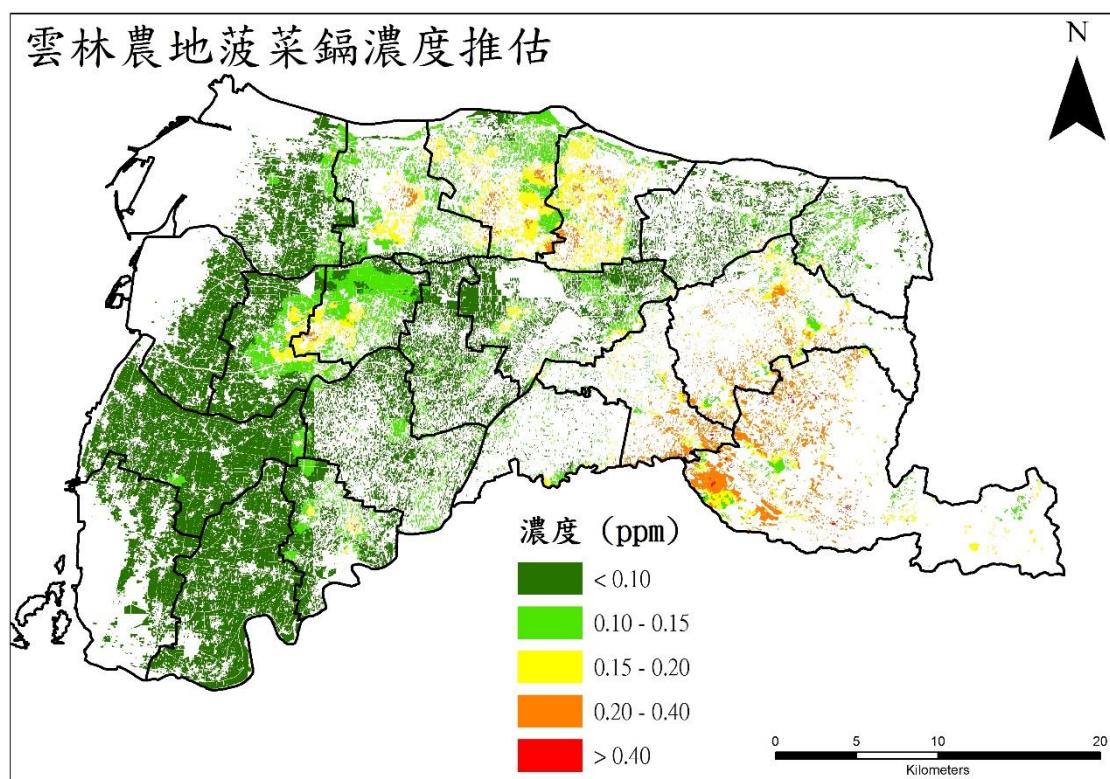


圖 4.13 雲林旱地種植菠菜鎘濃度推估分佈圖

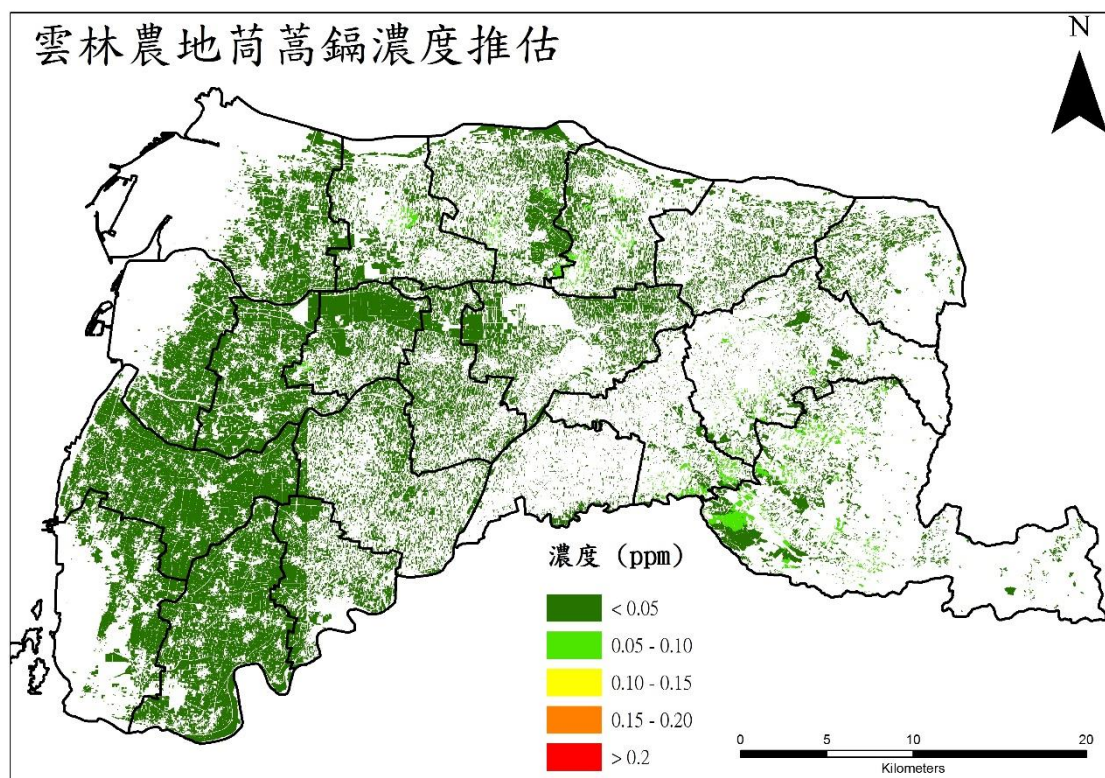


圖 4.14 雲林旱地種植茼蒿鎘濃度推估分佈圖

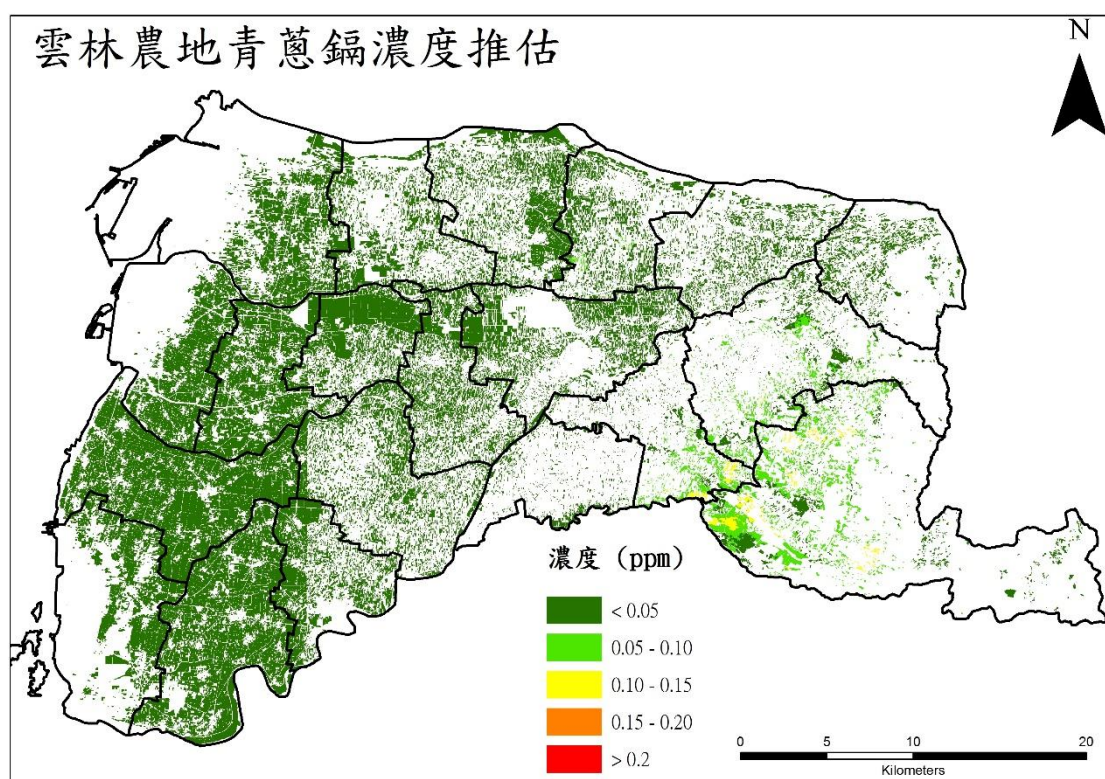


圖 4.15 雲林旱地種植青蔥鎘濃度推估分佈圖

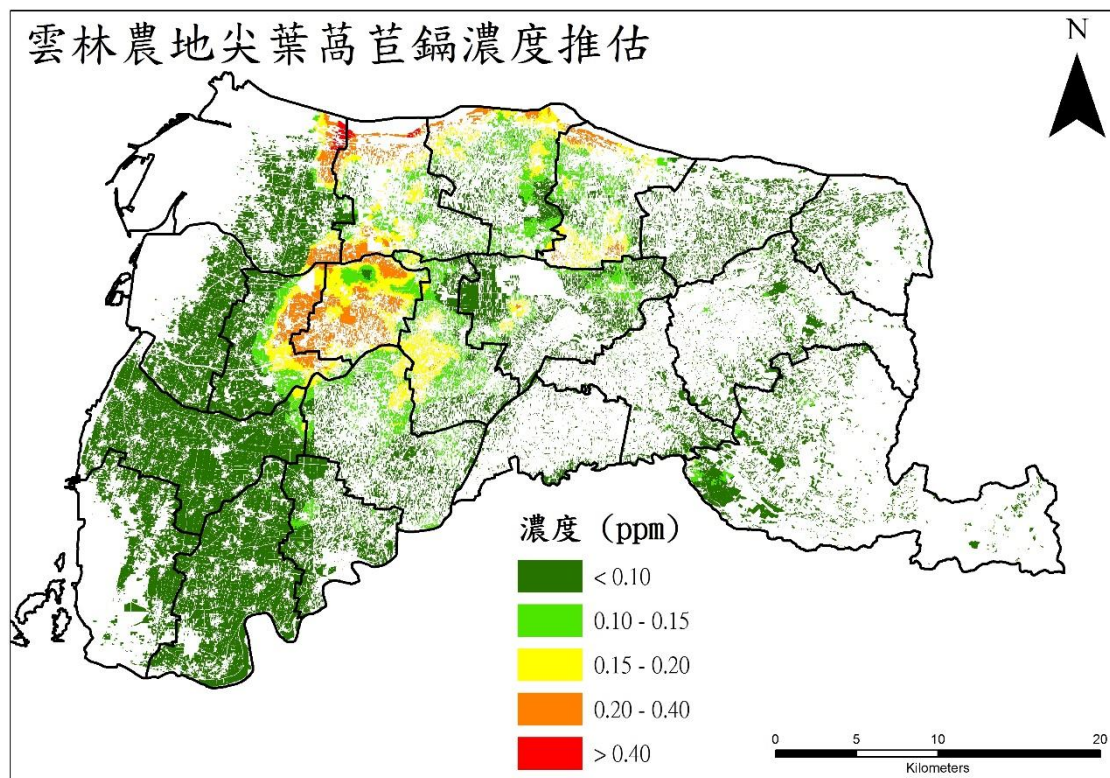


圖 4.16 雲林旱地種植尖葉萵苣鎘濃度推估分佈圖

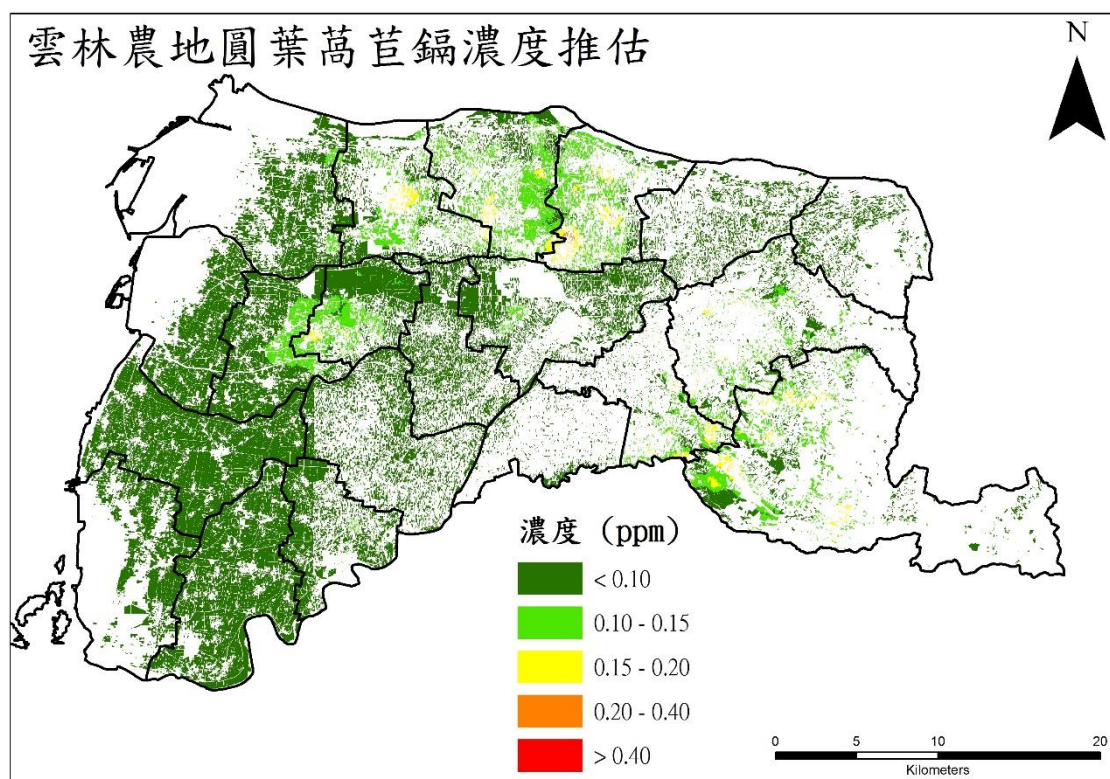


圖 4.17 雲林旱地種植圓葉萵苣鎘濃度推估分佈圖

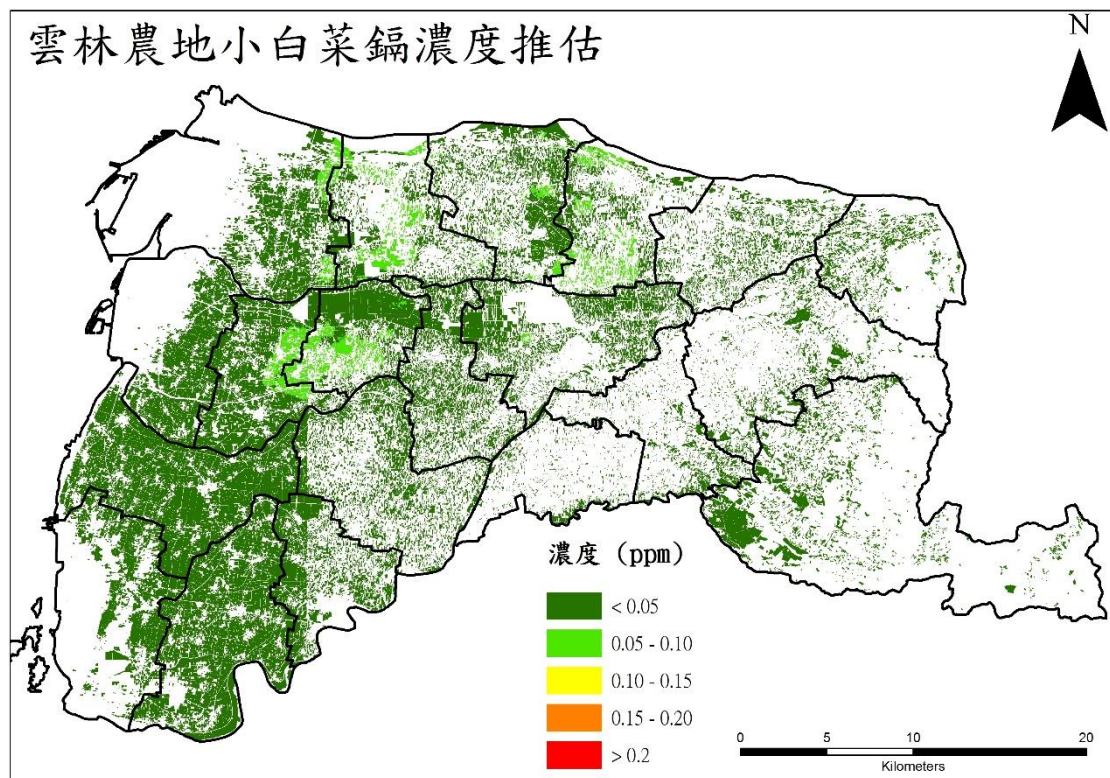


圖 4.18 雲林旱地種植小白菜鎘濃度推估分佈圖

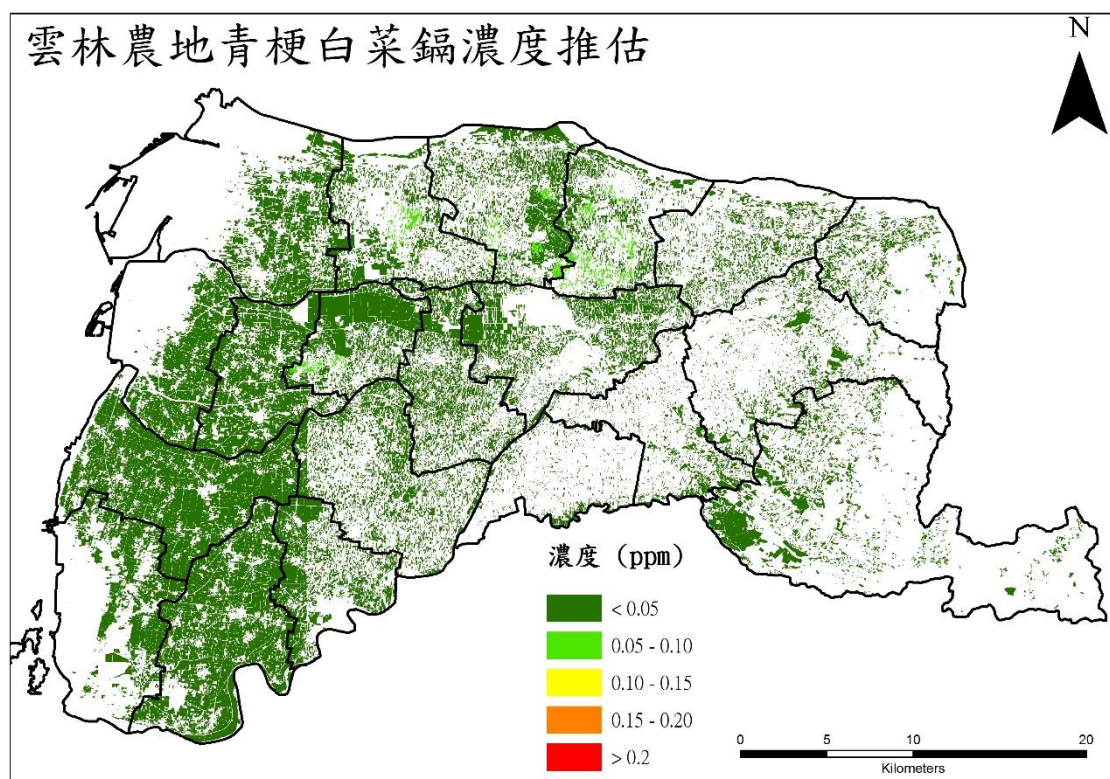


圖 4.19 雲林旱地種植青梗白菜鎘濃度推估分佈圖

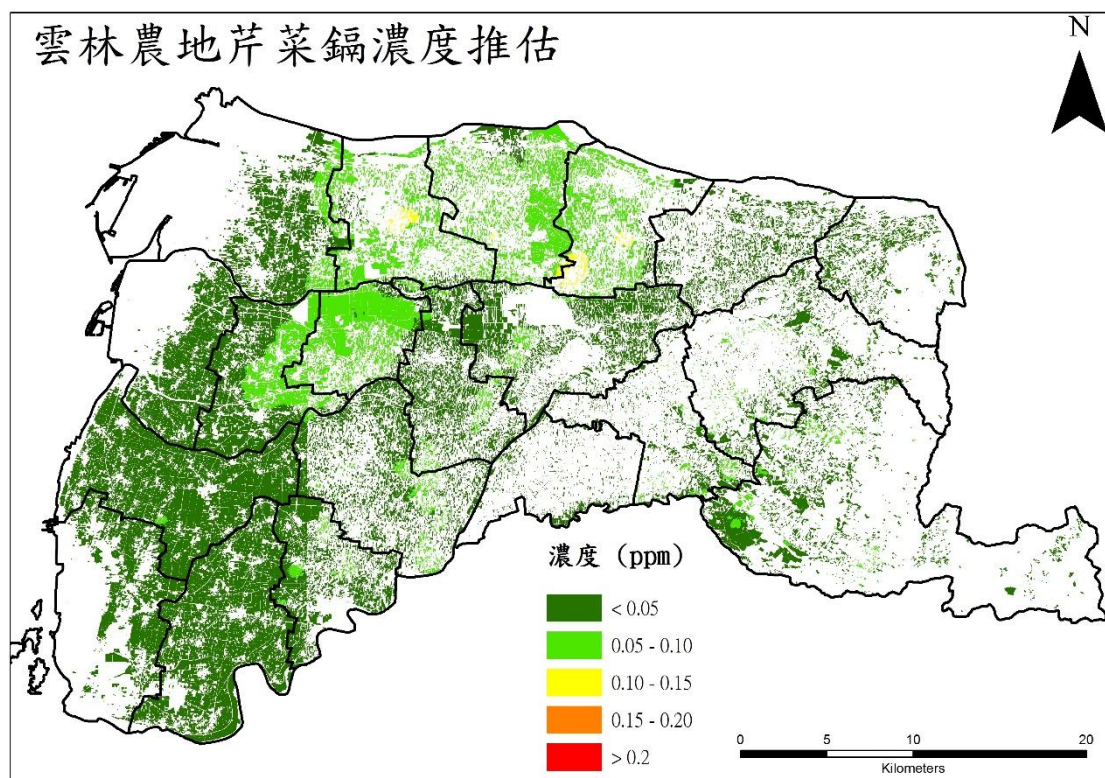


圖 4.20 雲林旱地種植芹菜鎘濃度推估分佈圖

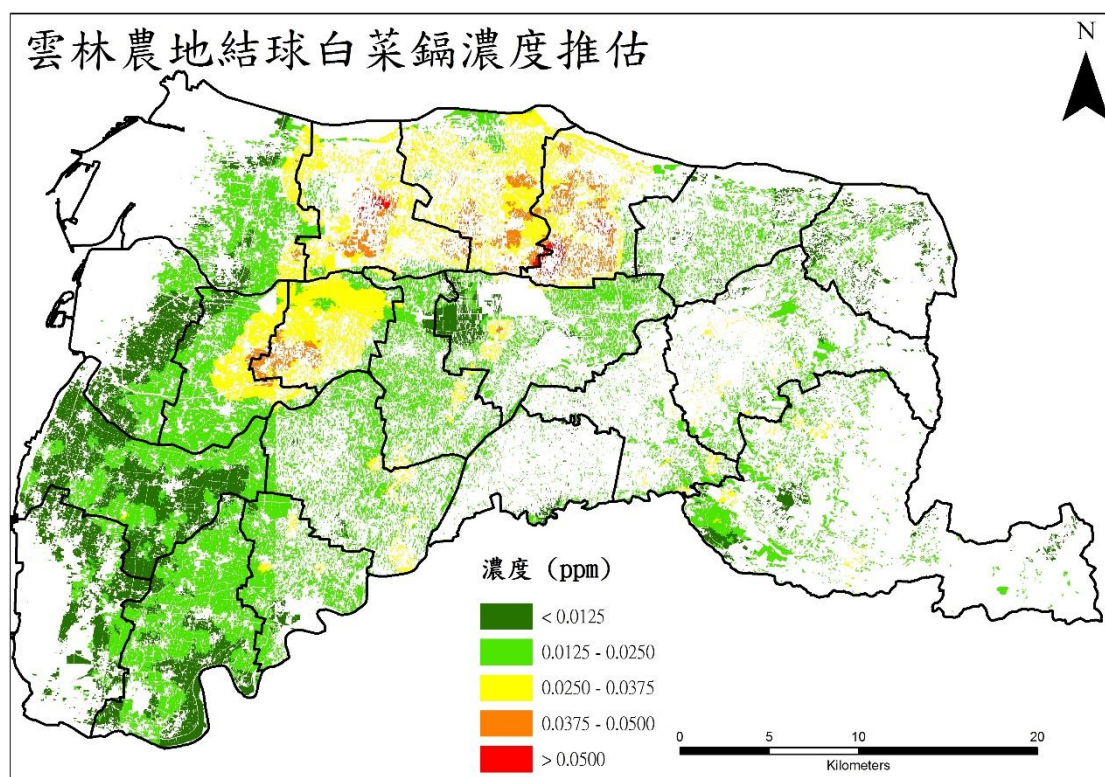


圖 4.21 雲林旱地種植結球白菜鎘濃度推估分佈圖

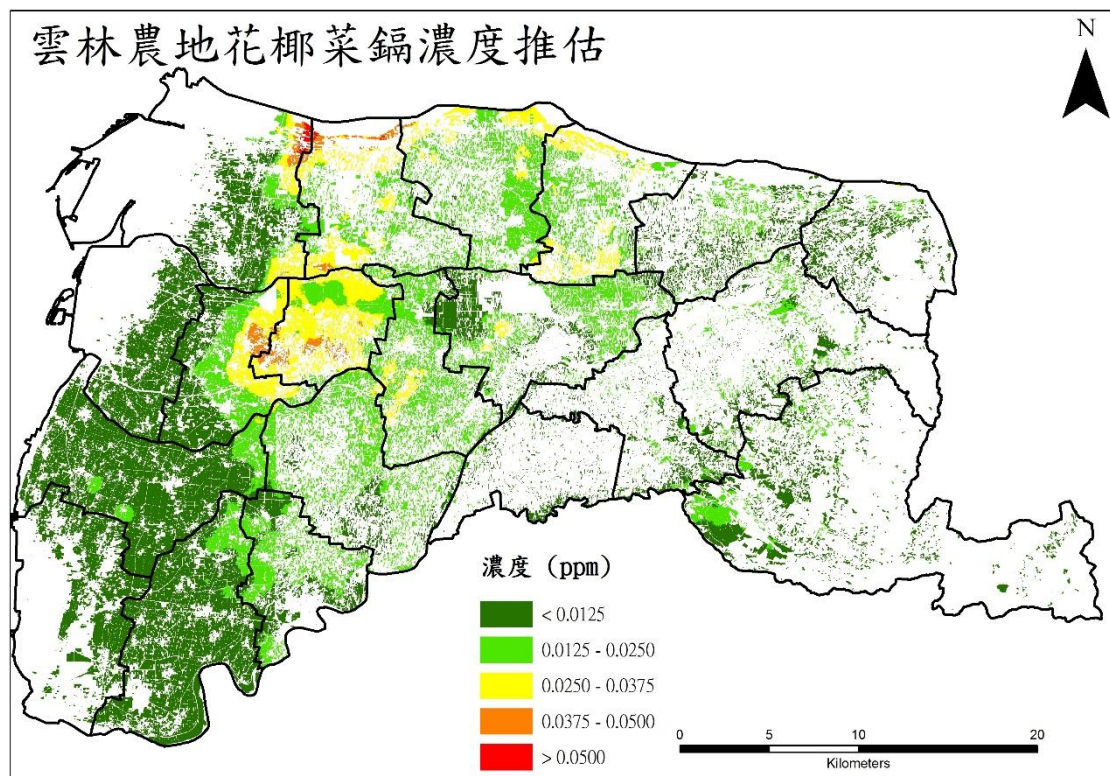


圖 4.22 雲林旱地種植花椰菜鎘濃度推估分佈圖

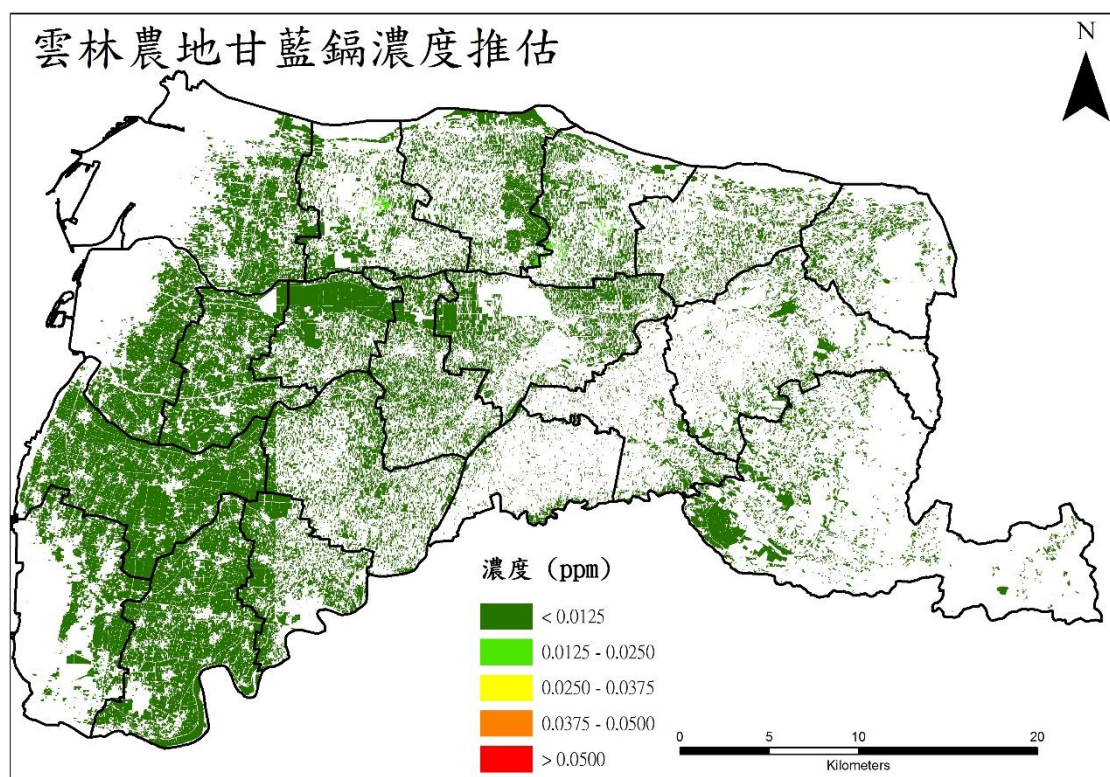


圖 4.23 雲林旱地種植甘藍鎘濃度推估分佈圖

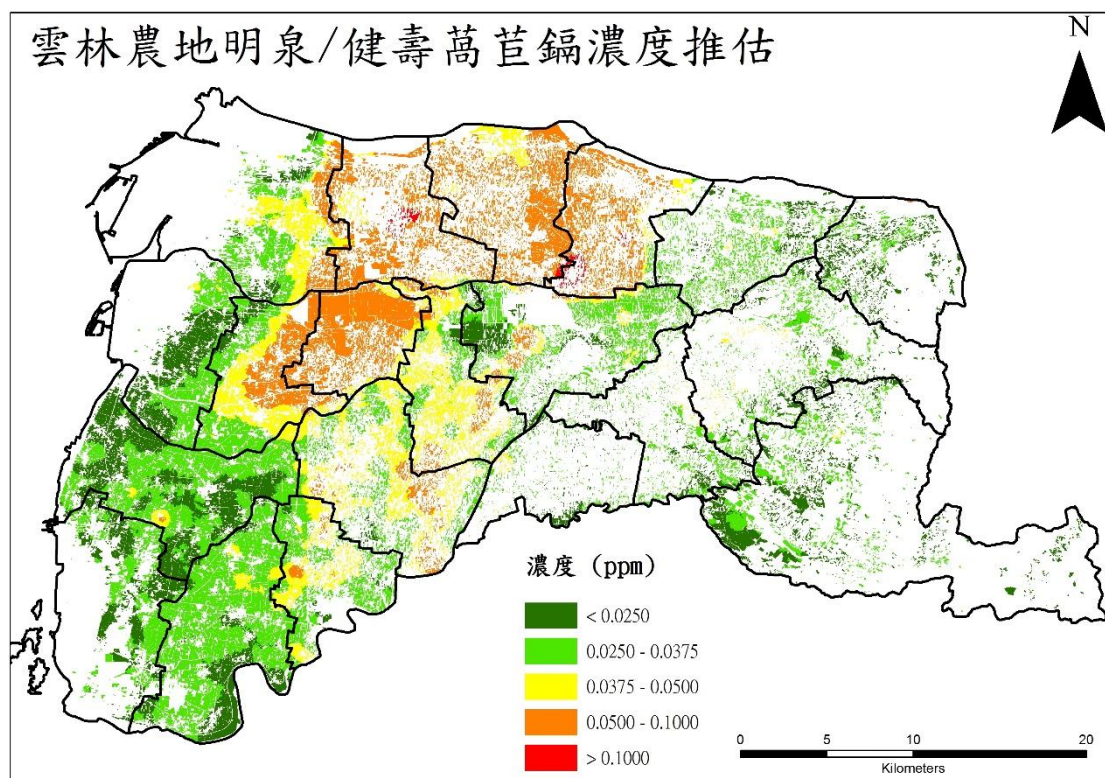


圖 4.24 雲林旱地種植明泉/健壽萵苣鎘濃度推估分佈圖

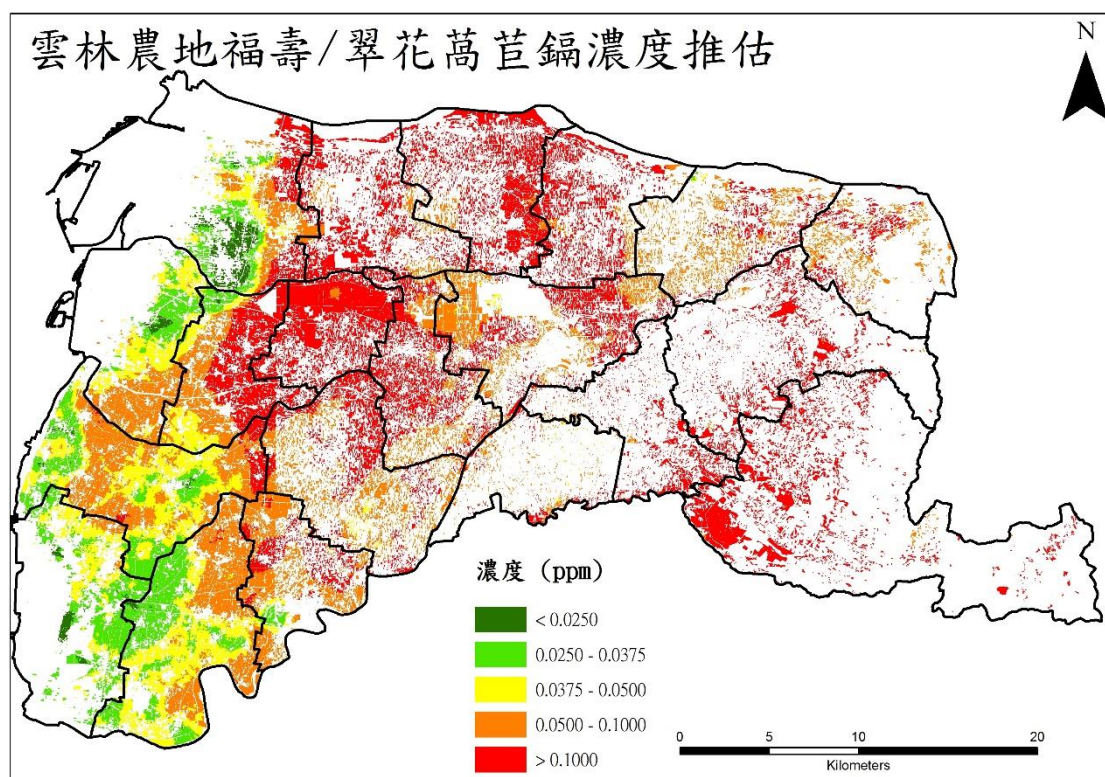


圖 4.25 雲林旱地種植福壽/翠花萵苣鎘濃度推估分佈圖

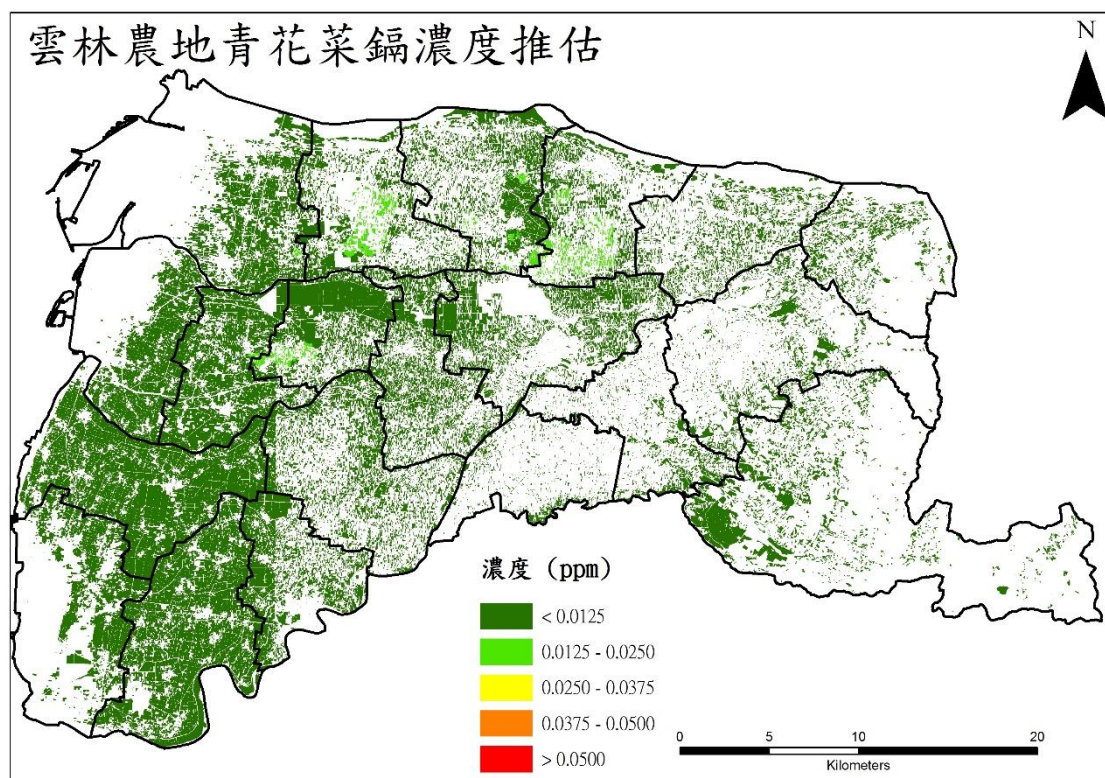


圖 4.26 雲林旱地種植青花菜鎘濃度推估分佈圖

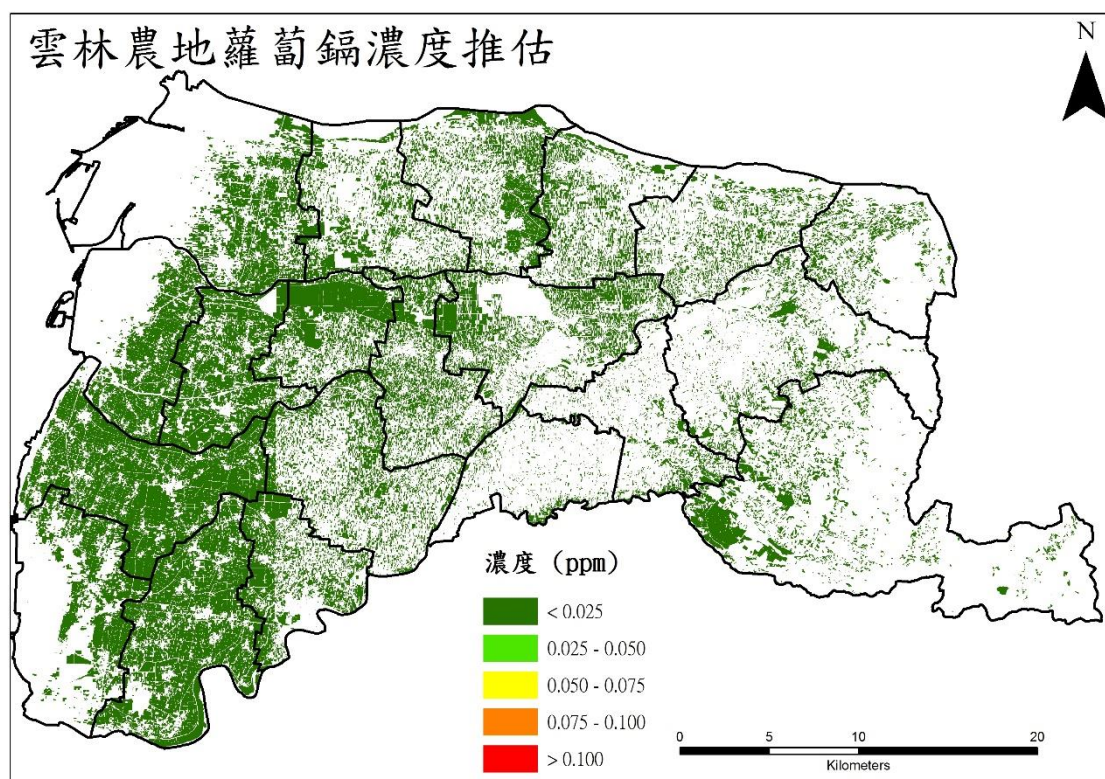


圖 4.27 雲林旱地種植蘿蔔鎘濃度推估分佈圖

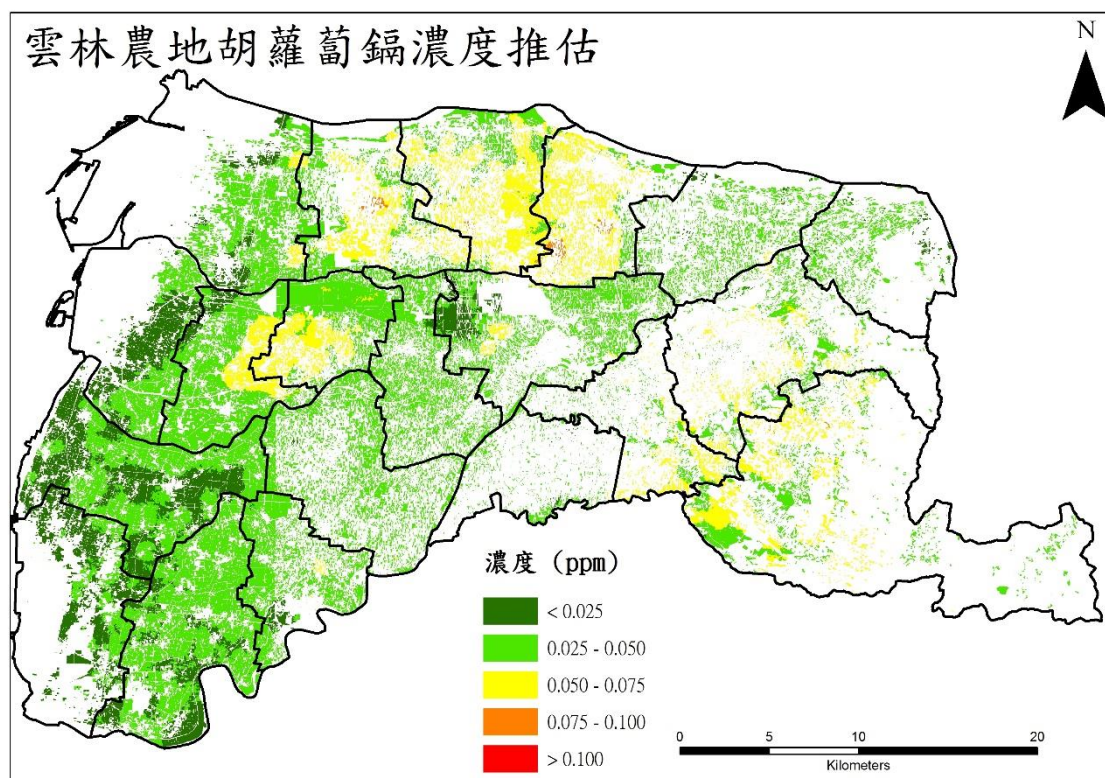


圖 4.28 雲林旱地種植胡蘿蔔鎘濃度推估分佈圖

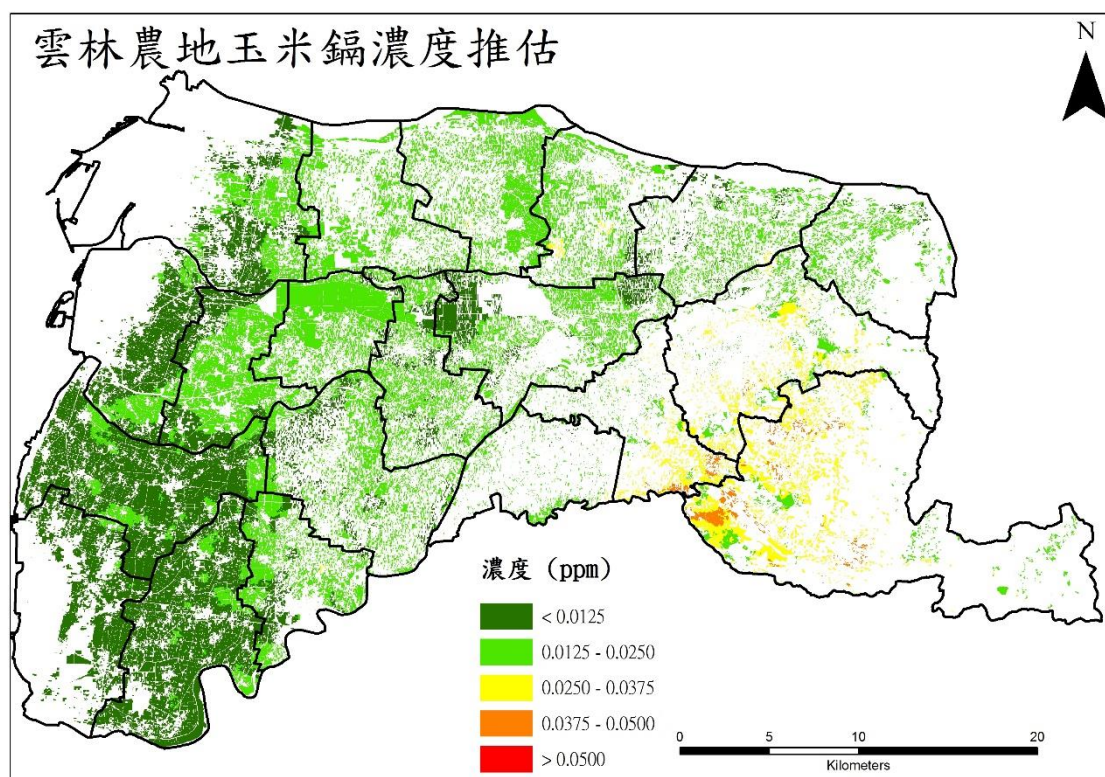


圖 4.29 雲林旱地種植玉米鎘濃度推估分佈圖

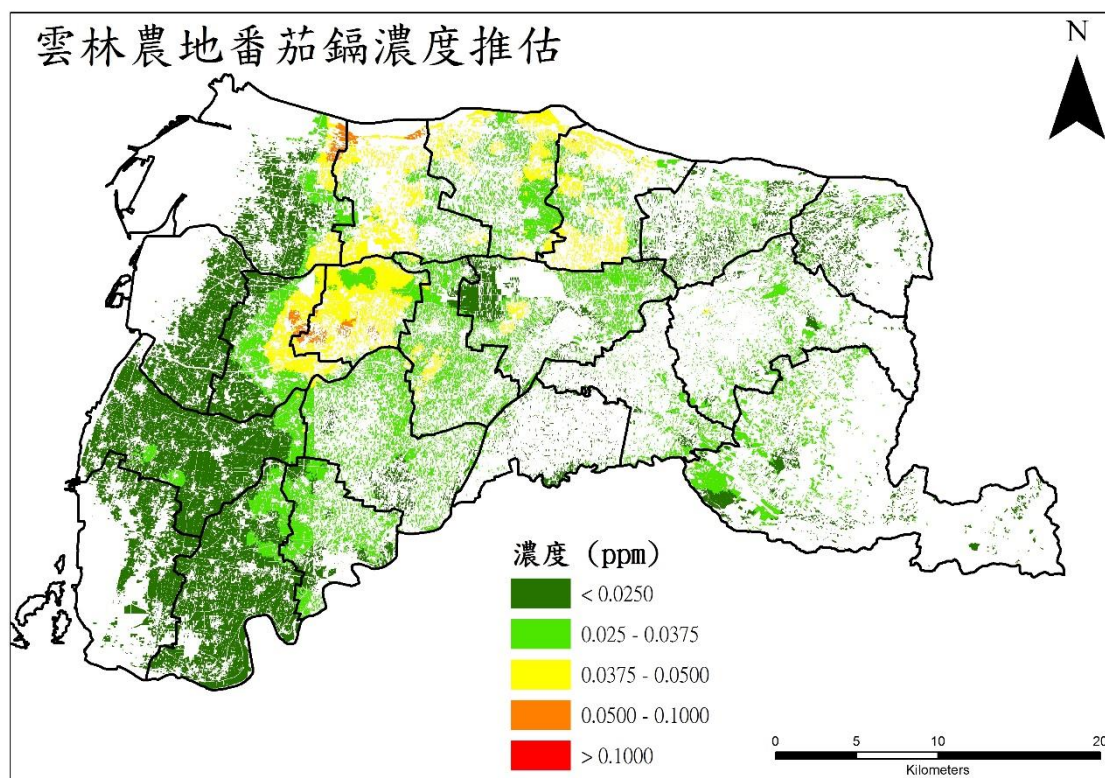


圖 4.30 雲林旱地種植番茄鎘濃度推估分佈圖

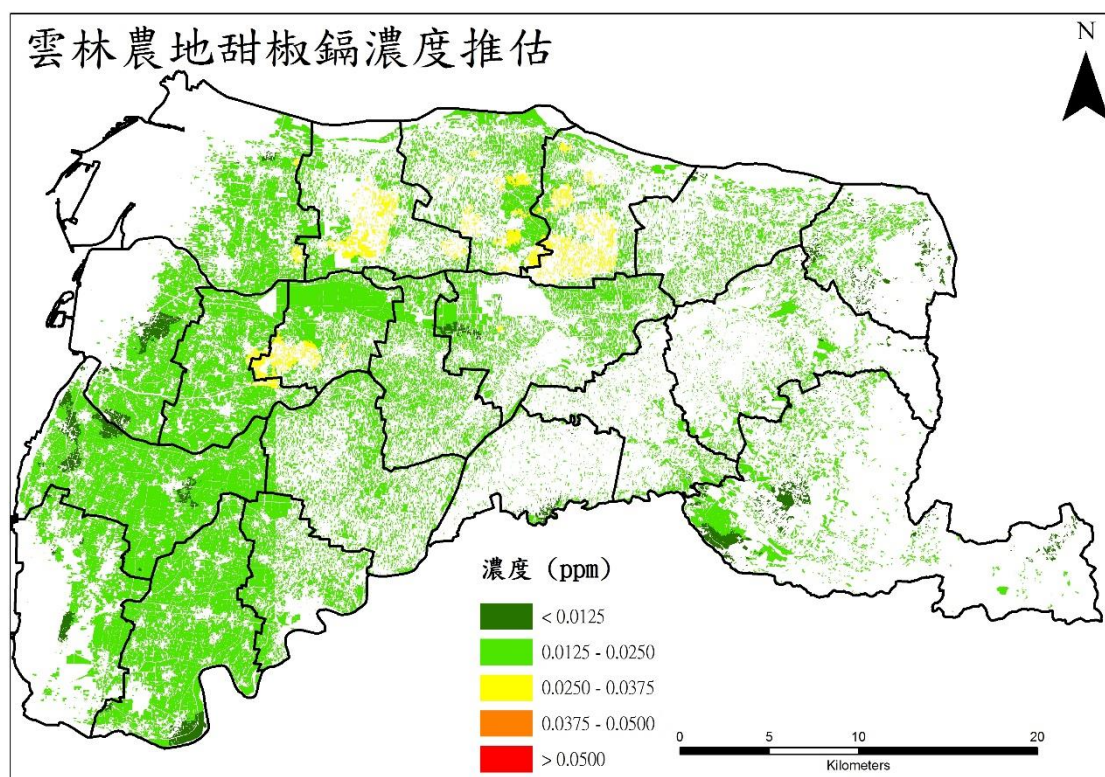


圖 4.31 雲林旱地種植甜椒鎘濃度推估分佈圖

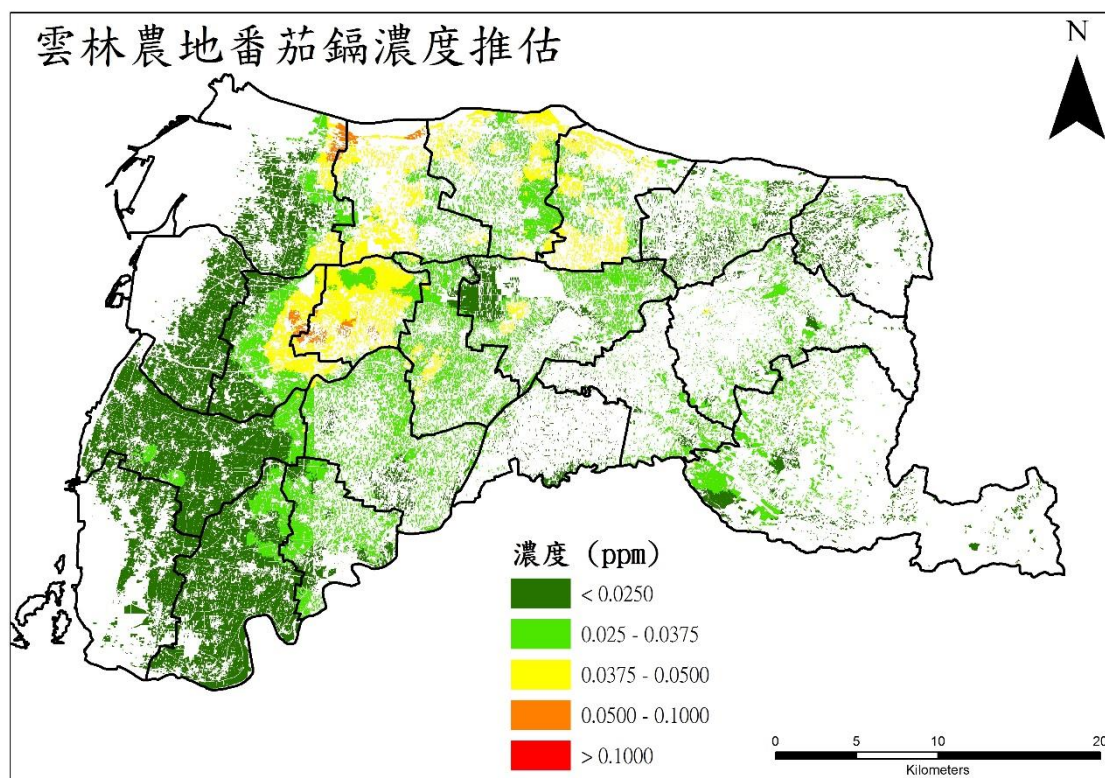


圖 4.32 雲林旱地種植茄子鎘濃度推估分佈圖

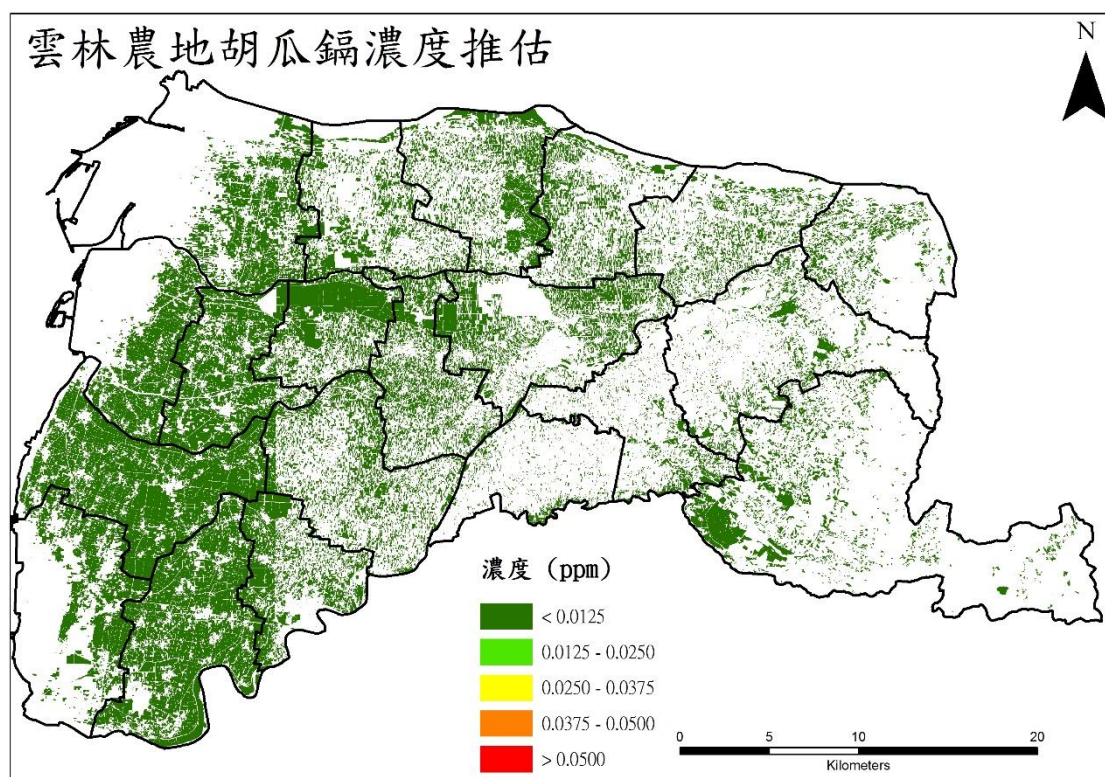


圖 4.33 雲林旱地種植胡瓜鎘濃度推估分佈圖

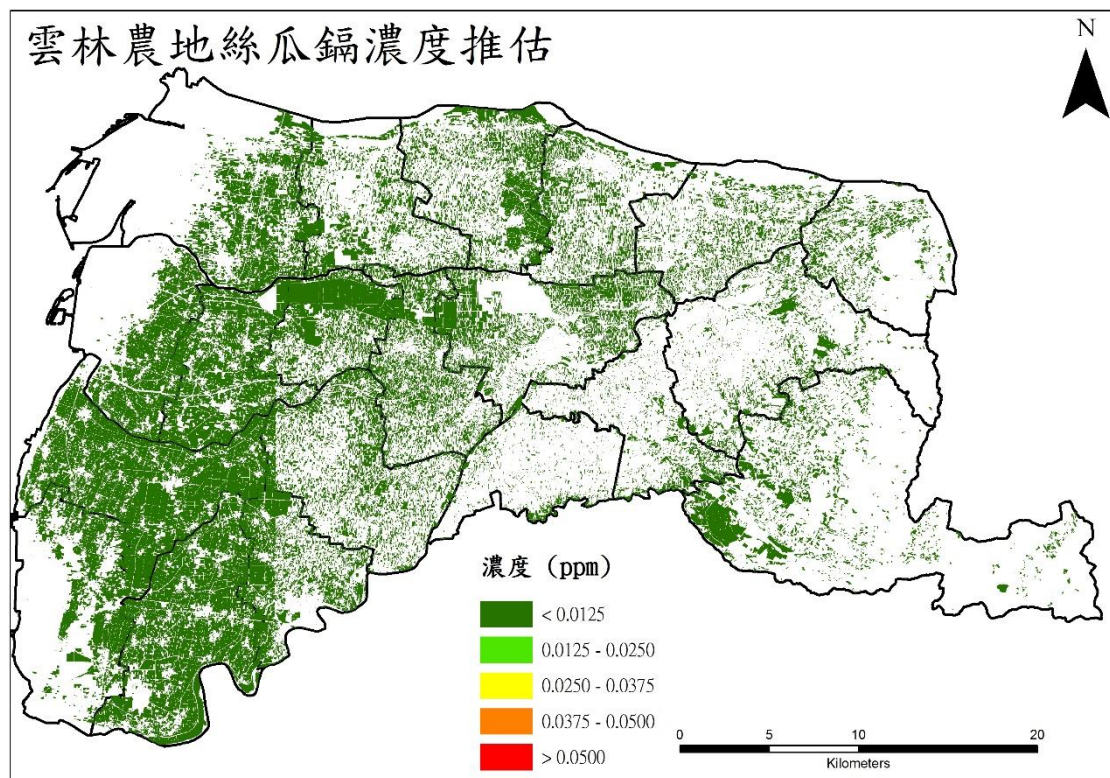


圖 4.34 雲林旱地種植絲瓜鎘濃度推估分佈圖

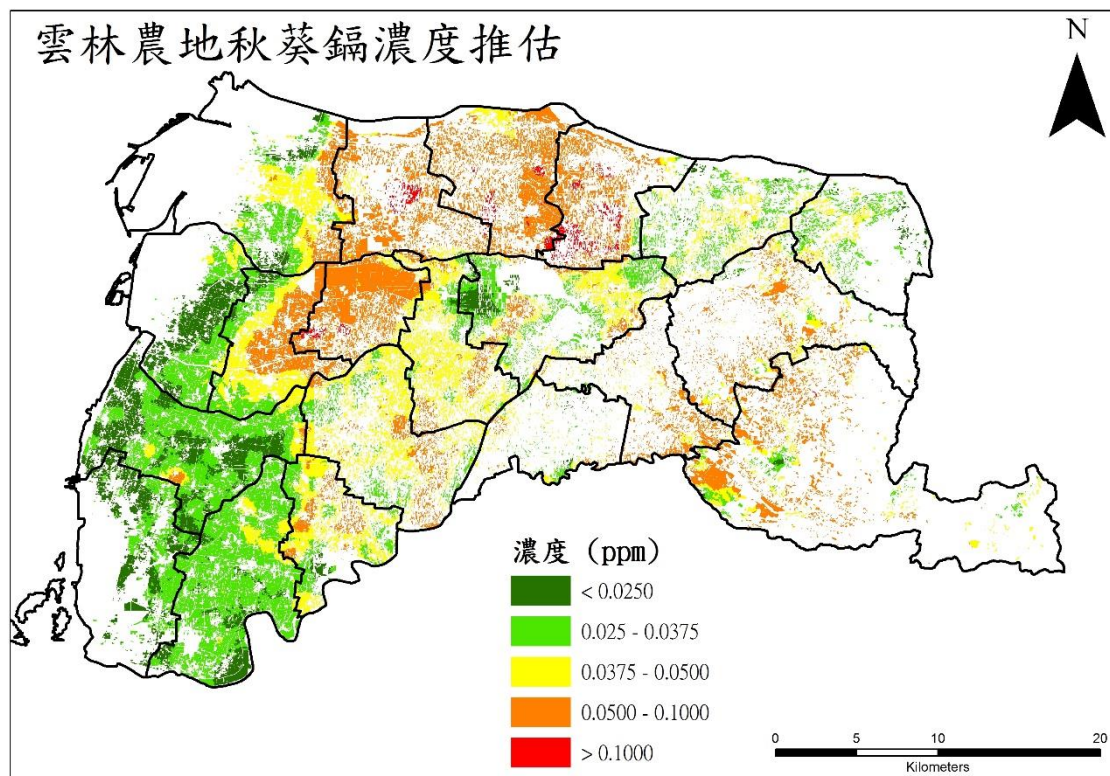


圖 4.35 雲林旱地種植秋葵鎘濃度推估分佈圖

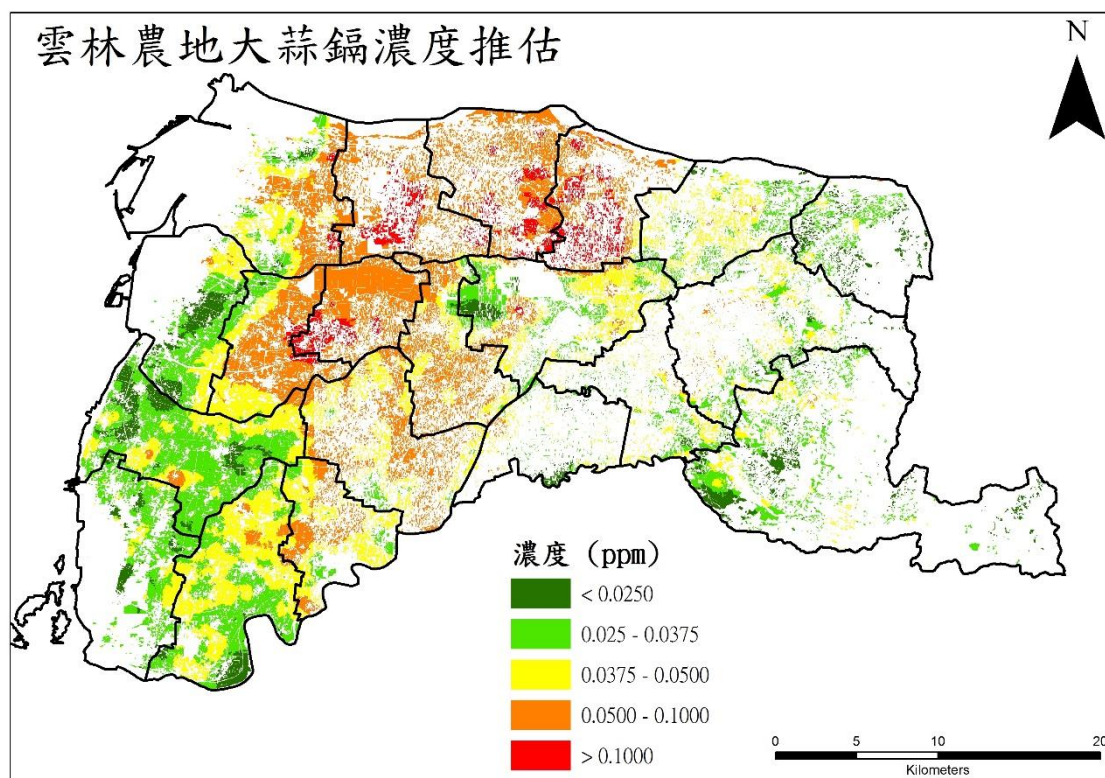


圖 4.36 雲林旱地種植大蒜鎘濃度推估分佈圖

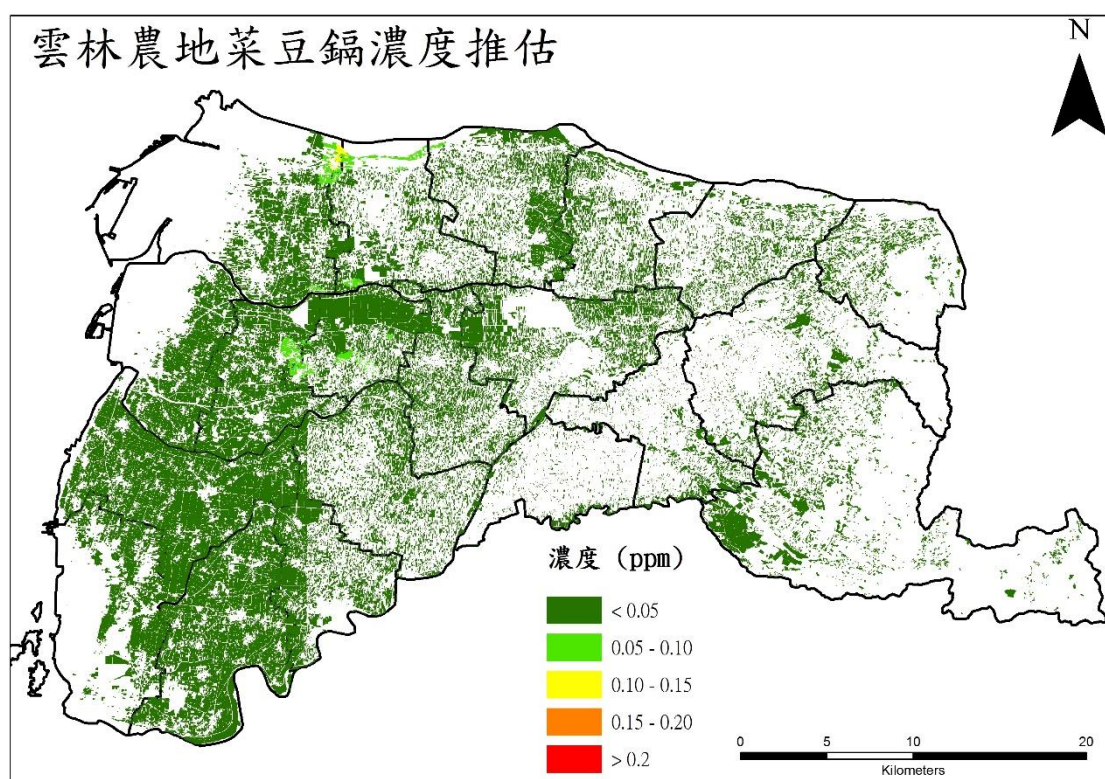


圖 4.37 雲林旱地種植菜豆鎘濃度推估分佈圖

(三) 各大類蔬菜鎘含量比較

將 31 種蔬菜分成各個大類作推估平均鎘濃度的比較，如果將個別只有一種蔬菜的鱗莖類、豆類及豆菜類排除不算，各大類推估平均鎘濃度排序為：小葉菜類 (0.040 mg kg^{-1}) > (半)結球類及花菜類 (0.032 mg kg^{-1}) > 根莖類 (0.023 mg kg^{-1}) > 瓜菜及果菜類 (0.021 mg kg^{-1})，Lin et al. 在臺灣的蔬菜主要產區採了 1900 個蔬菜樣品並且測量其鎘含量，研究結果顯示與本篇研究結果相符。在小葉菜類中推估平均鎘濃度最高及最低的為菠菜與葉用甘藷，其推估平均鎘濃度分別為 0.107 mg kg^{-1} 和 0.012 mg kg^{-1} 。在 (半) 結球類中推估平均鎘濃度最高及最低的為福壽/翠花萵苣與青花菜，其推估平均鎘濃度分別為 0.110 mg kg^{-1} 和 0.005 mg kg^{-1} 。根莖菜類推估的蔬菜只有蘿蔔與胡蘿蔔兩種，本研究發現胡蘿蔔的推估平均鎘濃度為 0.038 mg kg^{-1} ，比蘿蔔的 0.009 mg kg^{-1} 高。在瓜菜與果菜類中推估平均鎘濃度最高及最低的為秋葵與胡瓜，其推估平均鎘濃度分別為 0.046 mg kg^{-1} 和 0.001 mg kg^{-1} 。



4.2.2 以限量標準評析雲林縣農地蔬菜鎘含量推估結果

(一) 以平均值和限量標準比較

現在將各個蔬菜推估平均鎘濃度配合蔬菜重金屬鎘限量標準，以各個蔬菜推估平均鎘濃度和其重金屬限量標準的比值檢視在重金屬限量標準限制下，各個蔬菜鎘濃度的高低。本研究發現屬於半結球類的福壽/翠花萵苣的推估平均鎘濃度 (0.110 mg kg^{-1}) 只略高於第二名的菠菜，但是與其重金屬限量標準 (0.05 mg kg^{-1}) 比較，本研究發現其推估平均鎘濃度遠高於重金屬限量標準達兩倍之多，代表如果在雲林全部農地種植福壽/翠花萵苣，很容易出現鎘濃度超標的情況，估計是因為萵苣本身就是比較容易吸收鎘的蔬菜，林等 (2012) 在臺灣地區主要蔬菜產區採了 1900 個蔬菜樣本，測其鎘含量，研究結果發現 (半) 結球萵苣有最多超標情況，與本研究結果相符合。另外，屬於鱗莖類的大蒜，其推估平均鎘濃度 (0.051 mg kg^{-1}) 略高於其重金屬限量標準 (0.05 mg kg^{-1})；最後，屬於瓜菜及果菜類的秋葵，其推估平均鎘濃度 (0.046 mg kg^{-1}) 也接近了限量標準值 (0.05 mg kg^{-1})。原本純粹以推估平均鎘濃度角度來看，小葉菜類多佔前幾高，但經過重金屬限量標準限制下，本研究發現接近其限量標準的蔬菜前幾名多是 (半) 結球類、花菜、果菜類和鱗莖類等限量標準為 0.05 mg kg^{-1} 的蔬菜如：福壽/翠花萵苣、大蒜、秋葵、明泉/健壽萵苣、茄子。由以上例子可知，不同種類的蔬菜受不同的蔬菜重金屬鎘限量標準規範，因此，所推估之蔬菜鎘含量須配合其對應之限量標準，方得以正確研析其風險。

(二) 盒形圖

將表 4.4 中 31 種蔬菜的推估鎘濃度分佈分成六大類蔬菜，再以三種重金屬鎘限量標準為依據將六大類蔬菜鎘濃度整理成 3 張盒型圖如下圖 4.38、圖 4.39 和圖 4.40 所示，盒型圖中誤差線底端是數據第一十分位數所在，盒子底部是數據第一四分位數，盒子中的藍橫線是數據中位數，盒子頂部是數據第三四分位數，誤

差線頂端是數據第九十分位數所在，各圖中均以紅色虛線表示該張圖中蔬菜重金屬鎘限量標準。

本研究發現，推估鎘濃度中位數較高的蔬菜如：福壽/翠花萵苣、菠菜、尖葉萵苣等蔬菜，其數據範圍畫成盒型圖，盒子形狀較為狹長，代表推估出來的鎘濃度變異範圍比較大；推估鎘濃度中位數較低的蔬菜如：胡瓜、青花菜、蘿蔔等蔬菜，盒子形狀則是非常寬扁，代表推估出來的鎘濃度變異範圍比較小；觀察最高和最低推估鎘濃度中位數的蔬菜中間，推估鎘濃度中位數越小的蔬菜，其盒型圖的盒子形狀明顯有由狹長變為寬扁的趨勢。由盒型圖可以看出，雖然（半）結球類、瓜菜及果菜類的蔬菜推估鎘濃度整體比小葉菜類低，但是因為限量標準比小葉菜類的低，所以（半）結球類、瓜菜及果菜類反倒比較容易出現蔬菜鎘含量超標的情況。

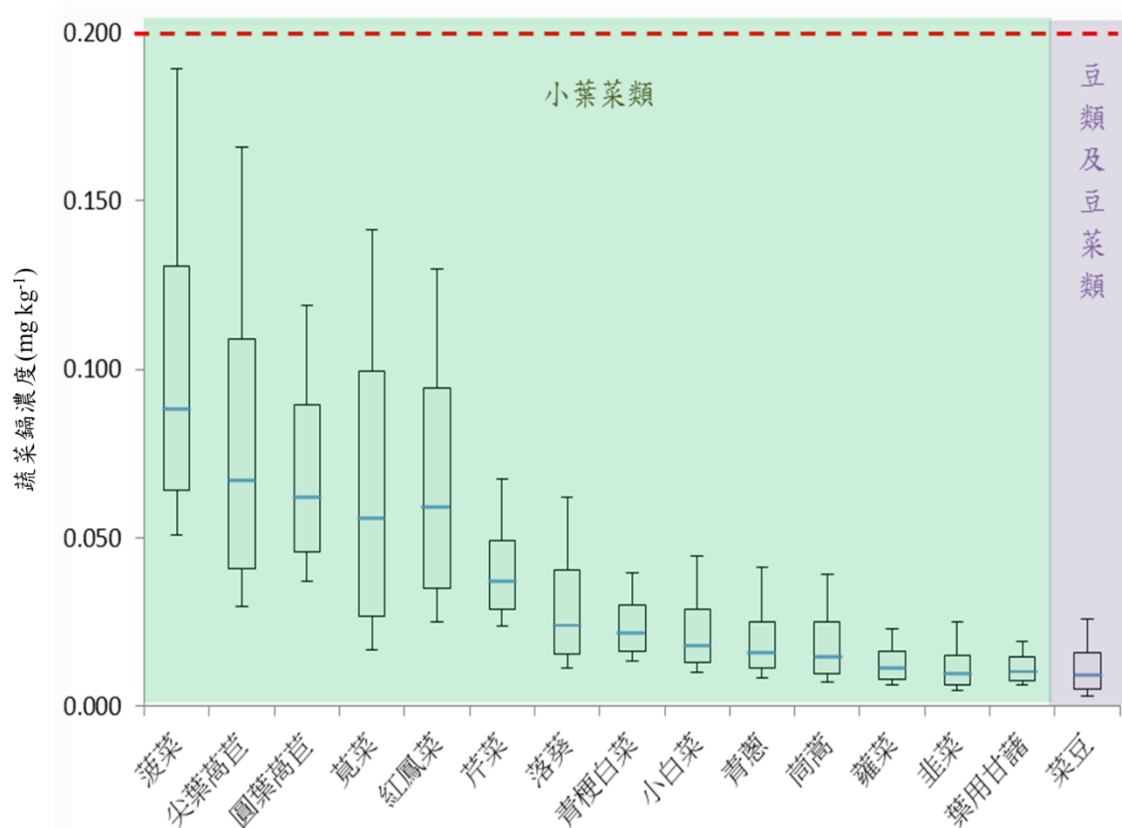


圖 4.38 限量標準為 0.2 mg kg⁻¹ 之蔬菜推估鎘濃度盒型圖

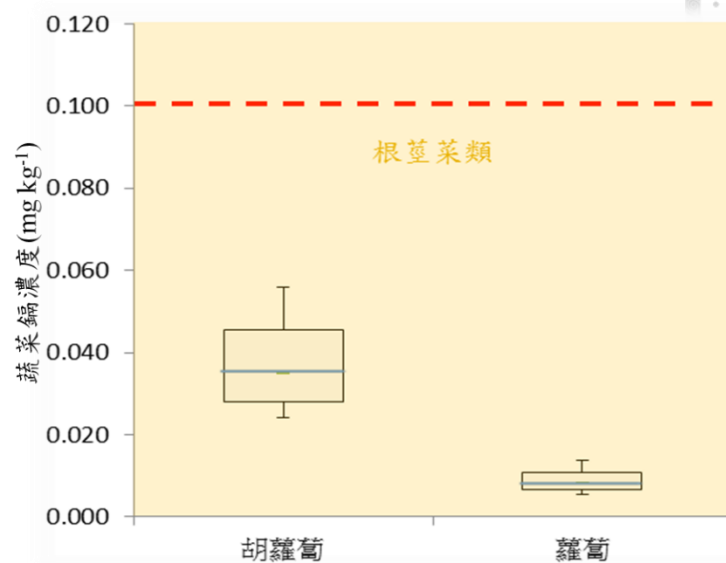


圖 4.39 限量標準為 0.1 mg kg^{-1} 之蔬菜推估鎘濃度盒型圖

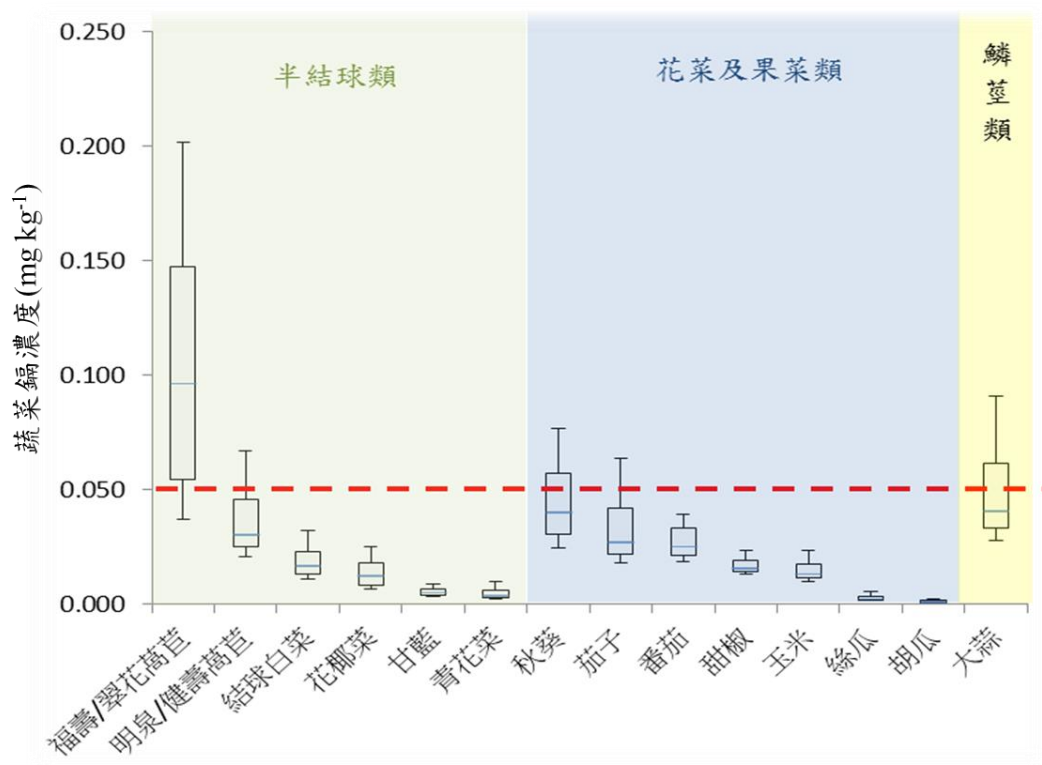


圖 4.40 限量標準為 0.05 mg kg^{-1} 之蔬菜推估鎘濃度盒型圖



4.3 國人蔬菜攝食安全評析

4.3.1 國人近五年之平均蔬菜攝食量

本研究經由糧食供需年報取得國人於民國 98 年至民國 102 年，共 5 年間平均一年各大類蔬菜攝食量（表 4.5），假設國人攝食所有蔬菜皆為本研究提及之 31 種蔬菜，則計算國人藉由攝食 31 種蔬菜吃進人體中的鎘含量。但由於糧食供需年報中對於蔬菜的分類與衛福部不同（表 4.6），所以必須對 31 種蔬菜依照糧食供需年報中的分類法進行分類。而後分成三種情境探討我國民眾攝食蔬菜的安全性。

表 4.5 我國民眾平均蔬菜攝食量

| 蔬菜種類 | 民國 98 年 | 民國 99 年 | 民國 100 年 | 民國 101 年 | 民國 102 年 | 平均 |
|------|---------|---------|----------|----------|----------|-------|
| 葉菜類 | 36.56 | 34.62 | 38.46 | 38.09 | 36.60 | 36.87 |
| 根菜類 | 9.57 | 9.58 | 8.92 | 8.53 | 10.03 | 9.33 |
| 花果菜類 | 24.29 | 25.50 | 25.24 | 23.54 | 25.41 | 24.80 |
| 玉米 | 4.32 | 4.56 | 4.28 | 3.82 | 3.53 | 4.10 |

（資料來源：農委會，單位：kg）

表 4.6 農委會與衛福部蔬菜分類與鎘限量標準

| 項目 | 限量標準 (mg kg ⁻¹) | 衛福部分類法 | 農委會分類法 |
|---------|-----------------------------|-------------------|--------|
| 葉用甘藷 | 0.2 | 小葉菜類 | 葉菜類 |
| 薺菜 | | | |
| 莧菜 | | | |
| 落葵 | | | |
| 韭菜 | | | |
| 紅鳳菜 | | | |
| 菠菜 | | | |
| 茼蒿 | | | |
| 青蔥 | | | |
| 尖葉萵苣 | | | |
| 圓葉萵苣 | | | |
| 小白菜 | | | |
| 青梗白菜 | | | |
| 芹菜 | | | |
| 結球白菜 | 0.05 | (半)結球類及 花菜類等蔬菜 | |
| 花椰菜 | | | |
| 甘藍 | | | |
| 明泉/健壽萵苣 | | | |
| 福壽/翠花萵苣 | | | |
| 青花菜 | | | |
| 蘿蔔 | 0.1 | 根莖菜類 | 根菜類 |
| 胡蘿蔔 | | | |
| 玉米 | 0.05 | 瓜菜及果菜類 | 穀類-玉米 |
| 番茄 | | | 果菜類 |
| 甜椒 | | | |
| 茄子 | | | |
| 秋葵 | | | |
| 胡瓜 | | | |
| 絲瓜 | | | |
| 大蒜 | 0.05 | 鱗莖類 | 根菜類 |
| 菜豆 | 0.2 | 豆類及豆菜類 | 果菜類 |



4.3.2 國人蔬菜攝食安全評析

(一) 以推估蔬菜平均鎘濃度計算我國民眾食用蔬菜安全

假設我國民眾攝食的蔬菜，各大類中每樣蔬菜攝食量皆相同，則將各大類中每樣蔬菜的推估平均鎘濃度平均起來，再與該大類的年攝食量相乘，即是攝食該大類蔬菜得到的鎘，最後將攝食各大類蔬菜得到的鎘加總，就是平均一位國人一年攝食蔬菜得到的鎘。

表 4.7 以推估蔬菜平均鎘濃度計算我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量

| 蔬菜種類 | 近 5 年平均食用量(kg) | 因攝食攝取到的鎘(mg) |
|------|----------------|--------------|
| 葉菜類 | 36.87 | 1.46 |
| 根菜類 | 9.33 | 0.30 |
| 花果菜類 | 24.80 | 0.51 |
| 玉米 | 4.10 | 0.06 |
| 總和 | 75.09 | 2.33 |

經由本估算結果，我國平均一位民眾一年經由攝食蔬菜吃進體內的鎘是 2.33 mg，換算成每人每月攝取量約為 $2.95 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}$ ，占了 WHO 規定的 PTMI $25 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}$ 的 11.8 %。在計算攝食各類蔬菜得到的鎘時，本研究發現攝食葉菜類時攝取到的鎘佔了攝食所有類別蔬菜得到的鎘約 62 % 的比例，不僅因為國人的葉菜類攝食量大，也因為其中小葉菜類本身的鎘濃度比較高的緣故。

(二) 以推估蔬菜鎘濃度 90 % 處計算我國民眾食用蔬菜安全

另外假設一個高風險的情況：「倘若我國民眾吃到的蔬菜都是推估結果中站在 90 % 的位置的蔬菜鎘濃度，則平均一位國人一年攝食蔬菜得到的鎘是多少？」則將各大類中每樣蔬菜的推估鎘濃度 90 % 處平均起來，再與該大類的年攝食量相乘，最後將攝食各大類蔬菜得到的鎘加總，就是平均一位國人一年攝食蔬菜得到的鎘。

表 4.8 以推估蔬菜鎘濃度 90 % 計算我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量

| 蔬菜種類 | 近 5 年平均食用量(kg) | 因攝食攝取到的鎘(mg) |
|------|----------------|--------------|
| 葉菜類 | 36.87 | 2.68 |
| 根菜類 | 9.33 | 0.50 |
| 花果菜類 | 24.80 | 0.84 |
| 玉米 | 4.10 | 0.10 |
| 總和 | 75.09 | 4.11 |

經由本估算結果，我國平均一位民眾一年經由攝食蔬菜吃進體內的鎘是 4.11 mg，換算成每人每月攝取量約為 $5.20 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}$ ，占了 WHO 規定的 PTMI $25 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}$ 的 20.8%。在計算攝食各類蔬菜得到的鎘時，本研究發現攝食葉菜類時攝取到的鎘佔了攝食所有類別蔬菜得到的鎘約 65 % 的比例，與前面假設情況相比，顯示在 90 % 位置的蔬菜推估鎘濃度中，葉菜類的濃度比其他類高。

(三) 以蔬菜鎘限量標準計算我國民眾食用蔬菜安全

本研究最後假設一個最極端的情況：「倘若我國民眾吃到的蔬菜其鎘濃度都剛好與重金屬限量標準相同，則平均一位國人一年攝食蔬菜得到的鎘是多少？」則將各大類中每樣蔬菜的鎘濃度訂為與其限量標準相同，再與該大類的年攝食量相乘，最後將攝食各大類蔬菜得到的鎘加總，就是平均一位國人一年攝食蔬菜得到的鎘。

表 4.9 以蔬菜鎘限量標準計算我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量

| 蔬菜種類 | 近 5 年平均食用量(kg) | 因攝食攝取到的鎘(mg) |
|------|----------------|--------------|
| 葉菜類 | 36.87 | 5.71 |
| 根菜類 | 9.33 | 0.78 |
| 花果菜類 | 24.80 | 1.77 |
| 玉米 | 4.10 | 0.21 |
| 總和 | 75.09 | 8.47 |

經由本估算結果，我國平均一位民眾一年經由攝食蔬菜吃進體內的鎘是 8.47 mg，換算成每人每月攝取量約為 $10.71 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}$ ，佔了 WHO 規定的 PTMI $25 \mu\text{g kg}^{-1} \cdot \text{body weight}$ 的 42.8 %。在計算攝食各類蔬菜得到的鎘時，本研究發現攝食葉菜類時攝取到的鎘佔了攝食所有類別蔬菜得到的鎘約 67 % 的比例，這種比例居高不下，是因為葉菜類中的小葉菜類除了本身濃度高，其限量標準亦相對其他類為高，拉高我國民眾因為攝食蔬菜得到鎘的量。

（四）小結

綜合上面結論，我國民眾攝食葉菜類較其他蔬菜類別多，葉菜類中包含許多整體推估鎘濃度較高的小葉菜類蔬菜，使得我國民眾攝取葉菜類得到的鎘比例較高。另外，若我國民眾吃到的蔬菜其鎘濃度皆與其重金屬限量標準相同，藉由攝食蔬菜得到的鎘就佔 WHO 建議值的 42.8 %，若考慮其他鎘進入人體的途徑，此比例屬於偏高，本研究建議有關單位可以多注意小葉菜類蔬菜的鎘濃度。

表 4.10 統整我國民眾食用蔬菜之鎘攝入量 (mg/年)

| 蔬菜種類 | 情境一 | 情境二 | 情境三 |
|------|------|------|------|
| 葉菜類 | 1.46 | 2.68 | 5.71 |
| 根菜類 | 0.30 | 0.50 | 0.78 |
| 花果菜類 | 0.51 | 0.84 | 1.77 |
| 玉米 | 0.06 | 0.10 | 0.21 |
| 總和 | 2.33 | 4.11 | 8.47 |



4.4 蔬菜鎘含量預測模式中各種係數的敏感度分析

(一) 敏感度分析之控制變動項目與範圍

本研究挑選的蔬菜分別是紅鳳菜、尖葉萵苣、秋葵與韭菜，將四種蔬菜的鎘含量預測模式的截距和係數列於下表：

表 4.11 進行敏感度分析之蔬菜其截距和係數

| 項目 | α | β | γ | δ | R^2 |
|------|----------|---------|----------|----------|--------|
| 紅鳳菜 | 1.6443 | 1.0073 | -0.7475 | -0.2082 | 0.9189 |
| 尖葉萵苣 | 1.5405 | 0.8614 | -1.6078 | -0.1005 | 0.8890 |
| 秋葵 | 0.1866 | 0.8085 | - | -0.1285 | 0.9242 |
| 韭菜 | 0.8795 | 0.8690 | - | -0.3095 | 0.9383 |

有關於 β ($\text{Log}([\text{Cd}]_{\text{soil,AR}})$ 的係數)、 γ ($\text{Log}(\text{CEC})$ 的係數)、 δ (pH 的係數) 的敏感度分析結果如圖所示，此次敏感度分析的控制變動項目為土壤鎘濃度、CEC 及 $[\text{H}^+]$ ，因為 $[\text{H}^+]$ 的變動量非常大，最大可以是其中位數的 4700 倍左右，每種蔬菜的蜘蛛網圖都有聚焦尺度與全部但是經過取對數的尺度展現。

表 4.12 敏感度分析之控制變動項目與範圍

| 變動項目 | $[\text{Cd}]_{\text{soil}}$ | CEC | pH | $[\text{H}^+]$ |
|------|-----------------------------|-------|------|----------------|
| 最小值 | 0.02 | 2.32 | 3.61 | 2.45E-04 |
| 最大值 | 0.71 | 15.85 | 8.39 | 4.07E-09 |
| 中位數 | 0.13 | 6.45 | 7.28 | 5.25E-08 |

(二) 以聚焦尺度觀點看敏感度分析結果

由圖 4.41、圖 4.42 可知，如果以斜率觀點來看，本研究發現整體來說，土壤鎘濃度的變化不管是對於紅鳳菜或者是尖葉萵苣的鎘含量的影響都是最大的，CEC 對於蔬菜鎘含量的影響較小，轉換成 $[H^+]$ 的 pH 的影響則是最小，可是，當土壤鎘濃度和 pH 不變的條件下，CEC 值低於中位數的 $6.45 \text{ cmol kg}^{-1}$ 時，尖葉萵苣 ($\gamma = -1.6078$) 內的鎘含量會隨著 CEC 的減少而明顯增加，增加的幅度甚至比土壤鎘濃度的影響為大，但是紅鳳菜 ($\gamma = -0.7475$) 就看不到相同情況，紅鳳菜內鎘含量隨著 CEC 值的改變而改變的幅度相當小，整個曲線相當平穩。由圖 4.43、4.44 可知，如果以斜率觀點來看，本研究發現整體來說，土壤鎘濃度的變化不管是對於秋葵或者是韭菜的鎘含量的影響都比轉換成 $[H^+]$ 的 pH 的影響大，當土壤鎘濃度不變的情況下，轉換成 $[H^+]$ 的 pH 對韭菜 ($\delta = -0.3095$) 鎘含量的變化量比秋葵 ($\delta = -0.1285$) 為小。

本研究得到結論：以斜率觀點來看，土壤鎘濃度的變動對於蔬菜鎘含量的影響整體來說比 CEC 和 pH 為大，但是 γ 絕對值越大的蔬菜，在土壤鎘濃度及 pH 固定的情況下，其鎘含量會隨 CEC 的減少而增加，且 CEC 值越低，蔬菜鎘含量的增加幅度會越顯著，所以本研究建議鎘含量預測模式中 γ 絕對值比較大的蔬菜選擇種植地點宜考慮避免種植在 CEC 值低的土壤，避免含鎘超標蔬菜產出。對於模式中只有 β 、 δ 的蔬菜而言， δ 絕對值越小的蔬菜，在土壤鎘濃度固定的情況下，其鎘含量變動量會隨 $[H^+]$ 的增加（pH 的減少）比 δ 絕對值較小的蔬菜為小。

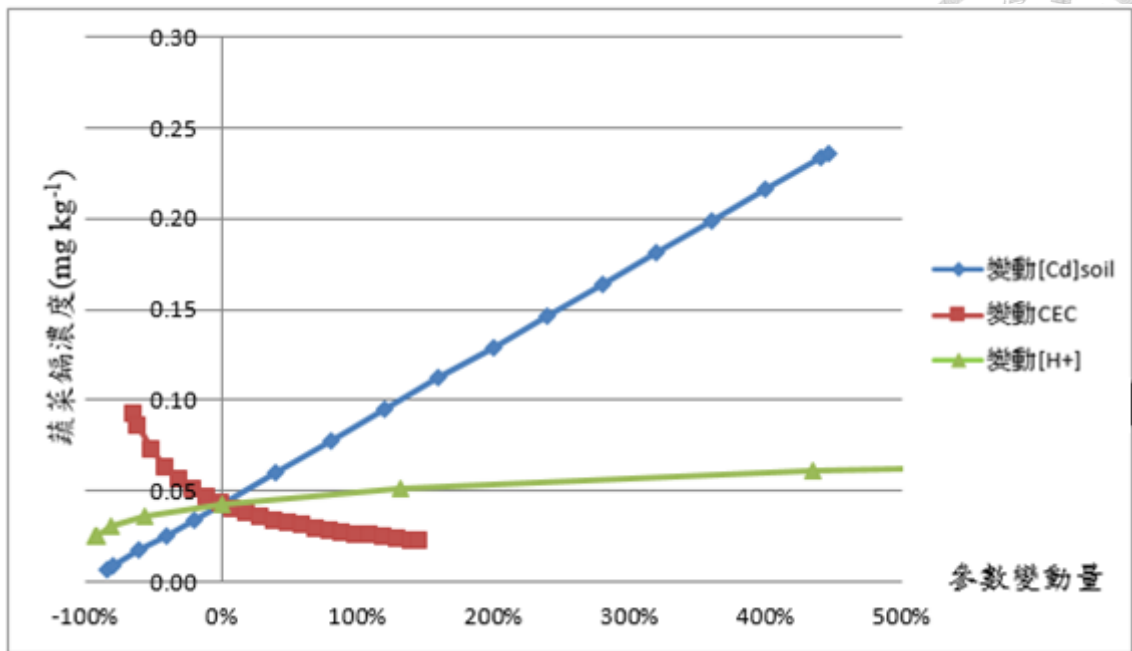


圖 4.41 紅鳳菜蜘蛛網圖（聚焦尺度）

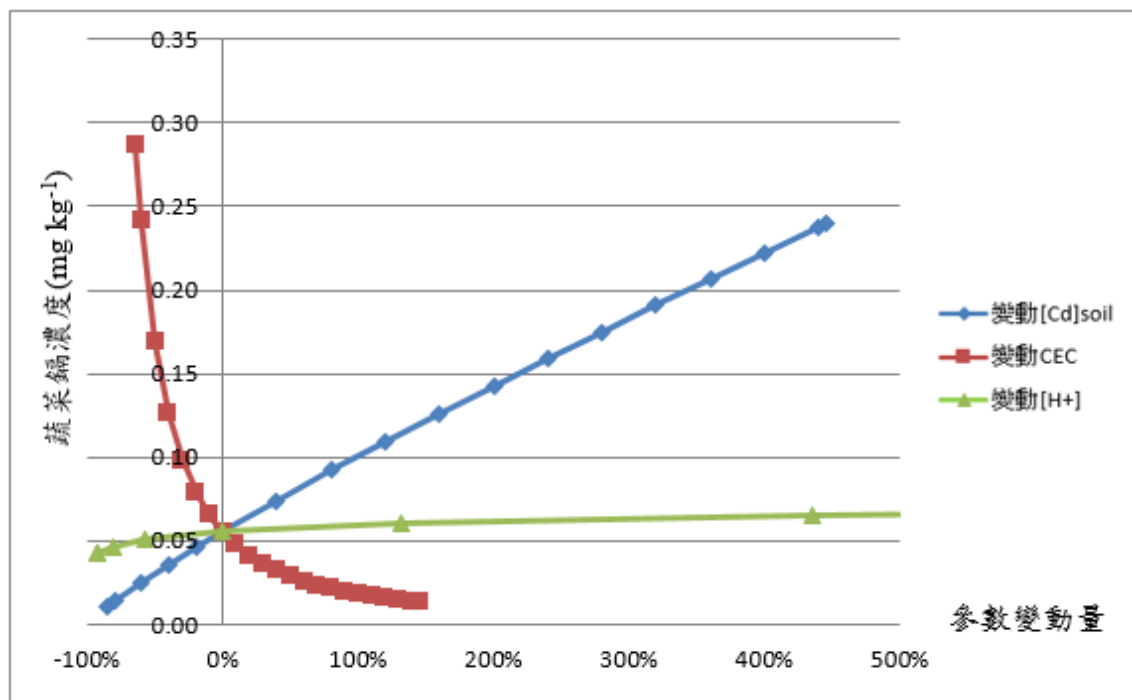


圖 4.42 尖葉萵苣蜘蛛網圖（聚焦尺度）

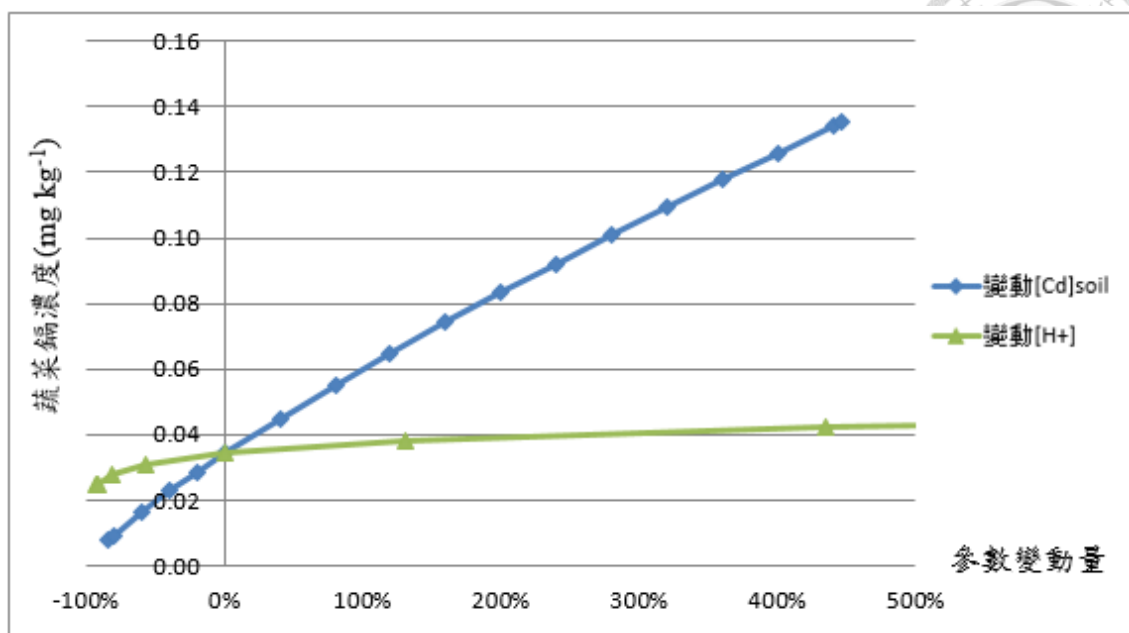


圖 4.43 秋葵蜘蛛網圖（聚焦尺度）

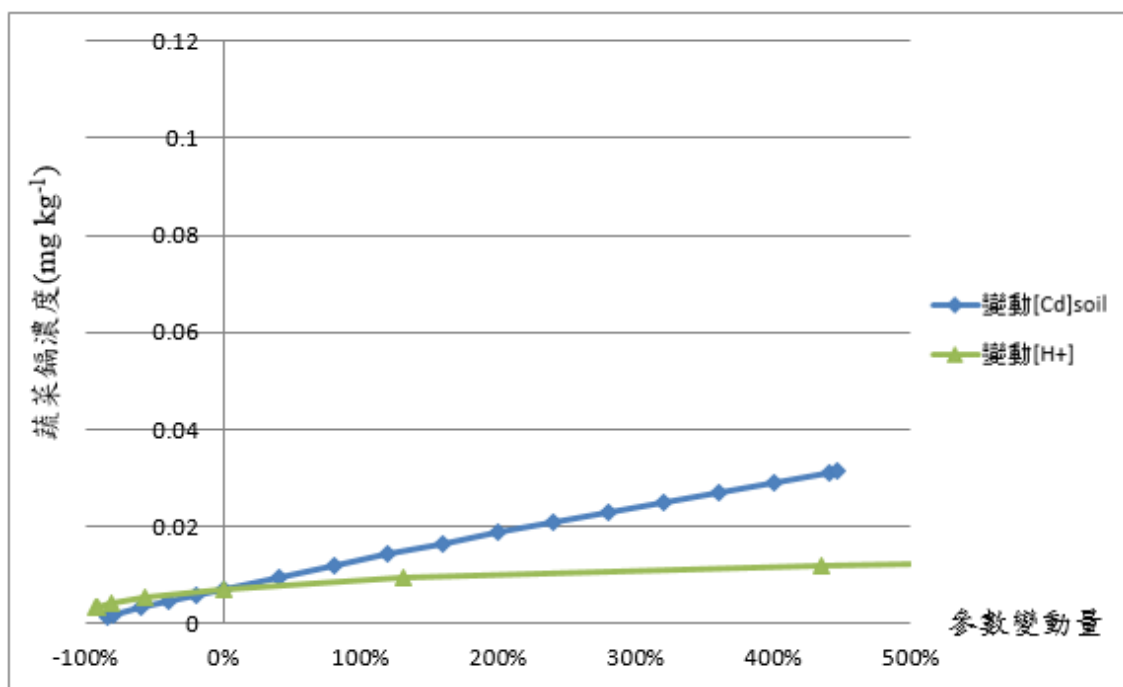


圖 4.44 韭菜蜘蛛網圖（聚焦尺度）

(三) 以全研究尺度觀點看敏感度分析結果

經由圖 4.45、圖 4.46，可以完整看出 $[H^+]$ 的增加對於紅鳳菜及尖葉萵苣鎘含量影響的全貌，如果以斜率來看， $[H^+]$ 的增加對於紅鳳菜及尖葉萵苣鎘含量影響可以說是微乎其微，但是將蜘蛛網圖的尺度放大，可以看到 $[H^+]$ 對於紅鳳菜鎘含量的影響並不遜於土壤鎘濃度，其對紅鳳菜鎘含量影響的最大值超過土壤鎘濃度對紅鳳菜鎘含量影響的最大值，但 $[H^+]$ 對尖葉萵苣（ $\delta = -0.1005$ ）鎘含量的影響就不像對紅鳳菜（ $\delta = -0.2082$ ）一樣大。經由圖 4.47、4.48，可以完整看出 $[H^+]$ 的增加對於秋葵及韭菜鎘含量影響的全貌，可以看到 $[H^+]$ 對於秋葵（ $\delta = -0.1285$ ）鎘含量的影響，比土壤鎘含量對秋葵鎘含量的影響稍小，但是韭菜（ $\delta = -0.3095$ ）的情況就不同， $[H^+]$ 對於韭菜鎘含量的影響，比土壤鎘含量對韭菜鎘含量的影響為大，其對韭菜鎘含量影響的最大值超過土壤鎘濃度對韭菜鎘含量影響的最大值達 2 倍以上。

本研究得到結論：將蜘蛛網圖的尺度放大來看， $[H^+]$ 對於蔬菜鎘含量的影響一定會比 CEC 對蔬菜鎘含量的影響為大，且 δ 絕對值越大的蔬菜，其受 $[H^+]$ 的影響會越來越大，甚至比其受土壤鎘濃度的影響大上許多，因此本研究建議鎘含量預測模式中 δ 絕對值比較大的蔬菜選擇種植地點宜考慮避免種植在 pH 值低的土壤，避免含鎘超標蔬菜產出。

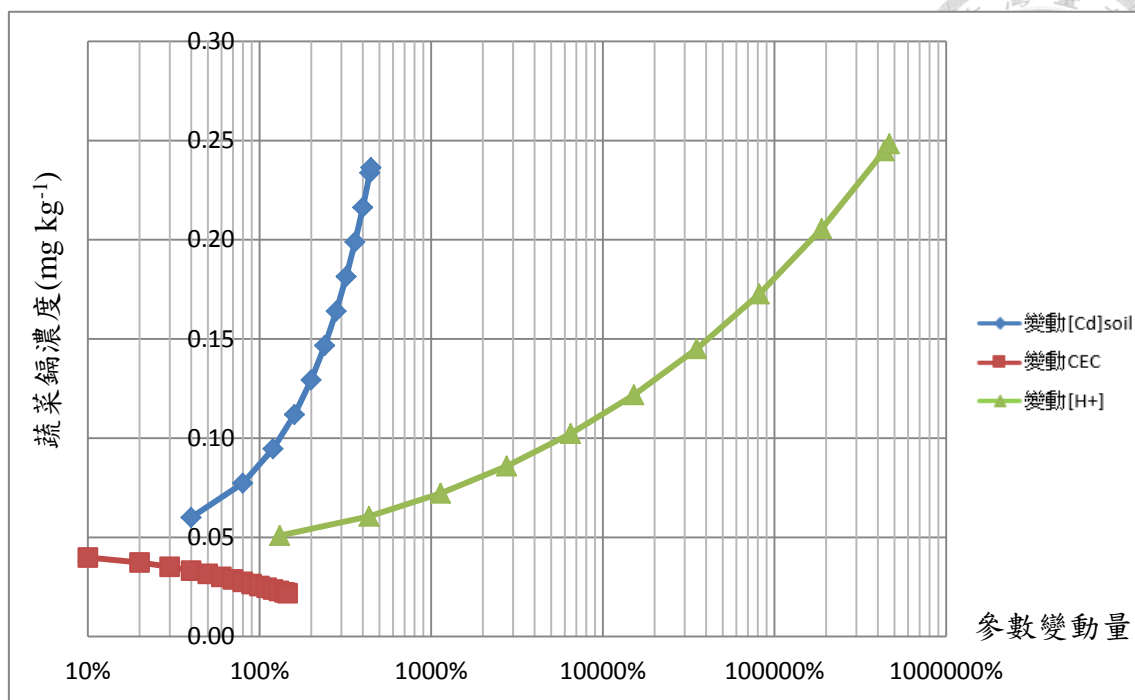


圖 4.45 紅鳳菜蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數）

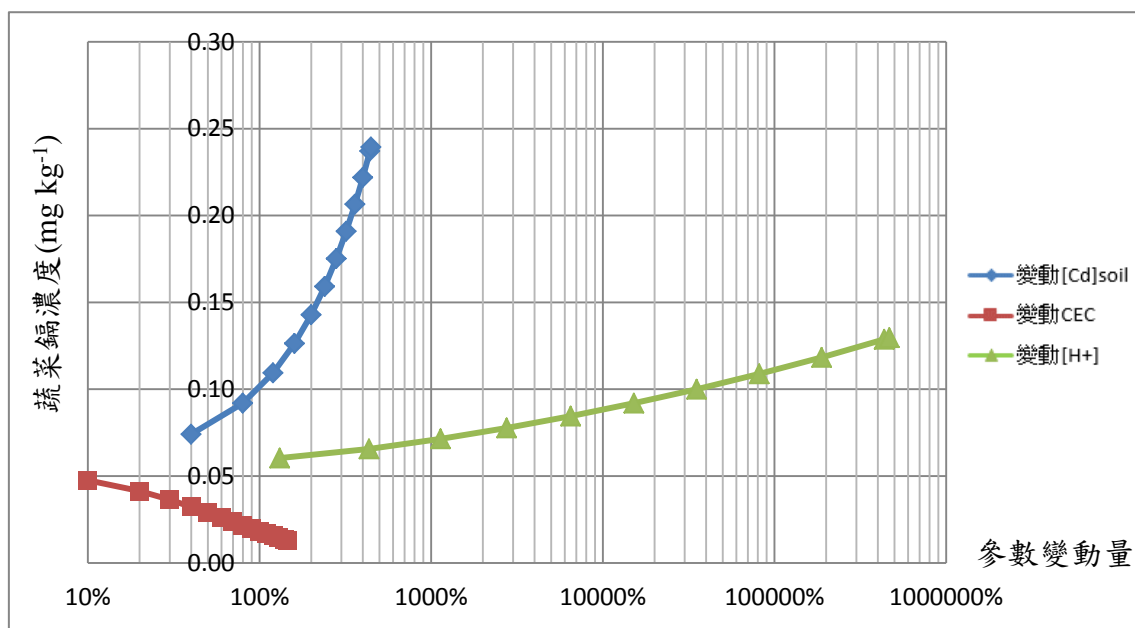


圖 4.46 尖葉萵苣蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數）

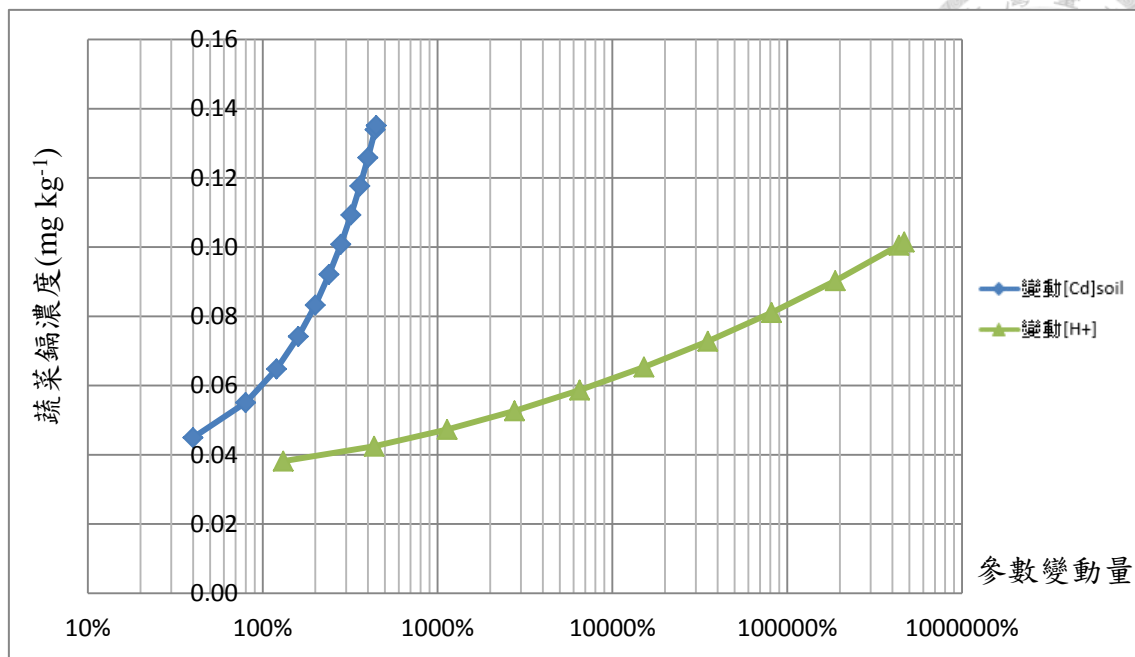


圖 4.47 秋葵蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數）

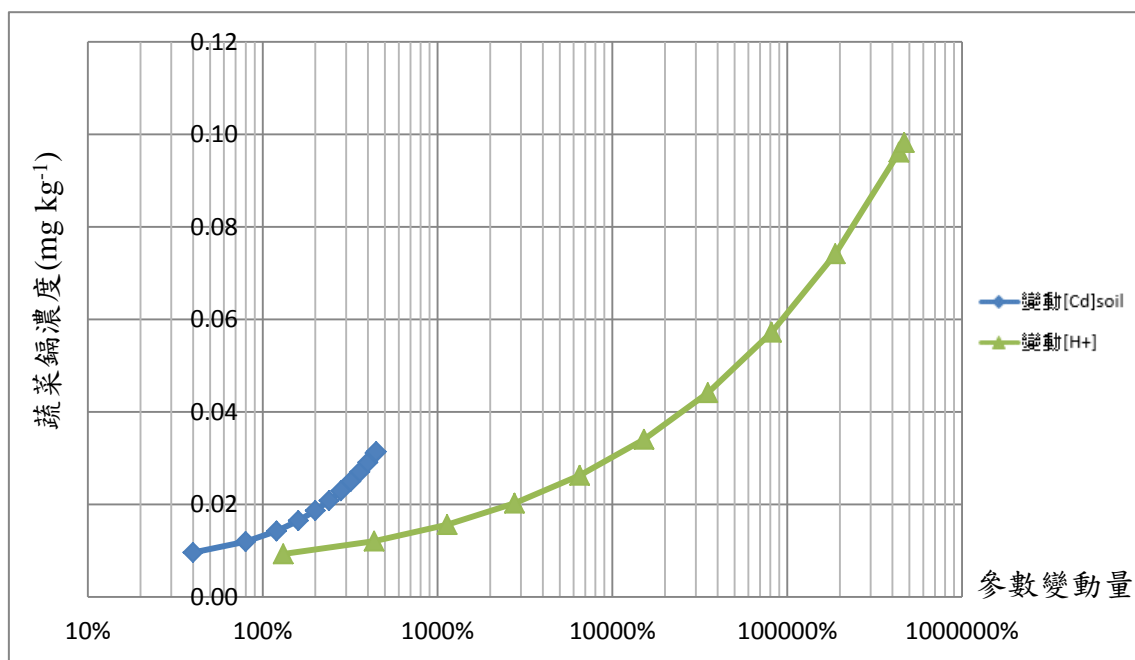


圖 4.48 韭菜蜘蛛網圖（全研究尺度，橫軸座標取對數）

第五章 結論與建議



5.1 結論

1. 經由本研究推估於雲林縣農地種植 31 種蔬菜的鎘含量，可發現平均鎘濃度最高的 5 種蔬菜為福壽/翠花萵苣、菠菜、尖葉萵苣、圓葉萵苣及莧菜，最低的 5 種蔬菜為蘿蔔、甘藍、青花菜、絲瓜及胡瓜；小葉菜類的蔬菜鎘濃度普遍高於其他類的蔬菜，瓜菜及果菜類是所有蔬菜類別中，平均鎘濃度最低的。
2. 蔬菜重金屬鎘限量標準規範依不同種類而異，小葉菜類、豆類及豆菜類的限量標準為 0.2 mg kg^{-1} ，根莖類的限量標準為 0.1 mg kg^{-1} ，（半）結球類及花菜類、瓜菜及果菜類及鱗莖類的限量標準為 0.05 mg kg^{-1} 。因此，所推估之蔬菜鎘含量須配合其對應之限量標準評析。福壽/翠花萵苣、秋葵及大蒜的平均鎘濃度分別為 0.11 mg kg^{-1} 、 0.046 mg kg^{-1} 及 0.051 mg kg^{-1} ，與其重金屬鎘限量標準（ 0.05 mg kg^{-1} ）比較，發現這些蔬菜屬於超標風險較高之種類。
3. 本研究將各種蔬菜的推估平均鎘含量與國人每年食用蔬菜量結合做計算，發現攝食葉菜類是攝食蔬菜中鎘進入人體的最主要來源，不僅是因為國人攝食的葉菜類最多，亦因小葉菜類的平均鎘濃度較高的緣故。如果國人攝取的蔬菜之鎘濃度都為其限量標準，則我國民眾經由攝取蔬菜進入人體的鎘將會占 WHO 建議每人每天容許攝取量的 43 % 左右。
4. 以敏感度分析圖的斜率觀點來看，土壤鎘濃度的變動對於蔬菜鎘含量的影響整體來說比 CEC 和 pH 為高，但是 γ 絕對值越大的蔬菜，其會隨 CEC 值越低，其鎘含量的增加幅度會越明顯。將蜘蛛網圖以大尺度角度觀看， $[\text{H}^+]$ 對於蔬菜鎘含量的影響比 CEC 對蔬菜鎘含量的影響為大，且 δ 絕對值越大的蔬菜，其受 $[\text{H}^+]$ 的影響會越來越顯著，甚較受土壤鎘濃度的影響更大。

5.2 建議

1. 超標機率因各種蔬菜之限量標準不同而異，因此對超標機率較大之蔬菜，為了預防其超過限量標準，建議有關單位可以參考本研究結果選擇適合種植地點種植。
2. 本研究發現攝食葉菜類是經由攝食蔬菜鎘進入人體的最主要途徑，建議有關單位宜多留意小葉菜類蔬菜的鎘含量，以保護我國民眾食用蔬菜安全。
3. 本研究經由敏感度分析得知，鎘含量預測模式中 γ 絕對值比較大的蔬菜選擇種植地點宜考慮避免種植在 CEC 值低的土壤，如尖葉萵苣；鎘含量預測模式中 δ 絕對值比較大的蔬菜選擇種植地點宜考慮避免種植在 pH 值低的土壤，如韭菜，避免含鎘超標。

參考文獻



- 中華土壤肥料學會，2010。農作物重金屬污染監測管制講習會講義。
- 王明光，1997。土壤環境化學，國立編譯館
- 內政部國土測繪中心，2007。土地利用面積統計資訊查詢。
- 行政院農業委員會，2013。農業統計資料查詢。
- 行政院衛生福利部，2007。發佈「食米重金屬限量標準」，衛福部授食字第 0960406296 號令。
- 行政院衛生福利部，2013。修正「蔬果植物類重金屬限量標準」，衛福部授食字第 1021350146 號令。
- 行政院衛生福利部，2013。修正「食用菇類重金屬限量標準」，衛福部授食字第 1021350146 號令。
- 林浩潭、翁愷慎、李國欽，1992。作物中重金屬含量調查及我國國民對重金屬取食量之探討，中國農業化學會誌，30(40)，463-470。
- 林毓雯、劉滄琴、陳吉村、湯雪溶、陳鴻堂、卓家榮、蔡正賢、林永鴻、張繼中、蔡淑珍、黃維廷，2012。臺灣地區蔬菜鉛、鎘濃度調查，台灣農業研究，60(1)，38-51
- 林毓雯、劉滄琴、郭鴻裕、江致民、何雅婷、陳丹桂，2014。蔬菜吸收金屬含量之研究及農地新興工業污染金屬元素脂含量調查，行政院環保署。
- 江季亭、林恕德、蘇哲俊、蔡國陽、連怡斌、黃耀輝、張尊國，2009。土壤重金屬鎳含量與口腔癌發生率之空間相關性探討，農業工程學報，第 55 卷，第 4 期，19-34。
- 江博煌、謝顯堂、陳筱蕙、詹大千、劉德明、溫啟邦、陳筱蕾、毛義方，2006。利用地理資訊系統評估台南安順污染廠址周圍之土壤污染，台灣公共衛生雜誌，第 25 卷，第 5 期，363-371。

李達源、莊愷瑋，2003。應用地理統計界定污染場址中之污染範圍，臺灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第7期，2-13。

吳家誠、呂進榮，2003。臺灣地區不同土綱土壤中重金屬總量檢測分析，行政院環境保護署環境檢驗所。

施如佳、王炯文、周宏奕、黃明坤、潘志寬，2013。101 年度市售水產品重金屬含量調查分析，食品藥物研究年報，4，70-76。

施如佳、陳宛瑩、高雅敏、施養志，2008。臺灣地區市售蔬菜類重金屬含量背景資料之建立，藥物食品檢驗局調查研究年報，26，212-224。

徐貴新、張尊國、林裕彬，2001。地理統計結合地理資訊系統應用於土壤污染防治，中國農業工程學報，第47卷，第4期，40-51。

徐貴新、張尊國、林裕彬、徐明麟，1999。利用多變量指標克利金界定土壤重金屬污染範圍，中國農業工程學報，第45卷，第2期，40-51。

陳韋如，2013。以克利金法增進應變叢及土壤調查採樣之效率-以桃園污染區為例，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。

翁震圻，2006。農作物重金屬污染監測與管制措施，農政與農情，169。

張尊國、王允義、林裕彬，1996。利用地理統計方法鑑識土壤重金屬污染之空間分佈，第九屆環境規劃與管理研討會論文集，169-176。

張尊國、黃國珍、徐貴新，1997。土壤重金屬污染特性探討-因子分析，中國農業工程學報，第43卷，第2期，11-19。

郭鴻裕、朱戡良、江志峰、劉滄琴、陳丹桂、何建仁、黃淑美，2009。作物（水稻）吸收土壤重金屬機制與農產品安全之影響探討(3)，行政院環保署。

郭鴻裕，2014。鎘污染潛在危害農地蔬菜安全性調查，行政院環保署。

陳瑤瓊、王依婷、管麗珍、林宜蓉、周秀冠，2013。食品藥物研究年報，4，77-85。

國土利用調查成果資訊網，2015。國土利用資料查詢。



楊晴晴、鄭景智、劉曜文、李達源、莊愷瑋，2012。以地理統計結合 X 射線螢光光譜分析推估土壤銅濃度的空間分佈，作物、環境與生物資訊，第 9 卷，第 2 期，108-122。

楊福麟、詹榮弘、蔡易達，1997。臺灣中部地區市售蔬果中重金屬（鉛、鎘）含量調查，藥物食品檢驗局調查研究年報，15，180-183。

鄭森源、萬鑫森，1992。地理統計學在土壤污染方面之應用，中國農業化學會誌，第 32 卷，第 4 期，406-429。

Australian Government, 2005. Information about cadmium in Australia.
http://www.chem.unep.ch/.../Files/Submission%20GOV/Submis_GOV_AUS/Submis_GOV_AUSTRALIA-nnote-cadmium-Dec%202005

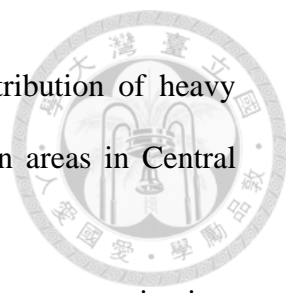
Burgess, T. M., Webster, R., 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *Journal of Soil Science*, Vol. 31, 315-331.

Chaney, R. L., 1980. Health risks associated with toxic metals in Municipal Sludge. *Sludge Health Risk of Land Application*, 59-83.

Chaney, R. L., and S. B. Hornick, 1978. Accumulation and effects of cadmium on crops. In: *Proceeding of the First International Cadmium Conference*, San Francisco, Metals Bulletin Ltd., London. 125-140.

Chang, A. C., Page, A. L., Warneke, J. E., Resketo, M. R., & Jones, T. E., 1983. Accumulation of Cadmium and Zinc in Barley Grown on Sludge-Treated Soils – a Long-Term Field-Study. *Journal of Environmental Quality*, 12(3), 391-397.

Chen, W., Li, L., Chang, A. C., Wu, L., Chaney, R., L., Smith, R., & Ajwa, H., 2009. Characterizing of As, Cd, and Pb in California croplands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129, 212-220.

- 
- Cheng, B. Y., Fang, W. T., Shyu, G. S., Chang, T. K., 2013. Distribution of heavy metals in the sediments of agricultural fields adjacent to urban areas in Central Taiwan. *Paddy and Water Environment*, Vol. 11, 343-351.
- Cooper, R. M., Istok, J. D., 1988. Geostatistics applied to ground water contamination, *L. Envir. Engrg., ASCE*, Vol. 114, No 2, 270-286.
- Davis, R. D., and C. Calton-Smith, 1980. Crops as indicators of the significance of contamination of soil by heavy metals. WRC, Stevenage TR140.
- Debusk, W. F., K. R. Reddy, M. S. Koch and Y. Wang, 1994. Spatial Distribution of Soil Nutrients in a Northern Everglades Marsh Water Conservation Area 2A. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 543-552.
- FAO/WHO, 2010. Summary and conclusions of the seventy-third meeting the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.
- IARC, 1993. Summarize & evaluation: Cadmium and cadmium compounds (Group 1). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 58.
- Jeffery, L. Smith, Jonathan, J. Halvorson and Robert, I. Papendick, 1993. Using Multiple-variable Indicator Kriging for evaluation Soil Quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 57, 43-749.
- Jinadasa, K. V. P. N., Milham, P. J., Hawkins, C. A., Cornish, P. S., Williams, P. A., Kaldor, C. J., & Conroy, J. P., 1997. Survey of Cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney. Australia (Vol. 26). Madison, WI, ETATS-UNIS: American Society of Agronomy.
- Lin, Y. W., T. S. Liu, C. T. Chen, H. J. Tang, H. T. Chen, J. R. Job, J. H. Tsai, Y. H. Lin, C. C. Chang, S. J. Tsai, and W. T. Huang, 2012. Contents of cadmium and lead in vegetable crops produced in Taiwan. *Jour. Agric. Res. Taiwan*, 61(1): 38-51.

Mench, M. J., 1998. Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 67, 175-187.

Musa B. and Abdullahi M. S., 2013. The toxicological effects of cadmium and some other heavy metals in plants and humans. *Journal of Environmental Science and Water Resources*, Vol. 2(8), 245-249.

Römkens, P., Groenenberg, J., Bonten, L., De Vries, W., & Bril, J., 2004. Derivation of partition relationships to calculate Cd, Cu, Ni, Pb and Zn solubility and activity in soil solutions: Alterra.

Römkens, P., Guo, H. Y., Chu, C. L., Liu, T. S., Chiang, C. F., & Koopmans, G. F., 2009. Characterization of soil heavy metal pools in paddy fields in Taiwan: chemical extraction and solid solution partitioning. *Journal of Soils and Sediments*, 9(3), 216-228.

Tavonen, R., 1996. Contents of lead and cadmium in foods and diets. *Food Rev. Int.*, 12(1), 1-70.

Warrick, A. W., Myers, D. E., Nielsen, D. E., 1986. Geostatistical methods applied to soil science, 53-73.

Webster, R., Oliver, M. A., 1989. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: VI. Disjunctive kriging and mapping the conditional probability. *J. Soil Sci.*, Vol. 40, 497-512.

WHO, 2010. Exposure to Cadmium: A Major Public Health Concern World Health Organization.

Yost, R. S., Uehara, G., Fox, R. L., 1982, Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semivariograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 1028-1032.

Zhang, Z. W., Watanabe, T., Shimbo, S., Higashiwaka, K., & Ikeda, M., 1998. Lead and Cadmium contents in cereals and pulses in north-eastern China. *Sci Total Environ*, 220(2-3), 137-145.

