

國立臺灣大學公共衛生學院公共衛生碩士學位學程

碩士論文—實務實習成果報告

Master of Public Health Program

College of Public Health

National Taiwan University

Master's Thesis—Practicum Report



有機磷類農藥殘留累積膳食風險評估：以新北市為例

Cumulative Risk Assessment of Organophosphorus Pesticide

Residues in Food: A New Taipei City Case Study

吳承臻

Cheng-Chen Wu

校內單位指導教授：羅宇軒 助理教授

實習單位指導老師：劉君豪 簡任技正

Advisor: YU-SYUAN LUO, Ph.D.

Preceptor: CHUN-HAO LIU, Senior Technical Specialist

中華民國 114 年 7 月

July, 2025

誌謝



本篇論文的完成首要感謝的就是指導教授羅宇軒助理教授，第一次跟教授討論就感受到他對研究的熱情，腦子裡有各式各樣的研究想法，每次遇到困難的時候詢問教授，都會立即撥雲見日，也常常引領我找到新的思路，而且也盡量擠出時間配合我為數不多的到校日，沒有教授的指導提點，可能無法順利寫出本篇論文，更遑論畢業，教授居功至偉。

接下來要感謝實習計劃書及最後口試的口試委員們，感謝風險評估的專家吳焜裕教授，為我不成熟的研究提供了許多修改方向，提醒風險評估的重點與注意事項，讓我的論文更加精確；感謝農業部農業藥物試驗所的蔡韙任主任秘書，提供臺灣農藥評估發展的專業見解；感謝新北市政府衛生局的劉君豪簡任技正，在百忙之中撥冗幫我確認論文內容並參加口試，在論文寫作中，也提供許多寶貴的建議與協助，衷心感謝。

也感謝新北市政府衛生局能夠給我在職進修的機會，可以請公假讀書，還可以應用局裡的龐大的資料庫進行寫作，感謝長官們的包容還有同仁們的體諒，尤其是楊舒秦科長及萬柏彥視察，知道我每周要上課，都會盡量幫我把會議排開，還會幫我看公文，不勝感激。

能夠順利畢業要感謝的人太多了，從推坑報名臺大公共衛生碩士學位學程的學姊姚香禔、邱子宜，義不容辭就幫我寫推薦信的許朝程前副局長、林東毅教授，到一路上互相扶持一同出遊的同學們，還有認真教學溫柔鼓勵的老師們，雖然因為是在職生所以和研究室的學弟妹們沒有過多交集，但出遊的時候感謝大家讓我這個老人一起融入，在 meeting 的時候也都能感受到原來這就是臺大碩士生的專業風采。

最後要感謝我的家人，你們是我最大的後盾，也是我最大的精神支柱，在讀研究所及寫論文的期間，給我最大的包容與支持，永遠愛你們。

中文摘要



目前已經有多項研究表明有機磷類農藥會抑制乙醯膽鹼酯酶，使神經傳導物質乙醯膽鹼在神經元連接處積聚，破壞中樞神經系統神經元發育，傳統研究農藥殘留風險，主要針對單一化合物進行評估，但消費者攝食食品常含有多種農藥殘留，國際上目前致力於研究並制定方法評估農藥的累積和協同效應，美國環保署訂有「具有共同毒性機制的農藥化學品累積風險評估指南」，針對有機磷等 5 組相同毒性作用機制類別農藥進行累積風險評估；主要是使用相對效力因子 (RPF) 方法來確定與接觸有機磷農藥相關的累積風險。

目前臺灣法規僅針對單一農藥進行限量標準，並未針對累積暴露量及風險控管，依據農業部動植物防疫檢疫署農用藥劑分類及作用機制檢索，乙醯膽鹼酯酶抑制類有機磷類農藥共計 47 種，藉由分析新北市衛生局 109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量之檢驗數據，並利用國家攝食資料庫數據評估蔬菜水果每日的攝食量，以 RPF 方法估計有機磷類農藥累積飲食暴露量，計算出每日攝取量平均值為每日每公斤體重 0.0003992 毫克，約為達馬松 ADI 之 10%，而第 95 百分位 (P95) 的人及第 99 百分位 (P99) 的人累積攝食量約為達馬松 ADI 之 30% 及 95%，尚於可接受範圍，但還是有約 0.92% 的民眾累積攝食量會超過 ADI 值，顯示主管機關仍需持續監控並確認農藥累積風險。

ABSTRACT



Numerous studies have confirmed that organophosphate pesticides inhibit acetylcholinesterase (AChE), leading to the accumulation of the neurotransmitter acetylcholine at neuronal synapses and thereby disrupting the development of neurons within the central nervous system. Traditionally, pesticide residue risk assessments have focused on evaluating individual compounds. However, given that consumers are commonly exposed to multiple pesticide residues simultaneously through food intake, there is a growing international emphasis on developing methodologies to assess the cumulative and synergistic effects of such exposures. In this context, the United States Environmental Protection Agency (EPA) has issued the Guidance on Cumulative Risk Assessment of Pesticides Sharing a Common Mechanism of Toxicity, which specifically addresses the cumulative risks of five groups of pesticides, including organophosphates, that act via similar toxicological mechanisms. The primary approach adopted in this guidance is the use of the Relative Potency Factor (RPF) method to quantify cumulative risks associated with exposure to organophosphate pesticides.

In contrast, current regulations in Taiwan set maximum residue limits (MRLs) for individual pesticides but do not establish controls based on cumulative exposure or cumulative risk management. According to the pesticide classification and mechanism database compiled by the Bureau of Animal and Plant Health Inspection and Quarantine under the Ministry of Agriculture, there are 47 organophosphate pesticides identified as acetylcholinesterase inhibitors. To address this gap, the present study analyzed pesticide residue monitoring data for vegetables and fruits collected by the New Taipei City Department of Health from 2020 to 2024, and incorporated dietary intake data from the

National Food Consumption Database to estimate cumulative dietary exposure to organophosphate pesticides using the RPF method.

The results indicated that the average daily intake was 0.0003992 mg/kg body weight per day, corresponding to approximately 10% of the acceptable daily intake (ADI) of methamidophos. At higher exposure percentiles, the cumulative intake for the 95th and 99th percentile of the population reached approximately 30% and 95% of the methamidophos ADI, respectively, suggesting that cumulative exposures generally remained within acceptable safety margins. Nevertheless, approximately 0. 92% of individuals exhibited cumulative dietary exposures exceeding the ADI, highlighting the need for regulatory agencies to strengthen monitoring and management of cumulative risks arising from pesticides sharing the same mechanism of action.

目次



誌謝	i
中文摘要	ii
ABSTRACT	iii
目次	v
圖次	vii
表次	viii
第一章 緒論	1
第一節 文獻回顧.....	1
第二節 研究動機.....	7
第三節 研究目的.....	11
第二章 材料與方法	12
第一節 研究架構.....	12
第二節 農藥殘留資料.....	12
第三節 攝食資料.....	15
第四節 RPF 資料.....	16
第五節 暴露量計算.....	23
第三章 研究結果.....	25
第一節 攝食資料與農藥殘留資料分析.....	25
第二節 點估計 (LB/UB) 計算	28

第三節	點估計與機率模擬方式比較.....	32
第四節	暴露量模擬.....	32
第五節	性別及年齡分層之累積暴露量.....	36
第六節	與傳統累積風險評估（HQ）比較.....	37
第四章	討論.....	39
第五章	研究限制.....	42



圖次



圖 1-1 農藥登記審查流程圖	2
圖 1-2 農藥長期攝食暴露評估原則	3
圖 1-3 市售蔬果農產品農藥殘留管理流程圖	4
圖 1-4 陶斯松農藥禁用、限用情形	4
圖 1-5 有機磷與乙醯膽鹼酯酶不可逆結合的示意圖	5
圖 1-6 有機磷類及胺基甲酸鹽類農藥作用機制及對人體影響	6
圖 1-7 分層考慮多種化學物質暴露危害的方法	8
圖 2-1 本研究架構流程圖	12
圖 3-1 蔬果及農藥檢出情形分析	27
圖 3-2 其他大漿果類陶斯松農藥殘留量點估計與機率模擬分布	32
圖 3-3 累積暴露量計算	35
圖 3-4 農藥累積暴露量分別以性別及年齡分層	37
圖 3-5 HI 及 RPF 累積暴露量與達馬松比值的比較	38

表次



表 1- 1	浙江省蔬菜對成人和兒童的潛在健康風險	10
表 2- 1	各蔬果品項抽驗件數及檢出項次數	13
表 2- 2	各農藥檢出件數	17
表 2- 3	各有機磷類農藥之相對效力因子 (RPF)	22
表 3- 1	109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量抽驗結果	25
表 3- 2	LB 及 UB 有機磷類農藥累積暴露量 (農藥分層) (單位 : mg/kg bw/day)	29
表 3- 3	LB 及 UB 有機磷類農藥累積暴露量 (蔬果分層) (單位 : mg/kg bw/day)	30

第一章 緒論

第一節 文獻回顧



臺灣作為一個海島型國家，地狹人稠，耕地面積有限，但為了滿足日益成長的人口對糧食與蔬菜的需求，農業生產必須朝向高度集約化的方向發展。而且臺灣氣候溫暖潮濕，病蟲害及雜草問題嚴重，民眾對於農產品的品質及種類要求亦不斷提升，農民為了確保農作物的產量與品質，就需要依賴農藥進行防治[1]。依據國際作物永續發展協會(Crop Life Organization)統計，適時使用農藥可提高農作物產量10~20%，還能夠提高勞動生產效率及降低生產成本[2]。因此，農藥早已成為臺灣農業生產中不可或缺的一環，但也對生態環境與食品安全構成潛在風險。

依據聯合國糧農組織(FAO)發布「2024年全球糧食與農業—統計年報」整理出2,000~2,022年各國農藥使用量，其中2,022年美國每公頃農藥用量為3.02公斤，韓國13.01公斤，日本則為11.63公斤[3]。然而2022年臺灣每公頃農藥使用量為13.78公斤[4]，略高於韓國、日本，且高於美國4倍之多。雖然農業部於2017年9月已宣示化學農藥減半政策，並於2018年開始推動，目標訂為2027年可將化學農藥有效成分用量降低至降為4,570公噸，為2014~2016年基期年平均9,139公噸的一半，或將每公頃農藥用量由基期年平均12.73公斤降至一半6.3公斤，但於2023年臺灣農藥總用量為仍高達8,941公噸[4, 5]。

依據「農藥管理法」對於農藥成品的定義，指藥品或生物製劑：用於防除農林作物或其產物之有害生物、用於調節農林作物生長或影響其生理作用或用於調節有益昆蟲生長等。依其防治對象可以大致劃分為殺蟲劑、殺菌劑、除草劑、殺蟎劑、

殺鼠劑、植物生長調節劑、殺線蟲劑與除藻劑等類別。依據「農藥管理法」，所有農藥須經主管機關審查登記後方可製造、加工與輸入。截至 2023 年，臺灣共核准 1,188 種農藥產品，其中殺菌劑 451 種，殺蟲劑 429 種，占整體品項七成以上；若依農藥性質分類，有效成分則計有 352 種[6, 7]。

臺灣的農藥管制是結合多個單位共同管控，新開發的農藥須提交包含物理性、化學性、毒理試驗、田間試驗等相關資料予農業部動植物防疫檢疫署，確認資料完備後，轉予農業部農業藥物試驗所審查，經農業部農業藥物試驗所及內部專家會議初審通過後，再交由農業部動植物防疫檢疫署邀請各領域的專家學者，組成農藥技術諮詢會共同審核，通過後會發給農藥許可證並公告此農藥的田間使用方法。接下來就會交給衛生福利部食品藥物管理署訂定最大殘留容許量（Maximum Residue Limit，簡稱 MRL）[2]。

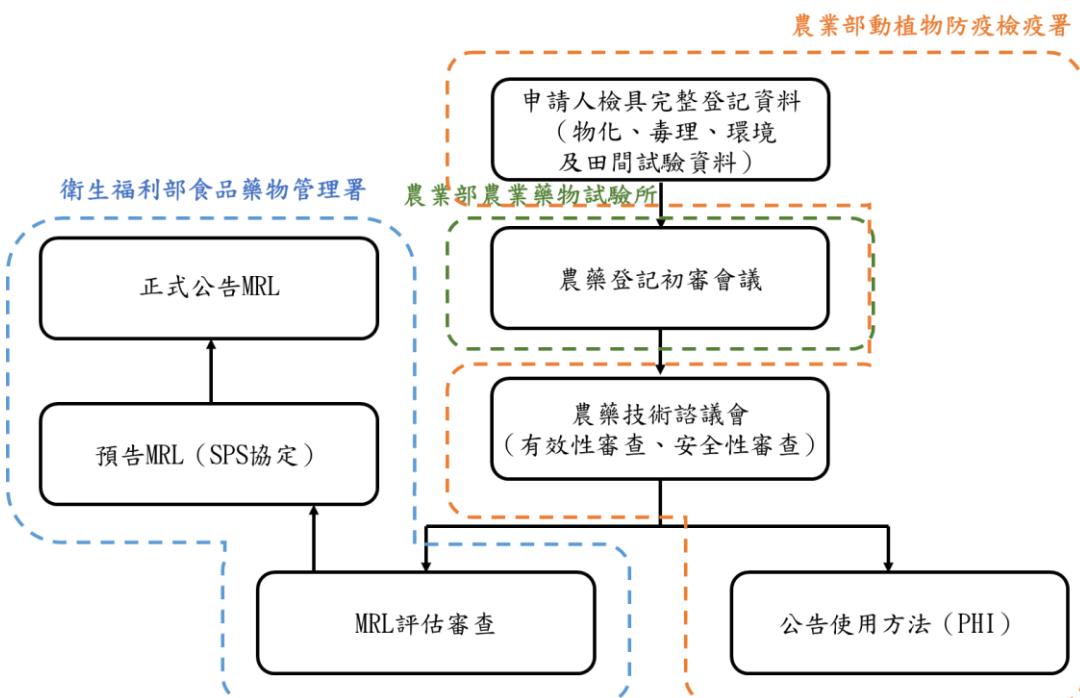


圖 1-1 農藥登記審查流程圖[2]

MRL 的制定是為了執法的目的，確認農民在遵循臺灣良好農業規範下使用農藥，民眾在長期食用農產品中殘留的農藥，不會造成人體健康不良影響的最大殘留量，能夠提供政府追蹤管理農民使用農藥的情形，並追蹤監管市場上蔬菜水果的農藥殘留情形。其訂定方式除了參酌國際標準，包含國際食品法典委員會、歐盟、美國及日本等公告之容許量，主要會評估每日可接受攝取量(Acceptable Daily Intake，簡稱 ADI)，即每人每日每公斤體重食用該農藥的可容許攝入量，並以國人的飲食習慣進行攝食暴露風險估算可能殘留該農藥的作物的總和，計算出理論最大每日攝取總量(Theoretical Maximum Daily Intake，簡稱 TMDI)和估算每日攝取總量，再除以國民平均體重(60 公斤)，並將攝取量控制低於 80% ADI[2, 8]。

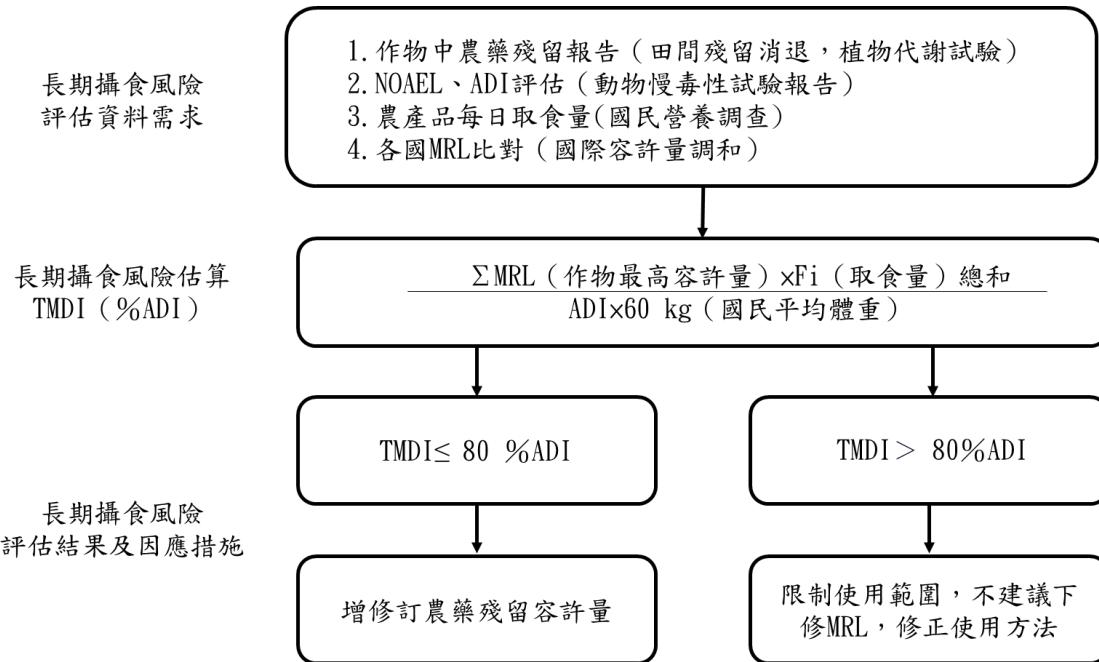


圖 1-2 農藥長期攝食暴露評估原則[8]

據前述流程綜整評估，衛生福利部於 2008 年訂定發布「農藥殘留容許量標準」，並持續依國際方向、藥劑的禁用和新研發、儀器效能及檢驗技術的精進等滾動式進行標準修訂，最近一次於 2025 年 3 月 11 日修訂[2, 9]。除農政機關會依前述農藥

使用管理監控農民使用農藥及安全採收期，而衛生機關則在農產品進入市場端後進行抽樣及檢驗，確認產品符合農藥殘留容許量標準，並持續跨部會橫向與縱向溝通，強化農產品品質的管控[10]。

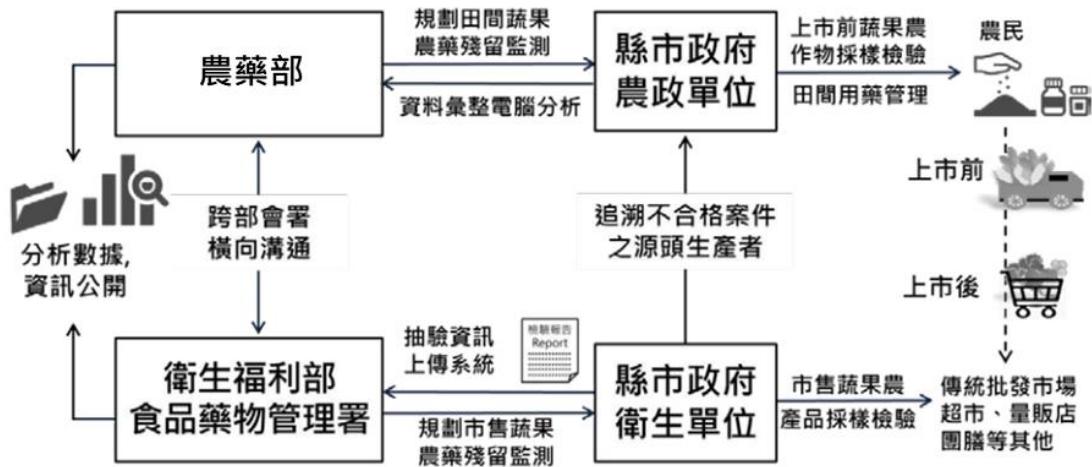


圖 1-3 市售蔬果農產品農藥殘留管理流程圖[10]

衛生福利部食品藥物管理署除辦理相關抽驗計畫，並追蹤不合格業者依法處辦，也會定期分析抽驗結果，並發布相關檢驗資料，供民眾及各界參考。依據衛生福利部食品藥物管理署 112 年度市售蔬果農產品農藥殘留監測資料，111、112 年檢出最多的農藥都是陶斯松 (Chlorpyrifos)，雖然衛生福利部配合農業部逐步依國際趨勢限用及禁用陶斯松，仍可見農民對於此類農藥的依賴[5, 11] 。

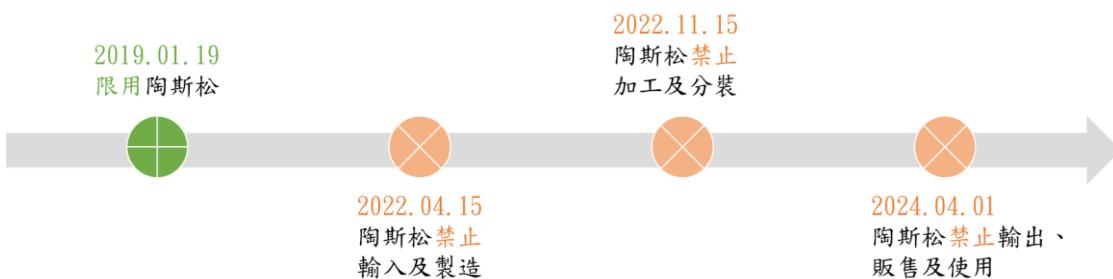


圖 1-4 陶斯松農藥禁用、限用情形[5]

陶斯松屬於有機磷類殺蟲劑，有機磷農藥約於 18 世紀初被合成出來，為磷酸

或磷酸所形成的醯胺、酯類或硫醇類化合物衍生物，自 1970 年代，隨著最常用的有機氯類殺蟲劑逐漸被淘汰或禁用，有機磷農藥的使用量達到高峰，約占美國所有殺蟲劑使用量的 70%[12, 13]，另依據中國 2022 年研究，有機磷農藥使用量仍占該國高達 60%~70%[14]，顯示有機磷仍因其價格低廉及有效性為農民常用的殺蟲劑之一。

有機磷農藥作用機制是與乙醯膽鹼酶結合，乙醯膽鹼是一種關鍵的神經傳導物質，負責將神經衝動從大腦傳遞至肌肉與骨骼系統，對維持神經系統正常功能至關重要，有機磷抑制乙醯膽鹼酶作用，使乙醯膽鹼蓄積於神經中，引發神經過度興奮及傳導異常[15]。

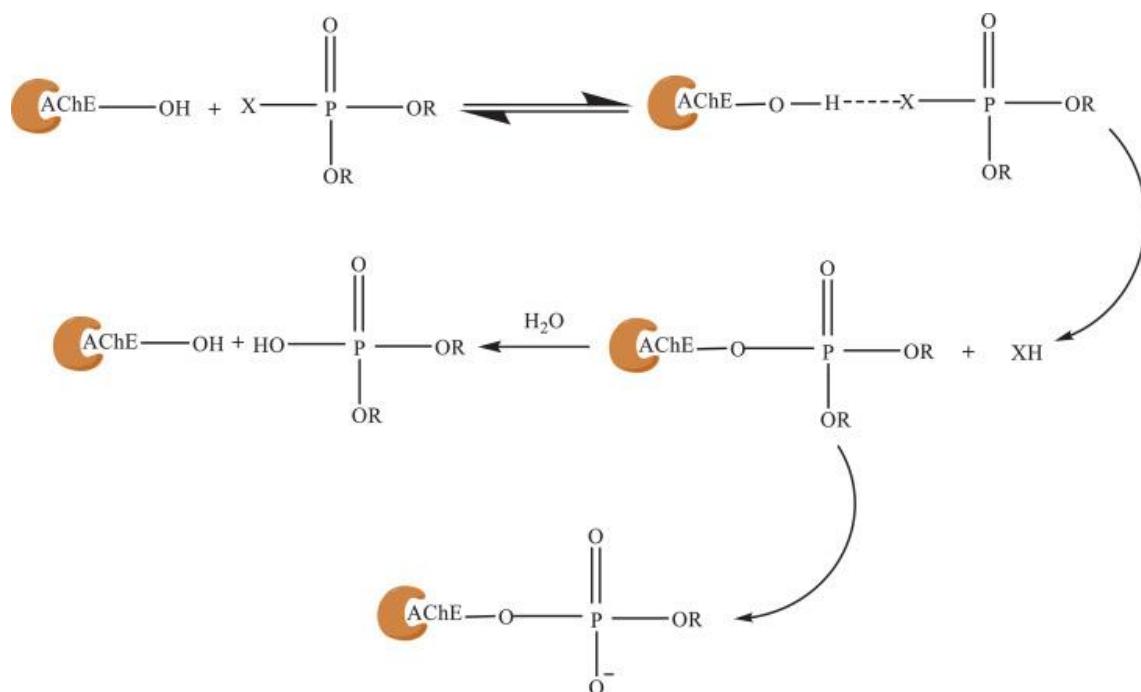


圖 1-5 有機磷與乙醯膽鹼酯酶不可逆結合的示意圖[15]

雖然胺基甲酸鹽類農藥的作用機制也是與乙醯膽鹼酶結合，但相較於胺基甲酸鹽類農藥形成可逆性結合，抑制作用通常在約 30 分鐘內可自然解除，毒性持續時間相對較短，有機磷農藥作用與乙醯膽鹼酶結合後則會在數小時或數天內發生

不可逆的老化作用 (aging)，儘管有機磷農藥在急性暴露下不一定立即造成明顯危害，然而越來越多的研究指出其對人體健康的長期影響不容忽視，相關流行病學研究結果顯示，農藥暴露與至少十種癌症的風險上升具相關性[16-18]，在非癌症的健康風險方面，農藥暴露亦與多種生理異常有關，包括生殖系統損傷、神經系統毒性、基因毒性以及皮膚異常反應[19]。

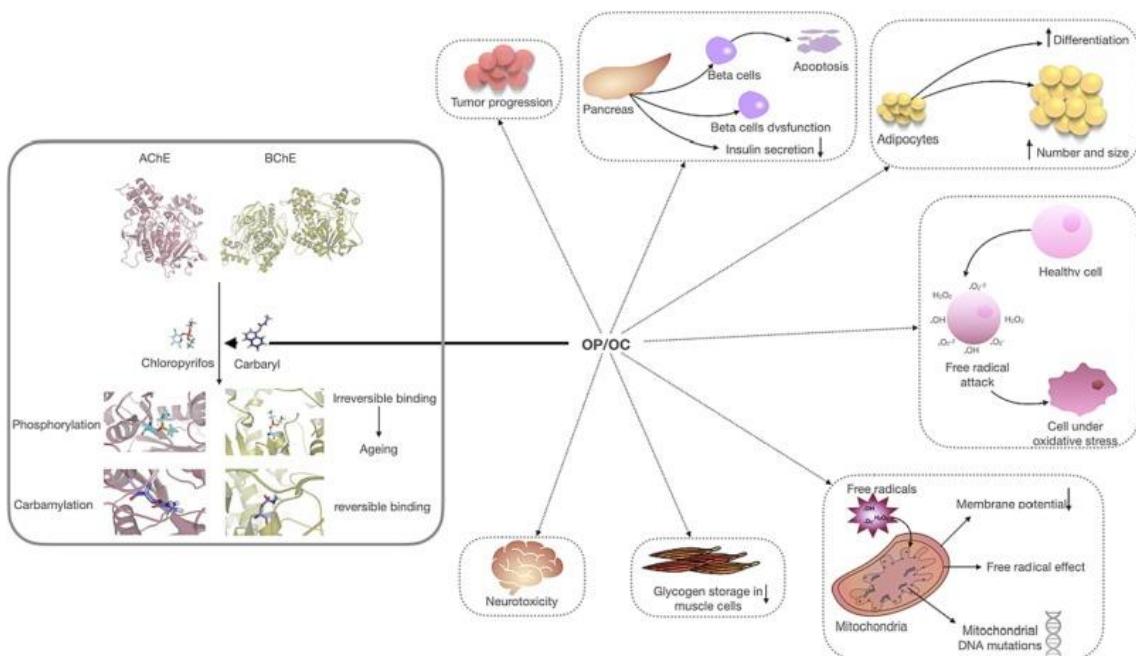


圖 1-6 有機磷類及胺基甲酸鹽類農藥作用機制及對人體影響[16]

綜合以上研究證據，可見有機磷農藥雖廣泛使用於農業生產中，但其對神經系統所造成的潛在危害值得高度關注。對於有機磷農藥的生產、應用及環境中殘留所引發之人類暴露問題，亟需進一步深入研究與系統性的風險評估，以作為政策與監管制度修正的重要依據。有機磷類的農藥有相似的作用機轉，對於人體也可能會造成相似的毒性，雖然臺灣依據國民攝食情形，對個別農藥訂有 MRL，但每日攝入多種不同農藥，僅評估單一農藥的攝入量及風險，可能會低估健康風險，且相同作用機制累積的毒性作用，也需進一步的深入探討。

第二節 研究動機

傳統的健康風險評估模式專注於單一化學物質、單一暴露途徑與來源的假設之上。然而，實際生活與環境暴露情境往往是多種暴露途徑及多種化合物同時暴露的複雜狀況。所以混合物風險評估（Mixture Risk Assessment）逐漸成為當前環境與食品安全領域的重要議題[20]。美國、加拿大及歐洲各國與世界性相關組織，包括世界衛生組織（World Health Organization，簡稱 WHO）、國際化學品安全規劃署（International Programme on Chemical Safety，簡稱 IPCS）、經濟合作暨發展組織（Organization for Economic Cooperation and Development，簡稱 OECD）、歐洲食品安全局（European Food Safety Authority，簡稱 EFSA）及美國國家環境保護局（U.S Environmental Protection Agency，簡稱 US EPA），也開始建立許多計畫，希望可以更準確的評估出累積性風險[21]。

依據世界衛生組織國際化學品安全計畫（WHO/IPCS）於 2007 年舉辦的「多重化學物質聯合暴露風險評估國際工作坊」提出，「累積暴露（cumulative exposure）」係指針對多種化學物質的總體暴露情形，而「累積風險（cumulative risk）」則是此類暴露所導致的聯合風險，常應用於具有共同毒性機制之化學物質群組，而此定義是為發展跨物質風險評估框架提供了基本依據。並建議累積風險評估可採用分層式（tiered）方法進行，依據資料的可得性與風險程度，以保守假設逐步進展至更精準地分析。在資料不足時，建議預設使用劑量加成（dose addition）模式來整合多種化學物質的毒性；化學物質的分組則可依據共同毒性機制（common MoA）或毒性作用模式進行。隨著資料完整度提高，WHO 建議導入機率方法（如 Monte Carlo 模擬）以更真實反映暴露變異性與不確定性，形成一個科學、透明且可用於

風險管理決策的分析框架[22]。

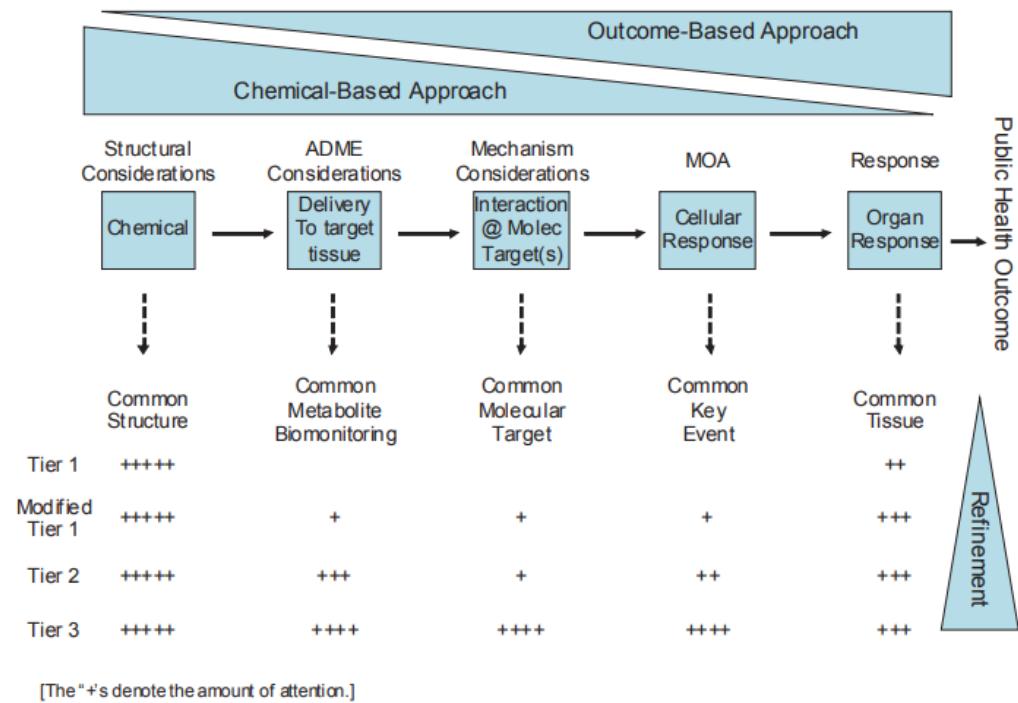
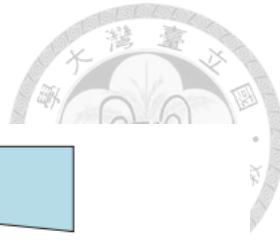


圖 1-7 分層考慮多種化學物質暴露危害的方法[22]

歐盟也啟動 EuroMix 專案致力於發展多重化學物質暴露的科學風險評估，以提供各國統一有參考性的評估模式，核心在於建立以健康效應為導向的群組式評估方法。透過共同評估群組（Common Assessment Group，簡稱 CAG）將具相似毒性結果的化學物質歸類，採用相對效力因子（Relative Potency Factor，簡稱 RPF）方法進行暴露加總，搭配蒙地卡羅風險評估（Monte Carlo Risk Assessment，簡稱 MCRA）平台等開放平台進行機率模擬，整合攝取量、殘留量與毒理資料，以支持更透明、靈活且標準化的累積性風險評估程序[20]。

相較之下，美國採取較為保守且具法規導向的方式，主要依據食品品質保護法（Food Quality Protection Act，簡稱 FQPA）要求，針對具有共同毒性作用機制（Common Mechanism of Toxicity，簡稱 CMoT）的農藥進行累積風險評估。美國

環保署訂定「具有共同毒性機制的農藥化學品累積風險評估指南」，針對有機磷、氨基甲酸鹽類等5組相同毒性作用機制類別農藥進行累積風險評估；有機磷類(OPs)農藥的毒性表現，是透過其與乙醯膽鹼酯酶結合並磷酸化該酶，從而影響中樞(腦)與周邊神經系統，行為學上的改變通常發生在劑量高於乙醯膽鹼酯酶抑制門檻時，且行為量測工具本身評估範圍有限。因此，在有機磷類累積風險評估中，血漿、紅血球與腦部的乙醯膽鹼酯酶抑制皆被考慮作為風險評估效應 (endpoint)。並使用 RPF 方法來確定與接觸有機磷農藥相關的累積風險，RPF 方法是將化學品的毒性效力與指標化學品的毒性效力相比，將組中所有化學品的暴露量轉換為指標化學品的暴露當量，以計算相同毒性作用機制累積的風險性。使用雌性大鼠 (Rat) 連續暴露 21 天以上的腦部乙醯膽鹼酯酶抑制資料作為毒性終點，找出各種有機磷農藥的 10% 腦部乙醯膽鹼酯酶抑制基準劑量值 (benchmark dose ，簡稱 BMD₁₀)，選用達馬松 (methamidophos) 作為指標化合物，因該物質具備各暴露途徑的高品質劑量反應數據；並計算其他化合物之 RPF (RPF = 測試物質的 BMD₁₀ / 指標化合物的 BMD₁₀)，並將所有其他有機磷農藥的暴露量，均換算為達馬松等效暴露量以進行累積風險整合評估 [23] 。

另中國也有研究使用 RPF 方法，調查 8 種蔬菜中的 5 種有機磷農藥累積風險評估，利用 8 種蔬菜的農藥檢驗數據及攝食問卷評估 5 種農藥攝入量，並以 RPF 方式計算風險，此方法使用參考化學品作為指標化合物，應用於綜合暴露評估研究，選用陶斯松作為指標化合物，換算出預估每日攝取量 (Estimated Daily Intake, 簡稱 EDI)，再與 ADI 比較，得到健康風險指數 (The health risk index, 簡稱 HRI)，如果 $HRI < 1$ ，則不存在重大健康風險；如果 $HRI > 1$ ，暴露族群有顯著的健康風險，



且 HRI 越高則代表風險越大。研究結果成人和兒童的所有 HRI 值均遠低於 1[24]。

然而，自行檢視其檢驗結果發現，溫州僅需茄子與韭菜的 HRI 相加，其值已經大於 1，顯示在不同蔬果食用到的農藥，累積後可能仍有風險。

表 1-1 浙江省蔬菜對成人和兒童的潛在健康風險[24]

		Cabbage	Celery	Cowpea	Eggplant	Green bean	Leek	Pepper	Turnip
Wenzhou	EDI-adult	0.0003	0.0003	0.0003	0.0035	0.0003	0.0077	0.0003	0.0003
	EDI-child	0.0002	0.0003	0.0003	0.0027	0.0002	0.0059	0.0002	0.0002
	HRI-adult	0.0312	0.0334	0.0337	0.347	0.0312	0.770	0.0312	0.0312
	HRI-child	0.0240	0.0256	0.0258	0.266	0.0240	0.590	0.0240	0.0240
Lishui	EDI-adult	0.0003	0.0018	0.0005	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
	EDI-child	0.0002	0.0014	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
	HRI-adult	0.0312	0.177	0.0495	0.0313	0.0312	0.0312	0.0312	0.0312
	HRI-child	0.0240	0.136	0.0380	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240
Hangzhou	EDI-adult	0.0003	0.0007	0.0003	0.0003	0.0015	0.0003	0.0003	0.0003
	EDI-child	0.0002	0.0006	0.0002	0.0003	0.0011	0.0002	0.0003	0.0002
	HRI-adult	0.0312	0.0718	0.0321	0.0350	0.146	0.0326	0.0341	0.0312
	HRI-child	0.0240	0.0550	0.0246	0.0268	0.112	0.0250	0.0261	0.0240

西班牙研究針對巴倫西亞地區蔬菜水果攝入有機磷、氨基甲酸鹽以及擬除蟲菊酯和除蟲菊酯之累積性風險進行評估，利用農藥檢驗數據及攝食問卷評估各種農藥攝入量，並以 RPF 的方法分別使用乙醯達馬松、歐殺滅和溴氰菊酯作為指標化合物來估計有機磷、氨基甲酸鹽以及擬除蟲菊酯和除蟲菊酯的長期累積飲食暴露，研究結果顯示，殘留農藥的累積風險低，尚不至於對人體有健康風險影響[25]。

雖然本研究表示已含有巴比倫地區最常消費的商品，但該研究僅針對高麗菜、波菜、草莓等單項食品，而未廣泛列出所有民眾會攝食食品項進行評估，恐有不完整之處。

此外，臺灣雖有研究有機磷累積風險評估，但是使用毒性當量因子 (toxicity equivalency factor, 簡稱 TEF)方法，是使用其中一項農藥作為指標化合物 (reference chemical)，設定此農藥的 TEF=1，其他農藥則使用 ADI 值，估算不同的 TEF 值 (TEFi = ADIREF / ADIi)，並藉由臺灣攝食及農藥檢驗數據，計算出 EDI 後換算出累積健康風險，計算結果為 8.94%，為可接受風險(<100%)[26]。

查臺灣尚未有使用 RPF 方法計算民眾食物中有機磷農藥殘留累積風險評估，且目前臺灣法規僅針對單一農藥進行限量標準，並未針對相同作用機制農藥累積暴露量及風險進行控管，另依據農業部動植物防疫檢疫署農用藥劑分類及作用機制檢索，乙醯膽鹼酯酶抑制類農藥包含有機磷類 47 種[27]，希望藉由 RPF 方法分析消費者每日食用含該類農藥殘留量的累積暴露量評估相關風險性。

第三節 研究目的

藉由 RPF 方法分析消費者每日食用含該類農藥殘留量的累積暴露量評估相關風險性，透過研究結果估計飲食中攝入多種不同的乙醯膽鹼酯酶抑制有機磷類農藥，是否可能會對人體造成影響及風險性，以評估法規研擬是否有需要將相同作用機制的農藥設定相關的法規限量標準，亦可將相關的研究結果作為新北市抽驗計畫管理方向的評估參考。

第二章 材料與方法



第一節 研究架構

本研究屬於量性研究，分析新北市政府衛生局 109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量之檢驗數據，整理各種不同類別蔬菜水果的乙醯膽鹼酯酶抑制類有機磷農藥殘留數據，並與國家攝食資料庫 112 年國民蔬菜水果攝食量進行整理，及利用國民營養健康狀況變遷調查計算出每公斤體重的單一農藥農藥攝取量。再設定其中一種農藥作為指標化合物，利用 RPF 的方法將所有農藥的攝食量，換算為指標化合物的攝食量，計算出累積攝食量，並與指標化合物的 ADI 值相比較，以評估乙醯膽鹼酯酶抑制類有機磷農藥的累積風險。另再以 ADI 值計算各項農藥的危害商數 (Hazard Quotient，簡稱 HQ)，再相加計算出危害指數 (Hazard Index，簡稱 HI)，比較傳統 ADI 評估總體風險的方式，與 RPF 方法數值的差異性。

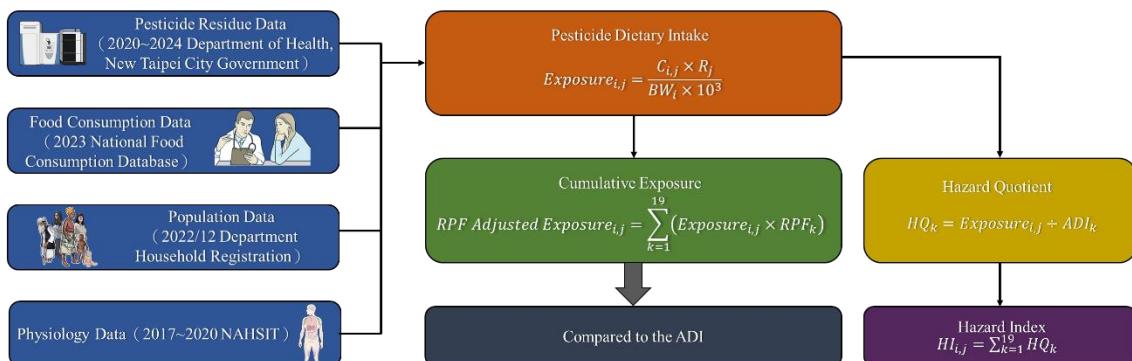


圖 2-1 本研究架構流程圖

第二節 農藥殘留資料

本研究使用新北市政府衛生局 109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量檢驗數據，檢驗方法是依照衛生福利部公告的「食品中殘留農藥檢驗方法—多重殘留分析方

法(五)(MOHWP0055.05)」，檢體以 QuEChERS 方法 (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, Safe) 進行前處理，再以液相層析串聯質譜儀(liquid chromatograph/tandem mass spectrometer, LC-MS/MS)及氣相層析串聯質譜儀 (gas chromatograph/tandem mass spectrometer, GC MS/MS) 分析。109 至 111 年是 380 個品項，112 及 113 年公告更新為 410 個品項，公告更新前後均有檢驗本研究目標品項[28]。

先將數據資料以國家攝食資料庫品項類別進行分類，並評估整理出各類別蔬菜水果檢出乙醯膽鹼酯酶抑制類 47 種有機磷農藥之農藥殘留項次數 (1 件蔬菜水果檢出 2 項農藥為 2 項次數)，因部分蔬菜水果抽驗件數較少，如納入計算恐造成偏頗，經評估將皆未檢出農藥殘留的品項暫不列入計算 (灰底為符合設定刪除品項)。

表 2-1 各蔬果品項抽驗件數及檢出項次數

類別	品項	英文 簡稱	109 年	110 年	111 年	112 年	113 年	合計	合計檢出 項次數
I01.大漿果 類及其製品	I010101.香蕉	BAN	7	4	5	4	3	23	1
	I010102.鳳梨		0	1	2	0	0	3	0
	I010103.木瓜		6	7	5	7	3	28	0
	I010104.奇異果		11	6	7	7	5	36	0
	I010105.火龍果		6	0	3	4	5	18	0
	I010106.其他大漿果類	OLB	8	12	13	11	10	54	19
I02.小漿果 類及其製品	I020101.番石榴		3	5	9	2	4	23	0
	I020102.蓮霧		3	5	0	3	3	14	0
	I020103.葡萄	GRA	8	7	5	7	12	39	1
	I020104.其他小漿果類	OSB	1	2	7	14	16	40	1
I03.梨果類 及其製品	I030101.蘋果	APP	23	15	13	19	21	91	1
	I030102.梨	PER	10	0	4	4	1	19	3
	I030103.桃李	PAP	5	4	0	4	5	18	1
	I030104.棗	JUJ	2	4	4	1	4	15	1
	I030105.其他梨果類	OPF	4	0	2	8	1	15	1
	I040101.芒果	MAN	10	8	9	7	7	41	6

I04.核果類 及其製品	I040102.其他核果類	OSF	2	1	2	9	4	18	11
I05.瓜果類 及其製品	I050101.西瓜		3	0	0	2	3	8	0
	I050102.其他瓜果類		1	3	4	4	5	17	0
I06.柑桔類 及其製品	I060101.橘子	TAN	14	14	9	8	16	61	54
	I060102.柳橙	ORA	10	1	6	4	3	24	20
	I060103.其他柑桔類	OCF	3	3	0	6	12	24	23
J01.包葉菜 類及其製品	J010101.高麗菜	CAB	5	6	10	14	10	45	1
	J010102.大白菜		4	7	4	2	4	21	0
	J010103.花椰菜	CAU	1	3	4	14	3	25	4
	J010104.其他包葉菜類	OLV	5	6	5	2	11	29	8
J02.小葉菜 類及其製品	J020101.地瓜葉及空心 菜		5	3	11	3	8	30	0
	J020102.十字花科小葉 菜類	CLV	43	45	42	26	34	190	41
	J020103.菊科小葉菜類	ASL	8	12	15	9	7	51	5
	J020104.蒜、蔥、韭菜 等	GOL	12	17	6	10	12	57	5
	J020105.菠菜		4	8	7	2	4	25	0
	J020106.芹菜	CEL	4	6	5	7	0	22	6
	J020107.莧菜		4	4	4	0	2	14	0
	J020108.龍鬚菜		0	0	2	0	0	2	0
	J020109.其他小葉菜類	OSL	12	8	17	15	19	71	10
J03.果菜類 及其製品	J030101.番茄	TOM	15	12	9	12	13	61	5
	J030102.青椒、甜椒、 辣椒等	GSH	13	7	17	10	9	56	1
	J030103.其他果菜類	OFV	11	5	7	5	3	31	1
J04.豆菜類 及其製品	J040101.四季豆	FRB	9	10	5	6	6	36	3
	J040102.長豆		2	5	2	1	3	13	0
	J040103.豌豆	PEA	8	2	6	5	6	27	1
	J040104.其他豆菜類		0	0	1	4	0	5	0
J05.芽菜類 及其製品	J050101.綠豆芽		2	1	2	2	2	9	0
	J050102.其他芽菜類		1	4	3	2	1	11	0
J06.瓜菜類 及其製品	J060101.絲瓜		3	2	4	5	3	17	0
	J060102.苦瓜	MOM	9	1	2	2	2	16	1
	J060103.小黃瓜		4	5	7	4	1	21	0
	J060104.冬瓜		2	0	0	0	0	2	0
	J060105.大黃瓜		1	1	0	2	2	6	0

J07.根莖 菜 類 及 其 製 品	J060106. 南瓜		1	2	1	2	3	9	0
	J060107. 其他瓜菜類		1	0	3	6	6	16	0
	J070101. 蘿蔔	RAD	10	9	12	13	14	58	4
	J070102. 筍類		2	0	0	4	3	9	0
	J070103. 洋蔥		3	1	2	3	3	12	0
	J070104. 薑		0	0	2	0	0	2	0
	J070105. 蕃薯		0	0	2	1	3	6	0
	J070106. 馬鈴薯	POT	1	1	3	2	2	9	1
	J070107. 山藥		0	0	0	0	3	3	0
	J070108. 芋頭		2	2	3	2	2	11	0
J08.蕈 菇 類 及 其 製 品	J070109. 其他根蒸菜類		2	6	3	10	7	28	0
	J080101. 香菇		0	0	2	0	2	4	0
	J080102. 金針菇		1	2	2	0	0	5	0
	J080103. 木耳		2	0	0	0	0	2	0
	J080104. 杏鮑菇		4	1	0	0	3	8	0
	J080105. 其他蕈菇類		1	0	1	2	3	7	0
合計			357	306	342	344	362	1711	240
刪除後合計			289	234	262	268	279	1332	240

另本研究以 Toxicological Prioritization Index (簡稱 TOXPI) (版本 2.3) 工具進行農藥檢驗資料之整合與視覺化分析，選擇「檢出率」與「攝食量」作為主要指標，分別納入不同切片 (slice) 進行標準化與加權後計算綜合 TOXPI 指數 (TOXPI Score)，用以評估各類蔬果潛在暴露風險。後續以 R 軟體 (版本 4.2.3) 進行斯皮爾曼等級相關係數 (Spearman rank correlation) 分析，比較 TOXPI 指數與抽樣率之間的相關性，以探討暴露評估與實際檢驗策略之關聯性。

第三節 攝食資料

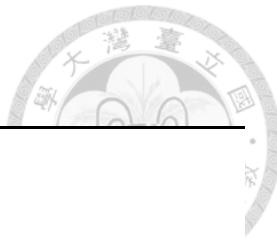
考量全臺灣飲食風俗習慣接近，故直接以全國攝食資料取代新北市民攝食資料數據。利用 112 年國家攝食資料庫進行分析，該年度資料來源為衛生福利部國民健康署「國民營養健康狀況變遷調查結果報告 2017-2020 年」資料[29]，該調查涵

蓋臺灣 20 個縣市的全年齡訪視調查，共完成問卷訪視 12,120 人，蒐集 24 小時飲食回憶紀錄資料，依其調查彙整攝食量資料。其年齡分層為 0-3 歲、3-6 歲、6-12 歲、13-15 歲、16-18 歲、19-65 歲、65 歲以上共 7 個分層，其攝食資料分為生重及熟重，生重為烹調前重量，熟重則為烹調後重量，因為依據農藥檢驗方法及「農藥田間試驗準則」第 3 條附件一附表二「農藥殘留量試驗各類作物樣品前處理之取樣部位修正規定」[30]，蔬果農藥殘留都是以未烹調樣品進行檢驗，且烹調方式多樣化，依據烹調方式不同熟重差異較大，所以選用不同蔬菜類及水果類之生重攝食量的平均、最大值、最小值及標準差進行後續分析；另其資料分為 Consumer only，只整理有攝食的資料進行平均值標準差等資料計算，及非 Consumer only，所有的攝食狀況（包含未食用）的資料一併進行計算，因 Consumer only 可能會高估風險，故選用非 Consumer only，不扣除攝食量為 0 的資料，較接近國民攝食量數據[31]。另因國家攝食資料庫各年齡分層體重資料僅提供平均值，會同樣以衛生福利部國民健康署「國民營養健康狀況變遷調查結果報告 2017-2020 年」進行體重標準誤數據的補充[29]。另人口統計資料取自中華民國內政部戶政司全球資訊網統計資料（2022 年 12 月）[32]。

第四節 RPF 資料

經分析衛生局 109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量檢驗資料，整理乙醯膽鹼酯酶抑制類 47 種有機磷農藥之檢出件數，經彙整後發現有過半之農藥未檢出，可能該項農藥使用量較低，列入評估反而會高估風險值，所以先予以排除。

表 2-2 各農藥檢出件數



序號	有機磷類檢出 (ORGANOPHOSPHATES)	件數	檢出品項及件數
1	愛殺松 (ethion)	56	橘子*28、柳橙*14、其他柑桔類 *12、香蕉*1、棗*1
2	佈飛松 (profenofos)	46	十字花科小葉菜類*35、蘿蔔*3、 其他包葉菜類*2、其他柑桔類*1、 菊科小葉菜類*1、蒜、蔥、韭菜等 *1、其他果菜類*1、四季豆*1、豌 豆*1
3	陶斯松 (chlorpyrifos)	25	其他小葉菜類*6、梨*3、其他核果 類*3、芹菜*3、其他大漿果類*2、 芒果*2、其他梨果類*1、橘子*1、 柳橙*1、其他包葉菜類*1、蒜、蔥、 韭菜等*1、番茄*1
4	益滅松 (phosmet)	25	橘子*12、柳橙*4、其他核果類*2、 蒜、蔥、韭菜等*2、其他小漿果類 *1、花椰菜*1、芹菜*1、其他小葉 菜類*1、苦瓜*1
5	三落松 (triazophos)	14	其他大漿果類*14
6	撲滅松 (fenitrothion)	13	其他大漿果類*3、其他核果類*3、

序號	有 機 磷 類 (ORGANOPHOSPHATES)	檢出 件數	檢出品項及件數
			其他小葉菜類*2、芒果*1、橘子 *1、柳橙*1、其他柑桔類*1、蒜、 蔥、韭菜等*1
7	馬拉松 (malathion)	12	橘子*7、其他柑桔類*2、十字花科 小葉菜類*2、桃李*1
8	歐殺松 (acephate)	9	其他包葉菜類*2、橘子*1、花椰菜 *1、十字花科小葉菜類*1、芹菜 *1、番茄*1、四季豆*1、馬鈴薯*1
9	加福松 (isoxathion)	7	其他柑桔類*4、番茄*2、青椒、甜 椒、辣椒等*1
10	芬殺松 (fenthion)	7	芒果*3、其他核果類*3、其他柑桔 類*1
11	達馬松 (methamidophos)	6	其他包葉菜類*3、花椰菜*1、番茄 *1、四季豆*1
12	大利松 (diazinon)	4	十字花科小葉菜類*2、葡萄*1、蘋 果*1
13	托福松 (terbufos)	4	菊科小葉菜類*2、其他小葉菜類 *1、蘿蔔*1

序號	有 機 磷 類 (ORGANOPHOSPHATES)	檢出 件數	檢出品項及件數
14	賽達松 (phentoate)	4	菊科小葉菜類*2、花椰菜*1、芹菜 *1
15	歐滅松 (omethoate)	3	橘子*1、其他柑桔類*1、高麗菜*1
16	大滅松 (dimethoate)	2	橘子*1、其他柑桔類*1
17	白克松 (pyraclofos)	1	十字花科小葉菜類*1
18	硫滅松 (thiometon)	1	橘子*1
19	滅大松 (methidathion)	1	橘子*1
20	乃力松(naled)	0	
21	二硫松 (disulfoton)	0	
22	二氯松 (DDVP)	0	
23	三氯松 (trichlorfon)	0	
24	巴賽松 (phoxim)	0	
25	加護松 (kayaphos)	0	
26	必芬松 (pyridaphenthion)	0	
27	甲基巴拉松 (parathion-methyl)	0	
28	谷速松 (azinphos-methyl)	0	
29	亞芬松 (isofenphos)	0	
30	亞特松 (pirimiphos-methyl)	0	

序號	有機磷類檢出 (ORGANOPHOSPHATES)	檢出品項及件數	
		件數	
31	亞素靈 (monocrotophos)	0	
32	亞培松 (temephos)	0	
33	依殺松 (isazofos)	0	
34	美文松 (mevinphos)	0	
35	拜裕松 (quinalphos)	0	
36	飛達松 (heptenophos)	0	
37	普硫松 (prothiofos)	0	
38	氰乃松 (cyanophos)	0	
39	滅加松 (mecarbam)	0	
40	滅多松 (oxydemeton-methyl)	0	
41	滅賜松 (demeton-S-methyl)	0	
42	裕必松 (phosalone)	0	
43	福木松 (formothion)	0	
44	福瑞松 (phorate)	0	
45	福賜米松 (phosphamidon)	0	
46	繁米松 (vamidothion)	0	
47	雙特松 (dicrotophos)	0	

針對檢出之 19 項農藥確認 RPF 值，首先參考美國環保署「具有共同毒性機制的農藥化學品累積風險評估指南」[23]設定達馬松 (methamidophos) 作為指標化合物，其 RPF 值為 1，因為達馬松針對有機磷類共通毒性效應於各項暴露途徑都有較充足的研究，且具有高品質的劑量反應資料，亦在毒理作用機制上與其他農藥相似；另於其評估指南 33 種農藥找出本研究要分析的 12 種農藥，佈飛松 (profenofos)、陶斯松 (chlorpyrifos)、益滅松 (phosmet)、馬拉松 (malathion)、歐殺松 (acephate)、芬殺松 (fenthion)、達馬松 (methamidophos)、大利松 (diazinon)、托福松 (terbufos)、歐滅松 (omethoate)、大滅松 (dimethoate)、滅大松 (methidathion) 的 RPF 值。

再參考荷蘭有機磷農藥累積性風險評估研究[33]的 RPF 資料，此研究資料數據主要來自美國環保署「具有共同毒性機制的農藥化學品累積風險評估指南」及世界糧農組織及衛生組織農藥殘留專家聯合會議 (FAO/WHO Joint Meeting on Pesticide Residues，簡稱 JMPR) 的數據，參考 JMPR 的資料是大鼠、狗或人體抑制紅血球或大腦的 NOAEL 值資料，並為了盡可能排除動力學差異，使用相同終點計算 RPF，取得愛殺松 (ethion)、三落松 (triazophos)、撲滅松 (fenitrothion) 的 RPF 值。

另再於 JMPR[34]及澳洲農藥和動物用藥管理局政府資料[35]及日本食品安全委員會風險評估報告[36]找出賽達松 (phentoate)、硫滅松 (thiometon)、白克松 (pyraclofos) 與加福松 (isoxathion) 的 NOAEL 值相關資料。

此外，於 WHO 的 JMPR 評估清單查詢各農藥殘留的 ADI 值[34]，作為後續評估參考，僅有加福松 (isoxathion) 及白克松 (pyraclofos) 未有 ADI 數值，則分別參考日本食品安全委員會風險評估報告[36]及澳洲農藥和動物用藥管理局政府資

料[35]。

表 2-3 各有機磷類農藥之相對效力因子 (RPF)

序號	有機磷類 (organophosphates)	ADI (mg/kg bw/day)	NOAEL (mg/kg bw/day)	BMD ₁₀ (mg/kg bw/day)	Species and type of AChE	Source	RPF
1	愛殺松 (ethion)	0.002	0.6		Dog/brain	JMPR90	0.33
2	佈飛松 (profenofos)	0.03		20.58	Rat/brain	USA EPA	0.004
3	陶斯松 (chlorpyrifos)	0.01		1.48	Rat/brain	USA EPA	0.06
4	益滅松 (phosmet)	0.01		3.56	Rat/brain	USA EPA	0.02
5	三落松 (triazophos)	0.001	1.5		Rat/RBC	JMPR02	0.27
6	撲滅松 (fenitrothion)	0.006	0.36		Human/R BC	JMPR00	0.0002
7	馬拉松 (malathion)	0.3		313.91	Rat/brain	USA EPA	0.0003
8	歐殺松 (acephate)	0.03		0.99	Rat/brain	USA EPA	
			2.5		Rat/brain	JMPR02	
			5		Rat/RBC	JMPR02	0.08
9	加福松 (isoxathion)	0.002	0.2		Dog/RBC	Japan	2
10	芬殺松 (fenthion)	0.007		0.24	Rat/brain	USA EPA	0.33
11	達馬松 (methamidophos)	0.004		0.08	Rat/brain	USA EPA	1
12	大利松 (diazinon)	0.003		6.24	Rat/brain	USA EPA	0.01
13	托福松 (terbufos)	0.0006		0.1	Rat/brain	USA EPA	0.85
14	賽達松 (phentoate)	0.003	0.29		Dog/RBC	JMPR80	1.38
15	歐滅松 (omethoate)	0.004		0.09	Rat/brain	USA EPA	0.93
16	大滅松 (dimethoate)	0.01		0.25	Rat/brain	USA EPA	0.32
17	白克松	0.001	0.1		Mouse/R	Australia	4

序號	有機磷類 (organophosphates)	ADI (mg/kg bw/day)	NOAEL (mg/kg bw/day)	BMD10 (mg/kg bw/day)	Specie and type of AChE	Source	RPF
	(pyraclofos)			BC	n		
18	硫滅松 (thiometon)	0.003	0.25		Rat/RBC	JMPR73	1.6
19	滅大松 (methidathion)	0.002		0.25	Rat/brain	USA EPA	0.32

第五節 暴露量計算

暴露量計算的方法是將各種每日蔬果攝食量除以體重，再乘上農藥殘留量後相加，得到單一農藥殘留每日攝取量 (individual estimated daily intake，簡稱 iEDI)，再將所有攝食的單一農藥利用 RPF 加權後相加，得到估計每日累積攝取量 (Estimated cumulative daily intake，簡稱 EDI)，也就是每日達馬松的攝取量，再與達馬松的 ADI (0.004 mg/kg bw) [37] 進行比較。

利用點估計方式計算累積風險，上界 (upper bound，簡稱 UB) 設定低於偵測極限 (limit of detection，簡稱 LOD，為 0.01 ppm) 的值為 LOD 並計算平均值，下界 (lower bound，簡稱 LB) 設定低於 LOD 的值為零並計算平均值，另攝食量亦以平均值、第 95 百分位數、第 99 百分位數分別進行累積風險評估，計算方式為：

$$\text{Exposure}_{i,j} = \frac{C_{i,j} \times R_j}{BW_i \times 10^3} \quad (\text{單位：mg/kg bw/day}) , C_{i,j} \text{ 為個體 } i \text{ 每日攝取食物 } j \text{ 的量 (單位：g/day)} , R_j \text{ 為食物 } j \text{ 中農藥的殘留濃度 (單位：ppm = mg/kg)} , BW_i \text{ 為個體體重 (kg)}.$$

為統整不同農藥暴露所造成之健康效應，本研究採用 RPF 方法，以達馬松為指標化合物 (RPF = 1)，將其他農藥之暴露量依毒性加權，計算加權後總暴露量：

$$\text{RPF Adjusted Exposure}_i = \sum_{k=1}^{19} (\text{Exposure}_{i,k} \times \text{RPF}_k)$$

另以機率方式，利用



馬可夫鏈蒙地卡羅（Markov chain Monte Carlo，簡稱 MCMC）及蒙地卡羅方法模擬攝食量，流程分為三步驟，先以 MCMC 模型重建農藥殘留濃度分布，再建立模擬個體資料並估算每日暴露量，最後進行 RPF 加權與健康風險評估。所有模擬與統計分析皆以 R 軟體（版本 4.2.3）執行，使用套件包括 truncnorm（版本 1.0.9）進行截斷常態模擬，rstan（版本 2.32.7）進行 MCMC 模擬與後驗分布建構。

針對農產品監測資料中存在大量非檢出值（nondetects）的情形，本研究以 Stan 貝葉斯模型進行後驗模擬，重建對數常態分布之殘留濃度參數。模型中，檢出值依據對數常態分布處理，非檢出值則建模為介於 0 與 LOD 間的潛在值，因為此模擬至少需有 2 個檢出值才能進行模擬，所以檢出 1 件的另設 1 個虛擬數值（dummy）為 LOD，如皆未檢出則不納入該品項農藥計算，模型估計幾何平均與幾何標準差，產出完整的後驗分布。Stan 模型以 4 條鏈、每鏈 50,000 次疊代進行，並在模型於生成量區塊中輸出殘留值模擬、均值與標準差估計。模擬完成後，依據 posterior 結果，使用對數常態分布（rlnorm()）模擬 20 萬筆殘留濃度資料，且 R-hat 值小於 1.05，作為後續暴露模擬依據。

再依據臺灣人口統計數據，模擬 20 萬名一般人口（依人口比例模擬男性 98,855 人，女性 101,145 人），年齡範圍為 0 至 100 歲。每一模擬個體依據年齡與性別屬性，分別模擬體重與每日食品攝取量，計算出每日暴露量（ $\mu\text{g}/\text{kg bw/day}$ ）。

第三章 研究結果



第一節 攝食資料與農藥殘留資料分析

分析新北市政府衛生局 109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量之檢驗數據，蔬菜水果抽驗農藥殘留件數分別為 357、306、342、344 及 362 件，共計 1711 件，不合格率（檢出值超過法規限量標準）約為 10%。

表 3-1 109 至 113 年蔬菜水果農藥殘留量抽驗結果

	109年	110年	111年	112年	113年	合計
抽驗件數	357	306	342	344	362	1711
合格件數	331	282	304	312	321	1550
不合格件數	26	24	38	32	41	161
合格率	93%	92%	89%	91%	89%	91%

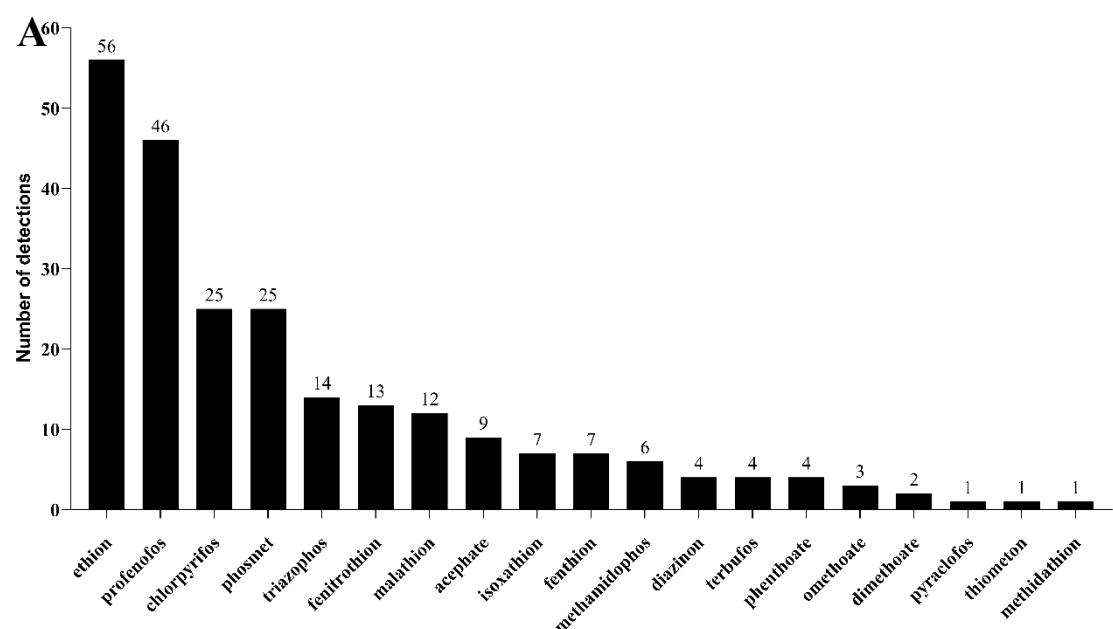
利用農藥殘留檢出件數進行作圖，最常檢出的農藥前 3 名分別為愛殺松、佈飛松及陶斯松，建議農政單位可加強該 3 類品項農藥使用的管制，落實安全採收期的控管，另最常檢出的蔬果品項前 3 名分別為橘子、十字花科小葉菜類及其他柑橘類，除農政單位可加強該 3 類蔬果農藥使用的管制，衛生單位也可加強後市場抽驗，一同監管該 3 類品項的農藥殘留量，以確保消費者食用安全。

另將各品項蔬果檢出率、平均攝食量與抽驗率（抽驗件數占總抽驗件數比率）作圖相比較，長條圖顯示全人口、男性、女性的每日攝食量平均值（單位：公克），以散布圖顯示各品項蔬果的檢出率及抽驗率。抽驗計畫的擬定，應參考民眾攝食習慣，平均攝食量高的品項應加強抽驗，以把關確認該品項農藥殘留量未超過法規標準值，確保民眾飲食安全，另亦可參考檢出率，檢出率愈高的品項應加強抽驗，以控管農民及食品業者加強農藥使用或自主管理的情形，圖中攝食量與抽驗率大致

方向一致，但未能明顯看出檢出率與抽驗率的相關性。

另以 TOXPI 工具進行農藥檢驗資料之整合與視覺化分析，選擇檢出率與攝食量作為主要指標，分別納入不同切片進行線性標準化，並皆以 1 加權後計算綜合 TOXPI 指數，可看出最高的 3 樣蔬果分別為其他柑橘類、橘子及高麗菜，前 2 者因檢出率較高，後者則因攝食量較高而有較高的 TOXPI 指數。

另以斯皮爾曼等級相關係數 (Spearman rank correlation) 分析，比較 TOXPI 指數與抽樣率之間的相關性，其相關係數(rho)為 0.26，為輕微正相關，但強度偏弱，且 p 值為 0.165，大於 0.05，顯示暴露風險評估與實際檢驗策略未有明顯相關。



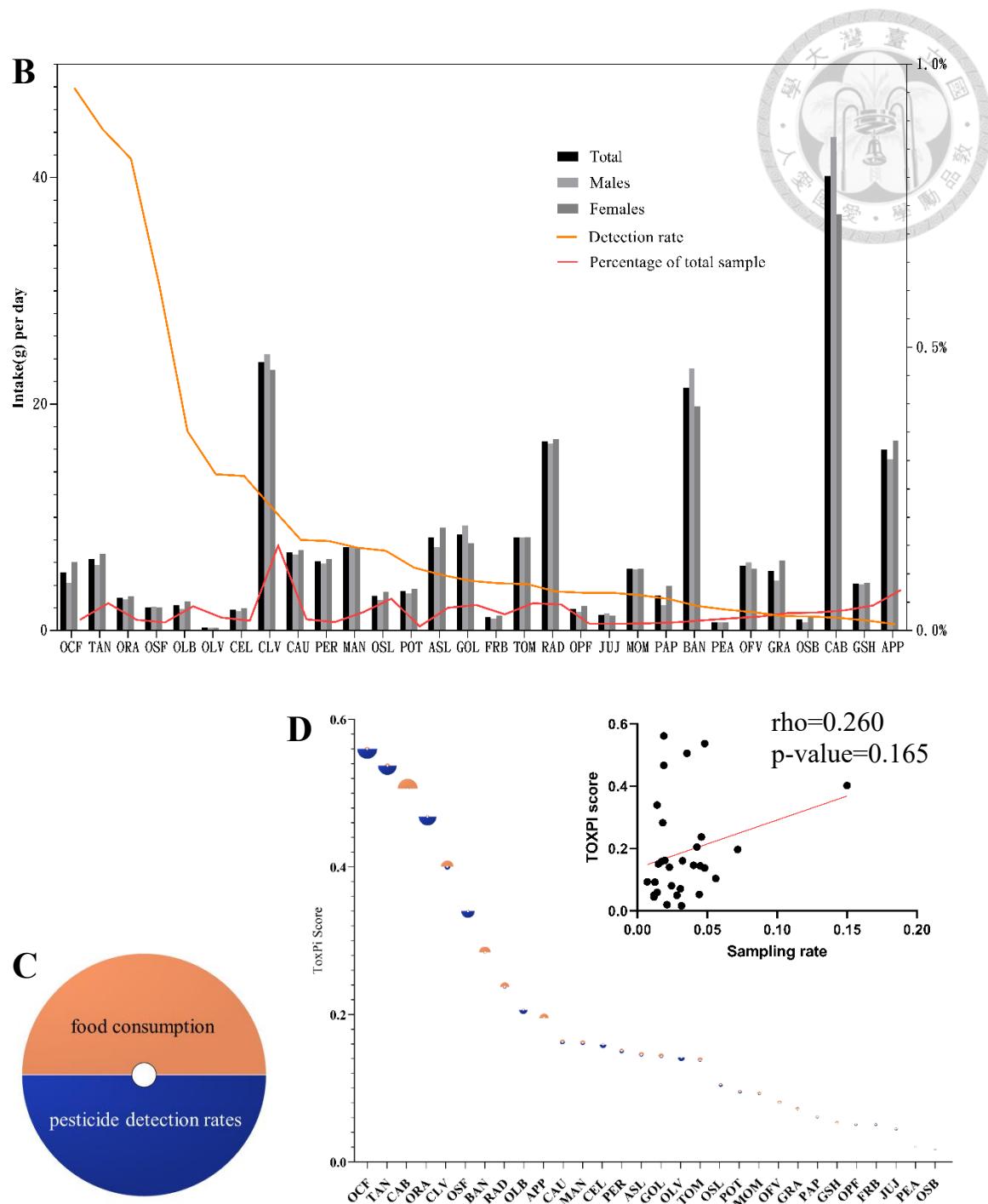


圖 3-1 蔬果及農藥檢出情形分析

- (A) 各農藥品項檢出件數 (B) 各品項蔬果檢出率、攝食量與抽驗率作圖
 (C) TOXPI 指數指標切片分別為平均攝食量及檢出率 (D) 大圖為各品項蔬果 TOXPI 指數分佈，右上小圖為 TOXPI 指數及抽驗率作圖



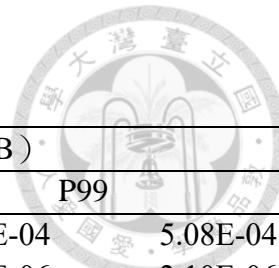
第二節 點估計 (LB/UB) 計算

LB 累積農藥（換算為達馬松）攝食量平均、95 百分位、99 百分位分別為每日每公斤體重 0.000039 毫克、0.00044 毫克、0.000060 毫克，約為達馬松 ADI 之 0.98%、10.89%、15.00%；UB 累積農藥（換算為達馬松）攝食量平均、95 百分位、99 百分位分別為每日每公斤體重 0.00055 毫克、0.0044 毫克、0.0059 毫克，約為達馬松 ADI 之 13.83%、108.94%、148.31%。顯示如果檢出低於 LOD 的結果實際值皆為 LOD，未能保障攝食量為 95 百分位的民眾其有機磷農藥的累積風險在可接受範圍，故建議中央單位可持續提高檢驗的精確性，降低 LOD 值，以確認實際的農藥殘留量，也能夠更精確的計算風險評估資訊。

而以有機磷農藥 RPF 加權後風險最高的農藥分別為白克松、加福松及硫滅松，與檢出率最高的農藥皆不相同，顯示 RPF 加權的重要性，毒性較高的農藥應加強其管控機制，應更謹慎避免農藥殘留。

各蔬果 RPF 加權後風險最高的品項分別為高麗菜、十字花科小葉菜類及其他柑橘類，亦為攝食量最高的 3 項蔬果，顯示雖然這 3 個品項農藥殘留檢出率低，但因為攝食量高，仍造成其農藥暴露風險高，農政及衛生主管機關仍應針對攝食量高的蔬果加強管制及查緝，以確保降低農藥殘留量。

表 3- 2 LB 及 UB 有機磷類農藥累積暴露量 (農藥分層) (單位 : mg/kg bw/day)



有機磷類農藥	RPF	下界 (lower bound, 簡稱LB)			上界 (upper bound, 簡稱UB)		
		MEAN	P95	P99	MEAN	P95	P99
愛殺松 (ethion)	0.33	2.25E-05	2.79E-04	3.85E-04	3.47E-05	3.70E-04	5.08E-04
佈飛松 (profenofos)	0.004	7.06E-08	4.10E-07	5.51E-07	2.19E-07	1.55E-06	2.10E-06
陶斯松 (chlorpyrifos)	0.06	1.40E-07	1.60E-06	2.21E-06	2.40E-06	1.87E-05	2.55E-05
益滅松 (phosmet)	0.02	1.61E-07	1.68E-06	2.31E-06	9.15E-07	7.40E-06	1.01E-05
三落松 (triazophos)	0.27	3.20E-07	4.85E-06	6.72E-06	1.06E-05	8.32E-05	1.13E-04
撲滅松 (fenitrothion)	0.0002	5.76E-10	9.29E-09	1.29E-08	8.17E-09	6.70E-08	9.14E-08
馬拉松 (malathion)	0.0003	1.04E-09	8.57E-09	1.17E-08	1.24E-08	9.52E-08	1.29E-07
歐殺松 (acephate)	0.08	1.24E-07	2.67E-06	3.72E-06	3.16E-06	2.59E-05	3.52E-05
加福松 (isoxathion)	2	7.10E-06	8.60E-05	1.19E-04	8.31E-05	6.65E-04	9.05E-04
芬殺松 (fenthion)	0.33	1.94E-07	2.71E-06	3.76E-06	1.27E-05	9.81E-05	1.33E-04
達馬松 (methamidophos)	1	1.17E-06	1.26E-05	1.73E-05	3.93E-05	3.04E-04	4.13E-04
大利松 (diazinon)	0.01	3.91E-09	2.89E-08	3.93E-08	3.85E-07	2.94E-06	4.00E-06
托福松 (terbufos)	0.85	2.17E-06	1.17E-05	1.56E-05	3.45E-05	2.59E-04	3.52E-04
歐滅松 (omethoate)	0.93	4.47E-07	3.03E-06	4.10E-06	3.58E-05	2.73E-04	3.71E-04
賽達松 (phenthroate)	0.25	5.89E-07	4.99E-06	6.81E-06	5.31E-05	4.06E-04	5.52E-04
大滅松 (dimethoate)	0.32	7.52E-08	8.49E-07	1.17E-06	1.23E-05	9.40E-05	1.28E-04
白克松 (pyraclofos)	4	3.94E-06	2.21E-05	2.96E-05	1.57E-04	1.19E-03	1.62E-03
硫滅松 (thiometon)	1.6	1.41E-07	1.49E-06	2.05E-06	6.12E-05	4.68E-04	6.36E-04
滅大松 (methidathion)	0.32	1.13E-08	1.19E-07	1.64E-07	1.22E-05	9.34E-05	1.27E-04
		3.92E-05	4.36E-04	6.00E-04	5.53E-04	4.36E-03	5.93E-03
	%ADI	0.98%	10.89%	15.00%	13.83%	108.94%	148.31%

表 3-3 LB 及 UB 有機磷類農藥累積暴露量 (蔬果分層) (單位 : mg/kg bw/day)



蔬果品項	下界 (lower bound, 簡稱LB)			上界 (upper bound, 簡稱UB)		
	MEAN	P95	P99	MEAN	P95	P99
I010101. 香蕉	3.20E-07	1.87E-06	2.51E-06	5.05E-05	2.95E-04	3.96E-04
I010106. 其他大漿果類	3.26E-07	4.94E-06	6.85E-06	5.44E-06	8.24E-05	1.14E-04
I020103. 葡萄	1.34E-09	1.41E-08	1.95E-08	1.41E-05	1.49E-04	2.05E-04
I020104. 其他小漿果類	2.09E-08	2.47E-07	3.40E-07	6.82E-06	8.06E-05	1.11E-04
I030101. 蘋果	6.39E-10	3.95E-09	5.32E-09	3.92E-05	2.43E-04	3.27E-04
I030102. 梨	4.43E-08	4.60E-07	6.32E-07	1.46E-05	1.52E-04	2.08E-04
I030103. 桃李	3.66E-11	4.86E-10	6.72E-10	7.41E-06	9.85E-05	1.36E-04
I030104. 梨	1.10E-08	1.92E-07	2.67E-07	3.37E-06	5.91E-05	8.21E-05
I030105. 其他梨果類	2.62E-09	4.43E-08	6.16E-08	4.42E-06	7.49E-05	1.04E-04
I040101. 芒果	1.04E-07	1.15E-06	1.58E-06	1.71E-05	1.88E-04	2.59E-04
I040102. 其他核果類	9.50E-08	1.78E-06	2.48E-06	4.86E-06	9.14E-05	1.27E-04
I060101. 橘子	1.07E-05	1.13E-04	1.55E-04	2.50E-05	2.64E-04	3.63E-04
I060102. 柳橙	4.95E-06	7.89E-05	1.09E-04	1.18E-05	1.88E-04	2.61E-04
I060103. 其他柑桔類	1.29E-05	1.65E-04	2.28E-04	2.47E-05	3.17E-04	4.38E-04
J010101. 高麗菜	2.81E-07	1.19E-06	1.57E-06	9.19E-05	3.90E-04	5.14E-04
J010103. 花椰菜	1.18E-06	8.55E-06	1.16E-05	1.72E-05	1.25E-04	1.69E-04
J010104. 其他包葉菜類	2.14E-07	7.25E-06	1.02E-05	7.66E-07	2.60E-05	3.64E-05
J020102. 十字花科小葉菜類	4.02E-06	2.25E-05	3.02E-05	5.89E-05	3.31E-04	4.43E-04
J020103. 菊科小葉菜類	4.86E-07	4.36E-06	5.97E-06	1.89E-05	1.70E-04	2.32E-04
J020104. 蒜、蔥、韭菜等	3.31E-08	1.74E-07	2.32E-07	1.89E-05	9.95E-05	1.33E-04
J020106. 芹菜	5.46E-08	6.08E-07	8.37E-07	4.28E-06	4.76E-05	6.56E-05
J020109. 其他小葉菜類	4.61E-10	9.78E-09	1.36E-08	2.49E-06	5.28E-05	7.36E-05

蔬果品項	下界 (lower bound , 簡稱LB)			上界 (upper bound , 簡稱UB)		
	MEAN	P95	P99	MEAN	P95	P99
J030101. 番茄	6.57E-07	5.42E-06	7.39E-06	2.03E-05	1.67E-04	2.28E-04
J030102. 青椒、甜椒、辣椒等	7.27E-07	6.91E-06	9.46E-06	9.87E-06	9.37E-05	1.28E-04
J030103. 其他果菜類	1.44E-09	1.23E-08	1.68E-08	1.26E-05	1.07E-04	1.47E-04
J040101. 四季豆	2.60E-08	2.82E-07	3.88E-07	2.74E-06	2.98E-05	4.09E-05
J040103. 豌豆	3.71E-11	5.37E-10	7.44E-10	1.69E-06	2.45E-05	3.39E-05
J060102. 苦瓜	8.62E-09	7.78E-08	1.06E-07	1.16E-05	1.05E-04	1.44E-04
J070101. 蘿蔔	2.05E-06	1.06E-05	1.41E-05	4.29E-05	2.21E-04	2.95E-04
J070106. 馬鈴薯	1.17E-08	1.14E-07	1.56E-07	8.87E-06	8.65E-05	1.19E-04
	3.92E-05	4.36E-04	6.00E-04	5.53E-04	4.36E-03	5.93E-03
	0.98%	10.89%	15.00%	13.83%	108.94%	148.31%

第三節 點估計與機率模擬方式比較



前一節利用點估計的方式計算累積風險，直接將低於 LOD 的值當成 0 或 LOD 進行計算，顯有低估及高估的疑慮，為了更準確的計算風險值，擬利用馬可夫鏈蒙地卡羅方法後驗抽樣的方式模擬各類蔬果各項農藥實際分布，以其他大漿果類陶斯松農藥殘留量為例，該品項共抽驗 52 件，其中 2 件檢出陶斯松，其餘皆未檢出（低於 LOD），如果以點估計的方式，50 個點皆以 0 或 LOD 進行計算，會明顯低估或高估實際值。

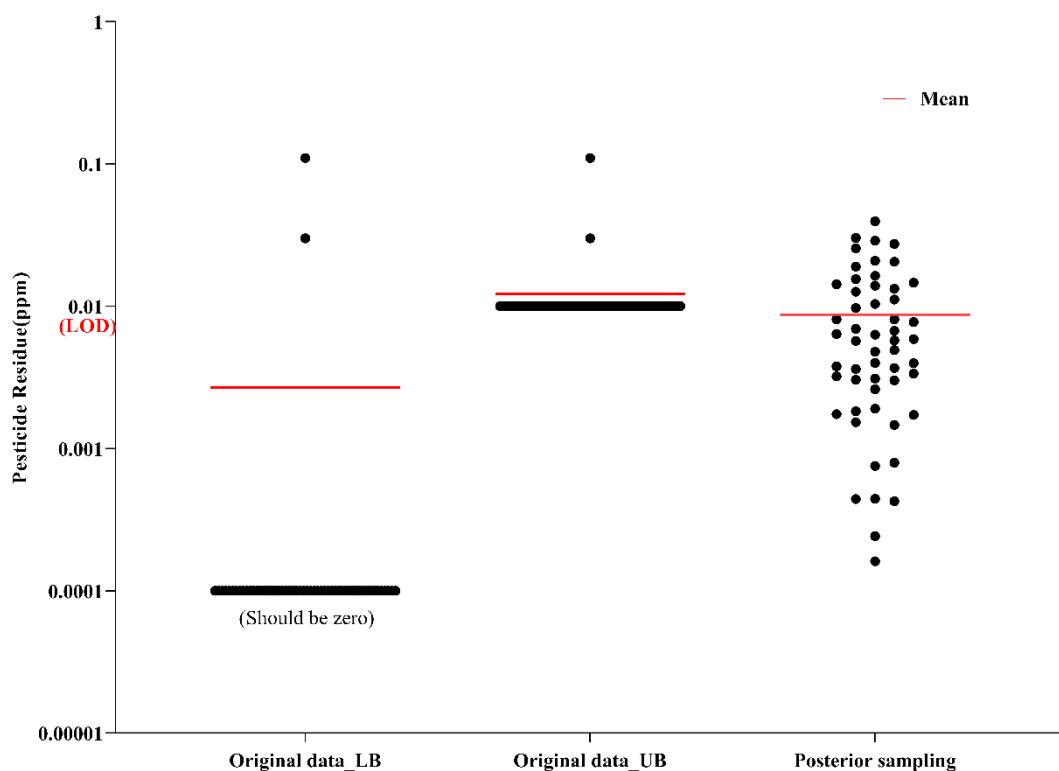


圖 3-2 其他大漿果類陶斯松農藥殘留量點估計與機率模擬分布

第四節 暴露量模擬

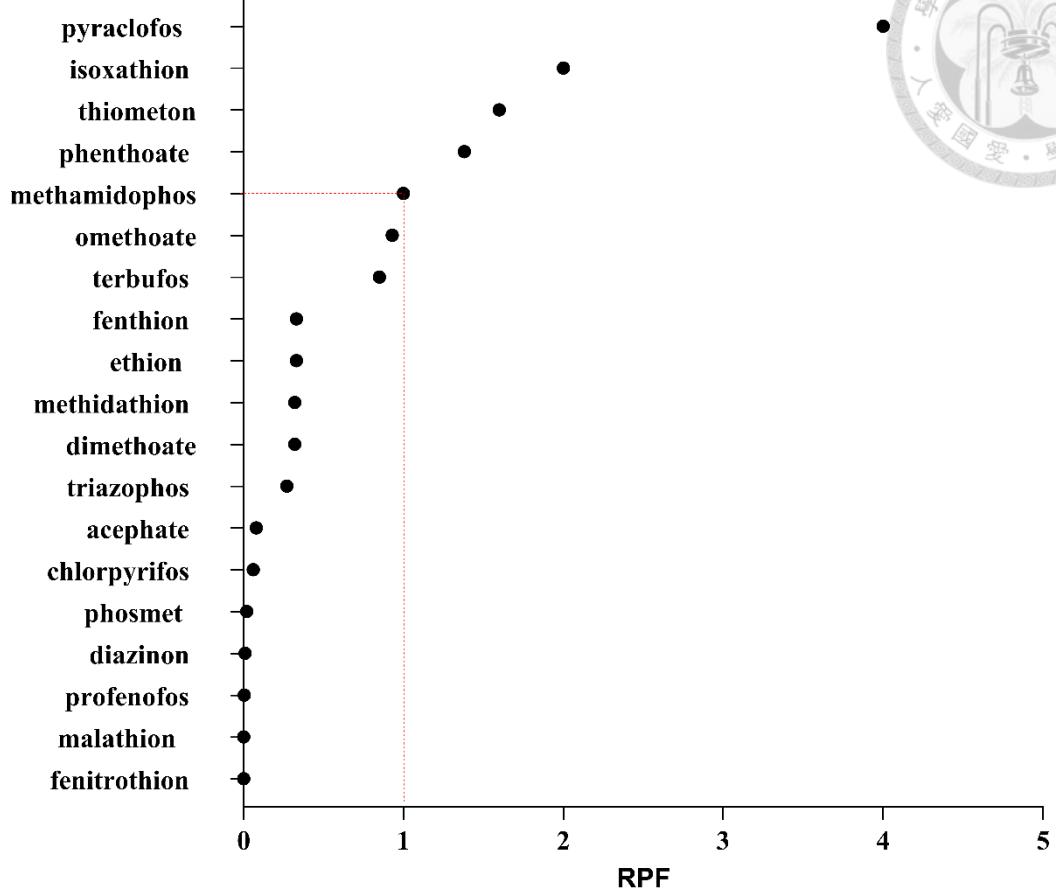
針對檢出之 19 項農藥確認 RPF 值，首先參考美國環保署「具有共同毒性

機制的農藥化學品累積風險評估指南」[23]設定達馬松 (methamidophos) 作為指標化合物，其 RPF 值為 1，並參考荷蘭有機磷農藥累積性風險評估研究[33]、JMPR[33]、澳洲農藥和動物用藥管理局政府資料[35]及日本食品安全委員會風險評估報告[36]，估計其餘 18 種有機磷農藥的 RPF 值，估計出的 RPF 值介於 0.0002 至 4 之間，最小為撲滅松，最大則為白克松。

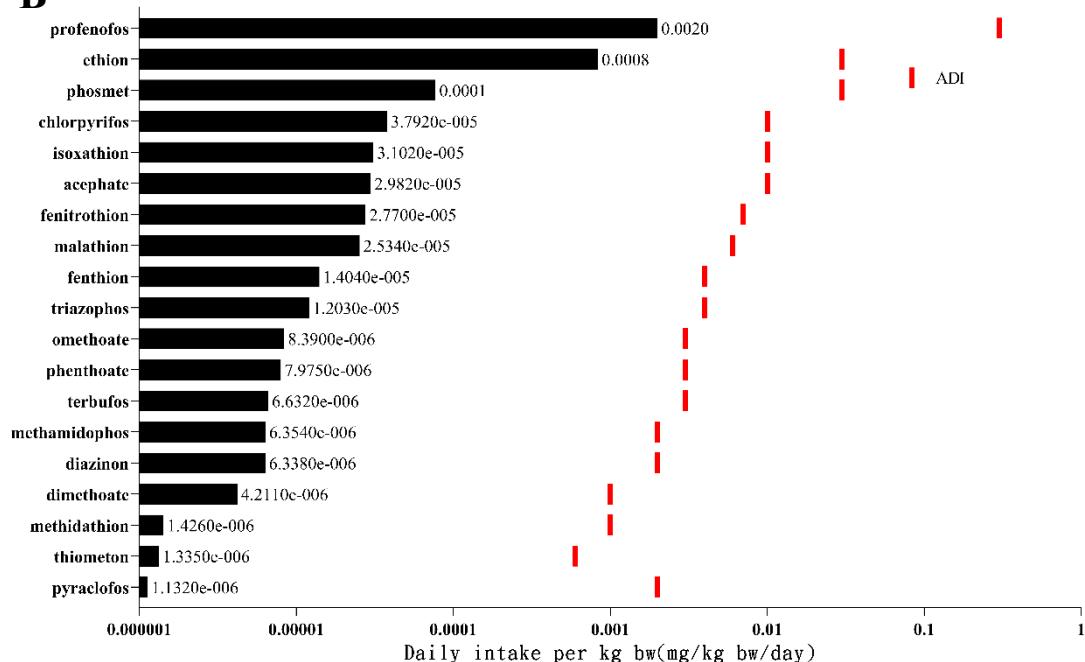
利用蒙地卡羅模擬各種蔬果的攝食量及農藥殘留量，計算各種農藥每日每公斤體重攝入量，全數農藥皆未達其 ADI 值。再以整理出的農藥檢驗資料，利用馬可夫鏈蒙地卡羅方法模擬各類蔬果各項農藥估計分布，因模擬方式限制，須至少檢出 1 件以上方能進行模擬。利用模擬出來的農藥殘留數據，以蒙地卡羅方法模擬出 20 萬人蔬果攝食情形，再模擬出各種農藥攝食量，並進行累積性風險評估，並作為實習單位計畫辦理參考，計算出 EDI 平均值為每日每公斤體重 0.0003992 毫克，約為達馬松 ADI 之 10%，而第 95 百分位 (P95) 的人及第 99 百分位 (P99) 的人累積攝食量約為達馬松 ADI 之 30% 及 95%，然而模擬出的數據 20 萬人約有 1,847 人 (約 0.92%) 會超過 ADI 值。



A



B



C

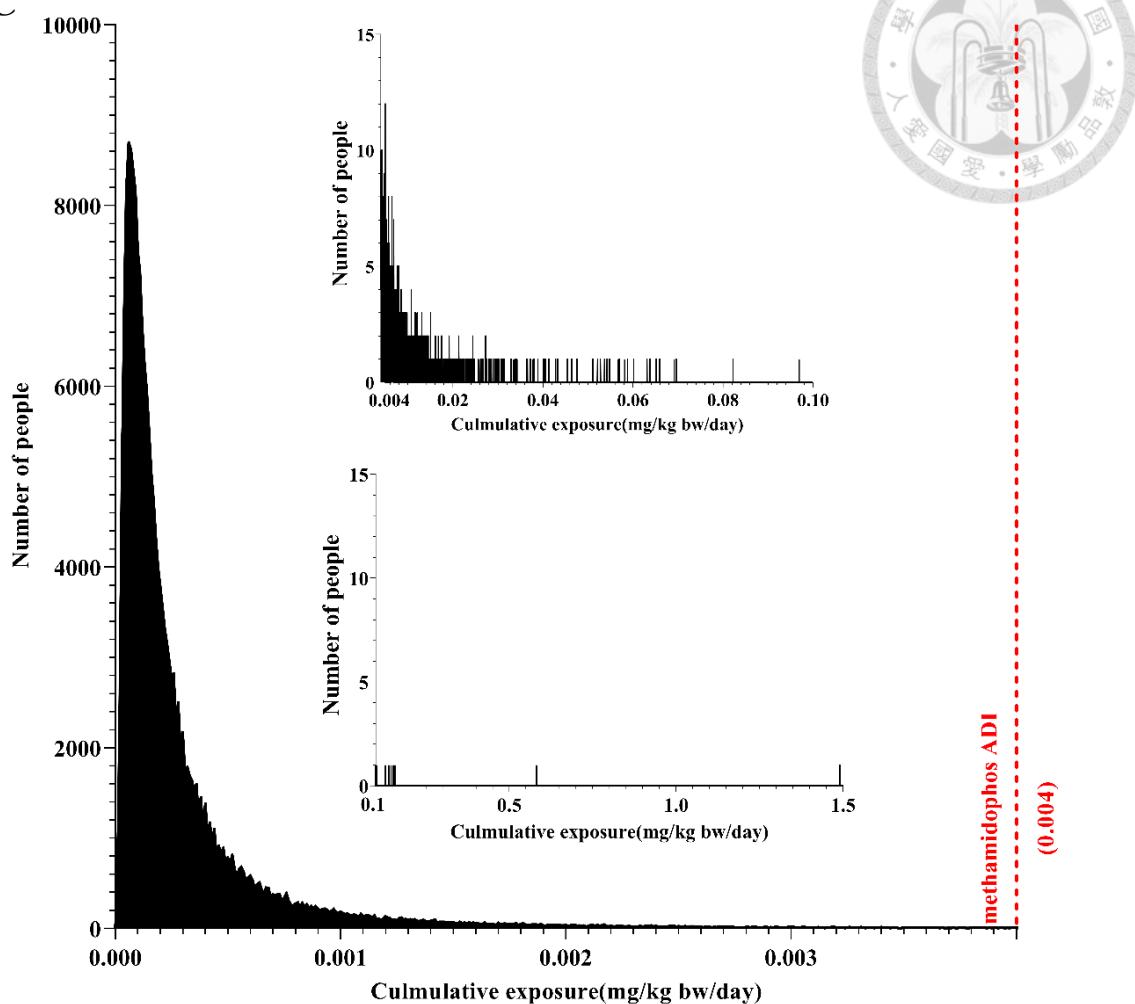


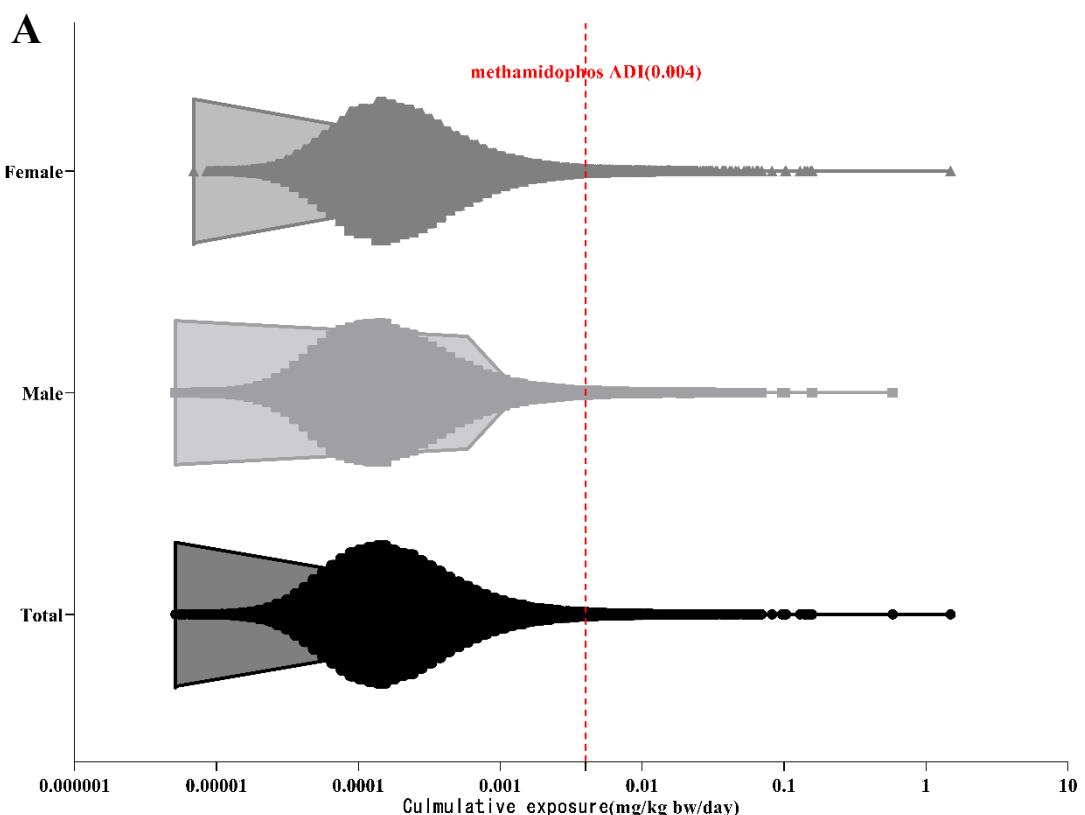
圖 3-3 累積暴露量計算

(A) 農藥 RPF 分佈 (B) 各農藥每日每公斤體重攝入量 (C) 農藥累積暴露量 (大圖：擷取 0-0.004 mg/kg bw/day，此區間共 198,153 人；小圖上：擷取 0.004-0.1 mg/kg bw/day，此區間共 1,834 人；小圖下：擷取 0.1-1.5 mg/kg bw/day，此區間共 13 人)

第五節 性別及年齡分層之累積暴露量



將暴露量模擬的資料以性別進行分層，可以看出女性的暴露狀況略高於男性，而以年齡進行分層，則可以看出 16-18 歲（高中）、13-15 歲（國中）、7-12 歲（小學）的暴露量較低。



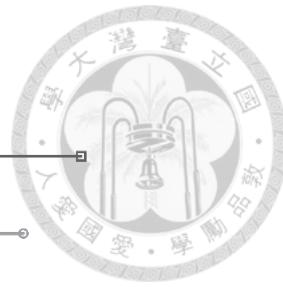
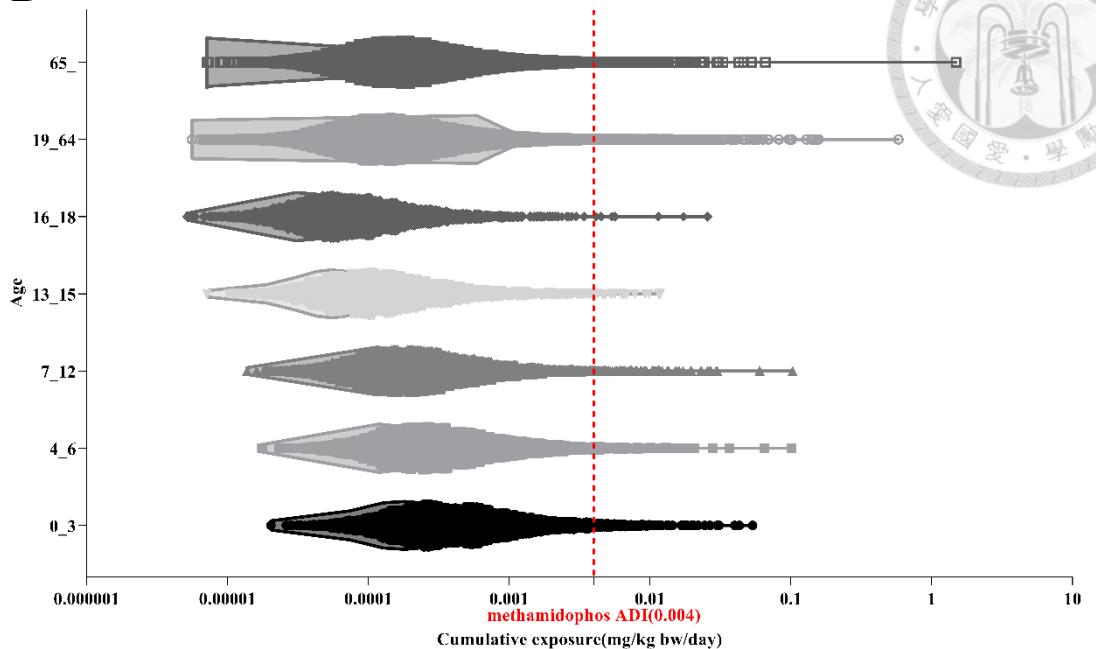
**B**

圖 3-4 農藥累積暴露量分別以 (A) 性別及 (B) 年齡分層

第六節 與傳統累積風險評估 (HQ) 比較

另將前述以蒙地卡羅模擬出 20 萬人各項農藥攝入情形，分別除以各項農藥的 HQ 值，並相加計算出 HI 值；另將 RPF 方法計算出 20 萬人的指標化合物達馬松的攝入量除以達馬松 ADI，分別有 16,903 人及 1,847 人大於 1。

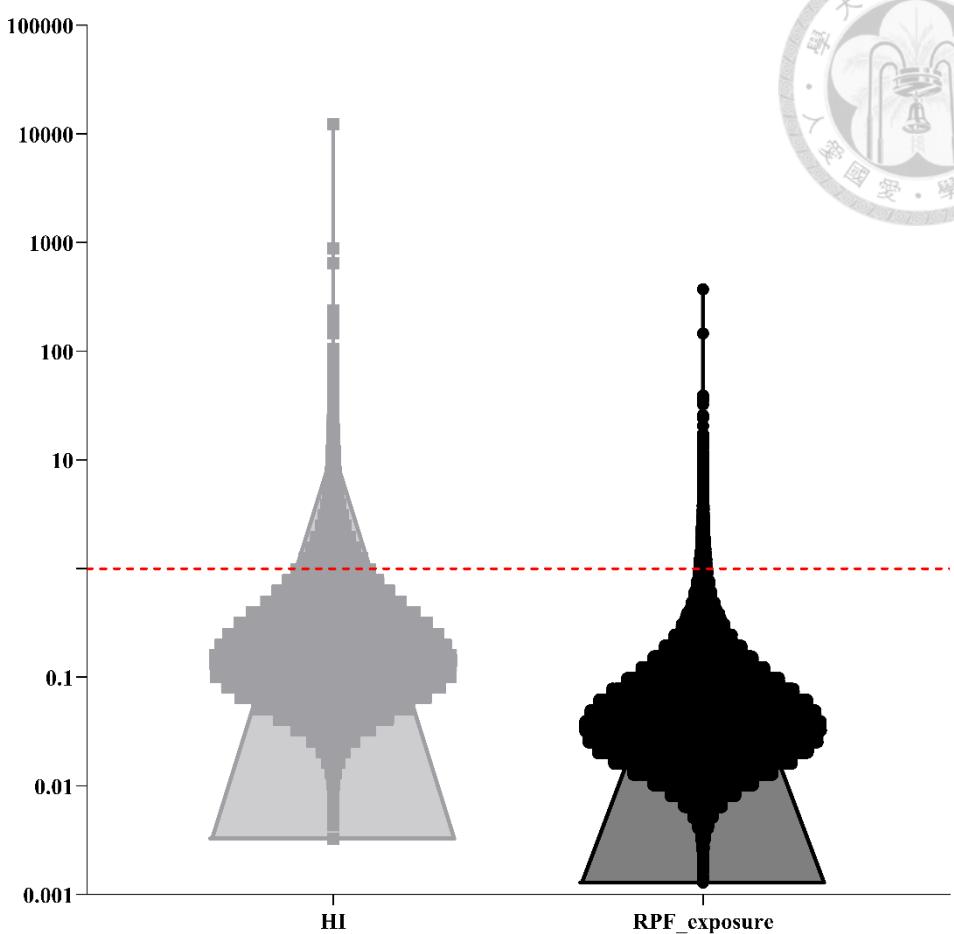


圖 3-5 HI 及 RPF 累積暴露量與達馬松比值的比較

第四章 討論



最常檢出的農藥前 3 名分別為愛殺松、佈飛松及陶斯松，最常檢出的蔬果品項前 3 名分別為橘子、十字花科小葉菜類及其他柑橘類，雖然本研究僅著重在有機磷類農藥，未有評估所有農藥檢出率（依據衛生福利部食品藥物管理署 112 年度市售蔬果農產品農藥殘留監測，較常檢出品項為小葉菜類、果菜類等[11]），仍建議農政單位可加強該 3 類品項農藥及蔬果品項使用的管制，落實使用及安全採收期的控管。

抽驗計畫的擬定，應參考民眾攝食習慣及檢出率進行加強抽驗，以 TOXPI 工具選擇檢出率與攝食量作為主要指標，計算綜合 TOXPI 指數，最高的 3 樣蔬果分別為其他柑橘類、橘子及高麗菜，建議衛生單位可加強該 3 品項蔬果後市場的抽驗，以把關該品項農藥的殘留量，維護消費者飲食安全。另以斯皮爾曼等級相關係數（Spearman rank correlation）分析，顯示上述暴露評估 TOXPI 指數與實際檢驗策略未有明顯相關，可能原因為檢出率係以有機磷類農藥去做計算，未評估所有農藥的檢出率，另可能實習單位在做決策時，還會以民眾關注度、輿情及攝食對象（例如針對供予校園營養午餐品項）加強抽驗，後續可以再蒐集相關資訊，一併納入風險評估模式，也能夠讓實習單位有更好的參考抽驗方向。

利用點估計計算有機磷農藥累積暴露量，UB 累積農藥（換算為達馬松）攝食量 95 百分位每日每公斤體重達 0.0044 毫克，約為達馬松 ADI 之 128.94%，已超過可接受範圍，顯示如果檢出低於 LOD 的結果實際值皆為 LOD，未能保障攝食量為 95 百分位的民眾其有機磷農藥的累積風險在可接受範圍，故建議加強檢驗的精確性，以便更精確的計算風險評估資訊。

利用馬可夫鏈蒙地卡羅方法及蒙地卡羅方法之機率模擬方式，進行累積性風險評估，約 0.92% 民眾有機磷攝食量累積會超過 ADI 值，但本研究在實際執行過程中，因模擬方法或計算的限制，可能會導致有高估或低估的狀況，針對高估部分，本研究方法是以個別基本食品 (individual basic products) 方法作為實驗設計，以生重作為攝食量計算方式，蔬果農藥殘留亦是以未烹調樣品進行檢驗，雖然可以針對每項食品的攝取量與農藥殘留濃度進行討論，有助於掌握不同食品對總暴露的相對貢獻，可清楚辨識哪些食品或食物類別是暴露主要貢獻者，並可靈活結合 RPF 等其他模組進行複合式毒理分析，但一般食物在進行烹調前，皆會進行清洗、去皮或去除根莖等部位，以「原型食品」估算暴露，會高估暴露值。

而低估部分，在蔬果品項及農藥品項篩選時，皆未檢出農藥殘留的品項不列入評估，且利用 MCMC 方法模擬各類蔬果各項農藥估計分布，因模擬方式限制，須至少檢出 1 件以上方能進行模擬，如皆未檢出則不納入該蔬果品項農藥計算，所以本研究尚有許多蔬果品項及有機磷類農藥未納入累積風險評估計算，如能夠取得更多檢測數據，可能會再增加累積風險值。

藉由機率模擬方式結果計算出 EDI 平均值為每日每公斤體重 0.0003992 毫克，約為達馬松 ADI 之 10%，雖略高於丹麥 (0.8-5%) [38] 及西班牙 (0-4%) [25] 的研究，但本研究在農藥及蔬果的品項上是多丹麥及西班牙的研究，且尚於可接受範圍。另約 10% 民眾有機磷攝食量累積會超過 ADI 值，顯示雖然目前法規的訂定機制已針對單一農藥的毒理作用及攝食量進行評估，並訂有 MRL，但仍須注意有機磷累積的風險性，另外本研究因為數據不足及研究方法的原因，會有高估或低估風險值的狀況，可以持續進行資料蒐集，或取得其他衛生及農政單位資料一併納入評估，

以取得更精確的數值。

另本研究之 19 種農藥，其中歐滅松、滅大松、達馬松、陶斯松分別在 2008 年、2012 年、2016 年、2024 年被禁用，但仍然有被檢出的情形，顯示政府單位應加強查核抽驗力度，已管控農藥使用情形，另對於本研究風險評估的影響，亦可持續追蹤其使用量是否有持續下降或未再檢出，及禁用對於整體累積性風險評估之情形。

另將暴露量模擬的資料以性別進行分層，可以看出女性的暴露狀況略高於男性，而以年齡進行分層，則可以看出 16-18 歲（高中）、13-15 歲（國中）、7-12 歲（小學）的暴露量較低，顯示就學兒童攝食蔬果品項與一般民眾有所差異，建議也可以評估其攝食品項，並管控幼兒園或學齡前兒童的攝食情形，以降低幼兒的農藥暴露風險。

將 RPF 方法與傳統 HQ 方法相比較，HQ 方法較為保守，計算出的值較大，有 16,903 人 HQ 累積風險會高於 1，而 RPF 因為是針對相同毒理作用進行累積性風險評估，結果更為精確，有 1,847 人大於 1。

第五章 研究限制



本研究以全國攝食資料取代新北市民攝食資料數據，但其實臺灣各地攝食狀況還是可能會有些許差異，會有部分誤差，且資料來源為衛生福利部國民健康署「國民營養健康狀況變遷調查結果報告 2017-2020 年」資料[29]，該調查是蒐集 24 小時飲食回憶紀錄資料，雖然回憶誤差 (recall bias) 影響較小，但會因為訪問季節時間的不同，會有攝食資料的誤差。

另本研究方法是以個別基本食品 (individual basic products) 方法作為實驗設計，相較於總膳食研究法 (Total Diet Study，簡稱 TDS)，無法反映實際消費與烹調方式，測定綜合樣品的實際殘留量與攝取量，是以原型食品估算暴露，會高估暴露值，未來也可以利用不同方式進行研究，以比較數值差異性。

此外，本研究數據是來自新北市衛生局抽驗資料庫，抽驗品項主要是配合各年度專案進行，會因應當年度時空背景、媒體事件或前幾年之抽驗分析結果改變抽驗項目及件數的分配，可能會有部分品項抽驗件數少，未能準確評估農藥殘留量，或因應上一年度曾經違規的店家進行抽驗，次一年度又被檢出，抽驗機率非隨機性，進而影響整體風險結果分析，另抽驗場域亦受專案計畫及稽查人員習性影響，並非平均分布於傳統市場、超商超市、餐飲業或食品工廠，也會導致與實際值有誤差。

而因為蔬果係以單品項進行農藥殘留計算，單一品項抽驗件數較少，也有可能會造成研究結果較不具代表性的情形，如能夠取得其他衛生單位或農政單位的檢驗數據等更多資料，可使研究更具代表性。

另 RPF 資料因部分農藥研究資料較少，所以使用不同動物實驗及方法的毒理資料一併進行評估，可能會導致估計資料與實際值有誤差，未來可持續搜索相關文

獻更新研究資料，使評估值更完整精準。

本研究藉由機率模擬方式結果第 95 百分位 (P95) 的人及第 99 百分位 (P99) 的人累積攝食量約為達馬松 ADI 之 30% 及 95%，尚在可接受範圍，已達管理目的，但仍有約 0.92% 民眾有機磷攝食量累積會超過 ADI 值，顯示仍須注意有機磷累積的風險性，建議仍需進一步針對該類別農藥累積風險進行評估，以確保民眾食用安全，另也可考慮於法規訂定是否需將相同作用機制農藥納入評估。此外，針對檢出項次數較多的蔬果品項橘子，也要加強採檢，以遏止違規品項在市面上流通，並確保農民在使用農藥確實遵循臺灣良好農業規範，另也要強化民眾衛生教育宣導，食用蔬菜水果前仍應以流水清洗後去皮，以降低農藥殘留風險。





1. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所：陳美蓮、李聯雄、林志鴻，栽植作物有機磷農藥噴灑作業暴露評估研究. 2014.
2. 王熙宇、鄭惠元，農作物農藥殘留風險說明會摘要. 消費者報導雜誌, 2023(507): p. 27-31.
3. FAO, World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024. 2024.
4. 農業部，農業統計年報. 2024.
5. 農業部動植物防疫檢疫署，化學農藥風險十年減半行動方案. 2024.
6. 農業部，農藥管理法.
7. 農業部動植物防疫檢疫署. 我國農藥管理及其展望. 2023.
8. 藥毒所：涂青宇，油料作物農藥殘留容許量之評估. 農業世界雜誌, 2018(416): p. 28-33.
9. 衛生福利部，農藥殘留容許量標準.
10. 侯珮萱、廖怡清、張嘉玲、楊千慧、魏任廷、黃英哲、周芳、尤譽姍、王映璇、盧昭吟、陳瑋芸、吳淑芬、邱子玲、鄭玉松、陳映庭, 108 年度市售農產品農藥殘留監測. 食品藥物研究年報, 2020(11): p. 100-115.
11. 趙慧琳、郭家維、張嘉玲、楊千慧、蔡佳芬、魏任廷、劉嘉欣、鄭玉松、黃郁宸、王韻惠、王語宸、葉修榜、陳渝臻、蕭琦芳, 112 年度市售蔬果農產品農藥殘留監測. 食品藥物研究年報, 2024(15): p. 449-453.
12. Costa, L.G., Organophosphorus Compounds at 80: Some Old and New Issues. Toxicological Sciences, 2017. 162(1): p. 24-35.
13. Mdeni, N.L., et al., Analytical Evaluation of Carbamate and Organophosphate Pesticides in Human and Environmental Matrices: A Review. Molecules, 2022. 27(3): p. 618.
14. Peng, W., et al., Characterizing the potentially neuronal acetylcholinesterase reactivity toward chiral pyraclofos: Enantioselective insights from spectroscopy, *in silico* docking, molecular dynamics simulation and per-residue energy decomposition studies. Journal of Molecular Graphics and Modelling, 2022. 110: p. 108069.
15. Mali, H., et al., Organophosphate pesticides an emerging environmental contaminant: Pollution, toxicity, bioremediation progress, and remaining challenges. Journal of Environmental Sciences, 2023. 127: p. 234-250.
16. Kaur, S., et al., Organophosphorus and carbamate pesticides: Molecular toxicology and laboratory testing. Clinica Chimica Acta, 2023. 551: p. 117584.
17. Kaushal, J., M. Khatri, and S.K. Arya, A treatise on Organophosphate pesticide pollution: Current strategies and advancements in their environmental degradation and elimination. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021. 207: p. 111483.
18. Bassil, K.L., et al., Cancer health effects of pesticides: systematic review. Can Fam Physician, 2007. 53(10): p. 1704-11.
19. Sanborn, M., et al., Non-cancer health effects of pesticides: systematic review and implications for family doctors. Can Fam Physician, 2007. 53(10): p. 1712-20.

20. Rotter, S., et al., Overview on legislation and scientific approaches for risk assessment of combined exposure to multiple chemicals: the potential EuroMix contribution. *Crit Rev Toxicol*, 2018. 48(9): p. 796-814.
21. Kienzler, A., et al., Regulatory assessment of chemical mixtures: Requirements, current approaches and future perspectives. *Regul Toxicol Pharmacol*, 2016. 80: p. 321-34.
22. WHO, Assessment of combined exposures to multiple chemicals: report of a WHO/IPCS international workshop on aggregate/cumulative risk assessment. 2009.
23. Agency, U.S.E.P., Guidance on Cumulative Risk Assessment of Pesticide Chemicals that have a Common Mechanism of Toxicity. 2002.
24. Zhang, Q., et al., The integrated exposure assessment and potential risks of five organophosphorus pesticides in vegetables in Zhejiang, China (2018-2020). *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023. 30(11): p. 28916-28924.
25. Quijano, L., et al., Chronic cumulative risk assessment of the exposure to organophosphorus, carbamate and pyrethroid and pyrethrin pesticides through fruit and vegetables consumption in the region of Valencia (Spain). *Food Chem Toxicol*, 2016. 89: p. 39-46.
26. 蔡經綸、余雅芳、陳建志、周詠勝、倪詩蓓、張嘉津、江舟峰, 台灣膳食暴露評估模型之電腦系統開發與應用：以有機磷農藥殘留為例. *台灣公共衛生雜誌*, 2016. 35(5): p. 487-497.
27. 行政院農委會動植物防疫檢疫局, 農用藥劑分類及作用機制檢索第四版 2023.
28. 衛生福利部, 食品中殘留農藥檢驗方法—多重殘留分析方法(五) (MOHWP0055.05) .
29. 衛生福利部國民健康署, 國民營養健康狀況變遷調查: 106-109 年. 2020, wei sheng fu li bu guo min jian kang shu.
30. 農業部, 農藥田間試驗準則第三條附件一農藥田間試驗規範修正規定.
31. 國家衛生研究院. 國家攝食資料庫. Available from: <https://tnfcds.nhri.edu.tw/index.php?action=index>.
32. 內政部戶政司, 人口統計資料.
33. Boon, P.E., et al., Cumulative risk assessment of the exposure to organophosphorus and carbamate insecticides in the Dutch diet. *Food and Chemical Toxicology*, 2008. 46(9): p. 3090-3098.
34. WHO, Inventory of evaluations performed by the Joint Meeting on Pesticide Residues (JMPR).
35. Authority, A.P.a.V.M., Acceptable daily intakes (ADI) for agricultural and veterinary chemicals used in food producing crops or animals. 2024.
36. Japan, F.S.C.o., Risk Assessmeny Report-Isoxathion (Pesticides) . 2016.
37. (JMPR), J.F.W.M.o.P.R., Inventory of evaluations performed by the Joint Meeting on Pesticide Residues.
38. Jensen, A.F., A. Petersen, and K. Granby, Cumulative risk assessment of the intake of organophosphorus and carbamate pesticides in the Danish diet. *Food Addit Contam*, 2003. 20(8): p. 776-85.

附錄

1. 以 MCMC 模擬單一蔬果單一農藥分布的 R 語言（以香蕉的愛殺松農藥殘留為例）



1. 載入套件

```
library(rstan)
```

2. 設定 options

```
rstan_options(auto_write = TRUE)
```

```
options(mc.cores = parallel::detectCores())
```

```
Sys.setenv(USE_CXX14 = 1)
```

3. 編譯模型

```
model <- stan_model(model_code = model_code)
```

4. 執行 MCMC 輸入檢出值

```
test <- c(0.28,0.55,0.17,0.18,0.94,1.06,0.06,0.09,0.68,0.15,0.41,0.97)
```

```
data_list <- list(N_obs = 12, N_cen = 12, Y_obs = test, N_new=24)
```

5. 執行 MCMC MODEL

```
model_code <- "
```

```
data{
```

```
    int N_obs; //sample number of detected data
```

```
    int N_cen; //sample number of nondetects
```

```
    vector[N_obs] Y_obs;// values of detected data
```

```
    int N_new;
```

```
}
```

```
transformed data{
```

```

real<lower=0> Y_obs_min; //minimum of observed value
real<lower=0> Y_obs_max; //maximum of observed value

Y_obs_min=min(Y_obs);
Y_obs_max=max(Y_obs);

}

parameters{
real<lower=0> GM; //location parameter, geometric mean
real<lower=1> GSD; //shape parameter, geometric standard deviation
real<lower=0, upper=Y_obs_min>RL; //Reporting limit
real<lower=0, upper=RL> Y_cen[N_cen]; // value of nondetects
}

model{
GSD~lognormal(log(4), log(1.5));
GM~normal(Y_obs_max/2, Y_obs_max/4);
RL~normal(Y_obs_min, Y_obs_min/5);
Y_cen~uniform(0, Y_obs_min);

Y_obs~lognormal (log(GM), log(GSD));
Y_cen~lognormal (log(GM), log(GSD));
}

generated quantities{
real log_lik_obs[N_obs];
real log_lik_cen[N_cen];
}

```



```

vector[N_new] Y_new;

real mean_est;

real sd_est;

for (i in 1:N_obs) log_lik_obs[i]=lognormal_lpdf(Y_obs[i]|log(GM), log(GSD));

for (i in 1:N_cen) log_lik_cen[i]=lognormal_lcdf(RL|log(GM), log(GSD));

for (i in 1:N_new) Y_new[i]=lognormal_rng(log(GM), log(GSD));

mean_est=exp(log(GM)+0.5*(log(GSD))^2);

sd_est=sqrt(exp(2*log(GM)+(log(GSD))^2)*(exp((log(GSD))^2)-1));

}"

model <- stan_model(model_code = model_code)

fit <- sampling(model, data = data_list, chains = 4, iter = 50000)

# 6. 結果

summary(fit, pars = c("mean_est", "sd_est"))

# 7. 作圖

library(ggplot2)

posterior <- as.data.frame(fit)

ggplot(posterior, aes(x = mean_est)) +

  geom_histogram(bins = 50) +

  xlab("Mean") +

  ylab("Density") +

  ggtitle("Posterior Distribution of the Mean")

```



2. 以蒙地卡羅模擬單一農藥攝入量的 R 語言（以佈飛松為例）

載入年齡模擬資料

```
agesim <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/age simulation.csv")
```

```
male <- agesim$male
```

```
female <- agesim$female
```

設定總模擬人數

```
N_total <- 200000
```

```
N_male <- 98855
```

```
N_female <- 101145
```

計算每年齡層的比例

```
male_prob <- male / sum(male)
```

```
female_prob <- female / sum(female)
```

用比例隨機抽樣年齡

```
set.seed(123)
```

```
age_m <- sample(0:100, size = N_male, replace = TRUE, prob = male_prob)
```

```
age_f <- sample(0:100, size = N_female, replace = TRUE, prob = female_prob)
```

合併性別與年齡向量

```
age <- c(age_m, age_f)
```

```
gender <- c(rep("M", N_male), rep("F", N_female))
```

建立資料框

```
popdata <- data.frame(Gender = gender, Age = age)
```

確認總人數

```
nrow(popdata)
```



```
table(popdata$Gender)

# 載入截尾常態分布套件

library(truncnorm)

# 建立一個空向量放體重

bodyweight <- numeric(nrow(popdata))

# 根據每一筆資料模擬體重

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

  age_i <- popdata$Age[i] + 1  # 因為 R index 從 1 開始，年齡從 0 所以 +1

  if (popdata$Gender[i] == "M") {

    bw_mean <- agesim$m_bw[age_i]

    bw_sd <- agesim$m_sd[age_i]

  } else {

    bw_mean <- agesim$f_bw[age_i]

    bw_sd <- agesim$f_sd[age_i]

  }

  bodyweight[i] <- rtruncnorm(1, a = 0, b = Inf, mean = bw_mean, sd = bw_sd)

}

# 加入資料框

popdata$Bodyweight <- bodyweight

# 結果

summary(popdata$Bodyweight)

# 載入 OCF 模擬參數資料
```

OCFdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/OCF simulation.csv")

建立空向量

OCF <- numeric(nrow(popdata))

模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

age_i <- popdata\$Age[i] + 1

if (popdata\$Gender[i] == "M") {

OCF[i] <- rtruncnorm(1,

a = OCFdata\$m_min[age_i],

b = OCFdata\$m_max[age_i],

mean = OCFdata\$m_OCF[age_i],

sd = OCFdata\$m_sd[age_i])

} else {

OCF[i] <- rtruncnorm(1,

a = OCFdata\$f_min[age_i],

b = OCFdata\$f_max[age_i],

mean = OCFdata\$f_OCF[age_i],

sd = OCFdata\$f_sd[age_i])

}

}

加入 popdata

popdata\$OCF <- OCF

檢查攝取量分布



summary(popdata\$OCF)

載入 OLV 模擬參數資料

OLVdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/OLV simulation.csv")

建立空向量

OLV <- numeric(nrow(popdata))

模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

age_i <- popdata\$Age[i] + 1

if (popdata\$Gender[i] == "M") {

OLV[i] <- rtruncnorm(1,

a = OLVdata\$m_min[age_i],

b = OLVdata\$m_max[age_i],

mean = OLVdata\$m_OLV[age_i],

sd = OLVdata\$m_sd[age_i])

} else {

OLV[i] <- rtruncnorm(1,

a = OLVdata\$f_min[age_i],

b = OLVdata\$f_max[age_i],

mean = OLVdata\$f_OLV[age_i],

sd = OLVdata\$f_sd[age_i])

}

}

加入 popdata





```
popdata$OLV <- OLV

# 檢查攝取量分布

summary(popdata$OLV)

popdata$OLV[is.na(popdata$OLV)] <- 0

# 載入 CLV 模擬參數資料

CLVdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/CLV simulation.csv")

# 建立空向量

CLV <- numeric(nrow(popdata))

# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

  age_i <- popdata$Age[i] + 1

  if (popdata$Gender[i] == "M") {

    CLV[i] <- rtruncnorm(1,
                          a = CLVdata$m_min[age_i],
                          b = CLVdata$m_max[age_i],
                          mean = CLVdata$m_CLV[age_i],
                          sd = CLVdata$m_sd[age_i])

  } else {

    CLV[i] <- rtruncnorm(1,
                          a = CLVdata$f_min[age_i],
                          b = CLVdata$f_max[age_i],
                          mean = CLVdata$f_CLV[age_i],
                          sd = CLVdata$f_sd[age_i])
  }
}
```



```
}

}

# 加入 popdata

popdata$CLV <- CLV

# 檢查攝取量分布

summary(popdata$CLV)

# 載入 ASL 模擬參數資料

ASLdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/ASL simulation.csv")

# 建立空向量

ASL <- numeric(nrow(popdata))

# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

  age_i <- popdata$Age[i] + 1

  if (popdata$Gender[i] == "M") {

    ASL[i] <- rtruncnorm(1,

      a = ASLdata$m_min[age_i],

      b = ASLdata$m_max[age_i],

      mean = ASLdata$m_ASL[age_i],

      sd = ASLdata$m_sd[age_i])

  } else {

    ASL[i] <- rtruncnorm(1,

      a = ASLdata$f_min[age_i],

      b = ASLdata$f_max[age_i],
```

```

mean =ASLdata$f_ASL[age_i],
sd =ASLdata$f_sd[age_i])
}

}

# 加入 popdata

popdata$ASL <-ASL

# 檢查攝取量分布

summary(popdata$ASL)

# 載入 GOL 模擬參數資料

GOLdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/GOL simulation.csv")

# 建立空向量

GOL <- numeric(nrow(popdata))

# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

  age_i <- popdata$Age[i] + 1

  if (popdata$Gender[i] == "M") {

    GOL[i] <- rtruncnorm(1,
                          a =GOLdata$m_min[age_i],
                          b =GOLdata$m_max[age_i],
                          mean =GOLdata$m_GOL[age_i],
                          sd =GOLdata$m_sd[age_i])

  } else {

    GOL[i] <- rtruncnorm(1,

```



```

    a =GOLdata$f_min[age_i],
    b =GOLdata$f_max[age_i],
    mean =GOLdata$f_GOL[age_i],
    sd =GOLdata$f_sd[age_i])

}

}

# 加入 popdata

popdata$GOL <-GOL

# 檢查攝取量分布

summary(popdata$GOL)

# 載入 OFV 模擬參數資料

OFVdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/OFV simulation.csv")

# 建立空向量

OFV <- numeric(nrow(popdata))

# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

  age_i <- popdata$Age[i] + 1

  if (popdata$Gender[i] == "M") {

    OFV[i] <- rtruncnorm(1,
      a =OFVdata$m_min[age_i],
      b =OFVdata$m_max[age_i],
      mean =OFVdata$m_OFV[age_i],
      sd =OFVdata$m_sd[age_i])
  }
}

```





```
} else {  
    OFV[i] <- rtruncnorm(1,  
        a =OFVdata$f_min[age_i],  
        b =OFVdata$f_max[age_i],  
        mean =OFVdata$f_OFV[age_i],  
        sd =OFVdata$f_sd[age_i])  
}  
}  
  
# 加入 popdata  
  
popdata$OFV <- OFV  
  
# 檢查攝取量分布  
  
summary(popdata$OFV)  
  
# 載入 FRB 模擬參數資料  
  
FRBdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/FRB simulation.csv")  
  
# 建立空向量  
  
FRB <- numeric(nrow(popdata))  
  
# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)  
  
for (i in seq_len(nrow(popdata))) {  
    age_i <- popdata$Age[i] + 1  
    if (popdata$Gender[i] == "M") {  
        FRB[i] <- rtruncnorm(1,  
            a =FRBdata$m_min[age_i],  
            b =FRBdata$m_max[age_i],
```

```

        mean =FRBdata$m_FRB[age_i],
        sd =FRBdata$m_sd[age_i])
    } else {
        FRB[i] <- rtruncnorm(1,
            a =FRBdata$f_min[age_i],
            b =FRBdata$f_max[age_i],
            mean =FRBdata$f_FRB[age_i],
            sd =FRBdata$f_sd[age_i])
    }
}

# 加入 popdata

popdata$FRB <-FRB

# 檢查攝取量分布

summary(popdata$FRB)

# 載入 PEA 模擬參數資料

PEAdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/PEA simulation.csv")

# 建立空向量

PEA <- numeric(nrow(popdata))

# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {
    age_i <- popdata$Age[i] + 1
    if (popdata$Gender[i] == "M") {
        PEA[i] <- rtruncnorm(1,

```



```

    a =PEAdata$m_min[age_i],
    b =PEAdata$m_max[age_i],
    mean =PEAdata$m_PEA[age_i],
    sd =PEAdata$m_sd[age_i])

} else {

PEA[i] <- rtruncnorm(1,
    a =PEAdata$f_min[age_i],
    b =PEAdata$f_max[age_i],
    mean =PEAdata$f_PEA[age_i],
    sd =PEAdata$f_sd[age_i])

}

# 加入 popdata

popdata$PEA <-PEA

# 檢查攝取量分布

summary(popdata$PEA)

# 載入 RAD 模擬參數資料

RADdata <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/RAD simulation.csv")

# 建立空向量

RAD <- numeric(nrow(popdata))

# 模擬每人攝取量 (依性別與年齡)

for (i in seq_len(nrow(popdata))) {

age_i <- popdata$Age[i] + 1

```





```
if (popdata$Gender[i] == "M") {  
  RAD[i] <- rtruncnorm(1,  
    a =RADdata$m_min[age_i],  
    b =RADdata$m_max[age_i],  
    mean =RADdata$m_RAD[age_i],  
    sd =RADdata$m_sd[age_i])  
}  
} else {  
  RAD[i] <- rtruncnorm(1,  
    a =RADdata$f_min[age_i],  
    b =RADdata$f_max[age_i],  
    mean =RADdata$f_RAD[age_i],  
    sd =RADdata$f_sd[age_i])  
}  
}  
}  
# 加入 popdata  
popdata$RAD <- RAD  
# 檢查攝取量分布  
summary(popdata$RAD)  
set.seed(999)  
# 建立一個殘留濃度模擬函數  
simulate_residue <- function(mean, sd) {  
  location <- log(mean^2 / sqrt(sd^2 + mean^2))  
  shape <- sqrt(log(1 + (sd^2 / mean^2)))  
  rlnorm(n = nrow(popdata), meanlog = location, sdlog = shape)  
}
```

```

}

# 模擬殘留濃度

popdata$OCF_res <- simulate_residue(0.00579719, 0.02253089)
popdata$OLV_res <- simulate_residue(0.01070118, 0.05433758)
popdata$CLV_res <- simulate_residue(0.06764032, 5.76015314)
popdata$ASL_res <- simulate_residue(0.002873682, 0.009604903)
popdata$GOL_res <- simulate_residue(0.002780126, 0.00550349)
popdata$OFV_res <- simulate_residue(0.00503878, 0.02592652)
popdata$FRB_res <- simulate_residue(0.004193594, 0.019401443)
popdata$PEA_res <- simulate_residue(0.004686049, 0.010926674)
popdata$RAD_res <- simulate_residue(0.01326118, 0.04491699)

# 檢查其中一個的結果

summary(popdata$OLV_res)

# 合併

popdata$TotalExposure <- (
  popdata$OCF * popdata$OCF_res +
  popdata$OLV * popdata$OLV_res +
  popdata$CLV * popdata$CLV_res +
  popdata$ASL * popdata$ASL_res +
  popdata$GOL * popdata$GOL_res +
  popdata$OFV * popdata$OFV_res +
  popdata$FRB * popdata$FRB_res +
  popdata$PEA * popdata$PEA_res +
  popdata$RAD * popdata$RAD_res
)

```



```

) / (popdata$Bodyweight * 1e3)

# 結果

summary(popdata$TotalExposure)

quantile(popdata$TotalExposure, probs = c(0.01, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9, 0.95,
0.99))

write.csv(popdata, "Profenofos_total_exposure.csv", row.names = FALSE)

# 作圖

library(ggplot2)

ggplot(popdata, aes(x = TotalExposure)) +
  geom_histogram(bins = 100, fill = "steelblue", color = "white") +
  scale_x_log10() +
  geom_vline(xintercept = median(popdata$TotalExposure), color = "red", linetype =
"dashed", linewidth = 1) +
  geom_vline(xintercept = quantile(popdata$TotalExposure, 0.95, na.rm = TRUE),
color = "darkgreen", linetype = "dashed", linewidth = 1) +
  labs(
    title = "Distribution of Daily Exposure to Ethion",
    x = "Exposure ( $\mu\text{g}/\text{kg bw/day}$ , log scale)",
    y = "Number of People"
  ) +
  theme_minimal()

```



3. 加權計算有機磷農藥累積攝入量的 R 語言



```
# 載入暴露資料
exposuresim <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/total_exposure.csv")
# 複製成 data 以便後續處理
data <- exposuresim
# 查看前幾筆資料確認欄位名稱
head(names(data))
# 設定農藥名稱
pesticide_names <- c(
  "Ethion_Exposure", "Profenofos_Exposure", "Chlorpyrifos_Exposure",
  "Phosmet_Exposure", "Triazophos_Exposure", "Fenitrothion_Exposure",
  "Malathion_Exposure", "Acephate_Exposure", "Isoxathion_Exposure",
  "Fenthion_Exposure", "Methamidophos_Exposure", "Diazinon_Exposure",
  "Terbufos_Exposure", "Omethoate_Exposure", "Phenthoate_Exposure",
  "Dimethoate_Exposure", "Pyraclofos_Exposure", "Thiometon_Exposure",
  "Methidathion_Exposure"
)
# 建立對應的 RPF 值
RPF <- c(0.33, 0.004, 0.06, 0.02, 0.27, 0.0002, 0.0003, 0.08, 2, 0.33, 1, 0.01, 0.85, 0.93,
1.38, 0.32, 4, 1.6, 0.32)
# 確保這些欄位存在
if (!all(pesticide_names %in% names(data))) {
  stop("某些農藥欄位不存在於資料中，請檢查欄位名稱是否正確！")
```

```
}
```

```
# 轉換成矩陣並進行加權計算
```

```
adjusted_exposure <- as.matrix(data[, pesticide_names]) %*% RPF*1000
```

```
# 加入到資料框
```

```
data$RPF_Adjusted_Total <- as.vector(adjusted_exposure)
```

```
# Summary statistics
```

```
summary(data$RPF_Adjusted_Total)
```

```
mean(data$RPF_Adjusted_Total)
```

```
sd(data$RPF_Adjusted_Total)
```

```
# 輸出到 CSV
```

```
write.csv(data, "C:/Users/wu/Desktop/MCMC/RPF_Adjusted_Total.csv", row.names =  
FALSE)
```

```
# 畫圖看分布
```

```
library(ggplot2)
```

```
ggplot(data, aes(x = RPF_Adjusted_Total)) +  
  geom_histogram(bins = 50) +  
  scale_x_log10() +  # 用對數 scale 通常會比較好看
```

```
  xlab("RPF 加權總暴露量 (mg/kg bw/day)") +
```

```
  ylab("人數") +
```

```
  ggtitle("累積暴露分布 (加權後) ")
```





4. 計算 HI

```
# 載入暴露資料
exposuresim <- read.csv("C:/Users/wu/Desktop/MCMC/total_exposure.csv")
# 複製成 data 以便後續處理
data <- exposuresim
# 查看前幾筆資料確認欄位名稱
head(names(data))
# 設定農藥名稱
pesticide_names <- c(
  "Ethion_Exposure", "Profenofos_Exposure", "Chlorpyrifos_Exposure",
  "Phosmet_Exposure", "Triazophos_Exposure", "Fenitrothion_Exposure",
  "Malathion_Exposure", "Acephate_Exposure", "Isoxathion_Exposure",
  "Fenthion_Exposure", "Methamidophos_Exposure", "Diazinon_Exposure",
  "Terbufos_Exposure", "Omethoate_Exposure", "Phenthoate_Exposure",
  "Dimethoate_Exposure", "Pyraclofos_Exposure", "Thiometon_Exposure",
  "Methidathion_Exposure"
)
# 建立對應的 ADI 值
ADI <- c(0.002, 0.03, 0.01, 0.01, 0.001, 0.006, 0.3, 0.03, 0.002, 0.007, 0.004, 0.003,
  0.0006, 0.004, 0.003, 0.01, 0.001, 0.003, 0.002)
# 確保這些欄位存在
if (!all(pesticide_names %in% names(data))) {
  stop("某些農藥欄位不存在於資料中，請檢查欄位名稱是否正確！")
```

```
}
```

```
# 計算每個農藥的 HQ 值，單位為 (暴露量除以 ADI)
```

```
HQ <- sweep(data[, pesticide_names], 2, ADI, "/")
```

```
# 將 HQ 結果併入原始資料框中
```

```
colnames(HQ) <- gsub("_Exposure", "_HQ", pesticide_names)
```

```
data <- cbind(data, HQ)
```

```
# 計算總 HI 值 (所有 HQ 加總)
```

```
data$HI <- rowSums(HQ, na.rm = TRUE)
```

```
# Summary statistics
```

```
summary(data$HI)
```

```
# 輸出到 CSV
```

```
write.csv(data, "C:/Users/wu/Desktop/MCMC/HI.csv", row.names = FALSE)
```

