

農藥施用者暴露量估計之國際模型簡介及探討

李悅怡^{1*}、林良怡¹、蔡建任¹

摘要

李悅怡、林良怡、蔡建任。2021。農藥施用者暴露量估計之國際模型簡介及探討。臺灣農藥科學 11 : 29-45。

由於減少農藥暴露風險為保護農藥施用人員中非常重要之一環，而要求每一種農藥產品或劑型皆進行實際田間施用者暴露量調查並不實際，且耗時、耗力、耗資源，因此目前國際上先進國家常採用階層式評估方式，進行暴露量是否低於暴露限值之評估，其中暴露量估計模型所計算出之數據，是在第一階層評估中最常使用之方式。本研究針對國際上公開的暴露量估計模型，進行討論及研析，其中包括美國環保署 (United States Environmental Protection Agency, USEPA)、歐洲食品安全局 (European Food Safety Authority, EFSA) 及日本農林水產省，分別公告之職業性農藥施用者暴露計算器 (Occupational Pesticide Handler Exposure Calculator, OPHEC)、農業操作者暴露模擬模式 (Agricultural Operator Exposure Model, AOEM) 及農藥使用者暴露計算表 (農藥使用者暴露計算シート，暫譯為 Pesticide Applicator Exposure Calculation Sheet, PAECS)，其中對於模型使用者而言，日本的 PAECS 模型因水稻參數、施藥模式、劑型等，較符合我國農藥田間施用情形，因此建議導入作為我國使用。另外對於我國模型建構方面，則應持續收集預設參數之資料，並依各項需求，建立我國自有之暴露量估計模型，以利精準我國農藥施用者暴露量估計，達成農藥暴露風險減量之目的。

關鍵詞：職業性農施用者暴露計算器、農業操作者暴露模擬模式、農藥使用者暴露計算表、農藥施用人員、每日可接受操作暴露劑量

接受日期：2021 年 10 月 5 日

* 通訊作者。E-mail: lyisi2001@tactri.gov.tw

¹ 臺中市 行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所

緒言

對於農業生產者而言，職業性之農藥暴露於安全評估中，是不可或缺的一環，世界各國對於職業性農藥施用者暴露皆非常重視，風險評估時多採階層評估方式⁽¹⁰⁾，其中第 1 階層即以估計模型計算暴露量，當暴露量大於暴露限值，如每日可接受操作暴露劑量值 (Acceptable Operator Exposure Level, AOEL)，則該項農藥列入不予登記或退場參考名單內⁽¹²⁾，或是進行第 2 階層之評估，其為皮膚吸收率評估，若評估農藥吸收後，暴露量仍大於 AOEL 值，方進行最終第 3 階層－田間實際暴露評估及藥物動力學評估。

田間實際暴露評估及藥物動力學評估被列為第 3 階層之原因主要為，要求每一種農藥產品或劑型，皆進行實際田野暴露量調查並不實際且耗時、耗力、耗資源，同時，相較第 3 階層，第 1 階層以估計模型計算暴露量，不僅快速，且完全不耗費資源，因此利用第 1 層之暴露量估計模型便日益興盛。估計模型建構時通常利用已有農藥施用暴露量資料庫之數據，建構完成後，即可依據各項農藥施用相關資料，如已知之毒性資料庫資料，或是以假設的預設值 (Default Value) 輸入模型，即可進行評估⁽¹⁰⁾。

國際上針對農藥施用者 (operator/applicator) 之暴露量估計模型約有 12 餘種^(7, 17)，歐、美較常使用者為歐洲之農業操

作者暴露模擬模式 (Agricultural Operator Exposure Model, AOEM)⁽⁵⁾，及美國之職業性農藥處理者暴露計算器 (Occupational Pesticide Handler Exposure Calculator, OPHEC)⁽¹³⁾，亞洲國家則如韓國、中國及日本，亦有針對該國之栽種作物之農藥施用特性，建立相關施用者暴露量估計模型，分別為 KO-POEM⁽⁴⁾、COPrisk2.2 及農藥使用者暴露計算表 (農藥使用者暴露計算シート，暫譯為 Pesticide Applicator Exposure Calculation Sheet, PAECS)^(1, 8)。目前國際上對於農藥暴露量估計模型之準確性、敏感性或其預測原理並無規範，且無硬性法規規範使用之模型，僅有歐盟有發表相關指引⁽⁷⁾，各國於發展暴露量估計時，主要概念是基於農藥的施用而造成的暴露，暴露量與施用模式 (pattern) 有關，如施用器具、劑型、包裝形式、穿著的保護能力、主要作用成分的施用總量、以及個人的工作熟練度有關，而與主要作用成分之物理化學性質較無相關^(1, 10)，因此利用農藥施用的資料庫建構之估計模型，便可估計各種農藥施用之暴露量，另外，國外為考量農藥施用實際情形與農藥商品標籤之指示防護等級有差距，因此這些暴露量估計模型多採用較保守的概念⁽¹⁶⁾。

由於我國目前並未完備針對農藥使用情形之農藥暴露量估計模型，因此如欲使用國際上已建立的暴露量估計模型，或建立符合我國農藥操作、施用模式之暴露量估計模型，則須先針對各國估計模型，多

所了解後，再依我國農藥施用特性，進行相關研析，因此本研究乃針對歐洲、美國、日本之暴露量估計模型，進行相關簡介及討論，最後提出相關模型使用及建構之建議。

暴露量預測估計模型簡介

一、美國的 OPHEC 模型 (2018)

OPHEC⁽¹³⁾ 可於美國環保署官方網站下載，其為以微軟 excel 軟體設計之暴露估計模型，會不定期更新，目前使用國家包括美國及澳大利亞等⁽⁷⁾，其計算依據資料為農藥處理者暴露資料庫 (Pesticide Handlers Exposure Database, PHED) 及職業性農藥處理者暴露資料 (Occupational Pesticide Handler Exposure Data, OPHEC)，PHED 之暴露資料為自 1984 年開始收集，資料分為 A、B、C、D、E 級，其中 A、B 級之資料具較高再現性，為早期之計算器主要使用資料⁽¹⁰⁾，到目前為止，共包含 1,700 位人員之施藥資料。由於許多資料並未符合優良實驗室操作規範 (Good Laboratory Practice, GLP)，且施用模式及防護模式於近代已改變，故於 2001 年成立農業處理者暴露專案組 (Agricultural Handler Exposure Task Force, AHETF)。另外進行特異性商品的資料收集，包括背包式 (backpack rights-of-ways)、開放式動力機具 (open cab) 等施藥模式之資料⁽¹⁴⁾，並於 2018 年將暴露估計模型改版，並更

進一步於 2020 年更新。目前暴露量或相關之數值之預測以集中趨勢數值 (central tendency value) 為主，如為常態分布之資料數值，則以算術平均 (arithmetic mean)、幾何平均 (geometric mean)、或中位數計算，以符合不同的作業模式數值⁽¹⁵⁾。

OPHEC 模型內共計有 10 項表單，其中“TOX and EXPO INPUTS”、“OccHandler_Non-cancer”、“Summary Report_Non-cancer”為暴露風險估計之主要參數輸入表單，另外“OccHandler_Cancer”及“Summary Report_Cancer”是致癌風險估計之主要參數輸入表單，其他表單則為說明頁或是預設參數計算頁，以下針對說明頁及各主要參數輸入表單進行說明及簡介，由於本文主要聚焦於農藥施用之暴露量，因此致癌風險估計不列入簡介及討論。

(一) 說明頁 (User Guide)

說明頁說明參數輸入表單頁面及位置 (綠色底欄位)，需輸入參數包括產品 (含環境用藥) 基本資料、施藥量、施藥器械、皮膚及呼吸暴露、施藥防護裝備、並說明防護裝備簡寫之意義，以及結果顯示之意義，另外作物分群的搜尋可在“Crop-Target Category Lookup”內尋找。

(二) 參數 (TOX and EXPO INPUTS) 表單輸入

相關於施用量及暴露風險者，應輸入欄位包括 10 個，其中主要作用成分 (active ingredient)、皮膚毒性及呼吸毒性之推估起點劑量 (Point of Departure, POD)、關切程度 (Level of Concern, LOC)、吸收率為填入欄位 (表一)，暴露期間 (Exposure Duration) 及體重為下拉式選單欄位。

在填入時須注意暴露期間可分為長期 (long-term, 對該農藥一生之暴露時間為 6 個月以上)、中期 (intermediate-term, 對該農藥一生之暴露時間約為 6 個月)、以及短期 (short-term, 對該農藥一生之暴露時間為 30 天以上)，但此輸入參數僅為後續致癌風險之計算參考。另外 POD 一般可為 AOEL、無可見毒害劑量 (No Observed Adverse Effect Level, NOAEL)、最低可見毒害劑量 (Lowest-Observed-Adverse-Effect Level, LOAEL)、及基準劑量下限值 (Bench Mark Dose, BMD)，如 POD 填入 AOEL 值，則 LOC 值應填入 1。在吸收率方面，其需換算成 0-1 之值，如吸收率為 90%，則應填入 0.9。在體重方面以美國人為基準則選擇 69 公斤或以上。

(三) 非致癌性風險 (OccHandler_Non-cancer) 表單輸入

此表單應輸入欄位包括 7 個，其中下拉式選單欄位中，工作項目 (work activity) 可選擇操作者 (applicator)、混藥

及填充藥者 (mixing/loading)、填充藥及操作者 (loading/applicator)、混藥、填充及操作者 (mixing/loading/applicator) 等等選項，劑型 (formulation) 選項相當多，與我國農藥較相關者則主要有乾懸浮劑 (Dry Flowable)、粉塵劑 (Dust)、粒劑 (Granule)、溶液 (Liquid)、噴劑 (Spray)、可濕性粉劑 (Wettable Powder) 等選項。施用器械 (application equipment) 欄位中，與我國農藥施用較相似者，則包括背負式 (backpack)、桿架式噴霧機 (boom sprayer (boat))、化學灌溉 (chemigation)、動力噴霧車 (groundboom)、手持式器械 (hand dispersal)、手動加壓式噴霧器械 (manual pressured handwand)、車載式噴霧機 (truck mounted fogger/mister) 等選項。施用型態 (application type) 則包括廣域施藥 (broadcast)、田間處理 (on farm treatment)、地面及土壤直接處理 (ground/soil directed) 等選項。在作物種類方面，則有大區域面積田野作物 (field crop, high acreage)、典型田野作物 (field crop, typical) 等選項。

在填入欄位中，包括輸入施用量 (application rate) 及處理面積 (amount handed/area treated) 欄位如表一，其中輸入施用量欄位最為重要，輸入時需比對我國該農藥之施用方式，並經單位換算，另外處理面積雖非綠底欄位，但亦可依需求變更數值。

表一、各施用者暴露量估計模型簡要所需填入之參數¹⁾**Table 1.** Parameters input by model users for different exposure dose estimation model¹⁾

Models	Input values	Definition	Unit
OPHEC	1. Active ingredient	Active ingredient name	-
	2. POD (NOAEL or other value)	Point of Departure	mg/kg bw/day
	3. LOC (Can be AOEL or other value)	Level of Concerns	mg/kg bw/day
	4. Fraction (oral route is 0 ; specific route is 1)	The percentage of absorption	-
	5. Application rate value	Application rate	lb ai/acre
	6. Amount Handed/Area Treated (optional)	Area	Acres/acres-foot/gallon
AOEM	1. Reference value non acutely toxic active substance; RVNAS (can be AOEL or other value)	AOEL, Acceptable Operator Exposure Level	mg/kg bw/day
	2. Reference value acutely toxic active substance; RVAAS (can be AAOEL or other value)	AAOEL, Acute Acceptable Operator Exposure Level	mg/kg bw/day
	3. Minimum volume water for application	Water applied by hectare	L/ha
	4. Maximum application rate of active substance	Active substance applied by hectare	kg a.s./ha
	5. Dermal absorption of product	Dermal absorption rate	%
	6. Dermal absorption of in-use dilution	Dermal absorption rate of dilution	%
	7. Oral absorption of active substance	Oral absorption rate	%
	8. Inhalation absorption of active substance	Normally 100%	%
	9. Number of applications	Number of applications per year	-
	10. Interval between multiple applications	Every application interval days	days
PAECS	1. Pesticide categories	Such as insecticides, miticides, etc.	-
	2. Pesticide name	Pesticide name	-
	3. Active ingredients	Active ingredient name	-
	4. AOEL	Acceptable Operator Exposure Level	mg/kg bw/day
	5. AAOEL (Can be NOAEL)	Acute Acceptable Operator Exposure Level	mg/kg bw/day
	6. Active ingredient concentration	-	%
	7. Crop name	Crop	-
	8. Application rate-dilution fold	Product dilution fold	-
	9. Application amounts	Pesticide amounts	L/10a, mL/10a, kg/10a, L/box, g/box
	10. Usage time	License limit time	-
	11. Application methods	Manual or mechanical application	-
	12. Application times	Number of every application	-
	13. Total application times	Application time number per year	-
	14. 10a application volume	Active ingredient/a plant	ml
	15. 10a application plants	Plants number/10a	-
	16. Dermal absorption of product	Dermal absorption rate of product	-
	17. Dermal absorption of in-use dilution	Dermal absorption rate of in-use dilution	-
	18. Exposure dose per unit (optional)	Head, hand, respiratory, and other body part exposure dose	µg a.i./g

¹⁾ 為直接填入欄位，非下拉式表單 (Parameters are input via a text field, not selected from a list of options in drop-down columns.)

(四) 結果摘要 (Summary Report_Non-cancer) 表單輸入

在此表單中，只有防護等級 (level of PPE or engineering control) (包括衣著及呼吸 2 欄位) 需輸入，並以下拉式選單填寫，施用時防護在衣著之選項包括單層防護 (single layer, SL) / 雙層防護 (double layer, DL) / 防護衣 (engineering control, EC)，有 / 無手套 (chemical-resistant gloves/no chemical-resistant gloves, G/ No G)，抗化學物質帽 (chemical-resistant hat, CRH)；單層防護為著長袖、長褲、鞋及襪，雙層防護單層防護再加連身衣。在呼吸防護之選項包括無呼吸器 (no respirator, No R)、保護因子為 10 之呼吸器 (respirator with protection factor of 10, PF10 R；如半面罩式彈性卡匣呼吸器)、保護因子為 50 之呼吸器 (respirator with a protection factor of 50, PF50 R；如全面罩式彈性卡匣呼吸器)、防護呼吸罩 (EC) 等。由於美國的 OPHEC 直接計算暴露風險，因此暴露量需自行將皮膚及呼吸之暴露量估計值加總後代表之。

二、歐盟的 AOEM 模型

AOEM 於 2013 年為聯邦風險評估研究所 (Federal Institute for Risk Assessment, BfR) Großkopf 所發表⁽⁹⁾，其亦以微軟 excel 軟體設計，其建立之原因為歐洲其他之估計模型皆使用超過 20 年以上，且

所依據的數據資料也無法與現代農藥施用之現況符合，因此 AOEM 採用的資料需符合農藥施用代表性模式、依循 GLP、良好農業規範 (Good Agricultural Practices, GAP)、操作者為農藥施用老手、以及皮膚暴露之全身計量方法、適當的空氣採樣器等標準⁽⁹⁾。AOEM 使用之資料庫為歐洲農藥製造商協會 (European Crop Protection Association, ECPA)、Agriphar 公司及 Globachem NV 公司所提供之資料，資料來源為 1994 年至 2009 年所進行的 34 個試驗⁽⁶⁾，將施用模式簡單分為 4 種，包括低作物拖拉機 / 車輛或小徑施用 (Low Crop Tractor/Vehicle-mounted or Trailed Application, LCTM)、低作物手持施用 (Low Crop Hand-held Application, LCHH)、高作物拖拉機 / 車輛或小徑施用 (High Crop Tractor/Vehicle-mounted or Trailed Application, HCTM)、高作物手持施用 (High Crop Hand-held Application, HCHH)，並搭配不同程度之防護變數⁽⁶⁾。由於資料為對數常態分布，因此模型中暴露量之計算以下列公式表示：

$$\log X = \alpha \times \log A + \sum [F_i]$$

或非線性公式：

$$X = A^\alpha \times \prod c_i$$

X 為估算之暴露量，A 為主要作用成分之用量，F_i 為影響因子，α 設定為 0 至 1 之間，為 A 之線性或次線性之依賴指數 (因主要作用成分之增加並不會造成指數

增加)， C_i 為影響因子；急性暴露以計算累積暴露量之第 95 百分位表示，慢性暴露則以第 75 百分位表示，估計模型之驗證 (validation) 以將資料某些變數去除後，進行交叉驗證 (cross-validation)。

AOEM 其內共計有 13 項表單，其中“Data Entry”及“Operator Outdoor Spray AOEM”為暴露風險估計之主要參數輸入表單，其他表單則為說明頁或是預設參數計算頁，以下針對說明頁及各主要參數輸入表單進行說明及簡介。

(一) 說明頁 (Instructions)

除了上述輸入表單，如所使用的農藥為粒劑，則可進行粒劑操作者 (operator granules) 之表單填寫，另外 AOEM 無法計算室內施藥，估計結果顯示於摘要頁 (summary)。

(二) 參數 (Data entry) 表單輸入

相關於農藥施用者及其暴露風險，應輸入欄位計 20 個，直接填入欄位如表一，包括物質名稱 (substance name)、產品名稱 (product name)、非急性毒性物質參考數值 (Reference Value Non Acutely Toxic Active Substance, RVNAS)、急性毒性物質參考數值 (Reference Value Acutely Toxic Active Substance, RVAAS)、最少施用使用水量 (minimum volume water for application (liquid))、最大施用量 (maximum application

rate of active substance)、產品之皮膚吸收率 (dermal absorption of product)、稀釋後產品之皮膚吸收率 (dermal absorption of in-use dilution)、主要作用成分之口服吸收率 (oral absorption of active substance)、呼吸吸收率 (inhalation absorption of active substance)、施用次數 (number of applications)、施用間期 (interval between multiple applications)、作物種類 (crop type)、劑型 (formulation type)、主要作用成分之蒸氣壓 (vapour pressure of active substance)、戶內／戶外 (indoor or outdoor application)、施用方法 (application method)、施用器械 (application equipment) 則為下拉式選單欄位。

其中參數填入須注意 RVNAS 值可填入急性每日可接受操作暴露劑量值 (Acute Acceptable Operator Exposure Level, AAOEL)，RVAAS 則可填入 AOEL 值。在可選擇之作物種類方面，共計 21 種；在劑型選擇方面，共計 4 大類，分為可濕性粉劑、可溶性粉劑類 (Wettable Powder, Soluble Powder)、粒劑、細粒劑類 (Granule, Fine Granules)、可濕性粒劑、可溶性粒劑 (Wettable Granules, Soluble Granules)、水懸劑、乳劑類 (Soluble Concentrates, Emulsifiable, etc.)；在施用器械選擇方面，共計 4 大類，包括車載式 (vehicle-mounted)、車載減少飄散式 (vehicle-mounted-drift reduction)、人工手持式 (manual hand held)、人工背負式 (manual-knapsack)。

(三) 操作者戶外施用 (Operator Outdoor Spray AOEM) 表單輸入

在此表單中，防護裝置之情形要以下拉式選單填入欄位，選項包括是否穿著手套、衣著、頭及呼吸防護、是否為封閉艙(車載)。防護衣著之選擇分為潛在暴露(potential exposure)及工作穿著(work wear)，工作穿著包括長褲及長袖，潛在暴露則否⁽¹⁰⁾；頭及呼吸防護之選擇分為連帽(hood)、連帽及鴨舌帽(hood and visor)、FP1、P1 或相似等級之呼吸防護(filtering facepiece, FP1, P1 and similar，約可濾過 80% 之空氣顆粒)、FP2、P2 或相似等級之呼吸防護(FP2, P2 and similar，約可濾過 94% 之空氣顆粒)。最後，AOEM 計算長期及急性暴露，其估計是分別以各暴露參數之第 75 百分位及 95 百分位進行最終暴露量估計。所有表單填寫完成後，估計結果顯示於摘要頁(summary)，其直接顯示暴露量及風險。

三、日本的農藥使用者暴露計算表 (農藥使用者暴露計算シート, PAECS) 模型

「農藥使用者暴露計算シート」(英文暫譯為 Pesticide Applicator Exposure Calculation Sheet, PAECS) 為日本農林水產消費安全技術中心(農林水產消費安全技術センター, Food and Agricultural Materials Inspection Center, FAMIC) 規

劃，日本農林水產省 (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, MAFF) 公告，其亦以微軟 excel 軟體設計，暴露量運算公式如下⁽²⁾：

$$\text{每日農藥施用者之農藥暴露量} = \text{單位面積之農藥主要作用成分使用量} \times \text{單位暴露量} \times \text{每日作業面積} \times \text{呼吸吸收率及皮膚吸收率}$$

其中單位暴露量為 MAFF 之統計數值，作業面積則依日本栽種模式統計出之 1 日作物作業面積。使用預測公式估算每日暴露量，匯總有關農藥使用者施用農藥時所調查的暴露量的數據，按類似用法和配方類型分類，計算的基礎立論與前述所提相同。使用者暴露量不取決於活性成分的物理化學性質，反而是取決於要施用的作物和製劑類型，因此估計公式假定皮膚和呼吸暴露量與所用主要作用成分的量成正比，另外估計暴露量的基本單位是日常工作面積⁽¹⁾。

PAECS 其內共計有 12 項表單，其中“入力シート”、“10 a あたり”、“作物名エラーの場合”、“補助 1”、及“出力シート (主要)”為暴露風險估計之主要參數輸入表單，其他表單則為說明頁或是預設參數計算頁，估計結果顯示於“出力シート (主要)”頁。以下針對說明頁及各主要參數輸入表單進行說明及簡介。

(一) 說明頁 (使い方)

使用時須先進行「要評估的活性成分是否為除草劑」(評価対象有効成分が除草剤か否か)之按鈕選擇，並選擇是否為除草劑。說明頁對於輸入表單之各項欄位皆有詳細說明，只要欄位底色非白色者，便需要填寫。

(二) 參數表單 (入力シート) 輸入

應輸入欄位包括 20 個，直接填入欄位如表一，包括種類、名稱、有效成分、AOEL、AAOEL、有效成分濃度及含量、作物名稱、施用量、使用時期、使用方法、使用回數，其中在施用量欄位中，如為殺蟲劑或殺菌劑則填稀釋倍數、成品使用量，如為除草劑，則填成品使用量、稀釋水量，如為粉或粒劑，則填使用量，如為育苗箱，則填使用水量 (箱) 及成品使用量 (箱)。在使用方法中，僅能填寫機械散布、手散布、育苗箱、土壤混合。而在使用回數方面，該劑的使用回數以該期作物之農藥使用次數計算，總使用回數則以整年之使用次數計算。下拉式選項欄位則包括製劑的型態，其中選項包括固體／噴塗時：固體、固體／分散體：液體、液體／分散液：液體 3 種選項，調製時的預測式則有液劑 (フロアブル剤等)、乳劑 (乳剤等)、準備工作無風險 (調製作業による暴露なし)3 選項，在此說明，製劑的型態是農藥配置前之劑型，調製時的預測式則是農藥配置好後之型態，準備工作無風險表示於農藥配置時可不用稀釋直接施

用，或是操作可同時插秧及施藥之耕耘機。上述施用模式的選擇結合農藥劑型 (例如液劑、乳劑、粒劑及可濕性粉劑等)、農作物 (例如水稻、蔬菜、果樹、棚架作物和草地等) 和噴灑方法 (人力方式或動力機械)，可具體的分為 16 種情況，包括：(1) 液劑用於水稻以人力方式噴灑，(2) 液劑用於水稻之育苗作業，(3) 液劑用於高作物蔬菜以人力方式噴灑，(4) 液劑用於低矮作物蔬菜以人力方式噴灑，(5) 液劑用於低矮作物蔬菜以動力機械噴灑，(6) 液劑用於高作物果樹以人力方式噴灑，(7) 液劑用於高作物果樹以動力機械噴灑，(8) 液劑用於棚架果樹以人力方式噴灑，(9) 液劑用於棚架果樹以動力機械噴灑，(10) 液劑用於草地以人力方式噴灑，(11) 粉劑用於水稻以人力方式噴灑，(12) 粉粒劑用於水稻以人力方式噴灑，(13) 粒劑用於水稻以人力方式噴灑，(14) 粒劑用於水稻之育苗作業，(15) 粉劑用於大型農地之土壤混合處理，(16) 粒劑用於大型農地之土壤混合處理。

(三) 10 公畝換算 (10 a あたり) 表單輸入

在此表單中，需輸入欄位如表一，包括作物名稱、施用量、每 10 公畝的株數、每 10 公畝的使用量；由於本國施藥量多以公頃計算，因此需進行單位換算，而每 10 公畝的使用量除以每 10 公畝的株數，則可得每株的施用量。

(四) 輔助的 1 (補助 1) 表單輸入

需填入的欄位是單位暴露量，當不填寫的時候會直接以表單“散布時”之數據帶入，如欲以實驗數據進行估計，則需自行填入單位暴露量。

(五) 作物名稱錯誤時 (作物名エラーの場合) 表單輸入

此表單是當“出力シート (主要)”頁顯示作物錯誤時，方須以下拉式選單填入平均每日工作區耕地面積及每日標準工作面積之作物種類。

(六) 輸出表 (出力シート (主要)) 表單輸入

此表單需填寫皮膚吸收率欄，無防護裝備欄位會顯示無防護裝備之估計暴露量，如於有防護裝備之欄位以下拉式選單填入防護裝備狀況，則會同時顯示有防護裝備之估計暴露量，選項欄分為配置農藥時及施用農藥時之裝備，其中面罩分為 2 等級，手套則是是否有穿戴，防護衣則分為長褲／長袖工作服、防滲透的防護衣、連帽及防滲透的衣服、面罩及連帽及防滲透的衣服。日本的 PAECS 之估計結果亦分為長期及急性暴露，其分別以每年之施藥頻率及每日作業面積為計算基礎，將各暴露參數之第 75 百分位及 95 百分位進行最終暴露量估計。

討論與結論

隨著未來運算及數據處理能力的進步，加上為減少人為因素造成農藥暴露量估計之誤差，以及減少資源之使用浪費，以模型做為於各暴露族群之估計農藥暴露量已成為目前先進國家之重要工具，因此為利暴露量估計模型使用者，及未來我國模型之應用及建立，本文乃針對歐盟、美國、日本所使用之暴露量估計模型，進行比較探討。

各模型比較摘要 (表二)，雖然三者模型皆以統計學為模型設計依據，且三者皆以微軟 excel 作為介面，但在參數輸入的複雜度方面，三者還是有部份的差異，如其中美國的 OPHEC 及日本的 PAECS 輸入參數處，分散於多個表單，而在輸入參數的複雜度方面，美國的 OPHEC 及日本的 PAECS 較需要單位換算，另外美國的 OPHEC 及歐盟的 AOEM 較少下拉式選項 (較多手動輸入數據)，日本的 PAECS 之下拉式選項欄位較多。而在輸出結果方面，美國的 OPHEC 需要將皮膚及呼吸暴露量自行加總，在暴露量估計值方面，歐盟的 AOEM 較美國的 OPHEC 及日本的 PAECS 保守，估計值較高。

將三者模型與我國暴露量估計需求比較 (表三)。在與我國作物符合性方面，我國代表作物中，日本的 PAECS 涵蓋品項最多，美國的 OPHEC 較少，其中亞洲地區特有作物－水稻參數模式，美國的 OPHEC 則列於高施用面積之田野作物中

表二、美國、歐盟及日本暴露量估計模型之比較

Table 2. Comparisons of three different model

Compare items		Models		
		OPHEC	AOEM	PAECS
Design logic		Statistics	Statistics	Statistics and fixed experiment values
Input	Interface complexity	High (Parameters input are in 3 sheets)	Low (Parameters inputs are in 2 sheet)	High (Parameters input are in 5 sheets)
	Parameters complexity	High 1. unit convert: area, volume 2. More number fillings, less chosen items 3. No need of definition conversion table	Low 1. unit convert: none 2. More number fillings and less chosen items are equal 3. No need of definition conversion table	Low 1. unit convert: area, volume 2. Less number fillings and more chosen items 3. Definition conversion table needed
Outputs	Exposure dose	Sum manually	Calculated	Calculated
	Risk	Calculated	Calculated	Calculated
	Protective degree	Realistic	More protective	Realistic

(Field crop high aceage)⁽¹⁴⁾，另外對於我國較特有的作物如檳榔及茶，則 3 者皆無涵蓋。在劑型方面，其中美國的 OPHEC 之劑型選項中噴劑可作為所有劑型的代表，歐盟的 AOEM 劑型則以分類涵蓋我國常用劑型，日本的 PAECS 可填入農藥配置前及配置後的不同農藥劑型形式。在施用器械方面，原則上 3 項模型皆涵蓋我國需求，惟歐盟的 AOEM 及日本的 PAECS 多以分類來選擇，而美國的 OPHEC 則以細項選擇，其中日本的 PAECS 簡單分為機械式及手動式。對於施藥區域方面，美國的 OPHEC 可直接填入施藥區域大小之數值，歐盟的 AOEM 已內建於模型內，無法修改，日本的 PAECS 則是依據所選擇的作物，內建施藥區域大小，無法修改。在

防護裝備的選項中，3 項模型皆無涵蓋我國防護裝備常態，如短袖、醫療口罩。最後在長期或短期暴露數據方面，僅有美國的 OPHEC 沒有提供長期暴露數據。綜上，由於日本的 PAECS 在作物類型、劑型、施用機具、長短期暴露數據，皆可滿足我國需求，因此在發展本國施用暴露量估計模型時，一方面可先以此 PAECS 模型進行使用者評估，另一方面可著手規畫建構我國之暴露量估計模型時，應特別增列他國未涵蓋的參數，包括作物、施藥區域、以及防護裝備，以完備符合我國農藥施用情形。

對模型之使用者或風險評估者而言，於暴露風險第一階層之評估時，要如何選擇或建構估計模型，考量方向包括：(1)

模型計算依據，(2) 模型輸入參數，(3) 作物施藥模式之預設參數。在模型計算依據方面，3 項模型皆依據過去實驗數據，再以統計學方法進行數據分析及數值估計，其中以美國的 OPHEC 之過去實驗數據累積較多年，計算依據為過去資料之集中趨勢數值為主，歐盟的 AOEM 及日本的 PAECS 之實驗數據筆數較少，但日本的 PAECS 所依據之實驗條件與我國施藥條件較為吻合，歐盟的 AOEM 之數據來源多為施用於葡萄之數據，某些作物類型之依據數據來自於美國的 OPHEC (如溫室)⁽⁶⁾，然而歐盟的 AOEM 對於模型內暴露量的估計計算方法或公式，敘述較為詳盡，可做為建構模型參考。

表三、我國需求與國際間暴露量估計模型之參數比較

Table 3. Parameters required to model pesticide operations in Taiwan

Item	Request	OPHEC	AOEM	PAECS
Crop type	Rice, grains, vegetables, fruits (tree), conifer plantation, miscellaneous plant (tea, betel)	Compatible with rice, grains, conifer plantation	Compatible with rice, grains, vegetables, fruits (tree)	Compatible with rice, grains, vegetables, fruits (tree), conifer plantation
Formulation	Granules, Soluble concentrate, Emulsifiable concentrate, Wettable powder, Water soluble powder, Dustable powder	Compatible only with granules, spray (all start formulations), liquid	Options compatible with requests by categories	Options compatible with requests
Application equipment	Groundboom, hand dispersal, handheld, manually pressurized, mechanically pressurized, backpack (manually or mechanically), mounted car	Compatible with Groundboom, hand dispersal, handheld, manually pressurized, mechanically pressurized, backpack (manually or mechanically)	Options compatible with requests by categories	Options compatible with requests by categories
Area treated	Optional write or built-in inputs	Optional write or built-in inputs	Built-in inputs	Built-in inputs with crops (the largest area can be treated one day)
Protection equipment	Wear: short/ long sleeve/trouser, protection suit, medical mask or none, cap or none, glove or none	No short sleeve/trouser, medical mask, cap choices	Compatible only with protection suit, cap, glove	No short sleeve/trouser, medical mask, cap choices
Short term or long term exposure	Short/ long term exposure dose	No	Short/ long term exposure dose	Short/ long term exposure dose

在模型輸入參數方面，除了輸入參數的單位轉換複雜度外，介面的友善程度也是考量之一，針對此點，由於美國的 OPHEC 可自行輸入許多參數值，因此在此方面較具彈性，但同時輸入也較為複雜，歐盟的 AOEM 輸入介面較為簡易，容易使用，輸入參數數量較少，但可更動的參數相對也較少，當我國施藥狀態與其不同時，則較無選擇彈性，日本的 PAECS 輸入參數量較多，但較多的下拉式選單可減少填入欄位的不便性。基於各模型之比較，可知在建構模型方面，基礎需輸入之參數主要包括暴露限值、作物、劑型、主要作用成分施用頻率（包括施用量、施用面積、施用頻率等）、施用機具、皮膚吸收率、呼吸吸收率、防護情形等，未來在建構模型時，應列為必要輸入參數，至於介面，則儘可能簡單，並以下拉式選單欄位為主。

在預設參數考量方面，三者預設參數方面，皆有相關說明資料。美國的 OPHEC 主要預設參數包括作物分類、施用面積大小、呼吸率、防護裝備相關係數^(13, 15)，歐盟的 AOEM 之預設參數則為不同作物之暴露量、防護裝備相關係數、粒劑由美國的 OPHEC 來源之暴露數據⁽⁶⁾、施用方向、施用機具與劑型^(5, 7)，日本的 PAECS 之預設參數則為作物面積、劑型與作物、防護裝備相關係數^(1, 8, 11)。模型使用前，應先進行模型預設參數與我國農藥施用相關參數之比對後，再行模型選擇，然而我國對於此些預設參數之資料並

不完整，因此未來對於建構模型時，除了應考量此些預設參數，亦應進行相關實際施藥對照研究，以累積足夠的數據，準確估計暴露量。

本研究藉由探討各國既有的暴露量預測估計模型之差異及特性，顯見國際間以日本的 PAECS 模型較能滿足我國的需求，然而對於模型使用者及建構未來我國自有的模型，建議應持續針對我國特有施用參數，進行相關農藥施用者暴露資料收集、研究及分析，才能達到我國精準暴露量預測估計，減少或預防我國農藥施用之暴露風險之目的。

謝辭

本研究由行政院農業委員會 2020 年農科-19.1.1-藥-P1(3)「農藥施用人員之田間暴露評估及其農藥管理技術研究」計畫經費補助，謹此致謝。

引用文獻

1. 日本農林水產省。2019。農藥使用者への影響評価ガイダンス。檢自 http://www.maff.go.jp/j/nouyaku/n_touroku/attach/pdf/index-26.pdf (Jun. 9, 2021)
2. 陳筱青、洪舒宜。2019。參訪「日本對農藥在水生生物及環境影響之安全性評估方法之工作會議」報告書。行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所出國報告。第 C10801740 號。

3. 盧欣怡。2019。完善食安源頭管理，確保國民健康新穎毒理技術對於農藥安全評估的衝擊及因應策略制定。行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所出國報告。第 C10801525 號。
4. 이지호. 2018. Risk assessment and predictive exposure model development for agricultural operators to pesticide exposure using whole body dosimetry. Retrieved from http://s-space.snu.ac.kr/handle/10371/140792_ (Jun. 9, 2021)
5. Bundesinstitut für Risikobewertung. 2013. Joint development of a new Agricultural Operator Exposure Model. Project report. Federal Institute for Risk Assessment, Berlin, German. 259pp.
6. EFSA. 2010. Scientific opinion on preparation of a guidance document on pesticide exposure assessment for workers, operators, bystanders and residents. EFSA J. 8: 1501.
7. EFSA. 2014. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment for plant protection products. EFSA J. 12: 3874.
8. FAMIC. 2019. 農藥使用者暴露計算シート. Retrieved from http://www.maff.go.jp/j/nouyaku/n_touroku/attach/other/index-1.xlsm_ (Jun. 9, 2021)
9. Großkopf, C., Mielke, H., Westphal, D., Erdtmann-Vourliotis, M., Hamey, P., Bouneb, F., Rautmann, D., Stauber, F., Wicke, H., Maasfeld, W., Salazar, J. D., Chester, G., and Martin, S. 2013. A new model for the prediction of agricultural operator exposure during professional application of plant protection products in outdoor crops. J. Verbr. Lebensm. 8: 143-153.
10. Krieger, R. 2010. Hayes' handbook of pesticide toxicology, 3rd ed. Elsevier Inc, USA. 2342 pp.
11. MAFF. 2019. 農藥使用者暴露説明シート. Retrieved from https://www.maff.go.jp/j/nouyaku/n_touroku/ (Jun. 9, 2021)
12. The European Parliament and the Council of the European Union. 2009. Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC. Document number 32009R1107.
13. US EPA. 2021. Occupational Pesticide Handler Exposure Calculator. Retrieved from https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/occupational-pesticide-handler-exposure-data_ (Jun. 9, 2021)
14. US EPA. 2020. Occupational Pesticide Handler Exposure Data. Retrieved from <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/occupational->

- pesticide-handler-exposure-data#previous
(Jun. 9, 2021)
15. US EPA. 2021. Occupational pesticide handler unit exposure surrogate reference table. Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/occupational-pesticide-handler-unit-exposure-surrogate-reference-table-may-2021.pdf> (Jun. 9, 2021)
16. US EPA. 1999. OPP official record health effects division scientific data reviews EPA Series 361. Retrieved from https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/hhbp/R000356.pdf (Jun. 9, 2021)
17. WHO. 2010. Generic risk assessment model for indoor and outdoor space spraying of insecticides. WHO. 63pp.

Introduction and Discussion of International Occupational Exposure Dose Estimation Models for Pesticides

Yueh-Yi Lee^{1*}, Liang-Yi Lin¹, Wei-Ren Tsai¹

Abstract

Lee, Y. Y., Lin, L. Y., and Tsai, W. R. 2021. Introduction and discussion of international occupational exposure dose estimation models for pesticides. *Taiwan Pestic. Sci.* 11: 29-45.

Reducing pesticide exposure is a key goal of evaluators who seek to decrease pesticide usage; however, it is not practical to conduct field-based human exposure dose surveys for every pesticide product. Even when such surveys are practical, they are expensive and very time consuming. Many countries now employ tiered evaluations to assess occupational pesticide exposure and to assess if exposure exceeding limits. Models for occupational exposure dose estimation are the most commonly applied measures in the first-tier assessment. In this article, we describe three openly-accessed models, including the Occupational Pesticide Handler Exposure Calculator (OPHEC), the Agricultural Operator Exposure Model (AOEM), and the Pesticide Applicator Exposure Calculation Sheet (tentative translation as PAECS). These models were published by the USEPA, the European Food Safety Authority (EFSA), and the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF), respectively. We conclude that PAECS are the most feasibly model applied in Taiwan, as their input parameters and options are well aligned with Taiwanese scenarios, such as crops, application equipment, and etc. With regard to model constructors, we also determined that data should be continuously collected in order to set appropriate default parameters for Taiwanese model building. This will allow exposure doses to be more precisely estimated, which will in turn reduce risks associated with pesticide exposure.

Accepted: October 5, 2021.

* Corresponding author, E-mail: lyisi2001@tactri.gov.tw

¹ Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute, Council of Agriculture, Taichung

Key words: Occupational Pesticide Handler Exposure Calculator (OPHEC), Agricultural operator exposure model (AOEM), Pesticide Applicator Exposure Calculation Sheet (PAECS), Pesticide Applicator, Acceptable Operator Exposure Level (AOEL)