

# 日本針對農藥在水生生物環境濃度預測模式之探討

洪舒宜<sup>1</sup>、蔡韙任<sup>1</sup>、謝玉貞<sup>1\*</sup>

## 摘要

洪舒宜、蔡韙任、謝玉貞。2021。日本針對農藥在水生生物環境濃度預測模式之探討。臺灣農藥科學 11 : 47-61。

農藥係指用於農業上防除病蟲害與雜草者，或用於調節作物生長之用，大部分農藥作用為殺蟲、殺菌或除草等，若不慎外逸可能對人體、動物或環境會造成某種程度的影響。田間施用的農藥往往直接灑佈於環境中，可能會透過沖刷或逕流進入鄰近水體中，進而可能產生對水生生物的危害，而環境濃度預測 (predicted environmental concentration, PEC) 模式為研究農藥暴露的主要工具之一，用於預測農藥施用於田間後，透過各種可能的途徑流入環境當中的濃度，目的在於瞭解農藥可能對環境非目標生物所造成的風險。本文以環境及農業條件皆與我國類似的日本為例，探討日本環境農藥濃度預測模式，其階段性預估農藥流入河川水域的濃度，主要是依據農藥施用量、施用方法、面積等相關參數，估算逕流量及漂移量，最終求得河川水域中的預估農藥濃度，並用以比對農藥之生態毒性，如魚類、水蚤、藻類之毒理試驗數據，決定農藥是否可通過申請登記，並做為源頭管控水生生物風險的方法之一，以強化農業活動可能對水生生物造成影響的防護，並作為建立我國對農藥在水生生物的環境濃度預測模式之雛形。

**關鍵詞：**農藥風險評估、日本 PEC 模式、水生生物、環境濃度預測、環境保護

---

接受日期：2022年1月11日

\* 通訊作者。E-mail: ych@tactri.gov.tw

<sup>1</sup> 臺中市 行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所

## 緒言

根據歐盟法令 91/414/EEC 對農藥生態風險評估的步驟，包含問題描述 (problem definition)、風險分析 (risk analysis)、風險特徵描述 (risk characterisation) 及風險管理 (risk management)。風險分析包含暴露評估 (exposure assessment) 與影響評估 (effect assessment)，而環境濃度預測 (predicted environmental concentration, PEC) 為暴露濃度評估的方法<sup>(17)</sup>，用於預測農藥施用於田間後，透過各種可能的途徑流入環境當中的濃度預測。在 2002 年時，Calliera 等人即透過考慮農藥施用後產生的漂移及逕流，建立地表水暴露評估的 PEC 模式，並應用於義大利玉米田之除草劑的環境濃度預測，瞭解施用農藥可能對環境非目標生物所造成的風險<sup>(21)</sup>。目前國際間用於農藥濃度預測的 PEC 模式主要以田間、地下水、地表水為主，在農藥對非目標生物的風險評估當中，以水生生物如魚類、水蚤及藻類等河川水域常見代表性物種為主要評估對象時，所使用的預測模式即以地表水之情境為考量，如降雨、逕流、飄散等環境因素，皆可能導致農藥施用後流入地表水域，進而對水域中物種造成危害，而水中流佈的農藥濃度可作為農藥管理人員審查水生生物毒理試驗資料時，納入暴露評估階段的考量要素之一，因此本文將對環境濃度預測模式之選擇與應用，探討

日本對於農藥風險評估之流程，從日本建立 PEC 前之政策、生態系統的條件、評估方法及導入日本階層一 PEC 作為建立我國評估指標之參酌等，做進一步的說明，以期擴大對環境中非目標生物的危害防範。

## 國際間環境濃度預測模式之選用

美國、歐盟、英國、日本皆有政府所公告之可選用於地表水濃度預測的 PEC 模式 (表一)，美國目前用於地表水暴露評估之模式為 PWC (Pesticide in Water Calculator，2017 年以前稱作 SWCC，Surface Water Concentration Calculator)，PWC 使用兩種模式 PRZM (Pesticide Root Zone Model) 和 VVWM (Variable Volume Water Model) 的數據。其中 PRZM 為模擬農藥於田間的變化，所需參數有降雨、蒸散、土壤以及農藥施用方式等，由水文學

表一、各國對地表水環境濃度預測 (PEC) 選用之模式

**Table 1.** The predicted environmental concentration (PEC) model used to assess pesticide risk to surface water in different countries.

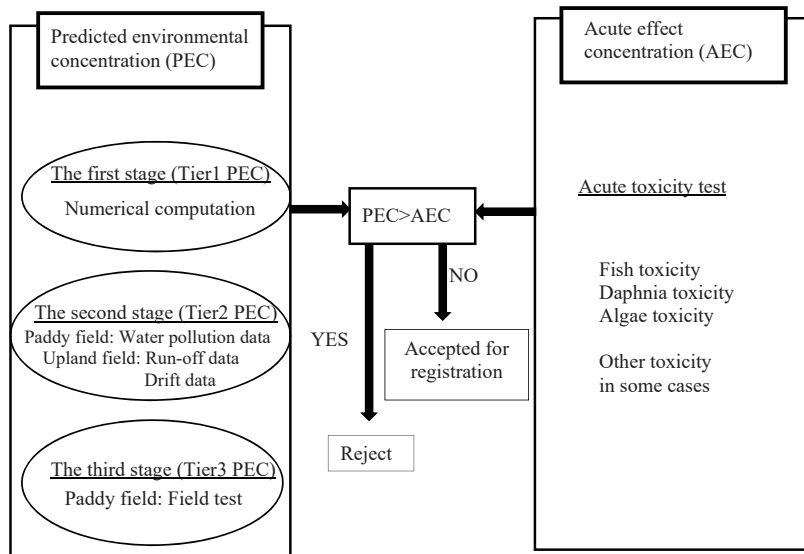
Country	Model
Japan	Calculation sheet
EU	FOCUS
US	PWC
UK	Environmental fate models

和化學於環境中之流佈所衍生出的相關資訊組成，VVWM 則透過使用 PRZM 生成的相關數據模擬農藥於環境水體中的命運，最終為 PWC 模式所產出的結果，以判讀農藥於地表水中的濃度<sup>(19, 20)</sup>；歐盟則使用 FOCUS (FORum for the Co-ordination of pesticide fate models and their USE) 作為環境濃度預測工具，除了輸入基本的施用參數以外，尚需選擇地區及天氣資訊<sup>(16)</sup>，部分數據與美國 PWC 同樣以國家本身的數據作為推算基準。英國與日本的環境濃度預測模式較為接近，皆以既定公式透過 excel 軟體進行計算<sup>(2, 20)</sup>，但在基本參數的變動上仍以日本較具彈性，能夠因應不同需求改變方程式數值。考量不同國家在 PEC 模式中參數的固定性及適

用性，以及對於農藥環境預測估算流程的階層性，在風險評估的步驟應以第一階段開始，針對日本及所建立之 PEC 模式中，對於農藥施用後流入地表水體之階層一計算方法，以及其在農藥登記相關流程中的應用進行研析與簡介，探討日本在環境濃度預測模式之建立與應用。

### 日本對於農藥之水生生物風險評估之流程

日本針對農藥之水生生物風險評估的方法<sup>(5)</sup> (圖一)，主要是透過 PEC (predicted environmental concentration, PEC) 與急性毒性影響濃度 AEC (acute effect concentration, AEC) 數值間的比較，以求得風險商



圖一、日本農藥登記之水生生物風險評估流程。

Fig. 1. Process used to assess pesticide risk prior to pesticide registration in Japan. (modified from the Ministry of Environment, Government of Japan, 2002).

數 HQ (hazard quotient)，AEC 的來源是透過申請農藥登記的廠商所繳交的毒理試驗資料，主要以水蚤 48 小時、藻類 72 小時、魚類 96 小時之三種水生生物的毒性試驗結果，將 EC<sub>50</sub> (Concentration for 50% of maximal effect, EC<sub>50</sub>) 值、LC<sub>50</sub> (Lethal concentration 50%, LC<sub>50</sub>) 值等毒理數據除以不確定因子後所求得之數值，再透過 PEC 預測模式針對欲登記之農藥進行施用後可能流入環境當中的濃度進行預測，將結果與 AEC 進行比較以求得農藥風險，初步判定是否核准登記。在日本的風險評估流程當中，水田的環境預測濃度分為三個階段：第一階段於模式中輸入一般數值計算，第二階段於模式中併入水質污濁性試驗數據進行計算，第三階段則以水田試驗評估實際的數據；而旱田的環境預測濃度分為兩個階段：第一階段同樣於模式中使用數值計算，第二階段則採用地表逕流試驗以評估實際之數據。由於日本在農藥登記流程中有風險評估的概念，其 PEC 預測模式及計算方法皆為公開資訊，可在政府機關網站上取得，可作為我國未來應用於農藥之水生生物風險評估的參考。

## 日本建立農藥 PEC 評估前的模式與管理政策

過去日本的農藥管理制度，是在農藥登記前針對野生動植物與生態系統的影響進行評估，主要以防止對水生動植物造成危害的角度出發，在評估對水生動物的危

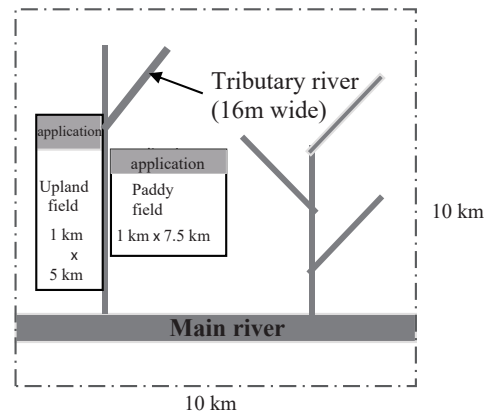
害時，其評估標準為 (1) 在每 10 公頃之農藥有效成分投予量  $\leq 1$  公斤時，對鯉魚造成的 48 小時之半致死濃度 (LC<sub>50</sub>) 為 0.1ppm 以下。(2) 每 10 公頃之農藥有效成分投予量  $> 0.1$  公斤時，對鯉魚造成的 48 小時之半致死濃度 (LC<sub>50</sub>) 以 ppm 計  $\leq$  每 10 公頃之農藥有效成分投予量，或 (3) 農藥施用後對鯉魚產生之毒性持續影響七日以上。當滿足前述三項之一時，該項農藥將不會被核准在日本登記使用。此外，雖然過去就有要求水蚤及藻類毒性試驗之資料，但評估僅限於鯉魚的魚類毒性，對於藻類與甲殼類的毒性評估並沒有設立相關標準，因此對農藥於水生植物與水生動物的安全性評估並不完善，亦沒有考慮農藥使用後所造成的環境暴露情形。而與水田使用的農藥相比，旱田與果樹等地區施用農藥後進入水域環境的可能性較低，因此水田與水田以外之不同地區的評估標準不應相同。基於上述過去農藥對環境風險的評估情形，需要改善的評估制度如下，增加毒性評估的物種數量；評估方法變更為比較毒性值與暴露量；除了水田中使用之農藥外，尚需評估旱田與果樹所使用的農藥。另一方面，除參考歐洲與美國的評估方法以外，亦應注意降雨、河流、氣候與土地等生態條件，基本的管理政策應是將登記前的評估與登記後的監測適當結合，並且需要與歐洲及美國評估方案達成一致性，以建立適合日本的農藥風險評估模式 (4)。

## 日本生態系統的條件

為了建立適當的評估體系，日本在建立農藥風險評估的方法前充分調查了生態系統的各项條件<sup>(3,11)</sup>。不同於西方國家的溫帶大陸性氣候，日本受到亞洲季風的影響，在夏季時炎熱潮濕且降雨量高，年平均降雨量可達 1,700 毫米，冬季時在降雪量大的地區則會在初春融化並流入河流。此外，地形條件與西方國家亦不相同，日本由於位在地震帶上，地形大多為高山或傾斜的形式，並不似西方國家存在大平原，因此河川長度較短、流速較急，且流量波動較大。稻田皆有設置排水溝作為與河流、湖泊和水庫系統相連接的排水通道，因此稻田與排水溝中也存在水生生物。稻田水以灌溉水及雨水作為來源，其變動除了地下滲透與蒸散作用外，地表逕流主要發生在大量降雨的 5-9 月之間，而日本使用農藥的主要時間時常與暴雨發生的時間重疊，因此農藥暴露於地表水並迅速流入海域的可能性非常高，另一方面，由於平原數量較少，日本的土地利用需要多元化並且與大自然競爭，例如梯田的開闢，也因此農業活動的地點與野生動植物的棲息地之區別並不明顯，農藥的使用容易造成對水生生物的影響，這些情況與臺灣的情境很類似。

## 日本建立 PEC 模式的風險評估方法

農藥暴露於公共水域的主要途徑為地表逕流與漂移效應（農藥於噴灑時直接飄散到水域之中），對於農藥施用後在環境中對生物造成的暴露濃度，日本透過建立 PEC 模式，針對透過這兩種暴露途徑預測目標水域的農藥殘留量，並且將水田與旱田分開估算<sup>(1,2,4,6)</sup>。模式中評估水域的位置是在河川的下游地區，預設的環境模式與農業環境（圖二）所示，反映了日本國內的河川與農業面積，每 100 平方公里（10 km × 10 km）的日本國土面積中，水田（paddy field）與旱田（upland field）所占有的面積約為 500 公頃與 750 公頃，此外，考慮到全國土地面積中河川所占的比例，模式中的河川設置為 2 平方公里，其中 60% 為主要河川（main river），40% 為河川支流（tributary river）。環境模式中河



圖二、日本 PEC 模式所預設之農田場景<sup>(4)</sup>。  
**Fig. 2.** The surface water scenario used in PEC modelling in Japan. (modified from the Ministry of Environment, Government of Japan, 2002)<sup>(4)</sup>.

川流速的設定上，主要河川在流域面積為每 100 平方公里的中下游區域，於年平均水流量 (如果全年的河流日流量從小到大排列，則全年 185 天流量都不會低於此流量，它是顯示河流流量狀況的指標之一 (7, 8) ) 之流速為每秒 3 立方公尺，在低水流量時 (一年中的 275 天，流量均不低於該流量) 之流速為每秒 1.9 立方公尺，考量到農業用地大多位於流量較低的上游地區，因此模式中的河川流速原則上訂定為每秒 3 立方公尺。在 PEC 模式當中，水田與旱田為不同計算模式，其中水田的部分分為二階段之計算，第一階段主要以一般固定數值進行理論濃度的推估，第二階段則套入更多實驗數據如農藥於水中之半衰期、辛醇水分配係數、水質污濁性試驗等數值，以預測更接近真實的環境濃度。除此之外，在水田之農藥濃度計算當中亦考慮了不同農藥施用方式的情形，如地面施用與使用無人機之航空施用時造成的漂移量不同，所產生的環境濃度預測結果亦不相同。

以 PEC 模式中水田第一階段來說，計算農藥施用於水田後產生之環境濃度如下公式：

$$PEC_{Tier1} = \frac{M_{runoff} + M_{Dr} + M_{Dd}}{3 \times 86400 \times T_e}$$

環境預測濃度 (PEC) 為最大地表逕流量  $M_{runoff}$  (g)、河川漂移量  $M_{Dr}$  (g)、排水溝漂移量  $M_{Dd}$  (g) 三者相加後除以每日之河流平均流量及毒理試驗的日數  $T_e$

(水蚤 48 小時、藻類 72 小時、魚類 96 小時之毒性試驗分別為 2 日、3 日及 4 日)，即可初步預估農藥在環境當中可能存在的濃度。

### 一、最大地表逕流量 $M_{runoff}$

地表逕流是指雨水或冰雪融化後流經農田區域，因土壤已飽和或來不及滲入等原因而順著地形向較低區域流動之匯流，會將田間當中的農藥、肥料、土壤污染物等物質沖刷帶入其他水域當中 (9, 12)，因此在 PEC 模式當中計算地表逕流之各項參數，是最終環境濃度之預估重要的影響因子之一。

$$M_{runoff} = I \times \frac{R_p}{100} \times A_p \times f_p$$

影響地表逕流量 ( $M_{runoff}$ ) 之參數為農藥施用量 (I)、農藥流出率 ( $R_p\%$ )、農藥施用面積 ( $A_p$ ) 及修正係數 ( $f_p$ )。農藥施用量為在一日內每公頃農田所施用之農藥有效分量 (克)；農藥流出率為自水田流出之農藥量，並將其換算為百分比率。在地面噴灑農藥的情況下，250 公頃的水田施用農藥的速度為每日 50 公頃，當第一日開始施加之農藥全部溶解於 5 公分水深之地表水中時，水中農藥濃度即設為第 0 日，爾後在維持固定水深之情況下，地表水的排水率為每日 10%，則每日產生之農藥流出率表 (表二)；農藥施用面積則是考量了模式中的設定，即「每 100 平方公里的日本國土面積中，水田與

旱田所占有的面積約為 500 公頃與 750 公頃」，但並不會一次使用同一種農藥，並且預期在水田中使用同種農藥的比例約占 10%，而在旱田中則占 5%，因此求得預測地表逕流量的參數中，水田之農藥施用面積 (A<sub>p</sub>) 為 50 公頃，而旱田之農藥施用面積則為 37.5 公頃。

由於急毒性影響濃度 AEC (Acute effect concentration, AEC) 的設定取自水蚤 48 小時、藻類 72 小時或魚類 96 小時毒性試驗，PEC 的預測同樣需評估農藥施用後 48 小時 (2 日)、72 小時 (3 日) 及 96 小時 (4 日) 水域中之濃度。根據日本施用於水田農藥之流出率如表二，為了求得最大地表逕流量 M<sub>runoff</sub>，需取表二中連續 5 日施藥後產生最大流出率 (%) 的其中 2、3 或 4 日之情形，分別合計後除以 5 日，即可求得各情形之下平均每日施藥所產生的最大流出率 (%)。在連續 5 日施藥後產生最大流出率的 4 日期間如表二中所

標示，最大農藥流出率為 29.1%，而產生最大流出率的 2 日期間及 3 日期間則分別為 15.6%、22.4%。

若是在航空中使用無人機噴灑農藥的情況下，由於施用速度相較於地面上快非常多，1 日就可以完成所有水田面積的施用，因此最大農藥流出率僅考量所對應的毒理試驗日數 T<sub>c</sub>，求出平均每次施用農藥於 2 日、3 日及 4 日內之最大農藥流出率分別為 19%、27.1%、34.4%。

$$R_p = 100 \times (1 - 0.9^{T_c})$$

計算出依據不同毒理試驗時間，於 2、3 及 4 日間之最大農藥流出率 (表三)。

修正係數 (f<sub>p</sub>) 則因施用方式的不同而異，在日本 PEC 模式當中的施用方式分為澆水散布、莖葉散布、育苗箱處理，這些施用方式所代表的修正係數分別為 1、0.5、0.2，其中澆水散布指的是在完全被水淹沒的水田中噴灑農藥，例如水稻除

表二、施用於水田農藥之流出率\*

Table 2. Predicted run-off ratios for pesticides applied using standard methods in paddy fields\*

Day	Elapsed Days									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Day 1	10.0%	9.0%	8.1%	7.3%	6.6%	5.9%	5.3%	4.8%	4.3%	3.9%
Day 2		10.0%	9.0%	8.1%	7.3%	6.6%	5.9%	5.3%	4.8%	4.3%
Day 3			10.0%	9.0%	8.1%	7.3%	6.6%	5.9%	5.3%	4.8%
Day 4				10.0%	9.0%	8.1%	7.3%	6.6%	5.9%	5.3%
Day 5					10.0%	9.0%	8.1%	7.3%	6.6%	5.9%
Total÷5 (2 days)		5.8%	9.2%	12.3%	15.1%	15.6%	14.0%	12.6%	11.3%	10.2%
Total÷5 (3 days)		11.2%	16.1%	20.5%	22.4%	22.2%	20.0%	18.0%	16.2%	10.2%
Total÷5 (4 days)			18.1%	24.3%	27.9%	29.1%	28.2%	25.3%	22.8%	16.2%

\* Modified from the Ministry of Environment, Government of Japan, 2002.

表三、無人機施用於水田之預測農藥流出率\*

Table 3. Predicted run-off ratios for pesticides applied using drones in paddy fields\*

Duration	48hrs (2 Days)	72hrs (3 Days)	96hrs (4 Days)
Run-Off (%)	19	27.1	34.4

\* Modified from the Ministry of Environment, Government of Japan, 2002.

草劑的使用，並在噴灑後數天保持淹沒狀態，因此在相較其他施用方式，湛水散布所預估可能流入水域中的農藥占有較高的比例。

## 二、河川漂移量 $M_{Dr}$

漂移現象是指農藥在噴灑過程中或噴灑結束後不久，農藥粉塵或液滴在空氣中移動到預期區域以外的位置<sup>(13, 19)</sup>，河川漂移量  $M_{Dr}$  (g) 即是透過公式估算農藥施用時及施用後流入河川當中的農藥總量。

$$M_{Dr} = I \times \frac{D_{river}}{100} \times Z_{river} \times N_{drift}$$

相較於地表逕流量  $M_{runoff}$ ，農藥因為漂移作用而流入水域當中的比例較低，使得在對環境預測濃度的貢獻中，河川漂移量所占之比重遠小於地表逕流量，而影響之參數為農藥施用量  $I$  (g/ha)、河川漂移率  $Dr$  (%)、河川漂移面積  $Z_r$  (ha/day) 及漂移發生日數  $N_d$  (day)。在地面施用農藥時之情況下，河川漂移率之設定主要是參考德國所研究的農藥漂移數據 (表四)，將日本農田至河川的距離以內插法對應表中「耕種作物」及「果樹」，取得水田與旱田在農藥施用時所可能產生的漂移比率；

河川漂移面積 ( $Z_r$ ) 為每日發生農藥漂移的河川面積 (ha/day)，根據河流連接水田之邊長與河川寬度相乘求得，其計算的考量為，水田或旱田中不太可能在相同時間內施用同一種農藥於所有耕種面積，一般認為目標農藥在耕地中的施用量占水田面積的 10%，在旱田中則占 5%，因此在圖一模式中所預設的水田與旱田邊長分別為 5 及 7.5 公里時，目標農藥施用的農田範圍，其與河川連接之邊長即為水田 0.5 公里、旱田 0.375 公里，然而河川漂移面積 ( $Z_r$ ) 該項參數為「每日發生農藥漂移的河川面積」，尚須將前述邊長結果換算。由於施用時間隨著施用方式不同，PEC 模式假設了地面施用的情形下，水田與旱田之農藥散布皆需要 5 日才可將農藥施用完畢，而若使用無人機在航空中噴灑農藥，則僅需要 1 日的時間就可將農藥施灑完成，因此將原本河川連接農田範圍之邊長除以施用所需日數後，所求之結果再與河川寬度相乘，即為模式中河川漂移面積 ( $Z_r$ ) 設定數值之來源。

## 三、排水溝漂移量 $M_{Dd}$

排水溝漂移量與河川漂移量是類似的

表四、農藥飄移數據 \*

Table 4. Drift ratios associated with pesticide application \*

Distance (m)	Crops (%)		Grape (%)		Fruit tree (%)		Hops (%)	
	Early/Late growth		Early growth	Late growth	Early growth	Late growth	Early growth	Late growth
1	4.0							
2	1.6							
3	1.0		4.9	7.5	29.6	19.6		
4	0.9							
5	0.6		1.6	5.2	19.5	10.1	18.0	12.7
7.5	0.4		1.0	2.6	14.1	6.4	8.5	10.8
10	0.4		0.4	1.7	10.6	4.4	4.8	8.9
15	0.2		0.2	0.8	6.2	2.5	1.7	4.7
20	0.1		0.1	0.4	4.2	1.4	0.8	3.8
30	0.1		0.1	0.2	2.0	0.6	0.3	2.1
40			0.1		0.4			
			0.1		0.2		0.1	0.3

\* Modified from the Ministry of Environment, Government of Japan, 2019.

概念，排水溝為水田中作為排水目的的渠道<sup>(10)</sup>，與河川同樣可能在農藥施用的過程中發生漂移作用而使農藥流入，其計算方式為施用量與排水溝漂移率  $Dd$  (%)、排水溝漂移面積  $Zd$  (ha/day)、漂移發生日數  $Nd$  (day) 相乘。

$$M_{Dd} = I \times \frac{D_{ditch}}{100} \times Z_{ditch} \times N_{drift}$$

排水溝的比率約占水田面積的 150 分之 1，因此 PEC 模式中所預設的情況－每 100 平方公里日本國土涵蓋 500 公頃水田面積來說，同一種農藥的散布面積約為 50 公頃，則排水溝面積則占 150 分之 1，而施用時間同樣需要 5 日，每日施用農藥對排水溝所產生的漂移面積即為每日 0.07 公頃，若使用無人機噴灑農藥，由於一日內就可施用完畢，因此漂移面積變為每日 0.33 公頃。漂移率  $Dd\%$  的設定上，由於

日本排水溝寬度約為 1 公尺，同樣參考德國漂移率實驗數據，對應在施用農藥後 1 公尺遠的距離所產生的農藥漂移率為 4%，最後與漂移發生日數相乘，即為模式中排水溝漂移量的計算。舉例說明，若某一於地面施用時會發生漂移的農藥，其施用後水田中每公頃農藥有效成分 ( $I$ ) 為 18g，乘以排水溝漂移率 ( $Dd$ ) 4% 後，再與排水溝漂移面積 ( $Zd$ ) 0.07、漂移發生日數 ( $Nd$ ) 1 相乘，求得該農藥施用後所產生之排水溝漂移量  $Md$  則為 0.0504 g。

以上三大參數之計算－最大地表逕流量、河川漂移量及排水溝漂移量為日本在預測水田施用農藥後可能流入水域當中的基本要素，若農藥施用於旱田，由於沒有排水溝的建立，因此不會產生流入排水溝的漂移或匯流，在 PEC 模式中旱田第一階段計算公式中，僅考量農藥施用時產生的

河川漂移量，以及遇到強降雨時所造成的地表逕流量，兩者分開計算，並取濃度較高的結果作為最終求得的預測濃度。降雨所造成的地表逕流量  $M_{runoff}$  (g) 及農藥施用之河川漂移量  $M_{Dr}$  (g) 公式如下：

$$PEC_{Tier1} = \frac{M_{runoff}}{11 \times 86400 \times T_e} \quad PEC_{Tier1} = \frac{M_{Dr}}{3 \times 86400 \times T_e}$$

考慮到降雨所造成的地表逕流在日本夏季平均約每 15 天發生一次，在模式中旱田的地表逕流情形，是假設農藥施用後 7 天發生了降雨造成地表逕流，而降雨將導致逕流量增加，預測旱田所產生的地表逕流農藥濃度時，河川流量設定為  $11 \text{ m}^3 / \text{s}$ 。

$$M_{runoff} = I \times \frac{R_u}{100} \times A_u \times f_u$$

$$M_{Dr} = I \times \frac{D_{river}}{100} \times Z_{river} \times N_{drift}$$

河川漂移量的計算與水田模式相同，地表逕流量的計算參數則略有不同。旱田地表逕流量的計算同樣需要考量農藥施用面積 ( $A_u$ ) 及修正係數 ( $f_u$ )，以及農藥從田中流出的比率 ( $R_u\%$ )，根據迄今為止在實際旱田現場測試的結果，因地表逕流所產生的農藥流出率 ( $R_u\%$ ) 為 0.2%。修正係數 ( $f_u$ ) 亦因施用方式的不同而異，不同的施用方式將影響農藥實際流出的總量，在旱田模式中，一般地面施用農藥若是與土壤混合，則修正係數 ( $f_u$ ) 為 0.1，空中施用時針對莖葉噴灑則為 0.3，剩餘其他情況下皆為 1。

在 PEC 第一階段的濃度預測方法中，並沒有考量農藥的分解速率、特性與實際殘留的數據，因此第一階段所計算的預估數值通常較為保守並顧及較大的風險，如果評估的對象農藥透過該模式所預測出的濃度大於毒性試驗的結果，則需要進入第二階段實際殘留數據的評估，或不予通過登記。

## 建立我國農藥環境濃度預測模式之探討

我國農藥登記審查流程中有關水生生物的毒性試驗資料，其與農藥施用後可能流入河川地表水當中的濃度，尚未建立完備可應用的 PEC 模式作預測對比。然而，對於水生生物毒理試驗資料的審查，除了毒性效應與危害分級的評估，若能夠透過模式在農藥登記前進行環境水域中的殘留濃度預測，將可以作為協助評估非目標水生生物毒理試驗結果的基準點。在日本的 PEC 模式當中，農藥的施用方法與使用量，為第一階段濃度預測主要的影響因素，由於並未將天氣、農藥理化特性 (如光分解、水解速率) 納入考量，因此在該模式的情境中，農藥流布於環境的估算趨於高估危害風險，在管理者的角度而言將可作為第一步的篩選工具，若評估的對象農藥可能產生的環境流布濃度，高出毒理試驗結果或所推斷的預估無效應濃度 (predicted no effect concentration, PNEC) 時，則可能存在對於水生生物產生毒性風

險時，需要額外的數據證明該項農藥的安全性。為日本 PEC 模式階層一所用之影響因子彙整 (表五)，以及設立各項因子所需之調查參數<sup>(13)</sup>。在日本的 PEC 模式中，農田與河川之間的關係及參數的設定主要為最嚴重之情境 (worst-case)，並且大部分的參數可因應不同地區之農田環境而更動，如影響最大地表逕流的參數中，需要調查我國水田與旱田耕地面積，以及為瞭解目標農藥所占之施用面積，需估算作物耕種面積比例；影響河川及排水溝漂移量的參數，漂移率的估算亦需要我國河川與排水溝寬度、排水溝鋪設比率，以對應現有的漂移率數據文獻，評估適當的設定數值。

建立預測農藥環境濃度的 PEC 模式，需要一定的人力與資金針對模式中的多項參數進行調查與設定，如果希望預測的結果與實際數據愈接近，所需要使用的參數

就愈複雜，日本所使用的 PEC 階層一之模式，其部分條件的設定是否適用我國作為建立 PEC 模式的參考，仍需要實際調查資料的支持，以及持續的驗證與研析，以確保使用模式計算後的評估結果可有效降低高風險農藥對環境的疑慮。因此，筆者認為透過由日本 PEC 模式的應用與優化，並輔以環境數據的採集與檢測，是建立適用於我國河川水域，農藥環境濃度預測模式第一步可執行的方式，若需要更高階的評估，則需建立更多試驗數據或由農藥申請者提供，例如施藥後每日田中水面農藥濃度、田水流出量、河川底泥農藥吸附量等，然而對於農藥管理單位來說，環境風險評估數據的結果追求的是有足夠的力道針對危害的預防及控管，確保評估的流程中能夠將所有具有高度風險者篩除，因此由階層一的評估方式出發，再持續進行細部的研究與優化，逐步建立更高階層的模

表五、日本 PEC 模式階層一之影響因子及調查參數

Table 5. Infected factors and parameters used in PEC modelling in Japan

Exposure route for paddy and upland field	Infected factor	parameter
Maximum Runoff Amount (Paddy field、Upland field)	I、Rp、Ap、fp	Amount of pesticide application、Run-off ratio、Area of paddy and upland field、Application Rate
The Amount of the pesticide entering river via drift on the event day. (Paddy field、Upland field)	I、Dr、Zr、Nd	Amount of pesticide application、Drift ratio on river、River wide
The Amount of the pesticide entering river via drift into ditch on the event day. (Paddy field)	I、Dd、Zd、Nd	Amount of pesticide application、rift ratio on ditch、Ditch wide

式，為目前我國對於環境風險評估的首要目標。

地表水的品質攸關環境物種生態及人類用水來源，社會的永續發展必須仰賴地球生態系統的維護與平衡，因此完備毒性風險評估技術以強化農藥使用後對環境影響與監控，針對我國河川水域及重要環境生態中水域生物的保護，是農藥與生態保護的議題中必須持續努力的目標。

## 謝辭

感謝行政院農業委員會補助本研究計畫 110 農科-5.4.6-藥-P1(1)，本文撰寫與研究期間承蒙本所應用毒理組李悅怡、陳筱青、盧欣怡、及殘毒管制組江珮瑜等先進提供寶貴意見，特此謝忱。

## 引用文獻

1. 日本環境省。2005。水域の生活環境動植物の被害防止に係る農薬登録基準・環境中予測濃度(水産 PEC)算定方法。檢自 <https://www.env.go.jp/water/sui-aitei/kijun.html> (Jun. 20, 2020)
2. 日本環境省。2005。水域の生活環境動植物の被害防止に係る農薬登録基準・環境中予測濃度(水産 PEC)算定の考え方について。檢自 <https://www.env.go.jp/water/sui-kaitei/kijun.html> (Jun. 20, 2020)
3. 日本環境省。1999。農薬生態影響評価の方向について～中間報告。檢自 <http://www.env.go.jp/press/745.html> (Aug. 10, 2020)
4. 日本環境省。2002。農薬生態影響評価検討会第 2 次中間報告。檢自 <http://www.env.go.jp/press/3377.html> (Aug. 10, 2020)
5. 日本環境省。2019。中央環境審議會「生活環境動植物に係る農薬登録基準の設定について(第一次答申)」及び意見募集(パブリックコメント)の結果について。檢自 <https://www.env.go.jp/press/106446.html> (Sep. 12, 2020)
6. 日本環境省。2018。農薬残留対策総合調査(河川モニタリング、後作物残留等)の結果について—平成 30 年度農薬残留対策総合調査業務調査報告書。檢自 <http://www.env.go.jp/water/dojo/noyaku/zanryutaisaku.html> (Sep. 28, 2020)
7. 日本水壩協會。ダム事典[用語・解説]。檢自 <http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranB/JitenIndex.cgi> (Jan. 12, 2021)
8. 日本國土交通省九州地方整備局。用語の解説。檢自 <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa/suisitunew/yougo.html> (Jan. 12, 2021)
9. 行政院農業委員會。2001。農薬毒理特性與管理。檢自 <https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=3985#tops> (May 11, 2020)
10. 行政院農業委員會。2003。灌溉排水原理。灌溉排水營運管理，第一篇。甘俊二、陳清田、張煜權、陳焜耀、黃振昌、鄭昌奇、譚智宏、陳世楷編。行政

- 院農業委員會。臺北。
11. 清水 徹朗。2007。日本の農地制度と農地政策－その形成過程と改革の方向。農林金融 60 : 346-356。
  12. 臺灣地質知識服務網。2011。逕流 Runoff。檢自 <https://twgeoref.moeacgs.gov.tw/GipOpenWeb/wSite/ct?xItem=146491&mp=105&ctNode=1233>。(Feb. 13, 2021)
  13. Capri, E. and Karpouzas, D. 2008. Pesticide risk assessment in rice paddies: theory and practice. Elsevier Science. 266 pp.
  14. Felsot, A. S. 2005. Evaluation and mitigation of spray drift. Retrieved from <http://feql.wsu.edu/esrp531/Fall05/FelsotCostaRicaDrift.pdf> (Aug. 27, 2020)
  15. Finizio, A. and Villa, S. 2002. Environmental risk assessment for pesticides: a tool for decision making. Environ. Impact Assess. Rev. 22: 235-248.
  16. FOCUS. 2001. “FOCUS Surface water scenarios in the EU Evaluation Process under 91/414/EEC”. Report of the FOCUS Working Group on Surface Water Scenarios, EC Document Reference SANCO/4802/2001-rev.2. EU. 245 pp.
  17. Rautmann, D., Streloke, M., and Winkler, R. 2001. New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/284496304\\_New\\_basic\\_drift\\_values\\_in\\_the\\_authorization\\_procedure\\_for\\_plant\\_protection\\_products](https://www.researchgate.net/publication/284496304_New_basic_drift_values_in_the_authorization_procedure_for_plant_protection_products) (Aug. 27, 2020)
  18. UK Health and Safety Executive. 2015. Environmental fate models: Excel calculator tools. Retrieved from <https://www.hse.gov.uk/pesticides/pesticides-registration/data-requirements-handbook/fate/environmental-fate-models.htm> (Feb. 09, 2021)
  19. United States Environmental Protection Agency (EPA). Models for pesticide risk assessment. Retrieved from <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/models-pesticide-risk-assessment> (Oct. 20, 2020)
  20. United States Environmental Protection Agency (EPA). 2015. Pesticide in water calculator version 1.50 user manual. Retrieved from <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/pesticide-water-calculator-version-150-user-manual>。(Jun. 25, 2020)
  21. Verro, R., Calliera, M., Maffioli, G., Auteri, D., Sala, S., Finizio, and A., Vighi, M. 2002. GIS-based system for surface water risk assessment of agricultural chemicals. 1. Methodological approach. Environ. Sci. Technol. 36: 1532-1538.

# Predicted Environmental Concentration Model Used in Japan to Assess Pesticide Risk to Aquatic Organisms

Shu-Yi Hung<sup>1</sup>, Wei-Ren Tsai<sup>1</sup>, Yu-Chen Hsieh<sup>1\*</sup>

## Abstract

Hung, S. Y., Tsai, W. R., and Hsieh, Y. C. 2021. Predicted environmental concentration model used in Japan to assess pesticide risk to aquatic organisms. *Taiwan Pestic. Sci.* 11: 47-61.

Pesticides are substances used in agriculture to (1) control pests, weeds, and microbes and (2) regulate the growth of crops and insects. However, certain pesticides can negatively affect humans, animals, and/or the environment. For example, pesticides applied in the field are often directly exposed to the environment and can flow into waterbodies through drainage facilities, thereby causing harmful effects in aquatic animals and plants. The predicted environmental concentration (PEC) model, which predicts environmental concentrations of pesticides applied in the field, is one of the tools used to evaluate potential risks to non-target organisms. Japan, a country with similar environmental and agricultural conditions as Taiwan, has applied the PEC model in stages to estimate the concentration of pesticides flowing into waters and to determine whether to approve the registration of pesticides. Stage one (Tier 1) of the PEC model involves estimating the amount of runoff and drift, predicting the concentration of pesticides in waterbodies, and comparing the ecotoxicity of the tested pesticide with that of other pesticides (e.g., using toxicological test data from fish, daphnia, and algae). Stage one predictions are primarily based on the amount of pesticide applied in the field, the pesticide application method, the affected area, and other related parameters. PEC modelling is a useful method to manage the risks associated with pesticides and to strengthen environmental protection in agricultural activities.

---

Accepted: January 11, 2022.

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

<sup>1</sup> Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute, Council of Agriculture, Taichung

**Key words:** pesticide risk assessment, PEC model in Japan, aquatic organisms, predicted environmental concentrations, environmental protection