

### 附件三 暴露量評估

#### 一、暴露量評估的定義

所謂暴露量評估（exposure assessment）是指量測或估計人類暴露在某一存在於環境中危害性化學物質之期間、頻率及強度之過程，或者是指估計某一危害性化學物質進入環境中而可能增加之假設（hypothetical）暴露量。一般而言，在完整之暴露量評估中應描述暴露之大小、期間、頻率及途徑，暴露人群之大小、特性、種類，以及在量測或估計過程中所有的不確定性（uncertainties）。暴露量評估係屬於風險評估過程中之第三步驟，亦常用於確認某些適當而可預期之控制選擇對暴露之影響，或用於預測有效之控制技術對暴露之影響。

#### 二、暴露量評估的工作項目

- (一) 暴露族群之界定：進行危害性化學物質暴露量評估時，首要工作為暴露人群之界定。因此，在暴露族群之界定上，應依據開發行為所排放危害性化學物質之影響範圍加以界定，故應先依據擴散模擬結果選定影響範圍，將影響範圍內之民眾納為暴露族群。此外，在暴露族群之界定，需特別注意較具敏感性且易產生不良健康影響之人群，如懷孕之婦女、年齡較大或較小之民眾，或者是健康狀態不良之民眾，因為其所能忍受暴露濃度較低之故。
- (二) 大氣擴散模式及多介質傳輸模式選擇與模擬：在大氣擴散模式選擇及模擬上，應依據環保署已公告之「空氣品質模式模擬規範」及「空氣品質模式評估技術規範」進行模式選擇及乾、濕沉降模擬；在土壤及地下水擴散模式選擇及模擬上，應依據環保署已公告之「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引」進行模式選擇及模擬；至於多介質傳輸模式之選擇與模擬將於以下章節說明。
- (三) 環境介質（空氣、飲水、食物、土壤、底泥等）中危害性化學物質之濃度推估：利用大氣擴散模式及多介質傳輸模式模擬後，環境介質中危害性化學物質之濃度應列出影響範圍內之最高、最低及平均濃度，並引用進行暴露劑量推估。
- (四) 暴露情境之選擇：就環境影響評估之觀點而言，健康風險評估對於情境設定應趨保守。由於健康風險評估主要評估開發行為是否對影響範圍內之居民健康造成風險，因此在評估時應以可能發生之實際情形建構暴露情境。在設定「實際暴露情境」後，應清楚說明其相關之暴露途徑，予以清楚定義，以完整建構暴露來源、暴露途徑及暴露族群之情境架構。在暴露途徑分析上，應依據危害性化學物質之物理化學環境特性、多介質傳輸模擬結果及相關資料加以綜合判斷。對於判定不存在之暴露途徑，應提出科學證據證明之。
- (五) 急毒性之暴露評估：僅考慮吸入暴露，以排放時間內之平均小時排放量進行五年之逐時模擬，並以最大小時濃度計算急毒性危害指標（Acute Hazard Quotient, AHQ，參考” Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities” , U.S. EPA, OFFICE OF SOLID WASTE, 2005）或採用化學暴露指標（Chemical Exposure Index, CEI，參考” DOW’ s Chemical Exposure Index Guide” , AIChE, 1994）。
- (六) 暴露參數之選擇：在暴露劑量計算過程中，引用合理且符合環境現況參數是極為重要之工作，亦對健康風險評估結果具關鍵性的影響。因此，在計算時應將計算過程中所有使用的參數詳細列表，並說明引用之數值及其來源，其內容應包括參數名稱、定義、單位、參數尺寸分類（實地參數或全國性參數）、參數值、參數範圍、分布型態、參數處理說明、資料來源和主要應用公式等。本技術規範建議應以引用行政院衛生署國民健康局公布之「台灣一般民眾暴露參數彙編」或環保署公布之「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引」參數資料。
- (七) 總暴露劑量之推估：主要根據空氣擴散模式、多介質傳輸模式等環境傳輸模式模擬結果，估計暴露族群經由吸入、食入及皮膚吸收等途徑暴露之劑量。因此估算時需考慮暴露時間的長短、頻率與人體之體重，一般使用標準劑量單位，即每天每公斤體重攝取多少毫克之危害性化學物質為單位，必須對每一暴露途徑中的各種危害性化學物質列表計算，各種暴露途徑之暴露劑量計算詳述如後。

### 三、多介質傳輸模式之選擇與模擬

環境品質監控、檢測與管理，大都以單一介質如空氣、地面水等主體，在 1970 年代末期，多介質質量平衡模式開始被初步的應用，並隨著化學物質的管制、法規制定、人類暴露與暴露風險評估，多介質傳輸模式成為評估的關鍵及瞭解污染物複雜的環境生命過程有力的工具。

一些大公司如 Procter & Gamble、Monsanto 和 3M 等開始使用多介質傳輸模式預測一些新產生的化學物質在環境中流布情形，由於模式其良好功能性與簡單性，逐漸受到許多國家與團體注意，加拿大與歐洲經濟共同市場開始推薦使用多介質傳輸模式評估一些新化學物質對人類及環境的安全性。荷蘭政府研究單位開始評估其所使用單一介質環境管理方針是否需因多介質傳輸模式而調整。以下將針對目前常見之多介質傳輸模式進行介紹：

#### (一) Fugacity 多介質傳輸模式

Fugacity 多介質傳輸模式，能預測化學物質進入環境中分布的廣泛圖像。逸能（Fugacity）似一種能量，而逸能模式（Fugacity Model）主要利用化學物質之逸能關係作為介質間的分布情形預測，同時此逸能模式需使用於較大環境中，因為在較大區間中化學物質才能趨於平衡，方可作為相關流布之預測。該模式將環境區分成幾個部門（圖 3），包括：大氣（Air）、水體（Water）、土壤（Soil）、底泥（Sediment）、水中生物（Biota）等，利用簡單的關係（平衡、跨相間傳輸等）追蹤化學物質的移動，這些模式可考慮所有可能影響化學物質流布和最終歸宿主要過程，包括擴散、反應、沉降、揮發、衰減等等。

質量是此模式系統最基本的資料，Fugacity 模式尚需要以下兩種基本資料：一般的環境狀況如溫度、流率和累積率；化學物質的特性及其基本資料，化學物質的基本特性將會影響分配和反應趨勢。

##### 1、Fugacity 多介質傳輸模式的應用

Fugacity 多介質模式提供一種簡便，卻能預測化學物質進入環境中分布的廣泛圖像。該模式將環境區分為幾個部門及次部門（空氣、水、土壤、底泥、生物……等），利用簡單的關係（平衡、跨相間傳輸等）追蹤化學物質移動，這些模式可考慮所有可能影響化學物質流布和最終歸宿主要過程，包括擴散、反應、沈降、揮發、衰減等等。

##### 2、Fugacity 多介質傳輸模式之模擬

Fugacity Model 根據不同介質分為空氣模式、地下水模式、土壤模式、底泥模式，並針對不同的假設與限制採用適當的模式來計算出各污染物質的排放量，評估特定時間點源的暴露濃度統計分布。

利用 Fugacity Model 模式模擬物質在環境中（空氣、水體與土壤）分布情形，需要物質之完整物理化學特性，包括分子量、水溶解度、log Kow、溶點、半衰期（空氣、水體、土壤）等，因此執行者需自資料庫收集危害性化學物質之物化特性。

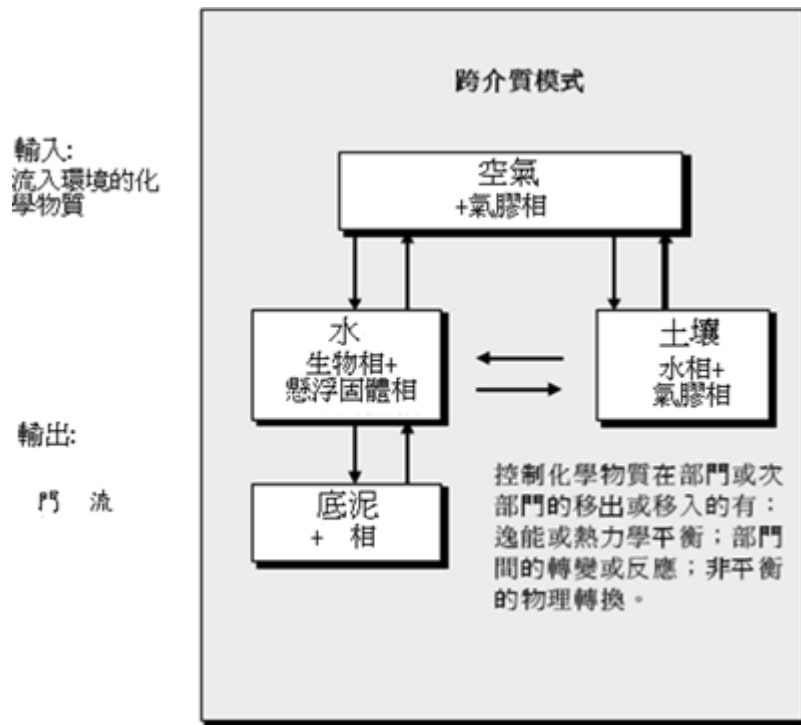


圖 3 Fugacity 部門區間圖

## (二) MEPAS 多介質傳輸模式

### 1、模式的適用性：

- (1) 危害性化學物質種類：有機、無機性化學物質皆可模擬。
- (2) 污染源種類：既存或新設污染源皆可模擬。
- (3) 傳輸途徑：空氣、土壤、地下水、地表水、地表漫流、食物鏈。
- (4) 暴露途徑：吸入、食入、皮膚接觸，且包含食物鏈。
- (5) 危害評估：致癌性、非致癌性。
- (6) 受體族群：人體、生態。

### 2、模式基本限制：

- (1) 作業平台：Win 95 以上作業系統。
- (2) 模式取得需要購買：<http://mepas.pnl.gov/earth/mepasbuy.html>。
- (3) 無法直接進行敏感度分析。

### 3、模式內容：

- (1) 模式全名：Multimedia Environmental Pollutant Assessment System。
- (2) 研發單位：太平洋西北國家研究室（Pacific Northwest National Laboratory）。
- (3) 版本／年代：Version 4.1.1／2002 年 5 月。
- (4) 模式簡介：採用較高階數學模式，整合污染物之傳輸與暴露途徑，以推估環境濃度及環境暴露導致之慢性健康衝擊。
- (5) 模式目的：
  - a、作為比較不同污染物、不同污染源、不同傳輸途徑、不同暴露途徑、不同場址與不同復育計畫之間，人體健康風險值或風險降低程度的篩選工具。
  - b、模擬污染物在每個環境介質中之時間與空間的分布情形，進一步瞭解污染物在環境介質間之界面的瞬時傳輸。
  - c、應用於 CERCLA、CAA 與 CWA 等場址之「復育行動優先系統」（Remedial Action Priority System，RAPS）的風險分析工具。

#### 4、模式來源：

- (1) 來源：可由 <http://mepas.pnl.gov/earth/mepasbuy.html> 網站，購得此軟體。
- (2) 輸入參數：參考模式使用手冊中輸入參數說明。

#### (三) MMSOILS 多介質傳輸模式

##### 1、模式的適用性：

- (1) 危害性化學物質種類：有機、無機性化學物質皆可模擬，含有 240 種化學污染物的資料庫。
- (2) 污染源種類：地下儲槽（underground storage tanks）、地表圍塘（surface impoundments）、露天棄置堆（waste pile）和掩埋場（landfill），直接釋放進入地下水、地表水與大氣等環境介質皆可模擬。
- (3) 傳輸途徑：空氣、土壤、地下水、地表水、地表漫流、食物鏈。
- (4) 暴露途徑：吸入、食入、皮膚接觸。
- (5) 危害評估：致癌性、非致癌性。
- (6) 受體族群：人體。

##### 2、模式基本限制：

- (1) 作業平台：MS-DOS。
- (2) 無法模擬放射性污染物。
- (3) 無法進行生態風險評估。

(4) 主要適合於有害場址污染土壤與地下水之污染源。

(5) 無法直接進行敏感度分析。

### 3、模式內容：

(1) 模式全名：The Multimedia Contaminant Fate, Transport, and Exposure Model。

(2) 研發單位：美國環保署研究發展部（USEPA, Office of Research and Development）。

(3) 版本／年代：Version 4.0／1997 年 6 月。

(4) 模式簡介：主要用以估算各種有害廢棄場址所釋放之化學污染物質，經由多介質環境傳輸後，造成周遭居民之污染暴露量與健康風險值，以作為比較各有害廢棄場址之相對危害性的篩選工具。

(5) 模式目的：

a、作為比較不同污染物、不同污染源、不同傳輸途徑、不同暴露途徑、不同場址與不同復育計畫之間，人體健康風險值或風險降低程度的篩選工具。

b、應用於 RCRA 場址之相對比較（relative comparison）的篩選工具。

c、特別用於模擬有毒污染物從地下儲槽、地表圍塘、露天棄置堆和掩埋場的釋放。

### 4、模式來源：

(1) 來源：由 <http://www.epa.gov/ceampubl/mmedia/mmsols/index.htm> 網站，可免費下載此軟體。

(2) 輸入參數：參考下載軟體中模式使用手冊中輸入參數說明。

## (四) MULTIMED 多介質傳輸模式

### 1、模式的適用性：

(1) 危害性化學物質種類：有機、無機性化學物質皆可模擬。

(2) 污染源種類：污染土壤（Contaminated soil）、掩埋場（Landfill）、地表圍塘（Surface impoundment）、地表水與空氣等環境介質皆可模擬。

(3) 傳輸途徑：空氣、土壤、地下水、地表水、地表漫流、食物鏈。

(4) 暴露途徑：吸入、食入、皮膚接觸。

(5) 危害評估：致癌性、非致癌性。

(6) 受體族群：人體及生態。

### 2、模式基本限制：

- (1) 作業平台：MS-DOS。
- (2) 主要適合於有害場址污染土壤與地下水之污染源。
- (3) 無法直接進行敏感度分析。

### 3、模式內容：

- (1) 模式全名：The Multimedia Exposure Assessment Model。
- (2) 研發單位：美國環保署的研究發展部（USEPA, Office of Research and Development）。
- (3) 版本／年代：Version 1.01／1992 年 11 月。
- (4) 模式簡介：用於模擬來自各種污染源的污染物，傳輸至空氣、水、飽和或非飽和土壤及傳輸到人體及其他物種的情境以進行危害評估，以及對工程及管理控制的衝擊分析。

### 4、模式來源：

- (1) 來源：由 <http://www.epa.gov/ceampubl/mmedia/multim1/index.htm> 網站，可免費下載此軟體。
- (2) 輸入參數：參考下載軟體中模式使用手冊中輸入參數說明。

## (五) 3MRA 多介質傳輸模式

### 1、模式的適用性：

- (1) 危害性化學物質種類：有機污染物與無機污染物，包括戴奧辛類化合物與水銀。
- (2) 污染源種類：地表圍塘（Surface impoundment）、Aerate tank、掩埋場（Landfill）、露天棄置堆（Waste pile）、Land application unit 皆可模擬。
- (3) 傳輸途徑：空氣、土壤、地下水、地表水、地表漫流、食物鏈。
- (4) 暴露途徑：吸入、食入、皮膚接觸。
- (5) 危害評估：致癌性、非致癌性。
- (6) 受體族群：人體及生態。

### 2、模式基本限制：

- (1) 作業平台：Win 98／NT／2000／XP。
- (2) 主要適合於有害場址污染土壤與地下水之污染源。
- (3) 無法直接進行敏感度分析。

### 3、模式內容：

(1) 模式全名：Multimedia, Multipathway, Multireceptor Risk Assessment。

(2) 研發單位：美國環保署的研究發展部和固體廢棄物部（USEPA, Office of Research and Development, Office of Solid Waste）。

(3) 版本／年代：Version 1.0／2003 年 6 月。

(4) 模式簡介：用來估算已受管理之工業廢棄物，其可能經由多介質傳輸、多途徑暴露而釋放出污染物質，而造成各個不同暴露族群（包括人類及生態暴露族群）的風險，為一全國性尺度，提供資訊給管理者作決策。

(5) 模式目的：

a、判定化學物質在已受管理的廢棄物流濃度，可能造成人類健康及對環境危害的風險。

b、建立、測試、提供一個多介質、多途徑、多族群暴露及風險評估的模式，並評估不確定性來支持管理為基礎的應用，來支持 Hazardous Waste Identification Rule（HWIR），未來可用做決策的工具。

#### 4、模式來源：

(1) 來源：由 <http://www.epa.gov/ceampubl/mmedia/3mra/index.htm> 網站，可免費下載此軟體。

(2) 輸入參數：可參考以下網址中模式使用手冊中輸入參數說明。

<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/id/hwirwste/risk03.htm>

#### (六) TRIM 多介質傳輸模式

##### 1、模式的適用性：

(1) 危害性化學物質種類：有毒空氣污染物（HAP）包括微粒狀物質（particulate matter）、臭氧（ozone）、一氧化碳（carbon monoxide）、氧化氮（nitrogen oxides）、二氧化硫（sulfur dioxide）和鉛（lead），以及部份於大都市的揮發性有毒空氣污染物。

(2) 污染源種類：空氣污染源皆可模擬。

(3) 傳輸途徑：空氣、水、土壤、食物、室內空氣。

(4) 暴露途徑：吸入、食入。

(5) 危害評估：致癌性、非致癌性。

(6) 受體族群：人體及生態。

##### 2、模式基本限制：

(1) 作業平台：Win 98／NT／2000／XP。

(2) 主要適合於空氣污染源與有毒氣體排放之風險評估。

(3) 無法直接進行敏感度分析。

### 3、模式內容：

(1) 模式全名：Total Risk Integrated Methodology。

(2) 研發單位：美國環保署的空氣品質計畫和標準部（USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards）。

(3) 版本／年代：2005 年 9 月。

(4) 模式簡介：主要作為估算有毒氣體與法規規定的氣體濃度標準，是否會對人體與生態造成衝擊的評估模式。

(5) 模式目的：

- a、用來模擬空氣污染物在不同介質和生物體中傳輸和濃度變化。
- b、估算不同的生物在每個環境介質中之時間與空間的暴露情況。
- c、提供人體暴露在不同時間和空間中的模組，可模擬其人口數變化。
- d、提供模組中的易變性及不確定性分析和追蹤。

### 4、模式來源：

(1) 來源：由 [http://www.epa.gov/ttn/fera/fate\\_download.html](http://www.epa.gov/ttn/fera/fate_download.html) 網站，可免費下載此軟體。

(2) 輸入參數：可參考以下網址中模式使用手冊中輸入參數說明。[http://www.epa.gov/ttn/fera/trim\\_fate.html](http://www.epa.gov/ttn/fera/trim_fate.html)

## 四、暴露劑量推估

暴露評估中最重要工作為暴露劑量推估，以下依據吸入、食入及皮膚吸收三種暴露途徑分別推算慢性低濃度暴露時之終生平均每日暴露劑量(Life-time Average Daily Dose, LADD);至於急性高濃度暴露，則以平均每日暴露劑量(Average Daily Dose, ADD)，而終生平均每日暴露劑量及平均每日暴露劑量應以估算吸收劑量為主。

### (一) 慢性低濃度暴露之吸入途徑之暴露劑量

暴露族群經由吸入途徑暴露危害性化學物質之終生平均每日暴露劑量，可依下列公式計算之：

$$LADD_{inhalation} = \frac{C_{tw} \times IR_{inhalation} \times AF_{inhalation}}{BW} \times \frac{ED}{AT}$$

$LADD_{inhalation}$ ：吸入途徑之終生平均每日暴露劑量 (mg/kg/day)

$C_{tw}$ ：周界大氣中危害性化學物質之時量平均濃度 (mg/m<sup>3</sup>)

$IR_{inhalation}$ ：每日呼吸量，單位：Nm<sup>3</sup>/day

$AF_{inhalation}$ ：吸入途徑之危害性化學物質吸收分率 (%)



BW：人體平均體重（kg）

ED：人體平均暴露時間

AT：暴露發生的平均時間

## (二) 急性高濃度暴露之吸入途徑之暴露劑量

暴露族群經由吸入途徑暴露危害性化學物質之平均每日暴露劑量可依下列公式計算之：

$$ADD_{inhalation} = \frac{C_{tw} \times IR_{inhalation} \times AF_{inhalation}}{BW} \times \frac{ED}{AT}$$

$ADD_{inhalation}$ ：吸入途徑之平均每日暴露劑量（mg/kg/day）

$C_{tw}$ ：周界大氣中危害性化學物質之時量平均濃度（mg/m<sup>3</sup>）

$IR_{inhalation}$ ：每日呼吸量，單位：Nm<sup>3</sup>/day

$AF_{inhalation}$ ：吸入途徑之危害性化學物質吸收分率（%）

BW：人體平均體重（kg）

ED：人體平均暴露時間

AT：暴露發生的平均時間

## (三) 食入途徑之暴露劑量

暴露族群經由食入途徑暴露危害性化學物質之終生平均每日暴露劑量（Life-time Average Daily Dose, LADD）可依下列公式計算之：

$$LADD_{ingestion} = \frac{C \times IR_{ingestion} \times AF \times LFC}{BW} \times \frac{ED}{AT}$$

$LADD_{ingestion}$ ：食入途徑之終生平均每日暴露劑量（mg/kg/day）

C：食物或飲水中危害性化學物質之濃度（mg/L，mg/kg）

$IR_{ingestion}$ ：食物或飲水之每日攝入量，單位：L/day，kg/day

$AF_{ingestion}$ ：食入途徑之危害性化學物質吸收分率（%）

LFC：Local food consumption，自產食物攝入比例（%）

BW：人體平均體重（kg）

ED：人體平均暴露時間

AT：暴露發生的平均時間

#### (四) 皮膚暴露途徑之暴露劑量

暴露族群經由皮膚暴露途徑暴露危害性化學物質之終生平均每日暴露劑量（Life-time Average Daily Dose, LADD）可依下列公式計算之：

$$LADD_{\text{skin absorption}} = \frac{C \times M_s \times SA \times AF_{\text{skin absorption}}}{BW} \times \frac{ED}{AT}$$

$LADD_{\text{skin absorption}}$ ：皮膚暴露途徑之終生平均每日暴露劑量（mg/kg/day）

C：皮膚接觸之環境介質中危害性化學物質濃度（mg/L，mg/kg）

$M_s$ ：單位皮膚面積接觸之環境介質量（L/m<sup>2</sup>，kg/m<sup>2</sup>）

SA：每日接觸環境介質之皮膚表面積（m<sup>2</sup>/day）

$AF_{\text{skin absorption}}$ ：皮膚暴露途徑之危害性化學物質吸收分率（%）

BW：人體平均體重（kg）

ED：人體平均暴露時間

AT：暴露發生的平均時間

上述各項計算公式所需之各種暴露參數應引用行政院衛生署國民健康局公布之「台灣一般民眾暴露參數彙編」或環保署公布之「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引」參數資料。若引用其他參數時，應詳細說明參數來源、使用之數值與數值合理性。有關經由土壤及地下水污染而暴露之暴露劑量計算，則依據「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引」所載之計算公式進行計算。經由各種暴露途徑暴露危害性化學物質之慢性低濃度所致之暴露劑量，應分別計算，最後再加總為總暴露劑量。