

## 環境保護

### 健康風險暴露評估準則之建立

阮國棟\* 簡慧貞\*\*

#### 摘要

暴露評估是評估在一特定時間內污染物進入人體的量，以及受影響之人數，也是進行環境風險度分析之重要步驟。在進行一評估計畫所需測量及鑑定的資料，包括污染物之實際濃度、重要的暴露途徑、污染物進入人體的方式、實際接收的內在劑量、及受暴露的人口大小及特性。在此測量的過程中應考慮下列的問題：接觸點之暴露量、內在劑量及生物有效劑量三者之關係，接受個體特異性等等，因這些考量直接影響到暴露評估之必要詳盡度。測量數據之品管／品保程度、對預期濃度的偵測極限、目前的偵測方法是否有能力偵測出標的污染物，均直接影響評估結果的可用性。

本文討論進行一暴露評估計畫所應有的基本考量，並分析接觸點測量，情境分析及劑量重建(reconstruction of dose)等評估方法，進而討論如何有效地進行一暴露評估計畫、如何就參數性質及種類選取適當之模擬模式，以及如何考量及測量評估之不確定度。

#### 【關鍵詞】

- ①暴露評估(exposure assessment) ②內在劑量(internal dose)
- ③情境分析(scenario evaluation) ④劑量重建(reconstruction of dose)

#### 一、前言

暴露評估是進行風險評估的四大步驟之一，主要在評估一特定時間內民眾吸收了多少污染物？有多少人暴露到此污染物？由於暴露評估乃以人體監測、環境監測、模式模擬為基礎，而人體的數據及監測又受到測量時間及資源等許多的限制，而必須藉助於模式的模擬。因此有效地掌握污染物的排放、排放特性、氣象、水文、地形等參數，以數學模式模擬污染源排放後至環境中的分布，以間接求得暴露量為最常被應用之評估方式，但也有其不確定度，因此評估暴露必須有一套依循之準則。

美國環境保護署(EPA)於1992年5月29日公布了最新暴露評估準則。這個準則的資

\* 行政院環境保護署環境衛生及毒物管理處處長

\*\*行政院環境保護署環境衛生及毒物管理處技正

料來源是一些原理、概念、和署內所使用之處理方法。這些準則為環保署建立了一套廣泛的架構，此一準則乃將1986年之暴露評估準則加以修正，並給予更明確之定義，包括一般暴露評估的觀念、暴露評估計算、暴露評估結果的代表性及不確定性。這些準則著重於人類對化學物質的暴露，對於野生動物的暴露評估則需要更多其他的規範。因為人類對生物性、噪音、放射線物質的暴露，及野生動物對化學物質的暴露這四項領域，具有獨特的挑戰性，不在本文討論範圍。本文即依此一套準則，討論如何進行一成功之暴露評估計畫。

## 二、暴露評估之概念

正確的定義暴露、攝入、吸收及劑量是暴露評估之第一步，暴露為發生在外界屏障（口、鼻、皮膚）接觸之情形。外界屏障(outer boundary)指的是皮膚以及身體對外界的開口，如口、鼻以及皮膚上的傷口，而暴露評估即為接觸之定量及定性評估過程。它對接觸的頻率(frequency)、強度(intensive)及時間(duration)作一描述，並加以評估化學物質之攝入(intake) 及吸收率(uptake rate)、進入途徑、及化學物質實際進入外界屏障的量（劑量）及被吸收的量（內在劑量）。

### 2.1 暴露、攝入、吸收及劑量的觀念

化學物質進入體內可分為二個步驟：接觸（暴露）及實際進入（透過屏障），不論是經由屏障或後續作用的吸收，此化學物質都會導致體內生物標的器官一定的化學質量（內在劑量）。

一個化學物質由外界透過屏障進入人體有二個主要步驟。

1.攝入(intake)是指化學物質經由口或鼻子等外界屏障被吸入、食入或喝入，而這些化學物質通常在空氣、食物、水等環境介質中。在此一過程中，質量傳輸通常發生在大流量，而其進入外界屏障的量即為化學物質攝入率(chamical intake rate)。化學物質攝入率是化學物質每單位時間內進入外界屏障的量，亦即暴露濃度(exposure concentration)與吸入或食入率(inhalation or ingestion rate)的乘積，吸入或食入率為介質在單位時間內通過外界屏障的量，如每小時吸入多少立方公尺之空氣( $m^3/hr$ )，每天食入幾公斤的食物(kg/day)，每天消耗幾公升的水(L/day)。吸入或攝入率一般而言並非持續不變的，但在已知條件下，可觀察出其變化。

2.吸收(uptake)是化學物質通過屏障，由體外進入體內的步驟

吸收涉及化學物質由皮膚或其它暴露組織如眼睛的吸收，雖然化學物質通常藉由環境介質進入人體，但是介質的被吸收率通常與化學物質的被吸收率不同，因此要估計化學物質進入人體的方法就不能與估計攝入量(intake)的方法相同，皮膚吸收(dermal absorption)便是一個由外界進入人體直接吸收的例子。化學物質的吸收率(uptake

rate)是指單位時間內被吸收之化學物質。在此一步驟，質量的傳輸是經由擴散，所以化學物質之吸收率視通過屏障之化學物質濃度之差率 (concentration gradient)、屏障之可透性 (permeability of the barrier) 及其它因素而定。化學性物質之吸收率可以一方程式來表示，其中包括暴露濃度 (exposure concentration)、滲透係數 (permeability coefficient)、暴露表面積 (surface area exposed) 及流通量 (flux)。

經接觸而進入與吸收之概念性程序可以導出暴露途徑中計算暴露量及劑量的公式 (表 1、表 2)。

## 2.2 暴露

暴露 (exposure) 為化學物質接觸外界屏障 (outer boundary) 的狀態，化學物質通常存在於空氣、水、土壤等介質中，所謂暴露濃度 (exposure concentration) 就是接觸點 (point of contact) 之化學物質的濃度。一段時間的暴露可以由時間和濃度所做的縱剖面圖 (profile) 來表示曲線下的面積即為暴露量。

$$E = \int_{t_1}^{t_2} C(t) dt \quad (2.1)$$

E : 暴露量 (magnitude of exposure)

C(t) : 隨時間而變之暴露濃度 (exposure concentration)

$t_e - t_i$  : 暴露期間 (ED) (exposure duration)

## 2.3 應用劑量及潛在劑量

應用劑量 (applied dose) 是化學物質在吸收屏障 (皮膚、肺、消化道) 中可供吸收的化學物質量，直接測量應用劑量通常很不容易，因為吸收屏障的部份常在體內，因此可由潛在劑量來推測。

潛在劑量 (potential dose) 是指食入、吸入或由皮膚進入之化學物質的量。食入或吸入的潛在劑量與劑量效應實驗中之分配劑量 (administered dose) 相似。潛在劑量可以用於分配劑量效應關係。

對由皮膚進入之途徑而言，潛在劑量指塗在皮膚上的化學物質量或塗於介質中的化學物質量，例如：留存在皮膚上少量的微粒子。必須特別注意的是，並非所有在微粒子中的化學物質都會與皮膚接觸，所以潛在劑量事實上不同於暴露量和應用劑量 (applied dose)。

如果此物質只能部分被生物吸收，則應用劑量或到達皮膚、肺、腸胃導之交替屏障的化學量，通常少於潛在劑量。只要生物可利用性 (bioavailability) 之資料可知，則可由潛在劑量換算成應用劑量及內部劑量。

表 1 暴露與劑量相關概念

詞彙	解釋	單位	特定單位範例
暴露	化學物質與人體外界屏障(如皮膚、鼻子、口)之接觸	濃度×時間	皮膚：(mg/L) × (hr) [水接觸]或 (mg/kg) × (hr) [土壤接觸] 呼吸：(ppm) × (hr) 或 (μg/m³) × (day) 口腔：(mg/L) × (day) [水] (mg/L) × (day) [食物]
潛在劑量	潛在於與食入、吸入或皮膚接觸物質之化學物質量 $D_{pot} = \int_{t_1}^{t_2} C_t \cdot IR(t) dt$ $D_{pot} = \sum C_i \cdot IR_i \cdot ED_i$	化學物質質量	皮膚：(mg/kg) × (kg) = mg [土壤中與皮膚接觸之化學物質量] 劑量率：質量 / 時間或 質量 / 體重 / 時間 呼吸：(mg/m³) × (m³/min) × (min) = [呼吸空氣中之化學物質量] 口腔：(mg/L) × (L/day) × (day) = [飲用水中之化學物質量] 劑量率 = mg/day
應用劑量	與主要吸收屏障(如皮膚、肺、腸胃道)接觸且待吸收之化學物質量	化學物質質量	皮膚：(mg/kg) × (kg) × (%接觸百分比) = mg [實際接觸皮膚之化學物質量] 呼吸：(mg/m³) × (m³) × (%接觸百分比) = mg [實際接觸肺之化學物質量。 口腔：(mg/kg) × (kg) × (%接觸百分比) = mg [實際接觸腸胃道之化學物質量] 劑量率 = mg/day
內部(吸收)劑量	經物理或化學程序而進入吸收屏障或交替屏障化學物質 $D_{int} = \int_{t_1}^{t_2} C(t) K_p \cdot SA(t) dt$ $D_{int} = C \cdot k_p \cdot SA \cdot ED$	化學物質質量	皮膚：mg (經皮膚吸收之化學物質量) 呼吸：mg (經肺吸收之化學物質量) 口腔：mg (經腸胃道吸收之化學物質量) 劑量率 = mg/day 或 mg/kg/day
傳送劑量	可與特殊器官或細胞交互作用之化學物質量	化學物質質量	mg (可供器官或細胞作用之化學物質量) 劑量率：mg/day

表 2 暴露與劑量公式

## 2.4 內在劑量

化學物質被吸收且可能與生物上重要之接受體或標的器官交互作用之量稱內在劑量 (internal dose)。一旦化學物質被吸收，則會經歷代謝、儲存、排泄、與傳輸等作用。傳輸至標的器官、組織或體液之化學物質的量稱為傳送劑量 (delivered dose)。傳送劑量可能僅是內在劑量之一小部分。而真正到達細胞或可產生不良效應之細胞膜中的化學物質量僅是傳輸劑量的一小部分，但卻是最重要的部份。因為以傳輸劑量或生物有效劑量 (biologically effective dose) 關係為基礎之藥理動力學，對於大部分之化學物質而言是不易獲得的。所以，現今大部份之風險評估，凡以環境化學物質為評估對象者，均使用潛在劑量或內部劑量為基礎之劑量效應關係。但當有關環境化學物質之藥理動力學較易了解後，則現今之趨勢將會改變。

劑量通常以劑量率 (dose rate)，或每單位時間之化學劑量 (如mg/day)，或每體重單位之劑量率 (如mg/kg/day)，來表示。

## 2.5 暴露與劑量關係

依暴露評估的用途不同，必須估算及測量各種形式之暴露與劑量，其表示方法如下：

1. 暴露濃度 (exposure concentration) 通常以  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mg/m<sup>3</sup>, mg/kg, mg/L, ppb 或 ppm 來表示。此一表示法常用來比較尖峰暴露量 (peak exposure) 與所關心的暴露濃度相比時，例如比較尖峰暴露量與短期暴露極限值 (short term exposure limits)。
2. 暴露量或劑量之剖析圖 (profile)：這是時間的函數圖，即暴露濃度或劑量隨著時間變化之紀錄，濃度與時間用以描述暴露。

剖析圖對風險評估是非常重要的，因在風險評估中，效應的嚴重度是依暴露發生的形式而不同，而總暴露量對效應較無直接影響。例如，某一發展性毒素只在一特定階段才產生毒性。相同的，高濃度污染物的急性暴露會產生不良之效應，即使它的平均暴露量比一般可能產生效應的劑量還低。若生物劑量反應模式可得，則此類剖析圖將日益重要。

3. 暴露量積分 (integrated exposure) 對求得一特定途徑之總暴露量是十分有用的。暴露量積分之單位乃是濃度乘以時間。暴露量積分乃是指位於暴露剖析圖之曲線以下的所有面積。而暴露剖析圖比暴露量積分提供更多的資訊，如暴露期間 (duration)、暴露週期 (periodicity)、尖峰暴露量 (peak exposure) 及時間—濃度曲線 (time-concentration curve) 之形狀與面積。
4. 時間加權平均 (time-weighted average) 常被廣泛地使用於暴露評估 (exposure assessment)，特別是致癌性風險評估 (carcinogen risk assessment)。時間加權平均之暴露濃度 (time-weighted average exposure concentration) 是指暴露量積分 (integrated exposure) 除以暴露期間。時間加權平均劑量率 (time-weighted average dose

rate)是指總劑量(total dose)除以施劑(dosing)時間，通常以每單位時間質量或每單位時間體重質量(如mg/kg/day)。終生平均每日劑量(LADD)通常用在劑量反應公式中以估計其效應與風險。

下面將著重由吸入、食入及皮膚吸收之暴露來說明暴露與劑量之關係(圖1)。其它暴露途徑可能包括注射、輸血、受傷部份之暴露、母體之胎盤傳給胎兒、或是藥物等途徑。這類途徑的暴露與劑量，可以採類似方法計算，但必須注意，是否牽涉其攝入或吸收的過程。

計算暴露評估的式子雖已廣泛使用，但評估者必須考慮一些運用於公式中的假設可能導致錯誤，尤其當使用平均參數如暴露濃度、食入率(ingestion rate)、吸入率(inhalation rate)、滲透係數(permeability coefficient)、暴露表面積及吸收分率(absorption fraction)之平均數時可能忽略其變異而導致誤差。上述問題都應列入不確定性之考量中。

### 三、量化暴露之方法

雖然暴露評估的目的可能很多，但暴露量化之方法(approaches to quantification of exposure)則有三種：(表3)

1. 接觸點測量法：暴露量可以由接觸發生時(身體之外部屏障)，測量暴露濃度及接觸時間，並加以積分而得之。
2. 情境評估法：暴露量可以經由分別估計暴露濃度及接觸時間，並合併各項資訊而得之。
3. 重建法：暴露量可以由生理內部指標如生物指標、身體負荷量，排泄程度等來依次重建劑量，並進而估計暴露量。

此三方法乃是以不同數據資料為基礎，因而其相互間是獨立的。這種獨立性對於查證或確認結果非常有幫助。每一方法均各有其優缺點(表3)，因此如果結合他們，則可增強風險評估之信用度。

#### 3.1 接觸點暴露量之測量

接觸點暴露方法藉由測量一段時間內人體與環境之介面的化學物質濃度，並建立其暴露量紀錄剖析圖。最為人知之接觸點測量例子是放射性劑量測定器。當暴露發生時，利用一小型如徽章型的偵測儀器，可提供在測量時間內暴露量之總估計。另一案例為由美國環保署所進行之總體暴露評估方法(total exposure assessment methodology,TEAM)之研究。在TEAM研究中，乃是利用掛在衣服上之一小具收集器與吸收劑之小唧筒，測量空氣溶劑或污染物之暴露。另一案例為一氧化碳接觸點測量研究，即是受測者帶著一小型測量儀器達數日而測得其暴露量。在上述之案例中，測量均發生在當暴露發生時之人體與環境之介面。應用這些數據來估計暴露量或劑量並不同於直接使用這些數據，因為還需要一些假設。

表 3 量化暴露之方法

方法名稱	說明	優點	缺點
接觸點測量法	暴露量由接觸發生時測量暴露濃度及接觸時間，並加以積分而得之	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 直接測量暴露量</li> <li>• 因使用準確性高之測量器，故可得正確之暴露值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 昂貴</li> <li>• 並非所有化學物質都現存有測量儀器及技術</li> </ul>
情境評估法	暴露量由分別估計暴露濃度及接觸時間，並合併各項資訊而得之	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 最便宜</li> <li>• 特別適合分析計畫行動之風險結果</li> <li>• 評估可藉少量數據或無任何數據而完成（此也為缺點）</li> <li>• 當有健全性、有效性、與不確定性假設之了解已具備時，此法為一最有效之技術</li> </ul>	
劑量重建法	暴露量由生理內部指標（如：生物指標、身體負荷量、排泄程度等）來依次重建劑量，並進而估計暴露量	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 暴露與吸收此化學物之過程已確實發生，可提供過去暴露之良好指標</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 化學物質會彼此干擾或交互作用相互反應，因此不能適用於每一化學物質</li> </ul>

此一測量方法之優點在於它直接測量暴露量。因使用準確性高之測量器，故可以獲得正確之暴露量值。然而，此法卻很昂貴，且並非所有化學物質都有現存之測量儀器與技術。此法亦須考慮有關短期採樣與長期暴露之關係的相關假設。此法並未對來源有特定性，故當需要特殊來源時，風險管理者須提出其限制。

### 3.2 由情境評估推測暴露量

在暴露情境評估中，評估者嘗試求出在某一介質或地點之化學物質濃度，並希望找出個體或族群與化學物之接觸時間與濃度之相關。有關各種關於接觸如何發生的一連串假說即是暴露情境(exposure scenario)。當評估暴露情境時，這一步驟利用公式 2.3，或公式 2.4來描述一連串之事件。

化學物質濃度與人口之特性，必須在暴露情境中合併描述，且此類描述可以多種方式來完成。評估劑量公式（如2.4至2.6公式）的最主要問題之一為假設的限制及屏障狀況（例如質量守恆）之假設，通常並不真確。二種主要解決的方法為：(1)評估在限制假設為真之情況下的暴露量或劑量公式。(2)處理因屏障狀況之相異而引發之不確定性問題。以第一種方式為例，局部環境方法通常用來評估空氣暴露量，時間及地區分段來分別

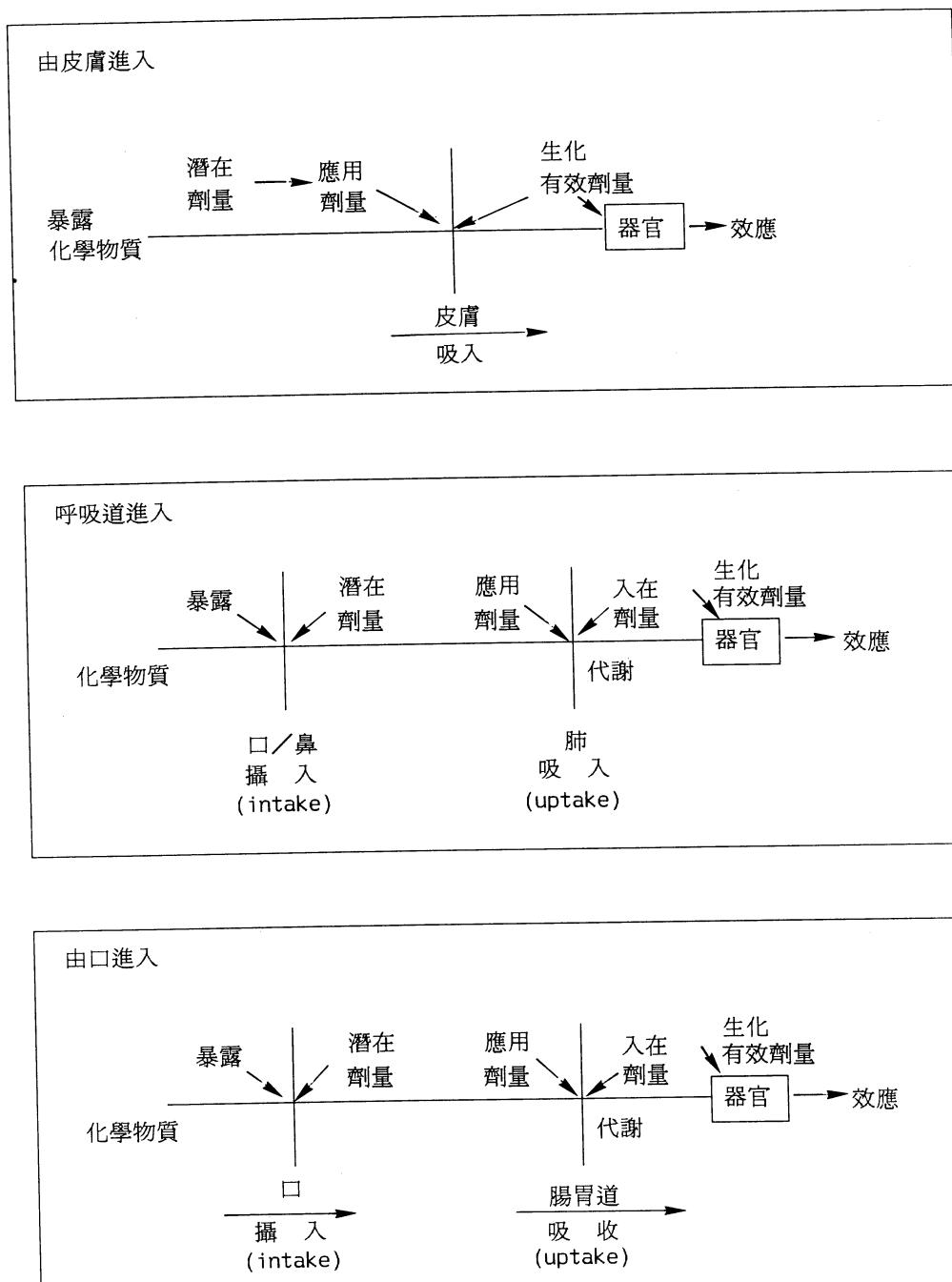


圖 1 劑量與暴露關係圖

測量真實性之濃度，然後將與每一段時間內呼吸途徑之總暴露量加總，並藉由使用較普遍之公式 2.3除去部分屏障狀況。如果暴露濃度之估計值及接觸時間仍由此法間接得之，則每局部環境之濃度與接觸時間之估計值是可以測得的。此法可以避免當濃度隨接觸時間而變化時，卻使用平均值來代表時間濃度值所造成的誤差。

情境評估 (scenario evaluation) 方法優點之一為：它是三方法中最便宜的。而且，此法特別適合分析計畫行動之風險結果。另一優點也是缺點，評估可以藉以少量數據或無任何數據而完成。當有關健全性，有效性與不確定性假設之了解已具備時，此法將為一最有效之技術。

### 3.3 由內部劑量之重建估計暴露量

暴露亦可在發生後再估計。如果總劑量已知，或可被重建，且有關攝入與吸收率之資料是可得的，則可估計過去平均暴露率。劑量的重建是當暴露、攝入、吸收過程已發生，藉由內部身體指標之測量，而導出劑量。然而，身體負荷量或生物指標之數據不可以直接使用，除非身體負荷量間之關係已建立或生物指標及內部劑量和相關反應可以計算出來，而產生干擾之交互作用如不相關化學物質間之代謝作用也可估算出並將之排除。生物組織或體液之測量可表示當某一化學物質之出現即代表暴露直接發生，且此化學物質並不與其他化學物發生代謝作用。

生物監測 (biological monitoring) 可以藉由測量下列項目來評估在體內之化學物質量。下列項目並不適用於所有化學物質之檢測：

1. 在生物組織或血清（血液、尿液、呼吸、毛髮、脂肪性組織等）之化學物質濃度。
2. 化學物質之代謝物之濃度。
3. 因人體暴露化學物質而產生的生物效應（如烷化血色素或酵素產生之改變）。
4. 在目標分子上之化學物及其代謝物。

如果背景濃度並不妨礙生物指標之測定，且吸收與指標之關係為已知，則生物監測之結果可用來估計定時間內之吸收量。指標之採樣時間非常重要。建立暴露與生物指標之測量之關聯性（包含藥理動力學）可以幫助使採樣狀況更適當。

此方法之優點為：暴露與吸收此化學物之過程已確實發生，理論上並可以提供過去暴露之良好指標。缺點為：基於化學物質間會彼此干擾或交互作用相互反應的特性，此法並不能適用於每一化學物質。因對於許多化學物並未建立其方法論，有關內部劑量與暴露量之資料是必須的，且昂貴的。

## 四、規劃暴露評估計畫

由於暴露評估是為多種不同目標而進行，因此並非只是簡單的制式計畫，但每個評估都有一系列相似的問題，藉著強調這些問題，評估者將較易於決定什麼才是評估所須的資訊及如何取得並使用資訊。為了幫助完成一計畫，暴露評估應考慮以下基本的問題。

## 1. 目的

為何進行此研究？此研究將研究什麼問題，而其結果將如何應用。（如表 4）

## 2. 範圍

研究的起始和結束點？研究推論是對國家、區域或地區而下的，監測的目標是什麼人或物？測量的介質或化學物質是什麼？暴露及劑量的預測是對那些人，那些族群或次族群。

## 3. 細部計畫

為了符合目標，劑量及暴露評估須有多精確？為了正確計畫評估暴露劑量、效應及風險間的生化關聯，需做到多詳盡的評估。計畫受到時間、經費等資源限制的程度，應如何有效的利用這些資源分配於不同的細部評估計畫。

## 4. 進行方式有下列的考量

如何進行暴露及劑量的測量及估算，這些方法是否可正確的提供暴露、劑量、效應、風險的生化關係；族群如何分類？暴露濃度如何估算；對物質之生化及環境宿命了解多少？重要的暴露途徑？對預期濃度、分析方法及偵測極限了解多少？目前的偵測方法是否有能力偵測出標的污染物，是否可達評估所需的品質水準？需搜集多少樣本，收集的時間、頻率、資料如何掌握、分析及推論。

藉著這些問題的進行，評估者將能對研究目的有清晰，概括的定義並有助於進一步計劃的基礎之形成。

表 4 暴露評估的目的

目 的	應 用 範 圍	強 調 重 點	主 要 進 行 工 具
應用於風險評估	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支援特定化學物質污染源管制</li> <li>• 設定環境介質標準</li> <li>• 決定廢棄物或化學物質外洩清理復原計畫</li> <li>• 設定環境風險優先排序</li> <li>• 預測環境中存在現況</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 污染源與暴露族群之關係</li> <li>• 介質中特定風險濃度值</li> <li>• 個人或特殊團體風險</li> <li>• 比較性風險</li> <li>• 個人暴露與污染源關係</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 情境分析</li> <li>• 污染源宿命模式模擬</li> <li>• 模式模擬</li> <li>• 情境分析模式模擬</li> <li>• 生物監測</li> <li>• 情境分析模式模擬</li> <li>• 情境分析模式模擬</li> </ul>
應用於暴露現況及趨勢評估		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 特定時間內實際的暴露量及其如何隨時間改變</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 統計採樣策略</li> </ul>
應用於流行病學研究		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 暴露及發生率（劑量、效應）關係建立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 採樣生物監測情境分析</li> </ul>

## 5. 建立暴露評估計畫

在暴露評估工作開始前，評估者必須先決定，評估的目的、範圍、詳盡度及方法，

並把這些項目列入具體目標，這些具體目標是暴露評估計畫的根本，暴露評估計畫不需要一正式文件，對複雜的暴露評估計畫則可將計畫寫出。如果暴露評估是為風險評估的部分，暴露評估計畫應反映出其結果將如何被應用在風險評估上，對某些評估而言可能須要加強三個部份，一是採樣策略、模式模擬策略及溝通策略（圖 2）。

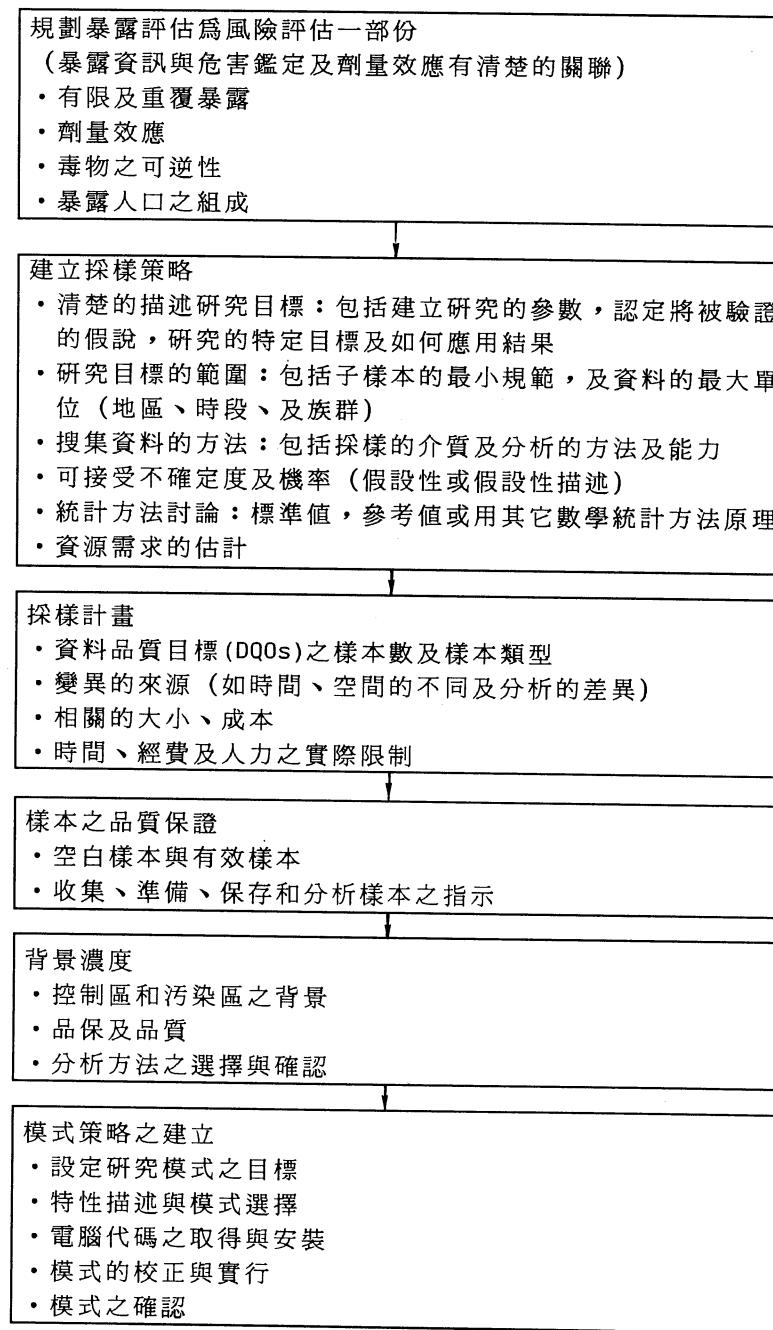


圖 2 建立暴露評估計畫

## 五、評估不確定性

暴露評估所用之假設、參數、模式等都可能產生不確定性，也是暴露評估的主要限制。不確定性推估(uncertainty characterization)與不確定性評估(uncertainty assessment)此兩大工作可導致於描述不確定性時之複雜程度。不確定性推估通常是指選出或淘汰特定資料、估計或情境等思考程序的定性討論。對簡易暴露評估而言，因許多數據化資料不可得，因此不確定性推估是必要的。

不確定性評估(uncertainty assessment)屬於較數據性。其過程始於較簡易之測量(如範圍測量)與分析技術(如敏感度分析)，並進一步支援暴露評估之政策，而至更複雜之測量與技術。為發展或執行適當之不確定性評估之策略可以視為決策之過程。

### 5.1 暴露評估中不確定性分析之角色

暴露評估使用廣泛之資料來源與技術。即使與實際暴露相關之測量法存在，假說與推演仍是必須的。通常，關於暴露評估之各方面資料並非可得的。而可得之資料可能在品質上是有疑問或者未知的。在此狀況下，暴露評估者必須依賴專業評判，類似化學物與狀況分析之推演、估計技術等之整合。因此，暴露評估將因各種假設而有不同程度之不確定性。

暴露評估之不確定性之原因為：

1. 由不同品質與不同來源所得之不確定資料必須加以整合。
2. 應決定是否及如何利用資源，以獲取額外資訊(如生產量、用途、釋放數據、環境宿命資訊、監測數據、與人口數據)來減低不確定性。
3. 許多實驗室證據指出偏差(bias)可能導致所謂的最佳估計(best estimates)，但事實上卻並不非常正確，即使我們僅需要一最佳估計之答案，則藉由對不確定性之討論分析可增進上述答案之品質。
4. 暴露評估是一重覆性的程序。如果不確定性已含蓋，且可作為改進之指針，則尋求合適與健全之方法解決目前之問題則可有效實行，且求得更確定之結論。
5. 決策並非僅建構在分析的一小部分上。應是連續性的。在多種決策的過程通常是持續性的。在最後決策決定前，研究之化學物質必須經過多層風險性評估。因此決策必須以暴露來考量。為描述不確實性特色之暴露評估如其他因素考慮可以使使用者或決策者有效地估計。
6. 暴露評估者不只應提供數值資料且應提出對分析之執行與限制的明確且清楚解釋，而不確定性推估可以有效完成此任務。

健全暴露評估之建立與不確定性分析互有關聯。分析不確定性可以使我們得知，結果將更完整，或現有資料間之鴻溝可能是決策過程中脆弱的一環。

## 5.2 不確定性之型態

暴露評估之不確定性可以分為三類（表 5）：

1. 情境不確定性：關於資料不全或遺失之不確定性，必須完整地定義暴露與劑量。
2. 參數不確定性：關於參數之不確定性。
3. 模式不確定性：關於需以一般推演來預測的科學理論之模式的不確定性。

表 5 不確定性之型態

類 別	來 源 别	主 要 來 源
情境不確定性	• 描述性錯誤	• 資料錯誤 • 暴露途徑、情境、暴露人口
	• 組合錯誤	• 推論之範圍及假設
	• 專業性判斷錯誤	• 每一步驟之專業判斷
參數不確定性	• 測量錯誤	• 測量程序
	• 採樣錯誤	• 系統性誤差
	• 變異性及一般性或替代性資料	• 樣本之代表性
模式不確定性	• 關係性錯誤	• 化學物屬性之關聯性 • 結構反應關聯性 • 環境宿命模式錯誤
	• 模式錯誤	• 模式過於簡單

## 六、結論

暴露評估中最重要一環節是檢視結果。評估工作最終是否成功或失敗，端視其結果是否符合計劃之目標 (objectives)。檢視暴露評估結果之要件詳列表 6。

### 6.1 可能導致低估暴露的一些陷阱

1. 途徑分析是否足夠廣泛，且應避免忽略某一重要的暴露途徑。

例如，在估計因多氯聯苯污染土壤之暴露時，暴露評估不應只估算皮膚接觸途徑。其他路線，如吸入灰塵或蒸氣，或食入因土壤污染河流中的魚類，也應加以估算，因為這些途徑可能導致高度的暴露。

2. 混合物中所關心的污染物是否均被評估？

因為暴露於複雜化學混合物中而引起之風險通常視為風險評估之添加物，如果無

表 6 檢視暴露評估結果

項目別	主要來源
可能導致低估暴露的陷阱	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 途徑分析是否足夠廣泛，且能避免忽略某一重要的暴露途徑。</li> <li>• 混合物中所關心的污染物是否均被評估？</li> <li>• 暴露或測定濃度是否與背景濃度相比較？</li> <li>• 偵測極限是否足夠敏感，而能解釋暴露量與健康之關係？這些資料解釋是否正確？</li> <li>• 額外途徑的機率是否被考慮？</li> </ul>
可能高估暴露的一般性錯誤	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不切實際的保守性暴露參數是否被用於情境中？</li> <li>• 潛在暴露是否存在於既存暴露途徑中？</li> <li>• 不可測暴露(ND)是否可代表實際暴露？</li> </ul>
可能導致高估或低估暴露的一般錯誤	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 是否該結果以合適且具意義之數值表示？</li> <li>• 是否檢視計算錯誤？</li> <li>• 是否如食入率之使用合宜？</li> <li>• 是否適當地指出不確定性？</li> <li>• 如果使用蒙地卡羅模擬技術，是否輸入分布之關聯為已知，並已計算其中？是否模擬之最大值事實上是一界值估計(bounding estimate)？是否蒙地卡羅技術為必須的？</li> </ul>

法評估其中之成分，則可能忽略總體暴露與風險之導因。此種現象對於少量相類似毒物之風險估算特別重要的。

### 3. 暴露或測定濃度是否與背景濃度相比較？

污染濃度或暴露濃度不應與其他污染媒介物或暴露族群相比。當與背景濃度相比時，暴露評估者必須決定是否此濃度或暴露量受人類活動之污染之影響。

### 4. 偵測極限是否足夠敏感，而能解釋暴露量與健康之關係？這些資料解釋是否正確？

因為不能檢測之報告值(ND)，代表實驗室分析時，此化學物無法在一特定檢測界限內發現，而不能檢測之報告值(ND)亦無法排除此化學物具相當濃度之可能性。端視暴露評估之目的與保守程度。

### 5. 額外途徑的機率是否被考慮？

如果暴露評估的目的在於評估總族群之總體暴露與風險，則個體路線之暴露必須加總。

## 6.2 可能高估暴露的一般性錯誤

### 1. 不切實際的保守性暴露參數是否被用於情境中？

暴露評估者必須真確的檢視以確定使用於情境中之暴露案例可能真實發生過。

### 2. 潛在暴露是否存在於既存暴露途徑中？

在某些情況下，特別是情境評估方法被使用時，評估的目標是在估算潛在劑量。

為了決定是否需要並催促法規行動，風險管理者應看重實際暴露量而非高潛在劑量。

因此，暴露評估應清楚表示該結論代表實際暴露潛在暴露。

### 3. 不可測暴露(ND)是否可代表實際暴露？

在某些暴露評估時，我們常以檢測界限或檢測界限之一半來代表不可測值。此類暴露估計應清楚說明其為一假說，因為此估計乃是一保守假設，而事實上，該暴露量

可能為零。由不可測值之結果來估計暴露，劑量與風險必須紀錄為少於估計之結果才對。

## 6.3 可能導致高估或低估暴露的一般錯誤

### 1. 是否該結果以合適且具意義之數值表示？

具意義之數值應該反應數值估算的不確定性。如果可能結果值之範圍分散於各等級，則應使用至少一個具意義之數值，以便確定結果值之可信度。

### 2. 是否檢視計算錯誤？

顯然地，計算必須檢視算術性錯誤與單位轉換錯誤。

### 3. 是否如食入率之使用合宜？

暴露因子必須加以檢視，以確信其與評估地點及狀況有關聯。

### 4. 是否適當地指出不確定性？

暴露評估是不精確科學，而其結果可能大不相同。故在暴露評估時包含不確定性評估是很重要的。

### 5. 如果使用蒙地卡羅模擬技術，是否輸入分布之關聯為已知，並已計算其中？是否模擬之最大值事實上是一界值估計(bounding estimate)？是否蒙地卡羅技術為必須的？

蒙地卡羅模擬乃是在輸入參數中隨機抽取數值以模擬出一數值。如果資料顯示變數與模擬數之關聯已存在，則並不適合用此技術，因為已有變數如何與模擬值相關的答案，故模擬(simulation)是不必要的。

除了檢視評估結果外，如何溝通評估結果亦是重點。

## 七、參考資料

- American Chemical Society. Principles of Environmental Sampling, Ln.Keith. C.H. ed, ACS Professional Reference Book, Washington. DC. American Chemical Society, 1988.

2. American Industrial Health Council. (1990) Presentation of Risk Assessments of Carcinogens. Report of an Ad Hoc Study Group on Risk Assessment Presentation. Washington. DC. American Industrial Health Council.
3. Atherley, G. (1985) A Critical Review of Time-weighted Average as An Index of Exposure and Dose, and of its Key Elements. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 46(9):481-487.
4. Cox,D.C. Baybuu, P.C. (1981) Methods for Uncertainty Analysis: A Comparative survey. Risk Analysis (4):251-258.
5. Dixon, W.J.(1950) Analysis of Extreme Values, Ann. Math, Statist,81.466-506.
6. National Research Council.(1983)Risk Assessment in the Federal Government, Managing the process, Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health, Commission on Life Sciences. NRC. Washington. D.C. National Academy Press.
7. National Research Council. (1989) Biologic Markers in Pulmonary Toxicology. Committee on Biologic Markers, Commission on Life Sciences, NRC. Washington, D.C. National Academy Press.
8. National Research Council. (1989) Human Exposure Assessment for Airborne Pollutants: Advances and Applications. Committee on Advances in Assessing Human Exposure to Airborne Pollutants Committee on Coosciences, Environment, and Resources, NRC. Washington DC:National Academy Press.
9. Neble, G.J:Akland. G.G. (1973) Procedures for Handling Aerometric Data Air Pollut. Control Assoc 23:180
- 10Nelson, J. D., Ward, R.C. (1983) Statistical Considerations and Sampling Techniques for Ground-water Quality Monitoring, Ground Water 19(6):617-625, New Jersey Department of Environmental Protection.(1988d) Improving Dialogue with Communities: A Risk Communication Manual For Government Division of Science and Research, Risk Communication Unit. Trenton, NJ.
- 11U.S. Environmental Protection Agency.(1985d) Methods for Assessing Exposure to Chemical Substances, Volume 5 Methods for Assessing Exposure to Chemical Substances in Drinking Water Office of Toxic Substances, Washington. DC, EPA-560/5-85/6006 NTIS PB86-1232156.
- 12U.S. Environemntal Protection Agency. (1986) Guidelines for Estimating Exposures, Federal Register 51:34042-34054.
- 13U.S. Environmental Protection Agency. (1986) Guideines for Carciregen Risk Assessment, Federal Register 51(185):33992-34003.

- 14U.S. Environemntal Protection Agency. (1986) Guideines for Mulagenic Risk Assessment, Federal Register 51(185):34000-34012.
- 15U.S. Environemntal Protection Agency. (1987) The Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study, Volume Summary and Analysis, Office of Acid Deposition, Environmental Monitoring and Quality Assurance Office of Research and Development, Washington. DC. EPA-600/6-87/002a.
- 16U.S. Environmental Protection Agency (1987) Selection Criteria for Mathematical Models used in Exposure Assessments: Surface Water Models, Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC,EPA-600/8-87/042, NTIS P888-139928/AS.
- 17U.S. Environmental Protection Agency. (1988) Proposed Guidelines for Exposure-related Measurements, Federal Register 53(232):48830-48853.
- 18U.S. Environmental Protection Agency. (1992) Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications. Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development. Washington DC, EPA-800/8-91/011F.
- 19U.S. Environmental Protection Agency. (1992) Guidelines for Exposure Assessment, Washington, DC.EPA/600/2-92/001.