

環境保護

毒物風險管理之設計— 化學物質釋放資料之應用

鄭顯榮* 簡慧貞**

摘要

毒物化學物質管理最終目的乃是預防人類暴露至有毒化學物質之環境中，並評估及降低其暴露風險，其管理之設計舉凡於減廢、減毒、減量、污染預防、生命週期之永續設計，風險評估及風險排序等等。降低暴露風險之第一步乃是掌握化學物質之環境排放並進一步定義出潛在暴露區域及評估其可能對健康之潛在危害，作風險篩選之依據。而化學物質環境排放資料之掌握，除由法令規範外（如：美國聯邦法令之社區知曉及緊急計畫法令對特定企業及特定化學物質規範其申報相關資料），在排放資料申報之設計上應考量可能影響排放資料品質之因素，測量之技術，及污染減量等。

本文討論化學物質釋放清冊在化學物質風險管理之應用，以美國環保署應用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)，並結合社區知曉及緊急應變法令所建立之毒性化學物質釋放清冊(Toxic Release Inventory, TRI)，評估出美國東南區化學物質排放對人體健康及生態的潛在危害為例，探討化學物質排放清冊之設計在化學物質潛在暴露區位評估風險篩檢及風險管理之主要助益，以作我未來我國化學物質清冊建立之參考。

【關鍵字】

1. 毒性化學物質釋放清冊(Toxic Release Inventory, TRI)
2. 風險管理(Risk Management)

*環保署環境衛生及毒物管理處處長

**環保署環境衛生及毒物管理處技正

一、毒性化學物質釋放量清冊

毒性化學物質釋放量清冊(Toxic Release Inventory, TRI)乃是特定毒性化學釋放及傳輸資訊之資料庫。以美國為例毒性化學物質釋放量清冊資訊在1986年社區知曉及緊急應變計畫法令規範下即開始建立，1990年污染預防法令規範下其資訊更加以擴充，凡相關製造加工工業(表1)，超過10位全時聘用員工，每年製造或加工之化學品超過25,000磅或使用超過10,000磅特定化學物質者都需申報以下資料：

- 廠內或設施排放特定化學物質總量；
- 廠內各種化學物質被轉載至其它地點以作為回收，能源再生，再處理或棄置之化學物質總量；
- 廠內各種化學物質回收，能源再生或再處理之總量；
- 一年中廠內存有化學物質最多時之總量；
- 廠內各種製程或操作過程中使用之毒性化學物質種類；
- 各種污染預防或廢棄物減量之措施；
- 工廠相關之環境許可證(Environmental permits)；
- 工廠聯絡人之姓名、電話等聯絡資訊。

美國環保署自1987年至1990年間所建立之TRI資料庫可提供70種屬性資料如行業別分類(SIC CODE)、化學物質名稱、CAS NO.、工廠名稱及地址和UTM座標等。因此，資料庫可以選擇其中幾種屬性，再以邏輯運算子（例如：and, or）找出具有某一特性之工廠資料，以瞭解該類別工廠釋放量之情況。這些資料已被新聞界、環保組織、地方民眾、環保署、國會或其他政府單位所應用分析，並被幾個州引以為據，要求廠商減量或另定相關規定。

TRI資料庫可以反應化學物質釋放及傳輸之資料，但此資料並不代表民眾暴露至化學物品的量。應用TRI資料結合其它相關資訊，可進而評估毒性化學物質經釋放、傳輸而進入人體之暴露量。暴露量之評估為評估化學物質潛在風險考量因素之一，因此在檢閱TRI資料庫時應將決定化學物質潛在風險之考量因素一併列入考量：

表1 美國緊急應變計畫及社區知曉法案下所規定需申報TRI資料之工廠行業別

SIC ¹ 編號	行業別屬名 ²
20	食品業
21	煙草業
22	紡織業
23	紡織品製造業
24	製材業(傢俱業除外)
25	木製傢俱及裝設品製造業
26	造紙業及相關行業
27	印刷出版業及相關工業
28	化學品製造業及相關工業
29	石油煉製業及相關工業
30	橡膠及塑膠產品製造業
31	皮革業
32	岩石、黏土、玻璃及水泥製品
33	金屬工業
34	金屬製品製造業(機械及運輸工具除外)
35	工業及商用機器、電腦設備
36	電子及其他電子設備和零件(電腦設備除外)
37	運輸工具
38	測量、分析、控制、裝備、攝影醫療器材、光學用品、鐘錶業
39	其他製造工業

¹Standard Industrial Classification (SIC) Codes.

²若工廠內有數個部門，有些屬此範圍，有些不是，則當屬於範圍所生產之產品量大於全廠總產量之50%或其任一含毒化物之產品量大於其他部門之產量時，仍需申報。

- 1.化學物質之毒性：化學物質釋放量清冊(TRI)收集了毒性效應差異極廣的化學物質，某些低毒性高釋放量的化學物質，可能比高毒性低釋放量之化學物質導致更嚴重之健康效應，反之亦然。如光氣比甲醇毒性更高，在評估健康風險或危害排序時如只考慮排放量，則可能產生誤差。
- 2.影響暴露之相關因子：化學物質環境潛在分解或持續暴露至化學物質之先決條件乃是化學物質之存在。化學物質在環境中持續存在愈久，其潛在暴露量

4 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

就愈高。陽光、熱或微生物可能造成化學物質之分解。如微生物可能將甲醇分解為較不具毒性之化學物質；揮發性有機物質如乙烯及丙烯在大氣中會反應為更具毒性之光霧；金屬在環境中不易分解。如此低釋放量高毒性易環境持續之化學物質，可能較高釋放量，但在環境中即快速轉換為低毒性之化學物質帶來更嚴重之環境問題。

- 3.化學物質經食物鏈造成生物濃縮效應：化學物質可能藉由食物鏈而造成濃縮或擴散。如汞可隨食物鏈之昇級而蓄積更高之濃度，導致更嚴重之暴露。
- 4.環境介質：化學物質排放至不同環境介質（空氣、水、土壤、地下水等）將影響族群之可能暴露之途徑，如吸入、皮膚接觸或食入。化學物質排放至空氣將導致廠區附近及下風處生物體之暴露而存留在空氣的化學物質被沖刷至土壤水體中則導致其它介質污染。水體放流引起之暴露則導因於下游之水體利用如飲水、浴用水、洗滌、烹調等。放流至廢水處理設備之化學物質，若廢水處理設備無法將其去除則將導致使用水體下游社區之暴露。土壤之排放將藉由沖刷、土壤至地下水之移轉等傳輸至其它環境介質，存在土壤或水體中的化學物質也可能進入食物鏈。地下水注入至良好設計之地下井中則較環境直接排放具更低之暴露風險。
- 5.廢棄物管理效率：毒性化學物質是否進入環境中與廢棄物之棄置、處理、能源再利用及回收有極大的相關。而廢棄物回收之效率則與回收物質之種類及回收方法有關。利用燃燒的方式來處理毒性化學物質，一般而言會產生化學物質95~99%之破壞。其餘者將逸散至空氣或土壤。廢水處理廠處理廢棄物之效率亦與廢水處理設備及處理之化學物質有關。高釋放量之甲醇經過污水處理廠，大部份都被降解，但氯則無法被降解而釋入水體，其它如焚化之效率也受到化學物質特性及處理設備特異性之影響。

二、清冊相關化學物質其廢棄物之污染預防管理

美國毒性化學物質釋放量清冊資訊之擴充乃在1990年污染預防法令(Pollution Prevention Act,PPA)下，要求運作TRI化學物質之工廠針對廢棄物減量措施申報相關資料（圖1）：

場內排放及廢棄物管理

場外廢棄物管理

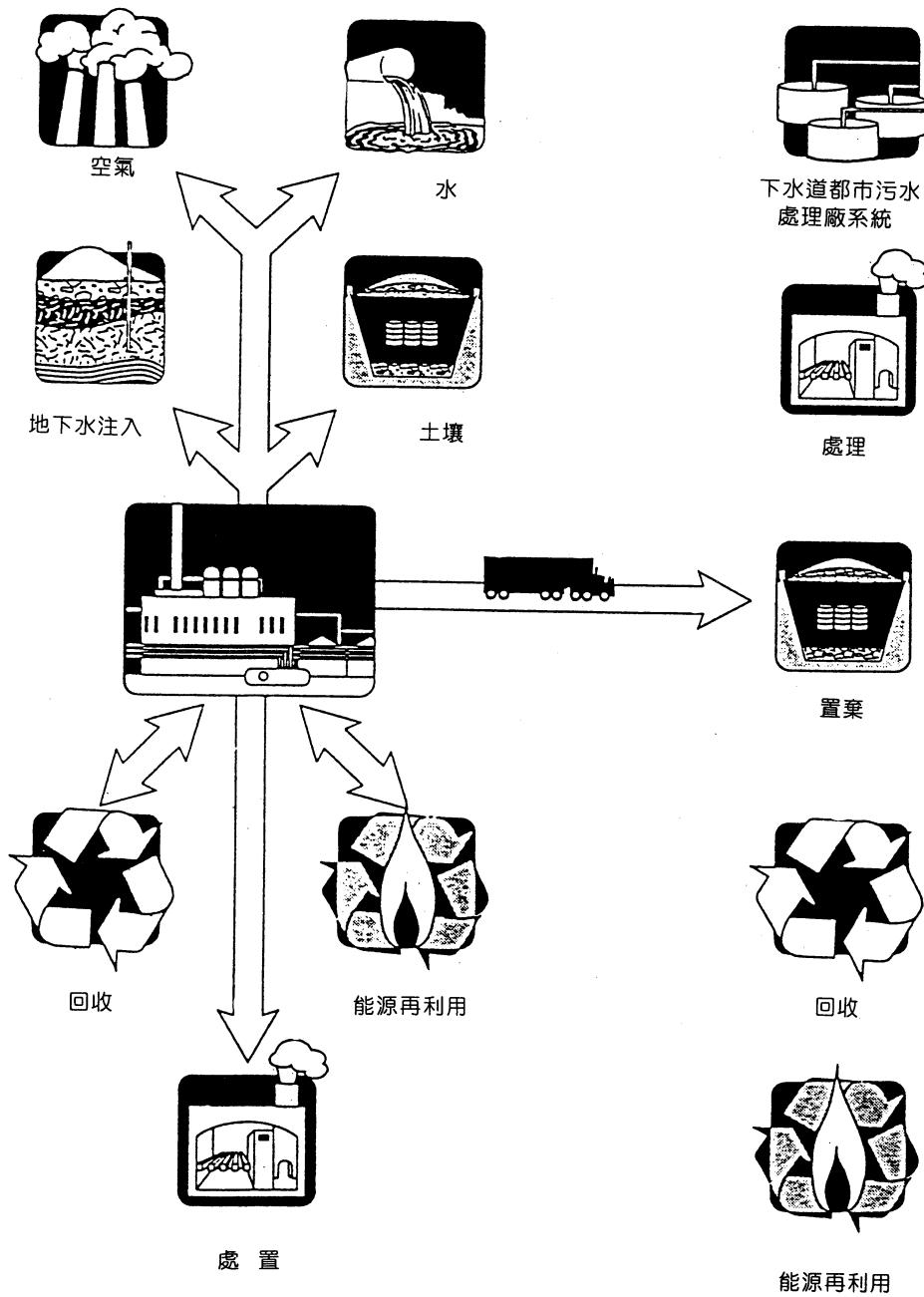


圖 1 毒性化學物質清冊(TRI)所搜集之廢棄物管理相關資料

6 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

- ・排放量(quantity released)：場址內直接排放至環境及場外置棄之毒性場址化學物質總量。
- ・場址能源再利用總量(quantity used for energy recovery on-site)：指在持續焚化過程中處理之毒性化學總量。如100,000磅之甲苯經由鍋爐焚化處理後，可能有98%之甲苯被焚化，剩餘者則排放至空氣中，則98,000磅視為能源再利用總量，2,000磅則視為排放量。
- ・場外能源再利用總量(quantity used for energy recovery off-site)。
- ・場址毒化物回收總量(quantity recycled on-site)：乃指毒性化學物質回收後可資再利用之總量。
- ・場外回收總量(quantity recycled off-site)。
- ・場址處理能量(quantity treated on-site)：場址內經由廢棄物處理程序所處理掉的廢棄物總量如100,000磅之苯經過焚化爐焚化之後可能有99%被處理掉，則場址內之處理總量為99,000磅。（剩餘之1,000磅則為排放量）。
- ・場外處理總量(quantity treated off-site)。
- ・單一事件排放總量(quantity recycled to the environment due to onetime events)：指某一事件發生時如意外外洩，清理計畫等與正常生產線不相關之事件所排放至環境或場址外之回收，能源再利用、處理或置棄等毒性化學物質的量。

在污染預防法令中並提出減少廢棄物來源(source reduction)為廢棄物管理之最高指導原則，其它如回收(recycling)，能源再利用(energy recovery)，適當的處理(treatment)及棄置(disposal)亦在廢棄物管理層級系統中各具功能(圖2)。

由污染預防法令(PPA)規範下所建立之資訊有助於TRI之毒性化學物質廢棄物管理，雖無法直接提供來源減量之特定數據，卻可作為毒化物回收，處理，能源再利用，排放或置棄之數量趨勢分析及場址廢棄物管理層級之指標。

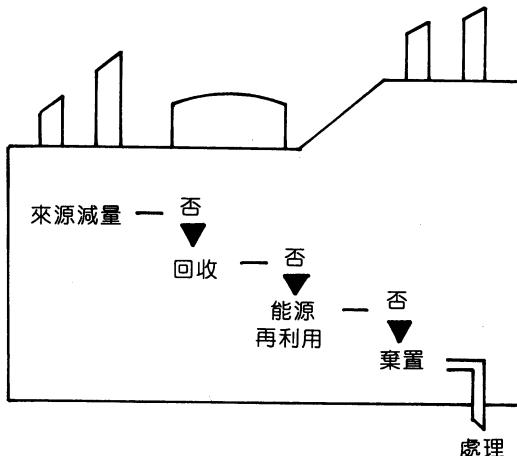


圖2 廢棄物管理層級圖

三、應用毒性化學物質釋放清冊於毒物風險管理實例

藉由毒性化學物質釋放清冊(TRI)所提供之相關統計資料，足以明瞭環境之相對負荷，如釋放量最高之十大工業別(圖3)，釋放量最高之十大污染物別(表3～6)(或致癌物別(表2))等不同目的之分項統計，在污染預防方面則可獲得回收處理能源再利用等相關廢棄物管理資料。這些數據之應用得以作為毒性化學物質管理策略訂定之參考，茲以美國33/50計畫及美國環保署第四分署進行之潛在暴露風險區位為例，詳加說明。

3.1 33/50計畫

33/50計畫乃是美國環保署根據TRI化學排放及傳輸資料，選擇17種優先列管之化學物質進行污染預防之工作，33/50計畫之名稱乃源自其目標：至1992年止降低排放量(包括傳輸量)33%，至1995年止降低其排放量50% (以1988年為基準點)，由圖4至7可見得此計畫之實施之成效。

8 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

(單位百萬磅)

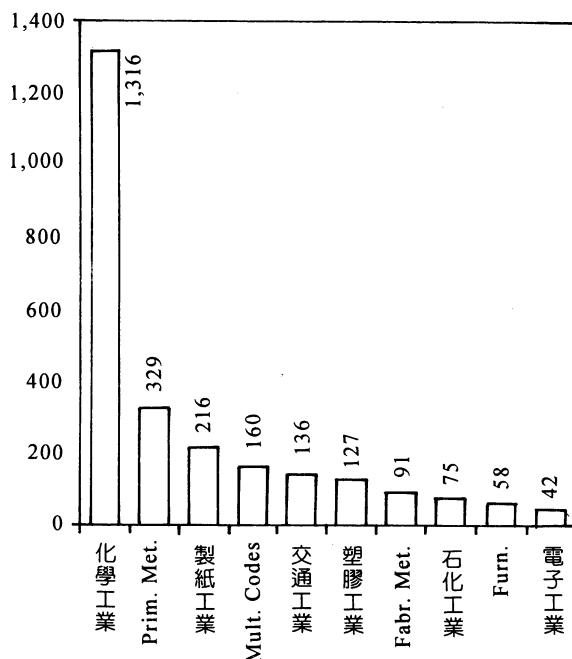


圖3 美國1993年釋放前10名之工業

表2 美國1993年釋放量前10名之致癌物

致癌物		釋放量，磅
Dichlormethane	二氯甲烷	64,454,387
Styrene	苯乙烯	32,776,445
Chloroform	氯仿	14,292,980
Formaldehyde	甲醛	12,207,744
Tetrachloroethylene	四氯乙烯	11,570,197
Benzene	苯	10,845,433
Acetaldehyde	乙醛	6,543,215
Lead	鉛	4,056,624
1,3-Butadiene	1,3-丁二烯	3,282,261
Nickel compounds	鎳化物	3,099,677
合計		163,128,963
總致癌物釋放量		179,858,444

表3 美國33/50計畫中之十七類化學物質與TRI化學物質排放傳輸量之比較(1988~1993)

年	所有TRI化學物質	TRI之化學物質扣除33/50化學物質	33/50計畫中之化學物質
	磅	磅	磅
1988	6,488,962,564	5,000,199,508	1,448,763,056
1990	5,047,042,788	3,788,023,022	1,259,019,766
1992	4,299,247,742	3,396,602,596	902,645,146
1993	3,754,621,658	2,951,312,798	803,308,860
	百分比	百分比	百分比
1988~1990	—22.23%	—24.24%	—15.43%
1990~1993	—25.61%	—22.09%	—36.20%
1992~1993	—12.67%	—13.11%	—11.01%
1988~1993	—42.14%	—40.98%	—46.04%

表4 美國1993年空氣釋放量前10名之化學物質

空氣釋放前10名化學物質		釋放量，磅
Toluene	甲苯	177,301,671
Methanol	醇	172,292,981
Ammonia	氨	138,057,165
Acetone	丙酮	125,152,462
Xylene(mixed isomers)	二甲苯	111,189,613
Carbon disulfide	二硫化碳	93,307,239
Methyl ethyl ketone	丁酮	84,814,923
Hydrochloric acid	氫氯酸(鹽酸)	79,073,655
Chlorine	氯	75,410,108
Dichlormethane	二氯甲烷	64,313,211
合 計		1,120,913,128
所有TRI化合物之釋放總量		1,672,127,735

10 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

表5 美國環保署1993年水體排放量前10名之化學物質

水體排放量前10名化學物質		釋放量，磅
Phosphoric acid	磷酸	175,861,627
Ammonia	氨	35,938,643
Sulfuric acid	硫酸	27,542,946
Methanol	甲醇	10,011,681
Ammonium nitrate(solution)	硝酸胺	7,386,387
Ammonium sulfate(solution)	硫酸胺	3,872,980
Ethylene glycol	乙二醇	1,170,533
Zinc compounds	鋅化物	1,046,444
Acetone	丙酮	990,315
Hydrochloric acid	鹽酸	719,541
合 計		264,541,097
所有TRI化物之釋放總量		271,152,864

表6 美國1993年土壤排放前10名之化學物質

土壤排放量前10名化學物質		釋放量，磅
Zinc compounds	鋅化物	67,413,392
Manganese compounds	鎳化物	47,671,055
Copper compounds	銅化物	40,082,409
Phosphoric acid	磷酸	35,491,946
Chromium compounds	鉻化物	22,675,748
Lead compounds	鉛	10,950,924
Zinc(fume of dust)	鋅(粉塵)	10,449,577
Ammonia	氨	10,144,184
Manganese	鎳	6,650,151
Ammonium nitrate(solution)	硝酸胺	6,457,512
合 計		257,986,898
所有TRI化物之釋放總量		289,052,581

表7 美國1993年地下水注入前10名之化學物質

地下水注入前10名化學物質		釋放量，磅
Ammonia	氨	168,725,501
Phosphoric acid	磷酸	145,097,099
Sulfuric acid	硫酸	105,872,094
Ammonium nitrate(solution)	硝酸胺	35,211,208
Methanol	甲醇	27,899,963
Nitric acid	硝酸	19,213,898
Acetonitrile	乙腈	15,707,895
Ammonium sulfate(solution)	硫酸胺	6,189,894
Ethylene glycol	乙二醇	5,943,528
Formaldehyde	甲醛	5,912,425
合 計		533,773,505
所有TRI化物之釋放總量		576,285,233

表8 33/50計畫優先列管之化學物質

Benzene	苯
Cadmium and compounds	鎘及其化物
Carbon terachloride	四氯化碳
Chloroform	氯仿
Chromium and compounds	鉻及其化物
Cyanide compounds	氰化物
Dichloromethane	二氯甲烷
Lead and compounds	鉛及其化物
Mercury and compounds	汞及其化物
Methy ethyl ketone	丁酮
Methyl isobuty ketone	甲基異丁酮
Nickel and compounds	鎳及其化物
Tetrachloroethylene	四氯乙烯
Toluene	甲苯
1,1,1-Trichloroethane	1,1,1,三氯乙烷
Trichlorethylene	三氯乙烯
Xylenes	二甲苯

12 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

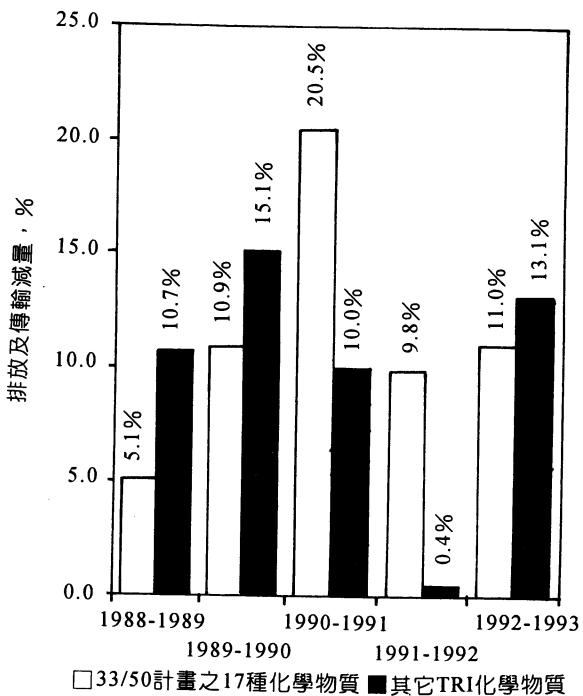


圖4 歷年來33/50計畫之化學物質及其它TRI化學物質排放及傳輸減量

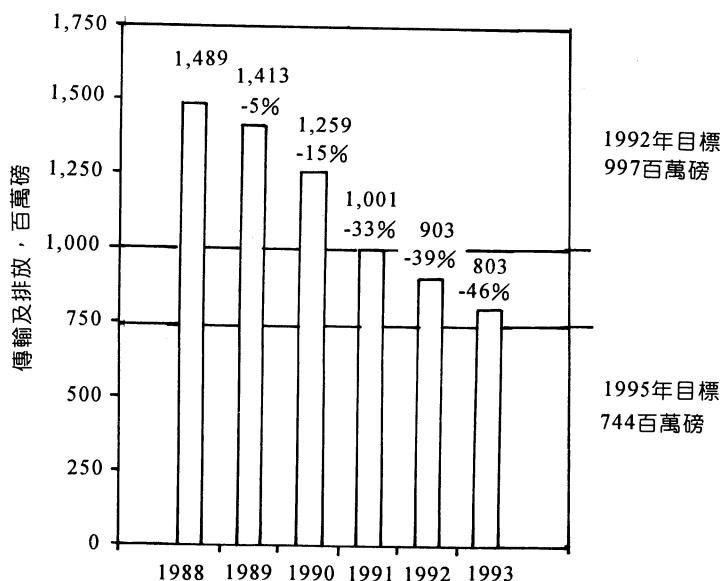


圖5 33/50計畫1988~1993年傳輸及排放量之改變

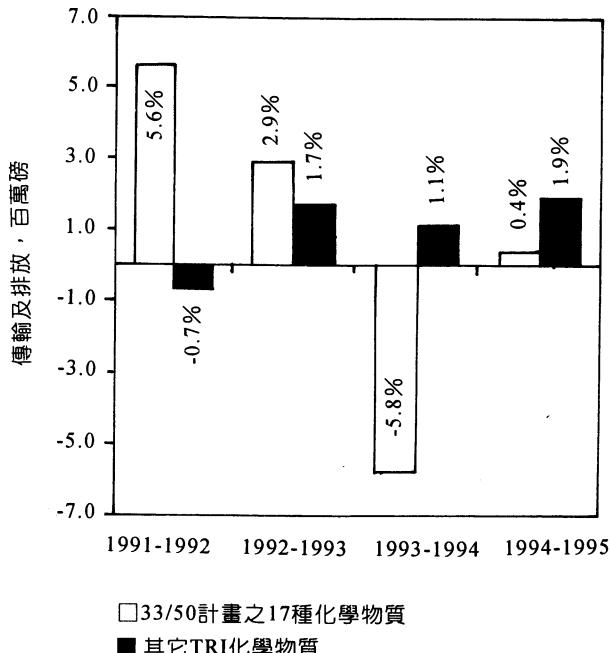


圖6 33/50計畫之化學物質及其它TRI化學物質之廢棄物產生量(1991~1995)

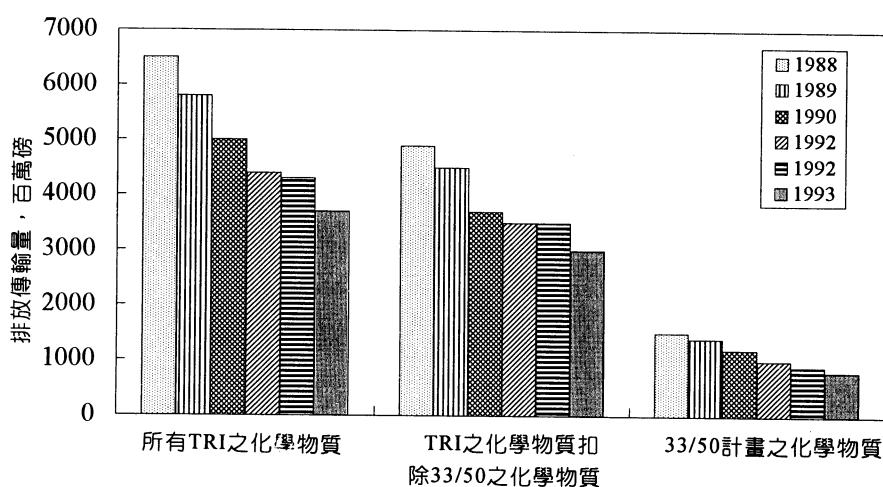


圖7 美國33/50計畫中之17類化學物質與TRI化學物質排放傳輸量之比較(1988~1993)

14 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

33/50計畫中之化學物質在1992至1993年間之排放及傳輸量減少了十億磅(即11%)(圖5)。其中參與33/50計畫之廠場其化學物質排放及傳輸之削減量為20%，未參與該計畫者為0.6%。有關33/50計畫中廢棄物之產生量(圖6)在1992至1993年間雖然有少許的增加(2.9%)，但在1994年卻有5.8%顯著之降低然而其它TRI化學物質之廢棄物產生量則逐年增加。在十七種33/50計畫之優先化學物質中1995年前參與該計畫之廠場廢棄物產生量之削減率為15%，而未參與之廠場其增加量為7%。

圖7及表3則說明了1988年至1993年間美國33/50計畫自願降低排放量之目標公佈後所有TRI化學物質、33/50計畫中之化學物質及TRI(扣除33/50計畫之化學物質)之排放及傳輸量。

3.2 結合地理資訊系統之風險區位設定

美國環保署毒物及污染預防局(即毒管局)發展了化學物質可能造成之健康效應及環境效應之毒性指標這些指標包括，並搜集相關數據證明某化學物質之暴露可能造成一項或多項人體健康效應或環境生態效應，同時將這些指標電腦化，收錄在毒性指標剖析檔內(Toxicity Index Profile TIP)(表9)，此電腦資訊檔與美國環保署地理資訊系統乃為相容之電腦系統，相關的指標可分為健康效應及生態效應兩方面。

表9 毒性指標剖析表

CAS 註冊號	化學物質名稱	潛 在 危 害										毒性指標 點 數	
		健康效應							生態效應				
		C	HG CM	DT	RT	AT	CT	N	ET	B	P		
50-00-0	甲醛	X	X		X	X	X	X	X			7	
51-28-5	2,4二硝基酚			X	X	X	X		X	X		5	
51-75-2	Nitrogen mustard	X	X	X	X	X						5	
51-79-6	脲酯	X											
52-68-6	氯仿			X	X	X	X		X		X	6	
53-96-3	乙醯胺基芴	X										1	
55-18-5	N-硝基代鈉乙基胺	X	X	X	X	X						5	
55-21-0	苯甲醯胺		X									1	

註：如需完整資料請見參考資料2

註：C：致癌性，HGCM：基因突變或遺傳突變性；DT：胚胎毒性；RT：生殖毒性；AT：急毒性；CT：慢毒性；N：神經毒性；ET：環境毒性；P：環境蓄積；B：生物蓄積性

3.2.1 健康效應方面

- 致癌性(C)：可能引起人類癌症或動物致癌性之化學物質（如苯可能造成人類血癌）。
- 基因突變或遺傳突變性(HGCM)：可能造成基因突變或染色體變異而遺傳至下一代之化學物質(如：氟化氫)
- 胚胎毒性(DT)：可能造成胚胎缺陷或流產者（如1,3—丁二烯）。
- 生殖毒性(RT)：有害生殖能力者（如鉛）。
- 急毒性(AT)：經由口、肺、皮膚等短期暴露即能導致死亡之化學物質（如光氣、芥子氣）。
- 慢毒性(CT)：癌症外，對人體如肝、肺、腎等器官可能引起長期之危害者（如四氯化碳）。
- 神經毒性(N)：可能造成腦、脊髓等神經系統危害者，（如汞）。

3.2.2 生態效應方面

- 環境毒性(ET)：化學物質排放至環境中可能造成野生動、植物危害者（如鋸、鋁等）。
- 環境蓄積性(P)：在環境中不易被分解者，而容易蓄積在土壤、污染及地下水中（如：三氯乙烯）。
- 生物蓄積性(B)：進入生物體而不易被代謝出來者，可能經由食物鏈而蓄積（如有機氯農藥）。

美國環保署毒物及污染預防局並依此10項指標將TRI清冊中之化學物質給予1~10之評分，此一評分點數即代表每項化學物質之潛在健康及生態效應之嚴重性（如表9）。

運用毒性指標剖析的方法，足以檢視暴露在TRI清冊那些化物中可能造成人體及生態之不良效應及其嚴重性。而後配合TRI資料庫找出這些化物之排放及傳輸量，並將排放量乘以TIP(毒性指標點數)即可找出每項化學物質之健康、環境效應排序。再將此資料與人口密度對照，即獲得各工廠之風險區位。美國環保署第四分署(美國東南區)結合毒性指標剖析檔與地理資訊系統進行TRI化學

16 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

物質風險區位評估計畫，則有高毒性高排放量之化學物質其地理區位剛好在人口密度最高之區域之結果。此一結果足以做為毒化物風險管理之參考。

美國環保署第四分署進行之TRI化學物質排放風險區位設定為例，依排放紀錄其1987~1989，3年之環境排放總量（排放至空氣、土壤、水體等環境介質）。為30億磅以上，排放至都市污水下水道系統(Publicly Owned Treatment Works, POTWs)場址外之廢棄物則超過10億磅以上(圖8)，圖9則標示出此區TRI化學物質總排放量前25名之場廠，依地理資訊圖所示，總排放量高之場廠其人口密度亦較高，換言之毒化物總排放及傳輸多近人口密度高之地區。此一資訊足以提供作為風險效應之篩檢，因風險評估者對評估高濃度污染物及高人口密度之地理區都較具興趣。

圖10至圖13則為暴露至化學物質引起不良效應之風險區位圖，圖中顏色深者，表排放濃度愈高，亦為易引起不良健康及生態健康效應之地理區。此一區位之界定有助於風險管理者之風險政策決策。

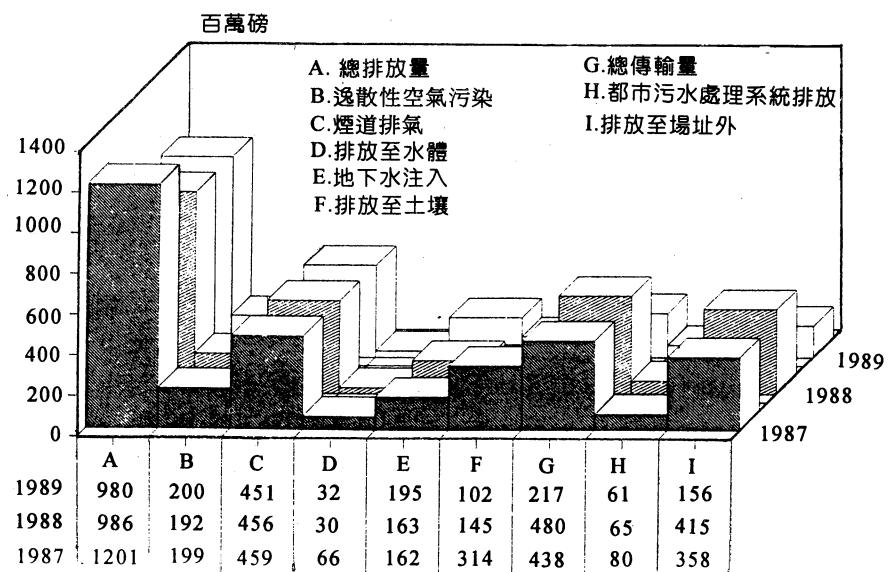


圖8 美國環保署第四分署廠場排放及傳輸量

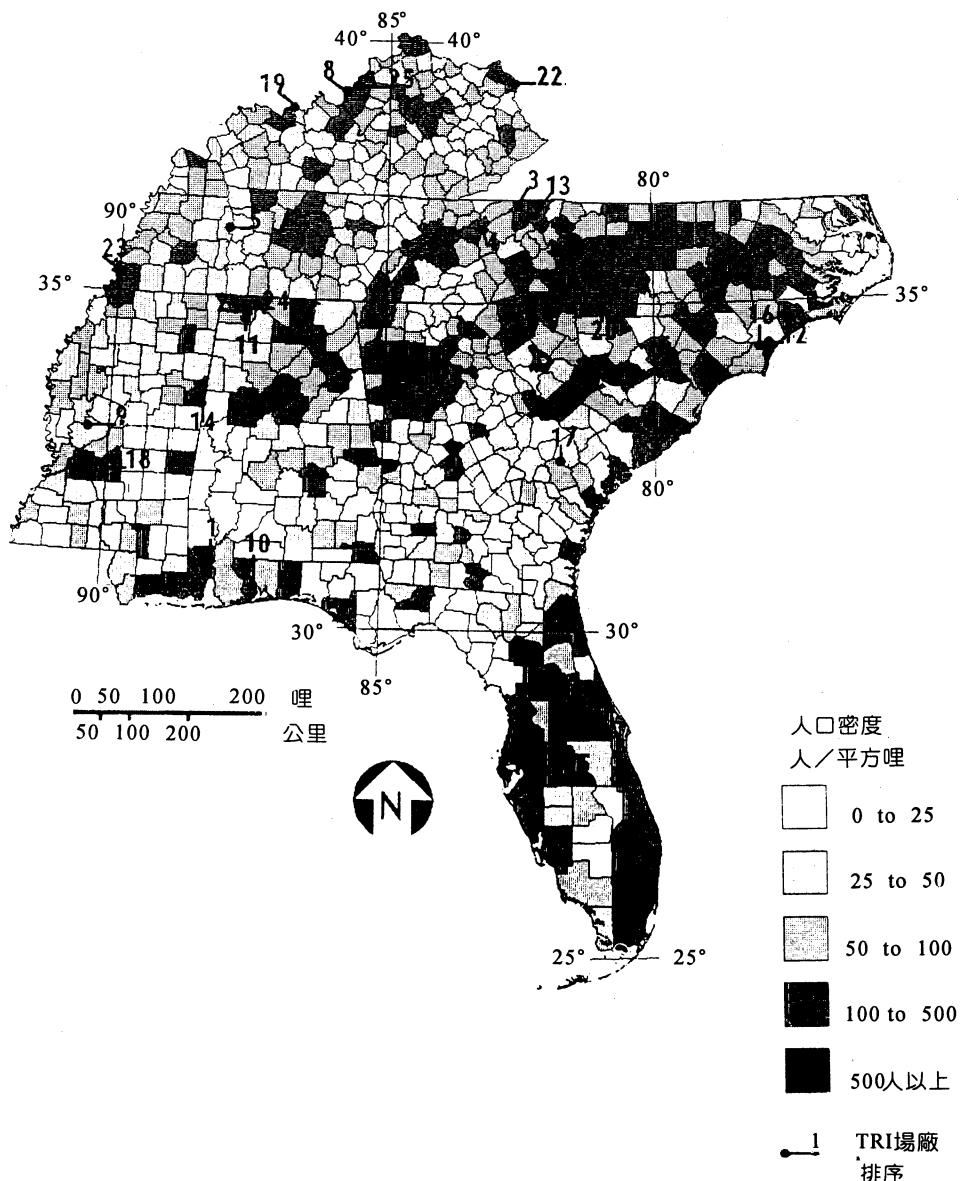


圖9 美國環保署第四分署TRI化學物質場廠排放量及附近人口密度(依1980年普查)

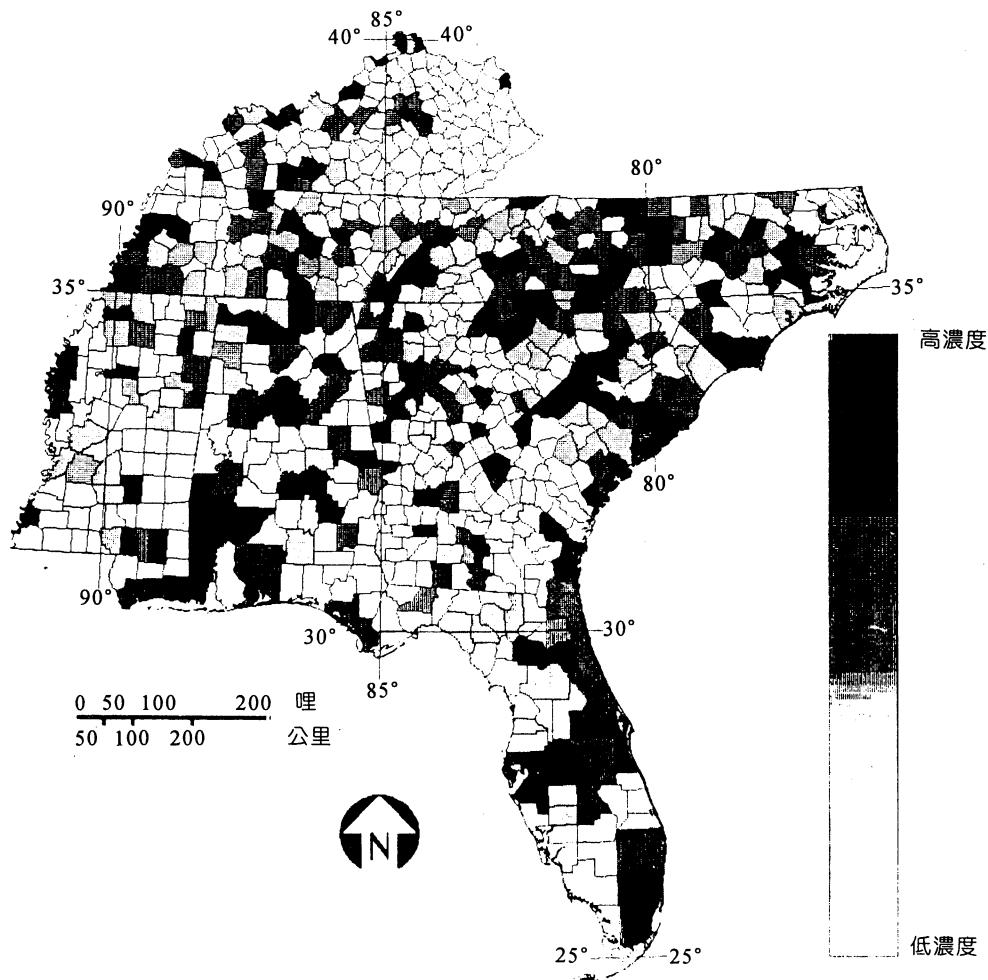


圖10 美國環保署第四分署致癌物排放圖

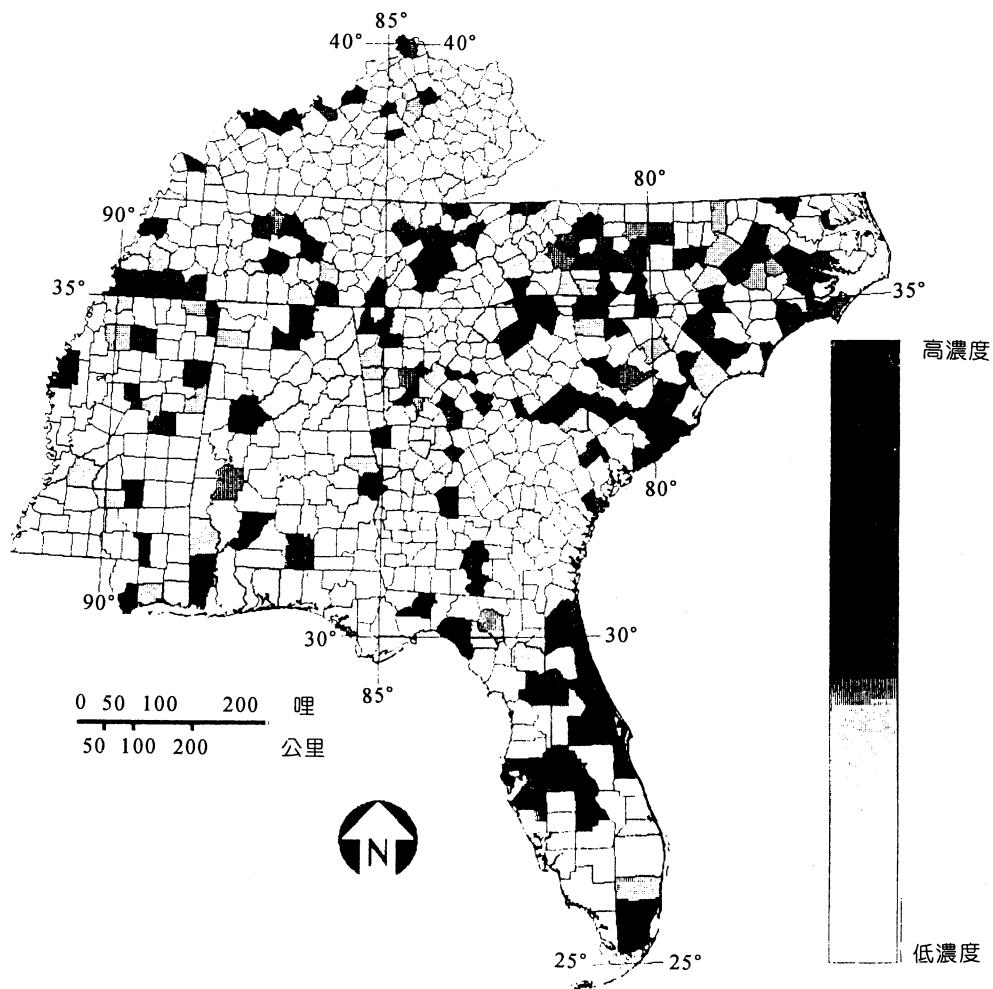


圖11 美國環保署第四分署致基因及染色體突變物質排放圖

20 毒物風險管理之設計—化學物質釋放資料之應用

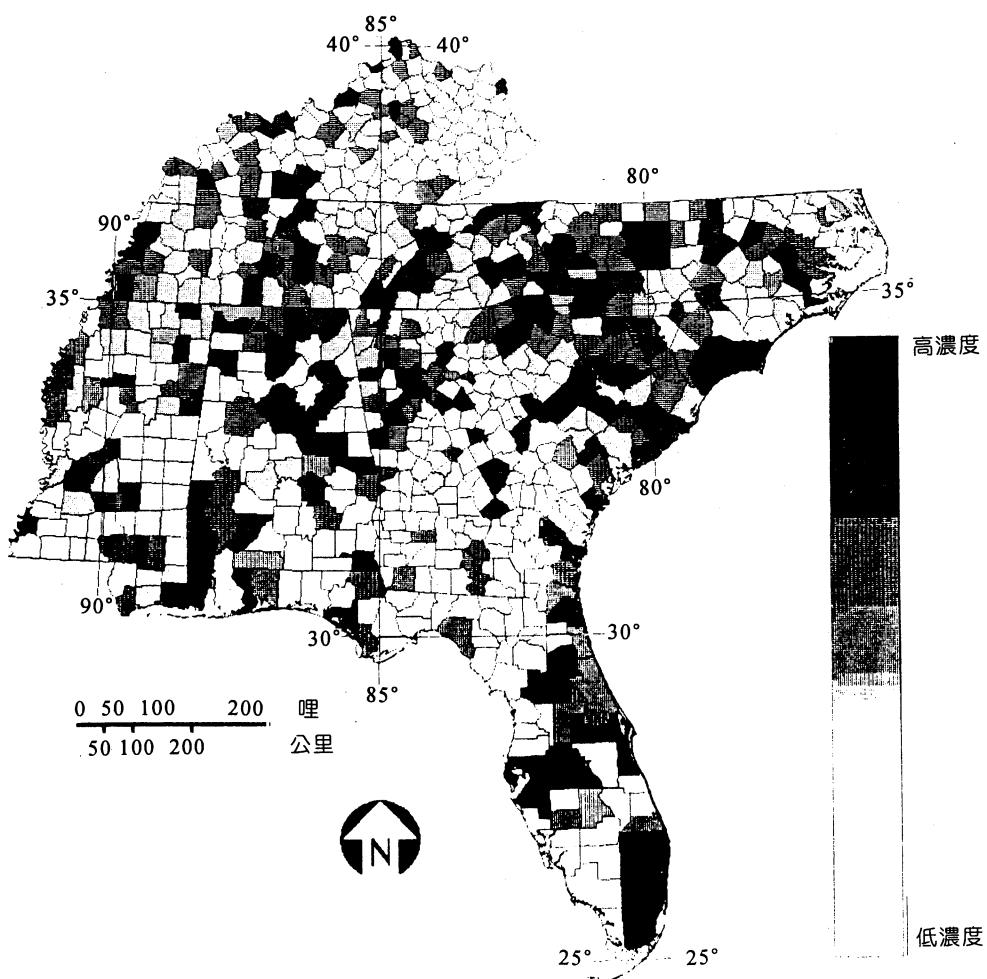


圖12 美國環保署第四分署致胚胎毒性物質排放圖

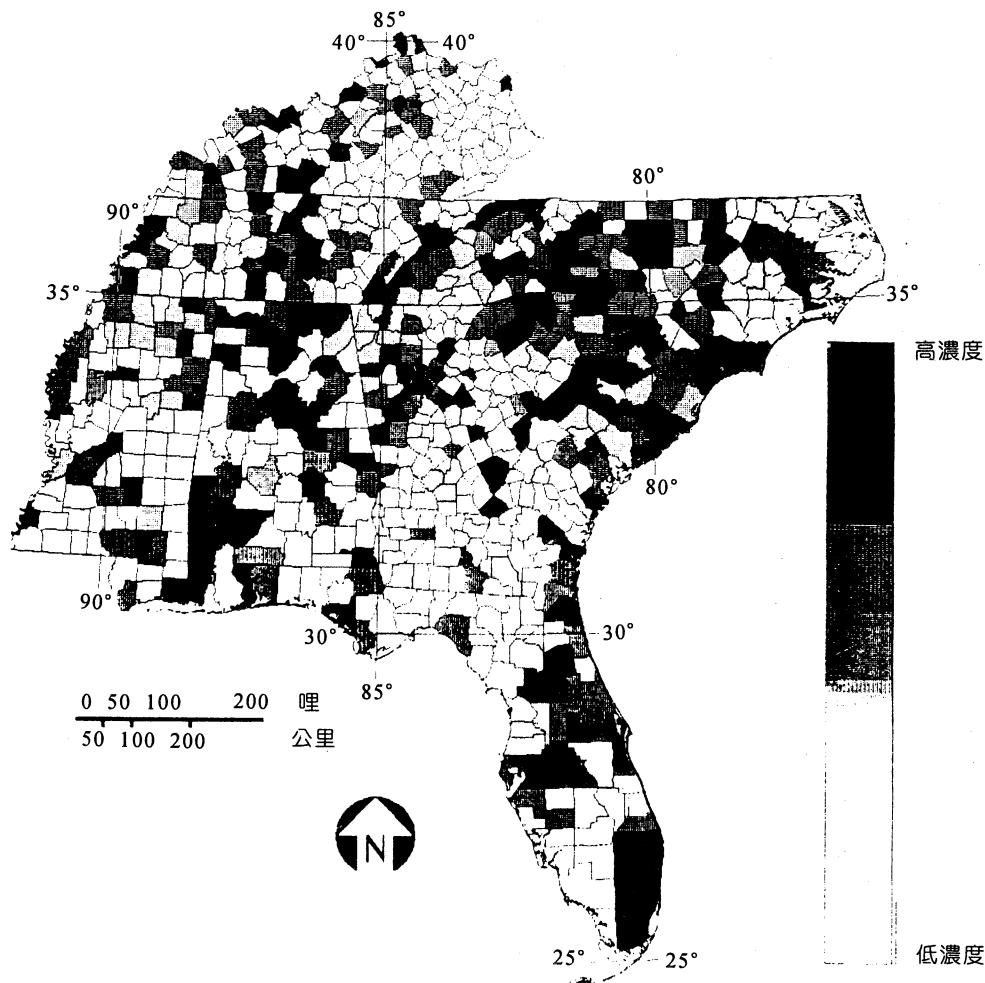


圖13 美國環保署第四分署致生育毒性物質排放圖

四、結論與建議

毒性化學物質排放清冊之建立並非一件容易的事，此一龐大的資料庫建立除要有良好之制度設計外，更要有工廠的配合。但此份排放清冊乃是檢視污染物排放至環境之基本數據，並藉此並足以評估可能帶來的潛在問題及風險，以

22 毒物風險管理之設計－化學物質釋放資料之應用

作為來源減量、污染預防及風險管理政策訂定之參考。排放清冊之資訊雖然無法直接代表人體或環境之暴露風險及不良效應，但結合其它風險評估因子，如毒性、吸收量、人口密度及特性等便容易評估出特定風險區位。

毒性化學物質排放清冊，應具準確性、可靠性及可用性，由申報工廠行業別開始考量，申報之毒性化學物質應具之特性，申報之排放及傳輸項目等都應有明確之定義，其它可能影響排放及傳輸資料品質之因素亦應列入設計時之考量。排放量及傳輸量變化趨勢，可以反映整個毒物管理成效趨勢，而來源減量污染預防工作之推動，測量方法之改變及製程、產品之改變都可能反映在排放量（及傳輸量）之變化趨勢上，因此在趨勢分析上應作此考量。

總之，化學物質釋放資料之建立為一複雜困難、昂貴的工作，但在化學物質使用頻繁之際，為有效做好污染預防、降低環境風險或許我們可以說不能逐步建立此一釋放資料，化學物質之管理將是更困難更昂貴的工作。

五、參考資料

- 1.Gwen J. Riley, John L. Warren, and Eun-Sook Goidel, "Assessment of Changes in Reported TRI Releases and Transfers between 1989 and 1990", J of Air & Waste Management, Vol 44, p769-772, 1994.
- 2.John R. Stockwell, Jerome W. Sorensen, James W. Eckert, Jr., and Edward M. Carreras, " The U.S. EPA Geographic Information System for Mapping Environmental Release of Toxic Chemical Release Inventory (TRI) Chemicals", Risk Analysis, Vol. 13 No. 2,p155-164,1993.
- 3.Office of Pollution Prevention and Toxics, USEPA, "1993 Toxics Release Inventory Public Data Release Executive Summary", EPA 754-S-95-001, 1995.
- 4.Office of Pollution Prevention and Toxics, USEPA, "1993 Toxics Release Inventory Public Data Release State Fact Sheets", EPA 745-F-95-002,1995.
- 5.Office of Pollution Prevention and Toxics, USEPA, "1993 Toxics Release Inventory Public Data Release State Fact Sheets", EPA 745-F-95-010,1995.