

重新評估戴奧辛健康危害及管制策略

簡慧貞* 阮國棟**

摘要

美國環保署集合100位以上署內外專家學者，費時3年，針對戴奧辛類化合物進行重新評估，於1994年9月13日公布近2,000頁之報告，要求世界各地民眾，在未來4個月內提供更多數據，再由美國環保署科學顧問委員會於1995年初進行最後的科學審查工作。2,000頁的重新評估報告分成6冊，包括2,3,7,8-TCDD及其相關化合物的健康評估（性質、藥物動力學、毒性作用機制、急性亞急性及慢性毒性、免疫毒性影響、生殖毒性、動物致癌性、人類流行病學資料、劑量效應關係、風險特性評估），以及戴奧辛類化合物之暴露推估（來源及暴露途徑、背景暴露情況、暴露情境、特異場址之評估步驟）二大部份。本文從科學評估及政策管理角度，評析美國環保署重新評估戴奧辛類化合物所做的努力，全文分三部分：介紹重新評估之沿革及程序、重新評估之科學見解及重點結論、以及美國環保署正進行的立法管制計畫。

【關鍵字】

1. 戴奧辛類化合物(dioxin-like compounds)
2. 排放估計值(emission estimates)
3. 現存排放(current emission)
4. 過去排放 (past emission)

*行政院環保署環境衛生及毒物管理處技正

**行政院環保署水質保護處處長

一、重新評估之沿革及步驟

- 1.1985年美國環保署完成了2,3,7,8-TCDD之風險評估，在此一評估報告中發現2,3,7,8-TCDD為一可能之人類致癌物(probable human carcinogen)，相當於美國環保署致癌物分類B₁。
- 2.1988年美國環保署預備重新評估暴露在環境中戴奧辛之人體健康風險草案，同時也預備一份特定場址暴露在戴奧辛類化合物暴露評估手稿。這些風險評估手稿同時也由美國環保署科學顧問委員會(SAB)來審查。委員會審查建議在戴奧辛風險評估步驟中應持續加強劑量效應評估分析方法。美國環保署接受此一建議，在目前的重新評估方案中發展更新之劑量效應評估方法。
- 3.1991年4月，美國環保署正式宣布必須要對暴露至戴奧辛及戴奧辛類化合物之健康風險作科學性之重新評估，美國環保署認為此一重新評估對戴奧辛之毒理機制，人類致癌潛勢及其它健康不良效應之了解將有顯著之幫助。此一重新評估也促進了基於研究及科學作為考量作政策決策之依據的最終目標。
- 4.美國環保署對戴奧辛重新評估之每一程序都採公開參與之過程，包括以下的活動設計：
 - (1)1991年11月15日及1992年4月28日分別舉行二次公開會議來告知大眾有關美國環保署對重新評估戴奧辛之計畫及相關活動，聽取並接受大眾的建議及任何最新的，科學性的相關資訊。
 - (2)1992年秋天美國環保署舉辦了二次評審討論會評審初稿及工作進度。第一次評審討論會在1992年9月10日及11日評審評估之初稿，第二次在1992年9月22日、23日評審健康風險評估之八章文獻，在同年9月24日、25日並舉辦了一個特別的討論會由前二次之評審專家共同參與，要求這些專家訂出風險度推估準則及相關要件之手稿。
 - (3)1993年9月7日、8日舉辦了第三個評審討論會，討論已增修之流行病學及人類數據之相關章節。
 - (4)1994年春天及夏天，美國環保署聯邦政府中的專家評審了重估戴奧辛之修正手稿之所有章節，並由美國環保署、農業部(USDA)、HHS等單位專家所組成之討論小組，十分細心地評審風險度推估章節。

5.1995年，初稿報告交由SAB來評審並將根據SAB之評審及建議作最後之修訂，期望能在1995年秋天能完成並公布戴奧辛重新評估報告。

二、重新評估之科學見解及重要結論

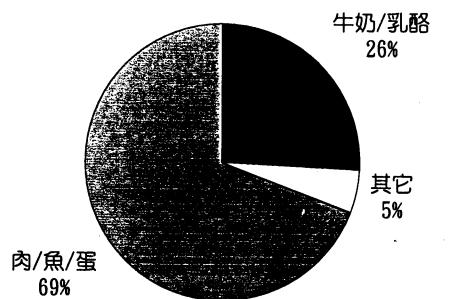
2.1 暴露來源

在暴露評估研究中提供了戴奧辛及其類化合物在美國的產生源調查，戴奧辛主要由四個工業操作產生：燃燒、焚化、化學製程、工業／城市操作過程。戴奧辛及其類化合物在生物組織中（特別是動物）有極強之持續性及累積性，因此人類暴露之主要途徑乃是經由攝食含有微量戴奧辛所致，導致一般廣大族群皆暴露至低濃度之戴奧辛。而特定族群可能因為接近污染源或飲食習慣(dietary practices)而增加額外暴露。在美國境內環境及食物中戴奧辛及其類化合物之濃度測量，乃根據極少數樣品之採樣測量，自有其不確定性，但與加拿大及西歐國家之測量結果似乎一致。此等工業國家測量出戴奧辛濃度之一致性是相當合理的，而搜集更多的資料來降低美國所測量出環境及食物中戴奧辛濃度之不確定性更是十分重要，這些資料之搜集目前也正由美國環保署，藥物食品局及農業部(USDA)進行中。

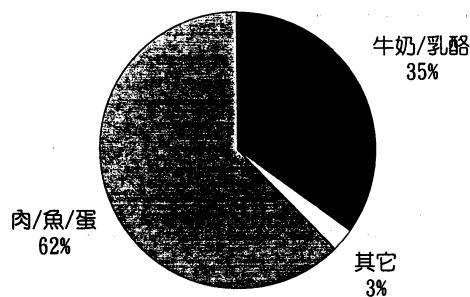
2.2 流布途徑

在新的評估報告指出，戴奧辛及其類化合物進入食物鏈之初級機制乃藉由大氣沉降。戴奧辛及其類化合物經由空氣排放直接或間接進入大氣（如由土地或水中之揮發），戴奧辛可能直接沉降在植物或土壤上。但存疑的是到底大氣沉降為傳遞各介質中戴奧辛及其類化合物至大氣中之初級機轉（現排放貢獻）或為環境中既存及再循環戴奧辛及其類化合物之過去排放效應。

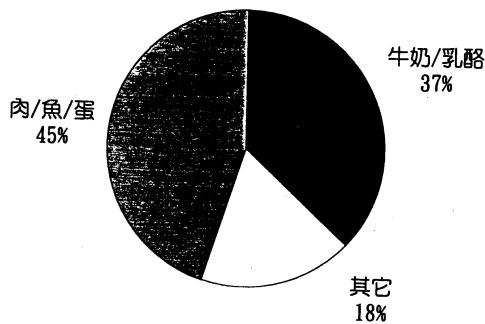
明瞭此二情境之相關，對於了解個別點污染源中此類化合物在食物鏈之相對貢獻值及以現在排放(current emission)及過去排放(past emission)著手來評估降低戴奧辛暴露之有效控制策略是十分重要的（圖1至5）。



北美(每天119pg)⁽¹⁾



德國(每天79pg)⁽²⁾



荷蘭(每天117pg)⁽³⁾

(1)根據現存排放估計

(2)根據Furst等估計

(3)根據Theelen(1991)估計

圖1 北美、德國、荷蘭TCDD毒性當量暴露背景濃度比較圖

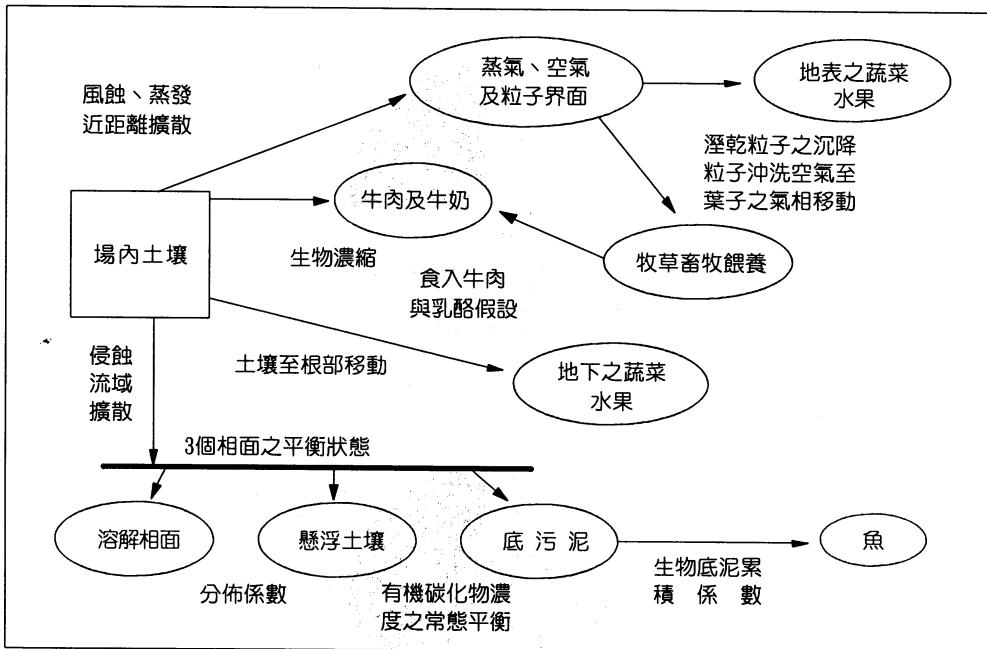


圖2 場內污染源之環境宿命傳輸及轉換關係圖

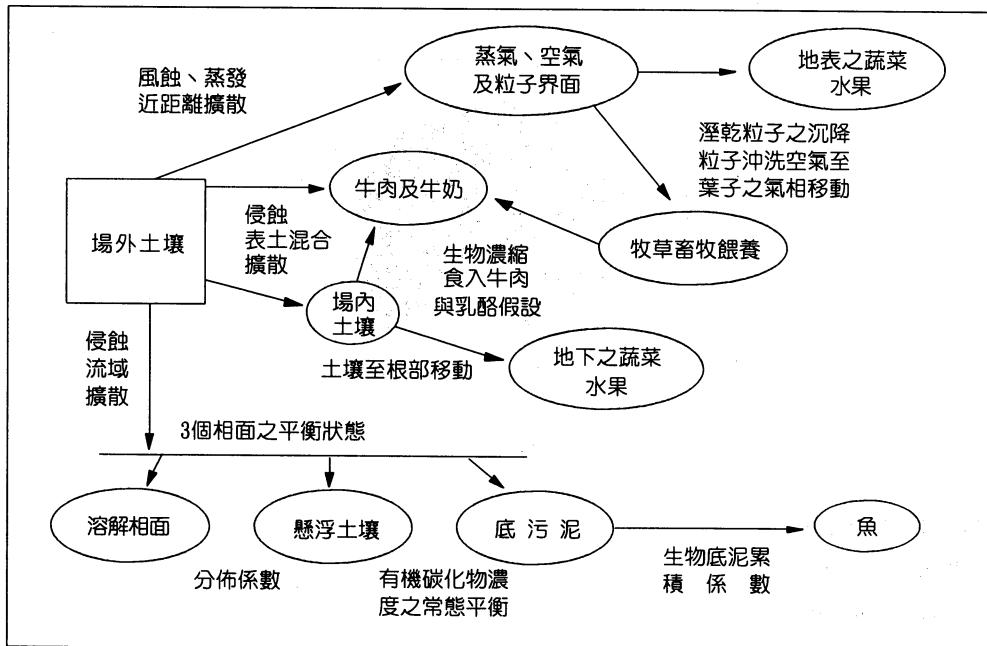


圖3 場外污染源之宿命傳輸及轉換關係圖

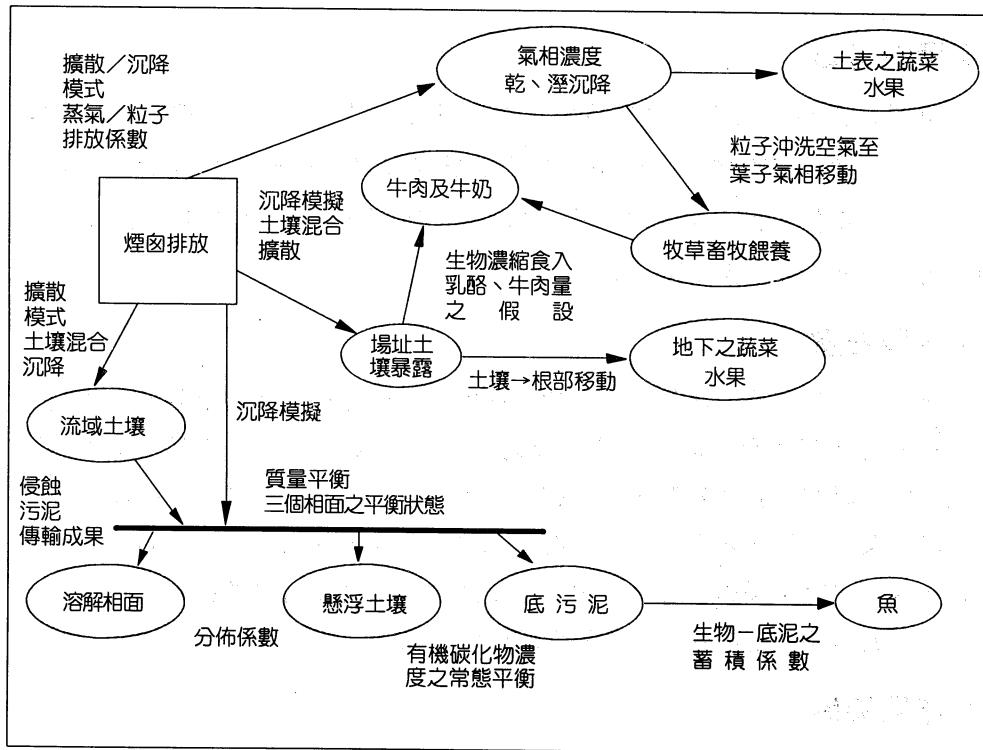


圖 4 煙囉排放源之環境宿命傳輸及轉換關係圖

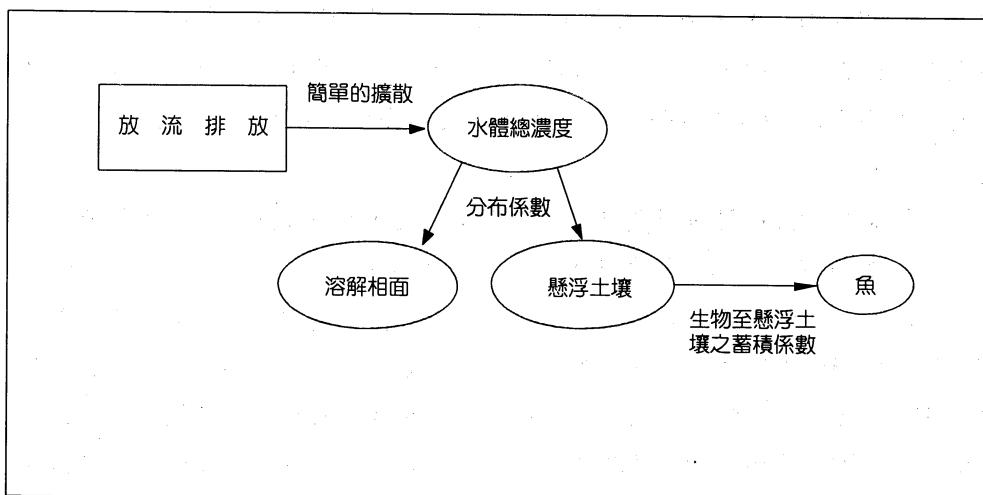


圖 5 放流排放污染源

2.3 毒性當量

重新報告中，戴奧辛及其類化合物之濃度則以2,3,7,8-TCDD當量(TEQs)表示，2,3,7,8-TCDD為研究此類化合物之最佳代表，亦為毒性當量之參考化物，在此一重估報告中也討論以毒性當量(TEQs)毒性當量係數(TEF)計量毒性強、弱之不確定性（表1至4）。

2.4 背景暴露

除了一般族群的暴露外，某些特定個體或族群亦可能暴露至戴奧辛類化合物，這些特定暴露例如聯業暴露，當地居民之直接或間接暴露至不連續污染源、嬰兒因母體哺乳而暴露，或暴露至食用或娛樂用魚類，經由這些暴露途徑之族群其濃度可能顯著高於一般族群，如果只是簡單的用每日平均攝入量來評估此次族群之終生暴露濃度，則會忽略了此次族群高暴露之潛在效應，特別是對於特定暴露期間是發生在成長教育階段的小孩。

2.5 作用機制

此份重估報告結論指出戴奧辛類化合物對脊椎動物之一列系生物作用機制。此一作用機制乃是一生化，細胞及組織層次之生化轉換，其第一步驟為戴奧辛類化物藉由「Ah受器」嵌合在細胞蛋白上，與Ah受器的嵌合乃是戴奧辛效應之必需條件，但並不是充分條件，但它能誘發一連串的反應。此效應的誘發乃是暴露至2,3,7,8-TCDD或其它具有Ah受器嵌合性質及結構相似之類化合物所引起的。

生物系統對累積暴露至戴奧辛類化合物之反應，較暴露至單一類戴奧辛類化物之反應為強，以目前對戴奧辛作用機制的了解Ah受器與細胞蛋白的交互作用是必要的，而在適當的劑量下，人體將產生在動物實驗中所證實的所有效應，當然物種與物種間，不同個體組織間是有變異的。重估報告同時也發現有足夠的證據（包括人體及動物實驗）推論只要暴露至戴奧辛及其類化合物之劑量足夠，人體可能產生極廣泛的效應。生化及細胞的機制改變在極低的暴露量即可產生，而在高濃度不良效應產生的仍有其不確定性及爭議。

表1 空氣中CDD及CDF之排放估計值

排 放 源	西德 (g TEQ/yr)	奧地利 (g TEQ/yr)	英國 (g TEQ/yr)	荷蘭 (g TEQ/yr)	瑞士 (g TEQ/yr)	美國 (g TEQ/yr)
工業／城市過程	4				1.5	2.7
• 造紙業	0.01~1.1	<1		0.3		23
汙泥焚化				0.5		
化學製程／製程來源						
• 有機化物製造	5.4~43.2	3	1,150	382	90~150	3,000
燃媒及焚化來源						
• 都市廢棄物焚化	0.5~7.2	6	11	16	<1	35
• 有害廢棄物焚化	5.4	4	32	2.1	2~3	5,100
醫療廢棄物焚化						350
石灰室						0.3
冶金過程						
• 輪胎燃燒						
精煉鐵金屬	1.3~18.9	19		30	6~16	
精煉金屬鉛回收	38~380					230
廢棄金屬線回收				1.5		
桶回收					2.14 ^a	1.7
電力／能源產生	7.2	<1 ^c	613 ^a	7.0 ^a		
• 合金						
汽機車燃料燃燒－無鉛	0.8					1.3
汽機車燃料燃燒－柴油	4.6					85
木材燃燒		70	16	12		40°
煤燃燒－居家用途	1.1	<1	989	3.7		230°
煤燃燒－工業用途				301		
煤燃燒－供用事業				199		
油品燃燒－居家用途	1.2			2 ^b		
木炭，櫟球，燃燒－居家用途	1.8					
合 计	67~926	<109	3,870	484	100~200	9,200

[註] a.所有燃料總合；b：每年2g TEQ；c：居家用途木材燃燒

表 2 a. CDD/CDF 多介質排放估計(美國現階資料)

排 放 源	空 气				水				土 壤				中 之 毒 性				當 量 品			
	低	中	高	CR ^a	低	中	高	CR ^a	低	中	高	CR ^a	低	中	高	CR ^a	低	中	高	CR ^a
工業／城市過程 •漂白紙業					74	110	150	H/H	71	100	140	H/H	110	150	210	H/H				
代處理業									150	210	290	H/H	2.5	3.6	5	H/H				
化學製造／製程／使用原料 氯酚					NEG	NEG	NEG	—	NEG	NEG	NEG	—								
氯苯					NEG	NEG	NEG	—	NEG	NEG	NEG	—								
氯化脂肪族化合物					NEG	NEG	NEG	—												
二號染料																				
農藥																				
燃燒及焚化源 •焚化／能源回收 •都市廢棄物焚化	1,300	3,000	6,700	H/M	NEG	NEG	NEG	—	810	1,800	4,000	M/M	NA	NA	NA	—				
有害廢棄物焚化	1.1	3.5	110	M/L	NEG	NEG	NEG	—					NA	NA	NA	NA				
醫療廢棄物焚化	1,600	5,100	16,00	M/L	NEG	NEG	NEG	—					NA	NA	NA	NA				
污泥焚化	0.9	2.7	4.3	H/M	NEG	NEG	NEG	—					NA	NA	NA	NA				
污泥焚化	10	23	52	M/L	NEG	NEG	NEG	—					NA	NA	NA	NA				
碳重反應爐	0.06	0.1	0.3	L/M	NEG	NEG	NEG	—	NA	NA	NA	—	NA	NA	NA	—				
石灰窯	110	350	1,100	H/L					7.8	24	78	H/L								
冶金過程													NEG	NEG	NEG	—				
精煉銅金屬	74	230	740	H/L									NEG	NEG	NEG	—				
精煉金屬鉛回收	0.7	1.6	3.5	M/M									NEG	NEG	NEG	—				
廢棄金屬線回收	NEG	NEG	NEG	—	NEG	NEG	NEG	—	NEG	NEG	NEG	—	NEG	NEG	NEG	—				
桶回收	0.5	1.7	5.4	L/L									NEG	NEG	NEG	—				

表2b. CDD/CDF多介質排放估計(美國現階段資料)

排 放 源	排 放 至 介 質 中 之 毒 性 當 量						產 品				CR ^a	
	空 氣			水			土 壤 /	掩 埋 廢	低	中	高	
低	中	高	CR ^a	低	中	高	CR ^a	低	中	高	CR ^a	
電子／能源產生 • 輪胎燃燒	0.1	0.3	1	H/L					NA	NA	NA	-
汽機車燃料燃燒－鉛				NA	NA	NA	-	NA	NA	NA	NA	-
汽機車燃料燃燒－無鉛	0.4	1.3	4.1	H/L	NA	NA	-	NA	NA	NA	NA	-
汽機車燃料燃燒－柴油	27	85	270	H/L	NA	NA	-	NA	NA	NA	NA	-
燃燒木材－居家用途	13	40	63	H/M	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
燃燒木材－工業用途	100	320	1,000	H/L					NA	NA	NA	-
燃燒木材－居家用途				NA	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
燃燒木材－工業用途				NA	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
燃燒木材－公共用途				NA	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
燃燒木材－居家用途				NA	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
木炭、煤球、燃燒－居家用				NA	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
保育來源 • 五氯酚表面處理												
森林火災	27	86	270	M/L	NA	NA	-		NA	NA	NA	-
合 計	3,300	9,300	26,00		74	110	150	1,000	2,100	4,500	110	150
											220	

a.CR : 信賴率 Confidence rating ENG:Expected to be negligible或不存在 NA:not applicable 空白 : 資料不足

表3 CDD/F在美國食物內之濃度(pg/g 新鮮食物)

食物	平均毒性當量 ND=0.5DL	平均毒性當量 ND=zero	樣本數	參考資料來源
牛肉	0.48	0.29	14	Stanley & Bauer (1989). Lafleur et al. (1990). Schechter et al. (1993)
豬肉	0.26	0.1	12	Stanley & Bauer (1989). Lafleur et al. (1990). Schechter et al. (1993)
雞肉	0.19	0.07	9	Stanley & Bauer (1989). Schechter et al. (1993).
蛋	0.13	0.0004	8	Stanley & Bauer (1989).
乳酪	0.36	0.35	5	Schechter et al. (1993)
牛奶	0.07	0	2	EPA. 1991b
魚	1.2	0.59	60	EPA. 1992

ND-Nondetect ; DL-Detection Limit

表4 CDD/F在環境介質及食物中濃度

介質 (TEQ)	北 美	歐 洲
土壤 ppt	7.96 ± 5.70 (n= 95)	8.69 (n= 133)
污泥 ppt	3.91 (n= 7)	34.89 (n= 20)
魚 ppt	1.16 ± 1.21 (n= 60)	0.92 (n= 18)
空氣 Pg/m ³	0.0949±0.24 (n= 84)	0.108 (n= 454)
水 ppq	0.0056±0.0079 (n=214)	NDA
牛奶 ppt	0.07.d (n= 2)	0.05 (n= 168)
ppt	0.36 ± 0.29 (n= 5)	0.08 (n= 10)
蛋 ppt	0.135 ± 0.119 (n= 8)	0.152 (n= 1)
牛肉 ppt	0.48 ± 0.99 (n= 14)	0.32i,0.61 (n= 7)
豬肉 ppt	0.26 ± 0.13 (n= 12)	<0.06 (n= 3)
雞肉 ppt	0.19 ± 0.29 (n= 9)	0.21 (n= 2)

NDA:no data available

三、美國正在進行戴奧辛類化合物的立法管制工作

3.1 清淨空氣計畫

1994年9月1日美國環保署Browner署長宣布擬訂中之都市廢棄物焚化爐之污染源空氣品質排放標準，都市廢棄物焚化爐為全國排放戴奧辛之第二大污染源僅次於醫療廢棄物焚化爐。此份擬訂計畫乃以科技為導向所制訂之標準，能將目前180座都市廢棄物焚化爐中戴奧辛排放量之去除率由95%提升至99%，新建的焚化爐戴奧辛排放之去除率將提升至99%以上，舊焚化爐有3年的改善期而新焚化爐則立即需焚化爐的操作者共同合作以確保提供減少排放量。

美國環保署將在1995年2月以前針對醫療廢棄物焚化爐擬訂類似的法令，並在1995年4月前完成法令標準，美國境內共有5,000座醫療廢棄物焚化爐，對已知的戴奧辛排放源而言其排放總量占了每年戴奧辛排放量貢獻值的第一位，但個別而言由醫療廢棄物焚化爐排放量相對的是較少，一旦法令徹底執行，都市及醫療廢棄物焚化爐戴奧辛排放量將占全國每年總排放量之少部份，美國環保署在1990年空氣清淨修正法中亦執行了以新科技為基礎之170種工業空氣毒物之管制，而戴奧辛及呋喃則是此170類中最重要的污染物，這些管制標準，將對排放之控制有所幫助。

3.2 有害廢棄物管制計畫

有害廢棄物之焚化可能因為燃燒含有戴奧辛之廢棄物或其它廢棄物之不完全燃燒而產生戴奧辛的排放，美國環保署之有害廢棄物管制計畫即針對有害廢棄物焚化可能產生之所有排放物進行管制。

1993年5月美國環保署長Browner公布了有害廢棄物燃燒爐之排放標準計畫，此一計畫包括對焚化爐、汽鍋爐及工業熔爐之管制，此計畫的執行可降低有害廢棄物燃燒爐之排放量去除率由94%至97%。計畫將在1995年9月擬定，1996年12月公布。

3.3 清潔水質計畫

美國環保署已執行清潔水質計畫，此計畫乃基於發展造紙業放流技術準則，來限制戴奧辛污染物排放至水體之活動計畫。

1993年10月Browner署長擬定了紙漿及造紙業放流標準，並認定造紙業中紙漿的漂白為產生戴奧辛的主要原因，在擬定的放流準則中並要求使用最佳可得技術，而此技術改變了傳統之漂白過程。

1984年美國環保署建議2,3,7,8-TCDD水體水質標準。此一標準乃根據百萬分之一之致癌風險來制定。

1993年4月Browner署長亦擬提了大湖水體水質指南，此一指南所訂之2,3,7,8-TCDD水質標準，可保護人體及野生動物。

3.4 飲用水管制計畫

1992年7月17日美國環保署發表了飲用水中2,3,7,8-TCDD之水質標準，其最大污染濃度(maximum contaminant level, MCL)容許標準每公升水體為 3×10^{-8} 毫克(mg/L)，此一容許標準為目前實驗技術所能偵測出精度及準度之最低偵測值，美國環保署並認為活性碳粒子處理法為能達到戴奧辛標準之最佳處理技術。

3.5 超級基金計畫

美國環保署認為，在超級基金長期復原時程之國家優先名單(National Priorities List, NPL)中所列的24個廢棄場址中戴奧辛是主要的污染物，同時美國環保署也將戴奧辛列為是50個應立即清除處理之國家優先污染場址名單中的重要污染物。

超級基金計畫包括農藥、中西部農場戴奧辛之不當棄置，Neward農藥製造廠附近被戴奧辛污染的街道、及土壤污染等之復原清除計畫。

超級基金場址內有害物質的焚化，不論是否含有戴奧辛或其它氯化物之污染，其不完全燃燒皆會產生戴奧辛排放。

3.6 農藥及毒物管制計畫

在1970及1980年早期，除草劑中含戴奧辛而引起戴奧辛被聯邦政府的注意，此後美國環保署便開始審查農藥製程中是否有戴奧辛／呋喃的產生。1987年美國環保署針對製造農藥之161種混合物的特定資料進行審查，同時排除了其中140種不含也不會產生戴奧辛／呋喃之混合物，其它的21種，有二種在製程中會產生可被偵測的戴奧辛／呋喃，但此濃度值在管制標準之下，另二種在製程可被偵測到戴奧辛／呋喃之混合物其毒物效應仍在審查中，至於其它的17種混合物美國環保署將在1996年前完成審查。

對於新農藥的管制，美國環保署皆評估其化性，以確保能篩選出是否含有戴奧辛／呋喃。美國環保署同時也關心上市的化學品其中是否被戴奧辛污染的問題，在1987年美國環保署根據毒性化學物質管理法要求，對可能產生戴奧辛污染之60種化學物質及先驅化學物質應提交相關資料的規定，公布了戴奧辛／呋喃之測試準則。經測試後發現這些化學物質當中，有一種含氯殺蟲劑及三種含溴之抗燃劑含有戴奧辛的污染物，並協議降低chlornil殺蟲劑之製程及進口產品中所含戴奧辛之濃度，而環保署正即評估含溴抗燃劑引起的風險。

1989年美國環保署評估了新化學物質管制計畫中要求提交之可能有戴奧辛污染之新化學物質報告，至目前為止，已測試了三種新化學物質（皆未上市），並駁回了10種新化學物質。

四、結語

美國環保署標榜是科學的署，環境問題的風險管理，亦係以科學為基礎的風險評估所得資訊做為決策系統參考依據。

戴奧辛的危害及管制問題，透過食物鏈及環境蓄積，是世界各地均要面臨的新興問題，面對過去資訊不足，美國環保署不惜巨資、不畏艱難，為風險管理立下良好模式。國內正在建立戴奧辛檢驗能力，顯示已相當重視此一問題，目前2,000頁的重新評估報告，以及1995年底完成的最後報告，均將我們參考應用的最佳資訊材料。

參考文獻

1. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds Vol. 1: Executive Summary, EPA/600/6-88/005Ca June., 1994.
2. United States Environmental Protection Agency, Communications, Education, and Public Affairs (1700) Sep. 1994.