

# 嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

計畫名稱

地下水與土壤污染之健康風險評估

計畫類別：個別型計畫                      整合型計畫

計畫編號：CNEM9303

執行期間：93年1月1日至93年12月31日

計畫主持人：盧明俊

共同主持人：

計畫參與人員：

執行單位：嘉南藥理科技大學環境資源管理系

中華民國九十四年二月二十五日

# 嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

## 地下水與土壤污染之健康風險評估

計畫編號：CNEM 9303

執行期限：93 年 1 月 1 日至 93 年 12 月 31 日

主持人：嘉南藥理科技大學環境資源管理系

### 一、摘要

本文是一篇實際的研究案例，污染場址位於台南縣與高雄縣交界處二仁溪旁的鄉村，主要污染來源為散佈於鄉境內的小型工廠，其中主要之污染物砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅等物質；本文的指標污染物為「砷」。

本文的評估方法是用 McKone & Daniels ' 91 model，暴露途徑為直接食用、空氣吸入及飲用水等，結果顯示，與 US EPA-SSLs 所訂風險等級的最低限度 ( $1 \times 10^{-6}$ ) 相對照，此三條途徑之風險值皆在可接受的範圍之內，本研究後續將針對土壤中砷含量的標準在做進一步的探討，在何種濃度下其風險值會超過 US EPA-SSLs 所訂風險等級的最低限度 ( $1 \times 10^{-6}$ )，並印證台灣的法規標準。

關鍵詞：比較危害指數，終身平均每日吸  
收量，個體過量癌症風險指數

### 二、污染場址背景介紹

早期台灣政府推行「家庭即工廠」之

政策，在一般的台灣鄉間散佈有許多的小型工廠，加之以環保意識的薄弱，含有重金屬的工業廢棄物到處堆置及排放，經雨水沖刷及農民引水灌溉，造成附近農業地區土壤遭受嚴重的污染。

本文之資料來源為高雄縣環境保護局九十一年年度計畫，並委由私立嘉南藥理科技大學環境工程與衛生系執行。在本研究中選取了其中一個污染區域來評估健康風險，污染區域附近有稻田、村莊、工廠及住宅。土壤中化學物質的濃度列於表一。

### 三、制定程序

STEP 1：指標污染物的選擇程序

- (1) 計算本體危害商數 Qh
- (2) 計算平均本體危害商數 Qh
- (3) 計算比較危害指數 CHIN
- (4) 土壤中有毒污染物的分類
- (5) 毒物學的分類(根據 US.EPA "A, B, C, D, E" 致癌物的分類)
- (6) 決定指標污染物

STEP 2：健康風險評估的程序

- (1) 污染物的傳輸和轉換模式  
(US.EPA-SSLs, ASTM-RBCA)
- (2) 使用"McKone & Daniels '91"人類暴露模式
- (3) 計算個人致癌風險等級 IECR

#### 四、選擇造成污染的指標物質

在污染的指標物質選擇上，要選擇對這個研究區域衝擊最大的污染物，應要考慮數量和質量兩方面。在數量的觀點上，污染物危害等級成長比例，也就是污染物濃度 (Concentration, C) 在環境中的增加，與相對應的高度可承認濃度 (Highest Permissible Concentration, HPC) 的比值，HPC是污染物濃度的最大值；台灣相關法規制定了污染物在環境中的HPC值 (如表二、表三)，許多土壤案例的研究都依賴HPC值，使用土壤污染的本體危害商數 $Q_h$ 來定義C/HPC的比例。在質量的觀點上，根據工廠廢棄污染物對環境衝擊的大小，以及對土壤污染危害的可能性來做分類 (如表四)。

利用表一污染物在土壤中的濃度值和表三的管制標準值食用農作物農地之標準值來計算 $Q_h$ 值，列於表四及表五中；平均 $Q_h$ 值的計算，是用每一個污染物與其相對應的五個採樣點的值做算數平均數，然後將每個值使用常態化的【0-1】對照規模相互對照，其結果定義為常態的比較危害指數 (normalized comparative hazard

indexes,  $CHI_N$ )，如表四及表五。

由表四中的 $CHI_N$ 值可以看到銅、鋅、鎳、鉛、砷的值較高，在表五中的 $CHI_N$ 值可以看到銅、鋅、鉛、砷的值較高，但是在US EPA的致癌物的分類中，銅、鋅、鎳、鉛不是致癌物，但砷是具有高度危害的致癌物質，所以我們將「砷」列為本研究的指標污染物。

根據 US EPA (US EPA, 1998) 的案例研究報告，由癌症風險計算出的無機砷毒性風險值為：

$$UR_i = 4.3 \times 10^{-3} [(\mu\text{g m}^{-3})^{-1}] (\text{inhalation unit risk})$$

$$SF_0 = 1.5 [(\text{mg kg}^{-1}(\text{d})^{-1})^{-1}] (\text{oral slope factor})$$

$$UR_0 = 5 \times 10^{-5} [(\mu\text{g L}^{-1})^{-1}] (\text{drinking water unit risk})$$

在厭氧的條件下，無機砷以三價的形式存在 (As (III))，通常是以砷酸鹽 (Arsenite,  $\text{AsO}_3^{-3}$ ) 的形式存在於土壤中，例如 $\text{H}_3\text{AsO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ 、 $\text{HAsO}_3^{2-}$ ；在有氧的條件下，無機砷以五價的形式存在 (As (V))，通常是以亞砷酸鹽 (Arsenate,  $\text{AsO}_4^{-3}$ ) 的形式存在於土壤中，例如 $\text{H}_3\text{AsO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ 、 $\text{HAsO}_4^{2-}$ 、 $\text{AsO}_4^{3-}$  (US EPA-GWRTAC, Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater, 1997)；而且砷在酸性的土壤中移動較慢，在中性或偏鹼性的土壤中移動較快 (McBride, 1994)。

砷也以有機的形式廣泛地存在，如 cacodylic acid, Methanearsonic acis, methylidihydroxyarsine, trimethylarsine, trimethylarsine acid (Dickerson, 1980)。

在本研究中，由於有機砷的毒性較低和在有氧的條件下之無機砷的氧化作用致使毒性減低，所以本研究中將不予以探討，只針對在厭氧條件下的無機砷進行人類健康的風險評估。

### 五、健康風險評估的程序

本研究的健康風險評估的參數值和終身平均每日吸收量 (lifetime-equivalent chronic daily intake, CDI) 的計算，其參考資料來自於 McKone (1988), McKone and Daniels (1991), US EPA (1996a), 模式是使用 McKone and Daniels '91 模式。

$$CDI = \frac{CR_i}{BW} \cdot \frac{C_i}{C_k} \cdot \frac{EF \cdot ED}{AT} \cdot C_k = PEF_{ki} \cdot C_k \quad (1)$$

CDI：終身平均每日吸收量 lifetime-equivalent chronic daily intake 【mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>】

CR<sub>i</sub>/BW：人類每天每公斤體重與污染物的接觸率 contact rate per kilogram body rate 【kg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, L kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, etc.】 (CR<sub>i</sub>：1g/y；BW：70kg)

C<sub>i</sub>：在所接觸媒介中的污染物濃度 contaminant concentration in contact

medium “i” (soil, air, water, etc.) (表土的砷濃度)

C<sub>k</sub>：在環境媒介中的污染物濃度 contaminant concentration in environmental medium “k” 【mg kg DM<sup>-1</sup> in soil, mg L<sup>-1</sup> in water, mg m<sup>-3</sup> in air】

EF：人類暴露頻率 human exposure frequency 【d y<sup>-1</sup>】 (360 d y<sup>-1</sup>)

ED：人類持續暴露時間 human exposure duration 【y】 (30 y)

AT：平均時間 average time【d】(25550 d)

PEF<sub>s</sub>：暴露途徑因子 pathway exposure factors

這些參數的假設，是在相關的人體解剖學、飲食和生活方式的特性來做假設，用來做案例研究的暴露計算，並將人依年齡分成兩部分：小孩(年齡在 0 到 15 歲)，成人(年齡在 16 到 70 歲)，本文僅針對成人做討論，小孩的部份將在未來繼續做討論。在農產品攝食CDI值的計算，只將表一中的表土土壤濃度列入C<sub>k</sub>值的計算，而忽略了污染物在裏土及植物中的濃度。在飲用水方面，沒有土壤中的砷濃度值可直接顯示此污染區是潛在的污染來源，因此我們使用下列的通式及US EPA (US EPA, 1998) 的案例研究報告中的飲用水單位風險來計算個體過量癌症風險指數 (ICER)。

接著要計算個體過量癌症風險指數 (individual excess cancer risk index,

ICER) (US EPA 1996a, b), 其通式如下 (US EPA, 1989):

$$IECR = CDI \cdot SF \quad (2)$$

IECR: 個體過量致癌風險指數 individual excess cancer risk index

在砷的吸入暴露方面, 現有的 $UR_i$ 值被放入在 $SF_i$ 的等式中, 等式如下:

$$SF_i = UR_i (m^3 \mu g^{-1}) \cdot 70 \text{ kg} \cdot \frac{1}{20} \text{ d} \cdot m^{-3} \cdot 1000 \mu g \cdot mg^{-1} \quad (3)$$

$SF_i$ : 口服因子 oral slope factor  $[(mg \text{ kg}^{-1} (d)^{-1})^{-1}]$

$UR_i$ : 吸入的單位風險 inhalation unit risk  $[(\mu g \text{ m}^{-3})^{-1}] (4.3 \times 10^{-3})$

計算出砷的 $SF_i$ 值為  $15 (mg \text{ kg}^{-1} (d)^{-1})^{-1}$ , 符合毒物資料庫的表列值。

## 六、結果與討論

在污染區的無機砷暴露之個體過量致癌風險指數的計算結果列在表六中。

根據表六之計算結果與 US EPA-SSL<sub>S</sub>所訂風險等級的最低限度 ( $1 \times 10^{-6}$ ) 相對照, 此三條途徑之風險值皆在可接受的範圍之內, 但再表一中研究點三與研究點七表土的砷濃度在「台灣地區土壤中重金屬含量標準與等級區分」中, 屬於第四級為需進一步確認是否為污染者, 且經由計算出的個體過量致癌風險指數可看出, 此二個研究點的風險高於其他的研究點, 雖然都在可接受的範圍內, 但亦不

容忽視, 一但累積過量亦可能對人體造成傷害, 因此本研究後續將針對土壤中砷含量的標準在做進一步的探討, 在何種濃度下其風險值會超過 US EPA-SSL<sub>S</sub>所訂風險等級的最低限度 ( $1 \times 10^{-6}$ ), 並印證台灣的法規標準。

## 七、參考文獻

中文部分:

1. 高雄縣政府環保局, 「推動土壤防制工作計畫」期末報告, 私立嘉南藥理科技大學環境工程衛生系, 2002 年。
2. 行政院環境保護署, 「108 公頃農地土壤重金屬調查與廠址列管計畫」, 2002 年。
3. 行政院環境保護署, 「111 公頃農地土壤重金屬調查與場址列管計畫」, 2002 年。
4. 行政院環境保護署, 「土壤及地下水污染整治法」, 2003 年。
5. 行政院環境保護署, 「土壤及地下水污染整治法施行細則」, 2001 年。
6. 行政院環境保護署, 「土壤污染管制標準」, 2001 年。
7. 行政院環境保護署, 「土壤污染監測基準」, 2001 年。
8. 行政院環境保護署, 「土壤及地下水污染管制區管制辦法」, 2003 年。
9. 行政院環境保護署, 「土壤及地下水污染控制場址初步評估辦法」, 2003 年。

英文部分:

1. Dickerson, O. B. (1980). Arsenic. In

- Metals in the Environment (H. A. Waldron, Ed.), pp. 1–25. Academic Press, London
2. McBride, M. B. (1994). Environmental Chemistry of Soils. Oxford Univ. Press, New York.
  3. McKone, T. E. (1988). Multiple Pathway Exposure Factors (PEFs) Associated with Multimedia Pollutants. Presented at Intermedia Transport of Pollutants. Modeling and Field Measurements, August 23–26, 1988, Santa Monica, CA.
  4. McKone, T. E., and Daniels, J. I. (1991). Estimating human exposures through multiple pathways from air, water and soil. Regul. Toxicol. Pharmacol. 13, 36–61.
  5. Tatiana Zakharova, Fabio Tat`ano and Valery Menshikov (2002), Health Cancer Risk Assessment for Arsenic Exposure in Potentially Contaminated Areas by Fertilizer Plants: A Possible Regulatory Approach Applied to a Case Study in Moscow Region–Russia, Regulatory Toxicology and Pharmacology 36, 22–33
  6. US EPA (1989). Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health Evaluation Manual, (Part A). EPA/540/1-89/002, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC.
  7. US EPA (1996a). Soil Screening Guidance: Technical Background Document. (TBD) EPA/540/R-95/128, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC.
  8. US EPA (1996b). Soil Screening Guidance: User's Guide. EPA/540/R-96/018, 2nd ed. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC.
  9. US EPA (1998). IRIS-Integrated Risk Information System, database

表一 污染區土壤重金屬含量分析結果表

監測站	土層	pH 值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
背景測站	表土	7.1	8.74	0.69	3.36	54.4	0.132	15.6	112	466
	裏土	7.8	7.66	0.66	5.63	25.5	0.078	8.41	13.3	236
1	表土	6.1	5.56	0.03	0.35	12.2	0.174	1.43	4.27	7.73
	裏土	6.1	4.9	0.04	0.59	0.93	0.068	1.86	5.67	9.48
2	表土	7.2	8.15	0.31	1.37	34.5	0.157	6.76	15.9	200
	裏土	7.3	7.48	0.47	1.81	132	0.223	14.4	54.7	398
3	表土	6.4	11.1	0.23	2.65	24.1	0.082	6.81	15.7	113
	裏土	6.4	10.6	0.24	1.5	62.1	0.059	3.71	11	84.1
4	表土	7.1	7.01	0.04	0.35	3.29	0.08	1.91	9.81	13.1
	裏土	7.9	7.41	0.03	0.92	2.67	0.097	3.09	6.28	11.5
5	表土	7.2	5.66	0.2	1.82	22.8	0.131	5.53	12.4	101
	裏土	7.4	5.29	0.07	1.32	9.77	0.135	4.52	11.6	33.4
6	表土	7.4	5.55	0.18	1.93	28.6	0.167	5.76	27.6	104
	裏土	7.6	5.78	0.22	1.9	40.9	0.156	3.94	49.3	123
7	表土	7.1	10.7	0.9	0.19	224	0.172	602	4455	4.5
	裏土	7.2	5.26	1.79	0.59	36	0.095	22.5	570	8.04

註：台灣地區土壤中重金屬含量標準與等級區分：□ 第四級，□ 第五級。

資料來源：高雄縣政府環保局，「推動土壤防制工作計畫」期末報告，私立嘉南藥理科技大學環境工程衛生系，2002 年。

表二 台灣地區土壤中重金屬含量標準與等級區分

單位：mg/kg

重金屬項目	第一級	第二級	第三級 (背景值)	第四級(觀察 值)	第五級	
					監測值	農地優先 整治值
1.As(砷)		表土<4 裏土<4	4~9 4~15	10~60 16~60	>60 >60	>60 >60
2.Cd(鎘)		<0.05	0.05~0.39	0.4~10※	>10	>10※
3.Cr(鉻)		<0.1	0.1~10	11~16	>16	>40
4.Cu(銅)	<1	1~11	12~20	21~100	>100	>180
5.Hg(汞)		<0.1	0.1~0.39	0.4~20※	>20	>20※
6.Ni(鎳)		<2	2~10	11~100	>100	>200
7.Pb(鉛)		<1	1~15	16~120	>120	>200
8.Zn(鋅)	<1.5	1.5~10	11~25	26~80	>80	>300

註：1、As 及 Hg 為全量，Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 為 0.1N 鹽酸抽出量；重金屬含量以三位有效數字表示為原則。2、第一級：土壤中缺乏銅、鋅等農作物生長所需元素者；第二級：土壤中重金屬含量低於環境背景值者；第三級：土壤中重金屬含量為環境背景值者；第四級：需進一步確認是否為污染者；第五級：土壤中有外來重金屬介入，應列為重點監測地區，並進行相關復育工作。3、※栽種稻米之農地土壤，其 Cd(鎘)與 Hg(汞)含量大於 1 mg/kg 時，應比照第五級地區，進行監測與整治事宜。

資料來源：行政院環境保護署，「土壤污染管制標準」，2001 年。

表三 土壤污染監測基準值與管制標準值

監測與管制項目	監測基準值	管制標準值
1.As 砷	30	60
2.Cd 鎘	10(2.5)	20(5)
3.Cr 鉻	175	250
4.Cu 銅	220(120)	400(200)
5.Hg 汞	10(2)	20(5)
6.Ni 鎳	130	200
7.Pb 鉛	1000(300)	2000(500)
8.Zn 鋅	1000(260)	2000(600)

註：

- 1、( )內為食用農作物農地之標準值
- 2、本標準依據土壤及地下水污染整治法第五條第二項規定訂定。
- 3、本標準採用之濃度單位為mg/kg dry material。
- 4、本標準適用於地下水最低水位以上之未飽和含水層之土壤

資料來源：行政院環境保護署，「土壤污染監測基準」，2001年。

表四 表土之本體危害商數 ( $Q_h$ ) 和本體危害指數 ( $CHI_N$ ) 表

監測站	Cu	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb
1	0.061	0.013	0.093	0.006	0.001	0.035	0.007	0.009
2	0.173	0.333	0.136	0.062	0.005	0.031	0.034	0.032
3	0.121	0.188	0.185	0.046	0.011	0.016	0.034	0.031
4	0.016	0.022	0.117	0.008	0.001	0.016	0.01	0.02
5	0.114	0.168	0.094	0.04	0.007	0.026	0.028	0.025
6	0.143	0.173	0.093	0.036	0.008	0.033	0.029	0.055
7	1.12	0.008	0.178	0.18	0.001	0.034	3.01	8.91
Total	1.748	0.905	0.896	0.378	0.034	0.191	3.152	9.082
CHI	1	0.518	0.513	0.216	0.019	0.109	1.803	5.196



表五 裏土之本體危害商數 ( $Q_h$ ) 和本體危害指數 ( $CHI_N$ ) 表

監測站	Cu	Zn	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb
1	0.005	0.016	0.082	0.008	0.002	0.014	0.009	0.011
2	0.66	0.663	0.125	0.094	0.007	0.045	0.072	0.109
3	0.311	0.14	0.177	0.048	0.006	0.012	0.019	0.022
4	0.013	0.019	0.124	0.006	0.004	0.019	0.015	0.013
5	0.049	0.056	0.088	0.014	0.005	0.027	0.023	0.023
6	0.205	0.205	0.096	0.044	0.008	0.031	0.02	0.099
7	0.18	0.013	0.088	0.358	0.002	0.019	0.113	1.14
Total	1.423	1.112	0.78	0.572	0.034	0.167	0.271	1.417
CHI	1	0.781	0.548	0.402	0.024	0.117	0.190	0.996

表六 個體過量致癌風險指數

監測站	食入的 IECR	空氣吸入的 IECR	飲用水的 IECR
1	$1.40 \times 10^{-6}$	$4.02 \times 10^{-10}$	$4.67 \times 10^{-12}$
2	$2.06 \times 10^{-6}$	$5.89 \times 10^{-10}$	$6.85 \times 10^{-12}$
3	$2.79 \times 10^{-6}$	$8.00 \times 10^{-10}$	$9.30 \times 10^{-12}$
4	$1.77 \times 10^{-6}$	$5.07 \times 10^{-10}$	$5.90 \times 10^{-12}$
5	$1.43 \times 10^{-6}$	$4.09 \times 10^{-10}$	$4.76 \times 10^{-12}$
6	$1.40 \times 10^{-6}$	$4.01 \times 10^{-10}$	$4.66 \times 10^{-12}$
7	$2.70 \times 10^{-6}$	$7.74 \times 10^{-10}$	$9.00 \times 10^{-12}$