

垃圾滲出水污染之地下水傳輸分析

張凱茹^[1] 謝平城^{[2]*}

摘要

地下水污染問題日益受到重視，若能了解模擬區域污染物特性並進行預測將會是重要的課題。本研究採用廣義積分轉換法求解一維 Advection Dispersion Equation (ADE)，藉此模擬污染物在地下水中的傳輸行為，並與前人研究所得之結果作比較。之後針對不同土壤及重金屬進行濃度分析，再來以葫洲里垃圾掩埋場，又名「內湖垃圾山」為例，探討其中重金屬濃度分布。最後以國內常用之傳統掩埋場處理程序，即於原水中加入化學藥劑—硫酸鋁，促使難以沈澱的膠體和慢速沈降的懸浮固體快速產生較大的膠羽，由膠羽吸附污染物，最後進行預測及評估處理方法，期望能達到後續降低污染物濃度的目的。

(**關鍵詞：**重金屬、垃圾滲出水、污染濃度、廣義積分轉換法)

Groundwater transport analysis contaminated with landfill leachate

Kai-Ju Chang^{[1]*} *Ping-Cheng Hsieh*^[2]

ABSTRACT

Groundwater contamination should be noticed. To predict the pollutant concentration with good accuracy will be an important research. The generalized integral transformation technique is employed to solve the one dimensional Advection Dispersion Equation (ADE), and the results are compared with previous research. In this paper, we use different soils and heavy metals to discuss the distribution of pollutant concentration in groundwater. Then we take the landfill in Neihu for example, set the different assumption to investigate the pollutant concentration. Leachates treated with $Al_2(SO_4)_3$ and colloid particles are removed from water with the flocculation process. It is hoped to achieve the purpose of control the pollution.

(**Key words:** heavy metal, landfill leachate, pollutants concentration, generalized integral transform technique)

[1]國立中興大學水土保持學系碩士生

[2]國立中興大學水土保持學系(通訊作者，email:pchsieh@nchu.edu.tw)

前言

自 1970 年起，有關地下水汙染方面包含地下水汙染處理及地下水汙染對人體健康風險評估，湯(1999)以桃園 Radio Corporation of America(RCA)場址為例，對廠區附近的一般民眾及農民做暴露群體的風險值評估。地下水汙染問題在工業發達人口密度高的地區較為嚴重，因此有效預測及降低汙染物濃度成為了一項重要目標。

廢棄物之掩埋處為垃圾處理體系中必備之設施，衛生掩埋場除了可接受未經減積、處理前之垃圾以外，尚可容納焚化爐之灰燼、一般事業廢棄物及資源回收後之殘餘物。然而早期掩埋方式多隨意傾棄，較少注意汙染防治措施，因此間接汙染了地下水體；其中王(2007)指出台灣的老舊垃圾掩埋，大多以夯實黏土或鋪設地工膜布作為不透水襯墊層。長時間下，其防滲效果會降低，造成地下水汙染。

汙染物傳輸模式主要是由菲克定律 (Fick's law) 與質量守恆定律 (Law of mass conversation) 為理論基礎，其控制方程式可描述汙染物於地下水飽和含水層中一維空間分布。汙染物傳輸方程式包括遲滯因子、延散係數及水流速度，其中遲滯的效應主要決定於汙染物本身性質。

研究流程如圖 1 所示，參考文獻中的控制方程式，收集其中所需應用到的延散係數、地下水流速度的資料，最後使用解析解方式作分析。

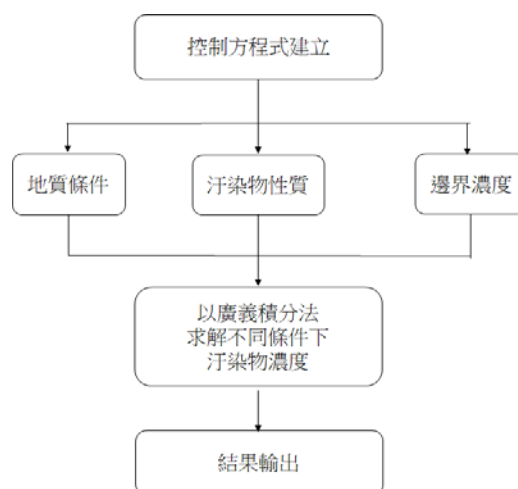


圖 1 研究流程圖

Fig. 1 Study flow chart

本研究以廣義積分轉換法求解線性方程式和 Kumar et al. (2010) 中使用的 advection-diffusion equation (ADE) 無限域之解析解作驗證，比較在老舊掩埋場因為襯層系統缺失而汙染地下水情況下汙染物濃度於地下水飽和含水層的空間分布。本研究並無現場進行實驗獲得相關資料，因此引用 Matos et al., (1999)和 Matos et al. (2001)實測出土壤的容積密度、分配係數、孔隙率結果再計算遲滯因子，並用 Pickens & Grisak (1981) 中推估之延散係數，模擬汙染物濃度變化。

材料與方法

1. 控制方程式建立

本研究模擬汙染物在地下水中濃度分布情形，假設條件為等向之含水層，如圖 2 所示。

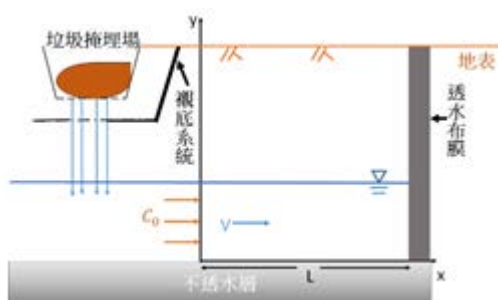


圖 2 研究示意圖

Fig. 2 Schematic diagram of study

引用 Kumar et al. (2010) 所提到的污染傳輸方程式為控制方程式：

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

其中， c 為污染物濃度(kg/km^3)， D 為污染物延散係數(km^2/yr)， R 為遲滯因子(-)， V 為平均流速(km/yr)， t 為時間(yr)， x 為距離(km)。

初始條件：

$$c(x, t = 0) = 0, 0 < x < L \quad (2)$$

邊界條件：

$$c(x = 0, t) = C_0, t > 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0, x = L, t > 0 \quad (4)$$

C_0 為污染物邊界濃度(kg/km^3)。

2. 無因次化

$$\text{令 } X = \frac{x}{L}, \quad C = \frac{c}{C_0}, \quad T = \frac{t}{(RL/V)},$$

$$\alpha = \frac{VL}{D}$$

可將 (1) 式同除 R 且無因次化：

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{\alpha R} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial C}{\partial X} \quad (5)$$

初始條件：

$$C(X, 0) = 0, 0 < X < L \quad (6)$$

邊界條件：

$$C(0, T) = 1, T > 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial C(X, T)}{\partial X} = 0, X = 1, T > 0 \quad (8)$$

3. 變數變換法

廣義積分轉換法為求解 Advection Dispersion Equation (ADE) 問題所使用的方法，欲滿足其偏微分方程式型式需先經由變數變換法消除空間一次項。

$$\text{令 } C(X, T) = e^{\frac{\alpha}{2}(X - \frac{\alpha}{4R}T)} C_v(X, T) \quad (9)$$

其中， C_v 為變數變換後之濃度。將 (5) 式消去空間一次項，得：

$$\frac{\partial C_v}{\partial T} = \frac{1}{\alpha R} \frac{\partial^2 C_v}{\partial X^2} \quad (10)$$

初始條件：

$$C_v(X, T = 0) = 0, 0 < X < 1 \quad (11)$$

邊界條件：

$$C_v(X = 0, T) = e^{\frac{\alpha}{4R}T}, T > 0 \quad (12)$$

$$\frac{\alpha}{2} C_v + \frac{\partial C_v}{\partial X} = 0, X = 1, T > 0 \quad (13)$$

4. 濃度之解析解

引用 Özisik (1968) 提出的廣義積分轉換法內容，參考其應用於空間有限域中之作法。

廣義積分轉換公式：

$$C_F(\beta_m, T) = \int_{X'=0}^1 K(\beta_m, X') C_v(X', T') dX' \quad (14)$$

積分反轉換公式：

$$C_v(X, T) = \sum_{m=1}^{\infty} K(\beta_m, X) C_F(\beta_m, T) \quad (15)$$

其 β_m 為方程式： $\beta \cot \beta L = -\frac{VL}{2D}$ 中 β 的正根

將 (10) 式取廣義積分轉換得：

$$\int_{x=0}^1 K(\beta_m, X) \frac{\partial C_v}{\partial T} dX = \frac{\partial C_F}{\partial T} \quad (16)$$

$$\int_{x=0}^1 K(\beta_m, X) \frac{1}{\alpha R} \frac{\partial^2 C_v}{\partial X^2} dX =$$

$$-\frac{1}{\alpha R} \beta_m^2 C_F + \varphi_r(\beta_m, T) \tag{17}$$

其中 $\varphi_r(\beta_m, T) = -\frac{1}{\alpha R} \sqrt{2} \sqrt{\frac{\beta_m^2 + (\alpha/2)^2}{L(\beta_m^2 + (\alpha/2)^2) + (\alpha/2)}}$

$$\times \cos \beta_m Le^{\frac{\alpha T}{4R}} \tag{18}$$

將 C_F 項整理至等號右邊得：

$$\frac{\partial C_F}{\partial T} + \frac{1}{\alpha R} \beta_m^2 C_F = \varphi_r(\beta_m, T) \tag{19}$$

解(19)式求得 C_F ：

$$C_F(\beta_m, T) = e^{-\frac{\beta_m^2 T}{\alpha R}} \int_0^T e^{\frac{\beta_m^2 T'}{\alpha R}} \varphi_r(\beta_m, T') dT' \tag{20}$$

根據邊界條件得知

$$K(\beta_m, X) = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\beta_m^2 + (\alpha/2)^2}{(\beta_m^2 + (\alpha/2)^2) + (\alpha/2)}} \times \sin \beta_m X \tag{21}$$

將(20)式進行逆轉換得：

$$C_v(X, T) = \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\beta_m^2 T}{\alpha R}} K(\beta_m, X) e^{-\frac{\beta_m^2 T}{\alpha R}} \int_0^T e^{\frac{\beta_m^2 T'}{\alpha R}} \varphi_r(\beta_m, T') dT' \tag{22}$$

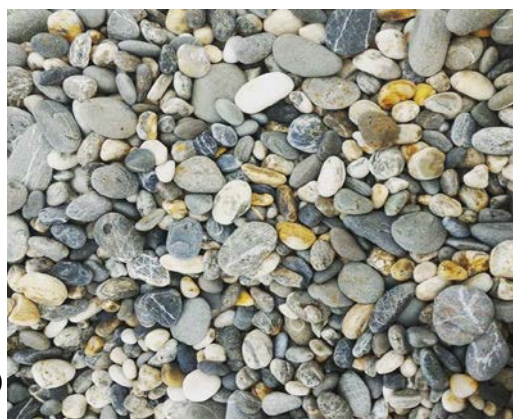
將上式 C_v 轉換回 C ：

$$C = e^{\frac{\alpha}{2}(X - \frac{\alpha T}{4R})} \frac{-2}{\alpha R} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\beta_m^2 T}{\alpha R}} \sin \beta_m X \frac{\beta_m^2 + (\alpha/2)^2}{[\beta_m^2 + (\alpha/2)^2 + (\alpha/2)]} \frac{4\alpha R \left[-1 + \exp\left(\frac{-4\beta_m^2 T + T\alpha^2}{\alpha R}\right) \right]}{4\beta_m^2 + \alpha^2} \tag{23}$$

(23)式即為在地下水流中污染物之濃度解。

5. 掩埋場土壤分析

本文採用三種土壤作探討，此三種不同垃圾場場址之土壤如圖 3 及其地下水平均流速如表 3 所示：



(a)



(b)



圖 3 垃圾場場址之土壤: (a)礫石、(b)砂土及
(c)坩土

Fig. 3 Soils in landfill:(a) gravel, (b) sand, (c)
silt.

6. 遲滯因子

de Matos et al. (1999). de Matos, et al., (2001) 及 Dimian et al. (2014) 文獻中多數設定 R 值為 1，其代表意義是以氯鹽做為追蹤劑，追蹤劑特性為不易與其他化學物質產生反應，屬保守型的化學物質。

7. 混凝劑

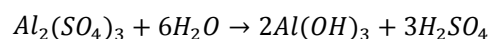
目前市面上較常見之混凝劑可分為鋁系、鐵系及高分子系，常用於水處理的混凝劑為硫酸鋁 ($Al_2(SO_4)_3$)，其優點為適合各種水質、價格便宜且無毒。本研究討論使用硫酸鋁藥劑後，是否能有效抑制重金屬溶出，並減量固化體以延長掩埋壽命。硫酸鋁反應可分為三個階段：

一、溶解：使膠體周圍離子濃度增加而減小界達電位。

二、水解：形成帶正電荷之金屬氫氧水合物離子，中和膠體之電荷。

三、聚合：形成金屬沈澱物，而將膠體同時網羅於其中。

在水中加入硫酸鋁，最後可產生大而不溶性之膠羽，整個反應之簡化式為：



結果與討論

1. 模式驗證

圖 4 為與 Kumar et al. (2010) 無限域解析解比較圖，模擬邊界釋放大量污染物的情況下，於地下水飽和含水層的空間分布之污染物濃度所使用參數如表 4 所示：

表 1 驗證垃圾滲出水在地下水中濃度變化
之參數

Table 1 Parameters selected for verification of
concentration of the landfill leachate in
groundwater

參數	數值	單位
模擬長度 L	1	km
邊界濃度 C_0	1	kg/ km ³
延散係數 D	0.21	km ² /yr
平均水流流速 V	0.11	km/yr
模擬時間 t	0.4	yr

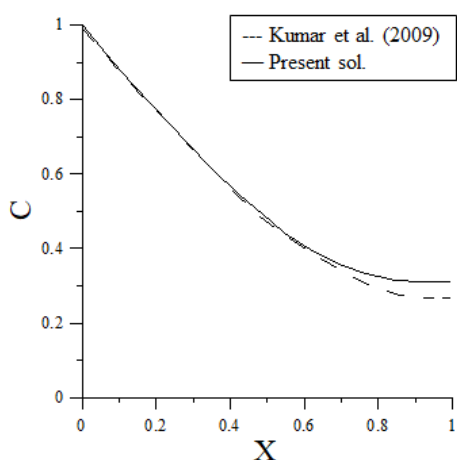


圖 4 無因次垃圾滲出水濃度變化之解析解驗證

Fig. 4 Comparison between the present analytical solution and the previous result of the dimensionless concentration of landfill leachate

從圖 4 可看出邊界釋放大量污染物之情況下，兩者所得之濃度有些許差異，但差異不大，由於兩者皆採用(1)式為控制方程式，故判斷此誤差可能是因為模擬範圍不同所造成的。圖中模擬時間為 0.4 年，無因次化後 $T=0.044$ 。

2. 不同土壤下垃圾滲出水濃度分布

依據葫洲里垃圾掩埋場規模對照 Pickens & Grisak (1981) 歸納出的延散係數，得到延散係數為 0.1-0.15 (km^2/yr)。從圖 5 與圖 6 得知在黏土中因為水力傳導度低，故污染物傳遞慢，而在細沙中污染物可以傳播較快；圖 6 是將參數 α 作倍數變化，更可以發現地下水流速度對污染物濃度影響比延散係數大。

表 2 模擬不同土壤中其他參數(王, 2014)

Table 2 Other parameters for concentration simulation of landfill leachate for different soils. (Wang, 2014)

參數	數值	單位
模擬長度 L	1	km
邊界濃度 C_0	1	kg/km^3
延散係數 D	0.15	km^2/yr
模擬時間 t	1	yr
礫石中平均流速 V	1.188	km/yr
砂土中平均流速 V	0.036	km/yr
坩土中平均流速 V	0.00036	km/yr

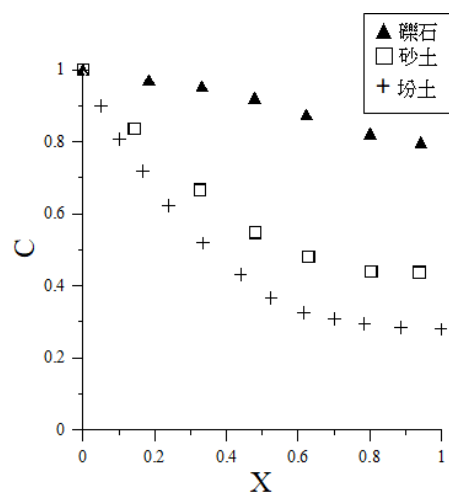


圖 5 不同土壤中無因次鉛濃度變化

Fig. 5 Variation of the dimensionless lead concentration for different soil

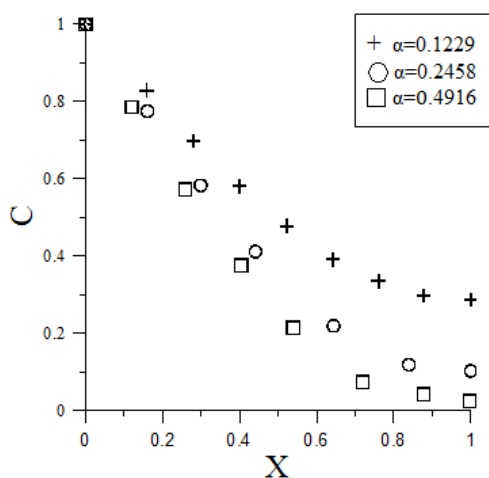


圖 6 不同 α 值之無因次垃圾滲出水濃度變化

Fig. 6 Variation of the dimensionless landfill leachate concentration for different α

圖 6 模擬在砂土中 $\alpha=0.1229$ 時，濃度從原本 0.089 升高至 0.269;但當 $\alpha=0.4916$ 時，透水布膜處濃度從 0.089 降為 0.033。在圖 6 的 0.5 公里處，設定 $\alpha=0.1229$ 時，濃度從原本 0.319 升高至 0.452;若設定 $\alpha=0.492$ ，此處濃度會從 0.319 降為 0.272。對於模擬相同廠址而言，延散係數不變， α 倍數變化即為流速變化。

3. 遲滯因子對於污染物濃度影響

圖 7 為在砂土中透水布膜處 ($X=1$) 污染物濃度及位置之變化使用參數如表 2 及表 6 所示，在相同假設條件下，根據垃圾滲出水中的污染物進行分析，可以發現因為重金屬的遲滯因子愈高，土壤吸附的重金屬濃度較高，在地下水濃度相對低。

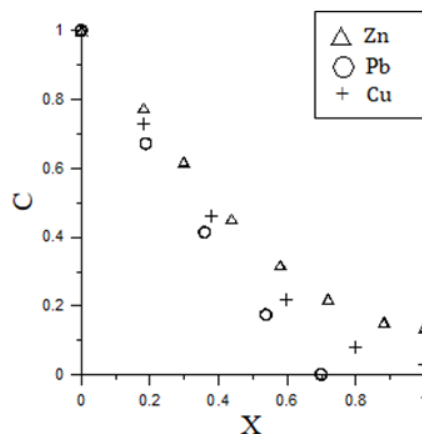


圖 7 垃圾滲出水中不同重金屬之無因次濃度變化

Fig. 7 Variation of dimensionless concentration for different heavy metals

4. 現地資料

模擬場址位置為葫洲里垃圾掩埋場，佔地 15.5 公頃，垃圾堆置面積 14.3 公頃、體積約為 429 萬立方公尺。規劃使用至民國 64 年，並在填滿滯地後停止使用。但由於台北市政府未能在原訂期滿後尋得新的垃圾掩埋場場地，使得掩埋場一直持續使用至民國 74 年。掩埋場僅採用簡單的覆土倒棄法，在填平滯地後繼續堆積垃圾後，使得垃圾逐漸堆積成山，並產生惡臭。參考李(1996)及林 (2016) 葫洲里垃圾掩埋場之參數如表 5 所示。

表 5 模擬現地資料之參數

Table 5 Parameters for simulation the site

參數	數值	單位
----	----	----

模擬長度 L	0.6	km
Zn 邊界濃度	0.8	kg/ km ³
Pb 邊界濃度	0.35	kg/ km ³
Cu 邊界濃度	0.7	kg/ km ³
延散係數 D	0.15	km ² /yr
平均水流流速 V	0.158	km/yr
模擬時間 t	1	yr

表 6 不同重金屬之遲滯因子(de Matos et al., 2006)

Table 6 Retardation factor for different heavy metals (Matos et al., 2006)

重金屬	遲滯因子
鋅	1.2
鉛	3.1
銅	1.8

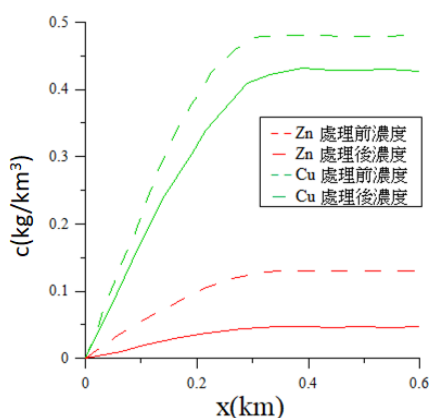


圖 8 葫洲里垃圾掩埋場滲出液中 Zn、Cu 未處理及處理後之濃度變化

Fig. 8 Heavy metals concentration before

pollution remediation compare with treatment

前面推導濃度解析解時將控制方程式無因次化，使得無法顯示初始濃度對地下水流中汙染物濃度的影響，因此在圖 8 縱軸以有因次的濃度表示垃圾滲出水在地下水中濃度，而配合葫洲里垃圾掩埋場大小探討 600 公尺。本研究以吳&羅 (2009) 中選用之混凝劑—硫酸鋁，控制 pH 值接近中性情況下進行混凝，所形成的膠羽體積大、沉降性佳，亦可將垃圾滲出液中重金屬 Cu 和 Zn 去除率提升至 40-70%，但對於鉛的並無去除能力，後續應以吸附劑加以處理，使鉛沉澱後再去除。從圖 8 看出兩種重金屬汙染物在有效下降。

結論與建議

1. 本研究引用廣義積分轉換法求解有限域汙染物傳輸之問題，所得解析解與前人研究所得無限域結果差異不大。
2. 探討汙染物質的遲滯因子，對汙染物濃度的影響。研究結果發現，當遲滯因子(R)愈高，在地下水濃度較低。
3. 對參數物理量分析影響因子之探討結果顯示，傳輸機制中影響因子影響程度較大者至小為地下水流速，其次為遲滯因子。本文在探討變動 α 值後，發現當 α 設定為 $\alpha/2$ 時，在透水布膜處濃度會減少近 2.71 倍;但當 α 設定為 2α 時，濃度變化約為原來的 3.04 倍。於 $L/2$ 處，當 α 設定為 $\alpha/2$ 時，濃度會減少近 1.17 倍;而 α 設定為 2α 時，濃度會增加約 1.42 倍。由此可發現，當模擬位置離接近汙染源時，垃圾滲出水濃度差異越小。

4. 本研究考量左邊界面為一穩定污染物進入模擬區，未來可考量以污染物以不同方式注入、或者考慮降雨條件下，對污染物傳輸的影響。

參考文獻

1. 王昱雲 (2007) ,「坡地型廢棄物掩埋場邊坡穩定分析」, 國立交通大學土木工程學系碩士論文。
2. 王棕元 (2014) ,「礫石含量對砂土之飽和水力傳導度及粗孔隙之交互作用」, 國立中興大學水土保持學系碩士論文。
3. 李榮崇 (1996) ,「垃圾衛生掩埋場滲出水水質之變動與處理設施之檢討」, 國立中興大學環境工程學系碩士論文。
4. 林立涵 (2017) ,「生命週期評估中結合地下水傳輸模式及風險評估之研究-以封閉掩埋場為例」, 國立臺灣大學工學院環境工程學系碩士論文。
5. 林盈孜 (2015) ,「有機高分子凝聚劑聚丙烯醯胺(PAM)於低濁度原水處理效能」, 朝陽科技大學綠色營建科技產業研發碩士專班碩士論文。
6. 吳冠中、羅煌木 (2009) ,「焚化爐灰燼作為掩埋場滲出液處理之混凝劑利用研究」, 朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文。
7. 陳鴻烈 (1995) ,「台中市垃圾滲出水研究」, 農林學報, 第四十四卷, 第三期, 第 17-28 頁。
8. 湯忠達 (1999) ,「地下水污染之暴露與健康風險評估-以桃園 RCA 場址為例」, 國立台灣大學環境工程學系碩士論文。
9. Matos, A. T., Costa, L. M., and Fontes, M.P.F. (1999). "Retardation factors and the dispersion diffusion coefficients of Zn, Cd, Cu and Pb in soils from Vicosa-MG, Brazil." *ASAE*, 42 (4), 903-910.
10. Matosa, A.T., Fontesb, M.P.F., Costab, L.M., and Martineza, M.A. (2001). "Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils." *Environ. Pollut.*, 111(5), 429-435.
11. Dimian, M.F., Donia, N.S., Wadi, A.S., and Ibrahim, F.N. (2013). "The effect of added pollutant along a river on the pollutant concentration described by one dimensional advection diffusion equation." *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, 5, 1662-1671.
12. Fry, V.A., Istok, J.D., and Guenther, R.B. (1993). "An analytical solution to the solute transport equation with rate-limited desorption and decay." *Water Resour. Res.*, 29(9), 3201-3208.
13. Jaiswal, D.K., Kumar, A., Kumar, N. and Yadav, R.R. (2009). "Analytical solutions for temporally and spatially dependent solute dispersion of pulse type input concentration in one-dimensional semi-infinite media." *J. Hydrol.*, 2, 254-263.
14. Kumar, A., Jaiswal, K., and Kumar, N. (2010). "Analytical solutions to one-dimensional advection-diffusion

equation with variable coefficients in semi-infinite media.” *J. Hydrol.*, 380 (3-4), 330-337.

15. Özisik, M.N. (1968), *Boundary value problems of heat conduction*, Dover Publications, Inc., New York.
16. Pickens, J.F. and Grisak, G.E (1981), “Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, grater.” *Water Resour. Res.*, 17, 1191-1211.

107 年 12 月 28 日收稿

108 年 01 月 09 日修改

108 年 02 月 13 日接受