

行政院環境保護署

「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

推估土壤傳輸參數現地試驗方法之改進

期末報告

主 辦 單 位：  行政院環境保護署

計 畫 執 行 單 位： 國立中央大學／應用地質研究所

計 畫 主 持 人： 陳瑞昇 教授

計 畫 執 行 期 間： 100 年11 月26 日起至

101 年11 月25 日

中 華 民 國 101年10 月 印製

計畫成果摘要

一、中文摘要

土壤宿命傳輸模式的可靠性取決於模式是否適當考慮相關傳輸過程，除了選擇合適的模式，模式所需輸入參數也非常重要，延散係數為數學模式重要輸入參數，而現地入滲追蹤劑試驗為同時決定土壤縱向與側向延散係數之有效方法。本計畫進行現地入滲追蹤劑試驗以驗證其可行性，現地試驗操作的經驗將有助於改進儀器設計、操作過程與相關細節，此外本研究亦改進相關試驗數學模式與分析方法。

關鍵詞：入滲追蹤劑試驗、延散係數、數學模式

Abstract

The reliability of soil transport model calculations depends on the accuracy with which relevant processes for contaminant transport are implemented in fate transport model. Besides an appropriate model choice, the parameterization of the model also plays an important role. Dispersion coefficients are important parameters for soil fate and transport model. Field infiltration test with a tracer is a proposed technology for simultaneous determination of longitudinal and transverse dispersion coefficients in soil. In this study the in-situ infiltration test with a tracer was performed to verify its applicability. Experience obtained in this test was used to refine the apparatus designs, operational procedures and relevant details for the test. Moreover, the mathematical model and interpreting method for the infiltration tracer test were investigated and improved.

Keywords : Infiltration Tracer Test; Dispersion Coefficient; Mathematical Model

二、緣由與目的

土壤與地下水污染的來源主要來自於地表的各種污染物伴隨著水體(包括廢水、雨水、灌溉水)的入滲而向下遷移進入土壤與地下水系統，因此了解地表污染源藉由入滲作用而進入土壤非飽和層的傳輸行為，對於相關污染調查、預防與整治皆扮演重要角色。宿命傳輸模式為預測並了解污染物移動與分布之有效工具，除選擇適當的宿命傳輸模式，模式參數亦是非常重要。宿命傳輸模式的建立都採用移

流-延散方程式，延散傳輸描述由於多孔介質異質性造成在個別孔隙地下水流動流速與流徑的差異，所形成的污染物的分散現象。延散係數為衡量污染分散程度之重要參數，縱向延散係數為沿水流方向溶質分散的程度，而側向延散係數則是垂直水流方向溶質分散的程度。有鑑於延散係數的重要，Zhang et al. (2006)提出結合傳統入滲試驗與追蹤劑試驗的方法可以同時決定表土層之縱向與側向延散係數，此一現地入滲追蹤劑試驗之現場執行實務問題與可能欠缺之技術操作細節須透過現場實際操作才能確實瞭解現場執行的實務困難與問題，並以改善儀器設計與操作流程。而數學模式的合理性惟有透過比較、檢驗改進使其更正確應用於分析現地試驗結果。本計畫目的為改善入滲追蹤劑試驗方法使其具體可行，計畫中也將探討現有數學模式的合理性並進行數學模式改進。

三、材料與方法

3.1 現地試驗

本計畫藉由多次入滲追蹤劑試驗實際操作，以評估操作程序之可行性，並改善儀器設計，以提昇試驗方法之實用性。以下就試驗原理、試驗儀器與試驗流程進行簡要說明。

試驗原理

試驗主要是改良傳統的雙環入滲試驗，另外加一追蹤劑注入內環，當入滲率達穩定時，藉由注入內環加入追蹤劑，並於土壤不同深度每隔一段時間進行水樣採樣，藉由合適的數學模式分析採樣點的濃度穿透曲線，可達到同時推估土壤的縱向與側向延散係數的目的。

試驗儀器

試驗儀器包括入滲率控制裝置、追蹤劑注入裝置與追蹤劑採樣裝置。入滲率控制裝置包括雙環入滲儀與定水頭補注裝置，雙環入滲儀由內徑30cm之內環與60cm之外環所組成，用於限制補注水於入滲儀內。定水頭補注裝置主要補給入滲儀所需的水量並控制其內維持固定水頭高度。追蹤劑注入裝置包括追蹤劑補注裝置與追蹤劑注入內環，試驗中將追蹤劑注入內環置於入滲儀中心，藉由追蹤劑補

注裝置讓追蹤劑流入追蹤劑注入內環使其入滲進入土壤。追蹤劑採樣裝置主要用來進行土壤追蹤劑採樣，採樣裝置由抽取杯、錐形瓶、分流閥、與真空幫浦組成。

試驗流程

- (1)場地整理與準備：取得水源並進行表土整平。
- (2)安置雙環入滲儀與追蹤劑注入內環：將雙環入滲儀嵌入十字盤，使其成同心圓排列，以橡膠鎚將雙環入滲儀均勻打進土層，中心放入注入內環做為注入追蹤劑使用。
- (3)安置追蹤劑採樣裝置：以鑽孔器具進行鑽孔，將抽取杯置入鑽孔，再將抽取杯與分流閥真空幫浦組合。
- (4)安置定水頭補注裝置與追蹤劑注入裝置：由於實驗需於入滲率為穩態情況下執行，架設定水頭裝置與追蹤劑注入裝置時須保持雙環入滲儀與追蹤劑注入內環的水頭高度一致。
- (5)注入追蹤劑：將事先製備之追蹤劑溶液加入追蹤劑注入裝置，試驗開始使其流入注入內環。
- (6)追蹤劑水樣採樣：開啟追蹤劑採樣裝置，每隔一段時間抽取土壤水樣，並記錄時間點。

3.2數學模式

入滲追蹤劑試驗數學模式可採用二維圓柱座標系統移流-延散傳輸方程式來描述，可表為

$$\frac{\partial C(r, z, t)}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C(r, z, t)}{\partial z^2} - V \frac{\partial C(r, z, t)}{\partial z} + D_T \left[\frac{\partial^2 C(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C(r, z, t)}{\partial r} \right] \quad (1)$$

此處 $C(r, z, t)$ 為追蹤劑濃度； r 為以入滲環中心為原點之徑向座標； z 為以地面為原點垂直方向座標(向下為正)； V 為達穩態時入滲速度； D_L 與 D_T 分別為沿水流方向之縱向延散係數與垂直水流方向之側向延散係數。

針對式(1)，Zhang et al. (2006)考慮下列條件求解

$$C(r, z, t = 0) = 0 \quad (2)$$

$$C(r \rightarrow \infty, z, t) = 0 \quad (3)$$

$$VC(r, z=0, t) - D_L \frac{\partial C(r, z=0, t)}{\partial z} = \begin{cases} \frac{M}{\phi \pi R_i^2} \delta(t) & 0 \leq r \leq R_i \\ 0 & R_i \leq r \leq \infty \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C(r, z \rightarrow \infty, t)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

此處 M 為注入追蹤劑質量， ϕ 為有效孔隙率， R_i 為注入內環半徑， $\delta(\bullet)$ 為 Dirac delta 函數，此處表示追蹤劑採用瞬間注入。

Zhang et al. (2006)求得解析解表為

$$C(r, z, t) = \frac{M}{R_0 \pi \phi} F(z, t) \int_0^\infty J_1(\rho R_0) J_0(\rho r) \exp(-D_T \rho^2 t) d\rho \quad (6)$$

此處 $J_0(\bullet)$ 與 $J_1(\bullet)$ 分別為零階與一階第一類 Bessel 函數，且

$$F(z, t) = \frac{1}{\sqrt{D_L \pi t}} e^{-\frac{(z-Vt)^2}{4D_L t}} - \frac{V}{2D_L} e^{\frac{Vz}{D_L}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z+Vt}{2\sqrt{D_L t}}\right) \quad (7)$$

$\operatorname{erfc}(\bullet)$ 為補誤差函數(complementary error function)。

本研究改進Zhang et al. (2006)的半無窮的流出邊界，改採沿水流方向(z 方向)為有限出流邊界，其數學表示為

$$\frac{\partial C(r, z=L, t)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

此處 L 為地表至自由水面的長度。

採用Laplace轉換、finite Hankel轉換與通用型積分轉換(generalized integral transform)可得解如下式：

$$\begin{aligned} C(r, z, t) = & \frac{\sigma}{V} \left(\delta(t) - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\delta(t) - \left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) e^{-\left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) t} \right] \Gamma(z, \beta_n) \right) \frac{R_i^2}{R_o^2} \\ & + \frac{\sigma}{V} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \delta(t) - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\delta(t) - \left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) e^{-\left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) t} \right] \Gamma(z, \beta_n) \right\} \\ & \frac{2R_i J_1(\rho_m R_i) J_0(\rho_m r)}{R_o^2 \rho_m |J_0(\rho_m R_o)|^2} \end{aligned} \quad (9)$$

四結果與討論

4.1 現地試驗改進

本計畫共進行了五次現地試驗，每次試驗操作都挖掘相關問題，重新進行儀器設計並改進操作程序，第四次與第五次已能維持水頭的穩定與順利進行抽取杯的採樣，採集的水樣保存後送至實驗室分別以 IC 與滴定法進行分析。圖 1 為第四次連續定濃度注入的方式所得之兩個不同觀測位置($r = 3\text{ cm}$, $z = 15\text{ cm}$)與($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)之濃度穿透曲線，從圖中可以發現滴定法與 IC 分析法所得的濃度大致結果相當一致，觀測的濃度的變化由背景濃度逐漸上升至一穩定範圍濃度，雖然圖中呈現些許的上下震盪變化，圖中穿透曲線的下降段部份，主要是連續追蹤劑的注入已停止，但仍持續進行採樣觀測，整體而言此次試驗結果符合連續定濃度注入試驗的穿透曲線型態。第五次試驗將注入時間延長且採樣深度加深，圖 2 為在兩個不同觀測位置($r = 3\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)與($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)之濃度穿透曲線，與上次試驗相同，觀測的濃度的變化基本上由背景濃度逐漸上升至一穩定範圍濃度，在觀測位置($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)處的濃度上下震盪的變化較小，而在($r = 7.5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)處之濃度穿透曲線震盪變化較大，此次由於在採樣觀測結束前一直維持定濃度注入，因此並未如第四次試驗有穿透曲線的下降段部份，此次試驗結果更進一步確認在較長期的連續定濃度注入，穿透曲線仍可符合連續定濃度注入型態。

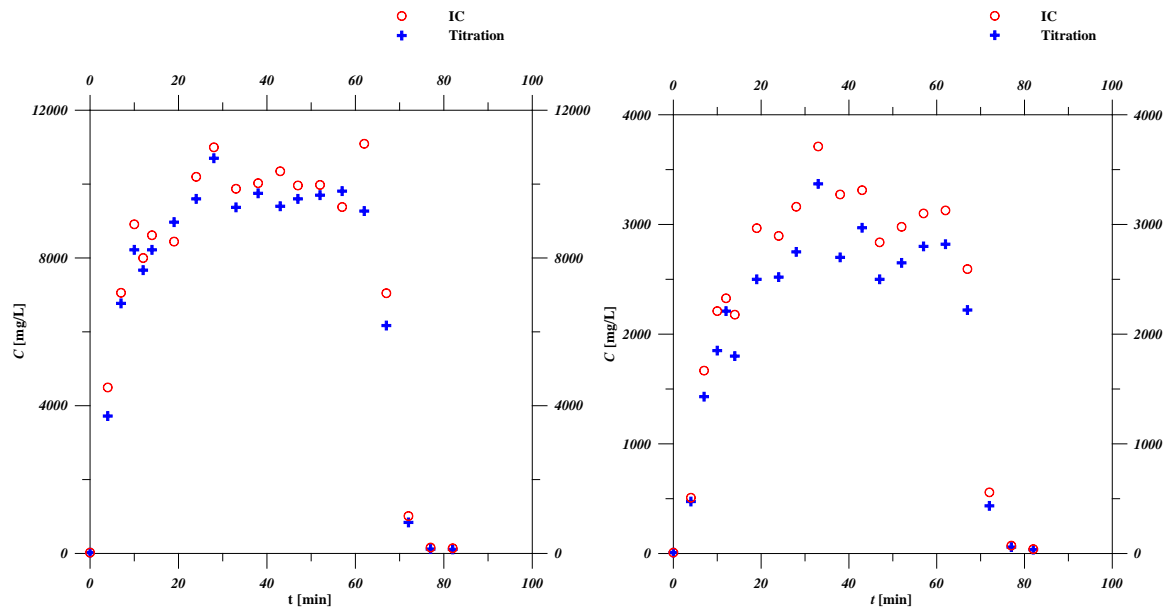


圖 1 第四次試驗連續定濃度注入之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

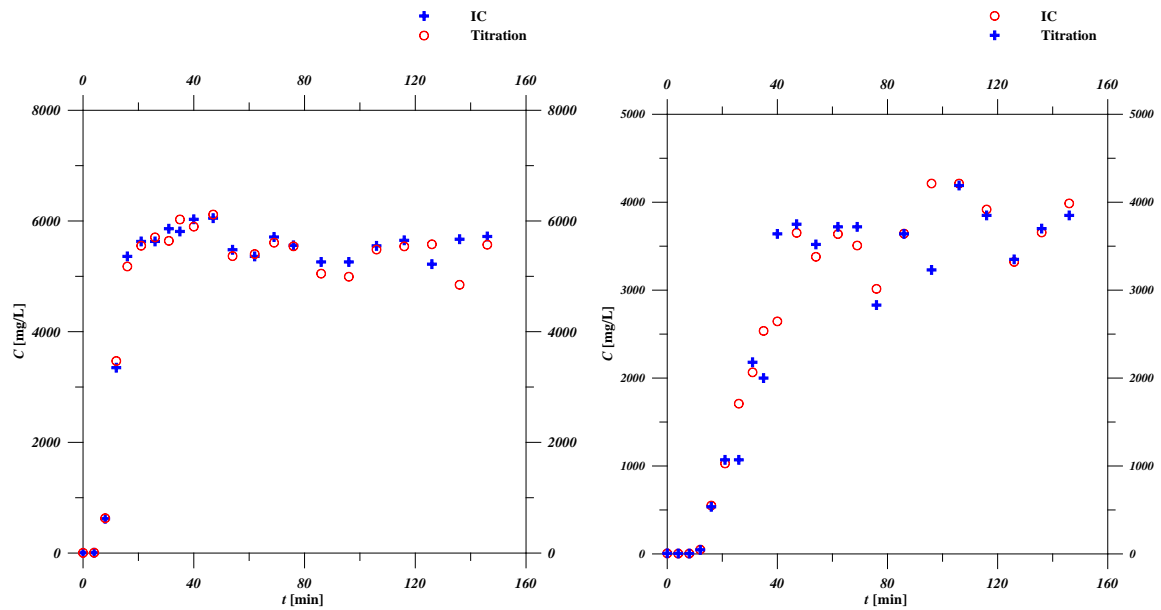


圖 2 第五次試驗連續定濃度注入之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

4.2 數學模式改進

圖 3 為半無窮長流出邊界 Eq.(6)與 Eq.(7)與本研究有限長度流出邊界解析解 Eq.(8)穿透曲線比較，圖中顯示半無窮遠流出邊界假設則會低估的穿透曲線的濃度，若使用其解來推估參數，將造成在錯估決定縱向與側向延散度。

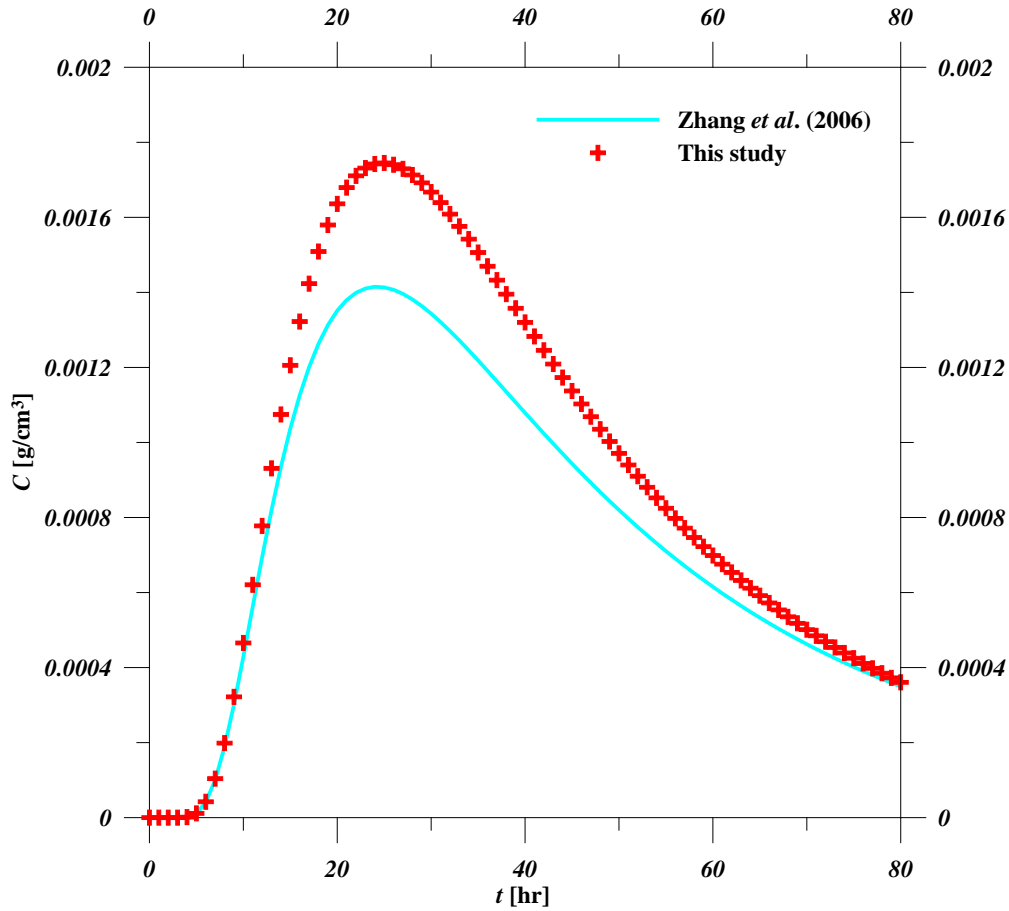


圖 3 半無窮流出邊界解析解與本研究改進解析解之穿透曲線比較。
($D_L = 45 \text{ cm}^2/\text{h}$, $D_T = 8.7 \text{ cm}^2/\text{h}$)於觀測點($r = 10 \text{ cm}$, $z = 90 \text{ cm}$)。

4.3 試驗資料分析

本研究利用 Chen et al. (2011)的解析解分析第五次連續定濃度注入試驗觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)與($r = 5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)之濃度穿透曲線，其結果如圖 4 與圖 5 所示，本研究發現無法調整至兩觀測點有相同的縱向延散係數與側向延散係數，且各觀測點濃度資料與標準曲線有可接受滿意的套配，兩觀測點套配所得之分別為縱向延散係數與側向延散係數分別為($D_L = 1 \text{ cm}$, $D_T = 0.1 \text{ cm}$)於觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)與($D_L = 2 \text{ cm}$, $D_T = 0.2 \text{ cm}$)於觀測點($r = 5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)。可以推測此試驗場址之縱向延散係數與側向延散係數可能具尺度延散效應，我們將所得之參數值比對比 Gelhar (1986)所提的尺度延散關係式($a_L = 0.1 \cdot z$)確定所得之延散係數值應屬合理。

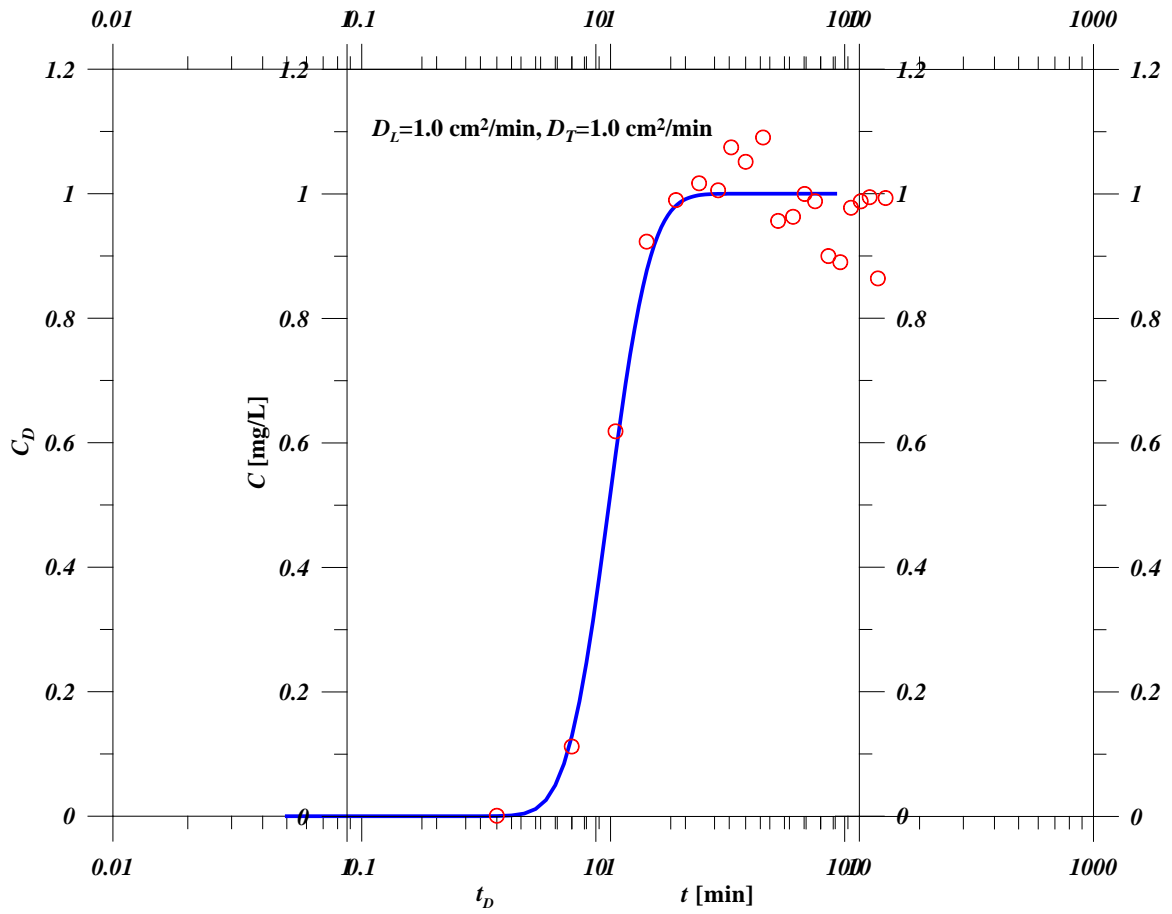


圖 4 第五次連續定濃度注入試驗觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)與標準曲線之最佳套配結果。

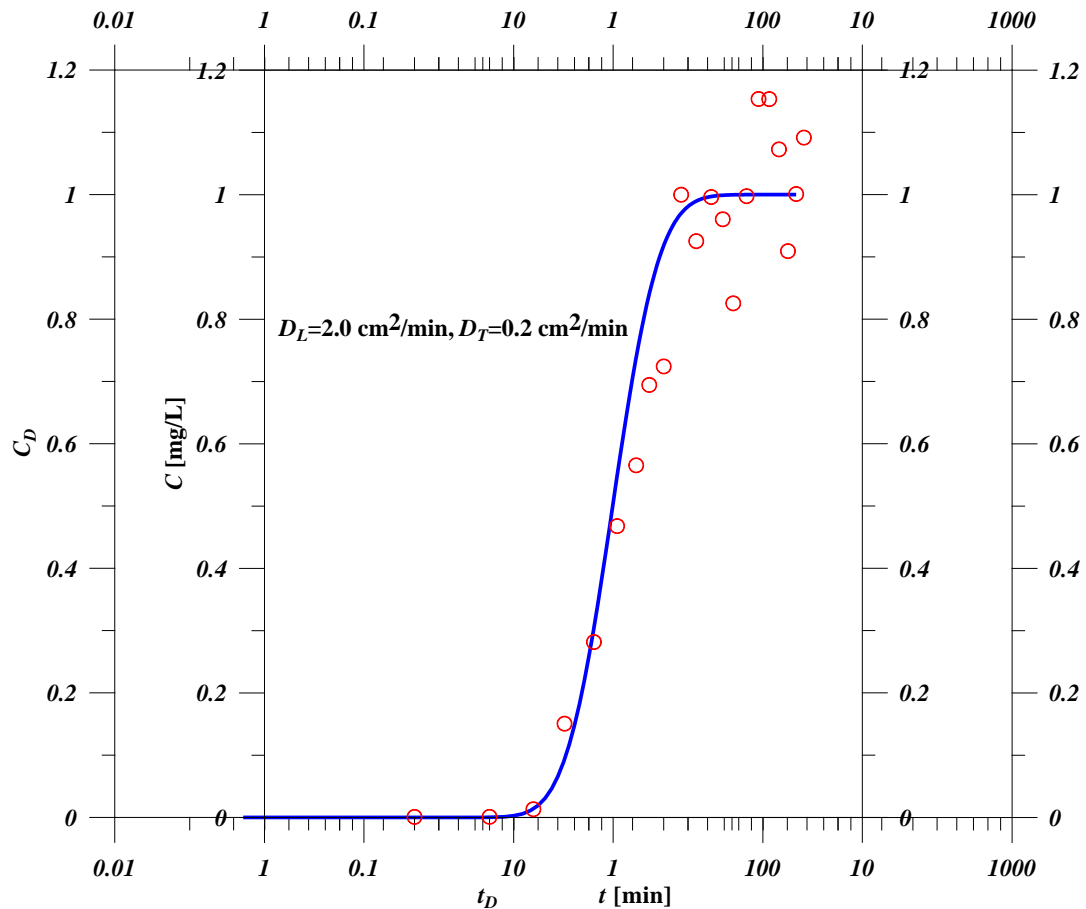


圖 5 第五次連續定濃度注入試驗觀測點($r = 5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)與標準曲線之最佳套配結果。

五、結論與建議

1. 執行現地試驗土壤質地決定入滲率之高低、在高入滲率的土壤為避免發生補水不及，建議準備較大容量的定水頭裝置。
2. 試驗中水頭的控制非常重要，如無良好的水頭控制，所測得的追蹤劑濃度會有不正常型態問發生。
3. 經現地多次試驗測試，本計畫改良了相關儀器設備與作業相流程，使現地入滲追蹤劑試驗之執行確實可行。
4. 連續濃度試驗相較於瞬間固定質量試驗相對較容易執行而獲得合理結果。
5. 前人所提出的推估參數方法，經本計畫比較測試，發現相關簡化假設極為不合理，可能造成推估土壤傳輸參數的誤差。
6. 試驗資料分析顯示此場址的入滲傳輸特性可能具尺度延散性。

參考文獻

- [1] Chen JS, Chen JT, Liu CW, Liang CP and Lin CM (2011) *J Hydrol*, 405(3-4): 522-531.
- [2] Gelhar LW (1986) *Water Resour Res*, 22(9): 135S-145S.
- [3] Zhang X, Qi X, Zhou X and Pang H (2006) *J Hydrol*, 328(3-4): 614–619

計畫大綱

本計畫進行推估土壤傳輸參數現地試驗方法之改進，報告架構分為第一章「計畫的背景與目的」；第二章「入滲試驗追蹤劑試驗的改進工作計畫」；第三章「入滲追蹤劑分析數學模式」；第四章「現地試驗程序與改進」，六個部分。第一章，介紹相關推估土壤傳輸參數現地之重要性試驗方法。第二章，介紹現地入滲追蹤劑試驗的方法，儀器的使用方式與原理，試驗儀器準備與測試，場址的介紹。第三章，討論目前使用在現地入滲追蹤劑試驗上，試驗場地規劃、布設與試驗儀器準備，經由重複多次現地入滲追蹤劑試驗，而改變儀器的選用與製作，進行作業程序檢討，增加現地入滲追蹤劑試驗的可行性。第四章，探討數學模式的適用性、分析與數學模式的更新。第五章，利用數學模式分析現地試驗資料。第六章，根據計畫成果給予相關結論。

中文摘要

在實務上利用宿命傳輸模式來計算土壤污染物的動態日漸受到重視，在台灣相關法規也規定藉由宿命傳輸模式計算地表污染物由土壤進入到地下水的暴露途徑以做為健康風險評估之基礎。土壤宿命傳輸模式的可靠性取決於模式是否適當考慮相關傳輸過程，除了選擇合適的模式，模式所需輸入參數也非常重要，延散係數為數學模式重要輸入參數，而現地入滲追蹤劑試驗為同時決定土壤縱向與側向延散度之有效方法。本計畫進行現地入滲追蹤劑試驗以驗證其可行性，現地試驗操作的經驗將有助於改進儀器設計、操作過程與相關細節，此外計畫中改進相關試驗數學模式與分析方法。

英文摘要

Fate and transport models to calculate chemical transport in soils are increasingly being used in practice. Health risk assessment on the basis of model calculations of leaching of surface-applied chemicals toward the groundwater has been legally prescribed in Taiwan. The reliability of soil transport model calculations depends on the accuracy with which relevant processes for contaminant transport are implemented in fate transport model. Besides an appropriate model choice, the parameterization of the model also plays an important role. Dispersion coefficients are important parameters for soil fate and transport model. Field infiltration test with a tracer is a proposed technology for simultaneous determination of longitudinal and transverse dispersion coefficients in soil. In this project the in-situ infiltration test with a tracer was performed to verify its applicability. Experience obtained in this test was used to refine the apparatus designs, operational procedures and relevant details for the test. Moreover, the mathematical model and interpreting method for the infiltration tracer test were investigated and improved.

符號說明：

$C(r, z, t)$ ：追蹤劑濃度 $[\text{ML}^{-3}]$ 。

$C_L(r, z, s)$ ： $C(r, z, t)$ 之 Laplace 轉換， $C_L(r, z, s) = \int_0^{\infty} C(r, z, t) e^{-st} dt$ 。

$C_H(\rho_m, z, s)$ ： $C_L(r, z, s)$ 之有限 Hankel 轉換，

$$C_H(\rho_m, z, s) = \int_0^{R_0} C_L(r, z, s) r J_0(\rho_m r) dr。$$

$C_G(\rho_m, \beta_n, s)$ ： $\overline{C_V}(\rho_m, z, s)$ 通用型積分轉換，

$$C_G(\rho_m, \beta_n, s) = \int_0^L K(\beta_n, z) \overline{C_V}(\rho_m, z, s) dz。$$

$C_V(\rho_m, z, s)$ ：為 $C_H(\rho_m, z, s)$ 之變數變換，

$$C_H(\rho_m, z, s) = e^{\frac{V}{2D_L} z} C_V(\rho_m, z, s) + \frac{\sigma}{V} g_H(\rho_m)。$$

D ：延散係數 $[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$ 。

D_L ：沿水流方向之縱向延散係數 $[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$ 。

$\text{erfc}(\bullet)$ ：補誤差(complementary error)函數。

D_T ：垂直水流方向之側向延散係數 $[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$ 。

F_x ：溶質傳輸通量 $[\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}]$ 。

$$g_H(\rho_m)：g_H(\rho_m) = \begin{cases} \frac{R_i^2}{2} & \rho_m = 0 \\ \frac{R_1 J_1(\rho_m R_i)}{\rho_m} & \rho_m \neq 0 \end{cases}。$$

$J_0(\bullet)$ ：零階第一類 Bessel 函數。

$J_1(\bullet)$ ：一階第一類 Bessel 函數。

$K(\beta_n, z)$ ：通用型積分轉換之核心函數(kernel function) ，

$$K(\beta_n, z) = \frac{V}{2D_L} \sin(\beta_n z) + \beta_n \cos(\beta_n z)。$$

L ：地表至自由水面的長度 [L]。

$$p(\beta_n) : p(\beta_n) = \frac{2}{L \left(\frac{V^2}{4D_L^2} + \beta_n^2 \right) + \frac{V}{D_L}}。$$

M ：注入追蹤劑質量 [M]。

r ：以入滲環中心為原點之徑向座標 [L]。

R_i ：追蹤劑注入環半徑 [L]。

R_o ：雙環入滲儀外環半徑 [L]。

s ：Laplace 轉換參數。

V ：穩態入滲速度 [LT⁻¹]。

z ：以地面為原點垂直方向座標(向下為正) [L]。

$$\beta_n : \text{通用型積分轉換參數，為滿足 } \frac{\frac{V}{D_L} \beta_n}{\beta_n^2 - \frac{V^2}{4D_L^2}} = \tan(\beta_n L) \text{ 之所有解(特徵值)。}$$

ϕ ：有效孔隙率 [-]。

$\delta(\bullet)$ ：Dirac delta 函數。

ρ_m ：有限 Hankel 轉換參數，為滿足 $\frac{dJ_0(\rho_m R_o)}{dr}=0$ 之所有解(特徵值)。

$$\sigma \, : \, \sigma = \frac{M}{\phi \pi R_i^2} \, .$$

$$\theta(\beta_n) \, : \, \theta(\beta_n) = \frac{\frac{V}{D_L} \beta_n}{\frac{V^2}{4D_L^2} + \beta_n^2} \, .$$

$$\Gamma(z,\beta_n) \, : \, \Gamma(z,\beta_n) = \theta(\beta_n)p(\beta_n)K(z,\beta_n) \, .$$

第一章 計畫背景與目的

1.1 計畫緣起

台灣過去數十年間經濟高度發展，環境污染伴隨各類工業與農業等人為活動而陸續出現，許多土壤與地下水污染問題的浮現，導致人體健康與生態環境安全備受威脅。一般而言土壤與地下水污染的來源主要來自於地表的各種污染物伴隨著水體(包括廢水、雨水、灌溉水)的入滲而向下遷移進入土壤與地下水系統。向下遷移的污染物先通過土壤非飽和層，部分污染物可能因為土壤的吸附作用而停留在土壤中，其餘的污染物則往下繼續滲漏直達地下水含水層系統，而吸附停留在土壤中的污染物，亦將藉由持續入滲及相關地化反應而脫附至水中，進而向下入滲至深層土壤或地下水含水層系統。

由於污染物進入地下水含水層系統時，相關的水文地質化學反應主要發生於非飽和層(unsaturated zone)，因此了解地表污染源藉由入滲作用而進入土壤非飽和層的傳輸行為，對於相關污染調查、預防與整治皆扮演重要角色，針對此類傳輸行為，宿命傳輸模式(fate and transport model)為預測並了解污染物移動與分布之有效工具，且宿命傳輸模式所預測的污染物動態，亦為健康風險評估(health risk assessment)的基礎(Vanderborght and Vereecken, 2007)。

關於不同的土壤宿命傳輸模式的假設、控制方程式與數值方法可參考(Vanclooster et al, 2005)的整理回顧。除選擇適當的宿命傳輸模式，模式參數亦是非常重要，相關資料庫如 HYPRES 資料庫(Wösten et al., 1999)與 UNSODA(Nemes et al., 2001)提供了土壤水力參數(soil hydraulic parameter)資料。宿命傳輸模式的建立都採用移流-延散方程式(Advection-Dispersion Equation, 簡稱 ADE)，在 ADE 中移流與延散傳輸為污染物移動主要機制，移流(advection)傳輸描述污染物在多孔介質(porous medium)隨平均孔隙水流的移動，然而由於多孔介質流動的數學模式都採用 Darcy 定律，並未考慮在孔隙的分佈之異質性(heterogeneity)，這種異質性將造成在

個別孔隙地下水流動流速與流徑的差異，進而造成污染物的分散現象(污染團的範圍變大與濃度減低)。由於純移流傳輸無法適當描述此溶質的分散現象，故研究者提出利用延散(dispersion)傳輸的觀念來修正、彌補此不足。研究者通常假設延散傳輸遵循 Fick's 定律，即溶質傳輸通量(F_x)正比於濃度梯度($\frac{dC}{dx}$)，表示為

$$F_x = -D \frac{dC}{dx} \quad (1-1)$$

此處 D 為兩者間之正比常數，稱為延散係數(dispersion coefficient)，延散係數為衡量污染分散程度之重要參數，分為縱向延散係數(longitudinal dispersion coefficient)與側向延散係數(transverse dispersion coefficient))，其中縱向延散係數為沿水流方向溶質分散的程度，而側向延散係數則是垂直水流方向溶質分散的程度。Boesten(2004)指出延散係數大小會影響地表施用殺蟲劑在土壤中之分散，將對預測的年平均殺蟲劑濃度有重要影響，特別是在低入滲狀況下。

現地追蹤劑試驗為決定延散係數的有效方法，其主要是在控制流場下，注入追蹤劑(鹽水或染料等)，並於適當觀測點觀測濃度穿透曲線(breakthrough curve，簡稱 BTC)，由於此濃度穿透曲線受其傳輸過程所控制，因此可透過合適的數學模式進行曲線套配(curve-fitting)，反推估延散係數等參數。過去幾十年來在地下含水層的現地試驗方面，研究者提出自然梯度(natural gradient)或強制梯度(forced gradient)追蹤劑試驗的方式進行(詳細文獻回顧可參考Ptak et al., 2004)，其中強制梯度追蹤劑試驗法則是藉由人為產生水力梯度，其所產生之水力梯度遠大於自然水力梯度，故其觀測所需時間較短。過去十幾年來地下水系統自然梯度與強制梯度追蹤劑試驗為地表下污染傳輸之主要研究課題，相關文獻中已累積許多資料，許多學者(Gelhar et al., 1992; Schulze-Makuch, 2005; Bromly et al., 2007) 收集整理相關縱向延散係數資料，Gelhar et al. (1992)整理側向延散係數資料，但相關資料主要是針對地下水含水層系統之追蹤劑試驗，無法適用於地表土壤非飽和層。Vanderborght and Vereecken (2007)指出污染物在土壤非飽和層遷移的距離較地下水短，污染物在地下水系統的傳輸為水平向(平行層面)，而在土壤系統中則為垂直向下(垂直層面)。在土壤系統的追蹤劑試驗主要是結合垂直入滲流動加入追蹤劑分別在實驗室進行土柱試驗(column test)或現地入滲試驗，Vanderborght and Vereecken (2007) 整理土

壤延散係數資料(從57篇科學期刊論文)，但其主要都是縱向延散係數。側向延散係數大小影響污染團範圍與污染濃度高低(圖1-1)，側向延散係數大時，污染團將分布於較大範圍，且有較低濃度；反之側向延散係數小時，污染團將分布於較小的範圍，但有較高濃度。對於某些污染物，若其濃度低於某一濃度值時，即不致於對人造成危害，此時即期待污染場址有較大之側向延散係數使濃度值減低，反之若污染物即使濃度低時仍對人體造成危害，此時則期待污染場址有較小側向延散係數使污染團侷限於小區域範圍，因此推估側向延散係數為土壤與地下水污染整治非常重要之工作。

有鑑於側向延散係數的重要，Zhang et al. (2006)提出結合傳統入滲試驗與追蹤劑試驗的方法以同時決定縱向與側向延散係數(圖1-2)。其原理為利用傳統雙環入滲試驗，在入滲試驗過程中當水流達成穩態時，增加一環做為注入追蹤劑使用，因此稱為入滲追蹤劑試驗，配合相關濃度監測可同時決定縱向與側向延散係數。Zhang et al. (2006)同時發展一個二維圓柱座標系統之解析數學模式以分析試驗所得結果，並推求縱向與側向延散係數。雖然Zhang et al. (2006)提出了可以同時決定縱向與側向延散係數入滲追蹤劑試驗方法，但其不管在現地試驗部分與試驗數學模式執行都有待改進的地方。在Zhang et al. (2006)數學模式部份有幾點須檢視釐清：(1)模式假設觀測點距離注入源相當遠，但實際安置濃度採樣或觀測裝置時，其深度原則上不可能太深，因此數學模式與實際操作情狀並不一致，(2)模式考慮無限小半徑的注入源，此亦不符合實際狀況。在實際操作上Zhang et al. (2006)採用抽取杯(suction cup)來收集注入追蹤劑溶液，但如何選擇合適的抽取杯亦是學問，抽取杯的透水性太差時無法收集足夠進行分析之注入追蹤劑溶液，但如果抽取杯的孔隙太大則容易太多泥砂進入抽取杯，另外如何同時進行多點的追蹤劑溶液採樣亦是問題，相關實驗可能產生問題，惟有透過現場實際操作才能確實瞭解場執行的實務困難與問題，以改善儀器設計與操作流程。

1.2 計畫目的及工作項目

Zhang et al. (2006)所提的現地入滲追蹤劑試驗之現場執行實務問題與可能欠缺之技術操作細節須透過現場實際操作才能確實瞭解，而數學模式的不合理性惟有透過比較、檢驗改進使其更正確應用於分析現地試驗結果。故本計畫目的為：

(1) 改善入滲追蹤劑試驗方法

藉由多組別入滲追蹤劑試驗的現場實作，依據逐次結果，檢討執行時面臨的問題並提出解決辦法，評估操作程序與相關細節之可行性，並改善相關儀器設置，藉此提昇試驗方法之實用性與現地數據之精確度。

(2) 建立相關數學模式的合理性與適用範圍

檢討前人提出之試驗分析模式，依據本計畫得到的現地數據，建構合適的數學模式與分析方法，以準確推估試驗場址之土壤非飽和層縱向與側向延散係數、以進一步了解污染物傳輸行為。

本計畫執行期限為 100 年 11 月 26 日至 101 年 11 月 25 日，計畫總經費為 1,200 千元。

本計畫的三個主要工作項目包含：(一)改善現地入滲追蹤試驗流程與儀器設計；(二)發展符合現況的數學傳輸模式與分析方法；(三)建立入滲試驗與模式分析之操作執行規範。

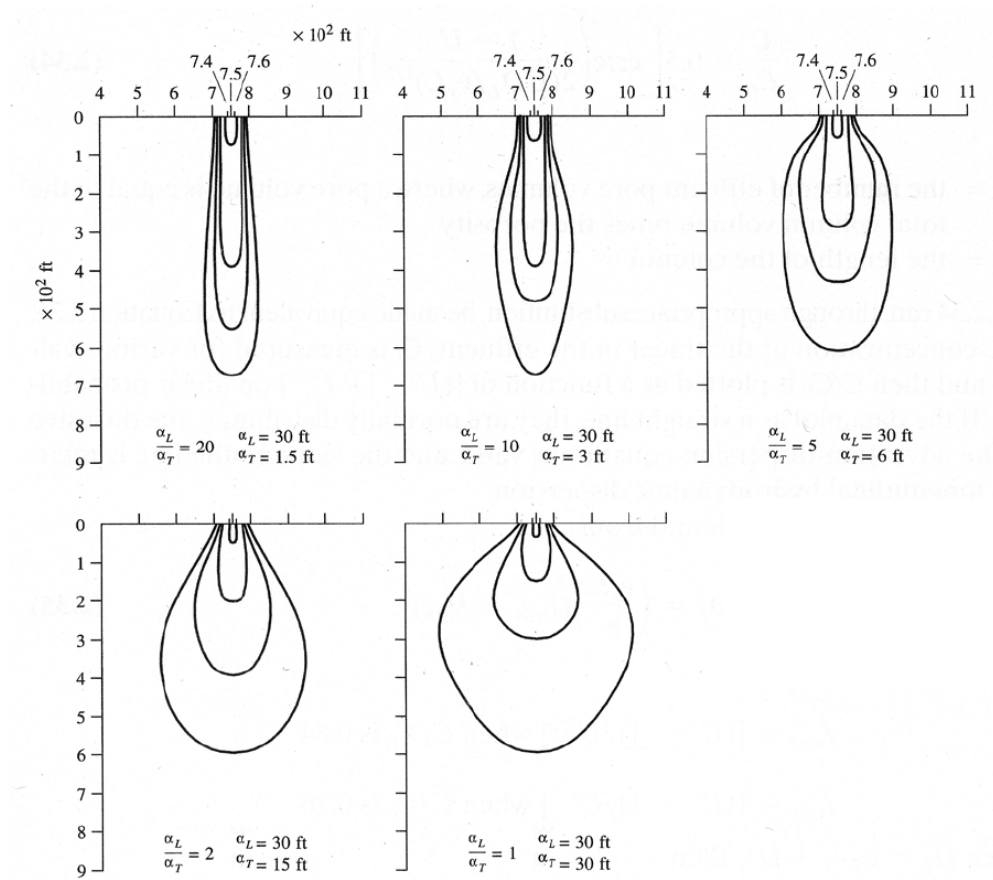


圖1-1 側向延散係數對污染團範圍影響示意圖。

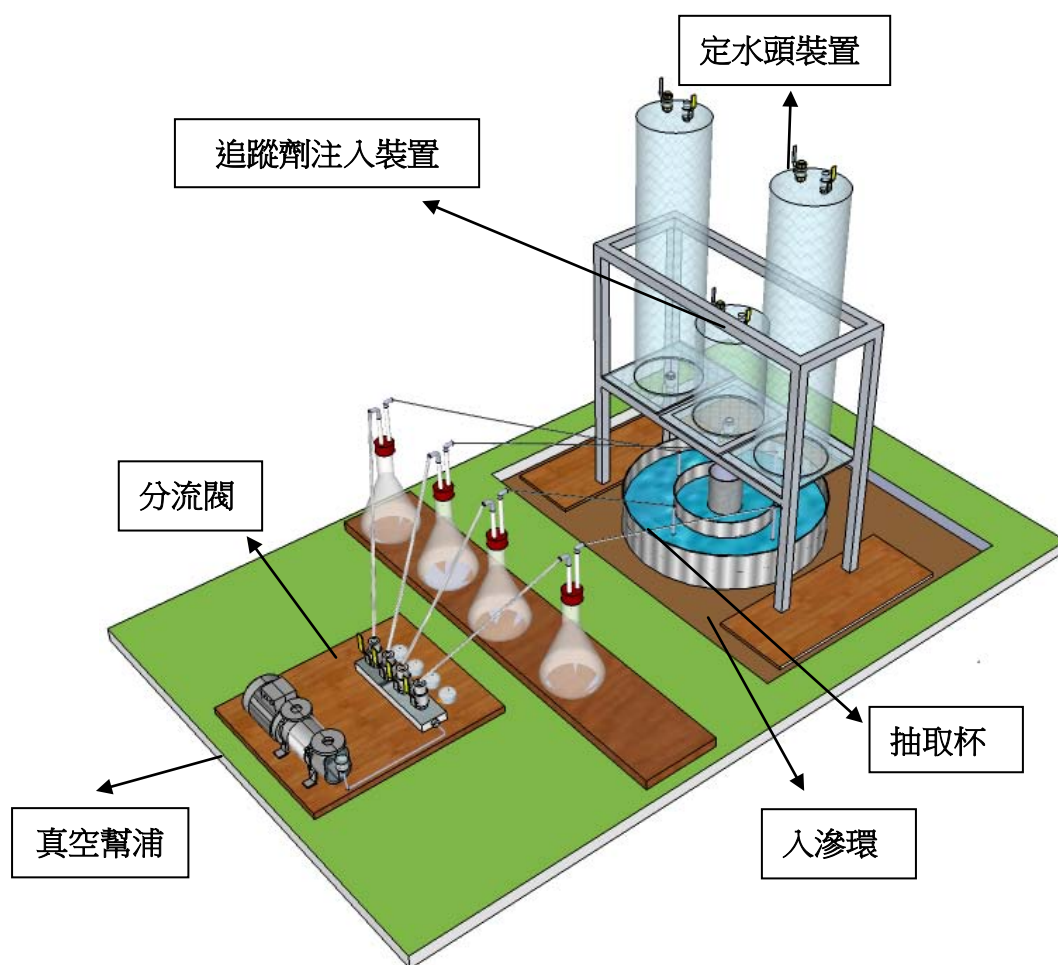


圖 1-2 入滲追蹤劑試驗示意圖。

第二章 入滲追蹤劑試驗改進工作計畫

本計畫進行推估土壤污染傳輸參數試驗方法的改進，計畫中藉由多次入滲追蹤劑試驗實際操作，以評估操作程序與相關細節之可行性，並改善相關儀器設計，藉以提昇試驗方法之實用性與現地數據之精確度。在進行入滲追蹤劑試驗實際操作前，本計畫針對入滲追蹤劑試驗原理與方法，儀器準備與使用、場址選定與水樣分析等提出工作計畫。

2.1 入滲追蹤劑試驗原理與方法

入滲追蹤劑試驗為Zhang et al. (2006)所提出結合傳統推估土壤入滲率的入滲試驗與推估污染傳輸參數的追蹤劑試驗的新方法，目的為同時決定土壤縱向與側向延散係數。試驗主要是利用傳統的雙環入滲試驗，當入滲率達穩定時，加入追蹤劑，並於土壤中每隔一段時間進行水樣採樣，藉由合適的數學模式分析至少兩個採樣點的濃度穿透曲線，可同時推估土壤的縱向與側向延散係數。為達到試驗中過程有側向延散現象發生，因此追蹤劑的注入不宜於整個雙環入滲儀注入，而是於雙環入滲儀另外加置一個追蹤劑注入內環做為注入追蹤劑使用。

現地進行入滲追蹤劑試驗的操作，首將入滲儀(兩個鐵環)與追蹤劑注入環，敲入土壤表層，用水填滿三環至一定水位高度，利用定水頭補注裝置(一般採用Marriot水槽)，維持水位高度，直至入滲率達穩態，在追蹤劑注入內環注入追蹤劑後，每隔一段時間利用抽取杯裝置採集土壤水樣，水樣經實驗室分析追蹤劑濃度後，將其繪製成濃度穿透曲線，並利用數學模式進行套配分析，可推估土壤的縱向與側向延散係數。

2.2 適用條件

根據ASTM D 3385 – 94 (ASTM, 1994)規範，雙環入滲試驗方法特別適用無非常塑性黏土的與礫石尺寸顆粒相對較均一細顆粒土壤，且對入滲儀的貫入有低至中的抵抗力，此試驗方法可於地表面或一定深度的凹坑進行，可在地表無被覆或有作物進行，但此試驗方法無法在試驗地表低於地下水位(water table)或暫棲水位(perched water table)進行，此方法在非常透水或非常不透水的土壤(土壤的水力傳導係數大於 10^{-2} cm/s或者小於 10^{-6} cm/s)可能不易執行或所得的資料可能是不準確，對於土壤中可能存在裂隙此方法亦不能適用。

2.3 儀器準備

入滲追蹤劑試驗的基本設備包括入滲率控制裝置、追蹤劑注入裝置、土壤追蹤劑採樣裝置與其他輔助裝置等。以下就相關儀器設備進行說明。

(1) 入滲率控制裝置

入滲率控制裝置包括雙環入滲儀與定水頭補注裝置。

雙環入滲儀：由內徑30cm 之內環與60cm 之外環所組成(如圖2-1所示)，一般為厚度0.2mm 之白鐵所製成，主要功能為限制注入水於入滲儀內，其中入滲儀外環主要功用為補給向下與向外的入滲水，使入滲儀內環的入滲水維持僅有向下的水流方向。

定水頭補注裝置：定水頭裝置主要補給入滲所需的水量並控制環內維持固定水頭高度(如圖2-2)，此裝置採用Marriot水槽的概念設計，由於現地入滲率隨土壤質地而不同，當現地入滲率太大時，須製作較大的水槽或使用多個水槽，水槽上應標上刻度以利於計算現地入滲率。

(2) 追蹤劑注入裝置

包括置放追蹤劑的定水頭補注裝置(如圖2-2)與5cm追蹤劑注入環(如圖2-3)，試驗中將追蹤劑注入環置於入滲儀中心，藉由追蹤劑水槽將追蹤劑注入注入環進而入滲進入土壤。

(3) 追蹤劑採樣裝置

追蹤劑採樣裝置主要用來從土壤中進行追蹤劑採樣，本計畫設計一可多點同時採樣裝置，採樣裝置由抽取杯、錐形瓶、分流閥(圖2-4)、與真空幫浦(圖2-5)組成。

抽取杯：放置於不同深度採樣點採集土壤水樣，於PVC 塑膠管前端裝設透水石，於PVC塑膠管後端連結錐型瓶收集抽出水樣。



圖 2-1 雙環入滲儀

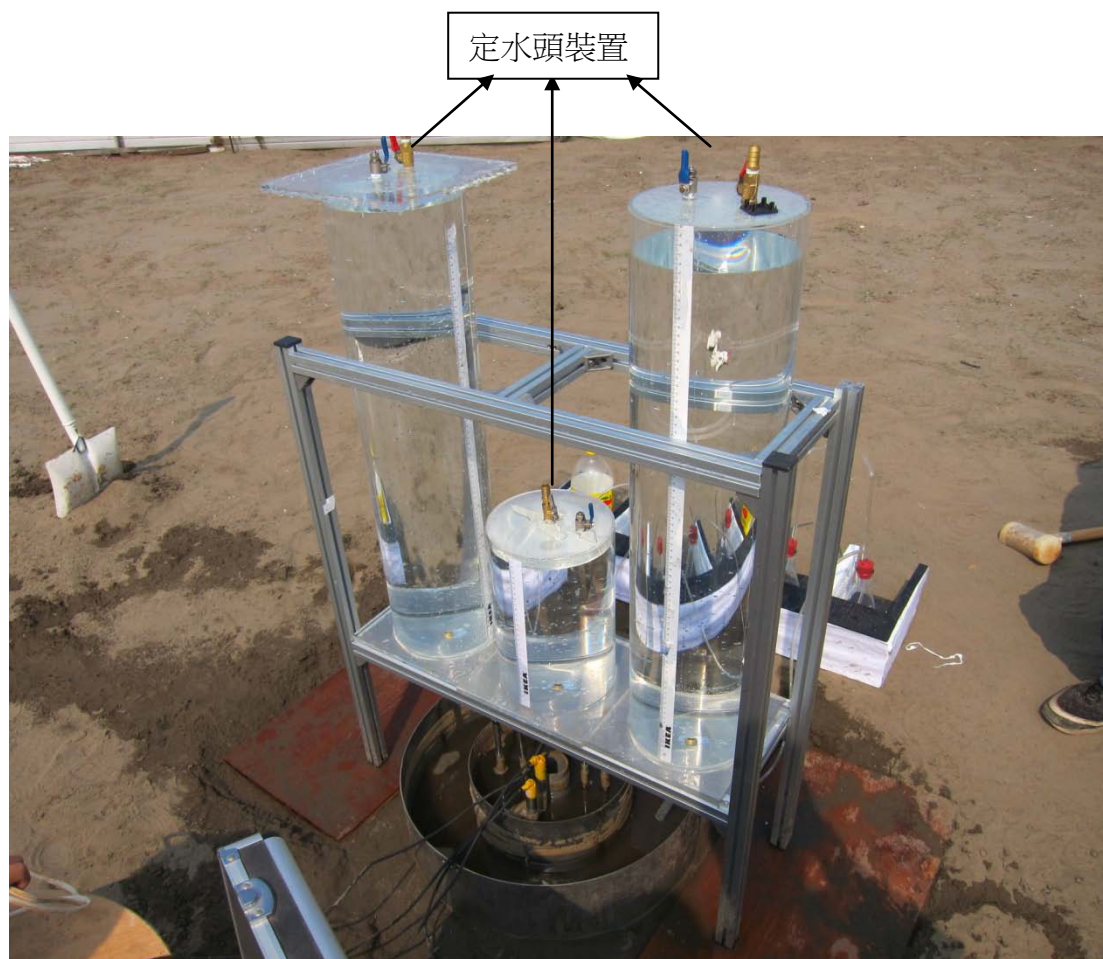


圖 2-2 使用定水頭裝置維持入滲環內定水頭



圖 2-3 直徑 5cm 注入環。

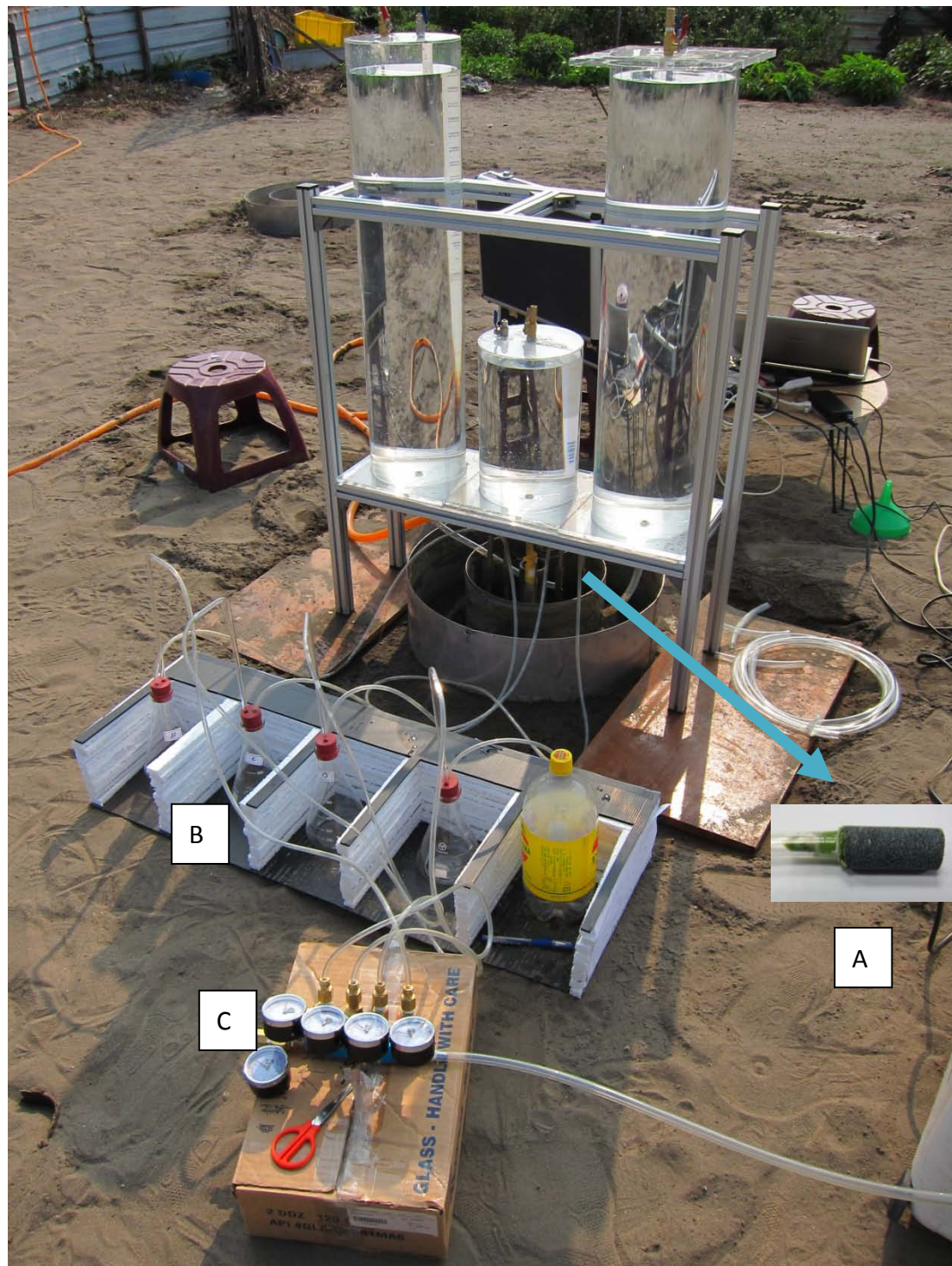


圖 2- 4 追蹤劑採樣裝置，(A)抽取杯、(B)錐形瓶、(C)分流閥。



圖 2- 5 追蹤劑採樣裝置：真空幫浦。

真空抽氣幫浦：為抽取杯提供吸力抽取土壤水樣。

分流閥：將真空抽氣幫浦吸力分流至多個抽取杯，藉此同時於多個採樣點採集水樣，另有調節各分流流率的功能。

錐形瓶：瓶口直徑4公分，高18公分，容量250ml的錐形瓶，於錐形瓶上方設置有雙孔之橡膠軟塞，並插入兩L型玻璃管分別連結真空幫浦與抽取杯。

(4) 其他輔助裝置

十字盤：可承受敲打之13公厘厚鋁合金，具5公厘深，1公厘寬的溝，用以嵌入雙環入滲儀，使雙環成同心圓(圖2-6)。

鏟子：利用鏟子將試驗場地刮平，試驗場地需要水平3平方公尺的區域進行。

橡膠鎚或木鎚：利用十字盤將入滲環固定後，需將入滲環踩實並利用橡膠鎚或木鎚敲擊十字盤的中心將入滲環打入土層約8~10公分。

地螺鑽：總長120公分底端設有鑽頭之實心鋼條，頂端T杆式的手把便於鑽入土壤中以安裝抽取杯(圖2-7)

L型管玻璃管：設置一高一低的兩玻璃管於錐形瓶口的橡膠塞，連結真空幫浦抽氣用L型玻璃管需設置於較高的位置，避免液體進入真空幫浦可能導真空幫浦的損壞，連結抽取杯之L型玻璃管設置於較低的位置插入約至錐形瓶的中下方，將抽取杯採集隻水樣收集至錐形瓶。

鐵製支撐架：支撐架用來擺放定水頭裝置，可調整定水頭裝置擺放平台至地面的高度，擺放平台一般設於距地面30公分處，底部設置四條橫架，以保持鐵架的平衡。

節流閥：於所有定水頭裝置底部出水孔接設置節流閥，便於開關控制水流。

氣閥：於定水頭裝置上方需裝置氣閥與節流閥，定水頭裝置補水時，關閉底部的節流閥避免水流出，開啟上方的氣閥與節流閥，於定水頭裝置上方節流閥處補水，並藉由氣閥排出定水頭裝置內空氣，需注意補水時氣閥沒有打開會造成定水頭裝置氣壓過高導致水箱爆裂。



圖 2- 6 其他輔助物裝置：十字盤。



圖 2- 7 其他輔助裝置:地鏢鑽。

2.4 試驗地點選定

本試驗地點位於宜蘭縣五結鄉(圖 2-8)，現地試驗可能面臨各種的問題與困難，場地、土壤性質、採樣尺度，注入延時與滲入率都是可能影響計畫執行成功與否的關鍵因素，本計畫經多次現勘初步擇定以宜蘭龍德工業區附近一較均質之砂質土壤進行試驗(圖 2-9)，以確保計畫執行的可行性。



圖 2- 9 入滲追蹤劑試驗場地實際情況。

2.5 分析方法

本計畫採集樣本主要分析水溶液中氯鹽濃度，分析方法主要參照環檢所環署檢字第 0940035295 號公告之「水中陰離子檢測方法-離子層析法」，水樣中之待測陰離子，隨流洗液流經陰離子層析管柱時，因其與強鹼性陰離子交換樹脂間之親和力不同而被分離，分離後再流經高容量陽離子交換樹脂抑制裝置，而被轉換成具高導電度酸之形態，移動相溶液則轉換成低導電度之碳酸。經轉換後之待測陰離子再流經電導度偵測器，即可依其滯留時間及波峰面積、高度或感應強度予以定性及定量。

收集後之水溶液樣本首先藉由抽取針筒與 0.22 μ m 過濾頭進行水樣過濾，除了避免沈積物或微生物影響各離子濃度，亦降低樣本通過離子層析管柱時堵塞的機率。過濾後的樣本再以離子層析儀分析氯鹽濃度，每次進樣體積為 1ml，且以二重複進行，必要時得稀釋不同倍率，達成檢測分析之目的。本計畫採用離子層析儀 (Ion Chromatography, IC) 主要包括下列四部份：

- (1) **蠕動幫浦**：樣本注入管柱時，須以蠕動幫浦帶動液體流動。
- (2) **分離管柱**：陰離子分析之沖提液pH值約為8~12，陽離子分析時則為2~5。分離管柱充填之樹脂多為低容量有機離子交換樹脂，可耐強酸鹼。低容量可延長抑制管柱壽命，且可使抑制效果更佳。
- (3) **抑制管柱**：一般為高容量交換樹脂，其作用可降低沖提液之電導度，並提高分析離子之解離度。
- (4) **偵測器**：通常為電導度計，重金屬分析時因不易以電導度計測量，可將重金屬離子以呈色劑形成錯離子呈色後，再以UV/Vis偵測器測定。

本計畫另以環檢所環署檢字第 0910065071 號公告之「水中氯鹽檢測方法-硝酸銀滴定法」分析氯鹽含量，作為數據分析比對，以確保後續模式參數輸入之準確性，此法在中性溶液中，以硝酸銀溶液滴定水中的氯離子，形成氯化銀沈澱，在滴定終點時，多餘的硝酸銀與指示劑鉻酸鉀生成紅色的鉻酸銀沈澱。其步驟為取 100 mL 水樣或適量水樣稀釋至 100 mL，以硫酸或氫氧化鈉溶液、酚酞指示劑，調整水樣之 pH 至 7-10，加入 1 mL 鉻酸鉀指示劑，最後以硝酸銀滴定溶液滴定至帶桃紅色之黃色終點，依據滴定體積計算水中氯鹽含量。

本計畫另以環檢所環署檢字第 0910065071 號公告之「水中氯鹽檢測方法-硝酸銀滴定法」分析氯鹽含量，作為數據分析比對，以確保後續模式參數輸入之準確性，此法在中性溶液中，以硝酸銀溶液滴定水中的氯離子，形成氯化銀沈澱，在滴定終點時，多餘的硝酸銀與指示劑鉻酸鉀生成紅色的鉻酸銀沈澱。其步驟為取 100 mL 水樣或適量水樣稀釋至 100 mL，以硫酸或氫氧化鈉溶液、酚酞指示劑，調整水樣之 pH 至 7-10，加入 1 mL 鉻酸鉀指示劑，最後以硝酸銀滴定溶液滴定至帶桃紅色之黃色終點，依據滴定體積計算水中氯鹽含量。

第三章 現地試驗程序與改進

3.1 試驗步驟

現地試驗大致可分為六個步驟，試驗流程如圖3-1所示，現場實際操作步驟如圖3-2~圖3-9，為達成改善現有入滲試驗之目的，本計畫將重複多次試驗，並針對歷次結果，檢討試驗流程與儀器設計改善之必要，以下針對各步驟重點說明：

- (1) **場地整理與準備**：選擇較平坦之小區鏟除部份表土整平。
- (2) **安置入滲環**：試驗場地之表土以不擾動為原則，將雙環入滲儀嵌入十字盤，使其成同心圓排列，以橡膠鎚將雙環入滲儀均勻打進土層約8 cm~10cm。此改良方法需於傳統的雙環入滲儀增加追蹤劑一注入環做為注入追蹤劑使用。
- (3) **安置追蹤劑採樣裝置**：以地鐮鑽入土壤，拔出再將抽取杯置入鑽孔，再將抽取杯與分流閥真空幫浦組合。
- (4) **安置定水頭補注裝置**：由於實驗需於入滲率為穩態情況下執行，故將於鄰近水源區取水，直接灌至雙環入滲儀內，加速現地土壤濕潤，直至入滲率接近穩態後，架設定水頭補注裝置保持雙環入滲儀與追蹤劑注入環的水頭高度一致，並避免液體從一個環流向另一個環，於試驗間保持雙環入滲儀與追蹤劑注入內環水面高度一致，初期由於土表未達飽和入滲狀態，入滲率較高，隨時間增加入滲率逐漸降低並趨於定值，藉此判斷已達成飽和入滲之狀況，直到入滲率達到穩態此時可由此時補助的水量計算入滲率。
- (5) **注入追蹤劑**：事先製備追蹤劑溶液，本試驗選用KCl，將其注入於追蹤劑注入內環，注入追蹤劑後，等待追蹤劑全部進入土壤內後，維持注入環內，水頭與雙環入滲儀一致。
- (6) **追蹤劑水樣採樣**：打開真空幫浦抽取土壤水樣，每隔一段時間抽取土壤水樣，並記錄時間點。採集足夠進行濃度分析之水量後，把瓶口打開將水樣倒進採樣瓶中，將採樣瓶放入冰筒冷藏於4°C之下保存，於實驗室進行追蹤劑濃度分析。

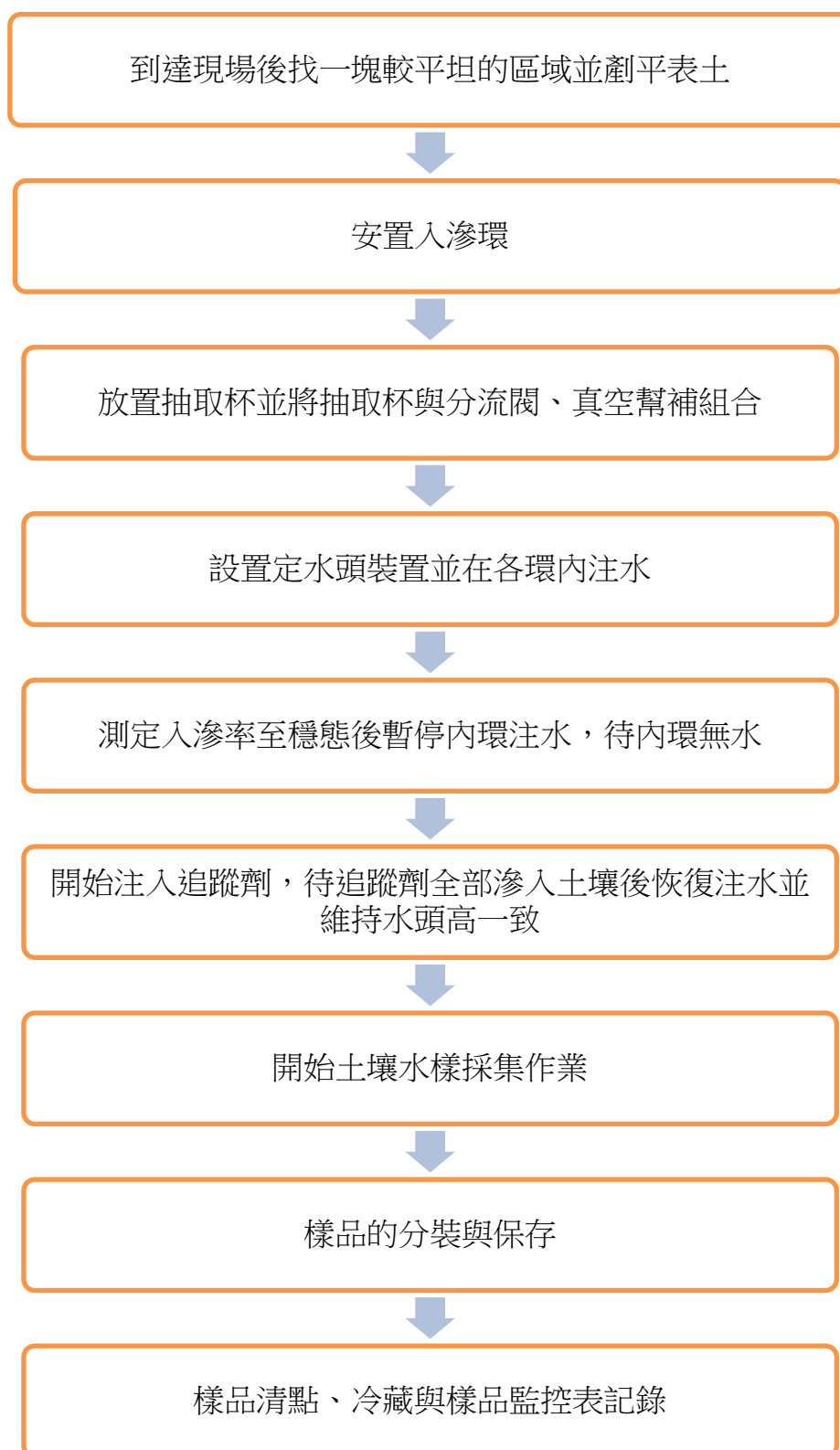


圖 3-1 入滲追蹤劑試驗流程圖。



圖 3-2 剷平表土。



圖 3-3 組合入滲環。



圖 3-4 將入滲環放置到刮平的土上。



圖 3- 5 敲打十字盤。



圖 3- 6 鑽孔放置抽取杯。



圖 3- 7 連結分流閥與幫浦。



圖 3- 8 放置定水頭裝置。

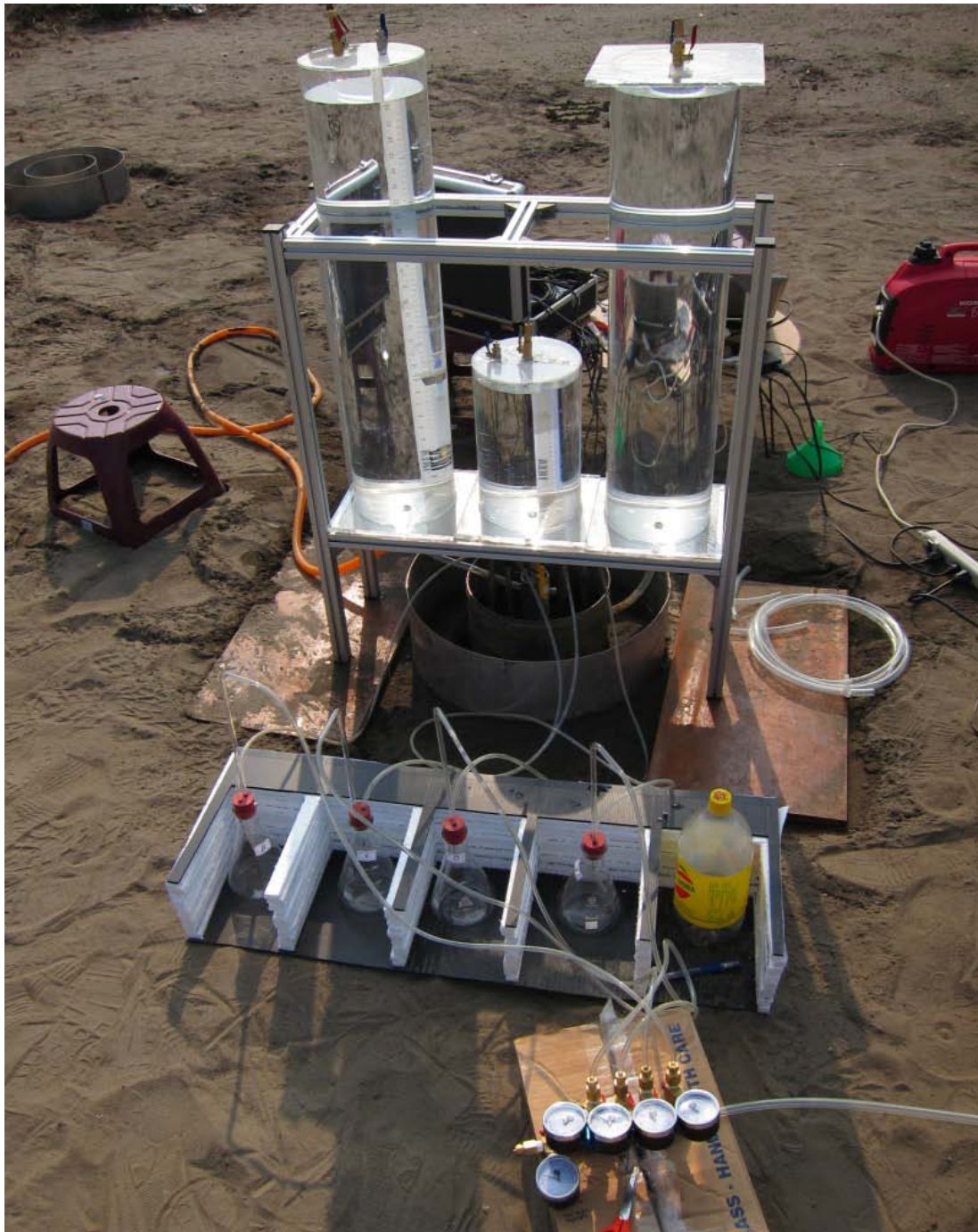


圖 3-9 完成裝置並開始進行入滲追蹤劑試驗。

3.2 入滲追蹤劑試驗檢討與改進

3.2.1 第一次試驗

儀器準備完成後，於 101 年 02 月 23 號進行第一次現場測試，此次試驗進行由於天氣晴朗，試驗場地內的砂土非常乾燥，造成入滲速率相當快速，試驗時用於雙環入滲儀與追蹤劑注入內環的定水頭裝置 (圖 3-10)，容量各約為 25 與 10 公升，底盤設置一閥門(圖 3-11)連結水管至雙環入滲儀內預定的定水頭高度，由於入滲率大於定水頭裝置的補注率，此定水頭裝置無法在補水期間，繼續維持入滲環內水頭高。因此下次試驗須進行定水頭補注裝置、數量與閥門數的修改。為了解各觀測點所得的追蹤劑濃度曲線，此次試驗的水樣在實驗室以 IC 進行分析，圖 3-12 與圖 3-13 為連續定濃度注入於($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)與($r = 10\text{ cm}$, $z = 50\text{ cm}$)處之濃度穿透曲線，從圖中可以發現其曲線型態為試驗開始後逐漸上升至一尖峰濃度，而後由尖峰濃度逐漸下降至一穩定濃度(呈現些許震盪)，此曲線型態與一般連續定濃度注入試驗型態並不相符，推測其原因應為試驗後期無法維持定水頭，所以造成後期入滲流速的減小，進而造成後期濃度的減低。

依照此次試驗發生的各種情況，本計畫增加定水頭裝置的數量、容量、閥門數、與改造支撐定水頭裝置用的用鐵架。將內、外入滲儀的定水頭補注裝置都增加至各兩個(圖 3-14)，其中一定水頭裝置中的水用盡時，將其底部閥門關閉，開啟另一個滿水的定水頭裝置繼續補水並補充水用盡之定水頭裝置。定水頭裝置底部的出水口也增加為兩個(圖 3-15)，可使出水速率增加，當水面低於水管底部時，其中一閥門進氣，而另一閥門則同時出水，改善原本的單一閥門需在同一管口同時進氣與出水，大量提升定水頭裝置之補注量。最後重製能夠承載新定水頭裝置的支撐鐵架(圖 3-16)。



圖 3- 10 入滲內、外環與注入環用的定水頭裝置。

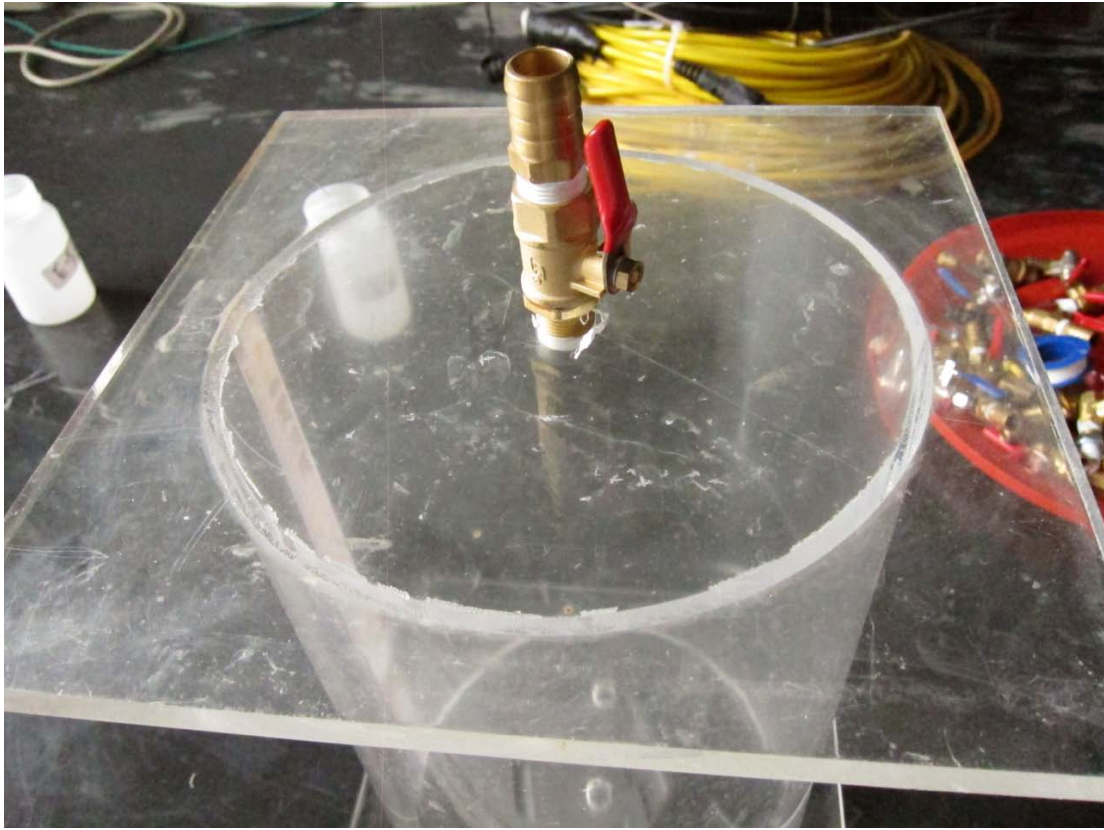


圖 3- 11 底部設置一只閥門的定水頭裝置(改良前)，圖中為定水頭裝置底部翻轉向上。

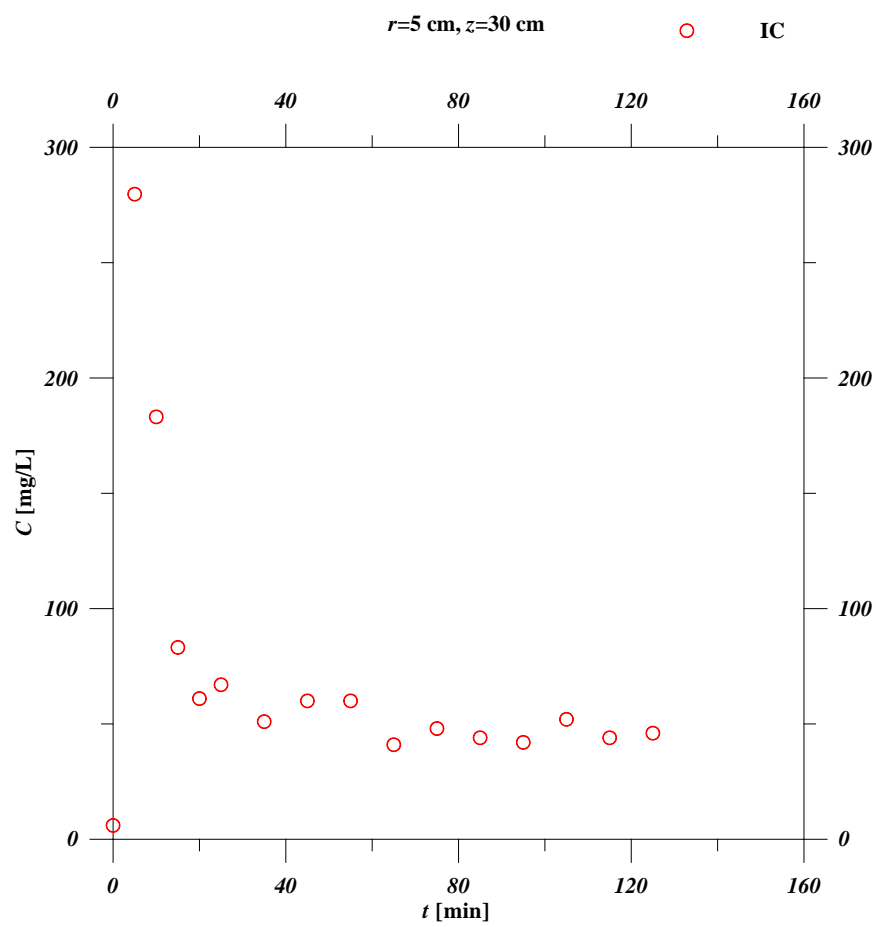


圖 3- 12 第一次試驗連續定濃度注入觀測點($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)之濃度穿透曲線 (IC)。

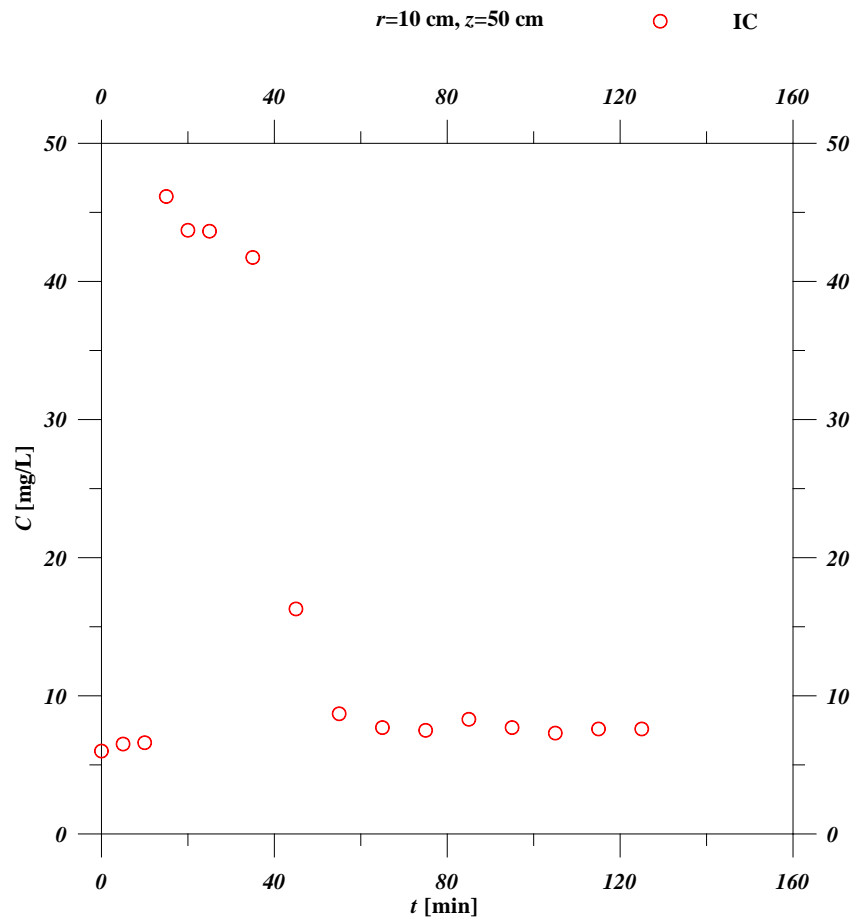


圖 3- 13 第一次試驗連續定濃度注入觀測點($r = 10\text{ cm}$, $z = 50\text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC)。

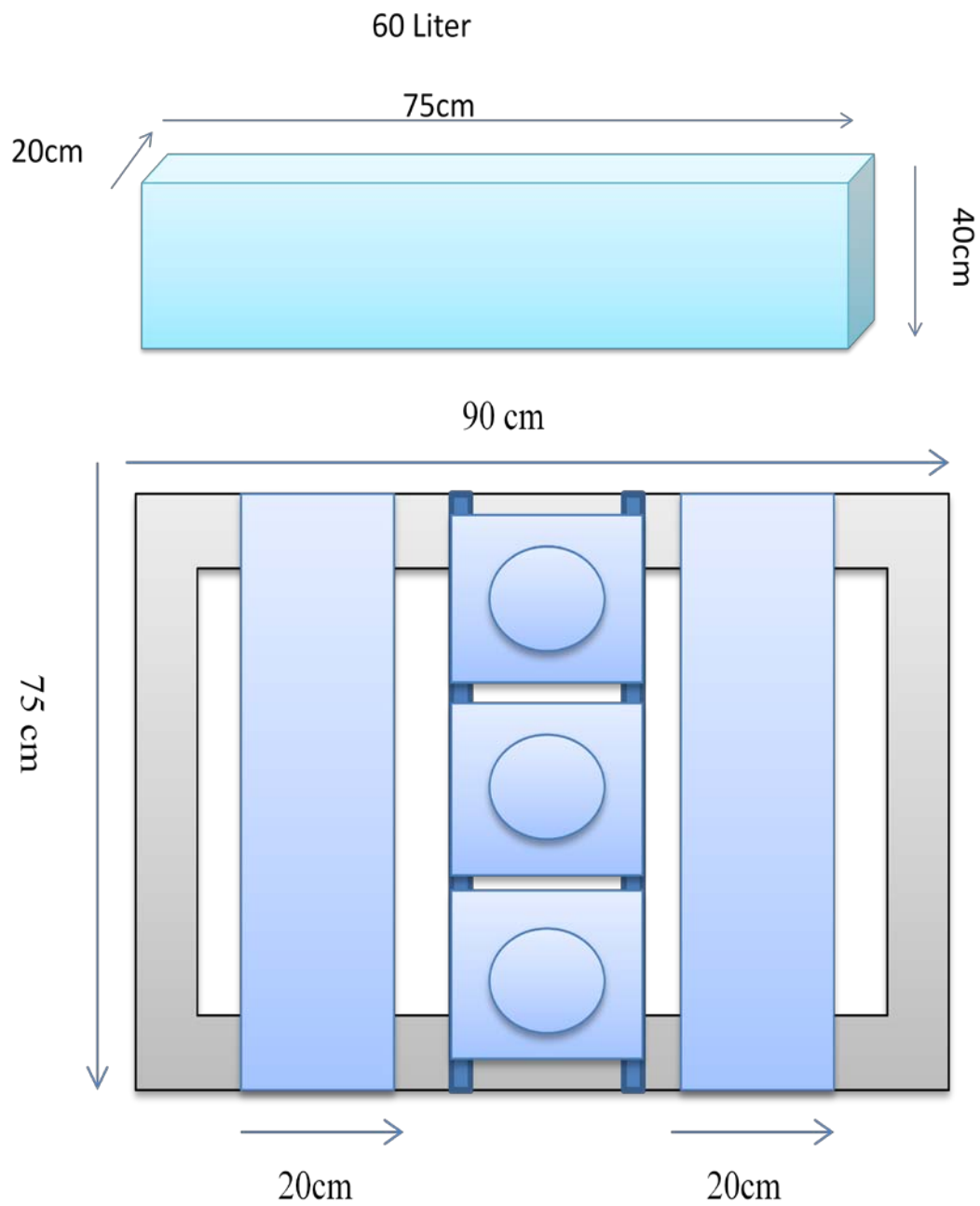


圖 3- 14 改良後外環定水頭裝置與定水頭裝置俯視圖。



圖 3- 15 定水頭裝置底盤閥門數增加至兩個(改良後)。



圖 3- 16 定水頭裝置的支撐鐵架(改良後)。

3.2.2 第二次試驗

經改良並重新製作相關試驗裝置後，本計畫於 101 年 04 月 01 號進行第二次現地測試，本日天氣晴朗但有午後雷陣雨。此次實驗發現，修改後的器材擺放過於壅擠，造成不易控制定水頭裝置底部閥門，且不易目測入滲儀內的水頭情況。修改後的定水頭裝置無法於閥門下方垂直補注入滲儀，需另接一個彎頭(圖 3-17)轉接至入滲內環之中，然而塑膠軟管會造成入滲內環中的水頭無法維持統一高度的情形發生。另外此次試驗發現採樣點在土壤的較深處會造成土壤水採集的困難，試驗後將對以上問題進行儀器修改。

依照此次試驗發生的各種情況，首先對定水頭裝置上部壅擠的問題做修正，縮小追蹤劑注入環定裝置圓筒(圖 3-18)的半徑並增加長度以方便目測下降的水量。設計一抽取杯儲水裝置(圖 3-19)，以期能於離地表較遠處的觀測點取得足夠分析的水量，抽取杯儲水裝置概念為塑膠圓管，內附上一層濾棉阻止砂土進入抽取杯儲水裝置。塑膠軟管彎曲問題對於入滲環內定水頭有非常大的影響，於塑膠軟管外套上一硬管(圖 3-20)來解決此問題。

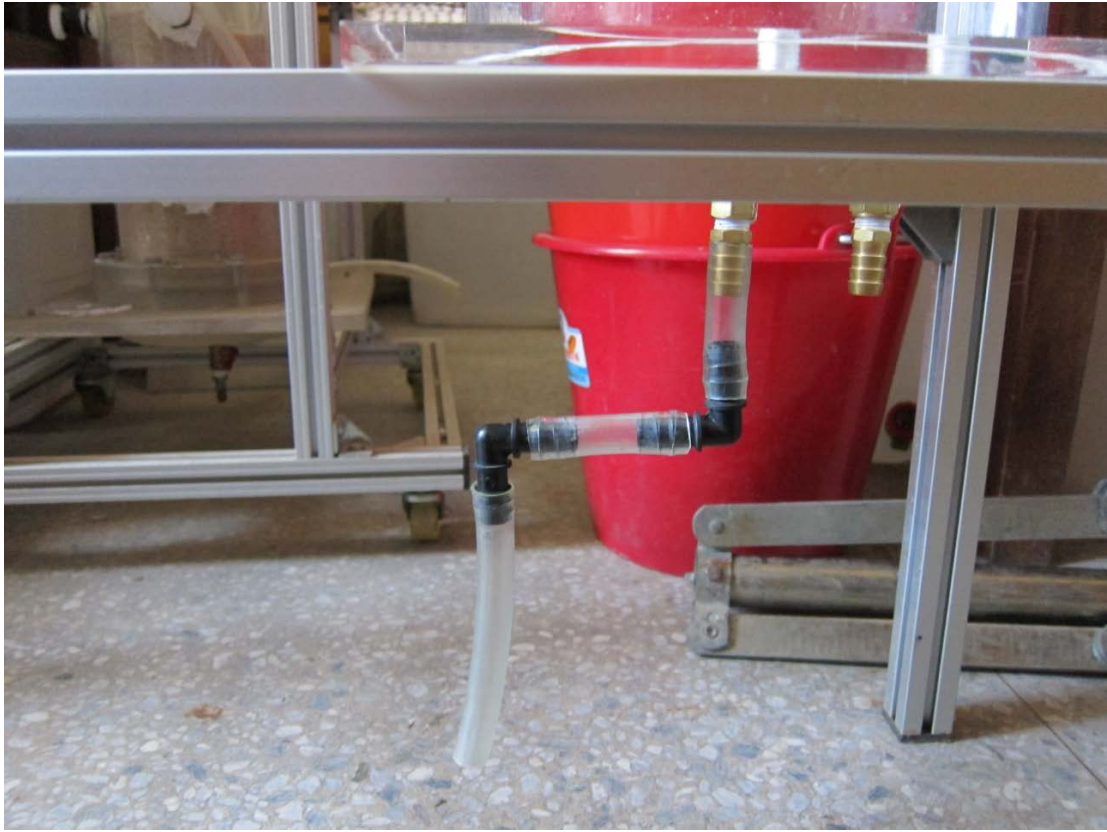


圖 3- 17 為入滲儀內環補水所設計之彎頭。



圖 3- 18 改良後的注入環定水頭裝置。



圖 3- 19 抽取杯儲水裝置。



圖 3- 20 塑膠軟管外套上硬管之改良圖。

3.2.3 第三次試驗

經重新改良相關儀器裝置後，本計畫繼續於 101 年 05 月 11 號進行第三次試驗，此次試驗期間天氣陰時偶陣雨，試驗地點由於先前已經連續下了好幾天的陣雨，土壤相對較為濕潤，因此試驗入滲率比起上二次試驗明顯下降了不少，本次試驗雙環入滲儀內、外環內均能持穩定的水頭高度，且各點採樣均取得充足的土壤水樣以供實驗室分析使用，現場亦利用電導度計概估可能的濃度穿透曲線，作為試驗結果驗證依據，水樣經冷凍保存，送至實驗室進行 IC 分析。圖 3-21 至圖 3-22 為連續定濃度注入方式所得之了兩個不同觀測位置($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)與($r = 10\text{ cm}$, $z = 40\text{ cm}$)之濃度穿透曲線，從圖 3-21 可以發現濃度從試驗開始逐漸上升，到達第 1 次的峰值後開始下降，下降至一濃度後又逐漸上升達到另一峰值後，小幅下降但仍維持一定濃度，此一雙峰濃度穿透曲線並不符合連續定濃度注入之穿透曲線型態。圖 3-22 基本上亦呈現雙峰濃度穿透曲線型態，所不同的是第 1 峰值明顯的高於第 2 峰值，此一雙峰濃度穿透曲線也不符合連續定濃度注入之穿透曲線型態。此次檢討整個過程，推測由於鑽孔後，安置抽取杯後並未確實進行砂土的回填，以致附近的孔隙可能相較於原來的土層鬆散，造成優勢流動路徑，試驗經過一段時間，由於優勢路徑入滲的水流所攜帶的部份砂土，逐漸將這些較鬆散的路徑填實後，濃度才逐漸趨於穩定。

於試驗結束之後將土壤挖開後把抽取杯拔起，觀察抽取杯在土壤中的情形(圖 3-23)，可見濾棉前端有泥沙淤積的情形，因此須將濾棉長度加長超出抽取杯儲水裝置以解決此問題。

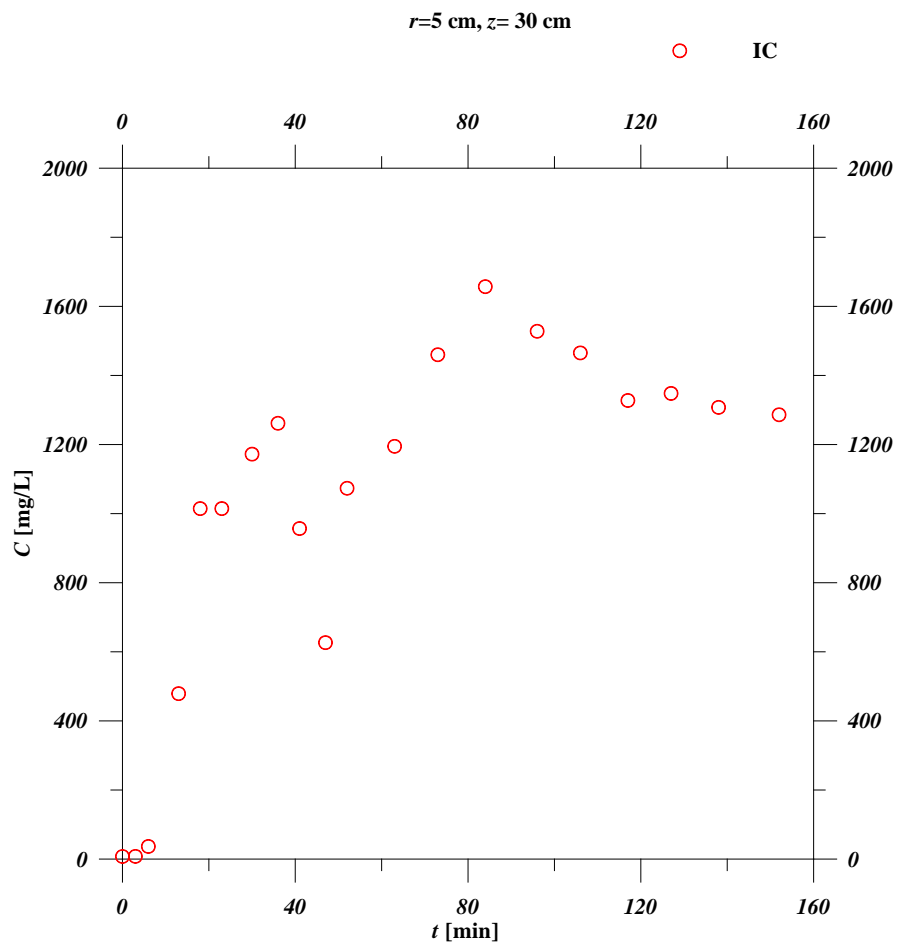


圖 3- 21 第三次試驗連續定濃度注入觀測點($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)之濃度穿透曲線 (IC)。

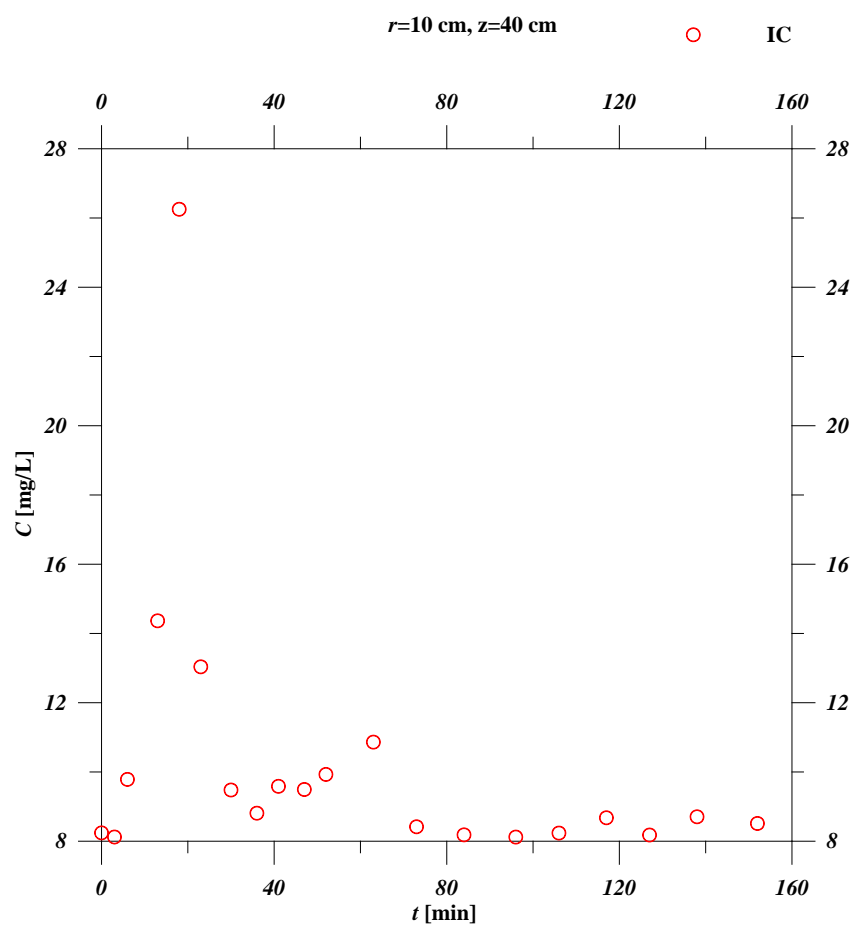


圖 3- 22 第三次試驗連續定濃度注入觀測點($r = 10\text{ cm}$, $z = 40\text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC)。



圖 3- 23 觀察抽取杯淤積砂土的情形。

3.2.4 第四次試驗

本計畫於 101 年 06 月 27、28 日進行第四次試驗測試，兩日皆天氣晴朗，入滲速率與前次試驗相比稍快，本次試驗因採用新的支撐架，因此在維持支撐架的水平需花費較多的準備時間。此次試驗在試驗執行的改進主要是在鑽孔放入抽取杯後不再使用套管，而是直接於鑽孔回填砂土以減低在抽取杯採樣裝置附近因鑽孔過程與套管放置所可能造成的優勢流動路徑(圖 3-24)。此次也特別注意到保持所有定水頭裝置出水閥門位置以保持雙環入滲儀與追蹤劑注入環內水頭平穩一致(圖 3-25)。為進一步比較水質分析的正確性，於每次採樣後，亦利用電導度量測水樣的導電度，採集的水樣保存後送至實驗室分別以 IC 與滴定法進行分析。圖 3-26 與圖 3-27 為連續定濃度注入的方式所得之兩個不同觀測位置($r = 3\text{ cm}$, $z = 15\text{ cm}$)與($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)之濃度穿透曲線，從圖中可以發現滴定法與 IC 分析法所得的濃度大致結果相當一致，觀測的濃度的變化基本上由背景濃度逐漸上升至一穩定範圍濃度，雖然圖中呈現些許的濃度上下震盪變化，其主因為在進行試驗時水流應該只是近似穩態或土壤並非完全理想的均質所造成，圖中穿透曲線的下降段部份，主要是連續追蹤劑的注入已停止，但仍持續進行採樣觀測，以進一步確認當停止追蹤劑注入後，觀測的濃度是否會逐漸回復到背景濃度，整體而言此次試驗結果符合連續定濃度注入試驗的穿透曲線型態。

此次同時也進行瞬間固定質量注入試驗，圖 3-28 至圖 3-30 為瞬間注入試驗所得之三個不同觀測位置(($r = 3\text{ cm}$, $z = 15\text{ cm}$)、($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)與($r = 7.5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$))的濃度穿透曲線，從圖中也大致確認發滴定法與 IC 分析法所得的濃度大致結果相當一致，觀測的濃度的變化基本上由背景濃度逐漸上升至一尖峰濃度，而後濃度逐漸降低回復到背景濃度，其中比較特別注意是在($r = 3\text{ cm}$, $z = 15\text{ cm}$)與($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)的觀測穿透曲線在下降段部份發生了一短暫的濃度回升現象，此現象的發生推測應為瞬間注入追蹤劑過程中，我們採取讓追蹤劑注入內環的追蹤劑自然完全入滲完後，讓追蹤劑注入內環補水，因為在追蹤劑自然完全入滲過程中，入滲內環內的水位變低，因此其流速較慢(水力

梯度減少)，造成追蹤劑的移動減慢或停滯，待定水頭補注裝置補水後，入滲內環的水位回復到與雙環入滲儀水頭同高時，此時的水流增加將追蹤劑再往下帶，排除此部份此次試驗結果符合瞬間固定質量注入試驗的穿透曲線型態。

此次試驗採樣的深度較淺且連續定濃度注入的時間較短，因此下次現地試驗有必要增加採樣深度與連續定濃度注入的時間。



圖 3- 24 拔起抽取杯套管後回填砂土之情形。



圖 3- 25 改進出水口位置與硬管套管後情形。

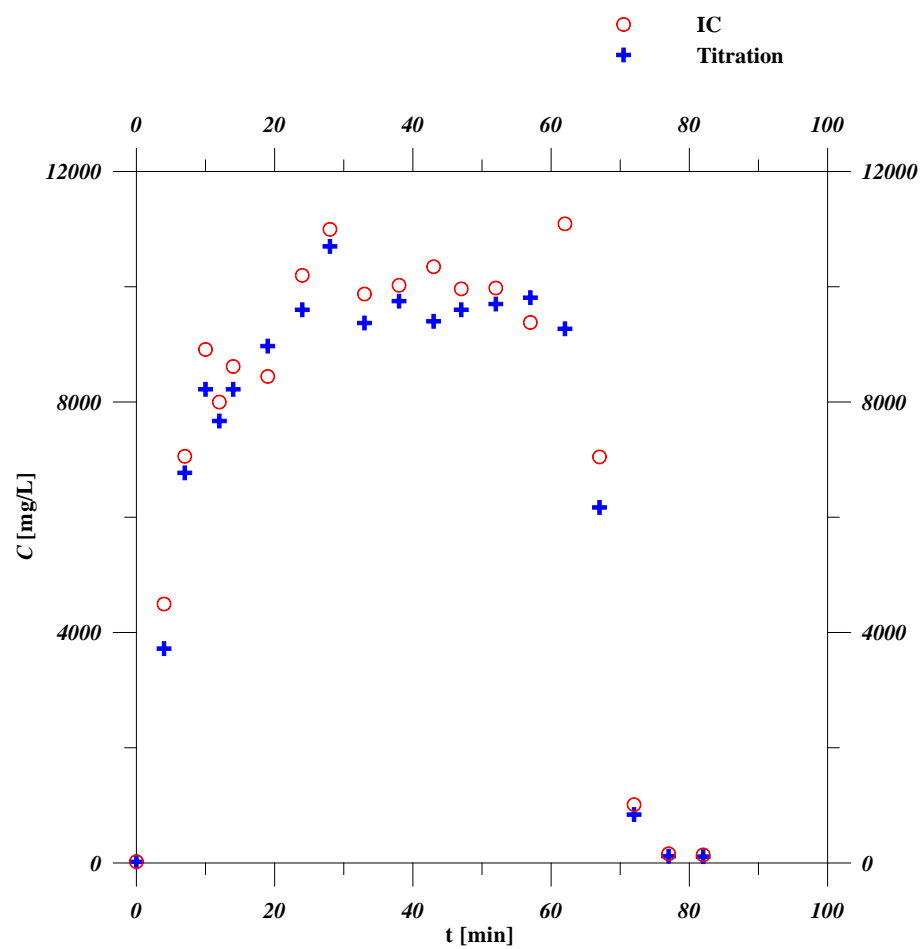


圖 3- 26 第四次試驗連續定濃度注入觀測點($r = 3\text{ cm}$, $z = 15\text{ cm}$)之濃度穿透曲線 (IC 與滴定法)。

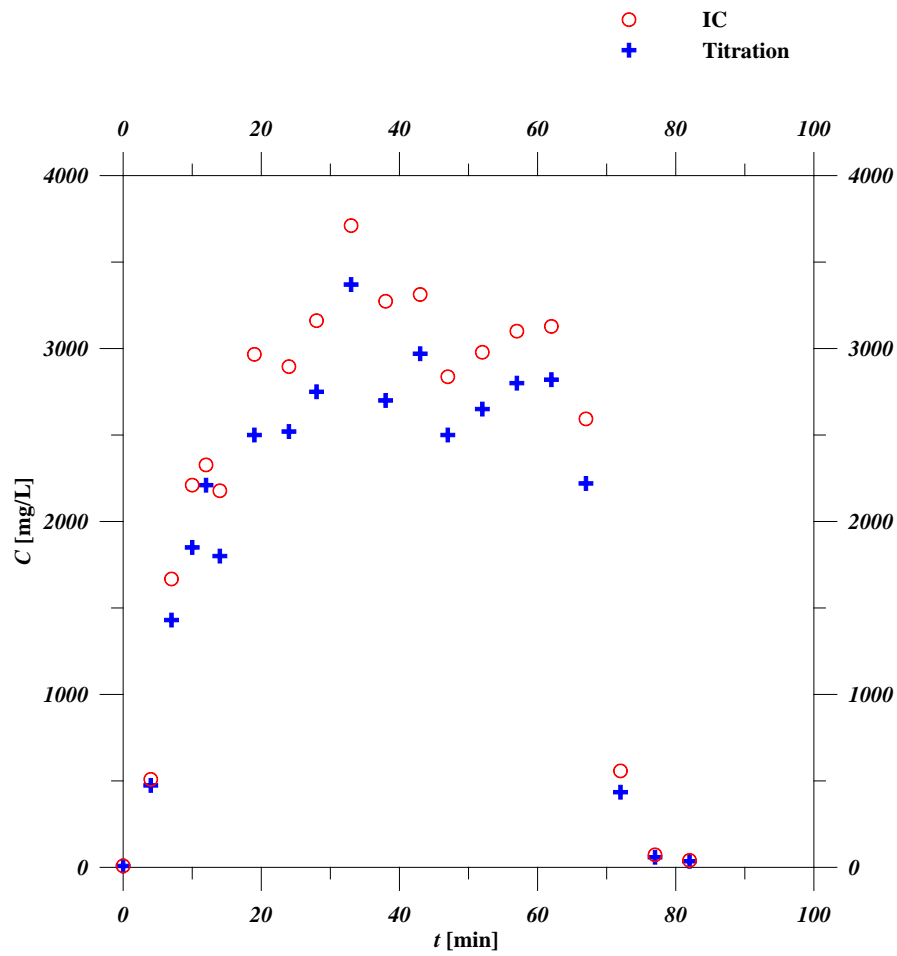


圖 3- 27 第四次試驗連續定濃度注入觀測點($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)之濃度穿透曲線 (IC 與滴定法)。

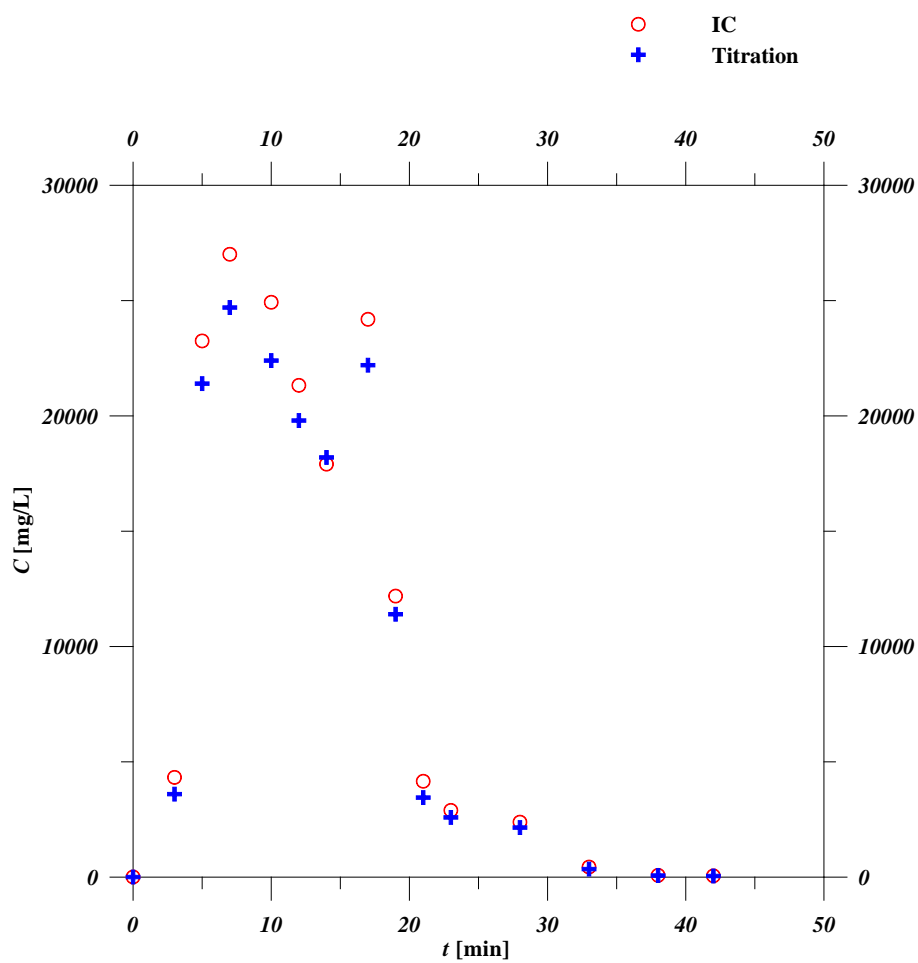


圖 3- 28 第四次試驗瞬間固定質量注入觀測點($r = 3\text{ cm}$, $z = 15\text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

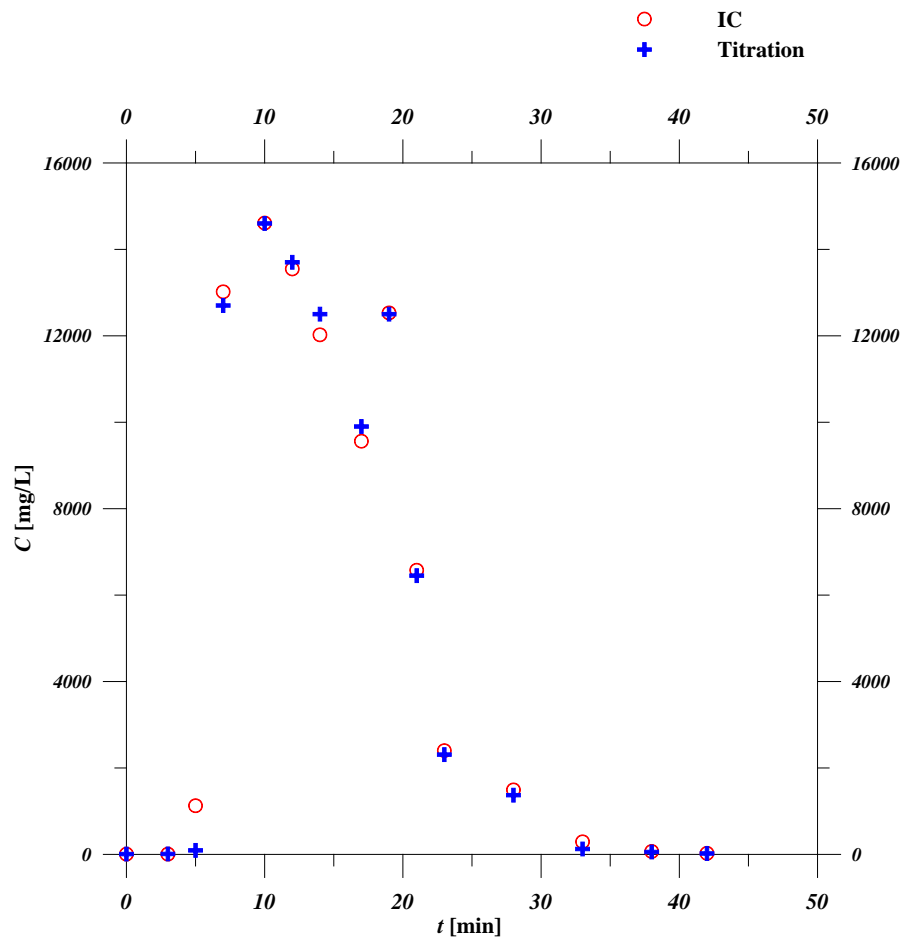


圖 3- 29 第四次試驗瞬間固定質量注入觀測點($r = 5 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

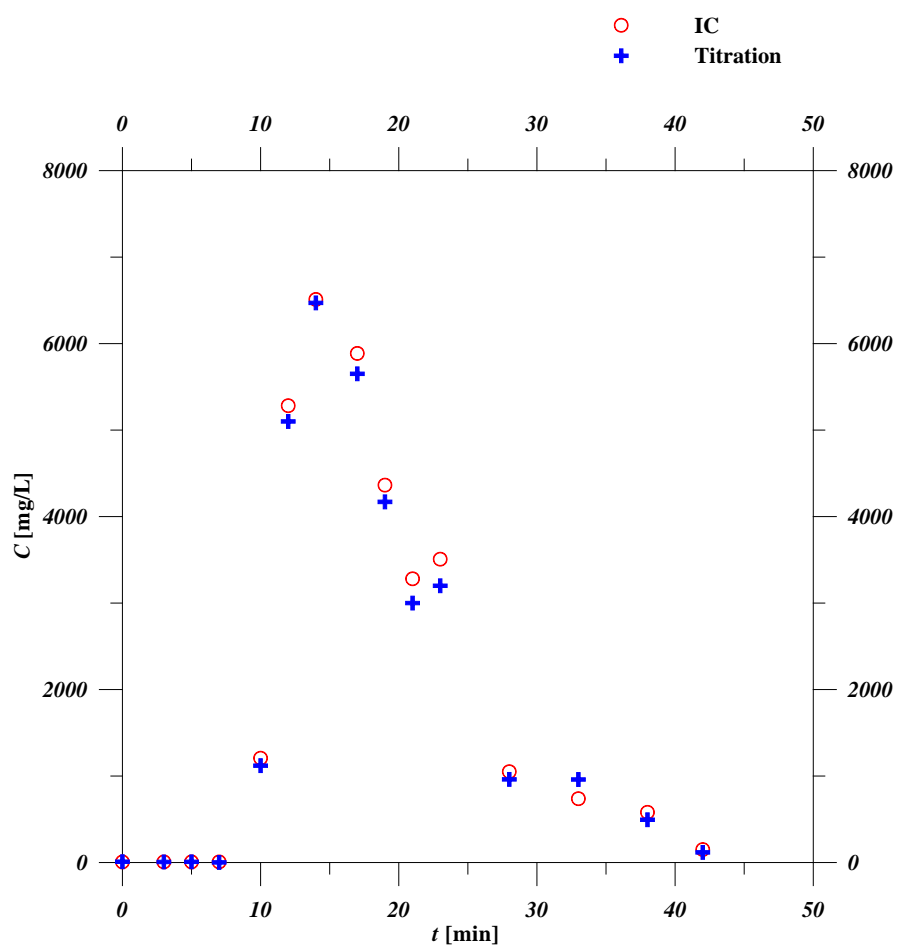


圖 3- 30 第四次試驗瞬間固定質量注入觀測點($r = 7.5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

3.2.5 第五次試驗

本計畫於 101 年 08 月 21、22 日進行第五次現地試驗測試，雖然氣象局在 08 月 22 日早上 5 時 30 分發布天秤颱風陸上警報，但兩日在宜蘭仍天氣晴朗。本次試驗首先進行連續定濃度注入追蹤劑試驗，相較於第四次試驗，連續定濃度注入追蹤劑時間延長為 150 分鐘，此次的重點在於觀察觀測的濃度穿透曲線，是否能符合連續定濃度注入穿透曲線的型態，另外此次觀測適度將觀測點再往下移動，採集的水樣保存後送至實驗室分別以 IC 與滴定法進行分析，圖 3-31 至圖 3-32 為在兩個不同觀測位置($r = 3\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)與($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)之濃度穿透曲線，從圖中可以確認滴定法與 IC 分析法所得的濃度大致一致，與上次試驗相同，觀測的濃度的變化基本上由背景濃度逐漸上升至一穩定範圍濃度，在觀測位置($r = 5\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)處的濃度上下震盪的變化較小，而在($r = 7.5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)處之濃度穿透曲線震盪變化較大，此次由於在採樣觀測結束前一直維持定濃度注入，因此並未如第四次試驗有穿透曲線的下降段部份，整體而言此次試驗結果更進一步確認在較長期的連續定濃度注入，穿透曲線仍可符合連續定濃度注入型態。

本次試驗同時也進行瞬間固定質量注入試驗，圖 3-33 至圖 3-35 為瞬間固定質量注入方式所得之了三個不同觀測位置($r = 3\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)、($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)與($r = 7.5\text{ cm}$, $z = 40\text{ cm}$)的濃度穿透曲線，從圖中可確認滴定法與 IC 分析法所得的濃度大致結果相當一致，但整個濃度穿透曲線呈現雙峰的型態，此雙峰穿透曲線並不符合瞬間固定質量注入試驗的穿透曲現型態，檢討整個試驗過程其主因應為採取讓注入內環的追蹤劑自然完全入滲完後，拔除追蹤劑注入環，讓從中環與外環的水流入此區域以維持此區的人滲速率與中環與外環的水流，在追蹤劑自然完全入滲過程中，入滲內環內的水位逐漸減低，因此其流速逐漸減小(水力梯度減少)，短暫延遲追蹤劑的移動，待移除注入環開始補水，雖然入滲內環的水位回復到與中環與外環同高時，此時的水流回復再將追蹤劑往下移動，但此處與上次試驗明顯比較不同是第 2 個峰值明顯高於第 1 峰值。

由於瞬間固定質量注入方式，所有追蹤劑用完後，會造成水頭的減低，本計畫經幾次試驗仍無法如 Zhang et al. (2006) 獲得較合理的穿透曲線，因此如何改進瞬間固定質量的操作方式，將為持續努力的目標。

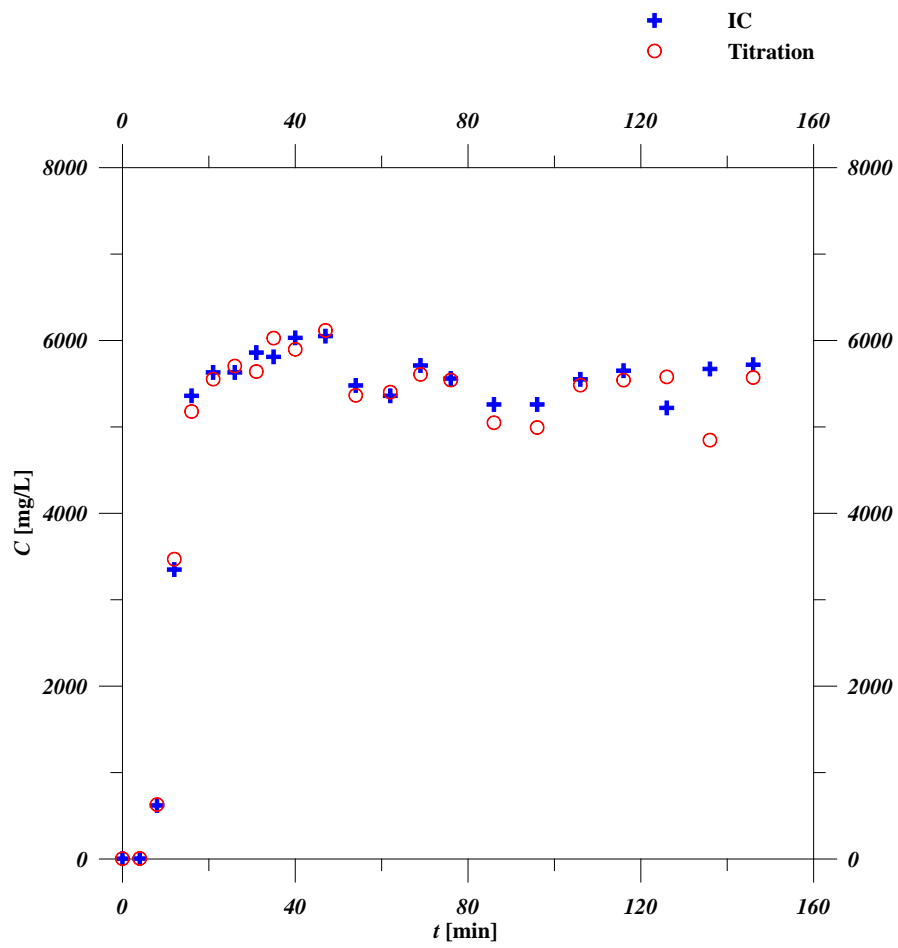


圖 3- 31 第五次試驗連續固定濃度注入觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

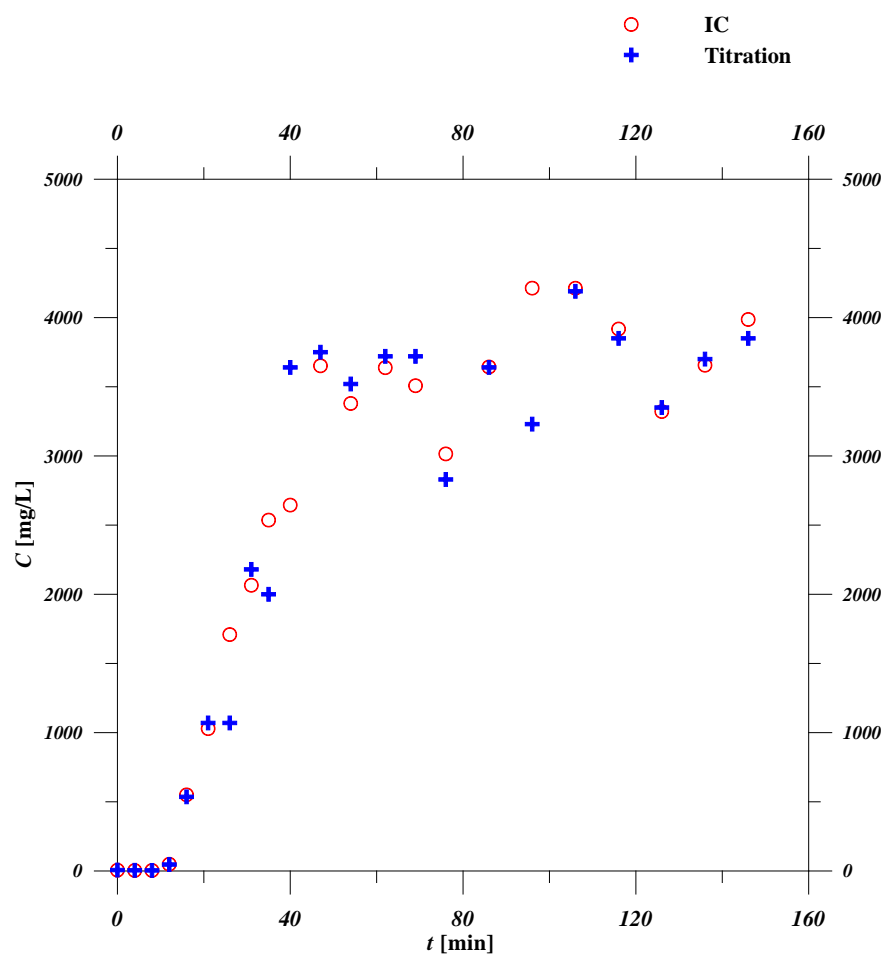


圖 3- 32 第五次試驗連續固定濃度注入觀測點($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

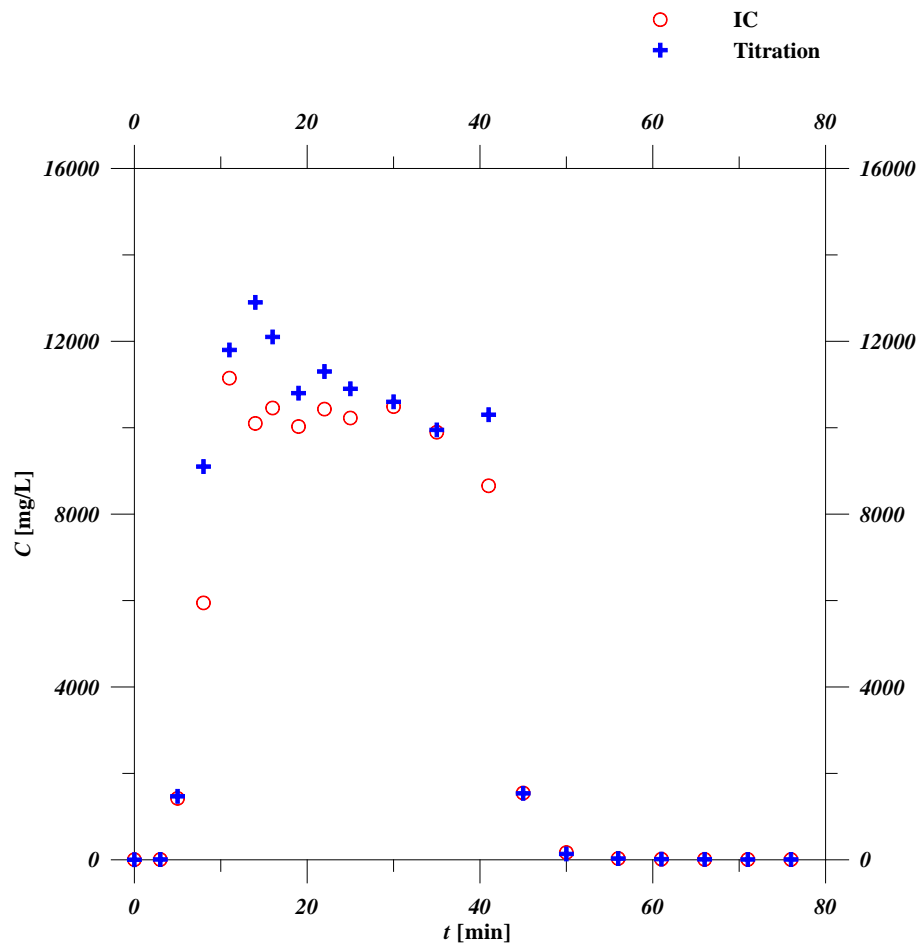


圖 3- 33 第五次試驗瞬間固定質量注入觀測點($r = 3\text{ cm}$, $z = 20\text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

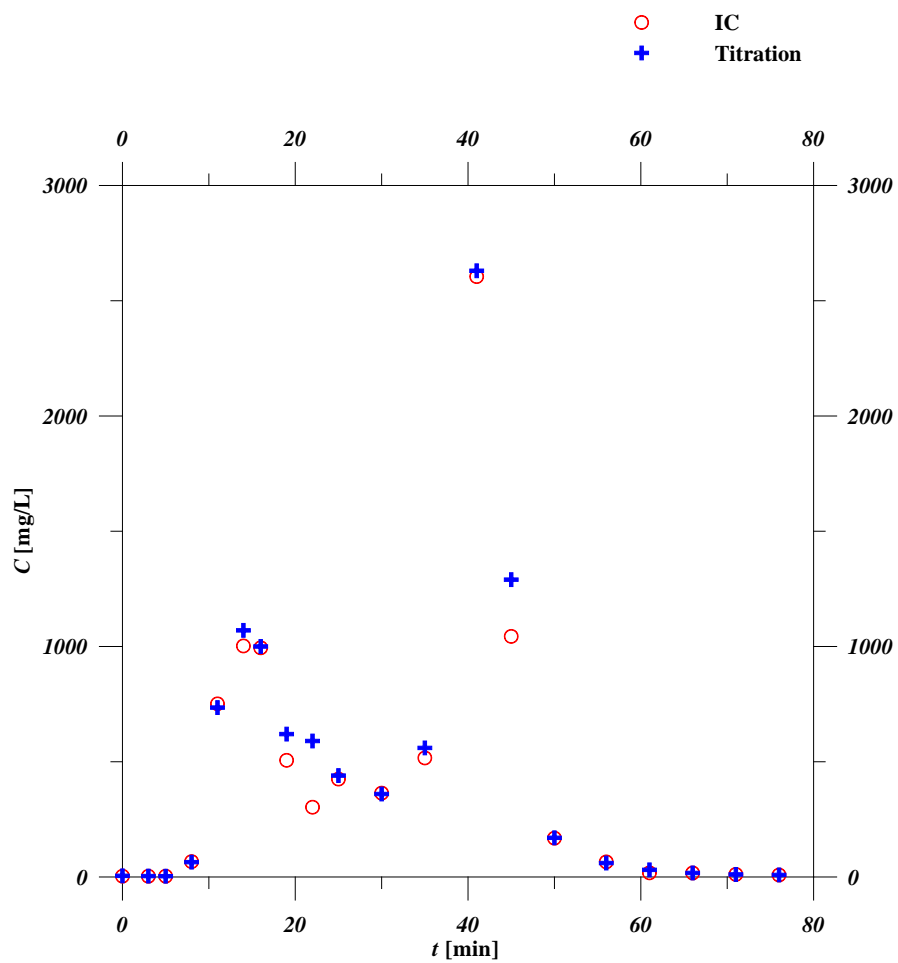


圖 3- 34 第五次試驗瞬間固定質量注入觀測點($r = 5\text{ cm}$, $z = 30\text{ cm}$)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

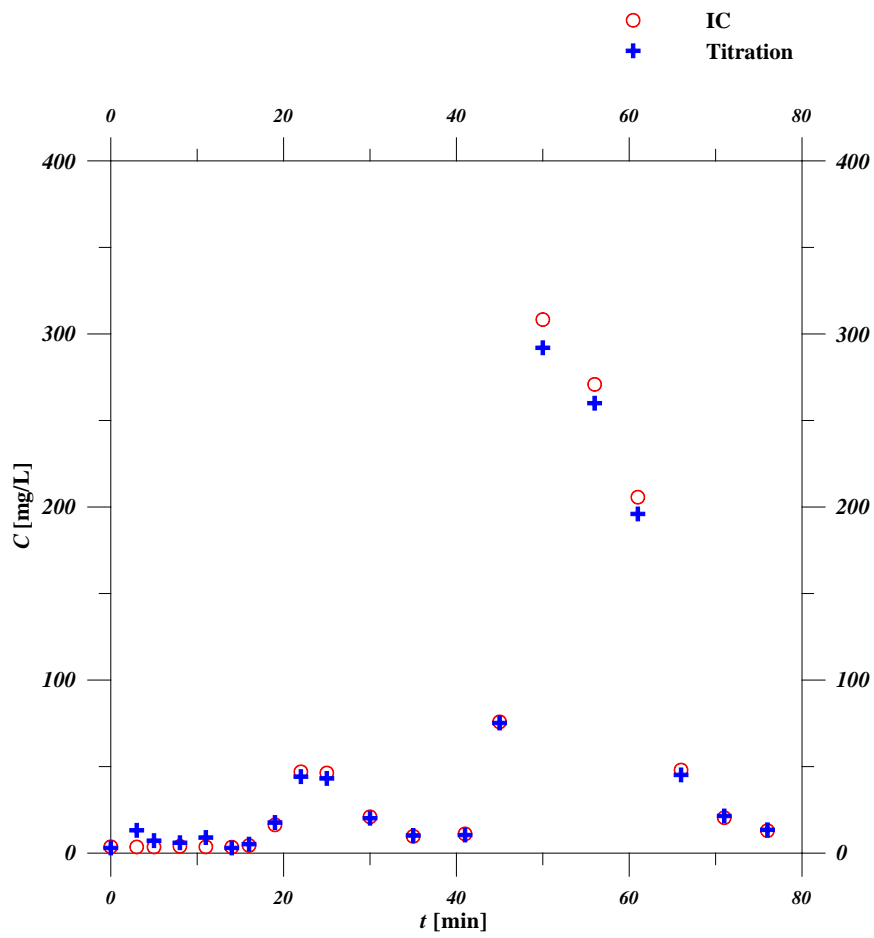


圖 3- 35 第五次試驗瞬間固定質量注入觀測點($r = 7.5$ cm , $z = 40$ cm)之濃度穿透曲線(IC 與滴定法)。

第四章 入滲追蹤劑試驗分析數學模式

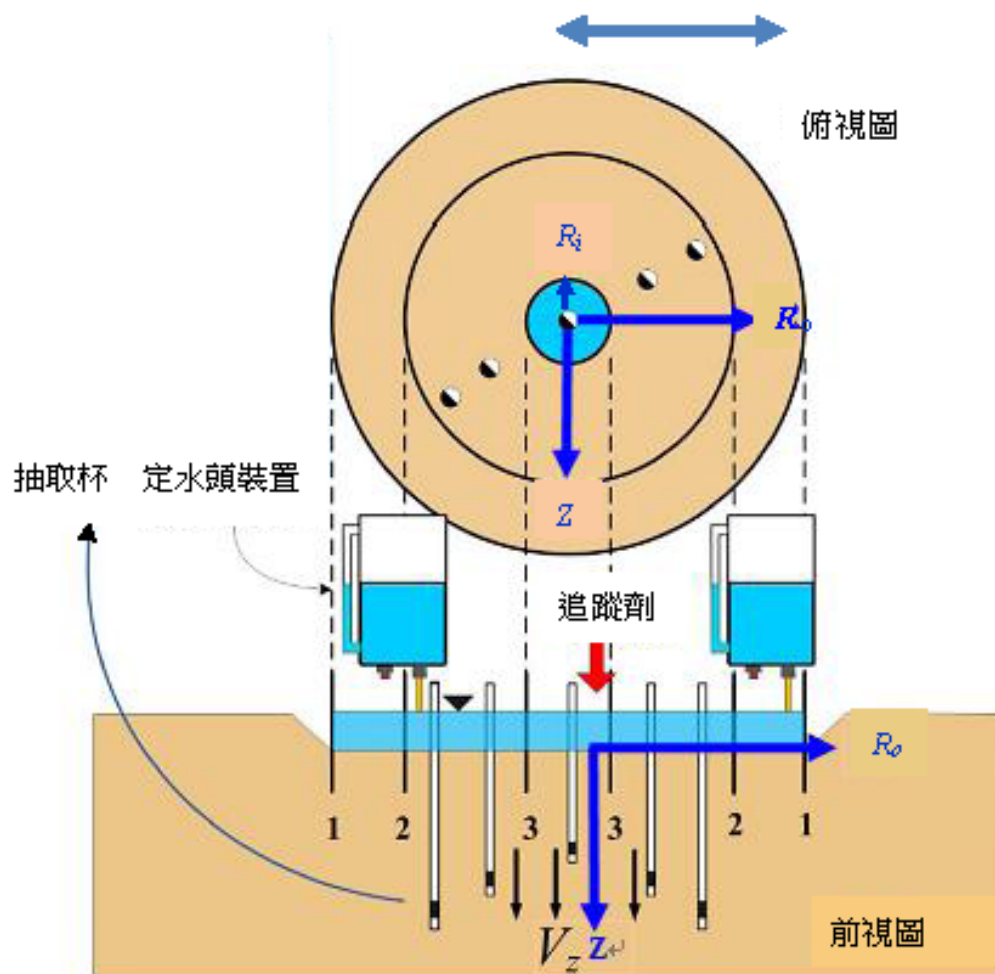
Zhang et al. (2006)提出入滲追蹤劑試驗同時推求縱向與側向延散係數的概念與數學模式，Zhang et al. (2006)考慮瞬間固定質量的注入方式，然而在實際執行上，試驗的執行也可採連續定濃度的方式執行，關於連續定濃度入滲追蹤劑可用的不同邊界條件的數學模式已相當完備(例如：Leij et al., 1993; Massabó et al., 2006; Chen et al. 2011a; 2011c)，Chen et al. (2011c)曾討論連續注入相關邊界條件的影響，以下僅就瞬間固定質量入滲追蹤劑試驗數學模式進行探討與改進。

4.1 現有Zhang et al. (2006)數學模式

目前分析瞬間固定質量入滲追蹤劑之數學模式主要由 Zhang et al. (2006)所提出，當然也有其他數學模式可用於分析入滲追蹤劑試驗結果(例如：Chen et al., 2011a)，基本上各種不同的數學模式在控制方程式與初始條件並無差異，僅所考慮的邊界條件不同，一般在入滲追蹤劑試驗數學模式大都可採用二維圓柱座標系統移流-延散傳輸方程式來描述試驗過程追蹤劑的傳輸(圖 4-1)，在考慮移流與延散為主要的傳輸機制，假設延散傳輸遵循 Fick's law，且所使用保守性追蹤劑為可忽略追蹤劑吸附於礦物顆粒，則其控制方程式可表為

$$\frac{\partial C(r, z, t)}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C(r, z, t)}{\partial z^2} - V \frac{\partial C(r, z, t)}{\partial z} + D_T \left[\frac{\partial^2 C(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C(r, z, t)}{\partial r} \right] \quad (4-1)$$

此處 $C(r, z, t)$ 為追蹤劑濃度； r 為以入滲環中心為原點之徑向座標； z 為以地面為原點垂直方向座標(向下為正)； V 為達穩態時入滲速度； D_L 與 D_T 分別為沿水流方向之縱向延散係數與垂直水流方向之側向延散係數。



1.入滲儀外環 2.入滲儀內環 3.追蹤劑注入環

圖 4- 1 入滲追蹤劑試驗數學模式示意圖。

式(1)之控制方程式須配合相關初始與邊界條件求解。

初始條件：

考慮土壤中一開始無追蹤劑，則可描述為

$$C(r, z, t = 0) = 0 \quad (4-2)$$

邊界條件：

Zhang et al. (2006)考慮追蹤劑的側向移動(與入滲水流垂直方向)未到達側向之(徑向 r 方向)之無窮遠處，因此表為

$$C(r \rightarrow \infty, z, t) = 0 \quad (4-3)$$

就一般而言，追蹤劑的側向傳輸應僅於入滲水流的部份，因此式(3)的邊界條件的合理性有待探討，因此邊界條件往座標中心移動。

Zhang et al. (2006)考慮注入邊界之質量守恒，因此採用第三類的 Cauchy 邊界條件

$$VC(r, z = 0, t) - D_L \frac{\partial C(r, z = 0, t)}{\partial z} = \begin{cases} \frac{M}{\phi \pi R_i^2} \delta(t) & 0 \leq r \leq R_i \\ 0 & R_i \leq r \leq \infty \end{cases} \quad (4-4)$$

此處 M 為注入追蹤劑質量， ϕ 為有效孔隙率， R_0 為注入內環半徑， $\delta(\bullet)$ 為 Dirac delta 函數，此處表示追蹤劑採用瞬間注入。

為了讓方程式有惟一解，Zhang et al. (2006)假設注入追蹤劑不會到達無窮遠處，因此沿水流方向(z 方向)無窮遠邊界之濃度梯度為零，即所謂的半無窮的出流邊界(semi-infinite exit boundary)

$$\frac{\partial C(r, z \rightarrow \infty, t)}{\partial z} = 0 \quad (4-5)$$

式(4-5)的邊界條件的合理性亦值得質疑，在實務上應考慮有限出流邊界(finite exit boundary)。過去許多學者也探討兩種邊界對溶輸影響 (e.g. Parlange and Star, 1978, Parlange et al., 1985, 1992, Barry and Sposito, 1988)，其結論為在大延散係數下其影響將非常顯注。

利用 Hankel 轉換與 Laplace 轉換，Zhang et al. (2006)求得解析解表為

$$C(r, z, t) = \frac{M}{R_0 \pi \phi} F(z, t) \int_0^\infty J_1(\rho R_0) J_0(\rho r) \exp(-D_T \rho^2 t) d\rho \quad (4-6)$$

此處 $J_0(\bullet)$ 與 $J_1(\bullet)$ 分別為零階與一階第一類 Bessel 函數，且

$$F(z, t) = \frac{1}{\sqrt{D_L \pi t}} e^{-\frac{(z-Vt)^2}{4D_L t}} - \frac{V}{2D_L} e^{\frac{Vz}{D_L}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z+Vt}{2\sqrt{D_L t}}\right) \quad (4-7)$$

$\operatorname{erfc}(\bullet)$ 為補誤差函數(complementary error function)。

由於式(4-6)與(4-7)的數學表示較為複雜，為方便進行參數推估，Zhang et al. (2006)進一步考慮注入內環半徑為無限小，此時式(4-6)與(4-7)可表為

$$C(r, z, t) = \frac{M}{4\phi D_T \sqrt{D_L \pi^3 t^3}} \exp\left[-\frac{(z-Vt)^2}{4D_L t} - \frac{r^2}{4D_T t}\right] - \frac{VM}{8\pi\phi D_T D_L t} \exp\left(\frac{Vz}{D_L} - \frac{r^2}{4D_T t}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z+Vt}{2\sqrt{D_L t}}\right) \quad (4-8)$$

就實際現地操作而言，注入井半徑不可能太小，此注入內環半徑為無限小假設之合理性須進一步加以檢驗。

另外Zhang et al. (2006)假設當採樣點距離注入位置很遠時，式(4-7)可以進一步簡化表為下式，

$$C(r, z, t) = \frac{M}{4\phi D_T \sqrt{D_L \pi^3 t^3}} \exp\left[-\frac{(z-Vt)^2}{4D_L t} - \frac{r^2}{4D_T t}\right] \quad (4-9)$$

式(4-8)採樣點距離注入位置很遠的假設更是不合理，因為入滲追蹤劑試驗主要是用來決定表土層之延散係數因此採樣之抽取杯之不可能距地表太遠。

4.2 Chen et al. (2011)數學模式

如前節所言，追蹤劑的側向傳輸應僅於入滲水流的部份，因此式(3)的邊界條件應往內移動，因此 Chen et al. (2011)考慮徑向(r 方向)為有限邊界，其數學表示為

$$\frac{\partial C(r = R_1, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (4-10)$$

此處 R_1 為外環半徑。

在控制方程式(4-1)與其他相關初始、邊界條件不變下，Chen et al. (2011)利用第二類的有限Hankel轉換與Laplace轉換，求得解析解表為

$$C(r, z, t) = \frac{M}{\pi R_i^2 \phi \sqrt{D_L \pi t}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{\rho_m} \left\{ \exp \left[-\frac{(Vt - z)^2}{4D_L t} - D_T \rho_m^2 t \right] - \frac{V}{2D_L} \exp \left(\frac{Vz}{D_L} - D_T \rho_m^2 t \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{z + Vt}{\sqrt{4D_L t}} \right) \right\} \left(\frac{R_i^2}{R_o^2} + \frac{2\rho_m J_1(\rho_m R_i) J_0(\rho_m r)}{R_o^2 |J_0(\rho_m R_o)|^2} \right) \quad (4-11)$$

此處 ρ_m 為超越方程式(transcendental equation) $\frac{\partial J_0(\rho_m R_o)}{\partial r} = 0$ 之所有根。

Chen et al. (2011)與 Zhang et al. (2006)模式的缺點為半無窮的出流邊界(semi-infinite exit boundary)，此不符合實際的情形。

4.3 數學模式的改進

本研究改進Zhang et al. (2006)與Chen et al. (2011)的半無窮的出流邊界，改採沿水流方向(z 方向)為有限出流邊界，其數學表示為

$$\frac{\partial C(r, z = L, t)}{\partial z} = 0 \quad (4-12)$$

此處 L 為地表至自由水面的長度。

採用Laplace轉換、finite Hankel轉換與通用型積分轉換(generalized integral transform)可得解如下式(相關推導詳如附錄一)

$$C(r, z, t) = \frac{\sigma}{V} \left\{ \delta(t) - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\delta(t) - \left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) e^{-\left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) t} \right] \Gamma(z, \beta_n) \right\} \frac{R_i^2}{R_o^2} + \frac{\sigma}{V} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \delta(t) - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\delta(t) - \left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) e^{-\left(D_T \rho_m^2 + D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L} \right) t} \right] \Gamma(z, \beta_n) \right\} \frac{2R_i J_1(\rho_m R_i) J_0(\rho_m r)}{R_o^2 \rho_m |J_0(\rho_m R_o)|^2} \quad (4-13)$$

4.4 數學模式探討

4.4.1 Zhang et al. (2006)的兩個簡化基本假設探討

Zhang et al. (2006)基於兩個簡化基本假設所得之解(Eq. (4-8)和 Eq. (4-9)與現地入滲追蹤劑試驗實際操作情況是相當矛盾的。「假設一：注入環視為點源注入」是很難在現地試驗中執行成功的。「假設二：採樣點距離注入位置很遠的假設」由於現地入滲追蹤劑試驗是設計用來決定表土層的污染傳輸參數，且抽取杯

沒有辦法安裝在離土壤表面很遠的地方。另外考慮追蹤劑的側向移動(與入滲水流垂直方向)未到達側向之(徑向 r 方向)之無窮遠處有待檢驗。

在此我們以 Zhang et al. (2006) 所進行的現地試驗，作為一個案例來檢驗這些簡化假設。考慮模式輸入的參數為， $D_L = 4.5 \text{ cm}^2/\text{h}$ ， $D_T = 0.87 \text{ cm}^2/\text{h}$ ， $V = 1.4 \text{ cm/h}$ ， $R_i = 10 \text{ cm}$ ， $m = 300 \text{ g}$ ， $\phi = 0.44$ ，圖 4-2 與圖 4-3 為 Zhang et al. (2006) 的三個解(Eq.(4-6)、Eq.(4-8)與 Eq.(4-9))與 Chen et al. (2011)側向有限邊界解在($r = 10 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)與($r = 20 \text{ cm}$, $z = 50 \text{ cm}$)兩個觀測點的穿測曲線比較，圖中可以發現 Zhang et al. (2006) 的 Eq.(4-6) 與 Chen et al. (2011a)側向有限邊界解的穿透曲線大致重合，顯示在這個現地試驗案例，由於側向延散係數較小，因此在整個入滲追蹤試驗進行的過程中，側向延散溶質傳輸不強，並未到達入滲水的側向邊界。然而從圖中發現 Zhang et al. (2006) 的 Eq.(4-6)，Eq. (4-8)和 Eq. (4-9) 三條濃度穿透曲線都不一致，此顯示 Zhang et al. (2006) 的兩個基本假設於此現地試驗案例是不合理的，「假設一：注入環視為點源注入」的假設降低了濃度穿透曲線的峰值濃度，而「假設二：採樣點距離注入位置很遠」這個假設則大大增加的穿透曲線的峰值濃度。此處可明顯的看到此兩假設是不正確的，若使用其解來推估參數，將造成在決定縱向與側向延散度時會造成不可避免的錯誤。

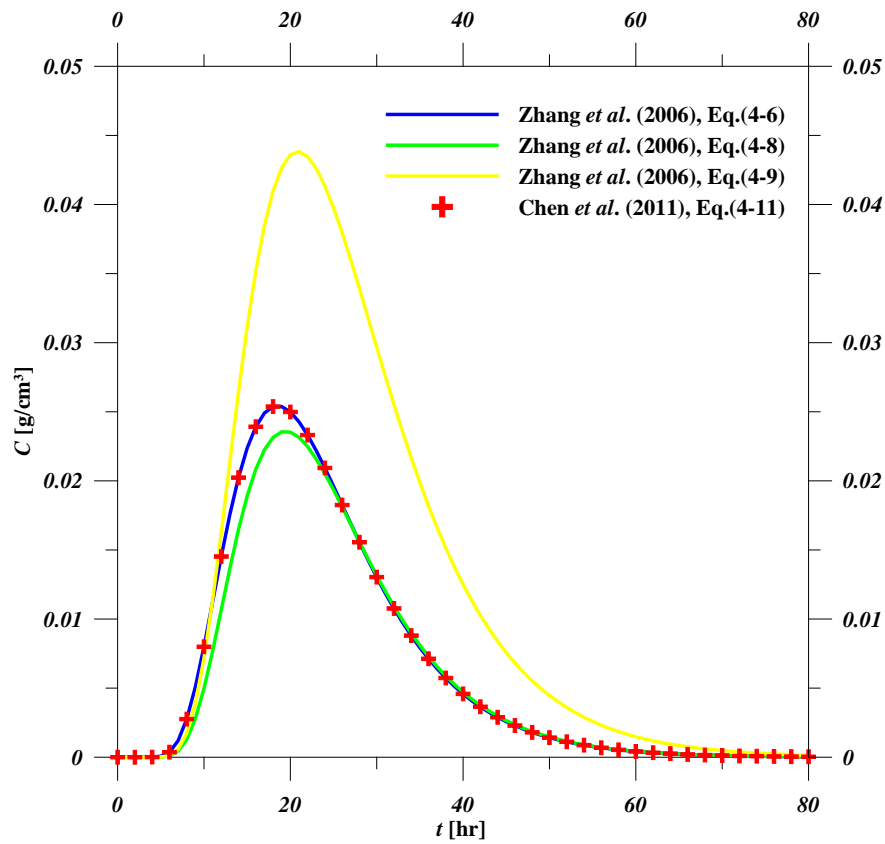


圖 4- 2 Zhang et al. (2006)的三個解析解(Eq.(4-6)、Eq. (4-8)、Eq. (4-9))與 Chen et al. (2011a)的解析解(Eq. (4-11))於觀測點($r = 10 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)之穿透曲線比較。

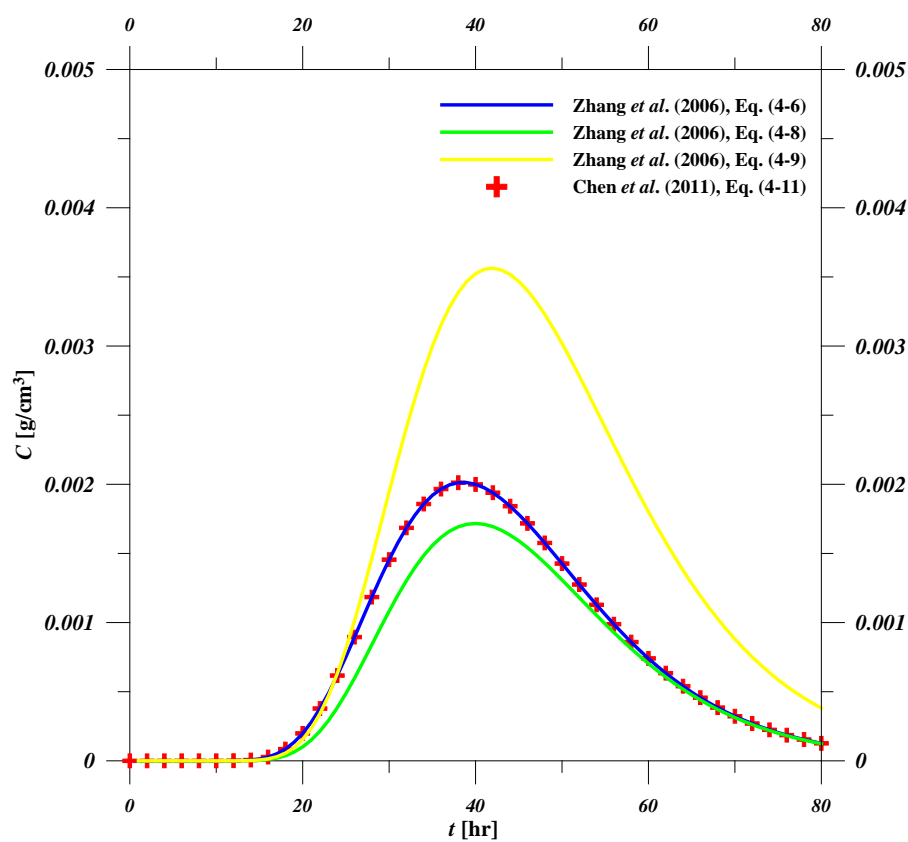


圖 4- 3 Zhang et al. (2006)的三個解析解(Eq.(4-6)、Eq. (4-8)、Eq. (4-9))與 Chen et al. (2011a)的解析解(Eq. (4-11))於觀測點($r = 20$ cm, $z = 50$ cm)之穿透曲線比較。

4.4.2 半無窮遠流出邊界假設探討

由於 Zhang et al. (2006)與 Chen et al. (2011a)的解析解都採用半無窮遠流出邊界，此假設並不符合實際的現場的情況，因此本研究中另外改進此半無窮遠流出邊界為有限流出邊界，並求得相關解析解(Eq. (4-13))，本研究並以此解析解檢驗無窮遠流出邊界解析解的適用性，採用與 4.4.2 節相同參數條件，圖 4-4 為 Chen et al. (2011a)解析解(Eq. (4-11))與解析解(Eq. (4-13))，圖 4-4 顯示兩者一致，說明了在此參數條件下半無窮遠流出邊界可以適用，相關研究指出半無窮遠流出邊界假設不適用於大延散係數與遠離追蹤劑入流處時，圖 4-5 在大延散係數下 ($D_L = 45 \text{ cm}^2/\text{h}$, $D_T = 8.7 \text{ cm}^2/\text{h}$)於觀測點($r = 10 \text{ cm}$, $z = 90 \text{ cm}$)之穿透曲線比較，圖中顯示半無窮遠流出邊界假設則會低估的穿透曲線的濃度，若使用其解來推估參數，將造成在錯估決定縱向與側向延散度。

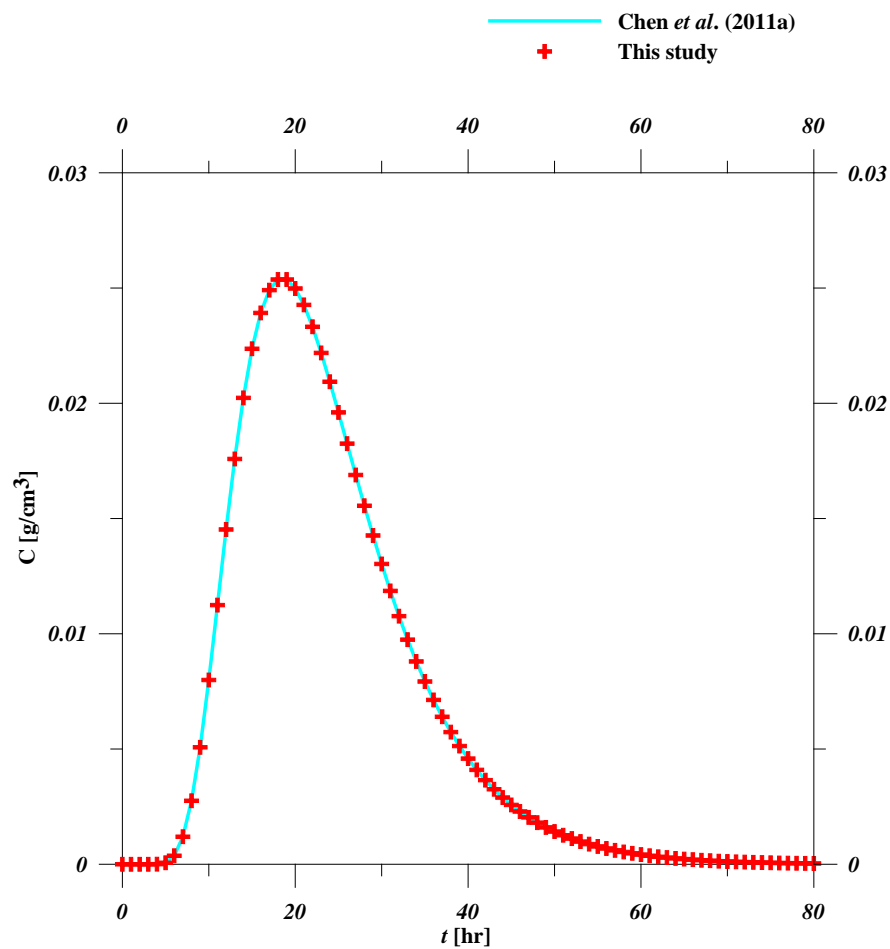


圖 4- 4 Chen et al. (2011a)的解析解(Eq. (4-11))與本研究改進解析解 (Eq. (4-13))於觀測點($r = 10$ cm , $z = 30$ cm)之穿透曲線比較。

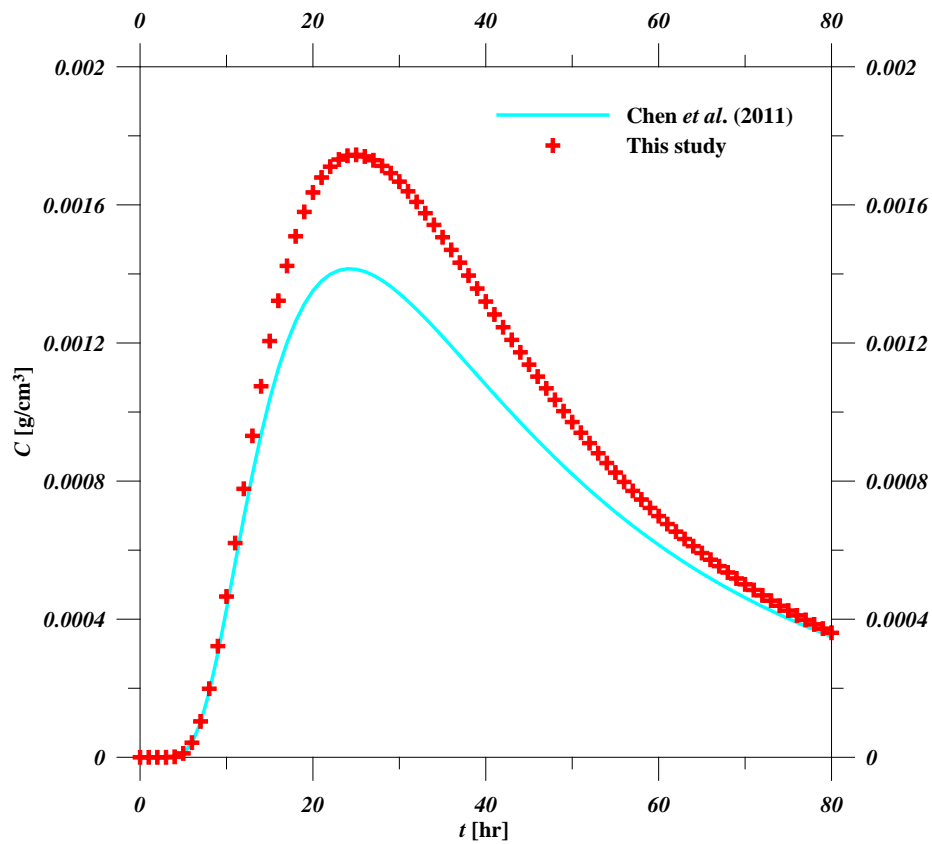


圖 4- 5 Chen et al. (2011a)的解析解(Eq. (4-11))與本研究改進解析解 (Eq. (4-13))y
在大延散係數下($D_L = 45 \text{ cm}^2/\text{h}$, $D_T = 8.7 \text{ cm}^2/\text{h}$)於觀測點($r = 10 \text{ cm}$, $z = 90 \text{ cm}$)
之穿透曲線比較。

第五章 現地試驗資料分析

入滲追蹤劑試驗主要目的是推求現地土壤的縱向與側向延散係數，由於本計畫在瞬間固定質量注入方式的結果較不理想，因此本章採用連續定濃度注入方式的試驗資料進行分析，由於第五次試驗追蹤劑注入的延時較長且觀測深度較深，因此取用第五次試驗資料。雖然 Zhang et al. (2006)曾提出利用 Eq. (4-9)同時推求現地土壤的縱向與側向延散係數的方法，但其方法只適用於瞬間固定質量注入方式，且在前一章本研究也證實了採用該式會造成嚴重的誤差，因此本研究採用傳統分析追蹤劑試驗最常用的標準曲線(type curve)套配法(Sauty, 1990; Carrera and ualtero, 1985, Chen et al., 1996; 2003; 2007)進行分析，此方法的步驟如下：

1. 首先將各觀測點所測得之濃度資料以穩定濃度正規化，經正規化濃度對真實時間 t 變化繪圖於半對數(semi-log)紙。
2. 利用數學模式建立在各觀測點不同縱向延散係數與側向延散係數下之濃度穿透曲線，如步驟 1 同樣地將所數學模式所得之濃度以穩定濃度正規化，另外同時進行時間之無因次化， $t_D = \frac{Vt}{z}$ ，將經正規化濃度對無因次時間 t_D 變化繪圖於半對數紙所建立的曲線即為標準曲線。
3. 將此步驟 1 所得之半對數圖於步驟 2 所建立的標準曲線半對數圖沿無因次時間 t_D 軸平移直到獲得滿意之套配(match)，此時可得所對應的縱向延散係數與側向延散係數。
4. 比對各觀測點所得之縱向延散係數與側向延散係數，再進行調整至各觀測點有相同的縱向延散係數與側向延散係數，且各觀測點濃度資料與標準曲線有可接受滿意的套配，若仍無法得到滿意的套配，可能顯示該試驗場址之縱向延散係數與側向延散係數可能具尺度延散性(scale effect of dispersion)，因此現有的常係數數學模式無法說明試驗資料。

依照上述步驟，本研究分析第五次連續定濃度注入試驗觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)與($r = 5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)之濃度穿透曲線，其結果如圖 5-1 與 5-2 所示，

本研究發現無法調整至兩觀測點有相同的縱向延散係數與側向延散係數，且各觀測點濃度資料與標準曲線有可接受滿意的套配，兩觀測點套配所得之分別為縱向延散係數與側向延散係數分別為($D_L = 1 \text{ cm}$, $D_T = 0.1 \text{ cm}$)於觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)與($D_L = 2 \text{ cm}$, $D_T = 0.2 \text{ cm}$)於觀測點($r = 5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)。可以推測此試驗場址之縱向延散係數與側向延散係數可能具尺度延散效應，我們將所得之參數值比對 Gelhar (1986)所提的尺度延散關係式(如圖 5-3)，

$$D_L = 0.1 \cdot z \quad (5-1)$$

確定所得之延散係數值應屬合理。

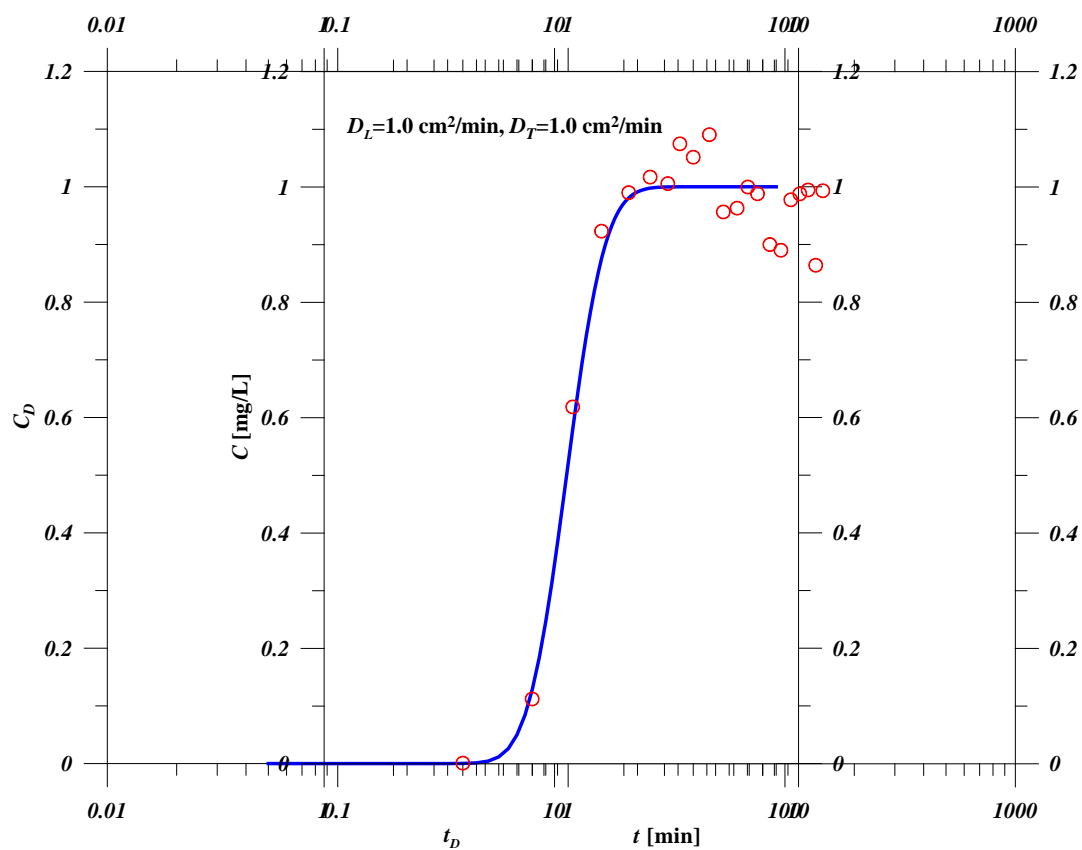


圖 5- 1 第五次連續定濃度注入試驗觀測點($r = 3 \text{ cm}$, $z = 20 \text{ cm}$)與標準曲線之最佳套配結果。

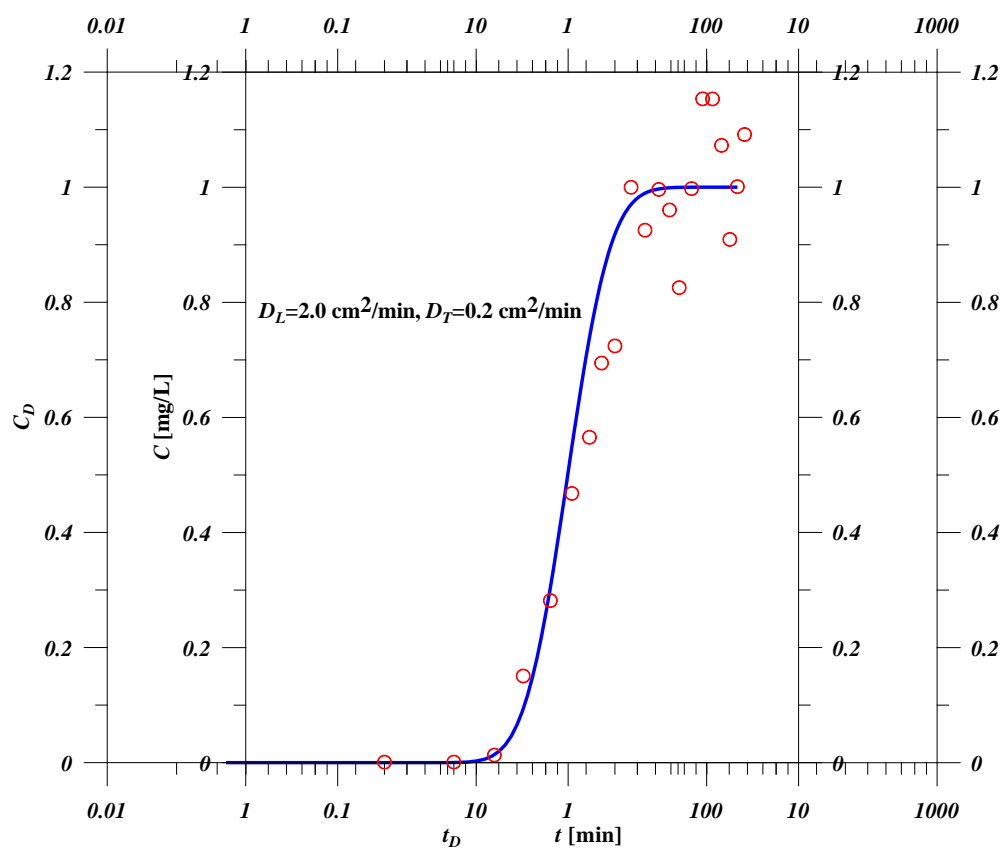


圖 5- 2 第五次連續定濃度注入試驗觀測點($r = 5 \text{ cm}$, $z = 30 \text{ cm}$)與標準曲線之最佳套配結果。

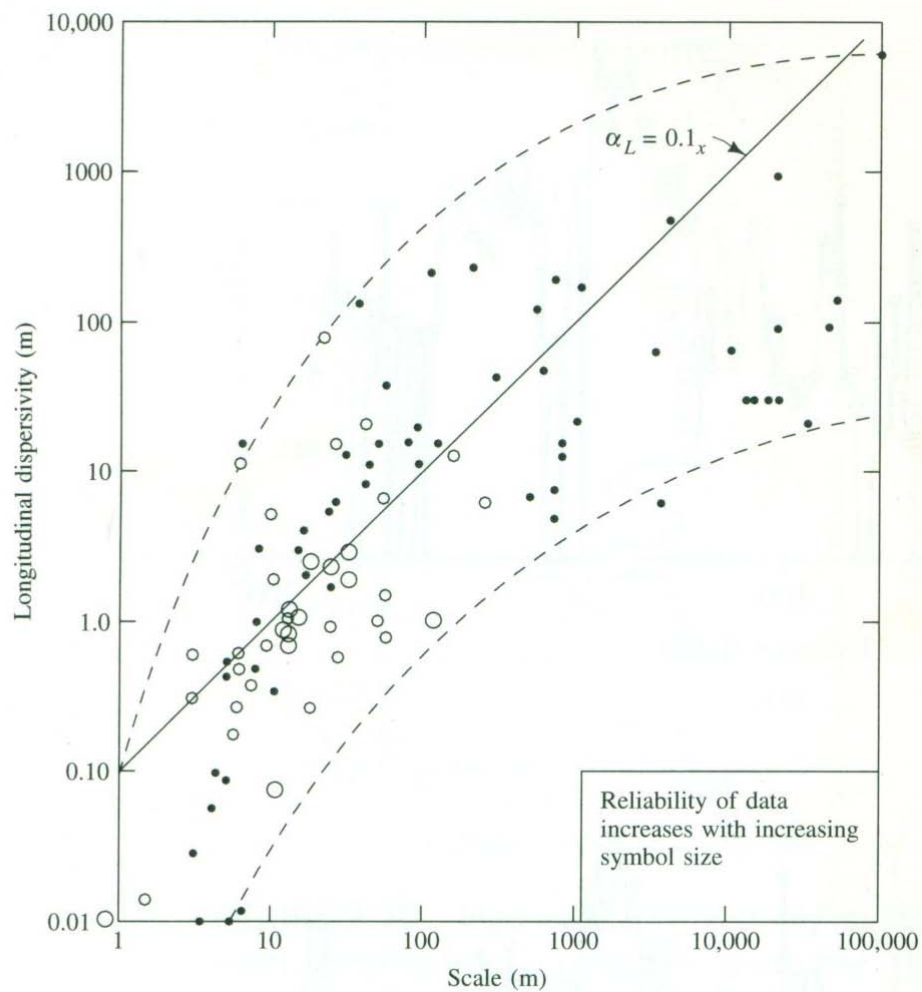


圖 5- 3 現地量測的縱向延散度值表示為量測尺度的函數，最大的圓圈表示做最可信賴的資料。(摘自 L.W. Gelhar, Water Resources Research 22, no. 9 [1986]:135S-145S.)

第六章 結論與建議

1. 經實際現地多次試驗測試，本計畫改良了相關儀器設備與執行作業相關流程，使現地入滲追蹤劑試驗之執行確實可行。
2. 執行現地入滲追蹤劑試驗現地土壤質地決定入滲率之高低、在高入滲率的土壤為避免發生補水不及，建議準備較容量的水槽或多水槽定水頭裝置。
3. 在執行現地入滲追蹤劑試驗中水頭的控制非常重要，如無良好的水頭控制，所測得的追蹤劑濃度會有上下波動的問題發生。
4. 現地入滲追蹤劑試驗時，抽取杯能否順利採樣為重要關鍵，因此在放入追蹤劑前須先測試抽取杯能否順利採樣，若發生所抽取的速率過慢或是水量過少，需將抽取杯先行拔起並更換濾頭後，並更換採樣點。
5. 連續濃度試驗相較於瞬間固定質量試驗相對較容易執行而獲得合理節結果。
6. 前人所提出的推估參數方法，經本計畫比較測試，發現相關簡化假設極為不合理，造成推估土壤傳輸參數的誤差，本計畫將進一步提出可以較準確有效的推估土壤傳輸參數方法。
7. 試驗資料分析顯土此場址的入滲傳輸特性可能具尺度延散性。

參考文獻

- ASTM, 2008. Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08, D 3385-09.
- Barry, D.A., Sposito, G., 1988. Application of the convection–dispersion model to solute transport in finite soil columns. *Soil Science Society of America Journal* 52(1), 3–9.
- Boesten, J.J., 2004. Influence of dispersion length on leaching calculated with PEARL, PELMO and PRZM for FOCUS groundwater scenarios. *Pest Management Science*, 60(10), 971–980.
- Bromly, M., Hinz, C., Aylmore, L.A.G., 2007. Relation of dispersivity to properties of homogeneous saturated repacked soil columns. *European Journal of Soil Science*, 58(1), 293-301.
- Carrera, J. and Walters, G., 1985. *Theoretical developments regarding simulation and analysis of convergent flow tracer test*. Sandia National Laboratories, Tucson, AZ.
- Chen, J. S., C.W. Liu, C.S. Chen, H.D. Yeh, 1996, A Laplace transform solution for tracer test in a radially convergent flow field with upstream dispersion, *Journal of Hydrology*, 183(3-4), 263-275.
- Chen, J.S., C.W. Liu, H.T. Hsu, C.M. Liao, 2003, A Laplace transformed power series solution for solute transport in a convergent flow field with scale-dependent dispersion, *Water Resources Research*, 39(8), doi:10.1029/2003WR002299.
- Chen, J.S., C.S. Chen, C.Y. Chen, 2007, Analysis of solute transport in a divergent flow tracer test with scale-dependent dispersion, *Hydrological Processes*, 21(18), 2526-2536.
- Chen, J. S., 2007. Two-dimensional power series solution for non-axisymmetrical transport in a radially convergent tracer test with scale-dependent dispersion, *Advances in Water Resources*, 30(3), 430-438.
- Chen, J.S., Liu, Y.H., Liang, C.P., Liu, C.W., Lin, C.W., 2011a. Exact analytical solutions for two-dimensional advection-dispersion equation in cylindrical

- coordinates subject to third-type inlet boundary condition. *Advances in Water Resources*, 34(3), 365-374.
- Chen, J.S, Liu, C.W., 2011b. Generalized analytical solution for advection-dispersion equation in finite spatial domain with arbitrary time-dependent inlet boundary condition. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2471-2479
- Chen, J.S., Chen, J.T., Liu, C.W., Liang, C.P., Lin, C.M., 2011c. Analytical solutions to two-dimensional advection–dispersion equation in cylindrical coordinates in finite domain subject to first- and third-type inlet boundary conditions. *Journal of Hydrology*, 405(3-4), 522-531.
- Chen, W.F., Liu, T.K., 2003. Dissolved oxygen and nitrate of groundwater in Choushui Fan-Delta. *western Taiwan Environmental Geology*, 44(6), 731-737.
- Cotta, R.M., Mikhailov, M.D., 1997. *Heat Conduction: Lumped Analysis, Integral Transforms, Symbolic Computations*. New York, Wiley-Interscience.
- Fetter, C. W., 1999. *Contaminant Hydrogeology, second ed.* Prentice Hall, Upper Saddle River.
- FOCUS, 2000. *FOCUS groundwater scenarios in the EU review of active substances*. EC Doc. Ref. SANCO/321/2000 rev2. INRA, Versailles.
- Gelhar, L.W., 1986. Stochastic Subsurface Hydrology from Theory to Applications *Water Resources Research* 22(9), 135S-145S.
- Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.R., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research*, 28(7), 1955-1974.
- Leij, F.J., Skaggs, T.H., Van Genuchten, M. Th., 1991. Analytical solution for solute transport in three-dimensional semi-infinite porous media. *Water Resour. Res.* 27(10), 2719-2733.
- Massabò, M, Cianci, R, Paladino, O., 2006. Some analytical solutions for two-dimensional convection–dispersion equation in cylindrical geometry. *Environ. Modell. Softw.* 21(5), 681-688.
- Nemes, A., Schaap, M.G., Leij, F.J., Wosten., J.H.M., 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 151–162.
- Parlange, J.Y., Barry, D.A., Starr, J.L., 1985. Comments on boundary conditions for

- displacement experiments through short laboratory soil columns. *Soil Science Society of America Journal*, 49(5), 1325.
- Parlange, J.Y., Starr, J.L., van Genuchten, M.Th., Barry, D.A., Parker, J.C., 1992. Exit condition for miscible displacement experiments in finite columns. *Soil Science*, 153 (3), 165–171.
- Parlange, J.Y., Starr, J.L., 1978. Dispersion in soil columns: effect of boundary conditions and irreversible reactions. *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 15–18.
- Ptak, T., Piepenbrink, M., Martac, E., 2004. Tracer tests for the investigation of heterogeneous porous media and stochastic modelling of flow and transport—a review of some recent developments. *Journal of Hydrology*, 294 (1-3), 122-163.
- Ozisik, M.N., 1980. *Heat Conduction*. New York, Wiley.
- Ozisik, M.N., 1968. *Boundary Value Problems of Heat Conduction*. New York, Dover Publications, Inc.
- Sauty, J.-P., 1980. An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers. *Water Resour. Res.*, 16(1): 145-158.
- Schulze-Makuch, D., 2005. Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Ground Water*, 43(3), 443–456.
- Simunek, J., van Genuchten, M.Th.. 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 782-797.
- Vanclooster, M., Javaux, M., Vanderborght, J., 2005. Solute transport in soil at the core and field scale. p. 1041–1055. In M.G. Anderson (ed.) *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Vol. 2, New York, John Wiley & Sons.
- Vanderborght, J., Vereeken, H., 2007. Review of dispersivities for transport modeling in soils. *Vadose Zone Journal*, 6(1), 29-52.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., and Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3-4), 169–185.
- Zhang X., Qi, X., Zhou, X., Pang, H., 2006. An in situ method to measure the longitudinal and transverse dispersion coefficients of solute transport in soil. *Journal of Hydrology*, 328(3-4), 614–619.
- 行政院環境保護署，土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法，中華民國九十五年四月。

推估土壤傳輸參數現地試驗方法之改進

經濟部水利署，**2010年度地下水質檢測分析與評估**，財團法人農業工程研究中心。

附錄一：入滲追蹤劑試驗執行規範

壹、概要

入滲追蹤劑試驗為 Zhang et al. (2006)所提出結合傳統推估土壤入滲率的入滲試驗與推估污染傳輸參數的追蹤劑試驗的新方法，目的為同時決定地表土壤層之縱向與側向延散係數。試驗主要是改良傳統的雙環入滲試驗，另外加一追蹤劑注入內環，當入滲率達穩定時，藉由注入內環加入追蹤劑，並於土壤不同深度每隔一段時間進行水樣採樣，藉由合適的數學模式分析不同採樣點的濃度穿透曲線，以達同時推估土壤的縱向與側向延散係數的目的。本執行規範內容包含儀器設備、現地試驗過程及資料分析。

貳、適用範圍及限制

本試驗方法適用無非常塑性黏土的與礫石顆粒相對較均一細顆粒土壤，且土壤對雙環入滲儀的貫入有低至中的抵抗力，土壤的水力傳導係數介於 10^{-2} cm/s 與 10^{-6} cm/s間，此試驗方法可用於地表面或一定深度的凹坑進行。

本試驗方法不適用在地表面低於地下水位或暫棲水位或非常透水(水力傳導係數大於 10^{-2} cm/s)或不透水的土壤(水力傳導係數小於 10^{-6} cm/s)，另外土壤中若存在裂隙本試驗方法亦不能適用。

參、儀器設備

(一)入滲率控制裝置

入滲率控制裝置包括雙環入滲儀與定水頭補注裝置。雙環入滲儀由內徑30cm 之內環與60cm之外環所組成，一般可採厚度0.2mm之白鐵製作，主要功能為限制注入水於入滲環內，其中外環主要功用為補給向下與向外的入滲水，使內環的入滲水維持僅有向下的水流方向。定水頭補注裝置主要補給入滲所需的水量並控制環內維持固定水頭高度。由於現地入滲率隨土壤質地與濕潤條件而有所不同，當現地入滲率太大時，可考慮製作較大的定水頭補注裝置，定水頭補注裝置應標示刻度以利於計算入滲率。

(二)追蹤劑注入裝置

包括追蹤劑補注裝置與注入內環，試驗中將注入環置於入滲儀中心，藉由追蹤劑補注裝置讓追蹤劑流入注入內環使其入滲進入土壤。追蹤劑補注裝置建議採與入滲率控制裝置相似設計，以使在追蹤劑注入的同時，入滲內環內的水頭能與入滲內其他處的水頭相同。

(三)追蹤劑採樣裝置

追蹤劑採樣裝置主要用來從土壤中進行追蹤劑採樣，採樣裝置由抽取杯、錐形瓶、分流閥、與真空幫浦組成。抽取杯放置於不同深度採樣點採集土壤水樣，後端連結錐形瓶收集抽出水樣。真空抽氣幫浦提供吸力抽取土壤水樣。分流閥將真空抽氣幫浦吸力分流至多個抽取杯，藉此同時於多個採樣點採集水樣，另有調節各分流流率的功能。錐形瓶收集抽取杯所得之抽出水樣。

肆、實驗步驟

(一)場地整理與準備

於場址外水源處汲取足夠水源運抵試驗目的地備用，並選擇較平坦之小區鏟除部份表土整平。

(二)安置雙環入滲儀與追蹤劑入滲內環

試驗場地之表土儘量以不擾動為原則，將雙環入滲儀嵌入十字盤，使其成同心圓排列，以橡膠鎚將雙環入滲儀均勻打進土層約8 cm~10cm。中心放入注入內環做為注入追蹤劑使用。

(三)安置追蹤劑採樣裝置

以土壤鑽孔器具進行鑽孔，將抽取杯置入鑽孔，再將抽取杯與分流閥真空幫浦組合。此處須注意須現地填實鑽孔使其土壤條件與儘量與鑽孔前同。

(四)安置定水頭裝置與追蹤劑注入裝置

由於實驗需於入滲率為穩態情況下執行，架設定水頭裝置與追蹤劑注入裝置時須保持雙環入滲儀與追蹤劑注入內環的水頭高度一致，初期由於土壤未達飽和狀態，入滲率會較高，隨時間增加入滲率逐漸降低並趨於定值，藉此判斷已達成

穩態入滲之狀況，達到穩態此時可算穩態入滲率。

(五)注入追蹤劑

將事先製備之追蹤劑溶液加入追蹤劑注入裝置，試驗開始使其流入注入內環，注入追蹤劑後，仍須維持注入內環水頭與雙環入滲儀一致。

(六)追蹤劑水樣採樣

開啟追蹤劑採樣裝置，每隔一段時間抽取土壤水樣，並記錄時間點。採集的水樣倒進採樣瓶中，將採樣瓶放入冰筒冷藏於4°C之下保存，於實驗室進行追蹤劑濃度分析。

伍、資料分析

各採樣點的濃度觀測資料可標準曲線套配之半對數法進行分析，分析過程如下：

(一)以濃度觀測資料為縱軸(算術尺度)，時間為橫軸(對數尺度)繪製濃與時間變化資料於半對數紙。

(二)利用數學模式建立在各觀測點不同縱向延散係數與側向延散係數下之濃度穿透曲線，將所數學模式所得之濃度正規化，另外同時進行時間之無因次化，將經正規化濃度對無因次時間變化繪圖於半對數紙所建立的曲線即為標準曲線。

(三)將濃度觀測資料半對數圖建於標準曲線半對數圖沿無因次時間 t_D 軸平移直到獲得滿意之套配，此時可得對應的縱向延散係數與側向延散係數。

(四)比對各觀測點所得之縱向延散係數與側向延散係數，再進行調整至各觀測點有相同的縱向延散係數與側向延散係數，且各觀測點濃度資料與標準曲線有可接受滿意的套配。

參考文獻

Zhang X., Qi, X., Zhou, X., Pang, H., 2006. An in situ method to measure the longitudinal and transverse dispersion coefficients of solute transport in soil.

推估土壤傳輸參數現地試驗方法之改進

Journal of Hydrology, 328(3-4), 614–619.

附錄二：數值模式推導

本研究考慮之相關控制方程式與初始、邊界條件如下

$$\frac{\partial C(r, z, t)}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C(r, z, t)}{\partial z^2} - V \frac{\partial C(r, z, t)}{\partial z} + D_T \left[\frac{\partial^2 C(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C(r, z, t)}{\partial r} \right] \quad (A1)$$

$$C(r, z, t = 0) = 0 \quad (A2)$$

$$\frac{\partial C(r = R_1, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (A3)$$

$$VC(r, z = 0, t) - D_L \frac{\partial C(r, z = 0, t)}{\partial z} = \begin{cases} \sigma \delta(t) & 0 \leq r \leq R_i \\ 0 & R_i \leq r \leq R_o \end{cases} \quad (A4)$$

$$\sigma = \frac{M}{\phi \pi R_i^2}$$

$$\frac{\partial C(r, z = L, t)}{\partial z} = 0 \quad (A5)$$

首先針對(A1)與(A3)-(A5)之時間變數 t 進行Laplace 轉換，可得

$$D_L \frac{\partial^2 C_L(r, z, s)}{\partial z^2} - V \frac{\partial C_L(r, z, s)}{\partial z} + D_T \left[\frac{\partial^2 C_L(r, z, s)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_L(r, z, s)}{\partial r} \right] \quad (A6)$$

$$-s C_L(r, z, s) = 0$$

$$\frac{\partial C_L(r = R_o, z, s)}{\partial r} = 0 \quad 0 \leq z \leq L \quad (A7)$$

$$VC_L(r, z = 0, s) - D_L \frac{\partial C_L(r, z = 0, s)}{\partial z} = \begin{cases} \sigma & 0 \leq r \leq R_i \\ 0 & R_i \leq r \leq R_o \end{cases} \quad (A8)$$

$$\frac{\partial C_L(r, z = L, s)}{\partial z} = 0 \quad 0 \leq r \leq R_o \quad (A9)$$

此處 $C_L(r, z, s)$ 為 $C(r, z, t)$ 之Laplace轉換， $C_L(r, z, s) = \int_0^\infty C(r, z, t) e^{-st} dt$ ， s 為

Laplace轉換參數。

針對(A6)之空間變數 r 進行有限Hankel轉換

$$D_L \frac{d^2 C_H(\rho_m, z, s)}{dz^2} - V \frac{dC_H(\rho_m, z, s)}{dz} - (s + D_T \rho_m^2) C_H(\rho_m, z, s) = 0 \quad (A10)$$

此處 $C_H(\rho_m, z, s)$ 為 $C_L(r, z, s)$ 之有限Hankel轉換，其轉換與逆轉換定義為

$$C_H(\rho_m, z, s) = \int_0^{R_o} C_L(r, z, s) r J_0(\rho_m r) dr \quad (A11)$$

$$C_L(r, z, s) = \frac{2}{R_o^2} C_H(\rho_m = 0, z, s) + \frac{2}{R_o^2} \sum_{m=1}^{m=\infty} C_H(\rho_m, z, s) \frac{J_0(\rho_m r)}{|J_0(\rho_m R_o)|^2} \quad (A12)$$

此處 ρ_m 為有限Hankel轉換參數，其為超越方程式 $\frac{dJ_0(\rho_m R_o)}{dr} = 0$ 之所有根。

(A8)-(A9)之有限Hankel轉換為

$$VC_H(\rho_m, z=0, s) - D_L \frac{dC_H(\rho_m, z=0, s)}{dz} = \sigma g_H(\rho_m) \quad (A13)$$

$$\frac{dC_H(\rho_m, z=L, s)}{dz} = 0 \quad (A14)$$

$$\text{此處 } g_H(\rho_m) = \begin{cases} \frac{R_i^2}{2} & \rho_m = 0 \\ \frac{R_i J_1(\rho_m R_i)}{\rho_m} & \rho_m \neq 0 \end{cases}。$$

控制方程式(A10)與其邊界條件(A13)與(A14)可藉由通用型積分轉換法 (Generalized Integral Transform Technique, 簡稱GITT)求解，一般在應用通用型積分轉換法須將控制方程式之移流項消除，使控制方程式轉換為純擴散方程式 (purely diffusive differential equation)。另外由於邊界條件中包含非齊次項 (nonhomogeneous term)，此非齊次項可能造成緩慢收斂之問題(Ozisik,1980; Cotta and Mikhailov, 1997)。控制方程式轉換為純擴散方程式與邊界條件的齊次化可利用下列變數變換達成

$$C_H(\rho_m, z, s) = e^{\frac{V}{2D_L} z} C_V(\rho_m, z, s) + \frac{\sigma}{V} g_H(\rho_m) \quad (A15)$$

控制方程式(A10)與其邊界條件(A13)與(A14)可以 $\overline{C_V}(\rho_m, z, s)$ 表示為

$$D_L \frac{d^2 C_V(\rho_m, z, s)}{dz^2} - \left(s + \frac{V^2}{4D_L} + D_T \rho_m^2 \right) C_V(\rho_m, z, s) \quad (A16)$$

$$= \frac{\sigma}{V} e^{-\frac{V}{2D_L} z} \left(s + D_T \rho_m^2 \right) g_H(\rho_m)$$

$$\frac{V}{2D_L} C_V(\rho_m, z=0, s) - \frac{dC_V(\rho_m, z=0, s)}{dz} = 0 \quad (A17)$$

$$\frac{dC_V(\rho_m, z=L, s)}{dz} + \frac{V}{2D_L} C_V(\rho_m, z=L, s) = 0 \quad (A18)$$

滿足上述方程式之通用型積分轉換為(Özisik, 1968; Chen and Liu, 2011)

$$C_G(\rho_m, \beta_n, s) = \int_0^L K(\beta_n, z) C_V(\rho_m, z, s) dz \quad (A19)$$

$$C_V(\rho_m, z, s) = \sum_{n=1}^{n=\infty} p(\beta_n) K(\beta_n, z) C_G(\rho_m, \beta_n, s) \quad (A20)$$

此處 $K(\beta_n, z) = \frac{V}{2D_L} \sin(\beta_n z) + \beta_n \cos(\beta_n z)$ 為通用型積分轉換之核心函數(kernel

function)， β_n 為通用型積分轉換參數，其滿足 $\frac{\frac{V}{D_L} \beta_n}{\beta_n^2 - \frac{V^2}{4D_L^2}} = \tan(\beta_n L)$ 之所有解(特

徵值)， $p(\beta_n) = \frac{2}{L \left(\frac{V^2}{4D_L^2} + \beta_n^2 \right) + \frac{V}{D_L}}$ 。

操作通用型積分轉換運算子 $\int_0^L K(\beta_n, z) \cdot (*) dz$ 於式(A16)的左、右兩邊，且利用下

列積分轉換定理

$$G \left[\frac{d^2 C_V(\rho_m, z, s)}{dz^2} \right] = -\beta_n^2 G[C_V(\rho_m, z, s)] \quad (A21)$$

此處 $G[]$ 表通用型積分轉換運算子。

式(A16)可表為

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{s}{D_L} + \frac{D_T}{D_L} \rho_m^2 + \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2} \right) C_G(\rho_m, \beta_n, s) \\ & = \frac{\sigma}{V} \left(\frac{s}{D_L} + \frac{D_T}{D_L} \rho_m^2 \right) g_H(\rho_m) \theta(\beta_n) \end{aligned} \quad (A22)$$

此處 $\theta(\beta_n) = \frac{\frac{V}{D_L} \beta_n}{\frac{V^2}{4D_L^2} + \beta_n^2}$ 。

求解式(A22)可得

$$C_G(\rho_m, \beta_n, s) = -\frac{\sigma}{V} \frac{\frac{s}{D_L} + \frac{D_T}{D_L} \rho_m^2}{\frac{s}{D_L} + \frac{D_T}{D_L} \rho_m^2 + \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2}} g_H(\rho_m) \theta(\beta_n) \quad (A23)$$

對式(A23)進行通用型積分轉換之逆轉換(式A(20))可得

$$\overline{C_V}(\rho_m, z, s) = -\frac{\sigma}{V} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{s + D_T \rho_m^2}{s + D_T \rho_m^2 + D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2}} g_H(\rho_m) \Gamma(z, \beta_n) \quad (A24)$$

此處 $\Gamma(z, \beta_n) = \theta(\beta_n) p(\beta_n) K(z, \beta_n)$ 。

利用式(A15)變數變換可得

$$C_H(\rho_m, z, s) = \frac{\sigma}{V} g_H(\rho_m) - \frac{\sigma}{V} e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{s + D_T \rho_m^2}{s + D_T \rho_m^2 + D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2}} g_H(\rho_m) \Gamma(z, \beta_n) \quad (A25)$$

再進行有限Hankel逆轉換(式A(12))可得

$$C_L(r, z, s) = \frac{2}{R_o^2} \frac{\sigma}{V} \left[\frac{R_i^2}{2} - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{s}{s + D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2}} \frac{R_i^2}{2} \Gamma(z, \beta_n) \right] + \frac{2}{R_o^2} \frac{\sigma}{V} \sum_{m=1}^{m=\infty} \left[\frac{R_i J_1(\rho_m R_i)}{\rho_m} - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{s + D_T \rho_m^2}{s + D_T \rho_m^2 + D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2}} \frac{R_i J_1(\rho_m R_i)}{\rho_m} \Gamma(z, \beta_n) \right] \frac{J_0(\rho_m r)}{|J_0(\rho_m R_o)|^2} \quad (A26)$$

最後進行Laplace逆轉換可得

$$C(r, z, t) = \frac{\sigma}{V} \left[\delta(t) - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\delta(t) - \left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2} \right) e^{-\left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2} \right) t} \right] \Gamma(z, \beta_n) \right] \frac{R_i^2}{R_o^2} + \frac{\sigma}{V} \sum_{m=1}^{m=\infty} \left\{ \delta(t) - e^{\frac{V}{2D_L} z} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\delta(t) - \left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2} \right) e^{-\left(D_L \beta_n^2 + \frac{V^2}{4D_L^2} \right) t} \right] \Gamma(z, \beta_n) \right\} \frac{2R_i J_1(\rho_m R_i) J_0(\rho_m r)}{R_o^2 \rho_m |J_0(\rho_m R_o)|^2} \quad (A27)$$

附錄三：意見回覆

100 年度「土壤及地下水污染研究與技術提昇補(捐)助計畫」推估土壤傳輸參數 現地試驗方法之改進-審查意見表	
委員意見	意見回覆
1. 延散度與尺度有密切關係。計畫未考慮此問題。	謝謝委員意見，許多文獻確實指出延散係數確實有尺度延散相關問題，一般而言現地場址之尺度延散特性可藉由檢視分析不同深度之穿透曲線所得之參數資料釐清，因此本計畫將加入分析尺度延散之相關工作項目。相關項目加入於修正計畫書中「4.2 研究步驟」。
2. 不飽和層土壤污染物之縱向傳輸比側向傳輸快很多。縱向擴散之敏感度極大，未見有所處理（例如 probes 之垂直分布）。	理論上不飽和層土壤污染物之縱向傳輸比側向傳輸大，一般可概略估計縱向延散係數為側向延散的十倍，但平行水流之縱向溶質傳輸因同時受移流與縱向延散機制影響，而垂直水流之側向溶質傳輸因只受側向延散機制影響，因此縱向延散的敏感度反而較側向延散小。
3. 土壤之不均質性造成延散係數之空間變異極大，模式未予考慮。	延散現象主要是以巨觀的觀點去考慮由土壤不均質性所造成的污染物之分散現象，代表由追蹤劑注入點至穿透曲線觀測處之平均延散行為，故無須考慮延散係數之空間變異。
4. 計畫對於研究方法之細節未有詳細之描述，例如場地、土壤性質、採樣尺度，注入延時與滲入率。	現地試驗進行可能面臨各種的問題與困難，場地、土壤性質、採樣尺度，注入延時與滲入率都是可能影響計畫執行成功與否的關鍵因素，本計畫經多次現勘初步擇定以宜蘭龍德工業區附近一較均質之砂質土壤進行試驗，以確保計畫執行的可行性，相關採樣尺度，注入延時與滲入率取決於現場土壤質地，但本計畫結果可提供採樣尺度，注入延時與滲入率之參考依據。相關項目加入於修正計畫書中「4.1.1 現地入滲追蹤劑試驗」
5. 可增加有關土壤不飽和層垂直入滲之側向延散之研究文獻回顧。	謝謝委員意見，計畫執行將增加土壤不飽和層垂直入滲之側向延散之研究文獻之收集與整理。相關項目加入於修正計畫書中「4.2 研究步驟」。

6. 研究目的僅為推求較準確的污染傳輸參數，但此值受環境特性影響很大。	污染傳輸參數基本上取決於場址特性，因此受現地環境特性的影響很大，藉由現地試驗重覆執行，進而分析比較每次執行的參數，可進一步確保所得傳輸參數的合理性。
7. 本計畫之執行或可改進對土壤傳輸參數之現地推估方法，惟其對污染調查實際貢獻尚待評估。	本計畫建立土壤污染參數推估方法，以提昇土壤宿命傳輸模式計算的準確度。所建立的參數可提昇健康風險評估中計算地表至地下水暴露量參數的正確性，因此對計畫結果應對地下水污染調查有實際具體貢獻。
8. 示蹤劑建議採用 Br，以避免土壤中原有 Cl-之干擾。希望也能進行示蹤劑以外之污染物在土壤中傳輸試驗，並用來驗證延散係數之可靠性。	謝謝委員意見，本計畫採用氯鹽做為追蹤劑，主要化學藥劑為氯化鉀(KCl)，主要由於氯鹽屬於保守性化學物質，不易與其他離子或化合物產生反應，且不致造成土壤及水體的污染，且土壤或水中原有的背景值含量通常偏低，本計畫於實驗進行過程中，將背景值扣除，以獲得精確可靠的數據，此外，由於採用追蹤劑以外之污染物有污染現地土壤之虞，故本計畫將不以污染物進行土壤傳輸試驗。

行政院環境保護署 100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫
期中報告審查意見表

委員意見	意見回覆
1. 未有實驗結果。進度已落後	前面多次的實驗主要目的為藉由現地試驗實際操作的經驗改進儀器設計、操作過程與相關細節，以驗證試驗的可行性，依當初規畫的研究進度，本計畫已完成入滲追蹤劑試驗作業程序檢討，因此符合規畫進度。期中報告撰寫期間，本計畫多次現地試驗實際操作中所採得的樣本，雖已於實驗室分析完成，由於實驗結果與預期有些差距，由於未完成相關結果的探討與解釋，因此未於期中報告中提出結果，相關結果與探討已於期末報告加入。
2. 實驗設備之設置對於現地之地層條件造成極大之擾動，包括入滲環之敲擊震動、體積甚大之取水杯之鑽孔埋設等。宜討論實驗數據之可用性。	感謝指教，任何現地的試驗或採樣，都有可能造成地層條件的改變，因此在執行相關試驗應儘量減小對於地層條件的干擾，相較於地下含水層的水質採樣、水力試驗與追蹤劑試驗中鑽井的建置，本計畫試驗相對干擾較少。相關試驗因實驗設備的設置所可能造成的干擾本計將於期末報告說明並討論。

<p>3. 延散度與尺度有密切關係。計畫未考慮此問題。以目前之實驗規模，恐無法將結果推展應用於大尺度之現場。</p>	<p>謝謝委員意見，現地場址之尺度延散特性可藉由檢視分析不同深度之穿透曲線所得之參數資料釐清，因此本計畫將藉由數學模式分析不同深度之穿透曲線，推估最可能的傳輸參數，並進一步探討可能的尺度延散效應。本計畫的試驗方法若配合合適的試驗建置仍可進行較大尺度的現場，惟其尺度仍限制於地表面到地下水面距離。</p>
<p>4. 入滲追蹤劑試驗之儀器設計以及現地試驗已大體完成。建議後續能撰寫完整之測試方法的SOP 以供參考應用。</p>	<p>謝謝委員意見，將於期末報告中加入完整的試驗操作規範。</p>
<p>5. 後續建議能加入土壤質地(texture)及構造(structure)對於使用所建立的測試方法的限制或應注意事項探討。</p>	<p>ASTM 已對於相關入滲試驗適的土壤性質說明，本計畫加於期中加入相關參考文獻。</p>
<p>6. 本計畫依據文獻所提出的現地入滲追蹤劑試驗的方法與流程，進行現地試驗，並改進儀器設計、操作過程與相關細節。本計畫並收集試驗相關數學模式與分析方法。由目前研究結果可知，本研究目前已經實際現地多次試驗測試，並改良了相關儀器設備與執行作業相關流程，使現地入滲追蹤劑試驗之執行確實可行。</p>	<p>謝謝委員意見。</p>
<p>7. 本計畫具應用性，初步結果發現相關簡化假設不合理，造成推估土壤傳輸參數的誤差，後續需針對此結論進一步提出驗證。</p>	<p>相關數學模式的不合理性，本計畫將於期末報告探討並以實際現地試驗所得的參數闡明其不合理性。</p>
<p>8. 期末報告可針對本方法簡述操作步驟並說明應用前提。</p>	<p>謝謝委員意見。相關操作步驟與應用前提將於期末報告探討說明。</p>
<p>9. 主要成果符合計畫書之內容，目前進度並無落後情況。</p>	<p>謝謝委員意見。</p>
<p>10. 經費支用僅 29.35%，請加強。</p>	<p>謝謝委員意見，由於前期的試驗在於現地試驗，並未使用相關採樣分析的費用，本計畫將本於有效與合理的方式進行經費使用。</p>

<p>11. 此計畫經實際現地多次測試，改良了相關儀器及執行作業流程，使現地入滲追蹤劑減到更確實可行。</p>	<p>謝謝委員意見。</p>
<p>12. 本試驗方法是否可以適用於含水層的所在位置(例如污染物於地下含水層中的傳輸位置)或只能量測接近地表的土壤層。</p>	<p>本試驗方法的入滲試驗，限用於地表面的土壤層，難以適用於含水層中。適用含水層的試驗一般須有多口鑽井，可採強制梯度(抽水與注水)的方式，減少抽水的時間，惟期試驗時程通常耗時，因此相關儀器器的準備較為煩複(例如：多組的抽水馬達與現地觀測人員)，試驗容易失敗(無法掌握追蹤劑的採樣)且其時間隨試驗的尺度急遽增加，根據主持人過去的實際操作經驗，以 10 公尺的尺度，其完整的試驗操作與觀測時程需達二個月以上，因此目前在國際相關水力試驗(抽水試驗、微水試驗)的數據很多，但含水層追蹤劑試驗的數據相對稀少。在國內可能僅有少數的含水層追蹤劑試驗結果於期刊發表(Chen et al., 1996)。</p>
<p>13. p. 57 “...相關簡化假設極為不合理...”建議討論。</p>	<p>相關數學模式的不合理性，本計畫將於期末報告探討並以實際現地試驗所得的參數闡明其不合理性。</p>
<p>14. 適用條件建議討論。</p>	<p>ASTM 已對於相關入滲試驗適的土壤性質說明，本計畫加於期中加入相關參考文獻。</p>

附錄四：品保報告書

本計畫品保報告之內容包括績效查核之結果統計彙整與品保目標數據之精密度、準確度及完整性之評估資料。

一、 績效查核之結果統計彙整

為獲致高品質的數據，應正確執行品管程序，評估誤差，找出原因並矯正，針對本計畫執行之檢測項目氯鹽檢驗室亦執行盲測樣品績效查核，績效查核樣品來源為購買商業化之品管樣品，另有環境檢驗所盲樣測試，評估結果登錄於績效盲樣測試紀錄表並評估合格否，績效查核結果列為不合格的人員及項目需檢討原因及修正措施，且加以追蹤查核。本計畫績效查核執行結果如表 1 內容所示，結果合格率達 100%。

二、 品保目標數據之精密度、準確度及完整性之評估資料

本計畫氯鹽檢測時，均依本檢驗室管理手冊與個標準作業程序執行品管措施，包括空白樣品、查核樣品、重複樣品與添加樣品分析。

- 1、準確度(Accuracy)：指一測定值或一組測定值之平均值與真值接近的程度，準確度可由分析濃度經確認過之標準品來認定；以回收百分比(Percent recoveries)表示之。由實驗室進行品管查核樣品分析所得之回收率，準確度評估結果達 100%，詳見表 2。
- 2、精密度(Precision)：指一組重複分析其測定值間相符的程度，精密度可由重複分析樣品後計算其測定值間之相對標準偏差($n>2$)或相對差異百分比($n=2$)來認定。由實驗室進行重複樣品分析或添加樣品重複或查核分析重複求得之相對差異百分比，精密度評估結果達 100%，詳見表 2。
- 3、完整性(Completeness)：係計畫執行後，評估最終所得之有效數據數量與預期所得的數據數量之比值。本計畫設定完整性數據品質目標為 95%，達成目標為 100%。
- 4、方法空白樣品分析：又稱實驗室空白樣品 (Laboratory blank sample) 或試劑空白樣品(Reagent blank sample)。指為監測整個分析過程中可能導入污染而設計之樣品，係計畫執行時，以不含待測物之試劑水隨同樣品分析，由方法空白樣品之分析結果，可判知樣品在分析過程是否遭受污染或樣品之背景值。本計畫設定空白樣品分析值品保目標需符合低於待測物方法偵測極限的 2 倍，空白樣品分析結果達成品質目標 100%，詳見表 2。

表 1 績效查核結果

日期	項目	檢測值	單位	檢測人員	樣品來源	樣品濃度	可接受範圍		偏差	合格與否
							上限	下限		
101.05.17	氯鹽	105	mg/L	張玉縹	RTC	103	117	88.5	1SD	合格
101.05.17	氯鹽	291	mg/L	張玉縹	工秘處盲樣	---	---	---	1SD	合格

表 2、氯鹽檢測數據之精密度、準確度結果表

檢測方法：NIEA W407.51C

分析日期	方法偵測極限 (mg/L)	空白分析 mg/L		重覆分析%		查核分析%		添加分析%		相關係數 r 值 ≥ 0.995
		管制範圍	結果	管制範圍	結果	管制範圍	結果	管制範圍	結果	
1010829	1.3	<2.6	0.00	≤9.5	0.0	87~111	103	85~115	103	--
1010829	1.3	<2.6	0.20	≤9.5	2.3	87~111	101	85~115	95	--
1010829	1.3	<2.6	0.00	≤9.5	2.4	87~111	99	85~115	102	--
1010829	1.3	<2.6	0.20	≤9.5	0.9	87~111	97	85~115	99	--
1010831	1.3	<2.6	0.50	≤9.5	2.7	87~111	102	85~115	97	--
1010831	1.3	<2.6	0.20	≤9.5	0.0	87~111	97	85~115	104	--
1010831	1.3	<2.6	0.00	≤9.5	0.0	87~111	103	85~115	101	--
1010831	1.3	<2.6	0.00	≤9.5	0.6	87~111	100	85~115	100	--
1010831	1.3	<2.6	0.00	≤9.5	0.0	87~111	98	85~115	101	--
1010831	1.3	<2.6	0.50	≤9.5	1.3	87~111	101	85~115	102	--
1010831	1.3	<2.6	0.00	≤9.5	0.0	87~111	98	85~115	102	--

“ --- ” 表示該項不必執行品管分析

檢測原始數據

增修訂人員：鍾逸珠	初/修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	--------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心

環境組檢驗室

氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C

檢測日期：101.08.29

檢測人員：張玉鏢 張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.29	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.70	0.0140	0.0140
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴 定體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、重複、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829E1	536	5.00	100.00	20.0	0.00	6.00	6.00	536.0	8	---	536	---
B010829A1	6.5	100.00	100.00	1.0	0.00	1.90	1.90	6.5	8	---	---	---
B010829B1	5.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.60	1.60	5.0	8	---	---	---
B010829C1	4.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.40	1.40	4.0	8	---	---	---
B010829D1	46.7	100.00	100.00	1.0	0.00	10.00	10.00	46.7	8	---	---	---
B010829G1	1070	5.00	100.00	20.0	0.00	11.35	11.35	1067.0	8	---	---	---
B010829H1	2180	4.00	100.00	25.0	0.00	18.20	18.20	2183.7	8	---	---	---
B010829I1	2000	4.00	100.00	25.0	0.00	16.75	16.75	2003.8	8	---	---	---
B010829J1	3640	2.50	100.00	40.0	0.00	18.95	18.95	3642.8	8	---	---	---
B010829K1	3750	2.00	100.00	50.0	0.00	15.70	15.70	3747.1	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.60	0.60	0.0	8	---	---	---
重複分析	---	3.00	100.00	33.3	0.00	6.85	6.85	1032.9	8	999.0	103	回收率P%
重複分析	B010829E1	5.00	100.00	20.0	0.00	6.00	6.00	536.0	8	---	0.0	差異百分 比R%
添加分析	B010829E1	5.00	100.00	20.0	0.00	12.20	12.20	1151.4	8	600.0	103	回收率P%
添加重複分析	B010829E1											差異百分 比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

重複回收率R% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準品濃度}} \times 100\%$ 差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$ 添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品保品管人員

歸檔編號：T-17-05-01- W01-20-1

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 249-253 頁

增修訂人員：鍾志雄	初修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組實驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢 測 日 期：101.08.29
	檢 測 人 員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.29	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.70	0.0140	0.0140
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 \cdot V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829F1	1070	4.00	100.00	25.0	0.00	9.25	9.25	1073.2	8	---	1073.2	---
B010829L1	3520	2.00	100.00	50.0	0.00	14.80	14.80	3523.7	8	---	---	---
B010829M1	3720	2.00	100.00	50.0	0.00	15.60	15.60	3722.3	8	---	---	---
B010829N1	3720	2.00	100.00	50.0	0.00	15.60	15.60	3722.3	8	---	---	---
B010829O1	2830	2.00	100.00	50.0	0.00	12.00	12.00	2828.9	8	---	---	---
B010829P1	3640	2.00	100.00	50.0	0.00	15.25	15.25	3635.4	8	---	---	---
B010829Q1	3230	2.00	100.00	50.0	0.00	13.60	13.60	3226.0	8	---	---	---
B010829R1	4190	2.00	100.00	50.0	0.00	17.50	17.50	4193.7	8	---	---	---
B010829S1	3850	2.00	100.00	50.0	0.00	16.10	16.10	3846.3	8	---	---	---
B010829T1	3350	2.00	100.00	50.0	0.00	14.10	14.10	3350.0	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.65	0.65	0.2	8	---	---	---
查核分析	---	4.00	100.00	25.0	0.00	8.75	8.75	1011.2	8	999.0	101	回收率r%
重複分析	B010829F1	4.00	100.00	25.0	0.00	9.05	9.05	1048.4	8	---	2.3	差異百分比R%
添加分析	B010829F1	4.00	100.00	25.0	0.00	16.50	16.50	1972.8	8	950.0	95	回收率P%
添加重複分析	B010829F1											差異百分比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$ 差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$ 添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品保品管人員

歸檔編碼：T-17-05-01- W01-20-2

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 249-253 頁

增修訂人員：鍾惠珠	初/修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	--------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組檢驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢測日期：101.08.29
AgNO ₃ 溶液標定	檢測人員：張玉鏢

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.29	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.70	0.0140	0.0140
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 \cdot V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、重複、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829Z1	620	5.00	100.00	20.0	0.00	6.85	6.85	620.4	8	---	620.4	---
B010829U1	3700	2.00	100.00	50.0	0.00	15.50	15.50	3697.4	8	---	---	---
B010829V1	3850	2.00	100.00	50.0	0.00	16.10	16.10	3846.3	8	---	---	---
B010829W1	2.5	100.00	100.00	1.0	0.00	1.10	1.10	2.5	8	---	---	---
B010829X1	4.2	100.00	100.00	1.0	0.00	1.45	1.45	4.2	8	---	---	---
B010829Y1	5.7	100.00	100.00	1.0	0.00	1.75	1.75	5.7	8	---	---	---
B010829AA1	3350	2.00	100.00	50.0	0.00	14.10	14.10	3350.0	8	---	---	---
B010829AB1	5360	1.00	100.00	100.0	0.00	11.40	11.40	5360.0	8	---	---	---
B010829AC1	5630	1.00	100.00	100.0	0.00	11.95	11.95	5633.0	8	---	---	---
B010829AD1	5630	1.00	100.00	100.0	0.00	11.95	11.95	5633.0	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.60	0.60	0.0	8	---	---	---
查核分析	---	5.00	100.00	20.0	0.00	6.55	6.55	590.6	8	599.4	99	回收率P%
重複分析	B010829Z1	5.00	100.00	20.0	0.00	7.00	7.00	635.3	8	---	2.4	差異百分 比R%
添加分析	B010829Z1	5.00	100.00	20.0	0.00	15.10	15.10	1439.3	8	800.0	102	回收率P%
添加重複分析	B010829Z1											差異百分 比R%

$Cl(mg/L) = [(A - B) \cdot N \cdot 35450] \cdot X / V$

查核回收率P% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$

差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$

添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

許志強

品保品管人員

許志強

歸檔編號：T-17-05-01- W01-20-3

數據出處：工作日誌

12-01-10-3

冊

249-253

頁

增修訂人員：鍾惠珠	初修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組檢驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C

檢 測 日 期：101.08.29

檢 測 人 員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.29	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.70	0.0140	0.0140
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829AJI	5360	0.50	100.00	200.0	0.00	6.00	6.00	5360.0	8	---	536	---
B010829AEI	5860	1.00	100.00	100.0	0.00	12.40	12.40	5856.3	8	---	---	---
B010829AFI	5810	1.00	100.00	100.0	0.00	12.30	12.30	5806.7	8	---	---	---
B010829AGI	6030	1.00	100.00	100.0	0.00	12.75	12.75	6030.0	8	---	---	---
B010829AHI	6050	1.00	100.00	100.0	0.00	12.80	12.80	6054.9	8	---	---	---
B010829AII	5480	1.00	100.00	100.0	0.00	11.65	11.65	5484.1	8	---	---	---
B010829AKI	5710	1.00	100.00	100.0	0.00	12.10	12.10	5707.5	8	---	---	---
B010829ALI	5560	1.00	100.00	100.0	0.00	11.80	11.80	5558.6	8	---	---	---
B010829AMI	5260	1.00	100.00	100.0	0.00	11.20	11.20	5260.8	8	---	---	---
B010829ANI	5260	1.00	100.00	100.0	0.00	11.20	11.20	5260.8	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.65	0.65	0.2	8	---	---	---
查核分析	---	5.00	100.00	20.0	0.00	5.50	5.50	486.4	8	499.5	97	回收率r%
重複分析	B010829AJI	0.50	100.00	200.0	0.00	6.05	6.05	5409.7	8	---	0.9	差異百分比R%
添加分析	B010829AJI	5.00	100.00	20.0	0.00	11.00	11.00	1032.3	8	500.0	99	回收率P%
添加重複分析	B010829AJI											差異百分比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準品濃度}} \times 100\%$ 差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$ 添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品保品管人員

歸檔編號：T-17-05-01- W01-20-4

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 249-253 頁

增修訂人員：鍾惠琳	初修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組檢驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢測日期：101.08.31
	檢測人員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829AO1	5550	0.50	100.00	200.0	0.00	6.15	6.15	5548.3	8	---	554.8	---
B010829AP1	5650	1.00	100.00	100.0	0.00	11.90	11.90	5648.2	8	---	---	---
B010829AQ1	5220	1.00	100.00	100.0	0.00	11.05	11.05	5223.4	8	---	---	---
B010829AR1	5670	1.00	100.00	100.0	0.00	11.95	11.95	5673.2	8	---	---	---
B010829AS1	5720	1.00	100.00	100.0	0.00	12.05	12.05	5723.2	8	---	---	---
B010829AT1	ND<1.3	100.00	100.00	1.0	0.00	0.65	0.65	0.2	8	---	---	---
B010829AU1	5.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.60	1.60	5.0	8	---	---	---
B010829AV1	4.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.40	1.40	4.0	8	---	---	---
B010829AW1	3.5	100.00	100.00	1.0	0.00	1.30	1.30	3.5	8	---	---	---
B010829AX1	64.5	100.00	100.00	1.0	0.00	13.50	13.50	64.5	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.70	0.70	0.5	8	---	---	---
查核分析	---	5.00	100.00	20.0	0.00	6.70	6.70	609.8	8	599.4	102	回收率r%
重複分析	B010829AO1	0.50	100.00	200.0	0.00	6.00	6.00	5398.3	8	---	2.7	差異百分比R%
添加分析	B010829AO1	5.00	100.00	20.0	0.00	11.00	11.00	1039.7	8	500.0	97	回收率P%
添加重複分析	B010829AO1											差異百分比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$

差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$

添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

許義聰

品保品管人員

許義聰

歸檔編碼：T-17-05-01- W01-24-1

數據出處：工作日誌

12-01-10-3

冊

254-260

頁

增修訂人員：鍾惠珠	初修訂日期：93.12.20~99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心

環境組檢驗室

氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C

檢 測 日 期：101.08.31

檢 測 人 員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 \cdot V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829AY1	735	5.00	100.00	20.0	0.00	7.95	7.95	734.8	8	---	734.8	---
B010829AZ1	1070	5.00	100.00	20.0	0.00	11.35	11.35	1074.7	8	---	---	---
B010829BA1	1000	5.00	100.00	20.0	0.00	10.60	10.60	999.7	8	---	---	---
B010829BC1	590	5.00	100.00	20.0	0.00	6.50	6.50	589.8	8	---	---	---
B010829BD1	440	10.00	100.00	10.0	0.00	9.40	9.40	439.9	8	---	---	---
B010829BE1	360	10.00	100.00	10.0	0.00	7.80	7.80	359.9	8	---	---	---
B010829BF1	560	10.00	100.00	10.0	0.00	11.85	11.85	562.3	8	---	---	---
B010829BG1	2630	2.50	100.00	40.0	0.00	13.75	13.75	2629.2	8	---	---	---
B010829BH1	1290	5.00	100.00	20.0	0.00	13.50	13.50	1289.6	8	---	---	---
B010829BI1	170	20.00	100.00	5.0	0.00	7.40	7.40	169.9	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.65	0.65	0.2	8	---	---	---
查核分析	---	5.00	100.00	20.0	0.00	8.35	8.35	774.8	8	799.2	97	回收率r%
重複分析	B010829AY1	5.00	100.00	20.0	0.00	7.95	7.95	734.8	8	---	0.0	差異百分比R%
添加分析	B010829AY1	5.00	100.00	20.0	0.00	16.30	16.30	1569.5	8	800.0	104	回收率P%
添加重複分析	B010829AY1											差異百分比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準品濃度}} \times 100\%$ 差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$ 添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品保品管人員

歸檔編碼：T-17-05-01-W01-24-2

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 254/260 頁

增修訂人員：鍾意珠	初修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組檢驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢測日期：101.08.31
	檢測人員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 \times V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴 定體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829BB1	620	5.00	100.00	20.0	0.00	6.80	6.80	619.8	8	---	620.4	---
B010829BJ1	60.5	100.00	100.00	1.0	0.00	12.70	12.70	60.5	8	---	---	---
B010829BK1	31.0	100.00	100.00	1.0	0.00	6.80	6.80	31.0	8	---	---	---
B010829BL1	17.5	100.00	100.00	1.0	0.00	4.10	4.10	17.5	8	---	---	---
B010829BM1	11.0	100.00	100.00	1.0	0.00	2.80	2.80	11.0	8	---	---	---
B010829BN1	9.0	100.00	100.00	1.0	0.00	2.40	2.40	9.0	8	---	---	---
B010829BO1	ND<13	100.00	100.00	1.0	0.00	0.80	0.80	1.0	8	---	---	---
B010829BP1	4.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.40	1.40	4.0	8	---	---	---
B010829BQ1	7.5	100.00	100.00	1.0	0.00	2.10	2.10	7.5	8	---	---	---
B010829BR1	1470	5.00	100.00	20.0	0.00	15.30	15.30	1469.5	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.60	0.60	0.0	8	---	---	---
查核分析	---	5.00	100.00	20.0	0.00	6.80	6.80	619.8	8	599.4	103	回收率r%
重複分析	B010829BB1	5.00	100.00	20.0	0.00	6.80	6.80	619.8	8	---	0.0	差異百分比R%
添加分析	B010829BB1	5.00	100.00	20.0	0.00	12.85	12.85	1224.6	8	600.0	101	回收率P%
添加重複分析	B010829BB1											差異百分比R%

$Cl(mg/L) = [(A - B) \times N \times 35450] \times X / V$

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$

差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$

添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

許玉鏢

品保品管人員

許玉鏢

歸檔編碼：T-17-05-01- W01-24-3

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 254-260 頁

增修訂人員：鍾惠珠	初/修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	--------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心

環境組檢驗室

氣鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C

檢測日期：101.08.31

檢測人員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量濃度(N)
	N ₁ 當量濃度(N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積(mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829BU1	12900	0.30	100.00	333.3	0.00	8.35	8.35	12911.4	8	---	1291	---
B010829BS1	9100	1.00	100.00	100.0	0.00	18.80	18.80	9097.2	8	---	---	---
B010829BT1	11800	0.50	100.00	200.0	0.00	12.40	12.40	11796.3	8	---	---	---
B010829BV1	12100	0.50	100.00	200.0	0.00	12.75	12.75	12146.2	8	---	---	---
B010829BW1	10800	0.50	100.00	200.0	0.00	11.40	11.40	10796.7	8	---	---	---
B010829BX1	11300	0.50	100.00	200.0	0.00	11.90	11.90	11296.5	8	---	---	---
B010829BY1	10900	0.50	100.00	200.0	0.00	11.50	11.50	10896.6	8	---	---	---
B010829BZ1	10600	0.50	100.00	200.0	0.00	11.25	11.25	10646.7	8	---	---	---
B010829CA1	9950	0.50	100.00	200.0	0.00	10.55	10.55	9946.9	8	---	---	---
B010829CB1	10300	0.50	100.00	200.0	0.00	10.90	10.90	10296.8	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.60	0.60	0.0	8	---	---	---
查核分析	---	4.00	100.00	25.0	0.00	8.60	8.60	999.7	8	999.0	100	回收率r%
重複分析	B010829BU1	0.30	100.00	333.3	0.00	8.30	8.30	12828.1	8	---	0.6	差異百分比R%
添加分析	B010829BU1	3.00	100.00	33.3	0.00	16.20	16.20	2596.6	8	1300.0	100	回收率P%
添加重複分析	B010829BU1											差異百分比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$ 差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$ 添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品保品管人員

歸檔編碼：T-17-05-01- W01-24-4

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊

254-260

頁

增修訂人員：鍾惠珠	初/修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	--------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組檢驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢 測 日 期：101.08.31
	檢 測 人 員：張玉繹

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、重核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829CD1	135	20.00	100.00	5.0	0.00	6.00	6.00	135.0	8	---	135	---
B010829CC1	1540	5.00	100.00	20.0	0.00	16.00	16.00	1539.5	8	---	---	---
B010829CE1	30.0	100.00	100.00	1.0	0.00	6.60	6.60	30.0	8	---	---	---
B010829CF1	16.5	100.00	100.00	1.0	0.00	3.90	3.90	16.5	8	---	---	---
B010829CG1	10.5	100.00	100.00	1.0	0.00	2.70	2.70	10.5	8	---	---	---
B010829CH1	8.5	100.00	100.00	1.0	0.00	2.30	2.30	8.5	8	---	---	---
B010829CI1	7.0	100.00	100.00	1.0	0.00	2.00	2.00	7.0	8	---	---	---
B010829CJ1	ND<13	100.00	100.00	1.0	0.00	0.70	0.70	0.5	8	---	---	---
B010829CK1	3.0	50.00	100.00	2.0	0.00	0.90	0.90	3.0	8	---	---	---
B010829CL1	13.2	90.00	100.00	1.1	0.00	3.00	3.00	13.2	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.60	0.60	0.0	8	---	---	---
重核分析	---	20.00	100.00	5.0	0.00	6.50	6.50	147.5	8	150.0	98	回收率r%
添加分析	B010829CD1	20.00	100.00	5.0	0.00	12.05	12.05	286.2	8	150.0	101	差異百分比R%
添加重核分析	B010829CD1											回收率P%
												差異百分比R%

$Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V$

重核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$

差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$

添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重核分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

許成強

品保品管人員

許成強

歸檔編碼：T-17-05-01- W01-24-5

數據出處：工作日誌

12-01-10-3

冊

254-260

頁

增修訂人員：鍾志雄	初修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心

環境組檢驗室

氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢測日期：101.08.31
	檢測人員：張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量濃度(N)
	N ₁ 當量濃度(N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積(mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴 定體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、查核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829DA1	196	20.00	100.00	5.0	0.00	8.45	8.45	196.2	8	---	196.2	---
B010829CM1	7.2	100.00	100.00	1.0	0.00	2.05	2.05	7.2	8	---	---	---
B010829CN1	6.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.80	1.80	6.0	8	---	---	---
B010829CO1	9.0	100.00	100.00	1.0	0.00	2.40	2.40	9.0	8	---	---	---
B010829CP1	3.0	100.00	100.00	1.0	0.00	1.20	1.20	3.0	8	---	---	---
B010829CQ1	5.2	100.00	100.00	1.0	0.00	1.65	1.65	5.2	8	---	---	---
B010829CR1	17.7	100.00	100.00	1.0	0.00	4.15	4.15	17.7	8	---	---	---
B010829CS1	44.2	100.00	100.00	1.0	0.00	9.45	9.45	44.2	8	---	---	---
B010829CT1	43.2	100.00	100.00	1.0	0.00	9.25	9.25	43.2	8	---	---	---
B010829CU1	20.2	100.00	100.00	1.0	0.00	4.65	4.65	20.2	8	---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.70	0.70	0.5	8	---	---	---
查核分析	---	20.00	100.00	5.0	0.00	8.65	8.65	201.2	8	199.8	101	回收率P%
重複分析	B010829DA1	20.00	100.00	5.0	0.00	8.35	8.35	193.7	8	---	1.3	差異百分比R%
添加分析	B010829DA1	20.00	100.00	5.0	0.00	16.60	16.60	399.9	8	200.0	102	回收率P%
添加重複分析	B010829DA1											差異百分比R%

Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V

查核回收率r% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$ 差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$ 添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重複分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品質品管人員

歸檔編號：T-17-05-01-W01-24-6

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 254-260 頁

增修訂人員：鍾克珠	初修訂日期：93.12.20/99.07.05	核准人：張大偉	發行日期：99.08.17
-----------	-------------------------	---------	---------------

財團法人農業工程研究中心
環境組檢驗室
氯鹽檢測紀錄表

文件編號：T-17-05-01(1.2版)

檢驗方法：NIEA W407.51C	檢 測 日 期：101.08.31
	檢 測 人 員：張玉鏢 張玉鏢

AgNO₃溶液標定

標定日期	NaCl標準溶液		空白滴定量		AgNO ₃ 標定溶液		標定溶液平均當量 濃度(N)
	N ₁ 當量濃度 (N)	V ₁ 體積(mL)	B體積(mL)	B平均體積 (mL)	V ₂ 體積(mL)	N ₂ 當量濃度(N)	
101.08.31	0.0141	10.00	0.60	0.60	10.60	0.0141	0.0141
	0.0141	10.00	0.60		10.70	0.0140	

計算公式： $N_2 = N_1 * V_1 / V_2$

樣品測定

樣品編號	報告值 (mg/L)	水樣量(mL)		稀釋 倍數 X	最初滴 定體積 V ₀	最終滴 定體積 V _L	硝酸銀滴定 體積A(mL) (A=V _L -V ₀)	氯離子濃 度(mg/L)	pH	添加、重核、 確認標準品濃 度(mg/L)	品管結果	
		原取量	最終體 積									
B010829CY1	292	10.00	100.00	10.0	0.00	6.45	6.45	292.4	8	---	292.4	---
B010829CV1	10.2	100.00	100.00	1.0	0.00	2.65	2.65	10.2	8	---	---	---
B010829CW1	10.5	100.00	100.00	1.0	0.00	2.70	2.70	10.5	8	---	---	---
B010829CX1	75.2	100.00	100.00	1.0	0.00	15.65	15.65	75.2	8	---	---	---
B010829CZ1	260	20.00	100.00	5.0	0.00	11.00	11.00	259.9	8	---	---	---
B010829DB1	45.2	100.00	100.00	1.0	0.00	9.65	9.65	45.2	8	---	---	---
B010829DC1	21.5	100.00	100.00	1.0	0.00	4.90	4.90	21.5	8	---	---	---
B010829DD1	13.5	100.00	100.00	1.0	0.00	3.30	3.30	13.5	8	---	---	---
B010829DE1	ND<13	80.00	100.00	1.3	0.00	0.40	0.40	-1.3	8	---	---	---
以下空白										---	---	---
空白分析	---	100.00	100.00	1.0	0.00	0.60	0.60	0.0	8	---	---	---
重核分析	---	10.00	100.00	10.0	0.00	6.50	6.50	294.9	8	299.7	98	回收率P%
添加分析	B010829CY 1	10.00	100.00	10.0	0.00	6.45	6.45	292.4	8	---	0.0	差異百分 比R%
添加分析	B010829CY 1	10.00	100.00	10.0	0.00	12.55	12.55	597.3	8	300.0	102	回收率P%
添加重核分析	B010829CY1											差異百分 比R%

$Cl(mg/L) = [(A - B) * N * 35450] * X / V$

重核回收率P% = $\frac{\text{測試濃度}}{\text{標準濃度}} \times 100\%$

差異百分比R% = $\frac{|X1 - X2|}{\frac{1}{2}(X1 + X2)} \times 100\%$

添加回收率P% = $\frac{(M - B)}{T} \times 100\%$

其中：X1與X2分別為重核分析最大最小測定值

T為添加標準品濃度

M為添加後濃度

B為樣品濃度

數據查核

品保品管人員

歸檔編碼：T-17-05-01 W01-24-7

數據出處：工作日誌 12-01-10-3

冊 254-260 頁