

Abstract

用於生產多種工業產品所使用的化學溶劑在不當處理的情況下會滲入地下水造成污染，其中四氯乙烯(Tetrachloroethylene, PCE)及其降解的子物種等含氯有機污染物為工業場址中常見的污染物。現今在現地污染場址內常見多個內部污染源釋出的情況，即便過去的一些研究已發展出模擬含氯有機溶劑污染地下水的傳輸模式，但多數研究裡考慮的邊界源傳輸模式在模擬多個內部污染源的場址污染問題時會受到限制且難以廣泛應用。考慮內部污染源的傳輸模式可以模擬場址內任意污染源的注入情形，且模式中考量限制速率吸附來避免低估可降解污染物的濃度。本研究欲發展隨任意時間變化之多個內部污染源的多物種污染物傳輸半解析解模式，並考慮移流、延散、限制速率吸附和一階降解反應等傳輸機制。此半解析解推導依序應用Laplace轉換、finite Fourier cosine轉換及廣義型積分轉換消去時間及空間微分項，將偏微分方程式轉換為代數方程式進行求解，再利用一系列逆轉換求得半解析解。本模式的最大特點在於模擬現實場址中常見的內部污染源釋放情形，並作為初步評估污染整治的基礎。

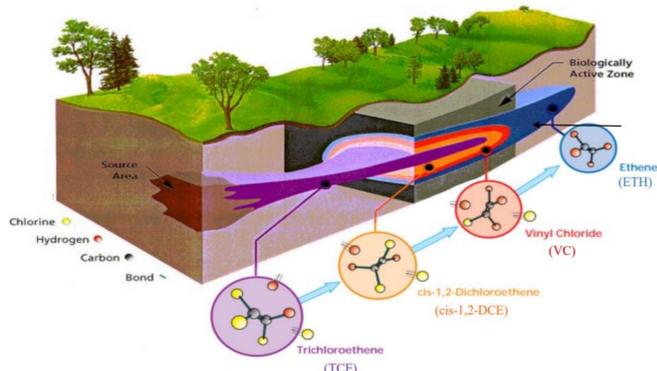
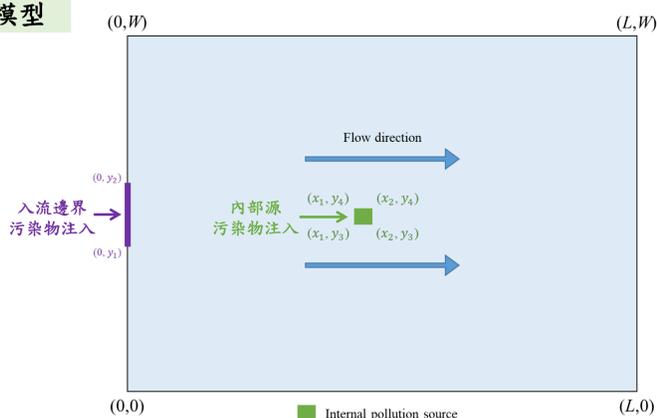


圖1 含氯有機污染物在地下水系統中之降解與傳輸行為。

Mathematical model

概念模型



污染傳輸控制方程式

本研究發展半解析解所根據的移流-延散方程式考慮多個傳輸機制標示如下：

$$D_L \frac{\partial^2 C_i(x, y, t)}{\partial x^2} + v \frac{\partial C_i(x, y, t)}{\partial x} + D_T \frac{\partial^2 C_i(x, y, t)}{\partial y^2} - k_i C_i(x, y, t) + k_{i-1} C_{i-1}(x, y, t) + \sum_{m=1}^{NS} \frac{M_i^m}{\phi} p_{x,i}^m(x) p_{y,i}^m(y) q_i^m(t) - \frac{\beta_i}{\phi} [C_i(x, y, t) - \frac{S_i(x, y, t)}{K_{di}}] = \frac{\partial C_i(x, y, t)}{\partial t} \quad i=1 \dots N$$

限制速率吸附關係式

$$\rho_b \frac{\partial S_i(x, y, t)}{\partial t} = \beta_i [C_i(x, y, t) - \frac{S_i(x, y, t)}{K_{di}}] \quad i=1 \dots N$$

初始條件

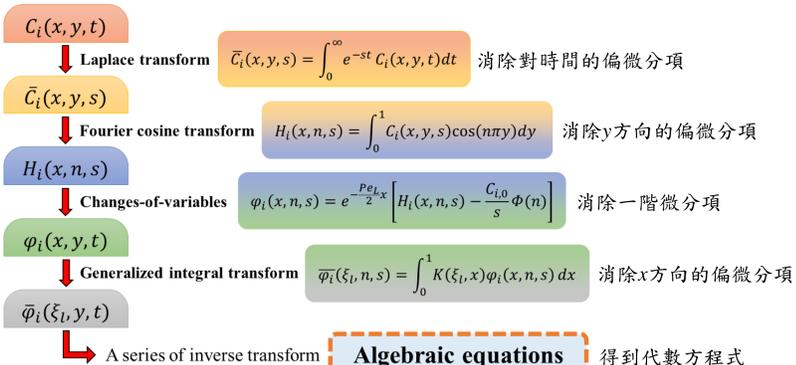
$$C_i(x, y, t=0) = 0 \\ S_i(x, y, t=0) = 0 \quad i=1 \dots N$$

邊界條件

$$-D_L \frac{\partial C_i(x=0, y, t)}{\partial x} + v C_i(x=0, y, t) = v C_{i,0} [H(y-y_1) - H(y-y_2)] \\ \frac{\partial C_i(x=L, y, t)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial C_i(x, y=0, t)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial C_i(x, y=W, t)}{\partial y} = 0 \quad i=1 \dots N$$

Method

推導流程



Results

持續注入 f(t)=1

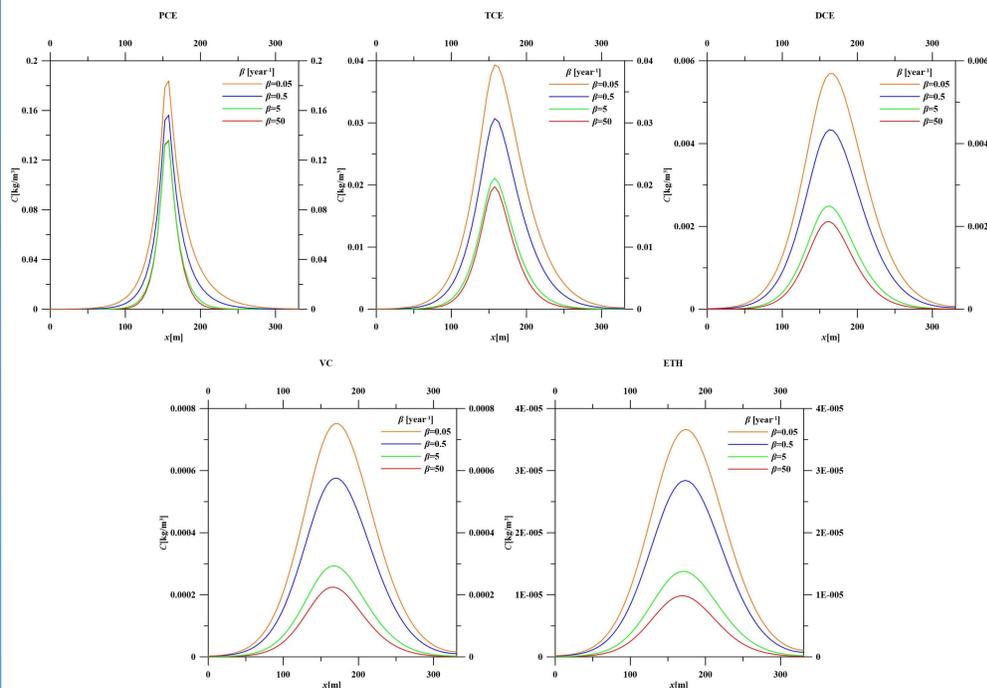


圖2 利用本研究所發展之半解析解模式來模擬場址內定濃度且持續注入的四氯乙烯(PCE)污染源，模擬時間為1年，並觀察其與子物種的溶解相污染團在不同吸附速率係數(sorption rate coefficient, β)下的濃度分布。 β 值越小表示其吸附速率越慢，即受到限制速率吸附的程度越高；而 β 值越大則表示其吸附速率越快，當 $\beta=50$ 的時候已經趨近於線性平衡吸附。

分時段注入 f(t)=H(t)-H(t-t_q)

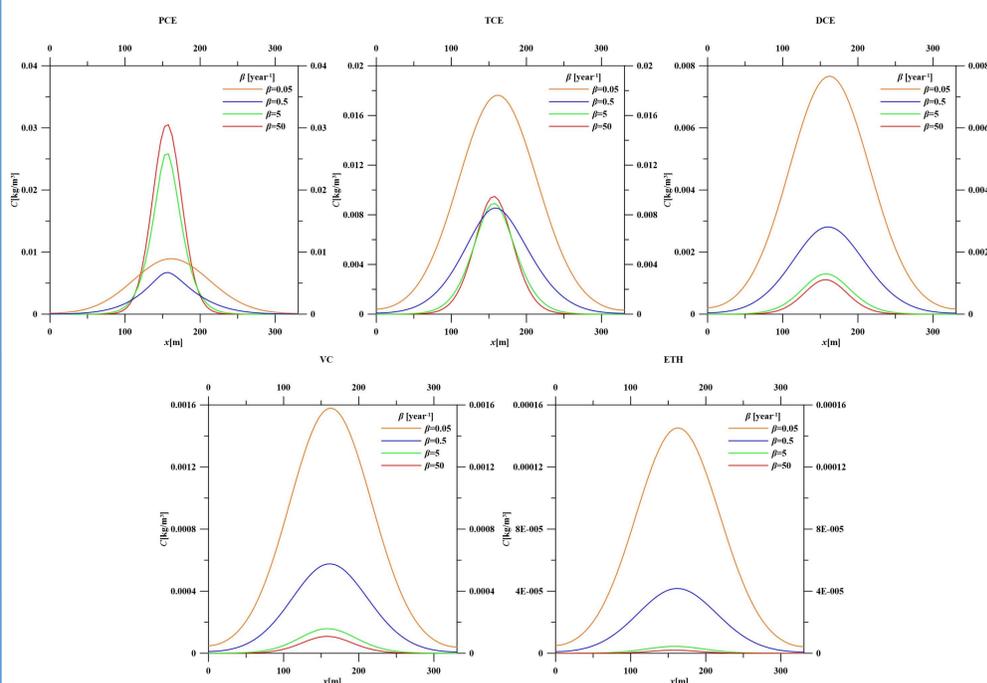


圖3 利用本研究所發展之半解析解模式來模擬場址內定濃度注入的四氯乙烯(PCE)污染源，注入時間區段為t=0年至t=0.5年，模擬時間為1年。H(t)為單位階梯函數(Heaviside step function)。

Discussion and Conclusions

- 多數污染場址內都存在非點狀污染源，然而多物種溶質傳輸解析解的發展上缺乏適當模式來研究相關問題，因此本研究發展之半解析解模式不僅可用於瞭解此類問題在土壤與地下水系統中的污染傳輸行為，模擬結果亦能對污染整治計畫做初步的評估。
- 本研究考慮限制速率吸附而非過去通常考慮的線性平衡吸附，既能避免低估污染團濃度，也能提供正確的現地資料來分析健康風險。圖2的模擬結果表明受到限制速率吸附作用的污染物在持續注入的條件下會於溶解相累積較高的濃度，進而使污染團範圍分布的更廣。
- 圖3考慮時間函數為單位階梯函數的狀況，並從降解序列之母物種污染物(PCE)觀察到一現象：污染源的停止注入會導致溶解相濃度在考慮線性平衡吸附($\beta=50$)時明顯高於限制速率吸附($\beta=0.05$)。此現象是因為較高的 β 值伴隨脫附速率越快的特徵所造成，因此在沒有污染源注入的情況下，吸附相濃度在短時間內會急遽降低並使得溶解相濃度急遽升高。