

震波激盪技術應用於地下水污染整治最佳化之理論探討

EXPLORING THE OPTIMAL PARAMETERS FOR WAVE STIMULATION TECHNOLOGY -
APPLICATIONS TO GROUNDWATER REMEDIATION

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士班研究生

王常勉
Chang-Mien Wang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

羅偉誠*
Wei-Cheng Lo

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士後研究員

李哲璋
Jhe-Wei Lee

中國科技大學
土木與防災設計學系
退休教授

陳主惠
Chu-Hui Chen

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士班研究生

鄧教弘
Jiao-Hong Deng

摘要

低頻震波激盪應用在含非混合流體流動的多孔介質邊界內，可藉以尋得地下水污染之整治，其包含提高除去非水流體、增加石油取得或提高汙染物質析出。但值得注意的是，目前少有研究發表可提供量化的描述，來確定震波下非水流體流動與震波激盪刺激發特性有關聯，可見以理論下模擬的研究較實驗結果缺乏。

為解決這部分概念的缺漏，本研究根據 Lo *et al.* (2005,2007)所發展的孔彈性理論，加入邊界條件，並代入相關孔隙介質的彈性參數和含有水及三氯乙烯兩相流體的水文參數，進行模擬計算與分析，並針對 Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數進行模擬與探討分析，藉以了解不同土壤質地條件下，孔隙震波激盪對三氯乙烯的傳輸影響情形，並取得不同土壤介質對三氯乙烯傳輸之最佳震波頻率及傳輸趨勢。

關鍵詞：震波激盪、孔彈性理論、汙染傳輸、地下水汙染整治。

* 通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系教授

701 台南市東區大學路 1 號 · lowc@mail.ncku.edu.tw

EXPLORING THE OPTIMAL PARAMETERS FOR WAVE STIMULATION TECHNOLOGY - APPLICATIONS TO GROUNDWATER REMEDIATION

Chang-Mien Wang

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Wei-Cheng Lo*

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Jhe-Wei Lee

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Chu-Hui Chen

Department/Graduate Institute of Civil
Engineering and Hazard Mitigation Design,
China University of Technology

Jiao-Hong Deng

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

ABSTRACT

Seismic wave stimulation is emerging as an important technology with the capability of improving efficiency in extracting organic contaminants from aquifers. To understand and predict the behavior of immiscible fluids in a porous medium subject to stress pulsing at a boundary lag significantly behind the progress, a boundary-value problem was formulated to describe pore-pressure pulsing at seismic frequencies that was based on the continuum theory of poroelasticity for an elastic porous medium bearing two immiscible fluids. Numerical investigation was applied by using elasticity parameters and hydraulic data to simulate the stimulation-induced mobilization of trichloroethene (TCE) in water flowing through a compressed sand core. The optimum frequencies of seismic stimulation which enhance higher TCE concentration for 12 soil texture classes can be found. The results of sensitivity analysis indicate that bulk modulus and shear modulus of different soil textures dominate the optimum frequency of seismic stimulation.

Keywords: Wave stimulation technology, Theory of poroelasticity, Contaminant transmission, Contaminated groundwater remediation.

一、緒論

1.1 文獻回顧

低頻震波(或聲波)的刺激,應用在含有水和非水流體(例如,石油或氯化的有機液體)的多孔介質邊界內,此一新興技術具有顯著的潛力,提供了一個成本較低、對環境影響較小,且更有效的手段,藉以增加非水流體的流動和析出(Beresnev and Johnson, 1994; Iassonov and Beresnev, 2003; Kouznetsov *et al.*, 1998; Roberts *et al.*, 2001)。在含有流體的孔隙介質中,施加應力在孔隙介質之邊界,並加震波刺激流體,由於介質中流體流動與固體介質變形之間的孔彈性耦合,可使孔隙介質的體積產生變化(Biot, 1962; Wang, 2000)。雖然震波刺激可使多孔介質內部產生變化,增加孔隙邊界的壓力梯度,以提高流體的流速,但刺激停止後,增加的流速將慢慢下降至原本之穩態流速(Wang *et al.*, 1998)。

Roberts *et al.* (2001)的研究中利用震波刺激施加在含有機溶劑三氯乙炔(TCE)及水之砂柱軸向邊界,實驗方式為固定通過的水流流速,提供一個或兩個以上之變異因子,並穩定施加頻率低於 100 Hz 的震波,可增加三氯乙炔流出之濃度。在震波頻率為 25~100 Hz 的循環範圍內,三氯乙炔流出最大濃度出現在 75 Hz。且重要的是,僅增加水流通過的流速,而缺乏震波刺激的情形下,流出的三氯乙炔濃度並未因此增加。

儘管有了先前這些進展,但沒有模擬研究能夠量化並描述應力震動等震波刺激造成介質中非水流體析出量增加的現象及關連性。基本上,在連體物理學的震波震盪模式必須遵守守恆定律、滿足實際邊界條件及與熱動力學一致的背景。孔彈性理論(Wang, 2000)應用這些限制由數學描述來探討低頻震波震盪在含二相流體流動耦合之孔彈性介質。為了應對這一挑戰,Lo *et al.* (2012)應用 Lo *et al.* (2005, 2007)藉由多相連體力學所發展的孔彈性理論,模擬 Roberts *et al.* (2001)的震波刺激實驗,考慮其邊界條件,並代入含有水及三氯乙炔的水文參數及砂柱彈性參數進行模擬與分析,模擬結果與實驗結果相符。

1.2 研究動機

本研究模擬的非水流體,為常見的有機溶劑三氯乙炔(TCE),主要用作金屬除脂和羊毛及織物的乾洗劑,亦可用在樹脂、瀝青、煤焦油、醋酸纖維素、硝化

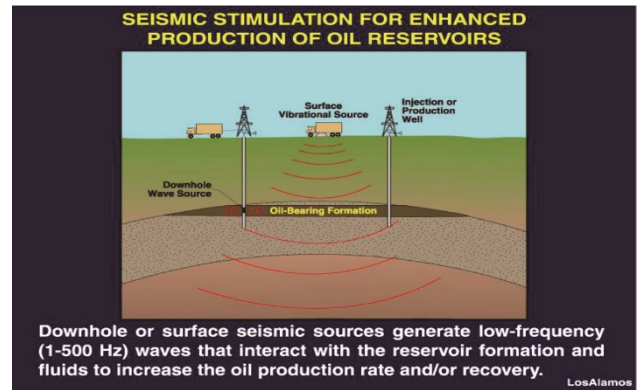


圖 1 利用震波改善抽取處理法示意圖

纖維素、橡膠和塗料等的溶劑,因此大量使用含氯有機溶劑的工廠,如電子工廠、化學工廠、殺蟲劑製造廠、煉焦碳廠等地,常會有地下水汙染的情形。

傳統的地下水汙染整治,一般採用抽取處理法(pump and treat),即在同一地區周邊同時進行地下水灌注及抽取,藉以抽取附著在土壤介質中的汙染物。但因汙染物本身的黏滯力與土壤介質顆粒表面存在表面張力,即使已浸沒在水中,並增加了地下水灌注及抽取的壓力與速度,仍有部分汙染物不會被析出,此時稱為囚滯(trap)現象。

為改善地下水汙染整治的囚滯現象,可於地表或地下進行低頻震(聲)波刺激,藉此增加其流動性與傳輸能力,並增加抽取汙染物之濃度,其方式與國外地下原油開採的方式相同(詳圖 1)。Roberts *et al.* (2001)研究中,震波應力刺激施加在含有機溶劑三氯乙炔及水之砂柱邊界,保持震波的頻率保持低於 100 Hz,可增加流動三氯乙炔流出之濃度即為此例。

Lo *et al.* (2012)應用 Lo *et al.* (2005, 2007)利用多相連體力學所發展的孔彈性理論,考慮邊界條件,並代入含有水及三氯乙炔的水文參數及砂柱彈性參數進行模擬與分析,得到與 Roberts *et al.* (2001)震波刺激實驗一致的結果,可證明 Lo *et al.* (2005, 2007)所發展的孔彈性理論之可靠性及可實用性。但其模擬僅針對單一孔隙介質,現今學界對不同土壤質地條件下,孔隙震動對三氯乙炔的傳輸情形了解仍非常有限,因此需要一個系統的研究來探討此現象。

爰此,本研究根據 Lo *et al.* (2005, 2007)發展的孔彈性理論及參考 Lo *et al.* (2012)的邊界、初始條件,針對 Carsel and Parrish (1988)得到的 12 種土壤參數進行模擬與探討分析,藉以了解不同土壤質地條件下,孔隙震動對三氯乙炔的傳輸影響情形,並取得不同土壤介質對三氯乙炔傳輸之最佳震波頻率及傳輸趨勢。

依據美國農業部(U.S. Department of Agriculture,

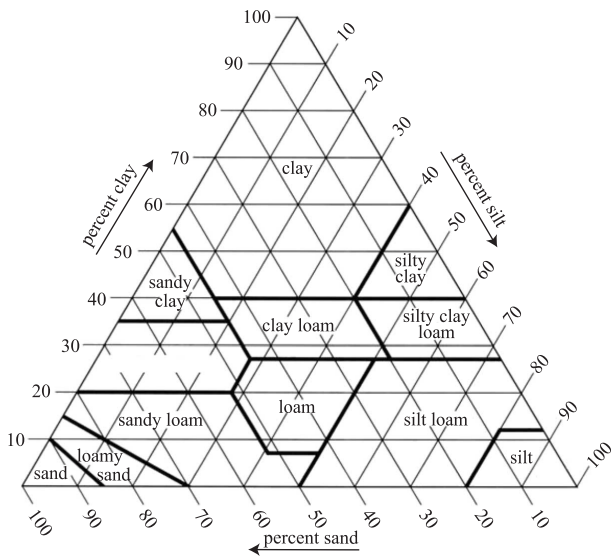


Chart Showing the percentages of Clay, Silt, and Sand in the basic textural classes

圖 2 美國農業部(USDA)土壤分類圖

USDA)的分類標準，任何土壤皆由砂土(sand)、坩土(silt)和黏土(clay)組成，USDA 依據這三種土壤的含量，將土壤歸類為十二個種類，分別為砂土(Sand)、壤質砂土(Loamy sand)、砂質壤土(Sandy loam)、壤土(Loam)、坩土(Silt)、坩質壤土(Silt loam)、砂質黏壤土(Sandy clay loam)、黏質壤土(Clay loam)、坩質黏壤土(Silty clay loam)、砂質黏土(Sandy clay)、坩質黏土(Silty clay)和黏土(Clay)，如圖 2 所示。

二、理論模式

2.1 Roberts 實驗

2.1.1 實驗配置及結果

Roberts *et al.* (2001)流體邊界和實驗中使用的測量裝置示意圖如圖 3 所示，當達 trap 現象後，三氯乙烯測得的濃度約為 1000 ppm，此時開始給予震波刺激。在軸向震波頻率為 25~100 Hz 的範圍內，三氯乙烯濃度皆為增加，最大增加濃度出現在震波頻率為 75 Hz，其實驗結果如圖 4。

2.1.2 邊界及初始條件

在模擬 Roberts *et al.* (2001)實驗使用的裝置中，我們採用 Lo *et al.* (2012)各項設定，邊界在 $y = 0$ 和 $y = L$ 時，其條件為靜態軸向應力。為了維持恆定的流體流過砂柱，施加一個靜態壓力梯度，表示為 $\bar{P}_a(1 - y/L)$ 。孔隙水壓力的震動，可表示為 $p_f = \bar{p}_b \sin(\omega t)$ ，其中 ω 是

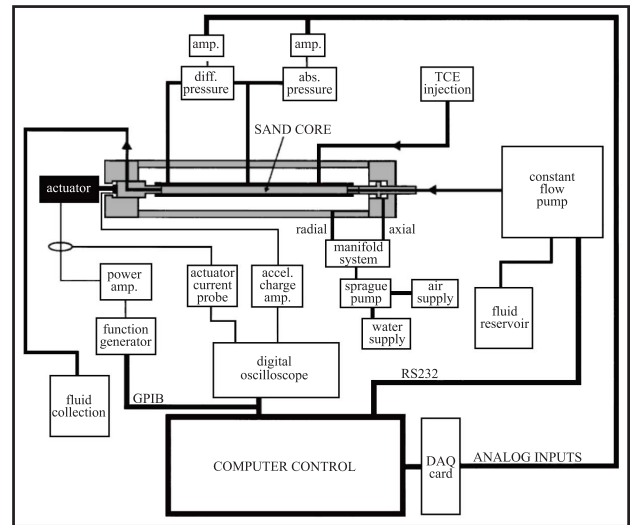


圖 3 Roberts *et al.* (2001)實驗使用裝置示意圖

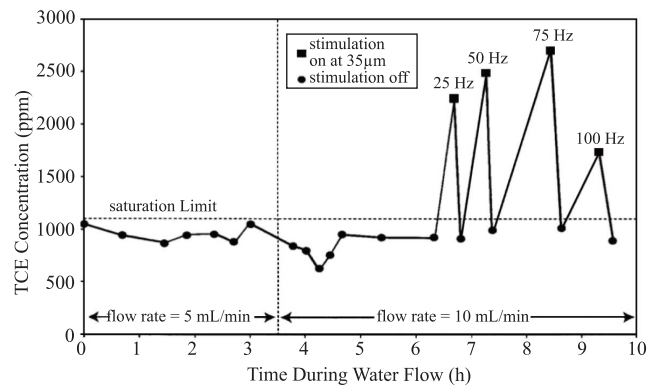


圖 4 Roberts *et al.* (2001)實驗結果圖

震波頻率，作用在 $y = L$ 的邊界，並且分布在兩個不同之孔隙流體之間， $p_f = S_1 p_1 + S_2 p_2$ 表示平均孔徑(表壓)的壓力， $S_\xi = \theta_\xi / \phi$ ($\xi = 1, 2$)為被引用在流體飽和和孔隙率 ϕ 下的相對流體飽和度， p_ξ 為 ξ 相流體的壓力，假設其壓力由水及三氯乙烯兩流體平均承受，即 $S_1 p_1 = S_2 p_2$ 。

藉由上述各項設定，我們可假設邊界條件為：

$$p_1(0, t) = 0 \dots\dots\dots(1.1)$$

$$p_2(0, t) = \bar{p}_a \dots\dots\dots(1.2)$$

$$\sigma(0, t) = -\bar{\sigma} \dots\dots\dots(1.3)$$

$$p_1(L, t) = \frac{\bar{p}_b}{2S_1} \sin(\omega t) \dots\dots\dots(1.4)$$

$$p_2(L, t) = \frac{\bar{p}_b}{2S_2} \sin(\omega t) \dots\dots\dots(1.5)$$

$$\sigma(L, t) = -\bar{\sigma} \dots\dots\dots (1.6)$$

有了上述各項邊界條件設定，我們可得到在時間 $t=0$ 時的初始條件如下列所示：

$$p_1(y, 0) = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$p_2(y, 0) = \bar{p}_a \left(1 - \frac{y}{L}\right) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\sigma(y, 0) = -\bar{\sigma} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$p_{1t}(y, 0) = 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$p_{2t}(y, 0) = 0 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\sigma_t(y, 0) = 0 \dots\dots\dots (2.6)$$

其中，下標 t 表示對時間微分。

2.2 控制方程式

2.2.1 電信方程式

假設 Lo *et al.* (2005, 2007)以孔彈性理論為基礎的研究，可適用在 Roberts *et al.* (2001)的實驗研究中，如果波的刺激頻率小於臨界頻率之 kHz 範圍，其流體的線性增加量 ζ ，滿足一個消散的波動偏微分方程式，即為電信方程式(Lo *et al.*, 2007)：

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + D \frac{\partial \zeta}{\partial t} = C_2^2 \nabla^2 \zeta \dots\dots\dots (3)$$

在公式(3)中， $\zeta = \theta_1(e - \varepsilon_1) + \theta_2(e - \varepsilon_2)$ 代表進入或離開流體部分的體積，體積元素附著於固體邊界反應在所施加的應力或流體壓力的變化(Berryman *et al.*, 1988; Wang, 2000)。其 e 為固體相之體積應變量； θ_ζ 為孔隙流體 ζ 相的體積分量， ε_ζ 為流體 ζ ($\zeta = 1, 2$) 相的體積應變量。

在公式(3)中，存在消散之波速 C_2 及消散係數 D 可定義為：

$$C_2 = \sqrt{\frac{(MH - C^2)}{\left[\frac{(\alpha_1 \rho_1 / \theta_1) b_1 + (\alpha_2 \rho_2 / \theta_2) b_2}{(b_1 + b_2)} H - \frac{(\rho_1 b_1 + \rho_2 b_2)}{(b_1 + b_2)} C \right]}} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$D = \frac{\eta_{eff}}{k_s} \frac{H}{\left[\frac{(\alpha_1 \rho_1 / \theta_1) b_1 + (\alpha_2 \rho_2 / \theta_2) b_2}{(b_1 + b_2)} H - \frac{(\rho_1 b_1 + \rho_2 b_2)}{(b_1 + b_2)} C \right]} \dots\dots\dots (4.2)$$

其中 k_s 為滲透係數， ρ_ζ 為孔隙流體 ζ 相的密度，

$b_\zeta = k_{r_\zeta} / \eta_\zeta$ 為流體 ζ 的相對流動性，其中 k_{r_ζ} 為 ζ 相流體對固體相的相對傳導函數， η_ζ 為 ζ 相流體的動力黏滯係數。公式(2.4.2)中參數 $\eta_{eff} = \frac{1}{b_1 + b_2} = \frac{\eta_1 \eta_2}{k_{r1} \eta_2 + k_{r2} \eta_1}$ 為含兩種不同流體之有效動力剪力黏滯係數(Berryman *et al.*, 1988)， $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\phi}\right)$ 為彎曲度因子，用以量化在流體和固體加速流動時產生之阻抗(Biot, 1962; Wang, 2000)。方程式中的 C 、 M 和 H 是飽合狀態下 Biot 彈性係數。

2.2.2 應力 - 應變關係式

為了使上述初始條件和邊界條件滿足電信方程式，Lo *et al.* (2012)依據 Biot (1962)模式，推導出在等向性的多孔隙介質中線性之應力-應變關係式：

$$\bar{\tau} = 2G\bar{e} + [(H - 2G)e - C\zeta] \bar{\delta} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$p_f \bar{\delta} = (-Ce + M\zeta) \bar{\delta} \dots\dots\dots (5.2)$$

其中 $\bar{\tau}$ 是總張力張量， $\bar{e} = \frac{1}{2} (\nabla \vec{u}_s + \nabla \vec{u}_s^T)$ 是固相應變張量，上標 T 為矩陣轉置， \vec{u}_s 為固相的位移向量， $\bar{\delta}$ 為單位張量。

σ 為總軸向應力，為各方向張力的總和(Chandler and Johnson, 1981 年)，可表示如下：

$$\sigma = \tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz} = (3H - 4G)e - 3C\zeta \dots\dots\dots (6)$$

依先前已知，我們可以整理出使用震動產生的孔隙水壓(p_f)和軸向應力(σ)表示流體的線性增加量：

$$\zeta = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_s} \right) \sigma + \left[\left(\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_s} \right) + \phi \left(\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_s} \right) \right] p_f \dots\dots\dots (7)$$

2.2.3 流體線性增加量的邊界及初始條件

將先前所假設的邊界及初始條件代入由應力-應變關係式整理出之方程式(7)，我們可以得到流體線性增加量的邊界及初始條件為：

$$\zeta(0, t) = -a_1 \bar{\sigma} + a_2 S_2 \bar{p}_a \dots\dots\dots (8.1)$$

$$\zeta(L, t) = -a_1 \bar{\sigma} + a_2 \bar{p}_b \sin(\omega t) \dots\dots\dots (8.2)$$

$$\zeta(y, 0) = -a_1 \bar{\sigma} + a_2 S_2 \bar{p}_a \left(1 - \frac{y}{L}\right) \dots\dots\dots (8.3)$$

$$\zeta_t(y, 0) = 0 \dots\dots\dots (8.4)$$

2.3 解析解

2.3.1 線性化假設

本研究控制方程式為一非齊性方程式，為了將其簡化為齊性方程式，並將邊界值問題簡化為線性關係，以便控制方程式可以求解，可將流體線性增加量假設為：

$$\zeta(y, t) = \zeta^I(y, t) + \zeta^{II}(y, t) \dots\dots\dots (9)$$

並將其中 $\zeta^{II}(y, t)$ 假設為下列方程式：

$$\zeta^{II}(y, t) = -a_1 \bar{\sigma} + a_2 S_2 \bar{p}_a + \frac{a_2 \bar{p}_b \sin(\omega t) - a_2 S_2 \bar{p}_a}{L} y \dots\dots\dots (10)$$

有了上述假設之方程式，並配合前章節流體線性增加量的邊界及初始條件，可得到 $\zeta^I(y, t)$ 的邊界及初始條件如下：

$$\zeta^I(0, t) = 0 \dots\dots\dots (11.1)$$

$$\zeta^I(L, t) = 0 \dots\dots\dots (11.2)$$

$$\zeta^I(y, 0) = 0 \dots\dots\dots (11.3)$$

$$\zeta_t^I(y, 0) = -\frac{a_2 \bar{p}_b \omega}{L} y \dots\dots\dots (11.4)$$

將上述流體增加量假設式代入電信方程式後，即可得到一組偏微分控制方程式：

$$\frac{\partial^2 \zeta^I}{\partial t^2} + D \frac{\partial \zeta^I}{\partial t} - C_2^2 \frac{\partial^2 \zeta^I}{\partial y^2} = a_2 \bar{p}_b \omega [\omega \sin(\omega t) - D \cos(\omega t)] \frac{y}{L} \dots\dots\dots (12)$$

2.3.2 Fourier 級數求解

上述偏微分控制方程式，為滿足 $\zeta^I(y, t)$ 的邊界及初始條件，假設有一收斂的 Fourier 正弦級數的解：

$$\zeta^I(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_n(t) \sin\left(\frac{n\pi y}{L}\right) \dots\dots\dots (13)$$

在偏微分控制方程式(12)的兩邊同乘 $\sin(n\pi y/L)$ ，可以將其簡化成非齊次的常微分方程式，由 $y = 0$ 積分到 $y = L$ ，然後經過整理後可以產生一個 Fourier 係數 $\zeta_n(t)$ 非齊次的常微分方程式，即

$$D\zeta_n'(t) + C_2^2 \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \zeta_n(t) = -\frac{2 \cos(n\pi)}{n\pi} a_2 \bar{p}_b \omega [\omega \sin(\omega t) - D \cos(\omega t)] \dots\dots\dots (14)$$

2.3.3 方程式穩態解

$\zeta_n(t)$ 非齊次的常微分方程式中，由於暫態解隨時間呈指數衰退的 D 值相當的大，隨時間消退， $\zeta_n(t)$ 非齊次的常微分方程式只有穩態解存在他們當時的實驗，即 $D^2 - 4\omega_n^2 < 0$ (Lo et al., 2012)。

我們可以再將 $\zeta^I(y, t)$ 的初始條件編寫成一個新的 Fourier 正弦級數，為 $\zeta_t^I(0) = \frac{2a_2 \bar{p}_b \omega}{n\pi} \cos(n\pi)$ 。因此計算出總流體含量的體積平均增量：

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}(t) &= \frac{1}{L} \int_0^L \zeta(y, t) dy \Big|_{y=L} \\ &= -a_1 \bar{\sigma} + a_2 S_2 \bar{p}_a + \frac{[a_2 \bar{p}_b \sin(\omega t) - a_2 S_2 \bar{p}_a]}{2} \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \frac{2 \cos(n\pi)}{n\pi} a_2 \bar{p}_b \left[\sin(\omega t) + \frac{\omega_n^2}{[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + D^2 \omega^2]^{\frac{1}{2}}} \sin(\omega t + \delta_n) \right] \times [1 - \cos(n\pi)] \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

其中：

$$\sin \delta_n = \frac{D\omega}{\left[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + D^2\omega^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots(16.1)$$

$$\cos \delta_n = \frac{(\omega^2 - \omega_n^2)}{\left[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + D^2\omega^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots(16.2)$$

方程式(15)中，表示總流體含量之增加量隨時間而變，而原本實驗研究只呈現樣本流出物的三氯乙烯濃度。故我們反過來，定義流體總含量和水之間增量的差異，和三氯乙烯含量的增量有關，即：

$$\zeta_{TCE}(y, t) = \zeta(y, t) - \zeta_{water}(y, t) = \zeta(y, t) - \theta_2(e - \varepsilon_2) = \zeta(y, t) - S_2\phi(e - \varepsilon_2) \dots\dots\dots(17)$$

鑑於在流出物中三氯乙烯的濃度非常低，在方程式(17)最後的 $\phi(e - \varepsilon_2)$ 可以近似為 $\phi(e - \varepsilon)$ ，故使用方程式(3)中只含有水的多孔介質溶液替換 $\zeta_{water}(y, t)$ ，其中 ε 表示其擴張。

體積平均含水量的增量 $\zeta_{water}(t)$ ，可以藉此推得。並由三氯乙烯體積平均濃度增加量計算其差異 $\bar{\zeta}_{TCE}(t) = \bar{\zeta}(t) - \bar{\zeta}_{water}(t)$ 。

$\Delta\bar{\zeta}_{TCE}$ 被定義為三氯乙烯體積平均濃度增加量 $\bar{\zeta}_{TCE}$ 在一定的頻率下產生震波刺激的變化。 ΔC_{TCE} 為每單位體積孔隙流體混合物內三氯乙烯的量，其數量與三氯乙烯濃度的變化成正比，所以在震波的刺激的情況下，其流出物樣本增加量可量測得到：

$$\Delta C_{TCE} = \frac{\rho_1}{\phi} \times \Delta\bar{\zeta}_{TCE} \dots\dots\dots(18)$$

2.3.4 模擬實驗結果

有了上述各項的解析解方程式，Lo *et al.* (2012)將實驗研究中使用的參數及解析解的方程式編碼到 MATLAB，並藉由調整部分參數，可以重現 Roberts *et al.* (2001)實驗研究中最佳頻率 75 Hz 的結果，如圖 5。

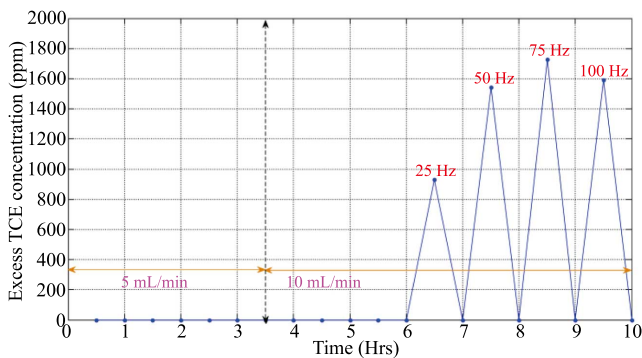


圖 5 Lo *et al.* (2012)模擬 Roberts *et al.* (2001)實驗結果圖

三、數值模擬

3.1 數值模擬所需之相關參數

3.1.1 保水曲線

保水曲線為描述土壤含水量和水頭之間的關係，不同類型土壤的保水曲線都有其特異性，一般最常用的保水曲線是 Brooks and Corey (1964)和 van Genuchten (1980)的模式，本研究使用 van Genuchten (1980)的保水曲線：

$$S_2^e = \left[1 + (\chi h_c)^n \right]^{-m} \dots\dots\dots(19)$$

3.1.2 水力傳導函數

在各介質中，單位水力梯度下的單位流量，表示流體通過孔隙介質的難易程度，稱為水力傳導函數，根據 Mualem (1976)的孔隙大小分佈模式，並結合 van Genuchten (1980)方程式，稱為 VGM 模式，則潤濕與非潤濕流體之相對滲透數與飽和度之間可以下式表示：

$$k_{r1}(S_2) = (1 - S_2)^n \left[1 - (S_2)^{\frac{1}{m}} \right]^{2m} \dots\dots\dots(20.1)$$

$$k_{r2}(S_2) = (S_2)^n \left\{ 1 - \left[1 - (S_2)^{\frac{1}{m}} \right] \right\}^2 \dots\dots\dots(20.2)$$

3.1.3 土壤參數

本研究對 Carsel and Parrish (1988)所提出的 12 種土壤參數 (可參考 Sadeghi *et al.*, 2011, Table 1)進行模擬研究，藉以了解不同土壤質地條件下，孔隙震動對三氯乙烯的傳輸影響情形，並藉此取得不同土壤介質對三氯乙烯傳輸之最佳震波頻率及傳輸趨勢。

表 1 Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數

no	Soil texture	θ_s (or ϕ)	χ (1/m)	n	K_b (Mpa)	G (Mpa)
1	砂土(Sand)	0.43	14.5	2.68	35.3	13.3
2	壤質砂土(Loamy sand)	0.41	12.4	2.28	29.9	11.3
3	砂質壤土(Sandy loam)	0.41	7.5	1.89	25.4	9.3
4	壤土(Loam)	0.43	3.6	1.56	20.0	7.3
5	坩土(Silt)	0.46	1.6	1.37	12.4	3.7
6	坩質壤土(Silt loam)	0.45	2.0	1.41	16.2	5.5
7	砂質黏壤土(Sandy clay loam)	0.39	5.9	1.48	23.8	9.1
8	黏質壤土(Clay loam)	0.41	1.9	1.31	16.5	6.1
9	坩質黏壤土(Silty clay loam)	0.43	1.0	1.23	12.3	4.3
10	砂質黏土(Sandy clay)	0.38	2.7	1.23	20.7	8.0
11	坩質黏土(Silty clay)	0.36	0.5	1.09	11.5	4.1
12	黏土(Clay)	0.38	0.8	1.09	4.5	2.4

*註：Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數中， η 值皆為定值 0.5

其中 θ_s 為孔隙率、 χ 、 n 、 η 為率定參數、 K_b 為土壤統體模數(土壤承受正向應力時，其應力與產生應變的比值)、 G 為土壤剪力模數(土壤承受剪力時，其剪力與產生應變的比值)。

表 2 迴歸土壤率定參數比較

no	Soil texture	$n_{air-water}$	$\chi_{air-water}$	$n_{TCE-water}$	$\chi_{TCE-water}$
1	砂土(Sand)	2.68	14.5	2.68	30.597
2	壤質砂土(Loamy sand)	2.28	12.4	2.28	26.166
3	砂質壤土(Sandy loam)	1.89	7.5	1.89	15.826
4	壤土(Loam)	1.56	3.6	1.56	7.597
5	坩土(Silt)	1.37	1.6	1.37	3.376
6	坩質壤土(Silt loam)	1.41	2.0	1.41	4.22
7	砂質黏壤土(Sandy clay loam)	1.48	5.9	1.48	12.45
8	黏質壤土(Clay loam)	1.31	1.9	1.31	4.01
9	坩質黏壤土(Silty clay loam)	1.23	1.0	1.23	2.11
10	砂質黏土(Sandy clay)	1.23	2.7	1.23	5.697
11	坩質黏土(Silty clay)	1.09	0.5	1.09	1.055
12	黏土(Clay)	1.09	0.8	1.09	1.688

Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數如(表 1)。

3.1.4 迴歸土壤率定參數

Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數中，其 n 和 χ 值為空氣和水二相流體的率定參數，因本研究所探討的二相流體為三氯乙烯及水，但並無相關研究可提供 Carsel and Parrish (1988)所提出的土壤性質下三氯乙烯與水的率定參數，故我們藉由 Chen *et al.* (1999)的

研究，以無因次函數 $J(S_{ew}) = \frac{P_{c,1}}{\gamma_1} \left(\frac{k_1}{\phi_1} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{P_{c,2}}{\gamma_2} \left(\frac{k_2}{\phi_2} \right)^{\frac{1}{2}}$ 來描述兩個任意土壤系統之間的相似性關係，並將之簡化為相同的土壤基質：

$$h_{c,2}(S_{ew}) = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) h_{c,1}(S_{ew}) \dots \dots \dots (23)$$

其中 γ 表示為表面張力。

首先，我們先將(21)式改為 $h_{c,TCE-water} = \left(\frac{\gamma_{TCE-water}}{\gamma_{air-water}} \right) h_{c,air-water}$

後，可以藉由(19)式及表 1 求得 12 種土壤在不同污染物濃度下的 h_c (即取得保水曲線)，並代入 $h_{c,air-water}$ ， $\gamma_{TCE-water}$ 及 $\gamma_{air-water}$ 則分別代 34.5 dyne/cm 及 72.8 dyne/cm (Mercer and Cohen, 1990; Farn, 2008)，可得到 12 種土壤時不同污染物濃度下的 $h_{c,TCE-water}$ 及保水曲線。

取得上述數值資料，可再藉由(21)式迴歸出三氯乙烯和水二相流體的率定參數 $n_{TCE-water}$ 及 $\chi_{TCE-water}$ ，並求得水力傳導函數($k_{r,\xi}$)，迴歸出之率定參數 $n_{TCE-water}$ 及 $\chi_{TCE-water}$ 數值如表 2，由其可知迴歸出三氯乙烯和水二相流體的率定參數 n 和 χ 中，僅 χ 值改變， n 則保持不變，故我們假設率定參數 n 值不受污染物不同而改變。

表 3 Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數模擬結果整理

no	Soil texture	最佳頻率 (Hz)	最佳增加濃度 (ppm)	歸零頻率 (Hz)	最差頻率 (Hz)	最差增加濃度 (ppm)
1	砂土(Sand)	36	5509	91	180	-4315
2	壤質砂土(Loamy sand)	29	7704	73	147	-6108
3	砂質壤土(Sandy loam)	22	10377	58	118	-7860
4	壤土(Loam)	16	13679	44	89	-9245
5	坩土(Silt)	9	19058	27	56	-10769
6	坩質壤土(Silt loam)	13	15867	36	72	-9744
7	砂質黏壤土(Sandy clay loam)	22	14693	52	94	-10811
8	黏質壤土(Clay loam)	16	18819	39	70	-12046
9	坩質黏壤土(Silty clay loam)	12	21443	32	58	-12344
10	砂質黏土(Sandy clay)	24	21507	47	77	-13296
11	坩質黏土(Silty clay)	16	35313	32	51	-19700
12	黏土(Clay)	6	52560	18	31	-23619

*註：歸零頻率，本研究定義為不影響三氯乙烯增加之頻率，即給定該頻率時，三氯乙烯增減濃度趨近 0。

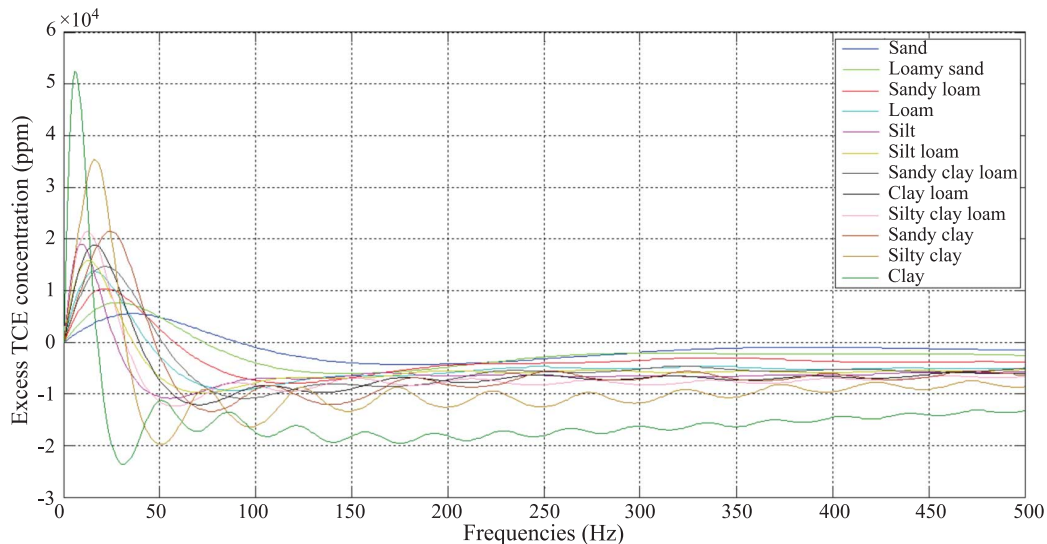


圖 6 12 種土壤中三氯乙烯濃度增減趨勢模擬結果圖

3.2 數值模擬結果

本研究針對 Carsel and Parrish (1988)提出的砂土(Sand)、壤質砂土(Loamy sand)、砂質壤土(Sandy loam)、壤土(Loam)、坩土(Silt)、坩質壤土(Silt loam)、砂質黏壤土(Sandy clay loam)、黏質壤土(Clay loam)、坩質黏壤土(Silty clay loam)、砂質黏土(Sandy clay)、坩質黏土(Silty clay)和黏土(Clay)等 12 種土壤參數，因不同比例之混和流體，遲滯現象條件不同，水利傳導函數將受一定程度影響，為與 Lo *et al.* (2012)重現 Roberts *et al.* (2001)實驗研究呈現一致性，故本研究假設在 90%的水及 10%的三氯乙烯之情況下進行，可模擬出各種土壤在不同震波頻率下，三氯乙烯的析出濃度增減情形及趨勢，模擬之結果如表 3 及圖 6。

3.3 綜合討論

由模擬出來的結果，可觀察及歸納出以下情形，Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數中，砂土的含量愈高，即愈靠近 USDA 土壤分類圖之左下角者，其最佳頻率、歸零頻率及最差頻率值皆較大。另外，隨著砂土的含量愈高，其最佳頻率(最佳解)增加三氯乙烯濃度較小，最差頻率(最差解)減少三氯乙烯濃度亦較小(即最差增加濃度較大)，且最後趨勢穩定時三氯乙烯濃度增加較大(仍為負值)，如圖 7 所示。

Carsel and Parrish (1988)提出的 12 種土壤參數中，當黏土的含量愈高，即愈靠近 USDA 土壤分類圖之上方者，最差頻率值較小，最佳頻率(最佳解)增加三氯乙烯濃度較大，最差頻率(最差解)減少三氯乙烯濃度亦較

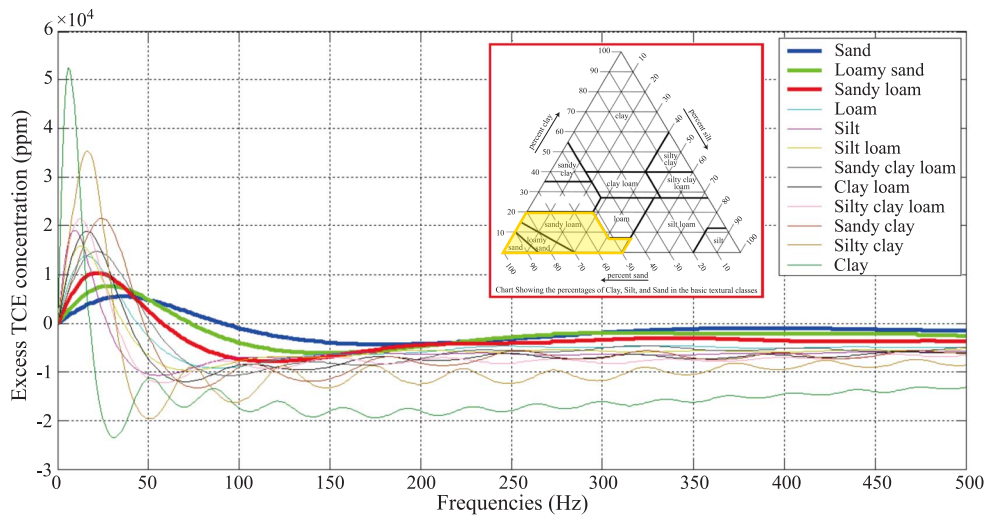


圖 7 砂土(Sand)含量較高土壤中三氯乙烯濃度增減趨勢模擬與 USDA 土壤分類比較圖

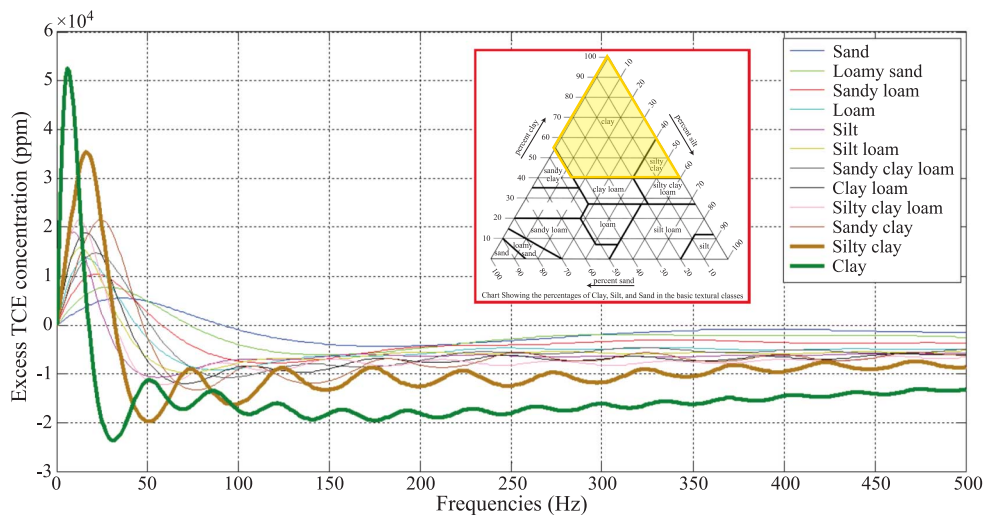


圖 8 黏土(Clay)含量較高土壤中三氯乙烯濃度增減趨勢模擬與 USDA 土壤分類比較圖

大(即最差增加濃度較小)，如圖 8 所示。

3.4 敏感度分析

在得到了上述的結果後，本章節針對不同土壤的統體模數(Kb)及剪力模數(G)二個主要土壤參數，在最佳頻率時進行敏感度分析，其結果如圖 9、10，由分析趨勢可知，12 種土壤三氯乙烯濃度皆隨統體模數增加而減少，隨剪力模數增加而增加。

四、結論

由本研究模擬結果可知，在固定二相流體的比例後，針對 Carsel and Parrish (1988)所提出的 12 種土壤給予不同頻率的震波激盪其三氯乙烯濃度增加的趨勢

皆為先隨震波頻率增加而上升至最佳解後，再隨震波頻率增加而下降至最差解，而後則隨震波頻率增加而緩慢上升至某一程度後，隨震波頻率增加上下起伏而趨向穩定，且逐漸趨緩，但趨向穩定時，增加三氯乙烯濃度皆為負值，即三氯乙烯濃度減少。

此外，土壤中砂土(Sand)含量愈高，即愈靠近 USDA 土壤分類圖之左下方者，其最佳解較大，可增加三氯乙烯濃度較小；反之，黏土(Clay)含量愈高，即愈靠近 USDA 土壤分類圖之上方者，其最佳解較小，可增加三氯乙烯濃度較大。

最後，針對土壤統體模數(Kb)及剪力模數(G)二個主要的參數，分別在最佳頻率時進行敏感度分析，其 12 種土壤的統體模數(Kb)與最佳增加濃度皆呈負相關；剪力模數(G)與最佳增加濃度則呈正相關。

傳統的地下水抽取處理法(pump and treat)整治，因

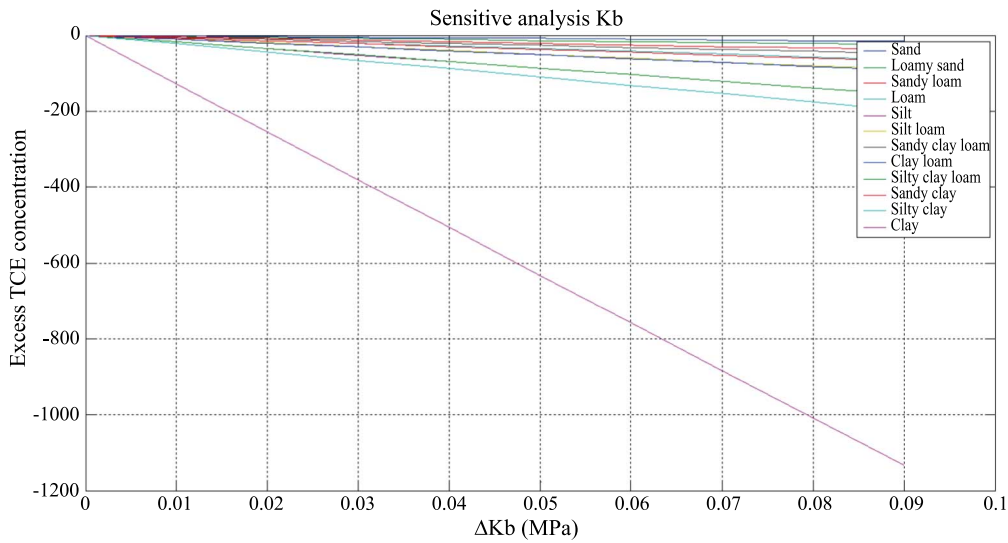


圖 9 統體模數增加對三氯乙烯濃度增減趨勢比較圖

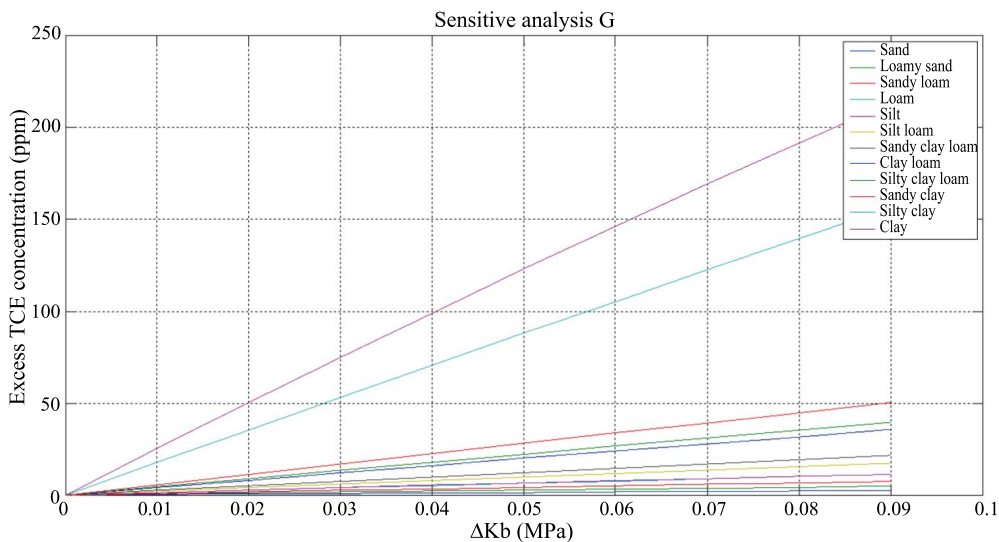


圖 10 剪力模數增加對三氯乙烯濃度增減趨勢比較圖

污染物黏滯力與土壤介質顆粒面張力影響，因滯(trap)現象成為不可避免的障礙，但配合實地參數之取得並透過模擬結果，可藉由給予固定頻率之地表或地下震(聲)波刺激，增加抽取污染物之濃度，此一方法除改善地下水污染外，且相對成本較低、對環境影響較小及更為有效。

參考文獻

1. Biot, M. A. "Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media." *Journal of Applied Physics* 33.4:1482-1498, 1962.
2. Carsel, R. F., and Parrish, R. S. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics." *Water Resources Research* 24.5:755-769, 1988.
3. Chen, J., Hopmans, J. W., and Grismer, M. E. "Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions." *Advances in Water Resources* 22.5: 479-493, 1999.
4. Furman, K., et al. "Increasing Wells Injectivity and Productivity by Seismic and Seismo-Chemical Stimulation." *SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. Society of Petroleum Engineers*, 2018.
5. Lo, W. C., Sposito, G., and Majer, E. "Wave propagation through elastic porous media containing two immiscible

- fluids.” *Water Resources Research* 41.2, 2005.
6. Lo, W. C., Sposito, G., and Majer, E. “Low-frequency dilatational wave propagation through fully-saturated poroelastic media.” *Advances in water resources* 29.3: 408-416, 2006.
7. Lo, W. C., Sposito, G., and Majer, E. “Low-frequency dilatational wave propagation through unsaturated porous media containing two immiscible fluids.” *Transport in porous media* 68.1:91-105, 2007.
8. Lo, W. C., Sposito, G., Majer, E., and Yeh, C. L. “Motional modes of dilatational waves in elastic porous media containing two immiscible fluids.” *Advances in water resources* 33.3:304-311, 2010.
9. Lo, W. C., Sposito, G., and Huang, Y. H. “Modeling seismic stimulation: Enhanced non-aqueous fluid extraction from saturated porous media under pore-pressure pulsing at low frequencies.” *Journal of Applied Geophysics* 78:77-84, 2012.
10. Roberts, P. M., Sharma, A., Uddameri, V., Monagle, M., Dale, D. E., and Steck, L. K. “Enhanced DNAPL transport in a sand core during dynamic stress stimulation.” *Environmental Engineering Science* 18.2:67-79, 2001.
11. Roegiers, J-C., L. Cui, and M. Bai. “Poroelasticity applications.” *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. Routledge, 2018.
12. Van Genuchten, M. T. “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” *Soil Science Society of America Journal* 44.5:892-898, 1980.

收稿日期：民國 108 年 06 月 18 日
修正日期：民國 109 年 09 月 01 日
接受日期：民國 109 年 02 月 07 日