

# 表征土壤水分持留曲线的几种模型的 适应性研究\*

徐绍辉<sup>1</sup> 张佳宝<sup>1</sup> 刘建立<sup>1</sup> 陈德立<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 墨尔本大学, 澳大利亚)

**摘 要** 土壤水分持留曲线指的是土壤体积水分含量与压力水头之间的关系, 在研究土壤水分流动和溶质运移中有着非常重要的作用。由于它们之间的关系复杂, 难以从理论上推导出确切的关系式; 但通过大量的试验研究, 人们已提出了许多经验公式来描述它, 其中比较常用的有: Brooks-Corey(1964)模型, Gardner(1970)模型, van Genuchten(1980)模型和 Gardner-Russo(1988)模型等。在这些模型中都含有许多待求的参数。本文借助于最小二乘法, 形成了确定这四个模型中的参数所对应的非线性方程组, 并用 Picard 迭代求解它们。最后, 用数值例子说明了这四种模型对不同类型土壤的适应性。

**关键词** 水分持留曲线, 模型, 最小二乘法, Picard 迭代, 土壤类型

**中图分类号** S152.7

土壤体积水分含量与压力水头之间的关系, 即水分持留曲线, 反映了土壤的基本特性, 对研究土壤水流和溶质运移起着非常重要的作用。因此, 人们已提出了许多经验公式来描述它, 比较常用的有: Brooks-Corey(1964)模型<sup>[1]</sup>, Gardner(1970)模型<sup>[2,3]</sup>, van Genuchten(1980)模型<sup>[4]</sup>和 Gardner-Russo(1988)模型<sup>[5]</sup>等。

## 1 描述土壤水分持留曲线的模型

### 1.1 Brooks-Corey 模型

Brooks-Corey(1964)模型可写为:

$$\begin{aligned} S_e &= \left(\frac{h_b}{h}\right)^\lambda & h < h_b \\ S_e &= 1 & h \geq h_b \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $S_e$  是饱和度,  $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,  $\theta$  是体积水分含量 ( $L^3 L^{-3}$ ),  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为剩余水分含量和饱和水分含量 ( $L^3 L^{-3}$ );  $h_b$  是进气压力(或起泡压力)值(L);  $h$  是压力水头(L);  $\lambda$  是大于零的正常数, 它反映了土壤的空隙大小分布。

\* 国家自然科学基金(No.49971041)、973项目(G1999011803)、所长基金(ISSDF0004)和ACIAR(LWR1/96/164)资助  
收稿日期:2000-12-02;收到修改稿日期:2001-02-27

## 1.2 Gardner 模型

该模型是由 W.R.Gardner 于 1970 年提出的,他所给出的体积水分含量  $\theta$  与压力水头  $h$  之间的关系式为:

$$h = a\theta^{-b} \quad (2)$$

式中,  $h$  是压力水头(L);  $\theta$  是体积水分含量(L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>);  $a, b$  是大于零的正常数。

## 1.3 van Genuchten 模型

van Genuchten(1980)模型的具体表达形式为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha h|^n]^{-m} \quad h < 0 \quad (3)$$

$$S_e = 1 \quad h \geq 0$$

式中,  $S_e$  是饱和度,  $\theta$  是体积水分含量(L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>),  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为剩余水分含量和饱和水分含量(L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>);  $h$  是压力水头(L);  $\alpha$ (L<sup>-1</sup>)和  $n$  是曲线形状参数,而  $m = 1 - 1/n$ 。

## 1.4 Gardner-Russo 模型

该模型是 Russo(1988)借助于 Gardner(1958)模型<sup>[6]</sup>(表示非饱和水力传导率与压力水头之间的关系),即

$$K(h) = K_s \exp(-\alpha |h|) \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  是一个土壤参数(L),代表水力传导率随着压力水头的减小而减小的相对速率;  $K_s$  是饱和水力传导率(LT<sup>-1</sup>);  $h$  是压力水头(L)。

并结合 Mualem(1976)模型<sup>[7]</sup>(相对水力传导率模型)推出的。其具体表达式为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [e^{-0.5\alpha|h|} (1 + 0.5\alpha|h|)]^{2/(m+2)} \quad (5)$$

式中,  $S_e$  是饱和度,  $\theta$  是体积水分含量(L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>),  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为剩余水分含量和饱和水分含量(L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>);  $h$  是压力水头(L);  $\alpha$ (L<sup>-1</sup>)和  $m$  是水分持留曲线的形状参数。

# 2 参数的确定<sup>[8,9]</sup>

## 2.1 Brooks-Corey 模型中参数的确定

在以下各式中压力水头  $h$  都取正值。方程(1)可变形为:

$$S_e = (\alpha h)^{-\lambda} \quad h < h_c \quad (6)$$

$$S_e = 1 \quad h \geq h_c$$

式中,  $\alpha, \lambda$  以及  $\theta_s$  和  $\theta_r$  是待求的参数,  $\alpha = 1/h_c$  (L<sup>-1</sup>)。

为了求得  $\alpha, \lambda, \theta_s$  和  $\theta_r$ , 把方程(6)改写为:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} + \theta_r \quad (7)$$

应用最小二乘法,即

$$\text{Min}Q = \sum_{i=1}^N (\theta_i - \hat{\theta})^2 = \sum_{i=1}^N [\theta_i - (\theta_s - \theta_r)(\alpha h_i)^{-\lambda} - \theta_r]^2 \quad (8)$$

式中,  $\theta_i$  和  $h_i$  分别为体积水分含量和压力水头的第  $i$  次实测值,  $N$  为实测总数。

令  $\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial Q}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial Q}{\partial \theta_s} = 0$  和  $\frac{\partial Q}{\partial \theta_r} = 0$ , 则分别有:

$$\alpha^{-\lambda-1} \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda} - (\theta_s - \theta_r) \alpha^{-2\lambda-1} \sum_{i=1}^N h_i^{-2\lambda} - \theta_r \alpha^{-\lambda-1} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda} \ln(ah_i) - (\theta_s - \theta_r) \alpha^{-\lambda} \sum_{i=1}^N h_i^{-2\lambda} \ln(ah_i) - \theta_r \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda} \ln(ah_i) = 0 \quad (10)$$

$$\alpha^{-\lambda} \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda} - (\theta_s - \theta_r) \alpha^{-2\lambda} \sum_{i=1}^N h_i^{-2\lambda} - \theta_r \alpha^{-\lambda} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \alpha^{-\lambda} \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda} - (\theta_s - \theta_r) \alpha^{-2\lambda} \sum_{i=1}^N h_i^{-2\lambda} - \theta_r \alpha^{-\lambda} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda} \\ & - \sum_{i=1}^N \theta_i + (\theta_s - \theta_r) \alpha^{-\lambda} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda} + N\theta_r = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

方程(9)、(10)、(11)和(12)构成一方程组。由于它是非线性的,可考虑用 Picard 迭代来求解<sup>[10,11]</sup>。把方程(9)、(10)、(11)和(12)分别改写为:

$$\begin{aligned} \alpha^{(k+1)} = & (\alpha^{-\lambda-1})^{(k)} \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{(-\lambda)^{(k)}} - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} (\alpha^{-2\lambda-1})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{(-2\lambda)^{(k)}} \\ & - \theta_r^{(k)} (\alpha^{-\lambda-1})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda^{(k)}} + \alpha^{(k)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \lambda^{(k+1)} = & \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda^{(k)}} \ln(\alpha^{(k)} h_i) - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} (\alpha^{-\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-2\lambda^{(k)}} \ln(\alpha^{(k)} h_i) \\ & - \theta_r^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda^{(k)}} \ln(\alpha^{(k)} h_i) + \lambda^{(k)} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta_s^{(k+1)} = & (\alpha^{-\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda^{(k)}} - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} (\alpha^{-2\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{(-2\lambda)^{(k)}} \\ & - \theta_r^{(k)} (\alpha^{-\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda^{(k)}} + \theta_s^{(k)} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \theta_r^{(k+1)} = & (\alpha^{-\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{-\lambda^{(k)}} - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} (\alpha^{-2\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-2\lambda^{(k)}} - (\theta_r \alpha^{-\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda^{(k)}} \\ & - \sum_{i=1}^N \theta_i + (\theta_s - \theta_r)^{(k)} (\alpha^{-\lambda})^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{-\lambda^{(k)}} + N\theta_r^{(k)} + \theta_r^{(k)} \end{aligned} \quad (16)$$

方程(13)、(14)、(15)和(16)中的  $\alpha^{(k+1)}$ ,  $\lambda^{(k+1)}$ ,  $\theta_s^{(k+1)}$  和  $\theta_r^{(k+1)}$  以及  $\alpha^{(k)}$ ,  $\lambda^{(k)}$ ,  $\theta_s^{(k)}$  和  $\theta_r^{(k)}$  分别为参数  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  的第  $k+1$  次和第  $k$  次迭代值。

具体计算时,先给  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  一个初始估计值,即  $\alpha^{(0)}$ ,  $\lambda^{(0)}$ ,  $\theta_s^{(0)}$  和  $\theta_r^{(0)}$ ,把它们代入方程(13)、(14)、(15)和(16)的右端,算出  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  的第一次迭代值  $\alpha^{(1)}$ ,  $\lambda^{(1)}$ ,  $\theta_s^{(1)}$  和  $\theta_r^{(1)}$ ;再把  $\alpha^{(1)}$ ,  $\lambda^{(1)}$ ,  $\theta_s^{(1)}$  和  $\theta_r^{(1)}$  代入上述方程的右端,得出  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  的第二次迭代值  $\alpha^{(2)}$ ,  $\lambda^{(2)}$ ,  $\theta_s^{(2)}$  和  $\theta_r^{(2)}$ ,……,依次下去,直到  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  的第  $k+1$  次和第  $k$  次迭代值之差小于预先给定的常数  $\varepsilon$  ( $\varepsilon$  为一给定的充分小的正常数),也就是满足  $|\alpha^{(k+1)} - \alpha^{(k)}| < \varepsilon$ ,  $|\lambda^{(k+1)} - \lambda^{(k)}| < \varepsilon$ ,  $|\theta_s^{(k+1)} - \theta_s^{(k)}| < \varepsilon$  和  $|\theta_r^{(k+1)} - \theta_r^{(k)}| < \varepsilon$ ,此时得到的  $\alpha^{(k+1)}$ ,  $\lambda^{(k+1)}$ ,  $\theta_s^{(k+1)}$  和  $\theta_r^{(k+1)}$  即是所要求的  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$ 。

## 2.2 Gardner 模型中参数的确定

对方程(2),两边取对数并整理得

$$\theta = \frac{\ln a}{b} - \frac{\ln h}{b} \quad (17)$$

应用最小二乘法,即

$$\begin{aligned} \text{Min}Q &= \sum_{i=1}^N (\theta_i - \hat{\theta})^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \left( \theta_i - \frac{\ln a}{b} + \frac{\ln h_i}{b} \right)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

令  $\frac{\partial Q}{\partial a} = 0$  和  $\frac{\partial Q}{\partial b} = 0$ , 则可得到下列非线性方程组:

$$\sum_{i=1}^N \theta_i + \frac{1}{b} \sum_{i=1}^N \ln h_i - \frac{N}{b} \ln a = 0 \quad (19)$$

$$b \ln a \sum_{i=1}^N \theta_i + 2 \ln a \sum_{i=1}^N \ln h_i - N (\ln a)^2 - b \sum_{i=1}^N \theta_i \ln h_i - \sum_{i=1}^N (\ln h_i)^2 = 0 \quad (20)$$

把方程(19)、(20)改写成 Picard 迭代的形式:

$$\ln a^{(k+1)} = \frac{b^{(k)}}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln h_i \quad (21)$$

$$\begin{aligned} b^{(k+1)} &= [ b^{(k)} \ln a^{(k)} \sum_{i=1}^N \theta_i - N (\ln a^{(k)})^2 \\ &\quad + 2 \ln a^{(k)} \sum_{i=1}^N \ln h_i - \sum_{i=1}^N (\ln h_i)^2 ] / \sum_{i=1}^N \theta_i \ln h_i \end{aligned} \quad (22)$$

解式(21)、(22)构成的方程组,就可得到待求的参数  $a$  和  $b$ 。

### 2.3 van Genuchten 模型中参数的确定

在方程(3)中,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  是待求的参数,  $m$  不是一个独立的参数,  $m$  和  $n$  之间存在着关系:  $m = 1 - 1/n$ 。与 2.1 中的推导类似,对方程(2),也可通过最小二乘法得到一个非线性方程组,其 Picard 迭代形式为:

$$\begin{aligned} \alpha^{(k+1)} &= \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^{n^{(k)}} \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-m^{(k)} - 1} \\ &\quad - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-2m^{(k)} - 1} h_i^{n^{(k)}} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} n^{(k+1)} &= (\alpha^n)^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^{n^{(k)}} \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-m^{(k)} - 1} \ln(\alpha^{(k)} h_i) \\ &\quad - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} (\alpha^n)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-2m^{(k)} - 1} h_i^{n^{(k)}} \ln(\alpha^{(k)} h_i) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \theta_s^{(k+1)} &= \sum_{i=1}^N \theta_i \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-m^{(k)}} - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-2m^{(k)}} \\ &\quad - \theta_r^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^{n^{(k)}} \right]^{-m^{(k)}} + \theta_s^{(k)} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \theta_r^{(k+1)} = & \sum_{i=1}^N \theta_i \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^n \right]^{-m^{(k)}} - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^n \right]^{-2m^{(k)}} \\ & + (\theta_s - 2\theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + (\alpha^n)^{(k)} h_i^n \right]^{-m^{(k)}} - \sum_{i=1}^N \theta_i + N\theta_r^{(k)} \end{aligned} \quad (26)$$

Brooks-Corey 模型中的参数  $\lambda$  与 van Genuchten 模型中的参数  $m, n$  存在下列关系: 当  $n \rightarrow \infty$  时,  $\lambda = mn$ 。实际上, 当  $n$  充分大时, 上述关系即可成立。解式(23)、(24)、(25)和(26)构成的方程组, 就能计算出待求的参数  $\alpha, n, \theta_s$  和  $\theta_r$ 。

#### 2.4 Gardner-Russo 模型中参数的确定

在方程(5)中,  $\alpha, m, \theta_s$  和  $\theta_r$  是待求的参数。借助于最小二乘法, 可以得出下列用 Picard 方法求解的非线性方程组:

$$\begin{aligned} \alpha^{(k+1)} = & \sum_{i=1}^N \theta_i h_i^2 e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{-m^{(k)}/(m^{(k)}+2)} \\ & - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^2 e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{(2-m^{(k)})/(m^{(k)}+2)} \end{aligned} \quad (27)$$

$$- \theta_r^{(k)} \sum_{i=1}^N h_i^2 e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i)^{-m^{(k)}/(m^{(k)}+2)} + \alpha^{(k)}$$

$$\begin{aligned} m^{(k+1)} = & \sum_{i=1}^N \theta_i \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{2/(m^{(k)}+2)} \ln \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right] \\ & - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{4/(m^{(k)}+2)} \ln \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

$$- \theta_r^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{2/(m^{(k)}+2)} \ln \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right] + m^{(k)}$$

$$\begin{aligned} \theta_s^{(k+1)} = & \sum_{i=1}^N \theta_i \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{2/(m^{(k)}+2)} \\ & - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{4/(m^{(k)}+2)} \end{aligned} \quad (29)$$

$$- \theta_r^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{2/(m^{(k)}+2)} + \theta_s^{(k)}$$

$$\begin{aligned} \theta_r^{(k+1)} = & \sum_{i=1}^N \theta_i \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{2/(m^{(k)}+2)} \\ & - (\theta_s - \theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{4/(m^{(k)}+2)} \end{aligned} \quad (30)$$

$$- (\theta_s - 2\theta_r)^{(k)} \sum_{i=1}^N \left[ e^{-0.5\alpha^{(k)} h_i} (1 + 0.5\alpha^{(k)} h_i) \right]^{2/(m^{(k)}+2)}$$

$$- \sum_{i=1}^N \theta_i - (N-1)\theta_r^{(k)}$$

解式(27)、(28)、(29)和(30)构成的方程组, 便可得到待求的参数  $\alpha, m, \theta_s$  和  $\theta_r$ 。

### 3 数值例子

为了探讨上述四种模型对不同类型土壤的适应性,我们选择砂壤土、粉质壤土中的实测资料(体积水分含量  $\theta$  和压力水头  $h$ )<sup>[5,12,13]</sup>,用这四种模型分别拟合它们,其拟合曲线见图 1、图 2。

### 4 讨论

从图 1、图 2 我们可以看出,对砂壤土来说,用 van Genuchten 模型拟合效果最好,Gardner 模型的拟合效果很差。当压力水头(吸力)在  $-10^3 \sim -10^5$  Pa 时,Brooks-Corey 模型、Gardner-Russo 模型的拟合效果都较差;但当压力水头(吸力)在  $-10^5 \sim -10^8$  Pa 时,Brooks-Corey 模型和 Gardner-Russo 模型的拟合效果较好。对粉质壤土而言,当压力水头(吸力)为  $-10^3 \sim -10^5$  Pa 时, van Genuchten 模型和 Gardner 模型的拟合效果稍好,其他二种模型的拟合较差;当压力水头(吸力)为  $-10^5 \sim -10^8$  Pa 时,Gardner-Russo 模型的拟合效果最好,其他模型都较差。

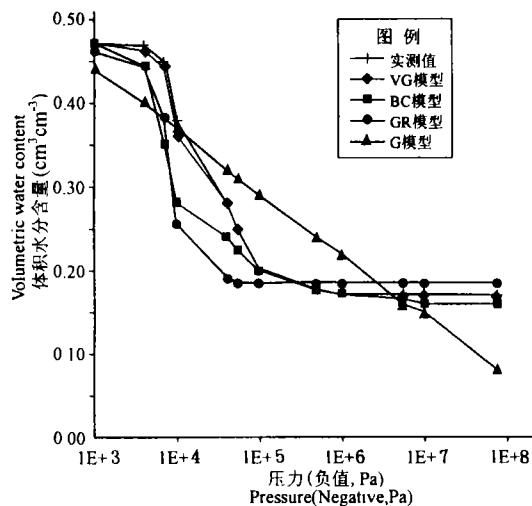


图 1 砂壤土四种模型拟合的水分持留曲线

Fig.1 Sandy loam water retention curves fitted by the four models

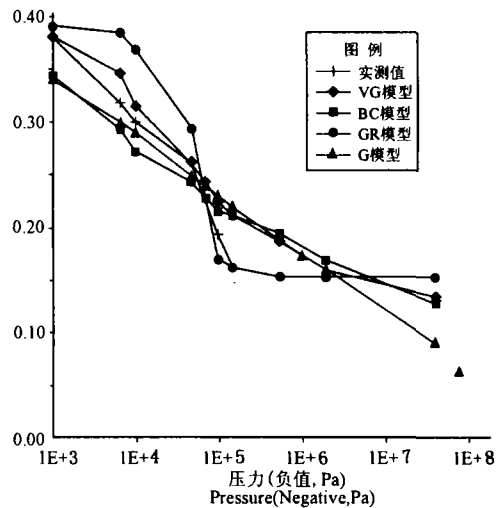


图 2 粉质壤土四种模型拟合的水分持留曲线

Fig.2 Silty loam water retention curves fitted by the four models

由此可见,对粗质地的土壤,如砂壤土,用 van Genuchten 模型来拟合水分持留曲线比较合适。对较细质地的土壤,如粉质壤土,在高压水头(低吸力)时,用 van Genuchten 模型和 Gardner 模型来拟合水分持留曲线比较好;而在低压水头(高吸力)时,Gardner-Russo 模型更为适宜。也就是说,对较细质地的土壤,没有一种模型来描述水分持留曲线自始至终是合适的。在不同的压力水头(吸力)阶段要选用不同的模型来表征水分持留曲线,从而为进一步较准确地预测水分和污染物等的运移打下良好的基础。

### 参 考 文 献

1. Milly P C D. Estimation of the Brooks-Corey parameters from water retention data. Water Resour. Res., 1987, 23:1085 ~ 1089

2. Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water: I. Redistribution. *Water Resour. Res.*, 1970a, 6:851 ~ 861
3. Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water: II. Simultaneous redistribution and evaporation. *Water Resour. Res.*, 1970b, 6:1148 ~ 1153
4. van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44:892 ~ 898
5. Russo D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 1988, 24:453 ~ 459
6. Gardner W R. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 1958, 85:228 ~ 232
7. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 1976, 12:513 ~ 522
8. Kool J B, Parker C, van Genuchten M Th. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation I. Theory and numerical studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985a, 49:1348 ~ 1354
9. Parker J C, J B Kool, van Genuchten M Th. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter identification II. Experimental studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49:1354 ~ 1359
10. 徐绍辉, 朱学愚, 朱国荣. 二维潜水流动问题的分裂解法. *应用数学与力学*, 1996, 37(11):989 ~ 996
11. 徐绍辉, 张佳宝. 求土壤水力特征的一种迭代法. *土壤学报*, 2000, 37(2):271 ~ 274
12. Durner W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.*, 1994, 30:211 ~ 223
13. van Genuchten M Th, Leij F J, Yates S R, Williams J R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, OKLAHOMA: ADA 1991

## SUITABILITY OF MODELS DESCRIBING SOIL WATER RETENTION CURVE

Xu Shao-hui<sup>①</sup> Zhang Jia-bao<sup>1</sup> Liu Jian-li<sup>1</sup>

( *Institute of soil science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008* )

Chen De-li<sup>2</sup>

( *The University of Melbourne, Australia* )

### Summary

Soil water retention curve refers to the relationship between volumetric water content and pressure head, which plays a very important role in solving the problems of water flow and solute transport in soil. Due to its complexity, it is difficult to derive an accurate equation theory erically However, quite a number of experience formulas have ever been proposed on the basis of a number of experiments, such as Brooks-corey(1964) model, Gardner(1970) model, van Grnuchten(1980) model, and Gardner-Russo(1988) model etc., in which many parameters need to be determined. In this paper, by means of the least square method, the nonlinear equation groups that are used to obtain the parameters in models above mentioned, are derived respectively, and their Picard iterative forms are got. At last, the suitability of the four models for different types of soil is indicated by the numerical examples.

**Key words** Water retention curve, Model, Least square method, Picard iteration, Soil type