第 40 卷 第 2 期
2003 年 3 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 40, No. 2
Mar., 2003

# 土壤水分特征曲线的推算*

夏卫生[1,2,†] 雷廷武[2] 刘贤赵[2] 刘纪根[2] 潘英华[2]
(1 湖南师范大学国土学院, 长沙 410081) (2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

# DEDUCTION OF CHARACTERISTIC CURVES OF SOIL MOISTURE DETENTION

Xia Wei-sheng[1,2] Lei Ting-wu[2] Liu Xian-zhao[2] Liu Ji-gen[2] Pan Yin-hua[2]
*(1 College of National Land, Hunan Normal University, Changsha 410081, China) (2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)*

关键词 土壤机械组成, 数学模拟, 土壤水分特征曲线
中图分类号 S157.1

在研究土壤水分入渗、蒸发、土壤侵蚀及溶质运移过程中, 土壤水分特征曲线是推求各种水分运动参数的重要手段[1,2]。目前测定土壤水分特征曲线主要是用压力膜法; 这种方法费时多, 花费大, 极不方便, 严重制约了研究工作特别是数学模拟工作的进展。在野外研究土壤水分运动时, 人们一般是进行分层(如 0~10 cm、10~20 cm)采样测定; 有的测定是原装土样, 有的测定的是搅动土样, 其测定结果作为每层的平均值。而实际上这种平均值是相当不准确的; 首先由于在土壤剖面中, 由于土壤颗粒组成变化、耕作层与下层土壤的有机质含量的差别对土壤水分特征曲线的影响是相当明显的; 更重要的是从土壤水分特征曲线本身的特点来看, 它与土壤质地、有机质含量等不存在线性相关, 因此土壤水分特征曲线是没法用平均法表示的。在模拟田间溶质运移、土壤水分蒸发、入渗及水分再分布时, 模拟结果与实测结果都有较大的差异, 这可能与土壤水分特征曲线的确定有很大的关系。由此可见研究一种快速的、方便的, 与土壤基本特性紧密关联的精确方法是非常重要的。国内外研究表明土壤水分特征曲线主要受土壤有机质含量、颗粒组成、容重等因素的影响。土壤的容重、机械组成与有机质含量是比较容易测定的。从理论上而言这些土壤特性与土壤水分特征曲线有非常紧密的联系。国外土壤科学家[3~8]在这方面已做作了许多的工作。他们的研究表明, 这种间接推求土壤水分特征曲线的方法是可能的。目前主要有四种方法, 一是对土壤体积含水量与土壤的颗粒分布的关系进行最小二乘法回归模拟[3,4], 但模拟结果的误差二倍于常规实验测定的误差[5]。二是用物理模型进行模拟[5,9], 尽管模拟结果比较准确, 但主要针对土壤孔径大小均一的土壤, 其应用不具有广泛性。第三种方法是利用土壤颗粒组成的累积曲线, 结合物理模型(把土壤颗粒作为不能被压缩和不收缩的刚体)推求土壤水分特征曲线[10,12~15]。其结果误差相对较小, 并可考虑了土壤水分滞后作用的影响; 对砂壤土相当准确, 随着粘粒的增加, 误差增大, 且未考虑有机质的影响。另外一种方法是一个概念模型[4,16~20], 也是目前精度较高, 普适性较好的模型。黄土高原的土壤有机质一般较低, 大部分土壤质地较轻; 因此本文将用第三、四种数学模型对黄土高原四种典型土壤的特征曲线进行模拟, 并作适当的改进, 提高模拟精度, 以望广泛应用。

* 中国科学院"引进国外杰出人才"基金(982602)资助
† E-mail: xws@ms.iswc.ac.cn
收稿日期: 2001-06-09; 收到修改稿日期: 2001-09-04

## 1 数学模型

### 1.1 经验模型(模型 1)

Rawls[1]对一系列的土壤特征曲线进行比较研究(土水势范围在 0~ - 1 500 kPa),建立了经验模型。在- 1 500~ - 10 kPa 之间,土水势( Ψ) 与相对含水量( Θ= 100.0θ) / $\theta_s$, $\theta_s$ 为饱和体积含水量) 成指数关系;而当土水势大于- 10 kPa 时与含水量成线性关系。由于我国对于土水势为 0~ - 10 kPa 的含水量很少测量,在此不作计算。概括其经验公式如表 1 所示。

表 1 土壤水分特征曲线的经验公式及参数

| 土水势(kPa) | 经验公式 | 经验参数(无量纲) |
|---|---|---|
| - 1 500~ - 10 | $\Psi = A\Theta^B$<br>$A = \exp[a + b(\%C) + c(\%S)^2 + d(\%S)^2(\%C)]\ 100.0$<br>$B = e + f(\%C)^2 + g(\%S)^2 + g(\%S)^2(\%C)$ | $a = -4.396$ $b = -0.071\,5$<br>$c = -0.000\,488\,0$ $d = -0.000\,042\,58$<br>$e = -3.140$ $f = -0.002\,22$<br>$g = -0.000\,034\,84$ $h = 0.332$<br>$j = -0.000\,725\,1$ $k = 0.127\,6$<br>$m = -0.108$ $n = 0.341$ |
| - 10~ $\Psi_e$ | $\Psi = 10.0 - (\theta - \theta_{10})(10.0 - \Psi_e)/(\theta_s - \theta_{10})$<br>$\theta_{10} = \exp[(2.302 - \ln A)/B]$<br>$\Psi_e = 100.0[m + n(\theta_s)]$<br>$\theta_s = h + j(\%S) + k\log_{10}(\%C)$ | %S: 沙粒百分数<br>%C: 粘粒百分数<br>Ψ: 土水势(kPa)<br>θ: 体积含水量 |
| $\Psi_e$~ 0.0 | $\theta = \theta_s$ | |

### 1.2 理论模型(模型 2)

Assouline[3]和 Haverkamp[4, 18]等利用毛管孔径( $d$) 与水吸力( $h$) 的关系建立了土壤水分特征曲线与土壤机械组成关系的理论模型。对于细长的土壤孔隙,由 Laplace 方程可得孔隙中的水头值公式为:

$$h = \frac{2\sigma_{lv}\cos\phi}{Rg\rho_w} \tag{1}$$

式中 $\sigma_{lv}$: 气- 液表面张力$(Nm^{-2})$; $\phi$: 液- 固表面接触角; $\rho_w$: 水密度$(kgm^{-3})$; $R$: 当量孔量。在温度为 20℃时,(1) 式可写为[7]:

$$h = 0.149/R \tag{2}$$

式中 $h$ 的单位是 cm 水柱。假设土壤粒径( $d$) 与当量孔径( $R$) 的关系为:

$$d = \gamma R \tag{3}$$

$\gamma$ 为土壤特征参数,可认为是一个常数。根据土壤颗粒的形状确定为 4.830 9(锥体) 和 8.888 9(四面体)[15]。根据黄土高原土壤的矿物组成, $\gamma$ 一般可取 4.830 9。在不考虑封闭孔隙的情况下,假定土壤水饱和度(含水量与饱和含水量的比值) 函数 $S(R)$ 与土壤颗粒累积分布函数 $F(d)$ 相等,即:

$$S(R) = F(d) \tag{4}$$

$$S(R) = (\theta - \theta_\gamma)/(\theta_s - \theta_\gamma) \tag{5}$$

这样只要拟合土壤颗粒累积分布函数 $F(d)$ 就可以求出土壤水分特征曲线。土壤颗粒积分布函数 $F(d)$ 可以利用 Van Genuchten[4]公式进行拟合。

$$F(d) = 1/[1 + (d_g/d)^n]^m \tag{6}$$

式中 $d_g$, $m$ 为拟合参数, $m = 1 - 1/n$。

由(4) ~ (6) 式可知:

$$\theta = (1/(1 + (\alpha h)^n)^m)(\theta_s - \theta_\gamma) + \theta_\gamma \tag{7}$$

式中 $\alpha = d_g/0.149\gamma$。

## 2　实验测定和参数推算

### 2.1　土壤颗粒累积分布的测定与函数 $F(d)$ 的拟合

在黄土高原选用土壤武功的重壤土, 洛川的中壤土, 安塞的轻壤土, 榆林的砂土作为供试土壤。经风干处理后, 测定四种供试土壤颗粒的累积分布如表 2 所示。由于在粒级为 0.25 mm 时, 累积百分数已接近 100, 因此可用粒径在 0~ 0.25 mm 之间累百分数进行拟合。

表 2　供试土壤颗粒累积百分数

| 土　壤 | 粒　级 (mm) | | | | | | % C | % S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ≤0.001 | ≤0.005 | ≤0.01 | ≤0.05 | ≤0.25 | ≤1.00 | | |
| 重壤土 | 19.10 | 39.70 | 50.40 | 95.10 | 99.60 | 100 | 28.48 | 21.09 |
| 中壤土 | 14.00 | 26.60 | 36.50 | 87.30 | 99.60 | 100 | 15.33 | 15.24 |
| 轻壤土 | 9.40 | 12.50 | 16.70 | 77.30 | 99.87 | 100 | 12.2 | 25.5 |
| 紧砂土 | 3.00 | 7.00 | 8.50 | 26.00 | 99.55 | 100 | 3.98 | 65.91 |

用公式(6) 对土壤颗粒累积分布进行拟合, 函数 $F(d)$ 的 $D_g$ 和 $n$ 结果如表 3 所示。由拟合结果和公式(6) 可计算出供试土壤的砂粒含量(% S) 和粘粒含量(% C) (如表 1)。将% S 和% C 代入下列公式就可计算参数 $A$ 和 $B$ 的值。其中:

$$A = \exp[-4.396 - 0.0715(\%C) - 4.880\times10^{-4}(\%S)^2 - 4.285\times10^{-5}(\%S)^2(\%C)]\ 100.0 \tag{8}$$

$$B = -3.140 - 0.002\,22(\%C)^2 - 3.484\times10^{-5}(\%S)^2(\%C) \tag{9}$$

参数 $A$ 和 $B$ 的计算结果如表 3 所示。

表 3　土壤颗粒分布的拟合结果

| 供试土壤 | $D_g$ | $n$ | $R^2$ | 标准差 σ | $A$ | $B$ | $\theta_s$(计算值) | α |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 重壤土 | 0.036 25 | 1.358 9 | 0.97 | 6.78 | 3.93 | -5.40 | 0.492 3 | 0.088 87 |
| 中壤土 | 0.013 35 | 1.564 2 | 0.92 | 10.02 | 16.50 | -3.79 | 0.472 2 | 0.046 54 |
| 轻壤土 | 0.006 54 | 1.888 0 | 0.99 | 5.37 | 25.54 | -3.38 | 0.452 3 | 0.064 63 |
| 紧砂土 | 0.004 65 | 2.154 1 | 0.98 | 7.43 | 4.62 | -3.60 | 0.432 5 | 0.021 74 |

### 2.2　土壤水分特征曲线的测定

设定重壤土、中壤土、轻壤土和砂壤土的容重分别为 1 400 kg $m^{-3}$、1 400 kg $m^{-3}$、1 350 kg $m^{-3}$、1 350 kg $m^{-3}$, 由中国科学院南京土壤研究所土壤物理实验室测定土壤水分特征曲线如表 4 所示。

表 4　土壤水分特征曲线实验测定结果

| 土水势 (- kPa) | 0 | 10 | 20 | 40 | 50 | 80 | 100 | 300 | 500 | 1500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 重壤土 | 0.475 0 | 0.362 6 | 0.324 4 | 0.290 7 | 0.270 1 | 0.250 3 | 0.243 6 | 0.202 7 | 0.181 3 | 0.154 1 |
| 中壤土 | 0.480 1 | 0.395 6 | 0.352 3 | 0.278 7 | 0.241 1 | 0.198 5 | 0.186 9 | 0.138 9 | 0.128 8 | 0.095 1 |
| 轻壤土 | 0.466 4 | 0.423 0 | 0.323 0 | 0.233 2 | 0.194 1 | 0.164 6 | 0.150 9 | 0.121 0 | 0.110 8 | 0.092 7 |
| 紧砂土 | 0.440 2 | 0.376 1 | 0.242 2 | 0.153 3 | 0.135 6 | 0.117 0 | 0.110 5 | 0.085 8 | 0.077 4 | 0.062 1 |

### 2.3　饱和含水量和残余含水量

在(7) 式中, 残余含水量 $\theta_Y$ 用- 1 500 kPa 土水势下实验测定的体积含水量表示; 饱和含水量由公式 $\theta_s = -3.14 - 0.002\,22(\%C)^2 - 3.484\times10^{-5}(\%S)(\%C)$ 进行计算, 计算结果如表 3。由表 3 和表 4 可知

计算结果和测定结果( $\Psi = 0$ 时的含水量) 比较一致, 其误差主要是由于容重控制而产生的。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模拟结果

由 $\Psi = A\Theta^{B}$ 可知

$$\theta = \theta_s(\Psi/A)^{1/B} \tag{10}$$

由公式(10) 与公式(7) 及所计算的参数就可计算出土水势在 $-10$ kPa~ $-1\,500$ kPa 之间各点的含水量, 模拟结果如图 1~ 4 所示。

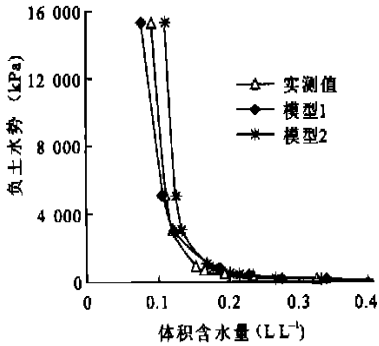


图 1 重壤土的实测与模拟结果

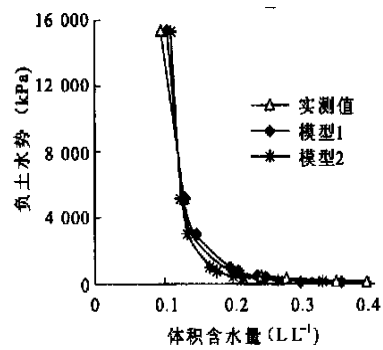


图 2 中壤土的实测与模拟结果

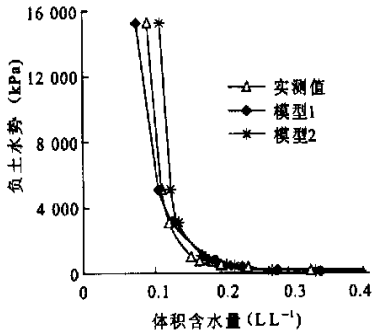


图 3 轻壤土的实测与模拟结果

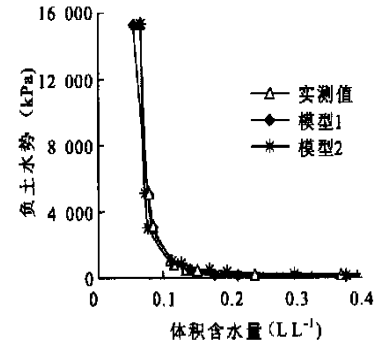


图 4 紧壤土的实测与模拟结果

### 3.2 误差分析

设实测的含水量为因变量( $Y$) , 相对土水势下模拟的含水量为自变量( $X$) , 令:

$$Y = KX \tag{11}$$

在理想情况下, 即误差为零时, $K = 1$。用公式(11) 对实测结果和模拟结果进行回归分析, 结果如表5

表 5 模拟结果的误差分析

| 供试土壤 | 经验模型 | | | 理论模型 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K$ 值 | $R^2$ | 标准差 | $K$ 值 | $R^2$ | 标准差 |
| 重壤土 | 1.007 3 | 0.984 | 0.012 0 | 1.042 4 | 0.958 | 0.019 28 |
| 中壤土 | 1.052 9 | 0.975 | 0.019 7 | 1.129 0 | 0.938 | 0.031 28 |
| 轻壤土 | 1.052 0 | 0.945 | 0.031 8 | 0.982 0 | 0.993 | 0.018 17 |
| 砂 土 | 1.156 8 | 0.859 | 0.049 1 | 0.943 9 | 0.961 | 0.025 89 |

所示。由表 5 和图 1~ 4 可知,两个模型的模拟结果和实测结果非常吻合,均在容许的范围之内。经验模型对砂土的拟合效果较差,这可能是由于实际测定的机械组成是过了 1 mm 土筛,而测定特征曲线的土壤却没有,而砂土大于 1 mm 的颗粒相对较多,这样造成了一定的影响。理论模型对中壤土的模拟也有较大误差,这在表 3 中可以看出,用公式( 6) 对中壤土的拟合有较大的误差,这说明土壤累积曲线的拟合是重要的。从上面计算过程可以看出理论模型比较直观、简单; 同时从表 5 可知经验模型相对比较准确。

**3.3　结语**

由上可知,用土壤机械组成推导黄土高原的土壤水分特征曲线是可行的。尽管在此我们只考虑了不含有机质搅动土的土壤水分特征曲线,结果比较精确; 足以说明这种方法有推广的价值。当然,若应用于野外原状土或有机质含量较高的土壤,仍需进一步探讨。

参考文献


1. 李卫东, 李保国, 石元春. 区域农田土壤质地剖面的随机模拟模型. 土壤学报, 1999, 36( 3) : 289~ 301
2. 邵明安, 王全九. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法Ⅰ. 理论分析. 土壤学报, 2000, 37( 1) : 1~ 9
3. Assouline S, Tessier D. A conceptual model of the soil water retention curve. Water Resour. Res., 1998, 34( 2) : 223~ 231
4. Panjit Kumar Ghost. Estimation of soil moisture characteristics from mechanical properties of soils. Soil Sci., 1979, 130( 2) : 60~ 63
5. Arya L M, Richter J C, Davidson S A. A comparison of soil moisture characteristics predicted by the Arya-Paris model with laboratory-measured data. National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, TX. 1982
6. Borg H. Estimating soil hydraulic properties from textural data. Ph. D. Thesis. Washington State Univ., Pullman ( Diss. Abstr. 83~ 03292) , 1982
7. Bouyoucos G J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. Agron. J., 1951, 43( 1) : 434~ 438
8. Bloemen G W. Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd, 1980, 143( 3) : 581~ 605
9. Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3. Colorado State University, For Collins, 1964
10. Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci., 1974, 117: 311~ 314
11. Clapp R B, Hornberger G M. Empirical equations for some soil hydraulic properties. Water Resour. Res., 1978, 14: 601~ 604
12. Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, *et al*. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resour. Res., 1984, 20: 682~ 690
13. Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of water: Ⅰ. Redistribution. Water Resour. Res., 1970, 6: 851~ 861
14. Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of water: Ⅱ. Simultaneous redistribution and evaporation. Water Resour. Res., 1970, 6( 4) : 1 148~ 1 153
15. Gupta S C, Larson W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density. Water Resour. Res., 1979, 15: 1 633~ 1 635
16. McCuen R H, Rawls R J, Brakensiek D L. Statistical analyses of the Brooks-Corey and the Green-Ampt parameters across soil textures. Water Resour. Res., 1981, 17: 1 005~ 1 013
17. Rogowski A S. Watershed physics: Model of the soil moisture characteristic. Water Resour. Res., 1971, 17: 1 575~ 1 582
18. Rawls W J, Brakenseik D J, Saxton K E. Estimation of soil water properties. Trans. ASAE, 1982, 25: 1 316~ 1 320
19. Strait S, Saxton K E, Papendick R I. Pressure and hydraulic conductivity curves for various soil textures. Internal Report. USDA~ ARS, Washington State University, Pullman, 1979
20. Williams J, Prebble R E, Williams W T, *et al*. The influence of texture, structure, and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. Aus. J. Soil Res., 1983, 21: 15~ 32