

土壤水分特征曲线模型比较分析*

来剑斌, 王全九

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 在分析土壤水分特征曲线经验模型中特征参数的基础上, 选取5种不同质地土壤, 利用张力计测定了土壤水分特征曲线, 根据实验资料确定了土壤水分特征曲线经验模型中参数。采用回归分析方法建立了参数与土壤物理特性间的函数关系, 为采用土壤颗粒组成等土壤物理特性确定土壤水分特征曲线提供了指导。

关键词: 土壤水分特征曲线; 模型参数; 模型比较

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2003)01-0137-04

Comparison of Soil Water Retention Curve Model

LA I J ian-bin, WANG Q uan-jiu

(Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048)

Abstract: Based on the analysis of model parameters of soil water retention curve, the parameters were determined by five types of soil water retention curve data. A fitted relationship between the parameters and the soil texture was established, with which the model parameters of soil water retention curves can be predicted by the soil physical characteristic.

Key words: soil water retention curve; model parameter; model comparison

土壤水分特征曲线是描述土壤含水量与吸力(基质势)之间的关系曲线。它反映了土壤水能量与土壤含水量的函数关系, 因此它是表示土壤基本水力特性的重要指标, 对研究土壤水滞留与运移有十分重要的作用。

几十年来, 人们投入大量的精力发展确定水分特征曲线, 这些方法归纳起来可分为两大类: 一类是直接测定法, 如张力计法、离心机法、压力膜法、砂芯漏斗法、平衡水汽压法等。张力计法简单且便于操作, 在室内和田间都得到了广泛应用^[1]。同时人们也发展了多种经验公式来表示土壤含水量与吸力的关系, 如Brooks-Corey (1964)模型^[2]、van Genuchten (1980)模型^[3]、Campbell (1974)模型^[4]、Mualem (1976)模型^[5]等。其中Brooks-Corey模型和van Genuchten模型得到了广泛应用; 另一类是间接推求法。间接法主要是利用易于测定的土壤物理特性来推求土壤水分特征曲线, 如Arya-Paris (1999)^[6]利用土壤颗粒组成来估算土壤水分特征曲线, 这是近年来发展的利用土壤物理特性确定土壤水分特征曲线的新方法。本文根据5种质地土壤颗粒组成采用Arya-Paris模型预测其土壤水分特征曲线, 并利用实测土壤水分特征曲线, 分析对于不同土壤质地, Brooks-Corey (1964)模型、van Genuchten (1980)模型及Arya-Paris (1999)模型参数的变化特征, 为利用质地资料预测土壤水分特征曲线提供指导。

1 理论模式

土壤水分特征曲线主要受土壤质地、土壤结构、土壤干容重、土壤温度等影响。此外, 土壤的膨胀收缩、吸附性离子的种类和数量等因素也影响土壤水分特征曲线。由于影响因素较多, 且关系复杂, 目前尚不能从理论上推求土壤基质势与含水量之间的关系, 一般常用上述经验公式或简单模型表示。

Brooks-Corey模型可表示为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h} \right)^{\lambda} \quad (1)$$

van Genuchten模型表示为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (2)$$

式中: θ 为体积含水量 (cm^3/cm^3); θ_r 为残留含水量 (cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水量 (cm^3/cm^3); h 为土壤吸力 (cm); h_d 为土壤进气吸力 (cm); λ, m, n, α 为拟合参数, $m = 1 - 1/n$ 。

由式(1)和式(2)可知, 当土壤处于饱和状态时, 式(1)中的土壤吸力 h 等于进气吸力, 式(2)中的土壤吸力 h 等于零。从这种意义上讲, Brooks-Corey模型更符合脱湿曲线, 而van Genuchten模型更符合吸湿曲线。但由于两种模型在实际应用中各具特点, 如Brooks-Corey模型形式简单, 便于推求描述土壤水分运动模型和确定

* 收稿日期: 2002-05-28

基金项目: 霍英东教育基金资助项目、国家自然科学基金重大研究项目(90102012)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金
作者简介: 来剑斌, 男, 生于1977年, 硕士研究生。主要从事土壤水入渗模型及参数方面的研究。

土壤水分运动参数的简单方法,而 van Genuchten 模型适用土壤质地范围比较宽,同时可以使饱和土壤吸力为 0,符合吸湿过程中土壤吸力变化特点。因此两模型在实际应用中并没有严格区别脱湿和吸湿过程。同时 Brooks-Corey 模型与 van Genuchten 模型也可以进行简单转化,如果省略 van Genuchten 模型等式右边分母项中 1,式 (2)就可变为式 (1)。

Arya-Paris 标定参数模型是根据土壤颗粒组成,分别计算各个粒径范围内的含水量与相应吸力,然后获得整个范围的土壤含水量与吸力关系,以预测土壤水分特征曲线。

各个粒组内等效球体颗粒总数表示为:
$$n_i = 3w_i / (4\pi\rho_s R_i^3) \tag{3}$$
 式中: n_i ——第 i 个粒组内等效球体颗粒总数; w_i ——第 i 个粒组质量占总体百分数(%) ; ρ_s ——土壤颗粒密度 (g/cm^3) ; R_i ——第 i 个粒组平均颗粒半径 (cm)。

第 i 个粒组的孔隙半径 r_i 为:
$$r_i = 0.816 R_i \sqrt{\alpha n_i^{1-\alpha}} \tag{4}$$

$$e = (\rho_s - \rho_b) / \rho_b \tag{5}$$

式中: e 为孔隙率; ρ_b 土壤干容重 (g/cm^3) ; r_i 第 i 个粒组的孔隙半径 (cm) ; α 标定参数。

小 D 于第 i 个粒径的充水孔隙体积累加即得到含水量,表示为:

$$\theta = \left(\frac{Q}{Q_w} \right) \sum_{j=1}^i w_j \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

根据毛管理论可得到相应的吸力,即:
$$h_i = \frac{2\gamma \cos\Theta}{\rho_w g r_i} \tag{7}$$

式中: θ 为体积含水量 (cm^3/cm^3) ; Q 总孔隙度; S_w 孔隙有效度; h_i 土壤吸力 (cm) ; γ 表面张力 (g/s^2) ; Θ 表面接触角; g 重力加速度 (m/s^2)。

模型中的标定参数 α 最初作为一常数处理,近年来的研究表明标定参数 α 随着土壤质地的变化有一定变幅,而不是一常数。对于不同质地的土壤应选取不同的参数 α 值,以获得更好的预测结果。

2 实验结果与分析

实验选取有代表性的 5 种质地土样,即榆林土、安塞土、绥德土、西安土、新疆土。利用筛分法和吸管法进行土壤颗粒分析,5 种土样颗粒组成如表 1 所示。

按照国际土壤分类标准,5 种土样质地分别为粉粘壤土、粉壤土、沙壤土、沙壤土和壤质沙土。土样经风干、碾压和过筛后,

按设计容重(榆林土、安塞土、绥德土、西安土、新疆土容重分别为 1.65, 1.35, 1.4, 1.35, 1.45 g/cm^3) 分层均匀装入实验土柱,实验土柱为截面直径 9 cm、高 9 cm 的圆筒,然后插入张力计。在实验过程中,首先测定吸湿曲线,待土壤饱和后开始定时蒸发脱水,测定脱湿曲线。实验结果表明随着土壤粘粒含量增加,土壤质地由重变轻,土壤水分特征曲线形状逐渐变缓,呈有规律的变化趋势。

2.1 Brooks-Corey 模型

采用 Brooks-Corey 模型拟合 5 种土壤水分特征曲线,拟合结果列于表 2。从表 2 可知,各种土样模型拟合与实测点相关系数均在 0.9 以上,说明 Brooks-Corey 模型可以很好配合实测资料。无论吸湿过程还是脱湿过程, Brooks-Corey 模型参数 λ 与 h_d 基本由大变小,仅新疆土和绥德土略有偏差,可能是由于容重对水分特征曲线影响的结果。为了分析土壤物理性粘粒含量 C ($d < 0.02 \text{ mm}$) 对参数 λ 与 h_d 影响,将 5 种土样物理性粘粒含量 C 与参数 λ 及 h_d 两者关系进行回归分析,结果如下:

土壤物理性粘粒含量 C 与参数 λ 关系式:

吸湿过程:
$$\lambda = 0.00005C^2 - 0.0072C + 0.5991 \quad R^2 = 0.842 \tag{8}$$

脱湿过程:
$$\lambda = 0.00001C^2 - 0.0058C + 0.7565 \quad R^2 = 0.941 \tag{9}$$

土壤物理性粘粒含量 C 与参数 h_d 关系式:

吸湿过程:
$$h_d = -0.0062C^2 + 1.2032C + 8.9086 \quad R^2 = 0.9512 \tag{10}$$

脱湿过程:
$$h_d = -0.0288C^2 + 2.8929C + 16.221 \quad R^2 = 0.969 \tag{11}$$

表1 5种土壤的颗粒组成 (d 为粒径)

土样	各级颗粒(mm)含量百分数(%)		
	$d > 0.25$	$0.25 > d > 0.02$	$d < 0.02$
新疆土	0.173	31.376	68.451
西安土	0.216	48.504	51.280
绥德土	0.264	70.295	29.441
安塞土	0.498	76.845	22.657
榆林土	16.19	77.16	6.65

表2 Brooks-Corey 模型参数

土样	吸湿曲线			脱湿曲线		
	h_d	λ	R^2	h_d	λ	R^2
新疆土	60.47	0.341	0.989	85.97	0.339	0.954
西安土	58.53	0.337	0.934	89.35	0.342	0.915
绥德土	33.02	0.480	0.906	71.58	0.632	0.931
安塞土	35.0	0.426	0.921	71.64	0.615	0.952
榆林土	17.08	0.558	0.982	32.54	0.708	0.951

由拟合结果可以看出土壤物理性粘粒含量 C 与 Brooks- Corey 模型中的参数 λ 及 h_d 存在二次曲线的变化规律, 且相关系数均在 0.95 以上, 表明相关关系较好。参数 λ 随着土壤物理粘粒含量 C 的增大而减小; 参数 h_d 随着土壤物理粘粒含量 C 的增大而增大, 但新疆土的参数 h_d 值与其余 4 种土样的变化规律偏差较大。同时, C 与 λ 拟合式中二次项系数存在相反符号, 吸湿过程为正, 而脱湿过程为负, 说明脱湿过程参数 λ 随物理性粘粒增加而减少的程度比吸湿过程大。因此, 对于不同质地土壤, 根据其物理粘粒含量, 采用二次函数可以预测 Brooks- Corey 模型中的参数 λ 及 h_d 值, 且能得到较好结果。

2.2 van Genuchten 模型

为了分析土壤质地对 van Genuchten 模型参数的影响, 以 5 种质地土壤吸湿过程的水分特征曲线为依据, 采用 van Genuchten 模型对实测资料进行拟合, 拟合结果如表 3 所示。由表 3 可知, 随着土壤

表3 van Genuchten 模型拟合结果

土 样	θ	θ	α	n	m	R^2
新疆土	0.0657	0.4862	0.0124	1.4627	0.3163	0.984
西安土	0.0627	0.5047	0.0130	1.5003	0.3335	0.964
绥德土	0.0359	0.4900	0.0181	1.6473	0.3929	0.976
安塞土	0.0335	0.4988	0.0193	1.6636	0.3989	0.993
榆林土	0.0317	0.3809	0.0426	1.8160	0.4493	0.992

质地由重变轻, van Genuchten 模型中的参数 α 和 n 均由小变大。分析土壤物理性粘粒含量 C ($d < 0.02\text{ mm}$) 与参数 α 、 n 之间的关系可得, 参数 α 和 n 均随着土壤物理粘粒含量 C 的增大而逐渐减小。

采用回归分析方法对其关系进行拟合, 结果如下:

粘粒含量 C 与参数 α 关系式: $\alpha = 0.1115C^{-0.5384}$ $R^2 = 0.9824$ (12)

粘粒含量 C 与参数 n 关系式: $n = 2.1919C^{-0.093}$ $R^2 = 0.9493$ (13)

由拟合结果可以看出, van Genuchten 模型中的参数 α 和 n 均呈现幂函数关系变化。随着土壤物理粘粒含量 C 的增大, 参数 α 和 n 均以幂函数形式减小, 二者同样具有较好的相关性。

2.3 两模型参数间关系分析

从上面分析可知, Brooks-Corey 模型和 van Genuchten 模型都可以较好描述土壤水分特征曲线。同时这两个模型也可以进行简单转化, 如果省略 van Genuchten 模型等式右边分母项中 1, 式 (2) 就可变为式 (1)。式 (2) 中的 m 、 n 与 α 分别对应式 (1) 中的 λ 与 $1/h_d$, 因此可分析建立两模型中特征参数的相关关系。

对模型中特征参数 λ 和 m 、 n 及 α 与 $1/h_d$ 分别拟合, 结果如下。

参数 λ 与 m 、 n 关系式: $m \cdot n = 1.4429\lambda$ $R^2 = 0.93$ (14)

参数 α 与 $1/h_d$ 关系式: $\alpha = 0.7021/h_d$ $R^2 = 0.98$ (15)

严格意义上讲, 如果上述近似简单转化方法成立, 则 $m \cdot n$ 与 λ 及 α 与 $1/h_d$ 应该相等。但由拟合结果可知, $m \cdot n$ 是 λ 的 1.4429 倍, 而 α 是 $1/h_d$ 的 0.7021 倍。这就说明若 van Genuchten 模型与 Brooks-Corey 模型间进行上述简化将产生较大误差。如采用上述拟合关系式进行必要的修正可减少误差。

2.4 Arya- Paris 标定参数模型

根据土壤颗粒分析结果, 将土壤颗粒按粒径 (0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 mm) 分为 12 个粒径组, 分别计算出每个粒组中土壤颗粒质量含量百分数 W_i 及该粒组的平均粒径 R_i , 然后利用式 (3) 计算每个粒组内等效球体颗粒总数 n_i , 进而代入式 (5) 计算每个粒组的孔隙半径 r_i 。最后, 对于不同质地的 5 种土样选用不同的标定参数 α (榆林土、安塞土、绥德土、西安土、新疆土选用的参数 α 分别为 1.40, 1.27, 1.25, 1.22, 1.11), 利用式 (6) 和式 (7) 分别计算含水量 θ 及相应土壤吸力 h 。

计算所得 5 种土样土壤水分特征曲线预测值及实测值如图 1 所示。图示结果表明, 只要获得土壤颗粒组成情况, 选取适当的标定参数 α , 就可利用 Arya- Paris 模型预测质地相差较大的各种土壤的水分特征曲线, 结果与实测值吻合较好。

采用幂函数对 5 种土样的标定参数 α 与土壤物理粘粒含量 C 关系进行回归分析, 结果如下:

$\alpha = 1.6615C^{-0.0871}$ $R^2 = 0.91$ (16)

由上式可知, 标定参数 α 与土壤物理粘粒含量 C 之间存在明确的幂函数变化关系, 指数为负值表明, 随着土壤中物

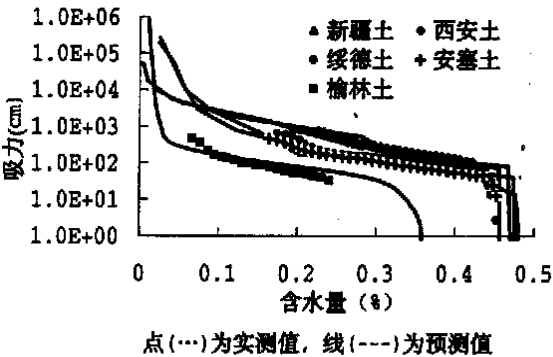


图1 预测及实测的水分特征曲线

理粘粒含量 C 的增加, 土壤质地由轻变重, 标定参数 α 逐渐减小。因而土壤物理粘粒含量 C 同样可以用来预测 A rya- Paris 模型中的标定参数 α 。

因此, 根据实测土壤颗粒分析资料, 利用上述 α 与 C 的拟合关系式确定参数 α , 再采用 A rya- Paris 模型可以预测土壤的水分特征曲线, 且预测的土壤吸力范围较宽。这种方法弥补了张力计法测定土壤水分特征曲线耗时、测定吸力范围较窄的不足。

3 结 论

利用张力计法测定了5种质地土壤水分特征曲线, 并利用实测资料确定了 Brooks-Corey 模型和 van Genuchten 模型参数, 分析了两模型参数与土壤粘粒含量间关系。同时分析了两模型近似转化的可行性。利用 A rya-Paris 方法根据土壤颗粒组成确定了5种质地土壤水分特征曲线, 预测结果与实测资料相吻合。同时发现 A rya- Paris 模型标定参数与土壤粘粒含量存在幂函数关系。

参考文献

[1] 邵明安, 黄明斌 土根系统水动力学[M] 西安: 陕西科学技术出版社, 2000

[2] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[J]. Colorado States University Hydrol Paper, 1964(3): 27.

[3] van Genuchten R. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1980, 44: 892- 898

[4] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data[J]. Soil Sci., 1974, 117: 311- 314

[5] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12: 513- 522

[6] Arya L M, Leij F J, et al. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1999, 63: 510- 519

上接第136页

表4 不同生境条件区几项主要水质指标3年监测平均值									mg/L
监测区域	对照区					退耕还湖区			
取样编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
生境条件	河流	内湖	地下水	渔塘	老堤垸	老渔塘	老稻田	老宅基地	老林地
氨氮	0.92	1.50	0.54	5.29	1.51	1.22	2.00	2.42	1.61
硝酸盐氮	0.27	0.49	0.15	1.97	0.63	0.35	0.52	0.59	0.62
总磷	0.030	0.058	0.011	0.076	0.071	0.063	0.052	0.063	0.062
COD _{Mn}	1.89	2.04	0.26	6.90	2.08	2.32	3.23	4.55	2.79
BOD ₅	0.75	0.77	0.12	2.67	0.82	0.94	1.19	1.52	1.02
pH	7.47	6.74	6.44	6.83	7.04	7.39	7.57	7.30	7.49
电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$)	173.5	215.5	148.9	314.7	203.7	191.6	213.3	177.6	197.4
大肠菌群(个/L)	317	358	75	802	442	367	633	750	408

4 结 论

洞庭湖退耕还湖区, 由于退耕后季节性的淹水、退水, 氨氮、硝酸盐氮、总磷、大肠菌群等项水质指标, 在头1~2年明显偏高, 并在老宅基地、老稻田及部分老堤垸区出现轻度水体富营养化, 随着时间的推延, 这种作用越来越小。而化学耗氧量、生物化学耗氧量是缓慢上升然后回落, 电导率也有类似耗氧有机物的变化趋势。其它污染物质含量甚低, 与天然水体无甚差别。水质监测结果表明, 洞庭湖某些区域在围垦20多年后退耕还湖, 正逐渐恢复为自然湿地生态系统, 其水质指标也正在接近本区河流、湖泊等天然水体水平。

参考文献

[1] 王克林. 洞庭湖区灾害后重建的流域生态管理学思考[J]. 自然资源学报, 1999, 14(2): 97- 102

[2] 邓学建, 王斌, 邓树德. 目平湖冬季鸟类的群落结构及多样性分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000, 23(3): 76- 79

[3] 李景保, 朱翔, 蔡炳华. 洞庭湖湿地资源可持续利用途径研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 387- 392

[4] 余瑞宝, 陆正龙. 水质污染的分析方法和仪器[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985

[5] 魏复盛, 等. 水和废水监测分析方法指南(上册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992