

土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用

宋孝玉¹, 李亚娟¹, 李怀有², 沈冰¹

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

2. 黄委会西峰水土保持科学试验站, 西峰 745000)

摘要:在对甘肃省南小河沟流域不同地貌类型、不同质地土壤样品的土壤水分特征曲线进行试验测定的基础上,建立了南小河沟流域土壤水分特征曲线的单一参数模型,通过实测值对模型进行检验。结果表明:单一参数模型预测的土壤水分特征曲线与实测土壤水分特征曲线比较接近,而该模型参数少,结构简单,可进一步推广应用。

关键词: 土壤水分特征曲线, 单一参数模型, 土壤质地, 地貌类型

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0012-04

宋孝玉, 李亚娟, 李怀有, 等. 土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 12-15.

Song Xiaoyu, Li Yajuan, Li Huaiyou, et al. Establishment and application of one-parameter model of soil water characteristic curve [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 12-15.(in Chinese with English abstract)

0 引言

非饱和土壤的水力性质是进行土壤水分与污染物运移模拟的物理参数,其中土壤水分特征曲线是定量模拟土壤水分流动和溶质运移最重要的参数。但是,由于这些参数具有强烈的空间变异性,使得直接测定方法在较大区域的研究中往往是不可行的,并且受土壤质地空间结构变异性的影响,测定存在较大的误差。为克服这些缺点,众多研究者试图在土壤结构与水力参数之间建立起一定的函数关系,从而找到一种土壤水分特征预测较为简易有效的方法^[1-10]。近年来,有研究者针对土壤结构的复杂性,从土壤结构形成的物理机制出发,利用法国数学家Mandelbrot创立的分形几何理论^[11-17],将土壤作为一种在统计意义上具有分形特征的多孔介质,得到了与Campbell等的经验公式在形式上完全一致或类似的关系式。这些函数关系式赋予了经验公式中的拟合参数以明确的物理意义,加深了对土壤水力性质的物理本质的认识,为土壤水力参数的确定指出了发展方向。本文在试验的基础上建立了南小河沟流域非饱和土壤水分特征曲线的单一参数模型并对模型进行检验,以便进一步推广应用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省庆阳市境内的南小河沟流域,地理位置为东经 107°30'~107°37',北纬 37°41'~35°44'。流域总面积 39.6 km²,多年平均降水量 556 mm,降水年

际变化大,年内分配不均匀,年内 7~9 月降水量占全年降水量的 63.0%。具有明显的丰、平、枯水年特征。年平均气温 9.3℃,年均日照时数 2454.1 h,无霜期 156 d,蒸发量 1474.6 mm,干燥度 1.6。流域主要由塬面、山坡、沟谷 3 大地貌类型组成,具有典型的黄土高原沟壑区地貌特征。流域地质构造较为单一,全部为黄土覆盖,主要包括黄土状重亚黏土、红色黄土、黄土。在长期农作习惯的基础上,现已形成了以粮食、苹果和畜牧业为主体的农业生产格局,在土地利用方式上,则表现为耕地、林地、荒草地以及作物收获后的留茬地等主要类型。

1.2 研究方法

1.2.1 采样与分析方法

采样地点在甘肃省庆阳境内的南小河沟流域,在流域不同断面(塬面、坡地、沟道)、不同坡向(阳坡和阴坡)以及不同土地利用类型和植被条件(耕地、林地、荒地等)下进行取样,土壤剖面深 1 m,根据土壤自然分层状况,每一取样地点分 0~20、20~60、60~100 cm 3 层取样。用环刀采原状土土样,同时用袋装散土土样,共采集 56 个土壤样品,每个样品 2~3 个重复。土壤水分特征曲线采用压力膜仪测定。土样为用 100 cm³ 环刀取的原状土,仪器压力设置为 5、10、30、50、80、150、300、500、1000、1500 kPa。

1.2.2 土壤水分特征曲线模型的分析

土壤水分特征曲线(土壤持水曲线)是描述土壤吸力与土壤水含量的关系曲线,表示土壤水能量和数量之间的关系。由于土壤水和土壤介质之间的相互作用异常复杂,目前尚无理想的理论模型,常用的多为经验模型。Gardner 模型是土壤水分特征曲线模型中参数比较少、形式比较简单的模型,应用也比较广泛,其双对数形式为

$$\lg h = -A \lg \theta - B \quad (1)$$

式中 h ——负压水头, kPa; θ ——体积含水率,无量纲; A 、 B ——大于零的经验参数。

A 、 B 之间具有线性关系

收稿日期: 2007-11-05 修订日期: 2008-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(50209016); 陕西省自然科学基金(2007E235); 陕西省教育厅自然科学计划项目(08JK406)

作者简介: 宋孝玉(1971—),女,陕西安康人,副教授,博士,主要从事农业水文学及水资源利用方面的研究。西安 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室 748[#], 710048。Email: songxy@xaut.edu.cn

$$A = pB + q \tag{2}$$

式中 p 、 q ——常数。

将式（2）代入式（1）有

$$\lg h = -(pB + q) \lg \theta - B \tag{3}$$

式（3）中只有一个变量 B ，因此称作土壤水分特征曲线的单一参数模型。不同土壤的水分特征曲线 B 值不同，则不同的 B 值就能表示不同的土壤水分特征曲线，

应用该参数可以分析土壤水分特征参数的空间变异。

2 土壤水分特征曲线的单一参数模型

2.1 单一参数模型的建立

以Gardner模型的双对数形式作为基本模型，对南小河沟流域56个样品的土壤水分特征曲线实测资料进行了拟合，复相关系数都在0.9以上，拟合效果比较好，拟合所得参数结果见表1。

表 1 土壤水分特征曲线对数模型的拟合参数

Table 1 Fitted parameters of logarithmic model of soil water characteristic curve in Nanxiaohegou basin

编号	取样点	$\lg h = -A \lg \theta - B$			编号	取样点	$\lg h = -A \lg \theta - B$		
		B	A	R^2			B	A	R^2
1	花果山沙棘林 0~20 cm	0.9772	6.9719	0.9841	29	坡耕地 0~20 cm	1.0168	5.8581	0.9780
2	花果山沙棘林 20~60 cm	1.2434	7.887	0.9926	30	坡耕地 20~40 cm	1.4001	6.9425	0.9950
3	花果山沙棘林 60~100 cm	0.2966	6.2231	0.9935	31	坡耕地 40~60 cm	0.8611	5.7106	0.9867
4	董庄沟干沟道 0~20 cm	1.4789	7.4236	0.9855	32	坡耕地 60~100 cm	1.2984	6.0977	0.9823
5	董庄沟干沟道 20~60 cm	1.4295	7.2796	0.9901	33	塬面苹果园 0~20 cm	1.3546	6.7799	0.9957
6	董庄沟干沟道 60~100 cm	2.2291	8.478	0.984	34	塬面苹果园 20~60 cm	0.9914	6.5337	0.9958
7	董庄沟荒地 0~20 cm	1.3439	6.5661	0.9929	35	塬面苹果园 60~100 cm	0.4746	4.7697	0.9935
8	董庄沟荒地 20~60 cm	1.9706	7.9646	0.9879	36	塬面黄豆地 0~20 cm	0.8671	5.6003	0.9892
9	董庄沟荒地 60~100 cm	1.6882	7.3218	0.9888	37	塬面黄豆地 20~40 cm	0.7986	5.6235	0.9886
10	十八亩台有水沟道 0~20 cm	1.0696	6.5444	0.9872	38	塬面黄豆地 40~60 cm	1.4685	7.2334	0.9941
11	十八亩台有水沟道 20~60 cm	2.6021	2.7246	0.9891	39	塬面黄豆地 60~100 cm	1.7375	7.3128	0.9922
12	十八亩台有水沟道 60~100 cm	1.8327	7.8067	0.9852	40	魏家台油松 0~20 cm	0.3782	5.4873	0.9867
13	十八亩台沟台地 0~20 cm	0.4394	4.5935	0.9758	41	魏家台油松 20~60 cm	-0.1607	3.2349	0.9897
14	十八亩台沟台地 20~40 cm	0.4022	6.1442	0.9847	42	魏家台油松 60~100 cm	0.8359	6.5817	0.9919
15	十八亩台沟台地 40~60 cm	0.9122	5.9701	0.9866	43	常青山杏树林 0~20 cm	0.0719	4.3837	0.9759
16	十八亩台沟台地 60~100 cm	0.7860	5.4131	0.9825	44	常青山杏树林 20~60 cm	0.2199	4.5598	0.9676
17	十八亩台坝地 0~20 cm	1.4168	6.5697	0.9922	45	阴坡苜蓿地 0~20 cm	0.2368	4.525	0.9733
18	十八亩台坝地 20~40 cm	0.9788	6.1845	0.9887	46	阴坡苜蓿地 20~60 cm	0.1333	4.6152	0.9752
19	十八亩台坝地 40~60 cm	1.0630	6.4152	0.9948	47	阴坡苜蓿地 60~100 cm	0.2256	4.4972	0.9696
20	十八亩台坝地 60~100 cm	0.7181	6.0302	0.9929	48	常青山荒地 0~20 cm	0.2229	4.2339	0.9892
21	常青山侧柏 0~40 cm	0.2545	4.4885	0.9727	49	常青山荒地 20~60 cm	-0.004	4.5303	0.9666
22	常青山侧柏 40~100 cm	0.4614	4.0134	0.9616	50	常青山荒地 60~100 cm	0.2106	4.6704	0.9719
23	常青山刺槐 0~20 cm	0.1900	4.3265	0.9950	51	阳坡苜蓿地 0~20 cm	0.1231	4.1033	0.9719
24	常青山刺槐 20~60 cm	0.3607	4.5666	0.9746	52	阳坡苜蓿地 20~60 cm	2.3188	10.051	0.9946
25	常青山刺槐 60~100c	0.1570	4.2578	0.9697	53	阳坡苜蓿地 60~100 cm	0.2229	4.3549	0.9699
26	塬面玉米地 0~20 cm	0.5849	5.1613	0.9868	54	常青山果园 0~20 cm	0.5366	4.1119	0.9893
27	塬面玉米地 20~60 cm	2.0088	8.0742	0.9911	55	常青山果园 20~60 cm	1.5867	7.1002	0.9931
28	塬面玉米地 60~100 cm	1.5850	7.0349	0.9929	56	常青山果园 60~100 cm	1.6421	6.978	0.9944

注：表中 R^2 为相关系数。

用南小河沟流域56个样品，对Gardner 模型双对数形式中的两个参数之间的关系进行了分析（图1），参数 A 与参数 B 之间有明确的线性关系，全流域复相关系数为0.8607。又按地貌和土壤质地，分别对Gardner型的对数形式中的参数进行了分析，并总结为表2。可以看到，按地貌分类时，各类Gardner模型中参数之间的相关性，塬面相关系数最高为0.8889，坡地最低，仅为0.8487，其次为沟道，相关系数为0.8574。按土壤质地分类时，各类Gardner模型中参数之间的相关性，砂壤土最高为0.9923，其次为粉砂壤土为0.8727，最低的为粉砂黏土为0.7666。比较不同质地土壤 $A=pB+q$ 关系式中的 p 、 q 值， p 变化范围1.5817~2.204，全流域 p 取值为2.0531。由坡地到塬面再到沟道， p 值逐渐减小；由砂壤土到粉砂壤土再到粉砂黏土，随黏性增强， p 值逐渐减小；而 q 变化范围3.9129~

5.207，全流域 q 取值4.1055。由坡地到塬面再到沟道， q 值则逐渐增加；由砂壤土到粉砂壤土再到粉砂黏土，随黏性增强， q 值逐渐增大。

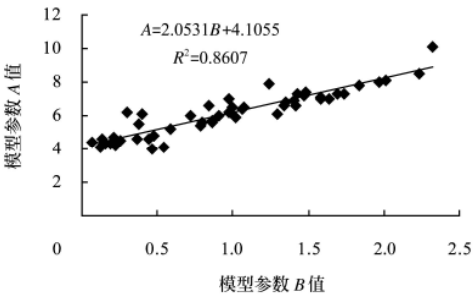


图1 土壤水分特征曲线双对数模型中参数 A 与 B 之间的关系
Fig.1 Relationship between parameters A and B in double logarithmic model of soil water characteristic curve

将A与B的关系式代入式(3),即可得到南小河沟全流域、不同地貌和不同土壤质地的单一参数模型(表2)。

表2 A与B的关系式及单一参数模型
Table 2 Formulas of A and B and one-parameter model of water characteristic curve

地貌或土壤质地	A与B的关系	R ²	单一参数模型
全流域	A=2.0531B+4.1055	0.8607	lg h=-(2.0531B+4.1055)lg θ-B
塬面	A=1.8865B+4.1681	0.8889	lg h=-(1.8865B+4.1681)lg θ-B
坡面	A=2.204B+4.0527	0.8487	lg h=-(2.204B+4.0527)lg θ-B
沟道	A=.8425B+4.4622	0.8574	lg h=-(1.8425B+4.4622)lg θ-B
粉砂壤土	A=1.9165B+4.071	0.8727	lg h=-(1.9165B+4.071)lg θ-B
粉砂黏土	A=1.5817B+5.207	0.7666	lg h=-(1.5817B+5.207)lg θ-B
砂壤土	A=2.0548B+3.9129	0.9923	lg h=-(2.0548B+3.9129)lg θ-B

2.2 单一参数模型中参数B的统计特征

对单一参数模型的参数B按全部样品和地貌的分类进行了统计,统计特征见表3,以不同地貌来看,最小值、最大值均出现在坡面,坡面的均值最小,沟道的均值最大;以不同土壤质地来看,最小值出现在粉砂壤土,最大值出现在粉砂黏土,B值随着土壤黏性的增强有增大的趋势,这与贾宏伟^[18]的研究结果一致。

表3 单一参数模型中参数B的统计特征
Table 3 Statistical characteristics of parameter B in one-parameter model of soil water characteristic curve

地貌或土壤质地	最小值	最大值	均值	标准差	样本数
全流域	0.0719	2.3188	0.9267	0.6230	53
塬面	0.4746	2.0088	1.1458	0.4130	18
坡面	0.0719	2.3188	0.6888	0.6729	26
沟道	0.4022	2.2291	1.1755	0.6195	9
粉砂壤土	0.0719	1.9706	0.7726	0.5601	35
粉砂黏土	0.2966	2.3188	1.3807	0.6032	13
砂壤土	0.19	1.585	0.8241	0.6294	5

注:参数B为大于零的值,故剔除3个小于零和接近于零的值,样本数变为53个。

2.3 全流域单一参数模型的应用

单一参数模型只有一个参数,如果知道土壤水分特征曲线上一个点,就可以根据单一参数模型计算参数B值,从而得到土壤水分特征曲线,可以不必测定太多的点,省时省力。

为了进一步验证南小河沟全流域单一参数模型的适用性,随机选取了6个样本,分别标号为6(沟道、荒草地、粉砂黏土)、16(沟道、荒草地、粉砂壤土)、26(塬面、玉米地、砂壤土)、36(塬面、黄豆地、粉砂壤土)、46(坡地、苜蓿地、粉砂壤土)和56(坡地、苹果地、粉砂壤土),由全流域的单一模型计算得到B值,然后转化为土壤水分特征曲线,并与另一组实测的土壤水分特征曲线进行了比较,模拟值与实测值的相关系数及均方根误差见表4,拟合结果见图2。均方根误差公式见公式(4)。

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_{mi} - \theta_{ei})^2 \right]^{1/2}$$
 (4)

式中 RMSE——均方根误差;N——实测含水率的个数;θ_{mi}——实测土壤含水率;θ_{ei}——单一参数模型计算得到的土壤含水率。

表4 单一参数模型土壤含水率模拟值与实测值比较
Table 4 Comparison between simulated and tested values of soil moisture by one-parameter model

序号	R ²	RMSE
6	0.9574	0.0175
16	0.9871	0.0523
26	0.992	0.0234
36	0.983	0.0257
46	0.9921	0.0206
56	0.9687	0.0204

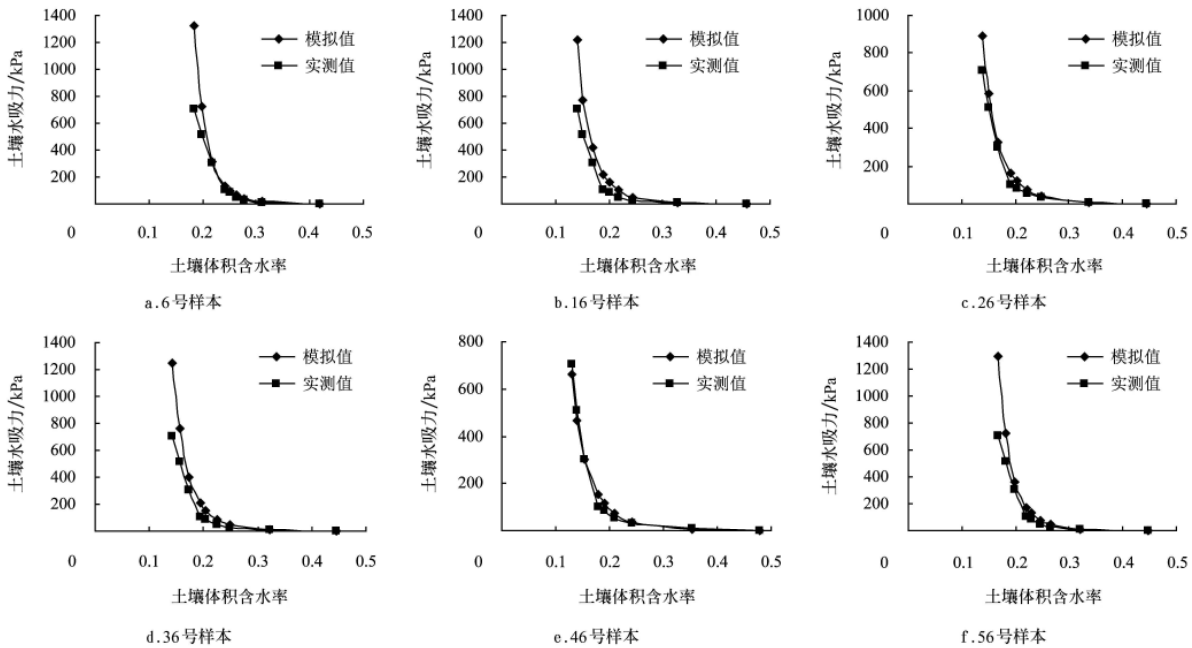


图2 单一参数模型模拟土壤水分特征曲线与实测土壤水分特征曲线对比图
Fig.2 Comparison between simulated and tested soil water characteristic curves by one-parameter model

3 结 论

1) 土壤水分特征曲线的单一参数模型, 只含一个参数 B , 结构简单。如果知道土壤水分特征曲线上一个点, 就可以根据单一参数模型计算参数 B 值, 从而得到土壤水分特征曲线, 不必测定太多的点, 省时省力。

2) 土壤水分特征曲线的单一参数模型中的参数 B 值, 随着地貌类型和土壤质地的变化具有一定的变化趋势, 使得这个参数能够代表土壤水分特征曲线, 可以直接作为其空间变异的变异系数, 应用于区域土壤水分特征曲线的估计中。

3) 土壤水分特征曲线的单一参数模型在南小河口不同地貌及不同土壤质地的应用中, 取得较好的效果。但在更大区域和更大范围的应用还需实践的检验。

[参 考 文 献]

- [1] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. *Soil Sci*, 1974, 117(6): 311—314.
- [2] 赵爱辉, 黄明斌, 史竹叶. 两种土壤水分特征曲线间接推求方法对黄土的适应性评价[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 11—15.
- [3] Zhuang J, Yan J, Miyazaki T. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept[J]. *Soil Science*, 2001, 166: 308—321.
- [4] 刘建立, 徐绍辉, 刘 惠. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. *水利学报*, 2004, 34(2): 68—76.
- [5] Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. An equation to represent grain-size distribution[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37: 817—827.
- [6] 宋孝玉, 李亚娟, 蒋 俊, 等. 非饱和土壤水分运动参数空间变异性研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(6): 613—618.
- [7] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水科学研究进展与评述[J]. *水科学进展*, 1999, 3(10): 311—318.
- [8] 张新民, 沈 冰, 谢志伟. 非饱和土壤水分运动参数空间变异特性的统计分析[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 18—21.
- [9] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [10] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513—522.
- [11] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal process in soil water retention[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26: 1047—1056.
- [12] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 987—996.
- [13] Kravchenko A, Zhang R. Estimating the soil water retention from particle-size distribution: a fractal approach[J]. *Soil Science*, 1998, 163(3): 171—179.
- [14] Filogueira R R. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling [J]. *Soil Science*, 1999, 164(4): 217—223.
- [15] Gomendy V. Silty topsoil structure and its dynamics: the fractal approach[J]. *Geoderma*, 1999, 88: 165—189.
- [16] Perfect E. An improved fractal equation for the soil water retention curve[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32: 281—287.
- [17] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*[M]. New York: W H Freeman and Co, 1982.
- [18] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓. 土壤水力参数的单一参数模型[J]. *水利学报*, 2006, 37(3): 272—277.

Establishment and application of one-parameter model of soil water characteristic curve

Song Xiaoyu¹, Li Yajuan¹, Li Huaiyou², Shen Bing¹

(1. Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xifeng Experiment Station of soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng 745000, China)

Abstract: The soil water characteristic curve of 56 soil samples from different landform types and different kinds of soil texture in Nanxiaohegou basin was tested, and the one-parameter model of soil water characteristic curve was established based on experimental data of 56 soil samples in Nanxiaohegou basin, Gansu Province, China. The model was proved by the measured data. The results indicate that one-parameter model has high accuracy and can be used to describe the soil water characteristic curve. The unique parameter of the model can be used as the variable coefficient to describe the spatial variability of soil hydraulic properties. It is useful in describing the spatial distribution of soil water characteristic curve in basin scale.

Key words: soil water characteristic curve, one-parameter model, soil texture, landform types