

# 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究<sup>\*</sup>

李卓<sup>1</sup>, 冯浩<sup>2</sup>, 吴普特<sup>2</sup>, 赵西宁<sup>2</sup>, 郭珍<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 通过人工配制不同质地土壤, 测定土壤水分特征曲线, 研究了土壤中砂粒含量对其水分蓄持能力的定量影响。结果表明: (1) 砂粒含量对土壤水分蓄持能力有较大影响, 土壤持水能力随砂粒含量增加递减, 表征土壤持水能力的水分特征曲线 Gardner 模型参数及表征土壤饱和含水量的 Van Genuchten 模型参数均随砂粒含量增加逐渐减小。(2) 砂粒含量对土壤比水容量有较大影响, 试验土壤在任一吸力水平下的比水容量值均随其砂粒含量增加递减。(3) 试验土壤饱和含水量与砂粒含量呈线性关系, 田间持水量、凋萎系数与砂粒含量都呈开口向下抛物线右半段的关系。(4) 试验土壤有效水、迟效水含量随砂粒含量增加递减, 二者与砂粒含量均呈开口向下抛物线右半段的关系。易效水含量与砂粒含量呈开口向上抛物线关系。

**关键词:** 土壤砂粒含量; 水分蓄持能力; 水分特征曲线

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2009)03-0204-05

## Simulated Experiment on Effects of Soil Clay Particle Content on Soil Water Holding Capacity

LI Zhuo<sup>1</sup>, FENG Hao<sup>2</sup>, WU Pu-te<sup>2</sup>, ZHAO Xi-ning<sup>2</sup>, GUO Zhen<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** This research studied the quantitative effects of sand content on soil water-holding capacity by compounding different texture of soil. The results showed that: (1) Sand content had a great effect on soil water holding capacity. Soil water holding capacity was decreased with the increase of sand content. The parameters of Gardner soil water characteristic curve model A (stand for water holding capacity) and Van Genuchten model (stand for saturated water content) went down with the increase of sand content. (2) Soil sand content had a great effect on specific water capacity. The specific water capacity of experimental soils decreased with the increase of sand content at any water suction level. (3) The saturated water content of experimental soils had liner relationship with sand content. Field capacity and wilting coefficient both have right segment of down opening quadratic parabola relationship with sand content. (4) Available water and resistant available water content of experimental soils decreased with sand increasing. Both of them have right segment of down opening quadratic parabola relationship with sand content. Quickly available water have right segment of up opening quadratic parabola relationship with sand content.

**Key words:** soil clay content; water holding capacity; water characteristic curve

储蓄水分是非饱和带土壤最基本的物理性质之一。土壤蓄水性能对区域生态环境、农林业生产有很大影响, 是土壤水分及土壤-植物-大气连续体研究必不可少的资料<sup>[1]</sup>。土壤是一种高度复杂的非饱和介质, 其蓄持水分的能力受土壤自身条件及气候条件等多方面的影响, 其自身的容重、有机质含量、土壤颗粒组成及结构性等是主要的影响因素<sup>[2-3]</sup>, 它们通过影响土壤孔隙状况与比表面积来影响土壤的蓄水能力<sup>[4-5]</sup>。在低吸力段 ( $< 0.1 \times 10^5$  Pa), 土壤持水性能主要取决于土壤孔隙状况、容重、结构等, 在中高吸力段 ( $0.7 \times 10^5$  Pa 以后), 土壤水的保持主要是依靠吸附作用, 土壤比表面积越大, 吸附能力越强, 持水能力愈高<sup>[6-7]</sup>, 因此影响土壤比表面积的质地、有机质含量及粘土矿物种类等成为主要的影响因素<sup>[8-9]</sup>。砂粒是土粒中最粗的部分, 比表面积小,

\* 收稿日期: 2009-03-01

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA100204); 新世纪优秀人才支持计划(01140602); 国家自然科学基金课题“黄土高原小流域降雨径流调控利用潜力动态分析与优化配制研究”(40701092)

作者简介: 李卓(1979-), 男, 山西吕梁人, 在读博士, 从事水土资源高效利用研究。E-mail: lizhuo\_2000@sina.com

通讯作者: 冯浩(1970-), 男, 陕西延安人, 从事水土资源高效利用研究。E-mail: nerewsi@vip.sina.com

且相互支撑容易形成较大孔隙,所以土壤中砂粒含量的多寡势必影响整个土壤的孔隙状况及比表面积进而影响土壤的蓄水能力。

关于土壤质地对土壤水分蓄持能力的影响已有较多研究,但主要是采用不同土壤质地区域多点采样的方法来完成。采用这样的方法可以定性阐明土壤质地对持水能力的影响,但由于土壤性质空间变异性较大以及影响持水性能参数较多和研究方法限制等问题,质地对土壤持水能力影响的定量化研究受到限制。本文采用自然土壤中添加沙粒的方法配制不同质地土壤,研究土壤砂粒含量对水分蓄持能力的定量影响和规律,为土壤改良和促进农田降水转化提供理论依据。

## 1 材料与方法

表 1 原料各级颗粒含量

粒径/mm	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
自然土壤/%	0.8	8.5	30.0	11.6	18.7	30.4
试验所用自然土 沙子/%	11.6	81.7	3.7	1.6	1.2	0.2

壤采自陕西杨凌二道

塬农田地表 40 cm 以下,以减小耕层有机质的影响。将所采集土壤烘干、研磨,过 0.45 mm 筛,测定各级颗粒组成。所用沙粒采自渭河沙滩,过 0.45 mm 筛,测定各级颗粒组成。所用自然土壤、沙粒颗粒组成见表 1。将制备好的沙粒按试验所需比例加入自然土壤中,充分搅拌均匀即成试验土样。

### 1.2 试验设计

试验设计加沙 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% 共 9 个处理,每试验重复 3 次。试验中由于所加沙子密度较土壤大,所以在同一紧实度水平上随所加沙量的增多,试验土壤的容重也逐渐增大,经前期土柱试填装后土壤紧实度仪测量结果显示,试验土壤容重需按表 2 所示变化方可达到紧实度一致。由于所用原料土壤及沙粒的颗粒级配都已测定,按比例配制成的试验土壤颗粒级配有计算而得(表 3)。将配制好的土壤充分混合均匀,按设计容重填装到高速离心机环刀中,测定水分特征曲线。

本试验田间持水量用威尔科斯法测定。土壤含水量达凋萎系数时的土壤水吸力平均为 1 500 kPa<sup>[10]</sup>。本试验均以 1 500 kPa 水吸力下的含水量作为凋萎系数值。

表 2 试验土壤沙粒添加量及容重水平

编号	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>
加沙量	0	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5	1.55	1.6	1.65	1.7

表 3 试验土壤各级颗粒含量

试验土壤	物理性砂粒				物理性粘粒			%
	砂粒/mm		粉粒/mm		粘粒/mm			
	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001		
S <sub>0</sub>	0.8	8.5	30.0	11.6	18.7	30.4		
S <sub>1</sub>	1.9	15.8	27.4	10.6	16.9	27.4		
S <sub>2</sub>	3	23.1	24.7	9.6	15.2	24.4		
S <sub>3</sub>	4	30.5	22.1	8.6	13.5	21.3		
S <sub>4</sub>	5.1	37.8	19.5	7.6	11.7	18.3		
S <sub>5</sub>	6.2	45.1	16.8	6.6	10	15.3		
S <sub>6</sub>	7.3	52.4	14.2	5.6	8.2	12.3		
S <sub>7</sub>	8.4	59.7	11.6	4.6	6.4	9.3		
S <sub>8</sub>	9.4	67.1	9	3.6	4.7	6.2		

## 2 结果与分析

### 2.1 试验土壤水分特征曲线分析

由图 1 可以看出,试验土壤各吸力段持水量均随砂粒含量增加逐渐减少,特别是中低吸力段,减幅更大。土壤水分的保持在中低吸力段主要依赖于毛管作用和孔隙大小分布,在较高吸力范围内,愈来愈受吸附作用的制约,土壤颗粒的吸附能力及土壤比表面的影响作用增强。砂粒含量越少的土壤毛管孔隙越多,比表面积越大,吸附力越强;反之砂粒含量越多的土壤毛管孔隙越少,比表面积越小,吸附能力越弱。所以试验土壤各吸力段的持水能力均随砂粒含量增加而减弱。从图 1 还可以看出,在吸力小于 100 kPa 时,土壤水分特征曲线随砂粒含量增多陡度增大;在吸力大于 100 kPa 时,土壤水分特征曲线随砂粒含量增多陡度减小。这是因为试验土壤中砂粒含量较高的土样其非毛管大孔隙较多,毛管作用比较弱,较小的吸力变化就能引起较大的含水量变化,所以在低吸力段曲线陡直;在较高吸力段,由于其细小颗粒含量少,细小毛管含量亦较少,土壤比表面积小,吸附能力弱,水分蓄持能力弱,经过低吸力段的失水后,土壤中保持的水分已经不多,所以吸力变化引起含水量的变化较小,曲线平缓。砂粒含量低的土壤各种孔径的毛管数量都比较丰富,且比表面积大,吸附能力强,所以低吸力段较小的吸力变化引起的含水量变化相对砂粒含量高的土壤要小,曲线较之平缓。另外,由于其较强的水分蓄持能力,经过低吸力段的失水后,土壤中依然有较多水分保留,所以较高吸力段的吸力变化仍然能引起较大的含水量变化,故低砂粒含量土壤的水分特征曲线陡度较高砂粒含量土壤要大。

2.2 砂粒含量对土壤水分特征曲线模型参数的影响

2.2.1 Gardner 模型 近年研究表明, Gardner<sup>[11-12]</sup>的幂函数经验公式  $S_{wc} = A \cdot h^{-B}$  对我国大部分土壤适合<sup>[13]</sup>。式中:

——土壤水吸力(kPa);  $S_{wc}$  ——土壤持水量。经转换可得出以 为因变量的关系式:

$$S_{wc} = A \cdot h^{-B} \quad (1)$$

式中:参数 A 表示持水能力的大小, A 值越大, 持水能力越强, 参数 B 则反映了土壤水势值变化时, 土壤含水量变化的快慢程度, B 值越大变化越快<sup>[14]</sup>。

利用试验数据通过 SPSS 对式(1)拟合得到模型参数 A, B 值(表 4)。

从表 4 可以看出, 模型参数 A 值随试验土壤砂粒含量增多递减, 这进一步说明土壤持水能力随砂粒含量增多而减弱。前面已经分析了土壤持水能力随容重增大递减的原因, 兹不赘述。参数 B 有随土壤砂粒含量增加而增大趋势, 说明随砂粒含量增加土壤含水率因水吸力变化而变化的越快。这主要是由于砂粒含量多的土壤大孔隙较多, 而大孔隙毛管作用较弱, 所以较小的土水势的变化就能引起土壤含水量较大变化; 而砂粒含量少的土壤, 大孔隙含量随之减少, 土水势变化引起土壤含水量的变化也随之减小。

2.2.2 Van Genuchten 模型 Van Genuchten<sup>[15]</sup>模型参数物理意义明确, 其线型与实测曲线之间的吻合效果也比较好, 而且不管砂性土壤还是粘性土壤都有较好效果, 所以在学界得到广泛应用<sup>[16-17]</sup>。模型具体表达为:

$$1 = r + (s - r) \cdot [1 + |h|^n]^{-m} \quad (2)$$

式中:  $h$  ——壤体积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) 和土壤基质势 ( $\text{cm H}_2\text{O}$ );  $s, r$  ——壤饱和和含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) 和残余含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\frac{1}{\text{cm}}$  和  $n$  ——验拟合参数 (或曲线性状参数), 而  $m = 1 - 1/n (n > 1)$ 。利用 RETC 软件对式 2 拟合得到模型参数值(表 5)。

从表 5 可以看出, 随土壤砂粒含量增多呈逐渐减小趋势, 也随土壤砂粒含量增多呈逐渐减小趋势( $S_7$  例外), 这也说明土壤含水量随砂粒含量增加而减少。

2.3 砂粒含量对土壤比水容量的影响

比水容量  $C(h)$  是指土壤水吸力增加(或减少)一个单位时所释放(或吸收)的水量<sup>[4]</sup>。比水容量不同, 表示植物消耗同样的能量从土壤中吸收的水分数量不同, 因此它反映土壤水分的有效程度, 是一个强度指标, 在评价土壤水分有效性程度方面具有极其重要的意义。比水容量在数值上等于土壤水分特征曲线的斜率, 其表达式可通过对土壤水分特征曲线公式求导而得:

$$C(h) = - \frac{dS_{WC}}{dh} = A \cdot B \cdot h^{-(B+1)} \quad (3)$$

将表 4 的数据代入式(3)即得试验土样各吸力下的比水容量值(表 6)。

由于水分特征曲线是非线形的, 所以不同吸力范围内的比水容量也不相同, 一般在低吸力情况下, 比水容量随吸力变化较大, 随吸力增大, 比水容量变化减小。从表 6 可以看出, 各试验土样比水容量值在低吸力段变化较快, 3 kPa 一个数量级; 10 kPa ~ 30 kPa 一个数量级; 70 kPa ~ 300 kPa 一个数量级; 500 ~ 1 500 kPa 一个数量级。同时也可以看出, 在任一水吸力水平下, 试验土壤比水容量值均随砂粒含量增加而减小。这说明试验

图 1 试验土壤水分特征曲线

表 4 Gardner 模型参数及精度检验 ( $\alpha = 0.01$ )

土样	A	B	R <sup>2</sup>	均方误差
S <sub>0</sub>	0.315	0.140	0.969	0.02109
S <sub>1</sub>	0.299	0.144	0.964	0.02176
S <sub>2</sub>	0.275	0.150	0.967	0.02240
S <sub>3</sub>	0.254	0.156	0.968	0.02532
S <sub>4</sub>	0.231	0.161	0.968	0.02177
S <sub>5</sub>	0.211	0.165	0.963	0.02191
S <sub>6</sub>	0.175	0.172	0.961	0.01750
S <sub>7</sub>	0.168	0.176	0.967	0.01985
S <sub>8</sub>	0.114	0.217	0.978	0.01341

表 5 Van Genuchten 模型参数及精度检验 ( $\alpha = 0.05$ )

土样	s	r	n	R <sup>2</sup>	均方误差	
S <sub>0</sub>	0.56566	0.09485	0.02284	1.24198	0.997653	0.01036
S <sub>1</sub>	0.52538	0.08549	0.01334	1.27398	0.997782	0.00617
S <sub>2</sub>	0.50711	0.07664	0.01472	1.23781	0.978669	0.01277
S <sub>3</sub>	0.49761	0.05385	0.02803	1.20617	0.998012	0.00943
S <sub>4</sub>	0.44385	0.03751	0.03128	1.20963	0.998191	0.00538
S <sub>5</sub>	0.38755	0.03231	0.03144	1.18525	0.99863	0.00471
S <sub>6</sub>	0.33402	0.01789	0.02284	1.1972	0.999168	0.00258
S <sub>7</sub>	0.33255	0.04208	0.03408	1.26086	0.991709	0.00213
S <sub>8</sub>	0.27453	0.01132	0.3110	1.27069	0.994643	0.00385

土壤的供水能力随其砂粒含量增加在降低。

表6 试验土样各吸力水平下比水容量值

土样	水吸力/(kPa)										
	3	10	30	70	100	300	500	700	900	1200	1500
S <sub>0</sub>	2.4017	0.6087	0.1740	0.0662	0.0441	0.0126	0.0070	0.0048	0.0036	0.0026	0.0020
S <sub>1</sub>	2.3780	0.5998	0.1707	0.0648	0.0431	0.0123	0.0068	0.0046	0.0035	0.0025	0.0019
S <sub>2</sub>	2.3250	0.5822	0.1646	0.0621	0.0412	0.0117	0.0065	0.0044	0.0033	0.0024	0.0018
S <sub>3</sub>	2.2825	0.5675	0.1594	0.0598	0.0396	0.0111	0.0062	0.0042	0.0031	0.0022	0.0017
S <sub>4</sub>	2.1802	0.5388	0.1505	0.0563	0.0372	0.0104	0.0057	0.0039	0.0029	0.0021	0.0016
S <sub>5</sub>	1.8763	0.4631	0.1313	0.0494	0.0327	0.0092	0.0051	0.0035	0.0026	0.0019	0.0014
S <sub>6</sub>	1.8285	0.4462	0.1232	0.0457	0.0301	0.0083	0.0046	0.0031	0.0023	0.0016	0.0013
S <sub>7</sub>	1.8181	0.4415	0.1213	0.0448	0.0295	0.0081	0.0044	0.003	0.0022	0.0016	0.0012
S <sub>8</sub>	1.756	0.4078	0.1071	0.0382	0.0247	0.0065	0.0035	0.0023	0.0017	0.0012	0.0009

## 2.4 砂粒含量对土壤持水能力的影响

(1) 砂粒含量对饱和含水量(SW)、毛管断裂含水量(CRM)的影响。土壤含水量为毛管断裂含水量时,土壤基质吸力约为100 kPa左右<sup>[18]</sup>。本试验统一以土壤水吸力为100 kPa时的含水量作为毛管断裂含水量。砂粒含量对试验土壤饱和含水量、毛管断裂含水量的影响如图2所示。

由图2可以看出,试验土壤饱和含水量、毛管断裂含水量均随砂粒含量增加而减少。砂粒含量从9.3%增加到76.5%时,饱和含水量从60.8%升高到28.6%,毛管断裂含水量从31.6%升高到8.5%。饱和含水量与砂粒含量呈线性关系( $y = -0.4601x + 64.939$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.9895$ );毛管断裂含水量与砂粒含量的关系为开口向下抛物线的右半部分,相关方程为( $y = -0.0041x^2 + 0.0211x + 31.413$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.9945$ )。

(2) 砂粒含量对田间持水量(FC)、凋萎系数(WC)的影响。砂粒含量对试验土壤田间持水量、凋萎系数的影响如图3所示。由图3可以看出,试验土壤田间持水量与凋萎系数均随砂粒含量增加递减。砂粒含量从9.3%增加到76.5%时,田间持水量从40.6%下降到15.3%,凋萎系数从18.9%下降到5.4%。田间持水量、凋萎系数与砂粒含量关系均为抛物线右半部分的一段,相关方程分别是( $y = -0.0023x^2 - 0.1808x + 42.736$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.9919$ )、( $y = -0.0011x^2 - 0.1035x + 19.83$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.9865$ )。

(3) 砂粒含量对有效水(AW)、易效水(RAW)及迟效水(SAW)含量的影响。从前面的论述可知,土壤砂粒含量对田间持水量、凋萎系数及毛管断裂含水量都有一定影响,所以由这些土壤水分特征参数决定的有效水含量、易效水含量及迟效水含量很可能会受到土壤砂粒含量的影响(图4)。

从图4可知,试验土壤有效水含量随砂粒含量增加递减,砂粒含量从9.3%增加到76.5%,有效水含量从21.7%减少到9.9%,二者关系呈开口向下的抛物线右半部分( $y = -0.0012x^2 - 0.0773x + 22.906$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.9846$ )。迟效水含量也随砂粒含量增加呈递减趋势,砂粒含量从9.3%增加到76.5%,迟效水含量则从12.7%减少到3.1%,二者关系也呈开口向下的抛物线右半部分( $y = -0.003x^2 + 0.1247x + 11.583$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.986$ )。易效水含量随砂粒含量增加呈先降低后升高趋势,砂粒含量从9.3%增加到51.3%,易效水含量从9.0%降低到5.2%,砂粒含量再从51.3%增加到76.5%,易效水含量则从5.2%又升高到6.8%。易效水含量与砂粒含量呈开口向上的抛物线关系( $y = 0.0018x^2 - 0.202x + 11.323$ ,  $a = 0.05$ ,  $R^2 = 0.8849$ ),此

图2 砂粒含量与饱和含水量、毛管断裂含水量关系

图3 砂粒含量与田间持水量、凋萎系数关系

图4 砂粒含量与有效水、易效水、迟效水含量关系

方程的顶点横坐标(56.1%)即为易效水含量最少的土壤砂粒含量。易效水含量关于砂粒含量关系曲线之所以呈开口向上抛物线是因为田间持水量曲线比毛管断裂含水量曲线开口大,作为此二者差值的易效水曲线必然会呈现开口向上的抛物线形状。

### 3 讨论

土壤存蓄水分首先需有存蓄空间,即土壤孔隙。孔隙度的大小会直接影响土壤饱和和水分存蓄能力。但是在一定吸力作用下,即使有相同孔隙度的土壤其含水量也可能有一定差异,这就涉及到孔径分布及颗粒比表面积,因为土壤持水本身就是孔隙毛管力、土粒吸附力共同作用的结果。砂粒对土壤水分蓄持能力的影响正是通过改变这孔径分布及土粒吸附力来实现的,但是砂粒含量变化引起的孔径分布与土粒比表面积的变化各自对土壤水分蓄持能力变化的贡献值却难以计算。如果以当量孔径的方法计算不同土壤各种尺度(大孔隙、毛管孔隙、贮蓄孔隙)的孔径分布来解释土壤持水能力的差异,而土粒吸附力的差异却难以计算,所以这是不合理的。何况当量孔径分布比例本身是由土壤不同水吸力下的蓄水量计算得来的,以此来解释土壤持水能力的差异就形成一个自循环,显然不合理。所以,土壤水分蓄持作用机理方面的研究尚需在试验方法及仪器上取得新的突破。

### 4 结论

(1) 试验土壤各吸力段持水能力均随砂粒含量增加递减,表征土壤持水能力的水分特征曲线模型参数  $A$  随试验土壤砂粒含量增加逐渐减小,试验土壤在任一吸力水平下的比水容量值均随其砂粒含量增加而减小,说明土壤的供水能力随其砂粒含量的增加在降低。

(2) 试验土壤饱和含水量均随砂粒含量增加递减,饱和含水量与砂粒含量呈线性关系,田间持水量、凋萎系数均随砂粒含量增加递减,田间持水量、凋萎系数与砂粒含量均呈抛物线右半部某一段的关系。

(3) 试验土壤有效水、迟效水含量均随砂粒含量增加递减,都呈开口向下抛物线右半部某一段的关系。易效水含量与砂粒含量呈开口向上抛物线关系。

#### 参考文献:

- [1] 张保华,何毓蓉,程根伟. 贡嘎山东坡林地土壤低吸力段持水特性及其影响因素分析[J]. 西部林业科学, 2006, 35(1): 49-51.
- [2] 张小泉,张清华,毕树峰. 太行山北部中山幼林地土壤水分的研究[J]. 林业科学, 1994, 30(3): 193-200.
- [3] 周择福,李昌哲. 北京九龙山不同植被土壤水分特征的研究[J]. 林业科学研究, 1994, 7(1): 48-53.
- [4] Hillel D. Application of soil physics[M]. New York: New York Academic Press, 1980.
- [5] Williams J, Prebble R E. The influence of texture Structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic[J]. Aust. J. Soil Res., 1983, 21: 15-32.
- [6] 陈志雄,汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性质[J]. 土壤学报, 1979, 16(3): 277-281.
- [7] 柳云龙,吕军,王人潮. 低丘红壤作物易旱与土壤持水供水特性的关系[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(1): 42-46.
- [8] 刘恩斌,董水丽. 黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J]. 水土保持通报, 1997, 17(7): 20-26.
- [9] 杨金楼,朱连龙,朱济成. 上海地区土壤持水性的研究[J]. 土壤学报, 1982, 19(4): 35-38.
- [10] 邵明安. 土壤物理与生态环境建设研究文集[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2000.
- [11] Gardner W R, Hillel D, Benyamin Y. Post irrigation of soil water:I. Redistribution[J]. Water Resources, 1970, 6: 851-861.
- [12] Gardner W R, Hillel D, Benyamin Y. Post irrigation of soil water:II. Simultaneous redistribution and evaporation[J]. Water Resources, 1970, 6: 1148-1153.
- [13] 沈思渊,席承藩. 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 34-42.
- [14] 王孟本,柴宝峰,李洪建,等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J]. 林业科学, 1999, 35(2): 7-14.
- [15] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 892-898.
- [16] 朱安宁,张佳宝,陈效民,等. 封丘地区土壤传递函数的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 53-57.
- [17] 刘贤赵,李嘉竹,张振华. 土壤持水曲线 van Genuchten 模型求参的一种新方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1135-1138.
- [18] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社, 2000: 74-75.

责任编辑:李鸣雷 刘 英