

南小河沟流域土壤水力特性参数的试验研究及特征分析

宋孝玉¹,李亚娟¹,李怀有²,沈冰¹

(1 西安理工大学 教育部西北水资源与环境生态重点实验室,陕西 西安 710048;

2 黄委会西峰水土保持科学试验站,甘肃 西峰 745000)

[摘要] 【目的】研究土壤水力特性参数及其特征,为土壤水力特性参数的选取和确定及水分运动和污染物迁移的预测奠定基础。【方法】对甘肃省南小河沟流域不同地貌、不同土地利用方式的土壤进行分层取样,采用离心机法测定各地类的土壤水分特征曲线,运用 Gardner 模型对试验结果进行分析。【结果】Gardner 模型的对数形式能较好地反映各地类的土壤水分特征曲线。对全流域及划分地类后得到的模型参数的关系分析表明,它们具有较好的线性关系,因此可将模型进一步简化为单一参数模型。对单一参数模型参数统计特征的分析表明,单一参数 A 随着地貌类型的变化而表现出一定的变化特征,可以作为土壤水分特征曲线空间变异的变异系数。【结论】可以用参数 A 作为反映地貌类型的指标,并可应用于区域土壤水分特征曲线的估计。

[关键词] 土壤水分特征曲线;Gardner 模型;特征参数;南小河沟流域

[中图分类号] S152.7

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)10-0209-06

Experimental study and characteristic analysis of soil water characteristic curve in Nanxiaohegou basin

SONG Xiao-yu¹, LI Ya- juan¹, LI Huai-you², SHEN Bing¹

(1 Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

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

Abstract: 【Objective】To study soil hydraulic properties parameters and fractal characteristic can lay a foundation for the selection and identification of soil hydraulic properties parameters, as well as for soil water movement and prediction of pollutants transport. 【Method】Soil water characteristic curves of 56 soil samples from different land uses were obtained in Nanxiaohegou basin by field and inside experiments. 【Result】And the curve shape fitted in with use of Gardner logarithmic model, powerful model and exponential model at the same time, the entire model fitted well and the logarithmic model was the best. Further analysis of the relationship of the Gardner logarithmic model coefficient and constant showed that all the coefficients and constants of the different landform types were of linear relationship. 【Conclusion】So, the Gardner logarithmic model can be established to characterize the soil water characteristic curve of the Nanxiaohegou basin.

Key words: soil water characteristic curve; Gardner model; characteristic parameter; Nanxiaohegou basin

* [收稿日期] 2009-03-20

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2007BAD88B05);陕西省自然科学基金项目(2007E235);陕西省教育厅自然科学计划项目(08JK406);西安理工大学科技创新计划项目(106-210807)

[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研究。

E-mail:songxy@xaut.edu.cn

研究土壤的水力特性参数并进行特征分析,可为土壤水力特性参数的选取和确定及水分运动和污染物的迁移预测奠定基础。由于土壤水力特性参数具有强烈的空间变异性,用直接测定法确定这些参数时因受土壤质地空间结构变异性的影响而存在较大误差^[1-4]。为克服这些缺点,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,研究了土壤水力性质与土壤结构之间的关系,所得到的函数关系式赋予了经验公式中拟合参数以明确的物理意义,加深了对土壤水力性质物理本质的认识,为土壤水力参数的选取及确定方法的研究指明了发展方向^[5-14]。但由于不同区域的经验公式和拟合参数的形式都有待实践的检验,为此,本研究在试验的基础上,建立了甘肃省庆阳市南小河沟流域非饱和土壤水分特征曲线的Gardner对数模型,并对模型进行了简化,以期通过模型参数统计特征的分析,寻求其与地貌类型的关系,从而为其在大区域范围的推广应用奠定基础。

1 研究区概况

试验所在地南小河沟流域位于甘肃省庆阳市境内。南小河沟流域总面积为39.6 km²,流域多年平均降水量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%,并具有明显的丰、平、枯水年特征。流域主要由塬面、山坡、沟谷三大地貌类型组成,具有典型的黄土高原沟壑区的地貌特征。流域地质构造较为单一,全部为黄土覆盖,主要土壤有黄土状重亚黏土、红色黄土和黄土。在长期农作习惯的基础上,该地区现已形成了以粮食、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。

2 研究方法

采样地点在甘肃省庆阳市境内的南小河沟流域,对流域不同断面(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)的土壤进行取样,土壤剖面深1 m,根据土壤自然分层状况取样,所采集的56个土样的来源情况详见表1。采集土样时用100 cm³环刀采取原状土土样,每个样品2~3个重复。土壤水分特征曲线采用西北农林科技大学教育部农业水土工程重点实验室的日立高速离心机测定,仪器压力分别设置为5,10,30,50,80,150,300,500,1 000和1 500 kPa。

表1 土壤水分特征曲线取样地类情况表

Table 1 Experimental land of soil water characteristic curve in Nanxiaohegou basin

土样编号 Number	土样来源 Source of soil	土层深度/cm Depth	土样编号 Number	土样来源 Source of soil	土层深度/cm Depth
1	花果山沙棘林	0~20	29		0~20
2	Huaguoshan hippophae	20~60	30	坡耕地	20~40
3	rhamnoides	60~100	31	Sloping land	40~60
			32		60~100
4	董庄沟干沟道	0~20	33		0~20
5	Dongzhuanggou	20~60	34	塬面苹果园	20~60
6	dry gully	60~100	35	Table apple orchard	60~100
7	董庄沟荒地	0~20	36		0~20
8	Dongzhuanggou	20~60	37	塬面黄豆地	20~40
9	wasteland	60~100	38	Table soybeans land	40~60
			39		60~100
10	十八亩台有水沟道	0~20	40	魏家台油松	0~20
11		20~60	41	Weijiatai tabulaeformis	20~60
12	Shibamutai wet gully	60~100	42	land	60~100
13			43	常青山杏树林	0~20
14	十八亩台沟台地	0~20	44	Changqingshan	20~60
15		20~60		apricotwood	
16	Shibamutai wet gully	60~100	45	阴坡苜蓿地	0~20
17			46	Niatside slope alfalfa	20~60
18	十八亩台坝地	0~20	47	land	60~100
19	Shibamutai dam land	20~40	48	常青山荒地	0~20
		40~60	49	Changqingshan	20~60
20	常青山侧柏	0~40	50	wasteland	60~100
21	Changqingshan	40~100			
	oriental arborvitae		51	阳坡苜蓿地	0~20
22	常青山刺槐	0~20	52		20~60
23	Changqingshan robinia	20~60	53	Sunny slope alfalfa land	60~100
24	pseudoacacia	60~100			
25			54	常青山果园	0~20
26	塬面玉米地	0~20	55	Changqingshan orchard	20~60
27	Table corn land	20~60	56		60~100
28		60~100			

3 土壤水分特征曲线模型的选择及参数的确定与分析

3.1 土壤水分特征曲线模型的分析

在进行土壤水分特征曲线特性的分析时,常用的经验模型有以下几种^[15]:

(1) Brooks-Corey 模型。其表达式为:

$$S = (h_d/h)^\lambda, h < h_d. \quad (1)$$

$$S < 1, h \geq h_d. \quad (2)$$

式中: S 为饱和度, $S = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, 其中 θ 为体积含水量(cm^3/cm^3), θ_r 为剩余含水量(cm^3/cm^3), θ_s 为饱和含水量(cm^3/cm^3); h 为土壤负压水头(cm); h_d 为土壤进气压力(cm), 对饱和土壤加压到该值后, 土壤大孔隙中的水分开始排出, 空气随之进入土壤; λ 为大于零的经验参数, 反映了土壤的孔隙分布特征。Brooks-Corey 模型形式较为简单, 应用广泛, 但在进气值处不连续, 在土壤湿润条件下的拟合偏差较大。

(2) Gardner 模型。该模型的表达式为:

$$h = a\theta^{-b}, \quad (3)$$

$$\text{或者为 } h = ae^{-b\theta}. \quad (4)$$

式中: a, b 为大于零的经验参数, 其余符号意义同前。(3)式和(4)式分别为乘幂形和指数形的 Gardner 模型。Gardner 模型的形式最为简单, 参数少, 计算方便, 具有广泛的应用性, 但不能精确描述饱和含水量附近土壤水分特征曲线的变化趋势。

(3) Campbell 模型。其表达式为:

$$\theta/\theta_s = a(h_d/h)^{-b}. \quad (5)$$

表 2 南小河沟流域土壤水分特征曲线拟合参数

Table 2 The fit parameter values of soil water characteristic curve of Nanxiaohegou basin

编号 Number	$h = ae^{-b\theta}$			$h = a\theta^{-b}$			$\lg h = -A\lg \theta - B$		
	a	b	R^2	a	b	R^2	B	A	R^2
1	753 979	24.136 0	0.962 3	0.105 4	6.971 9	0.984 1	0.977 2	6.971 9	0.984 1
2	3 000 000	26.756 0	0.992 1	0.057 1	7.887 0	0.992 6	1.243 4	7.887 0	0.992 6
3	464 479	20.278 0	0.985 1	0.505 1	6.223 1	0.993 5	0.296 6	6.223 1	0.993 5
4	2 000 000	29.826 0	0.995 2	0.033 2	7.423 6	0.985 5	1.478 9	7.423 6	0.985 5
5	1 000 000	29.389 0	0.994 1	0.037 2	7.279 6	0.990 1	1.429 5	7.279 6	0.990 1
6	6 000 000	35.386 0	0.995 6	0.005 9	8.478 0	0.984 0	2.229 1	8.478 0	0.984 0
7	623 436	28.856 0	0.981 7	0.045 3	6.566 1	0.992 9	1.343 9	6.566 1	0.992 9
8	3 000 000	33.564 0	0.996 6	0.010 7	7.964 6	0.987 9	1.970 6	7.964 6	0.987 9
9	2 000 000	31.935 0	0.996 8	0.020 5	7.321 8	0.988 8	1.688 2	7.321 8	0.988 8
10	473 323	25.185 0	0.954 8	0.085 2	6.544 4	0.987 2	1.069 6	6.544 4	0.987 2
11	7 000 000	38.078 0	0.996 1	0.002 5	2.724 6	0.989 1	2.602 1	2.724 6	0.989 1
12	3 000 000	32.469 0	0.993 7	0.014 7	7.806 7	0.985 2	1.832 7	7.806 7	0.985 2
13	58 441	21.716 0	0.908 8	0.363 6	4.593 5	0.975 8	0.439 4	4.593 5	0.975 8
14	111 596	20.800 0	0.936 3	0.396 1	6.144 2	0.984 7	0.402 2	6.144 2	0.984 7
15	275 018	24.691 0	0.953 0	0.122 4	5.970 1	0.986 6	0.912 2	5.970 1	0.986 6
16	144 702	24.047 0	0.936 3	0.163 7	5.413 1	0.982 5	0.786 0	5.413 1	0.982 5

续表 2 Continued table 2

编号 Number	$h = ae^{-b\theta}$			$h = a\theta^{-b}$			$\lg h = -A \lg \theta - B$		
	a	b	R^2	a	b	R^2	B	A	R^2
17	583 042	29.266 0	0.975 2	0.038 3	6.569 7	0.992 2	1.416 8	6.569 7	0.992 2
18	338 363	24.953 0	0.956 2	0.105 0	6.184 5	0.988 7	0.978 8	6.184 5	0.988 7
19	539 951	26.409 0	0.983 6	0.086 5	6.415 2	0.994 8	1.063 0	6.415 2	0.994 8
20	316 400	23.163 0	0.967 1	0.191 4	6.030 2	0.992 9	0.718 1	6.030 2	0.992 9
21	50 502	19.774 0	0.899 3	0.556 5	4.488 5	0.972 7	0.254 5	4.488 5	0.972 7
22	29 556	16.468 0	0.871 4	0.345 6	4.013 4	0.961 6	0.461 4	4.013 4	0.961 6
23	63 465	21.495 0	0.965 5	0.645 6	4.326 5	0.995 0	0.190 0	4.326 5	0.995 0
24	55 608	20.812 0	0.904 3	0.435 8	4.566 6	0.974 6	0.360 7	4.566 6	0.974 6
25	39 235	19.096 0	0.888 4	0.696 7	4.257 8	0.969 7	0.157 0	4.257 8	0.969 7
26	116 257	22.653 0	0.904 6	0.260 1	5.161 3	0.986 8	0.584 9	5.161 3	0.986 8
27	3 000 000	33.047 0	0.990 1	0.009 8	8.074 2	0.991 1	2.008 8	8.074 2	0.991 1
28	1 000 000	30.965 0	0.993 0	0.026 0	7.034 9	0.992 9	1.585 0	7.034 9	0.992 9
29	213 387	25.244 0	0.931 5	0.096 2	5.858 1	0.978 0	1.016 8	5.858 1	0.978 0
30	871 976	28.548 0	0.981 4	0.039 8	6.942 5	0.995 0	1.400 1	6.942 5	0.995 0
31	204 316	24.463 0	0.947 8	0.137 7	5.710 6	0.986 7	0.861 1	5.710 6	0.986 7
32	282 767	27.843 0	0.941 0	0.050 3	6.097 7	0.982 3	1.298 4	6.097 7	0.982 3
33	778 847	38.595 0	0.985 5	0.044 2	6.779 9	0.995 7	1.354 6	6.779 9	0.995 7
34	593 445	25.472 0	0.982 9	0.102 0	6.533 7	0.995 8	0.991 4	6.533 7	0.995 8
35	86 453	22.825 0	0.953 0	0.335 3	4.769 7	0.993 5	0.474 6	4.769 7	0.993 5
36	196 450	25.074 0	0.956 2	0.135 8	5.600 3	0.989 2	0.867 1	5.600 3	0.989 2
37	191 871	24.116 0	0.951 1	0.159 0	5.623 5	0.988 6	0.798 6	5.623 5	0.988 6
38	1 000 000	28.726 0	0.981 3	0.034 0	7.233 4	0.994 1	1.468 5	7.233 4	0.994 1
39	1 000 000	30.705 0	0.972 3	0.018 3	7.312 8	0.992 2	1.737 5	7.312 8	0.992 2
40	159 912	20.246 0	0.943 6	0.418 6	5.487 3	0.986 7	0.378 2	5.487 3	0.986 7
41	17 258	19.462 0	0.904 5	1.447 7	3.234 9	0.989 7	-0.160 7	3.234 9	0.989 7
42	537 579	23.508 0	0.967 1	0.145 9	6.581 7	0.991 9	0.835 9	6.581 7	0.991 9
43	49 031	18.521 0	0.908 5	0.847 4	4.383 7	0.975 9	0.071 9	4.383 7	0.975 9
44	52 291	19.128 0	0.892 3	0.602 7	4.559 8	0.967 6	0.219 9	4.559 8	0.967 6
45	52 621	19.553 0	0.901 3	0.579 7	4.525 0	0.973 3	0.236 8	4.525 0	0.973 3
46	58 649	18.506 0	0.906 9	0.735 7	4.615 2	0.975 2	0.133 3	4.615 2	0.975 2
47	49 981	19.372 0	0.895 0	0.594 9	4.497 2	0.969 6	0.225 6	4.497 2	0.969 6
48	46 900	20.966 0	0.932 1	0.598 6	4.233 9	0.989 2	0.222 9	4.233 9	0.989 2
49	50 382	17.077 0	0.889 9	1.009 3	4.530 3	0.966 6	-0.004 0	4.530 3	0.966 6
50	61 141	19.088 0	0.903 4	0.615 8	4.670 4	0.971 9	0.210 6	4.670 4	0.971 9
51	34 121	19.132 0	0.882 9	0.753 2	4.103 3	0.971 9	0.123 1	4.103 3	0.971 9
52	20 000 000	33.476 0	0.992 8	0.004 8	10.051 0	0.994 6	2.318 8	10.051 0	0.994 6
53	43 422	19.613 0	0.892 4	0.598 5	4.354 9	0.969 9	0.222 9	4.354 9	0.969 9
54	114 240	22.416 0	0.945 9	0.290 7	4.111 9	0.989 3	0.536 6	4.111 9	0.989 3
55	1000 000	30.113 0	0.981 0	0.025 9	7.100 2	0.993 1	1.586 7	7.100 2	0.993 1
56	993 732	31.294 0	0.988 3	0.022 8	6.978 0	0.994 4	1.642 1	6.978 0	0.994 4

从拟合结果可以看出,土壤水分特征曲线的各个土样中,除 Gardner 模型的指数形式有个别相关系数小于 0.9 以外,地貌类型从塬面到坡地再到沟道,3 个公式拟合的相关系数基本多在 0.9 以上,表明 3 个公式的拟合效果均比较好,可见这 3 个公式均是适用的。相比之下,Gardner 模型的乘幂形式(公式(3))和对数形式(公式(8))较其指数形式(公式(4))的拟合效果更好,并且 Gardner 模型对数形式的参数范围较其乘幂形式和指数形式(参数差别较大)合适,故可做进一步分析。

3.3 单一参数模型的建立

3.3.1 模型的建立 对南小河沟全流域 56 个试样 Gardner 模型对数形式的系数 A 和常数 B 进行相关分析,得到其复相关系数 R^2 为 0.861 9,具有比较好的线性关系。综合全流域土样数据,由表 3 可见,在按地貌和耕种类型划分的不同地类上,Gardner 对数模型的系数 A 与常数 B 均具有比较好的线性关系。因此,在南小河沟流域上,可用对数形式的 Gardner 模型来描述土壤水分特征曲线,并且可以作进一步简化。

表 3 不同地类 Gardner 模型参数 B 与 A 的关系分析Table 3 The relationship between parameter B and A in different landform types

地类 Landform type	B 与 A 的关系 Relationship between B and A	R^2	地类 Landform type	B 与 A 的关系 Relationship between B and A	R^2
全流域 Whole basin	$B=0.4161A-1.5791$	0.8619	农田 Farm land	$B=0.4273A-1.5905$	0.9443
塬面地 Table land	$B=0.4596A-1.7394$	0.9307	林地 Woodland	$B=0.3570A-1.3615$	0.8580
坡地 Slope land	$B=0.3755A-1.4198$	0.8524	荒地 Wasteland	$B=0.4731A-1.9532$	0.8950
沟道地 Gully land	$B=0.4731A-1.9532$	0.8394			

由于参数 A 与 B 具有很好的线性关系,因此将 B 值代入 Gardner 对数模型就可以得到仅有参数 A

的 Gardner 对数模型(表 4),该模型即为单一参数模型。

表 4 不同地类的单一参数模型

Table 4 One-parameter model of whole basin and different geomorphology

地类 Landform type	单一参数模型 One-parameter model	地类 Landform type	单一参数模型 One-parameter model
全流域 Whole basin	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.4161A + 1.5791$	农田 Farm land	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.4273A + 1.5905$
塬面地 Table land	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.4596A + 1.7394$	林地 Woodland	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.3570A + 1.3615$
坡地 Slope land	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.3755A + 1.4198$	荒地 Wasteland	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.4731A + 1.9532$
沟道地 Gully land	$\lg h = -\text{Alg } \theta - 0.4731A + 1.9532$		

3.3.2 模型参数 A 的统计特征 对单一参数模型的参数 A ,按全部土壤样品和地貌的分类进行统计(舍弃小于零的),得其统计特征如表 5 所示。对不同地貌最小值、最大值和均值进行比较,可以看到 A 的最小值和最大值均出现在坡地。按地貌类型看,坡地 A 的均值最大,沟道地 A 的均值最小;按耕种

类型看,农田 A 的均值最大,荒地 A 的均值最小。由此可见,参数 A 值随着地类的变化而表现出一定的变化趋势,因此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。在实际应用中,可参考表 5 选择南小河沟全流域或相应地类的参数 A 值。

表 5 单一参数模型中参数 A 的统计特征分析Table 5 Statistical characteristics of A in the one-parameter model

地类 Landform type	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	样本数 Sample size
全流域 Whole basin	2.7246	10.0510	5.8735	1.4678	56
塬面地 Table land	4.5935	6.5817	5.8935	0.8260	14
坡地 Slope land	2.7246	10.0510	6.3252	1.6171	32
沟道地 Gully land	4.1033	4.5666	4.4000	0.1832	10
农田 Farm land	4.5935	10.0510	6.5726	1.2504	27
林地 Woodland	2.7246	7.0349	5.5358	1.4606	13
荒地 Wasteland	4.1033	7.8067	4.9682	1.2767	16

4 结论与建议

1) 南小河沟流域各种地貌类型,如塬面坡地和沟道的土壤水分特征曲线均可用 Gardner 模型进行拟合,而且 Gardner 模型的乘幂形式和对数形式较其指数形式的拟合效果更好,Gardner 模型对数形式的参数范围较 Gardner 模型的乘幂形式和指数形式更合适。

2) 进一步对南小河沟全流域 56 个试样对数形 Gardner 模型的系数 A 和常数 B 进行相关分析,发现其具有比较好的线性关系,因此将 B 值代入 Gardner 对数形模型中,就可以得到仅有单个参数 A 的 Gardner 对数模型,即单一参数模型。

3) 土壤水分特征曲线单一参数模型中的参数

A 值,随着地貌类型的变化而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的变化特征,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。

[参考文献]

- Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil Sci, 1974, 117(6):311-314.
- 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.
Lei Z D, Hu H P, Yang S X. A review of soil water research [J]. Advances in Water Science, 1999, 3(10):311-318. (in Chinese)
- 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.
- Song X Y, Li Y J, Jiang J, et al. Progress and perspective of spatial variability study on unsaturated soil water movement parameters [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(6): 613-618. (in Chinese)
- [4] 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; 25-124.
- Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil water dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988; 25-124. (in Chinese)
- [5] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- [6] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal process in soil water retention [J]. Water Resources Research, 1990, 26: 1047-1056.
- [7] 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.
- [8] Kravchenko A, Zhang R. Estimating the soil water retention from particle-size distribution: a fractal approach [J]. Soil Science, 1998, 163(3): 171-179.
- [9] Arya L M, Leij F J, Van Genuchten M T, et al. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data [J]. Soil Soc Am J, 1999, 63: 510-519.
- [10] Wosten J H M, Van Genuchten M T. Using texture and other properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions [J]. Soil Soc Am J, 1988, 52: 1762-1770.
- [11] 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.
- [12] Gomendy V. Silty topsoil structure and its dynamics: the fractal approach [J]. Geoderma, 1999, 88: 165-189.
- [13] 贾宏伟. 石羊河流域土壤水分运动参数空间分布的试验研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- Jia H W. Experimental study on parameter distributions of soil water movement in Shiyang River basin [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese)
- [14] 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.
- Jia H W, Kang S Z, Zhang F C. One-parameter model of soil hydraulics parameters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 272-277. (in Chinese)
- [15] Leij F J, Russell W B, Lesch S M. Closed-form expressions for water retention and conductivity data [J]. Ground Water, 1997, 35(5): 848-858.

(上接第 208 页)

- [15] Kinnell P I A, Risse L M. USLE-M: empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration [J]. Soil Science Society of American Journal, 1998, 62(6): 1667-1672.
- [16] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Transaction of the ASAE, 1977, 20(6): 1100-1104.
- [17] 曹文洪, 张启舜, 姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究 [J]. 泥沙研究, 1993(1): 1-13.
- Cao W H, Zhang Q S, Jiang N S. The study on mathematical model for sediment yields caused by one storm in loess zone [J]. Journal of Sediment Research, 1993(1): 1-13. (in Chinese)
- [18] 李占斌, 符素华, 靳 顶. 流域降雨侵蚀产沙过程水沙传递关系研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 44-49.
- Li Z B, Fu S H, Jin D. Study on transference relationship from runoff discharge to sediment discharge in rainfall erosion sediment yield processes of watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 3(4): 44-49. (in Chinese)
- [19] 王孟楼, 张 仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究 [J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 11-18.
- Wang M L, Zhang R. Study on the storm-sediment yield model of the Chaba gully basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(1): 11-18. (in Chinese)
- [20] 毕华兴, 朱金兆, 张学培. 晋西黄土区小流域场暴雨径流泥沙模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 14-19.
- Bi H X, Zhu J Z, Zhang X P. Small watershed runoff and sediment model in the western Shanxi Province in Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(6): 14-19. (in Chinese)
- [21] 蔡强国, 刘纪根, 刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型 [J]. 地理研究, 2004, 23(4): 434-439.
- Cai Q G, Liu J G, Liu Q J. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin [J]. Geographical Research, 2004, 23(4): 434-439. (in Chinese)
- [22] 刘纪根, 蔡强国, 刘前进, 等. 流域侵蚀产沙过程随尺度变化规律研究 [J]. 泥沙研究, 2005(4): 7-13.
- Liu J G, Cai Q G, Liu Q J, et al. Study on the regularity of sediment yield processes in catchments under different scales [J]. Journal of Sediment Research, 2005(4): 7-13. (in Chinese)
- [23] 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Li B C. Remote Sensing Monitoring on soil and water loss and its comprehensive control in small watershed [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)