

# 岷江上游典型植被下土壤分形特征及对水分入渗的影响

吴尧<sup>1,2</sup>, 姚健<sup>1</sup>, 吴永波<sup>1</sup>, 薛建辉<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 江苏省林业生态工程重点实验室, 江苏 南京 210037; 2. 上海市林业总站, 上海 200072)

**摘要:** 以岷江上游 5 种典型植被类型下(高山栎林、岷江冷杉林、灌竹林、阔叶乔木林、高山草甸)土壤颗粒组成数据为基础, 运用分形模型计算出这 5 种类型土壤颗粒的分形维数, 研究了土壤颗粒分形维数与土壤性状的关系。结果表明, 15 个样地表层土壤颗粒的分形维数  $D$  为 1.117 ~ 1.315。通过逐步多元回归分析, 土壤颗粒分形维数仅与  $<0.002$  mm 的颗粒含量相关系数达到极显著。根据土壤入渗过程曲线将入渗过程划分为 3 个阶段: (1) 入渗瞬变阶段(0 ~ 8 min); (2) 入渗渐变阶段(8 ~ 30 min); (3) 入渗稳定阶段(30 ~ 120 min) 表明土壤入渗过程主要受土壤机械组成、团聚体和孔隙组成的综合影响。在整个入渗过程中, 高山栎林、灌竹林和阔叶林的渗透速率要高于冷杉林和草甸。

**关键词:** 岷江上游; 土壤颗粒粒径分布; 分形维数; 入渗过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0012-05

中图分类号: X825, S152

## Fractal Characteristics of Soils and Their Effects on Water Infiltration Under Typical Vegetations in Upper Reaches of Minjiang River

WU Yao<sup>1,2</sup>, YAO Jian<sup>1</sup>, WU Yong-bo<sup>1</sup>, XUE Jian-hui<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Forest Ecological Engineering, Nanjing Forest University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. Shanghai Forestry Station, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The relationship between soil fractal dimension and soil properties under five vegetation types (*Quercus aquifolioides*, *Abies taxoniana*, *Sinarundinaria fangiana*, board leaved forest and subalpine meadow) in upper reaches of Minjiang River was studied based on data of the soil particle composition and fractal theory. The fractal dimension of surface soil particle size distributions of the fifteen plots ranged from 1.117 to 1.315. This fractal dimension only had a significant correlation with the content of  $<0.002$  mm soil particles by stepwise multivariate regression. The infiltration process was divided into three phases according to the soil infiltration process curve: (1) the initial phase(0 ~ 8 min); (2) the transition phase(8 ~ 30 min); (3) the stable phase(30 ~ 120 min). Soil infiltration process was influenced comprehensively by soil partical size distribution(PSD), aggregate size distribution(ASD) and soil pore size distribution(SPD). During the process of soil water infiltration, the infiltration rate of *Quercus aquifolioides*, *Sinarundinaria fangiana* and board leaved forest was faster than that of *Abies taxoniana* and subalpine meadow.

**Keywords:** upper reaches of Minjiang River; particle size distribution; fractal dimension; infiltration process

土壤粒径分布(particle size distribution, PSD)影响着土壤的水力特性、肥力状况以及土壤侵蚀等, 是重要的土壤物理特性之一<sup>[1-3]</sup>。分形理论是研究 PSD 的主要进展之一, 是 Mandelbrot 于 20 世纪 70 年代中期首次提出, 用于研究自然界中没有特征长度但具有相似性的图形和图像<sup>[4]</sup>。分形理论广泛应用于土壤结构、水分特征以及溶质转移等方面的研究<sup>[5-8]</sup>, 分形理论的发展为土壤体系的定量化研究提供了一种有效

工具。土壤粒径分布常被用来分析和预测土壤物理性质如持水量、容积密度、渗透率和孔隙度等<sup>[7,9]</sup>。20 世纪末的研究主要集中于对不同土壤的单一分形的研究上, 近期研究主要集中于两个方面: 一是同种土壤不同土地利用类型 PSD 的单一分形研究<sup>[10-11]</sup>; 二是不同土壤类型 PSD 的多重分形研究<sup>[12-13]</sup>。

川西亚高山植被是长江上游重要的生态屏障, 具有涵养水源、调节气候、保持生物多样性等多种生态

收稿日期: 2010-06-22

修回日期: 2010-12-20

资助项目: 国家重大基础科学研究(973) 发展计划项目“西部典型区域森林植被对农业生态环境的调控机理”(2002CB111501)

作者简介: 吴尧(1982—), 男(汉族), 江苏省宜兴市人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为森林生态学。E-mail: wy820214@163.com。

通信作者: 薛建辉(1962—), 男(汉族), 江苏省启东市人, 教授, 研究方向为森林生态学。E-mail: fredy8214@gmail.com。

功能。此前,有关学者对该区域内亚高山植被不同恢复阶段的群落结构、凋落物生态功能、养分循环特征、土壤性质变化等方面开展了许多研究<sup>[14-16]</sup>。本文对岷江上游亚高山典型森林植被下土壤颗粒质量分形维数与土壤颗粒含量之间的关系进行研究,探讨不同土地利用类型和地貌中土壤颗粒质量分形维数的变化规律,土壤分形特征对水分入渗的影响,旨在利用分形维数来定量表征岷江上游亚高山群落土壤特征。

## 1 研究区概况

研究区位于岷江上游卧龙国家级自然保护区内,地理位置东经 102°52′—103°24′,北纬 30°45′—31°25′。

区内年平均气温为 4.3 °C,以 12 月最低(平均 -5.2 °C),7 月份最高(平均 12.4 °C),年降水 848.9 mm,年蒸发量为 772.5 mm,日照时数为 11 854 h,年平均相对湿度为 80%。本研究在两个典型植被区域进行(邓生山阴坡和巴郎山阳坡)。阴坡建群种主要是由岷江冷杉林(*Abies taxoniana*)、灌竹林(*Sinarundinaria fangiana*)、阔叶乔木林(board leaved forest)等组成,树龄多在 200 a 以上,林下灌木主要有竹叶花椒(*Z. armatum* D.C.)、红花蔷薇(*Rosa moyesii*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)等;阳坡主要群落为高山栎林(*Quercus aquifolioides*)和高山草甸(subalpine meadows)组成,样地基本情况详见表 1。

表 1 典型植被标准地基本情况

林型	立地因子			郁闭度	林型		枯落物	
	海拔/m	坡向	坡度/(°)		下木盖度/%	地被物盖度/%	厚度/cm	贮量/(t·hm <sup>-2</sup> )
高山栎林	2 740	东南	28.5	0.84	60	68	5.13 ± 0.69	10.80 ± 2.78
岷江冷杉林	2 770	西北	42.2	0.90	90	88	6.41 ± 2.44	18.71 ± 5.68
灌竹林	2 690	西北	28.3	0.92	30	72	4.60 ± 0.34	10.00 ± 1.25
阔叶乔木林	2 750	东南	25.4	0.86	85	85	6.20 ± 0.42	11.19 ± 0.95
高山草甸	3 280	东南	31.0	—	—	22	1.20 ± 0.22	2.18 ± 0.46

## 2 研究方法

### 2.1 样口采集与分析方法

于 2007 年 5 月至 9 月在阴坡海拔 2 700 m 处设置岷江冷杉林、灌竹林和阔叶乔木林 3 种群落类型的样地,在阳坡 2 700 m 处设置高山栎群落样地,3 300 m 处设置高山草甸样地,每种样地设置 3 个 20 m × 20 m 的标准样方,每个样方中采用对角线法挖取土壤剖面并取样。每一样点分 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 取样。采回样品剔除植物细根和杂质后风干,采用比重计法进行土壤颗粒大小分析,共设 75 组试验。根据土壤分级标准将土壤粒径分为:1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.5 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.05 mm、0.05 ~ 0.002 mm、小于 0.002 mm 共 6 个级别。

### 2.2 土壤粒径的分形原理

假定具有相似结构的多孔介质土壤有大小不同的土壤颗粒组成,土粒的质量密度为恒量,且不用考虑土粒形状差异的基础上,Tylerl 等人建立了土壤颗粒的累积质量与粒径的分形关系。

$$\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中:  $W$ ——粒径大于某一粒级  $d_i$  颗粒的累积重量;  $W_0$ ——土粒总重量;  $d_{\max}$ ——最大粒径的平均直径;

$$\bar{d}_i = \frac{(d_i + d_{i+1})}{2}; D——质量分形维数; \delta——测定维度。$$

对该式两边取对数,可得土壤颗粒组成维数计算公式:

$$\lg\left(\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}\right) = (3 - D) \lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right) \quad (2)$$

分别以  $\lg(W_i/W_0)$  和  $\lg(d_i/d_{\max})$  为纵横坐标,  $K$  为直线的斜率且  $K = 3 - D$ ,  $D$  为土壤分形维数。

### 2.3 土壤孔隙分形维数

采用黄冠华等<sup>[17]</sup>基于 Mesger 海绵体结构推导出的水分特征曲线模型来计算孔隙分形维数:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_a}\right)^{D-3} \quad (3)$$

式中:  $D$ ——分形特征的孔隙分形维数;  $\theta$ ——土壤含水率;  $\theta_s$ ——饱和含水率;  $\varphi$ ——介质的基质吸力;  $\varphi_a$ ——进气吸力。

对土壤的水分特征曲线进行幂函数拟合,所得幂为  $1/(D-3)$ ,由此即可计算出孔隙组成的分形维数  $D$  的值。

### 2.4 土壤水分入渗过程

采用公式(4—6)来模拟土壤水分的入渗过程。根据回归系数的大小确定水分入渗模型。环刀分层取原状土后采用双环入渗试验测定不同植被下土壤各层稳定入渗率和稳渗率,根据回归系数的大小来拟合土壤水分入渗模型,以模拟土壤水分的入渗过程。

(1) 飞利浦(Philip)公式:

$$f = \frac{1}{2}st^{-\frac{1}{2}} + A \quad (4)$$

式中:  $f$ ——入渗速率;  $s, A$ ——分别为吸水率和稳渗率;  $t$ ——时间。

(2) 霍顿(Horton)公式:

$$f = f_c + (f_0 + f_c) e^{-kt} \quad (5)$$

式中:  $f_c, f_0, k$ ——稳定入渗率、初始入渗率、常数。

(3) 幂函数回归方程:

$$f = at^{-b} \quad (a, b \text{ 为常数}) \quad (6)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤颗粒的分形维数特征

岷江上游各种植被群落下土壤质量分形维数见表 2。

由表 2 可知, 15 个样地土壤颗粒的分形维数为 1.117 ~ 1.315。在所收集的数据中, 随着地表植被的类型和坡向的不同, 其土壤颗粒分形维数并没有明显的规律变化。

表 2 各个样地概况及其土壤分形维数

样号	海拔 / m	粒径组成 %						群落类型	分形维数 $D$	相关系数 $R$
		1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.05 ~ 0.25 mm	0.002 ~ 0.05 mm	< 0.002 mm			
1	2 740	5.87	9.87	14.18	27.49	27.66	13.80	高山栎林	1.315	0.882 7
2	2 708	7.00	8.37	8.38	12.11	40.88	22.24	高山栎林	1.171	0.905 4
3	2 910	8.10	6.85	7.66	17.54	33.69	28.38	高山栎林	1.272	0.888 0
4	2 770	8.00	9.33	10.45	16.04	36.76	19.43	岷江冷杉林	1.244	0.877 5
5	2 770	9.18	9.40	12.69	19.24	25.40	24.10	岷江冷杉林	1.289	0.890 4
6	2 770	9.84	9.13	10.23	17.85	35.94	19.01	岷江冷杉林	1.215	0.883 2
7	2 690	6.46	8.32	10.60	17.46	40.97	16.20	灌竹林	1.154	0.862 4
8	2 690	5.25	7.28	8.41	14.40	48.88	15.77	灌竹林	1.118	0.849 5
9	2 690	6.28	8.12	10.33	19.35	39.88	16.05	灌竹林	1.167	0.864 3
10	2 750	1.37	5.82	30.47	30.08	20.60	11.67	阔叶乔木林	1.117	0.951 5
11	2 750	5.01	6.70	7.28	19.77	43.77	17.47	阔叶乔木林	1.141	0.860 0
12	2 750	4.72	6.00	6.56	27.61	39.37	15.74	阔叶乔木林	1.166	0.867 8
13	3 280	13.06	12.35	13.46	17.66	25.95	17.54	高山草甸	1.141	0.903 7
14	3 280	7.28	6.68	7.04	15.86	49.12	14.03	高山草甸	1.137	0.851 5
15	3 560	8.84	9.83	8.52	16.45	33.64	22.68	高山草甸	1.139	0.872 4

#### 3.2 土壤颗粒分形维数与各粒径等级的关系

根据计算过程可知, 分形维数  $D$  值的计算与土壤颗粒粒径由小到大的累计含量有关, 各土壤颗粒粒径与粒径含量的对数相关系数  $R \geq 0.849 5$ , 呈显著相关。由土壤颗粒各粒径含量与土壤分形维数的相关性分析可知, 从土壤颗粒分形维数  $D$  与各粒径含量的相关关系来看,  $D$  与粒径 0.5 ~ 0.25 mm, 0.25 ~ 0.05 mm, 0.05 ~ 0.002 mm 呈负相关, 与 < 0.002 mm 颗粒呈现显著正相关。采用逐步回归法, 用各样品的各个粒径级含量对分形维数建立多元二项式方程, 采用 F 检验的概率作为变量引入模型的依据, 当显著性水平  $\alpha \leq 0.05$  时, 变量进入回归方程; 当显著性  $\alpha \geq 0.01$  时, 将变量从回归方程中剔除。由此建立的多元二项式方程为:

$$D = 0.368 + 0.142S_i - 0.007 C_i^2 + 0.001S_a \times C_i$$

式中:  $S_i$ ——沙粒(2 ~ 0.05 mm)含量;  $S_a$ ——粗粉粒(0.05 ~ 0.002 mm)含量;  $C_i$ ——黏粒(< 0.002 mm)含量。

由此可见黏粒对土壤颗粒分形维数影响较大, 这和相关学者的研究结果一致。通过计算 5 种典型植被群落类型土壤颗粒机械组成成分维数与黏粒含量关系为:  $D = 0.009 9x + 0.994 4$  ( $R^2 = 0.910 5$ )。

#### 3.3 分形维数与土壤孔隙容重和石砾含量的关系

表 3 为分形维数与不同植被覆盖下土壤相关性状的单相关关系。由表 3 可以看出, 土壤分形维数与总孔隙度呈较高的相关关系, 相关系数达到 0.743 9, 而与土壤容重、非毛管孔隙度, 毛管孔隙度、石砾含量和细根(根长 < 2.5 cm)含量无显著相关性。

表 3 土壤分形维数与土壤相关性状的相关关系

土壤性状	关系式	相关系数	显著水平
土壤容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	$D = 0.117 8x + 1.077 3$	0.243 7	0.213 2
非毛管孔隙度/%	$D = -0.005 5x + 1.286 0$	0.149 1	0.133 8
毛管孔隙度/%	$D = -0.003 9x + 1.265 6$	0.325 8	0.314 6
总孔隙度/%	$D = -0.004 4x + 1.462 0$	0.743 9	0.521 7
石砾含量/%	$D = -0.01 1x + 1.556 5$	0.202 9	0.366 1
细根/%	$D = 0.000 5x + 1.147 0$	0.202 2	0.223 1

3.4 土壤结构分形特征对土壤水分入渗率的影响

3.4.1 土壤水分入渗过程 根据不同入渗模型拟合相关系数  $R^2$  的大小,可以判断不同林型土壤入渗模型拟合效果。对于林地土壤,Philip 公式比 Horton 公式拟合效果较好;对于草甸土壤,采用 Horton 公式模拟效果更好;运用入渗模型模拟要优于直接幂函数回归。不同植被下土壤入渗模型见表 4。由图 1 可知,阔叶乔木林的入渗性能优于其它林型和草甸,高山栎林的初渗率相当大,但稳渗速率明显降低;而灌竹林土壤水分入渗过程差别不大。

表 4 典型植被下土壤入渗模型

林型	入渗模型	相关系数
高山栎林	$f=0.5 \times 18.901t^{-0.5} + 12.238$	0.827 0
岷江冷杉林	$f=0.5 \times 8.605t^{-0.5} + 8.605$	0.916 0
灌竹林	$f=0.5 \times 24.097t^{-0.5} + 15.107$	0.945 0
阔叶乔木林	$f=0.5 \times 20.187t^{-0.5} + 14.711$	0.878 0
高山草甸	$f=7.24 + (13.30 - 7.24)e^{-0.064t}$	0.789 0

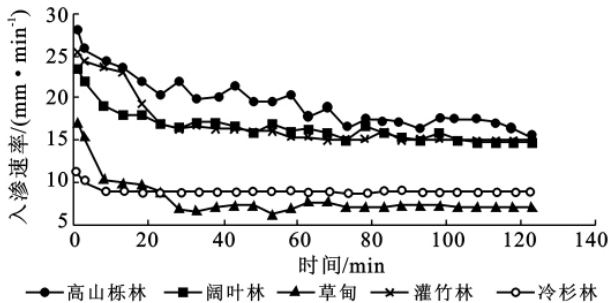


图 1 研究区典型植被下的土壤入渗过程

根据所选林地土壤入渗模型,将土壤水分入渗过程划分为变化较快的入渗瞬变阶段(0~8 min),入渗渐变阶段(8~30 min)和入渗稳定阶段(30 min后),以探讨土壤结构对入渗过程的影响。

3.4.2 入渗瞬变阶段土壤结构分形特征对入渗率的影响 通过对土壤入渗瞬变阶段  $t \in [0, 8]$  入渗过程土壤机械组成分维、团聚体组成和土壤孔隙组成分形维数进行回归,关系式为:

$$f = -1.424t + 223.527D_{孔} - 417.714D_{机} + 221.620D_{团} + 36.627 \quad (R=0.792)$$

由关系公式可知,在土壤水分入渗率变化最快的前 8 min 内,其入渗率主要受土壤孔隙组成、机械组成和团聚体组成影响,即前 8 min 入渗受土壤结构的控制。此阶段入渗率与孔隙组成分形维数和微团聚体分形维数呈正相关,与机械颗粒分形维数呈负相关。各分形维数结构系数处于同一个数量级,因此初渗阶段的入渗率受土壤机械组成、团聚体组成和孔隙组成的综合影响,其中受孔隙分形维数与机械组成成分

形维数的影响略大于团聚体分形维数的影响。从各植被土壤在前 8 min 水分入渗率可知,高山栎林、灌竹林和阔叶林的入渗率大于其它林地土壤。这与高山栎林、灌竹林和阔叶林土壤的孔隙组成机械分形维数(3.023 2.835 2.428)有关。

3.4.3 入渗渐变阶段土壤结构分形特征对入渗的影响 在 8~30 min 内,入渗变化渐缓,水分入渗模拟公式为:

$$f = -0.292t + 77.812D_{孔} + 8.527D_{机} - 3.724D_{团} + 317.110 \quad (R=0.824)$$

在此阶段,高山栎林、灌竹林和阔叶林的入渗率仍大于其它林地土壤。而草甸土壤在此阶段的入渗率迅速下降,这与其孔隙组成分形维数下降有关,且其入渗率依旧低于林地土壤,这是由于其土壤通透性低于林地。

3.4.4 入渗稳定阶段土壤分形特征对入渗率的影响

在土壤水分入渗率趋于平稳的 30~120 min 内,其入渗率主要受土壤的孔隙组成、团聚体组成和机械组成的影响。由模拟公式可以看出,土壤入渗速率受土壤机械组成负影响最大,系数为 -84.216,大于孔隙组成分形维数和团聚体分形维数。

$$f = -1.271t + 6.703D_{孔} - 84.216D_{机} + 12.504D_{团} + 49.232 \quad (R=0.724)$$

此阶段高山栎林、灌竹林和阔叶林的入渗率趋于一致,而草甸和冷杉林的土壤入渗率也比较接近。可见,土壤机械组成分形维数越高,质地越细,越不利于入渗,而孔隙分形维数越大越利于入渗,团聚体分形维数越小越利于入渗。

4 结论

(1) 岷江上游 5 种典型植被下土壤样品的分形维数介于 1.117~1.315 之间;5 种植被下土壤粒径分形维数排序为:高山栎林(1.253) > 岷江冷杉林(1.249) > 灌竹林(1.146) > 阔叶乔木林(1.141) > 高山草甸(1.139)。

(2) 土壤颗粒分形维数  $D$  与黏粒含量呈显著正相关,与其它级别粒径的土壤颗粒无明显相关性。研究结果表明,土壤颗粒分形维数是反映土壤质地的一个较好指标,土壤颗粒分形维数主要反映了土壤黏粒的含量,这与邓良基、周先容等人在该区域的研究结果一致。

(3) 土壤颗粒分形维数  $D$  能较好地反映土壤物理性状。土壤颗粒分形维数  $D$  和土壤总孔隙度呈较明显正相关关系,与土壤容重、土壤石砾含量均呈正相关关系。

(4) 在土壤水分渗透的过程中,入渗速率主要受土壤孔隙组成、机械组成和团聚体组成综合影响。机械组成成分维越大,质地越细,入渗率越小;团聚体组成成分维数越小,结构和稳定性越好,入渗率越大;孔隙组成成分维数越大,孔隙分布越均一,入渗率越大。入渗平均速率大小排列顺序依次为:高山栎林 > 灌竹林 > 阔叶林 > 冷杉林 > 草甸。

(5) 土壤颗粒分形维数  $D$  能够很好地表征土壤的结构性状,这对进一步建立岷江亚高山林土壤分形维数与土壤结构、土壤肥力特征之间的定量关系模型,对深入探讨分形理论在土壤结构上的利用和揭示土壤肥力特征具有重大意义。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 苏里坦,宋郁东,陶辉. 不同风沙土壤颗粒的分形特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 244-248.
- [2] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [3] 吴承祯,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
- [4] 程先富,史学正,王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J]. 地理科学, 2003, 12(5): 617-622.
- [5] Michel R, Garrison S. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55(5): 1231-1238.
- [6] Pefect E, Mchaughlin N B, Kay B D, et al. An improved fractal equation for the soil water retention curve [J]. Water Resource Res., 1996, 32(2): 281-287.
- [7] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(2): 362-369.
- [8] 吴彦,刘庆,乔永康,等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648-655.
- [9] Scott W T, Stephen W W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. Soil Sci. Soc. Am., 1989, 53(4): 987-996.
- [10] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518-524.
- [11] 张社奇,刘云鹏,刘建军,等. 黄土高原油松人工林地土壤颗粒的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(11): 151-155.
- [12] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [13] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 72-74.
- [14] 周先容,陈劲松. 川西亚高山针叶林土壤颗粒的分形特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 891-894.
- [15] 姚健,吴尧,薛建辉,等. 岷江上游 3 种亚高山森林土壤蓄水和渗透能力比较[J]. 林业科技开发, 2009, 23(6): 44-47.
- [16] 王玉杰,王云琦,齐实,等. 重庆缙云山典型林地土壤分形特征对水分入渗影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 73-78.
- [17] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 29(4): 490-496.
- [18] 郝振纯,李丽,王加虎,等. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2010: 161-179.
- [19] 马宏伟,王乃昂. 近 50 年石羊河出山口径流对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 113-117.
- [20] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-162.
- [21] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-162.

(上接第 11 页)

- [26] 吴倩如,康世昌,高坛光,等. 青藏高原纳木错流域扎当冰川度日因子特征及其应用[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 891-897.
- [27] 陈仁升,刘时银,康尔泗,等. 冰川流域径流估算方法探索:以科其喀尔巴西冰川为例[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 942-951.
- [28] Arnaud P, Bouvier C, Cisneros L, et al. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction [J]. Journal