

# 大理河流域地貌多重分形特征空间分异研究

王民<sup>1</sup>, 李占斌<sup>2,4</sup>, 崔灵周<sup>3</sup>, 李鹏<sup>4</sup>

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 郑州 450016; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所  
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 温州大学 生命与环境科学学院,  
浙江 温州 325027; 4. 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)

**摘要:**利用流域数字高程 DEM, 采用流域地貌多重分形模型及其实现方法, 对大理河流域中的 11 条子流域地貌多重分形参数进行了计算, 分析了其空间分异特点。结果表明: 大理河流域地貌多重分形参数奇异指数的最小值  $\alpha_{\min}$ 、地貌表面积分布最小概率子集的分形维数  $f(\alpha_{\min})$  和最大概率子集的分形维数  $f(\alpha_{\max})$  的平均值从上游至下游呈明显递减趋势, 奇异指数最大值  $\alpha_{\max}$  和奇异指数变化范围  $\Delta\alpha$  平均值从上游到下游呈递增趋势, 说明最大坡度地貌单元出现在上游, 最小坡度地貌单元出现在下游, 大理河流域地貌形态变化自上游向下游趋于复杂。大理河流域左岸  $\alpha_{\min}$  和  $f(\alpha_{\min})$  均值大于右岸, 表明最大坡度地貌单元所占比例左岸较大; 左岸  $\Delta f$  平均值大于右岸, 表明右岸中最小坡度的地貌单元所占比例大于最大坡度地貌单元所占比例;  $\Delta\alpha$  均值右岸大于左岸, 表明大理河右岸地貌复杂程度相对较大; 总体来说, 大理河流域地貌右岸的差异性、不均匀性和复杂度均大于左岸。该研究对于探讨黄土地貌多重分形参数的地貌学意义具有重要参考价值。

**关键词:**大理河流域; 流域地貌; 多重分形特征; 空间分异

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0178-04

## Study on Spatial Variation of Geomorphology Multi-Fractal Characteristic in the Dali River Watershed

WANG Min<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>2,4</sup>, CUI Lingzhou<sup>3</sup>, LI Peng<sup>4</sup>

(1. He'nan Water & Power Consulting Engineering Co., Ltd, Zhengzhou 451006, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325027, China;

4. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Based on the digital elevation model (DEM) of eleven subwatersheds of the Dali River watershed, the geomorphology multi-fractal parameters were calculated by using watershed geomorphology multi-fractal model and its spatial variation was also analyzed. The mean values of the geomorphology multi-fractal parameters, including  $\alpha_{\min}$ ,  $f(\alpha_{\min})$  and  $f(\alpha_{\max})$ , obviously decreased from the upstream to downstream. The mean values of  $\alpha_{\max}$  and  $\Delta\alpha$  showed increasing trends from the upstream to downstream. The results indicated that the proportion of geomorphic unit with higher slope was more than with lower slope in the upstream, whereas the proportion of geomorphic unit with lower slope was more than with higher slope in the downstream. The topographic features of the Dali River watershed became more complex from the upstream to downstream. The mean values of  $\alpha_{\min}$  and  $f(\alpha_{\min})$  on the left bank were greater than on the right bank of the Dali River watershed, which suggested that the proportion of geomorphic unit with higher slope on the left bank was more. The mean value of  $\Delta f$  on the left bank was more than on the right bank, which suggested that the proportion of geomorphic unit with higher slope on the right bank was more. The mean value of  $\Delta\alpha$  on the right bank was more than on the left bank, which indicated that the topographic features on the right bank were more complex than on the left. In a word, the topographic features on the right bank were more diver-

gent, homogeneous and complex than on the left bank. The results are of great scientific significance to effectively resolve the complex issues and master the characteristics of various landforms in geomorphology.

**Keywords:** Dali river watershed; geomorphology; multi-fractal characteristic; spatial variation

分形理论的提出为复杂流域地貌的定量描述提供了新思路,成为地貌形态非线性量化研究的有力工具<sup>[1-5]</sup>,对于流域地貌这一具有非均匀和奇异性的分形体,一个维数无法描述其全部特征,需要用多重分形测度来表示。Goodchild<sup>[6]</sup>、Mark 等<sup>[7]</sup>和 Andrieu 等<sup>[8]</sup>先后发现地形在正交方向上具有不同的标度变换因子,反映了地貌形态在很宽的尺度范围内具有统计自相似性。Matsushita 等<sup>[9]</sup>研究认为山脉剖面的起伏由于标度不同可以具有两个分维值。Andrieu<sup>[10]</sup>指出测量长度与标度之间存在非线性关系,只能由广义分维来定义。高鹏<sup>[11]</sup>依据多标度分形理论,建立了流域水系的双标度康托模型,并运用这个模型分析了水系发育演化的规律,探讨了泥石流沟判别的定量指标。曹汉强等<sup>[12]</sup>采用多重分形谱进行地形特征的分析,多重分形谱参数分层次地刻画了空间内部的精细结构,并从复杂的地形数据中选出具有明显个性特征的区域,研究表明多重分形的奇异谱函数比简单的分形维数能提供更多的信息。李猛等<sup>[13]</sup>利用标准偏差法和固定质量法,研究了新疆天山地区3种不同构造地貌单元地形剖线的自仿射分形和多重分形特征,在所研究的标度范围内,不同构造地貌单元剖线分维值总体上呈现出高山区>中低山区>盆地区特点,同一个地貌研究区不同方向的剖线呈现不同程度的各向异性。鲁克新等<sup>[14]</sup>对岔巴沟5个子流域的地貌多重分形特征进行研究,结果表明多重分形谱及其主要参数能更加全面地对流域三维地貌的总体特征进行描述,能够分层次地刻画流域内部精细结构。上述研究对地貌非均匀性和各向异性的总体分形规律产生较大影响,但对于以此揭示野外典型流域地貌形态多重分形特征空间变化等应用研究还很少涉及。

为此,本文以黄土高原丘陵沟壑区的典型流域大理河为研究对象,基于流域地貌多重分形模型及其实现方法,利用大理河流域的地貌数字高程模型DEM,对该流域中的11条子流域地貌多重分形参数进行计算并分析其空间分异规律。本研究对于探讨流域地貌形态的非线性特征量化及地貌学意义具有重要参考价值。

## 1 大理河流域概况

大理河流域位于东经109°14′—110°13′,北纬37°30′—37°56′,流域面积3 873 km<sup>2</sup>,全长170 km,

是无定河最大的一级支流。沟壑密度达4~6 km/km<sup>2</sup>,流域内地面切割破碎,地形起伏较大,属晋陕黄土崆峒丘陵沟壑区。大理河流域可分为黄土梁塬河源丘陵沟壑区(简称河源区)和黄土梁崆丘陵沟壑区(简称丘陵区)两种地貌类型区。以青阳岔、周家砭为界可将流域分为上、中、下游三段,青阳岔以上为上游段,属于河源区,包括靖边县的绝大部分、安塞县的全部和横山县的部分地区,占流域总面积的28.1%;青阳岔一周家砭为中游段,周家砭—绥德为下游段,中、下游段均属于丘陵区,包括子洲、绥德两县的全部,横山的大部和靖边的小部分,占流域总面积的71.9%,沟壑纵横,梁崆起伏,支离破碎,沟壑密度为5~6 km/km<sup>2</sup>,沟深可达100~150 m。子洲以上的中游地区梁地较多且梁多陡,梁长仅为150~200 m,坡长50~70 m,坡度15°~20°。大理河左右两岸地貌形态差异较大,右岸地貌的破碎程度大于左岸。

## 2 研究方法

### 2.1 研究子流域选取

本研究根据大理河流域的地貌类型空间分布特点,在大理河流域的上、中和下游区共选取11个子流域作为研究对象,其空间分布及特征统计见表1。上游区选择清水河、崆峒沟和王家湾沟3个子流域,均属于河源丘陵沟壑区;其中,崆峒沟位于大理河源头(不列入左右岸划分),清水河和王家湾沟分别位于左岸和右岸,流域面积为199 km<sup>2</sup>,115 km<sup>2</sup>。中游区选择石乔沟、大水沟、马义河和大堡岔子4个子流域,均属于梁崆丘陵沟壑区;其中石乔沟和大堡岔子流域位于大理河右岸,大水沟和马义河位于左岸;马义河子流域面积最大,为211 km<sup>2</sup>;大水沟子流域面积最小,为81 km<sup>2</sup>。下游区选择艾好崆、石窑沟、南驼耳巷沟和周坨崆4个子流域,属于梁崆丘陵沟壑区;其中艾好崆和石窑沟位于左岸,南驼耳巷沟和周坨崆位于右岸;南驼耳巷沟子流域面积最大,为234 km<sup>2</sup>;周坨崆子流域面积最小,仅为61 km<sup>2</sup>。

### 2.2 流域地貌多重分形参数计算

本文采用投影覆盖法<sup>[15-16]</sup>实现对三维地貌表面积概率测度的计算,定义地貌表面积的概率为:

$$P_i(r) = \frac{A_i(r)}{\sum_i A_i(r)}$$

式中: $A_i(r)$ 为投影面中尺度为 $r$ 的第 $i$ 个网格所对

应三维地貌表面的面积; $P_i(r)$ 为在第  $i$  个网格上的表面积概率; $\sum_i A_i(r)$ 为流域地貌的总表面积。

表 1 大理河 11 条研究子流域特征统计

序号	所属河段	子流域名称	流域面积/ km <sup>2</sup>	所属左岸/右岸	所属地貌类型区
1	上游	清水河	199	左岸	河源丘陵沟壑区
2		崑则沟	237		
3		王家湾沟	115	右岸	
4	中游	石乔沟	89	右岸	梁崩丘陵沟壑区
5		大水沟	81	左岸	
6		马义河	211	左岸	
7		大堡岔	125	右岸	
8	下游	艾好崑	118	左岸	
9		石窑沟	190	左岸	
10		南驼耳巷沟	234	右岸	
11		周坨崑	61	右岸	

把全部概率分布组成的集划分为一系列子集,若  $P_i(r)$  是其中一个子集,则存在如下标度关系:

$$P_i(r) \propto r^\alpha$$

式中: $\alpha$  为奇异指数,它反映了地貌表面分形体上不同概率层次的奇异程度。若将子集内单元数  $N(r)$  和  $r$  的关系定义为:  $N(r) \propto r^{-f(\alpha)}$

$f(\alpha)$  是奇异指数为  $\alpha$  子集的分形维数。Chhabra 等<sup>[17-18]</sup>提出了一种直接计算  $f(\alpha)$  的方法。该方法建立在覆盖的基础上,构造一个归一化的单参数测度集  $\mu(q,r)$ :

$$\mu_i(q,r) = \frac{[P_i(r)]^q}{\sum_i [P_i(r)]^q}$$

式中: $\sum_i [P_i(r)]^q$  表示对所有网格概率的  $q$  次方求和。 $q$  为尺度推绎指数[即阶距  $q, q \in (-\infty, +\infty)$ ]用来量化不同尺度和位置上的分形。

该测度族子集的 Hausdorff 维数可直接计算,而关于测度集的奇异强度的平均值  $\alpha_i = \ln p_i(r) / \ln(r)$  可以估计为:

$$f(\alpha) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i(q,r) \ln \mu_i(q,r)}{\ln(r)}$$
$$\alpha = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i(q,r) \ln P_i(r)}{\ln(r)}$$

对于每个给定的  $q$  值,直接计算相应的  $\alpha$  和  $f(\alpha)$ ,从而可以作出相应的多重分形曲线。

$\alpha_{\min}$  和  $\alpha_{\max}$  分别表示地貌表面积概率子集奇异指数的最小值和最大值; $\Delta\alpha(\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min})$  为奇异指数变化范围,定量反映了流域地貌表面积分布概率的不均匀程度,其值愈大表明地貌表面积分布越不均匀,地貌表面

的地貌复杂度、差异性与不均程度越大; $f(\alpha_{\min})$  和  $f(\alpha_{\max})$  分别表示地貌表面积分布最小、最大概率子集的分形维数,分别定量反映了坡度最大和最小地貌单元子集在流域内所占比例大小; $\Delta f[\Delta f = f(\alpha_{\min}) - f(\alpha_{\max})]$  为多重分形谱值高差,描述了最小奇异指数  $\alpha_{\min}$  所代表子集和最大奇异指数  $\alpha_{\max}$  所代表子集的数目差异,揭示了最大概率子集与最小概率子集的对比关系,即分形体内部不同概率子集的结构变化。

3 结果与分析

3.1 大理河流域上、中和下游地貌多重分形特征

根据多重分形计算模型分析的大理河流域上、中及下游 11 个子流域地貌多重分形参数计算结果(表 2),可以看出,最小地貌奇异指数  $\alpha_{\min}$  平均值从上游的 1.906 3,中游的 1.886 6,到下游的 1.8855,呈递减趋势;多重分形谱值  $f(\alpha_{\min})$  平均值从上游的 1.488 2 下降至中游的 1.040 8,最后减小至 0.824 4,呈递减趋势,表明最大地貌表面积概率子区域出现在上游,即最大坡度地貌单元所占比例以上游最大。最大地貌奇异指数  $\alpha_{\max}$  平均值从上游的 2.036 7 增至中游的 2.041 0,最后增至下游的 2.046 0 上呈递增趋势;最大地貌奇异指数  $\alpha_{\max}$  对应多重分形谱值  $f(\alpha_{\max})$  平均值从上游的 1.747 7 下降至中游的 1.615 4,最后降至下游的 1.543 7,呈递减趋势,这种趋势表明了最小地貌表面积概率子集出现在下游,即最小坡度地貌单元所占比例以下游最大。

多重分形谱高差  $\Delta f$  平均值以上游最大,值为 -0.259 5;中游次之,值为 -0.574 7;下游最小,值为 -0.719 3,表明下游流域中最小坡度的地貌单元所占比例相对于最大坡度地貌单元所占比例与上中游流域相比明显增大。地貌奇异指数分布范围  $\Delta\alpha$  平均值以上游最小,值为 0.130 4;中游较大,值为 0.154 4;下游最大,值为 0.158 4,表明大理河流域地貌形态变化自上游向下游趋于复杂。因此,地貌多重分形参数可以量化揭示流域地貌形态的破碎度及复杂度等空间分异特征。

3.2 大理河流域左岸和右岸地貌多重分形特征

根据流域地貌多重分形计算模型,得到大理河流域左、右两岸 10 个子流域(不含源头区的崑则沟)地貌多重分形谱参数平均值(表 3)。从中可以看出,左岸 5 个子流域中最小地貌奇异指数  $\alpha_{\min}$  平均值为 1.895 9 及其对应的多重分形谱值平均值为 1.170 9,大于右岸 5 个子流域  $\alpha_{\min}$  和  $f(\alpha_{\min})$  分别为 1.886 5,0.972 2,表明最大地貌表面积概率子区域出现在左岸,即最大坡度地貌单元所占比例以左岸较大。右岸

最大地貌奇异指数  $\alpha_{\max}$  平均值为 2.043 6 大于左岸的 2.039 0,最大地貌奇异指数  $\alpha_{\max}$  对应的多重分形谱值  $f(\alpha_{\max})$  平均值左岸为 1.682 8 大于右岸的 1.578 4,表明了最小地貌表面积概率子集出现在右岸,即最小坡度地貌单元所占比例右岸较大。地貌多重分形谱高差平

均值  $\Delta f$  左岸为-0.511 9,大于右岸的-0.606 2,表明右岸中最小坡度的地貌单元所占比例相对于最大坡度地貌单元所占比例大于左岸。地貌奇异指数变化范围  $\Delta\alpha$  平均值右岸为 0.157 2,大于左岸的 0.143 1,表明大理河右岸地貌复杂程度相对较大。

表 2 大理河上、中和下游流域地貌多重分形参数

位置	流域	$\alpha_{\min}$	$f(\alpha_{\min})$	$\alpha_{\max}$	$f(\alpha_{\max})$	$\Delta\alpha$	$\Delta f$
上游	清水河	1.916	1.4907	2.0314	1.797	0.1154	-0.3063
	昂则沟	1.8956	1.5074	2.0361	1.7697	0.1405	-0.2623
	王家湾沟	1.9074	1.4666	2.0427	1.6764	0.1353	-0.2098
	平均值	1.9063	1.4882	2.0367	1.7477	0.1304	-0.2595
	大水沟	1.9043	1.2803	2.0413	1.6982	0.137	-0.4179
中游	石乔沟	1.8758	0.8131	2.0448	1.5871	0.169	-0.774
	马义河	1.8924	1.137	2.0391	1.6352	0.1467	-0.4982
	大堡岔	1.8739	0.9326	2.0386	1.5411	0.1647	-0.6085
	平均值	1.8866	1.04075	2.04095	1.6154	0.15435	-0.57465
	艾好昂	1.8815	0.9175	2.0419	1.6726	0.1604	-0.7551
下游	石窑沟	1.8852	1.0288	2.0414	1.6109	0.1562	-0.5821
	南驼耳巷沟	1.8822	0.7629	2.0396	1.5797	0.1574	-0.8168
	周坨崆	1.8930	0.8859	2.0524	1.5077	0.1594	-0.6218
	平均值	1.8855	0.8988	2.0438	1.5927	0.1584	-0.6940

表 3 大理河流域左岸、右岸子流域地貌多重分形参数平均值

流域空间	平均	平均 $f$	平均	平均 $f$	平均	平均
部位	$\alpha_{\min}$	( $\alpha_{\min}$ )	$\alpha_{\max}$	( $\alpha_{\max}$ )	$\Delta\alpha$	$\Delta f$
左岸	1.8959	1.1709	2.0390	1.6828	0.1431	-0.5119
右岸	1.8865	0.9722	2.0436	1.5784	0.1572	-0.6062

4 结 论

(1) 大理河最小地貌奇异指数  $\alpha_{\min}$  平均值、多重分形谱值  $f(\alpha_{\min})$  和  $f(\alpha_{\max})$  平均值从上游至下游呈递减趋势,最大地貌奇异指数  $\alpha_{\max}$  平均值从上游到下游呈递增趋势,表明最大坡度地貌单元出现在上游,最小坡度地貌单元出现在下游。地貌奇异指数分布范围  $\Delta\alpha$  平均值以上游最小,中游较大,下游最大,表明大理河流域地貌形态变化自上游向下游趋于复杂。

(2) 大理河流域最小地貌奇异指数  $\alpha_{\min}$  及多重分形谱值  $f(\alpha_{\min})$  平均值左岸大于右岸,表明左岸最大坡度地貌单元出现在左岸。 $\Delta f$  平均值左岸大于右岸,表明右岸中最小坡度的地貌单元所占比例相对于最大坡度地貌单元所占比例较大; $\Delta\alpha$  平均值右岸大于左岸,表明大理河右岸地貌复杂程度相对较大;总体来说,大理河流域地貌差异性、复杂度和不均匀性右岸均大于左岸。

参考文献:

[1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain-statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science,

1967,156(3775):636-638.  
[2] Mandelbrot B. Fractal Form, Chance and Dimension[M]. San Francisco:Freeman, 1977.  
[3] 李斌斌,李占斌,宇涛,等. 基于归一化植被指数的流域植被覆盖分形维数研究[J]. 农业工程学报,2014,30(15):239-247.  
[4] 周兴林,肖神清,肖旺新,等. 粗集料表面纹理粗糙度的多重分形评价[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2017,45(2):29-33.  
[5] 杜修力,张佩,金浏,等. 基于分形理论的北京地区砂砾石地层细观建模[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(2):437-445.  
[6] Goodchild M F. Fractals and accuracy of geographical measures[J]. Math. Geol., 1980,12(2):85-98.  
[7] Mark D M, Aronson P B. Scale-dependent fractal dimension of topographic surface[J]. Math. Geol.,1984,16(7):671-684.  
[8] Andrieu R, Abrahams A D. Fractal techniques and the surface roughness of talus slopes[J]. Earth Surf. Proc. Landform,1989,14(4):197-209.  
[9] Matsushita M, Ouchi S. On the self-affinity of various curves[J]. Physica D,1989,38(1/4):246-251.  
[10] Andrieu R. Estimating fractal dimension with the divide method in geomorphology[J]. Geomorphology,1992. 5(1):131-141.  
[11] 高鹏. 流域水系的多尺度分形研究及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,1995,6(2):31-38.

- constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [7] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N, P 的化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [8] 蔡艳, 张毅, 刘辉, 等. 峨眉山常绿阔叶林常绿和落叶物种叶片 C, N, P 研究[J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(3): 9-13.
- [9] 旷远文, 温达志, 闫俊华, 等. 贵州普定喀斯特森林 3 种优势树种叶片元素含量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(2): 158-163.
- [10] 罗绪强, 张桂玲, 杜雪莲, 等. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1121-1129.
- [11] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C, N, P 含量和空间异质性[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [12] 张百平, 聂朝俊, 朱军, 等. 贵州省森林资源动态变化[J]. *地理研究*, 2003, 22(6): 725-732.
- [13] 杨泉, 袁茂琴, 冯邦贤. 榕江月亮山珍稀植物马蹄参群落结构及资源研究[J]. *资源与利用*, 2013, 32(12): 55-59.
- [14] 穆彪, 张宗兰, 聂明章. 月亮山林区气候概况[J]. *贵州农学院学报*, 1994, 13(3): 6-10.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Elser J J, Stemer R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [17] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [18] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2003(1): 92-97.
- [19] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 965-973.
- [20] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [21] 陈步峰, 陈勇, 尹光天, 等. 珠江三角洲城市森林植被生态系统水质效应研究[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(4): 453-460.
- [22] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(2): 1-67.
- [23] 张和平, 朱灿梅, 杨东升. 月亮山山区梯田及其生态文化研究[J]. *中国水土保持*, 2011(5): 49-50.
- [24] 徐朝斌, 钟全林, 程栋梁, 等. 基于地理种源的刨花楠木比叶面积与叶片化学计量学关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6507-6515.
- [25] Chen F S, Niklas K J, Zeng D H. Important foliar traits depend on species-grouping: Analysis of a remnant temperate forest at the Keerqin Sandy Lands[J]. *China. Plant and Soil*, 2011, 340: 337-345.
- [26] 刘微. 天童主要落叶和常绿树种叶片 N, P 化学计量学及分配特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [27] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 682-693.



(上接第 181 页)

- [12] 曹汉强, 朱光喜, 李旭涛, 等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(12): 1182-1185.
- [13] 李锰, 朱令人, 林海英. 不同类型地貌的各向异性分形与多重分形特征研究[J]. *地球学报*, 2003, 24(3): 237-242.
- [14] 鲁克新, 王民, 李占斌, 等. 岔巴沟流域三维地貌多重分形特征量化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 248-254.
- [15] 王民. 基于 GIS 的流域地貌多重分形特征与侵蚀产沙关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [16] 王民, 崔灵周, 胡彩虹, 等. 基于投影覆盖法的小流域模型地貌分形特征[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(6): 74-77.
- [17] Chhabra A, Jensen R V. Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(12): 1327-1330.
- [18] Chhabra A, Jensen R V. Direct determination of the  $f(a)$  singularity spectrum [J]. *Phys Review Letters*, 1989, 62(2): 1327-1330.