

基于分形维数的中小河流滩地沉积物空间分布研究

张琦¹, 夏继红¹, 汪颖俊², 王金平¹, 彭苏丽¹, 周子晔¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 龙游县水利局, 浙江 龙游 324400)

摘要:以浙江省龙游县灵山港滩地沉积物为研究对象,在现场监测和室内测定的基础上,运用分形方法,分析了山丘区中小河流滩地沉积物空间分布格局及其影响因素。结果表明:滩地沉积物在空间分布上具有明显的分段、分区、分层特征。土壤分形维数从上游至下游呈增大趋势;在河道横断面上,离水 0~16 m 为土壤分形维数的高变幅区,离水 16~49 m 为低变幅区,离水 49 m 到滩地边界为平稳区;垂向上,0—20 cm 层土壤分形维数小于 20—40 cm 层。砾石分形维数从上游至下游逐渐增大;在河道横断面上,砾石主要分布在离水边缘 4~33.5 m 范围内,在该范围内,砾石分形维数随离水距离增大而增大。沉积物空间分布差异性主要受水流、植被、采砂、滩地地形和周期性洪水等因素的影响。对于采砂严重的滩地,修复中需要考虑沉积物分布的分段、分区、分层特点,配置组成适宜的基质,保证滩地的稳定和功能的发挥。

关键词:山丘区;河岸带;土壤;砾石;空间变异性

中图分类号:TV853

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0366-04

Research on Fractal Dimension-Based Deposition Distribution on the Floodplains in Medium or Small Rivers

ZHANG Qi¹, XIA Jihong¹, WANG Yingjun², WANG Jinping¹, PENG Suli¹, ZHOU Ziyue¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Conservancy Bureau, Longyou, Zhejiang 324400, China)

Abstract: The Lingshan River, in Longyou County, Zhejiang Province, was taken as a typical example of small and medium rivers in hilly area, and the spatial distribution of deposition and its impact factors were studied based on the fractal theory. The deposition has obvious segmented, zoning and layered features. From upstream to downstream, the fractal dimension of the soil increases. In cross section, it is a high-amplitude region of soil fractal dimension in the distance of 0~16 m from the water, and a low-amplitude region in the distance of 10~49 m from the water, and a stable region in the distance of 49 m from water to the boundary of the floodplain. From vertical view, the fractal dimension of soil in 0—20 cm layer is smaller than that in 20—40 cm layer. From upstream to downstream, the fractal dimension of the gravel increases. In cross section, the gravel mainly distributes in the distance of 4~33.5 m from the water, farther the distance from the water is, larger the stone fractal dimension is. The spatial differentiation of deposition is mainly influenced by flow, vegetation, sediment removal, floodplain topography and periodic flooding and so on. In the floodplain with serious sediment removal, with respect to restoration, the segmented, zoning and layered features should be taken into consideration and suitable matrix should be arranged in order to ensure stability and exertion of function of the floodplains.

Keywords: hills; riparian zones; soil; stone; spatial heterogeneity

河流滩地是维护河流生态系统健康的重要屏障,它具有调蓄洪水、削减污染和生物栖息等功能^[1-2]。长期以来,由于裁切、采砂、侵占等原因,造成山丘区

中小河流滩地大面积减少,功能退化,尤其是无序采砂、弃渣随意倾倒等造成滩地千疮百孔。因此,如何有效修复滩地成为当前山丘区中小河流建设和管理

的重点和难点。针对这一问题,一些学者开展了河流滩地研究和治理的实践探讨,如:黄进良^[3]研究了洞庭湖湿地面积变化与演替规律;伊紫函等^[4]研究提出了基于形态指数的中小河流滩地定量分类方法;汪颖俊等^[5]研究提出了中小河流滩地生态修复的基本思路,建立了生态修复的技术体系;余根听等^[6]研究提出了中小河流滩地植被分布规律、主要影响因子及其驱动机制;庞家珍等^[7]研究了三角洲泥沙淤积。研究表明:滩地形态、植被分布及其各项功能均与其沉积物分布密切相关。因此,深入研究中河流滩地沉积物的组成及空间分布特征,是有效修复和保护中小河流滩地的重要基础性工作之一。以往的研究多采用粒径来反映沉积物的物理特征,这仅能描述沉积物颗粒大小,而河流滩地沉积物通常含土壤和砾石等,其组成较为复杂,因此,仅采用粒径不能准确描述沉积物的综合形体特征和分布规律。分形理论是 Mandelbrot 于 1973 年提出的一种数学方法,它可对具有自相似性结构的物体进行有效度量^[8],还能定量描述不规则物体的几何形体和组成等^[9-11],这一理论已在土壤颗粒组成^[12]、肥力^[13]、孔隙^[14]和水分特征^[15]等方面得到较好应用,这为定量描述复杂的滩地沉积物的组成和分布提供了新途径。本文以浙江省龙游县灵山港滩地沉积物为研究对象,在野外监测及室内测定的基础上,应用分形方法,分析沉积物空间分布特征,探讨沉积物分布的影响因素及驱动机理,以期对滩地生态修复和管理提供参考。

1 研究区概况

浙江省龙游县(119°02'—119°20'E, 28°44'—29°17'N)位于浙江省西部金衢盆地腹地,属亚热带季风气候区,年平均气温 17.1℃,年降雨量 1 666.4 mm。灵山港是龙游县境内衢江右岸的一条重要支流,境内流长 43.79 km,流域面积 367.6 km²,平均坡降为 2.45‰,河道蜿蜒曲折,洪水暴涨暴落,是典型的丘陵区中小河流。河流沿线滩地资源丰富,植被种类多样,沉积物组成复杂,滩地沉积物主要以土壤和砾石为主。

2 研究方法

2.1 取样与样品处理

2.1.1 监测点布置与调查取样 本文将灵山港从纵向上分为上、中、下游 3 个区段,其中上游段包括沐尘村(L₁)、溪口四桥(L₂)和下徐桥滩地(L₃);中游段包括寺下(L₄)、梅村(L₅)、周村(L₆)和姜席堰滩地(L₇);下游段包括寺后(L₈)、上扬村(L₉)、高铁桥(L₁₀)和彩虹桥滩地(L₁₁)(图 1A)。对每个滩地在滩

头、滩中和滩尾分别布置 3 个取样断面,每个断面按间隔 5~10 m 取样(图 1B),垂向上若有明显分层则按 0—20 cm 和 20—40 cm 分层取样(图 1C)。每个采样点砾石的调查通过布设 1 m×1 m 的样方,并用数码相机拍照记录。按汛期前后分别于 2015 年 10 月和 2016 年 4 月开展两次现场勘查采集。

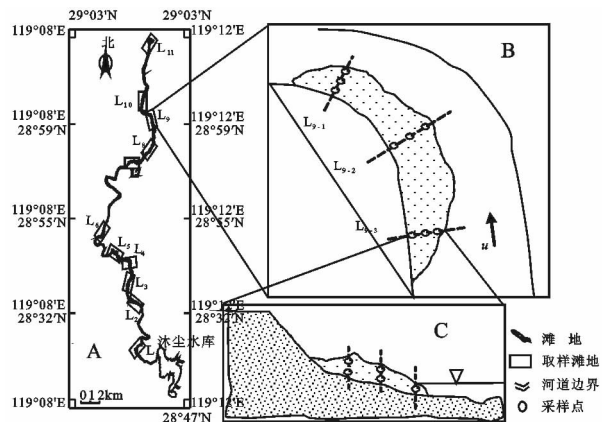


图 1 采样点布置

2.1.2 样品处理与指标测定 对土样,风干后采用沉降法测定粒径,并用国际制土壤分级标准进行分类。对砾石,采用图像处理法进行处理。拍摄的砾石照片先经 Adobe Photoshop CS6 校正后,用 Image J 进行二值化处理。根据已知长度和图像像素之间的关系进行转换,读取砾石直径。本文采用的砾石直径为 Feret 平均直径,处理过程如图 2 所示。

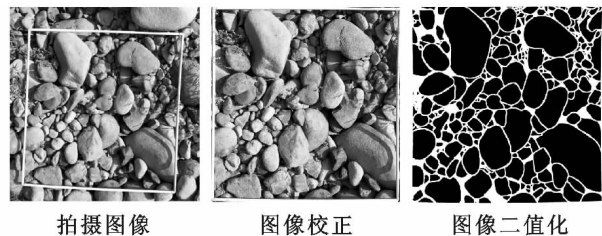


图 2 图像处理过程

2.2 分形维数计算方法 在指标测定的基础上,应用杨培岭等^[16]提出的质量分形模型计算沉积物的分形维数,即:

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

式中: $W(\delta < \bar{d}_i)$ 为小于 \bar{d}_i 累积颗粒质量(g); \bar{d}_i 为两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值(mm); W_0 为沉积物各粒级质量总和(g); \bar{d}_{\max} 为最大粒级颗粒的平均直径(mm); D 为颗粒的质量分形维数,对公式(1)两边取对数,得到:

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

根据实测值,运用最小二乘法进行线性拟合,得到直线斜率 k ,则分形维数 $D=3-k$ 。

2.3 数据处理方法

应用 SPSS 19.0 进行数据处理和组间方差分析(ANOVA),应用最小显著差数法(LSD)检验组间差异性显著水平($p<0.05$);应用 Origin 9.1 绘制数据处理和分析结果图。

3 结果与分析

3.1 滩地沉积物总体分布特征

灵山港沿线各区段沉积物质量分数及分形维数如

表 1 滩地沉积物分形维数和质量分数纵向分布

河段	质量分数/%		分形维数			R^2
	砾石	土壤	土壤	砾石	总体	
上游	31.78±13.87	68.22±13.87	2.454±0.036a	2.608±0.054a	2.739±0.042a	0.927
中游	22.68±16.61	77.32±16.61	2.525±0.004ab	2.765±0.012ab	2.764±0.008ab	0.939
下游	8.19±6.06	91.81±6.06	2.549±0.018b	2.713±0.092b	2.778±0.022b	0.924
平均	19.89±15.24	80.11±15.24	2.514±0.044	2.703±0.086	2.762±0.023	—

注:不同小写字母表示不同区段间差异显著($p<0.05$),下表同。

3.2 滩地土壤空间分布特征

在河道纵向上,土壤分形维数变化如图 3 所示,土壤分形维数呈现明显的区段性。其中,上游段土壤分形维数为 2.414~2.484,中游段土壤分形维数为 2.520~2.529,下游段土壤分形维数为 2.531~2.569。可见,从上游至下游,土壤分形维数呈增大趋势,表明土壤颗粒从上游至下游呈现细化特征。有研究表明,结构良好的土壤,分形维数应在 2.75 左右^[17],而灵山港滩地土壤分形维数均低于 2.75,呈现较为明显的砂性,土壤颗粒间的胶结效果较差,容易受到水流的冲蚀。

从上中下游中各选择一个滩地分析滩地土壤分形维数横向分布特征(图 4)。由图 4 可知,土壤分形维数呈明显的分区分布。总体而言,分形维数随离水距离的增大而增大,在离水距离 16 m 内,空间变异幅度较大,表明砂粒含量减小快,黏粒含量增加快,分形维数增加幅度大,将这一区域称为高变幅区。离水距离在 16~49 m 范围内,空间变异幅度减小,分形维数增长速率减小,将这一区域称为低变幅区。离水距离 49 m(变程)到滩地边界(上中下游滩地最大宽度分别为 64,61,67 m)范围内,半变异函数变化幅度均在 5%以内,无明显的空间变异性,表明土壤颗粒组成达到稳定值,因此将这一区域称为平稳区。

河道沿线各区段滩地土壤分形维数垂向分布特征如图 5 所示(不同大写字母表示不同深度间差异显著 $p<0.05$)。各区段滩地 0—20 cm 层土壤平均分形维数为 2.513,20—40 cm 层土壤平均分形维数为 2.529,0—20 cm 层内土壤分形维数值小于 20—40

表 1 所示。滩地沉积物以土壤为主,其质量分数从上游至下游逐渐增大,平均质量分数为 80.11%,砾石质量分数从上游至下游逐渐减少,平均值为 19.89%。以最小二乘法线性回归分析,得到各区段样品的线性拟合相关系数 R^2 均在 0.9 以上,表明灵山港滩地沉积物具有良好的分形特征。滩地沉积物平均分形维数为 2.762,上中下游滩地沉积物分形维数平均值分别为 2.739,2.764,2.778,沿程逐渐增大,其中上游沉积物分形维数最小,表明上游沉积物分选性最好。

cm 层。上中下游滩地 20—40 cm 分形维数较 0—20 cm 增幅分别为 3.18%,3.10%,2.95%,表明各区段滩地土壤层间变幅没有明显的差异。

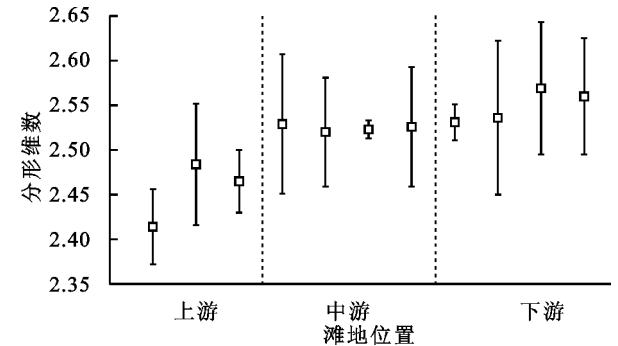


图 3 土壤分形维数纵向变化

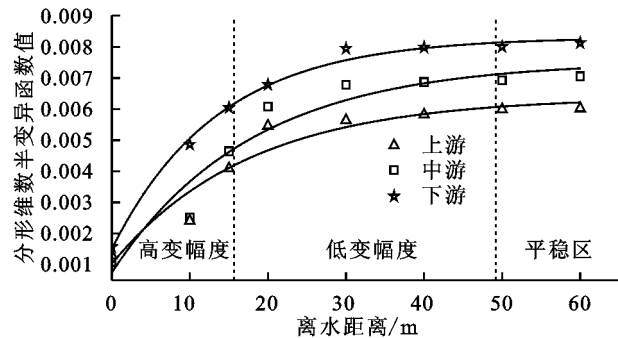


图 4 土壤分形维数横向变化

3.3 滩地砾石空间分布特征

砾石分形维数空间变化如图 6 所示。除个别滩地外,滩地砾石均以粒径为 100~300 mm 的颗粒为主,其质量分数为 62.94%~99.04%,而滩地 L_2, L_3, L_{11} 则以粒径为 20~100 mm 的颗粒为主,其中滩地 L_{11} 质量分数最高,为 2.79%。从图 6 中可以看出,从

上游到下游砾石分形维数总体呈增大趋势,而且,当粒径为 20~100 mm 的颗粒质量分数越高,100~300 mm 的颗粒质量分数越低时,砾石分形维数越大。

从河道横断面上,滩地砾石主要分布在离水边缘 4~33.5 m 范围内,并且在该范围内,砾石分形维数随着离水距离的增大而增大。

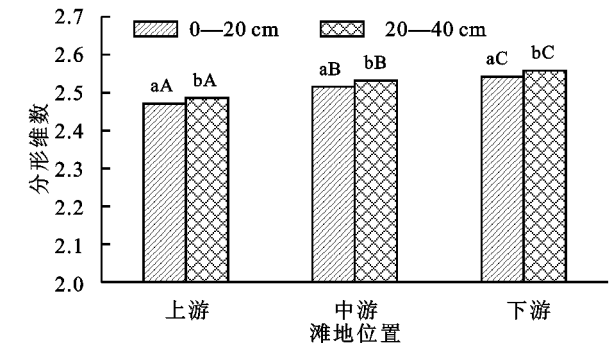


图 5 土壤分形维数垂向变化

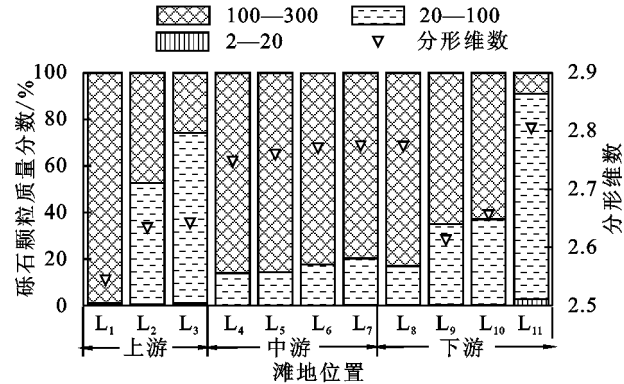


图 6 砾石分形维数纵向变化

3.4 滩地沉积物空间分布影响机制

总体而言,灵山港滩地沉积物分布主要受水流、滩地地形、植被以及人为采砂的影响。沉积物在河道纵向上呈明显的分段分布,这主要受水流的影响。汛期时,滩地被淹没,湍急的水流携带源头颗粒物进入上游滩区,由于漫滩水流动能小于主河槽水流动能,粗颗粒首先沉积^[18]。中下游河道坡降减小,水流挟沙能力降低,较细的颗粒开始沉积。

沉积物在河道横断面上呈明显的分区分布,这主要受植被、采砂和滩地地形的影响。随着离水距离的增加,滩地高程逐渐增大,漫滩水流能量降低,限制了粗颗粒扩散,这一结果与 Asselman 等^[19]的发现一致。在部分存在采砂坑的滩地内,采砂坑中的积水与河道形成压力差,促进细颗粒对流^[20],细颗粒含量增加。另外,随着离水距离增加,滩地植被丰富度增大^[6],植被根系拦截细颗粒含量增大^[21],这进一步促使细颗粒在远离河道的滩地上沉积。

沉积物在垂向上呈明显的层状分布,这主要受周期性洪水的影响。由于周期性洪水作用,粗颗粒在表层富

集,表层沉积物结构疏松,水分下渗强度较大,导致细颗粒由表层向下层运移并沉积^[22],从而造成垂向上沉积物分形维数逐渐增大且差异性不显著的分布特征。

4 结 论

(1) 滩地沉积物平均分形维数为 2.762,其中土壤平均分形维数为 2.514,砾石平均分形维数为 2.703。滩地沉积物在空间分布上差异性显著,具有明显的分段、分区、分层特征。土壤分形维数从上游至下游呈增大趋势;在河道横断面上,离水 0~16 m 为土壤分形维数的高变幅区,离水 16~49 m 为低变幅区,离水 49 m 到滩地边界为平稳区;垂向上,0—20 cm 层土壤分形维数小于 20—40 cm 层。砾石分形维数从上游至下游逐渐增大;在河道横断面上,砾石主要分布在离水边缘 4~33.5 m 范围内,在该范围内,砾石分形维数随离水距离增大而增大。

(2) 灵山港滩地沉积物分布主要受水流、滩地地形、植被以及人为采砂的影响。在纵向上主要受水流影响;在横向上主要受植被、采砂和滩地地形的影响;在垂向上主要受周期性洪水的影响。

(3) 在滩地生态修复时,需根据沉积物在三维方向的分段、分区和成层分布特点,适当调整或配置基质组成,尤其是对于存在采砂坑的滩地,在修复时需外运填料,按照基质组成的配比关系进行配置。

参考文献:

[1] 夏继红,鞠蕾,林俊强,等.河岸带适宜宽度要求与确定方法[J].河海大学学报:自然科学版,2013,41(3):229-234.

[2] 高传友,赵清贺,刘倩.北江干流河岸带不同植被类型土壤粒径分形特征[J].水土保持研究,2016,23(3):37-42.

[3] 黄进良.洞庭湖湿地的面积变化与演替[J].地理研究,1999,18(3):297-304.

[4] 伊紫函,夏继红,汪颖俊,等.基于形态指数的山丘区中小河流滩地分类方法及演变分析[J].中国水土保持科学,2016,14(4):128-133.

[5] 汪颖俊,张琦,程越洲,等.论山丘区中小河流滩地生态修复体系构建[J].中国水土保持,2017(6):57-59.

[6] 余根听,夏继红,毕利东,等.山丘区中小河流边滩植被分布驱动因子及响应关系[J].中国水土保持科学,2017,15(2):51-61.

[7] 庞家珍,司书亨.黄河河口演变:Ⅱ.河口水文特征及泥沙淤积分布[J].海洋与湖沼,1980,11(4):295-305.

[8] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].生态环境学报,2000,9(4):7-9.

[9] 张海廷,时延庆.山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征[J].水土保持研究,2018,25(1):126-138.

- 效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191.
- [9] 张陈俊, 章恒全, 陈其勇, 等. 中国用水量变化的影响因素分析: 基于 LMDI 方法[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1308-1322.
- [10] 张陈俊, 章恒全, 张丽娜. 基于多层次 LMDI 方法的中国水资源消耗变化分析[J]. 统计与决策, 2016, 27(3): 98-102.
- [11] 叶凯, 章恒全, 张陈俊. 基于 LMDI 的区域因素与水资源消耗强度变化关系的研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(5): 95-99.
- [12] 张强, 王本德, 曹明亮. 基于因素分解模型的水资源利用变动分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1209-1216.
- [13] Ang B W, Huang H C, Mu A R. Properties and linkages of some index decomposition analysis methods [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4624-4632.
- [14] Ang B W, Lee S Y. Decomposition of industrial energy consumption: Some methodological and application issues [J]. *Energy Economics*, 1994, 16(2): 83-92.
- [15] Ang B W, Zhang F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies [J]. *Energy*, 2000, 25(11): 1149-1176.
- [16] 杨雅雪, 杨井, 许玉凤, 等. 基于 LMDI 方法的新疆生产用水变化分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 67-76.
- [17] 李艳娟. 济南市水资源生态足迹计算与水环境压力分析[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- [18] 方伟成, 孙成访, 郭文显. 基于 LMDI 法东莞市水资源生态足迹影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 115-117.
- [19] 马剑锋, 秦腾, 佟金萍. 干旱区水资源生态足迹变动及影响因素的分析[J]. 统计与决策, 2016, 26(18): 100-103.
- [20] 洪思扬, 王红瑞, 朱中凡, 等. 辽宁省水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水利经济, 2016, 34(3): 46-53.
- [21] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1280-1286.
- [22] 李丹. 基于水生态足迹的水资源可持续利用评价: 以河西内陆河流域为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [23] 张义. 基于生态足迹模型的广西水资源利用评价[J]. 人民黄河, 2014, 36(2): 58-61.
- [24] 葛通达, 卞志斌, 方红远, 等. 基于因素分解法的区域水资源利用驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, (8): 98-101.
- [25] 孙学颖, 唐德善. 广西水资源生态足迹时空分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 34-37.
- [26] 盖东海. 河北省水资源可持续利用研究: 基于生态足迹法[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2012.
- [27] 吴全志. 基于 ARIMA 模型的贵州省水资源生态足迹动态变化和预测分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- [28] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 等. 城市水生态足迹变化分析与模拟[J]. 资源科学, 2006(5): 152-156.
- [29] 胡永红, 吴志峰, 李定强, 等. 基于 ARIMA 模型的区域水生态足迹时间序列分析[J]. 生态环境, 2006(1): 94-98.

~~~~~

(上接第 369 页)

- [10] 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤颗粒组成及分形特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 84-93.
- [11] 马媛, 丁树文, 邓羽松, 等. 五华县崩岗洪积扇土壤分形特征及空间变异性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 279-285.
- [12] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 等. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 134-138.
- [13] 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.
- [14] 王清, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 496-498.
- [15] 徐永福, 董平. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 400-405.
- [16] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [17] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇, 等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 92-94.
- [18] 李彬, 郭志学, 陈日东, 等. 变坡陡比降河道强输沙下泥沙淤积与水位激增的试验研究[J]. 泥沙研究, 2015(3): 63-68.
- [19] Asselman N E M, Middelkoop H. Floodplain sedimentation: Quantities, patterns and processes[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1995, 20(6): 481-499.
- [20] He Q, Walling D E. An investigation of the spatial variability of the grain size composition of floodplain sediments[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 12(7): 1079-1094.
- [21] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. The characteristics of overbank deposits associated with a major flood event in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK[J]. *Catena*, 1997, 31(1/2): 53-75.
- [22] 王冬冬, 高磊, 陈效民, 等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J]. 土壤, 2016, 48(2): 361-367.