

风水两相侵蚀条件下流域泥沙粒径分布分形维数特征

——以黄河上游内蒙古段西柳沟为例

阳辉^{1,2}, 师长兴^{1,2}, 姚海芳^{1,2}

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 研究在风水两相侵蚀条件下流域泥沙粒径分布分形维数特征, 为风水两相侵蚀产沙和高含沙水流侵蚀产沙的治理等问题的研究提供理论和试验依据。[方法] 选取位于黄河上游内蒙古段的西柳沟流域为例, 采集沉积物表层样, 利用激光粒度仪对 43 个样点的泥沙粒度组成进行分析, 采用分形理论, 结合方差分析以及 K 均值聚类法进行分析和研究。[结果] (1) 不同沉积环境下泥沙粒径分布分形维数不同, 以水力侵蚀为主的丘陵沟壑区分形维数平均值最大, 为 2.48; 以风力侵蚀为主的沙漠区分形维数平均值最小, 为 1.95。(2) 对于西柳沟流域, 泥沙颗粒组成中粒径在 0.05 mm 以下的含量越高, 粒径越离散, 分维值越高; 粒径在 0.05~1 mm 之间的颗粒含量越高, 分形维数越低; 粒径在 1 mm 以上的颗粒含量与分形维数关系不明显。相对来说, 粉粒含量对于分形维数的影响大于黏粒含量。[结论] 地貌条件主要影响的是河床样的泥沙粒径组成, 产沙层土样的颗粒组成不受地貌条件的影响, 河滩样的泥沙粒径组成受地貌条件和沉积环境的双重影响。

关键词: 西柳沟; 风水两相; 泥沙; 分形维数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0084-06

中图分类号: K903

文献参数: 阳辉, 师长兴, 姚海芳. 风水两相侵蚀条件下流域泥沙粒径分布分形维数特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 84-89. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.015

Fractal Dimension of Sediment Particle Size Distribution in Catchment with Coupled Wind-Water Erosion Processes

—A Case Study at Xiliugou Catchment in Upper Reaches of Yellow River in Inner Mongolia

YANG Hui^{1,2}, SHI Changxing^{1,2}, YAO Haifang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The fractal dimension of particle size distribution in a basin with coupled wind-water erosion processes was studied to provide theoretical and experimental basis for the research and control of coupled wind-water erosion and hyper-concentrated flow sediment. [Methods] Xiliugou catchment, which is located in the upper stream of the Yellow River in Inner Mongolia Autonomous Region, was selected as the study area. Total 43 Surface sediment samples at different locations were collected in the catchment. The sediment grain size composition was measured by a laser particle size analyzer. Based on the fractal theory and using the ANVOA and K -means cluster methods, the fractal dimensions of particle size distribution in the Xiliugou catchment were obtained and its influencing factors were analyzed. [Results] (1) The fractal dimension of particle size distribution varied under different depositional environment. The highest fractal dimension (2.48) was found in the hilly-gullies region where water erosion prevail, and the lowest (1.87) in the desert region, where wind erosion is much active. (2) The fractal dimension increased with the increase of

收稿日期: 2015-08-04

修回日期: 2015-09-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄河上游十大孔兑流域泥沙输移过程及机制研究”(41371036); 国家重点基础研究(973)研究发展计划(2011CB403305)

第一作者: 阳辉(1988—), 女(汉族), 湖南省常宁市人, 博士研究生, 研究方向为河流过程与环境治理。E-mail: yangh.14b@igsnr.ac.cn.

通讯作者: 师长兴(1963—), 男(汉族), 河北省正定县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域泥沙输移、河流地貌和环境治理等方面的研究。E-mail: shicx@igsnr.ac.cn.

particles content lower than 0.05 mm, but decreased with the increase of particles content within 0.05~1 mm. The relation between the fractal dimension and the content of particles larger than 1 mm was not significant. The influence of silt content on the fractal dimension was greater than that of clay content. [Conclusion] The sediments on river bed in different geomorphic units had significant discrepant particle size composition and the particle size composition of sediments on berms changed evidently both in different geomorphic units along the river and in different depositional environment within the floodplains. The particle size composition of sediment sources, the regolith or loess, did not show obviously variations between different geomorphic units.

Keywords: Xiliugou catchment; wind-water erosion; sediments; fractal dimension

泥沙粒径分布 (particle size distribution, PSD) 作为重要的泥沙物理属性,对研究泥沙的侵蚀、搬运、堆积规律以及河床的演变具有重要的意义^[1]。分形理论已被广泛应用于自然科学和社会科学的几乎所有的领域,成为国际上科学领域的前沿研究课题之一。在国内,分形理论在地理学中的应用自 20 世纪 90 年代以来逐渐活跃起来,应用日益广泛,并在地貌学、城市地理学、地图学和遥感等分支学科取得了较大进展^[2]。泥沙作为一种具有自相似结构的多孔介质,可以利用分形几何学来研究其性状特征,因此分形理论的运用成为表征 PSD 的主要进展之一^[3]。目前,泥沙颗粒物表面存在分形特征已经成为各研究学者的共识^[4],众多学者在这方面做了大量工作。主要集中在两类:(1) 不同地貌、不同土地利用类型、不同沉积环境下土壤粒径分形特征^[5-8];(2) 典型区域下土壤粒度分形特征,如黄土高原典型土壤剖面^[9]、黄土丘陵沟壑区土壤^[5]、北京山区土壤^[10]、红壤丘陵区耕层土壤^[11]、干旱区植被恢复过程中土壤^[12]、绿洲农田土壤^[13]、河流干旱河谷土壤^[14]等的粒度分形特征。然而,目前关于泥沙粒径分形维数与泥沙侵蚀程度的相关性报道较少。因此,本研究将结合这两类问题,分析位于鄂尔多斯高原地区风水两相侵蚀区泥沙分布分形维数特征。黄河上游内蒙古河段南岸的十大孔兑(孔兑为蒙语“山洪沟”的音译),位于干旱半干旱气候区,降水量虽然不大,但很集中,且常常形成极强的暴雨,加上该流域自身的地貌条件—上游为薄层黄土覆盖的“砒砂岩”,其特征是厚度大、结构松散、极易风化、遇水成泥、遇风成砂,中游为库布齐沙漠,使得该区域成为了典型的风水两相侵蚀区。同时,由于该流域河长较短,比降陡,坡面植被少,侵蚀模数高,一遇大暴雨往往形成峰高量大、含沙量高的洪水涌入黄河,极易形成沙坝堵塞黄河,导致黄河防洪防凌形势严峻,影响沿岸人民生活、生命财产安全,制约社会经济发展^[15]。目前,对于 10 大孔兑的研究主要集中于泥沙的产输沙关系和侵蚀产沙与风水两相作

用及高含沙水流的关系^[16-17]。对于泥沙本身的重要物理属性之一的粒度研究鲜有报道,因此,本研究选取了 10 大孔兑之一的西柳沟为研究区,结合实地考察,在 2014 年 11 月(非汛期),对西柳沟流域的 43 个采样点进行取样,对其进行粒度分析,利用分形原理,研究其泥沙粒径分布分形维数特征及其影响因素,以期为开展西柳沟的其他研究提供第一手的基础资料,对西柳沟流域泥沙的粒径组成有一个大致的认识。同时,为风水两相侵蚀产沙和高含沙水流侵蚀产沙的治理以及解决大量粗沙入黄问题提供理论。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西柳沟是位于黄河右岸的一级支流,是内蒙古境内直接入黄的 10 大孔兑之一。该沟发源于鄂尔多斯高原北缘丘陵沟壑区,流域面积 1 356 km²,河长 106.5 km,海拔 1 008~1 392 m,河道平均比降为 3.6‰。属于温带大陆性季风气候,流域干旱少雨,降雨主要以暴雨形式出现,暴雨产生峰高量少、陡涨陡落的高含沙量洪水。汛期 7—10 月沙量占年沙量的 98%以上,绝大多数洪水发生时间均在 7 月上旬至 8 月下旬。流域地形南高北低,从南到北直入黄河。沿程地貌和地表物质组成均有明显变化,上游为丘陵沟壑区,出露砒砂岩,并有沙黄土覆盖,占流域总面积的 64.6%,地表支离破碎,沟壑纵横,植被稀疏,水土流失严重,土壤侵蚀以水力侵蚀为主,侵蚀模数为 9 000 t/(km²·a)左右;中游为沙漠,占总面积的 20.7%,冬季和春季风沙活动强烈,大量风沙可直接被大风吹入河道,属风力剧烈侵蚀区,侵蚀模数在 3 000 t/(km²·a)左右;下游为冲积—洪积平原区,占总面积的 14.7%,河槽宽浅,游荡多变,泥沙大量落淤,河床抬高,遇到暴雨时,洪水又把堆积在河道的泥沙带入黄河^[16,18]。

1.2 采样及分析方法

根据西柳沟流域所处的特殊水文地质条件并结

合现场实地考察,从上游到下游共布设 43 个采样点,依次为 XLG₁₋₄₃。依照不同的地貌单元将这 43 个样分为 3 组:(1) 丘陵沟壑区(18 个样):包括冲沟、产沙层(砒砂岩风化物或黄土)土样、河滩、和河床样,为 XLG₁₋₁₈; (2) 沙漠区(10 个样):库布齐沙漠沙丘样(4 个样),包括有植被的固定沙丘和没有植被的移动沙丘,产沙层土样(3 个样)以及沙丘底部的河床样(3 个样),为 XLG_{19-27,30}; (3) 冲、洪积平原区(15 个样):包括河床及高、低滩地样,为 XLG_{28-29,31-43}。所有样品均取沉积物表层样,取样时间为 2014 年 11 月初(枯水期且未封冻)。采得样品放入聚乙烯塑料袋带回实验室进行分析。样品经室内自然风干后,过 1 mm 的筛子,剔除杂草及根系。1 mm 以上的样品采用筛分法并计算得出其质量百分比,1 mm 以下通过去除有机质、碳酸盐,并分散 1 min 后,采用激光粒度仪 Mastersizer 2000 测量泥沙粒径的体积百分比。最后,通过加权法计算出泥沙在各个级配下的粒径组成。

1.3 粒径分形理论

用于研究沉积物的粒度分形,属于自然界的碎形现象,为统计分形。用 D 表示分维值的大小。分形维数 D 能够定量刻画粒径分形特征,可反映地表土壤(泥沙)的复杂度及破碎度。其计算最初是由 Tyler 等^[19]提出的三维空间体积分维模型。由于土壤粒径分布的体积当时难以获得, Tyler 等^[19]和 杨培岭^[20]分别把它修改为颗粒的质量分维模型。近年来由于激光粒度仪的普遍使用,容易测得土壤颗粒的体积含量,王国梁等^[21]推导出与质量分形维数模型相似的体积分形维数计算公式,并认为体积分形维数因为不需要做不同粒级土壤具有相同密度这一假设,因此较之质量分维模型更具有合理性,其推导出的计算公式为:

$$\lg\left[\frac{V(r < R_i)}{V_T}\right] = (3-D)\lg\frac{R_i}{R_{\max}} \quad (1)$$

式中: V ——粒径 r 小于某一特征尺度 R_i 的土壤颗粒累积体积百分含量(%); V_T ——土壤颗粒总体积百分含量(%); R_{\max} ——测量范围的最大粒径(2 mm)。

实际上 $V(r < R_i)/V_T$ 就是粒径小于 R_i 的颗粒的累积体积百分含量。计算中 R_i 取某级粒级中的上限值和下限值的平均数。以 $\lg[V(r < R_i)/V_T]$ 为纵坐标, $\lg(R_i/R_{\max})$ 为横坐标作图,其拟合的直线斜率即等于 $3-D$,进而求出 D 值。

1.4 数据处理

通过测量得到的泥沙粒径体积百分含量导入

Excel 进行分形维数 D 值计算,同时,采用 SPSS 20.0 进行数据的相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 分形维数的分布特点

根据体积分形维数计算公式计算得到的 43 个泥沙样品在各个级配下的分形维数 D 值如图 1 所示。由图 1 可见,西柳沟流域泥沙分形维数分布在 1.29~2.80 之间。按地貌特征,将西柳沟流域从上到下划分为 3 个地貌单元,求不同地貌单元内泥沙粒径分布分形维数平均值,可以发现地貌单元间存在不同的泥沙粒径分布分形维数。上游丘陵沟壑区分形维数平均值最大,为 2.48;下游冲、积平原区次之,为 2.28;中游沙漠区最小,为 1.95。对于沙漠区和冲、洪积平原区,区内不同沉积环境的泥沙样的分形维数差异也较大。由此可知,西柳沟流域泥沙粒径分形维数变化与其所在的地貌单元及沉积环境有关。分形维数可以表征沉积物粒径组成的复杂程度。以水力侵蚀为主的丘陵沟壑区泥沙破碎程度大,形成的泥沙粒度组成范围宽,分维数最大,以风力侵蚀为主的沙漠区泥沙破碎程度小,形成的泥沙粒度组成范围窄,分维数最小。

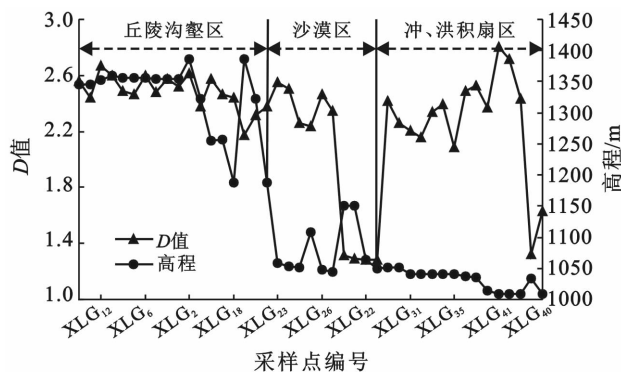


图 1 西柳沟流域泥沙粒径分形维数分布

2.2 分形维数与体积百分含量的关系

在粒度测定中,输出测试结果的粒径从 <0.001 ~3 mm 共分为 19 个等级。为揭示泥沙各粒径体积百分含量的组成与分形维数之间的关系,根据国际标准对泥沙粒径分组:0~0.002 mm 为黏粒,0.002~0.05 mm 为粉粒,0.05~1 mm 为砂粒,1~3 mm 为石砾。对分形维数与各粒径组百分含量进行回归可知,分形维数与黏粒($R^2=0.992, p<0.0001$)和粉粒($R^2=0.975, p<0.0001$)含量呈极显著正相关关系,与砂粒含量呈显著负相关关系($R^2=-0.677, p<0.0001$),与石砾含量相关性不显著($R^2=0.208,$

$p=0.181$)。由此可见,对于西柳沟流域,泥沙颗粒组成中粒径在 0.05 mm 以下的含量越大,粒径越离散,分形值越高;0.05~1 mm 之间的颗粒含量越大,分形维数越低;分形维数与粒径在 1 mm 以上的含量无关。由回归分析结果可知,泥沙中黏粒和粉粒含量越高,分形维数越大,而砂粒含量越高,分形维数越小。为进一步探究泥沙中的这 3 种粒径含量对于分形维数的贡献率,将 3 个粒径体积百分含量与 D 值进行多元逐步回归分析,得到 D 值与黏粒(x_1)、粉粒(x_2)和砂粒(x_3)的回归方程为:

$$D=0.211x_1+0.519x_2-0.378x_3 \quad (2)$$

$$(R=0.693, n=43, p<0.000 1)$$

可见,粉粒含量对于分形维数的影响大于黏粒和砂粒含量。

3 讨论

3.1 分形维数无标度区的确定

在利用幂指数法求取分形值时,必须注意的是 R 值的上、下限即无标度区的问题。所谓无标度区是指分形关系成立的尺度范围,是统计分形中的一个重要的界定^[22]。此定义并没有界定一个统一明确的无标度区。目前,研究者多在此定义的基础上依据各自的经验而定。对于每个样品,无标度区若取值区间不同,求得的分形值也会有差异^[7]。根据粒径分组进行标度区的划分,从而计算分形维数。根据上文计算的分形维数的拟合曲线可知,除了采样点 XLG₄₁ 和 XLG₄₂ 拟合曲线的相关系数分别为 0.77 和 0.88,其他采样点的相关系数均在 0.9 以上,说明对以黏粒(0~0.002 mm)、细粉粒(0.002~0.01 mm)、粗粉粒(0.01~0.05 mm)、细砂(0.05~0.25 mm)、粗砂(0.25~1.0 mm)和石砾(1~3 mm)界定 R 值的上下限计算得到的西柳沟泥沙粒径分形维数基本合适。因此,在计算分形维数时,可以以泥沙的质地(黏粒、粉粒、砂粒和石砾)进行标度区的划分。

3.2 分形维数与沉积环境及地貌单元的关系

为探究泥沙分形维数与地貌单元和沉积环境之间的关系,采用方差分析(ANOVA)对不同的地貌单元及沉积环境下的 D 值进行多重分析比较。结果表明不同的地貌条件和不同的沉积环境对于 D 值的改变均具有显著性影响。进一步采用 LSD 和 Tukey 法进行检验。检验结果表明,就地貌单元而言,3 种地貌单元之间均存在显著性差异;就沉积环境而言,风成沙和河床样与其余的样之间均存在显著性差异,冲沟、河滩和产沙层(砒砂岩风化物或黄土)土样之间

不存在显著性差异。同时,在丘陵沟壑区的产沙层对于全流域的泥沙粒径组成影响是最大的。为进一步探讨 D 值变化与地貌单元和沉积环境的联系,采用 K-均值聚类将 43 个样点分成 3 类。聚类结果显示, D 值大于 2.408 5 被归为 1 类(共 14 个采样点),大于 1.816 9 被归为 2 类(共 23 个采样点),小于 1.816 9 被归为 3 类(共 6 个采样点)。由表 1 可知,丘陵沟壑区和沙漠区的产沙层土样基本都属于 2 类,由此判断,产沙层土样的颗粒组成与所在的地貌单元无关;来自丘陵沟壑区的冲沟中土样均属于 1 类,说明所有的冲沟中土样泥沙粒径组成具有相似性;对于河床样,来自丘陵沟壑区的都属于 1 类,来自沙漠区的存在 1,2 两类,而冲积平原的河床样都属于 3 类,从而判断冲积平原的河床样与其他两种地貌条件下的河床样差异较大;在丘陵沟壑区和冲积平原区的河漫滩样都存在 1,2 类,说明同一地貌单元和相同沉积环境下河漫滩样也存在差异。综上可知,地貌单元差异主要影响的是河床样的泥沙粒径组成,产沙层土样的颗粒组成与所在的地貌单元无关,河漫滩样较大的泥沙粒径组成变化说明除地貌单元差异的作用外,河漫滩内还存在明显的沉积环境变化。

3.3 分形维数与风水两相侵蚀

根据许炯心^[16]的研究可知,西柳沟为典型风水两相侵蚀区,即在少雨的春冬季,风沙活动强烈,使得中游的库布齐沙漠的大量风沙被吹入河道,而到了夏季,上游的砒砂岩区的暴雨洪水携大量细颗粒泥沙,形成高含沙水流,经过沙漠区时带走之前储存在河道的风成沙,形成含沙更高的水流进入下游冲积平原区。平原区河道比降明显下降,河宽增大,这就使得高含沙水流可能失去稳定输送条件^[23],部分粗颗粒在下游淤积下来。在这个过程中,由于中游风成沙(据沙漠沙样品粒度组成分析结果,0.05~1 mm 粒径占 99%以上)的加入,使得高含沙水流经过沙漠区时所堆积下来的物质含有更多的砂粒组分。从上文分析可知,砂粒含量越高,分形维数越低。因此,中游泥沙粒度分布分形维数低于上游。在下游,泥沙沉积过程中粗颗粒更容易落淤,沉积物的砾石组分相对提高,砂粒(0.05~1 mm)含量相对降低,泥沙粒径组成离散程度增大,造成分形值又有所升高,但是由于下游没有细颗粒(<0.05 mm)的泥沙进入,使得下游泥沙粒度分布分形维数仍低于上游。由此造成了西柳沟流域泥沙颗粒组成分形维数沿途呈现出“高一低一中”的分布特征。其中,中游分形维数的降低体现了风力侵蚀对流域产输沙的影响。

表 1 各采样点聚类分析结果

采样点	聚类结果	地貌单元	沉积环境	采样点	聚类结果	地貌单元	沉积环境
XLG ₁	1	丘陵沟壑	河床	XLG ₂	2	丘陵沟壑	河滩
XLG ₁₃	1	丘陵沟壑	河床	XLG ₃	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₁₄	1	丘陵沟壑	河滩	XLG ₄	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₁₇	1	丘陵沟壑	河滩	XLG ₅	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₂₁	1	沙漠区	河床	XLG ₆	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₂₇	1	沙漠区	河床	XLG ₇	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₂₉	1	冲积平原	河滩	XLG ₈	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₃₀	1	沙漠区	产沙层	XLG ₉	2	丘陵沟壑	冲沟
XLG ₃₁	1	冲积平原	河滩	XLG ₁₀	2	丘陵沟壑	产沙层
XLG ₃₂	1	冲积平原	河滩	XLG ₁₁	2	丘陵沟壑	产沙层
XLG ₃₃	1	冲积平原	河滩	XLG ₁₂	2	丘陵沟壑	产沙层
XLG ₃₄	1	冲积平原	河滩	XLG ₁₅	2	丘陵沟壑	河滩
XLG ₃₅	1	冲积平原	河滩	XLG ₁₆	2	丘陵沟壑	河滩
XLG ₃₉	1	冲积平原	河滩	XLG ₁₈	2	丘陵沟壑	河滩
XLG ₁₉	3	沙漠区	风成沙	XLG ₂₃	2	沙漠区	产沙层
XLG ₂₀	3	沙漠区	风成沙	XLG ₂₄	2	沙漠区	产沙层
XLG ₂₂	3	沙漠区	风成沙	XLG ₂₆	2	沙漠区	河床
XLG ₂₅	3	沙漠区	风成沙	XLG ₂₈	2	冲积平原	河滩
XLG ₃₇	3	冲积平原	河床	XLG ₃₆	2	冲积平原	河滩
XLG ₄₀	3	冲积平原	河床	XLG ₃₈	2	冲积平原	河滩
XLG ₄₂	2	冲积平原	河滩	XLG ₄₁	2	冲积平原	河滩
XLG ₄₃	2	冲积平原	河滩				

4 结论

(1) 不同沉积环境下泥沙粒径分布分形维数不同,以水力侵蚀为主的丘陵沟壑区分形维数平均值最大,为 2.48;以风力侵蚀为主的沙漠区分形维数平均值最小,为 1.87。

(2) 对于西柳沟流域,泥沙颗粒组成中粒径在 0.05 mm 以下的含量越大,粒径越离散,分形值越高;粒径在 0.05~1 mm 之间的颗粒含量越高,分形维数越低;粒径在 1 mm 以上的颗粒含量与分形维数关系不明显。相对来说,粉粒含量对于分形维数的影响大于黏粒含量。

(3) 地貌条件主要影响的是河床样的泥沙粒径组成,河滩样的泥沙分形维数除受地貌条件影响外,还受河漫滩身存在的较大的沉积环境变化影响,产沙层土样的分形维数与所在地貌单元无关。

(4) 由于风水两相侵蚀的交互作用使得西柳沟流域泥沙分布呈现出与其他流域泥沙不一样的分布特征,本研究将泥沙粒径的分形维数与该流域的泥沙侵蚀搬运动力之间的关系进行分析,这是本研究的创新之处。但是,本研究仅做了定性分析,至于分形维数与侵蚀量之间的定量关系,需今后进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Bayat H, Rastgo M, Zadeh M, et al. Particle size distribution models, their characteristics and fitting capability [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529(3):872-889.
- [2] 秦耀辰,刘凯.分形理论在地理学中的应用研究进展[J].地理科学进展,2003,22(4):426-436.
- [3] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: A review [J]. Soil & Tillage Research, 1995,36(1/2):1-20.
- [4] 周银军,陈立,刘同宦.分形理论在泥沙研究中的应用概述[J].泥沙研究,2012(2):73-80.
- [5] 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:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2007,27(7):3081-3089.
- [6] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(9):155-167.
- [7] 陈冬梅,穆桂金.不同沉积环境下沉积物的粒度分形特征的对比研究[J].干旱区地理,2004,24(1):47-51.
- [8] Posadas A N D, Gimenez D, Bittelli M, et al. Multi fractal characterization of soil particle-size distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001,65(5):1361-1367.
- [9] 党亚爱,李世清,王国栋,等.黄土高原典型土壤剖面土

- 壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
- [10] 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 65-70.
- [11] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒分形研究[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 617-621.
- [12] 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): 518-525.
- [13] GUI Dongwei, LEI Jiaqiang, ZENG Fanjiang, et al. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands: A case study of the Cele Oasis [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11): 1306-1311.
- [14] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 120-125.
- [15] 周丽艳, 崔振华, 廖晓芳. 黄河上游西柳沟流域水土保持治理及水沙置换初步探讨[J]. 泥沙研究, 2012(1): 63-67.
- [16] 许炯心. “十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J]. 泥沙研究, 2013(6): 28-37.
- [17] 刘韬, 张士锋, 刘苏峡. 十大孔兑暴雨洪水产输沙关系初探: 以西柳沟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(3): 18-21.
- [18] 郭彦, 侯素珍, 林秀芝. 近 51 a 西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 176-183.
- [19] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [20] 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.
- [21] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- [22] 陈隅, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- [23] 许炯心. 高含沙曲流河床的形成机理[J]. 科学通报, 1989, 34(21): 1649-1651.

(上接第 83 页)

- [8] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(1): 1-61.
- [9] Sovacool, B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment I Energy Policy, 2010, 38(9): 4856-4869.
- [10] Yoon S Y, Kim Y R, Kim T H et al. Study of Garlic's Carbon Footprint though LCA [J]. Korea Journal of Organic Agriculture, 2012, 20(2): 161-172.
- [11] 黄贤金, 葛扬, 叶堂林, 等. 循环经济学[M]. 江苏南京: 东南大学出版社, 2009.
- [12] 郭运功. 特大城市温室气体排放量测算与排放特征分析: 以上海为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [13] 赖力, 黄贤金, 刘伟良. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析: 以 2002 年江苏为例[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1285-1292.
- [14] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057.
- [15] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1639-1649.
- [16] 赵荣钦, 城市系统碳循环及土地调控研究[M]. 江苏南京: 南京大学出版社, 2012.
- [17] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [18] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 北京气象出版社, 2000.
- [19] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 1-6.