

渭河咸阳段近代洪水沉积物粒度分形特征研究

史兴民¹, 韩艳²

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:对渭河咸阳段高漫滩沉积物的粒度分形进行了研究。首先确定沉积物粒度分布具有分形特征的无标度区,然后计算出分维数。在无标度区范围内相关系数 R^2 均大于 0.95,沉积物粒度平均分维值为 2.12,说明沉积物粒度分布具有很好的分形特征。将分维值作为一种新的沉积物粒度分析参数,与其传统粒度参数如平均粒径、标准偏差(σ)、偏度(SK)、峰度(KG)进行比较,利用 SPSS 软件分析 Pearson 相关系数,得出粒度分维值与其平均粒径的相关系数为 0.807,与其标准偏差的相关系数为 0.707,与其峰度的相关系数为 0.675,与其偏度的相关系数为 0.112。分析结果表明,沉积物粒度分维值与其平均粒径、标准偏差、峰度呈现明显的正相关关系,与其偏度呈现出并不明显的正相关关系。

关键词:分形理论;渭河洪水沉积物;粒度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0022-05

中图分类号: X141, TV141

Grain-Size Fractal Characteristics of Fluvial Sediment in Xianyang Section of Weihe River

SHI Xing-min¹, HAN Yan²

(1. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Fractal theory was applied to analyze grain size distribution of the sediment of Weihe River in Xianyang City. The fractal scaleless range and the fractal dimension of grain size distribution were determined. In the non-scaled range, the correlation coefficients (R^2) of 53 samples were all higher than 0.95 and the average fractal dimension was 2.12, which shows that the distribution of sediment particle size exhibited good fractal characteristics. The fractal dimension as a new parameter of sediment grain size analysis was compared with traditional granularity index such as mean-diameter (Φ), standard deviation (σ), skewness and kurtosis. The correlation coefficients of fractal dimension of sediment grain size with mean diameter, standard deviation, kurtosis and skewness are 0.807, 0.707, 0.675, and 0.112, respectively, implying fractal dimension correlated significantly positively with mean diameter, standard deviation and kurtosis, but insignificantly positively with skewness.

Keywords: fractal theory; sediment of Weihe flood; grain size

沉积物的粒度分布特征可以反映沉积物的来源、沉积环境,特别是沉积动力等特征^[1-3],但是以往多用一些粒度统计参数如平均粒径、中值粒径、偏度和峰度等来描述。现在许多学者利用分形理论的方法研究了多种沉积物粒度的分布特征,如南京市江北地区下蜀黄土^[4]、冻土^[5]、湖泊沉积物^[6]等,结果表明沉积物的粒度分布具有一定标度范围内的自相似性即分形特征,显然传统的粒度统计参数无法描述这种分形特征。但是前人对沉积物粒度分维结果研究的较多,而对传统粒度统计参数的关系研究较少,使用统计检

验来分析两者关系的研究就更少了。本文对咸阳段渭河高河漫滩剖面的 53 个样品利用分形理论进行沉积物粒度分形研究,并利用显著性水平检验探讨了传统粒度参数与分维值的关系以及不同粒级的百分含量与分维值的关系。

1 研究地点和数据获取

采样点位于咸阳渭河一号桥东约 600 m 处北堡子村(34°19'30"N,108°42'46"E)。剖面位于渭河高河漫滩,厚度为 2.16 m,共分 13 层(图 1)。由于秦岭的

持续隆升,渭河自秦末以来一直向北迁移^[8-9],剖面所在河漫滩位于渭河南岸,所以比较有利于洪水沉积物的保存,同时该河漫滩分布较广,具有一定的代表性。对剖面进行连续采样,间距为 5 cm,特殊层根据实际厚度进行采样,共采集样品 53 个。其各层由上而下的岩性特征详见表 1。

在野外采样时,于第 11 层第 7 个样品(距地表 155 cm)中发现白色塑料薄膜(图 1)。据资料表明^[10],白色塑料薄膜出现于 20 世纪 60 年代中期,在我国大规模使用于 20 世纪 80 年代中后期。另据研究渭河秦都咸阳渭河段河道北移的速率为 1.87 m/a^[9],剖面位置据此处仅 5 km 左右,北移速率应该相差不大,而剖面据现近河道约 70 m,以此来推算,剖面形成时间也大概在 30 a 左右。

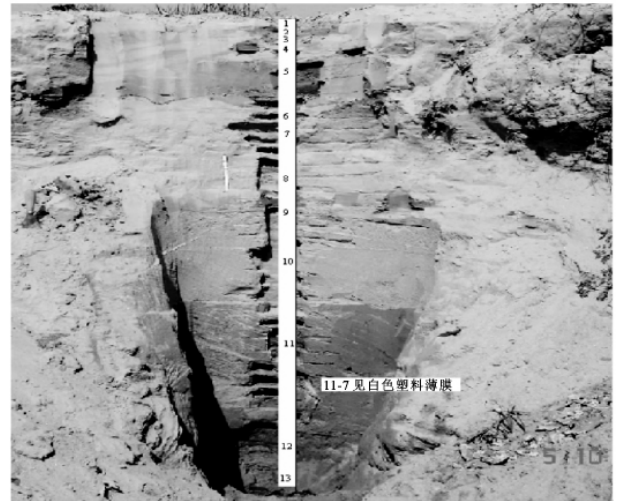


图 1 渭河咸阳段采样点剖面

表 1 渭河咸阳段北堡子剖面分层与特征

层号	各层名称	深度/cm	岩性特征
1	粗粉砂层	0—4	灰白色,粗粉砂为主,少量极细砂、中粉砂,有植物根系。
2	粗粉砂层	4—7	深灰色,粗粉砂为主,少量极细砂、细粉砂、细砂。
3	粗粉砂、中粉砂层	7—11	浅棕色,粗粉砂为主,中粉砂次之,含少量细粉砂。
4	粗粉砂、中粉砂、极细砂层	11—21	灰色,粗粉砂为主,中粉砂次之,含少量极细砂、细砂。
5	粗粉砂、中粉砂层	21—35	深棕色,粗粉砂为主,中粉砂次之,含少量中砂、细粉砂。
6	极细砂、粗粉砂层	35—40	深灰色,极细砂为主,粗粉砂次之,少量细砂、粗砂。
7	极细砂、粗粉砂层	40—44	灰白色,极细砂为主,少量粗粉砂、细砂。
8	细砂、极细砂层	44—74	深灰白色,细砂为主,极细砂次之,含少量植物碎屑。
9	极细砂、粗粉砂层	74—86	浅棕色,极细砂为主,粗粉砂次之,含少量中砂、细砂。
10	中砂、粗砂层	86—120	浅灰黄色,中砂为主,粗砂次之,含少量细砂、极细砂、粗粉砂。
11	中砂、粗砂层	120—178	深棕色,灰色中砂,粗砂次之,少量极细砂、粗粉砂。在该层中发现白色塑料薄膜。
12	细粉砂、极细粉砂、粗黏土层	178—184	棕黄色,细粉砂为主,少量极细粉砂、粗黏土。
13	中粉砂、粗粉砂层	184—216	灰白色,中粉砂为主,少量粗粉砂、中砂、细砂、极细砂。

在咸阳师范学院旅游与资源环境学院环境分析实验室,使用英国马尔文仪器有限公司生产的 Mastersizer 2000E 激光粒度分析仪,完成了 53 个样品的粒度分析。

2 分维值计算方法

分维值是分形理论中最核心的概念,表征了“物质的自组织能力和物质组成的复杂程度”,用 D 表示^[3]。分维值的计算多采用幂指数法,具体数学推导在很多文献中都有,这里不再详细推导。 $P(r < x)$ 表示粒径小于 x 的沉积物颗粒质量累计百分比; r 表示粒径小于 x 的粒径,只要在 $\lg[P(r < x)]$ 和 $\lg x$ 相互关系的双对数坐标图中,应用最小二乘法拟合计算,绘制出 $\lg[P(r < x)]$ 和 $\lg x$ 相互关系的直线,就可以得出该直线的斜率 b ,描述沉积物粒度分布的分维值 D 便通过公式(1)求得:

$$D = 3 - b \quad (1)$$

3 无标度区的确定

分形的重要特征是自相似性或标度不变性,标度不变性是指在分形上任选 1 个局部区域,不论将其放大还是缩小,它的结构、形态、性质(功能)、复杂程度、不规则性等特性均不会发生变化(或者是在统计上具有这种意义),通常就把无标度区称为具有自相似性的尺度范围^[7]。利用幂指数关系计算分维值时,必须确定无标度区的范围。在本研究中,确定分形分布的无标度范围,是遵循连续改变拟合数据即粒径的范围,直到找出拟合时最大的相关系数,且要保证拟合数据包含粒径分布范围的主要部分^[3]。

以 2 个代表性样品来说明沉积物粒度分形分布的无标度区的确定过程(图 2)。

当无标度区选在沉积物颗粒的全部粒径范围之内时,如图 2a 和图 2b,可以看出 $\lg[P(r < x)]$ 和 $\lg x$

之间的线性关系并不是很好,利用最小二乘法拟合得出的相关系数 R^2 (图 2a 为 0.872 4; 图 2b 为 0.850 1); 而当连续改变拟合数据即粒径的范围,直到找出拟合时最大的相关系数,且保证拟合数据包含粒径分布范围的主要部分时,把图 2c 选为 $(4.22, 1000) \mu\text{m}$ 、图 2d 选为 $(1, 86.6) \mu\text{m}$ 范围时,发现这 2 个样品粒径在

无标度区范围内 $\lg[P(r<x)]$ 和 $\lg x$ 之间的线性关系就很明显的显示出沉积物粒度分布的分形特征了,利用最小二乘法拟合得出的相关系数 R^2 (图 2c 为 0.994 4; 图 2d 为 0.984 8),且拟合数据都包含在粒径分布范围的 90% 以上。从而说明了利用这些粒径区间作为沉积物粒度分形分布的无标度区是合理的。

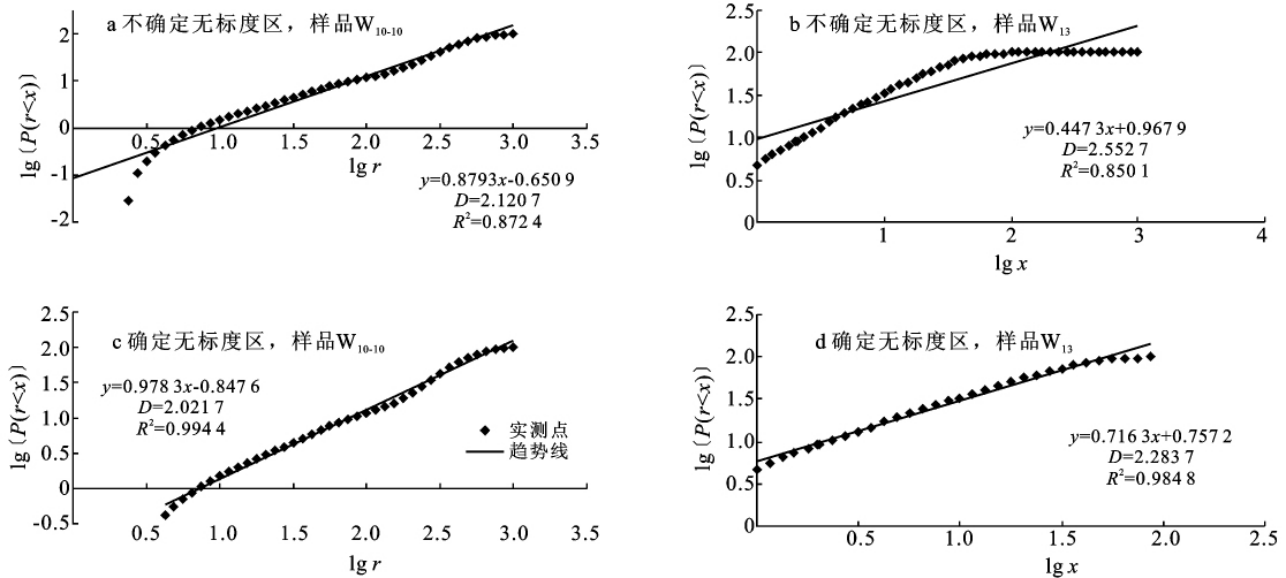


图 2 粒度分形无标度区的确定

注: $P(r<x)$ 表示粒径小于 x 的沉积物颗粒质量累积百分比, r 表示粒径小于 x 的粒径。

使用 SPSS 13.0 对包含全剖面的所有沉积物样品的粒度拟合后的线性相关系数 R^2 及确定粒度的无标度区后线性相关系数 R^2 进行描述统计(表 2)。当在所有粒径区间范围之内时,进行 $\lg[P(r<x)]$ 和 $\lg x$ 线性拟合, R^2 最小值为 0.725, 最大值为 0.989, 平均值是 0.896; 而当将沉积物的粒径确定在无标度区间之后, 53 个样品的 $\lg[P(r<x)]$ 和 $\lg x$ 的线性拟合关系表现的就很好了, 线性拟合的相关系数平均为 0.985, R^2 最低为 0.960, 最高达 0.996, 所以沉积物的粒度分布在利用最小二乘法拟合确定的无标度区的范围内具有明显的分形特征。

表 2 确定无标度区间前后相关系数 R^2 统计

项目	样品数	极差	最小	最大	均值	标准差
包含全部粒径	53	0.264	0.725	0.989	0.896	0.055
确定标度区	53	0.037	0.960	0.996	0.985	0.010

4 沉积物的分维值

4.1 沉积物的分维值分析

利用幂指数法计算出的沉积物分维值见表 3。在

所有 53 个样品中有 14 个样品的分维值小于 2, 也就是说, 这 14 个样品失去了实际的物理意义, 所以并非所有沉积物的分维值在三维欧几里德空间里都具有实际的物理意义。不少学者认为分维值作为 1 个描述沉积物粒度特征的参数, 无论利用幂指数法求出的分维值 D 是否具有实际的物理意义, 而仅仅将其作为一种粒度分析参数, 也同样具有实用性^[2]。本研究也将 14 个失去了实际物理意义的样品与其它样品一起进行统计分析, 这样表征沉积物粒度分布分形特征的 53 个样品在无标度区内的分维值 (D) 的平均值为 2.076。根据柏春广等^[6]对不同类型沉积物粒度分布分维值的研究, 河流悬移质粒度分布的分维值为 2.617, 河床质粒度分布的分维值为 2.361, 湖泊沉积物粒度分布的分维值为 2.407, 潮滩沉积物粒度分布的分维值为 2.342, 海底沉积物粒度分布的分维值为 2.428, 王俊超等^[11]对黄河口沉积物粒度分布分维值的研究, 黄河口沉积物粒度分布的分维值为 2.416, 唐建华等^[3]对长江口南槽沉积物粒度的分形特性分析, 长江口沉积物的平均分维值为 2.488, 分析得出的渭河洪水沉积物的平均分维值 2.076, 与上述研究中不同类型沉积物的粒度分维值相比较小。

表 3 在无标度区沉积物样品的分维值 D 统计

项目	平均	中位数	众数	标准差	最小值	最大值
D 值	2.076	2.056	2.105	0.112	1.922	2.300

4.2 分维值与传统粒度分析参数的关系

以往沉积物粒度分析多采用粒度统计参数如平均粒径、标准偏差(σ)、偏度(SK)和峰度(KG)等来描述沉积物粒度分布特性,而自从分形理论诞生以来,分维值就作为一种新的参数描述沉积物粒度分布,本研究将沉积物的分维值与传统的粒度参数进行比较与讨论。

4.2.1 平均粒径与分维值的关系 陈冬梅等通过对不同沉积环境下的沉积物粒度分维值的计算,指出洪泛平原沉积物、风成沙的平均粒径与分维值呈现弱的正相关关系,湖泊、湖滨三角洲沉积物的平均粒径与分维值呈现弱的负相关关系,唐建华等通过对长江口南槽沉积物粒度的分形特性分析,指出长江口南槽沉积物的平均粒径与分维值呈现较弱的正相关关系,本研究中分析的渭河洪水沉积物的平均粒径(μm)与分维值(D)呈现较好的负相关关系,相关系数为 -0.807 (表 4)。分析不同粒级百分含量与分维值的相关性(表 5),可见分维值 D 与粉砂至黏土级颗粒含量呈正相关,与细砂以上的级别的颗粒含量呈负相关,且多数通过了 0.01 显著性水平检验。说明分维值与细颗粒物含量呈正相关,与粗颗粒物含量呈负相关。

表 4 平均粒径、标准偏差、偏度、峰度与分维值的关系

项目	平均粒径	峰度	偏度	标准偏差
分维值	-0.807^{**}	0.675^{**}	0.112	0.707^{**}
显著性(双尾)	0.000	0.000	0.425	0.000

注: ** 表示在 0.01 水平显著(双尾检验)。

4.2.2 标准偏差与分维值的关系 沉积物的标准偏差与其分维值的相关系数为 0.707,而且通过了 0.01 显著性水平检验。表明沉积物的标准偏差与分维值的正相关关系是明显的,这是因为沉积物的标准偏(σ)是描述分选性的参数,标准偏差越大表明沉积物分选性越差,沉积物粒径分布越分散,而沉积物粒度分维值(D)也就越大;相反,分维值越小。

4.2.3 偏度与分维值的关系 沉积物的偏度与其分维值的相关系数为 0.112,但是没有通过 0.01 的显著性水平检验,也没有通过 0.05 显著性水平检验,说明渭河洪水沉积物的偏度与其分维值的正相关并不明显。因为沉积物偏度(SK)是描述沉积物粒径分布不对称性的参数,沉积物偏度越大反映其粒径分布越复杂^[3]。

4.2.4 峰度与分维值的关系 沉积物的峰度(KG)是用来衡量沉积物粒径频率分布曲线的频率极值上下偏离正态分布频率极值的程度,从而反映粒度分选的集中程度的参数^[3]。沉积物的峰度与其分维值的相关系数为 0.675,而且通过了 0.01 显著性水平检验,说明渭河洪水沉积物的峰度与分维值的正相关关系明显。

表 5 沉积物不同粒级含量与分维值的相关系数

项目	粗砂	中砂	细砂	极细砂	粗粉砂	中粉砂	细粉砂	极细粉砂	粗黏土	细黏土	黏土	分维值 D
粗砂	1	0.000	0.301	0.311	0.023	0.017	0.196	0.312	0.243	0.083	0.193	0.009
中砂	0.915	1	0.095*	0.334	0.009	0.005	0.146	0.267	0.198	0.051	0.149	0.002
细砂	0.311	0.483	1	0.075	0.074	0.001	0.026	0.091	0.070	0.012	0.048	0.011
极细砂	-0.305	-0.291	0.510	1	0.195	0.417	0.015	0.033	0.040	0.051	0.040	0.354
粗粉砂	-0.623	-0.690^*	-0.512	0.384	1	0.007	0.698	0.393	0.496	0.933	0.613	0.242
中粉砂	-0.646	-0.726^*	-0.814^*	-0.247	0.706*	1	0.060	0.334	0.258	0.038	0.179	0.003
细粉砂	-0.384	-0.427	-0.611	-0.654	-0.119	0.534	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
极细粉砂	-0.304	-0.333	-0.488	-0.591	-0.259	0.291	0.937*	1	0.000	0.000	0.000	0.007
粗黏土	-0.349	-0.382	-0.518	-0.575	-0.207	0.339	0.945*	0.998*	1	0.000	0.000	0.004
细黏土	-0.499	-0.551	-0.672	-0.551	0.026	0.580	0.972*	0.942*	0.957*	1	0.000	0.000
黏土	-0.386	-0.424	-0.557	-0.574	-0.155	0.397	0.959*	0.993*	0.998*	0.974*	1	0.002
分维值 D	-0.694^*	-0.767^*	-0.679	-0.280	0.349	0.746*	0.806*	0.704*	0.735*	0.884*	0.775*	1

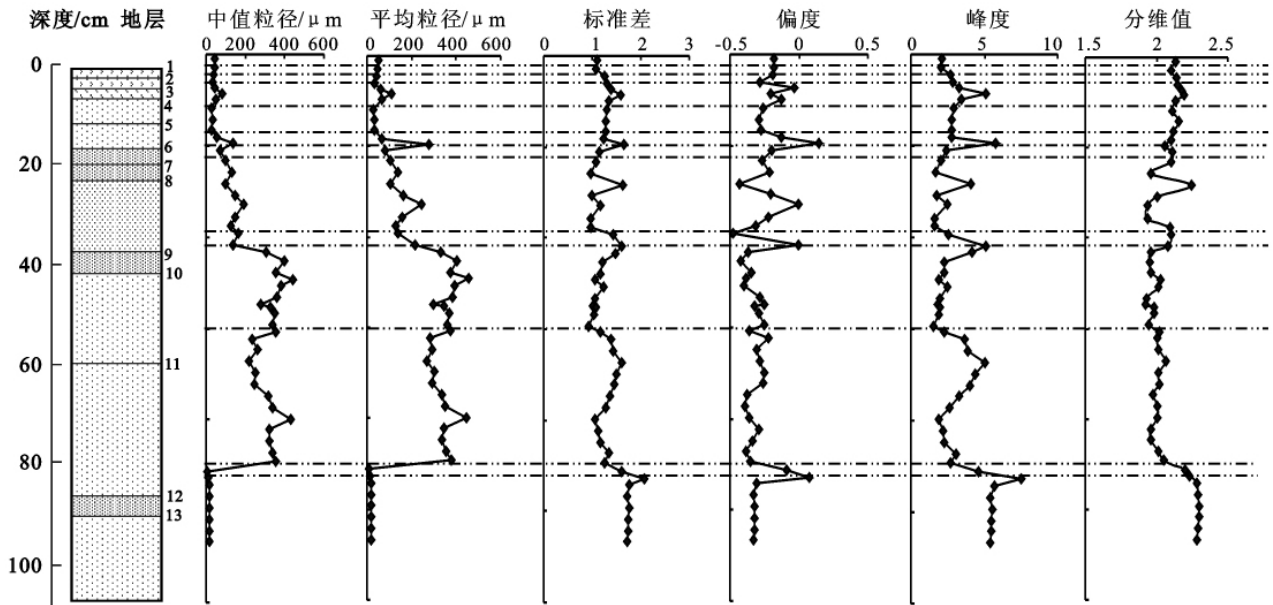
注: * 表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾检验)。

总结以上的分析可以得出,沉积物粒度的标准偏差、偏度、峰度与分维值的正相关关系较为明显。平均粒径与分维值是负相关。

图 4 为分维值(D)、平均粒径、标准偏差(σ)、偏度

(SK)、峰度(KG)分别随剖面距离地表深度变化趋势图。从图中可以看出,分维值(D)随全剖面距离地表深度变化趋势与标准偏差(σ)、偏度(SK)、峰度(KG)变化一致。

因此,分维值能反映沉积物的沉积环境特点。分维值与细颗粒物含量呈正相关,与粗颗粒物含量呈负相关,在水动力较强的环境下沉积物的分维值较小,相反水动力较弱的环境下沉积物的分维值较大。



注:1 灰白色粗粉砂层; 2 深灰色粗粉砂层; 3 浅棕色粗粉砂层; 4 灰色粗粉砂层; 5 棕色粗粉砂层; 6 深灰色极细砂层; 7 灰白色极细砂层; 8 灰白色细砂层; 9 浅棕色极细砂层; 10 灰黄色中砂层; 11 棕色中砂层; 12 棕黄色细粉砂层; 13 灰色白中粉砂层

图 4 沉积物粒度分维值、平均粒径、标准偏差、偏度、峰度对比

5 结论

(1) 分形计算的结果表明,渭河咸阳段高河漫滩剖面 13 层沉积物的平均分维值存在明显差异,沉积物分维值最高 W_{13} 层为 2.290,最低 W_{10} 层为 1.973,平均为 2.12。

(2) 沉积物粒度分维值与标准偏差、峰度呈现明显的正相关关系,与其偏度呈现出并不明显的正相关关系,与平均粒径呈负相关关系。分维值与沉积物中粉砂至黏土级颗粒含量呈正相关,与细砂以上的级别的颗粒含量呈负相关。

[参 考 文 献]

- [1] Adolfo N D P, Daniel Gime'nez, Marco B, et al. Multi-fractal characterization of soil particle-size distributions [J], *Soil Sci.*, 2001, 65: 1361-1367.
- [2] 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*, 2005, 27(1): 47-51.
- [3] 唐建华,何青,刘玮,等. 长江口南槽沉积物粒度的分形特性分析[J]. *泥沙研究*, 2007(3): 50-56.
- [4] 毛龙江,刘晓燕,许叶华. 南京江北地区下蜀黄土粒度分形与全新世环境演变[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(6): 264-267.
- [5] 易顺民,唐辉明. 冻土粒度成分的分形结构特征及其意义[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(4): 314-319.
- [6] 柏春广,穆桂金,王建. 艾比湖湖相沉积物粒度的分形特征及环境意义[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(4): 336-341.
- [7] 陈绍英,王启文. 分形理论及其应用[J]. *呼伦贝尔学院学报*, 2005, 13(2): 59-63.
- [8] 史兴民,万正耀,师静. 渭河咸阳段近代洪水沉积物粒度特征分析[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 71-76.
- [9] 桑广书. 秦末以来秦都咸阳地貌演变[J]. *地理科学*, 2005, 25(6): 709-715.
- [10] 中国大百科全书《化工》编辑委员会. 中国大百科全书(化工)[M]. 北京:中国大百科全书出版社, 1987: 607-608.
- [11] 王俊超,贾永刚,史文君,等. 差异水动力导致黄河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(2): 177-183.