

文章编号:1672-3031(2021)01-0015-10

黄河乌兰布和沙漠段不同区域入黄沙物质粒度特征及其来源分析

郭建英¹, 李锦荣¹, 陈新闻², 董智³, 田世民⁴, 田秀民¹

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

3. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 4. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 土壤是具有自相似结构及一定分形特征的不规则复杂多孔介质, 为更好地对黄河乌兰布和沙漠段不同区域入黄沙物质粒度特征进行定量表征并解析其来源, 利用传统统计学和多重分形理论, 研究了黄河乌兰布和沙漠不同地段土壤的粒度特征及粒径分布。结果表明: 研究区土壤颗粒组成具有明显的多重分形特征, 沙头对岸 D_0 值为 0.821、 D_1 值为 4.386, 即粒径分布范围最宽且最不均匀, 荒漠草原 D_1 值为 2.970、 D_1/D_0 值为 4.595, 即粒径分布最均匀且离散程度最大; 不同地段土壤粒径分布范围间存在差异, 但相近地段颗粒组成类似; 河道左岸由于受乌兰布和沙漠的影响, 使得河道左侧的沉积物粒度变粗, 其来源于沙漠的沙物质, 而右侧河道几乎不受乌兰布和沙漠的影响。

关键词: 多重分形维数; 粒度特征; 来源分析; 乌兰布和沙漠

中图分类号: P642.11²

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200130

1 研究背景

黄河河道淤积一直是制约黄河流域生态保护和高质量发展的首要因素, 其中风沙入黄是河道淤积的主要因素之一, 尤其黄河上游宁蒙河段是风沙入黄的主要发生区域, 河东沙地、乌兰布和沙漠和库布奇沙漠中易被搬运侵蚀的沙物质直接或间接输入黄河河道, 其中石嘴山—巴彦高勒段的年均风沙入黄量高达 9.31×10^6 t/a, 严重制约黄河流域可持续发展及区域生态安全^[1-2]。乌兰布和沙漠黄河段分布有较大面积的新月形流动沙丘, 且沙丘逐年向黄河移动, 在移动过程中致使大量风积沙输送到黄河, 每年输送约 2800 万 ~ 6000 万吨, 是单位长度内输沙量较高的区域之一^[3]。对于乌兰布和沙漠的研究一直是区域生态治理的重点和热点, 研究集中于区域土地利用变化、生物群落特征、入黄沙量的估算、风沙活动特征、沙丘治理方法等^[4-16], 均对区域生态监测和治理提供了一定的理论基础。目前针对该地区及黄河流域的生态系统的动态监测技术及综合治理已经纳入中国今后发展和研究的重点领域。首要任务就是研究黄河沿岸沙物质特征、输移机制及来源特征, 以便准确开展生态监测和生态治理。

沙物质在风力作用下, 其机械组成、矿物和化学成分等均不断地发生变化^[17]。沙物质不仅记录着风力堆积的过程信息, 同时记录着沙丘、河道泥沙形成发育过程中的沉积环境信息, 如区域地形形成、演化及地球化学变化等, 沉积物中各元素的分布、迁移规律^[18-21], 除受元素本身理化性质影响而具有不同特性外, 还因其在风化、迁移和沉积过程中受气候环境等变化而产生地球化学行为的差异, 这些条件决定了沉积物中化学元素和化合物的分布及其地球化学特征, 据此可以讨论它们的沉积环境及其与环境因素的关系, 在分析物源方面都有积极的作用^[17]。沙物质的粒度特征受搬运介

收稿日期: 2020-07-13; 网络首发时间: 2021-01-22

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210121.1616.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301303); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(MK0145B722017)

作者简介: 郭建英(1979-), 博士, 正高级工程师, 主要从事草地水土保持与植被恢复研究。E-mail: guojianying1980@163.com

通讯作者: 李锦荣(1980-), 高级工程师, 主要从事荒漠化研究。E-mail: lijnrong918@126.com

质、搬运方式、沉积环境等因素的控制，而这些正是探究黄河入黄沙物质搬运迁移的重要内容，进而估算黄河沿岸新月形沙丘的移动机制和速率，且通过对沙物质粒度特征的辨识阐明沙物质来源，以便从根源防沙治沙^[22]。沙物质的粒度特征及其变化总是被作为风沙研究的重要切入点并且效果明显^[23]。基于此，本文综合黄河乌兰布和沙漠段河道两侧土地利用类型特点，开展黄河沿岸不同区域入黄沙物质的粒度特征分析并探究其来源，以期为区域生态治理和生态修复提供一定的理论基础。

2 入黄沙物质粒度试验和特征表示方法

2.1 研究区概况 乌兰布和沙漠沿黄段位于内蒙古乌海市乌达区与巴彦淖尔市磴口县之间， $39^{\circ}35'N-40^{\circ}19'N$ 、 $106^{\circ}46'E-107^{\circ}02'E$ ，右与鄂尔多斯杭锦旗相邻。研究区位于黄河乌兰布和沙漠刘拐子沙头段内(图1)，该区域黄河的左岸为乌兰布和沙漠，右岸为荒漠草原，气候干燥，雨量稀少，年平均降水量142.7 mm，年平均气温8.0℃，风沙频繁，地表风蚀强烈，在大风的作用下大量风沙侵入黄河河道。年平均风速3.7 m/s，大风和风沙一年四季均有出现，以3—5月份最多，风向多为西风及西南风，多年平均大风日数10~32 d，多年平均扬沙日数75~79 d，沙尘暴日数19~22 d，属于典型的中温带大陆性干旱季风气候。

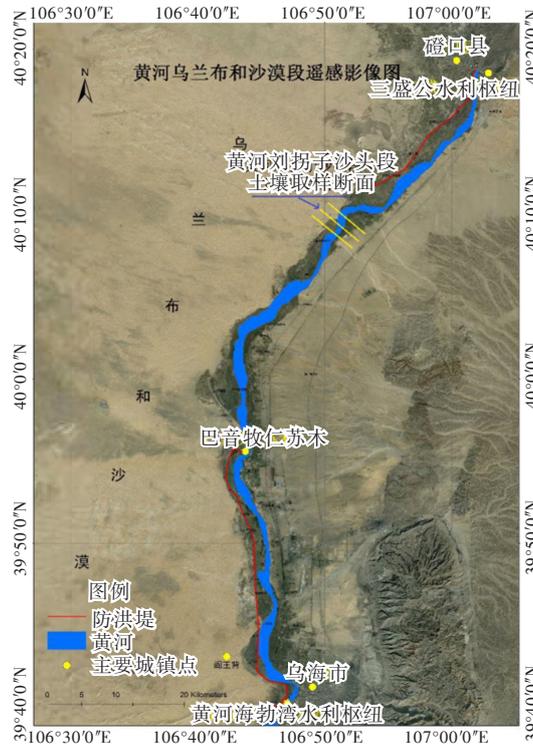


图1 研究区示意图

2.2 土壤样品采集 对乌兰布和沙漠刘拐子沙头选取典型断面进行取样，取样断面位置见图1，黄河左岸到右岸的取样顺序依次为沙丘、左岸河漫滩草地、左侧河道、右侧河道、右岸河漫滩草地、荒漠草原及上游的宁夏惠农区河道，取地表0~10 cm的沉积物(图2)，每个类型取样点平行取3个样

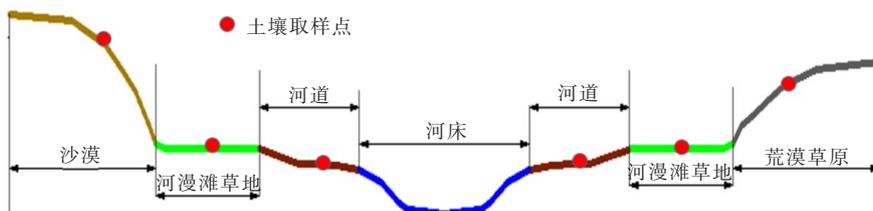


图2 研究区沉积物取样断面示意图

品,通过对样品粒度进行室内测试,对比分析黄河上游河段(进入沙漠穿越区之前)与黄河沙漠穿越段横断面的沙粒级配及粒度特征参数。

2.3 土壤粒度分析 粒度分析已成为风沙地貌学研究中的重要手段之一,其主要目的是确定沉积物中大小颗粒的相对含量。根据试验样品特性不同,粒度分析方法主要有筛分法、沉降法、激光粒度仪3种。根据样品性质、试验条件等因素,本研究采用激光粒度仪。对于试验数据的处理方面,沉积物粒径大小的表示方法:一种是采用真数,颗粒直径以mm表示,优点是比较直观;另一种是运用对数(以2为基数),以 Φ 值表示颗粒直径,使用的 Φ 值是克鲁宾(Krumdein)根据伍登-温德华(Udden-Wenworthseale)粒级标准^[11],优点是分界等距,便于统计运算和作图。

$$\Phi = -\log_2 d \quad (1)$$

2.4 土壤粒度级配特征 沉积物的粒度组成又称为机械组成或颗粒级配,指沉积物中不同粒径大小的颗粒所占的比例,一般以体积百分比表示。不同的沉积环境和沉积动力机制所形成的沉积物一般具有各自不同的粒度组成。因此,依据沉积物的粒度组成可以对沉积物进行命名分类、追溯沉积物来源方向、成因动力条件及搬运过程或沉积过程的变化等。对于粒级的划分标准,因目的、工作性质的不同而不完全一致。由于研究区内表层沉积物既有沙漠沙又有河道沉积物(图1),因此,在粒径百分含量分析中采用中国土壤粒径分级标准, Φ 值计算分析采用温德华粒度分级,见表1。

表1 研究区土壤粒径分级制

温德华粒度分级			中国土壤粒径分级	
粒径名称	粒径/mm	Φ 值	粒径名称	粒径/mm
极粗砂	1~2	-1~0	极粗砂粒	1~2
粗砂	0.5~1	1~0	粗砂粒	0.5~1
中砂	0.25~0.5	2~1	中沙粒	0.25~0.5
细砂	0.125~0.25	3~2	细砂粒	0.1~0.25
极细砂	0.063~0.125	4~3	极细沙粒	0.05~0.1
粉砂	0.0039~0.063	8~4	粉粒	0.02~0.05
黏土	0.0039	>8	细粉粒	0.002~0.02
			黏粒	<0.002

2.5 粒度参数特征 根据试验输出数据中的分布百分比,经统计分析得到沉积物的粒度参数,常用的粒度参数主要有平均粒径(M_z)、分选系数(δ)、偏度(S_k)和峰态(K_g),以上参数值能从不同方面反映粒度分布的总体特征(表2)。平均粒径(M_z)代表粒度分布的集中趋势,表示沉积物颗粒的粗细程度,反映搬运作用营力的平均动能。据其也可了解物质来源及沉积环境的变化情况。标准离差(δ)表示沉积物的分选程度,常用于分析沉积环境的动力条件和沉积物的物质来源。标准离差值越大,分选越差。偏度(S_k)是用以度量频率曲线的不对称程度,即表示非正态性特征的。偏度可以判别分布的对称性,并表明平均值与中值的相对位置。若正偏,则此沉积物的粒度分布为粗偏即分布中主要粒度集中在粗粒部分;如为负偏,则沉积物为细偏,即分布中主要粒度集中在细粒部分。峰态(K_g)也称尖度,是度量粒度分布的尾部和中部展开度的比例,即用其分布曲线与正态分布曲线相比,可用以衡量其峰的宽窄尖锐程度。它是衡量频率曲线尖峰凸起程度的参数。依据峰态可以判断沉积环境及追溯沉积物物源。若沉积物分布曲线是宽峰或马鞍状或是多峰曲线,即 K_g 值很低,则表明沉积物没有经过改造直接进入新环境,且新环境对它的改造又不明显。因此,它代表几种物质(或总体)直接混合而成,若沉积物中出现极端峰态(极高或极低),说明该沉积物中的某些组分已经在之前分选能力较好的环境中得到了很好的分选,然后才被搬运到现在的沉积环境中,并与这儿的其他沉积物混合。

2.6 土壤粒径多重分形参数 取激光粒度仪测量区间 $I=[0.02, 2000]$,依据给定的尺寸(ξ)将所研究的序列分为 N 个连续等距小片段, $N = \lg(\Phi_{i+1}/\Phi_i)$ 为常数(Φ_i 及 Φ_{i+1} 均为机测粒径范围),设第 i 个小片段序列总长为 L_i ,为使用多重分形方法分析区间 I 的粒径分布特征,须使各子区间长度一致,故取 $L_i = \lg(\Phi_i/\Phi_1)$ (Φ_1 为机测粒径范围首值),则出现量纲为1的新区间 $T=[0, 5]$,含100个等距子区间

表2 Folk和Wald(1957)粒度参数分级标准

分选性(ϕ 值)		偏度(S_k)		峰度(K_g)	
范围	描述	范围	描述	范围	描述
< 0.35	分选极好	-1.0 ~ -0.3	极负偏	< 0.67	很宽平
0.35 ~ 0.50	分选很好	-0.3 ~ -0.1	负偏	0.67 ~ 0.90	宽平
0.50 ~ 0.71	分选较好	-0.1 ~ 0.1	近对称	0.90 ~ 1.11	中等
0.71 ~ 1.00	分选中等	0.1 ~ 0.3	正偏	1.11 ~ 1.56	尖窄
1.00 ~ 2.00	分选较差	0.3 ~ 1.0	极正偏	1.56 ~ 3.0	很尖窄
2.00 ~ 4.00	分选很差			> 3.0	极尖窄
> 4.00	分选极差				

$T_i=[L_i, L_{i+1}]$, 则每个子区间的分形体分布概率为 $p_i(\xi)$, 按 $p_i(\xi)$ 大小划分为满足下面幂函数的子集^[24-25]:

$$p_i(\xi) \propto \xi^\alpha \quad (2)$$

式中: ξ 为粒径范围; i 为[1, 100]内的整数; p 为概率; α 为奇异指数。若具有奇异性指数为 α 的单元个数为 $N_\alpha(\xi)$, 则 $N_\alpha(\xi)$ 与 ξ 呈幂指数关系:

$$N(\xi) \propto \xi^{-f(\alpha)} \quad (3)$$

式中: N 为片段数; $f(\alpha)$ 即为具有奇异性指数 α 的分形子集的分形维数, 也称多重分形谱, 用于度量研究对象的粗糙程度、复杂程度、不规则度、不均匀程度。因不同的 ξ 所产生不同的 α 和 $f(\alpha)$, 便构成了一个刻画多重分形性质的多重分形谱。

为定义 $\alpha \sim f(\alpha)$ 的关系, 引入配分函数:

$$\chi_{q(\alpha)} = \sum_{i=1}^{N(\xi)} p_i^q(\xi) = \xi^{\tau_q} \quad (4)$$

式中: q 为实数且在[-10, 10]内取整并以1为步长; $\chi_{q(\alpha)}$ 为配分函数。如果式(3)后面的等式成立, 则可从 $\ln \chi_{q(\alpha)} \sim \ln \xi$ 得到:

$$\tau_q = \ln \chi_{q(\alpha)} / \ln \xi \rightarrow 0 \quad (5)$$

式中: τ_q 为质量指数。对 τ_q 、 q 作勒让德变换, 可得到粒径分布的 D_q (广义维数谱):

$$\begin{aligned} D_q &= \tau_q / (q - 1) & (q \neq 1) \\ D_1 &= \tau_1 \ln p_i(\xi) & (q = 1) \end{aligned} \quad (6)$$

本文只讨论 $q=0, 1$ 时的特殊情况。当 $q=0$ 时, D_0 代表粒径分布的宽度(容量维数), 数值越大则表示粒径分布的范围越宽; 当 $q=1$ 时, D_1 反映了颗粒分布测度的集中度(信息维数), 它可以表征粒径分布的不均匀程度, D_1 越大说明粒径分布越不均匀, 且各分布区域的体积百分比在各尺度上呈非均匀分布; D_1/D_0 可表征粒径分布的离散程度, 数值越小则离散程度越大^[26-27]。

3 结果与分析

3.1 粒级百分含量 沙漠地表沉积物的沙粒粒度组成可以直观地反映风成沙的主要粒径组成以及不同粒径组沙粒的相对含量。研究区沉积物粒级配分析结果表明(图3): 研究区内左岸沙丘以0.1 ~ 0.25 mm的细砂粒为主, 占87.03%; 左岸的河漫滩草地以0.1 ~ 0.25 mm的细砂粒为主, 占76.87%; 右岸的荒漠草原以0.1 ~ 0.25 mm的细砂粒为主, 占33.93%; 河道以0.002 ~ 0.05 mm粉粒为主, 占53.5% ~ 85.0%; 右岸的河漫滩草地以0.002 ~ 0.05 mm粉粒为主, 占53.28%。研究区左侧河漫滩草地粒级配与沙丘的粒级配基本相似, 右侧河道与上游河道(惠农区)的粒级配基本相似, 左侧河道的细沙含量比右侧河道及上游河道百分比含量明显增加, 分别为58.4倍和19.7倍; 左侧河道极细沙含量比右侧河道及上游河道百分比含量明显增加, 分别为12.3倍和7.7倍; 左侧河道的粉粒含量比右侧河道及上游河道百分比含量明显减少, 分别减少37.1%和32.2%。

通过对研究区刘拐子沙头段黄河横断面样品的粒度测试，绘制不同类型区沉积物的频率曲线(图4)。由图4可知，不同类型地貌沉积物自然分布频率曲线除荒漠草原为双峰型，其他均属单峰型，峰值粒径范围为 $2.2\Phi \sim 6.8\Phi$ ，其中沙丘的峰值粒径为 2.2Φ ，距离沙丘最近的河漫滩草地的峰值粒径为 2.5Φ ，二者基本相近且峰型尖锐，分选较好；上游惠农区的河道泥沙与刘拐子沙头右侧河道泥沙的峰值粒径均为 6.8Φ ，峰型较为平缓且基本相同，河道左侧的泥沙峰值粒径为 4.1Φ ，峰型较陡，分选相对较好，其峰值粒径介于 $2.2\Phi \sim 6.8\Phi$ 之间，该区域河道两侧沉积泥沙粒径具有明显的差别，是由于河道两侧风沙环境不同，左侧河道在大风的作用下，沙丘中的粉砂和极细砂进入有关。

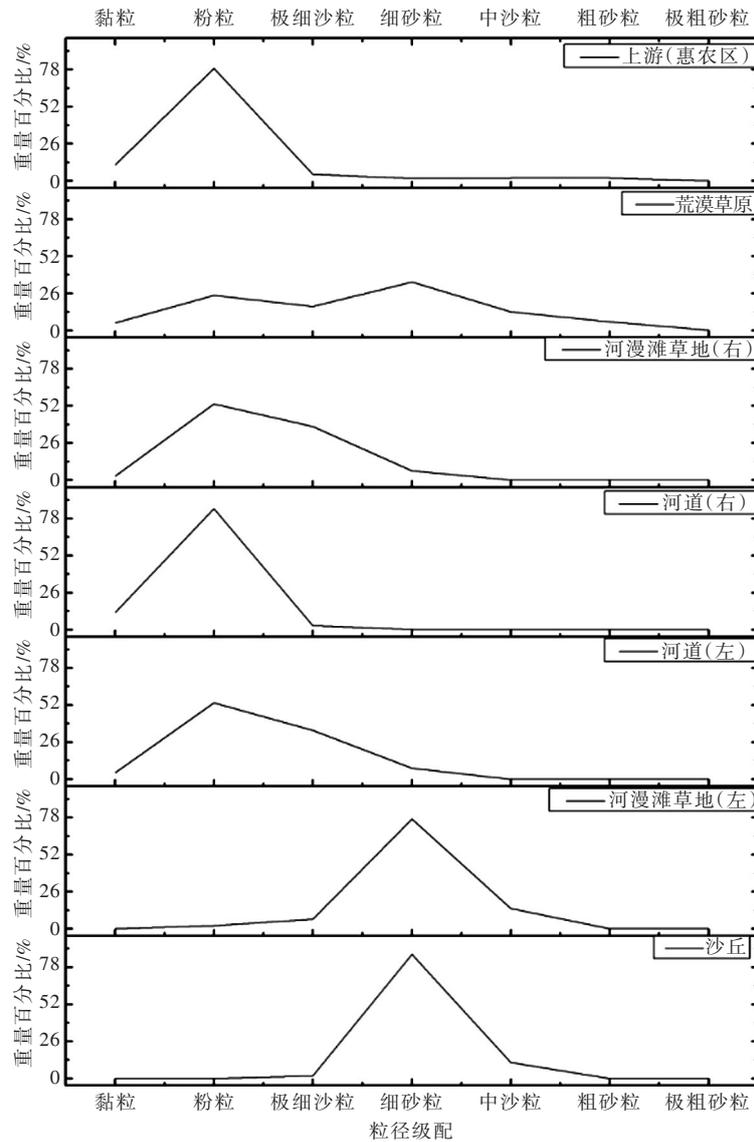


图3 研究区不同类型区沉积物机械组成百分比

3.2 粒度参数特征 根据对研究区内不同地貌类型区粒度数据计算的粒度参数结果发现(图5)，黄河刘拐子沙头段不同地貌沉积物地表颗粒的平均粒径 M_z 的平均值为 4.44Φ ，介于 $2.32\Phi \sim 6.55\Phi$ 之间，变异较大，数值为40.4%，其中沙丘与河道左侧河漫滩草地平均粒径值在 $2\Phi \sim 3\Phi$ 之间(细沙)、荒漠草原平均粒径值在 $3\Phi \sim 4\Phi$ 之间(极细沙)、其他地貌平均粒径值在 $4\Phi \sim 8\Phi$ 之间(粉沙)，左侧河道的平均粒径 4.63Φ ，明显小于右侧河道平均粒径 6.85Φ 及上游河道平均粒径 6.55Φ ；沉积物的分选系数 δ 平均值为 1.40Φ ，介于 $0.41\Phi \sim 2.60\Phi$ 之间，变异较大，数值为55.1%。其中沙丘颗粒的分选系数为 0.41Φ (分选很好)，河道左侧河漫滩草地颗粒分选系数为 0.55Φ (分选较好)，荒漠草原颗粒分选系数为 2.60Φ (分选很差)，其他地貌类型颗粒分选系数介于 $1.00\Phi \sim 2.00\Phi$ 之间(分选较差)；沉积物

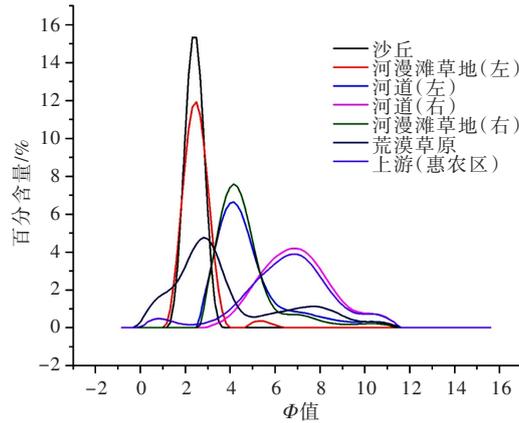


图4 不同类型地貌沉积物自然分布频率曲线

的偏度值 S_k 均值为 0.18, 变化范围在 $-0.04 \sim 0.46$ 之间, 变异极大, 数值为 112.1%, 其中沙丘、河道左侧河漫滩草地、右侧河道、上游河道沉积物颗粒的偏度值介于 $-0.1 \sim 0.1$ 之间(近对称), 其他地貌类型颗粒偏度值介于 $0.3 \sim 1.0$ 之间(极正偏); 地表颗粒的峰态值 K_g 均值为 1.17, 变化范围是 $0.95 \sim 1.47$, 变异较小, 数值为 18.7%, 其中沙丘、河道左侧河漫滩草地、右侧河道沉积物颗粒的峰态值介于 $0.90 \sim 1.11$ (中等), 其他地貌类型颗粒峰态值介于 $1.11 \sim 1.56$ (尖窄)。

通过对刘拐子沙头河道横断面不同地貌部位沉积物粒度参数分布特征分析的结果发现: 河道两侧由远到近沉积物的平均粒径逐步变小, 且左侧河道的平均粒径粗于河道右侧; 沙丘与河道左侧河漫滩草地沉积物的分选较好, 其他地貌类型沉积物的分选很差或者极差; 沙丘、河道左侧河漫滩草地、右侧河道、上游河道沉积物为近对称分布, 其他地貌类型沉积物颗粒为极正偏分布; 沙丘、河道

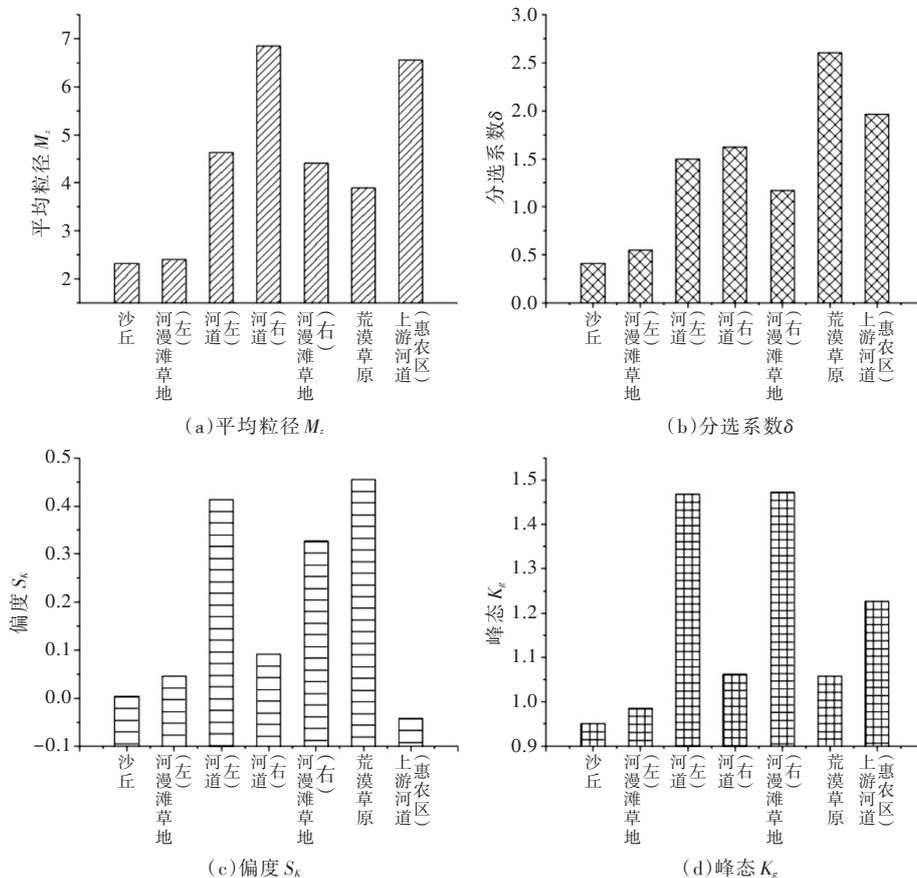


图5 研究区不同地貌沉积物沙粒粒度参数

左侧河漫滩草地、右侧河道沉积物颗粒为中等峰态，其他地貌类型峰态为尖窄。这一结果说明尽管研究区不同地貌之间存在巨大差异，但由于风沙环境的影响，相邻地貌之间形成较为类似的颗粒分布。

3.3 多重分形 由表3可知，各地貌类型 D_0 最小的是沙丘为0.437，最大的是右侧河道为0.821，即右侧河道粒径分布范围最宽，沙丘最窄，这可能由于风力对风沙土的分选所致，沙丘裸露缺乏植被覆盖，遭受风蚀强烈，使得细粒土壤被大量吹蚀，粒径分布范围于集中粗粒土壤，因此沙丘土壤粒径分布范围最窄。 D_1 最小的是右岸荒漠草原为2.970，最大是右侧河道为4.386，即右侧河道粒径分布最不均匀，而荒漠草原最均匀。 D_1/D_0 最小的是荒漠草原为4.959，最大的是沙丘为8.412，即荒漠草原粒径分布离散程度最大，沙丘离散程度最小。这可能由于荒漠草原植被对风沙流中被吹蚀物质的有所拦截，使其均匀地降落在植被周围，增加了土壤颗粒的均匀程度，同时也增加了土壤颗粒的离散程度。

表3 不同类型地貌沉积物多重分形参数

	上游河道(惠农)	右岸荒漠草原	右岸河漫滩草地	右侧河道	左侧河道	左岸河漫滩草地	沙丘
D_0	0.617	0.599	0.784	0.821	0.787	0.460	0.437
D_1	3.069	2.970	4.187	4.386	4.186	3.424	3.678
D_1/D_0	4.975	4.959	5.342	5.342	5.317	7.443	8.412

4 讨论

粗泥沙是导致黄河河道淤积、“悬河”发育以及洪水灾害的根源，王海兵等通过对黄河宁蒙段河床钻孔的粒径对比分析，证实了该河段的淤积物主要是粒径大于0.1 mm的沙漠沙，即风成沙是宁蒙河段的重要泥沙来源^[28]，从黄河乌兰布和沙漠段入黄泥沙的源头上来讲，本研究得出的结果与前人研究的结果相一致。前人多集中于从河道纵断面通过钻孔取样，分析河道泥沙的沉积过程，进一步关联分析河道水沙的运移过程^[29]。本文侧重点是从河道的横断面的土地利用变化来分析风沙输移对河道的影响及其范围。在人类活动和自然环境变化的综合作用下土地利用(景观格局)发生了剧烈的变化，在流域尺度上带来了诸多负面的生态效应，引起地表水文及风速的改变，特别是风沙区其明显影响沙丘形态、沙物质组成、植被类型等，造成区域生态系统结构和功能的变化，进而影响沙丘侵蚀速率及入黄风沙量，对区域生态安全构成威胁^[8,20,30-34]。入黄沙量除受风力、风向的影响之外，下垫面特征及沙物质粒度组成是主要影响因素^[6]。沙漠地区下垫面特征、沙物质特征与该地区的风沙活动相互影响，互为因果^[35]。

黄河乌兰布和沙漠段主要土地利用类型为草地和未利用地(沙漠)为主，生态系统较单一，且植被覆盖度较低，极易发生风蚀，风积沙直接入黄是入黄沙物质的主要来源。本研究对黄河两岸沙物质进行系统分析，研究区不同地貌之间存在巨大差异，但由于风沙环境的影响，相邻地貌之间形成较为类似的颗粒分布。黄河左岸靠近乌兰布和沙漠，河漫滩草地及河道内均以细砂粒为主，且越靠近河道平均粒径越小。乌兰布和沙漠风沙流中沙物质绝大多数都是局地物质^[11]，随着输送距离的增加，由于风速的降低及下垫面特征的改变，使得细砂粒逐渐沉降堆积，较大部分沉降在沙丘后荒漠草原及河道内，是造成黄河泥沙粒径变粗的主要因素^[3]。而本研究发现右侧河道与上游河道(惠农区)的粒径级配基本相似，乌兰布和沙漠的风沙运移特征对黄河右岸影响较小，因为经过黄河的风沙流中存在较多粒径较小的粉尘物，会被输送到远处^[11]。因此对于黄河入黄沙量的治理应集中于黄河左岸，且重点集中于对下垫面的治理。下垫面格局的优化和植被覆盖度的提高能够显著改变区域风沙流结构，降低区域输沙量^[1]。刘芳等^[36]对乌兰布和沙漠不同下垫面的风沙流输沙量的研究表明，当地表植被盖度达到40%以上时，可有效阻止地表风蚀。陈新闻等^[37]研究乌兰布和沙漠不同下垫面冬季沙尘通量，提出梭梭林、白刺能明显起到降低风蚀的作用。本研究也得出乌兰布和沙漠不同河道段的土壤粒径分布具有一定差异，荒漠草原粒径分布离散程度最大且分布最均匀。因此对于削减黄河

乌兰布和沙漠段入黄风沙量, 可通过改变黄河左岸土地利用格局, 尤其乌兰布和沙漠和黄河中间的荒漠草原地带, 应建立有效的风沙防护体系, 构建以植被为主体的防沙保土带, 使工程措施与生物措施相结合、固沙措施与阻沙措施相结合, 提升植被覆盖度, 增加下垫面粗糙度, 以及通过林灌草合理配置, 拦截运动的沙粒来缓解气流对地表的侵蚀作用。

5 结论

(1) 受乌兰布和沙漠风沙活动的影响, 左岸的河漫滩草地以 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 的细砂粒为主, 占 76.87% , 与研究区内左岸沙丘细砂粒所占比例 87.03% 相近, 主要受乌兰布和沙漠风沙侵入河道的影响; 而右岸的河漫滩草地以 $0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$ 粉粒为主, 占 53.28% , 与上游河道(惠农区)粉粒所占比例 78.8% 相近, 主要与上游来沙在该区域的淤积有关。

(2) 研究区不同地貌沉积物地表颗粒的平均粒径 M_z 的平均值为 4.44Φ , 介于 $2.32\Phi \sim 6.55\Phi$ 之间, 变异较大, 数值为 40.4% , 其中沙丘与河道左侧河漫滩草地平均粒径值在 $2\Phi \sim 3\Phi$ 之间(细沙)、荒漠草原平均粒径值在 $3\Phi \sim 4\Phi$ 之间(极细沙)、其他地貌平均粒径值在 $4\Phi \sim 8\Phi$ 之间(粉沙), 河道两侧由远到近沉积物的平均粒径逐步变小, 且左侧河道的平均粒径粗于河道右侧。

(3) 各地貌类型 D_0 最小的是乌兰布和沙漠沙丘为 0.437 , 最大的是右侧河道为 0.821 , 即右侧河道粒径分布范围最宽, 沙丘最窄, 且左侧河道 D_0 为 0.460 , 与沙丘的 D_0 值几乎相近。总体上该区域受左岸乌兰布和沙漠的影响, 河道左侧的河漫滩草地的沙物质主要来源于乌兰布和沙漠, 右侧河道主要受上游泥沙在该区域的淤积有关, 受乌兰布和沙漠的影响较小。

参 考 文 献:

- [1] 杜鹤强, 薛娟, 王涛, 等. 1986-2013年黄河宁蒙河段风蚀模数与风沙入河量估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 142-151.
- [2] 余明辉, 申康, 张俊宏, 等. 黄河宁蒙河段河道岸滩特性及入黄泥沙来源初步分析[J]. 泥沙研究, 2014 (4): 39-43.
- [3] 何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 71-77.
- [4] 张德魁, 马全林, 靳虎甲, 等. 乌兰布和沙漠典型草本植物群落特征[J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 53-59.
- [5] 马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等. 乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3423-3431.
- [6] 徐军, 郝玉光, 刘芳, 等. 乌兰布和沙漠不同下垫面风沙流结构与变异特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20 (4): 95-98.
- [7] 许婷婷, 董智, 李红丽, 等. 不同设障年限沙丘土壤粒径和有机碳分布特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27 (6): 628-634.
- [8] 周建秀, 刘志宁, 谷雨, 等. 黄河西岸乌兰布和沙漠综合治理区生态环境状况及动态变化[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 28-34.
- [9] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同土地利用类型对土壤分形特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 169-173.
- [10] 贾鹏, 王乃昂, 程弘毅, 等. 基于3S技术的乌兰布和沙漠范围和面积分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 131-138.
- [11] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘下风向降尘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36 (2): 295-301.
- [12] 郭建英, 董智, 李锦荣, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸沙丘形态及其运移特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 40-44.

- [13] 李锦荣, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同治理措施的风沙运移特征及其防护效果[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 113-119.
- [14] 罗凤敏, 辛智鸣, 高君亮, 等. 乌兰布和沙漠东北缘近地层风速和降尘量特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 147-154.
- [15] 黄雅茹, 郝玉光, 董礼隆, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 1-9.
- [16] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘起沙风况及输沙特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 145-152.
- [17] 常宏, 左合君, 王海兵, 等. 黄河乌兰布和沙漠段两岸地表沉积物多重分形特征及其指示意义[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1559-1567.
- [18] 李小妹, 严平, 吴伟, 等. 克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J]. 地理科学, 2016, 36(8): 1269-1276.
- [19] 洪畅, 韩旭娇, 戴佳栋, 等. 毛乌素沙地布寨淖尔下风向沙化湖滨地表沉积物理化特性[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 86-93.
- [20] 宋洁, 春喜. 乌兰布和沙漠不同土地覆被类型粒度特征及空间分异[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 243-251.
- [21] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1357-1364.
- [22] 梁爱民, 屈建军, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠沉积物粒度端元特征及其物源启示[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 33-42.
- [23] 代豫杰, 李锦荣, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J]. 环境科学研究, 2017, 30(7): 1069-1078.
- [24] 管孝艳, 杨培岭, 任树梅, 等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 196-205.
- [25] 孙哲, 王一博, 刘国华, 等. 基于多重分形理论的多年冻土区高寒草甸退化过程中土壤粒径分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 980-990.
- [26] MARTIN M A, MONTERO E. Laser diffraction and multifractal analysis for the characterization of dry soil volume-size distributions[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 64(1/2): 113-123.
- [27] MIRANDA J G V, MONTERO E, ALVES M C, et al. Multifractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal[J]. Geoderma, 2006, 134(3/4): 373-385.
- [28] 王海兵, 贾晓鹏. 大型水库运行下内蒙古河道泥沙侵蚀淤积过程[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 189-192.
- [29] 鲁俊, 安催花, 吴晓杨. 黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(6): 40-46.
- [30] 李盼盼, 何元庆, 马健, 等. 黑河下游灌丛沙丘的地球化学特征及对近代气候变化的指示意义[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 154-160.
- [31] 李海东, 沈渭寿, 赵卫, 等. 西藏高寒河谷沙地生态恢复与安全屏障建设的对策建议[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 160-163, 174.
- [32] 尤联元, 卢金发, 陈浩, 等. 以防沙治沙为目标的土地利用方式调整-以内蒙古自治区多伦县为例[J]. 地理研究, 2003(6): 680-686.
- [33] 谢敏, 张晓明, 赵阳, 等. 北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 39-44.
- [34] 邓晓雅, 龙爱华, 高海峰, 等. 塔里木河流域绿色生态空间与景观格局变化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(5): 369-376.
- [35] 杜鹤强, 薛娴, 孙家欢. 乌兰布和沙漠沿黄河区域下垫面特征及风沙活动观测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 156-165.
- [36] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1200-1207.
- [37] 陈新闯, 董智, 李锦荣, 等. 乌兰布和沙漠不同下垫面冬季沙尘通量[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1527-1532.

Grain size characteristics and source analysis of aeolian sediment feed into river in Ulanbuh Desert along bank of Yellow River

GUO Jianying¹, LI Jinrong¹, CHEN Xinchuang², DONG Zhi³, TIAN Shimin⁴, TIAN Xiumin¹

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources of China, Hohhot 010020, China;

2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Forestry College of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

4. Key Laboratory of Yellow River Sediment, Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Soil is a kind of irregular and complex porous media with self-similar structure and certain fractal characteristics. In order to quantitatively characterize the grain size characteristics and analyze the source of sediment in different areas of Ulanbuh desert along bank of the Yellow River, the grain size characteristics and particle size distribution of soil in different areas were studied by using traditional statistics and multifractal theory. The results show that the soil particle composition has obvious multifractal characteristics. The D_0 value of the opposite bank of sand head is 0.821, and the D_1 value is 4.386, which means that the distribution range of particle size is the widest and most uneven. The D_1 value of desert grassland is 2.970, and the D_1/D_0 value is 4.595, which means that the distribution of soil particle size is the most uniform and the degree of dispersion is the largest. Due to the influence of Ulanbuh desert on the left bank of the river channel, the grain size of the sediment on the left side of the river channel is coarser, which comes from the sand material of the desert, while the river channel on the right side is hardly affected by the desert.

Keywords: multi-fractal dimension; grain size characteristics; source analysis; Ulanbuh desert

(责任编辑: 王学风)

(上接第 14 页)

Determining the catchment property parameter of Budyko equation based on the complementary principle in the Loess Plateau

HAN Songjun, SHAO Weiwei

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In the present study, the catchment property parameter of Budyko equation was determined based on the complementary principle by using data from 29 catchments in the Loess Plateau. By analyzing the relationships between the catchment property parameter, vegetation coverage and atmospheric wetness index from the complementary principle, it was found that the vegetation coverage can be indirectly represented by the atmospheric wetness index. Thus, the catchment property parameter can be determined by the atmospheric wetness index, which is calculated by using the routinely measured meteorological variables. Compared to the fixed catchment property parameter, the performances on actual evapotranspiration estimation were improved by this approach. Because the meteorological data has longer time series and can be acquired more easily compared with the land surface data, this approach of determining the catchment property parameter has a good application prospect.

Keywords: evapotranspiration; Budyko equation; complementary principle; catchment property parameter; atmospheric wetness index

(责任编辑: 王学风)