

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.015.

刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 不同尺度下土壤粒径及分形特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 212-220.

Diao Erlong, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Soil Particle Size and Fractal Characteristics at Different Scales[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 212-220.

## 不同尺度下土壤粒径及分形特征

刁二龙<sup>1,2</sup>, 曹广超<sup>2</sup>, 曹生奎<sup>1,2</sup>, 袁杰<sup>1,2</sup>, 童珊<sup>1,2</sup>, 邱巡巡<sup>1,2</sup>

(1. 青海师范大学 地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室,

西宁 810008; 2. 青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008)

**摘要:** [目的] 土壤粒径及分形特征因研究尺度不同而存在差异, 从不同尺度上探讨土壤粒径及分形特征异质性, 以明确尺度效应对土壤粒径及分形特征的影响。[方法] 以黑河源区和八宝河小流域为研究区域, 采用单因素方差分析方法对不同尺度土壤粒径及分形维数进行差异显著性检验, 利用 Pearson 相关分析研究不同尺度下土壤分形维数与环境因子的相关性, 并使用地理探测器模型探究不同尺度下土壤分形维数环境驱动因素作用。[结果] (1) 黑河源区和八宝河小流域土壤粒径组成以粉粒和砂粒为主, 随着研究尺度扩大到黑河源区, 土壤黏粒、粉粒、砂粒和分形维数( $D$ )空间变异性增强, 土壤黏粒、粉粒和砂粒属于中等变异, 分形维数属于弱变异; (2) 不同土地利用类型土壤颗粒组分和分形维数因研究尺度不同而存在差异, 与八宝河小流域相比, 黑河源区 3 种土地利用类型土壤 PSD 频率曲线异质性增大, 土壤质地呈粗化趋势; (3) 皮尔逊相关分析和地理探测器结果均表明, 土壤粒径对分形维数的影响明显大于其他因子, 分形维数可以表征土壤质地情况。[结论] 不同尺度下土壤粒径及分形维数存在明显的异质性, 而这种异质性的产生是不同尺度环境因子综合作用的结果。

**关键词:** 尺度; 土壤粒径; 分形特征

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0212-09

## Soil Particle Size and Fractal Characteristics at Different Scales

Diao Erlong<sup>1,2</sup>, Cao Guangchao<sup>2</sup>, Cao Shengkui<sup>1,2</sup>, Yuan Jie<sup>1,2</sup>, Tong Shan<sup>1,2</sup>, Qiu Xunxun<sup>1,2</sup>

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Qinghai-Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** [Objective] Soil particle size and fractal characteristics vary depending on the scale of the study. The aims of this study are to explore the heterogeneity of soil particle size and fractal characteristics at different scales, and to clarify the influence of scale effects on soil particle size and fractal characteristics. [Methods] The Heihe River source area and the Babao River basin were taken as the study area. One-way analysis of variance (ANOVA) was utilized to test the significance of differences in soil particle size and fractal dimension at different scales. Pearson correlation analysis was conducted to investigate the correlation between soil fractal dimension and environmental factors at different scales. geographical detector modeling was employed to explore the impact of environmental drivers of soil fractal dimension at different scales. [Results] (1) In the Heihe River source area and the Babao River basin, the soil particle sizes were predominantly silt and sand. As the study scale expanded to the Heihe River source area, the spatial variability of soil clay, silt, sand, and fractal dimension ( $D$ ) increased. Soil clay, silt, and sand exhibited moderate variation, whereas  $D$  showed weak variation. (2) There were variations in soil particle composition

收稿日期: 2023-07-10

修回日期: 2023-10-18

资助项目: 青海省科技厅自然科学基金“祁连山国家公园青海片区典型流域土壤水文调蓄功能研究”(2021-ZJ-937Q)

第一作者: 刁二龙(1991—), 男, 山西大同人, 在读博士, 研究方向: 环境地表过程与生态响应。E-mail: 1530875132@qq.com

通信作者: 曹广超(1971—), 男, 山东苍山人, 博士, 教授, 研究方向: 环境变化与地理信息系统应用研究。E-mail: Caoguangchao@qhnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

and distribution in different land use types, which was influenced by different research scales. When compared to the Babao River small watershed, the heterogeneity of soil particle size distribution (PSD) frequency curves in the Heihe River source area was higher across three land use types, indicating a trend towards coarser soil texture. (3) Both Pearson correlation analysis and geographical detector results indicated that soil particle size had a significantly greater influence on  $D$  compared to other factors, and  $D$  could effectively characterize soil texture. [Conclusion] There is clear heterogeneity in soil particle size and fractal dimension at different scales, which is influenced by a comprehensive action of environmental factors at different scales.

**Keywords:** scale; soil particle size; fractal characteristics

土壤是由不同形状和大小的土壤颗粒组成,土壤粒径分布 (particle size distribution, PSD) 不仅反映土壤的结构和性质<sup>[1]</sup>,还会间接影响土壤的侵蚀<sup>[2]</sup>、肥力状况<sup>[3]</sup>。土壤是一种多孔介质,表现出不规则形状和自相似结构<sup>[4]</sup>,具有一定的分形特征。分形几何理论可以描述具有复杂形状和自相似特征的自然物体, Tyler 等<sup>[5]</sup>将分形理论引入土壤学研究中,这为定量研究土壤 PSD 特征提供了新的方法。激光粒度仪作为一种新型的粒度测试仪器,具有测试范围宽、重复性和真实性好的特点,这使得分形理论在土壤学研究中的应用更加广泛。 Jordão 等<sup>[6]</sup>研究了亚马逊州南部林地、可可和咖啡不同土地利用土壤质地的分形维数( $D$ ),结果表明可可种植区的  $D$  大于其他土地利用方式,此外  $D$  与黏土相关性最大; Bai 等<sup>[7]</sup>运用分形理论研究了松嫩平原西部  $D$  及其与土壤碱度的关系,结果表明  $D$  可以作为土壤碱化和碱性土壤质地变化的潜在指标。 阿克俭等<sup>[8]</sup>运用分形理论研究了长江源区不同植被类型  $D$ ,结果表明  $D$  与土壤粒径含量密切相关。

尺度的含义因学科不同而存在差异,在土壤学、气象学等学科中,不同尺度对应于不同的空间范围或时间幅度<sup>[9]</sup>。尺度因研究者的目的、方法不同而不一,不同尺度的土壤性质因为区域母质、地形、植被类型、人类活动强度不同而表现出明显的空间异质性<sup>[10]</sup>。近些年,一些学者对土壤粒级分形特征进行了研究<sup>[11-12]</sup>,但这些研究主要是对某一区域不同土地利用方式土壤颗粒分形特征的研究。黑河源区是祁连县及其中下游地区重要的水源地,是调节区域生态系统平衡之源,维系着西北地区生态安全和经济社会可持续发展。目前,对黑河源区的研究主要集中在土壤养分<sup>[13]</sup>、土壤侵蚀<sup>[14]</sup>、植被盖度变化等方面<sup>[15]</sup>,鲜有学者开展不同尺度下土壤颗粒分形特征的研究,本研究以黑河源区和八宝河小流域为研究区域,从两个不同尺度分析土壤粒径分形特征,以期明确尺度作用对土壤粒径及分形特征的影响,并为区域土壤质地评价提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑河源区地处青藏高原东北部祁连山中段腹地,地形以山地为主,地势起伏较大,该区域属高原大陆性气候,光照充足,雨热同季,土壤质地类型主要为粉质壤土、砂壤土和壤质砂土(图 1)。根据流向,黑河在源区分东西两支,西支即称为黑河,是黑河源区的干流,起源于铁里干山和八一冰川一带,土地利用类型主要为草地、乔木林地和灌木林地,土壤类型主要为高山土和半淋溶土;东支为八宝河(又名俄博河),是黑河的一级支流,流域面积约 2 450 km<sup>2</sup>,八宝河流域土地利用类型主要为草地、乔木林地和灌木林地,耕地面积较小且分布零散,土壤类型主要为高山土和半淋溶土,土壤质地类型主要为粉质壤土。

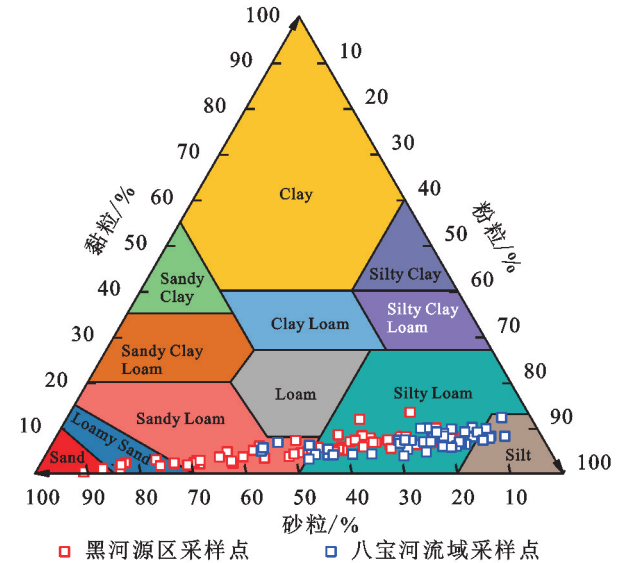


图 1 研究区采样点土壤质地

Fig. 1 Soil texture at sampling sites in the study area

1.2 样品采集与测定

通过对研究区水系、道路、土地利用类型的实地踏勘,于 2019 年 8 月在八宝河小流域和黑河源区进行土壤样品采集。在八宝河小流域和黑河源区分别选取采样点 45 个和 107 个(表 1),样品采集点分布在草

地、乔木林地和灌木林地。每个样点布设 20 m×20 m 标准样地,在样地内按 S 型布设 3 个 1 m×1 m 标准样方取重复样,将同一样地 3 个土样混合为 1 个土样,取样深度为 10 cm。土壤理化性质采用常规方法测定<sup>[16]</sup>;容重测定采用环刀法,总孔隙度根据土壤容重进行计算,有机质测定采用重铬酸钾容量法—外加热法,使用碳氮分析仪(Elementar Vario max)测定全氮,土壤粒径采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定<sup>[1]</sup>,土壤粒径划分参照美国制标准<sup>[1]</sup>。

### 1.3 其他数据来源与统计分析

DEM 数据:源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>) SRTMDEMUTM 90 m 数字高程数据。土地利用数据:源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m×30 m。归一化植被指数(NDVI)数据:本文使用的植被遥感数据 MOD13Q1,来源于 NASA 网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,经过拼接、裁剪及最大合成法得到 8 月 NDVI 数据。利用 ArcGIS 软件中的“多值对点提取”工具,提取采样点的属性值。使用 SPSS 软件进行描述性统计和逐步回归分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)的 Duncan 法进行差异显著性检验,利用 Pearson 进行相关性分析,使用地理探测器中的因子探测器进行土壤分形维数驱动因子分析,做图使用 Origin 2023。

### 1.4 研究方法

1.4.1 土壤单重分形模型 采用 Tyler 等<sup>[5]</sup>提出的土壤颗粒体积分形模型计算  $D$ ,模型计算公式如下:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{RL}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $r$  为土壤粒径; $R_i$  为第  $i$  级粒径; $V(r < R_i)$  为小于  $R_i$  的颗粒体积; $V_T$  为总体积; $RL$  为最大粒径。对上式两边取对数,分别以  $\log[V(r < R_i)/V_T]$  和  $\log[(R_i/RL)^{3-D}]$  为纵、横坐标进行线性拟合, $3-D$  为斜率, $D$  即为土壤分形维数。

1.4.2 地理探测器模型 地理探测器由王劲峰等<sup>[17]</sup>提出,它是一种用于探测空间分异性并揭示其背后驱动力的方法。地理探测器包括 4 个探测器,本研究主要使用因子探测器分析各环境因子对  $D$  的贡献率。因子探测用  $q$  值表示,值域 $[0,1]$ 。模型计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (4)$$

式中: $q$  为度量空间分异性的指标; $h$  为自变量  $x$  的分层, $h=1,2,\dots,L$ ;  $N_h$  为层  $h$  的单元数; $\sigma_h^2$  为层  $h$  的方差; $N$  为全区的单元数; $\sigma^2$  为总体的方差; $SSW$  为层内方差之和; $SST$  为区域总方差。

根据地理探测器数据要求,需要对连续变量进行数据离散化,本研究选用海拔、坡度、黏粒、粉粒、砂粒、容重、总孔隙度、有机质、全氮、归一化植被指数(NDVI)、土地利用类型 11 个指标作为自变量,除了土地利用类型外,其余 10 个自变量按自然间断的方法进行数据离散化,各指标划分为 5 个等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同尺度土壤颗粒组成及分形维数描述性统计

对黑河源区和八宝河小流域土壤颗粒组成及  $D$  进行描述性统计,结果见表 1。由表 1 可知,黑河源区土壤粒径含量粉粒最大(57.62%),其次为砂粒(36.28%),砂粒含量中又以极细砂为主,黏粒含量较低(6.10%);八宝河小流域土壤各粒径含量次序大小与黑河源区相同,具体表现为:粉粒(68.30%)>砂粒(24.74%)>黏粒(6.96%),黑河源区和八宝河小流域土壤粒径组成均以粉粒和砂粒为主,黏粒含量较低,但从土壤各粒径组分来看,八宝河小流域土壤细粒含量( $<50 \mu\text{m}$ )较黑河源区更大。受研究尺度的不同  $D$  也表现出一定的差异,黑河源区和八宝河小流域  $D$  分别为 2.61,2.64。从变异系数来看,黑河源区和八宝河小流域土壤黏粒、粉粒、极细砂和细砂均为中等变异( $10\% < CV < 100\%$ ),而中砂、粗砂和极粗砂为强变异( $CV > 100\%$ ), $D$  变异系数均小于 10%,属于弱变异。

### 2.2 不同尺度下各土地利用类型土壤颗粒组成及分形维数

由表 2 可知,黑河源区 3 种土地利用类型粉粒含量以乔木林地最大(68.67%),其次为灌木林地(64.71%),草地的粉粒含量最小(52.53%),乔木林地和灌木林地的粉粒含量显著大于草地( $p < 0.05$ ),砂粒含量次序与黏粒和粉粒相反,黏粒含量差异较小。黑河源区乔木林地的  $D$  最大(2.651),灌木林地次之(2.634),草地的  $D$  最小(2.593)。八宝河小流域乔木林地黏粒和粉粒含量最大,分别为 7.18%和 69.85%,其次为灌木林地,草地的黏粒和粉粒含量最低,分别为 6.71%和 67.19%, $D$  大小为,乔木林地(2.649)>灌木林地(2.643)>草地(2.639),八宝河小流域 3 种土地利用类型各粒径含量和  $D$  差异均不显著( $p > 0.05$ )。总体上看,土地利用类型在不同研究尺度上对土壤颗粒组成及  $D$  的影响作用不同。

表 1 不同尺度土壤颗粒组成及分形维数描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of particle composition and fractal dimension at different scales

尺度	样本数/个	描述性统计	黏粒	粉粒	砂粒						D
					极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	总量	
黑河源区	107	最小值/%	0.33	9.06	2.20	0.41	0.01	0.01	0.01	5.50	2.18
		最大值/%	13.38	84.93	31.44	38.09	45.36	32.92	8.67	90.61	2.73
		平均值/%	6.10	57.62	12.58	9.08	8.49	5.67	0.47	36.28	2.61
		标准偏差	2.49	18.34	5.13	6.50	9.71	7.53	1.32	20.35	0.09
		变异系数/%	40.84	31.83	40.82	71.58	114.43	132.84	279.34	56.10	3.27
八宝河流域	45	最小值/%	3.13	40.41	4.00	0.41	0.00	0.00	0.00	5.50	2.53
		最大值/%	12.23	84.93	29.76	23.84	22.34	17.53	5.71	54.67	2.73
		平均值/%	6.96	68.30	11.66	6.44	4.20	2.27	0.17	24.74	2.64
		标准偏差	2.01	11.71	4.18	5.21	4.50	3.24	0.85	13.00	0.04
		变异系数/%	28.83	17.14	35.38	80.80	107.31	142.67	507.92	52.56	1.69

表 2 不同尺度下各土地利用类型土壤颗粒组成及分形维数

Table 2 Soil particle composition and fractal dimension of each land use type at different scales

尺度	土地利用类型	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%						D	R <sup>2</sup>
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	总量		
黑河源区	乔木林地	7.26±0.45 <sup>a</sup>	68.67±2.97 <sup>a</sup>	11.50±0.58 <sup>a</sup>	6.42±0.95 <sup>b</sup>	3.79±0.65 <sup>b</sup>	2.02±0.44 <sup>b</sup>	0.34±0.30 <sup>a</sup>	24.06±2.34 <sup>b</sup>	2.651±0.01 <sup>a</sup>	0.78±0.03
	灌木林地	6.72±0.55 <sup>ab</sup>	64.71±3.65 <sup>a</sup>	11.90±0.90 <sup>a</sup>	7.23±1.27 <sup>ab</sup>	5.59±1.50 <sup>ab</sup>	3.67±1.31 <sup>ab</sup>	0.17±0.12 <sup>a</sup>	28.57±4.08 <sup>b</sup>	2.634±0.01 <sup>ab</sup>	0.79±0.07
	草地	5.61±0.31 <sup>b</sup>	52.53±2.30 <sup>b</sup>	13.05±0.71 <sup>a</sup>	10.36±0.84 <sup>a</sup>	10.61±1.33 <sup>a</sup>	7.24±1.02 <sup>a</sup>	0.60±0.18 <sup>a</sup>	41.85±2.55 <sup>a</sup>	2.593±0.01 <sup>b</sup>	0.84±0.08
八宝河流域	乔木林地	7.18±0.57 <sup>a</sup>	69.85±2.47 <sup>a</sup>	11.10±0.74 <sup>a</sup>	6.09±1.22 <sup>a</sup>	3.47±0.76 <sup>a</sup>	1.85±0.53 <sup>a</sup>	0.45±0.41 <sup>a</sup>	22.97±2.93 <sup>a</sup>	2.649±0.01 <sup>a</sup>	0.77±0.01
	灌木林地	7.06±0.65 <sup>a</sup>	68.17±3.90 <sup>a</sup>	10.89±1.03 <sup>a</sup>	6.58±1.69 <sup>a</sup>	4.82±1.41 <sup>a</sup>	2.47±0.80 <sup>a</sup>	0.01±0.01 <sup>a</sup>	24.77±4.35 <sup>a</sup>	2.643±0.01 <sup>a</sup>	0.78±0.02
	草地	6.71±0.42 <sup>a</sup>	67.19±2.93 <sup>a</sup>	12.65±1.24 <sup>a</sup>	6.62±1.28 <sup>a</sup>	4.32±1.26 <sup>a</sup>	2.46±1.02 <sup>a</sup>	0.06±0.05 <sup>a</sup>	26.10±3.14 <sup>a</sup>	2.639±0.01 <sup>a</sup>	0.78±0.01

注:不同小写字母表示同一研究尺度不同土地利用类型差异显著( $p<0.05$ )。

2.3 不同尺度各土地利用类型土壤粒度频率分布曲线

土壤粒度频率分布曲线可以表征土壤颗粒分布的异质程度,黑河源区(图 2A)和八宝河小流域(图 2B)3 种土地利用类型土壤粒度频率曲线均呈双峰型,与黑河源区相比,八宝河小流域土壤粒度频率分布曲线变化幅度较小。黑河源区乔木林地、灌木林地和草地粒度频率分布曲线第一波峰分别出现在 20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$  和 46  $\mu\text{m}$ ,与乔木林地相比,灌木林地和草地的土壤粒度频率曲线第一波峰向右发生偏移,虽然 3 种土地利用类型第二波峰未发生偏移(第二波峰均出现在 478  $\mu\text{m}$  附近),但土壤粒度频率分布曲线

变化幅度较大,尤其是草地的第二波峰变幅明显大于乔木林地和灌木林地,表明粗颗粒体积明显增加,土壤质地呈粗化趋势。总体上看,在黑河源区内,草地的粒度频率分布曲线较乔木林地和灌木林地均匀程度增加,土壤颗粒分布的异质程度增大。在八宝河小流域内,乔木林地、灌木林地和草地的土壤粒度频率分布曲线形态相似,高峰范围相近,第一波峰分别出现在 20  $\mu\text{m}$ 、23  $\mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}$  附近,第二波峰均出现在 417  $\mu\text{m}$  附近且土壤粒度频率分布曲线变化幅度较小,表明八宝河小流域 3 种土地利用类型土壤颗粒异质程度较小。

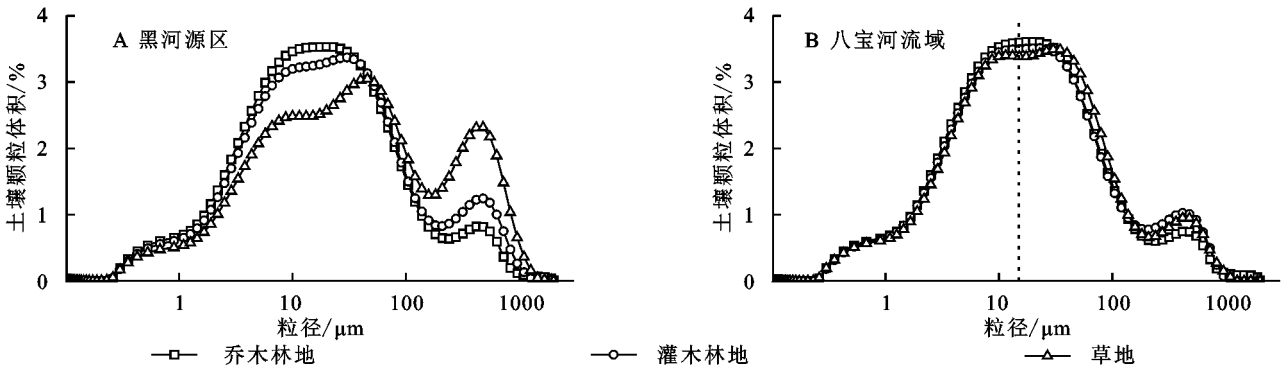


图 2 不同尺度下各土地利用类型土壤粒度频率分布

Fig. 2 Frequency curves of soil particle size distribution under different land use patterns at different scales



## 2.4 不同尺度土壤粒径与分形维数的关系

如图 3 所示,黑河源区和八宝河小流域土壤黏粒、粉粒含量与  $D$  呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),细砂、中砂、粗砂和砂粒总量与  $D$  呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),这表明  $D$  随土壤质地变粗而减小,0.1 mm 和 0.25 mm 粒径分别是八宝河小流域和黑河源区  $D$  值随土壤粒径变化的临界值,从决策系数  $R^2$  来看, $D$  与黏粒拟合效果最好( $R^2$  均达到 0.8 以上)。利用逐步

回归分析方法,进一步分析  $D$  与各粒径含量(黏粒  $X_1$ ,粉粒  $X_2$ ,极细砂  $X_3$ ,细砂  $X_4$ ,中砂  $X_5$ ,粗砂  $X_6$ ,极粗砂  $X_7$ ,砂粒总量  $X_8$ )的关系,黑河源区逐步回归方程为  $D = 2.517 + 0.02X_1 - 0.006X_5 + 0.003X_6 - 0.006X_7$ ,  $R^2 = 0.92$ ,八宝河小流域逐步回归方程为  $D = 2.524 + 0.019X_1 - 0.002X_4$ ,  $R^2 = 0.97$ ,逐步回归分析结果表明,黑河源区和八宝河小流域黏粒含量对  $D$  的影响最大。

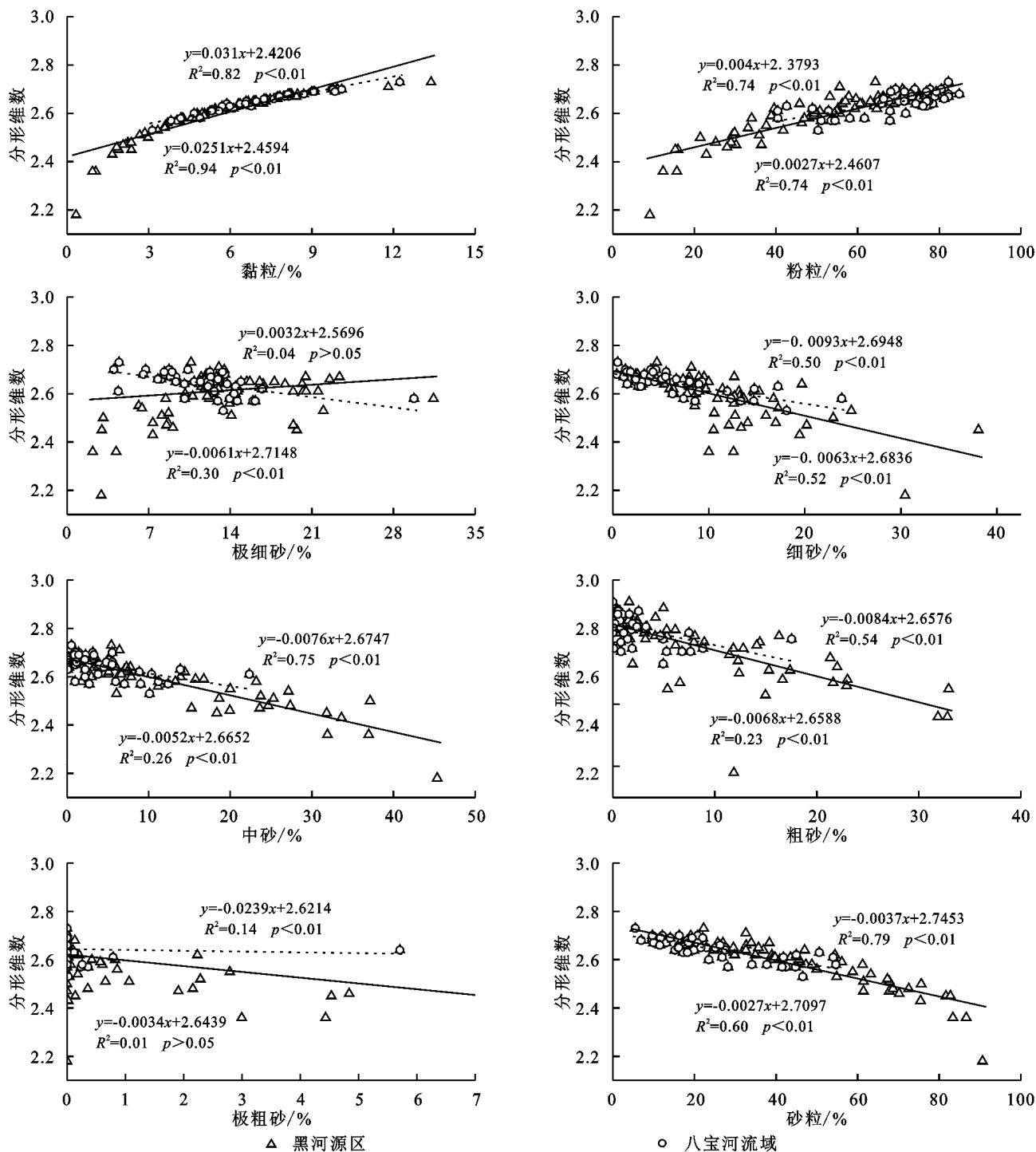


图 3 不同尺度下土壤粒径与分形维数的关系

Fig. 3 Relationship between soil particle size and fractal dimension at different scales

2.5 不同尺度下土壤分形维数影响因素分析

2.5.1 基于皮尔逊相关的土壤分形维数与环境因子相关性分析 由表 3 可知,不同尺度  $D$  与环境因子均存在一定的相关关系。在八宝河小流域,  $D$  与各环境因子的相关性未达到显著水平 ( $p>0.05$ ), 随着研究尺度扩大到黑河源区,  $D$  与各环境因子的相关性显著提高,  $D$  与有机质、全氮和坡度呈极显著正相

关,与海拔呈极显著负相关 ( $p<0.01$ )。环境因子间也存在一定的相关性,在八宝河小流域,坡度与极细砂呈显著正相关 ( $p<0.05$ ),全氮与细砂、极细砂呈显著或极显著负相关。在黑河源区,黏粒和粉粒与坡度、全氮、有机质呈显著或极显著正相关,与海拔呈显著或极显著负相关,砂粒总量与坡度、全氮、有机质和海拔的关系与粉粒相反。

表 3 不同尺度下土壤分形维数与环境因子相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of fractal dimension and environmental factors at different scales

尺度	因子	$D$	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	砂粒总量
黑河源区	海拔	-0.30 **	-0.22 *	-0.36 **	-0.11	0.17	0.35 **	0.39 **	0.23 *	0.36 **
	坡度	0.26 **	0.23 *	0.22 *	0.05	-0.21 *	-0.22 *	-0.14	-0.20 *	-0.23 *
	全氮	0.29 **	0.29 **	0.25 **	-0.24 *	-0.36 **	-0.14	-0.05	0.03	-0.26 **
	有机质	0.28 **	0.32 **	0.20 *	-0.11	-0.18	-0.15	-0.14	-0.22	-0.22 *
	容重	0.15	0.17	-0.05	0.02	0.00	0.01	-0.04	-0.03	0.03
	总孔隙度	-0.17	-0.18	-0.01	-0.03	0.06	0.04	0.04	0.02	0.03
	NDVI	0.09	0.06	0.04	0.07	-0.02	-0.07	-0.08	0.04	-0.05
	海拔	0.23	0.27	0.22	-0.16	-0.21	-0.16	-0.15	-0.18	-0.24
八宝河流域	坡度	-0.16	-0.09	-0.13	0.30 *	0.19	-0.05	-0.04	-0.21	0.13
	全氮	0.28	0.25	0.23	-0.42 **	-0.32 *	-0.01	0.05	0.12	-0.24
	有机质	0.18	0.24	-0.03	-0.24	-0.04	0.14	0.13	0.03	-0.01
	容重	0.15	0.17	-0.08	-0.01	0.01	0.10	0.10	-0.23	0.04
	总孔隙度	-0.20	-0.20	-0.15	0.06	0.20	0.10	0.08	0.24	0.17
	NDVI	0.06	-0.02	0.11	0.22	-0.07	-0.24	-0.22	0.00	-0.09
	海拔									

注: \* 和 \*\* 分别表示显著 ( $p<0.05$ ) 和极显著 ( $p<0.01$ ) 相关。

2.5.2 基于地理探测器的土壤分形维数驱动因子分析 受限于道路通达性和采样成本等问题,不同尺度野外采集的土壤样品数量有限,故利用 ArcGIS 软件进行渔网采样,并提取各渔网点的属性值。利用因子探测器进一步分析各环境因子对  $D$  的解释程度,因子探测器结果显示(图 4),黑河源区各环境因子对  $D$  解释程度为:黏粒>砂粒总量>粉粒>总孔隙度>容重>有机质>全氮>海拔>坡度>土地利用类型>NDVI,黑河源区  $D$  主要受土壤粒径影响,黏粒、砂粒总量和粉粒的解释力均在 80% 以上,其次为容重和总孔隙度,解释力在 40% 左右,其他环境因子对  $D$  影响较小,  $q$  值在 0.3 以下。八宝河小流域各环境因子对  $D$  解释程度为:黏粒>砂粒总量>粉粒>总孔隙度>容重>全氮>海拔>有机质>土地利用类型>NDVI>坡度,八宝河小流域  $D$  也主要受土壤粒径影响,  $q$  值在 0.4 以上,其他环境因子对  $D$  影响较小,  $q$  值在 0.2 以下。综上,黑河源区和八宝河小流域土壤粒径对于  $D$  的解释力普遍高于其他影响因子,尤以黏粒对  $D$  影响最明显,  $q$  值达到 0.8 以上。

3 讨论

3.1 不同尺度下土壤颗粒组分及分形维数分析

土壤粒径作为土壤基本的物理性质之一,继承了

母质的一定特征,并受环境变化的影响<sup>[18]</sup>,不同尺度土壤颗粒组分差异反映出其生境差异。黑河源区和八宝河小流域土壤颗粒组分主要以粉粒为主,砂粒次之,黏粒含量较低,这与李璇等<sup>[19]</sup>对祁连山区土壤颗粒组成研究结果一致,这是由于该地区成土母质主要为风积黄土,黄土的粒径组成主要是粉粒,此外,研究区部分成土母质为砂页岩风化物,受物理风化作用影响,风化物颗粒较粗。黑河源区砂粒含量(36.28%)大于八宝河小流域砂粒含量(24.74%),这是由于黑河源区岩石风化物除砂页岩风化物外,还有石灰岩类风化物,该类风化物发育的土壤砂粒较多<sup>[20]</sup>,此外,植被盖度会影响地表土壤颗粒流失情况和侵蚀程度,低植被盖度会增大表层细粒的流失,并使得土壤侵蚀程度加剧<sup>[21]</sup>,袁杰等<sup>[22]</sup>对黑河源区植被 NDVI 时空变化特征进行了研究,结果表明黑河源区植被覆盖度小于八宝河小流域,童珊等<sup>[21]</sup>对该区域土壤侵蚀时空变化特征进行了研究,结果表明黑河源区土壤侵蚀大于八宝河小流域,本文通过对研究区土壤采样点 NDVI 提取后发现,黑河源区土壤采样点 NDVI 均值(0.57)低于八宝河小流域土壤采样点 NDVI 均值(0.60),综合以上分析,黑河源区土壤粗粒大于八宝河小流域。由土壤分形维数计算过程可知,  $D$  受土壤颗粒组分影响明显,本研究结果表明,由于不同

研究尺度土壤颗粒组分差异明显,使得八宝河小流域  $D(2.64)$  与黑河源区  $D(2.61)$  也存在差异。有研究指出<sup>[23]</sup>,质地较细的  $D$  介于 2.6~2.8,八宝河小流域土壤质地较黑河源区偏细。随着研究尺度从八宝河小流域扩大到黑河源区,黏粒、粉粒、砂粒总量和  $D$  变异系数增大,这表明研究尺度不同,土壤颗粒组分和  $D$  表现出明显的空间异质性。

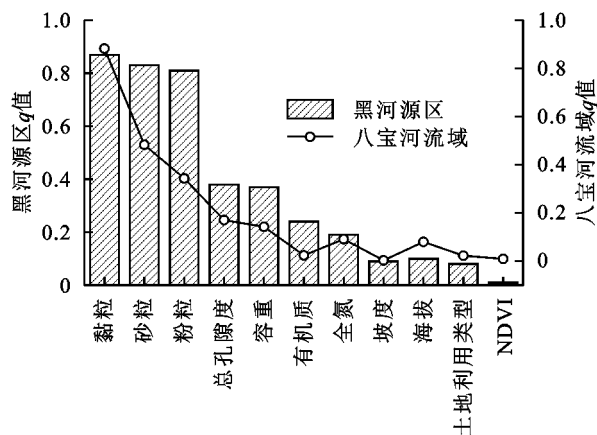


图 4 不同尺度下因子探测结果

Fig. 4 Factor detection results at different scales

### 3.2 不同尺度下各土地利用类型土壤颗粒组分及分形维数分析

土地利用类型不同是导致土壤性质空间变异的重要因素<sup>[24]</sup>,本研究结果显示,虽然黑河源区和八宝河小流域 3 种土地利用类型土壤粒径组成均以粉粒和砂粒为主,但不同土地利用类型土壤粒径含量和  $D$  仍存在一定差异。单因素方差结果显示(表 2),黑河源区草地砂粒含量显著大于乔木林地和灌木林地 ( $p < 0.05$ ),土壤粒度频率分布曲线(图 2A)也显示,草地的粒度频率分布曲线较乔木林地和灌木林地均匀程度增加,土壤颗粒分布的异质程度增大,究其原因,可能与不同土地利用类型表层土壤植被盖度、枯落物蓄积量有关<sup>[10]</sup>,较大的植被盖度、枯落物蓄积量可以减弱表层土壤的侵蚀。任立清等<sup>[15]</sup>对黑河上游植被时空分布研究表明,乔木林地的植被盖度大于草地,本研究通过对黑河源区采样点 NDVI 提取后也发现,乔木林地的 NDVI 均值(0.59)大于草地的 NDVI 值(0.57)。袁杰等<sup>[25]</sup>对祁连山南坡不同植被类型枯落物蓄积量研究显示,乔木林地和灌木林地的枯落物蓄积量大于草地的枯落物蓄积量。与黑河源区相比,八宝河小流域 3 种土地利用类型土壤各粒径组成差异较小 ( $p > 0.05$ ),土壤粒度频率分布曲线(图 2B)也显示,八宝河小流域 3 种土地利用类型土壤粒度频率分布曲线变化较为一致且变幅较小,这可能与八宝河小流域整体 NDVI 值较高有关。受不同研究尺度各土地利用类

型土壤颗粒组分差异的影响,黑河源区乔木林地、灌木林地和草地的  $D$  分别为 2.651, 2.634, 2.593,八宝河小流域为 2.649, 2.643, 2.639,有研究指出<sup>[26]</sup>,结构良好的土壤  $D$  应在 2.75 左右,与之相比,本研究不同尺度 3 种土地利用类型  $D$  均低于 2.75。

### 3.3 不同尺度下土壤分形维数与环境因子的关系

黑河源区和八宝河小流域  $D$  与黏粒、粉粒含量呈极显著正相关,与砂粒总量呈极显著负相关,这与安克俭等<sup>[8]</sup>研究结果一致,但与赵明月等<sup>[10]</sup>研究结果有所区别,这可能与不同研究区域尺度大小、环境因子空间异质性、上覆植被类型差异、粒径分级标准和土壤颗粒组分不同等有关<sup>[10,27]</sup>。 $D$  与容重呈正相关,而与总孔隙度呈负相关,这是因为  $D$  越大表征土壤质地越细,土壤越紧实,通透性越差<sup>[28]</sup>。 $D$  与有机质、全氮呈正相关,这可能与土壤有机质含量受土壤粒径大小影响有关,有研究表明,质地较细的土壤因其体表较大吸附能力较强,更易于吸附土壤有机质<sup>[29]</sup>,此外,土壤氮素主要来源于土壤有机质<sup>[30]</sup>,有机质含量高的土壤全氮含量也较高。 $D$  与海拔、坡度的相关关系在不同的研究尺度表现出不同的相关性,在黑河源区, $D$  与海拔呈负相关,而在八宝河小流域, $D$  与海拔呈正相关,这可能是因为不同研究尺度内采样点存在地形差异,海拔和坡度不同会导致地表光、温、水与土壤因子等的综合变化,进而引起植被盖度的变化,高植被盖度会减弱表层土壤受侵蚀的程度<sup>[10]</sup>。地理探测器在分析驱动因子对目标变量的解释程度方面有其独特作用,由因子探测器分析可知,土壤粒径是黑河源区和八宝河小流域  $D$  的主要驱动因子。土壤是在各种成土因素共同作用下形成的,环境因子之间相互作用,因此很难用单一的环境变量来解释土壤粒径分形的变化,在今后的研究中应更加注重环境因子综合作用对土壤粒径分形特征的影响,此外,环境变量和目标变量会因研究尺度不同而表现出明显的空间异质性,在采样时应注重区域化差异,合理设计采样点,从而更加准确地揭示出不同研究尺度下目标变量的空间异质性及受环境变量影响程度。

## 4 结论

(1) 黑河源区和八宝河小流域土壤粒径含量大小为:粉粒 > 砂粒 > 黏粒,土壤粒径组成以粉粒和砂粒为主, $D$  分别为 2.61, 2.64, 八宝河小流域土壤质地较黑河源区细,土壤黏粒、粉粒和砂粒总量属于中等变异, $D$  属于弱变异,随着研究尺度的扩大,土壤颗粒组分和  $D$  的空间异质性增强。

(2) 黑河源区和八宝河小流域 3 种土地利用类

型土壤黏粒、粉粒和  $D$  均表现为,乔木林地>灌木林地>草地,与八宝河小流域相比,黑河源区3种土地利用类型土壤 PSD 频率曲线异质程度增大,土壤粗颗粒化。

(3) 不同尺度  $D$  与环境因子均存在一定的相关关系。随着研究尺度的扩大, $D$  与土壤理化性质相关性明显增强。地理探测器结果显示,研究尺度不同,各环境因子对  $D$  的解释程度不同,总体上看,土壤粒径是黑河源区和八宝河小流域  $D$  的主要驱动因子。

#### 参考文献 (References):

- [1] 宛倩,王杰,王向涛,等.青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J].生态学报,2022,42(5):1716-1726.  
Wan Q, Wang J, Wang X T, et al. Effects of different meadow use types on the fractal characteristics of soil particle in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):1716-1726.
- [2] Qi F, Zhang R H, Liu X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:45-51.
- [3] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.  
Liu J Y, Zhou Z C, Su X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):267-273,298.
- [4] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. theory[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55(5):1231-1238.
- [5] 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.
- [6] Jordão H W C, Campos M C C, da Cunha J M, et al. Fractal features of soil texture and physical attributes in Indian dark earth under different uses in Western Amazon [J]. Bioscience Journal, 2020,36(6):1961-1974.
- [7] Bai Y F, Qin Y, Lu X R, et al. Fractal dimension of particle-size distribution and their relationships with alkalinity properties of soils in the western Songnen Plain, China[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):20603.
- [8] 安克俭,魏霞,赵恒策,等.长江源区高寒草原和高寒草甸土壤粒径分布特征[J].应用生态学报,2021,32(2):433-440.  
An K J, Wei X, Zhao H C, et al. Distribution characteristics of soil particle size in alpine steppe and alpine meadow in the source region of the Yangtze River, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(2):433-440.
- [9] 任建兰,张伟,张晓青,等.基于“尺度”的区域环境管理的几点思考:以中观尺度区域(省域)环境管理为例[J].地理科学,2013,33(6):668-675.  
Ren J L, Zhang W, Zhang X Q, et al. Regional environmental management from the scale: A case study of medium scale[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013,33(6):668-675.
- [10] 赵明月,赵文武,刘源鑫.不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2015,35(14):4625-4632.  
Zhao M Y, Zhao W W, Liu Y X. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: A case study in the Loess Hilly-gully area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(14):4625-4632.
- [11] 沙国良,魏天兴,陈宇轩,等.黄土高原丘陵区典型植物群落土壤粒径分布特征[J].干旱区地理,2022,45(4):1224-1234.  
Sha G L, Wei T X, Chen Y X, et al. Characteristics of soil particle size distribution of typical plant communities on the hilly areas of Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2022,45(4):1224-1234.
- [12] 董智今,展秀丽,丁小花.毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J].水土保持研究,2022,29(3):43-48,56.  
Dong Z J, Zhan X L, Ding X H. Fractal features of soil particles under different land uses in the southwestern edge of the Mu Us sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):43-48,56.
- [13] 苏世锋,李世雄,赵文,等.黑河源区退化草地恢复过程中土壤磷养分及其调控因子[J].草业科学,2022,39(8):1562-1570.  
Su S F, Li S X, Zhao W, et al. Study on soil phosphorus nutrient and its regulatory factors during the restoration of degraded grassland in the source region of Heihe River[J]. Pratacultural Science, 2022,39(8):1562-1570.
- [14] 童珊,曹广超,闫欣,等.祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(5):100-107,116.  
Tong S, Cao G C, Yan X, et al. Quantitative study on soil erosion and its influencing factors on the south slope of Qilian Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):100-107,116.
- [15] 任立清,董国涛,谷佳贺,等.黑河上游植被时空分布及驱动力分析[J].水土保持研究,2021,28(4):244-250.  
Ren L Q, Dong G T, Gu J H, et al. Spatiotemporal distribution and driving force analysis of vegetation in



- the upper reaches of Heihe River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):244-250.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 拓飞,董治宝,南维鸽,等.沙地柏人工林和天然林风沙土特性研究[J].水土保持研究,2021,28(2):80-87.
- Ta F, Dong Z B, Nan W G, et al. Study on the characteristics of aeolian sandy soils in plantation and natural stand of *Sabina vulgaris* [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):80-87.
- [19] 李璇,杨帆,李德成,等.祁连山区土壤砂粒含量剖面分布模式及其影响因素[J].土壤学报,2017,54(4):854-863.
- Li X, Yang F, Li D C, et al. Mode of profile distribution of soil sand content and its affecting factors in the Qilian Mountains[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(4):854-863.
- [20] 林小兵,张秋梅,周利军,等.不同母质发育及 pH 的农田土壤重金属含量差异[J].环境生态学,2021,3(1):83-88.
- Lin X B, Zhang Q M, Zhou L J, et al. Change of heavy metals in farmland soil from different parent material development and pH [J]. Environmental Ecology, 2021,3(1):83-88.
- [21] 童珊,曹广超,张卓,等.祁连山南坡土壤侵蚀时空变化及迁移特征分析[J].水土保持研究,2022,29(4):18-27.
- Tong S, Cao G C, Zhang Z, et al. Analysis of the spatial and temporal changes and migration characteristics of soil erosion in the south slope of Qilian Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):18-27.
- [22] 袁杰,曹广超,杨登兴,等.祁连山黑河源区植被 NDVI 时空变化特征及影响因素分析[J].生态科学,2021,40(5):172-182.
- Yuan J, Cao G C, Yang D X, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation NDVI in Heihe source region of Qilian Mountains [J]. Ecological Science, 2021,40(5):172-182.
- [23] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009,154(1/2):123-130.
- [24] 许明祥,刘国彬,赵允格.黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J].应用生态学报,2011,22(2):409-417.
- Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Effects of land use and environmental factors on the variability of soil quality indicators in hilly Loess Plateau region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(2):409-417.
- [25] 袁杰,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J].生态科学,2018,37(5):180-190.
- Yuan J, Cao G C, Cao S K, et al. Analysis on litterfall and soil water retention properties of different vegetation types on the South Slope of Qilian Mountains[J]. Ecological Science, 2018,37(5):180-190.
- [26] 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.
- Liu Y P, Wang G D, Zhang S Q, et al. Fractal characteristics of particle-size distribution for four kinds of soil samples in Shaanxi [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003,31(2):92-94.
- [27] 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.
- Gao C Y, Zhao Q H, Liu Q. Fractal characteristic of soil particle size under different vegetation types in riparian zone of the main stream of Beijiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(3):37-42.
- [28] 王瑞东,高永,党晓宏,等.希拉穆仁天然草地不同群落土壤分形特征及其影响因素[J].水土保持研究,2020,27(3):51-56.
- Wang R D, Gao Y, Dang X H, et al. Characteristics of soil fractals and the influencing factors of different plant communities in the XiLamuren grassland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3):51-56.
- [29] Lobe I, Amelung W, Du Preez C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld[J]. European Journal of Soil Science, 2010,52(1):93-101.
- [30] 高洋,王根绪,高永恒.长江源区高寒草地土壤有机质和氮磷含量的分布特征[J].草业科学,2015,32(10):1548-1554.
- Gao Y, Wang G X, Gao Y H. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen, phosphor content in alpine grassland ecosystem in upper Yangtze River[J]. Pratacultural Science, 2015,32(10):1548-1554.