

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.238>



黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带土壤粒径分形特征

南富森¹, 李宗省^{1,2*}, 张小平^{1*}, 梁鹏飞³, 熊雪婷¹

1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000
3. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070

摘要: 研究土壤粒径分形特征, 可为地区土壤质量评价提供科学依据. 利用分形理论分析了黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带土壤粒径分形特征. (1) 区域土壤颗粒主要为粉粒和极细砂粒, 随荒漠化加重和土壤深度增加, 土壤粗粒化, 质地均匀性降低, 粒径分布 (PSD) 频率曲线异质程度增大; (2) 荒漠化加重和土壤深度增加降低了单重分形维数 D_v 和多重分形谱参数 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 、 $\Delta\alpha$ 、 Δf ; (3) D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 同黏粒、粉粒呈正相关, 同砂粒呈负相关; 黏粒、粉粒、 D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 与荒漠化减弱程度呈正相关, 砂粒与其呈负相关. 土壤分形维数能反映区域土壤结构和变化, 可为地区生态治理与巩固提升提供技术指导.

关键词: 粒径分布; 分形特征; 荒漠-草原过渡带; 生态学.

中图分类号: P951

文章编号: 1000-2383(2023)03-1195-10

收稿日期: 2022-04-27

Particle Size Fractal Characteristics of Soils in Desert-Steppe Transition Zone along the Northern Bank of Yellow River Basin in Lanzhou

Nan Fusen¹, Li Zongxing^{1,2*}, Zhang Xiaoping^{1*}, Liang Pengfei³, Xiong Xueting¹

1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China
2. Northwest Institute of Eco-Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
3. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The study of soil grain fractal characteristics in the desert-steppe transition zone can provide a scientific basis for regional soil quality evaluation, ecological management, and restoration. In this study, we use fractal theory to analyze the soil particle composition and fractal characteristics of three vegetation types in the desert-steppe transition zone along the northern bank of the Yellow River basin in Lanzhou. (1) The soil in the study area is mainly composed of silt and very fine sand, and as desertification degree and soil depth increase, the contents of clay and silt decrease and sand contents show the opposite trend. In addition, the frequency curve of soil particle size distribution (PSD) becomes more heterogeneous, and the homogeneity of soil texture decreases. (2) The single fractal dimension (D_v), multifractal generalized dimension spectrum parameters (D_1 , D_1/D_0 , and D_2), and the singular spectral function parameters ($\Delta\alpha$ and Δf) decrease significantly with the increase of desertification degree and soil depth. (3) D_v , D_1 , D_2 , D_1/D_0 , $\Delta\alpha$, and Δf are significantly positively correlated with clay and silt contents, and

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目专题 (No. 2019QZKK0405); 国家自然科学基金项目 (No. 42077187); 中国科学院青年交叉团队项目 (No. JCTD-2022-18); 国家重点研发计划项目专题 (No. 2020YFA0607702); 中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项; 甘肃省创新群体项目 (20JR10RA038).

作者简介: 南富森 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为寒区旱区土壤物理化学循环. ORCID: 0000-0003-1919-7926. E-mail: nanfsn@163.com

* **通讯作者:** 李宗省, E-mail: lizxhhs@163.com; 张小平, E-mail: zxp296@163.com

引用格式: 南富森, 李宗省, 张小平, 梁鹏飞, 熊雪婷, 2023. 黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带土壤粒径分形特征. 地球科学, 48(3): 1195-1204.

Citation: Nan Fusen, Li Zongxing, Zhang Xiaoping, Liang Pengfei, Xiong Xueting, 2023. Particle Size Fractal Characteristics of Soils in Desert-Steppe Transition Zone along the Northern Bank of Yellow River Basin in Lanzhou. *Earth Science*, 48(3): 1195-1204.

significantly negatively correlated with sand contents. The clay contents, silt contents, D_v , D_1 , D_2 , D_1/D_0 , $\Delta\alpha$, and Δf are positively correlated with the decrease of desertification degree, while the sand content is negatively correlated with it. The single weight and multiple fractal dimensions of soil can well reflect the structural properties and changes of soil in different vegetation types of the desert-steppe transition zone, which can provide theoretical basis and technical guidance for regional ecological management and consolidation.

Key words: particle size distribution (PSD); fractal characteristics; desert-steppe transition zone; ecology.

土壤由颗粒状矿物质、有机质、空气、水分和微生物等组成,具有疏松多孔介质特性(兰龙焱等,2022),而土壤颗粒作为土壤结构的基本单元,对于土壤结构特征、水力特性、肥力和抗侵蚀性等具有重要影响(王德等,2007),其粒径分布(particle size distribution,简称PSD)特征可作为水土保持、养分状况、作物生长等的评价指标(冯瑞等,2017;李国旗等,2018).因此,对于土壤PSD的定量分析已成为土壤物理学的研究重点之一.

基于分形理论的研究方法近年来已成为研究土壤PSD的主要技术手段(Qi *et al.*, 2018).在早期,研究者更多地利用单重分形来研究土壤PSD,其对于反映土壤的整体性和均一性具有一定优势.其中胡云锋等(2005)基于不同粒径土壤重量分布的单重分形模型证明土壤分形的测算对于评估我国农牧交错带风蚀地区的风蚀程度具有指示意义;Wang *et al.*(2005)通过对Kozak *et al.*(1996)的单重分形方法进行改进,研究了不同土地利用模式下青藏高原干旱半干旱地区土壤的分形维数特征.随着激光粒度仪的发明与使用,对于土壤PSD的多重分形维数的研究也愈来愈多(Dai *et al.*, 2019;郭士维等,2022;宛倩等,2022),相较于单重分形维数,多重分形维数在表征土壤复杂的空间变异和非均质行为上具有很好的效果(Dai *et al.*, 2019),这为研究者进一步探究土壤结构及其与土壤肥力、土地利用类型和管理模式等之间的关系提供了便利.例如通过多重分形维数可探究不同土地利用方式下土壤PSD的结构特征,分析其与有机质之间的关系来评价土地利用方式的合理性(郭士维等,2022);在研究不同管理模式下土壤粒径的多重分形特征时,通过分析其与土壤养分特征之间的关系进而得出不同管理模式对于土壤质地改良的影响(宛倩等,2022).因此,单重分形和多重分形的结合,可更全面地揭示土壤PSD信息,反映土壤物理性质的变化特征(戴磊等,2021).

黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带植物组成简单,植被稀疏低矮,生态系统敏感脆弱,荒漠化演替明显,按照荒漠化程度的轻重程度可将其分为

荒漠草原、草原化荒漠和荒漠3种植被类型区.目前研究人员针对该区域已开展了水热特征(岳平等,2015)、土壤侵蚀(武翠翠和王世杰,2021)和水土保持(马海芸等,2012)等方面的研究,但有关土壤PSD的研究还处于空白状态.鉴于此,本文主要从不同植被类型区土壤颗粒机械组成、土壤PSD的单重和多重分形维数特征变化进行对比分析,以期后续区域生态治理与恢复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带(图1, $36^{\circ}0'0''\sim 37^{\circ}40'0''\text{N}$, $102^{\circ}0'0''\sim 104^{\circ}40'0''\text{E}$)属于温带半干旱大陆性气候,年均气温 $3.1\sim 9.1^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $180\sim 450\text{mm}$,年蒸发量为 $1\ 100\sim 2\ 100\text{mm}$,年日照时数 $2\ 050\sim 2\ 950\text{h}$,无霜期 $141\sim 158\text{d}$.该地区土壤类型主要为砂壤土、灰钙土和黄绵土等,土壤质地(图2)主要为砂壤土、粉质壤土和粉粒,自然植被以半灌木和矮半灌木为主,由南向北荒漠化程度逐渐加剧,是黄土高原土壤侵蚀、水土流失发生的重要地区.

1.2 样品采集与测定

本研究于2020年6月在黄河上游兰州段丘陵

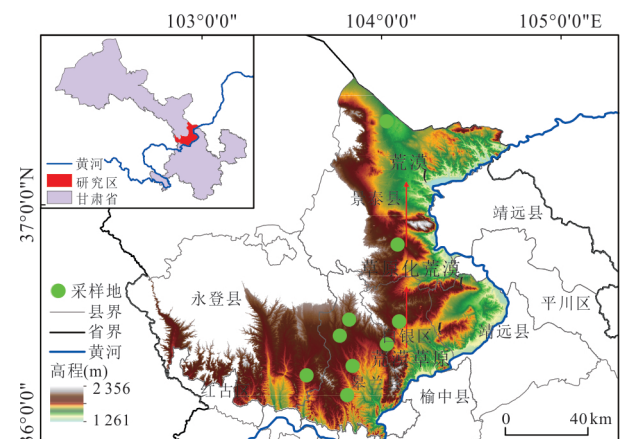


图1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

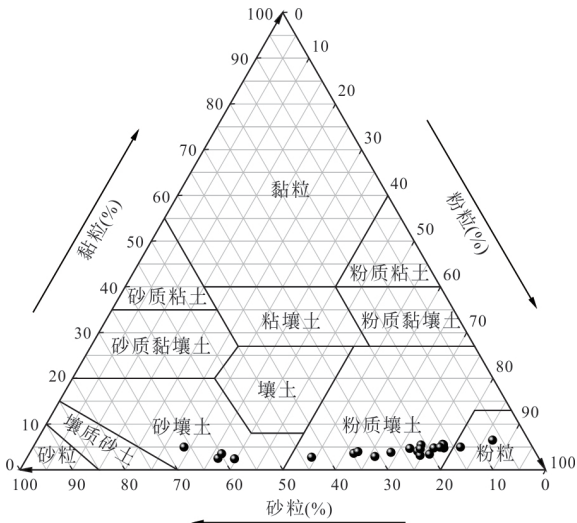


图2 采样点土壤质地

Fig.2 Soil texture at sampling sites

区进行采样工作,研究区内共设置12个采样地(图1),分层采集0~20 cm和20~40 cm土壤样品共24组,将土壤样品带回实验室后阴干过筛.取过10目筛样品0.5 g置于烧杯中,加入10 mL 10%的 H_2O_2 加热反应至气泡消失,以去除样品中的有机质;而后加入10 mL 10%的HCl去除样品中的碳酸盐,待反应完全后注满蒸馏水静置10 h.静置完成后去除上清液并加入六偏磷酸钠分散剂10 mL,使用超声波振荡仪超声15 min,最后使用FBS6100-B激光粒度仪进行土壤粒径分析,仪器测量范围为0.1~1 250.0 μm ,每个样品重复测定3次,取其均值作为最终结果.本研究以美国制分类标准作为粒径分类依据.

1.3 土壤分形维数

1.3.1 单重分形维数 使用激光粒度仪获取土壤颗粒体积分布数据,采用土壤颗粒体积分形模型计算单重分形维数,具体公式如下:

$$D_v = 3 - \frac{\lg(V_i/V_0)}{\lg(d_i/d_{\max})}, \quad (1)$$

式中: D_v 为土壤颗粒体积分形维数值, V_i 为直径小于 d_i 的土壤颗粒的总体积, V_0 为土壤颗粒的总体积, d_i 是某粒径区间上下限的算术平均值, d_{\max} 为粒径分级中的最大粒径值.

1.3.2 多重分形维数 对于单重分形,有一个标度指数 α 和一个分维数 D 便可,而对于非均匀分布的分形,则可看作是由单重分形集合构成的集合,它的 α 和 D 都不再是常量,这样的分形即为多重分形(徐建华,2002).本文的多重分形分析方法主要参考

于王德等(2007)、宛倩等(2022)的研究,首先将原有的测量区间 $[0.1, 1250]$ 划分为对数等差递增的100个小区间 $I_i = [\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, $i=1, 2, 3, \dots, 100$,这样 $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 便为一个常数,该划分在遵从土壤粒径分布规律的同时也更加客观;其次,划分完100个小区间后令 $\phi_i = \lg(\varphi_i, \varphi_1)$,构建出一个无量纲区间 $\omega = [\lg(0.1/0.1), \lg(1250/0.1)] = [0, 4.10]$,生成100个新的等距小区间 $\omega_i = [\phi_i, \phi_{i+1}]$, $i=1, 2, 3, \dots, 100$,则这100个区间对应的体积分数分别为 v_1, v_2, \dots, v_{100} ;最后,用尺度为 ϵ 的相等的“盒子”对整个土壤粒径分布跨度进行划分,得到盒子总数为 N ,这里设定 $\epsilon = 4.1 \times 2^{-k}$,则 $N = 2^k$,本文 k 值取为 $[1, 6]$, ϵ 取值为2.05、1.025、0.513、0.256、0.128、0.064.由每个盒子所占的概率密度(即区间内体积分数 v_i 的加和) $\mu_i(\epsilon)$ 、尺度 ϵ 和参数 q 可构建出一个配分函数族:

$$\mu_i(q, \epsilon) = \frac{\mu_i(\epsilon)^q}{\sum_{i=1}^N \mu_i(\epsilon)^q}, \quad (2)$$

式中, $\mu_i(q, \epsilon)$ 为第 i 个子区间 q 阶概率,这里 q 取值 $[-8, 8]$,步长为1,则土壤粒径分布的Rényi信息熵 $D(q)$ (即多重分形广义维数谱)为:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\lg \left[\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)^q \right]}{\lg \epsilon} \right) (q \neq 1), \quad (3)$$

$$D_1 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon) \lg \mu_i(\epsilon)}{\lg \epsilon} \right) (q = 1), \quad (4)$$

式中,当 $q=0$ 时, D_0 为容量维数,即经典分形维数; $q=1$ 时, D_1 为信息维数,提供分布均匀度或异质性的信息; $q=2$ 时, D_2 为关联维数,提供分布聚集程度的信息.

同样地,可计算得出奇异强度 $\alpha(q)$ 和奇异谱函数 $f(q)$:

$$\alpha(q) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(q, \epsilon) \lg \mu_i(\epsilon)}{\lg \epsilon}, \quad (5)$$

$$f(q) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(q, \epsilon) \lg \mu_i(q, \epsilon)}{\lg \epsilon}. \quad (6)$$

1.4 数据处理

本研究中所有的统计分析皆在SPSS 22.0

中完成,采用单因素方差分析法(one way-ANOVA)分析不同荒漠化程度和不同深度下 D_v 、 D_0 、 D_1 、 D_2 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 的差异性,并采用最小显著差异法(LSD)检测差异程度;采用Pearson相关分析和主成分分析法(PCA)分析土壤机械组成同分形维数之间的关系.土壤多重分形维数的计算在MFA软件(Han *et al.*, 2020)中完成,所有图像的绘制均使用Origin 2021b完成.

2 结果与分析

2.1 土壤机械组成与分布频率

由图3可知,研究区土壤颗粒主要以粉粒和极细砂粒为主,按照体积分数由大到小依次为粉粒>极细砂粒>细砂粒>黏粒>中砂粒>粗砂粒,表现出随着荒漠化程度加重和土壤深度增加,土壤颗粒逐渐加粗的趋势.具体为:黏粒和粉粒含量在0~20 cm(图3a)和20~40 cm(图3b)由大到小依次为荒漠草原>草原化荒漠>荒漠,其中黏粒体积分数在0~20 cm分别为3.01%、4.49%和4.53%,在20~40 cm分别为3.03%、4.16%和4.93%,粉粒体积分数在0~20 cm分别为50.65%、72.23%和78.40%,在20~40 cm分别为36.50%、67.84%和78.24%;极细砂粒体积分数在0~20 cm由大到小依次为荒漠(23.16%)>草原化荒漠(19.53%)>荒漠草原(15.31%),在20~40 cm由大到小依次为草原化荒漠(23.68%)>荒漠草原(15.77%)>荒漠(14.56%);细砂粒表现出与黏粒和粉粒相反的分趋势,在0~20 cm和20~40 cm由大到小依次皆为荒漠>草原化荒漠>荒漠草原,在0~20 cm体积分数分别为1.76%、3.73%和18.13%,在20~40 cm分别为1.06%、4.30%和21.85%;中砂粒和粗砂粒表

现出与细砂粒相似分布趋势,且基本只存在于荒漠土壤中,在0~20 cm体积分数分别为4.57%和0.48%,在20~40 cm分别为18.77%和5.28%.

土壤PSD频率曲线能够直观地反映土壤质地情况,频率分布曲线分布越均匀,则各分级内土壤颗粒体积分数越接近,颗粒分布的异质程度越大(王德等,2007).由图4可知,随着荒漠化程度加重,土壤PSD频率曲线均匀程度增加,颗粒分布的异质程度增大.其中荒漠草原和草原化荒漠土壤粒径分布频率曲线变化幅度较大,而随土壤深度变化不大,颗粒主要分布在1~100 μm 之间,说明荒漠草原和草原化荒漠土壤颗粒的异质程度较小,主要以细颗粒($<50 \mu\text{m}$)为主;而荒漠土壤PSD频率曲线变化幅度较小,各粒径段体积分数分布较均匀,且20~40 cm相较0~20 cm峰值向右移动,出现双峰情况,土壤颗粒主要分布于10~1 000 μm ,说明荒漠土壤颗粒分布的异质程度较大,且20~40 cm土壤相较0~20 cm颗粒异质程度有所增大.

2.2 土壤粒径分布的单重分形特征

通过拟合 $\lg(d_i/d_{\max})$ 和 $\lg(V_i/V_0)$ 建立回归曲线,计算出不同植被类型区土壤0~20 cm和20~40 cm土壤PSD单重分形维数 D_v .由图5可知,不同植被类型区土壤PSD单重分形维数 D_v 范围为(2.35 \pm 0.03)~(2.42 \pm 0.06),由大到小依次为荒漠草原>草原化荒漠>荒漠,表明随着荒漠化程度的加剧,土壤中细粒物质的损失量加大.在0~20 cm,荒漠草原(2.41 \pm 0.01)和草原化荒漠(2.41 \pm 0.01)土壤PSD单重分形维数 D_v 显著大于荒漠土壤(2.35 \pm 0.03)($P<0.05$);在20~40 cm,荒漠(2.37 \pm 0.03)和荒漠草原(2.42 \pm 0.06)土壤PSD单重分形维数 D_v 略有上升,而草原化荒漠(2.39 \pm 0.05)则有所下

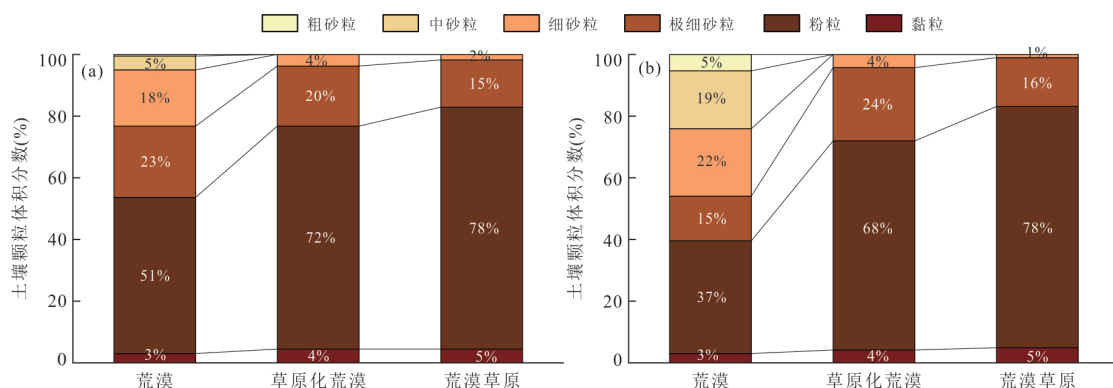


图3 不同植被类型区土壤颗粒组成

Fig.3 Soil particle composition in different vegetation types

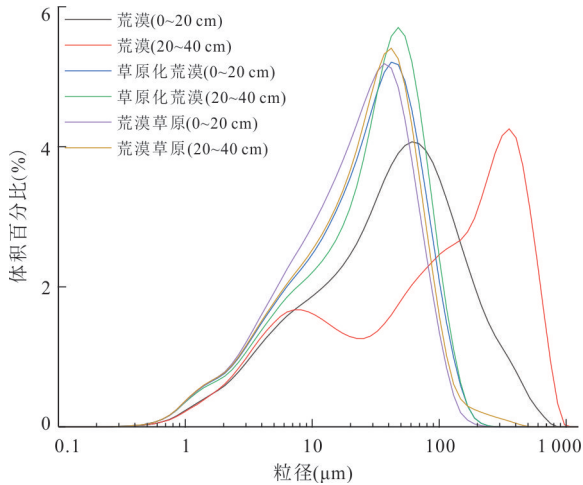


图4 不同植被类型区土壤PSD频率曲线

Fig.4 Soil PSD frequency curve in different vegetation types

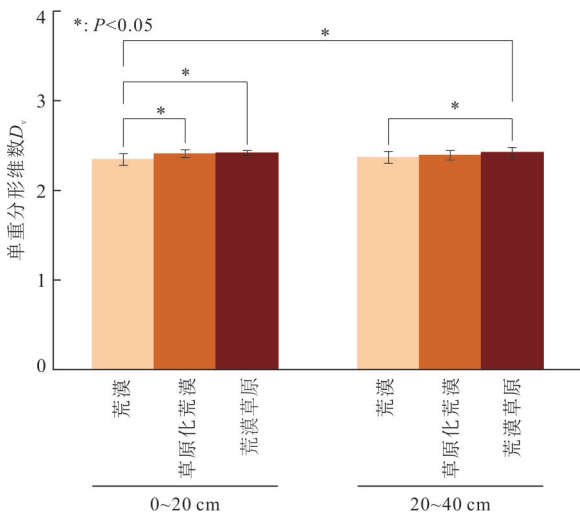


图5 不同植被类型区土壤PSD单重分形维数

Fig.5 Single fractal dimension of soil PSD in different vegetation types

降,表现为荒漠草原土壤PSD单重分形维数 D_v 显著大于荒漠土壤($P<0.05$);此外,除0~20 cm荒漠土壤PSD单重分形维数 D_v 显著小于20~40 cm荒漠草原土壤外,其余植被土壤PSD单重分形维数 D_v 在0~20 cm和20~40 cm皆无显著差异($P<0.05$).

2.3 土壤粒径分布的多重分形特征分析

如图6a所示,不同植被类型区土壤PSD的广义维数谱呈反“S”状下降,具有一定变化幅度,且当 $q>0$ 时下降趋势比 $q<0$ 更显著;同时由表1可知,广义维数谱参数 D_0 、 D_1 、 D_2 之间关系为 $D_0>D_1>D_2$,说明各级土壤PSD呈现出非均匀性,具有对其进行多重分形分析的必要性.当 $q<0$ 时, $D(q)$ 的变化幅度由大到小依次为荒漠草原>草原化荒漠>

荒漠,且除荒漠草原外表现为(0~20 cm)>(20~40 cm),表明随着荒漠化程度加重和土壤深度增加,土壤分形结构的精细程度有所下降.当 $q>0$ 时, $D(q)$ 变化幅度主要用来表征土壤PSD的均匀性,变化幅度越小代表土壤PSD越均匀.因此,不同植被类型区和土壤深度土壤PSD的均匀性由大到小依次为荒漠(0~20 cm)>草原化荒漠(20~40 cm)>草原化荒漠(0~20 cm)>荒漠草原(0~20 cm)>荒漠草原(20~40 cm)>荒漠(20~40 cm).

如图6b所示,不同植被类型区土壤PSD多重分形奇异谱函数呈非对称拱形曲线,说明在土壤形成和演变过程中,在外营力的作用下,土壤颗粒含量在局部发生了叠加,进而导致土壤PSD呈非均匀性特征(杨振奇等,2021).谱宽 $\Delta\alpha$ 在0~20 cm由大到小依次为荒漠草原(0.206)>草原化荒漠(0.186)>荒漠(0.132),在20~40 cm由大到小依次为荒漠草原(0.217)>荒漠(0.178)>草原化荒漠(0.170),整体上表现出随荒漠化程度加重和土壤深度增加而降低的趋势;形状特征 Δf 在0~20 cm表现出荒漠草原>草原化荒漠>荒漠,在20~40 cm表现出荒漠>荒漠草原>草原化荒漠,且均呈“右钩”状.

由表1可知,不同植被类型区和土壤深度的土壤PSD容量维数 D_0 差异不显著,说明不同植被类型区和土壤深度下土壤PSD范围接近.信息维数 D_1 在0~20 cm和20~40 cm由大到小皆为荒漠草原>草原化荒漠>荒漠,其中荒漠20~40 cm土壤的信息维数 D_1 显著低于草原化荒漠和荒漠草原的信息维数 D_1 ($P<0.05$),说明随着荒漠化程度加重,土壤PSD的异质性减小.关联维数 D_2 同信息维数 D_1 呈现出一致的变化趋势,说明随着荒漠化程度加重,土壤颗粒在测量间隔上分布越均匀. D_1/D_0 也呈现出同信息维数 D_1 一样的变化趋势,说明随着荒漠化程度的加剧,土壤颗粒在粒径密集区的分布数量逐渐降低.

2.4 土壤颗粒组成同分形维数的关系

不同植被类型区土壤颗粒组成同分形维数的相关性关系如图7所示,各因子间存在不同的相关关系.其中黏粒和粉粒含量同 D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 和 $\Delta\alpha$ 皆呈显著正相关($P<0.01$),同时,粉粒同 Δf 也呈显著正相关($P<0.01$);砂粒则与 D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 呈显著负相关($P<0.01$).

由图8可知,土壤颗粒组成共解释了93.2%分形维数的变异,其中第一轴解释了70.5%,第

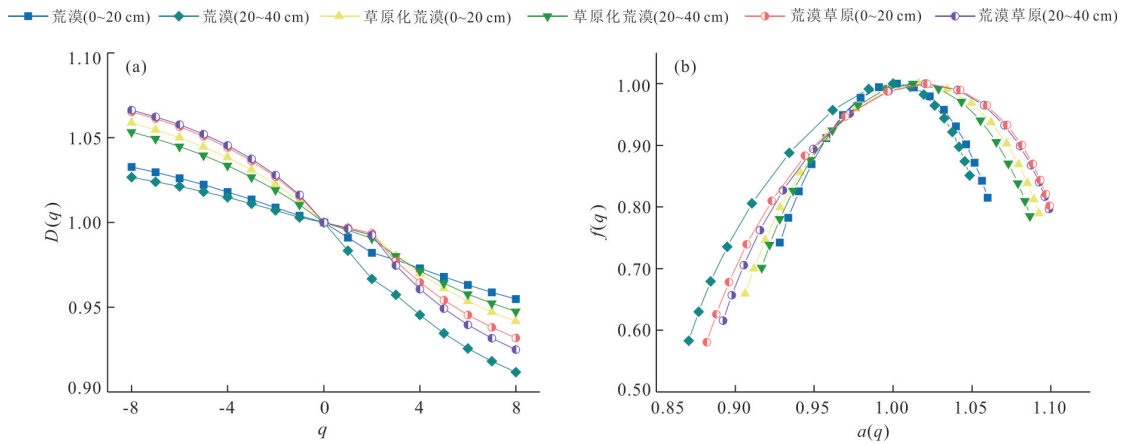


图 6 不同植被类型区土壤 PSD 多重分形谱函数

Fig.6 Multifractal spectrum function of soil PSD in different vegetation types

表 1 不同植被类型区土壤 PSD 多重分形参数

Table 1 Multifractal parameters of soil PSD in different vegetation types

指标	土壤深度 (cm)	荒漠	草原化荒漠	荒漠草原
D_0	0~20	1.000±0.000a	1.000±0.000a	1.000±0.000a
	20~40	1.000±0.000a	1.000±0.000a	1.000±0.000a
D_1	0~20	0.991±0.006ab	0.997±0.003a	0.997±0.002a
	20~40	0.983±0.006b	0.995±0.003a	0.996±0.006a
D_2	0~20	0.982±0.012ab	0.993±0.006a	0.994±0.005a
	20~40	0.967±0.011b	0.991±0.006a	0.992±0.012a
D_1/D_0	0~20	0.991±0.006ab	0.997±0.003a	0.997±0.002a
	20~40	0.983±0.006b	0.995±0.003a	0.996±0.006a

注:不同小写字母代表两组数据间存在显著差异性,其中 $P<0.05$.

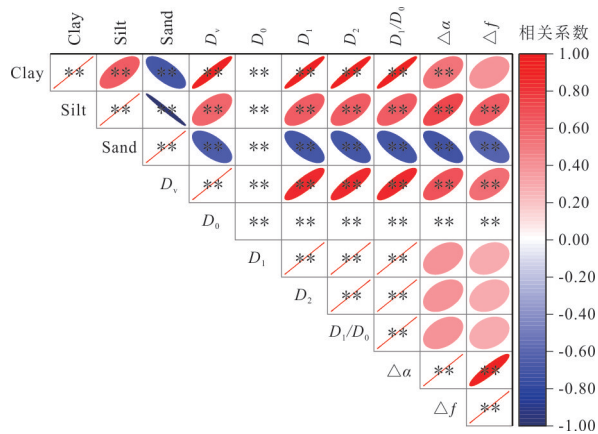


图 7 土壤分形维数同颗粒组成的相关关系

Fig.7 Correlation between soil fractal dimension and soil particle composition

红色椭圆代表正相关;蓝色椭圆代表负相关;相关系数绝对值越高,椭圆越窄,系数值为1时为一条直线,系数小于0.01时为一个点;*为 $P<0.05$;**为 $P<0.01$

二轴解释了 22.7%。在各植被类型区,土壤颗粒组成同分形维数间的关系发生了改变.此过程

中,随着荒漠化程度的改变,土壤颗粒分布具有明显的分化模式,表现为不同植被类型区和土壤深度的土壤颗粒分布置信区间逐渐分离,呈左移趋势.这种分化模式在荒漠土壤颗粒分布上(尤其 20~40 cm)表现得尤为明显.其中黏土含量、粉粒含量、 D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 随荒漠化减弱程度呈正相关($P<0.05$),砂粒含量则随荒漠化程度减弱而呈负相关($P<0.05$).

3 讨论

3.1 荒漠化程度对土壤颗粒组成和分布特征的影响

土壤颗粒组成受成土母质和环境变化的影响(魏传义等, 2015),一定程度上决定了土壤的基本形状(宛倩等, 2022).本研究中,土壤颗粒组成主要为粉粒和细砂粒,荒漠化程度的加重迫使土壤颗粒组成趋于砂粒,且随土壤深度增加这一趋势更为明显,这与多数研究结果一致(高君亮等, 2014;郭树江

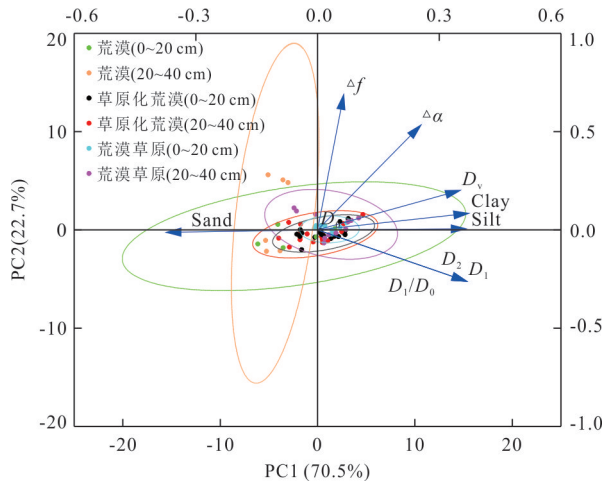


图8 不同植被类型区土壤颗粒组成及分形维数的主成分分析

Fig.8 PCA of soil particle composition and fractal dimension in different vegetation types

等,2018;蒋嘉瑜等,2021).这是因为荒漠-草原过渡带环境条件恶劣,植被和土地的荒漠化导致侵蚀作用进一步加强(高君亮等,2014),迫使更多的黏粒、粉粒迁移损失,砂粒含量增加(蒋嘉瑜等,2021);随着土壤深度的增加,土壤对侵蚀的敏感程度增加,越容易发生侵蚀(赵文智等,2002;贺燕,2020).从土壤颗粒分布频率来看,随荒漠化程度加重和土壤深度增加,土壤颗粒的异质程度逐渐增大,土壤质地分布均匀程度逐渐降低(图4),这与宛倩等(2022)的研究结果相似,其原因可能为:相较于草原化荒漠和荒漠草原,荒漠土壤由于植被覆盖度及矿物质含量的降低,土壤发育较差,地下根系较少,须根不发达,无法有效地固结土壤和改善土壤结构(宛倩等,2022),且随着侵蚀敏感度的增加,这一趋势愈加明显(齐雁冰等,2007).

3.2 荒漠化程度对土壤 PSD 分形维数的影响

单重分形维数进一步揭示了不同植被类型区土壤颗粒物质的损失情况(赵文智等,2002).本研究中,随着荒漠化程度的加剧,土壤颗粒的单重分形维数逐渐降低,且随土壤深度的增加无明显变化,与多数研究结果相一致(齐雁冰等,2007;刘红梅等,2021),其原因可能为:随着荒漠化程度的增加,植被覆盖度降低,风蚀程度增加,不利于细粒物质的沉积,而细粒物质相较粗粒物质所形成的微孔隙较多,能使土壤结构趋于复杂和稳定(齐雁冰等,2007);此外,细粒物质有利于土壤水分的吸附保持,但随着荒漠化程度的加重减少了细粒物

质含量,进而迫使土壤水分含量降低,抑制了植被的生长发育(刘红梅等,2021),这种恶性循环将导致细粒物质损耗殆尽,土壤趋于粗粒化.

多重分形维数可以量化土壤颗粒分布的局部变异和非均匀特征(Li *et al.*, 2022).本研究中土壤多重分形的广义维数谱呈反“S”形递减(图6a),且在稀疏区更为敏感(王德等,2007);同时,随着荒漠化程度加重和土壤深度增加,土壤分形结构的精细程度有所降低,土壤 PSD 的均匀性则逐渐升高,多重分形参数表现为 $D_0 > D_1 > D_2$,这与众多研究结果一致(张桢赫等,2019;刘红梅等,2021;郭士维等,2022).其中容量维数 D_0 与荒漠化程度和土壤深度无显著关系,说明在3种植被类型区,土壤颗粒缺失的粒径数目无区别(郭士维等,2022);信息维数 D_1 、关联维数 D_2 和 D_1/D_0 皆表现为随荒漠化程度的加剧和土壤深度增加逐渐降低,其原因可能为:荒漠化程度的加重减少了植被覆盖度、凋落物和根系数量,进而降低了土壤水分及有机质等营养物质的含量(刘红梅等,2021),使得细粒物质易受风雨侵蚀、雨水渗透而流失(张桢赫等,2019);同时,随着土壤深度的增加,根系进一步减少和侵蚀敏感度的增加使得这种趋势进一步加剧(赵文智等,2002;贺燕,2020).土壤多重分形的奇异谱函数均呈“右钩”状,这与代豫杰等(2017)的研究结果不一致,表明黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带土壤粒径分布多集中于小概率区间,这可能是由于生境类型多变引起的.谱宽 $\Delta\alpha$ 是对分形结构上不同区域、不同层次、不同局域条件特性的综合描述,对空间变量复杂程度的描述更为细致(杨振奇等,2021).本研究中 $\Delta\alpha$ 整体上随荒漠化程度加剧呈降低趋势,但在不同土层,降低趋势有所不同,其原因可能为:尽管荒漠化程度和土壤深度增加使得土壤 PSD 的均匀性逐渐增加,但小概率子集可能提供了更多样的生境条件,导致部分地区土壤 PSD 的均匀性发生改变(刘红梅等,2021).

3.3 分形维数与土壤颗粒组成的关系

土壤颗粒组成是影响分形维数的重要因素之一(宛倩等,2022).本研究中,土壤颗粒单重分形维数和多重分形维数同黏粒、粉粒含量呈显著正相关,同砂粒含量呈显著负相关,即颗粒越细,分形维数值越高,与多数研究结果一致(王德等,2007;Li *et al.*, 2018;宛倩等,2022),说明单重分形维数和多重分形维数能够很好地表示土壤颗粒组成及反

映其变化特征,证明了利用土壤颗粒单重分形维数和多重分形维数来描述不同荒漠化程度下土壤质地变化的可行性.主成分分析结果表明,随着荒漠化程度的增加,土壤颗粒分布呈现分化模式,这与 Li *et al.*(2022)的研究结果相似,表明 3 种植被类型区土壤颗粒机械组成与分形维数具有差异性,进一步验证了土壤分形维数在评价土壤质地方面的重要性;黏粒含量、粉粒含量、 D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 与荒漠化减弱程度呈正相关,砂粒含量则与荒漠化减弱程度呈负相关,说明随着荒漠化程度的加重,土壤各粒级体积分数空间上分布均匀程度降低,变异程度升高,这可能导致区域土壤侵蚀增加、水土保持能力下降和养分固持能力丧失,对区域生态系统造成不可逆转的影响.

4 结论

(1) 研究区土壤主要以粉粒和极细砂粒为主,按照体积分数排序为粉粒>极细砂粒>细砂粒>黏粒>中砂粒>粗砂粒.随着荒漠化程度加重和土壤深度增加,土壤 PSD 的均匀程度和颗粒分布异质程度增大,土壤质地均匀性降低.

(2) 三种植被类型区土壤颗粒分布的单重分形维数范围为 $(2.35\pm 0.03)\sim(2.42\pm 0.06)$,由大到小依次为荒漠草原>草原化荒漠>荒漠,随土壤深度改变无显著变化,表明随着荒漠化程度加重,细粒物质的损失逐渐加大.

(3) 土壤 PSD 多重分形参数 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 和 $\Delta\alpha$ 皆随荒漠化程度加重和土壤深度增加呈递减趋势,即土壤 PSD 的异质性减小,均匀性增加,土壤逐渐粗颗粒化;奇异谱函数中 Δf 呈“右钩”状,表明 PSD 结构中小概率子集占主要地位,但 $\Delta\alpha$ 随土层降低幅度的不同说明部分地区土壤 PSD 的均匀性发生了改变.

(4) 土壤 PSD 单重分形维数和多重分形维数与土壤颗粒组成具有显著相关关系,且黏粒含量、粉粒含量、 D_v 、 D_1 、 D_2 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 Δf 与荒漠化减弱程度呈正相关,砂粒含量与其则呈负相关,即土壤各粒级体积分数空间分布均匀程度降低,变异程度升高.

References

Dai, L., Wang, G. L., He, Y. J., 2021. The Relationship between Soil Structure and Water Characteristics Based on Fractal Theory. *Earth Science*, 46(9): 3410–3420

(in Chinese with English abstract).

- Dai, Y. J., Dong, Z., Li, H. L., et al., 2019. Effects of Checkerboard Barriers on the Distribution of Aeolian Sandy Soil Particles and Soil Organic Carbon. *Geomorphology*, 338: 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.016>
- Dai, Y. J., Li, J. R., Guo, J. Y., et al., 2017. Soil Particle Multi-Fractals and Soil Organic Carbon Distributions and Correlations under Different Shrubs in Ulan Buh Desert. *Research of Environmental Sciences*, 30(7): 1069–1078 (in Chinese with English abstract).
- Feng, R., Guo, Y. F., Zhang, X., et al., 2017. Soil Mechanical Composition of Two Main Soil Types in Aohan Banner. *Agricultural Engineering*, 7(6): 100–103 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. L., Gao, Y., Luo, F. M., et al., 2014. Response of Surface Soil Grain Size Characteristics to Wind Erosion Desertification. *Science & Technology Review*, 32(25): 20–25 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S. J., Yang, Z. J., Wang, D. Z., et al., 2018. The Fractal Characteristics of Soil Particle Size in the Oasis-Desert Transition Zone of Minqin. *Soil and Water Conservation in China*, (10): 53–56, 68 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S. W., Zhong, B., Xu, W. N., et al., 2022. Fractal Characteristics of Silt Loam Soil Particle Size in Different Land Use Types: A Case Study of Xialao River Small Watershed in Western Hubei. *Science of Soil and Water Conservation*, 20(1): 25–32 (in Chinese with English abstract).
- Han, L. W., Srocke, F., Masek, O., et al., 2020. A Graphical-User-Interface Application for Multifractal Analysis of Soil and Plant Structures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174: 105454. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105454>
- He, Y., 2020. Study on Soil Quality and Soil Erosion Characteristics in Middle-Wertern Qilian Mountains (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou, 29–33 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Y. F., Liu, J. Y., Zhuang, D. F., et al., 2015. Fractal Dimension of Soil Particle Size Distribution under Different Land Use/Land Coverage. *Acta Pedologica Sinica*, 42(2): 336–339 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, J. Y., Liu, R. T., Zhang, A. N., 2021. Comparative Analysis of Soil Fractal Dimension and Soil Physical and Chemical Properties between Caragana Korshinskii Shrub Plantations in Arid and Semi-Arid Desert Steppe. *Research of Soil and Water Conservation*, 28(4): 54–

- 61, 69 (in Chinese with English abstract).
- Kozak, E., Sokołowska, Z., Stepniewski, W., et al., 1996. A Modified Number-Based Method for Estimating Fragmentation Fractal Dimensions of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5): 1291—1297. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000050002x>
- Lan, L. Y., Ma, L. L., Guo, X. M., et al., 2022. Soil Particle Distribution and Fractal Characteristics of Different Grassland Types in Southern Jiangxi. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 44(1): 222—232 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. Q., Zhao, P. P., Shao, W. S., et al., 2018. Effects of Fencing on Soil Particle Size Fractal Dimension and the Physicochemical Properties of Agropyron Mongolicum Community in Desert Steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 26(3): 551—558 (in Chinese with English abstract).
- Li, K., Ni, R. Q., Lv, C. F., et al., 2022. The Effect of *Robinia Pseudoacacia* Expansion on the Soil Particle Size Distribution on Mount Tai, China. *CATENA*, 208: 105774. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105774>
- Li, K., Yang, H. X., Han, X., et al., 2018. Fractal Features of Soil Particle Size Distributions and Their Potential as an Indicator of Robinia Pseudoacacia Invasion. *Scientific Reports*, 8: 7075. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25543-0>
- Liu, H. M., Lü, S. J., Ren, Q. N., et al., 2021. The Study on Particles Sizes and Spatial Distribution of Sandy Soil under *Haloxylon ammodendron* Forest in Badain Jaran Desert. *Acta Agrestia Sinica*, 29(6): 1249—1256 (in Chinese with English abstract).
- Ma, H. Y., Yong, Y. M., Liu, Z. S., 2012. Comprehensive Evaluation of Returning Cropland to Forest and Grassland in the Arid and Semi-Arid Region: A Case Study of Yuzhong County. *Pratacultural Science*, 29(9): 1359—1367 (in Chinese with English abstract).
- Qi, F., Zhang, R. H., Liu, X., et al., 2018. Soil Particle Size Distribution Characteristics of Different Land-Use Types in the Funiu Mountainous Region. *Soil and Tillage Research*, 184: 45—51. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.011>
- Qi, Y. B., Chang, Q. R., Hui, Y. H., 2007. Fractal Features of Soil Particles in Desertification Reversing Process by Artificial Vegetation, *Acta Pedologica Sinica*, 44(3): 566—570 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Q., Wang, J., Wang, X. T., et al., 2022. Effects of Different Meadow Use Types on the Fractal Characteristics of Soil Particle in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 42(5): 1716—1726 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Fu, B. J., Cheng, L. D., et al., 2007. Fractal Analysis on Soil Particle Size Distribution Under Different Land-Use Types: A Case Study in the Loess Hilly Areas of the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 27(7): 3081—3089 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. D., Liu, S. Z., Liu, G. C., 2005. Fractal Characteristics of Soil under Different Land-Use Patterns in the Arid and Semi-Arid Region of the Western Tibet Plateau, China. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 10(4): 785—790. <https://doi.org/10.1007/BF02830395>
- Wei, C. Y., Li, C. A., Kang, C. G., et al., 2015. Grain-Size Characteristics and Genesis of the Huangshan Loess in Songnen Plain Area. *Earth Science*, 40(12): 1945—1954 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. C., Wang, S. J., 2021. Sensitivity Evaluation of Soil Erosion in Lanzhou Section of the Yellow River Basin. *Science Technology and Engineering*, 21(29): 12390—12397 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. H., 2002. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Yang, Z. Q., Qing, F. C., Li, L., et al., 2021. Relationship Between Soil Particle Multifractals and Water Holding Capacity Under Different Erosion Degrees in Feldspathic Sandstone Region. *Soils*, 53(3): 620—627 (in Chinese with English abstract).
- Yue, P., Zhang, Q., Zhao, W., et al., 2015. Influence of Environmental Factors on Land-Surface Water and Heat Exchange During Dry and Wet Periods in the Growing Season of Semiarid Grassland on the Loess Plateau. *Science China (Series D)*, 45(8): 1229—1242 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, A. H., Ding, J. L., Wang, J. Z., et al., 2019. Fractal and Multifractal Analysis on Saline Soil Particle Size Distribution in Arid Oasis. *Arid Zone Research*, 36(2): 314—322 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Liu, Z. M., Cheng, G. D., 2002. Fractal Dimension of Soil for Sand Desertification, *Acta Pedologica Sinica*, 39(6): 877—881 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴磊, 王贵玲, 何雨江, 2021. 基于分形理论研究土壤结构及其水分特征关系. *地球科学*, 46(9): 3410—3420.
- 代豫杰, 李锦荣, 郭建英, 等, 2017. 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. 环境科学研究, 30(7): 1069—1078.
- 冯瑞, 郭月峰, 张霞, 等, 2017. 敖汉旗两种主要土壤类型的土壤机械组成. 农业工程, 7(6): 100—103.
- 高君亮, 高永, 罗凤敏, 等, 2014. 表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应. 科技导报, 32(25): 20—25.
- 郭树江, 杨自辉, 王多泽, 等, 2018. 民勤绿洲—荒漠过渡带土壤粒径分形特征研究. 中国水土保持, (10): 53—56, 68.
- 郭士维, 钟斌, 许文年, 等, 2022. 不同土地利用方式下粉壤土粒径分形特征: 以鄂西典型小流域下牢溪为例. 中国水土保持科学, 20(1): 25—32.
- 贺燕, 2020. 祁连山区中西部土壤质量及侵蚀特征研究(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学, 29—33.
- 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 等, 2005. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征. 土壤学报, 42(2): 336—339.
- 蒋嘉瑜, 刘任涛, 张安宁, 2021. 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析. 水土保持研究, 28(4): 54—61, 69.
- 兰龙焱, 马丽丽, 郭晓敏, 等, 2022. 赣南不同草地类型区土壤粒径分布及分形特征. 江西农业大学学报, 44(1): 222—232.
- 李国旗, 赵盼盼, 邵文山, 等, 2018. 封育对荒漠草原沙芦草群落土壤粒径分形维数及理化性质的影响. 草地学报, 26(3): 551—558.
- 刘红梅, 吕世杰, 任倩楠, 等, 2021. 巴丹吉林沙漠梭梭林下沙质土壤的粒径变化和空间分布特征研究. 草地学报, 29(6): 1249—1256.
- 马海芸, 雍雅明, 刘宗盛, 2012. 干旱半干旱区退耕还林还草工程效益综合评价: 以榆中县为例. 草业科学, 29(9): 1359—1367.
- 齐雁冰, 常庆瑞, 惠洪河, 2007. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征. 土壤学报, 44(3): 566—570.
- 宛倩, 王杰, 王向涛, 等, 2022. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响. 生态学报, 42(5): 1716—1726.
- 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等, 2007. 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. 生态学报, 27(7): 3081—3089.
- 魏传义, 李长安, 康春国, 等, 2015. 哈尔滨黄山黄土粒度特征及其对成因的指示. 地球科学, 40(12): 1945—1954.
- 武翠翠, 王世杰, 2021. 黄河流域兰州段土壤侵蚀敏感性评价. 科学技术与工程, 21(29): 12390—12397.
- 徐建华, 2002. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社.
- 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等, 2021. 砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系. 土壤, 53(3): 640—647.
- 岳平, 张强, 赵文, 等, 2015. 黄土高原半干旱草地生长季干湿时段环境因子对陆面水、热交换的影响. 中国科学(D 辑), 45(8): 1229—1242.
- 张桢赫, 丁建丽, 王敬哲, 等, 2019. 干旱区绿洲盐渍土粒径分布单重分形和多重分形特征. 干旱区研究, 36(2): 314—322.
- 赵文智, 刘志民, 程国栋, 2002. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征. 土壤学报, 39(6): 877—881.