

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.050.

马悦阳, 夏栋, 舒倩, 等. 向家坝工程扰动区不同生态修复模式边坡土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 83-89.

MA Yueyang, XIA Dong, SHU Qian, et al. Fractal Features of Soil Particles Under Different Ecological Remediation Modes of Xiangjiaba Project [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 83-89.

向家坝工程扰动区不同生态修复模式 边坡土壤颗粒分形特征

马悦阳^{1,2}, 夏栋^{1,3,4}, 舒倩^{1,4}, 郭士维^{1,4}, 罗婷^{1,2}, 闫书星^{1,3}, 刘大翔^{1,2}

(1.水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4.三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 研究不同生态修复后边坡土壤颗粒分形特征, 为分形维数作为评价修复后向家坝工程扰动区边坡土壤质量的综合指标提供科学依据。 [方法] 以向家坝工程扰动区 6 种不同生态修复模式下的 0—10 cm 边坡土壤为研究对象, 通过野外采样和室内试验, 采用单重和多重分形理论相结合的方法, 研究自然演替与人工修复模式下土壤粒径分布(PSD)和分形特征及土壤养分特征并分析了其相关关系。 [结果] 不同生态修复模式下土壤颗粒组成以粉粒和砂粒为主, 黏粒含量较少, 粒径分布不均匀。天然林地土壤养分含量相对较高且土壤颗粒较细。黏粒与 D_v 呈极显著正相关($p < 0.01$), 与土壤有机碳和速效氮呈显著正相关($p < 0.05$), 粉粒含量与 D_1, D_2 呈极显著负相关($p < 0.01$), 砂粒与 D_1, D_2 呈极显著正相关($p < 0.01$)。土壤养分与黏粒、粉粒含量呈不显著正相关, 与砂粒含量, D_1, D_2 呈不显著负相关。 [结论] 向家坝工程扰动区土壤颗粒以粉粒和砂粒为主, 土壤质地较粗, 而植被混凝土修复技术有利于细颗粒的积累, 从而提高土壤均匀度, 可以作为生态修复的参考。粉粒和砂粒不仅主导多重分形参数, 还对养分有促进作用, 可用来作为研究区域生态修复效果的标度。

关键词: 土壤粒径分布; 分形维数; 土壤养分; 生态修复

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0083-07

Fractal Features of Soil Particles Under Different Ecological Remediation Modes of Xiangjiaba Project

MA Yueyang^{1,2}, XIA Dong^{1,3,4}, SHU Qian^{1,4}, GUO Shiwei^{1,4},

LUO Ting^{1,2}, YAN Shuxing^{1,3}, LIU Daxiang^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using Cement-based Materials (China Three Gorges University), Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 4. College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] The fractal characteristics of soil particles in slope after different ecological restoration was studied to provide a scientific basis for the fractal dimension as a comprehensive index to evaluate the soil quality of slope in the disturbed area of Xiangjiaba Project after restoration. [Methods] Soils in the depths of 0 to 10 cm in six different ecological remediation modes of the Xiangjiaba Project were used in this study. Monofractal and multifractal theory was used to measure and analyze soil particle size distribution (PSD), soil fractal features, soil nutrient contents and their correlations from natural succession and artificial restoration.

收稿日期: 2022-05-08

修回日期: 2022-07-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(51979147); 自然资源部城市自然资源监测与仿真重点实验室开放基金资助项目(KF-2019-04-071)

第一作者: 马悦阳(1998—), 男, 河南鹤壁人, 在读硕士研究生, 研究方向: 边坡防护与生态修复。E-mail: 775952607@qq.com

通信作者: 夏栋(1985—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 研究方向: 生态修复与水土保持相关研究。E-mail: xiadongsanxia@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

[Results] Soil particle composition under different ecological remediation modes is dominated by silt and sand particles, with less clay particles and uneven particle size distribution. Clay content was highly significantly positively correlated with D_v ($p < 0.01$), significantly positively correlated with soil organic carbon and rapidly available nitrogen ($p < 0.05$), silt content was highly significantly negatively correlated with D_1 and D_2 ($p < 0.01$), and sand content was highly significantly positively correlated with D_1 and D_2 ($p < 0.01$). Soil nutrients were positively and insignificantly correlated with contents of clay and silt and negatively insignificantly correlated with content of sand, D_1 and D_2 . [Conclusion] The soil particles in the disturbed area of Xiangjiaba Project are mainly silt and sand, and the soil texture is coarse. The vegetation concrete restoration technology is conducive to the accumulation of fine particles, so as to improve the soil uniformity, which can be used as a reference for ecological restoration. Silt and sand not only dominate the multifractal parameters, but also promote the nutrient, which can be used as the scale of ecological restoration effect in the study area.

Keywords: soil particle size distribution; fractal dimension; soil nutrient; ecological remediation

向家坝水电站属于长江上游水土流失重点防治区^[1]。坝区内扰动边坡的面积占施工区总面积的50%以上^[1],是土壤侵蚀主要来源。扰动区边坡土壤结构发生改变,植被退化、土壤养分流失、坡度大,导致水土流失,生态系统遭受严重破坏^[2]。植被生态修复技术是对坝区扰动边坡进行植被重建的重要措施,改善扰动坡面土壤结构,提高土壤抗侵蚀性,构筑绿色可持续发展的生态环境^[3]。随着坡面植被的不断演替,坡面侵蚀引起土壤的质地、结构和性能变化^[4]。土壤粒径分布(particle size distribution, PSD)是土壤重要的基本属性,在影响土壤物理、化学和生物等属性方面发挥着关键作用^[5],能够反映土壤侵蚀程度,与土壤的结构、水力学性质、养分等密切相关^[6-7]。研究边坡不同生态修复类型土壤 PSD 的差异,对于了解植被生态修复过程土壤侵蚀对边坡土壤质地和性能的影响具有重要意义。

由于土壤颗粒的异质性和不均匀性,采用质地分析不足以描述土壤粒径分布特征,因此引入分形理论量化土壤各个粒级之间的结构关系^[8-10]。分形理论被广泛用于定量描述土壤粒径分布特征^[11]。单一的标度指数是分形方法需要的表征数据集的统计分布^[12],因此早期研究大多使用单重分形表征土壤质地、粒径分布特征和均匀性。然而,单重分形用来表征土壤粒径分布的整体性和均一性,不足以描述土壤粒径分布范围^[9]。多重分形可以更详细分析土壤粒径分布对土壤结构的表征,反映土壤理化性质的变化^[8]。因此,将二者结合使用是全面分析土壤粒径分布特征的一种有效手段,但目前的研究多以单独使用分形理论为主,结合使用两种方法的研究较少,尤其是生态修复过程中的高陡边坡^[9]。

以向家坝水电站工程扰动区4种边坡生态修复技术和未扰动的天然林以及弃渣地为研究对象,采用

单重分形理论和多重分形理论相结合的方法,分析6种不同生态修复模式下土壤粒径分布特征。评价不同人工生态修复模式下土壤粒径分布特征与天然林的差异,为定量评价生态修复土壤质量提供分形指标,以期为长江经济带的生态建设提供参考。

1 研究区概况

向家坝水电站位于云南省昭通市水富市与四川省宜宾市叙州区交界的金沙江下游河段上,库区所在地属于亚热带季风气候区,随着海拔的升高,降雨量逐渐增多,气温逐渐降低,蒸发量趋于平衡。多年平均气温为12~18℃,极端最高气温38.8℃,极端最低气温-8.9℃,多年平均降雨量为646.2~1 164.8 mm,多年平均相对湿度为71%~85%。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

2019年8月,对研究区的6种样地进行了土壤样品采集(表1)。每个样地设置6个5 m×5 m的样方,样方之间至少间隔5~10 m且距样地边缘至少1 m。每个样方按“S”型取样法采集土壤样品,混合均匀保存于密封袋中,带回实验室,风干并去除碎石。由于样地土层厚度限制,采集深度为0—10 cm,每份混合土样自然风干后按四分法分成两份,一份过2 mm筛用于土壤理化分析,另一份过1 mm筛用于土壤养分的测定。

2.2 测试方法

2.2.1 土壤理化性质测定 土壤pH用电位法测定^[13];土壤有机碳采用重铬酸钾外加热氧化法测定^[1];全氮、全磷、速效氮使用SKALAR San++型连续流动分析仪测定^[1];有效磷采用浸提—钼锑抗比色法测定^[13]。

2.2.2 土壤颗粒组成测定 采用激光粒度分析仪(TopSizer)测定土壤颗粒组成,称取0.5 g过2 mm筛

的风干土样置于烧杯中,加 10 ml 10%浓度的 H_2O_2 溶液用来除去土壤中的有机质,用电热板沙浴加热使其加速反应,待反应完全后,向烧杯中加入 10 ml 的 10%浓度的 HCl 溶液除去土壤中的碳酸钙,注满蒸馏水静置 12 h后抽出上清液,在烧杯中加入 10 ml 0.06 mol/L 的六偏磷酸钠溶液分散土粒,超声震荡 15 min 后用激光粒度仪测得土壤粒径体积分数^[9]。

表 1 样地基本信息

样地	恢复模式	经度 E	纬度 N	海拔/m	坡度/(°)	恢复时间
TBS	厚层基材	104°26′	28°38′	388.90	51	2004-12
CBS	植被混凝土	104°24′	28°38′	328.50	63	2004-12
OSS	客土喷播	104°23′	28°39′	473.90	30	2005-06
FBS	框格梁	104°24′	28°38′	288.90	40	2004-11
AS	弃渣地	104°24′	28°38′	520.50	42	
NF	天然林	104°23′	28°39′	502.40	45	

2.2.3 土壤 PSD 单重分形维数计算 土壤粒径分布范围根据美国制土壤颗粒分级标准将土壤粒径分为 7 个级别:0~0.002 mm,0.002~0.05 mm,0.05~0.1 mm,0.1~0.25 mm,0.25~0.5 mm,0.5~1 mm,1~2 mm。采用土壤颗粒体积分形模型,根据以下公式^[14]计算土壤 PSD 单重分形维数(D_v)。

$$3-D_v=\frac{\lg\left[\frac{V_{(r<R_i)}}{V_r}\right]}{\lg\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)}$$

(1)

式中: R_i 为某粒径区间上下限算术平均值; R_{\max} 为最大粒径(本研究中 $R_{\max}=2$); $V_{(r<R_i)}$ 为土壤粒径小于 R_i 的土壤颗粒累计体积; V_r 为土壤颗粒总体积; D_v 为土壤颗粒体积分形维数。

2.2.4 土壤 PSD 多重分形维数计算 将激光粒度分析仪测量土壤粒径区间 $I=[0.02\sim2\,000\,\mu\text{m}]$ 划分成 100 个小区间 $I_i=[\varphi_i,\varphi_{i+1}]$, $i=1,2,\cdots,100$;使用分形理论分析区间 I 的粒径分布特征,须使各子区间有相同

的长度,令 $\Phi_i=\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$,其中 $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 为一常数, Φ 构造一个无量纲区间 $J=[\lg(0.02/0.02),\lg(2000/0.02)]=[0,5]$,同时生成了 100 个相同距离子区间 $J_i=[\Phi_i,\Phi_{i+1}]$, $i=1,2,\cdots,100$ 。在区间 J 中含有 $N(\epsilon)=2^k$ 个尺寸一致的小区间,其中 $\epsilon=5\times 2^{-k}$,为使每个小区间至少包含一个测量值, k 取 1,2,⋯,6。取 $\mu_i(\epsilon)$ 是第 i 个子区间 J_i 内的粒径分布的度量值之和。广义分形维数 $D(q)$ 的公式如下^[15]:

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

(2)

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

(3)

式中: q 为区间 $[-10,10]$ 内的整数,根据公式(2)和(3)计算土壤多重分形广义维数谱 $D(q)$ 。

2.3 数据处理

本文采用 SPSS 对不同生态修复模式边坡土壤的各项理化性质进行单因素方差分析,用 Excel 处理数据并制图,表格中的数据为三组重复数据的平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 不同生态修复模式下土壤养分特征

由表 2 可知,不同生态修复模式下土壤有机碳平均含量为 5.3~17.6 g/kg,天然林地土壤有机碳含量显著高于人工生态修复模式($p<0.05$)。全氮平均含量为 1.3~2.3 g/kg,不同生态修复模式下土壤全氮含量差异显著($p<0.05$)。全磷平均含量为 1.2~2.8 g/kg,FBS 和 NF 之间无显著差异,但二者与其他样地差异性显著($p<0.05$)。不同生态修复模式下土壤速效氮平均含量为 55.1~139.1 g/kg,除 CBS,NF 外,其余样地均无显著差异;土壤有效磷平均含量为 4.4~7.6 g/kg,除 CBS 外,其余样地均无显著差异。

表 2 不同生态修复模式下土壤养分

样地	有机碳 SOC/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	速效氮 AN/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (g·kg ⁻¹)
TBS	9.8±0.09b	2.3±0.01a	1.2±0.14d	74.0±16.34c	4.6±0.18b
CBS	9.0±0.15c	2.1±0.00c	2.0±0.07bc	94.8±6.49b	7.6±0.18a
OSS	5.3±0.32e	1.4±0.03e	1.7±0.17c	63.7±0.93c	5.7±1.50b
FBS	7.8±0.32d	1.6±0.00d	2.2±0.15b	55.1±0.36c	5.2±1.55b
AS	4.8±0.00e	1.3±0.03f	2.8±0.01a	66.5±5.59c	4.4±0.33b
NF	17.6±0.49a	2.2±0.02b	2.2±0.14b	139.1±4.78a	5.6±0.06b

注:同一列数值后字母相同代表在 0.05 水平上差异不显著,数值后字母不同代表在 0.05 水平上差异显著,下同。

3.2 土壤 PSD 及单重分形特征

图 1 表明,不同生态修复模式下土壤粒径分布相

对集中。从图 1 和表 3 可以看出,6 种生态修复模式土壤粉粒和砂粒含量较高,粉粒和砂粒含量分别为

49.7%~75.7% 和 21.4%~48.6%，黏粒含量极低(1.7%~4.2%)。此外,不同生态修复模式下土壤粒径分布的单重分形维数 D_v 值范围为 2.452~2.583,变化特征为 NF>CBS>TBS>AS>FBS>OSS,

TBS 与 CBS 之间无显著性差异,但二者与其他样地差异性显著($p<0.05$)。总体上天然林大于人工生态修复样地且差异显著($p<0.05$),表明天然林较人工生态修复土地相比土壤细粒化^[16]。

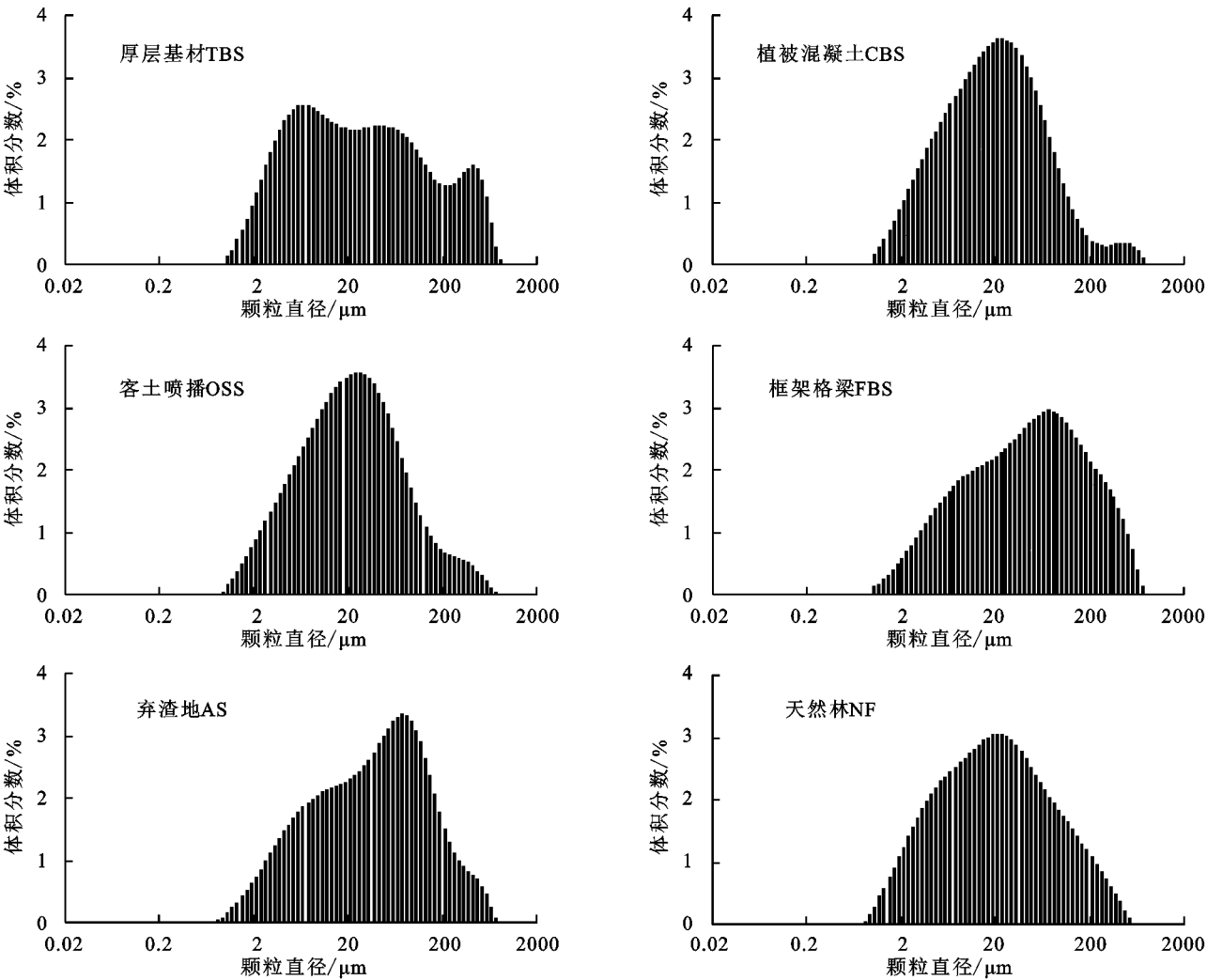


图 1 不同生态修复模式土壤粒径分布

表 3 不同生态修复模式土壤质地及单重分形维数

样地	黏粒 (<0.002 mm)/%	粉粒 (0.002~0.05 mm)/%	砂粒 (0.05~2 mm)/%	D_v		
				最小值	最大值	均值
TBS	2.9±0.07b	60.7±0.79d	36.6±1.15c	2.532	2.537	2.535b
CBS	2.9±0.14b	75.7±1.31a	21.4±1.44e	2.532	2.544	2.539b
OSS	1.7±0.01e	49.7±0.50f	48.6±0.53a	2.452	2.454	2.452e
FBS	2.3±0.07d	54.1±1.48e	43.6±1.54b	2.489	2.499	2.495d
AS	2.6±0.20c	72.5±1.35b	25.0±1.52d	2.515	2.534	2.522c
NF	4.2±0.02a	69.1±0.66c	26.7±0.64d	2.582	2.583	2.583a

注:土壤粒径相同粒径包含在较大的粒径范围内。

3.3 多重分形特征

根据多重分形计算方法对 6 种不同生态修复模式下的土壤颗粒进行分析,在 q 值的变化范围[−10, 10]内得到广义维数谱曲线 $D_q\sim q$ (图 2)。相关研究表明,土壤粒径分布均匀,则广义维数谱 $D(q)\sim q$ 呈线性分布,广义维数谱 $D_q\sim q$ 为曲线,表明土壤粒径

分布不均匀。整体上,随着 q 值的增加 $D(q)$ 呈现反“S”的递减函数,并具有一定的宽度。当 $q<0$ 时, D_q 反映了土壤 PSD 分形结构的精细复杂, $D_{-10}-D_0$ 值的变化幅度越大,土壤分形结构越复杂;当 $q>0$ 时, D_q 反映了 PSD 整体的复杂程度, D_0-D_{10} 值的变化幅度越大,表明土壤 PSD 越不均匀。

由图 2 可知, $q<0$ 时 $D(q)$ 的递减程度大于 $q>0$,不同生态修复模式下, $q<0$ 时, D_q 的变化幅度表现为 $OSS<TBS<CBS<NF<FBS<AS$,AS 的土壤分形结构复杂程度高于其他生态修复模式。 $q>0$ 时, D_q 的变化幅度表现为 $OSS<TBS<NF<FBS<AS<CBS$,OSS 土壤 PSD 均匀性显著大于其他生态修复模式($p<0.05$)。

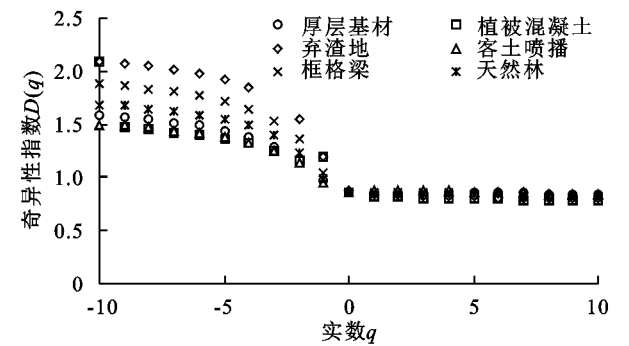


图 2 不同生态修复模式土壤粒径分布广义分形维数 D_q

表 4 为不同样地土壤 PSD 广义维数谱参数。容量维数 D_0 反映了土壤 PSD 范围,PSD 范围越广其值越大,不同生态修复模式下 D_0 值介于 0.851~0.863 之间,表现为 $NF\approx OSS<FBS<TBS\approx CBS<AS$,FBS,TBS,CBS,AS 分别高于天然林 1.06%,1.41%,1.41%,1.76%,除 OSS 的土壤 PSD 范围与天然林地相似,其他的人工修复模式均优于天然林地。信息维数 D_1 反映了土壤 PSD 的不均匀性,土壤 PSD 越不均匀 D_1 值越大,不同生态修复模式下 D_1 值介于 0.826~0.872 之间,表现为 $CBS<NF<AS<TBS<FBS<OSS$,除 CBS 低于天然林 1.08%,其他的修复模式均高于天然林,AS,TBS,FBS,OSS 分别高于天

然林 0.36%,2.16%,2.99%,4.43%,因此,除 CBS 外,天然林土壤 PSD 的均匀程度优于其他的生态修复模式。 D_1/D_0 反映了土壤 PSD 的离散程度,比值越接近 1 表明土壤 PSD 集中于密集区,越接近 0 土壤 PSD 集中于稀疏区。不同生态修复模式下 D_1/D_0 值介于 0.957~1.025 之间,表现为 $CBS<AS<NF<TBS<FBS<OSS$,各样地土壤的 D_1/D_0 值接近 1,说明土壤 PSD 主要集中于密集区,呈非均匀分布,进一步证明向家坝工程扰动区不同生态修复模式下土壤具有多重分形特征。

表 4 不同生态修复模式土壤 PSD 的多重分形特征参数

样地	D_0	D_1	D_1/D_0	$D_{-10}-D_0$	D_0-D_{10}
TBS	0.863b	0.853b	0.988bc	0.755a	0.024cd
CBS	0.863b	0.826d	0.957e	0.839a	0.078a
OSS	0.851a	0.872a	1.025a	0.610a	0.006d
FBS	0.860b	0.860b	1.000b	0.958a	0.052ab
AS	0.866b	0.838c	0.968de	0.982a	0.055ab
NF	0.851a	0.835c	0.982cd	0.896a	0.032bc

3.4 土壤质地、分形维数及养分相关性分析

不同生态修复模式下土壤质地、分形维数以及土壤养分之间的相关分析见表 5。单重分形维数与黏粒含量呈极显著正相关($p<0.01$),与粉粒含量呈正相关,与砂粒含量呈负相关。可见,单重分形维数随土壤细度变化显著;细粒土壤的单重分形维数大于粗粒土。此外, D_1,D_2 与土壤质地的关系一致,与黏粒呈负相关,与粉粒呈极显著负相关($p<0.01$),与砂粒呈极显著正相关($p<0.01$)。因此,土壤 PSD 的集中程度随粒径小于 50 μm 的土壤颗粒含量增加而减少,虽然黏粒会影响土壤 PSD 的集中程度,但不起主导作用。

表 5 土壤 PSD 分形维数与土壤颗粒组成及土壤养分相关性分析

项目	黏粒	粉粒	砂粒	D_v	D_0	D_1	D_2	D_{-10-0}	D_0-10	pH	SOC	TN	TP	AN	AP
AP	0.077	0.325	-0.318	0.092	-0.125	-0.408	-0.443	-0.178	0.476	0.023	0.145	0.294	-0.116	0.329	1
AN	0.907 *	0.533	-0.577	0.818 *	-0.426	-0.624	-0.543	0.125	0.056	-0.885 *	0.904 *	0.650	0.061	1	
TP	0.122	0.460	-0.453	0.166	0.220	-0.418	-0.427	0.777	0.508	-0.177	-0.116	-0.536	1		
TN	0.722	0.341	-0.375	0.726	-0.035	-0.444	-0.404	-0.083	0.068	-0.430	0.758	1			
SOC	0.912 *	0.284	-0.339	0.802	-0.447	-0.415	-0.335	0.158	-0.062	-0.905 *	1				
pH	-0.841 *	-0.242	0.296	-0.690	0.589	0.337	0.241	-0.226	0.176	1					
D_{0-10}	0.181	0.712	-0.693	0.355	0.652	-0.736	-0.804	0.685	1						
D_{-10-0}	0.397	0.530	-0.537	0.492	0.478	-0.552	-0.570	1							
D_2	-0.625	-0.978 **	0.978 **	-0.758	-0.454	0.993 **	1								
D_1	-0.698	-0.982 **	0.988 **	-0.812 *	-0.382	1									
D_0	-0.126	0.462	-0.427	0.115	1										
D_v	0.970 **	0.748	-0.784	1											
砂粒	-0.659	-0.998 **	1												
粉粒	0.614	1													
黏粒	1														

注: * 表示在 0.05 水平上相关性显著。 ** 表示在 0.01 水平上相关性显著。

SOC 与土壤黏粒含量呈显著正相关($p < 0.05$),与粉粒含量呈正相关,与砂粒含量呈负相关,说明黏粒含量对有机碳含量影响显著。黏粒含量多的土壤密度较小,有利于减少有机碳的流失,从而增加土壤有机碳的含量。SOC 与 D_v 呈正相关,与 D_0, D_1, D_2 呈负相关,但相关性不显著。TN, TP, AN, AP 与黏粒、粉粒呈正相关,与砂粒呈负相关。此外,土壤养分与 D_1, D_2 呈负相关。

4 讨论

4.1 不同生态修复模式下土壤粒径分布与分形维数的关系

土壤 PSD 是反映土壤结构和性质的基本物理特征,而分形维数可以用来判断土壤质地均匀程度^[17]。研究区土壤颗粒组成粉粒占比最大,砂粒占比居中,黏粒占比最小,造成不同生态修复模式下土壤颗粒组成差异性的原因在于环境引起的土壤侵蚀^[18]。向家坝工程扰动区所在位置水力侵蚀作用强烈,该地区较为集中的强降雨加速了表层土壤粗颗粒的崩解,受到地表径流的冲刷导致细颗粒流失,从而使得坡面表层土壤黏粒含量减少,粉粒和砂粒含量增多^[19-20]。有研究表明,土壤的抗侵蚀性随着 D_v 的增大而增强^[21]。本研究结果表明,向家坝工程扰动区生态修复边坡土壤 D_v 值为 2.45~2.58,土壤质地较粗^[22],均值依次 $OSS < FBS < AS < TBS < CBS < NF$ 。未扰动的天然林地 D_v 值最大,而在土壤 PSD 中,天然林土壤黏粒含量较其他 5 种样地最高(见表 3),因此土壤的抗侵蚀能力更强。原因在于天然林自然演替时间长,植物根系发育相对较好,具有丰富稳定的群落结构,植物根系不仅能起到良好的固土作用,同时天然林样地草本+灌木+乔木的组合使得地表积累大量的凋落物,这也为土壤微生物提供了充足的养分使其分泌较多物质,从而促进土壤颗粒团聚,增强土壤结构稳定性^[13,23]。

有研究表明, D_v 与黏粒含量和粉粒含量呈正相关,与砂粒含量呈负相关^[24],这与本研究得出的结果相一致,进一步表明 D_v 反映了土壤颗粒的均匀程度^[25]。土壤颗粒填补空间的能力可由单重分形维数进行描述,因此 D_v 值越大,土壤细颗粒含量越多,其填补空间的能力越强,土壤质地越好^[26-27]。单重分形维数仅能反映土壤颗粒的分布情况,而广义维数 $D(q)$ 则量化表征土壤 PSD 的非均匀程度和复杂性^[27-28]。研究结果表明,黏粒含量与 D_0, D_1, D_2 呈不显著负相关;粉粒含量与 D_0 呈不显著正相关,与 D_1, D_2 呈极显著负相关($p < 0.01$);砂粒含量与粉粒含量相反,与 D_0 呈不显著负相关,与 D_1, D_2 呈极显

著正相关($p < 0.01$)。这与 Wu 等^[24]研究结果一致,其结果显示 D_1, D_2 与黏粒和粉粒呈负相关,与砂粒呈正相关。此外, Bai 等^[29]认为黏粒含量与多重分形参数之间相关性显著,而本研究结果认为黏粒含量与多重分形参数呈现的相关性不显著,原因在于本研究区域土壤粉粒和砂粒含量相对较高,黏粒含量极低,因此黏粒含量对多重分形参数的影响不显著^[24]。

4.2 分形维数与粒径分布与土壤养分的关系

不同粒径的土壤颗粒之间的相互排列方式及胶结程度显著影响有机质状况^[30],由表 5 可知, SOC, TN, TP, AN 和 AP 含量与黏粒和粉粒含量呈正相关,与砂粒含量呈负相关,即黏粒和粉粒含量对土壤养分有促进作用,砂粒含量则起相反作用。有研究表明,黏粒和粉粒是土壤中的无机胶体,有机质是土壤中的主要有机胶体,两者优先结合在土壤中形成有机-无机复合胶体并增强对养分的吸附作用,增强土壤结构的稳定性,减少养分流失,对养分起保护作用,而与砂粒结合是非保护性的^[31-32]。此外,有研究指出黏粒含量与有机质分解速率呈负相关,即黏粒直接影响有机碳^[33]。相关性分析显示,土壤养分与单重分形维数 D_v 呈正相关,其中 AN 与 D_v 呈显著正相关($p < 0.05$),与 D_1, D_2 均呈不显著负相关,反映分形维数对土壤养分含量变化的指示意义。

5 结论

(1) 向家坝工程扰动区内,不同生态修复边坡土壤颗粒粉粒含量最高,砂粒含量次之,黏粒含量极低,土壤质地较粗。

(2) 研究区域内,植被混凝土修复边坡粉粒含量最高,颗粒分布更均匀,有利于细颗粒积累,从而提高粒径分布均匀度,可以作为生态修复的参考。

(3) 粉粒和砂粒含量对本研究区域土壤 PSD 非均匀性和集中程度有显著影响,主导着多重分形参数;此外作为土壤无机胶体对养分有促进作用,进而提高研究区域的土壤结构稳定性,因此粉粒和砂粒含量可用来作为研究区域生态修复效果的标度。

参考文献:

- [1] 赵冰琴,夏栋,夏露,等.向家坝工程扰动区植被恢复土壤质量评价[J].中国环境科学,2020,40(3):1224-1234.
- [2] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等.工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J].水利水电技术,2017,48(2):130-137.
- [3] 刘阳,闫美芳,王璐,等.山西西山煤矿矿区不同类型植被修复土壤的生态化学计量特征[J].土壤通报,2020,51(3):634-640.
- [4] Qi F, Zhang R H, Liu X, et al. Soil particle size distri-

- bution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:45-51.
- [5] 罗婷,许文年,程虎,等.向家坝水电站不同修复模式下根际土壤微生物化学计量特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):450-458.
- [6] Ma Y X, Minasny B, Welivitiya W D D P, et al. The feasibility of predicting the spatial pattern of soil particle-size distribution using a pedogenesis model[J]. Geoderma, 2019,341:195-205.
- [7] 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.
- [8] Li K, Ni R Q, Lv C F, et al. The effect of *Robinia pseudoacacia* expansion on the soil particle size distribution on Mount Tai, China [J]. Catena, 2022, 208: 105774.
- [9] 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.
- [10] 贺燕,魏霞,魏宁,等.祁连山区主要下垫面土壤粒径分布特征[J].水土保持研究,2020,27(2):42-47,54.
- [11] Deng Y S, Cai C F, Xia D, et al. Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China[J]. Plos One, 2017,12(3):e0173555.
- [12] Siqueira G M, Silva Ê F F, Vidal-Vázquez E, et al. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect[J]. Biosystems Engineering, 2018,168:105-120.
- [13] 严雨洁,夏露,赵冰琴,等.向家坝工程扰动区不同修复类型边坡土壤养分及土壤酶活性特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):2005-2015.
- [14] 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.
- [15] 管孝艳,杨培岭,吕焱.基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J].农业机械学报,2011,42(3):44-50.
- [16] 陈鹏,张铁钢,董智,等.水流驱动下不同灌草格局对泥沙分选特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):93-100,221.
- [17] 阎欣,安慧.宁夏荒漠草原沙漠化过程中土壤粒径分形特征[J].应用生态学报,2017,28(10):3243-3250.
- [18] 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.
- [19] 曲丽莉,郭红丽,李盟,等.江苏省沿海平原沙土区典型河沟边坡土壤侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2022,36(2):42-48,6.
- [20] 李松阳,余杭,罗清虎,等.洪涝诱发灾害干扰下受损恢复林地土壤颗粒的组成变化特征及多重分形分析[J].北京林业大学学报,2020,42(8):112-121.
- [21] 孙忠超,郭天斗,于露,等.宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程土壤粒径分形特征[J].草业学报,2021,30(4):34-45.
- [22] 兰龙焱,马丽丽,郭晓敏,等.赣南不同草地类型区土壤粒径分布及分形特征[J].江西农业大学学报,2022,44(1):222-232.
- [23] 郑晓岚,杨玲,宋娇,等.水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J].水土保持研究,2022,29(1):66-71.
- [24] Wu Z L, Deng Y S, Cai C F, et al. Multifractal analysis on spatial variability of soil particles and nutrients of Benggang in granite hilly region, China[J]. Catena, 2021,207:105594.
- [25] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China[J]. Natural Hazards, 2015,79(1):455-478.
- [26] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Multifractal characteristics of particle size distributions (50—200 μ m) in soils in the vadose zone on the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2021,205:104786.
- [27] Wei Y J, Wu X L, Xia J W, et al. Relationship between granitic soil particle-size distribution and shrinkage properties based on multifractal method [J]. Pedosphere, 2020,30(6):853-862.
- [28] Li Y, Li M, Horton R. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions[J]. Pedosphere, 2011,21(1):75-83.
- [29] Bai Y R, Wang Y K. Monofractal and multifractal analysis on soil particle distribution in hilly and gully areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(5):43-48.
- [30] Nadeu E, de Vente J, Martínez-Mena M, et al. Exploring particle size distribution and organic carbon pools mobilized by different erosion processes at the catchment scale[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011,11(4):667-678.
- [31] 张俊华,李国栋,南忠仁,等.黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系[J].地理研究,2012,31(4):608-618.
- [32] 董雪,迟悦春,许德浩,等.西鄂尔多斯荒漠灌丛土壤粒径分形特征与养分的耦合关系[J].草业科学,2020,37(12):2403-2413.
- [33] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. Plant and Soil, 1997,191(1):77-87.