向家坝水电站生态修复边坡土壤团聚体及有机碳含量特征

马佳鑫[1,2], 夏 栋[2,3], 刘 芳[2,3], 闫书星[2,3], 段晓明[1,2]

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

摘　要: [目的] 分析生态工程修复技术对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响,为向家坝水电站不同生态修复边坡土壤结构稳定及碳汇功能的提升提供科学依据。[方法] 以向家坝水电站 4 种不同生态修复边坡:植被混凝土(CBS)、厚层基材喷播(TB)、框格梁覆土(FB)、客土喷播(SS)表层土壤为研究对象,并以天然林(NF)和弃渣地(AS)两种自然恢复边坡为对照,采用湿筛法研究土壤团聚体分布和稳定性及其有机碳含量特征。[结果] ①各边坡土壤均以>0.25 mm 的大团聚体粒径为主;其中天然林大团聚体含量最高,为 81.83%;植被混凝土和厚层基材边坡次之,弃渣地含量最低,仅占 55.19%。4 个人工生态修复边坡的 MWD 和 GMD 均低于天然林高于弃渣地,其中厚层基材边坡的值最高,分别为 2.96 mm 和 1.47 mm。客土喷播和弃渣地的分形维数(D)显著高于($p<0.05$)其余 4 个边坡。②各生态修复边坡措施均以>0.25 mm 粒径的大团聚体有机碳含量最高;除客土喷播和弃渣地外,其他修复措施和天然林均以>2 mm 粒级土壤团聚体贡献率最大。③相关性分析表明土壤 SOC 与 MWD,GMD 和 $R_{0.25}$ 呈极显著正相关($p<0.01$),>5 mm和 5~2 mm 粒级团聚体数量与土壤 MWD,GMD,$R_{0.25}$ 和土壤 SOC 均呈极显著正相关($p<0.01$),与 D 呈极显著负相关($p<0.01$)。[结论] 向家坝水电站研究区内厚层基材喷播技术和植被混凝土生态修复技术对土壤结构和有机碳库的改善效果比较接近天然林,客土喷播技术改善效果较差。

关键词: 生态修复边坡; 团聚体稳定性; 土壤有机碳; 向家坝水电站

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2023)05-0404-07　　**中图分类号:** S151.9, U213.1+3

文献参数: 马佳鑫, 夏栋, 刘芳, 等.向家坝水电站生态修复边坡土壤团聚体及有机碳含量特征[J].水土保持通报,2023,43(5):404-410. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20230831.001; Ma Jiaxin, Xia Dong, Liu Fang, et al. Characteristics of soil aggregates and organic carbon content for ecological restoration slopes at Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):404-410.

Characteristics of Soil Aggregates and Organic Carbon Content for Ecological Restoration Slopes at Xiangjiaba Hydropower Station

Ma Jiaxin[1,2], Xia Dong[2,3], Liu Fang[2,3], Yan Shuxing[2,3], Duan Xiaoming[1,2]

(1.*College of Biology and Pharmacy*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*;
2.*Engineering Research Center of Cement Based Ecological Restoration Technology*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*;
3.*College of Hydraulic & Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of ecological engineering restoration technology on soil aggregate stability and organic carbon distribution were analyzed in order to provide a scientific basis for improving soil structure stability and carbon sink function of different ecological restoration slopes at Xiangjiaba Hydropower Station. [Methods] Four different ecological restoration slopes at Xiangjiaba Hydropower Station were studied: vegetation concrete (CBS), thick base material spraying (TB), frame beam covering soil (FB), and external soil spraying (SS). The distribution and stability of soil aggregates and the characteristics of organic carbon content were determined by the wet sieve method for two natural restoration slopes: natural forest (NF) and

收稿日期: 2023-04-24　　**修回日期:** 2023-05-30
资助项目: 国家自然科学基金面上项目"干旱—碱性环境下丛枝菌根对植被混凝土生态修复植物抗逆性的影响"(51979147); 内蒙古自治区科技重大专项课题"改性湖泊底泥协同寒旱地区堆填场生态修复技术研究"(2021ZD0007-03)
第一作者: 马佳鑫(1999—),女(汉族),陕西省汉中市人,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态学。Email:1227757628@qq.com。
通信作者: 夏栋(1985—),男(汉族),湖北省黄冈市人,博士,副教授,主要从事生态修复与水土保持研究。Email:xiadongsanxia@163.com。

abandoned land (AS, used as the control). [Results] ① The soil for each slope was dominated by large aggregates >0.25 mm. The macroaggregate content in natural forest was the highest (81.83%). The vegetation concrete and thick base material slope had the second highest macroaggregate contents, and the macroaggregate content of waste residue land was the lowest (55.19%). The MWD and GMD values of the four artificial ecological restoration slopes were lower than the values of the natural forest, and higher than the values of the waste residue land. The values of the thick substrate slope were the highest (2.96 mm and 1.47 mm), respectively. The fractal dimension (D) of the soil spray seeding and slag field was significantly higher ($p<0.05$) than observed for the other four slopes. ② The organic carbon contents of macro aggregates with particle size >0.25 mm were the highest in all ecological restoration slope measures. In addition to soil spray seeding and waste residue land, other restoration measures and natural forests had the largest contribution rate of >2 mm soil aggregates. ③ Correlation analysis showed that SOC was significantly positively correlated with MWD, GMD, and $R_{0.25}$ ($p<0.01$). Aggregates of size >5 mm and 5—2 mm were significantly positively correlated with soil MWD, GMD, $R_{0.25}$, and SOC ($p<0.01$), and significantly negatively correlated with D ($p<0.01$). [Conclusion] In the study area of Xiangjiaba Hydropower Station, thick substrate spraying technology and vegetation concrete ecological restoration technology improved soil structure and organic carbon pool similarly to natural forest. The improvement effect of external soil spraying technology was poor.

Keywords: ecological restoration slope; aggregate stability; soil organic carbon; Xiangjiaba Hydropower Station

向家坝水电站是金沙江下游梯级开发中的重要电站,建设初期由于工程扰动形成了大量裸露边坡,带来植被丧失、景观结构破碎、地质灾害等一系列生态环境问题[1]。植被生态护坡技术实现了工程固坡与植被保护的有机结合,是恢复扰动区受损生态系统功能的有效举措。伴随植被演替,裸露边坡植被覆盖度不断提升,水土流失减少,生态环境逐渐改善,会对土壤的结构和质量产生影响[2]。土壤团聚体和有机碳作为衡量土壤肥力与健康状况的两个关键指标,二者密切相关[3];团聚体不仅在提高土壤孔隙度和持水性能、改善土壤肥力以及促进植被生长演替等方面发挥着重要作用,还是有机碳的主要物理保护场所,据统计,陆地生态系统表层土壤中约 90%的 SOC 被固定在土壤团聚体中[4]。土壤有机碳不仅引起土壤肥力发生变化,同时也是促成土壤团聚体形成与稳定的重要胶结物质之一,其含量高低显著影响着团聚体的稳定性[5]。因此探究土壤团聚体稳定性与有机碳的分布特征对于反映生态工程修复后边坡土壤结构和质量的变化情况意义重大。

土壤作为植被恢复的基础物质,其结构稳定和肥力充足是植被生长发育所必须具备的重要前提条件[6]。植被在不断演替和变化的过程中产生大量凋落物和植物根系残体等有机物质,他们作用于土壤促使土壤的粒径大小与分布和理化性质发生变化,然后再次影响植被的恢复及演替,形成土壤与植被之间良好的养分循环机制[7]。可见土壤与植被处于相互影响、不断促进的过程。大量研究表明植被恢复可以显著改善土壤结构、增强土壤团聚体的稳定性并提高土壤固碳能力[8-10]。但由于恢复方式和植被种类不同,土壤团聚体的组成、稳定性以及土壤固碳等方面的改善效果往往具有明显的差异[11]。张钦第等[12]研究发现,相比人工恢复与天然荒地,半干旱黄土区采用自然恢复方式更有利于提高土壤团聚体稳定性;Zhong Zekun 等[13]研究表明天然草地比刺槐人工林更有利于增加土壤固碳和稳定土壤团聚体;陈月明等[14]针对不同水土保持植被对土壤团聚体稳定性的影响展开研究,结果表明植被恢复会显著改善土壤微结构,并增加微小团聚体内部的有机碳含量,从而增强团聚体的稳定性。以往研究说明自然恢复、人工促进恢复或是不同土地利用方式对土壤团聚体及有机碳的影响显著,但生态工程修复对土壤结构与质量的影响如何还有待进一步研究。

本文以向家坝水电站工程扰动区 4 种生态修复边坡和自然恢复的天然林及弃渣地为研究对象,采用野外定点采样和室内试验相结合的方法,分析不同生态恢复方式下土壤团聚体稳定特征及有机碳的分布特征,揭示扰动区内边坡土壤结构的稳定状况及固碳能力,旨在为不同生态修复边坡土壤质量评价和边坡生态恢复效果提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

向家坝水电站位于四川省宜宾市和云南省水富市交界的金沙江峡谷出口处,属于典型的干旱河谷地

带，地理坐标 28°22′15″—28°39′16″N，104°3′27″—104°25′25″E。所在地区为亚热带季风气候，冬暖夏热，降雨量丰富，年相对湿度范围在 74%～83%之间，年降雨量为 850～1 500 mm，90%以上的降雨集中在 6—11 月。

1.2　样地设置及样品采集

选取向家坝水电站 4 种恢复时间相似且具有典型性和代表性的生态修复边坡为研究对象，并以天然林边坡和弃渣地边坡作为对照样地，样地详细信息见表 1。2022 年 7 月中旬在每个样地随机设置 6 个 5 m×5 m的样方，按五点采样法在样方内采集表层原状土壤（约 5—10 cm 处）样品，将相同样地的土样放置在塑料盒中，避免挤压和碰撞破坏土壤结构。带回实验室去除枯枝落叶和石子，待自然风干后将样品分成两份，一份用于土壤团聚体筛分，另一份用于土壤有机碳测定。

1.3　研究方法

土壤水稳性团聚体筛分采用湿筛法[15]。称取 50 g风干土置于团聚体分析仪套筛最上层，套筛孔径从上到下依次为 5，2，1，0.5，0.25 mm。将套筛缓慢放入筛桶内，蒸馏水浸泡 10 min，然后开动马达，使套筛在水中上下振动 25 min（振速 30 次/min，振幅 3 cm）。完成后取出套筛静置，将各级土壤洗入铝盒，40 ℃烘干并称重，计算各粒级土壤团聚体的质量分数。每个样地设置 3 个重复。

土壤总有机碳和团聚体有机碳含量采用重铬酸钾外加热—硫酸亚铁滴定法[16]测定。

1.4　指标计算与数据处理

采用>0.25 mm 水稳性团聚体的含量（$R_{0.25}$）、平均质量直径（mean weight diameter，MWD）、几何平均直径（geometric mean diameter，GMD）和分形维数（fractal dimension，D）作为评价土壤团聚体稳定状况的指标，计算公式如下：

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}\bar{x}_i W_i \tag{1}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\left(\frac{\sum_{i}^{n}W_i \ln\bar{X}_1}{\sum_{i}^{n}W_i}\right) \tag{2}$$

$$R_{0.25}=\frac{M_{i>0.25}}{M_T} \tag{3}$$

$$\lg\left[\frac{M(r<\bar{X}_1)}{M_T}\right]=(3-D)\lg\left(\frac{\bar{X}_1}{X_{\max}}\right) \tag{4}$$

式中：W_i 为第 i 粒级土壤团聚体所占百分比（%）；$\bar{x}_i$ 为第 i 粒级土壤团聚体平均直径（mm）；$M_{i>0.25)}$ 为>0.25 mm 粒径土壤团聚体质量之和（g）；M_T 为各粒径土壤团聚体质量之和（g）；$M(r<\bar{x}_i)$为团聚体粒径小于 x_i 的总质量（g）；$x_{\max}$为最大粒级土粒平均直径（mm）。

团聚体有机碳贡献率（%）=

（某粒级团聚体有机碳含量×该级团聚体比例）/土壤总有机碳含量×100%

本文使用 Microsoft Excel 2019 软件对原始数据初步整理和统计，并用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析（one-way ANOVA）和 Pearson 相关性分析，最后使用 Origin 2021 绘制成图表。

表 1　样地基本信息

Table 1　Basic information of sample plot

恢复方式	样地	修复技术	坡体性质	恢复时间	基质构成	初始物种配置	地理位置	海拔/m
人工修复边坡	CBS	植被混凝土生态防护技术	开挖边坡	2004 年 12 月	种植土、水泥、有机质、专用活化添加剂、保水剂、长效肥、混合植绿种子	狼尾草 8 g/m² 高羊茅 6 g/m² 紫花苜蓿 5 g/m² 狗牙根 3 g/m² 多花木蓝 2 g/m²	28°38′20.8″N 104°24′46.1″E	320.0
	FB	框格梁填土护坡技术	开挖边坡	2004 年 11 月	（混凝土框格梁内回填）客土	扁穗冰草 8 g/m² 黑麦草 4 g/m² 狗牙根 3 g/m²	28°38′22.4″N 104°24′44.3″E	318.4
	TB	厚层基材喷播技术	开挖边坡	2004 年 12 月	种植土、纤维肥料、有机质、酸度调节剂、消毒剂、团粒剂、稳定剂、混合植绿种子	紫花苜蓿 6 g/m² 高羊茅 6 g/m² 狗牙根 3 g/m²	28°38′21.7″N 104°26′13.1″E	390.8
	SS	客土喷播技术	开挖边坡	2005 年 6 月	客土、有机基材、粘结剂、保水剂、稳定剂、酸碱调节剂、混合植绿种子	黑麦草 12 g/m²	28°39′1.6″N 104°23′40.3″E	490.5
自然恢复边坡	AS	弃渣地	弃渣弃土堆积边坡		弃土堆积		28°39′11.2″N 104°23′41.2″E	477.3
	NF	天然林	天然边坡		原始土壤		28°39′11.2″N 104°23′41.2″E	580.4

2 结果与分析

2.1 生态修复边坡土壤团聚体分布特征

6 种不同生态修复边坡土壤水稳性团聚体粒径分布特征见表 2。不同生态修复方式下，各边坡土壤团聚体粒径分布呈中间低两边高的分布趋势。>2 mm 和<0.25 mm 为主要粒径，两者之和占团聚体总质量的 64.96%～75.02%。

在>2 mm 粒径团聚体中，NF 样地土壤团聚体质量分数(51.89%)最高；FB，CBS 和 TB 样地次之，分别占总质量的 48.92%，48.05%和 47.43%；AS 样地边坡含量最低，仅占 24.73%。<0.25 mm 粒径团聚体中，SS 和 AS 样地边坡含量较高，分别为 44.81%和 40.23%，显著高于其他 4 个边坡($p<0.05$)。2～1 mm和 0.5～0.25 mm 粒级团聚体中除 SS 外其他各样地之间团聚体含量相当。

表 2 不同生态修复边坡土壤水稳性团聚体分布特征

Table 2 Distribution characteristics of soil water－stable aggregates in different ecological restoration slopes

样地	土壤水稳性团聚体质量百分数/%					
	>5 mm	5—2 mm	2—1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm	<0.25 mm
CBS	21.67±0.48[b]	26.38±0.65[a]	14.85±0.19[a]	11.22±0.05[b]	4.42±0.41[c]	21.47±0.99[d]
FB	21.66±0.27[b]	27.26±1.08[a]	13.43±0.30[a]	7.03±0.75[c]	4.53±0.54[c]	26.10±0.97[c]
SS	17.39±0.71[c]	9.33±0.82[d]	5.06±0.24[b]	8.53±1.06[c]	14.89±0.59[a]	44.81±0.55[a]
TB	23.82±0.66[ab]	23.60±0.94[b]	12.11±0.4[a]	16.33±0.74[a]	5.96±1.15[c]	18.17±0.25[d]
NF	27.95±1.06[a]	23.94±0.73[b]	12.48±0.24[a]	8.34±0.56[c]	5.28±0.40[c]	22.01±0.63[cd]
AS	7.31±0.89[d]	17.42±0.54[c]	12.60±0.90[a]	12.59±0.35[b]	9.85±1.22[b]	40.23±0.53[b]

注：①样地编号含议具体见表 1；②不同小写字母代表同一粒径在不同边坡间差异显著 $p<0.05$，下同。

2.2 生态修复边坡土壤团聚体稳定性特征

由图 1 得，MWD 和 GMD 在 6 种生态修复边坡中变化规律相似。其中 NF 样地 MWD 和 GMD 均为最大，分别为 3.23 mm 和 1.47 mm，TB 次之，但两者之间差异不显著。AS 均为最低，MWD 中显著低于 CBS，FB 和 SS，GMD 中显著低于 CBS 和 FB($p<0.05$)，与 SS 不存在显著差异。各边坡土壤的分形维数(D)大小各异，分布范围在 2.56～2.82 之间，其中 SS 和 AS 显著高于($p<0.05$)其他 4 个边坡。TB，CBS 和 NF>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)差异不显著，分别为 81.83%，78.53%和 77.99%，SS 边坡 $R_{0.25}$ 最低，仅有 55.19%。

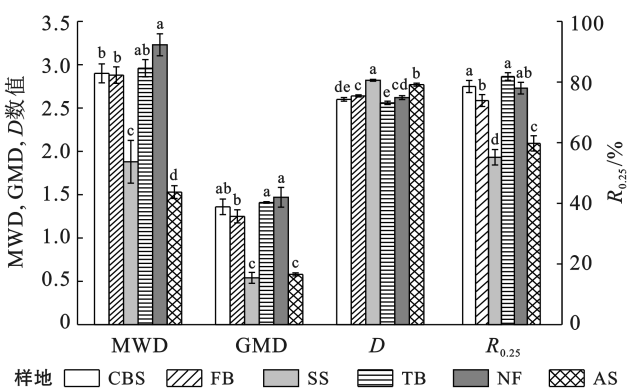


图 1 不同生态修复边坡土壤水稳定团聚体稳定性指标 MWD，GMD，D 和 $R_{0.25}$

Fig.1 Soil water stable aggregate stability indexes MWD, GMD, D and $R_{0.25}$ of different ecological restoration slopes

2.3 生态修复边坡土壤团聚体有机碳分布特征

由图 2 可知各生态修复边坡土壤总有机碳含量差异显著($p<0.05$)，从高到低依次排列为：TB>NF>CBS>FB>SS>AS，土壤总有机碳含量范围为 11.75～38.31 g/kg。不同生态修复边坡土壤有机碳在不同粒级团聚体中分布差异显著，变化范围为 9.55～31.61 g/kg(图 2)。TB 土壤团聚体在各粒级中有机碳含量均为最高，且显著高于 CBS 和 NF($p<0.05$)，除 5～2 mm 粒级团聚体外，CBS 和 NF 之间的团聚体有机碳含量差异均不显著。

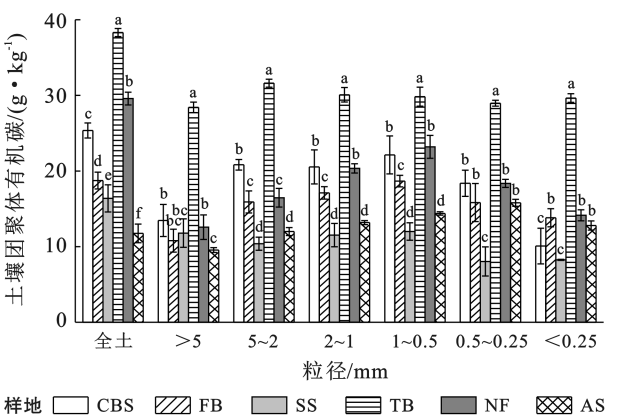


图 2 不同生态修复边坡土壤团聚体有机碳含量

Fig.2 Organic carbon content of soil aggregates in different ecological restoration slopes

5～2，2～1，1～0.5 mm 粒级团聚体中，FB 的团聚体有机碳含量显著高于 SS 和 AS($p<0.05$)，AS 和 SS 之间差异不显著。此外，6 个生态修复边坡土壤各粒级团聚体有机碳含量随粒级减小呈先增后降的变化趋势，除 TB 和 AS，其余样地的团聚体有机碳含量均在 1～0.5 mm 粒级达到最大值。

2.4　生态修复边坡土壤团聚体有机碳贡献率

不同生态修复边坡土壤团聚体有机碳贡献率见图 3。总体上,不同生态修复边坡的各粒级团聚体有机碳贡献率差异较大。各边坡>0.25 mm 的大团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率均为最高,这与团聚体有机碳含量分布特征相似。>0.25 mm 大团聚体中,FB,CBS,TB 和 NF 边坡均以 5～2 mm 团聚体有机碳贡献率最高,分别为 23.16%,21.66%,19.48%和 13.36%,而 0.5～0.25 mm 团聚体有机碳贡献率均为最低,分别为 3.92%,3.18%,4.50%和 3.28%;SS 边坡>5 mm 团聚体有机碳贡献率为 12.46%,2～1 mm 仅有 3.57%;AS 边坡>5 mm 团聚体有机碳贡献率最低,其余各粒级团聚体有机碳贡献率为 13.47%～17.80%。<0.25 mm 微团聚体中,AS 和 SS 贡献率大于其他 4 个边坡,其中 AS 边坡贡献率高达 43.94%。

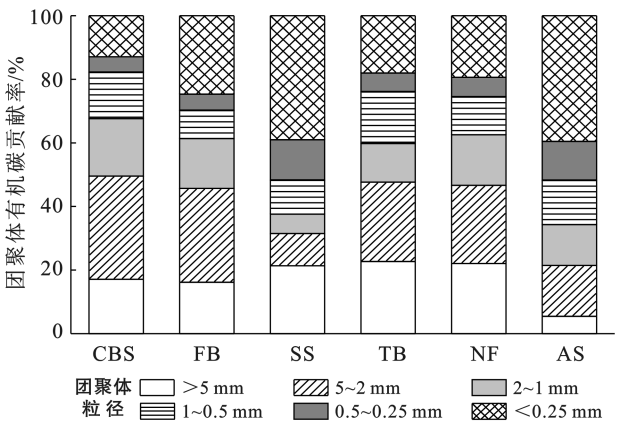
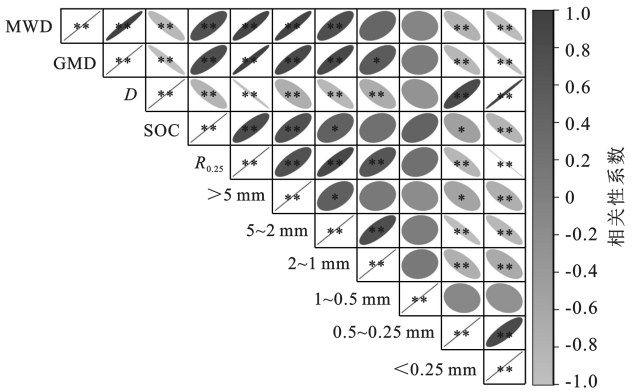


图 3　不同生态修复边坡土壤团聚体有机碳贡献率

Fig.3　Contribution rate of soil aggregate organic carbon in different ecological restoration slopes

2.5　不同生态修复边坡土壤团聚体各参数间相关性分析

由图 4 可知,>5 mm 和 5～2 mm 粒级团聚体数量与土壤 MWD,GMD 和 $R_{0.25}$ 均呈极显著正相关($p<0.01$),与 D 呈极显著负相关($p<0.01$);<0.25 mm 粒级团聚体数量与土壤 MWD,GMD 和 $R_{0.25}$ 呈极显著负相关($p<0.01$),与 D 呈极显著正相关($p<0.01$)。土壤 SOC 与 MWD,GMD 和 $R_{0.25}$ 呈极显著正相关($p<0.01$),与>5 mm 和 5～2 mm 粒级团聚体呈极显著正相关($p<0.01$),与<0.25 mm 粒级团聚体呈极显著负相关($p<0.01$)。这说明大团聚体数量越多,土壤结构越稳定,有机碳含量越高;微团聚体会导致土壤结构不稳定,有机碳含量减少。此外土壤有机碳含量与团聚体稳定性呈正比,即有机碳含量越高土壤结构越稳定。



注:* 代表显著相关($p<0.05$),* * 代表极显著相关($p<0.01$)。

图 4　不同生态修复边坡土壤团聚体参数间相关性

Fig.4　Correlation between soil aggregate parameters of different ecological restoration slopes

3　讨 论

3.1　不同生态修复边坡土壤团聚体分布和和稳定性差异

土壤团聚体的大小和数量影响着土壤质量及土壤有机碳平衡,探寻其稳定性对于分析区域土壤健康及有机碳库稳定性意义重大[17]。本文研究发现土壤团聚体各粒径的分布状况在 6 个不同生态修复边坡样地间存在差异,说明生态工程修复技术会影响土壤团聚体的形成和稳定性。一方面不同生态修复边坡由于在植被演替过程中其物种群落组成和地表凋落物的种类与数量不同,导致土壤有机质的分解和转化速率不同,进而影响胶结物质在不同粒径团聚体内部的形成,最终表现出土壤团聚体分布特征在不同修复边坡间存在差异[18];另一方面,6 个生态修复边坡由于不同的地表植被覆盖度和坡度,各自产生的地表径流和地下渗流对团聚体结构的击打和破碎作用也大不相同,所以各边坡土壤团聚体粒径分布差异显著[19]。

$R_{0.25}$ 是指土壤粒径>0.25 mm 的大团聚体数量,其含量在土壤团聚体中所占比例越大,说明土壤结构的稳定性越好[20]。本研究表明,6 个不同生态修复边坡土壤均以>0.25 mm 的大团聚体粒径为主,其中天然林样地大团聚体含量最高,说明天然林样地较其他人工修复边坡结构相对稳定。主要原因是:与人工修复边坡相比,天然林长时间的自然演替累积的有机质含量更高,另外草本灌木乔木相结合的丰富的群落结构促进了植被覆盖度和地表凋落物的增加,从而促使土壤累积更多的有机物质,其分泌的胶结物质可以加快微团聚体向大团体聚集[21]。土壤团聚体平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD)以及分形维数(D)是评价团聚结构稳定特征的重要参数,其中 MWD 和 GMD 越大,D 值越小,说明土壤团聚体团聚能力越高,

稳定性也越强[22]。本研究中,天然林的MWD和GMD均高于人工生态修复边坡,与>0.25 mm粒级团聚体含量的分布规律一致,且相关性分析表明$R_{0.25}$与MWD和GMD呈极显著正相关($p<0.05$),说明土壤大团聚体的含量越高,团聚体结构则越稳定,这与张艳等[23]和李文龙等[24]研究结果相似。本研究发现4个生态工程修复边坡的$R_{0.25}$,MWD和GMD均高于弃渣地,D值则相反,说明生态工程修复技术可以提高土壤结构的稳定性。差异的原因主要是:①生态工程修复技术在原始基材中加入了较多的复合肥、有机胶和腐殖质等有机物质[25],可通过营造适合微生物繁殖发育的环境来增加土壤微生物的数量、增强活性以及优化微生物群落而起到生态环境修复作用,这极大的促进了边坡土壤团聚体的形成与稳定发展。②弃渣地边坡由心土堆积而成,结构较差,且养分匮乏,加上土层水热、通气状况较差,植物生长受限[26],不利于土壤有机碳的积累和土壤颗粒的黏结。人工修复边坡中客土喷播边坡稳定性较其他3个边坡差,一方面可能是因为该边坡物种丰富度和植被覆盖率较低,产生的腐殖质和有机酸低于其他边坡,土壤胶结作用减弱[27],从而对团聚体稳定性造成影响。另一方面可能因为客土喷播边坡位于观景区,工作人员割草或者旅游者观光踩踏等人为干扰活动会导致边坡凋落物数量减少和团聚体结构破碎[28]。

3.2 不同生态修复边坡土壤团聚体有机碳及其贡献率差异

有机碳作为一种重要的胶结物质影响着团聚体的形成与稳定,而稳定的团聚体又可以增强土壤的固碳能力[29]。本文的相关性分析中表示土壤SOC与MWD,GMD和$R_{0.25}$呈极显著正相关($p<0.01$),便说明土壤有机碳与团聚体稳定性密切相关。程曼等[30]研究发现不同植被恢复措施下,各粒径团聚体有机碳含量呈中间高两边低的分布趋势,其中5~2,2~1,1~0.25 mm粒级含量最高;安韶山等[31]研究表明团聚体有机碳含量最大值出现在1~0.5 mm和0.5~0.25 mm粒级中。尽管不同粒径团聚体内有机碳含量存在差异,但植被恢复后大团聚体内的有机碳含量要高于微团聚体。在本研究中,4个生态工程修复边坡>0.25 mm粒径团聚体有机碳含量高于<0.25 mm粒径团聚体有机碳含量,其中5~2 mm,2~1 mm和1~0.5 mm粒径有机碳含量最高,这与上述研究结果一致,说明生态修复工程可以增加土壤大团聚体有机碳含量,提高土壤的固碳能力。厚层基材喷播边坡各粒径团聚体有机碳含量均高于天然林和植被混凝土边坡,这与土壤总有机碳含量变化规律一致,并且>2 mm粒径团聚体对有机碳的贡献率最高。主要原因有:除人为添加有机物质之外,①据实地考察,厚层基材喷播边坡位于阴坡,与天然林和植被混凝土边坡相比其湿冷的水热条件减缓了有机碳的矿化速率,有利于土壤有机碳的固定[32],所以厚层基材边坡有机碳含量最高,为土壤团聚体提供了更多的碳源。②厚层基材边坡的优势物种为银合欢,首先银合欢作为深根系树种,根系十分发达,其分泌物增加了土壤有机质的输入量,另外密集的根网在固土和防治水土流失方面作用重大,减少了土壤中有机养分的部分流失。其次银合欢是固氮植物,它的固氮特性可以在生长过程中为其他物种特别是当地物种的生长营造良好的条件,从而形成丰富的植被群落[33-34]。客土喷播边坡和弃渣地边坡主要以<0.25 mm的微团聚体贡献率最高。可能是因为这两个边坡土壤养分匮乏且物种单一,导致土壤团聚体不稳定,进而使大团聚体破碎释放内部固定的有机碳。而微团聚体内部的有机碳因受到物理保护比较稳定,不易被分解[23]。

4 结论

(1)与弃渣地相比,4个生态修复边坡的土壤团聚体稳定性均有所提高,但稳定状况差于天然林。其中厚层基材喷播边坡和植被混凝土边坡的稳定性指标值最接近天然林,框格梁覆土边坡次之,客土喷播边坡稳定性最差。

(2)土壤总有机碳含量表现为:厚层基材边坡>天然林>植被混凝土边坡>框格梁覆土边坡>客土喷播边坡>弃渣地;不同生态修复边坡以>0.25 mm粒径的大团聚体有机碳含量为主;厚层基材边坡、天然林、植被混凝土边坡和框格梁覆土边坡均以>2 mm粒级土壤团聚体贡献率最大,客土喷播边坡和弃渣地以<0.25 mm粒级的微团聚体贡献率最大。

(3)在向家坝水电站研究区内,厚层基材喷播技术和植被混凝土生态修复技术对土壤结构和有机碳库的改善效果最佳,客土喷播技术改善效果较差。

[参 考 文 献]

[1] 李桂媛,陈静,段中元,等.水电建设区的生态环境监测与评价:以向家坝水电站为例[J].长江流域资源与环境,2013,22(12):1573-1580.

[2] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions [J]. Ecological Indicators, 2017, 75: 307-320.

[3] Hartley W, Riby P, Waterson J. Effects of three differ-

ent biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability [J]. Journal of Environmental Management, 2016,181:770-778.

[4] Li Junya, Yuan Xiaoliang, Ge Le, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,304:107126.

[5] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014,68:A4-A9.

[6] 徐慧,吕庆,杨雨荷,等.边坡植被重建效果评价:研究进展与展望[J].生态学杂志,2022,41(3):589-596.

[7] 何园球,沈其荣,王兴祥.红壤丘岗区人工林恢复过程中的土壤养分状况[J].土壤,2003,35(3):222-226.

[8] Qiao Leilei, Li Yuanze, Song Yahui, et al. Effects of vegetation restoration on the distribution of nutrients, glomalin-related soil protein, and enzyme activity in soil aggregates on the Loess Plateau, China [J]. Forests, 2019,10(9):796.

[9] Gu Xiang, Fang Xi, Xiang Wenhua, et al. Vegetation restoration stimulates soil carbon sequestration and stabilization in a subtropical area of Southern China [J]. Catena, 2019,181:104098.

[10] Huang Yanzhang, Xin Zhongbao, Ran L, et al. Topsoil carbon sequestration of vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. Ecological Engineering, 2022,177:106570.

[11] 孙涛,刘艺杉,孙崇玉,等.石灰岩山地植被恢复对土壤水稳性团聚体的影响[J].草业科学,2018,35(6):1361-1367.

[12] 张钦弟,刘剑荣,杨磊,等.半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J].生态学报,2022,42(22):9057-9068.

[13] Zhong Zekun, Wu Shaojun, Lu Xuqiao, et al. Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021,196:104867.

[14] 陈月明,裴隆翠,崔钢,等.不同水土保持植被对典型黑土微团聚体稳定性的影响[J].东北林业大学学报,2019,47(6):26-30.

[15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[17] 季波,时龙,徐金鹏,等.宁夏典型天然草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征[J].生态学报,2021,41(19):7669-7678.

[18] 王冰,张鹏杰,张秋良.不同林型兴安落叶松林土壤团聚体及其有机碳特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(3):15-24.

[19] 赵晶,刘美英,郝孟婕,等.植被恢复对干旱区生态光伏电站土壤团聚体组成及有机碳的影响[J].水土保持研究,2022,29(5):137-143.

[20] 王心怡,周聪,冯文瀚,等.不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J].水土保持学报,2019,33(5):126-131.

[21] Zeng Quanchao, Darboux F, Man Cheng, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China) [J]. Catena, 2018,167:276-283.

[22] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9):1564-1576.

[23] 张艳,刘彦伶,李渝,等.喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响[J].土壤通报,2021,52(6):1308-1315.

[24] 李文龙,刘美英,李雪,等.植被恢复对采煤沉陷区土壤团聚体稳定性的影响[J].煤炭科学技术,2022,50(11):222-229.

[25] 周明涛,许文年,夏栋.向家坝水电站工程扰动区不同类型边坡土壤酸碱度与肥力分析[J].应用生态学报,2010,21(4):1031-1037.

[26] 杜祥运,许文年,夏振尧.向家坝工程扰动边坡微生物群落功能多样性分析[J].人民长江,2016,47(21):20-24.

[27] 徐红伟,吴阳,乔磊磊,等.不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性:以黄土高原为例[J].中国环境科学,2018,38(6):2223-2232.

[28] 田云国.旅游干扰对太原万柏林生态园土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].土壤通报,2021,52(6):1316-1322.

[29] 陈海,朱大运,陈浒.石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J].中国岩溶,2021,40(2):346-354.

[30] 程曼,朱秋莲,刘雷,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J].生态学报,2013,33(9):2835-2844.

[31] 安韶山,张玄,张扬,等.黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J].水土保持学报,2007,21(6):109-113.

[32] 潘蕊蕊,李小雁,胡广荣,等.青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(18):6374-6384.

[33] 周军,陈舰,郝国鹏.银合欢用于白鹤滩水电站渣场边坡绿化的研究[J].水电与新能源,2021,35(2):46-49.

[34] 唐亚,谢瑶,乔雪.新银合欢在四川盆地高速公路边坡防护中的应用[J].中国水土保持,2022(6):23-25.