

改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响

刘新梅, 田 剑, 张 昊, 刘奋武, 王改玲, 樊文华

(山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 为探究改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响, 采用田间微区的方法按表层 0—20 cm 土壤重量占比 1%, 3%, 5% 的比例添加泥炭、腐殖酸和蛭石, 研究 3 种改良剂对复垦土壤团聚体组成、总有机碳、各粒级团聚体有机碳含量、土壤红外光谱特征的影响。结果表明: 施用 3 种改良剂后各处理土壤机械稳定性团聚体均以 >5 mm 的最多, 施用泥炭和腐殖酸后 >5 mm 团聚体含量随着改良剂施用比例的升高而增大, 且 MWD(平均质量直径)值均高于 CK。其中, 5% 腐殖酸对调控 >5 mm 团聚体含量效果最佳, 在 6 个月时 >5 mm 机械稳定性团聚体占比达到 60.03%。而施用蛭石后 >5 mm 机械稳定性团聚体的占比与 CK 相比有所下降。施用 3 种改良剂后土壤水稳性团聚体以 <0.053 mm 团聚体含量最高, 但其含量均随改良剂施用比例的升高而降低。泥炭和腐殖酸能够提高复垦土壤总有机碳的含量, 增强抗侵蚀能力和团聚体的稳定性, 而施用蛭石后有机碳含量减少。泥炭、腐殖酸和蛭石各处理下各粒级机械稳定性团聚体有机碳含量均以 >5 mm 最高, 0.053~0.25 mm 次之, <0.053 mm 最少, 有机碳含量贡献率也以 >5 mm 团聚体的最大, 泥炭和腐殖酸处理下 >5 mm 团聚体有机碳含量贡献率均高于 50%, <0.053 mm 团聚体有机碳贡献率仅有 0.63%~2.82%。从土壤的红外光谱特征峰可以看出, 施用腐殖酸能够增加土壤中的多糖类物质, 而多糖类物质有大量的—OH, 能与黏粒矿物晶面上的氧原子形成氢键而把土粒团聚起来。

关键词: 改良剂; 团聚体组成; 有机碳含量; 红外光谱特征

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0326-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.01.047

Effects of Amendment on Aggregates Composition and Organic Carbon Content in Reclaimed Soil

LIU Xinmei, TIAN Jian, ZHANG Hao, LIU Fenwu, WANG Gailing, FAN Wenhua

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In this study, a series of field microfield experiments were set to explore the effect of amendments on aggregates composition and organic carbon distribution in reclaimed soil. Peat, humic acid and vermiculite as amendments were added to the soil (0—20 cm) at the weight ratios of 1%, 3% and 5%. Soil aggregates composition, total organic carbon, organic carbon distribution in each fraction aggregates, soil infrared spectrum characteristics were analyzed. The results showed that soil mainly composed by >5 mm mechanical stabilized aggregates, and the content of >5 mm aggregates increased with the increase of the proportion of peat and humic acid application in all treatment, and the MWD in all treatments were higher than CK. The effect of 5% humic acid application was the best for improving the content of >5 mm mechanical stabilized aggregates, and the proportion of >5 mm mechanical stabilized aggregates reached to 60.03% in the sixth month. However, compared with CK, the proportion of >5 mm mechanical stabilized aggregates decreased after vermiculite was used. After the application of amendments, soil mainly composed by <0.053 mm water stabilized aggregates, but its content all decreased with the increasing amounts of amendments. Peat and humic acid could increase the content of total organic carbon and the resistance to erosion and the stability of aggregates for reclaimed soil. However, the organic carbon content decreased after vermiculite was used. For all peat, humic acid and vermiculite treatments, the content of organic carbon in >5 mm aggregates were the highest, followed by 0.053 ~ 0.25 mm aggregates, and the content of organic carbon in <0.053 mm aggregates were the lowest. The organic carbon contribution in >5 mm aggregates were the highest. The or-

收稿日期: 2020-05-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(U1710255-4)

第一作者: 刘新梅(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事矿区土壤复垦研究。E-mail: 1165169546@qq.com

通信作者: 樊文华(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤生态和土壤质量研究。E-mail: fwh012@163.com

ganic carbon contribution rate of > 5 mm aggregates were higher than 50%. The organic carbon contribution rate of < 0.053 mm aggregates were the lowest, and accounted for 0.63% ~ 2.82% in all of peat and humic acid treatments. The soil infrared spectroscopy characteristic showed that humic acid increased the content of polysaccharides in soil. There were many hydroxyl in polysaccharides and they could form hydrogen bonds with the oxygen atoms on the crystal surface of clay minerals, which can agglomerate the soil particles.

Keywords: amendment; aggregate composition; content of organic carbon; infrared spectrum characteristics

土壤团聚体的组成能够影响土壤侵蚀、压实、板结等物理过程与作用^[1]。土壤有机碳(SOC)是土壤质量和功能的核心,是影响土壤肥力的决定因子^[2]。两者关系密切,团聚体能够有效保护 SOC,进而保持肥力,提升土壤质量^[3],而 SOC 又是团聚体的胶结物质^[4]。一般认为,有机物质是土壤形成良好结构的重要因素。有机质一方面可以为土壤微生物活动提供能量底物,微生物分解有机质时能产生黏性糖蛋白、多糖及一些有机复合物^[5],这些物质能够将土粒胶结成微团聚体,将微团聚体胶结团聚成大团聚体;另一方面可以通过其分子上的羧基、羟基、酰胺基等活性功能基团联结矿物质颗粒来形成和稳定土壤结构^[6]。已有研究^[7-8]表明,有机碳在团聚体中的分布差异较大,与小团聚体相比,大团聚体中含有更多的碳、氮等物质,且大团聚体中拥有更多的新增加的有机碳和不稳定的有机碳。江春玉等^[9]研究发现,大团聚体中的有机碳含量显著高于微团聚体的,且土壤团聚体中的有机碳含量以 1~2 mm 粒级的最高,0.053~0.25 mm 粒级的最低。张艺等^[10]指出,随着土壤团聚体粒径的逐渐减小,土壤有机碳含量呈降低趋势。

矿区生态环境重建的一个重要措施是矿区土壤复垦,复垦的目标是采用一系列物理化学及生物措施使矿区土壤恢复到可耕种的状态。但是,新复垦区耕作层土壤大多是没有经过生物作用或熟化过程的生土,其典型特征表现为土层紧实,团聚体数量少,土壤肥力低下,且保水保肥性能差。张志权等^[11]研究发现,矿区复垦土壤有机碳含量远低于煤矿开采前土壤有机碳含量,仅为之前的 20%~30%。因此,必须采取有效的手段对矿区复垦土壤的结构进行改良,提升土壤肥力。使用土壤改良剂是改良土壤结构的一种重要措施,目前,关于改良剂对土壤各项指标的影响的相关研究较多,但大多集中在宏观效果上,对土壤团聚体及有机碳含量的研究相对较少,同时,有关改良剂对土壤团聚体及有机碳的影响的研究主要集中在耕作土壤上,对矿区复垦土壤的研究较少。因此,探究不同改良剂对复垦土壤团聚体分布及有机碳含量的影响,有助于改良矿区土壤结构,提升土壤肥力,使矿区土壤达到可耕种的状态。土壤改良剂种类众多,其中,腐殖酸肥作为植物生长调节剂,被广泛用于改良土壤;泥炭是富含腐殖酸的有机质;蛭石是一种

铁镁质铝硅酸盐矿物,拥有独特的空间结构,可以改善土壤结构,有利于提高土壤的保肥保水性能。鉴于此,本试验以太原古交市屯兰煤矿区复垦土壤为研究对象,选用泥炭、腐殖酸和蛭石 3 种改良剂对矿区复垦土壤进行改良,测定施用改良剂 3 个月及 6 个月后土壤的机械稳定性及水稳性团聚体组成、总有机碳及各粒级机械稳定性团聚体中的有机碳含量、土壤红外光谱特征变化情况,以期明确 3 种改良剂作用下复垦土壤团聚体及其有机碳的变化情况,确定泥炭、腐殖酸和蛭石对矿区复垦土壤结构的改良效果,为改良矿区复垦土壤和提升矿区土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验基地及供试材料

1.1.1 试验基地 试验区位于太原古交市屯兰煤矿区复垦基地(112°06'E,37°53'N),海拔 1 142 m,该试验基地位于暖温带半干旱大陆性季风气候区,年均气温 9.5℃,年降水量 460 mm。基地于 2012 年开始采用充填的方式进行复垦,复垦土壤为生土,覆土深度 60 cm,初始肥力有限,土壤 pH 为 8.31,有机碳含量 2.81 g/kg,碱解氮含量 18.03 mg/kg,有效磷含量 4.94 mg/kg,速效钾含量 91.77 mg/kg。

1.1.2 供试材料 泥炭、腐殖酸和蛭石均由山西省交城红星化工有限公司提供,泥炭中有机质含量 326.30 g/kg,腐殖酸含量 15.11%;腐殖酸为硝基黄腐酸,黑色粉末状,有机质含量 548.80 g/kg,腐殖酸含量 28.90%;蛭石不含有机质。

1.2 试验设计

本试验采用田间微区试验,于 2018 年 8 月开垦 30 个 1 m×1 m 微区,分别按 0—20 cm 耕层土壤重量占比 1%,3%,5%的比例在微区中加入 3 种改良剂(泥炭、腐殖酸、蛭石),随后将改良剂与 0—20 cm 耕层土壤混匀。分别在添加改良剂 3,6 个月后,测定复垦土壤团聚体的组成、总有机碳及各团聚体有机碳含量和红外光谱特征图。同时设置不添加改良剂的微区做为空白对照(CK),每个处理设置 3 个重复,微区采用随机排列的方式布置。

1.3 样品采集

分别在布置试验 3 个月(2018 年 11 月)和 6 个月(2019 年 2 月)后进行采样。每个微区用土钻采集 1 个混合土样装于布袋中,用铝盒采集 1 个原状土

样,避免采样过程中对团聚体的破坏,采样深度均为 20 cm,混合土样用于有机碳相关指标的测定,原状土样用于团聚体相关指标的测定。

1.4 测定指标与方法

土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的分离和提取分别采用干筛法及湿筛法^[12],通过筛分将团聚体分为>5,2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5,0.053~0.25,<0.053 mm 7 级,称重并计算各级团聚体组成和平均质量直径。土壤及各级团聚体有机碳采用重铬酸钾—外加加热法^[13]测定。土壤官能团采用傅里叶变换红外光谱仪—压片法^[14]测定。

平均质量直径(MWD)^[15]和各级团聚体有机碳含量^[16]计算公式为:

$$MWD=\sum_i^n W_i X_i$$

式中:MWD 为平均质量直径(mm); W_i 为*i* 粒级团聚体质量比例(%); X_i 为*i* 粒级范围内团聚体的平均粒径(mm)。

某粒级团聚体中有机碳含量(g/kg)=该粒级团聚体中有机碳浓度×该粒级团聚体组成

某粒级团聚体中有机碳的贡献率(%)=某粒级团聚体有机碳含量/土壤有机碳含量×100%

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2010、SPSS 13.0、Origin 9.0 软件进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成及平均质量直径

2.1.1 土壤机械稳定性团聚体组成及平均质量直径
由表 1 可知,各处理下团聚体组成与 CK 相似,均以>5 mm 粒级的大团聚体含量最高,以<0.053 mm 粒径的微团聚体含量最低。从施用改良剂 3 个月后的结果来看,施用泥炭的处理与 CK 相比,>5 mm 团聚体的含量均有所增加,且施用量越多增量越大;与 CK 相比,施用腐殖酸的处理,>5 mm 粒径团聚体含量都有所增加,且在 5%腐殖酸处理下>5 mm 粒径的团聚体含量达到最高,为 58.57%,与 CK 相比增加了 31.09%。说明泥炭和腐殖酸有助于增加复垦土壤大团聚体含量,且在一定范围内施用量越高效果越好。而施用蛭石的处理与其他处理不同,施用蛭石后,>5 mm 粒径团聚体含量低于 CK,且随着蛭石浓度的增加>5 mm 的团聚体含量逐渐减少,1~2,0.25~0.5 mm 粒径的团聚体含量逐渐增加,5%蛭石处理下,>5 mm 粒径的团聚体仅占 37.37%,与 CK 相比减少了 16.36%。说明蛭石不利于复垦土壤形成大团聚体,且浓度越高效果越明显。6 个月时,泥炭和蛭石处理下的各团聚体组成变化趋势基本与 3 个月时相同,5%腐殖酸处理下>5 mm 粒径的团聚体含量大量增加,占比超过了 60%,可以看出随着时间的推移,腐殖酸对土壤团聚体的团聚作用在逐渐增强。

表 1 复垦土壤机械稳定性团聚体组成

处理 时间/月	改良剂	大团聚体/%					微团聚体/%		平均质量 直径/mm
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	
3	CK	44.68	13.67	12.72	5.63	6.58	13.99	2.73	3.01c
	1%泥炭	49.40	10.27	10.06	5.39	6.08	14.86	3.95	3.09c
	3%泥炭	53.83	10.57	11.90	5.62	6.75	9.58	1.75	3.34ab
	5%泥炭	54.13	9.69	9.92	4.78	6.08	13.26	2.13	3.29b
	1%腐殖酸	49.41	12.46	11.67	5.39	6.79	12.23	2.05	3.18bc
	3%腐殖酸	51.88	11.97	12.52	5.48	6.62	9.73	1.80	3.30b
	5%腐殖酸	58.57	9.10	8.92	4.94	5.83	10.85	1.78	3.47ab
	1%蛭石	48.02	11.66	13.90	6.33	6.57	12.08	1.43	3.12bc
	3%蛭石	42.10	9.50	15.44	10.25	10.45	10.10	2.15	2.82cd
	5%蛭石	37.37	10.89	16.05	11.67	11.03	10.99	1.99	2.65cd
6	CK	46.83	11.68	13.98	6.14	8.08	11.90	1.38	3.07c
	1%泥炭	48.80	12.32	12.36	5.49	7.38	12.32	1.33	3.16bc
	3%泥炭	53.03	12.18	11.99	4.98	6.43	10.58	0.80	3.35ab
	5%泥炭	55.97	11.04	10.99	4.73	6.31	10.10	0.86	3.44ab
	1%腐殖酸	50.94	9.85	11.66	5.76	9.51	11.23	1.04	3.18bc
	3%腐殖酸	52.53	10.06	11.75	5.67	7.20	11.01	1.78	3.26bc
	5%腐殖酸	60.03	10.41	10.34	4.46	5.09	7.92	1.75	3.60a
	1%蛭石	48.68	10.73	12.66	6.38	9.51	11.49	0.55	3.11bc
	3%蛭石	46.28	11.28	11.93	7.72	9.47	12.26	1.06	2.82c
	5%蛭石	38.11	10.70	16.85	12.30	10.53	10.86	0.65	2.69cd

注:同列不同小写字母表示不同处理间的差异显著($P<0.05$)。下同。

土壤平均质量直径(MWD)作为反映土壤团聚体大小分布的重要指标,其值越大,表明土壤平均团

聚度越好,稳定性越好^[17]。由表 1 可知,施用改良剂 3 个月及 6 个月后,复垦土壤机械稳定性团聚体

MWD 表现为:1%腐殖酸处理下 3 个月的 MWD (3.18 mm)等于 6 个月的(3.18 mm),但差异不显著;3%腐殖酸处理下 3 个月的 MWD(3.30 mm)大于 6 个月的(3.26 mm),且差异显著;1%蛭石处理下 3 个月的 MWD(3.12 mm)大于 6 个月的(3.11 mm),但差异不显著;其余各处理均表现为 3 个月的 MWD 小于 6 个月的,说明随着时间的推移改良剂有助于提高复垦土壤的稳定性。与 CK 相比,腐殖酸处理下的 MWD 变化最大,且以 5%腐殖酸处理下的 MWD 最大(3.47,3.60 mm),而蛭石处理下的 MWD 变化最小,不同时期 3%蛭石处理的 MWD(2.82,2.82 mm)和 5%蛭石处理的 MWD(2.65,2.69 mm)均小于 CK (3.01,3.07 mm)。说明 3 种改良剂不同处理中,5%腐殖酸最利于增加复垦土壤稳定性,少量蛭石的施用

仍可提高土壤稳定性,但大量施用蛭石会降低复垦土壤的稳定性。

2.1.2 土壤水稳性团聚体组成及平均质量直径 由表 2 可知,施用改良剂 3 个月后,5%腐殖酸处理以 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量最高,其他各处理均以<0.053 mm 微团聚体含量最高,而且不同改良剂处理下微团聚体含量均随着施用比例的升高而降低,>5 mm 大团聚含量则随着施用比例的升高而升高,其中 5%腐殖酸效果最佳,与 CK 相比,5%腐殖酸处理下>5 mm 大团聚体增加了 3 倍。而团聚体含量最低值则表现为与施用的改良剂种类相关,其中,CK 处理与蛭石处理相同,均以>5 mm 大团聚体含量最低,泥炭处理以 2~5 mm 团聚体含量最低,腐殖酸处理以 1~2 mm 团聚体含量最低。

表 2 复垦土壤水稳性团聚体组成

处理 时间/月	改良剂	大团聚体/%					微团聚体/%		平均质量 直径/mm
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	
3	CK	3.95	4.91	4.67	8.89	26.21	16.97	34.40	0.73jk
	1%泥炭	5.64	3.81	4.19	11.36	16.13	20.27	38.60	0.77jk
	3%泥炭	8.39	4.47	4.61	14.45	16.15	16.70	35.23	0.94i
	5%泥炭	11.47	4.41	5.22	12.03	15.83	18.47	32.57	1.08i
	1%腐殖酸	7.71	5.81	5.15	13.34	23.37	17.21	27.41	0.97i
	3%腐殖酸	12.07	7.08	6.46	15.15	17.72	15.68	25.85	1.23gh
	5%腐殖酸	15.67	6.70	5.21	19.23	18.97	17.74	16.49	1.40f
	1%蛭石	1.51	2.52	4.29	7.63	14.25	22.57	47.23	0.51i
	3%蛭石	3.62	4.08	7.53	17.93	12.81	19.53	34.51	0.75jk
	5%蛭石	5.35	2.56	10.43	15.55	14.23	17.55	34.32	0.81jk
	CK	5.69	3.61	4.17	15.03	17.55	20.92	33.03	0.79jk
	1%泥炭	5.67	4.47	4.33	9.37	17.68	21.40	37.07	0.79jk
6	3%泥炭	7.15	2.55	4.58	15.33	16.36	17.91	36.12	0.83jk
	5%泥炭	11.23	5.65	6.68	13.71	19.85	15.09	27.79	1.14hi
	1%腐殖酸	8.81	4.71	7.95	9.49	18.95	19.09	31.00	0.99f
	3%腐殖酸	11.53	7.82	7.27	16.88	15.51	17.13	23.86	1.25gh
	5%腐殖酸	16.59	7.06	8.65	19.76	13.01	11.25	23.67	1.49ef
	1%蛭石	3.95	3.28	5.39	11.63	19.17	22.41	34.17	0.69k
	3%蛭石	4.77	4.88	6.01	13.70	16.17	20.84	33.63	0.80jk
	5%蛭石	4.21	5.35	6.15	15.24	18.53	25.61	24.91	0.80jk

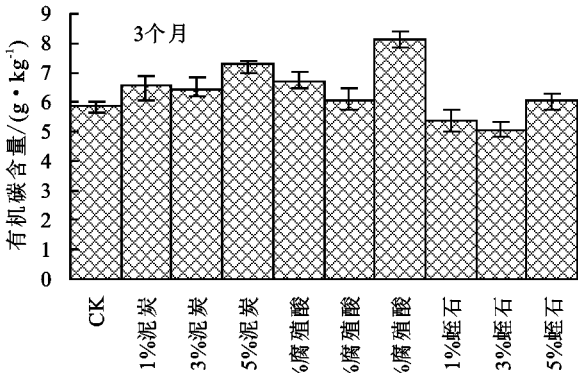
施用改良剂 6 个月后,CK 及不同改良剂不同浓度处理下土壤水稳性团聚体仍以<0.053 mm 微团聚体含量最高,且其含量高低随改良剂施用比例的变化规律与 3 个月时一致,其中仍以 5%腐殖酸效果最佳,与 CK 相比,5%腐殖酸处理下>5 mm 大团聚体增加了 2 倍。与 3 个月时相比,5%腐殖酸处理团聚体含量最高的粒级由 0.5~1 mm 变为<0.053 mm。与施用改良剂 3 个月的结果相比,6 个月时 CK 团聚体含量最低的粒级由>5 mm 变为 2~5 mm,而蛭石处理仍以>5 mm 团聚体含量最低,说明随着时间的推移蛭石具有保护>5 mm 团聚体的作用。

施用改良剂 3 个月及 6 个月后,复垦土壤水稳性团聚体 MWD 表现为:3%泥炭处理下 3 个月的 MWD(0.94 mm)大于 6 个月的(0.83 mm),且差异

显著;5%蛭石处理下 3 个月的 MWD(0.81 mm)大于 6 个月的(0.80 mm),且差异不显著;其余各处理均表现为 3 个月的 MWD 小于 6 个月的,再次说明随着时间的推移改良剂有助于提高复垦土壤的稳定性。同一改良剂不同施用比例下 MWD 的变化趋势均表现为随着施用比例的升高而增大,说明提高改良剂施用浓度有助于提高水稳性团聚体的稳定性。3 个月及 6 个月时,与 CK 相比,腐殖酸处理下的 MWD 变化最大,且以 5%腐殖酸处理下的 MWD 最大(1.40,1.49 mm),而蛭石处理下的 MWD 变化最小,不同时期 1%蛭石处理的 MWD(0.51,0.69 mm)均小于 CK(0.73,0.79 mm)。

2.2 土壤有机碳及各机械稳定性团聚体有机碳含量 2.2.1 土壤有机碳含量 由图 1 可知,总体上,除 1%及 3%蛭石处理外,其他各改良剂处理下总有机

碳含量与 CK 相比都有所增加。3 个月时 5%腐殖酸处理下有机碳含量最高,为 8.15 g/kg,与 CK 相比增加了 38.40%,且差异显著,5%泥炭处理的增幅次之,为23.67%,而蛭石处理下有机碳含量增幅不明显,且有减少的趋势,3%蛭石处理与 CK 相比降低了14.07%;同时,3 个月时,同种改良剂不同施用量处理下土壤有机碳含量呈“V”形,即 1%及 5%处理均高于 3%处理,而 6 个月时,同种改良剂处理下土壤有机碳含量随改良剂施用量的增加而升高,说明泥炭和腐殖酸能够增加复垦土壤有机碳含量,以土壤占比 5%施用腐殖酸最利于提高土壤有机碳含量,而



蛭石施用量低时有降低土壤有机碳的风险,同时,以土壤占比 3%施用改良剂时间越长越利于提高土壤有机碳含量。

与 3 个月时相比,6 个月时各处理总有机碳含量均有所下降,但泥炭和腐殖酸各处理仍高于 CK 中的总有机碳含量,5%泥炭及腐殖酸处理与 CK 相比分别增加了 23.32%和 40.19%,蛭石处理下总有机碳含量均低于 CK,其中 1%蛭石处理与 CK 相比下降最多,为 7.73%,近一步说明蛭石不利于提高土壤有机碳含量。同时从图 1 可以看出,泥炭和腐殖酸处理下有机碳含量随着施用比例的增加逐渐升高。

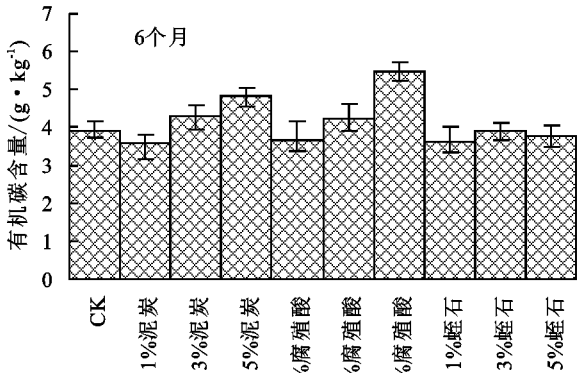


图 1 复垦土壤总有机碳含量

2.2.2 土壤各机械稳定性团聚体有机碳含量及贡献率 由图 2 可知,各处理下均以>5 mm 机械稳定性团聚体中的有机碳含量最高,0.053~0.25 mm 团聚体中的次之,<0.053 mm 团聚体中的最少。3 个月时,土壤各粒级机械稳定性团聚体中有机碳含量变化范围为 0.052~3.78 g/kg。泥炭处理下>5 mm 团聚体中的有机碳含量随泥炭浓度的增加而减少,但均高于 CK,1%泥炭处理下>5 mm 团聚体中的有机碳含量最高,为 3.78 g/kg,<0.053 mm 团聚体中的有机碳含量呈下降趋势,其余均呈上升趋势;腐殖酸处理下 0.053~0.25,<0.053 mm 团聚体中的有机碳含量随腐殖酸施用浓度的升高呈减少的趋势,其余各粒级团聚体中的有机碳含量则先增加后减少;蛭石处理下>5,2~5,1~2,0.053~0.25 mm 团聚体中的有机碳含量随蛭石施用浓度的增加而减少,0.5~1 mm 团聚体中的有机碳含量随蛭石施用浓度的增加而增加,0.25~0.5,<0.053 mm 团聚体有机碳含量则随蛭石浓度的增加先增加后减少。6 个月时,土壤各粒级机械稳定性团聚体中有机碳含量变化范围为 0.021~3.31 g/kg,较 3 个月时有所下降,与土壤总有机碳含量的变化一致。泥炭处理和 3 个月时的变化趋势不同,>5 mm 团聚体有机碳含量随泥炭浓度的增加而增加;腐殖酸处理下>5 mm 团聚体有机碳含量随腐殖酸浓度的增加呈“V”形变化,蛭石处理下>5 mm 团聚体有机碳含量随蛭石浓度的增加而减少。说明

短时期内泥炭施用量小比施用量大更利于>5 mm 团聚体中有机碳的积累,但时间越长泥炭施用量大时更有利于>5 mm 团聚体中有机碳的积累。

由表 3 可知,不同时期不同处理下各机械稳定性团聚体有机碳含量贡献率最大的均为>5 mm 大团聚体,且泥炭和腐殖酸处理的贡献率均高于 50%,而<0.053 mm 微团聚体的有机碳贡献率最小,在 0.63~2.82%,这与团聚体含量分布特征相似。3 个月时随着泥炭和腐殖酸施用量的增加,>5 mm 团聚体有机碳贡献率逐渐增加,但增幅不明显,蛭石处理下>5 mm 团聚体有机碳贡献率随着蛭石施用量的增加而逐渐降低。6 个月时与 3 个月时的变化趋势相似,贡献率数值稍有变化。

2.3 复垦土壤官能团

从团聚体组成结果可以看出,泥炭和腐殖酸对复垦土壤的影响效果明显。因此测定了 6 个月时泥炭和腐殖酸处理下复垦土壤的红外光谱特征图。由图 3 可知,6 个月时泥炭和腐殖酸处理下复垦土壤的红外光谱特征峰相似,土壤的红外光谱特征峰主要在 3 416.76, 2 803.65, 2 715.98, 1 576.81, 1 433.63, 1 383.39, 1 350.23, 1 034.64, 799.79, 472.81 cm⁻¹处,说明复垦土壤在加入改良剂后其碳骨架结构基本一致。由红外光谱吸收峰归属(表 4)可知,波数为 3 500~3 000 cm⁻¹时出现氢键结合的一COOH、醇及苯酚中的一

OH 的伸缩振动吸收峰,2 850~2 710 cm⁻¹出现的弱峰是醛类的 C—H 的伸缩振动吸收峰,在 1 640~1 550 cm⁻¹出现的是胺类和酰胺类—NH 的面内弯曲振动吸收峰,在 1 340~1 465 cm⁻¹出现饱和碳 C—H 振动峰,1 260~1 000 cm⁻¹的强吸收峰是醇类、多糖类、羧酸类及酯类 C—O 的伸缩振动峰,很有可能是半纤维素、纤维素的 C—O 峰,在 870~640 cm⁻¹出现的尖峰是苯环 C—H 面外弯曲振动吸收

峰。由此可见,土壤有机化合物主要有羧酸、醇类、醛类、胺类、苯酚、多糖等物质。从不同处理下各波段吸光度来看,腐殖酸处理下土壤各波段吸光度增加较为明显,5%腐殖酸处理下吸光度与 CK 相比 3 416.76 cm⁻¹处增加了 37.95%。根据朗伯比尔定律可知,红外吸收强度能够用于分析土壤有机质官能团的结构差异^[17],因此从红外光谱特征图可以看出,5%腐殖酸对复垦土壤有机质官能团的影响最大。

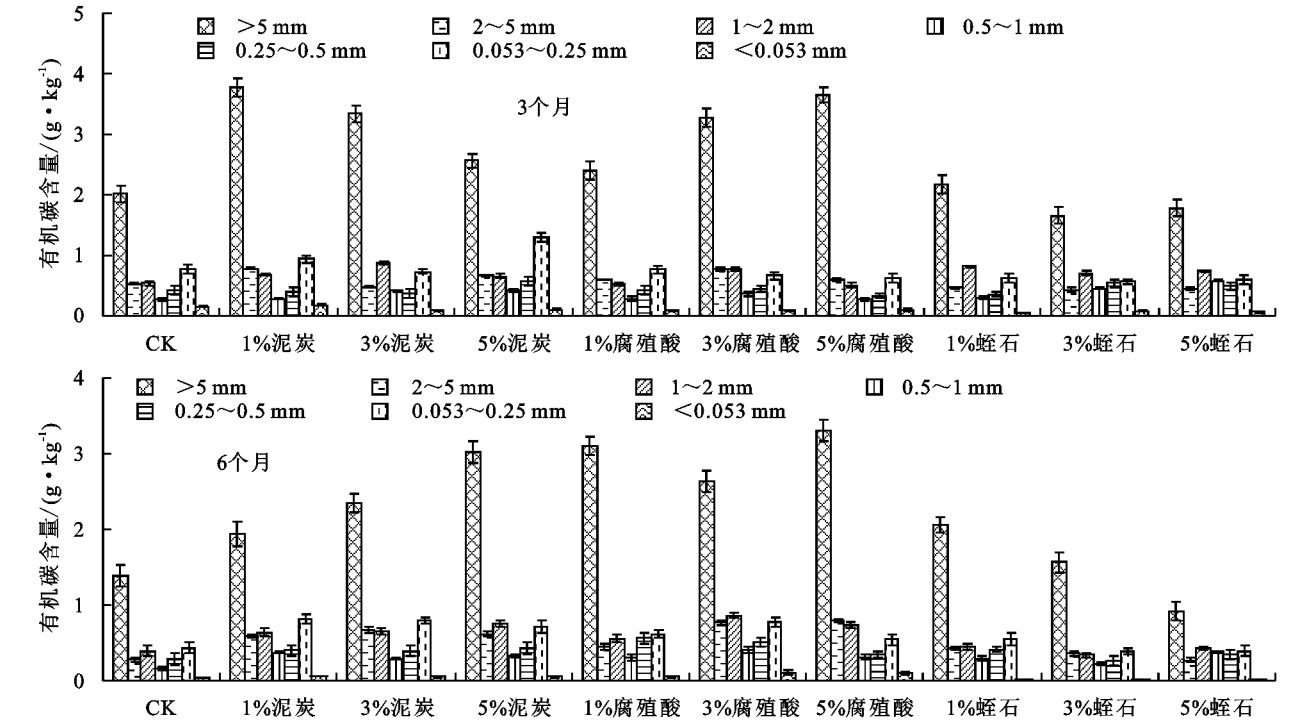


图 2 复垦土壤各团聚体有机碳含量

表 3 复垦土壤各粒级机械稳定性团聚体有机碳含量贡献率 单位: %

处理 时间/月	改良剂	大团聚体					微团聚体	
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
3	CK	50.26	9.61	10.57	6.62	7.12	13.22	2.60
	1%泥炭	51.10	11.06	10.37	4.35	6.04	14.26	2.82
	3%泥炭	53.02	12.53	9.23	6.54	5.75	11.48	1.45
	5%泥炭	55.71	9.11	9.06	5.87	7.81	10.93	1.52
	1%腐殖酸	52.87	10.94	10.80	6.16	6.32	11.46	1.45
	3%腐殖酸	53.85	12.70	10.54	6.04	6.38	8.92	1.56
	5%腐殖酸	56.18	14.36	6.28	8.29	6.10	7.60	1.18
	1%蛭石	40.21	8.61	15.10	10.01	8.71	15.40	1.96
	3%蛭石	35.81	8.56	14.03	11.24	10.81	16.81	2.73
	5%蛭石	32.33	7.42	15.19	12.90	15.50	15.55	1.10
6	CK	50.43	7.05	10.08	4.32	10.18	17.11	0.84
	1%泥炭	50.22	10.68	10.95	5.54	10.28	10.62	1.70
	3%泥炭	54.66	10.74	10.42	6.04	9.15	7.76	1.23
	5%泥炭	55.69	9.77	10.49	6.21	8.89	7.77	1.17
	1%腐殖酸	51.41	12.36	9.00	6.35	8.51	10.94	1.43
	3%腐殖酸	52.24	10.16	10.31	6.23	9.13	10.33	1.60
	5%腐殖酸	58.21	10.45	8.32	5.70	6.35	9.01	1.96
	1%蛭石	40.16	11.59	12.03	8.11	11.34	15.09	1.67
	3%蛭石	40.16	12.32	9.67	12.61	11.80	12.82	0.63
	5%蛭石	34.36	12.07	15.38	12.17	11.28	13.20	1.55

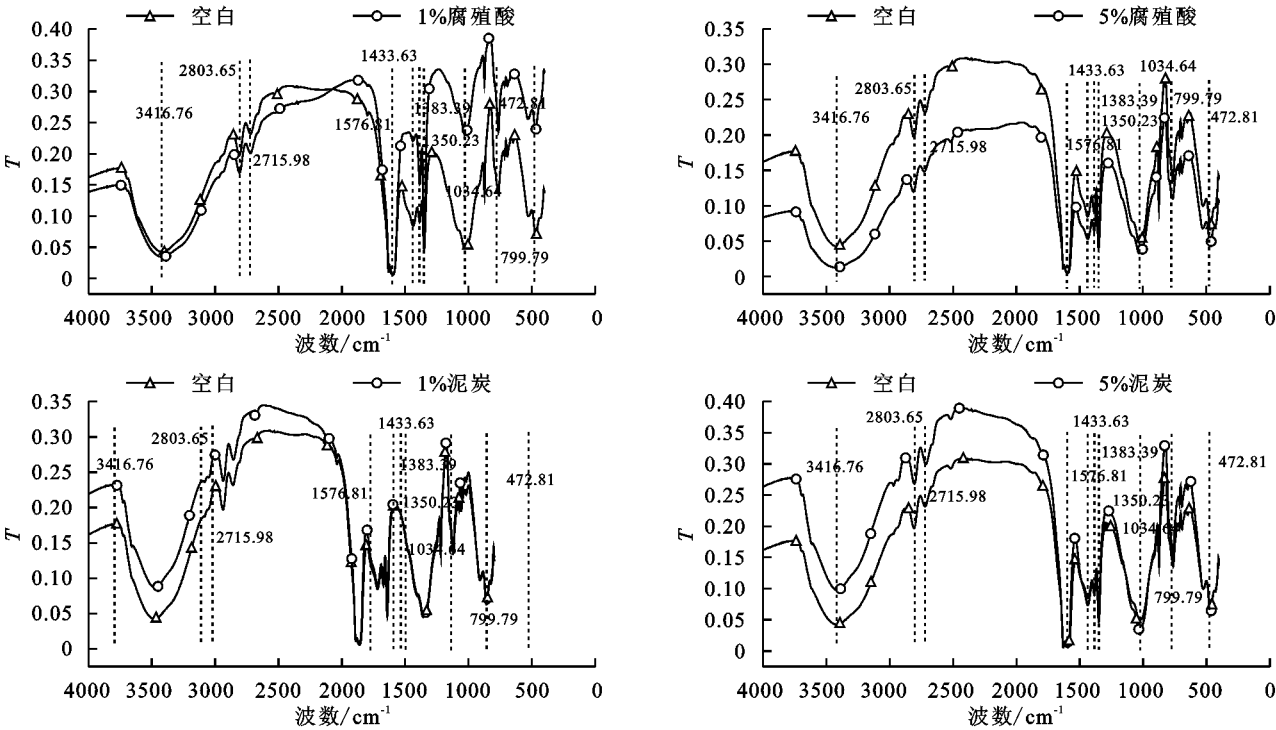


图 3 复垦土壤红外光谱特征

表 4 土壤官能团近红外(400~4 000 波段)吸收峰匹配表

波段/cm ⁻¹	土壤有机碳官能团
870~640	苯环 C—H 面外弯曲振动
1260~1000	多糖类、醇类、羧酸类及酯类 C—O 的伸缩振动
1465~1340	饱和碳 C—H(面内弯曲振动)
1640~1550	胺类和酰胺类—NH 的面内弯曲振动
2850~2710	醛类的 C—H 的伸缩振动
3500~3000	氢键结合的一COOH、醇及苯酚中的一OH 的伸缩振动

3 讨论

3.1 不同改良剂对复垦土壤团聚体组成的影响

从团聚体组成来看,施用改良剂 3 个月和 6 个月
后,各处理均以>5 mm 的机械稳定性团聚体为主,
施用泥炭和腐殖酸后土壤中>5 mm 团聚体的比例
升高了,且施用量越多增量越大,其中以 5%腐殖酸
效果最佳。表明泥炭和腐殖酸作为有机物质能够促
进大团聚体的形成,且施用量越大效果越明显,该结
果与胡燕芳等^[18]关于施用 4 种结构改良剂(β -环糊
精、聚丙烯酰胺、腐殖酸、商品有机肥)均在一定程
度上提高了土壤中的大粒径团聚体形成的研究结果一
致。而施用蛭石后土壤中>5 mm 粒径团聚体的比
例较 CK 有所下降,且蛭石浓度越高>5 mm 粒径的
团聚体含量越少。而各处理下的水稳性团聚体以<
0.053 mm 微团聚体最多,而且不同改良剂处理下微
团聚体含量均随着施用比例的升高而降低,而大团聚
体则随着施用比例的升高而升高,该研究结果与吴海
勇等^[19]关于土壤改良剂(腐殖酸钾、熟石灰)的施用
能一定程度地改善土壤结构,增加大水稳性团聚体数
量研究结果一致。这可能是因为泥炭和腐殖酸拥有

较大的比表面积,且富含有机质,具有很强的吸附螯
合能力,有利于团聚体的形成,增加了团聚体的稳定
性。同时,微水稳性团聚体减少,大水稳性团聚体增
加,可能是因为微团聚体的形成是大团聚体形成的前
提条件^[20],微团聚体不断被有机物质胶结团聚形成
大团聚体,从而导致微团聚体减少,大团聚体增加。
腐殖酸效果优于泥炭可能是因为腐殖酸的腐殖化程
度更高,而泥炭中含有未腐烂的植物残体,自身具有
密度低、含水量高、压缩性强、分解度低等性质^[21],对土
壤的团聚效果不如腐殖酸。而蛭石作为黏土矿物,密度
小,质量轻^[22],其本身粒径也集中在<0.25 mm 的水
平上,施用蛭石影响了土壤团聚体组成,导致大团聚体
占比减少。从红外光谱结果也可发现,在 1 260~
1 000 cm⁻¹ 波段腐殖酸加入后吸光度有明显增加,此
波段处官能团多为多糖类,根据朗伯比尔定律可知腐
殖酸能够增加土壤中的多糖类物质,多糖类是一种线
性的、扭曲的高分子聚合体,在其链上有大量的一
OH,它们能与黏粒矿物晶面上的氧原子形成氢键,
从而把土粒团聚起来。同时,试验基地以石灰性土壤
为主,钙离子含量较高,有利于腐殖质通过钙离子与
矿物质土粒形成有机-矿质复合体。因此,>5 mm
团聚体含量会随着腐殖酸浓度的增加和时间的推移
而逐渐增加。而泥炭对机械稳定性团聚体的影响不
如腐殖酸,这可能是因为本次试验使用的泥炭为草本
泥炭,腐殖化程度低于腐殖酸,且透水性较强,密度
低,与腐殖酸相比不利于团聚体的形成。

3.2 不同改良剂对复垦土壤有机碳的影响

土壤团聚体能够对有机碳起到物理保护的作用,

同时,土壤各粒径团聚体中的有机碳含量可以用于表征土壤有机质平衡和矿化速率^[23]。泥炭和腐殖酸均能提高复垦土壤总有机碳的含量,与 CK 相比差异显著,其中,腐殖酸效果更佳。相比之下,蛭石对总有机碳含量的影响不明显,且出现了有机碳含量减少的现象,这可能是一方面蛭石本身不含有有机碳,蛭石的加入所产生的稀释效应降低了土壤有机碳含量,另一方面土壤有机碳的水平通常与团聚体的数量相联系^[20],施用蛭石后土壤大团聚体减少,对有机碳的保护能力不足,从而导致了有机碳的损失;而泥炭和腐殖酸本身有机碳含量较高,且泥炭和腐殖酸处理下的土壤以大团聚体居多,有利于有机碳的保护,腐殖酸效果优于泥炭可能是因为腐殖酸分子结构复杂,其结构支链多,“捆绑”小颗粒形成大团聚体的能力更强^[5]。不同处理下各团聚体均以>5 mm 团聚体中的有机碳含量最高,这与张艺等^[10]的研究结果相同。这可能是因为有机质是团聚体形成的重要胶结物质,有机碳较高的土壤团聚体更加稳定,且大团聚体在胶结过程中会积累更多的有机碳。

此外,整体上 6 个月与 3 个月相比有机碳含量有减少的现象,这可能是随着时间的推移,大团聚体逐渐破碎成较小的团聚体,大团聚体中的有机碳暴露出来,被分解矿化了。6 个月时总有机碳含量较高的是加了泥炭和腐殖酸的处理,且施用浓度越高,有机碳的含量越高,充分说明了泥炭和腐殖酸不仅有效地增加了大团聚体的含量,提高了大团聚体的稳定性,还增加了有机碳的固定。

4 结 论

(1)复垦土壤的机械稳定性团聚体组成以>5 mm 大团聚体为主,水稳性团聚体以<0.053 mm 微团聚体为主,施用泥炭和腐殖酸能够增加>5 mm 大团聚体的含量,提高复垦土壤的团聚体稳定性及抗侵蚀能力,增强土壤的保水保肥性能。且在一定范围内,改良剂施用量越多越有利于>5 mm 大团聚体的形成,其中,以 5%腐殖酸的效果最佳。而施用蛭石会降低复垦土壤>5 mm 大团聚体的含量和平均质量直径,存在降低复垦土壤抗侵蚀能力和稳定性的风险。

(2)各处理下土壤的有机碳主要富集在>5 mm 团聚体中,碳固持和截获能力较强。泥炭和腐殖酸能够增加复垦土壤有机碳含量,且 5%腐殖酸的效果最佳。

(3)随着时间的推移团聚体中有机碳减少,改良剂的加入虽然能增加大团聚体的含量,一定程度上缓解了这种现象,但依然不能避免大团聚体在破碎和重组过程中有机碳的损失,具体机制还需要进一步的研究。

(4)在石灰性矿区复垦土壤上腐殖酸改良土壤结

构及增加有机碳含量的效果优于泥炭,而蛭石的效果相对较差。

参考文献:

[1] 唐骏,党廷辉,薛江,等.植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J].生态学报,2016,36(16):5067-5077.

[2] 贺美,王迎春,王立刚,等.应用 DNDC 模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):9-19.

[3] 王芸,赵鹏祥.华北地区土地利用类型对土壤呼吸、有机碳组分和水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):59-65.

[4] 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.

[5] Brady N, Weil R. 土壤学与生活[M].李保国,徐建明,译.北京:科学出版社,2019:130-136.

[6] 尚应妮,胡斐南,赵世伟,等.不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):204-208,239.

[7] 樊红柱,秦鱼生,陈庆瑞,等.长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1473-1480.

[8] 陈轩敬,梁涛,赵亚南,等.长期施肥对紫色水稻土团聚体中有机碳和微生物的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4669-4677.

[9] 江春玉,刘萍,刘明,等.不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态[J].土壤学报,2017,54(1):138-149.

[10] 张艺,戴齐,尹力初,等.后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响[J].土壤,2017,49(5):969-976.

[11] 张志权,束文圣,廖文波,等.豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J].生态学杂志,2002,21(2):47-52.

[12] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J].Soil Science Society of America Journal,1998,62(5):1367-1377.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999:30-34.

[14] 常汉达,王晶,张风华.基于傅里叶红外光谱弃耕地开垦前后土壤有机质结构变化分析[J].土壤通报,2019,50(2):333-340.

[15] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):265-270.

[16] 李雄飞,刘奋武,樊文华.五台山土壤水稳性团聚体有机碳分布特征[J].水土保持学报,2017,31(4):159-165,197.

- Kerala, India [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 328: 140-149.
- [14] 胡振宏,何宗明,范少辉,等.采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4205-4213.
- [15] Vanguelova E, Pitman R, Luiro J, et al. Long term effects of whole tree harvesting on soil carbon and nutrient sustainability in the UK [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 101(1): 43-59.
- [16] 胡嵩,张颖,史荣久,等.长白山原始红松林次生演替过程中土壤微生物生物量和酶活性变化[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 366-372.
- [17] Prieto-Fernández A, Acea M J, Carballas T. Soil microbial and extractable C and N after wildfire [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(2): 132-142.
- [18] Somova L A, Pechurkin N S. Functional, regulatory and indicator features of microorganisms in man-made ecosystems [J]. *Advances in Space Research*, 2001, 27(9): 1563-1570.
- [19] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review [J]. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1-10.
- [20] Barreiro A, Martín A, Carballas T, et al. Response of soil microbial communities to fire and fire-fighting chemicals [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(24): 6172-6178.
- [21] Törmänen T, Kitunen V, Lindroos A J, et al. How do logging residues of different tree species affect soil N cycling after final felling? [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427: 182-189.
- [22] Knelman J E, Graham E B, Ferrenberg S, et al. Rapid shifts in soil nutrients and decomposition enzyme activity in early succession following forest fire [J]. *Forests*, 2017, 8(9): e347.
- [23] Sinsabaugh R L, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of recalcitrant organic matter decomposition: The growth rate hypothesis in reverse [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1/3): 31-43.
- [24] Theuerl S, Buscot F. Laccases: Toward disentangling their diversity and functions in relation to soil organic matter cycling [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(3): 215-225.
- [25] 刘俊第,林威,王玉哲,等.火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [26] 樊博,史亮涛,潘志贤,等.干热河谷土壤酶活性对碳氮添加的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(23): 8604-8611.
- [27] 周嘉聪,刘小飞,郑永,等.氮沉降对中亚热带米槠天然林微生物生物量及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 127-135.
- [28] Li F R, Liu L L, Liu J L, et al. Abiotic and biotic controls on dynamics of labile phosphorus fractions in calcareous soils under agricultural cultivation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 681: 163-174.
- [29] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2898-2909.
- [30] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 252-262.
- (上接第 333 页)
- [17] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 100(1/2): 34-41.
- [18] 胡燕芳,章明奎.红砂土团聚体的组成特点及其对改良剂的响应[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(10): 88-93.
- [19] 吴海勇,李明德,刘琼峰,等.不同土壤改良剂在红壤旱地上的应用效果[J]. *湖南农业科学*, 2010(11): 45-47, 50.
- [20] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447-455.
- [21] 方丽婷,张一扬,黄崇俊,等.泥炭和褐煤对土壤有机碳和腐殖物质组成的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1149-1153.
- [22] 王小波,卢树昌,王瑞,等.蚯蚓粪与蛭石结合对设施菠菜生长和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2014(18): 63-66.
- [23] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618-623.