改良剂对复垦土壤水稳性团聚体及 POC 和 MOC 的影响

刘新梅，樊文华，张 昊，王改玲

（山西农业大学资源环境学院，山西 太谷 030801）

摘要： 为探究改良剂对煤矿复垦土壤有机碳的影响，以山西省襄垣县煤矿复垦区复恳 7 年的土壤为研究对象，采用田间微区的方法研究了泥炭和腐殖酸对复垦土壤及各粒级水稳性团聚体颗粒态有机碳（POC）和矿物结合态有机碳（MOC）的影响。结果表明：施用泥炭和腐殖酸均能增加复垦土壤水稳性大团聚体（＞0.25 mm）含量，但 6 个月后，水稳性大团聚体会减少，而水稳性微团聚体（＜0.25 mm）会增加，＞2 mm 和＜0.25 mm 粒级的团聚体变化较大，2 种改良剂相比，腐殖酸各处理土壤大团聚体及微团聚体的变化比泥炭大。泥炭和腐殖酸均能增加复垦土壤总 POC、MOC 含量及各粒级水稳性团聚体中的 POC、MOC 含量，施用比例相同时，施用腐殖酸的土壤 POC、MOC 增量更大，施用泥炭 6 个月和 1 年后土壤 POC 含量变化分别为 2.14～8.89，1.53～5.00 g/kg，施用腐殖酸 6 个月和 1 年后土壤 POC 含量变化分别为 8.07～20.12，5.63～19.36 g/kg，施用泥炭 6 个月和 1 年后土壤 MOC 含量变化分别为 4.84～10.51，5.41～8.08 g/kg，施用腐殖酸 6 个月和 1 年后土壤 MOC 含量变化分别为 9.10～35.34，5.91～30.00 g/kg。但 6 个月后，泥炭和腐殖酸各处理土壤 POC 和 MOC 含量会减少。施用泥炭和腐殖酸会降低土壤有机碳的稳定性，不利于有机碳的储存。

关键词： 复垦土壤；水稳性团聚体；改良剂；POC；MOC

中图分类号： S156.93；S158.5　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1009-2242(2021)02-0225-10

DOI： 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.030

Effects of Amendments on Water-stable Aggregates and POC and MOC in Reclaimed Soil

LIU Xinmei, FAN Wenhua, ZHANG Hao, WANG Gailing

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

Abstract: The objective of this study was to explore the effect of amendments on soil organic carbon in reclaimed soil. A series of micro field experiments were set to study the effect of peat and humic acid on particulate organic carbon (POC) and mineral-bound organic carbon (MOC) of soil and water-stable aggregates in the soil, which has been reclaimed for seven years in Xiangyuan, Shanxi province. The results showed that peat and humic acid increased the content of water-stable macroaggregates (＞0.25 mm) in reclaimed soil. After 6 months, the content of water-stable macroaggregates was decreased and the content of water-stable microaggregates (＜0.25 mm) was increased, the change of aggregates with ＞2 mm and ＜0.25 mm aggregates were obvious. Compared with the two amendments, the changes of soil macroaggregate and microaggregate in humic acid treatment were greater than those in peat. Peat and humic acid increased the contents of POC and MOC of soil and all level water-stable aggregates in reclaimed soil. When the application ratio was the same, the increases of POC and MOC in soil with humic acid were greater. After applying peat for 6 months and 1 year, the POC contents were 2.14～8.89 g/kg and 1.53～5.00 g/kg, and after applying humic acid for 6 months and 1 year, the POC contents were 8.07～20.12 g/kg and 5.63～19.36 g/kg. After applying peat for 6 months and 1 year, the MOC contents were 4.84～10.51 g/kg and 5.41～8.08 g/kg, and after applying humic acid for 6 months and 1 year, the MOC contents were 9.10～35.34 g/kg and 5.91～30.00 g/kg. However, after 6 months, the contents of POC and MOC were decreased. Peat and humic acid reduced the stability of soil organic carbon, it's not beneficial for the storage of organic carbon.

收稿日期： 2020-09-23

资助项目： 国家重点联合基金项目(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，博士生导师，主要从事土壤生态和土壤质量研究。E-mail：fwh012@163.com

Keywords：reclaimed soil；water-stable aggregates；amendments；POC；MOC

土壤有机碳含量约占陆地生物圈碳库的2/3[1]，在全球碳循环中至关重要；同时，土壤有机碳还影响土壤的结构、持水性、作物养分吸收及其稳定性[2]，土壤有机碳库的动态平衡影响土壤肥力，从而影响土壤的生产力和稳定性[3]。因此，研究土壤有机碳对改善全球气候及提升土壤肥力具有重要意义。土壤有机碳背景值较高，对土地管理措施和土地利用方式的反应具有滞后性，很难短期内检测出其发生的微小变化[4]，而某些有机碳组分的反应则比较敏感，其中，颗粒态有机碳(POC)被认为是土壤有机碳周转变化的敏感指标[5]，其在土壤碳循环中起重要作用；而矿物结合态有机碳(MOC)含量可间接表征有机碳的利用率和稳定性[6]。团聚体是土壤结构的重要组成部分，可保证和协调土壤中的水、肥、气、热，影响土壤酶的种类和活性，维持和稳定土壤疏松熟化层[1]，对维持土壤肥力及提高土壤质量意义重大。团聚体对有机碳具有保护作用[7]，而有机碳是团聚体形成过程中的重要胶结物质，团聚体与有机碳密切相关，研究团聚体内的有机碳对提升土壤质量意义重大。

山西煤炭资源极为丰富，改革开放以来，山西累计生产原煤近百亿吨，为我国的发展做出巨大贡献，同时也给山西带来了诸多环境问题，矿区土壤复垦对于恢复生态环境和解决人地矛盾具有重大意义。而矿区土壤多采用混推或堆垫等方法进行复垦，复垦后的土壤养分含量低，微生物多样性少，土壤结构不良，不利于耕种。施用改良剂可以提高土壤肥力，改善土壤结构，使土壤变得利于耕种。庞庆阳等[8]的研究表明，棉粕型腐殖酸肥能够增加土壤大团聚体含量，提高土壤酶活性；付琳琳等[9]研究发现，施用生物质炭能够提高稻田土壤总有机碳、易氧化态有机碳、颗粒态有机碳及微生物生物量碳含量；方丽婷等[2]研究发现，泥炭、褐煤能够增加土壤有机碳含量，促进土壤腐殖物质各组分之间的转化，增强有机质的稳定性，土壤改良效果好；陈琨等[10]的试验结果表明，施用硅钙肥和石灰后可以提高冷泥田的pH，同时减少土壤中有害的还原性物质，促进水稻对养分的吸收与利用；秦萍等[11]研究发现，脱硫石膏和结构改良剂配合施用后碱化盐土表层土壤容重较对照平均降低9.07%，有机质较对照也有明显增加。

但目前的研究多集中在改良剂对红壤、水稻田、盐碱土等的影响上，有关改良剂对矿区复垦土壤影响的研究较少，对矿区复垦土壤水稳性团聚体POC和MOC的影响更少。本试验以山西省襄垣县煤矿复垦区复垦7年的土壤为研究对象，研究了泥炭和腐殖酸2种改良剂对矿区复垦土壤POC和MOC的影响，以期为矿区复垦土壤的改良、矿区复垦土壤质量的提高及改良剂的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山西省东南部长治市襄垣县洛江沟村(36°28′N，113°00′E)，属于潞安集团五阳煤矿，该基地地处低山丘陵地带，平均海拔980 m，属暖温带半湿润大陆性季风气候，年平均气温9.5 ℃，年平均降水量500～600 mm，无霜期约160 d。该试验地于2012年开始采用混推复垦的方式平整为耕地，土壤类型为石灰性褐土，黄土母质，土壤容重1.59 g/cm^3，土壤pH 8.3，有机质含量9.32 g/kg，全氮含量0.51 g/kg，全磷含量0.49 g/kg，碱解氮含量30.02 mg/kg，有效磷含量4.66 mg/kg，速效钾含量117.49 mg/kg。

1.2 试验材料

本试验选用的改良剂为泥炭和腐殖酸，2种改良剂均由山西交城红星化工有限公司提供。腐殖酸为风化煤腐殖酸，黑色粉末状，有机质含量615.81 g/kg，腐殖酸含量37.34%；泥炭有机质含量326.30 g/kg，腐殖酸含量15.11%。

1.3 试验设计

在试验地选取面积为3.8 m×8.6 m(包括垄宽)的区域，将选定区域划分成21个1 m×1 m的微区，每个微区之间设置1条20 cm宽的垄。每种改良剂设置3个施用比例，即分别按0—20 cm耕层土壤质量1%，3%，5%的比例在微区中施用泥炭和腐殖酸，将改良剂与0—20 cm耕层土壤混合均匀后对微区进行平整，不种植作物。分别在添加改良剂6个月及1年后采集样品，测定土壤及各粒级水稳性团聚体POC、MOC含量。设置不添加改良剂的微区作为空白对照，每个处理均设置3个重复，采用随机排列的方式布置微区。

1.4 样品采集

分别于施用改良剂6个月(2019年11月)和1年(2020年5月)后采集土壤样品。在每个微区内选3个点并采用土钻采集0—20 cm土层的土壤样品，混合成1个土样；再在每个微区内采用大铝盒采集1个0—20 cm土层的原状土。混合土样用于土壤总POC和MOC的测定，原状土样用于水稳性团聚体的筛分及各粒级水稳性团聚体POC和MOC的测定。

1.5 测定指标与方法

1.5.1 土壤团聚体筛分制备 本试验采用湿筛法[12]对土壤进行筛分，通过筛分得到>2，2～0.25，0.25～

0.053,<0.053 mm 共 4 级水稳性团聚体,称重备用,并计算各级团聚体组成。

1.5.2　土壤及各粒级团聚体中 POC 和 MOC 的分离提取　土壤及各粒级团聚体中 POC 和 MOC 采用 5 g/L 六偏磷酸钠分散法[6]进行分离提取。

1.5.3　有机碳含量　土壤有机碳、土壤及各粒级水稳性团聚体 POC 和 MOC 采用重铬酸钾容量法—外加热法[13]测定。

1.5.4　计算方法

(1)土壤 POC 和 MOC 含量(g/kg)及其分配比例[14]:

土壤 POC 含量=POC 中有机碳×POC 占干土重的百分比

土壤 MOC 含量=MOC 中有机碳×MOC 占干土重的百分比

土壤 POC 分配比例=(土壤 POC 含量/土壤有机碳含量)×100%

土壤 MOC 分配比例=(土壤 MOC 含量/土壤有机碳含量)×100%

(2)某粒级水稳性团聚体中 POC 和 MOC 含量(g/kg)及其分配比例[14]:

某粒级水稳性团聚体中 POC 含量=某粒级团聚体中 POC 中有机碳×POC 占水稳性团聚体的百分比×该粒级团聚体组成

某粒级水稳性团聚体中 MOC 含量=某粒级团聚体中 MOC 中有机碳×MOC 占水稳性团聚体的百分比×该粒级团聚体组成

某粒级水稳性团聚体中 POC 的分配比例=(某粒级团聚体中 POC 含量/土壤有机碳含量)×100%

某粒级水稳性团聚体中 MOC 的分配比例=(某粒级团聚体中 MOC 含量/土壤有机碳含量)×100%

1.6　数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2010、SPSS 25.0 软件进行统计分析和演示,差异显著性检验($P<0.05$)采用最小显著差数法(LSD)。

2　结果与分析

2.1　改良剂对复垦土壤水稳性团聚体组成的影响

由表 1 可知,施用改良剂 6 个月后,泥炭和腐殖酸均能显著增加>2 mm 水稳性团聚体含量,且>2 mm 水稳性团聚体含量随泥炭和腐殖酸施用比例的升高而增加,其中,5%腐殖酸处理>2 mm 水稳性团聚体最多,为 23.25%,较空白对照增加 224.27%。泥炭和腐殖酸各处理中除 1%泥炭和 5%泥炭外,其余处理 2~0.25 mm 水稳性团聚体含量均低于空白对照,且 2~0.25 mm 水稳性团聚体含量随着腐殖酸施用比例的升高而降低。泥炭和腐殖酸均能显著降低<0.053 mm 水稳性团聚体含量,对于腐殖酸处理,其施用量越大<0.053 mm 水稳性团聚体含量越少,以 5%腐殖酸处理<0.053 mm 水稳性团聚体最少,为 12.65%,较空白对照减少 45.87%。整体而言,6 个月时施用泥炭和腐殖酸后水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量增加,而水稳性微团聚体(<0.25 mm)含量减少。

由表 1 可知,施用改良剂 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理中除 5%腐殖酸处理外,其余各处理>2 mm 水稳性团聚体含量均低于空白对照。泥炭和腐殖酸各处理中除 3%泥炭处理外,其余各处理 2~0.25 mm 水稳性团聚体含量均低于空白对照,与 6 个月时相同,施用腐殖酸后,2~0.25 mm 水稳性团聚体含量仍随腐殖酸施用比例的升高而降低。施用泥炭 1 年后,0.25~0.053 mm 水稳性团聚体含量仍低于空白对照,而施用腐殖酸 1 年后,0.25~0.053 mm 水稳性团聚体含量则均高于空白对照,以 5%腐殖酸处理 0.25~0.053 mm 水稳性团聚体最多,为 15.48%,较空白对照增加 11.93%。泥炭各处理<0.053 mm 水稳性团聚体含量均低于空白对照,但差异不显著,而腐殖酸各处理<0.053 mm 水稳性团聚体含量均高于空白对照,但差异也不显著。与施用改良剂 6 个月时不同,对于腐殖酸处理,其施用量越大<0.053 mm 水稳性团聚体含量越多。与施用改良剂 6 个月时规律相反,施用改良剂 1 年后,施用泥炭和腐殖酸后水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量减少,而水稳性微团聚体(<0.25 mm)含量增加。

2.2　改良剂对复垦土壤及水稳性团聚体中 POC 的影响

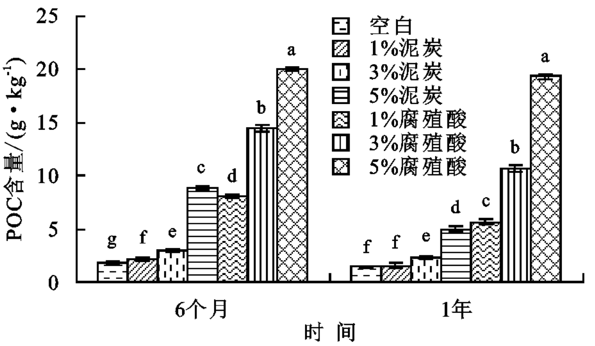
2.2.1　改良剂对土壤 POC 含量的影响　从图 1 可以看出,施用改良剂 6 个月后,未添加改良剂的空白对照土壤 POC 含量为 1.77 g/kg,施用泥炭的土壤 POC 含量变化范围为 2.14~8.89 g/kg,施用腐殖酸的土壤 POC 含量变化范围为 8.07~20.12 g/kg。泥炭和腐殖酸各处理土壤 POC 含量均显著高于空白对照;同时,土壤 POC 含量呈随泥炭和腐殖酸施用比例升高而增大的趋势,其中,以 5%腐殖酸处理土壤 POC 含量最高,为 20.12 g/kg,为空白对照的 10.37 倍。

从图 1 还可看出,施用改良剂 1 年后,各处理土壤 POC 含量与 6 个月时相比均有所下降,未添加改良剂的空白对照土壤 POC 含量为 1.42 g/kg,施用泥炭的土壤 POC 含量变化范围为 1.53~5.00 g/kg,施用腐殖酸的土壤 POC 含量变化范围为 5.63~19.36 g/kg。泥炭和腐殖酸各处理土壤 POC 含量也均高于空白对照,且差异显著。土壤 POC 含量随改良剂变化的规律与 6 个月时相同,其中,仍以 5%腐殖酸处理土壤 POC 含量最高,为 19.36 g/kg,为空白对照的 12.63 倍。

表 1 改良剂对土壤水稳性团聚体组成的影响 单位:%

时间	处理	大团聚体			微团聚体		
		＞2 mm	2～0.25 mm	＞0.25 mm	0.25～0.053 mm	＜0.053 mm	＜0.25 mm
6 个月	CK	7.17±0.41g	56.43±0.75b	63.61±2.52d	13.03±0.94ab	23.37±0.20a	36.40±0.86a
	1%泥炭	10.92±0.14f	60.55±0.06a	71.47±0.10b	11.66±0.17ab	16.88±0.20b	28.54±0.10cd
	3%泥炭	13.21±0.16d	53.18±0.24bc	66.38±0.36c	14.11±0.31ab	19.50±0.61b	33.61±0.36b
	5%泥炭	17.15±0.10b	60.93±0.20a	78.07±0.30a	10.86±0.22b	11.06±0.52c	21.92±0.30e
	1%腐殖酸	12.75±0.23e	54.91±0.35bc	67.66±0.87c	12.27±0.16ab	19.84±0.52b	32.11±1.43b
	3%腐殖酸	16.69±0.16c	53.78±0.55bc	70.47±1.14b	12.55±0.06ab	16.92±0.74b	29.47±0.76c
	5%腐殖酸	23.25±0.23a	49.55±0.25d	72.80±0.60b	14.55±0.43a	12.65±0.43c	27.20±1.73d
1 年	CK	6.14±0.13ab	55.83±1.54ab	61.97±0.84a	13.83±1.45ab	24.20±1.11d	38.04±0.55d
	1%泥炭	3.09±0.20b	54.45±0.44abc	57.54±0.25bc	12.04±0.34b	30.43±0.37a	42.46±0.25bc
	3%泥炭	4.44±0.26ab	56.85±0.46a	61.29±0.69a	13.14±0.28ab	25.57±0.82cd	38.71±0.70d
	5%泥炭	7.62±0.29a	53.61±0.47abc	61.23±0.39a	13.03±0.36ab	25.74±0.23bcd	38.77±0.39d
	1%腐殖酸	4.78±0.18ab	53.36±0.19bc	58.14±1.36b	14.19±0.28ab	27.67±0.74abc	41.86±0.77c
	3%腐殖酸	5.18±0.26ab	51.33±0.28cd	56.51±0.54cd	14.50±0.35ab	28.99±0.30ab	43.49±0.82b
	5%腐殖酸	6.41±0.50ab	49.04±0.30d	55.45±1.26d	15.48±0.16a	29.07±0.33ab	44.55±0.59a

注:表中数据为平均值±标准差;同列小写字母分别表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。



注:图中小写字母表示不同处理间的差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 改良剂对土壤 POC 含量的影响

2.2.2 改良剂对各粒级水稳性团聚体 POC 含量的影响 由图 2 可知,施用改良剂 6 个月后,泥炭和腐殖酸各处理＞2 mm 水稳性团聚体中 POC 含量均高于空白对照,且差异均显著,其中,以 3%腐殖酸处理 POC 含量最高,为 1.77 g/kg。泥炭和腐殖酸各处理 2～0.25 mm 水稳性团聚体中 POC 含量均高于空白对照,除 1%泥炭处理外差异均显著,以 5%腐殖酸处理 POC 含量最高,为 16.94 g/kg。0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中,1%泥炭处理 POC 含量低于空白对照,但差异不显著,其余泥炭和腐殖酸各处理 POC 含量均高于空白对照,仍以 5%腐殖酸处理 POC 含量最高,为 0.93 g/kg。泥炭和腐殖酸不同处理 POC 含量均表现为 2～0.25 mm 最大,＞2 mm 次之,0.25～0.053 mm 最小。各粒级水稳性团聚体中 POC 含量基本表现为随泥炭和腐殖酸施用比例的增加而增加。

从图 2 还可看出,施用改良剂 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理中只有 1%泥炭和 1%腐殖酸处理＞2 mm 水稳性团聚体 POC 含量低于空白对照,但差异均不显著,其余各处理＞2 mm 水稳性团聚体 POC 含量均高于空白对照,其中 5%泥炭处理＞2 mm 水稳性团聚体 POC 含量最高,为 1.25 g/kg。泥炭和腐殖酸各处理 2～0.25 mm 水稳性团聚体中 POC 含量均高于空白对照,其中 5%腐殖酸处理 POC 含量最高,为 12.45 g/kg。泥炭和腐殖酸各处理 0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 POC 含量均高于空白对照,以 5%腐殖酸处理 POC 含量最高,为 2.70 g/kg。各粒级水稳性团聚体中 POC 含量随改良剂施用比例变化的规律与 6 个月时相同。

2.2.3 改良剂对土壤及各粒级水稳性团聚体 POC 分配比例的影响 土壤 POC 分配比例排除有机碳总量的差异[15],反映土壤中非稳定性有机碳或非保护性有机碳的相对数量,POC 分配比例越高,表明有机碳中不稳定部分越多[16]。

由表 2 可知,施用改良剂 6 个月和 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理中只有 3%泥炭处理土壤 POC 分配比例显著低于空白对照,其余各处理土壤 POC 分配比例均高于空白对照,且差异显著。对于泥炭处理,6 个月和 1 年时,土壤 POC 分配比例均在施用比例为 3%时最低,分别为 21.50%和 19.68%,5%时最高,分别为 45.70%和 39.31%;而对于腐殖酸处理,土壤 POC 分配比例随腐殖酸施用比例的升高而降低,均在 5%时最低,分别为 35.60%和 38.50%。

施用改良剂 6 个月后,泥炭和腐殖酸各处理＞2 mm 水稳性团聚体中 POC 分配比例均高于空白对照,而施用改良剂 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理中除 3%泥炭处理＞2 mm 水稳性团聚体中 POC 分配比例高于空白对照外,其余各处理均低于空白对照,且差异显著;同时,1 年时泥炭和腐殖酸各处理＞2 mm 水稳性团聚体 POC 分配比例较 6 个月时均有所下降。施用改良剂 6 个月和 1 年后,除 3%泥炭处理 2～0.25 mm 水稳性团聚体 POC 分配比例低于空白

对照外,其余泥炭和腐殖酸各处理均高于空白对照;同时,1 年时泥炭和腐殖酸各处理该粒级水稳性团聚体中 POC 分配比例较 6 个月时也有所下降。施用改良剂 6 个月后,泥炭和腐殖酸各处理 0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 POC 分配比例均显著低于空白对照,而 1 年时,除 5%泥炭处理 0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 POC 分配比例低于空白对照外,其余泥炭和腐殖酸各处理均高于空白对照,1 年时泥炭和腐殖酸各处理 0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 POC 分配比例较 6 个月时有所上升。

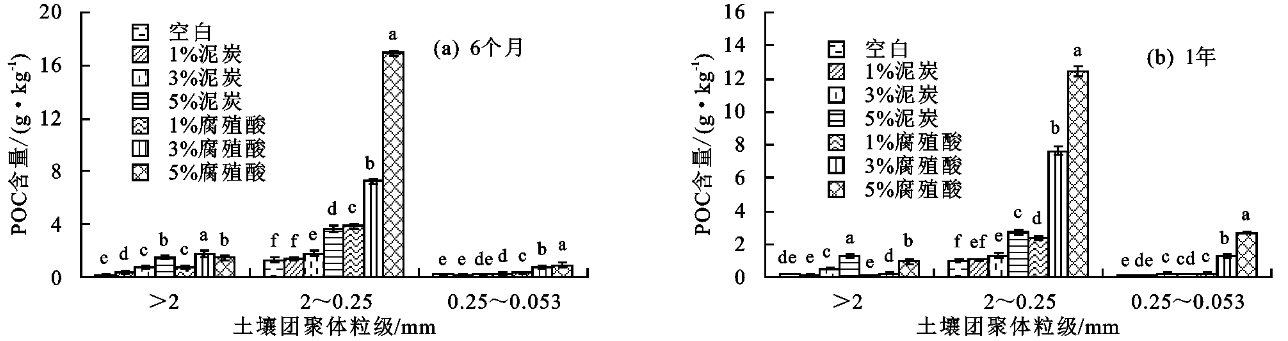


图 2　改良剂对各粒级水稳性团聚体 POC 含量的影响

表 2　改良剂对土壤及各粒级水稳性团聚体 POC 分配比例的影响　　单位:%

时间	处理	土壤	>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm
6 个月	CK	24.46±0.65f	2.50±0.17e	17.60±0.34e	2.60±0.14a
	1%泥炭	28.74±0.71e	4.90±0.14cd	18.74±0.33d	2.27±0.15b
	3%泥炭	21.50±0.30g	5.41±0.43b	13.30±0.34f	1.49±0.09e
	5%泥炭	45.70±0.35b	7.63±0.21a	18.66±0.70d	1.23±0.07f
	1%腐殖酸	46.63±0.14a	4.64±0.18d	22.25±0.55b	1.83±0.10d
	3%腐殖酸	42.45±0.31c	5.16±0.31bc	21.29±0.57c	2.04±0.06c
	5%腐殖酸	35.60±0.37d	2.61±0.10e	29.98±0.39a	1.65±0.14de
1 年	CK	20.60±0.15f	2.53±0.30b	14.91±1.06d	1.62±0.30c
	1%泥炭	21.71±0.97e	1.71±0.38c	14.94±0.83d	1.88±0.15c
	3%泥炭	19.68±0.12g	4.47±0.25a	11.24±1.15e	1.87±0.22c
	5%泥炭	39.31±0.17c	0.85±0.77e	21.62±1.15c	1.45±0.22c
	1%腐殖酸	48.36±0.53a	0.90±0.15d	20.34±0.91c	1.87±0.36c
	3%腐殖酸	40.23±0.40b	0.89±0.09d	28.75±0.76a	4.80±0.27b
	5%腐殖酸	38.50±0.50d	1.94±0.27c	24.75±0.87b	5.37±0.16a

2.3　改良剂对复垦土壤及水稳性团聚体中 MOC 的影响

2.3.1　改良剂对土壤 MOC 含量的影响　从图 3 可以看出,施用改良剂 6 个月后,未添加改良剂的空白对照土壤 MOC 含量为 4.86 g/kg,施用泥炭的土壤 MOC 含量变化范围为 4.84～10.51 g/kg,施用腐殖酸的土壤 MOC 含量变化范围为 9.10～35.34 g/kg。除 1%泥炭处理外,其余泥炭和腐殖酸各处理土壤 MOC 含量均显著高于空白对照。对于泥炭处理,土壤 MOC 含量随施用比例的变化规律呈倒“V”形,在施用比例为 3%时达到最高,而对于腐殖酸处理,土壤 MOC 含量随腐殖酸施用比例的升高而增大。泥炭和腐殖酸各处理中,5%腐殖酸处理土壤 MOC 含量最高,为 35.34 g/kg,为空白对照的 6.27 倍。

从图 3 还可以看出,施用改良剂 1 年后泥炭和腐殖酸各处理土壤 MOC 含量整体低于 6 个月时,未添加改良剂的空白对照土壤 MOC 含量为 5.30 g/kg,施用泥炭的土壤 MOC 含量变化范围为 5.41～8.08 g/kg,施用腐殖酸的土壤 MOC 含量变化范围为 5.91～30.00 g/kg。泥炭和腐殖酸各处理土壤 MOC 含量均高于空白对照。土壤 MOC 含量随改良剂变化的规律与 6 个月时相同。泥炭和腐殖酸各处理中,仍以 5%腐殖酸处理土壤 MOC 含量最高,为 30.00 g/kg,为空白对照的 4.66 倍。

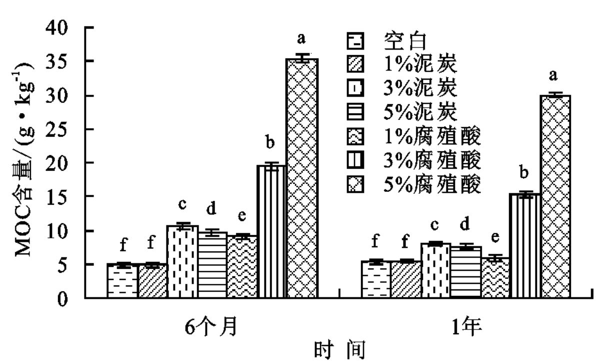


图 3　改良剂对土壤 MOC 含量的影响

2.3.2　改良剂对各粒级水稳性团聚体 MOC 含量的影响　由图 4 可知,施用改良剂 6 个月后,对于>2

mm 水稳性团聚体,泥炭和腐殖酸各处理中只有1%泥炭处理 MOC 含量低于空白对照,但差异不显著,其余各处理 MOC 含量均高于空白对照,且差异显著,3%腐殖酸处理 MOC 含量最高,为1.20 g/kg。对于2～0.25 mm 水稳性团聚体,只有1%泥炭处理 MOC 含量低于空白对照,但差异不显著,其余泥炭和腐殖酸各处理 MOC 含量均高于空白对照,其中3%腐殖酸处理 MOC 含量最高,为5.70 g/kg。对于0.25～0.053 mm 水稳性团聚体,3%和5%腐殖酸处理 MOC 含量高于空白对照,且差异显著,其余泥炭和腐殖酸各处理 MOC 含量均低于空白对照,以5%腐殖酸处理 MOC 含量最高,为0.82 g/kg。与6个月时各粒级水稳性团聚体 POC 含量规律相同,泥炭和腐殖酸不同处理下,MOC 含量均表现为2～0.25 mm 中的最大,>2 mm 中的次之,0.25～0.053 mm 中的最小。

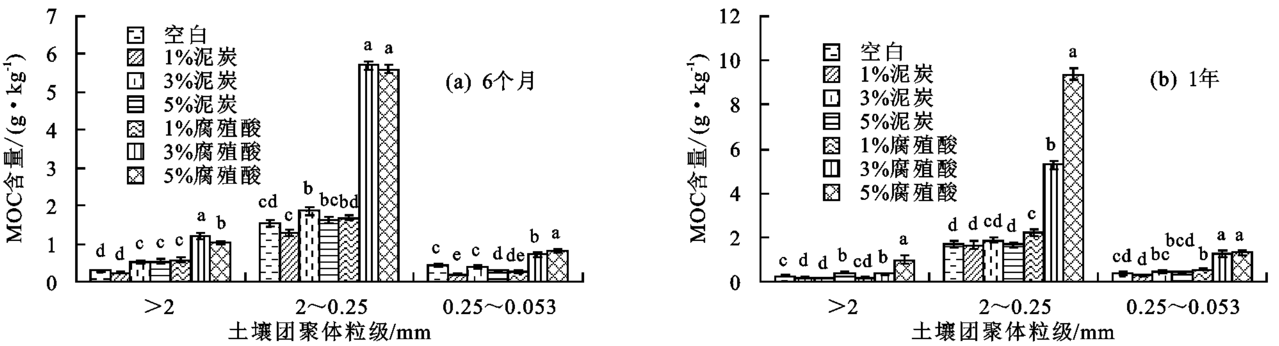


图4　改良剂对各粒级水稳性团聚体 MOC 含量的影响

从图4还可看出,施用改良剂1年后,>2 mm 水稳性团聚体中,5%腐殖酸处理下 MOC 含量最高,为0.99 g/kg。2～0.25 mm 水稳性团聚体中,泥炭和腐殖酸各处理中1%和5%泥炭处理 MOC 含量低于空白对照,但差异不显著,其余各处理 MOC 含量均高于空白对照,以5%腐殖酸处理 MOC 含量最高,为9.38 g/kg。0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中,泥炭和腐殖酸各处理中1%泥炭处理 MOC 含量低于空白对照,但差异不显著,其余各处理 MOC 含量均高于空白对照,以5%腐殖酸处理 MOC 含量最高,为1.31 g/kg。同时,各粒级水稳性团聚体中 MOC 含量均随腐殖酸施用比例的增加而增加。与6个月时不同,施用改良剂1年后,泥炭和腐殖酸不同处理 MOC 含量均表现为2～0.25 mm 中的最大,0.25～0.053 mm 中的次之,>2 mm 中的最小。

2.3.3　改良剂对土壤及各粒级水稳性团聚体 MOC 分配比例的影响　从表3可知,施用改良剂6个月后,与土壤 POC 分配比例规律相反,泥炭和腐殖酸各处理中3%泥炭处理的土壤 MOC 分配比例高于空白对照,且差异显著,其余各处理土壤 MOC 分配比例均低于空白对照,且差异显著。对于泥炭处理,土壤 MOC 分配比例随施用比例增加呈倒"V"形变化,在施用比例为3%时达到最高,为77.71%;而对于腐殖酸处理,土壤 MOC 分配比例则表现为随腐殖酸施用比例的升高而增大,在施用比例为5%时达到最高,为62.53%。施用改良剂1年后,泥炭和腐殖酸各处理土壤 MOC 分配比例均低于空白对照。对于泥炭处理,土壤 MOC 分配比例随泥炭施用比例的升高而减小,在施用比例为1%时达到最高,为76.73%;而腐殖酸处理土壤 MOC 分配比例随施用比例的变化规律与6个月时相同,在施用比例为5%时达到最高,为59.69%。

施用改良剂6个月和1年后,泥炭和腐殖酸各处理>2 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例均低于空白对照,同时,1年时泥炭和腐殖酸各处理>2 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例较6个月时有所下降。施用改良剂6个月和1年后,泥炭和腐殖酸各处理2～0.25 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例均低于空白对照,对于泥炭处理,土壤 MOC 分配比例表现为随施用比例的升高而降低;而对于腐殖酸处理,土壤 MOC 分配比例随施用比例的增加呈倒"V"形变化。同时,施用改良剂1年后泥炭和腐殖酸各处理2～0.25 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例较6个月时有所上升。施用改良剂6个月后,泥炭和腐殖酸各处理0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例均低于空白对照,且差异均显著,而施用改良剂1年后,泥炭和腐殖酸各处理中除5%泥炭处理0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例低于空白对照外,其余各处理均比空白对照高。施用改良剂1年后除空白对照外其余泥炭和腐殖酸处理0.25～0.053 mm 水稳性团聚体中 MOC 分配比例均高于6个月时。

2.4　改良剂对复垦土壤及各粒级水稳性团聚体 POC/MOC 的影响

由表4可知,施用改良剂6个月后,泥炭和腐殖酸各处理土壤 POC/MOC 变化范围为0.28～0.92,除3%泥炭处理外各处理土壤 POC/MOC 均高于空白对照,且差异均显著,以3%泥炭处理最低,为0.28。

施用改良剂 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理土壤 POC/MOC 变化范围为 0.27～0.95,各处理土壤 POC/MOC 均高于空白对照,且差异均显著,以 1%泥炭处理最低,为 0.28。

表 3　改良剂对土壤 MOC 与各粒级水稳性团聚体 MOC 分配比例的影响　　单位:%

时间	处理	土壤	>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm
6 个月	CK	67.05±1.08b	3.81±0.32a	21.11±1.27a	6.12±0.51a
	1%泥炭	64.94±1.06c	3.13±0.34ce	17.20±0.78b	2.41±0.39bc
	3%泥炭	77.71±1.08a	3.77±0.28a	13.79±0.94c	2.78±0.47bd
	5%泥炭	49.74±0.77g	2.69±0.36e	8.26±0.63d	1.43±0.31d
	1%腐殖酸	52.57±0.04f	3.25±0.31bc	9.72±0.93d	1.43±0.23d
	3%腐殖酸	56.86±0.30e	3.50±0.32abc	16.67±1.33b	2.07±0.20cd
	5%腐殖酸	62.53±0.71d	1.82±0.26f	9.90±0.35d	1.46±0.15d
1 年	CK	77.03±0.29a	3.32±0.53a	24.47±1.32a	4.97±1.04ab
	1%泥炭	76.73±0.51a	2.25±0.32bc	23.25±0.91a	4.03±0.45bcd
	3%泥炭	68.30±0.35b	1.28±0.18e	15.83±1.07cd	3.89±0.55cd
	5%泥炭	59.59±0.31c	3.13±0.28ab	13.22±0.94d	3.20±0.31de
	1%腐殖酸	50.80±0.44e	1.58±0.13de	19.92±1.32bc	4.62±0.54ac
	3%腐殖酸	57.26±0.37d	1.35±0.10e	20.16±1.07b	4.60±0.45abc
	5%腐殖酸	59.69±0.50c	1.98±0.15cd	18.66±1.06bc	2.60±0.22e

由表 4 还可看出,施用改良剂 6 个月和 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理>2 mm 水稳性团聚体 POC/MOC 变化范围分别为 0.66～2.88 和 0.57～3.52,6 个月时各处理>2 mm 水稳性团聚体 POC/MOC 均显著高于空白对照,以 3%泥炭处理最低,为 1.42。施用改良剂 6 个月和 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理 2～0.25 mm 水稳性团聚体 POC/MOC 变化范围分别为 0.84～3.03 和 0.60～1.65,各处理 2～0.25 mm 水稳性团聚体 POC/MOC 均高于空白对照。施用改良剂 6 个月和 1 年后,泥炭和腐殖酸各处理 0.25～0.053 mm 水稳性团聚体 POC/MOC 变化范围分别为 0.43～1.31 和 0.34～2.07,各处理 2～0.25 mm 水稳性团聚体 POC/MOC 均高于空白对照。

表 4　改良剂对土壤及各粒级水稳性团聚体 POC/MOC 的影响

时间	处理	土壤	>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm
6 个月	CK	0.37±0.01f	0.66±0.05c	0.84±0.08e	0.43±0.04c
	1%泥炭	0.44±0.02e	1.58±0.22b	1.09±0.07cd	0.97±0.22b
	3%泥炭	0.28±0.01g	1.42±0.03b	0.97±0.08de	0.54±0.08c
	5%泥炭	0.92±0.02a	2.88±0.50a	2.26±0.14b	0.89±0.14b
	1%腐殖酸	0.89±0.01b	1.44±0.19b	2.30±0.18b	1.31±0.27a
	3%腐殖酸	0.75±0.01c	1.48±0.06b	1.28±0.13c	0.99±0.12b
	5%腐殖酸	0.57±0.02d	1.45±0.22b	3.03±0.13a	1.14±0.22ab
1 年	CK	0.27±0.01e	0.77±0.13b	0.60±0.05d	0.34±0.08c
	1%泥炭	0.28±0.02d	0.76±0.17b	0.65±0.12d	0.46±0.02c
	3%泥炭	0.29±0.01d	3.52±0.36a	0.71±0.05d	0.49±0.04c
	5%泥炭	0.66±0.01c	3.18±0.53a	1.65±0.21a	0.46±0.11c
	1%腐殖酸	0.95±0.02a	0.57±0.08b	1.08±0.08c	0.41±0.09c
	3%腐殖酸	0.70±0.01b	0.67±0.10b	1.46±0.13b	1.04±0.15b
	5%腐殖酸	0.64±0.01c	0.98±0.08b	1.33±0.11b	2.07±0.18a

3　讨 论

3.1　改良剂对复垦土壤水稳性团聚体组成的影响

土壤团聚体作为土壤结构的基本构成单位,与土壤渗水性、透气性及有机质储存和供应矿质养分的能力密切相关,直接或间接影响土壤肥力[17]。本研究结果表明,试验地土壤以 2～0.25 mm 水稳性团聚体为主,而>2 mm 水稳性团聚体最少。施用泥炭和腐殖酸 2 种改良剂 6 个月后,水稳性大团聚体含量增加,而水稳性微团聚体含量减少。可能是因为泥炭和腐殖酸是大团聚体形成的重要有机胶结剂,同时,泥炭和腐殖酸为微生物提供了丰富的碳源,有利于微生物的繁殖和活动,加速有机物料的分解,产生大量的多糖、木质素和蛋白质等物质[18],这些物质也是大团聚体形成的重要有机胶结剂。而施用泥炭和腐殖酸

2种改良剂1年后，水稳性大团聚体含量减少，而水稳性微团聚体含量增加。柴亚凡等[19]的研究表明，施用土壤改良剂后大团聚体占比减小，小团聚体和微团聚体占比增大，该结果与本试验结果一致，原因可能是大团聚体内的颗粒有机物利于微团聚体的形成，随后在颗粒有机物的分解和一些其他的干扰过程中，大团聚体破碎，微团聚体被释放出来[20]。总体来看，腐殖酸对团聚体的影响比泥炭更明显，可能原因是腐殖酸类物质具有较强的表面吸附性能及凝聚溶胶作用，施入后可使土壤团聚体增加[11]，而本试验采用的腐殖酸改良剂中的腐殖酸含量为泥炭改良剂的2.47倍，因此腐殖酸对团聚体的影响比泥炭更明显。

3.2 改良剂对复垦土壤及水稳性团聚体中POC的影响

POC是动植物残体向土壤腐殖质转化的活性中间产物和一类腐殖化程度较低、活性较高的有机碳，与土壤总有机碳相比，POC更容易被人为管理措施影响[6]。本研究结果表明，泥炭和腐殖酸2种改良剂均能显著增加土壤POC分配比例，当改良剂施用比例为1%和3%时，相同施用比例下，施用腐殖酸的土壤POC分配比例更高，而当改良剂施用比例为5%时，施用泥炭的土壤POC分配比例更高。可能是因为泥炭和腐殖酸施入土壤后改善了土壤结构，促进团聚体的形成，有利于有机碳进入团聚体被保护[21]，从而促进土壤POC的形成。腐殖酸物质拥有的孔隙结构和酸性含氧官能团等，有助于土壤对活性碳源的吸附和对氧化物、有机物等物质的络合[22]，增加土壤中的活性有机碳组分，本试验采用的腐殖酸改良剂为风化煤腐殖酸，其腐殖酸物质的含量高于泥炭；同时，本试验使用的泥炭为草本泥炭，草本泥炭中含有未腐烂的植物残体，密度低、含水量高、压缩性强，分解度低于腐殖酸[23]，因此，泥炭和腐殖酸施用比例较少时施用比例相同情况下，施用腐殖酸的土壤POC分配比例更高；而当改良剂施用比例较高时，施用泥炭的土壤POC分配比例更高，可能与泥炭和腐殖酸自身带有的电荷数量有关，腐殖酸表面电荷数量多于泥炭，当腐殖酸施用量较高时其表面产生位阻效应[24]，导致其吸附颗粒物和有机碳的能力降低。施用改良剂1年后泥炭和腐殖酸各处理土壤POC含量与6个月时相比均有所下降，可能是因为泥炭和腐殖酸为微生物提供了大量碳源，促进了微生物的生长、繁殖，有效提高微生物的活性，而微生物分解的有机物质是活性有机碳库的主要来源[25]，随着时间的推移，活性有机碳库的来源越来越少，导致POC积累量小于分解量，表现为POC含量减少。

施用改良剂6个月后，>2，2～0.25 mm水稳性团聚体中POC分配比例增加了，0.25～0.053 mm水稳性团聚体中POC分配比例减少，这可能是因为新输入的有机碳会优先聚集在大团聚体(>0.25 mm)中，大团聚体的形成比微团聚体快，有机碳的矿化也快[26]，微团聚体内的有机碳比大团聚体内的有机碳更不易变化[27]。施用改良剂1年后，>2 mm水稳性团聚体中POC分配比例低于空白对照，2～0.25，0.25～0.053 mm水稳性团聚体中POC分配比例高于空白对照，同时，与施用改良剂6个月时相比，施用改良剂1年后，水稳性大团聚体(>0.25 mm)中POC分配比例降低，而水稳性微团聚体(<0.25 mm)中POC分配比例则升高，此变化规律与土壤团聚体变化规律相同，可能与土壤团聚体的变化有关。

3.3 改良剂对复垦土壤及水稳性团聚体中MOC的影响

MOC主要是颗粒有机质的分解产物，微生物活性较差[28]，是非活性有机碳，矿物颗粒对有机碳的吸附作用是土壤固持有机碳的重要机制[14]，MOC含量越高，土壤有机碳积累越多[29]。本研究结果表明，施用改良剂6个月和1年后，泥炭和腐殖酸各处理中除1%泥炭处理与空白对照差异不显著外，其他各处理土壤MOC含量均高于空白对照，但土壤MOC分配比例则均低于空白对照，可能因为MOC的周转期较慢[14]，而施用泥炭和腐殖酸后土壤总有机碳含量快速升高，因此MOC相对比例低于空白对照。同时，泥炭各处理土壤MOC分配比例高于腐殖酸，原因可能是MOC是有机物的最终分解产物与粉粒及粘粒结合的有机碳[28]，在土壤团聚化过程中，土壤矿物颗粒(粉粒和细砂粒)会被大量未分解的植物残渣和其他有机物质包裹[30]，而本试验所采用的泥炭为草本泥炭，其中含有未腐烂的植物残体[23]，腐殖酸中则不含未分解的植物残体。与6个月时相比，施用改良剂1年后泥炭和腐殖酸各处理土壤MOC含量均有所下降，原因可能是微生物代谢分泌物所增加的MOC量小于MOC向POC转移的量，导致MOC净含量减少[31]，同时，POC作为MOC的前一级产物，其储量的减少必定会引起MOC输入量的降低[32]。

施用改良剂6个月和1年后，泥炭和腐殖酸各处理>2，2～0.25，0.25～0.053 mm粒级水稳性团聚体中MOC分配比例均低于空白对照，但与施用改良剂6个月时相比，施用改良剂1年后泥炭和腐殖酸各处理>2，2～0.25，0.25～0.053 mm粒级水稳性团聚体中MOC分配比例有所升高，表明泥炭和腐殖酸能够促进矿区复垦土壤水稳性团聚体中MOC的积累，但是该过程较缓慢，这可能仍与MOC的周转期慢有关。与6个月时相比，施用改良剂1年后，>2 mm

和 2～0.25 mm 粒级水稳性团聚体中 MOC 含量有所下降,而 0.25～0.053 mm 粒级水稳性团聚体中 MOC 含量则有所上升,可能是因为当微团聚体内(20～250 μm)的孔隙小于细菌可通过的限度(3 μm)时,有机碳的降解就只能依靠胞外酶向基质扩散,该过程对生物来说极其耗能,因而有机碳分解量减少,积累量高于分解量[33],MOC 净含量增加。

3.4 改良剂对复垦土壤及各粒级水稳性团聚体 POC/MOC 的影响

研究[34]表明,POC/MOC 值大,有机碳易矿化、周转期短或活性高,即稳定性下降;POC/MOC 值小,则有机碳较稳定,不易被生物分解和利用,有利于有机碳储存。本研究显示,施用泥炭和腐殖酸后,土壤及各粒级水稳性团聚体 POC/MOC 均高于空白对照,其中,施用改良剂 6 个月后 3%泥炭处理土壤及各粒级水稳性团聚体 POC/MOC 均最低,表明泥炭和腐殖酸虽然能够增加 POC 和 MOC 含量,但会降低土壤有机碳的稳定性,不利于有机碳的储存,而短时期内泥炭施用比例为 3%时增加 POC 和 MOC 含量的效果并不是最好的,但却是最利于有机碳储存的。

4 结论

(1)泥炭和腐殖酸均能增加煤矿区复垦土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量,但随着时间的推移,水稳性大团聚体会减少,水稳性微团聚体(<0.25 mm)会增加,>2,<0.25 mm 粒级的团聚体变化较大,2 种改良剂相比,腐殖酸各处理土壤大团聚体及微团聚体的变化比泥炭大。

(2)试验地土壤 POC 主要集中在 2～0.25 mm 粒级水稳性团聚体中。泥炭和腐殖酸均能增加煤矿区复垦土壤及各粒级水稳性团聚体中的 POC 含量,提高 POC 分配比例,增加土壤有机碳中的不稳定部分,从而加快土壤碳循环,且施用量越大效果越明显,以 5%腐殖酸处理效果最佳,但 6 个月后,土壤 POC 含量会减少。

(3)试验地土壤 MOC 也主要集中在 2～0.25 mm 粒级水稳性团聚体中。施用泥炭和腐殖酸 2 种改良剂均能增加煤矿区复垦土壤及各粒级水稳性团聚体中的 MOC 含量,但其分配比例会降低,泥炭各处理土壤 MOC 分配比例高于腐殖酸,6 个月后,泥炭和腐殖酸各处理 MOC 分配比例有所提高。

(4)施用泥炭和腐殖酸 1 年内能够增加矿区复垦土壤 POC 和 MOC 含量,但是 POC/MOC 值会降低,即土壤有机碳稳定性降低,不利于有机碳的储存。相对来说,6 个月内按 0—20 cm 土层土壤质量 3%施用泥炭有机碳稳定性下降最小。

参考文献:

[1] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究[J].中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.

[2] 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.

[3] 郜继承,潘根兴.江汉平原不同土地利用和起源下农田土壤有机碳组分变化[J].水土保持学报,2012,26(6):153-157.

[4] 张国,曹志平,胡婵娟.土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J].应用生态学报,2011,22(7):1921-1930.

[5] 徐文静,丛耀辉,张玉玲,等.黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳及其颗粒有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2016,30(4):210-215.

[6] 唐光木,徐万里,周勃,等.耕作年限对棉田土壤颗粒及矿物结合态有机碳的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):237-241.

[7] Liua S B,Guoa Z C,Pana Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties,labeling method and aggregate structure[J]. Geoderma,2019,351:36-48.

[8] 庞庆阳,宣毓龙,蔡旭,等.棉粕腐植酸肥对土壤团聚体、酶及养分的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):54-60,94.

[9] 付琳琳,蔺海红,李恋卿,等.生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J].土壤通报,2013,44(6):1379-1384.

[10] 陈琨,秦鱼生,喻华,等.不同肥料/改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收及土壤性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):773-781.

[11] 秦萍,张俊华,孙兆军,等.土壤结构改良剂对重度碱化盐土的改良效果[J].土壤通报,2019,50(2):414-421.

[12] 朱姝,窦森,关松,等.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):127-136.

[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] 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.

[15] 姬强,孙汉印,王勇,等.土壤颗粒有机碳和矿质结合态有机碳对 4 种耕作措施的响应[J].水土保持学报,2012,26(2):132-137.

[16] 董洪芳,于君宝,管博.黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征[J].环境科学,2013,34(1):288-292.

[17] 柳开楼,黄晶,张会民,等.长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J].土壤学报,2018,55(2):443-454.

[18] 刘振东,李贵春,周颖,等.无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响[J].农业环境科学学

报,2013,32(11):2239-2245.

[19] 柴亚凡,周波,吕文强,等.黄土残塬区泻溜红土坡积体土壤改良效果研究[J].人民黄河,2019,41(1):85-87,100.

[20] 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,1998,62:1367-1377.

[21] 曲晓晶,吴景贵,李建明,等.外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):278-286.

[22] 陶雪,杨琥,季荣,等.固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J].土壤,2016,48(1):1-11.

[23] 吕岩.吉林省东部地区沼泽草炭土的结构特性及模型研究[D].长春:吉林大学,2012.

[24] Nadler A, Perfect E, Kay B D. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregates[J].Soil Science Society of America Journal,1996,60(2):555-561.

[25] 王芬,刘会,冯敬涛,等.牛粪和生物炭对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(12):1795-1801.

[26] Rabbi S M, Wilson B R, Lockwood P V, et al. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses[J].Geoderma,2014,216:10-18.

[27] 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.

[28] Kaiser M, Wirth S, Ellerbrock R H, et al. Microbial respiration activities related to sequentially separated, particulate and water-soluble organic matter fractions from arable and forest top soils[J].Soil Biology and Biochemistry,2010,42:418-428.

[29] 张豪.盐碱农田全年候土壤活性和惰性有机碳变化及其微生物作用研究[D].长春:吉林大学,2017.

[30] Brady N, Weil R.土壤学与生活[M].李保国,徐建明,等,译.1 版.北京:科学出版社,2019:134.

[31] 邹文秀,梁尧,郝翔翔,等.黑土颗粒有机碳和氮含量对有机肥剂量响应的定量关系[J].土壤,2016,48(3):442-448.

[32] 石亚攀,乔璐,陈立新,等.红松针阔混交林林隙土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳的时空异质性[J].林业科学,2014,50(6):18-27.

[33] 刘思佳,关松,张晋京,等.秆还田对黑土团聚体有机碳含量的影响:基于多级团聚体结构的物理和化学保护作用[J].吉林农业大学学报,2019,41(1):61-70.

[34] 王娜,朱小叶,方晰,等.中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化[J].水土保持学报,2018,32(3):218-225,234.

(上接第 224 页)

[28] Ahmed Z U, Woodbury P B, Sanderman J. Assessing soil carbon vulnerability in the Western USA by geospatial modeling of pyrogenic and particulate carbon stocks[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences,2017,122(2):354-369.

[29] Debasish S, Kukal S S , Bawa S S. Soil organic carbon stock and fractions in relation to land use and soil depth in the degraded Shiwaliks Hills of Lower Himalayas[J].Land Degradation and Development,2012,25(5):407-416.

[30] Covaleda S, Gallardo J F, F García-Oliva, et al. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico)[J].Soil Use and Management,2011,27(2):186-194.

[31] Lou Y, Xu M, Wang W, et al. Soil organic carbon fractions and management index after 20yr of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables[J]. Soil Use and Management,2011,27(2):163-169.

[32] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1994,58(1):123-130.

[33] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J].Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.