

刘新梅, 樊文华, 张昊, 田剑, 刘奋武, 王改玲. 改良剂对矿区复垦土壤机械稳定性团聚体及有机碳的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (4): 970-977
Liu XM, Fan WH, Zhang H, Tian J, Liu FW, Wang GL. Effects of amendments on mechanical stability aggregates and organic carbon in reclaimed soil [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (4): 970-977

改良剂对矿区复垦土壤机械稳定性团聚体及有机碳的影响

刘新梅 樊文华✉ 张昊 田剑 刘奋武 王改玲

山西农业大学资源环境学院 太谷 030801

摘要 为探究不同改良剂及施用时间对矿区复垦土壤结构和肥力的影响,在襄垣煤矿复垦区设置田间微区,研究施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸对复垦土壤机械稳定性团聚体分布与稳定性、土壤有机碳含量及土壤红外光谱特征的影响。结果显示,施用泥炭和腐殖酸6个月时大团聚体(> 0.25 mm)含量增加,施用泥炭和腐殖酸1年时大团聚体含量减少,微团聚体(< 0.25 mm)含量增加。施用改良剂6个月时,泥炭和腐殖酸各处理土壤平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均高于空白对照,均以5%腐殖酸处理最高,与空白对照相比分别增加了10.95%和22.43%;施用泥炭和腐殖酸1年时,泥炭各处理土壤MWD和GMD仍高于空白对照,腐殖酸各处理土壤MWD和GMD则均低于空白对照。施用泥炭和腐殖酸能够增加土壤总有机碳及各粒级团聚体有机碳含量。施用改良剂6个月及1年时均以5%腐殖酸处理土壤总有机碳含量最高,分别较空白对照增加了566.35%和502.59%。施用泥炭6个月和1年时土壤> 0.25 mm大团聚体有机碳增量最大,而施用腐殖酸6个月和1年时土壤0.25-0.053 mm团聚体有机碳增量最大。综上所述,泥炭和腐殖酸有利于大团聚体的形成,能改善团聚体的稳定性,增加土壤有机碳、碳水化合物、含氧官能团、多糖及取代芳香类物质的含量,但施用改良剂1年大团聚体含量和有机碳含量会减少,施用腐殖酸1年会降低复垦土壤团聚体稳定性。(图4表1参33)

关键词 泥炭; 腐殖酸; 团聚体; 有机碳含量; 红外光谱特征

Effects of amendments on mechanical stability aggregates and organic carbon in reclaimed soil

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

College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract To explore the effects of different amendments on the structure and fertility of reclaimed soil in the mining area, a series of microfield experiments were conducted in Xiangyuan reclaimed soil to study the effects of different proportions of peat and humic acid on the distribution and stability of mechanically stable aggregates, the content of soil organic carbon, and the characteristics of the soil infrared spectrum. The results showed that at 6 months after the application of amendments, the content of macro-aggregates (>0.25 mm) of each peat and humic acid treatment increased; however, the content of macro-aggregates decreased and that of micro-aggregates increased in each peat and humic acid treatment at 1 year after the application of amendments. At 6 months after the application of amendments, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of all peat and humic acid treatments were higher than those of the control (CK), and the highest was for the 5% humic acid treatment, which increased by 10.95% and 22.43% compared with those of CK. At 1 year after the application of amendments, the MWD and GMD of peat treatments were still higher than those of CK; however, the MWD and GMD of humic acid treatments were lower than those of CK. Peat and humic acid can increase the total organic carbon content of the soil. The content of soil total organic carbon in the 5% humic acid treatment was the highest, which increased by 566.35% and 502.59% compared with that in CK at 6 months and 1 year after the application of amendments. The increase in organic carbon in > 0.25 mm aggregates was the largest at 6 months and 1 year after the application of peat, whereas that in 0.25-0.053 mm aggregates was the largest at 6 months and 1 year after the application of humic acid. In conclusion, peat and humic acid are beneficial to promote the formation of macro-aggregates; improve the stability of aggregates; increase the content of organic carbon, carbohydrates, oxygen-containing functional groups, polysaccharides and substitute aromatic substances. However, the content of macro-aggregate and organic carbon will decrease 1 year after the application of amendments. The application of humic acid for 1 year will reduce the stability of soil aggregates.

Keywords peat; humic acid; aggregate; organic carbon content; infrared spectrum characteristics

收稿日期 Received: 2020-12-03 接受日期 Accepted: 2021-03-18

国家重点联合基金项目(U1710255-4)资助 Supported by the Key Joint Foundation of China (U1710255-4)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: fwh012@163.com)

土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[1],对提升土壤结构的稳定性、增加土壤养分含量、促进微生物活动、提高土壤肥力等具有至关重要的作用^[2],同时团聚体也是土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)转化和累积的重要场所,对有机碳的物理保护是有机碳稳定的重要机制^[3],Tisdall等发现SOC含量的增加与富含SOC大团聚体数量的增加密切相关^[4],提高团聚体的稳定性可提高土壤碳汇功能,协调土壤中的水肥气热,维持和稳定土壤疏松熟化层^[5]。有机碳则与土壤理化性质、作物产量等密切相关,是评价土壤肥力的重要指标^[6],同时,土壤有机碳是形成团聚体的重要胶结剂,是团聚体形成的重要物质基础^[7]。

煤炭作为重要的能源物质,被广泛应用于生产生活中,为人类社会的发展作出了重大贡献,但煤矿开采造成了大量土地被破坏。山西省煤炭资源丰富,截至2015年,山西累计生产原煤近亿吨,因采煤破坏的耕地达108 000 hm²(山西省发改委,2015)。矿区土地复垦是缓解人地矛盾、增加耕地面积及促进农业可持续健康发展的重要措施,再造良好的土壤层次和结构是土地复垦的基础^[8]。然而矿区土地多采用表层土壤与底层土壤混合整平或重新堆垫等方式进行复垦,复垦土壤存在有机碳养分含量低、结构性差、质地不良等问题^[9-10]。如何改良土壤结构、提高土壤肥力是矿区土地复垦的关键所在。

大量研究表明施用土壤改良剂是提高土壤肥力、改良土壤结构的有效措施。王永敏等发现聚丙烯酰胺改良剂可促进潮土>0.25 mm水稳性团聚体的形成^[11];Sun等的研究发现生物碳可增加黏土土壤团聚体稳定性及土壤孔隙度^[12];Tahir等发现施用膨润土可提高盐碱土中的阳离子交换量及对速效氮和速效磷养分固持^[13];马征等发现在黏质潮土中施用由保水剂、腐殖酸、生化黄腐酸钾为原料并添加尿素合成的新型营养型土壤改良剂可降低土壤容重,增加土壤稳定性^[14];马云艳等的研究表明施用泥炭和腐泥可显著增加风沙土土壤速效氮磷钾、有机质和腐殖酸含量,并促进土壤团粒结构的形成^[15];侯晓娜等发现生物炭可以提高土壤及不同粒级团聚体中的有机碳含量^[16]。然而改良剂对矿区复垦土壤的影响尚不明确,因此我们采用田间微区的方法研究泥炭和腐殖酸2种改良剂对矿区复垦土壤机械稳定性团聚体分布和稳定性、各粒级机械稳定性团聚体有机碳含量、土壤红外光谱特征的影响,以期为提升矿区复垦土壤肥力及合理利用改良剂提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验基地及材料

1.1.1 试验基地 试验基地位于山西长治襄垣县洛江沟村(36°28'N, 113°00'E),属于潞安集团五阳煤矿,地处低山黄土丘陵地带,属暖温带半湿润大陆性季风气候。基地于2012年开始采用混推(挖高垫低)的方式复垦,土壤为石灰性褐土,布置试验前测定土壤基本理化性质:pH 8.30,容重1.59 g/cm³,有机质9.32 g/kg,碱解氮30.02 mg/kg,有效磷4.66 mg/kg,速效钾117.49 mg/kg。

1.1.2 试验材料 选用的改良剂为泥炭和腐殖酸,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%。

1.2 试验设计

在试验基地选定面积为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条宽20 cm的垄。每种改良剂设置3个施用比例,即分别

按0-20 cm耕层土壤重量占比1%(2.25 kg)、3%(6.75 kg)、5%(11.25 kg)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,每个处理均设置3个重复,设置3个不添加改良剂的微区作为空白对照,对空白对照微区也进行翻耕平整,采用随机排列的方式布置微区。分别在添加改良剂6个月及1年时,采集样品,测定土壤机械稳定性团聚体分布、各粒级机械稳定性团聚体有机碳含量、土壤红外光谱特征。

1.3 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)时采集土壤样品。分别在每个微区0-20 cm土层采集1个原状土样和1个混合土样,原状土样用大铝盒采集,混合土样用土钻采集,即在微区内随机选3个点采集土样,装入自封袋混合成1个混合土样。原状土样用于机械稳定性团聚体的筛分及各粒级团聚体有机碳的测定,混合土样用于土壤红外光谱特征的测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤团聚体分布 采用干筛法^[17]对土壤进行筛分,通过筛分得到>2 mm、2-0.25 mm、0.25-0.053 mm和<0.053 mm共4级机械稳定性团聚体,称重备用,并计算各级团聚体重量百分比。

1.4.2 土壤有机碳含量 土壤各粒级团聚体有机碳含量采用重铬酸钾容量法—外加热法^[18]测定。

1.4.3 土壤红外光谱特征 土壤红外光谱特征采用傅里叶变换红外光谱仪—压片法测定^[19]。采用傅里叶变换红外光谱仪(Bruker, Tensor 27)测定土壤红外光谱特征,将风干的混合土壤样品在60℃烘箱内烘干4 h,从烘箱中取出样品,冷却后称取0.005 g土样及0.5 g干燥的KBr(光谱纯)(样品:KBr=1:100),将称好的土样与KBr在玛瑙研钵中充分研磨至粉末状,将研磨好的粉末倒入压片器,在10 MPa压强下将研磨好的粉末压成薄片,以空气作为背景,用光谱仪扫描测定并记录4 000-400 cm⁻¹波段的光谱特征图。

1.4.4 计算方法 (1)某粒级团聚体有机碳含量(g/kg)^[20]:某粒级团聚体有机碳含量=该粒级团聚体有机碳浓度×该粒级团聚体重量百分比。

(2)平均重量直径(MWD)^[21]:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \left(\frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \right)$$

式中: r_i 为第*i*个筛子孔径(mm); $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$; m_i 为第*i*个筛子的团聚体重量百分比(%)。

(3)几何平均直径(GMD)^[22]:

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \frac{r_{i-1} + r_i}{2}}{\sum_{i=1}^n m_i} \right]$$

式中: r_i 为第*i*个筛子孔径(mm); $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$; m_i 为第*i*个筛子的团聚体重量百分比(%)。

1.5 数据处理与分析

试验数据的统计与分析采用Excel 2010、SPSS 25.0进行。不同改良剂处理之间差异显著性检验($P < 0.05$)采用最小显著差数法(LSD)进行。

2 结果与分析

2.1 改良剂对复垦土壤机械稳定性团聚体分布及稳定性的影响

2.1.1 改良剂对复垦土壤机械稳定性团聚体分布的影响

施

用改良剂6个月和1年时土壤机械稳定性团聚体分布如图1所示。从图中可知,施用改良剂6个月时泥炭各处理土壤中2-0.25 mm团聚体最多,占45.63%-48.96%,腐殖酸各处理土壤中> 2 mm团聚体最多,占46.03%-51.98%;施用改良剂1年时泥炭和腐殖酸各处理土壤均以2-0.25 mm团聚体最多,占43.23%-50.14%。施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤均以< 0.053 mm团聚体最少,占1.53%-2.23%和1.34%-2.30%。施用泥炭和腐殖酸6个月时,除3%泥炭处理> 2 mm团聚体含量低于空白对照外,其余泥炭和腐殖酸各处理均高于空白对照,其中,腐殖酸处理> 2 mm团聚体含量均显著高于空白对照,且其含量随腐殖酸施用比例的增加而增加,以5%腐殖酸处理土壤> 2 mm团聚体含量最高,为51.98%,较空白对照增加了23.06%,差异显著,同时,腐殖酸各处理> 2 mm团聚体含量均高于泥炭处理。施用泥炭6个月时,各处理土壤中2-0.25 mm团聚体有所增加,且施用比例越高增量越大,施用比例为5%时土壤2-0.25 mm团聚体增量最大,较空白对照增加了9.68%,差异显著;而施用腐殖酸6个月时,各处理土壤中2-0.25 mm团聚体含量均低于空白对照,且腐殖酸施用比例越高其含量越少,以5%腐殖酸处理土壤2-0.25 mm团聚体含量最低,为41.59%,较空白对照减少了6.83%,差异显著。施用改良剂6个月时,泥炭和腐殖酸各处理土壤0.25-0.53 mm和< 0.053 mm团聚体含量均低于空白对照,0.25-0.53 mm团聚体含量随泥炭和腐殖酸施用比例的提高而减少,以5%腐殖酸处理土壤0.25-0.53 mm团聚体含量最低,为5.19%,较空白对照减少了53.37%,差异显著,同时,泥炭各处理土壤0.25-0.53 mm和< 0.053 mm团聚体含量均高于腐殖酸处理。

施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤中> 2 mm团聚体含量均低于空白对照,> 2 mm团聚体含量随腐殖酸施用比例的升高而减小,以5%腐殖酸处理土壤> 2 mm团聚体含量最低,为22.30%,较空白对照减少了46.15%,差异显著。施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤中2-0.25 mm团聚体含量均显著高于空白对照,与6个月时相反,施用改良剂1年时其含量随泥炭施用比例的提高而减少,随腐殖酸施用比例的提高而增加。施用泥炭1年时,各处理土壤中0.25-0.53 mm团聚体含量均低于空白对照,但差异不显著,而施用腐殖酸1年时,各处理土壤中0.25-0.53 mm团聚体含量均高于空白对照,且差异显著,以5%腐殖酸处理土壤中0.25-0.53 mm团聚体含量最高,为27.30%,较空白对照增加了113.95%。与6个月时不同,施用泥炭1年时,各处理土壤中< 0.053 mm团聚体含量均高于空白对照。与6个月时相比,施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤中> 2 mm团聚体含量减少了,而2-0.25 mm和0.25-0.53 mm团聚体含量增加了,< 0.053 mm团聚体无明显变化规律。

2.1.2 改良剂对复垦土壤稳定性的影响 平均重量直径(MWD)采用加权求和得出,是从总体上评价团聚体含量的指标,MWD越大,说明团聚体越多^[22]。从表1可以看出,施用改良剂6个月时,泥炭和腐殖酸各处理土壤MWD值均高于空白对照,除3%泥炭处理外,其余各处理土壤MWD值均达到显著水平,以5%腐殖酸处理土壤MWD值最大,为1.52 mm。与空白对照相比,泥炭施用比例为1%、3%、5%时,土壤MWD值分别升高了2.92%、2.19%、4.38%,各浓度间差异不显著;与空白对照相比,腐殖酸各施用比例下,土壤MWD值分别升高

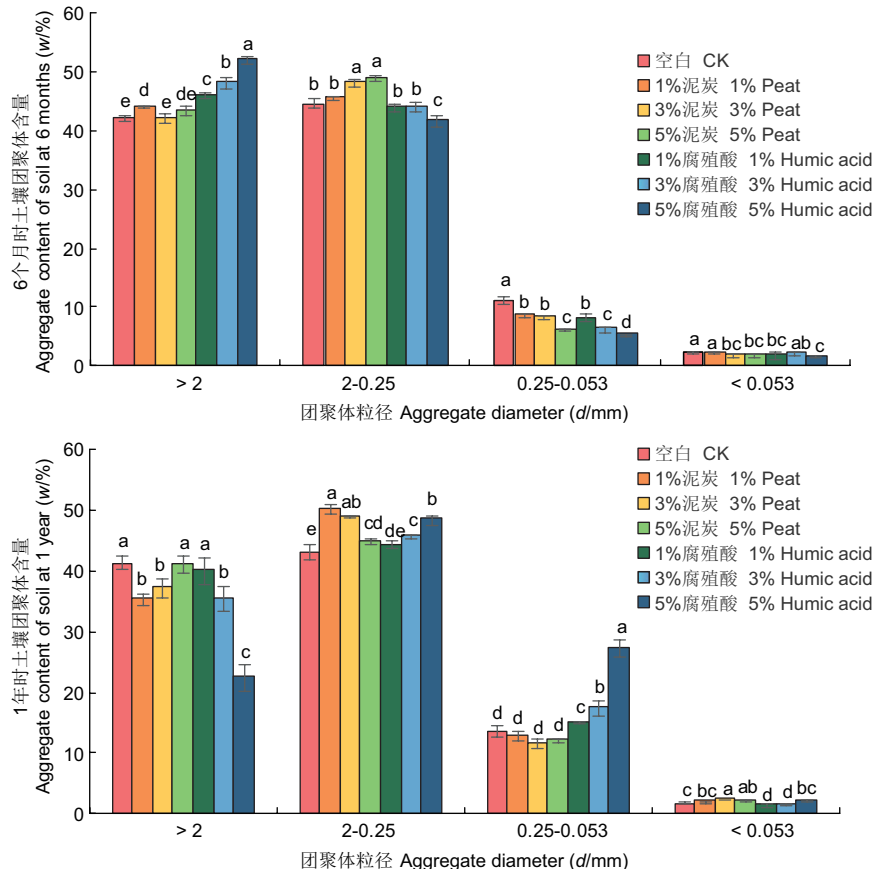


图1 不同改良剂处理下复垦土壤机械稳定性团聚体分布。小写字母不同表示同一粒径下不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 Distribution of the mechanically stable aggregates in reclaimed soil under different amendment treatments. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments of the same diameter ($P < 0.05$).

了4.38%、7.30%、10.95%，各浓度间的差异在施用比例为5%时达到显著水平。施用改良剂1年时，泥炭各处理土壤MWD值均显著高于空白对照，施用比例为1%、3%、5%时，与空白对照相比，土壤MWD值分别升高了3.94%、3.94%、9.45%，各浓度间的差异在施用比例为5%时达到显著水平；施用改良剂1年时，腐殖酸各处理土壤MWD值均显著低于空白对照，各施用比例下，与空白对照相比，土壤团聚体MWD值分别降低了4.72%、3.15%、2.83%，各浓度间的差异也在施用比例为5%时达到显著水平。但与6个月时相比，施用改良剂1年时泥炭和腐殖酸各处理土壤MWD值均下降。

几何平均直径（GMD）是通过对团聚体直径取对数后加权求和得出的，增加了团聚体含量在评价指标体系当中的影响^[22]。从表1可以看出，与土壤MWD值变化规律相同，施用改良剂6个月时，泥炭和腐殖酸各处理土壤团聚体GMD值均高于空白对照，且差异均显著，以5%腐殖酸处理土壤GMD值最大，为1.31 mm。与空白对照相比，施用改良剂6个月时，泥炭各施用比例下，土壤GMD值分别升高了7.48%、7.48%、13.08%，各浓度间的差异在5%时达到显著水平；与空白对照相比，施用改良剂6个月时，腐殖酸各施用比例下，土壤GMD值分别升高了10.28%、14.95%、22.43%，各浓度间的差异在5%时达到显著水平。与土壤MWD值变化规律相同，施用改良剂1年时，泥炭各处理土壤GMD值均显著高于空白对照，与空白对照相比，各施用比例下，土壤GMD值分别升高了6.12%、4.08%、8.16%；施用改良剂1年时，腐殖酸各处理土壤GMD值均显著低于空白对照，与空白对照相比，各施用比例下，土壤GMD值分别降低了5.10%、6.12%、36.73%，各浓度间的差异在5%时达到显著水平。整体来看，施用改良剂1年时泥炭和腐殖酸各处理土壤GMD值均低于施用改良剂6个月时。

2.2 改良剂对复垦土壤及各粒级团聚体有机碳含量的影响

2.2.1 改良剂对复垦土壤有机碳含量的影响 不同改良剂处理下复垦土壤有机碳含量如图2所示，从图中可以看出，施用改良剂6个月和1年时，泥炭和腐殖酸各处理土壤有机碳含量的变化规律相同，即施用泥炭和腐殖酸均能增加土壤有机碳含量，且土壤有机碳含量均随泥炭和腐殖酸施用比例的升高而升高。施用改良剂6个月时，泥炭和腐殖酸各处理土壤有机碳含量均显著高于空白对照，其中，腐殖酸处理土壤有机碳含量高于泥炭，以5%腐殖酸处理土壤有机碳最高，为55.44 g/kg，较空白对照增加了566.35%。施用改良剂1年时，泥炭和腐殖酸各处理土壤有机碳含量均高于空白对照，除1%泥炭处理差异不显著外，其余各处理差异均显著，腐殖酸处理土壤有机碳含量仍高于泥炭，仍以5%腐殖酸处理土壤有机碳最高，

为51.22 g/kg，较空白对照增加了502.59%。与6个月时相比，施用改良剂1年时泥炭和腐殖酸各处理土壤有机碳均下降。

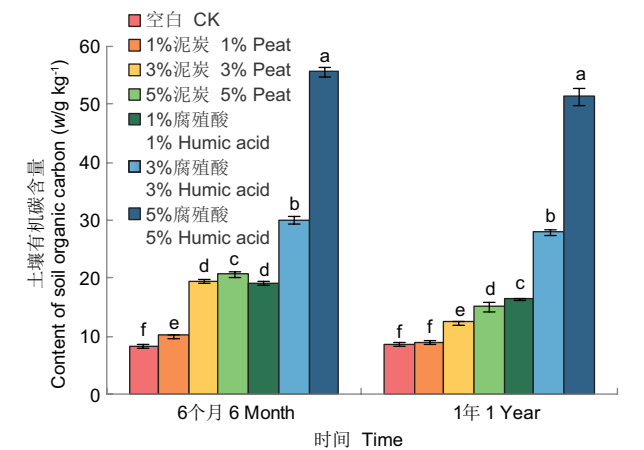


图2 不同改良剂处理下复垦土壤有机碳含量。小写字母不同表示同一时间下不同处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）。
Fig. 2 The organic carbon content in reclaimed soil under different amendment treatments. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same time ($P < 0.05$).

2.2.2 改良剂对复垦土壤各粒级团聚体有机碳含量的影响

从图3可以看出，施用改良剂6个月时，泥炭和腐殖酸各处理土壤中 $> 2\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量随泥炭和腐殖酸施用比例的升高而升高，以5%泥炭处理土壤 $> 2\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量最高，为8.83 g/kg，较空白对照增加了约1.31倍，泥炭和腐殖酸施用比例为1%时， $> 2\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量低于空白对照，但差异不显著，施用比例为3%和5%时， $> 2\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量高于空白对照，且差异显著。施用改良剂6个月时，泥炭和腐殖酸各处理土壤中 $2\text{--}0.25\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量显著增加，其中，以5%腐殖酸处理土壤 $2\text{--}0.25\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量最高，为20.50 g/kg，较空白对照增加了约5.10倍。施用改良剂6个月时，泥炭和腐殖酸各处理土壤中 $0.25\text{--}0.053\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量显著增加，仍以5%腐殖酸处理土壤 $0.25\text{--}0.053\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量最高，为25.58 g/kg，较空白对照增加了约24.08倍。施用改良剂6个月时，泥炭和腐殖酸各处理土壤 $< 0.053\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量均高于空白对照，但泥炭各处理差异不显著，而腐殖酸各处理差异显著，仍以5%腐殖酸处理土壤 $< 0.053\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量最高，为2.28 g/kg，较空白对照增加了约16.54倍。

施用改良剂1年时，泥炭和腐殖酸各处理各粒级团聚体有机碳含量较6个月时下降，但各粒级团聚体有机碳含量变化规律与6个月时基本相同，泥炭和腐殖酸各处理以5%泥炭处理 $>$

表1 不同改良剂处理下复垦土壤平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）
Table 1 The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of reclaimed soil under different amendment treatments

处理 Treatment	MWD/mm		GMD/mm	
	6个月 6 Month	1年 1 Year	6个月 6 Month	1年 1 Year
空白 CK	1.37 ± 0.02d	1.27 ± 0.03c	1.07 ± 0.01f	0.98 ± 0.03c
1%泥炭 1% Peat	1.41 ± 0.01c	1.32 ± 0.01b	1.15 ± 0.02e	1.04 ± 0.01ab
3%泥炭 3% Peat	1.40 ± 0.03cd	1.32 ± 0.01b	1.15 ± 0.01e	1.02 ± 0.01b
5%泥炭 5% Peat	1.43 ± 0.01bc	1.39 ± 0.01a	1.21 ± 0.01c	1.06 ± 0.01a
1%腐殖酸 1% Humic acid	1.43 ± 0.02bc	1.21 ± 0.01d	1.18 ± 0.01d	0.93 ± 0.01d
3%腐殖酸 3% Humic acid	1.47 ± 0.03b	1.23 ± 0.01d	1.23 ± 0.01b	0.92 ± 0.01d
5%腐殖酸 5% Humic acid	1.52 ± 0.05a	0.91 ± 0.01e	1.31 ± 0.02a	0.62 ± 0.01e

数据均以平均值±标准差表示；同列小写字母表示同一时间下不同处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）。
The data are expressed as average value ± standard deviation. The lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments at the same time ($P < 0.05$).

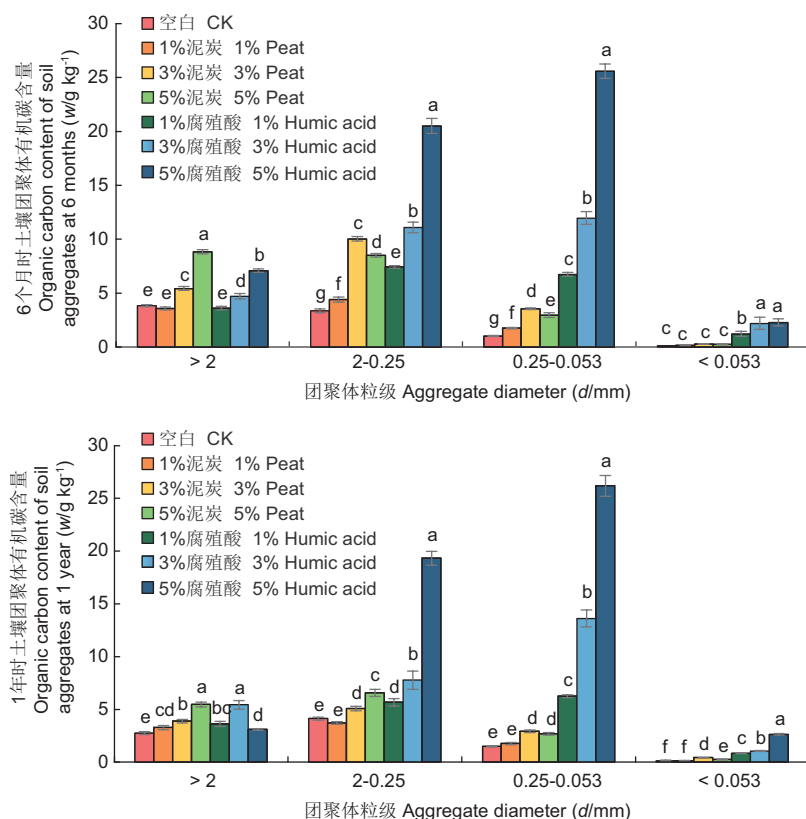


图3 不同改良剂处理下复垦土壤团聚体有机碳含量. 图中小写字母不同表示同一粒径下不同处理间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 3 The organic carbon contents of aggregates in reclaimed soil under different amendment treatments. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments of the same diameter ($P < 0.05$).

2 mm团聚体有机碳含量最高,为5.46 g/kg,较空白对照增加了约0.98倍;对于2-0.25 mm、0.25-0.053 mm和< 0.053 mm团聚体,均以5%腐殖酸处理有机碳含量最高,分别为19.32 g/kg、26.18 g/kg、2.63 g/kg,与空白对照相比分别增加了3.68倍、16.57倍、19.23倍。

2.3 改良剂对复垦土壤红外光谱特征的影响

施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤红外光谱特征图如图4所示. 参照文献[23-25]对所测红外光谱的谱峰进行归属,结果表明与空白对照相比,施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤红外光谱的吸收峰发生变化的主要有3 440-3 445 cm^{-1} (碳水化合物中的—OH形成的氢键的伸缩振动)、1 635 cm^{-1} (含氧官能团吸收振动)、1 425-1 440 cm^{-1} (硅酸盐矿物— CO_3^{2-} 伸缩振动)、1 030 cm^{-1} (碳水化合物或多糖结构中C—O伸缩振动)、777 cm^{-1} (取代芳香类的C—H段)。

由图4可知,施用改良剂6个月及1年时,空白对照及泥炭和腐殖酸各处理土壤均以1 030 cm^{-1} 处的吸收峰吸收强度最大,但泥炭和腐殖酸各处理土壤在1 030 cm^{-1} 处的吸收峰吸收强度高于空白对照,表明土壤中碳水化合物或多糖最多,并且施用泥炭和腐殖酸能够增加土壤中的碳水化合物或多糖的含量. 与空白对照相比,施用改良剂6个月及1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤特征吸收峰吸收强度均增加,但增加幅度不同. 与空白对照相比,施用改良剂6个月时,泥炭和腐殖酸各处理土壤在3 445 cm^{-1} 、1 636 cm^{-1} 、1 437 cm^{-1} 和777 cm^{-1} 波长处的吸收峰吸收强度明显增加,且泥炭和腐殖酸施用比例越高吸收峰吸收强度增量越大,而在1 030 cm^{-1} 波长处的吸收峰变化不明显,说明施用泥炭和腐殖酸能够增加土壤中的碳水

化合物、多糖、含氧官能团、硅酸盐矿物及取代芳香类物质中官能团的含量,且泥炭和腐殖酸施用比例越高这4种物质中官能团的增量越大. 同时还可发现,改良剂施用比例相同时施用泥炭的土壤在3 445 cm^{-1} 、1 636 cm^{-1} 、1 437 cm^{-1} 和777 cm^{-1} 波长处的吸收峰吸收强度均高于腐殖酸. 与对照相比,施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤在3 445 cm^{-1} 、1 636 cm^{-1} 、1 437 cm^{-1} 、1 030 cm^{-1} 和777 cm^{-1} 波长处的吸收峰吸收强度均明显增加,且泥炭和腐殖酸施用比例越高吸收峰吸收强度增量越大,说明施用泥炭和腐殖酸1年时土壤中的碳水化合物、多糖、含氧官能团、硅酸盐矿物及取代芳香类物质中的官能团均增加,且泥炭和腐殖酸施用比例越高这4种物质中官能团的增量越大. 与6个月时相比,施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤在4 000-500 cm^{-1} 波段的吸收强度整体增强。

3 讨论

3.1 改良剂对复垦土壤机械稳定性团聚体分布及稳定性的影响

施用改良剂6个月时的结果表明,施用泥炭和腐殖酸均能够促进大团聚体(> 0.25 mm)的形成,该结果与Brodowskis等的研究结果[26]一致,这可能是因为大团聚体的形成主要取决于有机胶结物质和土壤黏粒的相互作用[27],泥炭和腐殖酸具有较大的分子量和链状结构[22],作为外源有机物加入土壤后起到了胶结土粒的作用,同时,Barreto等研究表明, Ca^{2+} 能够通过键桥作用黏结土壤矿物质颗粒和有机碳,从而形成稳定性高的土壤团聚体[28],而本试验基地的土壤为石灰性褐土,

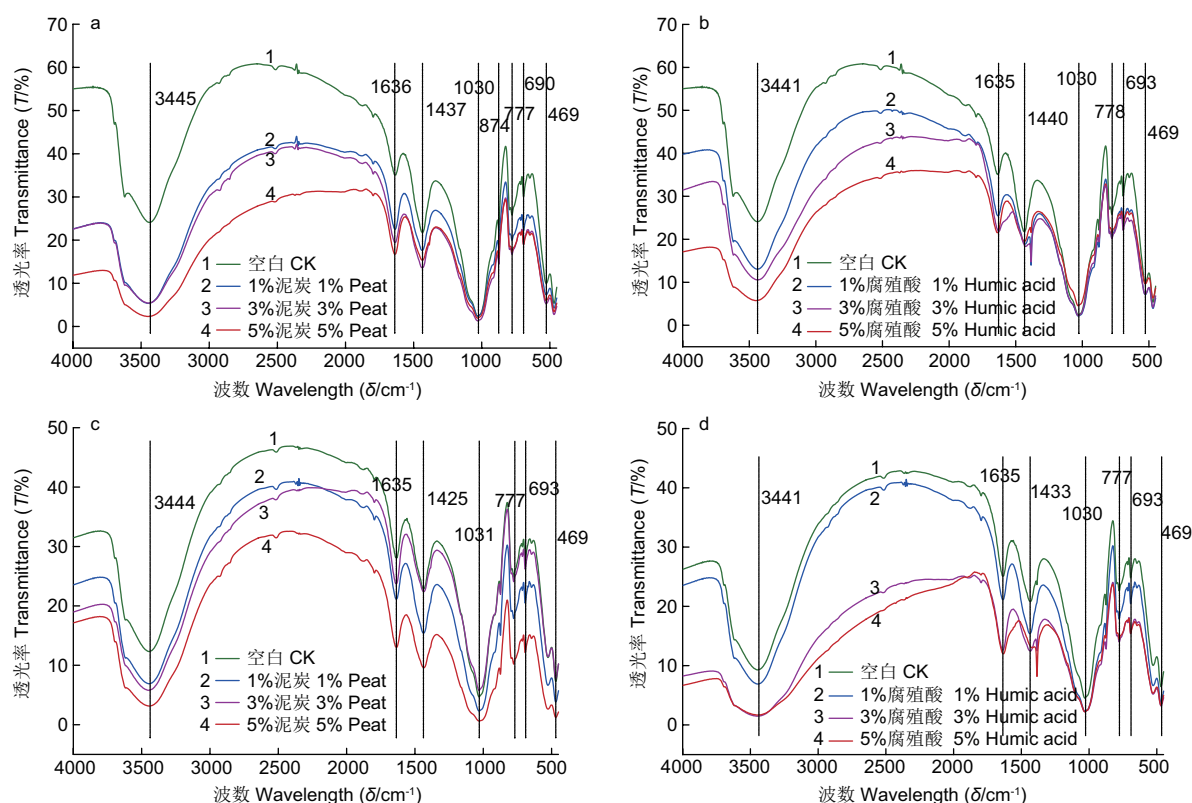


图4 不同改良剂处理下复垦土壤红外光谱特征。图a、b、c、d分别为施用泥炭6个月、施用腐殖酸6个月、施用泥炭1年和施用腐殖酸1年时土壤的红外光谱特征图。

Fig. 4 The infrared spectrum characteristics of reclaimed soil under different amendment treatments. Fig. a, b, c, and d are soil infrared spectrum characteristics under treatments of peat applied for 6 month, humic acid applied for 6 month, peat applied for 1 year, and humic acid applied for 1 year, respectively.

Ca^{2+} 含量丰富,有利于稳定性团聚体的形成。同时还发现施用泥炭6个月时各处理土壤 $< 2 \text{ mm}$ 团聚体含量均高于腐殖酸处理。而施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤大团聚体($> 0.25 \text{ mm}$)含量降低,微团聚体($< 0.25 \text{ mm}$)含量增加,尤其是 $0.25\text{-}0.053 \text{ mm}$ 粒级的团聚体,舒灏等的研究结果^[29]也表明随着时间的推移大团聚体开始破碎,微团聚体含量增加,这可能与土壤中多糖物质 C—O 官能团的增加有关,多糖分子为线性结构,带有较多的 —OH 等基团,能够黏结土粒形成团聚体^[30],由红外光谱特征图可知施用改良剂1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤多糖类物质 C—O 含量增加,但是可能由于本研究试验时间较短,施用改良剂1年时形成的团聚体为微团聚体,尚未团聚为大团聚体,因此表现为微团聚体占比增加,大团聚体的占比相对减少。

MWD和GMD常用来指示土壤团聚体状况,MWD和GMD值越大表示团聚体团聚度越高,土壤稳定性越强^[31]。本研究结果表明,施用泥炭后各处理土壤MWD和GMD值均高于空白对照,且施用比例越高其值越大,即施用泥炭有利于增加复垦土壤团聚体稳定性,而施用腐殖酸6个月时MWD和GMD值也均高于空白对照,这与尚应妮等的研究结果^[22]一致,但1年时MWD和GMD值则均低于空白对照,即施用腐殖酸6个月时有利于增加复垦土壤团聚体稳定性,但施用腐殖酸1年则会降低土壤稳定性,可能是因为施用改良剂刺激了土壤微生物的生长和繁殖,土壤中的有效养分被大量消耗,土壤有机质被微生物分解和利用,土壤团聚体稳定性降低^[32]。

3.2 改良剂对复垦土壤及各粒级团聚体有机碳的影响

施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤总

有机碳显著高于空白对照,表明施用泥炭和腐殖酸能够显著增加土壤有机碳含量,且腐殖酸各处理土壤有机碳含量高于泥炭各处理,该结果与Schmidt等的研究结果^[33]一致,原因可能是泥炭和腐殖酸本身含有大量有机碳,施入土壤后可增加土壤总有机碳,而腐殖酸各处理土壤有机碳含量高于泥炭是因为本试验采用的腐殖酸中的有机质含量高于泥炭。

施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤各粒级团聚体有机碳含量均增加,其中施用泥炭后 $> 0.25 \text{ mm}$ 大团聚体有机碳增量最大,而施用腐殖酸后 $0.25\text{-}0.053 \text{ mm}$ 团聚体有机碳增量最大,表明施用泥炭和腐殖酸能够提高土壤各粒级团聚体有机碳含量,原因一方面泥炭和腐殖酸作为有机碳源能够直接补充团聚体有机碳,另一方面有机碳能够被团聚体包裹或以颗粒形式存在于孔隙中从而减少有机碳的分解,泥炭和腐殖酸能够促进团聚体形成,降低有机碳的分解量从而增加有机碳含量。施用泥炭和腐殖酸后有机碳增量最大的团聚体分别是 $> 0.25 \text{ mm}$ 大团聚体和 $0.25\text{-}0.053 \text{ mm}$ 微团聚体,这可能与泥炭和腐殖酸2种改良剂自身的粒径及分解时间有关,泥炭粗细不均匀,总体粒径大于 0.25 mm ,而腐殖酸呈粉末状,粒径小于 0.25 mm ,大部分颗粒直径在 $0.25\text{-}0.053 \text{ mm}$ 之间,各粒级团聚体有机碳中可能还包含泥炭和腐殖酸中未与团聚体结合的有机碳。

3.3 改良剂对复垦土壤红外光谱特征的影响

施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤红外光谱谱形相似,表明施用泥炭和腐殖酸的土壤官能团种类与空白对照的基本一致,但是不同种类改良剂及不同施用比例处理的土壤特征吸收峰强度具有明显差异,说明改良剂种类

及施用比例对土壤官能团数量有一定的影响。本研究结果表明,施用改良剂6个月和1年时,泥炭和腐殖酸各处理土壤中官能团含量变化最大的是碳水化合物或多糖,即施用泥炭和腐殖酸6个月和1年能够大量增加土壤中的碳水化合物或多糖,此外,还能增加土壤中的含氧官能团及取代芳香类物质。其中,多糖带有较多的—OH等基团,能够促进团聚体形成^[30]。

4 结论

施用改良剂6个月时,泥炭和腐殖酸均能增加矿区复垦土壤中大团聚的含量、团聚体稳定性及总有机碳和各粒级团聚体有机碳含量,有利于改善土壤结构,提高土壤肥力。但施用

改良剂1年时泥炭和腐殖酸各处理土壤大团聚体含量及有机碳含量会减少,微团聚体尤其是0.25-0.053 mm团聚体的含量会增加,团聚体稳定性也会降低,施用改良剂1年时腐殖酸各处理土壤团聚体稳定性甚至低于不施改良剂的土壤。施用泥炭和腐殖酸6个月和1年能够增加土壤中的碳水化合物、含氧官能团、硅酸盐矿物、多糖及取代芳香类物质中官能团的含量,有利于改善土壤结构。由于本研究试验进行时间较短,泥炭和腐殖酸对复垦土壤团聚体及有机碳的后续影响尚不明确,下一步的研究重点是研究泥炭和腐殖酸在复垦土壤中的后效,从而指导矿区复垦土壤合理利用改良剂,在改善土壤结构、提升土壤肥力的同时减少资源浪费。

参考文献 [References]

- Mikha MM, Rice CW. Tillage and manure effect on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, **68** (3): 809-816
- Xie J, Peng B, Wang R, Batbayar J, Hoogmoed M, Yang Y, Zhang S, Yang X, Sun B. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthrosol [J]. *Eur J Soil Sci*, 2018, **69**: 555-567
- Assi AT, Blake J, Mohtar RH, Braudeau E. Soil aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity [J]. *Irrig Sci*, 2019, **37**: 511-522
- Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *J Soil Sci*, 1982, **33** (2): 141-163
- Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, **64**: 1042-1049
- 李博, 王金满, 王洪丹, 白中科. 煤矿区土壤有机碳含量测算与影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2016, **48** (3): 434-441 [Li B, Wang JM, Wang HD, Bai ZK. Progress on measurement and factors of soil organic carbon in mineral area [J]. *Soils*, 2016, **48** (3): 434-441]
- Eynard A, Schumacher TE, Lindstrom MJ, Malo DD. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts [J]. *Soil Till Res*, 2005, **81**: 253-263
- 胡振琪, 肖武. 矿山土地复垦的新理念与新技术: 边采边复[J]. *煤炭科学技术*, 2013, **41** (9): 178-181 [Hu ZQ, Xiao W. New idea and new technology of mine land reclamation: concurrent mining and reclamation [J]. *Coal Sci Technol*, 2013, **41** (9): 178-181]
- 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 郭彦涵, 洪坚平, 张杰, 李云霞, 李廷亮. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2020, **34** (3): 274-281+290 [Xie JY, Cao HB, Meng HS, Guo YH, Hong JP, Zhang J, Li YX, Li TL. Effects of different fertilization regimes and fertilization aggregates on size distribution and stability of soil aggregates [J]. *J Soil Water Conserv*, 2020, **34** (3): 274-281+290]
- 张云龙, 鄧春花, 刘靓, 靳东升, 卢晋晶, 李建华. 矿区复垦土壤碳组分对外源碳输入的响应特征[J]. *中国生态农业学报*, 2020, **28** (8): 1219-1229 [Zhang YL, Gao CH, Liu L, Jin DS, Lu JJ, Li JH. Response of soil organic carbon fractions to exogenous carbon input in mine reclamation [J]. *Chin J Eco-agric*, 2020, **28** (8): 1219-1229]
- 王永敏, 李俊颖, 王定勇. PAM对潮土水稳性团聚体的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, **26** (6): 297-299 [Wang YM, Li JY, Wang DY. Effect of PAM on soil water stable aggregates in alluvial soil [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26** (6): 297-299]
- Sun F, Lu S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2014, **177** (1): 26-33
- Tahir S, Marschner P. Clay addition to sandy soil influence of clay type and size on nutrient availability in sandy soils amended with residues differing in C/N ratio [J]. *Pedosphere*, 2017, **27** (2): 293-305
- 马征, 张柏松, 徐长英, 董晓霞, 边文范, 郑福丽. 改良剂对粘质潮土团聚体特征及分形维数的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30** (5): 337-341 [Ma Z, Zhang BS, Xu CY, Dong XX, Bian WF, Zheng FL. Effects of soil amendments on characteristics and fractal dimension of clay soil aggregates [J]. *J Soil Water Conserv*, 2016, **30** (5): 337-341]
- 马云艳, 赵红艳, 谢绿武, 王开莉, 严啸, 李鸿凯. 泥炭和腐泥对风沙土理化性质和白菜生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, **19** (2): 172-176 [Ma YY, Zhao HY, Xie LW, Wang KL, Yan X, Li HK. Effects of peat and sapropel on the physicochemical properties of Aeolian sandy soil and the growth of Chinese cabbage [J]. *Acta Agric Boroccid*, 2010, **19** (2): 172-176]
- 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 韩燕来, 唐政, 李忠芳, 谭金芳, 张水清. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, **48** (4): 705-712 [Hou XN, Li H, Zhu LB, Han YL, Tang Z, Li ZF, Zhang SQ. Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution [J]. *Sci Agric Sin*, 2015, **48** (4): 705-712]
- 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978: 75-76 [Institute of Soil Science, Chinese academy of sciences. Physical and Chemical Analysis of Soil [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 75-76]
- 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34 [Bao SD. Soil Agricultural Chemistrical Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1999: 30-34]
- 常汉达, 王晶, 张凤华. 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 [Chang HD, Wang J, Zhang FH. Change in soil organic matter structure before and after the reclamation for abandoned farmland based on Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Chin J Soil Sci*, 2019, **50** (2): 333-340]
- 20 李雄飞. 五台山土壤水稳性团聚体养分及有机碳分布特征[D]. 太谷: 山西农业大学, 2018 [Li XF. Distribution characteristics of nutrients and organic carbon in soil water-stable aggregates at Wutai mountain [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2018]
- 21 李丛蕾, 周际海, 袁颖红, 张文锋, 黄静, 黄欠如, 成艳红. 改良剂对旱地红壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29** (3): 112-116 [Zhou CL, Zhou JH, Yuan YH, Zhang WF, Huang J, Huang QR, Cheng YH. Effect of soil amendments on distribution of water stable aggregates and organic carbon in upland red soil [J]. *J Soil Water Conserv*, 2015, **29** (3): 112-116]
- 22 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 霍娜, 常闻谦. 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 [Shang YN, Hu FN, Zhao SW, Huo N, Chang WQ. Effects of cementing materials on the formation of Loessial soil aggregates [J]. *J Soil Water Conserv*, 2017, **31** (2): 204-208, 239]
- 23 张玉兰, 孙彩霞, 陈振华, 李东坡, 刘兴斌, 陈利军, 武志杰, 杜剑雄. 红外光谱法测定肥料施用26年土壤的腐殖质组分特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30** (5): 1210-1213 [Zhang YL, Sun CX, Chen ZH, Li DP, Liu XB, Chen LJ, Wu ZJ, Du JX. Determination of humus components in soil after 26 years of fertilizer application by infrared spectroscopy [J]. *Spectr Spectr Analys*, 2010, **30** (5): 1210-1213]
- 24 梁昌鸿, 梁伟强, 李伍. 基于傅里叶红外光谱不同煤阶煤的官能团研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, **48** (S1): 182-186 [Liang CH, Liang WQ, Li W. Functional groups of different coal ranks based on infrared spectroscopy [J]. *Coal Sci Technol*, 2020, **48** (S1): 182-186]
- 25 吴景贵, 席时权, 姜岩. 红外光谱在土壤有机质研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 1998, **18** (1): 52-57 [Wu JG, Xi SQ, Jiang Y. Infrared spectroscopy application in soil organic matter [J]. *Spectr Spectr Analys*, 1998, **18** (1): 52-57]
- 26 Brodowski S, John B, Flessa H, Flessa H, Amelung W. Aggregate-occluded black carbon in soil [J]. *Eur J Soil Sci*, 2006, **57**: 539-546
- 27 Martens DA. Management and crop residue influence soil aggregate stability [J]. *J Envir Qual*, 2000, **29**: 723-727
- 28 Barreto RC, Madari BE, Maddock JEL, Machado PLOA, Torres E, Franchini J, Costa AR. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a rhodic ferralsol in southern Brazil [J]. *Agric Ecosyst Envir*, 2009, **132** (3): 243-251.
- 29 舒灏, 石国荣, 谭军. 外源有机碳对植烟土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. 天津农业科学, 2017, **23** (6): 20-23+26 [Shu H, Shi GR, Tan J. The effects of exogenous organic carbon on the stability of water stable aggregates in tobacco growing soil [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2017, **23** (6): 20-23+26]
- 30 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, **48** (6): 1523-1529 [Xu XR, Wang JK. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon [J]. *Chin J Soil Sci*, 2017, **48** (6): 1523-1529]
- 31 Zheng ZC, Li TX, He SQ. Characteristics and stability of soil aggregates in tea plantation [J]. *Advanc Mat Res*, 2011 (343-344): 968-974
- 32 张迪, 姜佰文, 梁世鹏, 吕思琪, 徐欣彤. 草甸黑土团聚体稳定性对耕作与炭基肥施用的响应[J]. 农业工程学报, 2019, **35** (14): 125-132 [Zhang D, Jiang BW, Liang SP, Lü SQ, Xu XT. Responsive of aggregate stability of meadow black soil to different tillage practices and carbon-based fertilizers [J]. *Trans Chin Soc Agric Engin*, 2019, **35** (14): 125-132]
- 33 Schmidt MW, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications and current challenges [J]. *Glob Biogeochem Cycle*, 2000, **14** (3): 777-793