

施用蚯粪对滨海盐碱地土壤有机碳库及其稳定性的影响^①

卢 云¹, 秦天扬¹, 陈玮峰¹, 蔡 健¹, 许益伟¹, 李云龙¹, 左文刚¹, 陈硕桐¹, 单玉华^{1, 2},
柏彦超^{1, 2*}

(1 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225127; 2 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210018)

摘要: 为探讨施用蚯粪后滨海盐碱地土壤有机碳库及其稳定性变化, 选择江苏省南通市如东县栟茶镇方凌垦区的滨海盐碱地, 于2019年10月将蚯粪以0、25、50、100、200 t/hm²施用量一次性施于田间, 2022年10月采集耕层(0~20 cm)土壤样品, 测定其可溶性有机碳、钙结合有机碳、易氧化有机碳、颗粒态及矿物结合态有机碳的含量, 计算碳库管理指数, 并采用固体核磁共振波谱分析土壤有机碳的官能团结构。结果表明: 与不施用蚯粪相比, 施用超过50 t/hm²的蚯粪后, 土壤有机碳库变化显著, 土壤有机碳含量增加了35%~97%, 可溶性有机碳含量增加了27%~104%, 钙结合有机碳含量增加了19%~26%, 易氧化有机碳含量增加了6%~94%, 颗粒态和矿物结合态有机碳分别增加了14%~124%和37%~85%, 土壤碳库管理指数提高了6%~92%; 土壤中脂肪族碳与芳香族碳的比值减小, 烷基碳/O-烷基碳以及疏水碳/亲水碳的比值增大, 表明土壤有机碳的结构稳定性有所提升。综上, 施用蚯粪对提高滨海盐碱地土壤有机碳库及其稳定性具有显著作用, 且在50和100 t/hm²施用量下效果最佳。

关键词: 蚯粪; 滨海盐碱地; 土壤有机碳库; 碳库管理指数; 固体核磁共振

中图分类号: S156.4+2 文献标志码: A

Effects of Vermicompost Application on Organic Carbon Pool and Its Stability in Coastal Saline-alkaline Soil

LU Yun¹, QIN Tianyang¹, CHEN Weifeng¹, CAI Jian¹, XU Yiwei¹, LI Yunlong¹, ZUO Wengang¹, CHEN Shuotong¹, SHAN Yuhua^{1,2},
BAI Yanchao^{1,2*}

(1 College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China; 2 Jiangsu Organic Solid Waste Resource Collaborative Innovation Center, Nanjing 210018, China)

Abstract: To investigate the effects of vermicompost application on organic carbon pool and its stability in coastal saline-alkaline soil, a field experiment was conducted in such soil under barley-maize rotation in Fangling Reclamation Area, Bencha Town of Rudong County, Jiangsu Province, and the vermicompost was one-time applied to the field with the rates of 0, 25, 50, 100, 200 t/hm² in October 2019, soil samples were collected in October 2022 from the topsoil layer (0~20 cm) to determine the contents of dissolved organic carbon, calcium associated organic carbon, labile organic carbon, particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon. The carbon pool management index was calculated, and the functional group structure of soil organic carbon was analyzed by solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy. The results showed that compared with no application of vermicompost, soil organic carbon pool changed significantly after application of more than 50 t/hm² vermicompost, soil organic carbon content increased by 35%~97%, dissolved organic carbon content increased by 27%~104%, calcium associated organic carbon content increased by 19%~26%, and labile organic carbon content increased by 6%~94%, particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon increased by 14%~124% and 37%~85% respectively, and soil carbon pool management index increased by 6%~92%; The ratio of Aliphatic C to Aromatic C decreased, and the values of Alkyl C/O-alkyl C and Hydrophobic C/Hydrophilic C all increased, indicating the improvement in the structural stability of soil organic carbon. In conclusion, the application of vermicompost has a significant effect on the improvement of soil organic carbon pool and its stability in coastal saline-alkaline soil, and the effect is the best under the application amount of 50 and 100 t/hm².

^①基金项目: 国家自然科学基金项目(41977089)和江苏现代农业(水稻、蔬菜)产业技术体系项目(JATS[2023]318、JATS[2023]317)资助。

* 通讯作者(ycbai@yzu.edu.cn)

作者简介: 卢云(2000—), 女, 贵州纳雍人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地土壤改良研究。E-mail: mx120220709@stu.yzu.edu.cn

Key words: Vermicompost; Coastal saline-alkaline soil; Soil organic carbon pool; Carbon pool management index; Solid-state NMR

滨海盐碱地是我国最具开发价值的耕地储备资源, 拥有巨大的固碳潜力, 仅在江苏地区沿海滩涂总面积就达 50 万 hm², 约占全国沿海滩涂面积的 1/4^[1], 且仍以每年近 1.3 万 hm² 的速率向海自然淤长。然而高 pH、高盐分和肥力低下使得大量农作物难以生长, 制约了滨海盐碱地的开发与利用^[2]。因此, 高效培肥是改良利用滨海盐碱地的关键举措。

土壤有机碳是陆地生态系统中最大的碳库^[3], 是衡量土壤质量的重要指标, 提升土壤有机碳库储量及稳定性是改善土壤结构、提高土壤肥力和维持生态系统可持续发展的有效手段^[4]。颗粒结合态有机质(Particulate organic matter, POM) 主要由植物细根片断和其他有机残余组成^[5], 是土壤有机碳变化的敏感指标之一^[6]。矿物结合态有机质(Mineral-associated organic matter, MAOM) 是有机物的最终分解产物与土壤黏粒结合的部分, 周转期较慢且稳定, 其含量的多少可间接表征土壤有机碳的抗氧化程度与难利用程度。土壤易氧化有机碳(Labile organic carbon, LOC) 是土壤中移动快、最不稳定、易氧化、易矿化、生物活性最高的有机碳^[7], 可以更灵敏地反映土壤微小的变化, 对土壤碳库平衡、生化肥力的保持至关重要。土壤惰性有机碳(Recalcitrant organic carbon, ROC) 在土壤中相对稳定性较高, 不容易被微生物分解和植物利用, 它对农田管理措施反应不敏感, 但也是反映土壤肥力高低的重要指标^[8], 其含量越高越有利于土壤有机碳的积累。土壤碳库管理指数结合了土壤碳库指标和土壤碳库活度指标, 可综合反映外界管理措施对土壤有机碳总量的影响及土壤有机碳组分的变化情况^[9]。研究表明土壤有机碳含量及稳定性在一定程度上受土壤有机碳化学结构的影响, 植物残体中的碳水化合物和蛋白质类物质会优先被降解, 而芳香烃碳等结构复杂的化合物则在土壤中富集, 经过微生物周转形成稳定的土壤有机碳^[10]。然而, 现有的研究对滨海盐碱地有机碳组分及碳库变化、有机碳的化学结构及其稳定性尚不明确, 因此开展滨海盐碱地有机碳库的研究对完善不同生态系统碳循环特征具有重要意义。

蚯蚓粪结构松散、孔隙度高、团聚性能好, 不仅含有大量有机物、腐殖质, 还含有各种营养元素和植物激素, 以及活性酶类等^[11], 对改善土壤结构、增强微生物活性、缓解土壤连作障碍、促进植物生

长发育具有积极作用^[12]。目前, 针对蚯蚓粪肥的研究多集中在对作物产量和品质的影响上, 对于滨海盐碱地的改良以及滨海盐碱地有机碳库及其稳定性研究鲜有报道。本文通过探究不同蚯粪施用量对滨海盐碱地土壤有机碳、有机碳组分含量、有机碳库及其稳定性的影响, 为滨海盐碱地固碳培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于江苏省南通市如东县栟茶镇方凌垦区($120^{\circ}56'03''E$, $32^{\circ}36'30''N$)进行。试验区距黄海海岸约 5.5 km, 属于亚热带季风气候, 年平均气温为 15.1 ℃, 平均降水量为 1 074.6 mm。试验区围垦于 2010 年, 为淤涨型的淤泥质海岸, 该地区土壤类型为盐碱土。供试的蚯蚓粪来自江苏省泰州市春光生态农业发展有限公司, 蚯蚓粪符合国家农用标准(GB/T 4284—2018)^[13]。田间试验前表层土壤和供试蚯蚓粪的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和蚯蚓粪的基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of coastal saline-alkaline soil and vermicompost

理化性质	原始盐碱土	蚯蚓粪
pH	8.95	6.34
EC (mS/cm)	4.34	8.92
SOC (g/kg)	2.32	240.68
TN (g/kg)	0.22	24.38
TP (g/kg)	0.60	15.87
AP (mg/kg)	13.26	869

1.2 试验设计与田间管理

本试验设置 5 个蚯蚓粪施用量处理: 0、25、50、100、200 t/hm², 分别用 VC0、VC25、VC50、VC100、VC200 表示。每个处理设置 3 个重复, 小区面积为 16 m²(4.0 m × 4.0 m), 采用完全随机区组设计。2019 年 10 月, 将蚯蚓粪一次性施于小区表层, 并通过旋耕将其与 0~20 cm 深度的表土层充分混匀。试验区采用大麦和玉米轮作, 作物播种后人工控制田间杂草, 在整个作物生长季节不施用其他肥料, 也不提供额外淡水灌溉。

1.3 土壤样品的采集与测定

1.3.1 样品采集与基本理化性质测定 于 2022 年

10月作物收获后采用五点取样法采集0~20 cm耕层土壤样品，并进行风干处理，研磨、过筛(100目、20目、10目)，保存以供进一步分析。参照常规土壤农化分析方法^[14]测定土壤理化指标：使用电导率计和pH计在水土质量比为5:1的悬浮液中检测土壤电导率(EC)和pH；采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化法测定土壤有机碳(SOC)；土壤全氮(TN)、全磷(TP)和有效磷(AP)分别采用半微量凯氏法、硫酸-高氯酸消解法和碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定；采用TOC仪测定土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)含量(水土质量比5:1)。

1.3.2 土壤各有机碳库组分的测定方法 土壤颗粒态和矿物结合态组分的分离：称取10.00 g风干且过2 mm筛的土壤样品于50 mL离心管中，加入0.005 g/mL的六偏磷酸钠溶液30~35 mL，180 r/min振荡18 h，将土壤溶液过53 μm筛，留在筛上的部分收集冲洗烘干称重，即颗粒态有机物(POM)，过筛溶液4 000 r/min离心15 min，倾去上清液，剩余部分烘干称重，即矿物结合态有机物(MAOM)。参照常规土壤农化分析方法^[14]分别测定各组分中C、N、P含量。

土壤易氧化有机碳(LOC)的测定：土壤样品经研磨过0.5 mm筛，根据全土SOC含量，计算含有15 mg C的土壤样品量作为待测样品的称样重，置于50 mL离心管中，以不加土样作为空白。向离心管中加入25 mL浓度为333 mmol/L的高锰酸钾溶液，室温下振荡1 h，2 000 r/min离心5 min，将上清液用去离子水以1:250倍稀释，吸取1 mL上清液转移至250 mL容量瓶中，定容。同时配制不同浓度梯度的高锰酸钾的标准溶液，稀释样品和标准溶液用分光光度计在565 nm处测定吸光度。建立高锰酸钾浓度和吸光度线性直线方程，将待测样品的吸光度代入方程得到氧化有机碳后剩余高锰酸钾的浓度，同样得到空白的高锰酸钾浓度，前后二者之差即为氧化活性有机碳后高锰酸钾溶液的浓度变化值，根据假设，氧化过程中高锰酸钾浓度变化1 mmol/L消耗0.75 mmol或9 mg C，计算出LOC含量。

钙结合有机碳(Calcium associated organic carbon, Ca-OC)的测定：称取过0.25 mm筛的土壤样品0.25 g置于50 mL的离心管中，加入0.5 mol/L Na₂SO₄溶液20 mL。180 r/min振荡2 h，2 000 r/min离心10 min，滤膜过滤，用TOC仪测定上清液中的有机碳浓度，计算得到Ca-OC含量。

1.3.3 固体核磁共振波谱分析 土壤样品的前处

理：称取过0.149 mm筛的土壤样品2.00 g置于50 mL的离心管中，加入10%的氢氟酸10 mL，150 r/min振荡24 h，4 500 r/min离心15 min，上述氢氟酸洗涤过程重复10次。为去除氢氟酸残留物，在氢氟酸洗涤后的土壤样品中加入10 mL去离子水振荡4 h，4 500 r/min离心20 min，去离子水洗涤过程重复10次，处理后的土壤样品烘干进行固体核磁共振波普分析(600 MHz DSX-300光谱仪，美国安捷伦)。具体测试条件为：将土壤样品包在4 mm锆转子中，并以13 kHz的频率旋转，接触时间为1 ms，循环延迟为1 s，处理光谱采用的零填充因子为2，谱线增宽为75 Hz，并使用MestReNova软件(安捷伦，v.3.7.10)进行集成。四甲基硅烷用于校准化学位移。

根据核磁共振波谱图，将化学位移划分为4个共振区域^[15]：①0~44 ppm化学位移处是烷基碳官能团区，烷基碳是脂肪族化合物的一种，主要来源于脂类、软木质、蜡状质；②44~68 ppm化学位移处为N-烷基碳官能团区，主要来源为木质素；③68~113 ppm化学位移处为O-烷基碳官能团区，主要来源于纤维素、半纤维素、蛋白质以及木质素侧链等碳水化合物；④113~162 ppm化学位移处为芳香族碳，其主要来源是木质素和不饱和烯烃；⑤羰基碳官能团区的化学位移在162~220 ppm处，主要来源于脂肪酸、氨基酸、酰胺和酯类。

1.4 数据处理与分析

碳库管理指数(CMI)使用以下等式计算^[16]：

$$\text{碳库指数}(\text{CPI}) = \frac{\text{TSOC}}{\text{CSOC}} \quad (1)$$

式中：TSOC是各处理的SOC含量，CSOC是未施入蚯蚓粪处理即VC0的SOC含量；

$$\text{碳库活度}(\text{CPA}) = \frac{\text{LOC}}{\text{SOC} - \text{LOC}} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度指数}(\text{CPAI}) = \frac{\text{CPA}}{\text{CA}} \quad (3)$$

式中：CA是未施入蚯蚓粪处理即VC0的碳库活度；

$$\text{碳库管理指数}(\text{CMI}) = \text{CPI} \times \text{CPAI} \times 100 \quad (4)$$

利用SPSS 23.0进行数据统计分析，通过单因素方差分析和最小显著性差异(LSD)法对不同蚯蚓粪施用量处理土壤理化性质的显著性进行检验。采用MestReNova 14.2.1进行固体核磁共振图谱分析，土壤理化特征与土壤碳组分之间的相关关系采用Pearson相关分析方法。采用Canoco 5.0进行土壤有机碳组分和环境因子之间的冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同蚯粪施用量下土壤的理化性质

由表 2 可知, 随着蚯粪施用量的增加, 土壤中 pH 呈先下降后上升趋势, EC 呈先上升后下降趋势, SOC、TN、TP、AP 含量均呈上升趋势。施用蚯粪后, 各处理中 AP 含量较对照增加 79%、173%、198%、280%。在 50、100、200 t/hm² 施用量下, SOC 含量

较对照增加了 35%、38%、97%; TP 含量较对照增加了 53%、61%、137%。在 100、200 t/hm² 施用量下, TN 含量较对照增加了 62%、102%。

2.2 不同施用量下蚯粪对土壤 DOC 和 Ca-OC 的影响

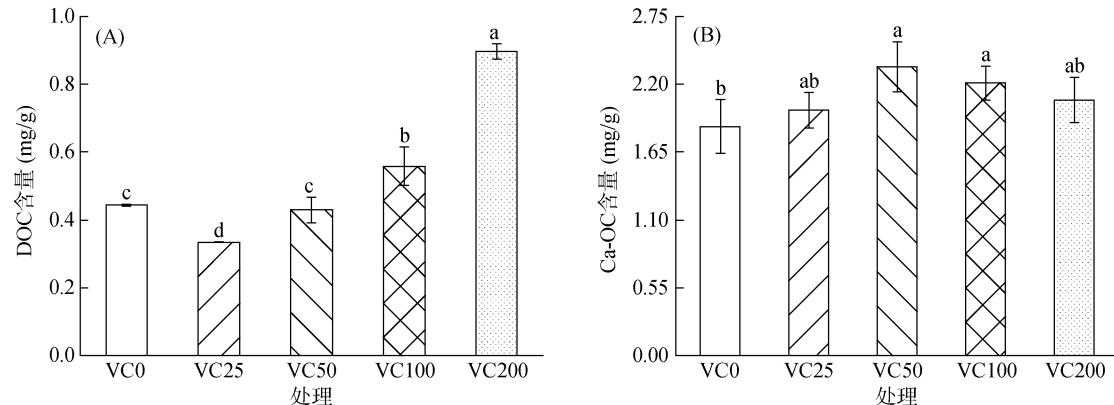
施用蚯粪后, 与对照相比, 土壤中 DOC 含量呈先下降后上升的趋势, 在 100、200 t/hm² 施用量下, 土壤中 DOC 含量较对照增加了 27%、104%(图 1A)。

表 2 不同蚯粪施用量下滨海盐碱地土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physiochemical properties of coastal saline-alkaline soil under different application amounts of vermicompost

处理	pH	EC(mS/cm)	SOC(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	AP(mg/kg)
VC0	8.98 ± 0.34 a	0.388 ± 0.01 c	5.13 ± 0.10 c	0.44 ± 0.08 c	0.81 ± 0.04 c	18.68 ± 1.55d
VC25	8.69 ± 0.43 a	3.350 ± 0.06 a	5.24 ± 0.06 c	0.48 ± 0.00 c	1.03 ± 0.17 bc	33.44 ± 0.37 c
VC50	8.82 ± 0.23 a	1.937 ± 0.04 b	6.95 ± 0.10 b	0.58 ± 0.08 bc	1.24 ± 0.25 b	51.03 ± 8.95 b
VC100	8.93 ± 0.49 a	0.234 ± 0.01 c	7.10 ± 0.41 b	0.71 ± 0.14 b	1.30 ± 0.10 b	55.66 ± 2.58 b
VC200	9.08 ± 0.07 a	0.309 ± 0.02 c	10.09 ± 0.22 a	0.89 ± 0.01 a	1.92 ± 0.24 a	70.97 ± 0.93 a

注: 表中同列数据小写字母不同表示不同蚯粪施用量处理间差异显著($P<0.05$), 下表同。



(图中小写字母不同表示不同蚯粪施用量处理间差异显著($P<0.05$), 下图同)

图 1 不同蚯粪施用量下土壤 DOC(A) 和 Ca-OC(B) 含量

Fig. 1 Soil DOC (A) and Ca-OC (B) contents under different application amounts of vermicompost

随着蚯粪施用量的增加, 土壤中 Ca-OC 含量呈先上升后下降趋势。在 50、100 t/hm² 施用量下, 与对照相比, Ca-OC 含量增加了 26%、19%(图 1B)。

2.3 不同蚯粪施用量下土壤 POM 和 MAOM 的变化

图 2 表明, 施用蚯粪后, 与对照相比, 土壤中 POM 的质量分数呈现先下降后上升的趋势, 各处理土壤中 POM 质量分数较对照下降了 16%、20%、15%、10%。

与对照相比, 土壤中 MAOM 的质量分数呈现先上升后下降的趋势, 各处理土壤中 MAOM 质量分数较对照上升了 61%、73%、55%、37%。

图 3 展示了 POM 和 MAOM 组分中 SOC、TN、TP 含量的变化。随着蚯粪施用量的增加, POM 和 MAOM 组分中 SOC、TN、TP 含量均呈上升趋势。

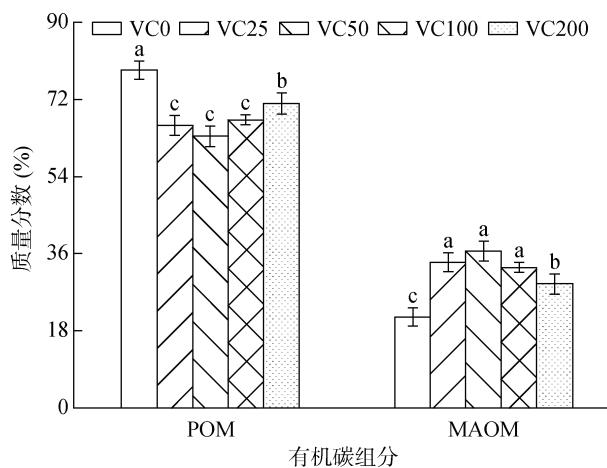


图 2 不同蚯粪施用量下土壤 POM 和 MAOM 的比例

Fig. 2 Proportions of soil POM and MAOM under different application amounts of vermicompost

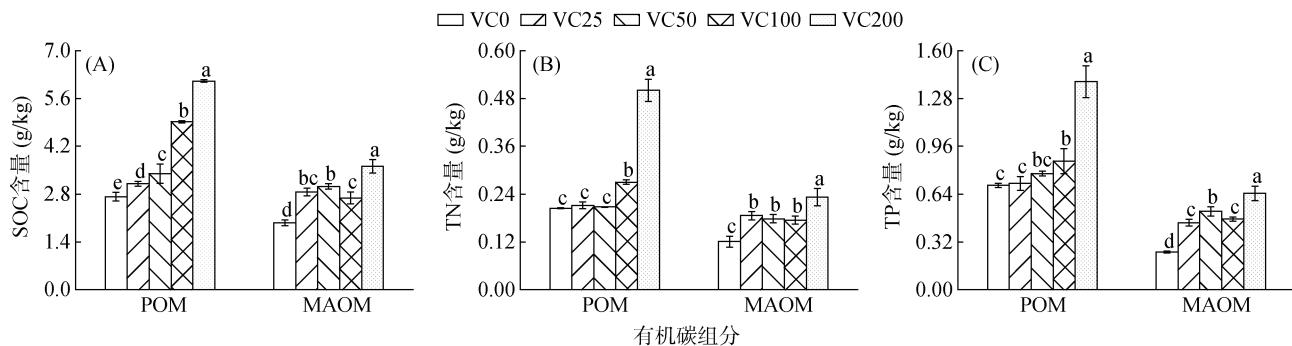


图 3 不同蚯粪施用量下土壤 POM 和 MAOM 组分中 SOC、TN 和 TP 含量
Fig. 3 Contents of SOC, TN and TP in soil POM and MAOM under different amounts of vermicompost

各处理下 POM 和 MAOM 组分中 SOC 含量较对照分别上升了 14%、25%、80%、124% 和 46%、54%、37%、85%(图 3A)。在 100、200 t/hm² 蚯粪施用量下, POM 组分中 TN 含量较对照增加了 32%、145%; TP 含量增加了 23%、99%。各处理下 MAOM 组分中 TN 含量和 TP 含量较对照分别增加了 54%、48%、45%、92% 和 79%、109%、89%、158%(图 3B、3C)。

2.4 不同施用量下蚯粪对土壤有机碳库动态变化的影响

由表 3 可知, 施用蚯粪后, 与对照相比, 土壤中 LOC 和 ROC 含量呈上升趋势。在 50、100、200 t/hm² 施用量下, 土壤中 LOC 含量较对照增加了 6%、9%、94%; 土壤中 ROC 含量较对照增加了 43%、46%、102%。

表 3 不同蚯粪施用量下滨海盐碱地土壤 LOC、ROC 含量和 CPI、CMI 的变化

Table 3 LOC, ROC, CPI and CMI of coastal saline-alkaline soil under different application amounts of vermicompost

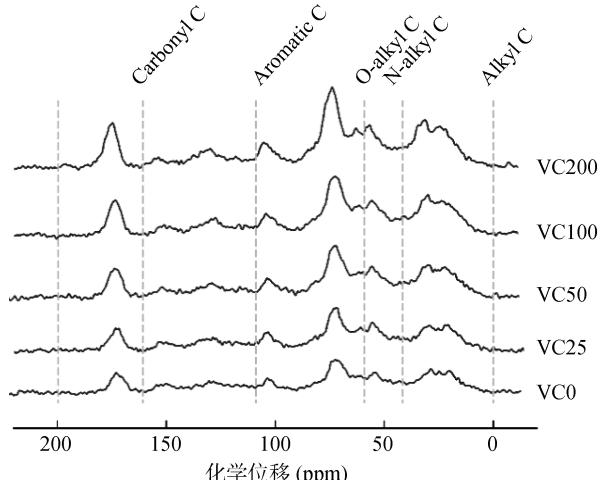
处理	LOC (mg/g)	ROC (mg/g)	CPI	CMI
VC0	0.56 ± 0.01 c	4.44 ± 0.04 c	1.00 ± 0.02 c	98.26 ± 3.02 c
VC25	0.57 ± 0.01 c	4.68 ± 0.07 c	1.05 ± 0.01 c	97.76 ± 2.18 c
VC50	0.60 ± 0.01 b	6.35 ± 0.09 b	1.39 ± 0.02 b	100.65 ± 1.23 bc
VC100	0.62 ± 0.01 b	6.48 ± 0.41 b	1.42 ± 0.08 b	104.32 ± 1.13 b
VC200	1.09 ± 0.02 a	8.99 ± 0.20 a	2.01 ± 0.04 a	189.03 ± 3.37 a

随蚯粪施用量增加, 土壤 CPI 呈上升趋势, 在 50、100、200 t/hm² 蚯粪施用量下, 与对照相比, CPI 增加了 39%、42%、101%。CMI 呈先下降后上升趋势, 在 100、200 t/hm² 施用量下, CMI 较对照上升了 6%、92%。

2.5 不同施用量下蚯粪对土壤有机碳官能团结构的影响

图 4 表明不同蚯粪施用量的土壤有机碳的核磁共振谱图形状基本一致, 但各处理的化学位移峰的强

度明显不同, 说明土壤有机碳的碳骨架相似, 但各种官能团的含量不同。



(烷基碳: 0 ~ 44 ppm; N-烷基碳: 44 ~ 68 ppm; O-烷基碳: 68 ~ 113 ppm; 芳香碳: 113 ~ 162 ppm; 羰基碳: 162 ~ 220 ppm)

图 4 不同蚯粪施用量下土壤 ¹³C 核磁共振谱
Fig. 4 Soil ¹³C NMR spectra under different application amounts of vermicompost

在滨海盐碱地土壤有机碳的 5 种主要官能团中含量最多的是 68 ~ 113 ppm 的 O-烷基碳, 相对含量为 31.27% ~ 36.11%; 其次为 0 ~ 44 ppm 的烷基碳, 其含量比例在 18.12% ~ 36.19%; 排在第三位的是 44 ~ 68 ppm 的 N-烷基碳, 相对含量比例在 10.55% ~ 18.12%; 排在第四位的是 113 ~ 162 ppm 的芳香族碳, 相对含量比例在 8.03% ~ 19.47%; 含量最低的是 162 ~ 220 ppm 的羰基碳, 其相对含量在 7.05% ~ 12.28% (表 4)。

3 讨论

3.1 施用蚯粪对土壤有机碳库的影响

本研究发现, 施用蚯粪显著增加了滨海盐碱地 SOC 的含量, 且随着蚯粪施用量的增加而增加。

表 4 不同蚯蚓粪施用量下滨海盐碱地土壤有机碳官能团相对含量(%)

Table 4 Relative contents of organic carbon functional groups in coastal saline-alkaline soils under different application amounts of vermicompost

处理	烷基碳 (0 ~ 44 ppm)	N-烷基碳 (44 ~ 68 ppm)	O-烷基碳 (68 ~ 113 ppm)	芳香族碳 (113 ~ 162 ppm)	羧基碳 (162 ~ 220 ppm)	烷基碳/ O-烷基碳	脂肪族/ 芳香族碳	疏水碳/ 亲水碳
VC0	26.29	14.82	31.27	8.03	11.61	0.84	7.16	0.80
VC25	25.10	14.34	34.04	19.47	7.05	0.74	3.04	1.08
VC50	18.12	18.12	35.21	16.27	12.28	0.51	3.28	0.72
VC100	27.89	12.84	36.11	13.47	9.68	0.77	4.75	0.90
VC200	36.19	10.55	32.68	11.04	9.54	1.11	6.24	1.12

这与邓晓等^[17]在海南滨海盐渍土中施用蚯蚓粪能显著增加土壤中有机质含量的研究一致。一方面蚯蚓粪本身富含有机质^[18]; 另一方面, 蚯蚓粪具有大的比表面积、适宜的孔隙率和大量的腐植酸, 有较强吸附能力^[19], 所以其吸附性能可以高效富集土壤中的 SOC。此外, 施用蚯蚓粪后明显改善了土壤的理化性质, TN、TP 和 AP 养分含量显著增加(表 2), 从而促进作物生长, 使得作物根系及其分泌物的输入增加^[20], 因此 SOC 含量增加。

大量研究表明施用有机物料能提高土壤 DOC 含量^[21-22]。蚯蚓粪中富含易被微生物降解的有机碳, 施入土壤后会释放出大量的水溶性有机碳^[23], 从而导致 DOC 含量增加。在 25、50 t/hm² 施用量下, 土壤中 DOC 含量下降可能是因为蚯蚓粪中存在着某些微生物可以直接降解利用的 DOC^[24]。

RDA 图中 Ca-OC 与 SOC 呈正相关关系(图 5)。有研究表明 Ca-OC 是土壤有机碳库的重要组成部分, 钙离子对土壤有机质保存具有重要作用^[25]。本研究发现, 施用蚯蚓粪后, Ca-OC 含量增加, 这可能是因为蚯蚓粪的施用改变了土壤的胶结程度, 蚯蚓粪中的有机胶体与土壤中水分散组胶结, 增强了钙离子与土壤的结合, 使得 Ca-OC 含量增加。这与许连周等^[26]长期施用有机肥改良苏打盐碱土能显著增加土壤钙结合复合体含量的研究结论一致。

土壤有机碳库由植物源碳和微生物源碳两部分组成^[27], POC 主要来源于土壤中的植物源碳, MAOC 主要来源于土壤中的微生物源碳^[28]。最近的一项 Meta 分析表明: 外源碳输入可以显著增加 POC 和 MAOC 的含量^[29]。本研究结果与此一致, 施用蚯蚓粪后发现 POC 和 MAOC 含量增加。这可能是因为蚯蚓粪中含有丰富的微生物群落, 这些微生物通过分泌胞外酶分解或转化大分子植物碳底物向土壤源源不断地输送植物源残体^[30], 导致土壤 POC 含量增加; 同时土壤中的微生物产物可驱动土壤植物源可溶性有机质和微生物源小分子有机物与黏土矿物结合, 从

而形成稳定的 MAOC, 微生物的死亡残体以及代谢产物的迭代累积也会促进 MAOC 的增加^[31]。RDA1 轴和 RDA2 轴(图 5)分别解释了有机碳组分 91.32% 和 5.78% 的变化, pH、DOC、LOC、TN、SOC、AP、ROC、TP、Ca-OC 对 POC 和 MAOC 影响显著 ($P < 0.05$), 表明有机碳组分的变化受到土壤环境和土壤养分的影响较大。

3.2 施用蚯粪对土壤碳库稳定性的影响

LOC 是土壤中移动快、不稳定、易于氧化和矿化、具有较高微生物活性的有机碳^[32], 主要来源于凋落物和根系分泌物的输入^[33]。ROC 是 SOC 中比较难降解的组分, 通常认为 SOC 与 LOC 之差就是 ROC^[34]。有研究表明, 有机物料和有机残体的输入能显著提高 LOC 和 ROC 的含量^[35-38]。本研究结果与此一致, 这可能是因为蚯蚓粪的施用增加了土壤中有机碳的投入, 同时还提供了 N、P 等养分的供给, 从而提高了土壤对 LOC 的固存能力, 造成 LOC 积累^[39]。与此同时, 蚯蚓粪中存在大量微生物在进行分解活动, 微生物的分解活动越强, 有机残体难降解部分进入土壤中也越多, 因此 ROC 含量也随之增多。

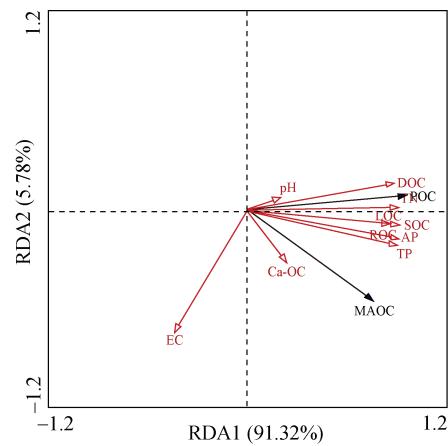
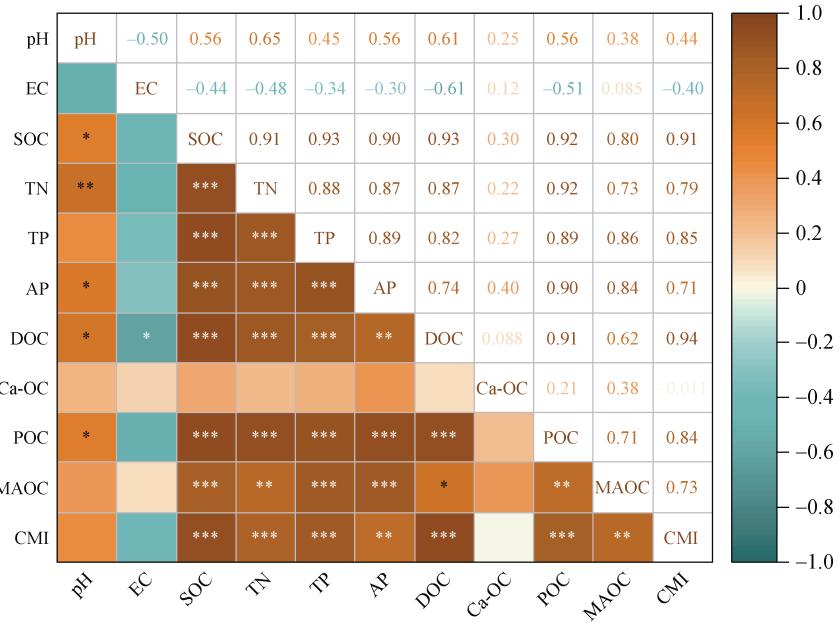


图 5 不同蚯粪施用量下滨海盐碱地土壤有机碳组分与环境因子冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil organic carbon components and environmental factors in coastal saline-alkaline soils under different application amounts of vermicompost

土壤碳库管理指数 CMI 是反映和评估土壤碳素动态变化的重要指标, 可反映土壤碳库和土壤肥力质量的变化^[40]。林晓钦等^[41]研究发现蚯蚓粪的添加使得 CMI 是对照组的 1.95 倍。井大炜等^[42]发现蚯蚓粪与化肥以不同比例配施能显著提高 CMI。本研究施

用蚯蚓粪后显著提高 CMI 的结果与上述研究一致。相关性分析(图 6)表明, CMI 与 AP、MAOC 呈极显著正相关($P<0.01$), 与 SOC、TN、TP、DOC、POC 呈极显著正相关($P<0.001$), 说明 CMI 能较好地反映土壤养分以及土壤有机碳库组分的变化。



(*、**、***分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 显著水平)

图 6 不同蚯粪施用量下滨海盐碱地土壤有机碳组分、碳库管理指数与环境因子相关性热图

Fig. 6 Heat map of correlation between soil organic carbon components, carbon pool management index and environmental factors in coastal saline-alkaline soils under different application amounts of vermicompost

本研究结果表明, 不同蚯粪施用量下有机碳官能团相对含量最多的是 O-烷基碳官能团, 其次是烷基碳官能团, 最后是 N-烷基碳官能团、芳香族碳官能团和羧基碳官能团。研究表明, 烷基碳是有机碳化学结构中最稳定的官能团, 其主要来源是植物体内的脂质、角质、木栓质、蜡状质等, 或者土壤微生物代谢也会产生烷基碳^[43]。施用蚯蚓粪后, 丰富了土壤中微生物群落, 提高了微生物的活性, 微生物代谢的产物也随之增加, 导致土壤中烷基碳官能团相对含量增加。同时, 本研究还发现 O-烷基碳相对含量也表现出增加的趋势。这可能是因为 O-烷基碳主要来源于纤维素、半纤维素等碳水化合物, 施用蚯蚓粪后, 土壤中微生物生物量升高, 其分解活动增强, 从而导致土壤中植物残体分解加快, 最终导致有机碳中 O-烷基碳相对含量增加^[44-45]。因烷基碳官能团是相对稳定、不易被分解的碳组分, 而 O-烷基碳官能团是较易被分解、不稳定的碳组分, 因此常用烷基碳官能团与 O-烷基碳官能团的相对含量之比来表示有机碳烷基化的程度高低, 指征有机碳的稳定程度^[46]。刘玲

等^[47]研究表明, 长期有机物料的添加可显著提高土壤有机碳库及其稳定性。由表 4 可知, 烷基碳/O-烷基碳的数值增大, 表明有机碳的稳定性呈上升趋势。芳香族碳官能团的相对含量也在施用蚯蚓粪条件下有所增加, 常用芳香族碳官能团来表示有机碳芳香结构的多少^[48]。当芳香族碳官能团相对含量增加时, 表示有机碳的方向及结构越多、分子结构越复杂、越不易被分解。此外有研究认为^[49], 增加芳香碳的相对含量, 有机碳的稳定性也会随之提高, 这一结果与脂肪族碳/芳香族碳的数值表现出的结果相同。常用脂肪族碳与芳香族碳的比值作为衡量土壤中有机碳化学结构的复杂程度^[50]。本研究中脂肪族碳与芳香族碳的比值减小, 即施用蚯蚓粪增加了有机碳的复杂程度, 最终导致有机碳稳定性上升。对于羧基碳来说, 施用蚯蚓粪后降低了其相对含量, 由于羧基碳官能团是土壤有机碳较易被分解的组分, 因此其相对含量降低时, 有机碳的稳定性相应有所上升。疏水碳/亲水碳的数值与有机碳的稳定程度呈正相关^[51], 这是因为疏水碳较难分解, 而亲水碳易分解, 因此二者的比

值在一定程度上可以表征土壤有机碳的稳定性。施用蚯蚓粪后,疏水碳/亲水碳的数值增大,表明土壤有机碳稳定性上升。

4 结论

施用蚯蚓粪后,不仅改变了滨海盐碱地土壤有机碳库的含量,也改变了有机碳的结构组成。当施用量超过 50 t/hm²时,滨海盐碱地土壤有机碳的含量显著提升,且随着蚓粪施用量的增加,土壤可溶性有机碳、颗粒态有机碳、易氧化有机碳以及惰性有机碳含量均随之增加;烷基碳与 O-烷基碳的比值逐步增大。施用 100 t/hm²时,土壤碳库管理指数显著提升;疏水碳与亲水碳的比值逐步增大。脂肪族碳与芳香族碳的比值随着蚓粪施用量的增加而减小。综上,施用蚯蚓粪有效提升了滨海盐碱地土壤碳库含量及其稳定性,且在 50 和 100 t/hm² 施用量下的效果最为明显。

参考文献:

- [1] 张芳怡. 江苏沿海滩涂资源开发利用问题与对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(4): 66–69.
- [2] Wu Y Y, Liu R C, Zhao Y J, et al. Spatial and seasonal variation of salt ions under the influence of halophytes, in a coastal flat in eastern China[J]. Environmental Geology, 2009, 57: 1501–1508.
- [3] Rounsevell M, Evans S, Bullock P. Climate change and agricultural soils: Impacts and adaptation[J]. Climatic Change, 1999, 43(4): 683–709.
- [4] 李硕, 刘汉粮, 孙少波, 等. 海河平原典型区表层土壤有机碳库变化及影响因素——以天津市津南区为例 [J/OL]. 农业资源与环境学报. <https://doi.org/10.13254/j.ajre.2023.0496>.
- [5] Cambardella C, Elliott E. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777–783.
- [6] Conant R, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38(6): 386–392.
- [7] 赵荟. 土壤碳组分及其环境意义概述[J]. 林业建设, 2017(2): 43–47.
- [8] Lagomarsino A, Grego S, Kandeler E. Soil organic carbon distribution drives microbial activity and functional diversity in particle and aggregate-size fractions[J]. Pedobiologia, 2012, 55(2): 101–110.
- [9] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359–365.
- [10] 崔雪梅, 米俊珍, 刘景辉, 等. 膨润土与秸秆配施对根区土壤有机碳化学结构和酶活性的影响[J/OL]. 中国土壤与肥料. <https://link.cnki.net/urlid/11.5498.S.20230824>.
- 1559.006.
- [11] 黄依雯, 朱萍, 王建华, 等. 蚯蚓粪有机肥对盐碱地茄子生长的影响[J]. 上海农业科技, 2022 (1): 112–113.
- [12] 沈婧丽, 杨建国, 王静, 等. 蚯蚓粪对盐碱土壤修复机理研究进展及展望[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(7): 245–247.
- [13] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用污泥污染物控制标准: GB 4284—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用 ¹³C 核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 796–812.
- [16] Liu B, Xia H, Jiang C C, et al. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. Science of The Total Environment, 2022, 841: 156608.
- [17] 邓晓, 武春媛, 杨桂生, 等. 蚯蚓粪对海南滨海盐渍土的改良效果[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(3): 225–230.
- [18] 严漪云, 左文刚, 徐凯达, 等. 污泥蚓粪对滩涂盐碱地土壤的培肥效应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(3): 111–116.
- [19] 李彩琴, 刘荔贞, 王琴, 等. 蚯蚓粪在农业方面的应用研究进展[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 13–16.
- [20] Prescott C. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils?[J]. Biogeochemistry, 2010, 101(1): 133–149.
- [21] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2907–2913.
- [22] 高忠霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同施肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 115–121.
- [23] 韩成卫, 李忠佩, 刘丽, 等. 去除溶解性有机质对红壤水稻土碳氮矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 107–113.
- [24] 魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373–2380.
- [25] 万丹. 铁氧化物和钙离子对土壤有机碳的固定及有机质对 Pb 形态转化的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [26] 许连周, 王琪, 刘丹阳, 等. 长期施用有机肥对苏打盐碱土胶体组分及有机无机复合状况的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(4): 152–158.
- [27] Camenzind T, Mason-Jones K, Mansour I, et al. Formation of necromass-derived soil organic carbon determined by microbial death pathways[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(2): 115–122.
- [28] 宋文婕, 梁誉正, 陶贞, 等. 微生物介导的土壤有机碳动态研究进展[J]. 地球科学进展, 2023, 38(12): 1213–1223.
- [29] Zhang F T, Chen X, Yao S H, et al. Responses of soil mineral-associated and particulate organic carbon to carbon

- input: A meta-analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 829: 154626.
- [30] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776–779.
- [31] Sokol N W, Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 46–53.
- [32] 王梦雅, 符云鹏, 黄婷婷, 等. 等碳量添加不同有机物料对土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响[J]. *中国烟草学报*, 2018, 24(2): 65–73.
- [33] 侯赛赛, 白懿杭, 王灿, 等. 土壤有机碳及其活性组分研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(13): 24–33.
- [34] Vonlützow M, Kögelknabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183–2207.
- [35] 高欣, 赵雪淞, 赵凤艳, 等. 有机培肥对连作花生土壤肥力及活性有机碳库的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(1): 67–76.
- [36] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 160–167.
- [37] 刘强, 梁鑫, 董佩丽, 等. 不同施肥措施对黄土丘陵区农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(2): 446–452.
- [38] 王义祥. 不同经营措施下果园土壤有机碳库特性及固碳潜力研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [39] 张雅柔, 安慧, 刘秉儒, 等. 短期氮磷添加对荒漠草原土壤活性有机碳的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(10): 12–24.
- [40] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1215–1222.
- [41] 林晓钦, 崔莹莹, 张孟豪, 等. 皮质远盲蚓体内酶对土壤有机碳形态及碳库管理指数的影响[J]. *西南农业学报*, 2023, 36(7): 1447–1454.
- [42] 井大炜, 王明友, 张红, 等. 樱桃栽培中施用蚯蚓粪对土壤有机碳氧化稳定性及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 73–77.
- [43] Ussiri D, Johnson C. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods[J]. *Geoderma*, 2003, 111(1): 123–149.
- [44] 范围. 玉米秸秆不同还田方式对黑钙土有机碳及微生物多样性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- [45] 杨龙. 果园生草草种腐解特征及其对土壤养分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [46] 李萌. 地膜和秸秆覆盖对渭北旱塬春玉米土壤团聚体碳分布及酶活性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [47] 刘玲, 崔俊芳, 杨红薇, 等. 长期外源有机物料添加对川中丘陵区农田土壤养分和有机碳组分的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(5): 991–1000.
- [48] Maillard F, Leduc V, Bach C, et al. Aboveground organic matter removal reshapes soil microbial functional group balance in temperate forests[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 184: 104776.
- [49] 吴家森, 张金池, 钱进芳, 等. 生草提高山核桃林土壤有机碳含量及微生物功能多样性[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 111–117.
- [50] 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 416–424.
- [51] Spaccini R, Piccolo A, Mbagwu J, et al. Influence of the addition of organic residues on carbohydrate content and structural stability of some highland soils in Ethiopia[J]. *Soil Use and Management*, 2002, 18(4): 404–411.