

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.017

邹炎, 廖超林, 杨振宇, 等. 地下水位及有机肥对红壤性水稻土有机碳活性组分的影响. 土壤, 2022, 54(2): 338–343.

地下水位及有机肥对红壤性水稻土有机碳活性组分的影响^①

邹炎, 廖超林*, 杨振宇, 程鹏, 尹力初

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 利用自 1981 年开始的红壤性水稻土长期定位试验, 对耕层土壤有机碳活性组分、孔隙状况及团聚体进行分析, 以探究不同地下水位(20、80 cm) 和施肥 (高量有机肥、常量有机肥、化肥) 管理对红壤性水稻土有机碳活性组分的影响, 并分析孔隙状况和团聚体对土壤有机碳活性组分的作用关系。结果表明: 降低地下水位导致高量有机肥和化肥处理的轻组有机碳(LFOC) 和颗粒有机碳(POC) 含量显著降低, 各处理的易氧化有机碳(EOC)含量则显著升高; 长期施用有机肥显著提高土壤 LFOC、EOC 和 POC 的含量; 双因素方差分析显示, 施肥对有机碳活性组分的影响大于地下水位。红壤性水稻土粗大团聚体可促进毛细孔隙的形成, 从而保护或稳定 LFOC 和 POC; EOC 受土壤孔隙状况及团聚体的影响不显著。因此, 南方稻田土壤有机碳管理及肥力调控需关注地下水位变化和合理施用有机肥。

关键词: 红壤性水稻土; 地下水位; 有机肥; 活性有机碳; 结构方程模型

中图分类号: S153.6+1; S511.4+2 **文献标志码:** A

Effects of Underground Water Table and Organic Manure on Labile Carbon Fractions in Red Paddy Soil

ZOU Yan, LIAO Chaolin*, YANG zhenyu, CHENG Peng, YIN Lichu

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: A long-term field experiment was conducted since 1981 in order to explore the effects of underground water table and organic manure on labile carbon fractions (light fraction organic carbon, LFOC; easily oxidized carbon, EOC; and particulate organic carbon, POC) as well as the interaction relation of aggregates and porosity on labile carbon fractions, the treatments included two underground water tables of 20 cm and 80 cm, applying organic manure with a high rate (HOM) and a normal rate (NOM), and applying chemical fertilizer (CF). The results showed that lowering underground water table resulted in significant lower content of LFOC and POC under NOM and CF, and the contents of EOC were increased significantly under different treatments; long-term application of organic manure significantly increased the contents of LFOC, EOC and POC. Two-way ANOVA revealed that the fertilization had a greater effect on labile carbon fractions than underground water table. The increased content of macro aggregates in red paddy soil could promote the formation of capillary pores, which protected or stabilized LFOC and POC; however, no obvious effect of porosity and aggregates on EOC was observed. Therefore, it is necessary to pay attention to the change of groundwater level and the rational application of organic manure in soil organic carbon management and fertility regulation of paddy fields in south China.

Key words: Red paddy soil; Water table; Organic manure; Labile carbon fraction; Structural equation model(SEM)

土壤有机碳(SOC)在减缓全球气候变化以及保持土壤肥力、确保农业生产中发挥着重要的作用, 然而 SOC 含量变化缓慢, 难以灵敏地预测土壤有机质质量的短期变化特征^[1]。土壤活性有机碳作为土壤有机碳库中周转速度快、较不稳定的部分, 是反映土壤

碳库短期波动和环境变化的敏感指标, 在改善土壤质量以及维护土壤碳库平衡等方面具有重要意义^[2], 已被作为评价土壤有机质变化和土壤肥力的一个重要指标。

人类活动如施肥等耕作措施对 SOC 的固持和

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41571211)和湖南省高校科研重点项目(15A085)资助。

* 通讯作者(clliao@163.com)

作者简介: 邹炎(1995—), 男, 湖北荆门人, 硕士研究生, 研究方向为土壤有机碳及土壤质量演变。E-mail: 562409287@qq.com

SOC 活性组分的变化与转化影响强烈。多数研究表明,单施有机肥或有机肥配施化肥明显提高 SOC 贮量及轻组有机质碳(LFOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)等活性有机碳组分的含量及其比例^[3]。如,李慧敏等^[4]认为有机物料施用显著提高潮土 POC 含量;俞巧钢等^[5]研究表明有机物料施用增加土壤轻组组分颗粒含量;何伟等^[6]研究发现有机肥配施化肥显著提高土壤 EOC 含量。近年来 SOC 动力学的新观点认为,有机碳在土壤中的稳定存在并非由其本身的化学结构和固有性质决定,而是因为来自周围环境的物理化学以及生物因素影响了其降解速率,进而影响其在土壤中的固持^[7]。地下水位作为重要的环境要素,影响着土壤结构、通气状况及微生物生态等土壤属性^[8-9]。那么,长期不同施肥的水稻土在地下水位变化条件下, SOC 活性组分如何变化?此外,土壤团聚体、孔隙状况及有机碳活性组分间的作用关系有待明确。由此,本研究利用两个地下水位(20、80 cm)不同施肥处理(高量有机肥、常量有机肥及化肥)的水稻土长期定位试验,探究长期不同施肥的水稻土在地下水位变化条件下 SOC 活性组分的变化特征,评估团聚体、孔隙状况与有机碳活性组分间的作用关系,以期为稻田 SOC 循环及土壤质量保育和调控提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

长期定位试验位于湖南农业大学天鹅湖畔(28°18' N, 113°08' E),年平均气温 17.2℃,年均降水量 1 362 mm,供试土壤母质为第四纪红色黏土发育的耕型红壤,耕作制度为稻-稻-冬闲。试验基地由 3 组双排平行的水泥池组成,半地下式,每排设 6 个小区,共计 36 个小区。各小区之间互不渗漏,可以独立灌溉,每组小区中间设有水位控制槽,水位控制槽的水位分别为土表以下 20 cm 和 80 cm。各小区大小为 1.6 m × 0.9 m × 1.5 m(长×宽×高),底层铺 15 cm 厚的卵石与粗砂。1982 年试验开始时,分别在两个地下水位深度下设置了 3 个不同有机肥施用水平处理,分别为:高量有机肥(HOM)、常量有机肥(NOM)、化肥(CF),共 6 个处理,每个处理设 6~8 个重复。每季水稻施 N 量:150 kg/hm², N:P₂O₅:K₂O 比例为 1:0.5:1。化肥处理氮、磷、钾肥分别以尿素、氯化钾、过磷酸钙施入。有机肥为粉碎的玉米秸秆,其 N、P、K 含量分别为 10.44、5.93、12.61 g/kg。有机肥处理秸秆施用量分别为 9.58 t/hm² 和 19.16 t/hm²,

即常量有机肥处理中有机肥带入的 N 为化肥 N 的 1/3,高量有机肥处理中有机肥带入的 N 为化肥 N 的 2/3。为保持各处理间施肥水平的基本一致,有机肥处理小区肥料不足部分用化肥补足,化肥和有机肥均在水稻移栽前一次性施入土壤。试验地近 5 年种植的早稻、晚稻品种分别为湘早籼 15、VY46,移植时间分别为每年 4 月与 7 月的中旬,收获期分别为每年 7 月上旬和 10 月下旬^[10]。

1.2 样品采集与制备

每处理的供试土样均采自随机选取的 3 个试验小区,于早稻翻耕前用铁锹取长宽高为 10 cm × 10 cm × 20 cm 的长方体原状土块,每小区随机采集 3 个原状土块,混合成 1 个复合样品,获得每个处理 3 个重复土样,共计 21 个土样。获得的土样无损、免受挤压带回实验室自然风干。室内风干土样达到土壤塑限时,沿着自然结构轻轻掰成 1 cm³ 左右的土块,并将可识别的砾石、落叶残体和根茬移除,待样品完全风干后用于土壤团聚体分析及其他理化性状测定。

1.3 测定项目与方法

土壤总有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;土壤轻组有机碳(LFOC)分离参照 Janzen 等^[11]的方法,烧失法测定碳含量^[12];颗粒有机碳(POC)含量采用 Cambardella 和 Elliott^[13]的方法测定;易氧化有机碳(EOC)含量采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化,可见分光光度计 565 nm 波长处比色测定^[14]。

土壤总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度测定采用环刀法^[15]。不同粒级的水稳性团聚体利用湿筛法测定^[16]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 21.0 进行试验数据的统计与分析,采用双因素方差分析(two-way ANOVA)比较处理间差异,用邓肯(Duncan's)新复极差法检验差异显著性($P < 0.05$)。图表中数据为平均值±标准差。借助 AMOS 24.0 的结构方程模型(SEM)探讨土壤有机碳活性组分主要驱动因素的影响路径及程度。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳及其活性组分

表 1 为不同地下水位及施肥处理的 TOC 及其活性组分含量。由表 1 数据可知,两个地下水位下长期不同施肥处理的 TOC 含量均表现为: HOM > NOM > CF,且各处理间差异显著;同时两个地下水位下相同施肥处理间均表现为 20 cm 地下水位(高水位)高于

表 1 土壤 TOC 及其活性组分含量
Table 1 Contents of TOC and labile carbon fractions

地下水位(cm)	施肥处理	TOC(g/kg)	LFOC(g/kg)	EOC(g/kg)	POC(g/kg)
20	HOM	28.32 ± 2.50 a	3.89 ± 0.33 a	9.25 ± 0.55 a	6.41 ± 0.85 ab
	NOM	25.03 ± 2.03 b	3.87 ± 1.13 a	5.94 ± 0.34 c	6.49 ± 1.33 a
	CF	18.27 ± 1.17 c	2.21 ± 0.20 cd	2.15 ± 0.16 d	4.22 ± 0.77 cd
80	HOM	23.47 ± 1.07 b	3.56 ± 0.43 ab	9.34 ± 0.68 a	5.46 ± 0.43 abc
	NOM	20.30 ± 0.97 c	2.84 ± 0.37 bc	7.38 ± 0.53 b	5.05 ± 0.45 bc
	CF	15.49 ± 0.81 d	1.64 ± 0.47 d	5.52 ± 0.46 c	3.28 ± 0.32 d
双因素方差分析(F)	地下水位	31.68**	5.63*	51.89**	9.27*
	施肥	51.93**	16.45**	192.47**	14.85**
	地下水位 × 施肥	0.84	0.58	17.52**	0.82

注：表中同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)；*表示在 $P < 0.05$ 水平上影响显著；**表示在 $P < 0.01$ 水平上影响显著，下表同。

80 cm 地下水位(低水位)。两个地下水位下长期不同施肥处理的 LFOC 与 POC 含量均表现为 HOM 和 NOM 处理显著高于 CF 处理，而 HOM 和 NOM 处理间差异不显著。两个地下水位下的 EOC 含量在不同施肥处理间的变化与 TOC 相同，但两个地下水位下相同施肥处理间均表现出相反的变化特征，即：高水位 < 低水位。

双因素方差分析结果表明，地下水位及施肥均显著影响土壤 TOC 及活性组分的含量，其中施肥对其影响的 F 值均大于地下水位；地下水位和施肥的交

互作用除显著影响 EOC 含量外，对 TOC 和 LFOC 及 POC 含量均影响不明显。

2.2 土壤孔隙状况

表 2 为不同地下水位及施肥处理的土壤孔隙度状况。从两个地下水位下的相同施肥处理看，高水位下各施肥处理的土壤总孔隙度和毛管孔隙度均显著高于低水位下的相同处理，非毛管孔隙度则变化相反。从相同地下水位下的不同施肥处理看，HOM、NOM 处理的总孔隙度和毛管孔隙度均显著高于 CF 处理，非毛管孔隙度则相反。

表 2 土壤孔隙度(%)
Table 2 Soil porosity

地下水位(cm)	施肥处理	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
20	HOM	68.51 ± 2.73 a	66.76 ± 1.27 a	1.75 ± 0.46 d
	NOM	66.41 ± 2.52 ab	64.39 ± 1.69 a	2.02 ± 0.58 d
	CF	64.44 ± 1.20 b	60.48 ± 1.96 b	3.96 ± 0.56 bc
80	HOM	61.01 ± 2.09 c	57.85 ± 1.82 bc	3.16 ± 0.32 c
	NOM	59.19 ± 1.77 c	54.73 ± 1.29 c	4.47 ± 0.65 b
	CF	54.83 ± 1.88 d	47.72 ± 2.02 d	7.11 ± 0.41 a

2.3 土壤团聚体分布

不同处理土壤团聚体分布如表 3 所示，可见，高水位下不同施肥处理 >2 mm 粗大团聚体含量(以质量分数计)在 51.06% ~ 67.86%，2 ~ 0.25 mm 细大团聚体含量范围为 22.04% ~ 25.15%，>0.25 mm 大团聚体含量为 76.17% ~ 89.90%；低水位下不同施肥处理的粗大团聚体、细大团聚体及 >0.25 mm 大团聚体含量变化分别为：35.06% ~ 43.41%、40.43% ~ 43.79% 和 78.85% ~ 83.84%。说明不同地下水位及施肥处理的红壤性水稻土团聚体均以 >0.25 mm 的大团聚体为主。

表 3 土壤团聚体分布(以质量分数计，%)
Table 3 Distribution of soil aggregates

地下水位 (cm)	施肥处理	团聚体粒径(mm)			
		>2	2 ~ 0.25	0.25 ~ 0.053	<0.053
20	HOM	67.86	22.04	6.51	3.58
	NOM	59.14	25.07	6.77	9.02
	CF	51.56	25.15	10.96	12.33
80	HOM	43.41	40.43	8.34	7.81
	NOM	35.06	43.79	7.74	13.41
	CF	35.84	43.48	12.13	8.55

2.4 土壤有机碳活性组分与孔隙状况及团聚体间的关系

土壤有机碳活性组分与孔隙状况及团聚体间的相关性分析(表 4)表明, TOC 含量与总孔隙度、毛管孔隙度和粗大团聚体含量呈极显著正相关, 与非毛管孔隙度、细大团聚体含量、粗微团聚体(0.25 ~

0.053 mm)含量及细微团聚体(<0.053 mm)含量呈显著负相关; LFOC 和 POC 含量均分别与总孔隙度、毛管孔隙度和粗大团聚体含量呈极显著正相关, 均与非毛管孔隙度、细大团聚体含量及粗微团聚体含量呈极显著负相关; EOC 含量则仅与两个粒级的微团聚体含量呈显著负相关。

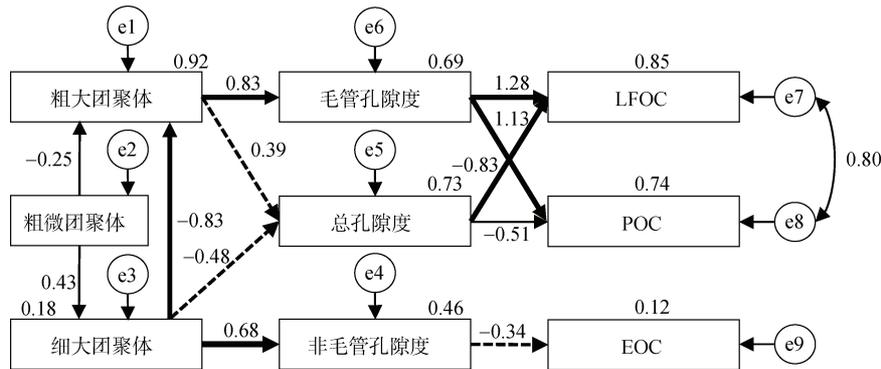
表 4 土壤有机碳活性组分与孔隙状况及团聚体的相关系数
Table 4 Correlation coefficient among labile carbon fractions, porosity and aggregates in soil

		TOC	LFOC	EOC	POC
孔隙状况	总孔隙度	0.789**	0.678**	0.102	0.729**
	毛管孔隙度	0.832**	0.743**	0.179	0.768**
	非毛管孔隙度	-0.869**	-0.799**	-0.343	-0.797**
团聚体	>2 mm	0.738**	0.564**	0.106	0.588**
	2 ~ 0.25 mm	-0.553*	-0.384*	0.196	-0.437*
	0.25 ~ 0.053 mm	-0.822**	-0.803**	-0.566**	-0.720**
	<0.053 mm	-0.525*	-0.391	-0.495*	-0.389

2.5 土壤孔隙及团聚体对有机碳活性组分的影响

为明确有机碳活性组分的影响因素, 通过构建 SEM 分析土壤孔隙及团聚体变化对有机碳活性组分的综合响应(图 1)。SEM 拟合结果为: $\chi^2=4.525$, $df=23$, $P=0.237$, $RMSEA=0.051$, $GFI=0.986$, 说明模型适配良好, 能代表自变量和因变量的关系。模型分别解释了 LFOC、POC 的 85% 和 74% 变异, 仅解释了 EOC 12% 的变化, 且影响不显著。同时模型用路径及回归系数来估计自变量对因变量的影响效应。模型中存在 4 条影响显著的路径, 其中影响

LFOC 的路径有两条, 即: 粗微团聚体—细大团聚体—粗大团聚体—毛管孔隙度—LFOC 和粗微团聚体—粗大团聚体—毛管孔隙度—LFOC; 两条影响 POC 的路径分别是粗微团聚体—细大团聚体—粗大团聚体—毛管孔隙度—POC 和粗微团聚体—粗大团聚体—毛管孔隙度—POC。总孔隙度与非毛管孔隙度虽影响有机碳活性组分, 但均不显著。总体上, 毛管孔隙度对土壤 LFOC 和 POC 均产生直接影响, 影响系数大小分别为 1.28 和 1.13; 而孔隙状况对土壤 EOC 影响不显著。



(图中箭头上的数字为标准化路径系数, 正值表示正向影响, 负值表示负向影响; 箭头的粗细表示影响水平: ---►表示 $P>0.05$ 不显著, —►表示 $P<0.05$ 显著水平, —►表示 $P<0.01$ 极显著水平)

图 1 有机碳活性组分影响因素的结构方程模型(SEM)分析

Fig. 1 Analysis of factors affecting labile carbon fractions with structural equation model

3 讨论

3.1 地下水位与长期施肥对土壤有机碳活性组分的影响

土壤活性有机碳含量是输入土壤的动植物残体

等有机物量和微生物分解造成有机物质的输出之间平衡的结果^[17]。地下水位变化引起土壤通气状况、氧化还原电位、微生物活性等环境要素的变化, 从而限制或促进有机质的矿化分解与微生物利用、腐殖化过程和土壤有机碳累积, 并改变有机碳组分含量^[18]。

易亚男等^[19]研究表明,高、低水位下施用有机肥提高红壤性水稻土 POC 含量,同时高水位下土壤的 POC 含量相对较高;而本研究表明,长期施用有机肥和化肥条件下,降低地下水位导致 NOM 和 CF 处理的 LFOC 和 POC 含量显著降低,POC 含量结果与以上研究一致,原因可能与地下水位降低,土壤通气状况良好、微生物活性强、土壤矿化分解强度增加、有机碳及其组分含量降低等有关^[20]。本研究中,HOM 处理有机碳活性组分(LFOC、EOC、POC)变化不明显,可能是有机物料输入量较大,原有机碳底物量较高和微生物分解能力差异的结果,其机理尚需有机碳周转、碳源微生物及有机碳矿化等数据的补充。本研究发现,降低地下水位导致各处理 EOC 含量显著升高,原因可能在于:EOC 主要是以松结合态复合体或以游离态形式存在,是移动快、不稳定、易于氧化和矿化的具有较高微生物活性的有机碳^[21],且淋失作用是稻田土壤 EOC 含量差异的决定性因素^[22]。较低地下水位的土壤湿度小,土壤淋溶作用相对较弱,EOC 淋失作用相对较弱,其含量相对较高。本研究还显示,施用有机肥显著提高红壤性水稻土 LFOC、EOC 和 POC 含量,与前人^[23-24]研究结果一致,其原因在于有机肥的施用可供微生物足够的底物,从而加速土壤原有机碳的矿化和植物残体及有机物料的腐解,释放更多的活性碳组分促进土壤碳循环^[25]。双因素方差分析表明,地下水位和施肥均显著影响红壤性水稻土有机碳活性组分的含量;地下水位和施肥对 EOC 存在显著交互作用,但对 LFOC 和 POC 的交互作用不明显,说明在施用有机肥条件下降低地下水位导致土壤 EOC 含量升高,同时,施肥对土壤有机碳活性组分的 F 值均大于地下水位(表 2),说明施肥对红壤性水稻土有机碳活性组分的影响大于地下水位。

3.2 土壤团聚体、孔隙及有机碳活性组分间的作用关系

施肥和改变地下水位是南方稻田最主要的农业管理方式,显著影响土壤有机碳及其活性组分。本研究中,LFOC 和 POC 含量均与总孔隙度、毛管孔隙度及粗大团聚体含量呈显著正相关,与非毛管孔隙度、细大团聚体含量及微团聚体含量呈显著负相关;EOC 含量则与微团聚体含量呈显著负相关。说明地下水位的变化和施用有机肥在引起有机碳活性组分变化的同时,土壤物理性质中孔隙和团聚体组成亦发生变化。SEM 分析表明,EOC 受土壤孔隙状况及团聚体的影响不显著,可能与 EOC 主要受水分运移的影响有关。EOC 主要以松结合态复合体或以游离态

形式存在,且具移动快、不稳定等特性,而南方稻田干湿交替频繁和水分淋溶强,因此水分运移对 EOC 影响较大,以至于掩盖了团聚体及孔隙状况对 EOC 的影响,其过程机理还有待进一步证实。土壤毛管孔隙分别直接影响 LFOC 和 POC,说明毛管孔隙是影响 LFOC 和 POC 的主要物理因素;而团聚体主要通过影响毛管孔隙度来间接影响 LFOC 和 POC,其作用路径可分为两条:Ⅰ.粗微团聚体通过负向作用粗大团聚体,粗大团聚体再通过正向作用毛管孔隙度后,分别间接作用 LFOC 和 POC,说明由于地下水位的变化和有机肥的施用导致粗微团聚体直接参与粗大团聚体的形成,粗大团聚体形成的结果增加了毛管孔隙度,从而分别促进了 LFOC 和 POC 的积累;Ⅱ.粗微团聚体通过正向作用细大团聚体而间接作用粗大团聚体,且为负向作用,粗大团聚体再通过作用毛管孔隙度后,分别作用 LFOC 和 POC,说明由于地下水位的变化和有机肥的施用还可导致粗微团聚体和细大团聚体共同参与形成粗大团聚体,粗大团聚体增加促进了土壤毛管孔隙度形成,有利于 LFOC 和 POC 的积累。研究表明,团聚体尤其是大团聚体的形成促进了土壤孔隙的发育,而团聚体内孔隙主要为毛管孔隙及孔径当量更小的超微孔隙^[26],同时团聚体对有机碳具有物理保护作用,其保护机理之一在于孔隙通过物理屏障来决定有机底物与微生物细胞或酶的可及性,同时通过调节微生物活性抑制土壤有机碳分解,使土壤有机碳免受分解(或稳定)^[27]。因此,红壤性水稻田 LFOC 和 POC 稳定与累积的途径之一在于粗大团聚体的形成促进了土壤毛管孔隙的形成,保护或稳定了 LFOC 和 POC。

4 结论

1)降低地下水位导致土壤 NOM 和 CF 处理的 LFOC 和 POC 含量显著降低,HOM 处理变化不明显,各处理的 EOC 含量则显著升高;施用有机肥显著提高土壤 LFOC、EOC 和 POC 的含量;施肥对土壤有机碳活性组分的影响大于地下水位。

2)红壤性水稻田粗大团聚体可促进毛管孔隙的形成,从而保护或稳定 LFOC 和 POC;EOC 受土壤孔隙状况及团聚体的影响不显著。

参考文献:

- [1] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2005: 221-268.

- [2] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1781–1796.
- [3] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 93–101.
- [4] 李慧敏, 田胜营, 李丹丹, 等. 有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 777–787.
- [5] 俞巧钢, 杨艳, 邹平, 等. 有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 170–175.
- [6] 何伟, 王会, 韩飞, 等. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 425–434.
- [7] Wen Y L, Xiao J, Li H, et al. Long-term fertilization practices alter aluminum fractions and coordinate state in soil colloids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(6): 2083–2089.
- [8] 林清美, 廖超林, 谢丽华, 等. 地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1414–1424.
- [9] Lou X D, Zhai S Q, Kang B, et al. Rapid response of hydrological loss of DOC to water table drawdown and warming in Zoige peatland: Results from a mesocosm experiment[J]. *PLoS One*, 2014, 9(11): e109861.
- [10] Yin L C, Zhang L, Yi Y N, et al. Effects of long-term groundwater management and straw application on aggregation of paddy soils in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(3): 386–391.
- [11] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799–1806.
- [12] 盛浩, 李洁, 周萍, 等. 土地利用变化对花岗岩红壤表土活性有机碳组分的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1098–1102.
- [13] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [14] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991–999.
- [15] 廖超林, 傅灵芝, 盛浩, 等. 紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 111–119.
- [16] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633.
- [17] 张西凤, 崔东, 刘海军, 等. 小飞蓬入侵对伊犁河谷草原土壤养分及活性有机碳组分的影响[J]. *环境化学*, 2020, 39(7): 1894–1903.
- [18] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 113–119.
- [19] 易亚男, 尹力初, 张蕾. 不同地下水位和施肥管理对水稻土有机碳组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1284–1289.
- [20] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1491–1503.
- [21] Pang D B, Cui M, Liu Y G, et al. Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded Karst ecosystems of southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 391–402.
- [22] 徐侠, 王丰, 栾以玲, 等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1115–1121.
- [23] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1942–1951.
- [24] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 728–736.
- [25] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1646–1655.
- [26] Martín M Á, Martínez F S J, Perfect E, et al. Soil structure and function in a changing world: Characterization and scaling[J]. *Geoderma*, 2017, 287: 1–3.
- [27] Killham K, Amato M, Ladd J N. Effect of substrate location in soil and soil pore-water regime on carbon turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(1): 57–62.