



连续施用土壤改良剂对沙质潮土肥力及活性有机碳组分的影响

周吉祥, 张贺, 杨静, 李桂花, 张建峰

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 【目的】以河北省廊坊市小麦-玉米轮作区沙质潮土为研究对象, 通过 2015—2018 年田间连续定位试验, 研究两种土壤改良剂对土壤活性有机碳组分含量和土壤碳库管理指数的影响, 以为沙质潮土有机碳库培育, 改善土壤质量提供理论依据。【方法】试验采用单因素随机区组设计, 设 4 个处理: (1) 单施化肥 (CK); (2) CK+有机改良剂 $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T1); (3) CK+无机改良剂 $2.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T2); (4) CK+有机改良剂 $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +无机改良剂 $2.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T3)。收获季测定土壤有机碳、全氮、pH、速效磷、速效钾, 并运用修正的内梅罗指数法计算土壤综合肥力指数 (IFI)。再分析活性有机碳各组分含量, 并计算碳库管理指数 (CPMI)。最后通过 CPMI 和 IFI 指示指标评价连续施用土壤改良剂对沙质潮土改良的应用效果。【结果】较 CK 处理, 施用有机改良剂处理土壤总有机碳 (TOC) 和土壤综合肥力指数 (IFI) 均显著提高, 尤其是有机无机改良剂配施时效果最显著; 施用有机改良剂处理各活性有机碳组分含量均呈升高趋势, 并且活性有机碳各组分含量呈现为: 易氧化有机碳 (LOC) > 可溶性有机碳 (DOC) > 微生物量碳 (MBC); 施用有机改良剂各处理土壤活性碳库组分有效率均呈下降趋势, T1、T3 处理土壤易氧化有机碳有效率 (LOC/TOC) 较 CK 分别显著降低了 12.57% 和 12.02%, 微生物量碳有效率 (MBC/TOC) 较 CK 分别显著降低了 12.84% 和 12.30%, 单施无机改良剂处理较 CK 无显著影响, 说明施用有机改良剂增加活性有机碳各组分含量的同时, 向土壤中输入了更多的稳定态碳, 进而导致有效率的降低; 施用有机改良剂各处理土壤碳库指数显著升高、碳库活度显著降低, 说明施用有机土壤改良剂能够促进土壤碳库的积累; 施用有机改良剂各处理土壤碳库管理指数均呈升高趋势。主成分分析结果表明, 施用有机改良剂能够影响土壤中活性碳各组分含量及其有效率。【结论】连续施用有机改良剂能够显著提高沙质潮土肥力, 增加土壤碳库管理指数, 累积碳库库容, 改善土壤质量。

关键词: 土壤改良剂; 沙质潮土; 肥力因子; 土壤活性有机碳; 碳库管理指数

Effects of Continuous Application of Soil Amendments on Fluvo-Aquic Soil Fertility and Active Organic Carbon Components

ZHOU JiXiang, ZHANG He, YANG Jing, LI GuiHua, ZHANG JianFeng

(National Engineering Laboratory of Cultivated Land Cultivation Technology, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: 【Objective】Impacting of two soil amendments on the contents of active organic carbon components and soil carbon pool management index were studied from 2015 to 2018 in a sandy fluvo-aquic soil in Langfang City, Hebei Province under wheat-corn rotation. The purpose of the study was to provide a theoretical basis for the higher accumulation of organic carbon in sandy fluvo-aquic soil and for the improvement of soil quality. 【Method】The experiment was carried out by a single factor randomized block design with four treatments: (1) chemical fertilizer only (CK), (2) CK+ organic amendment $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T1), (3)

收稿日期: 2019-09-26; 接受日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (21577172)

联系方式: 周吉祥, E-mail: 1011841170@qq.com. 通信作者李桂花, E-mail: liguihua@caas.cn; 通信作者张建峰, E-mail: zhangjianfeng@caas.cn

CK+ inorganic amendment 2.25 t·hm⁻² (T2), and (4) CK+ organic amendment 15 t·hm⁻²+ inorganic amendment 2.25 t·hm⁻² (T3). Soil organic matter content, total nitrogen, pH, available phosphorus and available potassium were measured to calculate soil integrated fertility index (IFI) by modified Nemerow index method. Active organic carbon pools were also measured to calculate carbon pool management index (CPMI). Both IFI and CPMI were used to evaluate the soil amendments for the improvement of soil quality.

【Result】 The results showed that soil organic carbon (TOC) and IFI increased significantly under organic amendment comparing to CK, especially under the combination of organic with inorganic amendment (T3). The contents of active carbon pools increased under organic amendment, and was in the order of easily labile organic carbon (LOC)> dissolved organic carbon (DOC)>microbial biomass carbon (MBC). The ratio of active carbon pools to TOC decreased under organic amendment: the ratio of easily labile organic carbon to TOC (LOC/TOC) decreased significantly by 12.57% and 12.02% under T1 and T3, respectively; the ratio of microbial biomass carbon to TOC MBC/TOC decreased significantly by 12.84% and 12.30% under T1 and T3, respectively. Inorganic amendment (T2) had no effects on TOC and active carbon pools, therefore, the decreased ratios of active carbon pools to TOC mean that organic amendment increased stable TOC more than active carbon pools. The increase of CPMI and decrease of the ratio of soil carbon pools to TOC under organic amendment (T1 and T3) indicated that organic amendment resulted in the accumulation of organic carbon. The CPMI increased under the organic amendment. Principal component analysis showed that the organic amendment affected the composition and ratio of active carbon pools in the soil. **【Conclusion】** Continuous application of organic amendment significantly improved fertility of sandy fluvo-aquic soil, increased soil carbon pool management index and carbon storage capacity, and ultimately improved soil quality.

Key words: soil amendment; sandy fluvo-aquic soil; fertility factor; soil active organic carbon; carbon pool management index

0 引言

【研究意义】黄淮海平原总面积达 3 000 万 hm², 占全国平原面积的 30%, 耕地占全国的 18%^[1], 是我国重要的粮食生产核心区域, 在我国粮食安全和国民经济发展中占有不可替代的战略地位。但该区域以沙质和盐碱化为主的各类中低产田约占耕地总面积的 2/3, 其中沙质土壤约为 267 万 hm²。土质疏松, 结构性差, 有机碳含量低, 土壤保肥蓄水能力弱, 养分含量少是当前黄淮海平原沙质潮土现状, 不利于作物生长, 严重影响了当地农业经济的发展。因此改良沙质土壤、提高沙质土壤肥力是促进当地农业经济平稳发展及保障国家粮食安全的重要手段。**【前人研究进展】**土壤改良产品种类繁多, 如松土剂、固沙剂、增肥剂、消毒剂、土壤调理剂、保水剂、土壤改良调节剂等统称为土壤改良剂^[2], 随着环境友好型土壤改良剂生产技术的不断完善, 其在各类障碍型土壤中的培肥改良应用逐渐发展为研究的热点, 大量研究表明, 施用有机改良剂能提升土壤肥力^[3]、改善土壤环境^[4]以及调节土壤中微生物活性^[5-6], 同时在一定程度上增加土壤有机质含量, 进而影响土壤有机碳库各组分的相互转化。有研究指出有机碳土壤改良剂施用量与风沙土孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效养分、微生物数量、酶活性和玉米产量呈正相关关系^[7]; 文星等^[8]研究发现施用土壤改良剂能够在一段时间内改变土壤 pH、影响速效磷和交换性 Ca、Mg 的含量; 刘慧军等^[9]认

为不同土壤改良剂均能显著提高土壤有机质、速效磷、速效钾等养分含量。有机碳作为衡量土壤质量的重要指标, 在调节土壤物理化学性质, 改善土壤结构, 影响作物产量等方面具有重要作用^[10]。根据有机碳生物稳定性和周转期的不同, 可分为活性、慢性和惰性有机碳, 其中, 活性有机碳主要包括: 易氧化有机碳 (LOC)、可溶性有机碳 (DOC) 和微生物量碳 (MBC)^[11-13]。因活性有机碳转化周期短、易被微生物分解利用, 常用作土壤碳循环和有效养分变化周转的敏感指标^[14-16]。有研究表明, 土壤活性碳对施肥措施的变化响应敏感, 因此可以作为预警或者较早反映土壤碳库变化的指示指标^[17]; 同时, 土壤活性碳占总有机碳的比值对土壤碳库质量的变化非常敏感, 可用来指示土壤质量的变化^[18]。根据不同活性有机碳指标, LEFROY 等^[19]和 BLAIR 等^[20]提出了土壤碳库管理指数 (CPMI) 的概念。CPMI 由人为影响下土壤碳库指标和土壤碳库活度两方面的内容组成^[21], 既可以反映土壤有机碳储量的变化, 也能反映土壤有机碳组分的变化情况, 能够指示土壤肥力和土壤质量的变化^[22]。因此, 研究有机改良剂施用条件下土壤有机碳的动态变化, 对于实现土壤有机碳库的累积储存, 改善土壤质量具有重要意义^[23]。**【本研究切入点】**周岩等^[2]认为当前土壤改良剂改土应用效果明显, 但缺乏长期定位试验跟踪和数据验证。近年来, 有机土壤改良剂在盐碱土、酸性土等土壤类型的相关研究中已经取得了较好成果, 同

时, 凹凸棒土作为一种储量丰富、用途多样的可利用资源, 在工业、医学、农业等多种行业上具有吸附和黏结等用途, 但目前关于两者配合连续多年施用于沙质潮土肥力和质量改良效应的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】综上, 本研究采用大田连续定位试验研究手段, 以廊坊市沙质潮土为研究对象, 施用实验室自制土壤改良剂, 通过研究土壤养分含量、活性有机碳各组分含量、各组分有效率及碳库管理指数的变化特征, 为沙质潮土培肥改良、提升土壤肥力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验基地位于河北省廊坊市万庄镇中国农业科学院国际高新技术示范园区内 (39°36'N, 116°36'E),

属温带大陆性季风气候区, 年均气温 11.9 °C, 降水量为 550 mm, 70%—80%降水集中在 6—8 月。全年平均日照时数为 2 660 h, 无霜期为 183 d。种植制度为冬小麦-夏玉米轮作, 土壤类型为沙质潮土。试验前土壤耕层基本理化性状: 含水量 5.87%, pH 8.83, 有机碳 (SOC) 7.48 g·kg⁻¹, 全氮 (TN) 0.81 g·kg⁻¹, 速效磷 (AP) 17.55 mg·kg⁻¹, 速效钾 (AK) 153.32 mg·kg⁻¹。

1.2 土壤改良剂

试验所用有机土壤改良剂为实验室自制。选用虾头蟹壳提取甲壳素后的废弃物, 粉碎后按照重量 2 : 3 混合加入草炭、秸秆和花生壳及其他保密材料, 接入微生物菌剂 (地衣芽孢杆菌、干酪乳杆菌、黑曲霉和枯草芽孢杆菌), 通过好氧发酵、高温堆肥等工艺处理后制成; 无机改良剂为改性凹凸棒土。两种改良剂理化性质如表 1 所示。

表 1 供试改良剂基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical property of test amendments

	含水量 Water content (%)	SOC (g·kg ⁻¹)	TN (g·kg ⁻¹)	TP (g·kg ⁻¹)	pH	TK (g·kg ⁻¹)	
有机改良剂 Organic amendment	13.2	73.74	14.7	21.05	7.75	22.88	
	CEC mol/100g	吸水率 (%)	比表面积 (m ² ·g ⁻¹)	TN (mg·kg ⁻¹)	TP (mg·kg ⁻¹)	pH	TK (mg·kg ⁻¹)
无机改良剂 Inorganic amendment	2196	202	369	68.5	82.3	8.40	10.55

1.3 试验设计

试验设计 4 个处理, 分别为: (1) 单施化肥 (CK); (2) CK+有机改良剂 15 t·hm⁻² (T1); (3) CK+无机改良剂 2.25 t·hm⁻² (T2); (4) CK+有机改良剂 15 t·hm⁻²+无机改良剂 2.25 t·hm⁻² (T3)。改良剂施用量参考许帆等^[24]的研究。每个处理设有 3 次重复, 按照随机区组方法设置排列重复, 小区面积为 30 m²。氮磷钾复混肥 (20-16-9) 施用 0.75 t·hm⁻²,

用量以当地农户习惯用量为依据。有机改良剂和无机改良剂随同基肥一次性施入耕作层混合均匀。试验自 2015 年 10 月开始至 2018 年 10 月, 连续种植 3 年 6 季作物。不同土壤改良剂各处理养分输入量见表 2。

1.4 样品采集、测定项目与分析方法

1.4.1 土壤样品采集 土壤样品于 2018 年 10 月 9 日 (第 6 季玉米收获期) 采自耕层 (0—20) cm 土壤,

表 2 不同土壤改良剂各处理养分输入量

Table 2 Nutrient input in different treatments of two soil amendments

处理 Treatment	TN (kg·hm ⁻²)	TP (kg·hm ⁻²)	TK (kg·hm ⁻²)
CK	150	52.39	46.68
T1	370.5 (150+220.5)	368.14 (52.39+315.75)	389.88 (46.68+343.2)
T2	150.15 (150+0.15)	52.58 (52.39+0.185)	46.70 (46.68+0.024)
T3	370.65 (150+220.5+0.15)	368.33 (52.39+315.75+0.185)	389.90 (46.68+343.2+0.024)

复混肥中的磷钾指的是 P₂O₅ 和 K₂O, 通过分子式换算成全磷全钾

Phosphorus and potassium in compound fertilizer refer to P₂O₅ and K₂O, which are converted into total phosphorus and total potassium by molecular formula

混合均匀后将四分法保留的土样分为两份,一份置于避光处自然风干后分别过筛保存,用于测定基本理化指标;一份带回实验室存放于-20℃冰箱保存,用于土壤微生物量碳及土壤可溶性有机碳测定。

1.4.2 测定项目及方法

(1) 土壤理化指标均采用《土壤农化分析》^[25]方法测定: pH 采用水土比 5:1 梅特 pH 计 (FE20) 测定、有机碳采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法、全氮采用凯氏定氮法、速效磷采用 Olsen 法、速效钾乙酸铵提取-火焰光度法。

(2) 土壤活性有机碳组分^[11-13]测定: 微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC): 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法^[26], 用 TOC 仪测定熏蒸、未熏蒸浸提液中土壤提取碳含量, 两者差值乘以转化系数 0.45 计算土壤微生物量碳。

易氧化有机碳 (labile organic carbon, LOC) 用 KMnO₄ 氧化法^[27]测定: 称取过 0.2 mm 筛的土壤样品 2 g 于 50 mL 塑料旋盖的离心管中, 加入 25 mL 浓度为 333 mmol·L⁻¹ 的 KMnO₄, 常温下振荡 1 h, 然后在转速 3 000 r/min 下离心 5 min, 取上清液 0.5 mL 于 250 mL 容量瓶中, 定容摇晃均匀, 在分光光度计 565 nm 下测定稀释样品的吸光率。由不加土壤的空白与土壤样品的吸光率之差, 计算出 KMnO₄ 浓度的变化, 进而计算出被氧化碳含量或有机质即活性有机质含量 (氧化过程 1 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 消耗 9 mg C)。

可溶性有机碳^[28] (dissolved organic carbon, DOC): 称取新鲜土样 25.00 g 于三角瓶中, 同时加入 50 mL 高纯水, 在 200 r/min 振荡器上振荡 2 h, 接着在转速为 10 000 r/min 高速离心机里离心 15 min, 用真空泵抽滤过 0.45 μm 薄滤膜, 用 TOC 自动分析仪测定过滤液中水溶性有机碳含量。

1.5 数据计算

(1) 土壤活性有机碳各组分碳素有效率^[29]计算方法:

$$\text{LOC 有效率} (\%) = \text{LOC}/\text{TOC} \times 100\%;$$

$$\text{MBC 有效率} (\%) = \text{MBC}/\text{TOC} \times 100\%;$$

$$\text{DOC 有效率} (\%) = \text{DOC}/\text{TOC} \times 100\%.$$

(2) 土壤碳库管理指数计算方法: 以试验周围撂荒地土壤为参考土壤 (CK₀), 其总有机碳含量为 6.84 g·kg⁻¹, 活性有机碳含量 (采用 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化法)^[30] 为 2.8 g·kg⁻¹。碳库管理指数计算方法如下:

$$\text{总有机碳} = \text{活性有机碳} + \text{非活性有机碳};$$

$$\text{碳库指数 (CPI)} = \frac{\text{样本中的总有机碳含量 (g·kg}^{-1}\text{)}}{\text{参考土壤总有机碳含量 (g·kg}^{-1}\text{)}};$$

$$\text{碳库活度 (L)} = \frac{\text{样本中的活性有机碳含量 (g·kg}^{-1}\text{)}}{\text{样本中非活性有机碳含量 (g·kg}^{-1}\text{)}};$$

$$\text{碳库活度指数 (LI)} = \frac{\text{样本碳库活度 (L)}}{\text{参考土壤碳库活度 (L}_0\text{)}};$$

$$\text{基于以上参数可以得到碳库管理指数 (CPMI)} = \text{CPI} \times \text{LI} \times 100.$$

土壤综合肥力指数 (soil integrated fertility index, IFI): 采用内梅罗指数法对各处理下土壤肥力质量进行评价, 本文选用土壤 pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾作为分肥力指标, 计算分肥力系数, 利用修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力指数^[31]。

(1) 分肥力指数 IFI_i 的计算:

$$\text{IFI}_i = \begin{cases} X/X_a & X \leq X_a \\ 1 + (X - X_a)/(X_c - X_a) & X_a < X \leq X_c \\ 2 + (X - X_c)/(X_p - X_c) & X_c < X \leq X_p \\ 3 & X > X_p \end{cases}$$

式中, IFI_i: 分肥力系数, X: 该属性测定值; X_a 与 X_p: 分级标准下、上限, X_c: 介于分级标准上、下限间 (表 3)。

(2) 综合土壤肥力指数 IFI 的计算:

$$\text{IFI} = \frac{\sqrt{(\text{IFI}_{i\text{平均}})^2 + (\text{IFI}_{i\text{最小}})^2}}{2} + \frac{n-1}{n}$$

式中, IFI_{i 平均} 与 IFI_{i 最小} 为土壤各属性分肥力均值与最小值; n 为评价指标个数。

表 3 土壤各属性分级标准值

Table 3 The grading standards of soil properties

分级 Grade	pH (H ₂ O)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	速效磷 Avail. P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K (mg·kg ⁻¹)
X _a	4.5	20	1.0	10	100
X _c	6.5	30	1.5	20	150
X _p	8.5	40	2.0	40	200

1.6 数据分析

用 Excel 软件进行数据相关计算，试验结果用 SPSS19.0 进行方差齐性检验，检验通过后，采用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验，用 F 统计量进行多因素方差分析，采用 Person 进行相关性分析；Canoco5.0 做主成分分析 (PCA) 以及相关统计分析。

2 结果

2.1 改良剂对沙质潮土化学指标及土壤综合肥力指数 (IFI) 的影响

施用有机改良剂 (T1 和 T3) 显著提高土壤有机碳、速效磷、速效钾含量 (表 4)，无机改良剂 (T2) 与 CK 无显著差异。其中 T1 和 T3 处理土壤有机碳含量较 CK 分别显著提高了 28.42% 和 32.89%；T1、T3 处理的土壤速效磷含量较 CK 分别显著提高了 243.76% 和 254.17%；T1、T2 和 T3 处理的土壤速效钾含量较 CK 分别显著增加了 43.83%、19.81% 和

74.10%。T1、T2 和 T3 处理的土壤 pH 较 CK 分别显著降低了 0.35、0.22 和 0.28，T1、T2、T3 处理之间无显著差异。土壤综合肥力指数 (IFI) T1、T3 处理较 CK 分别显著提高了 15.65% 和 17.39%，T2 较 CK 无显著差异。

2.2 施用不同改良剂对土壤碳库组分含量的影响

2.2.1 改良剂对土壤活性碳各组分含量的影响 由图 1 可知，土壤活性碳库组分含量由高到低依次为：易氧化有机碳 > 微生物量碳 > 可溶性有机碳。T1、T3 处理土壤可溶性有机碳 (DOC) 较 CK 分别显著升高了 16.55% 和 38.29%，T3 较 T1 显著提高了 18.65%，由于单施无机改良剂较 CK 无显著提高，说明有机无机改良剂配施存在一定的交互作用；T1、T3 处理土壤易氧化有机碳含量 (LOC) 较 CK 分别显著提高了 12.36% 和 16.74%；T3 处理土壤微生物量碳 (MBC) 较 CK 显著提高了 10.43%。所有 T2 处理较 CK 均无显著差异。

表 4 土壤改良剂对土壤化学特性及肥力水平的影响

Table 4 Changes of soil chemical properties and integrated fertility index with two soil amendments

处理 Treatment	有机碳 TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 AP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 AK ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	土壤综合肥力指数 IFI
CK	7.41±0.41b	0.92±0.15ab	22.76±6.85b	213.67±18.23d	8.65±0.09a	1.15±0.07b
T1	9.51±0.34a	1.14±0.21ab	78.24±1.50a	307.33±28.02b	8.30±0.02b	1.33±0.04a
T2	7.77±0.34b	0.84±0.21b	24.94±3.12b	256.00±15.10c	8.43±0.09b	1.17±0.04b
T3	9.84±0.62a	1.18±0.10a	80.61±16.68a	372.00±21.00a	8.37±0.06b	1.35±0.03a

不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同

The different letters above mean significant difference at 5% level. The same as below

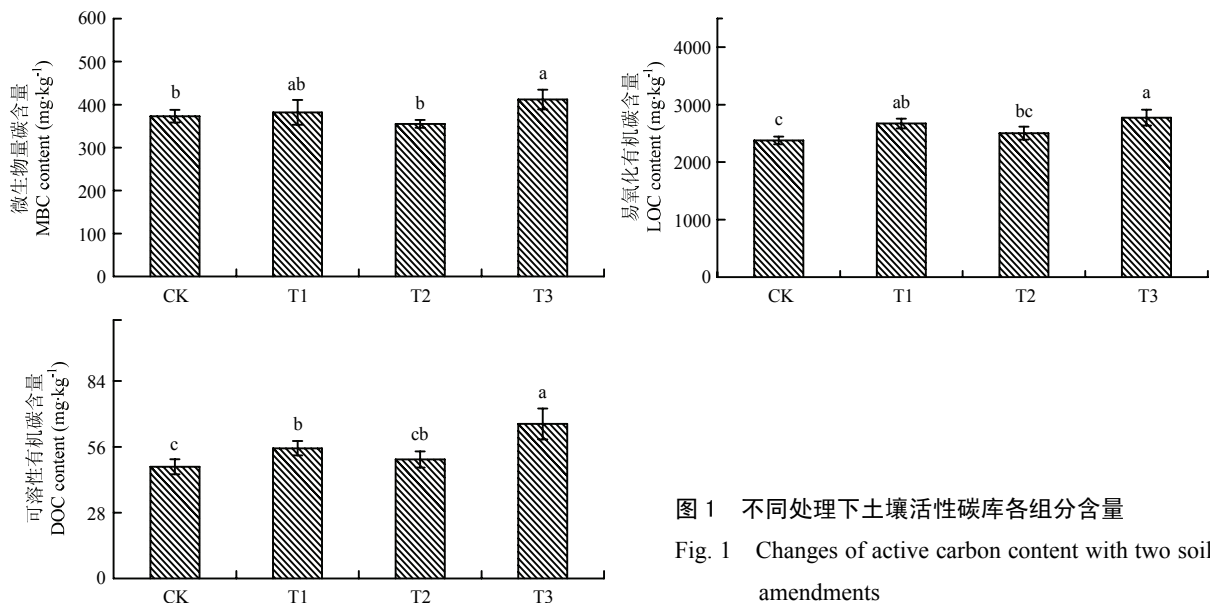


图 1 不同处理下土壤活性碳库各组分含量

Fig. 1 Changes of active carbon content with two soil amendments

2.2.2 改良剂对土壤活性碳组分有效率的影响 由表 5 可知, 不同活性碳占总有机碳的比值在不同改良剂下表现不同。有机改良剂处理 (T1、T3) 的易氧化有机碳有效率 (LOC/TOC) 较 CK 分别显著降低了 12.57% 和 12.02%, T1、T3 较 T2 分别显著降低了 12.84% 和 12.30%; 有机改良剂处理 (T1、T3) 的微生物量碳有效率 (MBC/TOC) 较 CK 分别显著降低了 12.84% 和 12.30%, T1 较 T2 显著降低了 12.14%; T1、T2 和 T3 处理的可溶性碳有效率 (DOC/TOC) 较 CK 均无显著性差异。

2.2.3 不同土壤改良剂对土壤碳库管理指数的影响 由表 6 可知, T1、T3 处理的土壤碳库指数 (CPI) 较 CK 分别显著增加了 28.70% 和 33.33%, T1、T3 处理

较 T2 显著增加了 21.93% 和 26.32%; T1、T3 处理土壤碳库活度 (L) 较 CK 分别显著降低了 17.02% 和 14.89%, T1、T3 处理较 T2 显著增加了 18.75% 和 16.67%; T1、T3 处理土壤碳库活度指数 (LI) 较 CK 分别显著增加了 17.78% 和 16.67%, T1、T3 处理较 T2 显著增加了 17.78% 和 16.67%; T3 处理土壤碳库管理指数 (CPMI) 较 CK 显著增加了 10.64%。以上指标 T2 较 CK 均无显著差异。

2.2.4 土壤碳库各指标的主成分分析 对土壤活性碳组分、碳组分有效率及碳库管理指数进行主成分分析, 结果表明 (图 2), 第一主成分 (PCA1) 解释率

表 5 不同处理下土壤活性碳各组分有效率 (%)

Table 5 Changes of the ratios of soil available carbon content to soil organic carbon with two soil amendments (%)

处理 Treatment	LOC/TOC	MBC/TOC	DOC/TOC
CK	32.13±1.03a	5.05±0.41a	0.64±0.02ab
T1	28.09±1.21b	4.02±0.34c	0.58±0.02b
T2	32.23±0.83a	4.57±0.12ab	0.65±0.07ab
T3	28.27±2.44b	4.19±0.30bc	0.67±0.03a

表 6 改良剂对土壤碳库管理指数(CPMI)的影响

Table 6 Effects of soil amendments on carbon pool management index (CPMI)

处理 Treatment	碳库指数 CPI	碳库活度 L	碳库活度指数 LI	碳库管理指数 CPMI
CK ₀	1	0.53	1	100
CK	1.08b	0.47a	0.90a	96.92b
T1	1.39a	0.39b	0.74b	102.84ab
T2	1.14b	0.48a	0.90a	102.32ab
T3	1.44a	0.40b	0.75b	107.23a

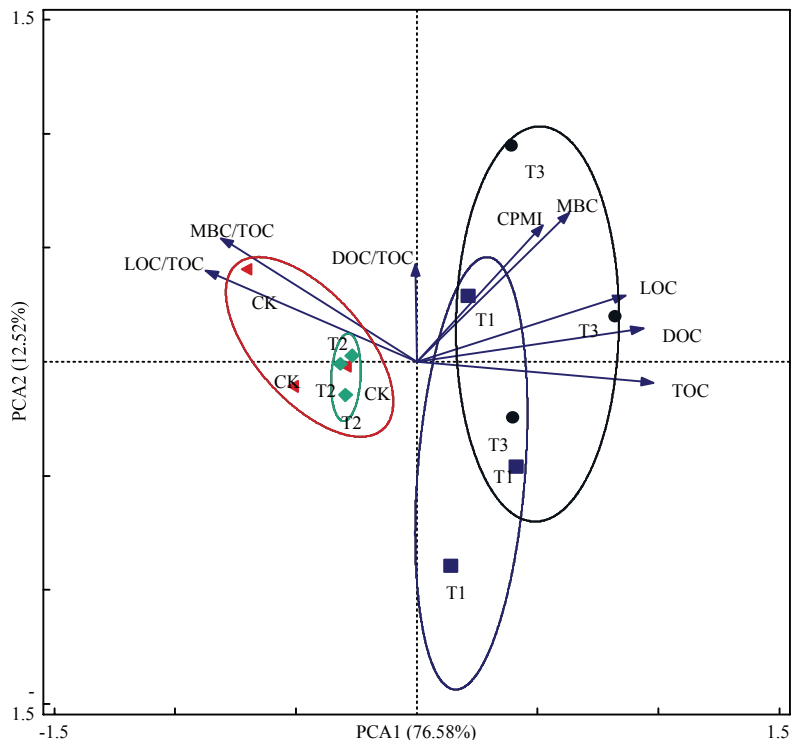


图 2 不同处理土壤碳库指标的主成分分析

Fig. 2 Principal component analyses (PCA) of soil carbon indices under two soil amendments

达 76.58%，主要解释指标是土壤各活性碳组分(LOC、DOC、MBC)及 TOC、CPMI，DOC/TOC 对 PCA1 解释率为几乎为零；第二主成分(PCA2)为 12.52%，主要解释指标是活性碳组分在 TOC 中的分配(MBC/TOC、LOC/TOC)；由图中各参数分布特征可知，LOC/TOC、MBC/TOC 在 CK 处理时最高；活性有机碳各组分在 T1、T3 处理上具有最高载荷。PCA1 主要代表不同土壤改良剂的施入，通过土壤改良剂种类的不同将各区组分开，其中，CK 处理与 T2 处理相交，反映了施用无机改良剂处理活性有机碳各组分与 CK 无明显差异；T1 处理与 T3 处理相交，且 T1、T3 处理点与 CK 处理点相距最远，反映了施用有机改良剂处理之间对提高土壤活性有机碳

各组分含量无明显差异，同时说明了有机改良剂的施用提高了土壤活性有机碳各组分的含量，有利于土壤碳库的积累。

2.2.5 土壤活性碳库各组分、碳库管理指数及活性碳各组分有效率之间的相关性 由表 7 知，活性碳库组分 LOC、MBC 与 DOC 之间存在极显著的相关关系，说明活性碳库各组分之间可以相互转化；LOC 与 MBC/TOC 之间存在显著关系，说明 MBC/TOC 受 LOC 变化影响较大；DOC 与 LOC/TOC、MBC/TOC 之间存在显著关系，说明 LOC/TOC、MBC/TOC 受 DOC 变化影响较大；CPMI 与 LOC、MBC 均存在着显著关系，说明碳库管理指数是能够反映土壤碳库组分变化情况的指标。

表 7 土壤活性碳库各组分、碳库管理指数及活性碳各组分有效率之间的相关系数

Table 7 Correlation coefficients (r) between soil active carbon, CPMI and the carbon pool component allocation ratio

	LOC	MBC	DOC	CPMI	LOC/TOC	MBC/TOC	DOC/TOC
LOC	1	0.726**	0.738**	0.869**	-0.562	-0.613*	-0.132
MBC		1	0.659*	0.631*	-0.392	-0.101	0.085
DOC			1	0.437	-0.748**	-0.63*	0.358
CPMI				1	-0.08	-0.232	-0.042

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $n=12$

3 讨论

3.1 不同土壤改良剂对土壤化学特性和肥力水平的影响

土壤肥力是物理、化学和生物等基本性质的综合表现，是土壤质量的重要组成部分，选用 pH、氮、磷、钾和有机碳计算的土壤肥力指数 (IFI) 可综合表征改良剂对土壤肥力的影响特征^[31]。有研究表明，施用有机土壤改良剂，能够提高土壤有机质、全氮、速效磷等养分含量，提高土壤综合肥力^[32-33]，与本文研究结果一致。本试验发现施用两种土壤改良剂均影响土壤肥力指数相关的 5 个参数。首先，施用有机改良剂能够显著提高土壤有机碳及速效磷含量，这是由于随着有机改良剂的连续施用，其自身向土壤中输入了大量有机物质及磷元素。其次，土壤 pH 均显著下降，并且施用有机改良剂的处理 pH 下降幅度大于无机改良剂。这是由于有机改良剂中含有有机物，经土壤微生物分解后会产生各种腐殖酸物质，从而调节土壤 pH。再者，施用两种土壤改良剂土壤速效钾含量均显著升高，且有机无机改良剂配施效果优于单施，由于无机改良

剂本身速效钾含量很低，因此造成这种结果的原因一方面可能是本试验所用有机改良剂提高了土壤有机质含量，进而减弱了蒙脱石类矿物的膨胀性，从而降低了土壤中钾的固定；另外有机质的增加会促进土壤有机胶体的形成，从而以胶膜形式包被于黏粒表面，阻止钾离子与黏粒矿物的直接接触，减少钾的固定。另一方面原因是无机改良剂自身具有巨大的阳离子交换能力，能够促进土壤缓效钾向速效钾的转化，进而减少了土壤交换性钾的固定量。试验发现施用有机改良剂处理能显著提高土壤综合肥力指数，说明施用有机改良剂使土壤肥力提高显著，可为植物生长提供丰富的养分，而施用无机改良剂对提升土壤肥力无显著效果。另有研究表明，施用有机改良剂不仅能够增加土壤养分含量^[34]，还能够促进作物生长，增加产量，能够提高籽粒品质^[35]。本研究得出，有机土壤改良剂施用于土壤后能显著提高土壤养分含量，提高土壤综合肥力。

3.2 不同土壤改良剂对土壤活性碳组分和活性碳各组分有效率的影响

土壤易氧化有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳

比总有机碳更能灵敏地反映土壤质量和肥力变化,而活性有机碳组分的生物利用率与土壤有机碳源输入密切相关^[36]。有研究发现,单施有机肥及配施有机肥-无机肥均能有效提高土壤中易氧化有机碳组分的含量,且效果较单施无机肥更为显著;连续有机无机肥料配施可提高土壤 MBC、DOC 含量以及 CPMI^[37-38]。本文施用有机改良剂也得到相似的结果,即土壤中 LOC、DOC、MBC 含量均显著升高,其主要原因是:有机改良剂经堆肥处理,其自身富含的好氧活性有机物分解成大量活性固体小颗粒,同时释放出大量 LOC 和 DOC 进入土壤,同时增加了微生物底物,促进微生物的生长^[39]。另由于有机改良剂向土壤输送了大量速效养分,促进了植株地下部的发育和根际有机物的积累,该有机物的分解为微生物活动提供了大量能源,刺激了土壤中微生物群落的生长,同时有机改良剂由于堆肥作用自身含有大量的微生物,从而极大的促进了土壤中的 MBC,同时研究发现有机无机改良剂配施处理较单施有机改良剂处理显著增加,而单施无机改良剂无显著效应,由于影响土壤可溶性有机碳因素很多,比如,季节、温度、湿度、pH,因此原因可能是两种改良剂材料配施后,通过改善土壤湿度和 pH 等影响微生物活性,增加可溶性有机碳的产生,具体机理还需进一步研究。

有研究指出,活性碳含量在土壤总有机碳中所占的比例比活性碳的绝对含量能更好地反映土壤碳库的现状,且活性碳与总有机碳之比可以消除土壤总有机碳含量对活性碳的影响^[18]。微生物熵(MBC/TOC)是评价土壤有机碳动态和质量的有效指标,它的变化反映了土壤中微生物碳的来源及转化效率^[40]。本研究发现施用有机改良剂显著降低该比值,这与用绿肥、有机肥能够增加土壤微生物熵^[30-42]的结果相反,原因可能是有机改良剂对 TOC 的增加效果高于绿肥、有机肥,而对 MBC 的增加效果低于绿肥、有机肥,所以比值降低。

土壤易氧化有机碳有效率(LOC/TOC)可以反映土壤有机碳的质量和稳定性,比例越高,有机碳越容易被微生物分解和矿化,转化时间越短或活性越高,比例越小意味着土壤有机碳稳定且不易被生物降解^[41]。有学者研究发现,绿肥^[42]、有机肥^[43-44]可以增加土壤 LOC 有效率。而本研究发现,施用有机土壤改良剂显著降低 LOC/TOC 比率,单施无机土壤改良剂无显著效果,这可能是由于虽然施入有机土壤改良剂显著提高了土壤各活性碳组分绝对含量,但同时也

向土壤输入了大量稳定态有机碳,因此,间接降低了有机碳转化为活性有机碳的相对效率。说明本试验所使用有机土壤改良剂中有机碳主要以稳定碳组分形式存在,进入土壤后短期分解量较少,从而降低活性有机碳组分的有效率,这与 POWLESON 等^[45]研究结果一致。

土壤可溶性有机碳是土壤中可以利用的部分,其占总有机碳的比例(DOC/TOC)大小既能直接反映土壤中碳库活跃程度,也能间接体现土壤中的生物化学反应现状。本研究发现施用土壤改良剂各处理土壤中 DOC/TOC 较 CK 无显著效果,说明 DOC 含量相对 TOC 同步提高,即转化比率要高于 LOC 和 MBC,这有利于土壤中有有机质的储存^[46]。原因是有机堆肥产物在好氧堆肥过程中其有机物质转换为了更为稳定的状态,如木质素,纤维素,半纤维素等^[47-48]。因此,施入有机土壤改良剂能增加土壤稳定性碳库的库容。

3.3 不同土壤改良剂对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数作为反映和评估土壤碳素动态变化的重要指标,可以灵敏地反应土壤肥力及碳库的变化^[49],能够有效的为研究土壤活性有机碳含量及变化提供理论支撑。本研究结果表明,施用有机改良剂能显著提高土壤碳库指数(CPI),但土壤碳库活度(L)、碳库活度指数(LI)均显著降低,表明施用有机改良剂能够向土壤输送大量非活性有机碳,使土壤稳定态碳含量增加,有利于固定土壤碳,这与上述的土壤碳素有效率降低的规律一致。另外,有学者研究发现仅施化肥的土壤其碳库管理指数会下降^[50],这与本研究结果一致,且发现 CK 处理其碳库管理指数仅为 96.92(低于撂荒地 100),这可能是由于该处理连续单施无机化肥,活性有机碳组分持续消耗且转化量小于消耗量导致的。

4 结论

4.1 以土壤综合肥力指数(IFI)作为指标,3年田间试验表明施用有机改良剂能够有效提高沙质潮土综合肥力。

4.2 施入有机改良剂能够提高土壤碳库各组分绝对含量,显著降低易氧化有机碳、微生物量碳在土壤总有机碳中的占比,表明施用有机改良剂会使土壤中微生物难利用的非活性有机碳含量增大,使得土壤稳定态碳含量增加,有利于沙质潮土有机碳的积累。

References

- [1] 杨劲松, 余世鹏, 刘广明, 李冬顺. 黄淮海平原高水肥改良中低产田耕地质量动态评估. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 232-238, 266.
YANG J S, YU S P, LIU G M, LI D S. Assessment of farmland quality in the improvement process of mid-low yield lands under high water-fertilizer treatments in Huang-Huai-Hai Plain. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 232-238, 266. (in Chinese)
- [2] 周岩, 武继承. 土壤改良剂的研究现状、问题与展望. 河南农业科学, 2010(8): 152-155.
ZHOU Y, WU J C. Research status, problems and prospects of soil amendment. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010(8): 152-155. (in Chinese)
- [3] 刘恋, 张建峰, 姜慧敏, 杨俊诚, 邓仕槐, 郭俊娟, 谢义琴, 张水勤, 王峰源, 李玲玲. 无害化污泥施用对土壤有机质、微生物量碳和氮含量的影响. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 978-984.
LIU L, ZHANG J F, JIANG H M, YANG J C, DENG S H, GUO J M, XIE Y Q, ZHANG S Q, WANG F Y, LI L L. Effects of non-hazardous sewage sludge application on soil organic matter and soil microbial biomass carbon and nitrogen. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 978-984. (in Chinese)
- [4] 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰. 无害化污泥与钼尾矿配施对沙化潮土土壤质量的影响. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2385-2396.
LIU X, HUANG L, GUO K L, ZHANG X L, YANG J C, JIANG H M, ZHANG J F. Effect on the quality of sandy fluvo-aquic soil by application of non-hazardous sewage sludge with molybdenum tailings. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2385-2396. (in Chinese)
- [5] BRYANT C S, ELSA N M, MICHELLE C, KELB F. Biochar and biosolids increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(5): 1372-1385.
- [6] LLORET E, PASCUAL J A, BRODIE E L, BOUSKILL N J, INSAM H, JUAREZ M F, GOBEMA M. Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101: 37-46.
- [7] 肖占文, 闫治斌, 王学, 马世军, 闫富海, 秦嘉海. 有机碳土壤改良剂对风沙土改土效应的影响. 水土保持通报, 2017, 37(3): 35-42.
XIAO Z W, YAN Z B, WANG X, MA S J, YAN F H, QIN J H. Effect of organic carbon soil amendment on sandy soil improvement. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3): 35-42. (in Chinese)
- [8] 文星, 李明德, 吴海勇, 刘琼峰. 土壤改良剂对酸性水稻 pH 值、交换性钙镁及有效磷的影响. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 618-623.
WEN X, LI M D, WU H Y, LIU Q F. The effects of acid soil modifiers on soil pH, exchangeable calcium and exchangeable magnesium, and available phosphorus in acid paddy soils. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(5): 618-623. (in Chinese)
- [9] 刘慧军, 刘景辉, 于健, 徐胜涛, 史吉刚. 土壤改良剂对燕麦土壤理化性状及微生物量碳的影响. 水土保持学报, 2012, 26(5): 68-72, 77.
LIU H J, LIU J H, YU J, XU S T, SHI J G. Effects of soil amendment on soil physicochemical properties of oat and soil microbial biomass carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 68-72, 77. (in Chinese)
- [10] ZHANG X, SUN N, WU L, XU M, BINGHAM I, Li Z. Effects of enhancing soil organic carbon sequestration in the topsoil by fertilization on crop productivity and stability: Evidence from long-term experiments with wheat-maize cropping systems in china. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 247-259.
- [11] DALAL R C, CHAN K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39: 435-464.
- [12] 裴久渤. 玉米秸秆碳在东北旱田土壤中的转化与固定[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
PEI J B. Transformation and fixation of maize straw carbon in the dryland soils of northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [13] STOCKMANN U, ADAMS M A, CRAWFORD J W, FIELD D J, JENKINS N H M, MINASNY B, MCBRATNEY A B, COURCELLES V R, SINGH K, WHEELER I, ABBOTT L, ANGERS D, BALDOCK J, BIRD M, BROOKES P C, CHENU C, JASTROE J D, LAL R, LEHMANN J, O'DONNELL A G, PARTON W J, WHITEHEAD D, ZIMMERMANN M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164: 80-99.
- [14] 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. *Biology and Fertility of Soil*, 2007, 44: 93-101.
- [15] SCHULZ E. Influence of site conditions and management on different soil organic matter (SOM) pools. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2004, 50: 33-48.
- [16] 张仕吉, 项文化. 土地利用方式对土壤活性有机碳影响的研究进展. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 134-143.
ZHANG S J, XIANG W H. Research progress in effects of land use

- mode on soil active organic carbon. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2012, 32(5):134-143. (in Chinese)
- [17] 谢钧宇, 孟会生, 焦欢, 洪坚平, 张杰, 李丽娜, 黄晓磊, 栗丽, 赵林婷, 李廷亮. 施肥对复垦土壤中活性和难降解碳氮组分的影响. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(5): 1113-1121.
- XIE J Y, MENG H S, JIAO H, HONG J P, ZHANG J, LI L N, HUANG X L, LI L, ZHAO L T, LI T L. Effects of fertilization regimes on organic carbon and total nitrogen in labile and recalcitrant fractions of reclaimed soils. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2019, 25(5): 1113-1121. (in Chinese)
- [18] LEIFELD J, KOGEL-KNABNER I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma*, 2005, 124:143-155.
- [19] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155/156(1): 399-402.
- [20] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [21] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 刘骅, 王伯仁, 李菊梅. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006(4): 459-465.
- XU M G, YU R, SUN X F, LIU H, WANG B R, LI J M. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006(4): 459-465. (in Chinese)
- [22] 张影, 刘星, 任秀娟, 李东方, 吴大付, 陈锡岭. 秸秆及其生物炭对土壤碳库管理指数及有机碳矿化的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 153-159, 165.
- ZHANG Y, LIU X, REN X J, LI D F, WU D F, CHEN X L. Effects of straw and biochar on soil carbon pool management index and organic carbon mineralization. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 153-159, 165. (in Chinese)
- [23] 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 朱兴娟, 姜慧敏, 杨俊诚, 李桂花, 张建峰. 无害化污泥堆肥施用量对沙质潮土土壤活性有机碳组分的影响. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 105-113.
- GUO K L, JI Z Y, LIU X, ZHU X J, JIANG H M, YANG J C, LI G H, ZHANG J F. Effects of the application rate of non-hazardous composted sewage sludge on soil active organic carbon fractions of sandy fluvo-aquic soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 105-113. (in Chinese)
- [24] 许帆, 张亚萍, 田兴武, 刘馨, 郝娟霞, 张雪艳. 复合型有机酸性土壤改良剂不同施用量对连作黄瓜土壤改良效果研究. *北方园艺*, 2016(14): 187-192.
- XU F, ZHANG Y P, TIAN X W, LIU X, QI J X, ZHANG X Y. Different dosages of complex organic soil amendments on soil improvement effect of continuous cropping cucumber. *Northern Horticulture*, 2016(14): 187-192. (in Chinese)
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-100.
- BAO S D. *Soil and Agrochemistry Analysis. 3rd ed.* Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-100. (in Chinese)
- [26] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 54-74.
- WU J S, LIN Q M, HUANG Q Y, XIAO H A. *Method for measuring Soil Microbial Biomass and Its Application.* Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54-74. (in Chinese)
- [27] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 朱坚, 田发祥. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 563-568.
- PENG H, JI X H, WU J M, ZHU J, TIAN F X. Organic carbon and carbon pool management index in soil under different rice straw returning way in double-cropping paddy fields. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4): 563-568. (in Chinese)
- [28] 韩琳, 张玉龙, 金烁, 王娇, 魏岩岩, 崔宁, 魏巍. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(8): 1625-1633.
- HAN L, ZHANG Y L, JIN S, WANG J, WEI Y Y, CUI N, WEI W. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(8): 1625-1633. (in Chinese)
- [29] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响. *热带亚热带土壤科学*, 1998(1): 1-5.
- SHEN H, CAO Z H. Effect of long term fertilization on soil available carbon pool and available ratio of soil carbon under different agroecosystems. *Tropicaland Subtropical Soil Science*, 1998(1): 1-5. (in Chinese)
- [30] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723-729.
- XU M G, YU R, WANG B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 723-729. (in Chinese)
- [31] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 黄庆海, 聂军, 张会民, 于寒青. 长期施

- 肥下土壤肥力变化的评价方法. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197-4204.
- BAO Y X, XU M G, LÜ F T, HUANG Q H, NIE J, ZHANG H M, YU H Q. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197-4204. (in Chinese)
- [32] 陈涛, 王新, 梁仁禄, 杨玉森, 尹宏生, 张大南. 污泥草地利用的初步研究. 应用生态学报, 2002(4): 463-466.
- CHEN T, WANG X, LIANG R L, YANG Y S, YIN H S, ZHANG D N. Sewage sludges fertilizer for grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002(4): 463-466. (in Chinese)
- [33] 李艳霞, 赵莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响. 生态学报, 2002, 22(6): 797-801.
- LI Y X, ZHAO L, CHEN T B. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium. *Acta Ecologica Sinica*. 2002, 22(6): 797-801. (in Chinese)
- [34] 赵金星, 周伟, 战英策, 历永杰, 高洪波, 何松榆, 张玉先, 张明聪. 土壤改良剂对盐化草甸土物理性质及水稻产量的影响. 作物杂志, 2018(6): 138-143.
- ZHAO J X, ZHOU W, ZHAN Y C, LI Y J, GAO H B, HE S Y, ZHANG Y X, ZHANG M C. Effects of a new soil ameliorants on soil physical properties and yield of rice in saline meadow soil. *Crops*, 2018(6): 138-143. (in Chinese)
- [35] 李小炜, 白春梅, 田丽, 李晓韬. 两种土壤改良剂对陕北旱区玉米生长及产量的影响. 湖北农业科学, 2019, 58(8): 64-66.
- LI X W, BAI C M, TIAN L, LI X T. Effects of two soil improvers on maize growth and yield in northern Shaanxi arid region. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(8): 64-66. (in Chinese)
- [36] 肖胜生, 房焕英, 段剑, 董云社, 杨洁. 植被恢复对侵蚀型红壤碳吸收及活性有机碳的影响. 环境科学研究, 2015, 28(5): 728-735.
- XIAO S S, FANG H Y, DUAN J, DONG Y S, YANG J. Effects of vegetation restoration on soil carbon sequestration and active organic carbon in eroded red soil. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(5): 728-735. (in Chinese)
- [37] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平平. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应. 环境科学, 2013, 34(2): 676-684.
- LUO K, HU R G, ZHANG W J, ZHOU B K, XU M G, ZHANG J Y, XIA P P. Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 676-684. (in Chinese)
- [38] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 李刚, 常泓, 杨殿林. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282.
- ZHANG R, ZHANG G L, JI Y Y, LI G, CHANG H, YANG D L. Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 277-282. (in Chinese)
- [39] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰, 蔡武, 王昊, 陈韦, 何云峰. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展. 土壤, 2015, 47(3): 446-452.
- HUAN Q, WU J T, CHEN J, CAI W, WANG H, CHEN W, HE Y F. Adsorption of dissolved organic carbon(DOC) on soil: a review. *Soils*, 2015, 47(3): 446-452. (in Chinese)
- [40] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 张文菊, 李兆强, 张敬业. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792-2798.
- SUN F X, ZHANG W H, XU M G, ZHANG W J, LI Z Q, ZHANG J Y. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2792-2798. (in Chinese)
- [41] 佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 梁爱华, 康迪. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用. 中国环境科学, 2013, 33(3): 466-473.
- TONG X G, HAN X H, YANG G H, FENG Y Z, REN G X, LIANG A H, KANG D. Carbon management index as an indicator for changes in soil organic carbon pool under conversion from cropland to forestland. *China Environmental Science*, 2013, 33(3): 466-473. (in Chinese)
- [42] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 陈洪俊, 王淑彬. 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. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2907-2913.
- YANG B J, HUANG G Q, LAN Y, CHEN H J, WANG S B. Effects of nitrogen application and winter green manure on soil active organic carbon and the soil carbon pool management index. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2907-2913. (in Chinese)
- [43] 廖敏, 彭英, 陈义, 谢晓梅, 吴春艳, 唐旭, 刘玉学, 杨生茂. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响. 水土保持学报, 2011, 25(6): 129-133, 138.
- LIAO M, PENG Y, CHEN Y, XIE X M, WU C Y, TANG X, LIU Y X, YANG S M. Effect of long-term different fertilizer management on soil carbon stock characteristics in paddy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 129-133, 138. (in Chinese)
- [44] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 石庆华, 李涛, 王苏影. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1572-1578.
- WU J F, ZENG Y H, PAN X H, SHI Q H, LI T, WANG S Y. Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool

- management index in double rice-cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6): 1572-1578. (in Chinese)
- [45] POWLSON D S, WHITMORE A P, GOULDING K W T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 42-55.
- [46] 刘向华. 可持续发展战略下河南粮食生产能力提高的低碳路径探析. *生态经济*, 2015, 31(9): 114-117.
- LIU X H. Analysis on low-carbon development of grain productivity in Henan under the strategy of sustainability. *Ecological Economy*, 2015, 31(9): 114-117. (in Chinese)
- [47] JORGE-MARDOMINGO I, SOLER-ROVIRAP, CASERMEIRO M A, CRUZ M T, POLO A. Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments. *Geoderma*, 2013, 206: 40-48.
- [48] SCIUBBA L, CAVANI L, NEGRONI A, ZANZROLI G, FAVA F, CIAVATTA C, MARZADORI C. Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates. *Geoderma*, 2014, 221/222: 40-49.
- [49] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 师江澜, 田霄鸿. 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. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1215-1222.
- LI S, LI Y B, WANG S J, SHI J L, TIAN X H. Effects of different straw-returning regimes on soil organic carbon and carbon pool management index in Guanzhong Plain, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1215-1222. (in Chinese)
- [50] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 赵旭, 陈春玉, 黄学芳. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1223-1228.
- WANG S L, YANG Y J, WANG G L, ZHAO X, CHEN C Y, HUANG X F. Effect of long-term fertilization on labile organic carbon in cinnamon soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5): 1223-1228. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)