

郭康莉, 冀拯宇, 刘 晓, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 105–113.

GUO Kang-li, JI Zheng-yu, LIU Xiao, et al. Effects of the application rate of non-hazardous composted sewage sludge on soil active organic carbon fractions of sandy fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 105–113.

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

郭康莉¹, 冀拯宇¹, 刘 晓¹, 朱兴娟², 姜慧敏¹, 杨俊诚¹, 李桂花^{1*}, 张建峰^{1*}

(1. 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; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要: 无害化污泥堆肥是指城市生活污水处理过程中产生并经无害化处理最终符合《城镇污水处理厂污泥处理土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)土地利用标准的堆肥产品(以下简称为污泥堆肥)。以河南省小麦-玉米轮作区沙质潮土为研究对象, 通过2013—2016年田间连续定位试验, 研究了污泥堆肥不同施用梯度对土壤活性有机碳组分含量和活性有机碳组分在土壤有机碳(SOC)中分配比例的影响, 试验处理设置为不施污泥堆肥(CK)、15 t·hm⁻²污泥堆肥(SW1)、30 t·hm⁻²污泥堆肥(SW2)和45 t·hm⁻²污泥堆肥(SW3)。结果表明, 较CK处理, 施用污泥堆肥处理土壤SOC、全氮(TN)含量和土壤综合肥力指数(IFI)均显著升高, 尤其是施用量为45 t·hm⁻²时效果最显著($P < 0.05$), 分别增加了265.83%、284.31%和55.51%。施用污泥堆肥处理各活性碳组分含量均显著提高, 且与其施用量呈正比, 施用污泥堆肥处理中活性碳库各组分含量呈现: 颗粒态有机碳(POC) > 轻组有机碳(LFOC) > 溶解性有机碳(DOC) > 微生物量碳(SMBC)。施用污泥堆肥处理促进微生物量碳分配比例(SMBC/SOC), 其中SW3处理促进效果最为显著, 较CK增加了256.84% ($P < 0.05$)。主成分分析结果与以上结果基本一致, 表明污泥堆肥主要是通过施入量的不同影响土壤中活性碳组分及其分配比例。冗余分析结果进一步发现, 土壤肥力水平、速效养分、pH和土壤水分对土壤活性碳组分含量及其分配产生影响, 其中土壤综合肥力IFI指数显著影响土壤活性有机碳组分含量及其分配率($P < 0.05$), 解释率达64.3%。综上可知, 连续施用4年污泥堆肥能提高沙质潮土土壤肥力, 改善土壤质量, 施入量为45 t·hm⁻²时效果最为显著。

关键词: 无害化污泥堆肥; 沙质潮土; 土壤培肥; 肥力因子; 土壤活性有机碳

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)01-0105-09 doi:10.11654/jaes.2017-0940

Effects of the application rate of non-hazardous composted sewage sludge on soil active organic carbon fractions of sandy fluvo-aquic soil

GUO Kang-li¹, JI Zheng-yu¹, LIU Xiao¹, ZHU Xing-juan², JIANG Hui-min¹, YANG Jun-cheng¹, LI Gui-hua^{1*}, ZHANG Jian-feng^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Non-hazardous composted sewage sludge (SW) originates from the treatment of sewage sludge and is utilized in accordance with the Control Standard of Pollutants in Agricultural Sludge (GB/T 24600—2009 China) for non-hazardous materials. This study focused on the effects of the continuous application of SW on the concentration and distribution of active organic carbon in sandy fluvo-aquic soil under

收稿日期: 2017-07-04 录用日期: 2017-09-22

作者简介: 郭康莉(1993—), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 从事土壤污染与防治研究。E-mail: camille19932016@outlook.com

* 通信作者: 李桂花 E-mail: liguihua@caas.cn

张建峰 E-mail: zhangjianfeng@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(21577172, 41501322); 国家国际科技合作专项(2015DFA20790); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB127406); 国家重点研发计划项目(2016YFE0101100); 中央级公益性科研院所科研业务费专项(1610132016043)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(21577172, 41501322); The International Scientific and Technological Cooperation Projects of China(2015DFA20790); The National Basic Research Program(973 Program) of China(2013CB127406); The National Key Research and Development Program(2016YFE0101100); Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution(1610132016043)

a wheat-maize rotation system during 2013—2016 in Henan Province, China. Four treatments were designed as follows: applying chemical fertilizers only (CK), $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ SW (SW1), $CK+30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ SW (SW2), and $CK+45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ SW (SW3). The results showed that SW could significantly increase soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and soil integrated fertility index (IFI) ($P < 0.05$). The SW3 treatment significantly increased SOC, TN, and IFI by 265.83%, 284.31%, and 55.51% ($P < 0.05$). The SW application could significantly increase soil active organic carbon fractions in an amount-dependent manner in the following order: particulate organic carbon (POC) > light fraction organic carbon (LFOC) > dissolved organic carbon (DOC) > microbial biomass carbon (SMBC). The SW application could enhance the SMBC/SOC ratio, particularly the SW3 treatment, which promoted the SMBC/SOC ratio by 256.84% ($P < 0.05$) compared with the CK treatment. However, the SW application decreased the distribution of LFOC/SOC, POC/SOC, and DOC/SOC, which indicated that SW promoted soil carbon conserved in the form of stable organic matter fractions. Consistent with the above results, the principle component analysis results showed that the influence on soil active organic carbon fractions and its distribution was dependent on the SW application amount. Redundancy analysis further revealed that soil fertility, soil available nutrients, pH and soil moisture were closely related to the content of soil active organic carbon fractions and its distribution. IFI was the most significant factor influencing soil active organic carbon fractions ($P < 0.05$), and it could explain 64.3% of the variation through the redundancy analysis. In summary, the four years of SW application, particularly the $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ non-hazardous composted sewage sludge treatment, could significantly increase soil fertility and the content of active organic carbon, and improve the soil quality.

Keywords: non-hazardous composted sewage sludge; sandy fluvo-aquic soil; soil fertility; fertility factors; soil active organic carbon

土壤有机碳可用于表征土壤肥力高低和评价土壤质量好坏,在调节土壤环境条件、改善土壤结构、提供植物养分及减少环境负面影响等方面具有重要作用。有学者指出,土壤有机碳(SOC)具有高度异质性,不同活性组分有机碳因存在方式和化学性质不同,其生物有效性和肥力功能存在差异,能反映不同的稳定机制^[1]。当前活性指标已发展了轻组有机碳(LFOC)、颗粒态有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)、微生物量碳(SMBC)和可溶性有机碳(DOC)多项指标^[2-3]。由于短时间内,土壤有机碳对人为活动和环境因子的变化响应不灵敏,而土壤活性碳指标能反映土壤质量和土壤总有机碳含量变化,且其容易受土壤管理措施的影响^[4],可用作指示不同农业管理方式的响应指标;同时,学者指出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^[5]。

经过无害化处理最终符合相关土地利用标准的污泥堆肥是一种新型有机物料(简称污泥堆肥)。城市生活污水中重金属的含量越来越低,有利于城市生活污水的土地利用^[6],大量研究表明,污泥土地利用能提升土壤肥力^[7-9]、提高土壤物理结构特征^[10]以及微生物活性^[11-12]。施入无害化污泥直接或间接地调控土壤有机质输入与转化,一定程度上影响土壤有机碳库存和转化,因此,研究污泥堆肥施用条件下土壤有机碳的动态变化,对于提升土壤质量具有重要意义。当前国内外学者对无害化污泥堆肥的研究主要集中在土壤总有机碳的变化上,如 Tian 等指出^[13],污泥堆肥含有大量难降解的有机物组分,土壤残留时间长达

20年,能够促进土壤颗粒对碳的固存,可用于提升土壤质量^[14-15]。Zoghiami 等^[16]通过向突尼斯沙质土壤施用城市污泥发现,污泥年施入量达 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时沙质土壤 C/N 值降低至 15,促进土壤有机碳固定,减少有机碳的损失。然而对土壤活性碳组分及各组分在土壤总有机碳中的分配比例的影响尚未进行深入研究,尤其是典型的沙质潮土。

河南省作为我国重要的粮食生产核心区域,当前沙质潮土面积已达到 66.7 万 hm^2 ,沙质土壤有机碳含量低,物理结构遭到破坏,土壤保肥蓄水能力下降,养分供应能力弱,直接影响了国家农业可持续发展^[17]。因此,本文采用田间连续定位试验,以施用不同量污泥堆肥的河南省沙质潮土为研究对象,通过研究多组分活性有机碳含量及其在土壤有机碳中的分配特征,以为污泥堆肥培肥沙质潮土、提高土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本试验地设在河南省开封市农林科学研究院试验基地($114^{\circ}27'E, 34^{\circ}77'N$),无霜期年均 221 d,2012—2015 年当地降雨及气温为:2012 年平均气温 15.38°C ,平均降雨 467.1 mm ;2013 年平均气温 15.66°C ,平均降雨 335.3 mm ;2014 年平均气温 15.87°C ,平均降雨 508.1 mm ;2015 年平均气温 15.42°C ,平均降雨 583.6 mm 。降雨主要集中在夏季 7—8 月,属于典型温带大陆性季风气候区。土壤类型为沙质潮土^[18]。试验前土壤耕层 0~20 cm 基本理化性质测定结果为:含水率

5.87%, pH 8.42, SOC 12.10 g·kg⁻¹, 全氮 0.44 g·kg⁻¹, C/N=27.50, 速效磷(AP) 13.25 mg·kg⁻¹, 速效钾(AK) 40.32 mg·kg⁻¹, 土壤重金属本底含量如表 1 所示。

1.2 无害化污泥堆肥

试验所用无害化污泥堆肥由郑州市污水净化有限公司提供,以郑州市污水管网分开后单独处理生活污水产生的污泥与秸秆及花生壳等辅料按照一定的比例进行混合,接入枯草芽孢杆菌、黑曲霉和嗜热侧胞酶等混合菌剂,通过好氧发酵、高温堆肥等工艺处理后制成。所得污泥堆肥基本理化特性为:含水率 33.08%, pH 8.05, SOC 223.92 g·kg⁻¹, 全氮(TN) 17.6 g·kg⁻¹, C/N=12.72, AP 559.43 mg·kg⁻¹, AK 4 562.50 mg·kg⁻¹。污泥堆肥中主要重金属和有机污染物含量如表 1 所示,符合《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—1984)中的农田标准。

1.3 试验设计

田间试验开始于 2012 年 10 月,到 2016 年 10 月已连续种植 4 年 8 季作物。试验采用冬小麦-夏玉米轮作制度,供试作物小麦品种选用“开麦 18”,玉米品种选用“开玉 15”,均为当地主栽品种。试验设置 4 个处理:(1)单施化肥,CK;(2)化肥配施 15 t·hm⁻² 污泥堆肥,SW1;(3)化肥配施 30 t·hm⁻² 污泥堆肥,SW2;(4)化肥配施 45 t·hm⁻² 污泥堆肥,SW3。污泥堆肥施入量以湿重形式计算。每个试验处理设置 3 次重复,共计 12 个试验小区,采用随机区组排列。试验小区之间用水泥墙隔断,每个小区面积为 5 m²。根据当地农民施肥习惯,在小麦、玉米种植前分别施入 N 225 kg·hm⁻², P₂O₅ 86 kg·hm⁻², K₂O 113 kg·hm⁻², 供试化肥分别为商品尿素、磷酸一铵和氯化钾。小麦和玉米种植前,污泥堆肥与化肥同时以基肥的形式施入,采用撒施法均匀施入到 0~20 cm 耕层土壤。其他大田管理措施均与当地农民习惯保持一致。

1.4 样品采集、测定项目与方法

1.4.1 土壤样品采集

土壤样品于 2016 年 9 月 26 日(第 8 季玉米收获

期)用四分法采自耕层 0~20 cm 土壤,混合均匀的土样分为三份:一份送往开封市农林科学研究院试验室测定土壤含水率;一份带回实验室,自然风干后分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛;一份置-20℃保存供土壤微生物量碳及土壤水溶性有机碳测定。

1.4.2 测定项目及方法

(1)土壤含水率、pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾等理化指标采用土壤农化分析常量分析法测定^[19]。

(2)土壤活性有机碳库测定

轻组有机碳(Light fraction organic matter carbon, LFOC)^[20]:采用相对密度 $\rho=1.7$ g·cm⁻³ NaI 溶液进行提取,用元素分析仪(EuroEA3000)测定轻组有机物中碳含量。

颗粒态有机碳(Particulate organic matter carbon, POC)^[21]:采用 5 g·L⁻¹ 六偏磷酸钠(HMP)溶液分散法,采用重铬酸钾-外加热法测定颗粒态土壤中的有机碳,即土壤颗粒态有机碳。

土壤微生物量碳(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN)^[22]:采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法,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计算土壤微生物量碳。

土壤水溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)^[23]:称取 25.00 g 过 2 mm 筛新鲜土,放入 250 mL 塑料瓶中,加入 50 mL 高纯水,在往复式振荡器(200 r·min⁻¹)上振荡 2 h,高速离心机(10 000 r·min⁻¹)离心 15 min,用真空泵抽滤过 0.45 μm 膜,用 Multi 2100 N/C TOC 分析仪测定水溶性有机碳含量。

1.5 数据计算

LFOC 含量(g·kg⁻¹)=轻组物质中有机碳含量×轻组物质占全土的质量分数

POC 含量(g·kg⁻¹)=颗粒态土壤中有机质含量×颗粒态土壤占全土的质量分数

SMBC 含量(mg·kg⁻¹)=(熏蒸测定值-未熏蒸测定值)×稀释倍数×浸提液体积×水分系数/(土壤质量×0.38)

表 1 土壤和污泥堆肥重金属和有机污染物含量

Table 1 Content of heavy metals and organic pollutants in the soil(initial values) and non-hazardous composted sewage sludge

指标	Cu/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	矿物油	苯并芘
土壤	9.77	0.14	13.95	28.9	26.71	12.31	—	—
堆肥产品	163.35	1.31	21.25	335.24	100.49	52.25	—	—
GB 4284—1984 规定最高容量	500	20	1000	1000	1000	200	3000	3

注:—表示未测出。

Note:— not detected.

LFOC 分配比例(%)=LFOC 含量/SOC 含量×100%

POC 分配比例(%)=POC 含量/SOC 含量×100%

SMBC 分配比例(%)=SMBC 含量/SOC 含量×100%

DOC 分配比例(%)=DOC 含量/SOC 含量×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(参照张雪凌等^[24]计算方法),本文选用土壤 pH、有机质、全氮、有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。

1.6 数据分析

采用 SPSS 19.0 对数据进行方差齐次性检验,检验通过后($P>0.05$),采用均值间最小差异显著性(LSD)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;Canoco 5.0 做主成分分析(PCA)、冗余分析(RDA)以及相关统计分析;采用 Origin 8.0 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 污泥堆肥对沙质潮土总氮、土壤有机碳及土壤综合肥力指数的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,施用污泥堆肥显著增加了土壤全氮(TN)含量,SW1、SW2 和 SW3 处理显著增加了 93.12%、148.73%和 284.31%($P<0.05$)。土壤有机碳(SOC)含量随污泥堆肥施入量增加而上升,分别增加了 121.23%、163.18%和 265.83%($P<0.05$)。TN 增幅高于 SOC,导致土壤 C/N 随污泥堆肥施入量增加而降低,这有利于土壤微生物对土壤有机质的矿化代谢,为植物生长提供养分。较 CK 处理,堆肥产品施入促进土壤田间持水作用,土壤含水率增加了 51.62%~233.04%,SW2、SW3 处理与 CK 处理差异达显著水平($P<0.05$),降低土壤 pH($P<0.05$),增加土壤速效养分含量,在 SW3 处理时,速效磷(AP)和速效钾(AK)分别显著增加了 190.92%和 373.82%($P<0.05$)。

由表 2 可知,污泥堆肥能显著提高土壤综合肥力,较 CK 处理,SW1、SW2 和 SW3 土壤综合肥力指数(IFI)分别增加了 25.31%、38.23%和 55.51%,均达显著性水平($P<0.05$)。

2.2 污泥堆肥对沙质潮土活性碳库各组分的影响

2.2.1 土壤活性有机碳库各组分变化特征

由图 1 可知,土壤活性有机碳各组分含量:POC>LFOC>DOC>SMBC。较 CK 处理,SW1、SW2 和 SW3 处理 LFOC 分别增加了 12.29%、36.72%和 246.17%;POC 分别增加了 109.26%、137.73%和 176.69%;SMBC 增加了 1.82、10.19 倍和 12.11 倍;DOC 增加了 51.64%、83.78%和 160.71%。各活性碳组分均随污泥堆肥施入量的增加而提高,活性有机碳各组分增加幅度呈现:SMBC>LFOC>POC>DOC,说明各活性碳组分中,SMBC 受污泥堆肥影响最为显著,DOC 所受影响最小。

2.2.2 土壤活性碳组分与土壤有机碳之间的相关性分析

由图 2 可知,土壤 POC、SMBC 和 DOC 活性碳组分与 SOC 呈极显著相关性,相关系数分别为 0.839、0.776 和 0.780($P<0.01$),LFOC 与 SOC 呈显著相关性,相关系数为 0.619($P<0.05$),各活性碳组分与 SOC 的相关性依次为 POC>DOC>SMBC>LFOC,说明活性碳组分与 SOC 的依存关系存在差异性。

2.2.3 活性有机碳各组分在 SOC 中的分配比例

由表 3 可知,LFOC/SOC、POC/SOC 和 DOC/SOC 分配比例在 SW1、SW2 和 SW3 处理下均较 CK 有所降低,LFOC/SOC 分配于 SW1 和 SW2 处理下显著低于 CK,分别降低了 49.78%和 47.75%($P<0.05$),其余各分配比例与 CK 不存在显著性差异;从 SW1、SW2 和 SW3 处理间活性有机碳分配比例变化特征可发现,污泥堆肥促进 LFOC/SOC 分配($P<0.05$),对 DOC/SOC 分配特征影响不显著,而 POC/SOC 分配比例随污泥堆肥施入量增加而降低,各处理间差异不显著;污泥堆肥促进 SMBC/SOC 分配,SW2 和 SW3 较 CK

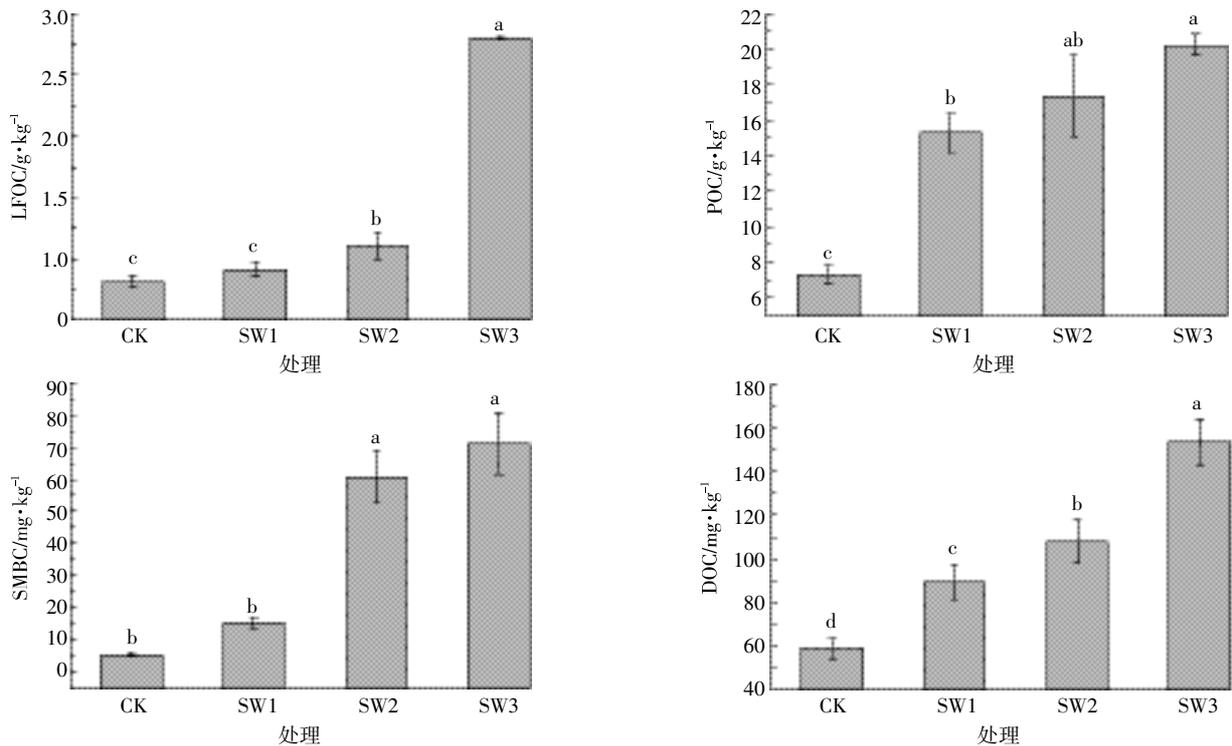
表 2 污泥堆肥对土壤理化特性及肥力水平的影响

Table 2 Soil physical, chemical properties and soil integrated fertility index under the treatments of composted sewage sludge

处理	含水率/%	土壤酸碱度 pH	全氮 TN/ g·kg ⁻¹	土壤有机碳 SOC/g·kg ⁻¹	碳氮比值 C/N	速效磷 AP/ mg·kg ⁻¹	速效钾 AK/ mg·kg ⁻¹	土壤综合肥 力指数 IFI
CK	3.62±0.61b	9.02±0.16c	0.50±0.07d	10.06±1.04c	20.34±3.01a	30.82±4.25d	13.37±1.15d	0.75±0.03d
SW1	5.49±1.18b	8.61±0.18bc	0.96±0.12c	17.83±0.94b	18.68±2.50a	61.10±3.97c	30.03±3.78c	0.94±0.02c
SW2	9.80±0.71a	8.19±0.14ab	1.24±0.16b	21.21±2.63b	17.08±0.05a	78.34±3.48b	48.35±2.90b	1.03±0.02b
SW3	10.97±1.12a	8.13±0.12a	1.72±0.09a	29.49±4.02a	15.39±2.31a	89.66±5.36a	63.35±7.63a	1.16±0.03a

注:不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

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



误差线上不同字母表示各处理在 0.05 水平下差异显著
Bars with different letters above mean significant difference at 5% level

图 1 施用污泥堆肥对土壤各活性有机碳库的影响

Figure 1 Contents of different forms of soil active organic carbon under the treatments of composted sewage sludge

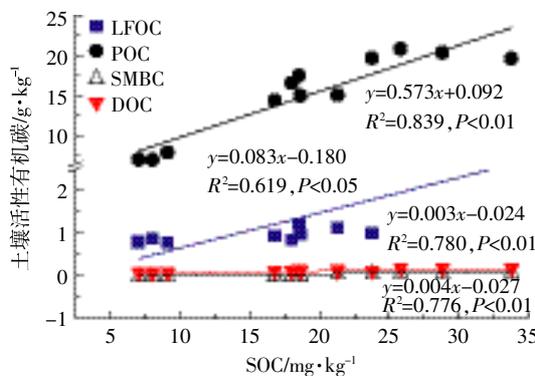


图 2 土壤各活性碳组分与土壤有机碳相关性分析

Figure 2 Correlation of the different forms of soil active organic carbon with soil organic carbon

显著增加了 3.22 倍和 2.57 倍($P<0.05$)。

2.3 土壤活性有机碳各组分之间及与 IFI 肥力指数、分配比例之间的相关性

由表 4 可知,土壤活性有机碳各组分之间均存在显著相关性($P<0.05$),说明各活性碳组分含量受污泥堆肥影响一致;土壤活性碳库(LFOC 除外)与土壤综合肥力因子相关性达极显著水平($P<0.01$),说明活性碳库与 IFI 肥力综合指数变化一致,活性有机碳库不仅能够指示土壤有机碳的组成特征,同时可以表征污泥堆肥对土壤肥力的影响特征。表 4 相关性分析表明,土壤活性有机碳组分与碳组分分配比例的相关性存在差异。LFOC/SOC 分配比例与各活性碳组分含量

表 3 施用污泥堆肥对土壤各活性碳组分分配比例影响情况(%)

Table 3 Proportion of different forms of soil active organic carbon account for the soil organic carbon(%)

处理	轻组有机碳/土壤有机碳 LFOC/SOC	颗粒态有机碳/土壤有机碳 POC/SOC	微生物量碳/土壤有机碳 SMBC/SOC	水溶性有机碳/土壤有机碳 DOC/SOC
CK	10.17±1.54a	91.31±7.44a	0.07±0.01c	0.74±0.13a
SW1	5.11±0.44b	85.90±5.68a	0.09±0.01c	0.50±0.06a
SW2	5.31±1.16b	82.49±11.81a	0.29±0.01a	0.52±0.12a
SW3	9.62±1.24a	69.66±11.26a	0.24±0.02b	0.53±0.10a

表 4 土壤活性有机碳组分、IFI 肥力因子及活性碳组分分配比例间相关性分析

Table 4 Correlation coefficient between different forms of soil active organic carbon,IFI index and allocation efficiency of soil active organic carbon

组分	LFOC	POC	SMBC	DOC	IFI	LFOC/SOC	POC/SOC	SMBC/SOC	DOC/SOC
LFOC	1	0.678*	0.746**	0.900**	0.465	0.402	-0.691*	0.540	-0.241
POC		1	0.831**	0.879**	0.873**	-0.331	-0.542	0.743**	-0.680*
SMBC			1	0.848**	0.889**	-0.086	-0.706*	0.940**	0.519
DOC				1	0.740**	0.078	-0.621*	0.736**	-0.377

不存在相关性;POC/SOC 分配比例与 LFOC、SMBC 和 DOC 呈显著性负相关关系($P<0.05$);SMBC/SOC 分配比例与 LFOC 不相关,与其余碳组分呈极显著正相关($P<0.01$);DOC/SOC 仅与 POC 存在显著负相关性($P<0.05$)。

2.4 土壤活性碳组分及其分配比例主成分分析

将收获期 4 个处理 12 个样本活性有机碳组分含量及其在 SOC 中的分配比例进行 PCA 排序(图 3)。PCA 排序图第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的方差贡献率分别为 58.57%和 36.42%,累计贡献率达到 94.99%,其中 PC1 主要与活性碳组分(SMBC、DOC 和 POC)、SMBC/SOC 和 DOC/SOC 分配比例相关,PC2 主要与 LFOC 和 LFOC/SOC 相关。可见 PCA 前两个排序轴涵盖样本绝大部分数据信息;由样本和活性碳组分及其分配比例分布特征可知,LFOC/SOC、POC/SOC 和 DOC/SOC 分配比例在 CK 处理时最高,远高于平均分配比例;SW1 和 SW2 处理时活性碳组分含量及其分配比例均较低,仅达到平均水平;活性有机碳各组分及 SMBC/SOC 分配比例在 SW3 处理点上具

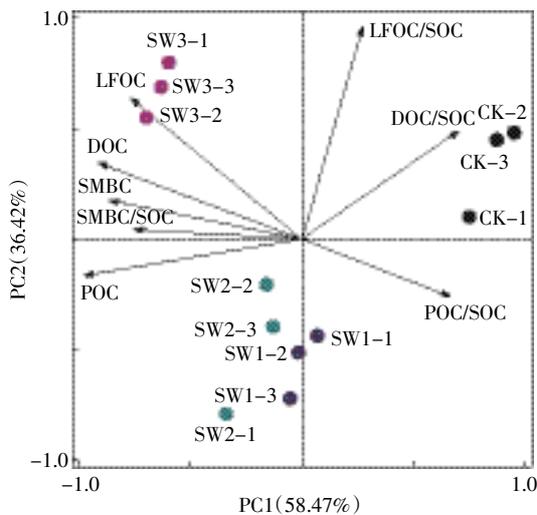
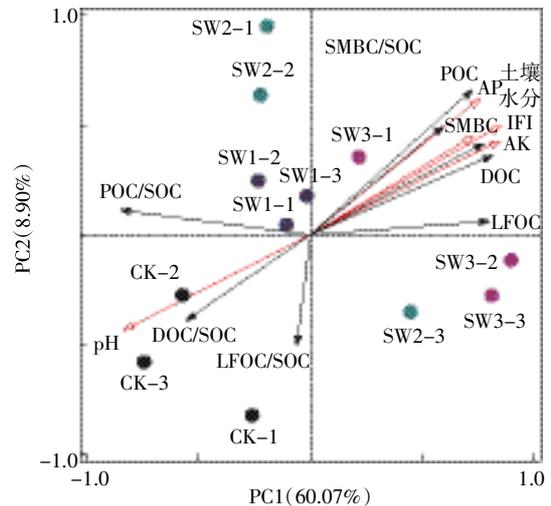


图 3 污泥堆肥处理土壤活性有机碳指标的主成分分析
Figure 3 Principal component analyses(PCA) of different forms of soil active organic nitrogen and allocation efficiency of soil active organic nitrogen under composted sewage sludge treatments

有最高载荷。PCA 图中,从右到左能较好地将 CK、SW1、SW2 和 SW3 处理点区分开,其中,SW3 处理点与 CK 处理点分隔最远,反映了污泥堆肥不同施用量对土壤活性有机碳及其分配比例的影响特征,说明高施入量污泥堆肥显著改变了土壤肥力水平。

2.5 土壤理化因子与土壤活性碳组分及分配比例的冗余分析

冗余分析表明(图 4),第一排序轴(PC1)能解释 60.07%,第二排序轴(PC2)解释 8.90%,前两个排序轴累积解释 68.97%的活性碳组分及分配比例与环境因子的关系,其中,分配比例 LFOC/SOC、POC/SOC 和 DOC/SOC 均与土壤 pH 呈正相关,土壤各活性碳组分及 SMBC/SOC 分配比例与其余土壤环境因子呈正相关,与 pH 负相关。进一步利用 RDA 内置偏蒙特卡罗置换检验可知每个环境指标所能解释的变化量,土壤



黑色实心箭头代表土壤活性有机碳组分及其在 SOC 中的分配比例;红色箭头代表环境因子
Black solid arrow mean the soil active organic carbon fractions content and its allocation; Red arrow mean environmental factors

图 4 土壤活性有机碳与土壤理化指标的冗余分析
Figure 4 Redundancy analyses(RDA) between soil biochemical index and different forms of soil active organic nitrogen, allocation efficiency of soil active organic nitrogen under the composted sewage sludge treatments

环境因子 IFI、AK、pH、AP 和土壤水分单独解释土壤活性碳组分及其分配比例变化的 64.3%、63.3%、61.8%、53.1%和 47.4% ($P < 0.05$), 其中 IFI 单独解释能力最强, 说明污泥堆肥改变了土壤肥力特征及土壤环境条件, 进而能显著影响土壤活性碳的组成及其分配特征。

3 讨论

3.1 施用污泥堆肥对土壤理化特性和肥力水平的影响

污泥堆肥显著增加土壤田间持水量, 降低土壤 pH, 提高土壤养分含量, 在施入量 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时沙质潮土质量提升效果最为显著。土壤肥力是众多物理、化学和生物学因子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、钾和有机质计算土壤肥力指数 (IFI) 可综合表征污泥堆肥对土壤肥力的影响特征^[25]。本研究表明, 污泥堆肥施入水平为 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时 IFI 指数最佳, 说明污泥堆肥在该施入量下土壤肥力提高显著, 可为植物生长提供丰富的养分。土壤主要养分指标的分析结果表明, 连续施用污泥堆肥 4 年后, 土壤 TN 和 SOC 均显著提升, 在施入量为 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最高水平, 这是由于污泥堆肥含有丰富的有机物, 施入量增加显著提升养分水平, 说明增加农田的系统投入量是提高土壤肥力的有效途径^[7, 17]。本研究同时发现, 施用污泥堆肥降低土壤 C/N 值, 主要因为污泥堆肥自身 C/N 值低, 可有效降低土壤 C/N 值, 土壤 C/N 值是影响有机物矿化速率进而影响土壤有机质供肥能力的重要因素, 是土壤微生物活性和土壤有机质矿化程度的重要评价指标。研究指出, 土壤有机质的 C/N 值与其分解速度成反比关系, 污泥堆肥施入降低土壤 C/N 值, 多余的土壤氮素受土壤微生物调控作用而矿化释放氮, 为作物提供养分^[13, 26]。

3.2 污泥堆肥对土壤活性碳组分和分配比例的影响

宋震震等^[27]通过连续 26 年长期定位试验发现, 长期施用有机肥显著增加黑土活性有机物各组分含量, 50% 有机肥和 50% 无机肥配施处理各活性有机物组分含量与全量施入有机肥处理效果相当, 说明有机肥和化肥对活性有机物各组分的形成均发挥着重要作用。本研究结果表明, 污泥堆肥施入提高沙质潮土土壤 LFOC、POC、DOC 和 SMBC 含量, 与土壤有机碳变化趋势保持一致, 主要因为污泥经堆肥处理后自身富含大量与活性有机物相似组分, 施入土壤后直接以轻组和颗粒态有机物形式包裹在土壤大团聚体上, 以一种非保护性有机碳组分形式存在, 或以 DOC 形式

溶出进入到土壤溶液中; 另外, 污泥堆肥为植物提供大量速效养分, 可增加植物根系生物量, 配施化肥可促进植物根茬和脱落物以轻组有机物的形式返还于土壤耕层, 从而增加活性有机物含量。本研究土壤类型为沙质潮土, 经污泥堆肥培肥后显著增加土壤有机物含量和土壤含水率, 提高沙质潮土保水保肥能力可降低土壤对 DOC 的淋溶作用, 从而提高土壤 DOC 组分含量^[17]。有学者指出, 土壤微生物对土壤碳和氮循环发挥着重要作用, 在有机质分解过程中发挥约 70% 的作用, 施用有机物可增加土壤活性有机物含量, 进而影响土壤生物量及微生物群落结构组成^[27]。Tian 等^[13]通过长期定位试验, 借助 ^{15}N 稳定性同位素标记技术发现, 农田土壤中施入无害化污泥可降低土壤微生物代谢熵 (SMBC/SMBN), 可有效减轻微生物生长压力, 提高土壤微生物对碳和氮的代谢能力。本研究发现, 污泥堆肥于 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施入水平时显著增加 SMBC 含量, 究其原因, 污泥堆肥增加 DOC 含量, 可供微生物直接吸收利用, 从而增加微生物的生物量和代谢活性。

Leifeld 等^[9]指出土壤活性有机碳组分含量占总有机物含量的百分率可消除 SOC 含量差异对活性有机碳组分的影响, 比各活性组分的绝对值更能体现土壤养分的储存情况。其中, 颗粒态有机碳分配比例 (POC/SOC) 和轻组有机氮分配比例 (LFOC/SOC) 能反映土壤过渡态有机碳库储存情况, 是其他活性有机碳库、微生物代谢主要物质和能量来源; 土壤可溶性有机碳分配比例 (DOC/SOC) 反映了土壤中最活跃碳组分占土壤有机碳的比例, 其值大小对土壤生物化学反应影响较大。本研究发现, 较 CK 处理, 施用污泥堆肥降低 LFOC/SOC、POC/SOC 和 DOC/SOC 分配, 随着污泥堆肥施入量增加, LFOC/SOC 和 DOC/SOC 分配比例逐渐升高, 但总体仍低于 CK 处理, 这是因为施入污泥堆肥仅提高了土壤活性碳绝对含量, 随着施入量增加, 有机碳转化为活性有机碳的效率降低, Powleson 等^[15]指出, 无害化污泥堆肥腐殖化程度较高, 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分配比例, 同时, 土壤颗粒态有机物和轻组有机物组分有机物中的 C/N 值含量较全土 C/N 值高, 外源施入氮肥促进微生物对 POC 和 LFOC 代谢利用, 从而降低 POC 和 LFOC 在 SOC 中的分配比例^[28-30]。污泥堆肥处理显著增加微生物代谢活性并促进 SMBC/SOC 分配, 主要因为污泥堆肥培肥土壤过程中土壤环境条件的改变为

微生物生长代谢提供有利条件,从而促进土壤碳素整合到微生物碳库中^[31],McDowell等^[32]和骆坤等^[28]研究也发现,施入有机物可提高土壤微生物的生物量,刺激微生物对DOC的消耗,从而降低DOC在SOC中的分配比例。

通过主成分分析结果可知,施用无害化污泥堆肥处理明显改变土壤活性碳各组分含量及其分配比例,从培肥土壤角度出发,污泥堆肥施入量达 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时显著增加土壤各活性碳组分含量,提高土壤有机物中碳的质量;从分配比例出发,污泥堆肥高施入量降低活性有机碳的分配比例,说明污泥堆肥培肥土壤过程中,土壤有机碳主要以惰性有机碳形式存在,从另一个角度而言,增大污泥堆肥的施入量可以使土壤碳库更稳定,有利于土壤有机质的储存^[17]。

3.3 土壤活性有机碳组分及其分配比例与环境因子的冗余分析

无害化污泥堆肥增加土壤速效养分,改善土壤物理环境条件,对土壤理化条件和肥力质量影响显著。冗余分析结果表明,提高土壤含水率可促进活性有机碳组分的形成,污泥堆肥降低土壤pH提高SMBC组分含量并促进SMBC/SOC分配,Liu等^[31]研究指出,连续施用城市生活污水污泥可通过降低土壤pH从而影响土壤微生物的丰富度和均匀度,增加土壤碳循环优势物种的丰度。土壤IFI综合指数对土壤各活性碳组分具有较高的解释率,说明土壤活性碳含量不仅可以指示土壤质量受土壤管理措施的影响情况,而且可表征土壤肥力高低程度^[4,33]。因此,合理施用无害化污泥堆肥能显著培肥与改良沙质潮土,提高土壤质量。

4 结论

(1)施用无害化污泥堆肥能改善土壤环境条件,提高沙质潮土TN、SOC含量和IFI综合肥力指数,培肥效果受施入量影响显著,于 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施入量下效果最佳。

(2)施用无害化污泥堆肥显著增加土壤活性有机碳含量;施入无害化污泥堆肥降低轻组有机碳、颗粒态有机碳以及溶解性有机碳在土壤有机碳中的分配比例,而显著增加土壤微生物量碳分配比例,主成分分析结果进一步表明,堆肥产品高施用量有利于提高土壤活性碳组分含量,并且增加施入量降低活性碳组分在土壤有机碳中的占比,有利于沙质潮土有机碳的积累。

(3)冗余分析表明,施用无害化污泥堆肥可改善

土壤环境条件,从而影响土壤活性碳组分及其分配比例,其中土壤肥力因子综合指数(IFI)对活性碳组分变化解释率较高,说明堆肥产品施入改变了土壤活性有机碳各组分含量及其分配,是提升土壤肥力的一个重要原因。

参考文献:

- [1] 张丽敏,徐明岗,娄翼来,等.长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J].中国农业科学,2014,47(19):3817-3825.
ZHANG Li-min, XU Ming-gang, LOU Yi-lai, et al. Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19):3817-3825.
- [2] 王玲莉,娄翼来,石元亮,等.长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J].土壤通报,2008,39(4):752-755.
WANG Ling-li, LOU Yi-lai, SHI Yuan-liang, et al. Effect of long-term fertilization on the soil active organic carbon indicators[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4):752-755.
- [3] 路文涛,贾志宽,张鹏,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):522-528.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):522-528.
- [4] Li S, Zhang S R, Pu Y L, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:289-297.
- [5] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1):143-155.
- [6] 刘峰,万新南,陈希伟.浅谈中国城市污泥的处置[J].环境科学与管理,2009,34(8):116-119.
LIU Feng, WAN Xin-nan, CHEN Xi-wei. On the disposal of sewage sludge[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(8):116-119.
- [7] 刘恋,张建峰,姜慧敏,等.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[J].农业环境科学学报,2014,33(5):978-984.
LIU Lian, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of non-hazardous sewage sludge application on soil organic matter and soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(5):978-984.
- [8] Withers P J A, Flynn N J, Warren G P, et al. Sustainable management of biosolid phosphorus: A field study[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(Suppl1):54-63.
- [9] Cogger C G, Bary A I, Myhre E A, et al. Biosolids applications to tall fescue have long-term influence on soil nitrogen, carbon, and phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(2):516-522.
- [10] 刘晓,黄林,郭康莉,等.无害化污泥与钼尾矿配施对沙化潮土土壤质量的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(12):2385-2396.
LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, et al. Effect on the quality of

- sandy fluvo-aquic soil by application of non-hazardous sewage sludge with molybdenum tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12):2385-2396.
- [11] Scharenbroch B C, Meza E N, Catania M, et al. Biochar and biosolid increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(5):1372-1385.
- [12] Lloret E, Pascual J A, Brodie E L, et al. Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101:37-46.
- [13] Tian G, Granato T C, Cox A E, et al. Soil carbon sequestration resulting from long-term application of biosolid for land reclamation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(1):61-74.
- [14] Scharenbroch B C, Meza E N, Catania M, et al. Biochar and biosolid increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(5):1372-1385.
- [15] Powelson 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[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1):42-55.
- [16] Zoghalmi R I, Hamdi H, Mokni-Thili S, et al. Changes in light-textured soil parameters following two successive annual amendments with urban sewage sludge[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95:604-611.
- [17] 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[J]. *生态经济*, 2015, 31(9):114-117.
LIU Xiang-hua. Analysis on low-carbon development of grain productivity in Henan under the strategy of sustainability[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(9):114-117.
- [18] 刘 晓, 黄 林, 郭康莉, 等. 施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变[J]. *环境科学*, 2017, 38(3):1218-1226.
LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, et al. Influence of the application of non-hazardous sewage sludge on the evolution of soil carbon pool and carbon pool management index[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1218-1226.
- [19] 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, 1999.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [20] Gregorich E G, Ellert B H. Light fraction and macroorganic matter in mineral soils[J]. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 1993:397-407.
- [21] 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.
- [22] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
WU Jin-shui. Soil microbial biomass methods and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [23] 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.
- [24] 张雪凌, 姜慧敏, 刘 晓, 等. 优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2):351-359.
ZHANG Xue-ling, JIANG Hui-min, LIU Xiao, et al. Optimization of nitrogen rate and base and topdressing ratio to improve agronomic soil fertility and use efficiency of nitrogen in rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2):351-359.
- [25] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(20):4197-4204.
BAO Yao-xian, XU Ming-gang, LÜ Fen-tao, et al. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20):4197-4204.
- [26] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(7):2669-2677.
LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju. Impacts of land use changes on soil light fraction and particulate organic carbon and nitrogen in Jinyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7):2669-2677.
- [27] 宋震震, 李絮花, 李 娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3):525-533.
SONG Zhen-zhen, LI Xu-hua, LI Juan, et al. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3):525-533.
- [28] 骆 坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. *环境科学*, 2013, 34(2):676-684.
LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, et al. Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2):676-684.
- [29] Luce M S, Whalen J K, Ziad N, et al. Net nitrogen mineralization enhanced with the addition of nitrogen-rich particulate organic matter[J]. *Geoderma*, 2016, 262:112-118.
- [30] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, et al. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter?[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4):988-995.
- [31] Liu X, Guo K L, Huang L, et al. Responses of absolute and specific enzyme activity to consecutive application of composted sewage sludge in a Fluventic Ustochrept[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5):e0177796.
- [32] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[M]//Biogeochemical Investigations at Watershed, Landscape, and Regional Scales. Springer Netherlands, 1998:175-182.
- [33] 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.