

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

刘 恋¹, 张建峰^{2,3}, 姜慧敏^{2,3}, 杨俊诚^{2,3*}, 邓仕槐^{1*}, 郭俊梅^{2,3}, 谢义琴¹,
张水勤^{2,3}, 王峰源⁴, 李玲玲^{2,3}

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3.耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 4.辽宁大学环境学院, 沈阳 110036)

摘要:合理施用无害化处理后的城市污泥是废弃物资源化利用的重要途径之一。本文采用小麦、玉米轮作的田间连续定位试验, 研究了不同施用量的无害化污泥对华北沙化潮土土壤中有机质、微生物量碳和氮含量的影响。结果表明:施用无害化污泥 $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CK)、 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A1)、 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A2) 和 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A3) 4 种处理下, 与 CK 相比, A3 处理在小麦季和玉米季土壤有机质含量均得到显著提高 ($p < 0.05$), 其中小麦季土壤有机质含量为 $17.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加了 30.91%; 玉米季土壤有机质含量为 $26.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加了 80.53%。A2 和 A3 处理对土壤微生物量碳和氮的提升也分别达到显著水平 ($p < 0.05$), 小麦季 A2 和 A3 处理土壤微生物量碳含量分别达到 $225.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $321.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 CK 处理分别增加 144.20% 和 247.18%; 玉米季 A2 和 A3 处理土壤微生物量碳含量分别达到 $154.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $190.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别增加 29.19% 和 59.60%; 小麦季 A2 和 A3 处理土壤微生物量氮含量分别达 $13.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $23.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 CK 处理分别增加 95.52% 和 245.66%; 玉米季 A2 和 A3 处理土壤微生物量氮含量分别达 $29.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $30.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 CK 处理分别增加 40.08% 和 45.82%。在小麦和玉米轮作周期, 随无害化污泥施用量的增加, 土壤有机质含量、土壤微生物量碳和氮的含量均得到有效提高; 土壤有机质、微生物量碳和氮的含量分别与无害化污泥的不同施用量呈正相关关系。

关键词:无害化污泥资源化利用; 土壤有机质; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)05-0978-07 doi:10.11654/jaes.2014.05.022

Effects of Non-Hazardous Sewage Sludge Application on Soil Organic Matter and Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen

LIU Lian¹, ZHANG Jian-feng^{2,3}, JIANG Hui-min^{2,3}, YANG Jun-cheng^{2,3*}, DENG Shi-huai^{1*}, GUO Jun-mei^{2,3}, XIE Yi-qin¹, ZHANG Shui-qin^{2,3}, WANG Feng-yuan⁴, LI Ling-ling^{2,3}

(1.College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; 3.National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 4.Environment College, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Applying non-hazardous sewage sludge to land is a good option to utilize wastes. In this study, the effects of different amounts of non-hazardous sewage sludge on soil organic matter (SOM), soil microbial biomass carbon (SMBC) and nitrogen (SMBN) were investigated in a continuous field experiment with wheat and maize rotation. Four treatments with 3 replicates each, sewage sludge applied at $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CK), $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A1), $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A2) and $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A3), were designed. The A3 treatment, significantly increased SOM contents in both wheat and maize season ($p < 0.05$), compared with the CK treatment. The average SOM was $17.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in wheat season and $26.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in maize season, 30.91% and 80.53% higher than the CK, respectively. Both SMBC and SMBN contents were also enhanced significantly ($p < 0.05$) in the A2 and A3 treatments. In wheat season, SMBC content was $225.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $321.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in A2 and A3 treatments, re-

收稿日期: 2014-01-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB127406); 国家自然科学基金(21107139); 科技部科研院所技术开发研究专项资金(2012EG134235); 科技部农业科技成果转化资金(2012GB23260542); 农业部行业专项(201103007); 中央级公益性科研院所专项资金(IARRP-2014-8); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13083)

作者简介: 刘 恋(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤培肥与环境。E-mail: lianliu66@163.com

* **通信作者:** 杨俊诚 E-mail: yangjuncheng@caas.cn

邓仕槐 E-mail: shdeng8888@163.com

spectively, being 144.20% and 247.18% greater than in the CK. In maize season, SMBC contents achieved 154.41 mg·kg⁻¹ and 190.75 mg·kg⁻¹, or increased by 29.19% and 59.60% in A2 and A3 treatment, respectively. Likewise, SMBN contents in the A2 and A3 treatments were 13.53 mg·kg⁻¹ and 23.92 mg·kg⁻¹ in wheat and 29.50 mg·kg⁻¹ and 30.71 mg·kg⁻¹ in maize seasons, or 95.52% and 245.66% and 40.08% and 45.82% increments, respectively. In brief, applications of non-hazardous sewage sludge enhance SOM, SMBC and SMBN, thus improving crop production.

Keywords: non-hazardous sewage sludge utilization; soil organic matter; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen

污泥是污水处理过程中的副产物,随着城市化进程的加速,污泥产量也越来越多,由此带来的环境污染和资源浪费等问题日益突出。根据国家统计局资料显示,2008年我国污水排放总量为571.68亿t,湿污泥(含水率80%)产生量为2858.40万t;2010年达到了3086.28万t;到2012年,湿污泥产量增至3423.81万t。据《中国污泥处理处置市场分析报告(2013版)》预测,我国污泥年产生量将持续增加。污泥的减量化、资源化、无害化已成为污泥处理与处置的必然趋势。但有资料表明,我国目前城市污泥资源化利用率仅为19%,大多采用传统填埋等方式来处理污泥,既给环境带来巨大的危害,又造成资源的极大浪费^[1-2]。关键问题是由于城市污泥含有重金属、潜在污染物和细菌病原体等有害物质,而经过无害化处理的污泥可以从根本上解决这一制约因素。

无害化处理后的城市污泥中含有大量的有机质和丰富的氮磷钾及其他微量元素等植物所需的营养物质^[3-6],它是一种很好的有机肥和土壤调理剂的原材料,具有较广阔的应用前景^[7-8]。土壤有机质是土壤的重要组成部分,不仅作为植物重要的养分来源,还可为土壤中动物和微生物的生长发育提供能源^[9];土壤有机质对土壤物理、化学性质的改善有十分重要的作用,是评价土壤肥力高低和质量优劣的重要指标;土壤有机质还与土壤微生物量碳、氮有着十分紧密的联系,因为土壤微生物量碳、氮是被土壤微生物所固持的碳和氮,能在一定程度上表征土壤微生物的生物量,被认为是土壤中活性养分的储备库,是作物生长所需营养元素的重要来源,是一项重要的土壤生态指标^[10-14]。土壤微生物量碳、氮可在一定程度上反应土壤中各物质新陈代谢的旺盛程度和植物吸收养分的状况,是一项重要的土壤肥力指标,它的变化会影响土壤的储碳能力和供氮能力,进而影响土壤的质量^[15-18]。

有研究表明,施用污泥与土壤有机质含量的提升有较为紧密的关系^[19-20],而且施用污泥既能刺激土壤中微生物的活性,也会对一些土壤微生物产生毒性^[21]。因此了解无害化污泥不同的施用量对土壤有机质、土壤微生物量碳和氮的影响十分必要,本文系统研究了无害化污泥的不同施用量对土壤中的有机质、微生物量碳和氮影响,以期为城市污泥的资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试污泥

供试的无害化污泥是由郑州市污水净化有限公司提供,是将秸秆、花生壳等辅料按照一定比例与污泥混合,接入枯草芽孢杆菌、黑曲霉和嗜热侧孢霉等混合菌剂,通过厌氧发酵、高温堆肥后制成,含水率为33.08%,pH为8.05,有机质为223.92 g·kg⁻¹,全氮为17.60 g·kg⁻¹,速效磷为4.30 g·kg⁻¹,速效钾为10.50 g·kg⁻¹。无害化污泥中主要的重金属元素的含量如表1所示,均低于《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—84)所规定的值,符合污泥农用的标准。

1.2 试验基地概况

试验基地位于河南省开封市农林科学研究院试验田(东经114.27°,北纬34.77°),地处暖温带大陆性季风气候区,年均气温为14.52℃,年均无霜期为221d,年均降水量为627.5mm,降水多集中在夏季7、8月份。土壤类型为沙化潮土,试验开始前耕层土壤的基本理化性状见表2。

1.3 田间试验设计

田间种植方式采用小麦、玉米轮作,试验时间为2012年10月至2013年9月。试验设计4个处理,包括分别施用无害化污泥0t·hm⁻²(CK)、15t·hm⁻²(A1)、30t·hm⁻²(A2)和45t·hm⁻²(A3),每个处理设置3次

表1 无害化污泥中重金属含量

Table 1 Contents of heavy metals in non-hazardous sewage sludge

Cr/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹
200.49	55.25	164.35	338.24	1.31	22.25	9.24

表2 供试土壤基本理化性状

Table 2 Basic physicochemical properties of experimental soil

含水率 Moisture content/%	pH	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	阳离子交换量 Cation exchange capacity/cmol·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹
5.87	8.42	12.10	9.27	0.44	20.33	13.25	40.32

重复。每个试验小区的面积为 30 m²,采用随机区组排列方式。供试作物分别为当地主栽品种开麦 18(小麦)和开玉 15(玉米),种植行距为 0.25 m,小区之间间隔 1 m。作物种植前对土地进行翻耕,翻耕深度为 20 cm。氮、磷、钾肥料用量按照当地农民习惯施肥水平施用,小麦季和玉米季分别施 N 为 225 kg·hm⁻²,施 P₂O₅ 为 86 kg·hm⁻²,施 K₂O 为 113 kg·hm⁻²,各处理的氮、磷、钾养分含量控制一致。在此基础上,再将各处理的无害化污泥分别在种植小麦和玉米前一次性以基肥形式采用撒施法均匀施入。其他大田管理措施均与当地农民习惯一致。

1.4 样品采集及处理

土壤样品分别于 2013 年 6 月 10 日(小麦收获期)和 2013 年 9 月 28 日(玉米收获期)在各试验小区内采用“Z”字式采集 0~20 cm 的耕层土壤样品 5 个,经充分混匀后,通过“四分法”留出土壤 1 kg 为一个样品,分别装入布袋带回实验室。样品经去除可见的动植物残体和小石子等杂物,过 2 mm 筛后将土壤样品分为两部分保存,其中一部分风干后用于测定土壤的有机质等理化性状,另一部分放于 4℃冰箱中冷藏,用于测定土壤微生物量碳和土壤微生物量氮。

1.5 测定项目及方法

土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法^[22]测定。土壤微生物量碳和土壤微生物量氮采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[23-25]测定。无害化污泥中的重金属经王水-高氯酸常压消解后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定^[26]。无害化污泥的 pH 值采用电极法^[29]测定。

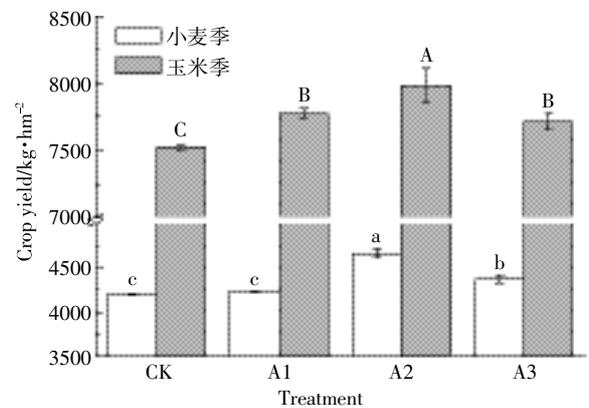
1.6 数据分析

数据采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)检验不同处理之间的差异,用最小显著差数法(LSD)进行显著性检验($p < 0.05$),如果差异显著,则进一步进行多重比较(DUNCAN),最后利用 Origin 8.0 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对作物产量的影响

由图 1 可看出,随着无害化污泥施用量的增加,



误差线上的不同字母表示差异达显著水平($p < 0.05$)。下同
Bars with different letters above mean significant difference at 5% level. The same below

图1 不同无害化污泥施用量对作物产量的影响

Figure 1 Effects of different amounts of non-hazardous sewage sludge on crop yield

对小麦和玉米的产量均具有增产效果,均在 A2 处理下产量达到最大值。小麦产量的变化范围是 4 201.20~4 662.67 kg·hm⁻²,与 CK 处理相比,A1、A2 和 A3 处理下小麦产量分别提高了 0.81%、10.98%和 4.02%;其中 A2 和 A3 处理对小麦产量的提高达到显著水平($p < 0.05$)。玉米产量的变化范围是 7 523.23~7 882.30 kg·hm⁻²,与 CK 处理相比,A1、A2 和 A3 处理均显著提高玉米的产量($p < 0.05$),分别提高了 3.83%、6.10%和 2.56%。说明施用无害化污泥能促进小麦和玉米的生长并在不同程度上提高其产量。

2.2 不同施肥处理对土壤有机质的影响

由图 2 可以看出,小麦季和玉米季土壤有机质(SOM)的含量均随着无害化污泥施用量的增加而提高。小麦季 SOM 含量的变化范围是 13.33~17.45 g·kg⁻¹,玉米季 SOM 含量的变化范围 14.69~26.52 g·kg⁻¹。与 CK 处理相比,小麦季 A1、A2 和 A3 处理 SOM 的含量分别为 14.01 g·kg⁻¹、14.67 g·kg⁻¹和 17.45 g·kg⁻¹,分别提高了 5.10%、10.05%和 30.91%;其中 A3 处理对 SOM 的提升达到显著水平($p < 0.05$)。无害化污泥施用量与小麦季 SOM 含量呈正相关关系,拟合的方程为: $y = 0.086 8x + 12.912$ ($R^2 = 0.864 2, n = 12$;式中 y 为土壤有机质含量, x 为无害化污泥施用量,下同)。玉米季 A1 处理 SOM 的含量与 CK 处理相比,提高到

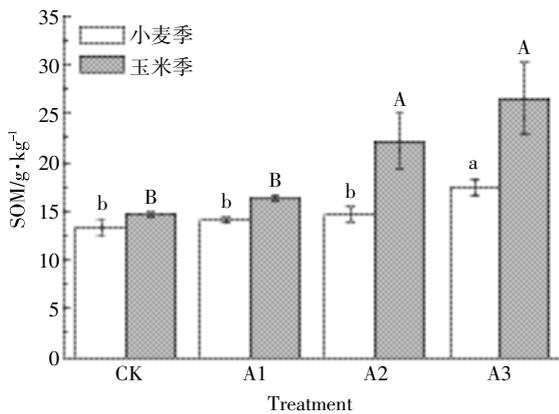


图2 不同无害化污泥施用量对土壤有机质的影响

Figure 2 Effects of different amounts of non-hazardous sewage sludge on soil organic matter

16.36 g·kg⁻¹, 增加了 11.37%; 玉米季 A2 和 A3 处理 SOM 含量的提升均达到显著水平 ($p < 0.05$), SOM 含量分别为 22.14 g·kg⁻¹ 和 26.52 g·kg⁻¹, 分别提高了 50.71% 和 80.53%。无害化污泥施用量与玉米季 SOM 含量呈正相关关系, 拟合方程为: $y = 0.275 1x + 13.737$ ($R^2 = 0.962 1, n = 12$)。说明施入无害化污泥能有效提高 SOM 的含量, SOM 的含量会随着无害化污泥施用量的增加而提高。此外, 在同一处理下, 玉米季 SOM 的含量均比小麦季的高。

2.3 不同施肥处理对土壤微生物量碳的影响

不同无害化污泥施用量对土壤微生物量碳 (SMBC) 的影响如图 3 所示, 表明污泥施入能有效提高 SMBC 的含量。与 CK 处理相比, 小麦季 A2 和 A3 处理 SMBC 含量分别显著提高到 225.91 mg·kg⁻¹ 和 321.18 mg·kg⁻¹ ($p < 0.05$), 分别增加了 144.20% 和 247.18%; 小麦季 A1 处理 SMBC 的含量变化虽未达到显著水平, 但仍比 CK 处理提高了 30.94%。无害化

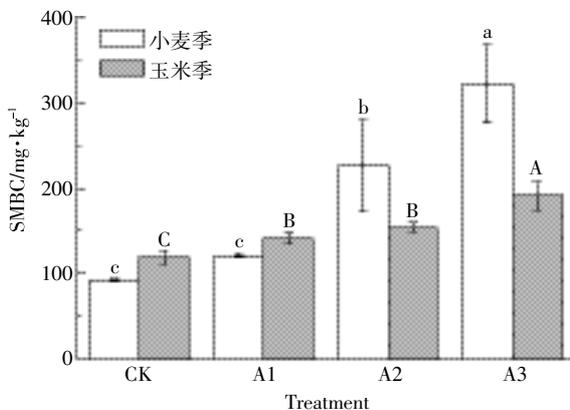


图3 不同无害化污泥施用量对土壤微生物量碳的影响

Figure 3 Effects of different amounts of non-hazardous sewage sludge on soil microbial biomass carbon

污泥施用量与小麦季 SMBC 含量呈正相关关系, 拟合方程为: $y = 5.271 9x + 71.564$ ($R^2 = 0.954 9, n = 12$; 式中 y 为土壤微生物量碳含量, x 为无害化污泥施用量, 下同)。玉米季 A1、A2 和 A3 处理 SMBC 的含量均得到显著提高 ($p < 0.05$), 含量分别为 141.62 mg·kg⁻¹、154.41 mg·kg⁻¹ 和 190.75 mg·kg⁻¹, 比 CK 处理 SMBC 的含量分别增加了 18.48%、29.19% 和 59.60%, 其中 A3 处理 SMBC 含量的涨幅达到极显著水平 ($p < 0.01$)。无害化污泥施用量与玉米季 SMBC 含量呈正相关关系, 拟合方程为: $y = 1.509 9x + 117.600$ ($R^2 = 0.960 8, n = 12$)。随着污泥施用量的增加, 小麦季各处理 SMBC 含量的增幅均高于玉米季。

2.4 不同施肥处理对土壤微生物量氮的影响

不同无害化污泥施肥量对土壤微生物量氮 (SMBN) 的影响如图 4 所示, 小麦季 A1、A2 和 A3 处理与 CK 处理相比, SMBN 的含量分别是 10.48 mg·kg⁻¹、13.53 mg·kg⁻¹ 和 23.92 mg·kg⁻¹, 分别增加了 51.45%、95.52% 和 245.66%, 其中 A2 和 A3 处理 SMBN 含量的提升均达到显著水平 ($p < 0.05$)。无害化污泥施用量与小麦季 SMBN 含量呈正相关关系, 拟合方程为: $y = 0.360 3x + 5.605$ ($R^2 = 0.908 3, n = 12$; 式中 y 为土壤微生物量氮含量, x 为无害化污泥施用量, 下同)。玉米季 A1、A2 和 A3 处理 SMBN 的含量分别是 23.52 mg·kg⁻¹、29.50 mg·kg⁻¹ 和 30.71 mg·kg⁻¹, 比 CK 处理分别增加了 11.68%、40.08% 和 45.82%, 且 A2 和 A3 处理 SMBN 含量的提升均达到显著水平 ($p < 0.05$)。无害化污泥施用量与玉米季 SMBN 含量呈正相关关系, 拟合方程为: $y = 0.232 9x + 20.958$ ($R^2 = 0.941 0, n = 12$)。同一处理下, 小麦季 SMBN 的含量均低于玉米季。

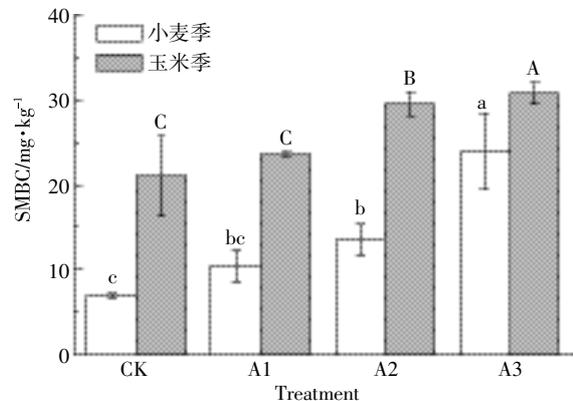


图4 不同无害化污泥施用量对土壤微生物量氮的影响

Figure 4 Effects of different amounts of non-hazardous sewage sludge on soil microbial biomass nitrogen

3 讨论

土壤有机质(SOM)是植物所需养分的主要来源,在农业生产、土壤培肥 and 环境保护等方面都具有十分重要的意义^[7]。在本研究中小麦季和玉米季各处理SOM含量的大小顺序均为:A3>A2>A1>CK。说明施入无害化污泥能提高SOM的含量,而且随着无害化污泥施用量的增加,对SOM含量的提升效果越明显。这是因为无害化污泥中含有丰富的有机质,施入土壤并与之混合,能在一定程度上提高土壤中有机质的含量。郝瑞军^[28]将熟化污泥施入滨海盐渍土,华正伟^[29]将城市污泥施入风沙土后,均得出与本研究类似的结果,指出污泥能提高土壤中有机质的含量。徐欣等^[30]将共消化污泥施入贫瘠土壤,发现不仅土壤中有机质的含量得到显著增加,而且第二季土壤中的有机质含量普遍大于第一季。这与本研究中玉米季SOM的含量比小麦季高的结果一致,主要是由于SOM在土壤中积累的结果,说明施用污泥年限越长,对提高SOM含量的效果越明显;此外,气温、降水和土壤pH等因素会影响土壤中有机质的矿化,进而影响SOM的含量。

土壤微生物量碳(SMBC)是土壤碳库中最为活跃的一部分,它可以反应土壤中养分的有效性和生物的活性,能在很大程度上反应土壤微生物的数量,是评价土壤微生物数量和群落活性的重要指标^[31-32]。在本研究中小麦季和玉米季SMBC的含量随着无害化污泥施用量的增加而提高;施用量越大,对SMBC含量的提升效果越明显,A3处理对小麦季和玉米季SMBC含量的提升效果最明显,分别增加了247.18%和59.60%。刘恩科等^[33]利用PCR-DGGE技术研究土壤中微生物的群落结构,发现土壤中的微生物主要以异养型为主。本研究中由于施用无害化污泥,为土壤中的异养微生物提供了碳源和能量,促进了微生物的生命活动与新陈代谢,刺激其对土壤中碳的固持,从而提高了SMBC的含量。在相同处理下,小麦季SMBC含量的增幅均高于玉米季,出现这种情况有三个方面主要的原因:一是因为小麦季的处理是在前期从未施用无害化污泥的基础上进行的,到小麦季收获期A1、A2和A3处理SMBC的含量在施用无害化污泥后增幅明显;而玉米季试验是在种植一季小麦后的基础上获得的结果,因此玉米季SMBC含量的相对增幅小于小麦季。二是作物根系会分泌大量的低分子量根系分泌物,该分泌物能促进土壤微生物的繁殖,加剧微生物生命活动的旺盛程度;在无害化污泥不同施用

量的处理下,小麦和玉米的根系分泌物分别对促进微生物生长的程度以及根系对土壤物理结构的改善程度不同。三是随着无害化污泥施入时间的延长,土壤中的碳库系统趋于稳定。因此玉米季SMBC含量的增幅比小麦季更平缓。

土壤中的微生物能够对土壤中的氮进行固持,既能减少因挥发、淋溶或者反硝化等造成土壤中氮的浪费,又能在作物生长期推迟氮的释放,在关键生育期提供作物所需的氮素。土壤微生物量氮(SMBN)是土壤氮素的重要储备库,能反应微生物对氮固持作用的强弱和土壤供氮能力的大小,并调节氮在土壤中的循环与转化。SMBN的有效性接近土壤矿质态氮,是作物吸收氮素的有效来源^[34]。在本研究中,施入无害化污泥有效提高了SMBN的含量,而且发现SMBN含量随着污泥施用量的增加而提高。这主要是由于无害化污泥的施入刺激了土壤中微生物的活性,促进了微生物对氮的固持,从而提高了SMBN的含量。在相同处理下,玉米季SMBN的含量均高于小麦季。主要的原因一是因为富含碳的有机物质施入土壤能提供土壤微生物繁殖所需的能源及营养,刺激土壤中微生物的活性,增强微生物对氮的固持作用^[35-36];无害化污泥施入土壤提高了土壤微生物对氮的固持能力,玉米季的土壤微生物对氮的固持能力相对较高,是在种植一季小麦即施用过一次无害化污泥后的基础上由于微生物活性进一步提高所致。二是由于当地降水主要集中在7、8月,而玉米收获期在降水较少的9月底;土壤的干湿交替可以促进土壤中氮的矿化,使更多的矿质态氮被土壤中的微生物所固持;再加上土壤温度升高,土壤中微生物的活性迅速增强,生物量增加,进而使SMBN含量增加,所以玉米季SMBN的含量高于小麦季。三是由于SMBN在土壤中的积累,使第二季作物(玉米季)的含量高于第一季(小麦季),说明随着无害化污泥施用量的增加,对SMBN的提升效果越明显。四是因为土壤中微生物的总量与土壤有机质的含量呈正相关关系^[37],在相同处理下,玉米季SOM含量均高于小麦季(图2),因而玉米季土壤中有更多的微生物对氮进行固持,所以玉米季SMBN的含量比小麦季高。五是小麦和玉米的根系分泌物分别对土壤微生物固持氮能力的影响程度不同。因而使玉米季SMBN的含量高于小麦季。

4 结论

(1)随着无害化污泥施用量的增加,对小麦和玉

米的产量均具有增产效果。

(2)施用无害化污泥能有效提高土壤中有有机质、微生物量碳和氮的含量。土壤中有有机质、微生物量碳及微生物量氮与无害化污泥的不同施用量均呈正相关关系。

(3)随着无害化污泥施用时间的增加,土壤有机质和土壤微生物量氮的含量存在不同程度的积累,而土壤微生物量碳的含量则有提高并逐渐稳定的趋势。经无害化处理后的城市污泥当施用量为 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,对华北沙化潮土土壤中的有机质、微生物量碳和氮含量的提升均能达到显著水平($p < 0.05$)。

可见合理施用无害化污泥不仅有效改善土壤质量,还能降低环境污染的风险,是废物资源化利用的重要途径之一。

参考文献:

- [1] 嵇雯雯,夏会龙,方治国,等.基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻培养研究[J].环境科学,2013,34(2):622-628.
JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, et al. Study on the *Chlorella pyrenoidosa* cultivation technology based on the excess sludge utilization[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2013, 34(2): 622-628.
- [2] 王菲,杨国录,刘林双,等.城市污泥资源和利用现状及发展探讨[J].南水北调与水利科技,2013,11(2):99-103.
WANG Fei, YANG Guo-lu, LIU Lin-shuang, et al. Research on development and utilization of municipal sewage sludge[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(2): 99-103.
- [3] 刘峰,蔡红,刘英.城市污泥农用存在的问题与对策[J].中国农学通报,2010,26(17):304-309.
LIU Feng, CAI Hong, LIU Ying. Limiting factors and countermeasures for agricultural use of sewage sludge[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 304-309.
- [4] 李琼,华璐,徐兴华,等.城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J].中国生态农业学报,2011,19(2):468-476.
LI Qiong, HUA Luo, XU Xing-hua, et al. A review on environmental effects and control criteria of biosolid agricultural application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 468-476.
- [5] 李霞,李法云,荣湘民,等.城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析[J].水土保持学报,2013,27(4):93-97,106.
LI Xia, LI Fa-yun, RONG Xiang-min, et al. Risk and leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in sandy soil amended with sewage sludge[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 93-97, 106.
- [6] 丘锦荣,刘雯,郭晓方,等.植物处理后的城市污泥农用对玉米生长的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(5):990-994.
QIU Jin-rong, LIU Wen, GUO Xiao-fang, et al. Effect of agricultural application of phyto-treated municipal sewage sludge on maize growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 990-994.
- [7] 杨丽标,邹国元,张丽娟.城市污泥农用处置研究进展[J].中国农学通报,2008,24(1):420-424.
Yang Li-biao, Zou Guo-yuan, Zhang Li-juan, et al. Progress in research on agricultural application of sewage sludge[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 420-424.
- [8] 丘锦荣,郭晓方,卫泽斌,等.城市污泥农用资源化研究进展[J].农业环境科学学报,2010,29(增刊):300-304.
QIU Jin-rong, GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, et al. Research advance in agricultural application of municipal sewage sludge[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 300-304.
- [9] 赵明松,张甘霖,李德成,等.江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J].生态学报,2013,33(16):5058-5066.
ZHAO Ming-song, ZHANG Gan-lin, LI De-cheng, et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 5058-5066.
- [10] Pansu M, Gautheyrou J. Handbook of soil analysis: Mineralogical, organic and inorganic methods[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [11] Anderson T H, Domsch K H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(12): 2039-2043.
- [12] 范凯,何永涛,孙维,等.不同管理措施对西藏河谷农田土壤微生物量碳的影响[J].中国土壤与肥料,2013(1):20-24.
FAN Kai, HE Yong-tao, SUN Wei, et al. Different management on soil microbial biomass carbon in the Tibetan Plateau farmland[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(1): 20-24.
- [13] 赵彤,闫浩,蒋跃利,等.黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J].生态学报,2013,33(18):5615-5622.
ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yue-li, et al. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the loess hilly Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [14] 于树,汪景宽,高艳梅.地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物量碳和氮的影响[J].沈阳农业大学学报,2006,37(4):602-606.
YU Shu, WANG Jing-kuan, GAO Yan-mei. Effect of plastic mulching and different fertilization treatments on soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(4): 602-606.
- [15] 杨淑莉,朱安宁,张佳宝,等.免耕对小麦-玉米轮作下玉米季土壤微生物量碳、氮的影响[J].土壤通报,2010,41(4):802-806.
YANG Shu-li, ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao, et al. Effect of no-tillage on microbial biomass carbon and nitrogen with maize grown under maize-wheat rotation condition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 802-806.
- [16] Mijangos I, Perez R, Albizu I, et al. Effects of fertilization and tillage soil biological parameters[J]. *Enzyme Microb Technol*, 2006, 40: 100-106.
- [17] 贾伟,周怀平,解文艳,等.长期有机无机肥配施对褐土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(4):700-705.
JIA Wei, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. Effects of long-term

- inorganic fertilizer combined with organic manure on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 700-705.
- [18] 李桂花. 不同施肥对土壤微生物活性、群落结构和生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 204-208.
LI Gui-hua. Effect of organic amendments and chemical fertilizer on soil microbial activity, biomass and community structure[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 204-208.
- [19] Nicolás C, Masciandaro G, Hernández T, et al. Chemical-structural changes of organic matter in a semi-arid soil after organic amendment[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(3): 283-293.
- [20] 辛涛, 白莉萍, 宋金洪, 等. 施用城市污泥对杨树土壤化学特性及金属含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2722-2727.
XIN Tao, BAI Li-ping, SONG Jin-hong, et al. Effects of municipal sewage sludge applications on chemical properties and metal contents in poplar soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11): 2722-2727.
- [21] 卢振兰, 刘锐敏, 白莉萍, 等. 施用城市污泥对土壤生态系统影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 172-179.
LU Zhen-lan, LIU Rui-min, BAI Li-ping, et al. Review on the effects of municipal sewage sludge application on soil ecosystem properties[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 172-179.
- [22] 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.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 703-707.
- [24] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17: 837-842.
- [25] Wu J S, Brookes P C, Jenkinson D S. Formation and destruction of microbial biomass during the decomposition of glucose and ryegrass in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(10): 1435-1441.
- [26] CJ/T 221—2005 城市污水处理厂污泥检验方法[S].
CJ/T 221—2005 Determination method for municipal sludge in wastewater treatment plant[S].
- [27] 李启权, 王昌全, 张文江, 等. 丘陵区土壤有机质空间分布预测的神经网络方法[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12): 2451-2458.
LI Qi-quan, WANG Chang-quan, ZHANG Wen-jiang, et al. Predict the spatial distribution of soil organic matter for a hilly region with radial basis function neural network[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12): 2451-2458.
- [28] 郝瑞军. 污泥施用量对滨海盐渍土肥力的改良效果[J]. *环境污染与防治*, 2013, 35(6): 55-59, 64.
HAO Rui-jun. Performance of sewage sludge application on saline-alkali soil fertility improvement[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, 35(6): 55-59, 64.
- [29] 华正伟. 城市污泥对风沙土改良及杨树生长的影响[D]. 辽宁大学, 2012.
HUA Zheng-wei. Effect of sewage-sludge on the aeolian sandy soil improvement and poplar growth[D]. Liaoning University, 2012.
- [30] 徐欣, 张盼月, 张光明, 等. 共消化污泥施用对贫瘠土壤性质和蔬菜品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(9): 1842-1847.
XU Xin, ZHANG Pan-yue, ZHANG Guang-ming, et al. Effects of co-digested sludge application on infertile soil and vegetable quality[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2012, 31(9): 1842-1847.
- [31] 周卫军, 曾希柏, 张杨珠, 等. 施肥措施对不同母质发育的稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1043-1048.
ZHOU Wei-jun, ZENG Xi-bai, ZHANG Yang-zhu, et al. Effects of fertilization on microbial biomass C and N in paddy soils derived from different parent materials[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1043-1048.
- [32] 何云, 周义贵, 李贤伟, 等. 台湾桫木林草复合模式土壤微生物量碳季节动态[J]. *林业科学*, 2013, 49(7): 26-33.
HE Yun, ZHOU Yi-gui, LI Xian-wei, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon in *Alnus formosana* forest-Grass compound models[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(7): 26-33.
- [33] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1079-1085.
LIU En-ke, ZHAO Bing-qiang, LI Xiu-ying, et al. Microbial C and N biomass and soil community analysis using DGGE of 16S rDNA V3 fragment PCR products under different long-term fertilization systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1079-1085.
- [34] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 长期不同施肥对旱地小麦土壤氮素供应及吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(5): 885-892.
LIANG Bin, ZHAO Wei, YANG Xue-yun, et al. Effects of long-term different fertilization managements on changes of N in soil and its uptake by wheat on dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(5): 885-892.
- [35] 张富国, 徐阳春, 沈其荣, 等. 不同种稻方式对后茬大麦产量和土壤微生物量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(2): 49-53.
ZHANG Fu-guo, XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, et al. Effects of rice cultivation pattern on yield of after-crop and soil microbial biomass[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(2): 49-53.
- [36] 郁洁, 蒋益, 徐春森, 等. 不同有机物及其堆肥与化肥配施对小麦生长及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1293-1302.
YU Jie, JIANG Yi, XU Chun-miao, et al. Effects of combined application of inorganic fertilizer with straw and pig slurry and their compost on wheat growth and nitrogen uptake[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1293-1302.
- [37] 王秋君, 张小莉, 罗佳, 等. 不同有机无机复混肥对小麦产量、氮效率和土壤微生物多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1003-1009.
WANG Qiu-jun, ZHANG Xiao-li, LUO Jia, et al. Effects of different organic-inorganic mixed fertilizations on yield of wheat, nitrogen use efficiency and soil microbial diversity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1003-1009.