

厌氧消化污泥对退化苗圃土壤的改良效果研究

杨长明, 范博博, 荆亚超

(同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过连续3年施用厌氧消化污泥(ADSS)的土柱试验, 测定了土壤基本理化指标和微生物学指标, 并分析了土壤中重金属积累特征, 以全面评价厌氧消化污泥施用对合肥某退化苗圃土壤的改良效果。结果表明: 施用厌氧消化污泥3年后, 苗圃土壤质地和理化环境有明显改善, 其中土壤中可溶性总盐含量(TDS)下降了67.6%, 电导率(EC)降低了45.3%, 对因多年种植苗木造成次生盐渍化的苗圃土壤具有较好的改良作用。施用厌氧消化污泥明显(概率 $P < 0.05$)增加了土壤中有机质和养分的供给, 较无添加厌氧消化污泥相比, 3年连续施用厌氧消化污泥后, 土壤中有机质增加了77.9%; 有效态氮和磷分别增加了110%和95.4%。同时, 施用厌氧消化污泥对苗圃土壤微生物生物量和代谢活性也具有显著($P < 0.05$)的提升作用, 其中微生物生物量碳(MBC)较无添加厌氧消化污泥增加了207%; 尿酶和碱性磷酸酶活性分别增加了118%和102%。由此表明, 施用厌氧消化污泥可以全面提升退化苗圃土壤质量。另外, 通过对土壤中主要重金属含量分析表明, 连续3年厌氧消化污泥施用后, 苗圃土壤中重金属有所增加, 但其含量远低于土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995), 但是长期施用厌氧消化污泥后的土壤重金属累积特征和生态风险还有待进一步深入研究。

关键词: 厌氧消化污泥; 苗圃土壤改良; 土壤酶活性; 重金属累积

中图分类号: X705

文献标志码: A

Effects of Anaerobically Digested Sewage Sludge Addition on Improvement of a Degraded Nursery Garden Soil

YANG Changming, FAN Bobo, JING Yachao

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A soil column experiment was conducted to evaluate the effect of 3-year consecutive application of anaerobically digested sewage sludge (ADSS) on a degraded soil from a nursery garden in Hefei City, Anhui Province. Soil

physicochemical and microbiological parameters were determined, and accumulation characteristics of heavy metals in the soil were also analyzed. The results showed that 3 years after the ADSS addition, soil texture and physicochemical environment were significantly ($P < 0.05$) improved, and the soil total dissolved salt (TDS) content and electric conductivity (EC) were decreased by 67.6% and 45.3%, respectively, which indicates that the ADSS application showed a improved effects on the degraded soil with secondary salinization due to continuous nursery plantation for several years. The application of ADSS significantly ($P < 0.05$) increased soil organic matter content and nutrients supply. After 3-year ADSS application, soil organic matter was increased by 77.9% and the available nitrogen and phosphorus were increased by 110% and 95.4%, respectively, as compared with the control (no ADSS addition). At the same time, the ADSS application also significantly ($P < 0.05$) enhanced nursery soil microbial biomass and metabolic activities. As compared to the control, soil microbial biomass carbon (MBC) was increased by 207%, and soil urease and alkaline phosphatase activity were increased by 118% and 102%, respectively. The above results showed that the application of ADSS could improve the degraded nursery soil quality. In addition, the nursery soil with 3-year application of ADSS showed an increase in the contents of heavy metals, but the contents of the determined heavy metals were far lower than the secondary level of soil environmental quality standard of China (GB 15618—1995). However the effects of long-term application of ADSS on accumulation of heavy metals in the nursery soil and its ecological risk need further study.

Key words: anaerobically digested sewage sludge (ADSS); nursery garden soil improvement; soil enzyme activities; accumulation of heavy metals

目前我国随着城镇污水处理规模不断增加, 污

收稿日期: 2017-07-14

基金项目: 国家水污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07303-003)

第一作者: 杨长明(1973—), 男, 理学博士, 研究员, 主要研究方向为污泥稳定化与资源化利用、退化与污染土壤改良与修复。

E-mail: cmyang@tongji.edu.cn

泥的产生量也在急剧上升,从而面临着巨大的有效科学处理和处置压力^[1]. 实现市政污泥的减量化、稳定化和资源化是解决污泥问题的主要手段和思路. 由于市政污泥富含有机质和营养元素,符合相关标准的污泥土地利用将是未来发展趋势. 高品质的市政污泥土地利用可能是未来污泥最终处置的重要途径和方向,但在土地利用之前,污泥必须进行稳定化处理,以降低其对土壤环境带来的生态风险^[2].

厌氧消化(Anaerobic digestion)是集中式污泥稳定化的一项重要技术,不但可以实现污泥的稳定化过程,还可以实现能源回收^[3-4]. 但是,厌氧消化后的污泥出路问题至今尚未得到完全解决,从而严重制约了污泥厌氧消化技术的发展. 市政污泥经过厌氧消化稳定化处理以后,仍富含氮、磷、微量元素和有机质等营养物质,而且养分更为均衡,特别是消化后污泥具有腐殖质胶体,能使土壤形成团粒结构,保持很好的养分和水分作用^[5]. 将厌氧消化稳定化后污泥就地土地利用,这不仅完全可以彻底解决厌氧消化污泥出路问题,降低污泥的处置成本,同时还可以对一些退化土壤进行改良,进而提高土壤质量. 但是,目前对厌氧消化后污泥土地利用后的土壤质量以及重金属累积特征的研究较少^[6],而且多以短期的实验为主,连续数年的施用效果研究尚未见报道.

本论文以严重退化的苗圃土壤作为研究对象,通过连续3年的厌氧消化污泥施用的柱状模拟实验,并结合对土壤主要理化指标以及微生物生理生态指标的测定,较为全面研究了厌氧消化污泥连续施用对退化苗圃土壤的改良效果. 同时,还对厌氧消

化污泥施用后土壤重金属的累积过程进行了分析和探讨,以全面评估厌氧消化污泥施入土壤后对土壤质量和土壤健康的影响,以期为今后厌氧消化稳定化污泥土地安全利用和资源化处理处置提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试土壤采自合肥市包河区大圩镇某香樟苗圃基地,其主要理化指标见表1. 由于多年连续种植,加上不合理的施肥和灌溉,导致该苗圃土壤呈现轻度的盐渍化状态,电导率(EC)高达 $245 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$; 土壤pH为8.28,也较周边土壤偏高. 该苗圃土壤容重也较高,土壤板结严重,透气性较差. 另外,该苗圃土壤有机质含量也偏低,仅为 $15.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效养分供给能力弱,使得该苗圃土壤退化问题较为严重,苗木生长缓慢,而且苗圃成活率较低.

厌氧消化污泥采自合肥十五里河污水处理厂内的国家水专项污泥厌氧消化研究基地,其基本泥质指标如表1所示. 由表1可以看出,该厌氧消化污泥有机质含量为 $339 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,养分含量也较高. 另外,由于该污水厂进水98%为生活污水,其原污泥重金属含量较低,厌氧消化后的污泥中几种主要重金属含量均显著低于《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》标准(GB/T23486—2009)^[7]. 因此,本实验采用的厌氧消化污泥泥质总体较好,非常适合进行土地利用.

表1 供试的苗圃土壤理化指标和厌氧消化污泥泥质特征

Tab.1 Physiochemical parameters of the tested nursery soil and anaerobically digested sewage sludge

供试材料	pH	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机质含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	重金属含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)						
						Cd	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb
苗圃土壤	8.28 (1.10)	245 (34.9)	15.2 (2.13)	1.62 (0.31)	2.05 (0.26)	0.10 (0.03)	—	1.13 (0.25)	2.24 (0.34)	—	16.1 (2.18)	1.35 (0.33)
消化污泥	6.91 (0.85)	168 (27.2)	339 (26.7)	38.5 (5.12)	16.8 (2.45)	0.24 (0.06)	0.05 (0.01)	45.1 (7.12)	50.1 (7.13)	6.6 (0.87)	209 (36.9)	18.6 (4.12)

注:1. 表中数据为3次测定平均值,括号内数据为标准误差;2. “—”表示未检测出,即含量低于仪器检测线水平.

本研究采用模拟土柱试验,土柱长为60 cm,直径为20 cm,每个土柱填装16 kg的苗圃土壤. 填装后,将风干、粉碎并过20目筛的厌氧消化污泥施于表层,然后与0~20 cm土壤充分混合,厌氧消化污泥施加量为 $300 \text{ g} \cdot \text{土柱}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$. 同时,设置不加污泥的土柱作为对比. 通过定期浇灌,以保证土柱表层土壤达到70%的田间持水量. 本土柱实验在四周通风的阳光棚中进行,除了可以防雨外,还可以加速

土壤中的反应过程. 实验自2014年1月开始,2016年12月结束,共持续3年时间.

1.2 土壤样品采集与测定

试验期间的每年12月底,采集土柱中表层(0~20 cm)土壤,采集的土壤样品一部分自然风干,做土壤理化指标分析,一部分放置冰箱冷藏($4 \text{ }^{\circ}\text{C}$),用作微生物分析用.

土壤质地(粒级组成)采用吸管法测定;土壤pH

和电导率(EC)采用电极法测定,水土比为 1:1. 土壤总可溶性盐含量(TDS)测定采用质量法测定:将土壤样品与水按一定的水土比例(5:1)混合,经过一定时间振荡后,将土壤中的可溶性盐提取到溶液中,然后将水土混合液进行过滤,滤液可作为土壤可溶性盐分测定的待测液,再进行蒸发后称重. 土壤有机质测定采用重铬酸钾法;土壤中凯氏氮测定采用 H_2SO_4 + 混合加速剂($K_2SO_4 + CuSO_4 + Se$) 消煮,半微量凯氏蒸馏定氮法;碱解氮测定采用碱解扩散法;总磷测定采用 $HClO_4 - H_2SO_4$ 消煮,钼锑抗比色法;Olsen-P(有效磷)测定采用 $NaHCO_3$ 提取,钼锑抗比色法,以上理化指标具体方法和步骤请参考文献[8];

厌氧消化污泥和苗圃土壤主要重金属(Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 和 Pb)和类重金属(As) 全量测定:准确称取 0.5 g 通过 100 目筛的沉积物土壤或污泥样品于聚四氟乙烯消解管中,加入 5 ml HNO_3 . 将消解管置于电热板上,以 $150^\circ C$ 加热至液体近干,再加入 5 ml HNO_3 、5 ml HF、3 ml $HClO_4$,保持 $150^\circ C$ 加热消解,直至固体消失. 将酸蒸至近干冷却后用 2% HNO_3 将消解样定容至 25 ml. 离心后取上清液,过 0.45 μm 的滤膜,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)(Optima 2100 DV,美国 Perkin Elmer 公司生产)测定其中 As、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 等元素含量.

土壤微生物生物量碳(MBC)和生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 溶液提取法测定;土壤关键酶活性分析:土壤脱氢酶活性采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测,TTC 被还原后,能形成脂溶性的红色产物三苯基甲簪(TPF);采用苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性,该方法以尿素为基质,根据酶促产物氨与苯酚-次氯酸钠作用生成蓝色的靛酚,以 24 h 后 1 g 土壤中产生的 NH_3-N 的质量(mg)表示脲酶的活性;采用磷酸苯二钠比色法测土壤碱性磷酸酶活性,以 24h 后 1g 土壤中释出酚(Phenol)的质量(mg)表示磷酸酶活性. 转化酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以蔗糖作为基质,根据葡萄糖与 3,5-二硝基水杨酸反应生成黄色产物来确定转化酶活性,最后以 24h 后土壤中生成的葡萄糖(Glucose)的质量(mg)表示蔗糖酶活性. 以上土壤微生物生理生态指标分析具体步骤参考文献[9].

1.3 数据分析与统计方法

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 统计软件进行处理,所有试验数据通过 ANOVA 变异分析

程序进行统计分析,采用邓肯新复检验法(Duncan's new multiple range test)对不同处理和不同施用年限下土壤理化指标、微生物指标以及重金属积累特征差异进行统计估计,在 $P < 0.05$ 的概率水平视为显著.

2 结果与分析

2.1 厌氧消化污泥施用对土壤主要理化指标的影响

厌氧消化污泥施用后对苗圃土壤主要理化性质的影响如表 2 所示. 由表 2 可明显看出,与不施厌氧消化污泥相比较,施用厌氧消化污泥后可明显提高土壤粘粒比例,从而有助于改善了土壤物理结构和土壤的缓冲性能. 施用厌氧消化污泥 3 年后,土壤 pH 较实验前和无添加厌氧消化污泥也有明显($P < 0.05$)降低,由无添加厌氧消化污泥的 8.24 降到至 7.89,属中性偏碱性,这种酸碱环境对于大多数植物和微生物生长都是有利的. 厌氧消化污泥施用也显著($P < 0.05$)增加了土壤有机质含量(表 2),与无添加厌氧消化污泥相比较,厌氧消化污泥土地施用 1 年、施用 2 年和施用 3 年以后,土壤有机质含量分别提高了 11.8%、39.1%和 76.9%,由此表明施用经厌氧消化后的稳定化污泥对土壤有机质提升作用明显,而且随着施用年限的增加,土壤有机质含量也会稳步上升,这与过去的研究结果一致,只是增加幅度因污泥施用量不同而有所差异^[10]. 污泥经过厌氧消化后,其中易降解有机质大部分被降解,剩余大部分为难降解的腐殖质类物质,这种物质更有利于在土壤中积累.

与土壤有机质变化类似,土壤总氮和总磷含量也是随着厌氧消化污泥的施用年限增加而增加,这说明在目前的施用量下向苗圃土壤施用厌氧消化污泥有助于土壤养分含量的增加^[11]. 从表 1 还可以看出,与无添加厌氧消化污泥土壤相比较,施用厌氧消化污泥还可明显($P < 0.05$)提高土壤有效养分的含量. 与无添加厌氧消化污泥相比较,厌氧消化污泥土壤施用 3 年后,土壤碱解氮和 Olsen-P 含量分别增加了 109%和 95.4%. 由此可以看出,相对于养分总量而言,厌氧消化污泥施用更有利于增加土壤中有效态养分的供给. 添加富含有机质的厌氧消化污泥大大改善了土壤理化环境,从而有利于微生物数量和活性的增加,增强了对土壤有机质的矿化和有效养分的释放^[12].

表 2 厌氧消化污泥施用不同年限对土壤理化性质的影响

Tab. 2 Effects of anaerobically digestion sludge application on soil physiochemical properties

施用年限	处理	粘粒 /%	砂粒 /%	pH(土与水质量比为 1:1)	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	总氮/(g·kg ⁻¹)	总磷/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)
第 1 年	消化污泥	17.4 (3.55)	18.3 (2.96)	8.13 (1.12)	18.9 (2.19)	1.72 (0.31)	2.12 (0.56)	56.8 (8.12)	19.6 (4.12)
	无添加厌氧消化污泥	17.1 (3.01)	18.9 (2.14)	8.24 (0.94)	17.1 (2.08)	1.58 (0.73)	2.01 (0.34)	53.1 (7.15)	18.5 (4.01)
第 2 年	消化污泥	18.9 (2.28)	17.3 (1.58)	8.04 (0.79)	23.5 (4.12)	1.89 (0.55)	2.78 (0.56)	78.2 (5.85)	23.8 (3.15)
	无添加厌氧消化污泥	16.8 (1.98)	19.1 (2.33)	8.23 (1.04)	16.7 (1.78)	1.41 (0.19)	1.94 (0.43)	50.9 (7.12)	17.8 (2.19)
第 3 年	消化污泥	22.6 (4.14)	17.5 (2.02)	7.89 (1.12)	29.9 (6.18)	2.78 (0.23)	4.56 (0.68)	103.8 (9.12)	33.8 (5.17)
	无添加厌氧消化污泥	16.9 (2.15)	19.2 (3.15)	8.25 (1.34)	16.3 (2.18)	1.27 (0.36)	1.92 (0.41)	49.8 (6.23)	17.3 (2.37)

注:表中数据为 3 次测定平均值,括号内数据为标准误差。

图 1 为施用厌氧消化污泥对苗圃土壤总可溶性盐含量(TDS)和电导率(EC)的影响.由图 1 可以看出,土壤全盐量自施用厌氧消化污泥后也出现明显降低,与无添加厌氧消化污泥相比较,厌氧消化污泥土地施用 1 年、施用 2 年和施用 3 年以后,土壤 TDS 较无添加厌氧消化污泥分别下降了 15.8%、23.7% 和 44.5%,电导率(electric conductivity,EC)分别下降 20.4%、41.6%、58.4%.土壤施用厌氧消化污泥 3 年后,土壤中 TDS 仅为 0.875 g·kg⁻¹,EC 值降至为 91.5 μS·cm⁻¹,大大缓解了由于长期不合理施肥和灌溉导致的苗圃土壤呈现次生盐渍化过程。

这也进一步说明,施用厌氧消化污泥对调节和改善退化苗圃土壤理化环境具有较好的效应.过去有研究表明,长期施用原污泥可能会造成土壤盐度升高,甚至出现次生盐碱化^[13].本试验结果则表明,厌氧消化污泥施用对较高盐度苗圃土壤具有一定的改良作用.盐度的降低一方面是原污泥中一些盐基离子在厌氧消化过程中进入液相中,使得厌氧消化后的污泥盐度有明显降低.另外,施用厌氧消化污泥后,增加的土壤孔隙,有利于盐基离子通过淋洗排出土壤系统^[14].

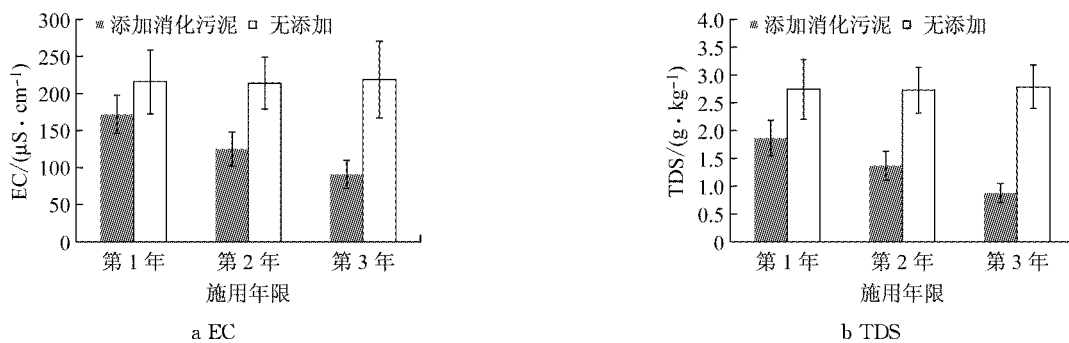


图 1 厌氧消化污泥施用对土壤 pH 和 EC 值的影响

Fig.1 Effects of anaerobically digested sludge application on soil pH and EC value

2.2 厌氧消化污泥施用对土壤微生物学特征的影响

作为土壤的重要组成部分,土壤微生物在土壤形成和演化过程中起着主导作用,并可用以较早地预测土壤有机质乃至土壤环境的变化过程,是土壤质量和土壤恢复性能评价的一项敏感性指标^[15].土壤微生物生物量(soil microbial biomass,SMB)是指土壤中体积小于 5μm 的活性微生物总量,是土壤有机质中最活跃和最易变化的部分^[15].土壤微生物生

物量与土壤中的 C、N、P、S 等养分元素的循环密切相关,可直接反映土壤肥力和土壤环境质量的變化^[15].图 2 为厌氧消化污泥施用到苗圃土壤后,土壤中微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)的变化情况.由图 2 可明显看出,苗圃土壤施用厌氧消化污泥后,土壤中 MBC 和 MBN 都有明显($P < 0.05$)的增加,与无厌氧消化污泥投施土壤相比较,厌氧消化污泥施用 1 年、施用 2 年和施用 3 年以后,土壤微生物生物量碳(MBN)含量分别提高了

22.1%、85.2%和 147.8%，而对土壤微生物生物量碳(MBC)含量的增加效应更为明显，分别提高了 28.4%、110.5%和 222.6%。由此说明，厌氧消化污泥施用对促进农田土壤微生物的生长是非常有利

的。这主要是由于厌氧消化污泥的施用，提高了土壤有机质和其他养分的含量，也改善了土壤的通气状况，改善了土壤微生物的环境，并为其代谢活动提供了良好的基质，进而增强了土壤微生物的活性^[16]。

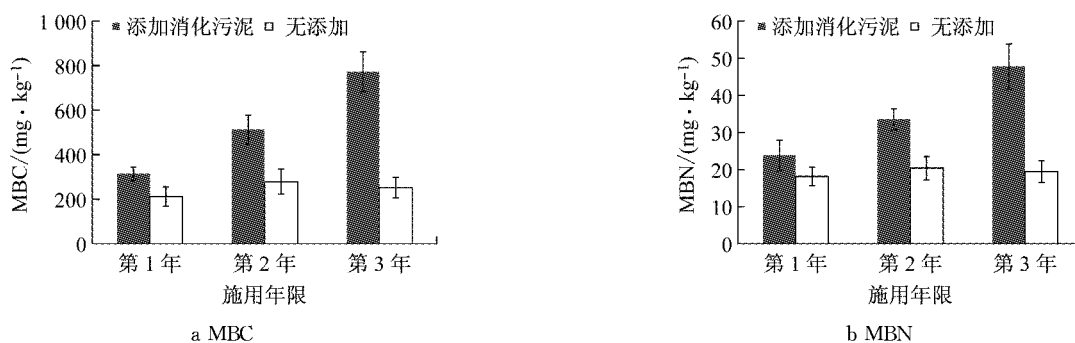


图 2 厌氧消化污泥施用对土壤微生物生物量的影响

Fig. 2 Effects of anaerobically digested sludge application on soil microbial biomass

土壤酶活性是反映土壤微生物代谢活性和生化过程的一个重要指标，也是土壤管理措施导致土壤质量变化的敏感性指标^[17]。通过对施用厌氧消化污泥后的土壤酶活性分析结果发现(表 3)，退化苗圃土壤施用厌氧消化污泥后，可明显提高土壤酶的活性，与无添加厌氧消化污泥相比较，苗圃土壤施用厌氧消化污泥 3 年后，土壤转化酶、脱氢酶、尿酶和碱性磷酸酶分别提高了 69.0%、35.1%、117.6%和 81.4%。由此说明，厌氧消化污泥土地施用可以显著增强土壤代谢功能，从而促进了土壤的生物化学过程的发生。

过去研究也表明，污泥施用普遍有利于提高土壤酶活性，譬如土壤淀粉酶、脲酶和蔗糖酶活性。但

原污泥施用量或时间延长，则会抑制多酚氧化酶和磷酸酶的活性，而污泥对过氧化氢酶的影响则不大。污泥对土壤微生物特性短期内有积极的影响，但长期则有负面作用^[18]。本研究结果则显示，施用经过厌氧消化后的稳定化污泥对土壤中关键酶活性的提升作用明显高于原污泥的效果，而且经过连续 3 年施用后，土壤微生物活性仍保持较高的增长速率。

另外，从表 3 还可发现，不同类型土壤酶对土壤厌氧消化污泥施用后的反应敏感性存在显著差异，相比较而言，在所调查的酶活性中，土壤尿酶对厌氧消化污泥园林土地施用后的响应更为敏感，可作为厌氧消化污泥土地利用评价的敏感性指标。

表 3 厌氧消化污泥施用对土壤酶活性的影响

Tab. 3 Effects of anaerobically digestion sludge application on soil enzyme activities

施用年限	处理	转化酶/ (mg·g ⁻¹)	脱氢酶/ (mg·g ⁻¹ ·(24 h) ⁻¹)	尿酶/ (mg·g ⁻¹ ·(24 h) ⁻¹)	碱性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹ ·(24 h) ⁻¹)
第 1 年	消化污泥	19.3(1.98)	5.12(1.12)	0.22(0.02)	0.55(0.11)
	无添加厌氧消化污泥	18.1(2.13)	4.41(0.74)	0.18(0.03)	0.50(0.07)
第 2 年	消化污泥	23.8(4.12)	5.46(0.89)	0.31(0.08)	0.62(0.09)
	无添加厌氧消化污泥	16.23(1.79)	3.68(0.72)	0.16(0.04)	0.42(0.03)
第 3 年	消化污泥	27.9(3.05)	6.55(1.34)	0.37(0.06)	0.79(0.14)
	无添加厌氧消化污泥	15.5(2.75)	3.37(0.29)	0.17(0.02)	0.39(0.05)

注：表中数据为 3 次测定平均值，括号内数据为标准误差。

2.3 厌氧消化污泥施用后土壤重金属累积效应

城市污水厂污泥土地利用后的重金属污染累积效应一直是人们关心的问题，也是厌氧消化污泥和污泥土地利用的瓶颈^[19]。本论文对厌氧消化污泥施用苗圃土壤后主要重金属的主要含量进行的采样和分析(表 4)。由表 3 可明显看出，对照土壤和厌氧消化污泥施用后的土壤 As 未检出，施用厌氧消化污泥

后土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb 含量均有不同程度增加，但对照土壤环境质量标准(GB 15618—1995)^[20]，其含量均低于土壤环境质量 1 级标准，对环境及生态系统的生态风险较小。但是，由于本次试验仅仅是持续 3 年的实验数据，施用厌氧消化污泥后对土壤中的重金属持续累积效应过程还有待于今后进一步持续监测，特别是厌氧消化污泥长期施用

表 4 厌氧消化污泥施用对土壤重金属含量的影响

Tab.4 Effects of anaerobically digested sludge application on concentrations of soil heavy metals

施用年限	处理	重金属含量/(mg · kg ⁻¹)						
		Cd	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb
第 1 年	消化污泥 对照	0.11(0.04)	—	2.34(0.57)	4.78(0.56)	0.34(0.06)	16.7(3.78)	1.89(0.19)
		0.09(0.02)	—	1.12(0.22)	2.12(0.34)	—	14.2(2.65)	1.34(0.18)
第 2 年	消化污泥 对照	0.12(0.03)	—	4.70(0.78)	6.45(0.81)	0.56(0.03)	19.4(4.07)	2.78(0.51)
		0.08(0.01)	—	1.08(0.34)	1.91(0.37)	—	14.1(2.38)	1.33(0.22)
第 3 年	消化污泥 对照	0.13(0.03)	—	5.89(0.45)	8.67(1.12)	0.89(0.07)	26.8(2.19)	3.56(0.29)
		0.07(0.01)	—	1.08(0.21)	1.89(0.20)	—	13.1(1.55)	1.33(0.18)
土壤环境质量标准(1 级) (GB 15618—1995) ^[20]		0.20	15	90	35	40	100	35

注:1.表中数据为 3 次测定平均值,括号内数据为标准误差;2.“—”表示未检测出,即含量低于仪器检测线水平。

后通过淋溶作用对地下水的影响还要进行全面评估^[21]。

3 结论

(1)3 年的持续模拟土柱实验研究表明,施用厌氧消化污泥对调节和改善苗圃土壤质地和物理特性具有较好的效果,土壤 pH 趋于中性,特别施用厌氧消化污泥后显著减少苗圃土壤中总可溶性盐含量,进而明显降低的土壤电导率,说明厌氧消化污泥施用对多年种植苗木造成的次生盐渍化苗圃土壤具有较好的改良效果。

(2)厌氧消化污泥园林土地施用后明显提高了苗圃土壤有机质和氮、磷等营养元素的含量,特别是增加了土壤中植物有效养分的含量和比例,从而有助于提高苗圃土壤的肥力,这对后续苗木高效、高产奠定了良好的基础。同时,土壤中养分较为均衡,C/N适中,从而有利于土壤中微生物的生长和繁殖。

(3)厌氧消化污泥施于苗圃土壤后明显增加了土壤微生物生物量和土壤中关键酶的活性,而且随着施用年数增加,土壤微生物生物量和酶活性也稳步上升,并没有出现过去原污泥施用造成后期微生物活性下降的现象,这大大改善了土壤生化代谢过程以及生物地球化学循环功能,有利于土壤质量和土壤健康的持续改善。

(4)厌氧消化污泥施用后土壤重金属累积效应分析结果表明,与无添加厌氧消化污泥相比,厌氧消化污泥施用 3 年后,供试苗圃土壤 Cr、Cu、As、Ni、Zn、Pb 含量均有不同程度增加,但是其含量远低于国家土壤环境质量标准 1 级标准。但长期施用厌氧消化污泥对苗圃土壤中的重金属累积过程和环境效应还应进一步深入研究和探讨。

参考文献:

- [1] 李雄伟,李俊,李冲,等.我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨[J].中国给水排水,2016,32(16):26.
LI Xiongwei, LI Jun, LI Chong, *et al.* Current application situation and development trend of sludge treatment and disposal technologies in China [J]. China Water and Wastewater, 2016, 32(16): 26.
- [2] SINGH R P, AGRAWAL M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge[J]. Waste Management, 2008, 28(2): 347.
- [3] GROSSER A, NECZAJ E, SINGH B R, *et al.* Anaerobic digestion of sewage sludge with grease trap sludge and municipal solid waste as co-substrates [J]. Environmental Research, 2017, 155(3): 249.
- [4] DU H, LI F. Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge [J]. Chemosphere, 2017, 168(2):1022.
- [5] 周立祥,胡霭堂.厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质[J].植物营养与肥料学报,1997,3(2):176.
ZHOU Lixiang, HU Aitang. Chemical composition and environmental chemical properties of anaerobic digested sludge [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(2): 176.
- [6] HEIMERSOON S, SVANSTRÖM M, CEDERBERG C, *et al.* Improved life cycle modelling of benefits from sewage sludge anaerobic digestion and land application [J]. Resources Conservation and Recycling, 2017, 122(7): 126.
- [7] 上海市市政工程研究总院,上海市园林科学研究所,上海市市政排水有限公司,等.城镇污水处理厂污泥处置——园林绿化用泥质:GB/T 23486—2009[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,中国标准化委员会,2009.
Shanghai Municipal Engineering Institute, Shanghai Institute of Garden Science, Shanghai Municipal drainage Co., Ltd., *et al.* Disposal of sludge from municipal wastewater treatment—quality of sludge used in gardens or parks; GB/T 23486—2009 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, China National Standardization Committee, 2009.
- [8] 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 Rukun. Soil agrochemistry analysis protocols [M].

- Beijing: China Agriculture Science Press, 2000.
- [9] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
LIN Xiangui. Principles and methods of soil microbiology research [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [10] LAGBROTONS A J, GÓMEZ I, NAVARROPEDREÑO J. Sewage sludge use in bioenergy production. A case study of its effects on soil properties under *Cymara cardunculus* L. cultivation [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(1):14.
- [11] URBANIAK M, WYRWICKA A, TOLOCZKO W, *et al.* The effect of sewage sludge application on soil properties and willow (*Salix* sp.) cultivation [J]. Science of the Total Environment, 2017, 586(3): 66.
- [12] 张强, 卜玉山. 污泥对不同土壤全氮和有机质及重金属含量的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(3):433.
ZHANG Qiang, BU Yushan. Effect of sewage sludge on total nitrogen, organic matter and heavy metals content in different soils [J]. Journal of Shanxi Agricultural Science, 2017, 45(3):433.
- [13] ABDULLAH R, CHE F I, WAN R K, *et al.* Application of raw and composted recycled paper mill sludge on the growth of *Khaya senegalensis* and their effects on soil nutrients and heavy metals [J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2016, 18(1): 65.
- [14] 张密密, 陈诚, 刘广明, 等. 适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 91.
ZHANG Mimi, CHEN Cheng, LIU Guangming, *et al.* Suitable utilization of fertilizer and soil modifier to ameliorate physicochemical characteristics of saline-alkali soil and increase crop yields [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(10): 91.
- [15] HERMANS S M, BUCKLEY H L, CASE B S, *et al.* Bacteria as emerging indicators of soil condition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 83(1): 1.
- [16] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. 土壤学报, 2015, 52(4):902.
GAO Songjuan, CAO Weidong, BAI Jinshun, *et al.* Long term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):902.
- [17] 徐志超, 宋彦涛, 乌云娜, 等. 放牧影响下克氏针茅草原不同物候期土壤酶活性与微生物生物量的变化[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2022.
XU Zhichao, SONG Yantao, WU Yunna, *et al.* Effect of grazing intensities on soil enzyme activities and soil microbial biomass of *Stipa krylovii* steppe in different phenological periods[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8):2022.
- [18] 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.
LU Zhenglan, LIU Ruimin, BAI Liping, *et al.* Advances in research on the effects of municipal sludge application on soil ecosystem [J]. Ecology and Environmental Science, 2012, 21(1): 172.
- [19] FANG W, DELAPP R C, KOSSON D S, *et al.* Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: Percolation leaching tests with repeated additions of compost [J]. Chemosphere, 2017, 169(2):271.
- [20] 国家环境保护局南京环境科学研究所. 土壤环境质量标准:GB 15618—1995 [S]. 北京: 国家环保总局, 国家技术监督局, 1995.
Nanjing Institute of Environmental Science of State Environmental Protection Bureau. Environmental quality standard for soils: GB 15618—1995 [S]. Beijing: State Environmental Protection Bureau, State Bureau of Technical Supervision, 1995.
- [21] 徐成斌, 董兴, 黄野, 等. 城市污泥土地利用的淋溶风险探析 [J]. 河北大学学报(自然科学版), 2017, 37(1):80.
XU Chengbin, DONG Xing, HUNG Ye, *et al.* A review on leaching risk of land application of urban sewage Sludge [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2017, 37(1):80.