

沼液的园林地消解处理利用 及其对土壤微生物碳、氮与酶活性的影响

耿晨光^{1,2}, 段婧婧^{1,2}, 李 汛¹, 段增强^{1*}

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:近年来,沼气工程发展迅猛,产生的大量沼液处理和排放问题日益突出,成为水环境保护中亟待解决的关键问题。为研究沼液灌溉园林地土壤进行消解处理利用过程对土壤微生物碳、氮及酶活的影响,提出沼液安全排放处理的新途径,通过在江苏宜兴万石镇葡萄园基地进行大田试验,比较了不同处理下沼液消解利用过程对土壤微生物碳、氮以及土壤微生物量碳与土壤有机碳的关系,并测定了土壤几种常见酶的活性。结果表明,沼液园林地(葡萄园)消解利用过程不会降低土壤微生物碳、氮含量,地面间作黑麦草或地下安装排水管道时能显著提高土壤微生物碳、氮含量,分别提高 8.70%和 17.34%。沼液园林地消解利用能提高土壤微生物量碳与土壤有机碳比率,但未达到显著性水平。沼液在园林地消解利用中,只进行沼液灌溉的处理区土壤蔗糖酶活性略微下降,其他试验区土壤蔗糖酶含量较对照区显著性提高,试验区土壤脲酶也较对照区提高了数倍以上,但土壤酸性磷酸酶和过氧化氢酶在该试验研究中未表现出较大变化。该试验仅为沼液消解处理利用的田间短期效应,沼液园林地消解利用处理对作物品质、土壤肥力和农业生产环境的综合影响仍需进行长期试验验证。

关键词:污水处理;沼液;园林地;微生物碳;微生物氮;土壤酶

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)10-1965-07

Short-term Effects of Biogas Slurry Application to Garden Land on Soil Microbial Biomass Carbon & Nitrogen and Soil Enzymes

GENG Chen-guang^{1,2}, DUAN Jing-jing^{1,2}, LI Xun¹, DUAN Zeng-qiang^{1*}

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the rapid development of biogas industries, large amount of biogas slurry was untreated and discharged randomly, which became a serious threat to the water safety. To study the effects of biogas slurry application to garden land on soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN), as well as enzymatic activities, we conducted the field experiment in a vineyard base in Wanshi Town of Yixing city, Jiangsu Province and proposed a new process to treat biogas slurry safely. The digestion and utilization process of biogas slurry was compared in different treatments to evaluate the relationship between MBC, MBN and soil organic carbon, and several enzyme activities were also determined. The results indicated that MBC and MBN were not decreased during the application of biogas slurry alone, whereas significantly increased 8.70% and 17.34%, respectively in the treatment with the intercrop of ryegrass (*Lolium perenne* L.) and the installation of below-ground drainpipe. The ratio of MBC to soil organic carbon was impacted by the digestion and utilization process of biogas slurry, but did not reach a significant level. Soil sucrase activities were markedly improved in the treatment with the biogas slurry compared with CK (except the treatment with biogas slurry for irrigation alone). Urease activities were considerably improved compared with CK, whereas the acidic phosphatase and catalase activities were not significant changed. In present experiment, the short-term effects of the utilization of biogas slurry in field condition were studied, and the integrated influence of the digestion and utilization of biogas slurry in garden land on crop quality, soil fertility and agricultural environment will be further investigated.

Keywords: sewage treatment; biogas slurry; garden land; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen; soil enzyme activities

收稿日期:2012-04-05

基金项目:农业部公益性行业项目(200903011)

作者简介:耿晨光(1986—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事植物营养和环境科学方面研究。E-mail:cgengg@issas.ac.cn

* 通信作者:段增强 E-mail:zqduan@issas.ac.cn

“十一五”期间我国农村发展进入了新的阶段,农村和农业产业结构优化调整,规模化养殖场发展迅猛,全国畜禽粪便年产生量已超过 25 亿 t,是工业废物的 2.7 倍^[1]。沼气工程是一项提供清洁能源、潜力巨大的生物质能源工程,技术日趋成熟,应用越来越广泛。但是,发酵后残留物(如沼液和沼渣)的处理还存在着许多问题,特别是对于沼气池连续排放、数量巨大的沼液,其养分管理研究国内外报道较少。这不仅制约了资源的合理循环利用,而且降低了沼气工程产业化和商品化的速度^[2-3]。针对此状况,国家提倡沼液等沼气工程后续废弃物就地消纳,维持种养平衡^[4]。土地消解污水是在不影响地面生产的情况下,利用土壤-植物-微生物联合作用体进行水资源再利用的过程,具有成本低、运行简单、去除效果好等优点^[5-9],世界多地已成功将处理后的污水用于农业生产并从中受益^[10-12]。西方发达国家多采用污水经初级处理后应用于苗木生产,价格低廉易操作^[13-18]。这些研究涉及到了污水灌溉农田作物的优缺点^[19],也包括对 N 素利用的研究^[20-24],还有一些对污水土地处理利用过程中产生温室气体的环境行为研究^[25-26]。园林地消解处理利用沼液等污水,实现水肥循环高效利用,有利于环境保护。国内有一些研究报道^[24-27,29]利用稻田进行沼液消解利用,效果很好。但是,对沼液在土地消解利用处理过程中土壤微生物及酶活性的研究报道较少。本文通过田间试验,结合本研究团队前期的相关工作,研究了沼液灌溉于园林地(葡萄园)过程对土壤微生物及酶活性的影响,以期评估土地消解利用沼液对土壤微生物及酶活性的短期效应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于江苏省宜兴市天蓬奶牛场葡萄园地生产基地定位试验区,地处宜兴市东北部(119°97'E, 31°47'N),属中亚热带气候,四季分明,气候温和湿润,年平均无霜期 240 d,年平均降水量 1177 mm。葡萄园占地近 6000 m²,所种葡萄为 6 年树龄欧亚种夏黑。本试验供试土壤为黄泥土,质地为粉砂质粘壤土,砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和粘粒(<0.002 mm)含量分别为 14%、56.8%和 29.2%(美国农业部土壤质地分类制)。土壤的基本理化性状为:pH 5.58,有机质 21.0 g·kg⁻¹,全氮 1.39 g·kg⁻¹,硝态氮 54.59 mg·kg⁻¹,总磷 1.42 g·kg⁻¹,速效磷 18.66 mg·kg⁻¹,速效钾 160.0 mg·kg⁻¹。本试验中供试沼液来自该奶牛

场沼气工程发酵剩余物。

1.2 田间试验设计

针对葡萄树对水分耐性不高、喜旱不喜涝的生理特性,本试验搭建了污水灌溉系统(包括地下排水系统和地面布水系统)。排水系统包括排水管、集水管和集水井。系统设计排水管理深为 0.6 m,排水管和集水管为 HDPE 波纹排水管,管内径 100 mm,管外包一层土工膜,防止堵塞。排水管长 15 m,排水管方向垂直于集水管,集水管比降 1%,排水管出水经集水管收集到两侧的集水井。布水系统为滴灌,滴头设计滴速为 4.5 L·h⁻¹。

试验设 5 个处理:A、B、C、D 和 CK 空白对照处理,具体见表 1。试验小区面积为 15 m×5 m,各处理 3 次重复。地表间作种植的黑麦草(*Lolium perenne* L.)为四倍体 1 年生品种。根据葡萄生长特性、试验区气象条件、葡萄地冬肥传统施肥量和土地接纳能力,依据相关文献^[30-31]计算了系统水力负荷,并结合试验用沼液基本性状设计了表 2 所示灌溉制度。本试验为短期试验,该试验区定位试验一直在进行中。

表 1 试验小区设计

Table 1 Design of experimental treatments

处理	排水系统	间作黑麦草	水源
A	有	有	沼液
B	无	有	沼液
C	无	无	沼液
D	有	无	沼液
CK	无	无	清水

1.3 采样及测定方法

在试验开始之前和结束之后用土钻在各小区取样,取样深度为 0~20 cm。新鲜土样混匀后,分出一半贮存于 4℃条件下保鲜,另一半风干后过筛用于分析。

土壤微生物量碳、氮的测定:根据 Vancel 等的方法^[32],采用氯仿熏蒸浸提法,计算系数 KEC、KEN 分别取值为 0.38、0.45。土壤酶活性根据文献的方法^[33]进行测定。蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,脲酶采用靛酚蓝比色法,酸性磷酸酶采用对硝基苯磷酸钠比色法,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法。土壤理化性质 pH、电导率、有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾的测定参照文献分别进行^[34]。

1.4 统计分析

数据分析采用 Microsoft Office Excel 2007 和 SPSS 17.0(SPSS Inc. Chicago, US)统计软件。多重比较

采取 LSD 检验法。

2 结果与讨论

2.1 沼液土地消解处理利用对土壤肥力的影响

由表 3 可见,沼液灌溉于葡萄园地后对土壤基本理化性质产生了不同程度影响。这可能是沼液中含有的碳源物质促进了微生物的生长和繁殖,加快了微生物对土壤有机质的分解矿化,释放出更多的有效养分。其中,pH 波动不大,表明土壤对酸碱性缓冲能力很好,对沼液接纳能力较高。电导率在不同处理之间差异显著。地表种植黑麦草的处理 A 和 B 显著低于未种植黑麦草的处理 C 和 D,表明黑麦草作为填闲作物,能利用沼液水肥营养,提高沼液消解率。比较处理 C 和 D,安装有地下排水管道的情况下,能提高矿质元素迁移流动,减少水力滞留时间,电导率差异显著降低。除速效钾、全磷外,有机质、全氮和速效磷均为种植黑麦草的处理显著高于其他处理,表明黑麦草在截留氮磷营养流失,提高土壤肥力方面发挥了重要作用。地下排水管道对不同处理的影响规律性不明显,对土壤肥力未造成直接影响,对土壤的影响需要经过长期的灌溉试验才能得以说明^[35]。但是地下排水管在提高水力负荷、减少水力滞留时间方面具有重要意义^[36]。总之,表层土壤施用沼液后,所有土壤养分指标都达到了高等以上水平,表明施用沼液有利于提高

土壤的供肥能力,满足作物生长所需主要养分。其中,全氮效果最明显,说明施用沼液有利于改善耕层土壤缺氮状况,有利于作物生长发育^[38]。休闲季施灌沼液贮肥于田的效果明显,在土壤中积累的大部分营养物质可在后期生长季被作物、土壤消解,有效地减缓农田肥力的过度富营养化^[28]。后期作物生长季土壤理化性质的变化有待在后续的试验中继续研究。

2.2 沼液土地消解处理利用对土壤微生物碳、氮的影响

土壤微生物可利用环境中的碳、氮源物质进行自身繁殖,向土壤中添加碳或氮源会促进土壤微生物量的增加^[43]。由图 1 可见,不同处理间沼液灌溉于葡萄园地对土壤微生物碳、氮产生了不同影响。土壤微生物碳在 90.5~116.8 mg·kg⁻¹。其中,种植黑麦草处理试验区显著高于裸地区域,裸地的微生物生物量碳、氮较低。黑麦草作为填闲作物,使得处理试验区植被丰富,归还土壤的有机物料较多,对沼液氨挥发也有一定抑制作用,有利于土壤微生物的繁殖发育,导致土壤微生物生物量较高^[37]。黑麦草对沼液灌溉有一定耐受能力,分蘖数、生物量和植株养分含量不会因沼液灌溉量增加而存在显著差异^[38]。同时,安装有地下排水管的处理 A、D 的微生物碳含量为 116.8、98.2 mg·kg⁻¹,较对应的无地下排水管的处理 B 和 C 分别提高了 12.74%和 3.60%。其中,A 处理较 B 处理达到了显著性差异水平,C 和 D 处理差异不显著。地下排水管

表 2 试验区沼液灌溉情况
Table 2 Irrigation managements of experiment plots

时间	灌溉量/mm	沼液成分指标			
		TN/mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹	COD/mg·kg ⁻¹
2011-09-29	33.3	243.20	186.6	19.39	190
2011-10-07	21.9	47.87	35.2	2.59	500
2011-10-12	33.3	388.29	321.7	30.22	200
2011-10-21	30.9	388.29	321.7	30.22	200
2011-11-04	22.4	499.39	401.8	50.90	360
2011-11-22	20.2	390.46	333.4	54.70	390

注:TN 为总氮,NH₄⁺-N 为铵态氮,TP 为总磷,COD 为化学需氧量。

表 3 土壤肥力变化
Table 3 Changes of soil fertility under different treatments

处理	pH	电导率/μS·cm ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
A	5.42a	150bc	24.7a	1.491a	1.42ab	25.47b	179.11ab
B	5.58a	142c	24.8a	1.488ab	1.43ab	26.59a	179.99ab
C	5.84a	387a	24.1ab	1.437bc	1.47a	24.74b	189.13a
D	6.02a	308ab	24.2ab	1.428cd	1.46ab	24.83b	184.56a
CK	5.50a	140c	22.4c	1.386e	1.42ab	18.64c	162.44c

注:不同字母表示平均值之间达到了显著差异(P<0.05)。下同。

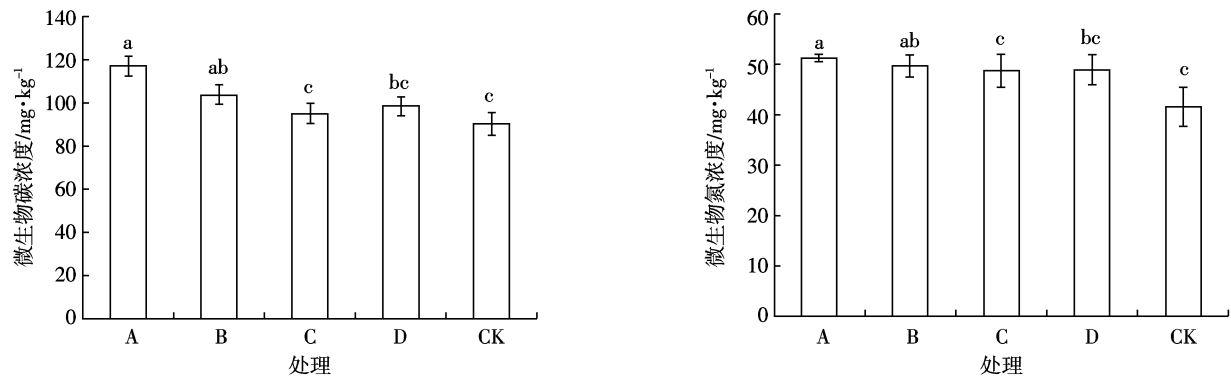


图 1 沼液土地消解处理利用对土壤微生物碳、氮的影响

Figure 1 Effects of biogas slurry application and digestion on MBC and MBN

能改善土体通气透水性,加之沼液丰富的有机质、矿物质营养,提高土壤团聚体数量,为微生物生长提供较好的水分、养分和温度等环境条件,致使微生物能在表土层及深达 60 cm 的土层保持较高活性。微生物活性的提高对污水处理效率的提供具有重要作用^[39]。该系统 and 国外研发的 FILTER 污水处理系统相似,通过利用地下排水系统,增大土壤的排水量,减少污水的存储,提高污水处理能力是一个有发展前途的污水处理技术^[40]。

2.3 微生物量碳与土壤有机碳的关系

土壤微生物量碳与土壤有机碳比率(C_{mic}/C_{org})是指示土壤碳有效性的重要指标,研究^[35,41]显示, C_{mic}/C_{org} 值一般为 0.5%~4.0%。由表 4 可见,本研究中此值在 0.39%~0.47%之间,平均为(0.42±0.03)%。各种处理之间 C_{mic}/C_{org} 差异不大,总体比率值偏低。这和葡萄园长期施用大量化肥以及农民生产过程中对土壤水肥管理情况有关。如果向土壤中加大添加有机物质,改善土壤微生物生长条件,提高土壤微生物活性,提高微生物碳含量,这一比值可缓慢提高^[35]。

2.4 沼液土地消解处理利用对土壤酶活性的影响

土壤酶作为土壤质量的生物活性指标和土壤肥力的评价指标,在土壤生态系统中扮演着重要的角

色^[42]。土壤酶来源包括土壤微生物、植物和动物的活体或残体等,土壤酶是通过催化土壤中的生化反应来发挥重要作用,其活性是土壤生物活性和土壤肥力的重要指标之一^[33]。它们参与土壤有机物质的分解转化,土壤酶活性的高低可以反映土壤养分转化的强弱。

2.4.1 对蔗糖酶的影响

由图 2 可见,不同处理中蔗糖酶活性在 0.07~0.17 $g \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 之间,不同沼液灌溉利用处理之间蔗糖酶活性存在差异,除 C 区外,其他处理均较对照区域的土壤蔗糖酶活性显著性提高。蔗糖酶与土壤全氮含量相关极为显著,对分解土壤碳源循环、提供养分能量具有重要意义^[33]。本试验进行灌溉所用沼液,作为外源性碳源反应底物对土壤蔗糖酶活性会产生不同程度的提高作用。但是,本研究中蔗糖酶活性没有表现出显著规律性。这可能和该研究的试验期较短以及施用沼液引起土壤原有土壤有机碳“激发效应”^[35]有关。具体原因有待在后期的试验中继续研究。

2.4.2 对脲酶的影响

脲酶在土壤肥力、土壤氮素循环方面具有重要意义^[33]。由图 3 可见,各处理土壤脲酶活性顺序为处理

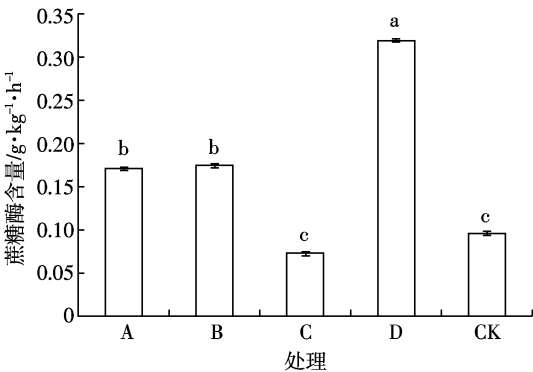


图 2 试验区蔗糖酶含量情况

Figure 2 Concentration of invertase activities

表 4 不同处理的土壤有机碳含量及其与微生物碳的比率		
Table 4 Contents of soil organic carbon and C_{mic}/C_{org} between different treatments		
处理	土壤有机碳/ $g \cdot kg^{-1}$	$C_{mic}/C_{org}/\%$
A	24.7	0.47
B	24.8	0.42
C	24.1	0.39
D	24.2	0.41
CK	22.4	0.40

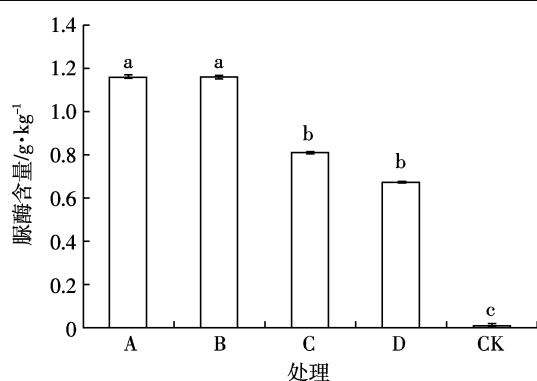


图3 试验区脲酶含量情况

Figure 3 Concentration of urease activities

A>处理 B>处理 C>处理 D>CK。各处理均与对照差异显著,分别比对照提高了 63、63、44 倍和 36 倍,说明沼液能提高土壤脲酶活性,这和沼液中含有大量的易分解的含氮化合物、生物活体及可以分泌脲酶等土壤酶类有关^[43]。安装地下排水管的 A、D 区较未安装的 B、C 区土壤脲酶活性差异不显著,说明排水设施的存在对土壤表层脲酶活性不产生影响。种植黑麦草的 A、B 区较未种植黑麦草的 C、D 区之间差异显著,说明黑麦草作为填闲作物对土壤系统 N 素循环利用具有一定的积极意义。沼液中含有大量营养物质,可被微生物直接吸收利用,对脲酶活性提高可能有重要影响,土壤微生物活性和土壤酶活的相关分析将在后续试验中继续进行。

2.4.3 对酸性磷酸酶的影响

磷酸酶对土壤有机磷的水解和磷酸活化具有重要意义^[33]。由图 4 可见,沼液灌溉葡萄园地消解利用过程中,土壤酸性磷酸酶出现了一个降低的现象,其中处理 C 甚至与对照区出现了显著性降低。处理区域的酸性磷酸酶活性平均降低了近 19.0%。这和前人的研究结果^[44]相似。沼液 pH 偏碱性,加上是厌氧发酵的产物,具有较强的还原能力,可能对酸性磷酸酶的活性产生一定的抑制作用。沼液长期灌溉园林地过程对土壤酸性磷酸酶的影响将在后续试验中继续研究。

2.4.4 对过氧化氢酶的影响

过氧化氢酶是一种非常重要的生物酶,在土壤中广泛分布,它参与了土壤中许多重要的生物化学过程,其活动同土壤性质关系密切^[33]。在该沼液灌溉葡萄园地进行消解利用的过程中,提高过氧化氢酶活性即加速有毒过氧化氢的分解,从而减少对葡萄根系的伤害,由图 5 可以看出,不同处理之间土壤过氧化氢酶活性存在差异,但未达到显著性水平。处理 A、D

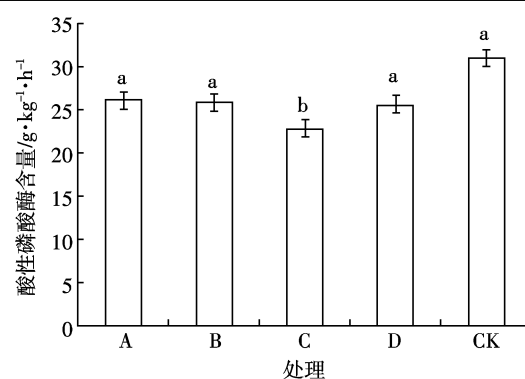


图4 试验区酸性磷酸酶含量情况

Figure 4 Concentration of acidic phosphatase activities

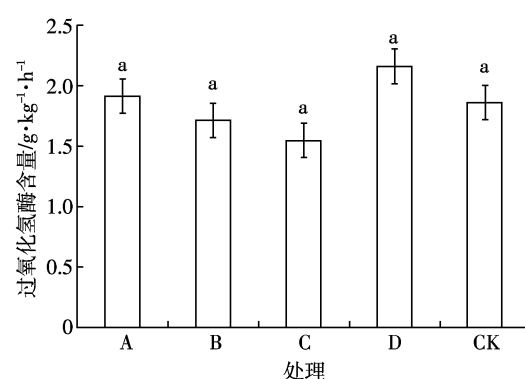


图5 试验区过氧化氢酶含量情况

Figure 5 Concentration of catalase activities

高于对照 CK,处理 B 和 C 均小于 CK,说明安装有地下排水管能改善土体通气透水性能,对于土壤良好的机械组成方面具有一定影响。总体各处理对土壤过氧化氢酶活性影响不大,短期施用沼液用于葡萄园生产过程相对比较安全,不会积累过多抑制植物生长的有毒有害物质。但是要说明沼液农用灌溉达到安全消解利用的目的,还需要长期试验的验证^[24]。

3 结论

本研究即为沼液灌溉于葡萄园林地进行消解处理利用的短期效应。试验结果表明,进行沼液灌溉于葡萄园地对土壤微生物 C、N 不会造成影响,灌溉区地面间作黑麦草或地下安装排水管道时能显著提高土壤微生物 C、N 含量。沼液园林地消解利用能提高土壤微生物量碳与土壤有机碳比率,但未达到显著性水平。沼液在园林地消解利用中,只进行沼液灌溉的处理区土壤蔗糖酶活性略微下降,其他试验区土壤蔗糖酶含量较对照区显著提高。试验区土壤脲酶也较对照区提高了数倍以上。土壤酸性磷酸酶和过氧化氢酶在该试验研究中未表现出较大变化。

综上所述,在适当的消解灌溉量下,沼液对园林地土壤微生物和酶活性不会造成负面影响,沼液应用于园林地中进行消解利用是安全可行的。该试验仅为短期效应,沼液园林地消解利用处理对作物品质、土壤肥力和农业生产环境的影响有待在后续长期定位研究中继续进行。

参考文献:

- [1] 颜 丽, 李景明, 任颜笑. 农村沼气的共生效应[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊1): 89-92.
YAN Li, LI Jing-ming, REN Yan-xiao. Symbiosis effect of rural biogas project[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl 1): 89-92.
- [2] 汤云川, 张卫峰, 张福锁, 等. 户用沼气工程发展对农田养分流动的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 192-199.
TANG Yun-chuan, ZHANG Wei-feng, ZHANG Fu-suo, et al. Effect of household biogas project development on farmland nutrient flow [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 192-199.
- [3] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 291-296.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 291-296.
- [4] 国家环境保护部. 畜禽养殖污染防治技术政策(征求意见稿)2009. <http://www.zhb.gov.cn/info/bgw/bbgt/200909/w020090918349658446952>. MEPPRC. Livestock and poultry pollution prevention technology policy (Draft for Soliciting Opinions)2009. <http://www.zhb.gov.cn/info/bgw/bbgt/200909/w020090918349658446952>.
- [5] Sousa G, Fanguero D, Duarte E, et al. Reuse of treated wastewater and sewage sludge for fertilization and irrigation[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(4): 871-879.
- [6] Aiello R, Cirelli G L, Consoli S. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy)[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93: 65-72.
- [7] Battilani A, Steiner M, Andersen M, et al. Decentralised water and wastewater treatment technologies to produce functional water for irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(3): 385-402.
- [8] Bhardwaj A K, Goldstein D, Azenkot A, et al. Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil[J]. *Geoderma*, 2007, 140(1-2): 199-206.
- [9] Bedbabis S Ferrara, Giuseppe Ben Rouina, Bechir Boukhris Makki. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 126(3): 345-350.
- [10] Levine A D, Asano T. Peer reviewed: Recovering sustainable water from wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(11): 201A-208A.
- [11] Gharbi L T, Merdy P, Lucas Y. Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part II: Role of organic carbon on Cu, Pb and Cr behaviour[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(11): 1711-1721.
- [12] Shenker M, Harush D, Ben-Ari J, et al. Uptake of carbamazepine by cucumber plants: A case study related to irrigation with reclaimed wastewater[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(6): 905-910.
- [13] Al-Jamal M S, Sammis T W, Mexal J G, et al. A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 56(1): 57-79.
- [14] Segal E, Dag A, Ben-Gal A, et al. Olive orchard irrigation with reclaimed wastewater: Agronomic and environmental considerations [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(3-4): 454-461.
- [15] Kalavrouziotis I K, Koukoulakis P H. Plant nutrition aspects under treated wastewater reuse management[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, 218(1-4): 445-456.
- [16] Pedrero F, Alarcon J Jose. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees[J]. *Desalination*, 2009, 246(1-3): 631-639.
- [17] Lubello C, Gori R, Nicese F P, et al. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation[J]. *Water Research*, 2004, 38(12): 2939-2947.
- [18] Cantrell K B, Stone K C, Hunt P G, et al. Bioenergy from Coastal bermuda-grass receiving subsurface drip irrigation with advance-treated swine wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(13): 3285-3292.
- [19] 赵丽莉. 养猪场沼液农业模式消纳技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
ZHAO Li-li. Study on the biogas fermentative liquid assimilative technology by agriculture pattern of the hogger[D]. Zhengzhou: Agricultural University of He'nan, 2010.
- [20] Lei X H, Sugiura N, Feng C P, et al. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145(3): 391-397.
- [21] Gericke D, Bornemann L, Kage H, et al. Modelling ammonia losses after field application of biogas slurry in energy crop rotations[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011: 1-19.
- [22] 雷廷宙, 张全国, 范振山, 等. 沼液中全氮含量的影响因素试验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 396-399.
LEI Ting-zhou, ZHANG Quan-guo, FAN Zhen-shan, et al. Impact factors on the content of total nitrogen in anaerobic fermentation slurry [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2005, 26(3): 396-399.
- [23] 黄红英, 曹金留, 靳红梅, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2353-2361.
HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, JIN Hong-mei, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353-2361.
- [24] Lu J, Jiang L, Chen D, et al. Decontamination of anaerobically digested slurry in a paddy field ecosystem in Jiading region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 13-22.
- [25] Terhoeven-Urselmans T, Scheller E, Raubuch M, et al. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(3): 297-302.
- [26] Suthar S. Potential of domestic biogas digester slurry in vermiculture[J].

- gy[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14):5419-5425.
- [27] 姜丽娜, 王 强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7):1328-1336.
JIANG Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas surry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1328-1336.
- [28] 姜丽娜, 王 强, 李艾芬, 等. 休闲稻田消解沼液生态效应及其对水稻安全生产影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2483-2490.
JIANG Li-na, WANG Qiang, LI Ai-fen, et al. The ecological effects of fallow paddy field disposal biogas slurry and its impact on the following rice safety production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2483-2490.
- [29] 邓欧平, 姜丽娜, 陈丁江, 等. 大量沼液施灌稻田的氨挥发特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):233-236.
DENG Ou-ping, JIANG Li-na, CHEN Ding-jiang, et al. Ammonia volatilization from the biogas slurry irrigation paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6):233-236.
- [30] 杨治元. 葡萄营养与科学施肥[M]. 北京:中国农业出版社, 2008.
YANG Zhi-yuan. Grape nutrition and fertilizer scientifically[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2008.
- [31] 沈阳农业大学. 农田水力学[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.
Agricultural University of Shenyang. Agricultural hydraulics [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2006.
- [32] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19:703-707.
- [33] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and study method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [34] 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. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [35] Kayikcioglu H H. Short-term effects of irrigation with treated domestic wastewater on microbiological activity of a Vertic xerofluvent soil under Mediterranean conditions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 102:108-114.
- [36] 赵建芬, 马香玲, 靳路明, 等. 污水慢速渗滤土地处理系统的改进试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9):85-88.
ZHAO Jian-fen, MA Xiang-ling, JIN Lu-ming, et al. Improved land treatment system with slow rate for sewage and its test[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9):85-88.
- [37] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 等. 施肥和土壤管理对土壤微生物生物量碳、氮和群落结构的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(1):32-42.
BI Ming-li, YU Wan-tai, JIANG Zi-shao, et al. Effects of fertilization and soil management on microbial biomass and community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1):32-42.
- [38] 唐 华, 郭彦军, 李智燕. 沼液灌溉对黑麦草生长及土壤性质的影响[J]. 草地学报, 2011(6):42-46.
TANG Hua, GUO Yan-jun, LI Zhi-yan. Effects of slurry application on ryegrass growth and soil properties[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011(6):42-46.
- [39] Chavez A, Maya C, Gibson R, et al. The removal of microorganisms and organic micropollutants from wastewater during infiltration to aquifers after irrigation of farmland in the Tula Valley, Mexico[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5):1354-1362.
- [40] 杨金忠, Jayawardane N, Blackwell J, 等. 污水灌溉系统中氮磷转化运移的试验研究[J]. 水力学报, 2004(4):1-9.
YANG Jin-zhong, Jayawardane N, Blackwell J, et al. Field experimental study of contaminant transport in sewage irrigation and treatment system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(4):1-9.
- [41] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 等. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4):750-757.
WANG Xiao-li, SU Yi-rong, HUANG Dao-you, et al. Effects of land use on soil organic C and microbial biomass C in hilly red soil region in subtropical China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4):750-757.
- [42] 刘善江, 夏 雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21):1-7.
LIU Shan-jiang, XIA Xue, CHEN Gui-mei, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21):1-7.
- [43] 王桂芳, 李丙智, 张林森, 等. 苹果园沼液配施钾肥对土壤酶活性及果实品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5):88-91.
WANG Gui-fang, LI Bing-zhi, ZHANG Lin-sen, et al. Effect of application of biogas slurry with potassium on soil enzyme activity and quality of Red Fuji Apple[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5):88-91.
- [44] Brzezinska M, Tiwari S, Stepniewska Z, et al. Variation of enzyme activities, CO₂ evolution and redox potential in an Eutric Histosol irrigated with wastewater and tap water[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(1):131-135.