

施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响

王卫平¹, 陆新苗², 魏章焕², 陈晓旻¹, 薛智勇¹, 胡余楚³, 洪春来¹, 朱凤香^{1*}

(1.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2.浙江省宁海县农业技术推广总站, 浙江 宁海 315600; 3.浙江省宁海县林特技术推广总站, 浙江 宁海 315600)

摘要:利用沼气发酵处理规模畜禽养殖场废水是综合治理畜牧业污染的主要途径之一,但大量沼液出路问题亟待解决。通过柑桔栽培过程中不同沼液灌溉量的多重复随机区组田间小区试验,对沼液不同灌溉量处理与常规施用化肥的对照处理进行了对比,结果表明,施用沼液可促进柑桔生长,对衡量土壤质量的几种重金属含量等基本无不利影响,且土壤中总氮、有机质等有所增加。用 300 000 kg·hm⁻² 沼液浇灌替代化肥,可使柑桔增加产量 8.59%,还可增加柑桔果实可溶性固形物含量,沼液处理 A 的果实中总糖比化肥对照提高 0.6 个百分点,总酸降低 0.262 百分点,果实糖酸比明显提高,糖酸比与施用化肥的对照相比差异达显著水平($P < 0.05$),改善了柑桔的部分品质指标。合理施用沼液进行柑桔灌溉不仅可以减少作物化肥施用量,还能缓解规模养殖场污水处理的排放压力。

关键词:柑桔;沼液;土壤质量;品质

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)11-2300-06

Influence of Applying Biogas Slurry on Yield and Quality of Citrus and Soil Environment

WANG Wei-ping¹, LU Xin-miao², WEI Zhang-huan², CHEN Xiao-yang¹, XUE Zhi-yong¹, HU Yu-chu³, HONG Chun-lai¹, ZHU Feng-xiang^{1*}

(1. Institute of Environment Resources & Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China; 2. Agricultural Technique Extension Center of Ninghai County, Ninghai 315600, China; 3. Forestry Technique Extension Center of Ninghai County, Ninghai 315600, China)

Abstract: Biogas fermentation of wastewater released from livestock and poultry farms is one of the most important ways to comprehensively manage the stock raising pollution. However, disposal of a large amount of biogas slurry has become a challenge. In this study, incorporating biogas slurry in irrigation on citrus was investigated. Field plot experiments with multi-repeat randomized blocks design were performed to assess the influence of different amount of biogas slurry on soil property and the yield and quality of citrus. The results showed that biogas slurry irrigation could promote citrus growth and improve the soil quality by increasing the total nitrogen and organic matter but had no detrimental effect on the heavy metal contents of the soil compared with the blank controls using general chemical fertilizer. Production of citrus was increased by 8.59% with application of 300 000 kg·hm⁻² biogas slurry instead of chemical fertilizers. The soluble solids content of fruit was improved as well. Total sugar of fruit was increased by 0.6% and total acid was decreased by 0.262%. The ratio of sugar to acid was significantly higher than that of the blank control ($P < 0.05$). Hence, incorporating biogas slurry in citrus irrigation could not only decrease the use of chemical fertilizer but also provide a way to deal with biogas slurry.

Keywords: citrus; biogas slurry; soil quality; quality

华东地区集约化畜禽养殖场污水多数采用以沼气工程为核心的处理工艺,养殖污水经沼气工程发酵

处理后虽然污染物指标大幅降低,但沼液中 COD 含量、总氮、总磷等含量依然较高^[1-3],无法满足直接排放的要求,又成为新的污染源,对当地养殖场周边的环境影响日趋明显,加强沼液的利用与净化技术研究显得非常迫切。沼液、沼渣农田利用是其首选的消纳途径^[4-5],但也提出了沼肥应用中可能出现的如产量大运输难、养分不平衡、长期田园沼肥浇灌造成二次污染等问题。现有研究主要集中在用沼液作肥料对作物

收稿日期:2011-03-21

基金项目:宁波市重点科研攻关择优委托项目(2009C10008);浙江省重点项目(2009C13002)

作者简介:王卫平(1963—),男,河南新蔡人,硕士,副研究员,主要从事农业废弃物资源化利用与环境修复等方面的研究工作。

E-mail: wangweiping119@126.com

* 通讯作者:朱凤香 E-mail: zfx76@yahoo.com.cn

的产量和品质的影响方面上,且用量较小,胡向军等^[6]在桡柑果树上进行了沼液喷施和追肥试验,与化肥对照相比:沼液可提高座果率,增加单果重、单株产量、可食率;果肉中可溶性固形物含量、总糖含量、Vc含量也有所增加;总酸含量减少,冷藏前后的固/酸和糖/酸都比对照高,有害重金属元素镉、铬、汞、铅、砷未检出。虞方伯等^[7]在金丝小枣栽培中施用沼渣和沼液能显著增强植株和枣果抗病、抗逆能力,改良土壤肥力状况,降低土壤 pH 值,土壤微生物量、微生物碳和氮量均比对照显著增加,提高了果实品质。史雅娟^[8]、许卫红^[9]等对多种叶菜、莴笋等施用沼液研究表明,与施用化肥对照相比,蔬菜产量提高,蔬菜中硝酸盐含量降低。兰家泉等^[10]利用沼渣、沼液作为肥料进行了玉米栽培试验,施用沼渣、沼液表现出良好的肥效应,前期生长旺盛,其中施用沼渣、沼液的处理产量最高,与对照处理相比,增产幅度经方差分析达显著水平。但在通过沼液浇灌柑桔果园方式大量消纳沼液、减少养殖场周边环境压力及对土壤环境的影响等方面的研究报道较少。

本试验以柑桔为材料,通过大量沼液作为部分柑桔灌溉用水及肥源并完全替代化肥,以期大量消解养殖场沼气工程产生的沼液提供应用依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2009 年在浙江省宁海县某柑桔合作社柑桔基地进行,柑桔品种为当地主栽桡柑品种。供试土壤基本性质为:pH 7.5, 有机质 $13.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 0.31%, 速磷 $389.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速钾 $453.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$):Cu 50.3、Zn 100.9、As 10.8、Cr 86.2、Cd 0.12、Pb 30.6、Hg 0.148。

供试沼液来源于邻近柑桔园的一规模养猪场养殖废水经沼气发酵池出水,初始灌溉沼液基本成分如下($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$):全氮 1 129.3、全磷 51.41、全钾 623.9、重金属 Cu 0.33、Zn 0.79、As 0.018、Cr 2.08、Cd 0.026、Pb 0.06、Hg 0.000 71,pH 为 6.4。第二次灌溉沼液基本成分为($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$):全氮 159.1、全磷 6.3、全钾 102.6、重金属 Cu 0.12、Zn 0.3、As 0.008、Cr 0.58、Cd 0.007、Pb 0.02、Hg 0.000 15,pH 为 8.4。

1.2 试验设计

依据当地气候降雨特点及柑桔需肥、水规律,试验设 4 个处理:A、沼液 $60\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;B、沼液 $150\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;C、沼液 $300\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;D、CK,不施沼液,

常规施肥(尿素 $1\ 125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 加三元复合肥 $1\ 800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。各处理面积为 333.5 m^2 ,在同一果园重复 4 次,随机区组排列。

沼液及施肥处理分二次完成:壮蕊催花肥(4 月 18 日),A、B、C 各处理施沼液 25%,CK 施尿素 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 加三元复合肥 $1\ 350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 壮果逼梢肥(7 月 17 日),A、B、C 各处理施沼液 75%,CK 处理施尿素 225 kg 加三元复合肥 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。柑桔种植密度 $900 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,未进行防病治虫,修剪、除草等其他农事管理均一致。

1.3 采样与测定

柑桔枝梢生长量分二次调查,第一次在 7 月 7 日,第二次在柑桔采摘前的 11 月 18 日。枝梢生长量调查,各处理每次随机抽查 20 支,分别记载枝梢生出情况。果实各处理随机抽查 20 个,分别记载果实大小、单果重、果肉、皮比例等性状,果实分级标准按直径,分为小果 6.0 cm 以下,中果 6.1~8.0 cm,大果 8.0 cm 以上。小区 11 月 30 日人工全采摘,以实际称量结果计算产量。

果实采收后分别对柑桔园土壤不同处理进行 0~20 cm 表层土多点采样,土壤 pH、有机质、全 N、速 N、速 P、速 K 等按常规土壤分析方法测定,重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 用原子吸收分光光度法测定,As 用原子荧光光度计测定^[11],果实中的 Vc、总糖、总酸参照 GB/T 8210—1987 出口柑桔鲜果检验方法测定。

1.4 统计分析

试验数据用 DPS8.0 软件进行多重随机区组统计分析,LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 沼液灌溉量对柑桔枝梢生长的影响

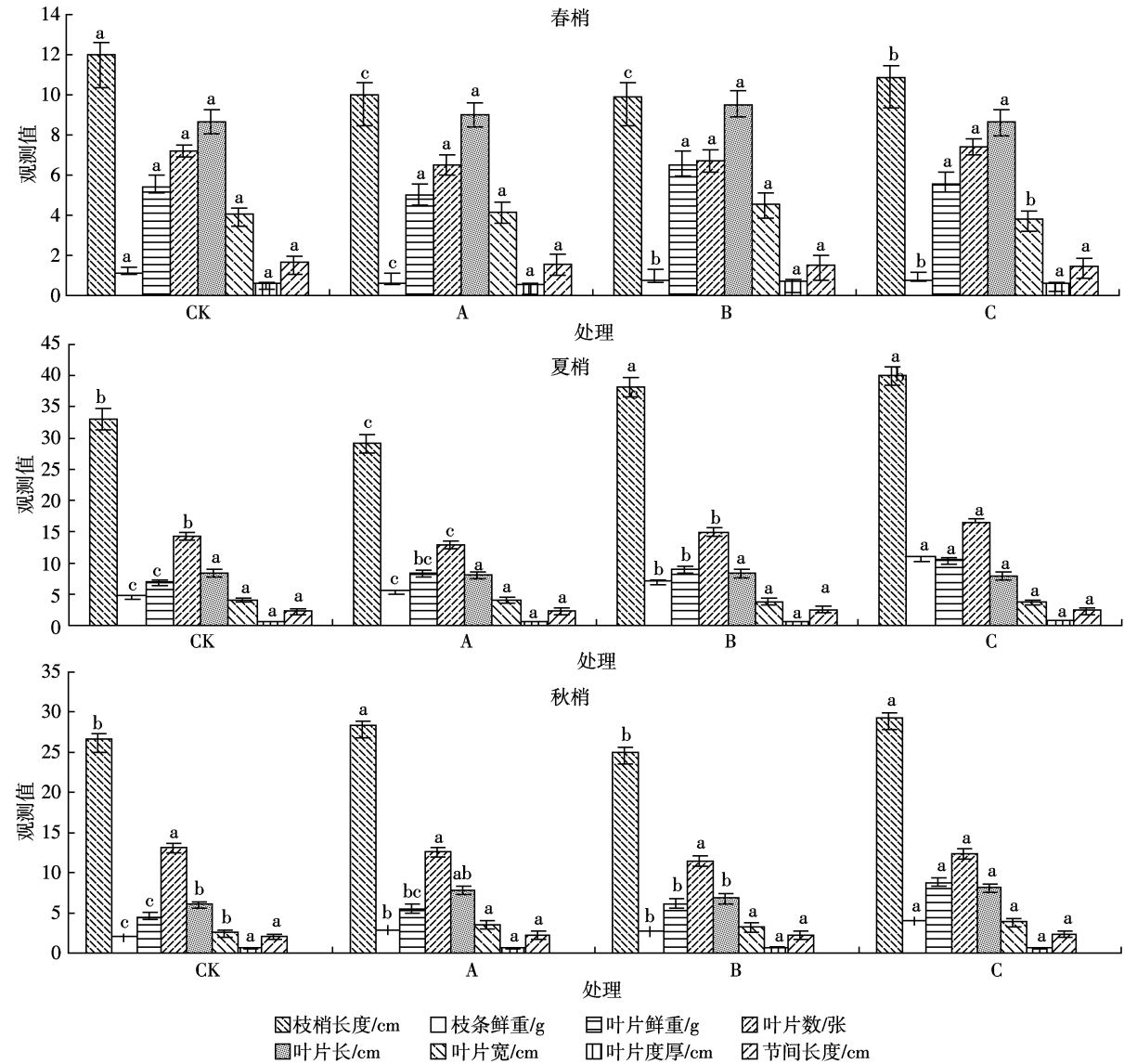
7 月 7 日调查统计显示,柑桔生长期单枝梢长度、单枝重量、单枝叶片数、叶片宽、单叶厚度和单叶重量都随着沼液施用量的增加而递增(表 1)。沼液中含有大量的氮、磷、钾、多种氨基酸、植物激素类物质等,对柑桔作物表现出促进生长及增加生物量的效应。

11 月 18 日调查显示(图 1),各处理的春梢、夏梢和秋梢 3 种梢中,以夏梢生长最旺,无论是梢长度、重量还是叶片数都以夏梢最多,其次是秋梢;叶片宽度、厚度和单叶重等指标变化不明显。春梢整体表现为 CK>沼液处理 C>处理 B>处理 A,这可能与沼液浇灌时间及浇灌量有关,春梢发生及生长所需养分主要来自树体贮藏养分。在夏梢中随着沼液施用

表 1 不同沼液浇灌量对柑桔枝梢生长量影响
Table 1 Effect of different biogas slurry quantity on citrus' shoots growth

处理	单株枝梢鲜重/g	枝梢长度/cm	枝叶片数/张	叶片		单叶厚度/cm	单叶鲜重/g
				长/cm	宽/cm		
CK	5.69c	13.90c	8.45b	8.47b	3.98a	0.025a	0.695b
A	7.23b	18.4b	9.1b	8.87a	4.23a	0.025a	0.74ab
B	9.22a	22.9a	10.9a	9.55a	4.44a	0.031a	0.855a
C	10.12a	23.17a	11.41a	9.32a	4.50a	0.034a	0.86a

注:数据后相同字母表示无显著差异,同列字母不相同表示差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Values with different superscripts in the same line are significantly different ($P<0.05$).The same below.



不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)

图 1 沼液浇灌对柑桔各季枝梢生长发育的影响

Figure 1 Effect of the biogas slurry quantity on citrus' branch growth in different season

量的增加而递增,如枝梢长度除 A 处理比 CK 短 11.9%,而 B 处理比 CK、A 处理分别长 15.5%、31.2%,C 处理比 CK、A、B 处理分别长 21.1%、37.5%、4.8%。单枝梢重量 A 处理比 CK 重 18.3%,B 处理比 CK、A 处理分别重 37.1%、15.8%,C 处理比 CK、A、B 处理分别重 80.7%、52.7%、31.8%。从增加生物量效果看,沼液处

理 C>处理 B>处理 A>CK,且大浇灌量增加效果大于小浇灌量及对照,枝条鲜重、叶片鲜重处理 C 与对照处理差异达显著水平($P<0.05$),这与胡向军等^[6-7]的研究结论一致。

2.2 沼液灌溉量对柑桔果实性状及品质的影响

从柑桔果实测定结果显示(表 2),各处理单果重量无明显的差别,但果肉重占果实的比例随着沼液施用量的增加而增加,果皮重减少。其中 C 处理果肉重占 79.18%,比 CK、处理 A、处理 B 分别增加6.53%、6.38%和 3.3%,这主要是由柑桔的果皮厚薄、重量决定的。经统计分析显示 C 处理与对照相比,果肉重、皮重、果肉占果实比、果皮占果实比、皮厚均达显著差异($P<0.05$)。

果实品质测定结果显示(表 3),各处理维生素C、总糖无明显差别,沼液浇灌处理可溶性固形物含量有所增加,随着沼液的施用量增加果实中总酸含量呈现下降趋势。统计分析显示:沼液处理的果实,处理 A 总糖比化肥对照提高 0.6 个百分点,总酸降低 0.262 百分点,糖酸比值明显比施用化肥的对照高,差异达显著水平($P<0.05$),食用口感有所改善,果实商品价值提高,这与沼液中易吸收利用的磷、钾元素有关,由

于沼液施用量的增加,柑桔吸收磷、钾量亦增大,而果实总酸度减小。

2.3 沼液灌溉量对柑桔果实产量的影响

果实产量现场采收实际称重显示,C 处理折合产量为 28 440.0 kg·hm⁻²,比 CK 增产 2 250.0 kg,增幅 8.59%,单产排序为:处理 C>处理 B>处理 C>CK(表 4)。处理 C 柑桔产量施用 300 000 kg·hm⁻²沼液与施用化肥 CK 相比,差异达显著水平($P<0.05$)。

2.4 沼液灌溉柑桔对土壤质量指标的影响

土壤检测结果显示(表 5),施用化肥处理的土壤理化性质、重金属含量等与处理前土壤本底值非常接近,变化不大;沼液不同浇灌量各处理间 pH 值差异不大,土壤中速磷、速钾含量沼液灌溉处理比化肥对照均呈现不同程度下降,这与李彦超^[14]、王宗寿^[15]等对牧草的研究结果有所不同,但沼液灌溉处理土壤中有机质含量、总氮明显提高,从土壤供肥特性及柑桔养分需求考虑,大量沼液灌溉柑桔的同时还需补施磷、钾肥。土壤中重金属铜含量沼液灌溉处理均有不同程度的增加,锌含量总体变化不大,砷、汞、镉、铬含量处理间变化较小,铅含量有上升趋势,但重金属含量均未超过 GB 15618—1995 土壤环境质量标准许可范

表 2 不同沼液灌溉量对柑桔果实性状的影响

Table 2 Effect of different biogas slurry quantity on citrus' fruit character

处理	单果重量/g	果肉重/g	果肉占果实比/%	皮重/g	果皮占果实比/%	皮厚/cm
A	102.75a	74.80b	72.8b	27.94b	27.20b	0.37ab
B	114.00b	86.50a	75.88ab	27.5b	24.12ab	0.37ab
C	105.50a	83.54a	79.18a	21.96a	20.82a	0.31a
CK	109.75a	79.73a	72.65b	30.02b	27.35b	0.39b

表 3 不同沼液浇灌量对柑桔果实品质的影响

Table 3 Effect of different biogas slurry quantity on quality of citrus fruits

处理	维生素 C/mg·100 g ⁻¹	可溶性固形物/%	总糖/%	总酸/%	糖酸比
A	26.1a	11.63a	10.5ab	0.672a	15.6a
B	29.6a	12.13a	10.8b	0.696a	15.5a
C	24.5a	12.63a	9.5a	0.603a	15.8a
CK	28.1a	11.68a	9.9a	0.934b	10.6b

表 4 不同沼液浇灌量处理对柑桔产量的影响

Table 4 Effect of different biogas slurry quantity on yield of citrus

处理	果实直径/cm		果实占比/%		单株果数	单株产量/kg	产量/kg·hm ⁻²	增产率/%
	平均	幅度	小果	中、大果				
A	6.34	5.2~7.2	10	90	284	29.3	26 370.0b	0.69
B	6.43	5.7~7.2	15	85	271	30.2	27 180.0ab	3.78
C	6.13	5.3~7.3	10	90	335	31.6	28 440.0a	8.59
CK	6.13	5.1~7.2	15	85	267	29.1	26 190.0b	0

围。各处理柑桔果实中重金属全部未检出,这与胡向军等^[4]的结论相吻合,说明沼液在此灌溉量下对土壤及柑桔品质是安全的。

3 讨论

3.1 大量沼液的出路及土壤环境问题

利用沼气技术处理和资源化利用猪场粪便废水日益广泛,但也凸现出规模养殖场沼液利用和出路问题。已有很多文献介绍了沼液的用途、施用优点及实例,但多数针对的是农村一家一户的小型沼气池所产沼液,被关注的多是沼液中的养分及其对作物的益处,而对沼液施用过程是否引起环境污染及其避免措施注意较少。本试验利用规模养殖场相邻的柑桔园作为大量消纳沼液的循环经济利用模式之一,即“猪-沼-果”模式,利用猪场废水发酵沼气后产生的沼液种植柑桔取得了良好的生长效果,各沼液灌溉试验组土壤整体质量有所提高,土壤总氮、有机质明显增加,土壤 pH 值有降低趋势,各处理间土壤重金属含量变化差异不大,重金属等有害元素在国家土壤环境质量标准允许的范围内,柑桔果实中上述 6 种重金属全部未检出,说明沼液在试验最大用量条件下,未发生重金属富集现象。施用沼液是否能改善柑桔中微量元素的吸收也是今后可以关注的议题,考虑到南方柑桔生长的气候条件,沼液的最大施用量及长期灌溉对柑桔品

质及土壤质量的影响还需进一步深入研究,如沼液施用于土壤后,相当一部分 N 以硝态氮形式渗滤到地下水,可能会对地下水造成潜在的污染问题^[16]。

3.2 沼液对柑桔生长及品质的影响

试验表明,柑桔园大量施用沼液能有利于促进植株生长,增强光合作用,积累干物质,沼液对促进柑桔夏、秋季枝条的生长效果是显著的,同时增加了土壤有机质含量,柑桔果实皮薄肉厚、酸度减少、糖酸比提高,进而达到提高柑桔产量与品质的效果。考虑到柑桔果树的营养需求及沼液的特点,在大量施用沼液的同时可以配施磷钾肥,沼液施用效果会更好,沼液的大量利用要优先考虑养殖场周边区域的种植结构和施用方法,沼液通过浇灌作物农田消纳污染的循环利用模式具有较大的市场前景。

4 结论

沼液不同灌溉量处理与常规施用化肥的对照处理相比,能显著促进柑桔植株营养生长,用试验最大沼液浇灌量 300 000 kg·hm⁻² 替代化肥,可使柑桔增加产量 8.59%,同时增加柑桔果实可溶性固形物含量,提高果实糖酸比,改善柑桔的部分品质指标;沼液灌溉处理对柑桔园的土壤质量如土壤中总氮、有机质等有所改善,而对土壤多种重金属含量等基本无不利影响;合理施用沼液进行柑桔灌溉不仅可以减少作物

表 5 沼液浇灌后柑桔果实、土壤理化性状及重金属变化
Table 5 Effect of different biogas slurry quantity on Citrus fruits and its soil quality

检测项目		处理			
		CK	A	B	C
土壤	pH	7.55	7.21	7.48	7.54
	有机质/g·kg ⁻¹	13.21	15.95	14.89	16.21
	速钾/mg·kg ⁻¹	477.6	429.2	352.5	430.4
	速磷/mg·kg ⁻¹	404.0	204.2	120.4	372.4
	速氮/mg·kg ⁻¹	83.9	96.1	79.3	93.8
	全氮/%	0.34	0.48	0.36	0.45
	铜/mg·kg ⁻¹	49.5	67.8	50.4	60.5
	锌/mg·kg ⁻¹	103.0	98.7	98.1	110.0
	砷/mg·kg ⁻¹	10.6	10.1	10.4	10.1
	汞/mg·kg ⁻¹	0.153	0.130	0.150	0.153
	铅/mg·kg ⁻¹	31.6	32.2	32.7	32.5
	镉/mg·kg ⁻¹	0.11	0.11	0.086	0.097
	铬/mg·kg ⁻¹	87.2	89.2	85.9	87.6
柑桔果实	铅、砷、汞、镉、铜、锌/mg·kg ⁻¹	—	—	—	—

注:—未检出 No detection;砷检出限 Detection limit of As:0.01 mg·kg⁻¹,铅检出限 Detection limit of Pb:0.005 mg·kg⁻¹,镉检出限 Detection limit of Cd:0.000 1 mg·kg⁻¹,汞检出限 Detection limit of Hg:0.000 15 mg·kg⁻¹,铜检出限 Detection limit of Cu:1.0 mg·kg⁻¹,锌检出限 Detection limit of Zn:0.4 mg·kg⁻¹。

化肥施用量,还能缓解规模养殖场污水处理的排放压力,柑桔园沼液最大施用量及长期灌溉对土壤质量的影响还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 林代炎, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 规模化养猪场粪污循环利用技术集成与模式构建研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 386-391.
LIN Dai-yan, YE Mei-feng, WU Fei-long, et al. Recycling model construction and technology integration of feces from large-scale pig farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 386-391.
- [2] 张国治, 吴少斌, 王焕玲, 等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. 中国沼气, 2009, 28(1): 21-24.
ZHANG Guo-zhi, WU Shao-bin, WANG Huan-ling, et al. Survey and analysis on state quo of public intention for utilizing digestate from large and medium size biogas plants[J]. *China Biogas*, 2009, 28(1): 21-24.
- [3] 甘寿文, 徐兆波, 黄武. 大型沼气工程生态应用关键技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1293-1297.
GAN Shou-wen, XU Zhao-bo, HUANG Wu. Key technology for ecological application of large scale biogas project[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1293-1297.
- [4] 汪开英, 陈小霞, 赖发英. 规模畜禽场沼肥资源化利用技术综述与展望[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(3): 105-109.
WANG Kai-ying, CHEN Xiao-xia, LAI Fa-ying. Utilization technology of intensive livestock biogas slurry and outlook[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2009, 30(3): 105-109.
- [5] Odlare M, Arthursen V, Pell M, et al. Land application of organic waste effects on the soil ecosystem[J]. *Applied Energy*, 2011, 88: 2210-2218.
- [6] 胡向军, 余东波. 沼液对桉树生长发育、产量和品质的影响[J]. 中国沼气, 2008, 26(3): 29-33.
HU Xiang-jun, YU Dong-bo. Effect of biogas slurry on growth of Pon-gan orange and its yield and quality[J]. *China Biogas*, 2008, 26(3): 29-33.
- [7] 虞方伯, 管晓进, 赵子如, 等. 沼气发酵残余物应用于金丝小枣栽培的初步研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 345-347.
YU Fang-bo, GUAN Xiao-jin, ZHAO Zi-ru, et al. Application of biogas fermentation residue in *Ziziphus jujuba* cultivation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 345-347.
- [8] 史雅娟, 杨林书, 李国学. 沼气发酵残余物对减少叶菜硝酸盐积累的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2002, 10(4): 58-61.
SHI Ya-juan, YANG Lin-shu, LI Guo-xue. Effect of anaerobic fermentation residues on nitrate accumulation in leaf vegetables [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2002, 10(4): 58-61.
- [9] 徐卫红, 王正银, 权月梅, 等. 沼液对莴笋和生菜硝酸盐含量及营养品质的影响[J]. 农村生态环境, 2003, 19(2): 34-37.
XU Wei-hong, WANG Zheng-yin, QUAN Yue-mei, et al. Effect of application of biogas slurry on nitrate content and nutrition quality of lettuce and romaine lettuce[J]. *Rural Eco-environment*, 2003, 19(2): 34-37.
- [10] 兰家泉, 田启建, 罗来和, 等. 玉米栽培施用沼渣沼液的肥效试验[J]. 山地农业生物学报, 2004, 23(6): 475-478.
LAN Jia-quan, TIAN Qi-jian, LUO Lai-he, et al. The experiment of fertilizer effect of biogas manure in growing corn[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2004, 23(6): 475-478.
- [11] 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: 474-490.
LU Ru-kun. Method of analysis in soil and agrochemistry[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2000: 474-490.
- [12] Jensen L S, Pedersen I S, Hansen T B, et al. Turnover and fate of ^{15}N labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12: 23-35.
- [13] Chantigny M H, Angers D A, Morvan T, et al. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ^{15}N [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2): 637-643.
- [14] 李彦超, 廖新伟, 吴银宝. 施用沼液对杂交狼尾草产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1527-1531.
LI Yan-chao, LIAO Xin-di, WU Yin-bao. Effects of slurry application on biomass of crossbred pennisetum and soil nutrient[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1527-1531.
- [15] 王宗寿. 利用沼液种植黑麦草对土壤环境质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 172-175.
WANG Zong-shou. Effects of fertilization with biogas slurry on soil planting tetragold-ryegrass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (Suppl): 172-175.
- [16] 李彦超, 廖新伟, 林东教, 等. 不同沼液灌溉强度对土壤和渗滤液的影响[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(4): 52-56.
LI Yan-chao, LIAO Xin-di, LIN Dong-jiao, et al. Effects of irrigation intensity of fermented slurry on soil and leaching liquid[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2009, 30(4): 52-56.