应用生态学报 2019年1月 第30卷 第1期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jan. 2019, 30(1): 243-250 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201901.035

沼液部分替代化肥在日光温室秋番茄上的应用效果

王靖荃[1] 谷端银[2] 于晓东[1] 崔秀敏[1*] 娄燕宏[1] 褚 屿[1] 王春兰[1] 诸葛玉平[1]
([1]山东农业大学资源与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271000; [2]泰安市农业科学研究院, 山东泰安 271000)

摘 要 为探索沼液和化肥协同促生的效果,以3种常见禽畜粪便(鸭粪、猪粪、牛粪)作为发酵原料的沼液为母液,以氮磷钾镁肥作为化学肥料辅助,平衡不同稀释比例之间的养分差异,研究沼液配施对番茄生长发育的影响. 结果表明: 沼液部分替代化肥可以显著改善土壤速效氮、磷、钾的肥力状况,依发酵原料和稀释比例不同,沼液对土壤水溶性钙、镁和有效铁、锰、铜、锌有不同程度的活化作用. 与完全施用化肥相比,沼液配施化肥可显著促进番茄生长,且随生育期的延长,沼液的促生作用愈发凸显,最终增产幅度达55.9%~232.8%,化肥用量减少18.2%~85.0%;番茄果实品质显著改善,番茄红素、Vc、总糖含量均显著提高,果实酸度显著降低,NO_2^-降幅达35.6%~90.3%,而口感得分比化肥处理高出7.0%~20.3%.相关分析发现,番茄产量和品质呈非线性关系,口感与糖酸比呈显著正相关,番茄果实口感受肥料种类的影响亦显著. 总之,沼液配施化肥用于番茄生产可以实现高产、优质、环保、培肥和资源高效利用的目的.

关键词 日光温室; 秋番茄; 沼液; 化肥; 产量; 品质

Application effects of biogas slurry partly substituting for chemical fertilizer on autumn tomato production in winter-solar greenhouse.

WANG Jing-quan[1], GU Duan-yin[2], YU Xiao-dong[1], CUI Xiu-min[1*], LOU Yan-hong[1], CHU Yu[1], WANG Chun-lan[1], ZHUGE Yu-ping[1] ([1]*College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an* 271000, *Shandong, China*; [2]*Tai'an Academy of Agricultural Sciences, Tai'an* 271000, *Shandong, China*).

Abstract: To explore the effects of biogas slurry coordinating chemical fertilizer on growth promotion of tomato, we used three kinds of typical biogas slurry as concentrated nutrient solution, respectively fermented from raw duck manure, pig manure, cow dung, while urea, monocalcium phosphate and potassium sulphate as auxiliary nutrition to balance the nutrient difference between different dilution ratios of biogas slurry. The results showed the biogas slurry partially substituting chemical fertilizer could significantly improve soil fertility, including available nitrogen, phosphorus, and potassium. As for water soluble calcium, magnesium, iron, manganese and zinc in soil, biogas slurry application could activate their availability, with the magnitude of such effects depended on the fermentation level of raw materials and dilution ratio. Compared with chemical fertilizer, coordinating biogas liquid fertilizer significantly promoted the growth of tomato, with the yield increased by 55.9%-232.8% and the chemical fertilizer dosage decreased by 18.2%-85.0%. Furthermore, such effects became more prominent along with prolonged time. The fruit quality was significantly improved with the increases of lycopene, ascorbic acid and total sugar, and the decreases of acidity and nitrite concentration, and the decrease of NO_2^- by 35.6%-90.3%. In addition, the taste flavor of fruits was 7.0%-20.3% higher than that of chemical fertilizer treatment. The yield

本文由山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2018ZC2363)和山东省双一流学科建设项目(SYL2017YSTD01)资助 This work was supported by the Major Basic Research Project of Shandong Natural Science Foundation (ZR2018ZC2363) and the Fund of Shandong "Double Tops" Program, China (SYL2017YSTD01).
2018-05-10 Received, 2018-11-29 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiumincui@sdau.edu.cn

and quality of tomato took on nonlinear synchronization, and the relation between taste flavor and sugar/acid showed significantly positive correlation, which was affected by fertilizer type. Biogas slurry partly substituting chemical fertilizer could achieve the goals of high yield, high quality, environmental protection, efficient utilization of agricultural resources in tomato production.

Key words: solar greenhouse; autumn tomato; biogas slurry; fertilizer; production; quality.

随着我国农村沼气工程的迅猛发展,沼液和沼渣产量也随之增多(约每年 6 亿 t).沼液多为农作物秸秆、粪尿肥在厌氧菌作用下的高温发酵产物,含有速效氮、磷、钾、铁、锌等矿质营养成分,且富含易被植物吸收的氨基酸、维生素、类激素类物质,在作物增产提质、病虫害防治、培肥地力等方面效果显著[1-3].但是由于发酵原料的多样化,沼液的成分和含量差异很大,盲目施用常导致烧苗、盐害、硝酸盐积累或重金属超标等问题[3-4].此外,沼液体积大、占地广,储存过程易滋生蚊虫病害,且挥发大量 NH_3、CH_4、N_2O 等气体,对区域环境造成二次污染[5-7].目前,国内沼液商品化利用率较低,异地运输成本高[8],就地消纳进行资源化利用是行之有效的途径[9-10].番茄是日光温室秋冬季生产最为普遍的蔬菜之一,设施栽培茬口密集、复种指数高,有限的生育时间和生长空间内,蔬菜需肥量大、地力消耗严重[11-12].施用有机肥可改善地力,但费时费力、投入成本高;施用化肥见效快、效率高,但盲目过量地依赖化肥导致设施土壤出现酸化、次生盐渍化、土传病害和土壤结构变差等问题.沼液兼具有机肥和化肥的优点于一体,根据其养分组成和浓度高低,研究其部分替代化肥用于蔬菜生产的配方,并简化施用技术,可为农业畜禽粪便资源化高效利用提供一条有效途径.

1 材料与方法

1.1 供试沼液

供试沼液有 3 种:以鸭粪为发酵原料的沼液,取自山东省平阴县孔村镇;以猪粪为发酵原料的沼液,取自山东省泰安市大陡山村;以牛粪为发酵原料的沼液,取自山东省桓台县宋家庄,均为大中型沼气工程.沼液中 NO_3^-、NH_4^+、有效磷、速效钾、有机质、腐殖酸含量测定参照鲍士旦[13]的方法, 见表 1.

1.2 试验设计与管理

试验在节能日光温室秋冬季进行.番茄为越冬粉果品种‘圣罗兰 3689’.供试土壤为棕壤,大田土,pH 7.58,有机质含量 8.8 g · kg^{-1},碱解氮 22.83 mg · kg^{-1},有效磷 5.87 mg · kg^{-1},速效钾 48.11 mg · kg^{-1},土壤肥力水平偏低.土壤去杂过筛后装盆,花盆直径 30 cm×20 cm,高 24 cm,每盆装土 12.5 kg.依据沼液的电导率(EC)值,确定 3 种稀释比例.以 3 种不同比例的沼液稀释液为基础母液,参照 Hoagland 改进配方配制番茄全营养液,保持各处理土壤中速效氮、磷、钾总量一致,用尿素、硫酸钾和过磷酸钙平衡不同处理间养分的差异.

试验共设 11 个处理,分别为:空白对照 CK_0(全过程不施任何肥料),完全施用化肥对照 CK_1;鸭粪沼液∶水(V∶V)为 1∶3、1∶6、1∶9,猪粪沼液∶水(V∶V)为 1∶3、1∶6、1∶9,牛粪沼液∶水(V∶V)为 1∶3、1∶6、1∶9.每个处理 6 盆,随机排列.依据养分平衡法的原理,计算番茄目标产量所需养分总量和土壤供肥量[3,14],根据番茄不同生育期的养分需求特性确定补充沼液的总量和浇施频率.2016 年 8 月 5 日播种,9 月 11 日定植.从定植后 10 d 开始,每隔 7~10 d 浇施一次营养液,每次营养液和水的总体积为 1000 mL,花盆底部的渗出液收集后全部返回盆土,共施用 7~8 次,期间视盆土干湿状况适量补水.番茄每穗留 5 个果实,保留 4 穗后打顶,其他管理措施按常规方法进行.番茄生育期间温室最高气温 34.6 ℃,最低气温 10.7 ℃,平均温度 22.0 ℃,平均空气湿度 66.5%.翌年 1 月 22 日收获所有番茄果实,拉秧后采集土壤样品(距主干5 cm,深10~15 cm),

表 1 供试沼液养分含量

Table 1 Nutrient content of experimental biogas slurry

沼液种类 Type of biogas slurry	电导率 EC (mS · cm^{-1})	NH_4^+-N (mg · kg^{-1})	NO_3-N (mg · kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus (mg · kg^{-1})	速效钾 Available potassium (mg · kg^{-1})	有机质 Organic matter (g · kg^{-1})	腐殖质 Humus (g · kg^{-1})
鸭粪 Duck manure	13.30	618.1	98.3	95.4	978.3	2.07	0.41
猪粪 Pig manure	16.39	839.3	195.1	190.6	127.3	8.22	4.77
牛粪 Cow manure	13.30	425.5	223.7	569.5	1614.0	17.21	16.50

去杂、风干、过筛、封口、备存，用于土壤肥力指标测定.

1.3 土壤与植株各项指标测定

1.3.1 土壤肥力指标的测定　常规土壤理化性状测定参照《土壤农化分析》[13].碱解扩散法测定碱解氮；0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定速效磷；1.0 mol·L^{-1}中性 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定速效钾；DTPA-TEA 浸提土壤，原子吸收分光光度计法测定有效 Fe、Mn、Cu、Zn；蒸馏水浸提土壤，原子吸收分光光度计(AA370)测定水溶性 Ca、Mg；重铬酸钾容量法测定有机质.

1.3.2 番茄植株茎、叶养分的测定　H_2SO_4-H_2O_2 消煮样品，奈氏比色法测定全氮，钒钼黄比色法测定全磷，火焰光度计法测定全钾；植株样品干灰化，原子吸收分光光度计(AA370)测定 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg[13,15].

1.3.3 番茄果实品质指标的测定　番茄果实自然成熟后采收，用第二穗果实测定各项品质指标[15].2,4-二硝基苯肼比色法测定 Vc 总量；蒽酮比色法测定总糖；NaOH 滴定法测定总酸；分光光度法测定亚硝酸盐含量.比色法测定番茄红素，参照 GB/CK 04215—2008[16].每个处理提供 6 个代表性番茄果实，每个切成 4 份，由 12 个 20~55 岁年龄段的成人逐一品尝(每个处理间隔 5 min)，对番茄的风味和口感做出综合评价，以完全肥料处理为对照(100 分).

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 DPS7.05 软件对数据进行统计分析.单因素 Duncan 法进行方差分析和多重比较(α=0.05).图表中数据为平均值±标准差.利用 Excel 2003 软件作图.

2　结果与分析

2.1 不同沼液处理对土壤有机质和速效氮、磷、钾的影响

由表 2 可以看出，与不施任何肥料的空白对照 CK_0 相比，完全施用化肥的 CK_1 和配施沼液的各处理土壤铵态氮含量均显著上升.配施沼液的各处理土壤碱解氮显著高于化肥处理，上升幅度达 11.9%~45.9%；随着沼液稀释比例的提高，土壤碱解氮呈现降低趋势，1∶3 的沼液稀释比例土壤碱解氮含量最高.土壤硝态氮含量变化趋势同铵态氮，但上升幅度远高于铵态氮，尤其是猪粪和牛粪沼液配施处理，增幅达 62.5%~114.2%，这与猪粪沼液和牛粪沼液含有较高浓度的 NO_3^-有关.

与不施任何肥料的空白对照 CK_0 相比，施用化肥和配施沼液的各处理土壤速效磷含量均显著增加，增幅达 106.7%~277.3%.与施用化肥的 CK_1 相比，牛粪 1∶3 和 1∶6 稀释比例的处理有效磷增幅最大，这可能是因为牛粪沼液原料有效磷含量较高的原因.

与速效磷含量变化趋势相似，施用化肥和配施沼液各处理的土壤速效钾含量亦显著高于 CK_0，增幅达 43.1%~100.4%，其中牛粪沼液处理的土壤速效钾增幅最大，比单纯施用化肥增加 33.5%~40.0%，且增肥效果显著高于鸭粪(10.9~13.4%)和猪粪沼液(19.2%~19.3%).

完全施用化肥处理对土壤有机质几乎无影响，

表 2　不同沼液处理下土壤速效养分含量

Table 2　Soil available nutrient contents under different biogas slurry treatments

处理 Treatment	沼液∶水 Biogas slurry∶water (V∶V)	NH_4^+ (mg·kg^{-1})	NO_3^- (mg·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus (mg·kg^{-1})	速效钾 Available potassium (mg·kg^{-1})	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})
CK_0	–	22.43d	95.3g	3.97f	43.7e	0.89e
CK_1	–	25.12c	268.8f	7.99e	476.8d	0.89e
鸭粪	1∶3	35.83a	345.4e	9.77d	528.7c	1.09c
Duck manure	1∶6	34.94a	336.1e	8.24e	495.6d	1.09c
	1∶9	30.98b	285.6f	8.26e	540.7bc	0.99d
猪粪	1∶3	33.65a	517.3b	10.53cd	491.3d	1.05cd
Pig manure	1∶6	29.08b	481.5c	11.05c	568.8b	1.06cd
	1∶9	28.10b	436.7d	8.81e	568.3b	1.06cd
牛粪	1∶3	36.41a	575.5a	15.04a	667.7a	1.36a
Cow manure	1∶6	35.06a	562.7a	13.44b	667.2a	1.34a
	1∶9	31.42ab	475.3c	9.41de	656.7a	1.20b

CK_0：全过程不施任何肥料 No fertilizer；CK_1：完全施用化肥 Application of chemical fertilizer. 同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05) Different small letters in the same column meant significanct difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

但配施沼液处理均不同程度提高土壤有机质,其中牛粪沼液增幅最大(63.7%~96.7%),且随稀释比例增大而降低;鸭粪沼液提高土壤有机质的幅度为11.3%~23.1%;猪粪不同稀释比例对土壤有机质的影响无显著差异.显然,牛粪沼液在丰富土壤有机质方面优于鸭粪和猪粪沼液,这与牛粪沼液本身含有较多的有机质有关.

2.2 不同沼液处理对土壤水溶性养分含量的影响

由表 3 可以看出,化肥和沼液配施对土壤水溶性钙影响均显著.除牛粪沼液外,相对于空白对照 CK_0,化肥和鸭粪、猪粪沼液增幅均在 2 倍以上,其中鸭粪沼液稀释 3 倍的处理增幅最高.但与化肥相比,只有 1∶3 的鸭粪沼液水溶性钙显著提高,其他比例鸭粪和猪粪沼液水溶性钙与化肥处理持平或略有降低,而牛粪沼液的水溶性钙显著低于化肥处理.

完全施用化肥和沼液配施对土壤水溶性镁的影响趋势与水溶性钙一致.随稀释倍数增大,鸭粪和猪粪沼液土壤水溶性镁呈逐渐降低的趋势.除牛粪沼液 1∶9 稀释比例外,牛粪其他两个处理水溶性镁均显著低于化肥处理.而鸭粪和猪粪沼液仅有 1∶3 的稀释比例显著高于化肥处理(比 CK_1 增加 17.7%).这说明营养液中的水溶性镁离子主要来自化肥供应.另外,牛粪沼液中的有机大分子与化肥配合施用可能螯合或固定水溶性钙、镁离子.

与不施任何肥料的空白对照 CK_0 相比,施用化肥和配施沼液的各处理土壤有效铁均有不同程度的提高,但增幅较小.与 CK_1 相比,只有 1∶3、1∶6 稀释比例的鸭粪和猪粪显著增加,增幅为 5.8%~13.9%.随沼液稀释比例的提高,土壤有效铁呈降低趋势,但牛粪沼液各稀释比例处理间差异不显著.说明土壤有效铁受化肥和沼液的影响较小.

不同施肥处理对土壤有效 Mn 含量的影响差异较大.与空白对照相比,完全施用化肥和 3 种沼液配施处理的土壤有效 Mn 均有不同程度的增加,牛粪沼液 3 个处理间差异不显著,鸭粪沼液对土壤有效 Mn 的影响最大,增幅为 17.5%~71.5%,以 1∶3 稀释效果最好.

不同施肥处理对土壤有效 Cu 含量的影响差异较大.鸭粪沼液与化肥处理差异不显著,且 3 个稀释比例间也无显著差异.猪粪沼液对土壤有效 Cu 影响最大,3 个稀释比例的猪粪沼液处理均显著高于化肥处理,增幅为 46.9%~113.5%.

与不施肥的空白对照相比,施用化肥处理土壤有效 Zn 无显著影响,但施用不同沼液配比处理对土壤有效 Zn 的影响显著,以猪粪增效最明显,增幅为 139.2%~261.5%.土壤有效 Zn 含量受沼液稀释比例的影响显著,沼液稀释倍数越大,有效 Zn 含量越低,且依次递减,各处理间差异显著.

2.3 不同沼液处理对番茄生长发育的影响

2.3.1 不同沼液处理对番茄株高和茎粗的影响 由图 1 可以看出,定植 10 d 后,完全施用化肥和沼液配施各处理的番茄株高和茎粗均呈快速增长趋势.40 d 后,株高增长逐渐变缓,茎粗则进入相对平稳的生长时期.化肥对番茄的营养生长促进作用明显,CK_1 株高在中前期稳定高于其他处理;而茎粗在定植 25 d 后各处理差异逐渐变大,沼液的优势逐渐凸显.至定植 40 d 时,除牛粪 1∶3 稀释处理偏低外,化肥与沼液配施处理的株高几乎无差异;60 d 后,沼液对茎粗的促生作用更加明显,沼液配施各处理番茄茎粗均大于 CK_1,外观长势亦更加健壮,茎粗增加

表 3 不同沼液处理下土壤水溶性养分含量

Table 3 Soil water-soluble nutrient contents under different biogas slurry treatments

处理 Treatment	沼液∶水 Biogas slurry∶water (V∶V)	水溶性钙 Water soluble calcium (mg·kg^{-1})	水溶性镁 Water soluble magnesium (mg·kg^{-1})	有效铁 Available ferrum (mg·kg^{-1})	有效锰 Available manganese (mg·kg^{-1})	有效锌 Available zinc (g·kg^{-1})	有效铜 Available copper (g·kg^{-1})
CK_0	–	93.3g	1.83h	12.23f	0.87f	2.23g	0.79e
CK_1	–	347.8b	6.57bc	12.97de	1.37cd	2.26g	0.87de
鸭粪	1∶3	377.5a	7.44a	14.81a	2.35a	5.17c	0.94cd
Duck manure	1∶6	349.4b	6.89b	14.21ab	1.61c	4.12d	0.94cd
	1∶9	343.7b	6.58bc	13.04d	1.93b	2.90f	0.95cd
猪粪	1∶3	354.3b	7.73a	14.13b	1.18de	8.26a	1.86a
Pig manure	1∶6	350.4b	5.81d	13.77bc	0.99ef	7.59b	1.80a
	1∶9	302.9c	5.29e	12.32ef	0.96ef	5.46c	1.28b
牛粪	1∶3	145.6f	2.39g	13.20cd	0.98ef	3.87d	1.04c
Cow manure	1∶6	204.2e	4.47f	12.96de	0.91ef	3.51e	1.03c
	1∶9	274.3d	6.24cd	12.75def	1.01ef	2.78f	0.85de

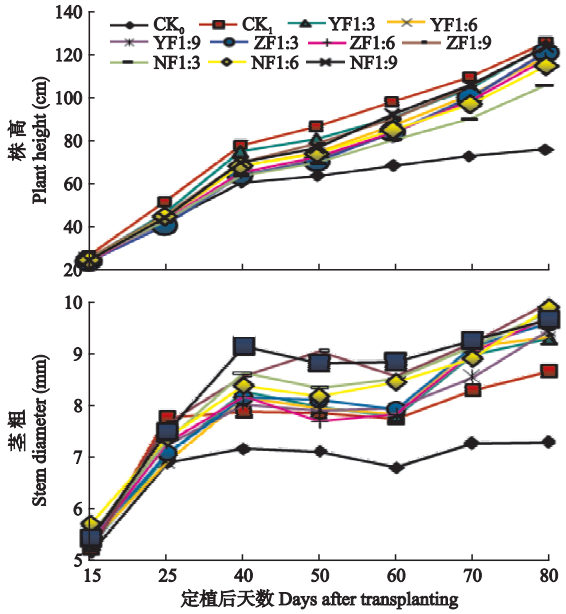


图 1　不同沼液处理下番茄株高和茎粗的动态变化

Fig.1　Dynamic changes of height and stem diameter of tomato plant under different biogas slurry treatments.

CK_0：全过程不施任何肥料 No fertilizer；CK_1：完全施用化肥 Application of chemical fertilizer；YF：鸭粪沼液 Duck manure biogas slurry；ZF：猪粪沼液 Pig manure biogas slurry；NF：牛粪沼液 Cow manure biogas slurry. 1∶3、1∶6、1∶9 表示沼液∶水(V∶V)为 1∶3,1∶6,1∶9 1∶3,1∶6,1∶9 meant the ratio of biogas slurry to water was 1:3, 1:6 and 1:9. 下同 The same below.

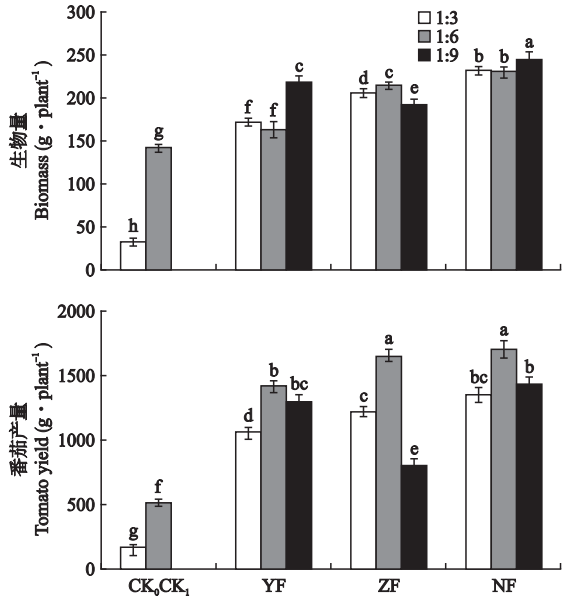


图 2　不同沼液处理下番茄生物量和果实产量

Fig.2　Biomass of tomato plant and fruit yield under different biogas slurry treatments.

不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

范围为 18.7%～35.7%.

2.3.2 不同沼液处理对番茄植株生物量和果实产量的影响　由图 2 可以看出,与空白对照 CK_0 相比,施用化肥和沼液均可显著促进番茄生物量的增加.与完全施用化肥的 CK_1 相比,沼液配施各处理地上部生物量均显著提高.鸭粪沼液和牛粪沼液均以 1∶9的稀释比例物质积累最多,猪粪以 1∶6 的稀释比例长势最优.

与 CK_1相比,沼液配施化肥可显著提高番茄产量,增产幅度达 55.9%～232.8%.沼液以 1∶6 的稀释比例产量最高,其中牛粪沼液 1∶6 稀释处理比 CK_1增产 2.3 倍;其次是 1∶6 猪粪沼液配施处理,增产 2.2 倍.值得一提的是,CK_1产量也较低,可能是因为土壤有机质少,固持养分的能力较弱,养分发生淋失所致.

2.4　不同沼液处理对番茄果实品质的影响

由表 4 可以看出,施用沼液处理的番茄果实品质比化肥处理均有不同程度改善.其中 Vc 含量提高最显著,增幅达 74%～155%;施用沼液处理的果实番茄红素含量也显著提高,平均增加 1.54 mg·100 g^{-1},以牛粪沼液处理增幅最高(达 115.4%);施用沼液各处理番茄果实总糖含量差异较大,其中鸭粪和牛粪沼液 1∶9 的稀释比例处理糖含量最高,分别比化肥处理提高 64.8%和 72.2%;除了 1∶3 稀释的鸭粪处理总酸与 CK_1 持平外,其他各处理略有降低,但差异不显著;施用沼液可显著降低番茄果实 NO_2^-含量,鸭粪沼液各处理降幅最大(67.5%～86.1%),其次是猪粪(36.5%～79.1%)和牛粪沼液各处理(35.6%～47.2%).

对各处理自然成熟的果实进行品尝,评价口感,得分最高的为 1∶3 稀释比例的猪粪沼液处理,其次为 1∶6 稀释比例的猪粪和牛粪沼液处理(产量均最高).对口感和 Vc、番茄红素、糖分、酸度、NO_2^-及糖酸比进行相关分析,发现口感与糖酸比的相关性最高,其关系符合二次多项式模型:$Y=-0.4217X^2+14.31X-2.1247$($R^2=0.98$),$X=16.97$ 时,此方程 Y 有最大值,此时番茄果实口感最好.

2.5　沼液和化肥配施用量比较

由表 5 可以看出,沼液部分替代化肥用于番茄栽培,不但未减产,而且节约化肥用量 18.2%～85.0%.产量最高的牛粪处理(1∶6)化肥用量比 CK_1 降低 48.6%,产量第二的猪粪处理(1∶6)节约化肥 26.0%,产量第三的牛粪处理(1∶9)节约化肥 34.0%.可见,沼液部分替代化肥用于番茄栽培,可以在节约化肥投入的同时,提高产量,改善品质.

表 4 不同沼液处理下番茄果实品质

Table 4 Quality of tomato fruits under different biogas slurry treatments

处理 Treatment	沼液：水 Biogas slurry : water (V : V)	Vc (mg · 100 g^{-1})	番茄红素 Lycopene (mg · 100 g^{-1})	总糖 Total sugar (%)	总酸 Total acid (%)	NO_2^- (mg · kg^{-1})	糖酸比 Sugar/acid	口感评价 Taste flavor evaluation
CK_1	–	4.32f	1.67g	3.87d	0.38a	2.43a	10.07	100
鸭粪	1 : 3	11.02a	3.06de	4.73cd	0.40a	0.39f	11.83	107
Duck manure	1 : 6	9.60bc	2.90f	5.01c	0.32b	0.34f	15.60	119
	1 : 9	8.40d	2.71f	6.38a	0.32b	0.79e	20.22	113
猪粪	1 : 3	7.52e	2.83f	5.73b	0.34ab	0.51ef	16.68	120
Pig manure	1 : 6	8.64cd	2.87ef	4.60c	0.30b	1.05d	15.19	118
	1 : 9	9.98b	3.34c	4.03d	0.30b	1.54b	13.34	114
牛粪	1 : 3	10.53ab	3.21cd	4.04d	0.34ab	1.29c	11.86	108
Cow manure	1 : 6	8.49d	3.61b	5.62b	0.30b	1.57b	18.74	118
	1 : 9	8.79d	3.93a	6.69a	0.32b	1.53b	20.94	114

因空白对照番茄长势太差,产量太低,未能满足鲜样的测试要求 Due to the poor growth and low yield in control, the tomato fruits could not meet the test requirements of fresh samples.

表 5 不同沼液处理下化肥用量

Table 5 Amount of chemical fertilizer under different biogas slurry treatments

处理 Treatment	沼液：水 Biogas slurry : water (V : V)	尿素 Urea (g)	过磷酸钙 Normal calcium super phosphate (g)	硫酸钾 Potassium sulphate (g)	总计 Total amount (g)	节约肥料 Saving rate (%)
CK_1	–	7.59	14.32	8.04	29.94	0
鸭粪	1 : 3	0	11.83	1.80	13.63	54.5
Duck manure	1 : 6	3.25	12.90	4.47	20.62	31.1
	1 : 9	4.55	13.32	5.54	23.42	21.8
猪粪	1 : 3	3.00	8.87	4.46	16.33	45.5
Pig manure	1 : 6	4.97	11.21	6.00	22.16	26.0
	1 : 9	5.75	12.14	6.61	24.50	18.2
牛粪	1 : 3	4.09	0	0.40	4.49	85.0
Cow manure	1 : 6	5.59	6.14	3.67	15.40	48.6
	1 : 9	6.19	8.59	4.98	19.76	34.0

3 讨 论

3.1 沼液部分替代化肥与土壤肥力的关系

本研究表明,在同等投入速效氮、磷、钾的情况下,沼液配施的土壤铵态氮(28.1~36.4 mg · kg^{-1})、有效磷(8.24~15.04 mg · kg^{-1})和有机质(9.86~13.55 g · kg^{-1})仍处于较低肥力水平,但沼液替代部分化肥配合施用对土壤肥力的改善作用显著高于或持平于完全化学肥料处理,尤其是速效钾(495.6~667.7 mg · kg^{-1})达到极高水平.沼液配施对土壤还原态氮具普遍提升效果,如果将土壤 NO_3^- 考虑在内,土壤可利用速效氮均大于 300 mg · kg^{-1},达到高氮肥力水平.沼液对速效磷的改善效果随稀释比例的增大而降低,但仍高于或持平于化肥处理.鸭粪和猪粪沼液对土壤速效钾的肥力提升效果明显不如牛粪沼液,且牛粪沼液对土壤速效钾的改善未随稀释倍数的升高而降低,这说明沼液中含有的有机组分对土壤中的钾具有活化作用,这与沼液在花生上的研究结果一致[17].同时,由于牛粪沼液含有的腐殖质是鸭粪和猪粪沼液的 40.32 和 3.45 倍,推测土壤钾生物有效性显著提高得益于此[1,18],而且与牛粪沼液显著提高土壤腐殖质的趋势相一致.

化肥和沼液施用对土壤水溶性钙和镁的提升效果极为显著,说明土壤中活性钙主要来自外源.但与完全施用化肥相比,仅有 1 : 3 稀释的鸭粪和猪粪效果显著,其他处理随稀释比例的增加呈持平或降低趋势.值得注意的是,牛粪沼液配施化肥的各处理水溶性钙和水溶性镁均显著低于纯化肥处理,且随稀释比例的升高而升高.原因可能包括两个方面:一方面,随着沼液稀释比例的提高,对土壤溶液中水溶性钙、镁的淋溶作用增强;另一方面,牛粪沼液中可能存在固持钙、镁离子的有机组分.这两个原因中前者的可能性要大于后者,土壤水溶性钙、镁均呈现随水分增多梯度递减的趋势,这需要进一步研究.

施用化肥和沼液对土壤有效铁具有部分改善作用，但各处理间差异不大；化肥和鸭粪沼液对有效锰具有显著提升作用，牛粪和猪粪沼液效果不明显；猪粪沼液处理土壤有效铜、锌远高于其他沼液处理，说明猪粪沼液中有较多的铜、锌，这与肉猪专用饲料中高浓度的铜、锌添加剂密切相关[19-20].

对土壤有机质、EC 值与其他速效养分统计分析发现，土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾与有机质含量存在显著正相关关系，而土壤水溶性钙、镁与 EC 值亦呈显著正相关.说明土壤速效矿质养分水平的提高离不开有机养分的供给，化肥与有机组分的协同作用是高产优质和培肥地力的重要措施[21-23].

3.2　沼液促进番茄产量提高及品质改善的因素分析

生育前期，完全施用化肥的番茄营养生长明显优于沼液配施，但沼液配施的壮苗指数明显高于化肥处理，这在番茄株高和茎粗的增长趋势上可以体现出来.沼液对番茄植株的促生效果随生育期的延长逐渐凸显，最终生物量和果实产量显著高于完全化肥处理.

在速效氮、磷、钾总量一致的前提下，施用沼液不仅能提高产量，还可改善果实品质.沼液对番茄果实的着色效果改善尤为明显，番茄红素显著提高.番茄红素是果实成熟的着色剂，具有强抗氧化性，是表征果实品质的重要外观和内在指标[24-25].口感或风味是对果实糖分、酸度、Vc 及风味物质等内在成分的综合评价，是番茄果实品质最直接、最真实的体现[25-26].从测试指标及评价结果来看，施用沼液配施化肥可显著改善番茄果实各项品质指标，并且与口感得分高度一致.但口感得分最高的果实并没有出现在产量最高的处理，说明在一定的土壤肥力范围内，产量的提高会不可避免地以稀释果实可溶性固形物为代价，致使品质有所降低.值得注意的是，本次品质测试，也包括从本地大型超市采购的两个番茄样本.超市番茄果实普遍空心少汁，糖分低，口感得分仅为 75 和 79.本研究中，虽然鸭粪和猪粪 3 种沼液的腐殖质含量并不高，但可能是沼液中的有机小分子物质较多(其中不乏生物活性物质)[5]，有机组分与无机养分协同促生，使得番茄在减少肥料的同时实现增产提质的目的.

4　结　　论

沼液替代部分化肥配施于番茄，可显著改善土壤有机质和速效氮、磷、钾，不同程度地活化中微量元素.与完全施用化肥相比，施用沼液显著促进番茄生长发育，产量提高达 55.9%～232.8%，果实品质显著改善，这与沼液含有全面的速效养分和特有的有机成分密不可分.沼液部分替代化肥，在节约化肥投入(18.2%～85.0%)的同时，可实现环保培肥和农业资源高效利用的双重目的.

参考文献

[1] Feng W (冯　伟), Guan T (管　涛), Wang X-Y (王晓宇), *et al*. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on wheat rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(4): 1007-1012 (in Chinese)

[2] Zhang F-M (张凤梅). Effect of Highly Efficient Biogas Slurry Fertilizer on Greenhouse Tomatoes. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2013 (in Chinese)

[3] Huang J-C (黄继川), Xu P-Z (徐培智), Peng Z-P (彭智平), *et al*. Biogas slurry use amount for suitable soil nutrition and biodiversity in paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers* (植物营养与肥料学报), 2016, **22**(2): 362-371 (in Chinese)

[4] Chen Y (陈　艳). Application Research of Biogas Slurry and Biogas Residue in Tomato Production. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2013 (in Chinese)

[5] Clemens J, Trimborn M, Weiland P, *et al*. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, **112**: 171-177

[6] Duan R (段　然). Studies on the Biogas Fertilizer Fertility, Potential Pollution Risk and Safety Evaluation of the Soil after Application. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2008 (in Chinese)

[7] Wu S-B (吴树彪), Liu L-L (刘莉莉), Liu W (刘　武), *et al*. Ecological effect evaluation of biogas project integrated with solar-ground source heat pump system and slurry recirculation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2017, **33**(5): 205-211 (in Chinese)

[8] Zhang C-A (张昌爱), Liu Y (刘　英), Cao M (曹　曼), *et al*. Pricing method and application effects of biogas slurry. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(6): 1735-1741 (in Chinese)

[9] Wang Z-C (王子臣), Liang Y-H (梁永红), Sheng J (盛　婧), *et al*. Analysis of water environment risk on biogas slurry disposal in paddy field. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(5): 213-220 (in Chinese)

[10] Yang R (杨　润), Sun Q-P (孙钦平), Zhao H-Y (赵海燕), *et al*. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2017, **36**(8): 1566-1572 (in Chinese)

[11] Huang S-W (黄绍文), Wang Y-J (王玉军), Jin J-Y (金继运), *et al*. Status of salinity pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(4): 96-918 (in Chinese)
[12] Gao X-H (高新昊), Zhang Y-P (张英鹏), Liu Z-H (刘兆辉), *et al*. Effects of cultivating years on soil ecological environment in greenhouse of Shouguang City, Shandong Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(5): 1452-1459 (in Chinese)
[13] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
[14] Tan J-F (谭金芳). Principle and Technology of Crop Fertilization. 2nd Ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011 (in Chinese)
[15] Li H-S (李合生). Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
[16] Yang D-Q (杨定清), Xie Y-H (谢永红), Wang P (王 鹏), *et al*. Improvement of determination method of lycopene in tomato fruit. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2010, **23**(1): 277-279 (in Chinese)
[17] Zheng XB, Fan JB, Xu L, *et al*. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on soil aggregation and C/N distribution in an Ultisol. *PLoS One*, 2017, **12**(1): e0170491
[18] Ni Z-Y (倪中应), Zhang M-K (章明奎). Chemical compositions of nitrogen, phosphorus, and potassium in biogas slurry and their bio-availability. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2017, **48**(5): 1114-1119 (in Chinese)
[19] Li S-Y (李松岩). The Assessment and Control of Environmental Impact of High-dose Zinc and Copper in the Pig's Food. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005 (in Chinese)
[20] Han Z-Y (韩志英), Ding Y (丁 颖), Zhu J (朱军), *et al*. Harmful components in livestock wastes and related control technologies. *Bulletin of Science and Technology* (科技通报), 2008, **24**: 559-564 (in Chinese)
[21] Havlin JL, Beaton JD, Tisdate SL. Soil Fertility and Fertilizers. Beijing: Higher Education Press, 2006: 7-13
[22] Tao L (陶 磊), Chu G-X (褚贵新), Liu T (刘涛), *et al*. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(21): 6137-6146 (in Chinese)
[23] Zhang Y-L (张运龙). Effect of Organic Fertilizer on Yield of Winter Wheat-Summer Maize and Soil Fertility. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
[24] Grozeff GEG, Senn ME, Bartolia CG, *et al*. Nocturnal low irradiance pulses improve fruit yield and lycopene concentration in tomato. *Scientia Horticulturae*, 2016, **203**: 47-52
[25] Hernández-Almanza A, Montañez J, Martínez G, *et al*. Lycopene: Progress in microbial production. *Trends in Food Science and Technology*, 2016, **56**: 142-148
[26] Xie J-H (谢景欢), Chen G (陈 钢), Yuan Q-X (袁巧霞), *et al*. Effects of combined application of biogas residues and chemical fertilizers on greenhouse tomato growth. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2353-2357 (in Chinese)

作者简介 王靖荃, 男, 1993 年生, 硕士研究生. 主要从事作物高效施肥技术研究. E-mail: 1026716650@qq.com

责任编辑 张凤丽

王靖荃, 谷端银, 于晓东, 等. 沼液部分替代化肥在日光温室秋番茄上的应用效果. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 243-250
Wang J-Q, Gu D-Y, Yu X-D, *et al*. Application effects of biogas slurry partly substituting for chemical fertilizer on autumn tomato production in winter-solar greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 243-250 (in Chinese)