



郑健,宿智鹏,刘俊彦,王燕. 基于养分平衡原理的温室番茄沼液替代氮肥适宜模式及评价[J]. 中国农业大学学报,2024,29(02):77-90.
ZHENG Jian, SU Zhipeng, LIU Junyan, WANG Yan. Suitable model and evaluation of nitrogen fertilizer replacement by greenhouse tomato digestate based on nutrient balance principle[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(02): 77-90.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.08

基于养分平衡原理的温室番茄沼液替代氮肥适宜模式及评价

郑健^{1,2,3} 宿智鹏^{1,2} 刘俊彦^{1,2} 王燕^{1,3}

- 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050;
- 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050;
- 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050

摘要 为探索沼液替代氮肥的适宜模式,以番茄为供试材料,首先根据作物养分平衡原理确定试验种植番茄的施氮量为 374.8 kg/hm^2 ,并基于该施氮量开展沼液替代氮肥适宜模式试验和评价分析。试验设置纯沼液处理(CF1)、纯氮肥处理(CF2)、沼液替代50%(T1)、35%(T2)、25%(T3)、15%(T4)6个处理,分析沼液替代氮肥对番茄农艺性状、产量和品质的影响,并对其农艺性状生长潜力及最大生长速率进行Logistic曲线分析,同时选取番茄可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物、维生素C、硝酸盐和含水量作为评价指标,运用TOPSIS法、灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序法和VIKOR法4种单一评价方法进行多属性决策评价,再采用均值法、模糊Borda法和Copeland法对4种单一评价结果进行组合评价,由此构建番茄品质综合效益评价体系。研究表明:T3处理番茄生长速率最大,呈现最优的番茄农艺性状;Logistic曲线的生长潜力及最大生长速率表现为 $T3>T4>T2>T1$;T2处理产量最大(4.72 kg/株),T3次之(4.55 kg/株);随着沼液替代氮肥比例的增加,可溶性糖、可溶性固形物含量呈现增长趋势,硝酸盐含量呈现下降趋势,可滴定酸、维生素C和果实含水率呈现开口向下的抛物线趋势,T2处理为抛物线最大值;4种单一评价方法得到结果存在差异,3种组合评价法结果均得到T2处理(沼液替代35%氮肥)组合评价得分最高,尽管T3处理(沼液替代25%氮肥)时番茄的农艺性状(株高、茎粗及干物质累积质量)及最大生长速率表现最优,但T2处理(沼液替代35%氮肥)可获得最适宜的番茄果实产量、品质及评价结果。

关键词 番茄;沼液;氮肥;养分平衡;品质;组合评价

中图分类号 S641.2;S216.4

文章编号 1007-4333(2024)02-0077-14

文献标志码 A

Suitable model and evaluation of nitrogen fertilizer replacement by greenhouse tomato digestate based on nutrient balance principle

ZHENG Jian^{1,2,3}, SU Zhipeng^{1,2}, LIU Junyan^{1,2}, WANG Yan^{1,3}

- College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
- Gansu Province Key Laboratory of Biomass and Solar Energy Complementary Energy Supply System, Lanzhou 730050, China;
- Northwest Collaborative Innovation Center of Low Carbon Town Support Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract In order to explore the suitable mode of replacing nitrogen fertilizer with biogas slurry, tomato was used as the test material. According to the principle of crop nutrient balance, the nitrogen application rate of tomato planted in the experiment was 374.8 kg/hm^2 , and the appropriate model test and evaluation

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969012);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-27,2021CYZC-33);济南市水务科技项目(JNSWKJ202206);2023年高校教师创新基金项目(2023B-431)

第一作者: 郑健(ORCID:0009-0003-5723-1950),教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail:zhj16822@126.com

analysis of biogas slurry to replace nitrogen fertilizer were carried out based on this nitrogen application rate. The experiment included 6 treatments, which were pure biogas slurry treatment (CF1), pure nitrogen fertilizer treatment (CF2), biogas slurry instead of nitrogen fertilizer 50% (T1), 35% (T2), 25% (T3), and 15% (T4) treatment, respectively. To analyze the effect of biogas slurry replacing nitrogen fertilizer on tomato agronomic traits, yield and quality. And carry out Logistic curve analysis on its agronomic traits growth potential and maximum growth rate. Tomato soluble sugar, titratable acid, soluble solids, vitamin C, nitrate and water content were further selected as evaluation indicators. This study adopted the TOPSIS method, gray relational analysis method, symmetrical cross entropy multi-attribute ranking method and VIKOR method to evaluate multi-attribute decision-making, and then used the mean value method, fuzzy Borda method and Copeland method to evaluate the four single evaluation results. Based on above analysis, a comprehensive benefit evaluation system for tomato quality was constructed. The results showed that: The T3 treatment had the highest growth rate and optimal agronomic traits of tomato, the growth potential and maximum growth rate of the Logistic curve in descending order is $T3 > T4 > T2 > T1$, while the T2 treatment had the highest yield (4.72 kg/plant) and T3 is in the second highest (4.55 kg/plant); With the increase of the proportion of nitrogen fertilizer replaced by biogas slurry, the content of soluble sugar and soluble solids showed an increasing trend, the content of nitrate showed a downward trend, titratable acid, vitamin C and fruit water content showed a downward parabolic trend, and T2 treatment is the maximum value of parabola; There were differences in the results obtained by the four single evaluation methods, and the results of the three combination evaluation methods all yielded the highest combination evaluation scores for the T2 treatment (35% nitrogen fertilizer replaced by biogas). Despite the optimum performance of agronomic traits (plant height, stem thickness and cumulative mass of dry matter) and maximum growth rate of tomato in T3 treatment (25% replacement of nitrogen fertilizer by biogas). However, T2 treatment (replacement of 35% nitrogen fertilizer by biogas) resulted in the optimum tomato yield, quality and evaluation results.

Keywords tomato; biogas slurry; nitrogen fertilizer; nutrient balance; quality; combination evaluation

我国农业农村部在2015年组织实施了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》^[1],提出“采用有机肥替代部分化肥”的方法,2022年又印发了《到2025年化肥减量化行动方案》^[2],提出“提高有机肥资源还田量”的目标,进一步明确了有机肥在化肥减施中的重要作用。沼液是沼气工程的产物,有丰富的蛋白质、氨基酸、植物激素和抑制病虫害活性的物质^[3],是一种多元、卫生的速效复合有机肥^[4-5]。研究表明,沼液替代化肥施用能够调节土壤理化性质,提高作物种植土壤肥力,进而提高产量和改善品质^[6-7]。但对沼液适宜替代施用量阈值却存在很大差异,郑学博等^[6]在沼液化肥配施试验中发现沼液全氮30%处理可提高花生产量、改善土壤微生物及酶活性,而柴彦君等^[7]认为猪粪沼液替代50%化肥施用量提升土壤肥力及改善芦笋品质效果最好,可见不同发酵原料获得的沼液替代比例存在较大差异。同时,已有研究中施肥量主要以当地种植经验为基础进行设置,未考虑耕地土壤肥力带来的影响。因此,对沼液替代化肥适宜比例的依据及模式

有待进一步研究。

养分平衡原理作为测土配方技术的代表,成为“十四五”全国农业规划中化肥减量工作的重点内容^[2]。作物养分平衡原理由Troug^[8]在第七届国际土壤学会中提出,即达到目标产量的作物养分输入与输出之间保持动态平衡,从养分的投入和产出角度分析作物养分的丰缺平衡,对肥料分配、施用具有一定的指导作用。吕开萌等^[9]基于养分平衡原理测土配方施肥发现配施有机肥较农田经验施肥明显提高产量;罗庆华等^[10]采用相同原理进行尿素等氮配施有机肥试验得到类似结果,说明基于养分平衡原理来进行施肥是科学合理的。基于作物养分平衡原理进行测土配方施肥可有效调控氮素营养,精准施肥为作物生长提供充足养分以保证土壤养分均衡性^[8,11-12]。如果将作物养分平衡原理应用到沼液替代氮肥模式研究中,或可为沼液合理替代量的确定提供新思路。

果实品质评价是相对复杂的多属性决策过程,寻求有效的评价方法和建立科学、合理的品质评价

体系,有助于果品选优及对沼液替代氮肥模式提供参考价值。目前组合TOPSIS法^[3-4]、对称交互熵排序法^[13]、VIKOR法^[14]和聚类分析法^[15]等评价方法在果实品质评价中已被大量应用,但单一评价方法对数据的侧重点及权重的赋值存在较大差异,评价结果有待商榷,故有些学者组合评价结果建立评价模型,如:组合灰色关联与TOPSIS法建立评价模型^[16]、对评价结果进行模糊Borda组合评价^[17],但多数采用单一方法组合单一评价结果。郭显光^[18]提出的新评价方法—组合评价法,有效解决单一评价方法得到结果不一致的问题,即选用均值法、Borda法、Copeland法和模糊Borda法对来自不同角度评价的方法重新组合排序,得到更加全面、科学的结果。组合评价法多用于统计管理类学科领域^[19],对于农业方面尤其是沼液替代氮肥适宜模式评价研究还显不足。

因此,本研究拟以番茄为研究对象,基于作物养分平衡原理,采用穴孔灌溉进行温室大田试验,研究沼液替代氮肥不同比例对番茄农艺性状、产量及品质的影响,将层次分析法获得主观权重和熵权法获得客观权重组合后进行TOPSIS法、灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序法和VIKOR法等进行评价,再运用组合评价法将单一评价结果重新组合,构建沼液替代氮肥适宜模式下番茄品质综合效益评价体系,寻求适宜番茄生长需求的最优替代比例,以期对番茄种植中沼液和化学氮肥的合理配施提供参考。

1 材料与方

1.1 研究区概况

本试验于2022年5—9月在兰州市七里河区魏岭乡绿化村建设的设施蔬菜水肥一体化示范点温室中开展,试验地点海拔为1 875 m(36°2'23" N、103°42'39" E),是温带大陆性气候区,年平均气温为9.4℃,年平均降水量为358.0 mm,降雨主要在6—9月,年平均蒸发量为1 197.2 mm,种植前测得0~60 cm深度土壤养分状况为:有机质含量为13.74 g/kg,全氮含量为0.88 g/kg,全钾含量为1.60 g/kg,有机碳含量为7.92 g/kg,碱解氮含量为70.45 mg/kg,有效磷含量为24.70 mg/kg,速效钾含量为189.68 mg/kg,初始含水率为15.35%。

1.2 试验材料

供试材料选用西安金鹏种苗有限公司提供的

‘金鹏3号’番茄,属于早熟高档大红、硬果品种。试验沼液取自兰州新苏生态能源有限公司,以尾菜厌氧发酵产生的沼液上层清液,总固体含量约小于2%,沼液中有有机质含量1.700 g/kg、全氮含量0.956 g/kg、全磷含量0.054 g/kg、全钾含量2.288 g/kg、碱解氮含量888.320 mg/kg、pH为7.78。其他灌溉肥料选用尿素(N 46%)、磷肥(P₂O₅ 12%)、钾肥(K₂O 50%),当季的化肥利用率分别为氮肥35%、磷肥25%、钾肥35%。

1.3 试验设计

根据种植土地近3年的平均产量与合理理想产量的年递增率确定番茄目标产量为4.5 kg/株,属于番茄当地种植高产水平,本研究根据DB62/T 836—2002《兰州市无公害蔬菜生产技术规程》^[20]中番茄形成1 000 kg目标产量需N(2.8~4.0 kg)、P₂O₅(1.1~1.6 kg)、K₂O(3.7~4.5 kg)质量确定试验需氮(N)17.37 g/株、磷(P₂O₅)5.17 g/株、钾(K₂O)19.98 g/株。通过测土配方技术的考证,番茄氮、磷、钾的土壤养分利用系数分别为0.74、0.51、0.55,在小区采用曲线布点,取3个土样,每10 cm区间取土,深度60 cm,测定土壤碱解氮含量后取平均值,得该区土壤碱解氮含量为70.45 mg/kg,通过计算,番茄种植施氮量为374.8 kg/hm²,本试验需氮质量由沼液与氮肥提供。在种植番茄N平衡的基础上,通过秋季温室大田试验对番茄的全生育周期进行不同比例沼液替代氮肥,为提高试验的准确性,供试沼液取自兰州新苏生态能源有限公司尾菜厌氧发酵产生的上层清液无固体渣的沼液,此沼液理化性质以及微量元素的变化波动不太明显(碱解氮含量为888.32 mg/kg),较动物粪便沼液更稳定^[21]。根据《中国番茄》^[21]中番茄各生育周期的需肥特性,在番茄苗期、开花坐果期、果实成熟期各施入总氮量的15%、35%、50%,基于氮、磷、钾肥总用量不变,按氮含量折算沼液替代氮肥用量,以单施沼液(CF1)、单施氮肥(CF2)处理为对照,对番茄的全生育周期设置沼液替代氮肥配施不同比例(T1:50%、T2:35%、T3:25%、T4:15%),共6个处理,每处理重复3次,取均值作为试验结果。试验小区面积设为20 m²(长6.0 m,宽3.4 m),采用当地大田沟垄相间覆膜栽培模式,单垄定植,垄宽设30 cm,行距设60 cm,株距设60 cm,每处理种植10株。

1.4 灌水及施肥

2022年5月7日定植,番茄各生育期的具体划

分时间为:苗期5月7日—6月6日、开花坐果期6月7日—7月12日、果实成熟期7月13日—8月30日,缓苗10 d,期间灌水1天1次,缓苗期后开始实验,将 ϕ 20 cm标准蒸发皿放置在作物同高冠层来计算蒸发量,为防止沼液与氮肥同时施入对作物根系的影响,氮肥用水溶解后,环状浇施,沼液采用穴孔灌溉。沼液同氮肥一样,用量按氮含量进行折算,在各个生育期均分至每2 d施入,期间按蒸发量减去沼液所含水量,来补充作物的需水量以保持各处理小区灌溉量相同。基于养分平衡原理计算发现沼液追施不能完全满足番茄生长所需P、K元素,为满足番

茄生长对P、K元素的吸收,扣除沼液所带P、K养分,按当地田间管理水平与氮肥同频次(苗期、开花结果期、果实成熟期各追施肥料3、5、5次)追施磷肥、钾肥以补齐各处理所缺养分(共追施磷肥94.5 kg/hm²、钾肥97.5 kg/hm²),沼液及化学氮肥施用量见表1。灌溉量计算方程为:

$$S=W_p \times A \times K_p$$

式中:S为灌溉量,mL;W_p为作物蒸发皿系数,本试验取0.8^[22];A为控制面积,cm²,本试验为30 cm×60 cm;K_p为2次灌水间隔的蒸发皿累计蒸发量,mm。

表1 不同处理的沼液、氮肥用量和总灌溉量

Table 1 Biogas, nitrogen fertilizer dosage and total irrigation amount for different treatments

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		开花结果期 Flowering and fruiting stage		果实成熟期 Fruit ripening stage		总灌溉量/ (m ³ /hm ²) Total irrigation volume
	沼液/ (L/hm ²) Biogas slurry	氮肥/ (kg/hm ²) Nitrogen fertilizer	沼液/ (L/hm ²) Biogas slurry	氮肥/ (kg/hm ²) Nitrogen fertilizer	沼液/ (L/hm ²) Biogas slurry	氮肥/ (kg/hm ²) Nitrogen fertilizer	
	CF1	1 398.9	0	3 264.2	0	4 663.1	
CF2	0	7.72	0	18.01	0	25.73	1791
T1	699.5	3.86	1 632.1	9.01	2 331.6	12.86	1791
T2	489.6	5.02	1 142.5	11.71	1 632.1	16.72	1791
T3	349.7	5.79	816.0	13.51	1 165.8	19.30	1791
T4	209.8	6.56	489.6	15.31	699.5	21.87	1791

1.5 测定内容及方法

使用精度1 mm的米尺自根部土壤基面至最高生长点测量番茄株高;使用精度为0.01 mm的数显游标卡尺在地表根部茎干交叉测量番茄茎粗;番茄各器官干物质累积质量使用精度0.01 g电子秤称量;采摘成熟的番茄使用精度0.01 g的电子秤称重后记录产量,番茄品质指标(可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物、维生素C、硝酸盐、含水量)测定方法依据参考文献[23]和[24]。

1.6 番茄品质评价方法

采用层次分析法主观赋权与熵权法客观赋权获得各评价指标权重^[3-4],应用TOPSIS法^[3-5,25]、灰色关联分析法^[16]、对称交互熵多属性排序法^[13]和VIKOR法^[14]等4种多属性决策评价方法进行番茄品质的单一评价,通过组合评价法的均值法、模糊Borda法^[16]和Copeland法^[17]对4种单一评价方法的结果进行组合评价。

1.7 数据结果分析

利用EXCEL 2021软件计算层次分析法、熵权法的单一权重和组合权重计算,并进行TOPSIS法、灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序法、VIKOR法、均值法、模糊Borda法和Copeland法的评价方法计算;利用SPSS 26.0软件进行株高、茎粗的Logistic模型拟合计算^[26]以及干物质累积质量、产量、水分利用效率、肥料偏生产力和品质指标的显著性分析,并建立沼液施用量与产量的回归方程;采用Origin 2022软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同沼液替代氮肥处理对番茄株高、茎粗的影响

不同沼液替代氮肥处理对番茄全生育期株高、茎粗变化见表2。可见:在定植后30 d(06-05),各处理株高、茎粗差异性开始显现;定植50 d(06-25)后,

表2 不同沼液替代氮肥处理对番茄株高、茎粗变化

Table 2 Changes in plant height and stem thickness of tomato by different treatments of biomass alternative to nitrogen fertilizer

处理 Treatment	定植日期(月-日) Planting time (MM-DD)													
	05-24	05-28	06-08	06-17	06-24	07-02	07-12	07-20	07-30	08-09	08-17	08-25	08-29	
株高/cm Plant height	CF1	17.1 f	26.4 e	37.6 e	48.6 f	60.3 e	71.4 e	91.1 e	107.0 e	128.9 e	149.7 e	167.3 e	182.8 e	193.1 e
	CF2	19.5 a	29.0 a	42.8 a	52.6 d	57.9 f	67.5 f	88.3 f	103.6 f	122.6 f	144.8 f	160.6 f	177.3 f	186.7 f
	T1	16.9 e	24.4 f	37.3 f	51.9 e	62.9 d	73.1 d	92.7 d	109.4 d	134.0 d	154.9 d	172.0 d	187.7 d	200.8 d
	T2	18.2 d	28.1 d	38.0 c	53.4 b	64.1 c	78.5 c	96.6 c	115.0 c	137.1 c	162.4 c	176.4 c	196.0 c	207.6 c
	T3	18.7 c	28.7 c	37.8 d	53.3 c	69.8 a	88.4 a	108.0 a	126.4 a	147.6 a	176.2 a	191.6 a	210.9 a	222.2 a
	T4	19.1 b	28.9 b	39.7 b	54.6 a	65.3 b	82.6 b	100.7 b	120.9 b	140.2 b	167.9 b	182.3 b	202.8 b	214.1 b
茎粗/mm Stem thickness	CF1	6.13 e	8.18 e	9.72 e	10.66 e	11.88 e	12.62 e	13.27 e	13.88 e	14.71 e	15.67 e	16.39 e	16.84 e	17.04 e
	CF2	6.05 f	8.08 f	9.56 f	10.38 f	11.30 f	11.93 f	12.93 f	13.52 f	14.47 f	15.34 f	16.02 f	16.52 f	16.66 f
	T1	6.24 d	8.35 d	9.98 d	11.12 d	12.27 d	13.10 d	13.91 d	14.65 d	15.68 d	16.44 d	17.06 d	17.30 d	17.52 d
	T2	6.55 a	8.99 a	10.23 c	11.79 c	12.65 c	13.53 c	14.55 c	15.27 c	16.05 c	17.01 c	17.60 c	17.97 c	18.20 c
	T3	6.48 b	8.95 b	10.76 a	12.04 a	13.25 a	14.28 a	15.22 a	15.99 a	16.95 a	17.95 a	18.49 a	18.90 a	18.99 a
	T4	6.45 c	8.88 c	10.25 b	11.93 b	13.04 b	13.93 b	14.88 b	15.71 b	16.55 b	17.39 b	17.91 b	18.40 b	18.68 b

注：不同小写字母表示各处理差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

各处理株高、茎粗增长迅速,动态变化较大;定植100 d(08-14)后,各处理株高、茎粗增长缓慢,生长至果实成熟后期停止生长。同时,试验发现,各处理株高呈现 $T3 > T4 > T2 > T1$ 的变化规律,相比CF2处理(186.7 cm),分别增加19.01%、14.68%、11.19%、7.55%,各处理茎粗保持与株高相同的 $T3 > T4 > T2 > T1$ 增长趋势,相比CF2处理(16.66 mm),分别增加13.99%、12.12%、9.24%、5.16%,沼液替代氮肥各处理番茄株高、茎粗均比单施沼液、氮肥处理生长水平高,T3处理保持最高的生长水平,单施氮肥CF2处理株高、茎粗为较低的生长水平(表2)。

Logistic曲线广泛应用于农业栽培领域,可反映不同沼液替代氮肥处理的番茄生长动态特征和最大生长潜力^[26]。根据表2数据对番茄株高、茎粗生长实测值进行Logistic曲线拟合,得到曲线参数见表3。可见拟合程度达到显著水平($P < 0.05$),不同沼液替代氮肥处理对番茄株高、茎粗的生长潜力及最大生长速率均表现为: $T3 > T4 > T2 > T1$ 。由此

可见,在施氮量一定的条件下,沼液替代氮肥处理(T1、T2、T3、T4)相对于对照处理(CF1、CF2)可取得较高的生长水平,即一定比例的沼液替代氮肥可促进番茄生长发育,T3处理(替代比例为25%)促进效果更明显。

2.2 不同沼液替代氮肥处理对番茄干物质累积质量的影响

研究不同沼液替代氮肥处理对番茄各生育期干物质累积质量的影响,结果见表4。可见:当施氮量一定时,苗期各处理根系干物质累积质量相近,CF2较其他处理获得最大的茎干质量(6.7 g/株)和总干物质累积质量(15.2 g/株),沼液替代氮肥组总干物质累积质量呈现 $T4 > T3 > T2 > T1$ 的趋势,说明苗期番茄吸收肥料首先来自土壤,然后消耗沼液、氮肥等外界养分供给;开花结果期为番茄由生理生长向生殖生长转化的阶段,沼液替代氮肥处理的干物质质量累积优势开始显现,各处理叶、果实质量均表现为 $T3 > T4 > T2 > T1$,T3处理有较高的干物质累积质量,较CF1的干物质累积质量高

表3 沼液替代氮肥处理的番茄 Logistic 曲线拟合参数

Table 3 Logistic curve fitting parameters for tomatoes treated with biogas alternative nitrogen fertilizer

处理 Treatment	株高 Plant height			茎粗 Stem thickness		
	Logistic 回归方程 Logistic regression equation	R^2	最大生长 速率/ (cm/(d·株)) Maximum growth rate	Logistic 回归方程 Logistic regression equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient R^2	最大生长 速率/ (mm/(d·株)) Maximum growth rate
CF1	$Y = 288.90 + 19.28e^{(-0.0319x)}$	0.997	2.304	$Y = 37.61 + 4.51e^{(-0.0123x)}$	0.937	0.116
CF2	$Y = 281.03 + 19.44e^{(-0.0318x)}$	0.997	2.234	$Y = 37.56 + 4.65e^{(-0.0122x)}$	0.948	0.115
T1	$Y = 310.34 + 20.65e^{(-0.0317x)}$	0.995	2.459	$Y = 36.56 + 4.23e^{(-0.0129x)}$	0.929	0.118
T2	$Y = 302.45 + 20.04e^{(-0.0328x)}$	0.996	2.480	$Y = 36.57 + 4.11e^{(-0.0133x)}$	0.926	0.122
T3	$Y = 299.97 + 20.04e^{(-0.0352x)}$	0.995	2.640	$Y = 37.09 + 4.02e^{(-0.0137x)}$	0.925	0.127
T4	$Y = 322.74 + 20.14e^{(-0.0322x)}$	0.996	2.598	$Y = 37.37 + 4.11e^{(-0.0133x)}$	0.925	0.124

表4 沼液替代氮肥对番茄干物质累积质量的影响

Table 4 Effect of replacing nitrogen fertilizer with biogas on the accumulated mass of dry matter of tomato g/株

处理 Treatment	苗期 Seedling stage			开花结果期 Flowering and fruiting stage				果实成熟期 Fruit ripening stage			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit
	CF1	2.0 e	4.2 e	6.4 d	5.2 c	33.1 f	18.9 f	19.1 f	14.6 e	96.9 e	46.5 f
CF2	2.4 a	6.7 a	6.1 e	5.2 c	42.8 a	19.9 e	20.9 e	14.3 f	104.1 f	54.0 e	94.7 f
T1	2.3 b	4.2 e	6.1 e	4.2 d	37.5 e	26.5 d	21.0 d	16.9 c	95.1 d	49.8 d	125.5 c
T2	2.2 d	4.4 d	6.5 c	5.2 c	38.1 d	28.1 c	25.4 c	18.1 a	106.2 c	59.0 c	155.1 a
T3	2.3 c	4.6 c	6.8 a	6.2 b	38.5 c	30.3 a	27.3 a	17.8 b	115.4 b	73.0 a	130.1 b
T4	2.2 d	4.8 b	6.7 b	6.4 a	39.2 b	33.6 b	26.7 b	16.3 d	110.8 a	63.1 b	116.5 d

25.41%，较CF2处理高13.19%，各处理根系、果实干物质累积质量接近；随着番茄生育阶段的推进，果实质量在干物质累积质量中占比开始凸显，各处理果实干物质累积质量为T2>T3>T4>T1，各处理差异性显著($P<0.05$)，T2处理替代比例促进果实产量的形成，果实干物质累积质量为155.1 g/株，总干物质累积质量为338.4 g/株，所占比例达到45.83%，不同沼液替代氮肥比例处理均比纯沼液处理CF1和纯氮肥处理CF2干物质累积质量高，CF1比CF2处理有更大的果实干物质累积质量。

2.3 不同沼液替代氮肥处理对番茄产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的响应

不同沼液替代氮肥处理对番茄产量、水分利用

效率和氮肥偏生产力的影响见表5。可见：在施氮量、灌溉量一定的情况下，不同比例的沼液替代氮肥均会对番茄产量产生影响，随着沼液替代氮肥比例的降低，番茄产量呈现开口向下的“抛物线”趋势(处理表现规律)，其中T2有最大的番茄产量(14.16 kg/m²)，CF2处理番茄产量最低(12.12 kg/m²)，CF2、T2两处理番茄单株产量差异性显著($P<0.05$)，不同比例的沼液替代氮肥对番茄水分利用效率、氮肥偏生产力有显著影响($P<0.05$)，在该替代模式下，番茄的水分利用效率与氮肥偏生产力均呈现T2>T3>T4>T1的趋势，T2处理的水分利用效率较CF1处理增大13.46%，较CF2处理增大16.83%，原因是在施氮量、灌溉量一定的情况下，产量与作物的水分利

表5 沼液替代氮肥对番茄产量、水分利用效率、氮肥偏生产力的影响

Table 5 Effect of replacing N fertilizer with biogas on tomato yield, water use efficiency, and N bias productivity

处理 Treatment	产量/(kg/m ²) Yield	水分利用效率/(kg/m ³) Water use efficiency	氮肥偏生产力/(kg/kg) Nitrogen fertilizer bias productivity
CF1	12.48±0.63 de	69.68±0.45 e	332.98±0.19 e
CF2	12.12±0.21 e	67.67±0.19 f	323.37±0.36 f
T1	13.11±0.24 cd	71.52±0.19 d	341.78±0.24 d
T2	14.16±0.24 a	79.06±0.11 a	377.80±0.32 a
T3	13.65±0.15 ab	76.21±0.12 b	364.19±0.39 b
T4	13.23±0.09 bc	73.87±0.15 c	352.99±0.36 c

用效率和氮肥偏生产力变化趋势相同,沼液的配施增强土壤的保水保肥能力^[23],但过量的沼液养分释放缓慢使作物成长后期养分供应不足,产量反而有所降低^[6],35%为沼液替代氮肥阈值。

为探求沼液施用量与番茄产量间的关系,以沼液施用量作为自变量X,将产量作为因变量Y进行回归分析,发现产量与沼液施用量呈二次曲线拟合关系,函数表达式为: $Y=12.377-6.4812X^2+6.0559X$,经检验,决定系数 $R^2=0.8159>0.8$,统计显著性值 $P=0.02<0.05$,回归关系显著,分别以本次试验设置中的0、0.93263 L/m²为沼液施用量的上下限,可求得沼液施用量为0.46719 L/m²时有最大的番茄产量。

2.4 不同沼液替代氮肥处理对番茄品质的影响

不同沼液替代氮肥处理对番茄品质影响的结果见表6。可见:各处理番茄果实品质指标可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物、维生素C、硝酸盐、含

水量均存在显著性差异;可溶性糖和可溶性固形物指标在相同灌溉量下,与沼液的施用量均呈正相关,减少沼液替代氮肥比例,可溶性糖和可溶性固形物含量有降低趋势,CF1处理的可溶性糖和可溶性固形物为各处理最高,较CF2处理显著增大31.03%、9.80%,且两处理指标间差异显著($P<0.05$),说明沼液较氮肥能更有效促进可溶性糖和可溶性固形物含量的累积;T2处理获得可滴定酸、维生素C和含水量指标的最大值,说明T2处理的沼液替代氮肥比例提高可滴定酸、维生素C和含水量更明显,不同的是沼液替代氮肥处理中可滴定酸指标排序为T4>T3>T1,维生素C和含水量指标排序为T1>T3>T4,且各处理指标差异显著($P<0.05$);硝酸盐作为番茄卫生品质评价指标日趋重要,CF2处理的硝酸盐(18.75 mg/kg)为各处理最高,分别较T1、T2、T3、T4处理高58.23%、37.26%、25.33%、3.76%,硝酸盐含量与氮肥的施

表6 沼液替代氮肥对番茄品质的影响

Table 6 Effect of replacing nitrogen fertilizer with biogas on the quality of tomatoes

处理 Treatment	w(可溶性糖)/ (g/100 g)	w(可滴定酸)/ (g/kg)	w(可溶性固形物)/ %	w(维生素C)/ (mg/100 g)	w(硝酸盐)/ (mg/kg)	w(含水量)/ (g/100 g)
CF1	3.8±0.17 a	9.58±0.07 e	5.6±0.03 a	13.6±0.29 c	10.61±0.25 f	94.6±0.12 c
CF2	2.9±0.05 e	10.92±0.01 b	5.1±0.04 e	10.4±0.23 f	18.75±0.21 a	93.8±0.17 d
T1	3.6±0.09 ab	9.73±0.11 d	5.5±0.04 b	14.7±0.28 b	11.85±0.12 e	94.9±0.01 b
T2	3.4±0.14 bc	11.24±0.10 a	5.3±0.03 c	15.3±0.32 a	13.66±0.28 d	95.3±0.03 a
T3	3.3±0.10 cd	10.74±0.08 c	5.2±0.04 d	12.0±0.29 d	14.96±0.55 c	94.8±0.05 b
T4	3.1±0.08 d	10.87±0.02 bc	4.8±0.03 f	11.0±0.42 e	18.07±0.31 b	94.4±0.07 c

用呈现同步增长,沼液的施用显著降低番茄硝酸盐含量,且随着沼液替代氮肥比例的增加而减少。

2.5 不同沼液替代氮肥处理构建番茄品质评价体系

2.5.1 番茄品质单一指标权重的确定

番茄品质指标存在多样性,各指标间相互影响且对番茄品质影响作用不同,为客观评价不同沼液替代氮肥处理对番茄品质的影响,选取可溶性糖、

可滴定酸、可溶性固形物、维生素C、硝酸盐和含水量构建番茄品质评价指标,同时为使多属性评价体系更全面、实用和科学,对决策专家的群体意见利用层次分析法确定主观权重,利用熵权法充分考虑品质各指标间信息量和差异性确定客观权重,通过乘法合成归一法对主客观权重进行融合,得到番茄综合品质各指标的组合权重(表7),根据组合权重对番茄综合品质各指标进行多属性决策评价。

表7 番茄品质指标主观、客观及组合权重

Table 7 Subjective, objective and combined weights of tomato quality indicators

指标 Indicator	可溶性糖 Soluble sugar	可滴定酸 Titratable acid	可溶性固形物 Soluble solid	维生素C Vitamin C	硝酸盐 Nitrate content	含水量 Fruit water content
主观权重 Subjective weight	0.138 7	0.164 4	0.152 2	0.242 3	0.048 4	0.253 6
客观权重 Objective weight	0.104 2	0.047 0	0.033 0	0.267 7	0.547 5	0.000 3
组合权重 Portfolio weight	0.121 8	0.065 1	0.042 3	0.546 4	0.223 5	0.000 6

2.5.2 番茄品质单一评价方法结果及排序

由2.5.1节确定的组合权重采用TOPSIS、灰色关联分析、对称交互熵多属性排序和VIKOR 4种方法进行番茄综合品质各指标多属性决策评价结果见表8。可见:4种方法所得到的结果存在一定差异,灰色关联分析法与VIKOR法对番茄成长中沼液替代氮肥各方案计算的排序结果一致,并与

TOPSIS法获得相同的最优方案T2,而在对称交互熵多属性排序法中T2处理排名第3,沼液替代氮肥方案中T2处理最优,CF2处理在各方法的评价排序均靠后,T3、T4处理结果及排序处于中间水平,排名差异比较大的是CF1、T4处理,CF1处理在TOPSIS法的排名第6,而在对称交互熵多属性排序法和VIKOR法下的排名分别为2和3,相差4位

表8 单一评价方法评价结果及排序

Table 8 Evaluation results and ranking of single evaluation method

处理 Treatment	TOPSIS法 TOPSIS method		灰色关联分析法 Gray correlation analysis method		对称交互熵多属性排序法 Symmetric interactive entropy multi-attribute ranking method		VIKOR法 VIKOR method	
	相对接近度 Relative proximity	排序 Sorting	关联度 Correlation degree	排序 Sorting	贴进度 Post progress	排序 Sorting	评估值 Estimated value	排序 Sorting
CF1	0.427 3	6	0.610 5	3	0.908 0	2	0.372 7	3
CF2	0.467 9	4	0.363 4	6	0.006 8	6	1.000 0	6
T1	0.536 4	2	0.711 4	2	0.962 9	1	0.200 0	2
T2	0.645 5	1	0.924 5	1	0.903 1	3	0.000 0	1
T3	0.429 7	5	0.500 7	4	0.287 8	4	0.653 0	4
T4	0.482 6	3	0.387 3	5	0.024 0	5	0.859 8	5

和3位,T4在TOPSIS法下排名第3,而在其余3种方法排序均为第5。

2.5.3 番茄品质组合评价

为解决单一评价方法局限性及结果不一致的问题,对番茄沼液替代氮肥处理的4种单一评价结果进行事前检验,4种单一评价方法之间的Kendall

相关系数见表9。可见:单一评价方法与其余3种相关系数均值为0.371~0.771,说明4种单一评价方法之间具有相关性,对称交互熵多属性排序法与其余3种方法之间相关性最强,相关系数均值为0.771,TOPSIS法与其余3种方法相关程度较低,相关系数均值为0.371。

表9 单一评价方法间的Kendall相关系数

Table 9 Kendall correlation coefficient between single evaluation methods

评价方法 Evaluation methodology	TOPSIS法 TOPSIS method	灰色关联分析法 Gray correlation analysis method	对称交互熵多属性排序法 Symmetric interactive entropy multi-attribute ranking method	VIKOR法 VIKOR method	均值 Average value
TOPSIS法 TOPSIS method		0.486	0.143	0.486	0.371
灰色关联分析法 Gray correlation analysis method	0.486		0.829	1.000	0.771
对称交互熵多属性排序法 Symmetric interactive entropy multi-attribute ranking method	0.143	0.829		0.829	0.600
VIKOR法 VIKOR method	0.486	1.000	0.829		0.771

进一步对4种单一评价方法的结果采用Kendall非参数进行一致性检验^[17],结果表明:Kendall协调系数为0.712($P < 0.05$),卡方检验统计量 $\chi^2 = m(n-1)w = 14.43 \geq \chi^2_{0.05}(5) = 11.07$,表明4种单一评价方法排序的事前检验结果在统计学上满足一致性,具有统计学意义,可以对TOPSIS法、灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序法和VIKOR法的结果进行组合评价。

为使组合评价结果更合理、准确,本研究采用均值法、模糊Borda法和Copeland法对4种单一评价方法的结果进行组合评价,结果见表10。可见3种组合评价方法得分排序是一致的,不用构造统计量 $t^{[16]}$,沼液替代氮肥各处理排序结果分别是T2、T1、CF1、T4、T5、CF2,T2处理在3种组合评价方法中得分最高,各处理得分在T2处理达到最大值后反向降低,6个处理的标准差均是0,组合评价方法的排序结果无差异性。

对3种组合评价方法以及4种单一评价方法的排序结果运用Spearman事后检验,相关系数见表11。可见:灰色关联分析法和VIKOR法与3种组合评价

方法的Spearman相关系数最高是1,TOPSIS法与组合评价方法的Spearman相关系数最小为0.4857,对称交互熵多属性排序法为0.8286,说明灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序法和VIKOR法与3种组合评价方法的相关性最强,可以用于构建番茄-品质组合评价体系。

3 讨论

3.1 沼液替代氮肥模式对番茄农艺性状及产量的影响

株高、茎粗是番茄优质、高产的重要株型指标,影响植株各器官干物质累积质量。适宜的沼液替代氮肥比例能促进番茄植株的生长发育,替代比例过大或过小均会抑制番茄的生长发育,杨雪妍等^[27]使用厨余尾菜发酵的沼液对黄瓜幼苗浸种培养,发现沼液中硫化氢、化学需氧量(COD)与沼液浓度成正比,高浓度沼液导致番茄生长发育迟缓及根系缺氧死亡^[28]。本研究中,沼液替代氮肥各处理(50%、35%、25%、15%)对全生育周期番茄的株高、茎粗以及干物质累积质量均产生不同影响,苗期化肥处

表10 3种组合方法评价结果

Table 10 Evaluation results of 3 combined methods

处理 Treatment	均值法		模糊Borda法		Copeland法	
	Average value method		Fuzzy Borda method		Copeland method	
	得分 Score	排序 Sort	得分 Score	排序 Sort	得分 Score	排序 Sort
CF1	3.79	3	24.91	3	0	3
CF2	1.71	6	7.53	6	-16	6
T1	5.27	2	38.10	2	14	2
T2	5.56	1	43.75	1	16	1
T3	2.78	4	15.11	4	-6	4
T4	2.64	5	10.57	5	-8	5

表11 组合评价方法与单一评价方法的Spearman相关系数

Table 11 Spearman correlation coefficients of the combined evaluation method and the single evaluation method

评价方法 Evaluation methodology	均值法 Average value method	模糊Borda法 Fuzzy Borda method	Copeland法 Copeland method	均值 Average value
TOPSIS法 TOPSIS method	0.485 7	0.485 7	0.485 7	0.485 7
灰色关联分析法 Gray correlation analysis method	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
对称交互熵多属性排序法 Symmetric interactive entropy multi-attribute ranking method	0.828 6	0.828 6	0.828 6	0.828 6
VIKOR法 VIKOR method	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

理(CF2)对番茄影响较大,造成植株徒长,较沼液替代氮肥各处理表现为株高最大、茎粗最小以及干物质累积质量最大,说明苗期番茄茎干对氮素类型需求不同,沼液中氮等元素生物利用度较低,生长前期沼液对番茄生理作用不明显;当进入开花结果期,高氮肥施用量在促进植株生长优势上逐渐减弱,沼液通过微生物降解提高酚类及类黄酮含量对番茄成长优势逐渐凸显^[29],且土壤氮素的流失以及氮肥缓释作用^[30]使T3处理有较高的番茄株高、茎粗以及干物质累积质量,沼液替代氮肥各处理比单施沼液CF1、氮肥CF2处理有较高干物质累积质量;在果实成熟期,果实对氮素的征调能力占主导地位^[31],番茄营养生长逐渐减弱,叶面存在脱落、萎

焉,提供干物质由营养器官转变为生殖器官,生殖器官的形成决定番茄产量的潜力,植株总干物质累积质量增长源主要集中在累积果实质量,从而促使T2、T3有最大果实干物质累积质量。同时,T3处理在整个生育期的叶干质量均最高,说明番茄叶片生长对25%的沼液替代氮肥比例最为敏感,为番茄产量的形成提供良好的物质基础。

沼液合理替代氮肥有助于番茄对营养元素的吸收与利用,从而有助于提高其产量^[6]。Liu等^[32]认为有机氮替代总氮低于70%,作物产量增加5.5%~5.6%,而柴彦君等^[7]研究表明,沼液替代化肥各处理对芦笋产量的提升并无显著差异,本研究表明沼液替代氮肥对番茄产量的影响基本达到显

著水平,作物产量是由植物组织器官从提供营养到生长发育协同作用所决定的,番茄生育期各项农艺性状的改善为产量的增加做出了一定的影响,促进T2、T3处理积累较多的干物质进行“源—库”转移,源库平衡是番茄高产群体的重要特征^[33]。

3.2 沼液替代氮肥模式对番茄品质的影响

品质是消费者更为关注的内容,番茄品质受自身基因特性、气候条件和水肥管理等因素相互作用的影响^[21]。在本试验中,随着沼液替代氮肥比例的增加,可滴定酸和硝酸盐等品质有所改善,其主要原因是高浓度沼液加快 NO_3^- 在土壤中的迁移^[34],番茄植株在吸收 NO_3^- 的同时,对番茄果实体内的硝化还原酶有激活作用,可降低硝酸盐含量^[35],而氮肥的减量可能提高了有机酸代谢关键酶—磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)的活性^[36],从而显著提高番茄可滴定酸含量,这与邢英英等^[37]滴灌水肥耦合研究取得的结果一致;维生素C是人体所需的营养物质,也是番茄品质的重要评价指标之一,增施氮素可提高维生素C含量,过量施氮效果相反,本试验在等氮量条件下,随着沼液替代氮肥比例的降低,番茄维生素C含量呈现开口向下抛物线趋势,可能是本试验使用含钾浓度较高的尾菜发酵沼液,钾素与维生素C合成有关的抗坏血酸过氧化物酶相互作用,由此提高维生素C的合成^[38];温室大棚栽培番茄的含水量通常为75%~95%,沼液内的超氧化物歧化酶(SOD)可以适当抵抗土壤胁迫和调节番茄叶片气孔导度^[39],进而降低叶片蒸腾速率使植株保持充足水分,提高番茄含水量^[40];此外,可溶性糖作为可溶性固形物的重要构成物质,相关性达到72%^[41],配施沼液使可溶性糖与可溶性固形物等风味品质指标有相同变化趋势,吕磊等^[42]认为沼液浓度降低会影响作物糖分的积累,降低可溶性糖含量,取得结果与本试验一致,原因是氮肥施用在番茄生长前期增加转化酶含量,导致可溶性糖的增加,特别是蔗糖含量的增加,随着后期生育期呼吸速率较高消耗更多可溶性糖^[43],导致可溶性糖含量降低;但果实蔗糖和己糖等可溶性糖是一个复杂的多基因性状,同化物输入、水分稀释、糖分代谢转化^[44]、环境因素和农艺管理都可影响番茄可溶性糖含量,目前对该影响机理解释各有千秋,后续可参考陈金亮等^[45]通过动态模拟对各影响因素与糖分代谢相结合进行深入研究。

3.3 沼液替代氮肥模式的适宜评价

针对多属性决策问题,至今已形成多种评价排序方法,本研究采用TOPSIS法、灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序法和VIKOR法4种单一方法对沼液替代氮肥不同处理的品质各指标进行综合评价,灰色关联分析法、VIKOR法得出排序结果一致,与其余2种方法结果存在差异,TOPSIS法、灰色关联分析法、VIKOR法均得出T2排名第一,对称交互熵多属性排序法得出排名第一为T1,原因可能是单一评价方法对评价信息的评判角度不同,对数据信息利用及思考维度不一致,无法对研究结果进行全面、科学的评价^[12]。组合单一评价方法可以减少评价产生的片面性,使结果更为科学、客观和符合实际^[16-18]。本研究运用均值法、模糊Borda法和Copeland法对4种单一评价结果进行重新组合,得到一致的排序结果(T2处理评分最高),说明整个组合评价方法体系的一致性,如果得到结果不一致,通过事后检验也可得到最佳组合^[16]。运用组合评价在充分发挥单一评价方法优点的同时降低了单一评价方法缺点造成的误差,综合并解决单一评价方法结果不尽一致的问题^[17],为沼液替代氮肥番茄模式的品质评价提供科学依据,在氮肥的减量化施用中发挥重要作用。

4 结 论

本研究基于作物养分平衡原理开展温室番茄沼液替代氮肥适宜模式及评价,主要结论如下:

1)基于番茄养分平衡原理的沼液替代氮肥适宜模式试验中,沼液替代氮肥处理番茄株高、茎粗均表现为 $T3>T4>T2>T1$,T3处理(沼液替代25%氮肥)有最优的番茄农艺性状;对番茄株高、茎粗的生长量进行Logistic曲线拟合,生长潜力及最大生长速率同样表现为: $T3>T4>T2>T1$ 。

2)氮肥与沼液的交互作用使T2有最大的干物质累积质量(336.4 g/株),并对番茄产量有明显提高作用,T2处理(沼液替代35%氮肥)的番茄产量(14.16 kg/m²)显著高于其他处理。在相同灌溉条件下,拟合沼液施用量与产量回归曲线,得出沼液施用量为0.467 19 L/m²时,番茄产量会达到最大值。

3)随着沼液替代氮肥比例的增加,可溶性糖、可溶性固形物含量呈现增长趋势,硝酸盐含量呈现降低趋势,可滴定酸、维生素C和含水量呈现开口向

下的抛物线趋势, T2处理(沼液替代35%氮肥)的番茄可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物、维生素C和含水量处于较高水平。

4)番茄综合品质各指标采用TOPSIS法、灰色关联分析法、对称交互熵多属性排序方法和VIKOR法进行单一方法评价后结果存在差异,运用3种组合方法组合4种单一评价结果,得到结果一致, T2处理(沼液替代35%氮肥)评分最高。

沼液替代氮肥能够提升温室番茄的农艺性状,提高作物品质及产量,结合农艺性状、产量、品质数据,采用组合评价发现, T2处理(沼液替代35%氮肥)为各处理中最适宜温室番茄生长的沼液替代模式。

参考文献 References

- [1] 农业部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[Z]. 中华人民共和国农业部公报, 2015(3): 19-27
Nong Y B. Notice of the ministry of agriculture on printing and distributing the action plan for zero growth of fertilizer use by 2020 and the action plan for zero growth of pesticide use by 2020[Z]. *Gazette of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China*, 2015(3): 19-27 (in Chinese)
- [2] 农业农村部. 农业农村部关于印发《到2025年化肥减量行动方案》和《到2025年化学农药减量行动方案》的通知[Z]. 中华人民共和国农业农村部公报, 2022(12): 11-19
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice of the ministry of agriculture and rural affairs on printing and distributing the action plan for reducing chemical fertilizer by 2025 and the action plan for reducing chemical pesticides by 2025[Z]. *Gazette of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China*, 2022(12): 11-19 (in Chinese)
- [3] Zheng J, Qi X Y, Feng L, Wang Y, Yang S H. Effects of NaOH pretreatment on the microbial community and its enzymatic activities in anaerobic digestion of chicken manure and straw[J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2021, 15(6): 826-834
- [4] Zheng J, Qi X Y, Shi C, Yang S H, Wu Y. Tomato comprehensive quality evaluation and irrigation mode optimization with biogas slurry based on the combined evaluation model[J]. *Agronomy*, 2022, 12(6): 1391
- [5] Zheng J, Zhang P A, Zhu C Y, Ma J, Wang Y. Tomato nutritional quality indexes under various biogas slurry and irrigation schemes [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2019, 22(6): 1271-1278
- [6] 郑学博, 樊剑波, 何园球, 崔健, 徐磊, 祝振球, 周静. 沼液化肥全氮配比对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 142-150
Zheng X B, Fan J B, He Y Q, Cui J, Xu L, Zhu Z Q, Zhou J. Effect of total nitrogen ratio of biogas slurry/chemical fertilizer on microflora and enzyme activities of soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19): 142-150 (in Chinese)
- [7] 柴彦君, 张睿, 江建锋, 姚光伟, 范志斌, 李艳, 李子川, 张进, 孟俊. 沼液化肥配施对芦笋地土壤肥力及芦笋品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 120-127
Chai Y J, Zhang R, Jiang J F, Yao G W, Fan Z B, Li Y, Li Z C, Zhang J, Meng J. Effects of the combined biogas slurry with chemical fertilizer on soil fertility and Asparagus quality in field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(5): 120-127 (in Chinese)
- [8] Troung E. Fifty years of soil testing[J]. *Transactions of 7th International Congress of Soil Science*, 1960, 7(3): 46-53
- [9] 吕开萌. 测土配方与生物有机肥配施对黄金小玉米与水果黄瓜生物效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020
Lv K M. Study on biological effects of soil testing formula combined with bio-organic fertilizer on golden corn and fruit cucumber [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [10] 罗庆华, 唐敦义, 曹庆良, 梁东. 测土配方施肥对水蜜桃桃园土壤理化性质和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(22): 113-119
Luo Q H, Tang D Y, Cao Q L, Liang D. Effects of formulated fertilization on soil physicochemical properties and fruit quality of "ball peach" [J]. *Northern Horticulture*, 2017(22): 113-119 (in Chinese)
- [11] Koritschoner J J, Whitworth Hulse J I, Cuchietti A, Arrieta E M. Spatial patterns of nutrients balance of major crops in Argentina [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159863
- [12] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(9): 1-13
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9): 1-13 (in Chinese)
- [13] Kumar A, Gandhi C P, Zhou Y Q, Tang H S, Xiang J W. Fault diagnosis of rolling element bearing based on symmetric cross entropy of neutrosophic sets[J]. *Measurement*, 2020, 152: 107318
- [14] 赵文举, 马锋, 曹伟, 马芳芳, 韩丽. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 95-101
Zhao W J, Ma F, Cao W, Ma F F, Han L. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(2): 95-101 (in Chinese)
- [15] 姜璐, 包怡红, 贾雨彤, 赖章飞, 徐福成. 18个品种蓝靛果营养成分分析及综合品质评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 326-335
Jiang L, Bao Y H, Jia Y T, Lai Z F, Xu F C. Nutritional component analysis and comprehensive quality evaluation of 18 different varieties of *Lonicera caerulea* [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(7): 326-335 (in Chinese)
- [16] 张智, 杨志, 黎景来, 张梦池, 李瑞, 贺代伟. 基于灰色关联与TOPSIS耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 302-311, 330
Zhang Z, Yang Z, Li J L, Zhang M C, Li R, He D W. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 302-311, 330 (in Chinese)
- [17] 胡田田, 何琼, 洪霞, 刘杰, 李鸿祥, 冯璞玉, 王丽, 杨硕欢. 基于模糊Borda组合模型评价番茄产量及品质对水肥供应响应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 142-151
Hu T T, He Q, Hong X, Liu J, Li H X, Feng P Y, Wang L, Yang S H. Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(19): 142-151 (in Chinese)
- [18] 郭显光. 一种新的综合评价方法: 组合评价法[J]. 统计研究, 1995,

- 12(5): 56-59
- Guo X G. A new comprehensive evaluation method: Combination evaluation method[J]. *Statistical Research*, 1995, 12(5): 56-59 (in Chinese)
- [19] Fu Y F, Zhang M. Research on credit portfolio evaluation of metaverse listed companies based on the fuzzy Borda method[J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 214: 1309-1316
- [20] DB62/T 836-2002. 兰州市无公害蔬菜生产技术规程 番茄[S]. 兰州: 中国标准出版社, 2002
- DB62/T 836-2002. Lanzhou City pollution-free vegetable production technical regulations Tomato[S]. Lanzhou: China Standard Press, 2002 (in Chinese)
- [21] 李祎雯, 曲英华, 徐奕琳, 韩艳霄, 林聪. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J]. 中国沼气, 2012, 30(3): 17-20, 24
- Li Y W, Qu Y H, Xu Y L, Han Y X, Lin C. Change of nutrition contents of biogas slurry with different fermentation raw materials[J]. *China Biogas*, 2012, 30(3): 17-20, 24 (in Chinese)
- [22] 徐鹤林, 李景富. 中国番茄[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007
- Xu H L, Li J F. Tomatoes in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese)
- [23] 郑健, 殷李高, 朱传远, 马静, 张平安. 施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 278-288
- Zheng J, Yin L G, Zhu C Y, Ma J, Zhang P A. Effects of digestate on tomato growth and soil ecological environment in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 278-288 (in Chinese)
- [24] Heuvelink E. Tomatoes[M]. Shanghai: Oxford Univ Pr, 2005
- [25] 马聪, 林坚. 基于熵权 TOPSIS 模型的耕地利用效益评价及障碍因子识别: 以东中西三地案例比较为例[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 196-210
- Ma C, Lin J. Evaluation of cultivated land use efficiency based on entropy TOPSIS model and identification of its obstacle factors: A case study of three regions in the east, middle and west of China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(8): 196-210 (in Chinese)
- [26] 杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 陈艳秋, 谭文. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 748-757
- Yang Z Q, Qiu Y X, Liu Z X, Chen Y Q, Tan W. The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 748-757 (in Chinese)
- [27] 杨雪妍, 刘佳琪, 李彦明, 陈清, 常瑞雪. 不同厨余沼液及其稀释倍数对黄瓜和萝卜种子萌发的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(12): 86-91
- Yang X Y, Liu J Q, Li Y M, Chen Q, Chang R X. Effects of different kitchen waste biogas slurry and its dilution multiples on seed germination of cucumber and radish[J]. *China Vegetables*, 2022(12): 86-91 (in Chinese)
- [28] Gao M X, Wang D M, Wang Y B, Wang X J, Feng Y Z. Opportunities and challenges for biogas development: A review in 2013-2018 [J]. *Current Pollution Reports*, 2019, 5(2): 25-35
- [29] Curadelli F, Alberto M, Uliarte E M, Combina M, Funes-Pinter I. Meta-analysis of yields of crops fertilized with compost tea and anaerobic digestate[J]. *Sustainability*, 2023, 15(2): 1357
- [30] Panuccio M R, Papalia T, Attinù E, Giuffrè A, Muscolo A. Use of digestate as an alternative to mineral fertilizer: Effects on growth and crop quality[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(5): 700-711
- [31] 刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 刘庆平, 闫立龙. 秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2528-2536
- Liu C, Zheng Y Q, Liu S, Liu Q P, Yan L L. Effects of biogas slurry application on nitrogen loss soil in black soil area during the autumn fallow period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2528-2536 (in Chinese)
- [32] Liu B, Wang X Z, Ma L, Chadwick D, Chen X P. Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 269: 116143
- [33] 白文明, 张伟丽, 侯亚方, 夏美娟, 宫香伟, 王鹏科, 高小丽, 高金锋. 不同氮肥处理对燕麦干物质积累、农艺性状及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(2): 38-47
- Bai W M, Zhang W L, Hou Y F, Xia M J, Gong X W, Wang P K, Gao X L, Gao J F. Effects of different nitrogen treatments on the dry matter accumulation, agronomic traits and yield of buckwheat [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(2): 38-47 (in Chinese)
- [34] 郑健, 向鹏, 孙强, 康健, 王燕. 生物炭混掺对沼液间接地下滴灌土壤水力特性的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 340-351, 404
- Zheng J, Xiang P, Sun Q, Kang J, Wang Y. Effect of biochar mixing on soil hydraulic characteristics of biogas slurry indirect subsurface drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 340-351, 404 (in Chinese)
- [35] 刘金. 沼液与其它肥源耦合在番茄有机基质培中的应用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013
- Liu J. Study on the application of biogas slurry coupled with other fertilizer sources in tomato organic substrate culture [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [36] 董彩霞, 徐新娟, 卢颖林, 周毅, 沈其荣. 不同形态氮素调控番茄果实和叶片内有机酸代谢的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(3): 139-145
- Dong C X, Xu X J, Lu Y L, Zhou Y, Shen Q R. Recent advances in organic acid metabolism in tomato fruit and leaves regulated by different nitrogen forms [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(3): 139-145 (in Chinese)
- [37] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 范军亮, 张燕, 李静. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 110-121
- Xing Y Y, Zhang F C, Wu L F, Fan J L, Zhang Y, Li J. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 110-121 (in Chinese)
- [38] Noctor G, Foyer C H. Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49: 249-279
- [39] 万海文. 沼液对土壤养分和玉米、小麦生理特性及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- Wan H W. Effects of biogas slurry on soil nutrients, physiological characteristics and yield of corn and wheat [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese)
- [40] 康群. 沼液水培植物的环境胁迫与生理适应研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2018
- Kang Q. Study on environmental stress and physiological adaptation of hydroponic plants with biogas slurry [D]. Wuhan: Hubei University, 2018 (in Chinese)
- [41] Bastías A, López-Climent M, Valcárcel M, Rosello S, Gómez-Cadenas A, Casaretto J A. Modulation of organic acids and sugar content in tomato fruits by an abscisic acid-regulated transcription factor [J].

- Physiologia Plantarum*, 2011, 141(3): 215-226
- [42] 吕磊. 猪粪沼液浇灌对土壤质量和四种蔬菜作物生长的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022
- Lv L. Effects of pig manure biogas slurry irrigation on soil quality and growth of four vegetable crops [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022 (in Chinese)
- [43] Kjellenberg L, Johansson E, Gustavsson K E, Granstedt A, Olsson M E. Influence of organic manures on carrot (*Daucus carota* L.) crops grown in a long-term field experiment in Sweden [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2016, 31(3): 258-268
- [44] Wang Z P, Deloire A, Carbonneau A, Federspiel B, Lopez F. An in vivo experimental system to study sugar phloem unloading in ripening grape berries during water deficiency stress [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92(4): 523-528
- [45] 陈金亮. 番茄果实生长和糖分模拟及节水调质优化灌溉决策研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016
- Chen J L. Study on tomato fruit growth and sugar simulation and optimal irrigation decision-making of water-saving conditioning [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



通讯作者简介: 郑健,工学博士,教授,博士生导师,甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室副主任。主要从事水资源高效利用与转化、可再生能源与环境方面的研究工作。近年来,主持完成国家自然科学基金项目3项,省部级项目10余项,参与完成国家重大研发计划项目1项、国家国际科技合作项目2项。发表学术论文60余篇,SCI/EI收录28篇。研究成果获省部级科技奖励一、二等奖各1项,厅局级科技奖励一等奖5项。