

不同生育阶段水/沼液一体化灌溉对 番茄生长及产量和品质的影响

郑健^{1,2,3}, 朱传远^{1,2,3}, 齐兴赞^{1,2,3}, 魏佳芳¹, 杨少鸿^{1,2,3}, 孙强^{1,2,3}

(1.兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2.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; 3.西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050)

摘要:【目的】探究在番茄不同生育阶段施加沼液对其产生的影响, 优化西北地区温室番茄水/沼液一体化灌溉模式。【方法】采用沼液浓度 1:4 的溶液(沼液:水, 体积比)分别在番茄的苗期(P1 处理)、开花作果期(P2 处理)、果实膨大期(P3 处理)和果实成熟期(P4 处理)施用, 并设置了不施用沼液的对照(CK), 共 5 个处理, 并在番茄不同生育阶段中测定了相关的生长生理及果实营养品质指标, 分析番茄植株生长和糖分积累动态过程及产量品质在不同生育时期对水肥的响应。【结果】不同沼液处理均能促进番茄的生长以及干物质、产量和品质的形成; P2 处理最有利于番茄叶面积的生长, P3 处理次之, 分别较 CK 增加了 48.32% 和 36.89%; P3 处理更有利于果实干物质积累, 较 CK 增加了 47.18%; 可溶性糖、可滴定酸、糖酸比和硬度以 P3 处理最优, 维生素 C 和可溶性固形物以 P2 处理最优。【结论】基于 TOPSIS 法的综合效益评价结果表明番茄的果实膨大期为产量品质形成的关键阶段, 应当适度增加水肥的投入; 果实成熟期的番茄对水肥的响应不明显, P4 处理(1:4, 沼液:水, 体积比)水肥调控, 可获得最适宜番茄吸收利用的水肥灌溉方案。

关键词: 番茄; 沼液; 生育阶段; 层次分析法; 熵权法; TOPSIS

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021164

OSID:



郑健, 朱传远, 齐兴赞, 等. 不同生育阶段水/沼液一体化灌溉对番茄生长及产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 64-71.

ZHENG Jian, ZHU Chuanyuan, QI Xingyun, et al. The Effects of Irrigation with Diluted Biogas Slurry on Growth, Yield and Fruit Quality of Tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 64-71.

0 引言

【研究意义】中国是世界上番茄种植面积最大, 产量最多的国家, 年产番茄约 5 500 万 t, 占蔬菜总量的 7% 左右, 种植面积约为 24.67 万 hm^2 ^[1]。近年来, 随着人们生活水平的日益提高, 对番茄的品质提出了更高的要求, 使得通过农业生产管理措施的改善, 获得兼具高产且品质优良的番茄就显得尤为重要^[2]。

【研究进展】水分和养分对作物生长及产量品质的形成作用并不是孤立的, 二者之间是相互作用、相互影响^[3-4], 水是养分向根系迁移的介质, 作物生长发育所需要的水分和养分都是通过根系从土壤中吸收, 根系对水分和养分汲取量取决于作物生长时期^[5]。合理的养分投入可以促进作物根系生长发育, 扩大作物获取水分和养分的土壤空间, 提高作物根系的活性。

因此, 通过水肥的调控, 可以对作物生长、产量和品质的形成产生一定影响^[6-8]。目前现有的研究多集中于水和化肥协同对作物生长、产量和品质的影响^[9-10], 而且化肥长期施用会引起土壤板结和酸化^[11], 因此, 近年来国内外的众多研究学者和政府机构都建议在肥料的施用中采用有机肥来替代化肥^[12-13]。沼液作为沼气生产的副产物, 富含大量的水解酶(纤维素酶、淀粉酶等)、有机物、无机盐类(铵盐、磷酸盐等)以及大量的营养元素(N、P、K 等), 有助于促进作物生长发育。沼液相比于化肥更容易被作物吸收利用, 被认为是一种高效有机肥, 广泛地应用于农业生产中^[14-15]。沼液具有高水低肥的特性, 不科学的施用会产生作物产量品质下降、土壤退化和地下水污染等问题^[16-17]。因此, 有必要开展沼液施用模式研究。

合理水肥利用模式的获得, 要求不仅要考虑产量或某项单一品质指标, 更要从产量、品质、水肥利用效率等多指标进行综合分析^[18]。目前, AHP 法、熵权法和 TOPSIS 法相结合在工程、经济以及农业领域都已经成功应用^[19-21]。如高金花等^[22]采用 AHP-

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969012); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目计划项目(2018CXY-14); 兰州理工大学红柳一流学科建设计划项目(0807J11); 甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2019C-13)
作者简介: 郑健(1981-), 男, 甘肃会宁人。副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail: zhj16822@126.com

熵权法对农业节水技术综合效益评价；邵毅明等^[23]基于熵权法和 TOPSIS 法的短时交通流预测模型性能综合评价；张桂莲等^[24]基于“TOPSIS-AHP”模型的城市绿化生态技术集成方案优选。

【切入点】将 AHP 法和熵权法相结合确定指标权重，并采用 TOPSIS 评价方法来探究番茄不同生育时期水肥施加量对番茄生长状况及产量和品质的研究还较少。【拟解决的问题】为此，设计沼液质量浓度（1：4，沼液：水，体积比）在番茄不同生育时期进行施用，分析番茄的叶面积、干物质量、产量和品质的响应规律。同时建立综合评价指标体系，采用 AHP 法和熵权法确定评价指标的权重，通过 TOPSIS 评价方法获得综合评价指标评价排序和函数变幅值，为番茄水/沼液一体化技术模式的推广及应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在甘肃省兰州市魏岭乡狗牙村的设施蔬菜水肥一体化示范点的温室大棚进行（北纬 36°2'23"，东经 103°42'39"）。试验区域海拔 1 861.3 m，日照充足，干旱少雨，属温带大陆性气候，年平均气温 10.5℃，无霜期 150 d 左右，年平均降水量 352 mm，且多集中在夏、秋二季，年平均蒸发量 1 175.0 mm。

1.2 试验材料

供试番茄品种为中研 958F1。试验于 2018 年 3 月 19 日定植，定植时番茄幼苗为三叶一心，定植后每株灌溉 2 000 mL 保苗水，7 月 21 日拉秧结束试验。番茄各生育时期的取样时间分别于苗期（4 月 18 日）、开花作果期（5 月 14 日）、果实膨大期（6 月 7 日）、果实成熟期（7 月 21 日）进行取样，测定番茄生理生长指标及产量品质指标。沼液是兰州市花庄镇荷斯坦奶牛养殖中心沼气池正常发酵，理化性质稳定，沼液从正常产气的沼气池抽出，经曝气静置 2 个月，待其理化性质稳定后，采用 4 层纱布过滤备用。沼液养分量：全氮 1.148 g/L，全磷 0.571 g/L，有机质 10.31 g/L。试验温室内土壤黏粒、砂粒和粉粒质量分数分别为 40.12%、38.62%、21.26%。种植前测得 0~60 cm 深度土壤养分状况为：有机质 9.16 g/kg，全氮 0.612 g/kg，全磷 1.573 g/kg。1 m 土体土壤平均体积质量 1.34 g/kg，田间持水率为 23.25%（质量含水率），0~60 cm 土壤平均含水率为 15.35%。

1.3 试验设计与布置

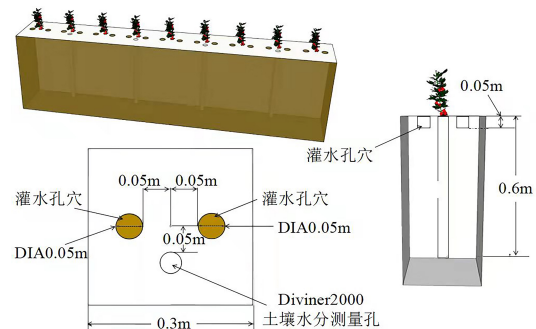
温室大棚长 67 m，宽 8.4 m，高 4 m，小区间掩埋 1 m 深的塑料膜做防渗隔离，防止各小区水肥相互渗透，影响试验结果。小区采用当地典型的沟垄覆膜

种植模式，单垄种植，垄宽 30 cm，行距 60 cm，株距 60 cm，每个处理定植 11 株。试验设置 5 个处理（CK、P1、P2、P3、P4 处理），每个处理重复 3 次，随机区组排列。CK 为对照，番茄全生育期采用纯水灌溉；P1—P4 处理分别在番茄的苗期、开花作果期、果实膨大期和果实成熟期施用 1：4 的沼液（沼液：水，体积比），具体试验方案如表 1 所示。灌溉量计算为^[25]： $W=Kp \times S \times Ep$ ，其中 Kp 为作物-蒸发皿系数，本试验取 0.6； S 为小区控制面积，本试验取 30 cm×60 cm， Ep 为 $\phi 20$ cm 标准蒸发皿 2 次灌水间隔的累计蒸发量，蒸发皿放置在与作物冠层同高的位置。灌溉方式为穴孔灌溉^[26]，穴孔布置在沿垄方向番茄植株两侧，距离植株均为 8 cm 处，灌溉频次设置为 2 d/次，施沼频次为 4 d/次，间隔灌溉清水（图 1）。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	苗期	开花坐果期	果实膨大期	成熟期
P1	沼液（1：4）	水	水	水
P2	水	沼液（1：4）	水	水
P3	水	水	沼液（1：4）	水
P4	水	水	水	沼液（1：4）
CK	水	水	水	水



(a) 装置示意



(b) 地面布设

图 1 试验装置及土壤剖面探测设备

Fig.1 Experimental setup and soil profile detection equipment.

1.4 测定项目与方法

土壤体积质量和孔隙度^[27]用环刀法测定，环刀规格为（内径 50 mm，高 51 mm）；土壤含水率采用土壤水分廓线仪（Diviner2000）测定，深度为 60 cm，

4 d 测 1 次；同时，在番茄各生育阶段用土钻取土，土样采用烘干法测定，每个生育阶段 1~2 次；指示剂测定方法：可溶性固形物用 WAY-2S 型阿贝折射仪测定。采用钼蓝比色法^[28]测定维生素 C。采用蒽酮比色

法^[29]测定可溶性总糖。用 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定法^[30]测定可滴定酸酸度。各处理在不同的生育期内施用纯沼液量及水量见表 2。

表 2 试验在各生育期单株纯沼液施用量

Table 2 Application amount of biogas slurry per plant in each growth period

生育期	纯沼液量（水量）/mL				
	CK	P1	P2	P3	P4
苗期	(5 303)	1 060.6 (4 242.4)	(5 303)	(5 303)	(5 303)
开花作果期	(4 223)	(4 223)	844.6 (3 378.4)	(4 223)	(4 223)
果实膨大期	(6 100)	(6 100)	(6 100)	1 220 (4 880)	(6 100)
果实成熟期	(8 197)	(8 197)	(8 197)	(8 197)	1 639.4 (6 557.6)

注 表内数值为番茄单株纯沼液施用量，括号中的数值为单株纯水施用量。

试验结束时，叶面积采用图像法^[31-33]测定，收集番茄叶片样本，从中获取图像，采用边缘检测对图像的叶片截面进行识别。干物质采用烘干法测定，每个生育阶段各取样 4 次，分别测定植株根、茎、叶、果干物质质量。根系干质量和地上部分干质量测定时，先将取样的番茄植株从茎基部剪下，获得完整的冠部，然后将植物地上各部分分开，擦拭表面尘污后立即称其鲜质量，根系取样面积为植株周围 30 cm×60 cm（其中沿垄方向植株两侧距离 30 cm，垂直垄向植株两侧距离 15 cm），取样深度 60 cm，然后将其浸泡在盆中，到土体变得松散时冲洗根系，采用吸水纸吸干根系表面水分后测定其鲜质量，自然风干后和地上各部分分别放入信封内，在 105 ℃干燥杀青 30 min，并在 75 ℃下干燥至恒质量，用 1/100 电子天平称取干质量。

测定各试验处理果实总产量，取算数平均值作为单株产量计算值。采用 Excel 2010 软件进行基于熵权法的各评价指标权重计算，以及基于 TOPSIS 法的综合评价指标评价排序和函数变幅值计算；采用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 叶面积响应规律

图 2 为沼液生育期调控对番茄叶面积的影响。从图 2 可以看出，各处理叶面积在全生育期均呈先增大后减小的变化趋势，在果实膨大期叶面积达到最大值；苗期采用沼液灌溉的 P1 处理，其叶面积明显高于其他各处理，分别比 CK、P2、P3 处理和 P4 处理高 15.56%、15.24%、15.74%和 16.09%，其他处理之间叶面积无明显差异；开花作果期采用沼液灌溉处理的 P2 处理，叶面积大幅提升，为各处理最高，分别比 CK、P1、P3 处理和 P4 处理高 50.75%、10.02%、49.93%和 48.96%，P1 处理因在苗期采用沼液灌溉处理，与 P2 处理之间差异较小；果实膨大期 P2 处理叶面积为

各处理最高，P3 处理叶面积增幅最大，达到 100.88%；果实成熟期除 P4 处理外各处理叶面积较果实膨大期均出现了下降，CK、P1、P2 处理和 P3 处理分别下降了 1.14%、5.23%、4.06%和 6.06%。说明不同生育阶段进行水/沼液一体化灌溉会对番茄叶面积产生明显差异，在开花坐果期进行水/沼液一体化灌溉最有利于番茄叶面积的增加。

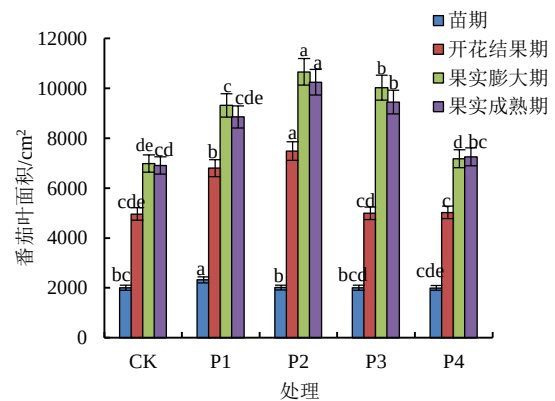


图 2 沼液不同生育期调控对番茄叶面积的影响

Fig. 2 Effects of biogas slurry at different growth stages on leaf area of tomato

2.2 干物质响应规律

从表 3 可以看出，不同处理番茄的总干物质积累量表现为 P3 处理>P2 处理>P1 处理>P4 处理>CK，P3、P2、P1 和 P4 处理较 CK 分别增加了 47.18%、39.22%、17.67%、17.32%；果实的干物质积累量/总干物质积累量的大小表现为 P3 处理>P1 处理>P4 处理>P2 处理>CK，P3、P1、P4、P2 处理和 CK 果实干物质积累量占总干物质质量占比分别为 68.68%、67.30%、65.07%、64.51%、60.06%。表明番茄的干物质主要体现在果实。从各处理总干物质质量、果实的干物质质量以及果实干物质积累量占总干物质质量占比来看，P3 处理最高，达到 406.69、279.32 g 和 68.68%，P2 处理次之分别为 384.70、248.17 g 和 67.30%。说明果实膨大期和开花作果期是番茄干物质形成的关键生育

阶段，充分的水肥供应可以显著提高番茄的产量和干物质的形成。

表 3 沼液不同生育时期调控对番茄干物质质量影响

Table 3 Effects of biogas slurry at different growth stages on dry matter quality of tomato

处理	根	茎	叶	果	总干物质质量/g
CK	5.74 ^{cd}	54.68 ^{bc}	49.94 ^{cd}	165.96 ^{de}	276.32 ^{de}
P1	6.11 ^{bc}	52.44 ^{cd}	47.76 ^{cde}	218.84 ^c	325.15 ^c
P2	7.31 ^a	63.96 ^a	65.26 ^a	248.17 ^b	384.70 ^b
P3	7.24 ^{ab}	62.12 ^{ab}	58.01 ^b	279.32 ^a	406.69 ^a
P4	5.61 ^{cde}	50.37 ^{cde}	57.24 ^{bc}	210.95 ^{cd}	324.17 ^{cd}

注 同列不同字母表示 $P<0.05$ 水平下差异显著 (Duncan 检验)，下同。

2.3 产量品质

图 3 为在不同生育期施用沼液对番茄产量的影响。番茄产量从第 1 穗果实成熟到第 5 穗成熟，数据统计至第 5 穗果实成熟采摘结束。从图 3 可以看出，CK 最低，P3 处理最高。在整个生育期内，番茄产量排序为 P3 处理>P2 处理>P4 处理>P1 处理>CK，各沼液处理比 CK 分别高 22.57%、16.25%、11.06%和 4.97%。不同生育期水肥供应对番茄产量影响差异不同。不同生育期施用沼液产量差异性排序为：果实膨大期>开花作果期>果实成熟期>苗期。苗期水肥供应对番茄产量影响最小，开花作果期、果实膨大期和果实成熟期水肥供应对番茄产量影响显著，果实膨大期水肥供应对番茄产量影响最为显著。

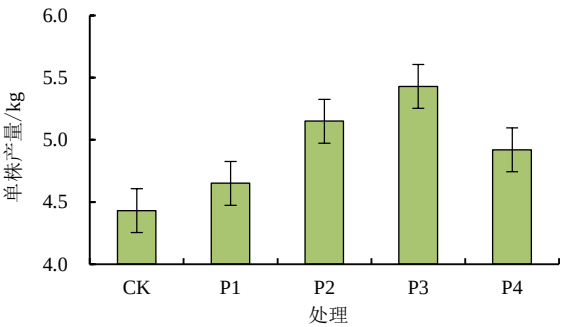


图 3 各处理单株产量

Fig.3 Yield per plant in each treatment

番茄品质性状包括商品品质、感官品质和营养品质 3 个主要方面^[34]，能反映番茄的质地、外观、口感的指标称为番茄的品质指标，可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物、硬度、番茄红素、有机酸等都属于番茄品质指标；本研究选取可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物、硬度作为品质指标进行对比分析，其中，糖酸比是衡量番茄风味的品质指标^[35]；维生素 C 被认为是衡量番茄的营养品质的指标；而番茄果实硬度小不利于运输，容易裂果，不但会造成经济损失而且会影响番茄的风味和营养价值^[36]。表 4 是沼液在番茄不同生育期调控

对番茄品质的影响，从表 4 可以看出，可溶性糖以 CK 最低，以 P3 处理最高，P3 处理较 CK 增加了 55.83%，P1 处理和 P4 处理无显著性差异 ($P>0.05$)，分别较 CK 增长了 34.97%、33.06%；可滴定酸以 P3 处理最高，CK 最低，较 CK 增长了 17.10%；糖酸比以 CK 最低，P3 处理最高，P3 处理较 CK 增加了 33.02%；维生素 C 以 CK 最低，P2 处理最高，较 CK 增加了 24.42%；可溶性固形物以 CK 最低，P2 处理最高，较 CK 增加了 30.0%；硬度以 CK 最低，P3 处理最高，较 CK 增加了 48.73%。与 CK 相比，沼液在番茄不同生育阶段进行水肥供应调控，可溶性糖、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物、硬度均有提升。

表 4 沼液不同生育期调控对番茄品质的影响

Table 4 Effects of biogas slurry at different growth stages on quality of tomato

处理	可溶性糖/%	可滴定酸/%	糖酸比	维生素 C/(mg·(100g) ⁻¹)	可溶性固形物/%	硬度
CK	2.574 ^d	0.269 ^d	9.57 ^e	32.52 ^e	5.10 ^e	5.11 ^e
P1	3.474 ^c	0.306 ^b	11.35 ^d	34.54 ^d	5.28 ^d	6.38 ^c
P2	3.559 ^b	0.301 ^b	11.82 ^c	40.46 ^a	6.63 ^a	6.51 ^b
P3	4.011 ^a	0.315 ^a	12.73 ^a	38.96 ^b	5.56 ^b	7.60 ^a
P4	3.425 ^c	0.287 ^c	11.93 ^b	38.08 ^c	5.36 ^c	6.16 ^d

2.4 综合评价模型的建立

采用层次分析法 (AHP)，选取叶面积、干物质质量、产量、可滴定酸、糖酸比、可溶性固形物、硬度、维生素 C、可溶性糖 9 项指标构建了评价指标体系 (表 5)。

2.5 番茄单一指标权重的确定

1) AHP 法番茄单一营养生长指标权重的确定。层次分析法 (AHP) 是一种定性和定量相结合的分析方法，根据番茄单一指标间的层次关系，构建的具有不完全层次关系的营养生长指标体系 (表 5)，然后采用 L-A-Medal 比率标度法^[37]，通过因素两两之间比较来构建判断矩阵，从而计算各层次相应指标的局部权重和最终权重 (表 5)，最后采用 yaahp 软件进行分析。

2) 基于熵权法番茄单一营养生长指标权重的确定。用番茄单一营养生长指标构造指标矩阵，建立基于熵权的多目标决策评价指标体系，采用熵权法 (EWM)^[38]计算各项评价指标的客观权重 (表 6，具体计算方法参见文献^[39])。从表 6 可以看出，番茄各单一营养生长指标对不同生育阶段水肥供应处理所确定的权重排序为，叶面积>可溶性糖>总干物质质量>硬度>可溶性固形物>糖酸比>维生素 C>产量>可滴定酸。由各指标权重可知，与生理生长相比，营养品质指标总体略高，叶面积最大，可滴定酸最小。

表 5 判断矩阵和层次分析法 AHP 权重计算结果

Table 5 Calculation results of AHP weight based on Judgment Matrix and AHP

权重	生长生理指标 (B1)			营养品质指标 (B2)					
	叶面积 C11	干质量 C12	产量 C13	可滴定酸 C21	糖酸比 C22	可溶性固形物 C23	硬度 C24	维生素 C C25	可溶性糖 C26
W_j	0.082	0.343	0.575	0.037	0.065	0.097	0.146	0.253	0.402
ω_j	0.022	0.094	0.158	0.027	0.047	0.070	0.106	0.184	0.292

注 W_j 表示相应元素对目标层 j 的重要性权值, 为局部权重, W_{j1} 和 W_{j2} 以此类推; ω_j 表示 j 层相应元素对总目标的最终重要性权值, ω_{j1} 和 ω_{j2} 以此类推。

表 6 基于熵权法确定番茄单一营养生长指标的权重

Table 6 Determining the weight of single vegetative growth index of tomato based on entropy weight method

指标	叶面积/cm ²	总干物质质量/g	产量/g	可溶性糖/%	可滴定酸/%	糖酸比	维生素 C/(mg (100g) ⁻¹)	可溶性固形物/%	硬度
θ_i	0.207 5	0.171 0	0.047 6	0.179 1	0.027 5	0.079 9	0.058 8	0.083 6	0.145 0

3) 番茄单一营养生长指标的最终权重。为了准确客观地评价各指标的重要性, 有必要进行权重的集化, 将指标的主观(AHP法)和客观(熵权法, EWM)的权重值进行融合, 确定番茄单一营养生长指标的最终权重(表7)。

$$\gamma_{ij} = \theta_j \omega_j / \sum_{j=1}^n \theta_j \omega_j \quad (j=1, 2, \dots, 7)$$

式中: ω_j 和 θ_j 分别利用 AHP 法和熵权法确定的第 j 个评价指标权重。

表 7 基于层次分析法和熵权法番茄单一营养生长指标的最终权重

Table 7 Final weight of tomato single vegetative growth index based on analytic hierarchy process and entropy weight method

指标	叶面积/cm ²	总干物质质量/g	产量/g	可溶性糖/%	可滴定酸/%	糖酸比	维生素 C/(mg (100g) ⁻¹)	可溶性固形物/%	硬度
ω_i	0.039 0	0.137 4	0.064 3	0.447 0	0.006 4	0.032 1	0.050 0	0.047 0	0.131 4

2.6 基于 TOPSIS 方法的番茄综合效益评价

TOPSIS 根据最靠近最优解和最远离最劣解的原则来进行排序^[40]。基于熵权法的 TOPSIS 法综合评价^[41]指标及其排序如表 8 所示, 从总体评价排序可以看出, P3 处理贴近期度最高, P2 处理次之, 说明在番茄果实膨大期和开花作果期施加养分, 可使果实产量和品质达到最优水平。同时也表明番茄全生育期中果实膨大期水肥需求最大, 在此时期施加水肥可以获得较高的番茄产量, 并兼具较好的品质。

表 8 TOPSIS 法综合评价指标及其排序

Table 8 Comprehensive evaluation indexes and their ranking by TOPSIS method

处理	d_i^+	d_i^-	f_i	排序
P1	0.017 0	0.024 6	0.592 1	3
P2	0.012 8	0.028 5	0.689 7	2
P3	0.002 2	0.040 8	0.949 2	1
P4	0.018 2	0.023 3	0.561 5	4
CK	0.041 0	0.000 0	0.000 0	5

3 讨论

叶面积和干物质质量是反映植物生理生化指标、衡量植物有机物积累、营养成分多寡、作物栽培技术等方面的重要指标, 对于深入研究光合效率、蒸腾速率和逆境胁迫等生理指标有重要意义^[42]。本研究中番茄不同生育阶段施用沼液处理与 CK 相比均可提高番茄的单株叶面积和干物质积累量, 但不同生育阶段施用沼液对番茄干物质积累量和叶面积的影响存在差异, 番茄膨大期施用沼液的 P3 处理, 干物质积累量和叶

面积均为各处理最高, 开花坐果期施用沼液的 P2 处理次之, 苗期施加沼液的 P1 处理和果实成熟期施用沼液的 P4 处理对番茄叶面积影响不大。说明番茄叶面积和干物质形成的主要阶段在开花坐果期和果实膨大期。分析上述规律产生的主要原因是番茄苗期主要以营养生长为主, 根茎叶干物质积累速率相对较快, 在该阶段施加沼液主要用于番茄的茎叶生长, 在番茄以生殖生长为主的阶段(开花坐果期、果实膨大期和果实成熟期)中存在养分供给不足, 使得最终干物质质量较低。果实成熟期的中后期, 番茄营养生长迅速减弱, 大量叶面出现萎蔫、脱落, 营养物质主要集中于果实中各物质的形成, 同时 P4 处理仅在果实成熟期施用沼液, 而番茄产量的形成关键在果实膨大期, 使得该处理叶面积和干物质质量均较低。王萍^[43]在番茄不同生育阶段采用不同营养液浓度调控番茄干物质质量的研究中也获得了相应的结果。作物不同生育期采用不同水肥施用模式有不同的增产效果^[44]。本研究中施用沼液各处理番茄产量情况为: P3 处理>P2 处理>P4 处理>P1 处理, 在果实膨大期施用沼液的 P3 处理最高, 在开花坐果期施用沼液的 P2 处理次之, 在苗期施用沼液的 P1 处理最低。进一步验证了作物产量形成的敏感阶段为开花坐果期和果实膨大期, 同时也说明作物不同生育阶段施肥不但会影响作物产量的形成, 而且还会对作物果实品质指标产生影响^[45-47]。

从番茄品质指标来看, 在番茄不同生育期施加沼液, 可溶性糖、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物、

硬度较 CK 均有所改善。P3 处理的可溶性糖、可滴定酸、糖酸比和硬度指标均为各处理最高, 而维生素 C 和可溶性固形物指标为 P2 处理最好, P3 处理次之。说明对番茄品质指标影响最显著的生育阶段在番茄的开花坐果期和果实膨大期。初步分析主要因为, 开花坐果期和果实膨大期是番茄主要的生殖生长阶段, 作物汲取的大部分养分集中于作物生殖器官的生长繁育, 使得在这 2 个生育阶段进行水肥调控时, 对作物产量的形成和品质指标的改善都产生了显著影响。张瑜等^[48]对不同施氮量对油桃产量和品质的影响研究, 以及韩启厚等^[49]对不同生育时期施钾对番茄生长发育及蔗糖代谢调控的研究均获得了近似的研究结果。本试验将 AHP 法和熵权法相结合确定指标权重, 并采用 TOPSIS 评价方法来探究番茄不同生育时期水肥施加量对番茄生长状况及产量和品质进行评价, 可为提高番茄不同生育阶段营养生长提供科学依据, 使在合理有效的施用沼液资源的同时减少化肥施用量。

4 结 论

1) 番茄叶面积和干物质积累量的大小受沼液施用影响显著, 各沼液处理较 CK 均有所提高; 最大值出现在 P2 处理和 P3 处理的果实膨大期为 10 654.5 cm²/株和 406.69 g/株。

2) 不同生育期水肥供应对番茄产量影响存在差异; 苗期和果实成熟期施用沼液随番茄产量影响较小, 影响最大的生育期为果实膨大期, 其次为开花坐果期。实际生产中可以按此规律调整生育期内施肥量的分配。

3) 沼液在番茄不同生育阶段进行水肥供应调控, 可溶性糖、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物、硬度均有所提升; 可溶性糖、可滴定酸、糖酸比和硬度以果实膨大期施用沼液最优, 维生素 C 和可溶性固形物以开花作果期施用沼液最优; 果实膨大期是影响番茄综合营养品质的主要时期, 其次是开花作果期。

4) 基于 TOPSIS 法的番茄综合效益评价指标优属度排序为: 果实膨大期>开花作果期>苗期>成熟期, 表明番茄的果实膨大期是番茄生长和产量品质形成的关键阶段, 应当适当增加水肥的投入。果实成熟期, 番茄生长和营养品质基本完成, 对水肥的响应不明显, 在进行(1:4, 沼液:水, 体积比)水肥调控, 可获得最适宜番茄吸收利用的水肥灌溉方案。

参考文献:

- [1] 费超, 丁效东. 设施番茄施镁提质增产效果显著[J]. 中国农资, 2020(19): 12.
- [2] ZHANG Y, WANG P J, WANG L, et al. The influence of facility agriculture production on phthalate esters distribution in black soils of northeast China[J]. The Science of the Total Environment, 2015, 506/507: 118-125.
- [3] XIANG M, LIU F Q, ZHOU S J, et al. Investigation of preparation of biochar-based sustained release fertilizer from filter mud of sugar Mills and its properties[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 453(1): 012 090.
- [4] BHADURI D, PURAKAYASTHA T J, PATRA A K, et al. Biological indicators of soil quality in a long-term rice-wheat system on the Indo-Gangetic plain: Combined effect of tillage-water-nutrient management[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(5): 1-14.
- [5] 李琬. 干旱对大豆根系生育的影响及灌溉缓解效应研究进展[J]. 草业学报, 2019, 28(4): 192-202.
- [6] AGEgnehu G, AMEDE T. Integrated soil fertility and plant nutrient management in tropical agro-ecosystems: A review[J]. Pedosphere, 2017, 27(4): 662-680.
- [7] 刘洋. 水肥调控对设施番茄生长和土壤改良作用的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [8] 严毅, 张夸云, 陈金龙, 等. 水肥调控对油橄榄光合特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(2): 173-178.
- [9] 刘思汝, 石伟琦, 马海洋, 等. 果树水肥一体化高效利用技术研究进展[J]. 果树学报, 2019, 36(3): 366-384.
- [10] 臧小平, 井涛, 陈宇丰, 等. 不同滴灌施肥配比对香蕉产量、养分利用及经济效益的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 66-71.
- [11] CHEN D M, YUAN L, LIU Y R, et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 90: 34-42.
- [12] DONG Jiaxi, TIAN Xiuping, TAN Yingai, et al. Effect of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on tomato growth and soil properties in sunlight greenhouse[C]/Proceedings of 2019 International Symposium on Agriculture, Food and Biotechnology. Francis Academic Press, 2019: 128-136.
- [13] HUANG R, WANG Y Y, LIU J, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic materials changed the abundance, diversity, and activity of nirS-type denitrifying bacterial communities in a vegetable soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 152: 103 589.
- [14] PU C J, LIU H, DING G C, et al. Impact of direct application of biogas slurry and residue in fields: in situ analysis of antibiotic resistance genes from pig manure to fields[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 441-449.
- [15] ZHENG Jian, PAN Zhanpeng, MA Jing, et al. Animal based biogas quality and yield of tomato in greenhouse was remarkable[J]. Chinese Agricultural Capital, 2020(19): 12.

FEI Chao, DING Xiaodong. The effect of applying magnesium on

- digestate application frequency effects on growth and water-nitrogen use efficiency in tomato [J]. International journal of agriculture & biology, 2019, 22(4): 748-756.
- [16] MULLER A, SCHADER C, EL-HAGE SCIALABBA N, et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1 290.
- [17] 任立军, 赵文琪, 陈松岭, 等. 有机肥和土壤调理剂组合对设施土壤氮素和番茄产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 70-77.
REN Lijun, ZHAO Wenqi, CHEN Songling, et al. Combining organic fertilization and soil conditioner to improve nitrogen use efficiency and yield of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 70-77.
- [18] TRIVENI D. Studies on heterosis for yield and yield contributing traits in tomato (*solanum lycopersicum* L.)(J). International Journal of Pure & Applied Bioscience, 2017, 5(4): 1 677-1 685.
- [19] ZHANG L, WU K X, LIU Y. Investigation on multi-objective performance optimization algorithm application of fan based on response surface method and entropy method[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(6): 533-539.
- [20] GUO S Y. Application of entropy weight method in the evaluation of the road capacity of open area[J]. North China electric power university, 2017, 1 839(1): 1-5.
- [21] KARDANI O, NAZEM M, KARDANI M, et al. On the application of the maximum entropy meshfree method for elastoplastic geotechnical analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 84: 68-77.
- [22] 高金花, 高晓珊, 廉冀宁, 等. 基于 AHP-熵权法的农业节水技术综合效益评价[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 58-63.
GAO Jinhua, GAO Xiaoshan, LIAN Jining, et al. Comprehensive benefit evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP-entropy weight method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 58-63.
- [23] 邵毅明, 钟颖, 吴文文, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的短时交通流预测模型性能综合评价[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(7): 205-211, 254.
SHAO Yiming, ZHONG Ying, WU Wenwen, et al. Comprehensive evaluation of short-term traffic flow prediction model based on entropy TOPSIS model[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(7): 205-211, 254.
- [24] 张桂莲, 易扬, 张浪, 等. 基于“TOPSIS-AHP”模型的城市绿化生态技术集成方案优选[J]. 园林, 2020(5): 70-76.
ZHANG Guilian, YI Yang, ZHANG Lang, et al. Optimization of urban greening ecological technology integration scheme based on “TOPSIS-AHP” model[J]. Landscape Architecture, 2020(5): 70-76.
- [25] KIRDA C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance[J]. Water Reports (FAO), 2002, 22: 102.
- [26] 郑健, 颜斐, 马彪, 等. 生育期沼液调控对番茄生长、产量、品质及土壤全氮的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 23-31.
ZHENG Jian, YAN Fei, MA Biao, et al. Effects of biogas slurry on growth, yield, quality and soil total nitrogen of tomato during growth period [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 23-31.
- [27] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 205-212.
ZHU Wanze, SHENG Zheliang, SHU Shumiao. Soil physical properties and water holding capacity of natural secondary forests in a sub-alpine region of western Sichuan, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 205-212.
- [28] 柳青, 刘继伟, 黄广学, 等. 钼蓝比色法测定特菜中还原型维 C 含量的研究[J]. 农产品加工, 2019(4): 56-59.
LIU Qing, LIU Jiwei, HUANG Guangxue, et al. Study on determination of content of reduction-type vitamin C in special vegetable with molybdenum-blue colorimetry[J]. Farm Products Processing, 2019(4): 56-59.
- [29] 张述伟, 宗营杰, 方春燕, 等. 蒽酮比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 196-200.
ZHANG Shuwei, ZONG Yingjie, FANG Chunyan, et al. Optimization of anthrone colorimetric method for rapid determination of soluble sugar in barley leaves[J]. Food Research and Development, 2020, 41(7): 196-200.
- [30] WANG J W, LI Y, NIU W Q. Deficit alternate drip irrigation increased root-soil-plant interaction, tomato yield, and quality[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(3): 781.
- [31] TECH A R B, DA SILVA A L C, MEIRA L A, et al. Methods of image acquisition and software development for leaf area measurements in pastures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 278-284.
- [32] VALLE B, SIMONNEAU T, BOULORD R, et al. PYM: a new, affordable, image-based method using a Raspberry Pi to phenotype plant leaf area in a wide diversity of environments[J]. Plant Methods, 2017, 13: 98.
- [33] BRIGLIA N, WILLIAMS K, WU D, et al. Image-based assessment of drought response in grapevines[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 595.
- [34] 卢琦, 梁燕. 不同类型番茄品质性状遗传多样性及其相关性分析[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(7): 27-35, 68.
LU Qi, LIANG Yan. Genetic diversity and correlation analysis of quality traits of different types of tomato accessions[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2020, 51(7): 27-35, 68.
- [35] QI W Y, WANG H J, ZHOU Z, et al. Ethylene emission as a potential indicator of fuji apple flavor quality evaluation under low temperature[J]. Horticultural Plant Journal, 2020, 6(4): 231-239.
- [36] BADR M A, ABOU-HUSSEIN S D, EL-TOHAMY W A. Tomato yield, nitrogen uptake and water use efficiency as affected by planting geometry and level of nitrogen in an arid region[J]. Agricultural Water Management, 2016, 169: 90-97.
- [37] MEDAL L A, SUNITIYOSO Y, KIM A A. Prioritizing decision factors of energy efficiency retrofit for facilities portfolio management[J]. Journal of Management in Engineering, 2021, 37(2): 04 020 109.
- [38] 王正选, 王静, 杨婷婷, 等. 基于改进熵权法的水资源承载力评价: 以曲陆坝区为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 82-87.
WANG Zhengxuan, WANG Jing, YANG Tingting, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on improved entropy weight method: A case study in Qulu Dam area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(4): 82-87.
- [39] 张霁, 黄航行, 俞雅蓉, 等. 基于熵权法的武威市长河考核评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 6-10.
ZHANG Ji, HUANG Hangxing, YU Yarong, et al. Evaluation of river head system in Wuwei based on entropy weight method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S2): 6-10.
- [40] WANG X, DUAN Q Q. Improved AHP-TOPSIS model for the comprehensive risk evaluation of oil and gas pipelines[J]. Petroleum Science, 2019, 16(6): 1 479-1 492.
- [41] 王蕾, 程凡. 基于评价指标权重融合的改进 TOPSIS 决策方法研究[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(30): 269-272.
WANG Lei, CHENG Fan. The improved TOPSIS decision method based on weight fusion of evaluation indexes[J]. Computer Knowledge and Technology, 2018, 14(30): 269-272.
- [42] AN N, PALMER C M, BAKER R L, et al. Plant high-throughput phenotyping using photogrammetry and imaging techniques to measure leaf length and rosette area[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 376-394.
- [43] 王萍. 生育期营养液浓度调控对番茄生长、产量及品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

- WANG Ping. Effects of nutrient solution concentration supply on growth, yield and quality during growing stage[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [44] 张旭东. 覆膜种植和施肥对半干旱地区资源高效利用及玉米生产持续性的影响机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- ZHANG Xudong. Influencing mechanism of mulch planting and fertilization on the efficient utilization of resources and maize production sustainability in semi-arid areas[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [45] 龚一丹, 王卫华, 管能翰, 等. 灌溉对番茄生长发育、产量和品质影响的研究进展[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(7): 7-13.
- GONG Yidan, WANG Weihua, GUAN Nenghan, et al. Research progress on the effect of irrigation on tomato growth, yield and quality[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020, 33(7): 7-13.
- [46] GONG Z Z, XIONG L M, SHI H Z, et al. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency[J]. Science China Life Sciences, 2020, 63(5): 635-674.
- [47] LUO H H, WANG Q, ZHANG J K, et al. One-time fertilization at first flowering improves lint yield and dry matter partitioning in late planted short-season cotton[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(2): 509-517.
- [48] 张瑜, 赵剑波, 任飞, 等. 果实膨大期不同施氮量对油桃产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 581-586.
- ZHANG Yu, ZHAO Jianbo, REN Fei, et al. Yield and quality response of nectarine to different nitrogen topdressing amounts at fruit expanding stage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 581-586.
- [49] 韩启厚. 不同生育期施钾肥对温室番茄蔗糖代谢的调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- HAN Qihou. Regulation effects of potash applied at different growth phases on sucrose metabolism of tomato in greenhouse[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.

The Effects of Irrigation with Diluted Biogas Slurry on Growth, Yield and Fruit Quality of Tomato

ZHENG Jian^{1,2,3}, ZHU Chuanyuan^{1,2,3}, QI Xingyun^{1,2,3}, WEI Jiafang¹, YANG Shaohong^{1,2,3}, SUN Qiang^{1,2,3}

(1.College of Energy & Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2.Key Laboratory of the System Biomass Energy and Solar Energy Complementary Energy System, Lanzhou 730050, China;

3.Western energy and Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: 【Objective】Irrigation is an environment-friendly way to treat liquid wastes of biogas digesters, but how to reduce its detrimental impact on soils and improve the use of its nutrients is critical to its sustainable application in agricultural production. The purpose of this paper is to study the impact of irrigation with diluted biogas slurry on growth, yield and fruit quality of tomato. 【Method】 The experiment was conducted in a greenhouse. Biogas slurry was diluted by freshwater at volumetric ratio of 1/4; it was then used to irrigate the crop at one of the following growth stages: seedling stage (P1), blooming and fruiting stage (P2), fruit expansion stage (P3) and fruit ripening stage (P4). Irrigation with freshwater was taken as the control (CK). For each treatment, we measured the growth physiology, nutritional quality of the fruits, as well as sugar accumulation. 【Result】Irrigation with the diluted biogas slurry promoted growth, dry matter accumulation, yield and fruit quality of the tomato. Compared to P0, P2 and P3 increased the leaf area index by 48.32% and 36.89%, respectively, P3 accumulated more than 47.18% of the dry fruit-biomass. In addition, P3 also increased soluble sugar, titratable acid, sugar-to-acid ratio in the fruit, as well as fruit hardness most; and P2 improved vitamin C and soluble solids most significantly, compared to P0. Comprehensive benefit evaluation shows that fruit expansion was the key period for yield formation and fruit quality, keeping soil water and nutrients sufficient in which is hence essential. During the fruit ripening stage, the crop did not respond to irrigation and fertilization as noticeably as it did in other growing stages. 【Conclusion】 The optimal irrigation for greenhouse tomato is to dilute the biogas slurry with freshwater at 1 : 4 volumetric ratio, and irrigate the crop at the fruit ripening stage.

Key words: tomato; biogas slurry; growth stage; analytic hierarchy process; entropy method; TOPSIS

责任编辑：白芳芳