

沼液深浅孔分根交替灌溉对番茄根系特征及产量品质的影响

郑健^{1,2,3}, 王有斌^{1,2}, 撒青林^{1,2}, 王燕^{1,3}

(1.兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃兰州 730050; 2.甘肃省太阳能与生物质互补多联供系统重点实验室,甘肃兰州 730050; 3.西北低碳城镇支撑技术省部共建协同创新中心,甘肃兰州 730050)

摘要:为探索沼液深浅孔分根交替灌溉对番茄根系形态和品质的影响,设置3个沼液配比($B_1:1:2$, $B_2:1:4$, $B_3:1:6$;沼液:水,体积比)和4种灌溉方式(I_0 :地表灌溉, I_1 :5 cm孔深分根交替灌溉, I_2 :10 cm孔深分根交替灌溉, I_3 :5 cm和10 cm孔深分根交替灌溉),采用盆栽试验探求沼液配比和灌溉方式对番茄根系形态、干物质量、产量、水分利用效率和品质的影响,同时应用TOPSIS法、对称交互熵多属性排序法、VIKOR法和灰色关联分析法等独立评价方法对番茄综合效益进行评价,并采用均值法、模糊Borda法和Copeland法对独立评价结果进行组合评价进而提出最优处理。结果表明: B_2I_3 处理干物质量最大,较 B_2I_0 、 B_2I_2 、 B_2I_1 处理分别增加30.35%、17.92%、5.94%;各处理番茄根系直径主要集中在0~2 mm, B_2I_3 处理的根长、根体积、表面积、根尖数和根系活力均为最高值; B_2I_0 处理产量最高($2.34 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$), B_2I_3 处理水分利用效率最高($98.43 \pm 0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$);综合评价结果表明, B_2I_3 处理为最优处理。研究可为改进沼液穴灌技术、促进该技术在设施农业中的推广应用提供理论支撑。

关键词:分根交替灌溉;沼液;根系特征;产量品质;组合评价

中图分类号:S641.2; S216.4 **文献标志码:**A

Effects of alternating irrigation of deep and shallow pores of biogas slurry on root characteristics, yield and quality of tomato roots

ZHENG Jian^{1,2,3}, WANG Youbin^{1,2}, SA Qinglin^{1,2}, WANG Yan^{1,3}

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

2. Key Laboratory of Multi-Supply System with Solar Energy and Biomass, Lanzhou, Gansu 730050, China;

3. Collaborative Innovation Center for Supporting Technology of Northwest Low-Carbon Towns, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: To explore the effects of alternating deep and shallow borehole split-root irrigation with biomass on the morphology and quality of tomato roots, a pot experiment was conducted. The experiment included three biomass ratios ($B_1:1:2$, $B_2:1:4$, $B_3:1:6$; biomass: water, volumetric ratio) and four types of irrigation methods (I_0 : surface irrigation; I_1 : alternating 5 cm borehole-deep split-root irrigation; I_2 : alternating 10 cm borehole-deep split-root irrigation; I_3 : alternating 5 cm and 10 cm borehole-deep split-root irrigation). The effects of biogas ratios and irrigation methods on tomato root morphology, dry matter quality, yield, water use efficiency, and quality were examined. The study also applied independent evaluation methods, such as the TOPSIS method, symmetric interaction entropy multi-attribute ranking method, VIKOR method, and grey correlation analysis, to assess the comprehensive benefits of tomatoes under different treatments. The evaluation results were combined using the mean value method, the fuzzy Borda method, and the Copeland method to propose the optimal treatment. The results showed that the dry matter mass of B_2I_3 treatment was the maximum value of all treatments, which was 30.35%, 17.92% and 5.94% higher than that of B_2I_0 , B_2I_2 and B_2I_1 treatments, respectively; the diameters of tomato roots in all treatments were mainly concentrated in 0~2 mm, and the root length, root volume, surface area, number of root

tips and root vigor of B_2I_3 treatment were the highest values of all treatments. The B_2I_0 treatment was able to obtain the highest yield ($2.34 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$), and the B_2I_3 treatment was able to obtain the best water utilization efficiency ($98.43 \pm 0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). The comprehensive evaluation results showed that the B_2I_3 treatment was the optimal treatment in the experiment. This study provides theoretical support for the popularization and application of biogas hole irrigation technology in facility agriculture.

Keywords: split-root alternate irrigation; biogas; root characteristics; yield quality; combination evaluation

分根交替灌溉是一种高效的节水灌溉技术,分根交替灌溉能够控制作物的营养分配和生长^[2],显著降低植株的蒸腾作用,促进作物毛细根的生长,提升果实品质^[1]。已有研究多集中在水平方向进行分根交替灌溉^[2-3],在垂直方向上进行分根交替灌溉的研究还略显不足,尤其是水肥一体化条件下的垂向分根交替灌溉研究。沼液是一种富含氮、磷、钾等微量元素的多元有机液态肥^[4]。针对沼液高水低肥且含有大量有机悬浮颗粒的特点^[5],本课题组提出了水-沼液一体化穴灌技术,经过多年的试验研究获得了适宜的技术参数组合,在试验中发现水-沼液一体化穴灌技术能够提升作物农艺性状,促进作物干物质质量累积,增加作物产量,改善作物品质,提高作物水肥利用效率,化肥替代率已经达到 35%^[6]。将分根交替灌溉技术与水-沼液一体化穴灌技术相结合,是否会对作物干物质累积、根系分布、产量品质和水分利用效率产生更积极的影响,这些都是有待深入研究的问题。

根系是作物吸收利用土壤中水分和养分的重要器官,会直接影响作物的生长发育^[7]。作物不同生长阶段根系的生长发育和空间分布会产生很大变化,并且会受自身遗传因子和环境的相互作用,是影响作物地上部分生长发育的主要因素^[8]。作物高产稳产在很大程度上取决于根系的发育状况,良好的根系形态和空间分布是保证高产、稳产的首要前提^[9]。地表滴灌会对作物根系的总根长、总表面积、总体积、根尖数等产生积极的影响,却降低了作物的根冠比^[10];地下滴灌交替灌溉能够增加根系总根长、总表面积、总体积、根尖数等指标,提高根系活力,促进根系的生长发育^[11]。研究表明水分和养分直接作用于作物根层会对作物根系的生长发育和空间分布产生更有利的影响。

水肥耦合和灌溉方式对作物生长、干物质累积、根系、产量、品质等多个指标产生影响,单一指标评价存在一定的片面性,需要融入多指标评价的分析,以获得科学合理的水肥灌溉模式^[12]。常用的独立评价方法有主成分分析法^[13]、层次分析法^[14]、

TOPSIS 法^[15]、灰色关联分析法^[16]和 VIKOR 法^[17]等,已在作物品质评价中应用^[18],但独立评价存在人为因素和机理因素的干扰,使得采用任何一种独立评价方法都存在一定缺陷,无法全面进行科学、全面的评价。研究表明,Borda 法、均值法、Copeland 法从不同视角和机理进行组合评价,能够实现科学、全面的评价^[19],并在生态学和环境科学领域得到了验证^[20]。

基于此,本研究以番茄为研究对象,采用盆栽实验,设置不同的沼液配比和灌溉方式探求沼液配比和灌溉方式对番茄根系形态、干物质量、产量、水分利用效率和品质的影响,同时应用 TOPSIS 法、对称交互嫡多属性排序法、VIKOR 法和灰色关联分析法等独立评价方法对不同处理的番茄综合效益进行评价,并采用均值法、模糊 Borda 法和 Copeland 法对独立评价结果进行组合评价,提出适宜的沼液深浅孔分根交替灌溉模式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2023 年 7 月 17 日—11 月 19 日在甘肃省兰州市七里河区狗牙山温室大棚中($103^{\circ}26'41''\text{E}$, $34^{\circ}7'25''\text{N}$,海拔 $1\,874.6 \text{ m}$)开展,该地区属于温带大陆性气候,年均降雨量 362 mm ,年均蒸发量 $1\,194.36 \text{ mm}$,年平均气温 11.3°C ,无霜期约 150 d 。

1.2 试验材料

盆栽试验采用土壤的有机质含量为 $15.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $0.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机碳含量为 $8.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 7.35,容重 $1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。供试番茄品种为‘德贝利’。试验沼液取自兰州新苏生态能源有限公司,发酵原料为尾菜,沼液曝气 40 d 以上。沼液中有有机质含量 $1.680 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.954 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $0.055 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量 $2.230 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 7.79。试验桶直径 40 cm、高 38 cm;为防止两侧水分交换用塑料薄膜将中间隔开,塑料膜两侧装同等容重土壤,塑料桶底部钻 8 个孔以增强透气性,在塑料膜中央裁剪“V”型缺口栽种番茄幼苗(图 1,见 75 页)。

1.3 试验设计

设置 3 个沼液配比 (B_1 、 B_2 、 B_3 , 沼液 : 水体积比分别为 1 : 2、1 : 4、1 : 6), 4 种灌溉方式 (I_0 : 地表灌溉; I_1 : 5 cm 孔深分根交替灌溉; I_2 : 10 cm 孔深分根交替灌溉; I_3 : 5 cm 和 10 cm 孔深分根交替灌溉), 共 12 个处理, 每处理 7 盆, 每处理重复 3 次, 共计 252 盆。试验设计如表 1 所示。试验于 2023 年 7 月 24 日定植, 缓苗 7 d, 每天灌水 400 mL 以保番茄植株的成活, 缓苗期结束后设置灌溉频率为每 2 d 一次, 左右交替进行灌溉。试验时间及生育时期划分为: 苗期 7 月 24 日—8 月 23 日、开花结果期 8 月 24 日—9 月 25 日、成熟期 9 月 26 日—11 月 5 日, 灌溉量采用 $\varphi 20$ 型气象蒸发皿的蒸发量控制, 计算公式为:

$$W = K_p \times S \times E_p \tag{1}$$

式中, W 为灌溉量 (mL); K_p 为作物蒸发系数, 取值 0.7; S 为试验处理控制面积, 为 1130 cm²; E_p 为 2 d 蒸发皿的累积蒸发量 (cm)。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	沼液配比 (沼液 : 水, 体积比) Ratio of biogas slurry (biogas : water, v/v)	灌溉方式 Irrigation method	灌溉量 Irrigation amount /(L · plant ⁻¹)
B_1I_0	1 : 2	I_0	40.84
B_2I_0	1 : 4	I_0	40.84
B_3I_0	1 : 6	I_0	40.84
B_1I_1	1 : 2	I_1	20.42
B_1I_2	1 : 2	I_2	20.42
B_1I_3	1 : 2	I_3	20.42
B_2I_1	1 : 4	I_1	20.42
B_2I_2	1 : 4	I_2	20.42
B_2I_3	1 : 4	I_3	20.42
B_3I_1	1 : 6	I_1	20.42
B_3I_2	1 : 6	I_2	20.42
B_3I_3	1 : 6	I_3	20.42

1.4 测定项目与方法

1.4.1 根系、干物质和产量品质 每个生育阶段结束后, 各处理选取具有代表性的 3 株番茄; 以番茄植株为中心进行破坏性取样, 将番茄根系取出, 将根系放在 0.25 mm 的网筛中, 小心用流水冲洗, 去除死根和泥土, 获得完整的番茄根系, 利用 WinRHIZO 根系分析软件测定根长、根平均直径、根体积、表面积、总根尖数和根质量等指标。

利用精度 0.01 g 的电子天平称量番茄各部分 (根、茎、叶、果) 鲜重, 然后放入 105℃ 烘箱杀青 30 min, 而后采用 75℃ 烘干至恒重, 称量各部分干物质质量。

每个处理随机选取 3 株番茄于成熟期采摘后称

量并记录产量, 果实的维生素 C、可滴定酸、可溶性糖、可溶性固形物等品质指标, 分别采用 2, 6-二氯酚靛酚滴定法、氢氧化钠滴定法、蒽酮显色反应测定法、手持式折光仪 (ATAGO, 日本) 测定^[21]。

1.5 番茄综合效益评价

首先选取评价指标, 并利用层次分析法和熵权法获得指标的主客观权重, 然后用组合赋权法获得番茄综合效益评价各指标的综合权重, 最后运用 TOPSIS 法、对称交互熵多属性排序法、VIKOR 法、灰色关联分析法对番茄综合效益进行独立评价。采用均值法、模糊 Borda 法^[22]、Copeland 法^[12] 对 4 种独立评价结果进行组合评价。

1.6 数据结果分析

利用 EXCEL 软件对 4 种独立评价方法和 3 种组合评价方法进行综合效益计算; 运用 SPSS 27.0 软件进行数据处理, 采用单因素方差分析对不同处理下干物质质量、根系特征参数、产量、品质和水分利用效率等指标进行差异显著性分析 ($LSD, P < 0.05$); 采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 番茄干物质质量

由图 2 可知, 番茄苗期 B_2I_1 处理能获得最大的根干质量 ($2.36\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$)、茎干质量 ($7.55\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$) 和总干物质质量 ($16.58\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$); 3 种沼液配比下, 不同灌溉方式总干物质质量呈现为 $I_1 > I_3 > I_0 > I_2$, 说明苗期番茄的根系主要集中在上层, 10 cm 深度的灌溉对根系发育促进作用不显著 ($P > 0.05$)。开花结果期深浅孔分根交替灌溉 (I_3) 番茄干物质质量显著增加 ($P < 0.05$), 不同灌溉方式下番茄茎、叶和果实干物质质量呈 $I_3 > I_1 > I_2 > I_0$; 4 种灌溉方式下, 沼液配比对番茄干物质质量的影响均呈现为 $B_2 > B_3 > B_1$, B_2I_3 处理的干物质质量为各处理的最高, 较 B_2I_0 、 B_2I_2 、 B_2I_1 处理分别高 30.35%、17.92%、5.94%。番茄成熟期干物质质量的迅速增长主要源于果实的生长, B_2I_3 处理获得最大的干物质质量, 其根、茎、叶、果的干物质质量为 19.61、64.21、69.61、75.80 g, 说明该生育阶段沼液深浅孔分根交替灌溉能够促进番茄植株生长发育, 强化番茄植株的干物质形成, 而沼液配比过高或过低都会对番茄植株生长产生影响。

2.2 番茄根系形态指标

不同灌溉方式和沼液配比会影响作物根系的空间构型, 番茄在沼液深浅孔分根交替灌溉处理下的根系形态特征及根系活力如表 2 所示。各处理的根长、根平均直径、根体积、表面积、根尖数、根系活

力差异性显著 ($P<0.05$), 3 种沼液配比下, 不同灌溉方式根系的根长、根体积、表面积、总根尖数表现为 $I_3>I_1>I_2>I_0$, 而根平均直径表现为 $I_0>I_3>I_1>I_2$, B_2I_3 处理表现出根长、根体积、表面积、根尖数最大, 较 B_2I_0 分别增加了 15.04%、21.89%、41.71%、95.76%, 较 B_2I_1 分别增加了 7.28%、5.89%、8.59%、10.91%, 较 B_2I_2 分别增加了 13.31%、30.06%、16.94%、32.52%, B_2I_0 处理根平均直径最大 (1.97 mm); 4 种灌溉方式下, 沼液配比处理组根系的根长、根体积、平均直径、表面积、总根尖数表现出 $B_3>B_2>B_1$, 其中根表面积在 I_0 灌溉方式下差异性最显著 ($P<0.05$), B_2I_0 较 B_1I_0 、 B_3I_0 分别增加了 33.81%、25.63%; 根体积在 I_3 灌溉方式下差异性最显著 ($P<0.05$), B_2I_3 较 B_1I_3 、 B_3I_3 分别增加了 70.04%、41.77%; 根尖数在 I_2 灌溉方式下差异性最显著 ($P<0.05$), B_2I_2 较 B_1I_2 、 B_3I_2 分别增加了 50.47%、29.78%; B_2I_2 处理的根系活力最大 ($151.45\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), 较 B_2I_1 、 B_2I_2 、 B_2I_0 分别增加了 9.97%、16.37%、35.53%, 较 B_1I_3 、 B_3I_3 分别增加了 17.17%、6.48%。表明沼液配比会影响番茄根系的形态指标, 适宜的沼液比对番茄根系生长有促进作用, 沼液深浅孔分根交替灌溉能够促进番茄根系发育, 增强了根系活力。

2.3 根系不同直径分级的根长和表面积

由图 3 可知, 3 种沼液配比下, I_3 根直径小于 2 mm 的根长较 I_0 分别升高了 25.74%、39.23%、13.10%; I_3 根直径小于 2 mm 的根长比 I_1 增加了 11.03%、33.59%、2.37%; I_3 比 I_2 分别增加了 19.42%、38.75%、4.84%, 各处理差异显著 ($P<0.05$)。 I_3 根直径大于 2 mm 的根长比 I_0 分别升高了 13.84%、25.35%、13.62%, I_3 比 I_1 分别升高了 3.71%、4.32%、

5.84%, I_3 比 I_2 分别升高了 7.78%、9.75%、9.89%, 表明沼液深浅孔分根交替灌溉下主要以影响 0~2 mm 根系直径的根长为主, 但对直径大于 2 mm 的根影响不显著 ($P>0.05$)。

3 种沼液配比下, I_3 比 I_0 的根表面积升高了 45.90%、24.94%、36.09%, I_3 比 I_1 升高了 7.80%、9.41%、7.19%, I_3 比 I_2 升高了 7.59%、19.53%、24.97%, 且各处理间差异性显著 ($P<0.05$)。表明沼液深浅孔分根交替灌溉引起根系表面积变化主要集中在根直径 ≤ 2 mm 的根系, 沼液深浅孔分根交替灌溉能够促进根系的发育, 使根系向更深地方生长, 增加了根系的表面积, 提高了根系能够吸收水分和养分的能力。

2.4 番茄产量、水分利用效率和品质

2.4.1 产量和水分利用效率 从表 3 可以看出, 4 种灌溉方式下, 不同沼液配比会对番茄产量产生影响, 番茄产量在 B_2I_0 处理达到最大 ($2.34\ \text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$), 不同沼液配比的番茄产量均表现为 $B_2>B_3>B_1$, 3 种沼液配比下, 灌溉方式处理均表现为 $I_0>I_3>I_2>I_1$, 沼液深浅孔分根交替灌溉处理对番茄产量、水分利用效率的差异性显著 ($P<0.05$)。3 种沼液配比下, 不同灌溉方式的水分利用效率均表现为 $I_3>I_1>I_2>I_0$, 沼液配比为 B_2 时差异性最显著 ($P<0.05$); I_3 的水分利用效率较 I_0 、 I_1 、 I_2 分别增加了 81.95%、13.56%、8.64%; 4 种灌溉方式下, 不同沼液配比的水分利用效率表现为 $B_3>B_2>B_1$, 灌溉方式为 I_3 时差异性最显著 ($P<0.05$), B_2 的水分利用效率较 B_1 、 B_3 分别增加了 17.54%、15.52%, 表明适宜沼液配比可以促进番茄产量的形成, 而沼液深浅孔分根交替灌溉模式可以提高番茄的水分利用效率。

表 2 沼液深浅孔交替对番茄根系的影响						
Table 2 Effects of alternating depth and shallow pores of biogas slurry on tomato roots						
处理 Treatment	根长 Root length/cm	根平均径 Average root diameter/mm	根体积 Root volume/cm ³	根表面积 Surface area /cm ²	根尖数 Root tips number	根系活力 Root activity /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
B_1I_0	3144.9i	1.65bc	61.69i	2202.14i	3013j	101.63i
B_2I_0	3741.8cd	1.97a	85.18d	2946.74d	3328h	111.74h
B_3I_0	3541.8f	1.70b	66.13g	2345.51h	3321h	108.91h
B_1I_1	3420.9h	1.47de	67.04h	2794.46f	4237f	110.98h
B_1I_2	3210.4i	1.39e	66.40h	2596.49g	3267i	101.63i
B_1I_3	3666.8de	1.56cd	75.54f	2978.99d	5196d	129.26d
B_2I_1	4012.3b	1.71b	113.99b	3307.64b	5874b	137.76c
B_2I_2	3799.1c	1.69b	92.81c	3071.44d	4916e	130.14d
B_2I_3	4304.7a	1.89a	120.71a	3591.93a	6515a	151.45a
B_3I_1	3781.6c	1.64bc	79.84e	2828.29e	4932e	127.79e
B_3I_2	3646.1e	1.52d	78.47e	2614.69g	3788g	119.27f
B_3I_3	3923.9b	1.67bc	84.88d	3017.60c	5714c	142.23b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: Different lowercase letters in the same column show significant differences ($P<0.05$), the same below.

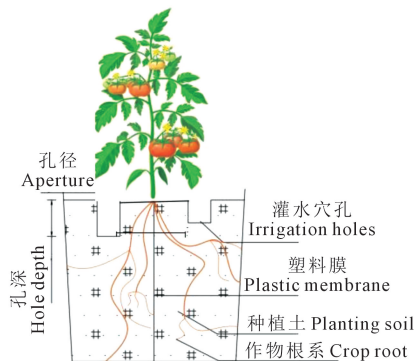
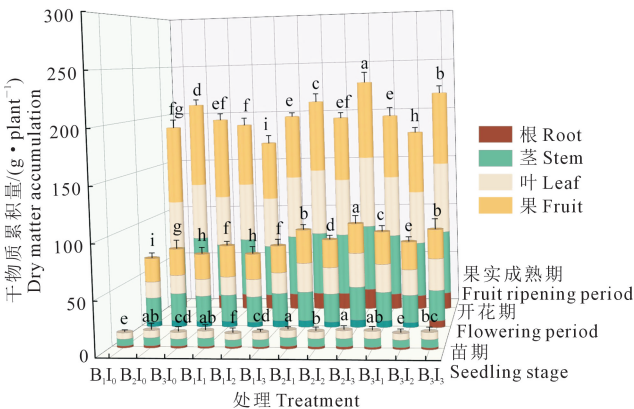


图 1 沼液深浅孔分根交替灌溉示意图

Fig.1 Schematic diagram of alternating irrigation of deep and shallow holes of biogas slurry



注:同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column show significant differences ($P<0.05$), the same below.

图 2 不同处理番茄各生育时期干物质累积量变化

Fig.2 Changes in dry matter accumulation at different growth stages of tomato under different treatments

表 3 不同处理对番茄产量和水分利用效率的影响

Table 3 Effects of different treatments on tomato yield and water use efficiency

处理 Treatment	单株产量 Yield per plant /kg	水分利用效率 Water use efficiency /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
B_1I_0	$2.05 \pm 0.08\text{c}$	$50.20 \pm 0.18\text{i}$
B_2I_0	$2.34 \pm 0.09\text{a}$	$57.29 \pm 0.18\text{g}$
B_3I_0	$2.21 \pm 0.07\text{b}$	$54.11 \pm 0.17\text{h}$
B_1I_1	$1.63 \pm 0.04\text{g}$	$79.82 \pm 0.22\text{e}$
B_1I_2	$1.52 \pm 0.04\text{i}$	$74.44 \pm 0.19\text{f}$
B_1I_3	$1.71 \pm 0.05\text{fg}$	$83.74 \pm 0.24\text{d}$
B_2I_1	$1.85 \pm 0.06\text{e}$	$90.60 \pm 0.27\text{c}$
B_2I_2	$1.77 \pm 0.05\text{f}$	$86.68 \pm 0.24\text{cd}$
B_2I_3	$2.01 \pm 0.07\text{c}$	$98.43 \pm 0.29\text{a}$
B_3I_1	$1.66 \pm 0.04\text{g}$	$81.29 \pm 0.23\text{de}$
B_3I_2	$1.57 \pm 0.03\text{h}$	$76.88 \pm 0.21\text{f}$
B_3I_3	$1.94 \pm 0.05\text{d}$	$95.00 \pm 0.24\text{b}$

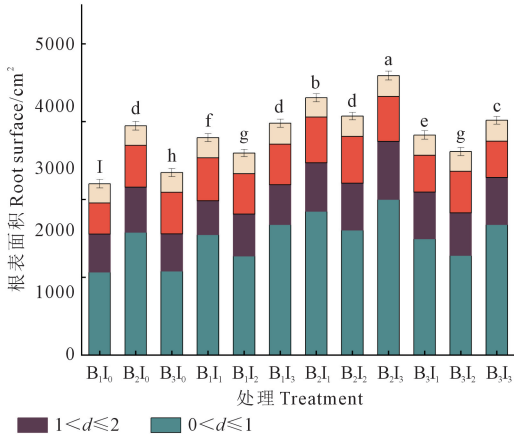
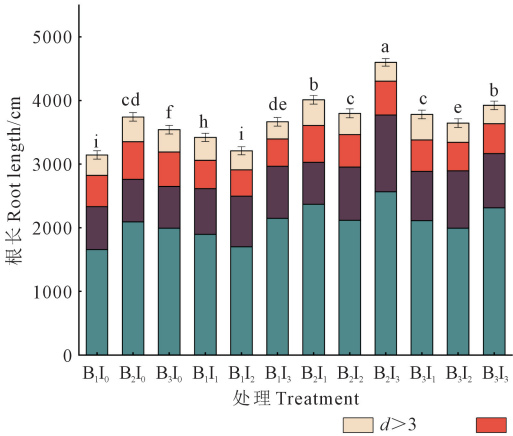


图 3 不同根直径分级的根长和表面积变化

Fig.3 Variation of root length and surface area for different root diameter classifications

2.4.2 品质 由表 4 可知,各处理的番茄果实的可溶性糖、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物等指标差异性显著 ($P<0.05$)。3 种沼液配比下,分根交替灌溉处理(I_1 、 I_2 、 I_3)可以提高可溶性糖、维生素 C、可

溶性固形物的含量,处理 B_2I_3 的可溶性糖、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物获得最大值,较 B_2I_0 分别升高了 5.97%、15.44%、8.91%、10.37%;相同灌溉方式下,3 种沼液配比的处理的可溶性糖、糖酸比、维生

素 C、可溶性固形物表现为 $B_2>B_3>B_1$,而各处理可滴定酸差异性不显著 ($P>0.05$) ,且在 B_2I_2 处理下获得最大值,表明适宜的沼液配比能够改善果实的风味品质,沼液配比过大或过小都会对降低番茄的品质,深浅孔分根交替灌溉能很大程度地提高番茄果实品质。

2.5 番茄综合效益评价

2.5.1 独立评价方法 番茄的指标评价维度存在差异性,各指标对番茄的综合效益产生不同的影

响。为了更加公正客观的评价沼液深浅孔交替对番茄的综合效益的影响,选取产量、水分利用效率、根表面积、根平均直径、根尖数、总根长、根体积、根系活力维生素 C、可溶性糖、可滴定酸和可溶性固形物等指标构建番茄综合效益评价体系,为解决多属性评价体系更加全面、科学的问题,采用层次分析法和熵权法确定各指标的主、客观权重,同时运用组合赋权法获得番茄综合效益评价各指标的综合权重(表 5),最后依据番茄指标综合权重进行评价。

表 4 不同处理对番茄品质的影响
Table 4 Effects of different treatments on tomato quality

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar/%	可滴定酸 Titratable acid/%	糖酸比 Sugar-acid ratio	维生素 C Vitamin C /(mg · 100g ⁻¹)	可溶性固形物 Dissolved solid/%
B ₁ I ₀	3.311±0.12j	0.357±0.02c	9.274±0.21j	35.194±0.21k	5.99±0.08bc
B ₂ I ₀	3.432±0.17h	0.353±0.04d	9.722±0.22g	36.211±0.33i	6.17±0.09a
B ₃ I ₀	3.394±0.16i	0.362±0.03b	9.376±0.24i	35.655±0.24j	6.04±0.09b
B ₁ I ₁	3.429±0.16h	0.341±0.03e	10.055±0.19e	36.599±0.33g	5.58±0.05f
B ₁ I ₂	3.498±0.15g	0.363±0.04b	9.637±0.18h	36.321±0.29h	5.41±0.02g
B ₁ I ₃	3.695±0.17d	0.355±0.03cd	10.408±0.22c	37.082±0.33e	5.64±0.05f
B ₂ I ₁	3.711±0.19c	0.367±0.04b	10.112±0.18d	38.011±0.39ab	5.82±0.08d
B ₂ I ₂	3.699±0.18d	0.377±0.04a	9.812±0.16f	37.791±0.38b	5.71±0.06e
B ₂ I ₃	3.962±0.24a	0.374±0.05a	10.593±0.28a	38.373±0.42a	5.97±0.07bc
B ₃ I ₁	3.647±0.20e	0.361±0.03bc	10.107±0.23de	37.158±0.36d	5.74±0.06e
B ₃ I ₂	3.584±0.18f	0.371±0.05ab	9.655±0.16ih	36.974±0.31f	5.53±0.04f
B ₃ I ₃	3.798±0.22b	0.359±0.02c	10.579±0.24b	37.734±0.38c	5.89±0.07c

表 5 番茄综合效益评价指标的主观、客观和组合权重
Table 5 Subjective, objective and combined weights of tomato comprehensive benefit evaluation indexes

指标 Index	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight	综合权重 Comprehensive weight
维生素 C Vitamin C	0.0029	0.0815	0.0027
可溶性糖 Soluble sugar	0.0034	0.0813	0.0032
可滴定酸 Titratable acid	0.0109	0.0897	0.0113
可溶性固形物 Dissolved solid	0.0079	0.0865	0.0078
产量 Yield	0.0818	0.1495	0.1409
水分利用效率 Water use efficiency	0.1874	0.1369	0.2956
根体积 Root volume	0.0787	0.0641	0.0581
根平均直径 Average root diameter	0.0349	0.0638	0.0257
根尖数 Root tips	0.2906	0.0629	0.2107
总根长 Root length	0.0337	0.0640	0.0249
根表面积 Root surface area	0.2060	0.0627	0.1487
根系活力 Root activity	0.0740	0.0825	0.0704

由表 5 中各个指标的综合权重采用 4 种方法进行番茄综合效益评价(表 6),可以看出 4 种独立方法番茄综合效益评价排序结果存在差异,对评价番茄综合效益造成了一定的困难和不确定性,但 4 种方法均显示 B_2I_3 处理获得了最优,而 B_2I_0 在 4 种方法评价下差异性最显著。

2.5.2 组合评价 在组合评价前进行各独立评价模型评价价值之间的事前一致性检验是保证组合评价结果科学性和合理性的重要方法。只有确保各独立评价模型间具有一致性时,对各方法的组合评价才有效。采用 Kendall 一致性系数检验法对组合评价进行事前检验,4 种独立评价之间的 Kendall 相关系数见表 7,可以看出独立评价与其他 3 种评价方法的均值在 0.8554~0.9437 之间,表明各个评价方法之间有关联性。

进一步采用 Kendall 非参数对 4 种独立评价方法进行一致性检验,计算表明 Kendall 的和谐系数 $W=0.9659$ ($P<0.01$),则卡方检验量 $\chi^2=m(n-1)w=42.5>\chi^2_{0.01}(11)$,表明 4 种独立评价方法满足事前一致性的检验,可以对 4 种独立方法进行组合评价。

本研究使用 3 种组合评价方法对 4 种独立评价方法的排名结果进行组合评价,结果见表 8,可见 3

种组合评价的结果基本一致,不用构造统计量^[22], 有处理的标准差为 0,3 种组合间评价无差异性且具
各处理的得分最高的三位分别为 B₂I₃、B₂I₁、B₃I₃,所 有一致性。

表 6 番茄综合效益独立评价结果及排序

Table 6 Independent evaluation results and ranking of tomato comprehensive benefits								
处理 Treatment	TOPSIS 法 TOPSIS method		对称交互熵多属性排序法 Symmetrical cross entropy multi-attribute ranking method		VIKOR 法 VIKOR method		灰色关联分析法 Grey relational analysis	
	相对接近度 Relative approach degree	排序 Ranking	贴进度 Paste progress	排序 Ranking	评估值 Evaluation value	排序 Ranking	关联度 Degree of association	排序 Ranking
B ₁ I ₀	0.1592	12	0.0327	11	1.0000	12	0.3971	12
B ₂ I ₀	0.3102	9	0.1835	9	0.7604	10	0.5400	6
B ₃ I ₀	0.2273	11	0.0205	12	0.8755	11	0.4427	10
B ₁ I ₁	0.3358	8	0.3268	7	0.5135	7	0.4749	8
B ₁ I ₂	0.2670	10	0.0992	10	0.6971	9	0.4156	11
B ₁ I ₃	0.5057	6	0.6326	5	0.3739	5	0.5520	5
B ₂ I ₁	0.7460	2	0.9315	2	0.1662	2	0.7293	2
B ₂ I ₂	0.5936	4	0.7322	4	0.2974	4	0.5846	4
B ₂ I ₃	0.8472	1	0.9914	1	0.0000	1	0.9806	1
B ₃ I ₁	0.5159	5	0.5702	6	0.3978	6	0.5289	7
B ₃ I ₂	0.3564	7	0.2535	8	0.5595	8	0.4588	9
B ₃ I ₃	0.5938	3	0.7823	3	0.2901	3	0.7027	3

表 7 独立评价方法间的 Kendall 相关系数

Table 7 Kendall correlation coefficient between independent evaluation methods					
评价方法 Evaluation method	TOPSIS 法 TOPSIS method	对称交互熵多属性排序法 Symmetrical cross entropy multi-attribute ranking method	VIKOR 法 VIKOR method	灰色关联分析法 Grey relational analysis	均值 Mean value
TOPSIS 法 TOPSIS method		0.958	0.958	0.860	0.9254
对称交互熵多属性排法 Symmetrical crossen tropy multi-attribute ranking method	0.958		0.972	0.874	0.9347
VIKOR 法 VIKOR method	0.958	0.832		0.832	0.9207
灰色关联分析法 Grey relational analysis	0.860	0.972	0.832		0.8554

表 8 组合评价结果及排序

Table 8 Portfolio evaluation results and ranking						
处理 Treatment	均值法 Method of mean value		模糊 Borda 法 Fuzzy borda method		Copeland 法 Copeland method	
	评价值 Evaluation number	排名 Ranking	评价值 Evaluation number	排名 Ranking	评价值 Evaluation number	排名 Ranking
B ₁ I ₀	1.24	12	20.96	12	-42	12
B ₂ I ₀	4.58	9	56.13	9	-16	9
B ₃ I ₀	1.95	11	28.72	11	-36	11
B ₁ I ₁	4.95	7	84.47	7	-8	7
B ₁ I ₂	2.61	10	36.43	10	-28	10
B ₁ I ₃	7.04	5	111.17	5	10	5
B ₂ I ₁	10.04	2	181.69	2	36	2
B ₂ I ₂	8.21	4	129.78	4	20	4
B ₂ I ₃	10.95	1	207.21	1	44	1
B ₃ I ₁	6.43	6	99.63	6	4	6
B ₃ I ₂	4.62	8	78.69	8	-12	8
B ₃ I ₃	9.13	3	166.63	3	28	3

3 讨 论

根系的分布取决于灌溉的深度和灌溉的方式,而根系功能取决于根系生物量和空间分布^[23]。于坤等^[24]研究表明水分的运移深度与根系分布有着密不可分的关系,水分运移对根系的分布有引导作用,灌溉深度的差异是导致根系空间分布差异的关键影响因子。分根交替灌溉为番茄根系生长创造干湿交替的环境,番茄受到水分干旱胁迫后,能够刺激根系产生较强补偿效应,同时产生水分胁迫信号 ABA,控制叶片的气孔开度,使另一部分处在湿润生长区域的根系吸水,减弱了番茄的蒸腾作用^[25]。沼液深浅孔分根交替灌溉对根系的分布产生不同影响,深浅孔分根交替灌溉处理较常规灌溉的根系更加旺盛,其根长、根体积、表面积、根尖数、根系活力都优于常规灌溉,这主要是关系穴孔深度变化对水分在土壤分布产生影响,引起了番茄根系的分布变化^[26]。同时,番茄的根系主要集中在表层(0~20 cm),深浅孔分根交替灌溉主要影响直径 ≤ 2 mm 的根系,毛细根具有很强的吸收水分和养分能力,番茄主要依靠其来维持自身的生长发育^[27]。苗期时, B_1I_1 处理由于沼液配比过高导致番茄根系发育过缓,且水分只能浸润下层土体,上层的根系长期得不到水分的供应,使其长期处于水分干旱状态,从而抑制了根系的发育程度;进入开花结果期和成熟期, B_2I_3 处理表明适宜的沼液配比能够促进番茄根系生长发育,深孔引导水分和养分向更深处运移,促进番茄根系向深层不断发育,提升番茄植株根系活力,而浅孔在苗期能够快速为番茄根系生长发育提供水分和养分,使得深浅孔分根交替灌溉出现左右两边根系分布不均匀现象。

植物不同生长发育阶段根、茎、叶和果实的生物量变化可直观反映作物生长情况。本研究发现适宜的灌溉穴孔深度和沼液配比能够对番茄的生长产生积极影响,并促进植株干物质质量积累。而作物具有较大的根系和较高的根系活力有利于保持其对地上部分水分和养分的供应^[28]。初步分析主要是番茄植株根系吸取足够的水分和养分,提高根系活力,进一步加快番茄植株地上部生物量的生长速率,提高番茄植株干物质积累质量。苗期时, B_2I_1 处理促进了番茄植株的生长发育,主要由于苗期的根系主要集中在上层^[29],浅孔的水分和养分引导两边的根系发育,而植株的养分和水分都是由根系逐渐传递到地上生物量,同时促进番茄植株干物质质量的积累;进入开花结果期和熟期,根系的发

育程度对植株生长程度尤为重要, B_2I_3 处理表明适宜的沼液配比能够促进番茄植株生长发育^[30],深孔引导水分和养分向更深处运移,促进番茄根系向深层不断发育,同时促进番茄植株地上部的生长发育,强化番茄植株根系发育和干物质的形成,而浅孔在苗期能够快速为番茄生长提供水分和养分,促进了番茄植株干物质质量累积。

果实品质是衡量作物生长健康程度的重要评价指标。影响番茄品质的因素主要有气候指标、水肥管理措施和自身基因限制等^[31]。本试验发现适量沼液的施加可以提高番茄维生素 C、可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物的含量,且可溶性糖含量的增幅大于可滴定酸,能够改善果实的糖酸比,提升番茄口感;灌溉方式一定时,随着沼液配比的增加,番茄维生素 C 含量呈现先增加后减少的趋势,初步分析主要是尾菜发酵沼液里含有一定的钾元素,而钾素与维生素 C 的合成相关,从而影响维生素 C 的含量^[32];本研究还发现分根交替灌溉可以提升番茄果实的品质,这与 Zhao 等^[33]研究结果一致,穴孔深度一致的分根交替灌溉主要由于水分和养分集中在表层或深层不利于根系的生长发育和根系将水分和养分向植株的运移,影响番茄果实的维生素 C、可溶性糖和可溶性固形物的增长速率^[34],而深浅孔分根交替灌溉加快了番茄果实的维生素 C、可溶性糖和可溶性固形物的增长速率,初步分析这可能是沼液深浅孔分根交替灌溉减少了叶片的冗余生长,使得根系吸收的养分和水分更多的向生殖生长倾斜,促使植物合成的光化产物和代谢产物转向果实^[35]。

本研究采用 4 种独立评价方法对沼液深浅孔分根交替灌溉不同处理进行综合效益评价,发现这 4 种独立评价方法的排序存在差异,初步分析可能在于独立评价对评价对象的信息深度和方向不同,无法做到对所有指标进行科学、全面的评价^[18],为了使番茄各个指标得到科学、全面的评价。本研究采用均值法、模糊 Borda 法、Copeland 法的组合评价方法对 4 种独立评价方法进行组合评价,结果表明各处理在 3 种组合评价方法下所得到的排序是一致的(B_2I_3 处理评分最高),说明组合评价方法能够克服独立评价方法结论受限的问题^[22],可为沼液深浅孔分根交替灌溉综合效益评价提供科学依据。

4 结 论

1) 沼液深浅孔分根交替灌溉能促进番茄干物质质量的积累和根系的发育, B_2I_3 处理获得了最大的

干物质质量,其根长、根体积、表面积、根尖数、根系活力均取得最大值。

2) 沼液深浅孔分根交替灌溉能提高水分利用效率, B_2I_0 处理能够获得最高的产量 ($2.34\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$), B_2I_3 处理能够获得最高的水分利用效率 ($98.43\pm0.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); B_2I_3 处理番茄可溶性糖、糖酸比、维生素 C、可溶性固形物含量最高, B_2I_2 处理可滴定酸含量最高。

3) 4 种独立评价方法所获得的排序结果存在差异,组合评价结果均表明 B_2I_3 处理(沼液配比 1:4, 5 cm 和 10 cm 孔深分根交替灌溉)为试验各处理中最优。

参 考 文 献:

[1] AL-KAYSSI A A. Role of alternate and fixed partial root-zone drying on water use efficiency and growth of maize (*Zea mays* L.) in gypsiferous soils[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1): 145-158.

[2] HOU J X, WAN H, LIANG K H, et al. Biochar amendment combined with partial root-zone drying irrigation alleviates salinity stress and improves root morphology and water use efficiency in cotton plant[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166978.

[3] YU W W, LIU H M, LUO J Q, et al. Partial root-zone simulated drought induces greater flavonoid accumulation than full root-zone simulated water deficiency in the leaves of *Ginkgo biloba* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2022, 201: 104998.

[4] 毕婷婷, 胡涵, 刘丽春, 等. 沼液施用对核桃高效生产的影响研究[J]. 东北农业科学, 2020, 45(6): 119-121, 128.

BI T T, HU H, LIU L C, et al. Effects of biogas slurry application on high efficient production of walnut [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(6): 119-121, 128.

[5] 郑健, 向鹏, 孙强, 等. 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, et al. Effects of biochar addition on soil hydraulic characteristics under indirect subsurface drip irrigation with biogas slurry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 340-351, 404.

[6] 郑健, 宿智鹏, 刘俊彦, 等. 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(2): 77-90.

ZHENG J, SU Z P, LIU J Y, et al. 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(2): 77-90.

[7] 李合生, 王学奎. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.

LI H S, WANG X K. Modern plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.

[8] 杨可钧, 宋海亮, 黄诗蓓, 等. 根系分泌物调控对人工湿地去除雌激素的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 59-66.

YANG K Y, SONG H L, HUANG S B, et al. Influence of different root exudates on steroidal estrogen removal in constructed wetlands[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 59-66.

[9] SHARMA B R, CHAUDHARY T N. Wheat root growth, grain yield and water uptake as influenced by soil water regime and depth of nitro-

gen placement in a loamy sand soil[J]. Agricultural Water Management, 1983, 6(4): 365-373.

[10] 范严伟, 史金红, 唐兴鹏, 等. 不同灌溉防护措施下梭梭根系生物量及形态特征[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7278-7289.

FAN Y W, SHI J H, TANG X P, et al. Root biomass and morphological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different irrigation protection measures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7278-7289.

[11] 杨雨. 交替根区地下滴灌对番茄生长的影响[D]. 淮北: 淮北师范大学, 2021.

YANG Y. The effect of alternate root zone subsurface drip irrigation on tomato growth[D]. HuaiBei: HuaiBei Normal University, 2021.

[12] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 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, et al. 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.

[13] WANG S P, KANG X N, DAI J H, et al. Evaluation of areca quality based on principal component and hierarchical cluster analyses in Hainan, China[J]. Hort Science, 2023, 58(6): 699-703.

[14] 金宁. 基质栽培黄瓜生长生理、产量及品质对不同灌水下限的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.

JIN N. Response of growth physiology, yield, and quality of cucumber cultivated in substrate to different irrigation limits [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.

[15] LIN S S, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Approach based on TOPSIS and monte carlo simulation methods to evaluate lake eutrophication levels[J]. Water Research, 2020, 187: 116437.

[16] 何梦婷, 张玲玲. 基于灰色关联—熵的威海市多水源利用综合效益分析[J]. 生态经济, 2020, 36(10): 155-159.

HE M T, ZHANG L L. Comprehensive benefit analysis of multiple water source utilization in Weihai city based on grey correlation-entropy[J]. Ecological Economy, 2020, 36(10): 155-159.

[17] 赵文举, 马锋, 曹伟, 等. 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, et al. The effect of water fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes cultivated in substrate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 95-101.

[18] WANG F, KANG S Z, DU T S, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1228-1238.

[19] 郭显光. 一种新的综合评价方法-组合评价法[J]. 统计研究, 1995, (5): 56-59.

GUO X G. A New comprehensive evaluation method-combination evaluation method[J]. Statistical Research, 1995, (5): 56-59.

[20] FU Y F, ZHANG M. Research on credit portfolio evaluation of meta-verse listed companies based on the fuzzy borda method[J]. Procedia Computer Science, 2022, 214: 1309-1316.

[21] 郑健, 殷李高, 朱传远, 等. 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, et al. 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.