

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.044

基于模糊 Borda 法的番茄营养液滴灌频率研究

胡晓辉^{1,2} 朱轲钰^{1,2} 张琪^{1,2} 赵玉红^{1,2} 马永博^{1,2}

(1. 西北农林科技大学农业农村部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 陕西省设施农业工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要:为实现设施番茄准确有效施肥管理,以改良金棚8号番茄为试验材料,常规基质栽培番茄营养液管理方式为对照(CK),将番茄结果时期与营养液滴灌频率2因子完全交互耦合,番茄结果期划分为结果前期(第3穗果坐果~第1穗果成熟)和结果后期(第1穗果成熟~第5穗果成熟),各结果期滴灌频率均设置1、3、5次/d共3个频率(供应营养液总量相同),共10个处理,研究不同耦合处理对番茄不同层果实品质和产量的影响。利用主成分分析法、逼近理想解排序法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法4种单一综合评价方法对番茄多层果实进行品质-产量单一算法综合评价,对通过事前一致性检验(Kendall-W)的单一综合评价结果进行模糊Borda组合评价,确定最优营养液滴灌频率方案。结果表明,耦合处理能显著增加番茄产量,不同层果实品质指标最优时,对应的耦合处理不同。4种单一综合评价方法的排序结果存在差异,Kendall-W一致性检验的协和系数为0.920,满足模糊Borda组合评价条件。主成分分析法与模糊Borda法的排序结果相关系数最高,为0.988。基于模糊Borda组合评价方法得出,结果前期1次/d、结果后期3次/d的滴灌频率可兼顾番茄获得较高产量和多层果实品质较优,为最优的营养液滴灌管理方案。本研究结果为设施番茄生产营养液科学管理提供依据。

关键词: 番茄; 滴灌频率; 品质; 产量; 模糊 Borda 法

中图分类号: S275.6; S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)08-0407-09

OSID:



Determining Optimal Drip Irrigation Frequency for Substrate-bag Cultured Tomato Based on Fuzzy Borda Method

HU Xiaohui^{1,2} ZHU Keyu^{1,2} ZHANG Qi^{1,2} ZHAO Yuhong^{1,2} MA Yongbo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwestern China,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Shaanxi Provincial Facility Agricultural Engineering Technology Research Center, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to implement accurate and effective fertilizer management for protected cultured tomato, the tomato 'improved Jinpeng No. 8' was selected as material. With the conventional substrate cultivation tomato nutrient solution management method as the control (CK), the tomato fruiting period was divided into the early fruiting stage (the third fruit of fruit set ~ the first of fruit mature) and the late fruiting stage (after the first ear of fruit mature ~ the fifth ear of fruit mature), the drip irrigation frequency in each fruiting period was set to be 1 time/d, 3 times/d and 5 times/d (the total amount of nutrient solution supplied was the same), and a total of 10 treatments. In order to study the effect of different treatments on the different layers fruit quality and yield of tomato, the effects of different treatment on quality and yield were investigated. Four single comprehensive evaluation methods, including principal component analysis, TOPSIS, membership function analysis and grey correlation analysis, were used to comprehensively evaluate the quality - yield of tomato multi-layer fruits. The single comprehensive evaluation result of the consistency test (Kendall - W) was used for fuzzy Borda combined evaluation to determine the optimal nutrient solution drip irrigation plan. The results showed that coupling treatment can significantly increase tomato yield. When the quality indexes of different layers of fruit were the best, the corresponding coupling treatments were different. There were differences in the ranking results of the four single comprehensive evaluation methods. The Kendall - W consistency test had a

收稿日期: 2021-08-27 修回日期: 2021-09-23

基金项目: 陕西省科技创新团队项目(2021TD-34)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-23-C07)、陕西省技术创新引导专项(2021QFY08-03)和陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2020-YL-09)

作者简介: 胡晓辉(1977—),女,教授,博士生导师,主要从事设施农业理论与生产技术研究,E-mail: hxx1977@163.com

concordance coefficient of 0.920, which satisfied the combined evaluation conditions. The principal component analysis method and the fuzzy Borda method had the highest correlation coefficient (0.988). The best drip irrigation frequency was 1 time/d in the early fruiting stage; 3 times/d in the late fruiting stage based on the fuzzy Borda method, which can achieve higher yields of tomatoes and multi-layer fruits with high quality. The research result can provide the basis for scientific management of nutrient solution produced by facility tomato.

Key words: tomato; drip irrigation frequency; quality; yield; fuzzy Borda method

0 引言

番茄 (*Solanum lycopersicum* L.) 为设施栽培的主要蔬菜作物之一,随着人民生活水平的日益提高,人们在追求产量的同时,越来越重视番茄的品质^[1];加之我国设施农业的快速发展,番茄基质栽培面积不断增加。基质栽培中,滴灌营养液是肥料供给的主要方式,而种植者通常凭借传统土壤栽培经验进行营养液供应管理,但因基质和土壤为作物提供的根际环境差异较大,因此在生产中常造成肥料利用率低、作物产量低和品质不佳等现象^[2-4]。

调整滴灌施肥制度是提高蔬菜品质和产量的重要农业管理方式。众多研究表明滴灌可节水节肥并提高番茄产量^[5-7]。滴灌量主要通过灌水量和施肥量来影响作物生长。番茄产量及构成要素均随灌水量增加呈不同程度的增加趋势^[8]。滴灌频率可通过改变根际含水率、温度和养分环境,来影响植株根系对水分的吸收,进而影响作物生长发育和产量形成^[9-12]。有研究表明提高灌溉频率、减少每次的灌溉量,能够减少土壤的水分散失,提高作物的水分利用率^[13-15],促进番茄果实可溶性糖、有机酸、维生素C含量品质改善^[16]。不同灌溉条件下,适宜作物产量和品质形成的滴灌频率不同^[17]。目前,关于滴灌施肥的研究主要集中于滴灌量和滴灌频率,而关于基质袋培番茄不同生育期的滴灌频率耦合研究还较少。由于不同生育阶段作物的需肥特性存在差异,即使相同的水肥条件下,滴灌频率对作物产量、品质等指标的影响差异也较大^[18]。同时,番茄果层多,单一果层品质无法代表番茄整个生育时期的果实品质,因此,综合考虑作物不同发育阶段、不同果层果实品质指标对滴灌频率的响应特性,科学应用多目标的评价优化方法获得施肥优化方案对实践生产具有重要意义。

主成分分析法、熵权法、逼近理想解排序法(TOPSIS分析法)、隶属函数分析法、灰色关联度分析法等数理统计方法被广泛应用于多指标综合评价研究^[19-21],但由于计算方法不同或人为干扰等原因,这些评价方法无法得到客观且准确的评价结果。因此,为解决各单一评价模型不一致的问题,需要运

用组合评价模型进行进一步的评价。基于整体差异的组合评价模型选用评价价值进行组合,通过对单一评价模型的评价价值进行计算得出组合权重,最大限度地利用了评价结论信息,在运算方式上进行了简化,组合结论的精确性进一步提高^[22]。模糊 Borda 组合评价模型同时考虑了评价价值和排序值,未涉及单一评价模型的权重,评价结果更加客观。目前,模糊 Borda 组合评价模型在农业领域^[23],特别是在番茄多指标综合评价中的应用相对较少。

本文在田间试验基础上,运用主成分分析法、TOPSIS 分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法 4 种单一综合评价方法对番茄的产量与多果层果实品质进行评价,再基于模糊 Borda 组合评价方法进行组合评价,以获得最优的营养液滴灌管理方案,为番茄营养液精准化、自动化管理决策提供依据与参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 3—8 月在陕西省杨凌示范区揉谷设施农业基地(北纬 34°23', 东经 108°07', 海拔 498.68 m)大跨度非对称内保温双层塑料薄膜覆盖大棚(长 80 m, 宽 20 m)内进行。供试番茄品种为改良金棚 8 号,采用基质袋式栽培(基质袋规格(长×宽×高)为 90 cm×20 cm×16 cm、基质体积为 18 L/袋)。栽培基质配比为发酵牛粪与商品基质体积比 1:1,其理化性质为:速效氮质量比 1 732.7 mg/kg、速效磷质量比 711.4 mg/kg、速效钾质量比 2 926.6 mg/kg、pH 值 6.52、电导率(EC)2.37 mS/cm。

1.2 试验设计

3 月 20 日选取长势一致、无病虫害的 4 叶 1 心番茄幼苗定植于基质袋中,各基质袋定植 2 株,株距 40 cm,行距 90 cm。5 层果后摘心打顶。灌溉施肥采用水肥一体化施肥系统进行,系统由储营养液桶、水泵、主管道、滴箭、电磁阀、控制柜、远程控制 APP 等组成,可实现远程操控和营养液定时滴灌。

将番茄结果期按照生长情况划分为结果前期和结果后期。结果前期为番茄第 3 穗果坐果~第 1 穗果成熟(5 月 22 日—6 月 14 日);结果后期为第 1 穗

果成熟~第 5 穗果成熟(6 月 15 日—7 月 20 日)。设置生育期内各处理营养液浇灌总量一致,营养液配方及用量为本实验室前期研究成果^[24]。在每天滴灌营养液总量相同的条件下(2 L/株,阴雨天不供应),设置 3 个滴灌频率,分别为 1 次/d(于 08:00 滴灌)、3 次/d(于 08:00、12:00、16:00 滴灌)和 5 次/d(于 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00 滴灌)。采用完全交互试验设计形成 9 组处理,同时,以种植者经验滴灌频率 1 次/(2 d)为对照(CK),阴雨天不供应。试验处理见表 1。

表 1 试验设计
Tab. 1 Experimental treatment

处理	结果前期滴灌频率/ (次·d ⁻¹)	结果后期滴灌频率/ (次·d ⁻¹)
T1	1	1
T2	1	3
T3	1	5
T4	3	1
T5	3	3
T6	3	5
T7	5	1
T8	5	3
T9	5	5
CK	常规管理,滴灌频率为 1 次/(2 d)	

1.3 测定指标及评价体系构建方法

1.3.1 产量和果实品质测定

各处理随机选取 5 株长势一致的番茄植株,每次摘果使用电子天平(JE1002 型,上海浦春计量仪器有限公司,精度 0.001 g)测定单果质量,记录单株果数,计算单株产量。同时,分别在其第 1、3、5 层果实成熟时选取成熟度、色泽、大小相似的番茄果实进行品质测定。还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定;可溶性总糖含量采用蒽酮-H₂SO₄法测定;维生素 C 含量采用钼蓝比色法测定;糖酸比和可溶性固形物含量采用 ATAGO PAL-1 型数字手持袖珍折射仪测定;番茄红素含量采用甲苯比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G250 染色法测定^[25]。

1.3.2 品质-产量综合评价体系构建

采用主成分分析法^[26]、TOPSIS 分析法^[27]、隶属函数分析法^[28]和灰色关联度分析法^[29]4 种单一综合评价方法对各处理 3 层果实的品质指标(还原糖含量、可溶性总糖含量、维生素 C 含量、糖酸比、可溶性蛋白含量、番茄红素含量、可溶性固形物含量)和产量共 22 个指标进行综合评价。对于 4 种单一综合评价方法得出的排名结果进行事前相容性检验,即 Kendall-W 一致性检验^[30]。在通过一致性检验的条件下,对 4 种单一综合评价方法的结果进

行模糊 Borda 组合评价,构建番茄品质-产量综合评价体系;若未通过一致性检验,则对单一评价方法进行筛选,直至通过一致性检验,再进行模糊 Borda 组合评价。

模糊 Borda 法在进行组合评价时的具体步骤如下:

首先,计算各单一评价方法下得分的隶属优度

$$\mu_{ij} = 0.9 \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.1 \quad (1)$$

式中 x_{ij} ——第 i 个处理在第 j 种方法下的得分

μ_{ij} ——第 i 个处理在第 j 种评价方法下的隶属优度

其次,计算第 i 个处理处于 h 位的模糊频数 ρ_{hi} 及模糊频率 W_{hi} ,计算式为

$$\rho_{hi} = \sum_{j=1}^m \delta_{ih} \mu_{ij} \quad (h=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$W_{hi} = \frac{\rho_{hi}}{\sum_{h=1}^n \rho_{hi}} \quad (3)$$

其中 $\delta_{ih} = \begin{cases} 1 & (\text{处理 } i \text{ 排在 } h \text{ 位}) \\ 0 & (\text{处理 } i \text{ 未排在 } h \text{ 位}) \end{cases}$

式中 m ——使用的单一评价方法数量

n ——处理数量

将排序转换成分数,定义 Q_{hi-j} 表示处理在第 j 种评价方法下第 i 个处理排名第 h 位的得分,即

$$Q_{hi-j} = \frac{(n-h)(n-h+1)}{2} \quad (4)$$

最后,计算处理 i 的模糊 Borda 数

$$B_i = \sum_{j=1}^m W_{hi} Q_{hi-j} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

B_i 越大,表示该处理的番茄品质-产量综合评价越优。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行绘图并进行 TOPSIS 分析、隶属函数分析、灰色关联度分析、模糊 Borda 数的计算;采用 IBM SPSS 23.0 对数据进行主成分分析、Spearman 和 Kendall 相关系数的计算以及方差分析。

2 结果与分析

2.1 滴灌频率对番茄不同层果实品质和单株产量的影响

2.1.1 对第 1 层果实品质的影响

由表 2 可以看出,与 CK 处理相比,结果前期滴灌频率处理可显著增加番茄第 1 层果实的番茄红素含量和可溶性固形物含量,但并未改善番茄还原糖含量、可溶性总糖含量、维生素 C 含量和糖酸比。

滴灌频率为3、5次/d处理的番茄品质各指标无显著差异,除此之外,可溶性蛋白含量和可溶性固形物含量在滴灌频率1、3、5次/d处理下均无显著差异。滴灌频率为3次/d的处理番茄第1层果实的可溶

性蛋白含量、番茄红素含量、可溶性固形物含量最高,分别较CK处理提高了27.26%、34.86%、29.35%。总体来看,滴灌处理对于第1层果实的品质无明显改善效果。

表2 滴灌频率对第1层番茄果实品质的影响

Tab.2 Effects of drip irrigation frequency on quality of tomato fruit in the first layer

滴灌频率/ (次·d ⁻¹)	还原糖 含量/%	可溶性总糖 含量/%	维生素C含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	糖酸比	可溶性蛋白含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	番茄红素含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	可溶性固形物 含量/%
1	(9.34 ± 0.25) ^a	(7.31 ± 0.41) ^c	(14.0 ± 0.52) ^c	(7.61 ± 0.29) ^a	(7.30 ± 0.68) ^{ab}	(3.86 ± 0.33) ^c	(4.97 ± 0.06) ^{ab}
3	(6.44 ± 0.40) ^b	(8.99 ± 0.42) ^b	(18.1 ± 0.24) ^b	(6.67 ± 0.28) ^b	(8.73 ± 0.65) ^a	(10.20 ± 0.21) ^{ab}	(5.73 ± 0.12) ^a
5	(6.42 ± 0.64) ^b	(8.5 ± 0.68) ^{ab}	(19.0 ± 0.69) ^b	(6.55 ± 0.26) ^b	(7.30 ± 0.60) ^{ab}	(10.10 ± 1.24) ^{ab}	(4.93 ± 0.06) ^{ab}
CK	(8.51 ± 2.02) ^a	(10.8 ± 1.97) ^a	(23.5 ± 1.18) ^a	(7.98 ± 0.42) ^a	(6.86 ± 1.13) ^b	(7.63 ± 1.40) ^b	(4.43 ± 0.06) ^c

注:同列数字后不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 对第3层果实品质的影响

由表3可以看出,结果前期滴灌频率显著影响糖酸比($P < 0.05$),极显著影响果实还原糖含量、可溶性总糖含量、维生素C含量、可溶性蛋白含量、番茄红素含量、可溶性固形物含量($P < 0.01$);结果后期滴灌频率极其显著影响除维生素C含量外的果实品质指标($P < 0.01$);两者交互作用极显著影响除可溶性总糖含量外的果实品质指标($P < 0.01$)。除T9处理外,其他耦合处理的番茄还原糖含量和可溶性总糖含

量均较CK处理显著提高,且以T2处理增幅最大,为98.9%和63.90%。与CK处理相比,各耦合处理均未显著提高番茄维生素C含量。T1处理糖酸比最优,较CK处理提高了10.6%。与CK处理相比,各耦合处理显著提高了番茄可溶性蛋白含量和可溶性固形物含量,分别以T2和T6处理含量最高,较CK处理增幅分别为49.1%和29.3%。对于番茄红素含量来说,仅T2、T3、T4 3个处理较CK处理有显著提高,以T2处理最优,较CK处理提高了55.7%。

表3 滴灌频率对第3层番茄果实品质的影响

Tab.3 Effects of drip irrigation frequency on quality of tomato fruit in the third layer

处理	还原糖含量/ %	可溶性总糖 含量/%	维生素C含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	糖酸比	可溶性蛋白含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	番茄红素含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	可溶性固形物 含量/%
T1	(8.78 ± 0.57) ^{cd}	(16.0 ± 0.64) ^{ab}	(16.54 ± 0.16) ^e	(11.23 ± 0.52) ^a	(8.19 ± 0.15) ^c	(6.20 ± 0.79) ^d	(4.9 ± 0.06) ^{efg}
T2	(13.07 ± 0.83) ^a	(17.05 ± 0.69) ^a	(19.45 ± 0.22) ^{abc}	(10.22 ± 0.08) ^{de}	(10.99 ± 0.03) ^a	(11.83 ± 0.79) ^a	(5.0 ± 0.01) ^{efg}
T3	(10.01 ± 0.36) ^b	(14.89 ± 0.61) ^{bcd}	(18.05 ± 0.73) ^{cd}	(11.21 ± 0.13) ^{ab}	(9.88 ± 0.18) ^b	(11.02 ± 0.01) ^a	(5.27 ± 0.06) ^c
T4	(8.44 ± 0.36) ^{cd}	(13.26 ± 0.31) ^{cde}	(20.41 ± 0.75) ^{ab}	(10.63 ± 0.41) ^{bcd}	(8.87 ± 0.12) ^d	(9.18 ± 0.87) ^b	(4.83 ± 0.15) ^g
T5	(9.99 ± 0.56) ^b	(14.96 ± 1.82) ^{bc}	(17.56 ± 0.91) ^{de}	(10.66 ± 0.30) ^{abcd}	(10.11 ± 0.12) ^b	(8.38 ± 0.55) ^{bc}	(5.47 ± 0.06) ^b
T6	(8.9 ± 0.68) ^{cd}	(13.16 ± 0.46) ^{def}	(20.74 ± 0.05) ^a	(10.47 ± 0.24) ^{cd}	(9.13 ± 0.05) ^{cd}	(8.18 ± 0.25) ^{bc}	(5.73 ± 0.12) ^a
T7	(8.07 ± 0.15) ^d	(12.08 ± 1.09) ^{ef}	(19.69 ± 0.08) ^{ab}	(10.54 ± 0.24) ^{cd}	(9.60 ± 0.27) ^{bc}	(8.96 ± 1.47) ^{bc}	(5.20 ± 0.01) ^{cd}
T8	(9.26 ± 0.37) ^{bc}	(14.27 ± 1.05) ^{bcd}	(19.61 ± 0.48) ^{ab}	(9.84 ± 0.16) ^e	(9.51 ± 0.26) ^{bc}	(7.92 ± 0.05) ^{bc}	(5.07 ± 0.06) ^{de}
T9	(6.68 ± 0.45) ^e	(11.41 ± 0.85) ^{fg}	(19.12 ± 1.02) ^{bc}	(10.98 ± 0.38) ^{abc}	(9.87 ± 0.08) ^b	(7.93 ± 0.09) ^{bc}	(4.90 ± 0.01) ^{fg}
CK	(6.57 ± 0.21) ^e	(10.14 ± 0.08) ^g	(19.72 ± 1.38) ^{ab}	(10.15 ± 0.13) ^{de}	(7.37 ± 0.85) ^f	(7.60 ± 0.27) ^c	(4.43 ± 0.06) ^h
结果前期滴灌频率	57.403 ^{**}	30.560 ^{**}	18.768 ^{**}	4.873 [*]	10.382 ^{**}	9.901 ^{**}	41.867 ^{**}
结果后期滴灌频率	58.786 ^{**}	14.142 ^{**}	1.487	12.060 ^{**}	146.616 ^{**}	7.653 ^{**}	36.867 ^{**}
F 结果前期滴灌频率 × 结果后期滴灌频率	10.639 ^{**}	0.513	20.794 ^{**}	4.945 ^{**}	64.490 ^{**}	25.656 ^{**}	52.667 ^{**}

注:*表示 $P < 0.05$ 显著水平,**表示 $P < 0.01$ 极显著水平。下同。

2.1.3 对第5层番茄果实品质的影响

由表4可以看出,结果前期滴灌频率极显著影响维生素C含量、番茄红素含量和可溶性固形物含量($P < 0.01$),但对还原糖含量、可溶性总糖含量、可溶性蛋白含量和糖酸比无显著影响;结果后期滴灌频率极显著影响除可溶性蛋白含量和番茄

红素含量外的其他品质指标($P < 0.01$);两者交互作用极显著影响维生素C含量、番茄红素含量、可溶性固形物含量($P < 0.01$),但对还原糖含量、可溶性总糖含量、可溶性蛋白含量和糖酸比无显著影响。在所有耦合处理中,以T8处理的还原糖含量、可溶性总糖含量、维生素C含量和可溶性固形

物含量最大, 分别较 CK 处理提升 99.5%、80.7%、20.8% 和 44.7%。与 CK 处理相比, 仅 T2 处理显著提升了番茄糖酸比(16.24%); 番茄可溶

性蛋白含量无显著提高; T4 和 T7 处理显著提高了番茄红素含量, 且以 T7 处理为最优(提高了 44.4%)。

表 4 滴灌频率对第 5 层番茄果实品质的影响

Tab. 4 Effects of drip irrigation frequency on quality of tomato fruit in the fifth layer

处理	还原糖含量/ %	可溶性总糖 含量/%	维生素 C 含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	糖酸比	可溶性蛋白含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	番茄红素含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	可溶性固形物 含量/%
T1	(10.14 ± 0.52) ^{ab}	(13.13 ± 0.34) ^b	(13.82 ± 1.10) ^d	(11.32 ± 0.62) ^{abc}	(10.30 ± 0.37) ^b	(5.01 ± 0.60) ^f	(5.20 ± 0.10) ^b
T2	(9.83 ± 1.45) ^{ab}	(16.24 ± 0.27) ^a	(18.05 ± 1.36) ^c	(12.38 ± 1.24) ^a	(10.93 ± 0.31) ^b	(6.80 ± 0.03) ^{de}	(4.63 ± 0.06) ^d
T3	(8.21 ± 2.43) ^{abc}	(11.41 ± 0.49) ^{bc}	(21.74 ± 2.13) ^b	(10.89 ± 0.40) ^{bc}	(10.76 ± 0.09) ^b	(8.59 ± 0.73) ^{bc}	(4.93 ± 0.06) ^c
T4	(7.18 ± 0.88) ^{bc}	(12.10 ± 0.60) ^b	(15.65 ± 0.08) ^d	(11.19 ± 0.28) ^{abc}	(10.76 ± 0.43) ^b	(9.13 ± 0.46) ^{ab}	(5.03 ± 0.06) ^{bc}
T5	(9.58 ± 1.89) ^{ab}	(16.61 ± 0.20) ^a	(21.09 ± 0.81) ^b	(11.70 ± 0.86) ^{abc}	(10.51 ± 0.18) ^b	(8.51 ± 0.62) ^{bcd}	(5.13 ± 0.06) ^{bc}
T6	(8.15 ± 2.08) ^{abc}	(11.88 ± 1.40) ^b	(21.56 ± 0.35) ^b	(10.40 ± 0.21) ^c	(10.77 ± 0.48) ^b	(8.33 ± 0.54) ^{bcd}	(5.20 ± 0.01) ^b
T7	(7.34 ± 0.76) ^{bc}	(12.93 ± 0.10) ^b	(19.93 ± 0.19) ^{bc}	(11.44 ± 0.17) ^{abc}	(10.93 ± 0.22) ^b	(10.66 ± 1.66) ^{ab}	(4.50 ± 0.01) ^d
T8	(11.23 ± 0.72) ^a	(16.66 ± 0.20) ^a	(24.43 ± 0.79) ^a	(11.75 ± 0.59) ^{ab}	(10.69 ± 0.52) ^b	(8.34 ± 0.14) ^{bcd}	(5.60 ± 0.35) ^a
T9	(5.86 ± 1.04) ^c	(11.85 ± 2.01) ^b	(20.81 ± 0.25) ^b	(10.63 ± 0.80) ^{bc}	(10.42 ± 0.06) ^b	(6.63 ± 0.02) ^{ef}	(4.20 ± 0.01) ^c
CK	(5.63 ± 1.41) ^c	(9.22 ± 2.55) ^c	(20.22 ± 0.61) ^b	(10.65 ± 0.33) ^{bc}	(11.95 ± 0.28) ^a	(7.38 ± 1.71) ^{cde}	(3.87 ± 0.06) ^f
结果前期滴灌频率	1.838	0.265	33.455 **	0.976	0.008	19.301 **	17.953 **
结果后期滴灌频率	8.127 **	75.130 **	68.918 **	8.670 **	0.087	0.958	17.047 **
F 结果前期滴灌频率 × 结果后期滴灌频率	2.555	0.692	13.365 **	0.265	2.545	21.705 **	50.884 **

2.1.4 对单株产量的影响

由图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))可知, 结果前期滴灌频率对产量影响不显著, 结果后期滴灌频率显著影响果实产量($P < 0.05$), 二者的交互作用极显著影响产量($P < 0.01$)。不同滴灌频率处理的产量均显著高于 CK 处理; 当结果前期滴灌频率为 1 次/d 时, 随着后期滴灌频率增加, 产量表现出先升后降的趋势, 以 T2 处理产量最高; 结果前期滴灌频率为 3 次/d 时, 产量随后期滴灌频率的增加逐渐降低; 当后期滴灌频率为 5 次/d 时, 产量随后期滴灌频率增加逐渐升高, 最大值为 T9 处理。整体来看, T2、T4、T5、T8 和 T9 处理间产量无显著性差异, 但以 T2 处理产量最高(3.13 kg/株), 较 CK 处理(2.16 kg/株)显著提高了 44.9%。

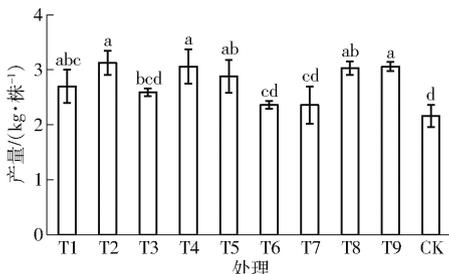


图 1 滴灌频率对番茄产量的影响

Fig. 1 Effects of drip irrigation frequency on yield of tomato

2.2 番茄品质-产量单一综合评价模型构建

由表 2~4 和图 1 可知, 当各层果实的单一品质指标及单株产量达到最优时, 所对应的处理不同。

因此, 依据每层果实的 7 个品质指标和单株产量共 22 项指标构建番茄果实品质-产量综合评价模型, 综合 3 层果实各单一品质指标和产量, 对各处理进行排名, 以得出最优的滴灌频率。运用主成分分析法、TOPSIS 分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法 4 种单一综合评价方法对 22 项指标进行综合评价, 得到综合得分及排名如表 5 所示。

2.3 基于模糊 Borda 组合评价的番茄品质-产量综合评价模型构建

2.3.1 4 种单一综合评价方法排序及事前检验

由表 5 可知, 对 4 种单一综合评价方法的排名存在差异, 标准差在 1~2 的有 4 个处理(T1、T3、T7、CK); 标准差小于 1 的有 6 个处理(T2、T4、T5、T6、T8、T9)。因此, 对排名结果进行组合评价。首先, 对 4 种方法的排序结果进行 Kendall 相关系数计算(表 6)。结果表明, 各单一模型评价结果与其他 3 种单一模型结果间的相关系数在 0.644~0.822 之间, 说明单一模型得出的排名结果间有一定的相关性, TOPSIS 综合评价方法与其他方法的相关系数平均值最低, 为 0.718; 隶属函数分析法与其他分析方法的平均相关系数最高, 为 0.807(表 6)。对 4 种评价方法结果排序进行 Kendall-W 系数一致性检验, 计算得到 Kendall-W 协和系数 $W = 0.920$, 则卡方检验统计量 $\chi^2 = m(n-1)W = 33.11 \geq \chi_{0.05}^2(9) = 16.92$, 表明 4 种评价方法的排序结果有一定的相容

表5 4种单一综合评价方法综合排名

Tab. 5 Comprehensive ranking of four single comprehensive evaluation methods

处理	主成分分析法		TOPSIS 分析法		隶属函数分析法		灰色关联度分析法		排名的 标准差
	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名	
T1	9.315 5	7	0.380 8	9	0.379 9	8	0.712 3	10	1.29
T2	11.795 3	1	0.555 5	3	0.593 1	2	0.816 7	1	0.96
T3	10.363 6	4	0.478 2	7	0.496 5	6	0.752 0	6	1.26
T4	9.371 1	6	0.518 8	6	0.518 9	5	0.757 4	5	0.58
T5	10.856 4	2	0.630 3	1	0.604 1	1	0.800 3	3	0.96
T6	9.776 4	5	0.535 3	4	0.524 4	4	0.767 4	4	0.50
T7	9.484 4	8	0.524 5	5	0.449 5	7	0.750 5	7	1.26
T8	10.735 7	3	0.624 2	2	0.545 7	3	0.808 8	2	0.58
T9	8.336 5	9	0.412 2	8	0.367 9	9	0.713 2	9	0.50
CK	6.761 6	10	0.377 2	10	0.348 7	10	0.726 2	8	1.00

表6 评价方法排序结果的 Kendall 相关系数

Tab. 6 Kendall correlation coefficients of ranking results of comprehensive evaluation methods

方法	主成分 分析法	TOPSIS 分析法	隶属函数 分析法	灰色关联 度分析法	均值
主成分分析法		0.644	0.822	0.689	0.725
TOPSIS 分析法	0.644		0.822	0.689	0.718
隶属函数分析法	0.822	0.822		0.778	0.807
灰色关联度分析法	0.689	0.689	0.778		0.719

表7 模糊 Borda 组合评价模型的综合排名

Tab. 7 Comprehensive ranking of fuzzy Borda combination evaluation model

处理	模糊 Borda 综合得分	排名
T1	4.799 3	7
T2	43.015 7	1
T3	17.990 3	5
T4	10.846 8	6
T5	36.669 1	2
T6	16.470 6	4
T7	4.480 1	8
T8	26.788 8	3
T9	1.156 3	9
CK	0.338 2	10

性,满足事前一致性检验,可以进行组合评价。

2.3.2 基于模糊 Borda 组合评价模型的番茄产量-品质评价指标对滴灌频率的响应

根据模糊 Borda 组合评价模型的排序结果(表7)与4种单一评价模型排序结果进行 Spearman 相关性检验。模糊 Borda 组合评价法与主成分分析法排序结果的相关系数最高,为0.988;与 TOPSIS 分析法排序结果的相关系数最低,为0.855,隶属函数分析法为0.964,灰色关联度分析法为0.891。平均相关系数为0.925,说明模糊 Borda 组合评价的排序结果与4种单一评价方法相关性强,可以将其用于构建番茄品质-产量组合评价模型。根据模糊 Borda 组合评价得出的综合评价得分,即按模糊 Borda 综合得分排序,综合排名为 T2、T5、T8、T6、T3、T4、T1、T7、T9、CK(表7),T2 综合得分为43.015 7,即结果前期滴灌频率为1次/d、结果后期滴灌频率为3次/d的处理番茄品质和产量综合最优。同时,当结果前期滴灌频率相同时,随着结果后期滴灌频率的增加,模糊 Borda 综合得分均呈先增后降的变化趋势。当结果后期滴灌频率为1次/d和5次/d时,随结果前期滴灌频率增加,模糊 Borda 综合得分表现出先增后降的趋势;后期滴灌频率为3次/d的处理排名前3,且随结果前期滴灌频率的增加,模糊 Borda 综合得分逐渐下降。

2.3.3 模糊 Borda 组合评价模型事后检验

由模糊 Borda 组合评价模型序值与各单一评价方法序值的 Spearman 相关性分析结果可以看出,平均相关系数为0.925,其中,主成分分析法与模糊 Borda 模型的排序结果相关系数最高,为0.988。模糊 Borda 组合评价模型的 $t = 6.886 > t_{0.01(8)} = 3.355$,通过了一致性检验。

3 讨论

番茄是一种需水量较大且对水肥较敏感的蔬菜^[31],结果期是其水肥敏感期^[32],协调的水肥供应可以实现番茄节水节肥高效优质生产。不同生育阶段营养液滴灌频率耦合处理对番茄不同层次果实的品质影响不同。与 CK 处理相比,营养液滴灌频率对番茄第3、5层果实品质和产量有明显的改善效果,对第1层果实品质无显著改善,这表明番茄果实形成初期,滴灌频率并不是构成番茄品质形成的主要因子。T2 处理(结果前期营养液滴灌频率为1次/d、结果后期营养液滴灌频率为3次/d)的第3层果实有4个品质指标达到最优,

这表明前期滴灌频率小,滴灌间隔较长,会形成轻度水分胁迫,有利于番茄品质提升^[33]。第 5 层果实的多数品质指标和产量主要受结果后期滴灌频率的影响,其中 T9 处理的品质指标较差,这说明番茄的品质与灌溉频率表现出一定的饱和效应,整个生育期灌溉频率增加不利于品质的形成,这与王鹏勃等^[34]所得结果一致。哈婷等^[35]在关于供液频率的研究中,得出供液频率为 3 次/d 的处理番茄植株长势和根系生长较好,产量最大,本研究结果与其相同。综上所述,各项指标最优时所对应的耦合处理并不完全一致,需要进行多目标综合评价。

从 19 世纪末多目标决策问题提出至今已经形成了多种比较成熟的评价方法^[36],因利用的评价信息和挖掘深度不同以及存在的人为因素等,单一评价方法的评价结果之间存在差异,均无法对客观事实进行准确的判断。因此,将这些单一评价方法得出的结果进行组合评价,可解决多种单一评价方法结果的不一致性、避免单一评价方法的片面性。番茄生育期长,不同果层番茄品质并不相同,且品质由多个品质指标共同决定;产量更是番茄生产中最重要的指标之一。以往的番茄品质和产量的综合评价只利用了某一层番茄果实的品质指标信息,并不能准确反映整个生产周期的番茄果实品质。因此,为了统筹兼顾不同层番茄品质和产量指标,本文利用主成分分析法、TOPSIS 分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法 4 种单一综合评价方法对番茄多层果实进行品质-产量综合评价,并引入模糊 Borda 组合评价方法对 4 种方法的结果进行组合评价,更为准确地分析番茄对耦合处理的响应效果。本试验中,主成分分析法、TOPSIS 分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法的评价结果间相关性较高,相

关系数均值为 0.718 ~ 0.807, Kendall - W 一致性检验的协和系数为 0.920, 满足模糊 Borda 组合评价条件。模糊 Borda 组合评价的排序结果与主成分分析法的排序结果之间的相关系数最高;且以 T2 处理番茄品质和产量综合最优,为最优的营养液滴灌方案。同时, T2、T5 和 T8 处理综合排名前 3, 其结果后期滴灌频率均为 3 次/d, 且随着结果前期滴灌频率的增加综合评价排名逐渐下降, 这说明结果前期滴灌频率的增加并不有利于综合得分的提高, 而在适宜范围内增加后期滴灌频率则有利于品质-产量的综合得分。但本试验仅初步分析了品质、产量与滴灌频率的响应关系, 未涉及深入影响机制, 此外, 对于最优营养液滴灌方案并未进行实际应用效果分析, 尚需开展进一步研究。

4 结论

(1) 营养液滴灌频率对番茄不同层果实品质影响不同。结果前期滴灌频率对第 1 层果实品质无明显改善作用, 不同生育期进行滴灌频率耦合处理可以显著改善番茄第 3、5 层果实品质并增加单株产量。

(2) 主成分分析法、TOPSIS 分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法 4 种单一综合评价方法的排序结果有差异, 但具有一定的相容性, 可以进行组合评价; 主成分分析法与模糊 Borda 法的排序结果相关系数最高。

(3) 模糊 Borda 法综合评价结果表明, 结果前期滴灌频率的增加并不有利于综合得分的提高, 而在适宜范围内增加后期滴灌频率则有利于品质-产量的综合得分。结果前期滴灌频率为 1 次/d、结果后期滴灌频率为 3 次/d 的营养液滴灌方案, 可使番茄产量较高和多层果实具有较优的品质。

参 考 文 献

- [1] CHEN J, KANG S, DU T, et al. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages[J]. *Agriculture Water Management*, 2013, 129: 152 - 162.
- [2] 杜建军, 阚玉景, 黄帮裕, 等. 水肥调控技术及其功能性肥料研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1631 - 1641. DU Jianjun, KAN Yujing, HUANG Bangyu, et al. Research progress on water and fertilizer regulation technology and functional fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilize*, 2017, 23(6): 1631 - 1641. (in Chinese)
- [3] 景博, 刁明, 张坤, 等. 基于临界氮浓度的加工番茄优化施肥效应研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6): 205 - 212. JING Bo, DIAO Ming, ZHANG Kun, et al. Estimation of optimum fertilization effect of processed tomato based on critical nitrogen concentration[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 205 - 212. (in Chinese)
- [4] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480 - 1493. HUANG Shaowen, TANG Jiwei, LI Chunhua, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1480 - 1493. (in Chinese)
- [5] BAR YOSE N B, SAGIV B. Response of tomatoes to N and water applied via trickle irrigation system[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(4): 633 - 637.

- [6] LARA D, ADJANOHOOUN A, RUIZ J. Response on tomatoes sown in the non-optimal season to fertigation on a compacted red ferralitic soil[J]. *Cultivar Tropicales*, 1996, 17(1): 8–9.
- [7] MAHAJAN G, SINGH K G. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1/2): 202–206.
- [8] YOU W, SHICHENG Y, JUNLIANG F, et al. Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 275: 109701.
- [9] EL-HENDAWY S E, HOKAM E M, SCHMIDHALTER U. Drip irrigation frequency: the effects and their interaction with nitrogen fertilization on sandy soil water distribution, maize yield and water use efficiency under egyptian conditions[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 194(3): 180–192.
- [10] 冉辉, 蒋桂英, 徐红军, 等. 灌溉频率和施氮量对滴灌春小麦干物质积累及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(3): 379–386.
RAN Hui, JIANG Guiying, XU Hongjun, et al. Effects of irrigation frequency and nitrogen application rate on dry matter accumulation and yield of spring wheat under drip irrigation[J]. *Acta Triticeae Sinica*, 2015, 35(3): 379–386. (in Chinese)
- [11] KOKSAL A, NAZMI D, DURSUN B, et al. Water productivity of soybeans under regulated surface and subsurface drip irrigation conditions[J]. *Irrigation Science*, 2021, 4(6): 493–499.
- [12] 田建柯, 张富仓, 强生才, 等. 灌水量及灌水频率对玉米生长和水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(9): 815–822.
TIAN Jianke, ZHANG Fucang, QIANG Shengcai, et al. Effects of irrigation amount and frequency on corn growth and water use[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(9): 815–822. (in Chinese)
- [13] INCROCCI L, MARZIALETTI P, INCROCCI G, et al. Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131(1): 30–40.
- [14] HAGEN E, SNAMBUTHIR I, FULCHER A, et al. Comparing substrate moisture-based daily water use and on-demand irrigation regimes for oakleaf hydrangea grown in two container sizes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 179(1014): 132–139.
- [15] FASINA A S, AWE G O, ILORI A O A, et al. Effect of drip irrigation frequency and N-fertilization on yield and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus*) in Ado-Ekiti, Nigeria[J]. *Research on Crops*, 2021, 22(2): 292–300.
- [16] 张筱茜, 郭鹏飞, 张坤, 等. 滴灌频率和施氮量对番茄生长及硝酸还原酶的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(1): 57–62.
ZHANG Xiaoxi, GUO Pengfei, ZAHNG Kun, et al. Effects of drip irrigation frequency and nitrogen application on tomato growth and nitrate reductase[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2018, 36(1): 57–62. (in Chinese)
- [17] 刘炼红, 莫言玲, 杨小振, 等. 调亏灌溉合理滴灌频率提高大棚西瓜产量及品质[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 95–104.
LIU Lianhong, MO Yanling, YANG Xiaozhen, et al. Reasonable drip irrigation frequency improving watermelon yield and quality under regulated deficit in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(24): 95–104. (in Chinese)
- [18] 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 Zhi, YANG Zhi, LI Jinglai, et al. Water and fertilizer irrigation decision of muskmelon based on grey correlation and TOPSIS coupling model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 302–311, 330. (in Chinese)
- [19] 张智, 李曼宁, 杨志, 等. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 267–276.
ZHANG Zhi, LI Manning, YANG Zhi, et al. Comprehensive regulation of water and fertilizer coupling based on multi-index collaboration of strawberry[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 267–276. (in Chinese)
- [20] 郑健, 蔡焕杰, 王健. 温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价模型[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 124–129.
ZHENG Jian, CAI Huanjie, WANG Jian. Fuzzy evaluation to integration benefit of regulated deficit irrigation of mini-watermelon based on information entropy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 124–129. (in Chinese)
- [21] SOUSA C C, DAMASCENO-SILVA K J, BASTOS E A, et al. Selection of cowpea progenies with enhanced drought-tolerance traits using principal component analysis[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2015, 14(4): 1598–1605.
- [22] 杨飞. 组合评价方法及其应用研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2015.
YANG Fei. Combination evaluation method and its application research[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [23] 胡田田, 何琼, 洪霞, 等. 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 Tiantian, HE Qiong, HONG Xia, et al. Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(19): 142–151. (in Chinese)

- [24] 张佼. 番茄袋栽培方式及营养液配方优化研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
ZHANG Jiao. Study on tomato bag cultivation method and nutrient solution formula optimization[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [25] 高俊风. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] 王振华, 陈潇洁, 吕德生, 等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 66-75.
WANG Zhenhua, CHEN Xiaojie, LÜ Desheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 66-75. (in Chinese)
- [27] 朱常安, 和志豪, 蔡泽林, 等. 融合镁元素的水肥多因子耦合对黄瓜综合营养品质的调控[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3258-3270.
ZHU Chang'an, HE Zhihao, CAI Zelin, et al. Regulation of comprehensive nutritional quality of cucumber by water and fertilizer coupling with magnesium[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(18): 3258-3270. (in Chinese)
- [28] 白金顺, 王雪翠, 王艳秋. 箭筈豌豆种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2253-2263.
BAI Jinshun, WANG Xuecui, WANG Yanqiu. Screening of drought-resistance index and drought-resistance evaluation of common vetch (*Vicia sativa* L.) germplasm at germination stage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(12): 2253-2263. (in Chinese)
- [29] 罗浩, 成仿云, 郭鑫, 等. 基于灰色关联度分析法评价筛选紫斑牡丹切花品种[J]. 园艺学报, 2020, 47(11): 2169-2180.
LUO Hao, CHENG Fangyun, GUO Xin, et al. Evaluation and selection of cut-flower cultivars based on grey relational grade analysis in flare tree peony (*Paeonia rockii*) [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(11): 2169-2180. (in Chinese)
- [30] 洪霞, 胡田田, 刘杰, 等. 基于方法集的番茄营养品质组合评价模型构建及其对水肥供应的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 129-138, 148.
HONG Xia, HU Tiantian, LIU Jie, et al. Construction of combination evaluation model for tomato nutrition quality based on method set and its response to water and fertilizer supply[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 129-138, 148. (in Chinese)
- [31] 张友贤, 冯成, 方小宇, 等. 日光温室滴灌条件下番茄需水规律研究[J]. 节水灌溉, 2014(8): 16-18.
ZHANG Youxian, FENG Cheng, FANG Xiaoyu, et al. Study on the law of tomato water requirement under drip irrigation in solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2014(8): 16-18. (in Chinese)
- [32] 刘浩. 温室番茄需水规律与优质高效灌溉指标研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
LIU Hao. Water requirement and optimal irrigation index for effective water use and high-quality of tomato in green house[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2010. (in Chinese)
- [33] 郝舒雪. 不同生育期水分胁迫及复水对番茄生理特性、品质及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
HAO Shuxue. Effects of water stress and re-water in different growth stages of tomato on physiological characteristics, fruit quality and yield[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [34] 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 314-323.
WANG Pengbo, LI Jianming, DING Juanjuan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 314-323. (in Chinese)
- [35] 哈婷, 张向梅, 李建设, 等. 营养液供液量及供液频率对高糖度番茄生长、产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(10): 1484-1491.
HA Ting, ZHANG Xiangmei, LI Jianshe, et al. Effects of supply amounts and frequencies of nutrient solution on plant growth and fruit quality of highly sugary tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(10): 1484-1491. (in Chinese)
- [36] 宋庆克, 汪希龄, 胡铁牛. 多属性评价方法及发展评述[J]. 决策与决策支持系统, 1997(4): 130-140.
SONG Qingke, WANG Xilin, HU Tieniu. Multi-attribute evaluation method and development review[J]. Decision Making and Decision Support System, 1997(4): 130-140. (in Chinese)