

网络出版时间:2018-12-04 10:11

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.06.009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20181204.1010.018.html>

全有机营养模式下番茄综合品质评价及其 对有机肥水耦合的响应

马乐乐^{1,2}, 高 宁³, 杨百良¹, 任瑞丹^{1,2}, 范兵华^{1,2}, 李建明^{1,2}

(1 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 2 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3 榆林职业技术学院, 陕西 榆林 719000)

[摘 要] 【目的】探究有机基质加有机营养液的全有机营养模式下番茄最优的水肥施用量组合, 为设施番茄有机栽培提供理论依据。【方法】以番茄为试材, 有机营养液滴灌量分别设 0, 3.48, 12, 20.52 和 24 L/株 5 个水平, 水分滴灌量依据蒸腾蒸发量(ET)分别设 1.2ET, 1.26ET, 1.40ET, 1.54ET, 1.60ET 5 个水平, 采用二因子五水平正交旋转组合设计, 设 9 个处理, 进行番茄袋培试验, 测定番茄果实 7 项单一品质指标(可溶性固形物含量、可溶性糖含量、有机酸含量、糖酸比、番茄红素含量、维生素 C 含量和可溶性蛋白含量), 采用主观层次分析法、客观熵权法对各单一指标进行赋权, 再利用基于博弈论的组合赋权法计算各指标权重, 然后用近似理想解法构建番茄果实综合品质评价指标, 建立评价综合品质的数学模型, 并分析其对有机肥水耦合的响应关系。【结果】采用基于博弈论的组合赋权法确定的单一品质指标权重次序为: 番茄红素含量>可溶性蛋白含量>可溶性糖含量>可溶性固形物含量>糖酸比>有机酸含量>维生素 C 含量。所建模型达到显著水平, 随有机营养液和水分滴灌量的增加, 番茄果实综合品质均呈现先升高后降低的趋势, 二者的交互作用对综合品质的影响为正效应, 任一单因素对综合品质的影响均为负效应, 其中有机营养液滴灌量对综合品质的影响效应大于水分。当有机营养液滴灌量为 10.30 L/株、水分滴灌量为 1.35ET 时, 番茄果实综合品质评价价值最高, 为 0.98。【结论】有机肥水耦合能显著提升番茄果实综合品质, 合理控制有机营养液和水分滴灌量可以有效改善番茄果实综合品质。

[关键词] 番茄有机栽培; 全有机营养; 有机肥水耦合; 综合品质评价

[中图分类号] S641.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2019)06-0063-10

Construction of integrated quality index of tomato with total organic nutrition and its response to organic fertilizer and water coupling

MA Lele^{1,2}, GAO Ning³, YANG Bailiang¹, REN Ruidan^{1,2}, FAN Binghua^{1,2}, LI Jianming^{1,2}

(1 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwestern China, Ministry of Agriculture,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Yulin Vocational and Technical College, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: 【Objective】The optimal combination of organic nutrient solution and water drip irrigation for tomato was studied under organic nutrition with organic matrix and organic nutrient solution to provide theoretical basis for organic cultivation of tomato facilities. 【Method】The drip volume of organic nutrients was set to 5 levels of 0, 3.48, 12, 20.52 and 24 L/plant, and the water drip volume was set to 5 levels of 1.2ET, 1.26ET, 1.4ET, 1.54ET, and 1.60ET. The two-factor five-level orthogonal rotation combination

[收稿日期] 2018-04-20

[基金项目] 国家大宗蔬菜产业技术体系项目(CARS-23-C05); 国家“十三五”重点研发项目(2016YFD0201005); 陕西省重点研发项目(2017ZDXM-NY-003)

[作者简介] 马乐乐(1992—), 男, 安徽亳州人, 在读硕士, 主要从事设施作物生理生态及有机栽培研究。E-mail: malele6666@163.com

[通信作者] 李建明(1966—), 男, 陕西洛川人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事设施农业工程与蔬菜生理生态研究。

E-mail: lijianming66@163.com

was designed with a total of nine treatments for tomato bag cultivation test. After determining seven quality indicators of tomato fruit (soluble solids content, soluble sugar content, organic acid content, sugar-acid ratio, lycopene content, vitamin C content and soluble protein content), the weight of each indicator was calculated by subjective analytic hierarchy process, objective entropy method, and weighted combination method based on game theory. Then, an evaluation index for comprehensive quality of tomato fruit was constructed by using an approximate ideal solution, a mathematical model of comprehensive quality was established, and the response relationship of organic fertilizer and water was analyzed. 【Result】 The weight order of the quality indicators determined by combination weighting method was lycopene content > soluble protein content > soluble sugar content > soluble solids content > sugar-acid ratio > organic acid content > vitamin C content. The established model reached a significant level. With the increase of organic nutrient solution and water drip irrigation amount, the overall quality of tomato fruit showed a trend of increasing first followed by decrease. The interaction between the two had positive effect on the overall quality. Each single factor had negative effect on the overall quality, and the effect of organic nutrient drip irrigation on overall quality was greater than that of water. When the organic nutrient drip volume was 10.30 L/plant and the water drip volume was 1.35 ET, the comprehensive evaluation value of tomato fruit was the highest of 0.98. 【Conclusion】 Coupling of organic fertilizer and water can significantly enhance the overall quality of tomato fruit. Reasonable control of organic nutrient solution and water drip volume can effectively improve the overall quality of tomato fruit.

Key words: tomato organic cultivation; organic nutrition; organic fertilizer-water coupling; comprehensive quality evaluation

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 色泽鲜艳, 风味独特, 是主要的设施栽培蔬菜品种之一^[1], 其果实中含有番茄红素、酚类物质和维生素 C 等营养物质, 这些物质是重要的抗氧化剂^[2], 因此倍受消费者喜爱。传统的蔬菜无机栽培模式生产成本低, 品质低, 且易导致土壤盐渍化^[3], 成为制约设施蔬菜健康发展的瓶颈。由有机基质和有机营养液组成的全有机营养模式具有成本低、无污染、能有效提高蔬菜品质等优点, 在设施蔬菜发展中具有重要意义^[4]。

关于番茄有机栽培, 前人已经开展了一些研究, 如王鹏等^[5]研究发现, 采用有机基质栽培可明显促进番茄的生长发育进程, 果实品质得到显著改善; 李惠等^[6]研究表明, 用堆肥浸提而成的有机营养液能显著提高番茄的净光合速率及植株各部位的氮、磷、钾含量, 加快养分积累速度。肥水是作物生长发育的必要因素, 二者既相互促进又相互制约, 存在明显的耦合关系^[7]。在番茄肥水耦合方面, 前人也有一定研究, 如张军等^[8]研究表明, 肥水耦合能显著提高番茄的水分利用效率, 有效提升其果实品质; 王鹏勃等^[9]研究表明, 番茄果实中的维生素 C、番茄红素、还原糖以及可溶性糖含量随肥料用量的升高呈现先增加后减少的变化趋势, 随基质含水量的增高逐渐降低, 中肥中水处理的番茄果实综合品质得分最高。

前人研究重点主要在于探讨有机基质或有机营养液单因素以及无机肥水耦合对番茄的影响, 而关于番茄有机肥水耦合的研究还较少。

番茄果实品质包括多种指标, 每种指标衡量标准不同但又相互关联^[10], 仅凭单一品质指标很难准确评价品质的优劣, 因此需要对不同品质指标进行综合评价。进行品质综合评价首先要准确确定各单一指标的权重, 权重的确定方法有主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 是一种主观赋权法, 该方法灵活、简捷, 并将定性与定量相结合, 应用广泛, 但无法反映观测值的变异程度^[11]。熵权法是一种客观赋权法, 该方法可以直接利用决策矩阵所给出的信息计算权重, 不引入决策者的主观判断, 但指标的重要性不一定与熵权法确定的权重值成正比^[12]。基于博弈论的组合赋权法^[13]可以将以上两种赋权法得到的权重融合, 得到一个均衡的单一品质指标权重, 然后利用科学的分析方法 (如近似理想解法) 对试验数据进行分析。近似理想解 (Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 法是一种多目标决策分析方法, 具有直观、真实、可靠等优点, 在各个领域应用广泛^[14]。因此, 利用基于博弈论的组合赋权法和 TOPSIS 法能够全面客观

地对番茄果实品质进行综合评价。

本试验在有机基质加有机营养液的全有机营养模式下栽培番茄,测定了其果实中的可溶性固形物含量、可溶性糖含量、有机酸含量、糖酸比、番茄红素含量、维生素 C 含量和可溶性蛋白含量等 7 项单一品质指标,利用基于博弈论的组合赋权法和 TOP-SIS 法构建番茄果实综合品质评价体系,建立有机肥水与综合品质评价值的回归模型,并分析综合品质对有机肥水耦合的响应关系,旨在探究设施番茄有机栽培中较优的有机营养液和水分滴灌量组合,为设施番茄有机栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验场地与材料

试验于 2017 年 9 月至 2018 年 1 月在西北农林科技大学园艺学院实验场的大跨度非对称水控酿热保温大棚内进行,大棚长 32 m,跨度 17 m,脊高 5.2 m。供试材料为荷兰“佳西娜”串番茄,由荷兰 RijkZwaan 公司提供。

供试基质由本课题组筛选确定^[15],将腐熟牛粪、菇渣和珍珠岩以 3∶3∶4 的体积比混合配制即成,其理化性质及养分含量为:体积质量 0.366 g/cm³,持水孔隙 45.13%,通气孔隙 23.37%,总孔隙 68.50%,pH 值 6.93,电导率值(EC) 2 230 μS/cm,速效 N 含量 2 343.51 mg/kg,速效 P 含量 1 026.66 mg/kg,速效 K 含量 2 312.01 mg/kg,有

机质含量约为 210.54 g/kg。番茄采用基质栽培袋栽培,栽培袋每条长 1 m,宽 0.3 m,高 0.2 m。利用荷兰 HortiMax 公司生产的水肥一体化滴灌设备进行肥水管理。

1.2 试验设计

本试验以有机营养液和水分滴灌量为因素,采用二因子五水平正交旋转组合设计,各处理编码组合及对应值见表 1。试验共设 9 个处理,每处理 3 次重复,每重复 35 株苗,随机区组排列,小区长 13 m,宽 3.3 m。2017-08-05 育苗,09-18 选取生长一致、五叶一心的壮苗定植,缓苗 7 d 后开始水分处理。利用自动连续作物耗水记录仪进行水分监测,在每日灌水后置零,次日灌水前记录读数,得到每日蒸腾蒸发量(ET),根据 ET 确定水分滴灌量。所用有机营养液配方由本课题组据前期试验结果确定^[16],将腐熟猪粪、牛粪和羊粪浸提液(将烘干后的腐熟粪肥与水按 1∶10 的质量比混合后搅拌,在有氧条件下浸提 72 h 后取上清液过滤,即可得到腐熟猪粪、牛粪、羊粪浸提液)按 4∶1∶1 的体积比混合并稀释 4.31 倍而成,其养分含量及理化性质为:全氮 242 mg/L,全磷 52.12 mg/L,全钾 476.61 mg/L,铵态氮 63.21 mg/L,硝态氮 162.08 mg/L,有机质 962.03 mg/L,电导率 1.62 mS/cm,pH 7.76。有机营养液处理从开花结果期开始进行,所有处理施肥频率相同,即每 7 d 1 次,共施 12 次,各处理每次施肥量为表 1 中对应总量除以总施肥次数。

表 1 全有机营养栽培番茄的试验方案

Table 1 Experimental design for total organic nutrition cultivation of tomato

处理 Treatment	有机营养液 Organic nutrient solution		水分 Water	
	编码值 Code	滴灌量/(L·株 ⁻¹) Drip irrigation content	编码值 Code	滴灌量/ET Drip irrigation content
T1	1	20.52	1	1.54
T2	1	20.52	-1	1.26
T3	-1	3.48	1	1.54
T4	-1	3.48	-1	1.26
T5	1.414	24	0	1.40
T6	-1.414	0	0	1.40
T7	0	12	1.414	1.60
T8	0	12	-1.414	1.20
T9	0	12	0	1.40

1.3 测定项目及方法

在番茄结果盛期,每处理取成熟度(红熟)一致的果实 10 个,用榨汁机打成匀浆,用于测定各指标。可溶性固形物含量采用 RHBO-90 型手持折射仪(LINK,Co. Ltd.,Taiwan,China)^[17]测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法^{[18] 195-196}测定;有机酸含量采用 0.1 mol/L NaOH 滴定法^[19]测定;糖酸比为可溶

性糖含量与有机酸含量的比值;番茄红素含量采用分光光度计(Thermo Fisher,USA)法^[20]测定;维生素 C 含量采用钼蓝比色法^{[18] 248-249}测定;可溶性蛋白含量采用考马斯-G250 染色法测定^[21]。

1.4 综合品质评价值的计算

1.4.1 采用 AHP 法计算单一品质指标权重 根据所测定的各个品质指标的性质和关联程度,建立

综合评价层次结构关系。将综合品质目标层(C)分为风味品质(C₁)和营养品质(C₂)2个准则层;风味品质包括可溶性固形物含量(C₁₁)、可溶性糖含量(C₁₂)、有机酸含量(C₁₃)和糖酸比(C₁₄)4个指标层;营养品质则包括番茄红素含量(C₂₁)、维生素C含量(C₂₂)和可溶性蛋白含量(C₂₃)3个指标层。评估层次结构构建后,运用比例标度法确定属性指标间的优先级并建立判断矩阵,利用Yaahp 6.0软件计算各层次相应元素的权重,具体计算方法参见文献[22]。

1.4.2 采用熵权法计算单一品质指标权重 计算采用EXCEL软件进行,首先将番茄单一品质指标实测数据进行归一化处理,消除各指标间量纲不同的影响,然后采用熵权法计算各指标的客观权重,具体计算方法参见文献[12]。

1.4.3 采用基于博弈论的组合赋权法计算单一品质指标最终权重 根据博弈论原理,采用上述2种方法对指标进行赋权后,得到2个指标权重向量,可构造一个基本的权重集化模型,其中必包含满意度最高的权重向量,采用Matlab 6.5软件对得到的集化模型进行运算即可得到最终权重,具体计算方法参见文献[23]。

1.4.4 采用TOPSIS法计算综合品质评价值 采用向量归一化法对番茄营养品质指标实测值进行无量纲化(均视为正向指标)。根据组合赋权法确定的番茄单一品质指标权重,采用TOPSIS法形成加权判断矩阵,得到各处理综合营养品质指标的相对贴近度C_j(0<C_j<1),用C_j表示综合品质评价值,作为衡量综合品质高低的标准,其值越接近1,表示番茄综合品质越好。C_j的具体计算方法参见文献[24]。采用统计软件DPS 7.05对综合品质总排序与单一品质排序进行Spearman相关分析。

1.5 番茄果实综合品质对有机肥水耦合响应的分析

1.5.1 有机肥水耦合与番茄果实综合品质模型的建立及检验 根据TOPSIS分析结果,采用统计软件DPS 7.05对番茄果实综合品质评价值进行二次多项式拟合,建立有机营养液滴灌量、水分滴灌量与综合品质的回归方程,并用该统计软件对回归方程进行显著性检验。

1.5.2 单因素效应的计算 分别对有机营养液和水分滴灌量进行单因素分析,将分析因素以外的因素固定为中间水平,仅考虑该单一因素对因变量的影响,对回归方程进行降维处理,仅保留常数项和含有待分析因素的项,即可分别得到有机营养液滴灌量、水分滴灌量对综合品质的单因素效应函数。

1.5.3 边际效应的计算 分别对有机营养液和水分滴灌量的单因素效应函数求导,即可得到番茄果实综合品质评价值随有机营养液滴灌量、水分滴灌量编码值变化的边际效应函数。

1.5.4 有机肥水耦合效应对番茄果实综合品质的模拟寻优 根据得到的番茄果实综合品质模型,采用EXCEL软件绘制有机营养液和水分滴灌量对番茄综合品质的耦合效应三维图,并利用统计软件DPS 7.05对模型进行模拟寻优。

1.6 数据处理分析

采用统计软件DPS 7.05对数据进行统计分析,采用EXCEL软件对分析结果进行绘图。

2 结果与分析

2.1 有机肥水耦合对番茄果实各单一品质指标的影响

9个有机肥水处理的番茄果实各单一品质指标见表2。

表 2 不同有机肥水处理下番茄果实的各项品质指标
Table 2 Quality of tomato fruit under different treatments

处理 Treatment	可溶性固形物含量/% SSC	可溶性糖含量/% Soluble sugar	有机酸含量/% Organic acid	糖酸比 Sugar/Acid	番茄红素含量/ (mg·hg ⁻¹) Lycopene	维生素C含量/ (mg·g ⁻¹) Ascorbic acid	可溶性蛋白含量/ (μg·g ⁻¹) Soluble protein
T1	5.90±0.50 d	3.29±0.12 c	0.82±0.05 cd	4.00±0.40 a	5.53±0.06 bc	14.45±0.67 d	138.14±4.45 de
T2	5.50±0.28 e	3.26±0.20 c	0.79±0.02 cd	4.11±0.27 a	5.47±0.06 bc	14.27±0.61 de	119.01±8.18 c
T3	4.80±0.36 f	2.22±0.13 e	0.75±0.03 d	2.95±0.22 b	4.10±0.28 d	13.58±0.17 f	100.66±3.17 d
T4	6.00±0.37 cd	3.56±0.36 bc	0.85±0.03 c	4.20±0.31 a	5.66±0.09 b	17.46±0.37 a	138.66±2.25 b
T5	6.30±0.54 c	4.02±0.28 ab	0.87±0.01 bc	4.63±0.38 a	5.62±0.03 bc	15.86±0.85 b	144.86±8.86 b
T6	6.70±0.22 b	4.08±0.51 ab	0.96±0.05 a	4.24±0.34 a	5.77±0.10 ab	16.29±0.32 b	143.83±1.15 b
T7	4.20±0.22 g	2.54±0.43 de	0.63±0.03 e	4.04±0.49 a	2.48±0.17 e	13.39±0.12 f	71.97±3.68 e
T8	5.20±0.14 e	3.08±0.50 cd	0.75±0.05 d	4.09±0.21 a	5.30±0.09 c	13.76±0.31 ef	103.76±1.90 d
T9	7.10±0.45 a	4.23±0.59 a	0.92±0.01 ab	4.57±0.67 a	6.08±0.23 a	15.20±0.28 c	161.92±7.22 a

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note:Different lowercase letters indicate significant difference between treatments (P<0.05).

由表 2 可知,各单一品质指标最优的有机肥水处理不尽相同。风味指标中 T9 处理的可溶性固形物和可溶性糖含量最高;T5 处理的糖酸比最高;T6 处理的有机酸含量最高。营养指标中 T9 处理的番茄红素和可溶性蛋白含量最高;T4 处理的维生素 C 含量最高。但在营养品质较高的基础上,风味品质也需要达到大众的接受标准,而番茄果实品质的单一指标之间既有一定的重叠性,又互相不可替代,因此,为找到最优的有机肥水组合,需要建立一个综合品质评价指标,将番茄果实各单一品质综合起来,进行准确客观的评价。

2.2 番茄果实单一品质指标权重的确定

采用 AHP 法计算的不同层次矩阵和各指标权重结果见表 3~5,CR 值均小于 0.10,说明建立的判断矩阵是合理的。由表 3~5 可知,番茄果实各单一

品质指标权重排序为:糖酸比(C_{14})>番茄红素含量(C_{21})>可溶性固形物含量(C_{11})>可溶性糖含量(C_{12})>维生素 C 含量(C_{22})>有机酸含量(C_{13})>可溶性蛋白含量(C_{23})。

采用熵权法计算的各指标权重排序为:番茄红素含量(0.258)>可溶性蛋白含量(0.248)>可溶性糖含量(0.198)>可溶性固形物含量(0.119)>有机酸含量(0.070)>糖酸比(0.068)>维生素 C 含量(0.039)。可见,AHP 法与熵权法确定的各单一品质指标权重不同,因此,有必要进行权重的集化。

采用基于博弈论的组合赋权法确定的各指标最终权重排序为:番茄红素含量(0.240)>可溶性蛋白含量(0.212)>可溶性糖含量(0.185)>可溶性固形物含量(0.126)>糖酸比(0.101)>有机酸含量(0.077)>维生素 C 含量(0.061)。

表 3 番茄综合品质目标层判断矩阵和权重

目标层 C Objective layer C	C_1	C_2	权重 Weight	一致性检验参数 Consistency test parameters			
				$\lambda_{\max}$			
				CI RI CR			
C_1	1.00	1.46	0.59	2.00	0.00	0.00	0.00
C_2	0.69	1.00	0.41				

注: C_1 为风味品质; C_2 为营养品质。 $\lambda_{\max}$ 是最大特征值; CI 是一致性指数; RI 是平均随机一致性指数; CR 是最终一致性检验系数, $CR<0.10$ 说明具有整体的满意一致性。下同。

Note: C_1 is flavor quality; C_2 is nutritional quality. $\lambda_{\max}$ is maximum eigenvalue; CI is consistency index; RI is average random consistency index; CR is final consistency test coefficient, $CR<0.10$ means overall satisfactory agreement. The same below.

表 4 番茄风味品质准则层判断矩阵和权重

风味品质准则层 C_1 Flavor quality criteria layer C_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	权重 Weight	一致性检验参数 Consistency test parameters			
						$\lambda_{\max}$			
						CI RI CR			
C_{11}	1.00	0.79	1.71	0.84	0.15	4.04	0.01	0.90	0.01
C_{12}	1.27	1.00	1.26	0.60	0.14				
C_{13}	0.59	0.79	1.00	0.49	0.10				
C_{14}	1.19	1.67	2.04	1.00	0.21				

注: C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14} 分别为可溶性固形物含量、可溶性糖含量、有机酸含量、糖酸比。表 6 同。

Note: C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} and C_{14} are soluble solids content,soluble sugar content,organic acid content,and sugar acid ratio,respectively. The same for Table 6.

表 5 番茄营养品质准则层判断矩阵和权重

营养品质准则层 C_2 Nutrition quality criteria layer C_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	权重 Weight	一致性检验参数 Consistency test parameters			
					$\lambda_{\max}$			
					CI RI CR			
C_{21}	1.00	1.37	1.92	0.18	3.00	0.00	0.58	0.00
C_{22}	0.73	1.00	1.40	0.13				
C_{23}	0.52	0.71	1.00	0.09				

注: C_{21} 、 C_{22} 、 C_{23} 分别为番茄红素含量、维生素 C 含量、可溶性蛋白含量。表 6 同。

Note: C_{21} 、 C_{22} and C_{23} are lycopene content,vitamin C content,and soluble protein content,respectively. The same for Table 6.

2.3 基于 TOPSIS 分析法的番茄果实综合品质评价

不同处理番茄综合品质评价价值 C_j 及排序见表

6。由表 6 可知,T9 处理番茄的综合品质评价价值最高,综合品质最好,T6 处理次之,T7 处理的综合品

质评价价值最低,综合品质最差。由表 6 各处理 C_j 值排序与各单一品质实测值排序的 Spearman 相关分析结果可知,各单一品质排序与综合品质排序的相

关性均达到了显著或极显著水平,吻合较好,表明利用 TOPSIS 法分析有机营养液和水分滴灌量对番茄果实综合品质的影响是可靠的。

表 6 基于 TOPSIS 法确定的不同有机肥水处理番茄果实综合品质指标及其排序
Table 6 Tomato fruit comprehensive quality index and sorting in different organic fertilizer and water combinations by TOPSIS

处理 Treatment	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	d^+	d^-	C_j	排序 Sorting
T1	0.114	0.109	0.112	0.109	0.120	0.108	0.123	0.021	0.048	0.691	5
T2	0.106	0.108	0.108	0.112	0.119	0.106	0.106	0.027	0.043	0.609	6
T3	0.093	0.073	0.102	0.080	0.089	0.101	0.090	0.050	0.022	0.305	8
T4	0.116	0.118	0.115	0.114	0.123	0.130	0.123	0.017	0.051	0.752	4
T5	0.122	0.133	0.118	0.126	0.122	0.118	0.129	0.011	0.056	0.831	3
T6	0.130	0.135	0.131	0.115	0.125	0.121	0.128	0.010	0.058	0.858	2
T7	0.081	0.084	0.085	0.110	0.054	0.100	0.064	0.064	0.010	0.141	9
T8	0.101	0.102	0.102	0.111	0.115	0.103	0.092	0.035	0.037	0.518	7
T9	0.137	0.140	0.126	0.124	0.132	0.113	0.144	0.004	0.066	0.938	1
S^+	0.137	0.140	0.131	0.126	0.132	0.130	0.144				
S^-	0.081	0.073	0.085	0.080	0.054	0.100	0.064				
R	0.915**	0.652*	0.891**	0.788*	0.912**	0.686*	0.961**				

注: C_j 表示相对贴近度; S^+ 和 S^- 分别表示理想解与负理想解; d^+ 和 d^- 分别表示各处理与理想解和负理想解的加权距离; R 表示综合品质总排序与单一品质排序的 Spearman 相关系数;* . 显著相关($P<0.05$);* * . 极显著相关($P<0.01$)。
Note: C_j indicates relative closeness degree; S^+ and S^- represent ideal solution and negative ideal solution, respectively; d^+ and d^- represent weighted distance between each process and ideal solution and negative ideal solution, respectively; R represents Spearman correlation coefficient of total ranking and single quality ranking of the comprehensive quality. *, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

2.4 番茄果实综合品质对有机肥水耦合的响应

2.4.1 有机肥水耦合与番茄果实综合品质模型的建立及检验 分析得到的模型为:

$$Y = 0.94 - 0.12X_1 - 0.11X_2 - 0.30X_1^2 - 0.16X_2^2 + 0.13X_1X_2. \tag{1}$$

式中: Y 代表综合品质评价价值; X_1 代表有机营养液滴灌量的编码值; X_2 代表水分滴灌量的编码值。

对式(1)进行显著性检验: $F=24.62>F_{0.05}(5,3)=9.01$;相关系数 $R^2=0.98$; $P(\text{模型})=0.012<0.05$, $P(\text{常数项})<0.0001$, $P(X_1)=0.0054<0.01$, $P(X_2)=0.0278<0.05$, $P(X_1^2)=0.0009<0.01$, $P(X_2^2)=0.0246<0.05$, $P(X_1X_2)=0.0103<0.05$ 。表明式(1)达到显著水平,各项系数均达到显著或极显著水平,回归模型可靠,有机营养液和水分滴灌量与综合品质之间存在显著的回归关系。

式(1)中一次项系数的正负和绝对值大小反映了其主效应的方向和大小^[25],从中可见,有机营养液和水分滴灌量的交互作用对综合品质具有正效应,说明有机肥水耦合能显著提高番茄果实综合品质。有机营养液和水分滴灌量中任一单因素对综合品质的影响均为负效应,其中有机营养液对综合品质的影响效应比水分大。

2.4.2 单因素效应分析 有机营养液滴灌量、水分滴灌量对综合品质的单因素效应函数式分别为:

$$Y_1 = 0.94 - 0.12X_1 - 0.30X_1^2. \tag{2}$$

$$Y_2 = 0.94 - 0.11X_2 - 0.16X_2^2. \tag{3}$$

式中: Y_1 、 Y_2 分别表示综合品质评价价值对有机营养液和水分滴灌量的单效应函数。

对上述单因子效应模型作图如图 1。

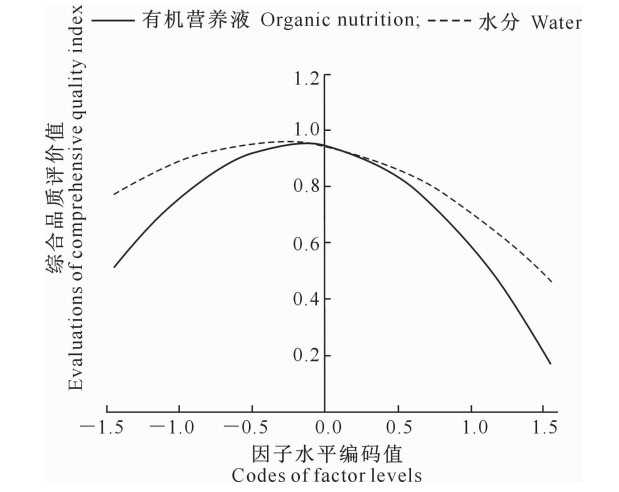


图 1 有机营养液和水分单因素对番茄综合品质的影响
Fig.1 Effects of single factor of organic nutrient solution and water on comprehensive quality of tomato

由图 1 可知,有机营养液和水分滴灌量对综合

品质的影响效应曲线均为开口向下的抛物线,随着二者的增大,综合品质呈现先升高后降低的趋势,说明有机营养液和水分滴灌量都符合报酬递减规律,当二者超过一定范围后再继续增加,都会使综合品质下降,综合品质最高值分别出现在 X_1 为 -0.20 和 X_2 为 -0.34 时。由图 1 还可以看出,随着有机营养液滴灌量的增加,综合品质急剧变化,而随着水分滴灌量的增加,综合品质变化较平缓,说明综合品质对有机营养液的响应更敏感;水分滴灌量曲线整体位于有机营养液滴灌量曲线上方,说明当有机营养液和水分滴灌量都处于较低水平时,有机营养液对综合品质的正效应大于水分,超过一定水平则负效应大于水分。

2.4.3 边际效应分析 番茄果实综合品质评价价值随有机营养液滴灌量、水分滴灌量编码值变化的边际效应函数式分别为:

$$Y_1' = -0.12 - 0.60X_1. \tag{4}$$

$$Y_2' = -0.11 - 0.32X_2. \tag{5}$$

式中: Y_1' 、 Y_2' 分别表示有机营养液和水分滴灌量对综合品质的边际效应函数。

对上述函数作图如图 2 所示。由图 2 可以看出,番茄果实边际综合品质随有机营养液和水分滴灌量的增加呈现降低趋势。在本试验条件下,当有机营养液滴灌量编码值小于 -0.20 时,边际综合品质为正,即对边际综合品质的增强有促进作用;大于 -0.20 时则具有抑制作用。当水分滴灌量编码值小于 -0.34 时,对边际综合品质有促进作用;大于 -0.34 时则具有抑制作用。

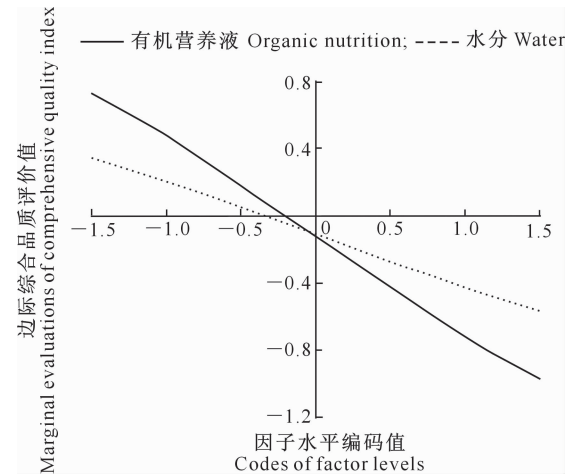


图 2 有机营养液和水分滴灌量对番茄综合品质的边际效应分析

Fig. 2 Marginal effect of organic nutrient solution and water drip irrigation on tomato comprehensive quality

2.4.4 有机肥水耦合效应对番茄果实综合品质的模拟寻优 有机营养液和水分滴灌量对番茄综合品质的耦合效应见图 3。由图 3 可以看出,图像呈开口向下的抛物面,表明当水分滴灌量一定时,综合品质随有机营养液滴灌量增加而先升高后降低;当有机营养液滴灌量一定时,随水分滴灌量增加综合品质呈现相同变化。综合品质较高区域集中在中肥中水区,说明有机营养液和水分滴灌量过高或过低均会降低综合品质。当肥水都处于较高水平时,综合品质最低。通过计算机模拟寻优,结合上述主效应、单因子效应分析及耦合效应分析,得出当 $X_1 = -0.20$, $X_2 = -0.34$, 即有机营养液滴灌量为 10.30 L/株 、水分滴灌量为 1.35 ET 时,综合品质评价价值最高,为 0.98 。

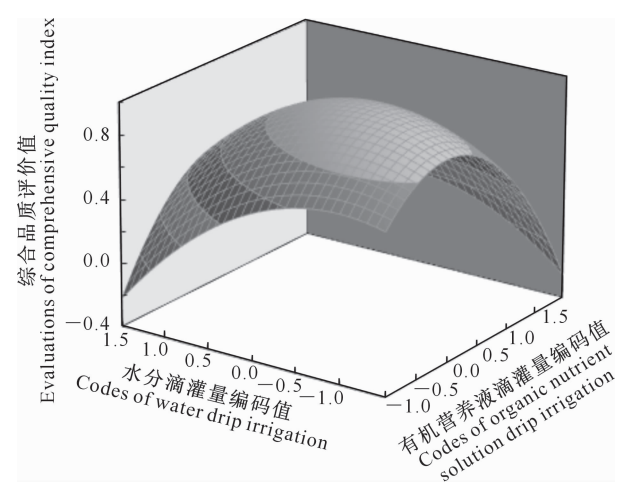


图 3 有机营养液和水分滴灌量对番茄综合品质的耦合效应
Fig. 3 Coupling effect of organic nutrient solution and water drip irrigation on tomato comprehensive quality

3 讨论

肥水是作物生长发育过程中的必需要素,二者通过调控植物碳氮代谢、气孔开闭、酶系活性及光合产物运输等生理生化过程,最终影响果实的品质^[26]。本研究结果表明,有机肥水耦合能显著提高番茄果实综合品质,且有机营养液对综合品质的影响效应大于水分,可能是因为有机营养液中不仅含有氮磷钾等无机养分,还含有大量水溶性有机物(Dissolved organic matter, DOM)等有机活性成分^[27]。贾华丽等^[28]研究发现,DOM 是一类来源广泛,成分非常复杂的混合物,既包含低分子质量的有机酸、游离氨基酸、糖类,又包含各类大分子成分,这些都是合成糖酸物质的直接前体物质,在植物新陈代谢、微生物生长活动、土壤有机质分解等过程中有

着重要作用。有机营养液的影响较大还可能与其含有类激素物质和大量有机质有关,Reeve 等^[29]认为,堆肥提取液中含有类激素活性能力的腐殖酸时,可促进作物生长;Zhang 等^[30]研究表明,有机营养液中有机质含量高、基本养分全面、肥效长,对于改善土壤微生物的群落结构,提高土壤肥力有显著效果。

不合理的肥水施用水平会给番茄生长造成不利影响,只有肥水保持在适宜水平才能获得较高的养分积累速度,从而提高果实品质^[31]。周博等^[32]研究表明,适量施肥可保持番茄产量,增加可溶性糖、还原糖含量,降低有机酸含量,改善果实品质。张国红^[33]研究表明,增加营养液的供应量能够显著提高番茄果实的可溶性糖、还原糖含量,但一定要适量。本研究结果验证了上述说法,有机营养液水平过高或过低时,番茄果实综合品质都呈现较低水平,原因可能是有机营养液水平过低时会导致营养供给不足,而过高时则会对生理代谢起抑制作用,这与 Liu 等^[34]的研究结果相似。有研究表明,低水抑制了植物根系的生长,降低了根系的吸收面积和吸收能力,木质部液流黏滞性增大,从而降低了养分的吸收和运输效率^[35];高水则会对番茄果实品质产生“稀释”效应^[36],在一定范围内控制低水量能显著增强番茄果实品质,这与本研究结果相似。Cristina 等^[37]的研究也表明,适当降低土壤含水量,可提高番茄果实中维生素 C、可溶性糖、有机酸等品质指标的含量。韦泽秀等^[38]研究发现,随灌水量的增加,土壤微生物多样性先增加后降低,说明适当的水分处理有助于土壤微生物多样性形成,有利于促进植物根系的生长和养分吸收,从而提高果实品质。本研究还表明,当有机营养液和水分滴灌量都处于较高水平时,综合品质最差。这可能是由于有机营养液是液体肥,施入后增强了水分对品质的稀释效应;也可能是由于有机营养液内的 DOM 等活性成分在中、低水条件下活性更高,而高水则抑制了其活性。可见有机肥水耦合对番茄综合品质的影响机制很复杂,有待进一步研究。

4 结 论

根据基于博弈论的组合赋权法,确定了番茄果实各单一品质指标的权重,从大到小为:番茄红素含量>可溶性蛋白含量>可溶性糖含量>可溶性固形物含量>糖酸比>有机酸含量>维生素 C 含量,科学评价了各指标的重要程度。TOPSIS 法构建了番茄果实综合品质评价指标,在此基础上,建立了有机

营养液和水分滴灌量对综合品质的回归模型,显著性检验表明回归模型可靠,能够对实际生产进行预测。有机肥水耦合能显著增强番茄果实综合品质,且有机营养液对综合品质的影响效应大于水分。随有机营养液和水分滴灌量的增加,番茄果实综合品质均呈现先升高后降低的趋势,肥水处于较高或较低水平时均不利于番茄果实综合品质的提高。通过计算机对模型的模拟寻优,得出理想的有机肥水施用方案为:有机营养液滴灌量 10.30 L/株,水分滴灌量 1.35 ET,此条件下番茄果实综合品质最优。

[参考文献]

- [1] 岳钉伊,张 静,赵建涛,等. 增施 CO₂ 与 LED 补光对番茄果实品质及挥发性物质的影响 [J]. 食品科学,2018,39(1):124-130.
Yue D Y, Zhang J, Zhao J T, et al. Effect of adding CO₂ and LED light on tomato fruit quality and volatile substances [J]. Food Science, 2018, 39(1): 124-130.
- [2] Toor R K, Savage G P, Heeb A. Influence of different types of fertilizers on the major antioxidant components of tomatoes [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(1): 20-27.
- [3] 袁宇含,南哲佑,朴光一,等. 有机生态型无土栽培技术及展望 [J]. 东北农业科学, 2017, 42(1): 61-64.
Yuan Y H, Nan Z Y, Piao G Y, et al. Organic ecotype soilless culture techniques and prospects [J]. Northeast Agricultural Sciences, 2017, 42(1): 61-64.
- [4] 史林峰,杨美凤. 台湾推出碧全有机农业栽培法 [J]. 现代农业, 1994, 20(10): 15-16.
Shi L F, Yang M F. Introducing Biquan Organic Agricultural Cultivation Method in Taiwan [J]. Modern Agriculture, 1994, 20(10): 15-16.
- [5] 王 鹏,王 净,刘社平,等. 不同有机基质配比对番茄生长发育、产量和果实品质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 211-213.
Wang P, Wang J, Liu S P, et al. Effect of organic matrix ratio on tomato growth, yield and fruit quality [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(5): 211-213.
- [6] 李 惠,李建明,丁 明,等. 堆肥浸提液对番茄、黄瓜种苗生长及养分吸收的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 123-127.
Li H, Li J M, Ding M, et al. Effect of compost extract on growth and nutrient uptake of tomato and cucumber seedlings [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 123-127.
- [7] 杜清洁,李建明,潘铜华,等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 10-17.
Du Q J, Li J M, Pan T H, et al. Effects of water and fertilizer coupling on tomato yield and comprehensive quality under drip

- irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3):10-17.
- [8] 张 军,李建明,张中典,等. 水肥对番茄产量、品质和水分利用率的影响及综合评价 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(7):215-222.
- Zhang J, Li J M, Zhang Z D, et al. Effect and comprehensive evaluation of water and fertilizer on tomato yield, quality and water use efficiency [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(7):215-222.
- [9] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等. 水肥耦合对日光温室袋培番茄产量和品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(10):129-136.
- Wang P B, Li J M, Ding J J, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield and quality of bag cultivated tomato in sun-light greenhouse [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(10):129-136.
- [10] 曹玉鑫,曹红霞,王 萍,等. 营养液浓度对番茄生长、品质以及耐贮性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(7):63-70.
- Cao Y X, Cao H X, Wang P, et al. Effects of nutrient solution concentration on tomato growth, quality, and storability [J]. *Food Science*, 2018, 39(7):63-70.
- [11] Omkarprasad S, Vaidyaa, Sushil K. Analytic hierarchy process: an overview of applications [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 169(1):1-29.
- [12] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5):1021-1023.
- [13] 支 援,王秀峰,梁龙跃,等. 基于完全信息博弈原理的虚拟水战略研究 [J]. *生态经济*, 2018, 34(3):202-207.
- Zhi Y, Wang X F, Liang L Y, et al. Virtual water strategy based on complete information game theory [J]. *Ecology Economy*, 2018, 34(3):202-207.
- [14] Wang Y J, Leeb H. Generalizing TOPSIS for fuzzy multiple-criteria group decision-making [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2007, 53(11):1762-1772.
- [15] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等. 番茄育苗基质理化特性及其对幼苗生长影响的研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(5):137-142.
- Wang P B, Li J M, Ding J J, et al. Physiological characteristics of tomato seedling substrate and its effect on seedling growth [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5):137-142.
- [16] 李 惠. 有机浸提液的制备及其在蔬菜上应用效果的分析 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- Li H. Preparation of organic extract and its application effect on vegetables [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [17] 岳 冬,刘 娜,朱为民,等. 樱桃番茄与普通番茄部分品质指标及氨基酸组成比较 [J]. *食品科学*, 2015, 36(4):92-96.
- Yue D, Liu N, Zhu W M, et al. Comparison of some quality indexes and amino acid composition between cherry tomato and common tomato [J]. *Food Science*, 2015, 36(4):92-96.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京:高等教育出版社, 2000:195-196.
- Li H S. *Physiological and biochemical experimental principles and techniques* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:195-196.
- [19] 西北农业大学植物生理生化教研组. 植物生理学实验指导 [M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1987:122-123.
- Plant Physiology and Biochemistry Research Group of Northwest Agricultural University. *Plant physiology experimental guidance* [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1987:122-123.
- [20] 胡晓波,温辉梁,许 全,等. 番茄红素含量测定 [J]. *食品科学*, 2005, 26(9):566-569.
- Hu X B, Wen H L, Xu Q, et al. Determination of lycopene content [J]. *Food Science*, 2005, 26(9):566-569.
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006:142-143.
- Gao J F. *Plant physiology experimental guidance* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:142-143.
- [22] Albayrak E, Erensal Y C. Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: an application of multiple criteria decision making problem [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, 15(4):491-503.
- [23] 赵 奎,刘维发,曾 鹏,等. 基于博弈论组合赋权 TOPSIS 法的深部进路参数优选 [J]. *有色金属科学与工程*, 2018, 9(2):70-74.
- Zhao K, Liu W F, Zeng P, et al. The game theory approach to parameter optimization of deep combination weighting method based on TOPSIS [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2018, 9(2):70-74.
- [24] Wang F, Kang S Z, Du T S. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8):1228-1238.
- [25] 李建明,潘铜华,王慧玲,等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10):82-89.
- Li J M, Pan T H, Wang H L, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthesis, yield and water use efficiency of tomato [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10):82-89.
- [26] 蔡东升,李建明,樊翔宇,等. 基质栽培营养液氮磷钾补充水平对番茄养分吸收及产量品质影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2017, 48(1):7-14.
- Cai D S, Li J M, Fan X Y, et al. Effects of N, P and K supplementation levels on nutrient uptake, yield and quality of tomato [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(1):7-14.
- [27] 钟秀娟. 不同工艺对堆肥水溶性有机物及肥效的影响 [D]. 广州:华南农业大学, 2016:7-12.
- Zhong X J. Effect of different processes on composted water-soluble organic matter and fertilizer efficiency [D]. Guang-

- zhou; South China Agricultural University, 2016; 7-12.
- [28] 贾华丽, 郗敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机质生物降解研究进展 [J]. 生态科学, 2016, 35(2): 183-188.
- Jia H L, Xi M, Kong F L, et al. Research progress on biodegradation of dissolved organic matter in soil [J]. Ecological Science, 2016, 35(2): 183-188.
- [29] Reeve J R, Carpenter-Boggs L, Reganold J P, et al. Influence of biodynamic preparations on compost development and resultant compost extracts on wheat seedling growth [J]. Biore-source Technology, 2010, 101(14): 5658-5666.
- [30] Zhang H, Xu M, Zhang F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China [J]. Journal of Agricultural Science, 2009, 147(1): 31-42.
- [31] 黄红荣, 李建国, 张军, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄光合、产量和干物质分配的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 6-12.
- Huang H R, Li J M, Zhang J, et al. Effects of water and fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield, and dry matter allocation under drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7): 6-12.
- [32] 周博, 陈竹君, 周建斌. 水肥调控对日光温室番茄产量、品质及土壤养分含量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 58-62, 68.
- Zhou B, Chen Z J, Zhou J B. Effect of water and fertilizer regulation on tomato yield, quality and soil nutrient content in solar greenhouse [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(4): 58-62, 68.
- [33] 张国红. 施肥水平对日光温室番茄生育和土壤环境的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Zhang G H. Effect of fertilization level on tomato growth and soil environment in sunlight greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [34] Liu K, Zhang T Q, Tan C S. Responses of fruit yield and quality of processing tomato to drip-irrigation and fertilizers phosphorus and potassium [J]. Agronomy Journal, 2011, 103(5): 1339-1345.
- [35] 王海艺, 韩烈保, 黄明勇. 干旱条件下水肥耦合作用机理和效应 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 124-128.
- Wang H Y, Han L B, Huang M Y. Coupling mechanism and effects of water and fertilizers under drought [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(6): 124-128.
- [36] 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 water saving and optimization of irrigation optimization [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [37] Cristina P, Simona T, Orazio S. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid mediterranean climate conditions [J]. Indian Journal of Horticulture, 2011, 129(4): 590-596.
- [38] 韦泽秀, 梁银丽, 山田智, 等. 不同水肥条件下番茄土壤微生物群落多样性及其与产量品质的关系 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(3): 580-586.
- Wei Z X, Liang Y L, Shan T Z, et al. Relationship between soil microbial community diversity and yield and quality of tomato under different water and fertilizer conditions [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3): 580-586.