

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

洪霞^{1,2}, 胡田田^{1,2}, 刘杰^{1,2}, 冯璞玉^{1,2}, 王丽^{1,2}, 杨硕欢^{1,2}, 张美玲³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 内蒙古水利水电勘测设计院设计处, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为探索番茄营养品质综合评价方法,分析综合评价指标对水肥供应的响应,以灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量为试验因素,按照五元二次通用旋转组合设计,进行番茄温室试验,监测番茄可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、番茄红素和维生素 C 等 6 项单一品质指标。应用方法集的思想,以主成分分析法、隶属函数分析法、基于组合赋权的 TOPSIS 模型和灰色关联度分析法 4 种独立的评价方法为基础,运用基于整体差异的组合评价模型,构建番茄营养品质组合评价模型,并探索综合评价指标对水肥供应的响应。结果表明,采用 4 种独立评价方法得到的评价两两之间呈现出良好的相关性,通过 KENDALL-W 一致性检验。组合评价模型与各独立方法的评价值的相关系数均在 0.943 以上,表明组合评价模型的有效性。因此,以此建立番茄综合营养品质指标对水肥用量的响应函数。各水肥因子对番茄综合营养品质的主效应表现为:有机肥用量>施磷量>施氮量≥灌水量>施钾量。当其他因素为中间水平时,番茄综合营养品质随灌水量、施氮量、施磷量和有机肥用量均呈开口向下的抛物线型变化,随施钾量呈开口向上的抛物线型变化。交互作用表现为,灌水量与施钾量、灌水量与有机肥用量之间存在一定的负交互作用,施氮量和施磷量存在一定的正交互作用。将灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量依次控制为 447.9~462.6 mm, 23.2~24.0 t·hm⁻²、532.6~581.0 kg·hm⁻²、418.0~454.3 kg·hm⁻²、712.6~776.9 kg·hm⁻²,是理论最优方案,可望获得较高的番茄综合营养品质值。

关键词:温室番茄;营养品质;组合评价模型;方法集;肥料;灌溉

中图分类号:S641.2 **文献标志码:**A

Construction of comprehensive evaluation model for tomato nutrition quality based on method set and its response to water and fertilizer supply

HONG Xia^{1,2}, Hu Tian-tian^{1,2}, LIU Jie^{1,2}, FENG Pu-yu^{1,2}, WANG Li^{1,2},
YANG Shuo-huan^{1,2}, ZHANG Mei-ling³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Inner Mongolia Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Hohhot, Inner Mongolia 150100, China)

Abstract: The objectives of this study were to investigate the response of tomato nutritional quality to irrigation and fertilization, and to explore a comprehensive method for evaluating the quality. A greenhouse experiment was designed using quadratic general composite rotatable method with five factors including irrigation, organic fertilizer, nitrogen (N) fertilizer, phosphorus (P) fertilizer, and potassium (K) fertilizer. Six quality indexes including soluble solid, soluble sugar, titratable acid, the ratio of sugar and acid, lycopene, and vitamin C were measured at the ripening stage of tomato fruit. We applied method set theory that is based on principal component analysis, member-

ship function analysis, the TOPSIS model based on combination weighting, and grey relational grade analysis. By using whole diversity-based reasoning for objective combined evaluation, the evaluation model for tomato nutrition quality was established and its response to fertilization and irrigation was explored. The results showed that there was a strong correlation between the ranking values obtained by the 4 independent evaluation methods and they were verified by the KENDALL-W consistency test. The correlation coefficients of the ranking values between combination evaluation model and independent method were above 0.943, indicating the evaluation model was reliable. It also reflected the effectiveness of combination evaluation model. Therefore, the response function of tomato comprehensive nutritional quality index to water and fertilizer amount was established. The effects of water and fertilizer factors on the comprehensive nutrient quality of tomato ranked as organic fertilizer quantity > P quantity > N quantity ≥ irrigation quantity > K quantity. When other factors were at the intermediate levels, the comprehensive nutrition quality of tomato responded with increasing water, N, P, or organic fertilizer in an opening downwards parabola, and an opening upwards parabola with increasing K. A negative interaction of the amount of K fertilizer with irrigation and N fertilizer was observed. There was a positive interaction of the amount of P fertilizer and organic fertilizer. It indicated that nutritional quality tomato could be obtained when the amounts of irrigation, organic fertilizer, and N, P, and K fertilizers were at 447.9~462.6 mm, 23.2~24.0 t · hm⁻², 532.6~581.0 kg · hm⁻², 418.0~454.3 kg · hm⁻², and 712.6~776.9 kg · hm⁻², respectively.

Keywords: greenhouse tomato; nutritional quality; combination evaluation model; method set; fertilizer; irrigation

番茄味道鲜美、营养丰富,是世界范围内种植分布最广、食用人数最多的蔬菜之一。我国蔬菜生产中,普遍水肥用量过大,不仅引起资源浪费、利用率下降,也造成环境污染、蔬菜品质下降等严重问题。目前蔬菜产品供应量已经基本满足了市场和消费要求,其品质越来越多地受到研究者和消费者的广泛关注^[1-2]。营养品质是番茄重要的品质之一,有可溶性固形物、可滴定酸、糖酸比、可溶性糖、维生素 C 和番茄红素等多个衡量指标,不同的品质指标之间又有一定的关联,仅凭单一品质指标不能够全面准确评价番茄的品质。而且,水肥用量对各单一品质指标的影响变化较大^[3-4]。如何对番茄营养品质进行客观评价、借以优化水肥管理便成为温室番茄持续、优质、高效生产的重要问题之一。

目前,不同学者采用不同的评价方法对番茄的综合营养品质进行评价,例如层次分析法^[5-6]、熵权法^[7-8]、主成分分析法^[9-10]、隶属函数分析法^[11-12]、灰色关联度分析法^[13-14]和 TOPSIS 分析法^[15-16]等。这些评价方法从不同角度出發,对评价对象的信息利用角度和挖掘深度有所不同,对同一个问题进行评价时,很有可能给出不同的结论^[17],不利于管理者做出更加客观的决策,有一定缺陷。为解决多种评价方法结论不一致的问题,有研究者将其中的两种方法进行组合,试图使评价结果更为客观,但将 3 种以上的独立评价方法组合在一起构建番茄营养品质组合评价模型的尝试较少。为此,本文引入基

于方法集的组合评价模型。

基于方法集的组合评价模型是指在综合评价基本原则指导下,以能独立完成对对象进行综合评价的方法为基础,根据一定的准则和规则从中抽取若干方法,运用这些方法对评价对象进行综合评价,然后通过合理的组合算法将其评价结果进行优化组合的评价模型。通过方法的集成去寻求一个更有效的方法组合,以消除单一方法产生的随机误差和系统偏差,进而解决多方法评价结论的非一致性问题^[18]。

温室蔬菜生产主要依靠肥水的大量投入来提高产量,不仅造成水资源和肥料的浪费,还导致蔬菜发病率高,品质下降,土壤硝酸盐淋失,微量元素缺乏及环境污染^[19]。同时,少施或不施有机肥、偏施氮肥、重施磷肥、少施或不施钾肥的现象也比较普遍,这种长期高氮、富磷、少钾的营养状况,导致养分供应失调,已成为限制当前蔬菜品质提高的主要因素之一。目前关于水肥对番茄营养品质的影响方面,大多集中在水肥单因素或不同肥料用量和配比的效果上^[3, 20-21],且由于选用的作物种类及品种、试验条件不同,所得试验结果不尽相同。全面系统地综合研究水、氮、磷、钾和有机肥多因素及其互作对番茄综合营养品质的影响方面尚未见报道。番茄内在品质的好坏主要取决于其维生素 C、番茄红素、可溶性糖、可滴定酸和可溶性固形物等营养物质的含量以及糖酸比。鉴于以上考虑,本文以五

元二次通用旋转组合设计的番茄水肥试验为基础,选取可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、番茄红素和维生素 C 这 6 项品质指标,采用基于整体差异的组合评价方法^[22],构建番茄营养品质综合评价指标,并分析其对水肥供应的响应关系,以期通过优化水肥管理实现番茄优质高效生产、维持温室土壤健康提供依据与参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年 9 月-2015 年 7 月在陕西省杨凌区大寨村 22 号温室大棚进行。杨凌区位于北纬 34°16'56.24",东经 108°4'27.95",温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量 637.6 mm,平均气温 12.9℃,年温差 27.3℃。年均日照时数 2 163.8 h,无霜期 210 d,昼夜温度 24~31℃/14~19℃。

供试番茄品种为“海蒂”。采用当地普遍使用的无加温土墙温室,长 100 m,宽 6.5 m,脊高 3.5 m。温室内土壤为肥力均匀的壤土,铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾的质量分数分别为 7.65、16.88、227 mg·kg⁻¹和 360 mg·kg⁻¹。10 月 1 日移栽定植,移栽时幼苗 5~6 片叶,高约 15 cm。移栽后浇水至田间持水量(34.5%)进行缓苗。打顶时每株留 3 穗果。宽窄行低垄地膜覆盖栽培,宽行与窄行共宽 1.2 m,沟宽 0.7 m,垄宽 0.5 m。每个小区设 4~6 行植株,共 160 行,每行 15 株,株距 35 cm。追肥采用滴灌施肥方式,每行铺设 1 条滴灌管,滴孔间距同株距。每个小区安装一个施肥罐。相邻小区间铺设埋深 60cm 的塑料布以防止水分和养分在水平方向运移。适时对大棚进行通风,减少病害。

1.2 试验设计

以灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量为试验因素,采用五元二次通用旋转组合设计,共 32 个处理。随机排列。缓苗期过后(约移苗 10 d 后),待土壤含水率接近 75%田间持水量,开始灌水处理。灌水根据天气、温度和作物需水状况,各时期采用不同灌水水平进行膜下滴灌,全生育期共灌水 12 次。从定植至收获后由水表记录灌水量。鸡粪有机肥基施,无机肥部分基施,部分追施,氮、磷、钾肥基施配比为 1:2:1,1~3 次追施配比为 1:1:1,4~12 次追施配比为 1:0.4:1.4。

基施所用肥料为:尿素(含纯 N 为 46.4%)、重过磷酸钙(含 P₂O₅为 44.0%)、硫酸钾(含 K₂O 为 50%)和有机肥(pH 7.55,有机质 3.25%,N 0.29%,P₂O₅0.20%,K₂O 0.301%)。通过灌溉追肥,氮肥用

尿素和硝酸铵,对于≤-1 水平的部分,用硝酸铵;超出部分用尿素。对于磷肥为非 2 水平的处理,用 CaCl₂按照 2 水平补充钙肥。对磷、钾同时施用的处理,磷肥用磷酸二氢钾,其他处理用氯化钾和磷酸按设计水平补足。试验方案及各处理具体水肥用量见表 1。

1.3 测定项目方法及模型构建方法

在果实成熟期取第二穗果,每株随机选取 2 个红熟果实,用榨汁机打成匀浆,取其匀浆进行分析,每个处理的品质指标测定分别设置 3 个重复,取其均值作为最终结果。可溶性固形物采用 RHBO-90 型号手持折射仪(LINK, Co.Ltd., Taiwan, China)^[23]

表 1 试验设计方案
Table 1 Experiment design

处理号 No.	灌水量 Irrigation amount	施氮量 N rate	施磷量 P rate	施钾量 K rate	有机肥用量 OM rate
1	1(543)	1(855)	1(657)	1(1476)	1(36)
2	1(543)	1(855)	1(657)	-1(369)	-1(12)
3	1(543)	1(855)	-1(219)	1(1476)	-1(12)
4	1(543)	1(855)	-1(219)	-1(369)	1(36)
5	1(543)	-1(285)	1(657)	1(1476)	-1(12)
6	1(543)	-1(285)	1(657)	-1(369)	1(36)
7	1(543)	-1(285)	-1(219)	1(1476)	1(36)
8	1(543)	-1(285)	-1(219)	-1(369)	-1(12)
9	-1(369)	1(855)	1(657)	1(1476)	-1(12)
10	-1(369)	1(855)	1(657)	-1(369)	1(36)
11	-1(369)	1(855)	-1(219)	1(1476)	1(36)
12	-1(369)	1(855)	-1(219)	-1(369)	-1(12)
13	-1(369)	-1(285)	1(657)	1(1476)	1(36)
14	-1(369)	-1(285)	1(657)	-1(369)	-1(12)
15	-1(369)	-1(285)	-1(219)	1(1476)	-1(12)
16	-1(369)	-1(285)	-1(219)	-1(369)	1(36)
17	2(650)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
18	-2(282)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
19	0(456)	2(1140)	0(438)	0(738)	0(24)
20	0(456)	-2(0)	0(438)	0(738)	0(24)
21	0(456)	0(570)	2(876)	0(738)	0(24)
22	0(456)	0(570)	-2(0)	0(738)	0(24)
23	0(456)	0(570)	0(438)	2(1476)	0(24)
24	0(456)	0(570)	0(438)	-2(0)	0(24)
25	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	2(48)
26	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	-2(0)
27	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
28	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
29	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
30	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
31	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)
32	0(456)	0(570)	0(438)	0(738)	0(24)

注:1.括号内数值表示水肥的实际用量,灌水量的单位为 mm,氮、磷、钾的用量单位为 kg·hm⁻²,有机肥用量的单位是 t·hm⁻²。

Note: The values in bracket represent the actual amount of water and fertilizer; unit for irrigation is mm, amounts of N, P, and K are in kg·hm⁻²; unit for organic fertilizer is in t·hm⁻².

测定;可溶性糖采用蒽酮比色法^[24]₁₉₅₋₁₉₆测定;可滴定酸采用 0.1 mol · L⁻¹ NaOH 滴定法^[25]测定;维生素 C 采用钼蓝比色法测定;番茄红素采用 EV300PC 型号紫外-可见分光光度计法 (Thermo Fisher, USA)^[24]₂₄₈₋₂₄₉,测定结果见表 2。

考虑到番茄综合营养品质评价问题的实际,选取基于组合赋权的 TOPSIS 模型(客观熵权法和主观

层次分析法确定权重)^[27]、灰色关联度分析法、主成分分析法、隶属函数分析法 4 种独立的评价方法,在分别使用上述评价方法进行评价的基础上,进行事前相容性检验即 KENDALL-W 一致性检验,采用基于整体差异的组合模型,将各种方法评价的结果进行“汇总”,借助组合评价模型对番茄营养品质进行综合评价。整个模型的处理流程如图 1 所示。

表 2 试验结果

Table 2 Experiment results

处理号 No.	可溶性固形物 Soluble solids /%	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)	番茄红素 Lycopene /(μg · g ⁻¹)	产量 Yield /(kg · hm ⁻²)
1	5.23±0.03	3.15±0.09	0.44±0.01	7.12±0.28	17.53±0.72	31.29±1.42	29584.62
2	4.21±0.00	2.50±0.10	0.38±0.02	6.55±0.47	18.16±0.37	40.24±0.47	24577.12
3	4.21±0.03	1.68±0.08	0.22±0.01	7.71±0.30	18.51±0.62	17.42±1.07	30109.72
4	4.75±0.04	2.39±0.09	0.28±0.01	8.43±0.24	14.61±0.39	22.44±2.94	36689.14
5	4.14±0.00	2.06±0.08	0.29±0.02	7.06±0.11	17.88±0.38	25.51±1.30	20315.80
6	4.64±0.03	2.50±0.09	0.28±0.01	8.98±0.10	13.98±1.08	27.62±2.27	32323.18
7	4.64±0.00	1.67±0.09	0.39±0.02	4.25±0.54	15.61±0.64	19.71±2.43	37603.78
8	3.84±0.03	1.64±0.03	0.25±0.03	6.47±0.94	16.25±1.21	19.75±3.49	31024.48
9	4.75±0.00	2.36±0.17	0.26±0.01	9.06±0.42	23.44±0.23	29.91±1.70	39087.72
10	5.37±0.00	3.07±0.07	0.55±0.02	5.54±0.52	19.54±0.27	40.02±0.46	45667.22
11	5.28±0.03	2.26±0.08	0.36±0.01	6.25±0.27	19.79±3.71	32.11±0.87	53019.74
12	4.36±0.03	1.62±0.13	0.23±0.03	7.03±0.32	20.43±0.15	25.15±3.34	38012.32
13	5.18±0.03	2.45±0.24	0.44±0.00	5.61±0.83	20.55±0.57	41.15±0.40	40225.78
14	4.29±0.00	1.72±0.15	0.22±0.00	7.68±0.56	21.18±0.61	20.11±1.65	33646.40
15	4.37±0.03	1.88±0.05	0.41±0.01	4.56±0.15	20.15±2.18	20.29±1.13	47107.08
16	4.79±0.03	2.61±0.27	0.33±0.03	8.01±0.53	16.25±0.18	22.31±2.03	58114.38
17	4.38±0.03	1.75±0.13	0.32±0.01	5.55±0.43	12.95±0.44	18.87±1.10	29542.68
18	5.06±0.03	1.64±0.20	0.41±0.01	4.04±0.88	20.15±0.87	41.13±0.20	51955.88
19	5.03±0.03	3.08±0.05	0.46±0.00	6.73±0.33	14.70±0.57	23.12±2.19	23753.02
20	4.46±0.03	1.80±0.09	0.40±0.02	4.48±0.41	12.17±0.28	20.58±1.33	27406.34
21	4.99±0.03	3.31±0.12	0.36±0.02	9.27±0.49	19.98±0.64	33.10±1.63	37135.08
22	4.60±0.00	1.75±0.04	0.33±0.00	5.23±0.14	17.32±0.40	20.43±0.82	57948.28
23	5.07±0.03	2.25±0.05	0.29±0.02	7.69±0.43	30.06±0.12	47.21±0.26	53004.88
24	4.69±0.03	2.24±0.02	0.35±0.01	6.44±0.19	26.79±0.50	36.27±1.20	53004.88
25	4.97±0.03	3.01±0.02	0.37±0.01	8.21±0.18	14.13±1.04	29.43±0.62	48949.88
26	3.54±0.03	2.35±0.15	0.24±0.01	9.72±0.39	18.67±0.43	21.36±3.93	27363.08
27	4.88±0.00	2.93±0.10	0.45±0.04	6.51±0.33	20.00±0.30	30.00±1.21	49004.88
28	4.85±0.03	2.70±0.12	0.36±0.01	7.57±0.40	21.24±1.01	31.22±2.56	53004.85
29	4.93±0.03	2.81±0.09	0.35±0.01	8.01±0.33	19.69±0.69	29.57±0.75	55123.93
30	5.02±0.03	3.03±0.36	0.46±0.01	6.58±1.19	20.34±0.25	31.97±3.02	47147.02
31	4.76±0.03	2.76±0.10	0.35±0.01	7.88±0.44	18.27±0.82	29.22±0.52	49747.76
32	4.95±0.03	2.80±0.10	0.44±0.02	6.36±0.63	22.70±1.21	28.36±1.01	52141.95

注:表中“±”后的数值代表各营养指标的标准误。
Note: The numerical value after “±” represents the stand error of nutrient index.

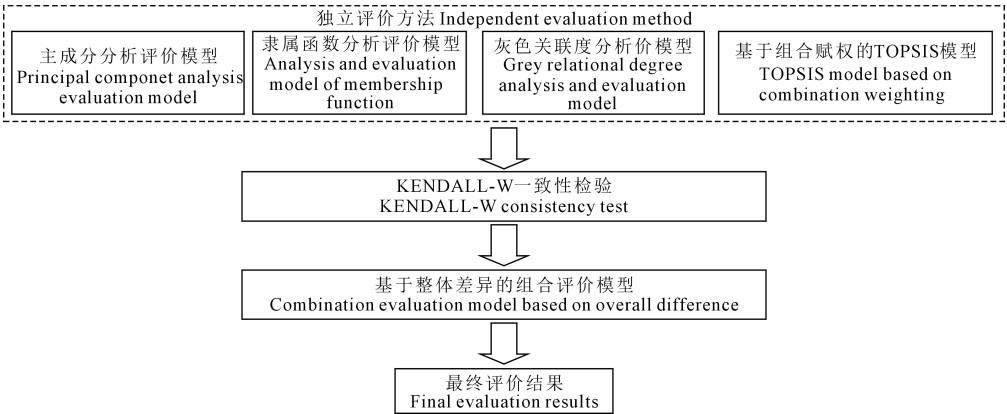


图 1 基于方法集的组合评价模型
Fig.1 Portfolio evaluation model based on method set

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 对试验数据进行熵权法、TOPSIS 分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法、函数变幅值、KENDALL-W 事前一致性检验和整体差异组合评价模型的部分计算。采用 MATLAB6.5 进行基于博弈论的组合赋权评价法中最优化组合系数及其归一化的运算和整体差异组合评价模型的部分计算并绘制相关图表。采用 SPSS 16.0 统计软件对数据进行主成分分析法的运算以及求 Pearson 相关系数。层次分析法所采用的权重值参考文献^[27]。采用统计软件 DPS 7.05 分析试验结果,得到番茄综合营养品质指标评价值与试验因素的二次多项式。依据该多项式计算函数变幅值,并采用降维法,分析各水肥因素对番茄综合营养品质的影响效应。

2 番茄综合营养品质组合评价模型构建

2.1 番茄综合营养品质独立评价方法

本文以番茄果实可溶性固形物、番茄红素、维生素 C、可溶性糖、可滴定酸含量及糖酸比为评价指标,分别采用主成分分析法、隶属函数分析、灰色关联度分析法和基于组合赋权的 TOPSIS 模型对番茄综合营养品质进行独立评价,评价结果见表 3。从表 3 可以看出,每个处理在不同的单一评价模型中的排名存在一定差异,排名的标准差分布在 0.82~5.56,且无明显的规律,单一评价模型得到的排序结果存在着不一致性,这必然对最优水肥用量的确定以及单因子效应和耦合效应分析造成困难和不确定性。4 种独立评价方法的 Pearson 相关系数如表 4 所示。从表中可以看出,每种独立的评价方法与其他 3 种方法的相关系数平均值均在 0.896 以上,表明 4 种独立的评价方法之间存在一定的相关性,在这种相关性和差异性并存的条件下,需要探索更有效的番茄营养品质综合评价方法。

2.2 番茄综合营养品质独立评价方法的 KENDALL-W 一致性检验

采用 KENDALL-W 协和系数检验方法进行事前检验,即对各独立评价方法的排序结果进行一致性检验,若排序结果具有一致性,说明几种方法的结果基本一致,直接进行组合模型的评价;如果在一致性检验中出现不一致性情况,需要进行两两一致性检验。

KENDALL-W 一致性检验主要考查 m 种评价方法对 n 个对象的评判结果是否一致。它通过讨论协和系数 W 这个指标显示样本数据的实际符合与

最大符合之间的分歧程度。KENDALL-W 协和系数的表达式为:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n R_i^2 - 3m^2n(n+1)^2}{m^2n(n^2-1)} \quad r_i = \sum_{j=1}^m y_{ij} \tag{1}$$

式中, m 为评价方法的数目; n 为评价对象的数目; R 为各被评价对象的等级之和。检验统计量 $\chi^2 = m(n-1)W$ 在大样本情况下近似服从 $\chi^2_{\alpha/2}(n-1)$,当 $\chi^2 \geq \chi^2_{\alpha/2}(n-1)$ 时认为 m 种评价方法的评价等级之间具有一致性。

计算得到 KENDALL-W 协和系数 $W = 0.926$, $\chi^2 = 114.830$,远大于 $\chi^2_{0.05}(31) = 52.191$,表明基于组合赋权的 TOPSIS 模型、灰色关联度分析法、主成分分析法和隶属函数分析法评价结果具有相容性。

2.3 基于整体差异组合评价模型的番茄营养品质评价

对于 n 个评价对象, m 种评价方法得到的评价结论(评价值)用矩阵 Y 表示(不失一般性,设 $n \geq 3, m \geq 3$),即

$$Y = [y_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} y_{1j} & y_{1j} & \cdots & y_{1j} \\ y_{2j} & y_{2j} & \cdots & y_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{nj} & y_{nj} & \cdots & y_{nj} \end{bmatrix} \tag{2}$$

若选用线性函数对 m 种评价结论进行组合, $z = (z_1, z_2, \dots, z_{im})^T$ 表示 n 个评价对象的组合评价值向量,有

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}$$
$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}, j = 1, 2, \dots, m \tag{3}$$

式中, y_{ij} 为第 $i(i = 1, 2, \dots, z)$ 个评价对象在第 $j(j = 1, 2, \dots, m)$ 种评价方法中的评价值,假设 $y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})^T$ 为已经过规范化处理后的第 i 个评价对象的评价值向量。

组合评价问题可描述为在给定的规则下寻找一组合权向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$,将 m 维评价结论空间 Y 向(组合权向量确定的)一维组合评价结论空间 Z 做投影变换,并将变换结果用于评价对象(或备选方案)的最终排序。具体步骤如下:

- (1) 按(2)式对原始多评价方法结论矩阵进行标准化处理,得到 Y ;
- (2) 求解实对称矩阵 $H, H = Y^T Y$;
- (3) 求 H 的最大特征值及相应的标准特征向

量 λ' ;

(4) 根据标准特征向量 λ' 各分量的取值情况确定组合权向量 λ ;

(5) 将 λ 代入(4) 式,计算各评价对象的组合评价价值;

$$z_i = \lambda_1 \cdot y_{i1} + \lambda_2 \cdot y_{i2} + \cdots + \lambda_m \cdot y_{im} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

(4)

按照上述方法对番茄营养品质进行综合评价,

并对评价对象按组合评价价值大小进行排序,结果如表 3 所示。对组合评价模型的排序值与各独立方法的排序值进行相关分析(表 4),相关系数均在 0.943 以上,平均值为 0.968,表明组合评价模型与独立评价模型评价结果有很好的相关性,也反映了组合评价模型的有效性。因此,下面将用基于整体差异的组合评价模型的结果进行水肥用量的单因子效应和耦合效应分析及模型寻优。

表 3 各模型的评价结果

Table 3 Results of different evaluation models

处理号 No.	主成分分析法 Principal component analysis	排名 Order	隶属函数分析法 Membership function analysis method	排名 Order	灰色关联 度分析法 Grey correlation method	排名 Order	基于组合赋 权的 TOPSIS 模型 The TOPSIS model based on combination weighting	排名 Order	整体差异组 合评价模型 Overall difference combination evaluation model	排名 Order	单一评价方法 排名的标准差 The standard deviation of a single evaluation method ranking
1	1.07	3	63.31	4	0.90	6	0.52	8	1.03	4	2.22
2	0.12	18	48.67	17	0.78	16	0.54	6	0.33	16	5.56
3	-1.14	28	23.35	29	0.59	31	0.29	26	-1.25	28	2.08
4	-0.13	20	39.87	21	0.68	22	0.37	22	-0.37	21	0.96
5	-0.68	23	32.25	23	0.64	26	0.34	23	-0.80	23	1.50
6	0.07	19	43.55	20	0.69	20	0.44	18	-0.12	20	0.96
7	-1.14	29	24.26	28	0.66	23	0.18	30	-1.30	29	3.11
8	-1.48	32	17.00	32	0.57	32	0.21	28	-1.62	32	2.00
9	0.33	14	52.55	14	0.75	18	0.52	9	0.36	15	3.69
10	1.33	2	71.56	1	1.11	1	0.59	3	1.74	1	0.96
11	0.24	16	51.17	16	0.81	12	0.44	17	0.29	17	2.22
12	-0.96	26	28.83	25	0.63	27	0.32	24	-0.97	25	1.29
13	0.61	11	59.55	6	0.91	5	0.55	4	0.91	6	3.11
14	-0.93	25	28.72	26	0.62	28	0.32	25	-0.98	26	1.41
15	-0.88	24	30.32	24	0.69	21	0.25	27	-0.96	24	2.45
16	0.12	17	44.67	18	0.72	19	0.39	21	-0.12	19	1.71
17	-1.28	31	19.68	31	0.60	30	0.16	32	-1.55	31	0.82
18	-0.35	21	44.10	19	0.83	11	0.45	16	0.05	18	4.35
19	0.62	10	53.17	13	0.86	9	0.41	20	0.45	13	4.97
20	-1.17	30	22.32	30	0.64	25	0.18	31	-1.37	30	2.71
21	1.34	1	68.16	2	0.92	3	0.62	2	1.39	3	0.82
22	-1.01	27	26.63	27	0.65	24	0.20	29	-1.21	27	2.06
23	0.86	5	67.97	3	1.05	2	0.67	1	1.58	2	1.71
24	0.25	15	54.24	12	0.84	10	0.54	5	0.56	12	4.20
25	0.71	7	54.87	11	0.81	13	0.48	14	0.56	11	3.10
26	-0.53	22	33.35	22	0.61	29	0.43	19	-0.63	22	4.24
27	0.72	6	58.23	8	0.86	7	0.50	12	0.73	7	2.63
28	0.56	12	55.92	10	0.80	15	0.52	10	0.58	10	2.36
29	0.66	9	56.48	9	0.80	14	0.51	11	0.60	9	2.36
30	0.94	4	62.52	5	0.91	4	0.53	7	1.02	5	1.41
31	0.46	13	52.44	15	0.77	17	0.48	15	0.37	14	1.63
32	0.66	8	58.27	7	0.86	8	0.48	13	0.69	8	2.71

表 4 各评价模型评价价值的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of evaluation values of each evaluation model

Pearson 相关性系数 Pearson correlation coefficient	主成分分析法 Principal component analysis	隶属函数分析法 Membership function analysis method	灰色关联度分析法 Grey correlation method	基于组合赋权的 TOPSIS 模型 The TOPSIS model based on combination weighting	均值 Mean value
主成分分析法 Principal component analysis		0.988	0.888	0.912	0.929
隶属函数分析法 Membership function analysis method	0.988		0.930	0.941	0.953
灰色关联度分析法 Grey correlation method	0.888	0.930		0.836	0.885
基于组合赋权的 TOPSIS 模型 The TOPSIS model based on combination weighting	0.912	0.941	0.836		0.896
整体差异组合评价模型 Overall difference combination evaluation model	0.979	0.997	0.943	0.953	0.968

3 基于整体差异组合评价模型的番茄综合营养品质指标对水肥供应的响应

对基于整体差异组合评价模型所确定的番茄综合营养品质指标评价价值进行二次多项式拟合,得出灌水量和施肥量 5 个水肥因素 X_i 的水平编码值 $[-2,2]$ 和番茄综合营养品质指标评价价值 Y 的关系。以下是在 $\alpha = 0.1$ 的显著水平下,剔除不显著项后得到的简化回归模型($F_{\text{回}} = 3.32 > F_{0.05}(13,18) = 2.314$):

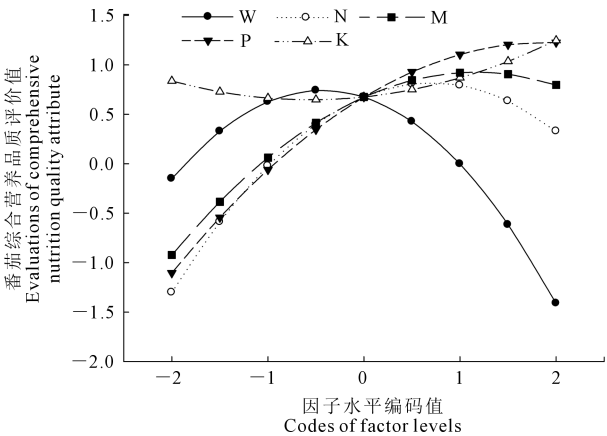
$$Y = 0.676 - 0.315X_1 + 0.408X_2 + 0.583X_3 + 0.103X_4 + 0.430X_5 - 0.364X_1^2 - 0.290X_2^2 - 0.154X_3^2 + 0.091X_4^2 - 0.185X_5^2 - 0.091X_1X_4 - 0.173X_1X_5 + 0.173X_2X_3$$

(5)

式中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_5 分别为灌水量、施氮量、施磷量、施钾量和有机肥用量的编码值。

3.1 单一因素对番茄综合营养品质的影响

通过计算回归模型(5)的函数变幅值 Si ,可知各水肥因素对番茄综合营养品质的影响效应:有机肥($Si = 1.153$)>磷($Si = 1.081$)>氮($Si = 0.876$) $\geq$ 水($Si = 0.822$)>钾($Si = 0.457$)。对回归模型(5)进行降维处理,可知在试验设计的各因素水平范围内,其他因素为中间水平时,番茄综合营养品质与灌水量、施氮量和有机肥用量的关系均呈凸型二次曲线;与施磷量的关系先增加后逐渐趋于平缓;与施钾量的关系呈凹型二次曲线(图 2)。从图 2 中还可以看出,当水肥投入量均为较低水平时,只有钾肥表现为负效应,有机肥的主效应高于氮肥和磷



注:W、N、P、K 和 M 依次表示试验因素灌水量及磷、氮、钾肥和有机肥用量。

Note: W, P, N, K, and M represent irrigation, phosphorus (P), nitrogen(N), potassium(K), and Organic fertilizer (M), respectively.

图 2 试验因素对番茄综合营养品质的影响

Fig.2 Effects of experimental factors on comprehensive nutrition quality of tomato fruit

肥;当水肥投入量为较高水平时,氮肥的主效应减小,低于磷肥和有机肥;在超过最适量后,灌水量、氮肥量和有机肥用量表现为负效应,且灌水量的负效应远大于施氮量和有机肥用量。

3.2 两因素对番茄综合营养品质的耦合效应

3.2.1 灌水量和施钾量对番茄综合营养品质的耦合效应 如图 3 所示,灌水量和施钾量交互项系数为-0.091,为负效应,即二者相互作用阻碍番茄综合营养品质的提高。无论灌水量处于什么水平,随着施钾量的增加,番茄综合营养品质先降低后升高。无论施钾量处于什么水平,随着灌水量的增加,番茄综合营养品质先升高后降低。

3.2.2 灌水量和有机肥用量对番茄综合营养品质的耦合效应 如图 4 所示,灌水量和有机肥用量交互项系数为-0.173,为负效应,即二者相互作用阻碍番茄综合营养品质的提高。当灌水量位于低水平时,随着有机肥用量的增加,番茄综合营养品质呈现上升的趋势;当灌水量位于高水平时,随着有机肥用量的增加,番茄综合营养品质先升高后降低;无论有机肥用量处于什么水平,随着灌水量的增加,番茄综合营养品质先升高后降低。

3.2.3 施氮量和施磷量对番茄综合营养品质的耦合效应 如图 5 所示,施氮量和施磷量的耦合效应关系为上凸曲面,曲面坡度变化较快,即当其它因子为中水平时,番茄综合营养品质随着施磷量和施氮量均呈抛物线状变化。无论施氮量处于什么水平,随着施

磷量的增加,番茄综合营养品质先升高后降低,转折点随施氮量的增大而后移,即施氮量越大,其最高品质对应的施磷量亦越大。同样,无论施磷量处于什么水平,随着施氮量的增加,番茄综合营养品质先升高后降低,转折点随施磷量的增大而后移,即施磷量越大,其最高品质对应的施氮量亦越大。即施氮量和施磷量存在正交互作用,二者间相互作用有助于番茄综合营养品质的提高。最高点为施氮量因子编码水平为 2,有机肥因子编码水平为 1。

3.3 模型寻优

使用 DPS 统计软件,对目标函数进行寻优,得出试验条件下番茄营养品质评价值的最大值 $Y_{max} = 2.860$,可滴定酸含量最大时各因素方案编码值 $X_1 = -1$ 、 $X_2 = 1$ 、 $X_3 = 2$ 、 $X_4 = 2$ 、 $X_5 = 2$,即水、氮、磷、钾和有机肥用量依次为 369 mm、855 kg · hm⁻²、876 kg · hm⁻²、1 476 kg · hm⁻²、48 t · hm⁻²,是理论最优方案。

试验优化的最大番茄营养品质评价值是计算机模拟的结果,是理论最大值,要在特定情况下才能实现,若考虑到非控制因素的影响,这个方案是很难实现的。为了将最大番茄营养品质评价值的方案建立在可靠的基础上,根据所建立的数学模型 5,可以得到 3125 个组合方案的番茄营养品质评价值的理论值,其值分布在-6~2.5,其中<-4.5 的组合方案 52 套,-4.5~-3.5 的方案 202 套,-3.5~-2.5 的方案 394 套,-2.5~-1.5 的方案 642 套,-1.5~-0.5 的方案 711 套,-0.5~0.5 的方案 550 套,0.5~1.5 的方案 414 套,大于 1.5 的方案 160 套,可见,较高的番茄营养品质评价值在-1.5~-0.5 的方案频率分布较大(见表 5),较为稳定,符合实际。表 5 中 95%置信区间就是相应方案的优化区域水平,实际水平为对应水肥实际用量。

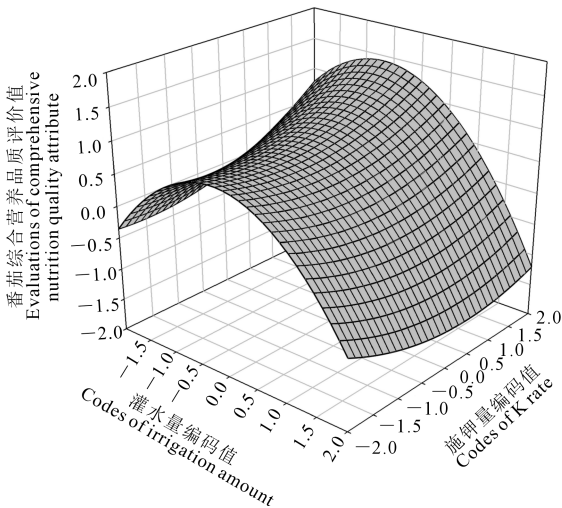


图 3 灌水量和施钾量对番茄综合营养品质的耦合效应
Fig.3 Coupling effect of W and K on comprehensive tomato nutrition quality

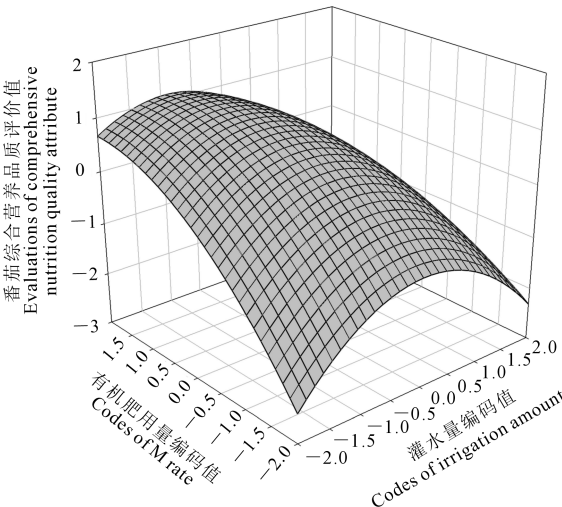


图 4 灌水量和有机肥用量对番茄综合营养品质的耦合效应
Fig.4 Coupling effect of W and M on comprehensive tomato nutrition quality

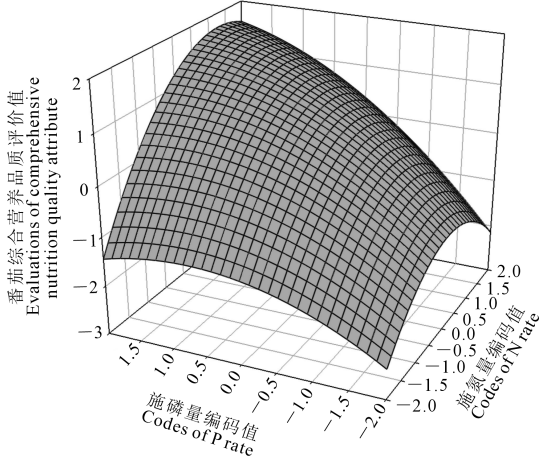


图 5 施氮量和施磷量对番茄综合营养品质的耦合效应
Fig.5 Coupling effect of N and P on comprehensive tomato nutrition quality

表 5 番茄营养品质评价在-1.5~-0.5 的 711 个方案中各因素水平的频率分布

Table 5 Frequency distribution of factors in 711 plans with comprehensive nutrition quality attribute within -1.5~-0.5

水平 Level	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅	
	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency
-2	123	0.173	134	0.188	115	0.162	137	0.193	117	0.165
-1	159	0.224	155	0.218	172	0.242	141	0.198	148	0.208
0	165	0.232	157	0.221	150	0.211	146	0.205	152	0.214
1	130	0.183	140	0.197	152	0.214	146	0.205	144	0.203
2	134	0.188	125	0.176	122	0.172	141	0.198	150	0.211
合计 Total	711	1.000	711	1.000	711	1.000	711	1.000	711	1.000
$\bar{\chi}$	-0.010		-0.046		-0.008		0.018		0.087	
s	0.042		0.042		0.042		0.044		0.043	
95%CI	-0.094~0.075		-0.131~0.039		-0.091~0.075		-0.069~0.105		0.001~-0.173	
实际水平 Actual level	447.9~462.6.0		532.6~581.0		418.0~454.3		712.6~776.9		23.2~24.0	

注: $\bar{\chi}$ 为加权平均值; s 为标准差; 95%CI 为 95%置信区间。
Note: $\bar{\chi}$ represents weighted average; s represents standard deviation; 95% CI represents 95% confidence interval.

4 讨 论

本研究发现,5 个水肥因子中,有机肥用量对番茄综合营养品质影响最大,适量的有机肥可以提高番茄的综合营养品质,但施用过量会使番茄的综合营养品质降低。也有研究表明,在一定范围内,适量施用有机肥可提高番茄中维生素 C 和可溶性糖的含量,降低有机酸的含量^[28-29]。大量的研究结果证明,有机肥可提供植株养分、增加基质有机质、促进微生物繁殖、增强基质的保水保肥能力,这些都是化肥所不能够替代的^[30-31]。有机肥还能够改善土壤结构,大幅度提高蔬菜根系活力^[32],从而明显促进植株生长发育,进而提高番茄的品质^[33]。试验结果表明,钾肥用量对番茄综合营养品质影响较小,原因可能是土壤本底钾含量较高,试验中追施的钾肥对番茄植株的生长及营养品质形成所起到的作用十分有限。

本研究表明,适量施用氮肥和磷肥可以显著提高番茄的综合营养品质,但过量施用反而会导致综合营养品质的下降。这与前人就灌水量和氮、磷肥用量对番茄单一品质指标影响的研究结果一致。例如,有研究表明,在一定范围内,适量施用磷肥或氮肥均可提高番茄中番茄红素、维生素 C、可溶性糖和可溶性固形物的含量,但过量施磷肥或氮肥则会导致维生素 C、可溶性糖和可溶性固形物的降低^[34-35]。灌水量与氮磷肥的影响有类似变化规律,但其影响幅度不同:灌水超过最适值后,灌水量对番茄营养品质影响明显增大(图 2)。在相同施肥水平下,随着灌水量的增加,番茄可溶性糖含量、维生

素 C、番茄红素、有机酸和硝酸盐与灌水量呈负相关关系,表明灌水有明显的“稀释作用”^[34-35]。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、有机酸等的含量^[36]。

按照组合模型介入的时机,分为“评价结论得出前的权重系数的组合”^[37]与“评价结论的组合”^[38]两类;在蔬菜营养品质的评价方面,有些学者曾应用组合评价的思想,采用组合赋权的方式对蔬菜水果的营养品质进行综合评价^[27,39],评价结论一般有序值和评价值两种形式。有学者认为,运用评价值进行组合较评价权重的组合更直接,同时避免了权重组合结果带来的偏差;而与序值组合相比较而言,评价值组合拥有更大的信息量,使得组合评价值更接近真实值^[40]。而本次的分析研究最终确定的组合评价模型为基于整体差异的客观组合评价模型,最终的评价指标集结了单一评价法的评价值,更加客观精确。

选择合适的评价指标、建立科学的评价模型对番茄品质进行综合评价,仍然是一个值得深入研究的问题。只有不断完善评价指标体系和评价模型,才能使评价结果更加准确地反应实际情况。有学者在探讨将独立方法相组合的适用性和相容性^[41],也有一些学者在组合评价结论的基础上进行了二次组合^[42],这在克服一些组合评价方法不足的同时,也增加了计算的复杂性。本文运用独立评价模型和基于整体差异的组合评价模型得出的结论还有待实践的进一步检验。

本研究表明,将灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量依次控制为 447.9~462.6 mm、23.2~24.0 t·

hm^{-2} 、532.6 ~ 581.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、418.0 ~ 454.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、712.6 ~ 776.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是理论最优方案。可望获得较高的番茄综合营养品质值。与过去的研究相比, 本研 究所得的最适水肥用量偏大, 除了试验品种和试验条件不同外, 可能与本次试验采用了越冬季无限生长周期番茄有关。

5 结 论

1) 采用 4 种独立评价方法分别对番茄的营养品质进行综合评价, 得到的排序结果两两之间存在着不一致的地方, 但 4 种独立评价方法之间存在良好的相关性, 通过了 KENDALL-W 一致性检验, 可以应用组合评价模型将 4 种独立评价方法的结果进行组合。基于整体差异的组合评价模型构建的番茄果实综合营养品质评价指标, 其排序值与各独立方法的排序值的相关系数均在 0.943 以上, 表明组合评价模型与独立评价模型评价结果有很好的相关性, 能够克服独立评价模型由于机理结构上的差异性导致评价结论不一致的缺点, 能够更加客观地评价番茄综合营养品质。

2) 在对番茄综合营养品质的影响方面, 各水肥因子的主效应表现为: 有机肥用量 > 施磷量 > 施氮量 ≥ 灌水量 > 施钾量。交互效应表现为, 灌水量与施钾量、施氮量与施钾量之间存在一定的负交互作用, 施磷量和有机肥用量存在一定的正交互作用。番茄营养品质随灌水量、施氮量、施磷量和有机肥用量均呈开口向下的抛物线型变化, 随施钾量呈开口向上的抛物线型变化, 表明灌水量、施氮量、施磷量和有机肥用量过高不利于番茄综合营养品质的提高, 合理增施钾肥可有效提高番茄营养品质。将灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量依次控制为 447.9 ~ 462.6 mm、23.2 ~ 24.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、532.6 ~ 581.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、418.0 ~ 454.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、712.6 ~ 776.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是理论最优方案。可望获得较高的番茄综合营养品质值。

参 考 文 献:

[1] 李会合. 蔬菜品质的研究进展[J]. 北方园艺, 2006, (4): 55-56.
[2] 刘浩, 孙景生, 王聪聪. 灌溉对蔬菜品质影响的研究现状及发展趋势[J]. 中国农村水利水电, 2011, (4): 81-84.
[3] 牛晓丽, 胡田田, 周振江, 等. 水肥供应对番茄果实维生素 C 含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (3): 37-42.
[4] 牛晓丽, 周振江, 瑞李, 等. 水肥供应对番茄中番茄红素含量的影响[J]. 园艺学报, 2011, 11(38): 2111-2120.
[5] 陈贤, 池涛, 杨德. AHP 法在番茄果实商品性性状评价上的应用分析[J]. 西南农业学报, 2008, 21(2): 432-435.
[6] 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.
[7] 刘新华. 基于熵值模型的亏缺灌溉对番茄产量与水分利用的综合评价[J]. 水利规划与设计, 2015, (9): 74-76.
[8] 杨慧, 曹红霞, 李红峥, 等. 基于空间分析法研究温室番茄优质高产的水氮模式[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 896-905.
[9] 孙健, 成自勇, 王铁良, 等. 日光温室春夏茬番茄灌溉模式试验研究[J]. 节水灌溉, 2011, (6): 1-3.
[10] 陈贤, 吴兴恩, 杨德, 等. 主成分权重法在番茄果实商品性综合评价上的应用探讨[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(4): 49-52.
[11] 马洪英, 张远芳, 张晓磊, 等. 运用隶属函数综合评价七份番茄种质资源[J]. 北方园艺, 2011, (1): 13-15.
[12] 吴丽君, 魏艳秀. NaCl 胁迫对番茄种子发芽和幼苗生理特性的影响[J]. 种子, 2013, 32(11): 3-7.
[13] 庞胜群, 赵颢, 李格. 灰色关联分析法综合评价不同品种加工番茄的品质[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24(6): 682-684.
[14] 袁丽萍. 水氮供应对日光温室番茄生育及品质影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
[15] 严海欧, 鲁富宽. DTOPSIS 法在番茄品种综合评价中的应用[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, (3): 175-177.
[16] 夏秀波, 王全华, 尹国香, 等. 应用 DTOPSIS 法对早春日光温室番茄组合进行综合评价[J]. 长江蔬菜, 2012, (2): 21-24.
[17] 柳玉鹏, 李一军. 基于降维思想的客观组合评价模型[J]. 运筹与管理, 2009, (4): 38-43.
[18] 陈国宏, 李美娟. 基于方法集的综合评价方法集化研究[J]. 中国管理科学, 2004, (1): 102-106.
[19] 陈修斌, 潘林, 王勤礼, 等. 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 138-141.
[20] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 151-157.
[21] 谢安坤, 李志宏, 张云贵, 等. 不同施氮水平对番茄产量、品质及土壤剖面硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (1): 26-29.
[22] 李柏洲, 徐广玉. 基于方法集的合作创新企业知识转移风险评价[J]. 科技进步与对策, 2014, 36(6): 112-117.
[23] 陈秀香, 马富裕, 方志刚, 等. 土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J]. 节水灌溉, 2006, (4): 1-4.
[24] 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, 248-249.
[25] 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.
[26] 张连富, 丁霄霖. 番茄红素简便测定方法的建立[J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(3): 51-55.
[27] 吴雪, 王坤元, 牛晓丽, 等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 119-127.
[28] 张占军. 不同有机肥对大棚番茄产量和品质效应的影响[J]. 甘肃科技, 2014, (7): 147-148.
[29] 万群, 阳淑, 熊丙全. 有机肥和化肥不同配比对番茄产量、品质及土壤养分和微生物的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(14): 158-161.