

番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应

吴雪¹, 王坤元², 牛晓丽¹, 胡田田^{1*}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 为构建番茄综合营养品质指标, 分析其对水肥供应的响应, 该文以灌水量和氮、磷、钾肥用量为试验因素, 按照四元二次正交旋转组合设计, 进行番茄盆栽试验, 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 6 项单一品质指标, 根据主观层次分析法与客观熵权法和基于博弈论的组合赋权法, 确定番茄单一营养品质评价指标权重, 次序为: 番茄红素>糖酸比>维生素 C>可溶性糖>可溶性固形物>可滴定酸; 通过近似理想解法, 构建番茄果实综合营养品质评价指标。在此基础上, 通过回归分析建立番茄综合营养品质与水肥因子的数学模型, 分析其对水肥因子的响应关系。结果表明, 各水肥因子对番茄综合营养品质的主效应表现为: 施磷量>施氮量>灌水量>施钾量。当其他因素为中间水平时, 番茄营养品质随灌水量或施氮量的增加呈开口向下的抛物线型变化, 随磷肥用量的增加线性增加, 随施钾量的增加呈开口向上的抛物线型变化。交互作用表现为, 灌水量与施氮量、磷与钾肥用量之间存在显著交互作用。表明灌水量、氮肥用量过高不利于番茄综合营养品质的提高, 合理增施磷肥和钾肥可有效提高番茄营养品质。

关键词: 肥料; 灌溉; 层次分析法; 番茄; 综合营养品质评价; 灌水量; 四元二次正交旋转组合设计

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.014

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0119-09

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.

Wu Xue, Wang Kunyuan, Niu Xiaoli, et al. Construction of comprehensive nutritional quality index for tomato and its response to water and fertilizer supply[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 119-127. (in Chinese with English abstract)

0 引言

番茄营养丰富、味道鲜美, 是人们广为喜爱的蔬菜品种, 栽培面积仅次于马铃薯。近年来, 蔬菜的品质越来越多地受到研究者和消费者的广泛关注保持^[1]。蔬菜品质包括外观品质、营养品质、储运品质等, 每一类品质又有多种衡量指标, 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准确评价蔬菜的品质, 蔬菜品质的综合评价越来越受到重视。目前, 大多数关于番茄综合品质指标的研究未考虑各品质属性的重要程度不同, 有一定缺陷。品质综合评价的关键在于准确确定各单一指标的权重。目前, 有关权重的确定方法可以分为

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)以其系统、灵活、简洁、并将定性与定量相结合处理复杂决策问题的特点, 得到广泛应用, 但没有反映观测值的变异程度^[2-3], 是一种主观赋权法。熵权法是一种客观赋权法, 有研究将其应用于水质评价, 取得了一定的成果, 但指标的重要性不一定与熵权法确定的权值成正比^[4]。近似理想解法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)是一种多目标决策方法, 具有真实、直观、可靠的优点, 基于熵权的 TOPSIS 法在工程、经济及农业领域应用广泛^[5,7-8], 虞娜等^[6]也曾将基于熵权的 TOPSIS 法应用于评价番茄水肥耦合效应。因此, 本文采用基于博弈论的综合赋权法^[9], 将 AHP 法、熵权法得到的权重融合, 最终得到一个均衡的单一营养指标权重, 并应用 TOPSIS 法进行番茄综合营养品质评价。

温室蔬菜生产中水肥的过量投入不仅造成资源浪费, 还导致蔬菜发病率高, 品质下降, 土壤肥力结构破坏及环境污染^[10-11]。偏施氮肥、重施磷肥、少施或不施钾肥的现象也已成为当前蔬菜品质提

收稿日期: 2013-10-15 修订日期: 2014-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51279169; 50939005); 国家“十二五”863 计划项目(2011AA100504)

作者简介: 吴雪(1989-), 女, 甘肃兰州人, 主要从事蔬菜节水调质理论与技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: wuxue0926@163.com

*通信作者: 胡田田(1966-), 女, 陕西礼泉人, 博士, 教授, 主要从事农业节水理论与技术方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 农业水土工程, 712100。Email: hutiantian@tom.com

高的主要限制因素之一。目前关于水肥对蔬菜单一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^[12-14],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分和氮、磷、钾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Vc、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,而且,番茄的口感品质也与糖酸比有密切关系,为此,本文以四元二次正交旋转组合设计的番茄试验为基础,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,研究番茄综合营养品质对水肥因素的响应关系,以期对番茄的优质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验于2011年4—9月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室节水灌溉试验站遮雨棚中进行。该试验站位于108°04'E, 34°20'N, 年均日照时数2 163.8 h, 无霜期210 d,

昼夜温度24~31℃/14~19℃。供试番茄品种为金鹏1号。供试土壤为壤土耕层土壤,土壤pH值为7.8,有机质质量分数为6.49 g/kg,全氮、全磷和全钾质量分数分别为0.78、0.39和10.90 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾质量分数分别为10.08、4.11和98.20 mg/kg,田间持水量24%。每桶装风干土20 kg。4月11日育苗,5月13日移栽。移栽后立即浇水至田间持水量进行缓苗。8月17号打顶,留四穗果,9月7日试验结束。

1.2 试验设计

试验因素为灌水量以及氮、磷、钾肥施用量(表1)。采用四元二次正交旋转组合设计1/2实施^[15],23个处理组合,4次重复,每盆1株番茄,共92盆,随机区组排列。缓苗期过后,待土壤含水率接近55%田间持水量时(5月26日)开始灌水处理。通过称重法确定灌水时间和灌水量,其灌水周期取决于土壤含水率的变化情况,一般为2~3 d 1次。整个生育期共灌水47次。供试肥料分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。磷肥一次性基施。氮肥和钾肥按基追比1:2施用,等份追肥分别在第一穗果膨大期(6月18日)和第二穗果膨大期(7月8日)随灌水施入。试验方案及各处理具体水肥用量见表2。

表1 试验因素水平及编码
Table 1 Designed variable levels and codes of experimental factors

因素 Factors	变化间距 Intervals	变量设计水平及编码 Designed variable levels and codes ear codes				
		-1.682	-1	0	1	1.682
灌水量 Irrigation amount X_1 /%	23.78	20	36.22	60	83.78	100
施氮量 N rate X_2 / (g·kg ⁻¹)	0.29	0	0.19	0.48	0.77	0.96
施磷量 P rate X_3 / (g·kg ⁻¹)	0.066	0	0.107	0.264	0.421	0.528
施钾量 K rate X_4 / (g·kg ⁻¹)	0.105	0	0.17	0.42	0.67	0.84

注: X_1 用各水平灌水量占实测土壤含水量灌至田间持水量所需的高水平灌水量的百分比表示。 X_2 和 X_4 分别以每千克P₂O₅、K₂O中所含P、K的含量表示。

Note: X_1 indicated each irrigation amount level's percentage of the highest irrigation amount, which was calculated by the difference between the field capacity and actual dried soil water content and the soil weight concerned; X_2 and X_4 was expressed as P, K content per kilogram of P₂O₅ and K₂O, respectively.

表2 试验方案
Table 2 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	处理号 No.	灌水量 Irrigation amount	施氮量 N rate	施磷量 P rate	施钾量 K rate
1	1 (53.464)	1 (15.4)	1 (8.42)	1 (13.4)	13	0 (40.257)	0 (9.6)	1.682 (10.56)	0 (8.4)
2	1 (53.464)	1 (15.4)	-1 (2.14)	-1 (3.4)	14	0 (40.257)	0 (9.6)	-1.682 (0)	0 (8.4)
3	1 (53.464)	-1 (3.8)	1 (8.42)	-1 (3.4)	15	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	1.682 (16.8)
4	1 (53.464)	-1 (3.8)	-1 (2.14)	1 (13.4)	16	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	-1.682 (0)
5	-1 (27.033)	1 (15.4)	1 (8.42)	-1 (3.4)	17	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
6	-1 (27.033)	1 (15.4)	-1 (2.14)	1 (13.4)	18	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
7	-1 (27.033)	-1 (3.8)	1 (8.42)	1 (13.4)	19	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
8	-1 (27.033)	-1 (3.8)	-1 (2.14)	-1 (3.4)	20	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
9	1.682 (63.038)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)	21	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
10	-1.682 (17.485)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)	22	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
11	0 (40.257)	1.682 (19.2)	0 (5.28)	0 (8.4)	23	0 (40.257)	0 (9.6)	0 (5.28)	0 (8.4)
12	0 (40.257)	-1.682 (0)	0 (5.28)	0 (8.4)					

注: 括号里的数字为各处理的水肥实际用量,其中,灌水量的单位为L,氮、磷和钾肥用量的单位均为g;括号前边的数据为编码值。

Note: The data in parentheses indicates the actual amount of irrigation water and N, P, K rates for treatments, and data in front of parentheses is the coded value; The unit of irrigation amount is L, and the unit of N, P, and K is g.

1.3 测定项目和方法

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。可溶性固形物采用 RHBO-90 型号手持折射仪 (LINK, Co.Ltd., Taiwan, China) [16]测定；可溶性糖采用蒽酮比色法 [17]测定；可滴定酸采用 0.1 molL⁻¹NaOH 滴定法 [18]测定；维生素 C 采用钼蓝比色法 [19]测定；番茄红素采用 EV300PC 型号紫外-可见分光光度计法 (Thermo Fisher, USA) [20]测定。

1.4 数据处理与分析

根据 AHP 法的形式构建评价指标体系(图 1)，设计番茄综合营养品质类别关注度和指标重要性调查问卷。采用 1~9 标度法在同一个层次对各评价指标的重要性进行两两比较，构成判断矩阵。衡量尺度划分为 5 个等级，分别是绝对重要、十分重要、比较重要、稍微重要、同样重要。向 300 名消费者和园艺专家进行问卷调查，发出问卷 300 份，其中向专家发出电子问卷 5 份，现场向消费者发出纸质问卷 295 份，收回电子问卷 5 份，纸质问卷 220 份，问卷有效率为 75%。将调查问卷打分结果采用 EXCEL 进行平均，采用基于 AHP 法的 yaahp0.6.0 软件对打分平均值进行分析。

采用统计软件 DPS7.05 设计试验及分析结果，

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。采用 EXCEL 对试验数据进行熵权法、TOPSIS 法和函数变幅值的计算。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，并绘制相关图表。采用 SPSS16.0 统计软件对 6 个番茄单一营养品质指标以及分别根据番茄单一营养品质实测值和 TOPSIS 法确定的各处理排序进行 Spearman 相关分析。

2 结果与分析

2.1 番茄单一营养品质指标权重的确定

番茄单一营养品质指标之间的相关分析(表 3)表明，番茄可溶性固形物与维生素 C 显著正相关，可溶性糖与糖酸比极显著正相关，番茄红素和维生素 C 间的相关系数接近信度为 0.05 的显著水平。表明用单一品质指标反映番茄品质时，其信息间有一定重叠性。但可溶性固形物属于风味品质，维生素 C 属于保健品质，且适合的糖酸比必须建立在较高的含糖量基础上，因此，番茄营养品质的单一指标之间既有一定重叠性，同时又互相不可替代，需要依据各项单一品质指标建立综合品质指标，对番茄营养品质进行客观准确评价。

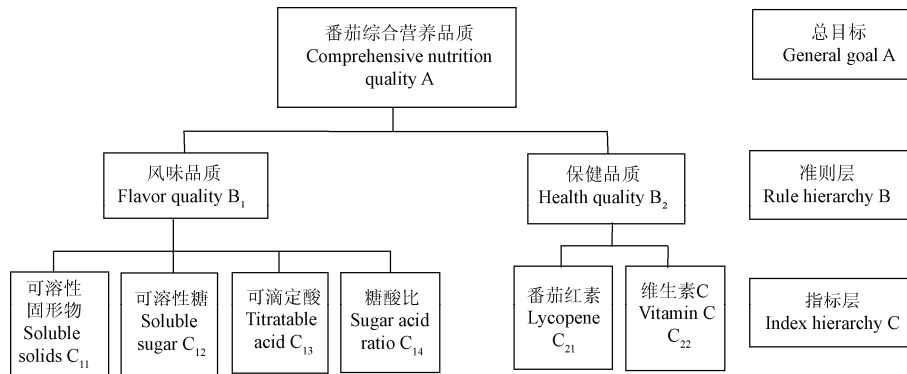


图 1 番茄营养品质层次模型
Fig.1 Hierarchical model of tomato nutritional quality

表 3 番茄单一营养品质指标间的 Spearman 相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficients between single nutrition quality indicators of tomato

	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)
可溶性固形物 Soluble solids/%	1.000					
可溶性糖 Soluble sugar/%	-0.121	1.000				
可滴定酸 Titratable acid/%	0.153	0.201	1.000			
糖酸比 Sugar acid ratio	-0.146	0.907**	-0.141	1.000		
维生素 C Vitamin C/(mg·100 g ⁻¹)	0.451*	0.005	-0.050	0.004	1.000	
番茄红素 Lycopene/(μg·g ⁻¹)	0.188	-0.054	0.061	-0.023	0.408	1.000

注：*表明在 0.05 水平上显著的相关性；**表明在 0.01 水平上显著的相关性，下同；样本量 n=23；r_{21, 0.05}=0.413；r_{21, 0.01}=0.526。
Note: * and ** means significantly correlation at 0.05, and 0.01 level, respectively; The same below; The sample size n is 23; r_{21, 0.05}=0.413; r_{21, 0.01}=0.526.

2.1.1 采用 AHP 法确定番茄单一营养品质指标权重
根据番茄综合营养品质评价指标及其关系, 构建的具有不完全层次关系的营养品质层次模型如图 1 所示。

为获得各项品质指标的主观权重, 根据问卷中

的相关数据, 建立判断矩阵, 从而计算各层次相应元素的局部权重和总体权重(表 4, 具体计算方法参见文献^[21])。结果表明, 番茄各单一营养品质权重次序为, 番茄红素>维生素 C>可溶性固形物>可溶性糖>糖酸比>可滴定酸。

表 4 判断矩阵和层次分析法 AHP 权重计算结果

Table 4 Pair-wise comparison matrixes and weights from AHP (analytic hierarchy process)

判断矩阵 Judgment matrix		局部权重 Local weight		最终权重 Ultimate weight		一致性检验参数 Consistency test parameters		
总目标层 A~准则层 B General goal A~rule hierarchy B	指标 Index	B ₁	B ₂	W _A	ω _A	CR=0 λ _{max} =2.000		
	B ₁	1.000	0.970	0.492	0.49			
	B ₂	1.031	1.000	0.508	0.50			
准则层 B ₁ ~指标层 C rule hierarchy B ₁ ~index hierarchy C	指标 Index	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	W _{B1}	ω _{B1}	CR=0.029<0.1 λ _{max} =4.077
	C ₁₁	1.000	2.187	2.934	2.433	0.442	0.22	
	C ₁₂	0.457	1.000	1.667	0.504	0.175	0.13	
	C ₁₃	0.341	0.600	1.000	0.429	0.121	0.06	
准则层 B ₂ ~指标层 C rule hierarchy B ₂ ~index hierarchy C	指标 Index	C ₂₁	C ₂₂	W _{B2}	ω _{B2}	CR=0.029<0.1 λ _{max} =2.000		
	C ₂₁	1.000	1.232	0.552	0.28			
	C ₂₂	0.812	1.000	0.448	0.23			

注: CR 是矩阵一致性检验系数 (<0.1); 指标层 C 对目标层 A 的总一致性检验系数 CR=0.029<0.1, 即具有整体的满意一致性; W_A 表示 B 层相应元素对目标层 A 的重要性权值, 为局部权重, W_{B1} 和 W_{B2} 依此类推; ω_A 表示 B 层相应元素对总目标的最终重要性权值, ω_{B1} 和 ω_{B2} 依此类推; λ_{max} 是最大特征值。

Note: CR is the check coefficient of matrix consistency and the accepted upper limit is 0.1; CR of object layer C to target layer A is 0.029<0.1, meaning the overall satisfaction with the consistency; W_A means the local weights of layer B according to layer A, and the same goes with W_{B1} and W_{B2}; ω_A means the ultimate weight of layer B to general goal A, and the same goes with ω_{B1} and ω_{B2}; λ_{max} is the largest eigenvalue.

2.1.2 采用熵权法确定的番茄单一品质指标权重
用番茄单一营养品质指标实测数据构造指标水平矩阵, 建立评价指标体系, 采用熵权法计算各指标的客观权重(表 5, 具体计算方法参见文献^[4])。结果表明, 番茄单一营养品质对不同水肥处理的敏感度排序为, 番茄红素>糖酸比>可溶性糖>维生

素 C>可溶性固形物>可滴定酸。熵权法与 AHP 法确定的权重均表现为保健品质>风味品质, 且番茄红素最高, 可滴定酸最低, 但对其他单一营养品质权重的赋值不同, 因此, 有必要进行权重的集化, 即将 2 种方法确定的权重值进行融合。

表 5 熵权法确定的番茄单一营养品质指标权重

Table 5 Weights of single tomato nutrition quality indicators based on entropy weighting method

指标 Index	B ₁	B ₂	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₂₁	C ₂₂
权重 Weight	0.488	0.512	0.098	0.179	0.0282	0.183	0.364	0.148

注: B₁ 为风味品质, B₂ 为保健品质, C₁₁ 为可溶性固形物, C₁₂ 为可溶性糖, C₁₃ 为可滴定酸, C₁₄ 为糖酸比, C₂₁ 为番茄红素, C₂₂ 为维生素 C, 下同。

Note: B₁: Flavor quality; B₂: Health quality; C₁₁: Soluble solids; C₁₂: Soluble sugar; C₁₃: Titratable acid; C₁₄: Sugar acid ratio; C₂₁: Lycopene; C₂₂: Vitamin C, the same below

2.1.3 采用基于博弈论的组合赋权评价方法确定番茄单一品质指标权重

对于番茄单一营养品质指标的权重赋值问题, 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(u_j), 可构造一个基本的权重集, 其中必包含满意度最高的权重向量 u*。本文采用博弈论集结模型获得 u* (表 6), 得到番茄单一营养品质权重向量的集化模型如下(具体计算方法参见文献^[9,22]):

$$\text{Min} \left\| \sum_{j=1}^i a_j \cdot u_j^T \right\|, i=1,2 \quad (1)$$

式中: a_j 是最优化线性组合系数, 即使 u* 与各权重向量的离差最小化, 以得到最满意的权向量。

根据矩阵的微分性质, 可得到上式最优化的一阶导数条件为:

$$\begin{pmatrix} 0.205 & 0.198 \\ 0.198 & 0.230 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.205 \\ 0.230 \end{pmatrix} \quad (2)$$

用 Matlab 软件求得上式的最优化组合系数为: a₁=0.213, a₂=0.817。将其归一化后得: a₁* = 0.2069, a₂* = 0.7931。

从表 6 可以得出, 番茄红素具有最高的权值(0.347), 糖酸比次之(0.172), 可滴定酸的权值(0.035)最低。番茄各单一营养品质的最终权重具体排序为, 番茄红素>糖酸比>维生素 C>可溶性

糖>可溶性固形物>可滴定酸。

表 6 基于博弈论的组合赋权法确定的番茄单一营养品质指标权重

Table 6 Weights of single tomato nutrition quality indicators from combination weighting approach based on game theory

指标 Index	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₂₁	C ₂₂
权重 Weight	0.123	0.160	0.035	0.172	0.347	0.164

2.2 TOPSIS 法评价番茄综合营养品质

由于中国目前没有关于番茄营养品质指标的统一标准,因此本文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,表 7)。根据基于博弈论的组合赋权法确定的番茄

单一营养品质指标权重矩阵,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进度 A_i^* (具体计算方法参见文献^[8])。其中 $0 < A_i^* < 1$,且越接近 1,番茄综合营养品质越好。依据 A_i^* 的大小对不同处理进行排序(表 7)。

表 7 TOPSIS 法确定的番茄综合营养品质指标及其排序

Table 7 Tomato comprehensive nutrition quality index and its rank based on TOPSIS

序号 No.	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₂₁	C ₂₂	d^+	d^-	A_i^*	排序 Sorting
1	0.164	0.246	0.229	0.222	0.317	0.130	0.090	0.165	0.648	3
2	0.151	0.154	0.181	0.176	0.147	0.169	0.151	0.062	0.290	21
3	0.164	0.255	0.176	0.299	0.175	0.130	0.116	0.108	0.483	14
4	0.153	0.269	0.175	0.318	0.053	0.162	0.171	0.091	0.349	18
5	0.253	0.277	0.256	0.223	0.243	0.260	0.064	0.148	0.698	1
6	0.208	0.336	0.228	0.304	0.206	0.247	0.071	0.149	0.677	2
7	0.275	0.198	0.192	0.214	0.204	0.241	0.098	0.120	0.549	10
8	0.249	0.157	0.211	0.154	0.154	0.122	0.152	0.073	0.325	19
9	0.130	0.177	0.224	0.163	0.141	0.171	0.153	0.059	0.277	22
10	0.275	0.239	0.228	0.216	0.102	0.188	0.144	0.082	0.362	17
11	0.211	0.173	0.205	0.174	0.085	0.234	0.166	0.060	0.266	23
12	0.194	0.167	0.252	0.137	0.202	0.201	0.129	0.097	0.431	15
13	0.208	0.164	0.213	0.159	0.147	0.189	0.145	0.069	0.321	20
14	0.175	0.267	0.221	0.249	0.226	0.146	0.093	0.124	0.572	8
15	0.221	0.173	0.190	0.188	0.275	0.278	0.091	0.150	0.623	4
16	0.194	0.214	0.186	0.238	0.220	0.254	0.088	0.125	0.586	6
17	0.215	0.209	0.202	0.214	0.255	0.222	0.083	0.136	0.621	5
18	0.220	0.164	0.208	0.163	0.269	0.234	0.102	0.139	0.578	7
19	0.222	0.146	0.196	0.154	0.233	0.221	0.118	0.118	0.501	13
20	0.216	0.175	0.203	0.178	0.176	0.210	0.126	0.089	0.414	16
21	0.212	0.182	0.199	0.189	0.216	0.218	0.107	0.111	0.509	12
22	0.208	0.164	0.196	0.173	0.260	0.230	0.103	0.134	0.565	9
23	0.203	0.148	0.200	0.153	0.255	0.232	0.113	0.130	0.535	11
S^+	0.275	0.336	0.256	0.318	0.317	0.278				
S^-	0.130	0.146	0.175	0.137	0.053	0.122				
R	0.220	0.430*	0.154	0.423*	0.838**	0.509*				

注: A_i^* 表示相对贴进度; 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 表示综合营养品质总排序与单一品质排序的 Spearman 相关系数 ($P < 0.05$)。

Note: A_i^* means the relative closeness; S^+ and S^- are the optimal and inferior ideal solutions, respectively; d^+ and d^- are the weighted distances between each alternative and the optimal or inferior ideal solutions, respectively; R means the Spearman correlation coefficient between comprehensive quality rank and single quality index rank ($P < 0.05$).

对分别根据番茄单一营养品质(均视为正向指标)实测值和 TOPSIS 法确定的各处理排序进行 Spearman 相关分析(表 7)。结果表明,依据 A_i^* 得到的排序,与依据番茄红素得到的排序呈极显著

正相关,与依据可溶性糖、糖酸比和维生素 C 得到的排序呈显著正相关,与可溶性固形物和可滴定酸呈正相关。表明根据 TOPSIS 法确定的番茄综合营养品质指标评价价值确定的各处理排序与大多数根

据单一品质指标确定的各处理排序相吻合,可以用来分析水肥供应对番茄综合营养品质的影响。

2.3 番茄综合营养品质对水肥供应的响应

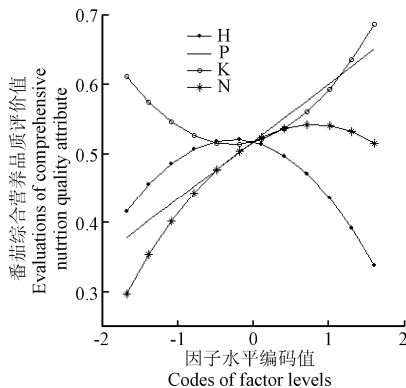
对番茄综合营养品质指标评价价值进行二次多项式拟合,得出灌水量和施肥量 4 个水肥因素 X_i 的水平编码值 $[-1.682, 1.682]$ 和番茄综合营养品质指标评价价值 Y 的关系。以下是在 $\alpha=0.10$ 的显著水平下,剔除不显著后得到的项简化回归模型 ($F_{回}=3.84 > F_{0.05(9,13)}=2.17$):

$$Y = 0.517 - 0.027X_1 + 0.064X_2 + 0.083X_3 + 0.026X_4 - 0.052X_1^2 - 0.040X_2^2 + 0.049X_4^2 - 0.025X_1X_2 - 0.025X_3X_4 \quad (3)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别为灌水量、施氮量、施磷量和施钾量的编码值。

2.3.1 单一因素对番茄综合营养品质的影响

通过计算回归模型 (3) 的函数变幅值 S_i , 可知各水肥因素对番茄综合营养品质的影响效应: 磷 ($S_i=0.121$) > 氮 ($S_i=0.098$) > 水 ($S_i=0.073$) \geq 钾 ($S_i=0.071$)。对回归模型 (3) 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和施氮量的关系均呈凸型二次曲线; 与施磷量的关系近于线性增加; 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, 磷肥的主效应高于氮肥; 当水肥投入量为较高水平时, 氮肥的主效应减小; 在超过最适量后, 灌水量和氮肥表现为负效应, 且灌水量的负效应远大于施氮量; 番茄综合营养品质较高时各水肥因素的用量分别为: 磷肥 0.528 g/kg 风干土, 钾肥 0.84 g/kg 风干土, 灌水量 53.82%, 施氮量 0.712 g/kg 风干土。



注: H、P、N 和 K 依次表示试验因素灌水量及磷、氮和钾肥用量。
Note: H, P, N, and K mean codes of irrigation amount, phosphorus(P), nitrogen(N), and potassium(K) rates, 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

2.3.2 两因素对番茄综合营养品质的耦合效应

1) 灌水量和施氮量对番茄综合营养品质的耦合效应

由模型 (3) 可知灌水量和施氮量的耦合效应表现为如图 3 所示曲面。从图 3 可以看出, 随着灌水量的增加, 抛物线的最高点向施氮量减少的方向移动; 随着施氮量的增加, 抛物线的最高点向灌水量减少的方向移动。说明水氮之间存在负交互作用, 即二者交互效应阻碍番茄综合营养品质的提高。当灌水量在 36.22%~60% 之间, 施氮量在 0.48~0.77 g/kg 时, 番茄综合营养品质指标评价价值较高。因此, 存在一个合理的灌水量和施氮量组合区域。

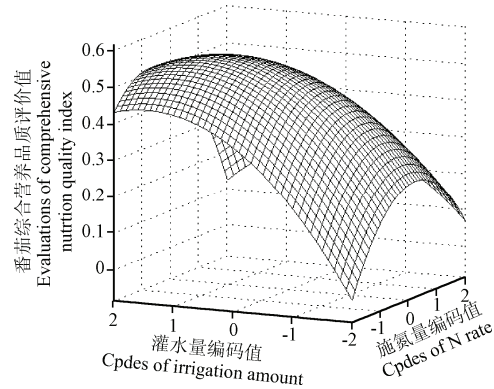


图 3 灌水量和施氮量对综合营养品质的耦合效应

Fig.3 Coupling effect of irrigation amount and N rate on comprehensive tomato nutrition quality

2) 施磷量和施钾量对番茄综合营养品质的耦合效应

由模型 (3) 可知施磷量和施钾量的耦合效应表现为下凸二次曲面 (图 4)。图 4 表明, 随着施钾量的减少, 直线斜率增大, 番茄综合营养品质随着施磷量的增加而提高; 随着施磷量的增加, 抛物线的最低点向施钾量增大的方向移动。说明磷钾肥用量之间存在负交互作用。

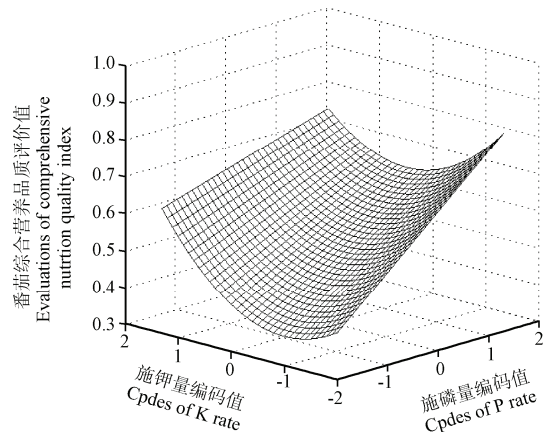


图 4 施磷量和施钾量对综合营养品质的耦合效应

Fig.4 Coupling effect of P and K rate on comprehensive tomato nutrition quality

3 讨 论

综合营养品质评价指标的构建可为提高番茄品质提供科学依据, 使在合理有效地利用水肥资源的同时, 提高农业管理水平。综合番茄各单一营养品质指标的主观权重和客观权重可知, 与风味品质相比, 保健品质的权重值略高。其中, 番茄红素和维生素 C 的权值较高, 可溶性固形物的权值较低。其原因可能在于, 一方面, 因为番茄红素抗氧化性强, 有抗癌和增强机体免疫力等重要作用^[23], 因此 AHP 法中主观打分值较高, 获得较大权值。另外, 风味品质包含了 4 项单一营养品质指标(可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸和糖酸比), 分配到每一项指标的权重值就较低; 而保健品质的权重值较风味品质虽然只高 0.02, 但包含指标个数较少(番茄红素和维生素 C), 分配到各项指标的权重值就较高。另一方面, 本试验条件下, 不同水肥因素对番茄红素的影响最显著, 其次是糖酸比, 对可滴定酸影响最小。前人研究也表明, 氮、磷、钾肥对番茄红素含量有显著影响^[24-25]。因而, 采用系统综合评价的数学模型方法, 综合考虑消费者的喜好和客观试验中测定指标对试验因素的敏感性, 得到的不同水肥条件下的番茄综合营养品质评价价值不仅弱化了主观赋权随意性强的缺点, 而且与生产实际相符, 可较好地表现各处理番茄营养品质的优劣。

蔬菜的营养品质主要取决于其遗传特性, 也明显受灌溉和土肥等环境因素的影响^[26]。本研究表明, 不同水肥处理对番茄综合营养品质有显著影响, 磷肥是影响番茄综合营养品质的最主要因素, 其次是氮肥, 灌水量和钾肥效应较小。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^[27-29]。因此适量施用磷、氮肥可显著提高番茄综合营养品质。本研究表明, 灌水超过最适值后, 灌水量成为番茄营养品质的最主要限制因素(图 1)。前人研究也表明, 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、有机酸等的含量^[30]。但也有研究指出, 日光温室栽培条件下, 采用节水灌溉处理对番茄品质无显著影响^[31]。可见, 番茄品质对土壤水分的响应很复杂, 需要进一步深入研究。

4 结 论

1) 采用基于主观、客观赋权法和博弈论综合赋权法确定了番茄单一营养品质评价指标权重, 次序为: 番茄红素>糖酸比>维生素 C>可溶性糖>

可溶性固形物>可滴定酸; 通过 TOPSIS 组合评价法构建的番茄果实综合营养品质评价指标, 与根据单一品质指标排序的相关性很好, 能够较好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: 施磷量>施氮量>灌水量 \geq 施钾量; 交互效应表现为, 灌水量与施氮量、施磷量与施钾量之间存在一定的负交互作用。番茄营养品质随灌水量和施氮量均呈开口向下的抛物线型变化, 随施磷量呈线性增加, 随施钾量呈开口向上的抛物线型变化, 表明灌水量、施氮量过高不利于番茄综合营养品质的提高, 合理增施磷肥和钾肥可有效提高番茄营养品质。

[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.
Li Huihe. Research progress of tomato quality[J]. Northern Horticulture, 2006(4): 55-56. (in Chinese with English abstract)
- [2] Omkarprasad S, Vaidya, Sushil Kumarb. Analytic hierarchy process: An overview of applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [3] 张亚琼, 张伟, 戴思兰, 等. 基于 AHP 的中国传统盆栽菊花产业化品种筛选[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4438-4446.
Zhang Yaqiong, Zhang Wei, Dai Silan, et al. AHP-Based Screening of Traditional Potted Chrysanthemum for Industrialized Production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4438-4446. (in Chinese with English abstract)
- [4] Zou Zhihong, Yun Yi, Sun Jingna. 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.
- [5] Wang Yujie, Leeb H. Generalizing TOPSIS for fuzzy multiple-criteria group decision-making[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2007, 53(11): 1762-1772.
- [6] 虞娜, 吴昌娟, 张玉玲, 等. 基于熵权的 TOPSIS 模型在保护地番茄水肥评价中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(4): 456-460.
Yu Na, Wu Changjuan, Zhang Yuling, et al. Application of TOPSIS model method based on entropy weight to evaluate coupling effect of irrigation and fertilization of greenhouse tomato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University Social and Edition, 2012, 43(4): 456-460. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 23(5): 217-227.
Li Can, Zhang Fengrong, Zhu Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 23(5): 217-227. (in Chinese with English abstract)

- [8] Wang Feng, Kang Shaozhong, Du Taisheng. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1228—1238.
- [9] 迟道才, 马涛, 李松. 基于博弈论的可拓评价方法在灌区运行状况评价中的应用[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 36—39.
Chi Daocai, Ma Tao, Li Song. Application of extension assessment method based on game theory to evaluate the running condition of irrigation areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(8): 36—39. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郭文龙, 党菊香, 吕家珑, 等. 不同年限蔬菜大棚土壤性质演变与施肥问题的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 85—89.
Guo Wenlong, Dang Juxiang, Lü Jialong, et al. Soil properties and fertilization in vegetable greenhouse at different age[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(1): 85—89. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33(2): 126—128.
Li Junliang, Cui Dejie, Meng Xiangxia, et al. The Study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in Shouguang, Shandong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2): 126—128. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.
Niu Xiaoli, Hu Tiantian, Zhou Zhenjiang, et al. Effects of water and fertilizer supply on vitamin C content in tomato fruit[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013(3): 37—42. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
Min Ju, Shi Weiming. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of Vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 151—157. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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—30.
Xie Ankun, Li Zhihong, Zhang Yungui, et al. Effect of different application of nitrogen on yield and quality of tomato and nitrate in soft profile[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2011(1): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 234—241.
Yang De. *Experimental Design and Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 234—241.
- [16] 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.
Chen Xiuxiang, Ma Fuyu, Fang Zhigang, et al. Preliminary study on the influence of soil moisture on yield and quality of processed tomato[J]. *Water Saving Irrigation*, 2006(4): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Hesheng. *The Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 195—196.
- [18] 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 in Northwest A&F University. *The Experimental Guide for Plant Physiology*[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1987: 122—123.
- [19] 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: 248—249.
Li Hesheng. *The Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 248—249.
- [20] 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.
Zhang Lianfu, Ding Xiaolin. Establishment of a new lycopene determination method[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2001, 27(3): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 胡杨, 张毅. 基于 Yaahp 软件实现 AHP 模型下 BOT 项目资本结构风险分析[J]. *项目管理技术*, 2011, 9(8): 27—31.
Hu Yang, Zhang Yi. Capital structure analysis of BOT project based on the AHP model by yaahp software[J]. *Project Management Technology*, 2011, 9(8): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈家良. 基于博弈论的组合赋权评价方法研究[J]. *福建电脑*, 2003(9): 15—16.
Chen Jialiang. Study on comprehensive evaluation weighting method based on Game Theory[J]. *Fujian computer*, 2003(9): 15—16.
- [23] Gerster Helga. The potential role of lycopene for human health[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 1997, 16(2): 109—126.
- [24] 周振江, 牛晓丽, 陈思, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄中番茄红素含量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2013(2): 46—51.
Zhou Zhenjiang, Niu Xiaoli, Chen Si, et al. Effect of water-fertilizer supply on tomato lycopene content under alternate subarea root-zone irrigation[J]. *China Vegetables*, 2013(2): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [25] Lester G E, Jifon J L, Makus D J. Supplemental foliar potassium applications with or without a surfactant can enhance netted muskmelon quality[J]. *Hort Science*, 2006, 41(3): 741—744.
- [26] 翟凤林. 作物品质育种[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 4.
Zhai Fenglin. *Crop Quality Breeding*[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1991: 4.
- [27] 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.
- [28] 李远新, 李进辉, 何莉莉, 等. 氮磷钾配施对保护地番茄产量及品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 1997(4): 10—13.
Li Yuanxin, Li Jinhui, He Lili, et al. The effect of N, P, K mixed application on yields and quality of tomato in solar greenhouse[J]. *China Vegetables*, 1997(4): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [29] 胡承孝, 邓波儿, 刘同仇, 等. 氮肥水平对蔬菜品质的影响[J]. *土壤肥料*, 1996(3): 34—36.
Hu Chengxiao, Deng Boer, Liu Tongchou, et al. Effect of N application rate on vegetable quality[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 1996(3): 34—36. (in Chinese

- with English abstract)
- [30] Cristina Patanè, Simona Tringali, Orazio Sortino. 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.
- [31] 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.

Zhou Bo, Chen Zhujun, Zhou Jianbin. Effect of different fertilizer and water managements on the yield and quality of tomatoes and nutrient accumulations in soil cultivated in sunlight greenhouse[J]. *Journal of Northwest SCI-TECH University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(4): 58—62. (in Chinese with English abstract)

Construction of comprehensive nutritional quality index for tomato and its response to water and fertilizer supply

Wu Xue¹, Wang Kunyuan², Niu Xiaoli¹, Hu Tiantian^{1*}

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

2. *College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)*

Abstract: In recent years, the nutritional quality of vegetables has been increasingly concerned by people and investigated by researchers. However, the decline in vegetable internal quality is common due to excessive irrigation and irrational fertilization. Although tomatoes have been grown successfully for many years, there is no accurate formula or recipe on amount of irrigation or fertilizer levels to get tomato fruit with high quality. For tomato fruits, the nutritional quality largely depends on the content of soluble solids, soluble sugar, titratable acid, Vitamine C and lycopene, some of which are correlated with each other. Therefore, tomato nutritional quality could not be assessed according to any one of these attributes. But the comprehensive evaluation of vegetable nutritional quality has not been well studied yet. To construct a comprehensive nutritional quality index of tomato fruits and investigate its response to irrigation amount and fertilizer rates of nitrogen, phosphorus and potassium, a composite quadratic orthogonal regressive rotation design of four factors and five levels was used in a pot experiment. The contents of soluble solids, soluble sugar, titratable acid, lycopene, Vitamin C and sugar-acid ratio were determined for tomato fruits. By using entropy weighting method, the objective weights of six single quality attributes were calculated based on measurements of these attributes. The subjective weights of these six attributes were calculated based on the analytic hierarchy process (AHP) from survey data from both consumers and horticulture experts. Based on these, the comprehensive weighting method of game theory was used to determine the balanced weight of single tomato quality attributes. Results indicated that the attributes were ranked based on their importance by lycopene>sugar-acid ratio>Vitamin C>soluble sugar>soluble solid>titratable acid. The comprehensive nutritional quality index was constructed according to the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). Moreover, a regression model on the amount of irrigation water and fertilizers and tomato comprehensive nutritional quality index was established. Based on the regression equation, the single, interactive and coupling effects of these four experimental factors on the comprehensive nutritional quality index were analyzed. The results showed that the main effects of four experimental factors on the comprehensive nutritional quality were ordered by P rate>N rate>irrigation amount>K rate. If codes of other three factors were zero, the comprehensive nutritional quality showed a downward quadratic parabola in response to the increase of irrigation amount, as it did in the case of N rate. It is interesting that an upward quadratic parabola occurred with the increase of K rate. The comprehensive nutritional quality increased linearly with P rate. Interaction between amount of irrigation and N, P and K fertilizers significantly affected comprehensive quality of tomato fruits. It indicated that comprehensive tomato nutritional quality decreased with excess input of irrigation amount and N fertilizer, and could be improved by appropriate supply of P and K fertilizers. The findings from this study also allowed us to optimize comprehensive evaluation of vegetable quality that could be used to study the management of water and fertilizers in the future.

Key words: fertilizers; irrigation; analytic hierarchy process; tomato; comprehensive evaluation of nutritional quality; irrigation amount; a composite quadratic orthogonal regressive rotation design with four factors

(责任编辑: 曾懿婷)