

# 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

胡田田,何琼,洪霞,刘杰,李鸿祥,冯璞玉,王丽,杨硕欢

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,杨凌,712100)

**摘要:**为构建番茄产量-品质组合评价模型,分析综合评价值对水肥供应的响应,该文采用温室番茄五元二次通用旋转组合设计的水肥试验数据,选取番茄可溶性糖、可溶性固形物、可滴定酸、番茄红素、维生素C、糖酸比6个品质指标及产量数据作为评价指标。研究表明:主成分分析法、隶属函数法、基于组合赋权的TOPSIS模型和灰色关联度法4种单一评价方法的评价值排名存在明显的不一致性;在Kendall-W协和系数事前检验的基础上,运用Broda法、Copeland法、模糊Borda法和基于整体差异的组合评价方法,构建番茄产量-品质组合评价模型。事后检验表明,针对32个处理,4种组合评价模型与各单一评价方法的排序值具有很好的相关性,以模糊Borda组合评价模型表现最优。进一步,根据模糊Broda组合评价模型的番茄产量-品质综合评价指标与水肥用量间的回归模型,各因子的主效应表现为:施氮量>灌水量>有机肥用量>施磷量>施钾量。其他因素为中间水平时,番茄产量-品质评价值随灌水量、施氮量、施磷量或有机肥用量的增加呈开口向下的抛物线变化,随施钾量无显著变化。而且,灌水量和有机肥用量存在负交互作用,施氮量和施磷量为正交互作用,表明灌水量过高不利于番茄产量-品质的提高,合理增施有机肥及氮、磷肥可有效提高番茄的产量和品质。该试验条件下,将灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量依次控制为488.3~508.7 mm、19.3~21.8 t/hm<sup>2</sup>、498.4~565.6 kg/hm<sup>2</sup>、399.7~447.1 kg/hm<sup>2</sup>、698.1~777.9 kg/hm<sup>2</sup>,可望获得较高的番茄产量,同时兼具较高的品质。

**关键词:**模型;肥;灌水;产量-品质综合评价;组合评价模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.017

中图分类号:S641.2 文献标志码:A 文章编号:1002-6819(2019)-19-0142-10

胡田田,何琼,洪霞,刘杰,李鸿祥,冯璞玉,王丽,杨硕欢.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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.017 <http://www.tcsae.org>  
Hu Tiantian, He Qiong, Hong Xia, Liu Jie, Li Hongxiang, Feng Puyu, Wang Li, Yang Shuohuan. Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19):142—151. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.017 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

随着生活水平的日益提高,人们越来越多地关注蔬菜的品质。通过农业生产管理措施的改善,获得兼具高产且品质优良双重特性的农产品就显得尤为重要。因而,现代温室番茄生产的水肥管理,不仅要关注产量或某项品质指标等单一目标,更要考虑产量、品质等多个目标的实现,具有多目标评价的特点。

目前,国内外建立的多目标综合评价方法已达数百种<sup>[1]</sup>,在农业方面较为常用的有层次分析法<sup>[2-3]</sup>、灰色关联度分析法<sup>[4-5]</sup>、隶属函数分析法<sup>[6-7]</sup>、TOPSIS法<sup>[8-9]</sup>和熵权法<sup>[10-11]</sup>等单一评价方法,在番茄品质及产量-品质综合评价方面的应用,多集中在单纯的品质评价中<sup>[12-16]</sup>。由于

各单一评价方法的机理不同,利用信息的角度和侧重点不同,加上评价过程中存在的人为因素,使得各方法的评价结果之间存在差异,选择任何一种方法都难以对客观事实进行全面准确地判断。

为解决多种单一评价方法结论不一致的问题,研究者提出了另一类综合评价方法,即组合评价方法,是在综合评价基本原则的指导下,遵循一定的准则和规则,采用若干能独立完成评价的方法对评价对象进行综合评价,在此基础上,再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。这方面,主要是国内一些学者利用数学分析方面的研究成果,提出了一系列方法与模型<sup>[17-20]</sup>。目前对组合评价的研究,主要集中在组合权重、组合结果、组合方法3方面。在组合结果方面,国内外常用的组合评价方法有Borda组合评价模型<sup>[17]</sup>、模糊Borda组合评价模型<sup>[17]</sup>、Copeland组合评价模型<sup>[17]</sup>以及基于整体差异的组合评价模型<sup>[21]</sup>。Borda组合评价模型是一种少数服从多数的方法,在实践应用中以排序值作为基础进行组合;Copeland组合评价模型在Borda法的计算方

收稿日期:2019-02-26 修订日期:2019-07-10

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

作者简介:胡田田,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。Email:hutiantian@nwsuaf.edu.cn

法上进行了优化,同样根据排序值进行模型组合<sup>[22]</sup>,在实际应用中简单易懂,二者在组合单一评价模型结论排序均不涉及单一评价模型结论的权重;模糊 Borda 组合评价模型同时考虑了评价值和排序值<sup>[17]</sup>,未涉及单一评价模型结论的权重,在运算方式上进行了简化,组合结论的精确性进一步提高;基于整体差异的组合评价模型选用评价值进行组合,通过对单一评价模型的评价值进行一系列的计算得出组合权限量,最大限度的利用了评价结论的信息<sup>[21]</sup>。作为一类新的综合评价方法,组合评价方法在管理科学等其他领域应用较多,对于农业领域尤其在番茄水肥管理方面的应用还鲜见报道。

为探讨组合评价方法及其在番茄产量-品质综合评价中的应用,在前期以基于整体差异的组合评价模型对番茄营养品质进行评价的基础上<sup>[23]</sup>,本文选取番茄水肥试验中番茄果实的 6 项品质指标(可溶性糖、可溶性固形物、可滴定酸、番茄红素、以及维生素 C、糖酸比)及产量数据,采用主成分分析法、灰色关联度法、隶属函数法和基于组合赋权的 TOPSIS 模型 4 种单一评价方法对番茄产量-品质进行评价,并在通过相容性检验的基础上,

采用 Borda、Copeland、模糊 Borda 和基于整体差异的组合评价方法 4 种组合评价方法,分别构建组合评价模型,通过事后检验择优,分析其综合评价值对水肥的响应,获得适宜的水肥用量区间,以期为番茄水肥管理决策提供依据与参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

研究资料包括番茄果实 6 项品质指标(可溶性糖、可溶性固形物、可滴定酸、番茄红素、维生素 C、糖酸比)及产量数据,来源于 2014 年 9 月—2015 年 7 月在陕西杨凌大寨村进行的 32 个处理的温室番茄水肥试验<sup>[23]</sup>。该试验针对长季节栽培番茄,采用滴灌施肥方式,以灌水量和氮、磷、钾肥及有机肥用量为试验因素,采用五元二次通用旋转组合设计,试验因素的 5 个水平及其编码值见表 1。试验方案及结果参见文献<sup>[23]</sup>。经方差分析与多重比较,32 个处理间的品质及产量数据差异显著,而且,保证产量或者品质最优的水肥用量存在一定差异(表 2),因此,有必要对产量和品质进行多目标综合评价,以确定多目标最优情况下水肥用量的适宜区间。

表 1 试验因子实际水平及其编码值  
Table 1 Levels of experimental factors and their codes

试验因素 Experimental factor	变量设计水平及编码 Variable levels and their codes				
	-2	-1	0	1	2
灌水量 $X_1$ Irrigation amount/mm	282	369	456	543	650
施氮量 $X_2$ N fertilizer rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0	285	570	855	1140
施磷量 $X_3$ P fertilizer rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0	219	438	657	876
施钾量 $X_4$ K fertilizer rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0	369	738	1107	1476
有机肥 $X_5$ Manure rate/(t·hm <sup>-2</sup> )	0	12	24	36	48

注:施氮、磷、钾肥用量以纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 计。  
Note: The amount of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer is calculated as pure N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O.

表 2 不同优化目标下最佳水肥用量组合  
Table 2 Optimal combination of water and fertilizer under different targets for optimization

最佳水肥用量 Optimal irrigation and fertilizer amount	优化目标 Target for optimization						
	产量 Yield	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性固形物 Soluble solids	可滴定酸 Titratable acid	番茄红素 Lycopene	维生素 C Vitamin C	糖酸比 Sugar acid ratio
灌水量 Irrigation amount /mm	369	456	369	369	456	456	456
施氮量 N fertilizer rate /(kg·hm <sup>-2</sup> )	285	570	855	855	570	570	570
施磷量 P fertilizer rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	249	738	657	657	876	876	738
施钾量 K fertilizer rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	369	876	369	369	738	738	438
有机肥用量 Manure rate/(t·hm <sup>-2</sup> )	36	24	36	36	24	24	0

1.2 模型构建方法

参考其他研究领域的组合评价的算法,本研究中组合评价具体包括以下步骤:

1)以番茄果实品质和产量为评价指标,采用主成分分析法(principle component analysis, PCA)、灰色关联度分析法(grey relational degree analysis, GRDA)、隶属函数分析法(membership function analysis, MFA)和基于组合赋权的 TOPSIS 模型(TOPSIS-CW)4 种单一评价方法分

别对番茄产量-品质进行综合评价。

2)单一评价方法的评价结果能否用于组合评价,即是否具有相容性,需要进行事前检验。文中采用 Kendall 协和系数检验法进行事前检验<sup>[18]</sup>,该检验主要考查  $m$  种评价方法对  $n$  个对象的评判结果是否一致。通过讨论 4 种单一评价方法下的协和系数  $W$  显示样本数据的实际符合与最大符合之间的分歧程度,当协和系数  $W$  越接近于 1,说明评价方法的相容性越高。在通过事前检验的

基础上,采用Borda评价法<sup>[17]</sup>、Copeland评价法<sup>[17]</sup>、模糊Borda评价法<sup>[17]</sup>和基于整体差异的组合评价法<sup>[21]</sup>(ODCA),分别构建组合评价模型,进行组合评价。若不能通过事前检验,则剔除效果最差的一种单一评价方法,重新进行上述的Kendall检验,直至所有方法通过检验。

下面简要介绍一下这4种组合评价方法:

#### Borda评价法

若评价认为处理 $X_i$ 优于 $X_j$ 的个数比 $X_j$ 优于 $X_i$ 的个数多,记为 $X_i S_{X_j}$ ,则定义Borda矩阵 $B = \{b_{ij}\}_{m \times n}$ ,  $b_{ij} = \begin{cases} 1, X_i S_{X_j} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ ,处理 $X_i$ 的得分 $b_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$ ,最后根据 $b_i$ 得分大小对 $X_i$ 进行排序。

#### Copeland法

该方法是在Borda法的基础上还要计算“劣”的次数,

即 $c_{ij} = \begin{cases} 1, X_i S_{X_j} \\ 0, \text{其他} \\ -1, X_j S_{X_i} \end{cases}$ ,处理 $X_i$ 的得分为 $c_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}$ ,最后根据 $c_i$ 得分大小对 $X_i$ 进行排序。

在上述Borda评价法、Copeland评价法2种方法中,若出现多个处理得分相同的情况,则根据每个处理在2种方法下的方差大小进行排序,方差小者排在前面。

#### 模糊Borda评价法

首先,计算4种单一评价方法的隶属度 $\mu_{ij}$

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

$X_{ij}$ 代表第 $i$ 个处理在第 $j$ 种方法下的得分, $\mu_{ij}$ 代表第 $i$ 个处理在第 $j$ 种评价方法下“优”的隶属度;

其次,计算模糊频率

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

$$\delta_{ih} = \begin{cases} 1, \text{处理} i \text{排在} h \text{位} \\ 0, \text{处理} i \text{未排在} h \text{位} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{则模糊频率为 } W_{hi} = \frac{\rho_{hi}}{\sum_{h=1}^n \rho_{hi}} \quad (3)$$

定义 $Q_{hi-j} = \frac{(n-h) \times (n-h+1)}{2}$ ,  $Q_{hi-j}$ 代表在第 $j$ 种评价方法下处理 $i$ 排在 $h$ 位的得分;

再次,计算模糊Borda数:

$$F_i = \sum_{j=1}^4 W_{hi} \cdot Q_{hi-j} \quad (i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

并按照 $F_i$ 进行排序,其值越大,番茄产量-品质越好。

#### 基于整体差异的组合评价方法

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

$$\text{即 } A = [a_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对原始多评价方法结论矩阵进行标准化处理,即

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij} - \bar{y}_j}{s_j} \quad (i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

得到 $A$ ;求解实对称矩阵 $H, H = A^T A$ ;求 $H$ 的最大特征值及相应的标准特征向量;根据标准特征向量中各分量的取值情况确定组合权向量;将权向量代入 $y_i = \lambda_1 \cdot a_{i1} + \lambda_2 \cdot a_{i2} + \cdots \lambda_m \cdot a_{im} \quad i = 1, 2, \dots, n$ ,计算各评价对象的组合评价价值;对评价对象按组合评价价值大小进行排序。

3)采用Spearman等级相关系数检验法<sup>[18]</sup>,对上述4种组合评价方法进行事后检验。首先依据组合评价结果的排序值对组合方法和单一方法做相关性分析,若4种组合评价的结果完全一致,则通过事后检验即可选定最优组合方法。若4种组合评价的结果仍存在差异,则利用Spearman等级相关系数法构造统计量 $t^{[18]}$ , $t$ 值越大说明该组合评价模型的性能越好,选择与原单一方法最接近的组合为最佳组合模型。

### 1.3 数据处理

基于博弈论的赋权和基于整体差异的综合评价采用MATLAB6.5进行计算,主成分分析法和相关性分析采用SPSS18.0完成,层次分析法所采用的权重值参照文献[14]。灰色关联度分析法、隶属函数分析法、熵权法、事前事后检验、Borda评价法、模糊Borda评价法以及Copeland法均采用Excel完成。采用DPS7.05建立综合评价价值与试验因素的二次多项式并进行寻优。水肥单因子及其耦合效应图采用Sigmaplot12.0完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于单一评价模型的番茄产量-品质综合评价

以番茄果实品质和产量为评价指标,分别采用主成分分析法、灰色关联度分析法、隶属函数分析法和基于组合赋权的TOPSIS模型4种单一评价方法对32个处理的产量-品质进行综合评价,评价结果见表3。从表3可以看出,4种方法评价价值排名的标准差分布在0~6.85,且无明显的规律。32个处理中,有7个处理(1、10、16、19、21、22和24)的评价价值排名相差较大,标准差在4.0及以上;16个处理评价价值排名的标准差介于1.0~4.0之间;9个处理(3、7、9、14、17、20、23、26和27)的评价价值排名相差较小,标准差在1.0及以下。可见,4种单一评价方法的评价结果存在较大的差异性。

### 2.2 番茄产量-品质单一评价模型的事前检验

4种单一评价模型序值的Kendall相关系数<sup>[24]</sup>见表4。表4表明,各单一模型评价价值与其他3种间相关系数的均值在0.605~0.812之间,表明单一模型的结果之间存在一定的相关性。其中基于组合赋权的TOPSIS模型与其他3种方法的综合相关性最弱,隶属函数模型与其他3种方法的综合相关性最强。

进一步采用Kendall-W协和系数检验方法进行显著性检验<sup>[23]</sup>。计算得到Kendall-W协和系数 $W=0.916$ ,则 $\chi^2 = m(n-1)W = 113.6 \geq \chi_{0.01/31}^2 = 55.0$ ,表明4种方法具有相容性,满足事前一致性检验。



表 3 单一评价模型的番茄产量-品质综合评价结果  
Table 3 Results of single evaluation model on yield and quality of tomato

处理号 No.	主成分分析模型 Principal component analysis model(PCA)		隶属函数分析模型 Membership function analysis model(MFA)		灰色关联度分析模型 Grey relational degree analysis model (GRDA)		基于组合赋权的 TOPSIS 模型 TOPSIS model based on combined weighting(TOPSIS-CW)		排名的标准差 Standard deviation of ranking
	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	
1	0.76	7	57.76	12	0.85	8	0.39	22	6.85
2	-0.23	21	43.33	19	0.73	21	0.33	25	2.52
3	-1.14	29	23.72	29	0.62	29	0.32	27	1.00
4	-0.13	20	40.36	21	0.72	22	0.44	19	1.29
5	-0.95	27	27.65	27	0.63	28	0.24	30	1.41
6	-0.02	18	41.87	20	0.74	20	0.42	21	1.26
7	-1.08	28	27.33	28	0.64	27	0.33	26	0.96
8	-1.50	32	18.62	32	0.59	32	0.27	29	1.50
9	0.32	16	52.14	16	0.80	17	0.55	16	0.50
10	1.19	1	70.92	1	1.00	2	0.59	12	5.35
11	0.47	13	56.22	13	0.83	4	0.64	8	2.71
12	-0.85	25	31.40	24	0.65	25	0.43	20	2.38
13	0.54	12	58.57	10	0.84	13	0.51	17	2.94
14	-0.90	26	29.66	26	0.65	26	0.38	24	1.00
15	-0.76	23	36.12	23	0.69	24	0.48	18	2.71
16	0.40	14	52.58	15	0.84	12	0.66	5	4.51
17	-1.29	31	20.36	31	0.59	31	0.21	31	0.00
18	-0.10	19	49.76	17	0.81	15	0.57	14	2.22
19	0.26	17	46.87	18	0.78	18	0.29	28	5.19
20	-1.28	30	21.81	30	0.61	30	0.17	32	1.00
21	1.14	2	64.78	3	0.93	3	0.56	15	6.18
22	-0.62	22	37.05	22	0.74	19	0.58	13	4.24
23	1.01	3	70.61	2	1.03	1	0.77	1	0.96
24	0.39	15	58.85	9	0.85	7	0.69	4	4.65
25	0.78	6	57.85	11	0.85	11	0.62	10	2.38
26	-0.76	24	31.25	25	0.71	23	0.39	23	0.96
27	0.70	9	60.75	7	0.85	9	0.62	9	1.00
28	0.69	10	60.29	8	0.85	10	0.70	3	3.30
29	0.81	5	61.57	6	0.87	5	0.71	2	1.73
30	0.88	4	63.73	4	0.87	4	0.62	11	3.50
31	0.55	11	56.07	14	0.81	16	0.64	7	3.92
32	0.71	8	61.97	5	0.86	6	0.66	6	1.26

表 4 单一评价模型序值的 Kendall 相关系数  
Table 4 Kendall correlation coefficient of single evaluation model sequence values

方法 Method	PCA	MFA	GRDA	TOPSIS-CW	均值 Mean value
PCA		0.907	0.879	0.569	0.785
MFA	0.907		0.915	0.613	0.812
GRDA	0.879	0.915		0.633	0.809
TOPSIS-CW	0.569	0.613	0.633		0.605

2.3 番茄产量-品质组合评价模型的构建

分别采用 Borda、Copeland、模糊 Borda 和基于整体差异的组合评价方法对上述单一评价方法的结果进行组合,构建组合评价模型,结果见表 5。32 个处理中有 17 个评价价值排名的标准差在 1.0 及以下,占处理总数的 50% 以上;1 个处理评价价值排名的标准差为 0,表明 4 种组合评价模型的评价结果有很强的一致性。

2.4 番茄产量-品质的组合评价模型的事后检验

对组合评价模型的序值与各单一模型的序值做

Spearman 相关性分析<sup>[18]</sup>(表 6),相关系数的均值介于 0.920~0.952 之间,表明组合评价模型与单一模型的结果有很强的相关性。其中 Borda 组合评价模型与各单一评价模型结果的相关性最弱,基于整体差异的组合评价模型和模糊 Borda 组合评价模型与各单一评价模型结果的相关性接近,表现最强。

进一步根据组合评价模型的排序结果与原始单一评价模型排序结果的相关程度构造统计量  $t$ ,取  $t$  值最大的组合为最佳组合评价模型。4 种组合方法的检验统计量见表 7。表 7 表明,4 种组合评价模型的  $t$  值均明显大于  $t_{0.01(31)}$  的临界值,即 4 种组合评价模型均通过一致性检验。模糊 Borda 组合评价模型  $t$  值最大, Borda 组合评价模型的  $t$  值明显小于其他模型,说明模糊 Borda 组合评价模型表现最优。因此,下面以模糊 Borda 组合评价模型的评价值与水肥用量间建立回归方程,分析番茄产量-品质综合评价值对水肥供应的响应。

表5 组合评价方法的番茄产量-品质综合评价结果  
Table 5 Results of combined evaluation model on yield and quality of tomato

处理号 No.	基于整体差异组合评价模型 Combined evaluation model based on overall difference(ODCA)		Borda组合评价模型 Borda combined evaluation model(Borda)		Copeland组合评价模型 Copeland combined evaluation model(Copeland)		模糊Borda组合评价模型 Fuzzy Borda combination evaluation model(Fuzzy Borda)		排名的标准差 Standard deviation of ranking
	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	评价值 Evaluation value	排名 Ranking	
1	0.44	15	10	18	5	15	242.58	11	2.87
2	-0.46	22	6	25	-11	22	66.03	22	1.50
3	-1.31	29	3	28	-23	28	9.24	29	0.58
4	-0.35	21	9	19	-7	20	74.05	21	0.96
5	-1.28	28	2	29	-24	29	11.34	28	0.58
6	-0.28	19	8	20	-7	19	83.25	20	0.58
7	-1.18	27	4	26	-21	27	14.61	27	0.50
8	-1.64	32	0	32	-28	30	2.79	30	1.15
9	0.32	16	14	14	1	16	132.71	17	1.26
10	1.39	2	20	5	20	4	430.71	2	1.50
11	0.62	11	17	9	13	12	216.48	14	2.08
12	-0.87	25	7	23	-12	23	47.77	24	0.96
13	0.52	14	14	15	6	14	197.93	15	0.58
14	-0.98	26	6	24	-17	26	26.08	26	1.00
15	-0.61	23	8	21	-9	21	64.41	23	1.15
16	0.60	13	17	10	14	11	235.55	12	1.29
17	-1.62	30	0	30	-29	31	1.00	32	0.96
18	0.22	17	12	16	1	17	135.37	16	0.58
19	-0.19	18	4	27	-12	24	96.93	19	4.24
20	-1.62	31	0	31	-29	32	2.48	31	0.50
21	1.06	3	17	12	17	7	386.35	4	4.04
22	-0.30	20	10	17	-2	18	112.37	18	1.26
23	1.64	1	29	1	29	1	473.59	1	0.00
24	0.76	9	17	11	15	10	294.40	8	1.29
25	0.76	10	17	8	15	9	270.51	10	0.96
26	-0.78	24	7	22	-13	25	39.13	25	1.41
27	0.79	8	18	7	15	8	289.12	9	0.82
28	0.88	7	21	4	19	5	316.28	7	1.50
29	1.02	4	26	2	25	2	395.11	3	0.96
30	0.94	5	19	6	18	6	364.15	5	0.58
31	0.62	12	16	13	12	13	223.57	13	0.50
32	0.89	6	21	3	20	3	344.75	6	1.73

表6 组合评价模型与单一评价模型序值的Spearman等级相关系数

Table 6 Spearman rank correlation coefficient between combined evaluation model and the sequence values of single evaluation model

组合模型 Combined model	PCA	MFA	GRDA	TOPSIS-CW	均值 Mean value
ODCA	0.97	0.988	0.981	0.866	0.951
Borda	0.896	0.920	0.915	0.947	0.920
Copeland	0.943	0.965	0.96	0.919	0.947
Fuzzy Borda	0.968	0.983	0.99	0.868	0.952

表7 Spearman等级相关系数事后检验

Table 7 Post-test of Spearman rank correlation coefficient

组合模型 Combined model	t
ODCA	16.84
Borda	12.82
Copeland	16.08
Fuzzy Borda	17.07
$t_{0.05}$ 的临界值 Threshold of $t_{0.05}$	2.20

2.5 基于模糊Broda组合评价模型的番茄产量-品质评价指标对水肥用量的响应

建立模糊Broda组合评价模型确定的产量-品质综合

评价值与5个水肥因素 $X_i$ 的编码值[-2,2]间的关系式,方差分析(表8)表明,回归方程的失拟性检验 $F_1 = 1.25 < F_{0.05}(6, 5) = 4.95$ ,说明回归方程对试验点拟合较好;回归 $F_2 = 7.38 > F_{0.01}(20, 11) = 4.1$ ,说明模型是有效的。进一步,剔除 $\alpha=0.1$ 下不显著项,得到如下简化回归模型:

$$Y = 327.62 - 68.59X_1^2 - 73.57X_2^2 - 23.66X_3^2 - 47.29X_5^2 - 46.52X_1 + 32.19X_2 + 44.74X_3 + 66.59X_5 - 30.29X_1 \cdot X_5 + 32.70X_2 \cdot X_3$$

(7)

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。

2.5.1 单一因素对番茄产量-品质综合评价值的影响

回归模型的函数变幅值 $S_i$ 是当其他因子固定时,某一因子取不同水平时函数值的标准差的大小,可衡量该因子对目标函数的相对重要程度,可用来比较二次模型中各因子的作用大小<sup>[25]</sup>。通过计算函数变幅值,可知各水肥因素对番茄产量-品质的影响效应:施氮量( $S_i=155.90$ )>灌水量( $S_i=154.36$ )>有机肥用量( $S_i=133.79$ )>施磷量( $S_i=92.95$ )>施钾量( $S_i=0$ )。通过降维处理,即固定其他因素为0水平,得到水肥用量各因素对番茄产量-

品质评价值的回归模型,据此可知在试验范围内,其他因素为中间水平时,番茄产量-品质综合评价与灌水量、施氮量、施磷量和有机肥用量的关系均呈凸型二次曲线;与施钾量呈水平线,表明施钾量对综合评价没有影响(图1)。从中可以看出,当水肥投入量均为较低水平时,灌水量和施磷量、施氮量和有机肥用量的影响效应比较接近;在超过最适量后,灌水量和施氮量均表现为明显的负效应,且前者的负效应远大于后者。

表8 模糊Broda组合评价回归关系的方差分析  
Table 8 Analysis of variance on regression of fuzzy Broda combination evaluation value

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
$X_1$	51 936	1	51 936	12.4	0.005
$X_2$	24 866	1	24 866	5.9	0.03
$X_3$	48 031	1	48 031	11.5	0.006 1
$X_4$	3 300	1	3 300	0.8	0.3937
$X_5$	106 340	1	106 340	25.4	0.000 4
$X_1^2$	139 456	1	139 456	33.3	0.000 1
$X_2^2$	158 770	1	158 770	37.9	0.000 1
$X_3^2$	16 415	1	16 415	3.9	0.07
$X_4^2$	2 935	1	2 935	0.7	0.42
$X_5^2$	65 605	1	65 605	15.7	0.002
$X_1 X_2$	35	1	35	0.008	0.93
$X_1 X_3$	392	1	392	0.09	0.77
$X_1 X_4$	2 030	1	2 030	0.48	0.50
$X_1 X_5$	14 677	1	14 677	3.50	0.09
$X_2 X_3$	17 112	1	17 112	4.09	0.07
$X_2 X_4$	109	1	109	0.03	0.87
$X_2 X_5$	4 947	1	4 947	1.18	0.30
$X_3 X_4$	71	1	71	0.02	0.90
$X_3 X_5$	5 694	1	5 694	1.36	0.27
$X_4 X_5$	3 219	1	3 219	0.77	0.40
回归 Regression	617 987	20	30 899	7.38	0.001
剩余 Residue	46 068	11	30 899		
失拟 Lack of fit	27 625	6	4 188	1.25	0.35
误差 Residue	18 442	5	4 604		
总和 Sum	664 055	31	3 688		

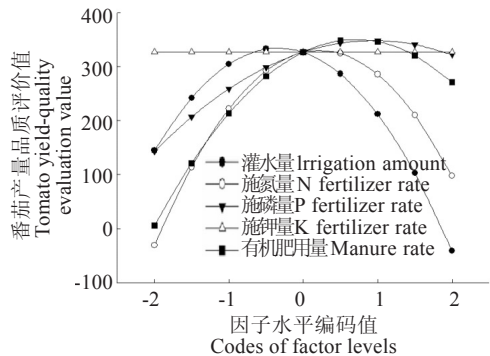


图1 单一因素对番茄品质-产量综合评价的影响  
Fig.1 Effect of each single factor on evaluation value of tomato quality and yield

2.5.2 两因素对番茄产量-品质评价值的耦合效应

1) 灌水量和有机肥用量对番茄产量-品质评价值的耦合效应  
灌水量和有机肥用量的交互项系数为-30.29,为负效应(式(7)),即二者相互作用阻碍番茄产量-品质评价值的提高。无论灌水量处于什么水平,随着有机肥用量的

增加,评价值先增大后减小;同样,不论有机肥用量为什么水平,随着灌水量增大,评价值仍表现为先升高后降低(图2a)。计算可知,灌水量为410 mm(接近中间水平),有机肥用量在32~38 t/hm<sup>2</sup>时(处于中间至较高水平),番茄产量-品质评价值达到最大值369;在灌水量和有机肥用量均处于最低水平(分别为282 mm和0 t/hm<sup>2</sup>)时,番茄产量-品质评价值达到最小值-297,比最大值降低了180%。表明灌水量和有机肥用量合理施用能同时提高番茄的产量和品质,过高或过低均不利于番茄产量品质的提高。

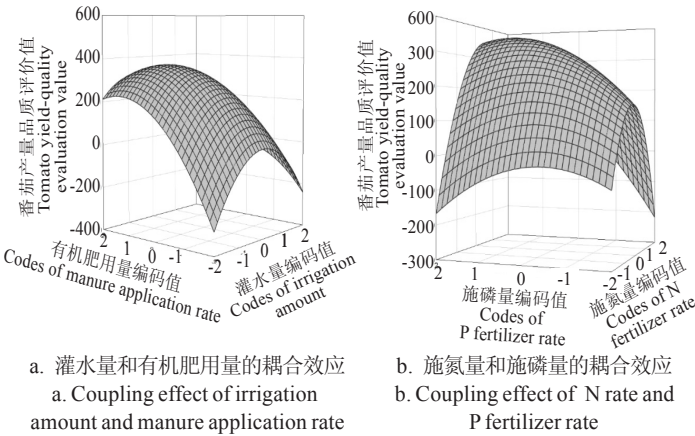


图2 两因素对番茄产量-品质评价值的耦合效应  
Fig.2 Coupling effect of 2 factors on comprehensive tomato yield and nutrition quality

2) 施氮量和施磷量对番茄产量-品质评价值的耦合效应  
施氮量和施磷量交互项系数为32.70,呈正效应(式(1)),即二者相互作用促进番茄产量-品质综合评价值的提高。图2b表明,当施氮量位于低水平和中间水平时,随着施磷量的增加,评价值呈先上升后下降的趋势;当施氮量为950 kg/hm<sup>2</sup>(较高水平)时,随着施磷量的增加,评价值呈线性增大趋势,而且,随着施氮量的增加,直线斜率增大,番茄产量-品质综合评价值随施磷量的增加幅度变大。不论施磷量水平,随着施氮量的增加,评价值均先增大后减小低,而且,随着施磷量增大,抛物线的最高点向施氮量变大的方向移动。计算可知,氮肥用量为722 kg/hm<sup>2</sup>(介于中间至较高水平),施磷量为730 kg/hm<sup>2</sup>(介于较高至高水平)时,番茄产量-品质的评价值最大,为365左右;当施磷量处于最低水平时(不施磷)、施氮量处于最高水平(1 140 kg/hm<sup>2</sup>),番茄产量-品质的评价值最小,为-217左右,比最大值降低了160%。可见,增加施磷量、合理配施氮肥有利于番茄产量-品质综合评价值的提高。

2.5.3 基于产量-品质综合评价值的最佳水肥用量

为使最大番茄产量-品质评价值的水肥用量决策建立在可靠的基础上,根据式(7),可得到3 125个理论组合方案,其值分布在-850~350,其中小于-750的组合方案20套,-750~-650的方案40套,-650~-550的方案95套,-550~-450的方案125套,-450~-350的方案260套,-350~-250的方案300套,-250~-150的方案450套,-150~-50的方案430套,-50~50的方案425套,50~150的方案385套,150~250的方案400套,250~350的方案160套,大于



350 的方案 35 套。表明较高的番茄产量品质综合评价在-250~-150 的频率分布较大,相对稳定,符合实际。表 9 中 95% 置信区间即是相应方案的编码水平,实际水平是对应的实际水肥用量,具体为:将灌水量、有机肥及

氮、磷、钾肥用量依次控制为 488.3~508.7 mm、19.3~21.8 t/hm<sup>2</sup>、498.4~565.6 kg/hm<sup>2</sup>、399.7~447.1 kg/hm<sup>2</sup>、698.1~777.9 kg/hm<sup>2</sup>,可望获得较高的番茄产量,同时兼具较高的品质。

表 9 番茄产量-品质评价在-250~-150 的 450 个方案中各因素水平的频率分布  
Table 9 Frequency distribution estimated value of tomato yield and quality varying from -250 to -150 among 450 scenarios for each factor level

水平 Levels.	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		X <sub>4</sub>		X <sub>5</sub>	
	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	70	0.156	120	0.267	85	0.189	90	0.200	115	0.256
-1	75	0.167	100	0.222	125	0.278	90	0.200	110	0.244
0	50	0.111	60	0.133	55	0.122	90	0.200	80	0.178
1	105	0.233	60	0.133	105	0.233	90	0.200	80	0.178
2	150	0.333	110	0.244	80	0.178	90	0.200	65	0.144
合计 Total	450	1	450	1	450	1	450	1	450	1
95%CI	0.3102~0.534		-0.251~-0.01		0.174~0.041		0.108~0.108		-0.394~-0.18	
实际水平 Actual levels	488.3~508.7 mm		498.4~565.6 kg·hm <sup>-2</sup>		399.7~447.1 kg·hm <sup>-2</sup>		698.1~777.9 kg·hm <sup>-2</sup>		19.3~21.8 t·hm <sup>-2</sup>	

注: 95%CI 为 95% 置信区间。  
Note: 95%CI represents 95% confidence interval.

3 讨论

构建番茄产量-品质综合评价模型、分析其对水肥供应的响应,可为通过调控水肥管理提高番茄产量与品质提供理论依据,达到合理利用水肥资源的同时,提高农业生产水平。本文采用隶属函数分析法、主成分分析法、灰色关联度分析法和基于组合赋权的 TOPSIS 模型 4 种单一方法对不同水肥用量番茄的产量-品质进行综合评价,32 个处理中 9 个处理的评价值排名相差较小,标准差在 1.0 及以下(表 3)。原因可能在于单一评价方法各自从不同角度出发,对评价对象的信息利用和挖掘深度不同所致<sup>[2,6,8,17]</sup>。这 4 种单一评价方法中,隶属函数法的结果与其他 3 种的综合相关性最强(表 4),而且计算简便,需要快速得到评价结果时,推荐使用隶属函数分析法。尽管本文将基于组合赋权的 TOPSIS 模型作为一种单一评价方法参与后续的组合,该方法在运算过程中其实是综合了主客观两方面权重,也有组合评价的思想,实质是一种比较简单的组合评价方法。

本研究发现,供试的 4 种组合评价方法中,Borda 与 Copeland 组合评价方法原理简单且计算最为简便,但评价结果较差(表 6),可能与组合过程只提取了单一评价方法结果的序值信息<sup>[26-27]</sup>有关,因而不推荐使用。模糊 Borda 组合评价法得到的评价结果优势最为明显,很大程度上是由于该组合过程提取了单一评价方法结果的评价值和序值两方面信息,且计算简便<sup>[28]</sup>;基于整体差异组合评价方法与模糊 Borda 法的结果相近,原因可能在于该方法的组合过程提取了单一评价方法结果的评价值信息,而评价值所包含的信息远大于序值<sup>[21]</sup>,计算的复杂程度与模糊 Borda 组合评价法也相当。因而,这后两种组合评价方法可推荐使用。

本研究采用模糊 Broda 组合评价模型将番茄产量和 6 个单一营养品质指标转化为能反映番茄产量-品质总体特征信息的综合指标,克服了多种评价方法结论不一致

的问题,也可达到舍短取长的效果,结果可用于番茄水肥管理决策。基于模糊 Broda 组合评价模型的番茄产量-品质综合评价指标与水肥用量间的回归模型表明,当其他因子为中水平时,番茄产量-品质评价价值随灌水量、施氮量、施磷量或有机肥用量的增加均呈凸形抛物线型变化。氮肥和灌水量对番茄产量-品质评价价值的影响较大,其次是有机肥,磷肥的效应较小。这与单一品质指标或产量对水肥用量的响应研究基本一致<sup>[29-32]</sup>。有研究表明,氮肥、有机肥和灌水量对番茄果实可溶性固形物的影响较大<sup>[31]</sup>,施氮量对番茄红素含量影响最大<sup>[32]</sup>。在一定范围内,随着施氮量增加,番茄产量迅速上升,当超出限度后,产量下降<sup>[33]</sup>。但是也有研究表明,磷肥对番茄营养品质的影响最大,氮肥次之<sup>[14]</sup>,这可能与不同试验所控制的施肥量、采用的供试土壤、作物品种及栽培方式等不同有关。本研究发现,在对番茄产量-品质综合评价价值的影响方面,灌水量和有机肥用量间具有拮抗作用,氮、磷肥用量间存在协同作用,表明灌水量增大时会减小有机肥对番茄产量品质的提升作用,施氮量增大会促进磷肥对番茄产量品质的提升作用。因而,要获得较高的番茄产量及品质,水肥用量要控制在合适范围。

选择恰当的评价指标、建立正确的评价模型对番茄水肥管理进行综合评价,目前仍是一个值得深入研究的问题。要使评价结果更加准确地反应实际情况,需要不断完善评价指标体系和评价模型。目前,有学者在探讨将单一方法组合的适用性和相容性<sup>[34]</sup>。也有学者在组合评价结论的基础上进行二次组合<sup>[35]</sup>,这在克服某些不足的同时,也增加了计算过程的复杂性。本文采用组合评价模型得出的结论有待实践的进一步检验。

4 结论

1)依据隶属函数分析法、主成分分析法、灰色关联度分析法和基于组合赋权的 TOPSIS 模型 4 种单一的综合

评价法,32个试验处理的评价值排名存在明显不一致,但各单一评价模型的评价结果与其他3种的Kendall相关系数通过了Kendall-W协和系数事前检验,具有相容性,可进行组合评价。

2)Borda评价法、Copeland评价法、模糊Borda评价法和基于整体差异的组合评价法与各单一评价模型评价值的Spearman相关系数均在0.866以上,反映了组合评价模型的合理性。其中,模糊Borda组合评价模型的等级相关系数表现最优。

3)各水肥因素对番茄产量-品质模糊Borda组合评价模型评价值的影响效应为:施氮量(函数变幅值 $S_i=155.90$ ) $\geq$ 灌水量( $S_i=154.36$ ) $>$ 有机肥用量( $S_i=133.79$ ) $>$ 施磷量( $S_i=92.95$ ) $>$ 施钾量( $S_i=0$ )。其他因子为中间水平时,番茄产量-品质评价值与灌水量及氮、磷肥和有机肥用量的关系均呈开口向下的抛物线变化,不随施钾量变化。施氮量和施磷量的交互作用对提高番茄产量-品质有促进作用,灌水量和有机肥用量的交互作用则相反。

4)模型寻优表明,将灌水量、有机肥及氮、磷、钾肥用量依次控制为488.3~508.7 mm、19.3~21.8 t/hm<sup>2</sup>、498.4~565.6 kg/hm<sup>2</sup>、399.7~447.1 kg/hm<sup>2</sup>、698.1~777.9 kg/hm<sup>2</sup>,可望获得较高的番茄产量,同时兼具较高的品质。

#### [参考文献]

- [1] 陈国宏,陈衍泰,李美娟.组合评价系统综合研究[J].复旦学报,2003,42(5):667—672.  
Chen Guohong, Chen Yantai, Li Meijuan. Research on the combination evaluation system[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2003, 42(5):667—672. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈贤,池涛,杨德. AHP法在番茄果实商品性状评价上的应用分析[J].西南农业学报,2008,21(2):432—435.  
Chen Xian, Chi Tao, Yang De. Application of AHP on the synthetic evaluation to the trade traits of the tomato fruits[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(2):432—435. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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(2):10—17.  
Du Qingjie, Li Jianming, Pan Tonghua, et al. The compound effects of water and fertilizer on yield and quality of tomato under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 10—17. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.  
Yuan Liping. Study on Effects of Irrigation, Nitrogen Supply on Tomato Growth, Development and Quality in Solar Greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [5] 庞胜群,赵飏,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.  
Pang Shengqun, Zhao Wei, Li Ge. Comprehensive evaluation on processing tomato breeds with gray relationship analysis[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2006, 24(6):682—684. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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.  
Wu Lijun, Wei Yanxiu. Effect of NaCl stress on seed germination and physiological characteristics in seedlings of tomato[J]. Seed, 2013, 32(11):3—7. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马洪英,靳力争,李响,等.运用隶属函数综合评价5个基质培育番茄品种[J].天津农业科学,2016,22(9):123—125.  
Ma Hongying, Jin Lizheng, Li Xiang, et al. Evaluation on comprehensive characteristics of 5 substrate cultivated tomato varieties by membership function[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(9):123—125. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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,2011,32(3):175—177.  
Yan Haiou, Lu Fukuan. Application of DTOPSIS in integrative evaluation of tomato varieties[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science, 2011, 32(3): 175—177. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.  
Xia Xiubo, Wang Quanhua, Yin Guoxiang, et al. Application of DTOPSIS method on comprehensive evaluation of tomato combinations in solar greenhouse in early spring[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2012(2): 21—24. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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):33—35.  
Liu Xinhua. Comprehensive evaluation of tomato yield and water use based on entropy model based on entropy model [J]. Journal of Water Resources Planning and Design, 2015(9): 33—35. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.  
Yang Hui, Cao Hongxia, Li Hongzheng, et al. An investigation on optimal irrigation and nitrogen rates of greenhouse tomato based on spatial analysis for high yield and quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5): 896—905 (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang F, Kang S, Du T, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 2011, 2: 1228—1238.
- [13] 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, 2012, 43(4): 456—460. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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)
- [15] 杜娅丹,曹红霞,柳美玉,等.基于层次分析法和熵权法的TOPSIS模型在番茄生长综合评价中的应用[J].西北农业学报,2015



- (6): 90—96  
Du Yadan, Cao Hongxia, Liu Meiyu, et al. Comprehensive evaluation of tomato growing with application of TOPSIS model based on AHP and entropy method[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015(6) 90—96. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王青, 戴思兰, 何晶, 等. 灰色关联法和层次分析法在盆栽多头小菊株系选择中的应用[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(17): 3653—3660.  
Wang Qing, Dai Silan, He Jing, et al. Application of grey correlation analysis and AHP method in selection of potted chrysanthemum[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(17): 3653—3660. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭显光. 一种新的综合评价方法: 组合评价法[J]. *统计研究*, 1995, 12(5): 56—59.
- [18] 曾宪报. 关于组合评价法的事前事后检验[J]. *统计研究*, 1997, 14(6): 56—58.
- [19] 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, 12(1): 101—105.  
Chen Guohong, Li Meijuan. The Research on the comprehensive evaluation method integration based on method set[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2004, 12(1): 101—105. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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, 18(38—43).  
Liu Yupeng, Li Yijun. Objective combined evaluation model based on dimension reduction[J]. *Operations Research and Management Science*, 2009, 18(38—43). (in Chinese with English abstract)
- [21] 郭亚军, 易平涛. 一种基于整体差异的客观组合评价法[J]. *中国管理科学*, 2006, 14(3): 60—64.  
Guo Yajun, Yi Pingtao. Whole Diversity-based reasoning for objective combined evaluation[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2006, 14(3): 60—64. (in Chinese with English abstract)
- [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. S Research and application of Combination Evaluation Method [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 with English abstract)
- [24] 苗敬毅. 不完全秩评定的 Kendall 协和系数在排序问题中的应用[J]. *山西统计*, 2002(1): 8—9.  
Miao Jingyi. Application of kendall cointegration coefficient of incomplete rank evaluation in ranking problem [J]. *Shanxi Journal of Statistics*, 2002(1): 8—9. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王小勇. 关于多元二次回归模型因子效应分析的一点改进意见[J]. *甘肃农业科技*, 1987(9): 15—20.
- [26] Marchant T. Cardinality and the Borda score[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 108(2): 464—472.
- [27] 刘洋. 基于模糊 Borda 法的组合评价模型在水质评价中的应用[J]. *城镇供水*, 2018(3): 38—41, 85.
- [28] 徐林明, 林志炳, 李美娟, 等. 基于模糊 Borda 法的动态组合评价方法及其应用研究 [J]. *中国管理科学*, 2017, 25 (2): 165—173.  
Xu Linming, Lin Zhibing, Li Meijuan, et al. A dynamic combined evaluation method based on fuzzy Borda and its application[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25 (2): 165—173. (in Chinese with English abstract)
- [29] 代顺冬, 胡田田, 陈思, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实 Vc 含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(2): 26—31.  
Dai Shundong, Hu Tiantian, Chen Si, et al. Effects of water and fertilizers on vitamin C content in tomato under alternate partial root-zone irrigation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(2): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [30] 代顺冬, 牛晓丽, 胡田田, 等. 水肥供应对番茄果实可溶性糖含量的影响[J]. *节水灌溉*, 2013(3): 5—8.  
Dai Shundong, Niu Xiaoli, Hu Tiantian, et al. Effects of water and fertilizers supply on soluble sugar content in tomato fruits[J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(3): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [31] 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性固形物含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(5): 893—901.  
Niu Xiaoli, Zhou Zhenjiang, Li Rui, et al. Effects of water and fertilizers applied on the soluble solid content in tomato under alternate partial root-zone irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(5): 893—901. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周振江, 牛晓丽, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2139—2146.  
Zhou Zhenjiang, Niu Xiaoli, Li Rui, et al. Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2139—2146. (in Chinese with English abstract)
- [33] 朱亚萍, 赵治书. 番茄配方施肥研究[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 1999(2): 166—169.  
Zhu Yaping, Zhao Zhishu. A study on specifically prescribed fertilization in tomato cultivation[J]. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science*, 1999(2): 166—169. (in Chinese with English abstract)
- [34] 林元庆, 陈加良. 方法群评价中权重集化问题的研究[J]. *中国管理科学*, 2002, 10(s1): 20—22.  
Lin Yuanqing, Chen Jialiang. Study on combination method of weighting set[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2002, 10(s1): 20—22. (in Chinese with English abstract)
- [35] 彭张林, 张强, 王素凤, 等. 基于评价结论的二次组合评价方法研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(9): 156—164.  
Peng Zhanglin, Zhang Qiang, Wang Sufeng, et al. Research on a recombination evaluation approach Based on the previous evaluation results[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24 (9): 156—164. (in Chinese with English abstract)

## Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply

Hu Tiantian, He Qiong, Hong Xia, Liu Jie, Li Hongxiang, Feng Puyu, Wang Li, Yang Shuohuan

(Key Laboratory Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education,  
Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The combination evaluation method is widely used in many fields, while rarely in agriculture, especially in the management of water and fertilizer supply in tomato plants. This study was to establish a combined evaluation model of tomato yield-quality and to explore its response to water and fertilizer supply. Tomato were grown in greenhouse from Sep. 2014 to Jul. 2015 in Yangling, Shaanxi, China (108.07 °E, 34.26 °N). The experiment was designed based on a 5-D quadratic rotation combination with factors including irrigation amount, nitrogen fertilizer rate, phosphorus fertilizer rate, potassium fertilizer rate and manure rate, resulting in 32 treatments. Tomato yield and quality parameters, i.e. the content of soluble solid, soluble sugar, titratable acid, lycopene, vitamin C in tomato fruit and ratio of sugar to acid were determined. Tomato yield and quality were comprehensively evaluated by principle component analysis (PCA), grain regression analysis (GRDA), membership function analysis (MFA) and technique for order performance by similarity to ideal solution model based on portfolio weighting (TOPSIS-CW). After then, Kendall-W concordance coefficient pre-test was conducted, and 4 combined evaluating models for tomato yield-quality was established using the methods of Broda, Copeland, fuzzy Borda and combined evaluation method based on overall difference, respectively. Spearman level correlation coefficient test method was used to test the above 4 combined evaluating methods for post-test. The result showed that the rank of the comprehensive value for the experiment treatments was inconsistent among 4 single evaluation methods, and the standard deviations of the ranking values varied from 0 to 6.85. However, the correlation coefficient between the evaluation value of each single model and the other 3 varied from 0.605 to 0.812, indicating a certain correlation between the results of single models existed. Additionally, pre-test was passed with high Kendall-W concordance coefficient (0.916) showing the 4 methods were of compatibility. Post-test indicated that ranking values of the 4 combined evaluating models were in good correlation with that of the 4 single evaluation methods (with correlation coefficients 0.920-0.952), especially for fuzzy Broda combined evaluating model. Furthermore, mathematical model between tomato yield-quality comprehensive index and amount of irrigation and fertilization supply was established. The main effect of each factor and coupling effect of 2 factors were analyzed. By calculating the amplitude of the function, the importance of each factor to the comprehensive value was well illustrated. The influence of nitrogen fertilizer (evaluation value 155.90) on the comprehensive value was top-drawer, followed by irrigation (evaluation value 154.36), manure fertilizer (133.79), phosphorus (evaluation value 92.95) and potassium fertilizer (evaluation value 0). The comprehensive value changed as downwards parabola with the increased rate of irrigation, nitrogen, phosphorus or manure fertilizer, while was not affected by potassium fertilizer rate. Additionally, negative interaction between irrigation and manure fertilizer (with interaction coefficient -30.29), and positive interaction between nitrogen and phosphorus fertilizer (with interaction coefficient 32.70) were observed, showing evaluation value increased then decreased by the increased rate of manure fertilizer irrespective of irrigation amount, indicating excessive amount of irrigation was not beneficial to the enhancement of tomato yield-quality comprehensive value, but reasonable application of manure fertilizer, nitrogen and phosphorus fertilizer could promote the comprehensive yield and quality. In this study, tomato yield and quality were expected to be superior when the amount of irrigation, manure fertilizer, nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer were 488.3-508.7 mm, 19.3-21.8 t/hm<sup>2</sup>, 498.4-565.6 kg/hm<sup>2</sup>, 399.7-447.1 kg/hm<sup>2</sup> and 698.1-777.9 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. It is still a scientific problem to be worthy further studied to establish a proper evaluation model to assess and guide the management of water and fertilizer application in tomato production by selecting appropriate evaluation indices. The results from the combined evaluation model in this study provide novel knowledge for integrated assessment of water and fertilizer effect in tomato production

**Keywords:** models; fertilizers; irrigation; comprehensive yield-quality evaluation; combined evaluation model