

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.032

基于多层次模糊评判的樱桃番茄综合生长水肥耦合调控

张智^{1,2} 和志豪^{1,2} 洪婷婷^{1,2} 朱常安¹ 蔡泽林¹ 刘建飞¹

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究水肥多因子耦合对樱桃番茄生长、产量、品质等方面的综合调控效果, 获取最适水肥因素组合, 以灌水量、施 N 量、施 K₂O 量、施 CaO 量为试验因子, 进行正交旋转组合设计, 利用多层次模糊评判方法对表征樱桃番茄生长的 4 类因素及 14 类子因素进行综合评判, 构建水肥多因子对樱桃番茄综合生长的调控模型。结果表明: 当其他因素为中间水平时, 樱桃番茄的综合生长随灌水量增加呈线性关系, 随施 N 量、施 K₂O 量、施 CaO 量的增加均呈开口向下的抛物线关系; 灌水量与施 K₂O 量及施 CaO 量均呈负交互效应; 多因子耦合作用中, 灌水量、施 N 量、施 K₂O 量、施 CaO 量编码值为 1.682、0、-0.744、-1.223 更有利于樱桃番茄的综合生长; 对于不同水平施 CaO 量而言, 灌水量、施 N 量、施 K₂O 量、施 CaO 量编码值为 1.682、0.521、0.071、-1 最有利于樱桃番茄综合生长。灌水量为补充至灌溉上限用量的 91.34%~100%、施 N 量为 12.26~13.50 g/株、施 K₂O 量为 2.92~5.13 g/株、施 CaO 量为 2.69~4.39 g/株时, 多层次模糊综合评判指数有最优区间, 最有利于樱桃番茄的综合生长。

关键词: 樱桃番茄; 多层次模糊综合评判; 水肥耦合; 综合生长模型; 钙素

中图分类号: S274.3; S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0278-10

Coupling Regulation of Water and Fertilizer Factors for Comprehensive Growth of Cherry Tomatoes Based on Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation

ZHANG Zhi^{1,2} HE Zhihao^{1,2} HONG Tingting^{1,2} ZHU Chang'an¹ CAI Zelin¹ LIU Jianfei¹

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

2. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the comprehensive regulation of growth, yield and quality of cherry tomatoes by multi-factor coupling of water and fertilizer, the optimal combination of water and fertilizer factors was obtained. The orthogonal rotation combination design was carried out with the amounts of irrigation, applied N, applied K₂O and applied CaO as test factors, and the multi-level fuzzy evaluation method was used to comprehensively evaluate the four factors and 14 sub-factors for characterization of cherry tomatoes' growth. Finally, the regulation model of water and fertilizer multi-factor on the comprehensive growth of cherry tomatoes was constructed. The results showed that when other factors were at the intermediate level, the comprehensive growth of cherry tomatoes showed a linear relationship with the increase of irrigation amount. With the increase of N application rate, K₂O application rate and CaO application rate, the parabolic relationship of the opening was downward. The interaction had a negative interaction effect between the amount of irrigation and the amount of K₂O application and CaO application. Among the multi-factor coupling effects, the irrigation, N, K₂O and CaO coding value were 1.682, 0, -0.744 and -1.223, respectively, which was more conducive to the comprehensive growth of cherry tomatoes; for different levels of CaO application, the irrigation, N, K₂O and CaO coding value were 1.682, 0.521, 0.071 and -1, respectively, which was most conducive to the comprehensive growth of cherry tomatoes. Finally, irrigation volume was the amount of water needed to replenish to the upper irrigation limit of 91.34%~100%, the amount of N applied was 12.26~13.50 g/plant, the amount of applied K₂O was 2.92~5.13 g/plant, the amount of applied CaO was 2.69~4.39 g/plant,

收稿日期: 2019-05-18 修回日期: 2019-06-22

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-03)、杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY-07)和西安市科技计划项目(2017050NC/NY011(2))

作者简介: 张智(1978—), 女, 副教授, 博士, 主要从事设施园艺环境工程研究, E-mail: zhangzhione@126.com

the multi-level fuzzy comprehensive evaluation value had the optimal interval, which was most beneficial to the comprehensive growth of cherry tomatoes.

Key words: cherry tomatoes; multi-level fuzzy comprehensive evaluation; water and fertilizer coupling; comprehensive growth model; calcium

0 引言

樱桃番茄是一种果蔬皆宜的高档型园艺作物,因其含有较高的可溶性固形物、独特的香气和口感而深受全世界人民的喜爱^[1-2]。水分管理和肥料施用是影响樱桃番茄生长发育和产量品质最重要的两个因素^[3-4]。无节制的灌水和盲目施肥除了造成严重的水资源浪费和肥料利用率低下,地下水受污染和土壤盐渍化等^[5],更使作物本身也遭受损害,致使作物生长受阻,产量品质下降^[6]。

对于樱桃番茄的水肥耦合研究,大多集中在不同氮磷钾的配比对作物的效应影响^[7-8],然而研究表明,钙元素也是作物生长不可缺少的元素之一^[9],它能有效减少番茄的病害发生,增强番茄的抗逆能力^[10]。近年来,一些种植者盲目追求作物产量,施入大量的氮元素导致土壤钙元素流失,在肥料投入时也较少考虑钙元素,导致土壤钙元素缺乏^[11];另一方面,土壤中能被作物直接吸收的钙素形态含量少,导致作物对钙元素的吸收较为匮乏^[12]。因此,研究樱桃番茄施入钙元素的水肥耦合十分必要。

不同的水肥耦合对作物的生长、果实产量、品质的影响不同,即使同一水肥条件,对这些指标的影响差异也较大。传统评价方法主要采用综合分析法,即通过单项指标的比较以及各指标之间的因果关系或相关性进行评价分析^[13-14]。由于受到研究者主观性的影响,使得评价结果具有某种程度的不确定性^[15]。因此,借助数学原理建立科学的评价模型,进而明确最佳水肥方案且有重要意义。多层次模糊综合评判隶属于模糊算法,是一种定性定量相结合、精确与非精确相统一的分析评价方法,通过对各级指标逐级进行模糊评判,最终得出较为全面、精确的评判值。因其在处理复杂系统问题方面的优越性,多层次模糊综合评判在气候变化模拟研究、农业机械结构优化和精密齿轮制造等评价分析中取得了很好的应用效果^[16-18]。

本研究旨在通过多层次模糊评价方法建立对樱桃番茄的生长、产量及品质等指标的科学评价,在此基础上,系统地构建融合钙元素的水肥多因子耦合对樱桃番茄综合生长的调控模型,模拟寻优得出适合西北干旱地区的最佳水肥组合,以期为实现樱桃

番茄科学灌溉施肥、高产优质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于 2018 年 3—7 月在杨凌示范区揉谷镇千玉农业合作社(34°16'N, 108°02'E, 海拔 450 m)的大跨度非对称塑料大棚中进行,该设施是双层塑料薄膜覆盖,棚长 100 m,宽 17 m,南北可种植区跨度分别为 9.6 m 和 6.5 m,脊高 5.5 m。棚内设有小型气象站(HOBO event logger, Onset computer corporation, 美国),可同时自动记录温度、湿度、光照辐射强度(lx)。为消除设施小环境造成试验误差,只在南跨度设置试验小区,并在靠近出口和最内侧各种植 4 行保护行。

供试土壤耕层为壤土,土壤的硝铵态氮质量比为 27.48 mg/kg,速效磷质量比为 23.64 mg/kg,速效钾质量比 152.14 mg/kg,电导率(EC) 0.34 mS/cm, pH 值 7.32,土壤容重约 1.34 g/cm³,有机质质量比约 5.89 g/kg,供试土壤最大田间持水率为 24.3%。试验采用的品种为“粉妹一号”。

1.2 试验设计

采用四因素五水平正交旋转组合试验方法,各因素编码如表 1 所示^[19-20],表中 X_1 为将土壤含水率由灌溉下限(田间持水率的 55%)灌至灌溉上限(田间持水率的 100%)所需灌水量的百分比, X_2 、 X_3 、 X_4 分别为单株施肥肥料中的 N、K₂O、CaO 含量。小区长 9 m,宽 1.2 m,每小区种植 32 株番茄,株距与滴灌管孔距保持一致且在孔下栽植,均为 0.5 m。试验有 23 个处理,每个处理 3 次重复,呈随机区组排列,小区间用 0.1 mm 黑色塑料薄膜隔开,防止处理间水肥侧渗相互影响。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素			
	$X_1/\%$	$X_2/(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$	$X_3/(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$	$X_4/(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$
-1.682	20	0	0	0
-1	36.22	4.18	1.99	3.99
0	60	10.31	4.92	9.85
1	83.78	16.44	7.85	15.71
1.682	100	20.62	9.84	19.70

樱桃番茄幼苗于五叶一心(2018 年 3 月 15 日)

移栽至田间,留七穗果,同年7月20日拉秧。定植后随即灌水缓苗,待其第1穗花现蕾(4月27日)开始灌水处理,首先使所有处理均处于同一灌溉下限(田间持水率的 $50\% \pm 5\%$),之后开始水肥处理,灌水方式为膜下滴灌,可减少蒸腾蒸散量,以达到保水目的。各处理的水分监测为动态监测,使用TDR型环境水分监测仪(Spectrum Technologies, Inc., 美国)测量土壤的含水率(体积含水率)来确定是否灌水,一般灌水周期为2~3

d/次,阴雨天不进行灌水。由每个处理灌水设备首部的Hall数显电子流量计记录灌水用量。将肥料溶于施肥设施中通过施肥器以滴灌方式施入植株根部,采用多频率滴灌施肥^[21],在每穗果膨大时进行,共施7次,每次用量均一致,灌溉施肥方案见表2,表中 $x_1 \sim x_4$ 为 $X_1 \sim X_4$ 编码值。 F_1 为 X_1 各水平下的单株灌水量, F_2 、 F_3 、 F_4 分别为 X_2 、 X_3 、 X_4 各水平下的实际单株施肥量,施用的肥料依次为尿素、硝酸钾、硝酸钙。

表2 灌溉施肥方案
Tab.2 Fertigation design

处理	因素				灌溉施肥用量			
	x_1	x_2	x_3	x_4	$F_1/(L \cdot 株^{-1})$	$F_2/(g \cdot 株^{-1})$	$F_3/(g \cdot 株^{-1})$	$F_4/(g \cdot 株^{-1})$
T1	1	1	1	1	41.28	19.23	19.69	34.15
T2	1	1	-1	-1	41.28	19.23	5.16	8.77
T3	1	-1	1	-1	41.28	5.08	19.69	8.77
T4	1	-1	-1	1	41.28	5.08	5.16	34.15
T5	-1	1	1	-1	18.04	19.23	19.69	8.77
T6	-1	1	-1	1	18.04	19.23	5.16	34.15
T7	-1	-1	1	1	18.04	5.08	19.69	34.15
T8	-1	-1	-1	-1	18.04	5.08	5.16	8.77
T9	-1.682	0	0	0	6.77	12.15	12.31	21.38
T10	1.682	0	0	0	57.09	12.15	12.31	21.38
T11	0	-1.682	0	0	36.98	0	12.31	21.38
T12	0	1.682	0	0	36.98	24.15	12.31	21.38
T13	0	0	-1.682	0	36.98	12.15	0	21.38
T14	0	0	1.682	0	36.98	12.15	24.62	21.38
T15	0	0	0	-1.682	36.98	12.15	12.31	0
T16	0	0	0	1.682	36.98	12.15	12.31	42.77
T17	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38
T18	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38
T19	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38
T20	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38
T21	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38
T22	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38
T23	0	0	0	0	36.98	12.15	12.31	21.38

1.3 试验测定项目

1.3.1 产量指标

产量指标包括单果质量、单株果数、公顷产量。每个处理共测定10株,均在果实全熟后测定,单果质量和单株果数均为平均值;公顷产量由小区产量折算,小区产量为单株产量与小区樱桃番茄株数的乘积。质量均用千分之一精度电子天平测定。

1.3.2 生长指标

生长指标包括总生物量,净光合速率,植株全N、K、Ca含量。总生物量为根、茎、叶、果各部位生物量总和;净光合速率在第4穗果全熟时期利用Li-6800型便携式光合测定仪(Li-Cor, 美国)测定;全N、全P含量利用AA3型高分辨自动化学分析仪

(Bran + Luebbe corporation, 德国)测定,全K含量利用M410型火焰分光光度计(Sherwood corporation, 英国)测定,全效元素含量分别测定根、茎、叶、果的含量再累加。测定总生物量和全效元素含量均在第7穗果采收结束时期,每个处理测定3株。

1.3.3 营养品质

营养品质包括维生素C和番茄红素含量。维生素C含量采用钼蓝比色法测定,番茄红素含量采用EV300PC型紫外-可见分光光度计(Thermo Fisher, 美国)测定。

1.3.4 风味品质

风味品质包括:可溶性总糖、有机酸、可溶性固形物含量和糖酸比。可溶性总糖含量采用蒽酮比色

法测定;有机酸含量采用 0.1 mol/L NaOH 滴定法测定;可溶性固形物含量和糖酸比采用 PAL - Easy ACID3 型番茄糖酸一体机 (ATAGO, 日本) 测定。

果实品质测定在第 4 硕果全熟时期测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 进行数据整理、分类。利用 DPS 7.05 进行试验设计及多元统计分析,并建立四元二次正交旋转模型。使用 Yaahp 10.01 对樱桃番茄 4 类指标进行层次分类(图 1),并对模型解析以及绘制相关图表。图中 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 分别为产量指标、生长指标、营养品质指标和风味品质指标; u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} 分别为单株果数、单果质量、公顷产量; u_{21} 、 u_{22} 、 u_{23} 、 u_{24} 、 u_{25} 分别为总生物量、净光合速率、植株全 N、P、K 含量; u_{31} 、 u_{32} 分别为维生素 C 含量、番茄红素含量; u_{41} 、 u_{42} 、 u_{43} 、 u_{44} 分别为可溶性总糖、有机酸、可溶性固形物含量和糖酸比。

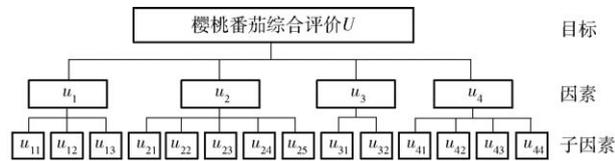


图 1 樱桃番茄综合评价层次模型

Fig. 1 Hierarchical model of cherry tomatoes comprehensive evaluation

2 结果与分析

2.1 基于多层次模糊评判的樱桃番茄综合生长评价

2.1.1 模糊评判因素集及所属子因素集构建

(1) 根据多层次模糊评判方法,首先将樱桃番茄的所有指标分为 4 大类:产量指标、生长指标、营养品质指标、风味品质指标,将这 4 类指标定义为第 1 层指标,即因素集

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} \quad (1)$$

(2) 将所有 2 级指标进行分类,并将其定义为子因素(共 14 类),其中归类于产量指标 u_1 的有:单株果数、单果质量、公顷产量;归类于生长指标 u_2 的有:总生物量、净光合速率、植株全 N、P、K 含量;归类于果实营养品质指标 u_3 的有:维生素 C 含量、番茄红素含量;归类于果实风味品质指标 u_4 有:可溶性总糖、有机酸、可溶性固形物含量和糖酸比。

$$\begin{cases} u_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}\} \\ u_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25}\} \\ u_3 = \{u_{31}, u_{32}\} \\ u_4 = \{u_{41}, u_{42}, u_{43}, u_{44}\} \end{cases} \quad (2)$$

2.1.2 因素及所属子因素评判集构建

各因素以及所属子因素有其对应隶属的评判值集合,一般用 V 、 v_{ij} 表示,因试验设有 23 个处理,因此

各有 23 个评判值。

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_{23}\} \quad (3)$$

$$v_{ij} = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i23}\} \quad (4)$$

2.1.3 多层次模糊评判因素权重的确定

(1) AHP 法

层次分析法(AHP)是根据调查问卷的结果建立判断矩阵,将总决策分解成目标层、因素层、子因素层,比较各个子因素之间的重要性,建立对比矩阵,利用调查问卷对子因素进行打分,对比矩阵中各指标的数值一般采用 1~9 为标度法确定,用一致性检验对比矩阵可接受程度,当一致性比例指标 $C_R < 0.1$ 时认为一致性检验通过,指标判断矩阵可接受。因素层、产量指标、生长指标、果实营养品质指标、果实风味品质指标子因素对比矩阵分别为

$$u_i = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.38 & 0.41 & 0.49 \\ 2.63 & 1.00 & 1.07 & 1.29 \\ 2.44 & 0.93 & 1.00 & 1.21 \\ 2.04 & 0.78 & 0.83 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$u_{1j} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.33 & 0.17 \\ 3.00 & 1.00 & 0.20 \\ 6.00 & 5.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$u_{2j} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.50 & 2.00 & 2.00 & 2.00 \\ 2.00 & 1.00 & 3.00 & 3.00 & 3.00 \\ 0.50 & 0.33 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.50 & 0.33 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.50 & 0.33 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$u_{3j} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.33 \\ 3.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$u_{4j} = \begin{bmatrix} 1.00 & 2.00 & 0.50 & 0.25 \\ 0.50 & 1.00 & 0.33 & 0.20 \\ 2.00 & 3.00 & 1.00 & 0.33 \\ 4.00 & 5.00 & 3.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

利用 Yaahp 10.01 处理所有子因素分值,最终获得产量、生长、营养品质、风味品质 4 个一级指标的权重,具体方法参照文献[22],结果如表 3 所示。

(2) 熵权法

在对樱桃番茄所有因素下的子因素进行评价时,考虑到因素较多,采用熵权法进行权重确定,以减小人为因素的主观影响。

熵权法是利用标准化后的实测值获取权重,考虑到多个样本之间的联系,能使多样本的数据评价结果更加客观、合理。利用 ZOU 等^[23]的方法计算各子因素的客观权重,具体权重如表 4 所示。表中 w_{11} 为单株果数权重, w_{12} 为单果质量权重, w_{13} 为公顷产量权重, w_{21} 为总生物量权重, w_{22} 为净光合速率权重, w_{23} 、 w_{24} 、 w_{25} 分别为植株全 N、P、K 含量权重, w_{31}

表 3 基于 AHP 法的因素权重

Tab. 3 Determination of factor weights based on AHP

	局部权重 W_{ij}	最终权重 a_{ij}	一致性检验参数
	0.302	0.302 (a_1)	
目标层 U	0.251	0.251 (a_2)	$C_R = 0$
因素层 u_i	0.123	0.123 (a_3)	$\lambda_{\max} = 4.000$
	0.324	0.324 (a_4)	
因素层 u_1	0.092	0.028	$C_R = 0.092$
子因素层 u_{1j}	0.201	0.061	$\lambda_{\max} = 3.096$
	0.707	0.214	
因素层 u_2	0.234	0.059	$C_R = 0.002$
子因素层 u_{2j}	0.394	0.099	$\lambda_{\max} = 5.010$
	0.124	0.031	
	0.124	0.031	
因素层 u_3	0.250	0.031	$C_R = 0$
子因素层 u_{3j}	0.750	0.092	$\lambda_{\max} = 2.000$
	0.140	0.045	
因素层 u_4	0.085	0.028	$C_R = 0.019$
子因素层 u_{4j}	0.233	0.075	$\lambda_{\max} = 4.051$
	0.542	0.176	

注: a_1 为产量指标权重, a_2 为生长指标权重, a_3 为果实营养成分指标权重, a_4 为果实风味品质指标权重。

为果实维生素 C 含量权重, w_{32} 为果实番茄红素含量权重, w_{41} 为果实可溶性总糖含量权重, w_{42} 为果实有机酸含量权重, w_{43} 为果实可溶性固形物含量权重, w_{44} 为果实糖酸比权重。

2.1.4 多层次模糊评判值计算

(1) 因素集的单层次模糊评判

利用各因素集下所属的子因素进行各因素集模糊评判指数的计算

$$b_{iz} = w_{ij} r_{jz} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ w_{31} & w_{32} & \cdots & w_{3m} \\ w_{41} & w_{42} & \cdots & w_{4m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ b_{31} & b_{32} & \cdots & b_{3n} \\ b_{41} & b_{42} & \cdots & b_{4n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $\sum_{z=1}^n b_{iz} = 1 \quad 0 \leq b_{iz} \leq 1$

表 4 基于熵权法的因素子集权重

Tab. 4 Determination of factor subset weight based on entropy weight method

处理	u_1			u_2					u_3		u_4			
	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{31}	u_{32}	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{44}
T1	0.046	0.049	0.037	0.044	0.037	0.045	0.045	0.043	0.050	0.062	0.055	0.045	0.041	0.050
T2	0.046	0.037	0.033	0.044	0.033	0.048	0.044	0.045	0.035	0.050	0.040	0.048	0.035	0.041
T3	0.036	0.047	0.059	0.046	0.051	0.048	0.048	0.041	0.047	0.065	0.050	0.042	0.030	0.045
T4	0.047	0.030	0.037	0.046	0.042	0.046	0.050	0.036	0.046	0.029	0.048	0.045	0.042	0.058
T5	0.050	0.035	0.030	0.050	0.047	0.044	0.045	0.050	0.039	0.027	0.052	0.037	0.035	0.039
T6	0.053	0.034	0.027	0.043	0.062	0.041	0.042	0.044	0.043	0.023	0.032	0.038	0.046	0.041
T7	0.046	0.035	0.036	0.046	0.040	0.045	0.042	0.040	0.037	0.024	0.032	0.039	0.042	0.045
T8	0.037	0.043	0.046	0.055	0.055	0.046	0.040	0.043	0.040	0.042	0.038	0.042	0.046	0.043
T9	0.048	0.036	0.040	0.049	0.038	0.041	0.044	0.049	0.049	0.035	0.032	0.036	0.044	0.048
T10	0.046	0.040	0.028	0.050	0.039	0.043	0.048	0.043	0.059	0.055	0.036	0.046	0.040	0.050
T11	0.041	0.041	0.084	0.047	0.044	0.047	0.048	0.041	0.040	0.027	0.043	0.042	0.037	0.056
T12	0.057	0.036	0.050	0.030	0.052	0.045	0.044	0.045	0.054	0.026	0.052	0.040	0.048	0.084
T13	0.044	0.040	0.028	0.042	0.047	0.044	0.041	0.046	0.059	0.042	0.045	0.039	0.058	0.053
T14	0.051	0.040	0.032	0.042	0.030	0.044	0.044	0.040	0.055	0.037	0.033	0.041	0.035	0.039
T15	0.052	0.041	0.068	0.051	0.035	0.041	0.047	0.042	0.054	0.050	0.052	0.044	0.027	0.043
T16	0.049	0.041	0.043	0.039	0.017	0.046	0.046	0.047	0.055	0.041	0.048	0.043	0.057	0.041
T17	0.036	0.054	0.046	0.039	0.047	0.041	0.041	0.043	0.034	0.052	0.045	0.047	0.048	0.032
T18	0.036	0.053	0.045	0.040	0.048	0.041	0.040	0.045	0.034	0.051	0.045	0.047	0.047	0.032
T19	0.036	0.053	0.047	0.039	0.047	0.039	0.040	0.043	0.034	0.052	0.045	0.047	0.048	0.032
T20	0.036	0.054	0.046	0.039	0.048	0.041	0.040	0.043	0.034	0.051	0.045	0.047	0.048	0.032
T21	0.036	0.054	0.046	0.040	0.047	0.040	0.040	0.043	0.034	0.051	0.045	0.047	0.047	0.032
T22	0.035	0.053	0.047	0.040	0.048	0.041	0.040	0.044	0.034	0.052	0.045	0.048	0.048	0.032
T23	0.036	0.054	0.047	0.039	0.049	0.042	0.041	0.043	0.034	0.052	0.045	0.048	0.048	0.032
权重	w_{11}	w_{12}	w_{13}	w_{21}	w_{22}	w_{23}	w_{24}	w_{25}	w_{31}	w_{32}	w_{41}	w_{42}	w_{43}	w_{44}
	0.335	0.105	0.561	0.289	0.505	0.093	0.060	0.052	0.364	0.636	0.210	0.104	0.217	0.469

式中 b_{iz} ——第 i 因素集的模糊评判指数
 w_{ij} ——第 i 因素集下第 j 子因素集客观权重
 r_{jz} ——第 i 个因素集归一化后数据矩阵

(2) 各处理的二次模糊评判

利用各因素集最终的模糊评判指数进行所有处理的综合模糊评判指数的计算

$$B_z = a_i b_{iz} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ b_{31} & b_{32} & \dots & b_{3n} \\ b_{41} & b_{42} & \dots & b_{4n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \dots & B_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $\sum_{z=1}^n B_z = 1 \quad 0 \leq B_z \leq 1$

式中 B_z ——第 z 处理的多层次模糊评判指数
 a_i ——第 i 因素集的权重

根据 B_z 值对各处理进行排序,最终樱桃番茄综合生长评价结果如表 5 所示。

表 5 多层次模糊评判指数及排序

Tab.5 Multi-level fuzzy evaluation index and ranking

处理	评判指数	排序	处理	评判指数	排序
T1	0.0413	16	T13	0.0467	7
T2	0.0511	2	T14	0.0381	20
T3	0.0440	12	T15	0.0460	10
T4	0.0419	15	T16	0.0408	17
T5	0.0348	22	T17	0.0437	14
T6	0.0395	19	T18	0.0440	12
T7	0.0357	21	T19	0.0457	11
T8	0.0298	23	T20	0.0484	3
T9	0.0466	8	T21	0.0469	5
T10	0.0546	1	T22	0.0466	9
T11	0.0401	18	T23	0.0469	6
T12	0.0469	4			

2.2 基于模糊评判的樱桃番茄综合生长对水肥耦合的响应

对樱桃番茄的多层次模糊评判指数进行二次多项式拟合,在剔除不显著项后,得出回归模型为

$$Y = 0.04673 + 0.00380x_1 + 0.00196x_2 - 0.00154x_3 - 0.00188x_2^2 - 0.00229x_3^2 - 0.00193x_4^2 - 0.00111x_1x_3 - 0.00282x_1x_4 \quad (7)$$

其决定系数 $R^2 = 0.8369, F = 2.9324 > F_{0.05(9,13)} = 2.17$ 。

2.2.1 单因素对樱桃番茄综合生长的影响

对回归模型进行降维消元处理,定义各因素在其编码范围内,其余元素均取中间水平,能够消除其余元素对分析元素的影响作用^[24-26]。由图 2 可知,

随着灌水水平的升高,樱桃番茄的多层次模糊综合评判指数越高,即综合生长最好;对于 N、K₂O、CaO 施用量,图像均呈开口向下抛物线,即过高或过低均对综合生长不利。由图 2 可知,灌水量和 N、K₂O、CaO 施用量均存在一个合理的用量区间,在达到最适值后会变为负效应。

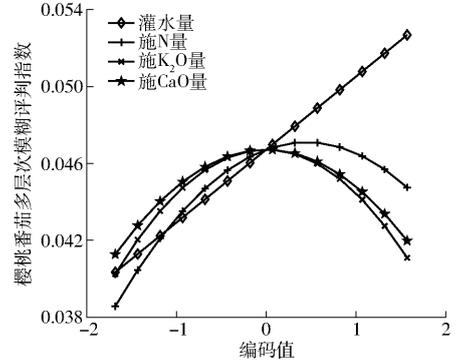


图 2 多层次模糊综合评判指数的单因素效应分析

Fig.2 Single factor effect analysis of multi-level comprehensive fuzzy evaluation index

2.2.2 两因素交互效应对樱桃番茄综合生长的影响

(1) 灌水量和施 K₂O 量的交互作用

对式(7)进行降维消元处理,使 x_2, x_4 处于 0 水平。图 3 中栅格的颜色深浅代表了多层次模糊综合评判指数的大小,由图 3 可以看出,在一定范围内樱桃番茄评判指数随着灌水量的增加而升高,随施 K₂O 量的增加呈先上升后下降的趋势。当评判指数越高时,灌水量需要较高的水平,施 K₂O 量则需要较低的水平,说明两者之间在一定范围内存在负交互作用,并存在着相互抑制作用。

(2) 灌水量和施 CaO 量的交互作用

同理对式(7)进行降维消元处理,使 x_2, x_3 处于 0 水平。由图 4 可知,在试验范围内,当灌水量及施 CaO 量都在较低水平时,对樱桃番茄综合生长最为不利;之后,随着灌水量及施 CaO 量的提升,综合生长评判指数逐渐提升;但在评判指数处于最优区间时,灌水量需要较高水平,而施 CaO 量则需要较低水平,因此两者之间同样在一定范围内呈现负交互作用,存在相互抑制作用。

2.3 樱桃番茄综合生长的最适水肥因子解析

2.3.1 水肥多因子耦合对樱桃番茄综合生长的影响

将灌水量、施 N 量、施 K₂O 量、施 CaO 量分别进行三因子组合模拟,并且使用 Matlab 进行最佳值计算,结果如图 5 所示。由图 5a 可知,在施 CaO 量为中等水平时,低灌水量、低施 N 量、高施 K₂O 量对樱桃番茄综合生长的促进作用较小,而较高的灌水量、中等偏上施 N 量以及中等偏下施 K₂O 量的组合有利于樱桃番茄的综合生长。由图 5b 可知,当施 K₂O

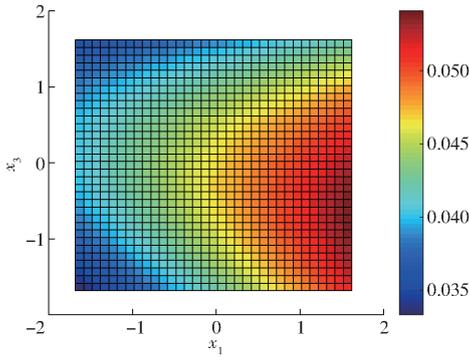


图 3 灌水量和施 K₂O 量对多层次模糊综合评判指数的交互影响

Fig.3 Interactive effects of irrigation quantity and K₂O amount on multi-level comprehensive fuzzy evaluation index

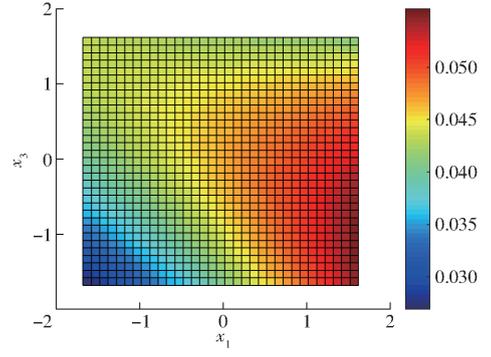


图 4 灌水量和施 CaO 量对多层次模糊综合评判指数的交互影响

Fig.4 Interactive effects of irrigation quantity and CaO amount on multi-level comprehensive fuzzy evaluation index

量为中等水平时,低灌水量、低施 N 量和高施 CaO 量不利于樱桃番茄综合生长,而较高灌水量、中等偏上施 N 量以及较偏下施 CaO 量对樱桃番茄综合生长影响最佳。由图 5c 可知,当施 N 量为中等水平时,低灌水量、高施 K₂O 量和高施 CaO 量限制樱桃番茄的综合生长,较高灌水量、中等偏下施 K₂O 量以及较偏下施 CaO 量更能促进樱桃番茄综合生长。

由图 5d 可知,当灌水量为中等水平时,施 N 量为中等偏上、施 K₂O 量为中等偏下,施 CaO 量为中等水平时,对樱桃番茄综合生长最有利。4 种模型的最佳编码值组合以及相应的多层次模糊综合评判指数如表 6 所示,由表 6 可知,当 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为 1.682、0、-0.744、-1.223 时的综合生长评判指数最大,最有利于樱桃番茄的生长发育。

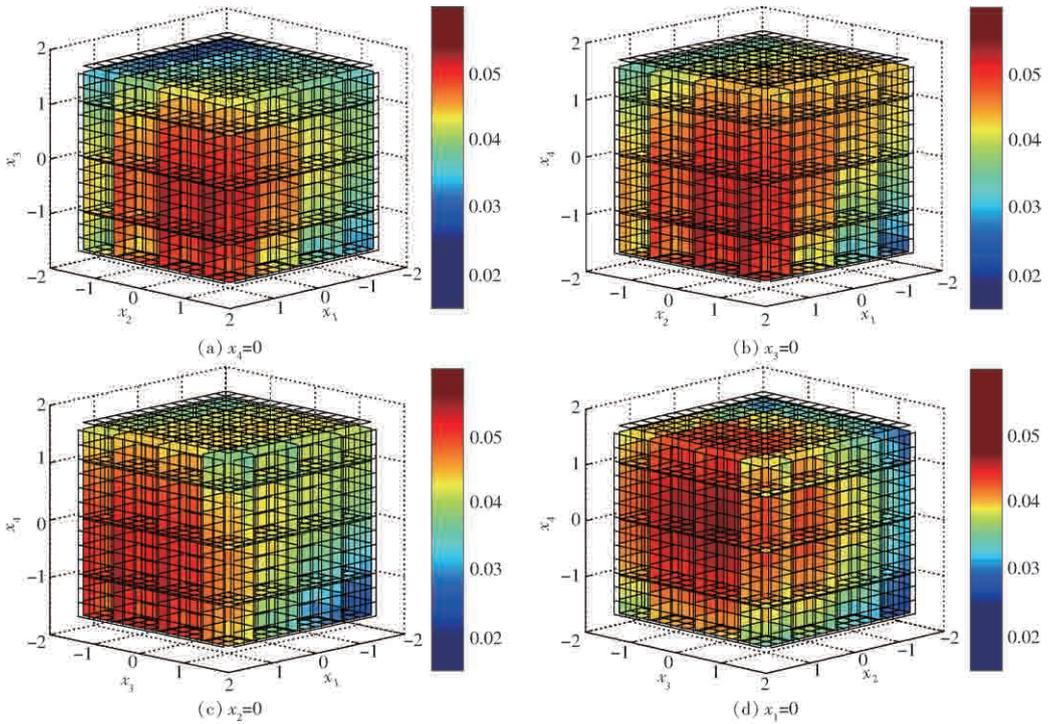


图 5 樱桃番茄综合生长对水肥多因子耦合的响应模型

Fig.5 Response models of comprehensive growth of cherry tomatoes to multi-factor coupling of water and fertilizer

表 6 不同模型最佳编码值组合及评判指数

Tab.6 The best code combination and evaluation index for different models

综合模型	x_1	x_2	x_3	x_4	评判指数
图 5a	1.682	0.521	-0.744	0	0.054 9
图 5b	1.682	0.521	0	-1.223	0.056 5
图 5c	1.682	0	-0.744	-1.223	0.057 3
图 5d	0	0.521	0.336	0	0.047 5

2.3.2 不同施 CaO 量对樱桃番茄综合生长的影响

为研究施 CaO 量对常规水肥因子耦合效果的影响,将施 CaO 量编码值分别设为 -1.682、-1、0、1、1.682,将其余 3 因子组合模拟,结果如图 5a 和图 6 所示。由图可知,当 x_4 从 -1.682 上升至 1 时,灌水量、施 N 量、施 K₂O 量的耦合效应有着相似的规律,即当评判指数越大时,灌水量

水平越高,施 N 量接近中等偏上水平,施 K_2O 量为中等偏上或中等偏下水平。当 x_4 从 1 上升至 1.682 时,评判指数越大,灌水量水平越低,施 N 量和施 K_2O 量变化规律和其余 x_4 水平的变化规

律相同。结合各模型的多层次模糊综合评判指数, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为 1.682、0.521、0.071、-1 时获得最高评判指数,更有利于樱桃番茄综合生长(表 7)。

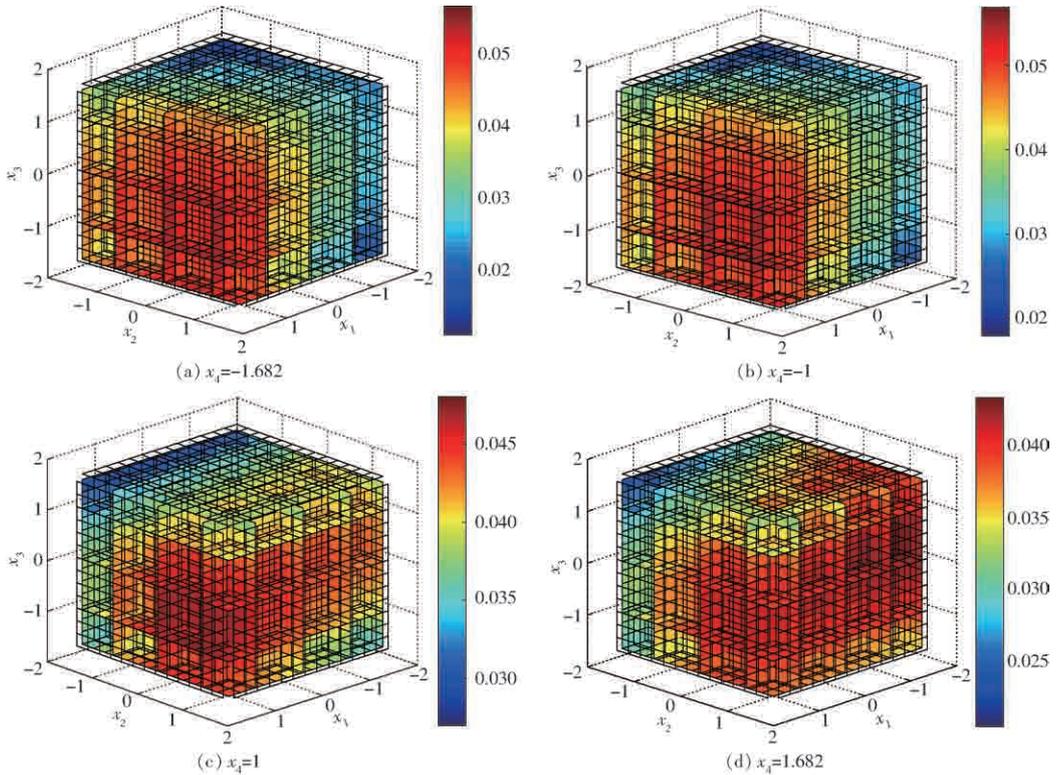


图 6 不同施 CaO 量下樱桃番茄综合生长对水肥多因子耦合的响应模型

Fig. 6 Response models of multi-factor coupling of water and fertilizer to cherry tomatoes under different CaO application levels

表 7 不同施 CaO 量模型最佳编码值组合及评判指数

Tab.7 The best combination of coding and evaluation

index for different CaO amount models

综合模型	x_1	x_2	x_3	x_4	评判指数
图 6a	1.682	0.521	0.071	-1.682	0.0574
图 6b	1.682	0.521	0.071	-1	0.0577
图 6c	1.682	0.521	0.071	1	0.0482
图 6d	-1.682	0.521	0.071	1.682	0.0434

2.3.3 基于多层次模糊评判的樱桃番茄最佳生长水肥因子

利用 Matlab 软件对式(7)进行在固定区间的最优值求解,结合图 5、6 中最佳评判指数模型相应的最优组合以及模型图切片,得出在樱桃番茄多层次模糊综合评判指数最大时,各因子相应的最优编码值区间分别为:灌水量 1.318 ~ 1.682、施 N 量 0.318 ~ 0.521、施 K_2O 量 -0.682 ~ 0.071、施 CaO 量 -1.223 ~ -0.932,即当灌水量为补充至灌溉上限用量的 91.34% ~ 100%、施 N 量为 12.26 ~ 13.50 g/株、施 K_2O 量为 2.92 ~ 5.13 g/株、施 CaO 量为 2.69 ~ 4.39 g/株时,樱桃番茄的多层次模糊综合评判指数有最优值区间,此时最有利于樱桃番茄的综合生长。

3 讨论

大多数的评价方法是利用主观评价或客观评价亦或主客观综合评价法对作物的某一类指标进行评判,但在兼顾研究对象多个方面的综合评判的研究甚少。有研究得出灌水量过高,施 N 量过高不利于番茄综合品质的提高^[27-28],也有研究得出充分灌溉的 2/3 能够协调番茄的产量和综合品质^[29]。为了统筹各类指标对樱桃番茄综合生长的影响,本文利用多层次模糊综合评判法对樱桃番茄 4 类大指标共 14 类小指标进行综合评判,将模糊评判进行分层,并使用主客观权重进行分层运算,能够更加准确地解释樱桃番茄综合生长中的需水需肥规律。

产量和品质是樱桃番茄生产中最重要的一类指标,而保证作物正常生长发育也是产量和品质的重要保证来源^[30],作物的营养生长和生殖生长之间既存在协同关系,也存在拮抗效应^[31]。减少灌溉会使作物减少侧枝和生殖生长,但作物体内碳水化合物会从韧皮部向果实运输,提高品质,但产量会有所降低^[32-33]。本试验中樱桃番茄的综合生长评判指数

随着施肥量呈先上升后降低的趋势,这也与前人的研究结果相似^[34-35]。随着灌水量逐渐增加到一定值,可以有效地权衡樱桃番茄产量、生长参数和两类品质指标以及各自所属的多种指标,使樱桃番茄的综合生长达到最优、最平衡的区间。因此通过综合评判,得出灌水量为中等偏高和施肥量中等偏低是樱桃番茄综合生长的最佳条件。

钙元素不仅是维系土壤活性的元素之一,更是作物吸收的重要营养因子。钙在作物体内的运输是缓慢的,作物不同部位对钙素的吸收效应也不同,且存在“离子竞争”现象^[36]。有研究报道若施用过量的氮素会导致作物缺钙,也有研究指出环境中钙离子浓度过高会抑制作物根系生长,导致对 K^+ 和 Mg^{2+} 等离子的吸收,影响作物的正常发育,这与本研究结果相似^[37]。

樱桃番茄综合生长受水肥因子不同组合的影响,不同的水肥组合会影响综合生长中的不同指标,进而影响最终的多层次模糊综合评判指数,并在最终的评判模型的模拟寻优中得出与前人不尽相同的结论,一方面是因为前人对多种指标进行综合评判

的研究甚少,另一方面也可能与栽培设施、温室小气候等外界因素影响有关,因此未来在综合各类指标的评判中还需进一步研究。

4 结论

(1)基于多层次模糊评判方法对樱桃番茄生长、产量、品质等指标进行综合评判,获得不同水肥处理下的评判指数,评价樱桃番茄综合生长更为可靠。

(2)构建了水肥因子耦合对樱桃番茄综合生长的调控模型,发现在单因素分析下,樱桃番茄综合生长与灌水量接近于线性,与施N量、施 K_2O 量、施CaO量均呈开口向下的抛物线关系;灌水量和施K量、灌水量和施Ca量均存在着负交互作用。

(3)对于不同多因子组合模型, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为1.682、0、-0.744、-1.223更有利于樱桃番茄的综合生长;对于不同的施CaO量,当 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为1.682、0.521、0.071、-1最有利于樱桃番茄的综合生长;最优区间为:最终灌水量补充至灌溉上限用量的91.34%~100%,施N量12.26~13.50 g/株,施 K_2O 量2.92~5.13 g/株,施CaO量2.69~4.39 g/株。

参 考 文 献

- [1] BECKLES D M. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 63(1): 129-140.
- [2] LIU H R, MENG F L, MIAO H Y, et al. Effects of postharvest methyl jasmonate treatment on main health-promoting components and volatile organic compounds in cherry tomato fruits[J]. *Food Chemistry*, 2018, 263: 194-200.
- [3] BERNACCHI C J, Van LOOCKE A. Terrestrial ecosystems in a changing environment: a dominant role for water[J]. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2015, 66: 599-622.
- [4] 邢英英,张富仓,张燕,等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 713-726.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 713-726. (in Chinese)
- [5] 夏哈,庄思全.科学利用耕地,提高土地生产力——中文版《土壤肥力与肥料》的评介[J]. *土壤肥料*, 1999(6): 40-41.
- [6] LIN K H R, WENG C C, LO H F, et al. Study of the root antioxidative system of tomatoes and eggplants under waterlogged conditions[J]. *Plant Science*, 2004, 167(2): 355-365.
- [7] 张国红,袁丽萍,郭英华,等.不同施肥水平对日光温室番茄生长发育的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊): 151-154.
ZHANG Guohong, YUAN Liping, GUO Yinghua, et al. Effects of fertilization levels on the growth and development of tomato in solar greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp.): 151-154. (in Chinese)
- [8] 王荣莲,于健,谭玉梅,等.温室滴灌施肥水肥耦合对无土栽培樱桃番茄产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(4): 87-89.
WANG Ronglian, YU Jian, TAN Yumei, et al. Impacts of water and fertilizer coupling on landless planting cherry-tomatoes vegetative yield under drip fertigation in greenhouse [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(4): 87-89. (in Chinese)
- [9] REDDY A S N, ALI G S, CELESNIK H, et al. Coping with stresses: roles of calcium-and calcium/calmodulin-regulated gene expression[J]. *Plant Cell*, 2011, 23(6): 2010-2032.
- [10] 于威,依艳丽,杨蕾.土壤中钙、氮含量对番茄枯萎病抗性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(1): 134-140.
YU Wei, YI Yanli, YANG Lei. Effect of different available calcium and nitrogen in soil on effectiveness of disease resistance to blight of tomato [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(1): 134-140. (in Chinese)
- [11] 史红平.关中农田土壤钙素状况及其退化特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
SHI Hongping. Degradation characteristics and effect of soil calcium in guanzhong farmland [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [12] WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92(4): 487-511.
- [13] 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)

- [14] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552–556. ZOU Zhihong, SUN Jingnan, REN Guangping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 552–556. (in Chinese)
- [15] 龚雪文, 刘浩, 刘东鑫, 等. 基于模糊算法的温室番茄调亏滴灌制度综合评判[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 144–151. GONG Xuewen, LIU Hao, LIU Dongxin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on regulated deficit irrigation scheduling of tomato drip irrigated in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 144–151. (in Chinese)
- [16] 胡文泽, 何珂, 金诚谦, 等. 基于模糊综合评判的农业机械 FMECA 方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 332–337. HU WENZE, HE KE, JIN CHENGQIAN, et al. FMECA method based on fuzzy comprehensive evaluation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 332–337. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s044&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.044. (in Chinese)
- [17] 李强, 谢里阳, 李海洋, 等. 基于模糊综合层次评判法的精密齿轮制造工艺优化优先度分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 750–757. LI QIANG, XIE LIYANG, LI HAIYANG, et al. Optimization priority analysis of precision gear manufacturing process based on AHP fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(4): 750–757. (in Chinese)
- [18] HUANG G H, COHEN S J, YIN Y Y, et al. Incorporation of inexact dynamic optimization with fuzzy relation analysis for integrated climate change impact study[J]. Journal of Environmental Management, 1996, 48(1): 45–68.
- [19] 刘素英. 四因素五水平二次正交旋转组合设计程序[J]. 计算机农业应用, 1988(1): 43–48, 60.
- [20] 吕富保. 多元二次回归正交旋转组合设计的结构矩阵的建立[J]. 农业系统科学与综合研究, 1988(2): 27–32.
- [21] FARNESELLI M, BENINCASA P, TOSTI G, et al. High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 52–58.
- [22] 李艾丹, 李春梅, 杨思维. 科研人员信用评价指标体系研究[J]. 中国科技论坛, 2017(12): 123–130. LI AIDAN, LI CHUNMEI, YANG SIWEI. Credit evaluation index system of scientific research personnel[J]. Forum on Science and Technology in China, 2017(12): 123–130. (in Chinese)
- [23] 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): 1020–1023.
- [24] 穆俊祥, 曹兴明, 弓建国, 等. 氮磷钾和有机肥配合施用对马铃薯淀粉含量和产量的影响[J]. 土壤, 2009, 41(5): 844–848. MU JUNXIANG, CAO XINGMING, GONG JIANGUO, et al. Effects of combined application of N, P, K and organic fertilizers on starch content and yield of potatoes[J]. Soils, 2009, 41(5): 844–848. (in Chinese)
- [25] 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等. 水肥供应对番茄中番茄红素含量的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(11): 2111–2120. NIU XIAOLI, ZHOU ZHENJIANG, LI RUI, et al. Effects of water and fertilizer supply on lycopene content in tomato fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(11): 2111–2120. (in Chinese)
- [26] 李轶, 刘雨秋, 张镇, 等. 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产沼气工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 185–192. LI YI, LIU YUQIU, ZHANG ZHEN, et al. Optimization of anaerobic fermentation with mixed materials of corn straw and pig manure[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 185–192. (in Chinese)
- [27] De PASCALE S, MAGGIO A, ORSINI F, et al. Cultivar, soil type, nitrogen source and irrigation regime as quality determinants of organically grown tomatoes[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 199: 88–94.
- [28] FAVATI F, LOVELLI S, GALGANO F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(4): 562–571.
- [29] 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, 98(8): 1228–1238.
- [30] 陈碧华, 郝庆炉, 孙丽. 番茄日光温室膜下滴灌水肥耦合效应研究[J]. 核农学报, 2009, 23(6): 1082–1086. CHEN BIHUA, HAO QINGLU, SUN LI. Effects of water and fertilizer coupling under drip fertirrigation covered with film sheet on tomato growth in solar greenhouse[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(6): 1082–1086. (in Chinese)
- [31] CREMER K W. Relations between reproductive growth and vegetative growth of pinus-radiata[J]. Forest Ecology and Management, 1992, 52(1–4): 179–199.
- [32] COYAGO-CRUZ E, MELÉNDEZ-MARTÍNEZ A J, MORIANA A, et al. Yield response to regulated deficit irrigation of greenhouse cherry tomatoes[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 212–221.
- [33] 王秀康, 邢英英, 张富仓. 膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 141–150. WANG XIUKANG, XING YINGYING, ZHANG FUCANG. Optimal amount of irrigation and fertilization under drip fertigation for tomato[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 141–150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.019. (in Chinese)
- [34] 李建明, 潘福华, 王玲慧, 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): 82–90. LI JIANMING, PAN FONGHUA, WANG LINGHUI, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 82–90. (in Chinese)
- [35] 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 CSAE, 2014, 30(7): 119–127. (in Chinese)
- [36] 牟咏花. 钙的生理功能及在果蔬生理中的重要性(综述)[J]. 浙江农业学报, 1995, 17(6): 76–78. MOU YONGHUA. The role of calcium in fruit and vegetable physiology[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1995, 17(6): 76–78. (in Chinese)
- [37] 范双喜, 伊东正. 钙素对叶用莴苣营养吸收和生长发育的影响[J]. 园艺学报, 2002, 29(2): 149–152. FAN SHUANGXI, YI DONGZHENG. Effects of calcium on nutrient absorption and growth and development of *Lactuca sativa* var. *longifolia* Lam. in nutrient film technique culture[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(2): 149–152. (in Chinese)