

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.029

基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控

张智^{1,2} 李曼宁^{1,2} 杨志^{1,2} 蔡泽林^{1,2} 洪婷婷^{1,2} 丁明^{1,2}

(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重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探寻草莓最优水肥组合, 设置灌水和施肥二因素三水平共 9 个处理, 分析不同水肥耦合对草莓产量、果实品质、水肥利用效率多个指标的影响。引入 AHP 层次分析法和熵权法对 3 类因素 9 个指标进行多层赋权, 运用基于博弈论的组合赋权法获得各单一指标最终权重, 基于 TOPSIS 法构建草莓综合生长评价体系, 并以高产、高品质、高效为目标建立草莓水肥耦合响应数学模型。结果表明, 水肥耦合作用对草莓的单果质量、产量、水分利用效率和肥料利用效率的影响极显著, 对品质无显著影响。中水、高肥灌溉下草莓的单果质量最大, 中水、中肥灌溉下草莓的产量和可溶性糖含量最优, 中水、低肥灌溉下草莓的糖酸比和可溶性蛋白质含量表现最优, 低水、中肥灌溉下草莓的可溶性固形物含量、水分利用效率和肥料利用效率最优, 低水低肥灌溉下草莓的维生素 C 含量最大。综合协调各指标, 赋权值最高为产量(0.264 1), 最低为可溶性蛋白质含量(0.059 5); 多指标综合评价最优水肥处理为中水中肥(T5)。解析草莓综合生长对水肥耦合的响应模型, 灌水量及施肥量的单因素效应均为开口向下的抛物线; 当灌水量编码值为 -0.23(2 375.1 m³/hm²)、施肥量编码值为 -0.02(1 825.88 kg/hm²)时, 草莓综合评分最高。以综合评分最大值的 90% 划分水肥耦合闭合区域, 得到最佳灌水和施肥区间分别为灌水量 2 268 ~ 2 520 m³/hm²、施肥量 1 759.88 ~ 1 869.87 kg/hm²。

关键词: 草莓; 水肥耦合; 产量; 品质; 水肥利用; 综合生长模型

中图分类号: S626.4; S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)02-0267-10 OSID: 

Comprehensive Regulation of Water and Fertilizer Coupling Based on Multi-index Collaboration of Strawberry

ZHANG Zhi^{1,2} LI Manning^{1,2} YANG Zhi^{1,2} CAI Zelin^{1,2} HONG Tingting^{1,2} DING Ming^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the optimal combination of water and fertilizer for strawberry, nine treatments were set from three levels of irrigation and fertilizer, and the effects of different water and fertilizer coupling on yield, fruit quality, water and fertilizer utilization efficiency of strawberry were analyzed. The analytic hierarchy process (AHP) and entropy weighted multilayer empowerment on nine indexes from three kinds of factors were introduced, combination method which derive from game theory was used to obtain the single final target weight, the comprehensive growth evaluation system for strawberry based on TOPSIS method was constructed, and mathematical fertilizer response model was established with the goal of achieve high yield, high quality and high efficiency. The results showed that the effect of water and fertilizer coupling on the weight of fruit per unit area, yield, water use efficiency and fertilizer use efficiency of strawberry was very significant, but not on the quality. The single fruit weight of strawberry was the highest under medium-water and high-fertilizer irrigation. The strawberry yield and soluble sugar were the best under medium-water and medium-fertilizer irrigation. The strawberry had the best sugar-acid ratio and soluble protein content under low-water and high-fertilizer irrigation. The soluble solids content and fertilizer utilization efficiency of strawberry were the best under low-water and medium-fertilizer irrigation. The vitamin C content of strawberry was the highest under low-

收稿日期: 2019-11-03 修回日期: 2019-11-28

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)、西安市科技计划项目(2017050NC/NY011(2))和现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-C07)

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

water and low-fertilizer irrigation. The strawberry had the highest water use efficiency under low-water and medium-fertilizer irrigation. Comprehensively coordinated the various indicators, the highest weighted value was yield (0.264 1) and the lowest was soluble protein content (0.059 5); the comprehensive evaluation of multiple indicators for optimal water and fertilizer treatment was medium-water and medium-fertilizer (T5). Analyzing the response model of strawberry comprehensive growth to the coupling of water and fertilizer, the single-factor effects of irrigation amount and fertilization amount were parabola opening downward. When the irrigation amount code value was -0.23 ($2\,375.1\text{ m}^3/\text{hm}^2$), the fertilizer amount code value was -0.02 . ($1\,825.88\text{ kg}/\text{hm}^2$), the strawberry comprehensive score was the highest. Dividing the optimal closed loop interval of water and fertilizer coupling based on a comprehensive evaluation of more than 90%, the irrigation amount of $2\,268\sim2\,520\text{ m}^3/\text{hm}^2$, and the fertilization amount of $1\,759.88\sim1\,869.87\text{ kg}/\text{hm}^2$ were the most beneficial to strawberry growth.

Key words: strawberry; water and fertilizer coupling; yield; quality; water and fertilizer utilization; comprehensive growth model

0 引言

草莓营养价值丰富,具有益心健脑的独特功效,且采摘期较长,逐渐成为多地农民增收致富的主导产业^[1]。目前我国草莓种植面积和产量位居世界第一^[2],主要采用温室栽培方式,反季节栽培草莓的经济效益更高^[3-4]。然而,过量的灌水和施肥不但造成大量的水分流失、肥料利用效率降低、土壤板结、地下水污染等一系列环境问题^[5-6],同时还影响植株的生长发育、产量和品质。水肥耦合可以促进植物对养分的快速吸收和高效利用,以达到节水节肥、增产增质、省工省时和减污等目的^[7]。

水肥对番茄产量和品质的形成起着决定性的作用^[8]。前人的研究表明,水肥一体化模式可以提高肥料利用效率,适量减少施肥可以提高草莓的品质和产量^[9];滴灌条件下轻度亏缺灌溉可以提高草莓果实的含糖量^[10]和产量^[11];适量的灌水施肥模式可以提高温室草莓的产量和水肥利用效率^[12-13];水氮耦合处理可以提高草莓果实中的维生素C含量、可溶性糖含量、有机酸含量和糖酸比^[14];在一定范围内适量施用磷肥或氮肥均可提高番茄中维生素C、可溶性糖和可溶性固形物含量^[15]。

不同水肥处理对产量、果实品质和水肥利用效率的影响不同,即使同一水肥处理,对不同指标的影响差异也较大。植株生长包括不同类别的多项指标,每种指标衡量标准不同,但又相互关联,仅凭单一指标进行评价具有局限性,很难准确评价草莓生长的优劣^[16]。因此,合理综合各项指标、建立科学的评价体系是取得整体水肥施用优化方案的基础。层次分析 (Analytic hierarchy process, AHP) 法可以通过对客观事实的主观判断,将元素的相对重要性定量描述^[17]。熵权法是一种由待评价指标确定指标权重的客观方法,具有较强的操作性,可根据指标的变异程度客观计算出各指标的权重值。TOPSIS

(Technique for order preference by similarity to ideal solution)模型可以充分利用原始数据,通过比较各个指标中的最优解和最劣解评价方案的优劣性^[18]。采用基于博弈论的组合赋权法对 AHP 法和熵权法得到的权重进行融合,充分利用主观赋权法反映决策者意愿及客观赋权法的理论依据优势,对定性的问题进行定量分析,同时克服单一方法的偏向性,得到更加合理的指标权重,再基于 TOPSIS 法构建评价体系,可实现对多指标内容的科学评价^[19-20]。

本文旨在对草莓多个指标分析的基础上,建立融合产量、品质、水肥利用效率等多因素的综合评价模型,提出多目标协同下的最优水肥组合模式,为实现设施草莓生产高产、高品质、高效的综合水肥管理提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2018年9月—2019年4月在陕西省杨凌示范区揉谷镇锦田果蔬合作社(北纬34°16',东经108°2')的大跨度非对称双层塑料大棚中进行。该试验区地处陕西省中部关中平原腹地,海拔450 m,属暖温带大陆性季风气候。年平均降水量635.1 mm,无霜期211 d,年平均日照时数2 163.8 h。塑料大棚跨度为17 m,长度为55 m。试验区土质为黄土,土壤中硝铵态氮质量比177.82 mg/g,速效磷质量比28.16 mg/g,速效钾质量比248.922 mg/g,电导率(EC)为587.33 μS/cm,土壤pH值为6.50。供试草莓品种为红颜。

1.2 试验设计

试验灌水量依据参考作物的蒸腾蒸发量 (Evapotranspiration, ET_c),施肥量根据目标产量法选择N、P₂O₅、K₂O 比例为14:6:30的复合肥^[21]。试验设置两因素,3个滴灌水平(高水W1:100% ET_c、中水W2:80% ET_c、低水W3:60% ET_c)和3个

施肥水平(高肥F1: 2 199.85 kg/hm²、中肥F2: 1 833.21 kg/hm²、低肥 F3:1 466.57 kg/hm²),以高水(W1)和不施肥作为对照,共10个处理,每个处理进行3次重复。试验小区呈随机区组排列,小区长10 m、宽2 m,每小区定植60株草莓,采用一垄两行的种植方式,垄高为0.4 m,小区之间用0.1 mm黑色塑料膜隔开,防止处理间的水肥相互影响。

试验采用膜下滴灌技术,进行水肥同时处理。草莓于2018年9月6日定植,2019年4月5日拉秧。定植和缓苗时灌水量为1 666.7 L,处理后每3~4 d灌一次水,ET_c依据Penman-Monteith修正公式计算^[22](参照文献中草莓各时期灌水系数计算^[23]),环境数据由小型气象站采集(HOBO event logger, Onset Computer Corporation,美国),在整个生育期W1、W2、W3灌水总量分别为3 150、2 520、1 890 m³/hm²。由数显电子流量计和施肥泵精确控制灌水量和施肥量。试验水肥施用量以及进行归一化处理的数据编码值见表1(括号中为各因素编码)。

表1 试验因素编码与试验设计

Tab.1 Test factor coding and test design

处理	施肥水平	施肥量/ (kg·hm ⁻²)	灌水水平	灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)
T1	F1	2 199.85(1)	W1	3 150(1)
T2			W2	2 520(0)
T3			W3	1 890(-1)
T4	F2	1 833.21(0)	W1	3 150(1)
T5			W2	2 520(0)
T6			W3	1 890(-1)
T7	F3	1 466.57(-1)	W1	3 150(1)
T8			W2	2 520(0)
T9			W3	1 890(-1)

1.3 测定指标和方法

(1)产量

果实成熟时,采收成熟度一致的草莓。每隔3~5 d采收一次,每次采收要分别测定单果质量、果实数量、单株产量,根据单株产量计算果实的总产量。

(2)果实品质

选取第3穗成熟度一致的果实进行果实品质测定。维生素C含量采用钼蓝比色法;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝-G250染色法;可溶性固形物含量和糖酸比均采用bxacid蓝莓专用糖酸一体机测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法。

(3)水肥利用效率

采用草莓的农学利用效率来表示草莓的水分利用效率(Water use efficiency, WUE),计算公式为

$$WUE = Y/L$$

(1)

式中 Y——各处理草莓的总产量,kg

L——生育期内的灌水量,m³

采用草莓的总氮利用效率来表示草莓的肥料利用效率(Apparent recovery efficiency, RE)^[24],全氮含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮法测定,肥料利用效率计算公式为

$$RE = (U_1 - U_0)/F \times 100\%$$

(2)

式中 U₁——施肥区667 m²吸收N的量,g

U₀——对照区667 m²吸收N的量,g

F——667 m²肥料施入量,g

1.4 数据处理

采用SPSS软件进行各数据的方差分析,利用Origin软件进行图表绘制;采用Yaaph软件绘制草莓综合分析层次模型及各项指标的权重分析;采用Excel软件按照TOPSIS法计算综合评价数值;运用DPS建立数学模型,采用Matlab解析模型。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对草莓产量的影响

灌水、施肥以及水肥耦合作用对草莓单果质量的影响都达到极显著水平(表2)。从灌水水平来看,单果质量由大到小为W1、W2、W3;从施肥水平来看,单果质量由大到小为F2、F1、F3。在同一施肥水平下,中肥和低肥处理时单果质量随灌水量增加均呈上升趋势。相同灌水处理下,高水和低水处理时单果质量随施肥量增加先增大后减小。由图1(图中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同)可知,在所有处理中,中水高肥(T2)的单果质量最高,为12.74 g;低水低肥(T9)的单果质量最低,仅为9.81 g。灌水、施肥以及水肥耦合作用对草莓产量的影响都达到极显著水平(表2)。从灌水水平来看,草莓产量由大到小依次为W1、W2、W3;从施肥水平来看,草莓产量由大到小依次为F2、F1、F3。在同一施肥水平下,在高肥和低肥处理时产量随灌水量增加呈现上升趋势;在同一灌水水平下,灌水量为中水和低水时,产量随施肥量的增加呈现先增后减的趋势。由图1可知,在中水中肥(T5)处理下草莓产量最高,为19 251.2 kg/hm²,低水低肥(T9)处理下产量最低,为12 598.4 kg/hm²。

2.2 不同水肥处理对草莓品质的影响

可溶性糖含量受灌水的影响显著、施肥的影响极显著,但水肥耦合作用对其无显著性影响(表2)。从灌水水平来看,中水处理草莓可溶性糖含量表现最优;从施肥水平来看,低肥最有利于草莓可溶性糖含量提升。施肥量一定的情况下,可溶性糖含量随

表 2 不同水肥处理下草莓的各项指标

Tab.2 Various indexes of strawberry under different water and fertilizer treatments

处理	单果质量/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)	可溶性糖 含量/ (mg·g ⁻¹)	糖酸比	可溶性固形 物含量/%	维生素 C 含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	可溶性蛋白质 含量/ (mg·g ⁻¹)	水分利用 效率/ (kg·m ⁻³)	肥料利用 效率/%
W1	11.90±0.23	18 228.45±705	7.11±0.17	5.18±0.45	8.94±0.12	156.44±6.64	0.392±0.020	6.00±0.23	11.91±0.23
W2	11.60±0.15	17 076.97±885	7.35±0.21	5.55±0.37	9.29±0.10	167.86±4.47	0.412±0.016	6.78±0.35	12.89±0.62
W3	10.65±0.33	14 487.86±445	7.08±0.20	5.23±0.46	9.46±0.23	183.92±11.42	0.388±0.021	7.44±0.27	13.94±0.18
F1	11.65±0.16	16 581.43±525	6.49±0.11	4.76±0.66	9.31±0.23	149.38±10.39	0.362±0.020	6.58±0.37	12.17±0.38
F2	12.07±0.27	18 244.65±975	7.49±0.20	5.53±0.36	10.07±0.14	167.39±6.00	0.378±0.028	7.39±0.24	13.98±0.43
F3	10.49±0.41	14 967.07±540	7.56±0.26	5.67±0.81	8.31±0.08	191.44±6.14	0.451±0.009	6.26±0.24	12.59±0.22
显著性检验 (<i>F</i>)									
灌水水平	37.946 **	60.961 **	4.531 *	1.480	16.347 **	18.186 **	2.863	43.177 **	49.890 **
施肥水平	57.462 **	44.614 **	71.471 **	11.801 **	186.574 **	46.838 **	39.574 **	28.187 **	43.239 **
灌水×施肥	11.724 **	5.075 **	2.777	0.081	1.748	2.847	0.326	4.553 **	5.717 **

注: * 表示差异显著 ($P<0.05$), ** 表示差异极显著 ($P<0.01$)。

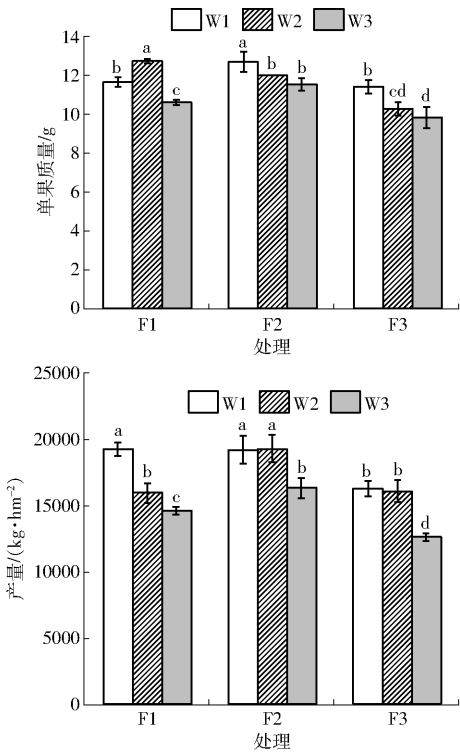


图 1 水肥耦合对产量的影响

Fig.1 Effect of water and fertilizer coupling on yield

灌水量的增加呈现先增后减的趋势 (T3 除外)。灌水一定的情况下,可溶性糖含量随施肥量的增加呈现先增后减的趋势 (T9 除外)。在中水中肥 (T5) 处理下果实的可溶性糖含量最高,为 7.8 mg/g,高水高肥 (T1) 处理下果实的可溶性糖含量最低,为 6.29 mg/g (图 2a)。

施肥对草莓的糖酸比具有极显著性的影响,灌水和肥水耦合对其无显著性影响 (表 2)。施肥量一定的情况下,糖酸比随灌水量由大到小表现为 W2、W3、W1;灌水量一定的情况下,糖酸比随施肥量增加而降低。水肥耦合作用下中水低肥 (T8) 处理下草莓的糖酸比最高,为 6.03,高水高肥 (T1) 处

理下草莓的糖酸比最低,为 4.64 (图 2b)。

灌水和施肥对草莓的可溶性固形物含量具有极显著影响,水肥耦合作用对其无显著性影响 (表 2)。从灌水水平来看,可溶性固形物含量由大到小依次为 W3、W2、W1;从施肥水平来看,可溶性固形物含量由大到小依次为 F2、F1、F3。同一施肥水平下,可溶性固形物含量随灌水量的增加而减小;同一灌水水平下,可溶性固形物含量随施肥量的增加先增大后减小。在低水中肥 (T6) 处理下草莓的可溶性固形物含量最佳 (图 2c)。

维生素 C 含量受施肥和灌水的影响极显著,水肥耦合作用对其无显著性影响。维生素 C 含量随灌水和施肥增加均呈现降低趋势。低水低肥 (T9) 处理下果实维生素 C 含量最高,为 221.30 mg/(100 g),高水高肥 (T1) 处理下果实维生素 C 含量最低,为 140.71 mg/(100 g) (图 2d)。

可溶性蛋白质含量只受施肥的影响极显著 (表 2)。同一施肥水平下灌水量的差异对可溶性蛋白质含量影响不显著,从整体来看,低肥处理下可溶性蛋白质含量最佳。如图 2e 所示,中水低肥 (T8) 处理下果实的可溶性蛋白质含量最佳。

2.3 不同水肥处理对草莓水肥利用效率的影响

灌水、施肥以及水肥耦合作用均对草莓的水分利用效率影响极显著 (表 2)。施肥量一定的情况下,水分利用效率随灌水量的增加而减小;灌水量一定的情况下,水分利用效率受施肥影响由大到小依次为 F2、F1、F3。水肥耦合作用下,低水中肥 (T6) 处理下水分利用效率最高,达到 8.36 kg/m³ (图 3a)。

同时,灌水、施肥以及水肥耦合作用也对肥料利用效率的影响极显著 (表 2)。从灌水水平来看,肥料利用效率随灌水量增加而减小;从施肥水平来看,

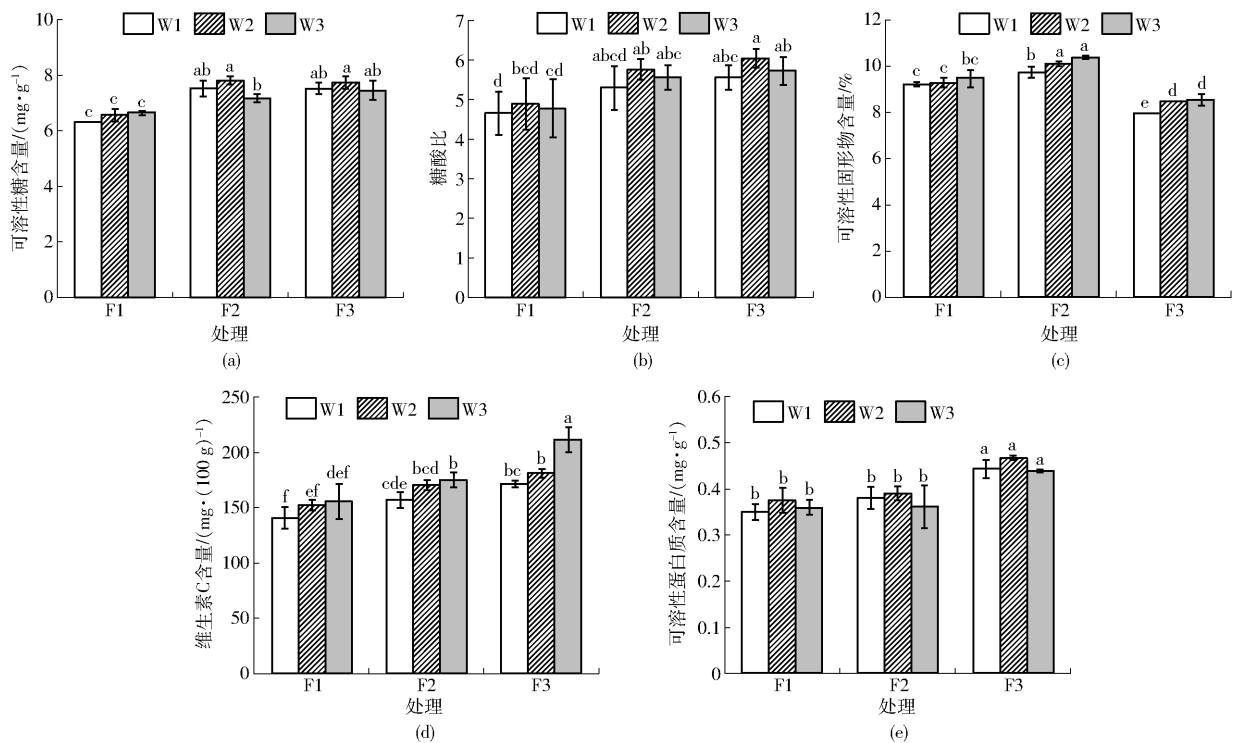


图2 水肥耦合对果实品质的影响

Fig. 2 Effect of water and fertilizer coupling on fruit quality

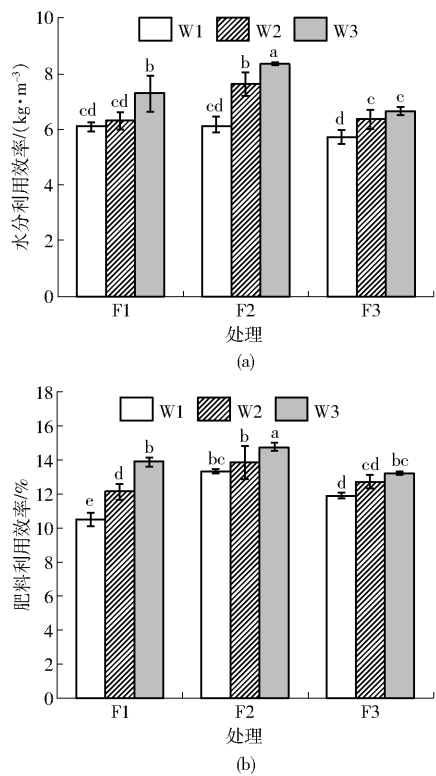


图3 水肥耦合对水肥利用效率的影响

Fig. 3 Effect of water and fertilizer coupling on water fertilizer utilization efficiency

中肥(F2)处理下肥料利用效率最高,其次为低肥(F3),高肥处理下肥料利用效率最低,各处理间差异显著。由图3b可知,在低水中肥(T6)处理下肥料利用效率最高,为14.74%,在高水高肥(T1)处理

下肥料利用效率最低,仅为10.49%。

2.4 草莓综合生长评价体系构建

2.4.1 综合评价层次模型

运用Yaaph软件建立草莓综合评价的层次模型(图4)。综合生长指标(C)目标层分为产量指标(C₁)、果实品质指标(C₂)、水肥利用效率(C₃)3个准则层;产量指标包括单果质量(C₁₁)和产量(C₁₂)两个指标层,果实品质指标包括可溶性糖含量(C₂₁)、糖酸比(C₂₂)、可溶性固形物含量(C₂₃)、维生素C含量(C₂₄)和可溶性蛋白质含量(C₂₅)5个指标层,水肥利用效率包括水分利用效率(C₃₁)和肥料利用效率(C₃₂)2个指标层。

2.4.2 指标权重

(1)基于AHP法确定权重

层次模型建立后采用1~9的比例标度法建立判断矩阵并对矩阵的一致性进行检验,综合生长指标、产量指标、果实品质指标、水肥利用效率判断矩阵分别为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 2.5 \\ 0.7692 & 1 & 2 \\ 0.4 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.6667 \\ 1.5 & 1 \end{bmatrix}$$
$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1.2 & 1.4 & 1.6 & 1.8 \\ 0.8333 & 1 & 1.2 & 1.4 & 1.6 \\ 0.7143 & 0.8333 & 1 & 1.2 & 1.4 \\ 0.625 & 0.7143 & 0.8333 & 1 & 1.2 \\ 0.5556 & 0.625 & 0.7143 & 0.8333 & 1 \end{bmatrix}$$

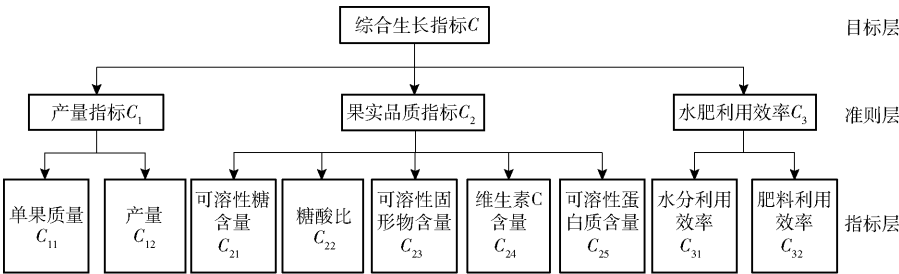


图 4 草莓综合生长指标层次模型

Fig. 4 Comprehensive growth index hierarchical model of strawberry

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 \\ 1.25 & 1 \end{bmatrix}$$

综合生长指标、产量指标、果实品质指标、水肥利用效率的一致性检验系数 C_R 均小于 0.10，一致性检验结果较好，所建立的判断矩阵具有可靠性和合理性（表 3，表中 $\lambda_{\max}$ 为最大特征值）。结果表明，草莓各项指标的权重由大到小依次为：产量、单果质量、肥料利用效率、可溶性糖含量、糖酸比、水分利用效率、可溶性固形物含量、维生素 C 含量、可溶性蛋白质含量。

(2) 基于熵权法确定权重

采用熵权法对草莓的单一指标进行赋权（具体计算方法和步骤见文献[21]），计算得出草莓各项指标的权重见表 4。由表可知，熵权法确定的草莓各项指标权重由大到小依次为：产量、水分利用效

表 3 AHP 层次分析法计算权重的结果

Tab.3 Results of AHP analytic hierarchy process

	局部权重	最终权重	一致性检验参数
目标层 C	0.459 9	0.459 9	$C_R = 0.000\ 2 < 0.1$ $\lambda_{\max} = 3.000\ 2$
	0.358 5	0.358 5	
	0.181 6	0.181 6	
准则层 C ₁	0.400 0	0.184 0	$C_R = 0$ $\lambda_{\max} = 2.000\ 0$
	0.600 0	0.275 9	
准则层 C ₂	0.267 4	0.095 9	$C_R = 0.000\ 2 < 0.1$ $\lambda_{\max} = 5.001\ 1$
	0.229 2	0.082 2	
	0.195 1	0.069 9	
	0.166 0	0.059 5	
	0.142 3	0.051 0	
准则层 C ₃	0.444 4	0.080 7	$C_R = 0$ $\lambda_{\max} = 2.000\ 0$
	0.555 6	0.100 9	

率、维生素 C 含量、可溶性蛋白质含量、肥料利用效率、糖酸比、单果质量、可溶性固形物含量、可溶性糖含量。

表 4 熵权法确定的草莓单一指标权重

Tab.4 Weight of single indicator based on entropy method

指标	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{31}	C_{32}
权重	0.079 9	0.190 6	0.060 4	0.084 4	0.075 4	0.145 0	0.112 3	0.154 2	0.097 8

(3) 基于博弈论的组合赋权

为了提高权重赋权值的可靠性和科学性，避免主观因素对评价的影响，在用 AHP 法和熵权法得到两个赋权值基础上，构造出一个基本的权重集

$$w = \sum_{k=1}^l \alpha_k \cdot w_k^T \quad (\alpha_k > 0)$$

式中 α_k 、 w_k ——AHP 法、熵权法所得权重
计算基于博弈论的权重集化模型，导出对策模型

$$\text{Min} \left\| \sum_{j=1}^i a_j \cdot u_j^T - u_i^T \right\|, i = 1, 2, \text{用 Matlab 可得到上式的最优化组合系数: } a_1 = 0.886\ 5, a_2 = 0.142\ 9. \text{ 归一化后 } a_1^* = 0.861\ 1, a_2^* = 0.138\ 9. \text{ 从而得到组合权重向量为 } w^* = \sum_{k=1}^2 a_k^* \cdot u_k^T, \text{ 最终结果见表 5. 由表可知, 草莓各项指标权重由大到小依次为: 产量、单果质量、肥料利用效率、可溶性糖含量、水分利用效率、糖}$$

表 5 基于博弈论的组合赋权确定的草莓单一指标权重

Tab.5 Weight of single strawberry indicator based on game theory

指标	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{31}	C_{32}
权重	0.169 5	0.264 1	0.091 0	0.082 5	0.070 7	0.071 4	0.059 5	0.090 9	0.100 5

酸比、维生素 C 含量、可溶性固形物含量、可溶性蛋白质含量。

2.4.3 基于 TOPSIS 法的草莓综合评价

基于组合赋权的 TOPSIS 综合模型评价^[25]，将决策矩阵进行归一化处理，建立加权矩阵，而后计算

评判指标的理想解和贴合度 C_i ，结果如表 6 所示。由表可知，T5（中水中肥）处理草莓的综合指标贴合度最大，草莓的综合评价最优，T4（高水中肥）处理和 T6（低水中肥）次之，T3 处理贴合度最小，说明草莓的综合表现最差。

表 6 基于 TOPSIS 法的草莓综合指标及其排序

Tab. 6 Strawberry comprehensive index and its rank based on TOPSIS

处理	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{31}	C_{32}	D^+	D^-	C_i	排序
T1	0.113 4	0.128 8	0.097 3	0.096 3	0.110 8	0.092 9	0.098 1	0.100 7	0.090 3	0.025 1	0.024 4	0.492 7	5
T2	0.124 1	0.106 6	0.101 2	0.101 1	0.111 6	0.100 4	0.105 2	0.104 2	0.104 5	0.023 0	0.018 1	0.440 5	7
T3	0.103 2	0.097 6	0.102 6	0.098 8	0.114 0	0.102 6	0.101 0	0.120 3	0.119 4	0.024 7	0.015 4	0.383 6	9
T4	0.123 7	0.128 5	0.116 2	0.109 5	0.117 2	0.103 5	0.106 5	0.101 6	0.114 7	0.017 0	0.028 4	0.625 5	2
T5	0.116 6	0.128 9	0.120 7	0.119 2	0.121 6	0.112 5	0.109 3	0.125 9	0.119 2	0.010 6	0.030 8	0.744 2	1
T6	0.112 4	0.109 0	0.110 9	0.115 0	0.124 8	0.115 6	0.101 5	0.137 8	0.126 8	0.015 4	0.025 7	0.624 8	3
T7	0.111 0	0.108 8	0.116 4	0.116 3	0.095 1	0.113 4	0.124 1	0.094 6	0.102 5	0.022 1	0.018 7	0.458 6	6
T8	0.100 0	0.107 5	0.119 5	0.125 2	0.102 3	0.119 6	0.131 0	0.105 0	0.109 0	0.020 3	0.020 6	0.502 6	4
T9	0.095 6	0.084 3	0.115 2	0.118 5	0.102 7	0.139 5	0.123 3	0.109 9	0.113 6	0.028 2	0.018 5	0.396 5	8
S^+	0.124 1	0.128 9	0.120 7	0.125 2	0.124 8	0.139 5	0.131 0	0.137 8	0.126 8				
S^-	0.095 6	0.084 3	0.097 3	0.096 3	0.095 1	0.092 9	0.098 1	0.094 6	0.090 3				

注： S^+ 为理想解、 S^- 为逆理想解； D^+ 为各处理与理想解的距离、 D^- 为各处理与逆理想解的距离。

2.5 草莓综合生长的水肥耦合响应模型

根据草莓的综合生长评分进行二元二次回归模拟,得到草莓综合生长评分(Y)与灌水量编码值(X_1)、施肥量编码值(X_2)的回归模型为

$$Y = 1.2027 + 0.0156X_1 - 0.0036X_2 - 0.0328X_1^2 - 0.1051X_2^2 - 0.0025X_1X_2 \quad (3)$$

对回归方程进行显著性检验,相关系数 $R = 0.9894$,决定系数 $R^2 = 0.9789$,拟合度较高; $F = 37.0842$, $P = 0.0019 < 0.01$,说明回归关系达到了极显著水平,证明建立的回归模型可靠。

2.5.1 水肥单因素效应

为了进一步研究单因素对草莓综合生长的影响,对建立的二元二次回归模型进行降维处理,得到灌水量(Y_W)和施肥量(Y_F)的单因素方程

$$Y_W = 1.2027 + 0.0156X_1 - 0.0328X_1^2 \quad (4)$$

$$Y_F = 1.2027 - 0.0036X_2 - 0.1051X_2^2 \quad (5)$$

由图 5 可以看出,灌水量和施肥量对草莓的综合评分的效应均为开口向下的抛物线,草莓的综合评分随灌水量或施肥量的增加呈现先增后减的趋势,符合报酬递减效应,即灌水量和施肥量超过一定的范围再继续增加综合评分都会呈现下降的趋势。随着灌水量的增加综合生长评分的变化比较平缓,随着施肥量的增加产生比较急剧的变化,说明对施肥量的变化更加敏感。

2.5.2 水肥交互作用

草莓的综合生长受灌水量和施肥量耦合作用的影响。根据建立的回归方程做出灌水量和施肥量对草莓的综合生长指标互作效应的三维关系图(图 6)。根据回归方程可以计算出,综合评分 Y 最高为 1.2045 时, X_1 为 -0.23、 X_2 为 -0.02,即灌水量为 2 375.1 m³/hm²、施肥量为 1 825.88 kg/hm²。

由图 6 可知,以综合评分最大值的 90% 划分水

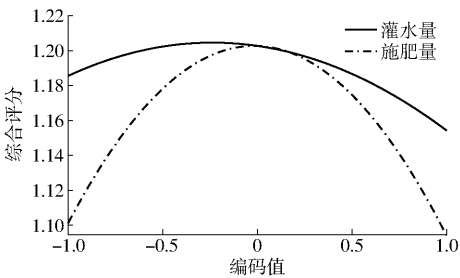


图 5 单因素对草莓综合评分的效应曲线

Fig. 5 Effect curve of single factor on comprehensive growth score of strawberry

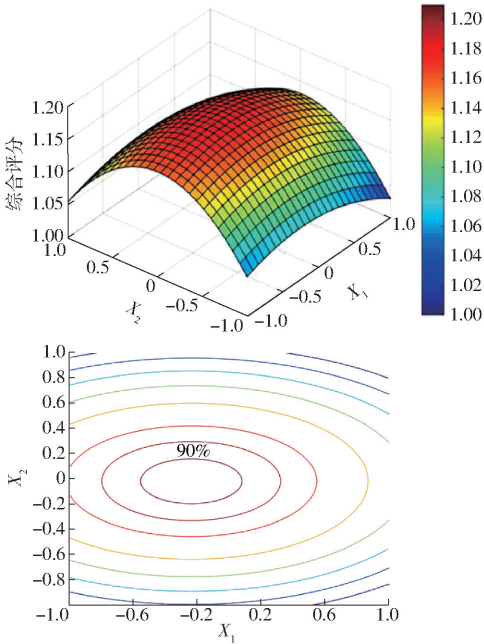


图 6 水肥耦合对草莓综合生长的影响

Fig. 6 Effect of water and fertilizer coupling on comprehensive growth of strawberry

肥耦合闭合区域,此闭合区域出现在中低灌水量水平与中等施肥水平,可得出在农业生产上最佳的灌水和施肥区间分别为灌水量在 2 268 ~ 2 520 m³/hm²、施肥量在 1 759.88 ~ 1 869.87 kg/hm²之间,此水肥区

间最有利于实现高产、高品质、高效。

3 讨论

设施内草莓的生长过程中,合理和良好的水肥管理是十分必要的条件。作物不同的水肥处理对草莓的耦合效应不同。适量灌水可以提高草莓产量,过量产量反而会降低^[26];水分亏缺条件下虽然草莓的产量和单果质量有所下降,但是果实含糖量增加,品质有所上升^[27];适当亏缺灌溉可以减少水分的消耗,降低果实对水分的吸收,导致稀释作用减弱,果实品质增加^[28-29]。有研究表明,田间持水率为20%时,灌水量为充分灌水的50%可以有效地提高水分利用效率^[30]。本研究亦得出中低水灌溉下可以提高草莓的品质,低水灌溉有利于提高草莓的水分利用效率。

作物地下部吸收水分和营养物质的器官是根,适当增加土壤的湿润程度可以促进根系的发育,扩大根系与土壤的接触面积,加快养分的吸收和利用,有效增加水肥利用效率^[31-32]。同样增加适量的氮肥可以提高草莓的产量,过量则会增加草莓的营养生长,抑制生殖生长,导致植株徒长、草莓的含糖量和产量降低^[33-34]。草莓需钾量比较多,合理地增加施钾量可以提高草莓的产量和果实中的可溶性固形物,过量可导致草莓酸度增加^[5,35]。本研究结果表明,中肥灌溉最有利于产量的增加,中低肥灌溉可以得到最佳果实品质,中肥灌溉使水肥利用效率达到最优效果,与前人得出结论相似。

合理的水肥配比可以增加产量,同时降低灌水量和施肥量^[36],有研究表明充分灌水的80%和充分施肥的80%交互下可以提高草莓的产量和营养品质^[37];在灌水量减少的情况下,适量的增施氮同样可以改善根系活力^[38],增加根系的吸收面积,减小水分缺失对作物的影响,同时增加氮素利用效率^[39],说明灌水和施肥二者存在耦合效应,充分验证了本试验的结论——滴灌条件下中水中肥的灌溉施肥模式最有利于草莓的生长。

大多数对草莓水肥耦合的研究,都只针对某一指标或者某几个指标进行主观或者客观的评价^[40-42]。本文为了更好地对草莓的综合指标进行评价,以高产、高品质、高效为目标,运用AHP主观赋权法、熵权客观法和基于博弈论的分层组合赋权法进行TOPSIS评价,得出草莓的综合生长评分最好

的水肥组合为中水中肥。通过建模得出灌水量、施肥量与草莓综合生长指标的多元二次回归方程,降维后得到灌水量和施肥量与草莓的综合生长指标均呈开口向下的抛物线形关系,表明随着灌水量和施肥量的增加草莓的综合生长指标呈现先增后减的趋势,与前人结论一致^[43-44]。综合建模的三维关系图得出,灌水量在中低水平、施肥量在中等偏低水平草莓的综合生长情况最好。

本试验针对滴灌灌水与施氮磷钾复合肥两因素对草莓的产量、果实品质和水肥利用效率的影响进行研究,各指标所得出的最优水肥组合不同,需要将各项指标综合进行判断。其次不同的水肥滴灌条件会影响3类因素的多个指标,进而影响综合赋权及评价,其结果与温室内的小气候、当地土壤状况等外因影响有关,还需要进一步研究。

4 结论

(1)水肥耦合作用对草莓的产量和水肥利用效率等各项指标均影响显著,对果实品质无显著影响。增加灌水量可以提高草莓的单果质量和产量,减少灌水量有利于提高草莓的可溶性固形物含量、维生素C含量及水肥利用效率,中等灌溉水平有利于草莓可溶性糖含量、糖酸比和可溶性蛋白质含量的提升;较低施肥量可以提升草莓的品质及水分利用效率,中等施肥水平有利于提高草莓的单果质量、产量和肥料利用效率。

(2)引入层次分析法和熵权法对3类因素9个指标进行多层赋权,运用基于博弈论的组合赋权法获得各单一指标的最终权重,赋权最高为产量(0.2641),最低为可溶性蛋白质含量(0.0595)。根据TOPSIS法建立的草莓综合生长评价体系,得到贴合度最好的处理为中水中肥(T5)。

(3)通过建立草莓综合生长对水肥耦合的响应模型得出,灌水量与施肥量单因素对草莓综合生长的影响均呈开口向下抛物线,水肥交互作用影响显著。当灌水量编码值为 $-0.23(2\,375.1\text{ m}^3/\text{hm}^2)$ 、施肥量编码值为 $-0.02(1\,825.88\text{ kg}/\text{hm}^2)$ 时,综合生长评分最高。以综合评分最大值的90%划分水肥耦合闭环区间,得到最佳灌水和施肥区间分别为灌水量 $2\,268\sim 2\,520\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、施肥量 $1\,759.88\sim 1\,869.87\text{ kg}/\text{hm}^2$,此时产量、果实品质以及水肥利用效率协同最优。

参 考 文 献

- [1] 吴晓云,高照全,李志强,等. 国内外草莓生产现状与发展趋势[J]. 北京农业职业学院学报,2016,30(2):21-26.
WU Xiaoyun, GAO Zhaoquan, LI Zhiqiang, et al. Present situation & trend of strawberry cultivation in China and abroad[J]. Journal of Beijing Vocational College of Agriculture, 2016,30(2):21-26. (in Chinese)

- [2] ZHANG Y, WANG G, DONG J, et al. The current progress in strawberry breeding in China[J]. *Acta Horticulturae*, 2017, 1156:7–12.
- [3] 田孝威,宋峰,包永信,等. 温室草莓栽培管理技术[J]. *农业科技通讯*, 2018(2):216–217.
- [4] 王忠和. 中国草莓生产现状及发展建议[J]. *中国农村小康科技*, 2008(11):21–22.
- [5] 李传哲,许仙菊,马洪波,等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(2):469–475.
LI Chuanzhe, XU Xianju, MA Hongbo, et al. Research advances in fertigation technology improving water and fertilizer use efficiency[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 33(2):469–475. (in Chinese)
- [6] 潘晓莹,武继承. 水肥耦合效应研究的现状与前景[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(10):20–23.
PAN Xiaoying, WU Jicheng. Current situation and prospects of water and fertilizer coupling effects[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(10):20–23. (in Chinese)
- [7] 吴现兵,白美健,李益农,等. 蔬菜水肥一体化研究进展分析[J]. *节水灌溉*, 2019(2):121–124.
WU Xianbing, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Research summary about the technology of fertigation for vegetables[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(2):121–124. (in Chinese)
- [8] 杜清洁,李建明,潘铜华,等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3):10–17.
DU 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(3):10–17. (in Chinese)
- [9] 徐莉莉,陈珏,陆雪珍,等. 水肥一体化施肥对草莓产量与品质的影响[J]. *长江蔬菜*, 2019(6):69–72.
XU Lili, CHEN Jue, LU Xuezhen, et al. Effects of integration of water and fertilizer on yield and quality of strawberry[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2019(6):69–72. (in Chinese)
- [10] WEBER N, ZUPANC V, JAKOPIC J, et al. Influence of deficit irrigation on strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) fruit quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(3):847–857.
- [11] LETOURNEAU G, CARON J. Irrigation management scale and water application method to improve yield and water productivity of field-grown strawberry[J]. *Agronomy*, 2019, 9(6):286–303.
- [12] 王甫,崔宁博,王龙,等. 苗期水肥耦合对温室冬草莓光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(1):103–108.
WANG Fu, CUI Ningbo, WANG Long, et al. Coupling effects between water and fertilizer at seedling stage on photosynthetic characters, yield and irrigation water use efficiency in strawberry[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(1):103–108. (in Chinese)
- [13] 隋岩,冯志文,王翠玲,等. 水肥耦合对设施草莓生长、产量品质及水分利用效率的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(3):369–375.
SUI Yan, FENG Zhiwen, WANG Cuiling, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth, yield and quality and water use efficiency of strawberry in greenhouse[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2011, 42(3):369–375. (in Chinese)
- [14] 董少康,高凡,郭家选,等. 分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5):657–667.
DONG Shaokang, GAO Fan, GUO Jiaxuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on strawberry yield and quality under partial root-zone irrigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5):657–667. (in Chinese)
- [15] 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. 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)
- [16] 马乐乐,高宁,杨百良,等. 全有机营养模式下番茄综合品质评价及其对有机肥水耦合的响应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6):63–72.
MA Lele, GAO Ning, YANG Bailiang, et al. Construction of integrated quality index of tomato with total organic nutrition and its response to organic fertilizer and water coupling[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(6):63–72. (in Chinese)
- [17] 张文耀. 基于层次分析法的高校财务绩效评价[J]. *西北大学学报(哲学社会科学版)*, 2009, 39(4):116–118.
ZHANG Wenyao. University financial performance evaluation analysis based on AHP[J]. *Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2009, 39(4):116–118. (in Chinese)
- [18] 信桂新,杨朝现,杨庆媛,等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1):238–249.
XIN Guixin, YANG Chaoxian, YANG Qingyuan, et al. Evaluation of post-construction effects of high standard basic farmland with entropy weight method and improved TOPSIS model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(1):238–249. (in Chinese)
- [19] 杨晟,贾超,张丰,等. 基于博弈论变权 TOPSIS 模型的煤层底板突水风险评价[J]. *中国矿业*, 2019, 28(增刊1):297–303.
YANG Sheng, JIA Chao, ZHANG Feng, et al. Risk evaluation of coal floor water inrush based on game theory and variable weight TOPSIS model[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(Sup. 1):297–303. (in Chinese)
- [20] 赵奎,刘维发,曾鹏,等. 基于博弈论组合赋权 TOPSIS 法的深部进路参数优选[J]. *有色金属科学与工程*, 2018, 9(2):70–74.
ZHAO Kui, LIU Weifa, ZENG Peng, et al. Optimization of structural parameters of deep stope based on combination weighting game theory[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2018, 9(2):70–74. (in Chinese)
- [21] 王丽英,张彦才,翟彩霞,等. 平衡施肥对连作日光温室黄瓜产量、品质及土壤理化性状的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6):1375–1383.
WANG Liying, ZHANG Yancai, ZHAI Caixia, et al. Effect of balanced fertilization on yield and quality of sunlight greenhouse cucumber and soil characteristics under continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6):1375–1383. (in Chinese)
- [22] 王健,蔡焕杰,李红星,等. 日光温室作物蒸发蒸腾量的计算方法研究及其评价[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(6):11–14.

- WANG Jian, CAI Huanjie, LI Hongxing. Study and evaluation of the calculation methods of reference crop evapotranspiration in solar-heated greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(6): 11–14. (in Chinese)
- [23] LOZANO D, RUIZ N, GAVILAN P. Consumptive water use and irrigation performance of strawberries[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 169: 44–51.
- [24] 李孝良, 胡立涛, 王泓, 等. 化肥减量配施有机肥对皖北夏玉米养分吸收及氮素利用效率的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(1): 118–123.
- LI Xiaoliang, HU Litao, WANG Hong, et al. Effects of combination of chemical fertilizer reduction with organic manure on nutrient uptake and nitrogen utilization efficiency of summer maize in Northern Anhui Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(1): 118–123. (in Chinese)
- [25] ZENG S Z, CHEN S M, FAN K Y. Interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making based on nonlinear programming methodology and TOPSIS method[J]. *Information Sciences*, 2020, 506: 424–442.
- [26] 万春雁, 糜林, 李金凤, 等. 苗期不同水分处理对草莓花芽分化及果实早熟化的影响[J]. *果树学报*, 2016, 33(12): 1523–1531.
- WAN Chunyan, MI Lin, LI Jinfeng, et al. Effect of different water treatments at seedling stage on flower bud differentiation and prematurity of strawberry[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(12): 1523–1531. (in Chinese)
- [27] ADAK N, GUBBUK H, TETIK N. Yield, quality and biochemical properties of various strawberry cultivars under water stress[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 98(1): 304–311.
- [28] MITCHELL J P, SHENNAN C, GRATAN S R, et al. Tomato fruit yield and quality under water deficit and salinity[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1991, 116(2): 215–221.
- [29] GUICHARD S, GARY C, LONGUENESSE J, et al. Water fluxes and growth of greenhouse tomato fruits under summer conditions[J]. *Acta Horticulturae*, 1999, 507: 223–230.
- [30] LIU F, SAVIC S, JENSEN C R, et al. Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation[J]. *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, 2007, 111(2): 128–132.
- [31] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊1): 110–121.
- XING Yingying, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(Supp. 1): 110–121. (in Chinese)
- [32] YUAN B Z, SUN J, NISHIYAMA S. Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(2): 237–245.
- [33] IATROU M, PAPADOPOULOS A. Influence of nitrogen nutrition on yield and growth of an everbearing strawberry cultivar (cv. Evie II)[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(11): 1499–1505.
- [34] 郑洪波, 李亚莉, 耿庆龙, 等. 不同氮素水平下的草莓生长状况研究[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(1): 104–109.
- ZHENG Hongbo, LI Yali, GENG Qinglong, et al. Strawberry growth under different nitrogen levels[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(1): 104–109. (in Chinese)
- [35] 蔡艳华, 田亨达, 胡冰, 等. 合理施用氮磷钾肥对日光温室草莓产量的影响[J]. *农业开发与装备*, 2018(10): 136–137.
- [36] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 70–80.
- XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(21): 70–80. (in Chinese)
- [37] SINGH S, SINGH N P, SHARDA R, et al. Response of irrigation, fertigation and mulching on plant growth and fruit yield of strawberry[J]. *Indian Journal of Horticulture*, 2019, 76(2): 223–240.
- [38] 郭丽, 史建硕, 王丽英, 等. 滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 668–676.
- GUO Li, SHI Jianshuo, WANG Liying, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content under drip fertigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 668–676. (in Chinese)
- [39] 胡梦芸, 门福圆, 张颖君, 等. 水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(3): 332–340.
- HU Mengyun, MEN Fuyuan, ZHANG Yingjun, et al. Research progress on water–nitrogen interaction and its effects on crop growth and utilization of nitrogen[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(3): 332–340. (in Chinese)
- [40] 朱冬梅. 设施栽培下草莓养分吸收及肥水耦合技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- ZHU Dongmei. Research of strawberry nutrient absorption and fertigation technology under facility cultivation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [41] 王翠玲. 水肥耦合对草莓生长、产量品质及水肥利用效率的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- WANG Cuiling. Effects of coupling water with fertilizer on growth, fruit, yield, and quality of quality of strawberry and use efficiency of water and fertilizer[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [42] 李超. 膜下滴灌条件下温室草莓生长环境试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- LI Chao. Study on growth environment of greenhouse strawberry under mulching drip irrigation[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018. (in Chinese)
- [43] 邢立文, 崔宁博, 董娟, 等. 基于熵权-模糊层次分析法的痕灌草莓水肥效应评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2019, 37(9): 815–821.
- XING Liwen, CUI Ningbo, DONG Juan, et al. Evaluation of water and fertilizer coupling effect of trace irrigation strawberry based on entropy weight and fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019, 37(9): 815–821. (in Chinese)
- [44] WANG F, KANG S Z, DU T S, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. *Agriculture Water Management*, 2011, 98(8): 1228–1238.