

膜下滴灌加工番茄水-氮-盐耦合模式研究

吴聚成^{1,2,3,4}, 李文昊^{1,2,3,4}, 马占利^{1,2,3,4},
裴冬杰^{1,2,3,4}, 刘梦洁^{1,2,3,4}, 温越^{1,2,3,4}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子832000; 2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆石河子832000;
3.兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心,新疆石河子832000; 4.农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,新疆石河子832000)

摘要:为确定北疆地区膜下滴灌加工番茄最佳的水氮盐耦合模式,以加工番茄‘金番3166’为研究对象,设置3个灌水水平:5 200(W1)、4 500(W2)、3 800(W3) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,3个施氮量水平:300(N1)、240(N2)、180(N3) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以及3个灌溉水矿化度水平:1(S1)、3(S2)、5(S3) $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,采用L9(3³)正交试验设计,探讨不同水氮盐处理对加工番茄的产量、灌溉水利用效率及氮肥偏生产力的影响,并构建多目标优化模型。结果表明:提高灌水量和施氮量、减少灌溉水矿化度可显著提高加工番茄的产量与灌溉水利用效率($P < 0.05$);而提高灌水量和矿化度同时减小施氮量可显著提高氮肥偏生产力($P < 0.05$)。W1N1S1处理产量和灌溉水利用效率最大,分别为188 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和36.15 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;W1N3S3处理下氮肥偏生产力最大,为760.50 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。通过熵权TOPSIS法综合评价得出,W1N1S1处理综合评价指数最大(0.859),为最优处理。基于多目标遗传算法与熵权TOPSIS综合评价法相结合得出不同灌溉水矿化度(S)下水(W)、氮(N)调控的最佳方案如下:当 $S = 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $W = 5 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N = 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最佳目标产量 Y_1 、灌溉水利用效率 Y_2 、氮肥偏生产力 Y_3 分别为189.88 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、36.07 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、593.44 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当 $S = 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $W = 5 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N = 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_1 = 129.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_2 = 17.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $Y_3 = 679.04 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当 $S = 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $W = 3 800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N = 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_1 = 134.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_2 = 24.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $Y_3 = 582.25 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词:加工番茄;水氮盐耦合;膜下滴灌;多目标优化;多目标遗传算法

中图分类号:S275.6; S641.2 文献标志码:A

Study on the water-nitrogen-salt coupling model for processing tomato under film drip irrigation

WU Jucheng^{1,2,3,4}, LI Wenhao^{1,2,3,4}, MA Zhanli^{1,2,3,4},
PEI Dongjie^{1,2,3,4}, LIU Mengjie^{1,2,3,4}, WEN Yue^{1,2,3,4}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Crop, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

3. Agricultural Water and Fertilizer Efficient Key Equipment Technology Innovation Center, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

4. Northwest Key Laboratory of Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To determine the optimal water-nitrogen-salt coupling model for processing tomatoes under drip irrigation in the northern Xinjiang region, the ‘Jinfa 3166’ processing tomato variety was used as the research subject. The experimental design included three irrigation levels: 5 200 (W1), 4 500 (W2), and 3 800 (W3) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; three nitrogen application levels: 300 (N1), 240 (N2), and 180 (N3) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; and three salinity levels: 1 (S1), 3 (S2), and 5 (S3) $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. An L9 (3³) orthogonal experimental design was used to investigate the effects of different water-nitrogen-salt treatments on the yield, irrigation water use efficiency, and nitrogen fertilizer partial productivity of processing tomatoes, and to develop a multi-objective optimization model. The results indicated that increasing irrigation and nitrogen application, while reducing irrigation water salinity, significantly

improved both the yield and irrigation water use efficiency of processing tomatoes. Conversely, increasing the irrigation amount and salinity, while reducing nitrogen application, notably enhanced the partial productivity of nitrogen fertilizer. The W1N1S1 treatment achieved the highest yield and irrigation water use efficiency, reaching $188 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $36.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, while the W1N3S3 treatment resulted in the highest nitrogen fertilizer partial productivity, at $760.50 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Comprehensive evaluation using the entropy weight TOPSIS method indicated that the W1N1S1 treatment had the highest overall evaluation index (0.859), making it the optimal treatment. Based on the combination of the multi-objective genetic algorithm and entropy weight TOPSIS evaluation method, the optimal solutions for water (W) and nitrogen (N) regulation under different salinity levels (S) were derived as follows: When $S=1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $W=5\,200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N=300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the optimal values for yield (Y_1), irrigation water use efficiency (Y_2), and nitrogen fertilizer partial productivity (Y_3) were $189.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $36.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, and $593.44 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively; when $S=3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $W=5\,200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N=180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_1=129.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_2=17.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, and $Y_3=679.04 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; when $S=5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $W=3\,800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, and $N=180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_1=134.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_2=24.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, and $Y_3=582.25 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: processing tomato; water-nitrogen-salt coupling; film drip irrigation; multi-objective optimization; multi-objective genetic algorithm

加工番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill) 是普通番茄的一种栽培类型,因其具有产量高、品质好和生命力强等特点,在番茄的生产和消费中占有重要地位^[1]。新疆是加工番茄的主要产区,由于具有日照充足、昼夜温差大等气候优势,该地区生产的番茄病虫害少,果实品质优良^[2]。新疆出口的番茄酱果叶浓郁,其可溶性固形物含量高达 28%~38%,且营养价值高,使加工番茄成为区域特色优势产业^[3]。据报道,2020 年新疆番茄酱出口量达 57.0 万 t,出口至全球 130 多个国家和地区^[4]。新疆地区淡水资源短缺,而加工番茄耗水量大,其生产长期受干旱影响^[5],但其对盐分敏感度适中,适合微咸水灌溉^[6]。同时加工番茄生育时期内对养分供应较为敏感。因此,合理开发利用微咸水进行灌溉,对于实现新疆加工番茄的高效种植和提高水资源利用效率至关重要。

新疆微咸水资源丰富,具有开发利用潜力的咸水资源储量约为 $3.482 \times 10^{11} \text{ t}^{[7]}$ 。开发可利用微咸水可以很大程度缓解农业用水压力^[8]。与淡水灌溉不同,微咸水中的盐分随水进入土壤,会改变原本水分与肥料两因素之间的水肥耦合效应^[9]。Sun 等^[10]研究表明,使用微咸水灌溉会增加土壤渗透势,从而引起植物渗透胁迫,最终抑制作物生长和产量提高。Wang 等^[11]研究发现,短期微咸水灌溉会破坏土壤水稳团聚体,而长期灌溉会造成表层土壤中盐离子积累和土壤初始入渗速率降低,进而导致土壤理化性质恶化。Assouline 等^[12]研究发现,土壤盐分胁迫会对氮肥有效性产生影响,过量的水分又会产生氮肥淋失导致环境恶化。此外,灌水量、

灌溉水矿化度与施氮量的交互作用对作物氮素吸收有显著影响,增加灌水量可以促进氮素吸收,而提高矿化度则会降低氮素吸收^[13]。土壤中的水分、养分与盐分之间存在复杂的交互效应,如何协同调控这三者以维持作物产量、降低生产成本并提高水肥利用效率,仍需进一步研究。

前人研究主要集中于分析水分、养分与盐分的两两因子耦合作用对作物生长和水肥利用的影响,对于三者之间复杂交互效应的研究尚不多见。尤其在水盐双重胁迫下,如何合理利用微咸水资源与氮肥保障作物产量,仍需深入探讨。而单靠试验结果难以全面解析这些因素间复杂的交互效应,需要借助模型进行模拟分析。因此,本研究基于正交试验测算番茄的产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力指标,通过偏最小二乘法建立数学回归模型,从而揭示三因素交互作用对加工番茄各指标的影响,以期通过模型来预测和指导生产,为新疆干旱区微咸水资源的合理开发和膜下滴灌加工番茄的增产增效提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2021 年 5—8 月在新疆石河子市石河子大学节水灌溉试验站 ($44^{\circ}18'28''\text{N}$, $86^{\circ}03'47''\text{E}$) 进行。试验区为典型温带大陆性气候,年均日照时数 2 950 h,年均降水量 220 mm,年均蒸发量 1 700 mm,年均气温 7.5°C ,无霜期约为 170 d。2021 年加工番茄生育时期内日降水量与气温如图 1 所示。试验站地下水埋深大于 9 m,土壤由砂粒 (47.3%)、粉

粒(36.9%)和黏粒(15.8%)组成,0~60 cm 土层土壤容重为 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水率为 18%,土壤全氮 $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全磷 $0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全钾 $8.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤速效磷 $30.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤速效钾 $407.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 值 7.64。

1.2 试验设计

通过调研当地加工番茄生产实际的灌溉定额与施氮量以及相关学者的研究^[14-15],加工番茄常规灌溉定额与施氮量分别为 $4\ 500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,本试验以此作为参照标准,设置 3 个灌溉水量水平: $5\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W1)、 $4\ 500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W2)、 $3\ 800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W3),3 个施氮水平: $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1)、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2)、 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3),将常规灌溉施肥组合(W2N2)作为对照,对比分析其他不同灌水量和施氮量组合对番茄产量和水肥利用效率的综合影响;参考加工番茄耐盐能力的相关研究^[16],本试验设置 3 个灌水矿化度水平: $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S1)、 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S2)、 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S3)。采用 $L_9(3^3)$ 正交试验设计,设 9 个处理(表 1),每个处理 3 个重复,共 27 个小区,小区面积 21.6 m^2 ($6 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$)。

供试加工番茄品种为‘金番 3166’,于 2021 年 4 月 30 日进行移苗定植,8 月 26 日进行成熟期采收,全生育期 116 d。种植模式为“一膜两管四行”,行距 30 cm,株距 35 cm,地膜为聚乙烯塑料,宽 145 cm。采用直径 16 mm,滴头间距 30 cm 的单翼迷宫式滴灌带,滴灌带间距 70 cm,滴头流量 $1.8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。以井水为灌溉水,矿化度为 $0.85 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,不同矿化度的微咸水由工业盐($\text{NaCl} \geq 96\%$)配制而成。供试氮肥为尿素 $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ (N:46.4%);复合肥磷酸二氢钾 KH_2PO_4 (K:28.72%,P:22.75%)作为磷肥与钾

肥,施用量为 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料主要以后期追肥的形式施入,施肥周期与灌溉周期保持一致,按生育时期划分肥料的施用,具体灌溉施肥制度见表 2。

1.3 项目测定及方法

1.3.1 产量 在成熟期,在各小区进行实收测产,并根据小区面积换算为公顷产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.2 水肥利用效率 灌溉水利用效率($IWUE, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)和氮肥偏生产力($NPFP, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)计算式如下:

$$IWUE = Y/I \quad (1)$$

$$NPFP = Y/N \quad (2)$$

式中, Y 为产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); I 为灌水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); N 为施氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 熵权 TOPSIS 综合评价法

TOPSIS 综合评价法是一种用于有限方案的多目标决策分析常用方法^[17]。该方法的核心是通过评价对象与最优解和最劣解的距离来进行排序,距离最优解越近的评价对象被视为最佳。熵权 TOPSIS 法则通过熵权法客观确定各评价指标的权重,并利用这些权重进行综合评价排序,此评价法能有效地消除主观因素的影响^[18]。

1.5 偏最小二乘回归

偏最小二乘回归(PLSR)是一种多变量统计方法,结合了多元线性回归分析、主成分分析和典型相关分析。与传统最小二乘回归不同,PLSR 通过引入数据降维和信息综合技术,提取最佳的综合成分,从而有效解决了多元回归分析中的变量高度自相关及噪声问题^[19]。

1.6 模型评价指标

选取决定系数 R^2 、平均绝对误差 MAE 、均方根误差 $RMSE$ 、平均绝对百分比误差 $MAPE$ 、标准化后预测

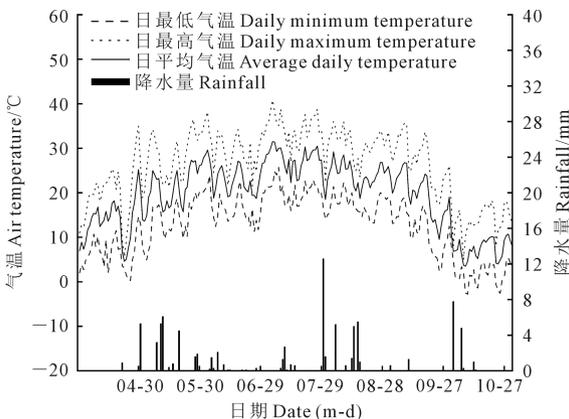


图 1 2021 年加工番茄生育时期内日降水量与气温
Fig.1 Daily precipitation and temperature during the growth period of processing tomato in 2021

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount $/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	施氮量 Nitrogen fertilization amount $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	灌溉水矿化度 Salinity of irrigation water $/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
W1N1S1	5200	300	1
W1N2S2	5200	240	3
W1N3S3	5200	180	5
W2N1S2	4500	300	3
W2N2S3(CK)	4500	240	5
W2N3S1	4500	180	1
W3N1S3	3800	300	5
W3N2S1	3800	240	1
W3N3S2	3800	180	3

表 2 加工番茄生育时期灌溉制度

Table 2 Irrigation system during the growth period of processing tomato

生育时期 Growth period	日期 Date (m-d)	持续时间 Duration time/d	灌水和施肥周期 Irrigation and fertilization cycle/d	灌水和施肥比例 Irrigation and fertilization ratio/%	灌水和施肥频率 Frequency of irrigation and fertilization
苗期 Seedling stage	05-01—05-31	30	30	14.3	1
花期 Florescence	06-01—06-20	20	20	14.3	1
果实膨大一期 Fruit expansion stage i	06-21—07-15	25	12	28.6	2
果实膨大二期 Fruit expansion stage ii	07-16—08-04	20	10	28.6	2
成熟期 Maturity stage	08-05—08-26	22	11	14.3	1
全生育期 Whole growth stage	05-01—08-26	117		100.0	7

残差平方和 $PRESS$ 作为模型的评价指标。其中 R^2 值越接近 1 说明模型预测性能越好, $PRESS$ 、 MAE 、 $RMSE$ 、 $MAPE$ 值越小模型预测性能越好。计算公式如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \quad (6)$$

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (O_i - \hat{S}_i)^2 \quad (7)$$

式中, n 为观测样本总数; O_i 为第 i 个观测数据; \bar{O} 为观测数据组的平均值; S_i 为第 i 个模拟或预测数据; \bar{S} 为模拟或预测数据组的平均值; \hat{S}_i 是模型在去掉第 i 个观测值时, 对第 i 个观测值的预测值。

1.7 多目标遗传算法 (NSGA-II)

NSGA-II 算法是一种经典的多目标优化算法, 用于解决多目标优化问题。它结合了快速非支配排序、Pareto 最优解、拥挤度距离和选择操作, 以求在目标空间中搜索最优的非支配解集^[20]。通过拥挤度来度量系统元素分布的情况, 从而选择出分布均匀、获得信息最多的基因。具体分为初始化种群、非支配排序、拥挤度距离计算、选择操作、交叉和变异、更新种群共 6 个步骤。

1.8 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2020 进行数据统计, 使用 Origin 2022 与 R 4.4.1 进行绘图。利用 SPSS 27.0 进行显著性检验, MATLAB R2024a 进行回归分析与多目标遗传算法寻优。

2 结果与分析

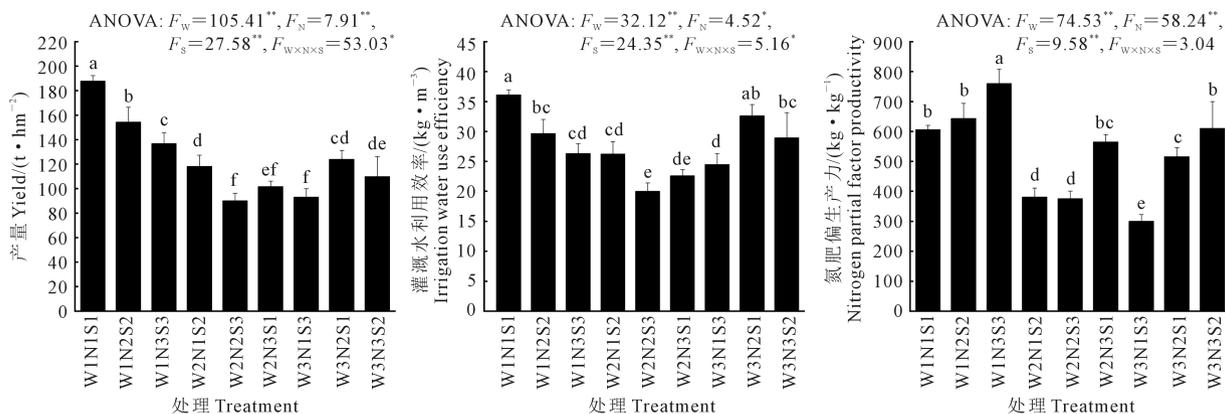
2.1 水、氮、盐调控对滴灌加工番茄产量和水肥利用效率的影响

产量、灌溉水利用效率以及氮肥偏生产力是评价作物生产效率和水平的重要指标。方差分析结果显示, 灌水量、施氮量和灌溉水矿化度对加工番茄的产量、灌溉水利用效率及氮肥偏生产力均有显著影响 ($P < 0.05$, 图 2)。其中, W1N1S1 处理加工番茄产量与灌溉水利用效率均为各处理中最大, 分别为 $188 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $36.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 较 W2N2S3 处理分别显著增加 108.37% 和 80.33%。在 W2 水平下, 增加施肥量和降低矿化度显著增加了加工番茄产量与灌溉水利用效率 ($P < 0.05$), N1S2 较 N2S3 处理的番茄产量与灌溉水利用效率分别增加 31.03% 和 31.00%; 在 W3 水平下, 同时增加施肥量和矿化度显著降低了产量和灌溉水利用效率 ($P < 0.05$)。在低灌溉水矿化度 (S1) 条件下, 加工番茄产量和灌溉水利用效率均随着灌水量和施氮量的增加显著增加 ($P < 0.05$), 与 W2N3S1 相比, W1N1S1 处理两指标增幅分别为 84.72% 与 59.85%。在相同施氮量下, 各处理的产量随灌水量的增加和矿化度的降低显著增加 ($P < 0.05$), 与 W3N1S3 相比, W1N1S1 处理产量增幅为 101.91%。由图 2 可知, 氮肥偏生产力随灌水量的增加和施氮量的降低显著增加 ($P < 0.05$), W1N3S3 处理的氮肥偏生产力达到最大

(760.50 kg · kg⁻¹), 与 W2N2S3 处理相比, 增幅为 102.30%。

2.2 基于熵权 TOPSIS 法对加工番茄产量与水肥利用效率的综合评价

由表 3 结果可知, 各指标权重排序表现为产量 > 氮肥偏生产力 > 灌溉水利用效率, 理论权重值较为符合。从 TOPSIS 综合评价结果 (表 4) 来看, W1N1S1 处理距离正理想最优解最近 (0.092), 与最劣负理想解的距离最远 (0.560), 由综合评价指数 C_i 值越大越优的准则可知, W1N1S1 处理与理想最优解的接近程度最大 (0.859)。W2N2S3 处理离正理想最优解的距离最远 (0.577), 而离负理想最劣解的距离最近 (0.045), 且与理想最优解的接近程度最小 (0.072)。综上, W1N1S1 为最优处理, W1N2S2 处理次之, W2N2S3 处理表现最差。



注: 图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 图中 ANOVA 表示多因素方差分析, F_w 、 F_n 、 F_s 、 $F_{w \times n \times s}$ 分别表示灌水量、施氮量、灌溉水矿化度以及三者交互作用效应的 F 值检验结果。* 表示影响显著 ($P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). In the figure, ANOVA represents multivariate analysis of variance, and F_w , F_n , F_s , and $F_{w \times n \times s}$ represent irrigation amount, nitrogen application amount, salinity of irrigation water, and F value test results of their interaction effects, respectively. * indicates significant effect ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant effect ($P < 0.01$).

图 2 水氮盐耦合对加工番茄产量和灌溉水利用效率及氮肥偏生产力的影响

Fig.2 Effects of water-nitrogen-salt coupling on yield and irrigation water use efficiency and nitrogen bias productivity of processing tomato

表 3 熵值法计算权重结果汇总

Table 3 The entropy method is used to calculate the weight results

指标 Index	产量 Yield	灌溉水利 用效率	氮肥偏 生产力
		Irrigation water use efficiency	Nitrogen partial factor productivity
信息熵值 e Information entropy value	0.815	0.890	0.888
信息效用值 d Information utility value	0.185	0.110	0.112
权重系数 w Weight coefficient/%	45.560	27.040	27.400

表 4 TOPSIS 综合评价计算结果

Table 4 TOPSIS comprehensive evaluation results

处理 Treatment	正理想解 距离 d^+	负理想解 距离 d^-	综合评价 指数 C_i	排序 Ranking
	Positive ideal solution distance	Negative ideal solution distance	Comprehensive evaluation index	
W1N1S1	0.092	0.560	0.859	1
W1N2S2	0.203	0.397	0.662	2
W1N3S3	0.290	0.365	0.558	3
W2N1S2	0.429	0.174	0.288	6
W2N2S3	0.577	0.045	0.072	9
W2N3S1	0.476	0.172	0.266	7
W3N1S3	0.556	0.076	0.120	8
W3N2S1	0.337	0.293	0.465	4
W3N3S2	0.393	0.255	0.393	5

2.3.2 模型的评估 为分析模型的适用性,对回归模型的预测值与实际值进行相关性分析可知(图 3, 见 135 页),预测值和实际值呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。产量与灌溉水利用效率呈显著正相关关系 ($P<0.05$),表明随着产量的增加,灌溉水利用效率也会显著提高。

为进一步检验模型拟合效果,对实际值与预测值进行线性回归并分别计算模型的评价指标。由图 4 可知,各指标预测值与实际值表现出良好的一致性,模型决定系数 R^2 均在 0.90 以上,平均绝对误差 MAE 与均方根误差 $RMSE$ 均在可接受范围内,平均绝对百分比误差 $MAPE$ 均小于 8%,表明模型拟合可信度在 92% 以上;由标准化后数据预

测残差平方和 $PRESS$ 可以看出,不同模型经过交叉验证的预测性能均小于 1,表明模型有着良好的预测能力。因此,模型可以用来描述加工番茄产量、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力与水氮盐耦合之间的关系。

2.4 水氮盐耦合模型效应分析与多目标优化

2.4.1 模型效应分析 主效应的大小表示因素对目标的影响大小,正负分别表示促进或抑制作用。当某一特征的交互效应为正向且高于各主效应之和或负向且低于各主效应之和时,分别定义为协同效应和拮抗效应,若不满足则正负仅表示促进或抑制作用^[21]。由图 5 可知,单因素对加工番茄产量影响表现为 $W>S>N$,其中 S 为负效应, W 与 N 为正效

表 5 水、氮、盐投入与各因变量的回归关系

Table 5 Regression relationship between water, nitrogen, salt input and dependent variables

因变量 Dependent variable	回归方程 Regression equation	R^2
产量 Yield	$Y_1 = 882.91 - 0.35W - 0.79N + 49.36S + 0.35 \times 10^{-4} W^2 + 0.27 \times 10^{-3} N^2 - 0.94S^2 + 0.27 \times 10^{-3} WN - 0.24 \times 10^{-2} WS - 0.16NS$	0.93
灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency	$Y_2 = 270.71 - 0.10W - 0.14N + 3.54S + 0.10 \times 10^{-4} W^2 - 0.20 \times 10^{-4} N^2 - 0.16S^2 + 0.47 \times 10^{-4} WN - 0.25 \times 10^{-4} WS - 0.02NS$	0.96
氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity	$Y_3 = 4560.08 - 1.61W - 3.42N - 44.03S + 0.16 \times 10^{-3} W^2 + 0.4 \times 10^{-2} N^2 - 3.32S^2 + 0.46 \times 10^{-3} WN + 0.04WS - 0.57NS$	0.91

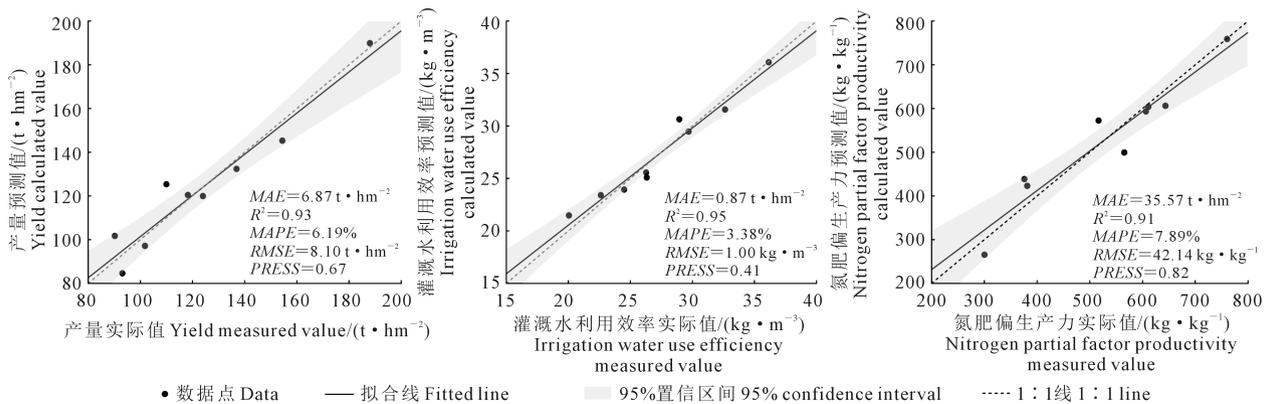


图 4 产量与灌溉水利用效率以及氮肥偏生产力的模型验证

Fig.4 Model validation of yield, irrigation water use efficiency, and nitrogen fertilizer partial productivity

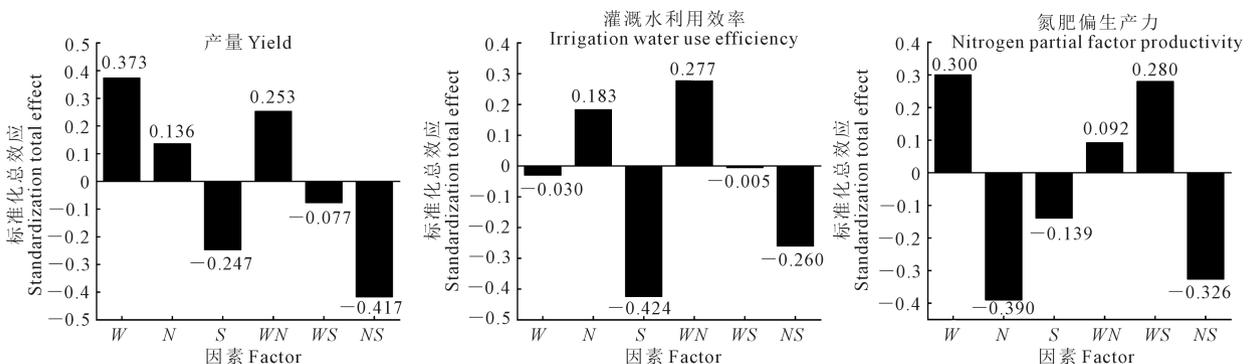


图 5 不同影响因素对加工番茄各指标的标准化影响

Fig.5 Standardized effects of different influencing factors on various indicators of processing tomato

应。单因素对灌溉水利用效率的影响表现为 $S > N > W$, 其中 W 与 S 为负效应, N 为正效应。单因素对氮肥偏生产力的影响表现为 $N > W > S$, 其中 N 与 S 为负效应, W 为正效应。

当两因子互作时, 各因素交互对产量影响表现为 $NS > WN > WS$, 其中 WN 交互虽未超过各主效应之和, 但是 $WN > 0$, 表明在同一矿化度条件下增加水肥用量会促进产量提高并未表现出协同效应可能是因为二者交互效应受到其他因素影响或限制; $NS < 0$, 且交互效应低于各主效应之和, 因此表现为拮抗效应, 表明同时增加施肥量与矿化度会对产量产生显著抑制作用; $WS < 0$, 且交互效应低于各主效应之和, 二者表现为拮抗效应, 结合主效应分析可知水盐交互时盐分的负向影响起主导作用。同理, 因子交互作用对灌溉水利用效率影响表现为 $WN > NS > WS$, 其中 NS 为拮抗效应, WS 仅表现为抑制作用, WN 为协同效应。表明提高灌水量或施肥量同时降低矿化度才能得到较大的灌溉水利用效率; 对于氮肥偏生产力, 两因子互作效应对其影响表现为 $NS > WS > WN$, 其中 NS 表现为抑制作用, 表明同时提高施肥量与矿化度不利于氮肥偏生产力的提高; WN 与 WS 表现为协同效应, 说明交互作用中灌水量占主导地位, 提高灌水量可以缓解盐分胁迫, 从而保持较高氮肥的利用效率。

总体而言, 增加灌水量的同时需要提高施氮量以显著提高加工番茄产量和灌溉水利用效率; 同时提高施氮量和矿化度或灌水量和矿化度不利于产量和灌溉水利用效率的提升, 但适度提高灌水量和灌溉水矿化度可减弱氮肥对氮肥偏生产力的抑制作用。

2.4.2 盐胁迫下最佳水氮耦合模式 由于产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力的量纲不同, 需先对数据进行归一化处理以提高可比性后, 再进行分析研究。为研究不同盐分胁迫下水氮交互作用的影响, 确定最佳的水氮调控策略, 通过二维等值线图分析了水氮交互效应。由图 6 可知, 在轻度盐胁迫 ($S = 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下, 产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力均在高灌水量 ($W1$) 和高施氮量 ($N1$) 条件下达到最大值, 最佳策略为 $W = 5\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $N = 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 预测目标产量 Y_1 、灌溉水利用效率 Y_2 、氮肥偏生产力 Y_3 分别为 $189.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $36.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $593.44 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

在中度盐胁迫 ($S = 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, 产量和灌溉水利用效率的最大值出现在高施氮量 ($N1$) 和高灌水量 ($W1$) 条件下, 而氮肥偏生产力最大值则出现在

低施氮量 ($N3$) 和高灌水量 ($W1$) 条件下, 与前者策略相冲突。

在重度盐胁迫 ($S = 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, 产量和灌溉水利用效率的最大值出现在低施氮量 ($N3$) 和低灌水量 ($W3$) 条件下, 而氮肥偏生产力的最大值则出现在低施氮量 ($N3$) 和高灌水量 ($W1$) 条件下。因此, 后续需要进一步优化 $S = 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $S = 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下的灌溉施肥策略, 以同时实现产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力的最优结果。

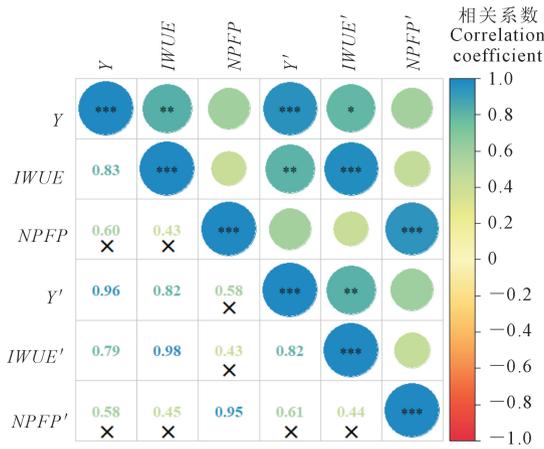
2.4.3 盐胁迫下水氮耦合的多目标优化 将产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力的回归方程引入优化求解, 并限定灌水量和施肥量在本试验条件下的区间, 即 $3\ 800 \sim 5\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $180 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别建立不同盐胁迫下多目标优化模型。

利用 MATLAB 对快速非支配排序遗传算法 NSGA-II 进行多目标优化。设定种群数目大小为 500, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1, 最大遗传代数为 1000, 得到 Pareto 非劣解集, 将输出的 Pareto 非劣解集利用熵值法得到不同指标的权重。结合各指标权重利用 TOPSIS 法计算每个解的综合评价指标 C_i 值并排序, 综合评价结果如图 7 所示。结果表明, 在中度盐胁迫 ($S = 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, 最佳灌水量和施氮量分别为 $5\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 对应的产量、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力分别为 $129.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $17.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $679.04 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 该方案相较于常规灌溉施肥方案 ($W2N2$), 灌水量增加 15.6%, 施肥量减少 25.0%, 产量增加 13.5%, 灌溉水利用效率减少 2.8%, 氮肥偏生产力增加 40.4%; 在重度盐胁迫 ($S = 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, 最佳灌水量和施氮量分别为 $3\ 800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 对应的产量、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力分别为 $134.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $24.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $582.25 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 该方案相较于常规灌溉施肥方案 ($W2N2$), 灌水量减少 15.6%, 施肥量减少 25.0%, 产量增加 48.6%, 灌溉水利用效率增加 24.0%, 氮肥偏生产力增加 54.9%。

3 讨论

3.1 水-氮-盐耦合模式对滴灌加工番茄产量和水肥利用效率的影响

水分、养分和盐分是旱地农业生产中主要的胁迫因子, 现代化农业灌溉不仅要求为作物提供适宜的养分和水分, 更要营造水、肥、盐相协调的土壤微环境^[22]。合理的水肥盐协同调控措施是确保作物高产的关键。本研究发现, 在不同水、氮、盐条件下, 水分不足时增加灌水量可显著提高产量和氮肥



注:Y、IWUE、NFPF 分别代表产量、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力的实际值, Y'、IWUE'、NFPF' 代表各指标预测值;左下角数字代表变量间皮尔逊相关系数;右上角圆圈大小表示显著性 P 值大小,圆圈越大代表 P 值越小;***、**、* 分别代表 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$, × 表示 $P > 0.05$ 。

Note: Y, IWUE and NFPF represent the actual values of yield, irrigation water use efficiency and nitrogen fertilizer bias productivity, respectively, and Y', IWUE' and NFPF' represent their predicted values. The number in the lower left corner represents the Pearson correlation coefficient between variables. The size of the circle in the upper right corner indicates the size of the significance P value, the bigger the circle the smaller the P value. ***, **, and * represent $P < 0.001$, $P < 0.01$, and $P < 0.05$, respectively, and × indicates $P > 0.05$.

图 3 实际值和预测值皮尔逊相关热图

Fig.3 Pearson correlation heatmap of actual and predicted values

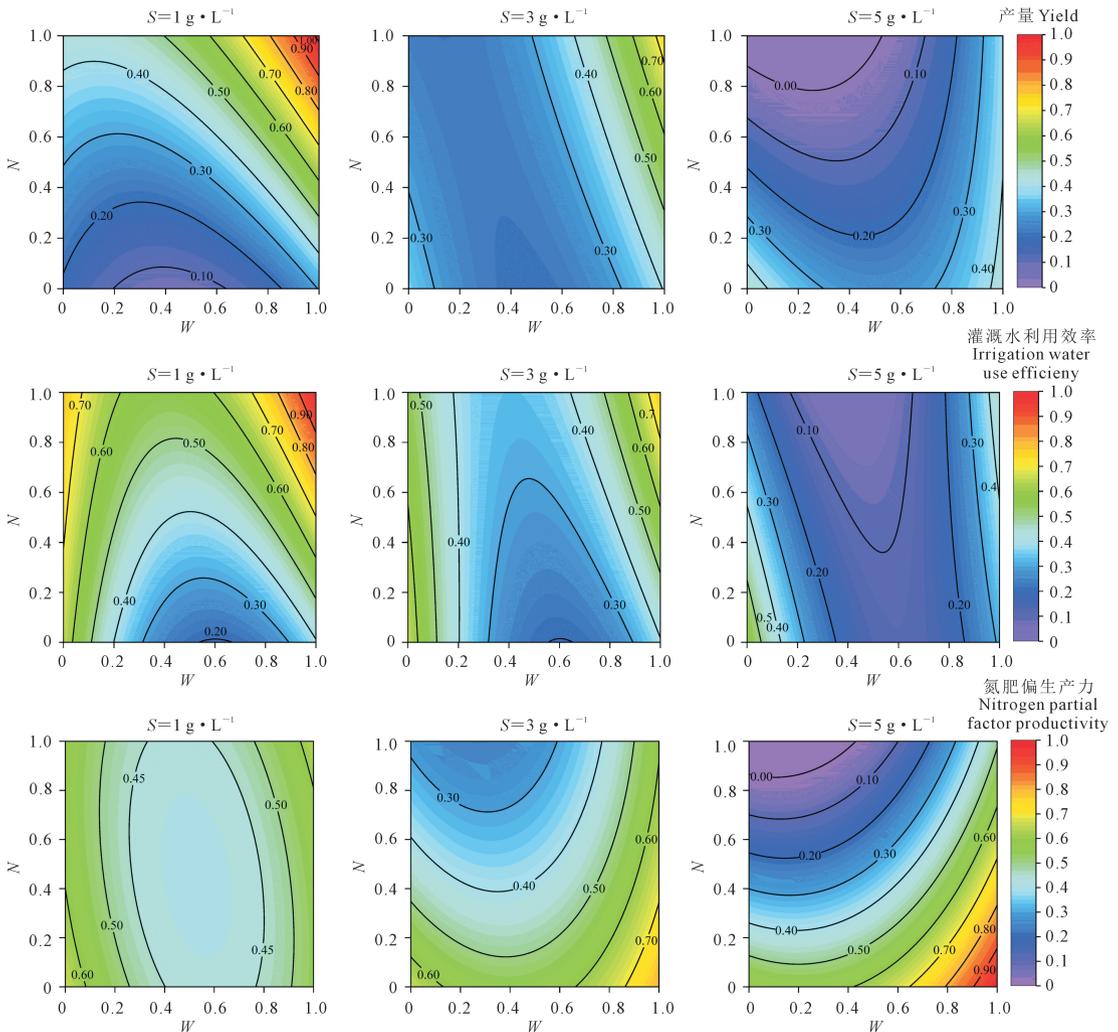


图 6 不同盐胁迫下水氮耦合等值线图

Fig.6 Isoline map of water nitrogen coupling under different salt stresses

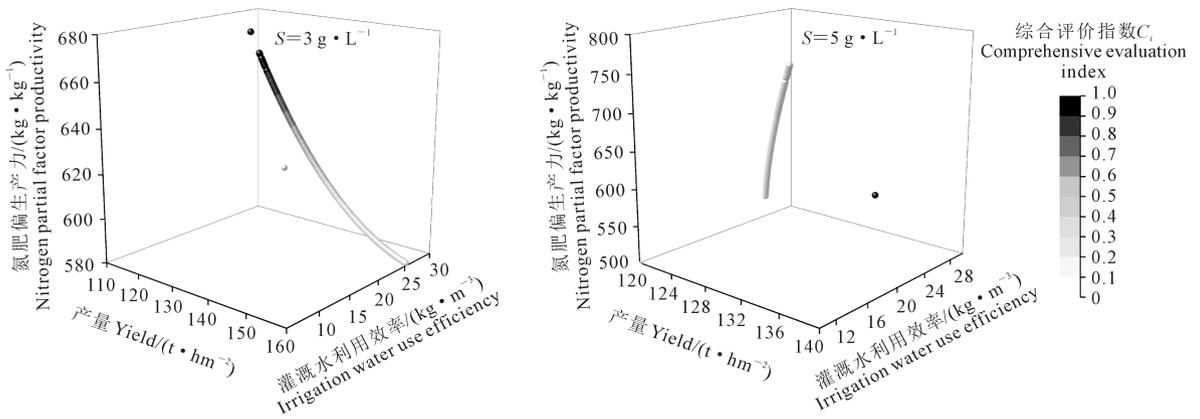


图 7 不同灌溉水矿化度下的 Pareto 前沿图

Fig.7 Pareto frontier maps at different salinity levels of irrigation water

偏生产力,但会降低灌溉水利用效率;养分不足时增加施氮量可提高加工番茄产量和灌溉水利用效率,但会降低氮肥偏生产力。这与王振华等^[23]的研究结果一致。本研究中 W1N1S1 处理的产量和灌溉水利用效率最高,这归因于合理的水肥管理和对环境因素的有效调控,即充足的水分供应(W1)通过减少干旱胁迫、提高光合作用和作物生长速率,显著提升了番茄生长^[6];适量的氮肥施用(N1)满足了植物对氮素的需求,促进了生物量的积累^[13];低矿化度的灌溉水(S1)减少了土壤盐分积累,避免了渗透胁迫和离子毒害,保障了作物的健康生长^[5]。此外,本研究还发现,适度提高灌溉水的矿化度和灌水量有助于增强作物对氮素的吸收,加快养分运输,从而提高氮肥偏生产力,这也与前人^[24-26]的研究结果相吻合。

3.2 多元回归模型在水肥管理决策中的应用

水肥管理是农田管理中的关键环节,平衡和优化水肥关系能够以较少的资源投入获得更高的产量和更优的品质^[27]。模型预测与优化在水肥管理决策中起到了重要作用,有助于实现水肥投入与产量及资源利用效率的最佳平衡。本研究采用偏最小二乘回归模型,分析了水、肥、盐三者间的主效应和交互效应,主效应分析结果表明,水分与养分单独作用均能促进加工番茄产量提高,而盐胁迫会使番茄产量降低,这与作物生长对水分和养分的基本需求规律相符,也与翟中民等^[28]的研究结果一致。本研究中交互效应表明水氮交互具有促进增产作用,因为水分促进了氮素的吸收并加快了氮素运输;氮盐与水盐交互为拮抗效应表明在交互作用中盐分占主导作用,抑制了氮素和水分的正面效应^[29]。盐分可能通过增加土壤渗透势,降低作物对

水分和氮素的吸收,进而导致产量下降。对于灌溉水利用效率,水分和盐分单独作用表现为负效应,表明过量的水分和高盐分会降低作物的吸收效率;施氮为正效应表明施肥有助于调节水分吸收^[24]。本研究表明,产量与灌溉水利用效率呈显著正相关关系,这是因为提高灌溉水利用效率能减少水分浪费,为作物提供适宜的水分和养分环境从而间接提升了作物的生长条件和产量^[30]。水盐交互为拮抗效应是因为盐分在根系区域积累,降低了根系对水分的有效吸收,进而影响产量;在氮肥偏生产力的研究中,氮与盐单独作用时表现为负效应,这是因为单施氮肥会降低氮素利用效率,增加土壤酸度进而影响土壤养分的有效性^[31],且高盐环境会抑制氮的吸收和利用。此外,水与氮以及水与盐之间的交互作用均表现为协同效应,这可能是因为适当的水分能够促进氮素的吸收,同时通过稀释土壤中的盐分来缓解盐胁迫,改善土壤环境,从而提高氮肥偏生产力^[32]。

3.3 多目标优化在水肥耦合调控中的应用

在加工番茄生产中,需同时优化产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力等多个目标,这些目标之间常存在冲突,产生多目标规划问题。采用 NSGA-II 算法,通过模拟自然选择过程可在多个目标间寻找平衡的最优解集^[33]。虽然此方法也曾用于农业生产研究中,但该方法的不足在于不能求得单一最优解。因此应用该方法的前人研究中在选取单一最优解时候仍存在一定局限性,如赵文举等^[34]对番茄产量与品质的优化和马建琴等^[35]对玉米产量和水分利用率的双目标优化,二者在选取最优解时具有较大的主观性。为弥补这一不足,采用熵权 TOPSIS 综合评价法可以客观地为解集赋权,从而减

少主观因素的影响,进一步从解集中筛选出唯一最优解。在农业优化领域,类似的多目标优化方法也得到了广泛应用。如 Sun 等^[36]和 Hormozi 等^[37]结合 NSGA-II 算法和熵权 TOPSIS,在优化农业水土资源配置和农业机械化优化等问题上取得了良好效果,表明该方法具有较强的科学性和实践性。因此,本研究结合 NSGA-II 算法和熵权 TOPSIS 方法,在通过算法求得最优解集后,通过综合评价法筛选出唯一最优解,得出了不同矿化度条件下的最佳水氮调控模式。本研究仅讨论了水、氮、盐及其交互作用对产量、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力的直接影响,并未考虑其他因素的间接影响。未来的研究应进一步探讨多因素之间的相互关系及其对作物生产力的影响机制,且模型的泛用性与可靠性还需要长期生产实践研究进行验证。

4 结 论

1) 加工番茄的产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力显著受灌水量、施氮量、灌水矿化度的影响。提高灌水量和施氮量,减少灌水矿化度,可显著提高产量和灌溉水利用效率,灌水量 $5\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $300\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、矿化度 $1\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下加工番茄产量和灌溉水利用效率最大,分别为 $188\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $36.15\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,较灌水量 $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、矿化度 $5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理分别增加 108.37% 和 80.33% ;提高灌水量和矿化度,减少施氮量,可显著提高氮肥偏生产力,灌水量 $5\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $180\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、矿化度 $5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下氮肥偏生产力最大 ($760.50\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$),较灌水量 $4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、矿化度 $5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理增加 102.30% 。综合评价得出的最优处理为灌水量 $5\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ +施氮量 $300\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ +矿化度 $1\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2) 结合多目标遗传算法 (NSGA-II) 和熵权 TOPSIS 综合评价法,分别求得不同灌溉水矿化度下的最佳水氮调控模式如下:当矿化度 $S = 1\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $W = 5200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N = 300\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳目标产量 Y_1 、灌溉水利用效率 Y_2 、氮肥偏生产力 Y_3 分别为 $189.88\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $36.07\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $593.44\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当 $S = 3\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $W = 5\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N = 180\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_1 = 129.06\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_2 = 17.75\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $Y_3 = 679.04\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当 $S = 5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $W = 3\ 800\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $N = 180\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_1 = 134.06\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Y_2 = 24.87\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $Y_3 = 582.25\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 崔豫蒙, 谭占明, 程云霞, 等. 加工番茄育种研究进展及展望[J]. 新疆农业科技, 2023, (4): 35-39.
CUI Y M, TAN Z M, CHENG Y X, et al. Research progress and prospect of tomato breeding for processing[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2023, (4): 35-39.
- [2] ZHAO D, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. Improving yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Miller) using alternate partial root-zone drip irrigation in arid northwest China[J]. Water, 2019, 11 (7): 1503.
- [3] DE MARCO I, RIEMMA S, IANNONE R. Uncertainty of input parameters and sensitivity analysis in life cycle assessment: an Italian processed tomato product[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 315-325.
- [4] DING J Y, LI Y Z, LIU J J, et al. Life cycle assessment of environmental impacts of cold and hot break tomato paste packaged in steel drums and exported from Xinjiang, China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106939.
- [5] ZHOU B B, LIANG C F, CHEN X P, et al. Magnetically-treated brackish water affects soil water-salt distribution and the growth of cotton with film mulch drip irrigation in Xinjiang, China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107487.
- [6] WANG X D, TIAN W, ZHENG W D, et al. Quantitative relationships between salty water irrigation and tomato yield, quality, and irrigation water use efficiency: a meta-analysis [J]. Agricultural Water Management, 2023, 280: 108213.
- [7] HU Y X, LI X W, JIN M G, et al. Reduced co-occurrence and ion-specific preferences of soil microbial hub species after ten years of irrigation with brackish water[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104599.
- [8] WANG Z M, LI Z F, ZHAN H B, et al. Effect of long-term saline mulched drip irrigation on soil-groundwater environment in arid northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153222.
- [9] LI J G, CHEN J, QU Z Y, et al. Effects of alternating irrigation with fresh and saline water on the soil salt, soil nutrients, and yield of tomatoes[J]. Water, 2019, 11(8): 1693.
- [10] SUN H Y, ZHANG X J, TIAN L, et al. Effects of saline water irrigation on soil quality and crop production: a review [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3): 354-363.
- [11] WANG H, ZHENG C L, NING S R, et al. Impacts of long-term saline water irrigation on soil properties and crop yields under maize-wheat crop rotation[J]. Agricultural Water Management, 2023, 286: 108383.
- [12] ASSOULINE S, RUSSO D, SILBER A, et al. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture [J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3419-3436.
- [13] MA C, WANG J, LI J S. Utilization of soil and fertilizer nitrogen supply under mulched drip irrigation with various water qualities in arid regions [J]. Agricultural Water Management, 2023, 280: 108219.
- [14] 窦允清, 王振华, 张金珠, 等. 水肥耦合对滴灌加工番茄生理生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 124-129.
DOU Y Q, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. Effects of water and fertilizer coupling on physiological growth and yield of tomato processed by drip irrigation [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 124-129.
- [15] 杨玉珍, 孟超然, 张新疆, 等. 氮、钾肥用量对膜下滴灌加工番茄产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (1): 61-67.
YANG Y Z, MENG C R, ZHANG X J, et al. Effect of nitrogen and potassium fertilizer on yield and quality of processing tomato under drip irrigation with plastic film mulching [J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2017, (1): 61-67.

- [16] 宋晓青, 刘燕, 王永, 等. 加工番茄幼苗对盐胁迫的响应[J]. 北方农业学报, 2021, 49(2): 104-108.
SONG X Q, LIU Y, WANG Y, et al. Response of processed tomato seedlings to salt stress[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2021, 49(2): 104-108.
- [17] YE J. An extended TOPSIS method for multiple attribute group decision making based on single valued neutrosophic linguistic numbers[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 28(1): 247-255.
- [18] LI Y X, ZHANG Y F, ZHANG X H, et al. Distribution of geothermal resources in Eryuan county based on entropy weight TOPSIS and AHP-TOPSIS methods[J]. Natural Gas Industry B, 2024, 11(2): 213-226.
- [19] 蒋沛含, 杨晓楠, 杨晨旭, 等. 基于偏最小二乘回归的谷子冠层氮素含量高光谱估测研究[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(6): 91-101.
JIANG P H, YANG X N, YANG C X, et al. Estimation of nitrogen content in millet canopy based on multi parameter partial least squares model[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(6): 91-101.
- [20] FAN M T, LI Y, SHEN J L, et al. Multi-objective optimization design of recycled aggregate concrete mixture proportions based on machine learning and NSGA-II algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2024, 192: 103631.
- [21] LIAO Q, DING R S, DU T S, et al. Stomatal conductance modulates maize yield through water use and yield components under salinity stress[J]. Agricultural Water Management, 2024, 294: 108717.
- [22] 郭凯, 封晓辉, 伍靖伟, 等. 盐碱地肥沃耕层构建水肥盐综合调控机理与技术研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 29-38.
GUO K, FENG X H, WU J W, et al. Research progress on mechanism and technology of integrated regulating on soil water, salt and fertility under fertile plough layers construction in saline-alkali soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 29-38.
- [23] 王振华, 陈潇洁, 吕德生, 等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 66-75.
WANG Z H, CHEN X J, LV D S, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 66-75.
- [24] 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, (z1): 110-121.
XING Y Y, ZHANG F C, WU L F, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, (z1): 110-121.
- [25] 江柱, 张江辉, 白云岗, 等. 膜下咸水滴灌水肥盐调控对棉花生长及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(6): 1389-1397.
JIANG Z, ZHANG J H, BAI Y G, et al. Effects of fertilizer and salt regulation on cotton growth and yield under plastic film drip irrigation [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(6): 1389-1397.
- [26] SOBHANI G H, GOLCHIN A, SHEKARI F. Effects of different levels of nitrogen and induced-NaCl stress on yield and growth indices of tomato[J]. Journal of Soil and Plant Interactions, 2014, 5(3): 49-63.
- [27] 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 Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 70-80.
- [28] 翟中民, 史文娟, 张艳超, 等. 水氮盐调控对膜下滴灌棉花产量的影响及耦合模型[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 721-728.
ZHAI Z M, SHI W J, ZHANG Y C, et al. Effects of water, nitrogen and salt regulation on cotton yield under mulch film drip irrigation and its coupled model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(7): 721-728.
- [29] 张继峰, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌下氮盐交互对加工番茄荧光特性及产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 990-1003.
ZHANG J F, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. The influences of different nitrogen and salt levels interactions on fluorescence characteristics, yield and quality of processed tomato under drip irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 990-1003.
- [30] BERGEZ J E, GARCIA F. Is it worth using short-term weather forecasts for irrigation management? [J]. European Journal of Agronomy, 2010, 33(3): 175-181.
- [31] LI J S, ZHAO Y Q, SHAO X Q, et al. The mixed addition of biochar and nitrogen improves soil properties and microbial structure of moderate-severe degraded alpine grassland in Qinghai-Tibet plateau[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 765041.
- [32] SHEN H Z, GAO Y H, SUN K X, et al. Effects of differential irrigation and nitrogen reduction replacement on winter wheat yield and water productivity and nitrogen-use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2023, 282: 108289.
- [33] 杨洋, 张宽地, 姚田成, 等. 基于 NSGA-II 遗传算法的 Myring 流线型量水槽体型优化设计[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 241-250.
YANG Y, ZHANG K D, YAO T C, et al. Optimization design of myring streamlined volume sink based on NSGA-II genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 241-250.
- [34] 赵文举, 马锋, 曹伟, 等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 95-101.
ZHAO W J, MA F, CAO W, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 95-101.
- [35] 马建琴, 何沁雪, 刘蕾. 双目标条件下玉米水肥耦合效应分析及配施方案优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 58-63.
MA J Q, HE Q X, LIU L. Optimizing irrigation and fertilization coupling to balance the improvement of yield and water use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 58-63.
- [36] SUN J X, YANG Y L, QI P, et al. Development and application of a new water-carbon-economy coupling model (WCECM) for optimal allocation of agricultural water and land resources [J]. Agricultural Water Management, 2024, 291: 108608.
- [37] HORMOZI M A, DIZAJI H Z, BAHRAMI H, et al. A multi-objective optimization to determine the optimal patterns of sustainable agricultural mechanization using NSGA-II algorithm [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2023, 13(4): 477-491.