

DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.01.001

基于 NSGA-II 模拟水肥耦合对小茴香产量及品质的影响

李洋洋^{1,2,3}, 李应海^{1,2,3*}, 王德全^{1,2,3}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对目前宁夏干旱地区小茴香作物面临的水肥利用效率低及缺乏明确的高效水肥制度问题,以宁夏中卫市海原县种植的小茴香(*Foeniculum vulgare*)为研究对象,研究水肥耦合条件对小茴香的生理指标、果实品质、产量的影响。设置3组灌溉水平(1 800, 3 000, 4 200 m³/hm²)和3组施肥水平(270, 450, 630 kg/hm²)双因素三水平试验,共9组处理,建立小茴香果实精油质量分数、公顷产量、水分利用率及肥料偏生产力与灌水量和施肥量的二元二次回归方程,并运用第二代遗传算法(NSGA-II)对模型进行优化求解,旨在确定最优水肥制度。结果表明,灌水量与施肥量及其耦合效应对小茴香各生长指标均具有显著影响;小茴香的果实品质、公顷产量、水分利用效率及肥料偏生产力随灌水量和施肥量的增加均表现出先升高后降低的单峰变化趋势,证实存在最佳水肥配比区间;最优灌溉与施肥处理为灌溉水平为4 200 m³/hm²,施肥水平为450 kg/hm²;通过NSGA-II模拟出的最优水肥制度为灌水量和施肥量分别为3 693.6 m³/hm²和536.19 kg/hm²。

关键词:小茴香;水肥耦合;水分利用效率;二元二次回归方程;NSGA-II 算法

中图分类号:S275.3 **文献标志码:**A

小茴香(*Foeniculum vulgare*)为耐旱耐盐的草本植物,其果实“茴香籽”既是调味香料,又具药用价值,经济价值突出,是重要的药食同源资源^[1]。宁夏海原县是我国小茴香的传统种植区^[2-4],近些年该地降水偏少导致土壤持续干旱。小茴香生育期受多重环境胁迫:苗期易受低温影响,生育后期则遭遇干旱与高温叠加胁迫,这使得传统优势产业的可持续性面临严峻考验^[5-6]。

优化水肥调控是缓解旱作物生长胁迫的关键路径,不合理的灌溉与施肥易造成土壤养分的失衡,造成作物减产及资源浪费^[7]。因此,需要构建科学的水肥协调体系,同步实现作物高产优质及资源高效利用^[8-9]。王晓军等^[10-11]指出,种植密度及水肥对小茴香生长指标与产量的影响存在差异,生产中需针对性调控水肥;秦梦等^[12]证实,增施适宜比例N,P,

K可有效提高产量;赵昕玥等^[13]发现,土壤盐分显著影响苗期株高、叶数、根系发育及脯氨酸等渗透调节物质含量,且合理水肥可缓解盐分影响。当研究转向水肥利用系数、精油积累与产量的协同机制时,针对小茴香具体作物的精准预测几近空白^[14-19]。

近年来,遗传算法因其在解决多目标优化问题中的科学性与可靠性备受瞩目,如赵文举等^[20-23]据此确定了最优水肥组合。本文以宁夏干旱区的小茴香为研究对象,围绕提升种植效益目标,探究不同灌水量与施肥量对其生长、水肥利用效率、精油质量分数及产量的非线性影响;构建水肥耦合下二元二次回归模型,结合NSGA-II算法进行多指标优化,在公顷产量、品质与水肥效率之间求解最优的水肥配比方案,为旱区小茴香栽培提供可量化依据,并为当地小茴香产业提供科学水肥管理方法。

收稿日期:2025-06-25

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2020AAC03042)

作者简介:李洋洋(2000—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究(1284958687@qq.com)。

*通信作者:李应海(1977—),男,副教授,博士,主要从事作物水分高效利用研究(li_yh@nxu.edu.cn)。

引用格式:李洋洋,李应海,王德全.基于NSGA-II模拟水肥耦合对小茴香产量及品质的影响[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(1):1-8.

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 3—9 月在宁夏海原县西安镇胡湾村(36°64'N, 105°51'E)进行。试验区海拔 1 366.0 m,属于典型的温带大陆性气候,四季分明,气候干燥。该区域年平均气温为 6~11℃,全年平均风速为 2.4 m/s,多年年均降水量为 334.5 mm,降水主要集中在 7—9 月份,年均蒸发量为 1 469.7 mm,最大冻土深度达 1.5 m。试验区日照充足,年均日照时数为 2 413.4 h,年均无霜期($\geq 2^\circ\text{C}$)为 157 d。试验土壤类型为黑垆土,田间持水率(水的质量分数)为 20.52%,土壤 pH 值为 8.86,有机质质量分数为 16.61 g/kg,铵态氮质量分数为 10.65 g/kg,有效磷质量分数为 9.74 g/kg,速效钾质量分数为 241.6 g/kg。试验期间的气象数据如图 1 所示。

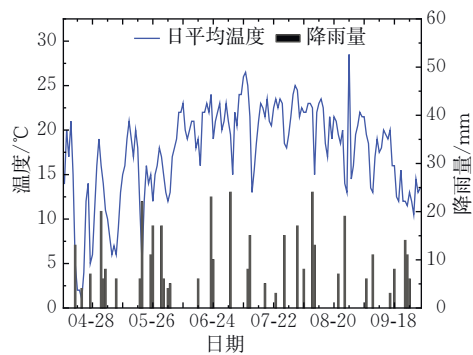


图 1 2023 年宁夏海原县气象数据

Fig. 1 Meteorological data for Haiyuan County, Ningxia, in 2023

1.2 试验设计

本试验选用宁夏小茴香的主栽品种——海原小

表 1 小茴香灌水、施肥试验设计

Tab. 1 Experimental design for fennel irrigation and fertilization

处理	苗 期		生长期		开花期		成熟期
	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	施肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	施肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)
W1F1	900	135			900	135	
W1F2	600	225	600		600	225	
W1F3	450	315	450		450	315	450
W2F1	1 500	135			1 500	135	
W2F2	1 000	225	1 000		1 000	225	
W2F3	750	315	750		750	315	750
W3F1	2 100	135			2 100	135	
W3F2	1 400	225	1 400		1 400	225	
W3F3	1 050	315	1 050		1 050	315	1 050

注:生长期与成熟期未施肥。

茴香,将其作为供试材料。对于肥料,采用当地种植户推荐的腐植酸型复合肥($w(\text{N}):w(\text{P}_2\text{O}_5):w(\text{K}_2\text{O})=18\%:18\%:18\%$)和硫基复合肥($w(\text{N}):w(\text{P}_2\text{O}_5):w(\text{K}_2\text{O})=15\%:32\%:6\%$),均由湖北新洋丰农业科技股份有限公司生产。对于种肥和追肥,均采用按 1:1 的质量比混合均匀的腐植酸型复合肥与硫基复合肥。小茴香于 2023 年 3 月 22 日播种,4 月 29 日出苗,6 月 8 日定植,9 月 14 日收获。播种前施用农家肥 4 500 kg/hm^2 作为底肥,播种前灌溉水量为 2 700 kg/hm^2 。播种采用穴播方式,带肥播种(种子 22.5 kg/hm^2 ,复合肥 75 kg/hm^2)。灌溉方式采用滴灌,追肥采用条施法,行间距与株间距均为 25 cm,定植密度为 16 万株/ hm^2 。整个生育期内,定期清理杂草并开展病虫害防治,以确保作物健康生长。

本试验采用水、肥双因素三水平处理方法:A 因素为灌溉定额,分为 W1(1 800 m^3/hm^2 ,低水),W2(3 000 m^3/hm^2 ,中水),W3(4 200 m^3/hm^2 ,高水);B 因素为施肥量,分为 F1(270 kg/hm^2 ,低肥),F2(450 kg/hm^2 ,中肥),F3(630 kg/hm^2 ,高肥),共 9 个处理。每个小区面积为 6.8 m^2 (2 m \times 3.4 m),每个处理 3 次重复,各小区之间通过埋设 1 m 深的大棚塑料膜进行隔离,以防水分渗漏,试验处理如表 1 所示。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 小茴香生长测定 试验开始时,在各处理小区随机取 5 株进行标记,采用卷尺与游标卡尺每隔 12 d 测定这些代表性植株的株高、茎粗。在盛花期统计单株上的花序数。采收时,用精度为 0.01 cm

的游标卡尺测量小茴香种子的横茎和纵茎。最后,将已标记的植株带根挖出,用精度为 0.01 g 的实验室电子天平称量茎鲜质量、根鲜质量、单株种子产量。

1.3.2 果实产量与品质 小茴香果实成熟后,对每个处理小区随机标记的 5 株代表性植株的 1 000 颗种子称量并折算为公顷产量。采取蒸馏萃取法^[24],将不同处理下的种子打碎,过 40 目筛,按质量比 1:10 的比例,加入 50 g 种子粉末和 500 mL 蒸馏水于烧瓶中,外部接数字显示恒温加热器,上端连接冷凝管和连通器,设定加热温度为 110 ℃,当有蒸汽出现时,打开冷凝水,使含有精油的蒸汽冷凝回流到连通器中,蒸馏时间为 3 h。所得精油用无水硫酸钠干燥,对精油进行称量和计算,每个处理重复 3 次操作,取平均值^[25]。

1.3.3 水肥利用效率 灌溉水分利用效率(IWUE, kg/m³)的计算公式为

$$IWUE=Y/W。 \quad (1)$$

式中:Y 为小茴香每公顷产量,kg;W 为全生育期小茴香每公顷耗水量(灌溉水量和降雨量),m³。

肥料偏生产力(PEP)的计算公式为

$$PEP=Y/F。 \quad (2)$$

式中:Y 为小茴香每公顷产量,kg;F 为每公顷投入肥料总质量,kg。

1.4 NSGA-Ⅱ 算法

NSGA-Ⅱ 算法开始执行时,先构建规模为 *N* 的初始种群,再对其实施非支配排序。经选择、交叉、变异等遗传操作完成迭代优化,同步计算个体拥挤度以生成新子代,此过程循环往复直至满足终止条件。相较于传统遗传算法,NSGA-Ⅱ 算法的核心优势在于:依托 Pareto 最优的非支配排序,精准筛选较优个体;通过拥挤度计算维系解集分布均匀性;精英策略可提升种群多样性与计算效率,并保留优良基因。获得的标准化编码值如表 2 所示,标准化公式为

$$X=\frac{X_i-\bar{X}}{\sigma}。 \quad (3)$$

式中:X 为数据进行标准化之后的编码值; X_i 是将进行标准化编码处理的数据; \bar{X} 为数据的均值; σ 为数据的标准差。

本研究选取灌水量与施肥量作为双因素,在预设灌水及施肥梯度约束条件下,针对小茴香精油质量分数、公顷产量、水分利用效率及肥料偏生产力 4 项指标开展二元二次回归拟合,构建相应预测模型。

进一步建立优化目标的四目标优化模型,并运用 NSGA-Ⅱ 算法求最优解。

表 2 试验因子编码值

Tab. 2 Coding of experimental factors

处理	灌水量编码值 X_1	施肥量编码值 X_2	灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	施肥量/ (kg·hm ⁻²)
W1F1	-1.224 5	-1.154 7	1 800	270
W1F2	-1.224 5	0	1 800	450
W1F3	-1.224 5	1.154 7	1 800	630
W2F1	0	-1.154 7	3 000	270
W2F2	0	0	3 000	450
W2F3	0	1.154 7	3 000	630
W3F1	1.224 5	-1.154 7	4 200	270
W3F2	1.224 5	0	4 200	450
W3F3	1.224 5	1.154 7	4 200	630

1.5 数据处理

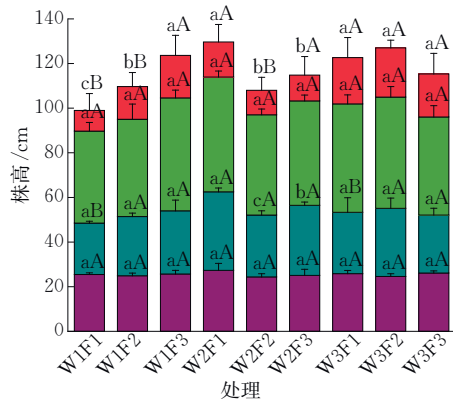
数据处理采用 Excel 2023,采用 SPSS 25 进行双因素方差分析与 Duncan 多重比较($P<0.05$)。利用小茴香水肥利用效率、果实品质及公顷产量数据建立二元二次回归方程,并通过 MATLAB 2023a 实现模型拟合,图表由 Origin 2024 绘制。

2 结果与分析

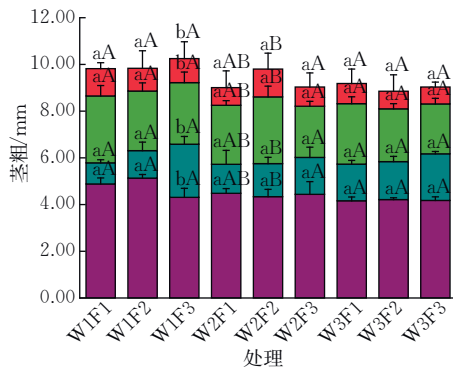
2.1 水肥耦合对小茴香生育期株高和茎粗的影响

图 2 显示了不同水肥调控处理对小茴香株高和茎粗的影响。可见,不同水肥处理对旱区小茴香株高与茎粗表现出差异化调控效应。在灌溉水平定额一致条件下,株高随着施肥梯度的增加而增加;但在开花期和成熟期,株高随着灌溉量的增加呈现先增加后降低的变化趋势;适度灌溉更利于植株纵向生长。相比之下,茎粗则随着灌溉定额的增加而递减,这表明过高灌溉量投入可能对茎部生长产生抑制作用。不同处理间,W2F1 处理所得株高最高,达 131.53 cm,比 W1F1 处理所得最低株高(97.22 cm)高出 34.31%。而茎粗表现出不同趋势,W1F3 处理

所得茎粗最高,达到 10.20 mm,表明在较低灌水量和较高施肥量的条件下,更利于小茴香的横向生长。



a 水肥耦合对株高的影响



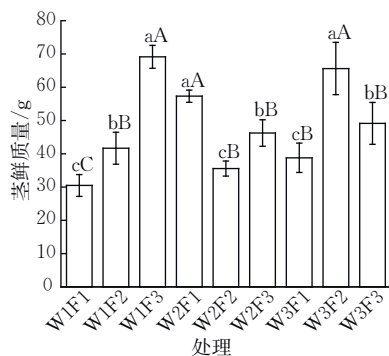
b 水肥耦合对茎粗的影响

成熟期 开花期
生长期 苗期

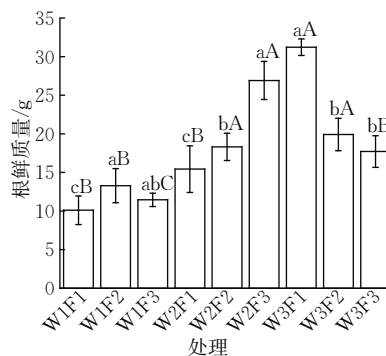
注:柱上小写字母表示不同施肥量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义,柱上大写字母表示不同灌水量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义。

图 2 水肥耦合对小茴香生育期间株高和茎粗的影响

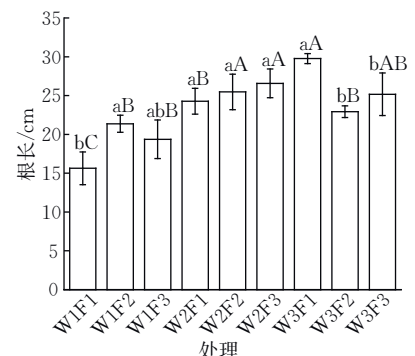
Fig.2 Effects of water-fertilizer coupling on plant height and stem diameter of fennel during the growth period



a 水肥耦合对茎鲜质量的影响



b 水肥耦合对根鲜质量的影响



c 水肥耦合对根长的影响

注:柱上小写字母表示不同施肥量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义,柱上大写字母表示不同灌水量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义。

图 3 水肥耦合对小茴香茎鲜质量、根鲜质量和根长的影响

Fig.3 Effects of water-fertilizer coupling on stem fresh mass, root fresh mass and root length of fennel

2.2 水肥耦合对小茴香茎鲜质量和根系特征的影响

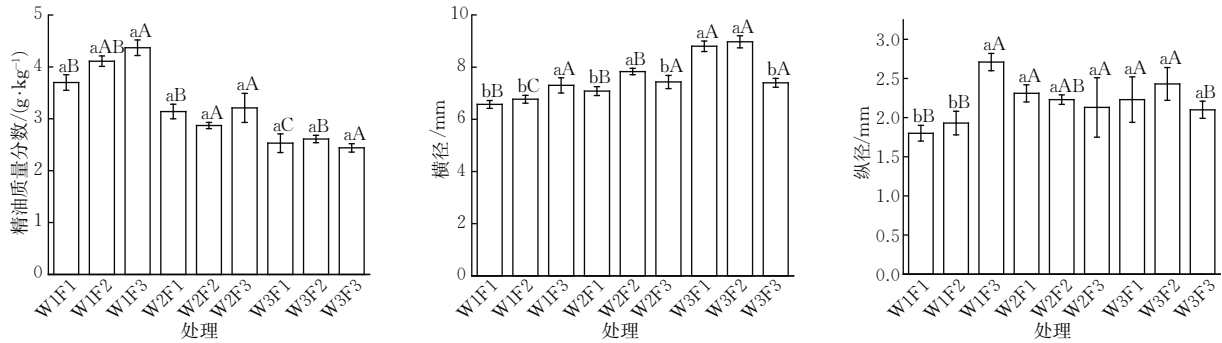
图 3 显示了不同水肥调控处理对小茴香茎鲜质量、根鲜质量和根长的影响。结果表明,茎鲜质量对水肥控制的响应呈现剂量-效应关系:方差分析显示,灌溉量与施肥量均具有显著的主效应($P < 0.05$)。在 W1 灌溉水平下,茎鲜质量随着施肥量的增加而增加;而在整体水肥调控下,茎鲜质量呈现先增加后下降的趋势,其中, W1F3 处理所得茎鲜质量最高,达 69.13 g,高水高肥配置未能形成最大生物累积量。灌溉定额波动对根鲜质量表现极显著($P < 0.01$),施肥量效应对根鲜质量的影响同样显著($P < 0.05$)。在施肥量一定的处理下,根鲜质量随着灌水量的增加表现出增加趋势,最大值出现在 W3F1 处理下(31.21 g),表明适量水分灌溉有助于根系生物量累积,但过量灌水、施肥反而可能抑制根系发育,形成负反馈。此外,灌溉定额和施肥量对小茴香根长的影响均达到差异具有统计学意义的水平($P < 0.01$)。在相同灌溉定额处理下,与施肥量 F2, F3 处理相比,施肥量 F1 处理显著抑制了根长;在施肥量 F1, F2 处理下,灌水量对根长产生了明显影响;在施肥量 F3 处理下,灌水量 W1 处理显著抑制了根长。这说明适度的水肥管理有助于促进根系生长,而灌溉与施肥量不足或过剩可能抑制根系生长。

2.3 水肥耦合对小茴香果实品质的影响

不同水肥调控处理对小茴香果实成熟后精油质量分数及果实形态(横径、纵径)的影响如图 4 所示。双因素方差分析表明,灌水量和施肥量对上述 3 个指标均达到显著效应水平($P < 0.01$)。精油质量分数在不同处理间波动幅度较大,峰值出现在 W1F3

处理下(4.37 g/kg);最小值出现在 W3F3 处理下(2.44 g/kg)。在特定灌水水平 W1 下,随着施肥梯度的增加,精油质量分数呈上升趋势。综合来看,随着灌水量和施肥量的整体增加,精油质量分数总体呈现下降趋势,表明适度减少灌水量有利于果实中

精油产物的累积。果实形态方面,横径表现出对灌水量的正向响应,最大值出现在 W3F2 处理下(8.97 mm);纵径随灌水量增加呈先上升后下降的趋势,最大值出现在 W1F3 处理下(2.70 mm),表明过高的灌水量可能对果实纵向生长产生抑制。



a 水肥耦合对果实精油质量分数的影响 b 水肥耦合对果实横径的影响 c 水肥耦合对果实纵径的影响

注:柱上小写字母表示不同施肥量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义,柱上大写字母表示不同灌水量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义。

图 4 水肥耦合对小茴香果实精油质量分数、横径和纵径的影响

Fig.4 Effects of water-fertilizer coupling on essential oil content and fruit transverse and longitudinal diameters of fennel

2.4 水肥耦合对小茴香产量的影响

不同水肥调控处理对小茴香单株产量、每公顷产量、千粒质量和花序数的影响如表 3 所示。可知,水肥配置对小茴香每公顷产量具有显著的调控效应,每公顷产量峰值出现于 W3F2 处理下(3728.25 kg),较 W1F1 处理下每公顷产量(2 421.25 kg)显著提高;在试验设置梯度内,小茴香每公顷产量随灌水定额与施肥水平的双重提升呈现递增趋势;小茴香单株产量的最大值出现在 W3F2 处理下(36.53 g),最小值出现在 W1F1 处理下(12.43 g);随着灌溉水量

的加大,单株产量呈现出先增加后下降的趋势。不同处理下,单株花序数受水肥管控影响极显著 ($P < 0.01$),在 W2, W3 水平下,单株花序数随着施肥量的增大先增加后下降。综上,灌水量与施肥量构成了小茴香公顷产量的关键限制因子,水肥量需控制在适宜范围内,以避免果实生长受抑制或资源无效消耗。

2.5 水肥耦合对小茴香产量、品质和水肥利用效率的效应

将小茴香精油质量分数(f_1)、公顷产量(f_2)、水

表 3 水肥耦合对小茴香单株产量、每公顷产量、千粒质量和单株花序数的双因素方差分析结果

Tab. 3 Results of two-way ANOVA for the effects of water-fertilizer coupling on per-plant yield, yield per hectare, 1 000-grain weight, and number of inflorescence per plant in fennel

处理	每公顷产量/kg	千粒质量/g	单株产量/g	单株花序数/个
W1F1	2 421.25±159.42 cC	9.64±0.15 cC	12.43±0.93 bC	15.33±2.08 bC
W1F2	2 705.85±183.41 bC	10.63±0.27 bB	13.70±2.12 bC	16.00±1.00 bB
W1F3	3 064.40±44.25 aB	12.04±0.07 aA	17.60±1.57 aC	21.33±1.53 aB
W2F1	2 895.5±125.92 bB	11.90±0.11 aB	16.44±3.26 cB	19.00±1.00 cB
W2F2	3 092.00±126.28 abB	11.62±0.08 aB	19.46±0.60 bB	28.33±0.58 aA
W2F3	3 310.20±73.3 aA	11.50±0.14 aB	24.38±3.63 aB	23.33±2.52 bB
W3F1	3 260.65±58.83 bA	12.52±0.58 aA	20.46±1.02 cA	25.67±2.52 cA
W3F2	3 728.25±132.45 aA	12.90±0.11 aA	36.53±2.10 aA	41.33±2.52 aA
W3F3	3 449.05±90.12 bA	11.71±0.10 bB	27.42±2.05 bA	33.67±1.53 bA

注:表中小写字母表示不同施肥量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义,表中大写字母表示不同灌水量在 $P < 0.05$ 水平差异具有统计学意义。

分利用效率(f_3)及肥料偏生产力(f_4)作为因变量, x_2)作为自变量,运用四元二次回归分析拟合,构建灌溉水量与施肥量的标准化编码值(分别记为 x_1 , 回归模型,结果如表 4 所示。

表 4 水肥调控编码因子与精油质量分数、公顷产量、水分利用效率、肥料偏生产力之间的回归关系

Tab. 4 Regression relationships between coded irrigation and fertilization factors and essential oil mass ratio, yield per hectare, water use efficiency, and partial factor productivity of fertilizer

回归方程	R^2	P
$f_1 = 4.19 - 0.32x_1 - 0.15x_1^2 - 0.08x_2 - 0.21x_2^2 + 0.02x_1x_2$	0.96	<0.01
$f_2 = 3769.38 + 132.83x_1 - 111.25x_1^2 + 106.58x_2 - 108.06x_2^2 - 8.98x_1x_2$	0.89	<0.01
$f_3 = 1.07 - 0.09x_1 - 0.09x_1^2 + 0.05x_2 - 0.07x_2^2 - 0.014x_1x_2$	0.91	<0.01
$f_4 = 0.79 + 0.06x_1 - 0.07x_1^2 + 0.04x_2 - 0.06x_2^2 - 0.024x_1x_2$	0.92	<0.01

回归分析表明,灌溉水量和施肥量对各因变量的影响均显著($P < 0.05$),其中,公顷产量和肥料偏生产力的回归关系达极显著水平($P < 0.01$)。模型决定系数较高(0.89~0.96),表明灌溉水量和施肥量对小茴香生长发育影响显著,模型拟合度好,可用于表征观测值并进行预测。一次项系数分析显示,灌溉水量和施肥量对小茴香生长发育均呈正向影响。其中,施肥量对果实精油质量分数和公顷产量的影响程度略低于灌溉水量,表明水分是果实生长和品质形成的关键因素。

如图 5 所示,水肥耦合效应对小茴香精油质量分数、公顷产量及水肥利用效率影响显著,不同指标的响应函数均呈现开口向下的抛物面关系,表明存

在最优水肥组合,以协同促进生长。具体而言,水分利用效率(WUE)和肥料偏生产力(PFP)均受水肥交互作用影响。固定灌溉水量时,水分利用效率随施肥量的增加呈现先升后降的趋势;固定施肥量时,水分利用效率随着灌溉水量的增加亦呈现先升后降的规律。精油质量分数、公顷产量及水肥利用率随着水肥量的增加而提升,但超过临界值后下降。W1F1 处理下,水肥不足导致品质和产量偏低;W3F3 处理下,水肥过量则抑制了品质和产量。综合分析表明,中等水肥水平下,耦合效应最佳,可实现最优产量、品质及较高的水肥利用率,进一步证实了适宜水肥管理对小茴香生产效益起到关键作用。

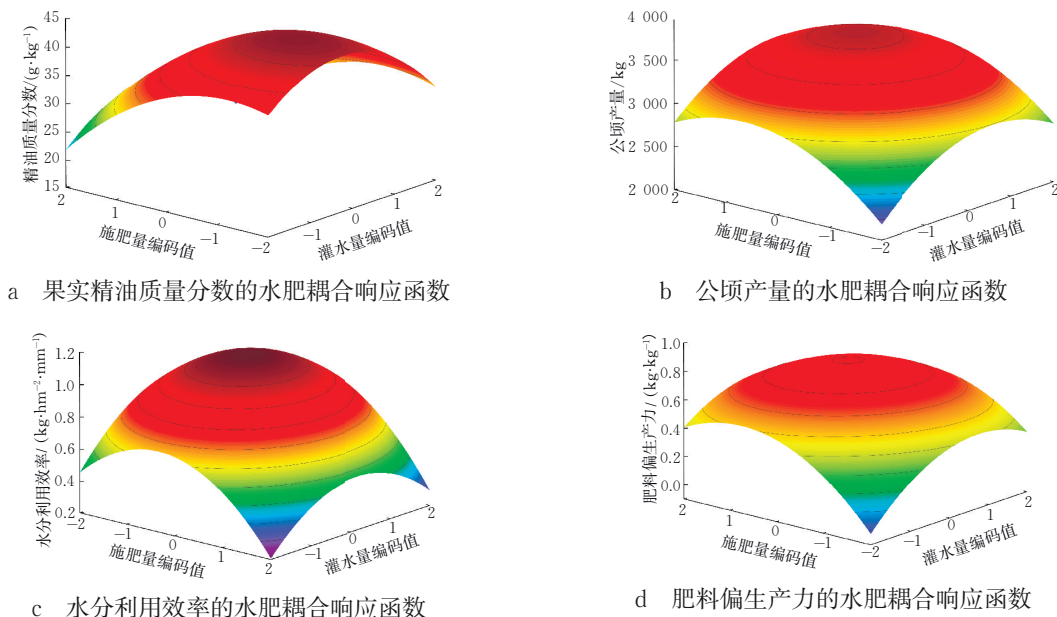


图 5 水肥效应耦合图

Fig. 5 Reponse surfaces for the coupled effects of irrigation and fertilization

2.6 基于 NSGA-Ⅱ 算法的四目标优化模型

为寻求小茴香水肥利用效率、精油质量分数和公顷产量的最优组合,建立基于 NSGA-Ⅱ 算法的四

目标优化模型,变量范围为 $-1.2245 \leq x \leq 1.2245$, $-1.1547 \leq y \leq 1.1547$ 。采用 MATLAB 求解该模型的双目标 Pareto 前沿,设置参数为种群规模 300,

最大遗传代数 400, 突变强度 0.2, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.1, 求解所得 Pareto 非劣解集的最优解对应的编码值后, 进而确定最优灌溉水量和施肥量, 分别为 $3\ 693.6\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $536.19\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。此方案下, 小茴香果实精油质量分数为 $38.78\ \text{g}/\text{kg}$, 公顷产量为 $3\ 832.77\ \text{kg}$ 。与公顷产量最优的 W3F2 处理相比, 灌溉水量可减少 12.07%, 公顷产量可提高 2.81%, 精油质量分数可提高 40.74%。

3 结论与讨论

3.1 结论

建立合理的水肥管理策略是实现小茴香优质高产的关键, W3F2 处理下(灌溉水量 $4\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 施肥量 $450\ \text{kg}/\text{hm}^2$)的小茴香千粒质量($12.9\ \text{g}$)、单株产量($36.53\ \text{g}$)、公顷产量($3\ 728.25\ \text{kg}$)及单株花序数表现均最优。在相同灌溉水平下, 增加施肥量可显著提高小茴香公顷产量、灌溉水分利用效率及肥料偏生产力。将灌溉水量与施肥量作为自变量, 构建涵盖小茴香精油质量分数、公顷产量、水分利用效率及肥料偏生产力的二元二次回归模型, 有效解析了水肥因子对各目标指标的非线性影响; 进一步采用 NSGA-II 算法进行多目标优化求解, 获得 Pareto 最优解集。优化结果显示, 在灌溉水量为 $3\ 693.6\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 施肥量为 $536.19\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 的条件下, 可同时实现小茴香果实精油质量分数为 $38.8\ \text{g}/\text{kg}$ 和公顷产量为 $3\ 832.77\ \text{kg}$ 的协同最优。

3.2 讨论

灌溉水量和施肥量的增产效应并非简单的线性积累, 合理的水肥耦合方案可实现高产与高效的协同。本试验的小茴香栽培中, 灌溉水量对产量具有显著调控影响, 不同水肥组合处理下的产量存在明显差异; 适量增加灌溉水量有助于提升小茴香的产量、花序数以及果实形态; 若水肥投入超过阈值, 反而会对产量形成抑制效应, 这一规律已与多项研究相吻合^[26-29]。陈华斌等^[30]对西兰花的栽培研究表明, 其产量与可溶性蛋白质量分数随着水肥用量的增加呈先升后降的趋势。本试验进一步分析表明, 小茴香的精油质量分数等品质同样受到水肥调控的显著制约。基于本研究构建的产量与品质等指标的回归模型, 分析发现, 水肥施用量与精油质量分数等品质参数间呈典型开口向下的抛物面特征, 说明当接近最优水肥区间时, 品质提升的边际效应逐渐递减, 该趋势与常子康等^[20]的研究结果相符。从水肥利用效率来看,

灌溉水量和施肥量对水分利用效率及肥料偏生产力的影响均达到极显著水平($P < 0.01$)。本研究为旱区小茴香实现精细化水肥管理提供了理论依据和实践范式。

参考文献:

- [1] 李晓微, 郭文场, 周淑荣. 北方地区小茴香标准化栽培技术[J]. 特种经济动植物, 2019, 22(12): 25-26.
- [2] 王朝昀. 小茴香高产栽培技术[J]. 乡村科技, 2021, 12(14): 49-50.
- [3] 吉红玉, 邵蒙苏, 余海霞, 等. 小茴香的临床应用及其用量探究[J]. 吉林中医药, 2020, 40(9): 1222-1224.
- [4] 王金金, 毋启桐, 时博, 等. 小茴香炮制历史沿革、化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(20): 178-190.
- [5] 李述成. 海原县小茴香产业发展现状及制约因素分析[J]. 宁夏农林科技, 2007, 48(6): 43.
- [6] 刘缙, 吴科, 徐璐娜. 海原县小茴香适宜生长气象条件分析[J]. 宁夏农林科技, 2018, 50(10): 60-62.
- [7] Razavi S M, Ghorbanian A, Abadi A. Impact of drought stress on growth - yield parameters, volatile constituents and physio-biochemical traits of three fenniculum vulgare genotypes [J]. Agricultural Research, 2022, 11(4): 591-607.
- [8] 吴科生, 车宗贤, 卢秉林, 等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量和水分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 104-109.
- [9] Dai Z G, Fei L J, Huang D L, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 146-154.
- [10] 王晓军, 刘华, 马斌, 等. 干旱地区不同颜色覆膜对土壤水热及茴香产量的影响[J]. 北方园艺, 2024(5): 75-81.
- [11] 王晓军, 李晓慧, 刘华. 不同种植密度对茴香菜苗生长及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(2): 118-123.
- [12] 秦梦, 张益铭, 杨兴栋, 等. 配方施肥对小茴香生长和产量的影响[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(16): 200-202.
- [13] 赵昕玥, 王晓敏, 赵云雅, 等. 不同地区小茴香苗期耐盐性综合评价及耐盐指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024(7): 125-135.
- [14] 王月丽, 祝海竣, 文帅, 等. 水肥耦合对水稻产量形成和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(12): 80-85.
- [15] 谷强远, 刘义国, 冯木彩, 等. 滴灌水氮耦合对不同土壤冬小麦产量构成及水肥利用的影响[J]. 山

- 东农业科学, 2021, 53(10): 47-55.
- [16] 丛鑫, 张立志, 徐征和, 等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 315-324.
- [17] 杜常亮, 王秀康, 王宁, 等. 水肥耦合对陕北温室马铃薯水肥吸收和产量的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(14): 4840-4850.
- [18] Dou X Y, Wang R S, Zhou X, et al. Soil water, nutrient distribution and use efficiencies under different water and fertilizer coupling in an apple - maize alley cropping system in the Loess Plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218: 105308.
- [19] 张俊, 王小昌, 崔晓路, 等. 灌溉量和氮肥增效剂对夏玉米产量及水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 123-132.
- [20] 常子康, 梁国成, 彭艳平, 等. 基于产量品质及水肥利用率的核桃水肥耦合方案优化[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(3): 162-172.
- [21] 赵文举, 曹伟, 吴克倩, 等. 盐碱地水肥耦合对基质栽培番茄生长与产量品质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 619-626.
- [22] Jalili A A, Najarchi M, Shabanlou S, et al. Multi-objective Optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(6): 16464-16475.
- [23] 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.
- [24] 王情, 黄谊, 王未, 等. 小茴香精油的提取工艺研究[J]. 云南化工, 2023, 50(6): 17-19.
- [25] 祁天成, 李应海, 李洋洋. 不同灌溉和施肥量对小茴香生长、产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(1): 66-75.
- [26] 胡晓辉, 高子星, 马永博, 等. 基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 81-89.
- [27] 雷菲, 潘孝忠, 张治军, 等. 灌溉施肥模式对海南辣椒产量和水肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 20-29.
- [28] 许鸿达, 何维海, 钟秀娟, 等. ‘兰引Ⅲ号’结缕草对水肥耦合的响应机制研究[J]. 草地学报, 2024, 32(10): 3252-3261.
- [29] 高晶霞, 裴红霞, 张清云, 等. 水肥耦合对黄花菜生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024(S1): 5-8.
- [30] 陈华斌, 田军仓, 李王成, 等. 基于水肥耦合的滴灌西兰花光合-产量-品质试验及综合评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 235-242.

NSGA-II-Based Simulation of the Effects of Water-Fertilizer Coupling on Fennel Yield and Quality

LI Yangyang^{1,2,3}, LI Yinghai^{1,2,3*}, WANG Dequan^{1,2,3}

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Ningxia Engineering Research Center for Water-Saving Irrigation and Water Resources Regulation, Yinchuan 750021, China; 3.Engineering Research Center of Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture for Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Addressing the low water and fertilizer use efficiency and the lack of well-defined, high-efficiency management regimes for fennel in the arid region of Ningxia, this study investigated the effects of coupled irrigation and fertilization on the physiological traits, fruit quality, and yield of fennel (*Foeniculum vulgare*) cultivated in Haiyuan County, Zhongwei City, Ningxia. A two-factor, three-level factorial experiment was conducted with three irrigation levels (1 800, 3 000, 4 200 m³/hm²) and three fertilization levels (270, 450, 630 kg/hm²), yielding nine treatments. Second-order (quadratic) polynomial regression models were developed to relate irrigation and fertilization amounts to essential oil content, yield per hectare, water use efficiency, and the partial factor productivity of fertilizer. The non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was then used to optimize these models and identify the optimal water-fertilizer regime. The results indicate that irrigation, fertilization, and their interaction significantly affected all fennel growth indices. Essential oil content, yield per hectare, water use efficiency, and partial factor productivity exhibited unimodal responses, increasing initially and then decreasing with higher irrigation and fertilization inputs, indicating the existence of an optimal supply range. The optimal treatment was 4 200 m³/hm² of irrigation combined with 450 kg/hm² of fertilizer. NSGA-II optimization recommended an irrigation amount of 3 693.6 m³/hm² and a fertilization amount of 536.19 kg/hm² as the optimal water-fertilizer regime.

Keywords: *Foeniculum vulgare*; water-fertilizer coupling; water use efficiency; quadratic polynomial regression; NSGA-II

(责任编辑 李 琼)