网络出版时间:2025-10-31 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.04.010

基于NSGA-Ⅲ算法优化滴灌苹果灌水量及施肥量

张在男[1,2],赵经华[1,2],秦伟[3],徐静波[1,2],范子奥[1,2],谢香文[4]

(1 新疆农业大学 水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052;3 新疆和田学院,新疆 和田 848000;4 新疆农业科学院 土壤肥料与农业节水研究所,新疆 乌鲁木齐 830091)

[摘 要] 【目的】探究干旱区水肥耦合对滴灌苹果生长、产量、品质及水肥利用效率的影响,并优化滴灌苹果的灌水量和施肥量,以实现节水节肥和提质增效的目的。【方法】以新疆阿克苏市8年生苹果树为试验对象,开展滴灌苹果田间试验,试验设置3个灌水量梯度(低水675 mm(W1)、中水800 mm(W2)、高水925 mm(W3))和3个施肥量梯度(低肥562.5 kg/hm^2(F1)、中肥750.0 kg/hm^2(F2)、高肥937.5 kg/hm^2(F3)),进行完全组合设计,共9个处理,测定不同处理苹果果实生长、产量、品质及水肥利用效率;在此基础上,以苹果产量、灌溉水利用效率、肥料偏生产力、可溶性固形物含量、果肉硬度为目标,构建多目标的灌水量和施肥量二元二次回归模型,利用第三代非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅲ)对回归模型进行验证求解,最终筛选出灌水量和施肥量的最优解。【结果】不同水肥耦合处理对苹果果实生长、产量和品质以及灌溉水利用效率、肥料偏生产力有明显影响。9个处理中,W2F2处理全生育期的果实纵径、横径均最高,分别为51.51和60.11 mm;产量最高,达到62.24 t/hm^2;单果质量、果形指数、可溶性固形物含量最高,分别为296.68 g、0.84和15.30%;果肉硬度较高,为8.96 kg/cm^2;灌溉水利用效率及肥料偏生产力较高,分别为77.80 kg/(hm^2·mm)和82.98 kg/kg。通过NSGA-Ⅲ算法验证并求解,确定最优的灌水量和施肥量分别为821.11 mm、783.22 kg/hm^2,对应的苹果产量、灌溉水利用效率、肥料偏生产力、可溶性固形物含量及果肉硬度分别为66.68 t/hm^2、79.73 kg/(hm^2·mm)、84.52 kg/kg、15.47%、9.16 kg/cm^2,以上指标均优于表现较佳的W2F2处理。【结论】适宜的灌水量和施肥量能明显促进苹果果实生长发育,提高产量和改善品质以及节水节肥。通过NSGA-Ⅲ算法得到了最优的灌水量和施肥量。

[关键词] 苹果;滴灌;水肥耦合;NSGA-Ⅲ算法;灌水量

[中图分类号] S661.1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)04-0081-11

Optimization of the irrigation amount and fertilizer amount of drip irrigation apple based on NSGA-Ⅲ algorithm

ZHANG Zainan[1,2], ZHAO Jinghua[1,2], QIN Wei[3], XU Jingbo[1,2], FAN Zi'ao[1,2], XIE Xiangwen[4]

(1 *College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 2 *Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 3 *Hotan University, Hotan, Xinjiang* 848000, *China*; 4 *Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang* 830091, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aimed to investigate the effects of water-fertilizer coupling on the growth, yield, quality, and water-fertilizer use efficiency of drip-irrigated apple trees in arid regions, and to optimize the irrigation and fertilization amounts for drip-irrigated apples, to save water and fertilizer while improving quality and efficiency. 【Method】 An 8-year-old apple orchard in Aksu City was selected for the field experi-

[收稿日期] 2024-12-23 [修回日期] 2025-03-05

[基金项目] 新疆林果产业技术体系项目(XJLGCYJSTX04-2024);新疆维吾尔自治区"十四五"重大专项(2023A02002-5)

[作者简介] 张在男(2000—),男,四川资阳人,在读硕士,主要从事灌溉节水理论研究。E-mail:2636597557@qq.com

[通信作者] 赵经华(1979—),男,新疆奇台人,教授,博士,博士生导师,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail:105512275@qq.com

中国知网 https://www.cnki.net

ment. The experiment included three irrigation levels (low water: 675 mm (W1), medium water: 800 mm (W2), high water: 925 mm (W3)) and three fertilization levels (low fertilizer: 562.5 kg/hm^2 (F1), medium fertilizer: 750.0 kg/hm^2 (F2), high fertilizer: 937.5 kg/hm^2 (F3)), with a full factorial design resulting in nine treatments. The growth, yield, quality, and water-fertilizer use efficiency of apple trees under different treatments were measured. Based on these results, a multi-objective binary quadratic regression model for irrigation amount and fertilization amount was constructed, with apple yield, irrigation water use efficiency, partial fertilizer productivity, soluble solid content, and flesh firmness as the target. The third-generation non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅲ) was used to validate and solve the regression model, ultimately identifying the optimal irrigation and fertilization amounts.【Result】Different water-fertilizer coupling treatments significantly affected apple fruit growth, yield, quality, irrigation water use efficiency, and partial fertilizer productivity. Among the nine treatments, the W2F2 treatment showed the highest fruit longitudinal diameter (51.51 mm) and transverse diameter (60.11 mm) throughout the growth period. It also achieved the highest yield of 62.24 t/hm^2, along with the highest single fruit weight (296.68 g), fruit shape index (0.84), and soluble solid content (15.30%). The fruit firmness was relatively high at 8.96 kg/cm^2, the irrigation water use efficiency was relatively high at 77.80 kg/(hm^2·mm), and the partial fertilizer productivity was relatively high at 82.98 kg/kg. Through validation and solution of the NSGA-Ⅲ algorithm, the optimal irrigation and fertilization amounts were determined to be 821.11 mm and 783.22 kg/hm^2, respectively, corresponding to an apple yield of 66.68 t/hm^2, irrigation water use efficiency of 79.73 kg/(hm^2·mm), partial fertilizer productivity of 84.52 kg/kg, soluble solid content of 15.47%, and flesh firmness of 9.16 kg/cm^2. All of these indicators were better than those in the W2F2 treatment, which showed relatively good performance.【Conclusion】Appropriate irrigation and fertilization amounts can significantly promote apple growth, increase yield, improve quality, and save water and fertilizer. The optimal irrigation and fertilization amounts obtained through the NSGA-Ⅲ algorithm provide a basis for achieving high-quality, high-efficiency, water-saving, and fertilizer-saving apple production.

Key words: apple; drip irrigation; water-fertilizer coupling; NSGA-Ⅲ algorithm; irrigation amount

新疆阿克苏地区光照充足、昼夜温差大、高山雪水灌溉等独特的优势条件非常适宜苹果的生长[1]。阿克苏苹果独特的“冰糖心”品质,以及色泽鲜红、脆爽多汁、果肉细腻等特点,深受消费者喜爱[2]。阿克苏作为新疆苹果的核心产区之一[3],截至2023年,阿克苏地区苹果种植面积已达3.37万hm^2,总产量为81.72万t,苹果产业已成为当地的主要经济支柱之一。阿克苏地区苹果园灌溉常采用漫灌方式,并伴随高量肥料投入,这导致水肥利用效率较低。随着人们生活水平的不断提高,消费者对苹果品质的要求也越来越高[4]。因此,为促进阿克苏地区苹果的优质高效生产,亟须制定科学合理的灌溉施肥制度。

研究表明,合理的水肥处理可以有效促进苹果树的生长,提升果实的产量和品质,同时提升土壤肥力[5]。张军等[6]的研究表明,水肥一体化技术可以提高番茄的产量,适宜的水肥配比可以提高番茄的品质。白少倩[7]则证实,不同水肥组合处理骏枣的生长、产量和品质有显著差异,而水肥用量超过一定限值后会导致水分利用效率下降。李青青等[8]的研究指出,水肥耦合不仅能显著提高葡萄的水分和肥料利用效率,还能够改善土壤性质,从而实现葡萄高产优质的目标。因此,合理的灌溉和施肥是提升作物产量和品质的关键。

灌溉制度优化通常分为单目标优化与多目标优化,大多以作物产量最大化或综合效益最优为目标。王凯航[9]采用AquaCrop-FloPy和第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorted genetic algorithm-Ⅲ,NSGA-Ⅲ)耦合模型对玉米多目标灌溉制度进行了优化。康燕楠等[10]通过NSGA-Ⅲ算法与FloPy模型构建了灌区水资源多目标优化模型,实现了灌区水资源多目标的优化配置。宋健等[11]基于AquaCrop模型、NSGA-Ⅱ算法以及功效系数法,构建了适应多决策需求的灌溉制度多目标优化模型,较好地满足了不同决策情境的需求。

综上可知,水肥调控对作物的产量和品质具有积极作用,但在干旱区滴灌条件下,苹果生长的水肥耦合效应及水肥制度的优化仍需待进一步研究。

中国知网 https://www.cnki.net

本研究以阿克苏地区苹果为对象，探讨滴灌条件下水肥耦合对苹果产量、品质、水肥利用效率的影响，并通过构建包含苹果产量、灌溉水利用效率、肥料偏生产力、可溶性固形物含量和果肉硬度在内的5目标二元二次回归方程，结合NSGA-Ⅲ算法进行验证与求解，并基于熵权-Topsis法从中选择最优解，确定最优灌水量和施肥量，为干旱区滴灌苹果的水肥管理以及提质增效提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于2024年3月至10月在新疆农业大学国家良种基地（80°14′E，41°16′N，海拔1 133 m）进行。试验地点位于阿克苏市红旗坡十队，地处温带大陆性气候区，平均年日照时数为2 855～2 967 h，多年平均气温为11.2 ℃，极端高温高达40.9℃，极端低温达到－27.4 ℃，无霜期205～219 d，多年平均降水量为29.6～71.4 mm。

供试材料为树龄8年的苹果树，品种为‘新红一号’，种植株行距为3 m×4 m。试验地块平整，土壤质地以壤质土为主，苹果树长势一致。田间管理按照当地果园的常规操作进行，包括疏花疏果、果实套袋与摘袋、铺设反光膜以及病虫害防治等措施，确保试验条件与实际生产状况相符。

1.2　试验方案

试验设置3个灌水梯度（675，800和925 mm）及3个施肥梯度（562.5，750.0，937.5 kg/hm^2），进行完全组合设计，共9个处理，每个处理设置3次重复，每个试验小区面积60 m^2，每个小区5株苹果树，具体的灌水与施肥方案见表1，其中3月20日进行春灌；4月22日起每10 d为1个周期进行生育期灌水，生育期灌水截至9月12日，共计灌水15次；11月20日进行冬灌。灌溉采用滴灌技术，使用内镶贴片式滴灌带，滴头流量2 L/h，滴头间距为0.3 m；每行苹果树两侧各布置一条滴灌带，距离树干0.3 m，灌水量采用水表精确计量。施肥采用水肥一体化技术，每个处理配置单独施肥罐，实现“肥随水移”，试验中所用肥料包括氮肥（尿素，N含量为46%）、磷肥（磷酸一铵，N、P_2O_5含量分别为14%，46%）、钾肥（硫酸钾，K_2O含量为52%）。

表1　灌水与施肥方案

Table 1　Irrigation and fertilization scheme table

处理 Treatment	灌水量/mm Irrigation amount				施肥量/(kg·hm^{-2}) Fertilizing amount			
	春灌 Spring irrigation	生育期灌水 Growth period irrigation	冬灌 Winter irrigation	总灌水量 Total irrigation amount	N	P_2O_5	K_2O	总施肥量 Total fertilizer application
W1F1	150	375	150	675	225	225	112.5	562.5
W1F2	150	375	150	675	300	300	150.0	750.0
W1F3	150	375	150	675	375	375	187.5	937.5
W2F1	150	500	150	800	225	225	112.5	562.5
W2F2	150	500	150	800	300	300	150.0	750.0
W2F3	150	500	150	800	375	375	187.5	937.5
W3F1	150	625	150	925	225	225	112.5	562.5
W3F2	150	625	150	925	300	300	150.0	750.0
W3F3	150	625	150	925	375	375	187.5	937.5

1.3　测定指标与方法

1.3.1　*果实纵径、横径和果形指数*　根据苹果的生长特点，将生育期划分为开花坐果期（4月15日－5月15日）、幼果期（5月16日－6月15日）、果实膨大期（6月16日－9月10日）、成熟期（9月11日－10月20日）4个阶段。开花坐果20 d后，每个处理选择3株长势相近、无病虫害的苹果树进行标记，从每株树的东、西、南、北4个方向各选取1个果实标记，并使用游标卡尺每间隔10 d测量1次果实纵径和横径，并计算果形指数（最大纵径/最大横径）。最后统计幼果期、果实膨大期、成熟期和全生育期苹果纵径、横径以及果形指数的平均值。

1.3.2　*产量和品质*　在每个处理中选择3株长势相近的苹果树，将所有果实采摘后称质量并计数，折算为每公顷产量。测定苹果品质时，从每个处理中选择3株树，在同一高度从东、西、南、北4个方向各选择1个果实进行分析。采用电子秤测定单果质量，用手持折射仪测定可溶性固形物含量，用GY-4型硬度计测定果肉硬度。

1.3.3　*水肥利用效率*　灌溉水利用效率及肥料偏生产力的计算公式为：

$$IWUE = Y/W; \quad (1)$$

中国知网　https://www.cnki.net

$$PFP=Y/F。\quad(2)$$

式中:IWUE为灌溉水利用效率(kg/(hm²·mm)),Y为总产量(kg/hm²),W为总灌水量(mm),PFP为肥料偏生产力(kg/kg),F为总施肥量(kg/hm²)。

1.4 基于NSGA-Ⅲ算法的苹果灌水量和施肥量优化

NSGA-Ⅲ算法是一种基于第二代非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)的进化多目标优化算法[12]。NSGA-Ⅱ算法主要基于局部的种群密度进行选择,以每个个体为基准,考虑相对位置,由局部控制整体;而NSGA-Ⅲ算法则是通过分布均匀的参考点来控制种群的整体分布,以绝对均匀分布的参考点为基准,不受个体间相对位置的影响。NSGA-Ⅲ算法较NSGA-Ⅱ算法更适用于3个以上目标任务,同时计算效率更高[13]。

为了提高数据的可对比性和精度,本研究对苹果总灌水量及总施肥量进行了标准化处理[14],编码值见表2。

表2 灌水量和施肥量的编码值

Table 2 Coded values of irrigation amount and fertilization amount

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount		施肥量 Fertilization amount	
	灌水量/mm Irrigation amount	编码值 Coding value	施肥量/(kg·hm⁻²) Fertilizer amount	编码值 Coding value
W1F1	675	−1.202	562.5	−1.202
W1F2	675	−1.202	750.0	0
W1F3	675	−1.202	937.5	1.202
W2F1	800	0	562.5	−1.202
W2F2	800	0	750.0	0
W2F3	800	0	937.5	1.202
W3F1	925	1.202	562.5	−1.202
W3F2	925	1.202	750.0	0
W3F3	925	1.202	937.5	1.202

本研究将产量、灌溉水利用效率、肥料偏生产力、可溶性固形物含量和果肉硬度设定为优化目标,将其与灌水量和施肥量的编码值进行二元二次回归方程拟合,建立回归模型,进而构建包含产量、灌溉水利用效率、肥料偏生产力、可溶性固形物含量和果肉硬度的多目标优化模型[15],并利用NSGA-Ⅲ算法进行优化分析。

1.5 数据处理

数据处理与分析采用Excel 2021、MATLAB 2022b和Origin 2024软件进行整理、分析及绘图,显著性检验和方差分析则使用SPSS 25.0完成。

2 结果与分析

2.1 不同水肥耦合处理对苹果果实纵径和横径的影响

不同水肥耦合处理对各生育期苹果果实纵径、横径的影响见表3和表4。

表3 不同水肥耦合处理对各生育期苹果果实纵径的影响

Table 3 Effects of different water-fertilizer coupling treatments on the longitudinal diameter of apple fruits at various growth stages mm

处理 Treatment	幼果期 Young fruit stage	果实膨大期 Fruit expansion stage	成熟期 Mature period	全生育期 Whole growth period
W1F1	25.58±1.50 b	45.91±9.15 c	64.76±1.91 d	46.87±15.24 d
W1F2	26.71±1.29 ab	46.98±9.14 bc	65.29±2.56 d	47.81±15.07 cd
W1F3	27.57±2.11 ab	48.61±9.34 abc	66.90±2.47 bcd	49.28±15.36 abcd
W2F1	26.57±1.72 ab	47.11±9.78 bc	68.18±2.97 bc	48.62±16.28 bcd
W2F2	28.57±1.00 a	50.29±9.85 a	71.15±2.08 a	51.51±16.54 a
W2F3	28.38±1.29 a	49.02±9.74 ab	69.64±2.07 ab	50.39±16.10 abc
W3F1	27.09±1.58 ab	48.12±8.94 abc	66.14±2.18 cd	48.72±15.12 abcd
W3F2	27.72±1.31 ab	49.24±8.86 ab	67.42±2.05 bcd	49.78±15.29 abc
W3F3	28.36±1.68 a	50.18±9.87 a	69.66±2.21 ab	51.01±16.12 ab

中国知网 https://www.cnki.net

表 3（续）　Table 3 (continued)　　mm

处理 Treatment		幼果期 Young fruit stage	果实膨大期 Fruit expansion stage	成熟期 Mature period	全生育期 Whole growth period
	W	17.406**	10.995**	7.664**	11.638**
F	F	4.137*	5.471*	15.267**	7.536**
	W×F	0.029	0.015	0.154	0.009

注：W 表示灌水量，其后的 1，2，3 表示灌水量分别为 675，800，925 mm；F 表示施肥量，其后的 1，2，3 表示施肥量分别为 562.5，750.0，937.5 kg/hm^2。同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。* 表示有显著影响（$P<0.05$），** 表示有极显著影响（$P<0.01$）。下表同。

Note: W represents the irrigation amount, with 1, 2, and 3 indicating irrigation amounts of 675, 800, and 925 mm respectively; F represents the fertilizer application rate, with 1, 2, and 3 indicating fertilizer application rates of 562.5, 750.0, and 937.5 kg/hm^2 respectively. Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). * indicates a significant effect ($P<0.05$), and ** indicates a highly significant effect ($P<0.01$). The same below.

表 4　不同水肥耦合处理对各生育期苹果果实横径的影响

Table 4　Effects of different water-fertilizer coupling treatments on the transverse diameter of apple fruits at various growth stages　　mm

处理 Treatment		幼果期 Young fruit stage	果实膨大期 Fruit expansion stage	成熟期 Mature period	全生育期 Whole growth period
W1F1		26.52±2.18 b	54.67±11.90 b	79.18±2.56 c	55.68±20.20 b
W1F2		27.60±2.09 ab	55.53±12.53 ab	80.26±3.64 c	56.60±20.51 ab
W1F3		29.01±2.76 ab	57.74±12.35 ab	81.28±3.02 bc	58.27±20.42 ab
W2F1		27.84±2.23 ab	55.83±12.90 ab	81.26±3.82 bc	57.15±20.82 ab
W2F2		30.15±1.79 a	58.68±12.95 a	85.59±2.94 a	60.11±21.61 a
W2F3		29.45±1.83 ab	57.86±13.02 ab	84.48±2.54 ab	59.37±21.57 ab
W3F1		28.46±1.97 ab	57.39±12.29 ab	81.23±2.94 bc	58.03±20.43 ab
W3F2		29.15±1.67 ab	57.75±12.13 ab	82.39±2.93 abc	58.67±20.52 ab
W3F3		29.89±1.91 ab	58.47±12.85 ab	84.26±2.77 ab	59.59±21.24 a
	W	23.694**	21.128**	10.34**	18.83**
F	F	5.069*	5.172*	9.732**	6.63**
	W×F	0.163	0.058	0.127	0.039

从表 3 和表 4 可以看出，在 W1 和 W3 处理下，果实纵径和横径均随着施肥量的增大而增大；在 W2 处理下，果实纵径和横径均随着施肥量的增加先增大后减小。在相同施肥量下，果实纵径、横径均随着灌水量的增加总体呈先增大后减小的趋势，总体表现为 W2＞W3＞W1。这表明适宜的水肥组合更有利于苹果果实的生长。9 个处理中，W2F2 处理幼果期、果实膨大期、成熟期的纵径和横径均最高，分别为 28.57，50.29，71.15 mm 和 30.15，58.68，85.59 mm。与 W1F1 处理相比，W2F2 处理苹果的纵径分别提高了 11.69%，9.54%，9.87%，横径分别提高了 13.69%，7.33%，8.10%。

表 3 和表 4 显示，灌水量对各生育期及全生育期苹果果实纵径、横径有极显著影响（$P<0.01$）；施肥量对幼果期和果实膨大期苹果果实纵径、横径有显著影响（$P<0.05$），对成熟期和全生育期苹果果实纵径、横径有极显著影响（$P<0.01$）；灌水量与施肥量的交互作用对各生育期及全生育期苹果果实纵径、横径的影响均不显著（$P>0.05$）。

2.2　不同水肥耦合处理对苹果产量的影响

不同水肥耦合处理对苹果产量的影响见图 1。

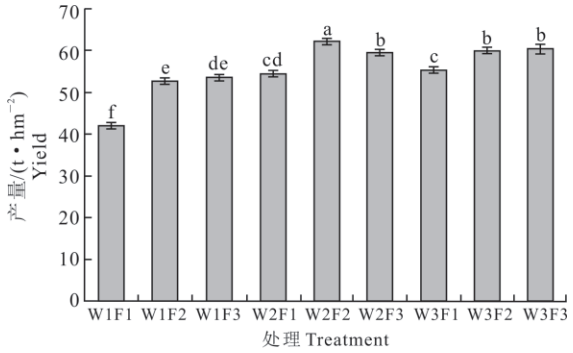


图 1　不同水肥耦合处理对苹果产量的影响

Fig. 1　Effects of different water-fertilizer coupling treatments on apple yield

图 1 显示，不同水肥耦合处理苹果产量有明显差异。W1 与 W3 处理下，苹果产量表现为 F3＞F2＞F1；而在 W2 处理下，苹果产量由大到小依次为 F2＞F3＞F1，表明高肥处理下苹果产量略有下降。在 F1、F3 处理下，苹果产量由大到小依次为 W3＞W2＞W1；而在 F2 处理下，苹果产量由大到小顺序为 W2＞

中国知网　https://www.cnki.net

W3>W1。总体来看,适宜的灌水量与施肥量组合能显著提高苹果产量。9个处理中,W2F2处理苹果产量最高,达到62.24 t/hm^2,较W1F1、W3F3处理分别提高了47.87%,2.74%。

2.3 不同水肥耦合处理对苹果品质的影响

不同水肥组合对苹果品质的影响如表5所示。表5显示,在W1与W3处理下,单果质量由大到小依次为F3>F2>F1;在W2处理下,则表现为F2>F3>F1。在F1与F3处理下,单果质量由大到小依次为W3>W2>W1;在F2处理下,则表现为W2>W3>W1。9个处理中,W2F2处理单果质量最大,为296.68 g;W1F1处理单果质量最小,为253.60 g。相比W1F1和W3F3处理,W2F2处理的单果质量分别提高了16.99%和1.79%。可见,适宜的灌水量与施肥量组合有助于单果质量的增加。各处理果形指数差异较小,其中W2F2处理最大(0.84),W1F1处理最小(0.78)。在W1与W3处理下,可溶性固形物含量由大到小依次为F3>F2>F1;而在W2处理下,则表现为F2>F3>F1。在F1与F2处理下,可溶性固形物含量由大到小依次为W2>W3>W1;而在F3处理下,则表现为W3>W2>W1。W2F2处理的可溶性固形物含量最高,为15.30%;W1F1处理最低,为11.21%。相比W1F1、W3F3处理,W2F2处理的可溶性固形物含量分别提高了36.49%和1.59%。同一灌水量下,果肉硬度由大到小依次为F3>F2>F1;同一施肥量下,果肉硬度由大到小依次为W3>W2>W1。9个处理中,W3F3处理的果肉硬度最高,为9.15 kg/cm^2;W1F1处理的果肉硬度最低,为8.31 kg/cm^2。相比W2F2、W1F1处理,W3F3处理的果肉硬度分别提高了2.12%和10.11%。

表5 不同水肥耦合处理对苹果品质的影响

Table 5 Effects of different water-fertilizer coupling treatments on apple quality

处理 Treatment		单果质量/g Weight of single fruit	果形指数 Fruit shape index	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	果肉硬度/(kg·cm^{-2}) Flesh fremness
W1F1		253.60±9.29 d	0.78±0.06 b	11.21±0.23 g	8.31±0.05 e
W1F2		264.55±11.49 cd	0.80±0.06 ab	12.01±0.26 f	8.72±0.09 cd
W1F3		274.58±6.77 abcd	0.81±0.05 ab	12.39±0.16 f	8.92±0.03 b
W2F1		269.00±13.42 bcd	0.82±0.04 ab	13.98±0.35 d	8.66±0.09 d
W2F2		296.68±16.63 a	0.84±0.04 a	15.30±0.38 a	8.96±0.09 b
W2F3		287.14±11.98 abc	0.81±0.04 ab	14.41±0.33 cd	9.02±0.04 b
W3F1		278.37±12.47 abc	0.81±0.05 ab	13.21±0.20 e	8.79±0.03 c
W3F2		285.28±10.64 abc	0.82±0.05 ab	14.67±0.34 bc	9.03±0.08 b
W3F3		291.47±12.29 ab	0.83±0.04 ab	15.06±0.45 ab	9.15±0.03 a
F	W	8.769**	2.821	201.792**	69.294**
	F	5.661*	1.008	41.774**	120.547**
	W×F	0.858	0.578	5.896**	4.426*

表5表明,灌水量对单果质量、可溶性固形物含量和果肉硬度有极显著影响($P<0.01$),但对果形指数无显著影响($P>0.05$);施肥量对可溶性固形物含量和果肉硬度有极显著影响($P<0.01$),对单果质量有显著影响($P>0.05$),但对果形指数无显著影响($P>0.05$);灌水量与施肥量的交互作用对可溶性固形物有极显著影响($P<0.01$),对果肉硬度有显著影响($P<0.05$),但对单果质量和果形指数无显著影响($P>0.05$)。

2.4 不同水肥耦合处理对苹果灌溉水利用效率及肥料偏生产力的影响

不同水肥耦合处理对水肥利用效率的影响见图2。由图2可知,在W1与W3处理下,灌溉水利用效率由大到小依次为F3>F2>F1;在W2处理下,则表现为F2>F3>F1。在F2与F3处理下,灌溉水利用效率由大到小依次为W1>W2>W3;在F1处理下,则表现为W2>W1>W3。9个处理中,灌溉水利用效率最高的为W1F3处理,达到79.39 kg/(hm^2·mm);最低的为W3F1处理,仅为59.74 kg/(hm^2·mm)。同一灌水量下,肥料偏生产力由大到小依次为F1>F2>F3。在F1与F3处理下,肥料偏生产力由大到小依次为W3>W2>W1;在F2处理下,则表现为W2>W3>W1。肥料偏生产力最高的是W3F1处理,达到98.24 kg/kg;最低的为W1F3处理,仅为57.16 kg/kg。

中国知网 https://www.cnki.net

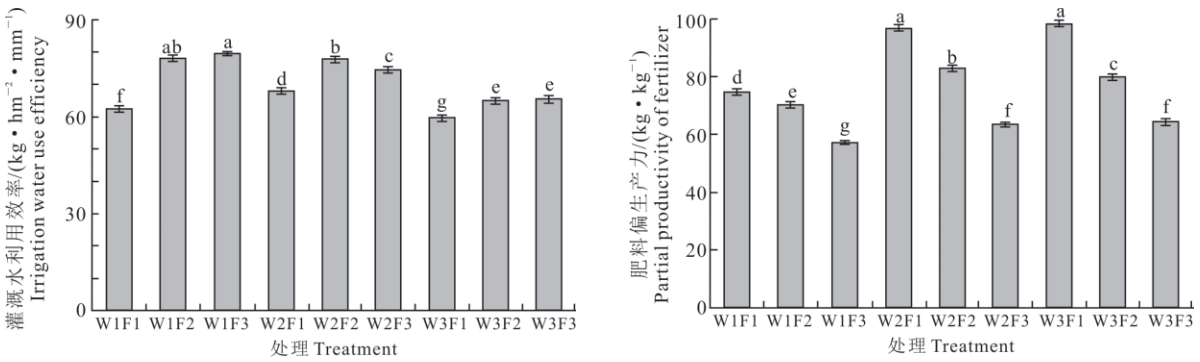


图2　不同水肥耦合处理对苹果水肥利用效率的影响

Fig. 2　Effects of different water-fertilizer coupling treatments on the water-fertilizer utilization efficiency of apples

2.5　基于NSGA-Ⅲ算法的苹果灌水量和施肥量优化

本研究以灌水量编码值(w)和施肥量编码值(f)为变量，选择苹果的产量(Z_1)、灌溉水利用效率(Z_2)、肥料偏生产力(Z_3)、可溶性固形物含量(Z_4)、果肉硬度(Z_5)5项指标作为优化目标，构建二元二次回归方程，结果(表6)显示，回归方程的$R^2>0.85$，可知方程拟合度较高。

表6　灌水量和施肥量对苹果各指标影响的二元二次回归方程

Table 6　Binary quadratic regression equation of the influence of irrigation amount and fertilization amount on each index of apples

目标 Target	二元二次回归方程 Binary quadratic regression equation	R^2
产量(Z_1) Yield	$Z_1=65.74+3.76w+3.01f-5.11w^2-4.65f^2-1.06wf$	0.86
灌溉水利用效率(Z_2) Irrigation water use efficiency	$Z_2=80.25-4.20w+3.99f-4.90w^2-5.04f^2-1.95wf$	0.91
肥料偏生产力(Z_3) Partial productivity of fertilizer	$Z_3=86.44+5.53w-11.80f-6.49w^2-2.99f^2-2.75wf$	0.96
可溶性固形物含量(Z_4) Soluble solid content	$Z_4=15.23+1.01w+0.47f-1.12w^2-0.53f^2+0.12wf$	0.92
果肉硬度(Z_5) Flesh fremness	$Z_5=9.10+0.15w+0.19f-0.10w^2-0.13f^2-0.04wf$	0.86

注：w. 灌水量编码值；f. 施肥量编码值。下表同。

Note: w. Coded value of irrigation amount; f. Coded value of fertilization amount. The same below.

2.5.1　单因子效应分析　为进一步研究灌水量和施肥量单因子对苹果产量、水肥利用效率、品质的影响，将表6中的二元二次回归方程进行降维处理，得到的单因子效应函数见表7，其对应的效应函数曲线见图3。

表7　灌水量和施肥量对苹果各指标影响的单因子效应函数

Table 7　Single factor effect function of the influence of irrigation amount and fertilization amount on each index of apples

目标 Target	灌水量单因子效应函数 Single-factor effect function of irrigation water quantity	施肥量单因子效应函数 Single-factor effect function of fertilization amount
产量(Z_1) Yield	$Z_1=65.74+3.76w-5.11w^2$	$Z_1=65.74+3.01f-4.65f^2$
灌溉水利用效率(Z_2) Irrigation water use efficiency	$Z_2=80.25-4.20w-4.90w^2$	$Z_2=80.25+3.99f-5.04f^2$
肥料偏生产力(Z_3) Partial productivity of fertilizer	$Z_3=86.44+5.53w-6.49w^2$	$Z_3=86.44-11.80f-2.99f^2$
可溶性固形物含量(Z_4) Soluble solid content	$Z_4=15.23+1.01w-1.12w^2$	$Z_4=15.23+0.47f-0.53f^2$
果肉硬度(Z_5) Flesh fremness	$Z_5=9.10+0.15w-0.10w^2$	$Z_5=9.10+0.19f-0.13f^2$

中国知网　https://www.cnki.net

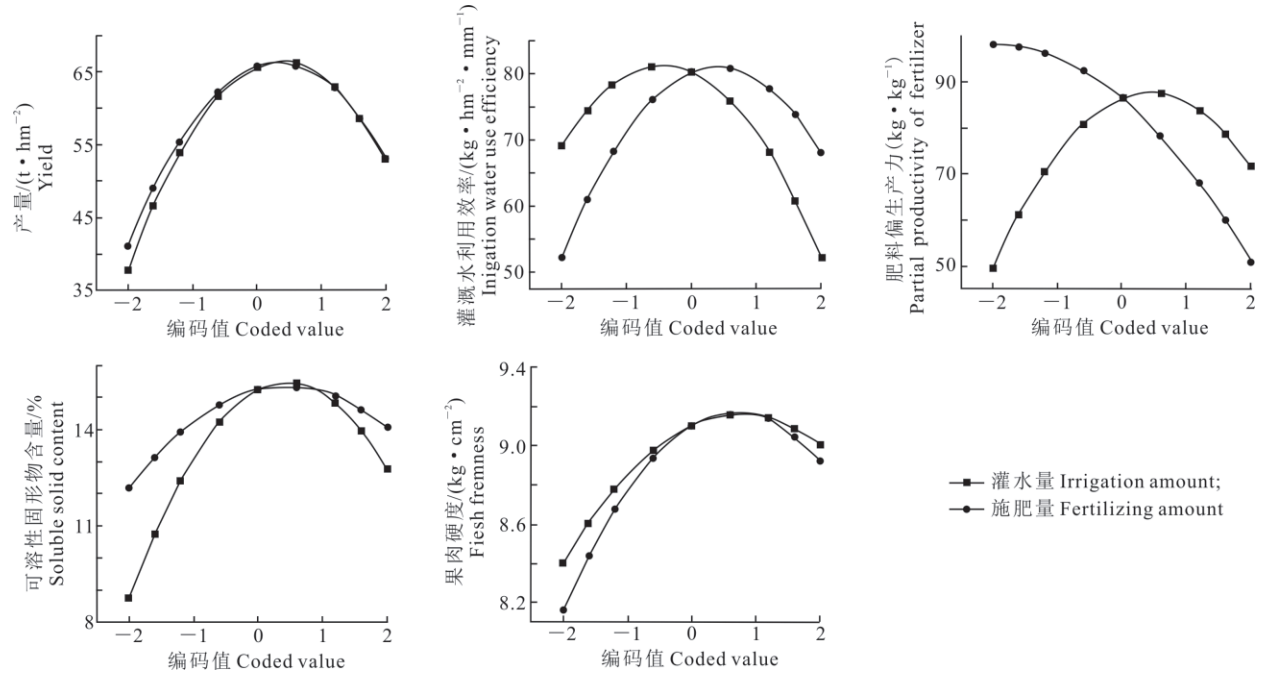


图3 灌水量和施肥量对苹果各指标影响的单因子效应函数曲线

Fig. 3 Single factor effect function curve of the influence of irrigation amount and fertilization amount on each index of apples

从图3可以看出,单因子效应函数曲线总体呈现为开口向下的抛物线,因此在特定区间内各目标存在最大值。就产量而言,灌水量编码值(w)的影响为:当$-1.202<w<0.368$,增加灌水量有助于提高产量;当$w=0.368$时,产量达到最大值;当$0.368<w<1.202$时,增加灌水量会导致产量下降。施肥量编码值(f)对产量的影响为:当$-1.202<f<0.324$时,提高施肥量有利于促进产量提高;当$f=0.324$时,产量达到最大;当$0.324<f<1.202$时,提高施肥量则会造成产量下降。

从图3可以看出,就灌溉水利用效率而言,灌水量编码值(w)的影响为:当$-1.202<w<-0.429$时,灌溉水利用效率与灌水量编码值呈正相关;当$w=-0.429$时,灌溉水利用效率达到最大值;当$-0.429<w<1.202$时,灌溉水利用效率与灌水量编码值呈负相关。施肥量编码值(f)的影响为:当$-1.202<f<0.369$时,灌溉水利用效率与施肥量编码值呈正相关;当$f=0.369$时,灌溉水利用效率达到最大值;当$0.369<f<1.202$时,灌溉水利用效率与施肥量编码值呈负相关。

从图3可以看出,就肥料偏生产力而言,灌水量编码值(w)的影响为:当$-1.202<w<0.426$时,肥料偏生产力与灌水量编码值呈正相关;当$w=0.426$时,肥料偏生产力达到最大;当$0.426<w<1.202$时,肥料偏生产力与灌水量编码值呈负相关。施肥量编码值(f)的影响为:当$f=-1.973$时,肥料偏生产力达到最大值;当$-1.202<f<1.202$时,肥料偏生产力与施肥量编码值呈负相关。

从图3可以看出,就苹果果实可溶性固形物含量而言,灌水量编码值(w)的影响为:当$-1.202<w<0.451$时,增加灌水量有利于提高可溶性固形物含量;当$w=0.451$时,可溶性固形物含量达到最大值;当$0.451<w<1.202$时,增加灌水量则导致可溶性固形物含量下降。施肥量编码值(f)的影响为:当$-1.202<f<0.443$时,增加施肥量有利于提高可溶性固形物含量;当$f=0.443$时,可溶性固形物含量达到最大值;当$0.443<f<1.202$时,增加施肥量抑制可溶性固形物含量的提高。

从图3可以看出,就苹果果肉硬度而言,灌水量编码值(w)的影响为:当$-1.202<w<0.75$时,增加灌水量有利于提高果肉硬度;当$w=0.75$时,果肉硬度达到最大值;当$0.75<w<1.202$时,增加灌水量抑制果肉硬度提高。施肥量编码值(f)的影响为:当$-1.202<f<0.731$时,增加施肥量会促进果肉硬度的提高;当$f=0.731$时,果肉硬度达到最大值;当$0.731<f<1.202$时,增加施肥量抑制果肉硬度的提高。

2.5.2 基于NSGA-Ⅲ算法的多目标优化模型分析 为实现提质增效,通过构建Z_1、Z_2、Z_3、Z_4、Z_5二元二次方程组成基于NSGA-Ⅲ算法优化模型,寻求

中国知网 https://www.cnki.net

苹果产量、水肥利用效率及品质最优时的灌水量和施肥量为：

$$Z_1 = 65.74 + 3.76w + 3.01f - 5.11w^2 - 4.65f^2 - 1.06wf;$$

$$Z_2 = 80.25 - 4.20w + 3.99f - 4.90w^2 - 5.04f^2 - 1.95wf;$$

$$Z_3 = 86.44 + 5.53w - 11.80f - 6.49w^2 - 2.99f^2 - 2.75wf;$$

$$Z_4 = 15.23 + 1.01w + 0.47f - 1.12w^2 - 0.53f^2 + 0.12wf;$$

$$Z_5 = 9.10 + 0.15w + 0.19f - 0.10w^2 - 0.13f^2 - 0.04wf。$$

通过MATLAB 2022b对上述模型进行计算，种群大小设置为50，最大遗传代数设置为50，交叉概率设置为0.5，得到了Pareto解集；通过熵权-Topsis法对Pareto解集进行分析，计算得到不同指标的权重分别为：产量0.21、灌溉水利用效率0.21、肥料偏生产力0.19、可溶性固形物含量0.13、果肉硬度0.26；最终确定的w、f最优解分别为0.203和0.213，对应的灌水量和施肥量分别为821.11 mm和783.22 kg/hm^2，对应的苹果产量、灌溉水利用效率、肥料偏生产力、可溶性固形物含量及果肉硬度分别为66.68 t/hm^2、79.73 kg/(hm^2·mm)、84.52 kg/kg、15.47%、9.16 kg/cm^2，以上指标均优于9个处理中表现较佳的W2F2处理。

3　讨　论

灌水量和施肥量是影响作物生长发育的2个关键因素[16-17]。合理的灌水量与施肥量有利于促进作物的健康生长[18]。研究显示，水肥耦合效应对蓝莓首年果实纵径、横径无显著影响；但对蓝莓次年果实纵径有极显著影响，而对果实横径无显著影响[19]。本研究中，水肥耦合效应对苹果果实纵径、横径均无显著影响，这与前人研究结果不一致，可能与研究作物种类不同有关。

适宜的灌水施肥可以协调作物养分的分配，促进光合产物的合成[20]，从而提高作物产量，改善作物品质。有研究指出，合理的灌溉量与施肥量能显著增产，但增产效果会随着灌溉量和施肥量的增加而逐渐减弱[21]。研究发现，在适宜的水肥条件下，库尔勒梨可溶性固形物和可溶性糖含量明显增加，可滴定酸和果核细胞含量降低，从而改善果实品质[22]。本研究发现，9个处理中，中水中肥处理(W2F2)的产量最高，显著高于低水低肥处理(W1F1)和高水高肥处理(W3F3)；此外，W2F2处理的单果质量、果形指数和可溶性固形物含量均达到最高。可知过高或过低的灌水量和施肥量不仅会降低苹果产量，而且会降低果实品质，这是由于缺水缺肥抑制了苹果树的正常生长，影响了光合产物的积累，导致果实养分供应不足从而降低了苹果产量和品质；而过量的水肥则导致苹果树营养生长过剩，削弱光合产物向果实的分配能力，从而影响苹果产量和品质。

研究表明，适量施用氮肥显著提高了辣椒的产量和水肥利用效率[23]。在同一施肥量下，马铃薯水分利用效率表现为低水＞中水＞高水[24]。在同一灌水量下，施肥量对棉花肥料偏生产力的影响显著，肥料偏生产力随着施肥量的增加呈下降趋势[25]。本研究中，当灌水量相同时，F3和F2处理的肥料偏生产力显著高于F1处理，但灌溉水利用效率显著低于F1处理，表明较高的施肥量能明显提高灌溉水利用效率；W2F1和W3F1处理的肥料偏生产力均显著高于其他处理，显示适宜的水肥组合能明显提高作物的水分吸收能力和灌溉水利用效率。

前人通过建立回归模型发现，苹果产量、灌溉水利用效率和肥料偏生产力达到最大值时，对应的最优灌水量和施肥量差异较大，难以同时兼顾最高产量与最大水肥利用效率[20]。MWIYA等[26]研究表明，NSGA-Ⅲ算法可优化灌溉制度，在提高作物产量的同时提高水资源利用效率。ZHAO等[27]则通过NSGA-Ⅲ算法的优化模型，成功解决了枸杞品质与产量之间的最优灌水量与施肥量差异较大的问题，获得了自动滴灌的最优灌水量与施肥量。本研究构建了二元二次回归方程，并基于NSGA-Ⅲ算法得到了苹果产量、水肥利用效率及品质最优时的灌水量为821.11 mm，施肥量为783.22 kg/hm^2，其对应的苹果产量、水肥利用效率及品质均优于W2F2处理，不仅实现了节水节肥，而且产量及品质均有所提升，真正实现了提质增效的目标。

4　结　论

不同水肥耦合处理对苹果果实纵径、横径、产量和品质都有明显影响，其中W2F2的产量最高，同时其品质指标(单果质量、果形指数和可溶性固形物含量)也总体优于其他处理。此外，W2F2处理的水肥利用效率也表现较佳。基于NSGA-Ⅲ算法构

中国知网　https://www.cnki.net

建了苹果的最优灌水量和施肥量多目标回归模型，最终确定最优灌水量为821.11 mm，最优施肥量为783.22 kg/hm^2，其对应的苹果产量、水肥利用效率及品质均优于表现较佳的W2F2处理。

[参考文献]

[1] 张亚若，刘园，童盼盼，等. 不同贮藏条件对阿克苏苹果品质及糖心的影响[J]. 新疆农业科学，2021，58(3)：493-501.
ZHANG Y R，LIU Y，TONG P P，et al. Effects of different storage conditions on quality and saccharine of Aksu apple[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2021，58(3)：493-501.

[2] 雷嘉豪. 阿克苏“冰糖心”苹果贮藏期品质智能检测装置研发[D]. 新疆阿拉尔：塔里木大学，2024.
LEI J H. Research and development of Aksu‘rock candy heart’ apple quality intelligent detection device during storage period[D]. Alaer，Xinjiang：Tarim University，2024.

[3] 魏雪松. 磁电活化水滴灌下新疆南疆沙地主干结果型苹果促生提质方法研究[D]. 西安：西安理工大学，2024.
WEI X S. Study on methods of promoting growth and improving quality of fruit-bearing apple under magneto-electric activated water drip irrigation in sandy trunk of southern Xinjiang[D]. Xi’an：Xi’an University of Technology，2024.

[4] 张建锴，曹红霞，潘小燕，等. 基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量和追施氮量优化研究[J]. 干旱地区农业研究，2020，38(5)：143-152.
ZHANG J K，CAO H X，PAN X Y，et al. Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in Northern Shaanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2020，38(5)：143-152.

[5] 崔佳伟，任佳伟，李著帅，等. 水肥耦合效应对苹果幼树生长、果实产量品质及土壤养分特征的影响[J]. 果树学报，2023，40(10)：2098-2111.
CUI J W，REN J W，LI Z S，et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth，fruit yield and quality and soil nutrient characteristics of apple saplings[J]. Journal of Fruit Science，2023，40(10)：2098-2111.

[6] 张军，李建明，张中典，等. 水肥对番茄产量、品质和水分利用率的影响及综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2016，44(7)：215-222.
ZHANG J，LI J M，ZHANG Z D，et al. Effect of water and fertilizer on yield，quality and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)，2016，44(7)：215-222.

[7] 白少倩. 不同水肥处理对骏枣树体生长及果实品质的影响[D]. 新疆阿拉尔：塔里木大学，2023.
BAI S Q. Influence of different water and fertilizer treatment on the body growth and fruit quality of ‘Junzao’ jujube tree[D]. Alaer，Xinjiang：Tarim University，2023.

[8] 李青青，张芮，高彦婷，等. 水肥耦合对葡萄土壤环境及品质的影响[J]. 农业工程，2023，13(2)：66-71.
LI Q Q，ZHANG R，GAO Y T，et al. Effects of water and fertilizer coupling on grape soil environment and quality[J]. Agricultural Engineering，2023，13(2)：66-71.

[9] 王凯航. 基于AquaCrop-FloPy和NSGA-Ⅲ耦合模型的TK601玉米新品种灌溉制度多目标优化[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2023.
WANG K H. Multi-objective optimization of irrigation scheduling based on AquaCrop-FloPy-NSGA-Ⅲ coupling model[D]. Yangling，Shaanxi：Northwest A&F University，2023.

[10] 康燕楠，降亚楠，苏振辉. 基于NSGA-Ⅲ和FloPy的灌区水资源多目标模拟优化模型[J]. 水利与建筑工程学报，2021，19(3)：17-23.
KANG Y N，JIANG Y N，SU Z H. Multi-objective water resources simulation and optimization model for irrigation district based on NSGA-Ⅲ and FloPy[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering，2021，19(3)：17-23.

[11] 宋健，李江，杨奇鹤，等. 基于AquaCrop和NSGA-Ⅱ的灌溉制度多目标优化及其应用[J]. 水利学报，2018，49(10)：1284-1295.
SONG J，LI J，YANG Q H，et al. Multi-objective optimization and its application on irrigation scheduling based on AquaCrop and NSGA-Ⅱ[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2018，49(10)：1284-1295.

[12] DEB K，PRATAP A，AGARWAL S，et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm：NSGA-Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation，2002，6(2)：182-197.

[13] 王昊煜，高培超，谢一茹，等. 基于遗传算法的土地利用优化：NSGA-Ⅱ和NSGA-Ⅲ的对比研究[J]. 生态学报，2023，43(2)：639-649.
WANG H Y，GAO P C，XIE Y R，et al. Land-use optimization based on genetic algorithm：a comparison between NSGA-Ⅱ and NSGA-Ⅲ[J]. Acta Ecologica Sinica，2023，43(2)：639-649.

[14] 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(3)：162-172.
CHANG Z K，LIANG G C，PENG Y P，et al. Optimization of walnut water-fertilizer coupling scheme based on yield quality and water-fertilizer utilization efficiency[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2024(3)：162-172.

[15] 曹毅，钟永红，张赓，等. 水肥耦合对设施葡萄产量、品质和水肥利用的影响[J]. 农机化研究，2021，43(9)：186-193.
CAO Y，ZHONG Y H，ZHANG G，et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield，quality and utilization of protected grape[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43(9)：186-193.

[16] 周罕觅，孙旗立，张硕，等. 基于多目标综合评价的滴灌苹果水肥协同调控研究[J]. 农业机械学报，2023，54(11)：335-346.
ZHOU H M，SUN Q L，ZHANG S，et al. Cooperative regulation of water and fertilizer in drip irrigation apple based on multi-objective comprehensive evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(11)：335-346.

中国知网 https://www.cnki.net

[17] 李萌. 南疆膜下滴灌棉花灌溉和施肥调控效应及生长模拟研究[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2020.
LI M. Study on effect of irrigation and fertilization regulation and simulation of cotton growth under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.

[18] 周罕觅，张硕，杜新武，等. 滴灌条件下水肥耦合对苹果幼树生长与生理特性的影响[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：337-348.
ZHOU H M, ZHANG S, DU X W, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth and physiological characteristics of young apple tree under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 337-348.

[19] 李双双. 水肥耦合对蓝莓生长发育及果实的影响效应[D]. 贵阳：贵州大学，2017.
LI S S. Water and fertilizer coupling effects on growth of blueberry and fruit[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.

[20] DUAN X X, WANG Q J, MU W Y, et al. Optimization of irrigation and fertilization of apples under magnetoelectric water irrigation in extremely arid areas[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1356338.

[21] ROLLI E, MARASCO R, VIGANI G, et al. Improved plant resistance to drought is promoted by the root-associated microbiome as a water stress-dependent trait[J]. Environmental Microbiology, 2015, 17(2): 316-331.

[22] LI T L, GAO Z J, BAI X L, et al. Water and fertilizer coupling regulated growth, fruit quality, and yield of the pear in Korla[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 34-46.

[23] GEBREIGZIABHER E T, GEBREMEDHIN T, FISSHA N. Effect of irrigation depth and nitrogen fertilizer rates on pepper (*Capsicum annum* L.) yield and water use efficiency in Tselemty District, Tigray, Ethiopia[J]. International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources, 2024, 5(3): 56-61.

[24] 张富仓，高月，焦婉如，等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报，2017，48(3)：270-278.
ZHANG F C, GAO Y, JIAO W R, et al. Effects of water and fertilizer supply on growth, water and nutrient use efficiencies of potato in sandy soil of Yulin area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 270-278.

[25] WANG H D, WU L F, CHENG M H, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 169-179.

[26] MWIYA R M, ZHANG Z Y, ZHENG C X, et al. Comparison of approaches for irrigation scheduling using AquaCrop and NSGA-Ⅲ models under climate uncertainty[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7694.

[27] ZHAO J P, YU Y D, LEI J Y, et al. Multi-objective lower irrigation limit simulation and optimization model for *Lycium barbarum* based on NSGA-Ⅲ and ANN[J]. Water, 2023, 15(4): 783.

（责任编辑：李小平）

（上接第 80 页）

[22] 景艳霞，袁庆华. NaCl胁迫对苜蓿幼苗生长及不同器官中盐离子分布的影响[J]. 草业学报，2011，20(2)：134-139.
JING Y X, YUAN Q H. Effects of salt stress on seedling growth of alfalfa (*Medicago sativa*) and ion distribution in different alfalfa organs[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 134-139.

[23] 孙凤岭，陈昆，姜涛. 盐胁迫对西瓜幼苗生物量及生理特性的影响[J]. 现代农业科技，2023(7)：63-65.
SUN F L, CHEN K, JIANG T. Effects of salt stress on biomass and physiological characteristics of watermelon seedlings[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(7): 63-65.

[24] 朱迎春，孙德玺，刘君璞，等. 壳寡糖对NaCl胁迫下耐盐性不同西瓜幼苗生理特性的影响[J]. 果树学报，2020，37(6)：866-874.
ZHU Y C, SUN D X, LIU J P, et al. Effects of chitosan oligosaccharides on watermelon seedlings with different salt tolerance under NaCl stress[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(6): 866-874.

[25] 何亚萍，尹丽娟，丁小玲，等. 25份西瓜种质苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(12)：49-59.
HE Y P, YIN L J, DING X L, et al. Identification and screening of drought resistance indexes of 25 watermelon germplasms at seedling stage[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(12): 49-59.

（责任编辑：李小平）

中国知网　https://www.cnki.net