

# 基于产量品质及水肥利用率的 核桃水肥耦合方案优化

常子康<sup>1,4</sup>, 梁国成<sup>2</sup>, 彭艳平<sup>3</sup>, 赵经华<sup>1,4</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐830052; 2.乌鲁木齐经济技术开发区(头屯河区)建设局,新疆乌鲁木齐830026; 3.中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司,新疆乌鲁木齐830002; 4.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)

**摘要:**针对干旱区核桃水肥利用效率低及高效水肥制度不明晰的问题,以新疆阿克苏地区核桃树为研究对象,以核桃提质增效为目标,研究水肥耦合条件下对滴灌核桃的生理生长指标、果实品质、产量的影响。为了更精准地预测水肥制度,以灌水量( $225\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , W1;  $300\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , W2;  $375\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , W3)、施肥量(常规施肥量0.5倍( $236.93\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), F1; 常规施肥量( $473.85\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), F2; 常规施肥量2倍( $947.7\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), F3)为试验因素,通过建立关于核桃的果实品质、产量、水分利用效率和肥料偏生产率的二元二次回归模型,并采用二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)对该回归模型进行验证求解,从而模拟出最优水肥制度。结果表明:灌水量和施肥量两因子及其耦合效应对核桃的生长指标均有显著影响,核桃的果实品质、产量和水肥利用率随着灌水量和施肥量的增加呈现先增加后减小的趋势,在各处理情况下,W2F2处理为最优的灌溉施肥处理。通过NSGA-II模拟出的最优水肥制度为灌水量和施肥量分别是 $336.93\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $715.21\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。最终对应的蛋白质含量、产量、水分利用效率和肥料偏生产率分别是21.36%、 $2\,971.66\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.76\text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和1.02。

**关键词:**核桃;滴灌;水肥耦合;水分利用效率;肥料偏生产率;NSGA-II算法

**中图分类号:**S664.1; S275.4 **文献标志码:**A

## Optimization of walnut water-fertilizer coupling scheme based on yield quality and water-fertilizer utilization efficiency

CHANG Zikang<sup>1,4</sup>, LIANG Guocheng<sup>2</sup>, PENG Yanping<sup>3</sup>, ZHAO Jinghua<sup>1,4</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;  
2. Urumqi Economic and Technological Development Zone (Toutunhe District) Construction Bureau, Urumqi, Xinjiang 830026, China;  
3. China Energy Construction Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xinjiang Urumqi 830002, China;  
4. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Project Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** Aiming at solving low water and fertilizer utilization efficiency of walnuts in arid areas and examining problems with water and fertilizer systems, we took walnut trees in the Aksu region of Xinjiang as the research object and set improving walnut quality and efficiency as the goal to study the effects of water and fertilizer coupling conditions on physiological growth indexes, fruit quality, and yield of drip-irrigated walnuts. Irrigation volume (W1:  $225\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; W2:  $300\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; W3:  $375\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ), and fertilizer application amounts including F1 ( $236.9\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ): half conventional fertilizer application; F2 ( $473.85\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ): conventional fertilizer application; and F3 ( $947.7\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ): double conventional fertilizer application were used as test factors. To predict the irrigation and fertilization system more accurately, a binary quadratic regression model was established to study the walnut fruit quality, yield, water use efficiency, and fertilizer productivity. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) was modeled to verify and solve the regression model and get the optimal irrigation and fertilization combination. The results showed that both factors of water irrigation and fertilizer application as well as

their coupling effects had significant effects on the growth indexes of walnuts. The fruit quality, yield, and water and fertilizer utilization of walnuts showed a trend of increasing and then decreasing with the increase of water irrigation and fertilizer application. The W2F2 treatment was the optimal irrigation and fertilization treatment. The optimum water and fertilizer regimes simulated by NSGA-II were  $336.93 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $715.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for irrigation and fertilizer application, corresponding protein content, yield, water use efficiency and partial fertilizer productivity were 21.36%, 2 971.66  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 8.76  $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and 1.02, respectively.

**Keywords:** walnut; drip irrigation; water and fertilizer coupling; water use efficiency; fertilizer partial productivity; NSGA-II algorithm

核桃又称胡桃,为胡桃科胡桃属植物,有木本油料之王的美誉<sup>[1]</sup>。因其较高的营养及经济价值和较强的环境适应性,被确定为我国战略性干果树种之一<sup>[2]</sup>。核桃营养价值丰富,蛋白质、脂肪含量高,脂肪主要是不饱和脂肪酸,同时也富含大量的微量元素、维生素、纤维、磷、烟酸等物质<sup>[3]</sup>,所以核桃仁的蛋白质和脂肪含量也常作为评价核桃品质的重要指标。

灌水和施肥都会影响土壤的养分供应,是核桃产量品质的关键影响因素。不均衡的灌水和施肥都会导致土壤养分失衡、产量品质下降<sup>[4]</sup>。不合理的施肥会给土壤和核桃生长产生各种负面影响,如土壤酸化、养分平衡失调,甚至会导致核桃根系死亡、枝叶黄化、枯死等现象<sup>[5-6]</sup>。因此,高效利用水肥对制定核桃高产优质管理制度和农业的可持续发展至关重要。大量学者对此问题做了相关研究,赵经华等<sup>[7]</sup>发现,核桃树不同生育期水分亏缺都会使单果重和仁重降低,但单株果实产量增加且在各生育阶段轻度水分亏缺下的核桃产量比中度水分亏缺要高。刘春晓等<sup>[2]</sup>研究发现施肥是影响核桃品质的重要因素,不同肥料施用对核桃各品质指标的影响存在差异,生产中应根据生产目标进行合理施肥量的推荐。曾成城等<sup>[8]</sup>研究发现不同施肥处理显著影响山核桃单果仁质量、出仁率、果壳厚度、可溶性糖含量、单宁含量和脂肪含量,喷施叶面肥对山核桃矿物质含量有较明显的提升作用。尽管前人在肥料施用、灌水方式和产量品质方面进行了大量研究,但主要局限在灌水定额和施肥量对产量品质或生理形态等少量指标的影响,或是灌溉下限和水分亏缺对核桃的影响,水肥耦合效应的研究也主要集中于小麦、玉米、番茄和黄瓜等粮食或蔬菜作物<sup>[9-16]</sup>,关于水肥两因子耦合作用对核桃的生长特性、水肥利用率和产量品质方面的研究较少,核桃水肥利用率、品质和产量的水肥方案的精确预测更是鲜有研究。

已有研究表明,作物的生长指标、品质和产量

用二次回归模型表示拟合度较好。马建琴等<sup>[17]</sup>通过玉米的产量和水分利用率进行二元二次回归模拟,分析得出了最佳的灌溉施肥水平。胡晓辉等<sup>[18]</sup>通过对袋培辣椒产量、果实综合品质、肥料利用率及水分利用效率的试验数据进行三元二次拟合且拟合效果较好。李建明等<sup>[11]</sup>建立了灌溉上限及施肥量对番茄光合与产量影响的模型,两模型均达到显著水平。对试验最优水肥组合范围进行验证可知,结果具有较高的重现性,表明模型较准确,能够对实际生产进行预测。本研究以南疆地区核桃树为研究对象,基于滴灌条件下水肥施用对核桃树生长发育、水肥利用率、果实品质和产量的影响,建立核桃树在水肥耦合效应下的水肥利用率、品质和产量的二元二次回归方程模型,并对模型进行单因子效应分析和边际效应分析,再利用 NSGA-II 对以上 4 个指标进行验证求解,以产量品质和水肥利用率的综合最优为目标制定最佳水肥组合方案,以期为制定南疆核桃水肥制度提供更为精确的思路,也能对南疆核桃业的发展起到支撑作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于南疆地区阿克苏市红旗坡十队新疆农业大学林果实验基地内( $80^{\circ}14' \text{ E}$ ,  $41^{\circ}16' \text{ N}$ ,海拔 1133 m),属温带大陆性气候,多年平均年日照时数 2 855~2 967 h,多年平均气温  $11.2^{\circ}\text{C}$ ,极端高温高达  $40.9^{\circ}\text{C}$ ,极端低温达到  $-27.4^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 205~219 d,多年平均降水量 29.6~71.4 mm。试验区 0~40 cm 土层土壤质地为粉砂壤土,容重  $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;40~60 cm 土层土壤质地为壤砂土,容重为  $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;60~100 cm 土层土壤质地为细砂,容重为  $1.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,地下水埋深大于 10 m。

### 1.2 试验设计

试验采用品种为‘温 185’的 7 a 核桃树作物为试材,试验地块平整,核桃树长势一致,核桃树株行间距  $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。试验是在水分监测条件下进行滴

灌,肥料随水滴施。滴灌管采用补偿式滴灌管,滴头间距 0.5 m,滴头流量  $3.75 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ;每行树布置两条滴灌管,分别位于树行两侧,滴灌管与树间隔 0.5 m。基于灌水量、施肥量设置水肥耦合处理,灌水定额设定 3 个梯度: $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  (W1)、 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  (W2)、 $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  (W3);施肥设定 3 个梯度:常规施肥量 0.5 倍( $236.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , F1)、常规施肥量 ( $473.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , F2)、常规施肥量 1 倍

( $947.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , F3),该研究主要针对氮肥(尿素)和磷肥(一铵),故未对钾肥(钾宝)设置梯度,其中尿素的 N 含量是 46%,一铵的 N、P 元素含量分别为 11%和 44%。各处理设置 3 次重复,随机排列,共计 9 个处理。核桃树根据其生长及生育表现分为萌芽期、开花坐果期、果实膨大期、硬核期、油脂转化期、成熟期六个阶段。试验的水肥设计施用量见表 1、2。

表 1 核桃树灌水试验设计

Table 1 Experimental design of walnut tree irrigation

生育期 Child-bearing period	时间 Time (m-d)	灌水日期 Irrigation date (m-d)	灌水周期/d Irrigation cycle	灌水次数 Frequency of irrigation	灌水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ Irrigation amount		
					W1	W2	W3
萌芽期 Sprouting period	04-05~04-14	04-05		1	750	750	750
开花坐果期 Flowering and fruit bearing periods	04-15~05-09	04-03	12	1	225	300	375
果实膨大期 Fruit swelling period	05-10~06-02	05-17,05-25	8	2	225	300	375
硬核期 Stone hardening stage	06-03~07-05	06-03,06-08,06-30	12	3	225	300	375
油脂转化期 Fat conversion period	07-06~08-31	07-26,08-10	12	2	225	300	375
冬灌 Winter irrigation	11-01~11-20	11-01		1	1200		
合计 Total				10	3750	4350	4950

表 2 核桃树施肥试验设计

Table 2 Experimental design of walnut tree fertilization

生育期 Child-bearing period	时间 Time (m-d)	F1/ $(\text{kg} \cdot \text{plant}^{-1})$			F2/ $(\text{kg} \cdot \text{plant}^{-1})$			F3/ $(\text{kg} \cdot \text{plant}^{-1})$		
		尿素 Urea	一铵 Monoam monium	钾宝 Potassium treasure	尿素 Urea	一铵 Monoam monium	钾宝 Potassium treasure	尿素 Urea	一铵 Monoam monium	钾宝 Potassium treasure
开花坐果期 Flowering and fruit bearing periods	04-15~ 05-09	0.45	0.2	0.4	0.9	0.4	0.4	1.8	0.8	0.4
果实膨大期 Fruit swelling period	05-10~ 06-02	0.15	0.15	0.4	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4
硬核期 Stone hardening stage	06-03~ 07-05		0.2	0.4		0.4	0.4		0.8	0.4
油脂转化期 Fat conversion period	07-06~ 08-31		0.2	0.4		0.4	0.4		0.8	0.4
合计 Total		0.6	0.75	1.6	1.2	1.5	1.6	2.4	3.0	1.6

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素 不同水肥处理各选三棵核桃树,在核桃树的东、西、南、北各选 2 片叶片,使用日本柯尼卡美能达公司叶绿素仪 (SPAD-502PLUS) 测定,并将各处理叶片的叶绿素含量取均值进行分析。

1.3.2 果实产量与品质 核桃收获后,在每个处理中随机选取三棵样树,数出果实个数,测定产量,并折算成公顷产量。每个处理取出 100 颗核桃,去掉青皮测定单果重、蛋白质及脂肪含量等指标。其中蛋白质含量用凯氏定氮法测定,脂肪含量用压力膜法测定。

1.3.3 水肥利用效率 由于试验区位于南疆地区阿克苏市,属于温带大陆性气候,在核桃生育期内无超过 5 mm 的有效降水,并且地下水位较深,视为无地下水补给。肥料为全生育期投入的尿素、一铵和钾宝的总量,水肥利用效率由水分利用效率和肥料偏生产力表示,计算公式为:

$$WUE = Y/W \quad (1)$$

$$PFP = Y/F \quad (2)$$

式中, WUE 为水分利用效率 ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); Y

为总产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $W$  为全生育期作物每公顷耗水量( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $FPF$  为肥料偏生产力( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $F$  为种植期间每公顷总施肥量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

#### 1.4 NSGA-II 算法

NSGA-II 的原理是随机产生规模为  $N$  的初始种群,在完成非支配排序后通过遗传算法的交叉、选择、变异三个操作,再进行拥挤度计算,最后产生新的子代种群;依此类推,直到满足结束的条件。NSGA-II 相较于以前的遗传算法的优点是引入了非支配排序、提出拥挤度以及引入精英策略等。非支配排序利用 Pareto 最优解是将种群中的个体进行分级,挑选出个体中较为优异的;拥挤度是比较个体

的优异程度;精英策略则提高了种群的多样性和计算效率。

为了提升数据的可比性,便于直观比较数据,提高数据精度,采用将数据标准化的方法,对不同处理的核桃整个生育周期的灌水量和施肥量进行标准化处理,得到标准化的数据的编码值表 3。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; $\sigma$  为数据的标准差。

表 3 试验因子编码表

Table 3 Experimental factor coding

处理 Treatment	灌水量编码值 $x_1$ Coding value of irrigation amount	施肥量编码值 $x_2$ Coding value of fertilization amount	灌水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ Irrigation amount	施肥量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ Fertilizer amount
W3F3	1.2247	1.3363	375	947.70
W3F2	1.2247	-0.2673	375	473.85
W3F1	1.2247	-1.069	375	236.93
W2F3	0	1.3363	300	947.70
W2F2	0	-0.2673	300	473.85
W2F1	0	-1.069	300	236.93
W1F3	-1.2247	1.3363	225	947.70
W1F2	-1.2247	-0.2673	225	473.85
W1F1	-1.2247	-1.069	225	236.93

本文以灌水量和施肥量的编码值作为两因素,将试验设置的灌水施肥梯度的编码值作为约束条件,对核桃的蛋白质含量、产量、水分利用效率和肥料偏生产率采用二元二次回归拟合,得到回归模型,再建立由蛋白质含量、产量、水分利用效率和肥料偏生产率组成的关于 NSGA-II 算法的四目标优化模型。

#### 1.5 数据处理

采用 Excel 和 MATLAB 对数据进行整理和作图,采用 SPSS 软件进行显著性检验和方差分析。通过建立关于核桃的水肥利用率、果实品质和产量的二元二次回归模型,并采用非支配排序的遗传算法(NSGA-II)对回归模型进行验证求解,模拟出最优的产量品质和水肥利用率。

## 2 结果与分析

### 2.1 水肥耦合对核桃树叶绿素的影响

不同处理对于核桃树的不同生长发育期的植株叶绿素的对比如表 4 所示,其中不同的灌水处理

在开花结果期和硬核期对核桃树的叶绿素含量产生了极显著影响( $P < 0.01$ ),不同的施肥处理在核桃树的开花结果期产生了极显著的影响( $P < 0.01$ )。

灌水和施肥处理对核桃树的不同时期叶绿素含量(叶片 SPAD 值)的影响如图 1(见 169 页)所示,其中 4 月 15 日—5 月 9 日为开花结果期,5 月 10 日—6 月 2 日为果实膨大期,6 月 3 日—7 月 5 日为硬核期,7 月 6 日—8 月 31 日为油脂转化期。可以看出,核桃树叶片 SPAD 值随生育期的推进呈现不断增大趋势。不同水肥处理下的核桃树开花结果期 SPAD 最大值(49.5)出现在 W2F3 处理,果实膨大期的 SPAD 最大值(54.0)出现在 W3F2、W2F3、W2F1 处理,硬核期的 SPAD 最大值(57.8)出现在 W2F1 处理,油脂转化期的 SPAD 最大值(58.7)出现在 W2F3 处理。整个生育期来看,W2F2 对于叶片的 SPAD 值影响更明显,其中最小值与最大值的差值由大到小依次为开花结果期、硬核期、果实膨大期、油脂转化期,表明随着核桃树生育期的推进,不同的水肥处理对核桃树叶片 SPAD 的影响也越来越小。



## 2.2 水肥耦合对核桃树果实品质的影响

水肥处理对核桃树果实品质的影响如图 2 所示,脂肪和蛋白质含量最大值均出现在 W2F2 处理,分别为 66.8%和 21.2%,脂肪和蛋白质含量的最小值均出现在 W1F1 处理,分别为 65%和 19%。在施肥处理 F2 情况下,随着施肥量的增加,脂肪含量和蛋白质含量均呈现先增加后减小趋势。表明灌水量和施肥量过高或过低均不利于提高核桃果实的品质;随着灌水量和施肥量的增加,核桃脂肪含量和蛋白质含量增大,但是超过一定量后,含量均呈现下降趋势。

## 2.3 水肥耦合对核桃树产量的影响

水肥处理对核桃树产量的影响如图 3 所示,其中不同处理核桃个数最多的是 W3F3 处理,均值为 165 个,个数最少的是 W1F1 处理,均值为 86.33 个。

在灌水处理 W1、W2、W3 和施肥处理 F1、F2、F3 情况下,随着施肥量和灌水量增大,核桃个数均呈增加趋势。核桃的单果重量的最大值出现在 W2F2 处理 (13.69 g),最小值出现在 W3F3 处理 (10.55 g)。在灌水处理 W1、W2、W3 情况下,单果重量均随着施肥量增大呈现先增大后减小趋势。不同处理下,核桃总干重的最大值也出现在 W2F2 处理 (5135 g),最小值出现在 W1F1 处理 (3215 g)。对于不同处理下核桃单位产量的统计发现,单产最高值在 W3F3 处理 (193.25 kg),最低的是 W1F1 处理 (118.96 kg),其中 W2F2 处理核桃产量为  $190 \text{ kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}$ ,与 W3F3 处理差异不大。综上,灌水量和施肥量都对核桃产量起着至关重要的作用,其中 W3F3 处理和 W2F2 处理的差异不大。

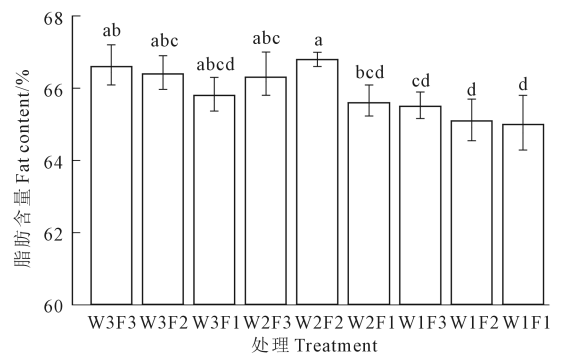
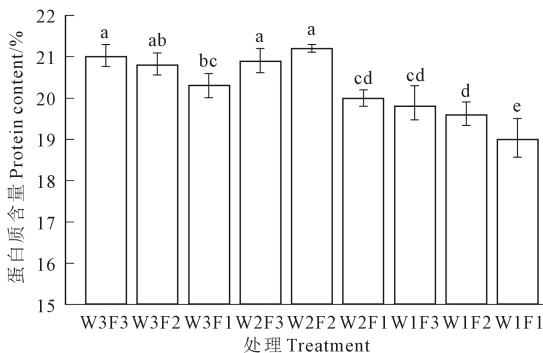
表 4 水肥耦合对核桃树不同生育期叶片 SPAD 值的影响

Table 4 Effects of water-fertilizer coupling on leaf SPAD values in different growth stages of walnut trees

灌水处理 Irrigation treatment	施肥处理 Fertilization treatment	开花结果期 Flowering and fruit bearing periods	果实膨大期 Fruit swelling period	硬核期 Stone hardening stage	油脂转化期 Conversion period
W1	F1	(34.7±1.4) <sup>a</sup>	(50.0±0.7) <sup>a</sup>	(55.2±1.5) <sup>a</sup>	(55.7±0.9) <sup>a</sup>
	F2	(33.6±0.3) <sup>a</sup>	(50.7±0.5) <sup>a</sup>	(57.0±0.2) <sup>a</sup>	(56.0±0.9) <sup>a</sup>
	F3	(35.1±0.6) <sup>a</sup>	(50.5±1.3) <sup>a</sup>	(56.1±0.4) <sup>a</sup>	(57.4±1.1) <sup>a</sup>
W2	F1	(36.0±0.9) <sup>b</sup>	(50.4±2.6) <sup>a</sup>	(56.5±2.0) <sup>ab</sup>	(54.2±2.8) <sup>a</sup>
	F2	(34.4±1.2) <sup>b</sup>	(50.5±1.0) <sup>a</sup>	(59.5±1.1) <sup>a</sup>	(55.6±0.4) <sup>a</sup>
	F3	(39.0±1.8) <sup>a</sup>	(51.4±1.4) <sup>a</sup>	(55.2±1.5) <sup>b</sup>	(56.7±1.2) <sup>a</sup>
W3	F1	(34.8±1.7) <sup>a</sup>	(51.2±1.4) <sup>a</sup>	(57.4±0.5) <sup>a</sup>	(57.2±0.8) <sup>a</sup>
	F2	(35.0±0.3) <sup>a</sup>	(50.1±0.9) <sup>a</sup>	(56.2±1.0) <sup>ab</sup>	(56.9±1.1) <sup>a</sup>
	F3	(35.6±0.4) <sup>a</sup>	(47.5±0.9) <sup>b</sup>	(54.7±1.4) <sup>b</sup>	(56.1±0.5) <sup>a</sup>
	灌水 Irrigation	9.180 **	1.127	7.654 **	2.210
	施肥 Fertilization	7.790 **	1.082	1.947	1.463
	灌水×施肥 Irrigation× Fertilization	2.920	3.299 *	3.971 *	1.635

注: \* 表示差异显著 ( $P<0.05$ ), \*\* 表示差异极显著 ( $P<0.01$ ); 同列数字后不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。

Note: \* indicates significant difference ( $P<0.05$ ), \*\* indicates very significant difference. Different letters after the same number indicate significant difference at  $P<0.05$  level.



注: 不同标记的小写字母表示差异显著, 有一个相同标记的字母表示差异不显著。下同

Note: The lowercase letters of different marks indicate significant differences, and the letters with the same mark indicate no significant differences. The same below

图 2 水肥耦合对核桃树蛋白质和脂肪含量的影响

Fig.2 Effect of water and fertilizer coupling on protein and fat in walnut trees

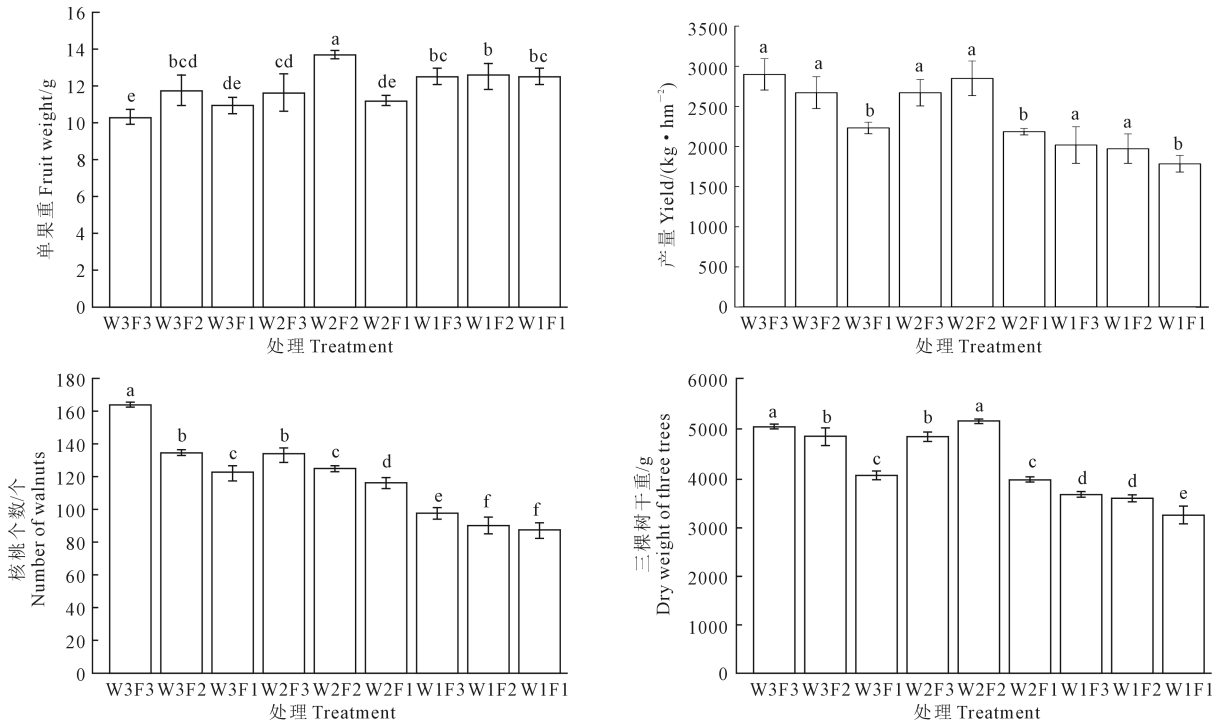


图 3 水肥耦合对核桃个数、单果重、产量和三棵树的果实干重的影响

Fig.3 Effect of water and fertilizer coupling on number of walnut trees, single fruit weight, yield and dry weight of three trees

### 2.4 水肥耦合对核桃产量品质和水肥利用率的效应研究

对核桃的蛋白质含量 ( $f_1$ )、产量 ( $f_2$ )、水分利用效率 ( $f_3$ )、肥料偏生产率 ( $f_4$ )、灌水量标准化的编码值 ( $x_1$ ) 和施肥量标准化的编码值 ( $x_2$ ) 采用二元二次回归拟合, 建立回归模型, 如下:

$$f_1 = 21.089 + 0.504x_1 - 0.411x_1^2 + 0.437x_2 - 0.389x_2^2 - 0.015x_1x_2$$

$$f_2 = 27840214 + 275.721x_1 - 203.865x_1^2 + 249.803x_2 - 215.412x_2^2 - 69.571x_1x_2$$

$$f_3 = 8.958 - 0.014x_1 - 0.411x_1^2 - 0.009x_2 - 0.225x_2^2 + 0.102x_1x_2$$

$$f_4 = 1.004 - 0.087x_1 - 0.071x_1^2 + 0.242x_2 - 0.121x_2^2 - 0.005x_1x_2$$

上述  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  模型的显著性分别为 0.022、0.003、0.094 和 0.005, 其中产量和肥料偏生产率的回归关系达到极显著水平, 决定系数  $R^2$  分别为 0.965、0.990、0.903 和 0.986, 决定系数都较高可能是由于核桃地此前未设置底肥, 并且该地区降雨量少, 地下水埋藏较深, 故灌水施肥对其影响较大。另外, 回归模拟关系和实际值的拟合较好, 可以用模拟值来表示实际值, 也可以用回归模型对实际值

进行模拟估测。通过对函数模型的一次项研究发现, 施肥量和灌水量在一定范围内都对核桃生长发育有正效应。其中施肥量对核桃蛋白质含量和产量的作用程度略小于灌水量。

2.4.1 单因子效应及边际效应分析 为了进一步研究灌水量和施肥量对核桃产量、品质和水肥利用率的影响, 将  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  进行降维处理, 分别研究单个因子对其效应, 得到单因子效应函数模型:

$$f_{1w} = 21.089 + 0.504x_1 - 0.411x_1^2$$

$$f_{1f} = 21.089 + 0.437x_2 - 0.389x_2^2$$

$$f_{2w} = 2784.214 + 275.721x_1 - 203.865x_1^2$$

$$f_{2f} = 2784.214 + 249.803x_2 - 215.412x_2^2$$

$$f_{3w} = 8.958 - 0.014x_1 - 0.411x_1^2$$

$$f_{3f} = 8.958 - 0.009x_2 - 0.225x_2^2$$

$$f_{4w} = 1.004 - 0.087x_1 - 0.071x_1^2$$

$$f_{4f} = 1.004 + 0.242x_2 - 0.121x_2^2$$

式中,  $f_{1w}$  和  $f_{1f}$  分别是灌水量和施肥量对核桃蛋白质含量的单因子效应函数;  $f_{2w}$  和  $f_{2f}$  分别是灌水量和施肥量对核桃产量的单因子效应函数;  $f_{3w}$  和  $f_{3f}$  分别是灌水量和施肥量对核桃水分利用效率的单因子效应函数;  $f_{4w}$  和  $f_{4f}$  分别是灌水量和施肥量对核桃肥料偏生产率的单因子效应函数。单因子效

应曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,核桃的蛋白质含量和产量的单因子效应函数均为开口向下的抛物线,故均存在有最大值。灌水量和施肥量对蛋白质含量趋于一致,均呈先增加、后趋于平缓、再下降的趋势。对于蛋白质含量而言,当 $-1.2247 < x_1 < 0.613$ 时,灌水量对核桃品质有提升作用,且在 $x_1 = 0.613$ 时达到最大;当 $0.613 < x_1 < 1.2247$ 时,核桃品质则会下降;当 $-1.069 < x_2 < 0.562$ ,施肥量对核桃品质有提升作用,且在 $x_2 = 0.562$ 时达到最大;当 $0.562 < x_1 < 1.3363$ 时,核桃品质则会被抑制。对于产量而言,当 $-1.2247 < x_1 < 0.676$ 时,灌水量对核桃产量有提升作用,且在 $x_1 = 0.676$ 时达到最大;当 $0.676 < x_1 < 1.2247$ 时,核桃产量则会下降;当 $-1.069 < x_2 < 0.580$ ,施肥量对核桃产量有提升作用,且在 $x_2 = 0.580$ 时达到最大;当 $0.580 < x_2 < 1.3363$ 时,核桃产量则会下降。对于水分利用效率而言,当 $-1.2247 < x_1 < -0.017$ 时,灌水量对水分利用效率有提升作用,且在 $x_1 = -0.017$ 时达到最大;当 $-0.017 < x_1 < 1.2247$ 时,核桃水分利用效率则会下降;当 $-1.069 < x_2 < -0.02$ ,施肥量对水分利用效率有提升作用,且在 $x_2 = -0.02$ 时达到最大;当 $-0.02 < x_1 < 1.3363$ 时,核桃的水分利用效率则会被抑制。对于肥料偏生产率而言,当 $-1.2247 < x_1 < -0.612$

时,灌水量对肥料偏生产率有提升作用,且在 $x_1 = -0.612$ 时达到最大;当 $-0.612 < x_1 < 1.2247$ 时,核桃的肥料偏生产率则会下降;当 $-1.069 < x_2 < 1$ 时,施肥量对肥料偏生产率有提升作用,且在 $x_2 = 1$ 时达到最大;当 $1 < x_1 < 1.3363$ 时,肥料偏生产率则会被抑制。

2.4.2 水肥耦合对核桃产量品质及水肥利用率的影响 如图 5 所示,水肥耦合效应对核桃水肥利用率、品质和产量影响显著。函数图像均开口向下的抛物面状,这表明存在最优解。核桃的水分利用效率和肥料偏生产率都受水肥交互作用影响。当灌水量一定时,水分利用率随施肥量增加呈先增大后减小趋势,且增大和减小趋势明显。在施肥量一定时,水分利用率随灌水量增加也呈先增大后减小趋势,且增大和减小趋势明显。在灌水量一定时,肥料偏生产率随施肥量的增加同样先增大后减小趋势,且减小趋势明显。在一定范围内,核桃的水肥利用率、品质和产量都随着灌水量和施肥量的增加而上升,超过一定范围后则呈下降趋势。W1F1 处理由于给核桃提供的养分不够导致品质和产量不佳,W3F3 处理则由于养分提供的过多,反而抑制核桃的品质和产量,当灌水量和施肥量处在中间水平时,水肥耦合效应最好,产量和品质达到最佳,水肥利用率达到较大值。

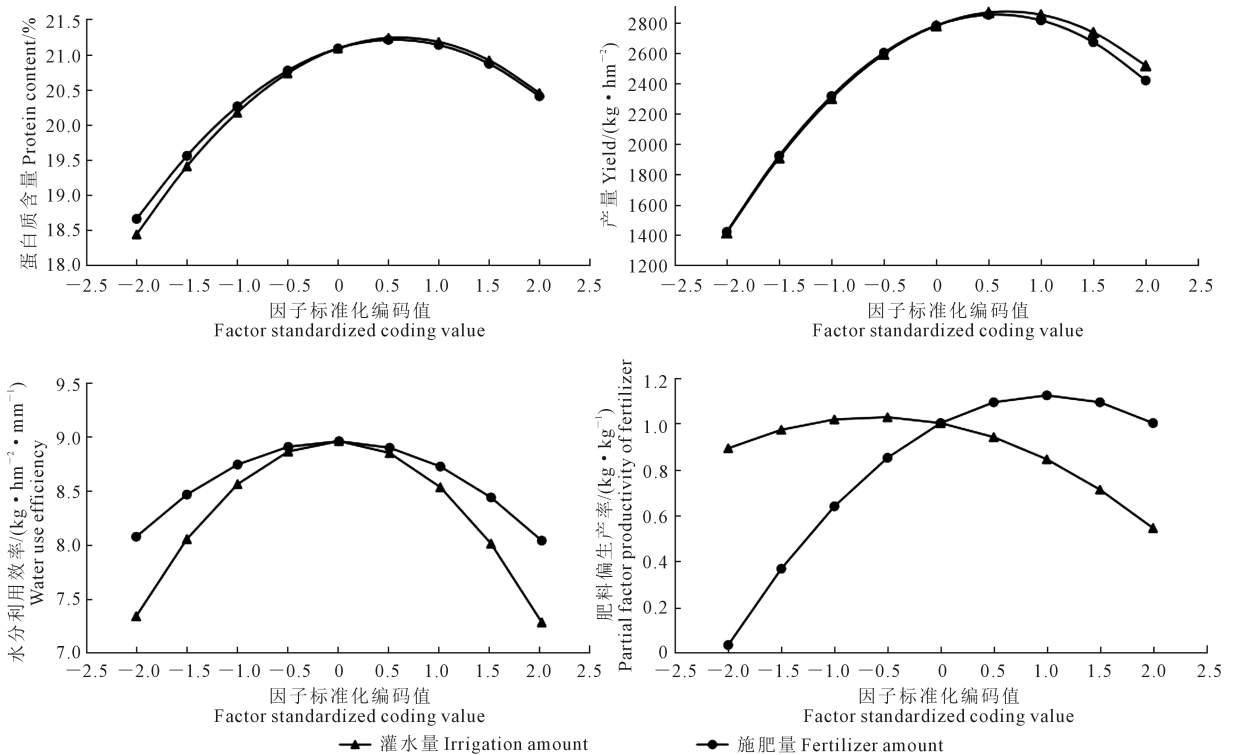


图 4 单因子效应曲线

Fig.4 Single-factorial effect curves

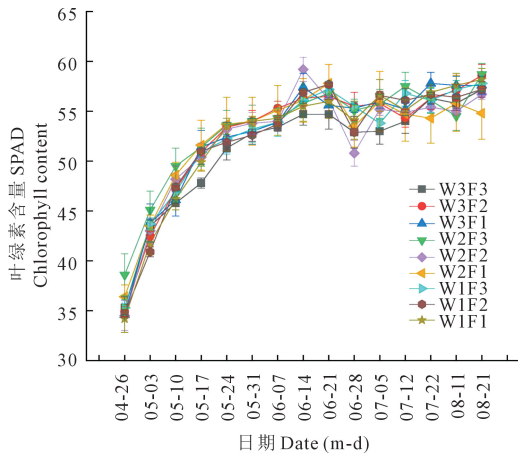


图 1 水肥耦合对核桃树 SPAD 值的影响  
Fig.1 Effect of water-fertilizer coupling on SPAD in walnut trees

### 2.5 基于 NSGA-II 算法的四目标优化模型

为了寻求核桃树的水肥利用率、果实品质和产量的最优解,建立由  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  组成的关于 NSGA-II 算法的四目标优化模型:

$$\begin{cases} \max f_1 = 21.089 + 0.504x_1 - 0.411x_1^2 + 0.437x_2 - 0.389x_2^2 - 0.015x_1x_2 \\ \max f_2 = 2784.214 + 275.721x_1 - 203.865x_1^2 + 249.803x_2 - 215.412x_2^2 - 69.571x_1x_2 \\ \max f_3 = 8.958 - 0.014x_1 - 0.411x_1^2 - 0.009x_2 - 0.225x_2^2 + 0.102x_1x_2 \\ \max f_4 = 1.004 - 0.087x_1 - 0.071x_1^2 + 0.242x_2 - 0.121x_2^2 - 0.005x_1x_2 \end{cases}$$

$(-1.2247 \leq x_1 \leq 1.2247, -1.0690 \leq x_2 \leq 1.3363)$

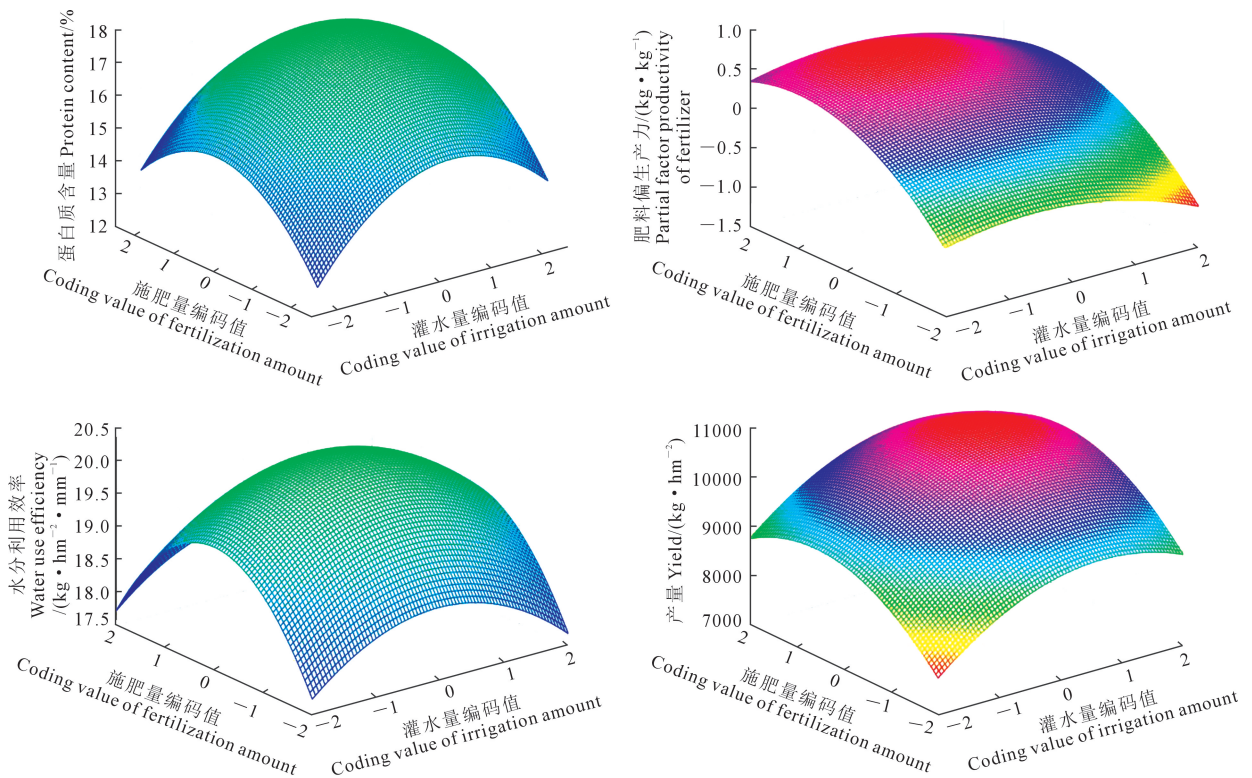


图 5 水肥耦合效应图  
Fig.5 Coupled effects of water and fertilizer

通过 MATLAB 进行 NSGA-II 算法计算上述模型的双目标 pareto 解,其中种群大小设置为 200,最大遗传代数设置为 300,交叉概率设置为 0.8,得到 pareto 非劣解,其中最优解对应的编码值分别是  $x_1 = 0.6031$ ,  $x_2 = 0.55$ ,所对应的灌水量和施肥量分别是  $336.93 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和  $715.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。最终对应的蛋白质含量和产量分别是  $21.36\%$ 和  $2971.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。该方案相较于低水低肥,灌水量增加了  $49.7\%$ ,

施肥量增加了  $202\%$ ,蛋白质含量、产量、水分利用效率和肥料偏生产率分别增加了  $12.4\%$ 、 $66.5\%$ 、 $6.8\%$ 和  $13.4\%$ ,相较于高水高肥,灌水量减少了  $10.2\%$ ,施肥量增加了  $24.5\%$ ,蛋白质含量、产量、水分利用效率和肥料偏生产率分别增加了  $1.7\%$ 、 $2.5\%$ 、 $8.2\%$ 和  $67.3\%$ ,相较于中水中肥而言,灌水量增加了  $12.3\%$ ,施肥量增加了  $50.9\%$ ,蛋白质含量和产量只增加了  $0.8\%$ 和  $4.3\%$ 。



### 3 讨 论

灌溉和施肥制度是影响作物的健康生长的两大关键因素<sup>[19-24]</sup>。本研究表明水肥耦合对核桃树不同生育时期的叶绿素含量都有一定的影响,叶绿素含量在开花结果期和果实膨大期迅速增大,在硬核期之后趋于平缓。这与张纪圆<sup>[25]</sup>的研究结果一致。

决定核桃经济效益的首要因素是产量和品质,要实现核桃生产的高产高效就要提升产量和品质,已有大量研究表明灌水和施肥量并非越多越好,制定合理的水肥耦合方案才能实现高产高效<sup>[26]</sup>。当灌水量过大时,则会因水分含量过大,影响果实的品质,使口感欠佳。而施肥量过大,同样会使肥料偏生产率下降,从而影响果实品质<sup>[27]</sup>。肥料可以直接参与或间接影响植物的氮素和脂肪的代谢,进而对植物的蛋白质和脂肪含量产生不同程度的影响<sup>[2]</sup>。这与本研究结果相似。胡渊等<sup>[28]</sup>研究表明,在普通的土壤养分条件下,氮、磷、钾肥对 11 a 生‘新温 185 号’的核桃果实粗脂肪含量的影响表现不同,氮肥的施用量对粗脂肪含量效应不显著,当磷肥和钾肥施用量小于  $0.484 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$  和  $0.198 \text{ K}_2\text{O kg} \cdot \text{株}^{-1}$  时,对粗脂肪含量的影响均存在正效应,反之则存在负效应。马建琴等<sup>[21]</sup>研究表明玉米产量和水分利用率随水和肥的增加呈先增后减趋势;灌水对玉米产量和水分利用率的影响程度大于施肥,这与本研究结果有些差别。本研究结果显示,灌水和施肥对核桃的品质和产量影响程度相当。随着灌水量和施肥量的增加,核桃脂肪含量和蛋白质含量增大,但是超过一定量后,含量均呈现下降的趋势。不同水肥处理下脂肪和蛋白质含量最大值均出现在 W2F2 处理,最大脂肪含量是 66.8%,最大蛋白质含量是 21.2%,脂肪和蛋白质含量的最小值均出现在 W1F1 处理,其中核桃个数最多的是 W3F3 处理,个数最少的是 W1F1 处理;核桃的单果重量的最大值出现在 W2F2 处理,最小值出现在 W3F3 处理;产量最高的在 W3F3 处理,最低的是 W1F1 处理。综上所述,灌水量和施肥量会显著影响核桃产量和品质。

水分利用效率和肥料偏生产力是决定核桃高效绿色生产的重要指标,适宜的灌溉与施肥耦合能使核桃对水分和养分的吸收利用产生协同作用。本研究发现灌水量和施肥量对水分利用效率和肥料偏生产率影响都极显著( $P < 0.01$ )。胡晓辉等<sup>[18]</sup>

研究发现灌水量和施肥量对袋培辣椒的水分利用效率和肥料偏生产率的影响显著且均存在阈值,且灌水量对水分利用效率的影响大于施肥量,这与本研究结果相似,本研究结果表明灌水量对水分利用效率的影响稍大于施肥量,但施肥量对肥料偏生产率的影响远大于灌水量。付秋萍等<sup>[29]</sup>研究表明适量氮肥对核桃水分利用率有明显的促进作用,并且随着施氮量的增加先增大而后减小,氮肥的偏生产力随着施氮量的增加显著降低,这与本研究结果略有不同,可能是由于付秋萍等<sup>[29]</sup>试验的施肥梯度设置过大,也可能是因为灌水梯度和施肥的种类和配比不同造成的,较低的灌水量可能会影响核桃对养分的吸收。

单一目标评价的结果难以真正实现作物的节约水肥和高效优质生产的目的,并且有一定程度的不确定性。因此,在现代农业生产中,建立品质、产量和水肥利用率等多目标下的最优水肥耦合模型,就能确定更有效的灌水和施肥制度。遗传算法目前在多个领域都展现出巨大作用,并且与以往可能会产生不确定因素的综合评判法相比更科学可靠<sup>[27]</sup>,赵文举等<sup>[30]</sup>运用 NSGA-II 对产量和品质进行研究,得出了最优处理,验证了其科学合理性和适应性。马建琴等<sup>[21]</sup>也建立玉米产量和水分利用率的双目标优化模型,利用 NSGA-II 算法对模型进行求解,从而得到最佳水肥组合方案。本研究通过建立二元二次回归模型,并采用 NSGA-II 对模型进行验证求解得出,最优的蛋白质含量和产量分别是 21.36% 和  $2\,971.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,灌水量和施肥量分别是  $336.93 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $715.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。模拟结果发现,得出的最优蛋白质含量相较于 W2F2 处理提升不大,这是由于水肥耦合对于品质和产量的效应是呈开口向下的抛物面,随着灌水和施肥量的增加,当其越接近最优值时蛋白质含量的变化速率就越慢,该模型是通过灌水和施肥量对核桃的蛋白质含量、产量和水肥利用率做了最优值的预测,但是由于核桃的生长周期较长,本试验只进行了一年,并且各处理的灌水量和施肥量差距稍大,可能对实验结果产生些许误差,试验数据的稳定性和该优化模型针对于核桃水肥制度的适应性还有待进一步研究。

### 4 结 论

1) W3F3 处理(灌水量  $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施肥量  $947.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和 W2F2 处理(灌水量  $300 \text{ m}^3 \cdot$

hm<sup>-2</sup>、施肥量 473.85 kg · hm<sup>-2</sup>) 的核桃个数、单果重量、产量差异不大,但 W3F3 处理所用的水肥更多,水分利用效率和肥料偏生产率差异较大,经济成本更高,且过高的肥料使用会对环境造成污染,故 W2F2 产量的总体经济价值更好。不同水肥耦合处理下,核桃的叶绿素含量、果实品质和产量都密切相关,总体看来 W2F2 处理为最优的灌溉施肥处理。

2) 由灌水量和施肥量建立了关于核桃品质、产量、水分利用效率和肥料偏生产率的二元二次回归模型,且拟合效果较好,可以用回归模型对实际值进行模拟估测;同时采用非支配排序的遗传算法(NSGA-II)对模型进行验证求解,得到最优的蛋白质含量和产量分别是 21.36% 和 2 971.66 kg · hm<sup>-2</sup>,灌水量和施肥量分别是 336.93 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup> 和 715.21 kg · hm<sup>-2</sup>。

#### 参考文献:

[1] 汪卫祥. 四川核桃生产现状及产业化发展建议[J]. 中国园艺文摘, 2015, 31(10): 60-62.  
WANG W X. Current status of walnut production in Sichuan and suggestions for industrialization development[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2015, 31(10): 60-62.

[2] 刘春晓, 苗庆选, 怀婷婷, 等. 氮磷钾肥料施用对核桃蛋白质和粗脂肪含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (5): 27-33.  
LIU C X, MIAO Q X, HUAI T T, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application on protein and crude fat content of walnut[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022, (5): 27-33.

[3] 王芳. 坚果中脂肪含量及脂肪酸组成分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(15): 4105-4111.  
WANG F. Analysis of fat content and fatty acid composition in nut[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(15): 4105-4111.

[4] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 48-51.  
HU C, CAO Z P, LUO Y R, et al. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2007, 15(3): 48-51.

[5] 宋素灵. 山核桃林地土壤退化现状和施肥改良研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.  
SONG S L. *Carya cathayensis* sarg. forest soil degradation and its improvement through fertilization [D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2014.

[6] 马闪闪. 土壤酸化与山核桃林退化的关系及其改良[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.  
MA S S. Soil acidification inducing degradation of Chinese hickory (*Carya cathayensis*) forests and its amelioration[D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2016.

[7] 赵经华, 张纪圆, 彭艳平, 等. 调亏灌溉对滴灌核桃树光合特性及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2020, (9): 52-57, 63.  
ZHAO J H, ZHANG J Y, PENG Y P, et al. Effect of regulated deficit irrigation on photosynthetic characteristics and yield of drip irrigation walnut trees[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (9): 52-57, 63.

[8] 曾成城, 苏天明, 苏利荣, 等. 减量化肥配施叶面肥对山核桃产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (6): 108-114.  
ZENG C C, SU T M, SU L R, et al. Effects of reducing chemical fertilizer combined with foliar fertilization on the yield and quality of *Carya cathayensis* [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022, (6): 108-114.

[9] 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.  
CONG X, ZHANG L Z, XU Z H, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 315-324.

[10] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 283-293.  
YAN F L, ZHANG F C, FAN X K, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer supply on yield and nitrogen absorption and utilization efficiency of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 283-293.

[11] 李欢欢, 刘浩, 庞婕, 等. 水氮互作对盆栽番茄生长发育和养分累积的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 272-279.  
LI H H, LIU H, PANG J, et al. Effects of water and nitrogen interaction on growth and nutrient accumulation of potted tomatoes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 272-279.

[12] 杨梦思, 罗莎莎, 王如月, 等. 水肥耦合效应对核桃属 2 种幼苗抗寒性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 163-175.  
YANG M S, LUO S S, WANG R Y, et al. The effect of water fertilizer coupling on the cold resistance of seedlings of two walnut species [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(19): 163-175.

[13] 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.  
DU C L, WANG X K, WANG N, et al. Effects of water and fertilizer coupling on nutrient absorption and yield of greenhouse potatoes in northern Shaanxi [J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(14): 4840-4850.

[14] 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.

[15] 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 Plat-

- eau, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 218: 105308.
- [16] ZHOU X, WANG R S, GAO F, et al. Apple and maize physiological characteristics and water-use efficiency in an alley cropping system under water and fertilizer coupling in Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 1-12.
- [17] 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.
- [18] 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.
- HU X H, GAO Z X, MA Y B, et al. Coupling scheme of water and fertilizer based on yield, quality, use efficiency of water and fertilizer in bag pepper growing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17): 81-89.
- [19] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 82-90.
- LI J M, PAN T H, WANG L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 82-90.
- [20] 烟亚萍, 刘勇, 贺国鑫, 等. 水肥耦合对楸树苗木生长和养分状况的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(2): 58-67.
- YAN Y P, LIU Y, HE G X, et al. The effect of water fertilizer coupling on the growth and nutrient status of Chinese catalpa seedlings[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(2): 58-67.
- [21] 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.
- [22] 温越, 王振华, 李文昊, 等. 极端干旱区水肥耦合对滴灌葡萄产量和品质的影响研究[J]. *核农学报*, 2021, 35(10): 2431-2439.
- WEN Y, WANG Z H, LI W H, et al. Research on the effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of drip irrigation grapes in extremely arid regions[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(10): 2431-2439.
- [23] 赵清竹, 高峰, 曹铁华, 等. 耕作与水肥耦合对冷凉区水稻产量及温室气体排放的影响[J]. *延边大学农学学报*, 2022, 44(1): 27-35, 56.
- ZHAO Q Z, GAO F, CAO T H, et al. Effects of tillage and water-fertilization coupling on rice yield and greenhouse gas emission in cold region[J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2022, 44(1): 27-35, 56.
- [24] 马新超, 周宇, 刘青, 等. 水肥耦合对黄沙炉渣复合基质栽培黄瓜光合荧光特性、产量及品质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(3): 597-608.
- MA X C, ZHOU Y, LIU Q, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic fluorescence characteristics, yield and quality of cucumber cultivated with yellow sand and slag composite substrate[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(3): 597-608.
- [25] 张纪圆. 调亏灌溉对滴灌核桃树生理生态及根系模拟的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- ZHANG J Y. Study of regulated deficit irrigation on drip irrigation walnut tree physiological ecology and root system simulation[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [26] 付秋萍, 赵经华, 马亮, 等. 塔里木盆地西北缘区密植核桃的滴灌水肥适宜用量[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3): 253-259.
- FU Q P, ZHAO J H, MA L, et al. Suitable amount of water and fertilizer for drip irrigation of closely planted walnuts in the northwest edge of Tarim Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(3): 253-259.
- [27] RASOOL G, GUO X P, WANG Z C, et al. Response of fertigation under buried straw layer on growth, yield, and water-fertilizer productivity of Chinese cabbage under greenhouse conditions[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(8): 1030-1043.
- [28] 胡渊, 潘存德, 陈虹. 根施氮磷钾肥对“新温 185 号”核桃坚果粗脂肪含量的影响[J]. *北方园艺*, 2015, (12): 152-155.
- HU Y, PAN C D, CHEN H. Effect of root fertilizing with nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on nut crude fat content of *Juglans regia* ‘Xinwen 185’[J]. *Northern Horticulture*, 2015, (12): 152-155.
- [29] 付秋萍, 王忠任, 赵经华, 等. 环塔盆地不同施氮量对滴灌核桃生长及产量的影响[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(11): 181-188.
- FU Q P, WANG Z R, ZHAO J H, et al. Effects of different nitrogen application rates on growth and yield of walnut under drip irrigation condition around Tarim Basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(11): 181-188.
- [30] 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.