

刘欢平, 郑彩霞, 刘 涛, 等. 基于产量、品质和水氮利用效率的油橄榄水氮耦合方案优选[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9): 1843-1853.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.09.006

## 基于产量、品质和水氮利用效率的油橄榄水氮耦合方案优选

刘欢平<sup>1,2</sup>, 郑彩霞<sup>1</sup>, 刘 涛<sup>1</sup>, 石琪仙<sup>1</sup>, 兰 波<sup>2</sup>, 陈 茜<sup>1</sup>, 闫 敏<sup>1</sup>, 余文俊<sup>1</sup>, 袁小虎<sup>1</sup>, 张志亮<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625000; 2. 聚峰谷农业科技开发有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为了实现油橄榄增产稳产、提质增效和可持续发展, 探究龙泉山区油橄榄栽培中高效的水氮耦合方案, 本研究的大田定位试验以 9 年生格洛桑作为研究材料, 设置灌水、施氮 2 个因素, 4 个灌水量 (I1: 50.00% I4; I2: 66.66% I4; I3: 83.33% I4; I4: 90.00%  $\theta_{fc}$ ;  $\theta_{fc}$  为田间最大持水量) 和 4 个施氮水平 (N1: 0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2: 150 kg/hm<sup>2</sup> N; N3: 300 kg/hm<sup>2</sup> N; N4: 450 kg/hm<sup>2</sup> N), 共 16 个处理。分析灌水、施氮及其耦合处理对油橄榄产量、橄榄油品质及水氮利用效率的影响, 利用优劣解距离 (TOPSIS) 法对橄榄油品质进行综合分析, 以油橄榄鲜果产量、橄榄油品质及水氮利用效率为评价指标, 通过综合评分法对各个处理进行综合评价, 探寻油橄榄水分、氮肥管理的最优处理。结果表明, N1I2 处理油橄榄鲜果产量最低 (4 333 kg/hm<sup>2</sup>), N4I3 处理油橄榄鲜果产量最高 (11 027 kg/hm<sup>2</sup>); 水氮耦合处理对橄榄油品质的影响极显著, 对灌溉水利用效率 (*iWUE*)、油橄榄鲜果产量及氮肥偏生产力 (*NPFP*) 的影响不显著; 由综合评分法求得本研究条件下的最优处理为 N2I3 处理, 油橄榄鲜果产量为 6 293 kg/hm<sup>2</sup>, *iWUE* 为 52.44 kg/m<sup>3</sup>, *NPFP* 为 62.93 kg/kg; 采用 TOPSIS 法进行油脂品质综合分析, 发现 N2I2 处理得分最高, 为 0.787。本研究结果可为指导山区油橄榄高效、绿色生产提供理论依据。

**关键词:** 油橄榄; 水氮耦合; 产量; 品质; 水氮利用效率; TOPSIS 法; 综合评分法

**中图分类号:** S565.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)09-1843-11

## Priority of water-nitrogen coupling scheme for olive based on yield, quality, and water-nitrogen use efficiency

LIU Huan-ping<sup>1,2</sup>, ZHENG Cai-xia<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, SHI Qi-xian<sup>1</sup>, LAN Bo<sup>2</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, YAN Min<sup>1</sup>, YU Wen-jun<sup>1</sup>, YUAN Xiao-hu<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-liang<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering of Sichuan Agricultural University, Ya'an 625000, China; 2. Jufenggu Agricultural Technology Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to increase and stabilize the yield, improve the quality and efficiency, and achieve sustainable development of olive, we explored the efficient water and

nitrogen coupling scheme in Longquan Mountain area, and used 9-year-old Grossane as the research material of field positioning experiment. We set four irrigation amounts (I1: 50.00% I4; I2: 66.66% I4; I3: 83.33% I4; I4: 90.00%  $\theta_{fc}$ ;  $\theta_{fc}$  was the the maximum water holding capacity in the field) and four nitrogen application levels (N1: 0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2: 150 kg/hm<sup>2</sup> N; N3: 300 kg/hm<sup>2</sup> N; N4: 450

收稿日期: 2022-12-24

基金项目: 四川省科技厅项目 (2019YJ0430); 四川省科技计划项目 (2020YFH0207); 四川省重点实验室开放基金项目 (SZKF2208)

作者简介: 刘欢平 (1997-), 男, 贵州锦屏人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程方面的研究。(E-mail) 2150413526@qq.com

通讯作者: 郑彩霞, (E-mail) caixia818@163.com

kg/hm<sup>2</sup> N), a total of 16 treatments. The effects of irrigation, nitrogen application and their coupling treatment on olive yield, olive oil quality and water and nitrogen use efficiency were analyzed. The quality of olive oil was comprehensively analyzed and evaluated by technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method. The fresh fruit yield, olive oil quality and water and nitrogen utilization efficiency were used as evaluation indices. The comprehensive evaluation of each treatment was carried out by comprehensive scoring method to explore the optimal treatment of olive water and nitrogen fertilizer management. The results showed that the fresh fruit yield of olive under N1I2 treatment was the lowest (4 333 kg/hm<sup>2</sup>), and the fresh fruit yield of olive under N4I3 treatment was the highest (11 027 kg/hm<sup>2</sup>). The effects of water and nitrogen coupling treatment on the quality of olive oil were extremely significant, and the effects on irrigation water use efficiency (*iWUE*), fresh fruit yield and nitrogen partial factor productivity (*NPFP*) were not significant. According to the comprehensive scoring method, the optimal treatment under the conditions of this study was N2I3 treatment. The fresh fruit yield of olive was 6 293 kg/hm<sup>2</sup>, *iWUE* was 52.44 kg/m<sup>3</sup>, and *NPFP* was 62.93 kg/kg. TOPSIS method was used to comprehensively analyze the oil quality, and it was found that N2I2 treatment had the highest score of 0.787. The results of this study can provide a theoretical reference for guiding the efficient and green production of olive in mountainous areas.

**Key words:** olive; water-nitrogen coupling; yield; quality; water-nitrogen use efficiency; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method; comprehensive scoring method

油橄榄 (*Olea europaea* L.) 又名齐墩果, 属于木犀科 (Oleaceae) 木犀榄属 (*Olea*), 是世界四大木本油料作物之一<sup>[1]</sup>, 原产自地中海沿岸国家<sup>[2]</sup>。中国于 20 世纪 60 年代开始引种油橄榄, 经过划区试种<sup>[3]</sup>、选种育种<sup>[4-5]</sup>、高产栽培<sup>[6-7]</sup>等发展历程, 2018 年中国油橄榄种植面积 3.96×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>, 四川省油橄榄种植面积 2.40×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 其中龙泉山区种植面积 4 400 hm<sup>2</sup>, 年产鲜果 5.5×10<sup>3</sup> t, 经济效益显著, 已成为当地特色作物和优势经济作物<sup>[8]</sup>。但因该地区季节性干旱严重, 降雨量分配不均及田间水肥管理不科学等导致油橄榄座果率低下、产量不稳定及橄榄油品质参差不齐, 严重制约了油橄榄的高产、优质发展。因此, 研究水氮耦合机理、优化油橄榄水肥管理模式对油橄榄集约化、高效、绿色生产和形成可持续发展产业具有重大意义。科学合理的灌溉施肥制度对油橄榄的生长发育、产量及橄榄油品质的提升至关重要。有研究表明, 干旱胁迫对油橄榄幼苗的生长存在一定的抑制作用<sup>[9]</sup>, 干旱程度加剧会提高叶片相对电导率和叶片渗透调节物质含量, 降低叶绿素含量<sup>[10]</sup>。适度的亏缺灌溉可增加作物吸水量、提高油橄榄产量和水分生产率<sup>[11]</sup>。朱绍丹等<sup>[12]</sup>研究发现中度干旱 (土壤含水率 12%) 与生草间作可提高油橄榄叶片含水量和光合色素含量, 提升根系活力, 促进植株生长发育。适度的氮素亏缺可显著提高油橄榄单株结果数量和单株产量, 过量施氮 (150 kg/hm<sup>2</sup> 以上) 会使橄榄油的酸值和多不饱和脂肪酸含量增加、总多酚含量和单不饱和脂肪酸

含量显著降低, 导致油脂品质及稳定性整体下降<sup>[13]</sup>。Haberman 等<sup>[14]</sup>的研究结果表明, 适宜的施氮量是集约化橄榄园高产、稳产的基础。养分供应在作物不同生育期发挥的作用存在较大差异, 促进氮素吸收利用以及提高氮素利用率的关键在于确定适宜的氮素施用量。水肥耦合效应根据作物不同生育阶段的需水、需肥要求, 从时空、数量、方式等多方面合理分配养分和水分, 实现以水促肥、以肥调水, 综合提高农田水肥利用效率<sup>[15]</sup>。但想同时实现高产、优质、节水、省肥, 因地制宜地建立科学、合理的复合评价体系必不可少。

衡量油橄榄的水氮利用效率、鲜果产量及橄榄油品质的标准各不相同, 但又存在一定的相关性, 仅凭单项指标无法明确该山区油橄榄最佳的水氮组合处理。优劣解距离 (Technique for order performance by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 法<sup>[16]</sup>因具有原始数据应用充分、信息量损失较少的优点, 在中药材品质评价体系中已得到广泛应用<sup>[17]</sup>。为进一步提高橄榄油品质综合评价的准确性及科学性, 本研究拟采用 TOPSIS 法对橄榄油品质进行综合分析评价, 利用变异系数法求出各项评价指标所占权重, 用综合评分法消除尺度差异造成的影响, 最后得出油橄榄水氮投入与产量、品质回报的综合评价价值, 探索龙泉山区滴灌水肥一体化条件下油橄榄最佳的水氮管理制度, 以期为推动当地油橄榄产业绿色、高产、稳产、优质以及向集约化、农业现代化方向发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年1月-2021年12月在四川省聚峰谷农业科技开发有限公司(104°34'E,30°44'N)进行。试验区为油橄榄次适生区,平均海拔733 m,属于亚热带季风气候,年降水量820 mm,多集中于夏季;年平均气温16.6℃,大于10.0℃有效积温为5450.0℃;年平均日照1268.7 h,年相对湿度60%~80%。供试土壤为紫色土,pH值为7.5,田间最大持水量0.246 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,试验区耕层土壤基本养分状况见表1。供试品种为9年生格桑,理论种植密度为1 hm<sup>2</sup> 400株,株高2.5~3.0 m,树体长势均匀;树体修剪、病虫害防治等其他田间农艺管理措施均参考当地油橄榄生产实际进行相同处理。月平均气象条件见表2。

表1 研究区橄榄园土壤基本养分状况

Table 1 Basic nutrient status of soil in olive orchard in the study area

| 土层深度<br>(cm) | 全氮含量<br>(g/kg) | 速效磷含量<br>(mg/kg) | 速效钾含量<br>(mg/kg) |
|--------------|----------------|------------------|------------------|
| 0~30         | 0.94           | 10.33            | 88.45            |

表2 试验区月平均气象数据

Table 2 Monthly average meteorological data of the test area

| 月份  | 平均气温<br>(℃) | 平均风速<br>(m/s) | 平均相对湿度<br>(%) | 降水量<br>(mm) |
|-----|-------------|---------------|---------------|-------------|
| 1月  | 6.3         | 1.9           | 71            | 1.2         |
| 2月  | 12.6        | 2.0           | 67            | 14.1        |
| 3月  | 15.0        | 2.0           | 67            | 33.1        |
| 4月  | 17.3        | 2.1           | 75            | 63.4        |
| 5月  | 22.0        | 2.1           | 73            | 51.8        |
| 6月  | 24.7        | 1.9           | 72            | 74.3        |
| 7月  | 27.1        | 1.7           | 78            | 147.2       |
| 8月  | 25.7        | 1.8           | 79            | 134.3       |
| 9月  | 23.3        | 1.8           | 82            | 142.0       |
| 10月 | 16.8        | 1.8           | 85            | 79.6        |
| 11月 | 10.9        | 1.5           | 78            | 56.6        |
| 12月 | 8.5         | 1.5           | 77            | 11.9        |

表中气象数据由四川省成都市金堂县气象台提供。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,根据油橄榄基

地多年水肥生产管理经验、地域特点与相关文献资料<sup>[18]</sup>,设置4个灌水量(I1:50.00% I4; I2:66.66% I4; I3:83.33% I4; I4:90.00%  $\theta_{fc}$ ;  $\theta_{fc}$ :田间最大持水量)和4个追施氮肥水平(N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N,低氮; N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N,中氮; N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N,高氮),共16个处理,灌水量和氮肥用量见表3;每个处理重复3次,共48棵树。参照公式(1)<sup>[19]</sup>计算I4处理的单次灌水量,在I4处理小区内埋设土壤水分传感器(DECAGON公司产品),监测深度0~0.6 m,定期采用烘干法进行校核。

$$M=s \times h \times \gamma \times \rho \times \theta_{fc} \times (q_1 - q_2) / \eta \quad (1)$$

式中: $M$ 为灌水定额(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>); $s$ 为灌溉面积(m<sup>2</sup>); $h$ 为土壤计划湿润深度,全生育期均为0.6 m; $\gamma$ 为土壤容重,1.53 g/cm<sup>3</sup>; $\rho$ 为设计土壤湿润比,作物为经济果林木、灌溉方式为滴灌,故取0.35; $\theta_{fc}$ 为田间最大持水量,0.246 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>;  $q_1$ 为灌水上限土壤水分含水量; $q_2$ 为实测土壤水分含水量; $\eta$ 为水分利用系数,滴灌取1.0<sup>[20]</sup>。

氮肥(尿素,含氮量46.6%)追施,于文丘里施肥罐中溶解后经滴灌系统施入田间;基肥(有机肥,N含量+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量+K<sub>2</sub>O含量≥5%,有机质含量≥45%,1棵树10 kg)于1月份环状沟施;为避免水、肥侧向流动,小区之间预埋深度0.50 m的不透水膜;将相同灌水水平的12棵树划为一个小区,试验地为大块梯田,几乎无坡度,不会产生地表径流。

滴灌管道系统采用一行一管布置,毛管间距5.0 m、管径20.0 mm;距树干0.6 m处环状布置4个压力补偿式滴头,相邻滴头间距1.0 m,滴头设计流量4.0 L/h。灌水与施氮均由滴灌系统控制,小区内单设水量表、压力表及控制阀精确控制灌水量;本试验油橄榄物候期内年有效降雨量为792.1 mm。

1.3 测定项目及方法

产量的测定:单株产量用电子天平(精度0.01 g)测定,每个处理测3株取平均值,折合成单位面积产量。

品质的测定:包括酸值、过氧化值、不饱和脂肪酸含量、油酸含量、亚油酸含量及棕榈油酸含量。酸值采用冷溶剂指示剂滴定法测定;过氧化值采用滴定法测定;脂肪酸组成采用气相色谱-质谱联用法(GC-MS法)测定。

氮肥偏生产力(*NPFP*)为施氮区油橄榄鲜果总产量与氮肥施入总量之比;灌溉水利用效率(*iWUE*)为油橄榄鲜果总产量与总灌水量之比。

#### 1.4 评价方法

1.4.1 TOPSIS 法 本研究采用 TOPSIS 法按如下步

骤对橄榄油各类指标进行计算<sup>[21]</sup>:

第一,归一化处理:原始数据可表示为原始矩阵  $X = (X_{ij})_{a \times b}$  ( $X_{ij}$  为第  $i$  个处理的第  $j$  个指标的原始数据),共有  $a$  个评价对象,  $b$  个评价指标。

表 3 灌水量和氮肥用量

Table 3 Irrigation amount and nitrogen fertilizer amount

| 处理   | 氮肥追施量 (kg/hm <sup>2</sup> ) |             | 氮肥追施总量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 灌水水平 | 灌水量<br>(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) |
|------|-----------------------------|-------------|---------------------------------|------|---|
|      | 开花座果期 (60%)                 | 果实膨大期 (40%) |                                 |      |   |
| N1I1 | 0                           | 0           | 0                               | I1   | 108                                       |
| N1I2 | 0                           | 0           | 0                               | I2   | 144                                       |
| N1I3 | 0                           | 0           | 0                               | I3   | 180                                       |
| N1I4 | 0                           | 0           | 0                               | I4   | 216                                       |
| N2I1 | 90                          | 60          | 150                             | I1   | 108                                       |
| N2I2 | 90                          | 60          | 150                             | I2   | 144                                       |
| N2I3 | 90                          | 60          | 150                             | I3   | 180                                       |
| N2I4 | 90                          | 60          | 150                             | I4   | 216                                       |
| N3I1 | 180                         | 120         | 300                             | I1   | 108                                       |
| N3I2 | 180                         | 120         | 300                             | I2   | 144                                       |
| N3I3 | 180                         | 120         | 300                             | I3   | 180                                       |
| N3I4 | 180                         | 120         | 300                             | I4   | 216                                       |
| N4I1 | 270                         | 180         | 450                             | I1   | 108                                       |
| N4I2 | 270                         | 180         | 450                             | I2   | 144                                       |
| N4I3 | 270                         | 180         | 450                             | I3   | 180                                       |
| N4I4 | 270                         | 180         | 450                             | I4   | 216                                       |

N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N, 低氮; N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N, 中氮; N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N, 高氮; I1:50.00% I4; I2:66.66% I4; I3:83.33% I4; I4:90.00% I4。 $\theta_{ic}$  为田间最大持水量。

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^b X_{ij}^2}} \quad (2)$$

式中,  $Z_{ij}$  表示原始数据的归一化矩阵;  $i = (1, 2, \dots, a)$ ,  $j = (1, 2, \dots, b)$ 。

第二, 归一化矩阵  $Z = (Z_{ij})_{a \times b}$ , 计算各列最大值、最小值构成的最优向量、最劣向量。

$$Z^+ = (Z_{1\max}, Z_{2\max}, \dots, Z_{b\max}) \quad (3)$$

$$Z^- = (Z_{1\min}, Z_{2\min}, \dots, Z_{b\min}) \quad (4)$$

式中,  $Z^+$  表示最优向量;  $Z^-$  表示最劣向量;  $Z_{j\max}$  表示第  $j$  个指标的最大值,  $j = (1, 2, \dots, b)$ ;  $Z_{j\min}$  表示第  $j$  个指标的最小值,  $j = (1, 2, \dots, b)$ 。

第三, 计算第  $i$  个处理与最优、最劣方案的加权距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^b (Z_{j\max} - Z_{ij})^2} \quad (5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^b (Z_{j\min} - Z_{ij})^2} \quad (6)$$

式中,  $D_i^+$  表示第  $i$  个处理与最优方案的加权距离;  $D_i^-$  表示第  $i$  个处理与最劣方案的加权距离;  $Z_{j\max}$  表示第  $j$  个指标的最大值,  $j = (1, 2, \dots, b)$ ;  $Z_{j\min}$  表示第  $j$  个指标的最小值,  $j = (1, 2, \dots, b)$ 。

第四, 计算不同水氮处理与最优方案的贴合度 ( $C_i$ )。

$$C_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (7)$$

式中,  $D_i^+$  表示第  $i$  个处理与最优方案的加权距离;  $D_i^-$  表示第  $i$  个处理与最劣方案的加权距离。



1.4.2 综合评分法 本研究以油橄榄产量、橄榄油品质、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力作为评价指标进行综合评分,按照如下步骤进行计算<sup>[22]</sup>:

第一,设有  $m$  个评价对象,  $n$  个评价指标,  $X_{ij}$  表示第  $i$  个处理的第  $j$  个指标,对实测值进行归一化处理( $Y_{ij}$ )。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij\min}}{X_{ij\max} - X_{ij\min}} \quad (8)$$

式中,  $i = (1, 2, \dots, m)$ ,  $j = (1, 2, \dots, n)$ ;  $X_{ij}$  表示第  $i$  个处理的第  $j$  个指标;  $X_{ij\min}$  表示  $X_{ij}$  的最小值;  $X_{ij\max}$  表示  $X_{ij}$  的最大值。

第二,计算平均值( $\bar{X}_j$ )、方差( $S_j^2$ )。

$$\bar{X}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (9)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (Y_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (10)$$

第三,计算变异系数( $Z_j$ )。

$$Z_j = \frac{S_j}{\bar{X}_j} \quad (11)$$

式中,  $S_j$  表示标准差。

第四,计算权重( $W_j$ )。

$$W_j = \frac{Z_j}{\sum_{j=1}^n Z_j} \quad (12)$$

第五,计算综合得分( $C_{sj}$ )。

$$C_{sj} = \sum_{j=1}^n W_j Y_{ij} \quad (13)$$

## 1.5 数据分析

采用 SPSS 27.0 软件进行方差分析和多重比较。利用 Origin 9.1 进行绘图,用 Excel 进行综合评分法和 TOPSIS 法的计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水、施氮处理对油橄榄产量的影响

表 4 显示,灌水、施氮处理分别对油橄榄鲜果产量影响极显著( $P < 0.01$ ),水氮耦合处理对油橄榄鲜果产量影响不显著( $P > 0.05$ ),灌水对产量的影响大于施氮。图 1 显示,N1I2 处理油橄榄鲜果产量最低( $4\,333 \text{ kg/hm}^2$ ),N4I3 处理产量最高( $11\,027 \text{ kg/hm}^2$ )。相同灌水条件下,产量随着施氮量的增加总体呈上升趋势。低氮、中氮条件下灌水量对产量的影响不稳定,高氮条件下灌水量对产量有较强

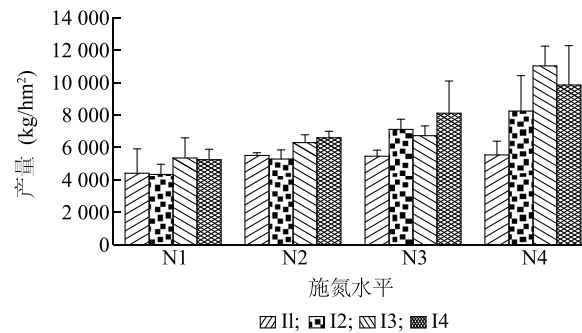
的正效应,但存在阈值。

表 4 不同处理因素对油橄榄鲜果产量的影响

Table 4 Effects of different treatment factors on fresh fruit yield of olive

| 因素    | F 值      |
|-------|----------|
| 灌水    | 21.910** |
| 施氮    | 9.142**  |
| 灌水×施氮 | 2.179    |

\*\* 表示影响极显著 ( $P < 0.01$ )。



N1:  $0 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ ; N2:  $150 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ , 低氮; N3:  $300 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ , 中氮; N4:  $450 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ , 高氮; I1:  $50.00\% I_4$ ; I2:  $66.66\% I_4$ ; I3:  $83.33\% I_4$ ; I4:  $90.00\% \theta_{fc}$ .  $\theta_{fc}$  为田间最大持水量。

图 1 不同水氮处理对油橄榄鲜果产量的影响

Fig. 1 Effects of different water and nitrogen treatments on fresh fruit yield of olive

### 2.2 灌水、施氮处理对橄榄油品质的影响

表 5 显示,灌水、施氮及水氮耦合处理对橄榄油酸值影响极显著,影响大小表现为水氮耦合>灌水>施氮。表 6 显示,N1 条件下,随着灌水量的增加,酸值呈上升趋势;N3 条件下,随着灌水量的增加,酸值总体呈下降趋势;N2 条件下,I3 处理的酸值显著高于其他灌水处理( $P < 0.05$ ),具体表现为  $I1 < I4 < I2 < I3$ ; N4 条件下,I4 处理的酸值显著高于 I1、I2 处理,表现为  $I2 < I1 < I3 < I4$ 。灌水、施氮及水氮耦合处理对橄榄油过氧化值影响极显著,影响大小表现为施氮>水氮耦合>灌水。N1、N2、N3 条件下,随着灌水量的增加,过氧化值呈上升趋势,最大值分别为  $9.05 \text{ mmol/kg}$ 、 $9.66 \text{ mmol/kg}$ 、 $9.44 \text{ mmol/kg}$ ,最小值分别为  $8.05 \text{ mmol/kg}$ 、 $7.68 \text{ mmol/kg}$ 、 $7.38 \text{ mmol/kg}$ 。

表 7 显示,灌水、施氮、水氮耦合处理对油酸含量、亚油酸含量和不饱和脂肪酸含量影响极显著( $P < 0.01$ ),对油酸含量和亚油酸含量的影响大小依

次为施氮>灌水>水氮耦合,对不饱和脂肪酸含量的影响大小依次为灌水>施氮>水氮耦合。施氮、水氮耦合处理对棕榈油酸含量影响极显著( $P<0.01$ ),灌水处理对棕榈油酸含量影响显著( $P<0.05$ )。

表 5 不同处理因素对橄榄油酸值和过氧化值的影响

Table 5 Effects of different treatment factors on acid value and peroxide value of olive oil

| 因素    | F 值       |           |
|-------|-----------|-----------|
|       | 酸值        | 过氧化值      |
| 灌水    | 12.603 ** | 3.064 **  |
| 施氮    | 7.714 **  | 20.591 ** |
| 灌水×施氮 | 16.531 ** | 4.222 **  |

\*\* 表示影响极显著( $P<0.01$ )。

表 6 不同水氮处理对橄榄油品质的影响

Table 6 Effects of different water and nitrogen treatments on olive oil quality

| 处理   | 酸值 (mg/g)  | 过氧化值 (mmol/kg) |
|------|------------|----------------|
| N1I1 | 0.23±0.04a | 8.05±0.25a     |
| N1I2 | 0.29±0.03a | 8.61±0.25ab    |
| N1I3 | 0.36±0.04b | 9.03±0.50b     |
| N1I4 | 0.47±0.04c | 9.05±0.40b     |
| N2I1 | 0.34±0.03a | 7.68±0.19a     |
| N2I2 | 0.45±0.05b | 8.38±0.22b     |
| N2I3 | 0.52±0.02c | 8.59±0.26b     |
| N2I4 | 0.40±0.01a | 9.66±0.53c     |
| N3I1 | 0.49±0.06b | 7.38±0.52a     |
| N3I2 | 0.31±0.10a | 7.63±0.60a     |
| N3I3 | 0.23±0.03a | 7.82±0.71a     |
| N3I4 | 0.27±0.05a | 9.44±1.25b     |
| N4I1 | 0.26±0.02a | 6.20±0.12a     |
| N4I2 | 0.22±0.02a | 9.19±0.84b     |
| N4I3 | 0.39±0.08b | 9.13±0.63b     |
| N4I4 | 0.46±0.06b | 8.33±0.75b     |

相同施氮条件下同列数据后不同小写字母表示不同灌水量处理之间存在显著差异( $P<0.05$ )。N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N;N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N,低氮;N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N,中氮;N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N,高氮;I1:50.00%I4;I2:66.66%I4;I3:83.33%I4;I4:90.00% $\theta_{lc}$ 。 $\theta_{lc}$ 为田间最大持水量。

表 7 不同处理因素对橄榄油组成成分的影响

Table 7 Effects of different treatment factors on the composition of olive oil

| 因素    | F 值       |            |           |           |
|-------|-----------|------------|-----------|-----------|
|       | 油酸含量      | 亚油酸含量      | 棕榈油酸含量    | 不饱和脂肪酸含量  |
| 灌水    | 28.484 ** | 53.264 **  | 3.027 *   | 33.625 ** |
| 施氮    | 33.346 ** | 114.024 ** | 22.238 ** | 5.156 **  |
| 灌水×施氮 | 5.425 **  | 20.520 **  | 4.771 **  | 3.477 **  |

\* 表示影响显著( $P<0.05$ ); \*\* 表示影响极显著( $P<0.01$ )。

图 2a 显示,N1、N2 条件下,I3 处理油酸含量高于其他灌水处理;N3、N4 条件下,随灌水量的增加,油酸含量呈上升趋势,N3I4、N4I4 处理油酸含量最高,分别为 76.24%、76.47%,N3I1、N4I1 处理油酸含量最低,分别为 69.01%、67.03%;N1 条件下不同灌水量处理间油酸含量的最大差值小于 N4 条件下不同灌水量处理间油酸含量的最大差值。说明随着施氮量的增加,油酸含量受灌水量的影响不断增强。

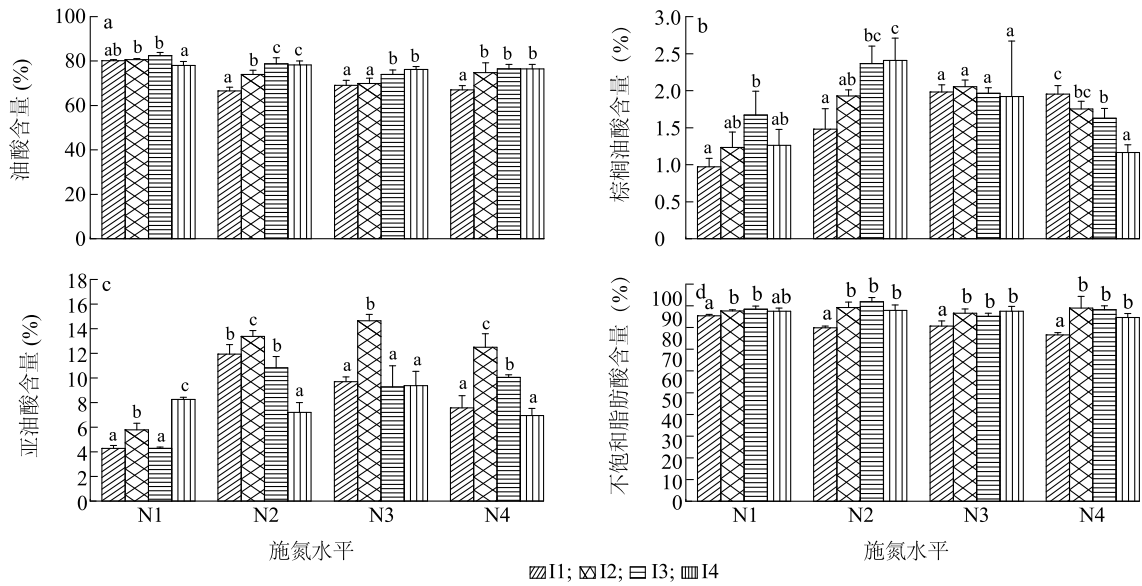
图 2b 显示,相同灌水条件下,棕榈油酸含量随着施氮量的增多,基本呈先增加后减少的趋势;相同施氮条件下,随灌水量的增加,棕榈油酸含量没有表现出相似的变化趋势。N2 条件下,棕榈油酸含量随灌水量的增加呈上升趋势;N4 条件下,棕榈油酸含量随灌水量的增加呈下降趋势。表明在本试验条件下,水氮耦合效应对棕榈油酸含量的影响为“单峰型”,水、氮过量会导致棕榈油酸含量下降。

图 2c 显示,相同施氮条件(N1 除外)下,I2 处理的亚油酸含量高于其他灌水处理,表明灌水量过高会对亚油酸含量产生负效应。

图 2d 显示,无氮(N1)条件下,不同灌水处理的不饱和脂肪酸含量间的最大差值较小;随着施氮量的增加,中氮(N3)条件下不同灌水处理的不饱和脂肪酸含量间的最大差值变大;高氮(N4)处理下,不同灌水处理的不饱和脂肪酸含量的最大差值达到最大值。表明随着施氮量的增加,灌水量对不饱和脂肪酸含量的影响愈加明显。

### 2.3 灌水、施氮处理对水氮利用效率的影响

表 8 显示,灌水、施氮处理对 *NPFP* 和 *iWUE* 影响极显著,施氮处理对二者的影响大于灌水处理;水氮耦合处理对二者的影响不显著。N1 为无氮处理,故不考虑 *NPFP* 状况。相同施氮条件下,*NPFP* 随灌水量的增加总体呈上升趋势;相同灌水条件下,*NPFP* 随着施氮量的增加总体呈降低趋势(图 3)。说明施氮量的增加对 *NPFP* 有消极影响,过量施氮会削弱水氮耦合对油橄榄的影响,抑制油橄榄对氮素的吸收与转化利用,从而降低 *NPFP*。图 4 显示,N1、N4 条件下,各灌水处理间 *iWUE* 差异不显著;N2、N3 条件下,I1 处理的 *iWUE* 大于其他处理;I1 条件下,各施氮处理间的 *iWUE* 差异不显著;I2 条件下,N4I2 处理的 *iWUE* 较大,为 84.44 kg/m<sup>3</sup>;I3、I4 条件下,N4 处理的 *iWUE* 高于其他处理。



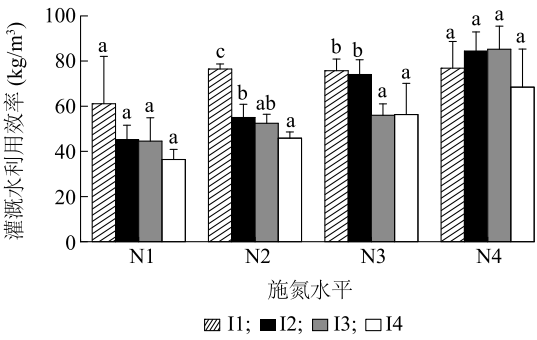
图中不同小写字母表示相同施氮条件下不同灌水量处理之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N, 低氮; N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N, 中氮; N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N, 高氮; I1:50.00% I4; I2:66.66% I4; I3:83.33% I4; I4:90.00%  $\theta_{fc}$ 。  $\theta_{fc}$  为田间最大持水量。

图 2 不同水氮处理对橄榄油品质的影响  
Fig.2 Effects of different water and nitrogen treatments on olive oil quality

表 8 灌水、施氮、水氮耦合处理对水氮利用的影响  
Table 8 Effects of water, nitrogen and their coupling treatment on water and nitrogen utilization

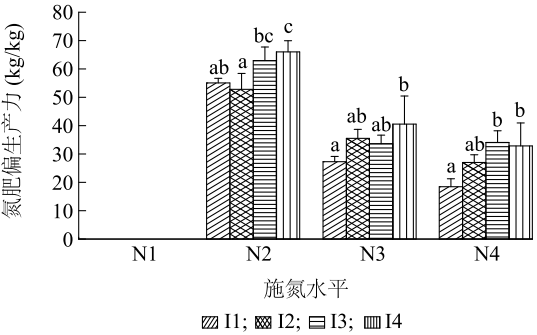
| 因素    | F 值       |            |
|-------|-----------|------------|
|       | 灌溉水利用效率   | 氮肥偏生产力     |
| 灌水    | 9.442 **  | 11.938 **  |
| 施氮    | 22.395 ** | 134.048 ** |
| 灌水×施氮 | 1.605     | 1.468      |

\*\* 表示影响极显著 ( $P < 0.01$ )。



图中不同小写字母表示相同施氮条件下不同灌水量处理之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N, 低氮; N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N, 中氮; N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N, 高氮; I1:50.00% I4; I2:66.66% I4; I3:83.33% I4; I4:90.00%  $\theta_{fc}$ 。  $\theta_{fc}$  为田间最大持水量。

图 4 不同水氮处理对灌溉水利用效率 (iWUE) 的影响  
Fig.4 Effects of different water and nitrogen treatments on irrigation water use efficiency (iWUE)



图中不同小写字母表示相同施氮条件下不同灌水量处理之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N; N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N, 低氮; N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N, 中氮; N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N, 高氮; I1:50.00% I4; I2:66.66% I4; I3:83.33% I4; I4:90.00%  $\theta_{fc}$ 。  $\theta_{fc}$  为田间最大持水量。

图 3 不同水氮处理对氮肥偏生产力 (NFPF) 的影响  
Fig.3 Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen partial factor productivity (NFPF)

## 2.4 橄榄油综合品质评价

对橄榄油品质指标的实测值进行归一化处理, 采用 TOPSIS 法计算不同处理下橄榄油整体品质与最优方案的贴合度 ( $C_i$ )。  $C_i$  值的大小能直接反映出橄榄油综合品质的优劣。表 9 显示, I1、I2 和 I3 处理下,  $C_i$  值的大小为 N2>N3>N4>N1; 即橄榄油综合品质的优劣表现为 N2>N3>N4>N1。 I4 处理下,  $C_i$  值

的大小为  $N3 > N1 > N2 > N4$ 。相同施氮条件 ( $N1$  除外)下,  $C_i$  值随着灌水量的增加表现为先增大后减小。 $N1I3$  处理的  $C_i$  值最小 (0.111),  $N2I2$  处理的  $C_i$  值最大 (0.787)。

## 2.5 油橄榄水氮耦合方案综合评价

本试验条件下,将油橄榄鲜果产量、橄榄油品质指标、 $NPFP$  和  $iWUE$  作为综合评价指标,运用综合评分法对不同水、氮处理进行综合分析评价。首

先利用变异系数法求出各项指标所占权重。其中,品质权重占比最高 (0.500),  $NPFP$  次之 (0.281), 产量权重占比 0.128,  $iWUE$  所占权重最小 (0.091)。然后计算各项指标的隶属度,最后求出综合得分。综合得分越高,表明水氮处理越优。表 10 显示,综合得分最高为 0.753 ( $N2I3$  处理),其次为 0.690 ( $N2I4$  处理)。

表 9 基于 TOPSIS 法的不同水氮处理橄榄油综合品质评价及排序

Table 9 Comprehensive quality evaluation and ranking of olive oil under different water-nitrogen treatments based on TOPSIS method

| 处理   | 综合品质指标 (归一化值) |       |       |       |        |          | $D_i^+$ | $D_i^-$ | $C_i$ | 排序 |
|------|---------------|-------|-------|-------|--------|----------|---------|---------|-------|----|
|      | 酸值            | 过氧化值  | 油酸含量  | 亚油酸含量 | 棕榈油酸含量 | 不饱和脂肪酸含量 |         |         |       |    |
| N1I1 | 1.029         | 1.000 | 0.995 | 0.053 | 0.012  | 0.727    | 0.158   | 0.048   | 0.235 | 15 |
| N1I2 | 1.025         | 0.999 | 0.994 | 0.071 | 0.015  | 0.733    | 0.138   | 0.050   | 0.264 | 14 |
| N1I3 | 0.998         | 0.999 | 0.994 | 0.052 | 0.020  | 0.729    | 0.161   | 0.020   | 0.111 | 16 |
| N1I4 | 1.002         | 0.999 | 0.993 | 0.105 | 0.016  | 0.742    | 0.107   | 0.060   | 0.357 | 11 |
| N2I1 | 0.981         | 0.999 | 0.993 | 0.176 | 0.022  | 0.762    | 0.056   | 0.129   | 0.696 | 3  |
| N2I2 | 1.006         | 0.999 | 0.994 | 0.177 | 0.026  | 0.763    | 0.036   | 0.134   | 0.787 | 1  |
| N2I3 | 1.001         | 0.998 | 0.994 | 0.135 | 0.030  | 0.754    | 0.076   | 0.092   | 0.549 | 6  |
| N2I4 | 1.000         | 0.999 | 0.992 | 0.091 | 0.030  | 0.743    | 0.120   | 0.050   | 0.297 | 12 |
| N3I1 | 1.000         | 0.998 | 0.994 | 0.138 | 0.028  | 0.755    | 0.073   | 0.095   | 0.564 | 5  |
| N3I2 | 0.980         | 0.999 | 0.994 | 0.204 | 0.029  | 0.770    | 0.048   | 0.159   | 0.767 | 2  |
| N3I3 | 1.029         | 1.000 | 0.994 | 0.124 | 0.026  | 0.751    | 0.083   | 0.091   | 0.525 | 7  |
| N3I4 | 1.021         | 1.000 | 0.992 | 0.121 | 0.025  | 0.749    | 0.086   | 0.084   | 0.495 | 9  |
| N4I1 | 0.983         | 0.999 | 0.996 | 0.112 | 0.029  | 0.749    | 0.105   | 0.066   | 0.388 | 10 |
| N4I2 | 0.984         | 1.000 | 0.993 | 0.164 | 0.023  | 0.759    | 0.062   | 0.117   | 0.656 | 4  |
| N4I3 | 1.007         | 0.999 | 0.993 | 0.129 | 0.021  | 0.750    | 0.081   | 0.086   | 0.517 | 8  |
| N4I4 | 1.004         | 0.998 | 0.994 | 0.090 | 0.015  | 0.738    | 0.122   | 0.047   | 0.277 | 13 |

$N1$ : 0 kg/hm<sup>2</sup> N;  $N2$ : 150 kg/hm<sup>2</sup> N, 低氮;  $N3$ : 300 kg/hm<sup>2</sup> N, 中氮;  $N4$ : 450 kg/hm<sup>2</sup> N, 高氮;  $I1$ : 50.00%  $I4$ ;  $I2$ : 66.66%  $I4$ ;  $I3$ : 83.33%  $I4$ ;  $I4$ : 90.00%  $\theta_{ic}$ 。  $\theta_{ic}$  为田间最大持水量。  $D_i^+$  表示第  $i$  个处理与最优方案的加权距离;  $D_i^-$  表示第  $i$  个处理与最劣方案的加权距离;  $C_i$  表示不同水氮处理与最优方案的贴合度。

## 3 讨论

农田水肥管理一方面可以使土壤-作物水分、养分供应关系达到最佳状态,另一方面对于实现节水省肥、提质增效的目标发挥着重大作用<sup>[23-28]</sup>。作物产量对于不同的水肥管理制度表现出明显差异,如水肥亏缺时补充灌溉与施肥可增加产量,随着土壤肥力的提高水分作用会逐渐增大;水肥交互作用对作物产量的影响存在阈值,低于阈值,随着水肥投入的增加增产效果明

显,高于阈值,增产效果不大<sup>[29]</sup>。

作物产量的提高是农业实践生产中最直接的追求目标。施肥对油橄榄年内产量无显著影响,但年际变化差异显著<sup>[30]</sup>。Ahumada-orellana 等<sup>[31]</sup>研究发现水分胁迫对橄榄油产量无明显影响,轻度、中度水分胁迫对年内鲜果产量无显著影响,而年际变化存在显著差异,中高度、重度水分亏缺对鲜果产量及构成要素造成严重影响。本研究结果表明,灌水、施氮处理对油橄榄鲜果产量有极显著影响,水氮耦合处理对鲜果产量影响不显著;低氮、中氮条件下灌水



表 10 基于综合评分法的油橄榄水氮耦合方案综合得分

Table 10 Comprehensive scores of water-nitrogen coupling schemes of olives based on comprehensive scoring method

| 处理   | 隶属度   |             |             |       |       |       |       |        |        | 综合得分  | 排序 |
|------|-------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|----|
|      | 产量    | <i>iWUE</i> | <i>NPFP</i> | 品质    |       |       |       |        |        |       |    |
|      |       |             |             | 酸值    | 过氧化值  | 油酸含量  | 亚油酸含量 | 棕榈油酸含量 | 不饱和脂肪酸 |       |    |
| N1I1 | 0.010 | 0.506       | 0           | 0.043 | 0.534 | 0.853 | 0.001 | 0      | 0.576  | 0.084 | 16 |
| N1I2 | 0     | 0.179       | 0           | 0.230 | 0.696 | 0.884 | 0.145 | 0.181  | 0.723  | 0.125 | 15 |
| N1I3 | 0.151 | 0.167       | 0           | 0.467 | 0.819 | 1.000 | 0     | 0.485  | 0.774  | 0.202 | 14 |
| N1I4 | 0.135 | 0           | 0           | 0.847 | 0.822 | 0.718 | 0.383 | 0.202  | 0.713  | 0.213 | 12 |
| N2I1 | 0.175 | 0.821       | 0.770       | 0.407 | 0.428 | 0     | 0.739 | 0.354  | 0.221  | 0.499 | 8  |
| N2I2 | 0.141 | 0.381       | 0.722       | 0.793 | 0.629 | 0.463 | 0.877 | 0.665  | 0.826  | 0.614 | 4  |
| N2I3 | 0.293 | 0.329       | 0.935       | 1.000 | 0.691 | 0.764 | 0.630 | 0.969  | 1.000  | 0.753 | 1  |
| N2I4 | 0.339 | 0.193       | 1.000       | 0.597 | 1.001 | 0.737 | 0.283 | 0.997  | 0.739  | 0.690 | 2  |
| N3I1 | 0.167 | 0.806       | 0.186       | 0.917 | 0.340 | 0.156 | 0.522 | 0.702  | 0.269  | 0.409 | 10 |
| N3I2 | 0.414 | 0.771       | 0.359       | 0.293 | 0.412 | 0.214 | 1.000 | 0.750  | 0.658  | 0.499 | 7  |
| N3I3 | 0.357 | 0.402       | 0.319       | 0.037 | 0.467 | 0.466 | 0.481 | 0.690  | 0.563  | 0.383 | 11 |
| N3I4 | 0.564 | 0.408       | 0.464       | 0.163 | 0.938 | 0.609 | 0.491 | 0.659  | 0.715  | 0.514 | 5  |
| N4I1 | 0.179 | 0.829       | 0           | 0.140 | 0     | 0.032 | 0.318 | 0.682  | 0      | 0.203 | 13 |
| N4I2 | 0.584 | 0.984       | 0.180       | 0     | 0.864 | 0.515 | 0.792 | 0.542  | 0.811  | 0.483 | 9  |
| N4I3 | 1.000 | 1.000       | 0.329       | 0.583 | 0.847 | 0.622 | 0.556 | 0.456  | 0.755  | 0.620 | 3  |
| N4I4 | 0.825 | 0.656       | 0.303       | 0.803 | 0.615 | 0.623 | 0.258 | 0.134  | 0.523  | 0.500 | 6  |

*NPFP*:氮肥偏生产力;*iWUE*:灌溉水利用效率。N1:0 kg/hm<sup>2</sup> N;N2:150 kg/hm<sup>2</sup> N,低氮;N3:300 kg/hm<sup>2</sup> N,中氮;N4:450 kg/hm<sup>2</sup> N,高氮;I1:50.00% I4;I2:66.66% I4;I3:83.33% I4;I4:90.00%  $\theta_{fc}$ 。 $\theta_{fc}$ 为田间最大持水量。

量对产量影响不稳定,高氮条件下灌水量对产量有较强的正效应,但存在阈值。与上述研究结果不同可能是因为试验区气候条件不同。西班牙中部和智利马乌莱地区属于典型的地中海气候,冬季温暖多雨,夏季炎热干燥,年降雨量仅 367 mm;龙泉山区属于亚热带季风气候,冬季温和多雨,夏季高温多雨、雨热同期,年降雨量达 820 mm 并且较多集中在夏季,这与地中海气候差异较大,会对油橄榄花芽分化、开花座果及果实产量、品质造成严重影响。

灌水、施肥、水肥耦合处理对作物肥料偏生产力影响极显著<sup>[32]</sup>。施肥量一定,调节不同生育期施肥占比可提高作物产量和肥料偏生产力<sup>[33]</sup>。本研究结果表明,灌水、施氮处理对 *NPFP* 和 *iWUE* 影响极显著,水氮耦合处理对 *NPFP* 和 *iWUE* 影响不显著;相同施氮条件下, *NPFP* 随灌水量的增加总体呈上升趋势;相同灌

水条件下, *NPFP* 随着施氮量的增加总体呈降低趋势。与上述结果存在差异的原因可能是不同作物对水、肥需求的关键期不同,水肥施用方式、施用量、施用阶段均会对作物的水肥吸收、利用与转化产生较大影响;不同营养元素对作物的响应不同,磷和钾参与植物糖类代谢,钾可加强植物对磷的吸收利用及光合产物的运输,促进植株体内氮代谢<sup>[34]</sup>。适宜的灌水量与施肥量耦合才能产生协同作用,促进水分与养分的吸收利用<sup>[35]</sup>。

本研究发现灌水、施氮、水氮耦合处理对棕榈油酸含量影响显著,水氮耦合对棕榈油酸含量的影响呈“单峰型”,能提高其含量,但存在阈值,这与张夸云等<sup>[36]</sup>得出“水肥调控可显著提高棕榈油酸含量”的结论不完全一致。其原因可能在于:油橄榄品种繁多,不同品种、树龄对不同的施肥方式、施肥时段以及化肥种类的响应规律存在

较大差异。张夸云等<sup>[36]</sup>以雨养方式为对照,着重于探究单项或组合调控处理对油橄榄果实品质的影响。曲继鹏等<sup>[13]</sup>研究发现,低氮处理对橄榄油酸值和总多酚含量无显著影响;施氮量达到 150 kg/hm<sup>2</sup>时会显著增加橄榄油酸值,降低总多酚含量;高氮处理会显著降低油酸含量,增加棕榈油酸、亚油酸含量。本研究结果表明灌水、施氮、水氮耦合处理对酸值影响显著,与上述结果不同的原因可能在于:二者氮肥梯度设置差异较大,前者氮肥梯度为 0 kg/hm<sup>2</sup>、75 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>、225 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥施用量过低不能满足植株的需求,更无法在品质上体现出氮素的影响效果。

综上所述,水氮耦合对橄榄油品质的影响极显著( $P<0.01$ ),对鲜果产量和水氮利用效率的影响不显著( $P>0.05$ )。N2I3 处理的不饱和脂肪酸含量较高,为 91.89%;N4I3 处理的鲜果产量和灌溉水利用效率较高,分别为 11 027 kg/hm<sup>2</sup>、85.22 kg/m<sup>3</sup>;N2I4 处理的氮肥偏生产力较高,为 66.00 kg/kg。依据综合评分法,N2I3 处理得分最高(0.753);利用 TOPSIS 法进行橄榄油品质分析,N2I2 处理的橄榄油品质最优。

#### 参考文献:

- [1] RUAN X, ZHU X M, XIONG H, et al. Characterisation of zero-trans margarine fats produced from camellia seed oil, palm stearin and coconut oil using enzymatic interesterification strategy[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49(1): 91-97.
- [2] SU C J, SUN J F, ZHU W Z, et al. History, distribution, and potential of the olive industry in China: a review[J]. Sustainability, 2018, 10: 1426.
- [3] 宁德鲁,陆 斌,杜春花,等. 云南省油橄榄适宜栽培区的划分[J]. 林业科技开发, 2008(5): 39-41.
- [4] 李庆华,子桂才,洪献梅,等. 油橄榄品种‘阿尔波萨纳’的选育[J]. 中国果树, 2020(6): 93-94, 142.
- [5] 吴文俊,赵梦炯,戚建莉,等. 油橄榄品种‘鄂植 8 号’的选育[J]. 中国果树, 2020(5): 111-113, 141.
- [6] 邓明全. 油橄榄丰产稳产栽培技术研究[J]. 林业科学研究, 2005(5): 590-594.
- [7] 张进德,辛 国,邓明全. 油橄榄优质丰产栽培技术[J]. 中国林副特产, 2008(4): 39-41.
- [8] 孔维宝,陈 冬,杨树玲,等. 油橄榄与丛枝菌根真菌的共生效应研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3): 750-758.
- [9] 赵 阳,赵曼利,焦润安,等. 陇南油橄榄主栽品种对干旱胁迫的生理响应及抗性综合评价[J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1620-1627.
- [10] 梁 剑. 干旱胁迫对油橄榄幼苗的影响[J]. 四川林业科技, 2015, 36(2): 38-41.
- [11] FRANCISCO S. Olive water use, crop coefficient, yield, and water productivity under two deficit irrigation strategies[J]. Agronomy, 2018. DOI: 10.3390/agronomy8060089.
- [12] 朱绍丹,陈 丽,焦 健,等. 土壤干旱及生草间作对油橄榄光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 282-288.
- [13] 曲继鹏,陈 涛,冯士令,等. 氮磷肥施用量对橄榄油产量与品质的影响[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2021, 35(3): 1-6, 38.
- [14] HABERMAN A, DAG A, SHTERN N, et al. Significance of proper nitrogen fertilization for olive productivity in intensive cultivation[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 710-717.
- [15] LIU X, LI M, GUO P, et al. Optimization of water and fertilizer coupling system based on rice grain quality[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 34-46.
- [16] 刘艳伟,周 潇,韩焕豪,等. 基于产量品质及水肥利用效率的三七水肥耦合方案优选[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 139-146.
- [17] 李 运,张 霁,徐福荣,等. 多指标决策分析 TOPSIS 对三七的质量评价研究[J]. 中草药, 2017, 48(22): 4764-4771.
- [18] 汪加魏,张东升,李玉印,等. 油橄榄生长关键期施肥和灌溉技术研究[J]. 林产工业, 2015, 42(5): 31-35.
- [19] 邵 森,王恩煜,朱昌伟,等. 土壤含水量对温室甜瓜生长、产量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 89-96.
- [20] 陈修斌,杨 彬,闫 芳,等. 不同土壤含水量对日光温室茄子生长及生理特性影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 231-234.
- [21] 张子龙,孙 萌,李凯明,等. 基于 TOPSIS-RSR 法的三七连作障碍消减效应综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 713-724.
- [22] 张运书,曾德凤,刘雅庆. 基于变异系数法的长江经济带绿色治理能力综合评价[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2019, 33(4): 56-60.
- [23] 傅鹏霄,王 珏,李广浩,等. 不同栽培模式对江苏省夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1151-1159.
- [24] 李 红,汤 攀,陈 超,等. 中国水肥一体化施肥设备研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学, 2021, 39(2): 200-209.
- [25] 张 霞,李 健,潘孝青,等. 不同熟化垫料替代比例对稻麦轮作下作物产量、土壤肥力及重金属的影响[J]. 江苏农业学报,

- 2021, 37(5):1175-1182.
- [26] 边巴卓玛. 拉萨河谷农区苦荞“3414”肥料效应试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4):398-403.
- [27] 朱 梅, 顾佳林, 储诚葵, 等. 基于柱塞泵与单片机的可控施肥机设计与喷灌试验[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(11):1169-1176.
- [28] 赵 颖, 周 枫, 罗佳琳, 等. 稻秸还田下不同施肥管理措施对土壤养分、冬小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5):1167-1174.
- [29] 王 新, 马富裕, 刁 明, 等. 不同施氮水平下加工番茄植株生长和氮素积累与利用率的动态模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4):1043-1050.
- [30] CENTENO A, GARCIA J M, GOMEZ-DEL-CAMPO M. Effects of nitrogen fertilization and nitrification inhibitor product on vegetative growth, production and oil quality in ‘Arbequina’ hedgerow and ‘Picual’ vase-trained orchards [J]. Grasas Y Aceites, 2017, 68(4):e215.
- [31] AHUMADA-ORELLANA L E, ORTEGA-FARÍAS S, SEARLES P S, et al. Yield and water productivity responses to irrigation cut-off strategies after fruit set using stem water potential thresholds in a super-high density olive orchard [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:1280.
- [32] 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.
- [33] 刘小刚, 孙光照, 彭有亮, 等. 水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16):125-133.
- [34] 孙琛梅, 程冬冬, 杨越超, 等. 土壤肥力质量与苹果生长、产量及品质关系的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2):207-215.
- [35] WEI W, YE C, HUANG H C, et al. Appropriate nitrogen application enhances saponin synthesis and growth mediated by optimizing root nutrient uptake ability[J]. Journal of Ginseng Research, 2020. DOI:10.1016/J.JGR.2019.04.003.
- [36] 张夸云, 严 毅, 陈金龙, 等. 调控措施对油橄榄果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46(5):35-37, 41.

(责任编辑:王 妮)