网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.002

灌溉模式对苹果树光合特性及叶绿素荧光参数的影响

刘鹏飞[1],李文胜[1],谢发旺[2],赵莎莎[1],蔺亚茹[1],张振军[3]

(1 新疆农业大学 林学与风景园林学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2 新疆农业大学 林业调查规划设计研究院(有限公司),新疆 乌鲁木齐 830063;3 新疆阿克苏地区林业技术推广服务中心,新疆 阿克苏 842008)

[摘 要] 【目的】比较 3 个品种苹果树的光合特性及叶绿素荧光参数对 2 种灌溉模式的响应机制,为筛选出适宜阿克苏 3 个品种苹果树矮化栽培的灌溉模式提供理论依据。【方法】以烟富 6 号、王林和维纳斯黄金 3 个品种 5 年生苹果树作为研究对象,设 1 行 1 管(W1)和 1 行 2 管(W2)2 种灌溉模式,分别于 5 月 20 日(幼果期)和 7 月 20 日(果实膨大期)10:00—20:00,测定不同灌溉模式下 3 个品种苹果树的光合特性及叶绿素荧光参数。【结果】2 种灌溉模式下 3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 P_n、T_r 和 G_s 的日变化趋势基本一致,总体呈“M”形,第 1 峰值和第 2 峰值分别出现在 12:00 和 16:00,且第 1 峰值高于第 2 峰值;叶片 F_o、F_v'/F_m' 和 ETR 的日变化呈先升后降趋势;叶片 C_i、F_m、F_v/F_o 和 F_v/F_m 的日变化呈先降后升趋势。在 W2 灌溉模式下,烟富 6 号和维纳斯黄金生育期叶片 P_n、T_r、G_s、F_o、F_v'/F_m' 和 ETR 最大,烟富 6 号幼果期叶片 P_n、T_r、F_o、F_v'/F_m' 和 ETR 较 W1 灌溉模式分别提高了 24.3%,0.5%,9.8%,3.8% 和 4.1%,果实膨大期较 W1 灌溉模式分别提高了 33.3%,19.2%,8.8%,8.9% 和 4.1%;维纳斯黄金幼果期叶片 P_n、T_r、G_s、F_o、F_v'/F_m' 和 ETR 较 W1 灌溉模式分别提高了 41.5%,11.2%,34.2%,1.7%,9.8% 和 31.5%,果实膨大期较 W1 灌溉模式分别提高了 6.2%,20.4%,31.9%,8.2%,11.2% 和 38.6%。W2 灌溉模式同时也有利于烟富 6 号和王林果实膨大期叶片 F_v/F_o 值的增大,较 W1 灌溉模式分别提高了 2.1% 和 24.6%。【结论】烟富 6 号和维纳斯黄金在 1 行 2 管(W2)灌溉模式下的光合能力及对光环境的适应能力较强,而王林苹果则在 1 行 1 管(W1)灌溉模式下的光合特性及叶绿素荧光参数更优。

[关键词] 灌溉模式;苹果树种;光合特性;叶绿素荧光参数

[中图分类号] S661.1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0010-09

Effects of irrigation mode on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of apple trees

LIU Pengfei[1], LI Wensheng[1], XIE Fawang[2], ZHAO Shasha[1], LIN Yaru[1], ZHANG Zhenjun[3]

(1 *College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 2 *Forestry Investigation, Planning and Design Research Institute of Xinjiang Agricultural University (Ltd.), Urumqi, Xinjiang* 830063, *China*; 3 *Forestry Technology Extension Service Center of Aksu Region, Aksu, Xinjiang* 842008, *China*)

Abstract: 【Objective】 The response mechanism of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of three apple tree cultivars to the two irrigation modes was compared to provide a theoretical basis for selecting the suitable irrigation mode for dwarfing cultivation of the three cultivars in

[收稿日期] 2024-12-10 [修回日期] 2025-03-04

[基金项目] 新疆维吾尔自治区重大专项“特色林果优质高效轻简化栽培关键技术”(2023A02002-3);新疆林果产业技术体系项目(XJLGCYJSTX04-2024)

[作者简介] 刘鹏飞(1996—),男,甘肃泾川人,硕士,主要从事果树栽培与生理研究。E-mail:1482501896@qq.com

[通信作者] 李文胜(1968—),男,新疆昭苏人,教授,硕士生导师,主要从事果树栽培与生理研究。E-mail:lws@xjau.edu.cn

Aksu.【Method】Five-year-old apple trees of Yanfu No. 6, Wanglin and Venus Gold were selected as research subjects. Two irrigation modes, one row one tube (W1) and one row two tubes (W2), were set up. The combined characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of 3 varieties of apple trees under different irrigation modes were determined from 10:00 am to 20:00 am on May 20 (immature fruit stage) and July 20 (fruit expansion stage).【Result】Under the two irrigation modes, the daily variation trends of P_n, T_r and G_s in the leaves of the three cultivars in the immature fruit stage and fruit expansion stage were basically the same, showing an overall pattern of "M" shape. The first and second peaks appeared at 12:00 and 16:00, respectively, and the first peak was higher than the second one. The diurnal variations of F_o, F_v'/F_m' and ETR values of the leaves increased first and then decreased, while the diurnal variations of C_i, F_m, F_v/F_o and F_v/F_m values decreased first and then increased. Under the W2 irrigation mode, the P_n, T_r, G_s, F_o, F_v'/F_m' and ETR values of Yanfu No. 6 and Venus Gold in both two growth stages were the largest. The leaf P_n, T_r, F_o, F_v'/F_m' and ETR values of Yanfu No. 6 in immature fruit stage were increased by 24.3%, 0.5%, 9.8%, 3.8% and 4.1%, respectively, compared with those under W1 irrigation mode. In the expanding stage, they were increased by 33.3%, 19.2%, 8.8%, 8.9% and 4.1%, respectively, compared with those under W1 irrigation mode. The leaf P_n, T_r, G_s, F_o, F_v'/F_m' and ETR values of Venus Golden in immature fruit stage were increased by 41.5%, 11.2%, 34.2%, 1.7%, 9.8% and 31.5%, respectively, compared with those under W1 irrigation mode. And in the fruit expansion stage, they were increased by 6.2%, 20.4%, 31.9%, 8.2%, 11.2% and 38.6%, respectively, compared to those under W1 irrigation mode. The F_v/F_o values of Yanfu No. 6 and Wanglin fruits in the expanding stage were increased by 2.1% and 24.6% compared with those under W1 irrigation mode, respectively.【Conclusion】Yanfu No. 6 and Venus Gold showed stronger photosynthetic capacity and better adaptability to light environment under one row two tubes (W2) irrigation mode, while Wanglin apple showed better photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameter under one row one tube (W1) irrigation mode.

Key words: irrigation mode; apple species; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameter

滴灌作为一种先进的灌溉技术，因具有节水、节肥及提高作物产量和品质等优点，在新疆苹果种植中得到了广发的应用与推广。滴灌通过在植物根部附近缓慢释放水分和养分，不仅降低了水分的蒸发和流失，同时显著提高了水肥利用效率及作物产量和品质[1]。光合作用是植物生长发育的基础，作为植物关键的生理活动，其变化特征受到植物遗传特性和环境条件的双重影响[2]。通过测定叶片光合作用参数，可以了解植物在不同灌溉模式下的光能利用效率和碳同化能力。研究表明，适宜的水分条件和合理的养分供应是影响作物生长、光合特性以及生产效益的主要因素，协调水肥关系有利于促进作物生长，改善叶片光合特性，提高作物产量和水肥利用效率[3-4]。刘星[5]研究表明，分根交替灌溉模式能够促进苹果树光合生产力，可为其高产奠定物质基础。张雯等[6]研究表明，在分根交替灌溉模式下，苹果叶片气孔导度和蒸腾速率明显降低，但叶片净光合速率与正常灌溉相比无明显差异，从而提升了水分利用效率。叶绿素荧光技术是研究植物光合生理与环境因子关系的探针，可以反映植物光合效率的高低[7]。耿东梅等[8]研究得出，叶绿素荧光动力学参数能够反映植物对光能的吸收和转化、能量的传递与分配及光合作用。

新疆是我国缺水最严重的省区之一，其农业发展的显著特点是"荒漠绿洲、灌溉农业"，即没有灌溉就没有农业[9]。干旱缺水成为该地区经济可持续发展和生态环境改善的最大制约因素。新疆阿克苏地区日照时间长、紫外线强、昼夜温差大，这些得天独厚的气候条件造就了苹果的高品质，成为全国苹果的特色产区之一。目前该地区果园多采用传统沟灌或畦灌，不但造成大量水资源的浪费，而且因传统的灌溉技术难以实现对水分和肥料进行精确调控，导致水肥利用效率偏低、生态环境污染，这在一定程度上制约了新疆苹果产业的发展[10]。

目前，关于水肥耦合对苹果树光合特性的影响虽有一定研究，但基于高效的节水滴灌技术，探究水肥

耦合条件下不同灌溉模式对不同品种苹果树光合特性和叶绿素荧光参数影响的研究却鲜见报道。为此，本研究以阿克苏地区红旗坡农场苹果树为研究对象，分析不同灌溉模式对苹果树光合特性及叶绿素荧光参数的影响，旨在为该地区矮化密植苹果园不同品种果树栽培的可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于新疆阿克苏地区红旗坡农场，地理坐标 41°17′15″ N，80°17′33″ E，属暖温带大陆性干旱气候，降水稀少、蒸发量大，昼夜温差大，光能资源丰富，年平均降水量 80.4 mm，年平均气温 11.2 ℃，年均日照时数 2 809 h。试验地土壤以砂砾土为主。

1.2 试验设计

选取阿克苏红旗坡农场 3 种苹果品种砧穗组合 5 年生树作为研究对象，品种名称分别为烟富 6 号、王林、维纳斯黄金，砧木为 M9-T337，栽培株行距均为 1 m×4 m。试验设 2 种灌溉模式，分别为 1 行 1 管(W1)和 1 行 2 管(W2)，滴头流量 2 L/h，滴头间距 30 cm，灌水定额为 2 820 m^3/hm^2，施肥为 N-P_2O_5-K_2O(120-105-180 kg/hm^2)，每组处理均安装控制阀门和水表，水量由水表精确控制，各处理灌水定额和施肥情况一致。试验共计 6 个处理，3 次生物学重复，合计 18 个小区。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合参数测定 采用北京力高泰科技有限公司生产的 LI-6800 便携式光合仪进行测试。选取晴朗无云天气条件，分别在 5 月 20 日(幼果期)和 7 月 20 日(果实膨大期)，于早上 10:00－20:00 每隔 2 h 进行 1 次光合日变化测量。每株样树固定 3 个叶片，每处理 3 次重复，取平均值作为固定参数。测定指标为净光合速率(P_n，μmol/(m^2 · s))、蒸腾速率(T_r，mmol/(m^2 · s))、气孔导度(G_s，mmol/(m^2 · s))和胞间 CO_2 浓度(C_i，μmol/(m^2 · s))。

1.3.2 叶绿素荧光参数测定 同步测定光合指标和叶绿素荧光参数，先测定光适应下的叶绿素荧光参数，待叶片暗适应 15 min 后测定暗适应下叶绿素荧光参数。采用英国 FMS-2 便携脉冲调制式荧光仪，测定荧光参数包括初始荧光产量(F_o)、最大荧光产量(F_m)、PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)、PSⅡ最大光能转化潜力(F_v/F_o)、PSⅡ有效光化学量子产量(F_v'/F_m')和光合电子传递速率(ETR)。

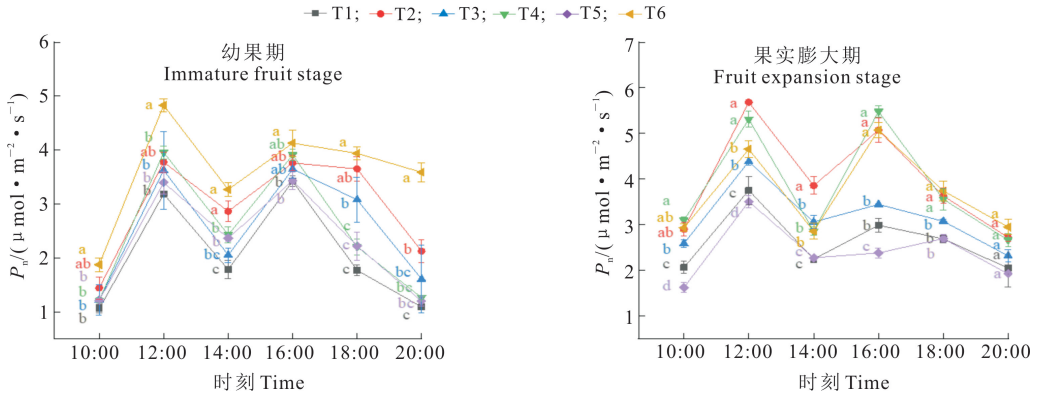
1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2021 和 Origin 2024 软件处理与绘图，用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件对处理间差异性进行单因素 ANOVA 方差分析，多重比较采用 Duncan's 法。图中的数据采用“平均值±标准误差”表示。

2 结果与分析

2.1 2 种灌溉模式对苹果树光合作用的影响

2.1.1 2 种灌溉模式对苹果树叶片 P_n 日变化的影响 2 种灌溉模式对苹果树叶片 P_n 日变化的影响见图 1。



T1. 1 行 1 管-烟富 6 号；T2. 1 行 1 管-王林；T3. 1 行 1 管-维纳斯黄金；T4. 1 行 2 管-烟富 6 号；T5. 1 行 2 管-王林；T6. 1 行 2 管-维纳斯黄金。图中不同小写字母表示同一时刻下不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

T1. One row one tube-Yanfu No. 6; T2. One row one tube-Wanglin; T3. One row one tube-Venus Gold; T4. One row two tubes-Yanfu No. 6; T5. One row two tubes-Wanglin; T6. One row two tubes-Venus Gold. Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between different treatments at the same time ($P<0.05$). The same below.

图 1 2 种灌溉模式对苹果树叶片 P_n 日变化的影响

Fig. 1 Diurnal variation in leaf P_n of apple trees under two irrigation modes

由图 1 可知，3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 P_n 的日变化均呈“M”形，具有明显的“光合午休”现象，第 1 峰值出现在 12:00，第 2 峰值出现在 16:00。在 W1 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期 P_n 的日变化趋势一致，P_n 由高到低依次为王林＞维纳斯黄金＞烟富 6 号。在 W2 灌溉模式下，幼果期 P_n 的日变化由高到低依次为维纳斯黄金＞烟富 6 号＞王林，而果实膨大期 P_n 的日变化由高到低依次为烟富 6 号＞维纳斯黄金＞王林。通过 2 个生育期比较，在 W2 灌溉模式下烟富 6 号和维纳斯黄金的 P_n 值较高，在幼果期分别较 W1 灌溉模式提高了 24.3%和 41.5%，在果实膨大期分别较 W1 灌溉模式提高了 33.3%和 6.2%。表明 W2 灌溉模式有利于烟富 6 号和维纳斯黄金苹果树叶片 P_n 的提高。

2.1.2　2 种灌溉模式对苹果树叶片 T_r 日变化的影响　由图 2 可知，3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 T_r 的日变化趋势基本相同，整体呈“M”形，与 P_n 日变化趋势相同。随着光照增强，苹果树叶片 T_r 迅速上升，全天最高峰基本都出现在 12:00。在 W1 灌溉模式下，3 个品种苹果树幼果期叶片的 T_r 由高到低依次为王林＞维纳斯黄金＞烟富 6 号，果实膨大期 T_r 由高到低依次为王林＞烟富 6 号＞维纳斯黄金。在 W2 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期叶片的 T_r 由高到低依次为维纳斯黄金＞烟富 6 号＞王林。通过 2 个生育期的比较，3 个品种苹果树果实膨大期叶片的 T_r 明显提高，说明这一时期植物对水分需求较明显。在 W2 灌溉模式下，烟富 6 号和维纳斯黄金叶片的 T_r 较高，在幼果期分别较 W1 灌溉模式提高了 0.5%和 11.2%，在果实膨大期分别较 W1 灌溉模式提高了 19.2%和 20.4%。综合分析得出，3 个品种苹果树果实膨大期 T_r 的日变化水平高于幼果期，W2 灌溉模式有利于 T_r 提高。

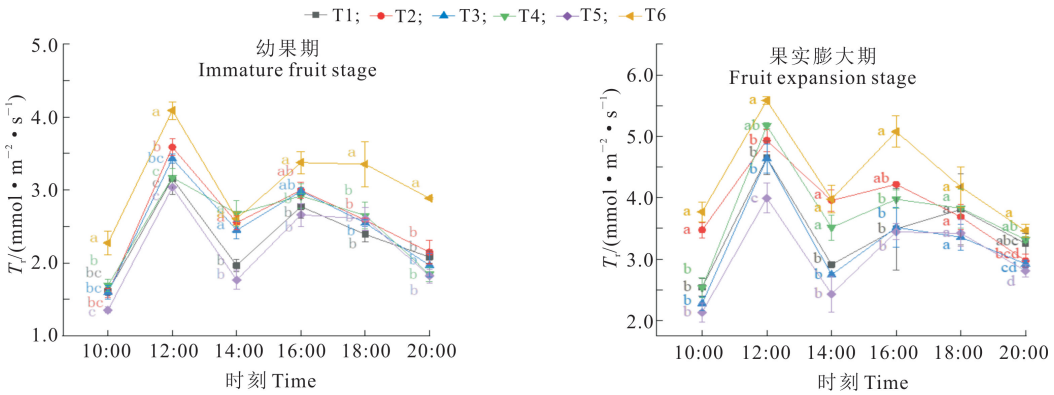


图 2　2 种灌溉模式对苹果树叶片 T_r 日变化的影响

Fig. 2　Diurnal variation in leaf T_r of apple trees under two irrigation modes

2.1.3　2 种灌溉模式对苹果树叶片 C_i 日变化的影响　由图 3 可知，在 W1 灌溉模式下，3 个品种苹果树幼果期叶片 C_i 的日变化由高到低依次为烟富 6 号＞王林＞维纳斯黄金，果实膨大期 C_i 的日变化由高到低依次为烟富 6 号＞维纳斯黄金＞王林。王林和维纳斯黄金在 2 个生育期叶片 C_i 的日变化呈先降后升趋势。在 W2 灌溉模式下，3 个品种苹果树幼果期叶片 C_i 的日变化由高到低依次为烟富 6 号＞王林＞维纳斯黄金，果实膨大期 C_i 的日变化呈先降后升趋势。通过 2 个生育期的比较，W1 灌溉模式有利于烟富 6 号幼果期 C_i 的提高，较 W2 灌溉模式提高了 3.35%，而 W2 灌溉模式有利于王林幼果期和果实膨大期 C_i 的提高，分别较 W1 灌溉模式提高了 8.57%和 23.21%。表明在 W2 灌溉模式下，王林幼果期和果实膨大期 C_i 最高。

2.1.4　2 种灌溉模式对苹果树叶片 G_s 日变化的影响　由图 4 可知，3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 G_s 的日变化趋势都呈“M”形变化特征，与 P_n 和 T_r 的日变化趋势相同，主峰值均出现在 12:00。在 W1 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期的 G_s 由高到低依次为王林＞烟富 6 号＞维纳斯黄金，在 W2 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期的 G_s 由高到低依次为维纳斯黄金＞烟富 6 号＞王林。综合分析认为，在 W2 灌溉模式下，维纳斯黄金幼果期和果实膨大期的 G_s 分别较 W1 灌溉模式提高了 34.2%和 31.9%。表明维纳斯黄金的 G_s 值在 W2 灌溉模式下最高。

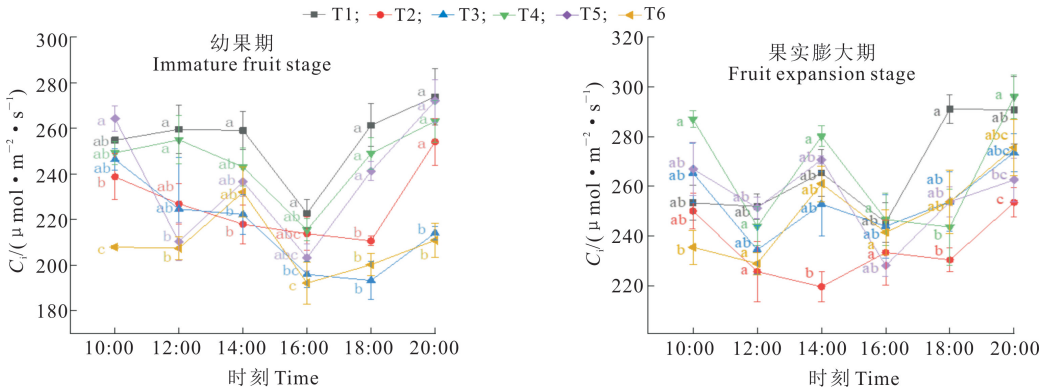


图 3 2 种灌溉模式对苹果树叶片 C_i 日变化的影响

Fig. 3 Diurnal variation in leaf C_i of apple trees under two irrigation modes

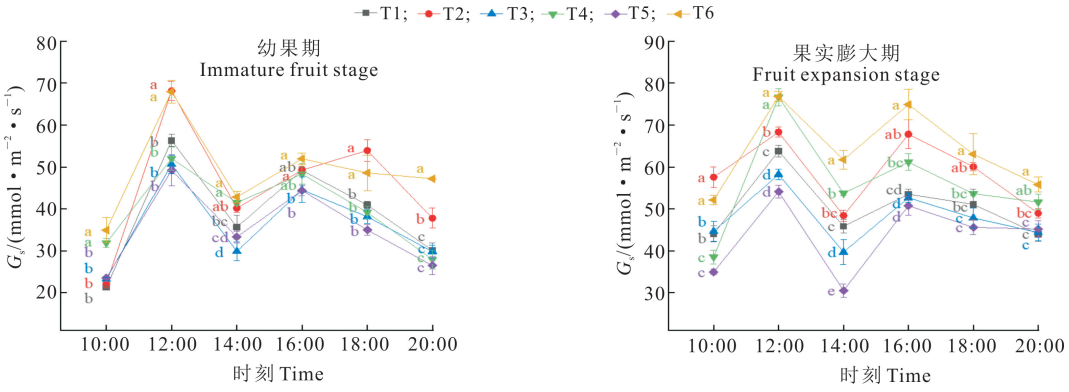


图 4 2 种灌溉模式对苹果树叶片 G_s 日变化的影响

Fig. 4 Diurnal variation in leaf G_s of apple trees under two irrigation modes

2.2 2 种灌溉模式对苹果树叶片叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_o 日变化的影响 由图 5 可知,2 种灌溉模式下 3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 F_o 的日变化呈先升后降的趋势,最高峰均出现在 16:00。比较 3 个品种苹果树在 2 个生育期的 F_o,在 W1 灌溉模式下 F_o 的日变化从高到低依次为维纳斯黄金>王林>烟富 6 号,在 W2 灌溉模式下 F_o 的日变化由高到低依次为维纳斯黄金>烟富 6 号>王林。综合分析认为,在 W2 灌溉模式下烟富 6 号和维纳斯黄金的 F_o 较高,幼果期的 F_o 分别较 W1 灌溉模式提高了 9.8%和 1.7%,果实膨大期的 F_o 分别较 W1 灌溉模式提高了 8.8%和 8.2%。表明 W2 灌溉模式有利于烟富 6 号和维纳斯黄金苹果树耐强光和高温。

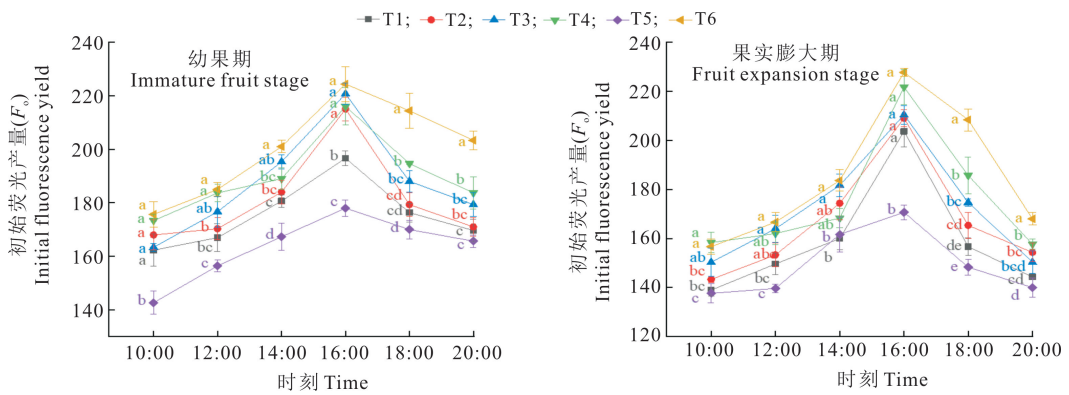


图 5 2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_o 日变化的影响

Fig. 5 Diurnal variation in leaf F_o of apple trees under two irrigation modes

2.2.2 2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_m 日变化的影响 由图 6 可知,3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 F_m 的日变化呈先降后升趋势。在 W1 灌溉模式下,3 个品种苹果树幼果期 F_m 最低谷出现在

14:00。在 W2 灌溉模式下，烟富 6 号幼果期 F_m 最低谷出现在 12:00，果实膨大期 F_m 最低谷出现在 16:00。综合分析认为，在 W1 灌溉模式下，烟富 6 号和维纳斯黄金的 F_m 分别较 W2 灌溉模式降低了 8.4%和 2.3%。表明 W1 灌溉模式对烟富 6 号和维纳斯黄金的光抑制作用较强。

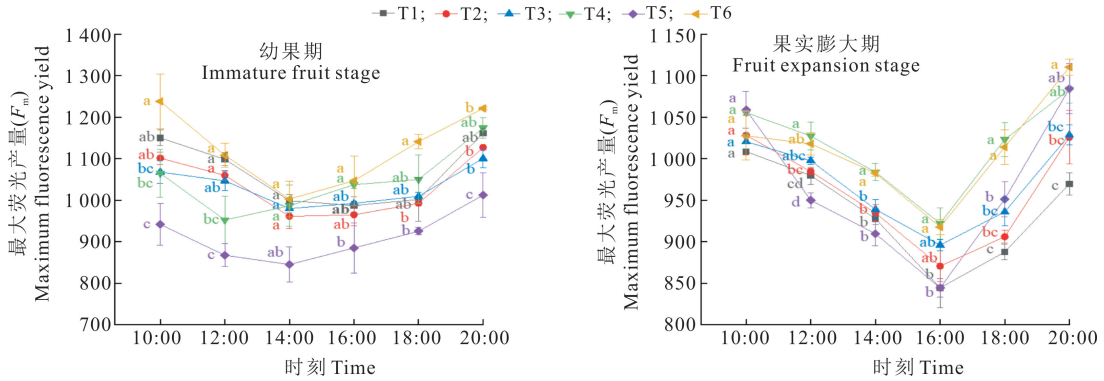


图 6　2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_m 日变化的影响

Fig. 6　Diurnal variation in leaf F_m of apple trees under two irrigation modes

2.2.3　2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_v/F_m 日变化的影响　由图 7 可知，3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 F_v/F_m 的日变化呈先降后升趋势，在 16:00 出现最低谷。在 W1 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期 F_v/F_m 从高到低依次为烟富 6 号＞王林＞维纳斯黄金。在 W2 灌溉模式下，3 个品种苹果树果实膨大期 F_v/F_m 从高到低依次为王林＞烟富 6 号＞维纳斯黄金。比较 2 个生育期的 F_v/F_m，W2 灌溉模式既有利于烟富 6 号和王林果实膨大期叶片反应中心开放程度的提高，同时还改善了叶片的光合能力。

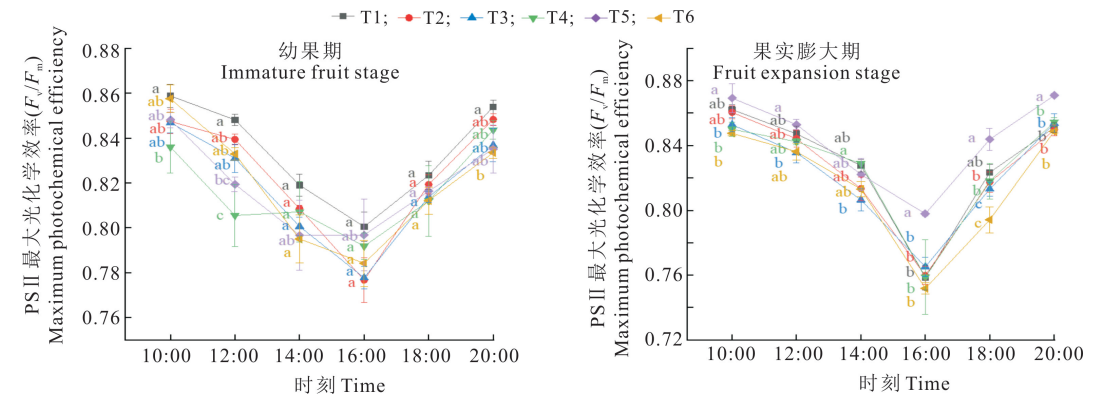


图 7　2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_v/F_m 日变化的影响

Fig. 7　Diurnal variation in leaf F_v/F_m of apple trees under two irrigation modes

2.2.4　2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_v/F_o 日变化的影响　由图 8 可知，3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 F_v/F_o 的日变化呈先降后升趋势，最低谷出现在 16:00。在 W1 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期 F_v/F_o 从高到低依次为烟富 6 号＞王林＞维纳斯黄金。在 W2 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期 F_v/F_o 从高到低依次为王林＞烟富 6 号＞维纳斯黄金。综合分析认为，在 W2 灌溉模式下，果实膨大期烟富 6 号和王林的 F_v/F_o 最高，较 W1 灌溉模式分别提高了 2.1%和 24.6%。表明 W2 灌溉模式有利于提高烟富 6 号和王林的潜在活性。

2.2.5　2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_v'/F_m' 日变化的影响　由图 9 可知，3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 F_v'/F_m' 的日变化呈先升后降趋势，最高峰出现在 16:00。比较 3 个品种苹果树在 2 个生育期的 F_v'/F_m'，在 W1 灌溉模式下，幼果期 F_v'/F_m' 从高到低依次为王林＞烟富 6 号＞维纳斯黄金；果实膨大期 F_v'/F_m' 从高到低依次为王林＞维纳斯黄金＞烟富 6 号。在 W2 灌溉模式下，3 个品种苹果树在 2 个生育期 F_v'/F_m' 的日变化趋势基本一致，F_v'/F_m' 从高到低依次为维纳斯黄金＞烟富 6 号＞王林。综合分析认为，烟富 6 号和维纳斯黄金在 2 个生育期的 F_v'/F_m' 均以 W2 灌溉模式下较高，在幼果期

分别较 W1 灌溉模式提高了 3.8%和 9.8%,在果实膨大期分别较 W1 灌溉模式提高了 8.9%和 11.2%。结果表明,W2 灌溉模式有利于烟富 6 号和维纳斯黄金叶片 PSⅡ有效光化学量子产量的提高。

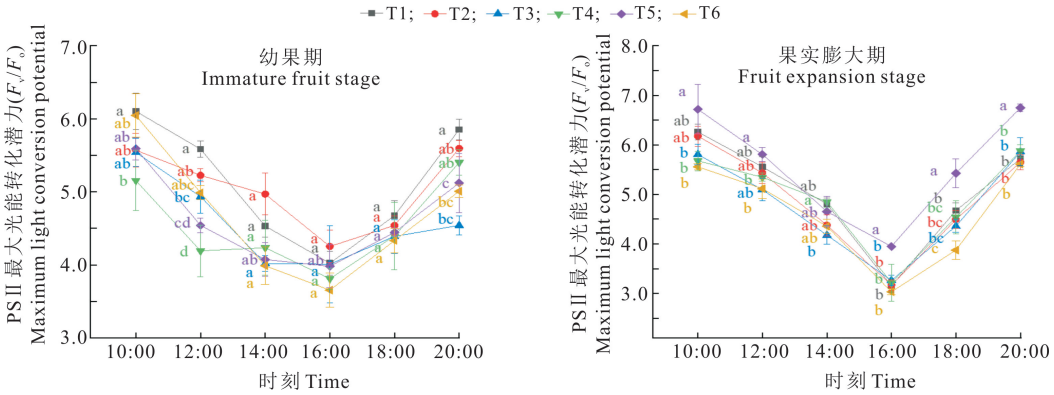


图 8 2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_v/F_o 日变化的影响

Fig. 8 Diurnal variation in leaf F_v/F_o of apple trees under two irrigation modes

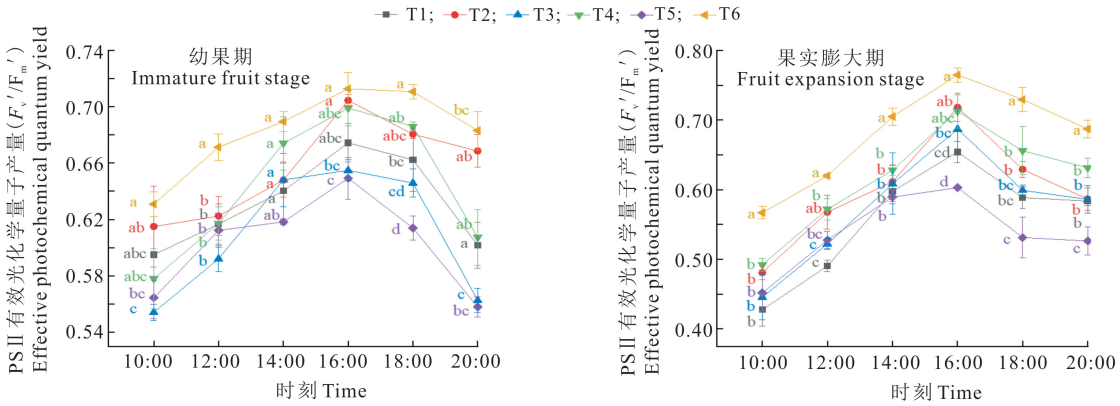


图 9 2 种灌溉模式对苹果树叶片 F_v'/F_m' 日变化的影响

Fig. 9 Diurnal variation in leaf F_v'/F_m' of apple trees under two irrigation modes

2.2.6 2 种灌溉模式对苹果树叶片 ETR 日变化的影响 由图 10 可知,3 个品种苹果树幼果期和果实膨大期叶片 ETR 的日变化呈先升后降趋势,最高峰出现在 16:00。3 个品种苹果树在 2 个生育期 ETR 的日变化趋势基本一致,在 W1 灌溉模式下,叶片 ETR 从高到低依次为王林>烟富 6 号>维纳斯黄金,在 W2 灌溉模式下,ETR 从高到低依次为维纳斯黄金>烟富 6 号>王林。综合分析认为,在 W2 灌溉模式下,烟富 6 号和维纳斯黄金 2 个生育期 ETR 均较高,在幼果期分别较 W1 灌溉模式提高了 4.1%和 31.5%,在果实膨大期分别较 W1 灌溉模式提高了 32.0%和 38.6%。表明在 W2 灌溉模式下,烟富 6 号和维纳斯黄金叶片光合系统Ⅱ传递光合电子能力较强,有利于积累有机物,从而加快碳同化运作效率。

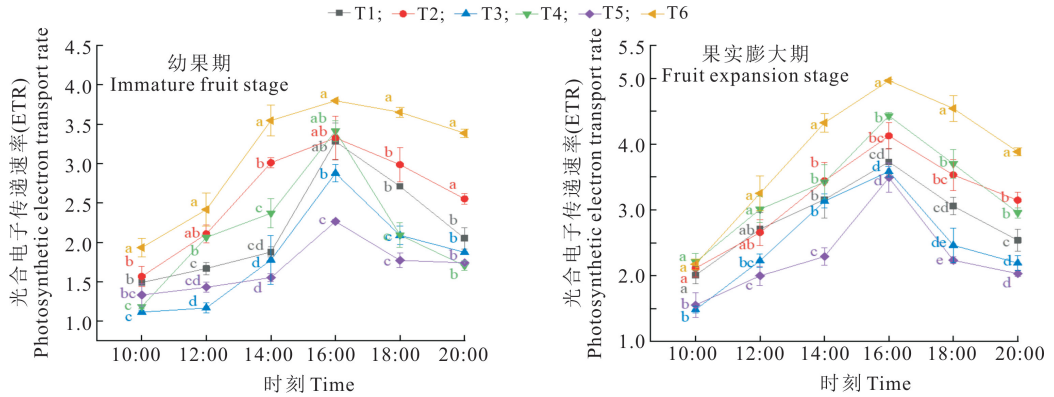


图 10 2 种灌溉模式对苹果树叶片 ETR 日变化的影响

Fig. 10 Diurnal variation in leaf ETR of apple trees under two irrigation modes

3　讨　论

3.1　2 种灌溉模式对苹果树叶片光合特性的影响

光合作用是植物吸收光能，制造有机物完成自身新陈代谢的重要途径[11]，与水分变化密切相关。作为光合作用的主要原料之一，水分会直接或者间接影响光合产物的转运[12]。在自然界中，植物净光合速率的日变化主要存在 2 种类型，即单峰型和双峰型。王姝婷[13]对嘎啦系幼年苹果树叶片光合作用的研究证实了这一规律。进一步研究发现，不同矮化中间砧对苹果苗光合特性具有显著影响，如罗静等[14]研究表明，3 种苹果嫁接苗的净光合速率日变化呈“M”形，表现出典型的光合“午休”现象，这一发现与本研究结果一致。植物光合“午休”现象是由于光照强度、温度等过高，导致植物叶片的蒸腾速率迅速增加，水势降低、气孔导度剧减，引起叶片光合效率的降低，从而使净光合速率锐减[15]。在这一过程中，气孔作为植物与外界进行气体交换的结构，在调节植物水分状况中起到关键作用，并且能够控制水分蒸腾[16-17]。影响植物净光合速率和蒸腾速率的因素可分为气孔因素和非气孔因素，当 P_n 和 C_i 同时下降，并伴随 G_s 升高，此时限制光合作用的是气孔因素，反之为非气孔因素[18]。本研究发现，在 2 种灌溉模式下，3 个品种苹果树叶片 P_n 降低同时伴随着 C_i 升高，表明 P_n 的降低主要是受非气孔因素限制，这一结论与魏永霞等[19]的研究结果一致。P_n 和 T_r 变化与气孔导度密切相关，蒸腾速率是植物调控自身水分耗损的重要生理指标[20]。本研究结果表明，在 W2 灌溉模式下，烟富 6 号和维纳斯黄金苹果树叶片的 P_n、T_r 和 G_s 值均显著增加，这一结果不仅证实了灌溉模式对苹果光合特性的重要影响，也为优化苹果栽培管理提供了理论依据。

3.2　2 种灌溉模式对苹果树叶片叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数是研究植物光合作用与环境关系的探针，而叶绿素荧光技术具有快速、灵敏和无损伤研究光合生理的特点[21]。F_o 和 F_m 分别指光系统Ⅱ反应中心全部开放和关闭时的荧光水平，F_v/F_m 是衡量植物光系统Ⅱ反应中心活性和光能转换效率高低的重要指标，其值一般为 0.75～0.85，值越低表明植物光抑制能力越高[22]。F_v/F_o 是光系统Ⅱ的潜在活性，其值越大，表明光系统Ⅱ反应中心的开放程度越大且吸收运用于光合作用的光能越多[23]。本研究发现，3 个品种苹果树在 2 个生育期叶片 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的日变化为先降后升趋势，均在 16:00 出现最低值；在 W1 灌溉模式下，烟富 6 号和王林 F_v/F_m 显著低于 W2 灌溉模式，表明在 W1 灌溉模式下，烟富 6 号和王林叶片 PSⅡ受损害程度较 W2 灌溉模式大。F_v'/F_m' 是 PSⅡ有效光化学量子产量，可以反映开放的 PSⅡ反应中心原初光能的捕获效率[24]，其值越高，表明 PSⅡ反应中心的能量转化效率越高，叶片的光合能力越强[25]。ETR 在一定程度上反映了实际光强下的相对电子传递效率，与植物净光合速率呈显著正相关，可用于度量光化学反应导致碳固定的电子转移情况[26]。本研究结果表明，在 1 行 2 管（W2）灌溉模式下，烟富 6 号和维纳斯黄金在幼果期和果实膨大期叶片 F_v'/F_m' 和 ETR 值较高，表明 W2 灌溉模式能够有效提高烟富 6 号和维纳斯黄金的光能转化效率和光合电子传递能力，从而促进光合产物的积累，有利于植株生长发育，也为早产和高产奠定了重要的物质基础。

4　结　论

本试验结果表明，3 个品种苹果树在幼果期和果实膨大期叶片 P_n、T_r 和 G_s 的日变化趋势基本一致，总体呈“M”形，第 1 和第 2 峰值分别出现在 12:00 和 16:00，且第 1 峰值高于第 2 峰值，而 C_i 的日变化则呈先降后升趋势。在 W2 灌溉模式下，烟富 6 号和维纳斯黄金叶片的 P_n、T_r 和 G_s 值较 W1 灌溉模式高，表明 W2 灌溉模式有利于烟富 6 号和维纳斯黄金光合作用的提高。通过比较叶绿素荧光参数发现，3 个品种苹果树在 2 个生育期 F_o、F_v'/F_m' 和 ETR 的日变化呈先升后降趋势，F_m、F_v/F_o 和 F_v/F_m 的日变化呈先降后升趋势；在 W2 灌溉模式下，烟富 6 号和维纳斯黄金在 2 个生育期 F_o、F_m、F_v'/F_m' 和 ETR 值均较高，表明 W2 灌溉模式更有利于烟富 6 号和维纳斯黄金光能转化效率的提高，从而有助于植株光合能力的提升。综上所述，烟富 6 号和维纳斯黄金苹果树在 1 行 2 管（W2）灌溉模式下具有较强的光合能力和光环境适应能力，而王林苹果树在 1 行 1 管（W1）灌溉模式下，其光合特性及叶绿素荧光表现更优。

[参考文献]

[1]　罗利华，胡田田，陈绍民，等. 水肥一体化模式对苹果叶片矿质元素含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2021，49(8)：101-110.

LUO L H, HU T T, CHEN S M, et al. Effects of fertigation mode on contents of mineral elements in apple leaves[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 101-110.

[2] 纵丹,王静敏,张垚,等.西南地区 9 种乡土杨树的秋季光合特性比较[J].西北林学院学报,2022,37(4):57-63.
ZONG D, WANG J M, ZHANG Y, et al. Comparison of photosynthetic characteristics of nine poplar species in southwest China in autumn[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 57-63.

[3] HAN H, YANG H, MA X Y, et al. Seasonal maintenance of leaf level carbon balance facilitated by thermal acclimation of leaf respiration but not photosynthesis in three angiosperm species[J]. Environmental and Experimental Botany, 2022, 195: 104781.

[4] 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.
LIU X G, SUN G Z, PENG Y L, et al. Effect of water-fertilizer coupling on photosynthetic characteristics, fruit yield, water and fertilizer use of mango[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 125-133.

[5] 刘星.滴灌方式与灌水量对陕北山地苹果园土壤水分、果树生长和产量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
LIU X. Effects of drip irrigation methods and irrigation amount on soil moisture, fruit tree growth and yield of apple orchards in mountainous areas of northern Shaanxi[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

[6] 张雯,安贵阳,李翠红.根系分区交替灌溉对富士苹果光合作用及果实品质的影响[J].西北林学院学报,2010,25(6):33-37.
ZHANG W, AN G Y, LI C H. Effects of alternative partial root-zone irrigation on the photosynthesis and fruit quality in Fuji fuji apple trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(6): 33-37.

[7] KALAJI M H, GOLTSEV V N, KRYSTYNA Z G, et al. Chlorophyll fluorescence: understanding crop performance-basics and applications[J]. CRC Press, 2017, 11: 222.

[8] 耿东梅,单立山,李毅,等.土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光合抗氧化酶活性的影响[J].植物学报,2014,49(3):282-291.
GENG D M, SHAN L S, LI Y, et al. Effect of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2014, 49(3): 282-291.

[9] 魏刚刚,杨建军,程平,等.井式节水灌溉下苹果园土壤水分和养分空间分布特征研究[J].节水灌溉,2023(5):24-32.
WEI G G, YANG J J, CHENG P, et al. Study on soil moisture and nutrient distribution characteristics of apple orchards under well-type water-saving irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2023(5): 24-32.

[10] 宋兆云.微喷补灌水肥一体化管理对小麦产量和水氮利用效率调节的生理基础[D].山东泰安:山东农业大学,2018.
SONG Z Y. Physiological basis of integrated management of micro-spray irrigation and fertilizer on wheat yield and water and nitrogen use efficiency[D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2018.

[11] 王红平.不同矮化中间砧对长富 2 号苹果生长生理及果实品质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2019.
WANG H P. Effects of different dwarfing intermediate root stocks on growth physiology and fruit quality of Changfu No. 2 apple[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.

[12] 韩云飞,任永峰,赵沛义,等.不同滴灌处理对藜麦生长及光合特性的影响[J].北方农业学报,2024,52(1):103-111.
HAN Y F, REN Y F, ZHAO P Y, et al. Effects of different drip irrigation treatments on the growth and photosynthetic characteristics of quinoa[J]. Journal of Northern Agriculture, 2024, 52(1): 103-111.

[13] 王姝婷.幼年苹果树叶片光合作用的限制形式及环境响应[D].太原:山西大学,2022.
WANG S T. Limiting forms and environmental response of photosynthesis in young apple leaves[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2022.

[14] 罗静,易盼盼,王飞,等.不同矮化中间砧对苹果苗光合特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):177-184.
LUO J, YI P P, WANG F, et al. Effects of different dwarfing interstocks on photosynthetic characteristics of grafted apple trees[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 177-184.

[15] 常浩杰.延安山地富士苹果光合生理特性及生态效应研究[D].陕西延安:延安大学,2021.
CHANG H J. Study on photosynthetic physiological characteristics and ecological effects of Fuji fuji apple in Yan'an mountain area[D]. Yan'an, Shaanxi: Yan'an University, 2021.

[16] 高冠龙,冯起,刘贤德,等.三种经验模型模拟荒漠河岸柽柳叶片气孔导度[J].生态学报,2020,40(10):3486-3494.
GAO G L, FENG Q, LIU X D, et al. Simulating the leaf stomatal conductance of the desert riparian *Tamarix ramosissima* Ledeb based on three empirical models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3486-3494.

[17] 李喜梅,赵君静,回祎,等.郑州市 4 种园林树木光合特性及其影响因素研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(5):105-112.
LI X M, ZHAO J J, HUI Y, et al. A study on photosynthetic characteristics and influencing factors of four kinds of garden trees in Zhengzhou[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(5): 105-112.

[18] 程平,赵明玉,李宏,等.干旱胁迫对苹果树生长、光合特性及果实品质的影响[J].云南大学学报(自然科学版),2022,44(2):405-414.
CHENG P, ZHAO M Y, LI H, et al. Effects of drought on growth, photosynthetic characteristics and fruit quality of apple trees[J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2022, 44(2): 405-414.

(下转第 34 页)

half-sib families of ornamental crabapple[C]//Chinese Society for Horticultural Science. Adances in ornamental horticulture of China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017:265-272.

[27] LIU Y,CHEN S,PAL S,et al. The hormonal,metabolic,and environmental regulation of plant shoot branching[J]. New Crops,2024(1):10028.

[28] 朱倩玉,姜新强,刘庆超,等. 青岛地区彩叶树种的综合评价研究[J]. 中国农学通报,2016,32(31):13-19.
ZHU Q Y,JIANG X Q,LIU Q C,et al. Comprehensive evaluation of colored-leaf trees in Qingdao[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(31):13-19.

[29] 王向光. 观赏海棠不同品种表型性状分析[D]. 河北秦皇岛:河北科技师范学院,2018.
WANG X G. Phenotypic analysis of different varieties of ornamental crabapple[D]. Qinhuangdao,Hebei:Hebei Normal University of Science & Technology,2018.

[30] 耿健. 观赏海棠花青素代谢途径与产物的研究[D]. 重庆:西南大学,2011.
GENG J. The metabolic pathway of anthocyanin and itsmetabolites in *Malus* crabapples[D]. Chongqing:Southwest University,2011.

[31] 郑杨,曲晓玲,郭翎,等. 观赏海棠资源谱系分析及育种研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2008(1):152-160.
ZHENG Y,QU X L,GUO L,et al. Advances on ornamental crabapple resources[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science),2008(1):152-160.

(责任编辑:窦春蕊)

(上接第18页)

[19] 魏永霞,曹晓强,冀俊超,等. 不同灌溉方式下旱直播水稻光合特性与干物质积累动态[J]. 农业机械学报,2021,52(10):358-368.
WEI Y X,CAO X Q,JI J C,et al. Effects of different irrigation methods on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation dynamics of dry direct seeding rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):358-368.

[20] 甘雨康,施浩然,崔宁博,等. 不同微灌方式下水分调控对猕猴桃光合特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(4):17-25.
GAN Y K,SHI H R,CUI N B,et al. Effects of water regulation on photosynthetic characteristics and yield of kiwifruit leaves under different micro-irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2020,39(4):17-25.

[21] 姚宇恒,南丽丽,陈洁,等. 红豆草幼苗叶片光合和叶绿素荧光对干旱胁迫的响应[J]. 草业科学,2024,41(5):1161-1174.
YAO Y H,NAN L L,CHEN J,et al. Effects of drought stress on the leaf photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of sainfoin seedlings[J]. Pratacultural Science,2024,41(5):1161-1174.

[22] 刘亚娜,刘世增,王芳,等. 穴贮肥水和秸秆覆盖对苹果树光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):164-172.
LIU Y N,LIU S Z,WANG F,et al. Impacts of hole fertilizer storage and straw mulching on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of apple trees[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2019,51(14):164-172.

[23] 王琦,谭占明,程云霞,等. 不同比例红蓝光夜间补光对番茄生长生理的影响[J]. 山东农业科学,2024,56(9):58-66.
WANG Q,TAN Z M,CHENG Y X,et al. Effects of supplementing red and blue light at different ratios at night on growth and physiology of tomato[J]. Shandong Agricultural Sciences,2024,56(9):58-66.

[24] 刘丙花,赵登超,梁静,等. 4个品种核桃砧木幼苗干旱生理响应及抗旱性评价[J]. 经济林研究,2020,38(1):11-19.
LIU B H,ZHAO D C,LIANG J,et al. Physiological responses to drought stress and resistances evaluation of four cultivars of walnut root stock seedlings[J]. Non-Wood Forest Research,2020,38(1):11-19.

[25] YU Z C,ZHENG X T,LIN W,et al. Photoprotection of *Arabidopsis leaves* under short-term high light treatment:the antioxidant capacity is more important than the anthocyanin shielding effect[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2021,166:258-269.

[26] 苗婷婷,吴中能,刘俊龙,等. 7个杨树品种苗期叶片解剖结构和叶绿素荧光特性研究[J]. 中国农学通报,2024,40(24):51-59.
MIAO T T,WU Z N,LIU J L,et al. Study on leaf anatomical structure and chlorophyll fluorescence characteristics of seven poplar varieties at seedling stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2024,40(24):51-59.

(责任编辑:屈李纯)