果 树 学 报 2026,43(8):2112-2124
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250697

灌溉模式对幼龄杏树光合特性及果实品质的影响

刘芊汝[1,2],汤志荣[1,2],洪艳章[1,2],秦丽欢[2],王海琪[2],曾 栋[2],
谭习羽[2],唐章虎[2],张志刚[3],王玉柱[2],曾 斌[1*],谢 辉[2*]

([1]新疆农业大学园艺学院,乌鲁木齐 830052;[2]新疆维吾尔自治区农业科学院,乌鲁木齐 830000;
[3]新疆维吾尔自治区林业科学院,乌鲁木齐 830092)

摘 要:【目的】系统探讨井式灌溉、滴灌与漫灌3种灌溉模式对轮台白杏生长、光合作用及果实品质的影响,旨在筛选出适宜干旱地区杏树节水增效的灌溉方案。**【方法】**以4年生轮台白杏为试材,采用裂区设计,设置井式灌溉、滴灌、漫灌3种灌溉模式,每种模式分别设置高、中、低3个灌水水平,共9个处理,并测定相关指标。**【结果】**滴灌中水量处理(DW2,230 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$)在节水与综合效益方面表现最优,其叶面积、$P_n$max、光饱和点、单果质量与滴灌高水量处理(DW1,310 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$)相近,但均低于漫灌高水量处理(MW1,500 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$);DW2的SPAD值与DW1、MW1均无显著差异;DW2的气孔导度低于DW1,但高于井灌处理;DW2的PSⅡ实际量子效率与MW1相近,但低于DW1;三者的电子传递速率无显著差异。此外,MW1的维生素C含量显著高于DW2,DW2较DW1减少25.8%,较MW1降低54%,且显著优于井灌处理。**【结论】**在轮台地区4年生杏树栽培中,滴灌模式下230~310 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$的中高灌溉量区间为实现节水与增效协同的可行范围。

关键词:轮台白杏;灌溉模式;光合特性;叶绿素荧光;果实品质

中图分类号:S662.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2112-13

Effects of irrigation mode on photosynthetic characteristics and fruit quality of apricot

Liu Qianru[1,2], Tang Zhirong[1,2], Hong Yanzhang[1,2], Qin Lihuan[2], Wang Haiqi[2], Zeng Dong[2], Tan Xiyu[2], Tang Zhanghu[2], Zhang Zhigang[3], Wang Yuzhu[2], Zeng Bin[1*], Xie Hui[2*]

([1]College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; [2]Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, Xinjiang, China; [3]Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi 830092, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】Xinjiang is a pivotal region for apricot cultivation. However, agricultural water use has become an increasingly pressing issue due to severe aridity and irrational water resource utilization structure. Traditional flood irrigation tends to cause substantial water evaporation, soil structural degradation, and resource waste, while drip irrigation technology provides a feasible solution for improving water use efficiency. Furthermore, well irrigation minimizes surface evaporation by delivering water directly to the root zone. This experiment investigates the effects of different irrigation regimes on the leaf characteristics, photosynthetic characteristics, and fruit quality of *Prunus armeniaca* 'Luntaibaixing'. The objective is to determine an optimal irrigation strategy that achieves water conservation and improves efficiency for apricot production in arid regions.【Methods】The test material was 'Luntaibaixing', with a tree age of 4 years and uniform growth. The experiment was conducted at the experimental station of the Institute of Fruits and Vegetables, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, located in Haerbake Township, Luntai County, Xinjiang. A split-plot design was adopted, where the

收稿日期:2025-12-31 **接受日期:**2026-02-09

基金项目:自治区重大科技专项项目—新疆杏种质创新与优良新品种选育(2023A02008-1);特色果树种质资源鉴定评价与肥水药高效管理技术研究(20244BDF60012)

作者简介:刘芊汝,女,在读硕士研究生,研究方向为果树栽培与生理。E-mail:18119466135@163.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:zengbin@xjau.edu.cn;E-mail:xhxjnky@163.com

main-plot factor was irrigation mode (well irrigation, drip irrigation, and flood irrigation) and the sub-plot factor was irrigation volume. Three irrigation levels were established: high (W1), medium (W2), and low (W3), resulting in a total of nine treatment combinations. Each treatment was replicated three times, and six apricot trees per plot were designated as the observational units. The specific irrigation quotas were defined as follows: well irrigation (JW1: 310 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$, JW2: 230 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$, JW3: 150 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$); drip irrigation (DW1: 310 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$, DW2: 230 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$, DW3: 150 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$); and flood irrigation (MW1: 500 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$, MW2: 350 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$, MW3: 200 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$).【Results】Analyses of leaf phenotype and chlorophyll content showed that the MW1 treatment achieved the best leaf growth performance, with both leaf length and leaf area significantly larger than those under other treatments. Under water-saving conditions, the DW2 treatment showed no significant difference in leaf area compared with DW1. Furthermore, its leaf length and width were comparable to those of MW1, demonstrating a strong compensatory growth effect. In contrast, the JW3 treatment had the lowest values for leaf length, leaf area, and SPAD. Light-response curves revealed that MW1 had the highest maximum net photosynthetic rate (P_n max) and light saturation point (LSP), indicating superior photosynthetic potential. Despite reduced water application, DW2 exhibited maximum Pn, LSP, and electron transport rate (ETR) values comparable to those of DW1 and MW1. This suggests that DW2 would maintain high photochemical efficiency and robust photosynthetic capacity even under water-saving constraints. In contrast, the P_n max and LSP of JW3 were approximately 24.7% and 30.7% lower than those of MW1, respectively. Similarly, compared with MW1, MW3 showed an approximate 18.3% reduction in P_n max and 9.4% reduction in LSP. Fruit quality assessments indicated that the MW1 treatment resulted in the optimal single fruit weight, along with the highest levels of total phenols, flavonoids, and vitamin C. However, this treatment requires substantial water consumption. Notably, DW2 maintained fruit quality comparable to that of the high-water treatments, demonstrating excellent water use efficiency. Photosynthetic fluorescence parameters were significantly correlated with the contents of soluble solids, total phenols, and flavonoids. These correlations indicate that photosynthetic efficiency directly affects the accumulation of sugars and secondary metabolites (such as phenols and flavonoids) in fruits, and these components are essential for fruit nutrition and sensory quality. In addition, ΦPSⅡ was positively correlated with the soluble solids content, indicating that higher photosynthetic efficiency directly promoted the accumulation of sugar in the fruit. While there was a substantial disparity in fruit quality between JW1 and MW1, JW1 was more comparable to DW2. Although differences persisted: JW1 exhibited lower fruit firmness, soluble solid concentration, and total phenol concentration compared with DW2, with reductions of 18.8%, 7.8%, and 17.6%, respectively.【Conclusion】The combination of drip irrigation with a medium-high irrigation volume range (230−310 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$) achieves an optimal balance between water conservation and production efficiency, and is identified as the superior irrigation strategy for apricot cultivation in arid regions. This approach sustains vigorous vegetative growth and high fruit quality while significantly cutting water consumption, demonstrating superior water use efficiency. Future experiments should focus on further refining irrigation regimes within this volume range to support the sustainable development of the apricot industry.

Key words: *Prunus armeniaca*‘Luntaibaixing’; Irrigation modes; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence; Fruit quality

新疆是我国杏（*Prunus armeniaca* L.）的核心栽培区之一[1]。轮台县作为新疆杏的主产区，地处暖温带干旱大陆性气候区，年均降水量52 mm，蒸发量高达2072 mm。由于自然补给匮乏且田间灌溉模

式相对粗放，该区域水资源短缺与低效利用问题并存，导致整体灌溉水利用系数不足50%[2-3]。水分是影响果实品质形成的关键限制因子，其供应状况不仅直接调控果实的发育进程，还能通过影响光合作用等生理过程，间接决定果实最终的品质表现[4]。尽管杏树具有较强的耐旱性[5]，但长期处于干旱与高温双重胁迫下，其正常生长发育仍受到显著抑制。因此，阐明杏树的光合生理响应机制并筛选出适宜干旱地区节水增效的灌溉方案，对保障新疆干旱区杏产业可持续发展具有重要意义。

灌溉模式和灌水定额作为水分调控的核心变量，直接决定了杏树的生长态势与果实品质[6]。长期以来，当地仍多沿用传统的漫灌模式，虽然能在短期内满足水分需求，但普遍存在水资源利用率低、深层渗漏严重等问题，甚至可能导致果实品质劣化[7]。相比之下，以滴灌、井式灌溉为代表的现代节水灌溉技术展现出较大的增效潜力[8-9]。现有研究表明，将滴灌灌水下限控制在田间持水量的60%~80%，可促进玉露香梨生长、提升品质并实现节水增效[10]；而井式灌溉[11]作为一种通过竖井管将水分精准输送至根区深层的技术，能有效规避地表蒸发损失[12]，在枣树[13]栽培中已有深入研究，但在杏树中报道较少。当前研究多集中于表观光合参数与生物量，对不同灌溉模式如何影响杏树光合作用的关键内在机制认识不足，且井式灌溉在杏树上的应用效果尚未明确，其生理响应机制亟待深入研究。

因此，本研究以轮台白杏为试材，系统比较井式灌溉、滴灌与漫灌3种灌溉方式，并深入解析其对光合生理过程的调控机制。通过测定不同处理下杏树叶片的表型特征、光响应曲线、叶绿素荧光动力学参数及果实品质指标，揭示不同水分管理策略对杏树生理生态特性的综合调控机制，为优化适用于轮台白杏在新疆的节水增效种植方案提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

2024年3月—2025年11月在新疆维吾尔自治区农业科学院果蔬研究所轮台县哈尔巴克乡试验基地（地理坐标：84°14′ E，41°44′ N，海拔962.7 m）开展试验。供试材料为4年生轮台白杏（*Prunus armeniaca* ‘Luntaibaixing’），选取树体生长健壮、长势一致的植株。试验采用裂区设计，主区因素为灌溉模式，设置井式灌溉、滴灌及漫灌3种模式；副区因素为灌水量，设置高（W1）、中（W2）、低（W3）三个水平，共9个处理组合（表1）。每个处理3次重复，每小区选取6株树作为观测单元。试验树株行距为2 m×5 m，南北行向，共计54株试验树。

为精确调控各处理的灌水量并确保灌溉均匀性，每个处理均安装独立的水表与阀门系统。为消除处理间的水分侧漏干扰，各处理边界均筑有高出地面50 cm的土垄进行物理隔离。试验期间，除灌溉措施外，果园常规管理（包括施肥、修剪及病虫害防治等）均保持统一。各处理灌溉系统布设如下：1. 井式灌溉：沿树行方向，在相邻两株杏树的中心点，埋设一根竖直井管。该井管内径8 cm，高50 cm，管壁均匀分布直径约2.5 mm渗水孔。灌溉时，通过φ 20 mm PE引流管将地面滴灌主管道的水源导入

表1 不同灌溉模式与灌水水平试验设计

Table 1 Experimental design of different irrigation modes and irrigation levels （$m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$）

灌水方式 Irrigation mode	处理 Treatment	春灌 Spring irrigation	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	冬灌 Winter irrigation	总灌水量 Total irrigation volume
井式灌溉 Well irrigation	JW1	35	18	40	60	60	22	75	310
	JW2	25	15	35	40	40	10	65	230
	JW3	0	6	24	30	30	5	55	150
滴灌 Drip irrigation	DW1	35	18	40	60	60	22	75	310
	DW2	25	15	35	40	40	10	65	230
	DW3	0	6	24	30	30	5	55	150
漫灌 Flood irrigation	MW1	55	26	72	96	96	40	115	500.
	MW2	40	16	48	68	68	30	80	350
	MW3	25	10	30	40	40	10	45	200

井管内，实现水分在根区的精准补给。2.滴灌：沿杏树行向铺设PE滴灌管带，滴头布置于距树干30 cm范围内，通过滴头将水分缓慢、均匀地滴入根系主要分布区的土壤中。3.漫灌：采用传统的单株畦灌方式。灌溉水经由管道出水口直接引入由土垄围成的树盘内，并在地表进行漫流和入渗（图1）。

A. 井式灌溉；B. 滴灌；C. 漫灌。

A. Well irrigation; B. Drip irrigation; C. Flood irrigation.

图1　不同灌溉模式输水系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of water conveyance system under different irrigation modes

1.2　测定指标与方法

叶绿素和叶片表型参数：于5—6月，使用叶绿素仪（SPAD-502，日本）测定叶绿素含量。每株随机选取新梢第5~7节间、朝向相同（向阳）、大小相近且无病虫害的5枚成熟功能叶片，每枚叶片在不同部位测定3次；使用游标卡尺测量叶长、叶宽，使用便携式叶面积仪（LI-3000C，美国）测定叶面积。

光响应曲线：在果实商业成熟期（6月）晴天的09：00—12：00，使用CIRAS-3光合仪（PP-Systems，美国）于室外测定9个不同灌溉处理的杏叶片光合参数。每株随机选取新梢第5~7节间、朝向相同（向阳）、大小相近且无病虫害的3枚成熟功能叶进行测定；采用人工光源叶室，叶室温度与环境温度一致；PAR（光合有效辐射）设定12个梯度（0~2000 μmol·m^{-2}·s^{-1}），采用直角双曲线修正模型拟合光响应曲线[14]，计算表观量子效率（AQY）、光补偿点（LCP）、光饱和点（LSP）、最大净光合速率（$P_n$max）和暗呼吸速率（Rd）。

叶绿素荧光参数：于果实商业成熟期（6月），使用MS-2便携脉冲调制式荧光（Hansatech，英国）在同一枚叶片上测定叶绿素荧光参数，待测叶片先经过30 min暗处理后，测定实际光化学效率（ΦPSⅡ）、光化学淬灭系数（*qP*）、PSⅡ最大光化学效率（F_v/F_m）、非光化学淬灭系数（*NPQ*）、电子传递速率（*ETR*）。

快速叶绿素荧光诱导动力学参数：于果实商业成熟期（6月），使用植物效率分析仪Handy PEA（Hansatech，英国）测定9个不同灌溉处理的杏叶片OJIP曲线并计算相关参数，包括V_i（I点相对可变荧光）、V_j（J点相对可变荧光）、φEo（电子传递量子产额）、dv/dto（QA还原率）等，参照李鹏民等[15]和Stirbet等[16]的方法进行JIP-test分析。

果实品质：使用硬度计（GY-4型，中国）测定果实硬度；使用糖酸度计（爱拓PAL-BX，ACID11型，日本）测定可溶性固形物和总酸含量；采用2,6-二氯靛酚滴定法测定抗坏血酸含量[17]；采用分光光度

法[18]测定总酚、黄酮含量。

1.3 数据处理

使用SPSS Statistics 26.0软件对试验数据进行分析，使用Origin 2024软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式对叶片表型和叶绿素的影响

由表2可知，随着灌水量增加，叶长、叶宽、叶面积及SPAD值显著增大。漫灌处理在叶片表型构建上表现最优，5月，MW1的叶长（5.73 cm）、叶宽（4.95 cm）和叶面积（15.62 cm^2）均处于较高水平；DW1的叶面积为（15.10 cm^2）与MW1（15.62 cm^2）无显著差异。DW2的叶面积为14.24 cm^2，小于DW1和MW1，但仍大于JW2和JW3。6月，各处理叶片生长指标整体高于5月。MW1的叶长和叶面积分别为7.57 cm和19.59 cm^2，处于最高水平；DW1分别为7.35 cm和19.08 cm^2，与MW1无显著差异。DW2的叶长、叶宽和叶面积分别为6.89 cm、5.35 cm和18.45 cm^2，虽小于DW1和MW1，但仍显著大于低水量滴灌处理DW3，表明中水量滴灌能够较好地维持叶片生长。5月，MW1和DW1的SPAD值处于较高水平，分别为46.90和46.36；DW2为44.22，低于DW1和MW1。6月，DW2的SPAD值提高至48.44，虽低于DW1和MW1，但高于DW3、JW2、JW3和MW3，表明其在适度节水条件下仍能维持较强的叶绿素积累能力。

表2 不同灌溉模式之间叶片表型和叶绿素

Table 2 Leaf phenotypes and SPAD values among different irrigation modes

月份 Month	处理 Treatment	叶长 Length of leaf/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm^2	SPAD
5月 May	JW1	5.45±0.10 bc	4.54±0.02 c	14.58±0.46 b	45.71±0.21 b
	JW2	5.23±0.03 c	4.48±0.07 c	12.35±0.68 c	43.07±0.07 d
	JW3	4.98±0.05 d	4.21±0.08 d	11.36±0.08 d	42.35±0.10 e
	DW1	5.41±0.11 bc	4.74±0.03 a	15.10±0.12 a	46.36±1.01 a
	DW2	5.20±0.17 c	4.62±0.02 b	14.24±0.52 b	44.22±0.12 c
	DW3	5.12±0.17 cd	4.29±0.09 d	14.01±0.17 b	43.95±0.18 cd
	MW1	5.73±0.05 a	4.95±0.05 a	15.62±0.80 a	46.90±0.05 a
	MW2	5.59±0.01 b	4.68±0.05 b	14.86±0.32 ab	42.88±0.17 e
	MW3	5.52±0.01 b	4.52±0.09 c	14.66±0.62 b	43.00±0.06 d
6月 June	JW1	7.08±0.03 a	5.37±0.17 ab	18.44±0.06 b	48.91±1.30 b
	JW2	6.01±0.17 b	5.12±0.18 b	17.47±1.08 c	47.09±1.30 c
	JW3	5.45±0.02 c	4.82±0.16 c	16.61±0.45 d	46.52±1.53 d
	DW1	7.35±0.13 a	5.55±0.20 a	19.08±0.83 a	49.70±1.76 a
	DW2	6.89±0.15 b	5.35±0.03 ab	18.45±0.99 b	48.44±0.82 b
	DW3	6.54±0.02 c	5.28±0.04 ab	17.29±0.88 c	47.66±0.10 c
	MW1	7.57±0.26 a	5.59±0.15 a	19.59±1.27 a	50.03±2.07 a
	MW2	7.38±0.12 a	5.36±0.14 ab	18.19±1.26 b	48.42±1.62 b
	MW3	6.91±0.13 b	5.10±0.15 b	17.30±1.01 c	47.37±1.93 c

注：不同小写字母表示在同一月份下不同处理间经Duncan's测验差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: Different small letters indicated significant difference among different treatments by Duncan's test in the same month($P< 0.05$). The same below.

2.2 不同灌溉模式及灌溉量对光响应曲线的影响

为探究不同灌溉模式对杏树叶片光合能力的影响，测定了光响应曲线并拟合了关键参数。结果表明，各处理组的光响应曲线均呈现典型的光饱和特征（图2-A）。在低光合有效辐射（PAR＜500 μmol·m^{-2}·s^{-1}）阶段，净光合速率（P_n）随光强增强呈线性快速增长，在PAR升至1500~2000 μmol·m^{-2}·s^{-1}时，增速减缓并逐渐趋于光饱和状态。

通过模型拟合获得的光合参数显示，最大净光合速率（$P_n$max）与光饱和点（LSP）的变化趋势一致，均以漫灌高水量处理（MW1）为最高（15.241 μmol·m^{-2}·s^{-1}；1 582.040 μmol·m^{-2}·s^{-1}）（表3），表明充分灌水可显著提升叶片的光合潜能和强光利用能力；在DW2较DW1节水25.8%的条件下，其$P_n$max（13.131 μmol·m^{-2}·s^{-1}）

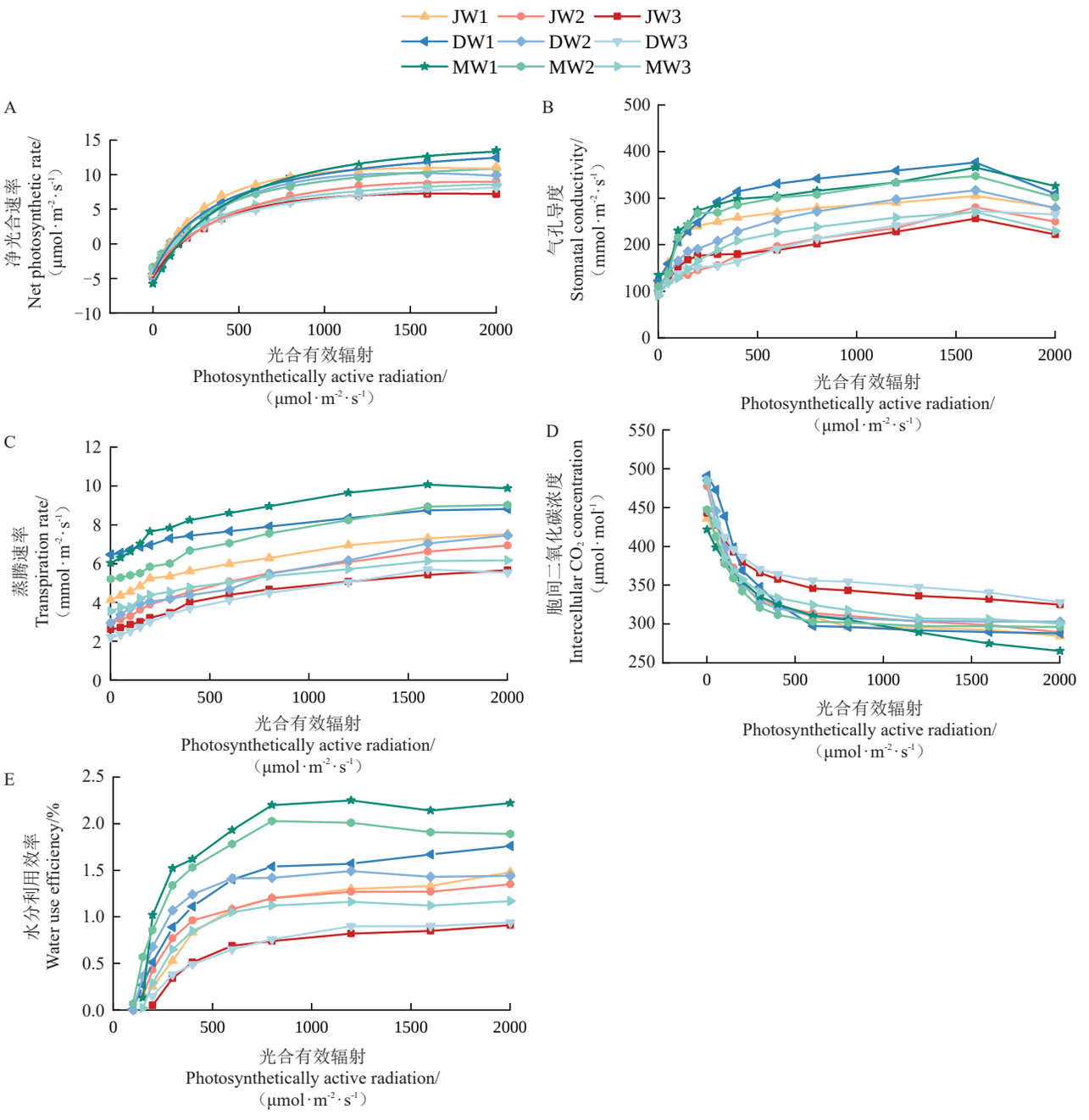


图 2　不同灌溉模式下杏叶片光合-光响应曲线

Fig. 2　Photosynthetic-light response curves of apricot leaves under different irrigation modes

与DW1（13.665 μmol·m^{-2}·s^{-1}）无显著差异，且两者的LSP均较高，表明DW2在适度节水条件下仍能维持较强的光合能力，显示出更优的水分经济性；而DW1的LSP（1 410.12 μmol·m^{-2}·s^{-1}）虽高于DW2，但其水分利用效率相对较低。低水量处理（JW3、DW3、MW3）下光补偿点（LCP）与暗呼吸速率（Rd）普遍较低，反映植株在水分胁迫下通过降低维持消耗以适应弱光环境。表观量子效率（AQY）在各处理间无显著差异，表明水分管理并未影响光反应中心对初始光能的转化效率。

气孔导度（G_s）和蒸腾速率（T_r）均随PAR增强呈单调递增趋势（图2-B~C）。在PAR=1599 μmol·m^{-2}·s^{-1}时，滴灌中水量处理（DW2）下气孔导度为317.00 mmol·m^{-2}·s^{-1}，虽低于滴灌高水量处理（DW1，376.33 mmol·m^{-2}·s^{-1}），但高于井灌处理，表明其在适度节水条件下仍能维持较强的气体交换能力；漫灌高水量处理（MW1）的蒸腾速率整体最高，反映其强烈的水分代谢，而DW2则处于中等水平，

表3 不同灌溉模式下杏叶片光合-光响应特征曲线参数

Table 3 Parameters of the photosynthetic-light response characteristic curve for apricot leaves under different irrigation modes

处理 Treatment	最大净光合速率 P_n max/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	光饱和点 I_{sat}/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	光补偿点 I_c/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	暗呼吸 R_d/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	量子效率 AQY/%
JW1	13.541±2.751 bc	1 451.361±39.732 abc	154.240±7.964 a	5.145±0.554 a	0.054±0.010 a
JW2	12.901±1.810 bc	1 442.515±200.360 abc	139.474±10.23 ab	4.948±0.453 a	0.047±0.019 a
JW3	11.482±2.372 c	1 096.883±102.494 c	106.541±5.743 c	4.143±0.573 a	0.046±0.010 a
DW1	13.665±1.861 bc	1 410.126±26.467 abc	158.052±2.373 a	5.387±0.363 a	0.067±0.011 a
DW2	13.131±2.991 bc	1 280.182±164.402 bc	147.212±1.122 ab	4.585±0.524 a	0.055±0.017 a
DW3	11.922±1.961 c	1 227.081±29.064 bc	101.624±1.034 c	4.234±0.681 a	0.053±0.025 a
MW1	15.241±4.123 a	1 582.040±40.010 a	150.220±10.104 ab	3.965±0.092 a	0.075±0.003 a
MW2	13.525±2.534 bc	1 521.525±73.064 ab	123.180±0.980 bc	4.237±0.442 a	0.064±0.001 a
MW3	12.447±3.511 c	1 433.240±199.434 abc	88.924±1.944 d	4.273±0.623 a	0.054±0.015 a

体现其水分输出的合理调控。相比之下，井灌低水量处理（JW3）在PAR=2001 μmol·m^{-2}·s^{-1}时的G_s（222.33 mmol·m^{-2}·s^{-1}）和在PAR=1599 μmol·m^{-2}·s^{-1}时的T_r（5.42 mmol·m^{-2}·s^{-1}）均最低，显示严重的水分限制；胞间CO_2浓度（C_i）随PAR增强而下降，DW2保持适中水平，表明中水量滴灌能够维持较高CO_2同化效率（图2-D）。水分利用效率（WUE）随PAR增强先快速升高后趋于稳定，MW1整体最高，DW2高于低水量滴灌和井灌处理（图2-E），表明在节水条件下仍能兼顾光合效率与水分利用效率。综上所述，漫灌（MW1）展现了最高的光合潜力，DW2在气体交换参数方面表现出最优的协调性，其气孔行为在适度节水条件下仍支持有效的CO_2吸收，水分利用效率与高水量滴灌处理相近，实现了光合性能与节水效益的最佳平衡，是实现水分高效利用的最优选择。

2.3 不同灌溉模式对光合特性的影响

2.3.1 PSⅡ的实际光化学效率 在反映PSⅡ光下实际运行状态的参数中，滴灌中水量处理（DW2）在中度节水条件下仍保持良好的光化学性能（表4）。DW2的实际光化学效率（ΦPSⅡ）为0.568，光化学淬灭系数（qP）为1.013，虽略低于DW1，但实际光化学效率高于JW2、JW3、MW2、MW3，表明其在减少供水25.8%的条件下仍能维持较高的光化学反应活性和反应中心开放比例。此外，DW2的电子传递速率（ETR）与DW1、MW1无显著差异，表明其光合电子传递链运行顺畅。DW2的非光化学淬灭系数（NPQ）处于中等水平，反映出其在适度水分限制下具备平衡的光保护机制，既能避免能量过度耗散，又可维持合理的光能分配效率。综上所述，DW2在光化学效率、反应中心开放程度和电子传递能力方面表现稳定，在节水的同时并未显著降低光化学反应活性，体现出更优的光合调控适应性与水分利用协调性。

2.3.2 叶绿素荧光动力学曲线和PSⅡ的潜在活性 快速叶绿素荧光诱导动力学曲线（OJIP）反映植物PSⅡ的原初光化学反应和光合电子传递状态的

表4 不同灌溉模式下杏叶片的叶绿素荧光参数

Table 4 Chlorophyll fluorescence parameters of apricot leaves under different irrigation modes

处理 Treatment	实际光化学效率 ΦPSⅡ	光化学淬灭系数 *qP*	PSⅡ最大光化学效率 F_v/F_m	非光化学淬灭系数 *NPQ*	电子传递速率 *ETR*
JW1	0.641±0.170 ab	1.526±0.445 ab	0.696±0.168 bc	1.156±0.544 ab	6.388±0.298 a
JW2	0.558±0.121 bcd	1.164±0.447 bc	0.661±0.115 bc	1.211±0.787 ab	5.097±0.611 c
JW3	0.433±0.129 e	1.033±0.421 c	0.567±0.122 c	1.411±0.668 a	5.707±0.387 bc
DW1	0.685±0.169 a	1.699±0.627 a	0.756±0.113 a	0.752±0.397 c	6.405±0.685 a
DW2	0.568±0.132 bc	1.013±0.587 c	0.739±0.125 a	0.915±0.445 bc	6.338±0.943 a
DW3	0.478±0.082 de	0.768±0.416 d	0.630±0.130 bc	1.259±0.657 ab	5.806±0.592 bc
MW1	0.588±0.216 b	1.102±0.546 c	0.648±0.105 bc	0.730±0.457 c	6.480±1.444 a
MW2	0.559±0.106 bcd	1.068±0.498 c	0.582±0.088 c	0.753±0.367 c	6.128±1.322 ab
MW3	0.548±0.116 cd	0.897±0.459 d	0.521±0.054 d	0.789±0.418 c	6.005±0.608 ab

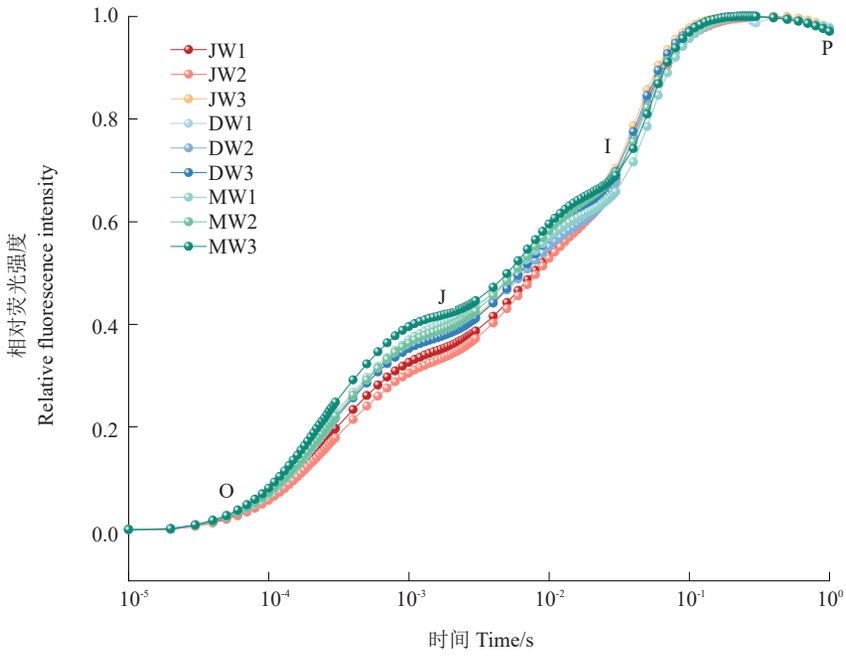


图 3　不同灌溉模式下杏叶片的叶绿素荧光动力学曲线

Fig. 3　Chlorophyll fluorescence kinetic curves of apricot leaves under different irrigation modes

变化过程。不同灌溉处理下的OJIP曲线形态正常，未发生明显变形（图3）。MW2的效果与MW1相当，表明在该条件下增加灌溉量未能进一步提高PSII光化学活性。在相同灌水量下，DW2的P点荧光强度介于JW2与JW1之间，处于中等偏上水平，表明其在适度水分条件下仍能维持较高的PSⅡ反应中心活性。P点荧光强度排序为JW3＜DW3＜MW3＜JW2＜DW2＜JW1＜MW2＜DW1＜MW1，表明低水量处理下光合机构活性普遍受到抑制，而DW2荧光强度显著高于低水量组，且与JW1和MW2水平相近，表明DW2在节水条件下仍具备较大的光化学活性潜力。尽管DW1与MW1表现出最高的潜在光化学活性，但DW2在水分利用经济性方面更具优势，体现了其在光合性能与水分节约之间的有效平衡。综上，DW2在维持PSⅡ光化学反应活性方面表现稳定，能够在适度节水的同时避免光合机构的显著抑制，具备较强的生理适应性。

JIP参数分析进一步揭示了不同灌溉处理对PSⅡ光化学活性的影响。由表5可知，DW2的J点相对可变荧光（V_j）为0.397，与DW1（0.352）存在显著差异，表明其PSⅡ受体侧电子传递阻力较小，电子传递链保持通畅。DW2的电子传递量子产额（φEo）为0.506，虽略低于JW1（0.548），但仍处于较高水平，表明在中水量条件下PSⅡ的光能转化效率稳定。比较不同处理发现，MW3、MW2和DW3的V_j值较高（0.427~0.438），反映在中低水量条件下电子传递受

表 5　不同灌溉模式下杏叶片的 JIP-test 参数

Table 5　JIP-test parameters of apricot leaves under different irrigation modes

处理 Treatment	I点相对可变荧光 V_i	J点相对可变荧光 V_j	电子传递量子产额 φEo	QA还原率 dv/dto
JW1	0.705±0.027 a	0.372±0.025 c	0.548±0.007 a	0.809±0.080 ab
JW2	0.686±0.045 ab	0.395±0.026 b	0.528±0.006 ab	0.708±0.061 bc
JW3	0.684±0.054 ab	0.404±0.003 b	0.478±0.039 b	0.642±0.087 c
DW1	0.704±0.016 a	0.352±0.012 c	0.512±0.003 ab	0.833±0.081 ab
DW2	0.691±0.035 ab	0.397±0.026 b	0.506±0.005 ab	0.780±0.048 abc
DW3	0.674±0.036 ab	0.427±0.067 a	0.504±0.007 ab	0.776±0.070 abc
MW1	0.699±0.028 a	0.410±0.023 b	0.500±0.005 ab	0.892±0.057 a
MW2	0.697±0.028 a	0.428±0.082 a	0.479±0.021 b	0.795±0.177 abc
MW3	0.665±0.022 b	0.438±0.020 a	0.477±0.005 b	0.792±0.075 abc

到抑制；而DW2在节水条件下仍维持较低的V_j与较高的φEo，综合表现优于多数中低水量处理。在滴灌条件下，3个水量处理间的φEo无显著差异，表明滴灌模式有助于维持光化学效率的稳定，受水量波动影响较小。MW1和DW1的QA还原速率（dv/dto）较高，反映其快速的光合启动能力；DW2的dv/dto为0.780，处于中等偏上水平，具备较高的光强响应能力。综合分析表明，DW2在V_j、φEo等关键JIP参数上表现均衡，在中水量条件下既能维持良好的电子传递效率，又具备稳定的光能转化性能，表现出优良的水分适应性与光化学调控能力。

2.3.3 光能在PSⅡ中的分配 从光合能量分配角度分析可知（表6），DW2在节水25.8%的条件下仍表现出高效的光能利用特性。DW2单位反应中心吸收的光能（ABS/CSm = 2 059.80）虽略低于DW1，但电子传递能量（ETo/CSm = 1 055.73）与DW1无显著差异，且显著高于JW3，表明DW2在光能吸收适度减少的情况下仍维持了较高的光化学转化效率。同时，DW2的能耗散能量（DIo/CSm =321.00）处于合理区间，既未能量过剩耗散，也保持了必要的光保护能力。DW1虽表现出“高吸收、高利用、低耗散”的特征，其ABS/CSm与ETo/CSm均最高，但在光能转化环节DW2与之接近，且具备更优的水分经济性。DW2“吸收适中、转化高效、耗散受控”的能量分配模式，是其在中水量条件下维持光合性能的重要生理基础。相比之下，MW1在电子传递能量方面与DW1、DW2相当，但其碳同化下游代谢（REo/CSm）更为活跃。井灌各处理在能量参数上整体表现较差，进一步表明滴灌模式在光能配置与水分利用方面更具系统优势。

表6 不同灌溉模式下单位面积光合物体能量通量参数

Table6 Photosynthetic organism energy flux parameters per unit area under different irrigation modes

处理 Treatment	单位反应中心吸收光能 ABS/CSm	单位反应中心耗散能量 DIo/CSm	单位面积吸收俘获能量 TRo/CSm	单位面积电子传递通量 ETo/CSm	单位面积传输到电子链末端的能量 REo/CSm
JW1	2 096.33±41.34 a	310.80±5.70 c	1 758.33±40.90 ab	1 048.13±30.49 ab	515.40±4.36 c
JW2	2 077.00±45.99 ab	319.00±5.48 bc	1 641.13±40.67 cd	1 030.87±30.76 ab	512.13±15.74 c
JW3	1 952.20±49.62 c	336.27±12.59 ab	1 577.13±56.23 d	925.67±78.85 c	484.53±16.56 d
DW1	2 113.47±27.48 a	298.67±6.49 c	1 777.33±36.49 ab	1 062.33±24.90 a	536.80±23.28 ab
DW2	2 059.80±34.63 ab	321.00±4.65 bc	1 750.87±30.20 ab	1 055.73±21.19 a	517.20±9.01 bc
DW3	1 937.27±47.45 c	360.13±37.44 a	1 641.40±45.71 cd	1 016.93±27.76 ab	511.67±11.74 c
MW1	2 022.00±43.62 b	308.93±4.74 c	1 796.53±25.43 a	1 047.80±19.82 ab	564.20±18.53 a
MW2	2 011.73±54.72 b	316.93±3.05 bc	1 690.73±51.04 bcd	1 009.80±20.77 ab	542.47±10.12 ab
MW3	1 939.80±45.83 c	318.67±5.99 bc	1 685.73±49.35 bcd	974.87±50.55 bc	532.80±13.14 ab

2.4 不同灌溉模式及灌溉量对杏果实品质的影响

灌水量是影响果实品质的重要因素，而灌溉模式则在此基础上表现出显著的调节效应（表7）。随着灌水量增加，果实各项品质指标（除总酸含量）呈上升趋势。MW1在单果质量（16.46 g）、总酚含量（w，后同）（1.49 mg·g^{-1}）、黄酮含量（19.74 mg·g^{-1}）及维生素C含量（12.26 mg·100 g^{-1}）方面均表现最优，但其灌水量达500 m^3·666.7 m^{-2}，水资源消耗较大。DW2在总灌水量为230 m^3·666.7 m^{-2}的条件下，单果质量为14.86 g，可溶性固形物含量达26.68%，总酚含量为1.42 mg·g^{-1}，均与DW1无显著差异。同时，DW2的果实硬度为12.38 kg·cm^{-2}，显著高于多数中低水量处理的果实，具有良好的商品品质与营养品质。DW1在果实硬度（15.37 kg·cm^{-2}）和可溶性固形物含量（27.32%）方面表现突出，但DW2以更低的灌水量实现了综合品质的均衡保持。此外，井灌各处理的品质指标普遍较低。综上所述，DW2在较MW1节水54%、较DW1节水25.8%的基础上，仍能维持与高水量处理相近的果实品质，表现出更高的水分利用效率与更优的栽培经济性。

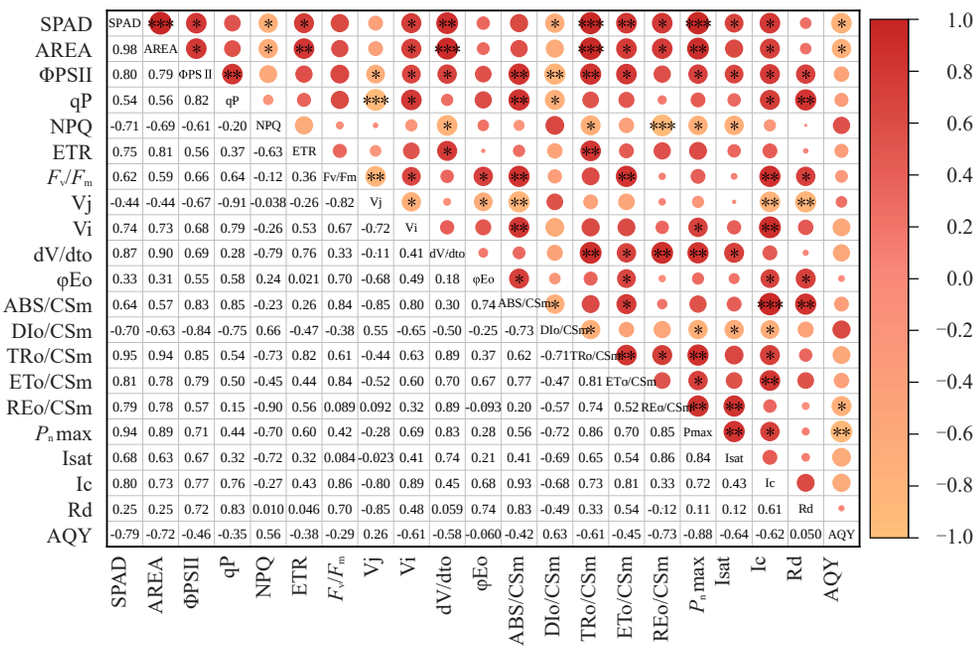
2.5 光合荧光参数的相关性分析

为探究不同生理指标间的内在联系，对主要光合与叶绿素荧光参数进行了相关性分析（图4）。结果表明，ΦPSⅡ与qP呈极显著正相关，表明PSⅡ反应中心的开放程度直接决定了光化学转换效率。F_v/F_m与V_j呈极显著负相关，表明V_j升高会显著降低原初光能转化效率。SPAD值与$P_n$max呈非常显著正相关，表明叶片叶绿素含量增加显著促进了光合

表 7　不同灌溉模式下杏果实基础品质指标

Table7　Basic quality indicators of apricot fruit under different irrigation modes

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	硬度 Fruit firmness/（kg·cm^{-2}）	w（可溶性固形物）Soluble solids content/%	w（总酸）Total acid content/（mg·g^{-1}）	w（总酚）Total phenols content/（mg·g^{-1}）	w（黄酮）Flavonoid/（mg·g^{-1}）	w（维生素C）Vitamin C content/（mg·100 g^{-1}）
JW1	14.38±1.12 ab	10.05±0.64 cde	24.61±0.59 bcd	1.17±0.23 c	1.22±0.15 ab	17.46±0.37 ab	10.96±0.68 bc
JW2	11.90±1.58 bc	7.96±0.53 fg	24.44±0.51 bcd	1.29±0.24 bc	1.27±0.01 ab	16.03±2.29 ab	10.37±0.41 c
JW3	9.16±0.65 c	6.84±0.55 g	22.60±1.13 d	1.46±0.14 a	1.22±0.03 ab	15.00±0.98 b	9.07±0.34 d
DW1	15.11±0.96 ab	15.37±0.61 a	27.32±1.19 a	1.12±0.18 c	1.45±0.10 a	18.74±0.97 ab	11.39±0.38 ab
DW2	14.86±1.47 ab	12.38±0.60 b	26.68±0.64 ab	1.24±0.17 bc	1.42±0.07 ab	17.63±0.84 ab	9.83±0.84 cd
DW3	9.82±0.37 c	9.36±0.76 def	23.83±0.67 cd	1.41±0.17 ab	1.15±0.01 b	16.86±0.98 ab	9.34±0.66 d
MW1	16.46±0.33 a	11.72±0.50 bc	26.33±1.08 ab	1.15±0.20 c	1.49±0.03 a	19.74±0.42 a	12.26±0.29 a
MW2	13.92±0.61 ab	10.90±0.49 bcd	25.71±1.11 bc	1.22±0.14 bc	1.42±0.14 ab	18.61±2.09 ab	11.66±0.94 ab
MW3	13.23±1.48 ab	8.89±0.45 ef	24.21±0.58 bcd	1.33±0.10 b	1.24±0.04 ab	17.62±0.21 ab	8.91±0.80 d



*、**和***分别代表显著相关性（P<0.05）、极显著相关性（P<0.01）和非常显著相关性（P<0.001）的相关水平。

*、** and *** represent significant correlation (P<0.05), extremely significant correlation (P<0.01) and very significant correlation (P<0.001), respectively.

图 4　光合与叶绿素荧光参数相关性热图

Fig. 4　Heatmap of Correlations Between Photosynthetic and Chlorophyll Fluorescence Parameters

潜力的增大。同时，SPAD 值也与 I_{sat} 呈显著正相关，表明叶绿素积累有助于植株适应更强的光照环境；$P_n$max 与 TRo/CSm、REo/CSm 及 ETo/CSm 均呈显著或极显著正相关；$P_n$max 与 DIo/CSm 呈极显著负相关，表明高光合速率的维持依赖于反应中心高效的光能捕获与电子传递，以及热耗散比例的降低。综上，SPAD 值、ETo/CSm、φEo 与 $P_n$max 紧密协同，共同决定了植株的光合生产力；而 DIo/CSm、V_j 则是限制光合作用的主要负向因子。

3　讨　论

3.1　灌溉模式对杏树光合特性的影响

在干旱与半干旱地区，探明果树生理状况与灌溉方式的关系是实施节水农业的关键[19]。本试验发现，DW2 在较 DW1 节水 25.8%的条件下，仍能维持较高的光合性能，其最大净光合速率（$P_n$max=13.131 μmol·m^{-2}·s^{-1}）与 DW1 无显著差异，且光饱和点（Isat=1 280.182 μmol·m^{-2}·s^{-1}）可满足当地光强需

求。这一结果与刘鹏飞等[20]在苹果树光响应特性的研究相符，表明适度水分调控不会显著抑制光系统Ⅱ（PSⅡ）功能。然而，DW2的气孔导度（G_s=315.28 mmol·m^{-2}·s^{-1}）虽低于DW1，但高于井灌处理，表明滴灌模式通过精准供水优化了气孔行为，避免了水分胁迫导致的胞间CO_2限制。叶绿素荧光分析进一步揭示，DW2的实际光化学效率（ΦPSⅡ=0.568）和电子传递速率（ETR=6.338）与高水量处理相当，但非光化学淬灭（NPQ）处于适中水平，体现其光能分配策略的均衡性。这与李鹏民等[15]对OJIP曲线的研究吻合，表明DW2在节水条件下保持了PSⅡ受体侧电子传递的顺畅性（V_j=0.397）。相比之下，MW1虽表现出最高的$P_n$max（15.241 μmol·m^{-2}·s^{-1}），但其水分利用效率低，与任玉忠等[21]在枣树上的研究结论一致，即过量灌溉可能导致光合增益被水资源浪费所抵消。而JW3表现出显著的光合抑制，其ΦPSⅡ低至0.433，该抑制作用不能仅归因于灌水量的减少，更深层的原因可能在于根系分布与供水区域的空间错位。井式灌溉通过50 cm深的渗水管供水。虽然该深度覆盖了4年生杏树的主根系层（20~40 cm），但可能由于土壤水分的垂直重力入渗作用强于横向扩散，灌溉后水分迅速下沉至管底及更深土层，难以在20~40 cm的关键吸水区形成持久有效的湿润体。这种水分运移特征，使得大部分有效根系仍长期处于生理干旱状态，诱导根源性ABA信号产生并迫使气孔关闭；同时，水分在50 cm以下深层的过度积聚可能导致局部根际缺氧，抑制ATP合成及根系对水分的主动运输，进一步加剧了植株的水分亏缺与光合生理障碍，如V_j升高、ΦPSⅡ下降。光合生理参数表明，JW3的气孔导度降至最低，但其胞间CO_2浓度并未随气孔导度的下降而呈等比例降低，甚至在部分光强下维持较高水平。G_s下降而C_i未同步明显下降的现象，表明光合速率已从气孔限制转变为叶肉细胞羧化能力受损的非气孔限制。叶绿素荧光参数的变化进一步证实了光合机构的物理损伤：JW3的实际光化学效率（ΦPSⅡ）显著降低，同时J点相对可变荧光显著升高。V_j升高标志着光合电子传递链中QA向QB的电子传递受阻，导致QA大量积累，进而诱发活性氧产生，损伤反应中心结构。这一结果与王真真[22]在成熟灰枣树上关于井灌优于漫灌的结论不同，表明井管深度与根系分布层位的匹配度是决定井式灌溉效果的关键因子。

3.2 灌溉模式对杏树果实品质的影响

水分是调控果实品质形成的关键环境因子，不同的灌溉模式通过改变根区水分环境，进而影响碳水化合物的合成、分配以及次生代谢产物的积累。果实品质分析表明，尽管DW2的灌水量较MW1减少了54%、较DW1减少了25.8%，但其单果质量（14.86 g）、可溶性固形物含量（26.68%）与DW1及MW1均无显著差异，表明适度水分并未打破果实发育的平衡，DW2维持了较高的光合产物向果实转运的效率。相关性热图（图4）进一步证实，ΦPSⅡ与可溶性固形物含量呈显著正相关，这与光合特性分析中DW2维持较高的ΦPSⅡ和AQY水平的结果一致（表3~4）。稳定的光化学效率是保障果实糖分积累的生理基础。滴灌模式下的精准供水有效避免了水分胁迫对光合碳同化的抑制。适度的水分胁迫能激发果树的防御反应，促进次生代谢产物的合成。本试验中，DW2的果实总酚含量（1.42 mg·g^{-1}）高于井灌处理，且与高水量处理相当；同时其果实硬度（12.38 kg·cm^{-2}）优于MW1（11.72 kg·cm^{-2}）。这一结果与王玉玉等[23]提出的“适度水分亏缺有利于提高果实硬度及抗氧化物质含量”的理论一致，据此推测DW2的根区水分环境诱导了酚类合成相关基因表达的上调，从而提升了果实的抗氧化能力和贮运品质。MW1的维生素C含量（12.26 mg·100 g^{-1}）最高，而DW2较其降低19.8%，这与王佳悦等[24]在葡萄中提出的“水分胁迫抑制维生素C合成”的结论相符。尽管该模式下维生素C含量有所降低，但在灌水量减少25.8%~54%的条件下，仍能维持较高的单果质量与可溶性固形物含量，同时提高果实硬度和总酚含量。

综上所述，不同灌溉模式通过调节水分供应，影响光化学效率ΦPSⅡ、V_j与电子传递链ETR、φEo进而调控光能分配NPQ、ABS/CSm与碳同化能力$P_n$max。这些光合生理变化最终反映在果实中光合产物的积累与分配上，表现为可溶性固形物、总酚含量等品质指标的差异。本试验中，DW2通过维持较高的ΦPSⅡ和较低的V_j，保障了电子传递畅通与光能高效转化，从而在节水条件下仍能维持果实糖分与次生代谢物的积累，实现了水分利用效率与果实品质的协同提升。

3.3 灌溉模式的水分利用效率及经济性

DW2的灌水量（230 m^3·666.7 m^{-2}）较MW1（500 m^3·666.7 m^{-2}）降低54%，但果实品质指标接近，

水分利用效率显著提升。这一结果与任玉忠等[21]在干旱区枣树研究中的结论高度一致，即滴灌处理通过减少蒸发和深层渗漏实现增效节水。然而，本试验发现井灌处理下水分利用效率普遍偏低，JW1的单果质量仅为14.38 g，可能与竖井管布设深度（50 cm）未完全匹配杏树根系分布有关（杏树根系主要分布于20~60 cm[2]）。这一局限性表明，未来需优化井管设计，避免水分运移不均匀。

经济性分析显示，DW2在节水25.8%条件下维持了与DW1相当的综合效益，但试验材料为4年生杏树，结果量较少，未能量化能耗及成本效益的实际占比。后续研究应引入生命周期评价方法，并结合市场收益，明确不同灌溉模式的推广可行性。

本试验系统分析了在不同灌溉模式下杏树的光合特性与果实品质，但仍存在一些局限性亟待未来深入探究：1. 试验期间的灌水量和气候条件可能会影响研究结果的广泛适用性，因此，应考虑在不同气候条件和种植区域进行长时间的跟踪试验。2. 本试验主要关注了光合作用和果实品质的定量分析，后续可结合根系吸水和土壤水分动态，优化灌溉制度，实现更精准的水分调控。3. 本试验材料为4年生幼龄杏树。随着树龄增长，根系下扎，50 cm深的井式灌溉效果可能发生改变。因此，将该结论应用于盛果期大树时需进一步验证。4. 本试验主要基于地上部生理指标间接推断地下部水分状况。未来需引入多土层水分传感器，精确量化不同灌溉模式下土壤水分的垂直运移规律。5. 井式灌溉效果不佳可能与参数设置有关。未来应开展不同管道深度和灌溉频率的对比试验，筛选适合幼龄杏树的井灌参数。6. 仅凭一年的观测数据难以消除气候波动的干扰，需通过多年多点的重复试验以验证结论的稳定性。

4　结　论

与漫灌和井式灌溉相比，滴灌在节水及维持树体生理活性方面表现更优。井式灌溉效果较差，可能与4年生幼树根系分布范围较小、灌溉水分布与根区不匹配有关，导致根区有效供水不足并诱发光合抑制。滴灌中水量处理（DW2，230 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$）通过优化光合性能，在维持较高光化学效率与电子传递畅通的基础上，保障了光合同化产物的稳定生成及其向果实的分配；同时，其叶面积、叶绿素含量与滴灌高水量处理DW1无显著差异，果实单果质量、可溶性固形物及总酚含量等关键品质指标均与高水量处理DW1、MW1相近，从而在节水54%的条件下实现了水分高效利用与果实品质提升。

滴灌模式下的中高水量区间（230~310 $m^3 \cdot 666.7\ m^{-2}$），是实现杏树水分高效利用与果实品质协调提升的可行范围。后续研究可在此基础上进一步细化该区间内的适宜灌溉量，探索更精准的水分调控策略，为干旱区杏树节水优质栽培提供理论依据。

参考文献 References：

[1] 胡东宇，黄力平，高健，王建英 . 新疆小白杏产业高质量发展对策研究[J]. 中国林业经济，2021(6)：76-78.
Hu Dongyu，Huang Liping，Gao Jian，Wang Jianying. Research on countermeasures for high-quality development of Xinjiang Xiaobai Apricot industry[J]. China Forestry Economics，2021(6)：76-78.

[2] 谢辉，阿丽娅•阿力木，秦丽欢，古丽米热•喀斯木，外力•喀迪尔，张大海 . 杏树叶果及土壤矿质营养的动态变化分析[J]. 北方园艺，2024(10)：69-77.
Xie Hui，Aliya · Alimu，Qin Lihuan，Gulimire · Kasimu，Waili · Kadi′er，Zhang Dahai. Dynamic changes of mineral nutrients in apricot leaf，fruit and soil[J]. Northern Horticulture，2024(10)：69-77.

[3] 张沛，龙爱华，海洋，邓晓雅，王浩，刘静，李扬 . 1988—2015年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究：基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土，2021，43(1)：242-253.
Zhang Pei，Long Aihua，Hai Yang，Deng Xiaoya，Wang Hao，Liu Jing，Li Yang. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988—2015：Based on statistical analysis of crop water footprint[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，2021，43(1)：242-253.

[4] 熊江，卢晓鹏，李静，肖玉明，曹雄军，谢深喜 . 水分胁迫对果实品质的影响研究进展[J]. 湖南农业科学，2014(18)：56-60.
Xiong Jiang，Lu Xiaopeng，Li Jing，Xiao Yuming，Cao Xiongjun，Xie Shenxi. Research progress in effects of water stress on fruit quality[J]. Hunan Agricultural Sciences，2014(18)：56-60.

[5] 章秋平 . 新疆杏种质资源评价与利用进展[J]. 北方果树，2025(5)：1-8.
Zhang Qiuping. Progress in evaluation and utilization of apricot germplasm resources in Xinjiang[J]. Northern Fruits，2025(5)：1-8.

[6] 李辉 . 农业节水灌溉技术的推广及应用[J]. 农机使用与维修，2022(8)：102-104.
Li Hui. Promotion and application of agricultural water-saving irrigation technology[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance，2022(8)：102-104.

[7] 刘范学 . 果园灌溉设施优化方式和措施[J]. 中国果业信息，2025，42(6)：84-85.
Liu Fanxue. Orchard irrigation facilities optimization methods and measures[J]. China Fruit News，2025，42(6)：84-85.

[8] 张远华 . 滴灌方式对杏幼苗水分利用率模型构建和生长研究[D]. 阿拉尔：塔里木大学，2022.
Zhang Yuanhua. Study on water use efficiency model and growth of apricot seedlings based on different drip irrigation methods[D]. Alar：Tarim University，2022.

[9] 王金辉，郭亚军，郭海云，张伟锋 . 农业水利灌溉技术下水资源高效利用研究[J]. 智慧农业导刊，2025，5(19)：40-43.
Wang Jinhui，Guo Yajun，Guo Haiyun，Zhang Weifeng. Research on efficient utilization of water resources under agricultural water conservancy irrigation technology[J]. Journal of Smart Agriculture，2025，5(19)：40-43.

[10] 王芸芸，杨凯，石美娟，何美美，窦彦鑫，郭华，任哲斌 . 滴灌中不同灌水上限对梨树生理生长、光合特性及品质的影响[J]. 节水灌溉，2021(1)：77-80.
Wang Yunyun，Yang Kai，Shi Meijuan，He Meimei，Dou Yanxin，Guo Hua，Ren Zhebin. Effects of different irrigation quantity upper limit on physiological growth，photosynthetic characteristics and quality of pear trees under drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation，2021(1)：77-80.

[11] 李宏 . 林木井式节水灌溉方法：CN201210314848. 2[P]. 2015-04-29.
Li Hong. Well-type Irrigation method：CN201210314848.2[P]. 2015-04-29.

[12] 刘帮 . 不同灌溉方式下幼龄灰枣茎流变化规律及耗水特性研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2016.
Liu Bang. Effect study of the stem flow variation and water consumption characteristics of young *Zizyphus jujube* Mill. ‘Huizao’ on different irrigation methods[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2016.

[13] 王和平，张志刚，李宏，孙明森 . 2 种灌溉方式下中龄灰枣树不同生育期光合特性[J]. 灌溉排水学报，2020，39(增刊 2)：33-39.
Wang Heping，Zhang Zhigang，Li Hong，Sun Mingsen. Photosynthetic characteristics of middle-aged grey *Ziziphus jujuba* ‘Huizao’ trees in different growth periods under two irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2020，39(S2)：33-39.

[14] 叶子飘，于强 . 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报，2008，32(6)：1356-1361.
Ye Zipiao，Yu Qiang. Comparison of new and several classical models of photosynthesis in response to irradiance[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version)，2008，32(6)：1356-1361.

[15] 李鹏民，高辉远，Jstrasser R T. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报，2005，31(6)：559-566.
Li Pengmin，Gao Huiyuan，Jstrasser R T. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology，2005，31(6)：559-566.

[16] Stirbet A，Govindjee. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem Ⅱ：Basics and applications of the OJIP fluorescence transient[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B：Biology，2011，104(1/2)：236-257.

[17] 张彩珍 . 2，6-二氯靛酚滴定法测定鲜榨桃汁中维生素 C 含量[J]. 食品安全导刊，2021(24)：53.
Zhang Caizhen. Determination of vitamin C concentration in freshly squeezed peach juice by 2,6-dichloroindophenol titration[J]. China Food Safety Magazine，2021(24)：53.

[18] 李合生 . 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2000.
Li Hesheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing：Higher Education Press，2000.

[19] 兰振虎 . 新疆干旱区节水灌溉相关技术改进探索[J]. 水利天地，2014(5)：41-42.
Lan Zhenhu. Exploration on the improvement of water-saving irrigation technology in arid area of Xinjiang[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering，2014(5)：41-42.

[20] 刘鹏飞，李文胜，谢发旺，赵莎莎，蔺亚茹，张振军 . 灌溉模式对苹果树光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J/OL]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025：10-18(2025-09-28)[2025-12-21]. https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20250928.0949.003.
Liu Pengfei，Li Wensheng，Xie Fawang，Zhao Shasha，Lin Yaru，Zhang Zhenjun. Effects of irrigation mode on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of apple trees[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)，2025：10-18(2025-09-28)[2025-12-21]. https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20250928.0949.003.

[21] 任玉忠，王水献，谢蕾，董新光 . 干旱区不同灌溉方式对枣树水分利用效率和果实品质的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(22)：95-102.
Ren Yuzhong，Wang Shuixian，Xie Lei，Dong Xinguang. Effects of irrigation methods on water use efficiency and fruit quality of jujube in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2012，28(22)：95-102.

[22] 王真真 . 三种灌溉方式下中龄灰枣树光合特性研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2015.
Wang Zhenzhen. The reaserch on photosynthetic characteristics of halfmature *Ziziphus jujuba* ‘Huizao’ under three irrigations[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2015.

[23] 王玉玉，李爽，杨玉婷，叶林 . 西北地区控水灌溉对番茄品质影响的研究进展[J]. 江西农业学报，2025，37(11)：13-21.
Wang Yuyu，Li Shuang，Yang Yuting，Ye Lin. Research progress in effect of water-controlled irrigation on tomato quality in northwest China[J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2025，37(11)：13-21.

[24] 王佳悦，李光宗，李娟，单守明，李翔 . 水分胁迫对北红葡萄果实品质及有机酸合成基因表达的影响[J]. 果树学报，2025，42(2)：266-275.
Wang Jiayue，Li Guangzong，Li Juan，Shan Shouming，Li Xiang. Effects of water stress on berry quality and organic acid synthesis gene expression in Beihong grape[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(2)：266-275.