

水钾耦合对南疆滴灌枣树叶片生理特征及产量的影响

孙世豪^{1,2}, 艾鹏睿^{1,2*}, 马英杰^{1,2}, 付秋萍^{1,2}, 许源^{1,2}

(1.新疆农业大学, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】探究南疆滴灌枣树最优灌溉施肥制度, 提高南疆特色林果种植业生产效益。【方法】以阿克苏地区典型果树—8 a 生灰枣为研究对象, 于 2022—2023 年开展灌水量与施钾量的二因素三水平全面试验(灌溉水平为 T1: ET_c , T2: 75% ET_c , T3: 50% ET_c ; 钾肥水平为 A: 240 kg/hm², B: 180 kg/hm², C: 120 kg/hm²), 探究灌水量与施钾量对枣树光合特征及产量影响。【结果】灌水量和施钾量对枣树生长发育影响显著, 枣树净光合速率和蒸腾速率、叶绿素量会随灌水量和施钾量增加而逐渐提高。增施钾肥对枣树叶片可溶性糖量影响显著, 2023 年 T1-A、T2-A、T3-A 处理可溶性糖量较 2022 年增加了 37.0%、36.9%、28.7%; 而枣树叶片脱落酸(ABA)量受灌水量影响显著, 其中 T3-C 处理 ABA 量最高。各处理枣树的瞬时水分利用效率(*iWUE*)随生育期推进多呈逐渐上升趋势, 枣树产量也随施钾量增加而上升; 施钾量为 240 kg/hm² 时, 2022 年, T1、T2 处理枣树产量较 T3 处理增加了 56.77%、45.52%; 2023 年, T1、T2 处理枣树产量较 T3 处理增加了 51.46%、37.61%; 其中 2022、2023 年 T2-A 处理水分利用效率(*WUE*)分别为 8.88、9.14 kg/(hm²·mm)。【结论】本试验条件下, T2-A 处理是适宜南疆地区枣树生产效益的灌溉施肥制度。

关键词: 水钾耦合; 叶绿素 a; 叶绿素 b; 光合特性; 产量

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024241

孙世豪, 艾鹏睿, 马英杰, 等. 水钾耦合对南疆滴灌枣树叶片生理特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 25-33.
SUN Shihao, AI Pengrui, MA Yingjie, et al. The combined effect of water and potassium on physiological traits of jujube leaves and fruit yield under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 25-33.

0 引言

【研究意义】新疆是我国枣树主栽区, 全国约 50% 的枣产自新疆, 新疆 70% 的枣产自南疆。南疆红枣总产值约占当地农业总产值的 28%^[1]。但不合理的灌水施肥导致水肥利用率降低, 严重制约了南疆枣树产量与品质的提升。氮肥是植物生成有机物的基础, 磷肥是植物生理代谢的催化剂, 钾肥是植物体内多种酶的活化剂。钾是植物生长发育所必需的矿质营养元素, 参与光合作用、物质转运和蛋白质合成等过程; 进而改善植物产量和枣树光合效率, 钾肥对植物生长代谢和调节光合作用有重要影响^[2-3]。探究钾肥与灌溉对南疆地区林果业的发展有重要意义。

【研究进展】水分不足会影响营养物质的运移和转化, 从而降低作物产量和品质, 而肥力不足则会影响水分的吸收。因此水分和养分的高效结合是发展旱地农业、节水农业的核心和关键。李宁等^[4]、

Li 等^[5]确定了黄瓜适宜的水钾耦合灌溉制度, 并对作物水钾利用效率、产量等进行了评价。李阳等^[6]研究指出, 在水分亏缺环境中, 沙枣树的光合作用能力会减弱, 同时其地上和地下部分的干物质积累也会减少, 这都限制了沙枣树的正常成长。孙三民等^[7]研究表明, 枣果实大小及品质与灌水量成正效应关系。魏瑞锋等^[8]研究发现, 果实膨大期中度、重度干旱胁迫处理梨枣单株总耗水量较成熟期分别降低 33.3% 和 58.1%, 且果实膨大期单株总耗水量高于果实成熟期。马军勇等^[9]研究指出, 随着灌水量减少使得净光合速率、蒸腾速率、气孔导度呈降低趋势。适宜水分调亏下, 枣树的净光合速率和瞬时水分利用效率会提升, 但过多或过少的水分调亏都可能导致其净光合速率和瞬时水分利用效率下降^[10-12]。合理的灌溉施肥制度有利于提升作物光合能力和叶绿素量^[13-15], 减少水分胁迫对作物生长发育的影响, 促进果树养分积累, 增加作物有效积温和冠层体积^[16]。调亏灌溉并不总是降低产量, 早期适度的调亏灌溉在某些作物上会有利于增产^[17]。与常规施肥处理相比, 在花期之后追施钾肥枣树叶片净光合速率、叶绿素量和水肥利用效率有明显提升^[18]。【切入点】目前, 枣树管理多以集中施入氮肥作为基肥, 不能完全满足枣树的需肥要求, 导致枣树产量低、枣果品质差。而钾肥对枣树光合作用、产量等研究尚不

收稿日期: 2024-06-15 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(ZYD2023A10); 国家自然科学基金项目(52069027); 自治区青年基金项目(2023D01B28)

作者简介: 孙世豪(1999—), 男, 安徽宿州人。硕士研究生, 主要从事灌溉节水理论研究。E-mail: s1319889410@163.com

通信作者: 艾鹏睿(1992—), 男, 吉林辽源人。讲师, 主要从事高效节水灌溉理论与应用研究。E-mail: a5124659@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

清晰。【拟解决的关键问题】为此，设置灌水量和施钾量 2 个试验因素开展田间定位试验，研究灌水量和施钾量对枣树光合特征、叶绿素、产量与品质等影响，确定适宜南疆地区的最佳灌溉施肥制度，为制定南疆地区枣树灌水施肥制度提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于新疆阿克苏地区温宿县红旗坡农场

新疆农业大学林果试验基地 (N 41°16', E 80°20', 海拔 1 133 m)，位于塔里木盆地北缘，属典型的大陆性温带干旱沙漠气候。昼夜温差大，平均气温约 11 °C，年平均降水量为 47.6~74.4 mm，太阳总辐射量为 544.115~590.156 kJ/cm²，多年平均日照时间为 2 855~2 967 h，无霜期达 205~219 d，年平均有效积温为 3 950 °C。且此试验站管理较好，果树的生长发育良好，分布密度合理，土壤质地适中，主体为砂壤土。试验区初始土壤性质见表 1。

表 1 试验区土壤性质

Tab.1 Experimental area soil properties

土层深度/cm	有机质量/(g kg ⁻¹)	速效氮量/(mg kg ⁻¹)	有效磷量/(mg kg ⁻¹)	有效钾量/(mg kg ⁻¹)	总盐量/(mg g ⁻¹)	pH 值	土壤性质
0~10	5.76	43.28	130.55	295.04	1 223	7.4	粉砂壤土
10~20	4.42	24.57	20.52	215.21	175.4	7.91	粉砂壤土
20~30	2.58	24.81	26.22	197.25	124.8	8.01	粉砂壤土
30~40	2.00	18.39	12.31	193.45	117.6	7.91	粉砂壤土
40~50	1.52	17.33	11.40	190.29	92.8	7.96	砂壤土
50~60	0.51	16.11	17.56	154.81	90.2	7.89	砂壤土

1.2 试验设计

作物为多年生灰枣树 (8 a)，行株距为 4 m×1 m。采用滴灌灌溉，滴灌带沿枣树行向距树 40 cm 铺设。滴头间距为 30 cm，滴头流量为 2.3 L/h。每 10 天灌溉 1 次，包括春灌 (70 mm) 和果实成熟期灌溉 (30 mm)。试验设计见表 2，用 Penman-Montieth 公

式计算前 1 个灌溉周期的累积蒸发蒸腾量确定灌水定额 (ET_c)。其中，作物系数 K_c 参考洪明等^[19]研究成果。各处理春季施复混肥 ($\omega(N) : \omega(P_2O_5) : \omega(K_2O) = 17 : 17 : 17$ ，总养分 $\geq 51\%$) 200 kg/hm²，花期、幼果期、果实膨大期均追施钾肥 ($\omega(K_2O) \geq 52\%$)，钾肥均选用在枣树滴灌带下方人工定点施肥。

表 2 枣树灌水及施肥方案

Tab.2 Jujube tree irrigation and fertilization experiment plan

因素	处理	春灌量/mm	萌芽期/mm	花期/mm	幼果期/mm	果实膨大期/mm	成熟期/mm
灌溉	T1	70	240	240	240	240	30
	T2	70	240	180	180	180	30
	T3	70	240	120	120	120	30
因素	处理	春季施肥量/(kg·hm ⁻²)	萌芽期/(kg·hm ⁻²)	花期/(kg·hm ⁻²)	幼果期/(kg·hm ⁻²)	果实膨大期/(kg·hm ⁻²)	成熟期/(kg·hm ⁻²)
施肥	A	200	-	240	240	240	-
	B	200	-	180	180	180	-
	C	200	-	120	120	120	-
	CK	200	-	-	-	-	-

1.3 测定项目与方法

1.3.1 枣树叶片 SPAD 值

采用日本 SPAD-502 叶绿素仪测定枣树萌芽期、花期、幼果期、果实膨大期、成熟期叶片 SPAD 值。每个处理随机选 3 棵枣树后，随机选取上、中、下 3 层共 9 片树叶，标记选中叶片，每 10 天测定 1 次枣树叶片 SPAD 值。

1.3.2 枣树叶片光合特征

在枣树萌芽期、花期、幼果期、果实膨大期、成熟期，利用美国 PPS 公司生产的 CIRAS-3 光合仪测定叶片光合指标，通过 CIRAS-3 自带的 LED 光源控制光合有效辐射 (PAR , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)， PAR 分别为 0、200、400、600、800、1 000、1 200、1 600、1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，测定系统稳定 120 s 后，分别记录已标记枣树叶片的的光合参数 (其中 P_n 为净光合速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); T_r 为蒸腾速率 ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);

$iWUE$ 为瞬时水分利用效率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)^[20-21]，由各处理的净光合速率/蒸腾速率计算得到)，每个叶片重复测定 3 次。选取 3 棵枣树，选取高度一致、大小相同并且向阳方向的 3 个叶片，共计 9 片树叶并取平均值。

1.3.3 枣树叶片叶绿素、可溶性糖 (SS)、脱落酸 (ABA) 量

采取当日新鲜枣树叶片，使用光吸收全波长酶标仪 (Read_{max} 1 900) 测定叶片叶绿素量、可溶性糖量、脱落酸量。叶片叶绿素测定方法：首先将待测样品在 450 nm 波长下测定吸光度 (OD 值)，然后再采用乙醇浸提法提取标本中植物叶绿素，最后通过标准曲线计算样品中植物叶绿素量。可溶性糖 (SS) 量选用蒽酮比色法，利用 ELISA 酶联免疫检测试剂盒进行测定。脱落酸采取双抗体夹心法测定，首先利用酶标仪在 450 nm 波长下测定吸光度 (OD 值)，通过标准曲线计算样品中植物脱落酸 (ABA) 量。

1.3.4 枣树产量、果实特征及水分利用效率

成熟期，每个小区随机选取 3 株果树测定单产，折算成产量，以代表该小区总产量；随机选取鲜果 20 个，分别测定果实纵横径、单果鲜质量；采用近似椭圆公式再乘作物体积参数求果实体积，由果实纵径/横径计算果实指数；由总产量/处理总灌水量计算水分利用效率 (WUE , $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$)。

1.3.5 气象数据

使用 Watchdog 小型自动气象站观测气温、辐射、降水量等气象数据，30 min 自动记录 1 次。

2 结果与分析

2.1 水钾耦合对枣树叶片 SPAD 值影响

由表 3 可知，萌芽期和花期枣树发育较快，叶片 SPAD 值迅速上升。花期和幼果期，枣树开始输送部分养分给生殖器官保持其坐果养分需求，枣树叶片生长保持稳定，此时 SPAD 值稳定增长。幼果期和果实膨大期，由于果实发育吸取大量养分，枣树叶片 SPAD 值增长速率减小。成熟期，叶片开始衰落，SPAD 值下降。相同施钾量下，随着灌水量增加，SPAD 值表现为 T1 处理>T2 处理>T3 处理。相同灌水量下，随着施钾量的增加，SPAD 值表现为 A 处理>B 处理>C 处理。2022 年，枣树幼果期 T2-A、T2-B、T2-C 处理 SPAD 值较花期分别增加了 11.83%、13.67%、10.65%；2023 年，枣树幼果期 T2-A、T2-B、T2-C 处理 SPAD 值较花期分别增加了 6.50%、8.47%、5.16%。2022 年枣树幼果期，T1-A 处理 SPAD 值较 T2-B、T3-C 处理分别增加了 4.85%、32.72%；2023 年枣树幼果期，T1-A 处理 SPAD 值较 T2-B、T3-C 处理分别增加了 7.93%、29.16%。T2 处理会促进叶片 SPAD 值增加，而 T3 处理会导致叶片 SPAD 值快速下降，此时施肥对作物生长无明显作用，这可能是由于水分严重不足，从而导致细胞内部遭到不可恢复的破坏。

2.2 水钾耦合对枣树叶片光合特征影响

由表 4 可知，2022 年枣树叶片光合特征与 2023 年变化规律一致。 P_n 、 T_r 、 $iWUE$ 均值随枣树生育期推进呈增大趋势。2022 年枣树果实膨大期，相同施钾量下 T1-B、T2-B、T3-B 处理净光合速率较幼果期增加了 9.52%、7.80%、3.12%，T1-B 处理净光合速率较 T2-B 处理增加了 3.65%；T2-B 处理净光合速率较 T3-B 处理增加了 28.07%，而其余处理净光合速率小于 T2 处理；T2-A、T2-B 处理净光合速率较 T2-C 处理增加了 38.77%、31.38%；T1-A、T1-B 处理净光合速率较 T1-C 处理增加了 31.47%、22.62%；2023 年枣树果实膨大期，T2-A、T2-B 处理净光合速率较 T2-C 处理增加了 28.45%、22.58%；T1-A、T1-B 处

理净光合速率较 T1-C 处理增加了 22.20%、19.01%；T1-A 处理净光合速率较 T1-B 处理增加了 2.60%，T1-B 处理净光合速率较 T1-C 处理增加了 19.03%。因此，当灌水量相同时，提高施钾量可以提升枣树光合作用。而施钾量相同时，T2 处理净光合速率高于 T1、T3 处理，同时 $iWUE$ 也较高，说明 T2 处理施钾量对枣树叶片光合特征影响大于灌水量。施钾量相同时，T1 处理对枣树光合作用提升效果更佳，说明当钾肥不足时，灌水量对枣树叶片光合特征影响大于施钾量。

2.3 水钾耦合对枣树叶绿素量影响

由表 5 可知，水钾耦合可显著提高枣树叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量。随着枣树生育期推进，施钾量相同时，减少灌水量会抑制叶绿素产生。灌水量相同时，随着施钾量的增加，枣树叶片叶绿素总量呈上升趋势。2022 年枣树果实膨大期，T2-A、T2-B、T2-C 处理叶片叶绿素总量较花期增加了 29.03%、20.25%、16.67%；T2-A、T2-B、T2-C 处理叶片叶绿素 a 量较幼果期增加 46.15%、39.04%、5%；2023 年，幼果期 T3-A、T3-B、T3-C 处理枣树叶片叶绿素总量较花期增加 19.76%、15.03%、11.76%；且枣树全生育期内，施钾量为 $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时，T1 处理枣树叶片叶绿素总量的增长速率仅略高于 T2 处理，说明 T1 处理枣树钾肥利用率较低，可能使枣树内部细胞受到破坏，从而影响枣树后期果实品质发育。T2 处理枣树钾肥利用效率较高，进而促进枣树叶片叶绿素总量增加。2022 年枣树叶绿素量变化规律与 2023 年保持一致。

表 3 2022—2023 年各处理枣树 SPAD 值

Tab.3 SPAD values of jujube trees for each treatment in 2022—2023

年份	处理	萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期	成熟期
2022	T1-A	31.04a	43.92a	49.68a	51.77a	48.97a
	T2-A	31.07a	42.61ab	48.33a	47.62c	45.77b
	T3-A	31.55a	43.62a	45.12c	43.77d	44.12c
	T1-B	31.29a	42.77ab	48.92a	50.77ab	48.32a
	T2-B	30.77a	41.68b	47.38b	50.01b	45.29b
	T3-B	29.53ab	42.63ab	45.24c	45.17d	40.09d
	T1-C	29.96ab	38.15c	42.97d	44.09d	42.09d
	T2-C	29.77ab	39.05c	43.21d	43.09d	41.77d
	T3-C	28.68b	37.29d	37.43c	42.78e	37.29e
2023	T1-A	31.02a	45.73a	49.91a	53.31a	48.50a
	T2-A	31.00a	45.61a	48.60a	51.33b	48.14b
	T3-A	31.01a	45.11a	47.85ab	50.35a	44.21c
	T1-B	30.08a	44.72ab	48.21ab	51.58a	48.33b
	T2-B	30.09a	42.63b	46.24a	48.62b	44.42c
	T3-B	30.01a	42.22b	44.83b	47.61c	41.35de
	T1-C	29.12ab	39.93b	42.55b	45.90cd	43.55ab
	T2-C	28.90ab	38.65b	41.03b	43.15c	40.75b
	T3-C	28.09b	36.63c	38.64c	40.34d	38.20d

注 同列数值后不同字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

表 4 2022—2023 年不同生育时期枣树叶片光合特性

Tab.4 Photosynthetic characteristics of jujube tree leaves at different growth stages in 2022—2023

年份	处理	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				$iWUE/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			
		萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期	萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期	萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期
2022	T1-A	11.28a	18.54a	24.81a	28.24a	7.14a	9.84a	11.24a	11.24c	1.58a	1.88a	2.21a	2.51a
	T2-A	12.34a	17.84b	25.94b	26.84b	7.45a	8.64a	10.08b	9.84c	1.66a	2.06a	2.57b	2.73b
	T3-A	12.84a	16.28b	20.21c	19.84c	7.05a	8.21b	9.04c	8.04bc	1.82a	1.98b	2.24c	2.47c
	T1-B	12.68a	18.95a	24.05a	26.34a	6.98a	9.84a	11.54a	10.84a	1.82a	1.93a	2.08a	2.43a
	T2-B	13.05a	19.58a	23.57b	25.41b	7.04a	8.42a	10.27b	10.05b	1.85a	2.33b	2.30b	2.53a
	T3-B	12.42a	17.64b	19.24c	19.84c	6.81a	7.15b	8.24c	8.03c	1.82a	2.47c	2.33c	2.47b
	T1-C	11.57a	18.24a	21.57a	21.48a	7.15a	9.42a	10.18a	10.48a	1.62a	1.94a	2.12a	2.05a
	T2-C	11.05a	17.59a	18.77b	19.34b	6.84a	8.08b	8.77b	8.24b	1.62a	2.18b	2.14b	2.35b
	T3-C	11.01a	15.88b	14.59c	16.27c	6.35a	6.37b	6.48c	7.01c	1.73a	2.49b	2.25c	2.32c
2023	T1-A	13.23a	19.96a	24.75a	27.63a	7.40a	10.62a	11.57a	11.82a	1.79a	1.88a	2.14a	2.34a
	T2-A	12.91a	17.85a	25.46b	25.82b	7.31a	9.81a	10.22b	9.51b	1.77a	1.82a	2.49b	2.72b
	T3-A	12.55a	16.62b	19.62c	18.61c	7.13a	7.90b	8.60c	7.63c	1.76a	2.10b	2.28c	2.44b
	T1-B	12.97a	19.67a	23.53a	26.91a	6.97a	10.13a	11.33a	11.52a	1.86a	1.94a	2.08a	2.34c
	T2-B	12.72a	20.16a	22.51b	24.64b	7.06a	8.72a	10.53b	9.53b	1.80a	2.31a	2.14b	2.59c
	T3-B	12.41a	17.30b	18.20c	19.22c	6.71a	7.33b	7.84c	7.80c	1.85a	2.36b	2.32c	2.46bc
	T1-C	12.86a	17.90a	22.02a	22.61a	7.03a	9.68a	10.33a	10.71a	1.83a	1.85a	2.13a	2.11b
	T2-C	12.58a	17.58b	19.30b	20.10b	6.62a	8.53a	8.91b	7.92b	1.90a	2.06a	2.17b	2.54ab
	T3-C	12.45a	14.56c	15.24c	16.78c	6.10a	6.33b	6.89c	7.03c	2.04a	2.30a	2.21c	2.39a

表 5 2022—2023 年枣树叶片叶绿素量

Tab.5 Chlorophyll content in jujube leaves in 2022—2023

年份	处理	叶绿素总量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)				叶绿素 a 量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)				叶绿素 b 量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			
		萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期	萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期	萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期
2022	T1-A	1.23a	1.93b	2.38b	3.35c	0.69a	1.46b	1.93a	2.77a	0.54a	0.47b	0.45a	0.58b
	T2-A	1.21a	1.86c	2.40c	3.21d	0.67a	1.44b	1.82b	2.66c	0.54a	0.42c	0.58b	0.55c
	T3-A	1.21a	1.83d	2.12d	3.09f	0.68a	1.43c	1.61cd	2.63d	0.53a	0.4d	0.51d	0.46d
	T1-B	1.23a	1.66b	2.06b	2.71b	0.72a	1.32b	1.51ab	2.23b	0.51a	0.34a	0.55a	0.48b
	T2-B	1.23a	1.63c	1.96c	2.44c	0.70a	1.27c	1.46c	2.03c	0.53a	0.36a	0.5b	0.41bc
	T3-B	1.24a	1.57d	1.82d	2.22e	0.70a	1.26d	1.38d	1.89de	0.54a	0.31b	0.44c	0.33d
	T1-C	1.20a	1.42a	1.73b	1.93a	0.69a	1.09a	1.15de	1.71ed	0.51a	0.33a	0.58c	0.22a
	T2-C	1.20a	1.38b	1.61c	1.68ab	0.67a	1.03b	1.08e	1.13d	0.53a	0.35a	0.53a	0.55b
	T3-C	1.21a	1.26d	1.48d	1.55e	0.69a	0.96c	0.96f	1.02e	0.52a	0.3a	0.52d	0.53d
2023	T1-A	1.27a	1.83a	2.47a	3.47c	0.70a	1.38b	1.96a	2.84a	0.57a	0.45b	0.51a	0.63bc
	T2-A	1.23a	1.77b	2.33b	3.32d	0.68a	1.32b	1.78a	2.76b	0.55a	0.45b	0.55c	0.56d
	T3-A	1.21a	1.72c	2.06d	3.28e	0.70a	1.33c	1.57ab	2.69c	0.51a	0.39c	0.49c	0.59f
	T1-B	1.24a	1.61a	1.92c	2.86b	0.70a	1.21a	1.43a	2.36a	0.54a	0.40a	0.49b	0.50a
	T2-B	1.24a	1.56b	1.83d	2.63cd	0.71a	1.21b	1.36a	2.14b	0.53a	0.35b	0.47b	0.49b
	T3-B	1.23a	1.53c	1.76f	2.39e	0.69a	1.15c	1.28b	1.96c	0.54a	0.38b	0.48b	0.43d
	T1-C	1.19a	1.42a	1.66a	1.91a	0.70a	1.08a	1.19b	1.61c	0.49a	0.34a	0.47a	0.30b
	T2-C	1.21a	1.39a	1.61b	1.65b	0.69a	0.97b	1.16b	1.31c	0.52a	0.42b	0.45a	0.34c
	T3-C	1.19a	1.36b	1.52d	1.52d	0.69a	0.93c	1.03c	1.15d	0.50a	0.43bc	0.49a	0.37c

由表 6 可知, 2022 年, 各因素对叶绿素 a、叶绿素 b 量及叶绿素总量影响表现为灌水量>水钾交互作用>施钾量。2023 年, 施钾量、灌水量及水钾交互作用对叶绿素 b 量影响不显著, 各因素对叶绿素 a 量影响表现为水钾交互作用>施钾量>灌水量, 各因素对叶绿素量总影响表现为水钾交互作用>施钾量>灌水量。

表 6 2022—2023 年枣树叶片叶绿素量双因素方差分析

Tab.6 Two-factor analysis of chlorophyll content in jujube tree leaves in 2022—2023

因素	2022 年			2023 年		
	叶绿素总量	叶绿素 a 量	叶绿素 b 量	叶绿素总量	叶绿素 a 量	叶绿素 b 量
施钾量	3.12	1.21	0.84	1.36	1.89	0.23
灌水量	5.78**	2.35	9.62**	1.12	1.62	1.28
施钾量×灌水量	4.21**	0.53	6.63**	12.68**	8.62**	0.35

注 *表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

2.4 水钾耦合对枣树叶片可溶性糖量影响

由表 7 可知，萌芽期枣树叶片可溶性糖量最低，之后随着生育期推进持续增长，于幼果期达到峰值，幼果一成熟期呈下降趋势。灌水量相同时，随着施钾量增加，枣树叶片可溶性糖量上升。而当施钾量相同时，随着灌水量减少，枣树叶片可溶性糖量下降。2022—2023 年，花期—幼果期枣树叶片糖分积累速率高。2023 年，施钾量为 240 kg/hm² 时，幼果期 T1-A、T2-A、T3-A 处理枣树叶片可溶性糖量较花期增加了 51.74%、52.34%、57.10%；施钾量为 180 kg/hm² 时，幼果期 T1-B、T2-B、T3-B 处理枣树叶片可溶性糖量较花期增加了 55.71%、56.04%、60.90%。随着枣树生育期推进，T3 处理枣树叶片可溶性糖量增加量最大，但此时叶片本身可溶性糖量较低，后续难以满足果实糖分积累。T2 处理叶片可溶性糖量与 T1 处理差异不显著，花期—幼果期，T2-A 处理叶片可溶性糖量增加速率高于 T1-A 处理，说明 T2 处理枣树钾肥利用率更高。故灌水量为 T2 处理时，施钾量为 240 kg/hm² 更适应南疆枣树生长。

表 7 2022—2023 年枣树叶片可溶性糖量

年份	处理	萌芽期	花期	幼果期	果实膨大期	成熟期
2022	T1-A	9.84a	15.62a	22.73a	14.78a	10.45a
	T2-A	9.76a	15.46b	22.53a	14.53c	10.33b
	T3-A	9.88a	13.85c	20.32c	13.23d	9.75c
	T1-B	9.92a	15.21a	22.12a	14.03ab	10.23a
	T2-B	9.85a	14.95b	21.69b	13.73b	9.95b
	T3-B	9.85a	13.11c	20.06c	12.85d	9.32d
	T1-C	9.80a	13.31a	21.59d	12.74d	9.52d
	T2-C	9.83a	13.05b	21.15d	11.56d	8.22d
	T3-C	9.83a	11.87c	19.47c	11.15e	8.03e
2023	T1-A	10.33a	16.37a	24.84a	16.88a	11.86a
	T2-A	10.36a	16.23b	24.73a	16.63c	11.32b
	T3-A	10.28a	14.08c	22.12c	15.23d	10.20c
	T1-B	10.29a	15.49a	24.12a	16.23ab	11.16a
	T2-B	10.31a	15.31b	23.89b	16.01b	10.80b
	T3-B	10.33a	13.71c	22.06c	15.04d	10.40d
	T1-C	10.25a	13.95a	23.59d	15.85d	9.66d
	T2-C	10.37a	13.75b	23.15d	14.76d	8.75d
	T3-C	10.27a	12.67c	21.56c	14.45e	8.86e

2.5 水钾耦合对枣树叶片脱落酸 (ABA) 量的影响

由图 1 可知，水钾耦合显著影响枣树叶片脱落酸量。2022—2023 年，枣树脱落酸量随灌水量减少而逐渐增多，T3-C 处理枣树脱落酸量最高。灌水量为 T2 处理时，增施钾肥会导致植株脱落酸量降低。灌水量为 T1 处理时，施钾量对枣树脱落酸量无显著影响。说明灌水量减少时，增施钾肥对叶片脱落酸

量有抑制作用。2022 年，施钾量为 240 kg/hm² 时，T1-A 处理枣树叶片脱落酸量较 T3-A 处理下降 56.26%；T1-A 处理枣树叶片脱落酸量较 T2-A 处理下降 32.40%；施钾量为 180 kg/hm² 时，T1-B 处理枣树叶片脱落酸量较 T3-B 处理下降 52.56%，T1-B 处理枣树叶片脱落酸量较 T2-B 处理下降 37.48%，而 T2-A 处理枣树叶片脱落酸量较 T3-B 处理下降 44.34%。

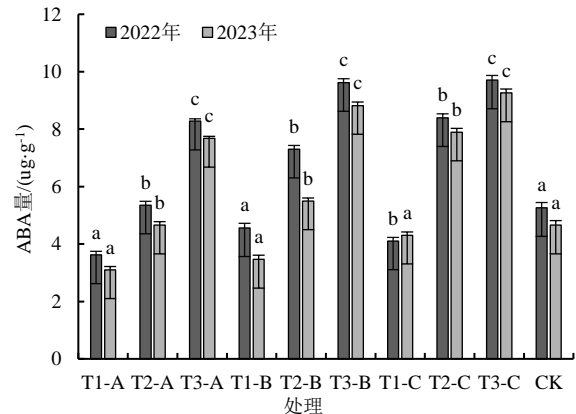


图 1 2022—2023 年果实膨大期枣树 ABA 量

Fig.1 ABA content during fruit enlargement

period in 2022—2023

2.6 水钾耦合对枣树产量、果实特征及水分利用效率影响

由表 8 可知，水钾耦合对枣树果实体积、单果鲜质量及产量均有较大影响；灌水量相同时，随着施钾量减少，果实产量及品质呈下降趋势。2022 年，T1-A 处理枣树产量较 T2-A 处理增加 7.7%，T3-A 处理枣树产量较 T1-A 处理减少 56.77%；T2-A 处理单果鲜质量较 T1-A 处理减少 1%，T3-A 处理单果鲜质量较 T1-A 处理减少 13.4%。2023 年，T1-A 处理枣树产量较 T2-A 处理增加 10.06%，T3-A 处理枣树产量较 T1-A 处理减少 51.46%。T2-A 处理单果鲜质量较 T1-A 处理减少 3%，T3-A 处理单果鲜质量较 T1-A 处理减少 16%。这表明 T2 灌水量处理对果实生长发育和产量无显著作用，而 T3 灌水量处理会显著影响枣树果实体积、单果鲜质量及产量等，其主要原因是灌水量减少会抑制枣树果肉细胞发育和分裂，使得枣树果实体积、产量下降，进而影响枣树经济效益。2022 年施钾量相同时，T3-A 处理枣树产量较 T2-A 处理下降 45.52%，T3-A 处理单果鲜质量较 T2-A 处理下降 12.35%。2023 年施钾量相同时，T3-A 处理枣树产量较 T2-A 处理下降 37.61%。说明 T3 处理灌水量不但会抑制枣树果肉细胞发育和分裂，还会导致果实产量降低。

表 8 2022—2023 年枣树品质、产量和水分利用效率

Tab.8 Jujube quality, yield and water use efficiency in 2022—2023

年份	灌水	施肥	果实横径/mm	果实纵径/mm	果实体积/cm ³	果形指数/(mm·mm ⁻¹)	单果鲜质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	WUE/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2022	T1	A	18.97	26.76	8.06	1.41	28.92	7 356	8.17
		B	18.77	26.21	7.73	1.4	28.32	7 079	7.87
		C	17.64	25.34	6.6	1.44	27.49	6 520	7.24
	T2	A	18.86	25.13	7.48	1.33	28.64	6 828	8.88
		B	18.53	24.38	7.01	1.32	27.8	6 620	8.56
		C	17.32	22.77	5.72	1.31	26.73	6 156	8.21
	T3	A	16.45	24.07	5.45	1.46	25.49	4 692	7.82
		B	15.78	21.79	4.54	1.38	22.79	4 459	7.43
		C	15.66	20.38	4.18	1.3	22.33	4 330	7.22
2023	T1	A	20.03	27.88	9.38	1.39	29.85	7 543	8.38
		B	19.93	27.34	9.06	1.37	29.43	7 321	8.13
		C	18.89	25.89	7.19	1.37	28.79	7 106	7.9
	T2	A	20.14	24.33	8.32	1.21	29.03	6 853	9.14
		B	19.88	24.78	8.15	1.25	28.5	6 465	8.62
		C	18.96	23.27	6.64	1.23	27.5	6 120	8.16
	T3	A	17.82	24.27	5.75	1.36	25.89	4 980	8.3
		B	17.79	22.1	5.21	1.24	24.59	4 630	7.72
		C	17.77	21.92	5.15	1.23	24.45	4 570	7.62

2.7 枣树光合特征、叶绿素量、叶片可溶性糖量与产量的相关性分析

水钾耦合显著影响枣树产量、光合作用和叶绿素量。叶片生理指标能够直接反映植物生长状况，是影响作物产量与水肥利用效率的关键。由图 2 可知，产量与 *SPAD* 值、叶绿素 a、叶绿素 b、 P_n 、*SS* 显著正相关，表明叶片合成酶的提高有利于作物生

长，对枣树产量、水肥利用效率有正向促进作用。而脱落酸 (ABA) 与 P_n 、叶绿素 a、叶绿素 b、*SPAD* 值和产量均负相关，表明脱落酸 (ABA) 的积累对枣树生长有抑制作用，不利于果实产量提升。说明在叶片长势良好情况下，进行合理灌溉用水更有益于南疆地区枣树生长。

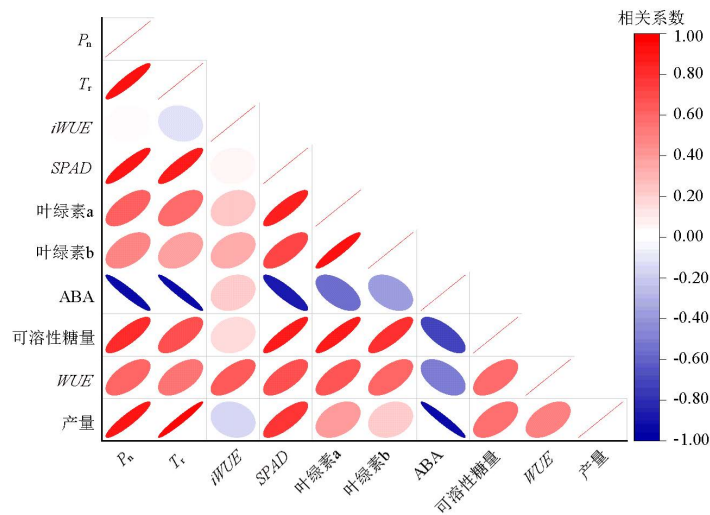


图 2 枣树叶片光合生理指标与产量相关性热图

Fig.2 Heatmap of correlations between photosynthetic physiological indicators and yield in jujube leaves

3 讨论

植株生长发育与光合指数 P_n 、 T_r 、 G_s 等密切相关，作物受到干旱胁迫时会通过激素延缓营养器官的生长速率，加速生殖器官发育^[22-23]。而钾肥可以通过调节植物细胞渗透压，增加根系被动吸水能力，减少水分不足对作物生长影响^[24-26]。因此处于非生物逆境条件时，增施钾肥对确保果树正常生长发育

有重要意义^[27-29]。孙梦晴等^[30]研究指出，马铃薯的干旱适应性与钾素营养特性显著正相关。钾素可通过提高水分利用效率进而增强其对干旱的适应能力。唐凡等^[31]研究指出，叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、瞬时水分利用效率 (*iWUE*) 和羧化速率 (*CE*) 均随施钾量增加而增大，施钾肥有助于猕猴桃树吸收水分和养分，弥补因水分不足对树体生长发育的不利影响。本研究指出，

水钾耦合影响枣树净光合速率、蒸腾速率及瞬时水分利用效率。果实膨大期一完熟期, P_n 、 T_r 和叶绿素量随灌水量增加呈先增加后减少趋势, 光合性能指标随施钾量的增加呈持续增加的趋势, 总体表现为 A 处理>B 处理>C 处理, 这与前人^[32-33]研究一致。

当水分不足时, 作物会降低光合作用以减少水分耗散, 同时叶绿素量、叶片干物质量等生理指标迅速降低^[34-35]。若持续水分亏缺, 作物光合产物不足将严重影响其生长发育, 最终导致作物产量和品质降低。钾是参与叶绿素合成和相关酶调控的主要物质之一, 可以增强作物进行光合作用从而提升光合产物分配到生殖器官的比例和同化效益^[36-37]。同时钾肥能够有效减轻土壤渗透胁迫对植物根系吸收水分和养分离子的不利影响, 进而提高作物水分、养分吸收效率。本研究表明, 施钾量较少时, 水分胁迫会促使枣树关闭气孔, 降低净光合速率; 而增施钾肥后, 枣树光合特性和生长指标明显提升。即增施钾肥对逆境植物叶片维持气孔开度以保证其必要的水分蒸腾循环有重要调控作用。此外, 水肥配比失衡会严重抑制作物光合速率, 导致植物根部产生大量的脱落酸 (ABA)。即过度施肥可能会对作物发育产生负面影响^[38]。但本研究发现仅 T3-A 处理枣树净光合速率异常下降, 这说明多年生作物对肥料的耐受性明显高于 1 a 生作物。

4 结 论

1) 随着生育期推进, 枣树 *SPAD* 值呈先增大后降低趋势, 在果实膨大期出现峰值。T2-A 处理枣树 *iWUE* 最优。

2) 施钾量为 240 kg/hm² 时, 枣树产量随灌水量增加呈逐渐增加趋势。T2-A 处理 *iWUE* 最优, 其中光合指标、*SPAD* 值等指标与产量显著正相关。

3) 增施钾肥可以提高枣树光合作用, 从而增强枣树对干旱的适应性。T2-A 处理 (灌水量为 180 mm, 施钾量为 240 kg/hm²) 光合作用、*WUE* 表现更好, 更能满足南疆地区节水高产目标。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 包艳丽, 程红梅, 张利召. 新疆红枣产业发展研究[J]. 农村经济与科技, 2022, 33(1): 145-146, 152.
- 尹海龙, 田长彦. 不同盐度环境下盐地碱蓬幼苗光合生理生态特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 850-855.
YIN Hailong, TIAN Changyan. Photosynthetic characteristics of *Suaeda salsa* seedlings under different salt conditions[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 850-855.
- 付彦博, 王成福, 黄建, 等. 水肥交互对红枣产量及生理状况的影响[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(1): 66-75.
FU Yanbo, WANG Chengfu, HUANG Jian, et al. Interaction effects of water and fertilizer on the yield and physiological condition of *Zizyphus Jujube*[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(1): 66-75.
- 李宁, 刘颖, 张振兴, 等. 水钾复合处理对越夏基质培黄瓜秧苗形态及生理指标的影响[J]. 河北农业大学学报, 2024, 47(3): 31-38.
LI Ning, LIU Ying, ZHANG Zhenxing, et al. Effects of water-potassium composite treatment on morphology and physiological indexes of cucumber seedlings grown on substrate in over-summer[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2024, 47(3): 31-38.
- LI N, WANG X X, XUE Z J, et al. Water and potassium utilization efficiency and yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 330: 113 025.
- 李阳, 齐曼·尤努斯, 祝燕. 水分胁迫对大果沙枣光合特性及生物量分配的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(12): 2 493-2 499.
LI Yang, QIMAN · Yunus, ZHU Yan. Effects of water stress on photosynthetic characteristics and biomass partition of *Elaeagnus moorcroftii*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(12): 2 493-2 499.
- 孙三民, 安巧霞, 叶含春, 等. 不同滴灌方式对骏枣生长和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 122-124.
SUN Sanmin, AN Qiaoxia, YE Hanchun, et al. Effects of different irrigation modes on growth and quality of jujube[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 122-124.
- 魏瑞峰, 庄飞, 范阳阳, 等. 土壤水分对枣树光合特性及耗水量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 107-111.
WEI Ruifeng, ZHUANG Fei, FAN Yangyang, et al. Effect of soil water content on photosynthetic characteristics and transpiration water consumption of jujube[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 107-111.
- 马军勇, 郑国玉, 周建伟, 等. 不同灌水下限对枣树光合特性、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 31-36.
MA Junyong, ZHENG Guoyu, ZHOU Jianwei, et al. The impact of the critical soil moisture used for scheduling deficit drip irrigation on photosynthesis, yield and quality of jujube tree[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 31-36.
- 侯裕生, 王振华, 李文昊, 等. 水肥耦合对南疆沙区滴灌红枣光合特性及叶绿素相对含量的影响[J]. 排灌机械工程学, 2018, 36(9): 914-919, 924.
HOU Yusheng, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics and chlorophyll relative contents of jujube under drip irrigation in Southern Xinjiang sandy area[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 914-919, 924.
- 张计峰, 耿庆龙, 曹文超, 等. 氮肥品种与施氮量对滴灌红枣光合特性和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 92-98.
ZHANG Jifeng, GENG Qinglong, CAO Wenchao, et al. Effects of type and amount of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of jujube under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(7): 92-98.
- 段晓显. 水肥耦合对南疆沙区主干结果型苹果生长产量及品质的作用效能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
DUAN Xiaoxian. Effect of irrigation and fertilizer coupling on the growth, yield and quality of trunk bearing apple in Southern Xinjiang sandy area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- 郭华, 秦聪, 石美娟, 等. 苹果幼树生理指标对土壤水分调控的响应研究[J]. 节水灌溉, 2021(6): 43-47.
GUO Hua, QIN Cong, SHI Meijuan, et al. Response of physiological indexes of young apple trees to soil moisture regulation[J]. Water Saving Irrigation, 2021(6): 43-47.
- 林之栋, 安鹏, 张振典, 等. 滴灌追肥次数对冬小麦产量形成的影响[J].

- 节水灌溉, 2024(8): 17-23.
- LIN Zhidong, AN Peng, ZHANG Zhendian, et al. Effect of number of drip irrigation topdressing on yield formation of winter wheat[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(8): 17-23.
- [15] 袁如芯, 孟新梅, 杨荣, 等. 不同灌水定额处理下基于有效积温玉米生长状况模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(3): 132-143.
- YUAN Ruxin, MENG Xinmei, YANG Rong, et al. Effect of different irrigating quotas on growth of maize: A perspective of effective accumulative temperature[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(3): 132-143.
- [16] 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 Jinghua, ZHANG Jiyuan, PENG Yanping, 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.
- [17] TURNER N C. Further progress in crop water relations[J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 58: 293-338.
- [18] 艾鹏睿. 干旱绿洲区滴灌枣树最优调亏灌溉模式与施肥制度研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- AI Pengrui. Study on the optimal regulated deficit irrigation and fertilization system of drip irrigation jujube in arid oasis area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [19] 洪明, 朱航威, 穆哈西, 等. 不同滴头流量及灌水定额下红枣树耗水规律[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 72-77, 109.
- HONG Ming, ZHU Hangwei, MU Haxi, et al. The water consumption rule of jujube trees under different emitter flow rate and irrigation quota[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2014, 32(1): 72-77, 109.
- [20] BIERHUIZEN J F, SLATYER R O. Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves[J]. *Agricultural Meteorology*, 1965, 2(4): 259-270.
- [21] 王强, 张欣薇, 黄英金, 等. 光环境和温度对商陆净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率的协同影响[J]. *植物生理学报*, 2021, 57(1): 187-194.
- WANG Qiang, ZHANG Xinwei, HUANG Yingjin, et al. Synergistic effects of light environment and temperature on net photosynthetic rate, transpiration rate and instant water-use efficiency of *Phytolacca americana*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2021, 57(1): 187-194.
- [22] 张纪圆, 赵经华, 庞毅, 等. 调亏灌溉对滴灌核桃树耗水规律及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(11): 1 674-1 684.
- ZHANG Jiyuan, ZHAO Jinghua, PANG Yi, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption and yield of walnut trees under drip irrigation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(11): 1 674-1 684.
- [23] 吕长平, 石雪晖, 杨国顺, 等. 水分胁迫对草莓叶片 SOD 活性以及 MDA 和 Vc 含量的影响[J]. *湖南农业大学学报*, 1996, 22(5): 451-455.
- LYU Changping, SHI Xuehui, YANG Guoshun, et al. Influences of water stress on SOD activity MDA and Vc contents in leaves of strawberry[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 1996, 22(5): 451-455.
- [24] 艾鹏睿, 马英杰. 调亏灌溉对干旱区枣树生理特性和果实产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(9): 9-15.
- AI Pengrui, MA Yingjie. Effects of regulated deficit irrigation on physiological characteristics and water consumption of jujube in arid area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(9): 9-15.
- [25] LI T L, GAO Z J, BAI X L, et al. Exploring the coupling mode of water and fertilizer for improving growth, fruit quality, and yield of the pear in the arid region[J]. *Open Life Sciences*, 2024, 19(1): 20 220 911.
- [26] LIN W. Optimization model of water-fertilizer coupling in garden plant cultivation based on big data analysis[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2024, 319: 100 516.
- [27] XIE J L, LI M, SHI M F, et al. Effects of potassium fertilizer base/topdressing ratio on dry matter quality, photosynthetic fluorescence characteristics and carbon and nitrogen metabolism of potato[J]. *Potato Research*, 2024: 1-19.
- [28] MASOUDI A N F, SHANNAN G R, ALASADI K K F. Effect of potassium supplementation and foliar spraying with ascorbic acid on some yield characteristics of wheat plants[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1371(5): 052 054.
- [29] BAILEY-SERRES J, PARKER J E, AINSWORTH E A, et al. Genetic strategies for improving crop yields[J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 109-118.
- [30] 孙梦晴, 叶佳丽, 刘溢健, 等. 不同马铃薯品种干旱适应性与其钾营养特性的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(4): 1-12, 51.
- SUN Mengqing, YE Jiali, LIU Yijian, et al. Relationship between drought adaptability and potassium nutrient characteristics in different potato varieties[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(4): 1-12, 51.
- [31] 唐凡, 崔宁博, 赵璐, 等. 滴灌水钾一体化对猕猴桃光合特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 10-18.
- TANG Fan, CUI Ningbo, ZHAO Lu, et al. The effect of water-potassium integration in drip irrigation on the photosynthetic characteristics of kiwifruit[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 10-18.
- [32] 韦泽秀, 梁银丽, 周茂娟, 等. 水肥组合对日光温室黄瓜叶片生长和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 69-74.
- WEI Zexiu, LIANG Yinli, ZHOU Maojuan, et al. Physiological characteristics of leaf growth and yield of cucumber under different watering and fertilizer coupling treatments in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 69-74.
- [33] 周小杰, 吕廷波, 邢猛, 等. 水肥耦合对新疆滴灌骏枣生长生理及产量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(5): 195-205.
- ZHOU Xiaojie, LYU Yanbo, XING Meng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth physiology and yield of Jun jujube under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(5): 195-205.
- [34] 强薇, 赵经华, 付秋萍, 等. 调亏灌溉对滴灌核桃树生长及产量的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(8): 186-190.
- QIANG Wei, ZHAO Jinghua, FU Qiuping, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of walnut trees under drip irrigation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(8): 186-190.
- [35] 王和平, 张志刚, 李宏, 等. 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(S2): 33-39.
- WANG Heping, ZHANG Zhigang, LI Hong, et al. Photosynthetic characteristics of middle-aged grey *Zizyphus Jujuba* 'Huizao' trees in different growth periods under two irrigation methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(S2): 33-39.
- [36] 柴仲平, 王雪梅, 孙霞, 等. 氮、磷、钾施肥配比对红枣光合特性与水分利用效率的影响研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(2): 144-150.
- CHAI Zhongping, WANG Xuemei, SUN Xia, et al. Photosynthetic characteristics and water use efficiency of *Zizyphus Jujube* under different treatments of N, P, K[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(2): 144-150.
- [37] 吕艳玲, 张家旺, 张丽丽, 等. 钾肥不同追施量对日光温室薄皮甜瓜光合特性、产量及品质的影响[J]. *北方园艺*, 2023(11): 53-59.
- LYU Yanling, ZHANG Jiawang, ZHANG Lili, et al. Effects of different topdressing K quantity on photosynthesis, yield and quality of oriental melon in solar greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2023(11): 53-59.
- [38] LIU J, HU T T, FENG P Y, et al. Effect of potassium fertilization during fruit development on tomato quality, potassium uptake, water and potassium use efficiency under deficit irrigation regime[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106 831.

The combined effect of water and potassium on physiological traits of jujube leaves and fruit yield under drip irrigation in Southern Xinjiang

SUN Shihao^{1,2}, AI Pengrui^{1,2*}, MA Yingjie^{1,2}, FU Qiuping^{1,2}, XU Yuan^{1,2}

(1. Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: 【Objective】 Jujube is a vital cash crop in Xinjiang. This study examined the combined effect of irrigation and potassium fertilization on physiological traits of jujube leaves and fruit yield to determine the optimal irrigation and fertilisation strategy for its sustainable production in this region. 【Method】 The field experiment was conducted from 2022 to 2023 in an 8-year grey jujube orchard in Aksu, Southern Xinjiang. There were three irrigation treatments by irrigating 100% (T1), 75% (T2) and 50% (T3) of estimated evapotranspiration. Each irrigation treatment had three potassium fertilizations: 240 kg/hm² (A), 180 kg/hm² (B) and 120 kg/hm² (C). During the experiment, we measured the photosynthetic traits of the jujube leaves and ultimate fruit yield. 【Result】 Both irrigation amount and potassium fertilization significantly impacted growth and development of the jujube. The net photosynthetic rate, transpiration rate and chlorophyll content of the jujube increased with increasing irrigation amount and potassium fertilization. Increasing potassium fertilization increased soluble sugar in jujube leaves, with its content in T1-A, T2-A and T3-A in 2023 increasing by 37.0%, 36.9% and 28.7%, respectively, compared to that in 2022. The abscisic acid (ABA) in jujube leaves varied with irrigation amount, being the highest in T3-C. The irrigation water use efficiency increased as the plant grew, and the fruit yield increased with the increase in potassium fertilization. When potassium application was 240 kg/hm², T1 and T2 increased the fruit yield by 56.77% and 45.52% in 2022, and 51.46% and 37.61% in 2023, compared to T3. Water use efficiency of T2-A was 8.88 kg/(hm²·mm) and 9.14 kg/(hm²·mm) in 2022 and 2023, respectively. 【Conclusion】 Among all treatments we compared, irrigating 75% of estimated evapotranspiration combined with a 240 kg/hm² of potassium fertilization is optimal for improving fruit yield and water use efficiency of jujube in Southern Xinjiang.

Key words: water-potassium fertilizer coupling; chlorophyll a; chlorophyll b; photosynthetic characteristics; yield

责任编辑：白芳芳