



赵蕾,刘润慧,张高煜,唐清芸,王子建,魏萌,王国栋,李玉祥.不同灌水量对滴灌水稻叶片光合特性及根系内源激素的影响[J].中国农业大学学报,2023,28(01):12-26.
ZHAO Lei, LIU Runhui, ZHANG Gaoyu, TANG Qingyun, WANG Zijian, WEI Meng, WANG Guodong, LI Yuxiang. Effects of different irrigation amounts on the photosynthetic characteristics of rice leaves and root endogenous hormones under mulching drip irrigation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(01): 12-26.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.01.02

不同灌水量对滴灌水稻叶片光合特性及根系内源激素的影响

赵蕾¹ 刘润慧¹ 张高煜¹ 唐清芸¹ 王子建¹ 魏萌¹ 王国栋^{2*} 李玉祥^{1*}

(1. 石河子大学 农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832003;

2. 新疆农垦科学院 农田水利与土壤肥料研究所/农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要 为探明覆膜滴灌条件下优化水分管理对水稻光合特性及根系内源激素的影响,以‘T-43’(抗旱性)和‘新稻1号’(干旱敏感性)为试验材料,生育期内设 8 670(W_1)、10 200(W_2)和 12 000 m^3/hm^2 (W_3)3 个灌水量处理,测定抽穗期和抽穗后 20 d 水稻叶片生长、光合荧光特性、根系内源激素、水分利用效率(WUEy)及籽粒产量等指标。结果表明,与 W_3 处理相比, W_1 条件下 2 个水稻品种的比叶重(SLW)、叶面积指数(LAI)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)及净光合速率(P_n)均显著下降,根系脱落酸(ABA)含量均显著增加($P<0.05$); W_2 条件下‘T-43’在抽穗期 SLW 和 ABA 含量较 W_3 增加 10%和 90%,但高效叶面积率、叶绿素 a 和 b 含量、 P_n 、 T_r 、非光化学淬灭系数(q_N)及抽穗后 20 d 根系 ABA 含量与 W_3 无显著差异,最终‘T-43’在 W_2 条件下产量及水分利用效率(WUEy)均显著高于 W_1 ($P<0.05$),而与 W_3 无显著差异。与‘新稻1号’相比,‘T-43’的 P_n 、最大光化学量子产量(F_v/F_m)及产量均显著增加, T_r 和 q_N 显著降低。相关性分析表明,产量与不同土层根系中 ABA、 P_n 、 G_s 呈显著或极显著负相关,与 0—40 cm 内水稻根系玉米素核苷(ZR)、 P_n 、 G_s 呈显著或极显著正相关。不同土层根系中 ABA 与 P_n 、 G_s 呈显著或极显著负相关。因此,在覆膜条件下,10 200 m^3/hm^2 的灌水量(W_2)可使抗旱性品种‘T-43’根系中 ABA 的含量升高,抑制气孔张开、减少地上部蒸腾耗水,同时叶片中叶绿素的降解得到缓解,可维持较高的有效叶面积、保持较强的光合活性,是实现新疆干旱稻作区节水高产目标的有效途径。

关键词 膜下滴灌; 水稻; 光合特性; 内源激素; 水分利用效率

中图分类号 S511.4;S511.6

文章编号 1007-4333(2023)01-0012-15

文献标志码 A

Effects of different irrigation amounts on the photosynthetic characteristics of rice leaves and root endogenous hormones under mulching drip irrigation

ZHAO Lei¹, LIU Runhui¹, ZHANG Gaoyu¹, TANG Qingyun¹, WANG Zijian¹,
WEI Meng¹, WANG Guodong^{2*}, LI Yuxiang^{1*}

(1. College of Agriculture/Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture of Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer/Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract To clarify the effects of optimizing water management under the condition of drip irrigation with plastic film mulch on the photosynthetic characteristics of rice leaves and root endogenous hormones, one drought-resistant rice variety ‘T-43’ and one drought-sensitive variety ‘Xindao 1’ were used as material. Three irrigation treatments,

收稿日期: 2022-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(31860345,31460541);石河子大学青年创新拔尖人才项目(CXBJ202003)

第一作者: 赵蕾(ORCID:0000-0001-9447-5792),硕士研究生,E-mail:1628794752@qq.com

通讯作者: 李玉祥(ORCID:0000-0003-3700-9474),副教授,主要从事作物高产生理与节水栽培研究,E-mail:yxli@shzu.edu.cn

王国栋(ORCID:0000-0003-0635-3280),副研究员,主要从事作物灌溉制度研究,E-mail:664812734@qq.com

8 670 m³/hm² (W_1), 10 200 m³/hm² (W_2) and 12 000 m³/hm² (W_3), were set up during rice growth period. The leaves growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of leaves, endogenous hormones, WUEy and yield at heading stage and 20 d after heading of rice were measured. The results showed that: Compared with W_3 , the specific leaf weight (SLW), leaf area index (LAI), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and photosynthetic rate (P_n) of W_1 all significantly decreased in both varieties ($P < 0.05$). The abscisic acid (ABA) in root significantly increased. Compared with W_3 , the contents of SLW and ABA in 'T-43' significantly increased by 10% and 90% at heading stage under W_2 ($P < 0.05$), respectively, but there was no significant difference in high effective leaf area ratio, chlorophyll a content (Chl a), chlorophyll b content (Chl b), P_n , T_r , non-photochemical quenching (qN) at heading stages, and the ABA content at 20 d after heading and W_3 ($P < 0.05$). The yield and WUEy of 'T-43' under W_2 treatment were significantly higher than those of W_1 treatment, but had no significant difference with those of W_3 treatment. Compared with 'Xindao 1', the P_n , maximal photochemical efficiency (F_v/F_m) and yield of 'T-43' were significantly increased, but the T_r and qN were significantly decreased ($P < 0.05$). The correlation analysis showed that yield was significantly negatively correlated with the ABA, P_n and G_s ($P < 0.05$), and was significantly positively correlated with the 0–40 cm soil layer zeatin nucleoside contents, P_n and G_s ($P < 0.05$). ABA was significantly negatively correlated with the P_n and G_s ($P < 0.05$). Therefore, under 10 200 m³/hm² drip irrigation with plastic film mulch, the drought-resistant rice variety could increase the ABA content in roots, reduce stomatal opening and the transpiration water consumption, and mitigate the degradation of chlorophyll, which could maintain higher leaf photosynthetic area and stronger photosynthetic activity. It was an effective way to achieve the goal of water saving and high yield of rice production under drip irrigation in Xinjiang.

Keywords plastic mulching with drip irrigation; rice; photosynthetic characteristic; endogenous hormones; water use efficiency

水资源短缺已成为一个全球性的问题^[1-2], 特别是中国西北地区水资源总量仅占全国水资源总量的 8%^[3], 而可耕地占全国耕地总量的 35%^[4], 未来随着气候变暖和社会经济发展可能面临更严重的缺水问题和生态压力^[1]。水稻作为主要的粮食作物之一, 全球超过 60% 的人口以水稻为主食^[5]。新疆全年太阳总辐射量 502~628 kJ/cm², 水稻生长季节 (4—10 月) 的光合辐射强度为 900~1 000 J/(cm²·d), 具有生产优质稻米的独特光、热资源优势^[6], 2014 年水稻平均单产高达 10.1 t/hm², 比全国平均水平高 48.9%, 成为我国西北的高产稻区^[7]。但由于土壤干旱, 加之农业用水供求矛盾十分突出, 水资源缺乏以及较为落后的灌溉方式已成为新疆水稻生产的主要限制因素^[8-9]。膜下滴灌栽培技术, 将滴灌技术和覆膜技术相结合, 不仅避免了水资源的渗漏、流失, 还减少了土壤水分的蒸发, 在增加作物产量的同时可提高水分利用效率^[10]。因此, 在新疆西部干旱稻作区开展水稻覆膜滴灌高产节水栽培技术研究, 有助于缓解新疆水资源危机、保障粮食产量和水资源的可持续利用。

抽穗开花期是水稻对水分胁迫最敏感的时期^[11], 若此时水分亏缺可导致水稻叶片气孔导度降低, 吸收利用 CO₂ 能力和蒸腾速率下降, 最终抑制光合效率, 限制水稻产量^[12-13]。此外, 干旱胁迫会导

致水稻叶绿体的超微结构遭到破坏, 叶绿体降解, 光合还原酶、暗反应酶活性及叶绿素 a、b 含量下降, 光合效率降低^[14]。Liu 等^[15-16] 研究认为旱作直播水稻籽粒产量与移栽水稻产量基本一致, 但旱作直播与移栽淹水相比耗水量减少 15.3%。因此, 在选育抗旱性品种的同时, 可通过优化生育期内水分管理措施, 挖掘水稻光合潜力, 进而实现节水高产的目标, 对提高水稻生产的水分利用效率具有现实意义。

根系为作物生长提供水分和养分, 在干旱胁迫下, 植物通过根系迅速感知胁迫, 调节根系内源激素的变化, 如脱落酸 (ABA) 含量增加时细胞分裂素 (CTK) 或玉米素 (ZR) 含量会相应降低等^[17-18], 并将干旱信息传递给地上部, 使植株代谢活动减弱, 进而调节其他生理生化过程, 以提高自身的抗逆能力^[19]。Teng 等^[20] 和郭贵华等^[21] 也发现干旱胁迫会导致水稻叶片 ABA 含量升高, 气孔关闭, 进而降低水稻的蒸腾作用、使水分耗散减少, 提高作物的保水能力和抗旱性。因此, 水稻根系内源激素与光合作用密切相关, 通过调控根系生理活性影响作物的光合生理, 是实现水稻节水高产的关键途径。

目前, 已明确认识到节水灌溉技术可提高水稻水分利用效率, 减少耗水量^[22]。韩品等^[23] 和王志军等^[24] 对不同灌溉方式下水稻生育及光合特性的研

究表明,滴灌水稻的株高、叶片数、产量均高于常规淹灌栽培模式。但有关在膜下滴灌条件下进一步降低灌水量,以提高水稻水分利用效率及其对光合特性、根系生理影响的研究尚未见报道。本试验选用抗旱性和干旱敏感性水稻品种作为试验材料,测定抽穗期和抽穗后 20 d 不同灌水量对水稻叶片生长、光合荧光特性、根系内源激素、水分利用效率(WUE_y)及产量等指标,旨在探明覆膜滴灌条件下优化水分管理对水稻光合特性及根系内源激素的影响,以期为新疆干旱稻作区实现水稻节水高产栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本试验于 2018—2019 年在新疆维吾尔自治区

石河子大学农学院实验站(44°18' N, 86°03' E, 海拔 450.8 m)进行,年均气温 6.5~7.2 °C,年均降雨 115 mm、蒸发量 1 942 mm 左右,属典型干旱半干旱大陆性气候。2018 年,水稻生育期内降雨总量为 110.7 mm, >5 mm 的有效降雨 6 次,5 月 1 日—9 月 30 日,日平均最高气温为 29.84 °C,日平均最低气温为 14.89 °C;2019 年整个生育期累积降雨 103.9 mm, >5 mm 的有效降雨 7 次,5 月 1 日—9 月 30 日,日平均最高气温为 27.78 °C,日平均最低气温为 8.17 °C(图 1)。供试土壤为砂壤土,土壤有机质 11.21 g/kg,全氮(N)0.74 g/kg、速效磷(P₂O₅)51.2 mg/kg、速效钾(K₂O)193.0 mg/kg、碱解氮 61.0 mg/kg。0—20、>20—40、>40—60 cm 土壤容重分别为 1.29、1.32 和 1.37 g/cm³。

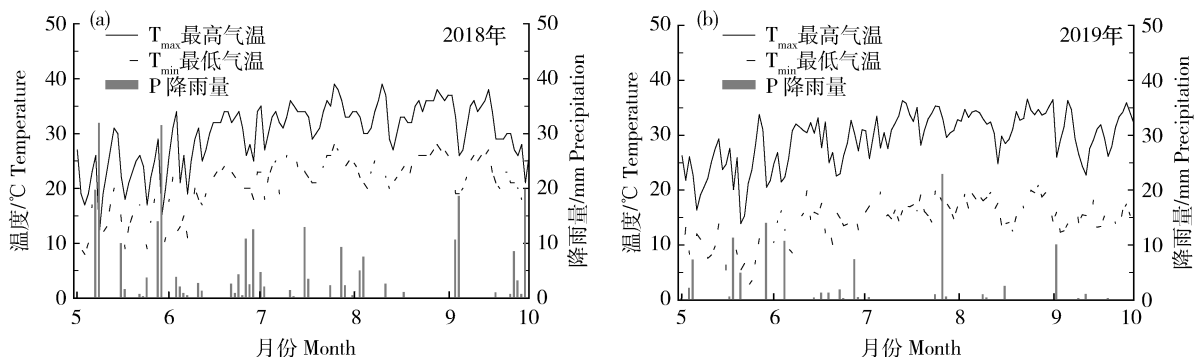


图 1 2018(a)和 2019(b)年试验区水稻生育期内的气温和降雨量

Fig. 1 Temperature and precipitation in the test area in 2018 (a) and 2019 (b)

1.2 试验设计

选用抗旱性品种‘T-43’和干旱敏感性品种‘新稻 1 号’为供试材料。采用管壁厚 1 cm、直径 35 cm、高 60 cm 的 PVC 管进行土柱栽培试验。为保证原有土层的空间分布,以 20 cm 为单位将试验小区内 0—60 cm 土层土壤过筛后按原来土层深度填到土柱内,浇水沉实。2018 年于 4 月 28 日人工点播,2019 年于 5 月 1 日人工点播,每柱 3 穴,每穴 10 粒种子,播深 2 cm,播种后地膜覆盖,采用滴灌系统模拟大田滴水 450 m³/hm²,出苗每穴保苗 8 株,2 年均于 9 月 30 日收获。

采用两因素随机区组试验设计,水稻生育期内设置 3 个灌水量处理:W₁(总灌水量 8 670 m³/hm²,每次灌水量 164.4 m³/hm²,灌 50 次)、W₂(总灌水量 10 200 m³/hm²,每次灌水量 195 m³/hm²,灌 50 次)和 W₃(总灌水量 12 000 m³/hm²,每次灌水量 231 m³/hm²,灌 50 次),每个处理 4 次重复,每次破

坏性试验取样,共计 72 个土盆。

在拔节前每隔 3 d 灌溉 1 次,拔节后每隔 2 d 灌溉 1 次,直到成熟前 15 d 停止灌溉(表 1)。全生育期各处理均按照 N 300 kg/hm²,P₂O₅ 270 kg/hm²,K₂O 240 kg/hm² 进行施肥。其中 N 肥 20% 作为基肥,80% 在出苗后第 20、70、90、120 天,按照 2:3:4:1 比例追施。磷钾肥一次性基肥。播种后按 450 m³/hm² 滴出苗水后,于 5 月 28 日进行水分处理,搭设防雨设施和遮阳网,根据天气预报提前盖好遮雨薄膜,雨后收起。6 月 23 日、8 月 30 日分别打药,做好病虫害防治工作。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶片相对含水量测定

于抽穗期、抽穗后 20 d 分别选择长势一致的水稻 3 穴,每穴选取剑叶 5 片,称鲜重后,放入密闭塑料桶中吸水 12 h,然后用吸水纸吸干叶片表面水分,称干重,即饱和鲜重。将叶片在空气中自然脱水,

表 1 2018—2019 年不同处理灌水周期及灌水量

Table 1 Irrigation cycles and irrigation amount under different treatments from 2018 to 2019

生育时期 Growth stage	日期 Date	历经时 间/d Over time	灌溉频率 Irrigation frequency	灌溉次数 Irrigation times	灌溉量/(m ³ /hm ²) Irrigation quantity		
					W ₁	W ₂	W ₃
苗期 Seedling stage	2018-04-28—05-27	30	1 次灌水	1	450.0	450.0	450.0
	2019-05-01—05-27	27					
苗期—拔节 Seedling stage-Jointing	05-28—07-06	40	每隔 3 d	14	164.4	195.0	231.0
拔节—成熟前 15 d Jointing-15 d before maturity	07-07—09-14	71	每隔 2 d	35	164.4	195.0	231.0
成熟前 15 d—收获 15 d before maturation-Harvest	09-15—09-30	15					
合计/(m ³ /hm ²) Total	2018-04-28—09-30	156		50	8 670.0	10 200.0	12 000.0
	2019-05-01—09-30	153					

于 80 °C 下杀青 30 min, 65 °C 烘干, 称重, 重复 3 次^[25]。计算公式如下:

$$RWC = (m_1 - m_2) / (m_3 - m_2) \times 100\% \quad (1)$$

式中: RWC, 相对含水量; m_1 、 m_2 、 m_3 , 叶片鲜重、干重和饱和鲜重, g。

1.3.2 叶面积和比叶重测定

于抽穗期、抽穗后 20 d 分别选择长势一致的水稻 3 穴, 每穴选取剑叶 5 片, 高效叶面积率取上三叶, 测量各叶片的长和最大宽度, 计算叶面积(LA)、叶面积指数(LAI)和高效叶面积率(Valid LA rate)后, 105 °C 下杀青 30 min、80 °C 烘干至恒重, 测定比叶重, 重复 3 次^[26]。计算公式如下:

$$LA = L \times W \times 0.75 \quad (2)$$

$$SLW = DW/LA \quad (3)$$

$$LAI = \text{叶片总面积} / \text{土地面积} \quad (4)$$

$$\text{高效叶面积率} = \text{上三叶叶面积} / \text{总叶面积} \quad (5)$$

式中: LA, 叶面积, cm²; L, 叶片的长, cm; W, 叶片最大宽度, cm; SLW, 比叶重, g/cm²; LAI, 叶面积指数; DW, 干重, g。

1.3.3 叶片叶绿素含量、气体交换参数和叶绿素荧光参数测定

分别于抽穗期、抽穗后 20 d 当日 11:00—13:00 测定气体交换参数, 选择长势一致的水稻 3 穴, 每穴选取剑叶 5 片, 自然光强约为 1 200~1 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

大气 CO₂ 浓度为 (400 ± 10) $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 使用便携式光合系统测定仪(LI-6400XT, 美国 LI-COR)测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)。用便携式荧光仪(MINI-PAM)测定已标识叶片的暗适应下的初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、实际光化学量子效率($Y(II)$)、光化学淬灭系数(qP)以及非光化学淬灭系数(qN)等叶绿素荧光参数^[27]。采用李合生^[28]的方法测定叶绿素含量, 重复 3 次。

1.3.4 根系内源激素测定

于抽穗期、抽穗后 20 d 分别选择生长发育一致的水稻 3 穴, 按 0—20、>20—40 和 >40—60 cm 分层, 用直径×高为 10 cm×10 cm 的根钻取出整层土壤, 置于 20 目网筛, 根系用自来水冲洗后, 再用蒸馏水冲洗干净, 最后用吸水纸擦干。每层根系剪碎后, 用液氮冷冻, 送至中国农业大学农学院检测。采用酶联免疫吸附法(ELISA)^[29]测定水稻根系的脱落酸(ABA)和玉米素核苷(ZR)含量, 重复 3 次。

1.3.5 产量和水分利用效率测定

水稻成熟期调查有效穗数、千粒重、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率; 收获后, 水稻产量按每桶面积与水稻种植株数折算为单产, kg/hm², 14.5% 标准含水率折算计产, 重复 3 次。

水分利用效率(WUEy, kg/m³) 计算公式:

$$WUE_y = \text{水稻产量} / \text{全生育期灌水量} \quad (6)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 计算平均值和标准误 (Mean ± SE), SPSS 26 进行方差分析 (Duncan) 和相关性分析, Sigmaplot 14.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理对膜下滴灌水稻产量的影响

由表 2 可知, 随灌水量的减少, ‘T-43’ 和 ‘新稻 1 号’ 产量及其构成因子均呈下降趋势, 其中, ‘T-43’ 在 W_2 条件下的产量与 W_3 差异不显著, 与 W_1 差异显著 ($P < 0.05$)。各处理下 ‘T-43’ 的 WUE_y 由高到低表现为 $W_2 > W_3 > W_1$, W_2 与 W_3 差异不显著, 与 W_1 差异显著 ($P < 0.05$), ‘新稻 1 号’ 的 WUE_y 由高到低表现为 $W_3 > W_2 > W_1$ 。2 个品种对比来看, 除穗粒数外, 其他产量及其构成因子和 WUE_y 均表现为 ‘T-43’ 高于 ‘新稻 1 号’, 尤其在 W_2 和 W_1 处理下 ‘T-43’ 的 WUE_y 分别比 ‘新稻 1 号’ 高 29.32% 和 70.85% (2018 年)、18.70% 和 94.57% (2019 年)。除结实率外, 每盆有效穗数、每穗粒数、千粒重、单盆产量及 WUE_y 在品种间和处理间差异均达极显著水平 ($P < 0.01$), 处理与品种间存在显著交互效应 ($P < 0.05$); 但所有参数在年季间差异均不显著, 表明各参数在年季间有很好的重复性, 后续数据分析与处理中, 仅用 2019 年数据进行分析。

2.2 不同水分处理对膜下滴灌水稻叶片生长的影响

由表 3 可知, 随灌水量的减少, 抗旱性水稻 ‘T-43’ 和干旱敏感性水稻 ‘新稻 1 号’ 的 RWC、LAI 和高效叶面积率呈下降趋势, W_2 降幅小于 W_1 。抽穗期, W_2 处理下 2 个品种的 RWC、高效叶面积率较 W_3 之间无显著差异, 但 ‘T-43’ 的 SLW 较 W_3 显著增加 10% ($P < 0.05$); 抽穗后 20 d, W_2 处理下 2 个品种的 SLW 和高效叶面积率较 W_3 无显著差异, 但 RWC 和 LAI 较 W_3 下降 7.44%~27.90% ($P < 0.05$)。抽穗至抽穗后 20 d, W_1 条件下 2 个品种的 RWC、SLW、LAI 较 W_3 分别下降 10.55%~18.45%、33.33%~58.33%、74.73%~115.38%。3 种水分处理下, 抗旱性水稻品种 ‘T-43’ 的 RWC 比干旱敏感性水稻品种 ‘新稻 1 号’ 高 1.10%、2.34%、6.72%, LAI 比 ‘新稻 1 号’ 高 11.57%、7.89%、32.50%, 高效叶面积率比 ‘新稻 1 号’ 高 7.20%、8.60%、8.47%, ‘T-43’ 的 SLW 在 W_2 条件下比 ‘新

稻 1 号’ 高 22.10%。

2.3 不同水分处理对膜下滴灌水稻叶绿素含量的影响

由表 4 可知, 随灌水量的减少, 干旱敏感性水稻 ‘新稻 1 号’ 的 Chl a、Chl b、T-chl 及 Chl a/Chl b 整体呈递减趋势。抽穗期, W_2 条件下抗旱性水稻 ‘T-43’ 和干旱敏感性水稻 ‘新稻 1 号’ 的 Chl a、Chl b、T-chl 及 Chl a/Chl b 较 W_3 无显著差异; 抽穗后 20 d, W_1 、 W_2 处理下 ‘T-43’ 和 ‘新稻 1 号’ 的 Chl a、Chl b、T-chl 及 Chl a/Chl b 分别较 W_3 下降 58.6%~111.54%、50.65%~111.32%、64.10%~86.41%、11.93%~25.50%。3 种水分处理下, 抗旱性水稻品种 ‘T-43’ 的 T-chl 比干旱敏感性水稻品种 ‘新稻 1 号’ 高 17.80%、13.74%、12.19%, 叶绿素 a/b 比 ‘新稻 1 号’ 高 19.83%、17.40%、11.23% ($P < 0.05$)。

2.4 不同水分处理对膜下滴灌水稻光合参数的影响

由表 5 可知, 随灌水量的减少, 抗旱性水稻 ‘T-43’ 和干旱敏感性水稻 ‘新稻 1 号’ 的 P_n 、 G_s 、 T_r 呈下降趋势, C_i 呈上升趋势。抽穗期, W_2 处理下 ‘T-43’ 的 G_s 比 W_3 高 64.17%, 而 P_n 、 T_r 较 W_3 无显著差异; W_1 处理下 ‘T-43’ 和 ‘新稻 1 号’ 的 P_n 、 G_s 、 T_r 分别比 W_3 低 93.35% 和 129.61%、216.40% 和 79.34%、104.59% 和 28.22%。抽穗后 20 d, W_1 和 W_2 处理下 ‘T-43’ 和 ‘新稻 1 号’ 的 P_n 、 G_s 、 T_r 较 W_3 均下降, 但 W_2 处理降幅小于 W_1 处理。品种间, W_2 和 W_1 条件下抗旱性水稻品种 ‘T-43’ 的 P_n 比干旱敏感性水稻品种 ‘新稻 1 号’ 高 23.13% 和 22.84%, 而 T_r 比 ‘新稻 1 号’ 低 24.93% 和 51.19% ($P < 0.05$)。

2.5 不同水分处理对膜下滴灌水稻叶绿素荧光参数的影响

由表 6 可知, 随灌水量的减少, 抗旱性水稻 ‘T-43’ 和干旱敏感性水稻 ‘新稻 1 号’ 的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 及 qP 均呈下降趋势, 而 qN 呈上升趋势。抽穗期, W_1 、 W_2 条件下 ‘T-43’ 和 ‘新稻 1 号’ 的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 、 qP 分别较 W_3 低 6.90%~20.79%、37.09%~65.70%、13.83%~50.36%, 其中, ‘新稻 1 号’ 的 F_v/F_m 、 qN 达到显著水平 ($P < 0.05$); 抽穗后 20 d, W_1 、 W_2 条件下 ‘T-43’ 的 F_v/F_m 、 qP 较 W_3 无显著差异。3 种水分处理下, 抗旱性水稻品种 ‘T-43’ 的 F_v/F_m 比干旱敏感性水稻品种 ‘新稻 1 号’ 高 3.50%~14.48%, $Y(II)$ 比 ‘新稻 1 号’ 高 11.48%~35.63%, qP 比 ‘新稻 1 号’ 高 6.54%~40.12%, 而 qN 比 ‘新稻 1 号’ 低 2.72%~26.52%。

表 2 不同水分处理下水稻的产量及水分利用效率 (WUEy)

Table 2 Grain yield and water use efficiency (WUEy) of rice under different water treatments

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	每盆有效穗数 Effective panicles per pot	每穗粒数 Spikelets number per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1 000-grain weight	单盆产量/g Yield per pot	WUEy/ (kg/m ³)	
2018	T-43	W ₁	45.3±3.3 b	62.6±4.1 b	73.00±2.83 c	21.42±0.35 b	44.76±5.98 b	0.53±0.07 b	
		W ₂	51.7±1.3 a	91.0±0.8 a	83.00±1.63 b	22.75±0.13 a	89.27±0.66 a	0.91±0.01 a	
		W ₃	52.0±0.8 a	93.4±3.3 a	88.73±1.32 a	22.99±0.05 a	99.67±4.83 a	0.86±0.04 a	
	新稻 1 号 Xindao 1	W ₁	32.7±1.7 b	79.3±6.2 b	51.33±2.87 c	19.43±0.33 b	26.20±4.42 c	0.31±0.05 c	
		W ₂	46.7±2.1 a	95.3±3.1 a	69.67±2.62 b	21.27±0.84 a	66.41±6.36 b	0.68±0.06 b	
		W ₃	51.3±3.3 a	100.7±2.1 a	85.00±2.94 a	22.40±0.54 a	99.24±10.90 a	0.86±0.09 a	
	2019	T-43	W ₁	39.7±0.9 b	59.9±7.5 b	81.67±7.72 a	21.42±1.17 a	41.80±7.15 b	0.50±0.09 b
			W ₂	50.9±1.5 a	91.0±1.6 a	87.33±1.70 a	22.22±2.24 a	90.71±12.00 a	0.92±0.12 a
			W ₃	51.3±1.3 a	93.4±3.3 a	90.40±1.23 a	23.33±1.27 b	101.51±4.62 a	0.88±0.04 a
新稻 1 号 Xindao 1		W ₁	30.7±3.7 b	79.3±6.2 b	51.33±2.87 c	16.43±1.45 b	21.48±7.07 c	0.26±0.08 b	
		W ₂	48.0±5.9 a	99.3±2.6 a	75.33±2.49 b	21.27±0.84 a	76.42±6.98 b	0.78±0.07 a	
		W ₃	49.3±3.1 a	106.3±3.9 a	88.67±2.49 a	22.73±0.76 a	106.64±11.99 a	0.92±0.10 a	
F		品种 (C)	16.67**	40.04**	113.49**	17.88**	10.57**	16.92**	
		处理 (T)	55.15**	118.05**	114.90**	20.04**	168.00**	92.27**	
		C×T	5.53*	6.26*	27.08**	4.38*	5.23*	6.00**	

注: 不同字母表示同一指标在处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。* 0.05 水平上显著相关; ** 0.01 水平上显著相关; *** 0.001 水平上显著相关。下同。

Note: Values followed by a different small letter are significantly different at the 5% probability level. * , Significant correlation at 0.05 level; ** , Significant correlation at 0.01 level; *** , Significant correlation at 0.001 level. The same as below.

表3 不同水分处理下水稻抽穗期和抽穗后20 d的叶片生长指标

Table 3 Leaf growth index at heading stage and 20 d after heading of rice under different water treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	抽穗期 HS				抽穗后 20 d 20 DAH			
		相对含水量/% RWC	比叶重/(g/cm ²) SLW	叶面积指数 LAI	高效叶面积率/% Valid LA rate	相对含水量/% RWC	比叶重/(g/cm ²) SLW	叶面积指数 LAI	高效叶面积率/% Valid LA rate
T-43	W ₁	86.44±2.07 b	0.15±0.01 c	1.82±0.16 c	71.50±3.29 b	81.80±1.28 c	0.14±0.02 b	1.60±0.23 c	56.90±1.90 a
	W ₂	90.69±3.01 a	0.22±0.03 a	2.50±0.38 b	75.10±4.57 a	86.17±5.36 b	0.18±0.01 a	2.33±0.14 b	57.70±4.20 a
	W ₃	95.56±1.48 a	0.20±0.01 b	3.18±0.09 a	75.10±0.80 a	92.58±4.45 a	0.19±0.00 a	2.98±0.28 a	60.50±2.30 a
新稻1号 Xindao 1	W ₁	80.82±6.01 b	0.15±0.02 b	1.30±0.13 c	63.00±3.22 b	76.81±1.36 c	0.12±0.01 b	1.28±0.08 c	55.00±3.20 a
	W ₂	88.90±4.73 a	0.19±0.01 a	2.35±0.10 b	65.75±2.44 a	83.93±2.76 b	0.18±0.03 a	2.13±0.09 b	56.00±1.90 a
	W ₃	95.14±1.25 a	0.20±0.01 a	2.80±0.07 a	68.73±3.43 a	90.98±2.41 a	0.19±0.01 a	2.72±0.15 a	57.50±1.90 a

表4 不同水分处理下水稻抽穗期和抽穗后20 d的叶绿素含量

Table 4 Chlorophyll content at heading stage and 20 d after heading of rice under different water treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	抽穗期 HS				抽穗后 20 d 20 DAH			
		叶绿素 a 含量/ (mg/L) Chlorophyll a content Chl a	叶绿素 b 含量/ (mg/L) Chlorophyll b content Chl b	叶绿素总含量/ (mg/L) Total Chlorophyll contents T-chl	叶绿素 a/b Chl a/Chl b	叶绿素 a 含量/ (mg/L) Chlorophyll a content Chl a	叶绿素 b 含量/ (mg/L) Chlorophyll b content Chl b	叶绿素总含量/ (mg/L) Total Chlorophyll contents T-chl	叶绿素 a/b Chl a/Chl b
T-43	W ₁	4.24±0.18 b	1.20±0.13 a	5.30±0.06 b	3.59±0.47 a	1.84±0.02 b	0.73±0.04 b	2.60±0.02 c	2.51±0.14 b
	W ₂	5.28±0.42 a	1.32±0.31 a	6.59±0.14 a	4.29±1.34 a	2.00±0.03 b	0.77±0.05 b	2.77±0.03 b	2.56±0.15 ab
	W ₃	5.42±0.09 a	1.27±0.06 a	6.76±0.05 a	4.26±0.19 a	3.61±0.11 a	1.16±0.10 a	4.75±0.09 a	3.15±0.34 a
新稻1号 Xindao 1	W ₁	3.57±0.53 b	1.30±0.16 a	4.85±0.69 a	2.75±0.11 b	1.30±0.05 c	0.53±0.02 b	2.06±0.32 b	2.30±0.00 c
	W ₂	4.92±0.65 a	1.44±0.42 a	6.04±1.26 a	3.32±0.37 ab	1.73±0.09 b	0.62±0.11 b	2.34±0.13 b	2.43±0.07 b
	W ₃	5.55±0.28 a	1.49±0.02 a	6.84±0.17 a	3.76±0.07 a	2.75±0.11 a	1.12±0.13 a	3.84±0.07 a	2.72±0.07 a

表 5 不同水分处理下水稻抽穗期和抽穗后 20 d 的光合参数

Table 5 Photosynthetic characteristics at heading stage and 20 d after heading of rice under different water treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	抽穗期 HS					抽穗后 20 d 20 DAH				
		$P_n/(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$G_s/(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$T_r/(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$C_i/(\mu\text{mol}/\text{mol})$	$P_n/(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$G_s/(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$T_r/(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$C_i/(\mu\text{mol}/\text{mol})$		
T-43	W ₁	7.80±0.79 b	0.06±0.01 c	4.13±0.68 b	325.51±19.05 a	7.43±0.69 c	0.11±0.00 c	7.06±0.16 c	308.11±15.97 a		
	W ₂	13.68±2.64 a	0.12±0.03 b	6.59±2.17 a	307.84±8.25 a	9.03±0.78 b	0.15±0.01 b	8.66±0.42 b	292.29±15.12 a		
	W ₃	15.07±1.19 a	0.20±0.02 a	8.45±1.07 a	298.20±15.27 a	11.44±1.39 a	0.21±0.01 a	9.01±1.76 a	275.01±6.12 a		
新稻 1 号 Xindao 1	W ₁	6.17±1.57 c	0.08±0.01 c	2.90±0.42 c	300.84±17.15 a	6.17±0.54 c	0.07±0.01 c	3.81±0.68 c	307.22±3.74 a		
	W ₂	10.58±0.56 b	0.11±0.02 b	5.83±0.16 b	294.25±36.10 a	7.73±1.27 b	0.08±0.00 b	6.82±0.87 b	298.79±5.49 a		
	W ₃	14.17±1.56 a	0.12±0.01 a	7.02±1.08 a	268.53±12.35 a	9.95±0.96 a	0.11±0.02 a	7.12±0.56 a	294.02±20.20 a		

表 6 不同水分处理下水稻抽穗期和抽穗后 20 d 的荧光参数

Table 6 Chlorophyll fluorescence parameter at heading stage and 20 d after heading of rice under different water treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	抽穗期 HS					抽穗后 20 d 20 DAH				
		最大光化学量子产量 Maximal photochemical efficiency F_v/F_m	光系统 II 的实际光化学量子效率 Actual photochemical efficiency in photosystem II $Y(\text{II})$	非光化学淬灭系数 Non-photochemical quenching qN	光化学淬灭系数 Photochemical quenching qP	最大光化学量子产量 Maximal photochemical efficiency F_v/F_m	光系统 II 的实际光化学量子效率 Actual photochemical efficiency in photosystem II $Y(\text{II})$	非光化学淬灭系数 Non-photochemical quenching qN	光化学淬灭系数 Photochemical quenching qP		
T-43	W ₁	0.75±0.01 c	0.16±0.01 b	0.32±0.02 c	0.38±0.08 a	0.67±0.02 a	0.14±0.01 c	0.27±0.02 b	0.51±0.03 a		
	W ₂	0.79±0.01 b	0.19±0.01 b	0.39±0.02 b	0.36±0.02 a	0.74±0.01 a	0.16±0.01 b	0.30±0.01 a	0.44±0.01 ab		
	W ₃	0.84±0.01 a	0.25±0.01 a	0.44±0.02 a	0.27±0.01 a	0.81±0.02 a	0.23±0.01 a	0.41±0.01 a	0.27±0.02 b		
新稻 1 号 Xindao 1	W ₁	0.71±0.02 c	0.14±0.01 c	0.25±0.01 b	0.51±0.04 a	0.61±0.02 c	0.11±0.00 b	0.15±0.00 c	0.61±0.02 a		
	W ₂	0.72±0.02 b	0.19±0.00 b	0.33±0.04 b	0.46±0.02 b	0.69±0.02 b	0.12±0.01 b	0.23±0.01 b	0.49±0.05 b		
	W ₃	0.78±0.04 a	0.22±0.00 a	0.38±0.02 a	0.39±0.03 c	0.76±0.02 a	0.19±0.00 a	0.36±0.01 a	0.41±0.02 c		

2.6 不同水分处理对膜下滴灌水稻根系内源激素的影响

由表7可知,抽穗期,随灌水量的减少,抗旱性水稻‘T-43’和干旱敏感性水稻‘新稻1号’不同土层的根系ABA含量呈递增趋势,而ZR、ZR/ABA含量呈递减趋势;抽穗后20 d, W_2 条件下‘T-43’根系中ABA含量较 W_3 无显著差异。3种水分处理下,抗旱性水稻品种‘T-43’抽穗期在 $>40-60$ cm土层根系中ABA含量比干旱敏感性水稻品种‘新稻1号’高5.91%~97.19%,但0—20 cm土层根系ZR含量在抽穗期和抽穗后20 d比‘新稻1号’低3.31%~60.53%。

2.7 根系内源激素、叶片光合荧光参数与产量及水分利用效率相关分析

由表8和表9可知,不同土层根系中的ABA含量均与 G_s 、 P_n 呈显著或极显著负相关,而0—20 cm ZR含量与 P_n 、 G_s 呈显著或极显著正相关;产量与不同土层根系中的ABA含量呈显著或极显著负相关、与0—40 cm ZR及 P_n 、 G_s 呈显著或极显著正相关。品种间,抗旱性水稻品种‘T-43’的ABA、 G_s 及 P_n 与产量呈显著或极显著正相关(表8),干旱敏感性水稻品种‘新稻1号’的ABA、ZR、 G_s 及 P_n 与产量呈显著或极显著正相关(表9)。

3 讨论

3.1 不同水分处理的膜下滴灌水稻产量及水分利用效率的变化

郭庆人等^[30]对新疆干旱区农业灌溉实践研究发现,发展节水灌溉技术不仅可实现实时、精量的水、肥控制,在减少地表径流、棵间蒸发和深层渗漏的同时,还能有效提高作物产量和水分利用效率。目前,以覆膜滴灌水稻为代表的高效节水栽培技术,已逐渐成为新的发展方向。陈林等^[31]研究表明,滴灌水稻田间实际产量最高可达12.05 t/hm²,耗水10 500 m³/hm²,水分利用率为0.83 kg/m³,与传统淹灌栽培模式相比可有效减少水稻耗水量、提高水分利用效率。本研究中,在进一步优化全生育期灌水10 200 m³/hm² (W_2)条件下,抗旱性水稻品种‘T-43’产量未显著下降(单盆产量90.0 g,即9.35 t/hm²),水分利用效率(WUEy)提高至0.92 kg/m³;而干旱敏感性水稻品种‘新稻1号’产量较 W_3 显著下降(7.43 t/hm²) ($P<0.05$),表明通过选用抗旱性强的水稻品种,充分挖掘水稻生物学节水潜力并

应用节水灌溉技术,在保证产量不显著降低的前提下可实现水分的高效利用。

3.2 不同水分处理的膜下滴灌水稻叶片光合荧光特性的变化

光合作用是作物干物质积累和产量形成的基础^[32]。杨晓龙^[12]和Pinheiro等^[14]研究结果表明,干旱胁迫使叶片的水势下降,叶绿体降解,气孔导度和蒸腾速率下降,最终导致光合能力下降。本研究中,抽穗期 W_2 处理提高了‘T-43’的Chl *b*与Chl *a*/Chl *b*,而高效叶面积率、相对含水量、Chl *a*、T-chl、 P_n 和 T_r 较 W_3 无显著差异,这可能与 W_2 条件下根系ABA含量没有显著增加($P<0.05$),抽穗期水稻叶片叶绿素合成没有受到显著抑制有关^[33];Chl *a*/Chl *b* 增加表明抽穗期‘T-43’具有相对较高的Chl *a*含量,能够捕获更多地光能适应水分减少,并将其转化为化学能,为碳同化提供更充足的能量来源,以维持光合作用的正常运转^[34];另一方面,较大的高效叶面积率为光能截获率提供了保障,有利于提高抽穗期的光合生产潜力,进而在满足光合作用正常进行的同时,小幅度降低蒸腾作用^[35],提高了水分利用效率。较高的比叶重也被认为是提高作物叶片韧性和抵抗物理干扰能力的指标^[36]。本研究中, W_2 提高了抽穗期抗旱性水稻的比叶重,说明减少灌溉量并没有抑制叶肉细胞的生长,反而提高了叶片的保水性和相对含水量,有利于延长抽穗期的光合时间,促进籽粒产量形成;这可能是 W_2 条件下保持较高光合速率的主要原因。

叶绿素荧光参数可反映植物的生理状态,通过叶绿素荧光参数可间接了解光合作用的过程^[37]。本研究中, W_2 处理下‘T-43’抽穗后20 d的 qP 、 qN 较 W_3 无显著差异,说明进一步减少水分后水稻通过保持较大的电子传递活性和较强的热耗散能力来保护光系统II不受损坏,有利于光合作用正常运行^[33]。此外,随着胁迫程度的增加,抗旱性水稻‘T-43’在 W_2 条件下可以及时减缓 qN 的上升,将多余的光能以热形式耗散,避免光抑制,而干旱敏感性水稻(‘新稻1号’)不能及时作出反应,导致 qN 持续上升,叶片PSII受到实质性损伤^[33-38],表现为叶面积指数和比叶重均显著下降($P<0.05$),光合作用受限,说明干旱胁迫下,抗旱性强的水稻具有较强的热耗散能力,从而维持PSII较强的光化学活性。

表 7 不同水分处理下水稻抽穗期和抽穗后 20 d 根系的内源激素含量

Table 7 The contents of endogenous hormone in root at heading stage and 20 d after heading of rice under different water treatments

生育期 Growth stage	根系所在土层/cm Soil layer of root	处理 Treatment	T-43				新稻 1 号 Xindao 1			
			ABA 含量/(ng/g) Content of ABA	ZR 含量/(ng/g) Content of ZR	ZR/ABA	ABA 含量/(ng/g) Content of ABA	ZR 含量/(ng/g) Content of ZR	ZR/ABA		
抽穗期 HS	0—20	W ₁	41.75±0.66 a	3.50±0.09 c	0.08±0.00 c	50.34±0.78 a	4.20±0.09 c	0.08±0.00 c		
		W ₂	34.27±0.51 b	3.80±0.07 b	0.11±0.00 b	40.68±0.40 b	6.10±0.11 b	0.15±0.00 b		
		W ₃	20.78±0.52 c	6.70±0.14 a	0.32±0.01 a	19.04±0.17 c	7.80±0.09 a	0.41±0.00 a		
	>20—40	W ₁	43.30±0.49 a	2.40±0.10 c	0.05±0.00 c	79.23±1.05 a	3.90±0.07 b	0.05±0.00 c		
		W ₂	38.97±0.28 b	3.60±0.14 b	0.09±0.00 b	59.06±0.83 b	3.90±0.02 b	0.07±0.00 b		
		W ₃	21.16±0.73 c	4.50±0.16 a	0.21±0.01 a	20.56±0.83 c	4.10±0.05 a	0.20±0.01 a		
	>40—60	W ₁	107.05±5.91 a	2.10±0.02 c	0.02±0.00 c	101.08±1.59 a	2.20±0.08 b	0.02±0.00 c		
		W ₂	88.25±0.95 b	2.70±0.07 b	0.03±0.00 b	58.72±0.80 b	2.10±0.07 b	0.04±0.00 b		
		W ₃	53.26±0.92 c	3.20±0.15 a	0.06±0.00 a	27.01±0.36 c	3.30±0.07 a	0.12±0.00 a		
抽穗后 20 d 20 DAH	0—20	W ₁	37.18±0.14 a	2.67±0.05 b	0.07±0.00 c	55.66±0.04 a	3.14±0.08 c	0.06±0.00 c		
		W ₂	26.15±0.87 b	2.84±0.07 b	0.11±0.00 b	32.09±0.02 b	3.88±0.08 b	0.12±0.00 b		
		W ₃	25.75±1.03 b	4.23±0.11 a	0.16±0.00 a	14.93±0.02 c	4.37±0.08 a	0.30±0.01 a		
	>20—40	W ₁	52.16±0.80 a	2.43±0.11 b	0.05±0.00 c	87.41±1.01 a	2.82±0.07 c	0.03±0.00 c		
		W ₂	17.94±0.51 b	2.27±0.07 b	0.13±0.01 b	43.78±0.62 b	3.56±0.08 b	0.08±0.00 b		
		W ₃	17.43±0.71 b	3.84±0.08 a	0.22±0.01 a	19.26±0.30 c	3.78±0.08 a	0.20±0.01 a		
	>40—60	W ₁	49.53±1.10 a	2.11±0.03 c	0.04±0.00 c	95.63±1.28 a	2.27±0.08 b	0.02±0.00 c		
		W ₂	31.84±1.01 b	2.38±0.07 b	0.07±0.00 b	45.80±0.62 b	2.20±0.10 b	0.05±0.00 b		
		W ₃	29.90±1.49 b	3.10±0.05 a	0.10±0.00 a	28.94±0.80 c	2.50±0.08 a	0.09±0.01 a		

表8 ‘T-43’水稻品种根系内源激素、叶片荧光参数与产量及水分利用效率相关分析

Table 8 Relationship between root hormone contents, photosynthetic parameters and yield, water use efficiency in ‘T-43’ rice

指标 Index	0—20 cm 土层根系 ABA含量 Content of ABA in root of 0-20 cm soil layer	>20—40 cm 土层根系 ABA含量 Content of ABA in root of >20-40 cm soil layer	>40—60 cm 土层根系 ABA含量 Content of ABA in root of >40-60 cm soil layer	0—20 cm 土层根系 ZR含量 Content of ZR in root of 0-20 cm soil layer	>20—40 cm 土层根系 ZR含量 Content of ZR in root of >20-40 cm soil layer	>40—60 cm 土层根系 ZR含量 Content of ZR in root of >40-60 cm soil layer	P_n	G_s	WUE _y	产量 Yield
0—20 cm 土层根系 ABA 含量	1.00									
>20—40 cm 土层根系 ABA 含量	0.87***	1.00								
>40—60 cm 土层根系 ABA 含量	0.93***	0.95***	1.00							
0—20 cm 土层根系 ZR 含量	-0.95***	-0.88**	-0.97	1.00						
>20—40 cm 土层根系 ZR 含量	-0.87**	-0.93	-0.90***	0.91***	1.00					
>40—60 cm 土层根系 ZR 含量	-0.87***	-0.90***	-0.90***	0.93***	0.90***	1.00				
P_n	-0.95***	-0.87***	-0.88***	0.90**	0.87	0.87***	1.00			
G_s	-0.87***	-0.97***	-0.93***	0.88**	0.94***	0.87***	0.92***	1.00		
水分利用效率 WUE _y	-0.58**	-0.68	-0.67*	0.62	0.57	0.68*	0.48**	0.52*	1.00	
产量 Yield	-0.88***	-0.93***	-0.92***	0.87*	0.82**	0.92	0.77***	0.80**	0.85***	1.00

表 9 ‘新稻 1 号’水稻品种根系内源激素、叶片光合荧光参数与产量及水分利用效率相关分析

Table 9 Relationship between root hormone contents, photosynthetic parameters and yield, water use efficiency in ‘Xindao 1’ rice

指标 Index	0—20 cm 土层根系 ABA 含量 Content of ABA in root of 0-20 cm soil layer	>20—40 cm 土层根系 ABA 含量 Content of ABA in root of >20-40 cm soil layer	>40—60 cm 土层根系 ABA 含量 Content of ABA in root of >40-60 cm soil layer	0—20 cm 土层根系 ZR 含量 Content of ZR in root of 0-20 cm soil layer	>20—40 cm 土层根系 ZR 含量 Content of ZR in root of >20-40 cm soil layer	>40—60 cm 土层根系 ZR 含量 Content of ZR in root of >40-60 cm soil layer	P_n	G_s	WUE _y	产量 Yield
0—20 cm 土层根系 ABA 含量	1.00									
>20—40 cm 土层根系 ABA 含量	0.87***	1.00								
>40—60 cm 土层根系 ABA 含量	0.88***	0.88***	1.00							
0—20 cm 土层根系 ZR 含量	-0.92***	-0.92***	-0.93***	1.00						
>20—40 cm 土层根系 ZR 含量	-0.72**	-0.68**	-0.80***	0.83	1.00					
>40—60 cm 土层根系 ZR 含量	-0.47**	-0.43	-0.57*	0.52*	0.17	1.00				
P_n	-0.88***	-0.98***	-0.92***	0.95***	0.72	0.45**	1.00			
G_s	-0.92***	-0.90***	-0.93***	0.87***	0.70**	0.53*	0.88***	1.00		
水分利用效率 WUE _y	-0.82***	-0.92***	-0.90***	0.80***	0.67	0.35	0.9	0.93***	1.00	
产量 Yield	0.87***	-0.95***	-0.93***	0.87***	0.70**	0.45*	0.93***	0.95***	0.98***	1.00

3.3 膜下滴灌水稻根系内源激素与叶片光合参数之间的关系

植物多种内源激素调控包括光合作用在内的多个生理过程^[19]。Wang 等^[17]在鸭跖草的相关研究中指出,ABA 含量增加的同时 ZR 含量的下降会导致叶片气孔关闭和蒸腾速率减慢。本研究中,抽穗期‘T-43’在 W_2 处理下 ZR 含量降幅较 W_1 小,而抽穗期‘T-43’在 W_2 处理下根系中 ABA 含量较 W_3 显著增加,说明在 W_2 条件下抗旱性水稻通过调控生育前期 ZR 下降幅度和 ABA 增加幅度,延缓根系衰老,促进根系下扎^[39],同时 ABA 作为逆境信号向地上部运输,引起水稻叶片气孔开度减小,控制 CO_2 的进入和水分散失,保持较高的叶片含水量,进而影响光合作用和水分利用效率^[18]。此外, P_n 、 G_s 均分别与 0—60 cm 土层中根系的 ABA、0—20 cm 土层中根系的 ZR 之间呈显著或极显著相关。在减少灌溉量(W_2)条件下根系中 ABA 含量升高和 ZR 含量下降,是维持抗旱性水稻光合能力的另一个原因。

4 结 论

在覆膜滴灌条件下,灌水量为 $10\ 200\ m^3/hm^2$ (W_2),可以显著增加抗旱性水稻‘T-43’抽穗期根系中脱落酸的(ABA)含量,抑制地上部叶片气孔开度,减少蒸腾作用,同时减缓叶片叶绿素(T-chl)的降解,在抽穗期可维持较高的有效叶面积和光合活性,实现新疆干旱稻作区水稻节水高产的目标。

参考文献 References

[1] Chen L, Chang J X, Wang Y M, Guo A J, Liu Y Y, Wang Q Q, Zhu Y L, Zhang Y, Xie Z Y. Disclosing the future food security risk of China based on crop production and water scarcity under diverse socioeconomic and climate scenarios[J/OL]. *Science of the Total Environment*, (2021-05-29) [2022-07-23]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148110

[2] Liu X, Shi L J, Engel B A, Sun S K, Zhao X N, Wu P T, Wang Y B. New challenges of food security in Northwest China: Water footprint and virtual water perspective[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, (2019-10-22) [2022-07-27]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118939

[3] Bao C, Zou J J. Exploring the coupling and decoupling relationships between urbanization quality and water resources constraint intensity: Spatiotemporal analysis for northwest China[J]. *Sustainability*, 2017, 9(11): 1960-1976

[4] 国土资源部. 中国国土资源统计年鉴[M]. 北京: 中国地质出版社, 2018
Ministry of Land and Resources. *Statistical Yearbook of China's Land Resources*[M]. Beijing: China Geological Press, 2018 (in Chinese)

[5] Patel D P, Das A, Munda G C, Ghosh P K, Bordoloi J S, Kumar M. Evaluation of yield and physiological attributes of high-yielding rice

varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(9): 1269-1276

[6] 杨益善, 陈立云, 徐耀武. 从稻米品质评价标准的变化看我国水稻品质育种的发展[J]. *杂交水稻*, 2004, 19(3): 5-10
Yang Y S, Chen L Y, Xu Y W. Viewing the Development of rice quality breeding from changes of the standards for high quality rice in China[J]. *Hybrid Rice*, 2004, 19(3): 5-10 (in Chinese)

[7] 潘俊峰, 钟旭华, 黄农荣, 刘彦卓, 约麦尔·艾麦提, 巴拉提·巴克, 梁开明, 彭碧琳. 近 20 年新疆水稻生产发展及影响因素分析[J]. *中国稻米*, 2017, 23(3): 22-27
Pan J F, Zhong X H, Huang N R, Liu Y Z, Yuemaier · A, Balati · B, Liang K M, Peng B L. Development of rice production in recent twenty years and its influencing factors in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *China Rice*, 2017, 23(3): 22-27 (in Chinese)

[8] He H B, Ma F Y, Yang R, Chen L, Jia B, Cui J, Fan H, Wang X, Li L. Rice performance and water use efficiency under plastic mulching with drip irrigation[J/OL]. *PLoS ONE*, (2013-12-10) [2022-07-27]. DOI: 10.1371/journal.pone.0083103

[9] Pandey V, Shukla A. Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress[J]. *Rice Science*, 2015, 22(4): 147-161

[10] 王传娟, 张彦群, 王建东, 许迪, 龚时宏, 吴忠东. 东北典型区覆膜滴灌春玉米节水增产的光合生理响应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 90-97
Wang C J, Zhang Y Q, Wang J D, Xu D, Gong S H, Wu Z D. Photosynthetic response of water-saving and yield-increasing of mulched drip irrigation for spring maize (*Zea mays* L) in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 90-97 (in Chinese)

[11] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, Lu G A, Quilang E J P, Li Y H, Spiertz J H J, Tuong T P. Effect of water saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(3): 193-210

[12] 杨晓龙, 汪本福, 陈亮, 曹凌贵, 李萍. 抽穗期干旱对水稻生理性状和产量的影响[J]. *中国稻米*, 2015, 21(4): 138-141, 146
Yang X L, Wang B F, Chen L, Cao C G, Li P. Effects of drought stress on rice physiological traits and grain yield at heading stage[J]. *China Rice*, 2015, 21(4): 138-141, 146 (in Chinese)

[13] Lauteri M, Haworth M, Serraj R, Monteverti M C, Centritto M. Photosynthetic diffusional constraints affect yield in drought stressed rice cultivars during flowering[J/OL]. *PLoS ONE*, (2014-10-02) [2022-07-23]. DOI: 10.1371/journal.pone.0109054

[14] Pinheiro C, Chaves M M. Photosynthesis and drought: Can we make metabolic connections from available data? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(3): 869-882

[15] Liu H Y, Hussain S, Zheng M M, Peng S B, Huang J L, Cui K H, Nie L X. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(1): 285-294

[16] Norton G J, Shafaei M, Travis A J, Deacon C M, Danku J, Pond D, Cochrane N, Lockhart K, Salt D, Zhang H, Dodd I C, Hossain M, Islam M R, Price A H. Impact of alternate wetting and drying on rice physiology, grain production, and grain quality [J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 1-13

[17] Wang Y Y, Zhou R, Zhou X. Endogenous levels of ABA and cytokinins

- and their relation to stomatal behavior in dayflower (*Commelina communis* L)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 144(1): 45-48
- [18] 周宇飞, 王德权, 陆樟镛, 王娜, 王艺陶, 李丰先, 许文娟, 黄瑞冬. 干旱胁迫对持续性高粱光合特性和内源激素 ABA、CTK 含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 655-663
- Zhou Y F, Wang D Q, Lu Z B, Wang N, Wang Y T, Li F X, Xu W J, Huang R D. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and endogenous hormone ABA and CTK contents in green-stayed sorghum[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 655-663 (in Chinese)
- [19] 汪莹, 南雨丽, 李景峰, 梁鹏飞, 陈洁, 魏少萍, 刘鑫. 干旱胁迫对不同根型苜蓿内源激素含量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 30-36
- Wang K, Nan L L, Li J F, Liang P F, Chen J, Wei S P, Liu X. Effects of drought stress on endogenous hormone contents of different root-type alfalfa[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 30-36 (in Chinese)
- [20] Teng K Q, Li J Z, Liu L, Han Y C, Du Y X, Zhang J, Sun H Z, Zhao Q Z. Exogenous ABA induces drought tolerance in upland rice; the role of chloroplast and ABA biosynthesis-related gene expression on photosystem II during PEG stress[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36: 2219-2227
- [21] 郭贵华, 刘海艳, 李刚华, 刘明, 李岩, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁艳锋. ABA 缓解水稻孕穗期干旱胁迫生理特性的分析[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(22): 4380-4391
- Guo G H, Liu H Y, Li G H, Liu M, Li Y, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding Y F. Analysis of physiological characteristics about ABA alleviating rice booting stage drought stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4380-4391 (in Chinese)
- [22] Zhuang Y H, Zhang L, Li S S, Liu H B, Zhai L M, Zhou F, Ye Y S, Ruan S H, Wen W J. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 374-382
- [23] 韩品, 银永安, 贾世疆, 李丽, 成华伟, 张晓峰, 包芳俊. 不同灌溉方式对水稻生育特性及产量品质的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2019, 36(5): 1-5
- Han P, Yin Y A, Jia S J, Li L, Cheng H W, Zhang X F, Bao F J. Effects of different irrigation methods on the growth characteristics, yield, and quality of rice[J]. *Barley and Cereal Science*, 2019, 36(5): 1-5 (in Chinese)
- [24] 王志军, 叶春秀, 李有忠, 董永梅, 陈林, 孙国清, 谢宗铭. 不同栽培模式下水稻各生育期光合生理指标的比较研究[J]. *华北农学报*, 2017, 32(1): 125-134
- Wang Z J, Ye C X, Li Y Z, Dong Y M, Chen L, Sun G Q, Xie Z M. Study on photosynthetic physiological indexes at different periods of rice under different cultivation patterns [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(1): 125-134 (in Chinese)
- [25] 高俊凤. 植物生理实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 71-228
- Gao J F. *Plant Physiology Experiment Instruction*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006, 71-228 (in Chinese)
- [26] 王勋, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 曹卫星. 不同生态环境下水稻基因型产量形成与源库特性的比较研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 615-619
- Wang X, Dai T B, Jiang D, Jing Q, Cao W X. Yield-formation and source-sink characteristics of rice genotypes under two different eco-environments[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 615-619 (in Chinese)
- [27] 张旺峰, 勾玲, 王振林, 李少昆, 余松烈, 曹连莆. 氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 893-898
- Zhang W F, Gou L, Wang Z L, Li S K, Yu S L, Cao L P. Effect of nitrogen on chlorophyll fluorescence of leaves of high-yielding cotton in Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 893-898 (in Chinese)
- [28] 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 H S. *Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [29] Liu Y, Ding Y F, Wang Q S, Meng D X, Wang S H. Effects of nitrogen and 6-benzylaminopurine on rice tiller bud growth and changes in endogenous hormones and nitrogen[J]. *Crop Science*, 2011, 51(2): 786-792
- [30] 郭庆人, 陈林. 水稻膜下滴灌栽培技术在我国发展的优势及前景分析[J]. *中国稻米*, 2012, 18(4): 36-39
- Guo Q R, Chen L. Advantages and prospect analysis of rice drip irrigation cultivation technology under film in China[J]. *China Rice*, 2012, 18(4): 36-39
- [31] 陈林, 程莲, 李丽, 陈伊锋. 水稻膜下滴灌技术的增产效果与经济效益分析[J]. *中国稻米*, 2013, 19(1): 41-43
- Chen L, Cheng L, Li L, Chen Y F. Analysis of the yield-increase effect and economic benefit of rice sub-membrane drip irrigation under film on rice[J]. *China Rice*, 2013, 19(1): 41-43 (in Chinese)
- [32] Xu Q, Ma X P, Lv T B, Bai M, Wang Z L, Niu J R. Effects of water stress on fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of drip irrigation in rice[J]. *Water*, 2020, 12(1): 289-207
- [33] 孙哲, 范维娟, 刘桂玲, 田昌庚, 张鹏, 柳洪鹏, 杨俊, 赵丰玲, 史春余. 干旱胁迫下外源 ABA 对甘薯苗期叶片光合特性及相关生理指标的影响[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(5): 873-880
- Sun Z, Fan W J, Liu G L, Tian C G, Zhang P, Liu H J, Yang J, Zhao F L, Shi C Y. Effects of exogenous ABA on leaf photosynthetic characteristics and associated physiological indexes of sweetpotato (*Ipomoea batatas*) seedlings under drought stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(5): 873-880 (in Chinese)
- [34] Wang Y J, Sperry J S, Venturas M D, Trugman A T, Love D M, Anderegg W R L. The stomatal response to rising CO₂ concentration and drought is predicted by a hydraulic trait-based optimization model[J]. *Tree Physiology*, 2019, 39(8): 1416-1427
- [35] 何海兵, 武立权, 杨茹, 马富裕, 黄义德. 干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 186-193
- He H B, Wu L Q, Yang R, Ma F Y, Huang Y D. Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 186-193 (in Chinese)
- [36] Onoda Y, Wright I J, Evans J R, Hikosaka K, Kitajima K, Niinemets Ü, Poorter H, Tosens T, Westoby M. Physiological and structural tradeoffs underlying the leaf economics spectrum [J]. *The New Phytologist*, 2017, 214(4): 1447-1463
- [37] 周玉霞, 巨天珍, 王引弟, 万子栋, 杨颖丽, 高天鹏. 3 种旱生植物的叶绿素荧光参数日变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 164-

170

Zhou Y X, Ju T Z, Wang Y D, Wan Z D, Yang Y L, Gao T P. Diurnal variation of chlorophyll fluorescence parameters of three xerophytes[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(5): 164-170 (in Chinese)

- [38] 俞双恩, 刘子鑫, 高世凯, 王梅, 丁继辉. 旱涝交替胁迫对水稻荧光参数与光合特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 304-312
Yu S E, Liu Z X, Gao S K, Wang M, Ding J H. Effects of waterlogging and drought alternative stress patterns on fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of rice[J]. *Transactions of the Chinese*

Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 304-312 (in Chinese)

- [39] 陆大克, 段骅, 王维维, 刘明爽, 魏艳秋, 徐国伟. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1362-1372
Lu D K, Duan H, Wang W W, Liu M S, Wei Y Q, Xu G W. Comparison of rice root development and function among different degrees of dry-wet alternative irrigation coupled with nitrogen forms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8): 1362-1372 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



通讯作者简介:李玉祥, 博士, 副教授。2007年9月—2011年6月, 甘肃农业大学农学专业本科学习, 获农学学士学位; 2011年9月—2016年9月, 研究生毕业于南京农业大学作物栽培学与耕作学专业, 获农学博士学位。2016年9月起在石河子大学农学院农学系作物栽培教研室任教, 主要讲授《作物栽培学》, 《作物生理学》, 《农学实践基础》等课程, 发表教学改革论文4篇。主要从事作物高产高效栽培生理与技术研究, 以第一作者发表学术论文9篇, 其中SCI 4篇、EI 1篇, 申请授权国家专利9项, 出版专著6部(主编2部, 参编4部), 参与制定滴灌水稻栽培技术规程1项, 现主持国家自然科学基金等项目4项。



通讯作者简介:王国栋, 硕士, 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 副研究员。研究方向为植物营养学、作物养分资源高效利用、作物与水分互作等。曾主持或参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、中央引导地方发展专项、公益性行业(农业)科研专项、国家科技支撑计划、兵团科技攻关与成果转化计划、兵团科技创新人才计划等各类科研项目16项。曾获2018年兵团科技进步一等奖和2020年兵团科技进步二等奖各1项。先后以第一作者或通讯作者发表学术论文10余篇, 参编出版著作7部; 获授权国家发明专利5项、实用新型专利16项。现为兵团植物营养与肥料学会副秘书长、新疆土壤与肥料学会理事、石河子大学农学院农业与种业专业硕士导师。