

旱作水稻在水分胁迫下的光合生理响应与优化灌溉策略

杨青青¹ 何进宇^{1,2,3,*} 杨海林¹ 李欣欣¹ 温鑫雨¹ 鲍宪远¹ 张登毓¹ 杨佳鹤¹
崔烜玮¹

(¹宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; ²旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心/宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室/宁夏水利科学研究院, 银川 750021; ³中国水利水电科学研究院, 北京 100038; *通信作者, email: hejinyu2017@163.com)

Photosynthetic Physiological Response and Optimized Irrigation Strategy of Dryland Rice Under Water Stress

YANG Qingqing¹, HE Jinyu^{1,2,3,*}, YANG Hailin¹, LI Xinxin¹, WEN Xinyu¹, BAO Xianyuan¹,
ZHANG Dengyu¹, YANG Jiahe¹, CUI Xuanwei¹

(¹School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; ²Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Areas, Ministry of Education/Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River/Ningxia Academy of Water Sciences, Yinchuan 750021, China; ³China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; *Corresponding author, email: hejinyu2017@163.com)

Abstract: 【Objective】 Given the challenges of water scarcity and abundant light resources in the arid northwest region, this study aims to investigate the relationship between farmland soil moisture and crop photosynthesis to improve comprehensive resource utilization. The goal is to establish a complementary soil moisture–light mechanism, thereby promoting sustainable resource utilization. 【Method】 From 2019 to 2021, field experiments were conducted at three typical experimental sites in the Yellow River irrigation area of Ningxia Hui Autonomous Region. Using traditional full irrigation as the control, different drip irrigation treatments with varying water levels were established to analyze the effects of different degrees of water stress on photosynthesis, key growth indicators, and yield components during critical growth stages of rice. 【Results】 Water stress reduced the photosynthetic rate and the transpiration rate of rice and negatively affected yield components, but improved water use efficiency. The maximum net photosynthetic rate occurred at the booting stage, during which that under water stress treatments decreased significantly by 4.5%–26.6% compared to CK. The minimum value appeared at the milk-ripe stage, with a significant decrease of 4.2%–46.9% under water stress compared to CK. The maximum transpiration rate was observed at the booting stage, decreasing by 2.2%–16.8% under water stress relative to CK. The minimum transpiration rate occurred at the seedling stage, decreasing by 7.5%–40.7% under water stress compared to CK. Under water stress, rice plant height, straw height, straw dry weight, filled grain rate, 1000-grain weight, and yield decreased by 2.2%–24.3%, 0.3%–12.6%, 0.8%–11.6%, 0.5%–7.9%, 0.3%–9.2%, and 2.3%–71.5%, respectively, compared to CK. However, water consumption decreased by 33%–46%. Under mild stress, water use efficiency at the yield level increased by 1.9%–21.5% compared to CK, while leaf-level water use efficiency decreased by 2.1%–6.8%. These results indicate that mild water stress can reduce water consumption while maintaining relatively high yield, thereby improving water resource utilization efficiency. Using the TOPSIS model combined with the information weight method and entropy weight method to evaluate different water stress treatments, it was found that maintaining the soil moisture lower limit at 90%–100% of field capacity can optimize yield, quality, and water use efficiency. 【Conclusion】 In arid and semi-arid regions, precisely regulated deficit irrigation strategies should be further promoted to maximize the drought resistance potential of rice. As an effective approach for water-saving agriculture, this can reduce water consumption while maintaining stable grain production.

Keywords: dryland rice; water stress; photosynthesis; physiological characteristics; TOPSIS model

收稿日期: 2025-03-05; 修改稿收到日期: 2025-04-16。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFD1900601-02-04); 宁夏重点研发项目(引才专项)(2018BEB04013); 宁夏自然科学基金资助项目(2022AAC03091); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03); 宁夏大学博士科研启动基金资助项目; 宁夏留学回国人员创新创业项目。

摘要:【目的】在西北干旱地区水资源短缺与光照资源丰富的特殊地缘条件下,为解决如何提高资源综合利用的问题,探讨农田土壤水分与作物光合作用间的关系,旨在形成土壤水分-光照互补机制,从而促进资源的可持续利用。【方法】于2019–2021年,分别在宁夏引黄灌区3个典型试验点开展水稻大田试验。以传统充分灌溉为对照(CK),设置不同水分水平的滴灌处理,分析不同程度水分胁迫对水稻关键生育阶段光合作用、关键生长指标及产量构成的影响。【结果】水分胁迫降低水稻光合速率和蒸腾速率,并对产量构成产生负面影响,但能提高水分利用效率。其中,净光合速率最大值出现在孕穗期,水分胁迫处理较CK显著下降4.5%~26.6%;最小值出现在乳熟期,水分胁迫较CK显著下降4.2%~46.9%。蒸腾速率最大值在孕穗期,水分胁迫处理较CK显著下降2.2%~16.8%;蒸腾速率最小值在苗期,水分胁迫处理较CK显著下降7.5%~40.7%,水分胁迫处理水稻株高、秸秆高度、秸秆干质量、饱籽率、千粒重、产量较CK分别下降2.2%~24.3%、0.3%~12.6%、0.8%~11.6%、0.5%~7.9%、0.3%~9.2%、2.3%~71.5%。但耗水量下降33%~46%,轻度胁迫产量水平上的水分利用效率比CK提高1.9%~21.5%,单叶水平水分利用效率较CK下降2.1%~6.8%。说明轻度水分胁迫能够在降低水分消耗的同时维持较高产量,有助于提高水资源的利用率。利用TOPSIS模型引入信息量权重法和熵权法对不同水分胁迫处理进行评价,发现水分下限占田间持水量的90%~100%可以实现产量、品质和水分利用效率的最优化。【结论】在干旱和半干旱地区,应进一步推广精准调控的非充分灌溉策略,以充分挖掘水稻的抗旱潜力。这是节水型农业的有效手段,减少水资源消耗,同时维持稳定的粮食生产。

关键词:旱作水稻;水分胁迫;光合作用;生理特性;TOPSIS模型

水资源短缺是全球农业生产面临的重要挑战,尤其在干旱和半干旱地区,农业用水需求与有限的水资源供应之间的矛盾日益突出。水稻是全球最重要的粮食作物之一,其生长发育依赖于充足的水分供应。因此,优化水分管理策略,以减少灌溉用水,提高水稻的水分利用效率(WUE)及产量,是干旱区水稻高效种植亟待解决的关键科学问题。

土壤水分影响着植物生理生态特性和生理生化特性,光合作用作为物质积累和能量转换的核心过程,决定着作物的生长发育和产量形成^[1]。水分胁迫通过影响叶片气孔导度、蒸腾速率及光合效率等关键生理参数,进而影响作物的生长发育和产量^[2-3]。众多学者针对水分胁迫对水稻的影响展开了广泛探讨。有研究表明,适度水分胁迫可增强水稻的抗逆性,提高水分利用效率,而严重水分胁迫则会抑制光合作用,降低干物质积累和产量^[4-6]。通过建立水分生产函数模型发现,充足的水分供应虽能带来较高产量,但耗水量大且水分利用效率低;与之相反,轻度水分胁迫既能实现节水,产量也能维持在较高水平^[7]。也有研究显示,节水灌溉有助于提升产量与水分利用效率,但是会降低稻米品质,净光合速率和蒸腾速率也呈现降低趋势^[8-10]。这些研究成果为深入理解水分胁迫与水稻生长关系,以及优化水稻种植的水分管理策略提供了重要参考。此外,目前关于水稻在干旱地区的适应性机制以及不同灌溉策略对其生长影响的系统研究仍然较少,特别是在西北干旱区,适宜的节水灌溉模式尚不明确。

因此,本研究选取代表性水稻品种,在水分胁迫条件下设置5组处理,分析其对水稻光合及生理特性的影响,并探讨对产量和水分利用效率的作用。

本研究采用TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)模型对不同水分管理策略进行综合评价。TOPSIS模型是一种多准则决策方法,通过计算各方案与理想最优解和最差解的相对接近度,实现对不同方案的综合评价和排序,能够综合考虑多指标、动态变化,在水分管理评价中具有较强的适用性。与以往研究不同,本研究采用TOPSIS模型结合信息量权重法和熵权法,对生长指标、光合特性及产量构成进行综合评价,确保评价体系的客观性,避免单一权重分配方法可能导致的偏差,结合试验结果以筛选出最优灌溉策略。本研究结果可为干旱地区水稻节水灌溉提供科学依据,提高水资源利用率和水稻产量,为节水型农业发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究的三个试验点分别是宁夏银川贺兰县洪广镇试验田基地(38°42'N, 106°20'E, 海拔1104.3 m)、宁夏银川平吉堡农八队试验田基地(38°30'N, 106°07'E, 海拔1111.5 m)和宁夏银川西夏区芦花镇试验田基地(38°27'N, 106°01'E, 海拔1095.3 m)(图1)。试验基地位于中国西北干旱地区,雨热不同期,蒸发强烈,气候干燥,年平均气温8.5℃左右,多年平均 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温为3200~3400℃·d,年平均日照时数为2800 h~3000 h,是中国太阳辐射和日照时数最多的地区之一,年平均降水量185 mm左右,年均蒸发量为1300~1800 mm,年均蒸散为700~1000 mm。2019–2021年试验区气温和降水情况如图1所

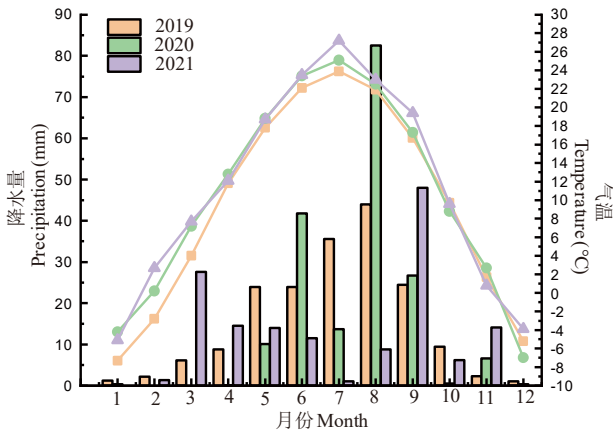


图 1 2019–2021 年宁夏回族自治区银川市水稻全生育期
降水量和气温变化

Fig. 1. Changes in precipitation and temperature
throughout the growth duration of rice in Yinchuan
City, Ningxia Hui Autonomous Region from 2019 to
2021

示，具体土壤理化性质见表 1。

1.2 试验材料

供试验种植水稻品种为富源 4 号(96D10), 属早作粳型早熟品种, 生育期约为 140 d, 每穗平均总粒数为 78.01, 每穗实粒数为 72.4, 千粒重为 24.2 g, 结实率为 92.81%。

1.3 试验设计

试验采用对比设计方法, 以充分灌溉为对照 (Control Check, CK), 设置 5 组不同水分胁迫处理, 分别为水分下限占田间持水量($\theta_{\text{田}}$)的 90%(轻度胁迫)、80%(轻-中度胁迫)、70%(中度胁迫)、60%(中-重度胁迫)和 50%(重度胁迫), 每个处理组设置 1 个试验小区, 面积为 600 m²(20 m×30 m), 重复 3 次。各处理灌水前后测定土壤含水率, 使其保持在设定含水率的上下限之间。每组处理采用起垄种植, 垄

长 25 m, 垄宽 1.4 m, 一垄 4 行, 行间距均为 24 cm。1、2 行中间与 3、4 行中间膜下铺设滴灌带, 采用水稻“开沟-施肥-铺管-覆膜-播种”一体机种植, 穴距为 13 cm, 为保证一定的出苗率, 可调节播种器控制每穴下籽量约为 30 粒。灌溉采用滴灌, 水源来自地下水, 经首部枢纽水泵抽水后过滤器过滤泥沙, 进行滴灌, 采用水肥一体化技术, 进行水肥控制管理。不同处理间进行垂直隔离并设置保护行, 其他管理按常规大田管理进行。

1.4 测定内容及方法

1.4.1 株高

分别于水稻 5 个关键生育阶段(包括苗期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期)在不同处理的试验小区内随机选取 3~5 穴水稻测量株高, 以评估不同程度水分胁迫对水稻生长的影响。首次测量后作标记, 之后对相同标记进行株高观测。

1.4.2 土壤含水率

水稻出苗后, 在水稻行间距根部 10 cm 处打入时域反射仪(TDR)测试管, 深度保证可测地下 80 cm 处数据, 每次灌水前采用仪器测定土壤含水率, 分别读取 0、20、40、60 cm 处数据。如遇降雨, 测量降雨量及雨后土壤含水率变化, 同时根据观测结果调整灌水时间与灌水量。

1.4.3 土壤理化性质

在试验地耕作前测定土壤养分, 以明确初始土壤肥力水平, 保持试验的均一性以及排除土壤肥力可能对试验结果造成的影响。按五点取样法分别采集 0~20、20~40、40~60 cm 等 3 个层次的土壤, 土样混合后按四分法留 1 kg, 经风干、除杂、研磨后用于养分测定。土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量、全盐量、田间持水量、土壤容重和 pH 值分别使用碱解扩散法、0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼

表 1 供试土壤的主要理化性质

Table 1. Main physicochemical properties of tested soils (0-60 cm)

试验点 Experimental sites	有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	有效磷含量 Available phosphorus content(mg·kg ⁻¹)	全盐量 Total salt content (g·kg ⁻¹)	碱解氮含量 Alkali-hydrolysable nitrogen content (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量 Available potassium content (mg·kg ⁻¹)	田间持水量 Field capacity (%)	土壤容重 Bulk density of soil(g·cm ⁻³)	pH 值 pH value
宁夏银川市洪广镇 Hongguang Town, Yinchuan City, Ningxia	12.6	9.3	0.092	53.0	114	25.2	1.51	8.48
宁夏银川市平吉堡 Pingjibao, Yinchuan City, Ningxia	12.2	9.8	0.098	55.0	111	25.7	1.49	8.43
宁夏银川市芦花镇 Luhua Town, Yinchuan City, Ningxia	12.4	9.5	0.095	51.0	109	25.4	1.53	8.41

锑抗比色法、乙酸铵浸提-火焰光度法、重铬酸钾容量法-硫酸氧化法、土壤水浸提法、称重法、环刀法和土壤水比 1:2.5 浸提-玻璃电极法进行测定^[11]。

1.4.4 光合速率与蒸腾速率

用 Li-Cor-6400 型便携式光合作用系统在关键生育阶段选取样本,在晴天 9:00–17:00 测定净光合速率和蒸腾速率,获取瞬时光合参数。在测量过程中,空气湿度、温度、CO₂ 浓度不设人工控制,全程在自然环境下进行。设置相应参数后,通过测量光合速率、蒸腾速率、气温、相对湿度等参数来评估旱作水稻的光合作用响应情况。

1.4.5 水稻产量及产量构成因素

水稻成熟后,每个处理小区内分 3 个不同位置各采 3 组样品,自然晾干后,进行考种和产量测定,产量=单位面积穗数×平均每穗粒数×结实率×千粒重/1000。

水稻产量的构成因素包括单位面积穗数、每粒穗数、结实率、千粒重四个因素。

1.4.6 耗水量测定

试验期间耗水量(Crop Water Consumption, ET)采用土壤水量平衡法计算,公式如下:

$$ET=P+I-R-D\pm\Delta S \quad (1)$$

其中, P 为降水量(mm), I 为灌溉量(mm), R 为地表径流(mm), D 为深层渗漏(mm), ΔS 为土壤水储量变化量(mm)。土壤水储量变化(ΔS)由土壤剖面 0~100 cm 含水量变化计算,使用土壤水分测定仪 TDR,在每次灌溉前后测定 0~100 cm 不同土层的含水率,并计算其变化量。

1.4.7 水分利用效率测定

(1) 水分利用效率也称水分生产率,是表示作物水分吸收利用过程效率的一个指标。在农业节水灌溉的发展历程中,水分生产效率是衡量决策是否可行的条件之一。公式如下:

$$WUE_L=Y/ET \quad (2)$$

式中,单位为 kg/m³, Y 为产量, ET 为实际耗水量。就耗水量而言,在农业节水研究中又分为三个层次:①作物总的耗水量(也称农业用水),即作物的实际蒸散量;②灌溉水量,对于节水灌溉研究意义重大;③降雨量,可以用来计算天然降水的利用效率,是雨养农业中的重要指标。

(2) 单叶水平水分利用效率(又称生理利用效率或蒸腾效率),指的是单位水量通过叶片蒸腾散失时,光合作用所产生的有机质量,是水分利用效率的理论值,计算公式如下:

$$WUE_L = \frac{P}{T} = \frac{\Delta_c D_c (r_a + r_s)}{\Delta_e D_E (r_a + r_s + r_i)} \quad (3)$$

式中,单位为 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, P 为叶片净光合速率, T 为叶片蒸腾速率; Δ_e 和 Δ_c 分别表示叶片内与大气间的水汽浓度差和大气与叶片间的 CO₂ 浓度差; D_c 和 D_E 分别为 CO₂ 和水汽的分子扩散系数; r_a 为气体扩散边界层阻抗, r_s 为气孔阻抗, r_i 为 CO₂ 扩散的叶肉阻抗。

1.4.8 调亏灌溉评价方法

TOPSIS 模型:通过各指标权重 W_i 和标准矩阵 X'_{ij} 的乘积得到加权后标准化矩阵,对加权后标准化矩阵计算求得各指标的正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- ,并得出各处理到正、负理想解的距离 d_i^+ 、 d_i^- ,最终得出各处理的相对贴近度 C_i , C_i 值越大表明整体水平越优。计算过程如公式如下所示。

$$Z^+ = (\max\{Z_{11}, Z_{21}, \dots, Z_{n1}\}, \max\{Z_{12}, Z_{22}, \dots, Z_{n2}\}, \dots, \max\{Z_{1m}, Z_{2m}, \dots, Z_{nm}\}) \quad (4)$$

$$Z^- = (\min\{Z_{11}, Z_{21}, \dots, Z_{n1}\}, \min\{Z_{12}, Z_{22}, \dots, Z_{n2}\}, \dots, \min\{Z_{1m}, Z_{2m}, \dots, Z_{nm}\}) \quad (5)$$

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_i^+ - z_{ij})^2} \quad (6)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_i^- - z_{ij})^2} \quad (7)$$

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (8)$$

式中, C_i 为综合评价指数, $0 \leq C_i \leq 1$; d_i^- 、 d_i^+ 为正/负理想解截距; Z^+ 、 Z^- 为正/负理想解向量。 C_i 值越接近 1, 表示第 i 个方案越接近最优水平, C_i 值越小, 表示第 i 个方案水平越差。

1) 熵权法是一种基于信息熵原理的客观赋权方法,可以用熵值来判断该指标的离散程度。根据评价指标数 n 和处理方案数 m , 构建评价矩阵 $X_{ij}=[x_{ij}]_{n \times m}$, 并进行数据标准化处理,得到标准化矩阵 $X'_{ij}=[x'_{ij}]_{n \times m}$ 。数据标准化计算方法如公式 9)、10) 所示。

$$X'_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (9)$$

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (10)$$

式中, X'_{ij} 为各评价指标经标准化处理之后得到的值; $i=1, 2, \dots, n$ (n 为评价指标数), $j=1, 2, \dots, m$ (m 为处理数)。

指标归一化处理, 计算标准化矩阵的第 i 项指标占第 j 个处理的特征比重 P_{ij} 。

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{j=1}^m x'_{ij}} \quad (11)$$

计算第 i 个评价指标的信息熵 e_i 。

$$e_i = \frac{-\sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln n}$$

12)

计算各指标权重 W_i 。

$$W_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)}$$

13)

(2)信息量权重法，也称为变异系数法，是一种客观赋权法，其原理是利用数据的变异系数进行权重赋值，变异系数越大，说明携带的信息量越大，相应的权重也越大。计算公式如下：

$$Cv = \frac{s}{\bar{y}} \times 100\% = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1}} \times 100\%$$

14)

$$W = \frac{Cv_i}{\sum_{i=1}^n Cv_i}$$

15)

式中， s 为样本标准差； $\bar{y}$ 为样本平均值； n 为样本个数； Cv_i 为第 i 个指标变异系数。

1.5 数据处理方法

实验数据采用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 25.0 进行数据处理及分析，采用 Origin 2022 绘图，并结合 TOPSIS 模型进行多指标综合评价，以确定

最优水分管理方案。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对水稻株高的影响

通过分析不同年份水分胁迫处理对水稻株高的影响可以看出(表 2)，株高表现为 CK>M1>M2>M3>M4>M5。在 2019 年 CK 的平均株高比各处理分别高 4.8%、9.0%、14.0%、19.5%、24.3%；在 2020 年，CK 的水稻平均高度比各处理分别高 3.7%、11.3%、13.0%、17.3%、19.6%；在 2021 年，CK 的水稻平均高度比各处理分别高 2.2%、4.9%、9.4%、14.8%、20.0%。试验结果表明，在水稻各个生育阶段，随着水分胁迫程度的加剧，水稻的株高均呈现显著递减趋势($P<0.001$)[2019 年 6 月初期各处理间无显著差异($P>0.05$)]。

2.2 全生育期水分胁迫对水稻光合作用的响应

2.2.1 净光合速率

不同水分胁迫处理对水稻的净光合速率日变

表 2 2019–2021 年不同水分胁迫下水稻株高
Table 2. Rice plant height under different water treatments in 2019–2021

处理 Treatment	2019-06-10	2019-06-30	2019-07-20	2019-08-10	2019-08-30	2019-09-20
CK	10.19±0.13 a	20.38±0.16 a	45.88±0.26 a	73.43±0.21 a	93.83±0.21 a	99.90±0.20 a
M1	10.13±0.13 a	19.35±0.15 b	44.83±0.21 b	71.33±0.21 b	87.72±0.20 b	93.80±0.20 b
M2	10.11±0.09 a	18.35±0.15 c	43.83±0.21 c	67.27±0.25 c	83.62±0.20 c	88.77±0.25 c
M3	10.15±0.10 a	17.35±0.15 d	40.77±0.15 d	63.22±0.20 d	77.52±0.20 d	84.62±0.20 d
M4	10.10±0.10 a	16.27±0.15 e	38.72±0.20 e	61.20±0.20 e	72.40±0.20 e	77.50±0.20 e
M5	10.13±0.08 a	16.27±0.15 e	36.70±0.20 f	58.12±0.20 f	65.22±0.20 f	72.40±0.20 f
F 值 F value	0.288	361.452	934.034	2367.379	7975.176	7095.524
P 值 P value	0.911	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
处理 Treatment	2020-06-14	2020-07-02	2020-07-14	2020-08-03	2020-08-13	2020-09-03
CK	32.67±0.19 b	49.05±0.18 a	69.25±0.20 a	78.38±0.21 a	81.12±0.16 a	98.42±0.16 a
M1	33.45±0.18 a	45.90±0.16 b	67.92±0.16 b	73.72±0.16 b	77.44±0.17 b	93.93±0.14 b
M2	32.85±0.19 b	45.08±0.21 c	61.82±0.16 c	64.07±0.21 c	69.03±0.17 c	86.52±0.16 c
M3	30.97±0.25 c	42.85±0.20 d	59.83±0.21 d	63.77±0.21 c	67.32±0.16 d	84.37±0.21 d
M4	30.22±0.16 d	40.12±0.16 e	57.92±0.16 e	60.37±0.21 d	65.62±0.16 e	80.17±0.21 e
M5	27.63±0.17 e	37.77±0.21 f	56.98±0.21 f	59.05±0.20 e	64.42±0.16 f	78.83±0.17 f
F 值 F value	255.362	942.845	1531.445	3004.815	3382.897	1369.774
P 值 P value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
处理 Treatment	2021-06-20	2021-07-10	2021-07-30	2021-08-10	2021-08-20	2021-09-01
CK	35.55±0.18 a	46.73±0.17 a	60.98±0.21 a	81.28±0.21 a	90.48±0.21 a	96.57±0.21 a
M1	35.57±0.16 a	45.75±0.19 b	59.97±0.21 b	79.27±0.21 b	87.42±0.16 b	94.52±0.16 b
M2	35.53±0.17 a	43.73±0.17 c	56.92±0.16 c	76.22±0.16 c	85.42±0.16 c	93.52±0.16 c
M3	35.58±0.17 a	41.67±0.21 d	54.92±0.16 d	70.12±0.16 d	81.32±0.16 d	89.42±0.16 d
M4	33.53±0.17 b	39.63±0.17 e	51.82±0.16 e	66.03±0.17 e	76.23±0.17 e	83.33±0.17 e
M5	32.53±0.17 c	37.63±0.17 f	46.73±0.17 f	62.02±0.16 f	71.13±0.17 f	79.23±0.17 f
F 值 F value	123.852	779.314	1736.832	3589.577	3466.298	3099.944
P 值 P value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

CK 为对照(充分灌溉)，M1、M2、M3、M4 和 M5 指水分下限占田间持水量(θ_m)的 90%、80%、70%、60%和 50%。下同。

CK refers to the control treatment with full irrigation. M1, M2, M3, M4, and M5 represent the treatments where the lower limit of soil moisture accounts for 90%, 80%, 70%, 60%, and 50% of the field capacity, respectively. The same applies below.

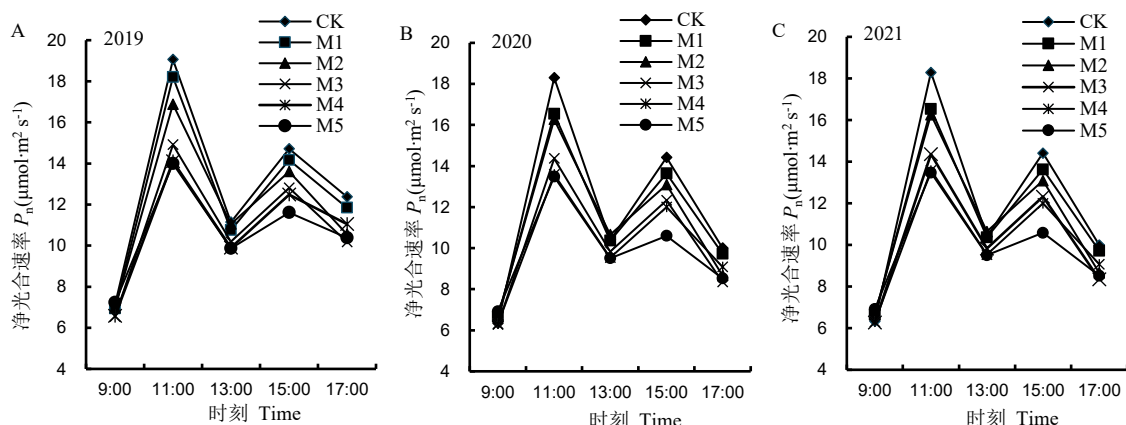
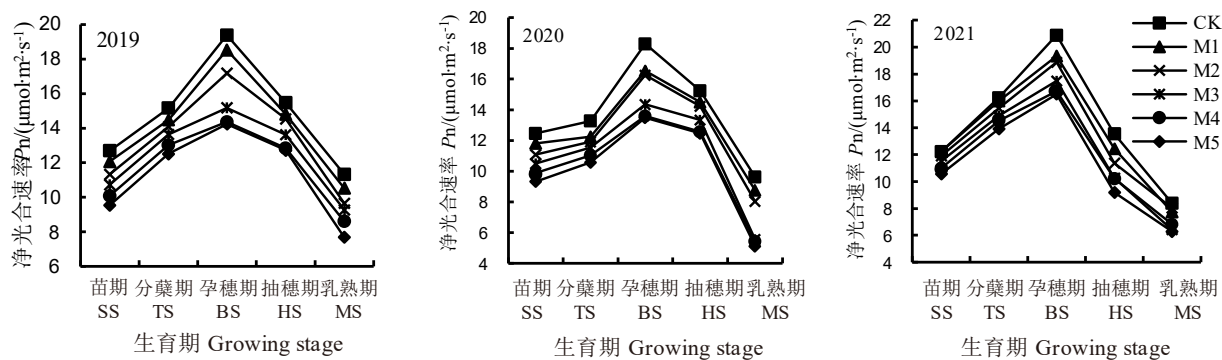


图2 2019–2021年水分胁迫下水稻净光合速率日变化

Fig. 2. Daily variation of rice photosynthetic rate under water stress from 2019 to 2021



SS, Seedling stage; TS, Tillering stage; BS, Booting stage; HS, Heading stage; MS, Milk ripening stage. The same below.

图3 2019–2021年水分胁迫下水稻净光合速率

Fig. 3. Net photosynthetic rate of rice under water stress from 2019 to 2021

化影响(图2), 均呈现“双峰”型, 2个峰值分别出现在早上 11:00 和下午 15:00 左右, 上午的峰值大于下午, 并且 2 个峰值之间存在显著差异, 中午 13:00 左右出现明显的光合“午休”现象。净光合速率日均值随着土壤水分含量的降低而降低, 表现为 $CK > M1 > M2 > M3 > M4 > M5$, 土壤水分对水稻净光合速率影响较大。

2019–2021 年际间的变化规律基本一致(图3), 水稻的净光合速率随着水分胁迫的加剧显著降低, 净光合速率表现为 $CK > M1 > M2 > M3 > M4 > M5$, 不同处理对比发现, 在水分胁迫条件下光合速率降速较快, 幅度较大。净光合速率最大值都出现在孕穗期, 最小值都出现在乳熟期, M5 净光合速率在孕穗期较 CK 显著降低, 三年降幅分别为 26.6%、26.3%和 21.0%, 乳熟期净光合速率也显著降低, 降幅分别为 32.2%、46.9%和 25.1%。

2.2.2 蒸腾速率

不同水分胁迫处理对水稻蒸腾速率的日均值变化呈现“单峰”型(图4), 土壤水分对水稻的蒸腾速

率在不同时间段的变化速率也有一定影响, 表现为 $CK > M1 > M2 > M3 > M4 > M5$, 随着土壤含水量降低, 水稻蒸腾速率的日变化表现为逐渐降低趋势。

2019–2021 年际间的滴灌水稻水分试验中, 变化规律基本一致(图5), 所有处理组蒸腾速率先升高后下降, 最大值都在孕穗期, 蒸腾速率最小值都在苗期, 蒸腾速率均表现为 $CK > M1 > M2 > M3 > M4 > M5$ 。M5 蒸腾速率在孕穗期较 CK 显著降低, 三年降幅分别为 14.4%、12.3%和 16.8%, 苗期也显著降低, 分别为 12.9%、12.9%和 40.7%。随着水分胁迫的加剧, 水稻蒸腾速率都在逐渐减小。在水稻生长周期内, 蒸腾速率都是先增大后降低, 充分灌溉组在水稻全发育期内的蒸腾速率都大于水分胁迫组。2021 年蒸腾速率减幅比 2019 年和 2020 年大, 可能原因是 2021 年相比前两年试验, 耗水量较大, 所以 2021 年正常灌溉组蒸腾速率远大于 2019 年和 2020 年。

2.3 水分胁迫对水稻产量及产量构成因素的影响

2.3.1 水分胁迫对水稻产量的影响

不同水分胁迫对水稻产量的影响规律见图 6。

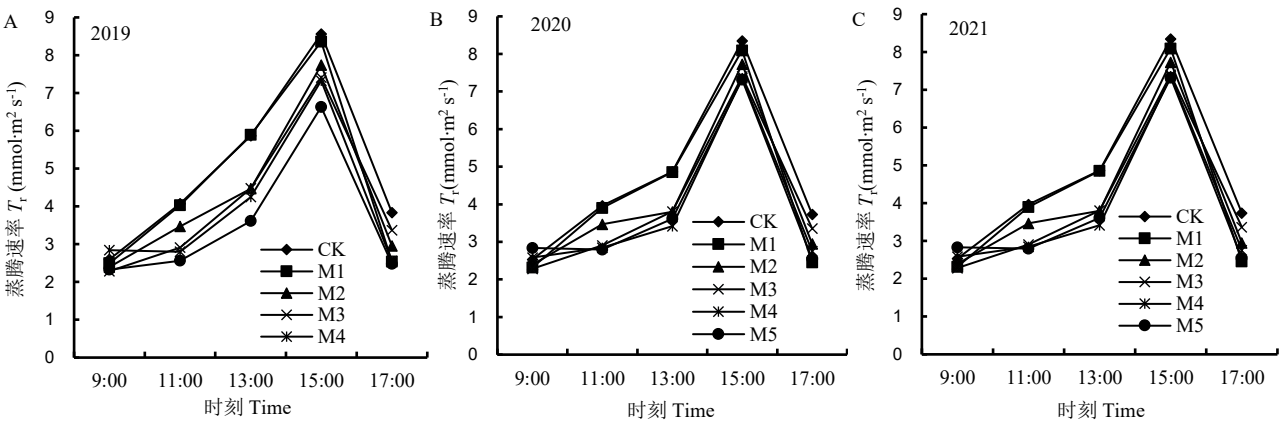


图 4 2019–2021 年水分胁迫下水稻蒸腾速率日变化
Fig. 4. Daily variation of transpiration rate of rice under water stress from 2019 to 2021

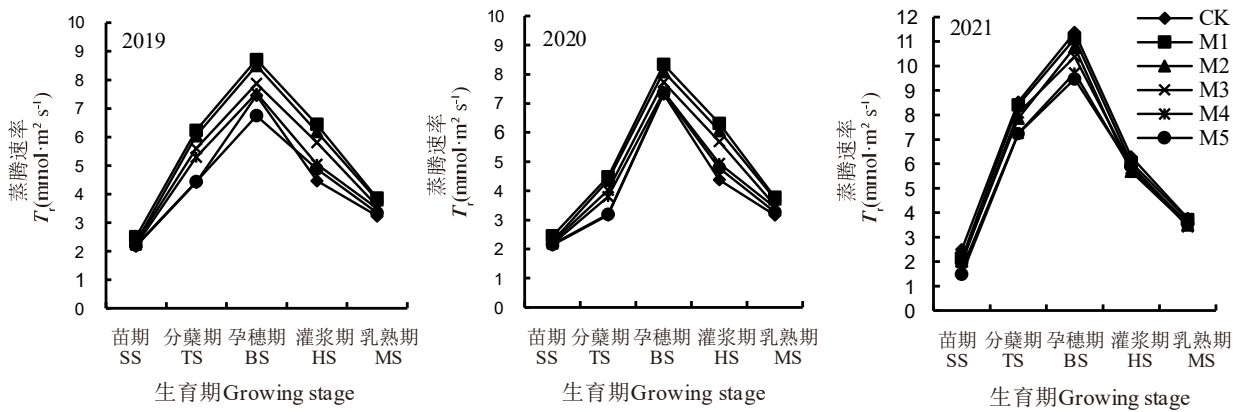


图 5 2019–2021 年水分胁迫下水稻蒸腾速率
Fig. 5. Transpiration rate of rice under water stress from 2019 to 2021

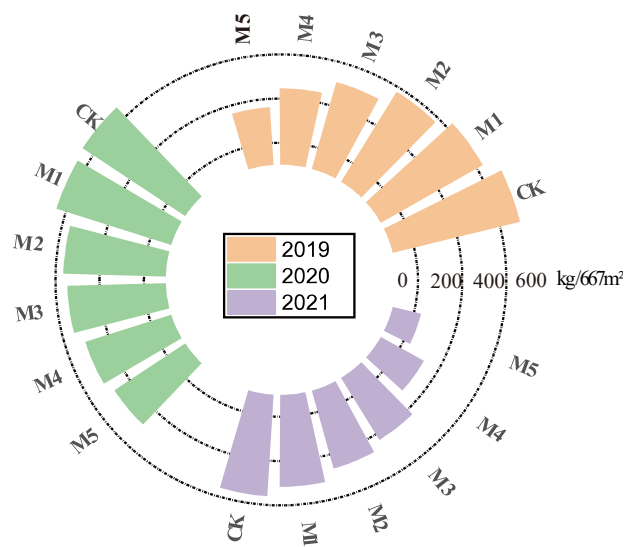


图 6 2019–2021 年水分胁迫下水稻产量
Fig. 6. Rice grain yield under water stress from 2019 to 2021

在 2019 年,CK 的平均产量比各处理分别高 10.6%、19.3%、31.0%、41.6%、55.8%; 在 2020 年,CK 的平均产量比各处理分别高 2.3%、16.7%、19.9%、

26.8%、31.0%; 在 2021 年,CK 的平均产量比各处理分别高 9.5%、20.6%、28.3%、51.7%、71.5%。CK 的产量为最大值,M5 的产量为最小值,由此可知,水分胁迫会对旱作水稻的生长和发育产生显著的负面影响,随着水分胁迫程度的加剧,旱作水稻的产量依次减小。

2.3.2 水分胁迫对水稻产量构成因素的影响

2.3.2.1 秸秆高度

不同水分胁迫对秸秆高度的影响规律见图 7。在 2019 年,各处理较 CK 分别降低了 3.9%、5.9%、7.3%、8.6%、11.9%; 在 2020 年,各处理较 CK 分别降低了 1.5%、3.8%、4.9%、5.0%、7.6%; 在 2021 年,各处理较 CK 分别降低了 0.3%、0.8%、3.1%、6.6%、12.6%。在 2019 年至 2021 年,随着水分胁迫的加剧,秸秆高度会呈现出减小的趋势。

2.3.2.2 秸秆干质量

不同水分胁迫对秸秆干质量的影响规律见图 8。在 2019 年,各处理较 CK 秸秆干质量分别降低 0.8%、2.8%、3.8%、4.1%、4.4%; 在 2020 年,各处理较 CK 秸秆干质量分别降低 1.8%、3.8%、4.8%、5.1%、

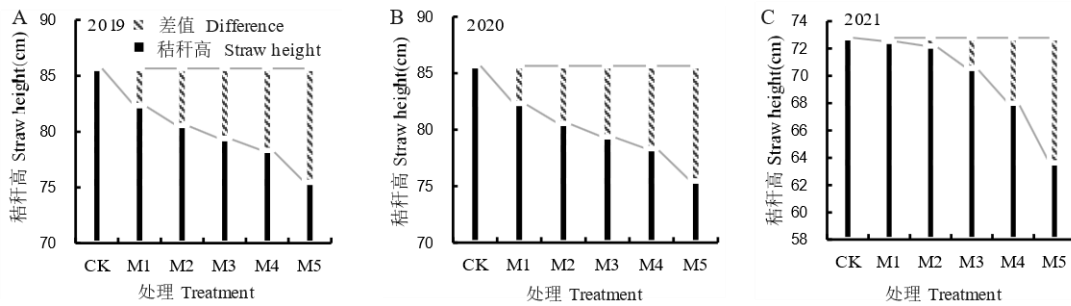


图 7 2019–2021 年水分胁迫下水稻秸秆高度
Fig. 7. Straw height of rice under water stress from 2019 to 2021

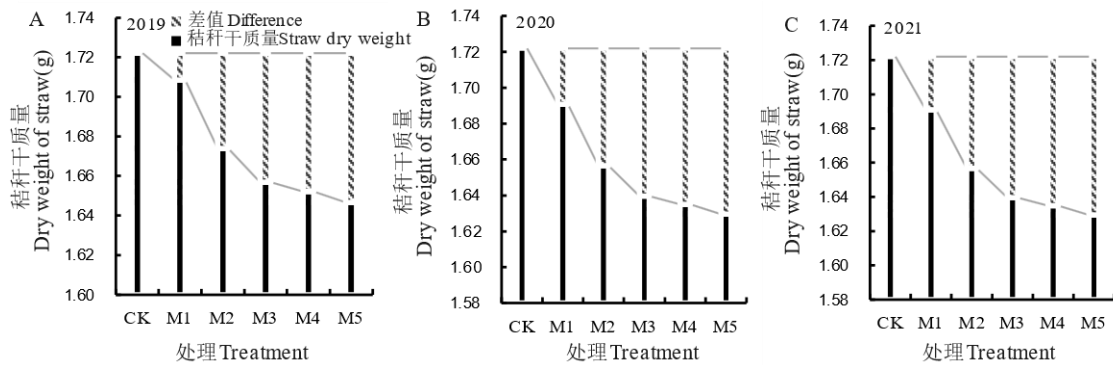


图 8 2019–2021 年水分胁迫下水稻秸秆干质量
Fig. 8. Straw dry weight of rice under water stress from 2019 to 2021

5.4%；在 2021 年，各处理较 CK 秸秆干质量分别降低 3.3%、6.1%、9.4%、11.0%、11.6%。结果表明，水分胁迫会影响秸秆干质量，水分胁迫越严重，秸秆干质量越小。作物生长发育阶段，面临水分胁迫时，植物的各项代谢速率都会减缓，导致生长速度变慢。

2.3.2.3 饱籽率

不同水分胁迫对水稻饱籽率的影响规律见图 9。在 2019 年，各处理与 CK 的饱籽率相比分别降低 1.2%、3.6%、5.2%、5.6%、7.4%；在 2020 年，各

处理与 CK 的饱籽率相比分别降低 1.8%、4.1%、5.8%、6.1%、7.9%；在 2021 年，各处理与 CK 的饱籽率相比分别降低 0.5%、1.1%、2.3%、2.6%、3.1%。CK 的饱籽率最高，重度水分胁迫组 M5 的饱籽率最低，随着水分胁迫的加剧，水稻饱籽率呈现出递减的趋势。

2.3.2.4 千粒重

不同水分胁迫对籽粒千粒重的影响规律见图 10。在 2019 年，各处理较 CK 的千粒重分别降低了 0.3%、0.4%、0.9%、1.1%、1.1%；在 2020 年，各

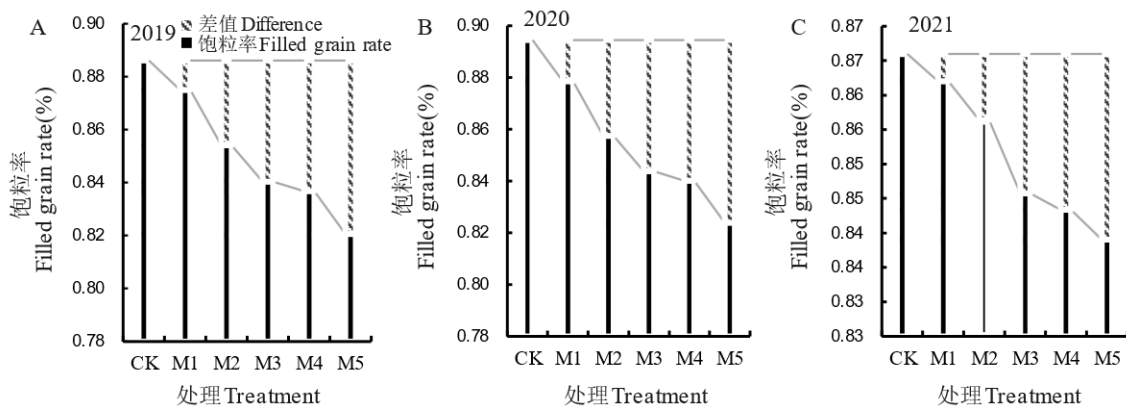


图 9 2019–2021 年水分胁迫下水稻饱籽率
Fig. 9. Filled grain rate of rice under water stress from 2019 to 2021

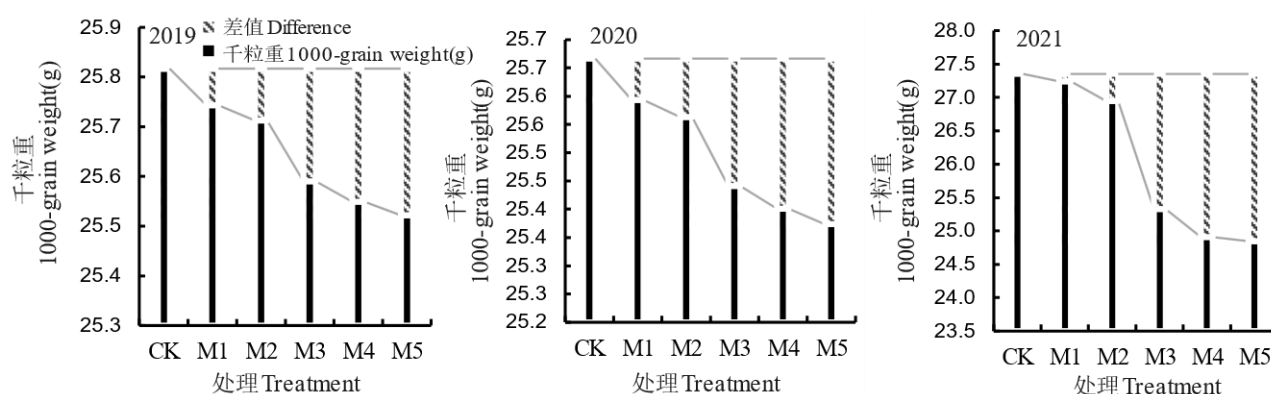


图 10 2019–2021 年水分胁迫下水稻千粒重

Fig. 10. Thousand-grain weight of rice under water stress from 2019 to 2021

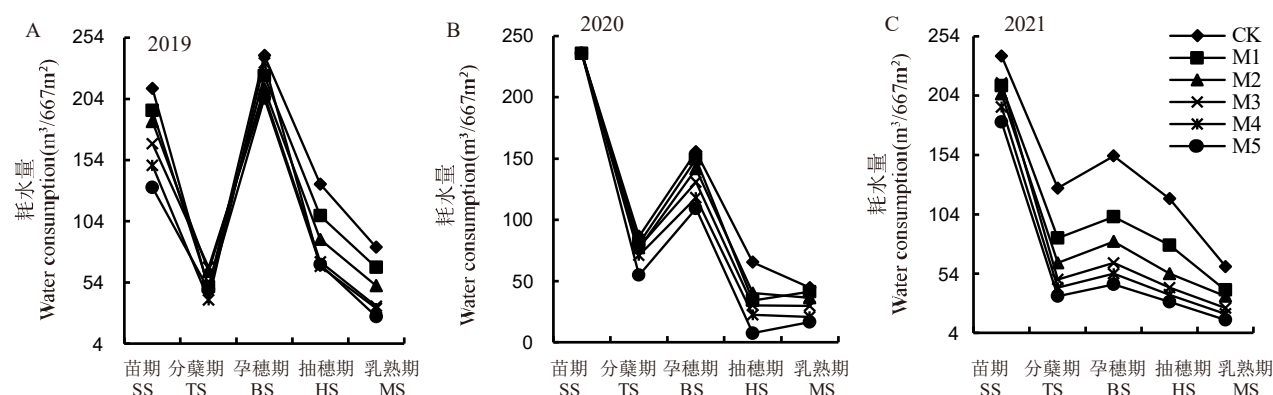


图 11 2019–2021 年水分胁迫下水稻耗水量

Fig. 11. Water consumption of rice under water stress from 2019 to 2021

处理较 CK 的千粒重分别降低了 0.3%、0.4%、0.9%、1.0%、1.1%；在 2021 年，各处理较 CK 的千粒重分别降低了 0.4%、1.5%、7.4%、8.9%、9.2%。由数据可以得出，水分胁迫对千粒重的影响较小，随着水分胁迫加剧，千粒重有减小的趋势，但是幅度较小。

2.4 水稻不同时期的需水特性

不同水分胁迫对水稻耗水量的影响规律见图 11。在 3 年滴灌水稻水分试验中，实验结果一致，耗水量均表现为 CK 至 M5 水分胁迫程度加剧，水量消耗递减，2019 年全生育期其他处理耗水量较 CK 显著降低 14.1%、21.2%、35.3%、49.4%、63.5%；2020 年全生育期其他处理耗水量较 CK 显著降低 7.8%、9.6%、14.2%、20.3%、27.8%；2021 年全生育期其他处理耗水量较 CK 显著降低 22.8%、32.8%、36.8%、44.4%、50.4%。耗水量较大的阶段是苗期和拔节孕穗期，乳熟期耗水量最少，在水稻生长发育阶段中，苗期和拔节孕穗期非常关键。

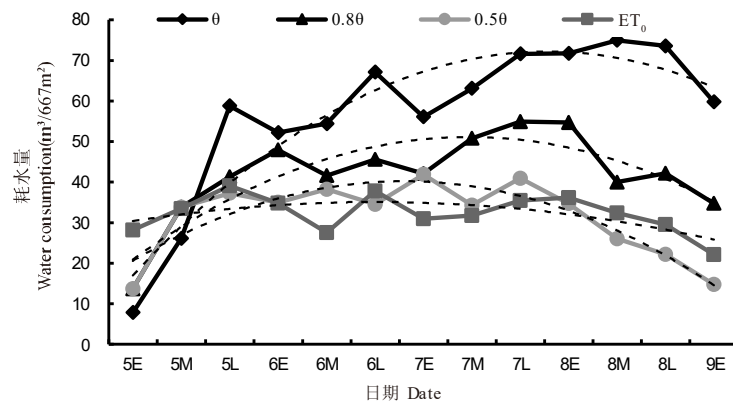
在 2021 年滴灌水稻水分试验中，分析了不同田间持水量时旱作水稻耗水量，并利用趋势线生成

不同田间持水量的函数表达式。耗水量随生育进程的变化规律用二次多项式函数拟合，拟合度较高(图 12)，随着水分胁迫的加剧，耗水量也在递减，同 2019 年和 2020 年试验结论相吻合，耗水量较大的两个阶段是苗期和拔节孕穗期。

2.5 水分胁迫对水稻水分利用效率的影响

不同水分胁迫对水稻产量水分利用效率的影响规律见图 13。2019 年，产量水分利用效率表现为 M1>CK>M2>M3>M4>M5，轻度水分胁迫组 M1 比 CK 上升 1.9%，重度水分胁迫组 M5 比 CK 下降 27.6%。2020 年，产量水分利用效率表现为 M1>CK>M5>M3>M4>M2，轻度水分胁迫组 M1 比 CK 增加 6.0%，重度水分胁迫组 M5 比 CK 下降 4.4%。2021 年，产量水分利用效率表现为 M1>M2>M3>CK>M4>M5，轻度水分胁迫组 M1 比 CK 增加 21.5%，重度水分胁迫组 M5 比 CK 下降 35.5%。由此可以得出，轻度水分胁迫会提高旱作水稻的水分利用效率，使水分利用效率达到最大值。

不同水分胁迫对水稻水分利用效率的影响规



θ: 田间持水量; 0.8θ: 田间持水量的 80%; 0.5θ: 田间持水量的 50%; ET_0 : 潜在腾发量横坐标日期缩写中, 数字代表月份, 字母代表旬, 即 E 代表上旬, M 代表中旬, L 代表下旬。例如, 5E 表示 5 月上旬, 6M 表示 6 月中旬。
θ, Field capacity (FC); 0.8θ, 80% of field capacity; 0.5θ, 50% of field capacity; ET_0 , Potential evapotranspiration (PET); In the date abbreviations on the abscissa, numerals denote months and letters denote ten-day periods, i.e. E = Early, M = Mid, L = Late. For example, 5E denotes the early ten-day period of May, and 6M denotes the mid ten-day period of June.

图 12 2021 年滴灌水稻水分试验耗水量
Fig. 12. Water consumption of rice in drip irrigation experiments in 2021

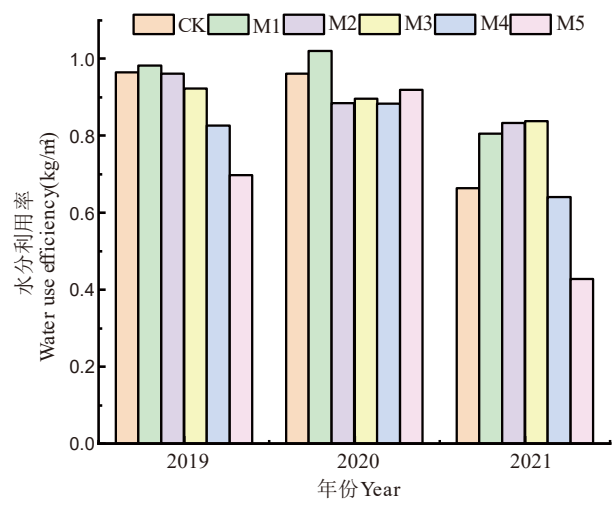


图 13 滴灌水稻水分试验水分利用效率
Fig. 13. Water use efficiency of rice in drip irrigation experiments

律见图 14。2019 年单叶水平水分利用效率表现为 $CK>M2>M1>M4>M3>M5$, 轻度水分胁迫组 M1 比 CK 下降 2.1%, 重度水分胁迫组 M5 比 CK 下降 14.2%。2020 年单叶水平水分利用效率表现为 $CK>M2>M1>M3>M4>M5$, 轻度水分胁迫组 M1 比 CK 下降 6.8%, 重度水分胁迫组 M5 比 CK 下降 16.0%。2021 年单叶水平水分利用效率表现为 $CK>M2>M5>M1>M4>M3$, 轻度水分胁迫组 M1 比 CK 下降 5.4%, 重度水分胁迫组 M5 比 CK 下降 5.1%。结果显示, 相对于对照组, 水分胁迫下旱作水稻的蒸腾速率显著下降, 而单叶水平水分利用效率处于较高水平。

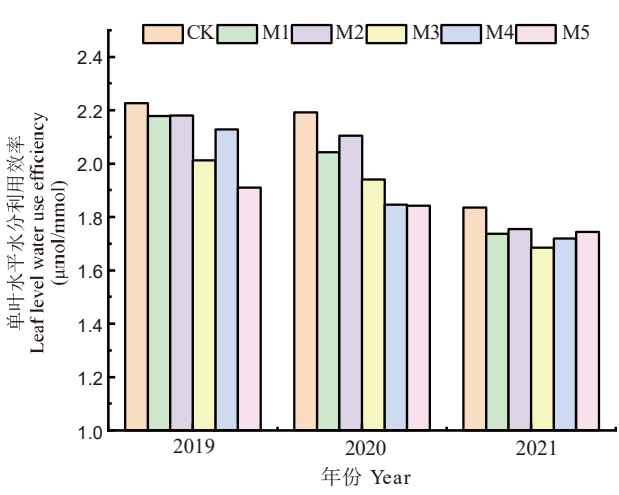


图 14 滴灌水稻水分试验单叶水平水分利用效率
Fig. 14. Water use efficiency of rice at single-leaf level in drip-irrigation experiments

2.6 基于 TOPSIS 模型综合评价

本研究选取水稻株高、产量、水分利用效率、单叶水平水分利用效率、耗水量、蒸腾速率、秸秆干重、饱粒率、千粒重、秸秆高、净光合速率等 11 项关键指标, 通过信息量法和熵权法对各指标计算其权重, 再通过 TOPSIS 模型得到相似贴进度, 进行评价选优。

基于信息量法确定的水稻各项指标权重从大到小排列依次为产量、耗水量、产量水分利用效率、净光合速率、株高、蒸腾速率、单叶水平水分利用效率、秸秆高、秸秆干质量、饱籽率、千粒重。熵权法确定的权重依次为秸秆干质量、千粒重、净光

表 3 2019–2021 年各水分胁迫处理方案评价相对贴近度
Table 3. Relative closeness of evaluation for each treatment plan from 2019 to 2021

年份 Year	处理 Treatment	正理想解距离 Distance to positive ideal solution D ⁺		负理想解距离 Distance to negative ideal solution D ⁻		相对接近度 Relative closeness C		排序结果 Ranking results	
		信息量法 Information value method	熵权法 Entropy weight method	信息量法 Information value method	熵权法 Entropy weight method	信息量法 Information value method	熵权法 Entropy weight method	信息量法 Information value method	熵权法 Entropy weight method
2019	CK	16.512	11.715	34.682	29.094	0.677	0.713	2	1
	M1	13.753	11.275	29.680	23.796	0.683	0.679	1	2
	M2	14.551	14.861	25.178	17.736	0.634	0.544	3	3
	M3	20.539	22.017	19.910	11.667	0.492	0.346	4	4
	M4	26.457	25.053	16.157	10.644	0.379	0.298	5	5
2020	M5	34.682	29.094	16.512	11.715	0.323	0.287	6	6
	CK	17.267	10.776	31.231	27.662	0.644	0.720	2	1
	M1	14.456	10.430	26.256	23.832	0.645	0.696	1	2
	M2	19.970	20.029	17.622	14.655	0.469	0.423	3	3
	M3	24.260	24.157	13.984	9.492	0.366	0.282	4	4
2021	M4	29.423	27.942	13.675	8.273	0.317	0.228	6	6
	M5	31.435	28.415	17.072	9.692	0.352	0.254	5	5
	CK	18.316	12.330	36.564	28.635	0.666	0.699	3	1
	M1	13.406	12.682	34.764	24.014	0.722	0.654	1	2
	M2	12.494	12.866	32.043	20.744	0.719	0.617	2	3
	M3	15.068	21.574	28.985	13.286	0.658	0.381	4	4
	M4	26.490	24.905	19.615	11.974	0.425	0.325	5	5
	M5	37.792	27.894	18.163	12.713	0.325	0.313	6	6

合速率、水分利用效率、单叶水平水分利用效率、蒸腾速率、饱籽率、株高、产量、耗水量、秸秆高。两种权重法确定的权重存在差异，可能是由于信息量权重法侧重于指标的信息量大小，而熵权法则关注指标值的变异程度，权重的不一致性可能对综合评价结果产生影响。

将各评价指标的权重代入 TOPSIS 模型中，通过计算正理想解距离和负理想解距离及接近度获得不同调亏灌溉制度的排序情况(表 3)，在 3 年的试验中，信息量法计算的不同水分处理相对接近度结果显示 M1 最优，表明水分下限占田间持水量 90%的处理组可以使得水稻各项指标达到最优，而 CK 仅次于 M1。随着水分胁迫程度的加剧，相对接近度越小，表明中度和重度水分胁迫会影响水稻的生长发育和产量。熵权法得到结果为 CK>M1>M2>M3>M4>M5，但是 M1 的相对接近度与 CK 相差不大，表明充分灌溉可使水稻各项指标达到最优，而水分下限占田间持水量 90%的处理也可以在减少灌溉水的情况下使水稻生长、生理状态和产量保持较高水平。结合信息量法和熵权法联合 TOPSIS 模型，得到水分下限占田间持水量 90%~100%均可

使水稻得到较高产量，而在节水高效情况下，推荐使用相对含水率为 90%田间持水量，节水但是不减产。

3 讨论

3.1 不同水分胁迫对水稻株高的影响

水分是作物生长发育的最大限制因素，土壤水分供给失调会导致水分胁迫，从而影响水作物产量、光合生理和形态^[12]。研究表明，水分胁迫对水稻株高具有显著影响，表现为水分充足时株高最高，而随着水分供应的减少，株高呈现递减趋势。其中，秸秆高度的降幅受到水分胁迫的强度、持续时间及水稻品种特性的影响。然而，水分充分处理的株高增长速率较慢，胁迫处理的增长速率较快。这可能是由于充分灌溉条件下水稻分蘖较多，光合产物的分配较为分散，株高增长受限。于靖等^[13]研究发现，水分胁迫对水稻株高的影响贯穿于整个生育期，分蘖期进行水分胁迫对水稻株高的生长有一定的影响。在水稻生长过程中，分蘖期是水稻生长的关键时期，此时的水分直接影响作物的分蘖和株高，充

分灌溉处理在分蘖期到拔节期使株高增长的速率快于前期胁迫的处理,故此时株高与前期胁迫的处理相差不多,然而水分胁迫组在分蘖期没有充足水分灌溉导致后期株高低于CK组。另外,各处理的株高随生育期持续增加,成熟期达到最大值,这与胡衍平等^[14]的研究结果一致,同时He等^[15]也研究表明100%田间持水率能够使得水稻株高达到最大值,进一步佐证了充分供水对水稻植株生长的促进作用。

3.2 不同水分胁迫对水稻光合作用的影响

光合作用是作物生长发育和产量形成的生理基础和作物生产力的决定性因素^[16],研究表明,作物90%~95%的干物质由光合作用提供,水分作为光合作用的原料之一,对作物的光合生理过程有重要影响^[17]。本研究表明,轻度胁迫对早期光合速率和产量的影响较小,但中度和重度胁迫对关键生育阶段的光合作用影响显著,主要由于土壤水分供应的减少,根系吸水能力下降,使光合作用所需的水分供应受限。此外,水分胁迫还会抑制CO₂的扩散,降低叶片内的CO₂浓度,进而削弱光合酶的活性,影响碳同化过程,最终导致水稻光合作用效率显著下降。这与潘念等^[18]、王婷等^[19]研究结果一致,即光合速率对水分状况极为敏感。夏江宝等^[20]研究揭示,在正常水分条件下,作物净光合速率最高。Tan等^[21]进一步指出,随着水分胁迫程度的增加,光合作用能力呈下降趋势。然而,过量灌溉同样可能对光合作用产生不利影响,过多的水分可能导致叶片气孔被动关闭,进而抑制CO₂的吸收,同时影响体内酶的活性及其他代谢过程,最终降低光合效率。因此,水稻光合作用的最佳状态需要精准的水分管理,以避免因水分过多或过少而导致的生理损伤。旱作水稻的蒸腾作用同样受到水分胁迫的显著影响,气孔作为生态系统水分循环和CO₂交换的重要通道^[22],受生理和环境因素的控制。当旱作水稻遭受水分胁迫时,由于水分亏缺造成水稻根系和叶片的有机渗透调节物质含量大幅上升,上升幅度与土壤干旱程度呈正相关,改变了植物的渗透压,使土壤水难以转移到植物体内。本研究中水分胁迫下旱作水稻的蒸腾速率显著下降这与刘溢健等^[23]、刘素军等^[24]、Li等^[25]研究结果一致。因此,在水分胁迫环境下,水稻需要通过调整气孔开闭及蒸腾作用来优化水分利用,以适应干旱胁迫,并最大限度地减少光合效率的损失。本研究进一步证实,水分管理对光合生理过程至关重要,精准调控水分供应可有效维持光合作用的稳定性,避免因水分过多或不足导致的光合抑制现象。

3.3 不同水分胁迫对水稻产量的影响

水分是作物生长过程中不可或缺的环境因子,其供应状况直接决定着水稻的生长发育和最终产量。研究表明,在土壤维持100%田间持水率的条件下,水稻产量达到最高。然而,随着水分胁迫程度的加剧,产量呈现逐步下降的趋势,其主要原因可能是当水分供应不足时,根系对水分及养分的吸收能力受限,细胞质液流失,胞间隙缩小,导致叶片水分丧失、气孔关闭以及CO₂扩散受限等一系列生理变化。气孔关闭直接抑制CO₂的进入与氧气的释放,从而降低光合效率。由于光合作用是植物合成有机物的核心生理过程,其效率下降将直接影响体内物质积累,导致生长受阻并降低产量。此外,水分胁迫还会导致植株生物量减少、干质量下降、千粒重降低,从而进一步削弱水稻的最终产量。这与何进宇等^[26]、雷俊等^[27]研究结果一致。进一步研究表明,长期处于高温或水分胁迫环境下的水稻幼苗,其品质和产量均受到显著影响^[28-29]。此外,段素梅等^[30]研究指出,持续的水分胁迫不仅抑制水稻分蘖的形成,还会降低有效穗数,从而对产量造成不利影响。由此可见,水分胁迫在不同程度上影响水稻的生长、生理代谢及产量构成。在轻度水分胁迫条件下,水稻仍能保持较高的生长速率和产量。然而,在重度水分胁迫下,植株的生理平衡被严重破坏,光合作用受抑,干物质积累显著减少,最终导致产量大幅下降。因此,优化水分管理策略,确保水稻在关键生育期获得充足的水分供应,是提升水稻抗旱能力、保障稳产高产的关键措施。

3.4 不同水分胁迫对水稻耗水量及水分利用效率的影响

耗水量作为水稻生长发育过程中的一个关键生理生态指标,不仅反映了水稻自身的需水特性,还与水稻的产量、品质以及农田生态系统的水分平衡和养分循环密切相关。在生育中前期,各处理的耗水量与耗水强度直接受制于土壤含水量,土壤含水量变化,耗水量随之变化,因此水稻苗期和拔节孕穗期是耗水量最大的两个时期。而在生育后期如抽穗期和灌浆期,气温降低,太阳辐射强度也不如前期高,因此土壤蒸发量显著下降,则各处理的耗水量较小且耗水强度都很相近,并且土壤含水量不能显著影响水稻的耗水量与耗水强度,这可能是由于水稻生长前期,气温比较高,太阳辐射强烈,土壤的蒸发量高,植株体小,太阳辐射更多直射土壤表面,无效耗水更多。适宜水稻分蘖的田间水分状况是土壤含水高度饱和到有浅水之间,以促进分蘖

早生快发,随着水层加深分蘖会受到抑制,需要不定期监测土壤水分状况,及时补充,才能保证正常出苗;而孕穗期水稻植株生长迅速,对水量的需求更大,也更敏感,一旦缺水受旱,就会影响水稻发育状态和生理性状,进而影响产量;灌浆期和乳熟期,需要严格控制水量,过多或过少,都会导致水稻减产。水稻的每个阶段科学调控水分状况,适时适量的灌溉有利于水稻的生长发育,且可以满足水稻生长对水分的基本需求,对于实现水稻的高产稳产至关重要。

水分利用效率与作物生长、产量、品质密切相关,体现作物产量与耗水量,决定其节水及水生产力。水分管理中,存在耗水量下降但水分利用效率上升的现象,主要是因为产量水平上水分利用效率是产量与耗水量之间的比值,而在产量保持较高水平,耗水量下降的情况下产量水平上的水分利用效率会有所提高,或受光合蒸腾耦合效应调控。本研究结果显示,轻度水分胁迫可有效提升旱作水稻的水分利用效率,这可能是由于适度水分胁迫引发了气孔调节和光合适应机制。在轻度胁迫下,水稻叶片可能通过部分气孔关闭减少蒸腾损失,同时维持相对较高的 CO_2 同化能力,使得蒸腾速率下降而净光合速率保持稳定或略有下降,从而提高单叶水平水分利用效率。然而,在中-重度水分胁迫下,光合速率和蒸腾速率同步下降,单叶水平水分利用效率反而降低,说明气孔关闭已经严重限制了 CO_2 吸收,非气孔因素(如叶绿素荧光特性下降、Rubisco活性降低等)可能成为限制光合能力的主要因素,最终影响产量^[31]。前人对沙棘、银水牛果、黄栌、春玉米的研究均表明,充分供水条件下的叶片水分利用效率低于轻度胁迫,即在降低供水的情况下水分利用效率会提升^[32-34]。因此,在水稻生产管理中,应优化水分管理策略,合理调控水分供应,以提升水分利用效率,促进水稻高产稳产,同时实现农业用水的可持续发展。

4 结论

(1) 不同水分胁迫对水稻生长影响不同,中度和重度水分胁迫显著降低了水稻株高、净光合速率、蒸腾速率、千粒重、饱籽率、秸秆干质量、产量和水分利用效率,轻度水分胁迫下,各项指标仅略低于充分灌溉,同时水分利用效率会高于充分灌溉组。

(2) 水分胁迫对作物的光合速率和蒸腾速率均表现出下降趋势。其中,光合速率在孕穗期达到

最高,乳熟期最低;蒸腾速率则在孕穗期最高,而在苗期最低。

(3) 从3年平均数据看,水分下限占田间持水量90%的处理组,产量较充分灌溉组产量平均减少7.5%,而耗水量减少17.5%,水分利用效率提高8.6%。因此,田间持水量90%可作为旱作水稻调控灌水定额和灌溉量指标,既可节约水资源又不明显减产。

(4) TOPSIS模型综合评价表明,水分下限占田间持水量90%~100%的处理可在保证较高产量的同时,显著提高水分利用效率。因此,在干旱和半干旱地区推广适度水分胁迫管理模式,可在节约水资源的同时实现稳产。

参考文献:

- [1] 郑洁, 胡美君, 郭延平. 光质对植物光合作用的调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1619-1624.
Zheng J, Hu M J, Guo Y P. Regulation of photosynthesis by light and its mechanism in plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1619-1624. (in Chinese with English abstract)
- [2] Ma F J, Li D D, Cai J, Dong J, Dai T B. Responses of wheat seedlings root growth and leaf photosynthesis to drought stress[J]. The Journal of Applied Ecology, 23(3): 724-730.
- [3] Sun G, Meng Y, Wang Y, Zhao M, Wei S, Gu W. Exogenous hemin optimized maize leaf photosynthesis, root development, grain filling, and resource utilization on alleviating cadmium stress under field condition[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(1): 631-646.
- [4] 朱士江, 孙爱华, 张忠学, 王忠波, 杜平. 不同节水灌溉模式对水稻分蘖、株高及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2013(12): 16-19.
Zhu S J, Sun A H, Zhang Z X, Wang Z B, Du P. Effects of Different Water-saving Irrigation Modes on Tillering, Plant Height and Yield of Rice [J]. Water Saving Irrigation, 2013, (12): 16-19. (in Chinese)
- [5] Rahman M S, Yoshida S. Effect of water stress on grain filling in rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1985, 31(4): 497-511.
- [6] 侯丹平, 谭金松, 毕庆宇, 张安宁, 刘毅, 王飞名, 刘国兰, 余新桥, 毕俊国, 罗利军. 水分胁迫对节水抗旱稻产量形成和根系形态生理特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2021, 35 (1): 27-37.
Hou D P, Tan J S, Bi Q Y, Zhang A N, Liu Y, Wang F M, Liu G L, Yu X Q, Bi J G, Luo L J. Effects of water stress on yield formation and root morphological and physiological characteristics of water-saving and drought-

- resistant rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(1): 27-37. (in Chinese with English abstract)
- [7] 何进宇, 田军仓, 马波, 沈晖. 膜下滴灌旱作水稻水分生产函数研究[J]. 西北农业学报, 2015, 24 (11): 41-48. He J Y, Tian J C, Ma B, Shen H. Study on the water production function of dryland rice under drip irrigation under film [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(11): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨晓龙, 王彪, 汪本福, 张枝盛, 张作林, 杨蓝天, 程建平, 李阳. 不同水分管理方式对旱直播水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37 (3): 285-294. Yang X L, Wang B, Wang B F, Zhang Z S, Zhang Z L, Yang L T, Cheng J P, Li Y. Effects of different water management methods on yield and grain quality of direct dry-seeded rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(3): 285-294. (in Chinese with English abstract)
- [9] George T, Magbanua R, Garrity D P, Tubaña B S, Quiton J. Rapid yield loss of rice cropped successively in aerobic soil[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(5): 981-989.
- [10] Liu E K, Mei X R, Yan C R, Gong D Z, Zhang Y Q. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167: 75-85.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000. Lu R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [12] Jiang M Y, Zhang J H. Abscissic acid and antioxidant defense in plant cells. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(1): 1-9.
- [13] 于靖, 徐淑琴, 高婷. 分蘖期不同程度水分胁迫对水稻需水规律及生长发育的影响[J]. 节水灌溉, 2012, (7): 21-23. Yu J, Xu S Q, Gao T. Effects of different degrees of water stress during the tillering stage on the water requirement law and growth and development of rice [J]. *Water Saving Irrigation*, 2012, (7): 21-23. (in Chinese)
- [14] 胡衍平, 刘卫东, 庞文胜, 张珉, 刘敏婕, 吴其军, 黄明军, 张雕, 李党仁. 水分胁迫对山乌柏幼苗生长及生理生化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43 (8): 62-72. Hu Y P, Liu W D, Pang W S, Zhang M, Liu M J, Wu Q J, Huang M J, Zhang D, Li D R. Effects of water stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of *sapium discolor* seedlings [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(8): 62-72. (in Chinese with English abstract)
- [15] He J, Ma B, Tian J. Water production function and optimal irrigation schedule for rice (*Oryza sativa* L.) cultivation with drip irrigation under plastic film-mulched[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 17243.
- [16] 孙彩霞, 郝健均, 王杰, 缪璐, 陈振华, 齐华. 两个品种转基因抗虫棉光合生理的 CO₂ 响应[J]. 生态学报, 2010, 30 (2): 504-510. Sun C X, Hao J J, Wang J, Miao L, Chen Z H, Qi H. CO₂ responses of photosynthetic physiology in two varieties of transgenic insect-resistant cotton [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 504-510. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐玉坤, 薛龙飞. 不同施肥模式对马铃薯光合特性及产量品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6): 83-90. Xu Y K, Xue L F. Effects of different fertilization modes on photosynthetic characteristics, yield and quality of potato [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27 (6): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- [18] 潘念, 苏旺, 周云, 王舰. 土壤水分胁迫对马铃薯生长发育光合特性和产量的影响[J]. 河北农业科学, 2022, 26 (1): 70-75+94. Pan N, Su W, Zhou Y, Wang J. Effects of soil water stress on the growth, photosynthetic characteristics and yield of potato [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2022, 26(1): 70-75+94. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王婷, 海梅荣, 罗海琴, 郭华春, 达布希拉图. 水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2010, 25 (5): 737-742. Wang T, Hai M R, Luo H Q, Guo H C, Dabusihlatu. Effects of Water Stress on Photosynthetic Physiological Characteristics and Yield of Potato [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2010, 25(5): 737-742. (in Chinese with English abstract)
- [20] 夏江宝, 张光灿, 刘刚, 韩炜, 陈建, 刘霞. 不同土壤水分条件下紫藤叶片生理参数的光响应[J]. 应用生态学报, 2007(1): 30-34. Xia J B, Zhang G C, Liu G, Han W, Chen J, Liu X. Light response of physiological parameters of wisteria sinensis leaves under different soil moisture conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007(1): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [21] Tan Y, Liang Z S, Dong J E, Hao H Y, Ye Q. Effect of water stress on growth and accumulation of active components of *Isatis indigotica*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, 33(1): 19-22.
- [22] Qi Y, Zhang Q, Hu S, Wang R, Wang H, Zhang K, Zhao H, Zhao F, Chen F, Yang Y, Tang G, Hu Y. Applicability of stomatal conductance models comparison for persistent water stress processes of spring maize in water resources limited environmental zone[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 277: 108090.
- [23] 刘溢健, 任建宏, 殷俐娜, 邓西平, 可庆波, 王仕稳.

- 马铃薯块茎膨大期不同程度干旱后复水的源库补偿效应[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (11): 3777-3786.
- Liu Y J, Ren J H, Yin L N, Deng X P, Ke Q B, Wang S W. Source-sink compensation effect of rewatering after different degrees of drought during potato tuber expansion [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (11): 3777-3786. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘素军, 蒙美莲, 苏日古嘎. 干旱胁迫及复水对马铃薯糖代谢途径中基因表达影响的研究[J]. 作物杂志, 2023 (1): 38-45.
- Liu S J, Meng M L, Suriguga. Study on the Effects of Drought stress and rewatering on the gene expression in the sugar metabolism pathway of potato [J]. *Crops*, 2023, (1): 38-45. (in Chinese with English abstract)
- [25] Li J, Zhou C, Liang Z, Miao Q. Effect of water stress in partial root zone on response of photosynthesis of *Aconitum barbatum*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2012, 37(9): 1184-1190.
- [26] 何进宇, 刘飞杨, 杨佳鹤, 崔烜玮. 干旱地区水盐胁迫对水稻产量构成及稻谷品质的影响研究[J]. 节水灌溉, 2024(1): 33-43.
- He J Y, Liu F Y, Yang J H, Cui X W. Study on the Effects of water and salt stress on the yield components and grain quality of rice in arid regions [J]. *Water Saving Irrigation*, 2024 (1): 33-43. (in Chinese with English abstract)
- [27] 雷俊, 蔡迪花, 齐月, 赵福年, 张凯, 姚玉璧, 张新刚, 仇喜红. 水分胁迫对半干旱区马铃薯产量形成的影响研究[J]. 干旱气象, 2023, 41 (2): 233-240.
- Lei J, Cai D H, Qi Y, Zhao F N, Zhang K, Yao Y B, Zhang X G, Qiu X H. Study on the influence of water stress on the yield formation of potato in semi - arid areas [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(2): 233-240. (in Chinese)
- [28] Pandey V, Shukla A. Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress[J]. *Rice Science*, 2015, 22(4):147-161.
- [29] Bunnag S, Pongthai P. Selection of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to drought stress at the vegetative stage under field conditions[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2013, 4(9): 1701-1708.
- [30] 段素梅, 杨安中, 黄义德. 分蘖期水分胁迫处理时间对水稻产量和生理指标的影响[J]. 中国稻米, 2017, 23(1): 36-42.
- Duan S M, Yang A Z, Huang Y D. Effects of drought treatment time at tillering stage on rice yield and physiological indexes [J]. *China Rice*, 2017, 23 (1): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [31] Zhao W, Liu L, Shen Q, Yang J, Han X, Tian F, Wu J. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2127.
- [32] 董梅, 秦景, 贺康宁, 张益源, 李安超, 孙晓涵, 郭倩倩. 银水牛果和沙棘幼苗在不同土壤水分条件下的光响应研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31 (1): 81-86.
- Dong M, Qin J, He K N, Zhang Y Y, Li A C, Sun X H, Guo Q Q. Study on the light response of *shepherdia argentea* and *hippophae rhamnoides* seedlings under different soil moisture conditions [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(1): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘刚, 张光灿, 刘霞. 土壤水分胁迫胁迫对黄栌叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1697-1701.
- Liu G, Zhang G C, Liu X. Effects of soil water stress on photosynthesis of *cotinus coggygia* leaves [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1697-1701. (in Chinese with English abstract)
- [34] 薛子钰, 张芮, 孙丽娜, 邵显显, 赵霞, 张梅花. 覆膜和水分胁迫对春玉米生长、水分利用效率及土壤养分的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2025(6): 183-196.
- Xue Z Y, Zhang R, Sun L N, Shao X X, Zhao X, Zhang M H. Effects of film-mulching and water stress on the growth, water use efficiency and soil nutrients of spring maize [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2025(6): 183-196. (in Chinese with English abstract)