

网络出版时间:2026-06-10

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260610.1034.002

光伏板对滨海盐碱地不同小麦品种光合与产量的影响

孙一¹, 任梦瑶², 刘全凤¹, 梁佳慧², 梁恩浩², 郭维新¹, 封晓辉³, 李晓刚²

(1. 沧州市农林科学院, 河北沧州 061001; 2. 河北农业大学, 河北保定 071001;

3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北石家庄 050021)

摘要:为阐明追踪式光伏板遮荫对滨海盐碱地冬小麦生长的影响并筛选耐荫品种,以冬小麦品种衡麦27、捷麦19和铜麦6号为材料,在南北走向、板间距10 m的光伏阵列间,自西向东每2 m设一种植带(S_{0-2} 至 S_{8-10}),测定小麦旗叶光合参数、叶绿素荧光特性及产量构成。结果表明:(1)光伏板遮荫具有显著的空间梯度效应。中心种植带(S_{4-6})的小麦净光合速率(P_n)最高,其中衡麦27的 P_n 达到 $18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,边缘区下降约22%。品种间光合特性存在显著差异,其中衡麦27的 P_n 与气孔导度(G_s)高且稳定,捷麦19的 P_n 仅 $6 \sim 8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (为衡麦27的40%~50%)且波动平缓;铜麦6号的 P_n 波动剧烈。光合峰值时间由种植区域中心向两侧延迟,反映出追踪式光伏板的时滞效应。 G_s 、 P_n 的日变化与蒸腾速率(T_r)高度同步,印证气孔是小麦光合与水分散失的关键调控位点。结合胞间 CO_2 浓度(C_i)分析,衡麦27的 G_s 与 C_i 均高,其光合属非气孔限制高效型;捷麦19的 C_i 最高,但 P_n 最低,其光合属光反应限制型;铜麦6号 G_s 波动大且后期 C_i 升高,其光合属气孔与光反应双重限制型。(2)品种间叶绿素荧光特性存在差异,反映了其光化学适应策略分化。衡麦27和铜麦6号的PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m ,约0.82)和实际光化学效率($\Phi_{\text{PSⅡ}}$)均显著高于捷麦19(F_v/F_m 仅约0.75, $P < 0.05$)。衡麦27初始荧光(F_0)低,PSⅡ基态稳定;铜麦6号 F_0 偏高,提示反应中心存在可逆性损伤;捷麦19可变荧光(F_v)最稳定,但 F_v/F_m 最低,主要依赖热耗散实现光保护。(3)品种与种植带互作对千粒重、产量、生物量及收获指数均有极显著影响($P < 0.01$),其中千粒重对遮荫响应最敏感。衡麦27千粒重降幅最小(2%~7%),中心种植带 S_{4-6} 的产量达到 $5309.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,收获指数稳定(50.23%~51.54%),库源协调;捷麦19在轻度遮荫下千粒重稳定,但种植带 S_{4-6} 的收获指数为46.03%,表现为生物量增加而库源失衡;铜麦6号千粒重降幅最大(8%~18%),种植带 S_{4-6} 的产量仅 $3475.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较衡麦27低34.5%。综上,气孔限制主导光合变异。衡麦27为高效利用型耐荫品种,最适宜光伏板下种植;捷麦19具较强光保护能力,可作备选品种;铜麦6号耐荫性弱,不宜光伏板下种植。

关键词:盐碱地;农光互补;光合作用;叶绿素荧光;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)08-1093-11

Effects of Shading by Tracking Photovoltaic Panels on Photosynthesis and Yield of Different Wheat Cultivars in Coastal Saline-Alkali Soil

Sun Yi¹, Ren Mengyao², Liu Quanfeng¹, Liang Jiahui², Liang Enhao²,
Guo Weixin¹, Feng Xiaohui³, Li Xiaogang²

(1. Cangzhou Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Cangzhou, Hebei 061001, China; 2. Hebei Agriculture University, Baoding, Hebei 071001, China; 3. Center for Agricultural Resources Research, IGDB, CAS, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: To clarify the effects of tracking photovoltaic(PV) panel shading on winter wheat growth in coastal saline-alkali land and screen shade-tolerant varieties, three wheat varieties(Hengmai 27, Jie-mai 19, and Tongmai 6) were used as materials. In the photovoltaic array with a north-south orientation and a panel spacing of 10 m, planting areas(S_{0-2} to S_{8-10}) were set every 2 m from west to east.

收稿日期:2026-04-15

修回日期:2026-05-12

基金项目:河北省重大科技支撑计划项目(242N6402Z)

第一作者 E-mail:sunyi107@163.com(孙一)

通讯作者 E-mail:xiaogang1217@126.com(李晓刚)

The flag leaf photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence parameters, and yield components were determined. The results showed that: (1) PV panel shading exhibited a significant spatial gradient effect. The net photosynthetic rate (P_n) was highest in the central planting area S_{4-6} , reaching $18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in Hengmai 27, while edge planting areas showed a reduction rate of approximately 22%. There were significant differences in photosynthetic characteristics among varieties: Hengmai 27 maintained high and stable P_n and stomatal conductance (G_s); Jiemai 19 showed low P_n ($6-8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, only 40%–50% of Hengmai 27) but gentle fluctuations; Tongmai 6 exhibited severe fluctuations in P_n with a reduction rate exceeding 50%. Photosynthetic peak time delayed from the central belt toward both planting areas, reflecting the time-lag effect of east-west tracking PV panels. The high consistency among G_s , P_n , and transpiration rate (T_r) confirmed that stomata are the key regulators of photosynthesis and water loss. Hengmai 27, with high intercellular CO_2 concentration (C_i) and G_s , belonged to the non-stomatal limitation type; Jiemai 19, with the highest C_i but the lowest P_n , belonged to the photochemical limitation type; Tongmai 6, with fluctuating G_s and elevated C_i in late stage, belonged to the combined stomatal and photochemical limitation type. (2) The differences of chlorophyll fluorescence parameters among varieties revealed divergent photochemical adaptation strategies. The PSII maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) and actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}) of Hengmai 27 and Tongmai 6 were significantly higher than those of Jiemai 19 ($P < 0.05$). However, Hengmai 27 had low initial fluorescence (F_o) with stable PS II basal state, while Tongmai 6 had high F_o indicating reversible damage to reaction centers. Jiemai 19 showed the most stable variable fluorescence (F_v) but the lowest F_v/F_m , adopting a defensive strategy dominated by thermal dissipation. (3) Yield analysis showed that the interaction of variety and planting area had significant effects on thousand-grain weight, grain yield, biomass, and harvest index ($P < 0.01$), among which 1 000-grain weight was the most sensitive to shading. Hengmai 27 showed the smallest reduction in thousand-grain weight (2%–7%), with grain yield of $5\,309.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and stable harvest index (50.23%–51.54%) in S_{4-6} , indicating coordinated source-sink relations. Jiemai 19 showed no significant change in thousand-grain weight under mild shading, but harvest index decreased to 46.03% in S_{4-6} , presenting source-sink imbalance with increased biomass but reduced harvest index. Tongmai 6 showed the largest reduction in thousand-grain weight (8%–18%), with grain yield of only $3\,475.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in S_{4-6} , 34.5% lower than that of Hengmai 27. In conclusion, stomatal limitation is the main regulatory factor of photosynthetic variation. Hengmai 27 is a high-efficiency shade-tolerant variety, which is most suitable for planting in photovoltaic shading areas; Jiemai 19 has strong photoprotection ability and can be used as an alternative; Tongmai 6 has weak shade tolerance and is not suitable for the current conditions.

Keywords: Saline-alkali land; Agrivoltaics; Photosynthesis; Chlorophyll fluorescence; Grain yield

小麦是中国主要粮食作物,在人口增长与膳食结构升级背景下需求持续攀升。然而,耕地资源紧缺与生态约束的矛盾日益凸显,拓展种植空间已成为保障粮食安全与农业可持续发展的关键^[1]。中国滨海盐碱地面积约 800 万 hm^2 ,广泛分布于环渤海、黄海及东南沿海滩涂区,是重要的后备耕地资源^[2]。小麦具有一定耐盐性,在中轻度盐碱地可实现稳产^[3]。在此背景下,于滨海盐碱地架设追踪式光伏阵列构建农光互补系统,不

仅能实现土地复合利用,还可借助光伏遮荫效应优化表层土壤水热条件,为作物生长营造适宜微环境^[4]。

现有农光互补研究多集中于干旱区,旨在利用光伏遮荫抑制蒸散以提升产量,但遮荫亦会导致光合有效辐射(PAR)下降,进而制约产能^[5-6]。研究表明,冬小麦籽粒产量在遮荫下最高可降 30%~40%,降幅随遮荫强度与时长而异^[7];但也有研究指出,轻度遮荫可提高冬小麦产量^[8]。其

他作物对遮阴的反应亦呈现类似分化,如遮荫下番茄产量下降,但水分利用效率升高^[9],而生菜则通过扩大叶面积、增强光捕获能力维持产量稳定^[10]。此外,当前的研究多聚焦固定式光伏系统,针对追踪式单轴光伏系统的农光互补研究匮乏^[11],追踪光伏系统下冬小麦的光合生理和产量对动态遮荫的响应机制仍不明确。

为此,本研究在滨海盐碱地开展追踪式光伏阵列下冬小麦生产试验,系统测定光合、叶绿素荧光及产量指标,阐明光伏板遮荫对小麦生长的影响规律,揭示不同品种的光合与光化学适应策略,筛选适宜耐荫品种,以期为盐碱地农光互补模式构建提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2022 年 10 月至 2023 年 7 月在河北省海兴县小山乡国家电投海兴盐碱地农光互补试验基地(38°12′56″N,117°32′33″E)进行。该地区位于渤海湾西岸滨海平原,属于温带半湿润大陆

性季风气候区,海拔 2~3 m,年平均气温 12.4℃,年均降水量 565.4 mm,年均辐射总量 124.7 kcal·cm⁻²。试验地为滨海中重度盐碱地,0~20 和 20~40 cm 土壤盐分含量分别为 1.3~1.5 和 2.0~3.3 g·kg⁻¹,耕层土壤有机质和全氮含量分别为 8~12 和 0.5~0.8 mg·g⁻¹。

1.2 试验材料与设计

试验地光伏板为追踪式,南北方向条带状排列,随太阳高度角东西翻转(上午东斜、下午西斜),光伏板中心距地面 3.2 m,板间距 10 m。光伏板之间自西向东每 2 m 设置 1 个种植带(长度 6 m),依次标记为 S₀₋₂、S₂₋₄、S₄₋₆、S₆₋₈ 和 S₈₋₁₀(图 1)。本试验采用两因素裂区设计,5 个种植带为主区,3 个小麦品种(衡麦 27、捷麦 19 和铜麦 6 号,均为黄淮海麦区主栽品种)为裂区,每个品种每个种植带重复 3 次。2022 年 10 月中旬条播小麦,东西行向,行间距 30 cm,播种量 225 kg·hm⁻²。2023 年 3 月初沟施尿素 150 kg·hm⁻²,其他管理措施与大田相同。2023 年 6 月中旬小麦成熟后收获。

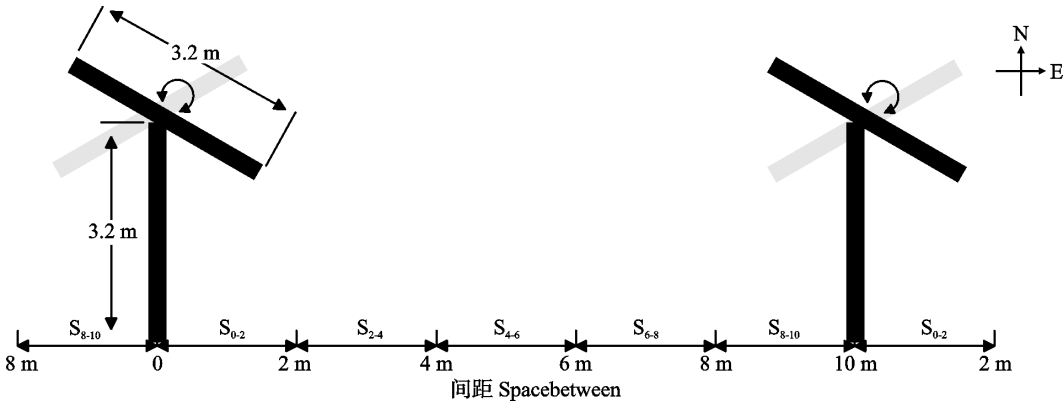


图 1 追踪式光伏板及小麦种植示意图

Fig.1 Schematic diagram of tracking photovoltaic panels and wheat planting

1.3 数据测定

1.3.1 旗叶光合参数的测定

旗叶光合日变化规律采用 Li-6400XT(Li-Cor Inc,美国)便携式光合作用测定仪测定。在每个种植带中间位置选择朝向和长势基本一致的旗叶 10 片标定,选择晴朗天气(2023 年 5 月 22—26 日)的 9:00—18:00 每个整点测定小麦旗叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。使用开放式气路, CO_2 浓度为 385 $\mu mol \cdot L^{-1}$;红蓝光源叶室,设定光量子密度为 1 100 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

1.3.2 旗叶叶绿素荧光参数的测定

叶绿素荧光动力学参数采用 FMS-2 型便携式脉冲调制式荧光仪(Hansatech,英国)测定。旗叶选定方法和测定时间同光合参数的测定。叶片在光下夹上叶夹,正对太阳光 10 min 后,测定叶片实际生长光强下的荧光值(F_s);再给 1 个强饱和脉冲光(4 000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),持续时间 0.7 s,测定光下最大荧光(F'_m);关闭作用光暗适应 3 s 后,打开远红光,在远红外光脉冲时,荧光开始下降,把最低的荧光记为 F'_0 。叶片暗适应 20 min 后,用弱测量光测定初始荧光(F_0),然后打 1

个强饱和脉冲光($4\,000\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),持续时间 0.7 s,测定最大荧光(F_m),计算出 PS II 量子效率(Φ_{PSII})和电子传递效率 ETR。

1.3.3 产量及其构成要素和生物量的测定

小麦成熟后,在每个种植带中间位置选取 $1\,\text{m}^2$ 代表性区域,调查单位面积有效穗数;随机取 25 个麦穗考种,测定穗粒数;脱粒后自然风干,调整至 13% 标准含水量,测定千粒重,并计算籽粒产量。每个种植带取 30 个代表性单茎,3 次重复,分为籽粒和非籽粒两部分,80 °C 烘干至恒重,称量干重,计算地上部生物量和收获指数。

1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据整理用 SPSS 20 实现方差分析和差异显著性检验,使用 Duncan 法进行多重比较($\alpha=0.05$),用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同种植带下小麦光合参数的差异

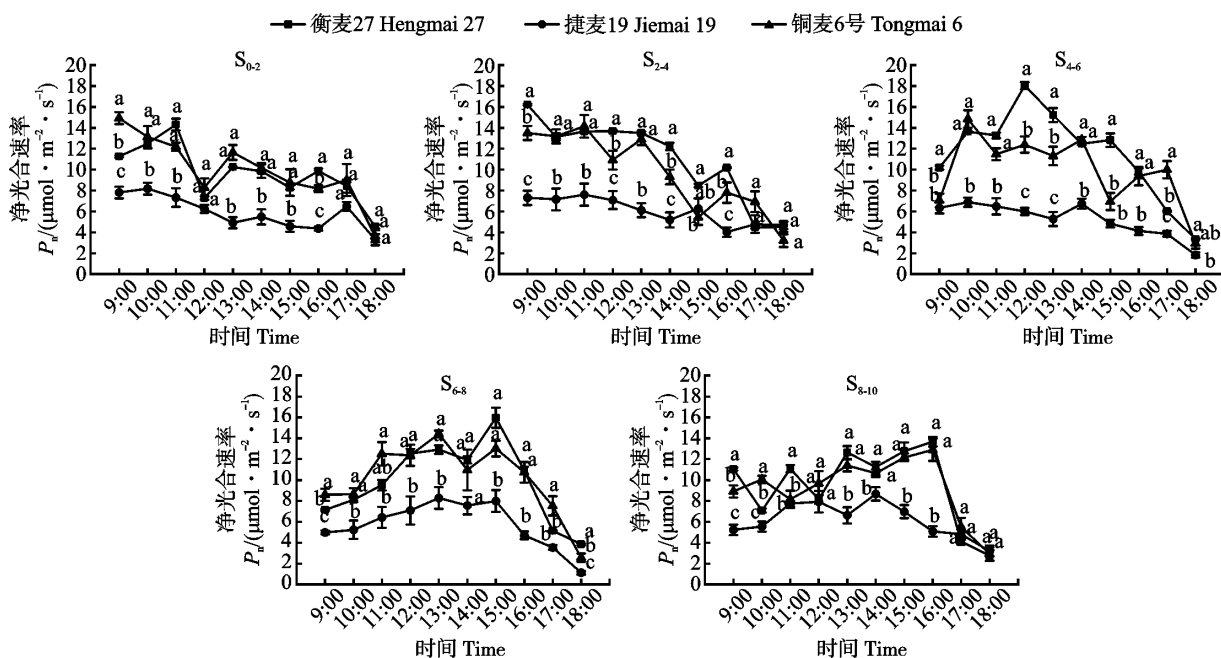
2.1.1 净光合速率(P_n)的日变化规律

不同品种之间 P_n 存在一定的差异(图 2)。在多数观测时间点,相同种植带下,衡麦 27 和铜麦 6 号的 P_n 均高于捷麦 19。其中,衡麦 27 在各种种植带下均维持较高的 P_n ,日变化节律稳定,峰值出现在 11:00—12:00,且峰值后下降平缓,中心种植带 S_{4-6} 达到 $18\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,在边缘

区(S_{0-2} 和 S_{8-10} 约 $14\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)显著下降,降幅约 22%;捷麦 19 整体光合能力偏低,且日变化平缓, P_n 峰值范围 $6\sim 8.5\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,仅为衡麦 27 的 40%~50%,在种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10} P_n 未出现剧烈下降;铜麦 6 号的 P_n 波动剧烈,峰值时间紊乱,傍晚下降迅速,9:00 出现峰值($15\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),但之后急剧下降至 12:00 时约 $6\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,降幅达 60%。随着种植带从光伏板附近到远离光伏板, P_n 逐渐提高,其中种植带 S_{4-6} 的 P_n 最高,而 S_{0-2} 和 S_{8-10} 的 P_n 因光伏板早晚遮光而显著降低。此外,随着遮光时间的变化,从种植带 S_{0-2} 至 S_{8-10} , P_n 峰值呈现逐渐推迟的趋势,反映了光伏板遮荫对光合日进程的时滞效应。

2.1.2 气孔导度(G_s)的日变化规律

由图 3 可知,衡麦 27 的 G_s 在多数时间点下较高,铜麦 6 号的 G_s 波动幅度较大,捷麦 19 的 G_s 整体偏低且波动相对平缓;总体上,衡麦 27 和铜麦 6 号的 G_s 在相同种植带位下均高于捷麦 19。5 个种植带的 G_s 整体呈先波动上升后下降的日变化规律,且随着太阳高度及光照方向的变化,从种植带 S_{0-2} 至 S_{8-10} , G_s 峰值呈现逐渐推迟的趋势。 G_s 的变化趋势与 P_n 高度一致,表明气孔对小麦光合有重要调控作用。



S_{0-2} 、 S_{2-4} 、 S_{4-6} 、 S_{6-8} 和 S_{8-10} 代表 5 个种植带;折线上不同字母表示同一时刻下不同品种间在 0.05 水平差异显著。下同。

S_{0-2} 、 S_{2-4} 、 S_{4-6} 、 S_{6-8} 、and S_{8-10} indicate five planting areas; Different letters above the error bars indicate significant differences among different varieties at the same time point at 0.05 level. The same in figures 3—6.

图 2 不同种植带下 3 个小麦品种旗叶净光合速率(P_n)的日变化

Fig. 2 Diurnal change of net photosynthetic rate(P_n) in flag leaf of the three wheat varieties under different planting areas

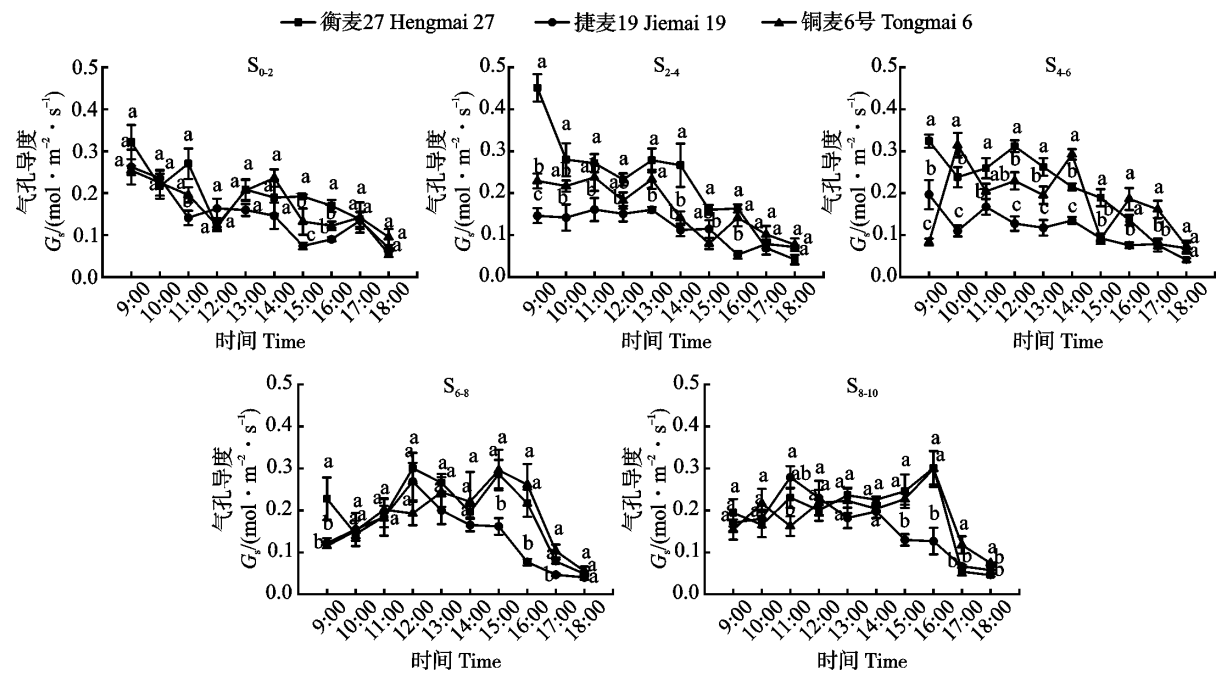


图 3 不同种植带下 3 个小麦品种旗叶气孔导度 (G_s) 的日变化

Fig. 3 Diurnal change of stomatal conductance (G_s) in flag leaf of the three wheat varieties under different planting areas

2.1.3 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的日变化规律

由图 4 可知,衡麦 27 的 C_i 在多数情况下较高,捷麦 19 的 C_i 整体相对稳定,铜麦 6 号的 C_i 波动幅度较大,后期(尤其是 17:00 后)上升特征明显。在相同种植带位下,衡麦 27 和铜麦 6 号的 C_i 在多数时间点均低于捷麦 19,这与 G_s 和 P_n 的变化规律相反。同时,各种植带的 C_i 峰值均出

现在早晨和傍晚,这与光照不足时气孔部分关闭、 CO_2 供应受限有关。

2.1.4 蒸腾速率 (T_r) 的日变化规律

衡麦 27 的 T_r 在多数时间点较高;捷麦 19 的 T_r 整体相对较低,且波动平缓;铜麦 6 号的 T_r 波动幅度大,峰值特征明显(图 5)。多数时间点下,捷麦 19 的 T_r 低于衡麦 27 和铜麦 6 号。在不同

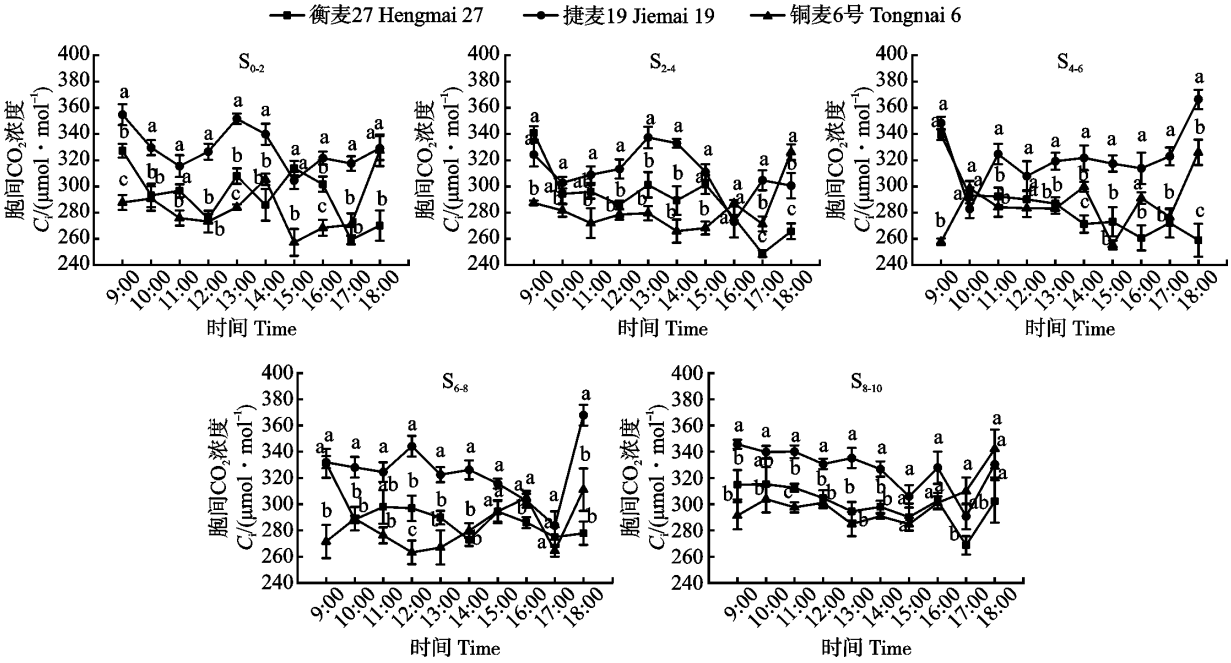


图 4 不同种植带下 3 个小麦品种旗叶胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的日变化

Fig. 4 Diurnal change of intercellular CO_2 concentration (C_i) in flag leaf of the three wheat varieties under different planting areas

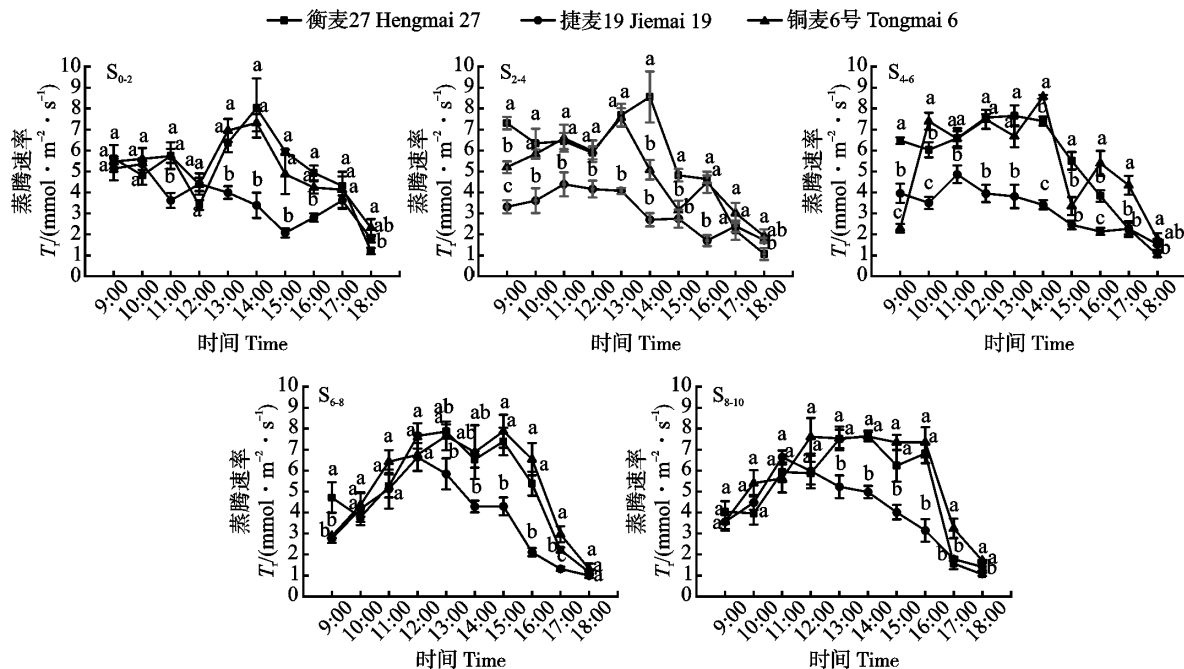


图5 不同种植带下3个小麦品种旗叶蒸腾速率(T_r)的日变化

Fig. 5 Diurnal change of transpiration rate(T_r) in flag leaf of the three wheat varieties under different planting areas

种植带下, T_r 整体呈先波动上升后波动下降的日变化趋势, 且随着太阳高度及光照强度的变化, 从种植带 S_{0-2} 至 S_{8-10} , T_r 峰值出现时间逐渐推迟, 体现出蒸腾作用对光照时序的动态响应。 T_r 的变化趋势与 G_s 高度一致, 进一步验证了气孔对水分散失和气体交换的双重调控作用。

2.2 不同种植带下小麦叶绿素荧光参数的差异

2.2.1 PS II 反应中心的潜在活性

捷麦 19 的初始荧光强度(F_0)整体高于衡麦 27 和铜麦 6 号, 其中在种植带 S_{0-2} 、 S_{2-4} 、 S_{4-6} 中捷麦 19 与衡麦 27 和铜麦 6 号差异均显著, 在种植带 S_{6-8} 中衡麦 27 与捷麦 19 差异不显著, 在种植带 S_{8-10} 中品种间无显著差异(图 6 I)。捷麦 19 和铜麦 6 号间最大荧光(F_m)在种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10} 中差异不显著, 但均显著高于衡麦 27; 在种植带 S_{2-4} 和 S_{4-6} 中, 3 个品种间差异均不显著; 而在种植带 S_{6-8} 中, 3 个品种间差异均显著(图 6 II)。3 个品种中捷麦 19 的光系统结构易受环境的影响, 但其潜在活性也较高。

2.2.2 PS II 最大光化学效率

捷麦 19 和铜麦 6 号的可变荧光值(F_v)在相同种植带位下表现一致, 衡麦 27 的 F_v 在种植带 S_{6-8} 和 S_{8-10} 中劣势显著(图 6 III)。衡麦 27 的 F_v 在种植带 $S_{0-2} \sim S_{4-6}$ 间无显著差异, 种植带 $S_{6-8} \sim$

S_{8-10} 与 $S_{0-2} \sim S_{4-6}$ 存在显著差异且其值逐渐下降; 捷麦 19 和铜麦 6 号在不同种植带间无显著差异, 表现稳定, 其中捷麦 19 均衡性最优(图 6 III)。由图 6 IV 可知, 相同种植带位下, 衡麦 27 的 F_v/F_m 值与铜麦 6 号差异不显著, 但二者均显著高于捷麦 19。在种植带 S_{6-8} 和 S_{8-10} 间衡麦 27 和铜麦 6 号的 F_v/F_m 值差异均显著, 捷麦 19 的 F_v/F_m 值在种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10} 与其他种植带间存在显著差异。

整体来看, 衡麦 27 和铜麦 6 号的 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)均显著高于捷麦 19。但衡麦 27 的 F_0 低, PS II 基态稳定; 铜麦 6 号 F_0 高, 反应中心可逆性损伤大; 捷麦 19 的 F_v 最稳定, 但 F_v/F_m 最低。这可能与其遗传特性有关, 也可能是对盐碱环境的适应性响应。

2.2.3 实际光化学效率(Φ_{PSII})与电子传递效率(ETR)

衡麦 27 的 Φ_{PSII} 与铜麦 6 号差异不显著, 二者均显著高于捷麦 19(图 6 V)。具体而言, 衡麦 27 的 Φ_{PSII} 在种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10} 下分别最高和最低; 捷麦 19 的 Φ_{PSII} 在不同种植带下表现相对稳定, 仅在种植带 S_{8-10} 下较低; 铜麦 6 号则在种植带 S_{0-2} 和 S_{2-4} 下较高, S_{8-10} 下最低。这表明, 衡麦 27 与铜麦 6 号在不同种植带下均能维持较高的光能利用效率, 整体表现优于捷麦 19。

ETR 显著受品种影响, 但衡麦 27 与铜麦 6 号间差异不显著(图 6 VI)。各品种的 ETR 均在种植带 S_{8-10} 下达到最低。其中, 衡麦 27 和铜麦 6 号的 ETR 在种植带 S_{0-2} 和 S_{2-4} 下相对较高, 捷麦 19 的 ETR 则在种植带 S_{2-4} 和 S_{4-6} 下表现较高。

2.3 不同种植带下小麦产量及构成要素和生物量的差异

品种、种植带及其互作对小麦千粒重、穗数、产量、生物量和收获指数均有显著影响, 而穗粒数仅受品种主效应调控(表 1)。衡麦 2 的产量在不

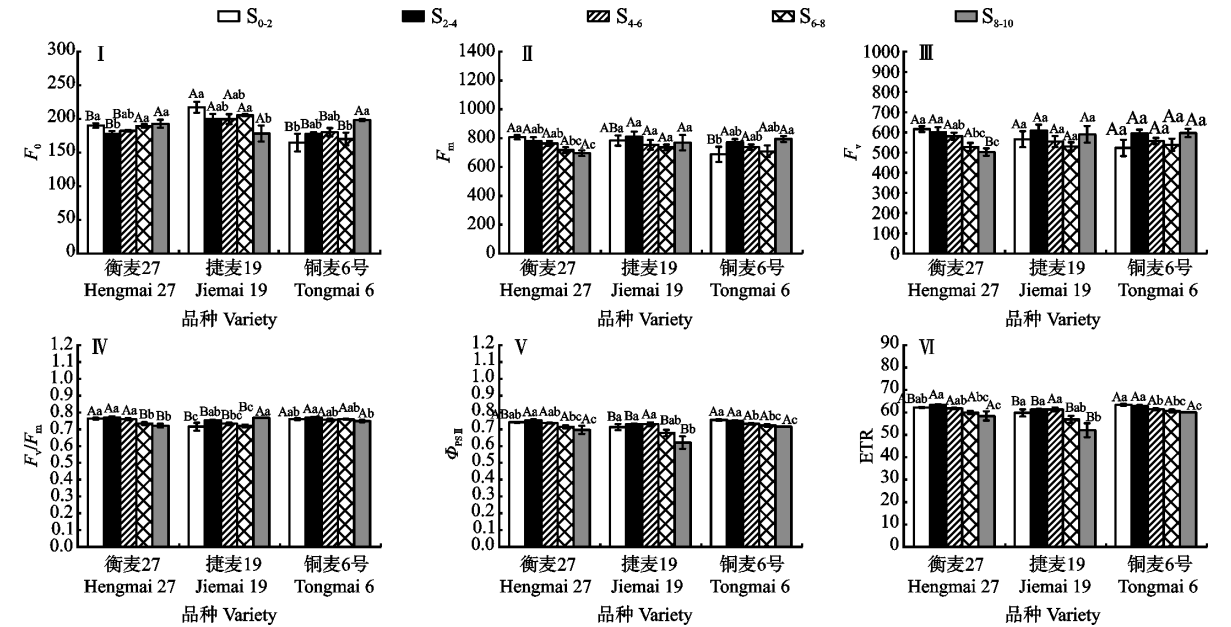


图 6 不同种植带下 3 个小麦品种叶绿素荧光参数的差异
Fig. 6 Difference of chlorophyll fluorescence parameters of wheat under different planting areas
图柱上不同大写和小写字母分别表示品种间和种植带间在 0.05 水平上差异显著。
Different capital and normal letters above the columns indicate significant differences among different varieties and planting areas at 0.05 level, respectively.

图 6 不同种植带下 3 个小麦品种叶绿素荧光参数的差异
Fig. 6 Difference of chlorophyll fluorescence parameters of wheat under different planting areas

表 1 不同种植带下 3 个小麦品种产量及收获指数的差异

Table 1 Differences of yield and harvest index of the three wheat varieties under different planting areas

品种 Variety	种植带 Planting area	穗数 Spikes/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获指数 Harvest index/%
衡麦 27 Hengmai 27	S_{0-2}	469.12 $\pm$ 2.55b	22.32 $\pm$ 0.51a	43.52 $\pm$ 0.09d	4 555.89 $\pm$ 84.28b	8 869.49 $\pm$ 41.41b	51.36 $\pm$ 0.73a
	S_{2-4}	531.93 $\pm$ 10.14a	21.97 $\pm$ 0.29a	44.64 $\pm$ 0.31b	5 216.30 $\pm$ 138.50a	10 118.47 $\pm$ 120.59a	51.54 $\pm$ 3.18a
	S_{4-6}	548.61 $\pm$ 14.82a	21.22 $\pm$ 1.18a	45.65 $\pm$ 0.11a	5 309.32 $\pm$ 185.44a	10 532.46 $\pm$ 413.18a	50.41 $\pm$ 1.72a
	S_{6-8}	523.04 $\pm$ 24.41a	21.43 $\pm$ 0.88a	44.18 $\pm$ 0.10c	4 948.87 $\pm$ 177.05a	9 852.42 $\pm$ 228.37a	50.23 $\pm$ 0.74a
	S_{8-10}	481.91 $\pm$ 23.11b	21.08 $\pm$ 1.32a	42.32 $\pm$ 0.39e	4 292.29 $\pm$ 141.20b	8 417.35 $\pm$ 36.32c	50.99 $\pm$ 1.47a
捷麦 19 Jiema 19	S_{0-2}	604.19 $\pm$ 40.03a	17.88 $\pm$ 0.61a	38.25 $\pm$ 0.11b	4 127.62 $\pm$ 166.71b	8 396.03 $\pm$ 144.52c	49.15 $\pm$ 1.14a
	S_{2-4}	594.19 $\pm$ 9.63a	18.40 $\pm$ 1.02a	42.62 $\pm$ 0.57a	4 657.33 $\pm$ 207.73a	9 953.14 $\pm$ 231.47b	46.78 $\pm$ 1.38ab
	S_{4-6}	608.64 $\pm$ 31.94a	18.98 $\pm$ 0.28a	42.24 $\pm$ 0.45a	4 884.69 $\pm$ 371.18a	10 602.21 $\pm$ 431.70a	46.03 $\pm$ 1.64b
	S_{6-8}	588.63 $\pm$ 20.29a	18.53 $\pm$ 1.4a	42.69 $\pm$ 0.39a	4 648.99 $\pm$ 205.78a	9 622.81 $\pm$ 293.92b	48.30 $\pm$ 0.72ab
	S_{8-10}	601.41 $\pm$ 25.47a	18.28 $\pm$ 1.29a	37.79 $\pm$ 0.37b	4 148.82 $\pm$ 186.47b	8 531.90 $\pm$ 277.24c	48.62 $\pm$ 1.38a
铜麦 6 号 Tongmai 6	S_{0-2}	359.62 $\pm$ 12.95a	25.95 $\pm$ 0.89a	31.80 $\pm$ 0.42c	2 970.23 $\pm$ 213.49b	6 561.86 $\pm$ 245.58b	45.23 $\pm$ 1.74b
	S_{2-4}	351.29 $\pm$ 18.37a	25.03 $\pm$ 0.53a	35.59 $\pm$ 0.10b	3 127.61 $\pm$ 108.18b	6 721.40 $\pm$ 78.47ab	46.52 $\pm$ 1.07ab
	S_{4-6}	345.73 $\pm$ 9.18a	25.92 $\pm$ 1.12a	38.80 $\pm$ 0.61a	3 475.82 $\pm$ 152.34a	7 191.28 $\pm$ 252.70a	48.34 $\pm$ 1.50a
	S_{6-8}	349.06 $\pm$ 12.95a	25.32 $\pm$ 0.55a	35.22 $\pm$ 0.20b	3 111.40 $\pm$ 74.77b	6 748.44 $\pm$ 202.36ab	46.12 $\pm$ 0.86ab
	S_{8-10}	350.17 $\pm$ 2.89a	25.63 $\pm$ 1.50a	32.27 $\pm$ 0.28c	2 897.56 $\pm$ 202.85b	6 414.81 $\pm$ 370.91b	45.19 $\pm$ 2.29b
品种 Variety		**	**	**	**	**	**
种植带 Planting area		NS	NS	**	**	**	**
品种 $\times$ 种植带 Variety $\times$ planting area		**	NS	**	NS	**	**

同一列数值后不同字母表示同一品种不同种植带间差异显著($P < 0.05$)。*: $P < 0.01$; NS: $P > 0.05$ 。
Different letters after the values in the same columns indicate significant differences among different planting areas of the same varieties at 0.05 level. *: $P < 0.01$; NS: $P > 0.05$.

同种植带间差异显著,其中种植带 S_{4-6} 最高。种植带对产量的影响主要归因于千粒重的变化。随着种植带向光伏板靠近,遮荫程度逐渐增加,千粒重降低,其中铜麦 6 号的降幅最大(8%~18%),衡麦 27 降幅最小(2%~7%);捷麦 19 的千粒重对轻度遮荫反应不显著,在遮荫程度较大的种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10} 中下降显著。此外,衡麦 27 的穗数在种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10} 下显著低于中间种植带。在种植带 S_{4-6} 下 3 个品种的生物量均显著高于其他种植带。衡麦 27 的收获指数在不同种植带之间差异不显著。在种植带 S_{4-6} 下,捷麦 19 和铜麦 6 号的收获指数分别为最低和最高。

3 讨论

光合作用分为光反应与碳同化两个阶段,前者依赖光能捕获与电子传递,可用叶绿素荧光参数表征,后者依赖 CO_2 供应与 Rubisco 活性,受气孔导度调节^[12-13]。环境改变(如遮荫)会首先干扰光反应,进而通过能量供给影响气孔开闭与碳同化速率^[14]。因此,结合气体交换与荧光技术,可系统解析不同环境胁迫下光合作用的限制机制及其品种间差异。本研究中,不同小麦品种在距光伏板不同距离的种植带中表现出显著差异的光合与荧光响应特征。光伏板随太阳高度动态调节,导致东西两侧边缘区域(种植带 S_{0-2} 和 S_{8-10}) 在早晚时段遭受强烈遮挡,有效光照时间缩短,PAR 累积量低于中心区(种植带 S_{4-6})。这种时段性弱光打破了光周期节律,影响气孔日动态调节与碳同化进程,表现为净光合速率(P_n)下降和光合峰值推迟。前人遮荫试验中也观察到类似现象^[15-16]。同时,光伏板遮荫降低了地表温度,减弱蒸散使土壤湿度维持较高水平,这有助于减缓盐碱地表层积盐风险^[17]。

针对这种非均匀分布的光-温-水环境,不同小麦品种展现出截然不同的适应策略。衡麦 27 在整个遮荫梯度下均表现出较高的 P_n 、 G_s 、 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} ,且 F_0 较低,说明其具备完整的 PS II 结构与高效的能量转化能力,属于高效利用型耐荫策略,这类策略在弱光适应品种中已有报道^[18]。捷麦 19 整体光合能力偏低,但在强遮荫区以热耗散为主的防御优先型策略,虽牺牲部分光能利用率,但在动态遮荫环境中具有生存优势。铜麦 6 号则表现为 F_0 升高, F_v/F_m 下降, C_i 偏高,而 P_n 偏低,反映出其 PS II 结构不稳定、碳同化能

力弱、气孔调控失灵等问题,属于敏感脆弱型。

不同程度遮荫的处理对小麦产量构成因素的影响存在差异,其中遮荫处理对小麦的千粒重影响最显著^[7-8,19],本研究也得到类似结果。也有研究发现,遮荫对小麦籽粒产量的影响不仅取决于遮荫的程度,而且还与品种有关^[20]。重度遮荫处理降低了小麦籽粒产量,低强度的遮荫对籽粒产量影响不显著^[21]。在叶片和冠层水平存在生理和形态的补偿效应,以减轻光伏板遮荫对小麦产量的不利影响。此外,光伏板遮荫条件下铜麦 6 号的减产幅度远大于衡麦 27 和捷麦 19,表明其对遮光的反应更敏感,跟光合速率和荧光参数的变化规律表现一致。收获指数可以揭示源库关系存在显著的基因型依赖特征。衡麦 27 的收获指数在不同种植带下差异不显著;捷麦 19 出现生物量增大,但收获指数降低的源库失衡现象;而铜麦 6 号的生物量减小,但收获指数显著提升。这说明不同品种对遮荫的应对策略不同。

4 结论

光伏板遮荫具有明显的空间梯度效应,同时通过降低蒸发形成降温-增湿-保墒的微气候改良。强遮荫直接抑制小麦光能利用效率,光强和光合有效辐射是驱动光合变异的主导因子,气孔限制是主要调控因子。3 个品种中,衡麦 27 耐荫性强,适宜光伏板下种植;捷麦 19 具光保护能力,可作备选品种;铜麦 6 号敏感脆弱,不宜在光伏板下种植。

参考文献:

- [1] 蒋 赞,张丽丽,薛 平,等.我国小麦产业发展情况及国际经验借鉴[J].中国农业科技导报,2021,23(7):1.
Jiang Y,Zhang L L,Xue P,et al. Development status of wheat industry in China and international experience for reference [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*,2021,23(7):1.
- [2] 刘小京,郭 凯,封晓辉,等.农业高效利用盐碱地资源探讨[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(3):345.
Liu X J,Guo K,Feng X H,et al. Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2023,31(3):345.
- [3] Wang C Y,Qiao Y Z,Zong R,et al. Sub-soil plastic film mulch promotes the growth and yield improvement of winter wheat in coastal saline-alkali soil [J]. *Crop Science*,2024,64(1):442.
- [4] Weselek A,Bauerle A,Hartung J,et al. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an

- organic crop rotation in a temperate climate [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41(5):59.
- [5] Amaducci S, Yin X Y, Colauzzi M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production [J]. *Applied Energy*, 2018, 220:545.
- [6] Naseer M A, Hussain S, Zhang N Y, *et al.* Shading under drought stress during grain filling attenuates photosynthesis, grain yield and quality of winter wheat in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, 208(2):255.
- [7] Qiao X, Chen X W, Lei J J, *et al.* Apricot-based agroforestry system in Southern Xinjiang Province of China: Influence on yield and quality of intercropping wheat [J]. *Agroforestry Systems*, 2020, 94(2):477.
- [8] Li H W, Jiang D, Wollenweber B, *et al.* Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(4):267.
- [9] Al-Agele H A, Proctor K, Murthy G, *et al.* A case study of tomato (*Solanum lycopersicon* var. legend) production and water productivity in agrivoltaic systems [J]. *Sustainability*, 2021, 13(5):2850.
- [10] Marrou H, Wery J, Dufour L, *et al.* Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 44:54.
- [11] Valle B, Simonneau T, Sourd F, *et al.* Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops [J]. *Applied Energy*, 2017, 206:1495.
- [12] 陈开俊, 张吉善, 韩科峰, 等. 光伏板下不同大豆品种苗期适宜性筛选[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(4):535.
- Chen K J, Zhang J S, Han K F, *et al.* Suitability screening of soybean varieties at seedling stage under photovoltaic panels [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2023, 49(4):535.
- [13] 张永光, 吴霖升, 章钊颖. 卫星日光诱导叶绿素荧光遥感十年研究进展[J]. 遥感学报, 2025, 29(6):2162.
- Zhang Y G, Wu L S, Zhang Z Y. Satellite solar-induced chlorophyll fluorescence remote sensing: A decade of development [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(6):2162.
- [14] 于睿. 桑树和构树电生理特征及对土壤水分亏缺的差异响应[D]. 镇江: 江苏大学, 2024:105.
- Yu R. Electrophysiological characteristics of mulberry and *Broussonetia papyrifera* and their differential responses to soil water deficit [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024:105.
- [15] 车光欣, 李艳梅, 胡元泽, 等. 滇中石漠化地区光伏阵列对微气候-土壤的影响机制及效应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3):191.
- Che G X, Li Y M, Hu Y Z, *et al.* Mechanisms and effects of photovoltaic arrays on microclimate-soil in the rocky desertification area of central Yunnan Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3):191.
- [16] 马克城, 雷倩, 阮俊潮, 等. 华榛幼苗对遮荫的生长和生理响应[J]. 生态学报, 2025, 45(19):9755.
- Ma K C, Lei Q, Ruan J C, *et al.* Growth and physiological responses of *Corylus chinensis* seedlings to shading [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(19):9755.
- [17] 任羽飞, 封晓辉, 李静, 等. 遮荫对滨海盐碱地水盐迁移及油葵生长和生理的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(19):8636.
- Ren Y F, Feng X H, Li J, *et al.* Effects of shading on soil water and salt transport of coastal saline-alkali land and *Helianthus annuus* Linn. growth and physiology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19):8636.
- [18] 贾梦哈, 杨洋, 张一含, 等. 不同蓝光强度连续供光对生菜形态建成、光合特性及营养离子吸收的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(5):839.
- Jia M H, Yang Y, Zhang Y H, *et al.* Effects of different blue light intensities with continuous light on morphogenesis, photosynthetic characteristics and nutrient ion absorption of lettuce [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(5):839.
- [19] 张永强, 方辉, 范贵强, 等. 遮阴和种植密度对南疆滴灌冬小麦旗叶生理特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(11):1352.
- Zhang Y Q, Fang H, Fan G Q, *et al.* Effects of shading and planting density on the physiological characteristics of flag leaf and yield of winter wheat under drip irrigation in south Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(11):1352.
- [20] 牟会荣, 姜东, 戴廷波, 等. 遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2):599.
- Mu H R, Jiang D, Dai T B, *et al.* Effect of shading on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characters in wheat flag leaves [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2):599.
- [21] Artru S, Garré S, Dupraz C, *et al.* Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82:60.