

6-BA 对太子参生长后期的生理调节作用

马菊林, 邱玲玲, 谢寅峰*, 閻倩, 马迎莉, 梁文超

(南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学生命科学学院, 江苏 南京 210037)

摘要:【目的】探究外源生长调节剂 6-BA 对太子参生长后期生长及生理的影响, 为太子参高效栽培提供理论依据。【方法】采用不同质量浓度(0、20、40、60 mg/L)的 6-BA 于 5 月中旬进行叶面喷施处理, 测定其对太子参块根生长、抗氧化酶系统及光合特性的影响。【结果】①与对照相比, 各 6-BA 处理组太子参块根长、块根直径、鲜根产量、单株生物量、地上部分干质量、地下部分干质量均显著增加; 以 60 mg/L 处理效果最佳, 其中, 鲜根产量和单株生物量分别比 CK 提高 35.41% 和 41.60%, 均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。②适当质量浓度的 6-BA 处理显著提高了试验期间太子参叶片 SOD、POD 活性以及叶绿素和类胡萝卜素含量, 有效缓解 MDA 含量上升和光合色素下降的趋势。③各 6-BA 处理组均不同程度提高了太子参的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r), 降低了胞间二氧化碳浓度 (C_i), 有效缓解了主要由非气孔限制导致的光合“午休”现象; 以 60 mg/L 处理效果最佳, P_n 日均值、峰值和谷值分别比对照增加 51.76%、41.24% 和 64.47%。④与对照相比, 各 6-BA 处理组均不同程度提高了试验期间太子参叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 和 qP, 降低了 NPQ 值。⑤适宜质量浓度 (60 mg/L) 的 6-BA 处理显著提升了 φ_{Po} 、 ψ_o 、 φ_{Eo} 、 $E_{ABS/CSm}$ 、 $E_{TRo/CSm}$ 、 $E_{ETo/CSm}$ 和 c_{Plabs} , 降低了 φ_{Do} 和 $E_{Dlo/CSm}$, 说明 6-BA 处理增强了 PS II 光能吸收与分配利用效率及叶片比活性, 缓解了过剩激发能导致的光抑制。【结论】适宜质量浓度的 6-BA 处理可以有效增强太子参生长后期叶片抗氧化活性和光合性能, 促进生长, 提高块根产量。光合性能的改善与叶片抗氧化活性及 PS II 光化学活性的增强有关。

关键词:太子参; 6-BA; 抗氧化系统; 光合作用; 叶绿素荧光

中图分类号: S718

文献标志码: A

文章编号: 1000-2006(2025)01-0137-08

Physiological regulation of 6-BA on late growth of *Pseudostellaria heterophylla*

MA Julin, QIU Lingling, XIE Yinfeng*, LÜ Qian, MA Yingli, LIANG Wenchao

(Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Life Sciences, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: 【Objective】This research aims to investigate the effects of exogenous growth regulator 6-BA on the growth and physiology of *Pseudostellaria heterophylla* at the late growth stage and to provide a theoretical basis for efficient cultivation of *P. heterophylla*. 【Method】Different concentrations of 6-BA (0, 20, 40, 60 mg/L) were applied to the leaves in mid-May to determine the effects of 6-BA on root tuber growth, the antioxidant enzyme system, and the photosynthetic characteristics of *P. heterophylla*. 【Result】(1) Compared to the control (CK), the root length, root diameter, fresh root yield, biomass per plant, dry weight of the aboveground part, and dry weight of the underground part of *P. heterophylla* in each 6-BA treatment group were significantly increased, with the 60 mg/L treatment showing the most pronounced effect. The fresh root yield and biomass per plant increased by 35.41% and 41.60%, respectively, compared to the CK, and these differences were statistically significant ($P < 0.05$). (2) The 6-BA treatment with an appropriate mass concentration significantly increased the activities of SOD and POD, as well as the chlorophyll and carotenoid contents in *P. heterophylla* leaves during the experiment. It also effectively mitigated the rising trend of MDA content and the declining trend of photosynthetic pigments. (3) The P_n , G_s , and T_r of *P. heterophylla* increased to varying degrees while C_i decreased, effectively alleviating the "nap" phenomenon of photosynthesis caused by non-stomatal restriction.

收稿日期 Received: 2023-03-03

修回日期 Accepted: 2024-03-14

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者: 马菊林(majulinlin@163.com)。* 通信作者: 谢寅峰(xxyff@njfu.edu.cn), 教授。

引文格式: 马菊林, 邱玲玲, 谢寅峰, 等. 6-BA 对太子参生长后期的生理调节作用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(1): 137-144. MA J L, QIU L L, XIE Y F, et al. Physiological regulation of 6-BA on late growth of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(1): 137-144. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202303007.

The 60 mg/L treatment had the most significant effect. The daily mean, peak, and trough values of P_n increased by 51.76%, 41.24%, and 64.47%, respectively. (4) Compared to the control, the chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_m , F_v'/F_m' , Φ_{PSII} , and qP in each 6-BA treatment group increased to varying degrees during the experiment, while the NPQ value decreased. (5) The φ_{Po} , ψ_o , φ_{Eo} , $E_{ABS/CSm}$, $E_{TRo/CSm}$, $E_{ETo/CSm}$, and c_{Plabs} significantly increased, while φ_{Do} and $E_{DTo/CSm}$ decreased with 6-BA treatment at an appropriate mass concentration (60 mg/L). These results indicated that the 6-BA treatment enhances the efficiency of PS II light energy absorption, allocation, and utilization, as well as leaf-specific activity, alleviating the photoinhibition caused by excess excitation energy.【Conclusion】 The 6-BA treatment at an appropriate mass concentration effectively enhances the antioxidant activity and photosynthetic performance of *P. heterophylla* leaves at the late growth stage, promoting growth and increasing root yield. The improvement in photosynthetic performance is related to enhancing antioxidant activity and PS II photochemical activity in the leaves.

Keywords: *Pseudostellaria heterophylla*; 6-BA; antioxidant system; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

太子参(*Pseudostellaria heterophylla*)为石竹科孩儿参属异叶假繁缕的干燥块根,为我国传统中药材^[1],具有益气健脾、生津润肺、保护心肌、降血糖、调节免疫等多种功效^[2-5],药用和经济价值极高。近年来,随着太子参需求量的不断增加,人工种植面积不断扩大,但是太子参性喜湿凉,适宜的生长温度为10~20℃;人工栽培条件下,春夏之交气温达30℃以上时,其地上部分茎叶即停止生长并逐渐衰老死亡,地下部块根物质积累达到最大值并进入休眠状态^[6],导致植株有效光合期较短,栽培效率不高,产量低下。因此,如何增强太子参生长后期生理功能及延缓叶片衰老,对太子参高产栽培具有重要的理论和现实意义。

6-苄基腺嘌呤(6-BA)作为一种常用的细胞分裂素类植物生长调节剂能够延缓植物衰老、促进植物的生长发育及器官形成^[7]。研究表明,使用不同浓度6-BA溶液处理可以提高小麦抗氧化酶活性,降低MDA含量,延缓旗叶衰老^[8];叶面喷施一定浓度的6-BA可以明显延缓甘蓝型油菜光合色素的降低,改善叶片光合特性,提升叶片光合能力,延长光合作用时间^[9]。目前,有关6-BA对植物地下部分生长调节作用的研究尚不多见,以药用植物太子参为材料的相关研究鲜见报道。本研究通过使用不同浓度的6-BA叶面喷施处理,探讨其对太子参生长后期块根生长、叶片抗氧化酶活性及光合作用特性等的影响,以期对太子参的高效栽培提供理论和应用依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省句容市下蜀镇南京林业大学下蜀林场(119°12'E,31°59'N),属北亚热带季风气候,年均气温15.2℃,年均降水量1104mm,年

均日照约2018h,无霜期229d。土壤为黄棕壤,土质为重壤至壤质。耕层(0~20cm)土壤含全N 704mg/kg、全P 146mg/kg、有效P 12.5mg/kg、速效K 103.7mg/kg、有机质7.39g/kg,pH 4.5~5.5。

1.2 试验设计

2019年11月底播种太子参。整地做畦起垄,共起5垄,垄长14m、宽1m、高25cm。在垄上开沟5条,深约15cm,行距15cm。种植时首先在沟中均匀撒入适量复合肥和草木灰,然后条播太子参,株距3~4cm,播种量为100g/m²。外源6-BA处理于2020年5月中下旬选择晴朗天气进行,共设置4个质量浓度,分别为0、20、40、60mg/L,依次记作CK(对照)、B1、B2、B3。每个处理设3个(小区)重复,每个试验小区面积为2m²(2m×1m),共12个小区。采用叶面喷施法进行处理,以叶面滴水为度,共处理2次,间隔时间为1周。处理后每隔1周进行生理指标取样测定,试验结束后进行生物量测定。试验期间常规田间管理。

1.3 指标测定

1)生长指标。每个处理小区随机挖取20株太子参带回实验室,将样品表面洗净擦干,分为地上部分和地下部分两部分,分别称取鲜质量,然后置于烘箱中105℃杀青15min后60℃烘干至恒定质量^[10],称量各部分干质量。根系生长指标包括主根长(芽眼到最底部的长度)、块根长(芽眼到块根变细处的长度)、块根直径(块根膨大处的直径)、块根生物量等。

2)抗氧化酶活性。采用改良的TBA法^[11]测定MDA含量,采用NBT法^[12]测定SOD活性,采用愈创木酚法^[13]测定POD活性。

3)叶片光合色素及光合日变化参数。叶绿素和类胡萝卜素含量测定采用丙酮-乙醇等量混合浸提法^[14]。光合作用日变化参数采用Li-6400R(Li-

cor)便携式光合测定仪于处理后3周(天气晴朗)测定。测定时间为7:00—17:00,每隔2h测1次^[15],测定叶片随机选择各部位受光良好、长势一致的倒数第2片叶片,每个处理6株重复。测定指标包括:光合有效辐射(L_{PAR})、大气 CO_2 浓度(C_a)、大气温度(T_a)、空气相对湿度(φ)、净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)。

4) 叶绿素荧光参数动态变化。叶绿素荧光参数周动态变化采用英国 Technologica 公司的叶绿素荧光快速成像系统 Chlorophyll fluorescence Imager (CF Imager),随机选取生长正常、部位一致的叶片进行测定,每个小区3片重复,每处理9个重复。测定指标包括:PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、有效光化学效率(F_v'/F_m')、PS II 实际光化学效率(Φ_{PSII})、PS II 光化学淬灭系数(qP)以及 PS II 非光化学淬灭系数(e_{NPQ})。采用 Handy PEA (Hansatech,英国)测定叶绿素荧光动力学参数,测定指标包括单位叶面积反应中心数($N_{RC/CSm}$)、单位叶面积热耗散的能量($E_{Dio/CSm}$)、单位叶面积吸收的光能($E_{ABS/CSm}$)、单位叶面积捕获的光能($E_{TRo/CSm}$)、单位叶面积电子传递的量子产额($E_{ETo/CSm}$)、单位叶面积的热耗散($E_{Dio/CSm}$)、PS II 捕获能量从 Q_A (与D1蛋白结合的质体醌)传递到 Q_B (与D2蛋白结合的质体醌)的效率(ψ_o)、电子传递的量子比率(φ_{Eo})、受体侧末端电子受体的量子产额(φ_{Ro})、综合性能指数(I_{total})以及 φ_{Po} [原初光化

学反应(电子传递至 QA^-)效率]、 ψ_o ($t=0$ 时,PS II 活性反应中心捕获的激子驱动电子传递的比率)、 φ_{Eo} ($t=0$ 时,电子从 QA^- 转移到电子传递链的量子效率)、 φ_{Do} ($t=0$ 时,能量耗散的量子效率)、 $E_{ABS/CSm}$ (达到荧光最大值时,单位叶截面积吸收的能量)、 $E_{TRo/CSm}$ (达到荧光最大值时,单位叶截面积捕获的能量)、 $E_{ETo/CSm}$ (达到荧光最大值时,单位叶截面积电子传递的能量)、 $E_{Dio/CSm}$ (达到荧光最大值时,单位叶截面积热耗散的能量)、 $N_{RC/CSm}$ (达到荧光最大值时,单位叶截面积活性反应中心的数量)和 c_{Plabs} (基于吸收的性能指数)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理分析和作图,以 SPSS 25.0 进行差异显著性等统计分析。

2 结果与分析

2.1 6-BA对太子参块根生长的影响

太子参主根和块根生长量、单位面积鲜根产量、单株生物量、地上部分干质量、地下部分干质量随6-BA质量浓度的增加均有不同程度的提高(表1)。其中,B3处理(60 mg/L)效果最佳,与对照相比,主根长、鲜根产量和单株生物量分别增长了30.43%、35.41%、41.60%,且差异显著($P<0.05$),说明适当质量浓度的6-BA对太子参主根生长和块根生物量积累具有显著的促进作用,同时也有利于地上部分养分向地下部分转移。

表1 不同质量浓度的6-BA对太子参块根生长的影响

Table 1 Effects of different concentrations of 6-BA on growth of *Pseudostellaria heterophylla* root tuber

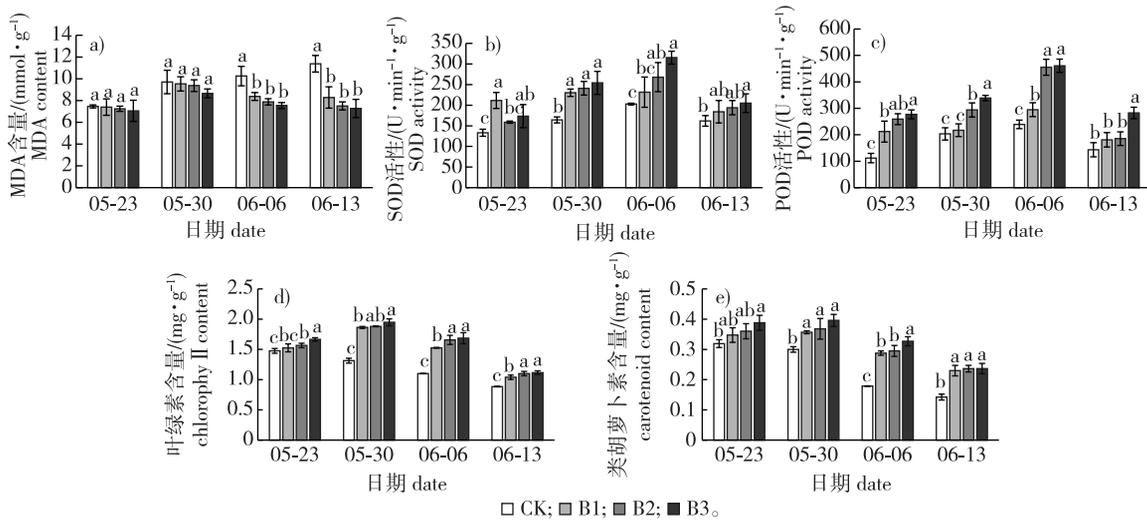
| 6-BA 处理/ (mg·L ⁻¹) treatment | 主根长/cm main root length | 块根 root tube | | 鲜根产量/ (g·m ⁻²) fresh root yield | 单株生物量/g biomass allocation | 地上部分 干质量/g aerial part weight | 地下部分 干质量/g underground part weight |
|--|-------------------------------|----------------------|------------------------|---|----------------------------------|--|---|
| | | 根长/cm root length | 直径/mm root diameter | | | | |
| 0(CK) | 8.38±0.81 b | 3.45±0.47 b | 4.78±0.37 b | 302.97±7.34 c | 3.51±0.07 c | 1.99±0.09 c | 1.52±0.05 c |
| 20(B1) | 8.93±0.46 b | 3.94±0.63 ab | 5.11±0.38 ab | 365.98±15.88 b | 4.04±0.13 b | 2.15±0.12 b | 1.88±0.10 b |
| 40(B2) | 10.81±0.47 a | 4.15±0.36 a | 5.07±0.42 ab | 364.87±9.07 b | 4.07±0.09 b | 2.20±0.06 b | 1.87±0.05 b |
| 60(B3) | 9.93±0.89 ab | 4.11±0.33 a | 5.61±0.37 a | 410.23±12.92 a | 4.97±0.17 a | 2.52±0.14 a | 2.45±0.05 a |

注:表中不同小写字母表示同列不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters in the table indicate significant differences at 0.05 level between different treatments in the same column. The same below.

2.2 6-BA对太子参叶片抗氧化酶活性的影响

试验期间,太子参对照组叶片MDA含量呈增加趋势,不同质量浓度的6-BA处理对太子参叶片MDA含量具有不同程度的抑制作用,其中B3处理抑制作用最明显,试验期间的不同取样点,MDA含量分别比对照降低5.36%、10.81%、26.44%和36.12%(图1a),说明一定质量浓度的6-BA可以有效缓解太子参生长后期叶片膜脂过氧化程度的

加剧,减轻细胞膜结构损伤。由图1b可知,试验期间,与对照相比,各6-BA处理组均不同程度地提高了太子参叶片SOD活性,缓解试验后期SOD活性的下降,且以B3处理效果最佳。POD活性变化趋势与SOD类似(图1c),说明6-BA处理下SOD和POD协同作用增强了太子参叶片的抗氧化活性。



图中不同小写字母表示同一时间不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate in the figure significant differences at 0.05 level among different treatments at the same time. The same below.

图 1 不同质量浓度 6-BA 对太子参叶片 MDA 含量、SOD 和 POD 活性及叶绿素和胡萝卜素含量的影响
 Fig. 1 Effects of different concentrations of 6-BA on MDA content, SOD activity and POD activity, chlorophyll and carotenoid contents of *P. heterophylla* leaves

2.3 6-BA 对太子参叶片光合色素的影响

随 6-BA 处理时间的延长,各处理组太子参叶片叶绿素含量也随处理时间的延长均呈现不同程度的下降趋势(图 1d);在同一处理时间,随 6-BA 质量浓度的增加太子参叶片叶绿素含量呈逐渐增加的趋势,且 B3 处理下叶绿素含量最高,在 5 月 30 日, B3 处理的叶片叶绿素含量高于对照 48.90%,差异显著 ($P < 0.05$),表明 6-BA 处理可以不同程度地提高太子参叶片叶绿素含量,增强太子参光合作用效率,进而提高太子参产量。

由图 1e 可知,在试验期间,除对照组外,各处理组太子参叶片类胡萝卜素含量随着 6-BA 质量浓度的增加呈逐渐增加的趋势,各处理组类胡萝卜素含量在 B3 时最高,各时期 B3 处理组太子参叶

片类胡萝卜素含量分别比对照高出 21.86%、33.34%、83.34%、71.43%,且差异显著 ($P < 0.05$)。说明一定质量浓度的 6-BA 处理可以有效提高太子参叶片类胡萝卜素含量,同时表明当叶片衰老时,类胡萝卜素合成减弱、降解增强。

2.4 6-BA 对太子参光合日变化动态参数的影响

测定当日天气晴朗,太子参叶片 PAR 呈先升后降的趋势,日均值为 $1\ 087.02\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在 13:00 达到峰值 $1\ 523.37\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C_a 呈先降后升的趋势,日均值为 $407.16\ \mu\text{mol}/\text{mol}$,在 13:00 达到谷值 ($398.36\ \mu\text{mol}/\text{mol}$) (图 2)。由图 2 还可知, T_a 的变化趋势与 PAR 一致,在 13:00 达到峰值 ($36.88\ ^\circ\text{C}$),日均值为 $32.88\ ^\circ\text{C}$; φ 的变化趋势与 C_a 一致,在 13:00 达到谷值 (64.47%),日均值为

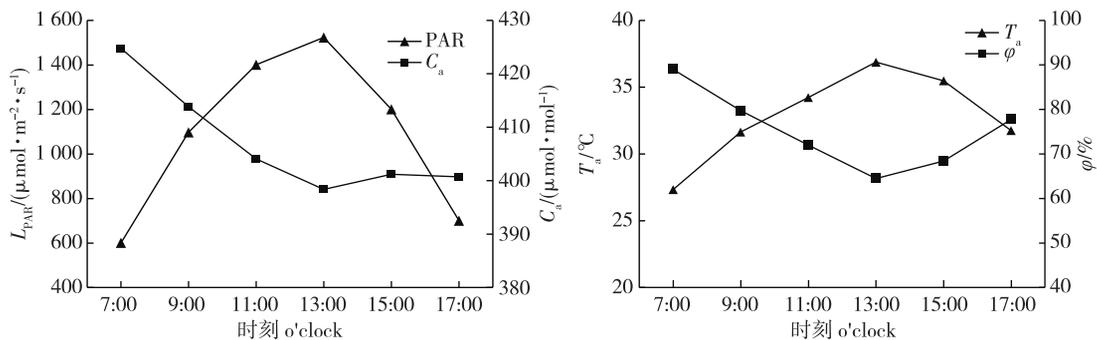


图 2 光合有效辐射 (L_{PAR})、大气 CO_2 浓度 (C_a)、大气温度 (T_a)、空气相对湿度 (φ) 的日变化
 Fig. 2 Diurnal variations of photosynthetic effective radiation (L_{PAR}), atmospheric CO_2 concentration (C_a), atmospheric temperature (T_a) and atmospheric humidity (φ)

75.24%。

6-BA对太子参光合参数的影响见图3。由图3a可知,试验期间,太子参叶片净光合速率 P_n 日变化均为双峰型曲线,两个峰值分别出现在9:00和15:00,且第2个峰值始终低于第1个峰值。太子参叶片净光合速率日变化有明显的“午休”现象,B3处理下太子参叶片净光合速率日均值最大,高于对照51.76%,且差异显著($P<0.05$),说明适当质量浓度的6-BA可有效缓解太子参光合“午休”现象。

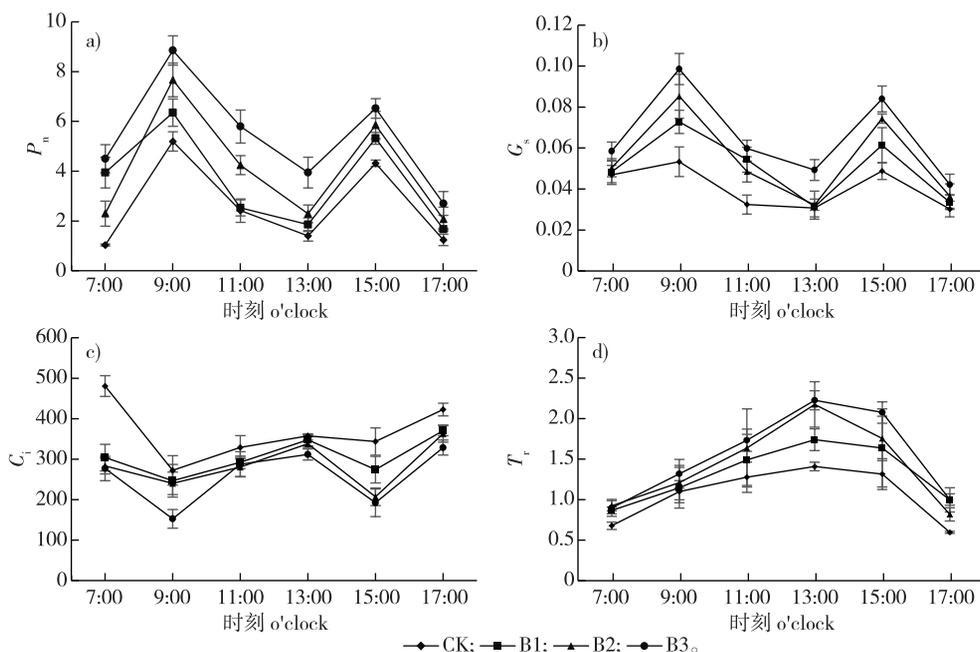


图3 6-BA对太子参净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)日变化的影响
Fig. 3 Effects of 6-BA on diurnal changes of net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular carbon dioxide concentration (C_i) and transpiration rate (T_r) of *P. heterophylla*

由图3d可知,不同质量浓度6-BA处理下的 T_r 日变化呈单峰型曲线,峰值出现在13:00, T_r 随6-BA质量浓度的增加呈先升后降的趋势,各6-BA处理组 T_r 日均值分别高出对照23.58%、25.35%、31.17%,且差异显著($P<0.05$)。

2.5 6-BA对太子参叶片叶绿素荧光参数动态变化、PS II能量分配及比活性参数的影响

在试验期间,对照组 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 qP 呈不同程度的下降趋势,各6-BA处理组 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 qP 变化趋势一致,呈上升趋势,且在B3处理下 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 qP 均有最高值;在5月30日 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 qP 高于对照1.30%、17.40%、37.5%、15.71%。与对照相比,各6-BA处理组 e_{NPQ} 均出现不同程度的下降,5月30日,B3处理组的 e_{NPQ} 值与对照相比降低4.43%,但差异不显著($P>0.05$)(图4)。

由图3b可知,太子参叶片气孔导度 G_s 日变化趋势与净光合速率 P_n 日变化趋势一致,均呈“M”形曲线,两个峰值也出现在9:00和15:00,B3处理下太子参叶片 G_s 日变化值最高,比对照高出62.5%,差异显著($P<0.05$)。由图3c可知,太子参叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)日变化趋势与 P_n 相反,呈“W”形曲线,两个谷值分别出现在9:00和15:00,各6-BA处理组 C_i 日均值分别低于对照组16.83%、22.40%、29.79%,且差异显著($P<0.05$)。

选用B3处理组与对照组分析其对太子参生长后期PS II量子产额和能量分配比率的影响,结果见表2,其中, φ_{P_0} 、 ψ_0 、 φ_{E_0} 、 φ_{D_0} 反映量子产额和能量分配比率。由表2可知,B3处理下的 φ_{P_0} 、 ψ_0 、 φ_{E_0} 均高于CK组且差异显著($P<0.05$),而热耗散的量子比率(φ_{D_0})显著低于CK组,表明6-BA处理对生长后期太子参叶片PS II光能分配具有显著调节作用,即显著促进了太子参光能吸收、捕获、转化为光化学能的能力的同时,减少了以热耗散方式消耗的光能。

比活性参数 $E_{ABS/CSm}$ 、 $E_{TRo/CSm}$ 、 $E_{ETo/CSm}$ 、 $E_{Dlo/CSm}$ 能准确反映植物的光合器官对光能的吸收、转化、耗散等状况。由表2可知,6-BA处理下叶片的 $E_{ABS/CSm}$ 、 $E_{TRo/CSm}$ 和 $E_{ETo/CSm}$ 大于CK组,而 $E_{Dlo/CSm}$ 显著低于CK组($P<0.05$)。

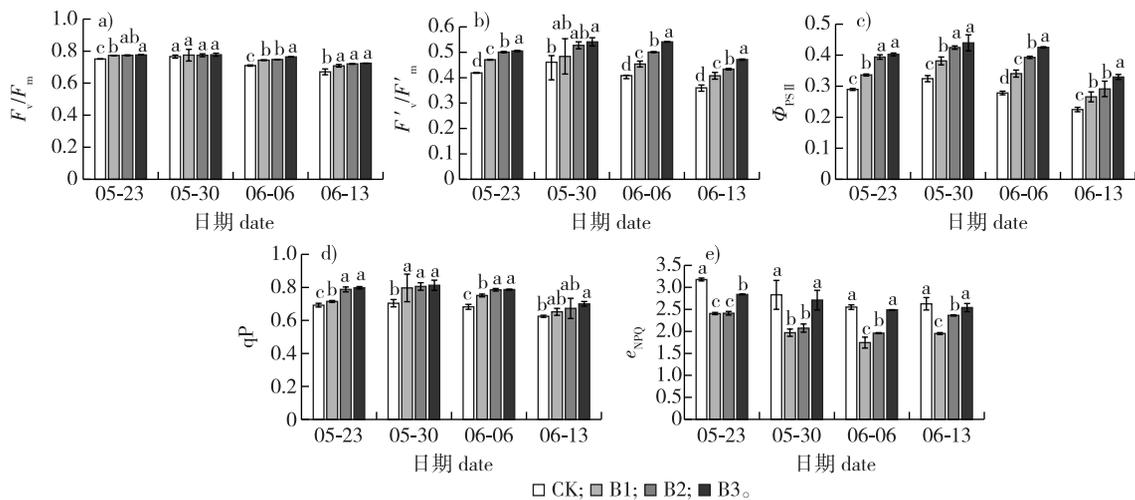


图 4 6-BA 对生长后期衰老太子参叶片叶绿素荧光参数动态变化的影响

Fig. 4 Effects of 6-BA on dynamic changes of chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *P. heterophylla* at late growth

表 2 6-BA 对太子参生长后期 PS II 能量分配及比活性参数的影响

Table 2 Effects of 6-BA on PS II energy distribution and specific activity parameters at late growth stage of *P. heterophylla*

| 活性参数 activity parameter | CK | B3 |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| φ_{P_0} | 0.60±0.04 b | 0.76±0.02 a |
| Ψ_0 | 0.38±0.03 b | 0.50±0.05 a |
| φ_{E_0} | 0.23±0.01 b | 0.38±0.04 a |
| φ_{D_0} | 0.41±0.04 a | 0.24±0.02 b |
| $E_{ABS/CSm}$ | 1 200.67±367.97 a | 1 299.00±124.07 a |
| $E_{TRo/CSm}$ | 720.40±188.50 b | 987.24±44.53 a |
| $E_{ETo/CSm}$ | 276.15±189.41 a | 493.62±91.83 a |
| $E_{Dlo/CSm}$ | 480.27±84.89 a | 311.76±82.44 b |
| $N_{RC/CSm}$ | 236.34±40.21 b | 304.61±43.53 a |
| c_{Plabs} | 0.19±0.05 b | 0.57±0.13 a |

$N_{RC/CSm}$ 表示单位面积有活性的反应中心的数量, c_{Plabs} 可以很好地反映植物光合性能的高低。由表 2 知, B3 处理组的 $N_{RC/CSm}$ 、 c_{Plabs} 均高于 CK 组, 且与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

太子参不耐高温强光, 自然状态下多分布于杂木林、阔叶林内及灌丛、林下岩石旁的凉湿环境。而人工栽培的太子参由于受高温、强光、干旱等环境条件的影响, 更易受到环境胁迫并呈现生理早衰, 从而影响块根产量^[6]。本研究表明, 春夏之交气温升高时太子参叶片 MDA 含量逐渐增加, 而叶

绿素和类胡萝卜素含量呈下降趋势, 表明其受胁迫影响产生生理功能的衰退。活性氧代谢失调、膜脂过氧化加剧导致的叶绿体色素受到破坏可能是其含量下降的主要原因^[16]。本研究中各 6-BA 处理组均不同程度增强了太子参叶片 SOD、POD 的活性, 抑制了生长后期叶片 MDA 含量的上升和叶绿素含量的下降, 表明外源 6-BA 能通过提高叶片的抗氧化能力缓解氧化胁迫对叶绿体、膜系统等细胞器的伤害, 延缓叶片生理功能的衰退, 与文献^[17-18]中采用 6-BA 缓解高温胁迫等对叶片生理伤害的结果类似。

光合作用作为植物生长的物质与能量基础, 不仅与植物产量紧密相关, 还反映植物衰老及抗逆性, 而光合日变化则直观反映植物一天中光合作用对环境变化响应的详细信息, 因而是分析环境因素影响植物光合能力的重要指标^[19]。本研究表明, 对照组太子参叶片 P_n 呈现典型的双峰型变化, 光合“午休”现象明显, 各外源 6-BA 处理组虽然没有改变太子参叶片净光合速率 P_n 的“M”形日变化趋势, 但使 P_n 日均值、峰值、谷值均得以提高, 光合“午休”现象得到有效缓解。根据 6-BA 处理下 P_n 、 G_s 的增强伴随着 C_i 下降的响应结果, 说明 6-BA 主要是通过改善非气孔限制即增强了叶肉细胞的光合活性提升了太子参的净光合能力^[20]。

叶绿素荧光作为光合作用的内探针^[21], 可以用来进一步分析 6-BA 提升太子参光合性能的内在机制。在光反应系统中, 与 PS I 相比, PS II 往往更易受到内外环境的影响, 也是植物受到高温、强光等逆境胁迫时, 光抑制发生的原初部位和主要部

位^[22]。 F_v/F_m 作为反映植物 PS II 生理状态及光抑制的重要指标^[23],在正常生长条件下较为稳定,并保持在 0.8 左右,在受到胁迫或衰老时才会下降。试验期间,对照组太子参 F_v/F_m 持续下降,后期明显低于 0.75,表明生长后期随着环境胁迫及太子参叶片的衰老,PS II 光抑制增强,使其对激发能的利用效率(F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII})明显下降,也进一步证明了太子参不耐强光和高温的生长特性;而过剩激发能的增多又易导致活性氧产生^[24]的增加以及光合机构的破坏^[25]。本研究从 MDA、叶绿素含量的变化趋势推测太子参生长后期膜脂过氧化及叶绿体色素降解的加剧与 PS II 光抑制及光破坏的增强有关;热耗散作为植物防御光抑制的有效途径,但对对照组太子参 e_{NPQ} 并未明显增强,反而呈下降趋势,可能是叶片衰老所导致光破坏的一种体现^[26]。适当浓度的 6-BA 处理(60 mg/L)显著增强了太子参 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、qP 值,有效缓解了上述参数的下降趋势,表明 6-BA 通过增强太子参叶片的光化学效率,提升生长后期的光合性能;而光化学效率的增强,有利于缓解过剩激发能的压力所导致的光抑制和光破坏。

基于荧光动力学参数的能量分配及比活性能更确切地反映植物光合器官对光能的吸收、传递、转化和耗散等状况^[27]。本研究中 60 mg/L 6-BA 处理下的太子参能量分配参数 φ_{P_0} 、 Ψ_0 、 φ_{E_0} 均高于对照,而 φ_{D_0} 有所下降,说明 6-BA 提高了 PS II 吸收的光能从被捕获至反应中心及电子传递等各个环节的分配比率,并降低了用于热耗散的量子比率。比活性参数($E_{ABS/CSm}$ 、 $E_{TRo/CSm}$ 、 $E_{ETo/CSm}$ 、 $E_{Dlo/CSm}$)以及 PS II 反应中心的密度参数(N_{RC/CS_0})测定结果进一步表明 6-BA 处理不仅增强了太子参 PS II 对光能的吸收及其转化效率,并且提高了叶片单位面积有活性的 PS II 反应中心的数量,从而显著提升了叶片的光化学活性及光合性能。

综上,适宜浓度的外源 6-BA 处理显著增强了太子参生长后期叶片抗氧化活性及光合性能,有效缓解了环境胁迫所加剧的光抑制、光破坏以及叶片生理功能的衰退,从而促进生长,提高太子参块根产量。PS II 光化学活性的增强,促进叶片对激发能的吸收、捕获及电子传递效率的全面提升是 6-BA 改善植物光合性能的主要原因,而光抑制、光破坏的缓解可能与 6-BA 处理下太子参抗氧化能力以及对过剩激发能的利用增强有关。本研究为太子参高产栽培提供了理论与应用依据,但有关 6-BA 对太子参块根品质的影响作用尚待进一步

研究。

参考文献 (reference):

- [1] WU L K, CHEN J, WU H M, et al. Insights into the regulation of rhizosphere bacterial communities by application of bio-organic fertilizer in *Pseudostellaria heterophylla* monoculture regime [J]. *Front Microbiol*, 2016, 7: 1788. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01788.
- [2] PANG W S, LIN S D, DAI Q W, et al. Antitussive activity of *Pseudostellaria heterophylla* (Miq.) Pax extracts and improvement in lung function via adjustment of multi-cytokine levels [J]. *Molecules*, 2011, 16 (4): 3360 - 3370. DOI: 10.3390/molecules16043360.
- [3] WU M, CHEN L J, HUANG X M, et al. Rapid authentication of *Pseudostellaria heterophylla* (Taizishen) from different regions by Raman spectroscopy coupled with chemometric methods [J]. *J Lumin*, 2018, 202: 239 - 245. DOI: 10.1016/j.jlumin. 2018. 05.036.
- [4] ZHANG L Y, GUO Z W, GAO H F, et al. Interaction of *Pseudostellaria heterophylla* with quorum sensing and quorum quenching bacteria mediated by root exudates in a consecutive monoculture system [J]. *J Microbiol Biotechnol*, 2016, 26 (12): 2159 - 2170. DOI: 10.4014/jmb.1607.07073
- [5] NG C W W, WANG Y C, NI J J, et al. Quality and yield of *Pseudostellaria heterophylla* treated with GGBS as pH adjuster against the toxicity of Cd and Cu [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 216: 112188. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112188.
- [6] 康传志,周涛,郭兰萍,等.全国栽培太子参生态适宜性区划分析[J].生态学报,2016,36(10):2934-2944. KANG C Z, ZHOU T, GUO L P, et al. Ecological suitability and regionalization of *Pseudostellaria heterophylla* (Miq.) Pax ex Pax et Hoffm. in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36 (10): 2934 - 2944. DOI: 10.5846/stxb201409231880.
- [7] 邵彩虹,唐秀英,李明心,等.6-苄基腺嘌呤延缓水稻衰老效应的蛋白质组学分析[J].华北农学报,2014,29(1):14-19. SHAO C H, TANG X Y, LI M X, et al. Proteomics analysis of mechanism of 6-benzyl adenine deferring contabescence of rice [J]. *Acta Agric Boreali Sin*, 2014, 29(1): 14 - 19. DOI: 10.7668/hbxb.2014.01.003.
- [8] 杨东清,王振林,尹燕桦,等.外源 ABA 和 6-BA 对不同持绿型小麦旗叶衰老的影响及其生理机制[J].作物学报,2013,39(6):1096-1104. YANG D Q, WANG Z L, YIN Y P, et al. Effects of exogenous ABA and 6-BA on flag leaf senescence in different types of stay-green wheat and relevant physiological mechanisms [J]. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(6): 1096 - 1104. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.01096.
- [9] 李玲,李俊,张春雷,等.外源 ABA 和 BR 在提高油菜幼苗耐渍性中的作用[J].中国油料作物学报,2012,34(5):489-495. LI L, LI J, ZHANG C L, et al. Effects of exogenous ABA and BR on waterlogging resistance of juvenile rapeseed [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2012, 34(5): 489 - 495.
- [10] 管宏友,张思兰,郭涛.基于³¹P 核磁共振分析的植物体内磷分级研究[J].中国土壤与肥料,2017(3):15-19. GUAN H Y, ZHANG S L, GUO T. Characterization of plant derived phosphorus with phosphorus ³¹ nuclear magnetic resonance study [J]. *Soil Fertil Sci China*, 2017 (3): 15 - 19. DOI: 10.11838/sfsc.20170304.
- [11] 魏鑫,高春燕,常纯皓,等.外源肌醇缓解长春花低温伤害的代

- 谢调控特征[J].植物生理学报,2021,57(12):2247-2257. WEI X, GAO C Y, CHANG C H, et al. Metabolic regulation characteristics of exogenous inositol alleviating low temperature injury of *Catharanthus roseus* [J]. Plant Physiol J, 2021, 57(12): 2247-2257. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2021.0256.
- [12] 何乐韵,周后珍,谭周亮,等.活性污泥中超氧化物歧化酶(SOD)活性测定影响因素[J].环境科学与技术,2012,35(12):146-149. HE L Y, ZHOU H Z, TAN Z L, et al. Interferential factors in determination of SOD activity of activated sludge[J]. Environ Sci Technol, 2012, 35(12): 146-149.
- [13] 侯林欣,吕强,黄明,等.不同温度水杨酸引发对于旱胁迫下玉米种子发芽及幼苗生理特性的影响[J].中国农学通报,2021,37(19):13-21. HOU L X, LYU Q, HUANG M, et al. SA priming of maize seeds at different temperature under drought stress: effects on seed germination and seedling physiological characteristics[J]. Chin Agric Sci Bull, 2021, 37(19): 13-21. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb2020-0504.
- [14] 韩文学,江皓,卞健,等.10个观赏海棠品种叶片春季色彩变化及其与色素含量的相关性[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(5):562-570. HAN W X, JIANG H, BIAN J, et al. Leaf color change and its correlation with pigment content in 10 ornamental crabapple varieties in spring[J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2020, 46(5): 562-570. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.2019.09.161.
- [15] 马迎莉,谷慧,张雨峰,等.稀土铈对太子参生长和光合特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(4):71-79. MA Y L, GU H, ZHANG Y F, et al. Effects of cerium nitrate on growth and photosynthetic characteristics of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2017, 41(4): 71-79. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201608009.
- [16] 王文银,高小刚,司晓林,等.外源钙盐对盐胁迫下沙拐枣渗透调节和膜脂过氧化的影响[J].环境科学研究,2017,30(8):1230-1237. WANG W Y, GAO X G, SI X L, et al. Effects of exogenous calcium on osmotic adjustment and peroxidation of *Calligonum mongolicum* membrane under salt stress[J]. Res Environ Sci, 2017, 30(8): 1230-1237. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.02.58.
- [17] 刘凯歌,朱月林,郝婷,等.叶面喷施 6-BA 对高温胁迫下甜椒幼苗生长和叶片生理生化指标的影响[J].西北植物学报,2014,34(12):2508-2514. LIU K G, ZHU Y L, HAO T, et al. Effect of foliar-spraying 6-BA on the growth and physiological and biochemical indexes of sweet pepper seedlings under high temperature stress[J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2014, 34(12): 2508-2514. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.12.2508.
- [18] 李颖,赵继浩,李金融,等.外源 6-BA 对不同生育时期淹水花生根系生长和荚果产量的影响[J].中国农业科学,2020,53(18):3665-3678. LI Y, ZHAO J H, LI J R, et al. Effects of exogenous 6-BA on root growth and pod yield of flooded peanut at different growth stages[J]. Sci Agric Sin, 2020, 53(18): 3665-3678. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2020.18.004.
- [19] 曾秀存,许耀照,孙万仓,等.白菜型冬油菜光合日变化特性研究[J].西南农业学报,2017,30(11):2490-2496. ZENG X C, XU Y Z, SUN W C, et al. Study on diurnal variation of photosynthesis for winter rapeseed (*Brassica rapes* L.) [J]. Southwest China J Agric Sci, 2017, 30(11): 2490-2496. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2017.11.017.
- [20] 姬慧娟,贾会霞,章小铃,等.干旱胁迫对红皮柳光合特性日变化及生长的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(6):41-46. JI H J, JIA H X, ZHANG X L, et al. Effect of drought stress on photosynthetic diurnal course and growth of *Salix purpurea* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2016, 40(6): 41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.06.007.
- [21] KUMAR D, SINGH H, RAJ S, et al. Chlorophyll a fluorescence kinetics of mung bean (*Vigna radiata* L.) grown under artificial continuous light [J]. Biochem Biophys Rep, 2020, 24: 100813. DOI: 10.1016/j.bbrep.2020.100813.
- [22] LI Y T, XU W W, REN B Z, et al. High temperature reduces photosynthesis in maize leaves by damaging chloroplast ultrastructure and photosystem II [J]. J Agronomy Crop Science, 2020, 206(5): 548-564. DOI: 10.1111/jac.12401.
- [23] 南吉斌,林玲.西藏 3 种沙棘属植物光合生理特性的比较[J].经济林研究,2019,37(4):96-103,111. NAN J B, LIN L. Comparisons of photosynthetic physiological characteristics of three species of *Hippophae* in Tibet [J]. Non Wood For Res, 2019, 37(4): 96-103, 111. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2019.04.013.
- [24] 张弦,王志博,聂雅婷,等.茉莉酸甲酯和油菜素内酯减轻苹果叶片光抑制的生理机制研究[J].西北农业学报,2017,26(6):906-915. ZHANG X, WANG Z B, NIE Y T, et al. Alleviation of photoinhibition by methyl jasmonate and brassinolide under strong light in apple leaves [J]. Acta Agric Boreali Occidentalis Sin, 2017, 26(6): 906-915. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2017.06.014.
- [25] 朱成刚,陈亚宁,李卫红,等.干旱胁迫对胡杨 PS II 光化学效率和激能耗散的影响[J].植物学报,2011,46(4):413-424. ZHU C G, CHEN Y N, LI W H, et al. Effect of drought stress on photochemical efficiency and dissipation of excited energy in photosystem II of *Populus euphratica* [J]. Chin Bull Bot, 2011, 46(4): 413-424. DOI: 10.3724/SP.J.1259.2011.00413.
- [26] 张金玲,陈海鹏,程达,等.毛乌素沙地臭柏(*Sabina vulgaris* Ant.)光抑制响应机制研究意义[J].干旱区研究,2018,35(4):882-890. ZHANG J L, CHEN H P, CHENG D, et al. Significance of photoinhibition response mechanism of *Sabina vulgaris* Ant. in the Muus sandland [J]. Arid Zone Res, 2018, 35(4): 882-890. DOI: 10.13866/j.azr.2018.04.16.
- [27] 吴思佳,李仁英,谢晓金,等.抽穗期高温对水稻叶片光合特性、叶绿素荧光特性和产量构成因素的影响[J].南方农业学报,2021,52(1):20-27. WU S J, LI R Y, XIE X J, et al. Effects of high temperature on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence and yield components of rice at heading stage [J]. J South Agric, 2021, 52(1): 20-27. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2021.01.003.

(责任编辑 郑琰焱)