

10份沿阶草族种质材料叶片光合特性对低温胁迫的响应及抗寒性评价

郑锋,白小明*,冉福,朱雅楠,闫玉邦,张才忠,郑四海

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】研究不同低温胁迫对沿阶草族种质的光合参数、叶绿素荧光特性的影响,以为沿阶草族种质在西北地区的合理栽培利用提供依据。【方法】以10份沿阶草族(Ophiopogoneae)种质为试验材料,设4个低温处理水平(5、0、-5和-10℃),以20℃为对照(CK),综合比较了10份沿阶草族种质的抗寒性。【结果】低温加重了光合作用的光抑制。随着胁迫加剧,10份沿阶草族种质净光合速率(P_n)呈先上升后降低趋势、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)呈降低趋势,而胞间 CO_2 浓度(C_i)呈上升趋势。10份沿阶草族种质变化趋势一致,但对低温胁迫的反应存在差异。金边麦冬的 P_n 下降幅度最小,受低温影响相对较小,而短药沿阶草受到的影响最大。在叶绿素荧光参数方面,温度降至-10℃,初始荧光(F_0)呈上升趋势,最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率($\Phi PS II$)呈先上升后降低趋势、电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qP)呈降低趋势。10份沿阶草族种质净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈显著正相关($P < 0.05$),净光合速率与初始荧光呈显著负相关($P < 0.05$),蒸腾速率与气孔导度呈极显著正相关($P < 0.01$),最大光化学效率与气孔导度、胞间 CO_2 浓度呈显著负相关($P < 0.05$),初始荧光与最大光化学效率呈显著正相关($P < 0.05$),与电子传递速率呈显著负相关($P < 0.05$)。隶属函数法综合分析显示,10份沿阶草族种质的抗寒性强弱依次为短药沿阶草>沿阶草(康县)>沿阶草(文县)>沿阶草(武都)>金边麦冬>山麦冬>玉龙草>沿阶草(河南)>禾叶山麦冬>麦冬。【结论】短药沿阶草、沿阶草(康县)、沿阶草(文县)种质抗寒性较强,更适宜在北方地区推广。

关键词:沿阶草族;低温胁迫;光合参数;叶绿素荧光;抗寒性;评价

中图分类号:S688.4 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2024)06-0042-11

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.06.005



中国西北地区秋冬季地被植物种类较少,品种较为单一,城市生态环境压力日趋严峻。因此,丰富地被植物,增加多层次植物配置具有提高城市绿化效果,突显地域文化特色和自然风貌色彩^[1],维持生态平

衡和防止水土流失等重要的作用。

光合作用是植物进行生长发育的物质基础,但植物的光合作用对低温、高温、干旱等在内的非生物逆境胁迫较为敏感^[2-3],因此,光合特性常被用作反映植物对逆境胁迫响应程度,判断植株生长状况及抗逆性强弱的重要指标^[4]。不适宜的温度往往会通过影响植物的光合能力进而对植物各个生育阶段产生不利影响,最终导致地被植物损伤和景观效果降低。受厄尔尼诺等现象的影响,低温等极端天气发生的频率、程度不断增加^[5]。有研究表明,叶绿素荧光动力学技术在测定植物对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用^[6],可以反映植物光合生理与逆境胁迫

收稿日期:2023-03-12;修回日期:2023-04-06

基金资助:甘肃省林草局草原生态修复治理科技支撑项目(GSLC-2020-3);甘肃省科技计划项目(20TR10RA564)

作者简介:郑锋(1995-),男,四川蓬安人,硕士研究生。

E-mail:1458389663@qq.com

*通信作者。E-mail:baixm@gsau.edu.cn

的关系^[7],它可以在不对植物叶片细胞造成破坏的前提下便捷、可靠、快速地反映植物光合系统的内在特性与光合作用的变化过程,因此,在植物胁迫生理学方面得到广泛应用。

百合科沿阶草族(Ophiopogoneae)植物,包括沿阶草属(*Ophiopogon*)和山麦冬属(*Liriope*)的多年生草本植物^[7],具有绿期长、抗寒、耐荫、耐旱、抗病虫害、抗逆性强等多种优良特性,在园林绿化中的应用前景广阔。因其管理简单,应用广泛,是室内环境、室外绿地、花坛、花境、护坡以及植被恢复等方面的理想地被植物。目前,已对沿阶草族种质的优良特性进行了大量研究,主要集中在资源分布现状、栽培繁殖、抗逆性、绿化应用等方面。全世界沿阶草属植物65种,主要分布在亚洲东部和南部的热带和亚热带地区^[8-9];有山麦冬属植物8种,主要分布在中国、越南、菲律宾、日本,其中,我国有6种^[10-11]。我国有野生沿阶草属和山麦冬属植物近60种,种质资源较丰富,是名副其实的沿阶草族植物分布中心^[12]。沿阶草族种质的栽培繁殖研究,多集中在沿阶草、杭麦冬、湖北麦冬、川麦冬栽培技术方面,主要是为增加沿阶草观赏性及麦冬块根产量。谢彩云等^[13]为了提高观赏草的观赏价值和应用效果,对其规范化栽培条件、栽培前准备、栽植、养护及更新等方面提出了具体操作要求和规定。在沿阶草族种质抗逆性研究方面,目前主要集中在麦

冬、日本矮生沿阶草上,其中丹麦草的研究也较为深入。扈明明^[14]通过对麦冬和玉簪的抗盐性比较研究证实,麦冬比玉簪更能耐受盐分胁迫,可以在土壤电导率1.7 ms/cm下存活,在黄河三角洲地区改良后的土壤上可以引种麦冬。在沿阶草族种质的绿化应用方面,作为地被植物已被广泛运用于室内环境、室外绿地、花坛、花境、护坡以及植被恢复等方面。崔寿福等^[15]对沿阶草在厦门地区园林绿化中的应用研究,结果表明沿阶草具有绿期长、抗寒、耐荫、耐旱、对土壤要求不严、病虫害少的优良属性,并且仅靠自然降雨即可正常生长,管理粗放,市场前景广阔。

虽然前人已对沿阶草族种质进行了丰富的研究,然而针对沿阶草族种质低温胁迫下的光合参数及叶绿素荧光特性研究鲜见报道。因此,本研究通过测定低温胁迫下10份沿阶草族种质的光合参数及叶绿素荧光特性,探索低温胁迫对沿阶草族种质的光合影响,对其耐寒种质资源的筛选、品种选育和抗寒栽培等提供理论和实践依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料共10份,其中7份野生材料2022年5月采自甘肃南部,3份材料购自河南郑州嘉景花境园艺有限公司(表1)。

表1 沿阶草族种质主要分布区地理环境

Table 1 The geographical environments distributed Ophiopogoneae germplasm

编号	材料名称	学名	来源	经度	纬度	海拔/m	生境
YJHN	沿阶草	<i>Ophiopogon reversus</i>	购自河南郑州嘉景花境园艺有限公司	113°42' E	34°57' N	521	农场
JBHN	金边麦冬	<i>Liriope spicata</i> var. <i>variegata</i>	购自河南郑州嘉景花境园艺有限公司	113°42' E	34°57' N	521	农场
YLHN	玉龙草	<i>O. japonicus</i> 'Nanus'	购自河南郑州嘉景花境园艺有限公司	113°42' E	34°57' N	521	农场
YJKX	沿阶草	<i>O. bodinieri</i>	甘肃康县	105°61' E	33°33' N	1 185	路边
YJWD	沿阶草	<i>O. bodinieri</i>	甘肃武都	105°49' E	32°99' N	964	茶园
DYWD	短药沿阶草	<i>O. angustifolius</i>	甘肃武都	105°49' E	32°99' N	964	茶园
MDWD	麦冬	<i>O. japonicus</i>	甘肃武都	105°49' E	32°99' N	964	茶园
YJWX	沿阶草	<i>O. bodinieri</i>	甘肃文县	105°23' E	32°73' N	677	路边
MDWX	山麦冬	<i>L. spicata</i>	甘肃文县	105°23' E	32°73' N	677	路边
SMTS	禾叶山麦冬	<i>L. graminifolia</i>	甘肃天水	106°05' E	34°40' N	1 480	林下

注:下文图表中出现的材料名称均以此表中编号表示。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方式,供试材料于2022年5月移栽于直径25 cm、深20 cm的塑料花盆中,栽培基质按农

田土:沙:有机质:羊粪为7:1:1:1体积比混合,每盆装混合基质3 kg。在室外培养3个月,待长势良好后选择生长一致、无病虫害的材料按试验设计移入低温培

养箱内进行低温胁迫处理。试验设 5、0、-5 和 -10 °C 4 个低温处理水平,以 20 °C 为对照(CK),每个水平设置 3 次重复。低温胁迫前将材料放置在 20 °C 的低温培养箱中预冷 12 h 后,按每 2 h 下降 5 °C 的温度梯度降到处理水平,再低温胁迫 12 h。胁迫结束后将花盆取出进行光合参数、叶绿素荧光特性的测定。

1.3 测定指标与方法

光合参数:净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i):于自然条件下,早上 9:00—11:00 和下午 14:00—17:00 测定,利用德国 GFS-3000 便携式光合系统分析仪,采用补光强度 $1\ 800\ \mu\text{mol}/(\text{photons}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})$,选取沿阶草族种质健康成熟叶片,取叶片中部并轻拭灰尘测定各光合参数值,每株取 3~5 片叶,每叶测定重复 4 次,每次待稳定后读取 5 个数据。

叶绿素荧光:初始荧光量(F_0)、最大荧光量(F_m)、最大光效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(ΦPSII)、光合电子传递速率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)。将温度胁迫处理完的花盆放入暗室中暗适应 30 min 后,采用 M 系列 IMAGING-PAM 调制叶绿素荧光成像系统测定各荧光参数,每份材料随机选取 10 片长势良好且无病虫害的叶片,利用叶绿素荧光仪进行叶绿素荧光参数的检测。

1.4 抗寒性综合评价方法

1.4.1 抗寒性的综合评价 利用主成分分析法可以全面而准确地分析植物的各种光合指标的综合抗寒性^[16-18]。本文对低温胁迫下 10 份材料的 7 个指标进行主成分分析,选取较大特征向量比较其抗寒性。利用极差法对各指标数值进行标准化,标准化公式为^[19]:

$$X=1-\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}}$$

式中: X 为标准化后所得数据, x 为某项指标的原始数据, x_{\min} 为某项指标原始数据的最小值, x_{\max} 为某项指标原始数据的最大值。

1.4.2 抗寒性评价分级标准 将各材料综合抗寒能力 D 值分为 3 级^[20],I 级:综合评价值 0.53 以上,为抗寒性强。II 级:综合评价值为 0.50~0.53,为抗寒性中等;III 级:综合评价值在 0.5 以下,为抗寒性弱。

1.5 数据处理

用 Excel 2019 对数据进行统计整理并制图,采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析软件进行数据处理、相关性分析、主成分分析等,DUNCAN 法进行差异性比较,最小显著极差法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对沿阶草族种质叶片净光合速率的影响

随着温度降低,10 份沿阶草族种质叶片 P_n 呈先上升后降低趋势(图 1)。5 °C 处理下,均与对照差异显著($P<0.05$)。叶片 P_n 较对照增加 24.04%~199.65%,其中 YJKX 增幅最小,JBHN 增幅最大。0 °C 处理时,除 YJWD 外均与对照差异显著($P<0.05$)。叶片 P_n 较对照增加 10.22%~137.30%,其中 YJWD 增幅最小,JBHN 增幅最大。且 YJHN、MDWX、SMTS 达到最高值,分别为 4.18、2.62、3.41 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,较对照分别增加 41.06%、120.91%、96.10%。-10 °C 处理下,除 JBHN、SMTS 外均与对照差异显著($P<0.05$)。10 份沿阶草族种质 P_n 达到最低值。JBHN 降幅最小,较对照下降 22.82%,DYWD 降幅最大,较对照降低 76.99%。

2.2 低温胁迫对沿阶草族种质叶片蒸腾速率的影响

随着温度降低,10 份沿阶草族种质叶片 T_r 呈降低趋势(图 2)。所有材料最大值均出现在对照处理下,与 5 °C 相比均差异显著($P<0.05$),其中 SMTS 最大,最大值为 1.10 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。5 °C 处理时,10 份沿阶草族种质叶片 T_r 均显著降低($P<0.05$),较对照相比下降 8.50%~26.90%,YJHN 降幅最大,MDWD 降幅最小。-10 °C 处理下,均与对照差异显著($P<0.05$)。10 份沿阶草族种质叶片 T_r 最低,较对照下降 55.77%~89.20%,YLHN 降幅最小,MDWX 降幅最大。

2.3 低温胁迫对沿阶草族种质叶片气孔导度的影响

随着温度降低,10 份沿阶草族种质叶片 G_s 呈逐渐降低趋势(图 3)。5 °C 处理下,除 JBMD 外叶片 G_s 均与对照差异显著($P<0.05$),与对照相比降低 6.17%~27.21%,JBHN 降幅最小,YJHN 降幅最大。-10 °C 处理时,均与对照差异显著($P<0.05$)。10 份沿阶草族种质叶片 G_s 均达到最低值,较对照降低 59.60%~90.00%,DYWD 降幅最小,YJKX 降幅最大。

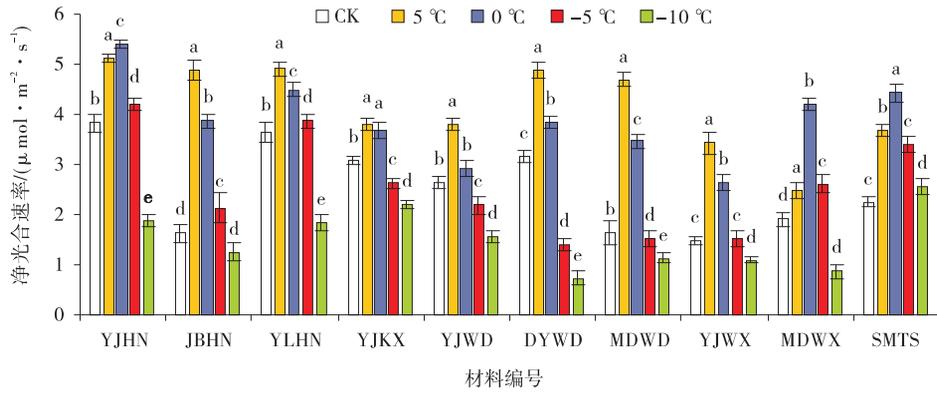


图 1 低温胁迫下沿阶草族种质净光合速率

Fig. 1 Net photosynthetic rate of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

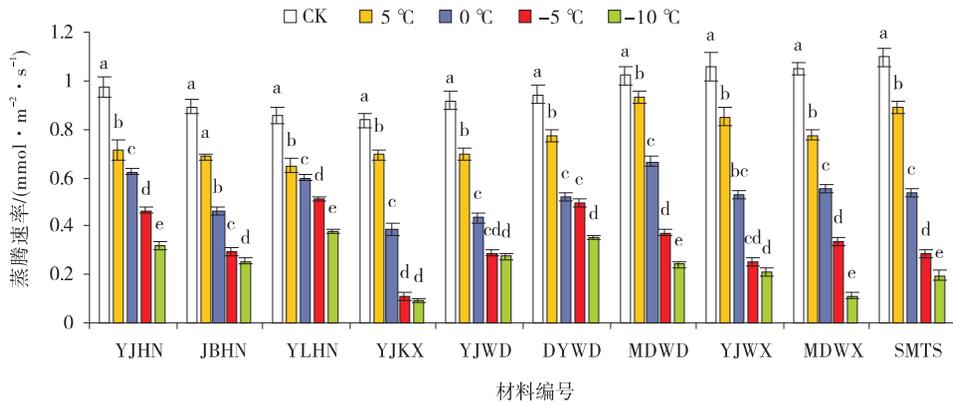


图 2 低温胁迫下沿阶草族种质蒸腾速率

Fig. 2 Transpiration rate of grass germplasm under low temperature stress

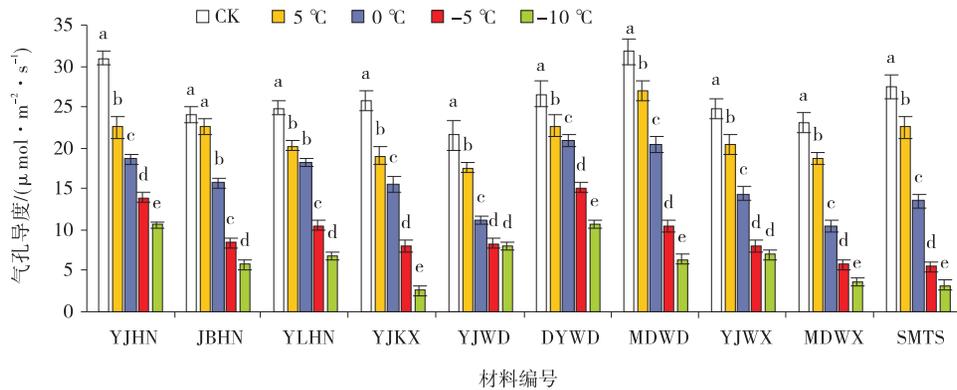


图 3 低温胁迫下沿阶草族种质气孔导度

Fig. 3 Stomatal conductance of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

2.4 低温胁迫对沿阶草族种质叶片胞间 CO₂浓度的影响

随着温度降低,10份沿阶草族种质叶片 C_i呈上升趋势(图4)。5 °C处理下,10份沿阶草族种质叶片 C_i均与对照差异显著(P<0.05),较对照升高 10.58%~140.73%,MDWD 增幅最小,YJKX 增幅最大。-10 °C处理下,10份沿阶草族种质叶片 C_i均与对照差异显著(P<0.05),且叶片 C_i达到最大值,较对照增加 82.71%~342.94%,YJHN 增幅最小,YJKX 增幅

最大。

2.5 低温胁迫对沿阶草族种质叶片初始荧光的影响

随着温度降低,10份沿阶草族种质 F_v随胁迫温度降低呈上升趋势(图5)。5 °C处理下,除 YJWD、YJWX 和 SMTS 外与对照差异显著(P<0.05),不同材料的变化幅度不同。0 °C处理时,除 YJWD 外均与对照差异显著(P<0.05),除 YJKX 外,9份沿阶草族种质 F_v显著增加,较对照增加 7.38%~60.39%,YLHN 增幅最小,YJWX 增幅最大。-10 °C处理下,均与对照差异

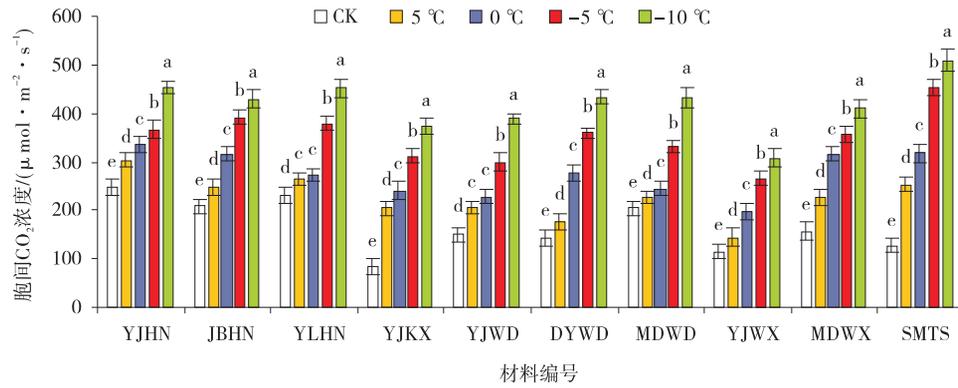


图4 低温胁迫下沿阶草族种质胞间CO₂浓度

Fig. 4 Intercellular CO₂ concentration of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

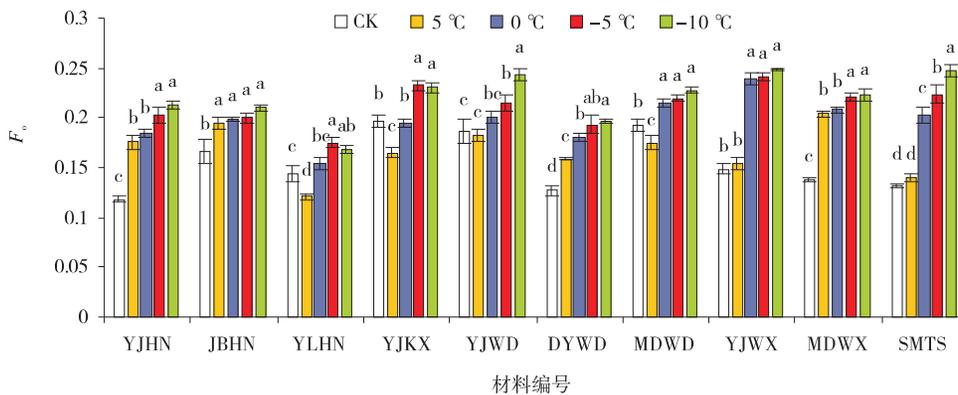


图5 低温胁迫下沿阶草族种质F_v。

Fig. 5 F_v of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

显著($P < 0.05$),除YLHN、YJKX外8份沿阶草族种质的F_v达到最大值,较对照增加17.27%~88.05%,YLHN增幅最小,SMTS增幅最大。

2.6 低温胁迫对沿阶草族种质叶片最大光化学效率的影响

随着温度降低,10份沿阶草族种质叶片F_v/F_m呈先上升后降低趋势(图6)。5 °C处理下,除YJWD、MDWD和MDWX均与对照差异显著($P < 0.05$),除

YJHN外叶片F_v/F_m较对照增加3.46%~45.18%。0 °C处理时,均与对照差异显著($P < 0.05$),10份沿阶草族种质叶片F_v/F_m显著增加,较对照增加5.67%~50.51%,MDWX增幅最小,JBHN增幅最大。且DYWD、SMTS外8份沿阶草族种质叶片F_v/F_m达到最大值。-10 °C处理下,均与对照差异显著($P < 0.05$),叶片F_v/F_m均降到最低值,较对照降低22.43%~76.32%,YJKX降幅最小,YJHN降幅最大。

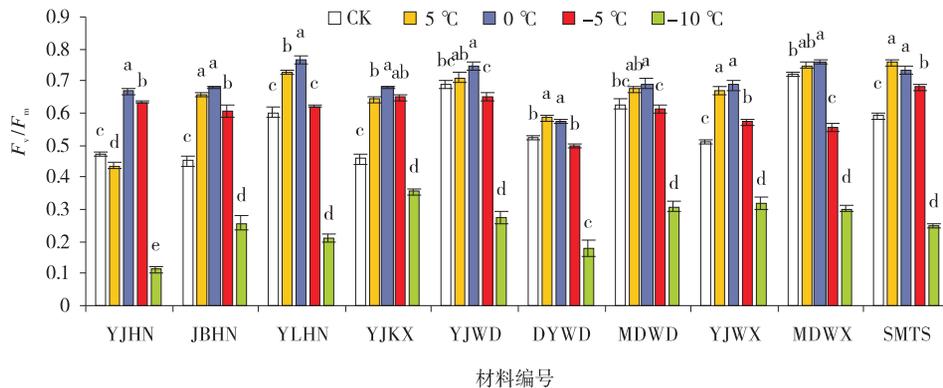


图6 低温胁迫下沿阶草族种质F_v/F_m

Fig. 6 F_v/F_m of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

2.7 低温胁迫对沿阶草族种质叶片实际光化学效率的影响

随着温度降低,10份沿阶草族种质叶片ΦPSII呈先上升后降低趋势(图7)。5℃处理下,除JBHN、YJWD外均与对照差异显著($P<0.05$),叶片ΦPSII较对照增加6.58%~53.87%,且10份沿阶草族种质叶片ΦPSII均达到最大值。0℃处理时,JBHN、

YLHN、YJKX、DYWD、YJWX、SMTS与对照差异显著($P<0.05$),除JBHN、YJWD外8份沿阶草族种质叶片ΦPSII显著增加,较对照增加5.46%~22.28%,YJKX增幅最小,MDWX增幅最大。-10℃处理下,均与对照差异显著($P<0.05$),叶片ΦPSII均降到最低值,较对照降低16.04%~73.65%,YJHN降幅最小,YLHN降幅最大。

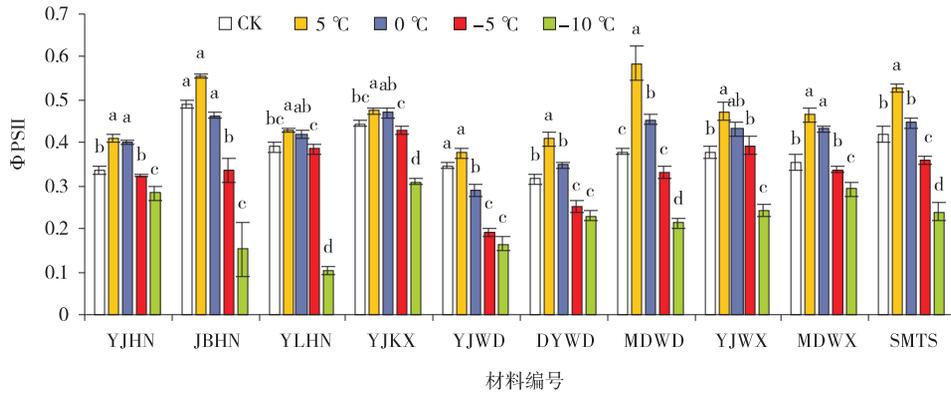


图7 低温胁迫下沿阶草族种质ΦPSII

Fig. 7 ΦPSII of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

2.8 低温胁迫对沿阶草族种质叶片电子传递速率的影响

随着温度降低,10份沿阶草族种质叶片ETR呈降低趋势(图8)。5℃处理下,除JBHN外均与对照差异显著($P<0.05$),叶片ETR较对照降低9.78%~24.21%。0℃处理时,均与对照差异显著($P<0.05$),

10份沿阶草族种质叶片ETR显著降低,较对照降低19.20%~49.27%,YLHN降幅最小,DYWD降幅最大。-10℃处理下,均与对照差异显著($P<0.05$),叶片ETR均降到最低值,较对照降低72.07%~99.58%,YJKX降幅最小,YJHN降幅最大。

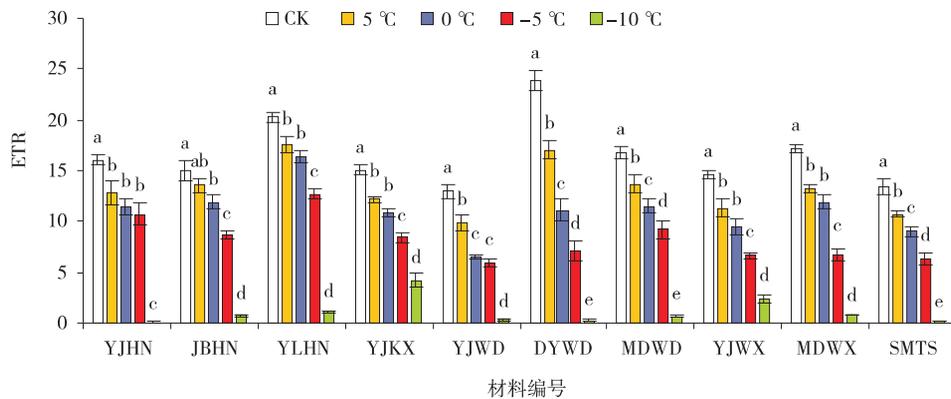


图8 低温胁迫下沿阶草族种质ETR

Fig. 8 ETR of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

2.9 低温胁迫对沿阶草族种质叶片光化学猝灭系数的影响

随着温度降低,10份沿阶草族种质叶片qP呈降低趋势(图9)。5℃处理下,均与对照差异显著($P<0.05$),叶片qP较对照降低15.26%~33.12%,JBHN降幅最小,MDWD降幅最大。0℃处理时,均与对照

差异显著($P<0.05$),10份沿阶草族种质叶片qP显著降低,DYWD降幅最小,MDWD降幅最大,较对照降低31.88%~49.14%。-10℃处理下,均与对照差异显著($P<0.05$),叶片qP均降到最低值,较对照降低51.48%~84.39%,YJHN降幅最小,MDWX降幅最大。

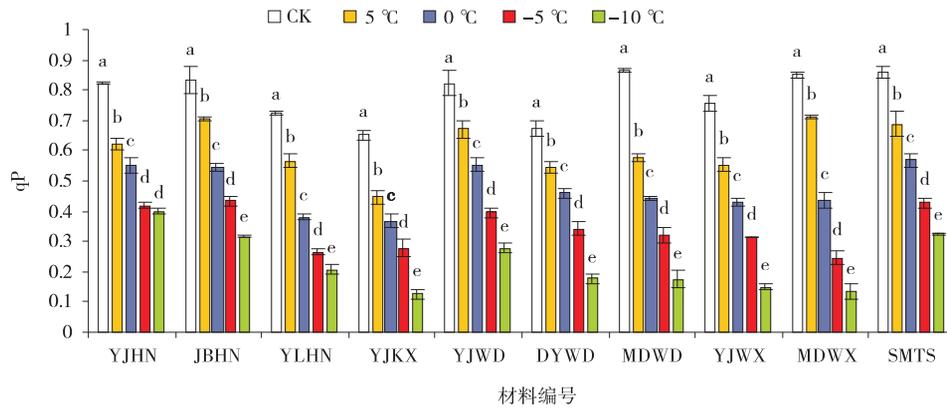


图9 低温胁迫下沿阶草族种质qP

Fig. 9 qP of Ophiopogoneae germplasm under low temperature stress

2.10 沿阶草族种质苗期抗寒性综合评价

2.10.1 不同指标间相关性分析 不同沿阶草族种质生理指标之间存在不同程度的相关性(表2),净光合速率与胞间CO₂浓度呈显著正相关($P < 0.05$),净光合速率与初始荧光呈显著负相关($P < 0.05$),蒸腾

速率与气孔导度呈极显著正相关($P < 0.01$),最大光化学效率与气孔导度、胞间CO₂浓度呈显著负相关($P < 0.05$),初始荧光与最大光化学效率呈显著正相关($P < 0.05$),与电子传递速率呈显著负相关($P < 0.05$)。

表2 沿阶草族种间光合指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of photosynthetic indexes among Ophiopogoneae germplasm

指标	净光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	气孔导度 G_s	胞间CO ₂ 浓度 C_i	初始荧光 F_o	最大光化学效率 F_v/F_m	实际光化学效率 $\Phi PSII$	电子传递速率 ETR	光化学猝灭qP
P_n	1								
T_r	0.041	1							
G_s	0.328	0.851**	1						
C_i	0.685*	0.352	0.45	1					
F_o	-0.672*	-0.325	-0.59	-0.553	1				
F_v/F_m	-0.681*	-0.475	-0.705*	-0.667*	0.738*	1			
$\Phi PSII$	-0.064	-0.208	-0.451	0.04	0.329	0.474	1		
ETR	0.36	0.063	0.343	0.197	-0.686*	-0.237	0.107	1	
qP	0.183	0.274	0.168	0.576	0.079	-0.423	-0.159	-0.609	1

注:*在0.05级别(双尾),相关性显著。**在0.01级别(双尾),相关性显著。

2.10.2 沿阶草族种质抗寒指标主成分分析 采用主成分降维的方法对10份材料的7个抗寒指标进行主成分分析(表3)。前2个主成分的累积贡献率为76.03%,基本代表了抗寒指标的大部分信息,可作为评价10份沿阶草族种质抗寒性的综合指标。选第1主成分到第2主成分中的较大特征向量:净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、初始荧光、最大光化学效率等6个指标作为10份沿阶草族种质抗寒性筛选与评价的关键指标。

2.10.3 种质间的抗寒性比较评价 试验选用6个生理指标作为叶片抗寒性评价指标,通过隶属函数法进

表3 沿阶草族种质抗寒指标主成分分析

Table 2 Principal component analysis of cold resistance indexes of Ophiopogoneae germplasm

变量	主成分1	主成分2
净光合速率	0.741	-0.493
蒸腾速率	0.584	0.775
气孔导度	0.812	0.502
胞间CO ₂ 浓度	0.763	-0.107
初始荧光	-0.878	0.269
最大光化学效率	-0.889	-0.047
电子传递速率	0.521	-0.42
特征值	3.964	1.359
贡献率/%	56.623	19.408
累计贡献率/%	56.623	76.031

行综合评价,结果显示(表4),10份沿阶草族种质的隶属函数值为0.327 2~0.533 6,其中DYWD综合评价价值最高,为0.533 6抗寒性最强;YJKX、YJWX综合评价价值分别为0.527 3、0.526 0,抗寒性中等;YJWD、

JBHN、MDWX、YLHN、YJHN、SMTS、MDWD。综合评价价值介于0.3~0.5,抗寒性较差。抗寒性强弱依次是DYWD > YJKX > YJWX > YJWD > JBHN > MDWX > YLHN > YJHN > SMTS > MDWD。

表4 10份沿阶草族种质抗寒性隶属函数值及综合评价

Table 4 Subordinate function value and comprehensive evaluation of cold resistance of 10 Ophiopogoneaegermoplasm

编号	隶属函数值							排序	分级
	净光合速率	蒸腾速率	气孔导度	胞间CO ₂ 浓度	初始荧光	最大光化学效率	综合评价价值		
YJHN	0.072 6	0.345 5	0.192 6	0.147 9	0.599 1	1.000 0	0.436 8	8	III
JBHN	0.606 0	0.675 8	0.719 0	0.292 5	0.389 3	0.398 0	0.501 8	5	II
YLHN	0.199 2	0.432 9	0.261 9	0.297 9	0.935 7	0.591 2	0.463 8	7	III
YJKX	0.436 7	0.969 3	1.000 0	0.745 9	0.269 9	0.000 0	0.527 3	2	I
YJWD	0.631 3	0.653 6	0.603 6	0.683 0	0.262 5	0.327 4	0.509 9	4	II
DYWD	0.586 1	0.365 7	0.206 6	0.549 1	0.698 3	0.715 1	0.533 6	1	I
MDWD	0.704 3	0.226 0	0.185 7	0.487 6	0.252 6	0.185 4	0.327 2	10	III
YJWX	0.879 7	0.429 9	0.650 2	0.962 6	0.243 6	0.147 8	0.526 0	3	I
MDWX	0.747 2	0.499 5	0.658 7	0.436 8	0.344 7	0.219 2	0.464 4	6	III
SMTS	0.369 2	0.361 4	0.554 4	0.238 4	0.463 3	0.443 8	0.410 4	9	III
权重	0.147 8	0.133 6	0.169 4	0.162 0	0.159 5	0.227 8	0.147 8		

3 讨论

3.1 沿阶草族种质光合特性与抗寒性

植物光合作用是最易受到低温胁迫伤害的生理过程^[21]。低温胁迫对植物叶片光合作用的影响涉及光能吸收、气体交换、碳同化过程等多个环节^[22-23]。光合参数是评价草坪草抗寒性的重要指标,能够反应光合作用强弱。已有研究发现,低温会造成光合速率下降,伴随净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)下降^[24-25]。

净光合速率(P_n)是衡量植物光合能力强弱的一个重要指标^[26],其值大小可以反应植物对逆境环境的适应能力,值越高表明适应逆境的能力越强。本试验中,随低温胁迫程度的加剧,沿阶草族种质叶片 P_n 呈先上升后降低趋势, T_r 、 G_s 呈降低趋势, C_i 呈上升趋势。低温胁迫下,YLHN叶片 P_n 较高,而 T_r 偏小, P_n 与 T_r 比值较高,说明相同条件下,这个种质积累的净光合产物更多,更能适应低温环境,反之,YJWD叶片 P_n 较低, T_r 较高,适应低温能力较低,表明低温胁迫对沿阶草族种质叶片的 P_n 和 T_r 的抑制存在差异^[27]。Farquhar等研究发现,低温导致光合速率下降的因素既有气孔因素也有非气孔因素^[28]。如果 P_n 和 G_s 同时下降, C_i

也相应下降,即气孔因素限制占主导^[29]如果, P_n 和 G_s 下降,而 C_i 上升时, P_n 下降主要是由非气孔限制因素引起^[30]。由此表明,在低温胁迫下,沿阶草族种质叶片的 P_n 下降的原因是非气孔限制因素。PSII反应中心是光合系统的重要组成部分,在光合作用的光能转化过程中起重要作用,因此 P_n 下降可能与PSII活性下降有关系。

叶片光合速率下降伴随气孔导度下降^[31]。低温胁迫对麦冬叶片气孔导度产生抑制作用,10份材料均呈逐渐降低趋势,温度降至-10℃,DYWD表现良好,叶片 G_s 较大,而MDWX表现较差,叶片 G_s 较小。

T_r 影响植物对空气中CO₂的利用。随着温度降低,10份沿阶草族种质叶片 C_i 呈升高趋势,在0℃以上轻度胁迫下,光合作用受到抑制,阻碍有机物质合成,CO₂利用率降低,从而胞间浓度升高;随着低温胁迫加剧,温度低于0℃时,叶片保卫细胞气孔关闭, C_i 继续上升,不同材料的上升速率不同,在-10℃时YJHN叶片 C_i 较高,YJWX叶片 C_i 最低,由此推测YJWX维持较低 C_i 抵抗低温胁迫。这与毛林鲜等3种蕨类植物低温胁迫下光合参数的结论一致。

3.2 沿阶草族种质叶绿素荧光特性与抗寒性

研究表明,逆境胁迫下植物初始荧光、最大光化

学效率、实际光化学效率、电子传递速率、光化学猝灭系数等参数是评价植物的抗逆对植物光合系统影响及耐性表现的重要指标^[32]。初始荧光指的是 ΦPSII 反应中心处于完全开放时所产生的荧光产量。低温胁迫常引起叶片 F_o 的上升, F_v/F_m 、 ΦPSII 、ETR、qP降低^[34-35]。导致 F_o 升高的原因有两种,一种是PSII反应中心发生了可逆的失活或不可逆的破坏,另一种是由于类囊体膜的损伤,并且增幅越大,类囊体膜受到的损害就越大^[32]。 F_v/F_m 可作为低温胁迫程度的指针和探针,温度越低降幅越大^[36]。 ΦPSII 表示的是PSII反应中心的实际光化学效率,常用来表示植物光合作用中电子传递的量子产额,可用来表明电子传递速度的快慢^[37],叶片同化 CO_2 的能力下降,导致植物对叶绿体中的ATP和NADPH的需求量下降,引发对PSII反馈氧化还原作用的发生,进而导致光能过剩,引起 F_v/F_m 下降;而 ΦPSII 下降可能与 $\text{QA}\rightarrow\text{QB}$ 的电子传递过程受到抑制有关。ETR则反映的是PSII光能利用能力,在低温胁迫下植物光能利用受阻,导致植物ETR值不断降低^[38]。qP是光化学反应所引起的荧光产额,反映PSII原初电子受体QA的还原状态及开放的反应中心占总PSII反应中心的比例^[39]。

本试验中,在 5°C 处理下,10份沿阶草族种质材料叶绿素荧光变化较缓。结果表明,在前期的冷害和沿阶草族种质的损害较轻。随在胁迫加剧,各个试验材料的叶片叶绿素荧光参数发生了显著变化,并且这种变化的幅度会随着胁迫温度的下降而变得更加明显。表现为 F_o 的持续增加, F_v/F_m 和 ΦPSII 呈先上升后降低趋势,ETR和qP呈降低趋势。这表明,沿阶草族种质的类囊体膜会开始受到损害,PSII分子被破坏,植株对过剩光能的转化能力变得很低,PSII中心甚至受到损害,而且随着胁迫时间的延长,这种损害会变得更加严重。胁迫 -10°C 时, F_o 达到顶峰,其余各荧光参数也达到最低值。与 -5°C 胁迫相比, F_o 值较低,而 F_v/F_m 、 ΦPSII 、ETR、qP却明显高于 -10°C 胁迫的值,说明 -10°C 胁迫下对沿阶草族种质的光合能力影响更大,致使光合器官损伤加剧。本研究与杨柳青等^[40]对南美天胡荽的研究结论一致。本试验虽然研究得出了沿阶草族种质不同光合指标对低温胁迫的响应状况,还需要在后期对沿阶草族种质细胞生物学及分

子生物学水平上的变化机制进一步研究,并找出抵御逆境低温胁迫伤害的防御措施。

4 结论

低温胁迫条件下,10份沿阶草族种质随着胁迫加剧光合参数、叶绿素荧光特性发生了显著变化,净光合速率呈先上升后降低趋势,蒸腾速率、气孔导度呈降低趋势,胞间 CO_2 浓度呈上升趋势; F_o 呈上升趋势, F_v/F_m 、 ΦPSII 呈先上升后降低趋势、ETR、qP呈降低趋势。研究结果表明,低温胁迫降低光合速率,PSII反应中心受到损伤,植株通过调节自身的保护机制进行自我调控。通过隶属函数法进行综合评价,抗寒性强弱依次为短药沿阶草>沿阶草(康县)>沿阶草(文县)>沿阶草(武都)>金边麦冬>山麦冬>玉龙草>沿阶草(河南)>禾叶山麦冬>麦冬。短药沿阶草、沿阶草(康县)、沿阶草(文县)这3份种质抗寒性较强,更适宜在北方地区推广。

参考文献:

- [1] 张玲,曹帮华,贾波,等. 山东地区地被竹引种试验初步研究[J]. 世界竹藤通讯,2009,7(1):4-7.
- [2] 陈思思,李春燕,杨景,等. 拔节期低温冻害对扬麦16光合特性及产量形成的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2014,35(3):59-64.
- [3] 陶宏征,赵昶灵,李唯奇. 植物对低温的光合响应[J]. 中国生物化学与分子生物学报,2012,28(6):501-508.
- [4] 许长成,李德全,邹琦,等. 干旱条件下冬小麦不同叶龄叶绿素荧光及叶黄素循环组分的变化(英文)[J]. 植物生理学报,1999(1):29-37.
- [5] Sanghera G S, Wani S H, Wasim H. Engineering cold stress tolerance in crop plants[J]. Current Genomics, 2011, 12(1):30-43.
- [6] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报,1999,16(4):444-448.
- [7] 王栋麟,王琳,吴亚,等. 铝胁迫下添加水杨酸对黑麦草生理及叶绿素荧光参数的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(6):88-97.
- [8] 马秀杰,王冠明,韩烈保. 不同产地麦冬遗传多样性的SRAP分析[J]. 草业科学,2012,29(11):1686-1691.
- [9] 余伯阳,徐国钧,金蓉鸾,等. 麦冬类中药的药源调查和商品鉴定[J]. 中国药科大学学报,1991(3):150-153.
- [10] 陈心启. Flora of China Vol. 24[M]. 北京:科学出版社,2006.

- [11] 傅立国,陈谭清,郎楷永,等. 中国高等植物[M]. 青岛: 青岛出版社,2002:237-239.
- [12] Liu W Q, Jin J H, Liao W B. *Ophiopogon acerobracteatus* (*Convallariaceae*), a new species from southern China [C]. *Annales Botanici Fennici*. Finnish Zoological and Botanical Publishing Board, 2007:492-494.
- [13] 谢彩云,范国华,莫志萍. 观赏草新品种剑江沿阶草栽培技术规程[J]. 现代农业科技,2018(22):136-137.
- [14] 扈明明. 园林植物麦冬和玉簪耐盐能力对比试验[J]. 山东林业科技,2006(5):22-23.
- [15] 崔寿福,张小杭,刘福平. 沿阶草在厦门地区园林绿化中的应用[C]. 第四届全国花卉资源、育种、栽培及应用技术交流会论文汇编,2016:131-138.
- [16] 邵怡若,许建新,薛立,等. 低温胁迫时间对4种幼苗生理生化及光合特性的影响[J]. 生态学报,2013,33(14):4237-4247.
- [17] 何跃君,薛立,任向荣,等. 低温胁迫6种幼苗生理特性的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(4):524-531.
- [18] 冯慧芳,薛立,任向荣,等. 4种阔叶苗木对PEG模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报,2011,31(2):371-382.
- [19] 谭雪红,高艳鹏,郭小平,等. 五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价[J]. 生态学报,2012,32(16):5076-5086.
- [20] 王赞,李源,吴欣明,等. PEG渗透胁迫下鸭茅种子萌发特性及抗旱性鉴定[J]. 中国草地学报,2008,19(1):50-55.
- [21] Bilska A, Paweł S. Closure of plasmodesmata in maize (*Zea mays*) at low temperature: a new mechanism for inhibition of photosynthesis[J]. *Annals of Botany*, 2010, 106: 675-686.
- [22] 段伟,李新国,孟庆伟,等. 低温下的植物光抑制机理[J]. 西北植物学报,2003,23(6):1017-1023.
- [23] 吴广霞,唐献龙,杨德光,等. 植物低温胁迫生理研究进展[J]. 作物杂志,2008(3):17-19.
- [24] 王瑞霞,闫长生,张秀英,等. 春季低温对小麦产量和光合特性的影响[J]. 作物学报,2018,44(2):288-296.
- [25] 周润泽,王翊豪,马晓惠,等. 低温对不同年限三七中的皂苷含量及光合生理的影响[J]. 中国农学通报,2020,36(34):71-75.
- [26] 丁友芳,张晓霞,史玲玲,等. 葛根净光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报,2010,32(5):132-137.
- [27] 马泉,张玉雪,陶源,等. 春季不同时期低温对小麦光合特性和粒重形成的影响[J]. 麦类作物学报,2022,42(2):226-235.
- [28] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal Conductance and Photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982,33(1):74-79.
- [29] 侯伟,孙爱花,杨福孙,等. 低温胁迫对西瓜幼苗光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J]. 广东农业科学,2014,41(13):35-39.
- [30] 王兆,刘晓曦,郑国华. 低温胁迫对彩叶草光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 浙江农业学报,2015,27(1):49-56.
- [31] 陈思思,李春燕,杨景,等. 拔节期低温冻害对扬麦16光合特性及产量形成的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2014,35(3):59-64.
- [32] 毛林鲜,朱芸琦,吴美丽,等. 低温胁迫对3种蕨类植物生理指标的影响[J]. 西南农业学报,2022,35(12):2772-2779.
- [33] 陈建明,俞晓平,程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 浙江农业学报,2006,18(1):51-55.
- [34] 汪炳良,徐敏,史庆华,等. 高温胁迫对早熟花椰菜叶片抗氧化系统和叶绿素及其荧光参数的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(8):1245-1250.
- [35] 郭延平,周慧芬,曾光辉,等. 高温胁迫对柑橘光合速率和光系统II活性的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(6):867-870.
- [36] 邵怡若,许建新,薛立,等. 低温胁迫时间对4种幼苗生理生化及光合特性的影响[J]. 生态学报,2013,33(14):4237-4247.
- [37] 郑毅. 温度胁迫对草莓叶片光合作用的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学,2005.
- [38] 罗嘉惠,刘小飞,李冬梅,等. 叶绿素荧光仪 MINI-PAM-II 在鸡冠花耐寒性测定中的应用[J]. 热带农业科学,2018,38(1):33-38+42.
- [39] Constant S, Perewoska I, Alfonso M, et al. Expression of the psbA gene during photoinhibition and recovery in *Synechocystis* PCC 6714: inhibition and damage of transcriptional and translational machinery prevent the restoration of photosystem II activity [J]. *Plant molecular biology*, 1997,34(1):1-13.
- [40] 杨柳青,张柳,廖飞勇,等. 低温胁迫对南美天胡荽光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 经济林研究,2014,32(4):99-102.

Responses of leaf photosynthetic characteristics to low temperature stress in 10 Ophiopogoneae germplasms and evaluation of cold resistance

ZHENG Feng, BAI Xiao-ming*, RAN Fu, ZHU Ya-nan, YAN Yu-bang,
ZHANG Cai-zhong, ZHENG Si-hai

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: **【Objective】** Low temperature is one of the main factors limiting plant growth and development. The effects of different low temperature stress on the photosynthetic parameters and chlorophyll fluorescence characteristics of Ophiopogoneae germplasm were studied in order to provide the basis for the rational cultivation and utilization of grass germplasm along the stage in Northwest China. **【Method】** In this study, the cold resistance of 10 Ophiopogoneae germplasm was comprehensively compared at 4 low temperature treatment levels (5 °C, 0 °C, -5 °C and -10 °C) and 20 °C as control (CK). **【Result】** The results showed that low temperature increased photoinhibition of photosynthesis. With the intensification of stress, the net photosynthetic rate (P_n) increased first and then decreased, the transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) decreased, while the intercellular CO₂ concentration (C_i) increased, indicating that non-stomatal factors were the main factors leading to the decrease of photosynthesis. The trend of germplasm change was the same among the 10 Ophiopogoneae, but there were differences in their responses to low temperature stress. The P_n of *Liriope muscari* Phnom Penh decreased the least, indicating that the influence of low temperature was relatively small, while the influence of the *Ophiopogon angustifolius* was the greatest. In terms of chlorophyll fluorescence parameters, when the temperature dropped to -10 °C, the initial fluorescence (F_o) showed an increasing trend, the maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) and the actual photochemical efficiency (PS II) show an increasing trend and then a decreasing trend, the electron transfer rate (ETR) and photochemical quenching (qP) show a decreasing trend. The results showed that the lower the temperature was, the greater the variation range of Ophiopogoneae germplasm along the rank was, the more obvious the photosynthetic inhibition was, and the greater the photosynthetic organ damage was. There was a significant positive correlation between net photosynthesis and intercellular CO₂ concentration ($P < 0.05$). There was a significant negative correlation between net photosynthetic rate and initial fluorescence ($P < 0.05$). There was a significant positive correlation between transpiration rate and stomatal conductance ($P < 0.01$). There was a significant negative correlation between maximum photochemical efficiency and stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration ($P < 0.05$). The initial fluorescence was positively correlated with the maximum photochemical efficiency ($P < 0.05$), and negatively correlated with the electron transport rate ($P < 0.05$). According to the comprehensive analysis by membership function method, the cold resistance of 10 Ophiopogoneae germplasm members of the grass family was in the order of *O. angustifolius* > *O. bodinieri* (Kangxian) > *Ophiopogon bodinieri* (Wenxian) > *O. bodinieri* (Wudu) > *L. muscari* > *L. spicata* > *O. japonicus* > *O. reversus* (Henan) > *L. graminifolia* > *O. japonicus*. **【Conclusion】** The germplasms of *O. angustifolius*, *O. bodinieri* (Kangxian) and *O. bodinieri* (Wenxian) were more suitable for promotion in northern China because of their strong cold resistance.

Key words: Ophiopogoneae; cold stress; photosynthetic parameter; chlorophyll fluorescence; cold resistance; evaluation

(责任编辑:刘建荣)