

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.016

引用格式:魏雅琴,郭美莹,刘亚玲,等.基于叶绿素荧光参数和生理指标对冰草种质资源幼苗期的耐盐性评价[J].草地学报,2026,34(2):543-552

WEI Ya-qin, GUO Mei-ying, LIU Ya-ling, et al. Evaluation of the Salt Resistance on *Agropyron* Germplasm at Seedling Stage Based on Chlorophyll Fluorescence Parameters and Physiological Indicator[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):543-552

基于叶绿素荧光参数和生理指标对冰草种质资源幼苗期的耐盐性评价

魏雅琴¹, 郭美莹¹, 刘亚玲³, 刘希强², 赵彦^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院/草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所/国家林业和草原局草原研究中心, 北京 100091; 3. 内蒙古草业技术创新中心有限公司, 内蒙古呼和浩特 010070)

摘要:为筛选耐盐冰草(*Agropyron Gaertn.*)种质资源,本研究对野生采集的31份冰草种质资源开展混合中性盐胁迫处理,通过检测叶绿素荧光参数,包括 ϕ PSII, NPQt, qL, Fv/Fm, Fo, Fm, Y(NPQ), Y(NO)及Y(II)同时测定MDA, Pro, SS和POD等生理指标,运用相关性分析、主成分分析(PCA)及聚类分析,对种质耐盐性进行综合评价。结果显示,31份冰草材料测定指标变异系数介于0.03~0.99之间。主成分分析显示,前四个主成分贡献率依次为43.152%, 22.847%, 9.746%和8.882%。聚类分析将种质分为三类:Ⅰ类光合效率与过氧化物酶活性较高,丙二醛含量较低;Ⅱ类光合速率处于中等水平;Ⅲ类光合作用及生理指标显著受盐胁迫影响。基于主成分及聚类分析,并结合生理响应变化,筛选出6份耐盐冰草种质资源(20-02, 20-03, 20-06, 20-08, 20-11, 20-17),其中多数为扁穗冰草。本研究获得的冰草耐盐种质资源可作为冰草新品种选育候选材料,也为挖掘优良耐盐基因提供种质基础。

关键词:冰草;耐盐性;叶绿素荧光参数;生理指标

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0543-10

Evaluation of the Salt Resistance on *Agropyron* Germplasm at Seedling Stage Based on Chlorophyll Fluorescence Parameters and Physiological Indicator

WEI Ya-qin¹, GUO Mei-ying¹, LIU Ya-ling³, LIU Xi-qiang², ZHAO Yan^{1*}

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources (IMAU), Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry/Grassland Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 3. Inner Mongolia Pratacultural Technology Innovation Center Co., Ltd, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China)

Abstract: To identify salt-tolerant germplasm resources of *Agropyron cristatum*, this study subjected 31 germplasm samples to salt stress treatment with a soil salt content of 0.9%. Chlorophyll fluorescence parameters (ϕ 2, NPQt, qL, Fv/Fm, Fo, Fm, Y(NPQ), Y(NO), and Y(II)) and physiological indicators (MDA, Pro, SS, and POD) were determined, and their salt tolerance was comprehensively evaluated using correlation analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis. The results showed that the coefficient of variation of the measured indicators of 31 samples ranged from 0.03 to 0.99. PCA indicated that the contribution rates of the top four principal components were 43.152%, 22.847%, 9.746%, and 8.882%, respec-

收稿日期:2025-03-19;修回日期:2025-05-15

基金项目:草种业核心技术攻关项目(SJCZFY2022-1-4);内蒙古自治区科技计划项目“黄河流域耐盐碱生产生态型优良草品种的高效繁育与加工利用”(2022YFHH0043);2023年国家草业技术创新中心(筹)重大创新平台建设专项专题(CCPTZX2023W1);国家自然科学基金项目(32160326)资助

作者简介:魏雅琴(1999-),女,满族,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事草种质资源与育种研究,E-mail:weiyaqinn@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:zhaoyannmg@imau.edu.cn

tively. Cluster analysis suggested that the first group had higher photosynthetic efficiency and POD activity, and lower MDA content; the second group had moderate photosynthetic rate; the photosynthesis and physiological indices of the third group were severely affected. Based on PCA and cluster analysis, combined with changes in physiological responses, six salt-tolerant *Agropyron* germplasm (20-02, 20-03, 20-06, 20-08, 20-11, 20-17) were screened, most of which belonged to *A. latissimum*. In conclusion, the salt-tolerant germplasm obtained in this study could be used as the candidate materials for the breeding of new varieties of *Agropyron*, and also provide germplasm resources for the exploration of excellent salt-tolerant genes.

Key words: *Agropyron cristatum*; Salt tolerance; Chlorophyll fluorescence parameters; Physiological index

土壤盐渍化已成为全球性的农业和生态难题。据统计,全球盐渍化土地面积高达 $9.9 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[1]。中国盐碱地面积约为 $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$,主要集中在西北、华北、东北的干旱和半干旱地区,以及东部沿海区域^[2-3]。当前,受气候干旱和草原水资源枯竭的影响,内蒙古草原正以每年 $2.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的速度发生盐碱化^[4]。大量研究表明,深入筛选和研究耐盐碱种质资源,开展遗传改良工作,培育适宜在盐渍化、沙化草原大规模生长的天然牧草,是退化草原治理和恢复的有效途径之一^[5-6]。目前,植物耐盐种质资源的筛选和遗传改良主要集中在经济作物上,而针对天然牧草的研究相对较少^[7-8]。

冰草 (*Agropyron* Gaertn.) 隶属于禾本科多年生牧草,主要分布于欧亚大陆的温带与寒带地区,在干旱及沙质区域尤为常见^[9]。在干旱气候生态系统中,冰草作为重要的天然牧草具有良好的饲用价值并表现出独特的生态适应性,其返青早,营养价值高,适口性好,且抗旱、耐寒能力较强,对盐碱胁迫也有一定耐受性^[10]。目前,冰草相关研究主要集中在种子萌发及幼苗生长阶段对盐胁迫的响应,且多采用单一盐类或两种盐组合模拟盐碱环境^[11-12]。该类研究大多局限于单一耐盐参数分析,对混合盐胁迫条件下系统的响应机制研究较少,难以深入揭示冰草在复杂环境中的耐盐特性。

盐胁迫通过渗透、离子及氧化胁迫造成膜脂过氧化和膜系统损伤,最终引发植物细胞死亡^[13-15]。光合作用作为植物生长的生理基础,是评判植物生长适应性的重要指标^[16]。Allakhverdiev 与 Kalaji 等^[17-18]研究表明,盐胁迫通过破坏叶绿体结构并抑制光合电子传递链活性,导致光系统 II (PSII) 中心蛋白 D1 (PsbA) 降解,最大光化学效率 (Maximum photochemical efficiency, F_v/F_m) 和光系统 II 的实际量子产量 (Actual quantum yield of photosystem II, $Y(II)$) 显著下降 ($P < 0.05$)。段九菊等^[19]研究表明,盐胁迫下万寿菊叶片的叶绿素及类胡萝卜素含

量升高,脯氨酸 (Proline, Pro) 含量增加,最大光化学效率 (F_v/F_m) 和非光化学淬灭系数 (Non-photochemical quenching coefficient, NPQt) 下降,丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量和电解质渗透率增加,植株生长受到抑制。以上研究表明,将叶绿素荧光参数与生理指标相结合,有助于评估植物在盐胁迫下的适应能力,为深入探究冰草种质资源在幼苗期的耐盐响应提供研究思路与方法。

本研究对采自内蒙古中东部的 31 份冰草种质资源开展耐盐性评价,通过土壤含盐量为 0.9% 的胁迫处理,深入探究冰草幼苗在该土壤环境下叶绿素荧光参数及生理指标的响应变化,以期筛选出可用于培育耐盐冰草新品种的优质候选材料,同时为探究禾本科植物耐盐分子机制提供种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 2020 年和 2023 年秋季采集自内蒙古中部及东部地区的 31 份野生冰草属种质,如表 1 所示。

1.2 试验方法

试验于 2024 年 4—6 月在中国林业科学研究院科研温室内进行,每份冰草种质挑选籽粒饱满、大小均一的种子,75% 乙醇溶液消毒 1 min,5% 次氯酸钠溶液消毒 5 min,后用无菌蒸馏水冲洗 3 次,均匀置于 9 cm 培养皿内湿润滤纸上。至于光照培养箱,培养条件设定为白天 25℃,光照 16 h,光照强度为 $54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (400~700 nm); 夜间 15℃,黑暗 8 h,湿度 50%。7 天后,挑选长势一致的幼苗,移栽至内径 7 cm、高 13 cm 的花盆中,基质为泥炭和蛭石按体积比 1:1 混合,每盆基质干重 0.6 kg,每盆定植一株,置于温室进行培养。每 3 天浇一次水,每周浇 1 次 1/2 浓度的 Hoagland 营养液,温度为白天 (25 ± 2)℃,夜间 (16 ± 2)℃^[20]。

表 1 试验材料和来源
Table 1 Test materials and sources

编号 Number	拉丁名 Latin name	地点 Locality	经纬度 Latitude and longitude
20-01	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	东乌珠穆沁旗巴彥高勒嘎查 Bayan Gol Gacha, Dong Ujimqin Banner	46°09'N, 118°17'E
20-02	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	霍林郭勒市查格达村 Chagda Village, Huolin Gol City	45°27'N, 119°30'E
20-03	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	西乌珠穆沁旗伊和塔萨尔亥村 Yihe Tasarhai Village, Xi Ujimqin Banner	44°36'N, 117°38'E
20-04	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	苏尼特左旗苏伯勒德音沃博勒卓 Sumberlin Woborjod, Sonid Left Banner	43°50'N, 113°58'E
20-05	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	克什克腾旗北井子 Beijingzi, Keshiketeng Banner	42°58'N, 116°48'E
20-06	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	西乌珠穆沁旗伊和塔萨尔亥村 Yihetasarhai Village, Xiwuzhumuqin Banner	44°36'N, 117°38'E
20-07	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	苏尼特左旗喇嘛图音浑迪 Lama Tuyin Hundi, Sonid Left Banner	44°11'N, 113°24'E
20-08	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	张北县南梁底 Nanliangdi, Zhangbei County	41°35'N, 114°59'E
20-09	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	呼和浩特市武川县 Wuchuan County, Hohhot City	41°08'N, 111°41'E
20-10	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	乌兰察布市四子王旗 Siziwang Banner, Ulanqab City	42°06'N, 112°11'E
20-11	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	苏尼特左旗巴彥根呼都格 Bayan Gen Hudug, Sunid Left Banner	43°33'N, 113°15'E
20-12	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	科尔沁右翼中旗突泉县 Tongliao County, Horqin Right Middle Banner	45°15'N, 121°32'E
20-13	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	阿巴嘎旗都博勒金 Dubolejin, Abaga Banner	43°51'N, 114°47'E
20-14	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	克什克腾旗经棚镇 Jingpeng Town, Keshiketeng Banner	43°19'N, 117°29'E
20-15	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	锡林浩特市宝力根苏木 Baoligen Sumu, Xilin Hot City	43°56'N, 116°05'E
20-16	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	苏尼特左旗拜兴图 Baixingtu, Sunid Left Banner	44°13'N, 113°22'E
20-17	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	东乌珠穆沁旗巴彥高勒嘎查 Bayan Gaol Gech, Dong Ujimqin Banner	45°44'N, 118°33'E
23-18	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	锡林浩特市宝力根苏木 Baoligen Sumu, Xilin Hot City	43°56'N, 116°4'E
23-19	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	克什克腾旗经棚镇 Jingpeng Town, Keshiketeng Banner	43°19'N, 117°29'E
23-20	蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i> Keng	锡林浩特市宝力根苏木 Baoligen Sumu, Xilin Hot City	43°56'N, 116°4'E
23-21	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	克什克腾旗浩来呼热苏木 Haolaihure Sumu, Keshiketeng Banner	42°33'N, 116°31'E
23-22	蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i> Keng	正蓝旗上都镇 Shangdu Town, Zhenglan Banner	42°15'N, 115°59'E
23-23	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	阿巴嘎旗脑汗嘎查 Naomuhan Gech, Abag Banner	43°04'N, 113°27'E
23-24	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	正蓝旗桑根达来镇 Sangendalai Town, Zhenglan Banner	42°41'N, 115°57'E
23-25	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	克什克腾旗经棚镇 Jingpeng Town, Keshiketeng Banner	43°19'N, 117°29'E
23-26	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	凉城县蛮汉镇 Manhan Town, Liangcheng County	40°37'N, 112°05'E
23-27	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	锡林浩特市宝力根苏木 Baoligen Sumu, Xilin Hot City	43°56'N, 116°05'E
23-28	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	阿巴嘎旗别力古台镇 Bieligutai Town, Abag Banner	44°01'N, 114°58'E
23-29	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	正蓝旗桑根达来镇 Sanggen Dalai Town, Zhenglan Banner	42°41'N, 115°57'E
23-30	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	苏尼特左旗满都拉图镇 Mandula Town, Sunite Left Banner	43°51'N, 113°39'E
23-31	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> (Fisch.) Schult	苏尼特左旗满都拉图镇 Mandula Town, Sunite Left Banner	43°51'N, 113°39'E

冰草生长至6周龄,选取健康、长势均一的植株进行处理,设置正常浇水(Watering treatment, WT)和盐胁迫处理(Salt stress treatment, ST)两组,每组6个生物学重复,每盆1个重复,处理组中每盆均匀施加60 mL摩尔比为NaCl:Na₂SO₄:KCl=3:2:1的0.9%混合盐溶液,使土壤基质与溶液平衡12 h,确保盐充分吸收。每隔3日称量盆重,计算土壤蒸发损失的水量,使用与原处理液相同浓度的混合盐溶液补充,避免土壤含盐量下降。对照组(WT)和处理组(ST)均设置6个生物学重复,将生理指标和叶绿素荧光参数的测定数据通过计算△=ST—WT的平均值结果进行评价分析。

1.3 测定内容

处理9天后,使用MultispeQ V2仪器(Photosynq, 美国)分别对对照组和处理组冰草种质进行叶绿素荧光参数测定,其内置夹持式叶夹,将叶片平整固定于探头测量窗口,确保叶片与传感器接触面无气泡或褶

皱,同步记录NPQt, Fv/Fm, Y(II), 光系统II实际光化学效率(Actual photochemical efficiency of photosystem II, Phi2), 光化学淬灭系数(Photochemical quenching coefficient, qL), 最大荧光(Maximum fluorescence, Fm), 非光化学淬灭的量子产量(Quantum yield of non-photochemical quenching, Y(NPQ)), 光系统II的非调节性能量耗散的量子产量(Quantum yield of non-regulated energy dissipation in photosystem II, Y(NO)), 初始荧光(Initial fluorescence, Fo)^[21-22]。

测定后取叶片样品用锡纸包裹,液氮速冻后放置于-80℃冰箱储存。之后使用植物可溶性糖(Soluble sugar, SS)、丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)以及过氧化物酶(Peroxidase, POD)提取试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)进行提取检测,称0.1 g冰草叶片于离心管,加入1 mL提取液,进行冰浴匀浆,将研磨好的匀浆转至新的离心管中,离心(8000 g, 4℃)10 min,取上清,依照说明书步骤在紫外可见分光光度计上测定^[23]。

1.4 数据分析

运用 WPS Office 软件对实验数据进行系统整理与预处理;采用 SPSS Statistics 23 软件开展主成分分析(Principal component analysis, PCA),完成数据降维并确定关键变量;利用 OriginPro 2021 绘制相关性热图、箱线图及聚类热图;在 R 语言中,利用 K-means 算法的“cluster”与“factoextra”程序包分别对各光合和生理指标进行聚类^[24-25]。

2 结果与分析

2.1 不同耐盐指标的统计分析

14 项耐盐指标的统计分析显示,其变异系数处于 0.03~0.99 之间(表 2)。结果表明,31 份冰草种质在盐胁迫下,各指标呈现差异变化。其中,脯氨酸(Pro)的变异程度最为明显,变异系数达 0.99;其次是 NPQt、POD 和 Y(NPQ),Phi2、Fv/Fm 以及 Y

表 2 31 份冰草种质各指标的统计分析

Table 2 Statistical analysis of various indicators of 31 *Agropyron* germplasm

指标 Index	△平均值 △Mean=(ST-WT)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
SS	17.13	3.39	0.20
MDA	42.05	14.33	0.34
Pro	14.73	14.60	0.99
POD	415.50	49.86	0.12
Phi2	0.70	0.02	0.03
qL	0.67	0.05	0.08
NPQt	0.43	0.18	0.42
Fv/Fm	0.77	0.02	0.03
Fo	11.22	2.92	0.26
Fm	24.84	5.46	0.22
Y(NPQ)	0.09	0.03	0.34
Y(NO)	0.22	0.02	0.09
Y(II)	0.70	0.02	0.03

注:SS,可溶性糖;MDA,丙二醛;Pro,脯氨酸;POD,过氧化物酶;Phi2,光系统 II 实际光化学效率;qL,光化学淬灭系数;NPQt,非光化学淬灭系数;Fv/Fm,最大光化学效率;Fo,初始荧光;Fm,最大荧光;Y(NPQ),非光化学淬灭的量子产量;Y(NO),光系统 II 的非调节性能量耗散的量子产量;Y(II),光系统 II 的实际量子产量;ST,盐胁迫处理;WT,清水处理;下同

Note: SS, soluble sugar; MDA, malondialdehyde; Pro, proline; POD, Peroxidase; Phi2, actual photochemical efficiency of photosystem II; qL, photochemical quenching coefficient; NPQt, non-photochemical quenching coefficient; Fv/Fm, maximum photochemical efficiency; Fo, Initial fluorescence; Fm, Maximum fluorescence; Y(NPQ), quantum yield of non-photochemical quenching; Y(NO), quantum yield of non-regulated energy dissipation in photosystem II; Y(II), actual quantum yield of photosystem II; ST, Salt stress treatment; CK, Treatment with clear water; the same as below

(II) 的变异程度较小。上述结果说明,31 份冰草种质资源的各耐盐性状具有广泛的变异,这反映了不同材料对盐胁迫的敏感程度存在差异,也表明所选评价指标具有良好的代表性。

2.2 荧光参数与生理指标的相关性分析

叶绿素荧光参数与生理指标的相关性分析结果表明(图 1),叶绿素荧光参数的多项指标间存在极显著相关性($P<0.01$)。其中,NPQt 与 Phi2,Fv/Fm,Y(NO)以及 Y(II)呈显著负相关($P<0.01$); ϕ (PSII),Y(II)与 Fv/Fm 呈显著正相关($P<0.05$),qL 与 Fo,Fm 和 NPQt 呈显著正相关($P<0.01$),与 Fv/Fm 及 Y(NO)呈显著负相关($P<0.05$)。Fv/Fm 与 Y(NO),Y(II)呈显著正相关($P<0.01$),与 Fo,Y(NPQ)呈显著负相关($P<0.01$)。此外,Y(NPQ)与 Y(NO),Y(II)呈显著负相关($P<0.01$)。NPQt 用于量化光系统 II(PSII)吸收并以热形式耗散的光能,能够表征植物对光系统 II 吸收光能的利用情况。Phi2,Fv/Fm 及 qL 等指标,同样可用于间接表征该光合指标。在生理指标方面,Pro,Fo 与 Fm 之间存在显著正相关($P<0.05$);POD 与 Fm 呈显著负相关($P<0.05$)。上述结果表明,生理指标与叶绿素荧光参数均能有效反映冰草在盐胁迫环境中酶活性及光合作用过程的变化,可作为全面筛选耐盐种质资源的必要指标。

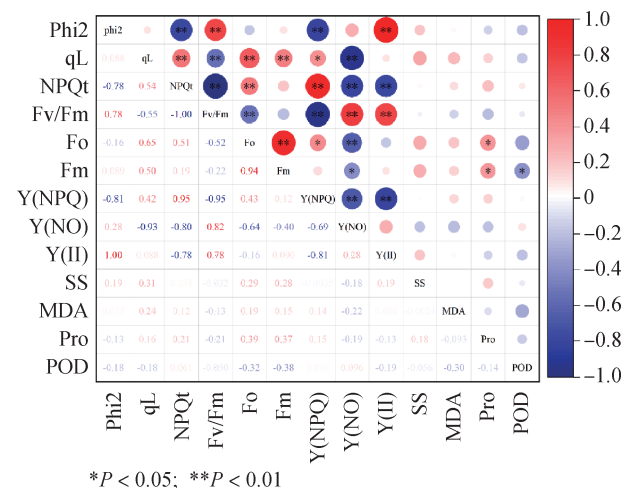


图 1 31 份冰草种质叶绿素荧光参数与生理指标的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of fluorescence parameters and physiological indicators of 31 *Agropyron* germplasm

注: * 显著相关($P<0.05$), ** 极显著相关($P<0.01$)

Note: * means significant correlation at the 0.05 level; ** means extremely significant correlation at the 0.01 level

2.3 荧光参数与生理指标的主成分分析

本研究对 31 份冰草种质的 13 项指标进行主成分分析,获取了特征值、方差贡献率及累积方差贡献率(表 3)。依据特征值大于 1 的原则提取主成分,确定前 4 个特征值大于 1 的主成分为主要成分,其累计贡献率达到 84.627%,能够概括冰草耐盐性的关键特征。主成分 1(PC1)贡献率为 43.152%,NPQt, Fv/Fm 及 Y(NPQ)的载荷系数绝对值相对较大,反映了冰草在盐胁迫下 PSII 对光能的吸收与利用情

况。其中,NPQt,φPSII,Fv/Fm,Y(NO)以及 Y(II)呈负值,其余指标均为正值,与相关性分析结果一致。主成分 2(PC2)中,NPQt,φPSII,Fm 和 Fo 的载荷系数绝对值相对较大,贡献率为 22.847%。主成分 3(PC3)贡献率为 9.746%,MDA 和 Pro 的载荷系数绝对值在该主成分中最高。主成分 4(PC4)中 POD 载荷系数绝对值最高,贡献率为 8.882%。PC1 主要体现冰草叶绿素荧光参数相关信息,PC2,PC3 及 PC4 综合反映冰草叶片的生理特征。

表 3 各指标主成分因子得分与载荷

Table 3 Score and load of principal component factors in each index

指标 Index	得分 Score				载荷 Load			
	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2	第 3 主成分 PC3	第 4 主成分 PC4	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2	第 3 主成分 PC3	第 4 主成分 PC4
SS	0.02	0.158	0.188	0.389	0.114	0.469	0.238	0.449
MDA	0.032	0.090	-0.508	-0.354	0.180	0.266	-0.644	-0.409
Pro	0.055	0.085	0.540	-0.150	0.308	0.253	0.684	-0.174
POD	-0.011	-0.175	0.087	0.549	-0.060	-0.520	0.110	0.634
Phi2	-0.124	0.219	-0.117	0.171	-0.698	0.650	-0.149	0.197
qL	0.112	0.198	-0.219	0.305	0.629	0.589	-0.277	0.352
NPQt	0.173	-0.068	-0.045	0.062	0.972	-0.203	-0.057	0.072
Fv/Fm	-0.174	0.063	0.050	-0.056	-0.976	0.186	0.063	-0.065
Fo	0.123	0.202	0.163	-0.125	0.687	0.601	0.206	-0.144
Fm	0.073	0.247	0.219	-0.191	0.408	0.734	0.278	-0.220
Y(NPQ)	0.164	-0.097	-0.067	-0.006	0.918	-0.288	-0.085	-0.007
Y(NO)	-0.151	-0.102	0.195	-0.234	-0.847	-0.302	0.247	-0.270
Y(II)	-0.124	0.219	-0.117	0.169	-0.697	0.651	-0.149	0.195
特征根 Eigenvalue					5.61	2.970	1.267	1.155
方差贡献率					43.152	22.847	9.746	8.882
Proportion of variation/%								
累计贡献率					43.152	65.999	75.745	84.627
Cumulative proportion/%								

2.4 31 份冰草种质叶绿素荧光参数的聚类分析

对 31 份冰草种质的叶绿素荧光参数进行分析(图 2)。第 1 组包括 13 份冰草材料,占总数的 42%。该组中 Phi2,Fv/Fm,Y(NO)以及 Y(NO)较高,其余指标变化不明显,表明在盐胁迫环境下,该组与光合特性相关的指标较为稳定,叶绿体受影响程度较小,光合效率较高。第 2 组包含 9 份冰草材料,占比 29%。其中,Fm,Fo 和 qL 升高,Phi2,Fv/Fm,Y(NO)以及 Y(II)下降,其余指标变化不大,表明在盐胁迫下其光合速率处于中等水平。第 3 组由 9 份冰草材料构成,占比 29%。在此组中,除 NPQt 与 Y(NPQ)无明显下降外,其他光合指标均受到影响,光合结构受损,光合效率降低。综上分析结果表明,第 1 组的 13 份冰草种质(编号为 20-02,20-07,20-06,20-10,20-17,23-30,20-16,23-25,20-08,

23-27,20-11,20-03,20-15)在盐胁迫条件下,叶绿素荧光参数受影响较小,表明其光系统结构与功能受盐胁迫损伤程度较小。

2.5 冰草种质的生理指标分析

利用 K-means 聚类方法将 31 个样本划分为高低两组。结果表明,20 个样本的 MDA 含量高于其余 11 个样本,其中低组中 20-02,20-03,20-11 和 20-17 属于上述第一聚类(图 3a)。20-02,20-03,20-06,20-08 及 20-17 的 POD 活性高于其他样本(图 3b)。20-02,20-03,20-06 与 20-08 的 Pro 含量低于高组样本,且低组中 84.6% 的冰草属于上述第一聚类(图 3c)。20-02,20-03,20-08,20-11 和 20-17 的可溶性糖含量高于其他组,且高组样本中 61.5% 的冰草属于上述第 1 聚类(图 3d)。

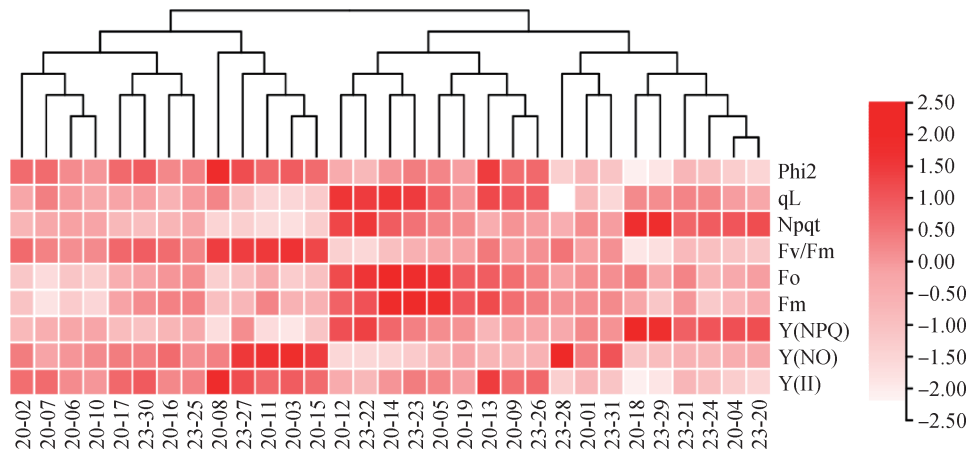


图 2 31 份冰草种质的叶绿素荧光参数聚类热图

Fig. 2 Cluster heat map of fluorescence parameters of 31 *Agropyron* germplasm

注:横轴代表样本,纵轴代表叶绿素荧光参数指标

Note: The horizontal axis represents the samples, and the vertical axis represents the chlorophyll fluorescence parameter indicators

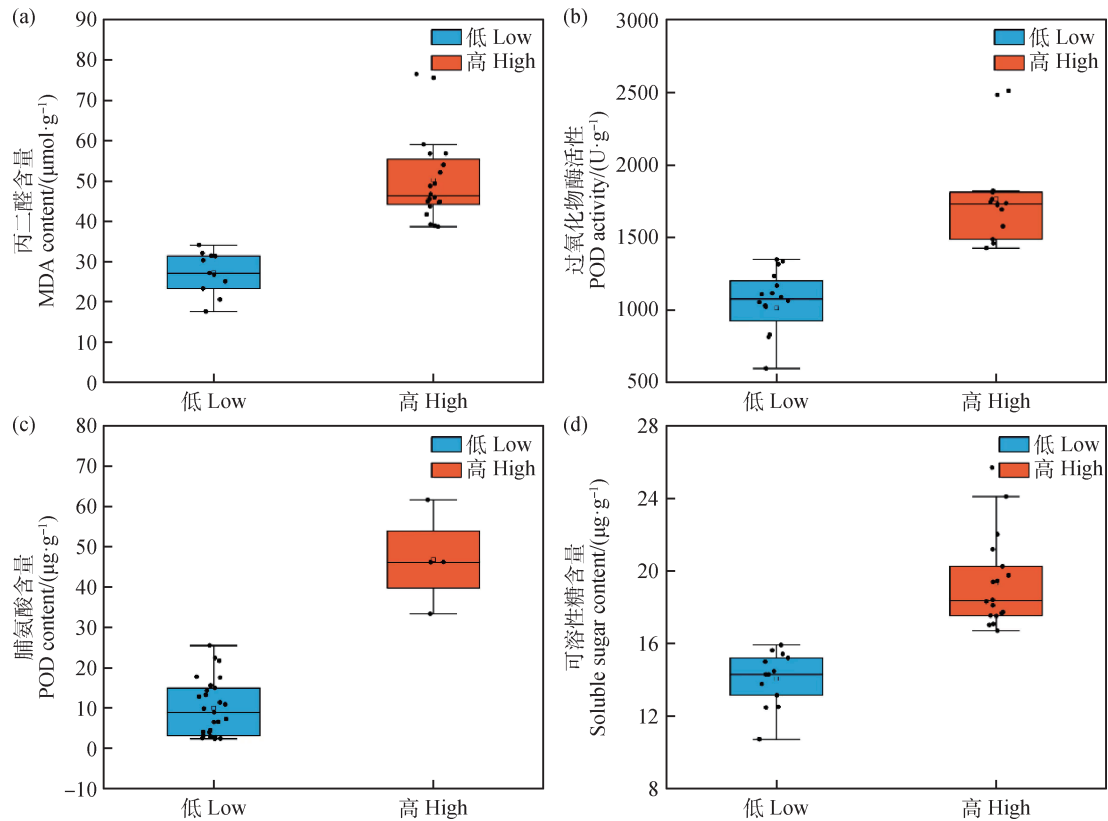


图 3 盐胁迫对 31 份冰草种质丙二醛含量(a)、过氧化物酶活性(b)、脯氨酸含量(c)和可溶性糖含量(d)影响的箱型图

Fig. 3 Box plots of the effects of salt stress on MDA content (a), POD activity (b), proline content (c) and soluble sugar content (d) of 31 *Agropyron* germplasm

注:“低”表示生理指标含量和活性较低的冰草;“高”表示生理指标含量和活性较高的冰草

Note: Low represents *Agropyron* with low content and activity of physiological indicators; High represents *Agropyron* with high content and activity of physiological indicators

2.6 20-01 和 20-02 冰草种质的生理指标和荧光参数分析

本研究基于聚类分析选取了两个具有代表性的种质 20-01 和 20-02(图 4)。经层次聚类确定 20-01 为第 3

类,20-02 属于第 1 类。20-02 的可溶性糖积累量显著高于 20-01($P < 0.05$)(图 4a)。在相同胁迫条件下,20-02 的 MDA 积累量显著低于 20-01($P < 0.05$)(图 4b),20-02 与 20-01 相比,Fo,NPQt 无显著变化(图 4c、4d)。

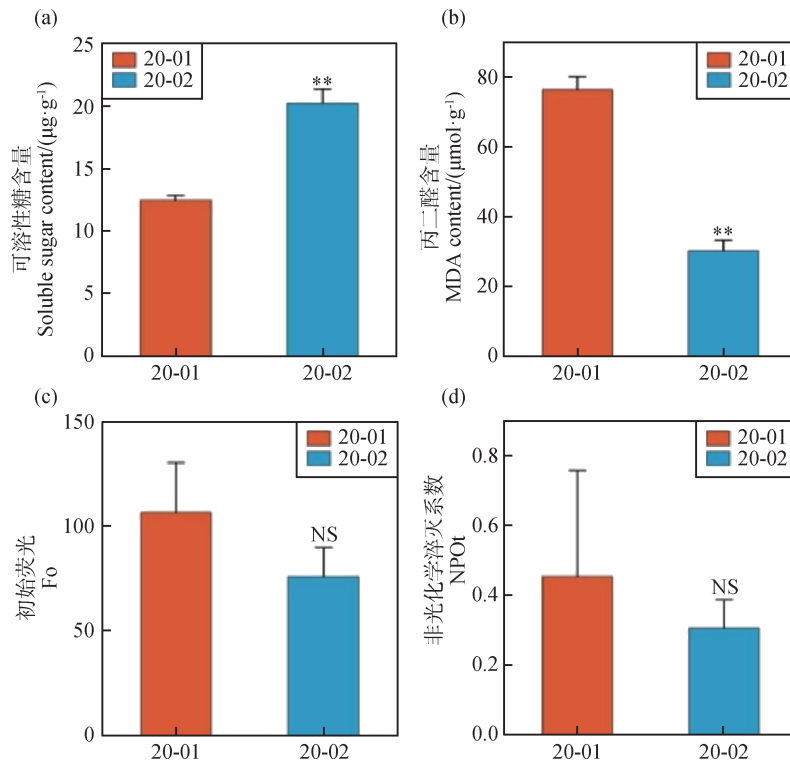


图4 盐胁迫对冰草20-01和20-02叶片中可溶性糖含量(a)、丙二醛含量(b)、初始荧光(c)以及非光化学淬灭(d)的影响

Fig. 4 Effect of salt stress on the soluble sugar content (a), malondialdehyde content (b), initial fluorescence (c), and non photochemical quenching (d) in the leaves of *Agropyron* 20-01 and 20-02

注:数值表示3次重复的平均值±标准差, $P < 0.05$; **表示基于配对样本t检验存在显著差异, NS表示无显著差异

Note: Values represent the mean ± standard deviation of the 3 replicates, $P < 0.05$; ** indicates significant differences based on paired-samples t-tests, NS indicates no significant difference

3 讨论

3.1 盐胁迫对冰草叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数被广泛视作阐释环境胁迫对光合作用过程影响的重要工具^[26]。盐胁迫下, F_v/F_m 降低反映了PSII功能受损,进一步限制植物生长与产量。 $Y(II)$ 的下降,可能由于反应中心结构受损、光抑制加剧,或者电子传递链遭到破坏。通过聚类分析发现, $Y(NPQ)$ 呈现上升趋势,可能是因为光能利用效率降低,使过剩的激发能以热能的形式耗散,这一现象本质上是植物在胁迫环境下,为减轻氧化损伤所进化出的自我保护机制^[27-28]。本研究中,观测到 F_v/F_m 值呈现上升趋势,该现象或可归因于光合器官针对盐环境所做出的复杂响应。已有相关研究明确指出,盐胁迫与 $Y(II)$, F_v/F_m 以及 Φ_2 之间呈现出显著的负相关($P < 0.05$);与此同时,植物在面对盐胁迫时,会主动上调 $Y(NPQ)$ 水平以增强自身的适应能力^[29-31]。聚类分析显示,第一组 $Y(II)$ 的有效量子产量增加,尤其在20-02, 20-08和20-11中表现突出,同时 $Y(NPQ)$ 数值下降。

这些发现表明,耐盐遗传材料可能具备有效的调控机制,能够在胁迫条件下优化光能利用,从而维持相对稳定的生命活动。

3.2 盐胁迫对冰草生理指标的影响

盐胁迫影响植物生长与新陈代谢,促使其内部生理机制发生适应性改变,主要体现在抗氧化酶系统、渗透调节系统及光合系统。众多研究表明,过氧化物酶(POD)作为内源性活性氧(ROS)的高效清除剂,是植物应对环境胁迫的关键防御机制之一。Pro, SS等渗透调节物质,能通过提高细胞质浓度、平衡细胞渗透势及增强细胞保水能力,抵御非生物胁迫^[32]。有研究指出,提高Pro等渗透调节物质水平,可减轻MDA积累造成的渗透胁迫损伤^[33]。箱型图显示,20-11和20-17的MDA含量处于低水平,Pro含量处于高水平,表明丙二醛含量随脯氨酸含量升高而降低,进一步证实渗透调节物质能缓解盐胁迫引发的叶片膜脂过氧化并清除植物体内积累的毒害物质^[34]。在0.9%的土壤含盐量胁迫条件下,冰草种质激活渗透调节机制,提升耐盐性以减轻盐胁迫损伤。

3.3 冰草幼苗期的耐盐性综合评价分析

本研究通过相关性分析,明确了生理指标与叶绿素荧光参数之间的关系,其中Pro和F_o,F_m呈显著正相关($P < 0.05$)。盐胁迫下,冰草响应渗透调节机制以减少盐分积累、维持细胞渗透压平衡,增强叶绿素荧光产生。本研究发现F_m与POD呈显著负相关($P < 0.05$),冰草受盐胁迫时,随着MDA含量降低出现协同效应,该效应通过调节酶活性实现,酶活性调节既能直接保护细胞膜,又能间接降低对PSII反应中心荧光的损害,从而维持植物正常生理代谢,此模式与濒危半红树植物玉蕊在盐胁迫下的响应相似^[35]。

本研究第一聚类的Phi2升高,表明PSII在盐胁迫下仍能高效利用光能,未发生明显光抑制。很多研究表明盐胁迫会导致F_v/F_m下降,是植物光损伤标志之一^[36],但该组材料F_v/F_m的升高,表明其PSII反应中心结构稳定,可能通过快速修复机制维持功能。同时,第一聚类材料的Y(II)升高,进一步验证了光能向光化学反应的转化效率未受抑制;Y(NO)升高,可反映部分未被调节的热能耗散,结合Phi2和F_v/F_m的升高,第一聚类中的材料可能通过增强抗氧化系统避免光损伤。NPQt与Y(NPQ)(非光化学淬灭)无显著变化,说明未依赖热耗散保护光合机构,间接反映其光化学途径的高效性。第一聚类材料在盐胁迫下维持光化学效率(Phi2,F_v/F_m,Y(II),Y(NO)),表明该种质叶绿体结构仍保持较好的完整性,同时未过度依赖非光化学淬灭(NPQt,Y(NPQ)),综合表现为叶绿素荧光受盐胁迫影响较小。

本研究进一步通过生理指标的聚类分析发现,第一聚类中20-02,20-03,20-06,20-08和20-17的POD活性高于低活性组(图3b),过氧化物酶(POD)是关键抗氧化酶,可反映植物在胁迫下的代谢状态。随着盐浓度增加,POD活性的下降,清除活性氧(ROS)能力受限,ROS大量积累会损伤植物细胞^[37]。本研究表明以上这些种质耐盐性强,植物受损程度低。MDA由细胞内脂质过氧化产生,其浓度常作为衡量植物膜受损程度的指标^[38]。苗涵^[9]研究指出,冰草的MDA含量随着盐胁迫加剧而升高,且其抗盐能力与MDA含量呈负相关。本研究第一聚类的20-02,20-03,20-11和20-17的MDA含量相对较低,表明这些种质缓解细胞膜脂过氧化的能力较强,具有一定耐盐性。可溶性糖

(SS)是重要的渗透调节物质,逆境胁迫下,其含量升高可保护酶类和细胞膜,很多研究表明,盐胁迫加剧时,SS含量先升后降^[39-40]。本研究中,20-02,20-03,20-08,20-11和20-17的SS升高,且均属于第一聚类,可能在盐胁迫下调节渗透平衡与代谢稳态。

综上所述,在耐盐胁迫下,冰草种质在光合荧光参数和生理指标结果上具有一致性,第一聚类中的种质通过生理响应,积累更多的抗氧化物和渗透调节物来保持光合效率,确保植株正常生长发育,具有较强的耐盐性。

4 结论

本研究对31份冰草材料进行了土壤含盐量0.9%的盐胁迫处理,以评估其幼苗耐盐性。相关性分析结果表明,F_o,F_m,Pro和POD之间存在显著相关性。利用主成分分析和聚类分析对光合荧光参数和生理指标进行综合评价,筛选出6个耐盐材料,即20-02,20-03,20-06,20-08,20-11和20-17。这些候选种质资源可作为培育冰草耐盐新品种(系)的优质材料,也为深入研究禾本科植物耐盐机制提供了重要种质资源。

参考文献

- [1] 侯瑞虹. 10份花苜蓿种质耐盐性评价及耐盐基因挖掘[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024:1-2
HOU R H. Salt tolerance evaluation and gene mining of 10 *medicago ruthenica* L. Germplasm[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024:1-2
- [2] 闫伟. 土默川平原盐碱化区域苜蓿根际促生菌的筛选及应用研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022:1-4
YAN W. The screening and application research of plant growth promoting rhizobacteria of alfalfa in the salinized area of tumochun plain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022:1-4
- [3] 王巍琦,杨磊,程志博,等. 干旱区不同类型盐碱地土壤微生物碳源代谢活性研究[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(6):158-166
WANG W Q, YANG L, CHENG Z B, et al. Study on soil microbial biomass carbon source metabolism in different types of sodic saline-alkali soil in arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(6):158-166
- [4] 福英. 不同措施对重度盐碱化草地修复效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016:1-2
FU Y. Study on the effect of different measures on the restoration of severely salinized grassland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016:1-2

- [5] TARIQ A, ULLAH A, SARDANS J, et al. *Alhagi sparsifolia*: an ideal phreatophyte for combating desertification and land degradation[J]. Science of the Total Environment, 2022, 844: 157228
- [6] 付强. 耐盐碱牧草的筛选与高产栽培技术[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 1-3
- FU Q. Screening and high-yield cultivation techniques of saline-alkali tolerant forage grass[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 1-3
- [7] ZHANG A N, LIU Y, WANG F M, et al. Enhanced rice salinity tolerance via CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the *OsRR22* gene[J]. Molecular Breeding, 2019, 39: 47
- [8] 邸桂俐, 张月学, 陈积山, 等. 松嫩平原盐碱化草地20种禾本科牧草生态适应性研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013(15): 85-89
- DI G L, ZHANG Y X, CHEN J S, et al. Study on the ecological adaptability of 20 species of gramineous forage grasses in saline-alkali grassland in Songnen plain [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2013(15): 85-89
- [9] 苗涵. 冰草不同生育时期耐盐性鉴定及综合评价[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2022: 1-3
- MIAO H. Identification and comprehensive evaluation of salt tolerance of *Agropyron cristatum* at different growth stages [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2022: 1-3
- [10] 王晓龙, 李红, 米福贵, 等. 3种冰草种子萌发期耐盐性评价[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(13): 97-101, 148
- WANG X L, LI H, MI F G, et al. Evaluation on salt tolerance of three species of wheatgrass seeds at germination stage [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021(13): 97-101, 148
- [11] 黄海燕, 刘帅帅, 王生荣, 等. 中间冰草种质材料苗期耐盐性研究[J]. 作物杂志, 2015(1): 36-42
- HUANG H Y, LIU S S, WANG S R, et al. Study on salt tolerance of 15 germplasm materials of *Agropyron intermedium* (host) nevski [J]. Crops, 2015(1): 36-42
- [12] 申吴燕, 吐尔逊娜依·热依木, 雪热提江·麦提努日, 等. 12种植物萌发期耐盐性筛选[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(10): 1912-1920
- SHEN W Y, REYIMU T E X N Y, MAITINURI X R T J, et al. Selection of salt tolerance of 12 forage species in xinjiang during germination period [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(10): 1912-1920
- [13] GUO X, AHMAD N, ZHAO S Z, et al. Effect of salt stress on growth and physiological properties of *Asparagus* seedlings [J]. Plants, 2022, 11(21): 2836
- [14] 王龙, 李静, 钱晨, 等. 盐胁迫对油菜生理特征和菜籽产量品质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(6): 1597-1607
- WANG L, LI J, QIAN C, et al. Effects of salt stress on yield, quality, and physiology in rapeseed [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(6): 1597-1607
- [15] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 909-930
- [16] 王业, 王楚, 常娜娜, 等. 基于光合和叶绿素荧光特性的九牛草种质资源评价[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(1): 81-87
- WANG Y, WANG C, CHANG N N, et al. Germplasm resource evaluation of *Artemisia stolonifera* based on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2025, 64(1): 81-87
- [17] ALLAKHVERDIEV S I, NISHIYAMA Y, MIYAIRI S, et al. Salt stress inhibits the repair of photodamaged photosystem II by suppressing the transcription and translation of *psbA* genes in *Synechocystis* [J]. Plant Physiology, 2002, 130(3): 1443-1453
- [18] KALAJI H M, JAJOO A, OUKARROUM A, et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(4): 102
- [19] 段九菊, 张超, 郑梅梅, 等. 万寿菊不同品种的耐盐性综合评价[J]. 核农学报, 2015, 29(7): 1406-1418
- DUAN J J, ZHANG C, ZHENG M M, et al. Evaluation for salt tolerance of marigold cultivars [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7): 1406-1418
- [20] LIU X Q, CHEN A P, WANG Y X, et al. Physiological and transcriptomic insights into adaptive responses of *Seriphidium transiliense* seedlings to drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2022, 194: 104736
- [21] 耿东梅, 单立山, 李毅, 等. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学报, 2014, 49(3): 282-291
- GENG D M, SHAN L S, LI Y, et al. Effect of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in *Reaumuria soongorica* seedlings [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2014, 49(3): 282-291
- [22] TRAUB J, PORCH T, NAEEM M, et al. Screening for heat tolerance in *Phaseolus* spp. using multiple methods [J]. Crop Science, 2018, 58(6): 2459-2469
- [23] 王湘莹, 魏溧姣, 王晓明, 等. 干旱胁迫对紫叶紫薇容器苗生长及生理的影响[J]. 西南林业大学学报, 2024, 44(5): 1-8
- WANG X Y, WEI L J, WANG X M, et al. Effects of drought stress on the growth and physiology of purple-leaf *Lagerstroemia indica* container seedlings [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2024, 44(5): 1-8
- [24] MAECHLER M, ROUSSEUW P, STRUYF A, et al. Cluster analysis basics and extensions [EB/OL]. <http://www.mendeley.com/catalog/cluster-analysis-basics-extensions-r-package-version-201,2015-01-31,2025-03-19>
- [25] ALBOUKADEL K, MUNDT F. Extract and visualize the results of multivariate data analyses [EB/OL]. https://www.semanticscholar.org/paper/Extract-and-Visualize-the-Results-of-Multivariate-Kassambara-Mundt/5cb503e3db8609405d.9f286fad2a8bb867e5b6e?utm_source=direct_link,2020-04-01,2025-03-19

- [26] AHMAD P, AHANGER M A, ALAM P, et al. Silicon (Si) supplementation alleviates NaCl toxicity in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] through the modifications of physio-biochemical attributes and key antioxidant enzymes[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(1):70-82
- [27] FRACHEBOUD Y, LEIPNER J. The application of chlorophyll fluorescence to study light, temperature, and drought stress [M]//Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology. Boston, MA: Springer US, 2003:125-150
- [28] MAGHSOUDI K, EMAM Y, ASHRAF M. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance [J]. Turkish Journal of Botany, 2015, 39(4):625-634
- [29] AHANGER M A, AGARWAL R M. Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum aestivum* L.) as influenced by potassium supplementation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 115:449-460
- [30] 张丽霞, 郭晓彦, 史鹏飞, 等. 旺长期水分胁迫对红麻叶片中叶绿素和胡萝卜素含量的影响[J]. 中国麻业科学, 2021, 43(2):80-87
- ZHANG L X, GUO X Y, SHI P F, et al. Effect of water stress on the chlorophyll content and carotenoid content of kenaf leaves during vigorous growing stage[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2021, 43(2):80-87
- [31] HAZRATI S, TAHMASEBI-SARVESTANI Z, ALI MOHAMMAD MODARRES-SANAVY S, et al. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 106:141-148
- [32] LI Z Y, CONG R C, YANG Q S, et al. Effects of saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances in willow seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24):8511-8517
- [33] 黄相玲, 林妃妃, 张明月, 等. 盐胁迫对小叶榄仁幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(7):1364-1369
- HUANG X L, LIN F F, ZHANG M Y, et al. Effects of salt stress on growth and osmoregulatory substances in *Terminalia neotaliala* Capuron seedlings[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(7):1364-1369
- [34] 赵元圆, 招礼军, 石孟春, 等. 盐胁迫下海刀豆幼苗的生长与生理适应性[EB/OL]. <https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20240905.001>, 2024-09-05, 2025-03-19
- ZHAO Y Y, ZHAO L J, SHI M C, et al. Growth and physiological adaptability of *Canavalia rosea* seedlings under salt stress[J]. Guangxi Sciences, 2025:1-11
- [35] 梁芳, 黄秋伟, 於艳萍, 等. 濒危半红树植物玉蕊对盐胁迫的生理响应及其相关性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10):12-18
- LIANG F, HUANG Q W, YU Y P, et al. Physiological response of endangered semi-mangrove *Barringtonia racemosa* to salt stress and its correlation analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(10):12-18
- [36] 朱春艳, 宋佳伟, 白天亮, 等. NaCl胁迫对不同耐盐性梗稻种质幼苗叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(13):2509-2525
- ZHU C Y, SONG J W, BAI T L, et al. Effects of NaCl stress on the chlorophyll fluorescence characteristics of seedlings of Japonica rice germplasm with different salt tolerances[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(13):2509-2525
- [37] 韩阳, 邱漫莉, 孟靖, 等. 碱胁迫对紫花苜蓿抗氧化酶的影响[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2020, 47(3):193-199, 188
- HAN Y, QIU M L, MENG J, et al. Effect of alkali stress on antioxidant enzymes of alfalfa[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2020, 47(3):193-199, 188
- [38] DIDI D A, SU S P, SAM F E, et al. Effect of plant growth regulators on osmotic regulatory substances and antioxidant enzyme activity of *Nitraria tangutorum* [J]. Plants, 2022, 11(19):2559
- [39] 贾子怡. NaCl胁迫对艾草叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023:4-5
- JIA Z Y. Effects of NaCl stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of wormwood leaves [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023:4-5
- [40] 黄勇, 郭猛, 张红瑞, 等. 盐胁迫对石竹种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(12):105-111
- HUANG Y, GUO M, ZHANG H R, et al. Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of carnation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(12):105-111

(责任编辑 刘婷婷)