

7份多年生黑麦草种质对铝胁迫的生理响应及耐铝性评价

陈谦伟, 宋鑫*, 吴紫翔, 方笛儿, 徐琪, 梁薇, 吴雨霏

(江西省作物生长发育调控重点实验室, 宜春学院生命科学与资源环境学院, 江西 宜春 336000)

摘要:【目的】研究不同多年生黑麦草(*Lolium perenne*)种质耐铝性差异, 筛选优质耐铝种质资源。【方法】收集自4个国家的7份多年生黑麦草种质为试验材料, 以20 mmol/L $AlCl_3$ 处理28 d, 测定并分析其生长和生理指标, 并对7份材料的耐铝性进行比较。【结果】与对照相比, PI220597、PI189391、PI502413株高显著低于对照; PI502413、PI287856、PI287855、PI287854株高与对照差异不明显。与对照相比, 所有材料地上部鲜重均下降, 其中PI287854降幅最大; 所有材料枯叶数显著上升; 除PI502413外, 其余材料分蘖数均减少; 叶宽、叶长保持稳定或小幅降低。在20 mmol/L $AlCl_3$ 处理下, 7份材料的过氧化氢酶(CAT)活性上升、过氧化物酶(POD)活性降低、脯氨酸含量和地上部 Al^{3+} 含量增加。【结论】主成分分析结果显示, 7份材料耐铝性强弱依次为: SecaleCerule> PI502413> PI220597> PI287854> PI189391> PI287856> PI287855。

关键词: 多年生黑麦草; 铝胁迫; 生长; 生理

中图分类号: S658.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2025)02-0246-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2025.02.028



铝(aluminum, Al)是一种广泛分布于地壳中的金属元素^[1], 在中性或偏碱性土壤中, Al主要以铝硅酸盐或氧化铝等无机盐形态存在, 此状态对植物无毒性^[2]; 但在pH值<5.0的酸性土壤中, 大量游离态 Al^{3+} 被活化, 对植物生长发育造成抑制^[3]。当大量 Al^{3+} 进入植物体内会破坏细胞骨架和细胞核等重要细胞器, 并导致膜脂过氧化, 产生有毒的衍生脂质过氧化物, 从而破坏抗氧化系统^[4-5]。当大量 Al^{3+} 积累在植物根部时, 会抑制根系正常生长发育, 导致根尖和侧根粗短且易脱落, 影响根对土壤水分和矿质营养的吸

收^[6-8]。张文秀等^[9]研究发现, 铝胁迫下, 水稻(*Oryza sativa*)和玉米(*Zea mays*)生长被抑制, 生物量与对照相比显著下降。重度铝胁迫下(250 μ mol/L $AlCl_3$), 小麦(*Triticum aestivum*)其生长受到抑制, 同时其抗氧化酶系统也遭到了破坏^[10]。

多年生黑麦草(*Lolium perenne*)是禾本科黑麦草属的一种广泛分布于全球温带地区的冷季型草坪草。因其强大的环境适应性以及优异的再生能力和生长速度被广泛运用于城市公园绿化、体育场等场所的草坪建植^[11]。此外, 多年生黑麦草具有产草量高、叶多质嫩、适口性良好以及营养价值丰富等优点, 是一种优质牧草^[12]。目前, 对于多年生黑麦草耐铝的研究主要集中在生理响应层面, 陈志刚等^[13]研究发现, 铝胁迫能降低黑麦草质膜透性, 改变膜结构, 使其原生质外渗; 另有学者研究发现, 添加外源谷氨酸(Glutamic acid, Glu)^[14]、一氧化氮(Nitric Oxide, No)和水杨酸(Salicylic acid, SA)均能缓解铝胁迫对黑麦草的毒害作用^[15]。多年生黑麦草因分布广泛和自然变异度广, 形成了丰富的自然适应类型, 具有较强的种质发掘

收稿日期: 2024-03-12; 修回日期: 2024-10-09

基金资助: 江西省教育厅科技项目(GJJ2201747); 江西省作物生长发育调控重点实验室开放课题项目(JXJJ202104)

作者简介: 陈谦伟(2001-), 男, 福建宁德人, 本科生。

E-mail: 2823050934@qq.com

*通信作者, 研究方向为草坪草抗逆生理学研究。E-mail: songx@jxycu.edu.cn

潜力^[11]。

目前,对于多年生黑麦草种质资源抗逆性的研究主要集中在耐盐^[11]、耐热^[16]等方面。宋鑫^[11]对收集的185份黑麦草种质材料的耐盐性进行了综合性评价,并将其划分成了耐盐型、中等型和盐敏感型;苏晏宁等^[16]对两份黑麦草种质材料进行了耐热性对比。然而对于多年生黑麦草不同种质耐铝性评价的研究依然较少,鉴于此,本研究以搜集于不同国家的7份多年生黑麦草种质资源为研究材料,通过测定在20 mmol/L AlCl₃处理下的生长、生理多项指标,进行耐铝性综合评价,为今后选育耐铝新品种提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为购买和收集于百思特草业公司和美国农业部种子库的7份多年生黑麦草种质,其中商业种1个,野生种6个(其中PI287856、PI287855、PI287854来源于西班牙不同地区,均为不同种质)。具体供试材料见表1。

表1 7个供试种质来源

Table 1 The sources of 7 *Lolium perenne* varieties

编号	种质原始编号	来源	类型
1	SecaleCerule	美国	商业种
2	PI220597	阿富汗	野生种
3	PI189391	新西兰	野生种
4	PI502413	乌兹别克斯坦	野生种
5	PI287856	西班牙	野生种
6	PI287855	西班牙	野生种
7	PI287854	西班牙	野生种

1.2 试验设计

选取饱满的黑麦草种子均匀撒播于装有蛭石的穴盘中,每孔3~5粒种子。用喷壶将种子及蛭石表面喷湿并覆盖保鲜膜以保持湿度,将处理后的花盆置于光照培养箱(设置为黑暗,23℃恒温)。试验开始后第4天(大部分种子已发芽),将培养条件设置为23℃,光照16 h,黑暗8 h。种子发芽后用1/2 Hoagland营养液(2 mmol/LKNO₃, 0.5 mmol/LNH₄H₂PO₄, 0.25 mmol/LMgSO₄·7H₂O, 0.1 mmol/LCa(NO₃)₂·4H₂O, 0.5 mmol/L Fe-citrate, 92 μmol/L H₃BO₃, 18 μmol/L MnCl₂·4H₂O, 1.6 μmol/L ZnSO₄·7H₂O, 0.6 μmol/LCuSO₄·5H₂O, 0.7 μmol/L(NH₄)₆Mo₇O₂₄·

4H₂O)培养,培养期间每7 d修剪1次,培养材料60 d后,进行铝胁迫处理。试验共设置2组处理:对照组(Control)正常浇灌1/2 Hoagland营养液;铝处理组浇灌添加20 mmol/L AlCl₃+1/2 Hoagland营养液的处理液。Al³⁺以AlCl₃·6H₂O形式提供,每个处理设置4个生物学重复,每3天浇灌营养液和AlCl₃处理液,调pH至4.5,每盆浇灌30 mL,处理28 d后收获并测定相关指标。根据前期预试验结果发现,20 mmol/L AlCl₃对多年生黑麦草生长具有显著影响,因此采用该浓度进行本实验。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标测定 在处理开始前,将多年生黑麦草幼苗统一修剪至5 cm(包括对照组),每天中午12:00在每个处理组随机取4株多年生黑麦草,用直尺(0.1 cm)测量幼苗株高(4次生物学重复),连续测量28 d,记录每天株高。处理28 d后,从每个处理组中随机取出均匀一致的3株幼苗,用直尺(0.1 cm)测量幼苗的叶长、叶宽,同时清点每株植株的叶片数、枯叶数、分蘖数。用天平分别称取地上部鲜重,然后放入80℃的烘箱中烘干至恒重,再称量干重,最后计算含水量。

1.3.2 生理指标测定 测定过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、脯氨酸(Pro)含量。以上指标测定样品均取自多年生黑麦草幼苗地上部,所有试剂盒均购自南京建成生物研究所,具体测定方法参照试剂盒说明书。植物地上部Al³⁺含量测定参照张美艳等^[17]的方法进行。

1.4 数据统计与分析

用Excel制图,SPSS 24软件(SPSS Inc., USA)对数据进行双因素方差分析,并多重比较,进行差异显著性分析($P < 0.05$)。综合性评价采用SPSS 24进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。

2 结果与分析

2.1 铝胁迫对多年生黑麦草株高生长的影响

7份供试材料在对照条件(-Al)和20 mmol/L AlCl₃处理下的28天,株高均呈现出先上升后逐渐趋于平缓的变化趋势(图1)。与对照组(-Al)相比,在20 mmol/L的AlCl₃处理下,3、4和2号种质材料的株高在处理至第9天时逐渐趋于稳定并与对照组株高差异开始逐渐扩大,在处理第28天与对照相比株高分别

下降了19.6%、19.1%、14.0%(图1-A,图1-C和图1-D)。1,7,6和5号材料在20 mmol/L的 AlCl_3 处理下,

株高与对照组相比始终差异不明显(图1-B,图1-E,图1-F和图1-G)。

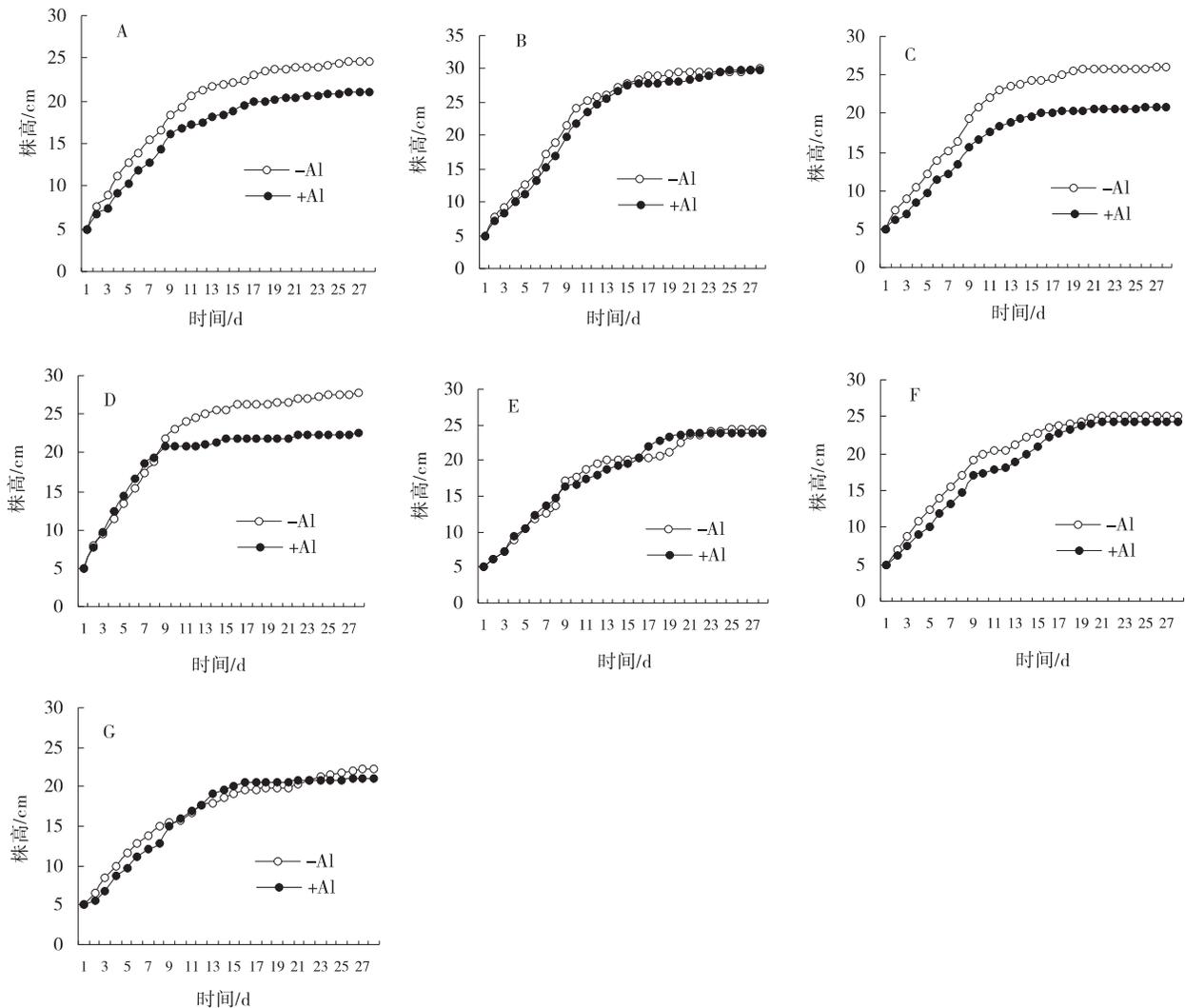


图1 铝胁迫下7种多年生黑麦草种质资源株高日生长动态

Fig. 1 Daily growth of plant height of 7 *Lolium perenne* germplasm resources under aluminum stress

注:字母为多年生黑麦草种质代号,A 2号;B 1号;C 3号;D 4号;E 5号;F 6号;G 7号。

2.2 铝胁迫对多年生黑麦草生长指标的影响

与对照组(-Al)相比,在20 mmol/L的 AlCl_3 处理下,7份供试材料地上部鲜重下降,降幅在18.7%~58.5%,其中7号材料降幅最大(图2-A)。与对照相比,在20 mmol/L的 AlCl_3 处理后,2、3、6和7号材料的地上部干重均下降(图2-B);1、20和5号地上部干重则上升。在20 mmol/L AlCl_3 处理下,1、3、4、6和7号材料地上部含水量较对照组(-Al)均下降,降幅分别为6.0%、5.4%、6.4%、2.9%、5.9%(图2-C)。与对照组(-Al)相比,在20 mmol/L的 AlCl_3 处理下7份供试材料的分蘖数和叶片数变化各不相同,其中4号材

料分蘖数和叶片数均增加,2号、3号、5号、7号分蘖数减少(图2-D);2、1、3、4、5和7号叶片数均不同程度减少(图2-E)。在20 mmol/L的 AlCl_3 处理下,2号、3号、4号、5号、7号多年生黑麦草的枯叶数与各自对照相比均显著增加($P < 0.05$),增幅分别为82.4%、96.4%、138.1%、87.5%、70.0%(图2-F)。与对照组(-Al)相比,在20 mmol/L的 AlCl_3 处理下,2、1、7号种质材料的叶宽变化不明显,其余均小幅降低,但不显著(图2-G)。叶长也呈现出类似的变化趋势,即2、1、7号材料叶长维持稳定,4号材料显著下降($P < 0.05$),其余均小幅下降,但不显著(图2-H)。

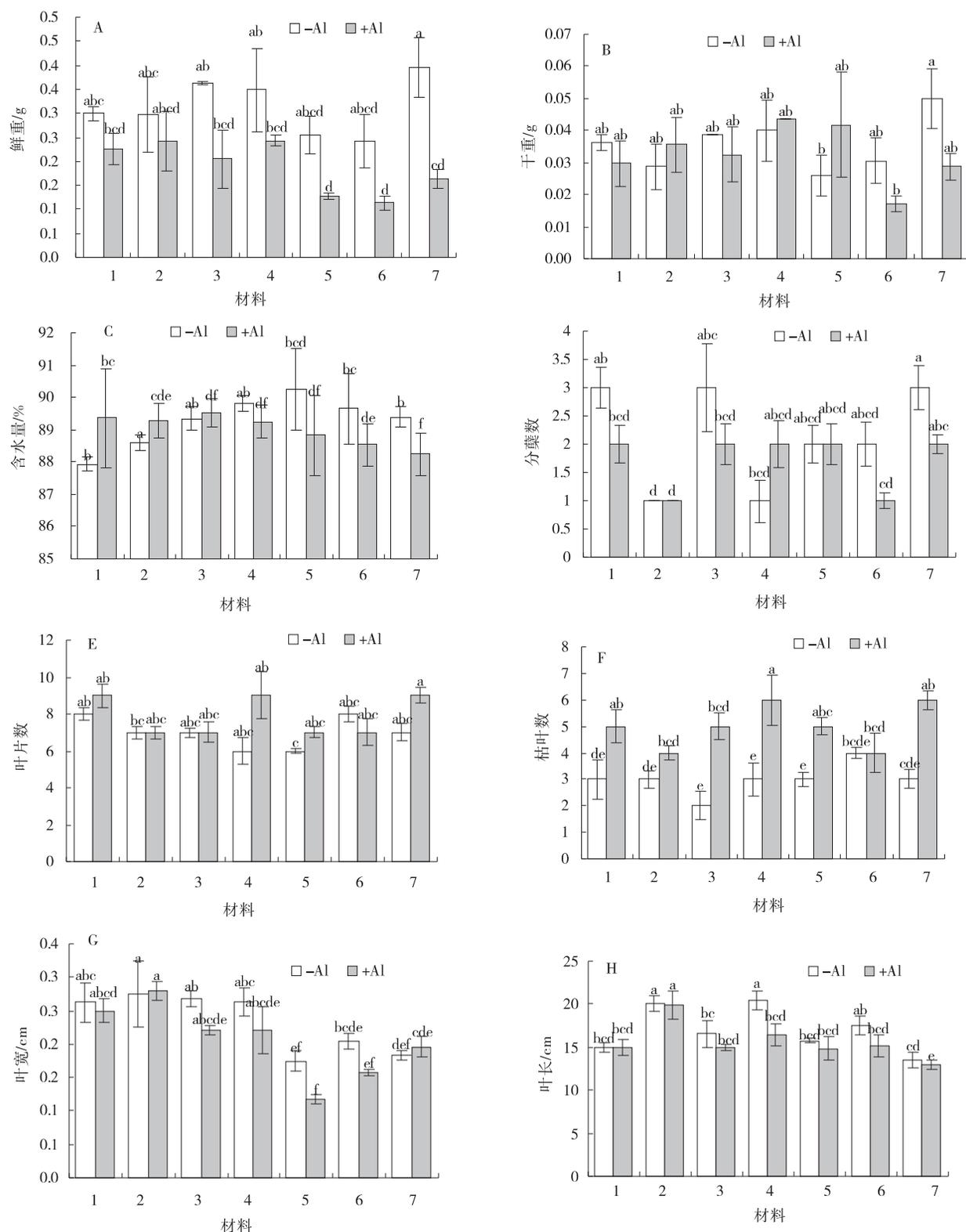


图 2 铝胁迫下 7 种多年生黑麦草种质资源各生长指标的变化

Fig. 2 Changes of growth characteristics of 7 *Lolium perenne* germplasm resources under aluminum stress

注:不同小写字母表示不同 $AlCl_3$ 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.3 铝胁迫对多年生黑麦草生理指标的影响

与对照组 (-Al) 相比, 在 20 mmol/L 的 $AlCl_3$ 处理下, 7 份种质的 CAT 活性与对照相比均有一定程度上升, 其中 2、1、3、6 和 7 号种质的 CAT 活性上升显著

($P < 0.05$), 分别上升了 23.8%、22.4%、44.5%、42.4%、21.9% (图 3-A); 与 CAT 变化趋势相似, SOD 活性也小幅上升并保持稳定, 其中 1 号种质 SOD 活性保持稳定, 其余均小幅上升, 但不显著 ($P > 0.05$) (图 3

-B);与对照组(-Al)相比,在20 mmol/L的 $AlCl_3$ 处理下,POD活性均出现下降趋势,其中2号和6号种质POD活性显著下降($P<0.05$)(图3-C)。

在20 mmol/L的 $AlCl_3$ 处理下,1、3、5、6和7号种质的脯氨酸含量较对照组(-Al)均显著上升($P<0.05$),分别上升了610.4%、664.4%、457.7%、

247.0%、481.8%,其中3号多年生黑麦草脯氨酸含量和增幅均为最高(图3-D)。在20 mmol/L的 $AlCl_3$ 处理下,7份多年生黑麦草的Al含量较对照组(-Al)均上升,其中2、3、4、5、6和7号显著上升($P<0.05$),分别上升了327.4%、2035.3%、592.5%、1087.9%、1146.4%、1012.2%(图3-E)。

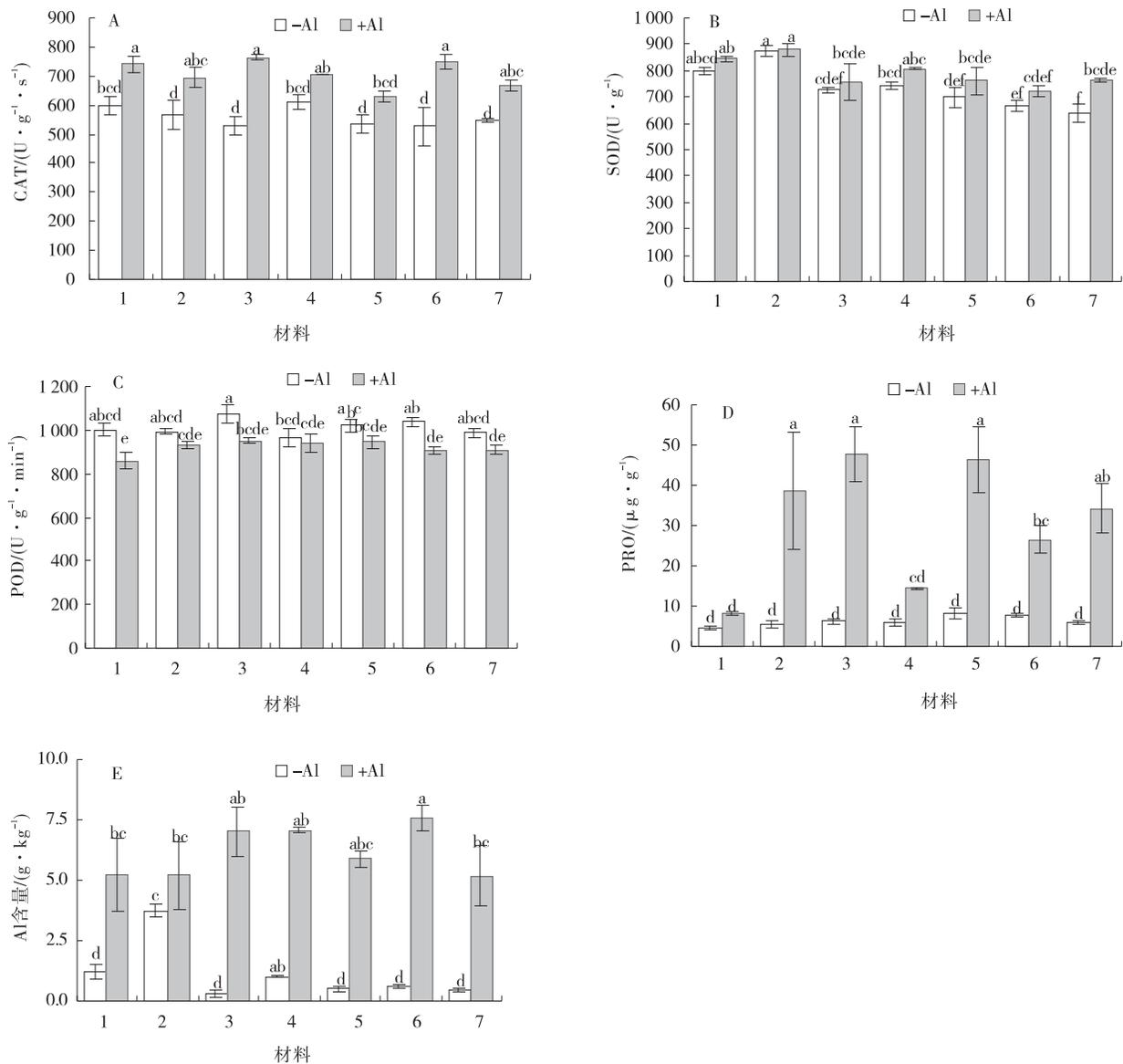


图3 铝胁迫下7种多年生黑麦草种质资源各生理指标的变化

Fig. 3 Changes of physiological characteristics of 7 *Lolium perenne* germplasm resources under aluminum stress

2.4 供试多年生黑麦草耐铝性主成分分析

运用主成分分析法(PCA)根据盐胁迫下7个多年生黑麦草种质资源各个表型的变异情况提取出了4个主成分。第1主成分(PC1)、第2主成分(PC2)、第3主成分(PC3)、第4主成分(PC4)分别占方差变异度的32.1%、27.5%、21.1%、10.6%,累积贡献率达91.2%,且特征值均高于1(表2)。在PC1中,负荷值

较大的是叶片长、SOD含量、叶片宽,其负荷值分别为0.859、0.831、0.817;在PC2中,叶片数、枯叶数两个指标的负荷值较大,分别为0.962和0.795;在PC3中,干重、CAT含量的负荷值较大,分别为0.836和-0.743;在PC4中,Al含量的负荷值较大,为0.742(表2)。根据各主成分的函数表达式计算出7个多年生黑麦草种质各主成分得分及排序结果,再以主成分

综合得分模型计算各种质在 20 mmol/L 的 $AlCl_3$ 处理下的综合得分和排名。在综合得分排名中(表 3), 1 号种质综合排名最高, 3 号、7 号、6 号、5 号得分均为负值, 其中 6 号得分最低。

表 2 铝胁迫下 7 个黑麦草种质资源生长指标和生理指标的成承载荷矩阵

Table 2 Component loading matrix of growth characteristics and physiological characteristics of 7 *Lolium perenne* germplasm resources under aluminum stress

变量	PC1	PC2	PC3	PC4
鲜重	0.684	0.537	0.222	0.395
干重	0.04	0.298	0.836	0.2
分蘖数	-0.796	0.581	0.092	-0.058
叶片数	-0.212	0.962	-0.001	-0.001
枯叶数	-0.389	0.795	0.267	0.262
叶片宽	0.817	0.402	-0.025	0.191
叶片长	0.859	-0.212	0.394	0.112
过氧化氢酶	0.359	-0.109	-0.743	0.515
超氧化物歧化酶	0.831	0.451	0.289	-0.134
POD 过氧化物酶	-0.205	-0.508	0.691	0.455
脯氨酸 Pro	-0.203	-0.679	0.464	-0.146
铝含量	-0.265	-0.479	-0.268	0.742
含水量	0.629	0.052	-0.63	-0.191
特征值	4.490	3.842	2.946	1.483
贡献率/%	32.1	27.4	21.0	10.6
累积贡献率/%	32.1	59.5	80.6	91.2

表 3 7 个黑麦草种质资源耐铝性主成分因子得分

Table 3 Principal component factor scores of aluminum tolerance of 7 *Lolium perenne* germplasm resources

种质编号	F1		F2		F3		F4		F	
	得分	排名								
1	3.85	1	-0.92	4	1.64	2	-0.64	4	1.26	1
4	-0.26	4	1.87	2	1.2	3	1.95	1	0.89	2
2	1.48	2	2.54	1	-2.12	6	-0.76	5	0.64	3
7	-2.32	7	1.61	3	0.23	4	-0.91	6	-0.35	4
3	-0.18	3	-1.44	6	-0.42	5	1.43	2	-0.39	5
5	-2.02	6	-1.18	5	1.82	1	-1.11	7	-0.71	6
6	-0.55	5	-2.48	7	-2.35	7	0.04	3	-1.35	7

3 讨论

铝胁迫主要影响植物根部的生长, 造成植物吸收水分和无机盐的能力减弱, 进而影响地上部生物量的积累^[18]。铝离子进入植物细胞后, 破坏细胞质膜结构, 增大细胞膜渗透率, 造成植物细胞死亡^[6-8]。在本试验中, 7 份种质材料在 20 mmol/L 的 $AlCl_3$ 处理下地上部鲜重均下降; PI502413、PI287854、PI287855、PI287856 地上部含水量均低于对照, 其原因可能是 20 mmol/L $AlCl_3$ 处理造成了局部组织和细胞失水, 这与张婷婷^[19]对橡胶 (*Hevea brasiliensis*) 的结果一致, 即铝胁迫造成橡胶局部组织脱水, 鲜重下降。然而,

PI189391、SecaleCerule、PI220597 在铝胁迫下其地上部含水量与对照相比却有所上升或保持稳定, 造成这一结果的原因可能是这 3 份种质存在着某种特殊机制, 是否通过调节地上部含水量来适应铝胁迫, 还有待于进一步研究。黑麦草 Secale Cerale 种质各生理指标变化均不明显, 表明 SecaleCerule 种质对铝胁迫不敏感; PI502413 株高生长速率显著下降, 枯叶数显著增加, 但干鲜重未受显著影响, 其干重、分蘖数、叶片数均有所增加, 表明 PI502413 可能主要通过加速生物量增长来抵消铝胁迫对地上部细胞损失的影响, 陈香等^[20]也发现北美车前 (*Plantago virginica*) 在 500 mg/L 铝胁迫下地上部和根生物量显著增加;

PI220597 各生长指标均受到一定程度抑制; PI287854、PI287855、PI287856 株高生长变化不显著, 但鲜重和含水量均大幅下降, 鲜重下降均超过 50%, 其他生长指标也受到不同程度影响, 表明 PI287854、PI287855、PI287856 受铝胁迫影响较大并主要体现在细胞严重失水; PI189391 株高、含水量、枯叶数均受到严重抑制, 其他指标也受到不同程度抑制, 表明 PI189391 在铝胁迫下生长受到抑制最严重。崔蓉菁对狗牙根的耐铝研究也表明不同耐铝型狗牙根枯叶率和生物量等指标因其自身遗传特性存在差异, 因此差异较大^[21]。

铝胁迫下, 植物细胞过氧化物、氧自由基等含量增高, CAT、SOD、POD 活性具有良好的抗氧化性, 是衡量植物抗逆性的重要指标^[22]。铝胁迫能破坏活性氧代谢系统的动态平衡, 使抗氧化酶活性下降, 据报道, 黑麦草和紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 根系 SOD、POD 活性在重度铝胁迫下均反映出显著下降^[23]。本试验中, 供试黑麦草种质的 SOD 和 CAT 活性均出现不同程度上升, 且 PI220597、*SecaleCerule*、PI189391、PI287855 和 PI287854 种质的 CAT 活性上升显著 (图 3-A), POD 活性则均不同程度下降, 表明在重度铝胁迫下, 多年生黑麦草的 POD 生成能力受到破坏较严重, 合成能力减弱, SOD 活性上升不显著推测是其对铝胁迫反应不敏感, 而 CAT 可能是应对铝胁迫最主要的抗氧化物, 汤霞等对燕麦 (*Avena sativa*) 的研究结果也表明耐铝品种 CAT 活性上升显著^[24], 刘影^[25]对多花黑麦草品种长江 2 号的研究也表明高浓度 (1 000 mg/L) 铝胁迫会导致 POD 活性下降。其中, PI189391 和 PI287855 的 CAT 活性上升幅度最大, POD 活性则均下降显著, 表明在铝胁迫下 PI189391 和 PI287855 在铝胁迫下抗氧化酶系统受影响最严重, 对铝胁迫最敏感。脯氨酸是一种重要的植物渗透调节物质, 植物在受到逆境胁迫时, 体内的脯氨酸含量显著升高^[26], 铝胁迫使其体内脯氨酸含量大幅升高的现象在多花黑麦草 (*Lolium multiflorum*)^[27]、葡萄 (*Vitis amurensis*)^[28] 等研究中均有报到。本试验中, 7 个种质资源材料的脯氨酸含量均大幅积累了 1~6.6 倍, 表明大量积累脯氨酸可能是多年生黑麦草的耐铝胁迫的主要生理反应机制之一。

然而耐铝性不同的植物抵御铝胁迫的机制存在显著差异。耐铝植物通过分泌有机酸, 讲土壤中的 Al^{3+} 进行螯合, 防止其在体内积累减轻铝毒害; 敏感型植物因缺乏分泌有机酸能力^[29], 因此造成大量的铝元素堆积在其体内造成铝毒害^[28]。段宏利等^[30]对比敏感型和耐铝型狗牙根发现, 铝胁迫 24 h 后敏感型狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 的 Al^{3+} 含量显著高于耐铝型; 姜娜等在对紫花苜蓿根尖和细胞壁的研究中也得到了类似结果^[31]。在本试验中, *SecaleCerule* 种质在对照组具有较高 Al 含量 ($P < 0.05$), 而在铝胁迫处理后 Al 含量上升不显著且含量最低, 表明 *SecaleCerule* 既有良好的 Al 富集能力, 又有较好的耐铝性; PI189391 Al 含量增加超过 20 倍, PI287856、PI287855 和 PI287854 Al 含量增加也超过 10 倍, 表明其控制物质运输的能力可能受到严重影响。张美艳等^[32]也发现耐铝型鸭茅 (*Dactylis glomerata*) 根系吸收的铝最少, 对铝胁迫的耐受性较高。

植物的耐铝胁迫能力是一个复杂的数量性状遗传系统, 不同性状对铝胁迫的反应程度不同, 仅使用单一的指标来评价植物耐铝性缺乏可靠性和准确性^[33-34]。随着种质资源筛选相关研究的发展, 主成分分析、系统聚类分析、隶属函数值法等方法已在大豆 (*Glycine max*)^[35]、燕麦^[36]、芦笋 (*Asparagus officinalis*)^[37] 等植物耐铝性研究中广泛运用。本研究采用主成分分析, 得到多年生黑麦草耐铝性的评价指标包括: 叶长、叶宽、叶片数、枯叶数, CAT、SOD 活性, 地上部 Al^{3+} 含量。结合主成分分析结果可得供试多年生黑麦草种质的耐铝性强弱排序为: PI287854 > PI502413 > PI220597 > PI287854 > PI189391 > PI287856 > PI287855。以上结果说明, 起源于不同地区和国家的多年生黑麦草种质在不同的环境中的适应能力各不相同, 因此耐铝性存在一定差异。

4 结论

7 份不同多年生黑麦草种质在铝胁迫下生长表型和生理响应既存在共性, 又存在差异。在 20 mmol/L 的 $AlCl_3$ 处理下, 7 份黑麦草种质生长均受到不同程度抑制, 生理指标变异度较大, 其中 *SecaleCerule* 种质受铝胁迫的影响相对较小, 同时对 Al 元素也具有相对良好的富集能力。通过对供试材料进行分析, 多年生黑

麦草种质的耐铝性强弱依次为: SecaleCerule> PI502413> PI220597> PI287854> PI189391> PI287856> PI287855。

参考文献:

- [1] 田政,杨正禹,陆忠杰,等. 44个紫花苜蓿品种的酸铝适应性与耐受性评价[J]. 草业学报, 2023, 32(3): 142—151.
- [2] Zhang X, Long Y, Huang J J, *et al.* Molecular mechanisms for coping with Al toxicity in plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(7): 1551.
- [3] Chunjuan Liu, Yijian Liu, Shiwen Wang, *et al.* Arabidopsis mutants with reduced monogalactosyldiacylglycerol contents are hypersensitive to aluminum stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 203: 110999.
- [4] Lina Yin, Jun'ichi Mano, Kiyoshi Tanaka, *et al.* A high level of reduced glutathione contributes to the detoxification of lipid peroxide - derived reactive carbonyl species in transgenic *Arabidopsis* overexpressing glutathione reductase under aluminum stress [J]. Physiologia Plantarum, 2017, 161(2): 211—223.
- [5] Lina Yin, Jun'ichi Mano, Shiwen Weng, *et al.* The involvement of lipid peroxide - derived aldehydes in aluminum toxicity of tobacco roots [J]. Plant Physiology, 2010, 152(3): 1406—1417.
- [6] Peter R. Ryan, Joseph M. Ditomaso, Leon V. Kochian. Aluminum Toxicity in Roots: An Investigation of Spatial Sensitivity and the Role of the Root Cap [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(2): 437—446.
- [7] Čiamporová M. Diverse responses of root cell structure to aluminum stress [J]. Plant and Soil, 2000, 226(1): 113—116.
- [8] Čiamporová M. Morphological and structural responses of plant roots to aluminum at organ, tissue, and cellular levels [J]. Biologia Plantarum, 2002, 459(2): 161—171.
- [9] 张文秀. 外施甜菜碱对水稻和玉米耐铝性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [10] 彭艳, 李洋, 杨广笑, 等. 铝胁迫对不同小麦 SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量的影响 [J]. 生物技术, 2006(3): 38—42.
- [11] 宋鑫. 多年生黑麦草耐盐关键基因的挖掘与关联分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [12] 乔子娇. 人工控制条件下黑麦草生产性能和经济性指标的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [13] 陈志刚, 张红蕊, 周晓红, 等. 铝胁迫对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 207—210.
- [14] 黄玉婷. 外源柠檬酸和谷氨酸对铝胁迫下多花黑麦草的缓解研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [15] 吴亚. 外源水杨酸和 NO 对铝胁迫下黑麦草的缓解研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [16] 苏晏宁, 王芮嘉, 蔡家邦, 等. 茉莉酸浸种对高温胁迫下多年生黑麦草种子发芽的影响 [J]. 草业科学, 2020, 37(4): 658—668.
- [17] 张美艳, 刘彦培, 张英俊, 等. 外源硅对铝胁迫下鸭茅形态构建和植株体内铝积累的影响 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(5): 1137—1144.
- [18] 许文花, 杨蔚, 段新慧, 等. 铝胁迫对紫花苜蓿生长及根系发育的影响 [J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 71—75.
- [19] 张婷婷. 铝胁迫造成橡胶幼苗死亡的生理机制解析 [D]. 海口: 海南大学, 2020.
- [20] 陈香, 陆耀东, 黄伟, 等. 铝胁迫对入侵植物北美车前生长特性和生物量分配的影响 [J]. 广西植物, 2011, 31(4): 495—500.
- [21] 崔蓉菁. 狗牙根耐铝种质的筛选及耐铝性状与标记的关联分析 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [22] Franco Navarro J D, Brumo. Chloride regulates leaf cell size and water relations in tobacco plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(3): 873—891.
- [23] 陈志刚, 张红蕊, 周晓红, 等. 铝胁迫对黑麦草根系抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究 [J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 391—395.
- [24] 汤霞, 陈仕勇, 周青平. 铝胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 种子, 2022, 41(9): 91—97+120.
- [25] 刘影. 扁穗牛鞭草和多花黑麦草对铝胁迫的生理响应 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [26] 郭锋, 樊文华. 外源硒对镉胁迫下绿豆幼苗生理特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 256—260.
- [27] 吴亚, 陈思, 张卫红, 等. 多花黑麦草对铝胁迫的生长生理响应 [J]. 植物科学学报, 2019, 36(5): 755—760.
- [28] 张永福, 徐仕琴, 杨砚斌, 等. 二十七份葡萄种质根系对铝胁迫的生理响应及耐铝基因型筛选 [J]. 北方园艺, 2020, 46(13): 15—24.
- [29] 邢承华, 刘仲书, 蒋红英. 不同作物品种耐铝毒基因型筛选试验 [J]. 现代农业科技, 2017(17): 34—38.
- [30] 段宏利, 蒋凌雁, 陈志坚, 等. 铝胁迫对狗牙根根系生长和营养元素的影响 [J]. 草地学报, 2022, 30(4):

936—942.

- [31] 姜娜,任健,罗富成,等. 铝胁迫对不同耐铝基因型紫花苜蓿根尖及细胞壁氧化酶活性的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(6):15—22.
- [32] 张美艳,薛世明,钟声,等. 鸭茅幼苗生长及形态对铝胁迫的响应[J]. 草地学报,2015,23(4):763—770.
- [33] Liu J, Wang X, Wang N, *et al.* Comparative analyses reveal peroxidases play important roles in soybean tolerance to aluminum toxicity[J]. *Agronomy*, 2021, 11:670.
- [34] Zhou H W, Xiao X J, Asjad A, *et al.* Integration of GWAS and transcriptome analyses to identify SNPs and candidate genes for aluminum tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1):130.
- [35] 周会汶,黄朝平,汪子怡,等. 大豆苗期耐铝毒特性综合评价及种质筛选[J]. 大豆科学,2022,41(6):654—662.
- [36] 蔺豆豆,赵桂琴,琚泽亮,等. 15份燕麦材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草业学报,2021,30(11):108—121.
- [37] 叶艳英,张冰冰,周劲松,等. 芦笋种子萌发期耐铝毒性综合评价及筛选[J]. 安徽农业大学学报,2022,49(6):906—912.

Comparison of physiological response and resistances of seven perennial ryegrass to aluminum stress

CHEN Qian-wei, SONG Xin*, WU Zi-xiang, FANG Di-er, XU Qi,
LIANG Wei, WU Yu-fei

(Key Laboratory of Regulation of Crop Growth and Development in Jiangxi Province / College of Life Science and Resources and Environment, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract: **[Objective]** To investigate the variations in aluminum tolerance among diverse perennial ryegrass (*Lolium perenne*) germplasms and explore high-quality aluminum-tolerant germplasm resources. **[Method]** In this research, seven perennial ryegrass germplasms collected from five countries were employed as experimental materials and were treated with 20 mmol/L $AlCl_3$ for 28 days. Subsequently, their growth and physiological indicators were measured and analyzed, and the aluminum tolerance of the seven materials was compared. **[Result]** The findings indicated that in contrast to the control, the plant heights of PI220597, PI189391, and PI502413 were markedly lower than that of the control; the plant heights of PI502413, PI287856, PI287855, and PI287854 did not exhibit a significant difference from the control. Compared with the control, the fresh weight of the aboveground parts of all the materials decreased, among which the decrease of PI287854 was the most significant; the number of dead leaves of all the materials increased significantly; except for PI502413, the tiller numbers of the other materials declined; the leaf widths and leaf lengths remained stable or decreased slightly. Under the treatment of 20 mmol/L $AlCl_3$, the activities of catalase (CAT) of the seven materials rose, the activities of peroxidase (POD) declined, and the proline content and the content of Al^{3+} in the aboveground parts increased. **[Conclusion]** The results of principal component analysis revealed that the order of aluminum tolerance of the seven materials was: *Secale Cereale* > PI502413 > PI220597 > PI287854 > PI189391 > PI287856 > PI287855.

Key words: ryegrass; aluminum stress; growth; physiology

(责任编辑:靳奇峰)