

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.018

引用格式:潘桂芳,孙宗玖,费瑞华,等.披碱草属不同种质资源耐低氮评价[J].草地学报,2026,34(8):2946–2959

PAN Gui-fang, SUN Zong-jiu, FEI Rui-hua, et al. Evaluation of Low Nitrogen Tolerance in Different Germplasm Resources of *Elymus* Species[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (8): 2946–2959

披碱草属不同种质资源耐低氮评价

潘桂芳¹, 孙宗玖^{1,2,3*}, 费瑞华¹, 郭锦华¹, 李培英^{1,2,3}, 阿斯太肯·居力海提¹,
张文龙¹, 胡蝶¹, 任梦龙¹, 马鹏¹

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆草地资源与生态自治区重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052;
3. 西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:披碱草属(*Elymus*)是重要的生态修复乡土草种,筛选耐低氮萌发种质,提高氮素利用效率,是退化草地近自然恢复的有效途径之一。本研究采用培养皿发芽法对低氮(0.01 mmol·L⁻¹)及对照(1.00 mmol·L⁻¹)下60份披碱草属种质12项萌发及幼苗生长指标进行测定,探讨其对低氮的响应差异,并结合隶属函数及系统聚类分析进行了耐低氮性综合评价。结果表明:低氮胁迫下所有种质的各项指标均呈下降趋势,其平均发芽率、发芽势、发芽指数、苗长、根长、苗鲜重、根鲜重、整体鲜重、苗干重、根干重、整体干重以及根冠比依次下降5.95%, 12.07%, 8.21%, 6.40%, 14.80%, 29.04%, 36.28%, 25.54%, 30.00%, 40.74%, 28.77%和8.08%。不同种质间耐低氮能力差异显著,E22,E58,E47等7份种质综合耐低氮系数超过0.850,而E32和E49低于0.66,基于耐低氮系数的聚类分析将供试种质划分为超强、中强、低强、低弱、中弱、超弱6类,其中超强耐低氮种质包括E47,E22等10份材料,超弱耐低氮种质包括E49,E32等3份种质。本研究为披碱草耐低氮性候选基因挖掘与功能研究、遗传改良及新品种的选育提供了优异亲本材料。

关键词:披碱草;种子萌发;耐低氮性;综合评价;聚类分析

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2946-14

Evaluation of Low Nitrogen Tolerance in Different Germplasm Resources of *Elymus* Species

PAN Gui-fang¹, SUN Zong-jiu^{1,2,3*}, FEI Rui-hua¹, GUO Jin-hua¹, LI Pei-ying^{1,2,3}, Astaken·GULHAITI¹,
ZHANG Wen-long¹, HU Die¹, REN Meng-long¹, MA Peng¹

(1. Grassland College, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang Province 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, Xinjiang Province 830052, China; 3. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of the Ministry of Education of the Western Arid Zone, Urumqi, Xinjiang Province 830052, China)

Abstract: The genus *Elymus* is an important native grass species for ecological restoration. Screening low nitrogen-tolerant germination germplasm and improving nitrogen use efficiency are one of the effective approaches for near-natural restoration of degraded grasslands. In this study, twelve indicators during germination and seedling growth stages of 60 *Elymus* germplasms were measured under low nitrogen (0.01 mmol·L⁻¹) and control (1.00 mmol·L⁻¹) conditions using the petri dish germination method. Their responses to low nitrogen were explored, and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance was conducted by combining membership function and systematic clustering analysis. The results showed that under low nitrogen stress, all the indicators of the germplasms were decreased. The average germination rate, germination vigor, germination index, seedling length, root length, seedling fresh weight, root fresh weight, total fresh weight, seedling dry weight, root dry weight, total dry weight, and root-shoot ratio decreased by 5.95%, 12.07%, 8.21%, 6.40%, 14.80%,

收稿日期:2025-12-15;修回日期:2026-01-19

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发项目(2023B02031)资助

作者简介:潘桂芳(1997-),女,汉族,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事草地资源利用与植物保护、草种质资源创新与品种选育科学研究,E-mail:1877277192@qq.com;*通信作者 Author for correspondence,E-mail:nmszj@21cn.com

29.04%, 36.28%, 25.54%, 30.00%, 40.74%, 28.77% and 8.08%, respectively. There were significant differences in low nitrogen tolerance among the different germplasms. Seven germplasms, including E22, E58 and E47, had a comprehensive low nitrogen tolerance coefficient exceeding 0.850, while E32 and E49 were below 0.66. Based on the low nitrogen tolerance coefficient, cluster analysis divided the tested germplasms into six categories: super-strong, medium-strong, low-strong, low-weak, medium-weak, and super-weak. Among them, 10 materials, including E47 and E22, were classified as super-strong low nitrogen-tolerant germplasms, and 3 materials, including E49 and E32, were classified as super-weak low nitrogen-tolerant germplasms. This study provides excellent parental materials for the mining and functional research of candidate genes related to *Elymus* low nitrogen tolerance, genetic improvement, and breeding of new varieties.

Key words: *Elymus*; Seed germination; Low nitrogen tolerance; Comprehensive evaluation; Cluster analysis

氮素是影响植物生长发育和品质形成不可缺少的核心元素^[1],在供应不足的低氮条件下,植物会受到严重损害,表现为植株生长缓慢,株高矮小,叶绿素含量下降,生物量下降,且种子发芽也会受到不同程度的影响^[2-3]。我国西北干旱区因土壤贫瘠化加剧,有效氮含量普遍较低,低氮胁迫已成为制约退化草地植被恢复的关键瓶颈^[4],而提高植物氮素利用效率是缓解低氮胁迫的有效途径之一。种子萌发是植物生命周期中对外界环境变化响应最为敏感的阶段^[5],其耐低氮性直接决定其种群萌发、生长及定植成功,因此开展耐低氮种质筛选与适应机制的研究具有重要理论价值。

披碱草属(*Elymus*)为禾本科(Gramineae)小麦族(Triticeae)多年生、中生-旱生疏丛型上繁禾草,约包括150种^[6-8],广泛分布于北半球温带和寒温带地区,我国主要分布于四川、西藏、新疆、东北、华北等地^[9]。该属植物因抗逆性强、生态价值高、成为我国西北干旱区及青藏高原的优势牧草,在“三江源”生态保护、黄土高原水土保持中发挥着“绿色屏障”作用^[10]。现有研究表明,披碱草属具有耐寒、耐旱、耐盐碱等特性,但其耐低氮机制研究仍存在明显不足^[11]。目前有关耐低氮性研究已在农作物中大量开展,通过整合发芽率、根冠比、氮代谢酶等多指标,结合主成分分析与聚类分析,成功筛选出苦荞^[12]、谷子^[13]等耐低氮基因型。然而,当前有关披碱草耐低氮性的研究需重点关注以下三个方面。一是研究尺度失衡,现有研究主要聚焦于苗期生理响应及大田实证,对种子萌发这一基础发育阶段的氮素需求规律仍缺乏系统认知^[14];二是评价方法单一,目前多依赖生物量、分蘖数等少数形态学指标^[15],难以揭示耐低氮抗性形成的内在机制,亟需通过关键指标的靶向筛选,来提升评价结果的科学性;三是种质资源挖掘不足,新疆作为披碱草的分布中心之一,其丰富的本地种质资源尚未得到系统的收集、评价与挖掘,因此在该区域开展相关研究具有重要的理论价值与应用前景^[16]。

基于以上认识,本研究以60份新疆披碱草种质为材料,设置0.01 mmol·L⁻¹低氮胁迫和1.00 mmol·L⁻¹正常氮处理,通过培养皿发芽法精准控制氮浓度,系统测定发芽率、苗长、干鲜重等12项指标,结合耐低氮系数、主成分分析及聚类分析,明确低氮胁迫对披碱草种子萌发与幼苗生长的影响,综合评价各种质的耐低氮性特征,筛选耐低氮差异的极端材料,为披碱草耐低氮候选基因挖掘与功能研究、遗传改良及新品种的选育提供优异亲本材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为60份披碱草属(*Elymus*)种质,其中58份材料采集自新疆不同生境,2个为育成品种(表1)。实验所用种子于2024年采集后在室温下保存,2个育成品种种子来自新疆维吾尔自治区草原总站。

1.2 试验设计与方法

试验采用完全随机设计,以60份披碱草种质为材料,设对照(1.00 mmol·L⁻¹)和低氮(0.01 mmol·L⁻¹)2个氮处理^[17],共120个处理组合,所有处理随机排列在种子发芽箱内。试验开始前,选取籽粒饱满、大小一致的各种质种子25粒,用1% NaClO溶液消毒5 min,蒸馏水冲洗3~4次后,将其放入铺有2层滤纸的直径9 cm培养皿中。然后,对照组和低氮组的滤纸分别用10 mL对照(1.00 mmol·L⁻¹)和低氮(0.01 mmol·L⁻¹)溶液润湿,每处理4次重复。置于种子发芽箱(ST-100)中进行培养,培养条件为26℃光照16 h和16℃黑暗8 h。每天定时观察统计种子露白与成苗情况,14 d后结束实验。种子萌发以胚根长度为种子长度的一半为依据^[18],而成苗以没有结构缺陷的正常幼苗为标准,试验期间适量补充蒸馏水以保证滤纸湿润及氮浓度相对恒定。

表 1 供试披碱草种质基本信息

Table 1 Basic information of the tested *Elymus*

编号 Number	种名 Species	采集地点 Collecting site	海拔 Elevation/m	经度 Longitude/°	纬度 Latitude/°
E01	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	伊犁新源县	1999.5	84.367 849	43.359 101
E02	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	塔城地区乌苏市	2664.6	84.453 481	43.777 318
E03	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密伊州区	2152.8	93.747 984	43.337 439
E04	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密巴里坤哈萨克自治县	1555.7	93.003 891	43.620 053
E05	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密巴里坤哈萨克自治县	1530.4	92.791 861	43.606 084
E06	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	昌吉奇台县	1631.2	89.616 873	43.631 564
E07	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密巴里坤哈萨克自治县	1941.8	93.520 273	43.467 780
E08	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密伊吾县	1847.0	94.239 368	43.356 950
E09	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	巴州和静县	2420.6	84.152 001	42.954 686
E10	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	伊犁昭苏县	1978.0	80.884 214	43.145 178
E11	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐沙依巴克区	887.5	87.308 283	43.658 558
E12	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	伊犁尼勒克县	2002.1	83.923 846	43.723 808
E13	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密伊州区	2277.6	93.785 150	43.351 460
E14	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	伊犁昭苏县	2097.3	81.190 265	43.252 668
E15	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	巴州和静县	2419.0	83.709 482	42.883 333
E16	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	2028.1	87.175 829	43.470 283
E17	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	2201.3	87.126 281	43.526 304
E18	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	哈密伊州区	2141.2	93.774 200	43.344 184
E19	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	1616.3	87.426 943	43.487 298
E20	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	巴州和静县	2454.1	83.796 049	42.921 056
E21	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	1079.0	87.636 714	43.604 974
E22	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	伊犁尼勒克县	2271.3	84.355 301	43.654 372
E23	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	伊犁昭苏县	1588.4	80.967 026	42.973 131
E24	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	2352.0	87.122 885	43.456 609
E25	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	巴州和静县	2369.6	83.873 528	42.828 882
E26	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	1885.2	87.178 136	43.481 162
E27	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	伊犁特克斯县	1800.0	81.996 009	43.248 373
E28	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	巴州和静县	2400.0	84.161 727	43.028 812
E29	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州夏尔西里	1807.0	81.838 082	45.222 177
E30	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州夏尔西里	1763.0	81.843 850	45.225 426
E31	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州夏尔西里	1789.0	81.889 754	45.254 768
E32	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	乌鲁木齐县	2475.0	87.210 777	43.260 203
E33	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州夏尔西里	1805.0	81.838 492	45.223 529
E34	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州赛里木湖	2111.0	81.334 630	44.635 232
E35	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州赛里木湖	2207.0	81.031 766	44.546 581
E36	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州温泉县	1019.0	81.530 258	44.911 237
E37	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州温泉县	1029.0	81.315 799	45.024 756
E38	披碱草 <i>E. dahuricus</i>	博州赛里木湖	2217.0	81.237 688	44.998 767
E39	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	昌吉阜康市	1252.0	88.642 336	43.993 444
E40	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州博乐市	1829.0	81.642 284	44.550 259
E41	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州博乐市	556.0	81.884 084	44.921 072
E42	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州博乐市	637.0	81.763 839	44.963 692
E43	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州赛里木湖	2051.0	81.150 012	44.520 107
E44	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州赛里木湖	2072.0	80.899 010	44.565 112
E45	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	塔城地区裕民县	1703.0	82.747 222	45.645 833
E46	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州夏尔西里	1708.0	81.860 343	45.230 477
E47	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	博州夏尔西里	2250.0	81.816 288	45.228 472
E48	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	伊犁昭苏县	2005.0	80.975 728	43.157 350
E49	圆柱披碱草 <i>E. cylindricus</i>	哈密伊吾县	2008.0	94.378 947	43.296 231
E50	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	昌吉阜康市	1819.0	88.162 489	43.940 053
E51	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	博州赛里木湖	2107.3	81.159 015	44.585 612
E52	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	博州夏尔西里	1900.0	81.838 082	45.222 177
E53	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	昌吉阜康市	1803.0	88.122 576	43.888 526
E54	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	伊犁昭苏县	1880.0	80.929 869	43.087 372
E55	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	博州夏尔西里	1773.0	81.860 516	45.225 455
E56	老芒麦 <i>E. sibiricus</i>	昌吉阜康市	1811.8	88.147 629	43.917 528
E57	老芒麦 <i>E. sibiricus</i>	昌吉阜康市	1987.0	88.146 667	43.869 722
E58	老芒麦 <i>E. sibiricus</i>	昌吉阜康市	2459.0	88.099 658	43.872 975
E59	同德老芒麦 <i>E. sibiricus</i>	伊犁昭苏县	2060.0	80.883 545	43.146 411
E60	昭苏老芒麦 <i>E. sibiricus</i>	伊犁昭苏县	1979.0	80.834 128	43.378 093

1.3 指标测定

试验结束后,每个培养皿随机选取10株正常幼苗,用精度为0.1 cm的刻度尺测定苗长(Shoot length, SL)和根长(Root length, LR);吸干幼苗表面水分后,用精度为0.0001 g的天平称量获得苗鲜重(Shoot fresh weight, SFW)、根鲜重(Root fresh weight, RFW)和整体鲜重(Total fresh weight, TFW)后,再将其置入105℃的烘箱中杀青30 min,于65℃下烘干至恒重获得苗干重(Shoot dry weight, SDW)、根干重(Root dry weight, RDW)及整体干重(Total dry weight, TDW)^[19]。

种子发芽率(Germination percentage, GP)、发芽势(Germination energy, GE)、发芽指数(Germination index, GI)和根冠比(Root-shoot ratio, R:S)计算公式如下^[20]:

$$\begin{aligned} \text{发芽率}(\%) &= (\text{第14天发芽种子数} / \text{供试种子总数}) \times 100\% \\ \text{发芽势}(\%) &= (\text{第7天发芽种子数} / \text{供试种子总数}) \times 100\% \\ \text{发芽指数} &= \sum (\text{第}t\text{天发芽种子数} / \text{相应发芽天数}) \\ \text{根冠比} &= \text{根鲜重} / \text{苗鲜重} \end{aligned}$$

1.4 耐低氮性综合评价

基于不同披碱草种子萌发与幼苗生长特性各项指标,为科学评价60份披碱草种质的耐低氮性,本研究首先基于种子萌发及幼苗生长指标计算耐低氮系数(Nitrogen tolerance coefficient, NTC)与综合耐低氮系数(Comprehensive low nitrogen tolerance coefficient, CNTC),接着通过主成分分析降维多指标数据,结合隶属函数分析实现各指标标准化转换,进而计算耐低氮性综合评价值(D 值),最终利用 D 值采用组间联接法和欧式距离对供试60份披碱草种质进行聚类分析,完成种质耐低氮能力的等级划分及综合评价。

耐低氮系数=低氮处理组某一指标平均值/对照组该指标平均值

$$T_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$$

式中, T_c 表示综合耐低氮系数, T_i 表示第 i 个指标的耐低氮系数。

综合指标值 $F(X_i)$ 、隶属函数值 $\mu(X_i)$ 、权重 W_i 及综合耐低氮评价 D 值:

$$\begin{aligned} F(X_i) &= a_{1i}X_{1i} + a_{2i}X_{2i} + \dots + a_{mi}X_{mi}, \\ m &= 1, 2, 3, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, n \\ \mu(X_i) &= (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), i = 1, 2, 3, \dots, n \\ W_i &= P_i / \sum_{i=1}^n P_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \\ D &= \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W_i] X_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

式中, $F(X_i)$ 为第 i 个综合指标值, a_{mi} 为各单一指标的特征值所对应的特征向量, X_{mi} 为各单一指标的标准化处理值; $\mu(X_i)$ 为某一测定指标的模糊隶属函数值, X_i 为某一综合指标平均值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为综合指标的最大值和最小值; W_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的权重, P_i 表示经主成分分析后所得各供试种质第 i 个综合指标的贡献率。 D 值为各种质披碱草经低氮处理后由综合指标评价所得的耐低氮性综合评价值。

1.5 数据统计与分析

用Microsoft Excel 2021软件进行数据整理,SPSS 27.0软件进行主成分分析、耐低氮性综合聚类分析评价和 D 值。结果中所有数值均以“平均值±标准误”(n=4)表示,并用SPSS 27.0中的ANOVA和系统聚类对测定指标进行方差分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 低氮胁迫对种子萌发的影响

低氮胁迫后披碱草种质的发芽率、发芽势和发芽指数平均值均有所下降,且均达到显著水平($P < 0.05$)。从变异系数看,对照、低氮胁迫处理下披碱草各种子萌发测定指标变异系数范围依次为16.67%~39.66%,20.25%~45.10%,且低氮胁迫后除发芽率表现降低外,其余发芽势和发芽指数的变异系数均表现为增加(图1)。与对照比,低氮胁迫下发芽率降幅较小,仅降低了5.95%,在低氮胁迫下,E24(97.00%)和E11(34.00%)表现出最高和最低的发芽率(图1A),发芽势降低了12.07%,E07表现出最高的发芽势(86.00%)和E28(3.00%)的发芽势最低(图1B),发芽指数降低了8.21%,E01(26.330)表现出最高值,E28(5.608)则表现出最低值(图1C)。以上结果表明,不同种质及不同萌发测试指标对低氮胁迫的响应存在较大差异。

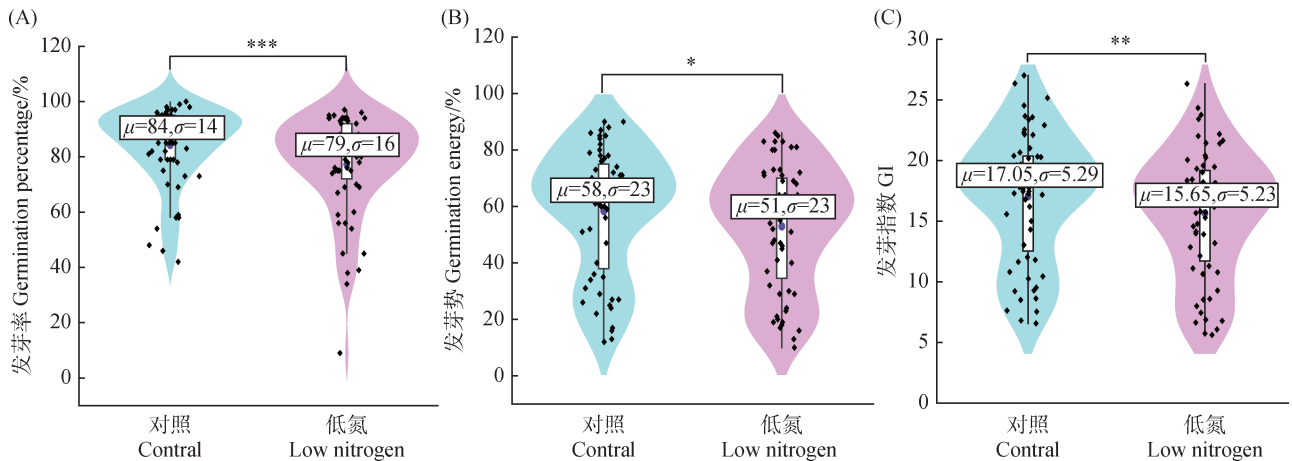


图1 低氮胁迫下披碱草供试种子的发芽指标

Fig. 1 Germination indices of tested *Elymus* seeds under low nitrogen stress

注:本文所有图表中“差异显著性”均指基于独立样本t检验的平均值差异显著性,小提琴曲线图显示了在对照(绿色 $1.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)和低氮胁迫(粉色 $0.01\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下,60个披碱草种质萌发相关性状的分布。 μ 代表总体平均值, σ 代表总体标准差,每个点代表一种种质;紫点表示平均数,曲线图宽度反映数据密度。下同

Note: In all charts of this paper, ‘significant difference’ refers to the significance of mean differences based on independent samples t-test, The violin plot shows the distribution of germination-related traits of 60 *Elymus* (wheatgrass) germplasms under control (green) and low nitrogen stress (pink) conditions. μ represents the population mean, and σ represents the population standard deviation, each point represents a germplasm; purple points indicate the mean, and the width of the violin plot reflects data density. The same as above

2.2 低氮胁迫对幼苗生长的影响

低氮胁迫后披碱草种质的各测定指标平均值均有所下降,除苗长和根冠比外,均达到显著水平($P<0.05$)。与对照组相比,低氮胁迫显著降低苗长(6.40%)、根长(14.80%)、苗鲜重(29.04%)、根鲜重(36.28%)、整体鲜重(25.54%)、苗干重(30.00%)、根干重(40.74%)、整体干重(28.77%)和根冠比(8.08%),其中苗鲜重、根鲜重、整体鲜重、苗干重、根干重和整体干重降幅较大。从变异系数看,对照、低氮胁迫处理下披碱草各幼苗生长测定指标变异系数范围依次为11.44%~97.29%、14.45%~78.95%,且低氮胁迫后除根鲜重、根干重及根冠比表现降低外,其余指标的变异系数均为增加的(图2)。在低氮胁迫下,E17(9.483 cm)和E02(4.153 cm)表现出最高和最低的苗长(图2A),E01和E19表现出最高和最低的根长分别为5.955 cm和1.583 cm(图2B),E59(0.0954 g)和E16(0.0062 g)表现出最高和最低的苗鲜重(图2C),而E33(0.0222 g)和E37(0.0012 g)分别显现出最高和最低的根鲜重(图2D),E29和E32表现出最高和最低的整体鲜重分别为0.2060 g和0.0073 g(图2E),苗干重而言,E59表现为最高值0.0191 g,E16则表现为最低值0.0012 g(图2F),E04(0.0059 g)和E37(0.0002 g)表现出最高和最低的根干重(图2G),E01和E19表现出最高和最低的整体干重分别为

0.0412 g和0.0015 g(图2H),E09(0.746)和E42(0.030)表现出最高和最低的根冠比(图2I)。

2.3 相关分析

为深入理解低氮胁迫下披碱草早期生长的内在调控网络,本研究对所有测定指标进行了相关性分析,以明确各指标间的潜在关联。相关分析表明(图3),对照与低氮胁迫组披碱草种子萌发与幼苗生长的12个单项指标间均存在相关性。如图3A所示,正常氮水平下苗鲜重和苗干重与根冠比呈显著负相关($P<0.05$),其他指标间如发芽率与根长和苗鲜重、发芽势与苗鲜重和苗干重、发芽指数与苗鲜重、苗干重和根鲜重、整体鲜重与根干重、根干重与苗干重、根干重与整体干重,发芽率与发芽势、发芽指数和根长、发芽势与发芽指数、苗长和根长、发芽指数与苗长和根长、苗长与根长和苗干重、根长与苗鲜重、整体鲜重、苗干重和整体干重、苗鲜重与根鲜重、整体鲜重、苗干重和整体干重、根鲜重与整体鲜重、苗干重、根干重和整体干重、整体鲜重与苗干重和整体干重、苗干重与整体干重、根干重与根冠比均呈显著正相关($P<0.05$)。

然而,低氮胁迫条件下(图3B),苗鲜重与根冠比,苗干重与根冠比呈显著负相关($P<0.05$),其余指标如发芽率与苗长、苗鲜重和苗干重、发芽势与苗鲜重和苗干重、发芽指数与苗鲜重和苗干重、苗干重与根干重、

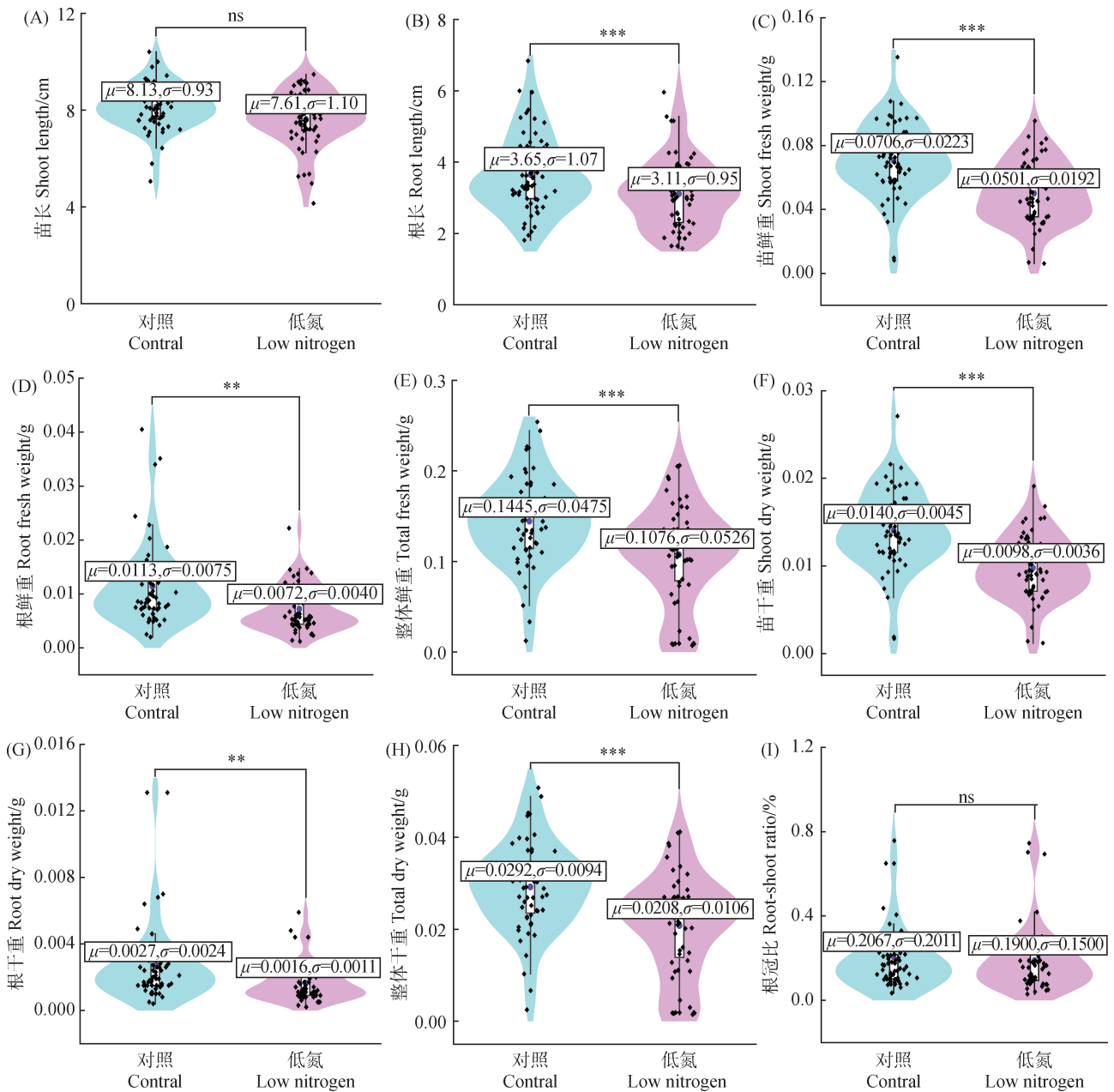


图 2 低氮胁迫下披碱草供试种子的幼苗指标

Fig. 2 Seedling indices of tested *Elymus* seedlings under low nitrogen stress

苗干重与整体干重,如发芽率与发芽势、发芽指数和根长、发芽势与发芽指数、苗长和根长、发芽指数与苗长和根长、苗长与根长、根长与苗鲜重、整体鲜重、苗干重和整体干重、苗鲜重与整体鲜重、根鲜重、苗干重、根干重和整体干重、根鲜重与整体鲜重、苗干重、根干重和整体干重、整体鲜重与苗干重、根干重和整体干重、苗干重与整体干重、根干重与根冠比呈显著正相关($P < 0.05$)。各单项指标间的相关系数差异较大,介于 $-0.410 \sim 0.970$ 之间。因此,仅利用测定的各单项指标对披碱草耐低氮性进行评价不够准确,需结合多元统计分析方法对其耐低氮性进行综合评价。

2.4 耐低氮系数分析

不同种质在正常氮水平下的基础生长能力存在显著差异,直接比较低氮胁迫下的绝对指标无法准确反映其耐低氮能力。耐低氮系数通过计算低氮胁迫下指标值与正常氮水平下指标值的比值,消除了基础生长差异的影响,使不同种质的耐低氮能力具有可比性。因此,由表 2 可知,低氮胁迫下披碱草种质各测试指标的综合耐低氮系数为 $0.657 \sim 0.885$,各单项指标耐低氮系数均值为 $0.650 \sim 0.950$,变异系数为 $6.92\% \sim 34.88\%$ 。其中 E48 的综合耐低氮系数最高,表现出超高的低氮耐受性,而 E49 最低,

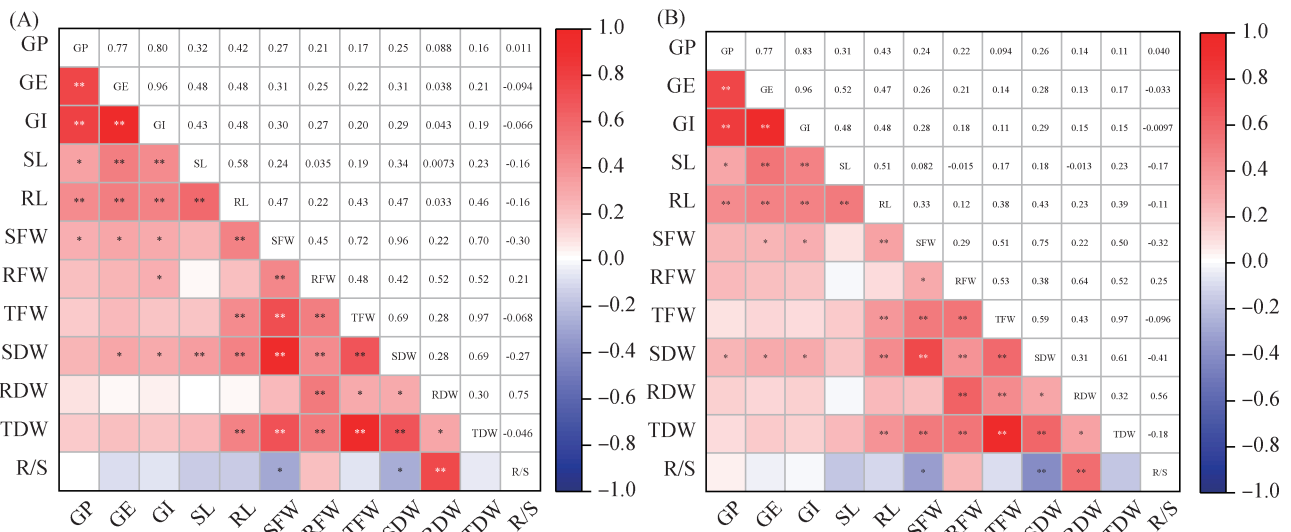


图 3 对照(A)和低氮胁迫(B)条件下披碱草种子萌发与幼苗生长各单项指标的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of various indices of seed germination and seedling growth of *Elymus* under control (A) and low nitrogen stress (B) conditions

注:GP,发芽率;GE,发芽势;GI,发芽指数;SL,苗长;RL,根长;SFW,苗鲜重;RFW,根鲜重;TFW,整体鲜重;SDW,苗干重;RDW,根干重;TDW,整体干重;R:S,根冠比。*表示显著水平($P<0.05$),**表示极显著水平($P<0.01$)。下同

Note: GP, germination percentage; GE, germination energy; GI, germination index; LS, shoot length; LR, root length; FWS, shoot fresh weight; FWR, root fresh weight; FWT, total fresh weight; DWS, shoot dry weight; DWR, root dry weight; DWT, total dry weight; R:S, root-shoot ratio. * represents a significant level ($P<0.05$) and ** represents an extremely significant level ($P<0.01$). The same as below

即表现出超低的低氮耐受性。从各指标看,发芽率、发芽势、发芽指数、苗长和根长平均耐低氮系数较高(均值大于0.850),变异系数较小(6.92%~12.02%),表明这些指标的整体受低氮胁迫较小;根冠比的平均耐低氮系数最高为0.950,变异系数较高为23.69%,表明该指标可能是筛选耐低氮种质的关

键指标;苗鲜重、根鲜重、整体鲜重、苗干重、根干重和整体干重平均耐低氮系数较低(0.650~0.720),但变异系数显著较高(15.75%~34.88%),尤其是整体鲜重和整体干重变异系数分别达32.47%和34.88%,显示这些指标在不同种质间差异极显著,是筛选超强耐低氮与超弱耐低氮种质的关键指标。

表 2 不同种质披碱草种子萌发期耐低氮系数及综合耐低氮系数

Table 2 Low nitrogen tolerance coefficient and comprehensive low nitrogen tolerance coefficient during seed germination of different *Elymus* germplasm number

编号 Number	耐低氮系数与综合耐低氮系数 Nitrogen tolerance coefficient and comprehensive nitrogen tolerance coefficient													排序 Order
	NTC1	NTC2	NTC3	NTC4	NTC5	NTC6	NTC7	NTC8	NTC9	NTC10	NTC11	NTC12	CNTC	
E01	0.98	0.97	1.00	0.94	0.99	0.84	0.14	0.87	0.86	0.74	0.66	0.86	0.822	21
E02	0.91	0.84	0.88	0.72	0.84	0.82	0.85	0.85	0.87	0.73	0.74	0.83	0.825	19
E03	0.97	0.98	0.97	0.96	0.93	0.85	0.72	0.91	0.52	0.33	0.77	0.64	0.796	35
E04	0.77	0.70	0.77	0.87	0.92	0.79	0.81	0.86	0.83	0.45	0.39	0.54	0.725	55
E05	0.84	0.94	1.00	0.80	0.89	0.76	0.69	0.89	0.72	0.77	0.34	1.07	0.809	27
E06	0.94	0.85	0.92	0.95	0.97	0.54	0.68	0.78	0.69	0.53	0.39	0.78	0.751	48
E07	0.98	0.99	0.99	1.00	0.75	0.78	0.77	0.79	0.78	0.78	0.79	0.99	0.866	4
E08	0.96	0.87	0.88	0.98	0.95	0.74	0.77	0.75	0.74	0.76	0.75	1.03	0.848	15
E09	0.98	0.92	0.94	0.95	0.82	0.84	0.83	0.07	0.83	0.82	0.07	0.98	0.755	47
E10	0.93	0.81	0.92	0.94	0.90	0.60	0.63	0.79	0.60	0.63	0.79	1.05	0.800	32
E11	0.63	0.53	0.62	0.90	0.76	0.54	0.93	0.79	0.54	0.63	0.79	1.16	0.735	53
E12	0.93	0.94	0.95	0.99	0.91	0.69	0.42	0.85	0.69	0.43	0.85	0.62	0.772	43
E13	0.97	0.68	0.92	0.96	0.86	0.53	0.61	0.71	0.53	0.61	0.71	1.15	0.770	44
E14	0.92	0.89	0.90	1.00	0.74	0.68	0.63	0.82	0.68	0.63	0.81	0.92	0.802	30
E15	0.97	0.95	0.96	0.89	0.70	0.77	0.62	0.82	0.77	0.61	0.82	0.78	0.805	28
E16	0.99	0.83	0.90	0.85	0.71	0.64	0.69	0.45	0.64	0.68	0.44	1.07	0.740	52
E17	0.95	0.95	0.93	0.95	0.66	0.66	0.57	0.76	0.66	0.57	0.76	0.86	0.774	42

续表 2

编号 Number	耐低氮系数与综合耐低氮系数 Nitrogen tolerance coefficient and comprehensive nitrogen tolerance coefficient													排序 Order
	NTC1	NTC2	NTC3	NTC4	NTC5	NTC6	NTC7	NTC8	NTC9	NTC10	NTC11	NTC12	CNTC	
E18	0.96	0.93	0.97	0.99	0.97	0.60	0.57	0.82	0.60	0.57	0.82	0.94	0.812	23
E19	0.96	0.96	0.96	0.83	0.58	0.71	0.68	0.67	0.72	0.69	0.67	0.96	0.782	41
E20	0.98	0.95	0.97	0.93	0.93	0.57	0.58	0.75	0.57	0.56	0.75	0.99	0.795	37
E21	0.98	0.89	0.92	0.96	0.68	0.78	0.64	0.77	0.78	0.64	0.77	0.82	0.803	29
E22	0.98	0.84	0.86	0.97	0.94	0.82	0.82	0.83	0.82	0.83	0.83	1.00	0.878	3
E23	0.78	0.94	0.90	1.00	0.89	0.71	0.56	0.08	0.71	0.59	0.08	0.83	0.673	58
E24	0.97	0.93	0.96	0.96	0.89	0.50	0.74	0.81	0.50	0.73	0.81	1.46	0.856	9
E25	0.98	0.99	0.95	0.95	0.98	0.79	0.49	0.75	0.79	0.49	0.75	0.62	0.794	38
E26	0.99	0.94	0.97	0.99	0.89	0.57	0.56	0.88	0.57	0.54	0.88	0.95	0.811	24
E27	0.98	0.72	0.93	0.93	0.76	0.58	0.62	0.84	0.58	0.64	0.84	1.10	0.794	39
E28	0.80	0.75	0.82	0.98	0.82	0.58	0.58	0.78	0.58	0.56	0.78	0.96	0.749	49
E29	0.83	0.93	1.00	0.97	0.75	0.63	0.81	0.84	0.63	0.82	0.84	1.29	0.862	6
E30	0.98	0.94	0.90	0.99	0.76	0.80	0.51	0.57	0.57	0.51	0.57	0.89	0.747	50
E31	0.94	0.94	0.88	0.99	0.96	0.62	0.68	0.92	0.62	0.68	0.92	1.09	0.852	13
E32	0.91	0.94	0.97	0.96	0.82	0.62	0.53	0.07	0.62	0.54	0.07	0.87	0.659	59
E33	0.96	0.85	0.91	0.96	0.81	0.71	0.63	0.76	0.71	0.63	0.76	0.89	0.799	34
E34	0.96	0.87	0.93	0.93	0.75	0.41	0.73	0.64	0.41	0.71	0.63	1.76	0.810	26
E35	0.94	0.62	0.77	0.98	0.97	0.68	0.88	0.79	0.68	0.88	0.79	1.29	0.855	10
E36	0.96	0.88	0.91	1.00	0.73	0.66	0.75	0.75	0.66	0.76	0.75	1.15	0.831	18
E37	0.83	0.86	0.81	0.98	1.12	0.77	0.48	0.45	0.77	0.42	0.45	0.55	0.707	56
E38	0.89	0.91	0.92	0.97	0.93	0.87	0.68	0.85	0.87	0.69	0.85	0.80	0.852	12
E39	0.87	0.81	0.91	0.77	0.78	0.76	0.63	0.85	0.76	0.62	0.85	0.82	0.785	40
E40	0.95	0.95	0.96	0.98	0.82	0.67	0.74	0.09	0.67	0.74	0.09	1.11	0.730	54
E41	0.89	0.69	0.81	0.92	0.87	0.79	0.72	0.78	0.79	0.75	0.78	0.95	0.813	22
E42	0.84	0.87	0.84	0.99	0.85	0.80	0.71	0.67	0.80	0.69	0.67	0.86	0.799	33
E43	0.95	0.83	0.89	0.95	0.97	0.73	0.71	0.72	0.73	0.70	0.72	0.96	0.823	20
E44	0.81	0.98	0.91	0.96	0.92	0.57	0.74	0.86	0.57	0.75	0.86	1.33	0.854	11
E45	0.86	0.89	0.98	0.91	0.81	0.82	0.64	0.92	0.82	0.64	0.92	0.78	0.832	16
E46	0.93	0.82	0.81	0.93	0.89	0.51	0.67	0.75	0.52	0.67	0.75	1.29	0.795	36
E47	0.90	0.84	0.85	0.91	0.91	0.90	0.85	0.76	0.90	0.85	0.76	0.94	0.865	5
E48	0.99	0.97	0.97	0.96	0.87	0.65	0.80	0.84	0.65	0.82	0.84	1.26	0.885	1
E49	0.99	0.68	0.92	0.84	0.81	0.81	0.57	0.09	0.81	0.57	0.09	0.70	0.657	60
E50	0.93	0.91	0.99	0.92	0.73	0.96	0.62	0.87	0.72	0.61	0.87	0.84	0.832	17
E51	0.91	0.75	0.80	0.94	0.96	0.78	0.61	0.85	0.78	0.61	0.85	0.78	0.801	31
E52	0.96	0.94	0.93	1.00	0.93	0.79	0.52	0.86	0.79	0.51	0.86	0.64	0.811	25
E53	0.99	0.86	0.88	0.99	0.95	0.63	0.62	0.08	0.63	0.61	0.08	0.97	0.691	57
E54	0.95	0.92	0.97	0.94	0.92	0.67	0.43	0.79	0.67	0.43	0.79	0.64	0.759	46
E55	0.96	0.96	0.97	0.93	0.81	0.80	0.75	0.73	0.80	0.77	0.73	0.97	0.848	14
E56	0.94	0.77	0.98	0.82	0.72	0.57	0.59	0.84	0.57	0.57	0.84	1.00	0.769	45
E57	0.97	0.62	0.77	0.74	0.86	0.80	0.59	0.75	0.80	0.57	0.75	0.71	0.744	51
E58	0.98	0.95	0.94	0.95	0.99	0.75	0.78	0.82	0.75	0.78	0.82	1.04	0.879	2
E59	0.96	0.94	0.97	0.87	0.75	0.71	0.79	0.83	0.70	0.81	0.83	1.15	0.859	8
E60	0.96	0.94	0.94	0.93	0.95	0.79	0.71	0.86	0.78	0.71	0.86	0.90	0.861	7
均值 Mean	0.93	0.87	0.91	0.93	0.86	0.71	0.66	0.72	0.70	0.65	0.68	0.95		
变异系数 Coefficient of variation/%	7.44	12.01	7.90	6.92	12.02	16.15	19.79	32.47	15.75	18.46	34.88	23.69		

注: NTC1, 发芽率; NTC2, 发芽势; NTC3, 发芽指数; NTC4, 苗长; NTC5, 根长; NTC6, 苗鲜重; NTC7, 根鲜重; NTC8, 整体鲜重; NTC9, 苗干重; NTC10, 根干重; NTC11, 整体干重; NTC12, 根冠比; CNTC, 综合耐低氮系数。CNTC 越大, 种子萌发期耐低氮性越强

Note: NTC1, germination percentage; NTC2, germination energy; NTC3, germination index; NTC4, shoot length; NTC5, root length; NTC6, shoot fresh weight; NTC7, root fresh weight; NTC8, total fresh weight; NTC9, shoot dry weight; NTC10, root dry weight; NTC11, total dry weight; NTC12, root-shoot ratio, CNTC, comprehensive nitrogen tolerance coefficient. The larger the CNTC, the greater the nitrogen tolerance during seed germination

2.5 综合评价

由于对照和低氮各指标之间均存在相关性,为了消除这种影响,减少信息重叠,使评价结果更加客观、准确,故而进行耐低氮性综合评价。通过主成分分析,将披碱草种子萌发期的 12 个单项指标转

化为 5 个新的相互独立的综合指标(Comprehensive index, CI),其贡献率分别为 22.101%, 19.451%, 16.385%, 14.555% 和 10.369%, 累计贡献率达 82.861%(表 3)涵盖了原来各单项测定指标的绝大部分信息。

表 3 基于主成分分析的各综合指标的系数及贡献率

Table 3 Coefficient and contribution of each comprehensive indicator based on principal component analysis

指标 Indicators	综合指标 Comprehensive indicators				
	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	CI ₅
GP	-0.176	0.607	0.215	0.212	-0.093
GE	-0.301	0.748	0.241	0.182	0.173
GI	-0.242	0.814	0.262	0.222	-0.187
SL	0.038	0.443	-0.193	-0.172	0.696
RL	-0.272	-0.091	-0.124	-0.299	0.731
SFW	-0.719	-0.333	0.403	0.302	0.088
RFW	0.579	-0.398	0.251	0.405	0.18
TFW	0.147	-0.062	0.768	-0.583	-0.021
SDW	-0.653	-0.446	0.381	0.373	0.152
RDW	0.481	-0.071	0.441	0.635	0.280
TDW	0.218	0.026	0.763	-0.561	0.000
R:S	0.904	0.248	0.054	0.221	0.099
特征值 Eigenvalues	2.652	2.334	1.966	1.747	1.244
贡献率 Contribute rate/%	22.101	19.451	16.385	14.555	10.369
累计贡献率 Cumulative contribute rate/%	22.101	41.552	57.937	72.492	82.861

注:CI₁,综合指标 1;CI₂,综合指标 2;CI₃,综合指标 3;CI₄,综合指标 4;CI₅,综合指标 5

Note: CI₁, comprehensive index 1; CI₂, comprehensive index 2; CI₃, comprehensive index 3; CI₄, comprehensive index 4; CI₅, comprehensive index 5

以新合成的 5 个综合指标为依据,计算了披碱草各种质的综合指标值 $F(X_i)$ 、隶属函数值 $\mu(X_i)$ 、权重 W_i 及综合耐低氮评价值 D ,其结果如表 4 所示,对供试的披碱草种质资源种子萌发期耐低氮性进行排序, D 值越大代表其种子萌发期

耐低氮性越强。60 份披碱草种质种子发芽期综合耐低氮评价值 D 为 0.822~0.413,其中种子萌发期耐低氮性最强的为种质‘E22’‘E47’‘E58’, D 值大于 0.800,材料‘E11’‘E32’‘E49’,其 D 值均小于 0.500。

表 4 不同种质披碱草种子萌发期耐低氮性的综合指标值 $F(X_i)$ 、隶属函数值 $\mu(X_i)$ 及综合评价

Table 4 Comprehensive indicator value $F(X_i)$, membership function value $\mu(X_i)$, D value and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance of different *Elymus* germplasm number during seed germination

编号 Number	综合指标值 Comprehensive index value					隶属函数值 Membership function value					综合评价 D 值 Comprehensive evaluation D value	排序 Order
	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$F(X_4)$	$F(X_5)$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	$\mu(X_5)$		
E01	1.229	1.491	-1.018	0.338	0.854	0.874	1.000	0.262	0.831	0.730	0.757	9
E02	1.662	-0.652	0.757	0.448	-1.936	0.963	0.637	0.698	0.860	0.129	0.712	14
E03	-0.033	0.583	-1.628	0.729	0.483	0.614	0.846	0.112	0.935	0.650	0.630	34
E04	1.253	-2.595	-0.881	-0.245	-0.159	0.879	0.309	0.296	0.677	0.512	0.548	48
E05	0.554	0.259	0.620	-0.301	-0.931	0.735	0.792	0.665	0.662	0.345	0.673	28
E06	-0.457	-0.296	-0.723	-0.460	0.689	0.527	0.698	0.335	0.620	0.695	0.566	44
E07	0.588	1.353	1.121	0.300	0.071	0.742	0.977	0.788	0.821	0.561	0.797	4
E08	0.367	-0.052	0.998	0.197	1.086	0.696	0.739	0.758	0.794	0.780	0.747	10
E09	1.169	0.700	1.603	-2.798	0.015	0.861	0.866	0.906	0.000	0.549	0.681	23
E10	-0.865	-0.197	-0.229	0.418	0.202	0.443	0.714	0.456	0.853	0.590	0.600	40
E11	-1.465	-4.420	0.560	0.356	-0.590	0.319	0.000	0.650	0.836	0.419	0.413	60
E12	-0.047	0.447	-2.042	0.706	0.739	0.611	0.823	0.011	0.929	0.705	0.610	37
E13	-1.651	-0.419	-0.364	0.026	-0.102	0.281	0.677	0.423	0.749	0.524	0.515	52

续表 4

编号 Number	综合指标值 Comprehensive index value					隶属函数值 Membership function value					综合评价 D 值 Comprehensive evaluation D value	排序 Order
	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$F(X_4)$	$F(X_5)$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	$\mu(X_5)$		
E14	-0.327	0.175	-0.190	0.442	-0.023	0.553	0.777	0.466	0.859	0.541	0.641	33
E15	0.609	0.884	-0.460	0.479	-1.333	0.746	0.897	0.399	0.869	0.259	0.674	27
E16	-0.570	0.143	0.232	-1.148	-1.719	0.503	0.772	0.569	0.438	0.175	0.527	51
E17	-0.485	0.704	-0.749	0.230	-0.991	0.521	0.867	0.328	0.803	0.332	0.590	41
E18	-0.776	0.606	-0.696	0.543	1.093	0.461	0.850	0.341	0.886	0.782	0.643	32
E19	0.068	0.950	0.182	-0.199	-2.532	0.635	0.908	0.557	0.689	0.000	0.614	36
E20	-1.006	0.735	-0.745	0.283	0.308	0.413	0.872	0.329	0.817	0.613	0.600	39
E21	0.529	0.604	-0.087	0.225	-0.816	0.730	0.850	0.491	0.801	0.370	0.678	25
E22	1.123	-0.141	1.520	0.493	0.964	0.852	0.724	0.886	0.872	0.754	0.820	2
E23	0.094	-0.426	-0.505	-2.681	1.017	0.640	0.676	0.388	0.031	0.766	0.507	55
E24	-1.858	0.698	0.978	0.453	0.455	0.238	0.866	0.753	0.862	0.644	0.648	30
E25	0.918	0.771	-1.425	0.313	0.862	0.810	0.878	0.162	0.825	0.732	0.691	20
E26	-1.155	0.845	-0.899	0.809	0.589	0.383	0.891	0.292	0.956	0.673	0.621	35
E27	-1.191	-0.066	-0.229	0.578	-0.905	0.375	0.737	0.456	0.895	0.351	0.564	45
E28	-1.139	-1.478	-0.801	0.322	0.259	0.386	0.498	0.316	0.827	0.602	0.503	56
E29	-0.769	0.469	1.468	0.542	-0.153	0.462	0.827	0.873	0.885	0.513	0.710	15
E30	-0.441	0.634	-1.107	-0.561	-0.091	0.530	0.855	0.240	0.593	0.526	0.560	46
E31	-0.636	0.077	0.294	0.940	1.299	0.490	0.761	0.585	0.991	0.826	0.702	18
E32	-0.742	0.551	-0.962	-2.727	-0.056	0.468	0.841	0.276	0.019	0.534	0.447	59
E33	0.014	0.158	-0.203	0.238	-0.087	0.624	0.774	0.462	0.805	0.527	0.647	31
E34	-3.013	0.399	1.083	-0.343	-0.691	0.000	0.815	0.779	0.651	0.397	0.509	54
E35	-0.228	-1.650	1.985	0.313	1.120	0.574	0.469	1.000	0.825	0.788	0.704	17
E36	-0.535	0.420	1.011	0.125	-0.074	0.510	0.819	0.761	0.775	0.530	0.681	22
E37	0.820	-1.361	-1.805	-0.969	2.104	0.790	0.518	0.069	0.485	1.000	0.556	47
E38	1.492	0.044	0.338	0.639	0.915	0.928	0.755	0.595	0.911	0.743	0.796	5
E39	0.635	-0.571	-0.508	0.677	-1.972	0.752	0.651	0.388	0.921	0.121	0.607	38
E40	-0.331	0.781	0.942	-2.724	0.258	0.553	0.880	0.744	0.020	0.602	0.580	43
E41	0.784	-1.346	0.674	0.331	-0.006	0.782	0.520	0.678	0.829	0.545	0.679	24
E42	0.844	-0.721	0.418	-0.181	0.734	0.795	0.626	0.615	0.694	0.704	0.690	21
E43	0.384	-0.243	0.461	0.099	0.828	0.700	0.707	0.626	0.768	0.725	0.702	19
E44	-1.186	-0.169	0.990	0.672	0.960	0.377	0.719	0.756	0.920	0.753	0.675	26
E45	1.010	0.213	-0.256	0.974	-0.486	0.829	0.784	0.449	1.000	0.441	0.725	12
E46	-1.670	-0.792	0.273	0.205	0.271	0.277	0.614	0.580	0.796	0.604	0.548	49
E47	1.841	-0.585	1.672	0.235	0.353	1.000	0.649	0.923	0.804	0.622	0.822	1
E48	-0.484	1.035	1.486	0.553	0.420	0.521	0.923	0.877	0.888	0.637	0.765	8
E49	0.971	-0.363	-0.811	-2.640	-1.531	0.821	0.686	0.313	0.042	0.216	0.476	58
E50	0.996	0.825	-0.343	0.758	-0.960	0.826	0.887	0.428	0.943	0.339	0.721	13
E51	0.752	-1.223	-0.457	0.671	0.708	0.776	0.541	0.400	0.920	0.699	0.662	29
E52	0.794	0.490	-1.210	0.745	1.023	0.784	0.831	0.215	0.939	0.767	0.708	16
E53	-0.602	0.014	-0.186	-2.688	0.997	0.497	0.750	0.467	0.029	0.761	0.502	57
E54	-0.146	0.509	-2.086	0.479	0.252	0.591	0.834	0.000	0.869	0.600	0.581	42
E55	0.843	0.914	0.961	0.089	-0.210	0.794	0.902	0.749	0.765	0.501	0.769	7
E56	-1.116	0.082	-0.867	0.647	-2.169	0.391	0.762	0.299	0.913	0.078	0.512	53
E57	1.075	-1.709	-0.986	0.303	-1.935	0.842	0.459	0.270	0.822	0.129	0.547	50
E58	0.582	0.598	1.133	0.525	1.057	0.741	0.849	0.791	0.881	0.774	0.805	3
E59	0.046	0.827	1.238	0.514	-1.128	0.630	0.888	0.817	0.878	0.303	0.730	11
E60	0.877	0.489	0.465	0.700	0.605	0.801	0.830	0.627	0.927	0.677	0.780	6
权重 Weight						0.267	0.235	0.198	0.176	0.125		

2.6 聚类分析

综合评价结果已对60份披碱草种质的耐低氮性进行了量化排序,为进一步明确不同种质耐低氮性的类型划分,本研究基于综合评价值进行了聚类分析,将耐低氮性划分为不同类型。基于 D 值,对供试的60个种质披碱草种子萌发期耐低氮性进行聚类分析,将耐低氮性划分为六种类型,即超强耐低氮性、中强耐低氮性、低强耐低氮性、低弱耐低氮性、中弱耐低氮性和超弱耐低氮性(图4),其 D 值依次为 $D \geq 0.747$, $0.641 \leq D < 0.747$, $0.600 \leq D < 0.641$, $0.547 \leq D < 0.600$, $0.502 \leq D < 0.547$, $D < 0.502$ (表5)。其中,超强耐低氮性的种质有10个,分别为‘E47’‘E22’‘E58’‘E07’‘E38’‘E60’‘E55’‘E48’‘E01’和‘E08’;中强耐低氮性的种质有23个,分别为‘E59’‘E45’‘E50’‘E02’‘E29’‘E52’‘E35’‘E31’‘E43’‘E25’‘E42’‘E36’‘E09’‘E41’‘E21’‘E44’‘E15’‘E05’‘E51’‘E24’‘E33’‘E18’和‘E14’;低强耐低氮性的种质有7个,分别为‘E03’‘E26’‘E19’‘E12’‘E39’‘E20’和‘E10’;低弱耐低氮性的种质有10个,分别为‘E17’‘E54’‘E40’‘E06’‘E27’‘E30’‘E37’‘E04’‘E46’和‘E57’;中弱耐低氮性的种质有7个,分别为‘E16’‘E13’‘E56’‘E34’‘E23’‘E28’和‘E53’;超弱耐低氮性的种质有3个,分别为‘E49’‘E32’和‘E11’。

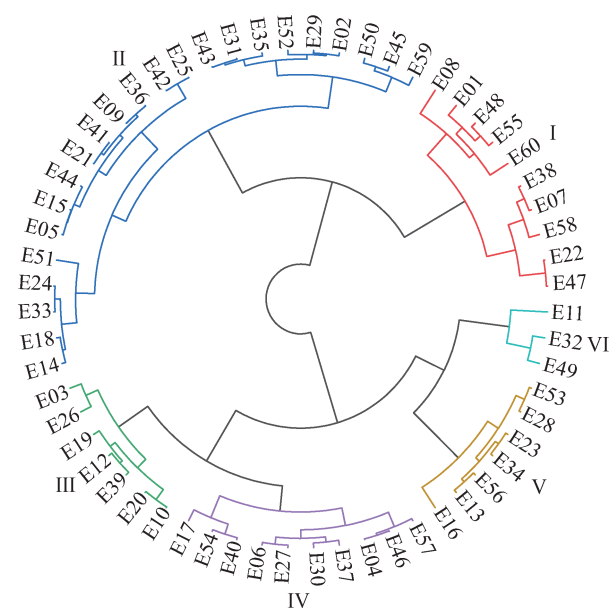


图4 基于披碱草种子萌发期耐低氮性综合评价值(D 值)的系统聚类分析

Fig. 4 Systematic cluster analysis based on comprehensive evaluation value (D value) of low nitrogen tolerance during *Elymus* seed germination

注: I, 超强耐低氮性; II, 中强耐低氮性; III, 低强耐低氮性; IV, 低弱耐低氮性; V, 中弱耐低氮性; VI, 超弱耐低氮性

Note: I, super strong nitrogen tolerance; II, medium strong nitrogen tolerance; III, low strong nitrogen tolerance; IV, low weak nitrogen tolerance; V, medium weak nitrogen tolerance; VI, super weak nitrogen tolerance

0.502(表5)。其中,超强耐低氮性的种质有10个,分别为‘E47’‘E22’‘E58’‘E07’‘E38’‘E60’‘E55’‘E48’‘E01’和‘E08’;中强耐低氮性的种质有23个,分别为‘E59’‘E45’‘E50’‘E02’‘E29’‘E52’‘E35’‘E31’‘E43’‘E25’‘E42’‘E36’‘E09’‘E41’‘E21’‘E44’‘E15’‘E05’‘E51’‘E24’‘E33’‘E18’和‘E14’;低强耐低氮性的种质有7个,分别为‘E03’‘E26’‘E19’‘E12’‘E39’‘E20’和‘E10’;低弱耐低氮性的种质有10个,分别为‘E17’‘E54’‘E40’‘E06’‘E27’‘E30’‘E37’‘E04’‘E46’和‘E57’;中弱耐低氮性的种质有7个,分别为‘E16’‘E13’‘E56’‘E34’‘E23’‘E28’和‘E53’;超弱耐低氮性的种质有3个,分别为‘E49’‘E32’和‘E11’。

3 讨论

氮素是维系植物生长发育进程所必需的核心营养元素之一^[21]。研究表明,植物在缺乏氮素的环境下生长时,生长进程会受到抑制^[22]。比如,低氮胁迫条件下,苦荞地上部干物质积累量、株高等指标呈显著下降趋势,且低氮敏感型品种的指标降幅显著高于耐低氮型品种^[23];低氮胁迫条件下青稞地上部生物量呈现显著降低趋势^[24]。低氮胁迫条件下,玉米地上部生长受到显著抑制^[25]。本研究发现,低氮胁迫显著抑制披碱草种子萌发与幼苗生长,这与前人研究结论一致,各项指标平均值降幅介于5.95%与40.74%之间,其中根鲜重、根干重等地下部指标降幅最大(36.28%、40.74%),而发芽率、苗长等地上部指标受影响较小(5.95%、6.40%)。这个结果说明,披碱草在缺氮环境下会优先保证种子能发芽,同时通过减少地下部分生长来适应缺氮的环境,这和干旱半干旱地区植物“躲开逆境”的长期进化策略是一样的,都是为了在不利生境中存活下来^[26]。

在植物生命周期中,从种子到幼苗的过渡阶段

表5 不同种质披碱草种子萌发期相对耐低氮性等级划分

Table 5 Classification of relative low nitrogen tolerance of different *Elymus* germplasm number during seed germination

编号 Number	相对耐低氮性等级 Relative nitrogen tolerance levels	D 值 D value
I	超强耐低氮 Super strong nitrogen tolerance	$D \geq 0.747$
II	中强耐低氮 Medium strong nitrogen tolerance	$0.641 \leq D < 0.747$
III	低强耐低氮 Low strong nitrogen tolerance	$0.600 \leq D < 0.641$
IV	低弱耐低氮 Low weak nitrogen tolerance	$0.547 \leq D < 0.600$
V	中弱耐低氮 Medium weak nitrogen tolerance	$0.502 \leq D < 0.547$
VI	超弱耐低氮 Super weak nitrogen tolerance	$D < 0.502$

是极为关键和敏感的时期,它极大地影响了植物群落的更新和维护^[14]。此阶段不仅受到光照、温度、湿度等环境的显著影响,还可能受到海拔的影响。在本项研究中发现,在相同的处理下,采自博尔塔拉蒙古自治州高海拔区域(如E47,海拔2250.0 m)的种质,其根鲜重、整体鲜重、整体干重和根冠比等指标降幅显著低于乌鲁木齐低海拔区域种质(如E11,海拔887.5 m),这可能是因为高海拔生境土壤氮素矿化速率低、有效氮含量匮乏,长期选择压力促使种质进化出更强的根系生长维持能力,与青藏高原嵩草属植物“高海拔种群根系生物量分配比低海拔种群高”的适应特征一致^[26]。

在植物低氮耐受性评价研究中,科学合理的筛选评价方法是确保抗性评估结果准确性与可靠性的关键。Liu等^[27]通过对20个谷子品种在氮胁迫条件下的株高、根长及地上部干鲜重等指标的测定,采用皮尔森相关性分析、主成分分析及隶属函数分析相结合的方法进行综合评估,建立了谷子的耐低氮评价体系。赵继秀^[28]筛选了燕麦种质资源相关指标,采用主成分分析、相关性分析和聚类分析等多种方法对19份不同基因型的燕麦品种进行株高、植株干鲜重、根冠比等多个指标进行综合评价,筛选出耐低氮种质和氮敏感种质。贵会平等^[29]通过主成分分析及隶属函数法在低氮和适氮两个处理下,对270份供试棉花苗期的株高、根干物质质量和总干物质质量等指标进行分析,筛选出了32个低氮耐受性品种以及32个对氮胁迫敏感品种。以上文献均说明数据分析如主成分分析和隶属函数分析等方法可以在品种筛选上广泛运用,且较为成熟。目前,许多植物已经建立了成熟的耐低氮评价体系,但在披碱草中报道甚少,仅在张心怡等^[17]采用相关分析、主成分分析、隶属函数、和聚类分析等多种方法对披碱草种质资源的耐低氮性进行综合评价中有所提及。基于前人研究报道,本研究参考模式物种^[30]和禾本科植物^[31]耐低氮能力评价体系,结合披碱草自身特点,选取了发芽率、苗长、苗干鲜重、根冠比等12个指标,通过综合耐低氮系数分析方法发现,综合耐低氮系数排名前6的种质为‘E48’‘E58’‘E22’‘E07’‘E47’‘E29’,表现出较强的耐低氮性,而‘E49’‘E32’‘E23’‘E53’‘E37’排名靠后,对氮缺乏较为敏感。通过隶属函数综合得分D值及聚类分析进一步发现,60份披碱草种质中超强耐低氮性种质10个、中强耐低氮性的种质23个、低强

耐低氮性的种质7个、低弱耐低氮性的种质10个、中弱耐低氮性的种质7个和超弱耐低氮性的种质3个。其中,‘E47’‘E22’‘E58’‘E07’‘E38’‘E60’‘E55’‘E48’‘E01’和‘E08’为超强耐低氮性种质,而‘E49’‘E32’和‘E11’为超弱耐低氮性种质。本研究评价筛选出的披碱草耐低氮性优异种质将为其在生态环境修复利用提供理论指导,也为耐低氮相关候选基因挖掘、遗传改良与分子育种提供基础材料和理论依据。与此同时,本研究还发现,通过综合耐低氮系数筛选的耐低氮差异极端种质与通过隶属函数综合评价结合聚类分析筛选的结果基本保持一致。因此,可推荐综合耐低氮系数作为披碱草低氮耐受性评价的重要方法。另外需要指出的是,本试验采用培养皿种子发芽法对萌发期披碱草耐低氮性种质快速筛选鉴定的结果,与大田的实际耐氮能力的相关性尚待考证,需要进一步验证。

4 结论

低氮胁迫后披碱草种质的发芽率、发芽势、发芽指数、苗长、根长、苗鲜重、根鲜重、整体鲜重、苗干重、根干重、整体干重与根冠比均出现不同程度的降低,降幅分别为5.95%,12.07%,8.21%,6.40%,14.80%,29.04%,36.28%,25.54%,30.00%,40.74%,28.77%和8.08%。综合评价,将60份披碱草种子萌发期的耐低氮性划分为6个等级,其中E47’‘E22’‘E58’‘E07’‘E38’‘E60’‘E55’‘E48’‘E01’和‘E08’为超强耐低氮性种质,而‘E49’‘E32’和‘E11’为超弱耐低氮性种质。

参考文献

- [1] COSTA B N S, SALAS M N M, GIL K, et al. Effect of silicon amendment on growth and nitrogen status of common landscaping plants[J]. American Journal of Plant Sciences, 2024, 15 (8): 603-616
- [2] GAO S, WANG J F, KNOPS J M H, et al. Nitrogen addition increases sexual reproduction and improves seedling growth in the perennial rhizomatous grass *Leymus chinensis* [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 106
- [3] 王鹤. 低氮胁迫下野大豆幼苗碳氮代谢响应及适应机制研究[D]. 长春: 长春师范大学, 2020: 11-16
WANG H. Carbon-nitrogen metabolic responses and adaptive strategies to low-nitrogen stress in *Glycine soja* [D]. Changchun: Changchun Normal University, 2020: 11-16
- [4] 张驰, 李生秀, 王长春. 氮素在地球生物中的分布及循环[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(1): 93-97

- ZHANG C, LI S X, WANG C C. Geobiological distribution of N and its cycle[J]. Acta Universitatis Agriculture Boreali-Occidentalis, 1995, 23(1): 93-97
- [5] PAN J, JU Z L, MA X, et al. Evaluation of low nitrogen resistance of *Avena sativa* germplasm during the seed germination period[J]. Heliyon, 2024, 10(23): e40765
- [6] SUN G L, SALOMON B, BOTHMER R V. Analysis of tetraploid *Elymus* species using wheat microsatellite markers and RAPD markers[J]. Genome, 1997, 40(6): 806-814
- [7] 黄薇. 披碱草属种质资源表型遗传多样性分析与综合评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2022: 1-2
- HUANG W. Analysis of phenotypic genetic diversity and comprehensive evaluation of *Elymus* L. germplasm resources[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022: 1-2
- [8] NTAKIRUTIMANA F, XIAO B W, XIE W G, et al. Potential effects of awn length variation on seed yield and components, seed dispersal and germination performance in Siberian wildrye (*Elymus sibiricus* L.) [J]. Plants, 2019, 8(12): 561
- [9] 王沛, 陈玖红, 王平, 等. 披碱草属植物抗逆性研究现状和存在的问题[J]. 草业学报, 2019, 28(5): 151-162
- WANG P, CHEN J H, WANG P, et al. Status of research into the abiotic stress tolerance of *Elymus* species[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 151-162
- [10] 张永超, 于辉, 魏小星, 等. 高寒区披碱草属花序分支种质资源穗型特征分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(10): 1697-1712
- ZHANG Y C, YU H, WEI X X, et al. Analysis of Inflorescence types of *Elymus* species from Alpine regions with branched spike germplasm resources [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(10): 1697-1712
- [11] 李旭谦, 陆福根, 辛有俊. 青海省优良牧草种质资源[J]. 青海草业, 2013, 22(2): 47-52, 56
- LI X Q, LU F G, XIN Y J. Good forage germplasm resources in Qinghai Province[J]. Qinghai Prataculture, 2013, 22(2): 47-52, 56
- [12] 张楚, 张永清, 路之娟, 等. 苗期耐低氮基因型苦荞的筛选及其评价指标[J]. 作物学报, 2017, 43(8): 1205-1215
- ZHANG C, ZHANG Y Q, LU Z J, et al. Screening *Fagopyrum tararicum* genotypes tolerant to low nitrogen stress at seedling stage and its evaluating indices [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(8): 1205-1215
- [13] 周璐璐, 平文超, 刘艳丽, 等. 谷子苗期性状对低氮胁迫的响应及耐低氮品种的筛选与评价[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(1): 164-168
- ZHOU L L, PING W C, LIU Y L, et al. Response of *Foxtail Millet* seedling traits to low nitrogen stress and screening and evaluation of cultivars with low nitrogen tolerance[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 164-168
- [14] 孙婉玉, 吕晔, 李阳晨, 等. 21份西藏野生披碱草属种质抗寒性综合评价[J]. 草业科学, 2025, 12(12): 3141-3152
- SUN W Y, LV Y, LI Y C, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of 21 wild *Elymus* germplasms in Xizang [J/OL]. Pratacultural Science, 2025, 12(12): 3141-3152
- [15] 苏志刚, 韩有健, 翟亚军, 等. 垂穗披碱草种质资源研究进展[J]. 草学, 2025, (5): 1-11, 24
- SU Z G, HAN Y J, ZHAI Y J, et al. Research progress on germplasm resources of *Elymus nutans* [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025, (5): 1-11, 24
- [16] 陈鑫, 焦婷, 牧仁, 等. 氮添加对高寒人工草地垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 生长及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 1964-1971
- CHEN X, JIAO T, MU R, et al. Effects of nitrogen addition on growth and photosynthetic characteristics of *Elymus nutans* in Alpine artificial grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 1964-1971
- [17] 张心怡, 何菲菲, 张亮, 等. 不同披碱草种质对低氮胁迫的形态和生理响应分析及耐低氮性评价[J]. 草地学报, 2024, 32(7): 2128-2142
- ZHANG X Y, HE F F, ZHANG L, et al. Analysis of the morphology and physiological response of different *Elymus dahuricus* germplasm under low nitrogen stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2128-2142
- [18] 吕艳贞, 聂宇婷, 张昭, 等. 紫花苜蓿种子耐贮藏性综合评价及关键指标筛选[J]. 草地学报, 2024, 32(4): 1131-1141
- LV Y Z, NIE Y T, ZHANG Z, et al. Comprehensive evaluation of seed storability of alfalfa and screening of key indicators [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(4): 1131-1141
- [19] IQBAL A, DONG Q, WANG X R, et al. N-efficient cotton genotype grown under low nitrogen shows relatively large root system, high biomass accumulation and nitrogen metabolism [J]. Agronomy Journal, 2022, 114(1): 582-600
- [20] 林智榕, 赖慧捷, 范辉华, 等. 氮沉降模拟对杉木和枫香种子萌发的影响[J/OL]. <https://link.cnki-net-s.webvpn.xjau.edu.cn/urlid/46.1068.S,2024-05-23/2025-11-15>
- LIN Z R, LAI H J, FAN H H, et al. Effects of Nitrogen Deposition Simulation on Seed Germination of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana* [J/OL]. <https://link.cnki-net-s.webvpn.xjau.edu.cn/urlid/46.1068.S,2024-05-23/2025-11-15>
- [21] 符春婵, 胡旭, 林佳奇, 等. 海雀稗低氮耐受性指标筛选及综合评价[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(2): 175-183
- FU C C, HU X, LIN J Q, et al. Screening and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance indicators in *Paspalum vaginatum* [J]. Journal of Tropical Biology, 2026, 17(2): 175-183
- [22] 方嘉琪, 赵妍, 周青平, 等. 低氮胁迫下作物谷氨酰胺合成酶-谷氨酸合成酶循环的研究进展[J]. 草业科学, 2025, 42(4): 1036-1050
- FANG J Q, ZHAO Y, ZHOU Q P, et al. Research progress on crop GS-GOGAT cycle under low nitrogen stress [J]. Pratacultural Science, 2025, 42(4): 1036-1050
- [23] 张楚, 张永清, 路之娟, 等. 低氮胁迫对不同苦荞品种苗期生长和根系生理特征的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(7): 1331-1339

- ZHANG C, ZHANG Y Q, LU Z J, et al. Effect of low nitrogen stress on the seedling growth and root physiological traits of *Fagopyrum tataricum* cultivars with different low-N treatments [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(7): 1331-1339
- [24] 时学双, 韩婧, 范晓通, 等. 青稞苗期耐低氮特性鉴定与筛选[J]. 大麦与谷类科学, 2024, 41(5): 43-48
- SHI X S, HAN J, FAN X T, et al. Identification and screening of low nitrogen tolerance characteristics of highland barley at seedling stage [J]. Barley and Cereal Sciences, 2024, 41(5): 43-48
- [25] 彭超颖, 霍川, 杨梅, 等. 玉米耐低氮胁迫响应研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(32): 1-9
- PENG C Y, HUO C, YANG M, et al. Research advances in response of maize to nitrogen stress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(32): 1-9
- [26] 谭美, 杨志玲, 杨旭, 等. 不同生境内厚朴种子萌发和幼苗生长研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 910-916
- TAN M, YANG Z L, YANG X, et al. Study on seed germination and seedling growth of *Houpoea officinalis* in different habitats [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(10): 910-916
- [27] LIU C J, GONG X W, WANG H L, et al. Low-nitrogen tolerance comprehensive evaluation and physiological response to nitrogen stress in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) seedling [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 151: 233-242
- [28] 赵继秀. 青海东部燕麦种质资源生产性能评价及耐低氮种质筛选[D]. 西宁: 青海大学, 2023: 48-56
- ZHAO J X. Evaluation of production performance of oat germplasm resources and screening of low-nitrogen tolerant germplasm in eastern Qinghai [D]. Xining: Qinghai University, 2023: 48-56
- [29] 贵会平, 董强, 张恒恒, 等. 棉花苗期耐低氮基因型初步筛选[J]. 棉花学报, 2018, 30(4): 326-337
- GUI H P, DONG Q, ZHANG H H, et al. Preliminary screening of low nitrogen-tolerant cotton genotypes at seedling stage [J]. Cotton Science, 2018, 30(4): 326-337
- [30] 王英, 马建森, 王芳, 等. 引黄灌区水稻氮高效品种筛选评价[J]. 中国稻米, 2025, 31(1): 74-78, 83
- WANG Y, MA J S, WANG F, et al. Screening and evaluation of nitrogen-efficient varieties in the yellow river irrigation area [J]. China Rice, 2025, 31(1): 74-78, 83
- [31] LI D D, LIU J X, ZONG J Q, et al. Integration of the metabolome and transcriptome reveals the mechanism of resistance to low nitrogen supply in wild bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) roots [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 480
- (责任编辑 付 宸)