

主持人: 张洪亮, 徐 冉

Open Access

## 海雀稗低氮耐受性指标筛选及综合评价

符春婵<sup>1,2#</sup>, 胡 旭<sup>1,2</sup>, 林佳奇<sup>1,2</sup>, 马梦欣<sup>1,2</sup>, 王晓椿<sup>1,2</sup>, 王志勇<sup>1,2</sup>, 廖 丽<sup>1,2\*</sup>

(1. 海南大学热带农林学院, 海南 儋州 571737 中国; 2. 海南大学三亚南繁研究院, 海南 三亚 572025 中国)

**摘要:** 为探究海雀稗(*Paspalum vaginatum*)的耐低氮特性, 本研究以 10 份海雀稗种质为试验材料, 采用水培法并设置全氮(5.0 mmol·L<sup>-1</sup>)和 1/100 氮(0.05 mmol·L<sup>-1</sup>) 2 个氮浓度处理 30 d, 测定处理后的叶绿素含量、地上部鲜质量、草层高度等 18 个农艺性状并进行方差分析, 比较探究 10 份海雀稗种质的耐低氮特性, 对种质低氮耐受性进行综合评价。结果表明, 相比正常氮处理, 低氮处理的地上部鲜质量、地上部干质量、分蘖总长度和分蘖数等指标显著降低; 根冠鲜质量比、根冠干质量比、地上部干物质含量、地下部干物质含量等指标显著增加。通过相关性分析、主成分分析和隶属分析, 筛选出耐低氮的海雀稗种质 17USA-03、17HN-39。

**关键词:** 海雀稗; 低氮胁迫; 种质筛选; 综合评价

中图分类号: S688.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7054(2026)02-0175-09

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. DOI: 10.15886/j.cnki.rds wxb.20240191 CSTR: 32425.14.j.cnki.rds wxb.20240191



氮元素(nitrogen, N)是植物生长的必需营养物质, 参与植物体内多种有机物的构成(如酶、叶绿素、激素等), 对植物生长发育发挥着重要的促进作用<sup>[1]</sup>。氮元素缺乏会影响植物的生物合成, 导致植物细胞生理生化活动受到抑制, 降低作物产量和品质<sup>[2]</sup>。施加氮肥是一种最有效且最重要的增产措施, 但有研究表明, 大部分作物仅吸收所施氮肥的 30%~40%<sup>[3]</sup>, 这不仅造成很大程度上资源浪费, 随着硝酸盐淋洗, 硝酸盐反硝化产生的氧化亚氮还会造成水体富营养化、大气酸化、土壤污染等一系列生态环境问题<sup>[4]</sup>。因此, 培育开发耐低氮或氮高效利用率的种质资源, 可以减少土壤中的氮肥施用, 改善土壤质地, 减少土壤板结, 提高土壤保水能力, 促进土壤系统的正向发展<sup>[5]</sup>。在植物耐低氮种质的选育过程中, 首先要针对不同植物, 建立耐低氮种质筛选的方法。植物耐低氮评价是一个综合性评价, 其评价指标涵盖光合指标、地上部性状、根系性状及产量性状等方面, 但是过多的指标在评价中存在着可操作性不强、费时、费力、

冗余复杂性等缺点<sup>[6]</sup>。因此, 用科学方法筛选具有代表性的评价指标, 不仅能获得准确的结果还能减轻工作量、提高评价效率。刘芯欣等<sup>[7]</sup>基于耐低氮系数, 综合运用表型指标的相关性分析、主成分分析(PCA)、聚类分析和回归分析, 对供试大豆品种资源进行了分类, 最终将其分为强耐低氮型、耐低氮型、中间型、不耐低氮型及极不耐低氮型五个类别。Liu 等<sup>[8]</sup>通过皮尔逊相关分析、主成分分析和隶属函数分析相结合的方法, 根据株高、根长、地上部生物量等指标, 综合评价 20 个谷子品种的耐低氮性, 建立了谷子的耐低氮评价体系。郭红霞等<sup>[9]</sup>对 9 份藜麦进行低氮胁迫后, 测定了株高、地上部干质量、根冠比等指标, 通过主成分分析将众多指标分成了 4 个主成分, 聚类分析得出 3 个类型, 分别是耐低氮型、中间型和低氮敏感型。吕立军等<sup>[10]</sup>对大葱进行水培低氮胁迫, 采用主成分分析、隶属函数、D 值等方法筛选指标与种质, 根据耐低氮性将 25 份大葱划分为耐低氮型品种、中度耐低氮型品种、低氮敏感型品种共 3 类。



收稿日期: 2024-12-20

修回日期: 2025-02-24

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32060409, 32371782, 32460358); 海南省科技人才创新基金项目(KJRC2023C21); 海南大学南繁与热带高效农业研究协同创新中心项目(XTCX2022NYB08); 海南大学生态文明协同创新中心项目(XTCX2022STC10)

**\*第一作者:** 符春婵(2000—), 女, 海南大学热带农林学院 2022 级硕士研究生。E-mail: fccscience@163.com

**\*通信作者:** 廖丽(1981—), 女, 副教授。研究方向: 热带草坪草遗传育种。E-mail: liaoli@hainanu.edu.cn

海雀稗 (*Paspalum vaginatum*) 是禾本科 (Gramineae) 雀稗属 (*Paspalum*) 的一种多年生暖季型草坪草, 主要分布在热带和亚热带滨海地区<sup>[11]</sup>。海雀稗喜湿、喜高温、喜光照, 具有耐修剪、耐践踏、耐盐和耐涝等多种优良特性, 对极端盐碱土壤也有较高的耐性<sup>[12]</sup>。因海雀稗分蘖能力强、抗逆性强、成坪质量高、管理简单粗放、冬季少枯黄的特点, 海雀稗常被用作高尔夫球场草皮和城市绿化植物。同时, 海雀稗具有发达的根系, 保持水土能力较强, 能从恶劣环境中摄取必需营养供给自身生长, 对吸收重金属、净化土壤有一定作用, 可以作为保持水土、修复土壤的生态修复草种<sup>[13]</sup>。在草坪草低氮耐受性研究中, 主要测量的生长指标有草层高度、叶长、叶宽、地上部干质量和叶绿素含量等<sup>[14-17]</sup>。不同施氮量对草坪生长的相关研究已经在狗牙根 (*Cynodon dactylon*)<sup>[14]</sup>、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)<sup>[15]</sup>、结缕草 (*Zoysia japonica*)<sup>[16]</sup>、地毯草 (*Axonopus compressus*)<sup>[17]</sup> 等草类中开展, 结果表明, 不同种质资源对氮肥的需求存在差异。目前, 海雀稗氮肥施用相关的研究鲜有报道。因此, 本研究以 10 份海雀稗种质资源为试验材料, 利用水培法设置正常氮处理 (5.0 mmol·L<sup>-1</sup>) 和低氮胁迫 (0.05 mmol·L<sup>-1</sup>) 处理, 进行 18 个生长指标测定, 并采用相关性分析、主成分分析和隶属函数分析法对种质低氮耐受性进行综合评价, 建立适用于海雀稗低氮耐受性种质的实用性筛选鉴定体系, 旨在为海雀稗耐低氮品种选育及基因的挖掘奠定基础。

## 1 材料与方法

**1.1 材料** 以课题组前期研究筛选的 10 份种质为试验材料, 分别为 17USA-18、17USA-45、SeaIsle 2000、TYB 2、Vero Beach、17USA-47、17USA-04、PI 509022、17HN-39 和 17USA-03, 10 份海雀稗种质均保存于海南大学热带草坪草育种实验室资源圃。

**1.2 方法** 试验于 2024 年 6—7 月在海南大学海南校区农科基地大棚进行。前期选取生长状态一致、健康无病虫害的 10 支海雀稗匍匐茎种植于育苗杯中, 每个种质的对照和胁迫各 4 个育苗杯。为排除海雀稗匍匐茎自身的生长差异, 统一施用霍格兰营养液 (氮浓度为 5.0 mmol·L<sup>-1</sup>) 培养 1 个

月, 之后进行齐杯口修剪处理和低氮胁迫。

试验采用 Hogland 营养液水培方式进行, 低氮胁迫处理组的营养液氮浓度设置为 0.05 mmol·L<sup>-1</sup>, 对照组设置为 5.0 mmol·L<sup>-1</sup>, 其他条件保持一致。每天检查水位, 及时对缺少的水分进行补充, 每隔 5 d 换 1 次水, 添加营养液, 并于处理第 30 天时测定植株生长指标。

**1.2.1 水培营养液配制** 所施营养液为改良型 Hogland 营养液, 共分为 Stock 1、Stock 2、Stock 3、Stock 4 四部分, 配方中不同氮浓度处理只改变 Stock 1 含量, 即改变硝态氮浓度, 不改变铵态氮浓度。

对照组处理的营养液 Stock 1 配方: KNO<sub>3</sub> 1.667 mmol·L<sup>-1</sup>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 1.667 mmol·L<sup>-1</sup>、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 0.833 mmol·L<sup>-1</sup>、KCl 0.833 mmol·L<sup>-1</sup>、Fe-EDTA(Na) 80 μmol·L<sup>-1</sup>。低氮处理组所施营养液 Stock 1 配方: KNO<sub>3</sub> 0.017 mmol·L<sup>-1</sup>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.017 mmol·L<sup>-1</sup>、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 2.483 mmol·L<sup>-1</sup>、KCl 2.483 mmol·L<sup>-1</sup>、Fe-EDTA(Na) 80 μmol·L<sup>-1</sup>。营养液 Stock 2 配方: K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.250 mmol·L<sup>-1</sup>、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 1 mmol·L<sup>-1</sup>。营养液 Stock 3 配方: MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 4.57 μmol·L<sup>-1</sup>、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.38 μmol·L<sup>-1</sup>、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 1.57 μmol·L<sup>-1</sup>、(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.09 μmol·L<sup>-1</sup>、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 23.13 μmol·L<sup>-1</sup>。营养液 Stock 4 配方: KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.25 mmol·L<sup>-1</sup>。

**1.2.2 生长指标测定** 草层高度(cm): 用卷尺测量植株自然生长的高度, 重复 8 次测量。

叶长(cm): 随机选取长势良好的倒二叶进行叶片长度的测量, 以叶片与叶鞘交界处为起点, 叶片末端为终点, 用直尺重复 10 次测量。

叶宽(cm): 取测量叶长的同片叶子测量叶片最宽处, 用直尺重复 10 次测量。

叶色: 用 3nh-NR60CP 便携式高精度色差仪随机挑选健康倒二叶进行读值得到叶色读值 1、叶色读值 2、叶色读值 3, 重复 10 次测量。

分蘖数: 对长出的匍匐茎枝数进行数量统计记录。

分蘖数总长度(cm): 随机选取匍匐茎进行长度测量, 统一以杯口为起点, 茎端为终点, 重复 10 次测量。

分蘖节间长(cm): 随机选取匍匐茎测量倒数第二节茎节长, 重复 10 次测量。

叶绿素含量: 用便携式 SPAD-502 仪随机挑选健康倒二叶进行读数, 重复 10 次测量;

地上部鲜质量、地下部鲜质量(g): 将鲜样剪下, 立即称重记录; 地下部需擦干根部水分再称重记录。

地上部干质量、地下部干质量(g): 鲜样经 105 °C 杀青 30 min 后, 65 °C 烘干至恒重即可称重记录。

其他生长指标的测定方法为: 地上部干物质含量=地上部干质量/地上部鲜质量; 地下部干物质含量=地下部干质量/地下部鲜质量; 根冠干质量比=根部干质量/地上部干质量; 根冠鲜质量比=根部鲜质量/地上部鲜质量。

**1.3 数据统计与分析** 原始数据在 Microsoft Excel 2016 中汇总并计算, R 语言进行数据分析。为了全面评估海雀稗的低氮耐受能力, 采用斯皮尔曼相关系数进行相关性分析, 隶属函数分析、主成分分析得出种质综合排名。进行聚类分析, 将种质划分出 3 个类群。计算公式如下:

$$\text{耐低氮系数} = \frac{\text{低氮处理组测定值}}{\text{正常氮对照组测定值}}, \quad (1)$$

$$U(X_j) = \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}, \quad (2)$$

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}, \quad (3)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j], \quad (4)$$

式中,  $X_j$  表示第  $j$  个指标,  $X_{j\min}$  和  $X_{j\max}$  分别表示第  $j$  个指标最小值和最大值。  $W_j$  表示权重, 指第  $j$  个指标在评价体系中的重要程度;  $P_j$  为第  $j$  个综合指标对应的贡献率;  $D$  值表示在低氮条件下海雀稗各种质耐低氮能力的综合评价值。

## 2 结果与分析

**2.1 低氮胁迫对海雀稗性状指标的影响** 试验处理 30 d 后, 分别测定正常氮对照组及低氮胁迫组的生长指标。结果表明(表 1), 不同氮处理下的 18 个指标均存在显著差异。相比正常氮处理, 低氮处理的 10 份海雀稗材料平均根冠鲜质量比、根冠干质量比、地上部干物质含量、地下部干物质含量、叶色读值 1、叶色读值 3 显著增大; 地上部鲜

质量、地上部干质量、地下部鲜质量、地下部干质量、分蘖总长度、分蘖数、分蘖节间长、草层高度、叶长、叶宽、叶绿素含量、叶色读值 2 显著降低。其中, 根冠鲜质量比、根冠干质量比增加最多, 相比正常氮对照组分别增加了 426.67% 和 428.57%; 地上部鲜质量和地上部干质量降低最多, 相比正常氮对照组分别降低了 90.26% 和 86.23%。

依据公式(1)计算每个指标的耐低氮系数, 其变异系数范围为 2.32%~71.92%。其中, 分蘖数、分蘖节间长、分蘖总长度的变异系数最大, 分别为 71.92%、59.72%、58.89%; 叶色读值 1、叶色读值 2、叶色读值 3 和叶宽变异系数最小, 分别为 2.32%、8.32%、6.64% 和 7.98%(表 1)。综上表明, 不同种质间耐低氮性状具有较为广泛的遗传差异性, 这为海雀稗耐低氮品种的筛选提供了依据。

**2.2 测量指标相关性分析** 根据每个指标的耐低氮系数(表 1)进行相关性分析, 结果表明, 指标间均存在不同程度的相关性, 综合影响着海雀稗的耐低氮能力(图 1)。其中, 叶绿素含量(SPAD)与地上部鲜质量(SFW)呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.70; 与叶色读值 2 呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 相关系数为 -0.72; 与地上部干质量(SDW)呈显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.84。地下部鲜质量(RFW)与根冠鲜质量比(FWRS)呈显著正相关( $P < 0.001$ ), 相关系数为 0.96; 与叶色读值 1 呈显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.82。分蘖总长度(TTL)与分蘖数(TN)、地下部干质量(RDW)均呈显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.79 和 0.86; 与分蘖节间长(TIL)和草层高度(TH)呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为 0.65 和 -0.68。指标之间相关性的各种关联, 说明存在信息冗余, 需采用主成分分析法进一步发掘各指标的内在相关性。

**2.3 测量指标主成分分析** 对海雀稗各指标的耐低氮系数先进行数据标准化, 而后进行主成分分析, 确定 4 个综合指标的贡献率分别为 42.73%、23.79%、14.70% 和 9.38%, 累计贡献率达 90.61%, 表明这 4 个主成分可以代表 18 个初始测定指标耐低氮系数的大部分信息(表 2)。其中, 主成分 1 中, 叶绿素含量、叶色读值 1、叶色读值 2 的载荷值分别为 0.61、0.78 和 0.61, 表明低氮耐受性与植株叶片的颜色有关, 低氮胁迫会影响到叶片的色

表 1 2 种供氮水平下海雀稗种质耐低氮指标值和耐低氮系数

Tab. 1 Relative index values and coefficients of low nitrogen tolerance of *Paspalum vaginatum* under two nitrogen treatments

耐低氮指标 Low nitrogen tolerance index	低氮处理			正常氮处理			耐低氮系数		
	Low nitrogen treatment			Normal nitrogen treatment			Low nitrogen tolerance coefficient		
	Mean	SD	CV/%	Mean	SD	CV/%	Mean	SD	CV/%
叶绿素含量 SPAD	23.08 <sup>b</sup>	4.46	19.34	39.58 <sup>a</sup>	2.01	5.08	0.58	0.09	14.74
草层高度/cm Turfgrass height	12.70 <sup>b</sup>	7.52	59.20	17.63 <sup>a</sup>	5.12	29.06	0.70	0.28	39.81
地上部干质量/g Shoot dry weight	6.52 <sup>b</sup>	2.49	38.24	47.36 <sup>a</sup>	12.95	27.34	0.14	0.03	21.87
地上部鲜质量/g Shoot fresh weight	23.25 <sup>b</sup>	6.83	29.37	238.82 <sup>a</sup>	35.73	14.96	0.10	0.02	20.01
地下部干质量/g Root dry weight	2.13 <sup>b</sup>	0.79	37.07	3.42 <sup>a</sup>	1.16	34.04	0.66	0.19	29.01
地下部鲜质量/g Root fresh weight	17.31 <sup>b</sup>	11.09	64.07	34.54 <sup>a</sup>	14.82	42.90	0.49	0.17	34.28
根冠干质量比 Dry weight ratio of root shoot	0.37 <sup>a</sup>	0.15	41.07	0.07 <sup>b</sup>	0.02	26.90	4.95	1.51	30.42
根冠鲜质量比 Fresh weight ratio of root shoot	0.79 <sup>a</sup>	0.46	57.78	0.15 <sup>b</sup>	0.06	42.18	5.27	1.90	36.03
地上部干物质含量 Shoot dry matter content	0.28 <sup>a</sup>	0.03	9.40	0.20 <sup>b</sup>	0.03	13.70	1.42	0.13	8.90
地下部干物质含量 Root dry matter content	0.15 <sup>a</sup>	0.06	42.23	0.11 <sup>b</sup>	0.02	23.18	1.40	0.44	31.78
叶长/cm Leaf length	5.85 <sup>b</sup>	1.57	26.83	7.94 <sup>a</sup>	1.85	23.24	0.74	0.11	15.15
叶宽/cm Leaf width	0.26 <sup>b</sup>	0.06	23.62	0.35 <sup>a</sup>	0.09	26.93	0.74	0.06	7.98
分蘖数 Tillers number	4.03 <sup>b</sup>	3.04	75.47	12.15 <sup>a</sup>	3.90	32.07	0.34	0.24	71.92
分蘖总长度/cm Total tillers length	4.84 <sup>b</sup>	2.82	58.22	34.91 <sup>a</sup>	12.01	34.4	0.16	0.1	58.89
分蘖节间长/cm Tillers internode length	0.73 <sup>b</sup>	0.43	59.31	2.08 <sup>a</sup>	0.74	35.73	0.42	0.25	59.72
叶色读值1(L*) Leaf color reading 1 (L*)	51.27 <sup>a</sup>	1.94	3.79	43.23 <sup>b</sup>	1.19	2.75	1.19	0.03	2.32
叶色读值2(a*) Leaf color reading 2 (a*)	-13.96 <sup>b</sup>	1.48	-10.60	-10.31 <sup>a</sup>	0.58	-5.67	1.35	0.11	8.32
叶色读值3(b*) Leaf color reading 3 (b*)	29.57 <sup>a</sup>	3.58	12.12	18.71 <sup>b</sup>	2.27	12.13	1.58	0.11	6.64

泽及程度。草层高度的载荷值为 0.90, 表明其与植株生长幅度密切相关, 低氮胁迫会影响到草层整体的生长状态。此外, 地上部鲜质量、地下部鲜质量、根冠干质量比和根冠鲜质量比的载荷值分别为 0.72、0.67、0.94、0.85, 表明低氮耐受性与植株生物量有关, 低氮胁迫会影响植株生长和生物量的积累。分蘖数、分蘖总长度和分蘖节间长的载荷值分别为 -0.63、-0.88 和 -0.89, 说明在低氮胁迫下, 海雀稗种质的分蘖数量和长度受到影响, 可能原因是营养不足使得分蘖生长速度减缓, 导致分蘖数量减少和长度缩短; 主成分 2 中, 地上部干

质量和地下部干质量的载荷值分别为 0.54 和 0.65; 地上部干物质含量和地下部干物质含量的载荷值为 0.82 和 0.81, 表明干物质含量和海雀稗低氮耐受性密切相关。利用各指标在主成分 1、主成分 2 的载荷系数, 将参试种质及所有指标绘制于 GGE 双标图中(图 2), 2 个指标向量夹角若小于 90°, 则 2 个指标呈正相关; 若大于 90°, 呈负相关, 可以直观表现指标间的相关性。种质 17USA-03、17HN-39 分布在双标图的右侧; 17USA-18、17USA-45 在双标图的左上方; 其他种质分散在双标图偏左下方。由双标图可知, 所测指标可以较好地供试

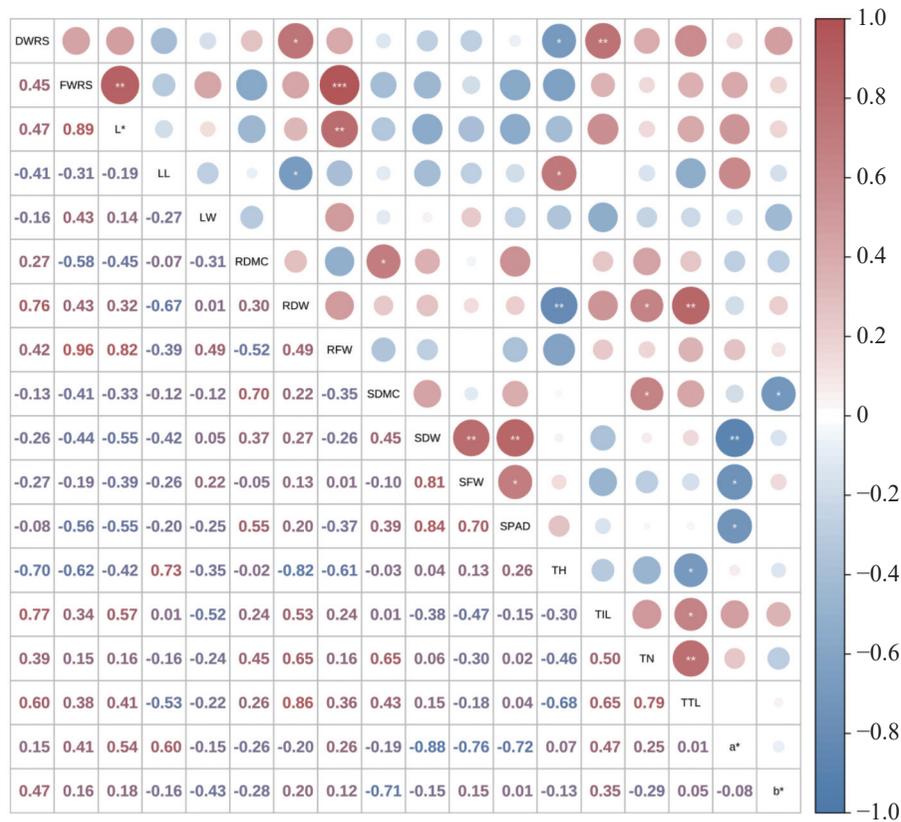


图 1 海雀稗各指标耐低氮系数的相关性

Fig. 1 Correlation analysis of low nitrogen tolerance coefficients of each index of *Paspalum vaginatum*

注: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$ 。DWRS, 根冠干质量比; FWRS, 根冠鲜质量比; L\*, 叶色读值 1; LL, 叶长; LW, 叶宽; RDMC, 地下部干物质含量; RDW, 地下部干质量; RFW, 地下部鲜质量; SDMC, 地上部干物质含量; SDW, 地上部干质量; SFW, 地上部鲜质量; SPAD, 叶绿素含量; TH, 草层高度; TIL, 分蘖节间长; TN, 分蘖数; TTL, 分蘖总长度; a\*, 叶色读值 2; b\*, 叶色读值 3。下同。

Note: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$ . DWRS, Dry weight ratio of root shoot; FWRS, Fresh weight ratio of root shoot; L\*, Leaf color reading value 1; LL, Leaf length; LW, Leaf width; RDMC, Root dry matter content; RDW, Root dry weight; RFW, Root fresh weight; SDMC, Shoot dry matter content; SDW, Shoot dry weight; SFW, Shoot fresh weight; SPAD, Chlorophyll content; TH, Turfgrass height; TIL, Tillers internode length; TN, Tillers number; TTL, Total tillers length; a\*, Leaf color reading value 2; b\*, Leaf color reading value 3. Similarly hereinafter.

海雀稗材料进行分类。

氮耐受性差异, 根据 1.3 中的公式(4)和公式(5)计

2.4 耐低氮种质筛选 为了进一步明确种质的低氮耐受性差异, 根据 1.3 中的公式(4)和公式(5)计算 10 份海雀稗种质对低氮胁迫的耐受综合值

表 2 海雀稗各指标耐低氮系数主成分分析及贡献率

Tab. 2 Principal component analysis and contribution rate of low nitrogen tolerance coefficient of each index of *Paspalum vaginatum*

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4
叶绿素含量 SPAD	0.61	0.62	-0.08	-0.35
草层高度 Turfgrass height/cm	0.90	-0.29	0.20	-0.06
地上部干质量 Shoot dry weight/g	0.66	0.54	-0.46	0.00
地上部鲜质量 Shoot fresh weight/g	0.72	0.23	-0.55	-0.22
地下部干质量 Root dry weight/g	-0.68	0.65	-0.27	-0.15
地下部鲜质量 Root fresh weight/g	0.67	0.14	0.68	0.02
根冠干质量比 Dry weight ratio of root shoot	0.94	-0.23	0.02	0.12
根冠鲜质量比 Fresh weight ratio of root shoot	0.85	0.26	0.41	-0.14
地上部干物质含量 Shoot dry matter content	-0.01	0.82	0.12	0.46
地下部干物质含量 Root dry matter content	-0.02	0.81	0.46	-0.20

续表 2 Tab. 2 Continued

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4
叶长 Leaf length/cm	-0.26	0.64	-0.30	-0.32
叶宽 Leaf width/cm	0.02	0.19	0.79	-0.48
分蘖数 Tillers number	-0.63	0.61	0.32	0.27
分蘖总长度 Total tillers length/cm	-0.88	0.41	0.05	-0.05
分蘖节间长 Tillers internode length/cm	-0.89	0.04	0.29	-0.19
叶色读值1 Leaf color reading 1 ( <i>L</i> *)	0.78	0.28	0.19	-0.02
叶色读值2 Leaf color reading 2 ( <i>a</i> *)	0.61	0.58	-0.42	-0.23
叶色读值3 Leaf color reading 3 ( <i>b</i> *)	0.01	0.40	-0.13	0.87
特征值 Eigenvalue	7.69	4.28	2.65	1.69
贡献率 Contribution rate/%	42.73	23.79	14.70	9.38
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	42.73	66.53	81.22	90.61

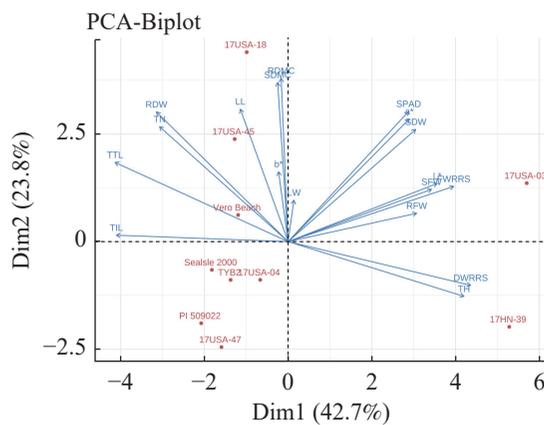


图 2 10 份海雀稗种质及指标的 GGE 双标图  
Fig. 2 GGE biplot of each index of 10 *Paspalum vaginatum*

(*D* 值)。对耐低氮性综合评分(*D* 值)进行排名,*D* 值越大,排名越靠前,说明该种质对低氮的耐受能力越强;反之,则说明该种质对低氮的耐受能力

越弱。种质低氮耐受性由高到低排序为: 17USA-03>17HN-39>17USA-18>17USA-45>Vero Beach>17USA-04>TYB 2>17USA-47>SeaIsle 2000>PI 509022(表 3)。

利用欧式距离法对 18 个指标的耐低氮系数进行低氮耐受性层次聚类分析,可以综合评估不同海雀稗种质对低氮胁迫的耐受能力。当欧氏距离为 7 时,可以将 10 份海雀稗分为 3 类。其中 17USA-03、17HN-39 属于耐低氮型种质,耐低氮性较强,其 *D* 值排名分别为 1 和 2 名; 17USA-18、17USA-45 属于中耐低氮型种质,其 *D* 值排名分别为 3 和 4 名;其余种质则被归类为不耐低氮型(图 3)。以上结果与低氮种质排名(表 3)基本一致,说明本研究筛选的耐低氮种质和低氮敏感种质结果可靠。

表 3 10 份海雀稗种质耐低氮排名

Tab. 3 Low nitrogen tolerance ranking of 10 *Paspalum vaginatum* germplasms

种质 Samples	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	<i>D</i> 值 <i>D</i> values	排名 Ranking
17USA-03	5.77	1.27	-2.19	0.33	2.65	1
17HN-39	5.23	-2.10	1.70	-1.08	1.96	2
17USA-18	-1.05	4.31	0.92	-1.82	0.48	3
17USA-45	-1.02	2.56	-1.29	2.31	0.30	4
Vero Beach	-1.11	0.70	2.85	0.15	0.13	5
17USA-04	-0.40	-0.68	0.93	2.00	0.08	6
TYB 2	-1.37	-0.85	0.14	0.35	-0.76	7
17USA-47	-1.60	-2.38	0.54	1.03	-1.09	8
Sealsle 2000	-2.21	-0.90	-1.22	-3.04	-1.85	9
PI 509022	-2.23	-1.94	-2.38	-0.25	-1.90	10

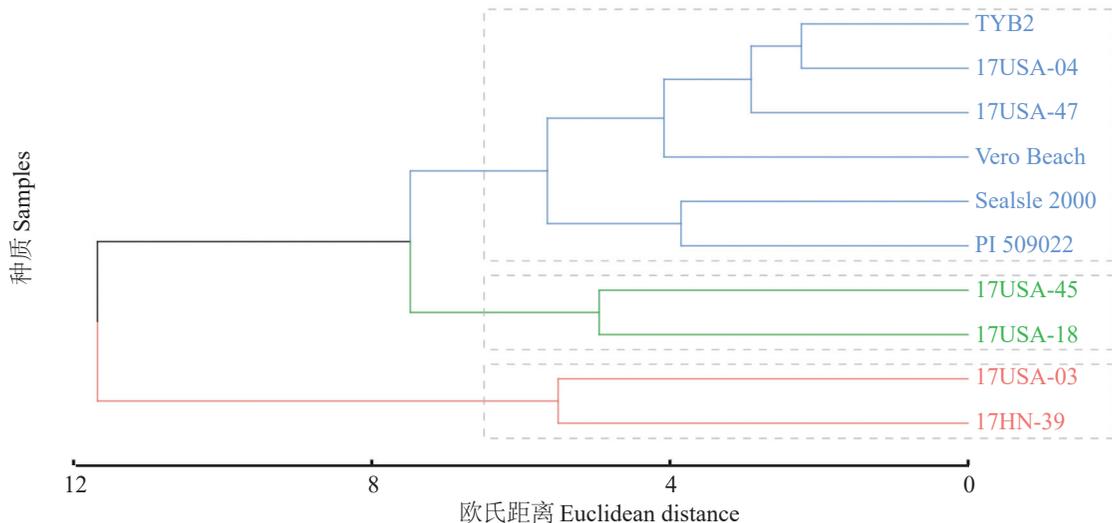


图 3 10 份海雀稗种质耐低氮性聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of low nitrogen tolerance in 10 *Paspalum vaginatum* germplasms

### 3 讨论

在植物耐低氮性研究中,通常以水培试验、大田试验、盆栽试验等方法来筛选优良种质。虽然大田试验的结果更符合实际情况,但其存在环境条件多变、氮浓度难以控制、试验周期长、需要耗费大量人力物力的弊端;盆栽试验主要采取土壤培养的方式,土壤本身存在土壤肥力,具有难以精准控制氮素营养、重复性较差的缺点;而水培方式能够有效避开土培的不利因素,能更有效挑选出优良种质和耐低氮指标<sup>[18-19]</sup>,因此,本研究采取水培试验进行海雀稗耐低氮性和低氮敏感性种质筛选。

氮素是植物生长发育不可或缺的主要营养元素之一。已有研究表明,植物在缺乏氮素的环境下生长时,生长进程会受到抑制,营养生长和生殖物候期也会延缓<sup>[20]</sup>。比如,玉米在低氮条件下,地上部的生长会受到抑制,但根冠比显著增加<sup>[21]</sup>;青稞在低氮条件下,地上部生物量显著降低,根冠比也显著高于正常氮处理<sup>[22]</sup>。谷子在低氮条件下,不同品种的株高均出现降低现象<sup>[23]</sup>。苦荞在低氮条件下,地上部干质量、株高、SPAD 等指标显著降低,且不耐低氮品种的降幅大于耐低氮品种<sup>[24]</sup>。本研究中,海雀稗在低氮胁迫下,地上部干质量、地上部鲜质量、地下部干质量、地下部鲜质量、SPAD 等指标显著低于对照组,而根冠干质量比、根冠鲜质量比等指标显著高于对照组,这与前人研究结论一致。

评价指标的筛选对植物低氮耐受性评价至关

重要。目前,许多植物已经建立了成熟的耐低氮评价体系,但在海雀稗中尚未报道。本研究参考模式物种<sup>[25]</sup>和禾本科草本植物<sup>[14]</sup>耐低氮能力评价指标,结合海雀稗自身特点,选取了 SPAD、草层高度、地上部鲜质量等 18 个指标进行试验。对数据采用相关性分析、主成分分析等分析方法发现,这些指标的相关性较强,主成分分析中的贡献率较高,说明这些指标对海雀稗低氮胁迫中的影响较为明显,综合考虑指标的获得性、可靠性和普适性后,将 SPAD、地上部鲜质量、地上部干质量、根冠干质量比、根冠鲜质量比、草层高度 6 个指标作为海雀稗低氮耐受性评价的主要推荐指标。本试验初步进行草坪草海雀稗的耐低氮性研究,在今后海雀稗养护及培育过程中,可依据叶片的浓绿程度、SPAD、地上部生物量和地下部生物量的生长情况及时进行氮素营养的调整。试验采取 Hogland 营养液水培法对海雀稗耐低氮性种质进行快速筛选鉴定,其与田间实际草坪应用耐氮能力评价的相关性尚待考究。今后可以继续深入挖掘水氮利用效率的动态平衡对海雀稗生长的调控机制,为海雀稗耐低氮种质的品种选育和田间生产提供理论依据。

本研究通过分析 10 份海雀稗种质在低氮和正常氮水平下的 18 个农艺性状,建立了海雀稗耐低氮评价体系。通过综合得分  $D$  值的排名和聚类分析,筛选出耐低氮性强的海雀稗种质 2 份,编号分别为种质 17USA-03、17HN-39,可作为海雀稗

耐低氮品种选育的参考资源。此外, SPAD、地上部鲜质量、地上部干质量、根冠干质量比、根冠鲜质量比、草层高度 6 个指标可作为海雀稗低氮耐受性评价的主要推荐指标。

### 参考文献:

- [1] Zayed O, Hewedy O A, Abdelmoteleb A, et al. Nitrogen journey in plants: from uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction [J]. *Biomolecules*, 2023, 13(10): 1443. <https://doi.org/10.3390/biom13101443>
- [2] Liu X, Hu B, Chu C. Nitrogen assimilation in plants: current status and future prospects [J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2022, 49(5): 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2021.12.006>
- [3] Nazir M, Pandey R, Siddiqi T O, et al. Nitrogen-deficiency stress induces protein expression differentially in low-N tolerant and low-N sensitive maize genotypes [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 298.
- [4] Sun X, Ren W, Wang P, et al. Evaluation of maize root growth and genome-wide association studies of root traits in response to low nitrogen supply at seedling emergence [J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(4): 794–804. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.09.011>
- [5] 顾汉柱, 王琛, 吴昊, 等. 减氮方式对不同穗型粳稻产量和品质的影响[J]. *作物研究*, 2023, 37(5): 448–460.
- [6] 叶润文. 黄爪种质苗期耐低氮性综合评价及相关生长调节剂利用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [7] 刘芯欣, 侯云龙, 杜楠琳, 等. 大豆耐低氮资源的苗期鉴定与筛选[J]. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(2): 408–418.
- [8] Liu C, Gong X, Wang H, 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. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.027>
- [9] 郭红霞, 王创云, 邓妍, 等. 藜麦对低氮胁迫的响应研究[J]. *作物杂志*, 2023(3): 221–229.
- [10] 吕立军, 石鼻坤, 袁瑞江, 等. 大葱品种苗期耐低氮性的综合评价及鉴定指标筛选[J]. *中国蔬菜*, 2020(12): 49–55.
- [11] 孙劝劝, 祝青, 胡旭, 等. 盐生植物海雀稗的气孔特征与光合特性[J]. *热带生物学报 (中英文)*, 2025, 16(04): 528–536.
- [12] 申晴, 韦海燕, 卞华, 等. 海雀稗种质资源的耐盐性评价[J]. *热带生物学报*, 2020, 11(1): 11–19.
- [13] 宋鑫. 海滨雀稗抗逆性研究进展[J]. *现代农业科技*, 2024(11): 126–132. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5739.2024.11.030>
- [14] Li D, Liu J, Zong J, 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. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03259-0>
- [15] 钱文武, 郭鹏, 朱慧森, 等. 草地早熟禾叶片表皮特征、解剖结构及光合特性对不同施氮量的响应[J]. *草业学报*, 2023, 32(1): 131–143. <https://doi.org/10.11686/cyxb2021498>
- [16] 徐苏男, 范丽霞, 何月, 等. 不同施氮量对结缕草生长及光合荧光特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 46–50. <https://doi.org/10.11838/sfsc.20130509>
- [17] He L, Teng L, Tang X, et al. Agro-morphological and metabolomics analysis of low nitrogen stress response in *Axonopus compressus* [J]. *AoB PLANTS*, 2021, 13(4): plab022. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab022>
- [18] 姜琪, 陈志伟, 刘成洪, 等. 大麦地方品种苗期耐低氮筛选和鉴定指标的研究[J]. *华北农学报*, 2019, 34(1): 148–155. <https://doi.org/10.7668/hbxb.201751103>
- [19] 姚立蓉, 谢蕾蕾, 强欣, 等. 大麦不同氮利用效率品种筛选及 GS2 基因的表达分析[J]. *核农学报*, 2017, 31(7): 1255–1262.
- [20] 方嘉琪, 赵妍, 周青平, 等. 低氮胁迫下作物 GS/GOGAT 循环的研究进展[J]. *草业科学*, 1–20(2024–12–04)[2024–12–19].
- [21] 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. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb2023-0831>
- [22] 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): 43–8.
- [23] 夏雪岩, 崔纪菡, 黄玫红, 等. 谷子苗期氮高效转录组分析与基因挖掘[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(10): 41–57.
- [24] 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. <https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2017.07.1331>
- [25] 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.

# Screening and comprehensive evaluation of low-nitrogen tolerance indices in *Paspalum vaginatum*

Fu Chunchan<sup>1,2#</sup>, Hu Xu<sup>1,2</sup>, Lin Jiaqi<sup>1,2</sup>, Ma Mengxin<sup>1,2</sup>, Wang Xiaochun<sup>1,2</sup>,  
Wang Zhiyong<sup>1,2</sup>, Liao Li<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. Sanya Institute of Breeding and Multiplication, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China)

**Abstract:** To investigate the low-nitrogen tolerance characteristics of *Paspalum vaginatum*, this study selected 10 *Paspalum vaginatum* germplasm accessions as experimental materials. A hydroponic method was applied with two nitrogen concentration treatments: full nitrogen ( $5.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) and 1/100 nitrogen ( $0.05 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), for a duration of 30 days. Eighteen agronomic traits, including chlorophyll content, shoot fresh weight, and turfgrass height, were measured after treatment, and variance analysis was conducted to compare and explore the low-nitrogen tolerance characteristics of the 10 germplasm accessions. A comprehensive evaluation of low-nitrogen tolerance was performed. The results showed that, compared to normal nitrogen treatment, indicators such as shoot fresh weight, shoot dry weight, total tillers length and tillers number significantly decreased under low nitrogen treatment, while indicators such as fresh weight ratio of root shoot, dry weight ratio of root shoot, shoot dry matter content and root dry matter content significantly increased. Through correlation analysis, principal component analysis, and membership function analysis, two low-nitrogen-tolerant *Paspalum vaginatum*, 17USA-03 and 17HN-39, were selected.

**Keywords:** *Paspalum vaginatum*; low nitrogen stress; screening germplasm; comprehensive evaluation

(责任编辑: 潘学峰)