

玉米杂交种苗期耐低氮鉴定及指标筛选

武阳春¹, 高婷婷¹, 侯宗运¹, 才卓¹, 杜金洹¹, 徐国良¹,
靳一男¹, 刘岩峰², 任军¹, 李穆¹

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)玉米研究所/主要粮食作物国家工程研究中心/国家玉米工程技术研究中心(吉林)/农业农村部东北中部玉米生物学与遗传育种重点实验室/吉林省农作物育种南繁基地开放实验室, 长春 130033;

2. 吉林吉农高新技术发展股份有限公司, 吉林 公主岭 136100)

摘要: 以29份“吉单”号玉米杂交种为材料, 以先玉335(耐低氮)为对照, 在正常氮和低氮水平处理下进行苗期水培试验, 测定根部和生物量相关的14个指标。利用耐低氮系数进行相关性分析、主成分分析、聚类分析和回归分析等方法鉴定和筛选具有耐低氮特性的玉米杂交种。结果表明, 不同氮处理下, 玉米杂交种苗期各项指标均有显著影响, 但影响程度在各杂交种和指标间均有不同。主成分分析将14个单项指标转化为4个综合指标, 经杂交种耐低氮综合评价, 通过聚类分析将供试玉米杂交种分为3种类型, 其中, 耐低氮型4份、中间型14份、低氮敏感型12份。通过逐步回归分析得出, 叶绿素含量、株高、地上部鲜重、地下部鲜重、根尖数和根冠比的耐低氮系数可作为鉴定玉米自交系苗期耐低氮特性的主要指标。

关键词: 玉米; 苗期; 根部性状; 低氮胁迫; 鉴定

中图分类号: S513.037

文献标识码: A

Screening and Identification of Low-Nitrogen Tolerance of Maize Hybrids at the Seedling Stage

WU Yang-chun¹, GAO Ting-ting¹, HOU Zong-yun¹, CAI Zhuo¹, DU Jin-huan¹, XU Guo-liang¹,
JIN Yi-nan¹, LIU Yan-feng², REN Jun¹, LI Mu¹

(1. Maize Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China)/National Engineering Research Center of Major Food Crops/National Engineering Research Center for Maize(Jilin)/Key Laboratory Biology and Genetic Improvement of Maize in Northeast Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033; 2. Jilin Jinong Hi-Tech Inc., LTD, Gongzhuling 136100, China)

Abstract: This study used 29 "Jidan" hybrid maize varieties as materials and Xianyu335(low-nitrogen tolerance) as controls. Hydroponics tests were conducted at the seedling stage under normal and low-nitrogen levels, and 14 indexes related to root and biomass were determined. Correlation analysis, principal component analysis, cluster analysis and regression analysis were used to identify and screen maize hybrids with low-nitrogen tolerance. The results showed that all indexes of maize hybrids at the seedling stage were significantly affected, but the degree of influence was different between self-hybrids and indexes. The 14 individual indexes were converted into 4 comprehensive indexes by principal component analysis. After comprehensive evaluation of low-nitrogen tolerance, the tested maize hybrids were divided into 3 types by cluster analysis, among which 4 were low nitrogen tolerant, 14 were intermediate and 12 were low-nitrogen sensitive. The low nitrogen tolerance coefficients of chlorophyll content, plant height, above ground fresh weight, below ground fresh weight, number of root tips and root to shoot ratio can be used as the main indexes to identify the low nitrogen tolerance characteristics of maize inbred lines at the seedling stage.

Key words: Maize; Seedling stage; Root character; Low nitrogen stress; Identification

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20210101018JC)、第四批吉林省青年科技人才托举工程项目(QT202016)

作者简介: 武阳春(1995-), 女, 吉林白城人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为玉米耐低氮研究。E-mail: 447901573@qq.com

高婷婷为并列第一作者。

李穆和任军为本文通信作者。

玉米(*Zea mays*)是我国最重要的农作物之一,提高玉米产量对于我国的粮食安全具有非常重要的意义^[1]。氮素是玉米生长发育和产量形成的重要营养元素,也是玉米生长的主要限制因素^[2]。通过增施氮肥可以显著提高玉米产量,过量增施氮肥不仅不会继续提升玉米的产量,还会造成化肥利用率低、营养流失、环境污染等问题^[3-5]。除此之外,我国的玉米氮效率(NUE)只有21~38 kg/kg,与美国和世界玉米氮效率的平均值(58 kg/kg)还有比较大的差距^[6-7]。因此,选育耐低氮玉米品种对于保护生态环境、降低生产成本和提高我国玉米氮效率具有重要的意义^[8-9]。

前人研究表明,玉米对耐低氮胁迫的能力存在基因型差异,因此对玉米进行耐低氮性评价,筛选耐低氮玉米种质资源,是玉米遗传改良和培育氮高效玉米新品种的基础^[10-11]。耐低氮种质筛选和评价的时期包括苗期和全生育期,苗期鉴定具有时间短、容量大、环境影响小、重复性强等优点^[12-14]。此外,根系是玉米苗期养分吸收的重要组织,优良的根系有利于玉米的氮素吸收和转运,在玉米苗期生长发育和代谢过程中都起到十分重要的作用^[15-16]。李强等研究发现,低氮胁迫对各玉米苗期各项指标均有显著影响,从中选择根冠比等7项指标作为耐低氮能力的评价指标,并从51份玉米杂交种中筛选出3份耐低氮玉米杂交种^[17]。进一步研究不同耐低氮玉米杂交种表明,与不耐低氮材料相比,耐低氮材料能够

通过保持较高的叶绿素含量和较大叶面积来维持较强的光合生产能力,还可以通过保持较高的可溶性蛋白、可溶性糖和保护酶来延缓叶片衰老,从而提高植株对低氮环境的适应性^[18]。赵泽群等认为,低氮胁迫使玉米幼苗供给地上部的氮素和蔗糖相对较少,因而限制了其生物量积累及叶片光合能力,分配给根系的相对较多,从而促进根系形态建成,以利于吸收更多的氮素^[19]。上述研究均表明,玉米耐低氮特性是一个综合性状,单一指标无法全面反映植株对低氮胁迫的响应,因而需要采用多指标综合评价。吉林省位于世界三大黄金玉米带之一,是我国重要的玉米主产区。过去的一段时间里,“吉单”系列玉米品种为吉林省粮食生产做出了巨大贡献,其响应低氮胁迫的研究却鲜有报道^[20]。因此,本研究以自育的29份“吉单”号玉米杂交种为材料,以耐低氮玉米杂交种先玉335为对照^[21],通过苗期低氮胁迫的方式,对其苗期性状开展相关研究,以明确玉米杂交种的耐低氮特性,筛选出耐低氮能力强、综合性状优良、适宜在吉林省推广应用的优良玉米杂交种。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为29份已审定的“吉单”号玉米杂交种及先玉335(表1)。“吉单”号玉米杂交种均为吉林省农业科学院玉米研究所选育并提供,玉米杂交种先玉335由市场中购买。

表1 供试玉米品种名称及其编号
Table 1 Information on participating maize name

编 号	品种名称	编 号	品种名称	编 号	品种名称
No.	Variety	No.	Variety	No.	Variety
1	吉单17	11	吉单432	21	吉单663
2	吉单436	12	吉单462	22	吉单68
3	吉单27	13	吉单20	23	吉单423
4	吉单30	14	吉单452	24	吉单926
5	吉单49	15	吉单461	25	吉单941
6	吉单63	16	吉单433	26	吉单953
7	吉单649	17	吉单596	27	吉单417
8	吉单83	18	吉单637	28	吉单982
9	吉单426	19	吉单643	29	先玉335
10	吉单962	20	吉单418	30	吉单535

1.2 试验设计

试验于2023年9-11月在吉林省农业科学院玉米研究所人工气候室内进行。营养液配制方法参照吴雅薇等^[22]报道的正常供氮和低氮处理的营养液改

良配方。挑选表面整洁、均匀的种子,先用10%的双氧水消毒30 min,用蒸馏水多次清洗并浸泡12 h后,转移至铺有润湿滤纸的发芽盘中,28℃黑暗环境下催芽。待胚根长至1.0 cm左右,挑选出长势均

一的幼苗放置于双层湿润滤纸中,将带苗滤纸卷起垂直放置于含 1/2 Hoagland 营养液的育苗箱中,置于人工气候室继续培养。待 1 叶 1 心时,挑选长势一致的幼苗,去除胚乳后将其随机分为两组,移植到盛有正常氮素水平(4 mmol/L, CK)和低氮(0.04 mmol/L, LN)营养液的育苗箱中进行培养,每个处理 3 次重复,每个重复定苗 8 株,每天用气泵通气 3~5 h,每 3 d 更换 1 次营养液。

1.3 指标测定

营养液处理 15 d 后测定指标。每个重复随机选取 3 株测定指标。

(1)叶绿素含量测定:用 SPAD-502 型便携式叶绿素仪测量玉米最新展开叶;

(2)株高测定:测定从子叶节至生长点的长度;

(3)地上部鲜重、地下部鲜重测定:将植株在子叶痕处剪断分为地上部和根部,用天平称量地上部鲜重和地下部鲜重;

(4)根系性状的测定:用根系扫描仪(Epson Expression 1000xl, WinRHIZO)测定根表面积、根体积、总根长、根粗、根数等性状;

(5)总干重、地上部干重、地下部干重测定:采用烘干法测定总干重、根干重和地上部干重;

(6)根冠比:根冠比=根干重/地上部干重。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2013、DPS 数据处理系统和 IBM SPSS Statistics 21.0 软件整理苗期耐低氮指标数据分析。应用 DPS 数据处理系统进行显著性分析, R 语言绘制聚类图。采用基于隶属函数的综合评价法对供试玉米自交系的耐低氮能力进行评价,计算公式如下:

$$\text{各指标耐低氮系数}(X) = \frac{\text{指标的低氮处理值}}{\text{指标的正常氮处理值}} \quad (1)$$

$$\text{各综合指标隶属函数值} \mu(X_j) = \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}, j=1, 2, 3 \cdots n \quad (2)$$

式中, $\mu(X_j)$ 为第 j 个综合指标隶属函数值; X_j 为第 j 个指标的耐低氮系数; $X_{j\min}$ 为第 j 个指标耐低氮系数的最小值; $X_{j\max}$ 为第 j 个指标耐低氮系数的最大值。

$$\text{各综合指标权重 } W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^m P_j}, j=1, 2, 3 \cdots n \quad (3)$$

式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重; P_j 为各自交系第 j 个综合指标的贡献率。

玉米自交系耐低氮能力综合评价(D)

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j], j=1, 2, 3 \cdots n \quad (4)$$

式中, D 表示在低氮胁迫条件下各自交系耐低氮能力的综合评价。

2 结果与分析

2.1 苗期低氮胁迫下玉米自交系间的性状差异

对 30 份玉米杂交种进行水培试验,结果表明,叶绿素含量、株高、地上部鲜重、地下部鲜重、总根长、根表面积、平均根系直径、根尖数、根分枝数、根体积、地下部干重、地上部干重、总干重和根冠比 14 个指标均呈现不同程度的变化(表 2)。低氮处理的玉米自交系苗期性状主要表现为叶绿素含量、株高、地上部干重明显减少,根冠比显著增加。通过耐低氮系数可初步鉴定供试玉米杂交种的耐低氮能力,叶绿素含量、株高、地上部鲜重、平均根系直径、根尖数、根分枝数、地上部干重、总干重均小于 1,表明低氮处理影响玉米的生长发育。

在不同氮处理下玉米杂交种各项指标均表现出一定的变异,并且各项指标的变异程度差距较大。14 个指标在两种氮处理下除叶绿素含量外,耐低氮系数的变异系数均大于 18%,表明不同的玉米杂交种耐低氮性存在较大的基因型差异。同时,由于耐低氮系数的大小不仅能够反映指标在不同氮处理的差异,也能消除杂交种间误差及生物学差异,利用耐低氮系数进行后续分析更加准确。

2.2 苗期耐低氮测量指标相关性分析

对所测定的 14 个指标的耐低氮系数进行相关性分析表明(图 1),总根长与根表面积、根体积、根尖数、根分枝数等根部性状的耐低氮系数呈极显著正相关,与平均根系直径呈极显著负相关,与叶绿素含量、株高、地上部鲜重等性状的耐低氮系数相关性较弱。表明低氮处理下干物质质量的耐低氮系数越大,根部性状的耐低氮系数越大;即低氮处理下根部性状变化越大,干物质相对变化越大。结果表明,这 14 个指标可作为筛选玉米耐低氮自交系的指标,但多指标间相关性存在显著或极显著差异,提供的耐低氮信息具有一定的重复性。

2.3 苗期耐低氮测量指标主成分分析

玉米的耐低氮能力受多因素影响,且各指标耐低氮系数的相关性明显不同。单一指标的耐低氮系数无法准确评价玉米自交系耐低氮能力,因此需要对自交系耐低氮系数进行综合评价。利用 SPSS 软件对 30 份玉米杂交种 14 个指标的耐低氮系数进行

表2 两种氮处理下玉米杂交种的苗期性状差异
Table 2 Differences in seedling traits of maize inbred under the two treatments

性 状 Trait	正常氮 Normal nitrogen		低 氮 Low-nitrogen		耐低氮系数 Low-nitrogen tolerance coefficient	
	平均值	变异系数(%)	平均值	变异系数(%)	平均值	变异系数(%)
	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
叶绿素含量SPAD	37.87 a	5.21	29.84 b	11.11	0.79	10.85
株高(cm) PH	22.03 a	19.35	16.20 b	20.32	0.74	30.39
地上部鲜重(g) SFW	2.79 a	39.54	1.14 b	24.62	0.41	35.51
地下部鲜重(g) UFW	1.20	52.87	1.21	25.53	1.01	37.64
总根长(cm) TRL	255.88	52.75	277.19	35.87	1.08	49.74
根表面积(cm ²) TRSA	46.19	40.96	48.89	28.66	1.05	39.82
平均根系直径(mm) RAD	0.63	23.16	0.58	16.76	0.92	18.46
根体积(cm ³) RV	0.70	39.90	0.71	28.86	1.01	40.19
根尖数RT	539.42	66.24	506.82	41.66	0.94	57.85
根分枝数RF	1 074.53	54.14	989.37	45.33	0.92	62.14
地上部干重(g) SDW	0.24 a	45.14	0.12 b	38.61	0.50	35.66
地下部干重(g) RDW	0.06 b	56.51	0.08 a	27.65	1.33	44.02
总干重(g) TDW	0.30 a	45.40	0.20 b	32.09	0.67	32.67
根冠比RSR	0.24 b	34.26	0.79 a	47.93	3.29	36.50

注:同行中不同小写字母表示差异达 $P<0.05$ 显著水平。
Notes: Different lowercase letters in same line indicate significant difference at $P<0.05$ level.

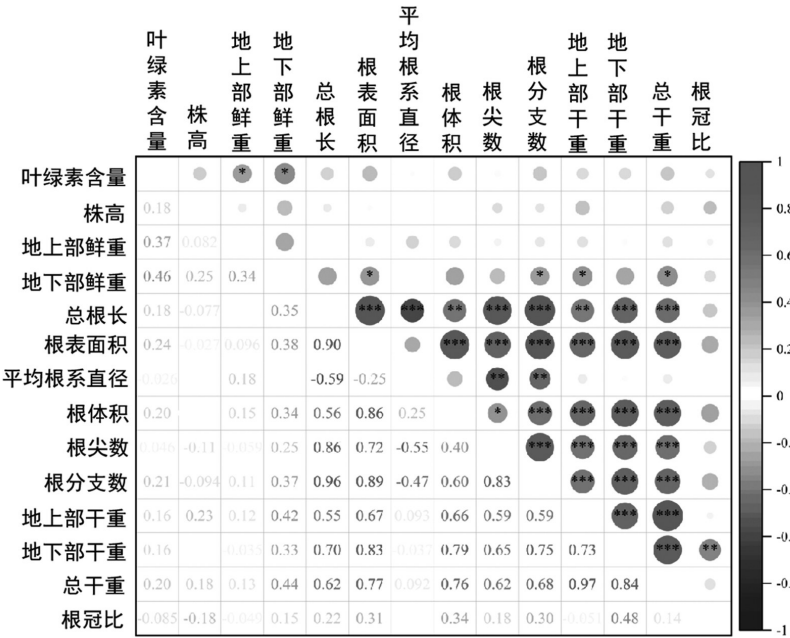


图1 玉米苗期耐低氮系数的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of low-nitrogen tolerance coefficient in maize seedling stage

主成分分析,根据特征值大于1的原则,将原来14个指标转化为4个相互独立的综合指标。

主成分分析结果表明,4个主成分的贡献率分别为46.529%、15.033%、11.116%和8.631%,累计贡献率81.309%,代表了玉米自交系耐低氮指标的大

部分信息。其中,第1主成分中特征向量较大的为总根长、根表面积、根体积、根尖数、根分枝数、地下部干重、地上部干重和总干重;第2主成分中特征向量较大的为地上部鲜重和平均根系直径;第3主成分中特征向量较大的为平均根系直径和根冠比。

表3 玉米杂交种耐低氮系数的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of the low-nitrogen resistance coefficient in maize inbred

指标 Index	主成分1 Component1	主成分2 Component2	主成分3 Component3	主成分4 Component4
叶绿素含量SPAD	0.268	0.451	-0.523	0.341
株高PH	0.041	0.458	-0.338	-0.474
地上部鲜重SFW	0.124	0.535	-0.329	0.443
地下部鲜重UFW	0.493	0.465	-0.310	0.235
总根长TRL	0.890	-0.355	-0.219	0.054
根表面积TRSA	0.953	-0.068	0.043	0.075
平均根系直径RAD	-0.230	0.731	0.596	0.004
根体积RV	0.797	0.282	0.373	0.072
根尖数RT	0.804	-0.420	-0.162	-0.105
根分枝数RF	0.914	-0.268	-0.140	0.112
地上部干重SDW	0.801	0.307	0.061	-0.428
地下部干重RDW	0.894	0.028	0.300	-0.026
总干重TDW	0.880	0.282	0.141	-0.279
根冠比RSR	0.311	-0.152	0.510	0.563
特征值	6.514	2.104	1.556	1.208
贡献率(%)	46.529	15.033	11.116	8.631
累计贡献率(%)	46.529	61.562	72.678	81.309

2.4 耐低氮及敏感型玉米自交系筛选

根据供试玉米杂交种的综合指标值和贡献率,通过模糊隶属函数法计算每个综合指标的数值,得出各性状权重,计算玉米杂交种耐低氮综合评价值(D)。结果表明,供试材料的D值范围0.217~0.764,平均数和标准差分别为0.441和0.154,变异系数为34.91%。将D值作为鉴定玉米杂交种耐低氮能力的标准,吉单30、吉单436、先玉335和吉单643这4份玉米杂交种耐低氮综合评价值(D)较高,说明这些玉米杂交种耐低氮能力较强;吉单535、吉单452、吉单432和吉单637等12份玉米杂交种耐低氮综合评价值(D)较低,说明这些玉米杂交种耐低氮能力较弱(表4)。

基于耐低氮综合评价值(D)对30份玉米杂交种进行聚类分析。结果表明,供试玉米杂交种被分为耐低氮型、中间型、低氮敏感型3个类群。D值均值分别为0.691、0.508、0.277,标准差分别为0.052、0.058、0.038,类群间D值存在显著差异。第Ⅰ类包括吉单30、吉单436和先玉335共4份玉米自交系,属于耐低氮型玉米杂交种;第Ⅱ类包括吉单423、吉单68和吉单462等14份玉米自交系,属于中间型玉米杂交种;第Ⅲ类包括吉单535、吉单452和吉单432等12份玉米自交系,属于低氮敏感型玉米杂交种(图2)。

2.5 回归分析耐低氮指标鉴定筛选

根据玉米杂交种耐低氮综合评价值(D)对各指标耐低氮系数(X)进行逐步回归分析,建立预测耐低氮数字模型,筛选与综合评价值紧密相关的指标,简化工作量。以耐低氮综合评价值为因变量,各指标的耐低氮系数为自变量,建立玉米杂交种苗期耐低氮能力鉴定的回归方程: $D=-0.284+0.143X_{\text{叶绿素含量}}-0.021X_{\text{株高}}+0.102X_{\text{地上部鲜重}}+0.044X_{\text{地下部鲜重}}+0.006X_{\text{根尖数}}+0.019X_{\text{根冠比}}$,得到的回归方程决定系数 $R^2=0.095$,F检验达极显著水平,说明其预测精度较高。根据回归方程可知,叶绿素含量、株高、地上部鲜重、地下部鲜重、根尖数和根冠比的耐低氮系数可作为鉴定玉米杂交种苗期耐低氮能力的主要指标。

3 结论与讨论

氮是植物生长发育的必需元素,低氮对植物的形态指标和生物量均有重要影响^[23]。本研究通过室内水培试验,系统地评估了30份玉米杂交种苗期低氮条件下的生长表现,并采用耐低氮系数作为分析工具,以减少外部环境因素干扰结果。研究结果表明,不同玉米杂交种对低氮胁迫的耐受性存在显著差异,验证了玉米品种间耐低氮能力的存在遗传多样性,进一步细化了不同品种间的苗期差异,特别是在苗期阶段。这种精细化的分析有助于早期筛选耐

表 4 耐低氮和低氮敏感型玉米杂交种各指标耐低氮胁迫指数及综合评价(D)分析
Table 4 Analysis of tolerance coefficient of different response maize inbred varieties under low-nitrogen stress

编号	品种	叶绿素含量	株高	地上部		地下部		总根长	根表面积		平均根系直径	总根体积		根尖数		根分枝数		地上部		总干重	根冠比	综合评价
				鲜重	SFW	鲜重	UFW		TRSA	TRL		TRSA	RV	RT	RF	干重	RDW	干重	SDW			
4	吉单30	1.02	0.72	0.61	1.79	2.07	1.98	0.97	1.90	1.98	2.18	0.90	2.83	1.27	3.16	0.764						
2	吉单436	0.82	0.44	0.46	1.84	3.47	2.26	0.62	1.46	3.29	3.62	0.75	3.00	1.04	3.84	0.711						
29	先玉335	0.81	0.64	0.37	0.85	2.08	2.26	0.96	2.37	1.18	2.07	0.40	2.89	0.73	5.90	0.664						
19	吉单643	0.68	0.58	0.54	1.44	1.07	1.43	1.34	1.92	1.07	0.97	0.83	2.42	1.05	3.03	0.626						
9	吉单426	0.94	1.44	0.66	2.09	0.96	0.79	0.82	0.65	0.55	0.55	0.33	0.82	0.43	2.49	0.329						
30	吉单535	0.78	0.43	0.95	0.38	0.84	0.84	1.00	0.84	0.78	0.85	0.30	0.84	0.43	2.79	0.327						
14	吉单452	0.79	0.84	0.62	0.87	0.90	0.90	0.98	0.87	0.44	0.53	0.37	1.00	0.55	2.70	0.325						
11	吉单432	0.91	0.64	0.44	0.84	0.82	0.81	0.98	0.79	0.52	0.57	0.31	1.00	0.50	3.22	0.317						
18	吉单637	0.74	0.87	0.24	0.68	0.87	0.81	0.94	0.74	1.04	0.52	0.42	1.41	0.56	3.45	0.287						
15	吉单461	0.74	0.69	0.33	0.92	0.54	0.62	1.15	0.72	0.54	0.44	0.46	0.93	0.58	2.03	0.280						
1	吉单17	0.74	0.78	0.27	0.73	1.14	0.92	0.81	0.74	1.38	0.63	0.45	1.22	0.56	2.72	0.276						
8	吉单83	0.70	0.64	0.34	0.75	0.78	0.69	0.89	0.63	0.72	0.79	0.41	1.08	0.58	2.60	0.257						
13	吉单20	0.88	0.59	0.60	1.22	0.47	0.45	0.97	0.44	0.26	0.40	0.26	0.58	0.34	2.27	0.241						
6	吉单63	0.56	0.58	0.33	0.75	1.69	1.00	0.60	0.59	1.84	1.11	0.40	1.09	0.51	2.83	0.240						
7	吉单649	0.76	0.64	0.17	0.57	0.51	0.54	1.05	0.58	0.44	0.46	0.40	1.08	0.56	2.63	0.235						
3	吉单27	0.72	0.66	0.18	0.55	0.82	0.69	0.81	0.58	1.23	0.68	0.31	0.97	0.40	3.78	0.217						

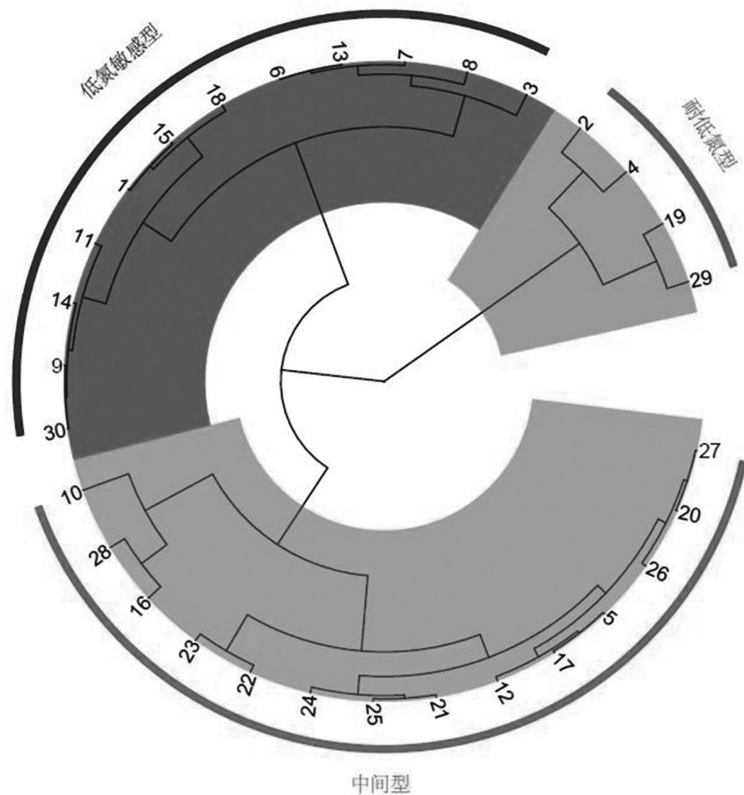


图2 玉米苗期耐低氮系数聚类图

Fig.2 Clustering diagram of low nitrogen resistance coefficient in maize seedling stage

表5 不同类群耐低氮系数及综合评价值

Table 5 Low nitrogen tolerance coefficients and comprehensive evaluation values of different taxa

类 群 Taxon	叶绿素含量 SPAD	株高 PH	地上部鲜重 SFW	地下部鲜重 UFW	总根长 TRL	根表面积 TRSA	平均根系直径 RAD	总根体积 RV
I	0.833	0.595	0.495	1.483 a	2.173 A	1.984 A	0.974	1.911 A
II	0.789	0.845	0.451	1.316 a	1.384 B	1.324 B	0.982	1.283 B
III	0.773	0.732	0.429	0.861 b	0.861 C	0.755 C	0.917	0.681 C

类 群 Taxon	根尖数 RT	根分枝数 RF	地下部干重 RDW	地上部干重 SDW	总干重 TDW	根冠比 RSR	综合评价值 D
I	1.880 a	2.210 a	0.719 A	2.785 a	1.022 A	3.984 a	0.672 A
II	1.435 a	1.249 b	0.606 A	2.110 b	0.848 B	3.777 a	0.453 B
III	0.811 b	0.628 c	0.368 B	1.002 c	0.500 C	2.793 ab	0.339 C

注:同列不同大写字母表示 $P<0.01$ 水平显著,不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平显著。

Note: Different capital letters in the same column indicate significant at $P<0.01$ level, different lowercase letters indicate significant at $P<0.05$ level.

低氮玉米品种,为育种工作提供更早的指示^[24-25]。

此外,与以往关注大田产量相关性状的研究相比,本研究选取叶绿素含量、株高、地上部鲜重、地下部鲜重等14个具体指标进行测定,为玉米耐低氮特性的综合评价提供了更为全面的视角^[26]。特别是采用耐低氮系数(指标低氮胁迫/指标正常氮)进行分析,不仅有效量化了各指标对低氮胁迫的响应程度,还显著提高了结果的可比性和可靠性。利用聚类分

析将30份玉米杂交种分为耐低氮型、中间型、低氮敏感型3个类群。玉米杂交种吉单30、吉单436和吉单643的耐低氮综合评价值(D)分别为0.764、0.711及0.626,其耐低氮系数高于或接近耐低氮品种先玉335的耐低氮综合评价值(0.664),不仅验证了研究方法的科学性和有效性,也为未来玉米耐低氮育种提供了新的种质资源。进一步分析采用耐低氮系数在低氮胁迫下表现出的遗传差异,认为可能

与根系发育特性、养分吸收利用效率以及代谢途径适应性等多方面因素有关。相较于低氮敏感型杂交种,耐低氮品种可能具有更发达的根系系统,以提高对介质中有限氮素的吸收能力;同时,耐低氮品种可能还具备更有效的氮素利用机制,如提高氮素同化酶的活性或优化氮素在植株体内的分配等。这些特性共同作用,使得耐低氮品种能够在低氮环境下保持较好的生长状态。此外,通过相关性分析、主成分分析和回归分析,筛选出叶绿素含量、株高、地上部鲜重、地下部鲜重、根尖数和根冠比等作为评估玉米杂交种苗期耐低氮能力的主要指标,这些指标的综合运用将有助于提高耐低氮品种筛选的准确性和效率。

在正常氮和低氮胁迫两种水平下,叶绿素含量、株高、地上部鲜重、地下部鲜重、根尖数和根冠比的耐低氮系数可作为鉴定玉米杂交种苗期耐低氮能力的主要指标。基于隶属函数值的主成分分析法从30份玉米杂交种中筛选出吉单30、吉单436和吉单643共3份耐低氮型杂交种,这些品种为玉米实际生产及耐低氮新品种选育提供了核心资源。

参考文献:

- [1] 米国华,陈范俊,吴秋平,等. 玉米高效吸收氮素的理想根构型[J]. 中国科学:生命科学,2010,40(12):1112-1116.
MI G H, CHEN F J, WU Q P, et al. Ideotype root architecture for efficient nitrogen acquisition by maize in intensive cropping systems[J]. Sci. China Life Sci., 2010, 40(12): 1112-1116. (in Chinese)
- [2] 王艳,米国华,陈范俊,等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J]. 生态学报,2003,23(2):297-302.
WANG Y, MI G H, CHEN F J, et al. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 297-302. (in Chinese)
- [3] 张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报,2007,24(6):687-694.
ZHANG F S, CUI Z L, WANG J Q, et al. Current status of soil and plant nutrient management in china and improvement strategies[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2007, 24(6): 687-694. (in Chinese)
- [4] GOOD A G, BEATTY P H. Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons[J]. Working Papers, 2011, 9(8): e1001124.
- [5] MULVANEY R L, KHAN S A, ELLSWORTH T R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(6): 2295-2314.
- [6] CHEN X, CUI Z, VITOUSEK P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. PNAS, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [7] 陈范俊,房增国,高强,等. 中国东华北部分地区玉米主推品种高产氮高效潜力分析[J]. 中国科学:生命科学,2013(4):342-350.
CHEN F J, FANG Z G, GAO Q, et al. Evaluation of the yield and nitrogen use efficiency of the dominant maize hybrids grown in North and Northeast China[J]. Sci. China Life Sci., 2013(4): 342-350. (in Chinese)
- [8] CHEN X, CUI Z, FAN M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-491.
- [9] RAO I M, MILES J W, BEEBE S E, et al. Root adaptations to soils with low fertility and aluminium toxicity. Anna[J]. Ls of Botany, 2016, 130(118): 593-605.
- [10] 王艳,米国华,陈范俊,等. 玉米自交系氮效率基因型差异的比较研究[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(4):361-365.
WANG Y, MI G H, CHEN F J, et al. Genotypic difference in nitrogen efficiency of five maize inbred lines as affected by nitrate levels [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(4): 361-365.
- [11] 刘建超,米国华,陈范俊. 两种供氮水平下玉米穗部性状的QTL定位[J]. 玉米科学,2011,19(2):17-20.
LIU J C, MI G H, CHEN F J. QTL mapping of ear traits in maize grown under two nitrogen applications[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 17-20. (in Chinese)
- [12] 马建华,孙毅,王玉国,等. 低磷胁迫对玉米自交系及其杂交种苗期生理特性的影响[J]. 山西农业科学,2014,42(3):220-222.
MA J H, SUN Y, WANG Y G, et al. Influence of low phosphorous stress on physiological characteristics of inbred line and cross-breeds seedlings of maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(3): 220-222. (in Chinese)
- [13] KURTYKA R, MAŁKOWSKI E, KITA A, et al. Effect of calcium and cadmium on growth and accumulation of cadmium, calcium, potassium and sodium in maize seedlings[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2008, 17(1): 51-56.
- [14] 刁锐琦,钱晓刚. 利用水培筛选玉米氮高效种质资源的研究[J]. 种子,2008,27(4):28-31.
DIAO R Q, QIAN X G. Studies on high nitrogen use efficiency maize resources in hydroponic[J]. Seed, 2008, 27(4): 28-31. (in Chinese)
- [15] SILVA I T, ABBARAJU H K R, FALLIS L P, et al. Mapping of QTL for N-metabolism related enzymes and metabolites in a maize testcross population grown in hydroponics: I. Leaves[J]. Theoretical & Applied Genetics, 2018, 52(130): 1453-1466.
- [16] SILVA I T, ABBARAJU H K R, FALLIS L P, et al. Biochemical and genetic analyses of N metabolism in maize testcross seedlings: 2. Roots[J]. Theoretical & Applied Genetics, 2018, 131(6): 1191-1205.
- [17] 李强,罗延宏,谭杰,等. 玉米杂交种苗期耐低氮指标的筛选与综合评价[J]. 中国生态农业学报,2014,22(10):1190-1199.
LI Q, LUO Y H, TAN J, et al. Indexes screening and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance of hybrid maize cultivars at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1190-1199. (in Chinese)
- [18] 李强,罗延宏,龙文靖,等. 低氮胁迫对不同耐低氮性玉米品种苗期生长和生理特性的影响[J]. 草业学报,2014,23(4):204-212.
LI Q, LUO Y H, LONG W J, et al. Effect of low nitrogen stress on different low nitrogen tolerance maize cultivars seedling stage growth and physiological characteristics[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(4): 204-212. (in Chinese)

- [19] 赵泽群,师赵康,王雯,等. 低氮胁迫下玉米幼苗氮素和蔗糖分配特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 783–796.
ZHAO Z Q, SHI Z K, WANG W, et al. Allocation of nitrogen and sucrose in maize seedling under low nitrogen stress[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4): 783–796. (in Chinese)
- [20] 刘文国. 吉单系列玉米品种的遗传基础及演变规律分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- [21] 李文娟,何萍,高强,等. 不同氮效率玉米干物质形成及氮素营养特性差异研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 51–57.
LI W J, HE P, GAO Q, et al. Dry matter formation and nitrogen uptake in two maize cultivars differing in nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 51–57. (in Chinese)
- [22] 吴雅薇,赵波,杜伦静,等. 低氮胁迫对不同氮效率玉米品种苗期叶片碳氮代谢的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(6): 74–83.
WU Y W, ZHAO B, DU L J, et al. Effects of low nitrogen stress on carbon–nitrogen metabolites and related enzyme activities in leaves of maize varieties with contrasting nitrogen efficiency at seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(6): 74–83. (in Chinese)
- [23] 刘宗华,卫晓轶,汤继华,等. 低氮胁迫对不同基因型玉米根部性状的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 50–53.
LIU Z H, WEI X Y, TANG J H, et al. Effects of low nitrogen stress on the root traits of different genotypes in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 50–53. (in Chinese)
- [24] 冯云超,余志江,霍仕平,等. 低氮对不同类型玉米品种籽粒产量与品质的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊): 381–387.
FENG Y C, YU Z J, HUO S P, et al. Effects of low nitrogen levels on yield and quality for the different types maize varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(S1): 381–387. (in Chinese)
- [25] 彭超颖,霍川,谢雯,等. 不同基因型玉米对低氮胁迫的反应与耐低氮品种性状选择[J]. 中国农学通报, 2024, 40(15): 19–28.
PENG C Y, HUO C, XIE W, et al. Response of different maize genotypes to low nitrogen stress and trait selection of low nitrogen tolerant varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(15): 19–28. (in Chinese)
- [26] 曹敏建,依莹,佟占昌,等. 耐低氮胁迫玉米的筛选与评价[J]. 玉米科学, 2000, 8(4): 64–69.
CAO M J, YI Y, TONG Z C, et al. Screening and evaluation of maize tolerant to low nitrogen stress[J]. Journal of Maize Sciences, 2000, 8(4): 64–69. (in Chinese)

(责任编辑: 朴红梅)