

# 玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选

郑云霄, 刘文斯, 赵永锋, 贾晓艳, 祝丽英, 黄亚群, 陈景堂, 郭晋杰  
(河北农业大学农学院 / 国家玉米改良中心河北分中心 / 河北省作物种质资源实验室, 保定 071001)

**摘要:** 倒伏是影响玉米高产稳产的主要问题之一。本研究以 181 份玉米自交系为试验材料, 对 22 个与抗倒伏性紧密相关的性状进行测定, 采用相关性分析、主成分分析、聚类分析、逐步判别分析和岭回归分析等方法, 综合评价玉米自交系的抗倒伏性。相关性分析的结果表明, 22 个性状间存在不同程度的相关性。主成分分析的结果表明, 前 7 个主成分代表了 181 份玉米自交系的 22 个性状 74.460% 的信息, 其贡献率分别为 25.700%、12.369%、9.782%、8.159%、7.782%、5.490% 和 5.177%。聚类分析的结果表明, 当遗传距离为 3.5 时, 181 份玉米自交系被聚为 4 大类, 第 I 类群有 35 份自交系、第 II 类群有 47 份自交系、第 III 类群有 49 份自交系、第 IV 类群有 50 份自交系。逐步判别分析的结果表明, 175 份玉米自交系被正确判别, 判对概率为 96.69%; 6 份玉米自交系被误判, 误判率为 3.31%, 这说明聚类分析的结果是准确可靠的。进一步利用岭回归方法筛选出半纤维素含量、穿刺强度、第 3 节间长度、第 3 节间直径、穗位高和维管束总面积 6 个性状, 建立了可靠的玉米自交系抗倒伏性评价回归模型。在 181 份玉米自交系中, 以 AHU24、e220、7026B 等 35 份自交系的抗倒伏能力最强。本研究结果为玉米抗倒伏种质资源的遗传改良和组配抗倒伏杂交种提供借鉴。

**关键词:** 玉米; 抗倒伏性; 主成分分析; 聚类分析; 岭回归; 综合评价

## Evaluation of Lodging Resistance and Selection of Identification Indexes of Maize Germplasm Resources

ZHENG Yun-xiao, LIU Wen-si, ZHAO Yong-feng, JIA Xiao-yan, ZHU Li-ying,  
HUANG Ya-qun, CHEN Jing-tang, GUO Jin-jie

(College of Agronomy, Hebei Agricultural University/Hebei Sub-center of National Maize Improvement Center/  
Key Laboratory for Crop Germplasm Resources of Hebei, Baoding 071001)

**Abstract:** Lodging is one of the main problems affecting the maize production and extension. In this study, 181 maize inbred lines were used for determining 22 characters associating to lodging resistance. Statistical analysis using the correlation analysis, the principal component analysis, the cluster analysis, the stepwise discriminate analysis and the ridge regression analysis was deployed for data interpretation. The results of the correlation analysis showed that 22 characters existed in varying degrees of correlation. The first seven principal components explained 74.460% of the phenotypic variation with the contribution rates of 25.700%, 12.369%, 9.782%, 8.159%, 7.782%, 5.490% and 5.177%. Four categories were clustered in the 181 maize inbred lines at a genetic distance of 3.5. Among them, the first class I has 35 inbred lines, the class II has 47 inbred lines, the class III has 49 inbred lines, the class IV has 50 inbred lines. The result of stepwise discriminant analysis showed that 175 maize inbred lines were correctly discriminated and the identification rate was 96.69%. Six maize inbred lines were incorrectly discriminated and the identification rate was 3.31%, which means that the result of cluster analysis is accurate and reliable. The hemicellulose content, rind penetrometer strength, third internode length, third internode diameter, ear height and area of total vascular bundles were selected and the regression model of

收稿日期: 2019-04-18 修回日期: 2019-05-16 网络出版日期: 2019-06-20

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190418001>

第一作者研究方向为玉米遗传育种, E-mail: zyx406939067@163.com

通信作者: 郭晋杰, 研究方向为玉米遗传育种, E-mail: guojinjie512@163.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0300501)

Foundation project: National Key R&D Program of China (2018YFD0300501)

lodging resistance of maize inbred line was established by using the ridge regression method. 35 inbred lines, such as AHU 24, e220 and 7026B, showed the highest lodging resistance. Thus, the results provided a reference of the maize lodging resistant germplasm resources, which become valuable in selection of elite germplasm resources in breeding for the lodging resistance hybrids.

**Key words:** maize; lodging resistance; principal component analysis; cluster analysis; ridge regression; comprehensive evaluation

玉米(*Zea mays* L.)已成为全世界重要的集粮、经、饲于一体的兼用作物,在粮食生产中起着重要的作用<sup>[1]</sup>。然而,倒伏是影响玉米正常生长发育及产量提高的主要因素,在玉米的整个生育期均可发生<sup>[2-3]</sup>。据统计,每年由于倒伏造成的玉米产量损失为5%~25%,而且每增加1%的倒伏就会引起108 kg/hm<sup>2</sup>的减产<sup>[4-5]</sup>,因此应对玉米的倒伏现象高度重视。有研究表明,倒伏分为根倒和茎倒(折)两种类型,而茎折对玉米的产量和品质造成的损失更大,因此国内外学者主要研究玉米茎秆的抗倒伏能力。

玉米抗倒伏的机制非常复杂,许多学者在玉米倒伏形成原因、机理以及抗倒伏鉴定指标方面做了大量的工作。王元东等<sup>[6]</sup>研究认为玉米雄穗大小与抗倒伏能力相关,减小雄穗会提高玉米抗倒性。薛金涛等<sup>[7]</sup>研究表明玉米茎秆的拉弯强度和表皮穿刺强度是衡量玉米茎秆机械性能的重要指标。Fu等<sup>[8]</sup>对玉米抗倒伏能力进行研究,结果表明,玉米茎秆化学成分中,纤维素、木质素含量与茎秆机械强度呈正相关,是影响植株倒伏的重要因素。穆春华等<sup>[9]</sup>在2个不同时期对维管束相关性状与抗倒伏性状进行了相关分析,结果表明两个测定时期研究结果一致,均表现为维管束数目与抗倒伏之间呈极显著负相关关系,而单个维管束面积与抗倒伏之间呈极显著正相关关系。可见,影响玉米自交系抗倒伏能力的性状有很多,且各项性状相关性不同。本研究以181份玉米自交系为试验材料,调查了22个与抗倒伏性紧密相关的性状,对性状进行多元统计分析,建立一套准确评价玉米自交系抗倒性的数学评价模型和筛选鉴定指标,以期对玉米抗倒伏种质资源的鉴定以及遗传改良提供参考,为玉米抗倒伏品种的选育提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为遗传多样性丰富、来源广泛的181份玉米自交系,由河北农业大学提供。

### 1.2 试验设计

2016年5月7日和2017年5月9日将材料种植于河北农业大学保定试验站。试验采用完全随机区组设计,2次重复,每个小区种植2行,行长3 m,行距0.6 m,密度为75000株/hm<sup>2</sup>。田间水、肥常规管理。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 茎秆质量性状测定** (1)抗推力:田间玉米授粉后1周,选取每个材料中除边株以外的长势一致的3个植株,参考任安然等<sup>[10]</sup>的方法,将日本的DIK-7401型推力测定仪放于穗位节中部,垂直用力,使玉米植株倾斜45°,此时推力测定仪显示的数值即为抗推力。

(2)穿刺强度和弯折强度:玉米散粉后10 d,选取每个株行中2株生长一致的代表植株,参考武丽芬<sup>[11]</sup>的方法,用YYD-1型数字式植株茎秆强度测定仪进行茎秆穿刺强度和茎秆弯折强度测定。将穿刺针对准基部第3、4节间的中间部位后缓慢匀速地插入,穿透茎秆表皮的受力最大值即为茎秆穿刺强度。同样,茎秆弯折强度也是在茎秆中部匀速下压,注意用力不要过猛,重复2次,记录数值(分辨率:0.01 N,最大负荷:500 N,精度:±0.5%)。

**1.3.2 茎秆纤维组分测定** 玉米散粉后10 d,选取每个株行中2株生长一致的代表植株,截取基部第3和第4茎节,立即放入105℃的烘箱中,杀青30 min,然后调至65℃烘干至恒重,使用高速多功能粉碎机粉碎,过40目筛后,研磨样品在自封袋中密封,放在室温下保存。采用武丽芬<sup>[11]</sup>建立的纤维品质性状NIRS模型,将模型安装到DA7200近红外分析仪上,然后将研磨的样品置于直径为75 mm的旋转样品池中,表面用尺子将样品刮平。每个样品分别重复装样2次,每次重复扫描2次。最后得到纤维素含量、半纤维素含量和木质素含量的表型数据。

**1.3.3 茎秆形态学性状测定** (1)第3、4节间长度和直径:在室内用游标卡尺进行测定,长度是对玉米植株基部向上数第3节、第4节的节间长度进行

测量,直径以测量每个节间的中部为准。(2)株高:玉米成熟期,测量主茎自地面至雄穗顶部的高度。(3)穗位高:玉米成熟期,测量主茎自地面至最上部有效雌穗着生节的高度。(4)气生根层数:玉米成熟期,植株地上根层数即为气生根层数。

**1.3.4 茎秆维管束结构测定** 首先配置浓度为5%的间苯三酚溶液,静置1d。然后,以进行茎秆抗推力测定的植株为研究材料,截取其雄轴中部进行徒手切片,厚度约为0.2~0.4mm,并用事先配置好的间苯三酚溶液和浓盐酸进行染色<sup>[12]</sup>,于Zeiss Axioskop 40 Germany型光学显微镜下观察维管束显微结构并完成拍照,用Zen(blue edition)2012图片处理软件进行维管束相关性显微结构测定。通常而言,小维管束位于组织边缘部分的1~2层,大维管束位于组织内部。大、小维管束的面积以及茎秆横截面积以近似椭圆面积的计算公式“ $S=\pi ab/4$ ”计算(a为椭圆的长轴,b为椭圆的短轴)<sup>[13]</sup>。

#### 1.4 统计分析

**1.4.1 数据记载** 观测记载各项性状:纤维素含量记为 $X_1$ ,半纤维素含量记为 $X_2$ ,木质素含量记为 $X_3$ ,穿刺强度记为 $X_4$ ,弯折强度记为 $X_5$ ,第3节间长度记为 $X_6$ ,第3节间直径记为 $X_7$ ,第4节间长度记为 $X_8$ ,第4节间直径记为 $X_9$ ,株高记为 $X_{10}$ ,穗位高记为 $X_{11}$ ,气生根层数记为 $X_{12}$ ,抗推力记为 $X_{13}$ ,小维管束数目记为 $X_{14}$ ,大维管束数目记为 $X_{15}$ ,总维管束数目记为 $X_{16}$ ,单个小维管束平均面积记为 $X_{17}$ ,小维管束总面积记为 $X_{18}$ ,单个大维管束平均面积记为 $X_{19}$ ,大维管束总面积记为 $X_{20}$ ,维管束总面积记为 $X_{21}$ ,横截面积记为 $X_{22}$ 。

**1.4.2 玉米自交系各综合性状的隶属函数值**  

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \times 100\%, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, $X_j$ 表示第j个综合性状, $U(X_j)$ 表示第j个综合性状的隶属函数值, $X_{\min}$ 与 $X_{\max}$ 分别表示第j个综合性状的最小值和最大值<sup>[14]</sup>。

**1.4.3 各综合性状的权重**  $W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2)$

式中, $W_j$ 表示第j个综合性状在所有综合性状中的重要程度即权重; $P_j$ 代表经主成分分析所得各玉米自交系第j个综合性状的贡献率。

**1.4.4 各玉米自交系的抗倒伏能力的大小**  

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

式中,D为各玉米自交系的抗倒伏性综合评

价值<sup>[15]</sup>。

利用Microsoft Excel 2010软件计算181份玉米自交系各性状2年2个重复下的观测平均值,为消除不同量纲的影响,首先对观测平均值采用Z-score法进行标准化<sup>[16]</sup>,然后用R平台的corrplot软件包进行相关分析,用SPSS 18.0软件进行各性状的主成分分析、聚类分析、逐步判别分析和岭回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各性状的相关性分析

通过对22个性状进行相关性分析(图1),各抗倒伏性状间存在相关性,颜色越深代表2个性状之间的相关性越显著。在抗倒伏机制中,各性状起的作用不尽相同,但性状间表现为显著或极显著相关,说明不同性状反映的信息有重叠现象,从而使得它们所产生的功能发生部分重合,对抗倒伏性评价产生影响。为弥补利用少数几个性状评价抗倒伏性的不足,需在此基础上利用主成分分析、聚类分析和岭回归分析对玉米自交系进行综合评价。

### 2.2 主成分分析

利用SPSS 18.0软件对22个抗倒伏性相关性状进行主成分分析,计算各主成分的特征向量和贡献率。由表1可知,7个主成分的累计贡献率已达74.460%,而一般认为累计贡献率达70%以上即为比较满意<sup>[17]</sup>,因此可以用这7个主成分对抗倒伏性进行综合评价。将原来22个具有相关性的性状转换为7个新的综合性状,这些综合性状相互独立,能代表原来的绝大部分信息。

决定第1主成分大小的性状主要是维管束总面积、大维管束总面积、横截面积、小维管束总面积、总维管束数目5个性状分量,主成分1相当于5.654个原始性状的作用,它可反映原始数据信息量的25.700%。这5个性状是关于维管束结构的,属于茎秆解剖性状。

决定第2主成分大小的性状主要是单个小维管束平均面积和株高2个性状分量,主成分2相当于2.721个原始性状的作用,可说明整个原始数据标准差异的12.369%,单个小维管束平均面积属于茎秆解剖性状,株高则属于茎秆形态学性状。

决定第3主成分大小的性状主要是第3节间直径和第4节间直径2个性状分量,主成分3相当于2.152个原始性状的作用,可反映全部信息量的9.782%,属于茎秆形态学性状。

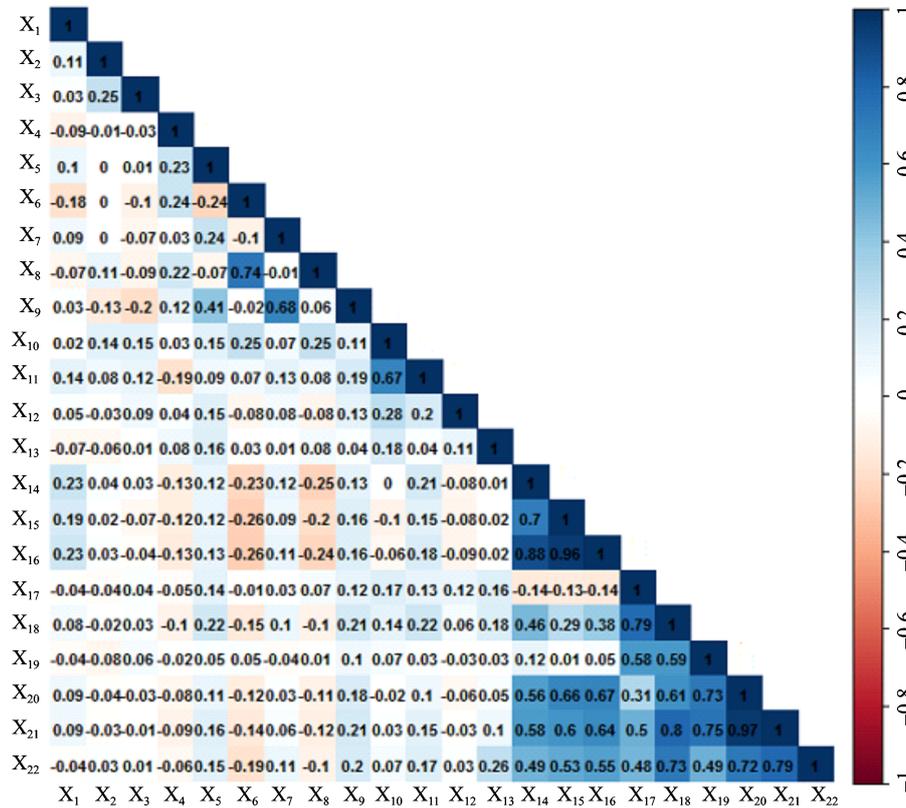


图 1 各性状间的表型相关系数  
Fig.1 Phenotypic correlation coefficient between traits

表 1 各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 1 Eigenvectors and percentages of accumulated contribution of principal components

性状 Trait	主成分 Principal component						
	1	2	3	4	5	6	7
纤维素含量 CC	0.172	-0.236	0.252	0.151	-0.158	-0.100	0.328
半纤维素含量 HC	-0.014	-0.016	0.107	0.446	-0.132	0.301	0.563
木质素含量 LC	0.003	0.054	-0.010	0.365	-0.475	0.344	0.294
穿刺强度 RPS	-0.143	0.223	0.123	-0.235	0.357	0.621	0.121
弯折强度 BS	0.257	0.125	0.469	-0.378	-0.122	0.389	0.107
第 3 节间长度 TIL	-0.285	0.487	-0.029	0.340	0.640	-0.046	-0.005
第 3 节间直径 TID	0.177	0.047	0.610	-0.406	0.097	-0.229	0.278
第 4 节间长度 FIL	-0.226	0.512	0.081	0.297	0.607	0.032	0.125
第 4 节间直径 FID	0.303	0.184	0.602	-0.486	0.223	-0.191	0.140
株高 PH	0.071	0.514	0.495	0.486	-0.122	-0.043	-0.162
穗位高 EH	0.255	0.257	0.526	0.502	-0.163	-0.306	-0.151
气生根层数 NGRL	0.015	0.236	0.360	-0.033	-0.400	0.079	-0.282
抗推力 PR	0.143	0.276	0.109	-0.042	-0.031	0.455	-0.532
小维管束数目 NSVB	0.720	-0.428	0.155	0.214	0.130	0.056	-0.038
大维管束数目 NLVB	0.717	-0.504	0.135	0.152	0.241	0.079	-0.108
总维管束数目 NTVB	0.776	-0.513	0.154	0.188	0.215	0.075	-0.087
单个小维管束平均面积 ASVB	0.419	0.692	-0.253	-0.171	-0.279	-0.101	0.080
小维管束总面积 TASVB	0.804	0.370	-0.127	-0.059	-0.164	-0.037	0.029
单个大维管束平均面积 ALVB	0.571	0.488	-0.428	-0.086	-0.026	-0.097	0.186
大维管束总面积 TALVB	0.897	0.023	-0.223	0.032	0.173	-0.001	0.055
维管束总面积 TAVB	0.949	0.138	-0.213	0.005	0.079	-0.013	0.051

表 1(续)

性状 Trait	主成分 Principal component						
	1	2	3	4	5	6	7
横截面积 CSA	0.839	0.162	-0.106	-0.006	0.006	0.122	-0.098
特征值 EV	5.654	2.721	2.152	1.795	1.712	1.208	1.139
贡献率(%) CR	25.700	12.369	9.782	8.159	7.782	5.490	5.177
累计贡献率(%) CCR	25.700	38.069	47.851	56.010	63.792	69.283	74.460

CC: Cellulose content, HC: Hemicellulose content, LC: Lignin content, RPS: Rind penetromrter strength, BS: Bending strength, TIL: Third intemode length, TID: Third intemode diameter, FIL: Fourth intemode length, FID: Fourth intemode diameter, PH: Plant height, EH: Ear height, NGRL: Number of gas rooting layer, PR: Pushing resistance, NSVB: Number of small vascular bundle, NLVB: Number of large vascular bundle, NTVB: Number of total vascular bundle, ASVB: Average area of single small vascular bundle, TASVB: Total area of small vascular bundle, ALVB: Average area of single large vascular bundle, TALVB: Total area of large vascular bundles, TAVB: Total area of vascular bundles, CSA: Cross sectional area, EV: Eigen value, CR: Contribution rate, CCR: Cumulative contribution rate. The same as below

决定第 4 主成分大小的性状主要是穗位高 1 个性状分量,主成分 4 相当于 1.795 个原始性状的作用,它可反映原始数据信息量的 8.159%,同样属于茎秆形态学性状。

决定第 5 主成分大小的性状主要是第 3 节间长度 1 个性状分量,主成分 5 相当于 1.712 个原始性状的作用,可说明整个原始数据标准差异的 7.782%,属于茎秆形态学性状。

决定第 6 主成分大小的性状主要是穿刺强度 1 个性状分量,主成分 6 相当于 1.208 个原始性状的作用,可反映全部信息量的 5.490%,属于茎秆质量性状。

决定第 7 主成分大小的性状主要是半纤维素 1 个性状分量,主成分 7 相当于 1.139 个原始性状的作用,它可反映原始数据信息量的 5.177%,属于茎秆纤维组分。

综合分析上述结果,维管束总面积、单个小维管束平均面积、第 3 节间直径、穗位高、第 3 节间长度、穿刺强度以及半纤维素可作为玉米自交系抗倒伏能力的鉴定指标。

### 2.3 聚类分析

根据公式(1)(2)(3)可以计算出各玉米自交系综合抗倒伏性评价值 D 值,以欧氏平方距离为遗传距离,采用离差平方和法<sup>[18]</sup>对 D 值进行聚类分析。当遗传距离取 3.5 时,可将 181 份自交系聚为 4 大类。第 I 类群有 35 份自交系,分别是 AHU24、e220、7026B 等,抗倒伏能力最强,属于高度抗倒类型;第 II 类群有 47 份自交系,分别是齐 205、68139、D33A 等,抗倒伏能力较强,属于抗倒类型;第 III 类群有 49 份自交系,分别是 20762、掖 488、Max 等,抗倒伏能力较弱,属于易倒类型;第 IV 类群有 50 份自交系,分别是 D20、S8324、PHM10 等,抗倒伏能力最弱,属于高度易倒类型(表 2)。

### 2.4 判别分析

通过多类逐步判别分析对聚类分析的结果进行验证。依据玉米自交系 7 个主成分的得分和聚类结果,计算 Fisher 判别函数( $S_i$ )系数,建立判别函数。

$$S_1 = -12.777 + 5.279Y_1 + 3.668Y_2 + 2.045Y_3 + 2.896Y_4 + 2.533Y_5 + 1.240Y_6 + 2.450Y_7$$

$$S_2 = -2.626 + 1.765Y_1 + 1.120Y_2 + 0.672Y_3 + 1.002Y_4 + 0.750Y_5 + 0.324Y_6 + 0.783Y_7$$

$$S_3 = -1.874 - 1.097Y_1 - 0.712Y_2 - 0.290Y_3 - 0.603Y_4 - 0.501Y_5 - 0.193Y_6 - 0.477Y_7$$

$$S_4 = -8.865 - 4.280Y_1 - 2.922Y_2 - 1.779Y_3 - 2.378Y_4 - 1.986Y_5 - 0.984Y_6 - 1.983Y_7$$

基于判别规则:如果  $S_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 值最大,则自交系归属于第  $i$  类<sup>[19]</sup>,对 181 份玉米自交系重新归类,发现原来聚类分析所得第 I 类群的 35 份玉米自交系,据判别分析重新分类后有 31 份仍被分为第 I 类,但有 4 份被分为第 II 类;原来聚类分析所得第 II 类群的 47 份玉米自交系,据判别分析重新分类后有 46 份仍被分为第 II 类,但有 1 份被分为第 III 类;原来聚类分析所得第 III 类群的 49 份玉米自交系,据判别分析重新分类后有 48 份仍被分为第 III 类,但有 1 份被分为第 II 类;原来聚类分析所得第 IV 类群的 50 份玉米自交系,据判别分析重新分类后维持不变。综合来看,与聚类分析结果相比,175 份玉米自交系被正确判别,判对概率为 96.69%;6 份玉米自交系被误判,误判率为 3.31%,表明聚类分析结果是准确可靠的。

### 2.5 回归模型建立及验证

为筛选测定抗倒伏综合能力的性状,建立一套准确评价玉米自交系抗倒伏性的数学评价模型,把抗倒伏性综合评价值(D 值)作为因变量,把决定主成分的 7 个主要性状作为自变量进行岭回归分析,建

表 2 181 份玉米自交系倒伏性分类

Table 2 Classification of lodging resistance in 181 maize inbred lines

类群 Group	份数 Number	D 值 D value	自交系名称 Inbred lines
I	35	0.533~0.696	AHU24、e220、7026B、E200、Sg1533、WN11H、R1656、W222、A801、WIL901、黄昌 b、南 21-3、丹 9046、P007、S22、F7584、XF77、68202、M1016、L061F、邢 230、AHU25、SC24-1、L135、4722、68122、Los-6、y9961、冲 72、W9706、LD61、Va26、农大 364 ♂、掖 515、武 109
II	47	0.469~0.533	AHU17、齐 205、68139、D33A、Y223、吉 444、926、WIL900、吉 846、DF32、18-599、SC30-1、40554(秀清 73-1 ♂)、7236、陕 89、6M502、DM101B、2FACC、R017、AHU3、17564、海 9-21、郑 32、AHU5、旅 28、757、DH65232、B68、W172、BS110、CR1HT、K12、XF27、B100、9706、A619、E600、R31、丹 598、DH149、豫 87-1、R548、W966、NQ508、P39、浚 926、98F1
III	49	0.395~0.469	20762、掖 488、Max、SC11-1、自 330、2369、P138、3335、M017、丹黄 02、M3、D881、浚 248、D886、AHU22、AHU6、7903E、928、AHU26、e 群 3、Ms71、B4、T24、掖 8112、永研 4 母本、C521、唐四平头、R136、丹 599、433-7、C8605-2、L473、浚 928、P25、GY3、齐 319、B8、M7、鉴 1495a、DF27、M14、PHT22、户 803、D1049、d140、长 72、郑 58、802、7922
IV	50	0.279~0.395	D20、S8324、PHM10、文 黄 31413、L127、LH194、AHU4、9711、La2-4、NS501、1145、XOP2、ys06、468-3、FAP1360A、宋 1145、AHU19、黄野四 3、WIL500、1313、Z31B、S0082、A554、方引、沈 5005、DF20、PHJ33、IB014、掖 832、AHU12、6103、CN104、207、3H2、H21、XF197、W64a、AHU18、N42、9058、AHU13、1614、e 群 4、AHU7、E601、KP3130、XF134、D1139、BM、PH6WC

立回归方程,结果发现单个小维管束平均面积的回归系数的显著水平  $\alpha=0.109>0.05$ ,可以从方程中剔除,因此重新对其他 6 个性状进行岭回归分析。选用未标准化的系数,最终建立回归方程  $D=0.460+0.017X_2+0.016X_4+0.020X_6+0.014X_7+0.027X_{11}+0.070X_{21}$ ,方程决定系数  $R^2=0.924$ ,调整后的  $R^2=0.921$ , $F=352.608$ , $P=0.000<0.01$ ,此方程达到极显著水平,表明半纤维素、穿刺强度、第 3 节间长度、第 3 节间直径、穗位高和维管束总面积与抗倒伏性综合评价(D 值)存在极显著的线性关系。把经过标准化

后的 6 个性状的数据代入方程,得到回归值,计算原始 D 值与回归值之间的均方根误差  $RMSE=0.023$ ,原始值与回归值非常吻合,表明本研究所建立的回归方程具有较高的精度,在实际生产中可用来确定玉米自交系的抗倒伏能力。

## 2.6 抗倒伏玉米自交系间特征比较

综合聚类分析划分出的 4 类玉米自交系及回归结果,比较 6 个重要性状在玉米自交系不同抗倒伏类群间的特征,进一步评价玉米自交系的抗倒伏能力(表 3)。

表 3 聚类结果中各抗倒类群表现特征

Table 3 Description of each group in hierarchical cluster result

类群 Group	各鉴定指标测定的平均值 Average of primary value					
	半纤维素 (%) HC	穿刺强度 (N/mm <sup>2</sup> ) RPS	第 3 节间长 度 (mm) TIL	第 3 节间直径 (mm) TID	穗位高 (cm) EH	维管束总面积 (mm <sup>2</sup> ) TAVB
I	18.329	63.056	88.641	17.994	83.007	4.454
II	17.493	57.147	81.305	17.725	75.351	3.590
III	17.982	59.231	79.383	17.205	71.867	2.769
IV	16.122	57.630	79.769	16.334	62.635	2.213

第 I 类群属于高度抗倒类型,玉米自交系中半纤维素、穿刺强度、第 3 节间长度、第 3 节间直径、穗位高和维管束总面积的数值均高于其他类别。

第 II 类群属于抗倒类型,玉米自交系中第 3 节间长度、第 3 节间直径、穗位高和维管束总面积的数

值均高于第 III 类群和第 IV 类群,半纤维素、穿刺强度的数值则低于第 III 类群。

第 III 类群属于易倒类型,玉米自交系中半纤维素、穿刺强度、第 3 节间直径、穗位高和维管束总面积的数值均高于第 IV 类群,第 3 节间长度的数值则

低于第Ⅳ类群。

第Ⅳ类群属于高度易倒类型,玉米自交系中半纤维素、第3节间直径、穗位高和维管束总面积的数值均低于其他类别,穿刺强度的数值则高于第Ⅱ类群,第3节间长度的数值则高于第Ⅲ类群。

### 3 讨论

#### 3.1 玉米抗倒伏相关性状的研究

玉米的抗倒伏性是一个复杂的综合性状,与多种因素有关。丰光等<sup>[20]</sup>研究发现茎秆穿刺强度是数量性状,与玉米倒伏存在显著的正相关关系。冯海娟等<sup>[21]</sup>利用不同耐密型品种农大108和郑单958研究了种植密度对玉米茎秆维管束结构的影响。结果表明,随着种植密度的增大,两品种基部茎节的横截面积、大小维管束数目和面积均显著减小。王永学等<sup>[22]</sup>的研究结果显示,倒伏率与茎粗呈负相关,与株高、穗位高、节间长、叶夹角呈正相关。Ching等<sup>[23]</sup>和Appenzeller等<sup>[24]</sup>研究发现,木质素含量和纤维素含量降低会导致植株机械强度降低。前人对玉米的抗倒伏性进行了分级和评价。王耘刘等<sup>[25]</sup>根据倒伏率不同将玉米自交系分为高度抗倒、一般抗倒、中倒、较易倒、易倒和极易倒6种类型。但这些研究仅是根据其中的一两个性状进行分级,不能充分反映玉米的抗倒伏能力。

通过大量研究发现,玉米倒伏与植株的质量性状、纤维组分、形态学结构和维管束结构密切相关,选择其中的少数几项性状进行研究具有局限性,不利于整体把握玉米自交系抗倒伏的机理。通过对国内外前人相关研究的广泛查阅,本研究对导致玉米茎秆倒伏的22个性状进行研究,涵盖了植株的质量性状、纤维组分、形态学结构和维管束结构各个层面,对抗倒伏性的机制加以认识和分析,利用数据更加全面,有利于科学判断玉米抗倒伏能力。

#### 3.2 玉米抗倒伏性评价方法的确定

评价作物品种的方法有很多,方法不同,其数学原理也不同。主成分分析是在损失较少信息的前提下,将多个具有相关性的差异不明显的指标转化成一个或几个独立的综合指标的多元统计方法<sup>[26-27]</sup>。聚类分析是一种对种质资源进行分类和对亲缘关系进行研究的多元统计方法<sup>[28]</sup>。逐步判别分析是通过已知样品的分类信息建立判别函数可以对聚类分析结果进行验证的多元统计方法<sup>[29]</sup>。岭回归分析是在存在共线性问题时采用的回归方法。近几年来,同时利用主成分分析和聚类分析研究小麦<sup>[30]</sup>、

高粱<sup>[31]</sup>、水稻<sup>[32]</sup>等作物的报道较多,在玉米上也有报道。郑崇兰等<sup>[33]</sup>选取四川省内外12个夏玉米品种,根据14个农艺性状进行主成分与聚类分析,通过主成分分析提取4个主成分,提供了92.204%的信息量,利用4个主成分因子进行系统聚类,将12个玉米品种分为4大类。Aktar等<sup>[34]</sup>对49种杂交玉米基因型进行了盆栽试验以鉴定耐旱玉米基因型,通过主成分分析,将10个抗旱相关性状转化为累计贡献率为82.0%的前4个主成分因子,通过聚类分析,将49种基因型划分为6个主要类群。董昕等<sup>[35]</sup>基于31个性状的聚类分析结果将重庆玉米地方品种划分为早熟小粒型、早熟中秆硬粒型和中熟高秆型3大类群。

本研究对玉米自交系的22个抗倒伏相关性状进行研究,经过主成分分析归属于7个主成分,对性状进行有效的降维,其累计贡献率为74.460%,包含了22个性状的主要信息。在主成分分析基础上,利用7个主成分值对玉米进行聚类分析,将181份玉米自交系根据抗倒伏能力强弱分为4个类群。用判别分析法对聚类结果进行验证,增加了聚类分析结果的真实可靠性。

#### 3.3 玉米的遗传改良和品种选育

当前,随着人们生活水平的提高,改良和选育高产、优质玉米成为玉米育种中的主要问题,可以促进玉米产业发展。而倒伏影响玉米的生长发育和产量提高,因此在玉米的遗传改良和品种选育方面,应着重考虑其抗倒伏性。本研究选取与抗倒伏性紧密相关的22个性状进行鉴定,从中发现半纤维素、穿刺强度、第3节间长度、第3节间直径、穗位高和维管束总面积是影响茎秆抗倒伏能力的重要性状,在改良和选育方面应重点考虑。由资料可知,半纤维素的热分解温度低于纤维素和木质素的热分解温度<sup>[36]</sup>,因此与纤维素和木质素相比,半纤维素的稳定性较差,易分解,而本文研究表明半纤维素比纤维素和木质素更能用于评价植株的抗倒性,具体原因有待下一步验证。在181份玉米自交系中,筛选出以AHU24、e220、7026B等为主的35份高度抗倒的自交系,应加强其在田间的种植,同时也为组配抗倒伏杂交种提供理论依据。结合刘洋<sup>[37]</sup>和刘志斋等<sup>[38]</sup>的群体结构分析结果,35份高度抗倒的自交系中,有31.4%的自交系来自于旅大红骨群,有25.7%的自交系来自于Reid亚群,有17.1%的自交系来自于P群,有14.3%的自交系来自于兰卡斯特群,有11.5%的自交系来自于塘四平头群,因此在抗

倒伏育种中应重视利用旅大红骨和 Reid 杂种优势群的种质资源。本研究侧重研究玉米种质资源茎秆的抗倒伏能力,为玉米杂交种的组配提供借鉴。本实验室的后续工作会在本研究的研究基础上开展单交种茎秆抗倒的研究,对单交种的抗倒伏能力进行评价。

#### 参考文献

- [1] 刘志娟,杨晓光,吕硕,王静, LIN XiaoMao. 东北三省春玉米产量差时空分布特征. 中国农业科学, 2017, 50(9): 1606-1616  
Liu Z J, Yang X G, Lv S, Wang J, Lin X M. Spatial-temporal variations of yield gaps of spring maize in northeast China. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(9): 1606-1616
- [2] 程富丽,杜雄,刘梦星,靳小利,崔彦宏. 玉米倒伏及其对产量的影响. 玉米科学, 2011, 19(1): 105-108  
Cheng F L, Du X, Liu M X, Jin X L, Cui Y H. Lodging of summer maize and the effects on grain yield. Maize Sciences, 2011, 19(1): 105-108
- [3] 薛军,王群,李璐璐,张万旭,谢瑞芝,王克如,明博,侯鹏,李少昆. 玉米生理成熟后倒伏变化及其影响因素. 作物学报, 2018, 44(12): 1782-1792  
Xue J, Wang Q, Li L L, Zhang W X, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Li S K. Changes of maize lodging after physiological maturity and its influencing factors. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1782-1792
- [4] Norboerg O S, Mason S C, Lowry S R. Ethephon influence on harvestable yield, grain quality, and lodging of corn. Agronomy Journal, 1988, 80: 768-772
- [5] Xu C L, Gao Y B, Tian B J, Ren J H, Meng Q F, Wang P. Effects of EDAH, a novel plant growth regulator, on mechanical strength, stalk vascular bundles and grain yield of summer maize at high densities. Field Crops Research, 2017, 200: 71-79
- [6] 王元东,段民孝,邢锦丰,王继东,张春原,张雪原,赵久然. 玉米理想株型育种的研究进展与展望. 玉米科学, 2008, 16(3): 47-50  
Wang Y D, Duan M X, Xing J F, Wang J D, Zhang C Y, Zhang X Y, Zhao J R. Progress and prospect in ideal plant type breeding in maize. Maize Sciences, 2008, 16(3): 47-50
- [7] 薛金涛,张保明,董志强,赵明. 化学调控玉米抗倒及产量性状的效应研究. 作物杂志, 2008(4): 72-76  
Xue J T, Zhang B M, Dong Z Q, Zhao M. Effect of chemical regulation on lodging and yield of Maize. Crops, 2008(4): 72-76
- [8] Fu X Q, Feng J, Yu B, Gao Y J, Zheng Y L, Yue B. Morphological, biochemical and genetic analysis of a brittle stalk mutant of maize inserted by mutator. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(1): 12-18
- [9] 穆春华,张发军,李文才,孙琦,孟昭东. 玉米自交系茎秆显微结构及其与茎节抗折强度的相关与通径分析. 玉米科学, 2012, 20(5): 71-75  
Mu C H, Zhang F J, Li W C, Sun Q, Meng Z D. Correlation and path analysis between node snap strength (NSS) and stalk microstructure of maize inbred line. Maize Sciences, 2012, 20(5): 71-75
- [10] 任安然,武丽芬,关红辉,杨莎,监立强,刘元峰,杜宇茜,王姣,郭晋杰,陈景堂. 不同种植密度下玉米茎秆纤维性状和抗倒性相关分析. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 653-664  
Ren A R, Wu L F, Guan H H, Yang S, Jian L Q, Liu Y F, Du Y Q, Wang J, Guo J J, Chen J T. Stalk fiber related traits and lodging resistance correlation analysis under different planting density in maize. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 653-664
- [11] 武丽芬. 玉米茎秆抗倒相关性状的遗传效应分析. 保定: 河北农业大学, 2017  
Wu L F. Genetic effects analysis of stalk lodging resistance traits in maize. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017
- [12] Huang C, Chen Q Y, Xu G H, Xu D Y, Tian J E, Tian F. Identification and fine mapping of quantitative trait loci for the number of vascular bundle in maize stem: QTL mapping for vascular bundle number. Journal of Integrative Plant Biology, 2016, 58(1): 81-90
- [13] 杨莎. 玉米自交系抗倒性鉴定及茎秆维管束性状 QTL 定位. 保定: 河北农业大学, 2016  
Yang S. Identification of lodging-resistance and mapping of quantitative trait loci (QTL) for stalk vascular bundle in maize. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016
- [14] 王军,周美学,许如根,吕超,黄祖六. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2145-2152  
Wang J, Zhou M X, Xu R G, Lv C, Huang Z L. Studies on selecting indices and evaluation methods for barley's (*Hordeum vulgare* L.) waterlogging tolerance. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(10): 2145-2152
- [15] 田治国. 万寿菊属植物耐热性与抗旱性的评价及生长生理特性的研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012  
Tian Z G. Evaluation on heat and drought tolerance of marigold (*Tagetes erecta* L.) and study on its growth and physiological characteristics. Yangling: Northwest A&F University, 2012
- [16] 林兆里,许莉萍,高三基,徐金汉. 基于因子分析和聚类分析的甘蔗品种抗螟性评价. 热带作物学报, 2015, 36(7): 1312-1318  
Lin Z L, Xu L P, Gao S J, Xu J H. Evaluation of sugarcane varieties resistance to borers based on factor analysis and cluster analysis. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(7): 1312-1318
- [17] 付凤玲,李晚忱,潘光堂. 模糊隶属法对玉米苗期耐旱性的拟合分析. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 83-85, 125  
Fu F L, Li W C, Pan G T. A fitting analysis on drought tolerance of maize seedling with fuzzy subordination method. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(1): 83-85, 125
- [18] 刘翔宇,赵龙,巴哈尔古丽·先木西,彭华,阿不都热衣木·玉拉音. 新疆陆地棉种质资源的综合评价. 中国农业科学, 2017, 50(24): 4679-4691  
Liu X Y, Zhao L, Bahaerguli X, Peng H, Abudoureyimu Y. Comprehensive evaluation of germplasm resources of upland cotton in Xinjiang. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(24): 4679-4691
- [19] 钟冲,郭强. 费歇尔判别法及其应用. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 136-141  
Zhong C, Guo Q. Fisher discrimination method and its application. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 136-141
- [20] 丰光,刘志芳,李妍妍,邢锦丰,黄长玲. 玉米茎秆耐穿刺强度的倒伏遗传研究. 作物学报, 2009, 35(11): 2133-2138  
Feng G, Liu Z F, Li Y Y, Xing J F, Huang C L. Genetics of lodging in tolerance to maize stem puncture. Acta Agronomica

- Sinica, 2009, 35(11): 2133-2138
- [21] 冯海娟, 张善平, 马存金, 刘鹏, 董树亭, 赵斌, 张吉旺, 杨今胜. 种植密度对夏玉米茎秆维管束结构及茎流特性的影响. 作物学报, 2014, 40(8): 1435-1442  
Feng H J, Zhang S P, Ma C J, Liu P, Dong S T, Zhao B, Zhang J W, Yang J S. Effect of plant density on microstructure of stalk vascular bundle of summer maize (*Zea mays* L.) and its characteristics of sap flow. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1435-1442
- [22] 王永学, 张战辉, 刘宗华. 玉米抗倒伏性状的配合力效应及通径分析. 河南农业大学学报, 2011, 45(1): 1-6  
Wang Y X, Zhang Z H, Liu Z H. Combining ability and path analysis of lodging resistance traits in maize. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(1): 1-6
- [23] Ching A, Dhugga K S, Appenzeller L, Meeley R, Bourett T M, Howard R J, Rafalski A. Brittle stalk 2 encodes a putative glycosylphosphatidylinositol-anchored protein that affects mechanical strength of maize tissues by altering the composition and structure of secondary cell walls. Planta, 2006, 224: 1174-1184
- [24] Appenzeller L, Doblin M, Barreiro R, Wang H Y, Niu X M, Kollipara K, Carrigan L, Tomes D, Chapman M, Dhugga K S. Cellulose synthesis in maize: isolation and expression analysis of the cellulose synthase (*Ces A*) gene family. Cellulose, 2004, 11: 287-299
- [25] 王耘刘, 王长进, 刘正, 李文阳. 72个玉米自交系抗倒性状的关联分析及评价. 安徽科技学院学报, 2016, 30(4): 26-30  
Wang T L, Wang C J, Liu Z, Li W Y. Correlation analysis and evaluation in lodging resistance properties of 72 maize lines. Journal of Anhui Science and Technology University, 2016, 30(4): 26-30
- [26] 何亮. 主成分分析在 SPSS 中的应用. 山西农业大学学报: 社会科学版, 2007, 6(5): 20-22  
He L. Principal components analysis in SPSS. Journal of Shanxi Agricultural University: Social Science Edition, 2007, 6(5): 20-22
- [27] 陈培峰, 王建平, 黄健, 朱勇良, 乔中英, 黄萌. 太湖地区香稻品种稻米品质性状相关和聚类分析. 江苏农业学报, 2013, 29(1): 1-7  
Chen P F, Wang J P, Huang J, Zhu Y L, Qiao Z Y, Huang M. Correlation and cluster analyses for grain quality traits in aromatic rice from Taihu Lake area. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2013, 29(1): 1-7
- [28] 杨小翠, 詹秋文, 刘言龙, 李杰勤, 林平. 苏丹草与高粱的判别分析和聚类分析. 中国草地学报, 2016, 38(1): 41-46  
Yang X C, Zhan Q W, Liu Y L, Li J Q, Lin P. Discrimination analysis and cluster analysis of sorghum sudanense and S. bicolor. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(1): 41-46
- [29] 陈森林, 黄曼艳, 林云, 陶红, 胡玉玲, 叶为民, 李攻科. 液相色谱结合多元统计分析多酚与烟叶香型的关联. 分析化学, 2019, 47(5): 725-735  
Chen S L, Huang M Y, Lin Y, Tao H, Hu Y L, Ye W M, Li G K. Liquid chromatography coupled with multivariate statistics for investigation of relationship between polyphenols and aroma types of tobacco. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2019, 47(5): 725-735
- [30] 彭智, 李龙, 柳玉平, 刘惠民, 景蕊莲. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 638-645  
Peng Z, Li L, Liu Y P, Liu H M, Jing R L. Evaluation of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 638-645
- [31] 范娜, 白文斌, 彭之东, 赵建武. 粒用高粱耐盐种质资源鉴定与评价. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 72-78  
Fan N, Bai W B, Peng Z D, Zhao J W. Identification and evaluation of salt-tolerant sorghum germplasm resources. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 72-78
- [32] 刘宝海, 黑龙江粳稻育种亲本主要农艺及品质性状的筛选及类群划分. 植物遗传资源学报, 2018, 19(4): 790-806  
Liu B H. Screening of main agronomic and quality traits and group division of japonica rice breeding parents in Heilongjiang province. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(4): 790-806
- [33] 郑崇兰, 王友富, 铁万祝, 晋一棠, 廖莉莉, 万幸, 祁正权. 四川攀西地区夏玉米主要农艺性状主成分与聚类分析. 贵州农业科学, 2018, 46(2): 9-13  
Zheng C L, Wang Y F, Tie W Z, Jin Y T, Liao L L, Wan X, Qi Z Q. Principal component and clustering analysis of main agronomic traits of different summer maize varieties in Panxi region, Sichuan. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(2): 9-13
- [34] Aktar S, Hossain N, Azam M G, Billah M, Biswas P L, Latif M A, Rohman M, Bagum S A, Uddin M S. Phenotyping of hybrid maize (*Zea mays* L.) at seedling stage under drought condition. American Journal of Plant Sciences, 2018(11): 2154-2169
- [35] 董昕, 李淑君, 杨华, 官玲, 付忠军, 祁志云, 金川, 余雪源, 易红华, 陈荣丽, 张丕辉. 重庆玉米地方品种表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2019, 20(4): 861-870  
Dong X, Li S J, Yang H, Guan L, Fu Z J, Qi Z Y, Jin C, Yu X Y, Yi H H, Chen R L, Zhang P H. Phenotypic diversity of maize landraces collected from Chongqing. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(4): 861-870
- [36] 陈尚研, 勇强, 徐勇, 朱均均, 余世袁. 稀酸预处理对玉米秸秆纤维组分及结构的影响. 中国粮油学报, 2011, 26(6): 13-19  
Chen S Y, Yong Q, Xu Y, Zhu J J, Yu S Y. Effects of dilute acid pretreatment on fibre components and structure of corn stover. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(6): 13-19
- [37] 刘洋. 玉米自交系抗倒伏性状的关联分析. 保定: 河北农业大学, 2014  
Liu Y. Association analysis of lodging resistance traits of maize inbred lines. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014
- [38] 刘志斋, 吴迅, 刘海利, 李永祥, 李清超, 王凤格, 石云素, 宋燕春, 宋伟彬, 赵久然, 赖锦盛, 黎裕, 王天宇. 基于 40 个核心 SSR 标记揭示的 820 份中国玉米重要自交系的遗传多样性与群体结构. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2107-2138  
Liu Z Z, Wu X, Liu H L, Li Y X, Li Q C, Wang F G, Shi Y S, Song Y C, Song W B, Zhao J R, Lai J S, Li Y, Wang T Y. Genetic diversity and population structure of important Chinese maize inbred lines revealed by 40 core simple sequence repeats (SSRs). Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(11): 2107-2138