

不同玉米自交系茎秆上部维管束数目的差异分析

杨 硕¹, 郑云霄¹, 黄亚群¹, 祝丽英¹, 赵永锋¹, 贾晓艳¹, 陈景堂^{1,2}, 郭晋杰¹

(¹ 河北农业大学农学院 / 国家玉米改良中心河北分中心 / 华北作物改良与调控国家重点实验室, 保定 071001;

² 青岛农业大学农学院, 青岛 266109)

摘要: 茎秆维管束数目是玉米养分运输和抗倒伏的关键影响因素, 本研究以遗传丰富的 172 份玉米自交系为研究材料, 对茎秆上部小维管束和大维管束数目进行差异性分析, 并通过不同杂种优势群的玉米茎秆上部维管束数目多重比较, 分析各杂种优势群维管束数目变化趋势。研究结果表明: 在不同玉米自交系中, 茎秆上部小维管束和大维管束数目变异系数分别为 16.67%~21.69%、25.83%~32.19%; 小维管束和大维管束数目在不同自交系间的差异均达到极显著水平; 小维管束和大维管束数目的广义遗传力分别为 78.87%、82.58%; 小维管束和大维管束数目在不同环境下均呈正相关关系。多重比较结果表明, 各杂种优势群自交系茎秆上部小维管束和大维管束数目趋势一致, 由少到多依次为: 兰卡斯特群、瑞德群、P 群、旅大红骨群、唐四平头群。本研究初步了解了不同玉米自交系中维管束数目的遗传变异规律, 并为进一步 QTL 定位和基因克隆奠定基础。

关键词: 玉米; 自交系; 茎秆; 小维管束数目; 大维管束数目

Analysis of the Number of Vascular Bundles in the Uppermost Stem of Different Maize Inbred Lines

YANG Shuo¹, ZHENG Yun-xiao¹, HUANG Ya-qun¹, ZHU Li-ying¹, ZHAO Yong-feng¹,
JIA Xiao-yan¹, CHEN Jing-tang^{1,2}, GUO Jin-jie¹

(¹ College of Agronomy, Hebei Agricultural University/Hebei Sub-center of National Maize Improvement
Center/State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Baoding 071001;

² College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109)

Abstract: The number of vascular bundles in the stem is a key factor that affects the nutrient transport and the lodging resistance in maize. Here we deployed an association panel including 172 maize inbred lines to analyze the difference between the number of small vascular bundles (NSVB) and the number of large vascular bundles (NLVB) in the uppermost internode of maize stem, followed by the multiple comparison analysis to learn about the difference and the trend in the number of vascular bundles among different heterosis groups. The results showed that coefficients of variation of NSVB and NLVB in the uppermost internode in different inbred lines were 16.67%~21.69% and 25.83%~32.19%, respectively. The highly significant differences on either of NSVB and NLVB were revealed in different inbred lines. The broad-sense heritability on NSVB and NLVB was 78.87% and 82.58% respectively, while a significantly positive correlation on NSVB in relative to NLVB was observed. Both NSVB and NLVB represented a similarity on the tendency in different heterotic groups (Lancaster<Reid<P group<Lvda Red Cob<Tangshipingtou. Collectively, this study represented a preliminary understanding of the

收稿日期: 2020-07-24 修回日期: 2020-08-09 网络出版日期: 2020-10-12

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200724001>

第一作者研究方向为玉米遗传育种, E-mail: yang_shuo82@163.com; 郑云霄为共同第一作者

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

陈景堂, 研究方向为玉米遗传育种, E-mail: chenjingtang@126.com

基金项目: 河北省科技计划项目 (16226323D-2); 国家粮食丰产科技工程河北项目区发展基金 (JY2019004); 国家重点研发计划 (2018YFD0300501)

Foundation projects: Hebei Province Science and Technology Support Plan (16226323D-2), National Grain High-yield Science and Technology Project Hebei Project Area Development Fund (JY2019004), National Key R&D Program of China (2018YFD0300501)

genetic variation in the number of vascular bundles in different maize inbred lines, and laid a foundation for future quantitative trait locus (QTL) mapping and gene cloning.

Key words: maize; inbred line; stalk; the number of small vascular bundles; the number of large vascular bundles

玉米 (*Zea mays* L.) 作为全球三大作物之一, 是重要的粮食经济作物和饲料及工业原料来源之一^[1], 据国家统计局 (National Bureau of Statistics) 资料显示, 2019 年我国玉米面积为 41.28 万 hm^2 , 占粮食作物播种面积的 35.6%。源足、库大、流畅是源库系统的理想状态, 维管束是“流”的通道, “流”是源库之间联系的重要纽带, 研究维管束是研究“流”的重要手段^[2]。前人研究表明植物维管细胞从上到下不间断连接茎部器官和根, 维管束是极性的、连续的和内部排列的^[3]。维管束是“流”的通道, 主要负责植物体内源库之间的长距离运输, 包括不同组织间的水分、必需矿物质及糖和氨基酸的运输, 并决定其运输效率^[4]。玉米倒伏的发生受内部和外部因素的共同影响, 其中, 茎的结构、机械强度以及维管束的数量等内部因素对抗倒伏起主导作用^[5-6]。倒伏严重影响植株光合效率、籽粒品质和养分运输, 进而阻碍玉米正常生长, 并成为实现玉米高产、稳产的限制因素之一^[7-9]。

王庭杰等^[10]研究 10 个玉米品种茎秆的形态结构、解剖特征和细胞壁的化学组成, 分析变量之间的相关性, 结果表明, 玉米维管束个数与抗压强度呈极显著负相关关系。采用通径分析进一步明确单位面积维管束个数是玉米茎秆抗压强度的主要因素之一。穆春华等^[11]在 2 个不同时期对维管束相关性状与抗倒伏性之间进行了相关分析, 结果表明维管束数目与抗倒伏之间呈极显著负相关关系。王立新等^[12]研究发现玉米自交系茎秆上部维管束数目变异范围为 10~16, 并发现同一视野内维管束数目与倒伏率之间呈显著正相关关系。王群瑛等^[13]认为外部维管束数目较多的材料抗倒伏能力强。Huang 等^[14]利用 866 份 RIL 群体, 对玉米茎上部维管束数目进行了 QTL 定位研究。Zhang 等^[15]结合全基因组测序信息建立玉米维管束表型-基因关联分析体系和遗传网络。可见关于玉米茎秆维管束研究多集中在维管束系统形成和功能以及发育、生理与穗粒库容的关系上^[16-19]。对玉米不同自交系茎秆上部维管束数目的研究鲜有报道。

本研究以来源广泛、遗传多样性丰富的玉米自交系群体的茎秆上部为研究对象^[14], 从显微水平对

玉米茎秆上部维管束数目进行统计, 结合杂种优势群的划分, 分析不同玉米自交系茎秆上部维管束数目的变化趋势, 为进一步 QTL 定位和基因克隆奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

由河北农业大学 / 国家玉米改良中心河北分中心提供, 为来源广泛、遗传多样性丰富的 172 份玉米自交系^[20-22], 参照刘洋^[23]、刘志斋等^[24]分群结果, 以 50% 作为划分群体的遗传相似比例^[25], 同时借鉴汪黎明等^[26]编写的《中国玉米品种及其系谱》, 将 172 份自交系划分为兰卡斯特群包括吉 846、Mo17 等 28 份自交系, 旅大红骨群包括丹黄 02 等 19 份自交系, P 群包括齐 319、黄昌 b 等 27 份自交系, 瑞德群包括郑 58、掖 488 等 45 份自交系, 唐四平头群包括唐四平头、黄早四、吉 444 等 17 份自交系, 混合群包括 36 份自交系。

1.2 试验设计

于 2017 年、2018 年及 2019 年 5 月中旬, 分别将试验材料种植在河北农业大学农学院试验站 (保定) 和河北农业大学辛集试验站 (石家庄)。采用完全随机区组设计, 2 次重复, 每份材料种植 2 行, 行长 4 m, 行距 0.6 m, 密度 7.5 万株 / hm^2 。水肥管理同大田生产。

1.3 试验方法

1.3.1 茎秆上部维管束数目测定的取材 在授粉后 1 周, 从每小区中间选取长势一致的 3 株作为取样材料。

1.3.2 茎秆上部维管束数目测定 制作切片前, 首先配置 5% 的间苯三酚溶液, 静置 1 d。截取取样材料茎秆上部进行徒手切片, 厚度为 0.2~0.4 mm 即可, 用预配的间苯三酚和浓盐酸进行染色。所有染色在实验室常温条件下进行。借助 Zeiss Axioskop 40 Germany 型光学显微镜观察维管束显微结构并拍照, 采用 Zen (blue edition) 2012 图片处理软件进行维管束显微结构测定及统计。常规状态, 位于切片组织内部的为大维管束, 小维管束位于组织边缘部分的 1~2 层。

1.4 数据分析

应用软件 Microsoft Excel 2013 统计原始数据和数据处理,并绘制箱线图和雷达图。利用 R 平台的 Performance Analytics 软件包进行相关性分析,对利用相同群体划分的不同杂种优势群,结合 SPSS 18.0 软件对不同杂种优势群间维管束数目变化,进行描述统计分析和方差分析。用 R version 3.3.2 软件中 lme4 程序^[27],基于混合线性模型的最优线性无偏预测 (BLUP, best linear unbiased prediction) 方法^[28-29]对 3 个环境表型数据进行处理,最后将这些 BLUP 预测表型值用于多重比较分析。

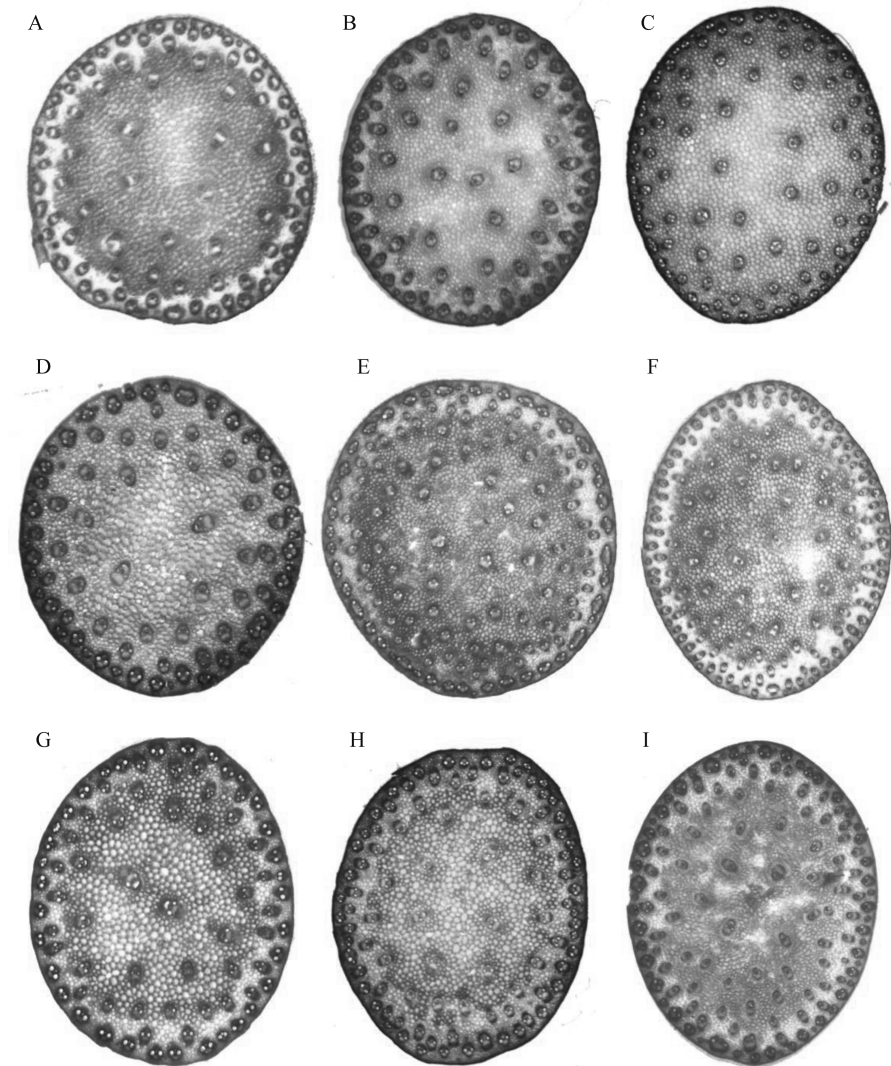
根据 Knapp 等^[30]提出的计算公式,估算 2 个表型性状的广义遗传力: $h^2=\delta_G^2/(\delta_G^2+\delta_{GE}^2/n+\delta_E^2/nr)$,其中, δ_G^2 为基因型方差, δ_{GE}^2 是基因型与环境互作的方

差, δ_E^2 是误差方差, r 是重复数, n 是环境数。

2 结果与分析

2.1 茎秆上部维管束表型变异和描述统计分析

观察玉米雄穗中部,茎秆维管束由小维管束和大维管束组成,其中位于茎秆边缘,排列紧密的 2~3 层维管束,周围由几层厚壁组织围绕,并发育不完全,单个维管束面积较小称为小维管束。另一类维管束松散分布于茎秆中央,排列较松散,结构发育完整,单个维管束面积较大,称作大维管束。两者的组织成分和结构差异较大,本研究中维管束数目存在广泛的表型变异,其中小维管束数目表型变异范围为 32~127 个;大维管束数目表型变异范围为 11~124 个(图 1)。



A: M131-5; B: 丹 599; C: 宋 1145; D: ys06; E: R98; F: XF134; G: e 群 3; H: 自 330; I: R1656
A: M131-5, B: Dan 599, C: Song 1145, D: ys06, E: R98, F: XF134, G: e qun 3, H: Zi 330, I: R1656

图 1 不同玉米自交系维管束结构

Fig.1 Vascular bundle structure of different varieties

对本试验群体的茎秆小维管束数目和大维管束数目进行描述统计分析(表 1),偏度和峰度均值均小于 1,表明符合正态分布。各环境条件下该群体茎秆上部维管束性状呈连续分布,且表型变异较丰富,变异系数均大于 15%,说明该群体不同材料间小维管束数目和大维管束数目差异较大;其中大维管束数目的表型变异较大,变异系数为 25.83%~32.19%;小维管束数目变异系数为 16.67%~21.69%。小维管束数目在 3 个环境下,表型均值分别为 57.87 个、62.16 个、67.56 个,差异比较大,说明小维管束数目受环境影响较大;大维管束数目表型值差异小,分别为 61.22 个、61.53 个、61.57 个,表明大维管束数目受环境影响小。

表 1 维管束数目的描述统计分析
Table 1 Statistical analysis in the number of vascular bundles

性状 Trait	环境 Environment	均值 Mean	标准差 SD	变异范围 Range	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数(%) CV
小维管束数目 NSVB	2017B	57.87	10.11	34.00~86.00	0.13	0.06	17.47
	2018X	62.16	10.36	38.50~91.50	0.23	-0.05	16.67
	2019B	67.56	14.66	37.25~120.50	0.78	0.49	21.69
大维管束数目 NLVB	2017B	61.22	15.81	28.00~106.00	0.34	0.14	25.83
	2018X	61.53	16.32	16.00~107.50	0.36	0.33	26.53
	2019B	61.57	19.82	22.50~132.50	0.62	0.25	32.19

B: 保定; X: 辛集
B: Baoding, X: Xinji. NSVB: The number of small vascular bundles, NLVB: The numbers of large vascular bundle.The same as below

2.2 茎秆上部小维管束和大维管束数目的联合方差分析

对玉米茎秆上部维管束数目进行联合方差分析(表 2),结果表明,玉米茎秆上部小维管束数目在环境间、自交系间的差异均达到极显著水平,环境与自交系互作效应极显著,其广义遗传力为

78.87%;大维管束数目在自交系间呈极显著差异,环境与自交系同样存在互作效应,其广义遗传力为 82.58%。说明玉米茎秆上部维管束数目变异丰富,广泛存在于不同自交系中;其中,小维管束数目受环境影响较大,大维管束数目受环境影响较小。

表 2 维管束数目的联合方差分析
Table 2 Combined variance analysis in the number of vascular bundles

变异来源 Source of variation	环境 Environment	重复 Repeat	自交系 Lines	环境 × 重复 Environment × Repeat	环境 × 自交系 Environment × Lines	重复 × 自交系 Repeat × Lines	广义遗传力 (%) h^2
小维管束数目 NSVB	304.725***	2.285	22.577***	4.878**	4.771***	0.880	78.87
大维管束数目 NLVB	0.228	5.774	25.112***	0.343	4.374***	0.981	82.58

表示在 0.01 水平上差异显著;*表示在 0.001 水平上差异显著。下同
** indicated significance at 0.01 levels, *** indicated significance at 0.001 levels, h^2 : The broad-sense heritability.The same as below

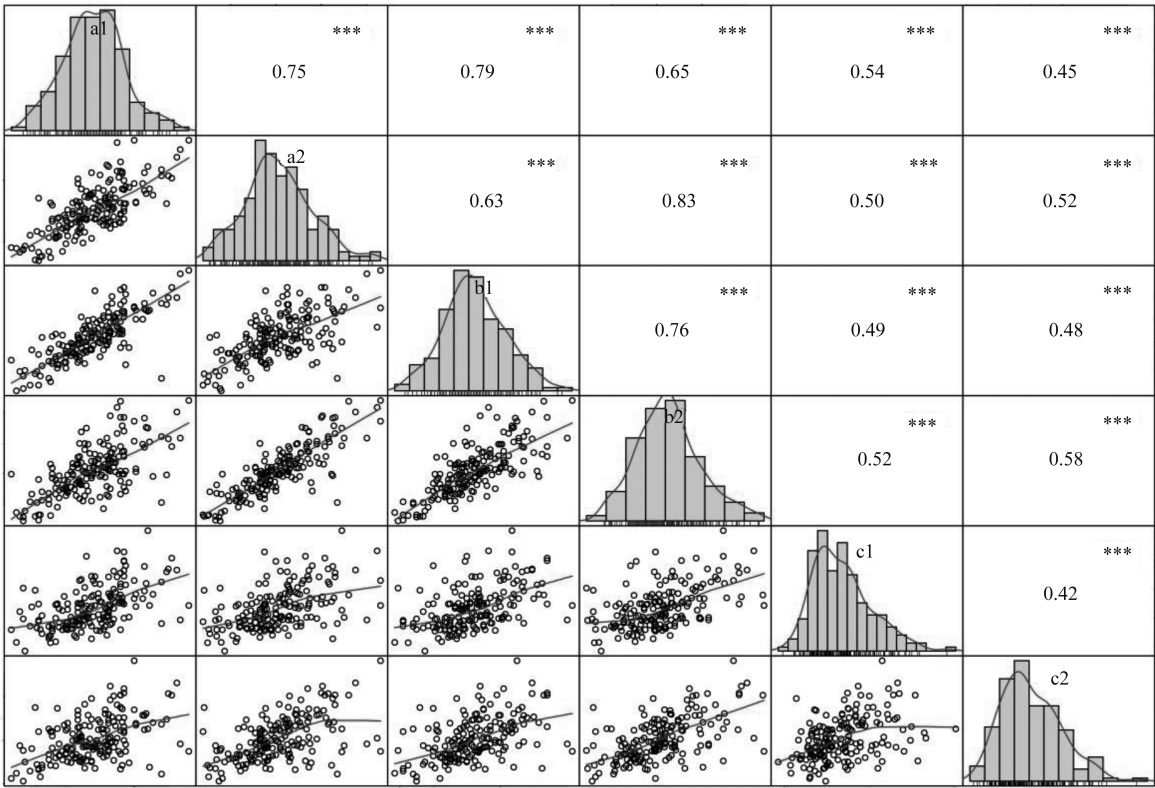
2.3 茎秆上部小维管束和大维管束数目相关性分析

通过对不同环境玉米茎秆维管束数目的相关性分析,发现不同环境下维管束数目(小维管束数目、大维管束数目)间均呈正相关(图 2),同一环境,小维管束数目同大维管束数目存在极显著正相关,相关系数分别为 0.75、0.76、0.42($P \leq 0.001$)。不同环境中,小维管束数目间呈极显著正相关,且相关系数分别为 0.79、0.49、0.54($P \leq 0.001$);大维管束数目不同环境中相关系数为 0.83、0.58、0.52($P \leq 0.001$),同时发现各环境下维管束数目间的相关系数为 0.42 及以上,推测玉米茎秆上部维管束数

目的生物合成调控存在着相互协同促进作用。

2.4 不同杂种优势群茎秆上部维管束数目联合方差分析

2.4.1 不同杂种优势群茎秆上部小维管束数目联合方差分析 各杂种优势群茎秆上部小维管束数目联合方差分析结果表明,小维管束数目在每个杂种优势群内自交系间、环境间的差异均达到了极显著的差异,且环境与自交系间互作显著;而在重复、环境与重复间互作及重复与自交系间互作中差异不显著(表 3)。表明不同杂种优势群内茎秆上部小维管束数目存在广泛的遗传变异,并受环境影响较大。



对角线处柱形图代表每个性状的表型分布,对角线上方的值是性状之间的 Pearson 相关系数;对角线下方图为性状散点图。a~c 分别代表 2017 年保定、2018 年辛集、2019 年保定共 3 个环境。字母后数字 1~2 分别表示小维管束数目和大维管束数目
The plots on the diagonal line show the phenotypic distribution of each trait as indicated, the values above the diagonal line are Pearson-correlation coefficients between traits, and the plots below the diagonal line are the scatter plots of compared traits.
a-c stands for Baoding in 2017, Xinji in 2018, Baoding in 2019, respectively. The number followed character, 1-2 stands for the numbers of small vascular bundle and the numbers of large vascular bundle, respectively

图 2 维管束数目的相关分析
Fig.2 Correlation analysis of vascular bundles

表 3 小维管束数目的联合方差分析
Table 3 Combined variance analysis of the number of small vascular bundles

变异来源 Source of variation	环境 Environment	重复 Repeat	自交系 Lines	环境 × 重复 Environment × Repeat	环境 × 自交系 Environment × Lines	重复 × 自交系 Repeat × Lines
旅大红骨 Lvda Red Cob	14.346***	0.007	11.384***	2.333	2.622**	0.752
唐四平头 Tangsipingtou	43.081***	3.312	10.186***	0.523	3.007**	1.447
瑞德群 Reid	159.538***	0.019	26.683***	2.464	6.095***	1.133
P 群 P group	72.207***	2.461	29.104***	1.663	5.985***	0.721
兰卡斯特 Lancaster	80.783***	0.833	37.528***	0.115	7.984***	1.112
混合群 Mix group	18.199***	0.002	13.975***	0.783	4.409***	0.411

2.4.2 不同杂种优势群茎秆上部大维管束数目联合方差分析 各杂种优势群茎秆上部大维管束数目联合方差分析结果表明(表 4),大维管束数目在各杂种优势群内自交系间、环境与自交系间互作均存在显著或极显著差异,其中,旅大红骨、P 群 2 个类群中,玉米茎秆上部大维管束数目环境与自交系间互作显著性差异,其余杂种优势群均为极

显著差异。P 群和混合群在环境间分别存在显著差异和极显著差异。各杂种优势群的大维管束数目在重复、环境与重复间互作、重复与自交系间互作差异不显著。说明茎秆上部大维管束数目在不同杂种优势群内遗传变异丰富,除 P 群和混合群受环境影响较大外,其他杂种优势群受环境影响较小。

表 4 大维管束数目的联合方差分析

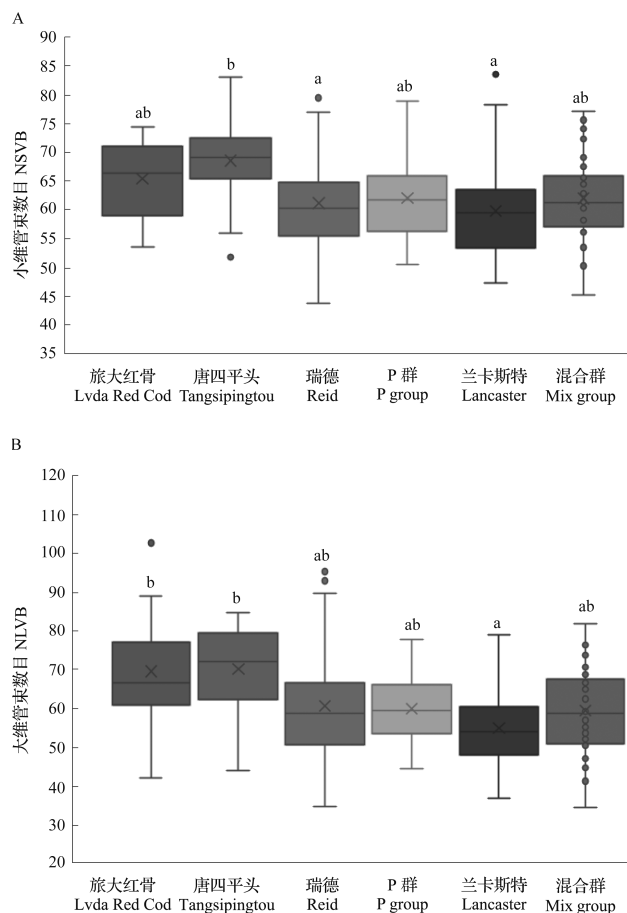
Table 4 Combined variance analysis of the number of large vascular bundles

变异来源 Source of variation	环境 Environment	重复 Repeat	自交系 Lines	环境 × 重复 Environment × Repeat	环境 × 自交系 Environment × Lines	重复 × 自交系 Repeat × Lines
旅大红骨 Lvda Red Cob	2.160	0.497	15.857***	1.590	2.506**	1.175
唐四平头 Tangsipingtou	1.158	2.165	8.114***	3.525	3.555***	0.680
瑞德群 Reid	2.645	1.402	33.167***	1.032	5.243***	0.990
P 群 P group	8.293**	1.048	17.109***	0.411	2.493**	1.026
兰卡斯特 Lancaster	0.370	1.618	28.822***	0.666	6.869***	1.152
混合群 Mix group	15.433***	0.535	23.963***	1.592	8.144***	0.797

2.5 不同杂种优势群茎秆上部维管束数目多重比较

玉米利用杂种优势研究每一个类群的维管束性状很重要,对组配杂交种具有指导意义。本研究应用基于混合线性模型的最优线性无偏预测 (BLUP) 方法,对不同杂种优势群的茎秆上部维管束数目表型数据进行处理,综合考虑环境和遗传关系因素,尽最大可能消除环境影响造成的偏差。对本试验群体的茎秆上部小维管束数目和大维管束数目进行了多重比较,发现唐四平头群与其他兰卡斯特群、瑞德群等 2 个类群相比,小维管束数目在 0.05 水平上差异显著,说明唐四平头群含有较多的小维管束数目。唐四平头群同旅大红骨群、P 群、混合群相比在 0.05 水平上差异不显著,表明这 3 个类群也含有较多的小维管束数目。兰卡斯特群的小维管束数目最少,其次为瑞德群、混合群、P 群、旅大红骨群、唐四平头群 (图 3A)。

不同杂种优势群大维管束数目多重比较表明 (图 3B),唐四平头群同兰卡斯特群相比在 0.05 水平上存在差异,但与 P 群、瑞德群、旅大红骨群、混合群等其他类群相比差异不显著,表明唐四平头群含有较多的大维管束数目。兰卡斯特群的大维管束数目最少,其次为混合群、瑞德群、P 群、旅大红骨群、唐四平头群。不同杂种优势群内自交系维管束数目分布见图 4。综合分析表明不同杂种优势群自交系维管束数目含量的变化趋势一致,小维管束数目和大维管束数目由少到多均为:兰卡斯特群 < 瑞德群 < P 群 < 旅大红骨群 < 唐四平头群。

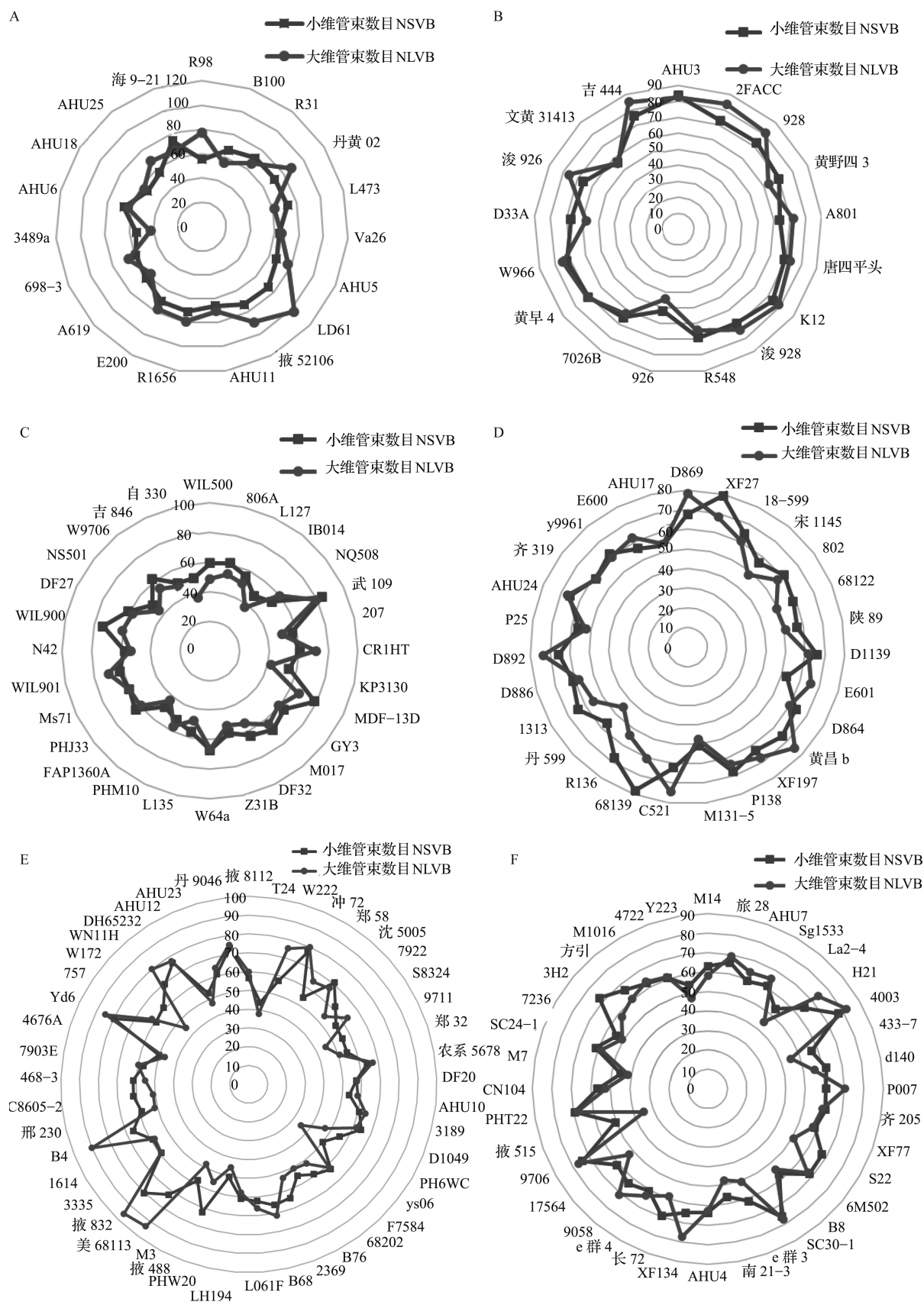


A、B 分别表示小维管束数目、大维管束数目在不同杂种优势群中的分布。a、b 表示在 0.05 水平下差异显著

A, B indicated the number of small or large vascular bundles in different subpopulations. a, b indicated significance at 0.05 levels

图 3 不同杂种优势群维管束数目的箱线图

Fig.3 Boxplot of number of vascular bundles in different subpopulations



A: 旅大红骨群; B: 唐四平头群; C: 兰卡斯特群; D: P 群; E: 瑞德群; F: 混合群
 A: Lvda Red Cob, B: Tangsipingtou, C: Lancaster, D: P group, E: Reid, F: Mix group

图 4 不同杂种优势群茎秆上部维管束数目分布雷达图

Fig.4 The radar map of the distribution of the number of vascular bundles in different subpopulations

3 讨论

玉米茎秆上部维管束数目与抗推力有相关性,进而与玉米茎秆倒伏性息息相关。目前,作物维管束的研究多集中在 C_3 作物上,对玉米的研究起步较晚,研究内容较分散,国内外关于玉米不同自交系维管束数目的研究鲜有报道。Sawchuk 等^[3]研究表明植物微管细胞从上到下相一致,因此本研究通过对玉米雄穗中部维管束数目来反映茎秆维管束数目的情况,利用相关性分析结果表明,小维管束数目和大维管束之间呈显著正相关关系,表明玉米茎秆小维管束和大维管束存在协同发育的关系。该结果同罗丽华^[31]在水稻研究中小维管束数目和大维管束数目的关系相一致。联合方差分析表明,玉米茎秆上部维管束数目在自交系间差异均达到极显著水平,说明不同自交系的维管束数目存在真实差异,存在较丰富的遗传变异,在控制茎秆上部维管束数目上存在丰富的等位基因变异。本研究不同环境中小维管束数目存在差异,表明环境条件对小维管束数目影响较大,这一研究结果同李梦阳等^[32]在水稻上的研究相一致;而大维管束数目在环境间无差异,说明大维管束数目受环境条件影响较少,这与申海兵等^[33]和张全国等^[34]在小麦上的研究结果一致。

不同杂种优势群的玉米茎秆上部维管束数目进行联合方差分析,在小维管束数目性状上,不同杂种优势群在不同环境及不同自交系间的 0.001 水平上存在极显著差异,这一结果更进一步说明小维管束数目受环境影响较大。在大维管束数目性状上,不同的杂种优势群在自交系间存在 0.001 水平上的极显著差异,在不同环境中,除了 P 群在 0.01 水平上存在显著差异和混合群在 0.001 水平呈极显著差异外,其他 4 个类群均差异不显著,更进一步说明了大维管束数目受环境影响较小。

对不同杂种优势群的茎秆小维管束数目和大维管束数目进行差异性分析,唐四平头群与兰卡斯特群、瑞德群的小维管束数目在 0.05 水平上差异显著,其维管束数目的平均值由小到大依次为:兰卡斯特群、瑞德群、P 群、旅大红骨群和唐四平头群。唐四平头群与兰卡斯特群的大维管束数目在 0.05 水平上差异显著,其维管束数目的平均值由小到大依次为兰卡斯特群、瑞德群、P 群、旅大红骨群、唐四平头群。各杂种优势群的小维管束数目和大维管束数目变化趋势一致,这也表明了小维管束数目和大维管束数目之间存在极强的相关性。综合小维管束

数目和大维管束数目结果,来源于兰卡斯特群的均值和幅度均最小,说明该类群含有 2 种维管束数目均较少。唐四平头群均值和幅度均最大,表明含有较多维管束数目。

已有研究表明维管束性状在玉米倒伏中也会产生影响和作用^[35],因此在不同杂种优势群维管束数目箱线图中,结合本实验室已发表的抗推力结果^[36],对不同杂种优势群的极端材料进行分析。在小维管束数目箱线图中,其中抗推力高于均值的材料,包括瑞德群的掖 832;抗推力低于均值的材料,包括唐四平头群的 926。在大维管束数目箱线图中,共包含瑞德群 2 份极端材料,其中抗推力高于均值的材料为掖 832 和美 68113,旅大红骨群的 LD61。因此,生产上可结合这些材料的田间综合表现判断其应用潜力。

维管束是极性的、连续的内部排列,并对植物体内营养物质的长距离运输和机械支撑起主要作用,因此,本研究结合郑云霄等^[37]玉米种质资源的抗倒伏性评价,表明玉米茎秆上部维管束数目同抗倒伏性呈负相关,以田间表现为抗倒伏材料的维管束数目为标准,筛选出维管束数目少的自交系,如:旅大红骨群 AHU25、Va26、3489a、AHU18,唐四平头群 7026B、926、文黄 31413,瑞德群 68202、邢 230、ys06、T24、PHW20、9711、PH6WC、4676A、AHU12、M3、B76、郑 32、P 群 68122、y9961、丹 599、M131-5、宋 1145,兰卡斯特群 L135、IB014、KP3130、L135、FAP1360A、NS501、吉 846、自 330。这些材料可为育种实践中提高抗倒伏遗传改良和组配抗倒性强的杂交种提供借鉴。

通过描述统计分析、联合方差分析、相关性分析及多重比较等方法,对遗传资源丰富的 172 份玉米自交系茎秆上部维管束数目进行研究,各杂种优势群的维管束数目不同,维管束数目最多的为唐四平头群,最少的为兰卡斯特群。本研究揭示了其维管束数目的变化趋势,同时也为基于这些资源的优异等位基因的 QTL 定位与基因克隆等相关研究奠定基础。

参考文献

- [1] Zhang J, Fengler K A, Van Hemert J L, Gupta R, Mongar N, Sun J D, Allen W B, Wang Y, Weers B, Mo H, Lafitte R, HOU Z L, Bryant A, Lbraheem F, Arp J, Swaminathan K, Moose S P, Li B L, Shen B. Identification and characterization of a novel stay-green QTL that increase yield in maize. *Plant Biotechnology Journal*, 2019; 17(12): 2272-2285

- [2] 王娜,李凤海,王志斌,周宇飞,史振声. 玉米维管束性状的研究进展. 玉米科学, 2011, 19(3): 148-152
Wang N, Li F H, Wang Z B, Zhou Y F, Shi Z S. Progress in study on vascular bundles characters of corn. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(3): 148-152
- [3] Sawchuk M G, Scarpella E. Polarity, continuity and alignment in plant vascular strands. Journal of Integrative Plant Biology, 2013, 9(55): 824-834
- [4] Peter D M, Housley T L, Luk T M. Oat stem vascular size in relation to kernel number and weight. II. field environment. Crop Science, 1982, 22: 259-263
- [5] 田保明,杨光圣. 农作物倒伏及其评价方法. 中国农学通报, 2005, 21(7): 111-114
Tian B M, Yang G S. The performance of lodging and developing a standard test for lodging resistance in crops. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(7): 111-114
- [6] 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
- [7] Remison S U, Dele A. Relationship between lodging, morphological characters and yield of varieties of maize (*Zea mays* L.). The Journal of Agricultural Science, 1978, 91(3): 633-638
- [8] Daniel J R, Margaret J, Shien Y L, Douglas D C. Maize stalk lodging: morphological determinants of stalk strength. Crop Science, 2017, 57(2): 925-934
- [9] Zhang Y L, Liang T H, Chen M, Zhang Y C, Wang T, Lin H J, Rong T Z, Zou C Y, Liu P, Lee M, Pan G T, Shen Y, Lübberstedt T. Genetic dissection of stalk lodging-related traits using an IBM Syn10 DH population in maize across three environments (*Zea mays* L.). Molecular Genetics and Genomics, 2019, 294(5): 1277-1288
- [10] 王庭杰,张亮,韩琼,郑凤霞,王天琪,冯娜娜,王太霞. 玉米茎秆细胞壁和组织构建对抗压强度的影响. 植物科学学报, 2015, 33(1): 109-115
Wang T J, Zhang L, Han Q, Zheng F X, Wang T Q, Feng N N, Wang T X. Effects of stalk cell wall and tissue on the compressive strength of maize. Plant Science Journal, 2015, 33(1): 109-115
- [11] 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. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 71-75
- [12] 王立新,郭强,苏青. 玉米抗倒性与茎秆显微结构的关系. 植物学通报, 1990, 7(3): 34-36
Wang L X, Guo Q, Su Q. The relative correlation between the anti-lodging property and the microstructure in corn. Chinese Bulletin of Botany, 1990, 7(3): 34-36
- [13] 王群瑛,胡昌浩. 玉米茎秆抗倒特性的解剖研究. 作物学报, 1991, 17(1): 70-75
Wang Q Y, Hu C H. Studies on the anatomical structures of the stalks of maize with different resistance to lodging. Acta Agronomica Sinica, 1991, 17(1): 70-75
- [14] 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, 2015, 58(1): 81-90
- [15] Zhang Y, Wang J L, Du J J, Zhao Y X, Lu X J, Wen W L, Gu S H, Fan J C, Wang C Y, Wu S, Wang Y J, Liao S J, Zhao C J, Guo X Y. Dissecting the phenotypic components and genetic architecture of maize stem vascular bundles using high-throughput phenotypic analysis. Plant Biotechnology Journal, 2020, 19(1): 35-50
- [16] 何启平,董树亭,高荣岐. 玉米果穗维管束系统的发育及其与穗粒库容的关系. 作物学报, 2005, 31(8): 995-1000
He Q P, Dong S T, Gao R Q. Relationship between development of spike vascular bundle and sink capacity of ear and kernel in maize (*Zea mays* L.). Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(8): 995-1000
- [17] 吕凤山,刘克礼,高聚林,郭新宇. 春玉米茎秆维管束与叶片光合性状和果穗发育的关系. 内蒙古农牧学院学报, 1998, 19(3): 42-48
Lv F S, Liu K L, Gao J L, Guo X Y. Relationship of stem vascular bundle with leaf photo synthetic traits and ear development in spring maize. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry, 1998, 19(3): 42-48
- [18] Lucas W J, Groover A, Lichtenberger R, Furuta K, Yadav S R, Helariutta Y, He X Q, Fukuda H, Kang J, Brady S M, Patrick J W, Sperry J, Yoshida A, López-Millán A F, Grusak M A, Kachroo P. The plant vascular system: evolution, development and functions. Journal of Integrative Plant Biology, 2013, 55(4): 294-388
- [19] Qiang Y, Wu J B, Han H B, Wang G D. CLE peptides in vascular development. Journal of Integrative Plant Biology, 2013, 55(4): 389-394
- [20] 郭晋杰,赵永峰,张冬梅,祝丽英,黄亚群,陈景堂. 不同杂种优势群玉米子粒脱水速率分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 39-48
Guo J J, Zhao Y F, Zhang D M, Zhu L Y, Huang Y Q, Chen J T. Analysis of grain dehydration rate in different maize heterotic groups. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(1): 39-48
- [21] 关红辉,刘文斯,郭晋杰,赵永峰,祝丽英,黄亚群,陈景堂. 不同杂种优势群玉米茎秆纤维品质及配合力分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(5): 925-936
Guan H H, Liu W S, Guo J J, Zhao Y F, Zhu L Y, Huang Y Q, Chen J T. Analysis of stalk fiber quality and combining ability in different maize heterotic groups. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(5): 925-936
- [22] 张静,王彩红,赵永峰,祝丽英,黄亚群,郭晋杰,陈景堂. 玉米种质资源子粒容重和品质性状差异性分析. 植物遗传资源学报, 2016, 17(5): 832-839
Zhang J, Wang C H, Zhao Y F, Zhu L Y, Huang Y Q, Guo J J, Chen J T. Difference analysis of kernel test weight and nutritional quality traits in maize (*Zea mays* L.) germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(5): 832-839

- [23] 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
- [24] 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 (SSR). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (11): 2107-2138
- [25] 张冬梅, 刘洋, 赵永锋, 祝丽英, 黄亚群, 郭晋杰, 陈景堂. 不同杂种优势群玉米籽粒灌浆速率分析. 中国农业科学, 2014, 47 (17): 3323-3335
Zhang D M, Liu Y, Zhao Y F, Zhu L Y, Huang Y Q, Guo J J, Chen J T. Analysis of maize grain filling rate in different heterotic groups. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (17): 3323-3335
- [26] 汪黎明, 王庆成, 孟昭东. 中国玉米品种及其系谱. 上海: 上海科学技术出版社, 1970: 893
Wang L M, Wang Q C, Meng Z D. Maize varieties and their pedigree in China. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1970: 893
- [27] Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 2014, 67 (1): 1-51
- [28] Henderson C R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. *Biometrics*, 1975, 31 (2): 423-447
- [29] Piepho H P, Möhring J, Melchinger A E, Büchse A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*, 2008, 161 (1): 209-228
- [30] Knapp S J, Stroup W W, Ross W M. Exact confidence intervals for heritability on a progeny mean basis. *Crop Science*, 1985, 25 (1): 192-194
- [31] 罗丽华. 水稻茎秆抗倒伏性性状的 QTL 定位研究. 长沙: 湖南农业大学, 2005
Luo L H. Mapping quantitative traits loci for the lodging resistance of culm in rice. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005
- [32] 李梦阳, 彭冠云, 邓彪, 孟桂元. 水稻维管束的研究进展. 植物生理学报, 2017, 53 (9): 1586-1590
Li M Y, Peng G Y, Deng B, Meng G Y. Research progress of rice vascular bundle. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53 (9): 1586-1590
- [33] 中海兵, 杨德龙, 景蕊莲, 吕小平, 曲延英. 小麦穗颈维管束遗传特性及其与产量性状的关系. 麦类作物学报, 2007, 27 (3): 465-470
Shen H B, Yang D L, Jing R L, Chang X P, Qu Y Y. Genetic characters of vascular bundle in the first internode and its relationship with yield components of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27 (3): 465-470
- [34] 张全国, 贾秀领, 马瑞昆. 基因型和供水对小麦维管系统发育的效应. 华北农学报, 2001, 16 (4): 65-70
Zhang Q G, Jia X L, Ma R K. Effect of genotype and water supply on development of wheat vascular system. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16 (4): 65-70
- [35] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 张吉旺, 赵斌, 董树亭, 刘鹏. 遮阴对夏玉米茎秆形态结构和倒伏的影响. 中国农业科学, 2012, 45 (17): 3497-3505
Cui H Y, Jin L B, Li B, Zhang J W, Zhao B, Dong S T, Liu P. Effect of shading on stalks morphology, structure and lodging of summer maize in field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (17): 3497-3505
- [36] 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
- [37] 郑云霄, 刘文斯, 赵永锋, 贾晓艳, 祝丽英, 黄亚群, 陈景堂, 郭晋杰. 玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选. 植物遗传资源学报, 2019, 20 (6): 1588-1596
Zheng Y X, Liu W S, Zhao Y F, Jia X Y, Zhu L Y, Huang Y Q, Chen J T, Guo J J. Evaluation of lodging resistance and selection of identification indexes of maize germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20 (6): 1588-1596