

我国玉米自交系茎秆性状多样性分析

尚玘玘¹, 张德贵², 王凯欣¹, 王国梁¹, 潘金豹¹, 李新海², 史利玉¹

(¹北京农学院植物科学技术学院, 北京 102206; ²中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 研究我国玉米自交系茎秆性状特征及其多样性, 是培育宜机收玉米品种的重要前提。本研究以兰卡斯特、PB、四平头、旅大红骨和瑞德五大主要类群 70 份主要玉米自交系为材料, 调查 12 个茎秆相关性状(茎高、穗位高、穗位系数、茎节数、穗位节、穗节系数、穗茎长、穗茎粗、茎鲜重、茎干重、含糖量和含水量), 分析性状相关性和类群多样性。结果表明, 我国地方种质四平头和旅大红骨茎秆性状表型变异丰富; 灌浆期玉米茎秆含水量比较稳定; 玉米植株高度与茎节长度显著相关; 玉米雌、雄穗节之间的节间数比较恒定; 玉米茎秆含糖量与茎节长度、茎粗、果穗着生位置有关; 有效降低穗位高度应从降低果穗着生节入手; 类群茎秆特征鲜明: 兰卡斯特茎节较少, 瑞德茎秆较粗, PB 茎秆较细, 旅大红骨茎秆较粗、茎节较短, 四平头植株较矮、茎秆含糖量较低、干物质含量较低; 兰卡斯特 × 四平头和兰卡斯特 × PB 类群间存在较强的生物量及籽粒产量杂种优势; 挖掘和利用茎节较长、穗位较低的玉米地方种质是我国宜机收玉米育种的技术途径。本研究结果对玉米育种具有重要指导意义。

关键词: 主要类群; 自交系; 茎秆性状; 多样性

Diversity Analysis of Stalk Traits in Maize Inbred Lines in China

SHANG Qi-qi¹, ZHANG De-gui², WANG Kai-xin¹, WANG Guo-liang¹, PAN Jin-bao¹,

LI Xin-hai², SHI Li-yu¹

(¹Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206; ²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: To study stalk characteristics and diversity of different main groups on maize in China is an important step for harvesting maize by mechanical means. In this study, seventy common maize inbred lines, derived from five groups of Lancaster, PB, Sipingtou, Lüda Red Cob and Reid respectively, were used to investigate their stalk-related traits, i.e. stem height (SH), ear height (EH), ear position coefficient (EPc), stem node number (SN), ear node (EN), ear node coefficient (ENc), internode length of ear (IL), internode diameter of ear (ID), stem fresh weight (FW), stem dry weight (DW), brix and moisture content (MC). A higher phenotypic variation existed in Sipingtou and Lüda Red Cob group, both of which are the local germplasms in China. At the filling stage, the moisture content of maize stalk became stable. A significant correlation in maize plant height and internode length was observed, while the number of internodes between ear and tassel was relatively constant. The sugar content of maize stalk was correlated to the length of internode, the diameter of stem and the location of ear. It's more effective through lowering ear locating node to reduce ear height. Furthermore, maize stalk exists distinct characteristics among different groups. For examples, Lancaster group has less stem node, Reid group has greater internode diameter while PB group has less one, Lüda Red Cob group has greater internode diameter and less internode length, Sipingtou group has shorter stem, less brix and dry weight. There

收稿日期: 2019-06-27 修回日期: 2019-07-26 网络出版日期: 2019-08-07

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190627003>

第一作者研究方向为玉米遗传育种, E-mail: shangqi818@126.com; 张德贵为共同第一作者

通信作者: 李新海, 研究方向为玉米遗传育种与种质资源研究, E-mail: lixinhai@caas.cn

史利玉, 研究方向为玉米遗传育种与种质资源研究, E-mail: sly321@bua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31671706); 北京市教委科研计划一般项目 (KM201810020005); 北京农学院学位与研究生教育改革与发展项目 (2019YJS007)

Foundation project: National Natural Science Foundation Project (31671706), Beijing Educational Committee Project (KM201810020005), Education Development and Innovation Project of BUA (2019YJS007)

has strong heterosis of biomass and grain yield in Lancaster \times Sipingtou and Lancaster \times PB. It's an alternative strategy of mechanization breeding utilizing China local germplasm with the longer internode and the lower ear node. These results could provide important reference for maize breeding.

Key words: main groups; inbred lines; stalk traits; diversity

玉米在长期驯化过程中,形成了明显的表型特征,并呈现出广泛多样性。这些多样性种质资源,对我国玉米育种发展具有重要意义。目前,我国玉米育种利用的种质资源主要有国内地方种和外来种质两大部分。以丹 340、E28 为代表的旅大红骨和以黄早四为代表的四平头种质是我国地方种质的典型代表。20 世纪 50 年代后期,随着美国玉米单交种的引进与利用,以及 Mo17、B73 等优良自交系的引入及改良,逐渐形成了兰卡斯特和瑞德种质。20 世纪 70-80 年代,以先锋杂交种 P78599 选系为代表,选育出齐 319、X178 等自交系,形成 P 群种质^[1-2]。随着玉米育种实践不断推进和玉米种质创新,不同研究者对我国玉米自交系主要类群划分略有不同,但一般都包含兰卡斯特、四平头、旅大红骨、瑞德和 PB 群^[3-6]。明确这些主要类群种质性状特征,有助于更好地开展育种工作。

玉米茎秆作为重要农艺性状,不仅是玉米获得水分、养分的重要途径,也是玉米运输光合产物至穗部籽粒的主要通道。着生于茎秆茎节处的玉米叶片是进行光合作用的主要器官,茎节越多,叶片越多,光合同化物越多^[7]。这些光合同化物主要以蔗糖形式通过玉米茎秆运输转移到发育籽粒中^[8-9],所以玉米茎秆中的蔗糖含量与玉米籽粒干物质积累有一定关系。研究表明玉米茎秆的茎高、茎粗以及果穗着生位置不仅与植株倒伏有关系^[10-12],与玉米的机械化收割也呈极大相关性^[13]。因此,对玉米主要类群种质的茎秆特征进行分析,可为玉米种质改良及品种选育提供指导。目前,对玉米茎秆性状的研究大部分集中在间接改变茎秆性状所引起的玉米倒伏或产量变化,如种植密度^[14-15]、生长调节剂^[14, 16-17]及肥料^[18-19]等因素产生的影响。直接以玉米茎秆为对象,从杂优模式角度系统分析自交系茎秆性状差异特征的研究未见报道。

本研究以我国玉米主要类群种质为基础,明确玉米茎秆性状关系,系统分析茎秆性状特点,指导我国玉米种质改良及新品种选育,为玉米机械化育种实践服务。

1 材料与方法

1.1 供试材料

来源于兰卡斯特、PB、四平头、旅大红骨和瑞德

五大主要类群的 70 份主要玉米自交系(表 1)。

1.2 试验方法

2018 年 5 月 13 日,将供试玉米自交系种植于北京农学院亭自庄科技园试验基地。供试材料随机排列,单行种植,行长 5 m,行距 60 cm,株距 25 cm(约 5445 株/667 m²)。其中,部分试验材料设置 3 次重复。试验区四周设 2 行保护行。2018 年 6-8 月降水量 243 mm,有效积温 2346 ℃。试验基地的土壤类型为潮土,pH 值 8.10。基肥分别施尿素 375 kg/hm²、磷酸二铵 375 kg/hm²、复合肥 375 kg/hm²,在大喇叭口时期追肥尿素 275 kg/hm²。田间其他管理与一般生产田相同。

1.3 茎秆性状测定方法

供试材料每行选取 2 株,在籽粒灌浆期进行全株收获(地上部分全部刈割)。随后,将叶片、叶鞘、雄穗、气生根等全部摘除,留带有果穗的玉米茎秆备用。测定性状包括:茎高(SH, stem height)、穗位高(EH, ear height)、穗位系数(EPc, ear position coefficient)^[14]、茎节数、穗位节、穗节系数、穗茎长、穗茎粗、茎鲜重、茎干重、茎秆含糖量、茎秆含水量。

茎节数(SN, stem node number):玉米茎秆的茎节个数;穗位节(EN, ear node):从玉米茎秆基部节起,玉米果穗着生节数;穗节系数(ENc, ear node coefficient):穗位节与茎节数的比值;穗茎长(IL, internode length of ear):玉米果穗着生节的长度。由果穗着生节上节间长和下节间长的平均值求得。穗茎粗(ID, internode diameter of ear):玉米果穗着生节上节间直径和下节间的直径的均值,用游标卡尺测量;茎鲜重(FW, stem fresh weight):玉米茎秆(无果穗)鲜重;茎干重(DW, stem dry weight):玉米茎秆(无果穗)烘干至恒重后的重量;茎秆含糖量(Brix):玉米茎秆榨汁混匀,用移液枪吸取 1~2 mL,使用手持数显糖度计(PR-101 α)测定;茎秆含水量(MC, moisture content):(茎鲜重-茎干重)与茎鲜重的比值。

1.4 数据分析

使用 Genstat 统计分析软件中的限制性最大似然(REML, Restricted maximum likelihood)函数对供试材料的茎秆性状进行最佳线性无偏估计;借助

表 1 70 份主要玉米自交系及其来源
Table 1 70 maize inbred lines and their source

序号 No.	名称 lines	来源 Source	类群 Group	序号 No.	名称 lines	来源 Source	类群 Group
1	吉 419	B68Ht × Mo17	Lan	36	444	A619Ht1 × 黄早四	SPT
2	416	404 × Mo17	Lan	37	昌 7-2	(黄早四 × 潍 95) × S901	SPT
3	四 -419	B68Ht × Mo17	Lan	38	唐四平头	四平头种质	SPT
4	吉 412	Mo17 × 金 09	Lan	39	吉 81162	丹 340 改良系	LRC
5	Mo17	C103 × CI 187-2	Lan	40	丹 360	(白轴旅 9 × 有稃玉米)F ₂ 辐照	LRC
6	豫 12	Mo17 改良系	Lan	41	辽 138	丹 340 × 长美 48	LRC
7	丹 1324	(Mo17 × NN14BHt) × Mo17	Lan	42	综 31	自 330 系统综合种	LRC
8	D185	Mo17 × B37 × Mo17	Lan	43	材 11-8	330 × 门可 B	LRC
9	吉 495	(Mo17 × C105) × Mo17	Lan	44	绥系 707	绥系 601 × 丹 340	LRC
10	J002	吉 63 × Mo17	Lan	45	沈 118	朝 23 × 超甜	LRC
11	吉 1037	黄早四 × 潍春	Lan	46	CA091	(505/o2 × 7091) × 7091	LRC
12	C649	Mo17 × 金皇后	Lan	47	郑 35	(138 × 郑 22) × 掖 52106	LRC
13	R18	美国 P78599 杂交种选系	PB	48	冲 72	美国垦秆群体	LRC
14	89-1	美国 P78599 杂交种选系	PB	49	四 273	81162 × 丹 340	LRC
15	SH15	P78599	PB	50	E28	(A619Ht1 × 旅 9 宽) × 旅 9 宽	LRC
16	金黄 59	P78599	PB	51	旅九宽	旅九变异株	LRC
17	丹 988	P78599	PB	52	鲁原 92	原齐 122 × 1137	LRC
18	齐 319	美国 P78599 杂交种选系	PB	53	掖 478	8112 × 沈 5003	Reid
19	多黄 29	美国 P78599 杂交种选系	PB	54	U8112	美国杂交种选系	Reid
20	沈 137	6JK1118	PB	55	488	U8112 × 沈 5003	Reid
21	农大 178	美国 P78599 杂交种选系	PB	56	7922	美国杂交种 P3382 选系	Reid
22	P138	美国 P78599 杂交种选系	PB	57	812	8112 导入外来种质后代选育	Reid
23	丹 3130	美国 P78599 杂交种选系	PB	58	辽 5114	铁 7922 × 沈 5003	Reid
24	吉 A-034	Mo17 早 × 78599	PB	59	B234	9046 × 478	Reid
25	中自 01	美国 PN78641 杂交种选系	PB	60	中黄 68	美国 P78599 杂交种选系	Reid
26	丹黄 25	美国 P78599 杂交种选系	PB	61	辽 6082	5003.7922.8112. 郑 32.N46.B73 微群体	Reid
27	丹 599	美国 P78599 杂交种选系	PB	62	辽 2345	铁 7922 × 沈 5003	Reid
28	沈 136	美国 P78599 杂交种选系	PB	63	832	PN3382	Reid
29	黄早四	塘四平头田间杂株	SPT	64	吉 046	9046 变异株	Reid
30	CN962	黄改系	SPT	65	四 387	(Mo17 × U8112) × Mo17	Reid
31	黄野四	(野鸡红 × 黄早四) × 墩子黄	SPT	66	D387	Mo17 × L105/8112	Reid
32	四至四	(黄早四 × 自 334) × 黄早四	SPT	67	四 -D105	L18 × 340/L18	Reid
33	冀 35	黄早四 × 农家种冀多 142	SPT	68	8129	8129	Reid
34	四 -279	黄早四 × 428	SPT	69	TS6278	南 602 × 478 杂交, 回交, 自交	Reid
35	D 黄 212	D729 × 黄早四	SPT	70	郑 58	掖 478 改良系	Reid

Microsoft Excel、Genstat 软件进行统计分析、方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 玉米茎秆性状表型变异

按主要类群对供试材料的茎秆性状进行统计分析(表 2),发现旅大红骨类群和四平头类群各有 6 个茎秆性状变异系数在 20% 以上,而瑞德、PB 和兰

卡斯特类群变异系数在 20% 以上的较少,分别为 3 个、1 个和 1 个。这说明旅大红骨和四平头种质的茎秆性状表型变异较为丰富。比较而言,四平头类群的穗位高和茎干重的变异系数较大,而旅大红骨类群的茎高和穗位节的变异系数较大。

就茎秆性状而言,穗位高、穗位数、穗茎长、茎鲜重、茎干重及茎秆含糖量的变异系数均在 20% 以上,说明 70 份玉米自交系在果穗着生位置、茎秆生

表 2 玉米自交系茎秆性状表型统计及方差分析

Table 2 Phenotypic traits of stalk in maize inbred lines and their analysis of variance

性状 Trait	兰卡斯特 Lan (12)			PB (16)			四平头 SPT (10)			旅大红骨 LRC (14)			瑞德 Reid (18)			total (70)			F 值 ^b	
	均值 ± 标准差	变异系数 (%)	CV	均值 ± 标准差	变异系数 (%)	CV	均值 ± 标准差	变异系数 (%)	CV	均值 ± 标准差	变异系数 (%)	CV	均值 ± 标准差	变异系数 (%)	CV	均值 ± 标准差	变异系数 (%)	CV		
	Mean ± SD			Mean ± SD			Mean ± SD			Mean ± SD			Mean ± SD			Mean ± SD				
茎高 (cm) SH	164 ± 14	9	150 ± 18	12	133 ± 22	17	148 ± 30	20	164 ± 23	14	153 ± 24	16	164 ± 23	14	153 ± 24	16	153 ± 24	16	3.894**	10.5**
穗位高 (cm) EN	69 ± 15	22	77 ± 13	17	77 ± 13	29	67 ± 12	18	72 ± 18	25	72 ± 16	22	72 ± 18	25	72 ± 16	22	72 ± 16	22	0.753	0.665
穗位系数 Epc	0.43 ± 0.06	14	0.51 ± 0.09	18	0.51 ± 0.09	22	0.51 ± 0.10	20	0.44 ± 0.07	16	0.48 ± 0.10	21	0.44 ± 0.07	16	0.48 ± 0.10	21	0.48 ± 0.10	21	4.339**	7.185**
茎节数 SN	12 ± 1	8	14 ± 2	14	14 ± 2	15	13 ± 2	15	13 ± 1	8	13 ± 2	15	13 ± 1	8	13 ± 2	15	13 ± 2	15	3.332*	1.074
穗位节 EN	6 ± 1	17	7 ± 1	14	7 ± 1	14	7 ± 2	29	6 ± 1	17	7 ± 1	14	6 ± 1	17	7 ± 1	14	7 ± 1	14	1.846	1.755
穗节系数 ENc	0.49 ± 0.05	10	0.51 ± 0.06	12	0.51 ± 0.06	15	0.50 ± 0.08	16	0.48 ± 0.05	10	0.50 ± 0.06	12	0.48 ± 0.05	10	0.50 ± 0.06	12	0.50 ± 0.06	12	0.942	1.202
穗茎长 (cm) IL	14.32 ± 2.38	17	11.30 ± 2.20	19	11.30 ± 2.20	21	10.77 ± 3.47	32	13.34 ± 2.17	16	12.15 ± 2.85	23	13.34 ± 2.17	16	12.15 ± 2.85	23	12.15 ± 2.85	23	5.623**	10.883**
穗茎粗 (mm) ID	14.65 ± 1.39	9	13.18 ± 1.88	14	13.18 ± 1.88	6	14.60 ± 1.91	13	15.25 ± 1.93	13	14.32 ± 1.85	13	15.25 ± 1.93	13	14.32 ± 1.85	13	14.32 ± 1.85	13	3.642**	0.119
茎鲜重 (g) FW	234.00 ± 26.44	11	181.09 ± 65.41	36	181.09 ± 65.41	34	175.00 ± 55.58	32	208.68 ± 72.04	35	197.48 ± 62.94	32	208.68 ± 72.04	35	197.48 ± 62.94	32	197.48 ± 62.94	32	1.72	1.511
茎干重 (g) DW	40.00 ± 6.82	17	33.04 ± 11.67	5	33.04 ± 11.67	26	38.00 ± 4.96	13	33.00 ± 8.66	26	34.36 ± 9.16	27	33.00 ± 8.66	26	34.36 ± 9.16	27	34.36 ± 9.16	27	2.772*	0.203
茎秆含糖量 (%) Brix	12.8 ± 2.1	16	11.3 ± 2.1	19	9.7 ± 2.8	29	12.0 ± 2.4	20	11.8 ± 1.8	15	11.6 ± 2.3	20	11.8 ± 1.8	15	11.6 ± 2.3	20	11.6 ± 2.3	20	2.925*	1.92
茎秆含水量 (%) MC	0.84 ± 0.03	4	0.81 ± 0.06	7	0.83 ± 0.08	10	0.79 ± 0.04	5	0.83 ± 0.04	5	0.82 ± 0.05	6	0.83 ± 0.04	5	0.82 ± 0.05	6	0.82 ± 0.05	6	1.347	1.444

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; ^a 70 份玉米自交系 5 个类群间方差分析的 F 值; ^b 70 份玉米自交系 2 个类群间 (国内和国外) 方差分析的 F 值* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; ^a F Value estimated of variance analysis with 70 maize inbred lines being divided into 5 groups, and ^b that being divided into 2 groups

物量及光合同化物运输方面存在较丰富的表型变异。其中,四平头类群的茎秆含糖量最低,为 9.7% (表 2)。玉米茎秆含水量的变异系数最小(6%),说明灌浆期,玉米对其茎秆含水量的要求比较严格,在 82% 左右。

2.2 玉米茎秆性状相关性分析

对 70 份玉米自交系 12 个茎秆性状进行相关性

分析,结果表明共有 45 对性状存在显著相关。其中,茎节数与穗位节极显著正相关,相关系数为 0.855,说明玉米茎节数越多,果穗着生节位置也相应变高。线性回归方程为 $SN=0.9841EN+6.6034$,说明玉米果穗着生节与雄穗着生节之间的节间个数比较固定,约有 6~7 个。此外,穗位节与穗节系数极显著正相关,说明穗位节越低,穗节系数越小(图 1、表 3)。

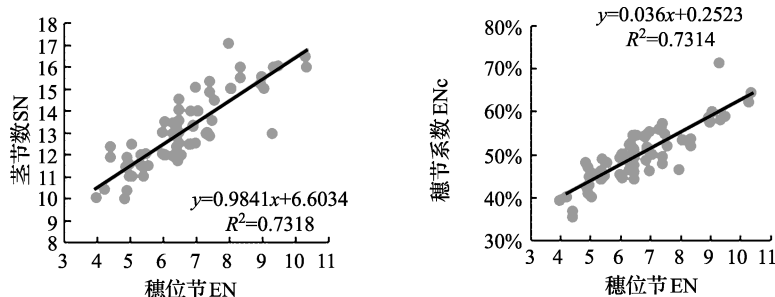


图 1 玉米茎秆性状散点图

Fig.1 Scatter plot of phenotypic traits of corn stalk

玉米茎高与穗茎长极显著正相关,与茎节数无明显线性关系。同时,穗茎长与茎节数极显著负相关(表 3),说明玉米植株高度的增加主要是通过增加玉米节间的长度,而非玉米节的个数。

玉米茎秆含糖量与穗茎长、穗茎粗和茎干重显著或极显著正相关。同时,穗茎长、穗茎粗与茎干重显著或极显著正相关(表 3),说明果穗着生节越长、越粗,茎秆含糖量越大,茎干重越大。

此外,玉米茎秆含糖量与穗位高、穗位系数、穗位节及穗节系数显著或极显著负相关(表 3),说明玉米果穗着生位置与茎秆含糖量,即光合作用同化物的运输或玉米籽粒干物质的积累有很大关系,果穗着生位置偏低可能更有利于籽粒中干物质的积累。同时,茎秆含糖量与茎节数极显著负相关,说明玉米茎节数越多,茎秆含糖量越低。因玉米茎节数与叶片数相等,而茎秆含糖量与茎高无明显线性关系,说明相比较来看,光合同化物的运输或玉米籽粒干物质的积累与玉米果穗着生位置,即库的位置关系更大。

2.3 主要类群茎秆性状差异比较

对玉米茎秆性状进行方差分析,发现茎高、穗位系数、穗茎长、穗茎粗 4 个性状在 5 个主要类群间存在极显著差异,茎节数、茎干重和茎秆含糖量在 5 个主要类群存在显著差异(表 2、图 2),说明不同类群玉米自交系的植株高度、茎粗、果穗着生位置以及含糖量有所不同。其中,四平头类群的茎高为 133 cm,穗茎长 10.60 cm,茎干重 29.04 g,茎秆含糖量 9.7%,

均显著低于兰卡斯特类群,而茎节数和穗位系数,显著高于兰卡斯特(表 2、图 2),说明四平头类群和兰卡斯特类群在茎秆性状上存在较大差异。

此外,兰卡斯特类群的茎节数、穗位系数、穗茎长及穗茎粗 4 个性状与 PB 类群对应性状也存在显著差异,说明两类群间自交系杂交,杂交后代的茎秆性状表型变异会更丰富,可能出现比较好的杂交组合。

若用高、低 2 水平或高、中、低 3 水平分别对茎秆性状的 Duncan 差异显著性比较结果进行统计(表 4),总结主要类群茎秆性状特征。

兰卡斯特类群:茎节数少,茎节较长、较粗,穗位较低,茎干重较大;PB 类群:植株较高,茎节短、细;四平头类群:植株较矮,茎节短、细,茎秆含糖量较低;旅大红骨类群:茎节短、粗,茎干重大;瑞德类群:茎节长、粗,穗位较低。

其中,瑞德类群的茎高、茎节数、茎秆含糖量、穗茎长、穗茎粗在均值差异显著性比较中,表型值都较高,推测茎干重也应该相应较高。但在茎干重差异显著比较中,瑞德类群的茎干重处于较低水平(图 2、表 3、表 4)。这是否是由于瑞德类群的穗位系数较低所导致的,还有待进一步验证。

四平头和旅大红骨与 PB、兰卡斯特及瑞德类群相比(表 2),其茎高(140 cm)、穗茎长(10.7 cm)极显著低于外来种质(茎高 158 cm、穗茎长 12.9 cm),而穗位系数(0.52)显著高于外来种质(穗位系数 0.46),说明我国地方种质植株较矮,茎节较短,穗位较高。

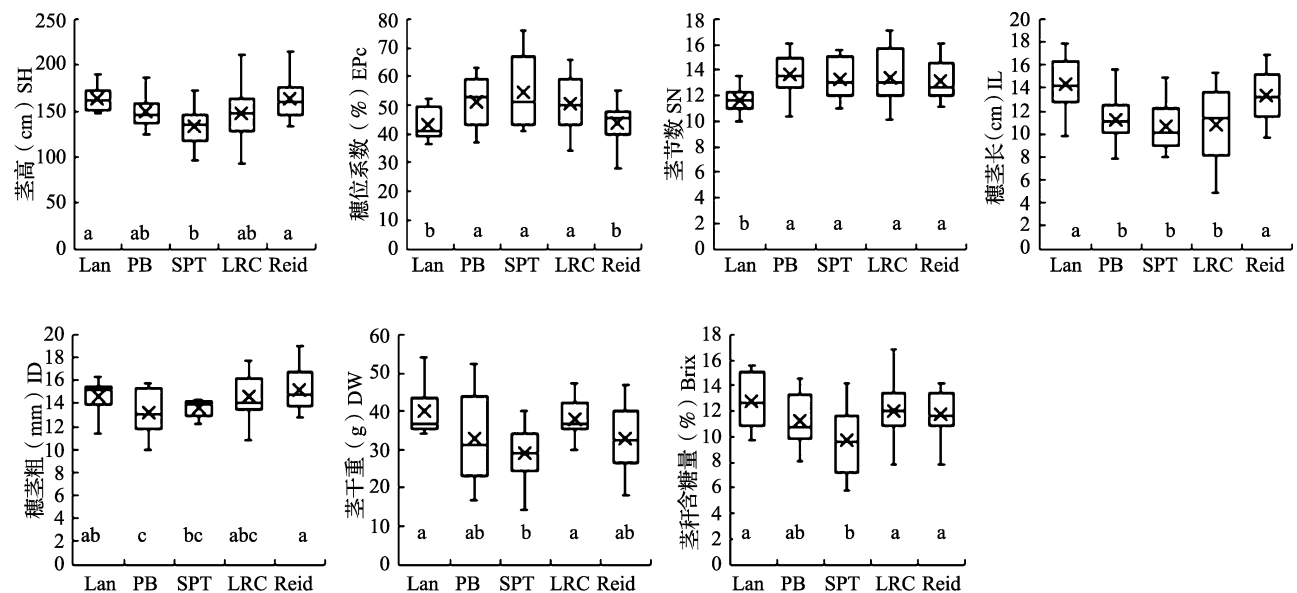
表 3 玉米自交系茎秆性状相关性分析

性状 Trait	茎高 SH	穗位高 EH	穗位系数 EPc	茎节数 SN	穗位节 EN	穗节系数 ENC	穗茎长 IL	穗茎粗 ID	茎鲜重 FW	茎干重 DW	茎秆含糖 量 Brix	茎秆含 水量 MC
茎高 SH	1.000	0.553**	-0.119	0.136	0.186	0.168	0.557**	0.320**	0.567**	0.438**	0.159	0.197
穗位高 EH		1.000	0.673**	0.441**	0.617**	0.597**	0.035	-0.029	0.462**	0.248*	-0.243*	0.202
穗位系数 EPc			1.000	0.529**	0.692**	0.658**	-0.476**	-0.246*	0.101	0.008	-0.463**	0.065
茎节数 SN				1.000	0.855**	0.471**	-0.449**	0.051	0.309**	0.011	-0.326**	0.203*
穗位节 EN					1.000	0.855**	-0.411**	-0.090	0.310**	0.030	-0.423**	0.239*
穗节系数 ENC						1.000	-0.266*	-0.208*	0.228*	0.036	-0.408**	0.222*
穗茎长 IL							1.000	0.311**	0.275*	0.227*	0.367**	0.139
穗茎粗 ID								1.000	0.666**	0.540**	0.290*	0.262*
茎鲜重 FW									1.000	0.643**	0.037	0.522**
茎干重 DW										1.000	0.291*	-0.109
茎秆含糖量 Brix											1.000	-0.087
茎秆含水量 MC												1.000

*, 0.05 水平上显著相关; **, 0.01 水平上显著相关
* and ** significant at 0.05 and 0.01 level, respectively

表 4 玉米茎秆性状 Duncan 结果统计

类群 Group	茎高 SH	穗位系数 EPc	茎节数 SN	茎干重 DW	茎秆含糖量 Brix	穗茎长 IL	穗茎粗 ID
Lan	高	低	低	高	高	高	高
PB	高	高	高	低	高	低	低
SPT	低	高	高	低	低	低	中
LRC	高	高	高	高	高	低	高
Reid	高	低	高	低	高	高	高



图中字母 a, b, c 表示在 0.05 显著水平下骨干类群间茎秆性状表型均值的 Duncan 检验
In figure, the letters a, b, and c indicate group classification of the five phenotypic means through Duncan's test at a 0.05 threshold
图 2 玉米自交系茎秆表型性状盒形图
Fig.2 Box plot of phenotypic traits of corn stalk in maize inbred lines

3 讨论与结论

3.1 玉米茎秆性状相关性分析

玉米茎秆性状是新品种选育的重要指标。玉米籽粒形成所需要的养分和水分需要通过茎秆的长距离运输到达果穗^[20]。灌浆期,籽粒体积迅速增长并基本建成,干物质积累相对较少,水分含量变动在 80%~90%,处于水分增长阶段。此时,茎秆充足的水分及养分输送是保证玉米籽粒产量的关键^[21]。本研究测定的玉米茎秆含水量约为 82%,变异系数较小,说明灌浆期玉米茎秆含水量比较稳定,也是玉米籽粒干物质形成的重要前提。

茎秆性状相关性分析表明,玉米果穗和雄穗着生节之间的节间个数比较恒定,为 6~7 个。而且,茎节长度是玉米株高的重要决定因素,与茎节节数关系不大,这与 Meng 等^[22]和 Feng 等^[23]的研究结果较一致。但也有研究表明,穗位上节数即雌、雄穗之间的节间数是影响玉米倒伏的重要因素,可通过增加穗上节间数来降低穗位高,减少倒伏率^[24-25]。

3.2 基于主要杂优模式茎秆性状的育种探讨

不同类群间自交系杂交一般具有较强的杂种优势,杂优模式的出现,对我国玉米杂交种组配和新品种选育具有很大意义^[26]。本研究通过茎秆性状比较发现四平头与兰卡斯特两类群在植株高度、茎粗、果穗着生位置以及含糖量存在显著差异。因这些性状直接影响玉米植株的生物量及籽粒产量,所以这两类群在生物量和籽粒产量方面可能存在强杂种优势。利用该杂优模式培育出的龙单 25、吉单 180 等优良品种就是很好的证明^[27]。此外,兰卡斯特类群的茎节数、穗位系数、穗茎长及穗茎粗 4 个性状与 PB 类群对应性状也存在显著差异,说明兰卡斯特类群和 PB 类群也可能存在强生物量杂种优势。调查发现,吉单系列部分品种(吉单 196、吉单 198、吉单 38)^[28]就是这种杂优模式的实践应用。因此,本研究可看作是我国主要类群杂优模式的一个理论验证。而且,兰卡斯特 × 四平头和兰卡斯特 × PB 类群可能出现生物量较大的杂交组合,可以尝试开展青贮玉米新品种培育工作。

3.3 挖掘和利用地方种质改良茎秆特性依然是我国育种实践的重要方向

兰卡斯特、PB、四平头、旅大红骨和瑞德是我国重要的玉米种质类群。其中,四平头和旅大红骨属于国内地方种质^[29]。相比外来种质而言,植株较矮,茎节较短,穗位较高。本研究结果表明茎节较

长、穗位较低更有利于籽粒干物质积累。鉴于植株较矮、穗位较低、茎秆坚韧、抗倒伏是玉米适宜机械化收获的重要指标^[30-33]。因此,国内地方种质,尤其是茎秆含糖量较低和穗位较高的四平头类群,在进行性状改良时,可以从茎节长度和穗位高度两方面考虑,如可以选择茎节较长、穗位系数较低的兰卡斯特类群种质对四平头进行性状改良。

因穗位系数是穗位高与茎高的比值,在保证茎节长度的基础上,有效降低穗位的方法便是降低果穗着生节位置。本研究中玉米果穗着生节变化范围在第 4~10 节,不同类群间无显著差异。其中,穗位节为第 4、5 节的自交系占全部自交系的 25.7%,且 72% 以上来源于外来种。不过,国内种质中也有茎节较长、果穗着生节较低的材料,如四平头类群中的冀 35、旅大红骨类群中的绥系 707、沈 118 等自交系。这些具有地方特色的种质是我国产量性状改良及品种选育的重要材料来源。

本研究系统分析兰卡斯特、PB、四平头、旅大红骨和瑞德 5 个类群 70 份玉米自交系的茎秆性状特征,得出如下结论:有效降低果穗高度应从降低果穗着生节入手;兰卡斯特 × 四平头和兰卡斯特 × PB 类群间存在强生物量及产量杂种优势;挖掘和利用茎节较长、穗位较低的地方种质是我国玉米育种的重要技术途径。本研究结果对玉米育种实践有指导意义。

参考文献

- [1] 黎裕,王天宇. 我国玉米育种种质基础与骨干亲本的形成. 玉米科学, 2010, 18(5): 1-8
Li Y, Wang T Y. Germplasm base of maize breeding in China and formation of foundation parents. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(5): 1-8
- [2] 赵久然,郭景伦,郭强,尉德铭,孔艳芳. 应用 RAPD 分子标记技术对我国骨干玉米自交系进行类群划分. 华北农学报, 1999, 14(1): 32-37
Zhao J R, Guo J L, Guo Q, Wei D M, Kong Y F. RAPD molecular marker technique was used to classify the backbone maize inbred lines in China. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 1999, 14(1): 32-37
- [3] 孙琦,李文才,张发军,于彦丽,张庆伟,窦圣强,孟昭东. 2001-2012 年国审玉米品种亲本自交系系谱来源分析. 玉米科学, 2014, 22(6): 6-11, 15
Sun Q, Li W C, Zhang F J, Yu Y L, Zhang Q W, Dou S Q, Meng Z D. Analysis on the pedigree of the parental lines of the maize hbrids approved by the nation from 2001 to 2012. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(6): 6-11, 15
- [4] 石海春,袁昊,李东波,余学杰,柯永培. 82 份玉米自交系遗传多样性分析. 华北农学报, 2014, 29(6): 84-93
Shi H C, Yuan H, Li D B, Yu X J, Ke Y P. Analysis of genetic

- diversity of 82 maize inbred lines. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(6): 84-93
- [5] 贺文姝, 张海波, 孙宏蕾, 阮燕晔, 崔震海, 张立军. 不同类群玉米自交系苞叶性状的差异分析. *华中农业大学学报*, 2018, 37(4): 30-35
- He W S, Zhang H B, Sun H L, Ruan Y Y, Cui Z H, Zhang L J. Variation analyses of husk traits in different maize heterotic group. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018, 37(4): 30-35
- [6] Xie C X, Zhang S H, Li M S, Li X H, Hao Z F, Bai L, Zhang D G, Liang Y H. Inferring genome ancestry and estimating molecular relatedness among 187 Chinese maize inbred lines. *Journal of Genetics and Genomics*, 2007, 34(8): 738-748
- [7] 岳尧海, 周小辉, 杨贤成, 任军, 刘俊英. 夏玉米产量性状与产量的灰色关联度分析. *玉米科学*, 2004, 12(4): 21-22, 25
- Yue Y H, Zhou X H, Yang X C, Ren J, Liu J Y. Analysis of grey correlated degree between yield trait and yield of summer maize. *Journal of Maize Sciences*, 2004, 12(4): 21-22, 25
- [8] 华鹤良, 赵青, 李国生, 曹振奇, 王杰, 卞云龙. 玉米籽粒灌浆特性及其与茎秆糖分的关系. *江苏农业学报*, 2018, 34(6): 1239-1246
- Hua H L, Zhan Q, Li G S, Cao Z Q, Wang J, Bian Y L. Kernel filling characteristics and their relationship with stalk sugar content in maize. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(6): 1239-1246
- [9] 华鹤良, 赵青, 周宇, 李国生, 王震寰, 卞云龙. 玉米棒三叶光合性状对茎秆糖含量的影响. *玉米科学*, 2016, 24(3): 92-98
- Hua H L, Zhao Q, Zhou Y, Li G S, Wang Z Y, Bian Y L. Effect of photosynthetic characters of three ear leaves on stalk sugar content in maize. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(3): 92-98
- [10] 丰光, 景希强, 李妍妍, 王亮, 黄长玲. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析. *华北农学报*, 2010, 25(Z1): 72-74
- Feng G, Jing X Q, Li Y Y, Wang L, Huang C L. Correlation and path analysis of lodging resistance with maize stem characters. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(Z1): 72-74
- [11] Pickett L K, Liljedahl J B, Haugh G G. Rheological properties of corn stalk subjected to transverse loading. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 1969(12): 392-396
- [12] Ma D L, Xie R Z, Liu X, Niu X K, Hou P, Wang K R, Lu Y L, Li S K. Lodging-related stalk characteristics of maize varieties in China since the 1950s. *Crop Science*, 2014, 54(6): 2805-2814
- [13] 周颖, 顾万荣, 赵猛, 佟桐, 刘笑鸣, 李彩凤, 李晶, 魏湜. 黑龙江省不同熟期春玉米品种茎秆特性及机收指标差异. *华北农学报*, 2017, 32(Z1): 140-146
- Zhou Y, Gu W R, Zhao M, Tong T, Liu X M, Li C F, Li J, Wei T. Differences of stalk characteristics and grain mechanically harvesting qualities of different maturing-type spring maize in Heilongjiang province. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(Z1): 140-146
- [14] 徐田军, 吕天放, 陈传永, 刘月娥, 张译天, 刘秀芝, 赵久然, 王荣焕. 种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响及调控. *中国农业科学*, 2019, 52(4): 629-638
- Xu T J, Lv T F, Chen C Y, Liu Y E, Zhang Y T, Liu X Z, Zhao J R, Wang R H. Effects of plant density and plant growth regulator on stalk traits of maize and their regulation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(4): 629-638
- [15] 邓妍, 王创云, 郭虹霞, 张丽光, 赵丽, 王陆军, 牛学谦, 王美霞. 群体密度对玉米茎秆农艺性状、力学特性和产量的影响. *作物杂志*, 2017(4): 89-95
- Deng Y, Wang C Y, Guo H X, Zhang L G, Zhao L, Wang L J, Niu X Q, Wang M X. Effects of population density on stalk agronomic traits, mechanical properties, and yield of maize. *Crops*, 2017(4): 89-95
- [16] 柴孟竹, 李钊, 秦东玲, 刘禹辰, 徐密林, 董璐铭, 张倩, 杨德光, 张平. 乙烯利对玉米茎秆抗倒伏性的调控效应. *玉米科学*, 2017, 25(6): 63-72
- Chai M Z, Li Z, Qin D L, Liu Y C, Xu M L, Dong L M, Zhang Q, Yang D G, Zhang P. Effect of ethephon on lodging resistance of maize stem. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(6): 63-72
- [17] 刘文彬, 冯乃杰, 张盼盼, 李东, 张洪鹏, 何天明, 赵晶晶, 徐延辉, 王畅. 乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1326-1334
- Liu W B, Feng N J, Zhang P P, Li D, Zhang H P, He T M, Zhao J J, Xu Y H, Wang C. Effects of ethephon and kinetin on lodging-resistance and yield of maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1326-1334
- [18] 刘笑鸣, 顾万荣, 李彩凤, 佟桐, 王彬, 吕英杰, 赵猛, 刘赵月. 高密度种植下氮肥和化控措施对春玉米茎秆性状及产量的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 450-458
- Liu X M, Gu W R, Li C F, Tong T, Wang B, Lv Y J, Zhao M, Liu Z Y. Effects of nitrogen fertilization and chemical control on stalk traits and yield of spring maize under super high planting density in Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 450-458
- [19] 边大红, 刘梦星, 牛海峰, 魏钟博, 杜雄, 崔彦宏. 施氮时期对黄淮海平原夏玉米茎秆发育及倒伏的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(12): 2294-2304
- Bian D H, Liu M X, Niu H F, Wei Z B, DU X, Cui Y H. Effects of nitrogen application times on stem traits and lodging of summer maize (*Zea mays* L.) in the Huang-Huai-Hai plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2294-2304
- [20] 杨同文, 李潮海. 玉米籽粒发育的粒位效应机理研究. *种子*, 2012, 31(3): 54-58
- Yang T W, Li C H. Study on mechanisms of kernel position effects in maize kernel developing. *Seed*, 2012, 31(3): 54-58
- [21] 赵福成, 谭禾平, 包斐, 韩海亮, 楼肖成, 陆卫平, 王桂跃. 灌浆期水分胁迫对甜玉米籽粒糖分积累和蔗糖代谢酶活性的影响. *分子植物育种*, 2018, 16(11): 3710-3717
- Zhao F C, Tan H M, Bao F, Han H L, Lou X C, Lu W P, Wang G Y. Effects of water stress during grain filling on sugar accumulation and enzyme activity associated with sucrose metabolism in sweet corn. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(11): 3710-3717
- [22] Meng Y, Yan J, Ma X, Teng W, Tang J. The genetic dissection of plant height using a set of RIL population in maize. *Euphytica*, 2007(155): 117-124
- [23] Feng T, Li H Z, Rui X L, Wei B, Li Q W, Dong G H, Yong S T, Yong L Z, Zu X Z. ZmGA3ox2, a candidate gene for a major QTL, qPH3.1, for plant height in maize. *The Plant Journal*, 2013(73): 405-416
- [24] 付志远, 邵可可, 陈德芝, 王炳民, 许志学, 丁冬, 汤继华. 穗上

- 节间数与玉米抗倒伏能力的相关性分析. 河南农业大学学报, 2011, 45(2): 149-154
- Fu Z Y, Shao K K, Chen D Z, Wang B M, Xu Z X, Ding D, Tang J H. Correlation analysis of the internode number above ear and lodging resistance in maize. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(2): 149-154
- [25] 陈德芝, 郭战勇, 谢惠玲, 石超男, 张战辉. 玉米穗上节间数的 QTL 分析. 河南农业大学学报, 2018, 52(1): 6-10
- Chen D Z, Guo Z Y, Xie H L, Shi C N, Zhang Z H. QTL analysis of the internodes above the upmost ear in maize. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 6-10
- [26] 赵久然, 李春辉, 宋伟, 王元东, 邢锦丰, 张如养, 易红梅, 杨扬, 石子, 王继东. 利用 SSR 标记解析京科 968 等系列玉米品种的杂优模式. 玉米科学, 2017, 25(5): 1-8
- Zhao J R, Li Chun H, Song W, Wang Y D, Xing J F, Zhang R Y, Yi H M, Yang Y, Shi Z, Wang J D. Elaboration of heterotic pattern in a series of maize varieties by SSR markers. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(5): 1-8
- [27] 靳晓春, 王俊强, 蒋佰福, 牛忠林, 邱磊, 吴丽丽, 夏永伟. 1980-2012 年黑龙江省玉米种质资源及其杂种优势利用回顾. 农学学报, 2016, 6(9): 8-14
- Jin X C, Wang J Q, Jiang B F, Niu Z L, Qiu L, Wu L L, Xia Y W. Germplasm resources and heterosis utilization of maize in Heilongjiang province from 1980 to 2012. Journal of Agriculture, 2016, 6(9): 8-14
- [28] 刘文国, 张志军, 赵万庆, 杨伟光, 路明. 基于 SSR 荧光标记的吉单系列玉米品种遗传分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(10): 25-36, 44
- Liu W G, Zhang Z J, Zhao W Q, Yang W G, Lu M. Genetic analysis of Jidan maize varieties using fluorescent SSR markers. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2016, 44(10): 25-36, 44
- [29] 黎裕, 王天宇. 玉米种质创新——进展与展望. 玉米科学, 2017, 25(3): 11-18
- Li Y, Wang T Y. Germplasm enhancement in maize: advances and prospects. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 11-18
- [30] 陈得义, 景希强, 王孝杰, 曹祖波. 耐密宜机收玉米品种选育探讨. 作物杂志, 2014, 30(2): 13-15
- Chen D Y, Jing X Q, Wang X J, Cao Z B. Discussion on the breeding for mechanical harvesting and density tolerant maize hybrids. Crops, 2014, 30(2): 13-15
- [31] 潘天遵. 玉米群体改良杂交组合宜机收性评价及其指标的筛选. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016
- Pan T Z. Population improvement of maize hybrid combinations suitable for machine harvesting evaluation and index screening. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016
- [32] 赵宽厚. 早熟玉米高代系宜机收特性研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018
- Zhao K H. Research of machine-harvesting characteristics of ear-maturing maize inbred lines. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018
- [33] 李川, 乔江方, 谷利敏, 夏来坤, 朱卫红, 黄璐, 刘京宝. 影响玉米籽粒直接机械化收获质量的生物学性状分析. 华北农学报, 2015, 30(6): 164-169
- Li C, Qiao J F, Gu L M, Xia L K, Zhu W H, Huang L, Liu J B. Analysis of maize biological kernel mechanically traits which affected corn harvesting qualities. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(6): 164-169