

不同种植密度下玉米茎秆纤维性状和抗倒性相关分析

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

(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 071000)

摘要:以 290 份遗传多样性丰富的自交系为材料, 研究不同种植密度下茎秆抗推力和纤维品质性状与茎秆抗倒性之间的关系; 对不同杂种优势群的抗推力和纤维素含量进行多重比较, 并筛选茎秆抗推力和纤维品质性状优良的自交系。结果表明: 不同种植密度和不同自交系间的抗推力的显著性差异均达到显著水平。抗推力与纤维素含量在高密度和低密度条件下均呈极显著正相关关系。多重比较结果显示, 高密度条件下的纤维素含量在不同类群间没有显著性差异, 高密度和低密度条件下的抗推力和低密度条件下的纤维素含量存在类群间的显著性差异。不同杂种优势群中, 抗推力和纤维素含量在两个密度下均表现稳定优良的自交系, 瑞德群分别包括 4 个和 3 个, 兰卡斯特分别包括 1 个和 5 个, P 群分别包括 2 个和 2 个, 旅大红骨分别包括 2 个和 1 个, 塘四平头分别包括 2 个和 1 个。

关键词: 玉米; 茎秆; 种植密度; 抗推力; 纤维品质性状; 抗倒伏

Stalk Fiber Related Traits and Lodging Resistance Correlation Analysis under Different Planting Density in Maize

REN An-ran, WU Li-fen, GUAN Hong-hui, YANG Sha, JIAN Li-qiang, LIU Yuan-feng,
DU Yu-qian, WANG Jiao, GUO Jin-jie, CHEN Jing-tang

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

Abstract: A total of 290 inbred lines with rich genetic diversity were used in this study. We investigated the relationship between stalk pushing resistance and fiber quality related traits with lodging resistance at different densities. Stalk pushing resistance and fiber quality related traits excellent performance lines were screened by multiple comparisons among different heterosis. The results showed that different lines had highly significant difference at different densities, furthermore, significantly positive correlation was studied between stalk pushing resistance and content of cellulose. The results of multiple comparison showed that content of cellulose among different heterosis had no significant difference at high density. Pushing resistance exist significant difference under two density and content of cellulose under low density among different heterosis. In different heterosis, the number of lines screened out with excellent performance about pushing resistance and content of cellulose under two density, and there were 4 and 3 lines in the Reid group, 1 and 5 lines in the Lancaster group, 2 and 2 lines in the P group, 2 and 1 lines in the LRC group, 2 and 1 lines in the TangSPT group.

Key words: maize; stalk; plant density; pushing resistance; fiber quality traits; resistant to lodging

适当增加种植密度是提高产量的重要途径, 而倒伏是增加种植密度的主要限制因素。据估计, 每年由于玉米茎秆倒伏而造成的产量损失在 5% ~ 25% 之间, 甚至更高^[1-3]。玉米茎秆倒伏一般可划分为根倒、

收稿日期: 2016-10-14 修回日期: 2016-12-11 网络出版日期: 2017-06-13

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20170613.0827.002.html>

基金项目: 国家大学生创新创业项目 (201610086017); 河北农业大学创新创业项目 (20160102); 河北省现代农业技术体系玉米创新团队项目资助 (HBCT2013020204); 国家重点研发计划 (2016YFD0101204-3); 河北农业大学作物学科梯队建设基金 (TD2016C307)

第一作者研究方向为玉米遗传育种, E-mail: renanran9503@163.com; 武丽芬为共同第一作者

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

茎倒和茎折。有研究报道,茎折占倒伏的30%~60%^[4],茎折对玉米生产的影响最为严重,不仅破坏茎秆的输导系统影响地上地下部水分和养分的运输,还会导致病虫害加剧^[5]。玉米倒伏轻者减产5%~10%,重者减产30%~50%,严重发生的地块几近绝产^[6]。此外,茎秆倒伏也直接影响玉米的机械化收获,间接导致农业机械化发展速度缓慢、玉米机械收获技术含量低、产品质量差等一系列问题,严重阻碍玉米机械收获的推广应用以及机械化收获市场的启动。前人研究多从茎粗、株高、穗位高等外在因素来探讨玉米茎秆抗倒伏情况^[7],然而,从内在玉米茎秆组分构成及含量的研究鲜有报道,因此,研究玉米茎秆的纤维组分对玉米茎秆抗倒性研究具有重要意义。

从细胞学角度分析,玉米茎秆的抗倒性主要取决于茎秆细胞壁,而细胞壁的主要组成部分是纤维素、半纤维素、木质素,因此提高细胞中纤维素的含量就会提高茎秆的机械强度。L. Appenzeller等^[8]认为,单位长度玉米茎秆的纤维素含量是茎秆强度的主要决定因素,提高细胞壁中纤维素的含量就会提高茎秆机械强度。E. R. Leng^[9]通过对玉米茎秆化学成分长期选择,从茎秆营养成分角度研究抗倒折性,结果表明茎秆中木质素含量与茎倒折呈负相关。

刘仲发^[10]对玉米抗倒伏性能的研究指出,茎秆中的纤维素和木质素与茎秆穿刺强度和茎秆压碎强度均呈显著或极显著的正相关。马延华等^[11]研究发现,抗倒性不同的玉米品种地上部第3节间茎皮的酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维及酸性洗涤木质素的含量极显著大于抗倒性能力弱的品种。H. Hu等^[12]研究指出,茎秆的穿刺强度与节间每单位体积纤维素含量呈显著正相关,茎秆外皮穿刺强度与茎秆强度呈显著正相关,提高穿刺强度有助于大大增强茎秆的抗倒伏性。H. A. Esehie等^[13]对两个玉米群体进行茎秆倒伏组分比较表明,倒伏与玉米茎皮厚度、茎秆抗断强度呈负相关。勾玲等^[4]研究不同玉米品种茎秆抗倒伏相关力学特点,认为最大抗弯应力与田间倒伏率呈显著负相关。汪黎明等^[14]研究认为玉米自交系茎秆抗推力、抗折力、拔根力存在显著相关性,杂交种抗推力与抗折力也存在显著正相关。综合表明玉米茎秆强度受环境条件、品种及其形态性状、化学组分含量等多因素的影响,是一个受多因素控制的相对复杂的性状。

国内外已有对玉米茎秆纤维成分和抗倒性的研究,但较多以基于双亲的玉米家系群体为试验材料^[15],关于玉米自然群体不同种质资源的研究鲜见报道。本实验以来源广泛、遗传多样性丰富的290

份自交系组建的自然群体为研究对象,对本群体的抗推力和纤维素组分性状进行相关的数据统计分析,并通过利用Y. Liu等^[16]对相同群体的杂种优势类群划分的结果,对各个杂种优势群中纤维素含量及抗推力的多重比较,筛选相关性状表现优异的自交系为选育优良自交系及组配抗倒性强的杂交种提供指导,服务于育种实践。

1 材料与方法

1.1 试验材料与田间种植

本研究以遗传多样性丰富、来源广泛的290份国内外自交系为研究材料,其中包括220份中国玉米自交系(核心种质及其衍生系,包括本课题组选育的自交系)以及70份美国玉米自交系(包括美国核心种质和品种保护权过期自交系)。这些自交系涉及到了中国主要玉米自交系的杂种优势群,较广泛的代表了我国玉米主产区的种质资源基础。

分别于2014年和2015年在河北农业大学/国家玉米改良中心河北分中心试验站(保定),对所有试验材料进行玉米抗倒伏相关性状的鉴定。田间试验采用裂区试验设计,密度为主区,不同自交系为裂区,2个重复,2个密度。低密度为75000株/hm²,高密度为105000株/hm²。单行区种植,行长3m,行距0.6m。按大田常规生产条件进行管理。

1.2 抗倒伏相关性状表型测定

在田间玉米人工授粉后1周对290份自交系进行抗推力鉴定,试验仪器为推力测定仪(DIK-7401,日本)。每行材料选取除边株以外3株长势一致的植株,将推力仪垂直于植株茎秆穗位节中部用力直到植株与地面呈45°夹角,记录此时推力仪显示的数值,得到抗推力的表型数据。之后,截取地上部第3、4茎节,立即在105℃下杀青30min,然后65℃烘干至恒重,用高速多功能粉碎机粉碎,过40目筛后放入自封袋中密封,室温保存。采用近红外漫反射光谱法^[17]测定玉米茎秆样品的纤维素含量,得到纤维品质相关性状的表型数据。使用仪器为瑞典波通公司的DA7200近红外谷物分析仪。

1.3 表型数据分析

用基于混合线性模型的最优线性无偏预测(BLUP, best linear unbiased prediction)方法^[18-19]对两年表型数据进行处理;运用SPSS 17.0对不同环境及自交系的抗推力进行联合方差分析,对抗推力和纤维品质性状的均值进行Person相关关系和描述性统计分析,对利用相同群体划分的不同杂种优

势群^[16]进行抗推力和纤维素含量的多重比较。

2 结果与分析

2.1 抗推力和纤维素含量的最优线性无偏预测

利用基于混合线性模型的最优线性无偏预测

(BLUP)方法对两年的表型数据进行处理。该方法估计值是无偏的,且可考虑到环境和遗传关系因素,能尽可能地消除环境影响而造成的偏差。对本试验群体的茎秆抗推力和纤维素含量的数据进行了处理,结果如表 1 所示。

表 1 290 份自交系的材料目录及抗推力和纤维素含量的 BLUP 值

Table 1 The 290 inbred lines and BLUP value of pushing resistance and cellulose content

编号 ID	材料名称 Germplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
1	Mo17	系 187-2 × C103 的二环系	5.44	3.89	33.62	34.81
2	R31	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
3	698-3	美国杂交种	4.99	3.93	31.41	33.60
4	琼 51	不详	4.43	3.85	32.28	30.88
5	757	不详	5.11	4.00	33.55	32.65
6	DH138	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
7	R08	美国杂交种 P78599	5.33	4.05	31.40	31.91
8	87001	不详	4.59	3.99	31.76	32.41
9	807D	不详	4.99	3.96	33.48	31.66
10	802	不详	4.81	3.85	32.81	33.31
11	宋 1145	美国杂交种 78599	4.36	3.78	32.47	32.95
12	E600	综合种	4.86	3.77	35.14	33.10
13	E200	综合种	4.97	4.04	31.44	32.95
14	L061F	利马格兰自交系	5.71	4.31	32.56	34.42
15	DM101B	不详	4.86	3.93	33.30	34.25
16	DM07	美国衍生系	4.81	4.08	32.67	34.03
17	SC24-1	不详	4.74	4.07	31.37	35.31
18	D1139	美国衍生系	5.16	3.87	31.32	34.34
19	W222	获白 × L1029	5.77	4.07	33.97	35.55
20	Y223	美国杂交种	4.84	4.07	31.52	33.94
21	C521	不详	4.96	3.85	32.15	32.63
22	LM-2	利马格兰杂交种选系	4.99	3.96	32.48	33.10
23	B97	BSCB1 ® C9	5.01	3.93	32.76	32.81
24	B100	美国早期核心种质	4.99	3.94	32.63	34.25
25	B98	美国早期核心种质	4.99	3.96	32.48	33.10
26	B8	不详	4.94	3.80	30.89	29.45
27	SC-9	不详	5.15	3.90	31.48	31.62
28	KP3130	韩国杂交种	5.36	4.19	32.56	36.70
29	L-1	法国自交系	5.07	3.98	35.66	34.82
30	W172	法国自交系	6.03	4.03	33.44	33.93
31	综 3	综合种	4.99	3.96	32.52	33.10
32	W238	不详	5.03	3.93	31.97	33.46
33	D33A	美国衍生系	5.87	3.99	32.68	33.78
34	1614	不详	4.61	4.38	31.82	33.63
35	1145	不详	4.67	3.88	33.20	33.48
36	郑 58	掖 478 变异株	4.95	3.97	31.47	31.98
37	昌 D	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
38	M14	美国早期核心种质	4.20	3.97	33.60	33.17

表 1(续)

编号 ID	材料名称 Germplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
39	M101	美国早期核心种质	5.73	4.05	33.77	34.00
40	陈 322	不详	4.69	3.83	33.52	32.88
41	黄昌 a	不详	4.72	3.81	32.94	35.33
42	953	美国衍生系	4.99	4.04	32.48	35.18
43	黄昌 b	不详	5.02	3.88	32.40	33.80
44	W499	美国杂交种	4.88	3.89	34.49	34.58
45	SC30-1	不详	4.27	4.01	31.01	32.37
46	468-3	不详	4.73	3.85	32.82	32.40
47	XF117	美国衍生系	6.04	4.35	32.81	34.33
48	XF223	美国衍生系	4.81	4.02	32.47	33.42
49	XF134	美国衍生系	4.83	3.91	33.01	32.43
50	M131-5	美国早期核心种质	5.09	4.02	32.27	35.54
51	XOP2	美国早期核心种质	5.91	4.12	33.91	35.04
52	R1656	不详	4.78	4.03	33.39	34.75
53	鉴 1496b	不详	4.61	3.92	31.10	32.10
54	Max	不详	5.22	3.93	32.48	31.60
55	CN104	美国衍生系	4.60	4.14	32.75	33.01
56	La2-4	美国衍生系	5.27	3.73	32.52	32.30
57	T24	不详	5.15	4.07	33.62	33.89
58	Lo415	美国衍生系	4.89	3.88	32.14	33.26
59	D20	美国衍生系	5.72	3.85	33.65	35.10
60	Lo5-6	不详	4.89	4.00	30.67	33.02
61	ys06	不详	5.16	3.88	32.44	34.29
62	L473	不详	4.83	3.76	31.93	33.57
63	e 群 3	综合种	4.59	3.93	32.27	32.43
64	e 群 4	综合种	5.01	4.31	33.65	36.42
65	18-599	美国杂交种 78599	5.13	3.88	33.40	35.52
66	697	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
67	K12	黄早四 × 维春	4.78	3.94	33.31	34.47
68	海 014	不详	4.99	3.96	32.48	33.10
69	长 3	地方品种改良系	4.99	3.96	32.48	33.10
70	吉 444	A619 × 黄早四	5.97	3.82	34.19	35.00
71	黄野四 3	(野鸡红 × 黄早四) × 黄早四	4.54	3.75	33.22	31.69
72	杂 C546	C103 变异株	4.42	3.96	31.83	31.59
73	吉 63	(127-32 × 铁 84) × (淮 24 × 淮 20)	4.30	3.70	31.73	32.66
74	掖 8112	美国杂交种 3382	4.93	4.08	33.41	34.30
75	郑 32	美国杂交种 3382	4.87	4.21	33.14	32.73
76	C8605-2	铁 7922 × 沈 5003	4.74	4.14	32.08	32.44
77	7922	美国杂交种 3382	5.29	3.96	33.36	31.39
78	掖 832	美国单交种	6.08	4.02	32.49	33.36
79	长 72	地方品种改良系	4.88	3.82	33.63	34.61
80	武 109	不详	5.28	4.03	31.11	29.89
81	旅 28	旅大红骨	4.40	4.06	30.07	32.07
82	沿 812	U8112 改良系	4.94	3.91	32.54	29.68
83	齐 205	(V 矮 141/中系 017) × 群体 70	5.09	4.00	31.82	33.50

表 1(续)

编号 ID	材料名称 Cermplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
84	D854	美国衍生系	4.51	3.90	31.97	32.13
85	DH857	美国衍生系	4.88	3.81	32.00	34.10
86	DH856	美国衍生系	4.64	4.03	32.65	32.75
87	D864	美国衍生系	5.07	3.91	32.40	29.89
88	D869	美国衍生系	5.04	3.90	33.30	32.82
89	D881	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
90	D886	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
91	DH65232	美国衍生系	4.25	4.09	31.43	32.45
92	3H2	(WeiDa202 × 自 330) × H84	4.38	3.80	30.77	30.41
93	豫 87-1	美国杂交种	5.80	4.25	32.48	31.75
94	南 21-3	南斯拉夫杂交种	4.84	4.05	31.43	32.37
95	K14	不详	5.42	4.08	31.67	33.61
96	掖 478	U8112 × 沈 5003	5.74	4.06	32.85	33.84
97	掖 52106	(掖 1075 × 掖 106) × 矮金 525	4.40	3.99	32.15	30.97
98	掖 8001	5003 × 8112	4.96	3.74	31.38	31.16
99	苏湾 1611	苏湾 2	4.81	3.99	31.68	33.10
100	丹 599	美国杂交种 78599	4.77	3.85	33.58	33.25
101	D892	不详	4.61	4.07	32.28	31.77
102	苏 75	7BU9 × 511	5.51	4.13	32.93	32.26
103	R136	美国衍生系	5.00	3.98	33.37	34.12
104	200B	自 330 × 187-2	5.73	3.86	32.80	34.01
105	3489a	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.11
106	Z31B	美国衍生系	4.82	3.85	31.33	32.61
107	N68a	美国早期核心种质	4.78	3.65	31.25	34.26
108	619	美国衍生系	4.40	3.79	32.17	34.74
109	沈 5005	不详	4.83	3.79	32.34	33.03
110	3335	美国衍生系	5.41	4.06	31.85	32.02
111	Beck	美国衍生系	4.58	3.95	33.24	34.71
112	98F1	不详	4.72	3.83	30.95	34.12
113	N42	不详	4.92	3.79	33.81	33.62
114	方引	不详	4.86	3.82	31.49	32.73
115	GY3	不详	4.58	3.87	32.65	34.50
116	P167	美国杂交种	4.71	4.01	32.87	34.28
117	郑 22	丹 340 × E28	4.41	4.01	32.90	33.18
118	DF32	不详	5.69	3.93	31.18	31.28
119	FAP1360A	欧洲自交系	5.26	4.11	31.73	31.72
120	7903E	美国衍生系	5.48	4.14	32.21	33.89
121	丹 340	旅 9 改良系	4.79	3.72	33.47	32.33
122	冲 72	美国衍生系	4.98	3.97	33.24	34.07
123	M101 ⁶	美国杂交种	5.02	3.90	32.47	29.73
124	丹 9046	沈 5003 × 铁 7922	4.66	4.07	30.83	31.94
125	P25	美国衍生系	5.33	4.22	33.85	34.12
126	BM	美国衍生系	5.09	3.89	33.23	32.81
127	d140	不详	5.34	4.21	32.56	33.27
128	W9706	美国早期核心种质	4.80	3.94	33.40	33.77

表 1(续)

编号 ID	材料名称 Germplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
129	R31	美国衍生系	4.86	3.80	30.25	29.51
130	R98	美国衍生系	5.63	4.01	31.02	31.66
131	齐 319	美国衍生系	4.53	4.00	34.35	35.53
132	20762	不详	4.47	3.77	33.02	32.72
133	XF77	美国衍生系	4.90	3.76	32.60	32.94
134	Los-6	不详	5.05	4.01	31.40	33.00
135	XF27	美国衍生系	5.09	3.78	32.39	31.79
136	荻塘黄	HTB42 × 海 1917 × Mo17Hi	4.96	3.96	31.69	30.14
137	SC11-1	美国衍生系	6.29	3.92	33.46	32.78
138	SC14	美国衍生系	5.97	3.85	32.76	32.57
139	811A	S1147 × 1112	4.99	3.96	32.48	33.10
140	806A	1688 × 黄 C	5.11	4.03	31.63	32.66
141	9058	美国杂交种 6JK × 8085Tai	5.27	3.98	31.50	33.20
142	PH6WC	先锋杂交种	5.82	3.94	32.19	33.83
143	PH4CV	先锋杂交种	5.66	4.13	32.48	33.82
144	海 9-21	美国杂交种	4.92	4.03	33.17	34.64
145	928	塘四平头	4.88	3.87	32.19	34.11
146	926	塘四平头	4.39	3.69	32.05	33.55
147	A801	丹 9042 × (丹 9046 × 墨黄 9)	5.45	4.07	33.95	35.37
148	DF20	不详	4.78	3.91	32.39	32.52
149	DF27	不详	5.51	4.04	32.66	33.86
150	DH149	美国衍生系	5.33	3.98	31.70	32.46
151	DF24	不详	4.86	4.16	31.85	31.94
152	7236	不详	4.45	4.01	33.36	32.70
153	433-7	不详	4.37	3.92	32.11	30.17
154	沈 977	美国衍生系	5.10	4.25	32.75	33.48
155	农大 364 δ	不详	4.89	4.05	32.80	33.70
156	68139	美国衍生系	4.49	4.01	32.46	34.88
157	68202	美国衍生系	4.92	4.02	30.88	31.06
158	17564	美国衍生系	4.92	3.80	31.32	34.63
159	户 803	U8112 × 5003	5.33	3.87	31.06	30.56
160	P007	美国杂交种	6.01	3.85	32.48	30.05
161	M7	美国早期核心种质	4.67	3.83	31.68	32.10
162	9702	不详	5.22	4.17	35.44	37.24
163	9710	不详	4.71	4.00	32.21	32.31
164	y9961	不详	5.66	3.84	32.50	30.89
165	7026B	美国衍生系	4.80	3.91	32.94	34.91
166	196	不详	4.43	3.66	31.96	31.16
167	LD61	不详	5.11	3.81	33.34	32.11
168	68122	不详	5.54	4.16	33.83	33.61
169	M22	美国早期核心种质	5.23	4.00	34.30	33.07
170	陕 89	不详	4.84	3.98	32.54	33.91
171	吉 846	(黄早四 × 自 330) × 自 330	4.64	3.91	30.60	30.21
172	自 330	OH43 × 可利 67	4.94	4.14	32.76	33.10
173	Q1261	K12 改良系	4.50	3.77	35.15	33.92

表 1(续)

编号 ID	材料名称 Germplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
174	F7584	不详	4.95	4.01	31.75	32.11
175	丹黄02	旅系综合种	5.39	3.98	31.46	31.25
176	浚971	不详	4.29	3.76	32.21	32.30
177	丹598	OH43H3 改良系	4.41	3.76	32.29	32.54
178	W64a	美国早期核心种质	4.64	3.78	31.23	32.51
179	A619	美国早期核心种质	5.26	3.94	31.92	30.20
180	A554	美国早期核心种质	3.97	3.82	32.23	34.09
181	Ms71	美国早期核心种质	4.49	3.93	32.62	32.64
182	B76	美国早期核心种质	5.98	3.88	31.84	30.67
183	Pa91	美国早期核心种质	5.15	4.04	33.55	36.89
184	A679	美国早期核心种质	5.32	4.12	33.57	35.23
185	Co109	美国早期核心种质	4.36	3.84	32.48	33.30
186	Sg1533	美国早期核心种质	4.44	3.74	31.74	32.91
187	W182bn	美国早期核心种质	4.99	3.96	32.48	33.10
188	Va26	美国早期核心种质	5.50	4.08	33.82	33.85
189	HP301	美国早期核心种质	4.66	3.96	34.50	33.10
190	4722	不详	4.56	3.86	32.79	33.26
191	P39	美国早期核心种质	4.32	3.88	32.43	31.35
192	W2H03	美国早期核心种质	5.10	3.91	32.86	36.26
193	LH194	美国品种保护权过期自交系	4.99	4.06	32.48	33.93
194	RS710	美国品种保护权过期自交系	4.48	3.96	31.71	31.23
195	NQ508	美国品种保护权过期自交系	5.03	3.99	33.87	33.66
196	SG17	美国品种保护权过期自交系	4.51	4.06	32.29	31.39
197	MDF-13D	美国品种保护权过期自交系	4.48	4.18	33.18	32.26
198	207	美国品种保护权过期自交系	4.90	3.80	32.35	35.33
199	CR1HT	美国品种保护权过期自交系	4.52	3.92	31.32	31.43
200	6103	美国品种保护权过期自交系	5.02	3.78	32.60	33.16
201	IB014	美国品种保护权过期自交系	4.75	3.95	31.58	33.98
202	LH150	美国品种保护权过期自交系	5.43	3.96	33.11	33.71
203	4676A	美国品种保护权过期自交系	5.10	3.87	30.83	34.63
204	PHG86	美国品种保护权过期自交系	5.52	3.96	32.86	35.15
205	2369	美国品种保护权过期自交系	5.16	4.07	34.19	33.83
206	6M502	美国品种保护权过期自交系	4.88	3.93	33.41	33.46
207	NS501	美国品种保护权过期自交系	4.21	3.85	31.00	31.32
208	S8324	美国品种保护权过期自交系	6.15	4.10	31.56	33.18
209	W11900	美国品种保护权过期自交系	4.77	4.00	32.51	32.87
210	W11901	美国品种保护权过期自交系	5.11	4.02	32.44	32.12
211	W11500	美国品种保护权过期自交系	5.21	4.27	31.76	35.56
212	1313	不详	5.60	3.93	33.16	32.82
213	3189	不详	5.25	4.03	32.76	34.33
214	4003	不详	4.99	3.97	32.48	31.72
215	5032	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
216	8982	美国衍生系	4.99	3.96	32.48	33.10
217	9706	不详	4.92	3.91	32.92	33.10
218	9711	不详	5.63	3.96	32.95	34.29

表 1(续)

编号 ID	材料名称 Cermplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
219	08-64	不详	4.99	3.96	32.48	33.10
220	B4	不详	4.85	4.00	33.43	33.82
221	B68	不详	5.56	3.73	33.26	33.66
222	BS110	不详	5.26	4.03	33.30	33.97
223	D1049	美国衍生系	5.42	4.03	32.62	31.97
224	e220	不详	5.43	3.93	34.20	33.70
225	E601	不详	4.98	3.94	33.03	33.76
226	GN4095	不详	4.99	3.96	32.48	33.10
227	M3	不详	4.69	3.96	31.17	33.57
228	N138	不详	4.84	3.96	31.66	33.10
229	P138	农大 3138 亲本	4.87	3.84	33.33	33.93
230	R017	不详	4.97	3.88	32.62	33.77
231	S22	不详	4.86	3.96	33.47	34.93
232	W967	不详	4.51	3.95	32.38	33.96
233	W968	不详	4.75	3.92	31.93	33.87
234	WN11H	不详	4.93	3.92	33.19	33.66
235	XF197	美国衍生系	4.79	3.88	32.61	33.66
236	Yd6	不详	4.82	3.93	32.64	33.98
237	成自 2142	不详	4.99	3.96	32.48	33.10
238	获塘黄 17	不详	5.07	4.06	30.23	31.69
239	吉 4112	A619 × 8112	4.99	3.96	32.48	33.10
240	冀 53	冀群 2Co-2 为材料	5.14	3.96	30.93	33.10
241	鉴 1495a	不详	4.80	4.15	32.53	32.89
242	美 68113	不详	4.99	3.91	32.48	33.10
243	农系 531	不详	5.41	3.96	31.88	33.10
244	塘四平头	不详	4.78	3.87	33.44	31.58
245	文黄 31413	不详	4.99	3.94	32.39	33.47
246	邢 230	不详	5.68	4.34	32.89	34.70
247	掖 488	不详	4.88	3.93	32.48	33.82
248	掖 515	不详	4.85	3.92	32.86	35.08
249	L127	美国品种保护权过期自交系	5.06	3.90	33.34	34.88
250	L135	美国品种保护权过期自交系	5.56	4.18	32.18	34.55
251	L139	美国品种保护权过期自交系	4.76	3.80	33.00	33.10
252	W966	不详	4.85	3.90	31.49	31.97
253	PHJ33	美国品种保护权过期自交系	4.72	4.14	33.21	34.33
254	PHM10	美国品种保护权过期自交系	4.77	3.98	33.12	33.17
255	PHN82	美国品种保护权过期自交系	5.47	3.91	33.54	32.08
256	PHP55	美国品种保护权过期自交系	5.64	4.04	33.13	35.25
257	PHT22	美国品种保护权过期自交系	5.02	4.15	32.48	34.00
258	PHW20	美国品种保护权过期自交系	5.02	3.90	31.77	32.04
259	2FACC	美国品种保护权过期自交系	4.45	3.97	32.55	35.22
260	浚 928	塘四平头	4.29	3.65	32.15	32.97
261	浚 926	塘四平头	5.00	3.83	33.23	33.39
262	AHU1	秀清 73-1 母本改良系	5.28	3.87	31.80	33.49
263	浚 248	塘四平头	5.65	4.28	33.47	33.92

表 1(续)

编号 ID	材料名称 Germplasm identity	系谱来源 Pedigree/Origin	低密度 Low density		高密度 High density	
			抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content	抗推力(N) Pushing resistance	纤维素含量(%) Cellulose content
264	AHU24	101314	4.94	3.96	32.48	34.14
265	AHU2	0522(白粒)	4.99	3.93	32.48	33.55
266	AHU3	T-Hz4	4.73	3.88	31.80	33.01
267	AHU4	2105(大38)	4.99	3.96	32.09	32.33
268	AHU5	(5237×陕811-1)×5237	4.48	3.87	31.60	31.73
269	AHU6	212×97-1	4.97	3.93	31.27	31.31
270	AHU7	郑58×92-8	5.39	3.97	30.57	33.25
271	AHU8	73-1×212	4.50	3.96	32.58	31.49
272	AHU9	衡单11父本改良系	6.13	3.98	33.12	34.40
273	AHU10	三北8母本改良系	5.09	4.21	33.74	34.99
274	AHU11	(P53×ETO)×P53	4.75	4.07	35.06	34.20
275	AHU12	永研4×35-1	5.66	3.92	33.71	33.14
276	AHU13	三北8×永4-1	4.75	3.66	33.18	31.47
277	AHU14	良玉88父本改良系	4.99	3.96	32.48	33.10
278	AHU15	AP13	4.99	3.96	32.48	33.10
279	AHU16	邢K36×郑58	4.90	3.90	32.98	31.82
280	AHU17	178×郑58	5.53	4.02	32.39	33.80
281	H21	黄早四×H84	4.30	3.88	30.64	33.80
282	AHU18	H004-2	5.60	4.07	32.84	33.53
283	R548	美国品种保护权过期自交系	4.67	3.94	33.23	33.26
284	AHU19	Zh907039	5.43	4.08	32.90	31.72
285	黄早四	塘四平头	4.36	3.69	31.44	31.75
286	AHU21	农单118母本	4.78	3.89	30.21	30.44
287	AHU22	农系5678	5.15	4.08	31.07	31.62
288	AHU23	永研4母本改良系	5.13	3.95	33.02	35.07
289	B394	美国早期核心种质	4.65	3.95	32.79	33.06
290	B73	美国早期核心种质	4.88	3.89	32.91	33.05

2.2 玉米茎秆抗推力的联合方差分析

对玉米茎秆的抗推力进行联合方差分析(表2)结果显示,抗推力在不同年份、密度、自交系、年份×

自交系、密度×自交系、年份×密度×自交系间均达到了极显著水平($P=0.01$)。

表 2 茎秆抗推力的联合方差分析

Table 2 Analysis of variance of stalk pushing resistance

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
年份 Year	678.813	1	678.813	226.660	0.000
重复 Repeat	161.319	1	161.319	53.865	0.000
密度 Density	278.602	1	278.602	93.027	0.000
自交系 Line	2128.639	291	7.315	2.442	0.000
年份×自交系 Year×Line	1337.535	237	5.644	1.884	0.000
密度×自交系 Density×Line	982.845	265	3.709	1.238	0.017
年份×密度×自交系 Year×Density×Line	674.340	157	4.295	1.434	0.001

2.3 表型性状的描述统计分析

对本试验群体的茎秆抗推力及纤维品质性状进行描述性统计分析(表3)可知,5个性状的偏度和

峰度绝对值均小于1,均符合正态分布。其中,抗推力的变异范围最广,其变异范围在低密度条件下为1.14%~14.95%,高密度条件下为1.31%~

10.78%,变异系数分别为45.08%和42.65%;其次,可溶性糖含量、木质素含量和半纤维素含量的变异系数居中,低密度条件下变异系数分别为21.22%、

12.04%和10.60%,高密度条件下分别为17.28%、12.82%和12.32%;纤维素含量的变异系数最小,低密度和高密度条件下分别为8.89%和8.12%。

表3 抗推力及纤维品质性状的描述统计分析

Table 3 Description statistical analysis of pushing resistance and fiber quality traits

性状 Trait	种植密度 Plant density	均值 Average	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	极小值 Min.	极大值 Max.	变异系数(%) CV
抗推力(N) Push resistance	低密度	6.12	2.76	0.63	-0.08	1.14	14.95	45.08
	高密度	4.48	1.91	0.89	0.45	1.31	10.78	42.65
纤维素含量(%) Cellulose content	低密度	32.73	2.91	-0.06	-0.01	24.86	40.64	8.89
	高密度	33.05	2.69	-0.01	0.38	24.87	41.51	8.12
半纤维素含量(%) Hemicellulose content	低密度	22.92	2.43	-0.09	-0.11	16.24	29.02	10.60
	高密度	22.21	2.74	-0.24	0.80	11.56	30.23	12.32
木质素含量(%) Lignin content	低密度	28.34	3.41	-0.08	0.04	18.54	38.06	12.04
	高密度	28.41	3.64	-0.08	-0.08	16.60	37.71	12.82
可溶性糖含量(%) Soluble sugar content	低密度	11.65	2.47	-0.4	0.26	4.46	17.9	21.22
	高密度	12.00	2.07	-0.21	0.06	6.35	17.47	17.28

2.4 抗推力及纤维品质性状间的相关性

对抗推力及纤维品质性状进行简单相关性分析(表4)。结果显示,低密度条件下抗推力与纤维素含量及木质素含量呈极显著正相关关系,与半纤维素含量呈显著正相关关系,与可溶性糖含量呈极显著负相关关系,纤维素含量与半纤维素含量、木质素

含量呈极显著正相关关系,与可溶性糖含量呈极显著负相关关系;高密度条件下抗推力与纤维素含量呈极显著正相关关系,纤维素含量与半纤维素含量、木质素含量呈极显著正相关关系,与可溶性糖含量呈极显著负相关关系。

表4 抗推力及纤维品质性状间的相关性分析

Table 4 Pearson correlations of pushing resistance and fiber quality traits

性状 Trait	抗推力 Pushing resistance	纤维素含量 Cellulose content	半纤维素含量 Hemicellulose content	木质素含量 Lignin content	可溶性糖含量 Soluble sugar content
抗推力	1	0.204 **	0.133 *	0.190 **	-0.183 **
纤维素含量	0.222 **	1	0.556 **	0.721 **	-0.779 **
半纤维素含量	0.025	0.637 **	1	0.648 **	-0.576 **
木质素含量	0.117	0.701 **	0.707 **	1	-0.723 **
可溶性糖含量	-0.108	-0.739 **	-0.605 **	-0.673 **	1

*表示在0.05水平上显著相关;**表示在0.01水平上极显著相关;表格右上方数据为低密度条件下的相关分析结果,左下方数据为高密度条件下的相关分析结果

* indicate significant correlation at 0.05 levels; ** indicate highly significant at 0.01 levels, bottom left of diagraph is the result of high density, top right of diagraph is result of low density

2.5 不同杂种优势群抗推力及纤维素含量的多重比较

为了解本研究群体的遗传结构,Y. Liu等^[16]利用201对SSR标记对本试验群体进行群体结构分析,基于STRUCTURE 2.3.4软件最终将本群体划分为5个杂种优势群和1个混合群。根据其分群结果对不同杂种群的抗推力及纤维素含量进行多重比较。

在低密度条件下(表5),瑞德群的抗推力整体偏高,其次是P群、旅大红骨、混合群、兰卡斯特和塘四平头,瑞德、P群、旅大红骨、混合群彼此之间在

0.05显著性水平上差异均不显著,瑞德、P群、旅大红骨与兰卡斯特、塘四平头在0.05水平上差异显著,兰卡斯特、塘四平头在0.05水平上差异不显著;其次,P群的纤维素含量整体偏高,随后依次是塘四平头、瑞德、兰卡斯特、混合群和旅大红骨,P群、塘四平头、瑞德、兰卡斯特、混合群彼此之间在0.05显著性水平上差异均不显著,P群和旅大红骨的纤维素含量在0.05水平上差异显著,然而旅大红骨、塘四平头、瑞德、兰卡斯特、混合群之间的纤维素含量在0.05水平上差异不显著。

表 5 低密度条件下不同杂种优势群抗推力与纤维素含量的多重比较

Table 5 Analysis of variance of pushing resistance and content of cellulose in different heterosis groups at low density

杂种优势群 Heterosis groups	抗推力均值(N) Pushing resistance average	差异显著性 Significance	杂种优势群 Heterosis groups	纤维素含量均值(%) Cellulose content average	差异显著性 Significance
瑞德 Reid	5.63	a	P 群 P group	32.49	a
P 群 P group	5.25	a	塘四平头 Tang SPT	31.93	ab
旅大红骨 LRC	5.13	a	瑞德 Reid	31.40	ab
混合群 Mix group	4.70	ab	兰卡斯特 Lancaster	31.39	ab
兰卡斯特 Lancaster	4.60	b	混合群 Mix group	31.18	ab
塘四平头 Tang SPT	4.06	b	旅大红骨 LRC	30.75	b

在低密度条件下(表 5),瑞德群的抗推力偏高,其次是 P 群、旅大红骨、兰卡斯特、混合群和塘四平头,瑞德群、P 群、旅大红骨、兰卡斯特彼此之间在 0.05 显著性水平上差异均不显著,瑞德群、P 群、旅大红骨与混合群、塘四平头的抗推力在 0.05 水平上

的差异显著,兰卡斯特、混合群、塘四平头之间在 0.05 显著性水平上差异均不显著;其次,P 群的纤维素含量整体偏高,随后依次是塘四平头、兰卡斯特、瑞德、混合群和旅大红骨,彼此之间在 0.05 显著性水平上差异均不显著。

表 6 高密度条件下不同杂种优势群抗推力与纤维素含量的多重比较

Table 6 Analysis of variance of pushing resistance and content of cellulose in different heterosis groups at high density

杂种优势群 Heterosis groups	抗推力均值(N) Pushing resistance average	差异显著性 Significance	杂种优势群 Heterosis groups	纤维素含量均值(%) Cellulose content average	差异显著性 Significance
瑞德 Reid	4.46	a	P 群 P group	32.63	a
P 群 P group	4.30	a	塘四平头 Tang SPT	32.58	a
旅大红骨 LRC	4.10	a	兰卡斯特 Lancaster	32.13	a
兰卡斯特 Lancaster	3.94	ab	瑞德 Reid	31.94	a
混合群 Mix group	3.77	b	混合群 Mix group	31.90	a
塘四平头 Tang SPT	2.92	b	旅大红骨 LRC	31.59	a

本试验基于路贵和等^[20]提出群体逐级分类法对群体的茎秆抗推力和纤维素含量进行分类,将群体分为极强或极高、强或高、中间型、弱或低、极弱或极低 5 种类型,对各个类群中抗推力强、纤维素含量高的部分自交系进行归类。低密度条件下,抗推力和纤维素含量都表现强或高的自交系共 11 个,其中,瑞德群中包括 M22、W222、XOP2 和 AHU12,兰卡斯特群中包括 PHN82,P 群中包括 68122 和 D20,旅大红骨中包括 Va26 和 200B,塘四平头中包括吉 444 和 A801;高密度条件下,抗推力和纤维素含量都表现强或高的自交系共 12 个,其中,瑞德群中包括 A679、XOP2 和 AHU10,兰卡斯特群中包括 KP3130、9702、WIL500、LI35 和 PHJ33,P 群中包括齐 319 和 68139,旅大红骨中包括 953,塘四平头中包括 A801。

3 讨论

玉米茎秆抗推力和纤维组分含量与茎秆的倒伏息息相关。纤维素、半纤维素和木质素等其他细胞

壁成分相互交联形成结构复杂的细胞外基质,增强了植物组织和细胞的机械强度。目前,国内外关于茎秆抗推力和纤维素含量与抗倒性关系的研究鲜见报道。方差分析结果表明,自交系间存在差异极显著水平,表明抗推力性状存在丰富的遗传变异,同时也表明本研究群体的遗传多样性丰富,在控制茎秆纤维品质和抗倒伏性状上存在丰富的等位基因变异。抗推力是微效多基因控制的数量性状,受环境条件影响较大,同时自然环境中在群体较大的情况下重复间很容易出现较大差异。

茎秆抗推力在两个密度条件下的变异系数均最大,其变异范围最广,其次为木质素含量和纤维素含量,这与马飞前等^[21]的研究结果一致,抗推力性状的变异范围较大,可能与所选择的遗传变异丰富的试验材料有关。直到目前,玉米茎秆的倒伏没有一个可供参考的标准,可能与不同的环境和所选材料不同有关。本研究结果的抗推力和纤维素含量呈极显著正相关与 H. Hu 等^[22]和汪黎明等^[14]的结果

一致。

对不同杂种优势群在不同密度下的抗推力和纤维素含量进行差异性分析,在低密度条件下,瑞德、P群、旅大红骨与兰卡斯特、塘四平头的抗推力在0.05水平上差异显著,其抗推力的平均值由大到小依次为瑞德、P群、旅大红骨、混合群、兰卡斯特和塘四平头;P群与旅大红骨的纤维素含量在0.05水平上差异显著,其纤维素含量的平均值由大到小依次为P群、塘四平头、瑞德、兰卡斯特、混合群和旅大红骨。在低密度条件下,瑞德、P群、旅大红骨与混合群和塘四平头的抗推力在0.05水平上有显著差异,其抗推力的平均值由大到小依次为瑞德、P群、旅大红骨、兰卡斯特、混合群和塘四平头;P群、塘四平头、兰卡斯特、瑞德、混合群、旅大红骨的纤维素含量彼此之间在0.05显著性水平上差异均不显著,其纤维素含量的平均值由大到小依次为P群、塘四平头、兰卡斯特、瑞德、混合群和旅大红骨。本研究筛选出86个强抗推力的自交系,其中,瑞德群所占比例最大为30.2%,与刘洋^[23]利用相同群体筛选得到的极抗推力的自交系中瑞德群所占比例最大这一研究结果一致,同样这也与在育种过程中常以瑞德群的自交系作母本组配杂交种这一实践相吻合。因此,在组配抗倒性强的杂交种时应重视利用瑞德杂种优势群的种质资源。通过对目标性状在不同种植密度下各杂种优势群中的优良自交系进行比较分析,结果发现,在低密度和高密度条件下筛选到强抗推力的自交系中包含杨莎^[24]筛选到的12个自交系,与此同时,在各密度下抗推力和纤维素含量都表现优良的自交系是兰卡斯特群中XOP2,塘四平头群中的A801。并且筛选出了在高密度条件下表现优异的自交系,其中,瑞德群中包括AHU23、郑32、自330、A679等12个自交系,兰卡斯特群中包括L135、PHJ33、KP3130等12个自交系,P群中包括D20、沈977、齐319等11个自交系,旅大红骨群中包括Zh907039、953、丹9046等5个自交系,塘四平头群中包括黄昌a、2FACC、7026B等3个自交系,这些自交系的茎秆具有高纤维素含量和强抗推力的表现。由此可见,这些自交系含有控制密植相关性状的优良等位基因,可能更适合密植。本研究对不同种植密度下玉米茎秆的纤维品质性状和抗倒性关系进行探究,同时对不同杂种优势群中茎秆的抗推力和纤维素含量表现优良的自交系进行筛选,为今后开展抗倒耐密育种工作提供种质资源基础。

参考文献

- [1] Flintgarcia S A, Darrah L L, McMullen M D, et al. Phenotypic versus marker-assisted selection for stalk strength and second-generation European corn borer resistance in maize [J]. *Theor Appl Genet*, 2003, 107(7): 1331-1336
- [2] Flintgarcia S A, Jampatong C, Darrah L L, et al. Quantitative trait locus analysis of stalk strength in four maize populations [J]. *Crop Sci*, 2003, 43(1): 13-22
- [3] Gou L, Huang J J, Sun R, et al. Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties [J]. *Tran Chinese Soc Agric Engin*, 2010, 26(11): 156-162
- [4] 勾玲, 赵明, 黄建军, 等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究 [J]. *作物学报*, 2008, 34(4): 653-661
- [5] 田保明, 杨光圣, 曹刚强, 等. 农作物倒伏及其影响因素分析 [J]. *中国农学通报*, 2006, 22(4): 163-167
- [6] 刘战东, 肖俊夫, 南纪琴, 等. 倒伏对夏玉米叶面积、产量及其构成因素的影响 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(18): 107-110
- [7] 丰光, 景希强, 李妍妍, 等. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析 [J]. *华北农学报*, 2010, 25(s1): 72-74
- [8] Appenzeller L, Doblin M, Barreiro R, et al. Cellulose synthesis in maize: isolation and expression analysis of the cellulose synthase (CesA) gene family [J]. *Cellulose*, 2004, 11(3): 287-299
- [9] Leng E R. Selection reversal in strains of corn previously long-term selected for chemical composition [J]. *Infect Medic*, 2006, 23(11): 547-562
- [10] 刘仲发. 群体光分布对玉米茎秆强度及抗倒伏能力的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011
- [11] 马延华, 孙德全, 李绥艳, 等. 玉米茎皮抗穿刺强度与形态性状和化学成分含量间的相关分析 [J]. *黑龙江农业科学*, 2012(4): 1-4
- [12] Hu H, Meng Y, Wang H, et al. Identifying quantitative trait loci and determining closely related stalk traits for rind penetrometer resistance in a high-oil maize population [J]. *Theor Appl Genet*, 2012, 124(8): 1439-1447
- [13] Esehie H A, Rodriguez V, Alasm H. Comparison of local and exotic maize varieties for stalk lodging components in a desert climate [J]. *Eur J Agron*, 2004, 21(1): 21-30
- [14] 汪黎明, 李建生, 姚国旗, 等. 玉米茎秆与根系抗倒的特性研究 [J]. *玉米科学*, 2012, 20(2): 69-81
- [15] 马飞前, 刘小刚, 王红武, 等. 玉米茎秆纤维素含量遗传分析 [J]. *玉米科学*, 2015, 23(1): 10-16
- [16] Liu Y, Guo J J, Zhang D M, et al. Genetic diversity and linkage disequilibrium estimation among the maize breeding germplasm for association mapping [J]. *Inter J Agric Biol*, 2014, 16(5): 851-861
- [17] 邵书静, 张仁和, 史俊通, 等. 近红外光谱法测定玉米秸秆饲用品质 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 151-155
- [18] Henderson C R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model [J]. *Biometrics*, 1975, 31(2): 423-447
- [19] Piepho H P, Möhring J, Melchinger A E, et al. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing [J]. *Euphytica*, 2008, 161(1): 209-228
- [20] 路贵和, 戴景瑞, 张书奎, 等. 不同干旱胁迫条件下我国玉米骨干自交系的抗旱性比较研究 [J]. *作物学报*, 2005, 31(10): 1284-1288
- [21] 马飞前, 刘小刚, 王红武, 等. 玉米茎秆纤维品质性状及其相关分析 [J]. *作物杂志*, 2014(4): 44-48
- [22] Hu H, Liu W, Fu Z, et al. QTL mapping of stalk bending strength in a recombinant inbred line maize population [J]. *Theor Appl Genet*, 2013, 126(9): 2257-2266
- [23] 刘洋. 玉米自交系抗倒伏性状的关联分析 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014
- [24] 杨莎. 玉米自交系抗倒伏性鉴定及茎秆维管束性状 QTL 定位 [D]. 保定: 河北农业大学, 2016