

不同杂种优势群玉米茎秆纤维品质及配合力分析

关红辉, 刘文斯, 郭晋杰, 赵永锋, 祝丽英, 黄亚群, 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 071001)

摘要: 研究建立快速测定玉米茎秆纤维品质的近红外模型, 用于评价不同杂种优势群的玉米材料的茎秆纤维品质。分析纤维品质性状的一般配合力, 筛选纤维品质和配合力好的材料, 为培育抗倒耐密玉米品种提供借鉴。本试验以玉米茎秆基部第3节间和第4节间为材料, 利用近红外光谱漫反射光谱(NIRS)技术建立测定秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的数学模型。基于建立的纤维品质模型对一年两点的94份自交系和376份杂交种的茎秆纤维品质进行预测和分析。对不同杂种优势群间整体差异进行方差分析, 并评价其一般配合力效应。结果表明, 各组分数学模型的校正决定系数、交叉验证和外部验证决定系数在0.801~0.998之间, 各项误差在0.131~1.454之间, 该模型准确性高, 能较为准确预测玉米茎秆的纤维品质, 为抗倒伏种质资源材料的鉴定提供参考。各杂种优势群中, 旅大红骨群的纤维品质最低, P群和唐四平头群纤维品质及其一般配合力正向效应较好。共筛选出了9个纤维品质好且一般配合力正向效应高的自交系。其中P群有2个, 唐四平头群有1个, 兰卡斯特群有2个, 瑞德群1个, 混合群3个。

关键词: 玉米; 茎秆纤维品质; 近红外光谱; 配合力; 杂种优势

Analysis of Stalk Fiber Quality and Combining Ability in Different Maize Heterotic Groups

GUAN Hong-hui, LIU Wen-si, GUO Jin-jie, ZHAO Yong-feng, ZHU Li-ying, HUANG Ya-qun, CHEN Jing-tang

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

Abstract: The objective of this experiment was to establish the model of near infrared for determining corn stalk fiber quality rapidly, which is used for strawing fiber quality evaluation of different heterotic groups of maize. The general combining ability (GCA) of fiber quality traits were analyzed, and the lines with good fiber quality and high positive GCA effect were identified as reference in breeding for the lodging resistant maize hybrids. With crushed the third internode and fourth internode of corn stalk as the material, the mathematical models of cellulose and hemicellulose and lignin were established using near infrared diffuse reflectance spectroscopy (NIRS) technology. The fiber quality models were used to calculate the stem fiber quality of 94 inbred lines and 376 hybrids, which were planted at two environmental conditions. Variance analysis of the overall difference in different heterotic groups showed that the correction coefficient of determination, cross validation and external of the mathematical models are between 0.801-0.998, with the error (RMSEC, RMSECV, RMSEP) of 0.131 to 1.454. This correction model has high accuracy, being valuable to predict the fiber quality of maize stalk accurately. Therefore, it could provide a reference for the identification of lodging resistant germplasm resources. The fiber quality of LRC is the lowest in these heterosis groups. The fiber quality of P group and TangSPT group are better than other heterosis groups, and it also have a high forward effect in GCA. With that, nine inbred lines with good quality fiber and high positive effect GCA

收稿日期: 2018-01-09 修回日期: 2018-02-10 网络出版日期: 2018-06-20

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20180619.1937.002.html>

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD201737); 国家重点研发计划(2016YFD0101204-3)

第一作者研究方向为玉米遗传育种。E-mail: guan honghui9202@163.com

通信作者: 郭晋杰, 研究方向为玉米遗传育种。E-mail: guo jinjie512@163.com

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

were obtained, including two lines in the P group, one line in the TangSPT group, one lines in the Lancaster group, one lines in the Reid group, three lines in the Mix group.

Key words: maize (*Zea mays* L.); stalk fiber quality; near infrared spectroscopy; combining ability; heterosis

倒伏一直是影响玉米高产、稳产的重要因素。近年来,随着玉米高密度育种的发展及全球气候的不断变化,玉米抗倒性已成为遗传育种研究的热点之一。玉米茎秆纤维品质与植株抗倒伏能力关系密切,越来越受到育种工作者的重视。纤维素(CEL, cellulose)、半纤维素(HCEL, hemicellulose)和木质素(LIG, lignin)是玉米茎秆的主要组成成分^[1]。Appenzeller等^[2]指出提高细胞壁纤维素含量就会提高茎秆机械强度。抗倒伏能力强的品种茎秆第3节间酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维及酸性洗涤木质素的含量极显著大于抗倒伏能力弱的品种^[3]。马飞前等^[4]研究发现玉米茎秆纤维性状遗传规律符合加性-上位性多基因遗传模型,不受遗传效应较大的主基因控制,由微效多基因控制。木质素能够增强植物次生细胞壁的机械强度,因此被认为具有抗茎腐性,并参与植物进化^[5]。Li等^[6]认为木质素含量主要由几个在代谢调控中其重要作用的功能变异基因控制。马延华等^[7]研究指出,玉米茎秆木质素含量主要受两对互补主基因控制,并受多基因的修饰。目前测量玉米茎秆纤维品质的方法主要有两种。一种是用化学法,化学法可以直接准确地测定样品的纤维品质含量,但是其测量过程繁琐,测定速度慢,适用于少量样品的测定;另一种是近红外光谱技术(NIRS, near-infrared spectroscopy reflectance technology), NIRS是一种间接测量技术,其应用的重点是先建立目标性状的校正模型,从而实现了对未知样品的测定。模型建成后可以快速地、大批量地测定样品。近红外光谱技术已被广泛用于玉米秸秆成分的测定。Albanell等^[8]以两个群体的玉米秸秆为样品建立了测定玉米中性洗涤纤维(NDF, Neutral Detergent Fiber)、酸性洗涤纤维(ADF, Acid Detergent Fiber)等品质性状模型,指出利用NIRS预测玉米群体的秸秆品质是可行的。很多学者以玉米秸秆为材料建立秸秆各成分含量近红外模型,用于快速大量检测玉米秸秆,提高秸秆生物质资源利用率^[9-11];此外,还应用于玉米秸秆青贮饲料营养品质研究^[12-15]。本研究用120份玉米茎秆第3、4节间为样品建立近红外光谱模型,用于快速鉴定育种材料的茎秆纤维品质。对94份不同

杂种优势群的自交系和376份杂交组合进行鉴定,分析不同杂种优势群自交系茎秆纤维品质的变化趋势及一般配合力差异,筛选抗倒伏能力强的种质资源。为进一步开展玉米茎秆纤维品质的关联分析、挖掘候选基因和抗倒耐密新品种的培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究以河北农业大学/国家玉米改良中心河北分中心提供的94份遗传多样性丰富、来源广泛的自交系为材料。于2015年在河北农业大学/国家玉米改良中心河北分中心实验基地(保定)将94份自交系与不同杂种优势群的骨干自交系昌7-2(唐四平头)、郑58(瑞德)、E28(旅大红骨)和Mo17(兰卡斯特)采用NC II设计组配376个杂交组合。

94份自交系和376份杂交组合于2016年分别在河北农业大学/国家玉米改良中心河北分中心试验基地(保定)、河北农业大学辛集试验站(石家庄)进行田间种植。自交系采用完全随机区组设计,2次重复,单行种植,行长4 m,行距0.6 m,密度为7.5万株/hm²;杂交组合采用的完全随机区组设计,2次重复,每个小区种植3行,行长4 m,行距0.6 m,密度为7.5万株/hm²。田间水、肥管理等同大田生产。

1.2 样品采集及处理方法

自交系和杂交组合均于玉米散粉后10 d取玉米茎秆基部的第3节间和第4节间,于恒温干燥箱中105℃杀青30 min,然后调至70℃烘干至恒重;用粉碎机粉碎,过40目网筛。将研磨好的样品装入自封袋中并标上编号,室温(25℃)保存。

从处理好的样品中选出60份自交系样品和60份杂交组合样品用于建立茎秆纤维品质的近红外光谱模型。

1.3 纤维品质的化学测量方法

纤维素、半纤维素、木质素含量的测量参考李小安等^[16]和王金主等^[17]的方法。纤维素用改进的硫酸与重铬酸钾氧化法;半纤维素用改进的盐酸水解法测量;木质素用改进的醋酸分离与硫酸水解法。

每个样品的处理重复测量 3 次,取其平均值为样品成分最终含量。

1.4 光谱采集及校正模型的建立方法

采用瑞典波通 (perten) DA7200 近红外漫反射光谱仪采集光谱,光谱波长范围 950 ~ 1650 nm。光谱吸收速率达到 100 次/s 的高速光谱数据采集,波长准确度 5 nm。为了消除样品不均一性,每个样品装样 2 次,每次重复扫描 2 次^[18]。

采用 CAMO 公司的 The Unscrambler 9.8 多元数据分析软件对漫反射光谱图进行预处理。为了消除由于样品颗粒分布不均匀及颗粒大小不同产生的散射对光谱的影响,对原始光谱使用标准正态变量校正 (SNV, standard normal variate correction) 方法进行校正;为了消除光谱基线的漂移和其他背景的干扰,提高分辨率和灵敏度,对光谱使用一阶导数校正;但它同时会放大噪音,导致信号噪比降低,因此对光谱进行导数运算前进行平滑处理^[19-21]。利用偏最小二乘法 (PLS, partial least squares method)^[22] 和完全交叉验证方式建立样品纤维素、半纤维素及木质素含量和光谱数据之间的

数学模型。

1.5 统计方法

应用软件 Microsoft Excel 2013 处理试验数据、作图和一般配合力的计算。使用 SPSS 21.0 对纤维品质相关性状进行相关分析,对不同杂种优势群间纤维品质进行整体方差分析^[23]。

母本自交系一般配合力效应: $g_i = \bar{y}_i - \bar{y}$ 。其中 g_i 为母本一般配合力效应, i 代表具体的母本自交系, \bar{y}_i 为同一母本不同父本的杂交组合的均值, \bar{y} 代表所有杂交组合的均值^[24]。

2 结果与分析

2.1 模型的建立及验证

2.1.1 建模样品各组分含量分布 对 120 个样品的纤维品质的化学值进行 3 次测量,求平均值。根据样品中纤维素、半纤维素和木质素含量的大小,顺序排列后将样品按 3:1 的比例分成校正集和验证集^[25],其分布情况见表 1。玉米茎秆各组成成分含量分布比较均匀,样品材料来源广泛,其含量变化范围较大,有利于准确模型的建立。

表 1 校正集和验证集纤维品质各组分含量分布

Table 1 Statistics of the components of fiber quality in calibration set and validation set

项目	性状	样本数	最小值	最大值	均值	标准差
Item	Traits	Samples	Min.	Max.	Mean	SD
校正集	纤维素	90	18.21	36.92	28.77	4.02
Calibration set	半纤维素	90	12.75	36.97	25.86	4.17
	木质素	90	16.99	32.33	25.28	3.43
验证集	纤维素	30	24.76	36.92	30.72	3.42
Validation set	半纤维素	30	19.01	36.97	27.42	4.14
	木质素	30	20.07	31.84	25.46	3.09

2.1.2 模型的建立 建立 NIRS 校正模型是通过化学计量学方法将光谱数据与化学值进行回归分析,建立起二者之间定量的函数关系。本研究利用 The Unscrambler 9.8 多元数据分析软件对漫反射光谱图进行平滑处理、标准正态变量校正 (SNV) 和一阶导数预处理。利用偏最小二乘法 (PLS) 和完全交叉验证方式建立数学模型 (图 1 ~ 3) (实测值为蓝色,预测值为红色)。模型质量以决定系数 (R_c^2)、交互验证均方根误差 (RMSECV) 和影响因子 3 个参数作为评价指标。一般认为决定系数 (R_c^2) 越大,交互验证均方根误差 (RMSECV) 和影响因子越低,表示回归模型的预测能力越好。由表 2 可见,各组分的数学模型的影响因子分别为 6、3、5,校正决定系数分别为 0.801、0.987、0.998,交互验证均方根误差

分别为 1.375、0.532、0.190。这说明所建的校正模型质量很高。

表 2 纤维素含量、半纤维素含量和木质素含量校正模型结果

Table 2 Correction models of cellulose content, hemicellulose content and lignin content

性状	影响因子	决定系数	均方根误差	交互验证决定系数	交互验证均方根误差
Characters	Factors	R_c^2	RMSEC	R_{cv}^2	RMSECV
纤维素 CEL	6	0.801	1.454	0.815	1.375
半纤维素 HCEL	3	0.987	0.500	0.985	0.532
木质素 LIG	5	0.998	0.131	0.996	0.190

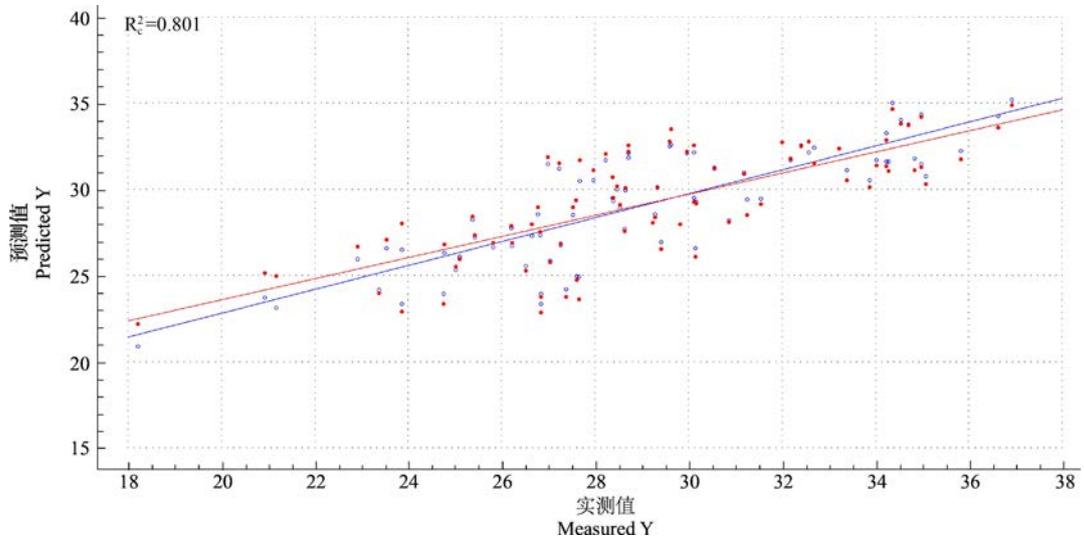


图 1 纤维素含量预测值与实测值相关图

Fig. 1 Correlation between predicted and measured cellulose content

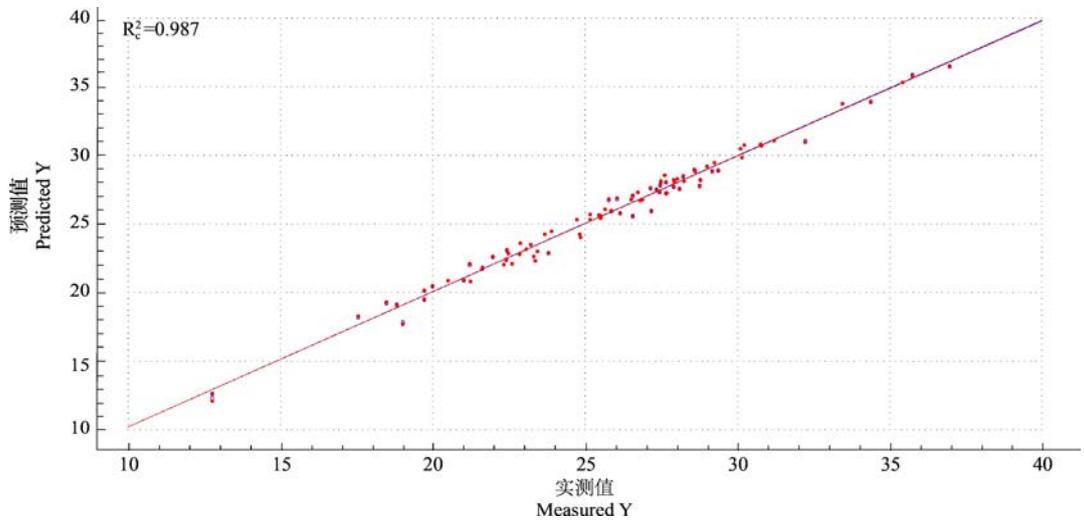


图 2 半纤维素含量预测值与实测值相关图

Fig. 2 Correlation between predicted and measured hemicellulose content

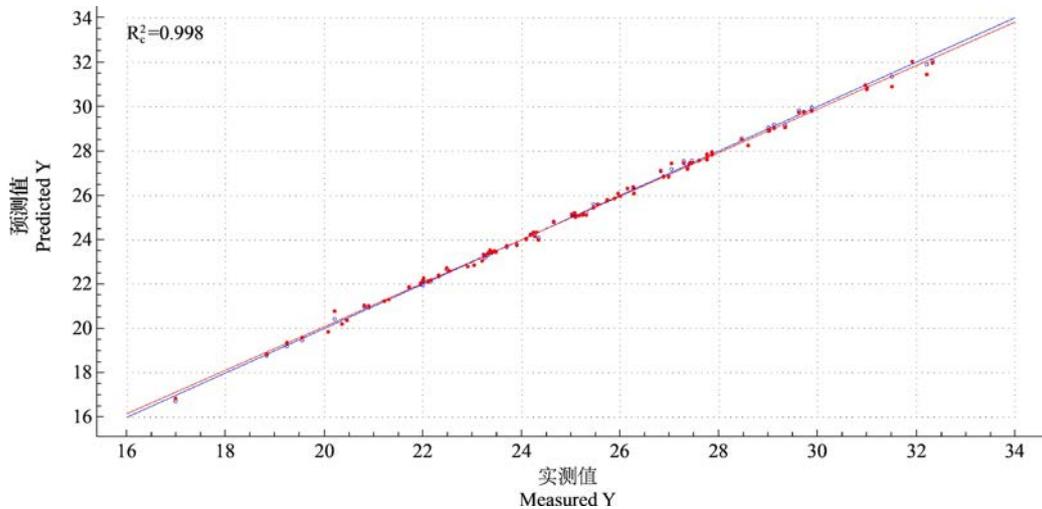


图 3 木质素含量预测值与实测值相关图

Fig. 3 Correlation between predicted and measured acid detergent lignin content

2.1.3 校正模型外部验证结果 采用外部验证的方法对模型准确性进行检验,评估模型的实际应用效果。由表 3 可见,预测均方根误差(RMSEP)均小于 1(0.271 ~ 0.977),外部验证决定系数分别为 0.917、0.996、0.915。验证集纤维素、半纤维素和木质素这 3 个性状含量的化学值的均值分别为 30.72%、27.42%、25.45%,预测值的均值为

30.59%、27.48%、25.61%。样品各性状的化学均值与预测均值非常接近。对预测样品各性状的化学值和预测值进行成对数据双尾 t 测验,化学值与预测值间的 t 检验值均未达到显著水平,表明样品 3 个性状的化学值与预测值整体差异很小。表明预测值与化学值比较接近,预测效果好,可用于对未知样品进行预测。

表 3 校正模型外部验证结果

Table 3 Validation results of the calibration model external

性状 Characters	样品数 No. of sample	决定系数 R ²	均方根误差 RMSEP	化学均值(%) Mean of chemical value	预测均值(%) Mean of predicted value	t	$t_{0.05}$
纤维素 CEL	30	0.917	0.977	30.72	30.59	0.774	2.045
半纤维素 HCEL	30	0.996	0.271	27.42	27.48	1.300	2.045
木质素 LIG	30	0.915	0.906	25.45	25.61	0.957	2.045

2.2 茎秆纤维品质各性状统计分析

用建立好的近红外模型对 2 个不同环境下的 94 份玉米自交系及其与 376 份杂交组合茎秆样品的纤维品质进行预测(表 4)。自交系和杂交组合 3 个性状的偏度和峰度绝对值均小于 1,均符合正态分布。自交系各性状的变异系数均大于杂交组合对应性状的变异系数。半纤维素在自交系和杂交组合

中的变异系数都是最大的,变异范围分别为 7.95% ~ 31.99% 和 14.45% ~ 38.14%;其次是木质素,自交系和杂交组合变异系数分别为 15.90%、14.00%;纤维素的变异系数最小,分别为 12.30%、7.86%。杂交组合与自交系的分布存在差异,其中,杂交组合的纤维素含量和半纤维素含量的最小值均远远大于自交系各性状的最小值。

表 4 茎秆纤维品质各性状统计分析

Table 4 Statistical analysis of characters in fiber quality of stalk

项目 Item	性状 Characters	样品容量 Number of samples	最小值 Min.	最大值 Max.	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	均值 Means	标准差 SD	变异系数 (%) CV
自交系 Line	纤维素(%) CEL	356	17.93	42.11	0.35	-0.14	32.36	3.98	12.30
	半纤维素(%) HCEL	356	7.95	31.99	0.41	-0.35	21.93	3.75	17.09
	木质素(%) LIG	356	15.18	41.20	0.21	-0.01	27.94	4.44	15.90
杂交组合 Cross	纤维素(%) CEL	1448	25.34	43.54	0.52	0.40	33.46	2.63	7.86
	半纤维素(%) HCEL	1448	14.45	38.14	0.30	0.72	25.01	3.86	15.43
	木质素(%) LIG	1448	15.91	41.12	-0.26	-0.13	29.23	4.09	14.00

2.3 自交系纤维品质性状间联合方差和相关分析

表 5 表明纤维品质各性状在不同自交系、自交系 × 环境、环境 × 重复均达到了极显著水平;重复、环境间差异不显著;通过对纤维品质各性状之间的相关分析(表 6),发现玉米茎秆纤维含量、半纤维素含量和木质素含量两两之间的相关性在 0.01 水平

上都达到了极显著的正相关。

2.4 自交系杂种优势群的划分

参照 Liu 等^[26]、张冬梅等^[27]的分群结果,以 50% 作为划分群体的遗传相似比例^[28],将 94 份玉米自交系划分成瑞德、兰卡斯特、P 群、唐四平头、旅大红骨 5 个杂种优势群和 1 个混合群(表 7)。

表5 纤维品质性状联合方差分析

Table 5 Variance analysis of fiber quality related traits

变异来源 Source	自由度 <i>df</i>	纤维素 CEL	半纤维素 HCEL	木质素 LIG
自交系 Line	93	7.916 **	10.517 **	5.746 **
环境 Environment	1	4.687	0.145	5.86
重复 Repeat	1	1.232	1.396	1.367
自交系 × 环境 Line × Environment	93	2.345 **	3.387 **	2.919 **
自交系 × 重复 Line × Repeat	93	0.814	0.774	0.892
环境 × 重复 Environment × Repeat	1	13.316 **	32.574 **	29.233 **

** 表示在 0.01 水平上差异显著,下同

** indicated significance at 0.01 levels, the same as below

表6 纤维品质相关性状间相关分析

Table 6 Correlation analysis of fiber quality related traits

性状 Characters	纤维素 CEL	半纤维素 HCEL	木质素 LIG
纤维素 CEL	1		
半纤维素 HCEL	0.563 **	1	
木质素 LIG	0.811 **	0.647 **	1

表7 94份玉米自交系及所属杂种优势群

Table 7 The heterotic groups of 94 maize inbred lines

杂种优势群 Heterotic groups	自交系 Lines
瑞德 Reid	1614、掖8001、757、PH6WC、C8605-2、AHU10、2369、S8324、7922、PHG86、浚248、DF20、M22、掖8112、Los-6、鉴1496b、ys06、AHU12、AHU22、掖832、98F1、南21-3
兰卡斯特 Lancaster	PHP55、B97、6103、GY3、PHM10、WIL900、PHJ33、吉63、DM07、BM、Z31B
P群 P group	68122、XF27、黄昌b、陈322、P25、E600、宋1145、619、丹599、802、R136、C521
旅大红骨 LRC	R1656、A619、200B、698-3、AHU11、E200、掖52106、AHU21、B100、丹9046、Pa91、L473、R31、AHU6、SC14、旅28、丹598
唐四平头 TSPT	吉444、黄野四3、AHU1、2FACC、浚928、926、AHU3、Beck、R548、浚971
混合群 Mix group	17564、SC30-1、P007、N68a、XF134、20762、R08、433-7、AHU16、长72、6M502、LH150、AHU9、CN104、d140、Q1261、M1016、W2H03、Y223、W967、D881、E601

2.5 不同杂种优势群纤维品质分析

不同杂种优势群各成分含量平均值方差分析表明(表8),茎秆纤维素含量从高到低依次为唐四平头群、P群、兰卡斯特群、瑞德群、混合群、旅大红骨群,旅大红骨群与唐四平头群的纤维素含量在0.05水平上差异达到显著水平,瑞德群、P群、兰卡斯特群、混合群彼此之间差异均不显著;各杂种优势群半纤维素含量顺序与纤维素含量顺序一致,旅大红骨与唐四平头、P群之间差异显著,而旅大红骨与瑞德群、兰卡斯特群、混合群彼此之间差异不显著;P群木质素含量最高,随后依次为兰卡斯特群、瑞德群、唐四平头群、混合群、旅大红骨群,旅大红骨群与唐四平头群、兰卡斯特群、瑞德群差异均不显著,而P群与唐四平头、旅大红骨群、混合群间在0.05水平上存在显著差异。在各杂种优势群中,旅大红骨群的纤维素、半纤维素和木质素含量均为最低,而唐四平头群与P群的含量总体高于其他杂种群。由图4可知各杂种优势群自交系茎秆各性状含量的高低均呈纤维素>木质素>半纤维素的趋势,纤维素含量与木质素含量的趋势相似。而旅大红骨群的自交系丹9046的纤维素含量低于木质素含量,旅28的半纤维素含量高于木质素含量。

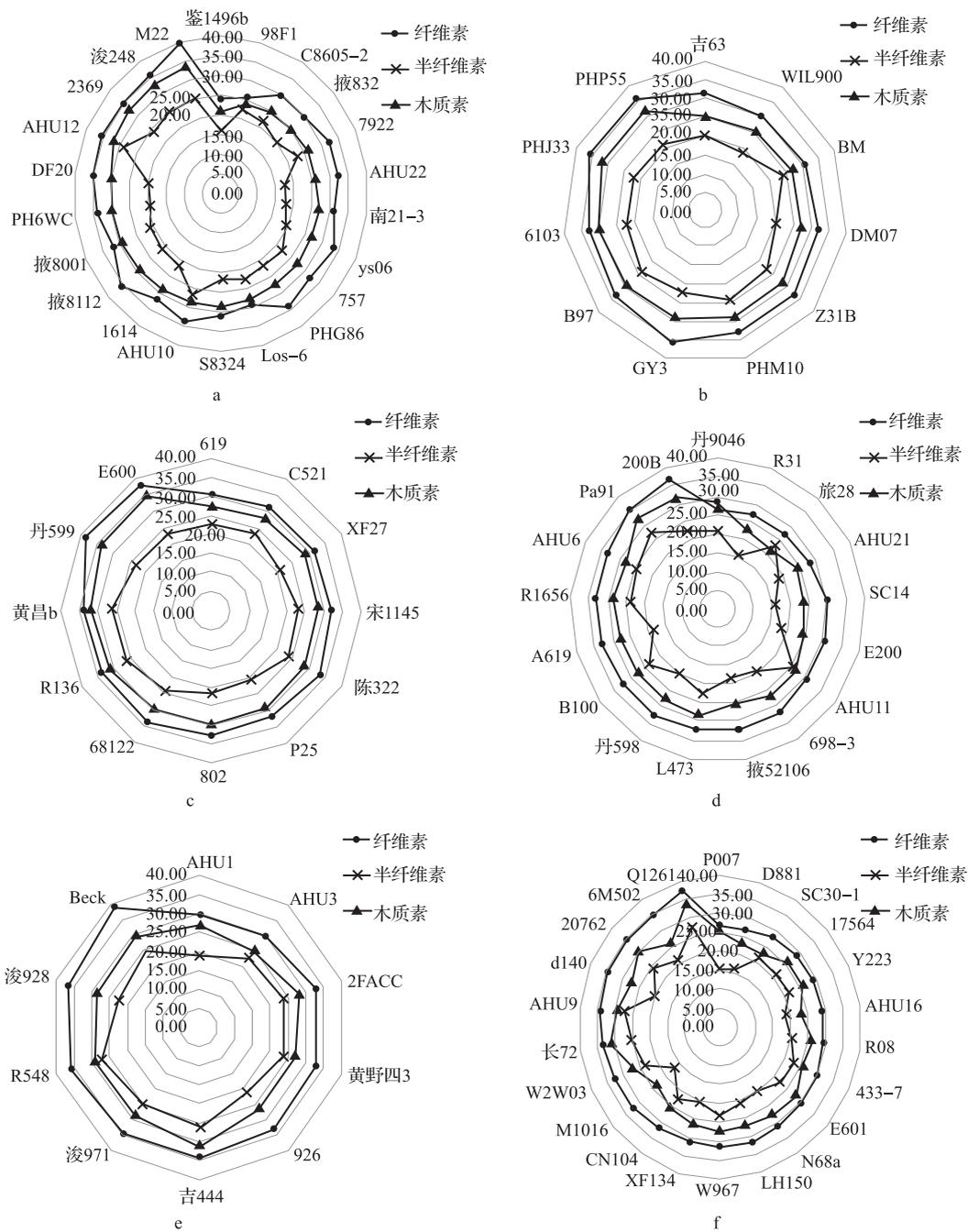
表8 不同杂种优势群茎秆各性状平均值方差分析

Table 8 Variance analysis of the average stem characters in different heterotic groups

杂种优势群 Heterotic groups	样本容量 Number of samples	纤维素 CEL	半纤维素 HCEL	木质素 LIG
唐四平头 TSPT	10	33.89b	23.55b	27.95a
P群 P group	12	33.51ab	23.33b	30.19b
兰卡斯特 Lancaster	11	33.16ab	22.02ab	28.69ab
瑞德 Reid	22	32.39ab	21.79ab	28.13ab
混合群 Mix group	22	31.51ab	21.44ab	26.77a
旅大红骨 LRC	17	31.24a	20.84a	26.67a

数据后不同字母表示在0.05水平差异显著

Means followed by different letters within a column are significantly different at $P = 0.05$



a,b,c,d,e,f 分别表示瑞德群, 兰卡斯特群, P 群, 旅大红骨群, 唐四平头群, 混合群

a,b,c,d,e,f respectively represent Reid, Lancaster, P group, LRC, TSPT, Mix group

图 4 各杂种优势群茎秆成分含量分布雷达图

Fig. 4 The radar map of the content distribution of components in the heterotic groups

2.6 茎秆纤维品质配合力分析

对供试组合的茎秆纤维性状进行方差分析(表 9), 结果表明各性状组合间的遗传差异均达到极显著水平。以组合平均值为单位进一步分解各性状组合间的差异, 各性状的父本自交系、母本自交系一般配合力方差均达到了极显著水平, 父

本自交系一般配合力方差明显大于母本自交系一般配合力方差, 同时父本一般配合力方差也远大于母本 × 父本特殊配合力方差; 木质素含量母本 × 父本的特殊配合力方差差异不显著, 而半纤维素和纤维素含量的母本 × 父本特殊配合力方差差异极显著。

表 9 玉米茎秆各性状配合力方差分析
Table 9 Variance analysis of combining ability of maize stalk with different characters

变异来源	自由度	纤维素	半纤维素	木质素
Variation source	df	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
组间 Cross	361	2.800 **	5.737 **	2.149 **
母本 Female parent	93	1.876 **	4.283 **	3.919 **
父本 Male parent	3	52.370 **	165.759 **	39.080 **
母本 × 父本 Female parent × Male parent	263	1.558 **	1.440 **	1.163
误差 Error	352	5.013	7.158	6.033

计算各亲本的一般配合力相对效应值^[24],由表 10 可以看出同一自交系不同性状和同一性状不同自交系间的 GCA 差异较大。W967、黄昌 b、R31、XF134、旅 28 等自交系在纤维素上具有较大的正向 GCA 值,W2H03、C521、20762、PHJ33 等自交系在半纤维素上具有较大的正向 GCA 值,丹

599、宋 1145、R31、20762、PHJ33 等自交系在木质素上具有较大的正向 GCA 效应值。黄昌 b、XF134、20762、PHJ33、R31 在 3 个性状上整体正向 GCA 较好。A619、SC14、LH150、698-3、吉 63 等自交系在 3 个性状上均有较大的负向 GCA 相对效应值,其中自交系 LH150 在纤维素和半纤维素上有最大负向 GCA 相对效应值。比较不同杂种优势群母本自交系各性状的一般配合力(图 5),不同杂种优势群的自交系各性状一般配合力均既有正向效应又有负向效应,而在唐四平头群中除了自交系 AHU1 和吉 444 外其他自交系的半纤维素 GCA 效应值均呈正向效应;P 群多数自交系的木质素 GCA 效应值呈正效应。

根据亲本自交系各性状含量及其一般配合力效应值,筛选出一批纤维品质好且一般配合力正向效应高的自交系。纤维素含量及其一般配合力效应都表现较好的自交系有黄昌 b、2369、6M502、Beck;半纤维素含量及其一般配合力效应都表现较好的自交系有 AHU9、长 72、Beck、AHU12、黄昌 b;木质素含量及其一般配合力都表现较好的自交系有 PHJ33、丹 599、AHU12、PHP55、黄昌 b。

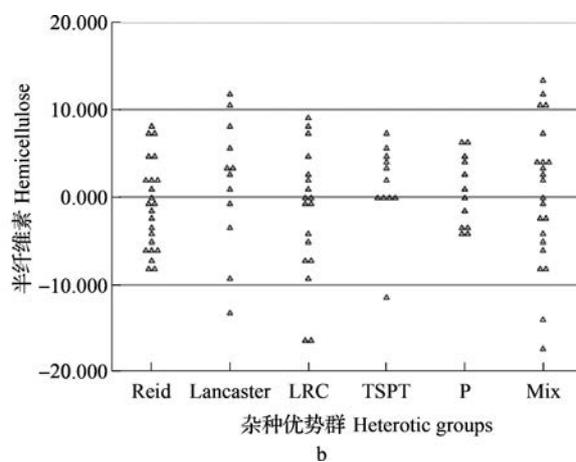
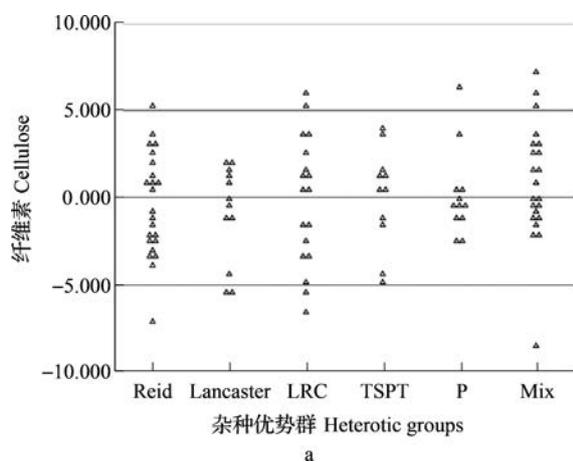
表 10 亲本自交系一般配合力相对效应值

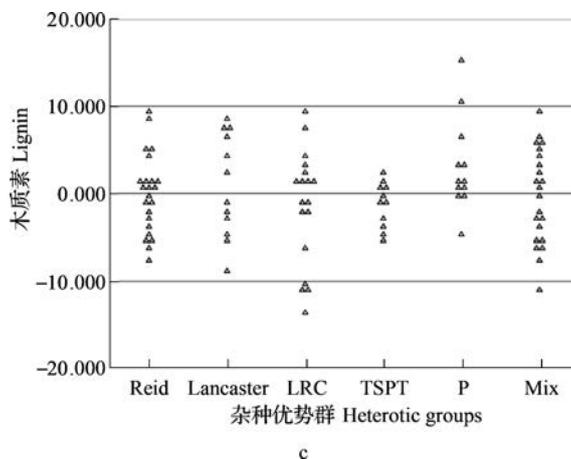
Table 10 Estimates of general combining ability effects of parents for measured characters

自交系	杂种优势群	纤维素	半纤维素	木质素	自交系	杂种优势群	纤维素	半纤维素	木质素
Line	Heterotic groups	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Line	Heterotic groups	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
吉 63	Lancaster	-5.550	-13.239	-8.830	R1656	LRC	0.464	-0.618	1.400
PHP55	Lancaster	-5.295	0.532	7.219	AHU11	LRC	0.528	-0.888	2.634
PHM10	Lancaster	-4.387	-3.616	-4.896	200B	LRC	1.074	-0.213	4.601
6103	Lancaster	-1.356	5.680	6.641	B100	LRC	1.402	-0.217	-2.129
B97	Lancaster	-0.618	3.242	-1.946	L473	LRC	1.425	0.894	3.059
C521	Lancaster	0.040	11.913	4.123	丹 599	LRC	2.561	8.034	1.605
BM	Lancaster	0.933	2.949	-1.098	掖 52106	LRC	3.544	-7.559	-2.293
PHJ33	Lancaster	1.350	10.205	8.757	旅 28	LRC	5.284	7.262	-1.241
GY3	Lancaster	1.559	2.585	-3.069	R31	LRC	6.104	4.842	9.584
W1L900	Lancaster	1.924	-0.478	7.808	LH150	Mix	-8.502	-17.324	-10.730
DM07	Lancaster	2.057	8.387	2.360	AHU16	Mix	-2.089	-7.899	-6.494
AHU21	LRC	-6.570	-6.924	1.636	P007	Mix	-2.074	-8.060	-5.091
A619	LRC	-5.460	-3.938	-13.605	17564	Mix	-1.444	-5.369	3.952
698-3	LRC	-4.800	-16.422	-10.582	SC30-1	Mix	-1.233	-2.556	0.865
AHU6	LRC	-3.513	2.039	-6.237	M1016	Mix	-1.178	1.552	-0.125
SC14	LRC	-3.193	-16.314	-11.272	Y223	Mix	-0.960	-2.183	-5.106
E200	LRC	-2.350	-9.081	-10.818	d140	Mix	-0.603	-6.096	-3.208
丹 9046	LRC	-1.743	-4.936	-0.766	D881	Mix	-0.343	-13.994	-7.812
Pa91	LRC	-1.428	2.631	7.161	CN104	Mix	-0.135	0.023	-3.697

表 10(续)

自交系 Line	杂种优势群 Heterotic groups	纤维素 Cellulose	半纤维素 Hemicellulose	木质素 Lignin	自交系 Line	杂种优势群 Heterotic groups	纤维素 Cellulose	半纤维素 Hemicellulose	木质素 Lignin
E601	Mix	-0.007	-4.424	1.533	南 21-3	Reid	-2.659	-6.317	-3.766
N68a	Mix	0.683	2.572	-2.259	掖 8001	Reid	-2.623	-1.378	-1.098
长 72	Mix	1.690	10.735	6.326	浚 248	Reid	-2.283	-1.128	0.329
Q1261	Mix	1.701	3.717	5.347	AHU12	Reid	-2.117	6.932	8.316
R08	Mix	2.453	3.630	3.438	鉴 1496b	Reid	-1.427	-2.776	1.066
AHU9	Mix	2.671	11.543	1.428	Los-6	Reid	-1.259	-8.491	4.357
20762	Mix	2.930	10.628	9.163	掖 832	Reid	-0.663	-8.471	-5.946
W2H03	Mix	3.204	13.298	5.612	7922	Reid	0.438	1.554	-5.376
6M502	Mix	3.763	3.592	-3.141	Z31B	Reid	0.827	7.407	9.443
433-7	Mix	5.355	-0.868	-6.464	PH6WC	Reid	0.977	-5.937	-4.542
XF134	Mix	5.885	7.560	5.999	M22	Reid	0.984	1.782	1.115
W967	Mix	7.203	4.257	2.137	ys06	Reid	1.316	7.735	4.800
P25	P	-2.634	-3.523	1.616	掖 8112	Reid	1.982	-5.834	-5.175
68122	P	-2.485	-4.536	0.713	DF20	Reid	2.587	1.174	-2.959
丹 599	P	-1.223	4.915	15.258	PHG86	Reid	2.974	4.687	-2.323
R136	P	-1.031	-4.051	3.114	AHU10	Reid	3.075	4.602	0.908
E600	P	-0.543	-0.223	-0.166	757	Reid	3.660	2.207	-0.939
宋 1145	P	-0.401	6.107	10.508	2369	Reid	5.146	-0.806	-0.009
619	P	-0.399	-3.336	-0.082	R548	TSPT	-4.892	4.087	-0.789
XF27	P	-0.231	-1.868	3.239	AHU1	TSPT	-4.363	-11.461	-5.655
802	P	0.339	3.780	1.066	浚 928	TSPT	-1.431	0.133	-0.603
陈 322	P	0.442	0.917	-4.656	浚 971	TSPT	-1.152	0.124	-1.299
98F1	P	3.716	2.282	0.625	2FACC	TSPT	0.362	5.422	1.075
黄昌 b	P	6.314	6.190	6.564	926	TSPT	0.474	1.787	-2.559
S8324	Reid	-7.110	-5.356	0.978	AHU3	TSPT	1.111	0.124	-4.911
C8605-2	Reid	-3.470	-7.294	-7.403	黄野四 3	TSPT	1.404	3.450	-3.932
AHU22	Reid	-3.271	-0.026	4.972	Beck	TSPT	3.482	7.260	0.751
1614	Reid	-3.131	-3.963	1.617	吉 444	TSPT	3.946	-0.403	0.852





a, b, c 分别表示纤维素、半纤维素、木质素的一般配合力相对效应值在不同杂种优势群中的分布
a, b, c respectively indicated the distribution of relative effects of cellulose, hemicellulose and lignin in different heterotic groups

图5 各性状一般配合力相对效应值在不同杂种优势群中的二维散点分布图
Fig. 5 Two dimensional scatter plot of relative effects of general combining ability of different characters in different heterotic groups

3 讨论

前人建立的玉米秸秆 NIRS 模型多用于玉米秸秆原料的检测,提高秸秆生物质能的利用与转化效率,而专门为鉴定抗倒育种材料而建立模型的研究鲜见报道。本研究以筛选抗倒能力强的种质资源为目的,选取与玉米抗倒伏能力关系密切的玉米茎秆基部第3、4节间为材料,建立的模型更适用于种质资源纤维品质的鉴定,筛选抗倒伏能力强的材料。同时供试亲本自交系来源广泛,遗传多样性丰富,保证了模型较为广泛的适应性。前人建立玉米茎秆纤维模型所用的样品来源渠道广,取材的生育期、部位也不尽相同^[8-11,29]。取材标准不一致,使得不同样品之间成分构成差异多样化,用相同的方法来测量这些样品的纤维品质含量会产生误差,模型的准确度会受到影响。本研究的取材时期、部位一致,提高了模型的准确性。CEL、HCEL、LIG 校正模型的校正决定系数为 0.801、0.987、0.998,交互验证均方根误差分别为 1.375、0.532、0.190,与刘会影等^[9]和胡世洋等^[10]所建立的模型相当或略高。

本研究自交系各性状的变异系数均大于杂交组合对应性状的变异系数,而纤维素含量和半纤维素含量的最小值杂交组合远大于自交系,杂交组合中各性状的均值均大于自交系的均值,说明杂交组合的纤维品质整体明显高于亲本自交系,这与实际相符,同时也证明了建立的模型的准确性。杂交组合与自交系各性状的最大值相差不大,说明亲本自交

系与测验种杂交后代没表现出很强的超亲优势。纤维品质各性状在不同自交系间均达到了极显著水平,表明 94 份自交系含有丰富的控制纤维品质性状的等位基因变异。相关分析表明 CEL、HCEL 和 LIG 性状之间均呈极显著正相关,这与马飞前等^[30]和徐丁一等^[31]的研究结果一致。各杂种优势群自交系茎秆各性状含量的高低趋势表现均为纤维素 > 木质素 > 半纤维素。由于纤维素是植物中最广泛的骨架多糖,细胞初生壁由微纤丝构成基本骨架,而纤维素是微纤丝的主要成分^[32],因此玉米茎秆纤维素的含量最高,对茎秆抗倒伏能力影响较大。Appenzeller 等^[2]也指出提高细胞壁纤维素含量就会提高茎秆机械强度和收获指数。玉米茎秆是地上部和地下部的运输通道,导管组织发达,木质化程度较高,因此茎秆中也含有较高的木质素。木质素和半纤维素作为植物细胞壁的重要组成成分,对维持茎秆的机械强度起着重要作用^[33]。茎秆细胞以 CEL、HCEL 和 LIG 为主要物质,与其他细胞壁成分相互交联形成复杂的细胞外基质,增强了玉米茎秆组织的机械强度。

对不同杂种优势群的纤维品质性状进行差异性分析,不同性状的杂种优势群间差异也有所不同。茎秆纤维素含量从高到低依次为唐四平头群、P 群、兰卡斯特群、瑞德群、混合群、旅大红骨群,旅大红骨群与唐四平头群的纤维素含量差异显著。这与任安然等^[34]的结果不尽相同,可能与群体的大小和杂种优势群的构成有关。各杂种优势群的纤维素含量顺

序与木质素含量变化趋势一致,这也表明了纤维素和木质素之间存在极强的相关性。旅大红骨与唐四平头、P 群之间的半纤维素含量差异显著,旅大红骨群的半纤维素含量最低;P 群的木质素含量最高,随后依次为兰卡斯特群、瑞德群、唐四平头群、混合群、旅大红骨群,而旅大红骨群与 P 群在 0.05 水平上差异显著。旅大红骨群的纤维素、半纤维素和木质素含量均为最低,而唐四平头群与 P 群的各性状总体高于其他杂种群。这表明 P 群与唐四平头群纤维品质较高,因此应重视利用 P 群和唐四平头群的种质资源。

一般配合力效应也就是基因加性效应,是评价杂交亲本的重要遗传参数^[35]。对供试组合的茎秆纤维性状进行方差分析,表明各性状组合间的遗传差异均达到极显著水平。CEL、HCEL 和 LIG 三个性状的父本自交系一般配合力方差、母本自交系一般配合力方差均达到了极显著水平,表明这 3 个性状受基因加性效应控制;父本自交系一般配合力方差明显大于母本自交系一般配合力方差,这表明父本自交系的基因加性效应对纤维品质性状具有更重要的作用;木质素含量母本 × 父本的特殊配合力方差差异不显著,而半纤维素和纤维素含量的特殊配合力方差差异极显著,表明木质素主要受加性基因控制,半纤维素和纤维素受加性基因和非加性基因共同影响。

同一自交系的不同性状和不同自交系间同一性状的 GCA 差异均较大。不同杂种优势群的自交系各性状一般配合力均既有正向效应又有负向效应,这为育种提供了更多的可能性。若要选育青贮品种,那么可以在不易倒伏的前提下选择纤维品质低、一般配合力为负向效应的自交系材料,如 A619、SC14、LH150、698-3、吉 63 等。W967、黄昌 b、R31、XF134、旅 28 等自交系在纤维素上具有较大的正向 GCA 值;W2H03、C521、20762、PHJ33 等自交系在半纤维素上具有较大的正向 GCA 值;丹 599、宋 1145、R31、20762、PHJ33 等自交系在木质素上具有较大的正向 GCA 效应值。这些自交系在纤维品质改良方面具有较大的利用价值。在玉米育种中,要求亲本自交系具有优良的农艺性状和较高的一般配合力。组配优良组合,至少要选择一个一般配合力高的材料作亲本^[36]。唐四平头群自交系半纤维素一般配合力呈正向效应,P 群中多数自交系木质素一般配合力呈正向效应,所以在抗倒育种中可以更多考虑 P 群和唐四平头群的种质资源。筛选出 9 个纤维品

质好且一般配合力正向效应高的自交系,如:黄昌 b、6M502、AHU9、长 72、Beck、2369、PHJ33、丹 599、PHP55 等,其中黄昌 b、丹 599 属于 P 群,Beck 属于唐四平头群,PHP55、PHJ33 属于兰卡斯特群,2369 属于瑞德群,长 72、AHU9 与 6M502 属于混合群。这些自交系可以作为培育抗倒耐密品种的基础材料。

4 结论

研究建立的纤维品质校正模型适用于抗倒种质资源的鉴定。不同性状的杂种优势群间纤维品质存在差异。旅大红骨群的纤维素、半纤维素和木质素含量均为最低。P 群与唐四平头群纤维品质较高,同时一般配合力正向效应较好,是组配抗倒杂交种最重要的种质资源。共筛选出 9 个纤维品质好且一般配合力正向效应高的自交系,其中黄昌 b、丹 599 属于 P 群,Beck 属于唐四平头群,PHP55、PHJ33 属于兰卡斯特群,2369 属于瑞德群,长 72、AHU9 与 6M502 属于混合群。

参考文献

- [1] Lundvall J P, Buxton D R, Hallauer A R, George J R. Forage quality variation among maize inbreds: in vitro digestibility and cell-wall components. *Crop Science*, 1994, 34(6): 1672-1678
- [2] Appenzeller L, Doblin M, Barreiro R, Wang H Y, Niu X M, Kollipara K, Carrigan L, Tomes D, Chapman M, Dhugga Kanwarpal S. Cellulose synthesis in maize: isolation and expression analysis of the cellulose synthase (*CesA*) gene family. *Cellulose*, 2004, 11(3-4): 287-299
- [3] 马延华,孙德全,李绥艳,林红,潘丽艳,张长勇. 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. *黑龙江农业科学*, 2012(4): 1-4
- [4] 马飞箭,刘小刚,王红武,黄长玲,吴宇锦,胡小娇,刘志芳. 玉米茎秆纤维素含量遗传分析. *玉米科学*, 2015, 23(1): 10-16
- [5] Vanholme R, Demedts B, Morreel K, Ralph J, Boerjan W. Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology*, 2010, 153: 895-905
- [6] Li K, Wang H W, Hu X J, Liu Z F, Wu Y J, Huang C L. Genome-wide association study reveals the genetic basis of stalk cell wall components in maize. *PLoS One*, 2016, 11(8): e 0158906
- [7] 马延华,孙德全,李绥艳,林红,潘丽艳,李东林,杨国伟,任晓亮. 玉米茎秆木质素含量的初步遗传分析. *作物杂志*, 2015(5): 31-36
- [8] Albanell E, Plaixats J, Ferret A, Bosch L, Casanas F. Evaluation of near-infrared reflectance spectroscopy for predicting stover quality trait in semi-exotic populations of maize. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 1995, 69(3): 269-273
- [9] 刘会影,李国立,薛冬桦,徐洪章,叶小金. 近红外光谱法测定玉米秸秆纤维素和半纤维素含量. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 182-186
- [10] 胡世洋,徐友海,宁艳春,岳军,惠继星,王继艳. 利用近红外光谱技术快速评价玉米秸秆原料. *化工科技*, 2017, 25(4): 34-39
- [11] 吴军,白琪林,苏胜宝,陈绍江,孟庆翔,严衍禄. 近红外反射光谱法分析玉米秸秆纤维素含量的研究. *分析化学*, 2005, 33(10): 1421-1423

- [12] 石平,白琪林,陈稳良.玉米自交系秸秆品质性状鉴定与评价.植物遗传资源学报,2012,13(1):29-34
- [13] De Boever J L, Cottyn B G, De Brabander D L, Vanacker J M, Bouque Ch V. Prediction of the feeding value of grass silages by chemical parameters, in vitro digestibility and near-infrared reflectance spectroscopy. *Animal Feed Science & Technology*, 1996, 60(1):103-115
- [14] 董苏晓,刘贤,韩鲁佳.近红外漫反射光谱法快速测定新鲜青贮饲料化学成分含量.中国农业大学学报,2007,12(6):85-88
- [15] 白琪林,陈绍江,严衍禄,朱雨杰,戴景瑞.近红外漫反射光谱法测定青贮玉米品质性状的研究.中国农业科学,2006,39(7):1346-1351
- [16] 李小安,段瑞君.小麦纤维素含量的测定及方法比较.黑龙江畜牧兽医,2015(5):116-118
- [17] 王金主,王元秀,李峰,高艳华,徐军庆,袁建国.玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的测定.山东食品发酵,2010(3):44-47
- [18] 刘强,罗长兵,陈绍江,孟庆翔.近红外光谱分析青贮玉米NDF中判别异常光谱的研究.光谱学与光谱分析,2007,27(8):1514-1518
- [19] 严衍禄,赵龙莲,韩东海,杨曙明.近红外光谱分析基础与应用.北京:中国轻工出版社,2005,98-103,122
- [20] Sun J G. Statistical analysis of NIR data; data pretreatment. *Journal of Chemometrics*, 1997, 11(6):525-532
- [21] 褚小立,袁洪福,陆婉珍.近红外分析中光谱预处理及波长选择方法进展与应用.化学进展,2004,16(4):528-542
- [22] 张琳,张黎明,李燕,刘丙萍,王晓斐,王俊德.偏最小二乘法在傅里叶变换红外光谱中的应用及进展.光谱学与光谱分析,2005,25(10):1610-1613
- [23] George D, Mallery P. IBM SPSS Statistics 21 Step by Step: A Simple Guide and Reference. 13 edn, New York: Pearson, 2013: 29-41
- [24] 孔繁玲.植物数量遗传学.北京:中国农业大学出版社,2006: 282-285
- [25] 王铎,张力,范素杰,韩笑,吴晗,王丕武,姚丹,张君.大豆主要脂肪酸含量近红外模型的建立.大豆科学,2017,36(2): 295-299
- [26] Liu Y, Guo J J, Zhang D M, Zhao Y F, Zhu L Y, Huang Y Q, Chen J T. Genetic diversity and linkage disequilibrium estimation among the maize breeding germplasm for association mapping. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2014, 16(5): 851-861
- [27] 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
- [28] 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
- [29] Cozzolino D, Fassio A, Gimenez A. The use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the composition of whole maize plants. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2001, 81(1):142-146
- [30] 马飞前,刘小刚,王红武,黄长玲,吴宇锦,胡小娇,刘志芳.玉米茎秆纤维品质性状及其相关分析.作物杂志,2014(4): 44-48
- [31] 徐丁一,王红武,刘志芳,吴宇锦,黄长玲.我国玉米骨干自交系秸秆纤维品质分析.作物杂志,2012(1):39-43
- [32] 李合生.现代植物生理学.2版.北京:高等教育出版社,2006: 13-15
- [33] 陈晓光,石玉华,王成雨,尹燕桦,宁堂原,史春余,李勇,王振林.氮肥和多效唑对小麦茎秆木质素合成的影响及其与抗倒伏性的关系.中国农业科学,2011,44(17):3529-3536
- [34] 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
- [35] 王玉平,郭明星,王峰,赵敏会,冉金蓉,刘志,钟由源,林纲,李仕贵.SSR标记遗传距离与杂交稻农艺性状一般配合力的相关性分析.分子植物育种,2013,11(3):317-325
- [36] 苟才明,余世权,黄宁,荣廷昭,张吉海,徐克成,李志龙.17个玉米地方种质选系的配合力分析.华北农学报,2015,30(2): 175-182

欢迎订阅 2019 年《草业学报》

《草业学报》由中国科协技术协会主管,中国草学会、兰州大学主办,国内外公开发行的学术性期刊。现入编全国中文核心期刊,荣获“百强报刊”、“百种中国杰出学术性期刊”、“中国精品科技期刊”、“中国科技论文在线优秀期刊一等奖”。本刊主要报道国内外草业科学及其相关领域,如畜牧学、农学、林学、经济学等领域的高水平理论研究和技术创新成果,发表国内外草业领域创新性的研究论文,刊载学术价值较高的草业科学专论、综述、评论等,探讨草业发展的新理论与新构思,是草业新秀成长的园地,推动草业科学发展的论坛。其读者对象主要是从事农林牧渔、园林绿化、生态环境、国土资源等领域的科研管理及教学等专业技术人员。

月刊,每期定价 25 元,全年 300 元。国内邮发代号:54-84,全国各地邮局均可订阅,若错过订期,可在本编辑部直接办理订阅。

地址:兰州市嘉峪关西路 768 号《草业学报》编辑部

邮编:730020

电话:0931-8913494

E-mail:cyxb@lzu.edu.cn

网址:http://cyxb.magtech.com.cn