



岳海旺, 魏建伟, 刘朋程, 陈淑萍, 卜俊周. 基于 AMMI 模型和 GGE 双标图对玉米品种产量稳定性和适应性选择评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 24-37.

YUE Haiwang, WEI Jianwei, LIU Pengcheng, CHEN Shuping, BU Junzhou. Stability and adaptability assessment for the selection of elite maize cultivars based on AMMI model and GGE-biplot[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 24-37.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.09.03

基于 AMMI 模型和 GGE 双标图对玉米品种产量稳定性和适应性选择评价

岳海旺 魏建伟 刘朋程 陈淑萍 卜俊周*

(河北省农林科学院 旱作农业研究所/河北省农作物抗旱研究重点实验室, 河北 衡水 053000)

摘要 为有效鉴定和评价黄淮海玉米品种产量丰产性、稳定性和适应性, 筛选出适宜黄淮海地区推广种植的优良玉米品种, 采用 AMMI 模型稳定性参数和非参数方法对黄淮海玉米区域试验 15 个参试品种在 6 个省 12 个试点进行产量稳定性评价, 同时利用 GGE 双标图对参试品种进行适应性分析。结果表明: 方差分析变异来源中基因型(G)、环境(E)以及基因型与环境互作(GEI)均达到了极显著差异($P < 0.01$)和显著差异($P < 0.05$), 其中环境效应在总平方和中占比最大, 为 85.02%, 其次是基因型与环境互作效应, 占比为 10.74%, 基因型所占比例最小, 为 4.25%。对基因型与环境互作效应进行分解, 前 5 个交互主成分(IPCA 1~IPCA 5)差异达到了显著和极显著水平, 共计解释了 85.41% 的互作效应。基于 Spearman 相关分析, 非参数统计因子和参数统计因子内部各指标之间存在着显著的相互关系。生物干重与非参数统计因子 $S^{(6)}$ 、 Z_1 、 Z_2 、 $NP^{(2)}$ 、 $NP^{(3)}$ 、 $NP^{(4)}$ 、KR 间均呈显著负相关($P < 0.05$), 与 $S^{(1)}$ 和 $S^{(2)}$ 则呈显著正相关($P < 0.05$)。AMMI 双标图显示, 参试品种整株生物干重范围在 18 000~22 000 kg/hm², ‘渝单 805’、‘正大 511’、‘青秀 001’和‘皖农科青贲 8 号’丰产性较好, ‘金诚 6’丰产性最差。‘正大 511’、‘雅玉 7758’、‘KNX22002’和‘青秀 001’等参试品种稳定性较强, 山东德州较其他试点有较好的辨别力, 而山东泰安和河南濮阳等试点辨别力较差。GGE 双标图分析表明‘正大 511’属于丰产性和稳定性均较好的品种, 为黄淮海地区的理想品种, 其次为‘青秀 001’和‘渝单 805’, 而‘安科青 2 号’离圆心位置最远, 为参试品种中最不理想的品种。综上, 采用 AMMI 模型和 GGE 双标图评价可为黄淮海地区玉米品种示范和推广提供依据。

关键词 AMMI 模型; GGE 双标图; 稳定性统计; 基因型与环境互作; 适应性

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2024)09-0024-14

文献标志码 A

Stability and adaptability assessment for the selection of elite maize cultivars based on AMMI model and GGE-biplot

YUE Haiwang, WEI Jianwei, LIU Pengcheng, CHEN Shuping, BU Junzhou*

(Dryland Farming Institute / Hebei Provincial Key Laboratory of Crops Drought Resistance Research, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

Abstract In order to effectively identify and evaluate the high yield, stability and adaptability of maize hybrids growing in the Huanghuaihai Plain in China, and to select superior maize hybrids suitable for widespread cultivation in this region, the stability parameters of AMMI model and non-parametric methods were used to evaluate the yield stability of 15 evaluated cultivars in 12 locations across 6 provinces of a

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 河北省农林科学院科技创新专项(2023KJCXZX-HZS-1, 2023KJCXZX-HZS-12); 国家玉米产业技术体系(CARS-02); 国家重点研发计划(2022YFD1201002-3); 河北省玉米现代种业科技创新团队(21326319D)

第一作者: 岳海旺(ORCID: 0000-0003-2555-5101), 副研究员, 主要从事作物丰产性和稳产性分析研究, E-mail: yanjiu1982@163.com

通讯作者: 卜俊周(ORCID: 0009-0009-7591-832X), 研究员, 主要从事玉米新品种选育研究, E-mail: bujunzhou@126.com

regional trial of summer maize in the Huanghuaihai Plain. Meanwhile, the adaptability of the evaluated hybrids was analyzed by using the GGE biplot. The results of combined analysis of variance (ANOVA) and additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) analysis showed that environments (E), genotypes (G), GE interaction, accounted for 85.02%, 4.25% and 10.74% of the total variation, respectively. The GE interaction effect was divided into five interaction principal component axes (IPCA), among them the first five IPCAs were highly significant, and a total of 85.41% of the GE interaction effects were explained. Based on Spearman correlation analysis, there were significant interrelationships within each of the non-parametric and parametric statistical statistics. Significant negative correlations were discovered between the whole plant dry yield and the non-parametric statistical statistics $S^{(6)}$, Z_1 , Z_2 , $NP^{(2)}$, $NP^{(3)}$, $NP^{(4)}$ and KR, while significant positive correlations were found with $S^{(1)}$ and $S^{(2)}$. The results of AMMI biplot analysis showed that the whole plant dry weight of the evaluated hybrids ranged from 18 000 kg/hm² to 22 000 kg/hm². 'Yudan 805' 'Zhengda 511' 'Qingxiu 001' and 'Wannongkeqingzhu 8' were more productive and 'Jincheng 6' was the least productive. 'Zhengda 511' 'Yayu 7758' 'KNX 22002' and 'Qingxiu 001' showed more stability than the other hybrids. Dezhou of Shandong Province had better discriminating power than other sites, while sites such as Tai'an and Puyang had poor discriminating power. The GGE biplot analysis showed that 'Zhengda 511' was a good cultivar in terms of high-yielding and stability and the ideal hybrid for this study, followed by 'Qingxiu 001' and 'Yudan 805'. 'Ankeqing 2' was the furthest from the center of the circle and the least desirable cultivar in this study. In conclusion, the use of the AMMI model stability analysis and GGE biplot can provide a basis for the demonstration and promotion of maize hybrids in Huanghuaihai Plain.

Keywords AMMI model; GGE Biplot; stability statistics; genotype $\times$ environment interaction; adaptability

青贮玉米(*Zea mays* L.)是世界上最重要的饲料之一,具备高生物产量、高淀粉含量、高消化率、低成本和适宜机械化收获等特点,是草食动物主要粗饲料原料的优质来源,被誉为“饲料之王”^[1-2]。我国青贮玉米研究始于上个世纪的70年代,截止到2020年我国青贮玉米种植面积为167 hm²,约占玉米总面积的4%,远低于西方发达国家^[3]。随着社会经济高速发展,人民生活质量和水平不断提升,人们对猪、牛肉和奶类产品的需求不断升级,青贮玉米饲料作为“饲料之王”,是发展集约化畜牧业不可或缺的原料之一,高质量青贮玉米产业发展是提高肉、乳制品质量的关键所在^[4]。因此,筛选优质、高产、稳产的品种是青贮玉米产业高质量发展的重要基础。

以往的研究中针对玉米品种丰产性多采用方差分析的方法,通过新复极差来衡量品种丰产性差异,与对照相比以显著或极显著的方式来展现,但往往忽略对品种的稳定性评价^[5-7]。已有研究表明,作物品种性状稳定性与基因型(G)、环境(E)和互作效应(GE)关系密切,GEI越大,说明该品种对试点环境越敏感,品种稳定性越差^[8-10]。由于基因型与环境互作效应的存在导致多点试验条件下品种选择效率的降低,从而给育种者进行品种选择带来了

诸多挑战^[11]。

玉米组合选育后需要经过多年的区域试验对品种丰产性、稳定性和适应性进行综合评判。多环境测试(Multi-environment trials, MET)在鉴定最佳品种方面发挥着关键作用,可以测定不同作物品种基因型与环境互作效应^[12-13]。MET中某一品种通常要经过不同试点和连续多年的评估,最终选择出丰产性突出、稳定性较好的品种^[14]。由于环境变化,GEI对玉米产量有很大影响^[15-16]。已有研究表明,GEI的应用导致印度尼西亚的甘薯^[17]、土耳其的硬粒小麦^[18]、巴西的大豆^[19]、埃塞俄比亚的谷子^[20]和中国的棉花^[21]等作物的品种筛选工作充满挑战。因此,GEI分析对提升玉米品种筛选效率,做到品种推广精准定位具有重要意义。Huehn等^[22]指出,有2种主要的方法来研究GEI。第一种是参数方法,取决于分布假设,涉及到观察到的基因型效应。第二种是非参数方法,它说明环境和表型与生物和非生物因素的关系。这些方法中的每一种都可以相互补充,以解释GEI,从而最终导致形成一个合理清晰的相互作用图,即基因型对一些确定的环境变量的不同敏感性^[23]。有些育种者还提出了结合不同统计技术的方法来进行稳定性分析,Gollob

等^[24]提出了1种将因子分析和方差分析的功能整合到一种算法中的方法。当时,这种方法被称为 F_R 检验^[25],加性主效应和乘法相互作用模型(additive main effect and multiplicative interaction model, AMMI模型)就是采用的这种方法,AMMI模型分析主要用于固定效应模型框架中^[26]。区别于AMMI模型侧重点在基因型与环境的互作效应,Yan等^[27]提出了1种新的MET分析方法-GGE双标图(genotype plus genotype by environment interaction biplot, GGE biplot)模型,该方法同时包含了基因型主效应(G)和基因型与环境互作效应(GEI),可以对参试品种适应性、试点辨别力以双标图形式展现。同时采用AMMI模型参数、非参数稳定性评价方法和GGE双标图技术对我国黄淮海地区玉米品种丰产性、稳

定性和适应性评价方面的研究尚未见报道。本研究采用AMMI模型参数和非参数统计方法对15个参试品种在6个省份12个试点的生物产量性状进行丰产性和稳定性分析,同时采用GGE双标图技术对参试品种稳定性和适应性进行综合评价,旨在准确评价黄淮海地区玉米品种丰产性、稳定性和适应性,以期今后的品种多点鉴定试验评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试组合来源于2022年黄淮海青贮玉米区域试验的15个参试品种,其中‘雅玉青贮8号’为对照品种(表1),试验种子由北京农学院提供。

表1 本研究所用到的参试品种
Table 1 The maize cultivars used in this study

序号 Number	品种编号 Cultivar code	品种 Cultivar	序号 Number	品种编号 Cultivar code	品种 Cultivar
G1	CD 3601	成单 3601 Chengdan 3601	G9	HF 159	泓丰 159 Hongfeng 159
G2	WNKQZ 8	皖农科青贮 8号 Wannongkeqingzhu 8	G10	LQZ 303	连青贮 303 Lianqingzhu 303
G3	YD 805	渝单 805 Yudan 805	G11	AKQ 2	安科青 2号 Ankeqing 2
G4	YY 7758	雅玉 7758 Yayu 7758	G12	JC 6	金诚 6 Jincheng 6
G5	SN 8872	SN 8872	G13	HY 1996	衡玉 1996 Hengyu 1996
G6	QX 001	青秀 001 Qingxiu 001	G14	KNX 22002	KNX 22002
G7	ZD 511	正大 511 Zhengda 511	G15	YYQZ 8	雅玉青贮 8号 Yayuingzhu 8
G8	ZQZ 7	郑青贮 7号 Zhengqingzhu 7			

1.2 试验设计及田间管理

试验于2022年分别在安徽合肥、宿州,河北邯郸,河南郑州、濮阳,江苏连云港,陕西杨凌、富平和宝鸡,山东德州、嘉祥、泰安等6个省份12个试点进行。各试点经纬度信息、海拔、生育期间气温和土质情况见表2。各点试验均采用随机区组试

验设计,3次重复,5行区,行长6.7 m,行距0.6 m,小区面积20.1 m²。播种期为5月下旬—6月上旬,种植密度75 000株/hm²。收获期为9月下旬—10月上旬,测定的农艺性状为生物产量,kg/hm²,试验期间各项农艺措施参照当地大田管理。

表 2 试点信息

Table 2 Description of the locations used in this study

省份 Province	试点 Location	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔/m Altitude	5—10月 May—October				土质 Soil type
					降雨量/mm Precipitation	最低温度/℃ Minimum temperature	最高温度/℃ Maximum temperature	平均温度/℃ Average temperature	
安徽 Anhui	合肥 Hefei	32°87′	117°56′	25	608.1	7.9	41.8	24.8	褐土 Cinnamon soil
	宿州 Suzhou	33°70′	117°08′	29	679.8	7.7	41.9	24.5	褐土 Cinnamon soil
河北 Hebei	邯郸 Handan	36°49′	114°54′	55	630.6	8.45	43.6	23.4	棕壤 Brown soil
河南 Henan	郑州 Zhengzhou	34°79′	113°68′	52	515.7	4.1	44.1	24.7	黄棕壤 Yellow brown soil
	濮阳 Puyang	35°76′	115°04′	56	698.4	3.2	42.7	23.7	黄棕壤 Yellow brown soil
江苏 Jiangsu	连云港 Lianyungang	34°54′	119°21′	7	872.3	5.8	39.3	23.4	褐土 Cinnamon soil
陕西 Shaanxi	杨凌 Yangling	34°27′	108°08′	465	573.9	2.9	41.9	22.2	黄绵土 Yellow sandy soil
	富平 Fuping	34°75′	109°17′	388	646.3	—1.1	39.8	21.5	黄绵土 Yellow sandy soil
	宝鸡 Baoji	34°37′	107°20′	837	562.3	1.1	38.7	19.8	黄绵土 Yellow sandy soil
山东 Shandong	德州 Dezhou	37°68′	116°81′	23	815.4	2.6	40.7	22.3	棕壤 Brown soil
	嘉祥 Jiaxiang	35°36′	116°40′	36	792.9	1.7	41.3	23.5	棕壤 Brown soil
	泰安 Taian	36°20′	117°09′	147	971.9	0.8	39.7	22.2	棕壤 Brown soil

1.3 数据分析方法

Microsoft Excel 2020 用于试验数据录入和整理,DPS v19.05 版本^[28]用于 AMMI 模型分析,采用 R software version 4.0.1 软件的“metan”程序包进行参数和非参数因子分析,AMMI 和 GGE 双标图作图通过 Genstat 18.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 全株生物产量方差分析及 AMMI 模型分析

由表 3 可知,基因型效应(G)和环境效应(E)均达到了极显著水平($P<0.01$),基因型与环境互作效应(GE)达到了显著水平($P<0.05$)。总变异来

表3 参试品种全株生物干重AMMI模型分析
Table 3 AMMI model analysis of the whole plant dry yield for tested cultivars

变异来源 Source	自由度 df	平方和 SS	均方 Mean squares	F	概率 Probability	所占比例/% Proportion	累积/% Accumulated
环境(E) Environment	11	2 092.72	190.25	110.87**	<0.001	85.02	
基因型(G) Genotype	14	104.55	7.47	4.35**	<0.001	4.25	
基因型与环境互作 GEI	154	264.25	1.72	1.51*	0.012	10.74	
第一主成分 IPCA 1	24	87.10	3.63	6.29**	<0.001		32.96
第二主成分 IPCA 2	22	54.34	2.47	4.28**	<0.001		53.53
第三主成分 IPCA 3	20	37.21	1.86	3.22**	0.002 3		67.61
第四主成分 IPCA 4	18	26.22	1.45	2.52*	0.013 8		77.53
第五主成分 IPCA 5	16	20.81	1.31	2.25*	0.029 3		85.41
第六主成分 IPCA 6	14	12.70	0.91	1.57 ^{ns}	0.149 4		90.22
第七主成分 IPCA 7	12	9.80	0.82	1.42 ^{ns}	0.216 1		93.93
残差 Residuals	28	16.20	0.58				
共计 Total	179	2 461.51	13.75				

注: *和**分别表示在5%和1%显著水平。ns表示不显著。
Note: * and **, significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. ns, not significant.

源中环境效应(E)占比85.02%,基因型与环境互作效应、基因型效应占比分别为10.74%、4.25%。对交互作用主成分轴(IPCA)进行显著性检测表明,前5个乘积项展现的交互信息达到了显著或极显著水平,同时将剩余IPCA并为残差,前5个乘积项(IPCA 1~IPCA 5)共计解释了85.41%的交互作用平方和。

2.2 参数统计分析

由表4可知,12个试点中,参试品种‘渝单805’‘正大511’‘青秀001’‘皖农科青贮8号’和‘泓丰159’的平均全株生物干重产量均较高,对照品种

‘雅玉青贮8号’‘安科青2号’和‘金诚6’的平均生物干重产量都较低。回归系数(b_i)>1的品种为‘成单3601’‘青秀001’和‘泓丰159’,产量均高于平均产量,对环境的适应性较好;而 b_i <1且产量较低的品种对环境的适应性较差。回归偏差(s^2d_i)越接近0的参试品种,稳定性越好。由于‘KNX22002’‘金诚6’‘泓丰159’‘郑青贮7号’‘郑青贮7号’和‘雅玉青贮8号’的Wricke生态价指数(W_i^2)和稳定性方差(σ_i^2)均较低,被认为是较稳定的品种。ASV较低的‘KNX22002’‘青秀001’‘金诚6’‘SN8872’和‘郑青贮7号’等被认定为产量稳定性较好的品种,但‘皖

表 4 参试品种的全株生物干重和参数统计
Table 4 The whole plant dry yield and parametric statistics of tested cultivars

品种 Cultivar	生物干重/(kg/hm ²) Dry yield	ASV	W_1^2	σ_i^2	s^2d_i	CV _i	θ_0	θ_i	b_i
成单 3601 Chengdan 3601	20 100 (6)	1.68 (11)	15.86 (8)	1.53 (8)	1.64 (6)	21.46 (13)	1.73 (8)	1.70 (8)	1.18 (14)
皖农科青贮 8 号 Wannongkeqingzhu 8	20 450 (3)	2.42 (15)	29.52 (15)	2.96 (15)	2.20 (10)	13.22 (1)	1.63 (15)	2.36 (15)	0.68 (1)
渝单 805 Yudan 805	20 860 (1)	1.33 (7)	16.34 (9)	1.58 (9)	2.32 (11)	17.56 (3)	1.73 (9)	1.72 (9)	0.97 (7)
雅玉 7758 Yayu 7758	19 010 (12)	1.72 (13)	23.77 (12)	2.36 (12)	3.22 (14)	18.57 (7)	1.67 (12)	2.08 (12)	0.91 (3)
SN 8872	19 640 (9)	0.98 (4)	15.64 (7)	1.51 (7)	2.05 (8)	20.72 (12)	1.73 (7)	1.69 (7)	1.10 (12)
青秀 001 Qingxiu 001	20 470 (2)	0.82 (2)	21.72 (11)	2.15 (11)	1.92 (7)	22.29 (14)	1.69 (11)	1.98 (11)	1.24 (15)
正大 511 Zhengda 511	19 530 (11)	1.71 (12)	24.26 (13)	2.41 (13)	3.30 (15)	20.08 (11)	1.67 (13)	2.11 (13)	1.09 (11)
郑青贮 7 号 Zhengqinghu 7	20 170 (5)	1.15 (5)	12.29 (4)	1.16 (4)	1.11 (1)	15.06 (2)	1.76 (4)	1.52 (4)	0.82 (2)
泓丰 159 Hongfeng 159	20 260 (4)	1.19 (6)	11.62 (3)	1.09 (3)	1.55 (3)	19.53 (10)	1.76 (3)	1.49 (3)	1.08 (10)
连青贮 303 Lianqingzhu 303	19 910 (7)	1.50 (10)	14.76 (6)	1.42 (6)	2.06 (9)	17.95 (4)	1.74 (6)	1.64 (6)	0.95 (6)
安科青 2 号 Ankeqing 2	18 560 (14)	1.78 (14)	25.80 (14)	2.57 (14)	3.20 (13)	23.49 (15)	1.65 (14)	2.18 (14)	1.16 (13)
金诚 6 Jincheng 6	18 390 (15)	0.90 (3)	11.32 (2)	1.06 (2)	1.54 (2)	18.92 (8)	1.76 (2)	1.48 (2)	0.94 (5)
衡玉 1996 Hengyu 1966	19 630 (10)	1.37 (8)	17.95 (10)	1.75 (10)	2.56 (12)	19.22 (9)	1.71 (10)	1.80 (10)	1.00 (9)
KNX 22002	19 780 (8)	0.55 (1)	10.94 (1)	1.02 (1)	1.56 (4)	18.50 (6)	1.77 (1)	1.46 (1)	0.99 (8)
雅玉青贮 8 号 Yayuqingzhu 8	18 630 (13)	1.49 (9)	12.45 (5)	1.17 (5)	1.62 (5)	18.24 (5)	1.75 (5)	1.53 (5)	0.91 (4)

注:ASV,AMMI稳定性值; W_1^2 ,生态价指数; σ_i^2 ,稳定性方差; s^2d_i ,回归偏差;CV_i,方差系数; θ_0 ,GE方差分量; θ_i ,平均方差分量; b_i ,回归系数。括号中为本列指标的排名。下同。
Note:ASV, AMMI stability value; W_1^2 , Wricke's ecovalence; σ_i^2 , Shukla's stability variance; s^2d_i , deviation from regression; CV_i, coefficient of variance; θ_0 , GE variance component; θ_i , mean variance component; b_i , linear regression coefficient. The ranking of indicators in column is shown in parentheses. The same below.

农科青贮8号’‘安科青2号’‘雅玉7758’‘正大511’和‘成单3601’等被认定为产量不稳定的品种。方差系数(CV_i)数值最低的是‘皖农科青贮8号’,被认为是最稳定的品种。

2.3 非参数统计分析

由表5可知,‘雅玉青贮8号’‘泓丰159’‘金诚6’‘成单3601’和‘雅玉7758’等品种 $S^{(1)}$ 和 $S^{(2)}$ 均较低,说明这些品种稳定性较好。根据2个非参数统计量 $S^{(3)}$ 和 $S^{(6)}$,较稳定的品种有‘雅玉青贮8号’‘泓丰159’和‘渝单805’,而‘金诚6’‘安科青2号’和‘连青贮303’等品种稳定性较差。 Z_1 和 Z_2 分别为 $S_i^{(1)}$ 和 $S_i^{(2)}$ 用于 χ^2 检验的标准值,‘正大511’‘郑青贮7号’和‘皖农科青贮8号’的数值较低,属于稳定性较好的品种,而‘雅玉青贮8号’的 Z_1 和 Z_2 均高于其他参试品种,属于稳定性较差的品种。根据调整后生物产量均值的等级计算出的Thennarsu非参数稳定性统计因子,数值低的品种被认为更稳定。根据 $NP^{(1)}$,与其他品种相比,‘雅玉青贮8号’被认为是最稳定的,其次是‘泓丰159’‘SN8872’和‘金诚6’。而数值较高的‘安科青2号’‘青秀001’和‘雅玉7758’被认定为不稳定品种。根据 $NP^{(2)}$,‘青秀001’是参试品种中数值最低的品种,其次是‘皖农科青贮8号’和‘SN8872’,属于稳定性较好的品种。而‘金诚6’数值最高,其次是‘安科青2号’和‘雅玉青贮8号’,属于稳定性较差的品种。根据 $NP^{(3)}$ 和 $NP^{(4)}$,‘泓丰159’和‘渝单805’的值较低,属于较为稳定的品种,而‘金诚6’和‘安科青2号’则属于稳定性较差的品种。KR稳定性测定结果显示,该稳定性指数最低的是‘泓丰159’,其次为‘渝单805’和‘郑青贮7号’等,均属于稳定性较好的品种。而‘安科青2号’‘雅玉7758’和‘正大511’等品种指数较高,属于不稳定的品种。

2.4 各稳定性因子间的相关分析

由表6可知,平均生物产量与稳定性指标 $S^{(1)}$ 和 $S^{(2)}$ 均呈显著正相关($P<0.05$),而与 $S^{(6)}$ 、 $NP^{(2)}$ 、 $NP^{(3)}$ 、 $NP^{(4)}$ 均呈极显著负相关($P<0.01$),与 Z_1 、 Z_2 和KR呈显著负相关($P<0.05$)。 b_i 与 CV_i 呈极显著正相关。参数因子 θ_i 、 σ_i^2 与非参数因子 $NP^{(1)}$ 和KR呈显著正相关,与ASV、 W_i^2 、 σ_i^2 和 s^2d_i 等参数因子呈极显著正相关。GE方差分量 θ_0 与 $NP^{(1)}$ 、KR呈显著负相关,与ASV、 W_i^2 、 σ_i^2 和 s^2d_i 等参数因子呈极显著负相关。Kang选择指数(KR)与 $NP^{(3)}$ 、 $NP^{(4)}$ 、 W_i^2 、 σ_i^2 和

s^2d_i 等因子均呈显著正相关,而与 θ_0 呈显著负相关。AMMI稳定性值(ASV)与 W_i^2 、 σ_i^2 呈显著正相关,而与 θ_0 呈显著负相关。Thennarasu非参数因子除 $NP^{(1)}$ 外,其余3个因子彼此间均呈显著正相关。Nassar和Huehn指数间均呈正相关关系,其中, $S^{(1)}$ 与 $S^{(2)}$ 、 $S^{(3)}$ 分别呈极显著、显著正相关, $S^{(3)}$ 与 $S^{(6)}$ 呈极显著正相关。

2.5 参试品种AMMI双标图分析

由图1可知,参试品种生物干重范围在18 000~22 000 kg/hm²。双标图水平方向试点图标较品种图标更分散,说明参试品种生物产量环境效应(E)大于基因型(G)效应。品种图标越靠近横坐标的右侧则代表该品种丰产性越好,‘渝单805’‘正大511’‘青秀001’和‘皖农科青贮8号’等品种丰产性较好,‘金诚6’丰产性最差。以IPCA 1为0时做水平虚线,根据品种图标与虚线垂直距离来判别品种稳定性,距离越近该品种稳定性越好。‘正大511’‘雅玉7758’‘KNX22002’和‘青秀001’等参试品种稳定性较好,‘皖农科青贮8号’‘成单3601’和‘安科青2号’等品种稳定性较差。以试点图标与虚线垂直距离来评价试点辨别力,距离越远则辨别力越好。德州较其他试点有较好的辨别力,而泰安和濮阳等试点辨别力较差。

2.6 GGE双标图品种适应性分析

由图2可知,第一主成分(PC 1)和第二主成分(PC 2)分别解释了G+GE变异平方和的35.89%、21.58%,总计57.47%。将双标图中处于最远处的品种连成一个多边形,从原点(0,0)出发给多边形的各边作一垂线,可以将试点划分为7个不同扇区,仅有4个扇区有试点落入。每个扇区中顶角位置的品种为试点最佳种植品种。邯郸、嘉祥和宿州等试点同处1个扇区,该扇区中‘皖农科青贮8号’适应性最好;宝鸡、连云港、郑州和合肥等试点处于1个扇区,该扇区内‘渝单805’适应性最好;‘正大511’在濮阳、富平和泰安等试点表现最好;德州试点独处1个扇区,‘成单3601’是该扇区产量最高的品种;‘安科青2号’‘雅玉7758’和‘雅玉青贮8号’所在扇区没有试点落入,说明这3个品种在所有试点表现不佳。

2.7 参试品种丰产性及稳定性分析

由图3可知,从品种丰产性方面看,‘正大511’产量最高,其次是‘渝单805’‘青秀001’,‘安科青2号’产量最低,‘金诚6’和‘雅玉7758’产量都低于

表 5 参试品种全株生物干重和非参数统计

Table 5 The whole plant dry yield and non-parametric statistics of tested cultivars

品种 Cultivar	生物干重/ (kg/hm ²) Dry yield	S ⁽¹⁾	Z ₁	S ⁽²⁾	Z ₂	S ⁽³⁾	S ⁽⁶⁾	NP ⁽¹⁾	NP ⁽²⁾	NP ⁽³⁾	NP ⁽⁴⁾	KR
成单 3601 Chengdan 3601	20 100 (6)	3.97 (4)	1.45 (12)	12.06 (4)	1.37 (11)	15.31 (3)	3.62 (5)	3.41 (6)	0.38 (5)	0.48 (6)	0.46 (5)	15 (7)
皖农科青贮 8 号 Wannongkeqingzhu 8	20 450 (3)	4.68 (11)	0.16 (3)	18.57 (12)	0.02 (3)	18.16 (7)	3.42 (3)	4.00 (9)	0.31 (2)	0.41 (3)	0.42 (4)	19 (11)
渝单 805 Yudan 805	20 860 (1)	4.42 (8)	0.46 (7)	16.09 (10)	0.24 (6)	15.39 (4)	3.48 (4)	3.50 (8)	0.38 (6)	0.36 (2)	0.38 (2)	10 (2)
雅玉 7758 Yayu 7758	19 010 (12)	4.15 (5)	1.17 (11)	12.33 (5)	1.37 (12)	22.00 (9)	5.51 (12)	4.25 (13)	0.46 (11)	0.79 (13)	0.67 (13)	24 (14)
SN8872	19 640 (9)	4.20 (6)	0.96 (9)	12.75 (6)	1.19 (10)	17.00 (5)	4.24 (7)	3.00 (3)	0.32 (3)	0.44 (4)	0.51 (7)	16 (8)
青秀 001 Qingxiu 001	20 470 (2)	4.45 (9)	0.23 (5)	14.97 (8)	0.20 (4)	17.03 (6)	4.21 (6)	4.50 (14)	0.30 (1)	0.49 (7)	0.46 (6)	14 (5)
正大 511 Zhengda 511	19 530 (11)	5.65 (15)	0.01 (1)	22.75 (14)	0.00 (1)	28.60 (12)	5.20 (11)	4.08 (11)	0.42 (10)	0.56 (10)	0.65 (11)	21 (13)
郑青贮 7 号 Zhengqingzhu 7	20 170 (5)	5.20 (13)	0.01 (2)	19.48 (13)	0.01 (2)	23.16 (10)	4.86 (8)	4.00 (9)	0.40 (7)	0.48 (5)	0.56 (8)	11 (3)
泓丰 159 Hongfeng 159	20 260 (4)	3.50 (3)	4.65 (13)	8.63 (2)	3.97 (14)	9.90 (2)	3.03 (1)	2.92 (2)	0.37 (4)	0.34 (1)	0.37 (1)	8 (1)
连青贮 303 Lianqingzhu 303	19 910 (7)	5.64 (14)	0.96 (10)	22.82 (15)	0.84 (9)	29.53 (13)	5.88 (13)	4.17 (12)	0.46 (12)	0.54 (9)	0.66 (12)	14 (6)
安科青 2 号 Ankeqing 2	18 560 (14)	4.20 (6)	0.81 (8)	13.66 (7)	0.69 (8)	31.63 (14)	7.68 (14)	4.92 (15)	1.26 (14)	1.09 (14)	0.88 (14)	28 (15)
金诚 6 Jincheng 6	18 390 (15)	3.24 (2)	6.25 (14)	10.09 (3)	3.20 (13)	31.71 (15)	8.86 (15)	3.17 (4)	1.79 (15)	1.12 (15)	0.93 (15)	17 (9)
衡玉 1996 Hengyu 1966	19 630 (10)	4.77 (12)	0.17 (4)	16.63 (11)	0.21 (5)	24.66 (11)	4.99 (9)	3.40 (5)	0.41 (9)	0.56 (11)	0.64 (10)	20 (12)
KNX 22002	19 780 (8)	4.59 (10)	0.38 (6)	15.11 (9)	0.58 (7)	21.45 (8)	5.03 (10)	3.43 (7)	0.41 (8)	0.50 (8)	0.59 (9)	12 (4)
雅玉青贮 8 号 Yayuyingzhu 8	18 630 (13)	1.70 (1)	17.98 (15)	2.42 (1)	9.19 (15)	6.15 (1)	3.08 (2)	2.42 (1)	1.17 (13)	0.71 (12)	0.39 (3)	18 (10)

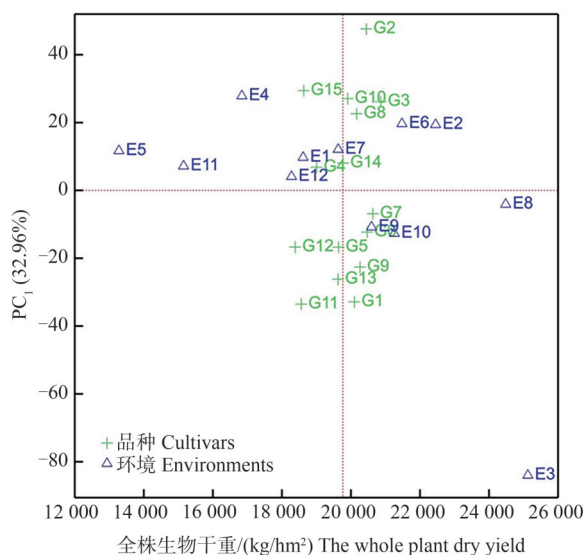
注: S⁽¹⁾, S⁽²⁾, S⁽³⁾ 和 S⁽⁶⁾, Nassar 和 Huehn's 非参数稳定性统计方法^[20]。NP⁽¹⁾, NP⁽²⁾, NP⁽³⁾ 和 NP⁽⁴⁾, Thennarasu 的非参数稳定性统计方法^[30]; Z₁和 Z₂, 分别为 S⁽¹⁾和 S⁽²⁾用于 χ^2 检验的标准值; KR, 同时将产量和 σ_1^2 作为选择标准。下同。

Note: S⁽¹⁾, S⁽²⁾, S⁽³⁾ and S⁽⁶⁾, Nassar and Huehn's non-parametric stability statistics^[20]. NP⁽¹⁾, NP⁽²⁾, NP⁽³⁾ and NP⁽⁴⁾, Thennarasu's non-parametric stability statistics^[30]; Z₁ and Z₂: the standard values of S⁽¹⁾ and S⁽²⁾ respectively, for χ^2 test; KR, Kang's rank-sum. The same below.

表 6 参试品种全株生物干重、稳定性参数和非参数统计之间的 Spearman 相关系数
Table 6 Spearman rank correlation between the whole plant dry yield and stability parametric and non-parametric statistics of tested cultivars

因子 生物干重		非参数统计 Non-parametric statistics										参数统计 Parametric statistics							
Factor	Dry yield	$S^{(1)}$	Z_1	$S^{(2)}$	Z_2	$S^{(3)}$	$S^{(6)}$	$NP^{(1)}$	$NP^{(2)}$	$NP^{(3)}$	$NP^{(4)}$	KR	ASV	W_i^2	σ_i^2	s^2d_i	CV _i	θ_{i_0}	θ_i
$S^{(1)}$	0.57*																		
Z_1	0.53*	-0.88***																	
$S^{(2)}$	0.55*	0.98***	-0.80***																
Z_2	-0.52*	-0.90***	0.98***	-0.85***															
$S^{(3)}$	-0.33	0.52*	-0.48	0.54*	-0.53														
$S^{(6)}$	-0.67**	0.08	-0.11	0.09	-0.15	0.88***													
$NP^{(1)}$	0.18	0.71**	-0.70**	0.70**	-0.73**	0.64**	0.36												
$NP^{(2)}$	-0.81***	-0.56*	0.54*	-0.48	0.48	0.36	0.72**	-0.19											
$NP^{(3)}$	-0.89***	-0.36	0.29	-0.33	0.25	0.58*	0.85***	0.15	0.88***										
$NP^{(4)}$	-0.71**	0.09	-0.12	0.09	-0.15	0.88***	0.99***	0.37	0.68*	0.87***									
KR	-0.63*	-0.11	0.05	-0.09	0.02	0.45	0.50	0.33	0.40	0.69**	0.59*								
ASV	0.06	0.10	-0.03	0.19	-0.06	0.03	-0.14	0.25	-0.09	0.03	-0.08	0.51							
W_i^2	0.14	0.35	-0.39	0.37	-0.43	0.24	0.03	0.64*	-0.16	0.09	0.08	0.62*	0.71**						
σ_i^2	0.14	0.35	-0.40	0.37	-0.44	0.24	0.04	0.64*	-0.17	0.09	0.08	0.62*	0.71**	1.00***					
s^2d_i	-0.07	0.28	-0.32	0.25	-0.33	0.36	0.23	0.46	-0.03	0.25	0.29	0.66*	0.51	0.76**	0.76**				
CV _i	-0.25	-0.12	-0.03	-0.23	0.02	0.16	0.28	0.18	0.19	0.35	0.30	0.28	-0.27	0.04	0.04	0.30			
θ_0	-0.08	-0.29	0.35	-0.32	0.39	-0.24	-0.06	-0.61*	0.12	-0.14	-0.11	-0.67**	-0.73**	-1.00***	-1.00***	-0.77**	-0.07		
θ_i	0.14	0.34	-0.39	0.37	-0.43	0.24	0.04	0.64*	-0.16	0.09	0.08	0.62*	0.71**	1.00***	1.00***	0.76**	0.04	-0.99***	
b_i	0.03	-0.01	-0.14	-0.12	-0.08	0.01	0.07	0.17	-0.04	0.07	0.06	0.01	-0.36	-0.03	-0.03	0.17	0.95***	0.03	0.03

注:*, ** and ***分别表示在 0.05, 0.01 和 0.001 水平上显著。
Note: *, ** and ***, significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.



G1, 成单 3601; G2, 皖农科青贮 8 号; G3, 渝单 805; G4, 雅玉 7758; G5, SN 8872; G6, 青秀 001; G7, 正大 511; G8, 郑青贮 7 号; G9, 泓丰 159; G10, 连青贮 303; G11, 安科青 2 号; G12, 金诚 6; G13, 衡玉 1996; G14, KNX 22002; G15, 雅玉青贮 8 号; E1, 合肥; E2, 宝鸡; E3, 德州; E4, 邯郸; E5, 郑州; E6, 嘉祥; E7, 连云港; E8, 泰安; E9, 杨凌; E10, 富平; E11, 宿州; E12, 濮阳。下同。

G1, Chengdan 3601; G2, Wannongkeqingzhu 8; G3, Yudan 805; G4, Yayu 7758; G5, SN 8875; G6, Qingxiu 001; G7, Zhengda 511; G8, Zhengqingzhu 7; G9, Hongfeng 159; G10, Lianqingzhu 303; G11, Ankeqing 2; G12, Jincheng 6; G13, Hengyu 1996; G14, KNX 22002; G15, Yayueqingzhu 8; E1, Hefei; E2, Baoji; E3, Dezhou; E4, Handan; E5, Zhengzhou; E6, Jiaxiang; E7, Lianyungang; E8, Taian; E9, Yangling; E10, Fuping; E11, Suzhou; E12, Puyang. The same below.

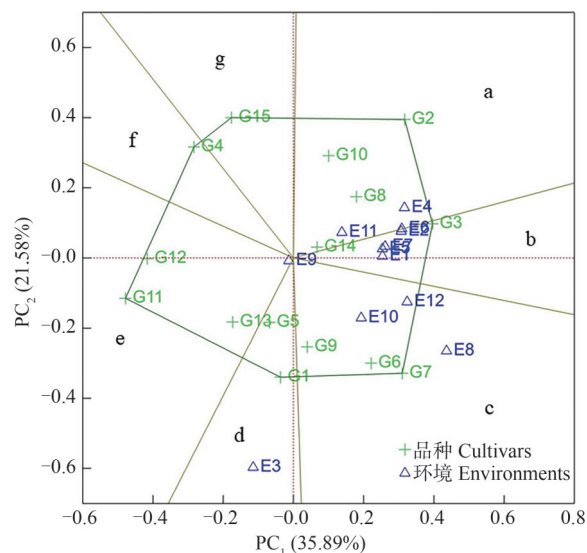
图1 基于 PC1 和全株生物干重的 AMMI 双标图

Fig. 1 Additive main effects and multiplicative interaction biplot based on PC₁ and the whole plant dry yield

对照品种‘雅玉青贮 8 号’。‘皖农科青贮 8 号’最接近原点,表明该品种接近试验总平均产量。从产量稳定性看,‘金诚 6’‘正大 511’‘青秀 001’和‘渝单 805’产量稳定性较高,‘皖农科青贮 8 号’产量稳定性最差。综合来看,‘正大 511’‘渝单 805’和‘青秀 001’是既高产又稳产的品种,‘皖农科青贮 8 号’产量较高但稳定性最差,‘金诚 6’和‘安科青 2 号’稳定性较好但产量较差。

2.8 GGE 双标图“理想品种”比较分析

将 AEA 上的箭头作为圆心的圆,圆心位置的品种即为理想品种,越靠近圆心位置的品种越理想。‘正大 511’最接近圆心位置,即为理想品种,其次为‘青秀 001’和‘渝单 805’。而‘安科青 2 号’离圆心位置最远,所以该品种为本次区域参试品种中



扇区 a、b、c、d、e、f 和 g 各表示 1 个生态区。

Each sector of a, b, c, d, e, f and g represents one mega-environment.

图2 基于 GGE 双标图“Which, Win, Where/What”功能对参试品种进行适应性分析

Fig. 2 The adaptability analysis of GGE biplot using “which, win, where/what” on silage maize hybrids in 12 environments

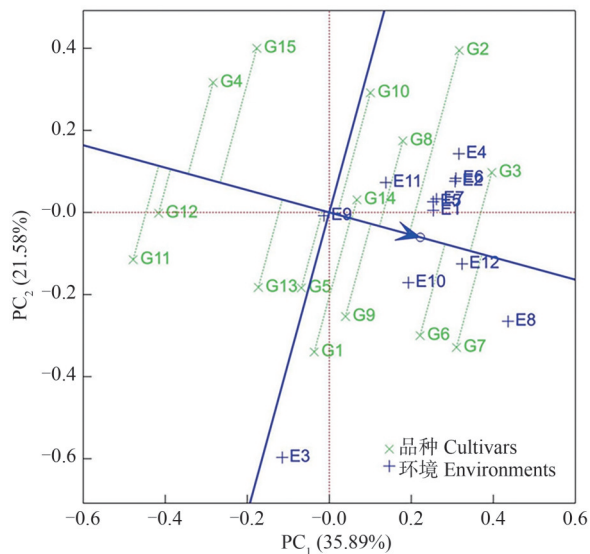


图3 品种丰产性和稳定性的 GGE 双标图分析

Fig. 3 Analysis of the high yield and stable yield of the cultivars based on GGE biplot

最不理想的品种,见图 4。

3 讨论

3.1 品种稳定性研究的重要性

黄淮海平原是我国重要的夏玉米种植区,该地

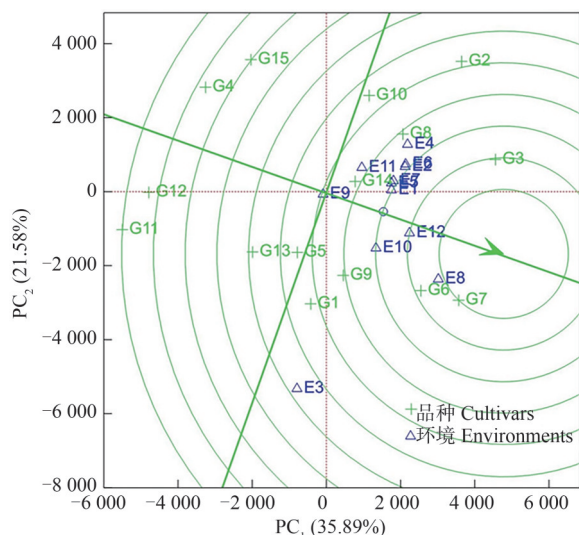


图4 GGE双标图理想品种分析

Fig. 4 Analysis of ideal cultivar for GGE biplot

区幅员辽阔、天气条件复杂多变,对选育丰产、稳定型玉米品种提出挑战^[31]。对黄淮海夏播玉米品种稳定性分析有助于研究该地区玉米品种遗传改良现状,从而为新品种的合理推广和布局提供理论支撑。本研究评估了2022年黄淮海夏播青贮玉米区域试验15个参试品种在6个省份12个试点上的产量表现和稳定性。综合方差分析和AMMI分析的结果表明,基因型效应在变异来源中呈极显著差异($P<0.01$),说明参试品种变异性很大,因此需要对各品种进行适应性和稳定性分析,然后再选择表现优异品种用于商业化推广。此外,环境效应解释的变异也很大(占变异来源的85.02%),表明环境具有多样性,环境均值之间的巨大差异造成了参试品种玉米生物产量的大部分变异。基因型与环境互作效应占总平方和的比例要高于基因型效应,这表明不同环境下的基因型效应存在很大差异^[6]。已有很多针对多点测试(METs)环境下作物品种稳定性的研究报道^[7,12-13,15]。本研究中,对参试品种稳定性分析基于参数和非参数方法。Becker等^[32]指出,所有稳定性方法都与“生物稳定性”和“动态稳定性”这2个对立的观念有关。生物稳定性类似于静态的“平衡”概念,基于这一概念,稳定的基因型倾向于在不同环境下保持恒定的产量;与此相反,动态稳定性表明不同环境下的产量响应稳定,即基因型与环境互作效应为零。此外,动态稳定性的衡量标准与静态稳定性的衡量标准不同,它取决于特定的参

试基因型。为了更好地理解参数统计和非参数统计之间的关系,分析它们与稳定性概念之间的关系,本研究使用Spearman相关分析评估生物产量与各因子之间的相关性。参数统计因子方面,生物产量与ASV、Wricke生态价指数(W_i^2)、稳定性方差(σ_i^2)、评价方差分量(θ_i)和回归系数(b_i)均呈正相关,而与回归偏差(s^2d_i)、方差系数(CV_i)和GE方差分量($\theta_{(i)}$)均呈负相关。非参数因子方面,生物产量与 $S^{(1)}$ 、 $S^{(2)}$ 呈显著($P<0.05$)正相关,而与 Z_2 、KR呈显著负相关,与 $NP^{(2)}$ 、 $NP^{(3)}$ 、 $NP^{(4)}$ 和 $S^{(6)}$ 呈极显著负相关,这与Awoke等^[33]、Kebede等^[34]和Bavandpori等^[35]的研究结果一致。 W_i^2 、 σ_i^2 、 s^2d_i 和 $\theta_{(i)}$ 在参数统计因子中对参试品种稳定性排名类似,表明这几个参数在根据不同环境下的稳定性对品系进行排序方面的能力相似。同理,方差系数(CV_i)和回归系数(b_i)也给出了相似的稳定性排序。Nassar和Huehn非参数稳定性4个统计因子 $S^{(1)}$ 、 $S^{(2)}$ 、 $S^{(3)}$ 和 $S^{(6)}$ 认定‘雅玉青贮8号’和‘连青贮303’分别是稳定性较好和较差的品种。此外,Thennarasu非参数统计因子($NP^{(2)}$ 、 $NP^{(3)}$ 和 $NP^{(4)}$)也给出了相似的品种稳定性排序模式,即‘皖农科青贮8号’‘渝单805’和‘泓丰159’是稳定性较好的参试品种,而‘雅玉7758’‘安科青2号’和‘金诚6’稳定性较差。

3.2 AMMI模型与GGE双标图结合用于基因型与环境互作分析

作物品种产量是受多基因控制的复杂数量性状,同时受到基因型(G)、环境(E)以及GE互作效应影响。GE效应直接影响品种稳定性表现,即效应值越大,该品种稳定性越差^[36-37]。目前,GE互作分析最为常用的两种分析方法分别是AMMI模型和GGE双标图。目前,国内关于这2种分析方法应用于青贮玉米方面的研究报道较少,仅有廖正巧^[38]对国家青贮玉米品种采用GGE双标图进行性状分析。龚锡震等^[39]以贵州省青贮玉米新品种区域试验参试品种为材料,应用AMMI模型筛选适宜贵州省推广种植的青贮玉米品种。本研究以2022年国家黄淮海夏播青贮玉米区域试验数据为材料,采用GGE双标图和AMMI模型对15个参试品种和12个试点进行综合评价。AMMI模型图显示,试点间图标较品种间图标更分散,说明参试品种生物产量环境效应要大于基因型效应,这与之Bertoia等^[5]、Yue等^[6]、Crevelari等^[7]分析结果一致。模型图中品

种图标越靠近右侧则代表该品种丰产性越好,反之越差。‘渝单 805’和‘金诚 6’分别为丰产性最好和最差的品种(图 1)。试点图标与中间横虚线间的垂直距离用来评价试点辨别力强弱,垂直距离越远则代表该试点辨别力越强,反之该试点辨别力越弱。德州较其他试点有较强的辨别力,而泰安和濮阳等试点辨别力较差(图 1)。GGE 双标图中“Which-Win-Where”功能可以鉴定参试品种的适应性,‘皖农科青贮 8 号’在邯郸、嘉祥和宿州等试点适应性最好,‘渝单 805’在宝鸡、连云港、郑州和合肥等试点最具有适应性,‘成单 3601’在德州试点表现最佳(图 2)。GGE 品种和试点排序双标图显示,‘正大 511’‘渝单 805’和‘青秀 001’等品种丰产性较好,‘安科青 2 号’丰产性最差;稳定性方面,‘金诚 6’表现最好,而‘皖农科青贮 8 号’表现最差(图 3)。试点辨识度方面,德州试点最具有辨识度,而杨凌、濮阳、富平、泰安和合肥等试点对品种辨识度较差,分析结果与岳海旺等^[37,40-41]一致。GGE 双标图用于理想品种筛选的功能显示,‘正大 511’‘青秀 001’和‘渝单 805’属于丰产且稳产的品种,而‘安科青 2 号’的丰产性和稳定性均较差,即最不理想品种(图 4)。综合来看,AMMI 模型和 GGE 双标图分析均能客观反映品种的丰产性、稳定性和试点的辨别力,分析结果基本一致,与岳海旺等^[42]、Kendal 等^[43]、Kindit 等^[44]和 Saeidnia 等^[45]的研究结果一致。有关 AMMI 模型参数和非参数稳定性评价以及 GGE 双标图技术在其他作物品种筛选中的应用需要进一步试验验证。

4 结 论

基于 AMMI 模型稳定性参数和非参数方法对 15 个参试品种在 12 个试点进行产量稳定性评价,同时利用 AMMI 模型和 GGE 双标图对参试品种进行试点辨别力和适应性分析。方差分析变异来源中基因型(G)、环境(E)以及基因型与环境互作(GEI)均达到了显著差异($P < 0.05$)和极显著差异($P < 0.01$)。基于 Spearman 相关分析,生物干重与非参数统计因子 $S^{(6)}$ 、 Z_1 、 Z_2 、 $NP^{(2)}$ 、 $NP^{(3)}$ 、 $NP^{(4)}$ 与 KR 间均呈显著负相关($P < 0.05$),与 $S^{(1)}$ 和 $S^{(2)}$ 则呈显著正相关。AMMI 双标图显示,参试品种整株生物干重范围在 18 000~22 000 kg/hm²,‘渝单 805’‘正大 511’‘青秀 001’和‘皖农科青贮 8 号’丰产性较好,‘金诚 6’丰产性最差。‘正大 511’‘雅玉 7758’

‘KNX22002’和‘青秀 001’等参试品种稳定性较强,山东德州较其他试点有较好的辨别力,而泰安和濮阳等试点辨别力较差。GGE 双标图分析表明‘正大 511’属于丰产性和稳定性均较好的品种,为黄淮海地区的理想品种。综上,采用 AMMI 模型和 GGE 双标图分析可为黄淮海玉米品种示范和推广提供依据。

参考文献 References

- [1] 张书兴,王云平,王筱,李心,王学敏,赵威. 内蒙古半干旱区青贮玉米的适应性[J]. 草业科学, 2022, 39(6): 1217-1224
Zhang S X, Wang Y P, Wang X, Li X, Wang X M, Zhao W. Adaptability of silage maize in semi-arid area of Inner Mongolia [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1217-1224 (in Chinese)
- [2] Zhao M Y, Feng Y P, Shi Y, Shen H H, Hu H F, Luo Y K, Xu L C, Kang J, Xing A J, Wang S P, Fang J Y. Yield and quality properties of silage maize and their influencing factors in China [J]. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(8): 1655-1666
- [3] 蒋丛泽,受娜,高玮,马仁诗,沈禹颖,杨宪龙. 陇东旱塬区不同青贮玉米品种生产性能和营养品质综合评价[J]. 草业学报, 2023, 32(7): 216-228
Jiang C Z, Shou N, Gao W, Ma R S, Shen Y Y, Yang X L. A multivariate evaluation of production performance and nutritional quality of different varieties of silage maize in the dry plateau area of Longdong [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(7): 216-228 (in Chinese)
- [4] 朱丽丽,张业猛,李万才,赵亚利,李想,陈志国. 39 个我国不同生态区培育的青贮玉米品种在青海高原适应性研究[J]. 草业学报, 2023, 32(4): 68-78
Zhu L L, Zhang Y M, Li W C, Zhao Y L, Li X, Chen Z G. Adaption to the Plateau climate in Qinghai of 39 silage maize varieties cultivated in different ecological regions of China [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(4): 68-78 (in Chinese)
- [5] Bertoia L M, Aulicino M B. Maize forage aptitude: Combining ability of inbred lines and stability of hybrids [J]. *The Crop Journal*, 2014, 2(6): 407-418
- [6] Yue H W, Li H Q, Xu L P, Bu J Z, Wei J W, Chen S P, Peng H C, Xie J L, Shang S Q, Jiang X W, Li H, Xu L, Bu J, Wei J, Chen S, Jiang X. Analysis of genotype -environment interactions of silage maize cultivars under environmental trials [J]. *Bangladesh Journal of Botany*, 2020, 49(1): 55-63
- [7] Crevelari J A, de Souza Y P, Santos J S, Ambrósio M, Gonçalves V M L, Pereira M G. Adaptability and stability of corn hybrids for silage via genotype and genotype $\times$ environment interaction biplot [J]. *Agronomy Journal*, 2023, 115(2): 687-697
- [8] Anley W, Zeleke H, Dessalegn Y. Genotype $\times$ environment interaction of maize (*Zea mays* L.) across North Western Ethiopia [J]. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 2013, 5(9): 171-181
- [9] Alemu G, Geleta N, Dabi A, Delessa A, Duga R. Stability models for selecting adaptable and stable bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties for grain yield in Ethiopia [J]. *Journal of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 7(1): 14-22
- [10] Krishnamurthy S L, Sharma P C, Sharma D K, Singh Y P, Mishra V K, Burman D, Maji B, Mandal S, Sarangi S K, Gautam R K, Singh P

- K, Manohara K K, Marandi B C, Chattopadhyay K, Padmavathi G, Vanve P B, Patil K D, Thirumeni S, Verma O P, Khan A H, Tiwari S, Geetha S, Gill R, Yadav V K, Roy B, Prakash M, Anandan A, Bonifacio J, Ismail A M, Singh R K. Additive main effects and multiplicative interaction analyses of yield performance in rice genotypes for general and specific adaptation to salt stress in locations in India[J/OL]. *Euphytica*, (2021-01-19). DOI: 10.1007/s10681-020-02730-7
- [11] Yue H W, Wang Y B, Wei J W, Meng Q M, Yang B L, Chen S P, Xie J L, Peng H C, Jiang X W. Effects of genotype-by-environment interaction on the main agronomic traits of maize hybrids[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18(1):1437-1458
- [12] Jocković M, Cvejić S, Jocić S, Marjanović-Jeromela A, Miladinović D, Jocković B, Miklič V, Radić V. Evaluation of sunflower hybrids in multi-environment trial (MET) [J]. *Turkish Journal of Field Crops*, 2019, 24(2): 202-210
- [13] Olivoto T, Lúcio A D C, Da Silva J A G, Marchioro V S, de Souza V Q, Jost E. Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(6): 2949-2960
- [14] Costa-Neto G, Fritsche-Neto R, Crossa J. Nonlinear kernels, dominance, and envirotyping data increase the accuracy of genome-based prediction in multi-environment trials [J]. *Heredity*, 2021, 126(1): 92-106
- [15] Kaplan M, Kokten K, Akcura M. Assessment of genotype $\times$ trait $\times$ environment interactions of silage maize genotypes through GGE Biplot [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2017, 77(3): 212-217
- [16] Wu J, Nadeem M, Galagedara L, Thomas R, Cheema M. Effects of chilling stress on morphological, physiological, and biochemical attributes of silage corn genotypes during seedling establishment[J/OL]. *Plants*, (2022-04-29). DOI: 10.3390/plants11091217
- [17] Karuniawan A, Maulana H, Anindita P A, Yoel A, Ustari D, Suganda T, Concibido V. Storage root yield and sweetness level selection for new honey sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam)[J]. *Open Agriculture*, 2021, 6(1): 329-345
- [18] Kendal E. Comparing durum wheat cultivars by genotype $\times$ yield $\times$ trait and genotype $\times$ trait biplot method[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2019, 79(4): 512-522
- [19] Zuffo A M, Steiner F, Aguilera J G, Teodoro P E, Teodoro L P R, Busch A. Multi-trait stability index: A tool for simultaneous selection of *Soya bean* genotypes in drought and saline stress [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2020, 206(6): 815-822
- [20] Tesfaye K, Alemu T, Argaw T, De Villiers S, Assefa E. Evaluation of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn) in multi-environment trials using enhanced statistical models [J/OL]. *PloS One*, (2023-02-01). DOI: 10.1371/journal.pone.0277499
- [21] Shahzad K, Qi T X, Guo L P, Tang H N, Zhang X X, Wang H L, Qiao X Q, Zhang M, Zhang B B, Feng J J, Iqbal M S, Wu J Y, Xing C. Adaptability and stability comparisons of inbred and hybrid cotton in yield and fiber quality traits[J/OL]. *Agronomy*, (2019-09-06). DOI: 10.3390/agronomy9090516
- [22] Huehn M. Nonparametric measures of phenotypic stability: Part 1 Theory[J]. *Euphytica*, 1990, 47(3):189-194
- [23] Dehghani M R, Majidi M M, Mirlohi A, Saeidi G. Integrating parametric and non-parametric measures to investigate genotype $\times$ environment interactions in tall fescue [J]. *Euphytica*, 2016, 208(3): 583-596
- [24] Gollob H F. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques [J]. *Psychometrika*, 1968, 33(1): 73-115
- [25] Freeman G H. Statistical methods for the analysis of genotype-environment interactions[J]. *Heredity*, 1973, 31(3): 339-354
- [26] Gauch H G Jr, Piepho H P, Annicchiarico P. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations [J]. *Crop Science*, 2008, 48(3): 866-889
- [27] Yan W K, Tinker N A. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype $\times$ environment interaction [J]. *Crop Science*, 2005, 45(3): 1004-1016
- [28] Tang Q Y, Zhang C X. Data Processing System (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. *Insect Science*, 2013, 20(2): 254-260
- [29] Nassar R, Huhn M. Studies on estimation of phenotypic stability: tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability [J]. *Biometrics*, 1987, 43: 45-53
- [30] Thenenarasu K. On certain non-parametric procedures for studying genotype-environment interactions and yield stability [D]. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute, 1995
- [31] 潘蒙英健, 高峰, 李长忠, 孙震, 苗福泓, 刘洪庆, 孙娟. 黄淮海地区不同青贮玉米品种播期及其适应性研究[J]. 青岛农业大学学报:自然科学版, 2018, 35(3):200-206
- Pan M Y J, Gao F, Li C Z, Sun Z, Miao F H, Liu H Q, Sun J. Study on different sowing seasons on yields and its adaptability of silage corn in Huang-Huai-Hai region[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science*, 2018, 35(3): 200-206(in Chinese)
- [32] Becker H C, Léon J. Stability analysis in plant breeding [J]. *Plant Breeding*, 1988, 101(1):1-23
- [33] Awoke S, Sharma M K. Parametric and non-parametric methods to describe genotype by environment interaction and grain yield stability of bread wheat[J]. *Statistics and Applications*, 2016, 14(1): 9-29
- [34] Kebede G, Worku W, Jifar H, Feyissa F. Grain yield stability analysis using parametric and nonparametric statistics in oat (*Avena sativa* L.) genotypes in Ethiopia[J]. *Grassland Research*, 2023, 2(3): 182-196
- [35] Bavandpori F, Ahmadi J, Hossaini S M. Yield stability analysis of bread wheat lines using AMMI model[J]. *Agricultural Communications*, 2015, 3(1): 8-15
- [36] 岳海旺, 韩轩, 魏建伟, 郑书宏, 谢俊良, 陈淑萍, 彭海成, 卜俊周. 基于GYT双标图分析对黄淮海夏玉米区域试验品种综合评价[J]. 作物学报, 2023, 49(5):1231-1248
- Yue H W, Han X, Wei J W, Zheng S H, Xie J L, Chen S P, Peng H C, Bu J Z. Comprehensive evaluation of maize hybrids tested in Huang-Huai-Hai summer maize regional trial based on GYT biplot analysis[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(5): 1231-1248 (in Chinese)
- [37] Yue H W, Jiang X W, Wei J W, Xie J L, Chen S P, Peng H C, Bu J Z. A study on genotype $\times$ environment interactions for the multiple traits of maize hybrids in China[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(6): 4889-4899
- [38] 廖正巧. 基于GGE双标图的青贮玉米主要性状分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015
- Liao Z Q. Analyzing main agronomic traits of silage maize based on GGE biplot[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [39] 龚锡震, 柏光晓, 任洪, 王春梅. 基于AMMI模型对青贮玉米区域试验稳定性和适应性分析[J]. 种子, 2019, 38(04): 110-113
- Gong X Z, Bai G X, Ren H, Wang C M. Stability and adaptability analysis of silage maize regional test based on AMMI model[J]. *Seed*,

- 2019, 38(4): 110-113 (in Chinese)
- [40] Yue H W, Gauch H G, Wei J W, Xie J L, Chen S P, Peng H C, Bu J Z, Jiang X W. Genotype by environment interaction analysis for grain yield and yield components of summer maize hybrids across the Huanghuaihai region in China [J/OL]. *Agriculture*, (2022-04-25). DOI: 10.3390/agriculture12050602
- [41] Yue H W, Olivoto T, Bu J Z, Li J, Wei J W, Xie J L, Chen S P, Peng H C, Nardino M, Jiang X W. Multi-trait selection for mean performance and stability of maize hybrids in mega-environments delineated using envirotyping techniques [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2022-11-14). DOI: 10.3389/fpls.2022.1030521
- [42] 岳海旺, 李春杰, 李媛, 卜俊周, 魏建伟, 彭海成, 陈淑萍, 谢俊良. 河北省春播玉米品种产量稳定性及试点辨别力综合分析[J]. *核农学报*, 2018, 32(7): 1267-1280
- Yue H W, Li C J, Li Y, Bu J Z, Wei J W, Peng H C, Chen S P, Xie J L. Comprehensive analysis of yield stability and testing site discrimination of spring sowing maize variety in Hebei Province [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(7): 1267-1280 (in Chinese)
- [43] Kendal E, Sal M, Sayar H, Tekdal S, Aktaş H, Karaman M. Assessment of the impact of ecological factors on yield and quality parameters in triticale using GGE biplot and AMMI analysis [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2016, 48(5): 1903-1913
- [44] Kindie Y, Tesso B, Amsalu B. AMMI and GGE biplot analysis of genotype by environment interaction and yield stability in early maturing cowpea [*Vigna unguiculata* (L) Walp] landraces in Ethiopia [J]. *Plant Environment Interactions*, 2021, 3(1): 1-9
- [45] Fatemeh S, Majidi Mohammad M, Dehghani Mohammad R, Ghodrattollah S, Aghafakhr M. Drought tolerance and stability of native Iranian and foreign tall fescue genotypes: Comparison of AMMI and GGE biplot analyses [J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(4): 2180-2185
- 责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 岳海旺, 河北省农林科学院旱作农业研究所副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向是早熟、宜粒收玉米新品种选育、示范推广等工作。河北省科技 110 专家服务团专家和河北省农林科学院科技专家服务团成员, CNKI 评审专家库专家, “河北省三三三人才工程”三层次人选, 先后多次被评为“河北省区试先进个人”“河北省农科院优秀共产党员”和“河北省农科院年度工作先进个人”等荣誉称号。作为主研人先后选育国审玉米新品种 8 个, 省审玉米新品种 10 个, 授权发明专利 4 项, 新品种保护授权 12 项。以第一作者身份在《作物学报》《草业学报》《中国农业大学学报》《玉米科学》《西南农业学报》, 以及 *Frontiers in Plant Science*、*Agronomy Journal*、*Agriculture*、*Scientific Reports* 等国内外专业期刊发表论文 25 篇, 其中 SCI 收录 12 篇, 参编著作 2 部, 制订地方标准 2 项, 获河北省科技进步奖 1 项。



通讯作者简介: 卜俊周, 研究员, 河北省农林科学院旱作农业研究所玉米育种研究室主任, 河北省农作物品种审定委员会委员。先后培育出‘衡玉 321’‘中地 175’‘衡玉 7188’等 12 个品种通过审定; 获得品种保护授权 10 项; 获发明专利 5 项, 实用新型专利 8 项; 获河北省科技进步奖 2 项, 河北省农科院科技进步奖 2 项, 河北省科技厅鉴定成果 2 项; 主笔发表文章 38 篇, 其中中文核心期刊 10 篇, SCI 8 篇, 参编专著 3 部; 主持制定河北省地方标准 1 项并颁布实施; 多次获河北省农科院优秀共产党员等荣誉称号。