



岳海旺, 卜俊周, 魏建伟, 刘朋程, 王延兵, 李媛. AMMI模型与BLUP方法相结合评价河北省冬小麦品种丰产性和稳定性[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 50-61.

YUE Haiwang, BU Junzhou, WEI Jianwei, LIU Pengcheng, WANG Yanbing, LI Yuan. High yield and stability evaluation of winter wheat varieties in Hebei Province by combining AMMI model and BLUP method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(8): 50-61.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.04

AMMI模型与BLUP方法相结合评价河北省冬小麦品种丰产性和稳定性

岳海旺¹ 卜俊周¹ 魏建伟¹ 刘朋程¹ 王延兵^{2*} 李媛^{3*}

(1. 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;

2. 河北省农林科学院 粮油作物研究所, 石家庄 050035;

3. 河北省种子总站, 石家庄 050031)

摘要 为有效鉴定和评价河北省冬小麦品种的丰产性、稳定性和适应性, 筛选出适宜河北省推广种植的优良小麦品种, 采用稳定性指数(WAASB)和同时选择指数(WAASBY)对2018—2019年河北省冬小麦节水组14个参试品种在10个试点产量数据信息进行综合分析。结果表明, 环境效应是引起产量变异的主要来源, 其次是基因型与环境互作效应, 基因型效应所占比例最小。通过卡方检验发现, AMMI 2和GGE 2分别为AMMI家族和GGE模型的适宜模型, 基因型与环境互作信号和GGE信号比例分别占84.06%和85.25%。各种稳定性因子主成分分析表明, 前2个主成分轴共计解释了方差变量的72.3%。产量与基于混合效应模型稳定因子以及几何适应性指数均呈现出高度正相关。‘衡H1704’‘中农202’‘众信8482’‘MG729’‘金禾16415’和‘石Ta14’等品种被籽粒产量×稳定性指数双标图选为丰产性突出、稳定性好的品种。其中, ‘众信8482’的WAASBY同时选择指数得分最高, 是参试品种中表现最好的。而‘邯科4242’的WAASBY得分最低, 是表现最差的品种。大曹庄、深州、永年等试点适宜种植的冬小麦品种为‘衡H1704’和‘中农202’, 藁城、武邑、南皮和邢台等试点适宜种植的冬小麦品种为‘博麦11号’‘邯生414’和‘科茂60’, 邯郸和鹿泉等试点适宜种植的品种是‘邯科4242’和‘MG729’, ‘众信8482’适宜在深州、辛集、邢台和永年等试点种植。综上, 采用混合线性模型稳定性指数(WAASB)和同时选择指数(WAASBY)可为河北省冬小麦品种示范和推广提供依据。

关键词 AMMI模型; BLUP方法; 稳定性指数; 同时选择指数; 多环境测试

中图分类号 S512

文章编号 1007-4333(2024)08-0050-12

文献标志码 A

High yield and stability evaluation of winter wheat varieties in Hebei Province by combining AMMI model and BLUP method

YUE Haiwang¹, BU Junzhou¹, WEI Jianwei¹, LIU Pengcheng¹, WANG Yanbing^{2*}, LI Yuan^{3*}

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

2. Institute of Cereal and Oil Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050035, China;

3. Hebei Seed General Station, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract In order to effectively identify and evaluate the yield, stability and adaptability of winter wheat

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 河北省农林科学院创新工程(2022KJCZX-RW-11)

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: 王延兵(ORCID: 0009-0002-4971-2829), 高级农艺师, 主要从事玉米小麦等作物新品种多点鉴定研究, E-mail: wybseed@163.com

李媛(ORCID: 0009-0007-1226-6964), 副研究员, 主要从事玉米小麦区试管理工作, E-mail: liyuanpinguan@163.com

varieties in Hebei Province, and to select superior wheat varieties suitable for widespread cultivation in this region, a new variety evaluation system, namely WAASB (weighted average of absolute scores) and WAASBY (considers both stability (WAASB) and mean performance (dependent variable, Y)) were employed. Comprehensive analysis was then conducted on the yield data of 14 trial varieties from the water-saving group in 10 test sites in Hebei Province during 2018—2019 winter wheat season. The AMMI (additive main effect and multiplicative interaction) model showed that environment effects were the main source of variation, followed by the interaction between genotype and environment, and genotype effects accounted for the smallest proportion. In terms of model diagnosis, AMMI 2 and GGE 2 were used as suitable models for the AMMI family and GGE models by FR test. The ratios of genotype and environment interaction (GE) signals and GGE signals accounted for 84.06% and 85.25%, respectively. The principal component analysis of various stability factors showed that the first two principal component axes collectively explained 78.5% of the variance. The grain yield was highly positively correlated with stability factors based on the mixed effects model and the geometric adaptability index. According to the $GY \times WAASB$ biplot, 'HH1704' 'ZN202' 'ZX8482' 'MG729' 'JH16415' and 'Sta14' were selected as the varieties with outstanding high yield and good stability. Among the selected varieties, 'ZX8482' had the highest WAASBY score, which performed the best among the tested varieties, while 'HK4242' had the lowest WAASBY score, which performed the worst. The suitable varieties to be promoted in Dacaozhuang, Shenzhou and Yongnian were 'HH1704' and 'ZN202'. The suitable varieties for planting in Handan and Luquan were 'HK4242' and 'MG729'. It was also found that variety 'ZX8482' was suitable for planting in Shenzhou, Xinji, Xingtai and Yongnian. In conclusion, the use of the mixed linear model stability index (WAASB) and simultaneous selection index (WAASBY) can provide a basis for the demonstration and promotion of winter wheat varieties in Hebei Province.

Keywords AMMI model; BLUP technology; WAASB; WAASBY; METs

河北省作为小麦主产省份之一,其小麦种植面积常年在223万 hm^2 左右,总产稳定在1300万t以上,播种面积、单产和总产常年稳居全国前3位^[1]。高产、稳产、节水和适应性广一直是小麦育种家所追逐的重要育种目标,河北省小麦种植区地域广阔,土壤类型多变,生态类型差异明显,筛选丰产、广适型小麦新品种(系)是多点鉴定试验(Multi-environments trials, METs)评价体系的重要指标^[2-3]。1个小麦品种是育种者经过多年、多点鉴定试验选育出来的,通过多年数据对测试品种进行综合评价是小麦育种中的重要环节。当前多点鉴定试验对参试品种分析主要体现在丰产性方面,往往忽视了品种的稳定性分析。品种的稳定性与基因型(Genotype)和环境(Environment)互作效应(GEI)关系密切,互作效应越大,说明该品种对测试环境越敏感,稳定性越差^[4-6]。因此,基因型与环境互作效应的深入研究对于提高小麦品种筛选效率,做到品种推广精准定位具有重要意义。

对农作物基因型与环境互作的研究是不断进行模型组建的过程,推动了品种稳定性分析中模型分析的准确性^[7-8]。Hardwick等^[9]早期提出了建立在回归

分析基础上包含对品种表现在不同环境平均值的简单联合回归分析,之后这一模型构建方法被广泛应用于品种稳定性的研究分析中^[10]。Gollob^[11]还提出了一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即 F_R test,目前所熟知的加性主效应和乘法相互作用模型(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^[12-13]。在特定情况下将基因型、环境或两者互作效应视为随机效应可能是合理的^[14]。从实践的角度看,BLUP和AMMI可被视为实现将GEI效应与随机误差区分开的2种不同方法。从统计的角度来看,这2种模型有很大的不同^[15]。首先,AMMI分析保留了由非累加效应矩阵的奇异值分解(SVD)产生的第一交互主成分轴(IPCA1)中的大部分GEI效应,而大多数随机误差则保留在最后的IPCA中。另一方面,BLUP首先估计方差分析(ANOVA)模型的效果,然后将权重归因于这些效果,因此可以将其视为收缩估算器^[16]。这2个分析模型在多点鉴定试验分析中往往单独使用,考虑到AMMI和BLUP的重要性,是否可以将这2种重要模型的优点合并到一个方法中。因此,将AMMI模型的稳定性评价功能与BLUP的预测准确

性相结合的研究似乎更有价值^[17-18]。基于线性混合效应模型的稳定性指数(WAASB)和同时选择指数(WAASBY)相较于固定效应模型如 AMMI模型和 BLUP 模型有更精确的预测,因此可获得更可靠的结果^[19-20]。

WAASB 和 WAASBY 在国外已应用于大豆^[21]、大麦^[22]、水稻^[23]、蚕豆^[24]、棉花^[25]和姜黄^[26]等植物的品种选择评价中,国内仅有益于夏玉米品种丰产性和稳定性评价的报道^[27],采用混合效应模型对我国小麦品种丰产性和稳定性的研究尚未见报道。本研究采用 AMMI模型和 BLUP 相结合的方法对 2018—2019 年河北省节水组小麦品种进行稳定性和适应性分析,并对不同稳定性分析因子进行比较,对参试品种适应性进行评价,旨在准确评价河北省小麦品种的丰产性、稳定性和适应性,以期

为今后品种多点鉴定试验评价分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

参试材料来源于 2018—2019 年河北省小麦节水组区域试验,因本组试验试点和品种数比较有代表性,故作为本研究的试验数据来源。参试品种 14 个(含对照品种‘石麦 22’),试点 10 个,各品种信息见表 1。试验采用随机区组试验设计,3 次重复,10 行区,小区面积 13.33 m²,全区收获测产。试验地周围设 5 行以上的保护行,试验的一侧设置 1.2 m 左右的观察道。播种日期均在 10 月 18 日之前,在足墒播种保证出苗的情况下,春季灌溉一水(起身-拔节期),试验地与普通水浇地设置一定隔离区。各试点地理信息见表 2。

表 1 参试品种名称信息

Table 1 Description of the varieties used in this study

代号	名称	来源	代号	名称	来源
Code	Name	Origin	Code	Name	Origin
MG729	MG 729	河北 Hebei	JM437	冀麦 437 Jimai 437	河北 Hebei
BM11	博麦 11 号 Bomai 11	河北 Hebei	JH16415	金禾 16415 Jinhe 16415	河北 Hebei
HP6216	海平 6216 Haiping 6216	河北 Hebei	KM60	科茂 60 Kemao 60	河北 Hebei
HK4242	邯科 4242 Hanke 4242	河北 Hebei	Sta14	石 Ta14 Shita 14	河北 Hebei
HS414	邯生 414 Hansheng 414	河北 Hebei	SM22	石麦 22 Shimai 22	河北 Hebei
HH1603	衡 H1603 Heng H1603	河北 Hebei	ZN202	中农 202 Zhongnong 22	北京 Beijing
HH1704	衡 H1704 Heng H1704	河北 Hebei	ZX8482	众信 8482 Zhongxin 8482	河北 Hebei

表 2 试点信息

Table 2 Description of the locations used in this study

试点代号	试点名称	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	海拔/m	年平均温度/℃	土壤类型
Location code	Location name	Longitude	Latitude	Altitude	Annual average temperature	Soil type
DCZ	大曹庄 Dacaozhuang	114.84	37.43	17	12.4	沙壤土
HD	邯郸 Handan	114.52	36.56	25	13.5	棕壤土
SZ	深州 Shenzhou	115.71	37.89	61	13.1	沙壤土
YN	永年 Yongnian	114.64	36.76	23	13.3	褐土
GC	藁城 Gaocheng	114.85	38.03	48	13.2	褐土
LQ	鹿泉 Luquan	114.29	38.14	52	13.8	壤土
XJ	辛集 Xinji	115.20	37.99	150	13.0	褐土
NP	南皮 Nanpi	116.63	38.01	40	12.3	潮土
WY	武邑 Wuyi	115.85	37.82	13	12.5	潮土
XT	邢台 Xingtai	115.27	37.47	21	13.6	潮土

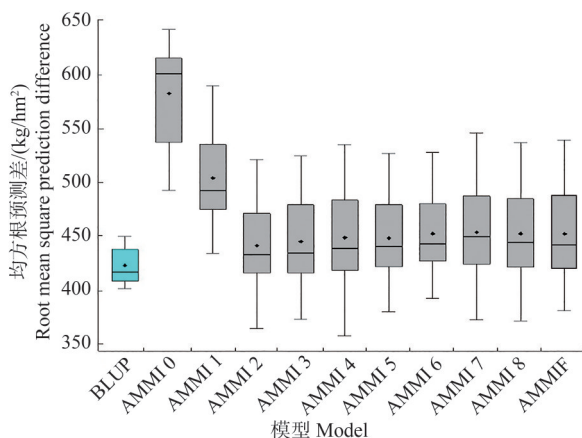
1.2 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据输入和整理, R software version 4.0.1 软件的“metan”程序包进行数据统计分析作图^[28]。

2 结果与分析

2.1 AMMI模型及BLUP预测

由图1可知,对于所有模型(AMMI 0, AMMI 1, ..., AMMIF 和 BLUP), 使用模型估计值和验证数据之间的均方根预测差(RMSPD)以相对方式比较容易预测成功。BLUP 和 AMMI0 分别是 RMSPD 最小(424 kg/hm²)和最大(585 kg/hm²)的模型,由此可见, BLUP 是预测最准确的模型。相反, AMMI 0 是预测最不准确的模型。AMMI 2 的 RMSPD (443 kg/hm²) 与 BLUP 相差不大,说明 BLUP 方法和 AMMI 模型预测基本上等效的。这个结果证实了在所分析的试验中存在不同的基因型与环境互作模式。



蓝色代表预测最为精准的模型

Blue represents the model with the most accurate predictions

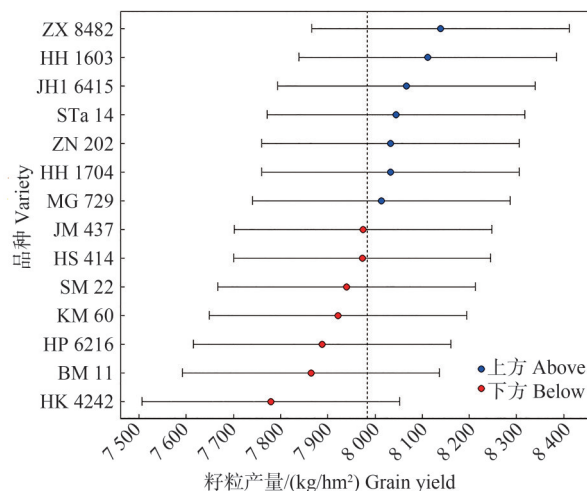
图1 AMMI家族模型和BLUP方法的精准预测

Fig. 1 Predictive accuracy of the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) family and best linear unbiased prediction (BLUP) for this study

2.2 依据BLUP预测参试品种籽粒产量平均值

由图2可知,通过垂直虚线可以将所有测试品种籽粒产量BLUP预测均值表现分为两类,虚线右边的是高于预测均值的,左边是低于预测均值的。‘ZX8482’和‘HH1603’较其他参试品种具有较高的产量预测均值,其次是‘JH16415’‘Sta14’‘ZN202’‘HH1704’和‘MG729’具有相近的预测均值。对照

品种‘SM22’籽粒产量BLUP值低于预测均值,‘KM60’‘HP6216’‘BM11’和‘HK4422’的籽粒产量BLUP值均低于对照。



HH 1603, 衡 H 1603; HK 4242, 韩科 4242; BM 11, 博麦 11 号; HS 414, 邯生 414; KM 60, 科茂 60; HH1704, 衡 H1704; ZN 202, 中农 202; ZX 8482, 众信 8482; JH 16415, 金禾 16415; JM 437, 冀麦 437; SM 22, 石麦 22; Sta 14, 石 Ta 14; HP 6216, 海平 6216。下同。蓝色和红色圆圈分别表示在 BLUP 平均值以上和以下的基因型。水平误差线表示考虑了两侧 t 检验的 95% 预测置信区间, 垂直虚线表示的是 BLUP 平均值。

HH 1603, HengH 1603; HK 4242, Hanke 4242; BM 11, Bomai 11; HS 414, Hansheng 414; KM 60, Kemaio 60; HH 1704, HengH 1704; ZN 202, Zhongnong 202; ZX 8482, Zhongxin 8482; JH 16415, Jinhe 16415; JM 437, Jimai 437; SM 22, Shimai 22; STa 14, ShiTa 14; HP 6216, Haiping 6216. The same below. Blue and red circles represent the genotypes that had BLUP above and below of BLUP means, respectively. Horizontal error bars represent the 95% confidence interval of prediction considering a two-tailed t test, and the vertical dashed line represents the average value of BLUP.

图2 基于BLUP方法预测14个参试小麦品种籽粒产量

Fig. 2 Predicted grain yield for 14 wheat genotypes based on the method of analysis of best linear unbiased predictor (BLUP)

2.3 基于基因型与环境相互作用信号噪声估计的AMMI模型诊断

由表3可知,基因型效应(G)、环境效应(E)和基因型与环境互作效应(G×E)均达到了极显著的水平($P<0.001$)。总变异来源中环境效应(E)占比67.63%,基因型与环境互作效应、基因型效应占比分别为12.46%、2.50%。对交互作用主成分轴(IPCA)进行显著性检测表明,前4个乘积项展现的互作信息达到了显著或极显著的水平,同时将剩余IPCA并为

残差。前4个乘积项(PC 1~PC 4)共计解释了94.9%的交互作用平方和。基于信噪估计AMMI2可作为本研究中籽粒产量最适宜的模型。用于籽粒产量数据的总GE中存在的GE信号占比为84.06,其余为噪声。交互主成分(PC)捕获的籽粒产量信号(GE_s)为98.16%。

表3 主效应和相互作用效应的F检验,乘积项的Gollob检验以及整个AMMI模型的F_R检验
Table 3 F-test of main and interaction effects, Gollob's test of multiplicative terms, and F_R test of the entire AMMI model

变异来源 Source of variance	df	平方和 SS	均方 MS	F	显著性 P _r (>F)	所占比例/% Proportion	累积/% Accumulated
F 检验 F-test							
环境 Environment(E)	9	524 154 683	58 239 409	253.48	0.000***	67.63	
重复 Rep(E)	20	4 595 167	229 758	1.75	0.027*		
基因型 Genotype(G)	13	19 352 604	1 488 662	11.32	0.000***	2.50	
交互 G×E	117	96 565 460	825 346	6.27	0.000***	12.46	
第一主成分 PC 1	21	50 583 505	2 408 738	18.31	0.000***	52.4	52.4
第二主成分 PC 2	19	29 093 275	1 531 225	11.64	0.000***	30.1	82.5
第三主成分 PC 3	17	7 483 689	440 217	3.35	0.000***	7.7	90.3
第四主成分 PC 4	15	4 512 623	300 842	2.29	0.0046**	4.7	94.9
第五主成分 PC 5	13	2 324 774	178829	1.36	0.179 ^{ns}	2.4	97.3
第六主成分 PC 6	11	1 196 887	108 808	0.83	0.610 ^{ns}	1.2	98.6
第七主成分 PC 7	9	825 950	91 772	0.70	0.708 ^{ns}	0.9	99.4
第八主成分 PC 8	7	447 208	63 887	0.49	0.842 ^{ns}	0.5	99.9
第九主成分 PC 9	5	97 549	19 510	0.15	0.979 ^{ns}	0.1	100.0
残差 Residuals	280	38 800 683	138 574				
纯残差 Pure Residuals	260	34 205 517	131 560				
共计 Total	2 153	775 000 000	1 446 714				
模型诊断 Model diagnosis							
交互信号 G×E Signal		81 172 977				84.06	
交互噪音 G×E noise		15 392 483				15.94	
最佳模型 Best model AMMI2							
捕获信号		79 676 779				98.16	
Signal captured							

注:**是指在0.01水平上显著,***是指在0.001水平上极显著,ns为不显著。下同。
Note: **,significant at $P < 0.01$; ***,significant at $P < 0.001$; ns, not significant. The same below.

2.4 基于基因型主效应加上基因型-环境交互信号-噪声估计的GGE模型诊断

由表4可知,在2018—2019年测试中,GGE模型对环境主效应的影响达到了极显著水平($P < 0.001$)。同时,基因型(G)主效应+基因型与环境交互效应(GE)也达到了极显著水平。模型显示前5个主成分

轴(PC 1~PC 5)表达的交互信息达到了极显著和显著水平,并且PC 1~PC 5平方和累计占交互效应平方和的97.3%。Gollob检测显示,GGE 2对于籽粒产量来说是最适合的模型。另一方面,信噪估计验证了GGE 2适用于籽粒产量数据分析。籽粒产量GGE_s和PC_s捕获的籽粒产量信号分别占85.25%和94.08%。

表4 主效应和交互效应的F检验,乘积项的Gollob检验以及整个GGE模型的F_R检验
Table 4 F test of main and interaction effects, Gollob's test of multiplicative terms, and F_R test of the entire GGE model

变异来源 Source of variance	df	平方和 SS	均方 MS	F	显著性 P _r (>F)	所占比例/% Proportion	累积/% Accumulated
环境 Environment (E)	9	524 154 683	58 239 409	253.48	0.000***		
基因型+交互 GGE	130	115 918 064	891 677	6.78	0.000***		

表 4（续）

变异来源 Source of variance	df	平方和 SS	均方 MS	F	显著性 $P_r(>F)$	所占比例/% Proportion	累积/% Accumulated
重复 Rep(E)	20	4 595 167	229 758	1.75	0.027*		
第一主成分 PC 1	21	62 553 250	2 978 726	22.64	0.000***	54.0	54.0
第二主成分 PC 2	19	30 414 783	1 600 778	12.17	0.000***	26.2	80.2
第三主成分 PC 3	17	9 998 374	588 140	4.47	0.000***	8.6	88.8
第四主成分 PC 4	15	6 665 990	444 399	3.38	0.000***	5.8	94.6
第五主成分 PC 5	13	3 101 439	238 572	1.81	0.042*	2.7	97.3
第六主成分 PC 6	11	1 300 470	118 225	0.90	0.541 ^{ns}	1.1	98.4
第七主成分 PC 7	9	829 705	92 189	0.70	0.709 ^{ns}	0.7	99.1
第八主成分 PC 8	7	562 393	80 342	0.61	0.748 ^{ns}	0.5	99.6
第九主成分 PC 9	5	420 333	84 067	0.64	0.669 ^{ns}	0.4	99.9
残差 Residuals	280	38 800 683	138 574				
纯残差 Pure Residuals	260	34 205 517	131 560				
模型诊断 Model diagnosis							
GGE 信号 GGE signal		98 815 305				85.25	
GGE 噪音 GGE noise		17 102 758				14.75	
最佳模型 Best model	GGE2						
捕获信号 Signal captured		92 968 033				94.08	

2.5 籽粒产量与稳定性指数(WAASB)相结合的双标图

由图 3 可知,结合籽粒产量和稳定性能将双标图分为 4 个象限,第 I 象限中包含稳定性差但拥有较高辨别力的试点。‘HK 4242’‘BM 11’和‘HS 414’位于第 I 象限,虽然这 3 个品种的产量接近平均产量,但是稳定性系数(WAASB)较高,稳产性较差。由此,研究这个象限中的品种特殊适应性是很有必要的。第 II 象限包含丰产性突出,但 WAASB 值较高的品种属于丰产但不稳定的品种,只有‘HH 1603’处于该象限中。在该象限中的深州和永年试点除了具有较高的产量外还具有较高的品种辨别力。第 III 象限中,‘KM 60’‘SM 22’和‘HP 6216’等品种表现为丰产性较差但稳定性较好。位于这个象限中的品种属于产量低但适应性较广的品种,WAASB 值越低代表着该品种在整个环境中稳定性越好。对照品种‘SM 22’位于本象限中,属于丰产性一般但稳定性较好的品种。同理,该象限中的试点具有产量低且鉴别力差的特点。第 IV 象限中的品种属于平均产量较高且适应性较广的品

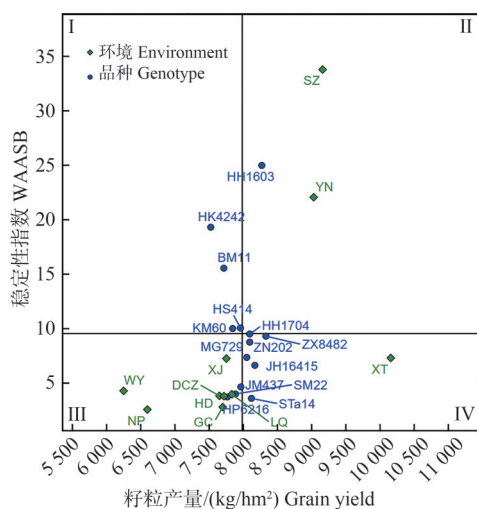
种,该象限中的试点能充分发挥品种丰产潜力,但由于 WAASB 值较低,对品种的鉴别能力较差。‘HH 1704’‘ZN 202’‘ZX 8482’‘MG 729’‘JH 16415’和‘Sta 14’等品种被认为是参试品种中丰产性突出且稳定性较好的品种。

2.6 依据稳定性和产量表现权重的基因型排名

由图 4 可知,品种产量和稳定性指数(WAASB)分别赋予 65 和 35 的权重得到 WAASBY 值,‘Sta 14’具有最高的 WAASBY 得分,其次是‘ZX 8482’和‘JH 16415’,这 3 个品种处于第 IV 象限,属于丰产性和稳定性皆较好的品种。对照品种‘SM 22’的 WAASBY 值为 63.4,位于参试品种的后列,属于丰产性一般但稳定性较好的品种。‘HK 4242’是参试品种中 WAASBY 值最低的品种。

2.7 各稳定性指数之间的相关性

由图 5 可知,前 2 个交互作用主成分(PC 1 和 PC 2)的变异平方和解释了交互效应平方和的 77.7%。除 Thennarasu 指数 N_1 、 N_2 、 N_3 ,幕律残差 POLAR 和 Huehn 稳定性因子 S_1 、 S_2 、 S_3 外,其余稳定性因子向量长度均较长,这说明这些因子在主成分



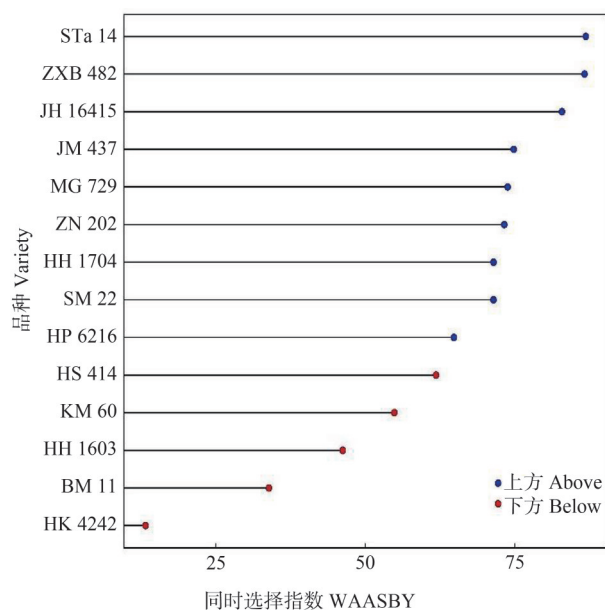
DCZ, 大曹庄; HD, 邯郸; SZ, 深州; YN, 永年; GC, 藁城; LQ, 鹿泉; XJ, 辛集; NP, 南皮; WY, 武邑; XT, 邢台。I、II、III和IV代表着4个不同象限。

DCZ, Dacaozhuang; HD, Handan; SZ, Shenzhou; YN, Yongnian; GC, Gaocheng; LQ, Luquan; XJ, Xinji; NP, Nanpi; WY, Wuyi; XT, Xingtai. I, II, III and IV represent four different quadrants, respectively.

图3 产量与稳定性系数(WAASB)在10个试点评估的14个小麦基因型的双标图

Fig. 3 Biplot of the yield vs. weighted average of absolute scores for the best linear unbiased predictions of the genotype vs. environment interaction (WAASB) of 14 wheat genotypes evaluated in 10 environments

分析中得到了很好的表达。2个指标之间的相关性可以通过向量之间的夹角余弦函数的大小来衡量,两向量之间的夹角角度越小则越密切,说明这2个指标之间存在显著正相关关系。反之,夹角越大说明2个指标之间存在负相关关系。基因型值的相对表现(RPGV),基因型值相对表现的调和平均值(HMRPGV),基因型值的调和平均值(HMGV)和几何适应性指数(Gai)等稳定性因子均与籽粒产量(GY)显著正相关($P < 0.05$),同时选择指数WAASY和WAASBY与籽粒产量(GY)也均呈正相关,张氏参数的同时选择指数(DZ_SSI),AMMI稳定性值的同时选择指数(ASV_SSI)和平方特征向量值的平均值同时选择指数(EV_SSI)等指标与籽粒产量(GY)均呈现出显著负相关($P < 0.05$)。稳定性因子WAAS、WAASB和AMMI稳定性值(ASV)、Zhang参数值(DZ)、平方特征向量值的平均值(EV)、主成分轴得分绝对值之和(SIPC)、交互作用主成分对相互作用相对贡献的绝对值(ZA)、联



蓝色和红色分别表示在BLUP平均值上方和下方的基因型。

Blue and red circles represent the varieties that had WAASBY above and below of WAASBY means, respectively.

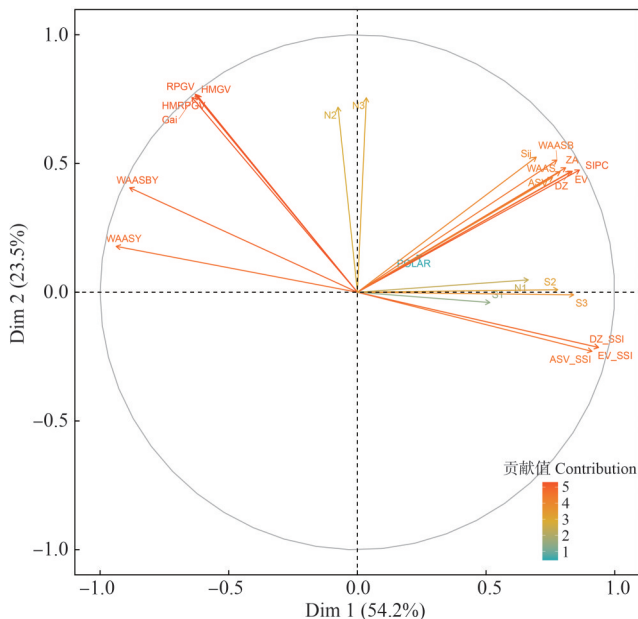
图4 14个参试小麦品种稳定性的加权平均值(WAASB)和籽粒产量(WAASBY)的估计值(考虑产量和稳定性的权重分别为65和35)

Fig. 4 Estimated values of weighted average of the stability (WAASB) and mean performance (Y) (WAASBY) for 14 wheat tested genotypes (considering the weights of 65 and 35 for yielding and stability, respectively)

合回归分析偏差(Sij)之间均呈现显著正相关($P < 0.05$),同时,稳定性因子WAAS、WAASB均与同时选择指数WAASY、WAASBY之间呈现显著负相关($P < 0.05$)。

2.8 品种与试点间的互作效应分析

由表5可知,每个参试品种和试点组合展现出不同的互作情况。品种(基因型)与试点(环境)的互作效应是由所有显著的IPCA得出的互作信息,是对品种确定合理推广区域的重要依据。‘HH 1704’和‘ZN 202’在大曹庄、深州、永年等试点均有较大的正交互效应值,对上述3个试点有特殊的适应性,而在藁城、辛集和邢台等试点则负交互效应值均较大,不适宜在这3个试点种植。藁城、武邑、南皮和邢台等试点适宜种植的小麦品种有:‘BM 11’‘HS 414’和‘KM 60’;邯郸和鹿泉等试点适宜种植的品种是‘HK 4242’和‘MG 729’;‘ZX 8482’适宜在深州、辛集、邢台和永年等试点种植。‘HS 414’‘JM 437’和‘KM 60’等品种不适宜种植的试点是邯郸、深州和永年。



Sij,联合回归分析的偏差;ASV,AMMI稳定性值;DZ,张氏参数;EV,平方特征向量值的平均值;ZA,交互作用主成分对交互作用相对贡献的绝对值;WAAS,绝对分数的加权平均数;WAASY,绝对分数和响应变量的加权平均值;SIPC,交互作用主成分得分的绝对值之和;HMGV,基因型值的调和平均值;RPGV,基因型值的相对表现;HMRPGV,基因型值相对表现的调和平均值;Gai,几何适应性指数;S1,S2和S3,Huehn稳定性因子;N1,N2和N3,Thennarasu统计量;POLAR,幂律残差;GY,籽粒产量;EV_SSI,DZ_SSI和ASV_SSI分别代表稳定因子EV、DZ和ASV的综合选择指数。

Sij, deviations from the joint-regression analysis; ASV, AMMI-stability value; DZ, Zhang’s D parameter; EV, sums of the averages of the squared eigenvector values; ZA, absolute value of the relative contribution of IPCs to the interaction; WAAS, weighted average of absolute scores; WAASY, the weighted average of absolute scores and response variable; SIPC, sums of the absolute value of the IPC scores; HMGV, harmonic mean of the genotypic value; RPGV, relative performance of the genotypic values; HMRPGV, harmonic mean of the relative performance of the genotypic values; Gai, geometric adaptability index; S1, S2 and S3, Huehn’s stability statistics; N1, N2 and N3, Thennarasu’s statistics; POLAR, power law residuals; GY, grain yield; EV_SSI, DZ_SSI and ASV_SSI, represents the combined selection indices for the stability factors EV, DZ and ASV, respectively.

图5 基因型产量和稳定性统计数据排名的主成分分析

Fig. 5 Loading plot obtained from principal component analysis with genotype yield and stability statistics ranks

表5 参试品种和试点间的互作效应值(D_{ge})数据

Table 5 Interaction effect values (D_{ge}) for participating genotypes and environments used in this study

品种 Variety	试点 Location									
	大曹庄 DCZ	藁城 GC	邯郸 HD	鹿泉 LQ	南皮 NP	深州 SZ	武邑 WY	辛集 XJ	邢台 XT	永年 YN
博麦 11 号 Bomai 11	−129	225	420	47	127	−1 703	187	−240	387	678
衡 H1603 HengH 1603	−129	−25	−11	−481	−105	2 559	−33	12	−393	−1 393
衡 H1704 HengH 1704	350	−353	47	−34	127	546	−76	−387	−895	674
邯科 4242 Hanke 4242	127	159	689	398	356	−1 657	3	−299	−607	831
海平 6216 Haiping 6216	−665	330	−100	26	−244	84	168	549	−31	−118
邯生 414 Hansheng 414	327	247	−304	333	232	−625	442	8	468	−1 127
金禾 16415 Jinhe 16415	−216	51	−55	−78	−365	324	−384	−183	127	778
冀麦 437 Jimai 437	277	86	−187	28	126	−246	180	−178	370	−457
科茂 60 Kemao 60	449	368	−235	188	241	−578	221	212	356	−1 222
MG 729	−249	−360	282	234	−10	461	58	92	104	−610
石麦 22 Shimai 22	−239	−110	3	−108	−136	347	−112	127	43	185
石 Ta14 ShiTa 14	−53	−151	48	−92	−107	−371	154	298	255	18
中农 202 Zhongnong 202	267	−114	−508	23	−117	429	−429	−158	−481	1 086
众信 8482 Zhongxin 8482	−118	−354	−90	−484	−126	429	−379	146	299	676

3 讨论

3.1 多环境测试在育种中的重要性

基因型与环境互作效应在自然界中普遍存在,基因型与环境互作效应显著影响农作物的产量及其相关性状^[15-18]。优良品种是建立在高产且稳产的基础上的,某一品种产量及产量相关性状表现在不同试点间波动较大,这个品种受到互作影响较大,属于稳产性较差的品种^[3-5]。多环境测试(multi-environmental trials, METs)作为作物商业育种过程中的重要环节,是品种推广的前提。选择合适的评价方法对METs数据进行丰产性和稳定性分析是育种者所面临的难题^[29]。采用科学、合理的评价分析方法有助于充分解析试验数据的信息,能为新品种合理布局提供依据^[30]。

Gauch等^[31]指出,提高METs预测准确性可以从以下3个方面来完成。首先是试点选择,其次是合理的试验设计以及重复次数,最后是采用有效的统计模型对数据进行分析。AMMI、BLUP和GGE双标图作为基因型与环境互作分析的3种常用方法都存在以下缺陷:首先是这3种方法都是建立在固定效应模型基础上,其次是所选择的试点必须是类似的,最后是所分析的数据不能出现缺失。如果仅靠单一方法对品种进行分析评价,数据结果难免出现偏颇^[32-34]。本研究采用AMMI和BLUP相整合的方法对2018—2019年河北省节水组小麦品种丰产性、稳定性和适应性进行综合评价,AMMI模型分析结果表明,基因型、环境以及互作效应均达到极显著水平($P < 0.001$),环境效应在总变异中占比最大为67.63%,其次为互作效应,基因型效应仅占比2.50%。预示在小麦品种示范布点过程中,要根据基因型与环境互作的影响因地制宜的种植适宜的品种^[35]。与传统的GGE双标图不同,本研究中所采用的基于混合效应模型的WAASB×GY双标图将产量和稳定性分成4个象限以此完成对参试品种产量和稳定性的联合解读。象限I和II中的品种属于稳定性较差的品种,这2个象限中的试点对于品种有特殊的适应性。象限III和IV中的品种属于稳定性较好的品种,其中,象限IV中的品种具有较好的丰产性和稳定性,但该象限中的试点对品种的鉴别力较差。与熟知的AMMI双标图相比,WAASB×GY双标图最大特点是将所有IPCA轴

(interaction principal component axis)都参与到模型运算中,可以在品种排序时将未保留IPCA1中的互作模式考虑进去^[36]。

3.2 选择最佳的预测模型

对于随机区组试验设计和交叉验证程序的多环境测试(METs)已采用均方根预测差(RMSPD)作为标准来选择最佳的乘法模型,具有RMSPD值最低的模型被认为是最佳预测模型^[37]。本研究中,AMMI家族AMMI 2的RMSPD为443 kg/hm²,且和最佳预测模型BLUP(424 kg/hm²)相差不大,这和Sa'diyah等^[38]研究结果类似。AMMI模型中第1主成分轴(PC 1)到第4主成分轴(PC 4)达到了显著水平,GGE模型中PC1~PC5达到显著水平,为了捕获数据中的真实模式,必须进行正确的模型诊断。 F_R 测试和信噪比比较是目前用于诊断AMMI模型的最优方法^[39]。但是,依赖于Gollob估计自由度的 F_R 检验往往会低估GGE自由度,尽管 F_R 检验的作用可能是通过标记1.0%或0.1%的显著性(而不是通常的5%)来抵消。本研究中,在GE以及G+GE水平上,采用专注于信号噪声估计和比较的 F_R 检验^[40]作为表型建模所采用的AMMI模型和GGE模型诊断的方法。经过模型诊断,AMMI 2和GGE 2分别作为AMMI和GGE家族最适宜的模型。Gauch等^[31]指出,预测精度在METs分析模型诊断中尤为重要。鉴于当前计算机具有强大的数据处理能力,因此,产量预测的最佳方法的选择应基于每种情况下的预测能力评估,这是因为BLUP和AMMI模型的功效都随每个试验的内在因素而增加^[41]。方差分量估计中的无偏差性导致可演性系数有偏差,换句话说,与随机效应相关的收缩效应可能被高估或低估了。同样,AMMI模型的效率随着试验规模扩大和数据中噪声的增强而增加^[15]。

3.3 稳定性指数(WAASB)及优越指数(WAASBY)的应用

本研究中提出的定量稳定性指数(WAASB),即来自线性混合效应模型(LMM)产生的互作效应的BLUP矩阵奇异值分解的加权绝对分数,是一种容纳BLUP和AMMI模型特点的图形化混合模型,有助于METs数据分析。基于WAASB的优越性指数(WAASBY),有助于同时兼顾目标性状和稳定的基因型^[18,42]。WAASBY是稳定性指数(WAASB)和品种产量(GY)的融合体,显著特点是

可以根据产量和稳定性设置不同的比例权重,比如100/0, 95/5, 90/10……5/95, 0/100。在育种过程中,首先是选择品种产量,脱离丰产性谈稳定性是没有意义的,比如本研究所选用的权重比例是65/35。这个权重比例是可以根据自身的育种目标调整的,育种者一般比较关心丰产性突出同时兼顾稳定性的品种。参试品种中,‘众信8482’的WAASBY最高,为90.7,其次是‘石Ta14’(82.9)和‘金禾16415’(82.0),这3个品种在产量×稳定性双标图中均位于第4象限,相较于‘石麦22’(对照品种)鉴定为丰产稳产型品种。‘石麦22’的WAASBY位于参试品种后列,‘海平6216’‘邯生414’‘科茂60’‘衡H1603’‘博麦11号’和‘邯科4242’等品种WAASBY均低于‘石麦22’,属于产量和稳定性综合表现较差的品种。以往多点鉴定试验分析中,很难将品种产量和稳定性等农艺性状的表现结合起来作为1个指标对品种进行综合评价,本研究中基于混合线性模型的WAASB和WAASBY品种适应性评价可以提高育种效率并筛选出适合当地生产的新品种。有关WAASB和WAASBY在其他作物品种筛选中的应用需要进一步试验和验证。

4 结 论

基于混合效应模型的稳定性指数(WAASB)分析2018—2019年河北省节水组小麦区域试验,环境效应、基因型效应和互作效应均达到了极显著水平($P < 0.001$)。GY×WAASB双标图鉴定出‘衡H1704’‘中农202’‘众信8482’‘MG729’‘金禾16415’和‘石Ta14’等品种为丰产性突出、稳定性较好的品种;其中,‘众信8482’的WAASBY得分最高,属于参试品种中表现较好的品种。而‘邯科4242’的WAASBY得分最低,属于表现较差的1个。大曹庄、深州和永年试点适宜推广种植的品种是‘衡H1704’和‘中农202’;藁城、武邑、南皮和邢台等试点适宜种植的品种为‘博麦11号’‘邯生414’和‘科茂60’;邯郸和鹿泉等试点适宜种植的品种是‘邯科4242’和‘MG729’;‘众信8482’适宜在深州、辛集、邢台和永年等试点种植。邯郸、深州和永年等试点不适合推广种植的品种有‘邯生414’‘冀麦437’和‘科茂60’。综上,采用混合线性模型稳定性指数(WAASB)和同时选择指数(WAASBY)可为河北省冬小麦品种示范和推广提供依据。

参考文献

- [1] 周宝元, 陈传永, 孙雪芳, 葛均筑, 丁在松, 马玮, 王新兵, 赵明. 冬小麦-夏玉米双机收籽粒模式周年资源利用效率及经济效益[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(12): 1959-1972
Zhou B Y, Chen C Y, Sun X F, Ge J Z, Ding Z S, Ma W, Wang X B, Zhao M. Resource use efficiencies and economic benefits of winter wheat-summer maize cropping system with double mechanical grain harvest[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(12): 1959-1972 (in Chinese)
- [2] 吴兆丹, 张依, 吴兆磊, 操信春, 梁希瑶, 吴奕卓. 中国粮食主产区农作物生产广义用水经济效率时空演变及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11): 2763-2777
Wu Z D, Zhang Y, Wu Z L, Cao X C, Liang X Y, Wu Y Z. Study on the spatio-temporal evolution and influencing factors of economic efficiency of generalized water use for crop production in China's major grain-producing area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11): 2763-2777 (in Chinese)
- [3] Studnicki M, Kang M S, Iwańska M, Oleksiak T, Wójcik-Gront E, Mądry W. Consistency of yield ranking and adaptability patterns of winter wheat cultivars between multi-environmental trials and farmer surveys [J/OL]. *Agronomy*, (2019-05-15). DOI: 10.3390/agronomy9050245
- [4] Gill H S, Halder J, Zhang J F, Brar N K, Rai T S, Hall C, Bernardo A, St Amand P, Bai G H, Olson E, Ali S, Turnipseed B, Sehgal S K. Multi-trait multi-environment genomic prediction of agronomic traits in advanced breeding lines of winter wheat [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2021-08-19). DOI: 10.3389/fpls.2021.709545
- [5] 岳海旺, 魏建伟, 王广才, 刘朋程, 陈淑萍, 卜俊周. 基于环境型鉴定技术划分生态区综合评价黄淮海青贮玉米品种[J]. 草业学报, 2024, 33(3): 120-138
Yue H W, Wei J W, Wang G C, Liu P C, Chen S P, Bu J Z. Comprehensive evaluation of silage maize hybrids in the Huanghuaihai Plain based on mega-environments delineated using envirotyping techniques [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 120-138 (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] Fernandez G C J. Analysis of genotype × environment interaction by stability estimates[J]. *HortScience*, 1991(26): 947-950
- [8] Kang M S. Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development[J]. *Advances in Agronomy*, 1997(62): 199-252
- [9] Hardwick R C, Wood J T. Regression methods for studying genotype-environment interactions[J]. *Heredity*, 1972, 28(2): 209-222
- [10] Eberhart S A, Russell W A. Stability parameters for comparing varieties [J]. *Crop Science*, 1966, 6(1): 36-40
- [11] Gollob H F. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques [J]. *Psychometrika*, 1968, 33(1): 73-115
- [12] 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
- [13] Forkman J, Piepho H P. Parametric bootstrap methods for testing multiplicative terms in GGE and AMMI models[J]. *Biometrics*, 2014, 70

- (3): 639-647
- [14] Rebollo I, Aguilar I, Pérez de Vida F, Molina F, Gutiérrez L, Rosas J E. Genotype by environment interaction characterization and its modeling with random regression to climatic variables in two rice breeding populations[J]. *Crop Science*, 2023, 63(4): 2220-2240
- [15] Piepho H P. Empirical best linear unbiased prediction in cultivar trials using factor-analytic variance-covariance structures [J/OL]. *Theoretical and Applied Genetics*, (1998-07-01). DOI: 10.1007/s001220050885
- [16] Bocianowski J, Liersch Z. Multi-environmental evaluation of winter oilseed rape genotypic performance using mixed models [J/OL]. *Euphytica*, (2021-04-02). DOI: 10.1007/s10681-020-02760-1
- [17] Sharifi P, Abbasian A, Mohammadi A. Evaluation the mean performance and stability of Rice genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques and selection based on multiple traits [J]. *Plant Genetic Researches*, 2021, 7(2): 163-180
- [18] Yue H W, Gauch H G, Wei J W, Xie J L, Chen S P, Peng H C, Jiang X W, Bu J Z. 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
- [19] Gela T S, Khazaei H, Podder R, Vandenberg A. Dissection of genotype-by-environment interaction and simultaneous selection for grain yield and stability in faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. *Agronomy Journal*, 2023, 115(2): 474-488
- [20] Amrate P K, Shrivastava M K, Borah M, Routhu G K, Sharma S, Nataraj V, Pancheshwar D K, Singh G. Molecular characterization of soybean yellow mosaic virus isolates and identification of stable resistance sources in central India[J]. *Australasian Plant Pathology*, 2023, 52(3): 165-179
- [21] Rajput L S, Nataraj V, Kumar S, Amrate P K, Jahagirdar S, Huilgol S N, Chakruno P, Singh A, Maranna S, Ratnaparkhe M B, Borah M, Singh K P, Gupta S, Khandekar N. WAASB index revealed stable resistance sources for soybean anthracnose in India [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2021, 159(9-10): 710-720
- [22] Verma A, Verma R P S, Singh J, Kumar L, Singh G P. AMMI appended with BLUP to assess the superiority of hullness barley genotypes evaluated under coordinated system of the country [J]. *International Journal of Plant and Soil Science*, 2021, 33(10): 48-61
- [23] Lee S Y, Lee H S, Lee C M, Ha S K, Park H M, Lee S M, Kwon Y, Jeung J U, Mo Y. Multi-environment trials and stability analysis for yield-related traits of commercial rice cultivars [J/OL]. *Agriculture*, (2023-01-20). DOI: 10.3390/agriculture13020256
- [24] Rubiales D, Moral A, Flores F. Agronomic performance of broomrape resistant and susceptible faba bean accession [J/OL]. *Agronomy*, (2022-06-13). DOI: 10.3390/agronomy12061421
- [25] Vineeth T V, Prasad I, Chinchmalatpure A R, Lokeshkumar B M, Kumar S, Ravikiran K T, Sharma P C. Weighted average absolute scores of BLUPs (WAASB) based selection of stable Asiatic cotton genotypes for the salt affected Vertisols of India [J]. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2022, 82(1): 104-108
- [26] Munda S, Paw M, Saikia S, Begum T, Baruah J, Lal M. Stability and selection of trait specific genotypes of Curcuma caesia Roxb. using AMMI, BLUP, GGE, WAAS and MTSI model over three years evaluation [J/OL]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, (2022-11-17). DOI: 10.1016/j.jarmap.2022.100446
- [27] 岳海旺, 魏建伟, 谢俊良, 姚文影, 曹红梅, 陈淑萍, 彭海成, 卜俊周. 基因型和环境互作对黄淮海夏玉米品种籽粒产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 31-43
- Yue H W, Wei J W, Xie J L, Yao W Y, Cao H M, Chen S P, Peng H C, Bu J Z. Effect of interaction between genotype and environment on the grain yield of summer maize hybrids in Huanghuaihai region [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(4): 31-43 (in Chinese)
- [28] Olivoto T, Lúcio A D. Metan: An R package for multi-environment trial analysis [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020, 11(6): 783-789
- [29] Olivoto T, Lúcio A D C, da Silva J A G, Sari B G, Diel M I. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(6): 2961-2969
- [30] Ahakpaz F, Abdi H, Neyestani E, Hesami A, Mohammadi B, Mahmoudi K N, Abedi-Asl G, Noshabadi M R J, Ahakpaz F, Alipour H. Genotype-by-environment interaction analysis for grain yield of barley genotypes under dryland conditions and the role of monthly rainfall [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2020-12-03). DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106665
- [31] Gauch H G, Zobel R W. Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials [J/OL]. *Theoretical and Applied Genetics*, (1988-07-01). DOI: 10.1007/BF00288824
- [32] Karimizadeh R, Pezeshkpour P, Barzali M, Mehraban A, Sharifi P. Evaluation the mean performance and stability of lentil genotypes by combining features of AMMI and BLUP techniques [J]. *Journal of Crop Breeding*, 2020, 12(36): 160-170
- [33] Singamsetti A, Shahi J P, Zaidi P H, Seetharam K, Vinayan M T, Kumar M, Singla S, Shikha K, Madankar K. Genotype $\times$ environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L) hybrids across moisture regimes [J/OL]. *Field Crops Research*, (2021-07-08). DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108224
- [34] Pour-Aboughadareh A, Barati A, Ali Koohkan S A, Jabari M, Marzoghian A, Gholipour A, Shahbazi-Homonloo K, Zali H, Poodineh O, Kheirgo M. Dissection of genotype-by-environment interaction and yield stability analysis in barley using AMMI model and stability statistics [J/OL]. *Bulletin of the National Research Centre*, (2022-01-29). DOI: 10.1186/s42269-022-00703-5
- [35] 王汉震, 单福华, 田立平, 马巧云, 赵昌平, 张凤廷. 北部冬麦区冬小麦区试品种(系)的稳定性和适应性分析[J]. 作物杂志, 2018(5): 40-44
- Wang H X, Shan F H, Tian L P, Ma Q Y, Zhao C P, Zhang F T. Analysis of stability and adaptability of winter wheat varieties in the regional trials of the northern wheat region of China [J]. *Crops*, 2018(5): 40-44 (in Chinese)
- [36] Nataraj V, Bhartiya A, Singh C P, Devi H N, Deshmukh M P, Verghese P, Singh K, Mehtre S P, Kumari V, Maranna S, Kumawat G, Ratnaparkhe M B, Satpute G K, Rajesh V, Chandra S, Ramteke R, Khandekar N, Gupta S. WAASB-based stability analysis and simultaneous selection for grain yield and early maturity in soybean [J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(4): 3089-3099
- [37] Moreno-González J, Cross A J, Cornelius P L. Additive main effects and multiplicative interaction model II: Theory on shrinkage factors for predicting cell means [J]. *Crop Science*, 2003, 43(6): 1976-1982
- [38] Sa' diyah H, Hadi A F. AMMI model for yield estimation in multi-environment trials: A comparison to BLUP [J/OL]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, (2016-02-23). DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.113
- [39] Hadasch S, Forkman J, Piepho H P. Cross-validation in AMMI and GGE models: A comparison of methods [J]. *Crop Science*, 2017, 57(1):

264-274

- [40] Oteng-Frimpong R, Kassim Y B, Puzoaa D K, Nboyine J A, Issah A R, Rasheed M A, Adjebeng-Danquah J, Kusi F. Characterization of groundnut (*Arachis Hypogaea* L.) test locations using representative testing environments with farmer-preferred traits [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2021-03-15). DOI: 10.3389/fpls.2021.637860
- [41] Pour-Aboughadareh A, Khalili M, Pocza P, Olivoto T. Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: An

applicable review for use in plant breeding programs [J/OL]. *Plants*, (2022-02-02). DOI: 10.3390/plants11030414

- [42] Li Z J, Wu W. Genotype recommendations for high performance and stability based on multiple traits selection across a multi-environment in rapeseed [J/OL]. *European Journal of Agronomy*, (2023-02-18). DOI: 10.1016/j.eja.2023.126787

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, 硕士研究生导师。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学术论文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: 王延兵, 河北省农林科学院粮油作物研究所高级农艺师, 河北省现代农业产业技术体系玉米创新团队鲜食玉米与加工岗位专家。主要从事农作物新品种选育、栽培技术等研究, 培育玉米新品种9个。获省部级以上奖励3次, 以第一作者或通讯作者发表论文30余篇, 先后获得河北省科技进步奖3项。



通讯作者简介: 李媛, 河北省种子总站高级农艺师。主要从事河北省玉米新品种试验、展示示范等相关工作。曾获得河北省科学技术进步三等奖1项, 软件著作权1项, 发明专利3项, 发表论文论著10余篇。