

DOI: 10.11686/cyxb2024390

http://cyxb.magtech.com.cn

贺宏, 李晋, 谭秋怡, 等. 基于AMMI模型和GGE双标图对青稞区域试验进行综合评价. 草业学报, 2025, 34(9): 111-120.

HE Hong, LI Jin, TAN Qiu-yi, et al. Comprehensive evaluation of regional trials for hulless barley based on AMMI model and GGE biplot. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(9): 111-120.

基于AMMI模型和GGE双标图对青稞区域试验进行综合评价

贺宏¹, 李晋¹, 谭秋怡², 刘益萍¹, 龙桂林¹, 潘峰¹, 张文富³, 刘兴元⁴, 周黎⁵, 张云书^{1*}

(1. 阿坝藏族羌族自治州农业科学技术研究所, 四川 马尔康 624000; 2. 阿坝藏族羌族自治州农业农村局, 四川 马尔康 624000; 3. 阿坝县科学技术和农业畜牧水务局, 四川 阿坝 624600; 4. 若尔盖县农技站, 四川 若尔盖 624500; 5. 松潘县科学技术和农业畜牧局, 四川 松潘 623300)

摘要: 为准确评价四川省2023年青稞区域试验参试品种的丰产性、稳产性和适应性以及各试点的区分力和代表性, 本研究基于R语言的加性主效应和乘积互作效应(AMMI)模型以及基因型主效应和基因型与环境互作(GGE)双标图对参试的14个青稞新品种(系)和5个试点进行了试验数据分析及综合评价。结果表明, 青稞产量极显著地受到基因型、环境以及两者之间互作效应的影响; 1277和阿青6号是既高产又稳产的品种, 适宜在若尔盖县、阿坝县和松潘县种植; 1325和10462为高产但稳产性一般的品种, 适合在特定区域马尔康市和壤塘县种植。在5个试验点中, 阿坝县具有较强的代表性和区分力, 是本研究中能筛选高产稳产品种较为理想的试验点。本研究为青藏高原青稞新品种的选育推广及区域试点的选择提供了理论依据。

关键词: 青稞; 区域试验; AMMI模型; GGE双标图; 稳产性

Comprehensive evaluation of regional trials for hulless barley based on AMMI model and GGE biplot

HE Hong¹, LI Jin¹, TAN Qiu-yi², LIU Yi-ping¹, LONG Gui-lin¹, PAN Feng¹, ZHANG Wen-fu³, LIU Xing-yuan⁴, ZHOU Li⁵, ZHANG Yun-shu^{1*}

1. Institute of Agricultural Science and Technology, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Barkam 624000, China; 2. Agriculture and Rural Bureau of Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Barkam 624000, China; 3. Science, Technology, and Agriculture Animal Husbandry Water Bureau of Aba County, Aba 624600, China; 4. Extension Station of Agricultural Technology in Zoige County, Zoige 624500, China; 5. Science, Technology, and Agriculture Animal Husbandry Bureau of Songpan County, Songpan 623300, China

Abstract: This research aimed to accurately evaluate the productivity, stability, and adaptability of hulless barley (*Hordeum vulgare* var. *nudum*) varieties tested in Sichuan Province in 2023, as well as the discriminative power and representativeness of testing sites. Accordingly, the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model written in the R language and genotype main effect plus genotype-environment interaction (GGE) biplots were employed to analyze the trial data and comprehensively evaluate 14 new hulless barley varieties (lines) and 5 testing sites. It was found that hulless barley yield was extremely significantly affected by the combined effects of genotype,

收稿日期: 2024-10-12; 改回日期: 2024-12-13

基金项目: 国家大麦青稞产业技术体系专项(CARS-05), 国家产业技术体系麦类作物四川创新团队(SCCXTD-2024-11)和特色青稞种质资源发掘与利用(育种攻关绩效项目)(2022YFYZ0001)资助。

作者简介: 贺宏(1995-), 男, 四川成都人, 助理农艺师, 硕士。E-mail: 952593353@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhangxsh828@163.com

environment and the interaction effect between the two; 1277 and Aqing 6 were both high-yielding and stable-yielding varieties suitable for planting in Zoige County, Aba County and Songpan County. Lines 1325 and 10462 were high-yielding but stable-yielding varieties with general stability, which were ideal for growing in specific regions of Barkam City and Zamtang County. Among the five test sites, Aba County has strong representativeness and discrimination, making it an ideal test site for screening high-yielding and stable varieties, based on results in this study. The study provides technical data for the selection and formulation of planting recommendations for new hulless barley varieties on the Qinghai—Xizang Plateau and the selection of regional pilots.

Key words: hulless barley; regional trial; AMMI model; GGE biplots; stability

青稞(*Hordeum vulgare* var. *nudum*)属禾本科大麦属作物,又称裸大麦^[1-2],长期生存于高寒地区,具有抗逆性强、生育期短等优良特性^[3],是我国青藏高原地区藏族人民的主粮^[4]。阿坝藏族羌族自治州位于青藏高原东南边缘,四川省西北部,东经100°30′—104°27′和北纬30°35′—34°19′,平均海拔3000 m,属高原寒温带气候。地理上毗邻甘肃省甘南藏族自治州,与青海省海北藏族自治州同处草原雨养旱地生态系统,生态环境相近,育种目标一致^[5]。全州现有农业耕地7.7万hm²,青稞种植集中在境内10县(市),占全州粮食播种面积的16.50%,青稞实际平均产量仅为2250 kg·hm⁻²,产量仍有很大的提升空间^[6]。选育高产稳产、综合多抗、专用特用的青稞新品种将会为四川省“高原粮仓”提供安全保障^[7]。受产业结构调整的影响,青稞新品种的培育面临着更高的期望和标准,而区域试验能有效客观地评价品种的高产稳产,为藏区农牧民青稞种植效益提供了保障。

区域试验是综合评价品种丰产性、稳产性和适应性的重要组成部分,是判断新品种能否通过审定及是否具有推广价值的重要理论依据^[8-10]。选取恰当的模型综合分析区域试验结果,是准确评价品种高产稳产的关键,将会提高育种和农业研究效率。目前,加性主效应和乘积互作效应(additive main effects and multiplicative interaction, AMMI)模型以及基因型主效应和基因型与环境互作(genotype main effects and genotype-environment interaction, GGE)双标图在分析品种的丰产性、稳产性及适应性上得到广泛的应用^[11],相较方差模型、线性回归模型分析更精准且有效^[12]。其中,AMMI模型由Gauch等^[13]提出,在处理基因型 and 环境的互作上把方差分析(analysis of variance, ANOVA)和主成分分析(principal component analysis, PCA)相结合^[14],能以一种更为全面且客观的方式对品种的丰产性、稳定性等进行综合评价,其重点考虑基因型与环境的互作效应^[15]。Yan等^[16]提出的GGE双标图,综合评估了基因型主效应(main effect of genotype, G)和基因型与环境的互作效应(interaction effect between genotype and environment, GEI)^[17],能有效地对品种、试点以及生态区的划分进行评价,是分析区域试验数据的理想方法^[18]。利用AMMI模型和GGE双标图进行综合分析,能更直观地、定量地分析品种间的差异及试点的区分力^[19-20],可以挖掘出一些在特定的生态区域内产量高但稳定性较低的品种,从而发挥其高产潜力。

目前,AMMI模型和GGE双标图已在水稻(*Oryza sativa*)^[21]、玉米(*Zea mays*)^[8]、小麦(*Triticum aestivum*)^[8]、苦荞(*Fagopyrum tataricum*)^[22]、大豆(*Glycine max*)^[23]、燕麦(*Avena sativa*)^[24]等作物的品种区域中广泛应用,但运用AMMI模型与GGE双标图联合分析青稞区域研究上的报道较少,针对青藏高原青稞育种综合评价的研究更为鲜见。本研究利用R语言中AMMI模型和GGE双标图联合分析2023年四川省青稞新品种(系)区域试验结果,综合评价参试品种的丰产性、稳产性及各试点的区分力和代表性,旨在为青藏高原青稞新品种的评价及大面积推广工作提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究数据来源于四川省2023年度青稞新品种区域试验结果。参加区试品种(系)共14个,分别是QK2022-16(G₁)、QK2022-17(G₂)、QK2022-19(G₃)、QK2022-20(G₄)、1277(G₅)、1282(G₆)、1325(G₇)、10450(G₈)、10462(G₉)、13-1036(G₁₀)、阿青6号(G₁₁)、藏青17(G₁₂)、藏青2000(G₁₃)、藏青3000(G₁₄),其中“阿青6号”(CK₁)和“13-

1036”(CK₂)为对照品种。试验材料由阿坝藏族羌族自治州农业科学技术研究所、四川省农业科学院作物研究所、西藏自治区农牧科学院作物研究所提供。

参加试验的单位有阿坝州农业科学技术研究所(E₁)、若尔盖县科学技术和农业畜牧局农技站(E₂)、壤塘县科学技术和农业畜牧局(E₃)、阿坝县科学技术和农业畜牧水务局(E₄)、松潘县科学技术和农业畜牧局种子站(E₅)共 5 个试验地点(表 1)。气象数据由阿坝州气象局提供。

表 1 5 个试验点基本信息

Table 1 Basic information of 5 test sites

试点编号 Location code	试点名称 Location name	试点地理坐标 Location geo- graphic coordi- nates	试点海拔 Location alti- tude (m)	年平均气温 Annual aver- age tempera- ture (°C)	年降水量 Annual pre- cipitation (mm)
E ₁	阿坝州农业科学技术研究所(马尔康市)Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture Institute of Agricultural Science and Technology (Barkam City)	31°53'40" N, 102°07'51" E	2585.90	9.9	460.7
E ₂	若尔盖县科学技术和农业畜牧局农技站(若尔盖县)Zoige County Science and Technology and Agricultural Animal Husbandry Bureau Agro-technical Station (Zoige County)	33°41'33" N, 103°24'54" E	2841.40	6.6	509.8
E ₃	壤塘县科学技术和农业畜牧局(壤塘县)Zamtang County Science and Technology and Agriculture Animal Husbandry Bureau (Zamtang County)	32°04'30" N, 100°58'57" E	3280.50	7.1	407.2
E ₄	阿坝县科学技术和农业畜牧水务局(阿坝县)Aba County Science and Technology and Agriculture Animal Husbandry Water Bureau (Aba County)	32°55'11" N, 101°40'09" E	3261.40	5.3	663.9
E ₅	松潘县科学技术和农业畜牧局种子站(松潘县)Songpan County Science and Technology and Agricultural Animal Husbandry Bureau Seed Station (Songpan County)	32°51'40" N, 103°39'09" E	3081.00	6.4	638.2

1.2 试验设计

四川省青稞品种区域试验各试点均严格按照《2023 年四川省青稞品种(系)区域试验实施方案》,并结合 NY/T 3923-2021《农作物品种试验规范 粮食作物》^[25]的标准化要求进行田间试验,采取随机区组设计,3 次重复,小区面积 20 m²(2 m×10 m),行距 25 cm,行长 10 m。同一试点各参试品种同期播种,田间管理水平略高于当地大田生产。观察记载项目与标准按照 NY/T 3923-2021《农作物品种试验规范 粮食作物》^[25]的要求执行,各试点试验过程中均按既定方案采取统一标准进行播种及田间管理。成熟期按小区收获并记产。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 对数据进行整理和分析,利用 R 语言软件的“Agricolae”包和“GGEBiplot GUI”包进行区域试验产量数据的方差分析、AMMI 模型分析和 GGE 双标图统计分析。

AMMI 模型为:

$$\gamma_{ge} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_{i=1}^n \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + \theta_{ge} + \epsilon_{ger}$$

式中: γ_{ge} 代表基因型 g 在特定环境 e 下的产量表现。关键参数定义如下: μ 代表所有观测值的平均产量, α_g 为基因型主效应,衡量基因型 g 相对于 μ 的偏离程度; β_e 为环境主效应,反映了环境 e 相当于 μ 的偏离程度;倍加性参数: λ_n 为第 n 个主成分的特征值,量化该主成分对总变异的贡献率; γ_{gn} 和 δ_{en} 分别为第 n 个主成分下的基因型特征向量值和环境特征向量值,共同描述了基因型与环境在该主成分方向上的特性; θ_{ge} 为残差,表示未被模型直接解释的变异; ϵ_{ger} 为试验误差。

稳定性参数^[26]是品种或环境的交互主成分(interaction principle component axis, IPCA)在多维空间内距原点的欧式距离,是评估品种稳定性或环境区分力的重要指标。其数学公式为:

$$D_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n (IPCA)_g^2}$$

$$D_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (IPCA)_e^2}$$

式中: n 表示达到显著水平的IPCA个数; D_g 与 D_e 分别表示品种和环境的稳定性参数,为基因型或环境在 n 个显著IPCA上的欧式距离。

GGE双标图的线性统计模型为:

$$Y_{ger} = \mu + \beta_e + \sum \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + \theta_{ge} + \varepsilon_{ger}$$

式中: Y_{ger} 为基因型 g 在特定环境 e 中第 r 个重复的产量表现。相较于AMMI模型,GGE双标图将试点划分为多个具有生态差异的区域,能直接定位每个区域中产量表现最突出的品种,借助GGE模型中的各种功能图对品种和试点进行综合分析。

2 结果与分析

2.1 AMMI模型分析结果

2.1.1 青稞品种(系)产量方差分析和AMMI模型分析 采用方差分析(ANOVA)与AMMI模型,对14个青稞品种(系)在5个不同试验点的产量数据进行综合统计分析(表2),青稞产量显著受到基因型(G)、环境(E)以及两者之间互作效应(GE)的影响,均达到极显著的统计学意义,进一步说明不同品种(系)在产量表现上的显著差异。其中,环境变异对总变异的贡献率高达46.69%,明显高于基因型的10.09%和基因与环境交互作用的23.85%,可见,试验环境在青稞产量中占主导作用。为深入探究不同青稞品种的适应性和稳产性,采用AMMI模型分解互作效应平方和,得到3个显著的互作主成分(interaction principal component axis, IPCA),IPCA1、IPCA2和IPCA3,分别解释52.80%、20.28%和15.31%的总互作效应,可解释总互作变异的88.39%,说明AMMI模型比较精确地解释了品种和试点的互作效应信息,避免ANOVA分析的局限性,表现出高度的合理性和有效性。

表2 青稞品种(系)产量方差分析和AMMI模型分析

Table 2 Hulless barley varieties (lines) yield analysis of variance and AMMI model analysis

变异来源 Source of variation	自由度 Degrees of freedom (df)	平方和 Sum of square (SS)	均方 Mean square (MS)	F值 F-value	占总变异SS比例 Proportion of total variation SS (%)
环境 Environment (E)	4	742.71	185.68	38.46***	46.69
区组 Block	10	48.28	4.83	2.41*	3.03
基因型 Genotype (G)	13	160.47	12.34	6.17***	10.09
交互作用 Interaction (G×E)	52	379.48	7.30	3.65***	23.85
IPCA1	16	200.35	12.52	6.26***	52.80
IPCA2	14	76.96	5.50	2.75**	20.28
IPCA3	12	58.10	4.84	2.42**	15.31
残差 Residual	10	44.08	4.41		
误差 Error	130	259.89	2.00		
总变异 Total variation	209	1590.83	7.61		

*, **, ***分别表示在0.05, 0.01, 0.001水平差异显著。*, **, *** represent significant difference at 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

2.1.2 AMMI模型分析参试青稞品种的丰产性、稳产性和试点的区分力 为了更为直接评价参试青稞品种(系)与各试点间的互作效应,以平均产量为横轴,解释基因型与环境互作效应52.80%的IPCA1为纵轴绘制AMMI模型双标图(图1)。参试品种的横坐标值与其丰产潜力呈正相关,其值越大,丰产潜力越高。对参试品种

而言,在 IPCA1 为 0 水平线上的垂直投影距离反映了其稳产性,距离越短,表明稳产性越好。结果表明,品种 G_7 在丰产性方面表现出明显的产量潜力,其次为 G_9 、 G_3 、 G_5 、 G_6 。在稳产性方面,品种 G_8 表现最好,呈现出较强的环境适应性,其次为 G_5 、 G_3 、 G_{10} 、 G_7 。综上, G_7 为稳产性一般但丰产性较好的品种。进一步分析各区试点对品种的区分能力,采用距水平线的垂直距离作为衡量标准,能直接反映该区试点对品种的区分能力,距离越远的试点,意味着该区试点对品种区分力越强。结果显示,区分力较强的区试点依次为 E_3 、 E_4 、 E_1 。

考虑到选择的 IPCA1 只占有显著主成分轴变异的 52.80%,不足以全面揭示品种与环境间的交互作用,采取以 IPCA1 为横轴, IPCA2 为纵轴的 AMMI 双标图(图 2),可共同解释高达 73.10% 的 $G \times E$ 交互作用,直观有效地对品种的稳定性及试点的区分力进行分析。品种图标在坐标轴上位置越趋近于坐标原点,该品种越稳定,受环境影响也越小;试点图标越靠近坐标原点,其对不同品种的区分力越弱。可以直观看出品种 G_5 、 G_8 的稳定性较好, G_6 、 G_{13} 的稳定性较差,试点 E_3 、 E_4 区分力较强。综合以上结果,稳定性较好的青稞品种为 1277(G_5) 和 10450(G_8),区分力较好的区试点为壤塘县(E_3) 和阿坝县(E_4)。

2.1.3 青稞品种稳定性与试点区分力分析 进一步参照张泽等^[26]的方法,量化了品种的稳定性参数(D_g)以及试点的区分力参数(D_e),通过计算各品种或试点在主成分值(principle component values, PC)框架下与原点之间的欧氏距离来实现。 D_g 作为衡量品种稳定性的关键性指标,其数值越小,表明该品种在某一特定性状上的表现越稳定,反映了该性状较少受到品种与环境间复杂的交互效应的影响,而是更多地由品种本身的遗传特性以及环境普遍条件所决定。结果显示(表 3),丰产性较好的品种为 G_7 、 G_9 、 G_3 ,一般的为 G_5 、 G_6 、 G_2 、 G_8 、 G_{11} 、 G_4 ,较差的为 G_{12} 、 G_1 、 G_{14} 、 G_{13} 、 G_{10} 。在稳产性方面,品种 G_8 、 G_1 、 G_{11} 、 G_2 、 G_5 虽然在产量上不是最高,但在不同生态环境下表现出更强的稳定性,品种 G_7 、 G_3 、 G_{14} 、 G_{12} 的稳定性一般,较差的为 G_9 、 G_4 、 G_{10} 、 G_{13} 、 G_6 。说明 G_7 、 G_3 为高产但稳产性一般的品种,丰产性一般而稳产性较好的为 G_8 、 G_{11} 、 G_2 、 G_5 ,高产但稳产性较差的为 G_9 。结合丰产性较好和稳定性较强的品种,通过杂交育种等手段,则能选育出既高产又稳产的优良品种。为提高试验的准确性和有效性, D_e 值可以直接反映各试点对不同品种的区分力, D_e 值越大对品种的区分力越强,强区分力的试点应作为重点。故区分力较强的试验点为 E_4 和 E_3 ,能有效地区分不同品种的田间表现,而 E_2 和 E_1 的区分力则相对较弱(表 4)。

2.2 GGE 双标图分析

2.2.1 青稞品种的丰产性和稳产性 采用 GGE 双标图对 G 和 GEI 的主成分进行变异分解,结果显示,横轴第

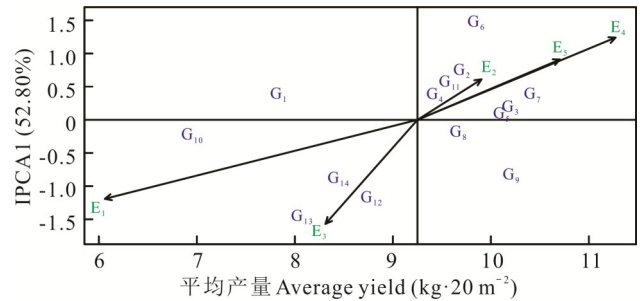


图 1 AMMI 模型分析参试品种的丰产性、稳定性及试点的鉴别力

Fig. 1 The yield ability, stability and discrimination of the tested varieties were analyzed by AMMI model

IPCA: 交互主成分 Interaction principal component. E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 依次表示马尔康市、若尔盖县、壤塘县、阿坝县、松潘县, G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 、 G_7 、 G_8 、 G_9 、 G_{10} 、 G_{11} 、 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{14} 依次表示 QK2022-16、QK2022-17、QK2022-19、QK2022-20、1277、1282、1325、10450、10462、13-1036、阿青 6 号、藏青 17、藏青 2000、藏青 3000。下同。 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 和 E_5 represent Barkam City, Zoige County, Zamtang County, Aba County, and Songpan County, respectively. G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 、 G_7 、 G_8 、 G_9 、 G_{10} 、 G_{11} 、 G_{12} 、 G_{13} , and G_{14} represent QK2022-16, QK2022-17, QK2022-19, QK2022-20, 1277, 1282, 1325, 10450, 10462, 13-1036, Aqing 6, Zangqing 17, Zangqing 2000, and Zangqing 3000, respectively. The same below.

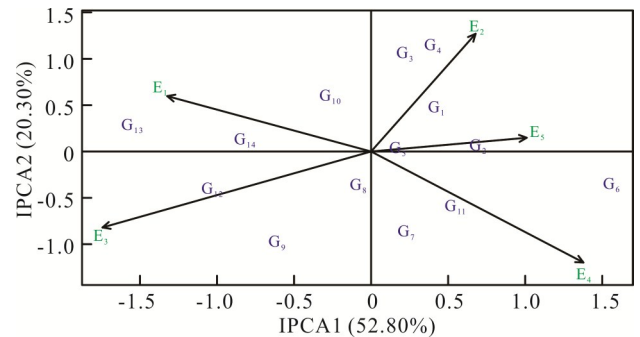


图 2 基于前 2 个交互主成分的 AMMI 模型双标图

Fig. 2 AMMI model biplot based on the first two interacting principal components

表3 参试青稞品种(系)产量、主成分值及稳定性参数(D_g)Table 3 The yield, principal component values and stability parameters (D_g) of hulless barley varieties (lines)

品种 Variety	平均产量 Average yield ($\text{kg}\cdot 20\text{ m}^{-2}$)	主成分值 Principle component values			稳定性参数 Stability parameter (D_g)	D_g 排序 D_g rank	产量排序 Yield rank
		PC1	PC2	PC3			
G ₁	8.60	0.383	0.327	-0.346	0.61	2	11
G ₂	9.66	0.701	0.044	0.435	0.83	4	6
G ₃	10.00	0.226	0.976	-0.107	1.01	7	3
G ₄	9.45	0.389	1.016	-0.492	1.19	11	9
G ₅	9.96	0.182	0.036	0.848	0.87	5	4
G ₆	9.90	1.566	-0.333	-0.806	1.79	14	5
G ₇	10.23	0.268	-0.857	0.232	0.93	6	1
G ₈	9.61	-0.078	-0.350	0.222	0.42	1	7
G ₉	10.04	-0.607	-0.956	0.008	1.13	10	2
G ₁₀	7.09	-0.246	0.681	1.278	1.47	12	14
G ₁₁	9.57	0.564	-0.587	0.028	0.82	3	8
G ₁₂	8.84	-1.009	-0.417	-0.128	1.10	9	10
G ₁₃	8.09	-1.536	0.298	-0.463	1.63	13	13
G ₁₄	8.48	-0.803	0.122	-0.708	1.08	8	12

表4 青稞区试点的产量、主成分值及稳定性参数(D_e)Table 4 The yield, principal component values and stability parameters (D_e) of the hulless barley regional test sites

环境 Environment	平均产量 Average yield ($\text{kg}\cdot 20\text{ m}^{-2}$)	主成分值 Principle component values			稳定性参数 Stability parameter (D_e)	D_e 排序 D_e rank	产量排序 Yield rank
		PC1	PC2	PC3			
E ₁	6.06	-1.323	0.665	-0.899	1.73	2	5
E ₂	9.90	0.679	1.412	-0.245	1.59	1	3
E ₃	8.31	-1.744	-0.911	0.661	2.08	4	4
E ₄	11.27	1.378	-1.331	-0.979	2.15	5	1
E ₅	10.70	1.010	0.165	1.462	1.78	3	2

一主成分(first principal component axis, AXIS1)和纵轴第二主成分(second principal component axis, AXIS2)分别贡献了51.47%、21.83%的变异平方和,两者合计解释高达73.30%的总变异平方和(图3)。带有箭头的线段描绘了平均环境轴(average environment center, AEC)的综合趋势线,从各品种向AEC绘制垂线所得到的交点位置,为判断品种产量的直观指标。位于AEC正方向的交点表明该品种的产量高于试验的平均产量,且随箭头延伸方向产量依次递增;反之,交点落在负方向则表明其产量低于试验的平均产量。参试品种在AEC上的坐标定位反映了其丰产性,坐标值的不同体现出品种间在产量上的显著差异。结果显示,试验中丰产性较好的品种(系)依次为G₇、G₆、G₉、G₁₁、G₅,一般的为G₂、G₈、G₃、G₄、G₁₂,较差的为G₁、G₁₄、G₁₃、G₁₀。参试品种(系)到AEC的垂直距离是衡量品种稳定性的关键指标,长度越短越稳定,因此稳产性较好的为G₅、G₁₁、G₈、G₇,一般的为G₃、G₁₄、G₂、G₁,较差的为G₄、G₁₃、G₁₂、G₆、G₉。其中G₇、G₁₁、G₅既能不同区试点均保持较高的产量,又能维持相对稳定的产量,为既丰产又稳产的品种;G₈为丰产性一般但稳产性较好的品种;G₆和G₉为丰产但稳产性相对较差的品种,适合在特定的生态环境下种植推广。

2.2.2 青稞品种的适应性 在 GGE 双标图中,连接距原点最近的品种构建封闭多边形,并从坐标原点向多边形各边绘制垂线,将其划分为若干个独立的扇形区域,试验点将被精确归类至特定的扇形区域内。根据扇形分布(图 4),试验点可以划分为 2 组,其中 E_1 、 E_3 为 1 组, E_2 、 E_4 、 E_5 为 1 组。在同一扇形区域内,顶点位置代表的品种,被视为该区域内表现最佳的品种,且包含的试点越多,反映该品种在不同环境下拥有广泛的适应性。 G_7 、 G_8 、 G_9 品种(系)所在扇形区内包含 E_1 、 E_3 试验点,其中 G_7 和 G_9 位于该区域多边形顶点,表明 G_7 和 G_9 在该区域内具有较强的适应性。 G_2 、 G_3 、 G_5 、 G_6 、 G_{11} 品种(系)所在扇形区内包含 E_2 、 E_4 、 E_5 试验点,其中 G_5 位于该区域多边形顶点,表明 G_5 在该区域内具有较强的适应性。此外, G_1 、 G_4 、 G_{10} 、 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{14} 品种(系)所在扇形区没有包含任一试验点,表明 G_1 、 G_4 、 G_{10} 、 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{14} 品种(系)在当年区域试验的 5 个试验点均不宜种植。

2.2.3 青稞试点的代表性和区分力 采用 GGE 双标图对各试点的代表性和区分力进行深入分析,靠近坐标原点的小圆圈作为平均环境的象征,通过量化平均环境与各试点向量间的夹角大小,能直观且精确地反映各试点的代表性强度,夹角越小,代表性越强,反之代表性则相对较弱,当夹角大于 90° 时,表明该环境不适合作为试点。结果表明,5 个试验点的代表性强弱依次为 E_4 、 E_5 、 E_2 、 E_3 、 E_1 (图 5)。在品种区域试验中,环境向量长度是评估试点筛选品种能力强弱的关键指标,其长度与区分力成正比,即长度越长区分力越强;相反,环境向量的长度越短,表明该试点的区分力相对较弱。本次区域试验中,5 个试点 E_4 、 E_3 、 E_5 、 E_2 、 E_1 ,对品种的区分力强弱依次递减。两个环境向量间夹角可以反映试点环境间的相关性,夹角小于 90° 表示正相关,大于 90° 表示负相关,等于 90° 说明两个试点环境不相关,夹角越趋近于 0° ,表明试点环境越相似^[18]。本试验中, E_1 和 E_3 、 E_2 、 E_4 和 E_5 两两之间均存在紧密的正相关,而 E_2 、 E_5 和 E_1 、 E_3 两两之间都存在明显的负相关,表明为不同类型的生态区。因此,本试验中的 E_4 是理想的区试点,既具有代表性又具有区分力,能够很好地选择高产且稳产的品种,这与利用 AMMI 模型分析的结果一致。

2.2.4 青稞品种排名及地点排名 根据 GGE 双标图,以平均环境轴箭头为圆心绘制的同心圆能反映品种或试点的综合排名,越靠近圆心的品种或试点,其丰产性和稳产性就越好。综合排名靠前的品种为 G_7 、 G_{11} 、 G_5 、 G_8 , 试点排名依次为 E_4 、 E_5 、 E_2 、 E_1 、 E_3 (图 6 和图 7)。

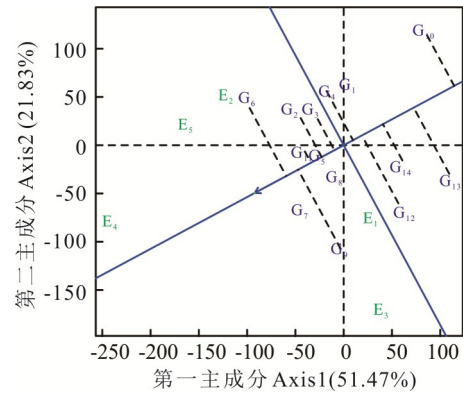


图 3 GGE 双标图分析青稞品种的丰产性和稳产性
Fig. 3 The yield ability and stability of hulless barley varieties were analyzed by GGE biplot

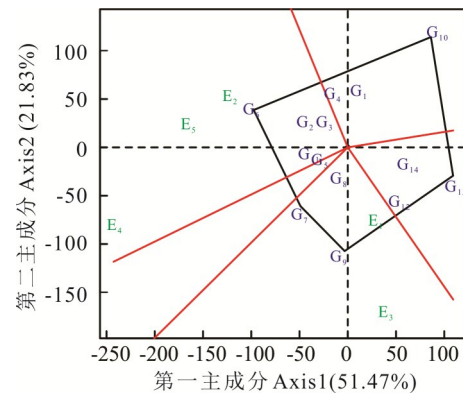


图 4 GGE 双标图分析青稞品种的适应性
Fig. 4 The adaptability of hulless barley varieties was analyzed by GGE biplot

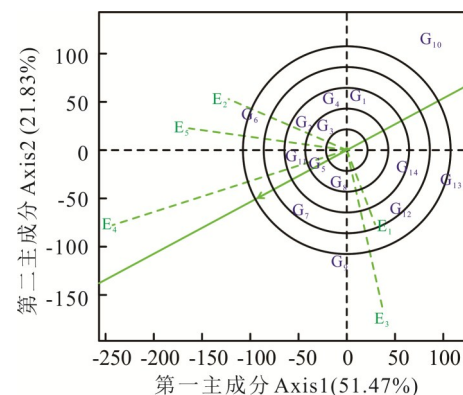


图 5 GGE 双标图分析青稞各试点的区分力和代表性
Fig. 5 Discrimination and representativeness of hulless barley regional test sites were analyzed by GGE biplot

3 讨论

作物品种的丰产性、稳产性和适应性是现代农业生产中的重要指标,决定了一个品种在不同种植环境下的表现和推广应用价值。本研究基于R语言软件的AMMI模型和GGE双标图对四川省2023年青稞新品种(系)区域试验进行了分析讨论,方差分析结果表明,产量在品种间、环境间以及品种×环境间均表现出极显著差异。AMMI模型评价出高产稳产的2个品种为 $G_5(1277)$ 和 $G_8(10450)$,GGE双标图鉴定出高产稳产的3个品种为 $G_7(1325)$ 、 $G_5(1277)$ 和 G_{11} (阿青6号)。而根据AMM模型和GGE双标图分析结果, $G_7(1325)$ 的丰产性和平均产量均排第一,具有显著的增产潜力,但其稳产性均低于对照品种 G_{11} (阿青6号),因此不能将其归类为高产稳产品种。此外,试点的代表性和区分力也是育种工作者关心的问题^[11]。在本研究中,AMMI模型与稳定性参数分析结果显示 E_4 (阿坝县)和 E_3 (壤塘县)为较好的试点,而GGE双标图表明 E_4 (阿坝县)为最佳的试验点,两者分析结果高度一致。综合以上结果,两种模型下产量居于前列的品种有 $G_5(1277)$ 、 $G_7(1325)$ 、 $G_9(10462)$ 、 G_{11} (阿青6号),稳产性较好的品种有 $G_5(1277)$ 、 $G_8(10450)$ 、 G_{11} (阿青6号),理想的区试点为 E_4 (阿坝县)。综上分析,既高产又稳产的品种为 $G_5(1277)$ 、 G_{11} (阿青6号),适宜在 E_2 (若尔盖县)、 E_4 (阿坝县)、 E_5 (松潘县)种植; $G_7(1325)$ 、 $G_9(10462)$ 为高产但稳定性较一般的品种,适合在特定区域 E_1 (马尔康市)、 E_3 (壤塘县)种植。

区域试验是鉴定新品种(系)高产稳产的重要途径之一,对确定品种适宜的种植区域、栽培模式,以及生产推广应用具有重要意义。在试验数据的分析中,传统的方差分析可以回答不同因素对试验指标的影响是否显著,但不能更为直观地回答品种与环境的交互作用^[8]。AMMI模型和GGE双标图作为区域试验中常用的分析工具,其中AMMI模型是将方差分析和主成分分析相结合,侧重分析GEI效应,对基因型评价存在局限性;而GGE双标图能直观显示主成分分析结果,便于从育种和推广的角度对基因型进行综合评价,强调G+GEI效应分析^[9,27-28]。如本研究中 G_{11} (阿青6号)在GGE双标图中显示其在多个生态区域中均表现出较好的丰产性和稳定性,但在AMMI模型中则表现较差。为更加准确地预测和评价品种在不同地区的适应性,需综合采用多种分析方法,规避单一方法的局限性,确保对品种的实际表现有更为深入且全面的把握^[24]。本研究创新结合AMMI模型和GGE双标图,实现了评价体系的优势互补,全面客观地对参试青稞品种的丰产性、稳产性、适应性,以及各试点的区分力和代表性做出综合评价,将对新品种的选育、推广工作起到重要的推动作用。

4 结论

本研究基于R语言的AMMI模型和GGE双标图对川西高原的青稞品种区域试验进行联合分析讨论,得出以下结论:1)本次参试的品种中,1277、阿青6号为高产、稳产的青稞品种,综合表现较好,适宜在若尔盖县、阿坝县、松潘县推广种植,1325、10462为高产但稳产性较一般的品种,适宜在特定区域推广种植。2)综合分析表明,阿坝县为本次试验中筛选高产稳产品种的最佳试验点,既有较强的代表性,又有很好的区分力。

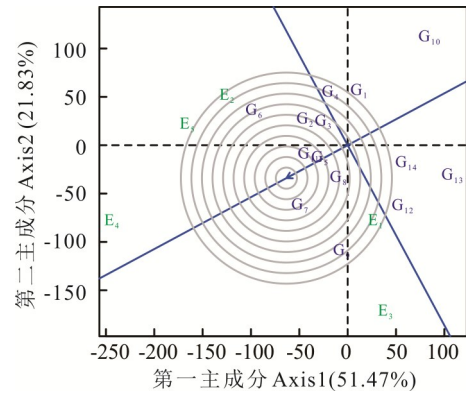


图6 GGE双标图分析青稞的综合排名

Fig. 6 Comprehensive ranking of hulless barley was analyzed by GGE biplot

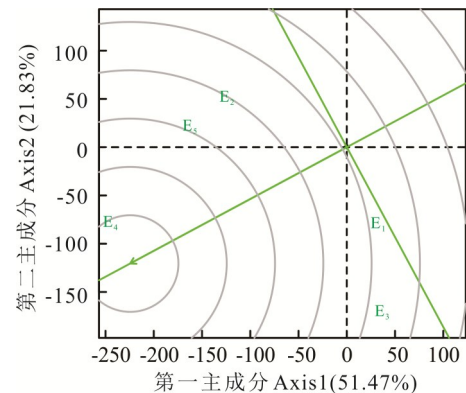


图7 GGE双标图分析青稞各试点的综合排名

Fig. 7 Comprehensive ranking of hulless barley regional test sites was analyzed by GGE biplot

参考文献 References:

- [1] Xu T W. Classification and identification of varieties of Chinese cultivated barley. *Scientia Agricultura Sinica*, 1982, 15(6): 39–47.
徐廷文. 中国栽培大麦的分类和变种鉴定. *中国农业科学*, 1982, 15(6): 39–47.
- [2] La G, Li M D, Zhang G P, *et al.* Barley: a potential cereal for producing healthy and functional foods. *Food Quality and Safety*, 2022(2): 142–154.
- [3] Wang Y C, Wang H J, Li B C, *et al.* GGE-biplot based study on cultivar stability and representativeness of test sites for highland barley. *Grassland and Turf*, 2018, 38(5): 22–27.
王育才, 王化俊, 李葆春, 等. 基于GGE双标图对青稞区试点代表性及品系稳定性的分析. *草原与草坪*, 2018, 38(5): 22–27.
- [4] Lu J, Yu B, Jiang M, *et al.* Assessment of genetic diversity in 58 highland barley germplasm resources. (2024-08-08)[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20240808.0850.008.html>.
卢晶, 余波, 江溢, 等. 58份青稞种质资源遗传多样性评价. (2024-08-08)[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20240808.0850.008.html>.
- [5] Liu M J, Guo J W, Sang A P, *et al.* Results of regional experiment of highland barley varieties in Gannan Hezuo. *Barley and Cereal Sciences*, 2015(2): 42–44.
刘梅金, 郭建伟, 桑安平, 等. 青稞品种区域试验甘南合作试点结果. *大麦与谷类科学*, 2015(2): 42–44.
- [6] Mou X H. Hulless barley cultivation techniques and promotion strategies of highland barley in Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture. *The Farmers Consultant*, 2021(23): 55–56, 138.
牟学红. 阿坝州青稞高产栽培技术与推广策略. *农家参谋*, 2021(23): 55–56, 138.
- [7] Liu T H, Tu Y, Li S Z, *et al.* Research progress and prospect of highland barley breeding in Sichuan Province. *Barley and Cereal Sciences*, 2023, 40(4): 1–5, 10.
刘廷辉, 涂洋, 李氏昭, 等. 四川省青稞育种研究进展与展望. *大麦与谷类科学*, 2023, 40(4): 1–5, 10.
- [8] Shao Q S, Liang J Z, Yang L, *et al.* Screening of winter wheat varieties in dry land of mountainous areas of Ningxia based on AMMI model and GGE biplot. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2020, 61(4): 1–4.
邵千顺, 梁继忠, 杨琳, 等. 基于AMMI模型和GGE双标图的宁夏山区旱地冬小麦品种筛选试验研究. *宁夏农林科技*, 2020, 61(4): 1–4.
- [9] Duan J L, Dong B, Chen G R, *et al.* Analysis of regional soybean test in Gansu based on AMMI model and GGE biplot. (2024-04-20)[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240418.1738.024.html>.
段佳霖, 董博, 陈光荣, 等. 基于AMMI模型和GGE双标图对甘肃大豆区域试验的分析. (2024-04-20)[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240418.1738.024.html>.
- [10] Huang D M, Xie X Z, Bai G P, *et al.* Application of AMMI model and GGE biplot in rape regional trial of Hubei. *Hubei Agricultural Sciences*, 2018, 57(12): 24–29.
黄大明, 谢雄泽, 白桂萍, 等. AMMI模型和GGE双标图在湖北省油菜区域试验中的应用. *湖北农业科学*, 2018, 57(12): 24–29.
- [11] Zhang H J, Wang H J, Ma X L, *et al.* Yield stability of cultivars and representativeness of test sites in barley regional rest of northern China barley cultivars based on GGE-biplot analysis. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(9): 1250–1256.
张海娟, 王化俊, 马小乐, 等. 基于GGE双标图的北方大麦区试品种稳产性及试点代表性评价. *麦类作物学报*, 2015, 35(9): 1250–1256.
- [12] Zhang Z F, Fu X F, Liu J Q, *et al.* Analysis on site discrimination and yield stability of oat varieties. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(3): 515–519.
张志芬, 付晓峰, 刘俊青, 等. 裸燕麦区域试验中地点鉴别力和育成品种稳产性分析. *麦类作物学报*, 2010, 30(3): 515–519.
- [13] Gauch H G, Zobel R W. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*, 1997, 37(2): 311–326.
- [14] Yan C L, Bai W Q, Guo C, *et al.* AMMI model analysis on the stability and adaptability of highland barley variety. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 157–162.
颜昌兰, 白文琴, 郭超, 等. 青稞品种稳定性及适应性的AMMI模型分析. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 157–162.
- [15] Zhang K D, Zhang F Q, Dong B, *et al.* Application evaluation of AMMI model and GGE biplot based on R language in soybean regional test. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(13): 140–145.

- 张恺东, 张凡巧, 董博, 等. 基于R语言的AMMI模型和GGE双标图在大豆区试中的应用评价. 中国农学通报, 2024, 40(13): 140–145.
- [16] Yan W K, Tinker N A. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype \times environment interaction. *Crop Science*, 2005, 45(3): 1004–1006.
- [17] Yue H W, Wei J W, Liu P C, *et al.* Stability and adaptability assessment for the selection of elite maize cultivars based on AMMI model and GGE-biplot. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 24–37.
岳海旺, 魏建伟, 刘朋程, 等. 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. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 24–37.
- [18] Yan W K. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1805–1819.
严威凯. 双标图分析在农作物品种多点试验中的应用. 作物学报, 2010, 36(11): 1805–1819.
- [19] Zhu Y B, Fan X Q, Ji W T, *et al.* Comprehensive evaluation of regional trials for the spring maize hybrids in Northwest China based on AMMI model and GGE biplot. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(12): 15–24.
朱艳彬, 樊晓琴, 吉闻天, 等. 基于AMMI模型和GGE双标图的西北春玉米品种区域试验综合评价. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 15–24.
- [20] Li W Q, Zhi X G, Zhao J H, *et al.* Analysis of the maize regional experiment based on the AMMI model and GGE biplot. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2023, 2(7): 607–610.
李伟琦, 支小刚, 赵建华, 等. 基于AMMI模型和GGE双标图的玉米区域试验分析. 寒旱农业科学, 2023, 2(7): 607–610.
- [21] Xie J X, Xiao Z W, Li X, *et al.* Stability differences of quality traits in high-quality hybrid rice. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, 18: 101346.
- [22] Mu L H, Chang K Q, Du Y P, *et al.* Analysis of stable yield adaptability of *Fagopyrum tataricum* varieties in different climate regions of Ningxia using AMMI model and GGE double label map. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2024(2): 8–14.
穆兰海, 常克勤, 杜燕萍, 等. AMMI模型和GGE双标图对宁夏不同气候类型区苦荞品种稳产性适应性分析. 黑龙江农业科学, 2024(2): 8–14.
- [23] Chang S H, Wang J X, Geng Z, *et al.* Analysis and evaluation of regional test results of soybean based on AMMI and GGE models. (2024-05-09)[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20240508.1538.008.html>.
常世豪, 王金霞, 耿臻, 等. 基于AMMI和GGE模型对大豆区域试验进行综合评价. (2024-05-09)[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20240508.1538.008.html>.
- [24] Wang X Y, Cheng J, Gao S, *et al.* Evaluation of adaptability of naked oat varieties in the alpine region of North China based on the AMMI model and GGE biplot. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(12): 76–84.
王星宇, 程静, 高生, 等. 应用AMMI模型和GGE双标图评价裸燕麦品种在华北高寒区的适应性. 草业学报, 2022, 31(12): 76–84.
- [25] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Specifications for the food crop variety trials: NY/T 3923-2021. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
中华人民共和国农业农村部. 农作物品种试验规范 粮食作物: NY/T 3923-2021. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [26] Zhang Z, Lu C, Xiang Z H. Analysis of varieties stability based on AMMI model. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(3): 304–309.
张泽, 鲁成, 向仲怀. 基于AMMI模型的品种稳定性分析. 作物学报, 1998, 24(3): 304–309.
- [27] Wan X, Liu Y, Xiao B Z. The adaptability of rice varieties tested in the middle and lower reaches of Yangtze River was analyzed based on AMMI model and GGE biplot. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2024, 45(1): 7–11, 25.
万星, 刘焱, 肖本泽. 基于AMMI模型和GGE双标图分析长江中下游水稻区试品种的适应性. 中南农业科技, 2024, 45(1): 7–11, 25.
- [28] Guo J W, Xu D L, Wang G P, *et al.* Stability analysis of hullless barley varieties in multi-year multipoint regional trials in of Gansu based on GGE model. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(11): 3677–3684.
郭建炜, 徐冬丽, 王国平, 等. 基于GGE模型对甘肃省青稞多年多点区试品种稳定性分析. 分子植物育种, 2024, 22(11): 3677–3684.