

AMMI 模型在马铃薯产量及农艺性状分析中的应用

李亚杰^{1,2}, 范士杰^{1,3}, 张俊莲^{1,2}, 白江平^{1,2*}, 王 蒂^{1,2*}

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室-甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 贵州省马铃薯研究所, 贵州 贵阳 550006)

摘 要: 使用 AMMI 模型对 2010—2011 年贵州省马铃薯区域试验结果中的产量及其农艺性状, 包括株高、单株块茎数、单株主茎数、生育期、单株块茎重量进行了分析。分析结果表明, AMMI 模型中的主成分轴能够解释产量、单株主茎数、单株块茎数、生育期、单株块茎质量等性状 90.64%, 90%, 86%, 82%, 81% 交互作用平方和, 在参加贵州省马铃薯区试的 11 个品种中, W04-36, 0402-2, 米拉等品种稳定性、适应性与丰产性表现良好, W04-36 可作为大面积推广种植品种, 0402-7, 宣薯 2 号, 2005-1, 盘薯 1 号, 丽薯 200202, 威薯 001 号, B01-41-4 产量表现一般, 黑美人产量表现差。参加区试的 5 个试点中, 通过对其鉴别力参数 D_i 进行计算可知, 毕节和安顺地区 D_i 值大, 鉴别力高, 对品种具有较强选择性, 六盘水地区的鉴别力最低, 对品种选择性弱, 适合多品种种植。

关键词: AMMI 模型; 马铃薯; 产量; 农艺性状

中图分类号: S5320038 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0048-13

Application of AMMI model in evaluation of yield and agronomic traits of potato

LI Ya-jie^{1,2}, FAN Shi-jie^{1,3}, ZHANG Jun-lian^{1,2}, BAI Jiang-ping^{1,2*}, WANG Di^{1,2*}

(1. Gansu Province Key Lab of Aridland Crop Science-Gansu Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Guizhou Potato Research Institute, Guiyang, Guizhou 550006, China)

Abstract: The aim of this study is to use AMMI model to analyze yield and agronomic traits, including plant height, tuber quantity per plant, stem quantity per plant, mature days, and tuber fresh weight per plant, in 2010—2011 potato regional test results in Guizhou province. The study results showed that the interact principle component of AMMI model is capable of explaining 90.64%, 90%, 86%, 82%, 81% of total sum of squares of yield, tuber quantity per plant, stem quantity per plant, mature days, tuber fresh weight per plant, respectively. The species stability, adaptability and high yield ability of three varieties, W04-36, 0402-2 and Mila, were better than rest species among the eleven of species tested in Guizhou potato regional test. W04-36 can be promoted and planted in large areas. Yield ability of Heimeiren was the worst among all the tested varieties. Among the five test sites, D_i values of Bijie and Anshun were larger than others. Both sites have a high discriminability for variety. Liupanshui has the lowest discriminability for variety; therefore it is suitable for planting many different species.

Keywords: AMMI model; potato; yield; agronomic traits

品种区域试验是农作物新品种推广环节中的重要组成部分。作为鉴定评价作物品种丰产性、稳定性和适应性的有效办法, 品种区域试验也是现在农业生产中不可缺少的部分, 而在最终的产量评估中, 现行的一些统计分析方法, 如方差分析等手段并不

能完全对影响产量的误差来源进行精准分析, 而且也没有对作物品种的稳定性与品种对种植区的适应性进行分析。由于参加区域试验的品种在不同地点的产量表现往往不一致, 这种差异表明品种的产量不仅受到自身基因的影响, 而且与环境因素有密切

收稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD06B03); 甘肃省重大专项项目(1102NKDA025)

作者简介: 李亚杰(1986—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: liyajie_2008@163.com。

* 通信作者: 白江平(1978—), 男, 甘肃天水人, 副教授, 主要从事作物育种研究。E-mail: baijp@gsau.edu.cn。

王 蒂(1955—), 男, 陕西长安人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物育种研究。E-mail: wangd@gansu.edu.cn。

关系,所以产生了环境与基因互作效应导致了品种产量表现的差异。

近年来,一种主效可加互作可乘模型(AMMI模型)开始应用于作物品种的稳定性与适应性分析,它将方差分析与主成分分析有效地结合在一起,将乘积形式的交互作用加入常规的基因型与环境的加性模型中,这种方法不仅能分析交互作用的显著性,而且还能估计出交互作用所占的比例大小^[1]。AMMI模型最早由Williams提出^[2],在国内AMMI模型应用比较广泛,涉及作物栽培及园艺方面等^[3-7]。AMMI以双标图作为有效表达途径,将环境与基因型的互作效应直观地通过坐标轴表示出来,从而定量地描绘了环境与基因型交互效应。

在国外,AMMI模型应用的主要作物包括棉花^[8],玉米^[9],水稻^[10],谷子^[11],豆类^[12]。Gauch^[13]将AMMI模型与其它模型进行了比较,最终发现AMMI模型是进行品种选育和分析品种适应性的最佳工具。目前在国内AMMI模型应用比较广泛,涉及作物栽培及园艺方面等^[3-7]。

贵州省是我国西南地区主要马铃薯种植地区,贵州大部分地区年平均气温在13℃~17℃之间,平均相对湿度在80%左右,平均降雨量达到1 000~1 400 mm,而马铃薯具有喜温凉湿润,喜光,不耐高温,干旱的特性,依靠其优越的地理环境与气候环境,马铃薯成为当地的主要粮食兼经济作物。作为四倍体作物,马铃薯产量形成不仅受复杂遗传背景影响,而且受制于种植地区的自然气候条件。但贵州省地形复杂,有高山、丘陵、盆地,环境差异较大,形成多种生态气候类型,而且马铃薯的种植区分布较多,对不同的生态类型形成了不同的适应性,很难有一个主品种可以满足贵州全省的马铃薯的生产需求。因此,在今后的育种推广工作中,选育适宜当地多种自然气候条件的栽培种是贵州马铃薯生产提高的重要途径,同时品种的稳定性、丰产性、适应性也是选育过程中重要参考指标。

本文主要利用AMMI模型,根据贵州省2010—2011年两年的区试试验数据,对参试马铃薯品种的稳定性、丰产性和对种植区的适应性进行分析,探讨研究马铃薯品种在贵州的合理布局,为特定品种选择最佳种植地点,同时为作物育种提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2010—2011年参加贵州省马铃薯区域试验有

11个品种(系),分别为B01-41-4(G1),宣薯2号(G2),丽薯200202(G3),2005-1(G4),W04-36(G5),0402-7(G6),0402-2(G7),盘薯1号(G8),威薯001号(G9),黑美人(G10),米拉(G11),其中米拉为对照品种(CK),如表1、表2所示。

1.2 试验地概况

区域试点5个,即安顺(E1),毕节(E2),凤冈(E3),六盘水(E4),威宁(E5),各试点海拔高度、环境平均温度、湿度具有差异,如图1所示。

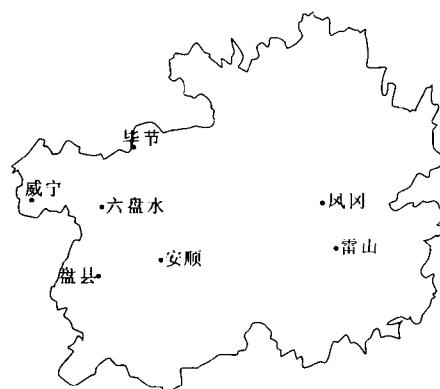


图1 区域试验地点分布图

Fig.1 The distribution of different locations in Guizhou

1.3 测定项目及试验方法

考察项目包括小区产量(kg)与产量组成性状,即生育期(d),单株主茎数(个·株⁻¹),单株块茎数(个·株⁻¹),单株块茎质量(g·株⁻¹)。

区域试验采用随机区组排列,重复3次,每小区5行,播种80株。小区长4.5 m,宽3 m,面积为13.34 m²,组株、行距为28 cm和60 cm。小区四周及重复间走道0.5 m,试验地四周设保护行。

2 模型应用

2.1 AMMI分析

AMMI模型^[14]将方差分析与主成分分析结合,形成一种主效可加互作可乘模型,具体模型为:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sum_{n=1}^N \lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn} + \theta_{ij} \quad (1)$$

式中, Y_{ij} 是在环境*i*中基因型*j*的产量; μ 代表总体平均值; α_i 是第*i*个环境型的主效应; β_j 是第*j*个基因型的主效应; λ_n 为第*n*个交互作用主成分轴奇异值的平方根; γ_{in} 是第*n*轴的环境特征向量; δ_{jn} 是第*n*轴的基因型特征向量;*n*是在模型主成分分析中主成分因子轴的总个数,参数*n*表示能合理解释*G*×*E*互作所需要的乘积项数目,包含*n*个乘积项的AMMI模型可写为AMMI_{*n*}; θ_{ij} 为相应的残差。

表 1 区域试验品种基本情况
Table 1 The basic information of different cultivars

品种(系) Cultivar/line	品种(系)代码 Code of Cultivar/line	选育单位 Breeding institutes	种植年份 Years
B01 - 41 - 4	G1	贵州省马铃薯研究所,威宁县农业科学研究所,云南省农科院经作所 Potato Institute of Guizhou Province; Agricultural Science Research Institute of Weining County; Commercial Crop Research Institution of Agricultural Science Research Academy of Yunnan Province	2010—2011
宣薯 2 号 Xuanshu2	G2	贵州省马铃薯研究所 Potato Institute of Guizhou Province	2010—2011
丽薯 200202 Lishu 00202	G3	贵州省马铃薯研究所 Potato Institute of Guizhou Province	2010—2011
2005 - 1	G4	威宁县农业科学研究所,贵州省马铃薯研究所,云南省农科院经作所 Agricultural Science Research Institute of WeiNing County; Potato Institute of Guizhou Province; Commercial Crop Research Institution of Agricultural Science Research Academy of Yunnan Province	2010—2011
W04 - 36	G5	威宁县农业科学研究所,贵州省马铃薯研究所,云南省农科院经作所 Agricultural Science Research Institute of WeiNing County; Potato Institute of Guizhou Province; Commercial Crop Research Institution of Agricultural Science Research Academy of Yunnan Province	2010—2011
0402 - 7	G6	毕节地区农科所 Agricultural Science Research Institute of Bijie	2010—2011
0402 - 2	G7	毕节地区农科所 Agricultural Science Research Institute of Bijie	2010—2011
盘薯 1 号 Panshu 1	G8	盘县农技站 Agrotechnical Station of Pan County	2010—2011
威薯 001 号 Weishu 001	G9	威宁县种子站 Seed Station of Weining County	2010—2011
黑美人 Heimeiren	G10	贵州省马铃薯研究所 Potato Institute of Guizhou Province	2010—2011
米拉(CK) Mila	G11	威宁县农业科学研究所 Agricultural Science Research Institute of WeiNing County	2010—2011

表 2 2010—2011 年区试试验品种平均产量
Table 2 Average yield in different locations during 2010—2011

品种(系) Cultivars/Line	安顺 E1 Anshun	毕节 E2 Bijie	凤冈 E3 Fenggang	六盘水 E4 Liupanshui	威宁 E5 Weining	小区平均产量 Average yield/kg	产量 Yield/(kg·667m ⁻²)
B01 - 41 - 4	22.78	43.90	21.73	29.03	38.62	31.21	1560.50
宣薯 2 号 Xuanshu 2	42.52	40.25	23.45	39.12	32.77	35.62	1781.00
丽薯 200202 Lishu200202	21.70	36.48	22.05	28.53	31.93	28.14	1407.00
2005 - 1	37.79	32.68	26.75	34.90	41.80	34.79	1739.50
W04 - 36	34.91	42.68	22.15	34.33	30.66	32.95	1647.50
0402 - 7	42.25	45.90	23.58	35.68	30.31	35.54	1777.00
0402 - 2	42.13	43.87	23.38	35.82	31.54	35.35	1767.50
盘薯 1 号 Panshu 1	24.01	26.27	21.67	27.43	27.48	25.37	1268.50
威薯 001 号 Weishu 001	45.55	50.65	22.97	34.97	34.81	37.79	1889.50
黑美人 Heimeiren	19.23	15.07	22.98	14.78	28.05	20.02	1001.00
米拉(CK) Mila	39.57	41.50	21.72	32.62	27.65	32.61	1630.50

如果试验设有重复,则误差项为 ϵ_{ijr} ,它等于 Y_{ij} 平均值与 r 个重复的单个观察值之间的偏差,并具有可加性,最终模型结果为:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sum_{n=1}^N \lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn} + \epsilon_{ijr} \quad (2)$$
$$i = 1, 2, \cdots, E; j = 1, 2, \cdots, G; n = 1, 2, \cdots, R$$

2.2 双标图

双标图^[15]是直观解释 AMMI 模型分析结果的有效工具,在一张图上同时给出了品种和试点。分为两种类型双标图,一种是以品种与地点的平均产量为横坐标,IPCA1 为纵坐标的 AMMI1 双标图,另一种是以 IPCA1 为横坐标,纵坐标为 IPCA2 的 AMMI2 双标图。AMMI1 双标图便于直观地进行丰产性和稳产的结合分析,AMMI2 双标图可分析各个品种在各试点的交互作用大小。

在 AMMI1 双标图中包括了对品种的稳定性与适应性分析。在稳定性分析中,水平方向上,品种与试点的分布范围大小,决定了其对总的变异的贡献大小,在垂直方向上,品种的 IPCA1 值的绝对值越大,表明其与试点的交互作用越大,品种的稳定性越差,IPCA1 值的绝对值越小,表明其与试点的交互作用越小,品种越稳定。

在适应性分析方面,过纵坐标零点做一条水平线,过零点水平线上下的品种与位于同侧地点之间的互作为正向,与位于另一侧地点间的互作为负向,品种与试点具有正向交互作用,表明这些品种在这些地点具有特殊适应性,适合该地区种植,可能取得较高产量。品种与试点具有较大正向互作作用,表明这些品种在这些地区具有特殊适应性,可能会取得较高产量。

在 AMMI2 双标图中,越接近坐标原点的品种或试点越稳定。如果品种的垂直投影落在试点与原点的连线或外延线上,则表明该品种与该试点有正向

交互作用,该品种在该试点有一定的特殊适应性,如果距离越大,则品种与该试点的交互作用越大,在该试点可能取得较高产量;如果投影落在连线的反向延线上,则该品种与该试点有负向交互作用,表明在该试点不利于该品种产量的增加。

2.3 稳定性参数

$$D_{i(j)} = \sqrt{\sum_{r=1}^N (IPCA)_{i(j)r}^2} \quad r = 1, 2, 3, \cdots, N(3)$$

式中, $D_{i(j)}$ 为稳定性参数^[16],在 $D_{i(j)}$ 中包括两个参数, D_i 为试点的鉴别力参数, D_j 为品种的稳定性参数; $IPCA_{i(j)r}$ 为第 j 个基因和 i 个环境在 N 个 IPCA 上的得分, D_i 值越大,表明试点对品种的鉴别力越高, D_j 值越小,表明品种的稳定性越高。

2.4 数据处理

方差分析(ANOVA),AMMI 分析及相关性分析均利用 SAS 软件(9.1 版本)。

3 结果与分析

3.1 方差分析及 AMMI 分析

对 2010—2011 年马铃薯在贵州省不同地区的产量表现进行方差分析。从表 3 中可知环境、基因、环境×基因互作的差异性都达到极显著水平,不同种植环境之间出现极显著差异性,表明试点的选择对产量有一定的意义;不同品种之间出现的极显著差异,表明品种的选择具有差异性;品种与试点的互作差异性达到极显著,表明品种的稳定性容易受到环境的影响。由于试点分布广泛,处于不同的生态环境下,外界条件引起环境、基因、环境与基因互作出现差异性,但是在常规方差分析中,没有出现对环境与基因互作信息的解释,只进行显著性差异的描述,表明常规方差分析对此类实验结果的分析有一定的局限性。

表 3 产量方差分析
Table 3 The ANOVA analysis of the yield

变异来源 Source	自由度 DF	平方和 Sum of Squares	均方 Mean Squares	F 检验 F-test	P
环境 ENV	4	8103.619426	2025.904857	23.35**	<0.0001
基因型 GEN	10	8452.127299	845.212730	9.74**	<0.0001
环境×基因 ENV×GEN	40	7584.974107	189.624353	2.19**	<0.0001

注: * 表示达到 5% 显著水平; ** 表示达到 1% 极显著水平。下同。
Note: * Denote the significance level at 5% probability; ** denote the significance level at 1% probability. Hereinafter the same.

为减少常规方差分析的局限性,利用 AMMI 模型对以上数据进行分析。如表 4 中所示,模型对总

平方和进行分解,IPCA1 与 IPCA2 的平方和分别占到总变异平方和的 64.46% 与 26.18%,第 1 乘积项

达到极显著水平,第 2 乘积项达到了显著水平,前两项共解释了 90.64% 的 $G \times E$ 平方和。可以看出, AMMI 模型分析比常规方差分析更能准确地分析环境与基因型的互作信息。

表 4 产量 AMMI 分析
Table 4 The AMMI analysis of the yield

变异来源 Source	平方和 Sum of Squares	占总平方和/% Percent	自由度 DF	均方 Mean Squares	F 检验 F-test	P
第 1 乘积项 IPCA1	2444.80	64.46	13	188.062	2.36718**	0.00915
第 2 乘积项 IPCA2	992.93	26.18	11	90.266	1.84021*	0.03100
第 3 乘积项 IPCA3	189.67	5.00	9	21.075	0.24286	0.98780
第 4 乘积项 IPCA4	165.09	4.35	7	23.584	0.27177	0.96449

3.2 品种与试点的适应性分析

图 2 给出的是基于试点和品种平均产量的 IP-CAI 值的双标图,图中地点和品种在水平方向上的分散程度反映其效应的变异情况;品种在垂直方向上的分布反映了 $G \times E$ 在大小和方向上的差异,且 IP-CA1 的绝对值愈大表明其交互作用愈大,反之则交互作用越小,越稳定,在过零点水平线上线下的品种与位于同侧地点之间的互作为正向,与位于另一侧地点间的互作为负向。在水平方向上环境比品种的分布范围广,说明环境间的变异大于品种间的变异。水平方向上,品种 G9 丰产性高,品种 G10 丰产性低。试点 E1,E2,E4,E5 的品种丰产性较高,而试点 E3 的品种丰产性较低。

垂直方向上,过纵坐标零点做一条水平线,品种 G1,G3,G4,G8,G10 与试点 E3,E5 具有正向交互作用,对这些地区具有特殊适应性,可能会得到较高产量,品种 G10 的 IPCA 值的绝对值最大,易受环境变化影响,稳定性差,品种 G2,G5,G6,G7,G9,G11 与试点 E1,E2,E4 具有正向交互作用,具有特殊适应性。试点 IPCA 的绝对值大小顺序为 $E5 > E3 > E2 > E1 > E4$ 。试点 E5 对品种鉴别力较强,要求在环境 E5 种植的品种需要具有特殊适应性,试点 E4 的鉴别力较低,大多数参试品种对 E4 有较好的适应性。

图 3 给出的是基于试点和品种 IPCA1 和 IPCA2 值的双标图。在图中可以看出,品种 G5 接近原点,稳定性较强。试点 E1 与试点 E2 到原点的连线具有较大距离,表明试点 E1,E2 与其种植品种具有较大交互作用。品种 10 到试点 E3,E5 与原点连线的垂直投影到原点具有较大距离,所以品种 10 与试点 E3,E5 具有较大正向交互作用,在该地区具有特殊适应性,可能取得较高产量。品种 G2,G5,G6,G7,G9,G11 在试点 E3,E5 的反向延长线上有投影,表明这些品种与试点 E3,E5 为负向交互作用,不适宜在该试点种植,相反,这些品种在试点 E1,E2,E4 与原

点连线上有垂直投影,且为正向交互,在试点 E1,E2,E4 具有特殊适应性,可以种植。

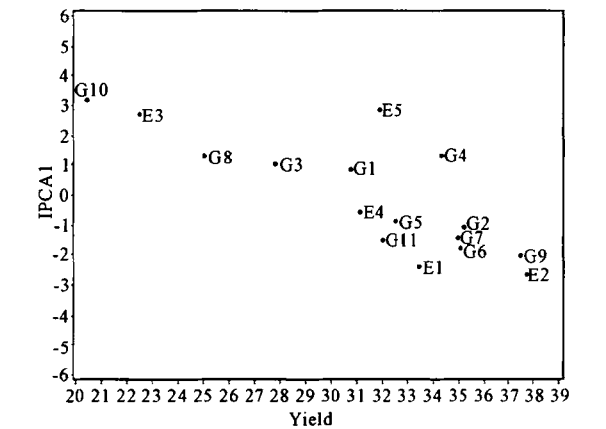


图 2 AMMI1 双标图
Fig.2 The biplot of AMMI1

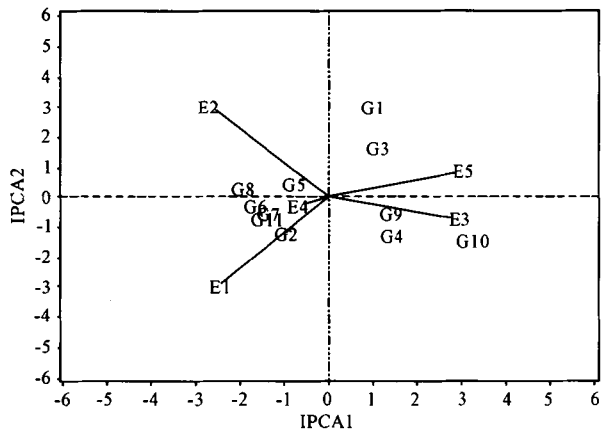


图 3 AMMI2 双标图
Fig.3 The biplot of AMMI2

3.3 品种的最佳适应性分析

为了明确品种在各试点的适应性,进行最佳区域适应性分析,在图 4 中,把品种的标志点用虚线连接起来,形成一个把所有品种都囊括在内的多边形,即蓝线区域内,从原点(0,0)起作各边的垂线,把整个双标图分为若干个扇区(虚线所标识),不同的试

点落于各个区内,每个区内的顶角品种即为该扇区内所有试点的最优品种。

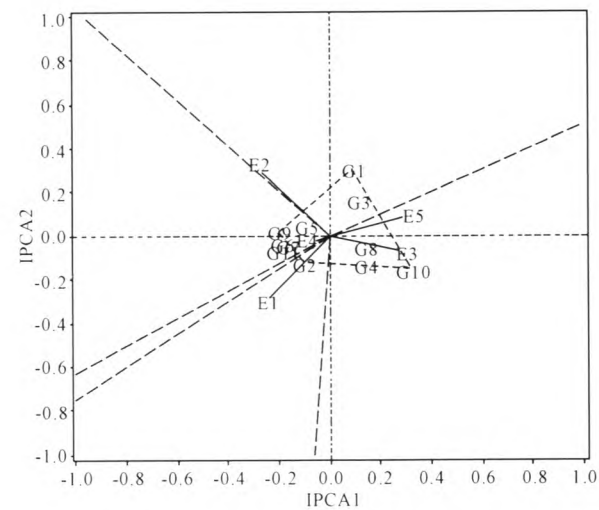


图 4 基于 AMMI2 双标图的品种最佳适应图

Fig.4 The suitable figure for cultivar based on the biplot of AMMI2

在图中,虚线将双标图分为 5 部分,每一部分包含品种及相应的种植区,可以看出,品种 G4,G8,G10 包含在试点 E3、E5 的区域内,而品种 G10 处于多边

形的顶角,表明品种 G10 是试点 E3、E5 的最优种植品种,依次类推,可知,品种 G1 是试点 E2 的最优种植品种,品种 G2 是试点 E1 的最优种植品种,品种 G9 是试点 E4 的最优种植品种。

3.4 马铃薯产量相关性状的 AMMI 分析

马铃薯产量的 AMMI 分析解释了环境与基因型的互作信息,为了更清楚地了解 AMMI 模型对环境与基因交互作用的解释,对组成马铃薯产量的农艺性状,如主茎数,生育期,株高,单株块茎数,单株块茎质量作相关性分析,结果表明,株高与产量呈负相关,相关系数为 - 0.09451,单株主茎数、生育期、单株块茎数、单株块茎质量与产量呈正相关,单株块茎数、单株块茎质量与产量相关系数为 0.33,0.49,达到极显著水平,生育期、主茎数与产量为正相关,相关系数分别为 0.19,0.24,且达到了显著水平。

不同性状之间具有一定的相关性,株高与单株块茎数,单株主茎数为正相关,且达到极显著水平。株高与单株块茎质量呈负相关,达极显著水平。单株块茎数与主茎数呈正相关,达到了极显著水平。生育期与单株块茎数、主茎数、单株块茎质量呈正相关,达到了显著水平。

表 5 马铃薯产量与农艺性状相关性

Table 5 The correlation of yield and agronomic traits

项目 Item	株高 Plant height	单株块茎数 Tuber quantity per plant	单株主茎数 Stem quantity per plant	生育期 Mature days	单株块茎质量 Tuber fresh weight per plant	产量 Yield
株高 Plant height	1.00000	0.54677 ^{**} < 0.0001	0.25429 ^{**} 0.0073	0.03497 0.7169	- 0.31718 0.0007	- 0.09451 0.3260
单株块茎数 Tuber quantity per plant	0.54677 ^{**} < 0.0001	1.00000	0.44800 ^{**} < 0.0001	0.20614 0.0307	0.09930 0.3020	0.33435 ^{**} 0.0004
单株主茎数 Stem quantity per plant	0.25429 ^{**} 0.0073	0.44800 ^{**} < 0.0001	1.00000	0.02211 [*] 0.04478	0.06043 0.5306	0.19416 [*] 0.0421
生育期 Mature days	0.03497 0.7169	0.20614 [*] 0.0307	0.02211 [*] 0.04478	1.00000	0.00289 ^{**} 0.00761	0.23946 [*] 0.0118
单株块茎质量 Tuber fresh weight per plant	- 0.31718 0.0007	0.09930 0.3020	0.06043 0.5306	0.00289 ^{**} 0.00761	1.00000	0.48512 ^{**} < 0.0001
产量 Yield	- 0.09451 0.3260	0.33435 ^{**} 0.0004	0.19416 [*] 0.0421	0.23946 [*] 0.0118	0.48512 ^{**} < 0.0001	1.00000

3.4.1 AMMI 双标图 通过分析 2010—2011 年贵州省马铃薯产量与其性状的相关性,得知单株主茎数、生育期、单株块茎数、单株块茎质量与产量具有不同程度的相关性,所以进一步利用 AMMI 模型进行产量性状的分析,如图 5 所示。在图 5(a)中,单株主茎数的变化趋势与产量的变化情况基本一致,试点 E2 的品种与品种 G5 的主茎数数量最多,品种

G10 的主茎数数量最少,试点 E4 的主茎数个数较少,大多数品种的单株主茎数为 3~4 个。在垂直方向上,品种 G1,G3,G4,G9 离水平线较近,表明这些品种的稳定性较强,试点 E2 的 IPCA 值最大,环境与品种的交互效应最大,试点 E2 的鉴别力较强,对于品种具有选择性,而试点 E3,E4,E5 的 IPCA 值的绝对值较小,说明该试点鉴别力低,大多数品种适合在

该地区种植。在图 5(b)中,品种与试点对单株块茎数的影响,在水平方向上,品种 G2,G9,G4,G6,G7,G5 的单株块茎数较多,试点 E1,E2,E5 的品种单株块茎数较多,品种 G10 的单株块茎数最少,其变化趋势与图 5(a)中的主茎数变化基本一致,在垂直方向上,试点 E2,E3,E4,E5 距离水平线较近,适合多品种种植,其品种的稳定性最高。在图 5(c)中,各品种均为中晚熟,在水平方向上,试点 E1,E2,E4 的生育期较长,品种 G10,G8 的生育期较短,试点 E5 的生育期最短。在垂直方向上,品种 G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,G9,G11 比较接近水平线,其品种的

生育期稳定性较高,试点 E2 的 IPCA 值较大,表明在试点 E2 其品种的生育期容易受到环境的影响。而品种 G10 的 IPCA 值较高,说明该品种的生育期容易受到环境因素的影响。在图 5(d)中,水平方向上,品种 G2,G4,G6,G7,G9 的单株块茎质量与试点 E1,E4,E5 的品种单株块茎质量较高,相反试点 E3 的品种单株块茎质量较低;在垂直方向上,品种 G1,G2,G3,G6,G9,G11 接近水平线,表明其品种的单株块茎质量与环境自身的因素交互作用小,比较稳定。品种 G10 的 IPCA 值较高,表明品种 G10 单株块茎质量受到环境的影响较大,与前面产量变化情况一致。

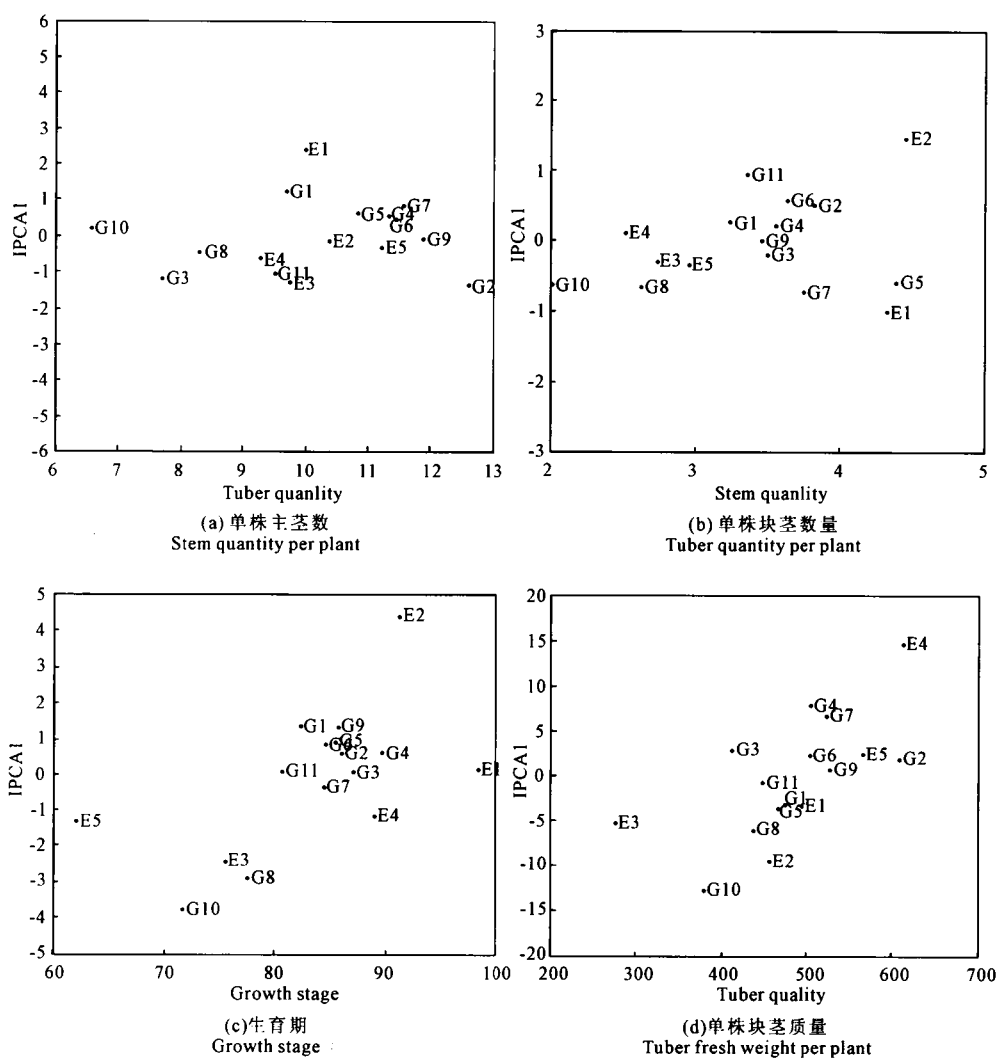


图 5 以 IPCA1 和农艺性状为坐标的 AMMI1 双标图

Fig.5 The biplot of AMMI1 based on IPCA1 and different traits

3.4.2 AMMI2 双标图 在图 6(a)中,从植株的主茎数上来看,试点 E1,E2 与原点的连线距离最长,其种植品种与环境具有较大交互作用,相反,试点 E4 的品种与环境的交互作用小,表明其环境鉴别力低。品种 G11 在试点 E2 与原点的连线上具有最大投影,品种 G11 与试点 E2 具有特殊适应性,品种

G5,G7 在试点 E1 的投影距离相等,在试点 E1 具有相同适应性。在图 6(b)中,依据环境与基因交互作用对单株块茎数影响情况,试点 E1 的种植品种与环境具有较大交互作用,品种 G1,G4,G7,G9,G10 可在试点 E1 种植,品种 G2,G11 与试点 E3 的交互作用较大,具有特殊适应性。在图 6(c)中,试点 E2 与

原点的连线距离最长,其试点的鉴别力高,与品种的交互作用大,品种 G8,G10 离原点较远,其稳定性差,易受环境影响。品种 G11 在试点 E3,E4 与原点的连线上具有较大投影距离,适合在试点 E3,E4 种

植。在图 6(d)中,试点 E4 的鉴别力最高,品种 G3,G4,G7 与试点 E4 具有相同特殊适应性,品种 G10 在试点 E2 具有特殊适应性,品种 G9 离原点最近,其稳定性最高。

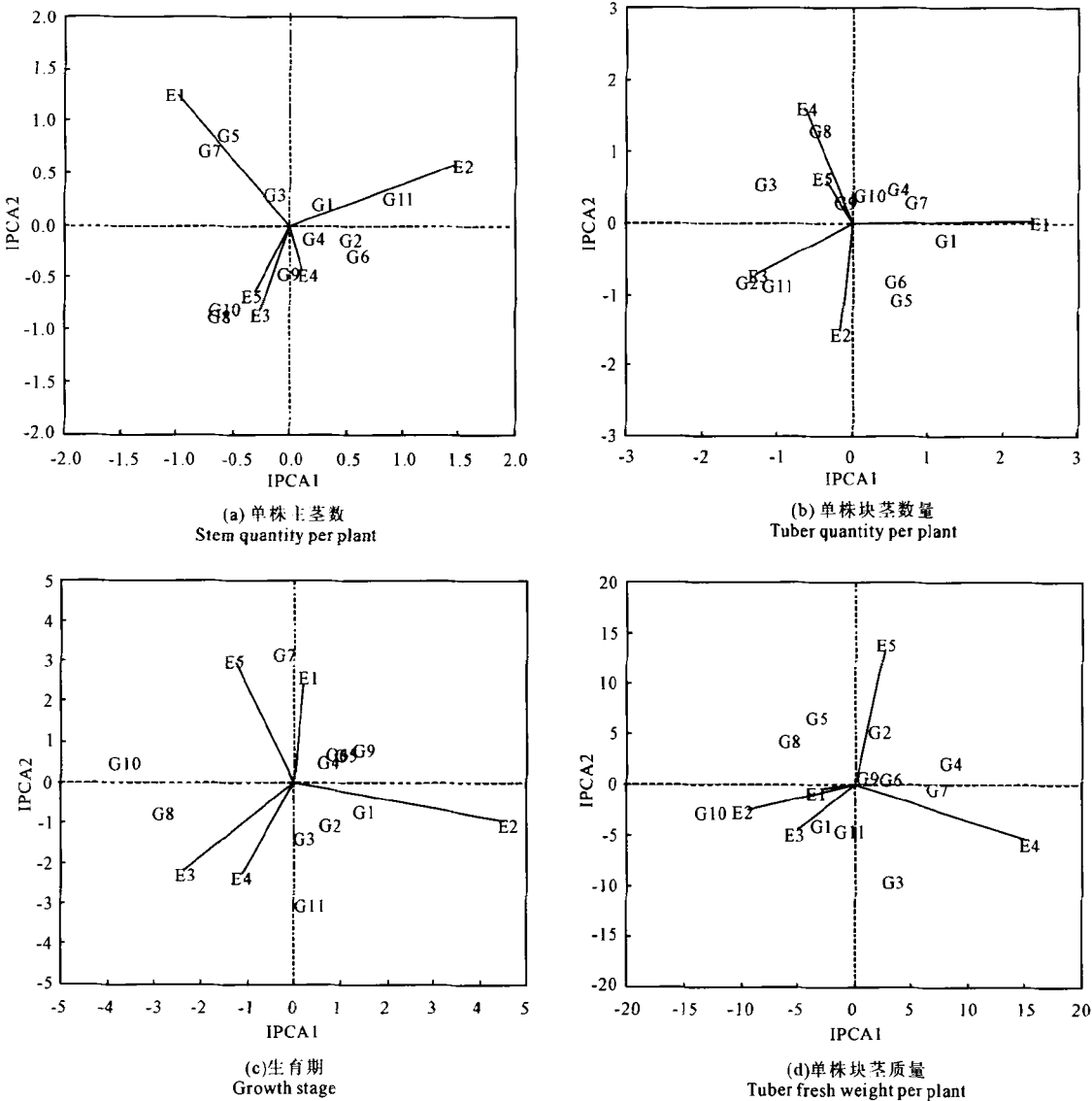


图 6 以 IPCA1 和 IPCA2 为坐标的 AMMI2 双标图

Fig.6 The biplot of AMMI2 based on IPCA1 and IPCA2

3.5 相关农艺性状最佳适应性分析图

前面根据产量表现情况作了品种最佳适应分析图,根据部分农艺性状与产量的相关性,我们进一步对各个农艺性状进行最佳适应性分析。

如图 7 所示,在图 7(a)中,品种 G1,G2,G4,G6,G11 的主茎数在试点 E2 的环境下较多,其中品种 G11 的主茎数数量最多;品种 G8,G9,G10 适合在试点 E3,E4,E5 种植,尤其是品种 G10,G8 是试点 E3,E4,E5 的最优种植品种。依次类推,品种 G5 的主茎数量在试点 E1 表现最优。在图 7(b)中,本试验中种植品种全为中晚熟型,根据生育期与产量呈正相

关的关系,生育期增长随之产量增高,可知,品种 G7 是试点 E5,E1 的最优种植品种,品种 G11 是试点 E4 的最优种植品种,品种 G1 是试点 E2 的最优种植品种。试点 E3 里没有发现最优种植品种,表明试点 E3 的环境条件不适宜中晚熟品种种植。在图 7(c)中,由于单株块茎质量与产量的相关性最大,直接影响到产量表现,选择具有较高单株块茎质量的品种对于最终产量具有重要意义,品种 G1,G8,G10 适宜在试点 E1,E2,E3 的环境条件下种植,但是品种 G10 是试点 E1,E2,E3 的最优种植品种,品种 G5 是试点 E5 的最优种植品种,品种 G2,G4,G6,G7,G9 在试点

E4 种植,但是,从图中发现,品种 G3,G11 没有出现最佳适宜种植区,表明品种 G3,G11 在单株块茎质量方面对于环境具有较强选择性,适应性较差。在图 7(d)中,品种 G8,G9,G10 适宜在试点 E4,E5 种植,但品种 G8 是最优种植品种,依次类推,品种 G1,G7 种植在试点 E1 中,品种 G1 是最优种植品种,品种 G5 是试点 E2 的最优种植品种,品种 G2,G11 适

宜种植在试点 E3 中,品种 G2 是最佳种植品种。但是,在图 7(d)中,品种 G3 的单株块茎数没有出现最佳适应区域,与图 7(c)中表现情况相似。

根据各个产量性状的最佳适应性分析图,可知,11 个品种具有各自的稳定性范围,对于 5 个试点具有不同的适应性,而各个试点对于不同的品种也有一定鉴别力。

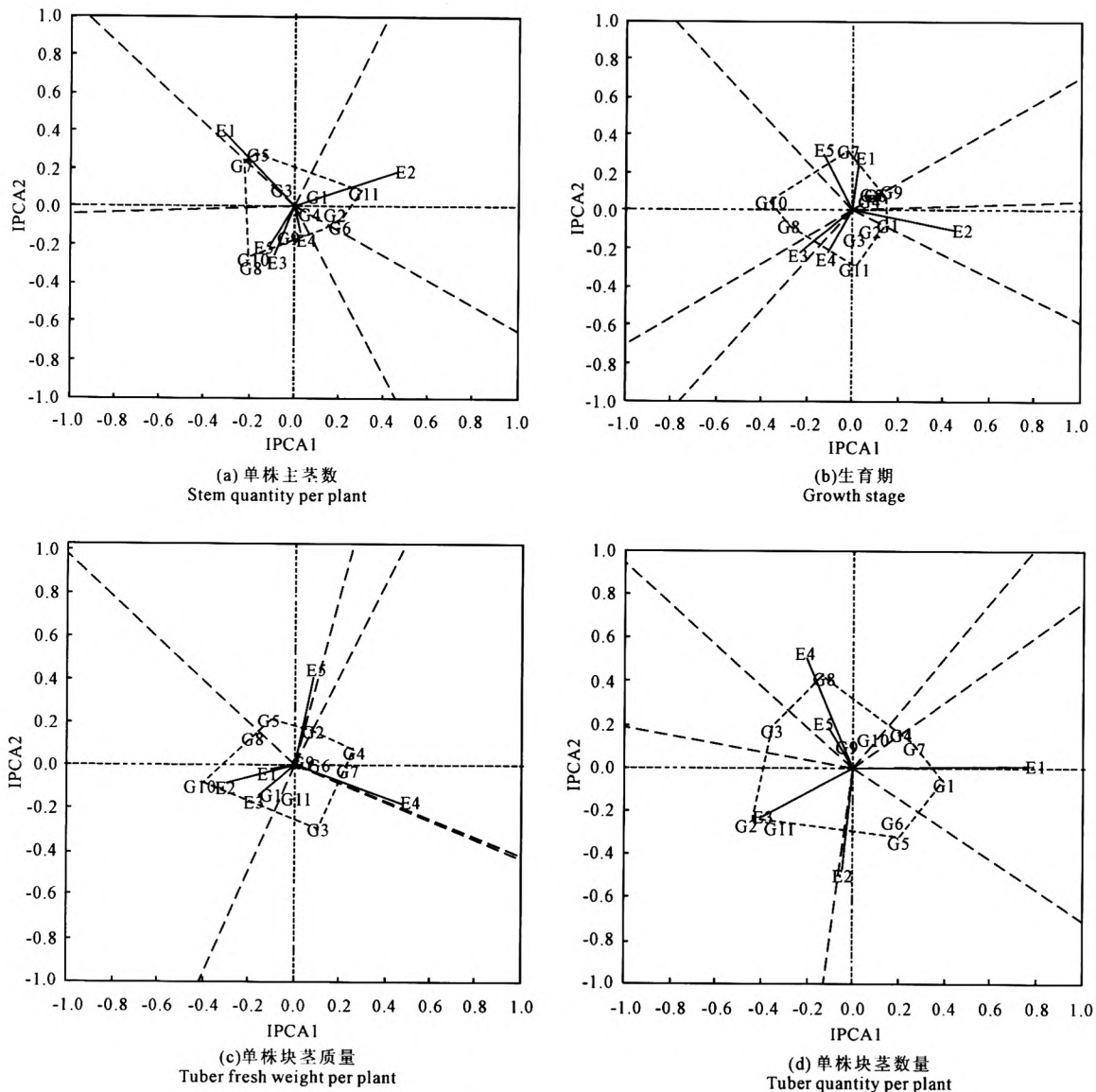


图 7 基于 AMMI2 模型的品种最佳适应图

Fig.7 The adaptable distribution of cultivars based on AMMI2

在表 7 中,对于主茎数,AMMI 模型的第一乘积项解释了 47% 的 $G \times E$ 的交互作用,并且达到极显著水平,第二乘积项解释了 42% 的 $G \times E$ 的交互作用,达到了极显著水平,AMMI 模型共解释了 90% 的交互作用。单株块茎数中,前三乘积项分别解释了 44%,23%,19% 的环境与基因交互作用达到了显著水平。生育期中,前两个乘积项分别解释了 46%,

36% 的 $G \times E$ 交互作用达到了显著水平。单株块茎质量,前两个乘积项分别解释了 58%,24% 的 $G \times E$ 交互作用,且达到了极显著水平。根据以上结果表明,主茎数、单株块茎数、生育期、单株块茎质量分别解释了 90%,86%,82%,81% 的基因环境互作,因此,AMMI 模型能很好地解释各性状基因型与环境的互作。

表 6 马铃薯主要性状方差分析结果
Table 6 ANOVA analysis of agronomic traits in potato

项目 Item	变异来源 Source	自由度 DF	平方和 Sum of square	均方 Mean of square	F 检验 F-test	P
单株主茎数 Stem quantity per plant	环境 ENV	4	0.2212641	0.00553160	77.62 ^{**}	<0.0001
	基因 GEN	10	0.01158733	0.00115873	16.26 ^{**}	<0.0001
	环境×基因 ENV×GEN	40	0.01377806	0.00034445	4.83 ^{**}	<0.0001
单株块茎数 Tuber quantity per plant	环境 ENV	4	0.01423980	0.00355995	4.428 ^{**}	0.0018
	基因 GEN	10	0.10868615	0.01086862	13.48 ^{**}	<0.0001
	环境×基因 ENV×GEN	40	0.08679133	0.00216978	2.69 ^{**}	<0.0001
生育期 Mature days	环境 ENV	4	5.40845733	1.35211433	89.73 ^{**}	<0.0001
	基因 GEN	10	0.72652114	0.07265211	4.82 ^{**}	<0.0001
	环境×基因 ENV×GEN	40	1.05607282	0.02640182	1.75 ^{**}	0.0052
单株块茎质量 Tuber fresh weight per plant	环境 ENV	4	4.43436361	1.10859090	122.67 ^{**}	<0.0001
	基因 GEN	10	1.17161061	0.11716106	12.96 ^{**}	<0.0001
	环境×基因 ENV×GEN	40	1.32754721	0.03318868	3.67 ^{**}	<0.0001

表 7 马铃薯主要性状 AMMI 分析结果
Table 7 AMMI analysis of agronomic traits in potato

项目 Item	变异来源 Source	自由度 DF	平方和 Sum of square	均方 Mean of square	F 检验 F-test	P
单株主茎数 Stem quantity per plant	IPCA1	13	47.2280	0.000250273	3.51166 ^{**}	0.00004
	IPCA2	11	42.9154	0.000268769	3.77118 ^{**}	0.00005
	IPCA3	9	7.0707	0.000054122	0.75941	0.65413
	IPCA4	7	2.7860	0.000027418	0.38471	0.91095
单株块茎数 Tuber quantity per plant	IPCA1	13	43.8529	0.001463865	1.81619 [*]	0.03054
	IPCA2	11	22.7272	0.000896600	1.61239 [*]	0.04131
	IPCA3	9	19.2953	0.000930368	1.55429 [*]	0.04477
	IPCA4	7	14.1247	0.000875645	1.08639	0.37212
生育期 Mature days	IPCA1	13	46.2099	0.019178	1.57271 [*]	0.02905
	IPCA2	11	35.8232	0.017571	1.46603 [*]	0.03074
	IPCA3	9	14.8602	0.008908	0.59118	0.80402
	IPCA4	7	3.1067	0.002394	0.15890	0.99265
单株块茎质量 Tuber fresh weight per plant	IPCA1	13	57.8024	0.029514	3.26590 ^{**}	0.00013
	IPCA2	11	23.5603	0.014217	2.57322 ^{**}	0.00231
	IPCA3	9	13.2599	0.009780	1.08218	0.37600
	IPCA4	7	5.3773	0.005099	0.56425	0.78469

前面对品种与试点的适应性进行了定性分析，以双标图的形式解释了品种与试点互作效应，为了能够全面利用极显著与显著乘积项的信息，我们进一步采用 AMMI 模型稳定参数进行分析。AMMI 模型稳定参数是定量判定试点鉴别力与品种稳定性的

重要指标，其中 D_i 值越大，表明试点对品种的鉴别力越高， D_j 值越小，表明品种的稳定性越高。如表 8,9 所示，在产量方面，品种稳定性大小为 W04-36 > 0402-2 > 米拉 > 0402-7 > 宣薯 2 号 > 2005-1 > 盘薯 1 号 > 丽薯 200202 > 威薯 001 号 > B01-41-4

> 黑美人,但是各品种的稳定性在单株块茎数、单株主茎数、单株块茎质量、生育期方面出现差异,单株主茎数的变幅最大,生育期变幅最小,品种的变化对于单株主茎数的影响最大,对生育期的影响最小,可能因为种植品种全为中晚熟品种,生育期的可变化范围较小。

试点的鉴别力在各农艺性状方面发生变化,试点对产量鉴别力高低为六盘水>凤冈>威宁>安顺

> 毕节,而对于其它农艺性状的鉴别力发生了一定变化,单株主茎数与单株块茎质量的变化相对较大,生育期变化最小。通过计算品种与试点的性状稳定性参数发现,马铃薯不同农艺性状的稳定性在各环境与品种之间表现出差异。根据本项研究中的各性状在不同品种与试点的稳定性差异情况,可知在马铃薯产量评估过程中,应尽可能地考虑品种的单株块茎数与单株块茎质量的变化情况。

表 8 品种产量及其性状稳定性参数 D_j
Table 8 The D_j value of cultivars/breeding lines

品种(系) Cultivars/line	代码 Codes	产量 Yield	单株块茎数 Tuber quantity per plant	单株主茎数 Stem quantity per plant	单株块茎质量 Tuber fresh weight per plant	生育期 Mature days
B01-41-4	G1	3.25 (2)	0.17 (1)	0.04 (4)	0.22 (7)	0.18 (5)
宣薯 2 号 Xuanshu 2	G2	1.78 (7)	0.16 (2)	0.07 (3)	0.28 (4)	0.15 (7)
丽薯 200202 Lishu200202	G3	2.19 (4)	0.13 (5)	0.07 (3)	0.34 (3)	0.18 (5)
2005-1	G4	1.90 (6)	0.09 (8)	0.04 (4)	0.35 (2)	0.16 (6)
W04-36	G5	1.11 (11)	0.12 (6)	0.11 (1)	0.26 (5)	0.13 (8)
0402-7	G6	1.66 (8)	0.15 (3)	0.07 (3)	0.09 (9)	0.12 (9)
0402-2	G7	1.43 (10)	0.10 (7)	0.10 (2)	0.25 (6)	0.34 (4)
盘薯 1 号 Panshu1	G8	2.00 (5)	0.15 (3)	0.10 (2)	0.26 (5)	0.35 (3)
威薯 001 号 Weishu001	G9	2.52 (3)	0.12 (6)	0.04 (4)	0.07 (10)	0.18 (5)
黑美人 Heimeiren	G10	3.72 (1)	0.10 (7)	0.10 (2)	0.41 (1)	0.38 (2)
米拉 Mila	G11	1.50 (9)	0.14 (4)	0.11 (1)	0.15 (8)	0.39 (1)

注:括号内数字表示次序号。下同。
Note: The number in parenthesis denotes the rank. Hereinafter the same.

表 9 各试点鉴别力参数 D_i
Table 9 The D_i value in different locations

试点 Locations	代码 Codes	产量 Yield	单株块茎数 Tuber quantity per plant	单株主茎数 Stem quantity per plant	单株块茎质量 Tuber fresh weight per plant	生育期 Growth stage
安顺 Anshun	E1	3.90 (2)	0.24 (1)	0.16 (1)	0.10 (5)	0.38 (3)
毕节 Bijie	E2	3.97 (1)	0.20 (3)	0.16 (1)	0.41 (2)	0.47 (1)
凤冈 Fenggang	E3	2.83 (4)	0.18 (4)	0.11 (2)	0.37 (4)	0.33 (4)
六盘水 Liupanshui	E4	2.46 (5)	0.21 (2)	0.04 (3)	0.51 (1)	0.26 (5)
威宁 Weining	E5	3.13 (3)	0.12 (5)	0.11 (2)	0.42 (3)	0.41 (2)

4 结 论

通过对贵州省两年区试数据的分析表明,AMMI 模型可以帮助我们对品种进行更可靠的稳定性分析,鉴别一些具有特殊品种基因型和环境互作效应的马铃薯基因型,为针对某一特殊环境的具有特殊

适应性的品种的育种提供有价值的信息。
综合以上试验分析结果可知,2010-2011 年参加贵州省马铃薯区试的 11 个品种中,W04-36、0402-2、米拉品种稳定性、适应性与丰产性表现良好,比较适应贵州省的多种生态气候条件,其中品种 W04-36 可作为大面积推广种植品种,0402-7、宣薯 2

号、2005-1、盘薯1号、丽薯200202、威薯001号、B01-41-4平均产量表现一般,黑美人产量表现最差。在对各品种的农艺性状进行分析后发现,产量表现优良的品种在其它农艺性状方面出现了一定差异,这种产量性状相互关系的差异是区域试验中品种间普遍存在的,其原因可能一方面是受外界环境气候影响,同时也会受到田间栽培管理措施影响。

同时,在参加区试的5个试点中,通过对其鉴别力 D_i 进行计算可知,毕节和安顺地区 D_i 值大,鉴别力高,对品种具有较强选择性。品种B01-41-4是毕节地区的最优种植品种,宣薯2号是安顺地区的最优种植品种。六盘水地区的鉴别力最低,对品种选择性小,适合多品种种植。根据最佳适应性分析图,威薯001号是六盘水的最佳适应品种,而且在所有品种中,威薯001号的产量最高。但是根据主要选育目标是为了确定一个能够大面积推广种植的品种,因此品种B01-41-4、宣薯2号、威薯001号只在一定区域内产量表现较好,不能作为大面积推广主栽品种,而品种W04-36适应整个贵州地区的生态环境条件,稳定性高,产量表现好,可作为主栽品种。

通过与其它分析方法的比较,AMMI模型中的极显著项与显著项能解释马铃薯产量、主茎数、单株块茎数、生育期、单株块茎质量等性状90.64%,90%,86%,82%,81%交互作用平方和。

5 讨论

在作物品种区域试验中, $G \times E$ 交互信息对于作物的经济产量非常重要,是育种工作者在新品种选育过程中不可忽视的重要因素。因此面对各种环境因素对作物生长的影响,有必要进行具有理想性状品种的选择和揭示品种间变化的差异。Nachit^[17]等证明AMMI模型在解释交互效应方面比一般线性回归分析更有效,AMMI模型更能解释环境与基因互作关系,能客观地描述品种的稳定性与试点的鉴别力,并且可借助双标图直观形象地对品种的稳定性差异进行分析,而且可以深入理解品种和试点互作,明确试点间的相互关系,制定合理的育种目标与栽培管理方式。P. Thangavel等^[12]利用AMMI模型分析了绿豆在干旱地区的基因与环境的交互作用,证明了干旱胁迫能够导致绿豆较好的营养生长,引起大部分同化物分配到根系生长,最终得到高产。在本试验中,运用了常规方差分析与AMMI分析的方法对贵州区域试验的数据进行了系统分析,根据分析结果,提出了适应于贵州省的主栽品种。

在田间统计分析方法的发展过程中,也出现了不同的经典分析方法,Yan^[18]提出一种同时包含基因型主效应与基因型与环境互作效应的双标图,简称“GGE”双标图,但是,GGE双标图具有局限性,只有当第一主效应值或者前两个主效应值能够解释由交互效应引起较大部分差异性时,从图中读取的信息才是有效的。金文林等^[19]提出了运用秩次分析模型,主要用于多年多点不完全平衡的试验资料。林华等^[20]运用秩次分析模型对不同基因型的芸豆进行了品种丰产性与稳定性分析,计算了各环境下参试品种的分级值 H_{1Mi} 和秩次值 H_{2Mi} 以及环境区分指数 Y_M ,分析了不同品种在环境下的适应性与稳定性。温振民^[21]运用高稳系数(HSC)法分析玉米杂交种高产稳产性,但是对玉米田间农艺性状无法鉴定。但是不同的统计分析模型在不同的应用方面具有局限性,科研工作者在具体使用时需要根据自己的要求进行选择。

在试验中,不仅对产量进行了分析,同时也对影响马铃薯产量的一些相关性状做了相关性分析。结果表明:除了株高与产量不具有相关性外,其它性状如生育期、主茎数、单株块茎数、单株块茎质量都与产量呈正相关。进一步对这些产量性状进行方差分析与AMMI模型解释,同时利用AMMI模型解释产量组成性状基因型与环境的互作,而且也分析比较各个性状对产量的影响。通过综合分析包括产量、单株主茎数、单株块茎质量、单株块茎数等性状的表现,并没有发现同时具备较强稳定性与适应性的品种。所以说,品种的稳定性与适应性在某一性状上表现优良,不能完全意味着在其它性状表现一致^[10]。

在进行马铃薯品种稳定性与适应性分析时,需进行多年多点试验。沈希宏等^[22]研究了水稻品种 $\times$ 环境互作及其与气候因子的关系,发现 $G \times E$ 互作与作物生育期内的气温、日照、降雨等都存在一些显著的相关关系,证明了气候因子是决定 $G \times E$ 互作的一项重要环境因子。人类无法在田间试验中控制气候条件变化的影响,但是应尽可能地减少外界条件对试验地造成的误差。马铃薯产量来自于块茎,而地下组织容易受到土壤条件的影响,包括水分含量、土壤温度、土壤养分等,因此在种植马铃薯之前,为了减少外界条件的影响,应该做到合理整地,水肥均一,保证最大程度地做到各个试点试验地的水肥情况一致,最后还要利用有效的数据处理方法以减少试验统计分析中的误差。

参考文献:

- [1] Gauch H G, Zobel R W. AMMI analysis of yield trials. Genotype – environment Interaction[M]. Florida: CRC Press, 1995.
- [2] Williams E J. The interpretation of interactions in factorial experiments [J]. Biometrika, 1952, 39: 65-81.
- [3] 郭天财, 马冬云, 朱云集, 等. 冬播小麦品种主要品质性状的基因型与环境及其互作效应分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 948-953.
- [4] 常磊, 柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3677-3684.
- [5] 杨志平, 何凤发, 王季春, 等. AMMI 模型在马铃薯品种区试中的适用性分析[J]. 西南农业大学学报, 2006, 28(2): 322-325.
- [6] 孙计平, 李雪君, 吴照辉, 等. 应用 AMMI 模型分析烤烟区试品种稳定性[J]. 中国农学通报, 2011, 27(19): 263-267.
- [7] 李艳艳, 丰震, 赵兰勇. 用 AMMI 模型分析玫瑰品种产花量的稳定性[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1761-1766.
- [8] Bilbro J D, Ray L L. Environmental stability and adaptation of several cotton cultivars[J]. Crop Sci, 1976, 16: 821-824.
- [9] Francis T R, Kannenberg L W. Yield stability studies in short-season maize I. A descriptive method for grouping Genotypes[J]. Can J Plant Sci, 1978, 58: 1029-1034.
- [10] Samonte, S O P B, Hernandez, J E. Genotype $\times$ Environment interactions of irrigated lowland rice II. Stability and adaptability analysis [J]. Crop Sci, 1991, 26(1): 7-14.
- [11] Misra R C, Das S, Patnaik M C. AMMI model analysis of stability and adaptability of late duration finger millet (*Eleusine coracana*) genotypes[J]. World Applied Sciences Journal, 2009, 6(12): 1650-1654.
- [12] Thangavel P, Anandan A, Eswaran R. AMMI analysis to comprehend genotype – by – environment ($G \times E$) interactions in rainfed grown mungbean (*Vigna radiata* L.) [J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(13): 1767-1775.
- [13] Hugh G. Gauch. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE [J]. Crop Sci, 2006, 46(1): 488-500.
- [14] 王磊, 杨仕华, 谢美贤, 等. AMMI 模型及其在作物区试数据分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 1997, 5(1): 39-46.
- [15] 王磊, McLaren C G, 杨仕华. 利用双标图分析作物区试数据[J]. 生物数学学报, 1997, 12(5): 557-563.
- [16] 张泽, 鲁成, 向仲怀. 基于 AMMI 模型的品种稳定性分析[J]. 作物学报, 1998, 24(3): 304-309.
- [17] Nachit M M, Nachit G, Ketata H, et al. Use of AMMI and linear regression models to analyze genotype-environment interaction in durum wheat[J]. Theor Appl Genet, 1992, 83: 597-601.
- [18] Yan W K, Hunt L A, Sheng Q L, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot [J]. Crop Sci, 2000, 40: 597-605.
- [19] 金文林. 作物区试中品种稳定性评价的秩次分析模型[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 926-930.
- [20] 林华, 高金锋, 高小丽, 等. 不同基因型芸豆品种丰产性及稳定性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 108-113.
- [21] 温振民. 用高温系数分析玉米杂交种高产、稳产性的探讨[J]. 作物学报, 1994, (4): 508-512.
- [22] 沈希宏, 杨世华, 谢美贤, 等. 水稻品种区域试验的品种 $\times$ 环境互作及其与气候因子的关系[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1): 31-36.
- [23] 李延, 刘星辉, 庄卫民, 等. 缺镁对龙眼光合作用的影响[J]. 园艺学报, 2001, 28(2): 102-106.
- [24] 张上隆, 郭延平, 陈屏昭, 等. 不同供磷水平对温州蜜柑叶片光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 186-191.
- [25] 肖祥希, 刘星辉, 杨宗武, 等. 铝胁迫对龙眼幼苗光合作用的影响[J]. 热带作物学报, 2005, 26(1): 63-69.
- [26] Pereira W E, Siqueira D L D, Martinez C A, et al. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminium stress[J]. J Plant Physiol, 2000, 157(5): 513-520.
- [27] 郭延平, 陈屏昭, 张良诚, 等. 缺磷胁迫加重柑橘叶片光合作用的光抑制及叶黄素循环的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 359-363.
- [28] 谷镜, 程晓建, 张敏. 环境因子对常绿树光合作用的影响[J]. 福建林业科技, 2009, 36(3): 270-274.
- [29] 邓义才, 陈荣. 钾对荔枝光合作用和呼吸作用的影响[J]. 华南农业大学学报, 1994, 15(4): 80-83.
- [30] 贾虎森, 蔡世英. 土壤干旱胁迫下钙处理对芒果幼苗光合作用的影响[J]. 果树学报, 2000, 17(1): 52-56.
- [31] 吴佳, 孙丙寅, 王敏. 地面覆盖对花椒林生理生态效应的影响[J]. 西北林学院学报, 2005, (4): 27-30.
- [32] 张自常, 李鸿伟, 王学明, 等. 覆草对旱稻直播稻产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1809-1818.
- [33] 柯世省, 陈模舜. 紫荆光合日变化及其与环境因子的关系[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2004, 24(3): 30-33.
- [34] 吴炫柯, 李永健, 李杨瑞. 不同生长期木薯品种气体交换特性的研究[J]. 西南农业学报, 2006, 19(3): 456-459.
- [35] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 地表覆盖及生理生态因子对苹果树光合特性的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 125-130.
- [36] 张守仁, 高荣孚, 王连军. 杂种杨无性系的光系统 II 放氧活性、光合色素及叶绿体超微结构对光胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 143-149.
- [37] 张坤, 王发林, 刘小勇, 等. 地面覆盖对果园土壤水分分布和果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(11): 125-130.
- [38] 尹晓宁, 马明, 等. 不同覆盖条件对陇东旱塬苹果园土壤水分及果实品质的影响[J]. 经济林研究, 2012, 30(1): 134-139.
- [39] 刘克长, 任中兴, 李中安, 等. 不同覆盖措施下龙廷杏梅园地小气候效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 1145-1148.
- [40] 徐胜利, 陈小青. 荒漠绿洲新梨 7 号梨园覆草节水效应的研究[J]. 新疆农业科学, 2003, 40(5): 257-261.

(上接第 25 页)