文章编号:1000-7601(2022)05-0013-11 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.02

基于 HIDAP 系统的马铃薯高代品系多性状综合分析

李亚杰[1,2],罗　磊[1,2],姚彦红[1,2],范　奕[1,2],边彩燕[3],李城德[3],董爱云[1,2],刘惠霞[1,2],李丰先[1,2],牛彩萍[1,2],韩儆仁[1,2],李德明[1,2]

(1. 定西市农业科学研究院,甘肃 定西 743000; 2. 甘肃省马铃薯工程技术研究中心,甘肃 定西 743000;
3. 甘肃省农业技术推广总站,甘肃 兰州 730000)

摘　要:为了更便捷清楚地将马铃薯新品种选育中高代品系的多性状因子进行综合分析评价,本文利用国际马铃薯中心开发的高交互性数据分析育种软件(HIDAP),对参与 2020 年定西市马铃薯多点试验的 14 个高代品系在 5 个试点的产量、薯块数量、商品薯率表现情况利用 AMMI 模型、GGE 双标图、Tai 稳定性模型结合方差显著性分析、联合回归等方法进行分析筛选评价。在 AMMI 分析图中,高代品系 0934-62 的产量、单株薯块数、商品薯率在垂直方向上的 IPCA 绝对值较小且在水平方向靠近最右侧;结合 GGE 双标图,高代品系 0934-62、1026-2、14137-20 处于水平线以上较高位置,其中品系 0934-62 位于水平线以上最远距离;在 Tai 模型分析中,根据高代品系在产量、块茎数量、商品薯率中 α_i 与 λ_i 参数的分布范围,可知稳定性高的品系为 0934-62、1026-2、1281-191。综合各分析结果可知,在参试的 14 个品系中,高代品系 0934-62 在产量、薯块数量、商品薯率中的稳定性与丰产性表现突出,高代品系 1026-2、1281-191、14137-20 表现良好,品系 1205-5 表现较差。HIDAP 软件通过自身所具有的评价系统利用多个数据分析模型,能够有效管理大量育种材料信息进行分析筛选并及时淘汰无用信息,减少成本支出,节约试验资源。

关键词:马铃薯;HIDAP;高代品系;多性状综合分析

中图分类号:S532;Q37　　**文献标志码**:A

Comprehensive analysis of potato high generation strains multiple traits based on HIDAP system

LI Yajie[1,2], LUO Lei[1,2], YAO Yanhong[1,2], FAN Yi[1,2], BIAN Caiyan[3], LI Chengde[3], DONG Aiyun[1,2], LIU Huixia[1,2], LI Fengxian[1,2], NIU Caiping[1,2], HAN Jingren[1,2], LI Deming[1,2]

(1. *Dingxi Academy of Agricultural Science*, *Dingxi*, *Gansu* 743000, *China*; 2. *Gansu Potato Engineering Technology Research Center*, *Dingxi*, *Gansu* 743000, *China*; 3. *Gansu Agricultural Technology Extension Station*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*)

Abstract: The purpose of this study was to comprehensively analyze and evaluate the multi-trait factors of high generation varieties in aspect of new potato variety breeding. The breeding software (HIDAP) developed by the international potato center was used. The yield, total number of potato tubers and marketable tubers rate for 14 potato high generation strains of multi-point test in five sites of Dingxi City were analyzed using the analysis of variance significance, AMMI model, the GGE-biplot and Tai stability in 2020. In the AMMI analysis diagram, the IPCA absolute values of yield, the number of tubers per plant and marketable tubers rate of high-generation varieties 0934-62 in the vertical direction were small and close to the right in the horizontal direction. Combined with the GGE biplot, the high-generation varieties 0934-62, 1026-2 and 14137-20 were in the higher position above the hori-

收稿日期:2021-11-03　　**修回日期**:2022-07-06

基金项目:定西市重点技术攻关专项(DX2022BZ38;DX2022AZ01);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-9);甘肃省科技重大专项(GZGG-2021-5);联合国世界粮食计划署甘肃省富锌马铃薯小农户试点项目(WFPGSPP-1)

作者简介:李亚杰(1986-),男,甘肃庆阳人,副研究员,主要从事马铃薯遗传育种及栽培技术研究。E-mail: liyajie_2008@163.com

通信作者:李德明(1963-),男,甘肃会宁人,推广研究员,主要从事马铃薯遗传育种及栽培技术研究。E-mail: dxlideming@163.com
韩儆仁(1973-),男,甘肃定西人,研究员,主要从事马铃薯栽培技术研究。E-mail: 18909320989@189.cn

zontal line, and the high-generation variety 0934-62 was the farthest distance above the horizontal line. In the Tai model analysis, the α_i and λ_i parameter distribution range of yield, the total number of potato tubers and marketable tubers rate of high-generation varieties were combined, and the varieties with high stability were 0934-62, 1026-2 and 1281-191. The results showed that among the 14 potato strains tested, the high generation variety 0934-62 had an outstanding performance in aspect of yield, the total number of potato tubers and marketable tubers rate. High generation varieties 1026-2, 1281-191 and 14137-20 showed better performance, while the high generation variety 1205-5 showed poor yield and stability compared with other varieties. HIDAP software effectively helped breeders manage a large amount of breeding material information, conduct analysis and screening, and timely eliminate through its own evaluation system and use of multiple data analysis models, to reduce the costs and save experimental resources.

Keywords: potato; HIDAP; high generation strain; comprehensive analysis of multiple traits

随着我国马铃薯主粮化战略的实施,主粮化产品加工成为战略实施的重要保障,对马铃薯新品种的目标性、功能性及品质加工性能提出相应要求,多种特色马铃薯新品种的选育工作成为研究重点。新品种选育中,高代品系的精确评价是优良品种审定的前提,决定品系能否进入区域试验环节,对大量参试材料的筛选成为重点工作。从单个性状进行评价分析,往往会造成优良育种材料及基因资源的丢失,利用综合性状对品种的稳定性、适应性进行评价分析是选育优良品种的基础条件。稳定性及适应性分析测定是品种审定命名的重要前期工作,在现有的研究报道中,在作物新品种选育中,从最初始的 Eberhart 和 Russell 模型[1](1966 年)、George C. C. Tai 模型[2](1971 年)、Shukla 模型[3](1972 年)、联合回归分析[4]等,到近年来出现的 AMMI[5]、GGE-biplot[6]等分析工具,均为育种家们准确把握品种的稳定性及适应性提供了帮助。

HIDAP(Highly interactive data analysis platform)为高交互性数据分析软件,属于 CIP 全球试验数据管理系统的一部分,主要包含数据收集、数据质量检测、数据分析等功能,与 CIP-BioMart 数据库建立连接形成数据共享。HIDAP 软件对国际马铃薯中心的无性系作物育种具有支持功能。HIDAP 基于之前的内部工具数据收集(Data Collector,DC)和无性系筛选(Clone Selector,CS)。目前对于 HIDAP 应用的相关学术论文还未检索到,本研究率先将 HIDAP 软件应用于马铃薯高代品系的相关数据系统分析。

本文主要利用 HIDAP 软件的数据高交互性处理分析原理,依据数据统计处理方法,以 2020 年定西市农科院在 5 个示范基地种植的 14 个马铃薯高代品系为分析对象,以产量、薯块数量、商品薯率性状表现为评价指标,对参试的 14 个马铃薯高代品系进行综合性分析筛选。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2020 年参加定西市农科院 5 个示范基地的 14 个马铃薯高代品系分别为 0934-62、1281-109、1281-191、1350-85、1293-14、14137-20、1275-38、1025-5、1026-2、0904-75、1125-36、1233-55、1035-8、1233-25,如表 1 所示。

表 1 参加 2020 年多点试验的 14 个马铃薯品系的基本信息

Table 1 Description of 14 potato genotypes evaluated in the multi-point test in 2020

编号 No.	名称 Genotype	代码 Entry code	类型 Type of genotype	亲本 Pedigree
1	0934-62	G1	栽培种 Cultivated species	定薯 1 号×陇薯 5 号 Dingshu#1×Longshu#5
2	1281-109	G2	栽培种 Cultivated species	定薯 1 号×青薯 10 号 Dingshu#1×Qingshu#10
3	1281-191	G3	栽培种 Cultivated species	定薯 1 号×青薯 10 号 Dingshu#1×Qingshu#10
4	1350-85	G4	栽培种 Cultivated species	定薯 3 号×陇薯 14 号 Dingshu#3×Longshu#14
5	1293-14	G5	栽培种 Cultivated species	定薯 3 号×大西洋 Dingshu#3×Atlantic
6	14137-20	G6	栽培种 Cultivated species	T22×青薯 9 号 T22×Qingshu#9
7	1275-38	G7	栽培种 Cultivated species	青薯 9 号×心里美 Qingshu#9×Xinlimei
8	1025-5	G8	栽培种 Cultivated species	定薯 3 号×T55 Dingshu#3×T55
9	1026-2	G9	栽培种 Cultivated species	定薯 1 号×农天 1 号 Dingshu#1×Nongtian#1
10	0904-75	G10	栽培种 Cultivated species	定薯 1 号×新大坪 Dingshu#1×Xindaping
11	1125-36	G11	栽培种 Cultivated species	天薯 12 号×定薯 3 号 Tianshu#12×Dingshu#3
12	1233-55	G12	栽培种 Cultivated species	同薯 23 号×定薯 4 号 Tongshu#23×Dingshu#4
13	1035-8	G13	栽培种 Cultivated species	陇薯 10 号×冀张薯 8 号 Longshu#10×Jizhangshu#8
14	1233-25	G14	栽培种 Cultivated species	同薯 23 号×定薯 4 号 Tongshu#23×Dingshu#4

5 个试点为安定(E1)、临洮(E2)、渭源(E3)、通渭(E4)、岷县(E5),各试点平均降雨量和气温具有差异,如表 2 所示。

1.2　试验设计

各试点进行统一管理,均采用随机区组排列,3 次重复。小区面积 20 m^2,小区长 6.67 m,宽 3.0 m。每小区种植 5 行,行距 60 cm,株距 30 cm,每行 20 株,共 100 株。

安定香泉播种时间为 4 月 17 日,临洮漫洼播种时间为 4 月 15 日,渭源会川播种时间为 4 月 23 日,通渭华家岭播种时间为 5 月 2 日,岷县禾驮播种时间为 5 月 6 日,各试点土壤理化性质如表 3 所示,各试点播前结合整地施腐熟农家肥 30 000 kg · hm^{-2},施尿素 300 kg · hm^{-2}(N 46%),过磷酸钙 750 kg · hm^{-2}(P_2O_5 14%),硫化钾 225 kg · hm^{-2}(K_2O 60%)。整地时用 40%辛硫磷乳油 7.5 kg · hm^{-2}加细沙土 450 kg · hm^{-2},搅拌撒施以防地下害虫。

1.3　测定指标

(1)小区产量(Toal tuber weight per plot, *TTWP*):对小区内所有植株进行收获,装袋测产。产量按照小区单收计算,单位 kg。

(2)小区薯块数量(Total number of tubers per plot, *TNTP*):收获时对整个小区的薯块数量进行人工统计计算。

(3)商品薯率(Marketable tubers rate per plot, *MTRP*)计算公式为:商品薯率(%)= 小区内(重量>70 g)的薯块重量/全部薯块重量×100%。

表 2　参加 2020 年多点试验的 5 个试点的基本信息

Table 2　Description of the 5 locations used for evaluation of 14 potato genotypes in the multi-point test in 2020

编号 No.	地点 Site	年份 Growing season	地理位置信息 Geographical position		海拔/m Altitude	平均降雨量/mm Average rainfall	平均气温/℃ Average temperature
			纬度 Latitude	经度 Longitude			
E1	安定香泉 Xiangquan Town, Anding district	2020	34°57′~36°12′	102°41′~103°40′	1900	430	6.3
E2	临洮漫洼 Manwa Town, Lintao County	2020	35°39′~36°02′	103°88′~104°88′	1730	550	7.9
E3	渭源会川 Huichuan Town, Weiyuan County	2020	35°13′~35°21′	104°02′~104°11′	1530	550	5.3
E4	通渭华家岭 Huajialing Town, Tongwei County	2020	34°55′~35°29′	104°57′~105°38′	2450	420	3.4
E5	岷县禾驮 Hetuo Town, Minxian County	2020	34°46′~34°47′	104°22′~104°29′	1750	665	3.5

表 3　各试点土壤理化性质

Table 3　The physical and chemical properties of soil for different tests

地点 Site	有机质 Organic matter /(g · kg^{-1})	pH 值 pH value	全氮 Total nitrogen /(g · kg^{-1})	碱解氮 Available nitrogen /(mg · kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus /(mg · kg^{-1})	有效钾 Available potassium /(mg · kg^{-1})	土壤容重 Soil bulk density /(g · cm^{-3})
安定香泉 Xiangquan Town, Anding County	15.6	8.19	0.78	115.4	7.8	264.3	1.2
临洮漫洼 Manwa Town, Lintao County	7.43	8.13	0.71	78.4	9.2	110.2	1.3
渭源会川 Huachuan Town, Weiyuan County	26.8	6.83	0.73	168.3	13.5	145.7	1.1
通渭华家岭 Huajialing Town, Tongwei County	14.2	8.25	0.71	102.8	12.7	238.6	1.2
岷县禾驮 Hetuo Town, Minxian County	86.3	6.44	0.69	241.1	10.2	148.6	1.1

1.4 模型应用

HIDAP(Highly interactive data analysis platform) V.1.0.3 数据分析软件包含方差分析(ANOVA)、AMMI 模型、GGE-biplot 模型、联合回归分析、Tai 模型。

1.4.1 GGE-biplot 模型 GGE 双标图的数学模型是考虑品系总体效应(G)和品系与环境互作(G×E)的方法,多品系多环境试验产量,一般可分解为:

$$Y_{ij} - \overline{Y_j} = \lambda_1\xi_{i1}\eta_{j1} + \lambda_2\xi_{i2}\eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$$

Y_{ij} 为基因型 i 在环境 j 中的产量,$\overline{Y_j}$ 为所有基因型在环境 j 中的产量表现,ξ_{i1} 与 ξ_{i2} 表示基因型 i 在 PC1 与 PC2 的得分,η_{j1} 与 η_{j2} 表示基因型 j 在 PC1 与 PC2 的得分,ε_{ij} 为模型中的残差。

为了将 PC1 和 PC2 显示在双标图中,GGE 双标图数学模型可重新表示为:

$$Y_{ij} - \overline{Y_j} = \xi_{i1}\eta_{j1} + \xi_{i2}\eta_{j2} + \varepsilon_{ij}, \quad \xi_{in} = \lambda_n^{\frac{1}{2}}\xi_{in},$$
$$\eta_{jn} = \lambda_n^{\frac{1}{2}}\eta_{jn}, \quad n = 1,2$$

1.4.2 AMMI 模型 AMMI 模型是指主效可加、互作可乘的数字模型,其表达式为:

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

式中,Y_{ij} 是第 i 品种在第 j 环境的平均值。加性参数:μ 为总体平均数;α_i 为第 i 基因型与总平均数的离差;β_j 为第 j 环境与总平均数的离差。λ_n 是第 n 个交互效应主成分轴(IPCA)的奇异值;γ_{in} 是第 n 轴的基因型特征向量值;δ_{jn} 是第 n 轴的环境特征向量值;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 AMMIn;N 是在模型主成分分析中主成分因子轴的总个数;θ_{ij} 为留下的残差。

1.4.3 Tai 模型 各个品种对环境效应的直线效应 α_i 及直线效应的离差 λ_i 计算方法参照陈海玲等[7]。$\alpha_i < 0, \lambda_i \to 1$ 的品种为超平均稳定性品种;$\alpha_i \to 0, \lambda_i \to 1$ 的品种为平均稳定性品种;$\lambda_i > 1$ 的品种为难以预测品种;$\lambda_i < 1$ 的品种为环境敏感性品种。

1.5 数据处理

试验材料各性状统计由 HIDAP 软件内含的材料管理(Material management)进行统计,试验数据采用 Microsoft Excel 2007 进行统计编辑,产量、薯块数量、商品薯率分析通过 HIDAP 软件的多点试验分析(MET report)模块进行分析。

2 结果与分析

2.1 方差分析

利用方差分析对薯块数量及产量等因子与基因、环境、基因与环境互作的相关性进行分析,通过方差分析(表 4)可知,基因型的变化对薯块数量、产量及商品薯率影响差异较大,均达到极极显著水平

表 4 马铃薯高代品系性状指标方差分析

Table 4 Analysis of variance for potato high generation strain traits

指标 Idex	变异来源 Source of variation	自由度 *Df*	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	*F* 检验 *F* test	*P* 值 *P* value
薯块数量 *TNTP*	基因 GEN	13	464915.0	35763.0	5.2071	2.031×10^{-7} ***
	环境 ENV	4	225049.0	56262.0	10.5619	0.0012 **
	区组间 REP	10	53269.0	5327.0	0.7756	0.6520
	基因×环境 GEN×ENV	52	554451.0	10663.0	1.5525	0.0240 *
	残差 RES	130	892845.0	6868.0		
产量 *TTWP*	基因 GEN	13	13283.6	1021.8	8.4845	2.946×10^{-12} ***
	环境 ENV	4	10070.2	2517.6	14.5932	0.0003 ***
	区组间 REP	10	1725.2	172.5	1.4324	0.1729
	基因×环境 GEN×ENV	52	11521.3	221.6	1.8397	0.0029 **
	残差 RES	130	15656.4	120.4		
商品薯率 *MTRP*	基因 GEN	13	238070.0	18313.1	8.2569	6.093×10^{-12} ***
	环境 ENV	4	110332.0	27583.0	18.2784	0.0001 ***
	区组间 REP	10	15091.0	1509.1	0.6804	0.7410
	基因×环境 GEN×ENV	52	227203.0	4369.3	1.9700	0.0010 **
	残差 RES	130	288329.0	2217.9		

注:* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著; *** 表示在 $P<0.001$ 水平差异极显著,下同。

Note: * and ** denote the significance level at $P<0.05$ probability and $P<0.01$ probability, respectively. *** denote the significance level at $P<0.001$ probability. The same below.

(P<0.001)。试点的环境变化对马铃薯薯块数量的差异影响达到极显著水平(P<0.01),对产量及商品薯率影响均达到极极显著水平(P<0.001);基因与环境的交互作用对薯块数量的差异影响达到显著水平(P<0.05),基因与环境的交互作用对产量及商品薯率的影响达到极显著水平(P<0.01)。

2.2　AMMI 分析

AMMI1 双标图(图 1a,1c,1e)主要针对品种的稳定性与适应性分析。稳定性分析中,在纵向,品种的 IPCA1 值的绝对值越大,表明其与试点的交互作用大,品种的稳定性较差;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

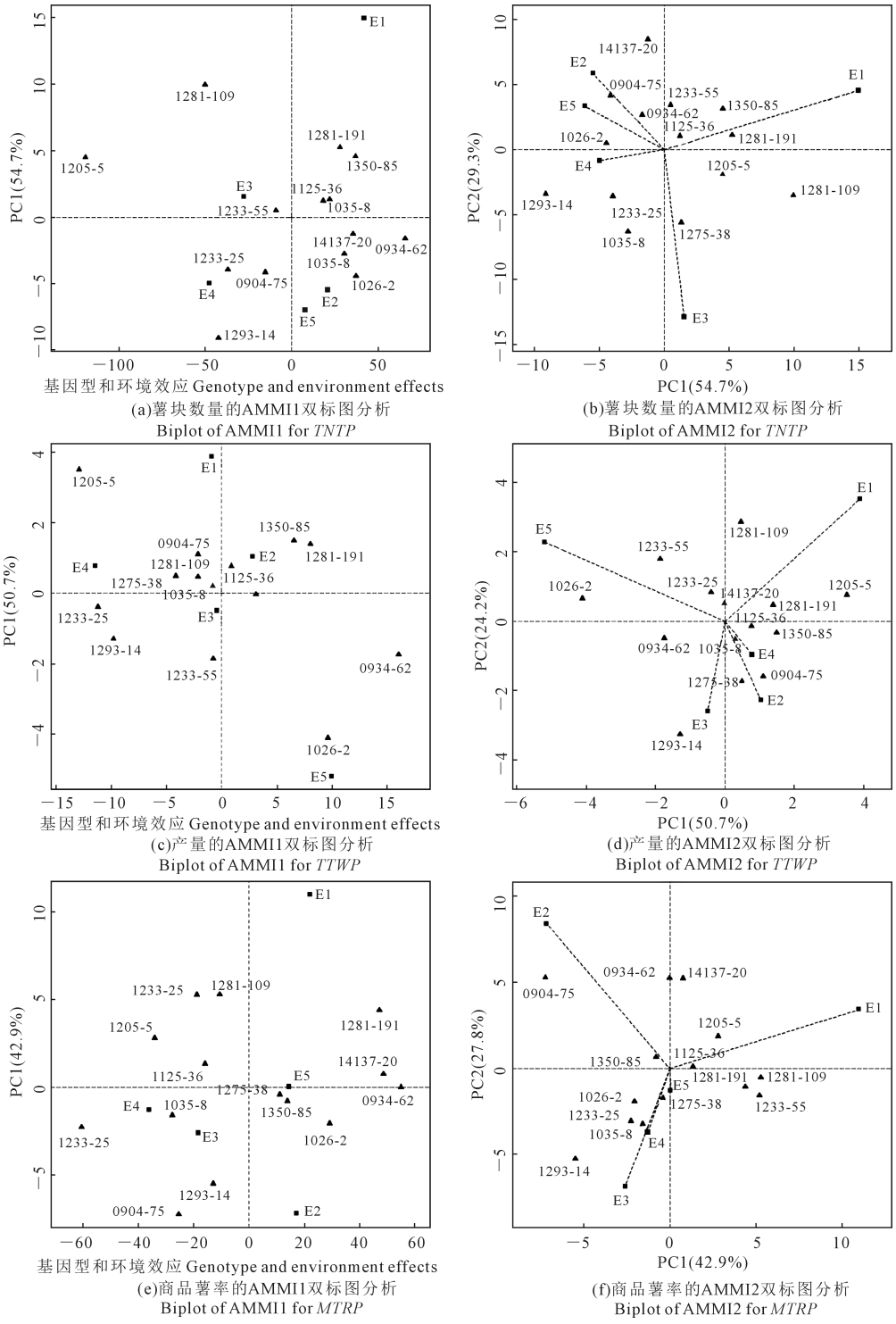


图 1　AMMI 双标图

Fig.1　Biplot of AMMI

适应性方面,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。在丰产性方面,水平线上越靠右的品系在产量、薯块数量及商品薯率中表现越好。

图 1a 表示高代品系在薯块数量(*TNTP*)的稳定性,图中看出高代品系 1205-5 位于水平线最左侧,其薯块数值最低,品系 0934-62、1281-191、1350-85、1125-36、1275-38、14137-20、1035-8、1026-2 的数值较高,其中高代品系 0934-62 位于水平线的最右侧且接近于水平线,丰产性与稳定性表现较好。品系 1281-109 与 1293-14 的 IPCA 绝对值较高,稳定性较差。品系 14137-20、0934-62、1035-8、1026-2、1233-25、0904-75 与环境 E2、E4、E5 具有正向交互作用,这些品种在这些地点具有特殊适应性,适合该地区种植,能够取得高产。与 E1、E3 具有负向交互作用。在图 1c 中,高代品系 1205-5 远离水平轴,IPCA 绝对值最高,稳定性差,高代品系 0934-62 位于水平线的最右侧,其产量水平数值最高。在图 1e 中,高代品系 0934-62 位于水平线的最右侧且接近于水平线,其商品薯率水平数值最高,高代品系 1233-25 与 1205-5 位于水平轴左侧,商品薯率较低。

在 AMMI2 双标图(图 1b,1d,1f)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,如果投影点与原点距离越大,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,表明品种在试点不具有推广种植价值。结合 AMMI2 双标图(图 1b)与表 5 可知,薯块数量(*TNTP*)中,在安定(E1)试点,品系 1281-109 在原点与试点(安定)连线的垂直投影线段最长,且相关性数值达到 131.888,与该环境具有最大正向交互作用,在该试点可能取得较高产量。品系 1293-14 与试点安定(E1)具有较大反向交互作用,且相关性数值达到-152.044,不适应在该地区进行推广种植。在临洮(E2),品系 0904-75 与环境的交互性强,相关性数值达到 105.117(表 4),品系 1281-109 落在试点临洮(E2)的反向延长线,投影点距原点最远,负向交互作用最大。在岷县(E5),品系 1233-55 与环境的交互性强,相关性数值达到 65.119,能够适应该地区生长环境,在通渭(E4),品系 1035-8 与环境的交互性强,相关性数值达到 46.950,能够适应该地区生长环境,在渭源(E3),品系 1275-38 与环境的交互性强,相关性数值达到 80.279,能够适应该地区生长环境。

表 5 环境与基因的相关性分析

Table 5 Analysis of correlation between environment and genotype

指标 Index	品系 Strain	地点 Site				
		安定 Anding	临洮 Lintao	渭源 Weiyuan	通渭 Tongwei	岷县 Minxian
薯块数量 *TNTP*	0904-75	-49.088	105.117	-43.565	-12.715	0.252
	0934-62	-13.111	29.761	-32.587	-8.293	24.230
	1026-2	-64.155	14.384	-9.298	-0.115	59.185
	1035-8	-67.755	-36.882	67.768	46.950	-10.080
	1125-36	21.777	-2.682	-3.365	-39.515	23.785
	1205-5	56.977	-0.815	28.501	14.350	-99.014
	1233-25	-73.622	-11.415	34.234	39.750	11.052
	1233-55	29.444	-50.682	-58.698	14.817	65.119
	1275-38	-7.244	-29.593	80.279	-17.871	-25.569
	1281-109	131.888	-74.126	67.079	-70.071	-54.769
	1281-191	84.155	-24.415	-8.987	-17.249	-33.503
	1293-14	-152.044	32.606	30.812	46.439	42.185
	1350-85	81.933	-7.304	-33.542	-25.026	-16.058
	14137-20	20.844	56.050	-118.631	28.550	13.185
产量 *TTWP*	0904-75	-2.796	14.593	-5.144	1.177	-7.829
	0934-62	-5.495	1.888	8.923	-13.554	8.237
	1026-2	-13.629	-5.573	0.289	-4.056	22.970
	1035-8	-1.023	-2.066	1.795	4.283	-2.989
	1125-36	3.376	-1.933	3.929	-0.549	-4.823
	1205-5	16.457	-0.357	-2.256	3.031	-16.875
	1233-25	-0.029	-4.940	-4.544	5.843	3.670
	1233-55	-0.996	-8.906	-2.544	-0.956	13.403
	1275-38	-2.330	-2.719	12.771	-0.107	-7.614
	1281-109	11.653	-5.456	-8.610	-1.856	4.270
	1281-191	8.002	1.414	0.004	-3.407	-6.014
	1293-14	-18.234	4.744	5.284	9.006	-0.800
	1350-85	5.237	2.022	1.823	-0.521	-8.562
	14137-20	-0.192	7.292	-11.723	1.665	2.957
商品薯率 *MTRP*	0904-75	-51.106	104.100	13.004	-29.296	-36.701
	0934-62	4.582	34.011	-78.973	12.058	28.320
	1026-2	-26.239	0.966	33.204	-9.096	1.165
	1035-8	-30.039	-17.166	14.071	33.769	-0.634
	1125-36	15.093	-8.700	-2.795	-4.763	1.165
	1205-5	49.604	4.366	-4.950	14.303	-63.323
	1233-25	-39.639	-13.100	5.804	40.169	6.765
	1233-55	42.093	-58.700	-24.461	-1.096	42.165
	1275-38	-6.039	-8.166	26.849	-3.341	-9.301
	1281-109	63.115	-36.788	17.893	-33.074	-11.146
	1281-191	52.115	-34.788	15.226	-8.407	-24.146
	1293-14	-81.595	-7.277	47.515	17.214	24.142
	1350-85	-12.595	6.500	-21.484	11.436	16.142
	14137-20	20.649	34.744	-40.906	-39.874	25.387

结合 AMMI2 双标图(图 1d)与表 5 可知,在产量(*TTWP*)中,在安定(E1)试点,品系 1205-5 在原点与试点(E1)连线的垂直投影线段最长,且相关性数值达到 16.457,与该环境具有最大正向交互作用,在该试点可能取得较高产量;在临洮(E2),品系 0904-75 在原点与试点(E2)连线的垂直投影线段最长,且相关性数值达到 14.593;在渭源(E3),品系 1275-38 在原点与试点(E3)连线的垂直投影线段最长,且相关性数值达到 12.771;在通渭(E4),品系 1293-14 在原点与试点(E4)连线的垂直投影线段最长,且相关性数值达到 9.006;在岷县(E5),品系 1026-2 在原点与试点(E5)连线的垂直投影线段最长,且相关性数值达到 22.970。

由 AMMI2 双标图(图 1f)与表 5 可知,在商品薯率(*MTRP*)中,品系 1281-109 与安定(E1)相关性强,相关性数值达到 63.115,品系 0904-75 与临洮(E2)的相关性数值达到 104.100,品系 1293-14 与渭源(E3)的相关性数值达到 47.515,品系 1233-25 与通渭(E4)的相关性数值达到 40.169,品系 1233-55 与岷县(E5)的相关性数值达到 42.165。

表 6 为 AMMI 模型中各主成分轴(PC)在产量、薯块数量、商品薯率中的贡献值大小。其中,主成分轴(PC1)与主成分轴(PC2)在产量、薯块数量、商品薯率中解释变异程度的累计贡献值分别达到 74.90254、83.98092、70.64809。

2.3　GGE 双标图分析

在 GGE 双标图中(图 2a,2c,2e),过纵坐标零点做一条水平线,过零点水平线上的品种在这些地点具有特殊适应性,综合性状表现优良,适合该地区种植,可能取得较高产量。综合图 2a、2c、2e 可知品系 0934-62、1026-2、14137-20 在薯块数量、产量、商品薯率方面排名靠前,综合表现突出,其中品系 0934-62 表现最好。

表 6　主成分(PC)的贡献值

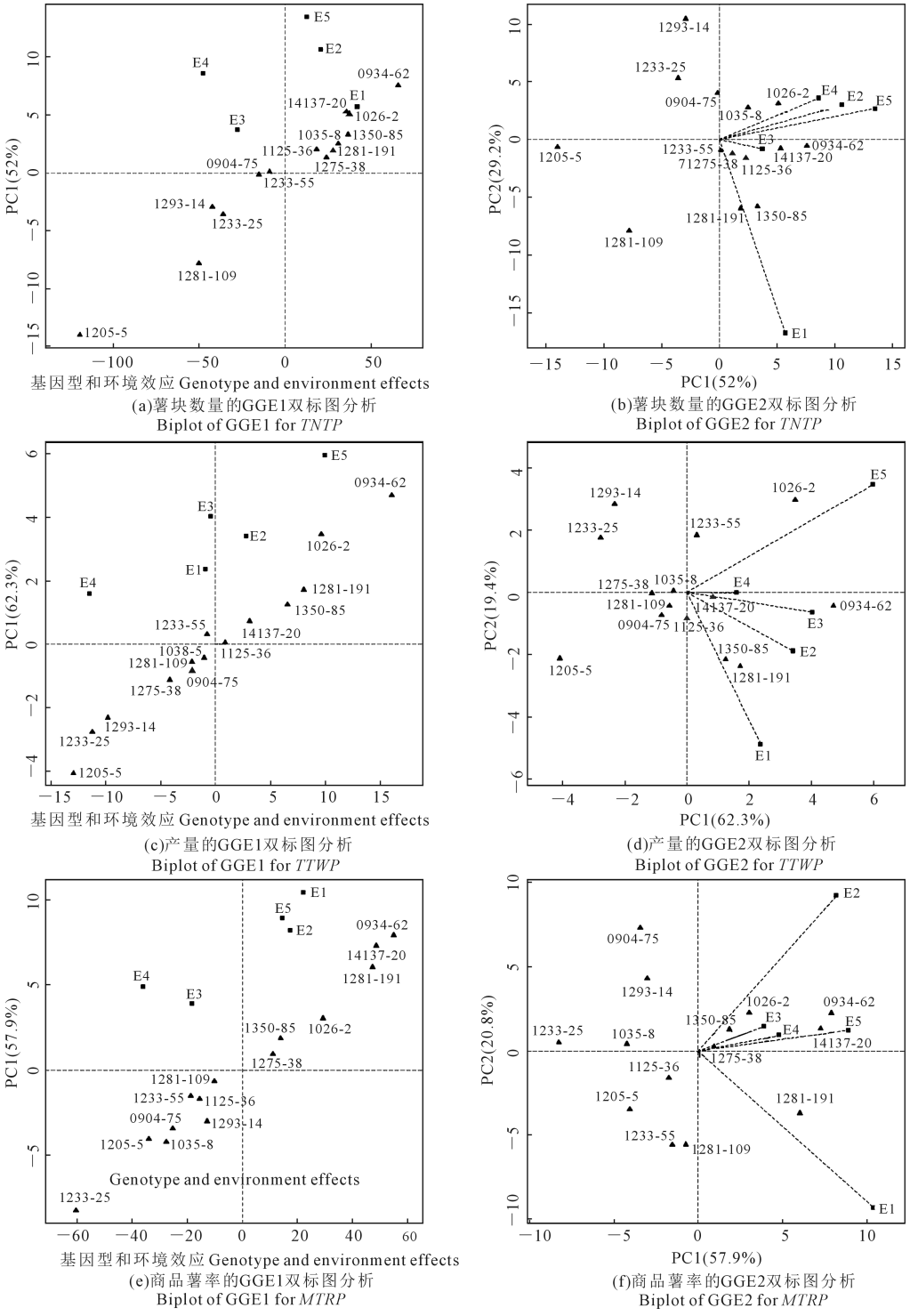
Table 6　Contribution value of principal component

指标 Index	主成分 PC	贡献率 Cont.	累计贡献率 Cum. cont.	自由度 *Df*	平方和 Sum squ.	均方 Mean squ.	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
薯块数量 *TNTP*	PC1	54.66865	54.66866	16	303110.83	18944.42	2.7583	0.0007
	PC2	29.31226	83.98092	14	162522.12	11608.72	1.6902	0.0649
	PC3	10.67460	94.65553	12	59185.46	4932.12	0.7181	0.7316
	PC4	5.34467	100.0000	10	29632.44	2963.24	0.4314	0.9289
产量 *TTWP*	PC1	50.69262	50.69263	16	5840.445	365.03	3.0309	0.0002
	PC2	24.20991	74.90254	14	2789.295	199.24	1.6543	0.0731
	PC3	15.76036	90.66291	12	1815.798	151.32	1.2564	0.2523
	PC4	9.33708	100.00000	10	1075.753	107.58	0.8932	0.5415
商品薯率 *MTRP*	PC1	42.89455	42.89456	16	97457.51	6091.10	2.7463	0.0008
	PC2	27.75353	70.64809	14	63056.72	4504.05	2.0307	0.2003
	PC3	20.98097	91.62907	12	47669.31	3972.44	1.7910	0.0559
	PC4	8.37093	100.00000	10	19018.97	1901.90	0.8575	0.5746

图 2b,2d,2f 主要功能是各试验点在育种材料评价上的相似性分析,连接环境与原点线段之间的夹角余弦值表示相关系数,夹角小于 90°表示正相关,说明两环境的品种排序相似,大于 90°表示负相关,表示两环境对品种排序相反,等于 90°说明两环境不相关。夹角较小说明试验点是重复设置的,去掉一个不影响对品种的评价。图 2b 中,在薯块数量(*TNTP*)中,环境 E2、E4、E5 之间夹角最小,说明环境之间相关性强,具有相同的地域环境条件,对品种的排序很相似。E1 与 E2、E4、E5 的夹角较大,它们之间相关性弱,环境之间具有不同的气候条件,对品种的排序能力强。图 2d 中,在产量(*TTWP*)方面,环境 E2、E3、E4 之间夹角最小,说明环境之间相关性强,具有相同的地域环境条件,对品种的排序很相似。E1 与 E5 的夹角较大,它们之间相关性弱,环境之间具有不同的气候条件,对品种的排序能力强。图 2f 商品薯率(*MTRP*)GGE2 双标图中,环境 E3、E4、E5 之间夹角最小,说明环境之间相关性强,具有相同的地域环境条件,对品种的排序很相似。综合图 2b、2d、2f 信息可知,环境 E2 与 E4 之间夹角最小,为了避免重复工作性,节省试验成本,可以将环境 E2 与 E4 只保留 1 个试点。

表 7 中,对 2020 年马铃薯高代品系的块茎数量、产量、商品薯率与环境、基因以及环境×基因的互作关系等进行联合方差分析。块茎数量、产量、商品薯率总变异由基因、环境、基因与环境互作,基因型回归异质性(Het. Regr. G),基因型回归误差(Dev.Regr.G),环境回归异质性(Het.Regr.E),环境回归误差(Dev.Regr.E)构成。

通过表 7 中数据可看到基因、环境对块茎数量、



(a)薯块数量的GGE1双标图分析 Biplot of GGE1 for *TNTP*

(b)薯块数量的GGE2双标图分析 Biplot of GGE2 for *TNTP*

(c)产量的GGE1双标图分析 Biplot of GGE1 for *TTWP*

(d)产量的GGE2双标图分析 Biplot of GGE2 for *TTWP*

(e)商品薯率的GGE1双标图分析 Biplot of GGE1 for *MTRP*

(f)商品薯率的GGE2双标图分析 Biplot of GGE2 for *MTRP*

图 2 GGE 双标图

Fig.2 GGE-biplot analysis

产量、商品薯率的总变异达到极极显著水平($P<0.001$),基因×环境的交互作用对总变异影响达到极显著水平($P<0.01$)以上,其余部分达到极显著水平($P<0.01$)。

表 8 为 GGE 双标图中各主成分轴(PC)的贡献值大小。主成分轴(PC1)与主成分轴(PC2)在产量、薯块数量、商品薯率中解释变异程度的累计贡献值分别达到 81.25460,81.73695,78.68588。

2.4 Tai 稳定性分析

用 Tai 模型进行指标稳定性分析时综合考虑了品种遗传基因与试点环境互作的影响,将每一品种的遗传型与环境互作效应分解为两个部分:以 α_i 测定对环境效应的直线效应,以 λ_i 测定直线效应的离差,$\alpha_i<0$,$\lambda_i\to1$ 的品种为超平均稳定性品种;$\alpha_i\to0$,

$\lambda_i \to 1$ 的品种为平均稳定性品种;$\lambda_i > 1$ 的品种为难以预测品种;$\lambda_i < 1$ 的品种为环境敏感型品种,从而对参试品种在多个环境下的表现进行比较和评价,是品种区域试验中实用的品种稳定性分析统计模型。

表 9 中标明各参试高代品系在块茎数量、产量、商品薯率中的 Tai 稳定性分布范围及相关评价参数。在产量中(*TTWP*),超平均稳定性高代品系为 1281-191,平均稳定性品系为 0934-62;在薯块数量(*TNTP*)中,超平均稳定性高代品系为 1026-2 与 1275-38,平均稳定性品系为 0934-62 与 1281-191;在商品薯率(*MTRP*)中,超平均稳定性高代品系为 1026-2。综合各高代品系在产量、块茎数量、商品薯率中 α_i 与 λ_i 参数分布范围,可知稳定性高的品系为 0934-62、1026-2、1281-191。

表 7　联合回归分析

Table 7　Combined regression analysis

指标 Index	变异来源 Source of variation	自由度 *Df*	平方和 Sum squ.	均方 Mean squ.	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
薯块数量 *TNTP*	基因 G	13	464915.0	35763.0	5.2071	2.031×10^{-7} ***
	环境 E	4	225049.0	56262.0	10.5691	0.0013 **
	重复:环境 R:E	10	53269.0	5327.0	0.7756	0.6520
	基因×环境 G×E	52	554451.0	10663.0	1.5525	0.0240 *
	基因型回归异质性 Het.Regr.G	13	153461.0	11805.0	1.1481	0.3516
	基因型回归误差 Dev.Regr.G	39	400990.0	10282.0	1.4971	0.0487 *
	环境回归异质性 Het.Regr.E	4	36750.0	9187.0	0.8518	0.4996
	环境回归误差 Dev.Regr.E	48	517701.0	10785.0	1.5704	0.0238 *
	残差 Res	130	892845.0	6868.0		
产量 *TTWP*	基因 G	13	13283.6	1021.8	8.4845	2.946×10^{-12} ***
	环境 E	4	10070.2	2517.6	14.5932	0.0004 ***
	重复:环境 R:E	10	1725.2	172.5	1.4324	0.1730
	基因×环境 G×E	52	11521.3	221.6	1.8397	0.0030 **
	基因型回归异质性 Het.Regr.G	13	2932.7	225.6	1.0244	0.4488
	基因型回归误差 Dev.Regr.G	39	8588.6	220.2	1.8286	0.0063 **
	环境回归异质性 Het.Regr.E	4	1670.6	417.7	2.0352	0.1043
	环境回归误差 Dev.Regr.E	48	9850.7	205.2	1.7040	0.0095 **
	残差 Res	130	15656.4	120.4		
商品薯率 *MTRP*	基因 G	13	238070.0	18313.1	8.2569	6.093×10^{-12} ***
	环境 E	4	110332.0	27583.0	18.2794	0.0001 ***
	重复:环境 R:E	10	15091.0	1509.1	0.6804	0.7417
	基因×环境 G×E	52	227203.0	4369.3	1.9700	0.0011 **
	基因型回归异质性 Het.Regr.G	13	51461.0	3958.5	0.8785	0.5808
	基因型回归误差 Dev.Regr.G	39	175742.0	4506.2	2.0317	0.0016 **
	环境回归异质性 Het.Regr.E	4	18337.0	4584.3	1.0535	0.3898
	环境回归误差 Dev.Regr.E	48	208865.0	4351.4	1.9619	0.0014 **
	残差 Res	130	288329.0	2217.9		

表 8　在显著互作主成分轴上的得分

Table 8　Scores in the principle components axis of significant interaction

指标 Index	主成分 PC	贡献值 Contribution value	累计贡献值 Cum. cont.
薯块数量 *TNTP*	PC1	52.012	52.012
	PC2	29.243	81.255
	PC3	13.819	95.073
	PC4	4.927	100.000
小区产量 *TTWP*	PC1	62.311	62.311
	PC2	19.426	81.737
	PC3	11.225	92.962
	PC4	7.038	100.000
商品薯率 *MTRP*	PC1	57.851	57.851
	PC2	20.835	78.686
	PC3	11.972	90.658
	PC4	9.342	100.000

表 9　Tai 稳定性分析

Table 9　Tai stability analysis

品系 Strain	产量 *TTWP*		薯块数量 *TNTP*		商品薯率 *MTRP*	
	α	λ	α	λ	α	λ
0904-75	-0.206	2.015	0.398	1.735	0.384	5.629
0934-62	0.162	1.317	0.396	1.244	0.849	2.393
1026-2	1.221	2.872	-0.285	0.884	-0.333	0.583
1035-8	-0.379	0.026	-1.614	0.025	-0.984	0.048
1125-36	-0.233	0.282	0.644	0.071	0.171	0.096
1205-5	-0.977	2.392	-0.070	1.652	-0.066	2.443
1233-25	-0.189	0.568	-1.240	0.114	-1.030	0.291
1233-55	0.546	1.347	0.343	0.259	0.408	2.615
1275-38	-0.384	1.348	-0.537	0.817	-0.314	0.246
1281-109	0.187	1.701	0.985	3.598	0.590	2.189
1281-191	-0.109	0.745	0.756	0.753	0.092	1.745
1293-14	-0.374	2.907	-1.695	1.779	-1.238	2.200
1350-85	-0.356	0.538	1.071	0.378	0.019	0.383
14137-20	1.092	0.661	0.849	1.780	1.453	0.110

3 讨 论

HIDAP 为块茎类作物专用的高交互性数据分析软件,能够帮助育种家进行育种试验设计、育种材料归类整理管理、分析评价,利用 AMMI 模型、GGE-biplot 模型、联合方差分析、Tai 稳定性模型等针对材料的各项性状指标进行综合性分析评价,通过查阅相关文献资料[7-12],针对各种农作物品种与环境的相互关系主要利用 AMMI 与 GGE-biplot 模型进行分析解释,在本研究中首次利用 HIDAP 软件以产量、薯块数量、商品薯率为评价指标进行马铃薯育种材料的多性状分析,利用图表解析方式准确的对育种材料进行排序选优,对试点环境的鉴别力进行评价筛选。

AMMI 分析图通过对马铃薯高代品系在水平与垂直轴的位置判断进行稳定性、丰产性与适应性分析,在 AMMI1 分析图中(图 1),高代品系 0934-62 在产量、单株薯块数、商品薯率中位于水平轴右侧,丰产性相比其他品系突出,仅次于 0934-62 的高代品系为 1281-191、14137-20、1026-2,其中高代品系 1026-2 在垂直方向的 IPCA 值大小不稳定,在后续的年份试验中可以进一步进行验证。

在利用图解方式解释基因与环境相互关系的同时,HIDAP 软件提供了主成分贡献值(表 6),环境与基因的相关性分析(表 5),通过图 1 的 AMMI2 结合表中数据能够准确分析育种基因材料在不同环境中的表现,为进一步试验材料筛选提供有效帮助。表 5 中的基因与环境的互作效应值能够解释基因与特定环境的关系。0904-75 品系的薯块数量的投影点落在安定区与原点的反向延长线上,交互效应值为-49.088,表现为较大负作用,但在临洮具有很强的正向交互作用,交互效应值为105.117,对环境具有特殊适应性,在临洮的产量与商品薯率均为正向交互作用,尤其在临洮的商品薯率达到 104.100,该品系在临洮可能取得较高产量。0934-62 的薯块数量与临洮、岷县成正向交互效应,与安定、渭源、通渭的负向交互效应值较小,在产量中与临洮、渭源、岷县的交互性为正值,在商品薯率中,与安定、临洮、通渭、岷县的交互作用为正值,综合表现稳定性良好,第二年继续进行试种观察。

在 GGE 双标图中,综合图 2a、2c、2e 可知品系 0934-62 在薯块数量、产量、商品薯率方面综合表现突出,排名靠前,与 AMMI 模型的分析结果基本一致。在多点区域性试验中,针对相似度较高的试验点,为了减少区域试验的成本,可以进行适当删减,在本文中,根据图 2b,2d,2f 中通过连接环境与原点线段之间的夹角余弦值大小对各试验点的相似性进行评价分析,通过对比分析各试点在 3 个衡量指标的相似度变化可知,在薯块数量(*TNTP*)中,环境 E2、E4、E5 之间夹角最小,E1 与 E2、E4、E5 的夹角较大,在产量(*TTWP*)方面,环境 E2、E3、E4 之间夹角最小,在商品薯率(*MTRP*)中,环境 E3、E4、E5 之间夹角最小,根据图 2b,2d,2f 的信息可知环境 E2 与 E4 相似度最高,可保留两个试点中的 1 个。

在 Tai 稳定性分析中,通过表中筛选出稳定性高的品系为 0934-62、1026-2、1281-191,但是,在 Tai 分析参数中表明 $\lambda_i>1$ 的品种为难以预测品种;$\lambda_i<1$ 的品种为环境敏感性品种,在薯块数量中,0934-62、1026-2 与 1281-191 的 λ_i 值均小于 1;产量中,0934-62 与 1281-191 的 λ_i 值均小于 1;商品薯率中,1026-2 的 λ_i 值小于 1,本试验由于只采用 2020 年的高代品系筛选数据进行分析,缺少多年份的重复性验证,部分品系的性状稳定性会出现变化。

在本研究中,创新性利用高交互性数据分析育种软件 HIDAP 的数据管理及处理功能对马铃薯多点试验中的多个高代品系在产量、薯块数量、商品薯率等指标利用 AMMI 模型、GGE 双标图、Tai 稳定性模型并结合方差分析(ANOVA),环境与基因的互作效应分析,联合回归分析进行分析筛选评价。在数据分析中首次运用环境与基因的互作效应分析,将高代品系与环境进行一对一的适应性分析,产生相对应的相关性数值,用数据明确品系与试点之间的关联度,明确品系的适应范围,增加系统分析的精准性,为后续的品种选育提供一定科学依据。

参 考 文 献:

[1] EBERHART S A, RUSSELL W A. Stability parameters for comparing varieties[J]. Crop Science, 1966, 6(1): 36-40.

[2] TAI G C C. Genotypic stability analysis and its application to potato regional trials[J]. Crop Science, 1971, 11(2): 184-190.

[3] SHUKLA G K. Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability[J]. Heredity, 1972, 29: 237-245.

[4] FINLAY K W, WILKINSON G N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1963, 14(6): 742-754.

[5] GAUCH H G Jr., ZOBEL R W. Predictive and postdictive success of

statistical analyses of yield trials [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1988, 76(1): 1-10.

[6] GABRIEL K R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis [J]. Biometrika, 1971, 58(3): 453-467.

[7] 陈海玲,黄金堂,李清华,等.福建省春花生新品种稳产性的 Tai 模型分析[J].江西农业学报,2007,19(2):14-16.
CHEN H L, HUANG J T, LI Q H, et al. Evaluation of yield stability of new spring peanut varieties in Fujian Province with Tai model[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(2): 14-16.

[8] 朴红梅,穆楠,王延兵,等.基于 AMMI 模型的黄淮海夏玉米基因型与环境互作效应对产量性状的影响分析[J].北方农业学报,2021,49(4):1-12.
PIAO H M, MU N, WANG Y B, et al. Impacts of genotype-environment interaction effect on yield traits of summer maize in Huang-Huai-Hai area based on AMMI model[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2021, 49(4): 1-12.

[9] 魏常敏,许卫猛,邢永锋,等.AMMI 模型和 GGE 双标图在黄淮海甜玉米中的应用[J].分子植物育种,2021,19(17):5909-5916.
WEI C M, XU W M, XING Y F, et al. Application of AMMI model and GGE biplot of sweet maize varieties in Huang-Huai-Hai regional [J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(17): 5909-5916.

[10] 曹元元,丁逸帆,左示敏,等.基于 GGE 双标图和 AMMI 模型对江苏省水稻区试品种的丰产性和稳定性分析[J].种子,2021,40(6):38-43,51.
CAO Y Y, DING Y F, ZUO S M, et al. Analysis of yielding ability and stability of rice varieties tested in Jiangsu Province based on GGE biplot and AMMI model[J]. Seed, 2021, 40(6): 38-43, 51.

[11] 朱艳彬,孙九超,王显,等.基于 Genstat 的 AMMI 模型和 GGE 双标图在玉米区域试验分析中的应用[J].安徽农业科学,2021,49(6):49-53.
ZHU Y B, SUN J C, WANG X, et al. Application of AMMI model and GGE-biplot based on Genstat in the analysis of maize regional experiment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(6): 49-53.

[12] 崔顺立,何美敬,侯名语,等.利用 GGE 双标图分析花生品质性状的基因型-环境互作[J].中国油料作物学报,2021,43(4):617-626.
CUI S L, HE M J, HOU M Y, et al. Genotype × environment interactions for the quality traits of peanut varieties based on GGE biplot analysis[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021, 43(4): 617-626.

[13] 陈彩锦,张尚沛,师尚礼,等.基于 GGE 双标图对苜蓿品种丰产性和稳定性综合评价[J].草地学报,2021,29(5):912-918.
CHEN C J, ZHANG S P, SHI S L, et al. Comprehensive evaluation of fertility and stability of alfalfa varieties based on GGE-biplot[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(5): 912-918.

(上接第 12 页)

[22] HAGEN G, GUILFOYLE T. Auxin-responsive gene expression: genes, promoters and regulatory factors[J]. Plant Molecular Biology, 2002, 49(3/4): 373-385.

[23] 王建林,何燕,栾运芳,等.中国芸薹属植物的起源、演化与散布[J].中国农学通报,2006,22(8):489-494.
WANG J L, HE Y, LUAN Y F, et al. A study on origin, evolution and spread of brassica in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 489-494.

[24] 周洁,温泽文,梅圆圆,等.*SAUR*72 在拟南芥叶片衰老调控中的作用机制[J].植物生理学报,2018,54(3):379-385.
ZHOU J, WEN Z W, MEI Y Y, et al. The mechanism underlying the role of *SAUR*72 in *Arabidopsis* leaf senescence regulation[J]. Plant Physiology Communications, 2018, 54(3): 379-385.

[25] KNAUSS S, ROHRMEIER T, LEHLE L. The auxin-induced maize gene ZmSAUR2 encodes a short-lived nuclear protein expressed in elongating tissues[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2003, 278(26): 23936-23943.

[26] ZENG X C, XU Y Z, JIANG J J, et al. Identification of cold stress responsive microRNAs in two winter turnip rape (*Brassica rapa* L.) by high throughput sequencing[J]. BMC Plant Biology, 2018, 18(1): 52.

[27] 赵玉红,马骊,常瑜,等.STM 和 CUC2 基因对不同抗寒性白菜型冬油菜生长点的调控研究[J].中国油料作物学报,2019,41(2):157-165.
ZHAO Y H, MA L, CHANG Y, et al. Regulation of STM and CUC2 genes on apical meristem of cold - resistant winter Brassica rapa[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(2): 157-165.

[28] 金姣姣.基于生长锥和下胚轴分析甘蓝型冬油菜的抗寒性机制[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
JIN J J. The mechanism of cold resistance of winter rape(*Brassica napu* L.) based on growth point and hypocotyl[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.