DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.94089

马铃薯产量组分的基因型与环境互作及稳定性

叶夕苗¹ 程鑫¹ 安聪聪¹ 袁剑龙¹ 余斌¹ 文国宏² 李高峰²
程李香¹ 王玉萍¹ 张峰^{1,*}

¹ 甘肃农业大学 / 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室培育基地 / 甘肃省遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃兰州 730070;

² 甘肃省农业科学院 / 马铃薯研究所, 甘肃兰州 730070

摘 要: 本研究主要探究基因型和环境互作(genotype + genotypes and environment interactions, GGE)双标图在马铃薯育种中的应用。综合评价马铃薯品系产量性状在不同环境中的丰产性、稳定性和适应性, 筛选出适应不同生态环境的产量性状优良品系。同时评价各试点的区分力和代表性, 为试点的选择提供依据。2015 年和 2016 年在甘肃安定区鲁家沟镇、安定区内官镇、渭源县五竹镇 3 个试点种植国际马铃薯中心引进的 101 份高代品系和对照青薯 9 号。收获后记录小区产量、小区大薯产量、小区小薯产量、单株产量、单株大薯产量、单株小薯产量、单株结薯数、单株大薯数、单株小薯数; 采用联合方差和 GGE 双标图对产量性状进行基因型与环境互作分析。方差分析表明, 除小区小薯产量在基因型与环境互作效应中无显著差异外, 其他产量组分在基因型效应、环境效应和互作效应中均呈现极显著差异($P < 0.01$)。小区产量、小区大薯产量、小区小薯产量、单株产量、单株大薯产量、单株结薯数环境效应平方和占总方差平方和最大; 单株小薯产量、单株大薯数和单株小薯数的基因型与环境互作效应平方和占总方差平方和最大。GGE 分析结果表明, 适应性最强的品系在鲁家沟试点是 G86; 在五竹镇试点是 G65; 在内官镇试点是 G86。参试品系中丰产品系有 G86、G116、G124; 稳产品系有 G124、G125、G10; 高产稳产品系有 G86、G116、G124、青薯 9 号。单株大薯数高的品系有 G45、G86、G67, 稳定性好的品系有 G67、G116、G51, 对照青薯 9 号的单株大薯产量不稳定。综合鉴别力和代表性的强弱, 依次为鲁家沟镇 2016 年、鲁家沟镇 2015 年、五竹镇 2015 年、五竹镇 2016 年、内官镇 2015 年、内官镇 2016 年。GGE 模型能够直观地展现多年多点品系试验结果, 并客观评价参试品系的丰产性、稳定性和适应性, 同时可以对试点的代表性和区分力进行评价。以 GGE 模型综合评价, 高产稳产品系有 G116、G124、G125、G122、青薯 9 号; 高产不稳定的品系有 G86、G10、G121、G106、G107、G72。最理想的生态区试点是鲁家沟镇, 对品种的鉴别力最强的试点是五竹镇。

关键词: 产量组分; GGE 双标图; 多年多点; 试点评价

Genotype × environment interaction and stability of yield components for potato lines

YE Xi-Miao¹, CHENG Xin¹, AN Cong-Cong¹, YUAN Jian-Long¹, YU Bin¹, WEN Guo-Hong², LI Gao-Feng²,
CHENG Li-Xiang¹, WANG Yu-Ping¹, and ZHANG Feng^{1,*}

¹ Gansu Agricultural University / Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science / Gansu Key Laboratory of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, Gansu, China; ² Gansu Academy of Agricultural Sciences / Potato Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0101905), 国家自然科学基金项目(31471433), 甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-17)和甘肃省科技重大专项计划项目(17ZD2NA016)资助。

This study was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFD0101905), the National Natural Science Foundation of China (31471433), Gansu High Educational Scientific Special Project (2018C-17), and Gansu Province Science and Technology Major Special Projects (17ZD2NA016).

* 通信作者(Corresponding author): 张峰, E-mail: zhangf@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: yeximiaogs@163.com

Received (收稿日期): 2019-06-21; Accepted (接受日期): 2019-09-26; Published online (网络出版日期): 2019-10-11.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.s.20191011.1215.004.html>

Abstract: This study mainly focused on the application of GGE (genotype + genotypes and environment interactions) biplot in potato breeding, to evaluate the productivity, stability and adaptability of yield traits of potato lines in different environments comprehensively, and screen out the excellent lines adapted to different mage-environments. The representativeness and discriminating ability of each test-environment were also evaluated, providing a basis for the selection of test-environment. A total of 101 advanced lines from International Potato Center (CIP) and potato variety Qingshu 9 were planted in Neiguan Town, Lujiagou Town and Wuzhu Town of Gansu province in 2015 and 2016 to measure the plot yield, plot yield of large-sized tubers, plot yield of small-sized tubers, yield per plant, large-sized tuber yield per plant, small-sized tuber yield per plant, tuber number per plant, large-sized tuber number per plant and small-sized tuber number per plant. The genotype and environment interactions were analyzed by the combined analysis of variance and GGE biplot. Except the plot yield of small-sized tubers had no significant difference in genotype and environment interactions effect, all the other yield components had significant differences ($P < 0.01$) in genotype effect, environmental effect and genotype and environment interaction effect. The square sum of environmental effect on the plot yield, plot yield of large-sized tubers, plot yield of small-sized tubers, yield per plant, large-sized tuber yield per plant, tuber number per plant, and the square sum of genotype and environment interaction effect on the plot yield of small-sized tubers, the large-sized tuber number per plant, and the small-sized tuber number per plant were worth the largest in the square sum of total variance. The most adaptable lines in Lujiagou Town were G86, in Wuzhu Town G65, in Neiguan Town G86. The high-yield lines were G86, G116, and G124; the stable-yield lines were G124, G125, and G10; the high-yielding and stable lines were G86, G116, G124, and Qingshu 9. The lines with more large-sized tuber number per plant were G45, G86, and G67, and the lines with good stability were G67, G116, and G51. The variety Qingshu 9 did not have stable large-sized tuber yield per plant. According to the comprehensive discrimination and representativeness, the order of test-environments were Lujiagou Town in 2016, Lujiagou Town in 2015, Wuzhu Town in 2015, Wuzhu Town in 2016, Neiguan Town in 2015, and Neiguan Town in 2016. GGE model can intuitively display the results in the genotype-location-year framework, and objectively evaluate the productivity, stability and adaptability of tested lines, as well as the representativeness and discriminating ability of test-environment. According to the comprehensive evaluation of GGE model, the high-yielding and stable lines were G116, G124, G125, G122, and Qingshu 9, and the high-yielding and unstable lines were G86, G10, G121, G106, G107, and G72. The most ideal mage-environment is Lujiagou Town, and Wuzhu Town is the test-environment with the strongest discriminating ability for varieties identification.

Keywords: yield component; GGE biplot; multi-years and sites; pilot evaluation

马铃薯是主要的宜粮宜菜作物。为了选育出多适和多用途类型的品种,需要对各类种质资源和选育出的品系进行产量、抗性、品质等方面的系统评价,并获得在不同生态区的适应性、丰产性和稳定性的基础数据,综合评价和筛选出产量性状优良的品系^[1-2]。同时评价各试点的区分力和代表性,为引进资源和品系筛选的理想试点提供选择依据。不同的基因型在不同环境会表现出性状差异,这些差异是由基因型、环境以及基因型与环境互作效应共同作用的结果^[3]。前期的研究表明,作物多数性状都会表现出不同环境表型差异的互作现象^[4-7]。对于产量性状稳定性,早期的研究方法是平均产量的变异系数说明基因型的稳定性,这种方法只能说明基因型效应的差异,不能说明环境效应以及基因型与环境互作效应。利用线性回归对品种的稳定性研究也不能体现出品种对环境的适应性特点。应用方差分析评价品种的适应性不能分析环境效应和互作效应的关系^[8-11]。将互作效应分解为基因型分量和环境分量的 AMMI 模型,虽然可以用双标图直观展现基因型与环境互作关系。但 AMMI 模型只考虑互作效应,没有将互作效应和基因型主效相结合^[12]。基因型(G)和基因型与环境互作(GE)联合效应的 GGE 模型综

合考虑 G 和 GE 效应,可以同时为基因型和环境评价^[13]。前期 GGE 模型已经在水稻、小麦、玉米等作物的产量、抗性、品质的基因型、基因型和环境互作中进行了研究^[14-18]。对于马铃薯这样的同源四倍体作物,大量农艺性状由多个等位位点决定,基因主效性不显著的作物中,基于基因型和基因型与环境互作联合效应的研究还没有广泛开展和验证^[19-21]。本研究进行 2 年 3 点试验,拟通过 GGE 模型分析 101 份引进种质资源的高代品系产量及产量组分性状,阐述基因型与环境互作效应对评价马铃薯块茎产量和产量组分的实际效果,综合产量组分筛选出优良的品系,同时评价 GGE 模型在区分试验点的代表性和鉴别力方面的作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

引自国际马铃薯中心的 101 份高代品系(表 1),其高代品系来源于 5 类不同群体,包括 Population A、B3C1、LBHT1(晚熟、抗晚疫病、高淀粉,适宜油炸加工、耐热)、Intermediate LT-LB(中早熟、菜用、抗晚疫病)和 LTVR(耐热、抗病毒病、菜用、具低海拔高温适应性)(<https://cipotato.org/catalogue>),

表 1 102 份引进国际马铃薯中心高代品系

Table 1 102 introduced potato advanced lines from CIP

品系编号 Line number	CIP 编号 CIP entry	品系编号 Line number	CIP 编号 CIP entry	品系编号 Line number	CIP 编号 CIP entry
G1	CIP 381381.13	G45	CIP 385561.124	G92	CIP 397099.6
G3	CIP 391583.25	G46	CIP 388676.1	G93	CIP 397100.9
G4	CIP 392617.54	G48	CIP 390478.9	G94	CIP 397196.3
G5	CIP 392634.52	G49	CIP 391207.2	G95	CIP 397196.8
G8	CIP 393227.66	G50	CIP 391382.18	G96	CIP 397197.9
G9	CIP 393228.67	G51	CIP 392781.1	G98	CIP 388611.22
G10	CIP 393371.164	G52	CIP 392797.22 (青薯 9 号 Qingshu 9)	G99	CIP 388615.22
G11	CIP 391004.18	G53	CIP 392822.3	G100	CIP 389468.3
G12	CIP 392657.171	G54	CIP 392973.48	G101	CIP 390637.1
G13	CIP 393280.64	G56	CIP 394034.65	G102	CIP 391180.6
G14	CIP 391047.34	G57	CIP 394034.7	G104	CIP 391724.1
G15	CIP 391058.175	G58	CIP 394579.36	G105	CIP 392032.2
G16	CIP 393085.5	G59	CIP 394600.52	G106	CIP 392740.4
G17	CIP 398192.213	G61	CIP 394613.139	G107	CIP 392745.7
G18	CIP 398098.119	G62	CIP 394613.32	G108	CIP 392759.1
G19	CIP 398098.203	G63	CIP 394614.117	G109	CIP 393613.2
G21	CIP 398180.289	G64	CIP 394881.8	G110	CIP 393615.6
G22	CIP 398180.292	G65	CIP 395186.6	G112	CIP 397030.31
G23	CIP 398180.612	G67	CIP 395195.7	G113	CIP 397035.26
G25	CIP 398203.509	G68	CIP 395196.4	G114	CIP 302428.20
G27	CIP 398208.33	G70	CIP 395432.51	G115	CIP 302476.108
G30	CIP 301024.14	G71	CIP 395434.1	G116	CIP 302499.30
G31	CIP 301029.18	G72	CIP 395436.8	G118	CIP 304350.100
G32	CIP 301040.63	G74	CIP 396311.1	G119	CIP 304350.118
G33	CIP 300046.22	G77	CIP 397014.2	G120	CIP 304350.95
G35	CIP 300054.29	G79	CIP 397029.21	G121	CIP 304371.67
G36	CIP 300056.33	G81	CIP 397039.51	G122	CIP 304383.41
G37	CIP 300063.4	G82	CIP 397044.25	G123	CIP 304383.80
G39	CIP 300072.1	G84	CIP 397065.2	G124	CIP 304387.39
G40	CIP 300093.14	G85	CIP 397067.2	G125	CIP 304405.47
G41	CIP 300099.22	G86	CIP 397069.5	G127	CIP 397077.16
G42	CIP 300101.11	G87	CIP 397073.15	G128	CIP 391919.3
G43	CIP 379706.27	G88	CIP 397078.12	G129	CIP 391930.1
G44	CIP 385499.11	G91	CIP 397098.12	G131	CIP 394906.6

其中 G52 (CIP 392797.22)为试验对照品种青薯 9 号。

1.2 试验设计

2015 年和 2016 年分别在渭源县五竹镇、安定区内官镇和安定区鲁家沟镇 3 个试点(表 2)采用随机区组设计, 播种 50 g 切块种薯, 设每个品种(系) 3 个小区, 单垄双行种植, 行距 40 cm, 株距 25 cm, 小区面积为 1.1 m × 2.5 m。所有试验不施肥, 无灌溉, 苗期进行覆土固苗(10~15 cm 覆土深度), 其余栽培和田间管理措

施均按统一方法, 保持各地块一致。每年 4 月 25 日至 30 日播种, 9 月 15 日至 25 日收获。收获期测定产量和产量组分。参照《马铃薯试验研究方法》^[22]统计小区产量、小区大薯产量、小区小薯产量; 单株产量、单株大薯产量、单株小薯产量; 单株结薯数、单株大薯数、单株小薯数(块茎大小以 75 g 为界限划分)。

1.3 试验点平均降水和气温状况

2015—2016 年五竹镇年平均降水量 437.6 mm,

年平均气温 6.4 , 内官镇年平均降水量 529 mm, 年平均气温 9.9 , 鲁家沟镇年平均降水量 253 mm, 年平均气温 9.1 。3 个试验点的平均降水和气温状况(表 2)均高于历史平均值, 其中内官镇的年平均降水量比历史平均值增加了 35%。产量组分分析中, 环境为试验地点和年份的组合。

表 2 试点环境
Table 2 Basic information of tested locations

试点 Location	试点编号 Location code	海拔 Altitude (m)	年降水量 Annual precipitation (mm)	年日照时数 Annual sunshine (h)	年平均温度 Mean annual temperature (°C)	无霜期 Frostless period (d)
五竹镇 Wuzhuzhen	WZ	2450	540	2462	3.5	145
内官镇 Neiguanzhen	NG	2080	390	2050	6.2	141
鲁家沟镇 Lujiagouzhen	LJG	1898	220	2780	6.3	160

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件统计分析数据。采用 GGEbiplot 8.0 软件处理基因型和环境互作模型数据。

1.5 稳定性分析

GGE 模型被称为环境中心化的主成分分析, 在原始数据中减去环境的平均值后将基因型在互作效应中进行奇异值分解^[23]。

$$Y_{ger} = \mu + \beta_e + \sum \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + \rho_{ge} + \varepsilon_{ger} \quad (1)$$

其中, Y_{ger} 是基因型 g 在环境 e 中的第 r 个重复的产量或者其他性状值。 μ 是总体平均值, β_e 是环境 e 的均值。 λ_n 是第 n 个主成分的奇异值, γ_{gn} 是基因型 g 在第 n 个特征向量得分, δ_{en} 是环境 e 在第 n 个特征向量得分, ρ_{ge} 基因型 g 在环境 e 的残差, ε_{ger} 是总体误差。

GGE 双标图是基于前 2 个主成分 PC1 和 PC2, 因此公式(1)可转化如下:

$$Y_{ger} = \mu + \beta_e + \lambda_1 \gamma_{g1} \delta_{e1} + \lambda_1 \gamma_{g2} \delta_{e2} + \rho_{ge} + \varepsilon_{ger} \quad (2)$$

其中, λ_1 是第 1 个主成分的奇异值, γ_{g1} 是基因型 g 在

第 1 个特征向量得分。 δ_{e1} 是环境 e 在第 1 个特征向量得分, 以此类推。

2 结果与分析

2.1 方差分析

高代品系产量性状及产量组分在基因型、环境和基因型×环境互作效应均极显著, 而小区小薯产量在基因型与环境互作方面差异不显著(表 3)。产量性状组分中单株小薯产量、单株小薯数的互作效应平方和占总方差平方和比例分别为 39.1%和 35.0%, 基因型效应占比分别为 18.9%、19.6%, 环境效应占比分别为 2.3%和 2.1%; 小区产量、小区大薯产量、小区小薯产量、单株产量、单株大薯产量和单株结薯数环境效应的平方和占比分别为 34.0%、28.0%、18.2%、25.9%、24.7%和 32.8%, 互作效应占比分别为 33.4%、27.6%、22.8%、12.1%、22.8%、22.90%和 26.7%, 基因型效应占比分别为 17.2%、3.4%、8.6%、15.5%、16.0%和 10.6%。单株大薯数互作效应平方和占比为 33.9%, 环境效应占比 19.5%, 基因型效应占比为 3.7%。

表 3 马铃薯产量性状方差分析
Table 3 Analysis of variance for yield traits in potato lines

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 检验 F-test	显著性 Significance
小区产量 Plot yield	基因型 G	101	6142.832	60.8201	26.97	< 0.001
	环境 E	5	12098.734	1228.566	276.57	< 0.001
	互作 G × E	505	11907.641	23.579	5.31	< 0.001
	残差 Residual	1224	5437.244	4.442		
	总变异 Total	1835	35586.452			
小区大薯产量 Plot yield of large-sized tuber	基因型 G	101	933.319	9.2408	8.29	< 0.001
	环境 E	5	7671.285	1534.257	20.39	< 0.001
	互作 G × E	505	7585.699	15.021	1.64	< 0.001

(续表 3)

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 检验 F-test	显著性 Significance
小区小薯产量 Plot yield of small-sized tuber	残差 Residual	1224	11207.720	9.157		
	总变异 Total	1835	27398.024			
	基因型 G	101	1323.103	13.100	1.71	< 0.001
	环境 E	5	2806.794	561.359	73.31	< 0.001
	互作 G × E	505	1867.107	3.697	0.48	1
单株产量 Yield of tuber per plant	残差 Residual	1224	9372.213	7.657		
	总变异 Total	1835	15369.218			
	基因型 G	101	119.526	1.1834	5.30	< 0.001
	环境 E	5	198.688	39.7376	177.82	< 0.001
	互作 G × E	505	174.808	0.3462	1.55	< 0.001
单株大薯产量 Yield of large-sized tubers per plant	残差 Residual	1224	273.529	0.2235		
	总变异 Total	1835	766.550			
	基因型 G	101	119.390	1.1821	5.38	< 0.001
	环境 E	5	183.742	36.7485	167.16	< 0.001
	互作 G × E	505	169.916	0.3365	1.53	< 0.001
单株小薯产量 Yield of small-sized tubers per plant	残差 Residual	1224	269.091	0.2198		
	总变异 Total	1835	742.139			
	基因型 G	101	2.882	0.0285	5.79	< 0.001
	环境 E	5	0.352	0.0704	14.28	< 0.001
	互作 G × E	505	5.948	0.0118	2.39	< 0.001
单株结薯数 Number of tuber per plant	残差 Residual	1224	6.029	0.0049		
	总变异 Total	1835	15.211			
	基因型 G	101	2978.502	29.490	4.32	< 0.001
	环境 E	5	9208.894	1841.779	270.03	< 0.001
	互作 G × E	505	7497.026	14.846	2.18	< 0.001
单株大薯数 Number of large-sized tubers per plant	残差 Residual	1224	8348.500	6.821		
	总变异 Total	1835	28032.922			
	基因型 G	101	475.476	4.708	5.54	< 0.001
	环境 E	5	2510.065	502.014	21.21	< 0.001
	互作 G × E	505	4349.834	8.614	1.92	< 0.001
单株小薯数 Number of small-sized tubers per plant	残差 Residual	1224	5487.667	4.483		
	总变异 Total	1835	12822.982			
	基因型 G	101	2434.490	24.104	5.51	< 0.001
	环境 E	5	270.209	54.042	12.35	< 0.001
	互作 G × E	505	4347.791	8.609	1.97	< 0.001
		残差 Residual	1224	5354.333	4.374	
		总变异 Total	1835	12406.824		

G: genotype; E: environment; G × E: genotype × environment.

2.2 产量性状适应性 GGE 双标图分析

GGE 双标图的多边形图(which-won-where)根据基因型-环境的互作效应对试点分组(图 1-A~F), 多边形由同一方向上距离原点最远的基因型连接而成, 所有基因型都包括在内。通过从原点到多边形各边

垂线将双标图分成若干扇区, 试点落在扇区中不同区域。GGE 多边形图中基因型小区产量、小区大薯产量、小区小薯产量、单株产量、单株大薯产量和单株小薯产量 G+GE 占比分别为 74.9%、77.7%、65.4%、69.8%、70.1%和 68.0% (图 1-A~F)。

试点所在区域中,“角顶”基因型是产量最高的基因型。小区产量 GGE 双标图中, G86、G27、G43、G53、G41、G109、G1、G65 连接成多边形, 8 条射线将多边形分为 2 个扇区, 第一个扇区位于射线 1 和 2 之间, 试点内官镇和鲁家沟镇落在扇区 1 内,

G86 产量最高; 第二个扇区位于射线 1 和 8 之间, 试点五竹镇落在扇区 2 内, G65 产量最高。无试点的扇区中,“角顶”基因型在所有试点中表现不佳。没有试点落于以基因型 G43、G53、G41、G109、G1 为角顶的区内, 这 5 个基因型在所有试点中小区产

图 1 产量性状适应性 GGE 分析

Fig. 1 Analysis of yield traits adaptability by the GGE biplot

A: 小区产量; B: 小区大薯产量; C: 小区小薯产量; D: 单株产量; E: 单株大薯产量; F: 单株小薯产量。

A: the yield of plot; B: the plot yield of large-sized tuber; C: the plot yield of small-sized tuber; D: the yield per plant; E: the yield of large-sized tubers per plant; F: the yield of small-sized tubers per plant.

量表现不佳(图 1-A)。“角顶”基因型不同,连接成的多边形不同,产量相关性状双标图被分成不同的扇区,相同试点中优势基因型不同(图 1-A~F)。小区大薯产量 GGE 双标图中, G86、G79、G53、G41、G1、G16 连接成的多边形分为 2 个扇区,试点内官镇和鲁家沟镇中 G86 产量最高,试点五竹镇中 G16 产量最高(图 1-B); 小区小薯产量 GGE 双标图中 G14、G25、G70、G43、G12、G109、G10 连接成的多边形分为 2 个扇区,试点内官镇和鲁家沟镇中 G70 产量最高,试点五竹镇中 G10 的产量最高(图 1-C); 单株产量 GGE 双标图中 G86、G113、青薯 9 号、G67、G68、G101、G22、G25、G109、G116 连接成的多边形分为 3 个扇区,试点鲁家沟镇中 G113 产量最高,试点五竹镇中 G86 的产量最高,试点内官镇 2016 年青薯 9 号产量最高(图 1-D); 单株大薯产量 GGE 双标图中 G113、G67、G68、G114、G25、G109、G116 连接成的多边形分为 3 个扇区,试点鲁家沟镇和内官镇 2015 年中 G113 产量最高,试点 2016 年内官镇中 G67 产量最高,鲁家沟镇和内官镇 2015、2016 年中青薯 9 号产量均在多边形边线上,属于 2 个区域的高产品种,试点五竹镇中 G116 产量最高(图 1-E); 单株小薯产量 GGE 双标图中 G11、G44、G36、G99、G54、G10、G14 连接成的多边形分为 3 个扇区,试点鲁家沟镇中 G11 产量最高,试点内官镇中 G36 产量最高,试点五竹镇中 G10 产量最高(图 1-F)。

2.3 产量丰产性和稳定性 GGE 双标图分析

理想基因型应具有最高的产量均值和最高的稳定性。产量丰产性和稳定性 GGE 双标图(Mean vs. stability view)呈现的是基因型的高产性与稳定性。单向箭头从原点指向平均环境作为平均环境轴(average environment axis, AEA), 箭头所指方向代表较高的产量平均值。垂直于 AEA 轴的双向箭头的直线为纵轴, 作为平均环境坐标(average environment coordination, AEC), 2 个箭头指向较不稳定产量平均值, 越接近于 AEA 轴, 基因型稳定性越好, GE 效应越小(图 2-A~F)。

小区产量 GGE 双标图中, 各试点中平均产量依次为 G86、G124、G116 等, G131 平均产量最低; 各试点中产量稳定性依次以 G124、G82、G64 等最高, G65 稳定性最差; 各试点中高产不稳定的基因型有 G86、G94、G27 等; 各试点中低产稳定的基因型有 G64、G82、G39 等; 各试点中高产稳定基因型有 G124、G125、G122 (图 2-A)。小区大薯产量 GGE

双标图中, 各试点中平均产量依次为 G86、G125、G122 等, G41 平均产量最低; 各试点中产量稳定性依次为 G57、G64、G58 等; 各试点中高产不稳定的基因型有 G86、G85、G65 等; 各试点中低产稳定的基因型有 G64、G44、G58 等; 各试点中高产稳定的基因型有 G125、G124、G121 (图 2-B)。小区小薯产量 GGE 双标图中, 各试点中平均产量依次为 G25、G116、G14 等; 各试点中产量稳定性依次为 G62、G120、G123 等; 各试点中高产不稳定的基因型有 G14、G74、G70 等; 各试点中低产稳定的基因型有 G17、G62、G22 等; 各试点中高产稳定的基因型有 G123、G124、G91 (图 2-C)。青薯 9 号在小区产量、小区大薯产量和小区小薯产量上均呈现较高的稳定性。

单株产量 GGE 双标图中, 各试点中平均产量依次为 G113、G86、G108 等; 各试点中产量稳定性依次为 G99、G102、G17 等; 各试点中高产不稳定的基因型有 G86、G108、G116 等; 各试点中低产稳定的基因型有 G12、G98、G49 等; 各试点中高产稳定的基因型有 G113、G45、G99 (图 2-D)。单株大薯产量 GGE 双标图中, 各试点中平均产量依次为 G113、G86、G108 等; 各试点中产量稳定性依次为 G51、G102、G1 等; 各试点中高产不稳定的基因型有 G125、G116, 青薯 9 号在单株大薯产量中同样呈现出高产不稳定; 各试点中低产稳定的基因型有 G98、G37、G44 等; 各试点中高产稳定的基因型有 G45、G87、G96 (图 2-E)。单株小薯产量 GGE 双标图中, 各试点中平均产量依次为 G11、G44、G128 等; 各试点中产量稳定性依次为 G58、G32、G87 等; 各试点中高产不稳定的基因型有 G44、G51、G14 等; 各试点中低产稳定的基因型有 G12、G67、G108 等; 各试点中高产稳定的基因型有 G25、G98、G85 (图 2-F)。

2.4 试点鉴别力和代表性 GGE 双标图分析

试点评价 GGE 双标图中接近原点的小圆圈代表平均环境, 通过原点和平均环境的单向直线所指同心圆的中心代表理想试点。双标图中的同心圆有助于判断平均环境到 AEA、AEC 和双标图原点的距离。理想试点应该是有鉴别力和代表性的。理想试点是所有试点中向量最长, 且具有绝对代表性的虚拟试点。试点向量越长, 对基因型鉴别力越强; 试点与 AEA 的夹角越小, 对理想环境代表性越强。2 个试点向量间夹角的余弦值与它们之间的遗传相关系

图 2 丰产性和稳定性 GGE 分析

Fig. 2 Mean yield performance and stability of potato lines by the GGE biplot

A: 小区产量; B: 小区大薯产量; C: 小区小薯产量; D: 单株产量; E: 单株大薯产量; F: 单株小薯产量。

A: the yield of plot; B: the plot yield of large-sized tuber; C: the plot yield of small-sized tuber; D: the yield per plant; E: the yield of large-sized tubers per plant; F: the yield of small-sized tubers per plant.

数近似, 夹角小于 90 度表示正相关, 对品种排序相似, 大于 90 度表示负相关, 对品种排序相反, 等于 90 度, 两试点不相关。

在试点评价 GGE 双标图中, 3 个试点被分为 2 个差异明显的品种生态区, 五竹镇属一个品种生态

区, 内官镇和鲁家沟镇属另外一个相同生态区。同一试点年份间鉴别力和代表性存在差别, 3 个试点 2016 年较 2015 年对基因型鉴别力更强, 而 2015 年环境代表性较 2016 年更强(图 3-A~F)。试点鲁家沟镇和内官镇在 2015 年和 2016 年份对产量组分中小

区产量、小区大薯产量、单株产量和单株大薯产量鉴别最接近理想试点; 五竹镇是 2015 年和 2016 年份中鉴别力最强的试点(图 3-A, B, D, E)。试点鲁家沟镇 2016 年份对小区小薯产量最具鉴别力, 鲁家沟镇 2015 最具代表性。综合鉴别力和代表性, 试点排序依次为鲁家沟镇 2015、鲁家沟镇 2016、五竹镇

2016、五竹镇 2015、内官镇 2015、内官镇 2016(图 3-C)。单株小薯产量 GGE 双标图中, 试点五竹镇 2016 最具鉴别力, 鲁家沟镇 2015 最具代表性, 综合鉴别力和代表性, 试点排序依次为鲁家沟镇 2016、鲁家沟镇 2015、五竹镇 2015、五竹镇 2016、内官镇 2015、内官镇 2016(图 3-F)。

图 3 品系综合评价、环境代表性和鉴别力

Fig. 3 Lines ranking of comprehensive evaluation, environmental representativeness and the discriminating by the GGE biplot

A: 小区产量; B: 小区大薯产量; C: 小区小薯产量; D: 单株产量; E: 单株大薯产量; F: 单株小薯产量。

A: the yield of plot; B: the plot yield of large-sized tuber; C: the plot yield of small-sized tuber; D: the yield per plant; E: the yield of large-sized tubers per plant; F: the yield of small-sized tubers per plant.

3 讨论

多数品种试验数据分析都是基于单一产量、品质或抗性单个性状的数据,但实际上在育种时需要同时考虑多个性状。基于单一性状组分综合分析得出的结论比单一性状分析的结论更重要^[23-24]。按照马铃薯单一产量性状分析,仅仅能够得出品系总产量数据,不能从总产量中获得大、小薯产量,单株大、小薯数及结薯数数据和影响这些数据的主要原因^[25-26]。

对3个试点马铃薯产量性状组分分析中发现,小区总产量和大薯产量环境及互作效应中环境和互作效应分别占总变异61.6%和50.8%,其中互作效应是影响小区总产量和大薯产量首要因素,各参试品系小区产量和大薯产量数据和图形相符;小区小薯产量中环境效应占总变异18.2%,环境是决定小区小薯产量的首要因素。对小区总产量、小区大薯产量与小区小薯产量决定因素不同,所以小区产量组分的GGE产量图中小区小薯产量图与前二者不相符。环境效应是决定单株产量和单株大薯产量的首要因素,互作效应是影响单株小薯产量首要因素。品系产量组分中结薯数是衡量产量的重要数据,但仅结薯数的数据不能完全说明结薯的整齐度和品系大薯、小薯的分布程度。单株结薯数受环境效应影响显著,与单株大小薯产量相关的单株大薯数和单株小薯数受互作效应影响显著。因基因型、环境、基因型与环境互作对各产量组分决定程度有差异,反映在产量适应性的双标图中,多边形图形有相似和不同。依照GGE产量适应性对参试品系的分析,在3个试点适应性均强的品系有G113、G106、G104和G116。青薯9号单株大薯产量同样受环境及互作效应影响显著,呈现出大薯产量不稳定。

品种试验中除需要评价每个产量性状中的组分形成的原因,还需要分析在多年品种试验中每个品种产量组分的稳定性^[27-28]。对2年3个试点马铃薯产量组分的稳定性分析发现,小区总产量、小区大薯产量的稳定性主要取决于环境和互作效应,其中环境效应是首要因素,小区小薯产量稳定性取决于互作效应。环境效应和互作效应是影响单株产量和单株大小薯产量与单株小薯产量稳定性的主要因素。本研究评估的所有产量组分中,环境、基因型与环境互作效应决定产量组分内稳定性的差异,基因型效应很小。依据产量性状的稳定性选择基因型时,试验地点的效应是显著的,可以为特定的环境

选育稳定性差的高产基因型或者稳定性强的一般基因型。试点环境对于所有产量组分都有显著影响时,就需要选育出在不同环境中性状稳定性高的基因型。按小区产量来选择,可将所有基因型可以分为三类。第一类是具有高产稳定性基因型,如G124、G125、G122、G10、G107、G25、青薯9号,这类基因型可适应于不同生态环境。第二类是高产不稳定性基因型,如G86、G94、G27、G65、G16、G79、G3,这类基因型可适于特定的环境。第三类基因型是低产稳定性的基因型,如G64、G82、G39、G4、G23、G22、G95,这类基因型可用于除产量以外的品质性状选择。广适高产稳定性强的基因型在各试点都体现出基因型主效显著,互作效应显著时表现为环境对基因型有利。广适高产稳定性差基因型在各试点的基因型主效差异显著,不同基因型受互作效应影响差异同样显著,这类在特定生态区表现出高产稳定性的品种是主要选择对象。筛选特定生态区高产稳定性强的基因型是更有效的品种稳定性选择方法。

试点评价的目的是鉴别试点是否适合品种试验,核心试点应该对目标环境具有高度代表性,同时对基因型的差异具有很强的鉴别力^[23]。如何判断品种试验设置的试点是否是同一生态下的最佳试点是提高品种选择效率的重要工作。试点GGE双标图能够将年份和试点分开展示,在3个试点鉴别各基因型,所有产量组分在2个年份中鲁家沟镇和五竹镇表现一致,环境和基因型互作效应在年份间不显著。各基因型小区小薯产量在试点内官镇的2个年份间差异显著,原因是年份间的气候变化。产量组分最高的基因型因试点不同存在差异,根据试点年份的组合环境划分为不同的品种生态区,环境分组与试点气候条件相符,3个试点中内官镇和鲁家沟镇同属典型的干旱和半干旱生态区,而五竹镇属高寒阴湿区。同属干旱半干旱区的2个试点中鲁家沟镇对目标生态区域的代表性强于内官镇,但在2个生态区中,高寒阴湿区的试点五竹镇比干旱半干旱区试点鲁家沟镇和内官镇有鉴别力。

4 结论

GGE模型对产量各组分分析可以综合评价并筛选出优良品系。本研究筛选出的高产稳定品系有G116、G124、G125、G122和青薯9号,高产不稳定的品系有G86、G10、G121、G106、G107和G72。最理想的生态区试点是鲁家沟镇,对品种的鉴别力

最强的试点是渭源五竹镇。

References

- [1] Zaheer K, Akhta M H. Potato production, usage, and nutrition-a review. *Crit Rev Food Sci*, 2014, 56: 711–721.
- [2] 王玉萍, 隋景航, 梁延超, 卢潇. 甘肃省两个生态区马铃薯加工品质差异和加工品系筛选. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51(5): 39–45.
Wang Y P, Sui J H, Liang Y C, Lu X. Screening for potato processing lines with tuber quality index from two ecoregions. *J Gansu Agric Univ*, 2016, 51(5): 39–45 (in Chinese with English abstract).
- [3] Mulema J M K, Adipala E, Olanya O M. Yield stability analysis of late blight resistant potato selections. *Crop Sci*, 2016, 56: 1645–1661.
- [4] Padi F K. Relationship between stress tolerance and grain yield stability in cowpea. *J Agric Sci*, 2004, 142: 431–443.
- [5] Bednarz C W, Bridges D C, Brown S M. Analysis of cotton yield stability across population densities. *Semigroup Forum*, 2000, 92: 128–135.
- [6] Fan X M, Kang M S, Chen H M. Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agron J*, 2007, 99: 220–228.
- [7] Mekbib F. Yield stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Euphytica*, 2003, 130: 147–153.
- [8] Aastveit A H, Martens H. ANOVA interactions interpreted by partial least squares regression. *Biometrics*, 1986, 42: 829–844.
- [9] Eberhart S A, Russel W A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci*, 1966, 6: 36–40.
- [10] Blouin D C, Webster E P, Bond J A. On the analysis of combined experiments. *Weed Technol*, 2015, 25: 165–169.
- [11] Kang M S. Simultaneous Selection for yield and stability in crop performance trials: consequences for growers. *Agron J*, 1993, 85: 754–757.
- [12] Gauch H G. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci*, 2006, 46: 1488–1500.
- [13] Yan W K, Fetch J M, Fregeau-reid J. Genotype $\times$ location interaction patterns and testing strategies for oat in the Canadian. *Prairies*, 2011, 51: 1903–1914.
- [14] Yan W K, Kang M S, Ma B L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci*, 2007, 47: 641–653.
- [15] Nzuve F, Githiri S, Mulunya D M. Analysis of genotype $\times$ environment interaction for grain yield in maize hybrids. *J Agric Sci*, 2013, 5: 75–85.
- [16] Soto B J, Duquid S, Booker H. Genomic regions underlying agronomic traits in linseed (*Linum usitatissimum* L.) as revealed by association mapping. *J Integr Plant Biol*, 2014, 56: 75–87.
- [17] Murphy S E, Lee E A, Woodrow L. Genotype $\times$ environment interaction and stability for isoflavone content in Soybean. *Crop Sci*, 2009, 49: 1313–1321.
- [18] Wachira F, Ngetich W, Omolo J. Genotype $\times$ environment interactions for tea yields. *Euphytica*, 2002, 127: 289–297.
- [19] Burgueño J, Campos G D L, Weigel K. Genomic prediction of breeding values when modeling genotype $\times$ environment interaction using pedigree and dense molecular markers. *Crop Sci*, 2012, 52: 707–712.
- [20] Phuke R M, Anuradha K, Radhika K, Jabeen F, Anuradha G, Ramesh T, Hariprasanna K, Mehtre S P, Deshpande S P, Anil G, Das R R, Rathore A, Hash T, Reddy B V S, Kumar A A. Genotype $\times$ environment interaction, correlation, and GGE Biplot analysis for grain Iron and zinc concentration and other agronomic traits in RIL population of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Front Plant Sci*, 2017, 5: 712–716.
- [21] Zolfaghar S, Bahram H, Dadkhodaie A. Dissection of genotype $\times$ environment interactions for mucilage and seed yield in *Plantago species*: application of AMMI and GGE biplot analyses. *PLoS One*, 2018, 13: e0196095.
- [22] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007. pp 90–93.
Zhang Y C, Tian F. Potato Experiment Test Research Method. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2007. pp 90–93 (in Chinese).
- [23] 严威凯. 农作物品种试验数据管理与分析. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. pp 133–146.
Yan W K. Crop Variety Trials Data Management and Analysis. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2015. pp 133–146 (in Chinese).
- [24] Dia M, Weherr T C, Hassel R, Price D S. Genotype $\times$ environment interaction and stability analysis for watermelon fruit yield in the United States. *Crop Sci*, 2016, 56: 1645–1661.
- [25] Wang R H, Hu D H, Zheng H Q, Yun S. Genotype $\times$ environmental interaction by AMMI and GGE biplot analysis for the provenances of *Michelia chapensis* in South China. *J For Res*, 2016, 27: 659–664.
- [26] Muthoni J, Shimelis H, Melis R. Genotype $\times$ environment interaction and stability of potato tuber yield and bacterial wilt resistance in Kenya *Am J Potato Res*, 2015, 92: 367–378.
- [27] 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: 1805–1819.
Yan W K. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1805–1819 (in Chinese with English abstract).
- [28] 严威凯, 盛庆来, 胡跃高, Hunt L A. GGE 叠图法: 分析品种火环境互作模式的理想方法. *作物学报*, 2001, 27: 21–28.
Yan W K, Sheng Q L, Hu Y G, Hunt L A. GGE Biplot: an ideal tool for studying genotype by environment interaction of regional yield trial data. *Acta Agron Sin*, 2001, 27: 21–28 (in Chinese with English abstract).