

GGE 双标图在西北旱区马铃薯新品种选育中的应用

李亚杰¹, 罗磊¹, 白江平², 王娟¹, 姚彦红¹,
黄凯¹, 刘毅³, 王兴政¹, 李德明¹

(1. 定西市农业科学研究院, 甘肃 定西 743000; 2. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070;
3. 定西市安定区团结镇人民政府, 甘肃 定西 743000)

摘要: 采用 GGE 双标图将西北旱区马铃薯品比试验中的 42 个参试品系的产量、株高、主茎数、单株块茎数、单株薯块质量、商品薯率等农艺性状展示在双标图中进行综合分析。结果表明, 在参加马铃薯品比试验的 42 个品系中, G38(0903-111) 与产量和单株薯块质量关系相互作用大; G16(0904-25)、G30(0904-51)、G31(0773-9)、G35(0773-3) 与主茎数、单株薯块数相互作用大; G1(0913-27)、G2(0911-101)、G6(0929-6)、G9(0904-75)、G20(0907-25)、G23(0904-11)、G24(0904-15) 等品系与株高和商品薯率的相互作用较大。表现较好的品系有 G38(0903-111)、G16(0904-25)、G31(0773-9)、G1(0913-27) 等, 其中品系 G38(0903-111) 综合表现最好。参加品比试验的 6 个农艺性状中, 产量和单株薯块质量相比其它农艺性状, 具有很强的代表性, 能够准确反映出试验各品系的表现特性。单株薯块数和商品薯率对各品系表现的区分力强。

关键词: 马铃薯; GGE 双标图; 品系比较试验; 农艺性状; 产量
中图分类号: S332.1 **文献标志码:** A

The application of GGE – biplot in the potato breeding in the Northwest China

LI Ya-jie¹, LUO Lei¹, BAI Jiang-ping², WANG Juan¹, YAO Yan-hong¹, HUANG Kai¹,
LIU Yi³, WANG Xing-zheng¹, LI De-ming¹

(1. Dingxi Agricultural Science Research Institute, Dingxi, Gansu 743000, China;
2. Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. The People's Government of Tuanjie Town, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: GGE – biplot was first used in this study for comprehensive analysis of agronomic traits of potato in the northwestern arid regions of China. The experimental results showed that there were closed interactions for G38(0903-111) with yield and tuber quality per plant; G16(0904-25), G30(0904-51), G31(0773-9), G35(0773-3) with main stem number and the number of tuber per plant; G1(0913-27), G2(0911-101), G6(0929-6), G9(0904-75), G20(0907-25), G23(0904-11), G24(0904-15) and other lines with plant height and potato commodity rate, respectively. G38(0903-111), G16(0904-25), G31(0773-9) and G1(0913-27) have good performance and the G38(0903-111) has the best performance in the 42 potato lines. For the six agronomic traits participated in the experiment, yield and tuber quality per plant can accurately reflect the characteristics of the test lines compared with other agronomic traits and have great representativeness, the number of tuber per plant and commodity potato rate of each line has fine discrimination.

Keywords: potato; GGE – biplot; comparative trials; agronomic traits; yield

在常规育种试验中, 品系比较试验是作物育种 程序中的关键步骤, 主要针对品种丰产性、稳定性、

收稿日期: 2016-04-12 修回日期: 2016-06-12
基金项目: 国家科技支撑计划项目“西北区马铃薯节水高效关键技术与示范(2012BAD06B03)”；现代农业产业技术体系专项资金(CARS-10)；农业科技成果转化资金(2014GB2G100146)
作者简介: 李亚杰(1986—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事马铃薯遗传育种。E-mail: liyajie_2008@163.com。
通信作者: 李德明(1963—), 男, 甘肃会宁人, 研究员, 主要从事马铃薯遗传育种。E-mail: dxlideming@163.com。
王兴政(1980—), 男, 甘肃定西人, 副研究员, 主要从事作物遗传育种。E-mail: wangxingzheng763@163.com。

抗逆性等特点进行分析对比,筛选出综合性状优良的品系进行区域试验,淘汰表现较差的品系,对于优良新品种的选育尤为重要,但是由于参试品系多,性状特点复杂,影响因子多,往往在最终结果处理中难以进行全面综合性分析。

基因型主效应及其与环境互作 (genotype main effect plus genotype – environment interaction, GGE) 双标图是研究基因型与环境互作以及不同环境下作物品系产量稳定性的新方法,该模型采用环境中心化后的数据,结果中只含有与品系评价有关的 G(品系效应)和 GE(品系与环境互作效应),是分析多点试验数据的理想工具^[1-2]。同时,GGE 双标图给出了品系与环境及其相互关系的信息,包括确定某一特定环境下最好的品系,某一特定品系最适宜的环境,任意的两品系在不同环境中的表现如何,什么品系是高产、稳产品系,什么是有利于筛选高产、稳产品系的环境等。对此,通过其在水麦^[3-4]、大豆^[5]、花生^[6]、油菜^[7]、芝麻^[8]、燕麦^[9]的区域试验和栽培试验的成功应用,GGE 双标图已经被证明是一种有效的分析基因环境互作的方法。

GGE 双标图的应用不限于多点试验数据分析,对数据的限制性不大,只要能够整理成两向表的形式,就可以用双标图进行直观分析。农业科研工作者将双标图多用于品种 – 环境、双列杂交^[7,10]、环境条件 – 作物性状^[6]等分析,本文中提到的品种 – 多性状^[11-12]双标图分析在作物育种试验中出现较少。

马铃薯是西北区主要栽培作物之一,马铃薯种植是甘肃省农村经济最具优势和最有特色的产业之一,主要分布在中部干旱、半干旱地区和高寒阴湿地区,中部地区马铃薯面积占全省马铃薯种植面积的 60% 以上。新品种的选育推广是推动西北区马铃薯产业发展的主要动力。为了更清晰地描述品比试验中马铃薯各品系与环境互作的表现情况,帮助马铃薯育种专家进行多品系多性状综合分析,确定入选多点试验的品系,在本文中利用 GGE 双标图将品系比较试验的各项性状指标数据进行综合分析比较,通过双标图的形式展现在育种工作者的面前。在双标图中包含品比圃中各品系的主要性状,包括株高、主茎数、单株块茎数、单株薯块质量、产量、商品薯率。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 2014 年参加甘肃省定西市农科院马铃薯品系比较试验的各品系,以陇薯 6 号为对照

品系(CK)(表 1)。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,各品系(系)在试验点随机种植 3 个小区,每个小区种植 5 行,播种量为 100 株。设计小区长 4.5 m,宽 3.0 m,面积为 13.5 m²,株距、行距分别为 30 cm 和 70 cm。每个重复内部的小区之间不留走道,试验地四周设有保护行,种植、灌溉、施肥等条件相同,收获测产时对每个小区单收单测称重。

试验地点位于定西市安定区市农科院育种基地,地跨北纬 35°17'54"至 36°02'40"、东经 104°12'48"至 105°01'06"之间,属中温带干旱、半干旱区,大陆性季风气候显著。年平均日照 2 500 h。年均气温 6.3℃,极端最高温 34.3℃,无霜期 141 d。全区正常年降水量 400 mm 左右,多集中在秋季,蒸发量高达 1 500 多毫米。

1.3 数据处理

试验数据应用 Excel 进行统计编辑,采用甘肃农业大学白江平博士提供的基因 – 基因环境互作分析软件(GGEbiplot 6.3)进行双标图^[13]分析,方差分析采用 SPSS17.0 统计分析软件。

1.4 分析方法

GGE 双标图理论由两个概念构成:双标图, GGE。该方法理论利用双标图去表示基因(G)与基因环境互作(GE)两个因素的关系(G + GE)。

双标图属于一种 2 维矩阵图,通过对含有品系环境的 2 维矩阵进行特征值分解(Singular Value Decomposition, SVD),将一个含有品系环境的区域试验数据集进行主成分分析,其中解释变异最多的主成分叫第一主成分(PC1),第二多的主成分叫第二主成分(PC2)。

GGE 双标图的数学模型是考虑品系总体效应(G)和品系 × 环境互作(GE)的方法,多品系多环境试验产量一般可分解为:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \epsilon_{ij}$$

Y_{ij} 为基因型 i 在环境 j 中的产量, $\bar{Y}_j$ 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:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \xi_{i1} \eta_{j1} + \xi_{i2} \eta_{j2}, \xi_{in} = \lambda \frac{1}{n} \xi_{in}, \eta_{jn} = \lambda \frac{1}{n} \eta_{jn}, n = 1, 2$$

GGE 双标图由 ξ_{i1}, η_{j1} 与 ξ_{i2}, η_{j2} 组成,为了使

GGE 双标图更容易、更全面地显示两向数据表中的信息结果。

表 1 参加马铃薯新品系选育的各品系产量及农艺性状

Table 1 Yield and agronomic traits of lines participated in the potato breeding

编号 Codes	品系 Lines	主茎数 Main stem	株高/cm Height	单株薯块数 Tuber number per plant	单株薯块质量/g Tuber quality per plant	商品薯率/% Commodity rate	产量/kg Yield
G1	0913 – 27	2.7	60.0	4.0	687.2	88	68.72
G2	0911 – 101	2.0	45.0	4.0	609.5	82	60.95
G3	0913 – 3	2.7	53.3	4.8	617.0	72	61.70
G4	0911 – 99	4.0	47.3	4.1	490.7	84	49.07
G5	0904 – 116	4.0	40.0	5.3	492.8	68	49.28
G6	0929 – 6	2.3	60.0	3.5	541.0	89	54.10
G7	0911 – 71	1.7	51.7	2.8	471.2	77	47.12
G8	0901 – 118	2.7	48.3	4.7	569.5	82	56.95
G9	0904 – 75	1.3	60.0	3.7	628.0	91	62.80
G10	10y4 – 7	2.3	58.3	5.2	333.3	60	33.33
G11	0732 – 23	2.0	59.3	3.9	628.5	89	62.85
G12	0913 – 5	1.7	36.7	3.9	449.2	76	44.92
G13	0830 – 7	1.3	56.7	2.8	382.7	84	38.27
G14	0913 – 111	2.0	48.3	4.4	445.5	78	44.55
G15	1003 – 2	2.3	46.7	5.5	704.5	79	70.45
G16	0904 – 25	4.7	60.0	8.2	708.2	71	70.82
G17	0906 – 30	1.7	38.3	2.7	273.2	75	27.32
G18	0732 – 8	1.3	41.7	2.7	143.7	59	14.37
G19	0909 – 3	2.3	58.3	5.1	515.6	68	51.56
G20	0907 – 25	2.7	58.3	4.2	469.3	90	46.93
G21	09 – 6 – 37	2.3	66.7	3.1	352.7	70	35.27
G22	0904 – 85	1.3	41.7	5.1	416.8	59	41.68
G23	0904 – 11	1.0	51.7	4.7	556.5	80	55.65
G24	0904 – 15	2.7	53.3	3.3	619.7	84	61.97
G25	09 – 6 – 14	2.3	56.7	4.4	547.3	76	54.73
G26	09 – 4 – 5	1.7	60.0	2.7	413.3	84	41.33
G27	0904 – 134	1.7	53.3	4.1	566.5	80	56.65
G28	1004 – 318	3.3	55.7	4.0	604.2	81	60.42
G29	0904 – 17	4.0	46.7	5.2	499.0	66	49.90
G30	0904 – 51	3.3	46.7	5.4	591.0	72	59.10
G31	0773 – 9	4.0	51.7	6.9	657.5	64	65.75
G32	0911 – 27	1.3	58.3	2.9	404.0	79	40.40
G33	0904 – 71	2.7	56.7	3.4	471.2	78	47.12
G34	0918 – 18	2.3	51.7	7.9	549.2	53	54.92
G35	0773 – 3	3.7	65.0	4.7	536.8	70	53.68
G36	1027 – 11	1.3	55.0	3.9	476.3	75	47.63
G37	0903 – 26	3.0	48.3	4.2	407.5	65	40.75
G38	0903 – 111	2.7	51.7	5.3	711.7	81	71.17
G39	09 – 4 – 3	3.0	83.3	4.3	543.3	88	54.33
G40	1019 – 11	2.3	75.0	4.7	551.6	78	55.16
G41	0904 – 161	1.7	46.7	4.8	458.5	75	45.85
G42	陇 6 Long 6	1.3	78.3	4.4	448.8	70	44.88

2 结果与分析

在表 2 中,对马铃薯新品系选育中的产量及农艺性状进行方差分析,可得知不同品系的产量及相关农艺性状之间具有极显著差异。在严威凯^[14]的相关研究结果中提到,与品种评价有关系的只是 G 和 GE,而且,可靠的品种评价必须同时考虑 G 和 GE。不同品系的产量及相关农艺性状之间的极显著

差异说明品系(G),品系×环境(GE)与这种差异出现有关联,可用 GGE 双标图作进一步分析。

2.1 品系与产量及产量因子之间的相关性分析

在图 1 中,PC1 与 PC2 分别解释了 45.7% 与 28.7% 的变异信息,共解释 74.4% 的变异信息,PC3 解释了 8.4% 的变异信息,解释变异信息的所占比例小,拟合度属中等水平,据此分析推断较可靠。

表 2 马铃薯参试品系产量及农艺性状方差分析

Table 2 The ANOVA analysis of yield and agronomic traits in the potato breeding

产量及相关农艺性状 Yield and agronomic traits	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	df	均方 Mean square	F	显著性 Sig.
产量 Yield	组间 Interblock	18357.786	42	437.090	6.715	0.000
	组内 Intra-class	5597.656	86	65.089		
	总数 Total	23955.442	128			
单株薯块质量 Tuber quality per plant	组间 Interblock	1809669.433	42	43087.367	6.589	0.000
	组内 Intra-class	562373.913	86	6539.232		
	总数 Total	2372043.347	128			
单株薯块数 Tuber number per plant	组间 Interblock	176.652	42	4.206	16.489	0.000
	组内 Intra-class	21.937	86	0.255		
	总数 Total	198.589	128			
商品薯率 Commodity potato rate	组间 Interblock	1.086	42	0.026	4.693	0.000
	组内 Intra-class	0.474	86	0.006		
	总数 Total	1.560	128			
主茎数 Main stem	组间 Interblock	93.597	42	2.228	3.549	0.000
	组内 Intra-class	54.000	86	0.628		
	总数 Total	147.597	128			
株高 Plant height	组间 Interblock	13221.566	42	314.799	27.420	0.000
	组内 Intra-class	987.333	86	11.481		
	总数 Total	14208.899	128			

图 1 中连接原点和各品系与产量及产量因子的直线称为“向量”,向量分别代表产量及产量因子向量与品系向量,产量及产量因子向量间夹角之余弦衡量产量及产量因子间在区分品系上的不相似性,品系向量之长度衡量该品系对产量及产量因子的反应能力,两品系向量间夹角之余弦衡量品系在对产量及产量因子反应方面上的不相似性,品系向量、产量及产量因子向量及二者间夹角之余弦衡量该品系与产量及产量因子之间相互作用的大小和方向。

从图 1 可以看出,单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率与产量间的夹角小于 90°,说明产量与单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率呈显著正相关关系;单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率间的夹角小于 90°,说明单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率间也呈正相关关系;商品薯率与主茎数、单株薯块

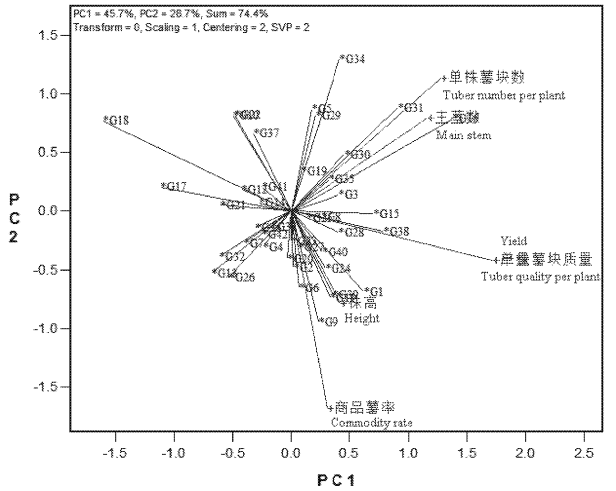


图 1 基于 GGE 双标图的品系与产量及产量因子的相关性分析
Fig.1 Relevance of lines and yield and yield components based on GGE – biplot analysis

数间的夹角均大于 90°,说明它们间均呈负相关关系,株高与主茎数、单株薯块数间的夹角大于 90°,说明它们间均呈负相关关系。

品系 G38(0903 - 111)与产量和单株薯块质量的夹角重合,表明 G38(0903 - 111)与产量和单株薯块质量关系相互作用大。G16(0904 - 25)、G30(0904 - 51)、G31(0773 - 9)、G35(0773 - 3)与主茎数、单株薯块数夹角较小,表明 G16(0904 - 25)、G30(0904 - 51)、G31(0773 - 9)、G35(0773 - 3)与主茎数、单株薯块数相互作用大,G1(0913 - 27)、G2(0911 - 101)、G6(0929 - 6)、G9(0904 - 75)、G20(0907 - 25)、G23(0904 - 11)、G24(0904 - 15)、G27(0904 - 134)、G39(09 - 4 - 3)等与株高和商品薯率夹角较小,表明它们之间的相互作用较大。

2.2 马铃薯参试品系的农艺性状表现

双标图能直观鉴别在各农艺性状中表现最好的品系,把各品系的标志点用直线连接起来,形成一个包含所有品系在内的多边形,从原点起作各边的垂线,将整个双标图分为若干扇形区域,每个农艺性状自然落于某个扇形区域内,每个区的“顶角”品系就是该区域内在每一农艺性状上都表现最好的品系,位于多边形内部的、靠近原点的品系是接近平均产量且对农艺性状变化不敏感的品系。在表 1 中对各个品系的基本情况进行了详细说明。

图 2 双标图被分成 6 大区域,6 个农艺性状分落于第 I 和第 III 区域内。第 I 区域内是产量、单株薯块数、主茎数、单株薯块质量,其中以品系 G16(0904 - 25)表现最佳。第 III 区域内是株高和商品薯率,以 G9(0904 - 75)表现最佳。没有性状落于第 II、IV、V、VI 区域内,说明这 4 个区域内所有品系的农艺性状都不是最好。位于多边形内部的、靠近原点的品系是农艺性状表现较差的品系。

2.3 马铃薯参试品系农艺性状的稳定性

在 GGE 双标图分析中,由于 AEA(Average environment axis)横轴代表了品系的农艺性状,在 AEA(Average environment axis)的投影,箭头所示方向为正,即各个品系在 AEA 轴上的投影点越靠右,其农艺性状表现越好。AEA 横轴将试点分为三个区域,横轴上部包括单株薯块数和主茎数,横轴包括产量、单株薯块质量,横轴下面包括株高、商品薯率。AEC(Average environment coordinate)纵轴代表了品系的稳定性,AEA 横轴上垂线的长短显示品系稳定性的大小,垂线越短,稳定性越好。在综合考虑品系与农艺性状的情况下(图 3),在 AEA 横轴上部 G18(0732 - 8)表现最差,G16(0904 - 25)的表现高于平均值,而

G38(0903 - 111)、G15(1003 - 2)的表现相对于 G16(0904 - 25)要稳定。在 AEA 横轴下部,G17(0906 - 30)表现最差,G1(0913 - 27)接近平均表现值且较其它品系在产量、单株薯块质量、株高、商品薯率方面表现更稳定。

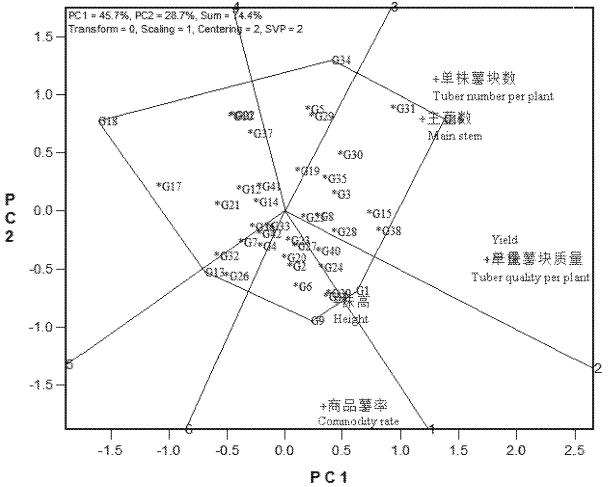


图 2 基于 GGE - biplot 双标图分析马铃薯参试品系的农艺性状

Fig.2 Agronomic traits represents of lines based on GGE - biplot analysis

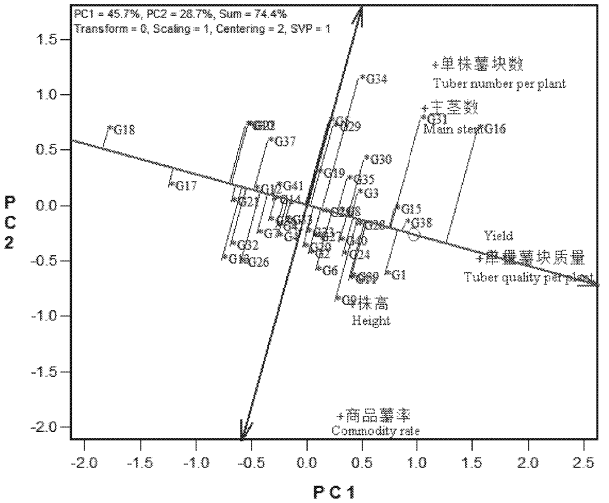


图 3 基于 GGE 双标图分析各品系农艺性状的稳定性

Fig.3 Agronomic traits stability of lines based on GGE - biplot analysis

2.4 农艺性状的区分力和代表性

为进一步分析农艺性状对各品系的影响力(区分能力)。利用 GGE 双标图对农艺性状进行分析,如图 4 所示,连接各个农艺性状的位点与双标图原点的直线称为处理向量。向量的长度反映的是不同农艺性状对各品系的区分能力,向量之间夹角的余弦值近似于两个农艺性状之间的相关系数。各农艺性状的向量长度比较接近,说明各品系的不同农艺

(0904 - 134)、G39(09 - 4 - 3)等与株高和商品薯率之间的相互作用较大。

在品比试验中,不仅要考虑各品系的丰产性还要考虑稳定性,在图 2 中,G16(0904 - 25)处于多边形的顶角位置,第 I 区域内包括产量、单株薯块数、主茎数、单株薯块质量,其中以品系 G16(0904 - 25)表现最佳,在图 3 中,在 AEA 横轴上部只有 G16(0904 - 25)的表现高于平均值,但是 G38(0903 - 111)、G15(1003 - 2)的表现相对于 G16(0904 - 25)要稳定许多,综合表现接近于平均水平,在农业可持续发展中,优良的作物品种在其适宜的生态区域内不仅在当年具有高产、优质、抗病虫性强,多年内也应一直具有产高、质优、抗病虫性强的稳定表现,综合起来 G38(0903 - 111)是表现最好的品系,其次为 G15(1003 - 2)。

在农艺性状的代表性和区分力方面,产量和单株薯块质量相较其它农艺性状,具有很强的代表性和区分力,能够准确反映出试验各品系的表现特性,筛选出优良的品系。单株薯块数和商品薯率的向量长度较长,说明其对各品系表现的区分力强。

在图 1 中,产量与单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率呈显著正相关关系;单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率间也呈正相关关系;商品薯率与主茎数、单株薯块数间呈负相关关系,株高与主茎数、单株薯块数间均呈负相关。在分析马铃薯产量时,可以将单株薯块数、主茎数、单株薯块质量、株高、商品薯率等主要影响因子结合起来综合评价,这与仲义^[15]的研究结论基本一致,在图 1 中还可以发现,商品薯率与主茎数、单株薯块数无关,植株的高度与主茎数、单株薯块数也无关。

在以后的品比试验总结中,马铃薯品质检测的分析更加重要,干物质含量,淀粉含量,Vc 含量,还原糖含量,蛋白质等品质指标的检测能增加马铃薯品比试验结果分析的精确性,提高品比试验结果的可信度,通过产量、农艺性状、品质指标的 GGE 综合分析,育种者可快速筛选出符合标准的优良品系,淘汰表现较差的品系,加快育种进程,提高育种质量。

在作物育种中,如果试验为多环境情况下,对照品种作为参照与新育品种相比较,通常只是比较两个品种的平均值,但是利用 GGE 双标图,两个品种在不同地点或环境下的表现会展示在图中。双标图图解方式以“内积原理”为基础,双向表中的每一个数值(元素)都可从图上直观得出,因为它近似等于

该数据所在行的向量长度、所在列的向量长度及行向量和列向量间夹角的余弦三者之积,根据这种特性,任意两向表或矩阵,只要能为一个 2 - D(二维)矩阵所近似,就可以用一个 2 - D 双标图来同时直观分析各行之间的关系、各列之间的关系和行与列之间的交互关系^[13]。所以,GGE 双标图的用途并不限于区域试验结果的分析,按照数据的特点,可以构造出品种 × 性状、双列杂交、基因表达数据等不同的叠图,以帮助全面地认识亲本和合理地选配亲本,而且在马铃薯病害药剂防控试验、不同栽培模式试验等方面应用,充分发挥 GGE 双标图的图解分析功能。

参 考 文 献:

[1] Yan W, Hunt L A, Sheng Q L, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot[J]. Crop Sci., 2000, 40(3):596-605.

[2] Yan W, Holland J B. A heritability-adjusted GGE Biplot for test environment evaluation[J]. Euphytica, 2010,171(3):355-369.

[3] 常磊,柴守玺.GGE 双标图在我国旱地春小麦稳产性分析中的应用[J].中国生态农业学报,2010,18(5):988-994.

[4] 柴守玺,常磊,杨蕊菊,等.小黑麦基因型与环境互作效应及产量稳定性分析[J].核农学报,2011,25(1):155-161.

[5] 周长军,田中艳,李建英,等.双标图法分析大豆多点试验中品系产量稳定性及试点代表性[J].大豆科学,2011,30(2):318-321.

[6] 陈四龙,李玉荣,程增书,等.用 GGE 双标图分析种植密度对高油花生长和产量的影响[J].作物学报,2009,35(7):1328-1335.

[7] 尚国霞,王瑞,李加纳,等.甘蓝型油菜油酸配合力的双标图分析[J].植物遗传资源学报,2010,11(5):566-572.

[8] 王瑾,周立杰,李玉荣,等.不同栽培方式对芝麻农艺性状及产量的影响[J].华北农学报,2011,26(S2):253-256.

[9] 张志芬,付晓峰,刘俊青,等.用 GGE 双标图分析燕麦区域试验品系产量稳定性及试点代表性[J].作物学报,2010,36(8):1377-1385.

[10] 尚毅,李少钦,李殿荣,等.用双标图分析油菜双列杂交[J].作物学报,2006,32(2):243-248.

[11] Yan W, Fréreau-Reid J A. Breeding line selection based on multiple traits[J]. Crop Sci., 2008,48(2):417-423.

[12] 石强,李亚杰,范士杰,等.贵州省马铃薯区试品种产量与农艺性状的 GGE 双标图分析[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):5-15.

[13] 严威凯.双标图分析在农作物品种多点试验中的应用[J].作物学报,2010,36(11):1805-1819.

[14] 严威凯,盛庆来,胡跃高,等.GGE 叠图法 - 分析品种 × 环境互作模式的理想方法[J].作物学报,2001,27(1):21-28.

[15] 仲义,梁焯赫,高华援.马铃薯主要农艺性状与单株产量的遗传相关及通径系数分析[J].吉林农业科学,2009,34(2):17-19.