

网络出版时间:2018-01-10 16:16

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.04.005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180110.1614.010.html>

基于 GGE 双标图的甘肃春小麦区试品系 稳产性和试点代表性分析

柳娜¹, 曹东², 王世红¹, 张雪婷¹, 杨文雄¹

(1 甘肃省农业科学院 小麦研究所, 甘肃 兰州 730070; 2 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008)

[摘要] 【目的】鉴定甘肃春小麦区试品系的适应性、稳产性及试点代表性, 为优良新品种的推广和品种的区域选择提供理论依据。【方法】利用 2007—2014 年甘肃省春小麦区域试验 40 个品系在 7 个试点的试验数据, 采用 GGE 双标图法分析参试品种(系)的适应性、稳产性及试点的代表性, 并分析环境因子及相关农艺性状与产量构成因子的相关性。【结果】环境及品系与环境交互作用对产量的影响均大于品系, 分别是品系效应的 3.71 倍和 3.12 倍; 品系 7095 属于适应性和稳产性均表现较好的品系; 在 7 个试点中, 黄羊点的代表性和鉴别力最好。产量及 9 个相关农艺性状与 5 个环境因子间有显著或极显著的相关性。【结论】环境间的差异是造成甘肃春小麦区试试验参试品种(系)产量差异最主要的因子。筛选出了在甘肃局部地区有推广价值的春小麦品种(系)以及具有代表性和良好鉴别力的区试点。

[关键词] GGE 双标图; 春小麦; 品系适应性; 品种稳产性; 试点代表性

[中图分类号] S512.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2018)04-0039-10

Yield stability and testing-site representativeness of regional trials for spring wheat lines in Gansu based on GGE-biplot

LIU Na¹, CAO Dong², WANG Shihong¹, ZHANG Xueting¹, YANG Wenxiong¹

(1 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: 【Objective】The study evaluated the adaptability and stability of cultivars and representative ability of testing-site in Gansu to provide theoretical basis for the popularization of new varieties and the selection of test regions. 【Method】Based on the experimental data of 40 strains in 7 sites of spring wheat area in Gansu Province from 2007 to 2014, it uses GGE-biplot method to analyze the adaptability, production stability and the representativeness of the pilots and to analyze the correlation among environmental factors, related agronomic characters and yield components. 【Result】The effects of environment and genotype-environment interaction on grain yield were 3.71 and 3.12 times of that of genotype. The variety 7095 had higher yield and better yield stability than other lines. Huangyang was the best representative testing site and discrimination than other sites. Yield and 9 agronomic traits had significant or extremely significant correlations with 5 environmental factors. 【Conclusion】Environmental factors were the main factor causing yield difference among different cultivars in Gansu. Based on GGE biplot, this study identified the productivity and stability of wheat cultivars and the best representative testing site in Gansu.

Key words: GGE biplot; spring wheat; line adaptability; line yield stability; testing-site representative-

[收稿日期] 2017-01-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31560390); 甘肃省科技重大专项(17ZD2NA016-7); 公益性行业农业科研专项(201503125-1)

[作者简介] 柳娜(1981—), 女, 甘肃靖远人, 助理研究员, 主要从事小麦分子和常规育种研究。E-mail: 592905658@qq.com

[通信作者] 杨文雄(1964—), 男, 甘肃会宁人, 研究员, 主要从事小麦育种研究。E-mail: ywxm822@126.com

ness

春小麦是甘肃省主要的粮食作物之一,高产一直是该地区春小麦主要的育种目标。选育优质高产品种是春小麦产量提升的重要途径。品种区试资料是国家和省级审定作物新品种的科学依据,是准确和客观评价新品系高产、稳产、广适性及试点代表性的基础,也是新品种推广及应用的直接影响因素。评价新品种各项指标主要是对试验资料进行算术平均值法和联合方差分析,并进行差异显著性比较分析^[1]。品种区试为多年多点试验,但由于试验点环境不同和试点报废等原因,很难客观公正地评价新品系的各项指标^[2-4],因此试点代表性及其对品种的鉴别区分能力和参试品系的稳产性、适应性,均是评价新品系的重要指标。

AMMI (additive main effects and multiplicative interaction model)模型常用于分析基因型与环境交互,以对基因型进行全面评价,在区试资料分析中运用比较广泛,但是该模型主要分析基因型与环境的交互效应,而不能从品种选育与推广方面对基因型进行全面分析,且在选择时容易忽视稳定性差但高产的品种(系)^[5]。GGE-biplot法以原始区试数据为基础,用图示简单又直观地解释基因型和基因型-环境交互效应比例,显示农作物品种的特殊适应性等更多的信息,且可以兼顾年际间的差异^[6-7],是目前分析区试资料比较理想的方法。Yan

等^[8-11]在小麦区试研究中提出的 GGE-biplot 法也逐渐被应用于多年多点区域试验中不同品种的稳定性和试点代表性分析。张志芬等^[12]、周长军等^[13]、李琴琴等^[14]、罗俊等^[15]和张大爱等^[16]借助 GGE-biplot,分别分析了燕麦、大豆、甜荞新品系、甘蔗和苦荞等作物品种产量等性状的稳定性和试点的代表性,常磊等^[17]将该方法用于我国旱地春小麦产量稳定性分析,尚国霞等^[18]用其分析甘蓝型油菜的油酸配合力,这些研究证明了 GGE-biplot 法分析的直观性和有效性。本研究借助 GGE-biplot 软件分析了 2007—2014 年甘肃省春小麦多年多点区域试验资料,研究区域试验中参试新品系的稳产性、适应性与试点代表性及鉴别力,以期客观准确地评价甘肃省春小麦参试品系的高产稳产性,为新品种鉴定与推广及区域试验分析方法的改进提供可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试点概况

2007—2014 年甘肃省春小麦区域试验参试品系 40 个,详见表 1;试点(环境)共 7 个,分别是酒泉、张掖、民乐、武威、民勤、黄羊、白银,各试点基本情况见表 2。

表 1 2007—2014 年区域试验参试春小麦品系基本情况

Table 1 The basic information of spring wheat lines in regional test in 2007—2014

| 品种(系) Cultivar (line) | 品种(系)代码 Code of cultivar (line) | 供种单位 Supplying institute | 区试年份 Year |
|--------------------------|------------------------------------|--|--------------|
| 甘春 8106 Ganchun 8106 | G1 | 甘肃农业大学农学院 Agronomy College, Gansu Agricultural University | 2007—2008 |
| N99-21 | G2 | 张掖市农业科学院 Gansu Zhangye Academy of Agricultural Sciences | 2007—2008 |
| 甘春 357786 Ganchun 357786 | G3 | 甘肃农业大学农学院 Agronomy College, Gansu Agricultural University | 2007—2008 |
| 陇春 2608 Longchun 2608 | G4 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2007—2008 |
| 宁春 4 号 A Ningchun 4 A | G5 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2007—2008 |
| 7095 | G6 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2008—2009 |
| 8972-14 | G7 | 古浪县良种繁殖场 Gansu Gulang Seed Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2008—2009 |
| 9075-2 | G8 | 张掖市农业科学院 Gansu Zhangye Academy of Agricultural Sciences | 2008—2009 |
| E32-1 | G9 | 武威市农业科学院 Gansu Wuwei Academy of Agricultural Sciences | 2008—2009 |
| E46-222 | G10 | 武威市农业科学院 Gansu Wuwei Academy of Agricultural Sciences | 2008—2009 |
| 瑞春 1 号 Ruichun 1 | G11 | 武威市瑞丰种业有限公司 Gansu Wuwei Ruifeng Seed Industry | 2008—2009 |
| 宁春 4 号 B Ningchun 4 B | G12 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2008—2009 |

表 1(续) Continued table 1

| 品种(系) Cultivar (line) | 品种(系)代码 Code of cultivar (line) | 供种单位 Supplying institute | 区试年份 Year |
|--------------------------|------------------------------------|--|--------------|
| 9913-17 | G13 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2009—2010 |
| 99W77-612 | G14 | 甘肃农业职业技术学院 Gansu Agricultural Technology College | 2009—2010 |
| 1486 | G15 | 白银市农业科学研究所 Gansu Baiyin Research Institute of Agricultural Sciences | 2009—2010 |
| 酒 9996 Jiu 9996 | G16 | 酒泉市农业科学研究所 Gansu Jiuquan Research Institute of Agricultural Sciences | 2009—2010 |
| 宁春 4 号 C Ningchun 4 C | G17 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2009—2010 |
| 6396 | G18 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2010—2011 |
| 甘春 9826 Ganchun 9826 | G19 | 甘肃农业大学农学院 Agronomy College, Gansu Agricultural University | 2010—2011 |
| D68-20 | G20 | 武威市农业科学院 Gansu Wuwei Academy of Agricultural Sciences | 2010—2011 |
| 张 925 Zhang 925 | G21 | 张掖市农业科学院 Gansu Zhangye Academy of Agricultural Sciences | 2010—2011 |
| 宁春 4 号 D Ningchun 4 D | G22 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2010—2011 |
| 陇春 3031 Longchun 3031 | G23 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2011—2012 |
| 绵杂麦 168 Mianzamai 168 | G24 | 四川绵阳农科所 Sichuan Mianyang Research Institute of Agricultural Sciences | 2011—2012 |
| 瑞丰 1620 Ruifeng 1620 | G25 | 武威市瑞丰种业有限公司 Gansu Wuwei Ruifeng Seed Industry | 2011—2012 |
| 酒 296 Jiu 296 | G26 | 酒泉市农业科学研究所 Gansu Jiuquan Research Institute of Agricultural Sciences | 2011—2012 |
| 9903-25 | G27 | 白银市农业科学研究所 Gansu Baiyin Research Institute of Agricultural Sciences | 2011—2012 |
| 宁春 4 号 E Ningchun 4 E | G28 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2011—2012 |
| J90-9 | G29 | 武威市农业科学院 Gansu Wuwei Academy of Agricultural Sciences | 2012—2013 |
| 99W169-10 | G30 | 甘肃农业职业技术学院 Gansu Agricultural Technology College | 2012—2013 |
| 00WT5-1-5 | G31 | 甘肃农业职业技术学院 Gansu Agricultural Technology College | 2012—2013 |
| 武科 2246 Wuke 2246 | G32 | 武威市农业科学院 Gansu Wuwei Academy of Agricultural Sciences | 2012—2013 |
| 宁春 4 号 F Ningchun 4 F | G33 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2012—2013 |
| 酒 0423 Jiu 0423 | G34 | 酒泉市农业科学研究所 Gansu Jiuquan Research Institute of Agricultural Sciences | 2013—2014 |
| 酒 0462 Jiu 0462 | G35 | 酒泉市农业科学研究所 Gansu Jiuquan Research Institute of Agricultural Sciences | 2013—2014 |
| 00WT19-4 | G36 | 甘肃农业职业技术学院 Gansu Agricultural Technology College | 2013—2014 |
| 9687-2 | G37 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2013—2014 |
| 张 182 Zhang 182 | G38 | 张掖市农业科学院 Gansu Zhangye Academy of Agricultural Sciences | 2013—2014 |
| 节水 9809 Jieshui 9809 | G39 | 甘肃农科院小麦所 Wheat Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences | 2013—2014 |
| 宁春 4 号 G Ningchun 4 G | G40 | 宁夏永宁县小麦育繁所 Ningxia Yongning Wheat Breeding Institute of Agricultural Sciences | 2013—2014 |

1.2 田间试验设计

2007—2014 年甘肃省春小麦区试各试点田间试验设计按统一试验方案执行,各试点均为随机区组设计,每公顷播种量 750 万粒,3 次重复,小区面积 $5\text{ m} \times 3\text{ m} = 15\text{ m}^2$ 。每小区 15 行,行距 0.2 m,以

宁春 4 号为对照。各试点内种植、灌溉、施肥、药剂防治等田间试验管理条件一致,成熟后每小区单收单脱计产,并考察各品系的基本苗数、生育期、有效穗数、株高、穗长、穗粒数、小穗数、体积质量、小区产量、千粒质量。

表 2 2007—2014 年甘肃春小麦区域试验试点基本情况
Table 2 The basic information of regional test-sites in 2007—2014

| 试验地点 Site | 试点代码 Code | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔/m Altitude | 年均温/°C Mean annual temperature | 年降雨量/mm Annual precipitation | 年日照时数/h Annual sunshine hours | 无霜期/d Frost-free days |
|--------------|--------------|-----------------|----------------|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------|
| 酒泉 Jiuquan | E1 | 98°31' | 39°44' | 1 765 | 8.5 | 85 | 3 300 | 142 |
| 张掖 Zhangye | E2 | 100°26' | 38°56' | 1 482 | 8.1 | 115 | 3 085 | 156 |
| 武威 Wuwei | E3 | 102°39' | 37°56' | 1 632 | 7.7 | 100 | 2 873 | 150 |
| 民乐 Minle | E4 | 100°49' | 38°27' | 2 271 | 4.0 | 210 | 2 794 | 140 |
| 民勤 Minqin | E5 | 103°50' | 38°37' | 1 367 | 8.3 | 113 | 3 073 | 162 |
| 黄羊 Huangyang | E6 | 107°12' | 40°40' | 1 740 | 6.8 | 141 | 2 600 | 140 |
| 白银 Baiyin | E7 | 104°12' | 36°33' | 1 947 | 8.1 | 198 | 2 872 | 183 |

1.3 统计分析

借助 GGE-biplot 软件进行双标图分析。GGE 双标图是一种在进行品种评价的同时考虑品种总体效应(G)和品种×环境互作(GE)的方法,多品种多环境试验产量(数学模型)一般可分解为:

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

式中: Y_{ij} 表示基因型*i*在环境*j*中的产量, \bar{Y}_j 表示所有基因型在环境*j*中的产量平均值, λ_1 和 λ_2 分别为主成分1(PC1)和主成分2(PC2)的单值分解, ξ_{i1} 与 ξ_{i2} 分别表示基因型*i*关于PC1与PC2的特征向量, η_{j1} 与 η_{j2} 分别表示基因型*j*关于PC1与PC2的特征向量, ϵ_{ij} 为随机误差。

双标图中用两向量间的夹角来判断其相关性(夹角 $<90^\circ$ 为正相关,夹角 $>90^\circ$ 为负相关,夹角 $=90^\circ$ 表示无关),用两向量夹角余弦值表示两向量间的相关系数;试验点向量长度代表试验点区分力,试

验点向量与平均环境向量夹角的大小代表环境代表性。

2 结果与分析

2.1 甘肃省春小麦参试品系的产量

2007—2014年甘肃省春小麦区域试验参试品系在每个参试点的产量、平均产量和排序见表3,对参试品系产量进行联合方差分析,结果见表4。从表4可以看出,基因型(品系)间、环境(试点)间及基因型与环境交互作用对产量的影响均极显著($P < 0.01$),其产量变异的平方和占总平方和的比例分别为12.76%,47.39%和39.80%,说明引起产量差异最主要的原因环境间的差异,其次为基因型与环境交互作用,环境和基因型与环境交互作用对产量的影响均大于品系,分别是品系效应的3.71倍和3.12倍,这与前人研究结果^[17,19-20]一致。

表 3 2007—2014 年甘肃省春小麦区域试验参试品系产量

Table 3 The yields of spring wheat lines in Gansu regional test in 2007—2014

| 品种(系)代码 Code of cultivar (line) | 试点 Test-sites | | | | | | | 平均 Average |
|---------------------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
| | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | |
| G1 | 8 287.80 | 7 865.25 | 6 337.50 | 8 124.15 | 8 106.30 | 7 812.30 | 6 537.00 | 7 581.45 |
| G2 | 8 912.85 | 8 857.80 | 6 477.60 | 7 485.45 | 8 575.05 | 8 588.70 | 5 479.80 | 7 768.20 |
| G3 | 8 652.75 | 8 827.80 | 6 818.40 | 8 638.65 | 8 025.00 | 8 600.55 | 6 682.95 | 8 035.20 |
| G4 | 7 887.75 | 7 930.20 | 7 116.90 | 8 042.25 | 8 312.55 | 8 640.00 | 6 490.20 | 7 774.20 |
| G5 | 8 512.95 | 7 390.20 | 7 008.75 | 7 849.65 | 9 050.10 | 8 601.00 | 6 073.35 | 7 783.65 |
| G6 | 9 250.50 | 8 700.30 | 7 680.75 | 7 507.05 | 9 300.15 | 9 179.10 | 6 409.50 | 8 289.60 |
| G7 | 8 988.00 | 8 462.70 | 7 200.75 | 7 540.95 | 9 500.10 | 9 177.15 | 6 874.95 | 8 249.25 |
| G8 | 8 900.25 | 9 412.80 | 7 726.95 | 7 649.70 | 9 287.55 | 8 849.10 | 6 508.20 | 8 333.55 |
| G9 | 9 325.50 | 8 562.75 | 7 711.95 | 7 719.60 | 8 400.00 | 9 324.75 | 7 332.00 | 8 339.55 |
| G10 | 8 752.80 | 8 595.30 | 7 469.40 | 6 724.35 | 8 631.30 | 8 929.20 | 6 856.80 | 7 994.10 |
| G11 | 8 912.55 | 8 002.80 | 6 818.25 | 6 663.30 | 8 775.00 | 8 023.20 | 7 938.45 | 7 876.20 |
| G12 | 8 800.50 | 8 065.20 | 7 265.10 | 7 035.75 | 9 262.50 | 8 947.20 | 6 273.45 | 7 950.00 |
| G13 | 9 525.30 | 8 550.30 | 8 424.60 | 7 839.00 | 8 487.75 | 8 327.70 | 6 637.80 | 8 256.00 |
| G14 | 9 162.75 | 8 525.25 | 7 978.35 | 7 542.75 | 8 325.30 | 7 414.05 | 6 525.15 | 7 924.80 |
| G15 | 9 037.80 | 8 312.85 | 7 660.95 | 7 378.95 | 8 350.20 | 7 329.00 | 6 812.70 | 7 840.35 |
| G16 | 9 675.30 | 7 675.20 | 8 295.90 | 7 125.30 | 8 950.20 | 7 339.65 | 5 812.65 | 7 839.15 |
| G17 | 8 962.80 | 8 237.70 | 8 036.55 | 7 509.00 | 9 062.70 | 7 752.75 | 5 950.20 | 7 930.20 |
| G18 | 7 946.10 | 7 476.00 | 7 953.75 | 9 702.75 | 8 538.75 | 6 805.65 | 6 526.05 | 7 849.80 |
| G19 | 8 551.20 | 7 638.60 | 8 100.60 | 8 772.75 | 8 713.80 | 6 680.10 | 6 488.55 | 7 849.35 |

表 3(续) Continued table 3

| 品种(系)代码 Code of cultivar (line) | 试点 Test-sites | | | | | | | 平均 Average |
|---------------------------------------|---------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|---------------|
| | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | |
| G20 | 8 428.65 | 6 913.35 | 8 486.25 | 8 761.35 | 7 963.80 | 7 091.10 | 6 238.50 | 7 697.55 |
| G21 | 7 921.20 | 7 801.05 | 7 919.25 | 8 958.90 | 7 713.75 | 6 016.50 | 6 150.90 | 7 497.30 |
| G22 | 8 149.95 | 6 888.45 | 7 400.40 | 8 805.15 | 8 288.70 | 6 485.85 | 5 950.95 | 7 424.25 |
| G23 | 8 489.25 | 7 463.55 | 7 876.95 | 8 324.25 | 8 290.35 | 7 338.60 | 6 851.10 | 7 804.80 |
| G24 | 8 236.20 | 6 784.35 | 6 870.00 | 7 614.75 | 7 571.70 | 6 753.75 | 7 072.05 | 7 271.85 |
| G25 | 8 854.20 | 6 105.00 | 6 038.70 | 8 345.25 | 7 583.40 | 6 310.05 | 6 646.95 | 7 126.20 |
| G26 | 8 920.35 | 6 855.15 | 6 893.40 | 8 088.60 | 6 783.00 | 6 461.25 | 5 517.60 | 7 074.15 |
| G27 | 7 384.95 | 6 846.75 | 6 813.60 | 7 512.75 | 7 381.20 | 6 820.05 | 7 092.90 | 7 121.70 |
| G28 | 8 254.05 | 6 467.55 | 6 511.50 | 7 859.25 | 7 841.25 | 6 479.85 | 6 188.55 | 7 086.00 |
| G29 | 8 907.15 | 7 910.55 | 8 265.30 | 6 367.05 | 8 700.00 | 6 659.85 | 6 963.90 | 7 681.95 |
| G30 | 7 768.05 | 8 799.15 | 7 768.95 | 6 880.35 | 8 400.00 | 6 636.00 | 6 786.15 | 7 576.95 |
| G31 | 8 392.80 | 8 200.65 | 8 325.45 | 5 780.25 | 8 533.50 | 6 911.40 | 5 913.60 | 7 436.85 |
| G32 | 9 360.60 | 8 562.60 | 8 951.55 | 7 580.40 | 8 611.50 | 6 741.15 | 6 108.60 | 7 988.10 |
| G33 | 8 570.25 | 8 032.35 | 6 457.65 | 6 475.95 | 8 788.50 | 6 368.55 | 6 092.10 | 7 255.05 |
| G34 | 8 226.30 | 8 165.70 | 8 986.50 | 7 459.05 | 8 599.50 | 6 463.50 | 5 890.50 | 7 684.50 |
| G35 | 7 930.80 | 7 990.20 | 7 853.85 | 6 778.80 | 8 267.25 | 6 224.25 | 5 067.90 | 7 159.05 |
| G36 | 7 558.05 | 8 503.80 | 8 998.05 | 7 471.50 | 8 977.50 | 6 627.30 | 5 332.35 | 7 638.30 |
| G37 | 8 192.40 | 8 818.35 | 6 875.85 | 7 182.30 | 10 299.75 | 7 323.75 | 5 148.45 | 7 691.55 |
| G38 | 7 840.65 | 8 404.20 | 7 943.10 | 7 002.30 | 8 411.25 | 6 018.90 | 5 947.80 | 7 366.95 |
| G39 | 7 289.25 | 8 579.25 | 7 753.80 | 7 346.25 | 8 877.75 | 6 764.25 | 5 825.40 | 7 490.85 |
| G40 | 7 611.75 | 8 002.35 | 6 939.30 | 6 596.55 | 8 488.50 | 6 074.70 | 5 119.50 | 6 976.05 |
| 平均 Average | 8 508.30 | 7 979.55 | 7 550.25 | 7 601.10 | 8 500.65 | 7 372.35 | 6 302.85 | 7 687.80 |
| 位次 Rank | 1 | 3 | 5 | 4 | 2 | 6 | 7 | |

表 4 甘肃春小麦区域试验参试品系产量的联合方差分析

Table 4 Combined analysis of yield variance of spring wheat lines in Gansu regional test

| 变异来源 Source of variation | 自由度 Degree of freedom (DF) | 平方和 Sum of squares (SS) | 占总平方和的比例/% Contribution percentage to SS | 均方 Mean square (MS) | F |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--|------------------------|-------------|
| 总变异 Total | 557 | 586 454 255.0 | | 1 052 880.2 | |
| 处理 Treatment | 278 | 586 422 867.5 | | 2 109 434.8 | 18 750.5** |
| 基因型(G) Genotype | 39 | 74 847 619.7 | 12.76 | 1 919 169.7 | 17 059.5** |
| 环境(E) Environment | 6 | 277 908 276.0 | 47.39 | 46 318 046.0 | 411 716.0** |
| 交互作用(GE) Interaction | 233 | 233 418 472.9 | 39.80 | 1 001 796.0 | 8 904.9** |
| 误差 Error | 279 | 31 387.5 | | 112.5 | |

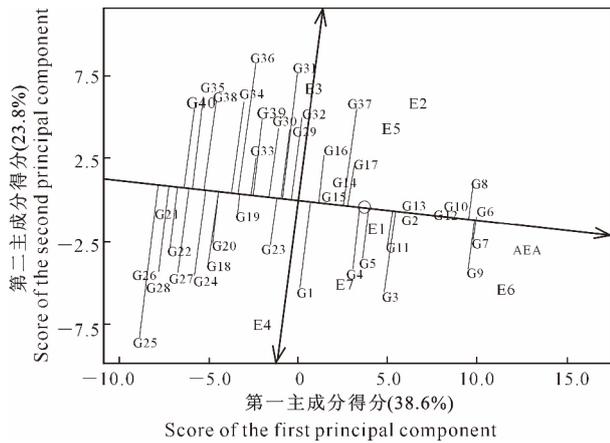
注: ** 代表影响极显著(P<0.01)。

Note: ** stands for extremely significant difference (P<0.01).

2.2 甘肃省春小麦参试品系的丰产性和稳产性

借助 GGE 双标图对甘肃省春小麦区域试验参试品系的丰产性(产量表现)和稳产性进行分析,结果见图 1。图 1 中平均环境轴(average-environment axis, AEA)代表参试品系的总体平均产量,其箭头方向为正,各品系到 AEA 的垂直线段代表各品系在所有试验地的平均产量和稳产性,线段长度越短稳产性越好,垂足越靠右则产量越高;与 AEA 垂直的实线为产量总体均值,在其左侧的基因型(品系)产量低于总体均值,反之在其右侧的基因型产量高于总体均值。从图 1 可以看出,PC1 和 PC2 分别解释了 38.6%和 23.8%的变异信息,共解释 62.4%的

变异信息,由此可知其分析推断结果具有一定的可靠性。所有参试品系中平均产量大于总体均值的品系丰产性由大到小排序依次为:G6>G7>G9>G8>G10>G12>G2>G13>G3>G11>G5>G4>G17>G37>G14>G15>G16>G1,稳产性由大到小排序依次为:G6=G10=G12=G13=G15>G2>G14>G7>G8>G11>G17>G5>G9>G16>G4>G3>G37>G1。产量性状和稳定性综合表现最好的品种是 G6(7095),其次是 G10(E46-222)、G12(宁春 4 号 B)、G2(N99-21)、G13(9913-17),而丰产性和稳产性较差的为 G1(甘春 8106),与目前生产应用情况基本一致。



G1—G40 的品系名称同表 1; E1—E7 的试点同表 2; 第一主成分、第二主成分得分括号内的数据分别表示其解释的方差百分比。下图同

The G1—G40 lines names are the same as Table 1; The E1—E7 test-sites names are the same as Table 2; Data in the brackets show the scores of the first principal component and the second principal component. The same below

图 1 甘肃春小麦区域试验参试品系丰产性与稳产性的 GGE 双标图分析

Fig. 1 GGE-biplot analysis of yield performance and stability of spring wheat lines in Gansu regional test

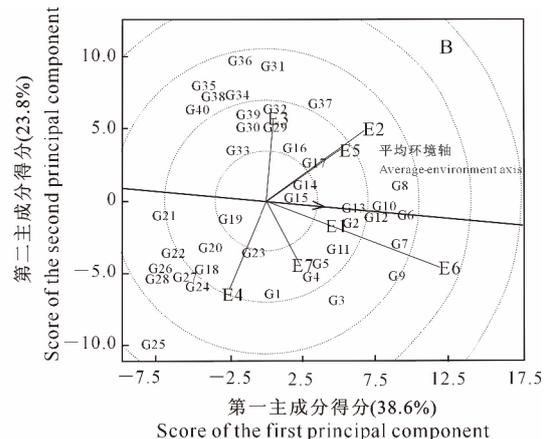
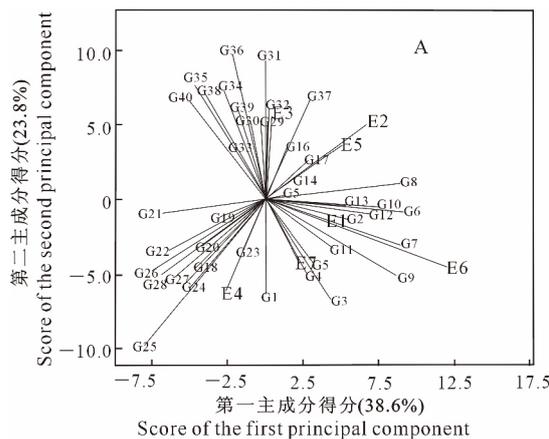


图 2 基于 GGE 双标图的甘肃春小麦区域试验参试品系与试点的相关性(A)及试点代表性(B)

Fig. 2 The test-site correlation (A) and representation (B) of Gansu spring wheat regional test based on GGE-biplot analysis

2.4 甘肃省春小麦参试品系的区域适应性

为了鉴别各试验地点中表现最好的品系,将 GGE 双标图中边缘各品种的顶点用直线串连,构成包含全部品系的多边形。从原点开始向各边作垂线,将多边形划分为若干扇形,各个试验点将落于其中一个扇形区域内,位于顶点的品系是在扇形内所有试点中表现最好的品系。位于原点附近和多边形内

2.3 甘肃省春小麦参试品系与试点之间的关系

从图 2-A 可以看出, E2(张掖)、E3(武威)与 E5(民勤)彼此间夹角均 $< 90^\circ$, 说明其间存在正相关关系; E3(武威)、E4(民乐)与 E6(黄羊)间夹角 $> 90^\circ$, 说明其间存在负相关关系。基因型 G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9、G10、G11、G12、G13、G14、G15、G17 与 E1、E2、E5、E6 和 E7 等 5 个试验点的夹角都小于 90° , 为正向交互作用, 基因型 G19、G20、G21、G22、G23、G24、G25、G26、G27、G28 与 E1、E2、E5、E6 等 4 个试验点及 G30、G33、G34、G35、G38、G39、G40 与 E1、E4、E6、E7 等 4 个试验点的夹角均大于 90° , 为负向交互作用, 说明这些基因型(品种)不能在这些区域推广种植。由此可以看出, 多数环境间为正相关, 且部分环境间为紧密正相关(在 E2 与 E5 和 E1 与 E6 间), 说明试验点可能是重复设置, 可以考虑在减少区试试验成本且不影响对品系客观评价的基础上取消重复的试验点。由图 2-B 可知, 在 7 个试点中, E1、E2、E5、E6、E7 等 5 个试验点与平均环境轴的夹角小于 90° , 表明这些试验点的代表性好, 其次序为 $E6 = E1 > E2 = E5 > E7$, E6(黄羊)的向量最长, 所以对品种鉴别力最强, 是最理想的试点。

部的品系产量趋于平均值且对环境不敏感。从图 3 可以看出, 试验点可以划分为 5 个扇区: 第 1 区试验点为 E3、G31、G35 和 G36 表现最好; 第 2 区没有试验点落入, 说明 G16 和 G37 在所有试验点中的表现不佳; 第 3 区试验点有 E2 和 E5、G8 表现最理想; 第 4 区试验点有 E1、E6 和 E7、G9 表现最好; 第 5 区试验点有 E4、G21 和 G25 表现最好。

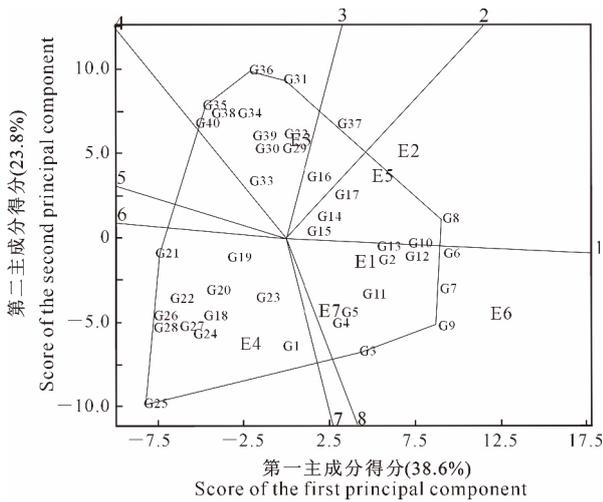
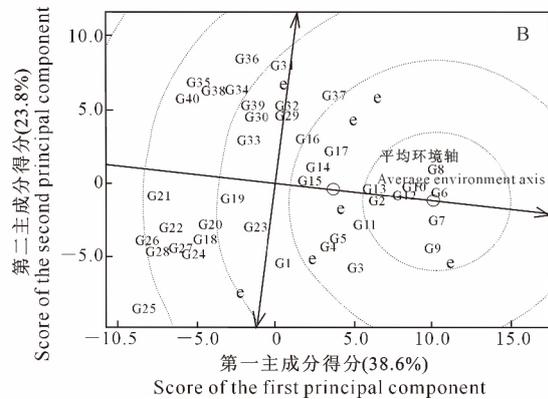
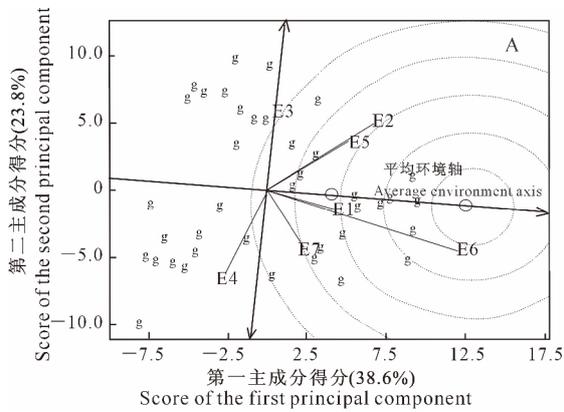


图 3 基于 GGE 双标图分析的甘肃春小麦区域试验参试品系的适应性

Fig. 3 Adaptability of spring wheat lines in Gansu regional test based on GGE-biplot analysis

2.5 甘肃省春小麦参试品系与最佳试点分析

利用 GGE 双标图可以方便直观地找出理想环境和理想品系的位置。理想环境指对品种(系)分辨能力最强且能普遍代表所有试验点的环境;理想品种(系)指所有试验点中平均产量最高和产量最稳定的品种(系)。以理想环境(或品种)为圆心,作若干同心圆,依据与理想环境(或品种)的靠近程度,可直接对环境(或品种)的表现进行排序,越接近圆中心的环境(或品种)表现越好。由图 4-A(理想环境的选择)和图 4-B(理想品系的选择)可以看出,E6 离最小同心圆的圆心最近,说明此区域是品种(系)评价的理想环境,E1、E2、E3、E4、E5 和 E7 离最小同心圆的圆心较远,说明这些区域对品种(系)的鉴别力较 E6 差。基因型 G2、G6、G7、G8、G9、G10、G12 和 G13 靠近最小同心圆的圆心,为高产稳产品系,G25 离最小同心圆的圆心最远,说明在所有品系中其丰产性最差。



A. 理想环境的选择;B. 理想品系的选择;g. 品系名称;e. 试点

A. Choice of ideal environment;B. Choice of ideal lines;g. Lines name;e. Test sites

图 4 甘肃春小麦区域试验参试品系理想基因型与最佳试点分析

Fig. 4 Analysis of the ideal lines in Gansu spring wheat regional trials and the best test sites

2.6 甘肃省春小麦参试品系农艺性状与环境因子的相关性

对甘肃省不同试验点、不同春小麦品系的产量及农艺性状与环境因子进行相关分析,结果见表 5。从表 5 可以看出:产量与有效穗数、穗粒数和千粒质量均呈极显著正相关;在有效穗数、穗粒数和千粒质量这 3 个产量构成因素间,有效穗数与穗粒数呈极显著正相关。基本苗数与有效穗数和穗粒数呈极显著正相关,与小穗数和千粒质量呈极显著负相关。穗长与千粒质量、穗粒数和小穗数呈极显著正相关;小穗数与千粒质量也呈极显著正相关。同时,株高

与穗长、小穗数和穗粒数呈极显著正相关。由此可以得出,甘肃省春小麦区试参试品系的产量相关要素仍可以同步改良提高,可以通过调控小麦群体的产量构成因素来增产。从产量与环境因子的相关性分析可以看出,产量与海拔高度和无霜期呈极显著负相关,可推断环境因素对春小麦产量高低及稳定性具有一定程度的影响。有效穗数、穗粒数、千粒质量、小穗数和基本苗数等与产量相关的要素,与海拔、年均温、年降雨量、无霜期和年日照时数等 5 个因子间有显著或极显著的相关性,说明环境因子对农艺性状也具有一定的影响。

表 5 甘肃省春小麦区试品系农艺性状与环境因子的相关分析

Table 5 Analysis of correlation between spring wheat agronomic traits and environment factors in Gansu regional test

| 指标代码 Indicator code | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 1 | 1 | | | | | | | |
| 2 | 0.028 | 1 | | | | | | |
| 3 | 0.288** | 0.829** | 1 | | | | | |
| 4 | 0.247** | 0.163 | 0.375** | 1 | | | | |
| 5 | -0.089 | -0.037 | 0.167 | 0.446** | 1 | | | |
| 6 | 0.554** | -0.288** | 0.088 | 0.330** | 0.533** | 1 | | |
| 7 | 0.251* | 0.702** | 0.817** | 0.421** | 0.289** | 0.156 | 1 | |
| 8 | 0.453** | -0.281** | 0.066 | 0.179 | 0.346** | 0.739** | 0.047 | 1 |
| 9 | -0.299** | -0.245* | -0.289** | -0.324** | 0.183 | -0.033 | -0.226* | 0.089 |
| 10 | -0.113 | -0.252* | -0.405** | -0.003 | -0.196 | -0.245* | -0.281* | -0.305** |
| 11 | -0.140 | 0.216* | 0.250* | 0.176 | 0.070 | -0.084 | 0.131 | 0.031 |
| 12 | 0.265* | 0.001 | -0.323** | -0.359** | -0.392** | -0.577** | -0.246* | -0.490** |
| 13 | -0.593** | 0.315** | 0.013 | -0.234* | -0.177 | -0.767** | -0.057 | -0.511** |
| 14 | 0.098 | 0.431** | 0.659** | 0.558** | 0.245* | 0.059 | 0.507** | 0.049 |
| 15 | 0.393** | 0.192 | 0.557** | 0.340** | 0.545** | 0.642** | 0.472** | 0.610** |

| 指标代码 Indicator code | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|----|
| 9 | 1 | | | | | | |
| 10 | -0.140 | 1 | | | | | |
| 11 | -0.011 | -0.768** | 1 | | | | |
| 12 | 0.039 | 0.784** | -0.684** | 1 | | | |
| 13 | 0.189 | -0.171 | 0.470** | 0.269* | 1 | | |
| 14 | -0.299** | -0.393** | 0.578** | -0.581** | 0.100 | 1 | |
| 15 | 0.041 | -0.419** | 0.085 | 0.539** | -0.387** | 0.434 | 1 |

注:1. 生育期;2. 基本苗数;3. 有效穗数;4. 株高;5. 穗长;6. 小穗数;7. 穗粒数;8. 千粒质量;9. 体积质量;10. 海拔;11. 年均温;12. 年降雨量;13. 无霜期;14. 年日照时数;15. 产量; * 为差异显著($P < 0.05$); ** 为差异极显著($P < 0.01$)。

Note: 1. Growth duration; 2. Number of basic seedling; 3. Effective spike number; 4. Plant height; 5. Panicle length; 6. Spikelet number; 7. Kernels per spike; 8. Thousand-kernel weight; 9. Test weight; 10. Altitude; 11. Annual temperature; 12. Annual precipitation; 13. Frost free days; 14. Annual sunshine hours; 15. Yield; * stands for significant difference ($P < 0.05$); ** stands for extremely significant difference ($P < 0.01$).

3 讨论

基因型、环境及其交互作用可影响小麦产量稳定性和品质性状^[21-22]。柴守玺等^[23]借助 GGE 双标图法对小黑麦基因型与环境的交互作用及产量稳定性进行分析,认为环境、基因型与环境互作效应对产量的影响分别是基因型效应的 25.9 倍和 2.1 倍。本研究结果表明,品系、环境及其交互作用对甘肃省春小麦区域试验参试品系产量的影响从大到小依次为环境 > 品系与环境交互作用 > 品系,环境及品系与环境的交互作用对产量的影响效应分别是品系效应的 3.71 倍和 3.12 倍,这与许多学者的研究结论^[19,23-25]基本一致。从农艺性状与环境因子的相关性可以看出,海拔和年降雨量等环境因素对小麦产量具有一定程度的影响。由此表明,在春小麦栽培及优良品种选择前,应充分考虑各区域自然环境的优势,同时应重视基因型与环境的交互作用,依据当

地的生态环境选择适宜种植的品种。

品种稳产性、适应性和对试点的鉴别力是作物应用推广的重要考察指标^[16]。所谓理想品种是在不同自然环境下,其产量表现为高产稳产,且有广适应性的品种。考虑作物产量应同时结合其农艺性状进行综合性分析^[13-15,21]。本研究通过 GGE 双标图分析发现,丰产性和稳产性结合较好的品系是 G6 (7095),其次是 G10、G12、G2 和 G13,同时在每个试点中都有表现好且只适应该区域的特殊适应性品种,因此应重视对特定区域的特殊性品种进行广适应性改良。本研究中不同的试验点对各品系的分辨力差距较大,所以区试中应慎重选择试验点。在试验点的选择上,既要考虑各个生产区域的代表性,又要考虑试点对品系的鉴别力,自然环境条件非常相似的地点不应重复设置,以降低试验成本。

作物品种区试为许多因子影响的多年和多点试验,且各因子间有互作效应,其统计分析较繁琐。而

GGE 软件可以对参试品系作出全面客观的评价,而且还可以进行作物品种的生态区划分^[26],是目前用于分析作物区试资料较好的软件。GGE 双标图可获得比 AMMI 模型更全面的解释,且可解释品系年际间的差异。在作物田间数据统计分析时,许多稳定性分析方法只是对变量进行分解和计算推测,很难对其互作机制作出精确无误的解释,只提供了量化的信息,需借助其他相关资料数据解释具体的互作机制。但是,交互作用的定量分析和环境因子与各个性状间的相关分析为证明基因型与环境的互作机制奠定了基础。

4 结 论

对 2007—2014 年甘肃省春小麦区域试验参试品系的产量及农艺性状进行分析得出,造成甘肃春小麦参试品种(系)产量差异的最主要因子是环境间的差异,筛选出在甘肃局部地区有推广价值的品种(系)(品系 9075-2、E32-1、张 925、瑞丰 1620、00WT5-1-5、酒 0462 和 00WT19-4)以及具有代表性和良好鉴别力的区试点(黄羊点)。

[参考文献]

- [1] 高金锋. 荞麦品种稳定性与适应性分析及评价研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
Gao J F. Analysis and assessment of stability and adaptability of buckwheat variety [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2008.
- [2] 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):925-930.
Jin W L. The rank analysis model of evaluating crop varieties stability in regional trials [J]. Acta Agron Sin,2000,26(6):925-930.
- [3] 金文林,白琼岩. 作物区试中品种产量性状评价的秩次分析法 [J]. 作物学报,1999,25(5):632-638.
Jin W L, Bai Q Y. The analysis based on ranks of crop varieties in regional trials [J]. Acta Agron Sin,1999,25(5):632-638.
- [4] 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.
Zhang Z, Lu C, Xiang Z H. Analysis of varieties stability based on AMMI model [J]. Acta Agron Sin,1998,24(3):304-309.
- [5] 金石桥,许乃银. GGE 双标图在中国农作物品种试验中应用的必要性探讨 [J]. 种子,2012,31(12):89-92.
Jin S Q, Xu N Y. The discuss of necessity about GGE double labeling chart applied in crop variety experiment in China [J]. Seed,2012,31(12):89-92.
- [6] Yan W K, Tinker N A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications [J]. Can J Plant Science, 2006,86:623-645.
- [7] Yan W K, Kang M S, Ma B L, et al. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype by environment data [J]. Crop Science,2007,47:641-653.
- [8] Yan W K, Hunt L A, Sheng Q L, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot [J]. Crop Science,2000,40:597-605.
- [9] Yan W K. GGE biplot: a windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data [J]. Agron J,2001,93:1111-1118.
- [10] Yan W K, Hunt L A. Biplot analysis of Diallel data [J]. Crop Science,2002,42:21-30.
- [11] 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.
Yan W K. Optimal use of biplots in analysis of Multi-Location variety test data [J]. Acta Agron Sin, 2010,36(11):1805-1819.
- [12] 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.
Zhang Z F, Fu X F, Liu J Q, et al. Yield stability and testing-site representativens in national regional trials for oat lines based on GGE-biplot analysis [J]. Acta Agron Sin, 2010,36(8):1377-1385.
- [13] 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.
Zhou C J, Tian Z Y, Li J Y, et al. GGE-biplot analysis on yield stability and testing-site representativeness of soyben lines in multi-environment trials [J]. Soybean Science, 2011,30(2):318-321.
- [14] 李琴琴,高乙萍,张志芬,等. 甜荞品种稳定性和试验地点相似性的 GGE 双标图分析 [J]. 干旱地区农业研究,2013,31(1):67-70.
Li Q Q, Gao Y P, Zhang Z F, et al. Stability and testing-site similarity for common buckwheat lines based on GGE-biplot analysis [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013,31(1):67-70.
- [15] 罗 俊,张 华,邓祖湖,等. 用 GGE 双标图分析甘蔗品种性状稳定性及试点代表性 [J]. 应用生态学报,2012,23(5):1319-1325.
Luo J, Zhang H, Deng Z H, et al. Trait stability and test site representativeness of sugarance varieties based on GGT-biplot analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(5):1319-1325.
- [16] 张大爱,赵绪明,钱一萍,等. 用 GGE 双标图分析苦荞品种的产量稳定性及试验地点相似性 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(7):101-108.
Zhang D A, Zhao X M, Qian Y P, et al. GGE biplot based yield stability and test site similarity of tartary buckwheat varieties [J]. Journal of Northwest A&F Univerity (Nat Sci Ed), 2015,43(7):101-108.
- [17] 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.
- Chang L, Chai S X. Application of GGE biplot in spring wheat yield stability analysis in rainfed areas of China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 988-994.
- [18] 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.
- Shang G X, Wang R, Li J N, et al. GGE biplot analysis of oleic acid combining ability of *Brassica napus* L. [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(5): 566-572.
- [19] Freeman G H, Perkins J M. Environmental and genotype-environmental components of variability: VIII. Relations between genotypes grown in different environments and measures of these environments [J]. Heredity, 1971, 27: 15-23.
- [20] Romagosa I, Fox P N. Genotype \times environment interaction and adaptation [M]//Hayward M D, Bosermark N O, Romagosa I. Plant breeding: principle and prospects. London: Chapman and Hall, 1993: 373-390.
- [21] Shrivastava D K, Sindhu V, Holkar A S. Genotype \times environment interactions for yield and major yield contributing traits in triticale (*X Triticosecale* Wittmack) [J]. Crop Research, 1998, 16(3): 325-332.
- [22] 乔玉强, 马传喜, 黄正来, 等. 小麦品质性状的基因型和环境及其互作效应分析 [J]. 核农学报, 2008, 22(5): 706-711.
- Qiao Y Q, Ma C X, Huang Z L, et al. The effects of genotype, environment and their interaction on wheat quality [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2008, 22(5): 706-711.
- [23] 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.
- Chai S X, Chang L, Yang R J, et al. Analysis on genotype \times environment interactions and yield stability of triticale [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2011, 25(1): 155-161.
- [24] Kang M S, Gauch H G. Genotype-by-environment interaction [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.
- [25] 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.
- Chang L, Chai S X. Application of AMMI Model in the stability of spring wheat in rainfed areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3677-3684.
- [26] 许乃银, 张国伟, 李 健, 等. 基于 GGE 双标图的棉花品种生态区划分 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 771-776.
- Xu N Y, Zhang G W, Li J, et al. Ecological regionalization of cotton varieties based on GGE biplot [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 771-776.

(上接第 38 页)

- [36] 李广敏, 唐连顺, 商振清, 等. 渗透胁迫对玉米幼苗保护酶系统的影响及其与抗旱性的关系 [J]. 河北农业大学学报, 1994, 17(2): 1-5.
- Li G M, Tang L S, Shang Z Q, et al. Effect of osmotic stress on protective enzyme systems in maize seedlings and their relationship to drought resistance [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1994, 17(2): 1-5.
- [37] 王兰兰, 刘 新, 刘贺楠, 等. 小麦幼苗对盐胁迫和水分胁迫的生理反应对比 [J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(1): 120-123.
- Wang L L, Liu X, Liu H N, et al. Physiological responses of wheat seedling to water and salt stress [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2013, 31(1): 120-123.
- [38] 靖姣姣, 张 颖, 白志英, 等. 盐胁迫对小麦代换系渗透调节物质的影响及染色体效应 [J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(4): 743-750.
- Jing J J, Zhang Y, Bai Z Y, et al. The effects of salt stress on osmoregulation substance and chromosome of wheat substitution lines [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(4): 743-750.
- [39] 彭巧慧, 刘孟雨, 姜净卫, 等. 生殖生长早期水分胁迫降低作物穗粒数的研究进展 [J]. 河北农业科学, 2013, 17(1): 12-15, 27.
- Peng Q H, Liu M Y, Jiang J W, et al. Research progress of water stress leading to reduced grain number of crops during early reproductive stage [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2013, 17(1): 12-15, 27.
- [40] Nguyen G N, Hailstones D L, Wilkes M, et al. Drought-induced oxidative conditions in rice anthers leading to a programmed cell death and pollen abortion [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2009, 195: 157-164.
- [41] 麦博儒, 郑有飞, 梁 骏, 等. 模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2227-2233.
- Mai B R, Zheng Y F, Liang J, et al. Effects of simulated acid rain on leaf photosynthate, growth, and yield of wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2227-2233.
- [42] Unkovich M, Baldock J, Forbes M. Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: examples from Australian agriculture [J]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 173-219.