

小豆新品种（系）多点联合鉴定及产量与生态适应性评价

胡亮亮 曹榕 陈天晓 宋倩楠 王素华 程须珍 王丽侠 陈红霖

(中国农业科学院作物科学研究所/中国农业科学院东北亚农业科技创新中心, 100081, 北京)

摘要 为筛选适宜不同区域种植的优良小豆品种,于2022-2023年在全国范围内18个试验点对27个小豆新品种(系)开展多环境联合鉴定,系统分析不同生态区间小豆品种(系)的主要农艺性状变异及产量。结果表明,不同试点和生态区间的小豆新品种(系)农艺性状和产量均存在显著差异,其中主茎分枝数、株高和单株荚数等性状的环境互作效应较强(变异系数>30.0%),而生育期、荚长和百粒重等性状遗传稳定性较高(变异系数<15.0%)。保红201429-8、赤红3号和唐红201301-2等9个品种较对照平均增产0.29%~8.79%。保红201429-8和唐红201509-12兼具高产性与广适性。

关键词 小豆; 新品种(系); 多环境评价; 农艺性状; 生态适应性

小豆[*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & Ohashi]起源于我国,是我国传统药食同源作物,在我国已有2000余年栽培历史^[1],现广泛分布于东北、华北和西北等地区^[2-3]。小豆富含优质蛋白质(20%~25%)及人体必需的8种氨基酸^[4],并含有丰富的铁、钙等矿质元素以及萜类和黄酮类等生物活性物质^[5-7]。此外,小豆还具有抗氧化、调节血糖、抗高血压和改善肠道健康等多种生理功效^[8-9],是功能性食品开发的理想原料。小豆在我国具有重要的经济价值。然而,相较于其他主要粮食作物,我国小豆生产面临单产水平较低、品种生态适应性不足等瓶颈问题。近年来,我国小豆育种研究在改良高产、广适、抗病及耐逆等性状方面取得了显著进展,并培育出了一批优良新品种,如高产品种中红6号^[10]、大粒品种辽红小豆8号^[11]、抗旱耐贫瘠品种晋小豆7号^[12]、抗叶斑病和霜霉病品种吉红8号^[13]和稳产广适品种冀红17号^[14]等。然而,由于基因型(G)与环境互作(E)效应的影响,现有小豆品种在跨生态区种植时普遍表现出产量波动较大和稳定性较差等问题。因此,亟需通过联合鉴定筛选出适宜不同区域种植的新品种。

联合鉴定试验可以解析基因型与环境互作(G×E)效应,是筛选特定生态适应性品种的关键手段^[15]。该试验方法能够有效揭示G×E规律,进而指导育种家在特定环境下选育表现最优的品种。通过多点多年的田间试验,可以全面评价作物新品

种的稳定性和适应性,筛选出适宜推广的优良品种,进而提高作物的生产效率和品质。近年来,联合鉴定试验已在小麦^[16]、水稻^[17]和玉米^[18]等作物育种中广泛应用,并取得了显著成效。与传统单点试验相比,联合鉴定方法能更准确地识别广适性基因型,从而降低品种推广风险^[17]。但目前针对小豆的系统性联合鉴定研究仍较缺乏,尤其缺乏覆盖全国主产区的品种适应性数据。

为了系统评价小豆新品种(系)的农艺性状、生态适应性和产量表现,筛选出适宜不同生态区种植的优良品种,本研究汇集了全国18个试验点27个参试品种(系)的联合鉴定试验数据。试验点涵盖了我国主要小豆种植区域,具有较强的区域代表性。通过对上述试验数据进行了系统分析,旨在评估小豆新品种(系)在不同生态区域的表现差异,遴选出适宜各区域推广的优良品种,为未来小豆育种工作提供理论参考。研究结果将为小豆品种的区域化推广应用提供科学依据,对提高我国小豆产业生产水平和可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验采用27个小豆新品种(系)作为参试材料(表1),材料来源于全国14家育种单位。以冀红352作为对照品种(CK),来源于河北省农林科学院粮油作物研究所。

作者简介:胡亮亮,主要从事食用豆类种质资源创新与利用研究, E-mail: hu15101081634@163.com

陈红霖为通信作者,研究方向为食用豆类种质资源, E-mail: chen honglin@caas.cn

基金项目:国家食用豆产业技术体系(CARS-08)

收稿日期:2025-01-26;修回日期:2025-03-10;网络出版日期:2025-06-03

表 1 参试品种（系）及其来源
Table 1 Test varieties (lines) and their sources

| 编号 Number | 品种（系） Variety (line) | 来源 Origin |
|--------------|-------------------------|------------------|
| 1 | 龙 11-203 | 黑龙江省农业科学院作物育种研究所 |
| 2 | 龙 11-805 | 黑龙江省农业科学院作物育种研究所 |
| 3 | H1016 | 吉林省农业科学院 |
| 4 | H1007 | 吉林省农业科学院 |
| 5 | 182-320 | 黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院 |
| 6 | 195-609 | 黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院 |
| 7 | 辽红 08704-05 | 辽宁省农业科学院 |
| 8 | 辽红 08706-12 | 辽宁省农业科学院 |
| 9 | 赤红 3 号 | 内蒙古赤峰市农牧科学研究所 |
| 10 | 品红 2020-21-12-8-11 | 中国农业科学院作物科学研究所 |
| 11 | 品红 2020-4-7-2 | 中国农业科学院作物科学研究所 |
| 12 | 品红 2019-3-3-1 | 中国农业科学院作物科学研究所 |
| 13 | 品红 2019-22-14-12 | 中国农业科学院作物科学研究所 |
| 14 | 冀红 0921 反-4-1-3-3-4 | 河北省农林科学院粮油作物研究所 |
| 15 | 冀红 1105 反-5-4-1-2 | 河北省农林科学院粮油作物研究所 |
| 16 | 保红 201432-8 | 保定市农业科学院 |
| 17 | 保红 201429-8 | 保定市农业科学院 |
| 18 | 唐红 201301-2 | 唐山市农业科学院 |
| 19 | 唐红 201509-12 | 唐山市农业科学院 |
| 20 | 同红 6 号 | 山西省农业科学院高寒区作物研究所 |
| 21 | 同红 7 号 | 山西省农业科学院高寒区作物研究所 |
| 22 | 苏红 17-606 | 江苏省农业科学院 |
| 23 | 陇红 3 号 | 庆阳市农业科学院 |
| 24 | 贵红 2 号 | 毕节市农业科学研究所 |
| 25 | 贵红 3 号 | 毕节市农业科学研究所 |
| 26 | 桂红 20-9-1 | 广西省农业科学院水稻研究所 |
| 27 | 桂红 20-21-1 | 广西省农业科学院水稻研究所 |

表 2 18 个试验点播种期
Table 2 The sowing period at 18 test sites

| 编号 Number | 试验点 Test site | 播种期 Sowing period | |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|-------|
| | | 2022 | 2023 |
| 北方春播区 Northern Spring Sowing Area | | | |
| E1 | 黑龙江哈尔滨 | 05-15 | 05-16 |
| E2 | 黑龙江齐齐哈尔 | 05-18 | 05-18 |
| E3 | 吉林长春 | 05-28 | 05-22 |
| E4 | 辽宁沈阳 | 06-11 | 05-25 |
| E5 | 内蒙古呼和浩特 | 05-10 | 05-15 |
| E6 | 内蒙古赤峰 | 05-25 | 05-12 |
| E7 | 山西太原 | 05-22 | 06-06 |
| E8 | 山西大同 | 05-19 | 05-21 |
| E9 | 河北张家口 | 05-14 | 05-16 |
| E10 | 陕西榆林 | 05-11 | 05-17 |
| 北方夏播区 Northern Summer Sowing Area | | | |
| E11 | 河北保定 | 06-26 | 06-21 |
| E12 | 河北石家庄 | 06-23 | 06-25 |
| E13 | 河北唐山 | 06-24 | 06-24 |
| E14 | 北京 | 06-18 | 06-18 |
| 南方区 South Region | | | |
| E15 | 江苏南京 | 06-22 | 07-25 |
| E16 | 贵州毕节 | 04-26 | 05-06 |
| E17 | 重庆 | 06-14 | 05-15 |
| E18 | 广西南宁 | 07-08 | 07-29 |

1.2 试验设计

多点联合鉴定试验于 2022-2023 年在北京、黑龙江齐齐哈尔和江苏南京等 18 个试验点进行。根据各试验点地理位置和气候条件的差异，将 18 个试验点划分为 3 个生态区（表 2）。试验地选择地势平坦、茬口一致、肥力中等偏上且具备灌溉条件的地块。不同生态区域播种期有所差异，北方春播区播期为 5 月 10-25 日，北方夏播区为 6 月 15-25 日，南方区则根据前茬作物收获时间确定播期。试验采用随机区组设计，设 3 次重复。小区面积 10 m²（种植 4 行，行长 5.0 m，行距 0.5 m），播深 3~4 cm，播深力求一致、均匀，覆土后进行镇压。成熟期按小区进行收获、脱粒和晾晒。

1.3 测定项目与方法

于小豆生长季，定期观测并记录主要农艺性状，包括生育期（从播种至成熟的天数）、株高（从地面至主茎顶端的高度）和主茎分枝数等。收获后，测定单株荚数、百粒重和单荚粒数等产量相关指

标。于成熟期每小区随机选取 5 株测定株高和主茎节数，取平均值；荚长为每小区随机选取 5 个豆荚测定平均长度，所有农艺性状的测定均参照《小豆种质资源描述规范与数据标准》^[19]执行。采用小区实收法测定产量。成熟后，按小区收获、脱粒、晾晒至水分含量 12%~14%后，折算为单位面积产量。

1.4 数据处理

采用方差分析（ANOVA）评估不同试验点和生态区小豆新品种（系）的农艺性状与产量表现的差异显著性，基于 R 统计分析软件（v4.3.1）进行数据分析。采用 Eberhart 和 Russell 联合回归模型^[20]评估品种稳定性，该方法基于线性模型分析品种产量对环境变化的响应，即产量 Y_{ij} 是环境效应 I_j 的线性函数，具体公式如下： $Y_{ij} = \mu_i + \beta_i I_j + \delta_{ij}$ ，式中， Y_{ij} 是第 i 个品种在第 j 个环境中的产量； μ_i 是第 i 个品种的平均产量； β_i 是第 i 个品种的回归系数，表示该品种对环境变化的响应程度； I_j 是第 j 个环境的平均效应； δ_{ij} 是回归残差，表示未解释的随机变异。

2 结果与分析

2.1 不同试点间小豆新品种（系）农艺性状变异

方差分析表明，小豆新品种（系）农艺性状在全国 18 个试验点间存在明显的区域异质性（表

3), 其中主茎分枝数、株高及单株荚数受环境互作效应较强, 变异系数较大。主茎节数次之, 单荚粒数、百粒重、荚长及生育期变异系数相对较小。各试验点间, 生育期的平均值变幅为 71.9~121.1 d; 平均株高在黑龙江哈尔滨最高, 在广西南宁最低;

主茎节数均值变幅为 7.2~19.9; 单株荚数最多的为南宁, 最少的为齐齐哈尔; 单荚粒数平均值变幅为 5.1~10.7; 百粒重均值变幅为 9.1~16.7 g。以上结果表明各性状受环境影响程度各异, 主茎分枝数、株高和单株荚数等性状受环境影响较大。

表 3 不同试点间小豆新品种(系)的主要农艺性状变异分析

Table 3 Analysis of main agronomic trait variations of new adzuki bean varieties (lines) among different test sites

| 编号 Number | 参数 Parameter | 生育期 Growth period (d) | 株高 Plant height (cm) | 主茎节数 Number of main stem nodes | 主茎分枝数 Number of main stem branches | 单株荚数 Number of pods per plant | 荚长 Pod length (cm) | 单荚粒数 Number of grains per pod | 百粒重 100-grain weight (g) |
|--------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| E1 | 最小值 | 111.5 | 61.0 | 14.5 | 1.4 | 15.6 | 7.8 | 6.2 | 10.9 |
| | 最大值 | 127.0 | 155.3 | 19.6 | 3.1 | 37.7 | 10.1 | 8.1 | 17.8 |
| | 平均值 | 121.1 | 114.2 | 16.9 | 2.2 | 24.6 | 8.9 | 7.3 | 14.1 |
| E2 | 最小值 | 99.5 | 29.5 | 12.6 | 0.6 | 8.5 | 7.6 | 5.2 | 7.8 |
| | 最大值 | 124.5 | 80.8 | 16.4 | 2.7 | 20.7 | 10.0 | 8.2 | 19.6 |
| | 平均值 | 117.8 | 59.7 | 14.3 | 1.6 | 13.8 | 8.8 | 6.7 | 13.9 |
| E3 | 最小值 | 101.5 | 33.7 | 11.5 | 1.0 | 2.0 | 5.9 | 7.6 | 8.3 |
| | 最大值 | 112.5 | 79.9 | 20.9 | 3.0 | 28.0 | 9.0 | 10.1 | 19.2 |
| | 平均值 | 107.0 | 56.2 | 15.6 | 2.2 | 15.4 | 7.6 | 9.1 | 12.7 |
| E4 | 最小值 | 81.5 | 53.5 | 16.2 | 2.7 | 20.4 | 7.7 | 5.8 | 9.9 |
| | 最大值 | 100.0 | 110.9 | 22.6 | 5.0 | 55.7 | 10.3 | 8.7 | 19.0 |
| | 平均值 | 93.0 | 69.8 | 19.0 | 4.0 | 36.1 | 9.1 | 7.7 | 13.5 |
| E5 | 最小值 | 115.0 | 46.1 | 11.1 | 5.5 | 27.2 | 7.9 | 5.6 | 9.7 |
| | 最大值 | 122.0 | 93.8 | 15.6 | 8.3 | 48.3 | 11.4 | 8.7 | 19.5 |
| | 平均值 | 118.2 | 71.6 | 13.2 | 7.2 | 36.2 | 9.1 | 7.1 | 15.0 |
| E6 | 最小值 | 105.0 | 55.5 | 14.0 | 2.0 | 12.0 | 9.9 | 9.0 | 12.2 |
| | 最大值 | 128.5 | 142.7 | 20.0 | 4.7 | 44.3 | 13.7 | 12.3 | 20.3 |
| | 平均值 | 115.0 | 84.9 | 16.5 | 3.7 | 32.5 | 12.1 | 10.7 | 15.5 |
| E7 | 最小值 | 97.5 | 35.5 | 12.7 | 1.8 | 4.9 | 7.9 | 6.0 | 9.4 |
| | 最大值 | 124.0 | 85.9 | 18.4 | 4.9 | 38.7 | 12.3 | 8.6 | 23.1 |
| | 平均值 | 107.8 | 52.8 | 15.3 | 2.9 | 19.5 | 9.0 | 7.1 | 16.7 |
| E8 | 最小值 | 98.0 | 31.7 | 9.2 | 1.9 | 2.1 | 8.0 | 6.2 | 8.2 |
| | 最大值 | 110.0 | 101.7 | 17.0 | 6.1 | 65.0 | 10.0 | 8.8 | 18.4 |
| | 平均值 | 103.9 | 60.2 | 12.9 | 3.6 | 37.8 | 9.1 | 7.6 | 13.5 |
| E9 | 最小值 | 93.0 | 40.6 | 11.9 | 1.2 | 7.0 | 7.8 | 5.5 | 8.5 |
| | 最大值 | 124.0 | 111.0 | 19.1 | 3.8 | 34.2 | 9.5 | 8.5 | 19.8 |
| | 平均值 | 106.2 | 71.4 | 15.4 | 2.1 | 24.1 | 8.6 | 7.1 | 13.6 |
| E10 | 最小值 | 88.0 | 12.9 | 3.2 | 2.0 | 10.6 | 5.9 | 5.5 | 5.2 |
| | 最大值 | 122.0 | 68.2 | 11.6 | 7.5 | 43.5 | 8.6 | 8.9 | 17.5 |
| | 平均值 | 102.7 | 35.1 | 7.0 | 3.2 | 27.6 | 7.8 | 7.3 | 11.8 |
| E11 | 最小值 | 87.0 | 28.7 | 12.6 | 1.7 | 12.4 | 6.7 | 6.1 | 7.4 |
| | 最大值 | 102.0 | 81.3 | 20.3 | 4.1 | 39.2 | 9.2 | 8.8 | 18.3 |
| | 平均值 | 94.6 | 56.2 | 17.2 | 2.7 | 28.0 | 8.2 | 7.0 | 12.6 |
| E12 | 最小值 | 80.0 | 28.3 | 13.8 | 1.1 | 17.3 | 6.7 | 5.3 | 6.7 |
| | 最大值 | 104.0 | 103.3 | 23.6 | 5.4 | 62.6 | 8.7 | 8.7 | 16.1 |
| | 平均值 | 88.1 | 49.6 | 18.6 | 2.8 | 38.7 | 8.0 | 6.6 | 12.1 |
| E13 | 最小值 | 82.0 | 43.2 | 15.5 | 1.6 | 18.8 | 6.5 | 6.1 | 6.0 |
| | 最大值 | 98.5 | 84.9 | 23.7 | 4.9 | 38.8 | 9.0 | 8.8 | 18.5 |
| | 平均值 | 89.2 | 62.1 | 19.9 | 3.2 | 26.2 | 7.7 | 7.2 | 13.2 |
| E14 | 最小值 | 95.0 | 28.7 | 11.7 | 1.3 | 16.7 | 5.7 | 4.7 | 7.4 |
| | 最大值 | 125.0 | 87.0 | 20.7 | 7.0 | 61.3 | 8.9 | 9.0 | 21.0 |
| | 平均值 | 108.0 | 55.4 | 16.5 | 3.5 | 35.4 | 7.4 | 6.4 | 13.5 |

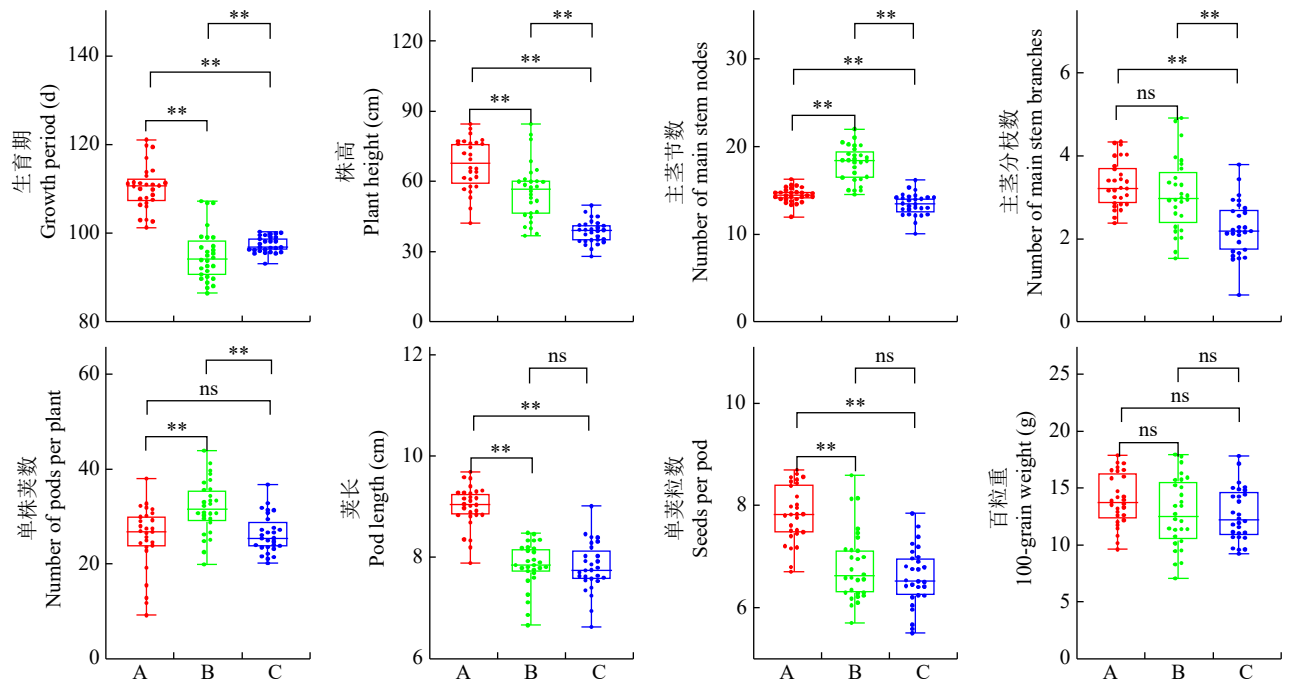
续表 3 Table 3 (continued)

| 编号 Number | 参数 Parameter | 生育期 Growth period (d) | 株高 Plant height (cm) | 主茎节数 Number of main stem nodes | 主茎分枝数 Number of main stem branches | 单株荚数 Number of pods per plant | 荚长 Pod length (cm) | 单荚粒数 Number of grains per pod | 百粒重 100-grain weight (g) |
|--------------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| E15 | 最小值 | 84.5 | 31.4 | 12.7 | 2.7 | 16.5 | 6.3 | 6.0 | 6.5 |
| | 最大值 | 95.5 | 61.8 | 17.0 | 5.5 | 46.9 | 8.4 | 8.8 | 17.2 |
| | 平均值 | 90.9 | 43.6 | 14.3 | 4.0 | 26.2 | 7.6 | 7.3 | 11.7 |
| E16 | 最小值 | 104.5 | 28.7 | 6.9 | 0.9 | 12.0 | 6.8 | 3.9 | 8.8 |
| | 最大值 | 114.5 | 58.0 | 13.0 | 4.0 | 33.3 | 9.7 | 6.5 | 19.5 |
| | 平均值 | 109.2 | 36.6 | 8.8 | 2.1 | 20.1 | 8.1 | 5.1 | 13.4 |
| E17 | 最小值 | 102.0 | 29.3 | 10.1 | 0.3 | 8.5 | 5.9 | 4.4 | 9.5 |
| | 最大值 | 126.5 | 57.2 | 19.8 | 4.3 | 29.6 | 9.7 | 8.2 | 24.9 |
| | 平均值 | 117.4 | 42.9 | 14.8 | 2.0 | 16.2 | 7.9 | 6.4 | 16.7 |
| E18 | 最小值 | 69.0 | 15.1 | 11.0 | 0.1 | 17.4 | 6.4 | 5.7 | 4.8 |
| | 最大值 | 75.0 | 43.9 | 20.7 | 1.8 | 65.7 | 9.4 | 10.8 | 12.7 |
| | 平均值 | 71.9 | 31.7 | 16.0 | 1.0 | 42.7 | 7.7 | 7.7 | 9.1 |
| 变异系数 Coefficient variation (%) | | 12.3 | 32.8 | 20.9 | 43.2 | 30.5 | 12.3 | 15.2 | 13.2 |

2.2 不同生态区间小豆新品种（系）的性状变异

不同生态区间小豆新品种（系）各性状差异显著（图 1）。北方春播区平均生育期最长，极显著高于北方夏播区和南方区；株高亦为北方春播区最高，北方夏播区次之，南方区最低；北方夏播区主茎节数最多，北方春播区次之，南方区最少；主茎分枝数南方区最低，极显著低于北方春播区和北方夏播区，北方春播区和北方夏播区无显著差异；单

株荚数北方夏播区最高，极显著高于北方春播区和南方区；荚长和单荚粒数均为北方春播区极显著高于其余 2 个区，北方夏播区和南方区无显著差异；百粒重在 3 个生态区间无显著差异。上述性状差异可能与生态区气候条件及土壤肥力相关。生态区间气候、土壤及水分条件的差异显著影响小豆生长、发育与产量。随纬度递增，小豆生育期、株高、主茎分枝数和单株荚数等性状呈增大趋势，而百粒重



A: 北方春播区, B: 北方夏播区, C: 南方区。“*”表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, “**”表示在 $P < 0.01$ 水平上差异极显著, ns 表示无显著差异。下同。

A: Northern Spring Sowing Area, B: Northern Summer Sowing Area, C: Southern Area. “*” indicates significant difference at $P < 0.05$ level, “**” indicates extremely significant difference at $P < 0.01$ level, ns indicates no significant difference. The same below.

图 1 不同生态区间小豆新品种（系）的性状差异

Fig.1 Trait differences of new adzuki bean varieties (lines) across different ecological regions

受环境因素影响较小。

2.3 不同小豆新品种(系)产量分析

18 个试验点产量结果(表 4)显示,保红 201429-8、赤红 3 号、唐红 201301-2、195-609、品红 2019-3-3-1、辽红 08704-05、品红 2020-4-7-2、同红 7 号和唐红 201509-12 平均产量高于 CK,增产 0.29%~8.79%。保红 201429-8 平均产量最高,达 1690.29 kg/hm²,赤红 3 号和唐红 201301-2 次之,分别为 1660.52 和 1652.24 kg/hm²。

小豆为短日照作物,光温反应较敏感,跨纬度引种显著影响其生长习性、生育期及产量^[14]。本研究结果(图 2)表明,北方春播区品种引种至北方夏播区和南方区,平均产量无显著变化;北方夏播区品种引至北方春播区和南方区,产量较原产区极显著降低;南方区品种引至北方春播区,产量极显著降低,引至北方夏播区,产量无显著变化。

2.4 不同小豆新品种(系)品种稳定性和适应性分析

高产与稳产是品种推广的基本要求。为了进一步评估小豆新品种(系)的稳定性和适应性,本研究采用了 Eberhart 和 Russell 的稳定性分析方法。结果(表 5)显示,保红 201429-8 和唐红 201509-12 产量高于冀红 352,且环境回归系数接近于 1,回归残差小,表明其对环境变化的响应稳定,适宜多点种植,具有高产广适特性。其中,保红 201429-8 在北方春播区和南方区表现突出,唐红 201509-12

表 4 不同小豆品种(系)间的产量差异
Table 4 The yield difference among adzuki bean varieties (lines)

| 编号 Number | 品种(系) Variety (line) | 平均产量 Average yield (kg/hm ²) | 较 CK 增产率 Yield increase over CK (%) |
|--------------|----------------------------|--|---|
| 1 | 龙 11-203 | 1478.87 | -4.82 |
| 2 | 龙 11-805 | 1352.27 | -12.97 |
| 3 | H1016 | 1253.93 | -19.30 |
| 4 | H1007 | 1372.48 | -11.67 |
| 5 | 182-320 | 1521.19 | -2.09 |
| 6 | 195-609 | 1649.30 | 6.15 |
| 7 | 辽红 08704-05 | 1597.64 | 2.83 |
| 8 | 辽红 08706-12 | 1549.87 | -0.25 |
| 9 | 赤红 3 号 | 1660.52 | 6.87 |
| 10 | 品红 2020-21-12-8-11 | 1453.06 | -6.48 |
| 11 | 品红 2020-4-7-2 | 1596.75 | 2.77 |
| 12 | 品红 2019-3-3-1 | 1599.56 | 2.95 |
| 13 | 品红 2019-22-14-12 | 1349.26 | -13.16 |
| 14 | 冀红 0921 反-4-1-3-3-4 | 1521.31 | -2.09 |
| 15 | 冀红 1105 反-5-4-1-2 | 1552.94 | -0.05 |
| 16 | 保红 201432-8 | 991.59 | -36.18 |
| 17 | 保红 201429-8 | 1690.29 | 8.79 |
| 18 | 唐红 201301-2 | 1652.24 | 6.34 |
| 19 | 唐红 201509-12 | 1558.29 | 0.29 |
| 20 | 同红 6 号 | 1440.00 | -7.32 |
| 21 | 同红 7 号 | 1560.45 | 0.43 |
| 22 | 苏红 17-606 | 1458.98 | -6.10 |
| 23 | 陇红 3 号 | 726.35 | -53.25 |
| 24 | 贵红 2 号 | 815.07 | -47.54 |
| 25 | 贵红 3 号 | 804.88 | -48.20 |
| 26 | 桂红 20-9-1 | 811.19 | -47.79 |
| 27 | 桂红 20-21-1 | 1279.59 | -17.64 |
| 28 | 冀红 352 | 1553.74 | - |

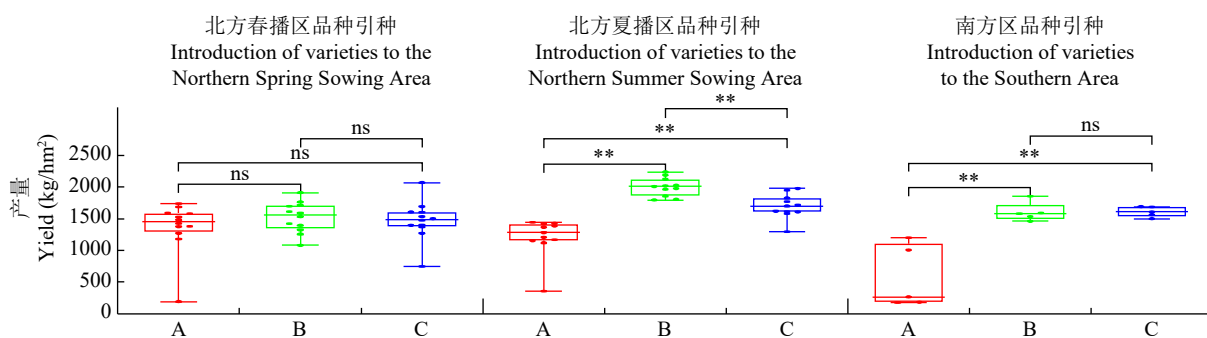


图 2 不同来源小豆新品种(系)在不同生态区的产量表现

Fig.2 Yield performance of new adzuki bean varieties (lines) from different sources across various ecological regions

则在北方夏播区表现最佳。赤红 3 号、195-609、辽红 08704-05 和同红 7 号在 18 个试验点的平均产量虽高于 CK,但稳产性欠佳,适宜在北方春播区种植。唐红 201301-2、品红 2019-3-3-1 和品红 2020-4-7-2 适宜在北方春播区和北方夏播区种植。苏红 17-606 产量变异系数低,稳产性良好,但产

量低于 CK。

2.5 不同区域适宜品种(系)的筛选

综合不同生态区间及试验点产量表现(表 6),筛选出适宜各区域种植的优良品种(系)。结果表明,赤红 3 号、195-609 和辽红 08704-05 等适宜北方春播区;唐红 201301-2、品红 2020-4-7-2、品红

表 5 不同小豆新品种（系）的产量稳定性分析
Table 5 Analysis of yield stability of different adzuki bean varieties (lines)

| 编号 Number | 品种（系） Variety (line) | 产量 Yield (kg/hm ²) | 回归系数 β_i | 回归残差 δ_i^2 | 适应地区 Adaptation region |
|--------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------|--|
| 1 | 龙 11-203 | 1478.87 | 1.05 | 0.22 | E1, E2, E3, E4, E9, E14, E16, E17, E18 |
| 2 | 龙 11-805 | 1352.27 | 0.98 | 0.18 | E1, E2, E4, E6, E7, E9, E15 |
| 3 | H1016 | 1253.93 | 0.92 | 0.20 | E3, E4, E5, E6, E8, E9, E10, E13, E16 |
| 4 | H1007 | 1372.48 | 1.10 | 0.25 | E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E16 |
| 5 | 182-320 | 1521.19 | 1.02 | 0.15 | E1, E2, E3, E4, E5, E6 |
| 6 | 195-609 | 1649.30 | 1.08 | 0.25 | E1, E2, E4, E5, E6 |
| 7 | 辽红 08704-05 | 1597.64 | 1.00 | 0.20 | E1, E2, E3, E4, E5, E6, E9, E10 |
| 8 | 辽红 08706-12 | 1549.87 | 0.95 | 0.18 | E1, E2, E3, E4, E5, E6, E9 |
| 9 | 赤红 3 号 | 1660.52 | 1.12 | 0.22 | E1, E2, E4, E5, E6, E7, E8, E9 |
| 10 | 品红 2020-21-12-8-11 | 1453.06 | 0.97 | 0.20 | E2, E5, E7, E10, E11, E12, E14, E15 |
| 11 | 品红 2020-4-7-2 | 1596.75 | 1.03 | 0.22 | E5, E6, E11, E12, E14, E17 |
| 12 | 品红 2019-3-3-1 | 1599.56 | 1.02 | 0.19 | E2, E4, E5, E6, E10, E11, E14 |
| 13 | 品红 2019-22-14-12 | 1349.26 | 0.95 | 0.25 | E5, E6, E7, E8, E10, E11, E13, E14, E15 |
| 14 | 冀红 0921 反-4-1-3-3-4 | 1521.31 | 1.04 | 0.23 | E5, E10, E11, E12, E14, E17 |
| 15 | 冀红 1105 反-5-4-1-2 | 1552.94 | 1.07 | 0.21 | E5, E8, E11, E12, E13, E14, E16, E17, E18 |
| 16 | 保红 201432-8 | 991.59 | 0.88 | 0.30 | E11, E12, E13, E14, E15, E16, E18 |
| 17 | 保红 201429-8 | 1690.29 | 1.15 | 0.18 | E1~E18 |
| 18 | 唐红 201301-2 | 1652.24 | 1.09 | 0.17 | E5, E7, E11, E12, E13, E14 |
| 19 | 唐红 201509-12 | 1558.29 | 1.05 | 0.19 | E1~E18 |
| 20 | 同红 6 号 | 1440.00 | 0.96 | 0.22 | E5, E8, E10, E11, E12, E13 |
| 21 | 同红 7 号 | 1560.45 | 1.08 | 0.18 | E1, E2, E4, E5, E7, E8, E9 |
| 22 | 苏红 17-606 | 1458.98 | 0.99 | 0.20 | E1~E18 |
| 23 | 陇红 3 号 | 726.35 | 0.75 | 0.35 | E7, E12, E13, E15, E16, E18 |
| 24 | 贵红 2 号 | 815.07 | 0.82 | 0.30 | E11, E12, E13, E14, E15, E16, E18 |
| 25 | 贵红 3 号 | 804.88 | 0.80 | 0.32 | E7, E11, E12, E13, E14, E15, E16, E18 |
| 26 | 桂红 20-9-1 | 811.19 | 0.85 | 0.28 | E7, E11, E12, E13, E15, E16, E17, E18 |
| 27 | 桂红 20-21-1 | 1279.59 | 0.95 | 0.25 | E2, E5, E7, E9, E11, E16, E17, E18 |
| 28 | 冀红 352 | 1553.74 | 1.00 | 0.20 | E4, E5, E6, E10, E11, E12, E14 |

表 6 各生态区及试验点产量排名前 3 位的小豆品种（系）
Table 6 The top three high-yielding adzuki bean varieties (lines) in each ecological region and test site

| 生态区 Ecological zone | 编号 Number | 适宜的品种（系） Suitable variety (line) |
|-----------------------------------|-----------|---|
| 北方春播区 Northern Spring Sowing Area | E1 | 195-609*, 辽红 08706-12, 182-320 |
| | E2 | 195-609*, 辽红 08706-12, 同红 7 号 |
| | E3 | 182-320, H1007, 辽红 08704-05* |
| | E4 | 195-609*, 赤红 3 号*, 龙 11-805 |
| | E5 | 赤红 3 号*, 唐红 201301-2, 品红 2020-4-7-2 |
| | E6 | 195-609*, 辽红 08706-12, 赤红 3 号* |
| | E7 | 赤红 3 号*, 同红 7 号, 品红 2020-4-7-2 |
| | E8 | 同红 6 号, H1016 (吉红 15 号), 同红 7 号 |
| | E9 | 辽红 08704-05*, 赤红 3 号*, 龙 11-203 |
| | E10 | 同红 6 号, 冀红 0921 反-4-1-3-3-4, 品红 2019-22-14-12 |
| 北方夏播区 Northern Summer Sowing Area | E11 | 唐红 201301-2*, 品红 2020-21-12-8-11, 冀红 1105 反-5-4-1-2* |
| | E12 | 冀红 0921 反-4-1-3-3-4, 冀红 1105 反-5-4-1-2*, 品红 2020-21-12-8-11 |
| | E13 | 冀红 1105 反-5-4-1-2*, 唐红 201301-2*, 唐红 201509-12 |
| | E14 | 品红 2020-4-7-2*, 品红 2019-3-3-1, 唐红 201301-2* |
| 南方区 South Region | E15 | 品红 2020-21-12-8-11, 品红 2020-4-7-2, 苏红 17-606 |
| | E16 | 龙 11-203*, 陇红 3 号, 贵红 2 号 |
| | E17 | 冀红 0921 反-4-1-3-3-4, 保红 201429-8*, 冀红 1105 反-5-4-1-2* |
| | E18 | 龙 11-203*, 陇红 3 号, 贵红 3 号 |

“*” 表示每个生态区产量排名前 3 位的小豆品种（系）。

“*” indicates the top three high-yielding adzuki bean varieties (lines) in each ecological zone.

2019-3-3-1 和冀红 1105 反-5-4-1-2 等适宜北方夏播区;保红 201429-8、冀红 1105 反-5-4-1-2 和龙 11-203 等适宜南方区。此外,鉴于产量性状易受环境影响,建议各试验点因地制宜选择品种(系)。

3 讨论

3.1 不同生态环境对小豆新品种(系)农艺性状的影响

农艺性状大多是由微效多基因控制的数量性状,易受环境因素及基因型与环境互作效应影响^[16-18,21-23]。本研究表明 27 个参试品种(系)各农艺性状在不同试验点存在差异。不同性状对环境的敏感性各异,主茎分枝数、株高和单株荚数等性状变异系数较大;而生育期、荚长和百粒重等性状变异系数相对较小,与前人^[24-25]研究结果一致。试点间土壤、气候及管理的差异导致株高、主茎分枝数和单株荚数显著变异。如哈尔滨和辽宁沈阳等试验点土壤肥沃,生育期雨水充足,部分品种株高和分枝数显著高于其他试验点。重庆试验点生育期内雨水和气温适宜,百粒重表现突出。

小豆短日照特性使其生育期与光温条件高度耦合,跨生态区种植易导致生育期失调和产量波动。北方春播区品种南移后生育期缩短,南方品种北移则无法正常成熟。除遗传因素外,地理纬度、日照时数及温度、播期等亦对其生育期产生重要影响^[26]。本研究发现,北方春播区生育期长于北方夏播区和南方区,与纬度呈正相关,与日照时数呈正相关。如保红 201429-8 由哈尔滨引至广西南宁,生育期缩短;南方品种北移,生育期延长甚至无法成熟,如陇红 3 号等南方品种在哈尔滨等地无法正常结荚,与前人^[27-28]研究结果一致。本研究结果表明,生育期受光温强烈调控,符合小豆短日照特性。

3.2 不同生态环境下小豆新品种(系)的产量差异

品种鉴定易受多种因素影响。本研究通过多点试验和综合分析,筛选出了 9 个产量优势小豆新品种(系),较对照冀红 352 平均增产 0.29%~8.79%。其中,保红 201429-8、赤红 3 号和唐红 201301-2 产量位列前三。研究^[29-31]表明,环境因素及基因与环境互作对作物产量的影响大于基因本身。本研究亦发现,不同生态区小豆新品种(系)产量差异显著。北方夏播区和南方区品种引至北方春播区,产量极显著降低,或因低纬度品种北移后晚熟甚至不能成熟所致。小豆选育应以丰产性为首要目标,兼

顾稳产性与生态适应性^[32-33]。保红 201429-8 和唐红 201509-12 在各试验点均表现优良,兼具高产广适等特性,具有推广价值。

鉴于小豆产量易受环境影响,未来宜扩大试验区域,如增加西北旱作区和东南沿海试验点,并增加试验年份、统一科学管理等,以全面评估新品种(系)的适应性。小豆育种目标亦应多元化,在追求丰产和稳产的基础上,顺应产业发展及市场需求,注重提高小豆品质、抗逆性及商品性,培育早熟、大粒、耐逆、抗病、结荚集中和宜机械化收获等优良性状的小豆品种。此外,未来研究应加强小豆分子标记辅助育种研究,探索抗病性和品质改良的分子机制,尤其针对小豆疫霉病、锈病、花叶病毒病和根腐病等主要病害,利用全基因组关联分析(GWAS)技术定位抗性基因,开发分子标记辅助抗病育种。并借助基因编辑和全基因组选择等现代育种技术,加速优良性状聚合与品种进程,全面提升小豆品种综合性状。

4 结论

基于 2 年全国多环境联合鉴定,本研究系统解析了 27 个小豆新品种(系)的多环境变异,筛选出高产广适性品种保红 201429-8 和唐红 201509-12。同时明确适宜北方春播区(赤红 3 号等)、北方夏播区(唐红 201301-2 等)、南方区(冀红 1105 反-5-4-1-2 等)种植的优良品种(系)。

参考文献

- [1] 陈红霖,田静,朱振东,等.中国食用豆产业和种业发展现状与未来展望.中国农业科学,2021,54(3):493-503.
- [2] 金文林,濮绍京.中国小豆研究进展.世界农业,2008(3):59-62.
- [3] Hu L L, Wang X L, Zhang Y Z, et al. High-resolution genomic resources for trait mapping and precision breeding for adzuki bean (*Vigna angularis*). *Advanced Science*, 2026, 13(4): e07157.
- [4] Chen H L, Liu L P, Wang L X, et al. Development of SSR markers and assessment of genetic diversity of adzuki bean in the Chinese germplasm collection. *Molecular Breeding*, 2015, 35: 1-14.
- [5] Padhi S R, Gore P G, Tripathi K, et al. Nutritional potential of adzuki bean germplasm and mining nutri-dense accessions through multivariate analysis. *Foods*, 2023, 12(22): 4159.
- [6] Wang Y, Yao X M, Shen H F, et al. Nutritional composition, efficacy, and processing of *Vigna angularis* (adzuki bean) for the human diet: an overview. *Molecules*, 2022, 27(18): 6079.
- [7] 颜军,杨旭红,王雨,等.农业农村部科技发展中心:我国小豆品种选育与新品种保护进展.种子,2021,40(4):51-58.
- [8] Jiang X J, Xu Q P, Zhang J Y, et al. Nutrient transfer and antioxidant effect of adzuki bean before and after GABA enrichment. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1123075.
- [9] Kuriya K, Goto S, Kobayashi E, et al. Cholesterol-lowering

- activity of adzuki bean (*Vigna angularis*) polyphenols. *Molecular Biology Reports*, 2023, 50(7): 5575-5584.
- [10] 华方静, 王乐政, 高凤菊. 中红系列红小豆农艺性状的评价分析. *安徽农业科学*, 2016, 44(2): 36-37.
- [11] 赵秋, 何伟锋, 李连波, 等. 辽红小豆 8 号新品种选育. *辽宁农业科学*, 2012(4): 80-81.
- [12] 张建宏, 韩文清, 申虎飞, 等. 大粒红小豆新品种晋小豆 7 号选育及栽培技术. *山西农业科学*, 2019, 47(6): 935-937.
- [13] 王桂芳, 徐宁, 王明海, 等. 红小豆吉红 8 号的选育及配套栽培技术. *现代农业科技*, 2013(17): 71-79.
- [14] 范保杰, 刘长友, 王彦, 等. 冀红 17 号新品种选育及高产高效配套栽培技术. *现代农村科技*, 2021(7): 14-15.
- [15] Gill H S, Halder J, Zhang J, et al. Multi-trait multi-environment genomic prediction of agronomic traits in advanced breeding lines of winter wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 709545.
- [16] Mohammadi R, Roustaii M, Haghparast R, et al. Genotype x environment interactions for grain yield in rainfed winter wheat multi-environment trials in Iran. *Agronomy Journal*, 2010, 102(5): 1500-1510.
- [17] Nguyen V H, Morante R I Z, Lopena V, et al. Multi-environment genomic selection in rice elite breeding lines. *Rice*, 2023, 16(1): 7.
- [18] Wang S Q, Jiang X W, Wang S D, et al. Genotype by environment interaction analysis in summer maize hybrids for grain yield under multi-environment trials in Huang-Huai-Hai Area, China. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2019, 22(6): 1573-1580.
- [19] 程须珍, 王素华, 王丽侠. 小豆种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [20] Eberhart S A, Russell W A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 1966, 6(1): 36-40.
- [21] Garcia-Barrios G, Crespo-Herrera L, Cruz-Izquierdo S, et al. Genomic prediction from multi-environment trials of wheat breeding. *Genes*, 2024, 15(4): 417.
- [22] Panda S, Pavani S L, Ganesan S, et al. Multi-environment evaluation of rice genotypes: impact of weather and culm biochemical parameters against sheath blight infection. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1280321.
- [23] Hu L L, Luo G L, Zhu X, et al. Genetic diversity and environmental influence on yield and yield-related traits of adzuki bean (*Vigna angularis* L.). *Plants*, 2022, 11(9): 1132.
- [24] 王晓磊, 康泽然, 魏云山, 等. 20 份小豆种质资源农艺性状鉴定与综合评价. *江苏农业科学*, 2023, 51(2): 98-104.
- [25] 白鹏, 程须珍, 王丽侠, 等. 小豆种质资源农艺性状综合鉴定与评价. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(6): 1209-1215.
- [26] Dong W X, Zhang Y Y, Zhang Y L, et al. Short-day photoperiod effects on plant growth, flower bud differentiation, and yield formation in adzuki bean (*Vigna angularis*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, 18(2): 337-345.
- [27] 王丽侠, 程须珍, 王素华, 等. 我国小豆应用核心种质的生态适应性及评价利用. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(5): 794-799.
- [28] 田静, 范保洁, 程须珍, 等. 小豆种质资源异地繁殖的可行性分析. *华北农学报*, 2003(增 1): 93-95.
- [29] 胡亮亮, 周洪妹, 王晓磊, 等. 小豆产量相关性状的基因型与环境互作效应及稳定性分析. *作物学报*, 2025, 51(10): 2581-2594.
- [30] 胡亮亮, 陈燕华, 王成, 等. 小豆种质资源产量性状的多环境评价与优异种质筛选. *植物遗传资源学报*, 2025, 26(7): 1342-1354.
- [31] Li Y B, Tao F L. Interactions of genotype, environment and management on wheat traits and grain yield variations in different climate zones across China. *Agricultural Systems*, 2022, 203: 103521.
- [32] 陈燕华, 罗高玲, 李经成, 等. 13 个小豆新品系在广西地区的引种试验. *南方农业学报*, 2016, 47(11): 1844-1848.
- [33] 张春明, 张耀文, 赵雪英, 等. 小豆品种联合鉴定试验与评价. *山西农业科学*, 2018, 46(7): 1092-1096.

Multi-Location Evaluation of Yield and Ecological Adaptability for New Adzuki Bean Varieties (Lines)

Hu Liangliang, Cao Rong, Chen Tianxiao, Song Qiannan,
Wang Suhua, Cheng Xuzhen, Wang Lixia, Chen Honglin

(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Northeast Asia
Agricultural Science and Technology Innovation Center, Beijing 100081, China)

Abstract To identify superior adzuki bean varieties suitable for planting in different regions, a multi-environment evaluation of 27 new adzuki bean varieties (lines) was conducted at 18 test sites nationwide from 2022 to 2023, to systematically analyzed the variations in main agronomic traits and yields of these varieties (lines) across different ecological zones. The results showed that there were significant differences in the agronomic traits and yields of the new adzuki bean varieties (lines) across different test sites and ecological zones. Traits such as the number of main stem branches, plant height, and number of pods per plant had strong environmental interaction effects (coefficient of variation >30%), while traits like growth period, pod length, and 100-grain weight showed higher genetic stability (coefficient of variation <15%). Nine varieties, including Baohong 201429-8, Chihong 3 and Tanghong 201301-2, showed yield increases of 0.29%-8.79% compared with the control. Baohong 201429-8 and Tanghong 201509-12 exhibited both high yield and broad adaptability.

Key words Adzuki bean; New varieties (lines); Multi-environment evaluation; Agronomic traits; Ecological adaptability