

基于 GMT 双标图对京津冀早熟夏玉米品种综合评价

张春原¹, 陈传永¹, 徐剑文², 吴珊珊¹, 边思文¹, 王卫红¹, 毛振武¹, 曹强¹, 许乃银²

(¹北京市农林科学院玉米研究所, 北京 1001252; ²江苏省农业科学院经济作物研究所, 南京 210014)

摘要: 京津冀地区作为我国重要的早熟夏玉米生产区, 对该区域早熟夏玉米品种开展多性状综合评价与筛选, 对促进夏玉米品种资源的科学利用具有重要意义。本研究在品种-产量×性状组合 (GYT, genotype by yield × trait) 双标图模型基础上, 将“产量”拓展为“主要目标性状”, 创新性提出品种-主性状×多性状 (GMT, genotype by major trait × multi-trait) 双标图方法。以2017-2024年期间完成京津冀地区京科联合体早熟夏玉米品种试验程序的72个参试品种为材料, 分别基于主性状 (产量、蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量) 与产量、生育期、株高、百粒重、出籽率、籽粒含水量、容重、淀粉含量、蛋白质含量、脂肪含量、赖氨酸含量、抗病指数共12个目标性状的组合水平, 采用新提出的GMT双标图方法对参试品种进行综合评价与选择。结果表明: (1) 以产量为主要目标性状的品种-产量×性状组合 (GYT) 双标图筛选出京农科458、京科628、MC921、鑫玉农812、京科383、京科938、京科597和京农科809共8个产量理想指数表现优秀的品种; (2) 以蛋白质含量为主要目标性状的品种-蛋白质×性状组合 (GPT, genotype by protein × trait) 双标图筛选出综合表现突出的品种京农科836和MC921; (3) 以脂肪含量为主要目标性状的品种-脂肪×性状组合 (GFT, genotype by fat × trait) 双标图筛选出表现优异的品种京农科458、京科383和MC616; (4) 以赖氨酸含量为主要目标性状的品种-赖氨酸×性状组合 (GLT, genotype by lysine × trait) 双标图筛选出表现较好的品种MC921、MC167、京农科836和京农科801; (5) 蛋白质理想指数和赖氨酸理想指数呈极显著正相关, 以蛋白质含量和赖氨酸含量为共同目标性状时, 筛选出“蛋白质-赖氨酸特专型”优秀品种MC921、京农科836和京农科458; 产量理想指数和脂肪理想指数也呈极显著正相关, 以产量和脂肪含量为共同目标性状时, 筛选出京农科458和京科383“产量-脂肪特专型”优秀品种; 基于上述4个主性状的理想指数同步筛选, 选出“全能型”核心品种京农科458和MC921。本研究提出的GMT双标图方法为多目标性状协同评价提供了新工具, 筛选出的特专型品种和全能型品种可为京津冀地区玉米品种高效利用和高品质育种提供参考。

关键词: 京津冀地区; 玉米 (*Zea mays* L.); 品种试验; GT 双标图; GYT 双标图; GMT 双标图

Comprehensive Evaluation of Early-Maturing Summer Maize Varieties in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on GMT Biplot

ZHANG Chunyuan¹, CHEN Chuanyong¹, XU Jianwen², WU Shanshan¹, BIAN Siwen¹, WANG Weihong¹, MAO Zhenwu¹, CAO Qiang¹, XU Naiyin²

(¹Maize Research Institute of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097; ²Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: As a vital production region for early-maturing summer maize in China, the Beijing-Tianjin-Hebei region holds immense significance in national agriculture production security. Conducting comprehensive multi-trait evaluation and selection of early-maturing summer maize varieties within this region is crucial for advancing the scientific utilization of summer maize germplasm resources, optimizing breeding strategies, and improving agricultural productivity. Building upon the established genotype by yield × trait (GYT) biplot model, this study makes a notable innovation by expanding the connotation of "yield" to encompass "major target traits", thereby proposing the novel genotype by major trait × multi-trait (GMT) biplot method to meet the demand for simultaneous evaluation of multiple traits in varieties under the background of diversified breeding major objectives. The research

收稿日期: 2025-07-18

网络出版日期: 2025-09-22

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250718002>

第一作者研究方向为玉米育种与品种区域试验技术, E-mail: zhangcy391@126.com

通信作者: 许乃银, 研究方向为农作物品种区域试验数据管理与分析, E-mail: naiyin@126.com

基金项目: 农业生物育种国家科技重大专项(2022ZD04019)

Foundation project: Biological Breeding-National Science and Technology Major Project (2022ZD04019)

materials consisted of 72 early-maturing summer maize varieties that completed all trial procedures in the multi-location variety trials organized by the Jingke maize variety trial consortium in the early-maturing summer maize ecological zone of the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2017 to 2024. Based on the combined level of major traits (including yield, protein content, fat content and lysine content) and grain yield, growth period, plant height, 100-kernel weight, grain yield rate, grain moisture content, test weight, starch content, protein content, fat content, lysine content, and disease resistance index, the varieties were comprehensively evaluated and ranked using a serial of GMT biplot. The results of the study are as follows: (1) The GYT biplot, which takes yield as the major target trait, successfully identified 8 varieties with excellent performance in terms of the yield superiority index (YSI), including Jingnongke 458, Jingke 628, MC921, Xinyunong 812, Jingke 383, Jingke 938, Jingke 597, and Jingnongke 809. (2) The genotype by protein \times trait (GPT) biplot, focusing on protein content as the major target trait, screened out Jingnongke 836 and MC921 as varieties with outstanding comprehensive performance across relevant traits. (3) When fat content is set as the major target trait, the genotype by fat \times trait (GFT) biplot selected Jingnongke 458, Jingke 383, and MC616 as varieties with exceptional performance. (4) The genotype by lysine \times trait (GLT) biplot, with lysine content as the major target trait, identified MC921, MC167, Jingnongke 836, and Jingnongke 801 as the top-performing varieties. (5) A highly significant correlation ($r=0.718^{**}$) was found between the protein superiority index (PSI) and the lysine superiority index (LSI). When both protein and lysine contents are taken as joint target traits, "protein-lysine specialized" varieties including MC921, Jingnongke 836, and Jingnongke 458 can be filtered out. Additionally, the yield superiority index (YSI) and the fat superiority index (FSI) also showed a highly significant correlation ($r=0.474^{**}$). When yield and fat content are set as common target traits, "yield-fat specialized" varieties including Jingnongke 458 and Jingke 383 are identified. Through simultaneous screening based on the superiority indices of the four major traits, "all-round" core varieties including Jingnongke 458 and MC921 were selected, demonstrating balanced excellence across all evaluated traits. The proposed GMT biplot method provides a new and effective tool for the synergistic evaluation of multi-target traits, and the varieties screened in this study offer valuable references for the efficient utilization of maize varieties and high-quality breeding practices in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; maize (*Zea mays* L.); variety trial; genotype by trait (GT) biplot; genotype by yield \times trait (GYT) biplot; genotype by major trait \times multi-trait (GMT) biplot

京津冀早熟夏玉米种植区涵盖河北省中北部及京津两市夏播区，作为区域粮食生产的核心组成，对保障京津冀地区粮食安全具有不可替代的作用^[1]。近年来，该区域早熟夏玉米新品种选育在产量提升、熟期优化、品质改良及抗逆性增强等方面成效显著^[2]。随着育种技术升级及种业对品种特性多样化需求的深化，玉米育种目标已从单一产量导向转向产量和品质等性状协同提升的多元化阶段，高蛋白、高油、高赖氨酸等优质育种逐渐成为行业焦点^[3-4]。在此背景下，以产量、蛋白质含量、脂肪含量及赖氨酸含量为核心目标，对京津冀早熟夏玉米品种开展多性状综合评价与筛选，不仅有助于明晰早熟夏玉米品种的特性，更可精准评估其在新品种选育及生产应用中的利用价值^[5]。Yan 等^[6]为了实现农作物品种产量与主要目标性状的同步筛选及综合评估，用“产量 \times 性状组合”替代“性状”以突破传统单性状选择的局限性，创新性地提出了品种-产量 \times 性状组合(GYT, genotype by yield \times trait)双标图方法，并将 GYT 数据表中各“产量 \times 性状”组合标准化数据的平均值称为产量理想指数 (YSI, yield focused superiority index)，用于体现品种产量与其他目标性状的组合水平，为品种综合排序与筛选提供了量化依据。目前，GYT 双标图已广泛应用于燕麦^[6-10]、玉米^[10-12]、棉花^[13-14]、大豆^[15]、小麦^[10, 16-18]、大麦^[19]和花生^[20]等作物品种的多性状评价，但针对京津冀早熟夏玉米品种，利用该方法综合评价其丰产性、早熟性、抗病性及品质指标等重要性状的研究尚未见报道，尤其缺乏以蛋白质、脂肪、赖氨酸含量为主要选择目标的多性状综合评价研究。本研究将 GYT 双标图模型中的“产量”拓展为“主要目标性状”，创新性提出品种-主性状 \times 多性状 (GMT, genotype by major trait \times multi-trait) 双标图方法。该方法可基于不同主要目标性状与其他性状的组合水平，对玉米品种进行多维度综合分析，解析品种与主性状 \times 性状组合的互作模式，并通过基于不同主要目标性状的理想指数实现品

种的综合排序与精准选择。以 2017-2024 年期间完成京津冀地区京科联合体早熟夏玉米品种试验程序的 72 个参试品种为材料, 采用 GMT 双标图方法, 分别基于产量、蛋白质含量、脂肪含量、赖氨酸含量与产量、生育期、株高、百粒重、出籽率、籽粒含水量、容重、淀粉含量、蛋白质含量、脂肪含量、赖氨酸含量、抗病指数等性状的组合水平, 对供试品种进行全面评价与排序。研究结果可为京津冀地区早熟夏玉米品种资源的高效利用及新品种选育提供理论支撑与实践参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

2017-2024 年期间, 由北京市农林科学院玉米研究所牵头组织的京农科玉米品种试验联合体(简称京科联合体), 在京津冀早熟夏玉米生态区开展早熟夏玉米品种多环境评价试验。试验常年在北京、天津和河北省境内共设置 17 个试验点(表 1), 各试点均采用随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 20 m², 每小区种植 5 行, 种植密度为 67500 株/hm², 以京单 58 作为对照品种。2017-2024 年期间参试品种共 305 个(次), 其中 72 个品种完成了全部试验程序, 包括区域试验、生产试验、抗性鉴定和品质检测。本研究以这 72 个早熟夏玉米品种为对象, 选取其籽粒产量、生育期、株高、百粒重、出籽率、籽粒含水量、容重、粗淀粉含量、粗蛋白质含量、粗脂肪含量、赖氨酸含量、抗病指数共 12 个主要目标性状数据进行分析。其中, 籽粒产量以实收产量相对于对照品种京单 58 的百分率表示, 以消除环境效应的影响; 产量、生育期等农艺性状均采用 2 年多点区域试验的平均值; 容重、蛋白质含量等品质指标采用品种参加生产试验时同步检测的数据(详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jjgr.20250718002>, 附表 1)。各品种的小斑病、茎腐病、穗腐病、叶斑病、南方锈病和黑粉病抗性由抗病鉴定单位鉴定, 分为高抗、抗、中抗、感和高感共 5 个抗性级别, 分别赋值为 1、3、5、7 和 9, 将各品种 6 个病害抗性级别量化赋值的平均值称为抗病指数(DRI, disease resistance index)。

表 1 2017-2024 年京津冀地区早熟夏玉米种质资源多点鉴定试验承担单位信息

Table 1 Information of the trial locations in the multi-locational evaluation trials of the early-maturing summer maize germplasm resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 2017-2024

序号 No.	试验承担单位 Units undertaking trials	简称 Abbreviation	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 (m) Altitude	序号 No.	试验承担单位 Units undertaking trials	简称 Abbreviation	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 (m) Altitude
1	北京市农林科学院玉米研究所	通州	116°41'E	39°43'N	19	9	玉田县集强农民专业合作社	玉田	117°43'E	39°47'N	9
2	北京丰度高科种业顺义育种中心	顺义	116°34'E	40°13'N	48	10	沧州青兴农业科技有限公司	青县	116°04'E	38°31'N	10
3	北京泰华芦村种植专业合作社	房山	116°02'E	39°38'N	40	11	天津市宝坻区农业发展服务中心	宝坻	117°32'E	39°45'N	11
4	定兴县玉米研究所	定兴	115°40'E	39°08'N	27	12	天津农学院	静海	117°04'E	38°47'N	12
5	北京雨田丰源农业科学研究院	涿州	115°53'E	39°28'N	39	13	天津中天大地科技公司	中天	116°58'E	39°01'N	13
6	河北沧州金瑞农业科技有限公司	沧县	116°45'E	38°16'N	9	14	天津市玉米良种场	宁河	117°33'E	39°25'N	14
7	河北省廊坊市农林科学院	廊坊	116°35'E	39°34'N	20	15	天津国杰农业科技有限公司	武清	116°56'E	39°27'N	15
8	河北奔诚种业有限公司	滦南	118°46'E	39°34'N	19	16	天津蓟县康恩伟泰种子有限公司	蓟县	117°29'E	39°55'N	16

1.2 数据分析

1.2.1 GT 双标图方法 采用 GGEbiplot 软件(<https://www.ggebiplot.com/>)的品种-性状(GT, genotype by trait)双标图^[21-22]分析京津冀早熟夏玉米品种的性状间相关性, 以及品种与性状之间的互作模式。GT 双标图通过对品种-性状双向表进行奇异值分解(SVD, singular value decomposition), 利用品种和性状的前两个主成

分 (PC, Principal Component) 绘制而成^[23], 公式如下^[24]。

$$P_{ij} = \frac{T_{ij} - \bar{T}_j}{s_j} = (d\lambda_1^\alpha \zeta_{i1})(\lambda_1^{1-\alpha} \tau_{1j}/d) + (d\lambda_2^\alpha \zeta_{i2})(\lambda_2^{1-\alpha} \tau_{2j}/d) + \varepsilon_{ij}$$

式中, P_{ij} 是品种 i 性状 j 的标准化数值, T_{ij} 是品种 i 性状 j 的观察值, \bar{T}_j 是所有品种性状 j 的平均值, s_j 是性状 j 的标准差; ζ_{i1} 和 ζ_{i2} 分别是对性状标准化数据进行奇异值分解得到的品种 i 的前 2 个主成分得分 (PC1 和 PC2); τ_{1j} 和 τ_{2j} 分别是性状 j 的 PC1 和 PC2 得分, λ_1 和 λ_2 分别为第 1 主成分和第 2 主成分的奇异值; α 是奇异值分配因子, GT 双标图中 α 通常取 0, 即奇异值分配 (SVP, singular value partition) 聚焦于性状 (图中用 “SVP=2” 表示); ε_{ij} 是品种 i 性状 j 的模型拟合残差。 d 为定标因子, 其数值等于定标前 GT 双标图中品种最长向量长度与性状最长向量长度比值的平方根, 经过定标后的 GT 双标图中品种最长向量长度与性状最长向量长度相等^[6]。

在 GT 双标图中, 从原点到性状图标的射线为性状向量, 任意两个性状向量夹角的余弦值与其 Pearson 相关系数相当^[25-26]。因此, GT 双标图中任意两个性状向量间的夹角大小与性状间的相关性成反比, 夹角越小, 性状间的相关性越强, 反之则越弱^[21-22]。当两个性状向量夹角小于 90° 时, 表示二者呈正相关; 大于 90° 时, 呈负相关; 等于 90° 时, 无相关关系。

1.2.2 GYT 双标图方法 采用品种-产量×性状双标图方法^[6, 17, 27]分析京津冀早熟夏玉米品种与产量×性状组合间的相关性, 解析品种与产量×性状组合的互作模式, 依据以产量为主要目标性状的产量理想指数, 实现对品种的综合评价和选择。GYT 双标的构建过程与 GT 双标图基本一致, 仅用 “产量与性状组合” 替代 GT 双标图中的 “性状”, 其余步骤均相同^[6]。在 GYT 双标图构建过程中, 百粒重、出籽率、容重、淀粉含量、蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量的数值越大表现越好, 产量与性状组合以 “产量×性状” 表示, 例如产量与百粒重的组合用 Y×HKW 表示; 而生育期、籽粒含水量和抗病指数的数值越小越好, 产量与性状组合则以产量除以性状的商数表示, 例如产量与生育期的组合用 Y/GP 表示, 从而将产量与性状组合全部转化为表型数值越大越优的形式。以产量为主要目标性状的产量理想指数, 为各产量与性状组合标准化数据的平均值, 用于衡量品种的多性状综合表现^[6]。GYT 双标图的 “品种排序” 功能图中, 以理想指数坐标作为同心圆的圆心, 各品种图标到圆心的欧氏距离表示该品种的理想程度, 距离越小, 品种表现越理想^[6, 13]。

1.2.3 GMT 双标图方法 采用品种-主性状×性状 (GMT, genotype by major trait × multi-trait) 双标图方法, 分析京津冀早熟夏玉米品种主性状×性状组合间的相关性, 明确品种与主性状×性状组合的互作模式, 并依据以主性状为主要目标性状的理想指数, 对品种进行综合评价和排序。GMT 双标图是 GYT 双标图^[6]的拓展, 将原有的单一产量指标拓展为主要目标性状 (简称主性状)。当主性状分别选择蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量时, GMT 双标图可相应表达为品种-蛋白质×性状 (GPT, genotype by protein × trait) 双标图、品种-脂肪×性状 (GFT, genotype by fat × trait) 双标图和品种-赖氨酸×性状 (GLT, genotype by lysine × trait) 双标图, 对应的品种综合评价指数分别为蛋白质理想指数 (PSI, protein focused superiority index)、脂肪理想指数 (FSI, fat focused superiority index) 和赖氨酸理想指数 (LSI, lysine focused superiority index)。GMT 双标的构建方法与 GYT 双标图相同, 仅将 GYT 双标图中的产量性状替换为蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量等主性状。

2 结果与分析

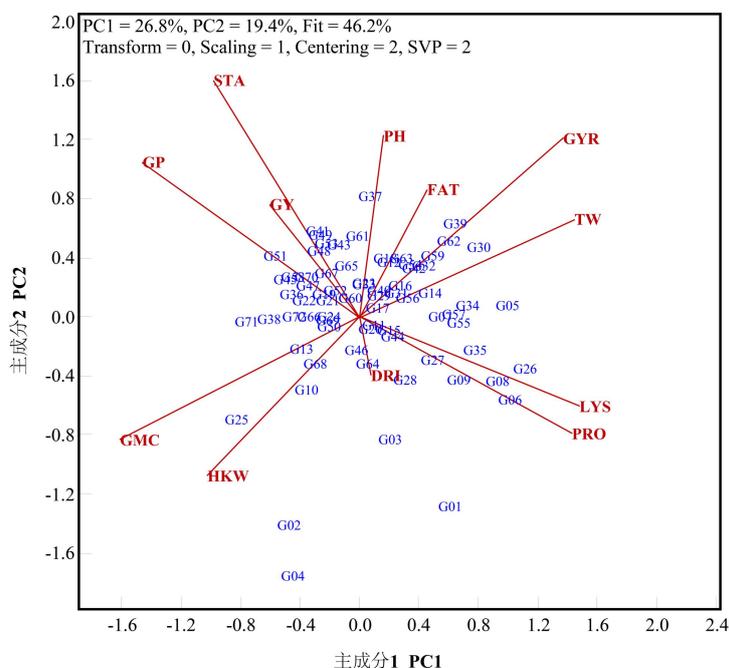
2.1 京津冀地区早熟夏玉米品种的 GT 双标图分析

京津冀地区早熟夏玉米品种的 GT 双标图分析结果（图 1）显示，该双标图的拟合度为 46.2%，尽管总体拟合度处于中等水平，但仍能清晰反映性状间的相关性及性状与品种的互动模式。其中，产量、生育期、淀粉含量和株高的性状向量两两之间夹角较小，容重、株高、出籽率和脂肪含量的性状向量两两之间夹角较小，百粒重与籽粒含水量的性状向量间夹角较小，蛋白质含量、赖氨酸含量和抗病指数的性状向量两两之间夹角较小，以上各组性状均呈显著正相关。与此相反，产量、生育期和淀粉含量的性状向量与蛋白质含量、赖氨酸含量及抗病指数的性状向量间夹角为钝角，且向量方向近乎相反，呈显著负相关；百粒重和籽粒含水量的性状向量与容重和出籽率的性状向量间夹角也为钝角，向量方向近乎相反，呈显著负相关。

在品种与性状的互动上，G08（京农科 836）、G06（京农科 985）、G26（JK9685）、G09（京农玉 658）、G35（京农科 801）、G27（MC167）和 G01（京农科 729）在蛋白质含量、赖氨酸含量及早熟性方面表现突出。G04（现代 59）、G02（京农科 736）、G25（鑫玉农 510）和 G10（NK806）的百粒重和籽粒含水量较高。G62（鑫玉农 811）、G39（MC616）和 G30（京丰 7678）在容重、籽粒含水量、出籽率和脂肪含量等性状上表现优良。

性状向量的长度反映了该性状在品种间的变异程度。其中，百粒重、籽粒含水量、蛋白质含量、赖氨酸含量、淀粉含量、容重、出籽率、生育期等性状的向量较长，表明这些性状在供试品种间的变异较大；而产量、脂肪含量和抗病指数等性状的向量较短，说明其在品种间的差异较小。

综上所述，京津冀地区早熟夏玉米品种的主要性状间存在复杂的遗传相关关系，GT 双标图虽可有效表达玉米品种性状间的相关性及品种特性，但难以实现对品种的综合选择与评价。



红色射线为性状的向量；品种代码详见附表 1；GY：产量；GP：生育期；PH：株高；HKW：百粒重；GYR：出籽率；GMC：籽粒含水量；TW：容重；PRO：蛋白质含量；FAT：脂肪含量；STA：淀粉含量；LYS：赖氨酸含量；DRI：抗病指数；下同

The red rays are the vectors of traits; The genotype codes are detailed in the supplementary table 1; GY: Grain yield; GP: Growth period; PH: Plant height; HKW: 100-kernel weight; GYR: Grain yield rate; GMC: Grain moisture content; TW: Test weight; PRO: Protein content; FAT: Fat content; STA: Starch content; LYS: Lysine content; DRI: Disease resistance index; The same as below

图 1 京津冀地区早熟夏玉米品种与主要目标性状的 GT 双标图

Fig. 1 The genotype by trait (GT) biplot of the early-maturing summer maize varieties in the Beijing-Tianjin-Hebei region

2.2 京津冀地区早熟夏玉米品种的 GYT 双标图分析

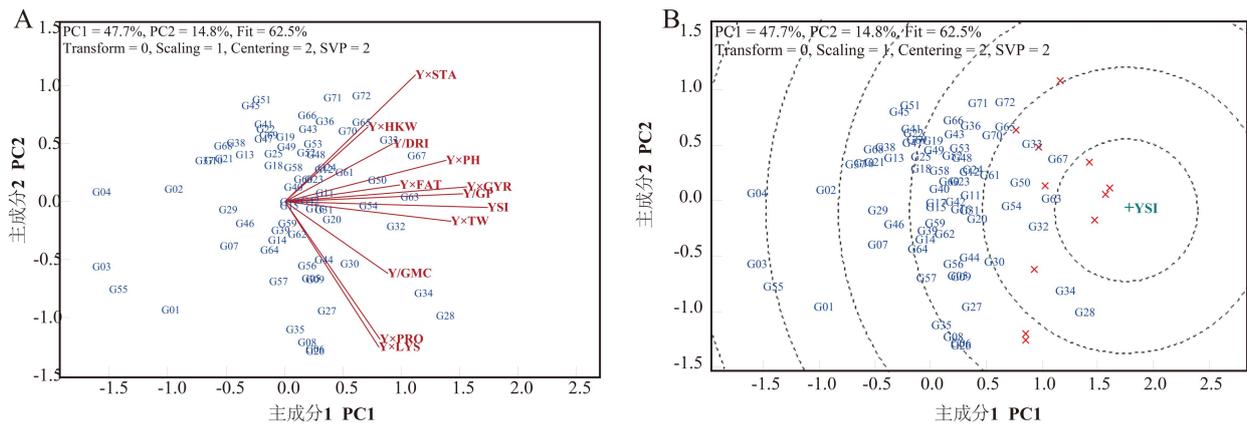
京津冀地区早熟夏玉米品种的 GYT 双标图的产量×性状组合相关性功能图（图 2A）表明，GYT 双标图的拟合度达到 62.5%，较 GT 双标图的拟合度（46.2%）显著提升，能够更精确地反映产量与性状组合间的相关性，以及品种与主要性状的互作模式。产量×性状组合向量与产量理想指数向量间的夹角均为锐角，表明各产量与性状组合与产量理想指数间均呈正相关，对品种的综合评价均产生正效应。其中，产量×生育期、产量×出籽率、产量×容重、产量×脂肪含量性状组合的向量与产量理想指数向量间的夹角较小，对品种综合评价的贡献最大；而产量×淀粉含量、产量×蛋白质含量、产量×赖氨酸含量和产量×百粒重性状组合的向量与产量理想指数向量间的夹角较大，这些组合的贡献较小。产量×淀粉含量、产量×百粒重组向量与产量×蛋白质含量、产量×赖氨酸含量组合向量间的夹角略大于 90°，表现为弱负相关；其余产量×性状组合向量间的夹角均为锐角，全部表现为正相关关系。

对产量×性状组合间相关性的量化分析结果（表 2）表明，多数产量×性状组合间呈显著或极显著正相关；产量×淀粉含量与产量×蛋白质含量、产量×赖氨酸含量组合间，以及产量×百粒重与产量×籽粒含水量组合间呈弱负相关，其余组合间均为正相关。产量理想指数与所有产量×性状组合间均呈极显著正相关；产量/生育期、产量×容重和产量×百粒重组与其他多数产量×性状组合基本呈显著或极显著相关。

从品种与产量×性状组合的互作模式（图 2a）可见，G28（MC921）、G08（京农科 836）、G06（京农科 985）、G26（JK9685）、G34（京农科 458）、G15（京科 257）、G44（京科 518）、G27（MC167）、G09（京农玉 658）、G50（京科 597）和 G35（京农科 801）共 11 个品种在产量×蛋白质含量和产量×赖氨酸含量上表现最优。G71（天时 522）、G72（BZ23675）、G65（华西 858）、G70（龙耘 699）、G33（京科 938）和 G67（京科 628）等 6 个品种在产量×淀粉含量、产量×百粒重和产量/抗病指数上表现突出。

以产量为主要目标性状的品种 GYT 双标图的品种排序功能图（图 2B）显示，在产量×性状组合多性状综合评价中，品种到产量理想指数的欧氏距离可反映其综合表现，距离越近表明综合性状越理想。其中，G34（京农科 458）、G67（京科 628）、G28（MC921）、G63（鑫玉农 812）、G32（京科 383）、G33（京科 938）、G50（京科 597）和 G54（京农科 809）共 8 个品种综合表现最优。

综上所述，GYT 双标图模型解释的变异比例明显高于 GT 双标图，GYT 双标图分析结果更加可靠。GYT 双标图的产量×性状组合向量间多数呈显著或极显著正相关，更适用于对产量和多个重要性状的同步选择与综合评价。



A: 产量与性状组合相关性功能图，红色射线为产量×性状组合的向量，如 Y×STA 表示产量与淀粉含量的乘积，Y/DRI 表示产量除以抗病指数的商数，Y 表示产量；B: 品种综合排序功能图，YSI: 产量理想指数，以+表示，产量×性状组合均用×表示；下同
 A: The yield × trait combination correlation view, the red rays are vectors of yield × trait combinations, e.g. Y×STA represents the product of yield and starch content, Y/DRI represents the quotient of yield divided by disease resistance index, Y stands for grain yield; B: The genotype comprehensive ranking view, YSI: Yield focused superiority index, denoted by "+", and yield × trait combinations are denoted by "×"; The same as below

图 2 京津冀地区早熟夏玉米品种的 GYT 双标图

Fig. 2 The GYT biplot of the early-maturing summer maize varieties in the Beijing-Tianjin-Hebei region

表 2 京津冀地区早熟夏玉米品种产量×性状组合间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between yield by trait combinations of early-maturing summer maize varieties in Beijing-Tianjin-Hebei region

产量×性状组合 Yield×trait combination	Y/GP	Y×PH	Y×HKW	Y×GYR	Y/GMC	Y×TW	Y×PRO	Y×FAT	Y×STA	Y×LYS	Y/DRI
Y/GP											
Y×PH	0.602**										
Y×HKW	0.513**	0.368**									
Y×GYR	0.774**	0.696**	0.212								
Y/GMC	0.337**	0.345**	-0.159	0.539**							
Y×TW	0.660**	0.522**	0.142	0.680**	0.511**						
Y×PRO	0.412**	0.203	0.143	0.278*	0.217	0.430**					
Y×FAT	0.429**	0.388**	0.047	0.461**	0.155	0.546**	0.146				
Y×STA	0.547**	0.652**	0.356**	0.674**	0.195	0.456**	-0.161	0.300*			
Y×LYS	0.406**	0.305*	0.093	0.357**	0.349**	0.290*	0.662**	0.138	-0.109		
Y/DRI	0.393**	0.360**	0.337**	0.431**	0.043	0.387**	0.225	0.271*	0.336**	0.012	
YSI	0.869**	0.779**	0.437**	0.873**	0.505**	0.805**	0.509**	0.556**	0.608**	0.502**	0.543**

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关；Y/GP: 产量/生育期；Y×PH: 产量×株高；Y×HKW: 产量×百粒重；Y×GYR: 产量×出籽率；Y/GMC: 产量×籽粒含水量；Y×TW: 产量×容重；Y×PRO: 产量×蛋白质含量；Y×FAT: 产量×脂肪含量；Y×STA: 产量×淀粉含量；Y×LYS: 产量×赖氨酸含量；Y/DRI: 产量/抗病指数

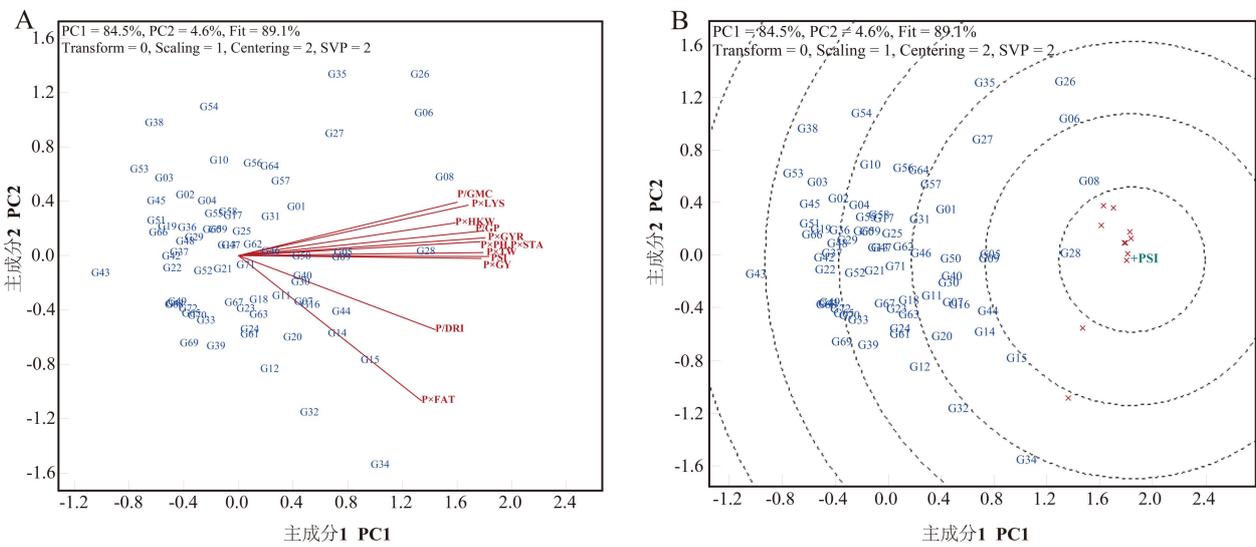
* and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively; Y/GP: Yield/Growth period; Y×PH: Yield×Plant height; Y×HKW: Yield×100-kernel weight; Y×GYR: Yield×Grain yield rate; Y/GMC: Yield×Grain moisture content; Y×TW: Yield×Test weight; Y×PRO: Yield×Protein content; Y×FAT: Yield×Fat content; Y×STA: Yield×Starch content; Y×LYS: Yield×Lysine content; Y/DRI: Yield/ Disease resistance index

2. 3 京津冀地区早熟夏玉米品种的 GPT 双标图分析

京津冀地区早熟夏玉米品种 GPT 双标图的蛋白质×性状组合相关性功能图(图 3A)分析结果表明，GPT 双标图的拟合度大幅提升至 89.1%，显著提高了双标图的拟合精确度。蛋白质×性状组合向量间的夹角均为锐角，表明各蛋白质×性状组合间均呈正相关，对品种的综合评价均产生正效应。其中，蛋白质×脂肪含量组合及蛋白质/抗病指数组合向量与其他蛋白质×性状组合向量间的夹角较大，其余蛋白质×性状组合向量间的夹角较小。

从品种与蛋白质×性状组合的互作模式（图 3A）可见，G34（京农科 458）、G32（京科 383）、G15（京科 257）、G44（京科 518）、G14（京科 256）、G20（屯玉 898）和 G12（京科 254）共 7 个品种在蛋白质×脂肪含量和蛋白质/抗病指数上表现较优。

GPT 双标图的品种综合排序功能图（图 3B）显示，品种 G08（京农科 836）和 G28（MC921）综合表现突出；G06（京农科 985）、G05（D1872）、G09（京农玉 658）、G44（京科 518）、G15（京科 257）、G14（京科 256）、G27（MC167）、G26（JK9685）、G40（MC699）、G50（京科 597）、G30（京丰 7678）、G01（京农科 729）、G16（京科 258）、G07（京农科 825）、G20（屯玉 898）和 G11（京科 253）共 16 个品种综合表现良好。可见，GPT 双标图中蛋白质×性状组合间的相关性均达到极显著水平，更适用于蛋白质与其他重要性状的同步选择。



A: 蛋白质×性状组合相关性功能图，P: 蛋白质含量；B: 品种综合排序功能图，PSI: 蛋白质理想指数

A: Protein × trait combination correlation view, P: Protein content ; B: Genotype comprehensive ranking view, PSI: Protein focused superiority index

图 3 京津冀地区早熟夏玉米品种 GPT 双标图

Fig. 3 The GPT biplot of the early-maturing summer maize varieties in the Beijing-Tianjin-Hebei region

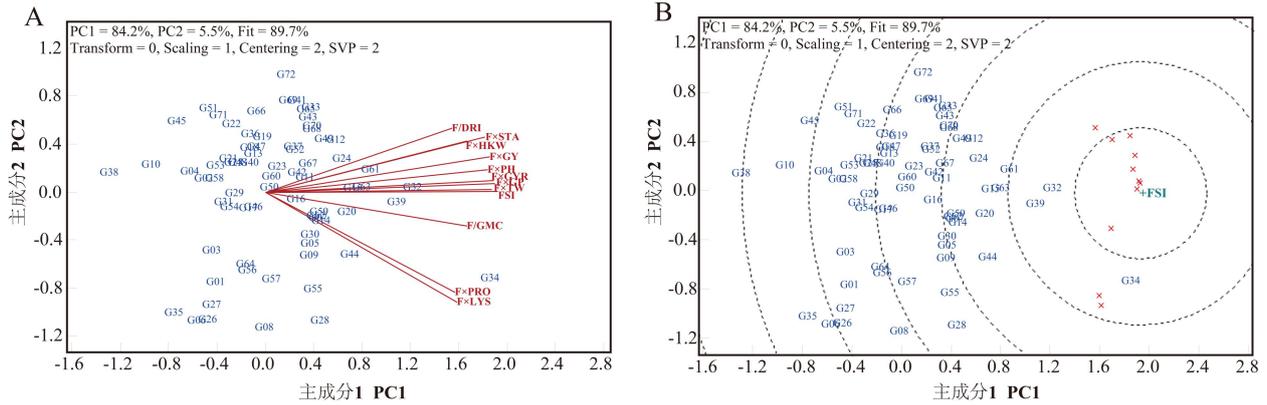
2. 4 京津冀地区早熟夏玉米品种的 GFT 双标图分析

京津冀地区早熟夏玉米品种 GFT 双标图的脂肪×性状组合相关性功能图（图 4a）分析结果表明，GFT 双标图的拟合度达到 89.7%，拟合精确度高。脂肪与性状组合向量间的夹角均为锐角，表明各脂肪×性状组合间均呈正相关，对品种的综合评价均为正效应。其中，脂肪×蛋白质含量组合及脂肪×赖氨酸含量组合与其他脂肪×性状组合向量间的夹角稍大，其余脂肪×性状组合向量间的夹角均较小。

从品种与脂肪×性状组合的互作模式（图 4A）可见，品种 G34（京农科 458）、MC921（G28）、京农科 813（G55）、京科 383（G32）、MC616（G39）和京科 518（G44）在脂肪×蛋白质含量和脂肪×赖氨酸含量组合上表现最优。

以脂肪为主要目标性状的品种 GFT 双标图的品种综合排序功能图（图 4B）显示，G34（京农科 458）、G32（京科 383）和 G39（MC616）综合表现突出；G61（鑫玉农 282）、G63（鑫玉农 812）、G15（京科 257）、G44（京科 518）、G20（屯玉 898）、G24（现代 545）和 G12（京科 254）综合表现良好。

综上所述，GFT 双标图中脂肪与其他重要性状组合间均表现为极显著正相关，更适用于对脂肪和其他重要性状的同步选择。



A: 脂肪×性状组合相关性功能图, F: 脂肪含量; B: 品种综合排序功能图, FSI: 脂肪理想指数
 A: Fat × trait combination correlation view, F: Fat content; B: Genotype comprehensive ranking view, FSI: Fat focused superiority index

图4 京津冀地区早熟夏玉米品种 GFT 双标图

Fig. 4 The GFT biplot for early-maturing summer maize varieties in the Beijing-Tianjin-Hebei region

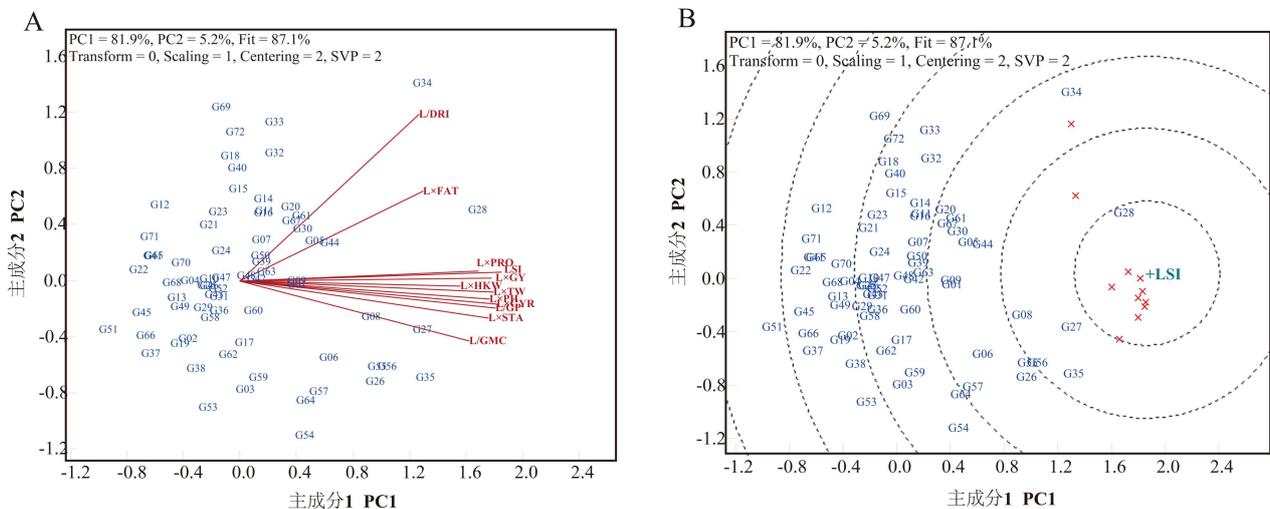
2.5 京津冀地区早熟夏玉米品种的 GLT 双标图分析

京津冀地区早熟夏玉米品种 GLT 双标图的赖氨酸×性状组合相关性功能图(图 5a)分析结果表明, GLT 双标图的拟合度达到 87.1%, 模拟精确度高。赖氨酸与其他性状组合向量间的夹角均为锐角, 表明各赖氨酸×性状组合间均呈正相关关系, 对品种的综合评价均产生正效应。其中, 赖氨酸/抗病指数组合及赖氨酸×脂肪含量组合向量与其他赖氨酸×性状组合向量间的夹角稍大, 其余赖氨酸×性状组合向量间的夹角均较小。

从早熟夏玉米品种与赖氨酸×性状组合的互动模式(图 5a)可见, G28 (MC921)、G34 (京农科 458)、G33 (京科 938)、G69 (京农科 845)、G18 (京农科 869)、G72 (BZ23675) 和 G40 (MC699) 7 个品种在赖氨酸/病指组合及赖氨酸×脂肪含量组合上表现优秀。

GLT 双标图的品种综合排序功能图(图 5b)显示, G28 (MC921)、G27 (MC167)、G08 (京农科 836) 和 G35 (京农科 801) 综合表现突出; G56 (京农科 820)、G34 (京农科 458)、G26 (JK9685)、G44 (京科 518)、G06 (京农科 985)、G57 (京农科 837)、G05 (D1872) 和 G30 (京丰 7678) 综合表现良好。

综上所述, GLT 双标图中赖氨酸×性状组合间均表现为极显著正相关, 适用于对赖氨酸与其他重要目标性状的同步选择。



A: 赖氨酸×性状组合相关性功能图, L: 赖氨酸含量; B: 品种综合排序功能图, LSI: 赖氨酸理想指数

A: Lysine × trait combination correlation view, L:Lysine content ; B: Genotype comprehensive ranking view, LSI: Lysine focused superiority index

图 5 京津冀地区早熟夏玉米品种 GLT 双标图

Fig. 5 The GLT biplot of the early-maturing summer maize varieties in the Beijing-Tianjin-Hebei region

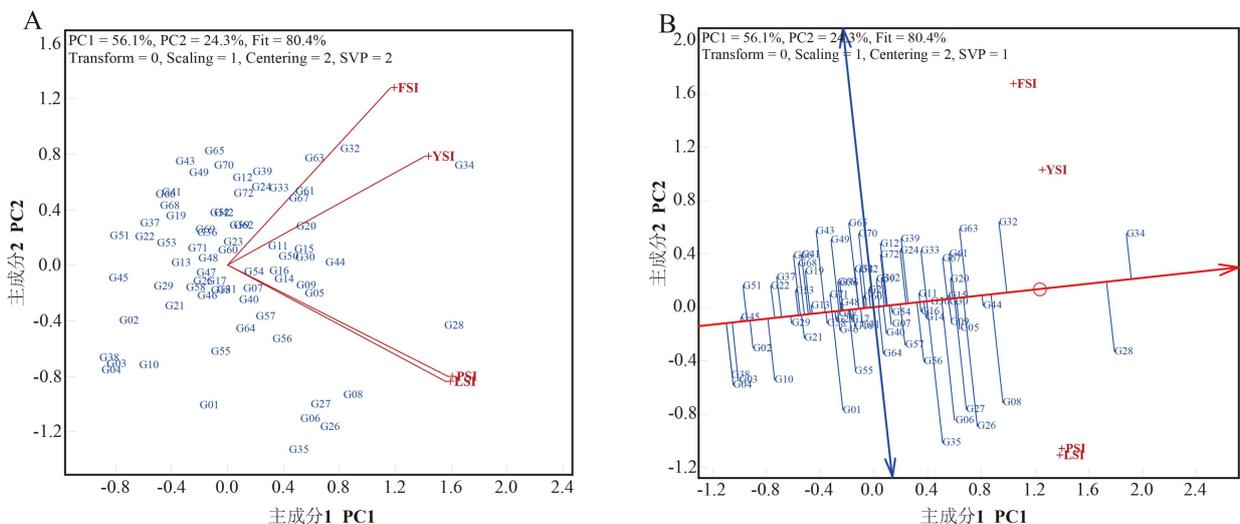
2. 6 京津冀地区早熟夏玉米品种多性状评价的理想指数关联性分析

京津冀地区早熟夏玉米品种与主性状理想指数的 GT 双标图 (图 6A) 分析结果表明, GT 双标图的拟合度为 80.4%, 模拟精确度高。各理想指数向量间的夹角均为锐角, 呈正相关关系, 表明以产量、蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量为主要目标性状时, 品种综合评价理想指数间均存在正效应。以蛋白质含量和赖氨酸含量为主要目标性状的蛋白质理想指数和赖氨酸理想指数间相关性极显著 ($r = 0.718^{**}$), 基于蛋白质理想指数和赖氨酸理想指数对品种的综合评价及排序结果基本一致; 同样, 以产量和脂肪含量为主要目标性状的产量理想指数和脂肪理想指数间的相关性也达到极显著水平 ($r = 0.474^{**}$), 基于产量理想指数和脂肪理想指数对品种的综合评价及排序结果相似度较高。

从早熟夏玉米品种与理想指数的互作模式 (图 6A) 可见, 在以蛋白质含量和赖氨酸含量为主要目标性状时, G28 (MC921)、G08 (京农科 836)、G34 (京农科 458)、G26 (JK9685)、G27 (MC167)、G06 (京农科 985) 和 G35 (京农科 801) 表现优秀; G44 (京科 518)、G05 (D1872)、G09 (京农玉 658) 和 G56 (京农科 820) 表现较好。在以产量和脂肪含量为主要目标性状时, G34 (京农科 458)、G32 (京科 383)、(G63 鑫玉农 812) 和 G28 (MC921) 综合表现最优; G61 (鑫玉农 282)、G67 (京科 628)、G39 (MC616)、G33 (京科 938)、G20 (屯玉 898) 和 G44 (京科 518) 表现较好。

基于产量、蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量理想指数的品种 GT 双标图的品种综合排序功能图 (图 6B) 显示, G34 (京农科 458) 和 G28 (MC921) 的综合表现突出, 在不同理想指数评价中均表现优秀; G32 (京科 383)、G44 (京科 518)、G05 (D1872)、G15 (京科 257)、G20 (屯玉 898)、G30 (京丰 7678)、G08 (京农科 836)、G09 (京农玉 658)、G50 (京科 597)、G61 (鑫玉农 282)、G63 (鑫玉农 812) 和 G67 (京科 628) 综合表现良好。

基于不同性状的理想指数有助于对不同目标性状进行综合选择, 而基于多个理想指数对品种综合理想程度的排序, 能够更全面地评价品种的利用价值。



A: 理想指数相关性功能图; B: 品种综合理想指数排序功能图, 红色横轴为品种平均理想指数轴, 箭头指向理想方向, 蓝色纵轴为品种理想指数稳定性轴, 箭头指向稳定性差的方向, 红色圆圈为理想指数的平均坐标

A: Superiority index correlation view; B: Genotype comprehensive superiority index ranking view, the red horizontal axis is the variety average superiority index axis, with the arrow pointing to the ideal direction, the blue vertical axis is the variety superiority index stability axis, with the arrow pointing in the direction of poorer stability, the red circle indicates the average coordinate of the superiority indexes.

图 6 京津冀地区早熟夏玉米品种理想指数的 GT 双标图

Fig. 6 The GT biplot based on the genotype by superiority index of the summer maize varieties in the Beijing-Tianjin-Hebei region

3 讨论

京津冀早熟夏玉米种植区涵盖河北省唐山市、秦皇岛市、廊坊市、沧州市北部、保定市北部，以及北京、天津两市的夏播区域。作为该地区第一大粮食作物，玉米在保障区域粮食生产安全中起到重要作用^[1]。近年来，该区域早熟夏玉米新品种选育成效显著，在产量提升、熟期优化、品质改良及抗逆性增强等方面取得突破，有力推动了生产水平的升级。对该地区早熟夏玉米品种开展多性状综合评价与筛选，不仅能系统厘清其遗传特性，更可精准评估其在新品种选育及生产应用中的价值，为品种的科学利用奠定理论基础。GYT 双标图作为一种新兴的可视化统计方法，适用于品种多性状综合评价^[6]，其独特之处在于以产量与性状组合水平选择替代传统意义上的单性状选择，从而实现聚焦于产量的多目标性状协同选择与综合评价^[6, 8, 10, 13, 17]。在玉米品种评价中，产量×性状组合通常呈现正相关关系，从而便于构建以产量为核心的综合评价理想指数^[6]。Yan 等^[6]首次提出在 GGE 双标图^[28-30]的基础上构建 GYT 双标图方法，并将其应用于燕麦品种试验，基于产量与 β -葡聚糖、生育期、麦仁率、千粒重、倒伏率、蛋白质含量和容重等性状组合进行品种综合评价。此后，该方法在多种作物多性状评价中得到推广应用。Merrick 等^[10]将 GYT 双标图方法应用于小麦农艺性状和抗病性状的综合选择与评价。许乃银等^[13]利用 GYT 双标图方法对西北内陆棉区国审棉花品种的产量与霜前花率、纤维品质及抗病性等性状组合进行分析，实现了品种分类评价。张笑晴等^[17]基于产量与熟期、穗部性状、品质及抗逆性等组合，对我国北部冬麦区国审小麦品种进行回溯分析。岳海旺等^[12]则采用 GYT 双标图方法，对黄淮海夏玉米区域试验品种的产量与生育期、株高、穗部性状等农艺性状组合进行评价，但该研究未涉及蛋白质含量、脂肪含量、赖氨酸含量及抗病指数等关键品质与抗逆性状，导致评价结果存在局限性。目前，GYT 双标图方法已应用于多种作物的品种多性状同步评价分析，但利用 GYT 双标图方法对京津冀早熟夏玉米品种丰产性、早熟性、抗病性和品质指标等重要目标性状进行综合评价的研究尚未见报道。本研究以 2017-2024 年期间完成京科联合体京津冀早熟夏玉米品种试验的 72 个品种为材料，采用 GYT 双标图方法，基于产量与生育期、株高、百粒重、出籽率、籽粒含水量、容重、淀粉含量、蛋白质含量、脂肪含量、赖氨酸含量、抗病指数等性状的组合，对供试品种进行全面评价与排序，筛选出京农科 458、京科 628、MC921 等产量理想指数表现突出的品种，为京津冀地区早熟夏玉米品种的合理利用提供参考依据。

玉米作为我国播种面积最大、产量最高的作物，其品质改良具有重要战略意义。当前，国际环境的不确定性加剧了我国大豆结构性进口的风险，而提高玉米蛋白质含量成为保障饲料蛋白自主供给、维护国家粮食安全的关键举措。研究表明，若将玉米蛋白质含量从当前的 8% 提升至 13%，每年可额外提供 1350 万 t 蛋白，相当于 3500 万 t 大豆的蛋白量，不仅能提高能量与饲料转化率，还可减少对大豆及豆粕进口的依赖^[4]。同时，玉米油是一种有益于心血管健康的高品质植物油^[31]，玉米油的脂肪酸组分中亚油酸含量高达 60% 以上^[3]，具有较高的营养与经济价值；赖氨酸作为人和畜禽必需的氨基酸，其含量的提升可促进蛋白质的消化吸收，进一步提高玉米的利用价值^[32]。因此，在产量育种取得突破后，高蛋白、高油、高赖氨酸育种逐渐成为行业关注的焦点^[3]。随着育种目标的多元化，产量已不再是唯一指标，蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量等品质性状正逐步成为重要的育种目标。基于此，本研究在 GYT 双标图基础上，将模型中的产量拓展为主要目标性状，创新性提出 GMT 双标图方法。该方法可基于不同主要目标性状与其他性状的组合水平，多角度对

品种进行综合评价与分析,揭示品种和主性状与其余重要性状组合的互作模式,并通过基于主性状的理想指数实现品种的综合排序与选择。当主性状为产量时,GMT双标图即等同于GYT双标图;而当主性状分别为蛋白质含量、脂肪含量和赖氨酸含量时,可相应构建GPT、GFT和GLT双标图,其对应的综合评价指数分别为蛋白质理想指数、脂肪理想指数和赖氨酸理想指数。本研究基于GPT双标图分析筛选出京农科836和MC921等蛋白质含量综合表现突出的品种,以及京农科985、京科518等表现优良的品种;基于GFT双标图分析发现京农科458和京科383等在脂肪含量相关组合中表现优秀,鑫玉农282、京科257等表现优良;基于GLT双标图分析表明MC921、MC167等在赖氨酸含量相关组合中表现突出,京农科820、京农科458等表现优良。进一步分析发现,蛋白质理想指数与赖氨酸理想指数间呈极显著正相关,产量理想指数与脂肪理想指数间亦达到极显著相关水平。其中,MC921、京农科836等品种在以蛋白质和赖氨酸为主要目标性状时表现突出,可归为“蛋白质-赖氨酸特专型”品种;京农科458和京科383等在以产量和脂肪为主要目标性状时表现最优,可称为“产量-脂肪特专型”品种。基于多个理想指数的GT双标图分析表明,京农科458和MC921在不同性状理想指数评价体系中均表现优异,属于“全能型”核心品种,京科383和京科518等品种也展现出较好的广适性。基于不同性状的理想指数可实现对特定目标性状的精准选择,而结合多个理想指数的综合排序则能更全面地评估品种的特专型和全能型特性,为京津冀地区早熟夏玉米多目标育种及品种高效利用提供了新思路。

参考文献

- [1] 杨国航,孙世贤,张春原,刘春阁,赵久然.京津唐夏播早熟玉米区玉米生产现状和发展趋势.种子,2007,26(2):86-88
Yang G H, Sun S X, Zhang C Y, Liu C G, Zhao J R. Production actuality and development trend of maize area with summer sowing and early maturing characteristics in Beijing-Tianjin-Tangshan region. Seed, 2007, 26(2):86-88
- [2] 赵久然,王帅,李明,吕慧颖,王道文,葛毅强,魏珣,杨维才.玉米育种行业创新现状与发展趋势.植物遗传资源学报,2018,19(3):435-446
Zhao J R, Wang S, Li M, Lyu H Y, Wang D W, Ge Y Q, Wei X, Yang W C. Current status and perspective of maize breeding. Journal of Plant Genetic Resources, 2018,19(3):435-446
- [3] 吴春胜,贾士芳,王成己,牟金明.高蛋白玉米、高油玉米与普通玉米品质的对比研究.玉米科学,2004,12(1):57-60
Wu C S, Jia S F, Wang C J, Mou J M. A comparison of quality among high-protein corn, high-oil corn and common corn. Journal of Maize Sciences, 2004,12(1):57-60
- [4] 何红卫,乐明凯.发展高蛋白玉米 实现大豆进口替代.农民日报.(2023-03-09)[2025-07-18]DOI:10.28603/n.cnki.nnmrb.2023.001051
He H W, Le M K. Promoting high-protein corn to achieve soybean import substitution. Farmers' Daily. (2023-03-09)[2025-07-18]. DOI:10.28603/n.cnki.nnmrb.2023.001051
- [5] 李永祥,李会勇,扈光辉,刘旭洋,李春辉,张登峰,黎裕,王天宇.玉米应用核心种质的构建与应用.植物遗传资源学报,2023,24(4):911-916
Li Y X, Li H Y, Hu G H, Liu X Y, Li C H, Zhang D F, Li Y, Wang T Y. Construction and utilization of applied core collection in maize. Journal of Plant Genetic Resources, 2023,24(4):911-916
- [6] Yan W, Fréreau-Reid J. Genotype by yield*trait (GYT) biplot: A novel approach for genotype selection based on multiple traits. Scientific Reports, 2018,8(1):8242
- [7] Yan W, Fréreau-Reid J, Mountain N, Kobler J. Genotype and management evaluation based on genotype by yield*trait (GYT) analysis. Crop Breeding, Genetics and Genomics, 2019,1:e190002
- [8] 严威凯.品种选育与评价的原理和方法评述.作物学报,2022,48(9):2137-2154
Yan W K. A critical review on the principles and procedures for cultivar development and evaluation. Acta Agronomica Sinica, 2022,48(9):2137-2154
- [9] Yan W. A systematic narration of some key concepts and procedures in plant breeding. Frontiers in Plant Science, 2021,12:724517
- [10] Merrick L F, Glover K D, Yabwalo D, Byamukama E. Use of genotype by yield*trait (GYT) analysis to select hard red spring wheat with elevated performance for agronomic and disease resistance traits. Crop Breeding, Genetics and Genomics, 2020,2(2):e200009
- [11] 岳海旺,魏建伟,刘朋程,陈淑萍,卜俊周.基于GYT双标图分析对黄淮海生态区玉米品种综合评价.作物学报,2024,50(4):836-856

- Yue H W, Wei J W, Liu P C, Chen S P, Bu J Z. Comprehensive evaluation of maize hybrids in the mega-environments of Huanghuaihai plain based on GYT biplot analysis. *Acta Agronomica Sinica*, 2024,50(4):836-856
- [12] 岳海旺, 韩轩, 魏建伟, 郑书宏, 谢俊良, 陈淑萍, 彭海成, 卜俊周. 基于GYT双标图分析对黄淮海夏玉米区域试验品种综合评价. *作物学报*, 2023,49(5):1231-1248
- Yue H W, Han X, Wei J W, Zheng S H, Xie J L, Chen S P, Peng H C, Bu J Z. Comprehensive evaluation of maize hybrids tested in Huang-Huai-Hai summer maize regional trial based on GYT biplot analysis. *Acta Agronomica Sinica*, 2023,49(5):1231-1248
- [13] 许乃银, 赵素琴, 张芳, 付小琼, 杨晓妮, 乔银桃, 孙世贤. 基于GYT双标图对西北内陆棉区国审棉花品种的分类评价. *作物学报*, 2021,47(4):660-671
- Xu N Y, Zhao S Q, Zhang F, Fu X Q, Yang X N, Qiao Y T, Sun S X. Retrospective evaluation of cotton varieties nationally registered for the Northwest Inland cotton growing regions based on GYT biplot analysis. *Acta Agronomica Sinica*, 2021,47(4):660-671
- [14] 李超, 付小琼. 基于GYT双标图综合评价黄河流域中熟杂交棉花区域试验品种. *作物学报*, 2025,51(1):30-43
- Li C, Fu X Q. Comprehensive evaluation of regional trial varieties of medium mature hybrid cotton in the Yellow River Basin based on GYT biplot. *Acta Agronomica Sinica*, 2025,51(1):30-43
- [15] Ebrahimi L. Genotype by yield*trait (GYT) biplot approach to evaluate resistance of soybean cultivars to *Helicoverpa armigera* Hübner under natural infestation conditions. *Phytoparasitica*, 2023,51:909-918
- [16] Hamid A E, Aglan M, Hussein E. The modified genotype by trait (GT) biplot technique as selection criterion in wheat under reduced irrigation. *Egyptian Journal of Agronomy*, 2019,41(3):293-312
- [17] 张笑晴, 许乃银, 孙晶, 刘素娟, 梁晨, 刘林斌, 徐剑文, 许栩. 基于GYT双标图对北部冬麦区国审小麦品种的回溯分析. *植物遗传资源学报*, 2024,25(2):218-226
- Zhang X Q, Xu N Y, Sun J, Liu S J, Liang C, Liu L B, Xu J W, Xu X. Retrospective analysis of wheat varieties nationally approved for the northern winter wheat region based on GYT biplot. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024,25(2):218-226
- [18] Muhammad F, Mir A S, Ali S M, Ahmed L K, Abdul Q. Genotype by yield*trait (GYT) biplot analysis: a novel approach for evaluating advance lines of durum wheat. *Cereal Research Communications*, 2022,51(2):447-456
- [19] Behnam B, Shakiba S S. Simultaneous selection of high-yielding and drought-tolerant barley landraces using GT, GYT and GYSI methodologies. *Cereal Research Communications*, 2022,51(1):237-248
- [20] Mahmoud M, Hussein E, Aboelkassem K, Ibrahim H. Graphical presentation of some peanut genotypes by comparing two patterns of biplot analysis. *Journal of Plant Production*, 2020,11(8):697-705
- [21] 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(11):1805-1819
- Yan W. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data. *Acta Agronomica Sinica*, 2010,36(11):1805-1819
- [22] Yan W, Kang M S, Ma B, Woods S, Cornelius P L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*, 2007,47(2):643-655
- [23] Yan W. Two types of biplots to integrate multi-trial and multi-trait information for genotype selection. *Crop Science*, 2024,64(3):1608-1618
- [24] Yan W, Rajcan I. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*, 2002,42(1):11-20
- [25] Yan W. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data. *Acta Agronomica Sinica*, 2010,36(11):1805-1819
- [26] Yan W. GGE Biplot vs. AMMI graphs for genotype-by-environment data analysis. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics*, 2011,65(2):181-193
- [27] 岳海旺, 魏建伟, 刘朋程, 陈淑萍, 卜俊周. 基于AMMI模型和GGE双标图对玉米品种产量稳定性和适应性选择评价. *中国农业大学学报*, 2024,29(9):24-37
- Yue H W, Wei J W, Liu P C, Chen S P, Bu J Z. Stability and adaptability assessment for the selection of elite maize cultivars based on AMMI model and GGE-biplot. *Journal of China Agricultural University*, 2024,29(9):24-37
- [28] 王晓斌, 王瀚, 胡开明, 李亚杰, 秦天元, 曾文婕, 李鑫, 张楷露, 张俊莲, 白江平. 基于层次分析法和GGE双标图对引进马铃薯种质资源的综合评价. *植物遗传资源学报*, 2017,18(6):1067-1078
- Wang X B, Wang H, Hu K M, Li Y J, Qin T Y, Zeng W J, Li X, Zhang K L, Zhang J L, Bai J P. Comprehensive evaluation of introduced potato germplasm resources based on the analytical hierarchy process and GGE-biplot. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017,18(6):1067-1078
- [29] 尚国霞, 王瑞, 李加纳, 徐新福, 谌利, 唐章林. 甘蓝型油菜油酸配合力的双标图分析. *植物遗传资源学报*, 2010,11(5):566-572
- Shang G X, Wang R, Li J N, Xu X F, Chen L, Tang Z L. GGE biplot analysis of oleic acid combining ability of *Brassica napus* L. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010,11(5):566-572
- [30] Yan W. GGEbiplot—a windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*,

2001,93(5):1111-1118

[31] 陆恒. 高蛋白玉米的营养优势及科学利用. 粮油食品科技, 2004(1):46-48

Lu H. Nutritional advantages and scientific utilization of high-protein corn. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2004(1):46-48

[32] 铁双贵, 孙静, 岳润清, 齐建双, 王延召, 柏松, 陈小洁, 田保明. 农杆菌介导法将高赖氨酸蛋白基因*sb401*导入玉米的研究. 玉米科学, 2012,20(6):49-53

Tie S G, Sun J, Yue R Q, Qi J S, Wang Y Z, Bo S, Chen X J, Tian B M. Transfer of high lysine gene *sb401* into maize by *Agrobacterium tumefactions* mediated transformation. Journal of Maize Sciences, 2012,20(6):49-53

附表1 2017-2024年我国京津冀地区京科联合体早熟夏玉米试验主要品种性状表

Supplementary Table 1 List of mainvarieties traits in the early-maturing summer maize trials of Jingnongke consortium in Beijing-Tianjin-Hebei region of China during 2017–2024

代码 Code	品种 Variety	产量 (%) GY	生育期 (d) GP	株高 (cm) PH	百粒重 (g) HKW	出籽率 (%) GYR	籽粒含 水量 (%) GMC	容重 (g/L) TW	淀粉含量 (%) STA	蛋白质 含量 (%) PRO	脂肪 含量 (%) FAT	赖氨酸 含量 (%) LYS	抗病指数 DRI	产量理想 指数 YSI	蛋白质理 想指数 PSI	脂肪理 想指数 FSI	赖氨酸理 想指数 LSI
G01	京农科 729	102.9	103	264.8	34.8	81.1	23.9	762	71.16	9.54	3.99	0.31	7.00	-1.15	0.58	-0.85	0.54
G02	京农科 736	105.1	105	270.1	39.3	79.2	25.5	734	71.47	8.49	3.99	0.28	7.67	-1.12	-0.77	-1.03	-0.74
G03	农华 16	101.4	105	269.1	34.1	81.9	23.1	731	72.30	8.30	4.06	0.30	8.00	-1.83	-1.03	-0.92	-0.08
G04	现代 59	101.8	105	257.0	40.9	79.9	25.6	730	71.47	8.71	3.89	0.28	7.00	-1.73	-0.50	-1.22	-0.70
G05	D1872	104.9	104	272.4	35.9	85.5	19.5	785	75.26	9.53	4.37	0.30	6.20	0.23	1.17	0.53	0.78
G06	京农科 985	106.6	104	283.1	35.0	83.3	21.0	776	72.48	10.57	3.75	0.31	7.00	0.22	2.11	-1.11	0.89
G07	京农科 825	103.1	106	276.8	35.6	83.1	22.2	798	75.03	9.33	4.52	0.29	6.60	-0.59	0.69	0.62	0.15
G08	京农科 836	105.7	105	283.4	36.5	84.0	21.7	782	73.01	10.68	4.12	0.32	7.00	0.20	2.37	-0.14	1.40
G09	京农玉 658	106.9	105	277.8	37.0	83.9	22.2	776	72.09	9.70	4.45	0.30	7.00	0.23	1.14	0.51	0.55
G10	NK806	105.0	107	272.2	39.0	84.0	22.9	710	75.09	8.64	3.57	0.28	6.33	-0.70	-0.36	-1.77	-0.47
G11	京科 253	107.7	106	282.6	37.1	82.9	22.5	750	75.08	9.07	4.43	0.29	6.33	0.33	0.42	0.45	0.20
G12	京科 254	107.9	106	276.6	34.4	84.0	22.7	770	75.72	9.02	4.67	0.26	6.33	0.23	0.28	0.88	-1.03
G13	京科 255	106.4	107	277.8	37.7	82.6	23.4	724	75.64	8.72	4.22	0.27	7.00	-0.45	-0.26	-0.31	-0.85
G14	京科 256	105.3	106	279.7	34.5	84.5	22.6	766	75.17	9.66	4.53	0.29	6.33	-0.14	1.10	0.67	0.18
G15	京科 257	105.5	106	286.1	37.5	82.9	23.1	759	75.25	9.92	4.69	0.28	6.33	0.03	1.50	1.14	-0.10
G16	京科 258	107.1	106	281.7	35.1	83.9	23.0	766	76.22	9.38	4.38	0.29	6.33	0.20	0.76	0.31	0.17
G17	京科 610	107.4	106	281.3	34.9	84.0	23.0	742	76.09	8.75	4.17	0.29	7.33	-0.10	-0.20	-0.39	-0.08
G18	京农科 869	105.2	106	281.4	35.0	84.9	22.6	760	76.94	8.85	4.10	0.28	5.67	-0.19	0.14	-0.35	-0.21
G19	硕秋 707	107.5	107	279.7	37.4	83.9	22.5	740	76.31	8.07	4.27	0.27	7.33	-0.11	-0.99	-0.19	-0.83
G20	屯玉 898	108.9	106	276.3	35.8	83.9	23.2	724	74.52	9.24	4.72	0.30	6.67	0.40	0.56	1.05	0.50
G21	现代 539	105.0	107	282.3	35.2	84.4	24.6	731	76.07	8.68	4.06	0.28	6.33	-0.68	-0.30	-0.67	-0.47
G22	现代 542	107.6	107	274.0	35.0	82.5	23.9	750	76.26	8.21	4.12	0.26	6.67	-0.34	-0.93	-0.64	-1.31
G23	现代 544	108.3	107	274.7	34.5	83.9	23.4	757	75.83	8.83	4.33	0.28	6.33	0.15	-0.02	0.04	-0.35
G24	现代 545	109.0	107	281.8	36.8	81.8	23.9	754	75.45	8.84	4.72	0.28	7.00	0.32	0.03	0.95	-0.32
G25	鑫玉农 510	108.7	107	279.8	39.1	78.3	24.5	722	75.10	8.90	4.10	0.28	7.00	-0.11	-0.08	-0.59	-0.50

代码 Code	品种 Variety	产量 (%) GY	生育期 (d) GP	株高 (cm) PH	百粒重 (g) HKW	出籽率 (%) GYR	籽粒含 水量 (%) GMC	容重 (g/L) TW	淀粉含量 (%) STA	蛋白质 含量 (%) PRO	脂肪 含量 (%) FAT	赖氨酸 含量 (%) LYS	抗病指数 DRI	产量理想 指数 YSI	蛋白质理 想指数 PSI	脂肪理 想指数 FSI	赖氨酸理 想指数 LSI
G26	JK9685	105.4	105	287.2	37.5	85.7	19.9	780	72.22	10.37	3.76	0.32	7.00	0.27	2.06	-0.94	1.44
G27	MC167	107.9	106	286.7	36.1	84.2	22.6	750	73.47	9.65	3.85	0.34	7.00	0.36	1.03	-0.90	1.99
G28	MC921	112.3	107	283.8	37.9	82.5	23.3	748	73.52	10.38	4.42	0.35	6.67	1.57	2.16	0.68	2.69
G29	MC922	105.5	107	272.3	33.7	84.0	22.7	762	74.85	8.44	4.13	0.28	7.00	-0.68	-0.66	-0.59	-0.56
G30	京丰 7678	107.6	106	286.2	33.9	86.8	20.8	762	73.57	9.20	4.43	0.30	6.33	0.51	0.64	0.52	0.63
G31	京科 232	108.4	106	281.0	34.6	84.1	22.1	756	75.28	9.08	3.98	0.28	6.67	0.24	0.26	-0.75	-0.37
G32	京科 383	109.9	107	284.7	35.6	83.6	22.4	790	73.05	9.26	5.05	0.29	6.33	0.98	0.78	1.99	0.33
G33	京科 938	109.8	106	287.2	37.9	83.7	22.3	760	74.48	8.21	4.42	0.29	5.67	0.93	-0.48	0.53	0.33
G34	京农科 458	110.0	106	280.1	35.9	83.5	22.7	788	73.01	9.82	5.43	0.33	6.33	1.32	1.65	3.12	2.09
G35	京农科 801	105.8	106	286.9	35.8	84.7	21.4	768	73.89	9.65	3.61	0.34	7.00	0.05	1.05	-1.44	2.02
G36	硕秋 712	109.0	107	289.3	38.0	82.0	23.7	750	77.06	8.22	4.16	0.28	7.00	0.28	-0.74	-0.36	-0.37
G37	京科 8868	102.9	107	292.4	34.3	83.7	21.1	770	78.09	8.16	4.45	0.26	7.33	-0.90	-0.84	0.24	-1.17
G38	MC366	107.1	108	276.8	36.3	82.3	23.6	736	77.29	8.08	3.37	0.28	7.00	-0.58	-1.17	-2.39	-0.67
G39	MC616	105.2	106	290.0	32.8	84.1	21.0	775	75.03	8.42	5.03	0.29	7.00	-0.17	-0.37	1.74	0.15
G40	MC699	105.8	106	288.7	36.7	83.0	21.4	757	75.70	9.23	4.06	0.28	5.67	0.06	0.68	-0.34	-0.11
G41	京科 2202	106.0	108	301.4	36.1	82.7	23.3	766	75.10	8.11	4.47	0.26	6.67	-0.34	-0.87	0.31	-1.13
G42	京科 505	107.2	106	276.1	35.1	84.6	20.7	764	75.12	8.00	4.42	0.29	6.67	0.12	-0.92	0.32	0.09
G43	京科 509	108.2	106	284.6	35.2	83.9	22.0	736	76.40	7.36	4.55	0.28	7.00	0.07	-1.78	0.46	-0.42
G44	京科 518	107.8	107	282.5	36.7	82.6	23.3	766	73.97	9.68	4.70	0.31	7.00	0.35	1.14	1.09	0.95
G45	京科 559	106.6	107	275.8	36.4	82.3	23.3	762	78.47	8.02	3.76	0.26	6.67	-0.45	-1.13	-1.42	-1.28
G46	京科 561	106.2	108	283.4	35.9	82.5	23.4	750	72.73	9.19	4.21	0.28	7.00	-0.46	0.27	-0.31	-0.48
G47	京科 562	105.9	107	283.9	37.5	82.7	23.3	748	78.36	8.64	4.18	0.28	6.67	-0.26	-0.22	-0.27	-0.33
G48	京科 575	108.9	108	277.4	35.0	83.6	23.4	754	77.68	8.23	4.10	0.29	6.67	0.17	-0.78	-0.54	-0.05
G49	京科 591	107.7	108	274.2	35.1	83.2	22.8	762	77.69	8.17	4.67	0.27	7.33	-0.11	-0.86	0.70	-0.82
G50	京科 597	110.8	107	288.7	37.5	82.6	23.6	734	75.21	9.32	4.23	0.29	6.67	0.81	0.65	-0.07	0.12
G51	京科 599	107.2	108	287.5	36.5	82.4	23.2	756	77.11	8.02	3.97	0.25	7.00	-0.37	-1.13	-0.96	-1.67
G52	京科 682	108.0	107	278.6	36.6	83.2	23.1	752	76.69	8.38	4.44	0.28	7.00	0.10	-0.55	0.28	-0.37

代码 Code	品种 Variety	产量 (%) GY	生育期 (d) GP	株高 (cm) PH	百粒重 (g) HKW	出籽率 (%) GYR	籽粒含 水量 (%) GMC	容重 (g/L) TW	淀粉含量 (%) STA	蛋白质 含量 (%) PRO	脂肪 含量 (%) FAT	赖氨酸 含量 (%) LYS	抗病指数 DRI	产量理想 指数 YSI	蛋白质理 想指数 PSI	脂肪理 想指数 FSI	赖氨酸理 想指数 LSI
G53	京科 999	109.0	107	287.0	35.3	84.5	22.0	728	77.54	7.81	3.99	0.28	7.67	0.10	-1.34	-0.88	-0.53
G54	京农科 809	108.4	105	297.6	38.0	84.3	19.1	750	76.61	8.26	3.93	0.30	7.33	0.71	-0.48	-0.65	0.61
G55	京农科 813	98.9	105	285.7	34.3	84.4	21.3	744	75.36	8.50	4.54	0.33	7.67	-1.61	-0.41	0.55	1.47
G56	京农科 820	107.1	107	290.9	35.3	83.0	21.9	760	75.82	8.82	4.09	0.33	7.33	0.14	0.04	-0.39	1.58
G57	京农科 837	105.8	105	277.7	34.6	84.5	21.1	760	75.57	9.15	4.26	0.31	7.67	-0.15	0.38	-0.05	0.79
G58	荃科 980	108.5	109	287.5	35.7	81.4	23.5	755	76.62	8.72	3.97	0.28	7.00	-0.03	-0.26	-0.87	-0.48
G59	荃科 998	105.7	106	279.5	35.5	84.9	20.7	778	76.43	8.47	4.55	0.29	7.67	-0.09	-0.36	0.62	0.08
G60	鑫农科 806	107.6	107	284.2	36.9	83.0	22.2	748	75.99	8.45	4.27	0.29	7.00	0.09	-0.44	-0.06	0.04
G61	鑫玉农 282	108.1	107	312.8	36.2	83.7	23.2	730	75.01	8.69	4.82	0.30	6.67	0.48	0.04	1.38	0.63
G62	鑫玉农 811	106.0	106	278.0	34.3	84.3	20.1	790	76.66	8.80	4.52	0.28	7.33	0.00	0.05	0.58	-0.26
G63	鑫玉农 812	111.0	106	277.7	35.5	84.1	21.9	768	76.21	8.81	4.78	0.29	7.00	1.07	0.14	1.25	0.21
G64	MC5592	107.2	106	277.9	36.3	83.8	22.9	720	75.03	9.15	4.15	0.31	8.00	-0.21	0.24	-0.43	0.63
G65	华西 858	110.2	105	280.3	35.2	83.3	22.9	754	76.40	8.26	4.52	0.26	6.67	0.55	-0.68	0.44	-1.12
G66	京科 265	108.7	107	273.6	38.5	83.3	23.2	764	75.71	8.00	4.24	0.26	7.33	0.07	-1.09	-0.28	-1.23
G67	京科 628	112.4	107	294.0	36.2	83.6	25.0	744	75.14	8.62	4.48	0.30	6.67	1.12	-0.17	0.48	0.50
G68	京农科 843	105.6	106	269.1	37.3	83.0	24.7	744	74.96	8.22	4.63	0.27	7.33	-0.69	-0.90	0.52	-0.91
G69	京农科 845	106.4	107	274.7	37.1	84.1	23.8	738	74.34	8.21	4.38	0.28	5.67	-0.21	-0.70	0.20	-0.29
G70	龙耘 699	110.5	107	282.9	35.9	83.0	24.3	746	75.60	8.37	4.58	0.27	7.00	0.44	-0.61	0.52	-0.80
G71	天时 522	110.3	108	282.2	37.9	81.5	24.9	734	76.78	8.87	3.98	0.26	6.33	0.37	-0.04	-0.81	-1.16
G72	BZ23675	109.6	107	285.3	39.7	81.7	23.0	750	75.56	8.08	4.30	0.28	5.67	0.70	-0.70	0.18	-0.12

产量=品种产量/对照产量×100%

GY: Grain yield=Variety yield / Control yield × 100%; GP: Growth period; PH: Plant height; HKW: 100-kernel weight; GYR: Grain yield rate; GMC: Grain moisture content; TW: Test weight; STA: Starch content; PRO: Protein content; FAT: Fat content; LYS:Lysine content; DRI: Disease resistance index; YSI: Yield focused superiority index; PSI: Protein focused superiority index; FSI: Fat focused superiority index; LSI: Lysine focused superiority index