

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.53075

综述

热带 Suwan 种质在我国玉米种质改良中的创新与利用

郭向阳¹ 涂亮¹ 王栋² 刘鹏飞¹ 王安贵¹ 易强³ 任洪¹
李刚⁴ 祝云芳¹ 吴迅¹ 蒋喻林¹ 田丰⁵ 陈泽辉^{1,*}

¹ 贵州省农业科学院旱粮研究所, 贵州贵阳 550006; ² 河南农业大学农学院, 河南郑州 450046; ³ 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025;
⁴ 福建省农业科学院生物技术研究所, 福建福州 350003; ⁵ 中国农业大学农学院, 北京 100093

摘要: Suwan 等热带玉米种质具有遗传多样性丰富、抗逆性强、配合力高等优点, 能够有效拓宽我国玉米遗传基础, 对抗逆育种和强优势杂交组合选育具有重要意义。然而, 该类种质在温带地区表现出感光性强、生育期延迟和营养生长过旺等特性, 严重限制了其直接应用。为突破这一瓶颈, 本文从“热带-温带种质融合与驯化”的视角出发, 综述了 Suwan 种质的起源与遗传特征, 梳理了在长日照环境下的驯化策略、温热人工合成群体构建方法及南北穿梭育种的实践成效。在此基础上, 热带种质的光温敏感性显著改善, 加速了优异等位基因向温带玉米中的导入, 为实现温热带玉米种质的高效融合与遗传创新提供了理论依据与方法支持, 从而进一步拓宽和丰富了我国玉米种质遗传基础。

关键词: Suwan; 温热带玉米种质; 光温驯化; 群体改良; 种质创新

Application and prospects of Suwan germplasm in maize breeding in China

Guo Xiang-Yang¹, Tu Liang¹, Wang Dong², Liu Peng-Fei¹, Wang An-Gui¹, Yi Qiang³, Ren Hong¹, Li Gang⁴,
Zhu Yun-Fang¹, Wu Xun¹, Jiang Yu-Lin¹, Tian Feng⁵, and Chen Ze-Hui^{1,*}

¹ Institute of Upland Food Crops, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, Guizhou, China; ² College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China; ³ College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; ⁴ Biotechnology Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, Fujian, China; ⁵ College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100093, China

Abstract: Tropical maize germplasm, such as Suwan, offers significant advantages including rich genetic diversity, strong stress resistance, and high combining ability, making it highly valuable for broadening the genetic base of maize in China. It holds great importance for stress-resistant breeding and the development of high-yielding hybrid combinations. However, such germplasm also exhibits strong photoperiod sensitivity, delayed maturity, and excessive vegetative growth under temperate conditions, which greatly restrict its direct utilization. To overcome these limitations, this study reviews Suwan germplasm from the perspective of “temperate-tropical germplasm integration and domestication”. It systematically summarizes its origin and genetic characteristics, elucidates adaptation strategies under long-day conditions, and outlines the development of synthetic temperate-tropical populations as well as the practical outcomes of north-south shuttle breeding. On this basis, the photoperiod and temperature sensitivity of tropical germplasm have been markedly improved, facilitating the introgression of superior alleles into temperate maize. This provides both theoretical foundations and methodological support for the efficient integration and genetic innovation of tropical and temperate maize germplasm, thereby further expanding and enriching the genetic base of maize in China.

Keywords: Suwan; temperate-tropical maize germplasm; photothermal acclimation; population improvement; germplasm enhancement

本研究由国家重点研发计划项目(2023YFD1201103)和农业生物育种重大项目(2023ZD0402806)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1201103) and the Major Project of Agricultural Biological Breeding (2023ZD0402806).

* 通信作者(Corresponding author): 陈泽辉, E-mail: chenzh907@sina.com

第一作者联系方式: E-mail: xyguo0372@163.com

Received (收稿日期): 2025-10-09; Accepted (接受日期): 2025-12-11; Published online (网络出版日期): 2025-12-12.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251212.0837.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

玉米起源于墨西哥西南部的热带地区^[1]。该地区全年气候适宜,使得玉米在高温的夏季和相对凉爽的冬季均可生长。这种持续生长的环境促使大多数热带玉米品种不仅具备良好的耐高温与耐低温特性,还具有较强的抗病虫害能力。热带玉米种质资源也因此对热带与亚热带地区的玉米育种与生产发展起到了重要的推动作用。

玉米作为我国三大粮食作物之一,在保障国家粮食安全、推动农业经济发展中具有举足轻重的地位^[2]。然而,当前我国玉米产业正面临严峻的种质资源瓶颈:种质资源遗传基础狭窄、杂种优势利用模式单一等问题日益凸显,已成为制约玉米育种创新和生产发展的关键因素^[3-5]。遗传多样性不足限制了品种在抗逆性、适应性和产量潜力等方面的进一步提升;而杂种优势模式单一则导致育种难以突破现有框架,品种同质化严重,无法满足农业生产对多样化、高性能品种的需求^[6]。

为突破这一局限,引进热带玉米种质(如 Suwan、Tuxpeño)并建立新型杂种优势模式,已成为我国玉米育种的重要方向。例如,自 20 世纪 70 年代起,李竞雄院士引进 Tuxpeño 种质,对我国南方玉米生产产生了深远影响^[7]。热带玉米种质具有遗传多样性丰富、抗逆性强、配合力好等优势,能够有效拓宽我国玉米种质的遗传基础,助力抗逆育种和强优势杂交组合的选育^[8]。然而,该类种质具有较强的感光性和繁茂的营养生长特性,在温带地区容易导致生育期延长、植株徒长以及产量下降,限制了其直接利用^[9-10]。

因此,如何对热带玉米种质进行有效改良与利用,已成为当前亟待解决的关键问题。针对这一挑战,国内外学者在热带种质改良方面已开展了大量研究并取得显著进展。其中,贵州省农业科学院通过系统引入并改良 Suwan 等优异种质,创制了温热玉米群体,成功选育出一系列优良温热种质,并在我国南方及北方多个地区推广应用,为育种实践提供了重要支持。本文主要介绍了热带 Suwan 种质的渗入以及贵州省农业科学院在温热种质融合中的主要策略和技术路径,以期后续温热玉米种质的遗传改良与创新利用提供可借鉴的思路与方法。

1 Suwan 的形成、传播及代表自交系

Suwan 群体由 36 份来自全球不同地区的材料组建而成^[11],其遗传来源广泛,充分体现了丰富的遗

传多样性。其具体构成为:来自加勒比地区 3 个群体(Argentino、Tuson 和 Tuson-Canill-Criollo-Tuson)的 16 份材料(Cuba Gr.、Cuba 11J、Puerto Rico Gr.1、Cuba 40、Cuba 1J、Cuba 59、Antigua Gr.1、Antigua Gr.2、Puerto Rico Gr.2、Barbados Gr.1、Cupurico、Caribb.Flint Composite、Flint Comp. Amarillo、Comp.Caribbean Amarillo、Tiquisate Golden Yellow×Caribb.Comp.和 Tiquisate Golden Yellow×Guadalupe 12D-14D)、墨西哥及中美洲 3 个群体(Tuxpeño、Salvadoreno 和 Argentino-Criollo)的 6 份材料(Veracruz 163、Veracruz 181、Veracruz Gr.48、Tamaulipas 8、Salvadoreno Amarillo 和 Tiquisate Golden Yellow)、南美洲 3 个群体(N.Catato、Cuban Yellow Dent 和 Argentino-Criollo-Tuson)的 5 份材料(Guayana Francesca III、Bahai III BCO、Dentado Amarillo、Narino 330-Peru 330 和 DV 103)、印度 1 个群体(Caribbean-Tuxpeño-India-USA)的 5 份材料(Composite A1*、Multiple Cross 2、Multiple Cross 4、Synthetic A3B 和 Synthetic A11),以及其他地区 1 个群体(Tuxpeño-Caribbean-USA)的 4 份材料(Tuxpantigua、Veracruz 181×Antigua Gr.2、Usatigua 和 Florida Synthetic)。

1960 年, Kasetsart 大学开始玉米自由授粉品种选育,到 1972 年,泰国综合种 1 号 C3 形成,被命名为 Suwan 1^[11]。此后,在 Suwan 1 的基础上,根据生态环境和市场的需要,加入不同的种质形成了 Suwan 2、Suwan 3 和 Suwan 5,其组装的大致过程如图 1 所示。

自 20 世纪 70 年代末起, Suwan 种质资源通过国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)逐步向亚洲、美国及中美洲地区发放、扩散并推广应用^[12]。Suwan 种质引入我国西南地区后,育种家以此为基础,对其开展了系统研究,成功创制出一系列核心自交系,为拓宽我国玉米种质遗传基础提供了重要支撑。

其中,四川农业大学荣廷昭院士于 1981 年从广西省玉米研究所引进 Suwan 1,经多代选育获得自交系 S37^[13]。该系于 1996 年被认定为“高配合力、高产、高抗多种病害新自交系”,其代表性杂交种雅玉 2 号(7922×S37)在西南地区大面积推广应用。贵州省引进 S37 后,进一步衍生出 S65 和 DT927 等自交系,贵州省安顺市农业科学院利用 S65 育成杂交种安单 3 号(安 1441×S65)^[14],截至 2014 年,该品种在贵州省中西部及云南等地累计推广面积达

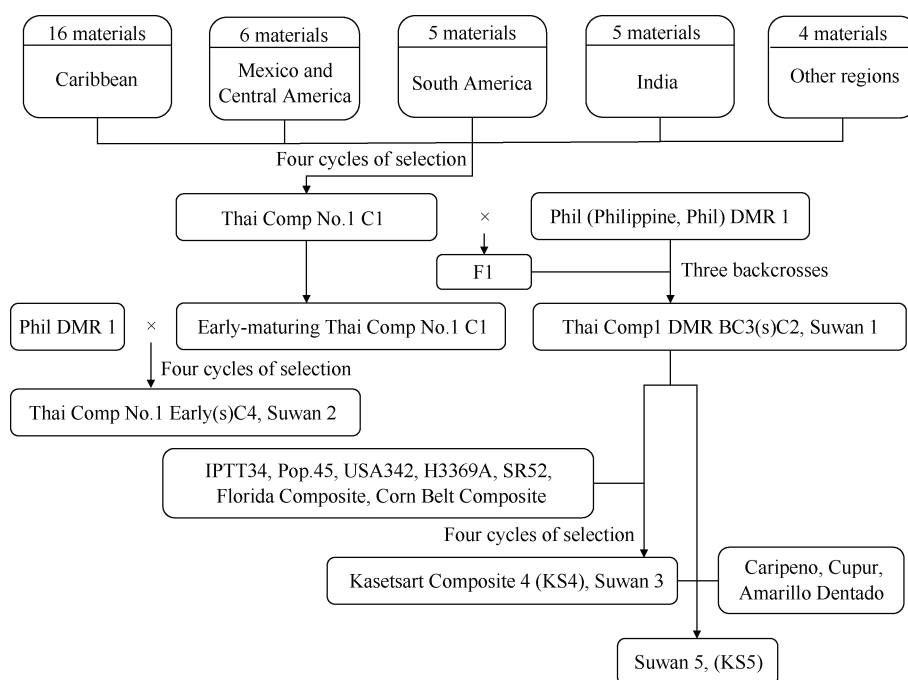


图1 Suwan 群体的组装及发展过程

Fig. 1 Formation and development of the Suwan population

94.12 万公顷。DT927 则是由贵州大学与云南大天种业有限公司联合育成的抗灰斑病优良抗源,截至 2025 年,以 DT927 为亲本已组配出审定及在试品种超 20 个;其代表品种罗单 297 (R200×DT927) [15]自 2019 年审定以来推广面积超过 33.33 万公顷。

贵州省从早期引进的 Suwan 1 中自交分离出苏 11,并利用其组配育成了适应喀斯特山区的代表性杂交种兴黄单 892 (5311×苏 11) [16]。苏 11 还进一步衍生出 XZ50612、S611 等优良自交系。其中,XZ50612 由贵州省黔西南州农业林业科学研究院与贵州省农业科学院旱粮研究所共同选育 [17],以其为亲本组配出北玉 1521、黔玉 1808、黔玉 1860 等多个优良杂交种;S611 则组配出黔单 19 号 [18]、北玉 1567 等品种。

此外,贵州省农业科学院旱粮研究所从 Suwan 1 中选育的 QR273,现已成为西南山区玉米主要骨干自交系之一 [19-20]。其主要衍生系包括 QB2182、GD909 和 TL209 等。截至 2024 年,其组配审定的优良玉米品种近 20 个;其衍生系共审定 67 个省级和国家级品种,其中包括 14 个国审品种和 6 个审定范围覆盖超过 4 个省份的省审品种(图 2)。相关杂交种在西南地区年推广面积达 33.33 万公顷以上,累计推广 200~300 万公顷。

同时,云南省会泽县农业技术推广中心从

Suwan 2 中选育出了素湾 1611 (S1611),与从山东省引进的自交系掖 107 组配,育成了会单 4 号 [21],成为云南省首个年种植面积突破 6.67 万公顷的自育品种,最高年种植面积 14.67 万公顷。

2 利用 Suwan 进行温热玉米种质改良的策略与育种实践

2.1 在长日照地区直接驯化

西南地区玉米育种首要解决品种抗性和适应性问题,杂优模式主要为“热带种质×温带种质”,但热带种质的光周期敏感性较强,难以在北方正常开花结实,严重影响了西南地区玉米杂交种的西北生产制种问题。因而,种子生产问题已成为制约西南地区优良玉米杂交种推广应用的关键技术瓶颈。为破解这一困境,可采取热带种质就地繁殖驯化策略,即在甘肃等制种核心区对 Suwan 等热带种质开展多年连续驯化。以热带 Suwan 种质 QB2182 为例,贵州省农业科学院在甘肃张掖开展了为期 3 年的就地驯化研究:第 1 年,将未在长日照条件下种植过的正常种子播种于长日照地区,待植株开花散粉后,按常规方法进行套袋授粉以保种。成熟后,将种子收获并贮存于当地冷库中,供次年驯化使用。第 2 年,将上一年在长日照地区收获的种子按同样方式进行播种、套袋与授粉,收获后仍贮藏于同一冷库中,用于第

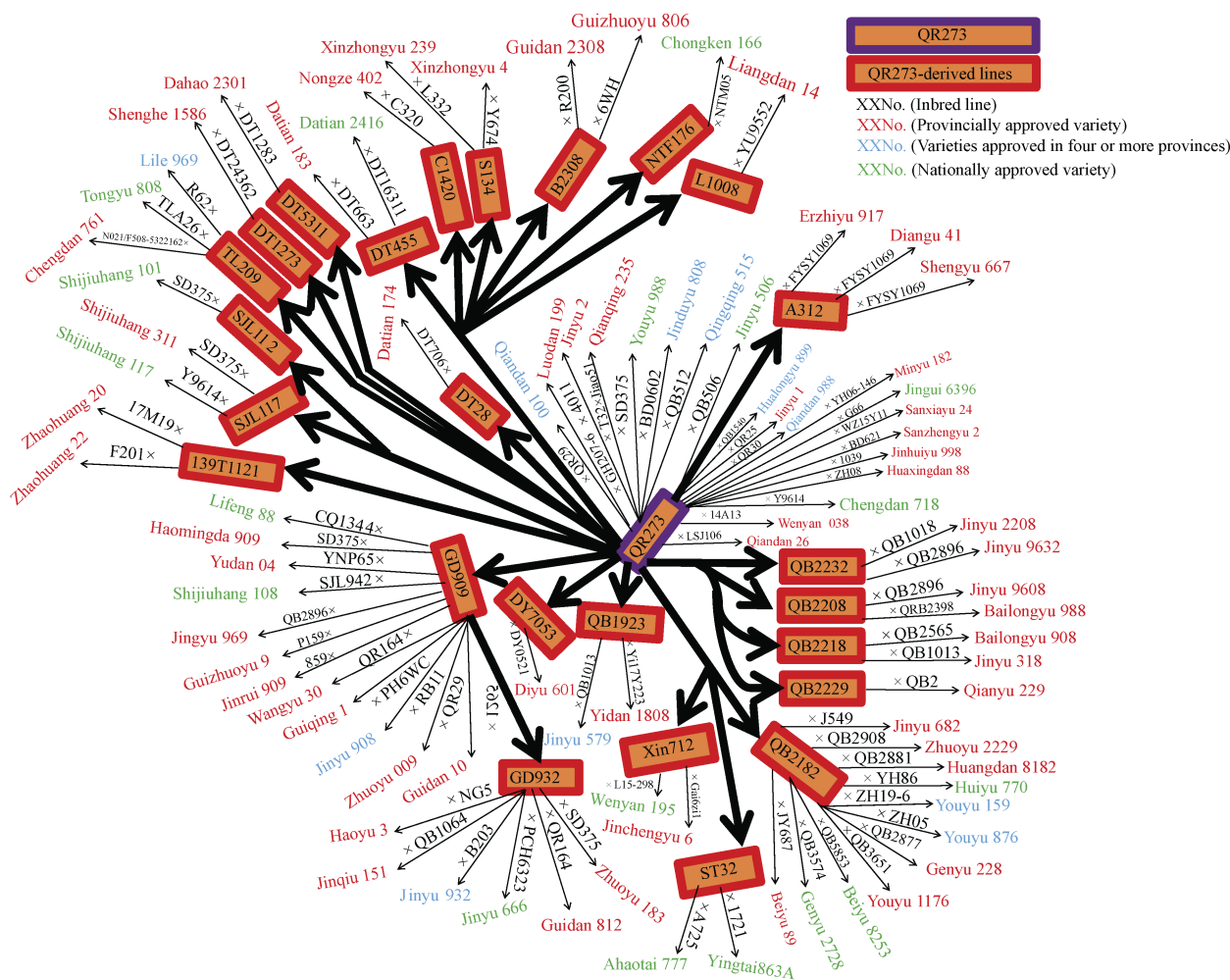


图 2 QR273 及其衍生系和相关的品种审定信息
Fig. 2 QR273 and its derivative lines, along with related variety registration information
该图由贵州大学农学院易强老师提供。This figure was provided by Yi Qiang from the College of Agriculture, Guizhou University.

3 年的驯化。此后每年重复上述流程，依次连续进行驯化。如图 3 所示，2023 年 7 月 26 日的观察结果显示：在张掖连续驯化 2 年的 QB2182 (图 3-A)已全部进入散粉期。驯化 1 年的 QB2182 (图 3-B)开始散粉，而未经驯化的 QB2182 (图 3-C)则刚刚开始散粉。对其开花时间进行的系统调查表明，经过 3

年连续驯化后，QB2182 的开花时间(抽雄所需天数、吐丝所需天数、散粉所需天数)显著提前了 6 d 左右(表 1)。这些结果说明，在长日照地区进行就地驯化可有效减轻热带种质的光周期敏感性，为 Suwan 等热带种质在西北地区实现规模化制种提供了重要依据。

表 1 2023 年不同驯化时间 QB2182 的生育期
Table 1 Flowering time of QB2182 at different domestication times in 2023

材料 Material	抽雄所需天数 Days to tasseling (d)	吐丝所需天数 Days to silking (d)	散粉所需天数 Days to pollen shed (d)
QB2182 (23)	96	98	102
QB2182 (22)	93	96	98
QB2182 (21)	90	93	96

QB2182 (21)为连续驯化 2 年的 QB2182; QB2182 (22)为驯化 1 年的 QB2182; QB2182 (23)为未经驯化的 QB2182。
QB2182 (21): QB2182 after two consecutive years of domestication; QB2182 (22): QB2182 after one years of domestication; QB2182 (23): QB2182 without domestication.

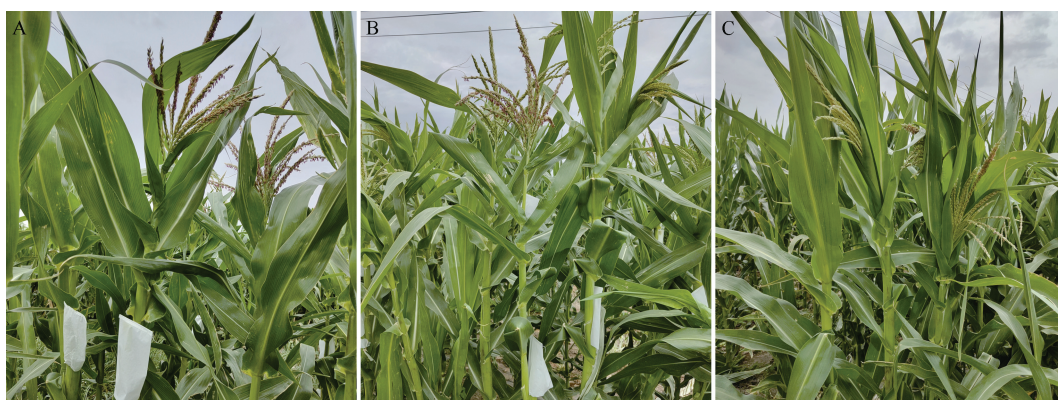


图3 QB2182在甘肃省张掖市驯化后的开花性状表现

Fig. 3 Flowering time traits of QB2182 after domestication in Zhangye, Gansu province

该图于2023年7月26日在甘肃省张掖市所拍; A为连续驯化2年的QB2182; B为驯化1年的QB2182; C为未经驯化的QB2182。

This photo was taken in Zhangye, Gansu province on July 26, 2023. A: QB2182 after two consecutive years of domestication; B: QB2182 after one year of domestication; C: QB2182 without domestication.

2.2 人工合成温热群体

2.2.1 温热群体合成的核心理论依据 温热玉米种质改良与创新的核心理论基础在于杂种优势模式。传统的美国杂种优势体系以BSSS(坚秆综合种)与NSS(非坚秆综合种)为主,而后续提出的新型模式—BSSS-Tuxpeño × NonBSSS-NonTuxpeño,则对这一经典模式进行了重要拓展^[22]。该模式的提出不仅验证了通过引入Tuxpeño种质可实现BSSS种质的遗传扩增,更揭示了杂种优势群及其模式的动态特性:它们并非一成不变,而是在新种质不断融入的过程中发生遗传重组与优化。当不同生态型或遗传背景(如热带、亚热带与温带)的种质发生基因交流时,群体的等位基因多样性得以显著提升,从而促进新的杂种优势群形成。

在这一理论框架的指导下,贵州省农业科学院将杂种优势模式的核心逻辑、群体遗传学和数量遗传学原理深度结合,系统开展了温热玉米种质的人工创新实践。研究团队通过多代轮回选择、定向交配与性状鉴定等操作,逐步提高优良基因频率,减少不良基因影响,最终成功合成了一系列适配温热环境的玉米种质群体。其中,针对BSSS-Tuxpeño × NonBSSS-NonTuxpeño模式中“BSSS-Tuxpeño”方向,构建了Tuxpeño-Reid(墨瑞)和BSSS-Tuxpeño等群体;而在“NonBSSS-NonTuxpeño”方向,则形成了Suwan-Lancaster(苏兰)和Suwan-Iodent(苏艾)等群体^[23-25]。这些群体的构建既严格遵循杂种优势模式的遗传配对规律,又充分利用了不同种质间的互补特性,为温热地区玉米育种提供了遗传基础丰富、目标性状突出的核心资源库,从而有效推动了南北玉米育种

体系的协同创新与产业升级。

2.2.2 种质创新技术要点 贵州省农业科学院自2000年以来,围绕温热玉米种质创新,形成了一条系统、严谨且高效的技术路线,涵盖“优异基础种质构建-大群体分离选择-多环境联合筛选-对称测配与多点鉴定”4个关键环节。其核心目标在于充分挖掘热带种质的遗传潜力,培育广适性强、综合性状优良的温热玉米新材料。具体的步骤及其要点如下:

(1) 基础核心种质筛选: 奠定创新基石

种质资源是培育优质、高产、抗病虫、抗逆玉米新品种的物质基础;筛选和鉴定出优异种质是育种工作最重要、最基础的内容。自2000年以来,贵州省农业科学院持续开展种质资源的引进、鉴定与评价工作。截至目前,已成功引进3000余份来源广泛、类型丰富的种质资源。这些引进的种质涵盖了多个极具研究价值的热带种质,包括Suwan、Tuxpeño、Maiz Amargo、ETO、Cateto以及Tuson等。这些热带种质往往携带着独特的基因资源,为拓宽玉米遗传基础、丰富遗传多样性提供了宝贵的材料。通过系统且严谨的鉴定与评价流程,对这3000余份种质资源的农艺性状、抗病性、抗逆性等进行了全面细致的检测与分析。经过多年的不懈努力,从中鉴定出一批抗白斑病、南方锈病和穗腐病、茎腐病,耐高温、矮秆等具有明显优良性状的种质资源(图4)。

(2) 大群体分离与优株选择: 提升遗传多样性

在温热玉米群体改良的研究与实践中,分离群体的样本量大小是整个改良工作成败的关键因素。这是因为群体样本量直接关系到遗传多样性的丰富



图 4 部分差异化的种质资源

Fig. 4 Partial differentiated germplasm resources

A 为植株(如株型结构、茎秆颜色等)存在差异的材料; B 为果穗(如穗型、籽粒颜色和穗腐病抗性等)存在差异的材料; C 为叶斑病抗性(如白斑病等)存在差异的材料。

A: germplasm with variations in plant characteristics (e.g., plant architecture, stalk color, etc.); B: germplasm with variations in ear characteristics (e.g., ear type, kernel color, ear rot resistance, etc.); C: germplasm with variations in resistance to leaf spot diseases (e.g., maize white spot, etc.).

程度、优良基因组合的出现概率以及后续选择工作的有效性。

如果个体数量不足,群体内部的遗传变异范围被极大压缩,携带优良基因或理想基因型的个体出现的概率大幅降低,这就使得育种人员很难从中精准选择出具有优良农艺性状、抗逆性强、产量潜力高的单株。即便花费大量时间和精力进行筛选,也往往因可供选择的优良个体基数过小,导致选择效果不佳,甚至可能错过真正有价值的遗传资源,严重制约温热玉米种质改良的进程。

与之相反,采用大群体进行优良单株选择是当前温热种质改良中被实践反复验证的最有效方法之一。一般而言,温热玉米群体的规模不应低于 30,000 株。较大的群体规模能够充分保留和展现群体的遗传多样性,为优良基因的重组与表达提供更广阔的空间。在此条件下,各类基因组合得以充分显现,优良单株出现的概率显著提高。育种人员可以在丰富的个体资源中,依据明确的育种目标,对单株的株型、抗病虫害能力、结实性、品质等多项指标进行严格筛选,精准挑选出综合表现优异的优株晋级到下一轮试验。这种基于大群体的优株选择机制能够不断累加优良基因,逐步提升温热玉米群体的整体遗传水平,可为培育出突破性的优良品种奠定坚实基础。例如,贵州省农业科学院在 Suwan-Iodent 群体第 1 轮选择中,从 30,000 株中筛选出开花早、穗

位适中、抗倒伏性强、果穗性状优良、苞叶良好以及抗病能力突出的 300 个优良单株晋级下一轮。

(3) 多环境联合选择: 增强广适性与稳定性

在玉米育种领域,品种的最终价值不仅取决于其内在的遗传潜力,更与对目标种植区域环境的适应能力密切相关。多环境联合选择作为一项核心育种策略,通过在多个具有代表性的生态环境中开展优良单株筛选,系统综合评价单株的产量表现、抗逆能力、品质特性等关键农艺性状,最终筛选出广适性突出、遗传稳定性强的优良自交系。

贵州省农业科学院针对性选取贵州、海南、云南、甘肃、河南、福建等不同生态区域开展多环境联合选择工作,结合各地区典型环境特点制定差异化鉴定目标:在甘肃重点完成光敏感性、丰产性等性状的精准鉴定;在河南聚焦耐高温、早熟性及抗倒性等适应性性状的筛选;在贵州、云南、福建、海南等南方多湿区域则侧重开展抗病性鉴定。通过多环境协同评价,最终保留在各环境中均表现优异的穗行,为后续育种工作奠定优质的材料基础。例如,将晋级的每一个果穗均分成 5 份,分别种于贵州、云南、甘肃、河南、福建,根据所种植地区相对应的选择目标进行鉴定,最后保留在贵州、云南、甘肃、河南、福建均表现优异的穗行。

(4) 对称性测配与多点鉴定: 验证杂种优势

在玉米育种中,配合力无疑是决定其成败的核

心性状,它直接关系到杂交组合能否表现出理想的杂种优势。而对称性测配和多点鉴定作为评估配合力的重要技术手段,在优良组合筛选过程中发挥着不可替代的作用。

对称性测配强调在杂交组合配制过程中,遵循科学的配对原则,确保测验种与待测亲本之间的遗传搭配具有合理性和代表性。这意味着需要根据不同的杂种优势模式,结合目标育种区域的生态特点,精心选择合适的测验种。这些测验种既可以来自不同的育种单位,也可以是经验丰富的育种家经过长期实践筛选出的优良材料,尽可能选择来自不同杂种优势的核心材料。通过对称性测配,能够更全面地挖掘待测亲本的一般配合力和特殊配合力,从而准确判断其在杂交组合中的应用潜力以及后续的育种价值。例如,基于 Suwan-Iodent 群体选育出的自交系多用作父本,因此主要选用 Reid、Tuxpeño、X 系等种质资源与其进行测配。

与此同时,多点鉴定是保障杂交种筛选准确性的关键环节。不同生态区在气候条件、土壤特性、病虫害发生情况等方面存在显著差异,这些差异会直接影响杂交种的表现。因此,按照不同生态区的特点对测配组合开展多点鉴定,能够充分考察测配组合在各种环境条件下的稳定性和适应性。通过在多个代表性地点进行种植试验,记录其生长发育动态、抗逆性表现、产量构成因素等指标,可以更客观地评价测配组合的综合表现,避免因单一环境下的偶然结果导致误选。为此,同一测配组合应至少设置 6 个重复,分别种植于 6 个不同的环境中进行鉴定。例如,若所选育品种主要应用于黄淮海地区,通常应在该区域的北部(如河南安阳、河北石家庄、山东泰安等)和南部(如河南驻马店、安徽阜阳、湖北襄阳等)各选择 3 个试验点,以确保生态代表性。

2.3 利用 Suwan 进行温热种质改良的成效

自 2000 年以来,贵州省农业科学院利用 Suwan 种质人工合成构建了 Suwan-Lancaster (苏兰)、Suwan-Iodent (苏艾)等群体(表 2);同时,基于这些群体,在贵州、海南、云南、甘肃、河南、福建等进行多生态联合选择,成功培育出一批配合力高、抗逆性强、光钝感的温热自交系。

从苏兰群体中选育出 QB408、QB446 和 QB6231 等自交系。其中, QB408 作为亲本组配的黔单 88 通过西南地区国家审定; QB446 组配出义农玉 1 号、金玉 838 和煌单 007; QB6231 则组配出卓玉 315、黔玉

331、友玉 7231 等品种。

从苏艾群体中选育出的一批优良的自交系,并且已完成了 4 代苏艾种质的改良,具体如下:

(1) 采用“光温驯化结合光温敏感基因利用”等策略开展相关的选育工作。具体而言,将苏艾群体种植于甘肃张掖等长日照地区进行光温驯化,并以相关的分子标记辅助选择,成功选育出了第 1 代苏艾种质(如 QB5721、QB5722 等)。这些自交系有效缓解了热带种质在温带地区的光周期敏感问题,但其抗性表现不足,仍需进一步改良。

(2) 在第 1 代苏艾种质的基础上,进一步扩大群体规模,有效地选择和利用 Suwan 种质携带的抗性基因,成功育成第 2 代苏艾种质(如 QB5775、QB5785 等)。该批种质为黄淮海地区引入了全新抗锈资源,但仍存在抗倒性偏弱、广适性不足等亟待解决的问题。

(3) 基于前 2 代改良基础,采用“多环境联合鉴定选择”等技术手段,在环境鉴定环节进一步拓展鉴定范围,鉴定环境从原来的 4 个区域(贵州、海南、甘肃和河南)扩展至 6 个及以上区域(贵州、海南、甘肃、河南、云南和福建等)。通过系统改良,获得了一批配合力高、抗性强、适应性广的自交系,这些材料具备跨生态区适应能力,可根据不同区域种植需求实现南北兼用。例如,以 QB5746 和 QB5725 组配的康农玉 8009、YD819、郑品玉 A6、汉玉 122 和金华创 826 等品种,已在多生态区进入审定流程;其中,金华创 826 已通过黄淮海夏玉米区审定,正在推进西北春玉米组、西南春玉米(中低海拔)组、东华北中晚熟春玉米组、东华北中熟春玉米组等区域的审定工作。以 QB5910 为亲本,在西南地区组配出农发 710、黔玉 2111、黔玉 2116 等品种,在黄淮海地区组配出敦研 628、京单 133 等组合。第 3 代苏艾种质(如 QB5725、QB5746、QB5910 等)展现出广泛的生态适应性和良好的应用潜力,但其籽粒较浅、生物量不足等问题仍需持续改良。

(4) 为此,在现有材料的基础上,针对苏艾种质存在的上述不足进一步开展了系统改良工作。通过种质扩增和轮回选择等方法,旨在进一步提升群体遗传多样性并获得更丰富的遗传增益。同时,结合前期在热带玉米种质资源感光性、抗病性、株型及产量性状的基因定位与克隆等方面的研究基础,团队开发了相关分子标记并将其应用于辅助选择。在此基础上,成功创制出第 4 代苏艾种质,包括

QD001、QD004 和 QD14 等。这些新种质在遗传背景和关键农艺性状(如株高、穗行数、粒型、出籽率等)方面均较原有材料取得了显著提升。以 QD001 为例,相较于 QB5725 和 QB5746, 其果穗更大、出籽率更高, 丰产性进一步增强。2024 年, 以 QD001 为亲本组配的 13 个杂交组合分别进入国家区试及多个省级区试, 所有组合均表现出稳产性好、适应范围广、抗逆性强等突出优势。其中,“滑玉 66”在河南省区域试验中表现优异, 排名第一。

此外, 还构建了 Tuxpeño-Reid (墨瑞)、BSSS-Tuxpeño 等一系列温热群体(表 2), 同样也从中选育出一系列优良的母本自交系。墨瑞群体选育出的 QB4557、QB6752 等自交系, 成功组配出农发 710、云海 2115 等品种。以 BSSS-Tuxpeño 群体为基础, 经南北多生态区鉴定与选择, 育成 QB7847、QB7855 等自交系, 这些种质与黄改、Suwan、苏艾、NSS 等类群杂交表现出强优势, 适宜在我国南北方作为母本种质利用。

表 2 温热玉米群体
Table 2 Temperate-tropical maize population

群体 Population	群体构成的主要材料 Main material	创制的部分自交系 Partial inbred lines	品种/组合 Varieties/combinations
Tuxpeño-Reid	449、毕 405、94-90 等 Tuxpeño 种质; 掖 478、郑 58、黄 C 等 Reid 种质 Tuxpeño germplasm such as 449, Bi 405, and 94-90; Reid germplasm such as Ye 478, Zheng 58, and Huang C	QB4552、QB4557、QB6752, 等 QB4552, QB4557, QB6752, etc.	农发 710、云海 2115, 等 Nongfa 710, Yunhai 2115, etc.
Suwan-Lancaster	S37、S611、QB44 等 Suwan 种质; Mo17、39141、Q137 等 Lancaster 种质 Suwan germplasm such as S37, S611, and QB44; Lancaster germplasm such as Mo17, 39141, and Q137	QB408、QB446 和 QB6231, 等 QB408, QB446, QB6231, etc.	黔单 88、金玉 838、金玉 318、卓玉 315, 等 Qiandan 88, Jinyu 838, Jinyu 318, Zhuoyu 315, etc.
Suwan-Iodent	S611、T32、QR273 等 Suwan 种质; PH207、LH82、LH85 等 Iodent 种质 Suwan germplasm such as S611, T32, and QR273; Iodent germplasm such as PH207, LH82, and LH85	QB5721、QB5725、QB5746、DC14、DC45、MD166、MD823、BH030, 等 QB5721, QB5725, QB5746, DC14, DC45, MD166, MD823, BH030, etc.	YD819、荟玉 6525、康农玉 8009、康农玉 802、郑品玉 A6, 等 YD 819, Huiyu 6525, Kangnongyu 8009, Kangnongyu 802, Zhengpinyu A6, etc.
BSSS-Tuxpeño	PH6WC、豫 1122、M03 等 BSSS 种质; TS6217、TS1524、TS1561 等 Tuxpeño 种质 BSSS germplasm such as PH6WC, Yu 1122, and M03; Tuxpeño germplasm such as TS6217, TS1524, and TS1561	QB7847、QB7855, 等 QB7847, QB7855, etc.	黔丰单 158、京汉 1086、黔丰 988, 等 Qianfengdan 158, Jinghan 1086, Qianfeng 988, etc.

3 存在的问题与展望

3.1 温热玉米群体改良的技术瓶颈

温热玉米种质改良对我国南北方种质创新具有重要意义, 但仍面临诸多技术瓶颈。由于热带与温带玉米在长期地理隔离和生态适应中形成了显著遗传差异, 优良基因的聚合受到天然障碍的限制^[25-26]。尽管基因渗入与人工选择可在理论上实现性状互补, 但实际中 F₁ 后代常出现性状分离, 难以获得兼具双亲优良特征的稳定材料, 且田间选择偏重农艺性状, 导致血缘比例偏离预期。此外, 优良基因与不利基

因的紧密连锁需通过扩大群体、增加重组和多代自交选择来打破^[27], 这会显著延长育种周期并提高成本。受光周期影响, 热带种质在温带常表现为生育期延迟、抽雄吐丝不协调等, 需通过热温区穿梭育种筛选适应性材料, 但气候差异又导致性状不稳与选择误差。总体而言, 温热玉米改良仍面临周期长、成本高、操作复杂等挑战, 亟需多方技术与资源的持续投入。

3.2 温热玉米群体的利用潜力

尽管温热玉米群体改良面临诸多技术瓶颈, 但其蕴含的巨大利用潜力为玉米产业的可持续发展提

供了重要支撑,在农业生产实践中展现出广阔的应用前景。

从性状优势来看,温热玉米群体集合了热带种质与温带种质的优良遗传资源,具备实现“1+1>2”的性状叠加效应^[25,28]。热带玉米种质中蕴含丰富的抗逆基因资源,如抗玉米大小斑病、南方锈病、茎腐病等病害的基因,以及耐旱、耐贫瘠、耐高温的基因,这些基因可为温带玉米品种注入抗逆“密码”,显著提升其在极端气候下的产量稳定性;而温带种质的高产基因、早熟基因、优质蛋白基因等,能弥补热带种质的光敏性和丰产性^[28]。通过科学的改良与筛选,温热玉米群体可培育出兼具高产、优质、多抗特性的新品种,满足多元化的生产需求。

在生态适应性方面,温热玉米为拓展玉米种植区域提供了新的可能。经过在南北多种环境下的联合选育及其南北遗传背景的融合,这类群体有望实现南北生态区的兼用,从而推动玉米种植向边际土地延伸,进一步增强粮食生产的稳定性和安全性。此外,温热玉米群体丰富的遗传多样性有助于拓宽育种材料的遗传基础,为玉米育种提供更为广泛的基因资源,降低因遗传基础单一带来的产业风险,为种业科技创新注入持续活力。

随着全基因组测序和基因编辑等现代生物技术的迅速发展,包括开花相关基因(如 *ZCN8*、*ZmCCT9*^[29])和理想株型基因(如 *Lac1*^[30])在内的多个有利基因被不断挖掘并应用于育种实践。这些进展显著缓解了热带玉米在温带地区种植时出现的开花延迟和株型过度繁茂等问题,同时促进了热带玉米中潜在优良基因的深入挖掘。

因此,未来研究可通过基因组选择、分子标记辅助育种及背景分析等手段,实现热带优良等位基因的定向渗入与遗传平衡控制;结合多环境表型数据与基因组信息,开展综合性状评价与遗传解析,筛选兼具热带优良基因与温带适应性的中间材料;并基于基因网络和主效位点信息,实施基因组编辑或分子设计育种,加速创制高产、抗逆、广适的温热型核心种质。通过构建系统化的种质创新技术体系,能够充分释放温热玉米种质的利用潜力,为我国玉米种质创新与区域适应性育种提供持续动力,拓展遗传多样性基础,从而为全球粮食安全与农业可持续发展贡献重要力量。

References

- [1] Yang N, Wang Y B, Liu X G, et al. Two teosintes made modern maize. *Science*, 2023, 382: eadg8940.
- [2] Luo N, Meng Q F, Feng P Y, et al. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management. *Nat Commun*, 2023, 14: 2637.
- [3] 李海明, 胡瑞法, 张世煌. 外来种质对中国玉米生产的遗传贡献. *中国农业科学*, 2005, 38: 2189–2197.
Li H M, Hu R F, Zhang S H. The impacts of US and CGIAR's germplasm on maize production in China. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 2189–2197 (in Chinese with English abstract).
- [4] 石雷. 引入美国种质对我国玉米育种的影响. *玉米科学*, 2007, 15(2): 1–4.
Shi L. The impacts of US germplasm on maize breeding efforts in China. *J Maize Sci*, 2007, 15(2): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张世煌. 玉米种质创新和商业育种策略. *玉米科学*, 2006, 14(4): 1–3.
Zhang S H. Germplasm development and commercial maize breeding strategy. *J Maize Sci*, 2006, 14(4): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- [6] 郭向阳, 王安贵, 吴迅, 等. 热带玉米 Tuxpeno 种质形成、改良及育种潜势分析. *玉米科学*, 2019, 27(2): 10–15.
Guo X Y, Wang A G, Wu X, et al. Analysis of development, improvement and breeding potential for tropical maize germplasm Tuxpeno. *J Maize Sci*, 2019, 27(2): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈泽辉, 祝云芳, 王安贵, 等. 玉米 Tuxpeno 和 Suwan 种质的改良研究. *贵州农业科学*, 2010, 38(2): 1–4.
Chen Z H, Zhu Y F, Wang A G, et al. Improvement of Tuxpeno and Suwan germplasm in maize. *Guizhou Agric Sci*, 2010, 38(2): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- [8] 郭向阳, 郭成, 陈泽辉, 等. 玉米 Suwan-Lancaster 和 Tuxpeno-Reid 改良系的产量及相关性状配合力分析. *西南农业学报*, 2016, 29: 2796–2799.
Guo X Y, Wu C, Chen Z H, et al. Combining ability of Suwan-Lancaster and Tuxpeno-Reid improved maize inbreds for grain yield and its components. *Southwest China J Agric Sci*, 2016, 29: 2796–2799 (in Chinese with English abstract).
- [9] Wu X, Liu Y, Lu X F, et al. Integration of GWAS, linkage analysis and transcriptome analysis to reveal the genetic basis of flowering time-related traits in maize. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1145327.
- [10] Jiang Y L, Guo S, Wang D, et al. Integrated GWAS, linkage, and transcriptome analysis to identify genetic loci and candidate genes for photoperiod sensitivity in maize. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1441288.
- [11] 陈泽辉. 贵州玉米育种. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011. pp 100–130.
Chen Z H. Maize Breeding in Guizhou. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 2011. pp 100–130 (in Chinese).
- [12] 李秀诗, 吴迅, 吴文强, 等. 玉米 Suwan 种质改良过程中的关键基因组区段发掘. *作物学报*, 2019, 45: 568–577.

- Li X S, Wu X, Wu W Q, et al. Excavation of main candidate genome regions in Suwan germplasm improvement process of maize. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 568–577 (in Chinese with English abstract).
- [13] 倪昔玉, 刘礼超, 雷本鸣. 山区玉米育种用优良自交系苏 37 (S37) 的选育研究. *四川农业大学学报*, 1996, 14(3): 366–370.
- Ni X Y, Liu L C, Lei B M. Research on the selection of excellent inbred line Su 37 (S37) for maize breeding in mountainous areas. *J Sichuan Agric Univ*, 1996, 14(3): 366–370 (in Chinese with English abstract).
- [14] 程叶诚. 杂交玉米新组合安单 3 号高产制种技术. *中国种业*, 2006(12): 51–52.
- Cheng Y C. High yield seed production technology of new hybrid maize combination Andan3hao. *China Seed Ind*, 2006(12): 51–52 (in Chinese with English abstract).
- [15] 许昌慧, 方琼菊, 柏光晓, 等. 优质饲料玉米罗单 297 在 2018–2023 年品种持续稳产性、广适性及抗性分析. *种子科技*, 2025, 43(4): 25–27.
- Xu C H, Fang Q J, Bai G X, et al. Analysis on the sustainable stability, adaptability and resistance of high-quality feed maize Luodan 297 in 2018–2023. *Seed Sci Technol*, 2025, 43(4): 25–27 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王国富. 玉米杂交种兴黄单 892 的选育及应用推广. *贵州农业科学*, 1998, 26(1): 8–10.
- Wang G F. Breeding of maize hybrid Xinghuangdan 892 and its popularization. *Guizhou Agric Sci*, 1998, 26(1): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张泽志, 王安贵, 陈泽辉, 等. 高配多抗紫秆玉米自交系 XZ50612 的选育及遗传应用分析. *种子*, 2018, 37(7): 105–107.
- Zhang Z Z, Wang A G, Chen Z H, et al. Breeding and genetic application analysis of maize inbred line XZ50612 with purple stalk, high compatibility, multi resistance. *Seed*, 2018, 37(7): 105–107 (in Chinese with English abstract).
- [18] 高翔, 陈泽辉, 高捷, 等. 优质丰产稳产型玉米新品种黔单 19 号的选育及配套技术. *西南农业学报*, 2004, 17: 674–676.
- Gao X, Chen Z H, Gao J, et al. Breeding of Qiandan 19, a new maize variety with quality, high-stable yield and its cultivated technique. *Southwest China J Agric Sci*, 2004, 17: 674–676 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郭向阳, 陈泽辉, 胡兴, 等. 不同供体对玉米自交系 QR273 的改良效应. *玉米科学*, 2016, 24(3): 15–19.
- Guo X Y, Chen Z H, Hu X, et al. Improvement effects of donors on inbred line QR273 in maize. *J Maize Sci*, 2016, 24(3): 15–19 (in Chinese with English abstract).
- [20] Wang D, He Y, Nie L, et al. Integrated IBD analysis, GWAS analysis and transcriptome analysis to identify the candidate genes for white spot disease in maize. *Int J Mol Sci*, 2023, 24: 10005.
- [21] 黄吉美. 会单 4 号制种技术. *作物杂志*, 1996(1): 12.
- Huang J M. Seed production technology of Huidan4hao. *Crops*, 1996(1): 12 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈泽辉, 吴迅, 郭向阳. 杂种优势与玉米育种. 北京: 中国农业出版社, 2022. pp 96–122.
- Chen Z H, Wu X, Guo X Y. Hybrid Advantage and Maize Breeding. Beijing: China Agriculture Press, 2022. pp 96–122 (in Chinese).
- [23] 陈泽辉, 祝云芳, 王安贵, 等. 玉米 Tuxpeno-Reid 和 Suwan-Lancaster 合成群体相互轮回选择效果及杂种优势研究. *玉米科学*, 2013, 21(4): 1–5.
- Chen Z H, Zhu Y F, Wang A G, et al. Two maize populations of Tuxpeno-Reid and Suwan-Lancaster by reciprocal recurrent selection and the heterosis. *J Maize Sci*, 2013, 21(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- [24] 祝云芳, 陈泽辉, 郭向阳, 等. 基于温热玉米 Suwan-Lancaster 群体改良自交系 QB446 的选育与应用. *贵州农业科学*, 2020, 48(7): 1–5.
- Zhu Y F, Chen Z H, Guo X Y, et al. Breeding and application of inbred line QB446 based on Suwan-Lancaster population improvement of maize. *Guizhou Agric Sci*, 2020, 48(7): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- [25] 郭向阳, 吴迅, 王安贵, 等. 玉米 Suwan 和 Iodent 改良系育种应用探索与分析. *植物遗传资源学报*, 2021, 22: 1676–1683.
- Guo X Y, Wu X, Wang A G, et al. Exploration and analysis of performance of test crosses of Suwan-Iodent improved lines in maize breeding. *J Plant Genet Resour*, 2021, 22: 1676–1683 (in Chinese with English abstract).
- [26] 赵立强, 姚文华, 潘兴明. 热带亚热带玉米种质在我国利用研究. *安徽农业科学*, 2013, 41: 4761–4763.
- Zhao L Q, Yao W H, Fan X M. Utilization of tropical and subtropical maize germplasm in China. *J Anhui Agric Sci*, 2013, 41: 4761–4763 (in Chinese with English abstract).
- [27] Musundire L, Derera J D, Dari S, et al. Assessment of genetic gains from introgression of temperate genes into tropical elite maize inbred lines: I. Performance per se. *Euphytica*, 2021, 217: 39.
- [28] 王栋, 郭爽, 裴蕾, 等. 基于高密度 SNP 标记对 112 份温热改良玉米自交系的遗传特征鉴定与表型性状评价. *江苏农业科学*, 2024, 52(6): 77–83.
- Wang D, Guo S, Nie L, et al. Genetic characterization and phenotypic traits evaluation of 112 maize lines derived from temperate-tropical germplasm by using high throughput SNP markers. *Jiangsu Agric Sci*, 2024, 52(6): 77–83 (in Chinese with English abstract).
- [29] Huang C, Sun H Y, Xu D Y, et al. *ZmCCT9* enhances maize adaptation to higher latitudes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: E334–E341.
- [30] Tian J G, Wang C L, Chen F Y, et al. Maize smart-canopy architecture enhances yield at high densities. *Nature*, 2024, 632: 576–584.