



植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources
ISSN 1672-1810, CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目: 36份极端花性状与衣分的海岛棉资源对高温胁迫的响应及综合评价
作者: 李江博, 严青青, 蔡永生, 陈琴, 周强, 高曼, 陈全家, 郑凯
DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.20241109001
收稿日期: 2024-11-09
网络首发日期: 2025-01-20
引用格式: 李江博, 严青青, 蔡永生, 陈琴, 周强, 高曼, 陈全家, 郑凯. 36份极端花性状与衣分的海岛棉资源对高温胁迫的响应及综合评价[J/OL]. 植物遗传资源学报. <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241109001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

36 份极端花性状与衣分的海岛棉资源对高温胁迫的 响应及综合评价

李江博¹, 严青青², 蔡永生¹, 陈琴¹, 周强¹, 高曼¹, 陈全家¹, 郑凯^{1*}

(¹新疆农业大学农学院/新疆作物生物育种重点实验室, 乌鲁木齐 830052, ²新疆农业科学院农作物品种资源研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 为了探究花器官性状和衣分对高温的响应, 并筛选出耐高温的海岛棉育种材料, 本研究于 2022 年在阿瓦提县对 534 份海岛棉资源的 5 个性状 (包括 4 个花器官性状和衣分性状) 进行了评价, 并据此筛选出了 36 份具有极端性状的材料。描述性统计分析发现, 534 份海岛棉资源变异系数范围在 8.57%-26.56% 之间, 衣分的变异系数最小 (8.57%), 柱头长度的变异系数最大 (26.56%)。相关性分析揭示了花柱长度与其余 4 个性状 (柱头长度、雄蕊长度、单个花药长度、衣分) 均具有显著正相关, 柱头长度与雄蕊长度存在显著负相关, 雄蕊长度与单个花药长度存在显著正相关, 单个花药长度与衣分存在显著正相关。2023 年, 我们在相同的地点 (阿瓦提县) 对之前筛选出的 36 份具有极端性状的海岛棉资源进行了增温棚高温胁迫试验, 并测定了它们 23 个表型性状的表现。结果显示, 这 36 份极端资源在农艺性状上表现出了不同程度的变异。描述性统计分析显示, 高温处理下各性状变异系数增加, 其中 14 个性状与对照相比表现出明显差异。主成分分析识别出 6 个主成分, 解释了总方差的 85.34%, 涵盖了产量构成、光合作用、纤维品质等多个方面。聚类分析将材料分为耐热、中抗、敏感和高敏四类, 相关性分析确认了有效铃数、有效果枝数等性状与耐热性的正相关关系。拟合回归分析进一步展示了花器官性状、衣分和花粉活力与综合评价值的关联性并不显著。本研究为海岛棉耐高温育种提供了重要的理论基础和种质资源。

关键词: 海岛棉; 遗传育种; 耐高温; 种质资源评价

Response and Comprehensive Evaluation of 36 *Gossypium barbadense* L. Extreme Flower Organs Resources and Lint Percentage Resources to High Temperature Stress

LI Jiangbo¹, YAN Qingqing², CAI Yongsheng¹, CHEN Qin¹, ZHOU Qiang¹, GAO Man¹,
CHEN Quanjia¹, ZHENG Kai¹

(¹College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University/Xinjiang Key Laboratory of Crop Biology Breeding, Urumqi 830052, ²Institute of Crop Variety Resources, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091)

Abstract: In order to explore the response of flower organ traits and Lint percentage to high temperature, and to evaluation the breeding materials of *Gossypium barbadense* L. with high temperature tolerance, this study

收稿日期: 2024-11-09

第一作者研究方向为棉花遗传育种, 李江博, E-mail: 760631995@qq.com;

通讯作者: 郑凯, 研究方向为棉花分子育种, E-mail: zhengkai555@126.com;

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2024A0003-2); "天山英才" 培养计划项目 (2023TSYCLJ0012)

资助: 新疆维吾尔自治区棉花产业技术体系资助 (XJARS-03-07); 国家育种攻关项目 (2022MH-01)

Foundation project: Key Research and Development Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2024A0003-2); "Tianshan Talents" Training Program Project (2023TSYCLJ0012); Xinjiang Uygur Autonomous Region Cotton Industry Technology System Support (XJARS-03-07); National Breeding Research Project (2022MH-01)

evaluated 5 traits (including 4 flower organ traits and Lint percentage traits) of 534 *Gossypium barbadense* L. resources in Awati County in 2022, and then selected 36 materials with extreme traits. Descriptive statistical analysis showed that the variation coefficient of 534 *Gossypium barbadense* L. resources ranged from 8.57% to 26.56%, the variation coefficient of Lint percentage was the smallest (8.57%), and the variation coefficient of stigma length was the largest (26.56%). Correlation analysis revealed that style length was positively correlated with the other 4 traits (stigma length, stamen length, anther length, Lint percentage), stigma length was negatively correlated with stamen length, stamen length was positively correlated with anther length, and anther length was positively correlated with Lint percentage. In 2023, we conducted an enhanced temperature shed heat stress test on 36 previously selected *Gossypium barbadense* L. resources with extreme traits in the same location (Awati County), and measured the performance of 23 phenotypic traits. The results showed that the 36 extreme resources showed different degrees of variation in agronomic traits. Descriptive statistical analysis showed that the variation coefficient of each trait increased under high temperature treatment, and 14 traits showed obvious difference compared with the control. Principal component analysis identified 6 principal components, which accounted for 85.34% of the total variance, covering yield composition, photosynthesis, fiber quality and many other aspects. The materials were classified into four categories of heat resistance, medium resistance, sensitive and high sensitivity by cluster analysis. The correlation analysis confirmed the positive correlation between the properties of effective boll number, effective fruit branch number and heat resistance. Fitting regression analysis further showed that there was no significant correlation between flower organ traits, Lint percentage and pollen activity and comprehensive evaluation value. This study provided important theoretical basis and germplasm resources for *Gossypium barbadense* L. breeding for high temperature tolerance.

Key words: *Gossypium barbadense* L.; genetic breeding; high temperature resistance; evaluation of germplasm resources

在全球气候变暖的背景下，高温胁迫已成为影响作物产量和品质的关键因素之一^[1]。为了应对这一挑战，作物高温胁迫育种与种质资源创新成为农业科学研究的热点^[2]。通过挖掘耐高温基因资源、解析高温抗性分子机制，并结合现代生物技术手段，科学家们致力于培育耐高温作物新品种^[3-4]。在水稻中的研究发现调控高温抗性的新基因位点 TT3，首次发现了潜在的作物高温感受器，为农作物抗高温育种开辟了新途径^[5-6]。种质资源创新在作物高温胁迫育种中发挥着重要作用^[7]，通过远缘杂交技术，可以将冰草的优异基因导入小麦，培育出具有高产、抗病、抗旱等特性的小麦新品种^[8]。通过挖掘耐高温基因资源、解析高温抗性分子机制^[9]，并结合种质资源创新手段，可以有效提高作物的耐高温能力，为农业生产的可

持续发展提供有力保障^[10]。

棉花作为全球重要的经济作物之一，不仅在纺织工业中占有举足轻重的地位，也是许多国家农业经济的重要组成部分^[11]。然而，棉花生殖发育期受夏季高温影响很大，高温胁迫已成为限制棉花产量和品质的重要因素，对棉花生产构成了严重威胁^[12-13]。在棉花耐高温育种研究中，传统上多聚焦于常规农艺性状和产量性状的评估^[14]，而对于花器官性状在高温胁迫下的变化及其与耐高温性的关系研究较少^[15]。然而，花器官作为植物繁殖的关键组成部分，其性状变化直接影响授粉受精过程，进而影响棉花的结实率和产量^[16]。现有研究表明高温影响棉花生殖生长期中多个关键阶段^[17]。在生殖器官发育阶段，高温导致雄蕊的花粉数量和活力显著降低，形成畸形花粉粒，进而削弱授粉功能，最终引发雄性不育和败育。同时，雌蕊也受到高温的负面影响，雌配子体退化，花柱和子房出现畸形，降低了雌蕊的结构完整性和胚珠的功能。在授粉到受精过程中，高温同样造成不利影响，如花粉粘附性和萌发性的减弱，花粉管生长受阻，以及胚珠活力和寿命的降低，最终影响配子的正常结合。随着气候变暖，如果不采取缓解措施，到本世纪末全球平均表面温度将上升（2.6°C~4.8°C），在生长季节，温度每升高 1°C，对作物产量的影响高达 17%^[18]。鉴于此，研究高温胁迫下棉花花器官性状的变化，对于揭示棉花耐高温机制，指导海岛棉耐高温育种实践具有重要意义。

近年来，随着分子生物学和遗传育种技术的飞速发展，棉花种质资源的创新和利用取得了显著进展^[19]。特别是通过大规模种质资源评价，筛选耐高温种质资源，为耐高温育种提供了丰富的材料基础^[20-22]。本研究基于这一背景，通过对 534 份海岛棉种质资源进行评价，筛选出 36 份极端性状（4 个花器官性状和衣分）材料，系统研究了其在高温胁迫下的农艺性状和花器官性状变化，旨在为海岛棉耐高温育种提供理论依据和种质资源支持，丰富棉花耐高温育种的理论体系，为其他作物的耐高温育种研究提供参考和借鉴。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

本试验所用的 534 份海岛棉种质资源均由新疆农业大学农学院作物遗传改良与种质创新重点实验室收集并提供。

1.2 试验方法

2022 年，在阿瓦提县（东经 80°39′，北纬 40°39′）对 534 份海岛棉资源的 4 个花器官性状（花柱长度、柱头长度、雄蕊长度、单个花药长度）以及衣分进行测量。基于这些测量数据，我们筛选出在 4 个花器官性状和衣分上表现极端的 36 份材料。2023 年，我们在阿瓦提县的另一地点，针对筛选出的 36 份极端性状海岛棉材料进行田间增温棚试验。为了进行对

比，我们同时以大田自然状态下的相同 36 份材料作为正常对照组，以观察资源对高温响应。

根据阿瓦提县天气情况与海岛棉生长情况在盛花期（2023.7.9-2023.7.18）进行为期 10 天的田间增温处理。增温棚小区采用 1 膜 6 行(66+10) cm 种植模式，株距为 10 cm，膜宽 2.05 m，行长 2.5 m，增温棚小区长 27.6 m，宽 2.5 m，小区面积 69 m²，共设置两个重复，总面积 138 m²。增温棚用高 1.8 m 木桩支撑，棚体用 0.08mm 厚，透光率为 80%的聚乙烯棚膜覆盖（棚膜与地面间隔 30cm，确保空气流通），于每日 11: 00—20:00 间进行增温胁迫（有研究报道，夜间高温对棉花损伤大于日间高温，为了贴合实际生产减少夜间高温对棉花影响，因此未进行全时间段增温棚搭建），大棚内外分别在冠层上方 30 cm 处悬挂温度计，胁迫期间平均增温 3.645℃（图 1）。

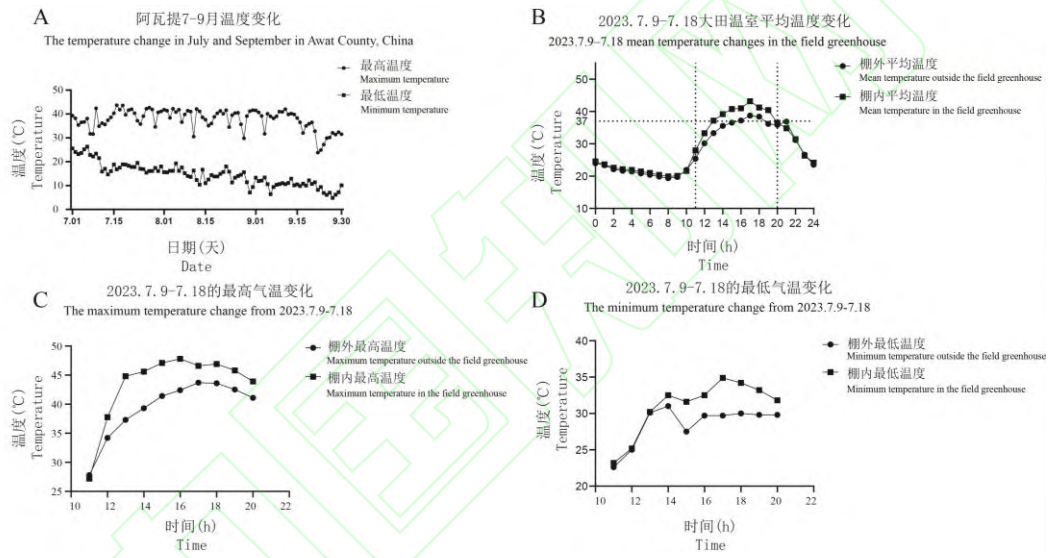


图 1 2023 年阿瓦提县气温变化图

Fig.1 Temperature change chart of Awati in 2023

1.3 调查性状

于花期调查（7 月中下旬）花柱长度、柱头长度、雄蕊长度、单个花药长度、最大光化学效率、花粉活力、蕾铃脱落率（第一次观察）；于吐絮期调查（10 月初）株高、每铃室种子数、始节高、第一果枝节位、有效铃数、有效果枝数、叶枝数、40 铃籽棉产量，40 铃皮棉产量、衣分、单铃重、蕾铃脱落率（第二次观察）、马克隆值、上半部平均长度、整齐度指数、断裂比强度、伸长率，共 23 项指标（除花粉活力仅调查了正常条件下的数据外，其余的 22 个性状均在正常与胁迫两种条件下进行了详细的数据调查）。

花柱长度、柱头长度、雄蕊长度、单个花药长度 4 个花器官性状的调查方法如图所示(图

2)

花粉活力采用 2,3,5-三苯基氯化四氮唑 (TTC, 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride) 染色法测定(称取磷酸二氢钾 5.32 g 和磷酸氢二钾 14.03 g 溶于 1 L 蒸馏水中, pH=7,称取 8 gTTC 粉末加入磷酸钾缓冲液中定容至终浓度约为 8%, 4℃避光保存)。取当天(7月16日)开放的花,放入 2 mL 离心管中加入 1 mL TTC 溶液, 37℃培养箱反应 30 min 后取出在显微镜下观察拍照,以正常染色的花粉粒与花粉总数的比值来测定花粉活力。

从每个处理的两个重复中连续选择五株长势均匀的植株来进行研究测量,按照《棉花种质资源描述规范和数据标准》^[23]进行调查记录。

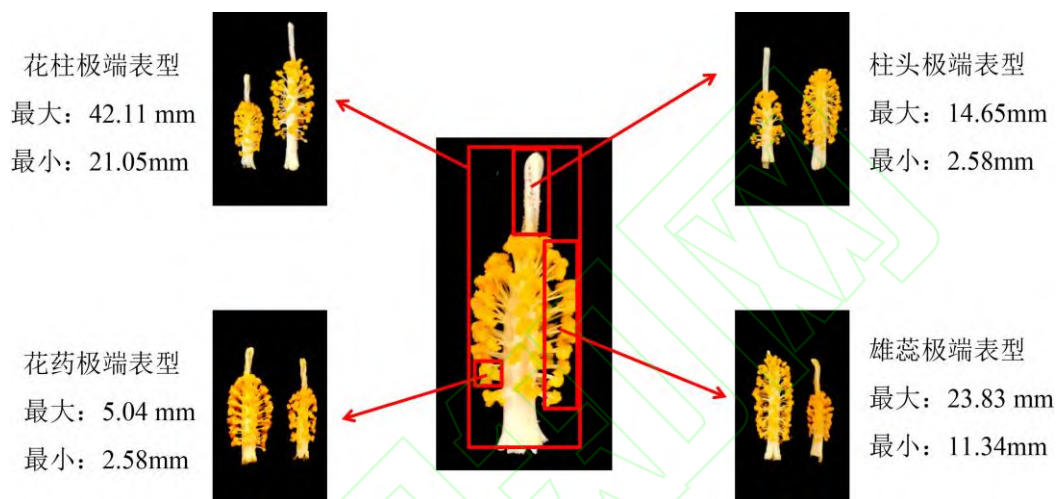


图 2 4 种花器官性状测定方法及 534 份海岛棉极端花器官表型

Fig.2 Determination method of four flower organ traits and Phenotype of extreme flower organs of 534 *Gossypium barbadense* L.

1.4 数据处理

使用 Excel 2021, SPSS 22 和 R-4.2.1 完成数据分析。Excel 2021 进行最大值, 最小值, 标准差等描述性指标计算; SPSS 22 进行主成分分析; R-4.2.1 进行相关性分析、多元回归分析、聚类分析。利用综合评价值 D1 对海岛棉进行综合评价。

$$\text{综合指标评价值: } D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times \omega_i], \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中: $\mu(X_i)$ 为隶属函数值, $\mu(X_i) = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$, $i=1,2,\dots,n$ 。其中 X_i 、 X_{min} 、 X_{max} 分别指第 i 个综合指标以及第 i 个综合指标的最小值和最大值; ω_i 为综合指标权重系数, $\omega_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i$, $i=1,2,\dots,n$ 。 P_i 为各品种第 i 个综合指标的贡献率。

$$\sum_{i=1}^n P_i, \quad i=1,2,\dots,n.$$

2 结果与分析

2.1 534 份海岛棉资源 4 个花器官性状和农分性状鉴定

2.1.1 534 份海岛棉资源 4 个花器官性状和农分性状描述性统计分析 对 534 份海岛棉的农艺性状进行描述性统计分析, 结果发现试验所用材料的表型变异较为丰富, 变异系数最小的是衣分 (8.57%), 变异系数最大的是柱头长度 (26.56%), 五个指标变异系数的范围在

8.57%~26.56%之间（表1）。

由图3可知，5个指标的分布均为正态分布，花柱长度在30~35mm区间上的统计频次最高，平均值为32.69。柱头长度在5~10mm之间区间上的统计频次最高，平均值为7.38。雄蕊长度在15~20mm之间区间上的统计频次最高，平均值为17.49。花药长度在3.5~4.0mm之间区间上的统计频次最高，平均值为3.81。衣分在30%~40%之间区间上的统计频次最高，平均值为35%。

表1 534份海岛棉资源农艺性状统计分析

Table 1 Statistical analysis of agronomic traits of 534 *Gossypium barbadense* L. resources

指标 Traits	平均数 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	变异系数(%)CV
花柱长度 (mm) STYL	32.69	2.90	21.05	42.11	8.87
柱头长度 (mm) STIL	7.38	1.96	2.58	14.65	26.56
雄蕊长度 (mm) STAL	17.49	1.86	11.34	23.83	10.63
单个花药长度 (mm) ANTL	3.81	0.41	2.58	5.04	10.76
衣分 (%) LP	35.21	3.00	21.21	43.13	8.57

STYL: Style length; STIL: Stigma length; STAL: Stamens length; ANTL: Anthers length; LP: Lint percentage; The same as below

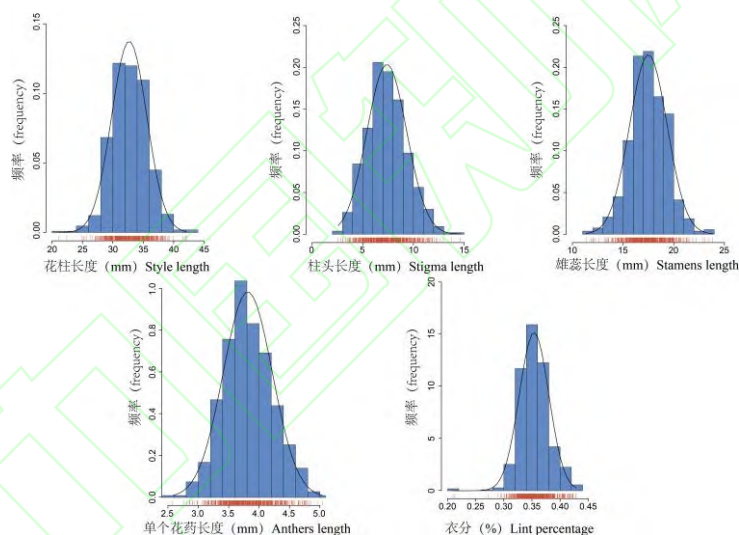


图3 534份海岛棉资源农艺性状频率分布分析

Fig.3 Frequency distribution analysis of agronomic traits in 534 *Gossypium barbadense* L. resources

2.1.2 534份海岛棉资源4个花器官性状和衣分性状相关性分析 为探究农艺性状之间的关系，相关性分析发现，花柱长度和其余四个性状（柱头长度，雄蕊长度，单个花药长度，衣分）均具有显著正相关性，柱头长度与雄蕊长度存在显著负相关，雄蕊长度与单个花药长度存在显著正相关，单个花药长度与衣分存在显著正相关（图4）。



*, **, ***分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上显著相关,下同

* and ** indicated significant correlation at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively, the same as below

图 4 534 份海岛棉资源农艺性状相关性分析

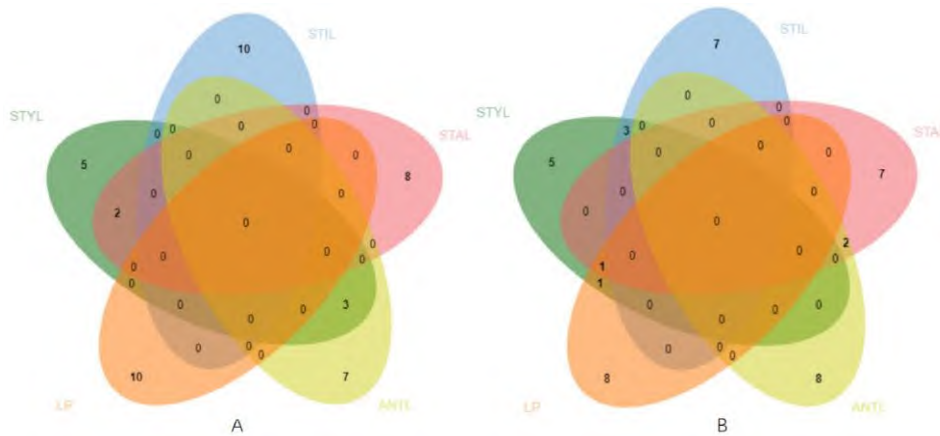
Fig.4 Correlation analysis of agronomic traits in 534 *Gossypium barbadense* L. resources

2.1.3 534 份海岛棉资源 4 个花器官性状和衣分性状极端材料筛选 我们对所测性状（图 5）各选择最大和最小的 10 份资源进行了分析（详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241109001>，附表 1）。

在每个性状最大的 10 份材料中，花柱长度与雄蕊长度间有 2 份相同材料，花柱长度与单个花药长度间有 3 份相同材料。共有 5 份材料存在于 2 种不同性状的交集中。

在每个性状最小的 10 份材料中，花柱长度与柱头长度间有 3 份相同材料，雄蕊长度与单个花药长度间有 2 份相同材料，花柱长度与衣分间有 1 份相同材料。共有 6 份材料存在于 2 种不同性状的交集中。花柱长度，雄蕊长度，衣分间有 1 份相同材料。共有 1 份材料存在于 3 种不同性状的交集中。

本研究后续实验选取了 4 个花器官性状最大的 4 份材料与最小的 4 份材料，衣分最大的 3 份材料和最小的 3 份材料进行，共 36 份材料（详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241109001>，附表 1）。



A:指标最大 10 份材料韦恩图; B:指标最小 10 份材料韦恩图; 本图中不同颜色区分了不同性状(如绿色代表花柱长度, 蓝色代表柱头长度), 图中重叠部分(即交集)所标记的数字, 表示同时属于这几个性状的元素数量

A: indicators maximum 10 materials Venn diagram, B: indicators minimum 10 materials Venn diagram; In this figure, different colors distinguish different traits (e.g., green for stylar length and blue for stigma length), and the numbers marked by overlapping parts (i.e., intersections) in the figure indicate the number of elements belonging to these traits at the same time

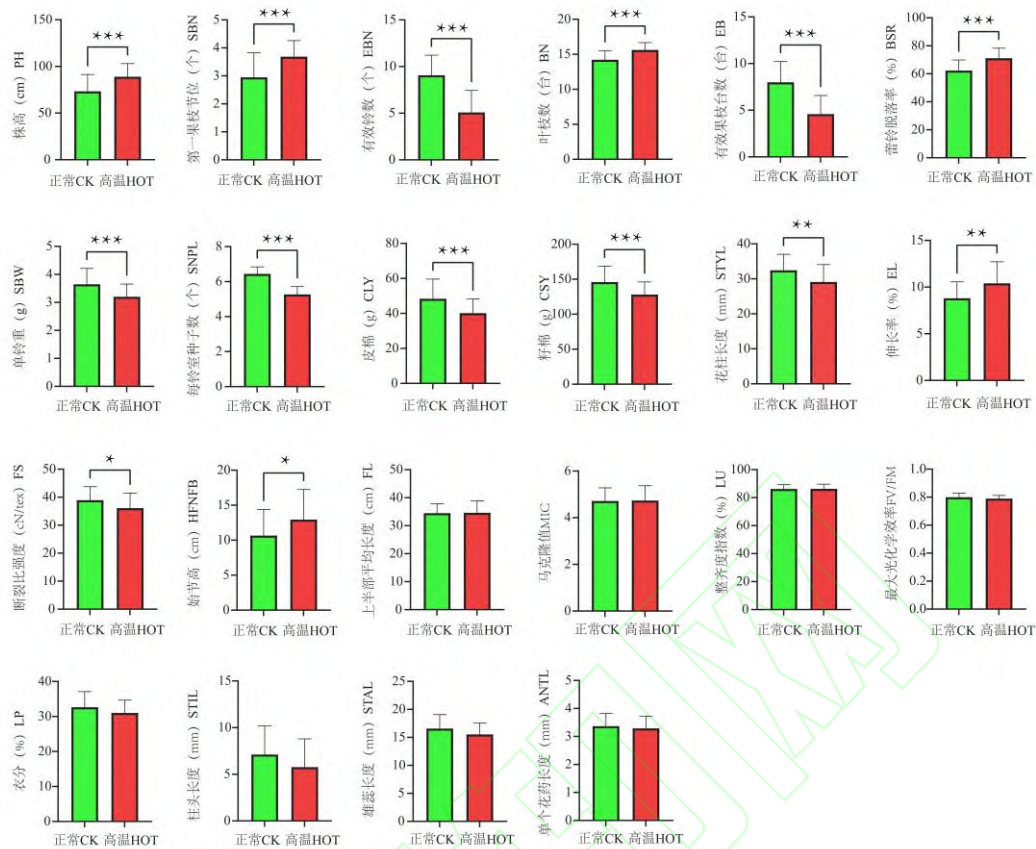
图 5 5 种性状最大最小的 10 份极端材料韦恩图

Fig.5 The maximum and minimum 10 extreme material Venn diagrams for 5 traits

2.2 36 份极端性状海岛棉资源对高温的响应及综合评价

2.2.1 36 份极端性状海岛棉资源描述性统计分析

36 份海岛棉资源在不同处理下的描述性统计结果如表 2 所示, 不同指标对高温的响应程度不同, 22 个性状中有 14 个性状在不同处理下存在显著差异(图 6)。各组性状的变异系数表现为正常处理(CK) 3.57%~43.12%之间, 高温处理(H) 2.53%~52.43%之间。不同处理使棉花性状产生了不同幅度的变化, 正常处理下只有 5 个指标的变异系数小于 10%, 其余 17 个指标的变异系数在 12.12%~43.12%, 变异系数最大的是柱头长度(43.12%), 最小的是最大光化学效率(3.57%)。高温处理下只有 5 个指标的变异系数小于 10%, 其余 17 个指标的变异系数在 12.27%~52.43%, 变异系数最大的是柱头长度(52.43%), 最小的是最大光化学效率(2.53%)。



*、**、***分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上显著相关,下同

* and ** indicated significant correlation at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively, the same as below

图 6 不同性状对高温响应

Fig.6 Different characters respond to high temperature

表 2 36 份极端海岛棉资源描述性统计分析

Table 2 Descriptive statistical analysis of 36 extreme *Gossypium barbadense* L. resources

指标 Traits	处理方式 Treatment	平均数 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	变异系数(%CV)
花柱长度(mm)	CK	32.43	4.58	19.76	39.81	14.12
STYL	H	29.12	4.98	15.89	37.91	17.10
柱头长度(mm)	CK	7.12	3.07	2.53	15.48	43.12
STIL	H	5.76	3.02	1.67	14.74	52.43
雄蕊长度(mm)	CK	16.57	2.50	11.18	21.77	15.09
STAL	H	15.52	2.08	8.93	18.33	13.40
单个花药长度(mm)	CK	3.37	0.46	2.41	4.33	13.65
ANTL	H	3.29	0.43	2.12	4.25	13.07
蕾铃脱落率(%)	CK	62.00	8.02	42.00	80.00	12.90
BSR	H	71.28	7.03	54.00	86.00	9.86
最大光化学效率	CK	0.80	0.03	0.74	0.84	3.75
Fv/Fm	H	0.79	0.02	0.72	0.83	2.53
株高(cm)	CK	73.27	18.05	48.06	123.08	24.63
PH	H	88.89	14.22	64.56	118.38	16.00

第一果枝节位	CK	2.95	0.88	1.40	5.00	29.83
SBN	H	3.69	0.57	2.60	4.70	15.45
始节高(cm)	CK	10.65	3.74	4.48	18.87	35.12
HFNFB	H	12.95	4.30	4.99	19.72	33.20
有效铃数	CK	9.07	2.15	4.60	12.80	23.70
EBN	H	5.08	2.37	2.10	14.70	46.65
有效果枝台数	CK	8.00	2.23	3.80	12.70	27.88
EB	H	4.59	2.00	1.80	11.00	43.57
每铃室种子数	CK	6.44	0.40	5.60	7.40	6.21
SNPL	H	5.27	0.44	4.50	6.30	8.35
叶枝数	CK	14.23	1.30	10.60	16.80	9.14
BN	H	15.63	1.05	13.50	17.80	6.72
籽棉(g)	CK	145.90	22.64	67.55	176.75	15.52
CSY	H	128.06	18.08	68.55	163.13	14.12
皮棉(g)	CK	48.36	11.27	12.84	66.61	23.30
CLY	H	40.14	8.11	13.09	54.18	20.20
衣分(%)	CK	33.09	4.02	19.10	41.23	12.12
LP	H	31.40	4.06	19.25	36.42	12.90
单铃重(g)	CK	3.65	0.57	1.69	4.42	15.62
SBW	H	3.20	0.45	1.71	4.08	14.06
马克隆	CK	4.71	0.57	3.77	6.95	12.10
MIC	H	4.74	0.64	3.93	6.89	13.50
上半部平均长度(mm)	CK	34.49	3.31	20.05	39.49	9.60
FL	H	34.62	4.25	19.66	40.78	12.28
整齐度指数(%)	CK	86.24	3.08	73.02	90.42	3.57
LU	H	86.32	3.29	74.34	91.23	3.81
断裂比强度(cN/tex)	CK	38.92	4.86	22.95	49.60	12.49
FS	H	36.08	5.37	23.04	45.68	14.88
伸长率(%)	CK	8.81	1.76	6.01	12.94	19.98
EL	H	10.41	2.31	6.89	14.03	22.19

BSR: Buds shedding rate; Fv/Fm: Maximal photochemical efficiency of PS II; PH: Plant Height; SBN: Sympodial branch node;

HFNFB: height of the frist node fruit branch; EBN: Effective boll number; EB: Effective fruit branch number; SNPL: Seed number

per locule; BN: Monopodial branch number; CSY: Cotton seed yield; CLY: Cotton lint yield; SBW: single boll weight; MIC:

Micronaire; FL: Fibre length; LU: Length uniformity; FS: Fiber strength; EL: Elongation; The same as below

2.2.2 36 份极端性状海岛棉资源花粉活力检测 利用 TTC 染色法对 36 份海岛棉资源进行了系统的花粉活力检测（表 3，图 7），检测结果显示出明显的活力分布差异：其中，有 1 份材料展现出了极高的花粉活力，超过了 90%；11 份材料则表现出较高的花粉活力，活力值介于 80%至 90%之间；另有 15 份材料的花粉活力处于中等水平，活力值在 70%至 80%的范围内；而剩余的 9 份材料则显示出较低的花粉活力，活力值低于 70%。

表 3 36 份极端海岛棉资源花粉活力

Table 3 Pollen viability of 36 extreme *Gossypium barbadense* L. resources

排序	材料名称	花粉活力 (%)	排序	材料名称	花粉活力 (%)	排序	材料名称	花粉活力 (%)
Ranking	Name of material	Pollen viability	Ranking	Name of material	Pollen viability	Ranking	Name of material	Pollen viability
1	DC220	92.86	13	GB25	79.51	25	DC147	71.68
2	GB02	89.90	14	DC43	79.37	26	DC215	70.43
3	DC40	89.49	15	DC151	78.57	27	DC73	70.23
4	DC158	88.91	16	DC288	78.26	28	DC276	69.91
5	DC315	86.37	17	DC7	77.90	29	GB200	69.84
6	GB84	86.05	18	GB206	76.84	30	GB131	69.19
7	DC159	84.88	19	GB174	75.72	31	DC107	68.90
8	DC275	84.78	20	DC164	75.64	32	GB109	67.11
9	DC175	84.25	21	DC115	74.32	33	GB09	66.99
10	DC313	82.28	22	DC281	73.79	34	GB210	66.35
11	GB22	82.18	23	DC304	73.67	35	DC84	32.45
12	DC122	81.96	24	GB150	72.37	36	GB113	29.55

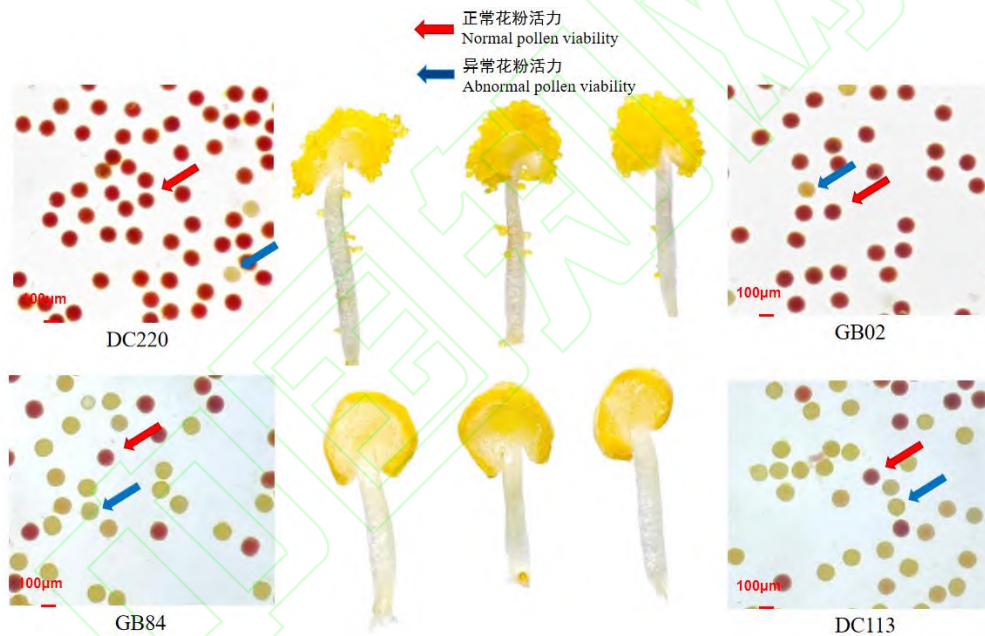


图7 极端花粉活力材料与花药表型

Fig.7 Extreme pollen viability materials and anther phenotype

2.2.3 36 份极端性状海岛棉资源主成分分析 利用高温胁迫下有显著差异的 14 个指标耐热系数进行主成分分析, 由表 4 可知, 特征值>1 的 6 个主成分解释的总方差达到 85.34%。主成分 1 的特征值为 4.136, 贡献率为 29.544%, 其中有效果枝数, 有效铃数的荷载最大, 代表产量构成因子; 主成分 2 的特征值为 2.106, 贡献率为 15.040%, 其中叶枝数的荷载最大, 代表光合作用因子; 主成分 3 的特征值为 1.808, 贡献率为 12.913%, 其中断裂比强度的荷载最大, 代表纤维品质因子; 主成分 4 的特征值为 1.450, 贡献率为 10.360%, 其中第一果枝节位的荷载最大, 代表营养生长因子; 主成分 5 的特征值为 1.346, 贡献率为 9.615%, 其

中每铃室种子数的荷载最大，代表生殖育性因子；主成分 6 的特征值为 1.101，贡献率为 7.866%，其中蕾铃脱落率的荷载最大，代表高温耐性因子。

表 4 主成分分析因子载荷矩阵和贡献率

Table 4 Principal Component Analysis Factor Load Matrix and Contribution Rate

性状 Trait	主成分 Principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
有效果枝台数 EB	0.833	0.380	-0.078	-0.159	-0.156	-0.144
有效铃数 EBN	0.825	0.388	-0.131	-0.151	-0.139	-0.093
单铃重 (g) SBW	0.809	-0.520	0.059	0.018	0.215	0.084
籽棉 (g) CSY	0.809	-0.520	0.059	0.018	0.215	0.084
皮棉 (g) CLY	0.795	-0.465	0.271	0.018	0.123	0.063
叶枝数 BN	0.416	0.691	0.068	0.105	-0.028	0.384
株高 (cm) PH	0.348	0.556	-0.224	-0.248	0.341	0.350
断裂比强度 (cN/tex) FS	-0.158	-0.131	0.666	-0.503	-0.191	0.206
始节高 (cm) HFNFB	-0.037	-0.208	-0.627	-0.466	-0.174	0.257
伸长率 (%) EL	-0.099	-0.078	-0.600	0.528	0.398	-0.009
花柱长度 (mm) STYL	-0.339	0.317	0.537	0.040	0.437	-0.174
第一果枝节位 SBN	0.146	0.108	0.375	0.666	-0.146	0.506
每铃室种子数 SNPL	0.232	-0.056	-0.068	0.356	-0.795	-0.129
蕾铃脱落率 (%) BSR	-0.548	-0.295	-0.140	-0.084	-0.087	0.609
特征值 Eigenvalue	4.136	2.106	1.808	1.450	1.346	1.101
贡献率 (%) Contribute rate	29.544	15.040	12.913	10.360	9.615	7.866
累计贡献率 (%) Cumulative Contribute rate	29.54	44.58	57.50	67.86	77.47	85.34

2.2.4 36 份极端性状海岛棉资源聚类分析 根据指标权重和隶属函数计算耐热性综合度量值

(D) (详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241109001>, 附表 2), D 值越大表明其耐

热能力越强，反之其对高温越敏感。结果发现高温处理的 D 值范围在 0.272-0.722 之间。根据 D 值综合划分不同材料的类别。根据聚类结果，36 份海岛棉资源被聚为 4 类，第一类为耐热材料，第二类为中抗材料，第三类为敏感材料，第四类为高敏材料（图 8），其中第一类主要包括：GB25,GB22 等 5 份材料；第二类主要包括：GB02,GB131 等 17 份材料，第三类主要包括：GB150,DC304 等 11 份材料，第四类主要包括：GB206,DC175 等 3 份材料。最后选择综合耐高温性前五的海岛棉资源进行展示（图 9）。

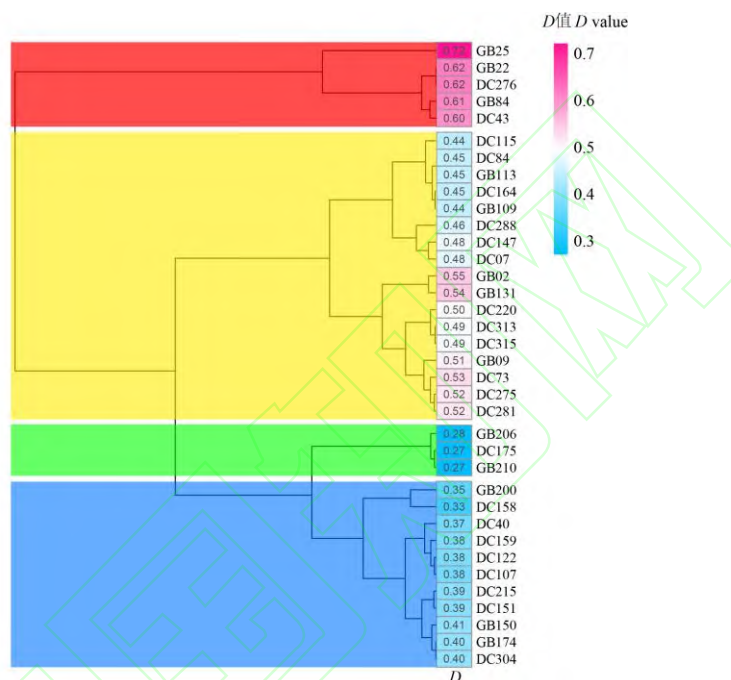


图 8 36 份海岛棉极端材料聚类分析

Fig.8 Cluster analysis of 36 extreme materials of *Gossypium barbadense* L.

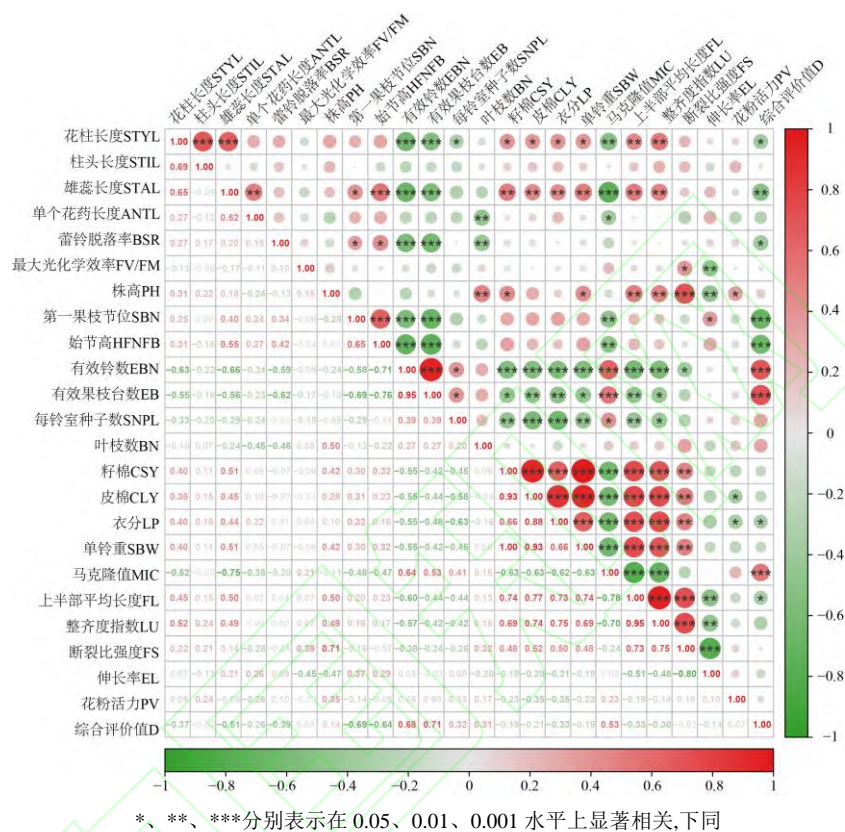


图 9 综合耐高温性前五的海岛棉资源表型

Fig.9 Phenotypic analysis of the top five heat-tolerant *Gossypium barbadense* L. resources

2.2.5 36 份极端性状海岛棉资源表型性状相关性分析 为进一步探究各性状与花粉活力和耐热综合评价值（D 值）之间的关系，利用胁迫后的 22 个性状与花粉活力和 D 值间进行相关性分析（图 10）。

由图 8 可知，有效铃数，有效果枝数和马克隆值 3 个性状与 D 值存在显著正相关；花柱长度、雄蕊长度、蕾铃脱落率、第一果枝节位、始节高、衣分和上半部平均长度 7 个性状与 D 值存在显著负相关，其余 13 个性状与 D 之间不存在显著关系。株高与花粉活力存在显著正相关；皮棉与衣分与花粉活力存在显著负相关，其余 20 个性状与花粉活力之间不存在显著关系。



* and ** indicated significant correlation at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively, the same as below

图 10 36 份海岛棉资源农艺性状相关性分析

Fig.10 Correlation analysis of agronomic traits in 36 *Gossypium barbadense* L. resources

2.2.2.6 4 个花器官性状、衣分性状、花粉活力、综合评价的多元回归分析 利用筛选极端材料的 5 个性状与 D 值间进行了拟合回归分析（图 11A-E）。结果显示 4 个花性状及衣分与 D 值间的决定系数并不高（表 5），决定系数最高的为雄蕊长度与 D 值间 ($R^2=0.26$)，决定系数最低的为柱头长度与 D 值间 ($R^2=0.01$)。拟合结果显示 5 个性状与 D 值间均为负相关关系，该结果与相关性分析结果保持一致。

接着我们选择了在胁迫后有显著性差异的花性状—花柱长度和花粉活力及综合评价进行了拟合回归分析（图 11E-G），旨在探讨三者之间的关系。结果显示 3 个指标之间的决定系数均较低。决定系数最高的为花柱长度与 D 值间 ($R^2=0.14$)，花柱长度与花粉活力、花粉活力与综合评价 (D) 间的决定系数均小于 0.01。拟合结果显示，花柱长度与 D 值之间存在正相关关系，花粉活力则与花柱长度及 D 值均呈负相关关系，这一结论与相关性分

析的结果相吻合。

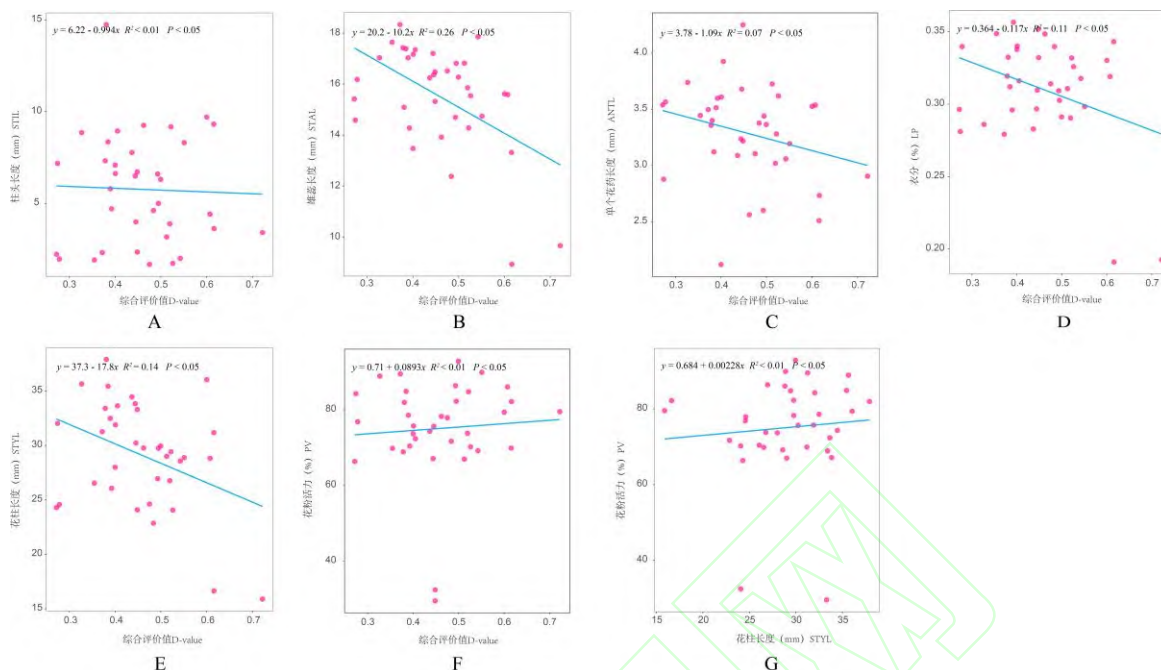


图 11 花器官性状、衣分、花粉活力与 D 值间拟合回归分析

Fig.11 Fitting regression analysis between flower organ traits, Lint percentage, pollen activity and D value

表 5 36 份极端性状海岛棉的综合评价分布

Table 5 Comprehensive value distribution of 36 *Gossypium barbadense* L. with extreme traits

条件 Conditions	材料 Material	花柱长度 (D) STYL(D)	柱头长 度 (D) STIL(D)	材料 Material	雄蕊长度 (D) STAL(D)	材料 Material	单个花药 长度 (D) ANTL(D)	材料 Material	衣分 (D) LP(D)
最大 Top	DC43	0.600	DC122 0.381	DC40	0.372	GB150	0.405	GB84	0.607
	DC151	0.389	DC107 0.378	DC275	0.522	DC84	0.448	GB206	0.278
	GB174	0.401	DC115 0.437	GB109	0.444	GB113	0.448	GB200	0.355
	DC158	0.327	GB02 0.551	DC164	0.445	DC175	0.274	/	/
	平均	0.429	平均 0.437	平均	0.446	平均	0.394	平均	0.413
最小 Bottom	DC220	0.499	GB131 0.542	DC288	0.462	DC159	0.384	DC313	0.495
	DC7	0.475	DC281 0.519	DC276	0.616	DC304	0.400	GB25	0.722
	GB25	0.722	GB210 0.272	DC215	0.392	DC315	0.493	GB22	0.616
	GB22	0.616	DC73 0.526	DC147	0.484	GB09	0.513	/	/
	平均	0.578	平均 0.465	平均	0.488	平均	0.448	平均	0.611

3 讨论

棉花在生殖发育期极易受到高温胁迫影响，导致减产^[24]，深入研究棉花在生殖发育期高温环境下的植株变化情况，显得十分关键和重要^[25]。目前，对于海岛棉不同花器官指标的研究鲜有提及。为了深入探究拥有极端花器官组织的材料对高温胁迫的响应，本研究从 534 份海岛棉资源中筛选出 36 份具有极端花器官性状和产量性状的材料。随后，在海岛棉

的花期，进行高温胁迫实验，观察和分析这些材料在高温环境下的具体表现，鉴定出了相对耐高温与敏高温的种质资源，聚类分析将 36 份海岛棉种质资源分为了 4 类，第一类为耐热材料 5 份，第二类为中抗材料 17 份，第三类为敏感材料 11 份，第四类为高敏材料 3 份。不同类别材料均表现出较明显的差异，在对传统的农艺性状评价的基础上，创新地引入了花器官性状，通过系统的数据收集和分析，筛选出了一批具有高温胁迫育种价值的海岛棉极端种质资源。

在玉米中，高温会导致花粉败育，花粉活力降低，影响花丝的正常生长和授粉受精过程，降低结实率，导致玉米粒的败育和空秆率增加，影响玉米的产量和品质^[26-27]。研究表明，番茄在高温胁迫下会出现落花落果现象，导致坐果率下降，影响番茄果实的正常膨大，使得果实变小、形状不规则，降低果实的糖度和口感^[28-29]。总之，植物的耐高温机制非常复杂，许多研究在指标选择上做了大量研究。故此，本研究基于详细的描述性统计分析发现衣分的变异系数最小为 8.57%，而柱头长度的变异系数最大为 26.56%，利用主成分分析发现 6 个主成分解释了总方差的 85.34%。通过相关性分析发现，有效铃数、有效果枝数等 3 个性状与耐热性综合度量值（D）存在显著正相关，而花柱长度、雄蕊长度等 7 性状则与 D 值存在显著负相关。

另一方面，高温胁迫会降低结实率，Wang 等^[30]的研究表明，当水稻抽穗开花期遭遇持续高温时，会导致花粉活力下降、柱头授粉能力减弱，结实率可显著下降 20%~30%。Fang 等^[31]研究发现高温影响马铃薯的块茎发育，高温条件下，马铃薯块茎容易形成小而多的畸形薯，降低块茎的淀粉含量和口感，还会导致马铃薯植株早衰，影响产量。以上研究主要集中在株高、光合速率等传统农艺性状研究上，而花器官形状由于受环境因素和测定难度影响，较少作为种质资源评价的纳入因素^[32-33]。在棉花上，Zhang 等^[34]的研究表明，棉花花期处于夏季高温期，高温胁迫会导致花败育，这说明花器官形状对于棉花种质资源评价及新品种发掘具有重要意义。过去研究多集中于对棉花常规农艺性状的评估，较少关注花器官性状对高温胁迫的响应。鉴于此，本研究通过纳入花柱长度、柱头长度、雄蕊长度和单个花药长度 4 个花器官性状，综合分析花器官性状与耐高温性的关系。

在本研究中，我们深入探讨了花器官性状、衣分、花粉活力与综合评价价值之间的关联性。结果显示，花器官性状、衣分和花粉活力与综合评价价值的相关性均不显著。尽管花器官性状、衣分、花粉活力作为植物生殖生长的关键指标，在高温胁迫下的变化能为我们提供宝贵信息，但它们仅能反映植物某一方面的生理状况或功能，无法全面衡量植物的整体适应性和抗逆性。此外，由于花器官性状、衣分和花粉活力在高温胁迫下的变化程度和重要性可能各不相

同,因此综合评价价值的变化与这三者之间可能存在不一致性。本研究采用的综合评价价值是基于高温胁迫下显著变化的14个性状综合考量得出的,这些性状涵盖了形态结构、生理生化、生长发育等多个维度,从而能更精确地反映植物在高温环境下的整体适应状况。尽管花器官性状、衣分和花粉活力与综合评价价值的相关性并不显著,但它们在评估植物适应性和抗逆性方面依然扮演着重要角色,不容忽视。

参考文献

- [1] 宋旭东,朱广龙,张舒钰,章慧敏,周广飞,张振良,冒宇翔,陆虎华,陈国清,石明亮,薛林,周桂生,郝德荣.长江中下游地区糯玉米花期耐热性鉴定及评价指标筛选.作物学报,2024,50(01):172-186
Song D X, Zhu G L, Zhang S Y, Zhang H M, Zhou G F, Zhang Z L, Mao Y X, Lu H H, Chen G Q, Shi M L, Xue L, Zhou G L, He D R. Identification of heat tolerance of waxy maizes at flowering stage and screening of evaluation indexes in the middle and lower reaches of Yangtze River region. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(1): 172-186
- [2] 王雷,郭岩,杨淑华.非生物胁迫与环境适应性育种的现状及对策.中国科学:生命科学,2021,51(10):1424-1434
Wang L, Guo Y, Yang S H. Designed breeding for adaptation of crops to environmental abiotic stresses. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2021, 51(10): 1424-1434
- [3] 薛红卫,焦雨铃,徐通达,丁兆军,武国章,高泓博,王佳伟,杜斐,唐文鑫,于子鹏,孔祥培,苏彤.植物细胞与发育生物学研究进展.植物生理学报,2023,59(12):2145-2187
Xue H W, Jiao Y L, Xu T D, Ding Z J, Wu G Z, Gao H B, Wang J W, Du F, Tang W X, Yu Z P, Kong X P, Su T. Recent advances in plant cell and developmental biology. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(12): 2145-2187
- [4] 刘刚,夏快飞,吴艳,张明永,张再君,杨金松,邱东峰.水稻耐热新种质R203的创制与应用.中国农业科学,2023,56(3):405-415
Liu G, Xia G F, Wu Y, Zhang M Y, Zhang Z J, Yang J S, Qiu D F. Breeding and application of a new thermo-tolerance rice germplasm R203. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(3): 405-415
- [5] Zhang H, Zhou J F, Kan Y, Shan J X, Ye W W, Dong N Q, Guo T, Xiang Y H, Yang Y B, Li Y C, Zhao H Yu, Yu H X, Lu Z Q, Guo S Q, Lei J J, Liao B, Mu X R, Cao Y J, Yu J J, Lin Y S, Lin H X. A genetic module at one locus in rice protects chloroplasts to enhance thermotolerance. *Science*, 2022, 376(6599): 1293-1300
- [6] 卞中,曹东平,庄文姝,张舒玮,刘巧泉,张林.水稻分子设计育种启示:传统与现代相结合.遗传,2023,45(9):718-740

- Bian Z, Cao D P, Zhuang W S, Zhang S W, Liu Q Q, Zhang L. Revelation of rice molecular design breeding: The blend of tradition and modernity. *Hereditas*, 2023, 45(9): 718-740
- [7] Aswin M S, Kiran, Biswajit L, Yogesh A S, Priya P, Asit P D, Songthat W H. The role of genetics and plant breeding for crop improvement: Current progress and future prospects. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2023, 35(20): 190-202
- [8] Yang W J, Han H M, Guo B J, Qi K, Zhang J P, Zhou S H, Yang X M, Li X Q, Lu Y Q, Liu W H, Liu X, Li L H. The genomic variation and differentially expressed genes on the 6P chromosomes in wheat-agropyron cristatum addition lines 5113 and II-30-5 confer different desirable traits. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(8): 7056-7070
- [9] 贾倩, 叶飒, 张辉, 串丽敏, 赵静娟. 基于核心专利识别视角的作物生物育种核心技术研究. *中国农业科技导报*, 2024, 26(8): 1-14
- Jia Q, Ye S, Zhang H, Chuan L M, Zhao J J. Research on core technology of crop biological breeding based on the perspective of core patent identification. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(8): 1-14
- [10] Taehoon K, Andrew E, Claire Q, Hannah M, Germán S, Kevin B. Global identification of LIM genes in response to different heat stress regimes in *Lactuca sativa*. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 751-763
- [11] 蔡永生, 郑凯, 王怡, 贺宏伟, 曲延英, 倪志勇, 陈全家. 海岛棉GbTCP14基因的克隆与表达分析. *西北植物学报*, 2018, 38(3): 401-408
- Cai Y S, Zheng K, Wang Y, He H W, Qu Y Y, Ni Z Y, Chen Q J. Cloning and expression analysis of GbTCP14 gene in *Gossypium barbadense*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(3): 401-408
- [12] Chen Y C S, Hubmeier C, Tran M, Martens A, Cerny R E, Sammons R D, CaJacob C. Expression of CP4 EPSPS in microspores and tapetum cells of cotton (*Gossypium hirsutum*) is critical for male reproductive development in response to late-stage glyphosate applications. *Plant Biotechnology Journal*, 2006, 4(5): 477-487
- [13] Ma Y Z, Min L, Wang J D, Li Y Y, Wu Y L, Hu Q, Ding Y H, Wang M J, Liang Y J, Gong Z L, Xie S, Su X J, Wang C Z, Zhao Y L, Fang Q D, Li Y L, Chi H B, Chen M, Khan A H, Lindsey K, Zhu L F, Li X Y; Zhang X L. Combined transcriptome GWAS and TWAS reveal genetic elements leading to male sterility during high temperature stress in cotton. *The New phytologist*, 2021, 231(1): 165-181
- [14] 李博, 张梦, 张学贤, 郭立平, 戚廷香, 唐会妮, 王瑞杰, 王海林, 乔秀琴, 吴建勇, 邢朝柱. 棉花胞质雄性不育的胞质效应研究现状及未来展望. *棉花学报*, 2023, 35(5): 429-438

- Li B, Zhang M, Zhang X X, Guo L P, Qi Y X, Tang H N, Wang R J, Wang H L, Qiao X Q, Wu J Y, Xing Z Z. Current status and future prospects of cytoplasmic effects of cytoplasmic male sterility in cotton. *Cotton Science*, 2023, 35(5): 429-438
- [15] 宋桂成, 王苗苗, 陈全战, 张培通, 唐灿明. 陆地棉花器官耐高温性的评价指标研究. *棉花学报*, 2015, 27(6): 495-505
- Song G C, Wang M M, Chen Q Z, Zhang P T, Tang C M. Evaluation of the high-temperature tolerance of floral organs in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Cotton Science*, 2015, 27(6): 495-505
- [16] Shrestha S, Mahat J, Shrestha J, K.C. M, Paudel K. Influence of high-temperature stress on rice growth and development. A review. *Heliyon*, 2022, 8(12): e12651
- [17] Zahid K R, Ali F, Shah F, et al. Response and tolerance mechanism of cotton *Gossypium hirsutum* L. to elevated temperature stress: A review. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1569-1579
- [18] Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. *Science*, 2003, 299(5609): 1032-1032
- [19] McMichael B, Lascano J R. Evaluation of hydraulic lift in cotton (*Gossypium hirsutum* L) germplasm. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 68(1): 26-30
- [20] K A, M.A R, M.Santha L P, P D, C L, Praduman Y, R.D P, J.Jawahar L, C S. Trait-specific accessions in global castor (*Ricinus communis* L) germplasm core set for utilization in castor improvement. *Industrial Crops&Products*, 2018, 112(1): 766-774
- [21] Mizanur R, Sujan M, Mukhlesur R. Genome-wide association study of heat stress-tolerance traits in spring-type *Brassica napus* L under controlled conditions. *The Crop Journal*, 2018, 6(2): 115-125
- [22] 李江博, 叶盛, 常国斌, 高曼, 王霞, 帕丽旦·艾海提, 曲延英, 郑凯, 陈全家. 213份海岛棉种质资源的遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(11): 1857-1874
- Li J B, Ye S, Chang G B, Gao M, Wang X, Palida A H T, Qu Y Y, Zheng K, Chen Q J. Genetic diversity analysis of 213 *Gossypium barbadense* L. germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(11): 1857-1874
- [23] 杜雄明, 周忠丽. 棉花种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005: 1-89
- Du X M, Zhou Z L. Descriptors and data standard for cotton. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 1-89
- [24] 赵杰堂. 蔗糖转化酶在高等植物生长发育及胁迫响应中的功能研究进展. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(03): 352-358
- Zhao J T. Advances in research on invertase in plant development and response to abiotic and biotic

- stresses. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2016, 24(03): 352-358
- [25] 张友昌, 黄晓莉, 胡爱兵, 李洪菊, 冯常辉, 李蔚, 张贤红, 罗艳萍, 杨国正. 长江流域麦/油后直播棉花播种时间下限研究. *棉花学报*, 2021, 33(2): 155-168
- Zhang Y C, Huang X L, Hu A B, Li H J, Feng C H, Li W, Zhang X H, Luo Y P, Yang G Z. Study on the limitation of late sowing date on cotton planted after wheat/rape in the Yangtze River Basin. *Cotton Science*, 2021, 33(2): 155-168
- [26] Dong X, Li B L, Yan Z Z, Guan L, Huang S B, Li S J, Qi Z Y, Tang L, Tian H L, Fu Z J, Yang H. Impacts of high temperature, relative air humidity, and vapor pressure deficit on the seed set of contrasting maize genotypes during flowering. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(9): 2955-2969
- [27] Li B B, Chen X M, Deng T, Zhao X, Li F, Zhang B C, Wang X, Shen S, Zhou S L. Timing effect of high temperature exposure on the plasticity of internode and plant architecture in maize. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(2): 551-565
- [28] Elsayed E, Laura Z, Tariq M, Naeema E, Maryam A Q, Nafeesath S, Aisha A K, Mohammed M M, Richard T, Dong C M. Genotypic selection using quantitative trait loci for better productivity under high temperature stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L). *Horticulturae*, 2024, 10(8): 874-891
- [29] Zhou R, Yu X Q, Ottosen C O, Zhao T M. High throughput sequencing of circRNAs in tomato leaves responding to multiple stresses of drought and heat. *Horticultural Plant Journal*, 2020, 6(1): 34-38
- [30] Wang Y L, Wang L, Zhou J X, Hu S B, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K, Zeng Y J, Shi Q H, Zhu D F, Zhang Y P. Research progress on heat stress of rice at flowering stage. *Rice Science*, 2019, 26(1): 1-10
- [31] Fang G N, Yang S W, Ruan B P, He M M, Su W, Zhou Y, Wang J, Yang S L. Research progress on physiological, biochemical, and molecular mechanisms of potato in response to drought and high temperature. *Horticulturae*, 2024, 10(8): 827-850
- [32] 罗韶凡, 蒋凯, 黄卫昌. 植物花距表型趋同进化和发育机制多样化的研究进展. *生物多样性*, 2023, 31(11): 194-205
- Luo S F, Jiang K, Huang W C. Advances in the convergent evolution of phenotypes and diversification of developmental mechanisms of floral spurs. *Biodiversity Science*, 2023, 31(11): 194-205
- [33] 吴佳俊, 涂燃冉, 张秋丽, 邹沁雯, 孙志豪, 王宏, 何光华. 过表达水稻OsPIN2通过减弱地上部重力反应增大分蘖角度. *作物学报*, 2024, 50(8): 1-9
- Wu J J, Tu R R, Zhang Q L, Zou Q W, Sun Z H, Wang H, He G H. Overexpression of OsPIN2 increases tiller angle by reducing shoot gravitropic response in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(8): 1-9

- [34] Zhang R, Zhou L L, Li Y L, Ma H H, Li Y W, Ma Y Z, Lv R J, Yang J, Wang W R, Alifu A, Zhang X L, Kong J, Min L. Rapid identification of pollen- and anther-specific genes in response to high-temperature stress based on transcriptome profiling analysis in cotton. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(6): 3378-3399

