



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: 不同年代籼稻品种主要农艺性状和耐热性差异
作者: 刘嘉俊, 崔迪, 杨窑龙, 马小定, 夏秀忠, 邱东峰, 黎小冰, 韩冰, 郭晓红, 韩龙植
DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.20250305001
网络首发日期: 2025-04-23
引用格式: 刘嘉俊, 崔迪, 杨窑龙, 马小定, 夏秀忠, 邱东峰, 黎小冰, 韩冰, 郭晓红, 韩龙植. 不同年代籼稻品种主要农艺性状和耐热性差异[J/OL]. 植物遗传资源学报. <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250305001>



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。

不同年代籼稻品种主要农艺性状和耐热性差异

刘嘉俊^{1,2}, 崔迪², 杨窑龙³, 马小定², 夏秀忠⁴, 邱东峰⁵, 黎小冰⁶, 韩冰², 郭晓红¹, 韩龙植²

(¹黑龙江八一农垦大学农学院, 大庆 163319; ²中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部粮食作物基因资源评价利用重点实验室/作物基因资源与育种全国重点实验室, 北京 100081; ³中国水稻研究所/水稻生物育种全国重点实验室, 杭州 311401; ⁴广西壮族自治区农业科学院水稻研究所/广西水稻遗传育种重点实验室, 南宁 530007; ⁵湖北省农业科学院粮食作物研究所, 武汉 430064; ⁶贵州省农业科学院农作物品种资源研究所, 贵阳 550006)

摘要:我国籼稻生产正面临着病虫害、热害等生物及非生物灾害的严峻挑战, 发掘能够适应气候环境变化的优异籼稻种质资源是当前及未来籼稻育种和种业的迫切需求。本研究以 654 份来源于我国南方各省的不同年代籼稻品种作为试验材料, 在广西南宁、贵州贵阳、湖北荆州、浙江杭州等 4 种异地环境下进行主要农艺性状的鉴定评价, 并在人工培养箱进行苗期耐热性鉴定评价。结果表明, 在异地环境下水稻主要农艺性状有明显的表型差异, 纬度较高、海拔较低的荆州和杭州鉴定点水稻单株产量高于纬度相对低、海拔较高的贵阳和南宁鉴定点; 贵阳鉴定点的海拔明显高于其他鉴定点、夏季温度低于其他鉴定点, 因此与其他鉴定点相比, 水稻结实率、千粒重和谷粒宽有所增加, 但株高、穗长、穗数和单株产量下降。在异地环境条件下, 穗数、穗长、千粒重、谷粒长和谷粒宽的表型值相对较稳定, 其次为抽穗天数、株高、结实率和单株产量, 而穗粒数的稳定性较差; 不同年代籼稻品种抽穗天数、株高、结实率和单株产量的稳定性系数随育种年代的增加而减小, 即随着育种年代的递进, 选育品种的生态能力逐渐提高。不同年代籼稻品种的表型比较表明, 籼稻品种的表型性状总体向着大穗、多粒、长粒、高产和耐热方向得到了遗传改良。聚类分析表明, 年代II (1980 年前育成的品种) 和年代III (1980~1999 年期间育成的品种) 的亲缘关系最近, 其次年代I (地方品种) 与年代II 和年代III 的亲缘关系较近, 年代IV (2000 年后育成的品种) 与其他三个年代品种间亲缘关系较远。本研究还筛选出对异地环境下抽穗期和产量稳定性较好的桂华占、上村早、华南 15、赣早籼 45 号等 30 份籼稻品种, 这些品种对异地环境有较强的适应性, 可作为亲本材料利用于未来的水稻育种中。

关键词: 籼稻; 种质资源; 农艺性状; 苗期耐热性; 稳定性; 亲缘关系

Differences of Main Agronomic Traits and Heat Tolerance for *Indica* Rice Varieties Developed in Different Years

LIU Jiajun^{1,2}, CUI Di², YANG Yaolong³, MA Xiaoding², XIA Xiuzhong⁴, QIU Dongfeng⁵, LI Xiaobing⁶, HAN Bing², GUO Xiaohong¹, HAN Longzhi²

(¹College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319; ²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key laboratory Grain Crop Genetic Resources Evaluation and Utilization Ministry of Agriculture and Rural Affairs/State Key Laboratory of Crop Gene Resources and Breeding, Beijing 100081; ³National Rice Research Institute/State Key Laboratory of Rice Biology and Breeding, Hangzhou 311401; ⁴Rice Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Guangxi Key Laboratory of Rice Genetics and Breeding, Nanning 530007; ⁵Grain Crop Research Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064; ⁶Institute of Crop Germplasm Resources, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006)

Abstract: The production of *Indica* rice in China is facing severe challenges from biological and non-biological disasters such as pests, diseases, and heat stress. There is an urgent need to explore elite *Indica* rice germplasm resources that can adapt to climate. **第一作者**研究方向为水稻种质资源遗传多样性研究, E-mail: lj981643044@163.com; 崔迪为共同第一作者
通信作者: 韩龙植, 研究方向为水稻优异种质资源发掘与创新利用, E-mail: hanlongzhi@caas.cn
郭晓红, 研究方向为水稻生理机制及分子育种, E-mail: guoxh1980@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(32201765); 国家重点研发计划项目(2021YFD1200500); 中国农业科学院创新工程项目; 国家作物种质资源库(NCGRC-2023-02)

Foundation projects: The National Natural Science Foundation of China (32201765); the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1200500); the CAAS Science and Technology Innovation Program; the National Crop Germplasm Resource Center (NCGRC-2023-02)

change for current and future rice breeding. In this study, 654 *indica* rice varieties of different periods from various southern provinces of China were selected as experimental materials. The main agronomic traits were evaluated in four different environments, including Nanning in Guangxi, Guiyang in Guizhou, Jingzhou in Hubei, and Hangzhou in Zhejiang. Additionally, heat tolerance at the seedling stage was assessed in artificial climate incubator. The results showed that there were obvious phenotypic differences in these agronomic traits in the different environments. The rice yield per plant in Jingzhou and Hangzhou with higher latitude and lower altitude was higher than that in Guiyang and Nanning with lower latitude and higher altitude. The altitude of the Guiyang is significantly higher than that of the other sites, and the summer temperature is lower than that of the other sites, therefore, compared to the other sites, the seed setting rate, thousand grain weight, and grain width of rice have increased, while the plant height, panicle length, panicle number per plant, and yield per plant have decreased. Under multiple environmental conditions, the phenotypic values of panicle number per plant, panicle length, thousand grain weight, grain length, and grain width are relatively stable, followed by heading days, plant height, seed setting rate, and yield per plant, while the stability of grain number per panicle is poorer. The stability coefficients of heading days, plant height, seed setting rate, and yield per plant for *Indica* rice varieties in different periods decrease with the increase of breeding periods, indicating that with the progress of periods, the ecological adaptability of the varieties gradually tends to strengthen. The comparison of phenotypes of *Indica* rice varieties in different periods indicates that the phenotypic traits of *Indica* rice varieties have been genetically improved overall towards larger panicle, more grain, longer grain, higher yield, and stronger heat tolerance. The genetic relationship between the varieties in Periods II (varieties developed before 1980) and Periods III (varieties developed between 1980 and 1999) was relatively closer, followed by that between the varieties in Periods II, Periods III and Periods I (landraces), while that between the varieties in Periods IV (varieties developed after 2000) and other periods' were relatively further. Thirty varieties such as Guihuazhan, Shangcun Zao, Huanan 15 and Ganzaoxian 45, were identified, which had better adaptability to the multiple environments and could be used as parent materials for future rice breeding.

Key words: *Indica* rice; germplasm resources; agronomic traits; seedling heat tolerance; stability; genetic relationship

水稻是世界重要的粮食作物之一，全球约 50%的人口以大米为主食，我国约 60%的人口以稻米为主食（<http://data.stats.gov.cn>）。目前我国水稻栽培面积约 2.86×10^7 公顷，其中籼稻栽培面积约占三分之二，籼稻对我国粮食安全、社会稳定和国民经济的发展发挥了重要作用^[1]。近 10 多年来，随着水稻育种技术的快速发展，我国在高产、抗病虫、抗逆等籼稻育种方面取得了显著成效，但随着全球气候生态环境变化和极端气候的频繁出现，目前水稻病虫害、热害等生物及非生物灾害有增无减，当前我国水稻育种面临严峻挑战^[2-5]。因此，通过水稻种质资源的表型精准鉴定评价，发掘对异地不同光温环境条件适应性强、能够适应气候变化的优异资源是当前及未来水稻育种发展的迫切需求。

随着全球气候变暖趋势加剧，极端高温正逐渐成为威胁水稻生产的重要环境因素。有研究显示，中国 1960 年至 2010 年期间的地表年均温升幅已达 1.2°C ，这一数值到本世纪末还将进一步升高 1.05°C ^[6]。在水稻不同生育阶段，若持续遭遇日平均温度超 30°C 、日最高温度超 35°C 或极端高温达 38°C 以上，同时伴随空气相对湿度不足 70% 的复合逆境条件，会引发水稻生长发育障碍、生理功能紊乱及代谢活动抑制，最终导致产量下降^[7]。因此，系统解析水稻响应高温胁迫的分子机制并挖掘其耐热遗传调控因子，为实现水稻稳产增产目标提供重要理论依据。

关于水稻表型性状的鉴定评价研究，前人已有很多报道。赵璐等^[8]对 193 份宁夏和新疆水稻种质资源进行 20 个农艺性状的鉴定表明，14 个性状的遗传变异达到极显著水平，其中单株产量变异系数最大，并根据综合评价价值选择了 HR-3、2012XW-239、宁 218、2012XW-103 等产量性状突出的优异种质。汤翠凤等^[9]对

1189 份云南省水稻地方品种进行 17 个农艺性状的鉴定表明,在云南省不同稻作生态区和稻作民族居住区分布的地方品种间有较大的农艺性状差异。胡标林等^[10]对 1579 份来自全球六大洲的水稻核心种质进行 14 个农艺性状的鉴定表明,亚洲、非洲和大洋洲的水稻资源具有较丰富的表型遗传多样性,其中千粒重、株高、谷粒长宽比等 6 个性状的多样性较高,从中筛选出综合性状突出的越南种质 PI392768。周健等^[11]对不同年代粳稻种质资源进行主要农艺性状的稳定性分析表明,随着年代的增加,选育品种的生态适应性增强,且生育期延长、株高降低、穗数减少、穗粒数增加、结实率提高、千粒重降低。金京花等^[12]对 1775 份栽培稻种质资源进行 20 个农艺性状的鉴定表明,地方品种的剑叶长、株高等 11 个性状表现较丰富的多样性,而选育品种的生育期、有效穗数等 9 个性状表现较丰富的多样性,还发现黑龙江种质有效穗数最多且结实率最高;宁夏种质剑叶特征及穗粒数最优;山东种质株高与穗长最大;新疆种质谷粒形态指标最突出。贺乔乔等^[13]对秦巴地区 198 份籼稻种质资源表型性状分析表明,秦巴地区籼稻的表型性状变异较丰富,多样性程度高,还发现穗长、株高、穗总粒数等 8 个性状是籼稻表型性状变异的主要因素。然而,针对不同年代籼稻品种在异地环境下开展鉴定评价的研究报道目前仍显不足。因此,本研究选取我国南方稻区主要省份收集的 654 份不同历史时期育成的籼稻品种为研究对象,在广西南宁、贵州贵阳、湖北荆州、浙江杭州等 4 种异地环境下开展主要农艺性状的精准鉴定,并在人工培养箱进行苗期耐热性鉴定评价,系统解析不同年代籼稻品种表型特征的变化趋势,筛选在异地环境条件下表型性状稳定性较好、耐热性较强的优异种质,旨在为未来籼稻育种提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 654 份我国南方不同年代种植的常规籼稻代表性主栽品种或育成品种,主要来源于广东省(167 份)、江西省(91 份)、浙江省(76 份)、湖南省(69 份)、广西壮族自治区(57 份)、安徽省(46 份)、福建省(36 份)、贵州省(27 份)、云南省(25 份)、江苏省(20 份)、湖北省(15 份)、河南省(10 份)、上海市(3 份)、四川省(3 份)和台湾省(3 份)。从 654 份材料中挑选 418 份材料进行农艺性状鉴定,根据育成年份,将试验材料分为 4 组。1 组为地方品种(55 份),命名为年代I;2 组为 1980 年前育成的品种(41 份),命名为年代II;3 组为 1980~1999 年期间育成的品种(143 份),命名为年代III;4 组为 2000 年后育成的品种(179 份),命名为年代IV;从 654 份材料中挑选 314 份材料进行苗期耐热性鉴定,包括年代I 20 份、年代II 41 份、年代III 127 份、年代IV 126 份。农艺性状鉴定群体与苗期耐热性鉴定群体包含 78 份重叠种质资源。

1.2 表型鉴定方法

1.2.1 农艺性状鉴定 2017 年、2018 年和 2019 年连续三年分别在广西南宁、贵州贵阳、湖北荆州、浙江杭州等 4 个鉴定点对 418 份籼稻主栽品种进行了异地表型鉴定评价,4 个鉴定点的大致气候特点和地理位置信

息列于表 1。严格遵循各生态区标准化农艺流程实施播种育苗作业，采用 26.7 cm×13.3 cm 规格单本移栽，每份品种设置 5 行×15 穴小区，按顺序排列设计，设置 2 次重复。试验地施用纯氮 150 kg/hm²，各试验区统一执行标准化水分调控与病虫害综合防控方案，确保环境变量精准控制。根据《水稻种质资源描述规范和数据标准》^[14]，每小区选择中间 10 个单株，进行株高、主穗长、单株穗数、穗粒数、结实率、千粒重、单株产量、谷粒长和谷粒宽的调查与测量。抽穗期天数定义为供试材料从播种至抽穗所经历的天数，调查抽穗期后计算。

表 1 4 个鉴定点环境信息

Table 1 Environmental information of the 4 identification location

鉴定地点	日均最高温度 (°C)	日均最低温度 (°C)	海拔 (m)
Identification Location	Average daily maximum temperature	Average daily minimum temperature	Altitude
南宁 Nanning	27	18	100~150
贵阳 Guiyang	18	10	1100~1200
荆州 Jingzhou	22	12	20~50
杭州 Hangzhou	22	13	20~60

1.2.2 耐热性鉴定 从 654 份材料中挑选 314 份材料，参照刘进等^[15]方法进行苗期耐热性鉴定。每份材料挑选 50 粒饱满的种子，经 1%次氯酸钠溶液表面消毒灭菌后，在 25℃下恒温浸种 24 h 然后在 32℃培养箱催芽。催芽 2 d 后，每份材料挑选芽长较一致的种子 12 粒，种植于 96 孔 PCR 板上（每个孔种 1 粒）。然后置于人工培养箱（28℃光照 14 h/24℃黑暗 10 h）培养生长。自出苗起，每 2 至 3 d 更换一次营养液（Yoshida）。待幼苗生长 14 d 后，将培养温度调整至 45℃并进行持续 48 小时的高温处理。使用植物营养测定仪在处理前一天测定叶绿素含量；高温处理结束后，在正常条件下恢复培养 7 d，然后测定叶绿素含量，调查幼苗存活率和幼苗赤枯度。幼苗存活率计算方法为：高温胁迫处理后存活株数/处理幼苗总株数×100%；根据恢复后苗的枯萎程度，分 1、3、5、7、9 五个等级进行幼苗赤枯度的判定（图 1）；以处理前与高温处理后叶绿素含量的差值与处理前叶绿素含量的百分比表示叶绿素降低率。

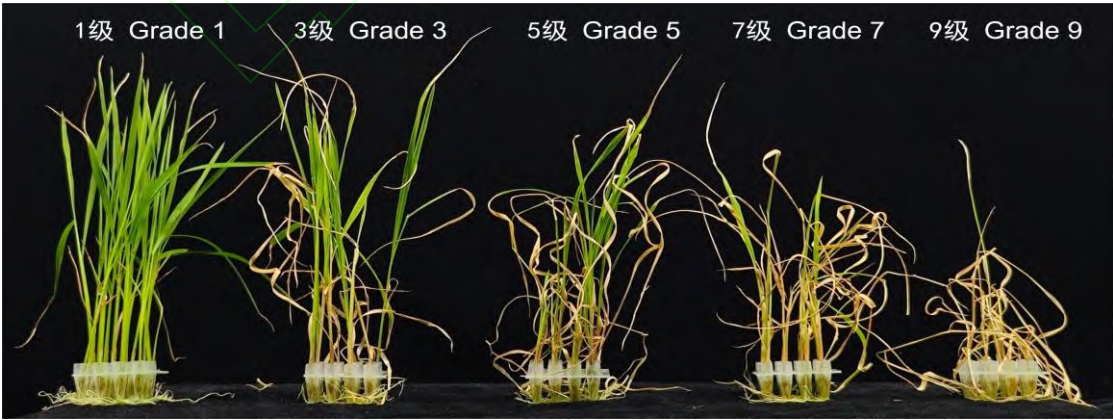


图 1 幼苗赤枯度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seedlings withering degree

1.3 数据统计分析

采用 AMMI 模型, 参照吴为人^[16]的方法计算供试材料的稳定性系数; 稳定性系数越小, 则说明其在异地环境条件下稳定性越好。稳定性系数计算公式如下: $D_i = \sqrt{\sum_{s=1}^c \gamma_{is}^2}$

式中 D_i 表示第 i 个品种的稳定性系数, c 为统计测验显著的 IPCA 的个数, γ_{is} 为第 i 个品种在第 s 个 IPCA 上的得分。使用 IBM SPSS v26 对主要农艺性状的表型数据进行多重比较 ($p < 0.05$); 本研究采用 R 语言与 Origin 软件绘制 AMMI 双标图, 利用 GraphPad Prism 绘制柱状图及小提琴图, 试验数据的统计分析则通过 Excel 工具完成。

2 结果与分析

2.1 异地环境下籼稻主栽品种的主要农艺性状表型差异

图 2 显示了广西南宁、贵州贵阳、湖北荆州及浙江杭州 4 个试验点籼稻品种主要农艺性状的平均值比较结果, 包括抽穗天数、株高、穗长、穗数、穗粒数、结实率、千粒重、单株产量、谷粒长、谷粒宽等性状。籼稻各农艺性状表型值在四个试验点间均呈现明显变异, 表明其表型值受环境因子的明显调控。贵阳点的抽穗天数明显长于其他 3 个鉴定点, 为 97.1 d, 而南宁点的抽穗天数最短, 为 68.2 d。在南宁、荆州和杭州鉴定点的株高明显高于贵阳鉴定点, 其中南宁点的株高最高, 为 116.2 cm, 而贵阳点最矮, 为 93.3 cm。南宁、荆州和杭州鉴定点的穗长较长, 为 25.2~26.0 cm, 而贵阳点的穗长明显小于其他 3 个鉴定点, 为 23.4 cm。荆州点的穗数最多, 明显多于其他 3 个鉴定点, 为 11.5 个, 而贵阳点穗数最少, 为 7.7 个。南宁、贵阳和杭州鉴定点的穗粒数明显多于荆州点, 为 194.5~210.3 粒, 而荆州点的穗粒数为 167.7 粒。贵阳点结实率最高, 为 88.9%, 而荆州点结实率最低, 为 78.0%。贵阳点的千粒重最高, 为 26.0 g, 而荆州点的千粒重最低, 为 24.2 g。荆州点的单株产量最高, 为 31.4 g; 其次为杭州点, 为 25.3 g, 南宁和贵阳点的单株产量低于其他 2 个点, 分别为 23.0 g 和 21.7 g。杭州点的谷粒长最长, 为 9.0 mm, 而南宁点的谷粒长最短, 为 8.1 mm。贵阳点的谷粒宽最宽, 为 2.9 mm, 而南宁点谷粒宽最短, 为 2.7 mm。

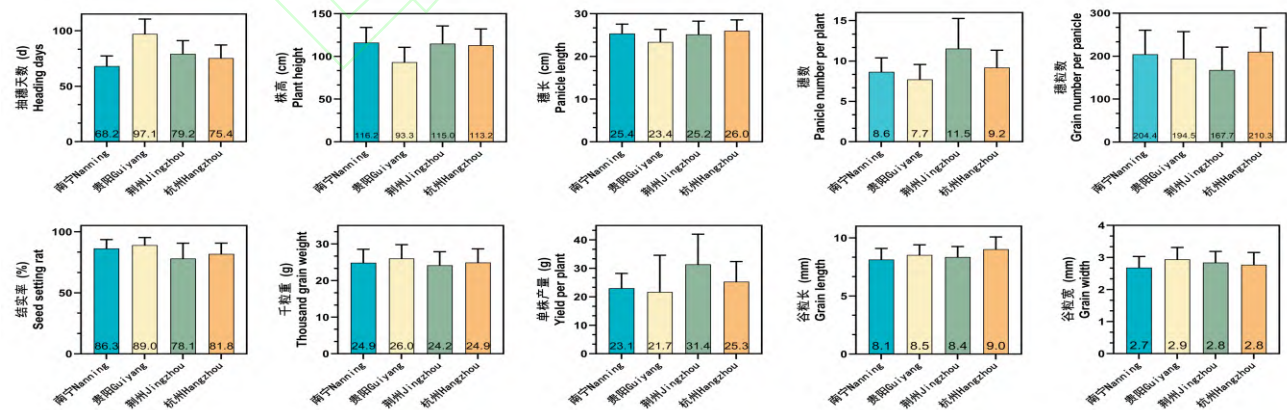


图 2 不同鉴定点籼稻主要农艺性状表型平均值的比较

Fig. 2 Comparison of phenotypic mean values for main agronomic traits of *Indica* rice under different environments

2.2 异地环境下籼稻主栽品种主要农艺性状的稳定性分析

表 2 列出了在南宁、贵阳、荆州和杭州 4 种鉴定环境下 10 个农艺性状的稳定性系数均值、变异范围和变异系数。结果显示，不同农艺性状的稳定性存在明显差异，穗长、穗数、千粒重、谷粒长和谷粒宽表现出高的表型稳定性（稳定性系数 0.118~0.374），说明这些性状受环境变异影响较小；其次是抽穗天数、株高、结实率和单株产量（稳定性系数 0.565~0.786）；而穗粒数则呈现最低稳定性（稳定性系数 1.542），表明其表型表达易受环境条件影响。抽穗天数变异系数最大（79.05%），穗长变异系数最小（47.73%），其余性状变异系数分布在 50.05%~66.50%之间。

表 3 列出了各农艺性状稳定性系数间的相关系数。抽穗天数的稳定性系数与株高、穗长、穗粒数、结实率和千粒重的稳定性系数呈极显著正相关，与穗数、单株产量和谷粒长的稳定性系数呈显著正相关。株高的稳定性系数与抽穗天数、穗长、穗数、穗粒数、千粒重和单株产量的稳定性系数呈极显著正相关。单株产量的稳定性系数与株高、穗数、穗粒数呈极显著相关，与抽穗天数、穗长、结实率呈显著相关。以上结果表明，生育期的稳定性对多数性状的稳定性有显著的影响；株高相对稳定的材料，其抽穗天数和产量构成因素（穗长、穗数、穗粒数、千粒重和单株产量）的表现也相对稳定；多数性状的稳定性对单株产量的稳定性有较大影响。

图 3 展示了 418 份籼稻材料主要农艺性状稳定性的 AMMI 双标图分析结果。材料在图中的位置越接近双坐标原点，表明其相关性状在 4 个鉴定点的表型值变异越小，稳定性越高；反之，距离原点越远的材料，其性状在 4 个鉴定点的表型值变异越大，稳定性越低。穗长、穗数、结实率和单株产量在 4 个鉴定点的表型值变异较大，而株高、千粒重和谷粒长在 4 个鉴定点的表型值变异较小。根据抽穗天数和单株产量的稳定性系数各挑选了 15 份稳定性系数较小的材料，列于表 4。这些材料在不同环境下抽穗天数与单株产量的稳定性系数较低，反映出其生育进程和产量性状在异地条件下保持相对稳定，具备较强的生态适应能力。

将不同年代籼稻品种间的稳定性系数平均值示于图 4。年代Ⅲ和年代Ⅳ的抽穗天数稳定性系数小于其他年代，分别为 0.545 和 0.557；年代Ⅱ和年代Ⅳ的株高稳定性系数小于其他年代，分别为 0.730 和 0.732；年代Ⅳ的结实率稳定性系数均小于其他年代，为 0.668；年代Ⅱ和年代Ⅳ的单株产量稳定性系数小于其他年代。以上说明，随着育种年代的增加，抽穗天数、株高、穗数、结实率和单株产量的稳定性系数趋于减小，意味着随着育种年代的递进，籼稻品种对异地环境的适应性增强。

表 2 不同环境条件下籼稻主要农艺性状的稳定性系数均值、变异范围和变异系数

Table 2 The mean stability coefficients, variation range and coefficient of variation of the main agronomic traits of *Indica* rice under different environments

性状 Traits	稳定性系数均值 Mean Stability parameter	标准差 Standard Deviation	变异范围 Variation Range	变异系数 (%) CV
抽穗天数 (d) HD	0.565	0.447	0.061~3.896	79.05
株高 (cm) PH	0.786	0.393	0.052~2.805	49.94
穗长 (cm) PL	0.374	0.179	0.039~1.159	47.72
穗数 PN	0.336	0.184	0.023~1.857	54.86

穗粒数 GN	1.542	0.814	0.045~5.943	52.79
结实率 (%) SST	0.732	0.413	0.037~3.113	56.45
千粒重 (g) TGW	0.328	0.218	0.037~2.147	66.49
单株产量 (g) PY	0.713	0.415	0.000~2.743	58.23
谷粒长 (mm) GL	0.150	0.099	0.013~0.850	65.84
谷粒宽 (mm) GW	0.118	0.059	0.015~0.720	50.05

HD: Heading days; PH: Plant height; PL: Panicle length; PN: Panicle number per plant; GN: Grain number per panicle; SST: Seed setting rate; TGW: Thousand grain weight; PY: Yield per plant; GL: Grain length; GW: Grain width

表 3 籼稻主要农艺性状稳定性系数间的相关关系

Table 3 Correlation between stability coefficients of main agronomic traits in *Indica* rice

各性状的稳定系数 Stability parameter (SP) of some traits	株高 稳定系数 SP ^{PH}	穗长 稳定系数 SP ^{PL}	穗数 稳定系数 SP ^{PN}	穗粒 稳定系数 SP ^{GN}	结实率 稳定系数 SP ^{SST}	千粒重 稳定系数 SP ^{TGW}	单株产量 稳定系数 SP ^{PY}	谷粒长稳 定系数 SP ^{GL}	谷粒宽 稳定系数 SP ^{GW}
抽穗天数稳定系数 SP ^{HD}	0.280**	0.148**	0.117*	0.132**	0.151**	0.168**	0.119*	0.097*	0.087
株高稳定系数 SP ^{PH}		0.198**	0.217**	0.221**	0.09	0.173**	0.200**	0.05	0.095
穗长稳定系数 SP ^{PL}			0.101*	0.272**	0.08	0.129**	0.112*	0.102*	0.09
穗数稳定系数 SP ^{PN}				0.052	0.069	0.054	0.183**	0.062	0.119*
穗粒数稳定系数 SP ^{GN}					-0.002	0.194**	0.189**	0.077	0.190**
结实率稳定系数 SP ^{SST}						0.189**	0.113*	0.068	0.126*
千粒重稳定系数 SP ^{TGW}							0.094	0.300**	0.297**
单株产量稳定系数 SP ^{PY}								0.063	0.116*
谷粒长稳定系数 SP ^{GL}									0.166**

*表示在 $p < 0.05$ 水平上相关显著; **表示在 $p < 0.01$ 水平上相关显著

* indicates a statistically significant correlation at the $p < 0.05$ level; ** indicates a statistically significant correlation at the $p < 0.01$ level.

表 4 异地环境下籼稻品种主要农艺性状的稳定性系数

Table 4 Stability coefficients of main agronomic traits for *Indica* rice varieties under different environments

序号 Number	种质名称 Name of germplasm	抽穗天数的稳定系数 SP of HD	来源 Source	序号 Number	种质名称 Name of germplasm	单株产量的稳定系数 SP of PY	来源 Source
1	桂华占	0.061	广西	16	华南 15	0.001	广东
2	上村早	0.069	江西	17	赣早籼 45 号	0.007	江西
3	红米 1 号	0.074	湖北	18	浙农 7 号	0.019	浙江
4	莲塘早 4 号	0.086	江西	19	赣晚籼 32 号	0.048	江西
5	胜泰 1 号	0.094	广东	20	南厦 060	0.062	福建
6	野籼占 6 号	0.102	广东	21	竹青	0.070	安徽
7	广二 104	0.102	广东	22	中广香 1 号	0.081	广西
8	HA79317-4	0.105	湖南	23	桂育 9 号	0.082	广西
9	贵辐籼 2 号	0.106	贵州	24	赣早籼 2 号	0.087	江西
10	矮仔占	0.117	广西	25	浙辐 802	0.097	浙江
11	红米粘	0.134	贵州	26	红梅早	0.101	广东
12	玉晚占	0.135	广西	27	嘉兴 8 号	0.117	浙江
13	桂朝 2 号	0.139	湖南	28	二九矮	0.130	广东
14	大叶子早	0.140	安徽	29	镇籼 232	0.132	江苏
15	盐籼 156	0.144	江苏	30	早籼 2430	0.146	安徽

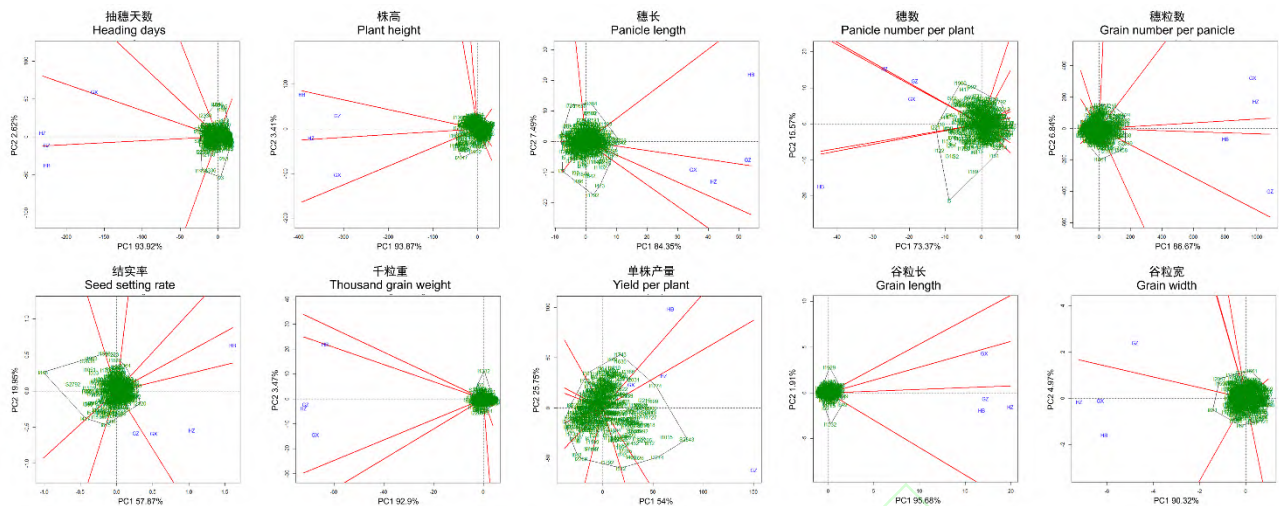


图 3 不同环境下各农艺性状的稳定性系数分布

Fig. 3 Distribution of stability coefficients of agronomic traits under different environments

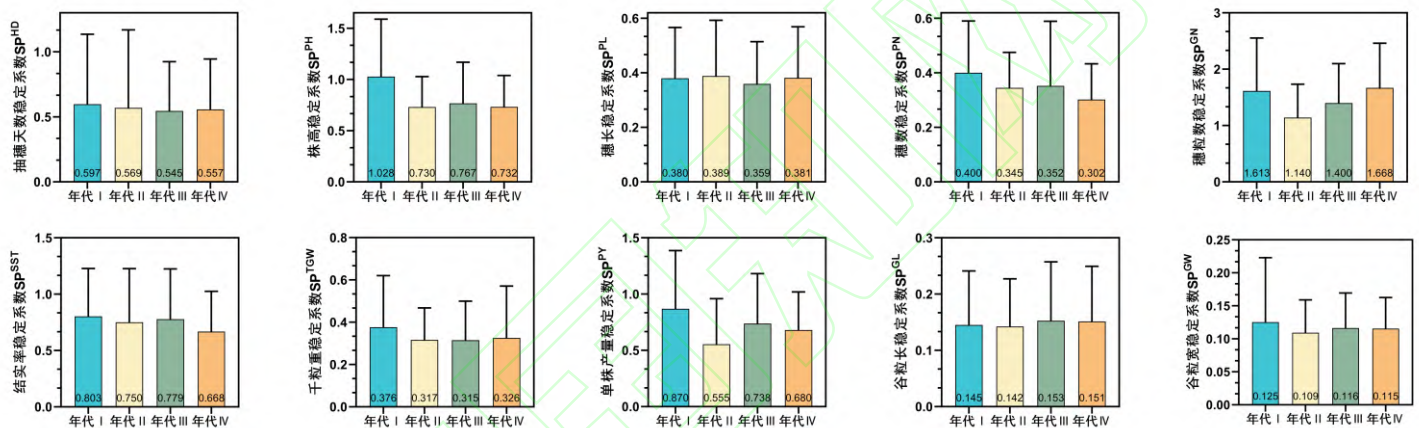


图 4 不同年代籼稻品种主要农艺性状的稳定性系数比较

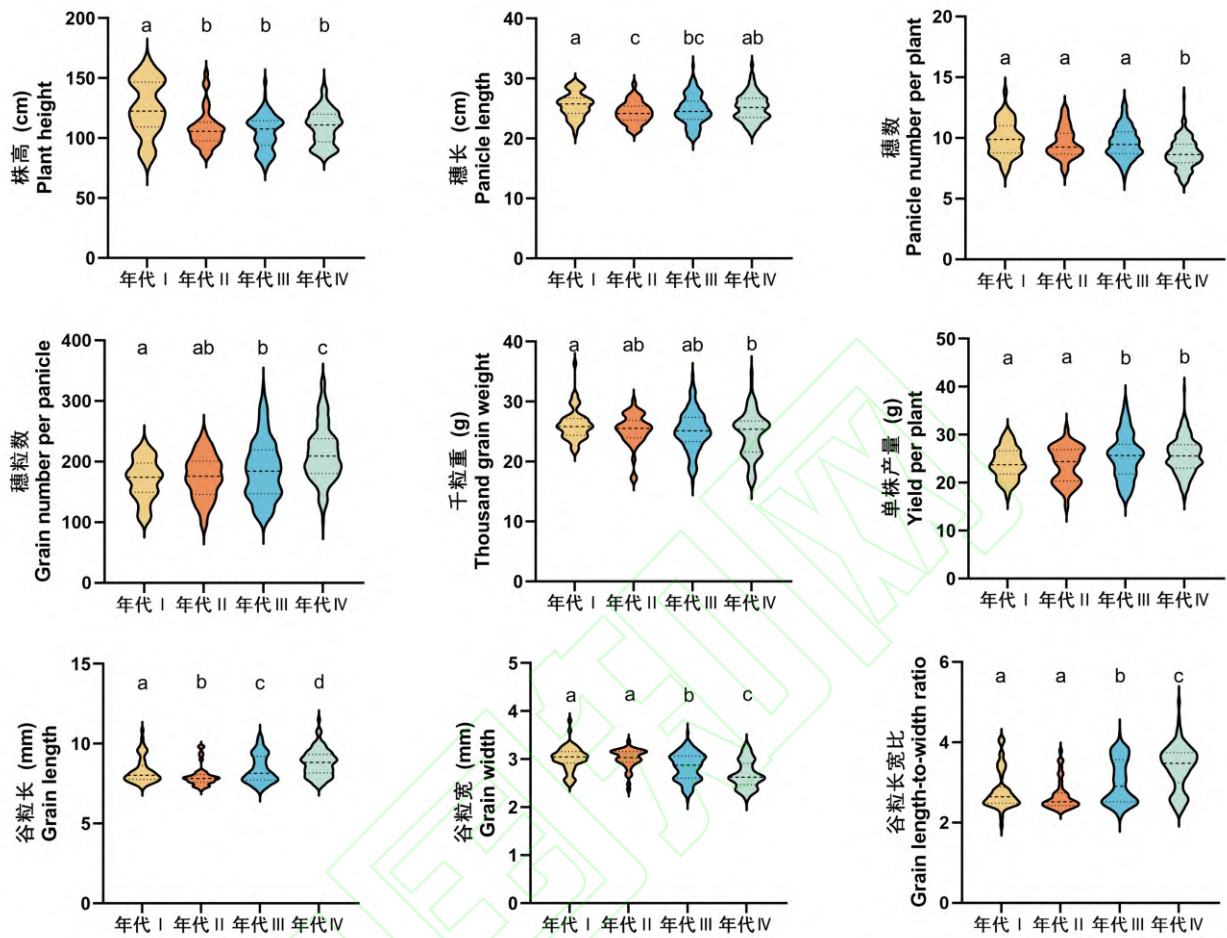
Fig. 4 Comparison of stability coefficients for main agronomic traits among *Indica* rice varieties developed in different years

2.3 不同年代籼稻主栽品种间主要农艺性状和苗期耐热性的表型差异比较

2.3.1 主要农艺性状比较 将不同年代籼稻种群主要农艺性状的表型变异及平均值比较示于图 5 和表 5。结果表明，年代I的株高显著高于年代II、年代III和年代IV，说明地方品种的株高显著高于育成品种。然而，年代II、年代III和年代IV的株高没有显著差异。穗长从年代I到年代II有显著的下降，但年代II到年代IV的穗长显著长于年代I；穗数随着育种年代的增加显著下降，年代I的穗数最多，为 9.93 个，而年代IV的穗数最少，为 8.69 个；穗粒数随着育种年代的增加而显著增加，年代I的穗粒数最少，为 170.03 个，而年代IV的穗粒数最多，为 212.22 个；千粒重随着育种年代的增加显著下降，年代I的千粒重最高，为 26.14 g，而年代IV的千粒重最低，为 24.54 g；与年代II相比，年代III和年代IV的单株产量有着显著的提高，其中年代II的单株产量最低，为 23.71 g，年代IV的单株产量最高，为 25.54 g；谷粒长随着育种年代的增加而显著增加，而谷粒宽随着育种年代的增加而降低，谷粒长宽比随着育种年代的增加而显著增加；随育种年代增加，抽穗天数没有显著的变化趋势，抽穗天数最长的是年代II，为 82.12 d，而抽穗天数最短的是年代III，为 79.26 d；

同样结实率也没有显著的变化趋势,结实率最低的是年代I,为 83.35%,而结实率最高的是年代IV,为 84.29%。

以上结果表明随着育种年代的增加,籼稻品种向大穗、多粒、长粒方向得到了遗传改良。



不同小写字母表示表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著,上虚线代表上四分位数,中间虚线代表中位数,下虚线代表下四分位数;下同
Different lowercase letters indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$ level., the upper dashed line represents the upper quartile, the middle dashed line represents the median, and the lower dashed line represents the lower quartile; The same as below

图 5 不同年代间籼稻主要农艺性状的比较

Fig. 5 Comparison of main agronomic traits for *Indica* rice varieties under different years

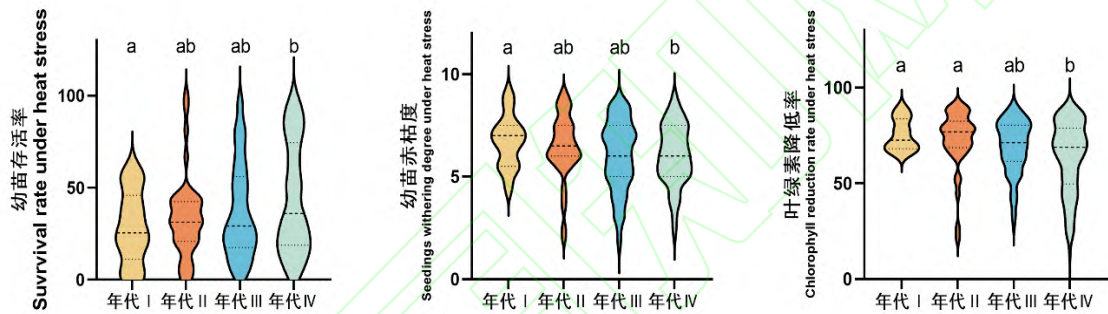
表 5 不同年代籼稻品种的主要农艺性状表型平均值

Table 5 Phenotypic values of main agronomic traits for *Indica* rice varieties under different years

年代 Years	抽穗天数(d) HD	株高(cm) PH	穗长(cm) PL	穗数 PN	穗粒数 GN	结实率(%) SST	千粒重(g) TGW	单株产量(g) PY	谷粒长(mm) GL	谷粒宽(mm) GW
I	81.9±10.01	124.9±22.91	25.6±2.06	9.9±1.40	170.0±33.71	83.4±4.64	26.1±2.58	24.8±3.66	8.3±0.81	3.0±0.25
II	82.1±15.19	107.7±15.35	24.3±1.79	9.6±1.26	175.3±35.75	83.9±3.88	25.2±2.68	23.7±3.77	7.9±0.64	3.0±0.21
III	79.3±10.72	104.6±14.75	24.7±2.46	9.6±1.28	186.7±49.08	83.7±5.03	25.1±3.32	25.5±4.62	8.4±0.88	2.8±0.28
IV	79.8±10.56	109.0±14.45	25.2±2.29	8.7±1.19	212.2±45.63	84.3±3.90	24.5±3.77	25.5±3.68	8.8±0.84	2.7±0.28

2.3.2 苗期耐热性比较 对不同年代籼稻品种间高温处理后的幼苗存活率、幼苗赤枯度和叶绿素降低率等耐热性表型值进行了多重比较，结果示于图 6。结果表明，高温处理后的幼苗存活率随着育种年代的增加而显著增加，年代I的幼苗存活率最低，为 28.36%，而年代IV的幼苗存活率最高，为 45.80%；幼苗赤枯度随着育种年代的增加而显著降低，年代I的赤枯度最高，为 6.95 而年代IV的赤枯度最低，为 5.66；叶绿素降低率随着育种年代的增加而有着显著的降低，年代I的叶绿素降低率最高，为 75.34%，而年代IV的叶绿素降低率最低，为 63.71%。以上结果表明随着育种年代的增加，籼稻品种向着更耐热的方向得到了遗传改良。

将不同稻区籼稻品种的苗期耐热性表型值列于表 6。结果表明，西南稻区的品种表现出极强的苗期耐热性，西南稻区的幼苗赤枯度和叶绿素降低率最低，分别为 4.85 和 54.06%，幼苗存活率最高，为 57.54%；其次是华南稻区的苗期耐热性，华南稻区的幼苗赤枯度、幼苗存活率和叶绿素降低率分别为 5.97、41.52%和 67.64%；而华中和华北的耐热性较弱，其中华中稻区的幼苗赤枯度、幼苗存活率和叶绿素降低率分别为 6.43、35.83%和 70.23%，华北稻区的幼苗赤枯度、幼苗存活率和叶绿素降低率分别为 6.68、34.79%和 69.38%。



不同小写字母表示表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著，上虚线代表上四分位数，中间虚线代表中位数，下虚线代表下四分位数

Different lowercase letters indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$ level, the upper dashed line represents the upper quartile, the middle dashed line represents the median, and the lower dashed line represents the lower quartile.

图 6 不同年代间籼稻苗期耐热性的比较

Fig. 6 Comparison of heat tolerance at the seedling stage for *Indica* rice varieties developed in different years

表 6 不同稻区籼稻品种的苗期耐热性表型值比较

Table 6 Comparison of phenotypic values of heat tolerance at the seedling stage for *Indica* rice varieties under different rice growing regions

稻区	华北	华中	华南	西南
Rice Growing Regions	North China	Central China	South China	Southwest China
幼苗赤枯度 HTG	6.68±0.85	6.43±1.86	5.97±2.05	4.85±2.73
幼苗存活率 SSR(%)	34.79±13.97	35.83±26.09	41.52±27.63	57.54±33.05
叶绿素降低率 RCC(%)	69.38±7.176	70.23±15.24	67.64±16.30	54.06±21.82

HTG: Seedlings withering degree under heat stress; SSR: Survival rate under heat stress; RCC: Chlorophyll reduction rate under heat stress.

2.4 不同年代籼稻主栽品种的聚类分析

2.4.1 不同年代籼稻主栽品种间的聚类分析 本研究基于 10 个主要农艺性状的表型数据，采用类平均法对 418 个籼稻栽培品种进行了系统聚类分析，其分类结果如图 7 所示。结果表明，以欧氏距离系数 70 为分类标准，

试验材料被划分为 3 个显著差异的遗传类群。其中，类群 1 共有 244 份品种，占 58.4%，包括年代Ⅰ 40 份、年代Ⅱ 25 份、年代Ⅲ 67 份和年代Ⅳ 112 份；从材料来源看，类群 1 主要来源于广东（34 份）、浙江（31 份）、江西（28 份）和湖南（27 份）。类群 2 共有 124 份品种，占 29.6%，包括年代Ⅰ 15 份、年代Ⅱ 16 份、年代Ⅲ 59 份和年代Ⅳ 34 份；从材料来源看，类群 2 主要来源于江西（40 份）和浙江（20 份）。类群 3 共有 50 份品种，占 12.0%，包括年代Ⅲ 17 份和年代Ⅳ 33 份；主要来源于广东（19 份）和广西（17 份）。

综上所述，品种的聚类并未完全按年代聚类，各年代的品种交错聚类于各类群中。如年代Ⅰ的多数品种（72.7%）和年代Ⅱ的多数品种（61%）主要归类于类群 1，年代Ⅲ品种归类于类群 1、类群 2 和类群 3 中的分布比例分别为 46.9%、41.3%和 11.9%；其中，类群 1 和类群 2 中包含年代Ⅲ品种的比例基本接近。而在类群 3 中，66%的品种来源于年代Ⅳ。以上说明不同年代品种之间既有遗传基础较相似的品种，也有遗传基础差异较大的品种。这可能是在育种过程中所采用的亲本材料相似或不同所致。

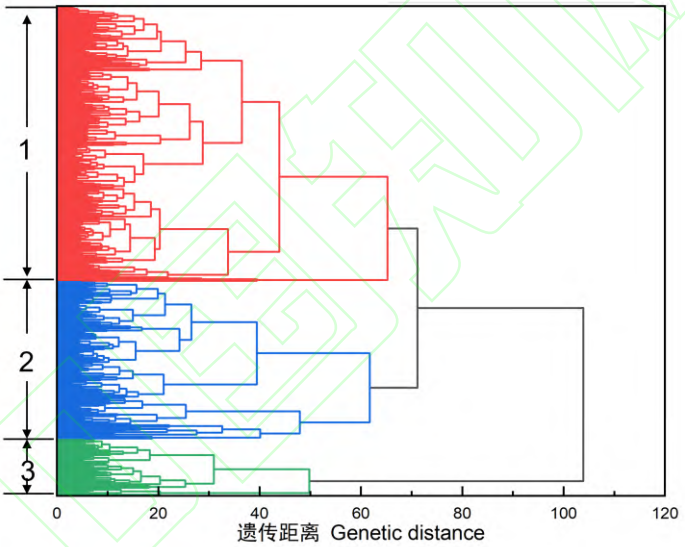


图 7 不同年代籼稻品种的聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of *Indica* rice varieties

2.4.2 不同年代籼稻主栽品种群体间的聚类分析 以 10 个主要农艺性状的表型平均值为基础数据，根据类平均法对 4 组不同年代籼稻主栽品种群体进行了聚类分析，结果示于图 8。结果表明，以欧氏距离系数 35 为分类标准，试验材料被划分为 2 个显著差异的遗传类群。类群 1 包括年代Ⅰ、年代Ⅱ和年代Ⅲ的品种，类群 2 只包括年代Ⅳ的品种。以欧式距离 15 为阈值，将类群 1 分为两个小类群，小类群i只包括年代Ⅰ的品种，小类群ii包括年代Ⅱ和年代Ⅲ的品种。以上说明在 418 份籼稻材料中年代Ⅱ和年代Ⅲ的品种亲缘关系最近，其次是年代Ⅱ和年代Ⅲ与年代Ⅰ，年代Ⅳ与其他年代之间的品种亲缘关系较远。

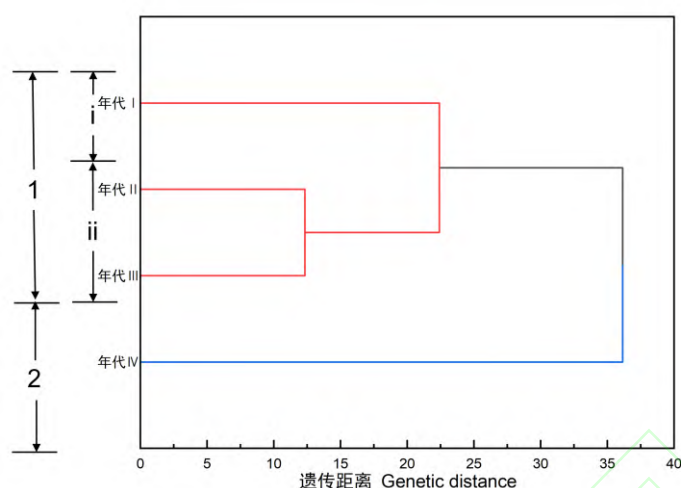


图 8 不同年代籼稻品种群的聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of *Indica* rice varieties developed in different years

3 讨论

3.1 异地环境对籼稻主栽品种主要农艺性状的影响

前人研究表明，水稻农艺性状受到多种环境因素的影响，包括降雨量、温度、海拔高低、光周期、土壤性质、生态群落等^[17-19]。邓飞等^[18]研究表明，水稻产量与全生育期及日均日照时数呈极显著正相关，与降雨量呈极显著负相关。程方民等^[19]研究表明，水稻灌浆结实期的日均温度对各品质性状的影响最大，其次是日平均温差和日平均太阳辐射。韩龙植等^[20]研究表明，不同生长环境下水稻结实率有着较大差异。本研究表明，异地环境下籼稻主栽品种主要农艺性状表现出明显的差异，这可能与本研究籼稻材料主要来源于我国广东、广西、江西、浙江、湖南等地，对光温表现极敏感有密切关系。本研究表明，纬度较高、海拔较低的荆州（纬度 29°26'~30°37'、海拔 20~50 m）和杭州（纬度 29°11'~30°34'、海拔 20~60 m）鉴定点环境下水稻单株产量高于纬度相对低、海拔较高的贵阳（纬度 26°11'~27°22'、海拔 1100~1200 m）和南宁（纬度 22°12'~24°02'、海拔 100~150 m）鉴定点，说明单株产量受纬度和海拔的影响较大。贵阳鉴定点与其他鉴定点相比，水稻结实率、千粒重和谷粒宽有所增加，但株高、穗长、穗数和单株产量下降。这可能与贵阳鉴定点海拔明显高于其他鉴定点，贵阳水稻生长季节温度低于其他鉴定点有关。

3.2 籼稻主栽品种对异地环境的适应性

水稻主要农艺性状受到环境和基因型的调控，不同生长环境下，水稻各农艺性状表现出明显的差异^[21]。Kim 等^[22]研究表明，地形复杂的地区对水稻农艺性状有着明显的影响。Shi 等^[23]研究表明，夜间高温对水稻产量和品质有明显的影响。农艺性状的稳定性系数是衡量水稻品种对不同环境适应能力的重要参考指标。稳定性系数越小，则说明异地环境下该品种相关性状的表现越稳定，对生态环境的适应能力越强，在水稻

育种中具有重要的利用价值。刘文江等^[24]利用 AMMI 模型对产量、穗粒数等性状进行稳定性分析表明,产量等性状的表型变异受环境因素影响较大。刘丽华等^[25]研究表明,水稻品种在不同地点种植,产量及其构成要素的稳定性存在较大差异。因此,多点多年的表型鉴定是全面准确地评价水稻对环境适应能力的有效方法。本研究表明,在异地环境条件下,穗数、穗长、千粒重、谷粒长和谷粒宽的表型值相对较稳定,其次为抽穗天数、株高、结实率和单株产量,而穗粒数的稳定性较差。本研究还表明,不同年代籼稻品种的抽穗天数、株高、结实率和单株产量的稳定性系数呈现逐年减小的趋势,即随着育种年代的推进,选育品种的生态适应能力逐渐提高。这可能与近几十年育种单位普遍采用的穿梭育种策略存在密切关联,在穿梭育种过程中异地适应性得到了遗传改良^[26]。本研究还筛选出抽穗天数和单株产量的稳定性系数较低,即异地环境下生态适应能力较强的桂华占、上村早、华南 15、赣早籼 45 号等籼稻品种 30 份,这些材料对异地环境有较强的适应性,可作为亲本材料利用于未来的水稻育种中。

3.3 不同年代籼稻主栽品种主要农艺性状和苗耐热性状的变化趋势

本研究表明,籼稻的穗长、穗粒数、单株产量随着育种年代的增加而显著增加,而穗数、千粒重随着育种年代的增加而显著下降,从过去到现在籼稻主要农艺性状的总体改良趋势是从多穗型转为大穗、多粒和长粒型,这与 Cui 等^[27]的研究结果一致。水稻株高在年代Ⅰ显著高于后续三个时期,且自年代Ⅱ起呈现持续上升趋势,这与 20 世纪 50~60 年代通过矮化育种来解决水稻抗倒伏并提高水稻产量,而近十多年来通过适当提升株高和生物产量的育种策略来提高水稻产量有密切相关^[28]。谷粒长随着育种年代的增加而显著增加,而谷粒宽却随着育种年代的增加而降低,粒形向着长粒形得到遗传改良,这可能与细长形籽粒通常拥有更好的外观品质有关^[29-30]。另外,本研究表明,随着育种年代的增加,籼稻品种的耐热性也随之增加。这与近几十年来全球气候不断变暖,高温给水稻生产带来了极大的隐患^[31],育种家不断开展耐热育种有密切相关^[32-33]。以上结果表明,籼稻性状总体向着耐热、高产、优质方向得到了遗传改良,这也是未来籼稻育种的重要研究方向。

3.4 不同年代籼稻主栽品种间亲缘关系

刘传光等^[34]研究表明,1980-1989 年由于桂朝 2 号及衍生品种在育种和生产上大量得到应用,该时期育成品种亲缘关系较近,而 2000-2008 年育成的大多数品种由矮仔占 4 号、低脚乌尖和花龙水田谷 3 个矮源共同参与育成,亲缘关系较远。李培富等^[35]研究认为,在育种中只有选择利用遗传距离远的材料,才能取得育种的较大突破。本研究表明,年代Ⅱ和年代Ⅲ的亲缘关系最近,其次年代Ⅰ与年代Ⅱ和年代Ⅲ的亲缘关系较近,年代Ⅳ与其他三个年代品种间亲缘关系较远,这与前人的研究结果一致^[11]。这可能由于 2000 年前亲本材料选择相对单一,而进入 21 世纪以来育种家更注重遗传多样性构建与国外稻种资源的整合利用,选择来源广泛、遗传背景丰富的材料为亲本所致。在今后的水稻育种工作中,应首选选取异地适应能力强、综合性状优良的材料基础上,尽可能选择亲缘关系较远的材料作为亲本,使杂交后代的遗传基础丰富多样,从

而提高育种效率，加快适应性强、高产、优质等品种的选育进程。

参考文献

- [1] 杨陶陶.双季籼稻产量和稻米品质对增温的响应特征及其机理.南昌:江西农业大学,2020
Yang T T. Response of *Indica* grain yield and grain quality to experimental warming in a double rice cropping system and its mechanism. Nanchang : Jiangxi Agricultural University, 2020
- [2] Li Z K, Zhang F. Rice breeding in the post-genomics era: from concept to practice. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013,16 (2):261-269
- [3] Lyu Z F, Zhu Y, Liu X J, Ye H H, Tian Y C, Li F F. Climate change impacts on regional rice production in China. *Climatic Change*, 2018, 147:523–537
- [4] Liu Z Q, Zhu Y J, Shi H B, Qiu J H, Ding X H, Kou Y J. Recent progress in rice broad-spectrum disease resistance. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22:11658
- [5] Visakh R L, Anand S, Arya S N, Sasmita B, Jha U C, Sah R P, Beena R. Rice Heat tolerance breeding: a comprehensive review and forward gaze. *Rice Science*, 2024, 31 (4): 375–400
- [6] Piao, S L, Ciais, P, Huang, Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467 (7311): 43-51
- [7] 杜雪树,殷得所,查中萍,万丙良.水稻高温热害研究进展.安徽农业科学,2017,45(35):20-22
Du X S, Yin D S, Zha Z P, Wan B L. Research advances in rice high temperature stress. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45 (35): 20-22
- [8] 赵璐,杨治伟,邵丽群,田玲,苏梅,田蕾,张银霞,杨淑琴,李培富.宁夏和新疆水稻种质资源表型遗传多样性分析及综合评价.作物杂志,2018, 1:25-34
Zhao L, Yang Z Y, Bu L Q, Tian L, Su M, Tian L, Yang S Q, Li P F. Analysis and comprehensive evaluation of phenotypic genetic diversity of Ningxia and Xinjiang rice germplasm. *Crops*, 2018, 1: 25-34
- [9] 汤翠凤,张恩来,董超,阿新祥,张斐斐,申时全,韩龙植.云南新收集水稻地方品种的表型多样性分析.植物遗传资源学报,2018,19(6):1106-1116
Tang C F, Zhang E L, Dong C, A X X, Zhang F F, Shen S Q, Han L Z. Analysis on phenotypic diversity of rice landraces newly collected in Yunnan province. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19 (6): 1106-1116
- [10] 胡标林,万勇,李霞,雷建国,罗向东,严文贵,谢建坤.水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价.作物学报,2012,38(5):829-839
Hu L B, Wan Y, Li X, Lei J G, Luo X D, Yan W G, Xie J K. Analysis on genetic diversity of phenotypic traits in rice (*Oryza sativa*) core collection and its comprehensive assessment. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38 (5): 829-839
- [11] 周健,崔迪,赵洙敏,孙建昌,黎毛毛,马小定,王先俱,李相奎,赵竣贤,朴东洙,郭晓红,韩龙植.不同年代水稻品种主要农艺性状的表型评价.植物遗传资源学报,2019,20(6):1566-1578
Zhou J, Cui D, Zhao Z M, Sun J C, Li M M, Ma X D, Wang X J, Li X K, Pu D Z, Guo X H, Han L Z. Phenotypic evaluation of main agronomic traits in rice varieties that were released over the past few decades. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20 (6): 1566-1578
- [12] 金京花,李淑芳,赵亚东,王迪,张好,金国光,李鹤南,全成哲,张强.1775 份水稻种质资源重要农艺性状遗传多样性研究.植物遗传资源学报,2025,24(3):481-495
Jin J H, Li S F, Zhao Y D, Wang D, Zhang S, Jin G G, Li H N, Quan C Z, Zhang Q. Study on important agronomic characters and genetic diversity of 1775 rice germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2025, 24 (3): 481-495
- [13] 贺乔乔,周希希,王业文,李培江,王胜宝,张羽.基于 SNP 和表型性状的籼稻种质资源遗传多样性研究.中国农业大学学报,2023,28(8):80-93
He Q Q, Zhou X X, Wang Y W, Li P J, Wang S B, Zhang Y. Genetic diversity of *Indica* rice germplasm resources based on SNP and phenotypic makers. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28 (8): 80-93
- [14] 韩龙植,魏兴华.水稻种质资源描述规范和数据标准.北京: 中国农业出版社,2006
Han L Z, Wei X H. Descriptors and data standard for rice (*Oryza sativa* L.). Beijing: China Agricultural Press, 2006
- [15] 刘进,崔迪,余丽琴,张立娜,周慧颖,马小定,胡佳晓,韩冰,韩龙植,黎毛毛.水稻苗期耐热种质资源筛选及 QTL 定位.中国水稻科学,2022,36(3):259-268.
Liu J, Cui D, Yu L Q, Zhang L N, Zhou H Y, Ma X D, Hu J X, Han B, Han L Z, Li M M. Screening and QTL mapping of heat-tolerant rice (*Oryza sativa* L.) germplasm resources at seedling stage. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36 (3): 259-268
- [16] 吴为人.对基于 AMMI 模型的品种稳定性分析方法的一点改进.遗传,2000,22(1):31-32
Wu W R. An improvement on the method of variety stability analysis based on the AMMI model. *Hereditas (Beijing)*, 2000, 22 (1): 31-32
- [17] Ushio M, Saito H, Tojo M, Nagano A J. An ecological network approach for detecting and validating influential organisms for rice growth. *eLife*, 2023;12:

- [18] 邓飞,王丽,刘利,刘代银,任万军,杨文钰.不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响.作物学报,2012,38(10):1930-1942
Deng F, Wang L, Liu L, Liu D Y, Ren W J, Yang W Y. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38 (10): 1930–1942
- [19] 程方民,钟连进.不同气候生态条件下稻米品质性状的变异及主要影响因子分析.中国水稻科学,2001,15(3):187-191
Cheng F M, Zhong L J. Variation of rice quality T traits under different climate conditions and its main affected factors. Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15 (3): 187-191
- [20] 韩龙植,张三元,乔永利,金钟焕,徐福荣,曹桂兰,南钟浩,戴陆园,芮钟斗,高熙宗.不同生长环境下水稻结实率数量性状位点的检测.作物学报,2006,32(7):1024-1030.
Han L Z, Zhang S Y, Qiao Y L, Jin Z H, Xu F R, Cao G L, Nan Z H, Dai L Y, Rui Z D, Gao X Z. Identification of QTLs for seed setting rate in rice under different growing environments. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32 (7): 1024-1030
- [21] Li X K, Wu L, Geng X, Xia X H, Wang X H, Xu Z J, Xu Q. Deciphering the environmental impacts on rice quality for different rice cultivated areas. Rice , 2018, 11 (1): 7
- [22] Kim J, Sang W, Shin P, Cho P, Seo, M, Yoo B, Kim K S. Evaluation of regional climate scenario data for impact assessment of climate change on rice productivity in Korea. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2015, 18 (4): 257-264
- [23] Shi W J, Yin X Y, Struik P C, Xie F M, Schmidt R C, Jagadish K S V. Grain yield and quality responses of tropical hybrid rice to high night-time temperature. Field Crops Research, 2016, 190: 18-25
- [24] 刘文江,李浩杰,汪旭东,周开达.用 AMMI 模型分析杂交水稻基本性状的稳定性.作物学报,2002,28(4):569-573
Liu W J, Li H J, Wang X D, Zhou K D. Stability analysis for elementary characters of hybrid rice by AMMI model. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28 (4): 569-573
- [25] 刘丽华,王新兵,汤凤兰,李红宇,郑桂萍,左豫虎.水稻产量及产量构成的稳定性和高产相关性分析.干旱地区农业研究,2013,31(5):84-88
Liu L H, Wang X B, Tang F L, Li H Y, Zheng G P, Zuo Y H. Stability of yield and yield components of rice and correlation analysis of high-yield related characters. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31 (5): 84-88
- [26] 陈海星,蔡国海,朱旭东,杨尧诚,赵忠良,曹立勇,严文潮,卢华金,熊振民,申宗坦.水稻穿梭育种研究初报.中国农业科学,1991,24 (6):20-26
Chen H X, Cai G H, Zhu X D, Yang Y C, Zhao Z L, Cao L Y, Yan W C, Lu H J, Xiong Z M, Shen Z T. Preliminary study on rice shuttle Breeding in rice. Scientia Agricultural Sinica, 1991, 24 (6): 20-26
- [27] Cui D, Zhou H, Ma X D, Lin Z C, Sun L H, Han B, Li M M, Sun J C, Liu J, Jin G X, Wang X J, Cao G L, Deng X W, He H, Han L Z. Genomic insights on the contribution of introgressions from Xian/Indica to the genetic improvement of Geng/Japonica rice cultivars. Plant Communications, 2022, 3 (3): 100325
- [28] Ferrero-Serrano Á, Cantos C, Assmann S M. The Role of dwarfing traits in historical and modern agriculture with a focus on rice. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2019, 11 (11): a034645
- [29] Zhao D S, Li Q F, Zhang C Q, Zhang C, Yang Q Q, Pan L X, Ren X Y, Lu J, Gu M H, Liu Q Q. GS9 acts as a transcriptional activator to regulate rice grain shape and appearance quality. Nature Communications, 2018, 9 (1): 1240
- [30] Calingacion M, Laborte A, Nelson A, Resurreccion A, Concepcion J C, Daygon V D, Mumm R, Reinke R, Dipti S, Bassinello P Z, Manful J, Sophany S, Lara K C, Bao J S, Xie L H, Loaiza K, El-hissew A, Gayin J, Sharma N, Rajeswari S, Manonmani S, Rani N S, Kota S, Indrasari S D, Habibi F, Hosseini M, Tavasoli F, Suzuki K, Umemoto T, Bualaphanh C, Lee H H, Hung Y P, Ramli A, Aung P P, Ahmad R, Wattoo J D, Bandonill E, Romero M, Brites C M, Hafeel R, Lur H S, Cheapun K, Jongdee S, Blanco P, Bryant R, Lang N T, Hall R D, Fitzgerald M. Diversity of global rice markets and the science required for consumer-targeted rice breeding. PLoS ONE, 2014, 9 (1): e85106
- [31] 张桂莲,陈立云,雷东阳,张顺堂.水稻耐热性研究进展.杂交水稻,2005,20(1):1-5
Zhang G L, Chen L Y, Lei D Y, Zhang S T. Progresses in research on heat tolerance in rice. Hybrid Rice, 2005, 20 (1): 1-5
- [32] 曹立勇,朱军,赵松涛,何立斌,颜启传.水稻籼粳交 DH 群体耐热性的 QTLs 定位.农业生物技术学报,2002,10(3):210-214
Cao L Y, Zhu J, Zhao S T, He L B, Yan Q C. Mapping QTLs for heat tolerance in a DH population from Indica-Japonica cross in rice (*Oryza sativa*). Journal of Agricultural Biotechnology, 2002, 10 (3): 210-214
- [33] 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 K 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

Agricoltura Sinica, 2023, 56 (3): 405-415

- [34] 刘传光,周新桥,陈达刚,周汉钦,冯道基,李丽君,李巨昌,张桂权,陈友订.华南地区常规籼稻主栽品种间亲缘系数分析.华南农业大学学报,2012,33(3):277-281

Liu C G, Zhou X Q, Chen D G, Zhou H Q, Feng D J, Li L J, Li J C, Zhang G Q, Chen Y D. Analysis of coefficient of parentage among major commercial inbred *Indica* rice cultivars in south China. Journal of South China Agricultural University, 2012, 33 (3): 277-281

- [35] 李培富,杨淑琴,马宏伟.宁夏水稻主要农艺性状的主成分及聚类分析.中国农学通报,2006,22(12):162-166

Li P F, Yang S Q, Ma H W. Principal Component and cluster analysis of main agronomic characters of rice in Ningxia. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (12): 162-166

