

- 中国科技核心期刊 ●中国农林核心期刊(A类)
- CAB Abstract ●Agrindex ●Rice Literature Update ●日本科学技术振兴机构数据库(JST China)
- 中国学术期刊综合评价数据库 ●中文科技期刊数据库 ●中国核心期刊(遴选)数据库
- 中国科技论文与引文数据库 ●中国农业科技文献数据库 收录本刊

ISSN 0439-8114

湖北农业科学

HUBEI AGRICULTURAL SCIENCES



★全国优秀科技期刊一等奖
★国家期刊奖百种重点期刊

湖北省农业科学院
华中农业大学 主办
长江大学

ISSN 0439-8114



9 780439 811249



10
2025

第64卷 第10期
Vol.64 No.10

湖北农业科学

(月刊)

HUBEI NONGYE KEXUE
(Monthly)

2025年第10期

第64卷 第10期
(总第751期)

1955年创刊

中国标准连续出版物号 ISSN 0439-8114
CN 42-1255/S

主管单位 湖北省农业科学院

主办单位 湖北省农业科学院
华中农业大学
长江大学

编辑出版 《湖北农业科学》编辑部
(武汉市洪山区南湖瑶苑 430064)

主编 游艾青

执行主编 王贵春

副主编 屠晶 王晓芳

社长 屠晶

副社长 孙瑾

电话 (027)87389334

网址 www.hbnykx.cn

电子信箱 hbnykxzz@126.com

出版日期 10月25日

国内总发行 中国邮政集团公司湖北省分公司
(邮发代号:38-21)

海外总发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(国外发行代号:BM2637)

印刷 武汉市宏达盛印务有限公司



随心订阅
“邮”享生活

扫描订阅《湖北农业科学》



《湖北农业科学》编辑委员会

顾问:

陈焕春 谢华安 陈温福 吴孔明 康振生 赵春江
万建民 李培武 焦春海

主任委员:

游艾青

副主任委员:

姚江林 余锦平 江厚顺 陈向军 梅书棋 刘前信

委员(以姓氏笔画为序):

于巍 王飞 王文建 王汉文 王艳树 王贵春
王晴芳 方正武 代小军 冯鹏 毕廷震 伍涛
刘汉成 杜何为 李先德 杨立军 肖俊红 邱正明
何亚慧 沈艳芬 张峰 张拥军 陈展鹏 郑军
罗红梅 周有祥 周明芹 胡光灿 胡爱兵 祝振洲
夏庆利 钱永忠 郭英 高学军 涂修亮 龚艳
彭立军 廖世勇

《湖北农业科学》第一届青年编辑委员会成员名单 (以姓氏笔画为序)

万丽丽 门玉英 王涌 王世泰 王连军 王胜鹏
王维薇 韦树根 亢龙飞 方林川 尹军良 艾小艳
卢艳平 叶家保 史德芳 付书林 吕备 朱永兴
朱先波 朱展望 乔木 伏虎 向小娇 刘凯
刘念 刘威 刘勇 刘二喜 刘东海 刘志有
刘春奎 孙千惠 李平 李芬妮 李於亭 李建华
李曼菲 李翔辉 杨盟 杨夫臣 吴艳 吴雪莲
何斌 何毅 何燕红 余长平 冷博峰 汪本福
沈剑波 宋幼良 宋兴超 张妮 张蔚 张灏
张文明 张志毅 张枝盛 张泽志 张勇洪 陆毅
陈杰(湖北省农业科学院) 陈杰(湖北省黄冈市农业科学院)
陈万旭 陈学玲 陈婧婷 罗治情 金慧芳 周洋
周雷 周志雄 周熠玮 郑兰兰 胡西湖 柳延涛
钦洁 侯冠宇 洪俊 袁勇 聂江文 夏颖
徐乐 徐礼志 徐延浩 郭旺 郭玲 郭威
郭金金 唐清 唐思琪 黄翔 黄大野 黄玛兰
黄思思 龚世飞 崔许峰 巢林 彭西甜 彭欧阳
董静 韩永超 詹亚斌 蔡杰 蔡海亚 缪祎晟
潘经韬

本刊荣获:

- ★首届国家期刊奖
- ★第二、三届国家期刊奖百种重点期刊
- ★第二届全国优秀科技期刊一等奖
- ★第二~六届湖北省优秀期刊奖
- ★第七、八、九、十届湖北省优秀精品期刊奖

收录本刊的数据库:

- CAB Abstract
- Agrindex
- Rice Literature Update
- 日本科学技术振兴机构数据库(JST China)
- 中国科技论文与引文数据库
- 中国期刊全文数据库

- 中国核心期刊(遴选)数据库
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国农业科技文献数据库
- 中文科技期刊数据库
- 中教数据库
- 长江文库

目 次

育种·栽培

- 126份水稻种质资源在自然高温下的综合评价 王廷宝, 刘刚, 邱东峰, 等(1)
52份早熟棉品种农艺性状及产量构成综合评价 闫振华, 黄晓莉, 戴宝生, 等(10)
外源褪黑素对铜胁迫下小麦萌发和幼苗生理特性的影响 吴秀宁, 党文丽, 刘梅, 等(16)

资源·环境

- 侧深减氮施肥对水稻生长、产量和经济效益的影响 李佳莹, 侣国涵, 彭成林, 等(21)
短期烤烟-玉米轮作对土壤酶活性、微生物群落结构及物质代谢的影响 徐大兵, 孙玉晓, 夏鹏亮, 等(27)
套作鲜食大豆和子粒大豆对南丰蜜橘产量和土壤肥力的影响 宋惠洁, 吴艳, 胡丹丹, 等(37)
不同年限丹参根际土壤丛枝菌根真菌多样性 李丽, 彭点, 杨浩, 等(41)
水土保持与土壤侵蚀互动关系的系统分析
——以耦合协调机制为框架的实证研究 刘新生, 黄秀芳(49)
黄河流域(河南段)景观生态风险时空演变及驱动因素 闫晓伟(54)
基于熵权TOPSIS 和 XGBoost 算法的耕地整治分区划定 窦邵华, 杜顺季(61)
基于云模型的洱海流域生态风险时空演变 张鳌, 曾维军, 吕洋, 等(69)
好氧堆肥消减畜禽粪便中抗生素抗性基因的研究进展 周源, 陈洁, 金尔光, 等(76)
锰基负载氮化碳活化过一硫酸盐对4-氯酚的降解效果 王莎莎, 崔鹏飞, 阮新潮, 等(83)

植物保护

- 阿维菌素B₂和氟吡菌酰胺对根结线虫二龄幼虫的混合毒力及田间防治效果 彭宇, 李彩斌, 马黔, 等(94)
湖南百合炭疽病病原菌的分离及鉴定 邓桥, 储昌斌, 方冬珍, 等(99)
条斑紫菜丝状体黄绿斑病病原优势菌分离鉴定及药敏性分析 王卫兵, 王洪斌(105)

园艺·特产

- 木本植物遗传转化体系构建相关研究进展 梁海雪, 曾娟, 宋升奕, 等(110)
不同播种期对雪茄烟叶产质量的影响 许芸芸, 王清江, 续勇波(119)
盐碱地磁化水灌溉处理对3种果树生理指标及品质的影响 唐金, 朱秋萍, 陶俊, 等(126)
镉胁迫下纳米氧化铁与生物炭复合处理对甜瓜幼苗生长及生理响应的影响 李豪天, 李俊丽, 夏鹏, 等(131)

药用植物

- 厚朴酚药理作用研究进展 郭耀东, 孙施蕊, 刘甜钰, 等(140)
不同土壤条件对寄生栽培沙氏鹿茸草生长及其活性成分含量的影响 关敏, 李先恩, 王秋玲, 等(147)

水产养殖

蚓粪浸出液-BG11 培养基配比差异对蛋白核小球藻种群增长的影响 郑睿涵, 马若冰, 解子杨, 等(153)

畜牧·兽医

基于 SG-PI 双重染色法的单增李斯特菌对苯扎溴铵耐受性快速检测方法的建立

..... 汪国俊, 曹文杰, 季强, 等(158)

PGAM5 基因核心启动子区域鉴定与转录调控分析 李泽亚(165)

检测分析

凝胶渗透色谱-气相色谱-串联质谱法测定黄芪中 20 种禁用农药残留量 钱叶会(171)

信息工程

基于 YOLOv8 的无人机影像农田地表残膜检测 张天乐, 王麒哲, 杨寒冰, 等(179)

基于多时相遥感生态指数的生态环境质量时空演变

——以柳州市鱼峰区为例 余鹏程, 任慈, 李小龙, 等(184)

面向类城市路网空间的多时相多地形耕地地块边界提取研究 郑明雪, 沈祥成, 罗治情, 等(190)

基于因子分析和 AdaBoost 算法的烟叶颜色分类 张千子, 邓邵文, 王文浩, 等(195)

YOLOv8n-LF 模型在机收小麦含杂率与破碎率检测中的应用 周洪, 孟小艳, 方伟舟, 等(201)

基于 CIW-YOLOv8n 的棉花叶病害检测与识别方法 李佳骏, 董辉, 余霖, 等(207)

棉花病虫害智能识别技术研究进展 张友昌, 张教海, 牛林涛, 等(213)

基于 GIS 的武汉市猕猴桃生态适应性区划 张鸿, 孟翠丽, 李秀丽, 等(219)

基于 ROS3DJS 的农业机器人竞赛仿真可视化技术研究 吕轩豪, 迪力夏提·多力昆, 孟小艳, 等(226)

经济·管理

世界遗产“三生”空间格局演变及其驱动因素分析

——以红河哈尼梯田为例 李影芝, 潘娇, 彭文忆, 等(233)

新疆农业绿色发展水平评价及障碍因素分析 梁凯丽, 吴彦山, 王志强(239)

数字金融对农村居民生存型消费的影响机制

——兼论过度消费的“双刃剑”效应 王莎(247)

广告 (封三, 封四)

协 办 单 位

(排名不分先后)

湖北省农学会

国家富硒农产品加工技术研发专业中心

武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院

湖北省农业技术推广总站

武汉市农业科学院

湖北省十堰市农业科学院

湖北省荆州市农业科学院

湖北省襄阳市农业科学院

湖北省襄阳市农业技术推广中心

湖北省宜昌市农业科学研究院

湖北省黄冈市农业科学院

湖北省咸宁市农业科学院

荆门(中国农谷)农业科学研究院

恩施土家族苗族自治州农业科学院

湖北省孝感市农业科学院

湖北省天门市农业科学院

CONTENTS

Breeding & Cultivation

- Comprehensive evaluation of 126 rice germplasm resources under natural high temperature conditions WANG Ting-bao, LIU Gang, QIU Dong-feng, et al(1)
 Comprehensive evaluation of agronomic traits and yield components of 52 early-maturing cotton lines YAN Zhen-hua, HUANG Xiao-li, DAI Bao-sheng, et al(10)
 Effects of exogenous melatonin on seed germination and seedling physiology characteristics of wheat under copper stress WU Xiu-ning, DANG Wen-li, LIU Mei, et al(16)

Resource & Environment

- Effects of side-depth fertilization with reduced nitrogen application on growth, yield and economic benefit of rice LI Jia-ying, SI Guo-han, PENG Cheng-lin, et al(21)
 Effects of short-term flue-cured tobacco-maize rotation on soil enzyme activities, microbial community structure, and substance metabolism XU Da-bing, SUN Yu-xiao, XIA Peng-liang, et al(27)
 Effects of intercropping with vegetable soybean and grain soybean on the yield of Nanfeng tangerine and soil fertility SONG Hui-jie, WU Yan, HU Dan-dan, et al(37)
 Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere soil of *Salvia miltiorrhiza* at different cultivation years LI Li, PENG Dian, YANG Hao, et al(41)
 Systematic analysis of the interactive relationship between soil and water conservation and soil erosion : An empirical study based on the framework of coupled coordination mechanism LIU Xin-sheng, HUANG Xiu-fang(49)
 Spatio-temporal evolution and driving factors of landscape ecological risks in the Yellow River Basin (Henan section) YAN Xiao-wei(54)
 Delimitation method of cultivated land remediation zoning based on entropy weight TOPSIS and XGBoost algorithms DOU Shao-hua, DU Shun-ji(61)
 Spatio-temporal evolution of ecological risk in the Erhai Lake Basin based on cloud model ZHANG Yun, ZENG Wei-jun, LYU Yang, et al(69)
 Research advancements on the abatement of antibiotic resistance genes in livestock and poultry manure during aerobic composting ZHOU Yuan, CHEN Jie, JIN Er-guang, et al(76)
 Degradation efficiency of 4-chlorophenol by manganese-based loaded carbon nitride activated peroxymonosulfate WANG Sha-sha, CUI Peng-fei, RUAN Xin-chao, et al(83)

Plant Protection

- The mixed virulence and field control efficacy of abamectin B₂ and fluopyram against the second-instar juvenile of *Meloidogyne* PENG Yu, LI Cai-bin, MA Qian, et al(94)
 Isolation and identification of pathogen of anthracnose of lily in Hunan Province DENG Qiao, CHU Chang-bin, FANG Dong-zhen, et al(99)
 Identification and antibiotic susceptibility analysis of the dominant pathogen from filamentous thalli of *Pyropia yezoensis* with yellow-green spot disease WANG Wei-bing, WANG Hong-bin(105)

Horticulture & Local Products

- Research progress on the construction of woody plant genetic transformation system LIANG Hai-xue, ZENG Juan, SONG Sheng-yi, et al(110)
 Effects of different sowing dates on cigar yield and quality XU Yun-yun, WANG Qing-jiang, XU Yong-bo(119)
 Effects of magnetized water irrigation on physiological indexes and quality of three fruit trees in saline-alkali land TANG Jin, ZHU Qiu-ping, TAO Jun, et al(126)
 Growth and physiological response of muskmelon seedlings treated with nano-iron oxide and biochar under cadmium stress LI Hao-tian, LI Jun-li, XIA Peng, et al(131)

Medicinal Plant

- Review on pharmacological action of magnolol GUO Yao-dong, SUN Shi-rui, LIU Tian-yu, et al(140)
 Effects of different soil conditions on the growth and active component content of
 parasitically cultivated *Monochasma savatieri* Franch. ex Maxim.
 GUAN Min, LI Xian-en, WANG Qiu-lin, et al(147)

Aquatic Products

- Effects of ratio variations of earthworm feces extract-BG11 medium on the population growth of
Chlorella pyrenoidosa ZHENG Rui-han, MA Ruo-bing, XIE Zi-yang, et al(153)

Animal Husbandry & Veterinary Medicine

- The establishment of a rapid detection method for benzalkonium bromide tolerance of
Listeria monocytogenes based on SG-PI dual-staining
 WANG Guo-jun, CAO Wen-jie, JI Qiang, et al(158)
 Identification of *PGAM5* gene core promoter and analysis of transcriptional regulation..... LI Ze-ya(165)

Detection Analysis

- Determination of 20 banned pesticide residues in *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge
 by gel permeation chromatography-gas chromatography-tandem mass spectrometry QIAN Ye-hui(171)

Information Engineering

- Detection of farmland surface residual plastic film from UAV images
 based on YOLOv8 ZHANG Tian-le, WANG Qi-zhe, YANG Han-bing, et al(179)
 Spatiotemporal evolution of eco-environmental quality based on multi-temporal remote
 sensing ecological index: A Case Study of Yufeng District, Liuzhou City
 YU Peng-cheng, REN Ci, LI Xiao-long, et al(184)
 Research on farmland parcel boundary extraction oriented to urban road network-like
 space using multi-temporal and multi-terrain images
 ZHENG Ming-xue, SHEN Xiang-cheng, LUO Zhi-qing, et al(190)
 Tobacco leaf color classification based on factor analysis and
 AdaBoost algorithm ZHANG Qian-zi, DENG Shao-wen, WANG Wen-hao, et al(195)
 YOLOv8n-LF model in detecting the impurity and broken rates of
 machine-harvested wheat ZHOU Hong, MENG Xiao-yan, FANG Wei-zhou, et al(201)
 A CIW-YOLOv8n-based method for cotton leaf disease detection
 and recognition LI Jia-jun, DONG Hui, YU Lin, et al(207)
 Research progress on intelligent identification technology for
 cotton diseases and pests ZHANG You-chang, ZHANG Jiao-hai, NIU Lin-tao, et al(213)
 GIS-based assessment of the ecological adaptability of kiwifruit
 in Wuhan City ZHANG Hong, MENG Cui-li, LIU Xiu-li, et al(219)
 Research on simulation and visualization technology for agricultural robot
 competition based on ROS3DJS LYU Xuan-hao, Dilixiati Duolikun, MENG Xiao-yan, et al(226)

Economy & Management

- Evolution of the spatial pattern of the world heritage site: A case study of
 Honghe Hani rice terraces LI Ying-zhi, PAN Jiao, PENG Wen-yi, et al(233)
 Evaluation of green development level in Xinjiang's agriculture and analysis of
 obstacle factors LIANG Kai-li, WU Yan-shan, WANG Zhi-qiang(239)
 The impact mechanism of digital finance on survival-type consumption of rural residents:
 A discussion on the double-edged sword effect of excessive consumption WANG Sha(247)

Sponsored by	Edited & Published by	Foreign Distributed by
Hubei Academy of Agricultural Sciences	Editorial Office of Hubei Agricultural Sciences (Nanhu, Wuhan, 430064, China Tel: 8627-87389334)	China Publish Foreign Trading Corporation (P. O. Box 782, Beijing, China, Distributed Code: NT 21020)
Huazhong Agricultural University	Chief Editor YOU Ai-qing	International Price US\$ 4.00
Yangtze University		

王廷宝,刘刚,邱东峰,等. 126份水稻种质资源在自然高温下的综合评价[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(10): 1-9, 15.

126份水稻种质资源在自然高温下的综合评价

王廷宝¹, 刘刚², 邱东峰², 朱业宝³, 张再君², 何勇¹, 刘之恩¹, 张诗骞¹, 刘耀威¹, 田志宏¹

(1. 长江大学生命科学学院, 湖北 荆州 434025; 2. 湖北省农业科学院粮食作物研究所/粮食作物种质创新与遗传改良湖北省重点实验室, 武汉 430064; 3. 福建省农业科学院水稻研究所, 福州 350018)

摘要: 利用湖北省荆州市和福建省三明市两地 2022 年的自然高温条件对 126 份水稻(*Oryza sativa L.*)种质资源进行耐热性评价和表型性状分析。结果表明, 自然高温下, 粒宽与结实率、千粒重均呈极显著正相关, 表明粒宽可能在耐热性中发挥重要作用; 穗数、穗粒数、长宽比和结实率的变异系数较大, 遗传多样性丰富, 具有较大的利用潜力。耐热性评价共鉴定出耐热型种质 40 份、疑似感种质 44 份和热敏感型种质 42 份; 聚类分析进一步将材料划分为 4 个类群, 其中第 3 类群在粒宽、结实率和千粒重方面表现突出。筛选出的耐热性优异种质资源可用于改良现有品种或作为挖掘耐热新基因的供体材料, 为水稻耐热性育种提供了重要的材料基础和理论依据。

关键词: 水稻(*Oryza sativa L.*); 耐热性; 种质资源; 自然高温; 综合评价

中图分类号:S511 文献标识码:A

文章编号:0439-8114(2025)10-0001-09

DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2025.10.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comprehensive evaluation of 126 rice germplasm resources under natural high temperature conditions

WANG Ting-bao¹, LIU Gang², QIU Dong-feng², ZHU Ye-bao³, ZHANG Zai-jun², HE Yong¹,
LIU Zhi-en¹, ZHANG Shi-qian¹, LIU Yao-wei¹, TIAN Zhi-hong¹

(1. College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China; 2. Food Crop Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences/Hubei Key Laboratory of Food Crop Germplasm and Genetic Improvement, Wuhan 430064, China; 3. Rice Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350018, China)

Abstract: The heat tolerance evaluation and phenotypic traits analysis of 126 rice (*Oryza sativa L.*) germplasm resources were carried out by using the natural high-temperature conditions in Jingzhou City, Hubei Province and Sanming City, Fujian Province in 2022. The results demonstrated that grain width exhibited a highly significant positive correlation with seed-setting rate and 1 000-grain weight under natural high-temperature, indicating that grain width might play an important role in heat tolerance. The coefficients of variation of spike number, grain number per spike, length-width ratio and seed setting rate were large, and the genetic diversity was rich, which had great potential for utilization. A total of 40 heat-resistant germplasms, 44 suspected susceptible germplasms and 42 heat-sensitive germplasms were identified by heat resistance evaluation. Cluster analysis further divided the materials into four groups, and the third group was outstanding in grain width, seed setting rate and 1 000-grain weight. The selected heat-resistant germplasm resources could be used to improve existing varieties or as donor materials for mining new heat-resistant genes, which provided an important material basis and theoretical basis for rice heat-resistant breeding.

Key words: rice (*Oryza sativa L.*); heat tolerance; germplasm resources; natural high temperature; comprehensive evaluation

收稿日期:2025-03-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0100101-05)

作者简介:王廷宝(1998-),男,湖北恩施人,在读硕士研究生,研究方向为水稻遗传育种,(电话)0716-8066257(电子信箱)tb_wang7777@163.com;并列第一作者,刘刚(1979-),男,湖北仙桃人,副研究员,博士,主要从事水稻耐热机理研究,(电话)027-87389897(电子信箱)liug1112@163.com;通信作者,田志宏(1966-),男,湖北监利人,教授,博士,主要从事水稻遗传育种研究,(电话)0716-8066257(电子信箱)zhtian@yangtzeu.edu.cn。

政府间气候变化委员会(IPCC)第六次评估报告指出,人类活动造成全球温室气体总量激增,全球气温呈逐渐升高的趋势,21世纪前20年的陆地温度较1850—1900年增长了 1.59°C ^[1],预计到2100年,全球气温将持续升高 $0.75\sim4.00^{\circ}\text{C}$ ^[2],这一变化将对水稻(*Oryza sativa L.*)生产造成极大危害。有研究报道,气温每升高 1°C ,水稻将减产 3.2% ^[3]。水稻作为全球56%人口的粮食作物^[4],气温升高严重影响世界粮食安全,选育水稻耐热新品种是水稻生产应对全球变暖的有效措施。耐热种质是挖掘耐热新基因、培育耐热新品种的基础,因此在高温条件下对水稻种质资源进行综合评价对选育水稻耐热新品种、减轻水稻生产中热害的影响具有重要意义。

水稻孕穗期和抽穗期对高温敏感^[5,6],其间若遭遇大于 2 h 的 35°C 及以上高温,会使花器官发育不全,花粉发育不良、花药不能正常开裂,散粉减少,严重影响花粉育性^[7,8]。生产上通常以日平均气温在 30°C 以上、日最高气温在 35°C 以上作为抽穗扬花期热害指标^[9];灌浆期遭遇高温,会使灌浆期缩短,光合速率和同化物积累量降低而导致水稻减产^[10],若灌浆期日平均气温 $\geq30^{\circ}\text{C}$ 、抽穗期极端高温 $\geq35^{\circ}\text{C}$ 的时间 $\geq6\text{ d}$,水稻结实率较正常气候水平将下降15%,同时平均产量和千粒重也较正常气候低^[11]。本试验利用2022年孕穗后期和抽穗开花期遭遇自然高温的湖北省荆州市和福建省三明市两地的126份水稻种质资源为研究对象,对这些种质资源的抽穗期、株高、穗长、粒型、有效穗数、穗粒数、结实率、千粒重等表型性状进行鉴定和综合评价,发掘优质耐热种质资源,以期为水稻耐热新基因的挖掘以及育种应用提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 材料来源

材料来源于国家重点研发计划项目(2016YFD0100101-05)中水稻种质资源精准鉴定项目,筛选在湖北省荆州市与福建省三明市两地的生长季中,在孕穗后期与抽穗开花期内遭遇了当地自然高温的126份种质资源作为研究对象。126份种质资源均为籼稻,其中来自国内的有86份,分别来自广东、广西、福建、安徽、贵州、云南、湖北、江苏、湖南、河南、四川等省(区),种质资源来源地包括华南双季稻作区、华中单季稻作区、华北单季稻作区、西南单双季稻作区4个稻作区;外引种40份,分别来自泰国、印度、古巴、巴西、菲律宾、斯里兰卡、哥伦比亚、马来西亚、印度尼西亚,涵盖了热带至亚热带主要水稻产区,详见表1。

1.2 种植方法

试验于2022年在湖北省荆州市荆州区和福建省三明市将乐县展开。荆州市播种日期为2022年5月8日,移栽日期为6月6日;三明市播种日期为2022年5月25日,移栽日期为2022年6月22日。

每份种质资源材料以小区种植,栽种10行,每行10株,株行距为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,田间水、肥、病虫、杂草管理按照当地常规生产模式进行。

1.3 测定项目与耐热性评判方法

1.3.1 性状测定 以小区为单位,随机选择非边行的5株水稻,测量抽穗时间、株高、穗长、粒长、粒宽、长宽比、穗数、穗粒数、结实率、千粒重等数据后取平均值作为表型数据。抽穗时间为播种日期至小区内50%稻株开始抽穗所经历的时间;株高为水稻基部至主茎穗穗顶距离;穗长为主茎穗穗颈节至穗顶距离;穗数为在一季生产中,稻株能形成产量的稻穗数量;粒长、粒宽、长宽比、结实率、千粒重数据由水稻数字化考种机(YTS-05D)测量得到。

1.3.2 耐热性评判方法 依据NY/T 2915—2016,结合水稻生殖生长期高温敏感的特性,动态界定热胁迫条件:孕穗后期(抽穗前9~15 d)需满足 $\geq4\text{ d}$ 日最高气温 $\geq35^{\circ}\text{C}$,抽穗扬花期(始穗后7 d)需 $\geq5\text{ d}$ 日最高气温 $\geq35^{\circ}\text{C}$,确保高温胁迫覆盖水稻生殖关键阶段^[6,9,12]。两地2022年7—9月气象数据源自荆州市和三明市两试验地所属市级气象观测站,经筛选后确定两地点均遭遇有效高温胁迫的种质资源126份。通过BLUE(Best linear unbiased estimates)法排除地域适应性偏差,进行种质资源的耐热性评价。

在水稻耐热性鉴定中,结实率是核心表型指标,已有研究主要采用高温下绝对结实率^[13]和相对结实率^[14]2种评价方法。焦颖瑞等^[15]通过整合自然高温与人工模拟高温鉴定体系,证实绝对结实率对结实率稳定性具有显著正向调控作用,而相对结实率因算法特性,可能导致对照结实率较低的品种在高温下误判为“高耐热性”(如对照处理结实率80%时,高温绝对结实率60%仍可计算为75%相对结实率),因此,育种实践中更倾向于选择绝对结实率作为直观筛选标准。

$$\text{绝对结实率} = (\text{饱满粒数} + \text{秕粒数}) / (\text{饱满粒数} + \text{秕粒数} + \text{空粒数}) \times 100\%;$$

D43和D81常规稻品种在 43.43°C 和 40.96°C 高温胁迫下绝对结实率仍达88.84%和72.43%^[16],证明该阈值在生理层面的可行性;耐热杂交稻两优517、隆两优1686、臻两优5438和玮两优8612在长江中下游自然高温区(日均温 $\geq35^{\circ}\text{C}$)绝对结实率稳定在80%以上,验证该阈值在田间场景的可操作

表1 126份水稻种质资源信息

序号	材料名称	来源	类型	序号	材料名称	来源	类型
1	1296	中国湖北	改良种	64	CNR 044-01	中国水稻研究所	CMS恢复系
2	71-3	中国福建	农家种	65	CNR 044-03	中国水稻研究所	改良种
3	87B-1	中国河南	改良种	66	光晴	中国贵州	改良种
4	92-3	中国云南	改良种	67	贵糯1号	中国贵州	改良种
5	95晚102	中国湖南	改良种	68	贵育268	中国贵州	改良种
6	96W355	中国湖南	改良种	69	贵育269	中国贵州	改良种
7	A 1421	国际水稻研究所	外引种	70	黑玉1号	中国河南	改良种
8	A 1531	国际水稻研究所	外引种	71	红稻8号	中国云南	改良种
9	B 11543F-MR-11-B-2-8	印度尼西亚	外引种	72	红晚52	中国福建	改良种
10	B 6397F-MR-7-SM-1-1	印度尼西亚	外引种	73	红香软7号	中国云南	改良种
11	BG 4909-R1-R2	斯里兰卡	外引种	74	红优3号	中国云南	改良种
12	CNB 242	中国水稻研究所	CMS保持系	75	红优5号	中国云南	改良种
13	CNR 044-05	中国水稻研究所	改良种	76	淮稻1号	中国江苏	改良种
14	CNR 054-02	中国水稻研究所	改良种	77	金陵玉籼	中国江苏	改良种
15	ECIA 141-C9	古巴	外引种	78	荆矮糯	中国湖北	改良种
16	IR 03N137	国际水稻研究所	外引种	79	荆糯1号	中国湖南	改良种
17	IR 06M143	国际水稻研究所	外引种	80	明双恢2	中国四川	CMS恢复系
18	IR 06M147	国际水稻研究所	外引种	81	南花11号	中国安徽	改良种
19	IR 07A179	国际水稻研究所	外引种	82	南京14号	中国江苏	改良种
20	IR 10N304	国际水稻研究所	外引种	83	南京2157	中国江苏	改良种
21	IR 10N396	国际水稻研究所	外引种	84	南京70272	中国江苏	改良种
22	IR 11C214	国际水稻研究所	外引种	85	南优2号选	中国湖北	改良种
23	IR 11L441	国际水稻研究所	外引种	86	南优2号选	中国湖北	改良种
24	IR 12L104	国际水稻研究所	外引种	87	南优3号选	中国湖北	改良种
25	IR 12M112	国际水稻研究所	外引种	88	披叶选30	中国四川	改良种
26	IR 13426-19-2	国际水稻研究所	外引种	89	七番占	中国广东	改良种
27	IR 13538-48-2-3-2	国际水稻研究所	外引种	90	黔籼4761	中国贵州	改良种
28	IR 14F734	国际水稻研究所	外引种	91	CNR 095-01	中国水稻研究所	改良种
29	IR 14L271	国际水稻研究所	外引种	92	CNR 095-02	中国水稻研究所	改良种
30	IR 14L272	国际水稻研究所	外引种	93	CNR 095-03	中国水稻研究所	CMS保持系
31	IR 17L1495	国际水稻研究所	外引种	94	双二占选	中国湖北	改良种
32	IR 18350-93-2	国际水稻研究所	外引种	95	双恢选11	中国四川	CMS恢复系
33	IR 19058-107-1	国际水稻研究所	外引种	96	双恢选21	中国四川	CMS恢复系
34	IR 23207-107-3-2-2	国际水稻研究所	外引种	97	双恢选41	中国四川	CMS恢复系
35	IR 39443-83-3-2-3	国际水稻研究所	外引种	98	双恢选6	中国四川	CMS恢复系
36	IR 48525-191-2-2	国际水稻研究所	外引种	99	四喜粘	中国湖北	改良种
37	IR 49688-167-1-2-1	国际水稻研究所	外引种	100	四优6号选	中国湖北	改良种
38	IR 55626-66	国际水稻研究所	外引种	101	晚香91-578	中国湖南	改良种
39	IR 64680-81-2-2-1-3	国际水稻研究所	外引种	102	晚香91-579	中国湖南	改良种
40	IR 65629-22-1-3-3-3-1	国际水稻研究所	外引种	103	五岑香丝稻	中国湖南	改良种
41	IR 65907-123-1-B	国际水稻研究所	外引种	104	籼梗恢10	中国四川	CMS恢复系
42	IR 73000-148-1-1-1	国际水稻研究所	外引种	105	籼梗恢11	中国四川	CMS恢复系
43	IR 80412-B-31-1	国际水稻研究所	农家种	106	籼梗恢2	中国四川	CMS恢复系
44	IR 82912-B-B-2	国际水稻研究所	外引种	107	籼梗恢4	中国四川	CMS恢复系
45	IR 82912-B-B-7	国际水稻研究所	外引种	108	籼梗恢8	中国四川	CMS恢复系
46	IR 9129-169-3-2-3-3	国际水稻研究所	外引种	109	信稻78	中国河南	改良种
47	KMP 34(CHECK)	印度	外引种	110	信香3号	中国河南	改良种
48	CNR 073-08	中国水稻研究所	CMS恢复系	111	信阳14	中国河南	改良种
49	P 59001	中国湖南	改良种	112	信阳20	中国河南	改良种
50	RD 2269-424-298	泰国	外引种	113	信阳23	中国河南	改良种
51	T 108	中国湖南	改良种	114	信阳77	中国河南	改良种
52	T 115	中国湖南	改良种	115	信阳黑米	中国河南	改良种
53	YR 92-7	中国云南	改良种	116	秀2481	中国贵州	改良种
54	爱明恢2	中国四川	CMS恢复系	117	豫南10号	中国河南	改良种
55	爱明恢3	中国四川	CMS恢复系	118	豫南香22	中国河南	改良种
56	爱明恢4	中国四川	CMS恢复系	119	豫南香98	中国河南	改良种
57	慈糯48	中国湖南	改良种	120	沅辐89	中国湖南	改良种
58	当育2号	中国安徽	改良种	121	云陆101	中国农业科学院	改良种
59	多恢57	中国四川	CMS恢复系	122	早育001	中国四川	CMS恢复系
60	二四杰1号	中国安徽	改良种	123	早中山1号	中国广西	改良种
61	辐晚732	中国湖南	改良种	124	中籼259	中国江苏	改良种
62	赣晚糯7号	中国江西	改良种	125	中籼381	中国江苏	改良种
63	哥罗21号	泰国	外引种	126	竹秋40	中国安徽	改良种

性^[17];经典耐热种质N22在38℃下绝对结实率为71%^[18],表明75%阈值可筛选出超越传统耐热水平的种质资源。本研究参考NY/T 2915—2016及文献[16–18],以高温下水稻绝对结实率是否达到75%为判定阈值。若某种质资源在荆州市和三明市两地遭遇高温后,结实率均≥75%,则认为该种质资源为耐热型,等级为I;若某种质资源在两地遭遇高温后,一地结实率≥75%而另一地结实率<75%,则认为该种质资源为疑似型,等级为II;若某种质资源在两地的结实率均<75%,则认为该种质资源为热敏感型,等级为III。

1.4 数据分析

采用Excel 2021软件对表型数据进行统计与整理,采用R 4.4.2软件“lme4”程序包对表型数据的最优线性无偏估计(BLUE)值和遗传力进行计算,基于BLUE值,采用“Hmisc”程序包计算相关系数和P,采用“corrplot”程序包可视化矩阵相关系数,采用“factoextra”程序包进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 水稻种质资源遗传多样性分析

对126份耐热材料的BLUE值进行分析,由表2可知,126份水稻种质资源的10个性状的变异系数为1.02%~12.45%。抽穗时间为88.75~93.57 d,平均值为91.58 d;株高为96.44~154.54 cm,平均值为118.41 cm;穗长为21.52~33.23 cm,平均值为26.91 cm;粒长为6.27~9.92 mm,平均值为8.60 mm;粒宽为2.24~3.14 mm,平均值为2.64 mm;长宽比为2.44~4.40,平均值为3.33;穗数为9.10~15.66穗/株,平均值为11.74穗/株;穗粒数为143.71~276.45粒/穗,平均值为197.36粒/穗;结实率为47.45%~88.50%,平均值为74.07%;千粒重为19.48~29.74 g,平均值为24.72 g。抽穗时间的变异系数最小(1.02%),说明其遗传多样性较小;变异系数大于10%的性状有穗粒数(12.45%)、穗数(12.12%)、长宽比(11.41%)、结实率(10.40%),这4项指标与水稻谷粒的形态和产量有关,变异幅度较大,遗传多样性较丰富。遗传力

最高的为长宽比(0.90),其次为粒长(0.89)和粒宽(0.74)等粒型相关性状,说明这几个性状的变异主要由遗传因素决定,环境因素影响较小,可在育种的低世代进行选择;遗传力最低的为抽穗时间(0.15),其次为穗数(0.40),这类性状受环境因素的影响较大,在育种中应在高世代进行选择以稳定性状。

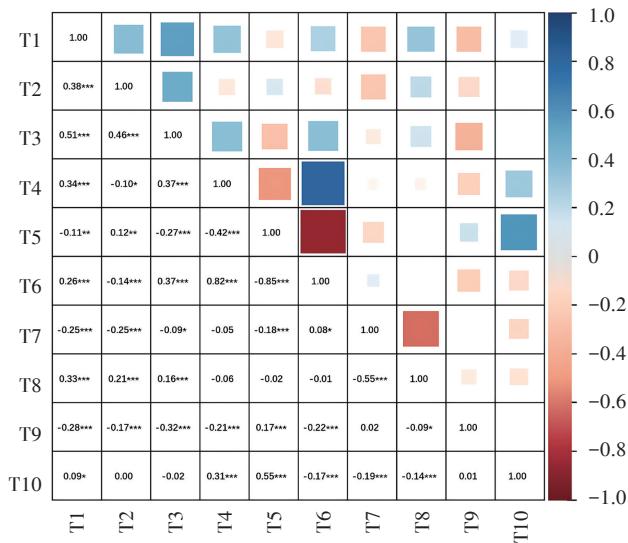
2.2 相关性分析

由图1可知,在自然高温下,结实率与抽穗时间呈极显著负相关($r=-0.28^{***}$),与株高呈极显著负相关($r=-0.17^{***}$),与穗长呈极显著负相关($r=-0.32^{***}$),与粒长呈极显著负相关($r=-0.21^{***}$),与粒宽呈极显著正相关($r=0.17^{***}$)。结实率与抽穗时间、株高、穗长、粒长均呈极显著负相关,可能是因为抽穗时间过长导致水稻花粉发育时期经历高温而活性变低、穗和子粒过长而导致传粉和受精效率变低,从而影响了结实率。结实率与粒宽呈极显著正相关,这可能意味着在一定范围内,粒宽的增加有助于提高结实率。千粒重与粒长呈极显著正相关($r=0.31^{***}$),与粒宽呈极显著正相关($r=0.55^{***}$),这表明谷粒越大,千粒重通常也越重,这可能是因为大粒谷物通常含有更多的营养物质,从而增加了重量。

抽穗时间与株高、穗长、粒长、长宽比、穗粒数呈极显著正相关,与穗数、结实率呈极显著负相关,与粒宽呈显著负相关,这意味着在一定范围内抽穗时间的延长可能会使水稻生殖生长期遭遇高温而导致水稻产量的降低;株高与穗长呈极显著正相关,与穗数呈极显著负相关,这表明水稻植株过高可能会影响分蘖;穗长与粒长、长宽比呈极显著正相关,与粒宽、结实率呈极显著负相关,表明穗长的增加可能会影响谷粒的形状和结实率;粒长、粒宽均与千粒重呈极显著正相关,但与结实率分别呈极显著负相关与极显著正相关,这表明虽然较长谷粒可能增加千粒重,但可能会降低结实率,而一定范围内谷粒宽度的增加可能有助于提高结实率和千粒重;长宽比与结实率、千粒重均呈极显著负相关,这表明谷粒形状(更宽或更圆)可能对提高结实率和千粒重更为有利;穗数与穗粒数、千粒重呈极显著负相关,这可能

表2 10个性状的变异情况及遗传力

参数	抽穗时间//d	株高//cm	穗长//cm	粒长//mm	粒宽//mm	长宽比	穗数//穗/株	穗粒数//粒/穗	结实率//%	千粒重//g
极大值	93.57	154.54	33.23	9.92	3.14	4.40	15.66	276.45	88.50	29.74
极小值	88.75	96.44	21.52	6.72	2.24	2.44	9.10	143.71	47.45	19.48
平均数	91.58	118.41	26.91	8.60	2.64	3.33	11.74	197.36	74.07	24.72
标准差	0.94	7.24	2.11	0.66	0.18	0.38	1.42	24.58	7.70	2.08
变异系数//%	1.02	6.12	7.85	7.67	6.75	11.41	12.12	12.45	10.40	8.41
遗传力	0.15	0.61	0.71	0.89	0.74	0.90	0.40	0.42	0.60	0.60
遗传力排名	10	5	4	2	3	1	9	8	6	7



图中数字表示相关系数;T1 表示抽穗时间,T2 表示株高,T3 表示穗长,T4 表示粒长,T5 表示粒宽,T6 表示长宽比,T7 表示穗数,T8 表示穗粒数,T9 表示结实率,T10 表示千粒重;“*”“**”“***”分别代表在 0.05、0.01、0.001 水平显著

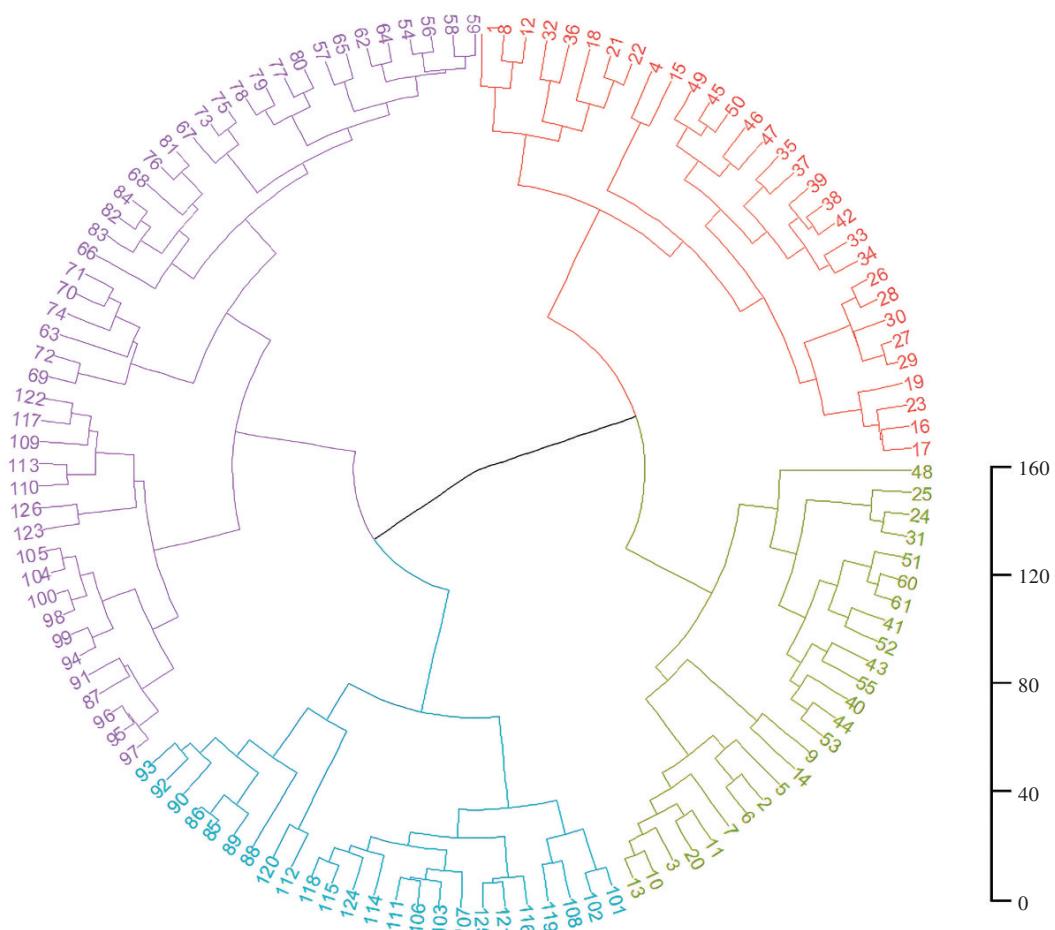
图 1 水稻种质资源 10 个表型性状的相关性分析

表明在一定的生育期内,穗数的增加可能会降低单个穗的重量;穗粒数与千粒重呈极显著负相关,这表

明单个穗的穗粒数增加可能会导致单粒谷物的重量降低。

2.3 聚类分析

如图 2 所示,可以将种质资源分为 4 个不同的类群。第 1 类群属于长粒多穗型,包含了 31 份种质资源,该类群的特点是粒长、长宽比和穗数大,最大值分别为 9.92 mm、4.40、15.66 穗/株,代表性种质资源为 IR 64680-81-2-2-1-3、IR 07A179、IR 13426-19-2 等;第 2 类群属于株型较大型,包括 IR 10N304、IR 65629-22-1-3-3-3-1、B 11543F-MR-11-B-2-8 等 25 份种质资源,这些资源在抽穗时间、株高和穗长方面表现突出,最大值分别为 93.43 d、154.54 cm、33.23 cm;第 3 类群有 46 份资源材料,属宽粒型种质,该类群的特点是粒宽、结实率和千粒重均值都最大,最大值分别为 3.05 mm、88.25%、29.74 g,典型代表材料有贵育 268、CNR 044-03、双恢选 41 等;第 4 类群属于大穗型,包括沅辐 89、信阳 20、披叶选 30 等 24 份资源材料,穗粒数平均值为 230.03 粒/穗,最大值为 276.45 粒/穗,但是粒长、穗数、千粒重的均值是 4 个类群中最小的(表 3),可能是因为大穗型的材料



右上角红色部分为第 1 类群,顺时针方向依次为第 1、2、3、4 类群

图 2 水稻种质资源类群划分