

# 西南伏旱区杂交水稻亲本开花期耐热性鉴定与评价

杨波 刘洁 袁小珍 付强 郭小蛟 陈琳 李耘

(四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院) /

农业农村部西南水稻生物学与遗传育种重点实验室, 德阳 618000)

**摘要:**为了明确西南伏旱区杂交水稻亲本的耐热性、培育耐热性强的品种,同时挖掘出耐热的优异水稻种质资源。通过大田分期播种,利用自然高温,对西南伏旱区选育的49个亲本材料进行开花期耐热性鉴定评价。结果表明:西南伏旱区各育种单位选育的亲本材料耐热性集中在耐热(3级)、较耐热(5级)等级,占比达75.51%。从材料类型来看,恢复系强耐热(1级)、耐热(3级)等级分别占10.34%、72.41%;保持系强耐热(1级)、耐热(3级)等级分别占5.00%、20.00%。西南伏旱区各育种单位选育的材料耐热性整体中等偏上,恢复系耐热性强于保持系,需加强耐热保持系的选择。Q恢52、缙恢12、泸恢1611、神农4B等4份材料耐热性为强耐热(1级)等级,可作为优异耐热性种质资源材料加以利用。

**关键词:**耐热性;开花期;杂交水稻;高温胁迫

## Identification and Evaluation of Heat Tolerance of Hybrid Rice Parents at Flowering Stage in Southwest China's Drought Prone Areas

YANG Bo, LIU Jie, YUAN Xiaozhen, FU Qiang, GUO Xiaojiao, CHEN Lin, LI Yun

(Rice and Sorghum Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences (Deyang Branch of Sichuan Academy of Agricultural Sciences) / Key Laboratory of Southwest Rice Biology and Genetic Breeding,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Deyang 618000, Sichuan)

温室气体的大量排放,导致全球气候变暖,极端高温天气频繁发生,多个年份发生了全国性大范围高温热害<sup>[1-3]</sup>。水稻是我国的主要粮食作物之一,稻谷总产量和需求量目前均居世界首位。西南伏旱区是我国主要的水稻生产区。该地区沿江河谷和低海拔平坝丘陵区大部分为高温伏旱区,特别是四川东部、北部,重庆大部,贵州北部和东南部,7月中下旬至8月上旬日平均气温大于30℃,日最高气温大于35℃的高温天气发生频率高,且昼夜温差小,水稻抽穗扬花期常遇高温<sup>[4-5]</sup>。抽穗开花期是水稻高温最敏感的时期,且以开花当日遇高温影响最大,温度高于35℃超过1h就会导致水稻不育<sup>[6]</sup>。灌浆

成熟期也是水稻易受高温胁迫的时期,如遇高温会造成谷粒充实度降低,稻米品质变差<sup>[7-8]</sup>,从而严重影响产量和稻米商品性。

高温热害已严重制约我国杂交水稻生产,对产量、品质等都有较大影响。谢晓金等<sup>[9]</sup>研究表明,抽穗期高温不仅降低了水稻每穗总粒数、结实率和千粒重,同时也影响了糙米率、精米率、整精米率、垩白度等品质性状。另有研究表明,籼型杂交稻的耐热指数显著高于粳型杂交稻,在籼稻资源中进行耐热性筛选将有更大的机会获得强耐热性的稻种资源<sup>[10-11]</sup>。郭晓艺等<sup>[12]</sup>在人工气候室高温和常温处理条件下对95份水稻杂交组合及恢复系进行耐热性鉴定,筛选鉴定出极耐热的恢复系1份、耐热的恢复系9份。杂交水稻的耐高温能力与其母本耐高温能力有直接关系,但母本不是决定品种耐热性的唯

**基金项目:**四川省财政自主创新专项(2022ZXCX069);四川省“十四五”水稻育种攻关(2021YFY20016)

**通信作者:**李耘

一因素,三系杂交稻的恢复系和保持系同样对杂交稻的耐高温性起着至关重要的作用<sup>[13]</sup>。因此,筛选出耐热性强的种质资源,创制耐高温水稻亲本材料,组配耐热品种用于生产,是育种家目前主攻的方向之一。

本研究针对西南伏旱稻区(四川东部、北部,重庆)选育的49个水稻亲本材料开展开花期耐热试验,分析并综合评价其耐热性,旨在了解西南伏旱稻区水稻亲本材料耐热性现状,并为进一步挖掘西南伏旱稻区耐高温水稻资源增产潜力奠定基础。

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 以西南伏旱稻区创制的49个籼稻亲本为试验材料,其中恢复系29个,保持系20个(表1)。

**1.2 试验地概况** 2021–2022连续2年利用泸州7月中旬至8月中旬自然高温条件,通过大田分期播种进行耐热性鉴定试验,试验在四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)泸县基地(泸州,28°52′28.94″N,105°26′20.32″E)进行。

**1.3 试验设计** 选用西南伏旱稻区创制的49个水

表1 供试亲本材料

序号	材料名称	选育单位	类型	序号	材料名称	选育单位	类型
1	Q恢108	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	26	西恢17	西南大学	恢复系
2	Q恢22	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	27	西恢22	西南大学	恢复系
3	Q恢28	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	28	西恢952	西南大学	恢复系
4	Q恢52	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	29	渝恢7109	重庆市农业科学院重庆再生稻研究中心	恢复系
5	R1018	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	30	渝802B	重庆市农业科学院重庆再生稻研究中心	保持系
6	R1099	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	31	115B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
7	R1222	重庆市农业科学院水稻研究所	恢复系	32	Q1B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
8	SCR12	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	33	Q2B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
9	SCR15	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	34	Q4B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
10	SCR4	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	35	神农2B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
11	泸恢1611	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	36	神农4B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
12	泸恢5240	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	37	神农5B	重庆市农业科学院水稻研究所	保持系
13	泸恢602	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	38	玉龙2B	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	保持系
14	泸恢9号	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	恢复系	39	泸6B	四川省农业科学院水稻高粱研究所(四川省农业科学院德阳分院)	保持系
15	涪恢060	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	40	陵1B	重庆市渝东南农业科学院	保持系
16	涪恢0724	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	41	陵27B	重庆市渝东南农业科学院	保持系
17	涪恢129	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	42	陵405B	重庆市渝东南农业科学院	保持系
18	涪恢6019	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	43	陵7B	重庆市渝东南农业科学院	保持系
19	涪恢8049	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	44	陵8B	重庆市渝东南农业科学院	保持系
20	涪恢9802	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	45	西农1B	西南大学	保持系
21	涪恢98070	重庆市渝东南农业科学院	恢复系	46	西农2B	西南大学	保持系
22	缙恢12	西南大学	恢复系	47	西大2B	西南大学	保持系
23	缙恢13	西南大学	恢复系	48	西大5B	西南大学	保持系
24	缙恢14号	西南大学	恢复系	49	西大8B	西南大学	保持系
25	西恢16	西南大学	恢复系				

稻亲本材料,均设置5个播期,恢复系播期分别为3月20日、3月30日、4月9日、4月19日、4月29日,保持系分别为4月9日、4月19日、4月29日、5月9日、5月19日。移栽株行距为16.7cm×26.7cm,每个小区面积为5m<sup>2</sup>,肥水管理和病虫害防治同一般大田。自水稻抽穗时记录始穗期与齐穗期,每个小区每天选取10个主分蘖按见穗期挂牌;待水稻成熟后按见穗期将挂牌分蘖进行分类,选择开花期经历高温的稻穗,考察结实率<sup>[14]</sup>。

**1.4 耐高温综合评价计算方法及分级** 根据当地气象资料,同时参照焦颖瑞等<sup>[14]</sup>的方法,确定常温结实率(SSR<sub>B</sub>)、高温结实率(SSR<sub>A</sub>)和水稻高温相对结实率(HRFR)。高温结实率:抽穗前后连续遇日最高温35℃以上或日平均气温30℃以上的最低

结实率。常温结实率:除高温期外的其他播期的最高结实率。水稻结实率(SSR)指已经受精结实的颖花占总颖花的比率,计算公式为 $SSR(\%) = (FG + SG) / (FG + SG + EG) \times 100$ ,式中FG为饱粒数,SG为秕粒数,EG为空壳数;高温相对结实率(HRFR)为水稻受高温影响后的实际结实率与未受高温影响正常生长的水稻结实率的比值,计算公式为 $HRFR(\%) = SSR_A / SSR_B \times 100$ 。耐热级数划分参考焦颖瑞等<sup>[14]</sup>的标准,具体见表2。

**1.5 数据分析** 采用Microsoft Excel 2010软件处理数据和做图。

## 2 结果与分析

**2.1 气象条件分析** 图1为2021年和2022年试验期7月1日至8月20日四川泸县试验基地的日

表2 水稻开花期耐热鉴定分级标准

耐热级数	1级	3级	3级	5级	5级	7级	7级	9级
高温相对结实率(%)	≥90	≥90	80~90	≥80	70~80	≥70	60~70	<60
高温结实率(%)	≥85	80~85	≥80	70~80	≥70	60~70	≥60	<60
耐热评价	强耐热	耐热	耐热	较耐热	较耐热	不耐热	不耐热	极不耐热

区间取值包括前值

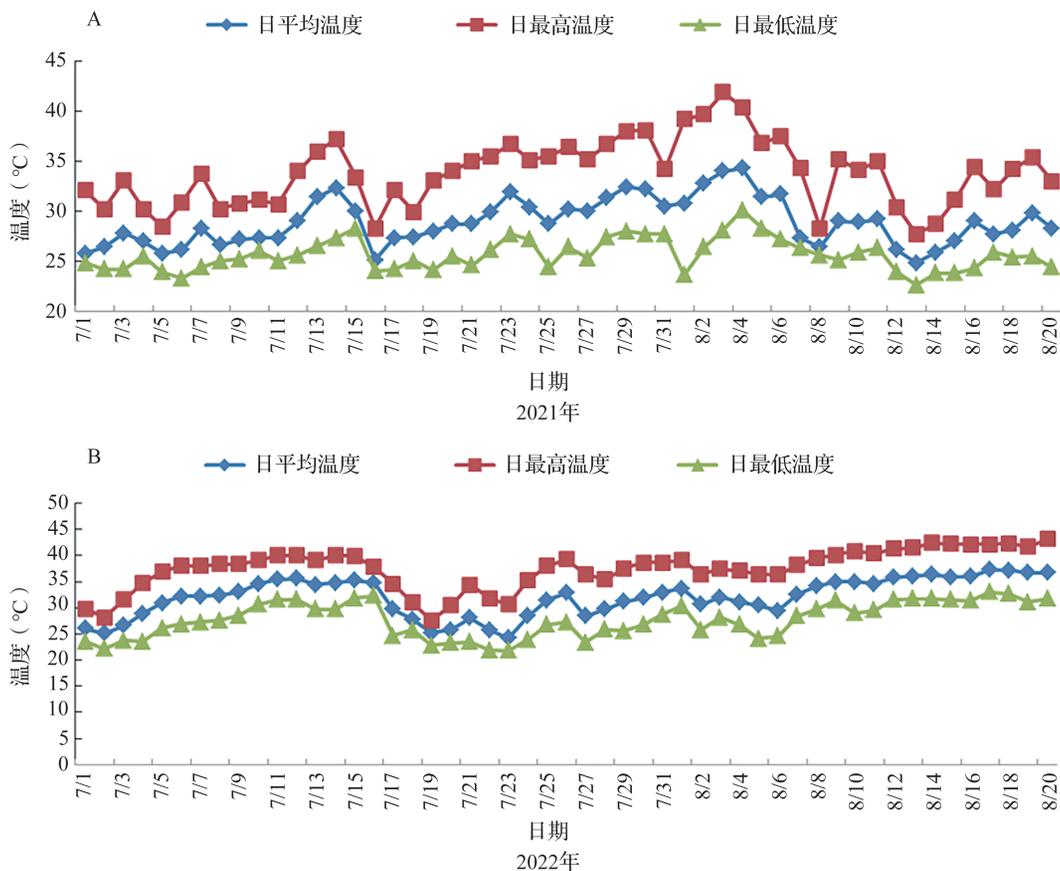


图1 2021-2022年7-8月的日最高温度、日最低温度和日平均温度

最高温度、日最低温度和日平均温度(以下简称日均温)。结果表明,2021年最高温 $35^{\circ}\text{C}$ 以上或日均温 $30^{\circ}\text{C}$ 连续3d以上致害高温天气集中出现在7月13–15日和7月21日至8月6日2个时段,共20d(图1A),其中8月1–4日连续4d最高温度为 $39.2\sim 41.9^{\circ}\text{C}$ 。2022年最高温 $35^{\circ}\text{C}$ 以上或日均温 $30^{\circ}\text{C}$ 连续3d以上致害高温天气集中出现在7月5–16日和7月24日至8月20日,2个时间段共40d(图1B),其中8月9–20日连续12d日均温达

到 $35^{\circ}\text{C}$ 以上。池忠志等<sup>[15]</sup>研究表明,抽穗前后3d平均最高温度 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为籼稻品种热害的临界温度。

**2.2 抽穗时期分布** 由表3、表4可知,2021年不同播期下,恢复系亲本材料的抽穗期分布在6月29日至8月8日之间,保持系亲本材料的抽穗期分布在6月14日至8月13日之间。2022年不同播期下,恢复系亲本材料的抽穗期分布在6月30日至8月2日之间,保持系亲本材料的抽穗期分布在6月15日至8月8日之间。高温时段主要集中在7月中下

表3 2021–2022年恢复系亲本材料不同播期的抽穗期分布

(月/日)

材料名称	2021年播期					2022年播期				
	3/20	3/30	4/9	4/19	4/29	3/20	3/30	4/9	4/19	4/29
Q恢108	6/30	7/8	7/14	7/17	7/28	7/1	7/12	7/14	7/20	7/26
Q恢22	6/29	7/7	7/13	7/18	7/25	6/30	7/9	7/14	7/17	7/20
Q恢28	7/5	7/12	7/17	7/22	7/30	7/9	7/15	7/17	7/25	7/26
Q恢52	7/5	7/12	7/16	7/21	7/30	7/8	7/14	7/15	7/24	7/26
R1018	6/30	7/10	7/14	7/18	7/26	7/3	7/11	7/15	7/20	7/25
R1099	7/8	7/15	7/20	7/26	8/4	6/30	7/18	7/21	7/26	7/30
R1222	6/29	7/7	7/13	7/16	7/25	7/3	7/10	7/13	7/15	7/21
SCR12	7/9	7/17	7/21	7/29	8/6	7/14	7/18	7/22	7/26	7/30
SCR15	6/30	7/8	7/13	7/19	7/27	7/3	7/10	7/15	7/18	7/23
SCR4	7/11	7/18	7/24	7/29	8/8	7/15	7/23	7/26	7/29	8/2
泸恢1611	7/1	7/8	7/12	7/17	7/28	7/3	7/11	7/14	7/18	7/26
泸恢5240	7/5	7/11	7/14	7/20	7/30	7/9	7/14	7/16	7/21	7/26
泸恢602	7/3	7/9	7/13	7/18	7/26	7/4	7/10	7/12	7/18	7/24
泸恢9号	7/4	7/11	7/15	7/20	7/30	7/7	7/15	7/17	7/21	7/28
涪恢060	7/5	7/12	7/18	7/22	8/1	7/7	7/15	7/18	7/22	7/27
涪恢0724	7/8	7/15	7/20	7/25	8/2	7/8	7/15	7/19	7/24	7/29
涪恢129	7/3	7/9	7/14	7/18	7/29	7/3	7/11	7/14	7/19	7/26
涪恢6019	6/29	7/8	7/12	7/16	7/27	7/1	7/11	7/14	7/16	7/23
涪恢8049	7/8	7/14	7/19	7/22	8/4	7/10	7/16	7/21	7/25	7/27
涪恢9802	7/7	7/15	7/21	7/26	8/2	7/13	7/18	7/21	7/24	7/29
涪恢98070	7/3	7/11	7/16	7/20	7/30	7/6	7/14	7/16	7/22	7/27
缙恢12	7/4	7/10	7/13	7/18	7/28	7/9	7/12	7/15	7/21	7/25
缙恢13	7/6	7/12	7/16	7/19	7/30	7/10	7/15	7/16	7/20	7/26
缙恢14号	7/5	7/12	7/17	7/24	7/31	7/10	7/15	7/19	7/25	7/26
西恢16	7/5	7/12	7/17	7/24	7/31	7/9	7/16	7/19	7/26	7/26
西恢17	7/8	7/13	7/19	7/25	8/3	7/10	7/17	7/19	7/24	7/28
西恢22	7/7	7/14	7/20	7/24	8/2	7/10	7/18	7/19	7/24	7/30
西恢952	7/3	7/10	7/16	7/19	7/30	7/6	7/14	7/16	7/20	7/26
渝恢7109	7/8	7/16	7/22	7/28	8/3	7/12	7/18	7/23	7/27	7/31

表4 2021–2022年保持系亲本材料不同播期的抽穗期分布

(月/日)

材料名称	2021年播期					2022年播期				
	4/9	4/19	4/29	5/9	5/19	4/9	4/19	4/29	5/9	5/19
渝 802B	7/2	7/6	7/14	7/28	8/1	6/30	7/8	7/14	7/21	7/30
115B	7/11	7/17	7/24	8/2	8/7	7/12	7/17	7/22	7/27	8/6
Q1B	7/13	7/18	7/27	8/4	8/13	7/15	7/18	7/24	7/30	8/8
Q2B	6/19	6/23	6/30	7/9	7/13	6/16	6/24	6/30	7/8	7/15
Q4B	7/7	7/12	7/22	8/4	8/9	7/8	7/12	7/17	7/26	8/3
神农 2B	7/5	7/10	7/17	7/28	8/6	7/5	7/13	7/19	7/25	8/2
神农 4B	7/1	7/7	7/14	7/25	8/1	6/30	7/13	7/15	7/20	7/26
神农 5B	7/7	7/11	7/22	7/30	8/5	7/6	7/14	7/21	7/27	8/3
玉龙 2B	6/30	7/3	7/11	7/24	7/31	6/29	7/4	7/11	7/20	8/1
泸 6B	7/5	7/9	7/18	8/2	8/6	7/8	7/15	7/17	7/24	8/1
陵 1B	6/27	6/30	7/10	7/22	7/28	6/26	7/4	7/11	7/18	7/27
陵 27B	6/24	6/28	7/9	7/20	7/27	6/26	7/5	7/11	7/19	7/28
陵 405B	7/5	7/9	7/18	7/26	8/3	7/3	7/12	7/17	7/26	8/2
陵 7B	7/5	7/9	7/14	7/20	7/30	7/6	7/11	7/15	7/23	8/1
陵 8B	6/22	6/28	7/8	7/23	7/31	6/23	6/30	7/5	7/17	7/28
西农 1B	6/14	6/23	6/29	7/6	7/15	6/15	6/23	6/28	7/6	7/12
西农 2B	7/4	7/8	7/16	7/31	8/3	7/4	7/11	7/14	7/24	8/2
西大 2B	7/4	7/7	7/18	7/30	8/3	7/5	7/10	7/15	7/24	8/1
西大 5B	6/19	6/23	7/2	7/10	7/17	6/18	7/3	7/8	7/10	7/17
西大 8B	7/3	7/8	7/16	7/27	8/1	7/5	7/10	7/15	7/26	7/30

旬至8月中旬,持续时间较长,各材料均遇到了连续高温危害。

**2.3 结实率及材料耐热性评价** 由表5、表6可知,各材料不同播期结实率差异明显,2021年各材料的常温结实率( $SSR_B$ )在第1期至第3期,这3期抽穗期集中在6月下旬至7月中旬。2022年各材料的常温结实率( $SSR_B$ )在第1期、第2期,这2期抽穗期集中在6月下旬至7月中旬。2021年恢复系常温结实率均在80.00%以上,保持系除渝802B、神农2B、泸6B、西大5B、陵405B外,其余保持系常温结实率均在80.00%以上;2022年恢复系除SCR12、泸恢9号、涪恢0724外,其余常温结实率均在80.00%以上;保持系除渝802B、陵27B、神农2B、西大5B、泸6B、陵405B外,其余保持系常温结实率均在80.00%以上;渝802B、神农2B、泸6B、西大5B、陵405B自身结实率较低,其余材料结实率正常。高温结实率( $SSR_A$ )集中在第4期和第5期,这2期抽

穗期在7月下旬至8月上旬,而高温时段主要集中在7月中下旬至8月中旬时段,绝大部分材料开花期受到了高温胁迫。2021年Q恢22等12个恢复系和神农4B、Q2B的高温结实率在80.00%以上,2022年Q恢52等10个恢复系和神农4B的高温结实率在80.00%以上,其余材料2年的高温结实率均在80.00%以下,高温结实率最低的材料是西农1B,2年分别为45.52%、39.91%。各材料高温结实率较常温结实率均显著降低,且材料间耐热性差异较大。

根据2021–2022年平均常温结实率( $SSR_B$ )、高温结实率( $SSR_A$ )和相对结实率(HRFR)进行耐热评价(表7),并分析了不同耐热性材料占比(表8)。耐热性等级1级为强耐热,3级为耐热,5级为较耐热,7级为不耐热,9级为极不耐热。各材料的耐热性不同,耐热性等级集中在3级、5级,占比达75.51%,说明西南伏旱稻区各育种单位选育的

表5 2021—2022年恢复系亲本材料不同播期的结实率

(%)

材料名称	2021年播期					2022年播期				
	3/20	3/30	4/9	4/19	4/29	3/20	3/30	4/9	4/19	4/29
Q恢108	76.05	88.32	85.44	80.18	85.29	86.88	83.28	81.35	87.69	86.37
Q恢22	86.63	88.05	85.00	90.33	89.77	85.03	83.51	84.35	80.77	76.58
Q恢28	83.99	92.66	85.67	87.68	76.14	88.91	80.96	86.40	88.55	75.92
Q恢52	86.41	93.21	89.10	88.20	78.44	88.40	87.07	84.34	88.31	89.32
R1018	90.86	89.68	85.16	85.68	79.64	84.09	53.67	78.72	85.93	80.61
R1099	62.82	90.01	88.29	78.65	76.18	65.11	76.11	81.27	77.32	78.98
R1222	83.18	84.98	90.63	85.69	88.00	87.81	84.98	78.93	86.53	82.17
SCR12	83.71	80.80	85.63	80.06	66.64	67.30	76.12	77.20	76.07	68.19
SCR15	84.37	80.46	87.84	79.26	81.23	85.28	67.14	50.61	66.63	74.13
SCR4	89.47	75.37	69.37	76.88	67.05	65.86	83.29	74.09	75.31	59.84
泸恢1611	84.46	91.51	94.28	88.53	83.71	83.77	77.12	76.79	89.40	83.99
泸恢5240	83.63	91.09	90.32	85.53	73.65	88.77	82.63	82.19	87.26	87.19
泸恢602	79.14	84.50	88.34	87.09	77.31	79.20	80.49	56.85	50.57	76.92
泸恢9号	79.54	81.90	83.52	77.32	74.65	75.61	67.87	63.74	68.45	64.05
涪恢060	71.63	84.82	89.70	78.47	66.45	80.44	71.35	81.67	86.78	75.85
涪恢0724	85.41	80.33	71.05	73.13	89.30	69.50	75.57	73.37	70.21	61.85
涪恢129	84.21	83.96	90.74	89.48	87.36	86.93	89.32	87.10	75.40	87.77
涪恢6019	76.60	82.66	83.25	80.11	77.44	80.14	69.99	88.69	64.60	86.00
涪恢8049	91.54	92.94	85.22	77.54	70.44	77.88	83.10	85.97	88.60	80.73
涪恢9802	83.77	82.54	82.74	76.41	75.92	83.86	79.53	76.67	82.26	67.90
涪恢98070	87.81	86.23	93.66	82.37	76.85	95.28	85.96	91.10	89.25	82.67
缙恢12	81.02	92.65	91.35	84.36	86.45	85.29	84.09	85.02	88.11	86.07
缙恢13	88.43	90.56	91.43	84.55	84.09	80.32	73.58	82.48	85.57	85.63
缙恢14号	83.38	83.40	84.01	88.21	78.68	82.68	79.87	83.41	82.68	73.12
西恢16	84.40	87.32	87.26	81.35	79.61	84.71	82.15	82.27	81.33	77.64
西恢17	85.22	89.36	82.82	75.86	71.83	80.77	85.70	83.02	81.92	77.03
西恢22	85.95	87.54	88.26	71.82	60.42	80.58	84.20	81.95	82.60	81.14
西恢952	84.27	86.17	51.71	81.77	82.16	85.25	88.35	82.34	60.74	87.33
渝恢7109	81.14	85.54	86.79	78.77	74.64	54.85	87.18	85.17	85.05	78.14

材料耐热性中等偏上。从材料类型来看,恢复系耐热性强于保持系,恢复系耐热性等级集中在1级、3级,分别有3个、21个,占比为10.34%、72.41%,保持系耐热性等级集中在5级、7级,分别有9个、5个,占比为45.00%、25.00%,说明选育的恢复系耐热性较强,保持系耐热性一般。恢复系耐热性为1级的材料有Q恢52、缙恢12、泸恢1611;保持系耐热性为1级的材料有神农4B。

### 3 讨论

目前我国在水稻品种耐热性鉴定评价标准上并未规范统一,主要采用NY/T 2915—2016《水稻高温热害鉴定与分级》进行评价,2020年安徽省制订并发布了DB 34/T 3484—2019《一季籼稻品种耐热性鉴定技术规程》。不同的科研工作者采用的耐热性分级指标略有不同,有些采用高温相对结实率HRFR,如果供试品种在常温下结实率偏低可能导致HRFR

表6 2021–2022年保持系亲本材料不同播期结实率

(%)

材料名称	2021年播期					2022年播期				
	4/9	4/19	4/29	5/9	5/19	4/9	4/19	4/29	5/9	5/19
渝 802B	74.65	75.87	78.05	77.54	57.15	78.68	69.24	76.99	64.77	70.00
115B	93.77	88.27	89.55	81.73	72.19	65.54	80.81	81.56	77.08	76.58
Q1B	90.78	89.68	83.75	73.83	73.16	74.42	83.62	87.10	75.67	65.30
Q2B	77.79	87.25	82.26	80.27	85.87	78.57	74.46	83.30	72.54	56.74
Q4B	91.73	87.20	90.97	84.89	65.84	79.27	80.51	84.49	69.33	74.81
神农 2B	73.86	77.38	77.47	76.71	61.96	77.00	66.91	68.75	68.32	61.35
神农 4B	72.85	86.15	93.84	89.34	84.43	92.29	84.58	83.58	91.32	86.54
神农 5B	85.46	90.38	86.19	85.86	72.65	94.03	89.04	88.71	70.42	83.41
玉龙 2B	79.34	77.40	80.09	77.89	67.95	81.33	71.87	64.18	76.14	74.86
泸 6B	72.58	67.48	72.36	65.77	49.90	72.59	64.69	69.48	55.71	65.21
陵 1B	70.52	87.20	73.41	73.10	57.32	80.16	87.32	81.55	82.98	78.99
陵 27B	72.08	77.11	86.82	78.92	70.96	73.65	78.20	71.77	71.89	74.48
陵 405B	76.62	69.47	74.88	82.50	48.13	72.23	59.33	67.41	55.66	62.24
陵 7B	85.22	80.45	87.48	76.54	67.47	84.28	82.19	76.50	73.01	70.30
陵 8B	77.35	81.56	68.54	82.01	56.79	84.37	73.44	61.97	68.30	66.02
西农 1B	88.42	85.61	83.97	49.91	39.91	84.76	68.89	93.22	86.25	75.52
西农 2B	84.21	77.52	83.93	73.58	62.06	81.46	78.18	65.06	60.40	68.32
西大 2B	84.68	75.94	82.11	79.10	67.01	77.35	72.12	80.74	58.98	67.65
西大 5B	75.49	76.84	73.71	72.22	77.62	71.76	75.90	73.75	72.84	71.45
西大 8B	87.82	80.80	85.68	82.67	68.84	79.57	69.88	81.56	68.63	63.93

偏高;有些采用相对耐热系数(供试品种的高温结实率/对照品种的高温结实率),对照品种不同相对耐热系数也不同。本文采用焦颖瑞等<sup>[14]</sup>的方法,考虑了常温下结实率偏低可能导致HRFR偏高的情况,按高温相对结实率与高温结实率划分耐热性不同等级,使得耐热品种的划分标准更加严格,评价结果契合生产实际,评级标准适合高温热害区。

目前,已报道的与耐热相关的QTL和基因数量较多,但在生产上广泛应用的较少,主要原因是水稻的高温耐性是受多基因调控的数量性状,单个基因的导入很难使高温耐性得到显著提升<sup>[15]</sup>。对水稻耐热的研究主要揭示耐热基因响应热胁迫的表达,而对其调控基因及其在育种中应用的研究较少<sup>[16]</sup>。因此,还需努力解析水稻耐热分子机制,为育种应用提供更多的耐热基因资源。

随着全球气候变暖,水稻生产受高温热害的影响日趋严重,培育耐热性强的水稻新品种是育种家的主要研究方向之一。研究表明,籼稻资源中有更

大的获得强耐热性稻种资源的可能<sup>[17]</sup>。在本研究中,恢复系材料耐热性比保持系材料强,主要是因为西南伏旱稻区每年6–8月均存在持续35℃以上的高温天气,大部分参试恢复系材料生育期长,均会经历高温胁迫,更容易选育出具有耐热性强的材料。胡声博等<sup>[18]</sup>研究表明,保持系对杂交水稻的耐热性起主导作用。目前而言,可利用的强耐热性种质资源相对匮乏,尤其是强耐热性保持系种质资源。因此,着力培育新的耐热性优异保持系(不育系)是培育耐热水稻品种的突破口。

#### 4 结论

西南伏旱稻区各育种单位选育的材料耐热性中等偏上,但强耐热材料较少。从材料类型看,恢复系耐热性强于保持系。Q恢52、缙恢12、泸恢1611、神农4B等4份材料耐热性为强耐热,可作为优异耐热性种质资源材料加以利用。同时,应加强强耐热材料的选育,特别是保持系的选育,助力强耐热水稻新品种的培育。

表7 各亲本材料的耐热性评价

恢复系名称	常温结实率 (%)	高温结实率 (%)	相对结实率 (%)	耐热等级	保持系名称	常温结实率 (%)	高温结实率 (%)	相对结实率 (%)	耐热等级
Q恢52	91.26	83.89	91.97	1	神农4B	93.07	84.00	90.26	1
缙恢12	90.38	84.22	93.24	1	玉龙2B	80.71	66.07	81.88	3
泸恢1611	91.84	80.25	87.34	1	陵1B	87.26	78.15	89.56	3
Q恢108	88.01	80.77	91.78	3	陵27B	82.51	71.37	86.75	3
Q恢22	87.68	80.79	92.08	3	陵7B	85.88	68.88	80.27	3
Q恢28	90.79	76.03	83.78	3	西农2B	82.84	61.23	73.92	5
R1018	88.40	76.65	86.69	3	渝802B	78.37	60.96	77.77	5
R1099	85.64	70.65	82.38	3	115B	87.67	68.87	78.67	5
R1222	89.22	82.31	92.22	3	Q1B	88.94	69.23	77.78	5
SCR12	81.41	66.97	82.50	3	Q4B	88.11	67.59	76.92	5
SCR15	86.56	74.94	86.52	3	陵8B	83.19	59.38	71.35	5
涪恢0724	82.43	67.49	81.87	3	神农5B	92.21	71.53	77.63	5
涪恢129	90.03	79.68	88.48	3	西大2B	82.71	63.00	76.09	5
涪恢6019	85.97	71.02	82.93	3	西大8B	84.69	66.38	78.38	5
涪恢8049	90.77	74.16	81.85	3	Q2B	85.28	56.31	66.07	7
涪恢9802	83.81	71.91	85.80	3	陵405B	77.36	56.89	73.76	7
涪恢98070	94.47	79.76	84.40	3	泸6B	72.58	52.81	72.76	7
缙恢13	88.53	78.83	88.95	3	神农2B	77.23	61.65	79.83	7
缙恢14号	85.81	75.90	88.43	3	西大5B	76.76	71.84	93.60	7
泸恢5240	89.93	77.92	86.72	3	西农1B	90.82	42.71	46.98	9
泸恢602	86.42	75.49	87.35	3					
西恢16	86.02	78.62	91.41	3					
西恢17	87.53	74.43	85.13	3					
西恢22	86.23	80.00	92.84	3					
SCR4	86.38	63.44	73.39	5					
涪恢060	88.24	68.90	78.15	5					
泸恢9号	79.56	69.20	86.85	5					
西恢952	87.26	56.22	64.37	7					
渝恢7109	86.99	59.74	68.69	7					

表8 不同耐热性材料占比分析

耐热等级	合计		恢复系		保持系	
	数量	占比 (%)	数量	占比 (%)	数量	占比 (%)
1级	4	8.16	3	10.34	1	5.00
3级	25	51.02	21	72.41	4	20.00
5级	12	24.49	3	10.34	9	45.00
7级	7	14.29	2	6.90	5	25.00
9级	1	2.04	0	0	1	5.00

## 参考文献

- [1] 黄义德,曹流俭,武立权,严平,陈多璞,杨安中. 2003年安徽省中稻花期高温热害的调查与分析. 安徽农业大学学报,2004,31(4):385-388
- [2] 田小海,罗海伟,周恒多,吴晨阳. 中国水稻热害研究历史、进展与展望. 中国农学通报,2009,25(22):166-168
- [3] 申广勒,张从合,王慧,严志,周桂香,杨韦,黄艳玲,汪和廷,张云虎,陈琳,庞战士,王林. 利用自然异常高温开展耐高温水稻品种大群体筛选的方法研究与应用. 安徽农业科学,2022,50(17):18-21
- [4] 肖本泽,南波,张方玉. 长江中下游流域水稻试验品种的耐热性鉴定. 中国稻米,2022,28(6):21-26
- [5] 黄英金,罗永锋,黄兴作,饶志明,刘宜柏. 水稻灌浆期耐热性的品种间差异及其与剑叶光合特性和内源多胺的关系. 中国水稻科学,1999,13(4):205-210
- [6] Jagadish S V K, Craufurd P Q, Wheeler T R. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Experimental Botany,2007,58(7):1627-1635
- [7] Asako K,Junya S,Kazuhiko S,Motohiko K,Norio I,Takeshi H,Katsura T,Masahiro Y,Toyohiro S. Detection and verification of QTLs associated with heat-induced quality decline of rice (*Oryza sativa* L.) using recombinant inbred lines and near-isogenic lines. Breed Science,2013,63(3):339-346
- [8] Lyman N B, Jagadish K S V, Nalley L L, Dixon B L, Siebenmorgen T. Neglecting rice milling yield and quality underestimates economic losses from high-temperature stress. PLoS ONE,2013,8(8):e72157
- [9] 谢晓金,李秉柏,李映雪,李昊宇,赵小艳,杨沈斌,王志明. 抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素和品质的影响. 中国农业气象,2010,31(3):411-415
- [10] 杨梯丰,张少红,王晓飞,黄章慧,赵均良,张桂权,刘斌. 水稻抽穗开花期耐热种质资源的筛选鉴定. 华南农业大学学报,2012,33(4):585-588
- [11] 查中萍,殷得所,万丙良,焦春海. 水稻种质资源开花期耐热性分析. 湖北农业科学,2016,55(1):17-19,23
- [12] 郭晓艺,熊洪,张林,蒋鹏,朱永川,周兴兵,刘茂,徐富贤. 杂交水稻恢复系和杂交组合的耐热性评价. 中国生态农业学报,2018,26(9):1343-1354
- [13] 胡声博. 水稻高温诱导颖花不育品种间差异及其机理研究. 北京:中国农业科学院,2013
- [14] 焦颖瑞,李玲依,杨仕会,胡健,曹红宇,刘雨菲,雷震胜,张红梅,王兵兵,霍帅宗,杨正林,李耘,杨波,何光华,姚贺盛. 长江上游水稻耐热性鉴定模型的构建与应用. 西南大学学报:自然科学版,2022,44(11):39-50
- [15] 池忠志,姜心禄,郑家国. 杂交水稻结实率的高温响应研究初报. 西南农业学报,2008,21(1):235-237
- [16] Ma Z M, Lv J, W W H, Fu D, Lv S Y, Ke Y G, Yang P F. Regulatory network of rice in response to heat stress and its potential application in breeding strategy. Molecular Breeding,2023,43(9):68
- [17] 陈云凤,黎世龄,罗筱平,李如意,管地发,吴青佼. 水稻抽穗扬花期抗高温品系筛选试验. 广东农业科学,2017,44(2):1-5
- [18] 胡声博,张玉屏,朱德峰,林贤青,向镜. 杂交水稻耐热性评价. 中国水稻科学,2012,26(6):751-756

(收稿日期:2025-05-27)

## (上接第115页)

- Research,2015,10(31):3029-3040
- [11] 马锦钰. 大力发展辽西地区特色农业. 现代农业,2012(4):58-59
- [12] 周伟,金广洋,余忠浩,周亚星. 176份糯高粱品系主要农艺性状综合评价. 江苏农业科学,2024,52(14):128-134
- [13] 韩永亮,张清华,罗河月,郭群,崔江慧,常金华,方路斌. 基于主成分和系统聚类分析法对高粱杂交组合的综合评价. 贵州农业科学,2022,50(11):13-19
- [14] 张一中,张晓娟,梁笃,郭琦,范昕琦,聂萌恩,王绘艳,赵文博,杜维俊,柳青山. 基于表型性状的高粱育种材料遗传多样性分析及综合评价. 中国农业科学,2023,56(15):2837-2853
- [15] 王自力,张北举,李魁印,陈松树,徐如宏,李鲁华,吴传喜,任明见. 高粱种质资源表型性状多样性分析及综合评价. 江苏农业科学,2022,50(18):115-121
- [16] 高旭,冯周,丁延庆,徐建霞,曹宁,程斌,汪灿,张立异. 257份高粱种质资源农艺性状的遗传多样性. 西南农业学报,2023,36(1):1-10
- [17] 陆平. 高粱种质资源描述规范和数据标准. 北京:中国农业出版社,2006
- [18] 杨珍,李斌,赵军,刘辉生,王凯,罗新华,殷稳娜. 甜高粱主要农艺性状与产量相关和通径分析. 中国糖料,2018,40(4):16-19
- [19] 高进,施庆华,蔡立旺,王永慧,戚永奎,施洋,王为,丁海洋,王海洋,孙艳茹,陈建平. 甜高粱新品种(系)主要农艺性状与产量的灰色关联度分析. 福建农业学报,2018,33(6):581-586
- [20] 王博,严亮亮,宋丽华. 宁夏5个野生酸枣种群遗传变异分析. 西北农业学报,2021,30(12):1824-1834
- [21] 付江鹏,柳发财,闫宝琴,赵智慧,李利利,王永栋,魏玮,周英霞. 不同高粱品种适应性综合评价与筛选. 西北农林科技大学学报:自然科学版. <https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20241111.1712.005>
- [22] 崔新晓,宫慧慧,李艳丽,王欣,董玉岭,张秀荣,陈莹,赵军胜. 基于主成分分析的11个紫苏品系引种表现分析. 中国种业,2025(3):98-104
- [23] 董承光,李成奇,李生秀,周小凤,马晓梅,肖光顺,李保成. 棉花种质资源主要农艺性状的综合评价及聚类分析. 新疆农业科学,2011,48(3):425-427,429
- [24] 邹剑秋. 高粱育种与栽培技术研究新进展. 中国农业科学,2020,53(14):2769-2773

(收稿日期:2025-05-07)