

张建福, 肖晏嘉, 谢鸿光, 等. 影响水稻再生力 QTLs 位点与再生稻筛选体系研究进展 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(6): 837-842.
ZHANG Jianfu, XIAO Yanjia, XIE Hongguang, et al. Research progress on QTLs loci affecting rice retooing ability and screening system for ratoon rice[J].
Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(6): 837-842.

特约综述

影响水稻再生力 QTLs 位点与再生稻筛选体系研究进展

张建福^{1,2†}, 肖晏嘉^{1,2†}, 谢鸿光^{1,2}, 林强^{1,2}, 蔡秋华^{1,2}, 谢华安^{1,2}

(1 福建省农业科学院 水稻研究所, 福建福州 350018; 2 农业农村部华南杂交水稻种质创新与分子育种重点实验室/国家水稻改良中心福州分中心/福建省作物分子育种工程实验室/福建省水稻分子育种重点实验室/福建省作物种质创新与分子育种省部共建国家重点实验室培育基地/杂交水稻国家重点实验室华南研究基地/水稻国家工程实验室, 福建福州 350003)

摘要: 挖掘水稻产量潜力是水稻研究最重要的方向之一。再生稻是一种利用水稻头季收割后稻桩上存活的腋芽, 在适宜的光照、温度、养分等条件下萌发成蘖, 进而抽穗成熟的水稻, 在节约大量人力物力的同时能够保证水稻产量与双季稻基本持平, 对于稳定国家粮食安全具有重要意义。本文综述了已报道的水稻再生力相关 QTLs 位点, 发现水稻再生力相关的 QTLs 位点贡献率偏低, 相关研究不深入, 与生产联系不紧密; 总结了水稻再生力评价标准的现状, 发现前期头季稻的 SPAD 衰减指数、中期再生稻的再生芽出鞘率以及收获后期的日产量和热量利用率是评价水稻品种再生力的重要指标, 可用于筛选强再生力的水稻品种; 概括了留桩高度对再生稻产量和品质的影响。提出再生稻的培育应聚焦优质、高产、抗病等水稻重要性状及强再生力相关性状, 利用多组学分析挖掘新基因及其优异自然变异, 开发功能分子标记, 利用全基因组关联分析与分子模块育种技术相结合开展强再生力水稻种质资源精准鉴定、新基因发掘、种质创新、新品种选育研究。

关键词: 水稻; 再生稻; 再生力; QTL; 再生力评价标准

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)06-0837-06

Research progress on QTLs loci affecting rice retooing ability and screening system for ratoon rice

ZHANG Jianfu^{1,2†}, XIAO Yanjia^{1,2†}, XIE Hongguang^{1,2}, LIN Qiang^{1,2}, CAI Qiuhua^{1,2}, XIE Huanan^{1,2}

(1 Rice Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350018, China; 2 Key Laboratory of Germplasm Innovation and Molecular Breeding of Hybrid Rice for South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Fuzhou Branch, National Rice Improvement Center/Fujian Engineering Laboratory of Crop Molecular Breeding/Fujian Key Laboratory of Rice Molecular Breeding/Incubator of National Key Laboratory of Fujian Germplasm Innovation and Molecular Breeding Between Fujian and Ministry of Sciences & Technology/Base of South China, National Key Laboratory of Hybrid Rice/
National Rice Engineering Laboratory of China, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Mining rice yield potential is one of the most important directions of rice research. Ratoon rice is a kind of rice that utilizes the axillary buds that survive on the rice pile after the first season of harvesting, the buds germinate into tillers under suitable light, temperature, nutrients and other conditions, and then proceed to heading and maturity. Growing ratoon rice saves a lot of manpower and material resources while ensuring that

收稿日期: 2023-05-20 网络首发时间: 2023-10-17 13:39:33

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20231016.1106.006>

作者简介: 张建福, 研究员, 博士, 主要从事水稻分子育种研究, E-mail: jianfzhang@163.com; 肖晏嘉, 助理研究员, 博士, 主要从事水稻分子育种研究, E-mail: 378766993@qq.com; †表示同等贡献

基金项目: 福建省属公益类科研专项 (2020R1023008, 2022R10230010); 福建省科技重大专项 (2022NZ030014); 福建省科技计划项目-中央引导项目 (2022L3018); 海南省院士创新平台科研专项 (YSPTZX202022)

the rice yield is basically the same as that of double-cropping rice, and it is of great significance for stabilizing national food security. In this paper, the reported QTLs related to rice retooing ability were reviewed, and we found that the contribution rates of the reported QTLs related to rice retooing ability were low, and the related research was not in depth and not closely related to production. The present situation of evaluation criteria for rice retooing ability was summarized. We found that the SPAD attenuation index of the first season rice in the early stage, the sprouting rate of ratoon rice in the middle stage, and the daily yield and heat utilization rate in the late harvest stage were important indicators for evaluating the retooing abilities of rice varieties, which could be used to screen rice varieties with strong retooing abilities. The effects of stump height on yield and quality of ratoon rice were summarized. Finally, we proposed to focus on important rice traits such as high quality, high yield, disease resistance, and other traits related to strong retooing ability, to mine new genes and their excellent natural variation by multi-omics analysis, to develop functional molecular markers, and to combine genome-wide association study with molecular module breeding technology to carry out research on accurate identification of rice germplasm resources with strong retooing abilities, new gene exploration, germplasm innovation and new variety breeding.

Key words: Rice; Ratoon rice; Retooing ability; QTL; Evaluation criteria for retooing ability

作为我国最主要的粮食作物之一,水稻稳产对保证国家社会稳定的重要性不言而喻,如何继续提高、挖掘水稻产量潜力仍是最重要的研究方向之一。近年来,随着我国城镇化和工业化的快速推进以及农村供给侧结构性改革,荒地复垦有限、农村劳动力转移、粮食种植效率低下等潜在问题也凸显出来。在这种情况下,提高水稻单产和稻田复种指数是确保我国粮食安全的有效途径。再生稻是一种利用收割后稻桩上存活的休眠芽,在适宜条件下萌发成蘖,进而成穗再收获一季的耕作模式。再生稻的历史十分悠久,在汉末郭义恭所著《广志》、张湛所著《养身要术》和明代徐光启所著《农政全书》中均有记载,俗称“抱孙谷”或“秧孙谷”^[1]。四川农学院杨开渠教授是世界上最早研究再生稻的学者,于 1937 年开始对再生稻高产技术进行系统研究,为我国再生稻的发展和应用奠定了基础^[2]。再生稻具有生育期短、日产量高、质量好、效益高、物料时间成本低等优点,适宜在光照、温度资源种植水稻一季有余而两季不足,以及“双改单”的南方稻区种植^[3]。而且再生稻的产量能够持平甚至超过双季稻,显著高于单季稻^[4]。由于减少了第二次播种插秧工序,节约大量人力物力的同时再生稻能够保证水稻产量与双季稻基本持平。农村劳动力大量转移以及双季稻种植面积逐渐减少的现状使得再生稻在生产上具有推广的意义。我国再生稻生产已取得较大发展,但仍有巨大的潜力,适宜推广种植的区域面积达 335 万 hm^2 ^[5]。

再生稻头季和再生季都要求高产,但其易受环

境和栽培条件影响,因此,再生稻育种难度大、育成品种少,且类型单一,现有品种主要由推广应用的品种筛选而来,远不能满足实际生产需求,急需再生力强、产量高、品质优、熟期短、抗倒伏、适于机收的综合性状优良的品种。因此,构建再生力遗传研究和评价体系,可为关键基因的挖掘与鉴定、提高育种效率提供保障。

目前再生稻分子机理方面的研究还处于初步探索阶段,再生稻形成机制研究进展较为缓慢,前人已报道一些影响水稻再生力的 QTL 位点,但具体的功能基因及其相关研究相对较少,再生稻分子生物学和生理学缺乏深入研究,制约了再生稻分子机理的研究,导致强再生力水稻品种选育缺乏可用的分子标记。因此对影响再生稻形成的功能基因克隆以及稳定的分子标记开发迫在眉睫。同时,对水稻再生力的评价标准也有部分研究,如何将其整合作为再生力评价体系,作为标准用于强再生力水稻新品种选育,也值得进一步分析研究。本文整理了目前已报道的水稻再生力相关 QTL 位点,分析了水稻再生力评价标准的现状,以期对强再生力水稻新品种的选育提供研究基础。

1 再生稻相关 QTL 位点分析

研究人员使用双亲材料挖掘影响再生稻的 QTL 位点,找到了一些有功能的 QTL 位点,但具体功能基因报道较少。谭震波等^[6]利用‘窄叶青 8 号’和‘京系 17’杂交 F_1 代花药离体培养,构建含有 133 个单株的双单倍体群体,以每株稻桩单

个茎秆的平均再生苗数作为衡量再生力的指标进行再生力 QTL 定位, 总共得到 6 个影响再生能力的 QTL 位点 (*Ra3a*、*Ra4a*、*Ra5a*、*Ra6a*、*Ra6b*、*Ra7a*), 其中, *Ra6a* 和 *Ra6b* 来源于‘窄叶青 8 号’, 能够提高再生能力, 其余 4 个 QTL 位点 (*Ra3a*、*Ra4a*、*Ra5a*、*Ra7a*) 来源于‘京系 17’, 会降低再生能力。郑景生等^[7]利用‘明恢 86’和‘佳辐占’构建含有 300 个单株的 F₂ 群体, 定位了 1 个提高水稻再生力(再生穗数)的 QTL、1 个提高再生产量的 QTL 和 2 个提高产量构成的 QTL, 分别位于 1 号 (*qsNP*, 贡献率 13.6%) 和 7 号染色体 (*qPN*, 贡献率 8.0%; *qGY*, 贡献率 7.9%; *qSS*, 贡献率 9.6%), 均来源于‘明恢 86’, 其中, 位于 7 号染色体的 *qPN*、*qGY*、*qSS* 遗传距离较近, 可能存在基因连锁。杨川航等^[8]利用‘糯 89-1’与‘蜀恢 527’构建了含有 169 个家系的重组自交系群体, 并对多个性状进行了 QTL 检测, 其中, 影响水稻再生季 7 个农艺性状的 QTL 位点有 19 个, 影响水稻再生力(最终再生率)的 QTL 位点有 2 个 (*qRa4*、*qRa5*), 分别位于 4 号和 5 号染色体上, 分别来源于‘糯 89-1’和‘蜀恢 527’, 贡献率分别为 8.17% 和 7.09%, 其中, *qRa4* 能够提高再生力, *qRa5* 则降低再生力。杨莉等^[9]利用‘日本晴’和‘泸恢 99’构建了含有 188 个家系的重组自交系群体, 对 7 个农艺性状进行了 QTL 检测, 共定位到 20 个 QTL 位点, 其中有 3 个影响水稻再生力的 QTL 位点, 分别位于 7 号和 8 号染色体, 贡献率仅为 3.40%~5.39%, 其中, 位于 7 号染色体的位点降低再生力, 2 个位于 8 号染色体的位点可提高再生力。Ji 等^[10]利用普通野生稻‘W1944’与‘Hwayeong’构建的含有 126 个家系的渗入系, 在 5 号染色体上找到 1 个提高再生力的主效 QTL 位点 *qRAT5*, 但由于定位区间较大且精细定位群体仅有 14 个单株, *RAT5* 的具体功能基因未能找到。李兴星等^[11]利用‘热粳 35’与‘协 B’构建了包含 226 个单株的 F₂ 群体, 在不同发育时期对单株穗数、再生穗数和再生后期穗数进行了 QTL 定位, 获得 2 个再生穗数 QTL 位点 *qRa8* 和 *qRall*, 贡献率分别为 23.35% 和 16.01%; 2 个再生后期穗数 QTL 位点 *qLsr11* 与 *qLsr12*, 贡献率分别为 12.18% 和 25.12%。Hu 等^[12]利用‘明恢 63’与‘02428’构建的渗入系群体, 对 9 个与再生力相关的性状进行统计, 包括头季和再生季的分蘖数、每株穗数、单株产量以及两季分蘖数比、每株穗数比、单株产量比, 共获得 22 个 QTL 位点, 贡献率

为 3.26%~18.63%, 其中, *qRA5* 显著降低了头季的分蘖数、每株穗数以及两季单株产量比, 显著提高了两季分蘖数比与两季每株穗数比, 通过精细定位确定 *qRA5* 区间大小为 311.16 kb, 包含 47 个候选基因。He 等^[13]前期在‘佳辐占’与‘恢 1586’构建的 NIL 群体中发现 1 个再生力低于‘佳辐占’的家系 NIL128, 通过图位克隆的方式将其定位于 2 号染色体, 测序发现定位区间内的 *LOC_Os02g51930* 在 NIL128 中存在 1 个单碱基的替换导致多肽链合成提前终止, 将其命名为 *qRA2*, 并通过基因敲除的方法验证了其降低了背景亲本‘佳辐占’的再生力。在不影响主要农艺性状的同时, *qRA2* 提高了水稻再生力, 具有重要应用价值。

已报道的大部分再生稻相关 QTL 位点集中在 4、5、6、7、8、11 号染色体上, 且都是微效 QTL 位点, 这可能是因为定位群体均由双亲材料构建, 群体基因变异不足。且这些位点的具体功能基因报道有限。再生稻形成的分子机理研究进程远远落后于水稻生产需求, 因此对影响再生稻的主效 QTL 挖掘、主效基因克隆以及后续的功能研究十分必要。

前期我们观察了影响再生稻发育最重要的水稻器官——腋芽的生长发育, 并对不同时期的腋芽进行了蛋白质组学分析。观察‘汕优 63’的腋芽发育时发现, 在母茎抽穗前, 不同节间的腋芽从下往上逐步缓慢分化, 准备形成新穗; 在母茎抽穗之后, 则是从上往下快速分化, 且顶部的腋芽发育显著快于其他节间的。随后对‘汕优 63’不同时期的再生稻腋芽进行蛋白质组学分析。分析筛选获得表达水平变化较大的蛋白 9846 个, 上调和下调表达的蛋白分别为 5268 和 4578 个。这些蛋白质研究主要有 3 个方面, 包括生理过程、细胞组分和分子功能。通过多种手段分析, 发现与油菜素内酯 (Brassin lactone, BR) 合成相关的 4 个蛋白积累量显著上升^[14]。通过 qRT-PCR 对 8 个参与类固醇生物合成/脂肪酸生物合成和酪氨酸代谢的编码差异表达蛋白的基因进行检测, 发现黄熟期后这 8 个基因的表达均下调; 有 7 个基因在再生力强的水稻品种‘汕优 63’中表达高于再生力弱的水稻品种‘珍汕 97B’; *BGIOSGA007157* 编码萜烯环化酶, 参与 BR 信号传导, 与蛋白质组学分析结果吻合, 因此 BR 很可能是参与再生稻腋芽萌发过程的重要激素。

2 再生力鉴定及评价指标

水稻再生力鉴定方法和评价指标已有诸多研究, 但研究手段、试验材料差异、栽培技术及环境

条件的不同,导致再生力评价指标存在争议。例如,对于头季稻桩茎秆相关表型,Ichii 等^[15]认为头季稻桩茎秆的粗壮程度可以作为评价再生力的特性指标。而 Garcia 等^[16]认为,水稻茎秆性状易受栽培、自然环境等外部因素影响,表型不稳定,不适宜作为鉴定再生力的指标。谭震波等^[6]、杨川航等^[8]、林强等^[17]研究表明,头季稻有效穗数与再生季产量呈显著或极显著负相关关系。任天举等^[18]研究指出,头季稻有效穗数相对较少的品种更适宜作为再生稻品种。林文雄等^[19]研究指出,头季分蘖力中等但再生力较强的重穗型杂交籼稻品种,再生季更容易高产。但也有研究指出,较多有效穗数是强再生力水稻品种的特征之一^[20-24]。李贵勇等^[25]研究表明,头季稻有效穗数增加有利于提高再生季水稻产量。刘永胜等^[26]研究也发现,有效穗数与亚种间杂交稻的再生季产量的直接效应达极显著水平。这些研究结果说明再生稻的评价鉴定体系仍然存在争议。

徐富贤等^[27]以 25 和 18 个杂交中籼迟熟组合为材料,从头季稻与再生力密切相关的若干性状中选择最高苗期单株分蘖数、齐穗期单穗颖花数、单位颖花的茎鞘干物质占有量、绿叶干物质占有量和再生芽出鞘率,构建其与再生稻产量的关系模型,最终发现分蘖数(前期)、齐穗期单位颖花茎鞘干物质占有量(中期)和头季稻收后的稻桩再生芽出鞘率(后期)与再生季产量显著相关,准确率高达 86.05%~93.02%,可据此在头季对水稻品种的再生力进行预测,可操作性强。

随着农业生产机械水平不断提高,以及农村劳动力短缺,轻简化机收低留桩再生稻成为发展趋势^[19],再生稻获得高产的关键在于品种选择^[1]。头季稻穗的灌浆期正是再生稻穗的 1、2 次枝梗分化和颖花分化期,存在养分供求矛盾,造成再生稻穗小粒少^[28]。结合再生稻穗发育的特点,在轻简化栽培方式下,再生稻的增产主要依靠提高有效穗数,因此促进腋芽的萌发成苗是再生稻高产增产的关键。此外再生稻穗茎比与产量及其构成因素也具有很强的关联性,有效穗数和穗茎比对再生稻产量起决定作用,头季大穗重穗和再生季多穗的品种,有助于发挥颖花量和库容量优势,易获高产。有效穗数多、穗茎比大,热能利用率、日产量和产量较高。穗茎比作为鉴定再生力的关键指标,预测再生季产量的平均精度超过 90%^[29]。

根据这一情况我们研究了轻简化栽培再生稻的关键筛选指标,发现轻简化栽培方式下再生稻的

增产因素是有效穗数,促进腋芽的萌发成苗是再生稻高产增产的关键。前期头季稻的 SPAD 衰减指数、中期再生稻的再生芽出鞘率,以及收获后期的日产量和热量利用率与再生稻产量呈极显著正相关,三者构建的产量模型预测精度较高^[30];其中,2 周和 1 周再生芽出鞘率的决定系数均达 60% 以上,是决定再生力的关键因子。我们以再生芽出鞘率为再生力指标,对 8 个恢复系的再生力进行分级,并以此构建了一系列水稻杂交组合,进行了强再生力恢复系材料的筛选与创制,最终获得 3 个产量高、农艺性状协调、米质优、抗稻瘟病、花粉量大、花期长、恢复力强、生育期较为一致的强再生力试验材料^[31]。这些研究说明以再生芽出鞘率预测水稻再生季产量具有可行性,可为适宜再生稻新品种的筛选提供参考。

3 强再生力再生稻推广与留桩高度

我们自 2000 年始开展强再生力水稻新品种的选育、筛选及高产栽培示范片区建设工作,育成众多再生稻新品种,在福建省尤溪县连续 23 年高产示范种植中,头季单产平均 12.41 t/hm²,再生季平均单产 7.24 t/hm²,两季最高总产 21.70 t/hm²,取得了良好的示范效应,为再生稻在福建省的推广种植奠定了基础^[3, 32-40]。各地先后利用当地的主栽品种进行再生稻种植,并根据种植情况总结了适应不同品种的栽培措施,包括播期管理、密植程度、水肥措施、病害防治、头季收获时间、留桩高度等^[41-43]。其中,留桩高度直接决定了再生稻的腋芽数量,与再生季的产量直接相关^[44-48]。前期我们以 192 份水稻品种为研究对象,分别在头季收获后进行了高留桩(40 cm)和低留桩(5 cm)处理,研究水稻再生力与品种及留桩高度的关系,研究表明,不同品种的再生力受留桩高度的影响程度各异,粳稻品种在低留桩处理下、籼稻品种在高留桩处理下,再生芽出鞘率相对较高^[43]。此外有研究表明,低留桩母茎上可利用的健壮腋芽相应减少,可利用促发成苗的概率明显降低;而 25 cm 以上的高留桩虽然母茎上的腋芽较多,但营养供给不足以支撑多芽萌发,导致穗多、粒少、产量下降。同时,稻桩节位越高节间距越长,各节位萌芽出苗时间延长,导致成熟期拉长、成熟一致性较差,最终导致产量不高;留桩 25 cm 能保证 3 个节芽的利用,从而获得最高产量^[49-50]。高留桩的再生稻的糙米率、精米率、整精米率、透明度明显较好,加工品质明显优于低留桩的^[51-53]。

4 总结与展望

随着劳动力短缺问题日益严重,水稻种植物料成本不断增加,继续挖掘水稻产量潜力,是保障我国粮食安全的研究方向之一。再生稻能够充分利用光照、温度资源,提高复种指数,对保障粮食安全具有重要意义,具有良好的推广前景。再生腋芽萌发能力是保证再生稻产量的关键因素。然而,强再生力水稻种质资源较为缺乏,再生稻相关的分子研究还处于起步阶段。虽然前人己发现一些影响再生力的 QTL 位点,但使用的材料多是双亲材料,遗传变异较少,且具体的功能基因及分子机制研究报道较少,缺乏可开发利用的分子标记,生产上综合性状优良的强再生力水稻品种不多,推广应用面积不大,再生稻品种的培育任重而道远。

挖掘调控再生稻腋芽萌发的关键基因,解析再生稻分蘖产生的分子机理,对选育再生力强的水稻品种具有重要的理论指导意义。研究者应结合各类组学以及全基因组关联分析等手段,获得影响水稻再生力的功能基因,深入研究其分子机理;同时开发可用的分子标记,结合水稻再生力评价体系,筛选强再生力水稻新品种。聚焦优质、高产、抗病等水稻重要性状,将表型与基因鉴定相结合,筛选可用于育种的优异材料,利用多组学分析挖掘复杂数量性状新基因及优异自然变异,开发功能分子标记,将全基因组关联分析与分子模块育种技术相结合,开展强再生力水稻种质资源精准鉴定、新基因发掘、种质创新和新品种选育研究。

参考文献:

[1] 熊洪, 冉茂林, 徐富贤, 等. 南方稻区再生稻研究进展及发展[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 297-304.

[2] 杨开渠. 双季稻再生稻的性状研究[M]. 成都: 四川人民出版社, 1958.

[3] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 等. 不同氮肥施用量对再生稻氮素吸收和分配的影响[J]. 福建农业学报, 2003, 18(1): 50-55.

[4] 旷娜, 莫文伟, 唐启源, 等. 再生稻与晚稻产量形成对比分析[J]. 杂交水稻, 2021, 36(6): 48-53.

[5] LIN W X. Developmental status and problems of rice ratooning[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(1): 246-247.

[6] 谭震波, 沈利爽, 陆朝福, 等. 水稻再生能力和头季稻产量性状的 QTL 定位及其遗传效应分析[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 289-295.

[7] 郑景生, 李义珍, 林文雄. 应用 SSR 标记定位水稻再生力和再生产量及其构成的 QTL[J]. 分子植物育种, 2004, 2(3): 342-347.

[8] 杨川航, 王玉平, 涂斌, 等. 利用 RIL 群体对水稻再生力

及相关农艺性状的 QTL 分析[J]. 作物学报, 2012, 38(7): 1240-1246.

[9] 杨莉, 蒋开锋, 张涛, 等. 水稻再生力与产量性状的 QTL 分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2179-2184.

[10] JI S D, LUO X, AHN S N. Mapping QTL for ratooning ability in advanced backcross lines from an *Oryza sativa* × *O. rufipogon* cross[J]. *Korean Journal of Agricultural Science*, 2014, 41(1): 1-7.

[11] 李兴星, 郑剑, 周军杰, 等. 利用籼粳交“热梗 35/协 B” F₂ 群体对水稻再生力的 QTL 分析[J]. 分子植物育种, 2016, 14(9): 2383-2391.

[12] HU H, GAO R, HE L, et al. Genetic dissection of rice ratooning ability using an introgression line population and substitution mapping of a pleiotropic quantitative trait locus *qRA5*[J]. *Plants*, 2022, 11(9): 1134.

[13] HE N Q, HUANG F H, YANG D W. Fine mapping and cloning of a *qRA2* affect the ratooning ability in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(2): 967.

[14] XU H B, LIAN L, WANG F X, et al. Brassinosteroid signaling may regulate the germination of axillary buds in ratoon rice[J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 14.

[15] ICHII M, SUMI Y. Effect of food reserves on the ratoon growth of rice plant[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1983, 52(1): 15-21.

[16] GARCIA R N, MABBAYAD B B, VERGARA B S. Effects of growth duration and different levels of light intensity on the ratooning ability of rice[J]. *Philippine Journal of Crop Science*, 1980, 5: 109-111.

[17] 林强, 姜照伟, 林祁, 等. 杂交稻强再生力鉴定指标的建立及组合筛选[J]. 福建农业学报, 2019, 34(8): 873-882.

[18] 任天举, 张晓春, 王培华, 等. 杂交中稻、再生稻两季高产组合的主要特征特性及配合力效应[J]. 西南农业学报, 2005, 18(4): 382-386.

[19] 林文雄, 陈鸿飞, 张志兴, 等. 再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 392-401.

[20] 任天举, 蒋志成, 王培华, 等. 杂交中稻再生力与头季稻农艺性状的相关性研究[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 613-617.

[21] 徐富贤, 熊洪, 赵甘霖, 等. 杂交中稻强再生力品种的冠层特征研究[J]. 作物学报, 2002, 28(3): 426-430.

[22] 徐富贤, 熊洪. 杂交中稻粒叶比与再生力的关系[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(4): 249-252.

[23] 徐富贤, 洪松, 熊洪. 促芽肥与杂交中稻再生力关系及其作用机理[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 311-317.

[24] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717.

[25] 李贵勇, 谭丽明, 刘玉文, 等. 再生稻的产量形成及其高产群体分析[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(4): 577-583.

[26] 刘永胜, 周开达, 罗文质, 等. 水稻亚种间杂种再生力评价及其与头季稻农艺性状的相关性[J]. 四川农业大学

- 学报, 1992, 10(3): 408-412.
- [27] 徐富贤, 郑家奎, 朱永川, 等. 杂交中稻再生力的鉴定方法[J]. 作物学报, 2005, 31(4): 506-510.
- [28] 李义珍, 黄育民. 再生稻丰产栽培技术研究: II: 水稻再生成穗规律[J]. 福建稻麦科技, 1990, 8(1): 26-28.
- [29] 林强, 郑长林, 林祁, 等. 再生稻穗茎比与产量及其构成因素的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 65-74.
- [30] 林强, 王颖姮, 林祁, 等. 轻简栽培再生稻的产量形成及关键筛选指标[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 38-47.
- [31] 林强, 郑长林, 林芳, 等. 水稻强再生力种质创制及遗传分析[J]. 科学通报, 2021, 66(2): 244-252.
- [32] 林强, 蔡秋华, 崔丽丽, 等. 强再生力水稻品种筛选与选育研究进展[J]. 中国稻米, 2022, 28(5): 1-6.
- [33] 蔡秋华, 林强, 朱永生, 等. 再生稻高产高效生产技术研究进展[J]. 科技促进发展, 2021, 17(10): 1843-1850.
- [34] 谢华安, 郑家团, 张受刚, 等. 中国种植面积最大的水稻良种“汕优 63”培育的理论与实践[J]. 福建省农科院学报, 1996(4): 1-6.
- [35] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 等. 不同氮肥施用量对再生稻干物质积累运转的影响[J]. 福建农业学报, 2004, 19(2): 103-107.
- [36] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 等. 不同氮肥施用量对再生稻若干生理特性的影响[J]. 福建农业学报, 2005, 20(3): 168-171.
- [37] 谢华安. 超级稻再生栽培高产特征及示范效果[C]//2007 中国科协年会专题论坛“红莲型杂交水稻学术专题研讨会”. 武汉: 中国科学技术协会, 2007: 189-195.
- [38] 谢华安. 超级稻作再生稻高产栽培特性的研究[J]. 杂交水稻, 2010, 25(S1): 17-26.
- [39] 谢华安, 李义珍, 姜照伟, 等. 再生稻超高产结构及其调控[C]//空间诱变育种研究与开发进展: 航天育种高层论坛. 北京: 中国高科技产业化研究会, 2005: 61-70.
- [40] 郑荣和, 卓传营, 张上守, 等. 超级稻 II 优航 2 号特征特性及作再生稻高产栽培技术[J]. 福建稻麦科技, 2008, 26(1): 8-9.
- [41] 林祁, 林强, 蒋家焕, 等. 谷优 676 作再生稻大面积示范高产栽培技术[J]. 杂交水稻, 2021, 36(4): 62-64.
- [42] 郑家团, 王乌齐, 张建福, 等. 超级杂交稻 II 优航 1 号的生物学特性[J]. 中国农学通报, 2006, 22(10): 111-115.
- [43] 朱永生, 何炜, 郑燕梅, 等. 不同留桩高度下水稻再生力的基因型差异[J]. 福建农业学报, 2014, 29(2): 123-127.
- [44] 罗赣丰, 郭飞舟, 周志宏, 等. 再生稻高产栽培技术研究[J]. 江西农业学报, 2007, 19(6): 19-20.
- [45] 易镇邪, 周文新, 屠乃美. 留桩高度对再生稻源库性状与物质运转的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(5): 509-516.
- [46] 邓小华, 郑贤陆. 冷浸田杂交中稻—再生稻高产栽培技术研究[J]. 杂交水稻, 2003, 18(6): 43-44.
- [47] 刘见平, 徐志德, 熊继东, 等. 杂交中稻免耕抛栽高桩再生集成技术研究[J]. 杂交水稻, 2003, 18(4): 42-45.
- [48] 陈丽娟. 留桩高度对内 6 优 7075 再生季生长发育及产量的影响[J]. 中国农技推广, 2022, 38(11): 40-42.
- [49] 林席跃, 伍先群, 雷正平, 等. 再生稻头季机收对再生季产量损失成因及减损技术研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(18): 200-204.
- [50] 刘秀斌, 刘正忠, 罗美玉. 再生稻头季机收留桩高度试验初报[J]. 福建农业科技, 2014(5): 13-15.
- [51] 姚晓云, 彭志勤, 陈春莲, 等. 头季与再生季稻米品质比较及留桩高度对品质性状的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(6): 70-76.
- [52] 王飞, 黄见良, 彭少兵. 机收再生稻丰产优质高效栽培技术研究进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(1): 1-6.
- [53] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 杂交中稻留桩高度对再生稻米质的影响及其与头季稻米质的关系[J]. 中国稻米, 2014, 20(1): 86-87.



张建福, 男, 博士, 1971 年 12 月生, 现任福建省农业科学院水稻研究所所长, 研究员, 博士生导师。主要从事水稻分子育种研究。近年来, 主持国家“973”项目子课题, 国家“973”“863”重大项目子课题, 国家自然科学基金面上项目, 福建省科技重大专项等。已主持育成 11 个水稻新品种并通过省级以上审定, 其中国家级审定 2 个, 育成的优质常规稻品种‘福香占’荣获第三届国家优质稻食味品质金奖, 授权国家发明专利 5 件和植物新品种权 8 项; 荣获福建省科技进步奖一等奖 1 项(排名第 1), 安徽省张海银种业促进奖二等奖 1 项, 农业部神农科技奖优秀创新团队奖 1 项(排名第 5), 作为副主编编著出版了《中国水稻品种志——福建台湾篇》1 部, 发表学术论文 130 余篇, 其中在《Science》《Nature Communication》《Molecular Plant》和《Plant Biotechnology Journal》等 SCI 刊物上发表论文 30 余篇, 已培养毕业研究生 54 名, 其中, 博士研究生 9 名。

【责任编辑 霍 欢】