

网络出版时间:2020-04-17 16:27 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.10.005
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200417.1316.010.html

轻简栽培再生稻的产量形成及关键筛选指标

林 强^{1,2,3}, 王颖姮^{1,2,3}, 林 祁⁴, 卓芳梅⁵, 张建福^{1,2,3}

(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, 福建 福州 350003; 3 水稻国家工程实验室, 福建 福州 350003;

4 福建省尤溪县农业技术推广站, 福建 尤溪 365100; 5 福建省尤溪县梅仙镇农业技术推广站, 福建 尤溪 365101)

【摘要】【目的】探析再生稻产量与植株性状间的关系,为适宜轻简栽培再生稻品种的选育和筛选以及高产栽培提供理论与实践依据。【方法】田间试验于 2018 年在福建省三明市尤溪县再生稻试验示范基地进行,以 5 个重穗型强再生力杂交稻品种为材料,采用轻简栽培方式,设置 3 个重复,完全随机区组设计。考查农艺及穗部性状,测定并计算 SPAD 值衰减指数、再生芽出鞘率、热能利用率和日产量。通过相关、回归与通径分析,研究再生稻产量构成与形成特点,解析性状指标与产量及产量构成因素的关系,进而确定再生力关键因子。【结果】轻简栽培方式下,再生稻产量构成因素中,有效穗数受千粒质量、结实率和颖花量间接作用的累加效应,对产量贡献最大,因而增加有效穗数是提高再生稻产量的重要途径。再生稻产量与头季稻株高、结实率、千粒质量呈极显著正相关关系,相关系数分别达 0.63, 0.54, 0.65, 说明筛选和选育再生力强、植株高度适宜、生产量大的高结实重穗型杂交稻品种是保障头季稻和再生稻产量的前提。SPAD 值衰减指数与再生稻产量间相关性达极显著水平,相关系数为 -0.82, 其偏相关系数也达极显著水平,可作为衡量再生稻品种产量高低的关键指标。1 周、2 周再生芽出鞘率与产量间均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.85 和 0.83, 决定系数均达 68% 以上,是决定再生力的关键因子。日产量和热能利用率由两季总产间接计算而来,与再生稻产量间相关性极显著,可作为再生稻品种筛选的关键指标。所建产量模拟模型对再生稻产量的预测精度均达 85% 以上。【结论】轻简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。不同时期鉴定再生力的关键筛选指标分别为前期头季稻的 SPAD 值衰减指数、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,所建产量模型预测精度较高。

【关键词】 水稻育种; 再生稻; 植株再生力; 产量形成; 轻简栽培

【中图分类号】 S511

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)10-0038-10

Yield formation and key screening indicators ratooning rice under simplified cultivation

LIN Qiang^{1,2,3}, WANG Yingheng^{1,2,3}, LIN Qi⁴, ZHUO Fangmei⁵, ZHANG Jianfu^{1,2,3}

(1 Rice Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350018, China;

2 Key Laboratory of Germplasm Innovation and Molecular Breeding of Hybrid Rice for South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fuzhou, Fujian 350003, China; 3 National Rice Engineering Laboratory of China, Fuzhou, Fujian 350003, China;

4 Agro-technical Extension Station of Youxi County, Youxi, Fujian 365100, China;

5 Agro-technical Extension Station of Meixian Town, Youxi County, Youxi, Fujian 365101, China)

Abstract: 【Objective】The relationships between agricultural traits and yield of ratooning rice were studied to provide basis for breeding and screening of ratooning rice varieties suitable for simplified cultivation.

【收稿日期】 2019-09-23

【基金项目】 福建省省属公益类科研院所基本科研专项“强再生力水稻新种质创制与新品种培育”(2016R1020-4); 国家重点研发计划资助项目“水稻优质高效品种筛选及其配套栽培技术”(2016YFD0300508)

【作者简介】 林 强(1977—), 男, 福建闽清人, 副研究员, 博士, 主要从事水稻遗传育种与栽培技术研究。
E-mail: 625460569@qq.com

【通信作者】 张建福(1971—), 男, 福建永定人, 研究员, 博士, 主要从事水稻分子生物学研究。E-mail: jianfzhang@163.com

tion and application of high yield cultivation technology. 【Method】 The field experiment was conducted on the experimental demonstrative base for ratooning rice at Youxi, Fujian in 2018. Five heavy panicle hybrid rice varieties with strong ratooning ability were planted in a simplified cultivation system with a completely random block design for three repeats. The agronomic and panicle traits, index for SPAD decay, ratio of ratooning bud number to total stems number, heat utilization efficiency of grain and daily grain yield were deducted. Then correlation analysis, regression and path analysis were used to study the characteristics of yield components and formation for ratooning rice, analyze the relationship between yield and yield components, and identify the key traits for ratooning ability. 【Result】 The combined effects of thousand grain weight, seed setting rate and spikelet number had the largest positive effect on yield under simplified cultivation, indicating that increasing effective panicle number was an important approach to increase the yield of ratooning rice. The plant height ($P < 0.01, r = 0.63$), seed setting rate ($P < 0.01, r = 0.54$) and thousand grain weight ($P < 0.01, r = 0.65$) for main crop season had positive correlations with the yield of ratooning rice. Those results showed that strong ratooning ability, suitable plant height and high yield of main crop were important factors to ensure the yield of main crop and ratooning rice. The SPAD decay index and yield of ratooning rice was negatively correlated ($P < 0.01, r = -0.82$), and the partial correlation coefficient was also significant ($P < 0.01$). Thus, it could be used as a key trait to forecast the yield of ratooning rice. The ratio of ratooning bud number to total stem number at the 7th and 14th days after harvest were positively correlated with the yield of ratooning rice ($P < 0.01, r = 0.85$ and 0.83) with coefficient of determination higher than 68%, and both of them were key factors for ratooning ability. The daily grain yield and heat utilization efficiency of grain calculated based on total yield of main crop and ratooning rice were correlated with the yield of ratooning rice ($P < 0.01$), and they can be used as key factors for identifying ratooning ability. According to the yield simulation model derived from these indexes, the prediction accuracy of the ratooning rice yield were higher than 85%. 【Conclusion】 Increasing the effective panicle number was important for yield improvement of ratooning rice under simplified cultivation, and the key factor was to promote the development of sprouting buds. The key factors for identifying ratooning ability at different stages were SPAD decay index at early main crop season, ratio of ratooning bud number to total stem number in middle ratooning rice season, and daily grain yield and heat utilization efficiency of grain in the late season after harvest, and the established prediction model of yield has higher precision.

Key words: rice breeding; ratooning rice; plant regeneration; yield formation; simplified cultivation

再生稻是在水稻收获头季后,利用其腋芽萌发并抽穗结实从而再次收获的水稻。由于再生稻具有生育期短、米质优、日产量高、省工、调节劳力、节约物料成本和经济效益高等特点,在热量资源一季有余而双季不足的稻区,或双季稻区只种单季的地区得以广泛应用。近年来,在四川、湖南、重庆、湖北、云南、江西、福建、广西、安徽、贵州、浙江等南方稻区形成一定的再生稻种植规模,面积达 124 万 hm^2 以上。随着农业生产机械化水平的不断提高,以及农村劳动力转移和短缺问题,轻简化机收低留桩再生稻成为发展的趋势^[1],而再生稻获得高产的关键在于品种选择^[2]。因此,选育适宜机械化轻简栽培的高效水稻品种及关键筛选指标体系的构建,对南方稻区发展高效优质再生稻具有重要的现实意义。

头季稻产量高、再生力强的品种是再生稻高产的重要基础^[3]。不同类型水稻腋芽再生率存在差异,品种的再生力是决定再生率的基础,多数研究认为水稻再生力由多基因控制^[4]。郑景生等^[5]、谭震波等^[6]、杨川航等^[7]在不同群体分别检测到控制水稻再生力的不同 QTL,但其贡献率和加性效应均较小,表明水稻再生力的遗传受微效多基因控制,存在显著的基因与环境的互作效应。研究还表明,水稻再生力与头季稻有效穗数呈极显著负相关关系,头季稻有效穗数是影响再生力的主要因素。强再生力的杂交稻品种头季稻群体特征包括生育期较短、后期冠层叶面积大、光合产物运转流畅、谷草比高、减穗增粒增重、植株较高且抗倒等^[8]。但也有大量研究表明,产量高、再生力强品种头季稻的源库特征主

要表现为早生快发、分蘖力强,有效穗数多、穗粒数中等偏少、齐穗期叶粒比较大^[9-12]。张上守等^[13]认为,头季稻稳穗数、攻大穗、具较高的干物质积累总量可获取超高产水平,再生稻产量则取决于多穗。李贵勇等^[14]研究表明,头季稻有效穗数是提高再生稻产量的关键,并指出腋芽萌发率和存活率是提高有效穗数的重要途径。任天举等^[9]研究认为,有效穗数与再生力的简单负相关不显著,而偏相关极显著,直接效应较大,是影响再生力的重要性状。刘永胜等^[15]研究指出,开花期和有效穗数对亚种间杂种再生力有极显著的直接效应,而穗粒数通过有效穗数间接对杂种再生力的调控发生作用。可见,头季稻产量构成因素中有效穗数与再生季产量关系密切,但因选用材料、研究方法 & 栽培条件的差异,结论并不一致。此外,对再生力的鉴定和判断方法目前研究也颇多,头季稻茎秆厚^[16]、茎鞘干质量^[9,17]、配合力总效应(Tca)^[18]、头季成熟期至再生季齐穗期根系活力^[19]、头季稻收后第 5 日头季稻桩再生芽出鞘率^[20]、头季稻齐穗到成熟叶片 SPAD 值衰减指数^[21]、负节比率^[1,22]等性状均可作为判断再生力、筛选再生稻品种的重要指标,然而目前也仅见负节比率作为低节位强再生力品种筛选指标^[1,22]的文献报道。

轻简栽培方式通常采用低留桩来减少收割机对稻桩的碾压,而人工收割的高留桩再生稻主栽品种并不完全适合轻简化栽培,开展适于机收的低节位强再生力的品种群体特征及相应筛选指标的研究,是进一步发展轻简化栽培再生稻的关键。鉴于此,本研究采用轻简栽培方式,以 5 个重穗型强再生力杂交稻品种为材料,探析再生稻产量与植株性状间的关系,以期为宜轻简栽培再生稻品种的选育和筛选,以及高产栽培提供理论与实践依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验点概况

大田试验于 2018 年在福建省三明市尤溪县再生稻试验示范基地进行。该基地位于东经 118°12', 北纬 26°18', 海拔 153 m, 年平均气温 19.6 °C, 无霜期 300 d, 降水量 1 600 ~ 1 800 mm, 日照时间 1 864.6 h, 属中亚热带海洋性季风气候, 其光温资源适于种植再生稻。试验田块土质肥力均匀, 土壤基本理化性质为: 有机质含量 25.3 g/kg, 全氮含量 2.6 g/kg, 有效氮含量 131.0 mg/kg, 速效磷含量 23.0 mg/kg, 速效钾含量 69.7 mg/kg。

1.2 试验设计

尤溪县再生稻试验示范基地生态条件特殊, 再生稻高产栽培多数以人工收割为主, 根据前期筛选试验, 选择生育期相近、强再生力的 5 个重穗型杂交稻品种(宜优 673、赣优 7076、内 6 优 7075、渝香 203、晶两优华占)为材料。3 月 13 日播种, 简易工厂化秧盘育秧, 4 月 17 日按 20.0 cm × 20.0 cm 规格移栽机插。头季稻施 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 180 kg/hm², 基肥与穗肥比为 8 : 2, 头季稻齐穗后 20 d 施氮 45 kg/hm² 作为催芽肥, 头季稻机收后 2 d 施氮 30 kg/hm², 促进再生分蘖, 此后再生稻生长期不施肥。头季稻机割时留茬高度 12 ~ 15 cm, 其他栽培管理同大田再生稻生产。小区面积 100 m², 3 次重复, 完全随机区组排列。

1.3 测定项目及amp;方法

头季稻每小区定点选择 5 丛稻株, 于齐穗期和成熟期选取 1 个主茎, 用日本 MINOLTA 生产的 SPAD-502 型叶绿素仪, 分别测定剑叶、倒二叶、倒三叶的上部、中部、下部的 SPAD 值, 取平均值作为该丛稻株叶片的 SPAD 值, 5 丛稻株的平均值作为该小区叶片的 SPAD 值^[23]; SPAD 值衰减指数 = (齐穗期 SPAD 值 - 成熟期 SPAD 值) / 齐穗期 SPAD 值^[21]。头季稻收获后第 1 周、第 2 周定点调查再生芽出鞘率, 再生芽出鞘率 = 有再生芽出鞘的母茎数 / 考查母茎总数 × 100%^[20]。根据三明市气象相关资料, 计算相应热能利用率, 热能利用率 = 单位面积两季水稻产量 / 两季全生育期内的有效积温 (≥10 °C)^[24]。于头季稻、再生稻成熟期每小区分别取样 10 丛稻株考查农艺及穗部性状, 主要包括株高、有效穗数、颖花量、着粒密度、穗均粒数、穗实粒数、结实率、千粒质量等, 头季稻和再生稻每小区均实割测产, 并根据生育期计算日产量。

1.4 数据统计分析

先对考查的性状进行极值、平均值、变异系数(CV)及方差分析处理, 再进行主要性状间的相关、回归与通径分析^[25], 上述计算及统计用 EXCEL 2007 软件和 DPS 数据处理系统运行完成。

2 结果与分析

2.1 头季稻和再生稻产量及其构成因素

2.1.1 再生稻品种间产量与再生力性状表现 从试验结果(表 1)可以看出, 5 个重穗型杂交稻品种头季及再生季 21 个植株性状及产量中, 除头季结实率和再生季颖花量外, 其他性状差异均达极显著水平,

方差分析 F 值为 1.37~204.86。各性状间的变异系数差异也较大,头季稻的颖花量和 SPAD 值衰减指数、再生季的 1 周再生芽出鞘率和 2 周再生芽出鞘率,其变异系数高达 27.5%~41.2%。而头季和再生季的结实率、全生育期、头季稻株高及再生季颖花量、穗均粒数、穗实粒数变异系数较小,均在 10% 以下。再生季结实率变异系数比头季稻高 71.0%,而有效穗数、颖花量、着粒密度、穗均粒数、穗实粒数和千粒质量的变异系数分别比头季稻低 50.5%,

76.5%,34.3%,47.3%,53.1%和 17.6%,这与常规人工收割栽培方式下再生稻变异明显高于头季稻^[21]的结论不同,可能是由于栽培方式、生态条件和品种特性的差异所致。再生稻平均产量为 4 019.7 kg/hm²,较头季稻平均产量(9 202.7 kg/hm²)低 56.3%;再生季的有效穗数、颖花量、着粒密度、穗均粒数、穗实粒数、结实率、千粒质量平均值比头季稻分别低 14.3%,55.9%,30.7%,47.3%,51.0%,7.0%和 8.1%。

表 1 头季稻·再生稻品种植株性状及再生力表现

Table 1 Plant characteristics and yield component traits of main crop and ratooning ability of rice

稻季 Rice season	性状或指标 Character	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	CV/%	F 值 F value
头季 Main crop	株高 X_1 /cm Plant height	114.0	137.3	129.2	6.2	27.42**
	有效穗数 X_2 /(穗·m ⁻²) Effective panicles	293.0	530.0	370.9	20.4	20.30**
	颖花量 X_3 /(×10 ⁴ 朵·m ⁻²) Spikelets	3.47	9.61	5.37	36.2	44.21**
	着粒密度 X_4 /(粒·cm ⁻¹) Spikelet density	4.29	8.02	5.61	20.7	25.03**
	穗均粒数 X_5 Spikelets per panicle	116.2	181.3	142.1	16.9	21.00**
	穗实粒数 X_6 Filled grain number per panicle	100.5	156.9	122.5	16.0	13.26**
	结实率 X_7 /‰ Seed setting rate	82.9	91.5	86.3	3.1	1.37
	千粒质量 X_8 /g 1 000-grain weight	22.4	34.2	30.9	13.6	357.11**
	SPAD 值衰减指数 X_9 SPAD index decreased	0.176	0.504	0.279	36.1	23.37**
产量 Y_1 /(kg·hm ⁻²) Yield	7 325.0	10 412.0	9 202.7	11.5	144.40**	
再生季 Ratooning rice	有效穗数 X_{10} /(穗·m ⁻²) Effective panicles	262.5	370.0	317.8	10.1	14.76**
	颖花量 X_{11} /(×10 ⁴ 朵·m ⁻²) Spikelets	2.13	2.85	2.37	8.5	2.29
	着粒密度 X_{12} /(粒·cm ⁻¹) Spikelet density	3.01	4.70	3.89	13.6	24.17**
	穗均粒数 X_{13} Spikelets per panicle	67.1	89.2	74.9	8.9	12.76**
	穗实粒数 X_{14} Filled grain number per panicle	52.9	67.5	60.0	7.5	6.36**
	结实率 X_{15} /‰ Seed setting rate	74.3	86.4	80.3	5.3	11.26**
	千粒质量 X_{16} /g 1 000-grain weight	22.1	31.7	28.4	11.2	210.90**
	1 周再生芽出鞘率 X_{17} /‰ Ratio of stems of ratooning bud to total stems at the 7 th day after harvest	15.0	89.1	56.1	41.2	49.19**
	2 周再生芽出鞘率 X_{18} /‰ Ratio of stems of ratooning bud to total stems at the 14 th day after harvest	44.7	119.0	85.3	27.5	16.64**
	产量 Y_2 /(kg·hm ⁻²) Yield	3 153.0	5 354.0	4 019.7	18.9	91.65**
头季·再生季 Main crop and ratoo- ning rice	全生育期 X_{19} /d Growth duration	205.0	213.0	208.4	1.5	34.89**
	热能利用率 X_{20} /‰ Heat utilization efficiency of grain	2.245	4.845	4.122	13.0	203.26**
	日产量 X_{21} /(kg·hm ⁻²) Daily grain yield	49.7	74.9	63.5	13.1	204.86**
	两季总产量 Y_3 /(kg·hm ⁻²) Total yield of main crop and ratooning rice	10 592.0	15 427.0	13 222.3	12.5	180.43**

注: * 表示差异达显著水平($P<0.05$), ** 表示差异达极显著水平($P<0.01$)。下同。

Note: * and ** indicate significant difference at $P=0.05$ and $P=0.01$, respectively. The same below.

2.1.2 再生稻产量及其构成因素的通径分析 再生稻产量构成因素与产量因素的相关程度及性质,可以反映出各项因素对目标因素的贡献大小。从通径与回归分析结果(表 2)可以看出,除穗均粒数(X_{13})外,再生稻产量构成因素与产量相关系数均为正值,从大到小依次为有效穗数(X_{10})>千粒质量(X_{16})>结实率(X_{15})>颖花量(X_{11})>着粒密度(X_{12})>穗实粒数(X_{14})>穗均粒数。从各项构成因

素分析,虽然有效穗数对产量直接作用的负效应较大,但间接效应总和最大,结果直接相关系数最高,决定系数达 75.78%;穗均粒数虽然对产量直接作用的正效应较大,但间接作用总和和负效应也较大,正负效应作用相互抵消后,最终导致呈负相关关系;穗实粒数对产量的直接作用为最大负效应,间接作用总和和正效应仅次于有效穗数,正负抵消后相关系数反而最低;千粒质量和着粒密度对产量的直接作用

为正效应,其间接作用总和均为正值,结果表现较大的正效应,决定系数分别为 57.12%和 34.48%;结实率和颖花量间接作用总和均为负值,而其对产量的直接作用均为较大的正效应,正负抵消后产生的决定系数分别为 55.16%和 36.69%。以上结果表明,再生稻产量构成因素中,有效穗数受千粒质量、

结实率和颖花量间接作用的累加效应,对产量贡献最大。因此,机械化轻简栽培再生稻,首先选择再生力强、有效穗数多,兼顾选择千粒质量较大的水稻品种,其次栽培措施上应调节颖花量和结实率,并且着重减轻机收碾压。

表 2 再生稻产量构成因素对其产量的通径与回归分析

Table 2 Path and regression analysis of effect of yield composition on grain yield of ratooning rice

性状 Character	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect						偏相关系数 Partial correlation coefficient	t 值 t test value	显著水平 Significant level		
			总和 Total	$X_{10} \rightarrow Y_2$	$X_{11} \rightarrow Y_2$	$X_{12} \rightarrow Y_2$	$X_{13} \rightarrow Y_2$	$X_{14} \rightarrow Y_2$				$X_{15} \rightarrow Y_2$	$X_{16} \rightarrow Y_2$
X_{10}	0.870 5	-2.702 7	3.573 2		1.491 9	0.131 6	-0.641 3	0.268 2	1.898 2	0.424 6	-0.471 6	1.415 1	0.194 8
X_{11}	0.605 7	2.387 0	-1.781 3	-1.689 3		0.228 3	0.248 8	-1.921 8	1.221 5	0.131 2	0.489 0	1.483 2	0.176 3
X_{12}	0.587 2	0.556 8	0.030 4	-0.639 0	0.978 9		0.161 6	-0.528 5	0.059 0	-0.001 6	0.860 6	4.471 0**	0.002 1
X_{13}	-0.455 7	1.053 2	-1.508 9	1.645 8	0.563 8	0.085 5		-2.303 5	-1.103 8	-0.396 7	0.090 3	0.239 9	0.816 4
X_{14}	0.001 8	-2.907 6	2.909 3	0.249 3	1.577 7	0.101 2	0.834 3		0.319 5	-0.172 7	-0.237 1	0.645 8	0.536 5
X_{15}	0.742 7	2.249 8	-1.507 1	-2.280 3	1.296 0	0.014 6	-0.516 7	-0.412 9		0.392 2	0.275 7	0.758 9	0.469 7
X_{16}	0.755 8	0.485 2	0.270 6	-2.365 2	0.645 4	-0.001 9	-0.860 9	1.034 6	1.818 6		0.580 2	1.884 9	0.096 2

注: X、Y 所示指标与表 1 同, 下表同。

Note: The expressing index of X and Y are the same as in Table 1. The same as below.

2.2 再生稻品种的关键筛选指标

2.2.1 头季稻影响再生力的关键因子 表 3 结果表明,再生稻产量(Y_2)与头季稻株高(X_1)、结实率(X_7)和千粒质量(X_8)呈显著或极显著正相关,与 SPAD 值衰减指数(X_9)、颖花量(X_3)、着粒密度(X_4)、穗均粒数(X_5)和穗实粒数(X_6)呈极显著或显著负相关,头季稻有效穗数(X_2)与产量相关性不显著。头季稻性状间存在较普遍的相关关系,除结实

率与株高、有效穗数、颖花量、着粒密度、穗均粒数、穗实粒数、千粒质量、SPAD 值衰减指数相关性不显著外,多数性状间均呈显著或极显著相关关系。由此可见,头季稻产量相关性状与再生稻产量关系密切,且对其有显著影响,但无法根据上述相关系数来判断各性状对再生力直接作用的大小,因此有必要采用多元逐步回归分析和通径分析筛选头季稻影响再生稻产量的关键因子。

表 3 头季稻产量构成因素与再生稻产量间的相关系数

Table 3 Coefficients of correlation between yield composition of main crop and yield of ratooning rice

性状 Trait	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_2	-0.74**								
X_3	-0.87**	0.93**							
X_4	-0.86**	0.70**	0.89**						
X_5	-0.82**	0.63**	0.87**	0.91**					
X_6	-0.78**	0.62*	0.85**	0.90**	0.98**				
X_7	0.42	-0.21	-0.29	-0.32	-0.35	-0.18			
X_8	0.89**	-0.88**	-0.93**	-0.89**	-0.78**	-0.75**	0.35		
X_9	-0.76**	0.74**	0.82**	0.83**	0.73**	0.69**	-0.45	-0.87**	
Y_2	0.63**	-0.40	-0.55*	-0.65**	-0.64**	-0.58*	0.54*	0.65**	-0.82**

多元逐步回归分析结果表明,头季稻颖花量(X_3)、穗实粒数(X_6)、结实率(X_7)、SPAD 值衰减指数(X_9)与再生稻产量(Y_2)存在极显著线性关系,其回归方程为: $Y_2 = 1\ 352.8 + 287.1X_3 - 19.5X_6 + 64.3X_7 - 7\ 317.8X_9$, $r = 0.893\ 3^{**}$ 。通径分析结果(表 4)表明,SPAD 值衰减指数对再生稻产量的直接负作用最大,且绝对值最高,虽然间接作用总和为正,但数值较小,导致其相关系数绝对值最大,方向为负,决定系数达 66.44%;颖花量对再生稻产量

的直接作用较大,通过较大的负效应影响各项间接作用总和,造成其与产量相关系数为负,决定系数为 30.66%;穗实粒数主要受直接作用的影响,间接作用较小,决定系数为 33.99%;结实率主要受直接作用和间接作用的共同影响,决定系数为 28.90%。SPAD 值衰减指数与再生稻产量的偏相关系数的显著性检验表明,其偏相关系数绝对值和 t 检验值均最大,达极显著水平,表明该指标是决定再生稻品种产量高低的关键因子,在机械化轻简栽培下可作为

判断再生稻产量的关键筛选指标。

表 4 头季稻产量构成因素对再生力的通径分析

Table 4 Path analysis of yield composition of main crop to ratooning ability

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Direct effect				偏相关系数 Partial correlation coefficient	t 值 t test value	显著水平 Significant level	
			总和 Total	→X ₃	→X ₆	→X ₇				→X ₉
X ₃	-0.553 7	0.734 5	-1.288 3		-0.427 7	-0.067 0	-0.793 6	0.558 5	2.128 9	0.056 7
X ₆	-0.583 0	-0.500 8	-0.082 2	0.627 3		-0.041 4	-0.668 1	-0.497 7	1.814 7	0.096 9
X ₇	0.537 6	0.228 4	0.309 2	-0.215 4	0.090 9		0.433 7	0.407 0	1.409 0	0.186 5
X ₉	-0.815 1	-0.969 1	0.154 0	0.601 5	-0.345 3	-0.102 2		-0.753 3	3.621 6**	0.004 0

2.2.2 再生稻影响再生力的关键因子 再生稻产量相关性状与产量的相关分析结果(表 5)表明,再生稻产量(Y₂)与有效穗数(X₁₀)、颖花量(X₁₁)、着粒密度(X₁₂)、结实率(X₁₅)、千粒质量(X₁₆)、1 周再生芽出鞘率(X₁₇)、2 周再生芽出鞘率(X₁₈)均呈显著或极显著正相关关系,穗均粒数(X₁₃)和穗实粒数(X₁₄)与产量相关不显著。从表 5 还可以看出,再生稻性状间多数存在相关关系,有效穗数与颖花量、结实率、千粒质量、1 周再生芽出鞘率、2 周再生芽出鞘率,颖花量与穗实粒数、结实率,穗均粒数与穗实粒

数,结实率与千粒质量、1 周再生芽出鞘率、2 周再生芽出鞘率,千粒质量与 1 周再生芽出鞘率、2 周再生芽出鞘率,1 周再生芽出鞘率与 2 周再生芽出鞘率,均呈极显著或显著正相关。而有效穗数与穗均粒数,穗均粒数与千粒质量、1 周再生芽出鞘率、2 周再生芽出鞘率表现极显著或显著负相关。可见,多数性状与再生稻产量关系密切,且对再生稻产量有显著或极显著正向相关关系。为了解各性状对再生力直接作用的大小,对影响再生稻产量的关键因子进行多元逐步回归分析和通径分析。

表 5 再生稻产量及构成因素间的相关系数

Table 5 Coefficients of correlation between yield composition and yield of ratooning rice

性状 Trait	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
X ₁₁	0.63**								
X ₁₂	0.24	0.41							
X ₁₃	-0.61*	0.24	0.15						
X ₁₄	-0.09	0.66**	0.18	0.79**					
X ₁₅	0.84**	0.54*	0.03	-0.49	0.14				
X ₁₆	0.88**	0.27	0.00	-0.82**	-0.36	0.81**			
X ₁₇	0.88**	0.40	0.24	-0.70**	-0.30	0.70**	0.88**		
X ₁₈	0.97**	0.48	0.16	-0.73**	-0.26	0.79**	0.93**	0.90**	
Y ₂	0.87**	0.61*	0.59*	-0.46	0.00	0.74**	0.76**	0.85**	0.83**

多元逐步回归分析结果表明,与产量(Y₂)呈极显著相关的性状有颖花量(X₁₁)、着粒密度(X₁₂)、结实率(X₁₅)、千粒质量(X₁₆)、1 周再生芽出鞘率(X₁₇)、2 周再生芽出鞘率(X₁₈),其回归方程为:

$Y_2 = -6\ 190.6 + 363.7X_{11} + 712.1X_{12} + 47.7X_{15} + 88.6X_{16} + 8.2X_{17} - 2.6X_{18}$, $r = 0.986\ 3^{**}$, 线性方程达极显著水平。进一步进行通径分析,结果见表 6。

表 6 再生稻产量构成因素对再生力的通径分析

Table 6 Path analysis of yield composition of ratooning rice to ratooning ability

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Direct effect						偏相关系数 Partial correlation coefficient	t 值 t test value	显著水平 Significant level	
			总和 Total	→X ₁₁	→X ₁₂	→X ₁₅	→X ₁₆	→X ₁₇				→X ₁₈
X ₁₁	0.605 7	0.095 7	0.509 9		0.202 8	0.145 4	0.100 0	0.100 0	-0.038 3	0.312 6	0.930 8	0.376 2
X ₁₂	0.587 2	0.494 6	0.092 7	0.039 3		0.007 0	-0.001 2	0.060 1	-0.012 5	0.924 9	6.879 9**	0.000 1
X ₁₅	0.742 7	0.267 9	0.474 9	0.052 0	0.013 0		0.299 0	0.174 2	-0.063 3	0.587 9	2.055 8	0.070 0
X ₁₆	0.755 8	0.370 0	0.385 8	0.025 9	-0.001 7	0.216 5		0.219 1	-0.074 0	0.463 0	1.477 6	0.173 6
X ₁₇	0.845 7	0.250 3	0.595 3	0.038 2	0.118 6	0.186 4	0.323 8		-0.071 7	0.506 2	1.660 2	0.131 2
X ₁₈	0.825 1	-0.079 7	0.904 8	0.046 0	0.077 4	0.212 8	0.343 5	0.225 1		-0.125 6	0.358 2	0.728 5

表 6 表明,各项因素对产量均有较大的正相关关系。1 周再生芽出鞘率通过着粒密度、结实率、千

粒质量产生间接作用的累加效应,与直接作用相加,结果该项决定系数最大,达 71.52%;2 周再生芽出鞘率表现较小的负向直接作用,但由于结实率、千粒质量、1 周再生芽出鞘率对其产生间接作用进而影响产量的效应累加值较大,结果该项决定系数为 68.08%;千粒质量和结实率均通过 1 周再生芽出鞘率产生的间接作用,并分别与相互的间接作用及其直接效应值累加,对产量产生较大的正效应;颖花量主要以千粒质量、着粒密度、结实率、1 周再生芽出鞘率产生的间接作用为主。另外,着粒密度与产量的偏相关系数的显著性检验表明,其偏相关系数和 t 检验值达极显著水平,表明着粒密度是影响再生稻产量高低的主要因子。根据与产量相关的强度大小,再生稻有效筛选指标依次为:1 周再生芽出鞘率、2 周再生芽出鞘率、千粒质量、结实率、颖花量、着粒密度。其中 2 周再生芽出鞘率和 1 周再生芽出鞘率决定系数均达 60% 以上,是决定再生力的关键因子,说明这 2 个指标在机械化轻简栽培下可作为判断再生稻产量的关键筛选指标。

2.2.3 头季-再生季影响再生力的关键因子 由表 7 可以看出,再生稻热能利用率(X_{20})、日产量(X_{21})与两季总产量(Y_3)均呈极显著正相关,日产量与热能利用率表现极显著正相关,而全生育期(X_{19})与热

能利用率、日产量均呈显著负相关。多元逐步回归方程为: $Y_3 = -12\ 889.4 + 61.6X_{19} - 123.8X_{20} + 217.2X_{21}$, $r = 0.999\ 9^{**}$, 达极显著水平。通径分析结果(表 8)表明,全生育期对两季总产量的直接作用虽为正值,但通过日产量较大的负效应影响各项间接作用总和,造成其与两季总产量相关系数为负值,决定系数为 19.45%;热能利用率对两季总产量的直接作用较小,而通过日产量产生较大的正效应影响各项间接作用总和,导致对两季总产量的决定系数达 99.38%;日产量对两季总产量的直接作用较大,各项间接作用较小,对两季总产量的决定系数达 99.06%。可见,热能利用率和日产量是衡量头季-再生季水稻产量高低的重要指标。

表 7 头季-再生季水稻全生育期、热能利用率、日产量及两季总产量间的相关系数

Table 7 Coefficients of correlation of growth duration, heat utilization efficiency of grain, daily grain yield and total yield of main crop and ratooning rice

性状 Trait	X_{19}	X_{20}	X_{21}
X_{20}	-0.51*		
X_{21}	-0.53*	1.00**	
Y_3	-0.44	0.997**	0.995**

表 8 头季-再生季水稻全生育期、热能利用率、日产量对两季总产量的通径分析

Table 8 Path analysis of growth duration, heat utilization efficiency of grain and daily grain yield to total yield of main crop and ratooning rice

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			偏相关系数 Partial correlation coefficient	t 值 t test value	显著水平 Significant level	
			总和 Total	$\rightarrow X_{19}$	$\rightarrow X_{20}$				$\rightarrow X_{21}$
X_{19}	-0.441 0	0.113 6	-0.554 6		0.020 5	-0.575 1	0.969 2	13.062 0**	0.000 1
X_{20}	0.996 9	-0.040 2	1.037 1	-0.057 8		1.094 9	-0.035 4	0.117 6	0.908 3
X_{21}	0.995 3	1.095 1	-0.099 8	-0.059 6	-0.040 2		0.690 9	3.169 7**	0.008 1

2.3 再生稻品种关键筛选指标对产量的预测

综上所述,SPAD 值衰减指数(X_9)、1 周再生芽出鞘率(X_{17})、2 周再生芽出鞘率(X_{18})是再生稻品种的关键筛选指标,热能利用率(X_{20})和日产量(X_{21})是衡量两季总产量(Y_3)高低的重要指标。经

回归分析,分别获得相关的产量预测模型: $Y_2 = 3\ 706.4 - 2\ 682.1X_9 + 17.3X_{17} - 1.07X_{18}$, $r = 0.872\ 1^{**}$; $Y_3 = 251.7 - 552.7X_{20} + 11\ 660.2X_{21}$, $r = 0.998\ 7^{**}$ 。分别计算出模拟的再生稻品种产量和两季总产量,结果见表 9。

表 9 5 个再生稻品种的模拟产量与实际产量

Table 9 Observed and simulated yields of five rice varieties

品种 Varieties	实际产量/(kg·hm ⁻²) Observed yield		模拟产量/(kg·hm ⁻²) Simulated yield		预测精度/% Accuracy	
	Y_2	Y_3	Y_2	Y_3	Y_2	Y_3
宜优 673 Yiyou 673	5 237	15 268	4 853	15 126	92.7	99.1
赣优 7076 Ganyou 7076	4 423	14 105	4 384	14 242	99.1	99.0
内 6 优 7075 Nei 6 you 7075	3 722	13 948	3 972	13 849	93.3	99.3
渝香 203 Yuxiang 203	3 452	12 193	3 956	12 199	85.4	100.0
晶两优华占 Jinliangyouhuazhan	3 263	10 698	2 934	10 696	89.9	100.0

由表 9 可以看出,再生稻品种产量预测模型预测结果与实际单产拟合度较高,预测精度最低为 85.4%,最高为 99.1%,平均精度为 92.1%;日产量和热能利用率由两季总产量间接计算而来,与两季总产量关系极显著,其产量预测模型预测的精度均在 99%以上。

3 讨 论

水稻产量构成由单位面积内的有效穗数、穗均粒数、结实率和千粒质量决定,这 4 个性状同样与再生稻产量密切相关,但作用程度差异显著^[26]。本研究结果表明,采用轻简栽培方式,再生稻有效穗数与产量的相关系数最大,5 个品种再生稻平均有效穗数为头季稻的 85.7%,因此再生季高产应培育更多的有效穗数,形成巨大的库容量,这与多数人工收割栽培方式下的研究结果一致^[27-30]。由于头季稻穗的灌浆期也是再生稻穗的一、二次枝梗分化和颖花分化期,导致养分供求矛盾,造成再生稻穗小粒少^[31]。可见,再生稻穗发育的特点限制了再生稻靠大穗增产的可能。因此轻简栽培方式下,再生稻的增产因素仍然是有效穗数,促进腋芽的萌发成苗是获取再生稻高产增产的关键。

本研究结果表明,再生稻产量与头季稻株高、结实率和千粒质量呈显著或极显著正相关。因此,筛选和选育再生力强、植株高度适宜、生产量大、高结实的重穗型杂交稻品种是保障头季和再生季产量的前提。头季稻不同节位再生芽幼穗分化程度不同,节位间生育期由长到短依次为:倒 5 节>倒 4 节>倒 3 节>倒 2 节,上节位比下节位熟度提早 2.5 d 左右^[32],而在轻简低留稻桩栽培方式下,头季机插秧移栽后缓苗期长,再生稻主体分蘖相应由倒 2、倒 3 节位分蘖变成倒 4、倒 5 节位分蘖,导致低留桩再生稻生育期比高留桩相对延长 15~25 d。可见,适宜的生育期才能满足轻简化低留稻桩栽培的要求,选择日产量和热量利用率高且生育期适中的早、中熟类型品种,有利于再生稻安全齐穗并取得高产。

许多学者的研究提出了鉴定水稻再生力的方法和指标^[1,9,16-22],并探明了再生力与产量构成性状的关系,但真正应用于田间选育和筛选品种实践的较少,主要缺陷是多数指标不够直观,需要通过田间大量取样并在室内测定,工作量大,存在一定的测试误差。徐富贤等^[21]采取人工高留稻桩收割方式的研究表明,SPAD 值衰减指数可作为判断再生稻品种的关键筛选指标。由于 SPAD 值衰减指数测定时,

齐穗期和成熟期前后两次为同一植株,可比性强,方法简单,且准确快速。SPAD 值衰减指数愈大,说明前期光合物质积累向穗部输送量大,母茎鞘供再生芽生长利用的光合物质相对减少,导致再生芽伸长慢,死亡率高^[33-35]。本试验在轻简化低留稻桩栽培方式下,SPAD 值衰减指数对再生稻产量相关达极显著水平,相关系数为 -0.82。因此,可将 SPAD 值衰减指数作为头季稻“前期”鉴定再生力的关键筛选指标。与再生稻产量密切相关的再生稻植株性状中,再生芽出鞘率性状的调查相对简便,可操作性强,且 1 周、2 周再生芽出鞘率与产量均呈极显著正相关,相关系数分别高达 0.85 和 0.83,是决定再生稻产量高低的关键因子,因而可作为再生稻“中期”鉴定再生力的关键筛选指标。在收获“后期”,日产量和热量利用率不仅直接可作为判断再生稻品种的关键筛选指标,而且对于受热量等资源制约的区域进行品种布局具有较大的参考价值。

4 结 论

轻简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。头季稻“前期”鉴定再生力的关键筛选指标为 SPAD 值衰减指数,再生稻“中期”则是再生芽出鞘率,收获“后期”为日产量和热量利用率。根据这些指标建立产量预测模型,与实际产量比对后发现,对再生稻产量的预测精度较高,均达 85%以上。

[参考文献]

- [1] 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.
Lin W X, Chen H F, Zhang Z X, et al. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 392-401.
- [2] 熊 洪,冉茂林,徐富贤.南方稻区再生稻研究进展及发展[J].作物学报,2000,26(3):297-304.
Xiong H, Ran M L, Xu F X. Achievements and developments of ratooning rice in South of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26(3): 297-304.
- [3] 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.
Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(9): 1702-1717.
- [4] 晏月明,王绪信,邵启明,等.水稻亚种间杂交再生力特性的遗

- 传 [J]. 西南农业大学学报, 1992, 14(6): 517-521.
- Yan Y M, Wang X X, Shao Q M, et al. Genetics of ratooning ability in inter-subspecies crosses of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1992, 14(6): 517-521.
- [5] 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率及其构成的 QTL [J]. 分子植物育种, 2004, 2(3): 342-347.
- Zheng J S, Li Y Z, Lin W X. Identification of QTL for ratooning ability and grain yield traits in ratoon rice based on SSR marker [J]. Molecular Plant Breeding, 2004, 2(3): 342-347.
- [6] 谭震波, 沈利爽, 袁祚廉, 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.
- Tan Z B, Shen L S, Yuan Z L, et al. Identification of QTLs for ratooning ability and grain yield traits of rice and analysis of their genetic effects [J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(3): 289-295.
- [7] 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.
- Yang C H, Wang Y P, Tu B, et al. QTL analysis of rice ratooning ability and related agronomic traits by using RIL populations [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(7): 1240-1246.
- [8] 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.
- Ren T J, Zhang X C, Wang P H, et al. Analysis of combining ability effect and the dominant characteristics of crosses with high yields in twice of hybrid mid-season and ratooning rice [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2005, 18(4): 382-386.
- [9] 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.
- Ren T J, Jiang Z C, Wang P H, et al. Correlation of ratooning ability with its main crop agronomic traits in mid-season hybrid rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(4): 613-617.
- [10] 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.
- Xu F X, Xiong H. Relationship between ratio of grain to leaf area and ratooning ability in middle season hybrid rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2000, 14(4): 249-252.
- [11] 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.
- Xu F X, Hong S, Xiong H. Relation between N applying for bud development and ratooning ability and its mechanism in hybrid rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(3): 311-317.
- [12] 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.
- Xu F X, Xiong H, Zhao G L, et al. A study on the canopy characters of mid-season hybrid rice in relation to their ratooning ability [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(3): 426-430.
- [13] 张上守, 卓传营, 姜照伟, 等. 超高产再生稻产量形成和栽培技术分析 [J]. 福建农业学报, 2003, 18(1): 1-6.
- Zhang S S, Zhuo C Y, Jiang Z W, et al. Yield formation and cultivation techniques in super high-yielding ratoon rice [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2003, 18(1): 1-6.
- [14] 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.
- Li G Y, Tan L M, Liu Y W, et al. Analysis on yield formation and its higher-yielding population quality of ratooning rice [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2015, 37(4): 577-583.
- [15] 刘永胜, 周开达, 罗文质. 水稻亚种间杂种再生力评价及其与头季稻农艺性状的关系 [J]. 四川农业大学学报, 1992, 10(3): 408-412.
- Liu Y S, Zhou K D, Luo W Z. Appraisal on ratooning ability of intersubspecies hybrid rice and its relation with panicle characters of main crop [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1992, 10(3): 408-412.
- [16] Ichii M, Sumi Y. Effect of food reserves on the ratoon growth of rice plant [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1983, 52(12): 15-21.
- [17] 徐富贤, 熊 洪, 洪 松. 杂交中稻单茎鞘干物重与再生力的关系及其高产栽培途径 [J]. 西南农业学报, 1998, 11(4): 34-42.
- Xu F X, Xiong H, Hong S. Relationship between single stem-sheath dry matter weight of main crop and ratooning ability and high yield cultivation approach in hybrid mid-rice [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1998, 11(4): 34-42.
- [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.
- Ren T J, Zhang X C, Wang P H, et al. Analysis of combining ability effect and the dominant characteristics of crosses with high yields in twice of hybrid mid-season and ratooning rice [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2005, 18(4): 382-386.
- [19] 郑景生, 林 文, 卓传营, 等. 再生稻根干物质量及根系活力与产量的相关性研究 [J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 106-109.
- Zheng J S, Lin W, Zhuo C Y, et al. The correlation of dry biomass and activity of root system with grain yield in ratoon rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(4): 106-109.
- [20] 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.
- Xu F X, Zheng J K, Zhu Y C, et al. The evaluation method of ratooning ability of mid-season hybrid rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(4): 506-510.
- [21] 徐富贤, 熊 洪, 张 林, 等. 杂交中稻齐穗后叶片 SPAD 值衰

- 减对再生力的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3442-3450.
- Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. Effects of the decreased index of SPAD value of leaf after full heading on ratooning ability [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10): 3442-3450.
- [22] 张初长. 杂交稻组合低留桩再生力筛选试验 [J]. 福建农业科技, 2013(5): 1-7.
- Zhang C C. Screening test to node regeneration capacity of low-stubbles of hybrid rice stalks [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2013(5): 1-7.
- [23] 田永超, 朱 艳, 曹卫星, 等. 利用冠层反射光谱和叶片 SPAD 值预测小麦籽粒蛋白质和淀粉积累 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 808-813.
- Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, et al. Monitoring protein and starch accumulation in wheat grains with leaf SPAD and canopy spectral reflectance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(6): 808-813.
- [24] 王 真. 河南中、北地区麦-玉两熟制小麦光热利用特性及其对产量影响的比较研究 [D]. 河南新乡: 河南师范大学, 2015.
- Wang Z. Comparative study on effects of wheat photothermal utilization on yield under wheat-corn cropping system in central and north of Henan [D]. Xinxiang, Henan: Henan Normal University, 2015.
- [25] 胡秉民, 张全德. 农业试验统计分析方法 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1985: 72-240.
- Hu B M, Zhang Q D. Method of statistics analysis for agricultural experiment [M]. Hangzhou: Zhejiang Sciences and Technology Press, 1985: 72-240.
- [26] 张桂莲, 屠乃美. 再生稻研究现状与展望 [J]. 作物研究, 2001, 15(3): 64-69.
- Zhang G L, Tu N M. Status and prospects of studies on regenerating rice [J]. *Crop Research*, 2001, 15(3): 64-69.
- [27] 唐文帮, 陈立云, 肖应辉, 等. 再生稻某些性状与产量及产量构成因子的关系 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(1): 1-3.
- Tang W B, Chen L Y, Xiao Y H, et al. Relationships among yield, yield components and some features of ratooning rice [J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2002, 28(1): 1-3.
- [28] 熊 洪. 杂交稻蓄留再生稻的增产技术分析 [J]. 杂交水稻, 1996, 11(5): 22-24.
- Xiong H. Analysis of yield-increasing techniques of ratoon hybrid rice [J]. *Hybrid Rice*, 1996, 11(5): 22-24.
- [29] 任昌福. 杂交稻蓄留再生稻产量构成因素的相关分析 [J]. 西南农业大学学报, 1982(2): 10-15.
- Ren C F. Correlation analysis of yield components of ratoon rice [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1982(2): 10-15.
- [30] 叶春萼, 姜苏民, 黄祖祥, 等. 密植度对再生稻产量的影响 [J]. 浙江农业学报, 1999, 11(4): 215-216.
- Ye C E, Jiang S M, Huang Z X, et al. Effect of plant density on ratooning rice yield [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1999, 11(4): 215-216.
- [31] 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(1): 25-28.
- Li Y Z, Huang Y M. High-yield cultivation technique of ratoon rice: II. the rule of ear bearing of ratoon rice [J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 1990(1): 25-28.
- [32] 樊仕勇, 李贤勇, 鲁远源. 重庆地区直播中稻机收蓄留再生稻高产栽培技术 [J]. 杂交水稻, 2018, 33(3): 29-30.
- Fan S Y, Li X Y, Lu Y Y. High-yielding cultivation techniques for ratooning rice of direct seeding mid-season rice harvested by machine in Chongqing area [J]. *Hybrid Rice*, 2018, 33(3): 29-30.
- [33] 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.
- Xu F X, Hong S, Xiong H. Relation between N applying for bud development and ratooning ability and its mechanism in hybrid rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 311-317.
- [34] 徐富贤, 洪 松, 熊 洪. 杂交中稻抽穗后再生芽生长与头季稻茎鞘物质积累的关系 [J]. 中国水稻科学, 1997, 11(3): 160-164.
- Xu F X, Hong S, Xiong H. Relation between axillary bud growth and matter accumulation of stem-sheath after heading of main crop in hybrid rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1997, 11(3): 160-164.
- [35] 徐富贤, 熊 洪, 赵甘霖. 杂交中稻收割前再生芽死亡机理及其调节 [J]. 中国农业科学, 2000, 33(4): 31-37.
- Xu F X, Xiong H, Zhao G L. A study on the death mechanism of the axillary buds before harvest of the hybrid midseason [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(4): 31-37.