

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.52021

研究简报

水分管理和品种类型对再生稻产量和稻米品质的影响

朱金娟^{1,**} 王慧萍^{1,**} 杨国栋¹ 王宇诚¹ 杨晨¹ 王斌² Agustiani
Nurwulan³ 涂军明⁴ 毕俊国⁵ 崔克辉¹ 黄见良¹ 彭少兵¹ 袁珅^{1,*}

¹ 作物遗传改良全国重点实验室 / 湖北洪山实验室 / 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室 / 华中农业大学植物科学技术学院, 湖北武汉 430070; ² 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; ³ Research Center for Food Crop, National Research and Innovation Agency, Jawa Barat 16915, Indonesia; ⁴ 黄冈市农业科学院, 湖北黄冈 438000; ⁵ 上海市农业生物基因中心, 上海 201106

摘要: 为探究节水灌溉以及品种类型对再生稻产量和稻米品质的影响, 2023 年在湖北蕲春和浠水开展大田试验。以 3 个节水抗旱稻品种(旱优 8200、旱优 116 和旱优 73)和 3 个优质稻品种(箴两优鄂香丝苗、荃优粤农丝苗和荃优 607)为供试材料, 以湖北省再生稻大面积种植的普通水稻品种(两优 6326)为对照, 设置常规灌溉和节水灌溉 2 种水分管理方式, 分析再生稻模式下不同品种产量和稻米品质对水分管理的响应差异。结果表明, 相较于常规灌溉, 节水灌溉处理使头季和再生季灌水量分别平均减少 76% 和 85%, 但产量和稻米的加工、外观和蒸煮食味品质在水分处理间无显著差异, 且这一结果在不同试验地点间保持一致。这表明, 与常规灌溉相比, 节水抗旱稻和优质稻品种在节水灌溉条件下均能保持较为稳定的头季和再生季产量和稻米品质。优质稻头季和再生季产量分别为 8.54 t hm⁻² 和 5.88 t hm⁻², 相较于普通水稻产量差异不显著; 但头季和再生季整精米率分别显著提高 13.5 个百分点和 20.6 个百分点, 垩白粒率和垩白度分别显著降低 22.6 个百分点和 6.4 个百分点、10.8 个百分点和 1.8 个百分点。节水抗旱稻在头季的产量以及稻米加工、外观和蒸煮食味品质方面与普通水稻无显著差异, 但在再生季, 产量显著下降 17%, 整精米率显著提高 17.0 个百分点, 垩白粒率和垩白度分别降低 5.5 个百分点和 1.0 个百分点。在同一品种类型中, 再生稻产量和稻米品质存在显著的品种间差异。相关性分析表明, 再生季稻米的加工、外观和蒸煮食味品质指标均与头季相应指标呈正相关。因此, 在降水条件较好的地区, 结合优良水稻品种, 实施“以雨养为主、关键生育期适时灌溉”的节水灌溉策略, 可有效降低水分消耗、提升水分利用效率, 同时实现再生稻的高产与优质目标。

关键词: 稻米品质; 节水灌溉; 节水抗旱稻; 优质稻; 再生稻

Effects of water management and variety type on grain yield and quality in ratoon rice

Zhu Jin-Juan^{1,**}, Wang Hui-Ping^{1,**}, Yang Guo-Dong¹, Wang Yu-Cheng¹, Yang Chen¹, Wang Bin², Agustiani Nurwulan³, Tu Jun-Ming⁴, Bi Jun-Guo⁵, Cui Ke-Hui¹, Huang Jian-Liang¹, Peng Shao-Bing¹, and Yuan Shen^{1,*}

¹ National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement / Hubei Hongshan Laboratory / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China; ² Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ³ Research Center for Food Crop, National Research and Innovation Agency, Jawa Barat 16915,

本研究由国家重点研发计划项目(2022YFD2301003), 湖北省科技厅国际科技合作项目(2024EHA059), 中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD2301003), the Hubei International Science and Technology Cooperation Project (2024EHA059), the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2022QNRC001), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-01).

* 通信作者(Corresponding author): 袁珅, E-mail: syuan@mail.hzau.edu.cn

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 朱金娟, E-mail: jinjuanzhu@webmail.hzau.edu.cn; 王慧萍, E-mail: wanghui ping9987@163.com

Received (收稿日期): 2025-06-09; Accepted (接受日期): 2025-10-30; Published online (网络出版日期): 2025-11-11.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251110.1733.008>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Indonesia; ⁴ Huanggang Academy of Agricultural Sciences, Huanggang 438000, Hubei, China; ⁵ Shanghai Agrobiological Gene Center, Shanghai 201106, China

Abstract: To evaluate the effects of water-saving irrigation and variety type on grain yield and quality in ratoon rice, field experiments were conducted in Qichun and Xishui, Hubei province, in 2023. Three water-saving and drought-resistant rice (WDR) varieties (Hanyou 8200, Hanyou 116, and Hanyou 73) and three superior-quality rice (SQR) varieties (Zhenliangyouyingxiangsimiao, Quanyouyuenongsimiao, and Quanyou 607) were tested, with Liangyou 6326—commonly grown in large-scale ratoon rice production in Hubei—serving as the check variety for ordinary paddy rice (OPR). Two irrigation regimes, continuous flooding and water-saving, were compared to assess varietal responses in yield and grain quality within the ratoon rice system. Results showed that, compared to continuous flooding, water-saving irrigation reduced water input by an average of 76% in the main crop and 85% in the ratoon crop, without significant differences in grain yield or in milling, appearance, and cooking/eating quality traits. These results were consistent across both experimental sites. WDR varieties maintained stable yield and grain quality under water-saving conditions. In SQR varieties, yields averaged 8.54 t hm⁻² in the main crop and 5.88 t hm⁻² in the ratoon crop, comparable to OPR. However, head rice rate significantly increased by 13.5 and 20.6 percentage points, while chalky grain rate and chalkiness degree decreased significantly by 22.6 and 6.4, and 10.8 and 1.8 percentage points, respectively, in the main and ratoon crops. For WDR varieties, yield and grain quality in the main crop were similar to OPR, but ratoon crop yield decreased significantly by 17%; nonetheless, head rice rate increased by 17.0 percentage points, and chalky grain rate and chalkiness degree decreased by 5.5 and 1.0 percentage points, respectively. Significant varietal differences were observed within each variety type for both yield and grain quality. Correlation analysis revealed positive associations between grain quality traits in the main and ratoon crops. Overall, in regions with favorable rainfall, combining superior rice varieties with a water-saving irrigation strategy that emphasizes rainfed cultivation supplemented by timely irrigation at critical growth stages can effectively reduce water use, improve water use efficiency, and achieve the dual goals of high yield and premium grain quality in ratoon rice systems.

Keywords: rice quality; water-saving irrigation; water-saving and drought-resistance rice; superior-quality rice; ratoon rice

我国是全球最大的水稻生产国和消费国, 超过 65% 的人口以稻米为主食^[1]。随着经济发展和居民消费升级, 优质稻米需求日益增长^[2], 推动水稻生产向高产优质协同目标转型。再生稻是一种利用水稻头季收获后稻桩上的休眠芽萌发成穗, 进而再收获一季水稻的种植模式, 具有省种、省工和省水等资源高效利用特点^[3-4]。研究表明, 再生稻周年产量比中稻显著提高 71%, 与双季稻相当^[5]; 且再生季稻米品质通常优于中稻, 与晚稻相当^[6-7]。得益于其显著的增产增效和品质优势, 我国再生稻种植面积近十年间迅速扩大, 目前约达 130 万公顷^[8-9]。

与此同时, 我国水稻生产中仍然存在一些挑战, 其中水资源短缺与低效利用尤为突出。目前, 我国水稻仍依赖高耗水的传统淹灌模式, 导致水稻生产耗水量占农业用水量的 70%, 相当于全国总用水量的 49%^[10]。这与我国人均可再生淡水资源严重不足 (2021 年仅 1992 m³, 不足全球平均水平的 40%) 的国情形形成尖锐矛盾^[11]。近年来, 气候变化进一步加剧了水资源供需矛盾, 长江流域中稻灌浆期干旱发生频率和强度均呈上升趋势^[12]。干旱胁迫显著降低水稻产量, 平均减产可达 24%^[13], 并劣化稻米品质, 表现为整精米率下降以及垩白粒率和垩白度显著增加^[14-15]。因此, 优化水分管理策略、发展节水灌溉

是实现水稻高产优质的关键路径。研究表明, 相较于传统淹灌, 湿润灌溉、间歇灌溉和干湿交替灌溉等不同模式的节水灌溉对水稻产量和品质的影响存在差异^[16-18]。张宏路等^[19]综合不同研究结果发现, 湿润灌溉对产量和品质的影响在不同研究中表现不一, 甚至存在矛盾; 相比之下, 适度的干湿交替灌溉普遍表现出增产提质的效果, 而重度干湿交替灌溉则对水稻产量和稻米品质均产生负面影响。因此, 因地制宜地采取节水灌溉方式对维持甚至提高水稻产量和稻米品质至关重要。

针对水资源制约, 我国近年来培育出一批兼具节水抗旱性与高产潜力的节水抗旱稻品种^[20-22]。在无灌溉条件的旱田, 节水抗旱稻可以实现旱直播早管并维持产量稳定^[20]。自 2010 年起, 节水抗旱稻从上海逐步推广至全国, 目前已经在华中和华东等地年推广 20 万公顷以上^[23]。研究表明其节水效果显著, 例如在安徽省旱田种植较在水田种植的普通水稻节水 57%, 产量 (8.82 t hm⁻²) 接近普通水稻 (9.65 t hm⁻²)^[24]; 在常规灌溉条件下, 其产量可高于普通水稻, 且产量优势随灌水量的减少而增加^[25]。在稻米品质方面, 节水抗旱稻在水田条件下的米质与普通水稻相当, 同时可节水 50% 以上^[20]。一批突破“优质不高产”^[26]的瓶颈的水稻新品种 (如箴两优

鄂香丝苗、荃优 607 等)也已被育成, 区试产量超过 9.00 t hm⁻², 米质达 NY/T 593-2013 标准三级及以上^[27]。综上所述, 将耐旱、优质的品种与合理的水分管理相结合, 是应对水资源挑战、实现水稻高产优质协同的重要策略。但当前这些节水抗旱稻和新型优质稻的研究多集中于中稻, 其在再生稻模式下的产量和品质表现、对不同水分管理方式的响应尚不明确。因此, 本研究以节水抗旱稻和新育成的优质稻品种为试验材料, 以普通水稻品种为对照, 在不同地点设置常规灌溉和节水灌溉 2 种水分管理方式, 明确水分管理和品种类型对再生稻产量和稻米品质的影响, 旨在为再生稻节水高效和丰产优质栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于 2023 年在湖北省黄冈市蕲春县赤东镇酒铺村(30°9'N, 115°22'E)和湖北省黄冈市浠水县洗马镇河东村(30°23'N, 115°43'E) 2 个试验点进行。试验点位于长江中游地区, 是典型的再生稻种植区。在每个试验点, 于大田平整之后施肥移栽之前对耕层 0~20 cm 土层土壤取样并测定理化性质。蕲春县试验田土壤含有机质 26.29 g kg⁻¹、全氮 2.12 g kg⁻¹、有效磷 6.68 mg kg⁻¹、速效钾 181.24 mg kg⁻¹, pH

5.26; 浠水县试验田土壤含有机质 33.94 g kg⁻¹、全氮 2.18 g kg⁻¹、有效磷 7.59 mg kg⁻¹、速效钾 71.85 mg kg⁻¹, pH 5.68。

1.2 试验设计与田间管理

2 个试验点的大田试验均采用裂区设计, 主区为常规灌溉和节水灌溉 2 种水分管理方式, 副区为 3 个节水抗旱稻品种(旱优 8200、旱优 116 和旱优 73)、3 个优质稻品种(箴两优鄂香丝苗、荃优粤农丝苗和荃优 607)和普通水稻品种(两优 6326, 对照)共 7 个水稻品种(表 1), 3 次重复, 小区面积为 25 m² (5 m × 5 m)。常规灌溉处理参照当地再生稻生产的典型水分管理模式。在头季移栽至分蘖中期, 田间保持 3~5 cm 水层; 当分蘖中期田间苗数达到预计苗数的 80%时开始排水晒田, 其中蕲春和浠水试验地晒田持续时间分别为 14 d 和 9 d; 晒田结束后至头季收获前 7 d, 田间保持 3~5 cm 水层, 之后排干水分。头季收获当天田间重新灌水, 并保持 3~5 cm 水层, 直至再生季收获前 7 d 排水晒田。节水灌溉处理则在关键农艺节点进行灌溉。如在移栽当天以及分蘖肥施用前 1 d (移栽后 10 d)、促芽肥施用前 1 d (头季齐穗后 15 d)和提苗肥施用前 1 d (头季收获后 3 d)进行灌溉, 使田间形成 3~5 cm 水层; 若遇降雨, 则不额外灌溉。其他生育阶段保持雨养, 不进行额外灌溉。

表 1 供试品种信息
Table 1 Information of the tested rice varieties

品种类型 Variety type	品种名称 Variety name	母本/父本 Female parent/male parent	育成年份 Release year
节水抗旱稻 WDR	旱优 8200 Hanyou 8200 (HY8200)	沪旱 7A/旱恢 8200 Huhan 7A/Hanhui 8200	2021
	旱优 116 Hanyou 116 (HY116)	沪旱 A/旱恢 116 Huhan A/Hanhui 116	2020
	旱优 73 Hanyou 73 (HY73)	沪旱 7A/旱恢 3 号 Huhan 7A/Hanhui 3	2014
优质稻 SQR	箴两优鄂香丝苗 Zhenliangyouyingxiangsimiao (ZLYYXSM)	箴 9311S/鄂香丝苗 Zhen 9311S/Yingxiangsimiao	2023
	荃优粤农丝苗 Quanyouyuenongsimiao (QYYNSM)	荃 211S/粤农丝苗 Quan 211S/Yuenongsimiao	2021
	荃优 607 Quanyou 607 (QY607)	荃 9311A/中种 R1607 Quan 9311A/Zhongzhong R1607	2020
普通水稻 OPR	两优 6326 Liangyou 6326 (LY6326)	宣 69S/WH26 Xuan 69S/WH26	2004

品种信息来源于国家水稻数据中心(<https://www.ricedata.cn/variety/>)。
Variety information was from the China Rice Data Center (<https://www.ricedata.cn/variety/>). WDR: water-saving and drought-resistance rice; SQR: superior-quality rice; OPR: ordinary paddy rice.

在蕲春和浠水试验点, 浸种催芽后的种子分别于 3 月 19 日和 3 月 18 日播种, 育秧方式采用田间湿润育秧。由于播种后气温较低(蕲春和浠水试验点播种后 1 周内最低温度分别为 4.1~12.5℃和 6.4~12.2℃), 该试验采用透明塑料薄膜覆盖苗床以防止

秧苗遭受低温冷害, 并根据环境温度和秧苗长势适时揭膜通风防止高温伤苗。在蕲春和浠水试验点, 秧龄为 31 d 和 34 d 的秧苗分别于 4 月 19 日和 4 月 21 日进行人工双本移栽, 栽插密度为每平方米 25 穴, 株距 13.3 cm, 行距 30.0 cm。头季氮肥用量为 160 kg

hm⁻², 于移栽前 1 d (基肥)和移栽后 10 d (分蘖肥)施用, 比例为 9 : 7。再生季氮肥施用量为 N 140 kg hm⁻², 分别以促芽肥(头季齐穗后 15 d)和提苗肥(头季收获后 3 d)等量施用, 氮肥作基肥和追肥分别以复合肥(15% N-15% P-15% K)和尿素(46.4% N)为氮源施用。磷肥和钾肥施用量分别为 P 39 kg hm⁻² 和 K 75 kg hm⁻², 均以复合肥形式做基肥一次性施用。病虫害管理依据当地高产管理方式进行。

1.3 测定项目与方法

于齐穗期在每个小区选取 12 株长势一致的植株, 将植株分为茎、叶和穗 3 部分。用叶面积仪(LI-3000, LI-COR Inc., 美国)测定绿叶面积, 计算叶面积指数, 公式为: 叶面积指数=绿叶面积/土地面积。随后将 3 部分样品分装在不同网袋, 置于烘箱中先 105℃杀青 30 min, 然后 80℃烘干至恒重后称重, 计算齐穗期总干物质重。成熟期同样选取 12 株长势一致的植株, 参照 Wang 等^[28]研究方法测定成熟期总干物质重和收获指数。成熟期另在每个小区中间选取 5.0 m²长势均匀一致的区域作为测产区。植株收割后脱粒并将稻谷晒干, 然后用风选机风选去除杂质和空瘪粒。待稻谷吸湿平衡后测定稻谷重量, 并用谷物水分测量仪(DMC-700, Seedburo, 美国)测定籽粒含水量, 最终换算成含水量为 14%的籽粒产量。

从测产样品中随机选取籽粒 200 g 左右, 放置

在阴凉通风处 3 个月, 待理化性质稳定后, 参照农业行业标准《米质测定方法》(NY/T 83-2017)测定稻米加工品质、外观品质和蒸煮食味品质。具体测定指标包括糙米率、精米率、整精米率、粒长、粒宽、长宽比、垩白粒率、垩白度、胶稠度和碱消值。上述指标测定均重复 2 次。

1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 整理试验数据。采用 Statistix 9.0 (analytical software, 美国)进行方差分析(ANOVA), 明确试验地点、水分处理和品种类型以及这些因素的交互作用对产量和稻米品质相关性状的影响。在 LSD_{0.05} 水平上进行多重比较, 在同一地点, 比较水分处理之间、同一水分处理不同品种类型之间以及同一水分处理同一品种类型中品种间产量和稻米品质相关性状的差异。采用 Origin 2021 进行相关性分析及作图。

2 结果与分析

2.1 再生稻头季和再生季的大田生育期、气象条件和灌溉量

再生稻生育期在不同水分处理间的差异较小, 但在不同试验地点和品种类型间以及同一品种类型内不同品种间差异较大(表 2)。蕲春试验点再生稻头季生育期较浠水短 0~4 d, 而再生季长 4~13 d。不同试验点优质稻和普通水稻的全生长季大田生育期相

表 2 蕲春和浠水试验点再生稻大田生育期
Table 2 Field growth duration for ratoon rice at the Qichun and Xishui experimental sites

水分处理 Water treatment	品种 Variety	蕲春 Qichun					浠水 Xishui				
		头季 Main crop		再生季 Ratoon crop		全生 长季 Whole season	头季 Main crop		再生季 Ratoon crop		全生 长季 Whole season
		移栽– 齐穗	齐穗– 成熟	头季成熟– 齐穗	齐穗– 成熟		移栽– 齐穗	齐穗– 成熟	头季成熟– 齐穗	齐穗– 成熟	
		TR–HD	HD–MS	MS–HD	HD–MS		TR–HD	HD–MS	MS–HD	HD–MS	
常规灌溉 CF	HY8200	77	32	19	39	167	81	32	14	37	164
	HY116	75	34	25	36	170	75	36	18	39	168
	HY73	77	32	16	54	179	75	36	13	44	168
	Mean _{WDR}	76	33	20	43	172	77	35	15	40	167
	ZLYYXSM	78	35	21	47	181	80	33	16	42	171
	QYYNSM	79	34	22	46	181	81	32	19	39	171
	QY607	82	31	32	41	186	82	31	30	37	180
	Mean _{SQR}	80	33	25	45	183	81	32	22	39	174
	LY6326 _{OPR}	71	36	32	43	182	71	40	23	42	176
	Mean _W	77	33	24	44	178	78	34	19	40	171

(续表 2)

水分处理 Water treatment	品种 Variety	蕲春 Qichun					浠水 Xishui				
		头季 Main crop		再生季 Ratoon crop		全生	头季 Main crop		再生季 Ratoon crop		全生
		移栽- 齐穗	齐穗- 成熟	头季成熟- 齐穗	齐穗- 成熟	长季 Whole season	移栽- 齐穗	齐穗- 成熟	头季成熟- 齐穗	齐穗- 成熟	长季 Whole season
		TR-HD	HD-MS	MS-HD	HD-MS		TR-HD	HD-MS	MS-HD	HD-MS	
节水灌溉 WS	HY8200	77	33	18	39	167	81	30	16	37	164
	HY116	75	34	25	36	170	77	34	16	41	168
	HY73	77	33	15	54	179	77	34	13	44	168
	Mean _{WDR}	76	33	19	43	172	78	33	15	41	167
	ZLYYXSM	78	35	21	45	179	81	32	14	47	174
	QYYNSM	79	34	22	44	179	81	32	19	42	174
	QY607	82	31	31	40	184	83	30	29	35	177
	Mean _{SQR}	80	33	25	43	181	82	31	21	41	175
	LY6326 _{OPR}	71	36	30	43	180	71	37	24	42	174
	Mean _W	77	34	23	43	177	79	33	19	41	171

缩写同表 1。CF: 常规灌溉; WS: 节水灌溉。TR: 移栽期; HD: 齐穗期; MS: 成熟期。Mean_{WDR}、Mean_{SQR} 和 Mean_W 分别表示节水抗旱稻、优质稻和水分处理的平均值。
Abbreviations are the same as those given in Table 1. CF: continuous flooded; WS: water-saving management. TR: transplanting; HD: heading; MS: maturity. Mean_{WDR}, Mean_{SQR}, and Mean_W are mean of WDR, SQR and water treatments, respectively.

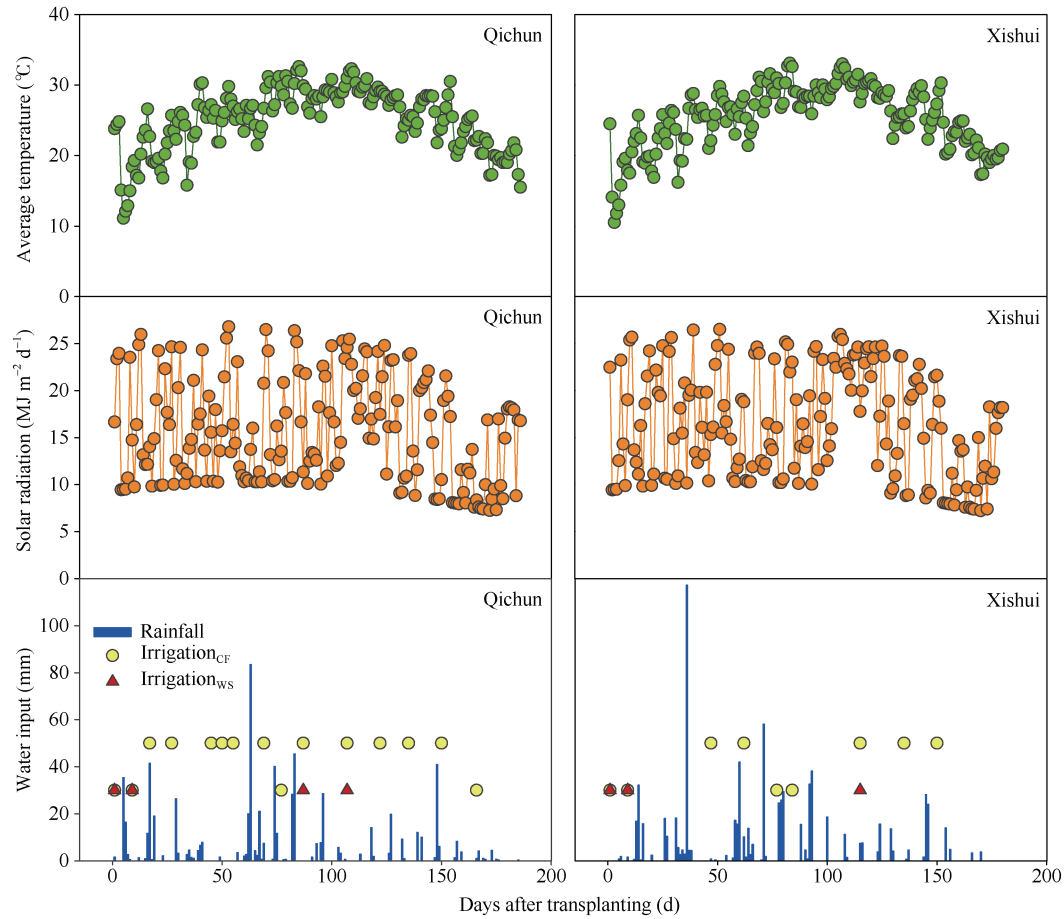


图 1 蕲春和浠水试验点生育期内日均温、日均辐射量和日总水分投入量
Fig. 1 Daily average temperature, solar radiation, and total water input during the ratoon rice growing seasons at the Qichun and Xishui experimental sites
水分处理同表 2。日总水分投入量包括日总降雨量和不同灌溉处理的灌溉量。
Water treatments are the same as those given in Table 2. Daily total water input including daily total rainfall and irrigation in different water treatments.

近, 较节水抗旱稻长 7~11 d, 但品种类型间生育期的差异在不同生长季表现不同。头季生育期表现为节水抗旱稻和普通水稻相近, 较优质稻短 1~6 d, 而再生季优质稻和节水抗旱稻分别较普通水稻短 4~5 d 和 10~12 d。并且, 两季品种类型间生育期的差异主要发生在齐穗期前。同一品种类型内, 品种间头季生育期差异较小, 而再生季生育期差异较大, 其中早优 73 和荃优 607 再生季生育期最长。

在再生稻生长季内, 日均温、日均辐射量和日总降雨量在 2 个试验点的变化趋势基本一致, 均表现为随着生育进程的推进先增加后下降(图 1)。平均来看, 头季与再生季在整个生育期内的日均温和日均辐射量差异较小, 但齐穗前后差异较大。头季齐穗后日均温和日均辐射量均高于齐穗前, 而再生季则相反。两季间的比较发现, 蕲春和浠水试验点头季齐穗后日均温分别为 29.3℃和 29.7℃, 均较再生季高 5.5℃; 两试验点头季齐穗后日均辐射量分别为 17.3 MJ m⁻² d⁻¹ 和 19.1 MJ m⁻² d⁻¹, 相比再生季分别高 4.3 MJ m⁻² d⁻¹ 和 5.7 MJ m⁻² d⁻¹。总降雨量表现为头季高于再生季, 分别为 524.7~639.2 mm 和 135.7~146.6 mm。尽管头季降雨主要发生在齐穗前, 再生季降雨主要发生在齐穗后, 但头季齐穗后降雨量仍高于再生季齐穗后(139.2~157.3 mm vs 89.1~97.7 mm)。

灌溉水量主要受水分处理的影响(图 1)。常规灌溉处理下, 蕲春和浠水试验点头季灌溉量分别为 440 mm 和 220 mm, 再生季分别为 280 mm 和 150 mm; 节水灌溉处理下, 则分别为 90 mm 和 60 mm, 以及 30 mm 和 30 mm。与常规灌溉相比, 节水灌溉在蕲春试验点使头季和再生季灌溉量分别减少 80%和

89%, 在浠水分别减少 73%和 80%。总体来看, 不同地点和水分处理下, 头季灌水量(60~440 mm)普遍高于再生季(30~280 mm)。此外, 由于降雨相对充沛, 浠水头季灌水量低于蕲春。

2.2 再生稻头季和再生季的产量

方差分析结果显示, 试验地点对头季和再生季产量均有显著影响, 品种类型仅对再生季产量有显著影响, 而水分处理对头季和再生季产量均没有显著影响, 试验地点、水分处理和品种类型对头季和再生季产量没有显著的交互作用(表 3)。在不同试验点、水分处理和品种类型下, 再生稻头季和再生季产量分别为 6.89~9.83 t hm⁻² 和 3.41~7.10 t hm⁻², 再生季平均产量为头季平均产量的 64% (图 2)。再生季品种间产量变异(变异系数为 11.8%~16.3%)大于头季(变异系数为 5.7%~7.9%)。具体来看, 蕲春试验点头季和再生季产量分别为 9.37 t hm⁻² 和 6.18 t hm⁻², 比浠水头季(7.48 t hm⁻²)和再生季产量(4.68 t hm⁻²)分别高 25%和 32%。头季和再生季产量在不同水分管理之间没有显著差异, 且在不同试验点之间表现一致。除在浠水常规灌溉条件下优质稻头季产量显著高于节水抗旱稻和普通水稻外, 在其他 3 个地点-水分管理组合中, 头季产量在 3 个品种类型之间差异不显著。再生季产量表现为优质稻和普通水稻之间没有显著差异, 但两者均显著高于节水抗旱稻, 且在不同水分管理和试验点之间表现一致。在同一品种类型中, 不同水稻品种头季产量没有显著差异, 但是在再生季, 节水抗旱稻不同品种的产量存在差异。其中, 在不同试验点和水分管理下, 早优 116 的产量均高于早优 8200。

表 3 头季和再生季产量和稻米品质性状的方差分析
Table 3 Analysis of variance for traits of grain yield and quality for the main and ratoon crops

指标 Trait	头季 Main crop						
	地点	水分处理	品种类型	地点×	地点×	水分处理×	地点×水分处理×
	S	W	T	水分处理	品种类型	品种类型	品种类型
				S×W	S×T	W×T	S×W×T
产量 GY	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
齐穗期总干物质重 TDW _{HD}	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
叶面积指数 LAI	*	ns	**	ns	ns	ns	ns
成熟期总干物质重 TDW _{MS}	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
收获指数 HI	**	ns	**	ns	ns	ns	ns
水分利用效率 WUE	**	**	ns	**	ns	*	ns
糙米率 BRR	**	ns	**	ns	ns	ns	ns
精米率 MRR	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
整精米率 HRR	ns	ns	**	ns	*	ns	ns

(续表 3)

指标 Trait	头季 Main crop						
	地点 S	水分处理 W	品种类型 T	地点× 水分处理 S×W	地点× 品种类型 S×T	水分处理× 品种类型 W×T	地点×水分处理× 品种类型 S×W×T
粒长 GL	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
粒宽 GW	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
长宽比 LWR	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
垩白粒率 CGR	**	ns	**	ns	*	ns	ns
垩白度 CD	**	ns	**	ns	ns	ns	ns
碱消值 ASV	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
胶稠度 GC	ns	ns	**	ns	**	ns	ns

指标 Trait	再生季 Ratoon crop						
	地点 S	水分处理 W	品种类型 T	地点× 水分处理 S×W	地点× 品种类型 S×T	水分处理× 品种类型 W×T	地点×水分处理× 品种类型 S×W×T
产量 GY	**	ns	**	ns	ns	ns	ns
齐穗期总干物质重 TDW _{HD}	*	**	**	*	ns	*	ns
叶面积指数 LAI	ns	*	**	*	ns	ns	ns
成熟期总干物质重 TDW _{MS}	ns	ns	**	*	ns	ns	ns
收获指数 HI	**	ns	**	ns	*	ns	ns
水分利用效率 WUE	ns	**	**	**	ns	*	ns
糙米率 BRR	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
精米率 MRR	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
整精米率 HRR	*	ns	**	ns	ns	ns	ns
粒长 GL	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
粒宽 GW	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
长宽比 LWR	*	ns	**	ns	ns	ns	ns
垩白粒率 CGR	ns	ns	**	ns	*	ns	ns
垩白度 CD	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
碱消值 ASV	ns	ns	**	ns	**	ns	ns
胶稠度 GC	**	ns	**	ns	ns	ns	ns

S: 地点; W: 水分处理; T: 品种类型; GY: 产量; TDW_{HD}: 齐穗期总干物质重; LAI: 叶面积指数; TDW_{MS}: 成熟期总干物质重; HI: 收获指数; WUE: 水分利用效率; BRR: 糙米率; MRR: 精米率; HRR: 整精米率; GL: 粒长; GW: 粒宽; LWR: 长宽比; CGR: 垩白粒率; CD: 垩白度; ASV: 碱消值; GC: 胶稠度。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著; ns 表示差异不显著。

S: site; W: water treatment; T: variety type; GY: grain yield; TDW_{HD}: total dry weight at heading; LAI: leaf area index; TDW_{MS}: total dry weight at maturity; HI: harvest index; WUE: water use efficiency; BRR: brown rice rate; MRR: milled rice rate; HRR: head rice rate; GL: grain length; GW: grain width; LWR: length-width ratio; CGR: chalky grain rate; CD: chalkiness degree; ASV: alkali spreading value; GC: gel consistency. * and ** mean significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns: not significant.

2.3 再生稻头季和再生季的作物生长分析

方差分析结果表明, 对齐穗期水稻而言, 试验地点对头季叶面积指数和再生季总干物质重有显著影响, 水分处理对再生季叶面积指数和总干物质重有显著影响, 品种类型对两季叶面积指数和总干物质重均有显著影响(表 3)。交互作用方面, 仅地点和水分处理对再生季叶面积指数和总干物质重、以及水分处理和品种类型对再生季总干物质重存在显著交互, 其余因素间无显著交互效应。平均而言, 再生

稻头季齐穗期总干物质重和叶面积指数分别为 11.03 t hm⁻² 和 5.47, 分别较再生季高 22%和 157%(图 3)。具体来看, 蕲春试验点头季齐穗期总干物质重和叶面积指数与泔水的差异较小且在不同水分处理下表现一致, 而再生季的差异较大是受水分处理的影响。常规灌溉条件下, 蕲春试验点再生季齐穗期总干物质重和叶面积指数与泔水相当, 而节水灌溉条件下分别高 20%和 55%。品种类型间表现为优质稻和节水抗旱稻头季齐穗期的总干物质重和叶面

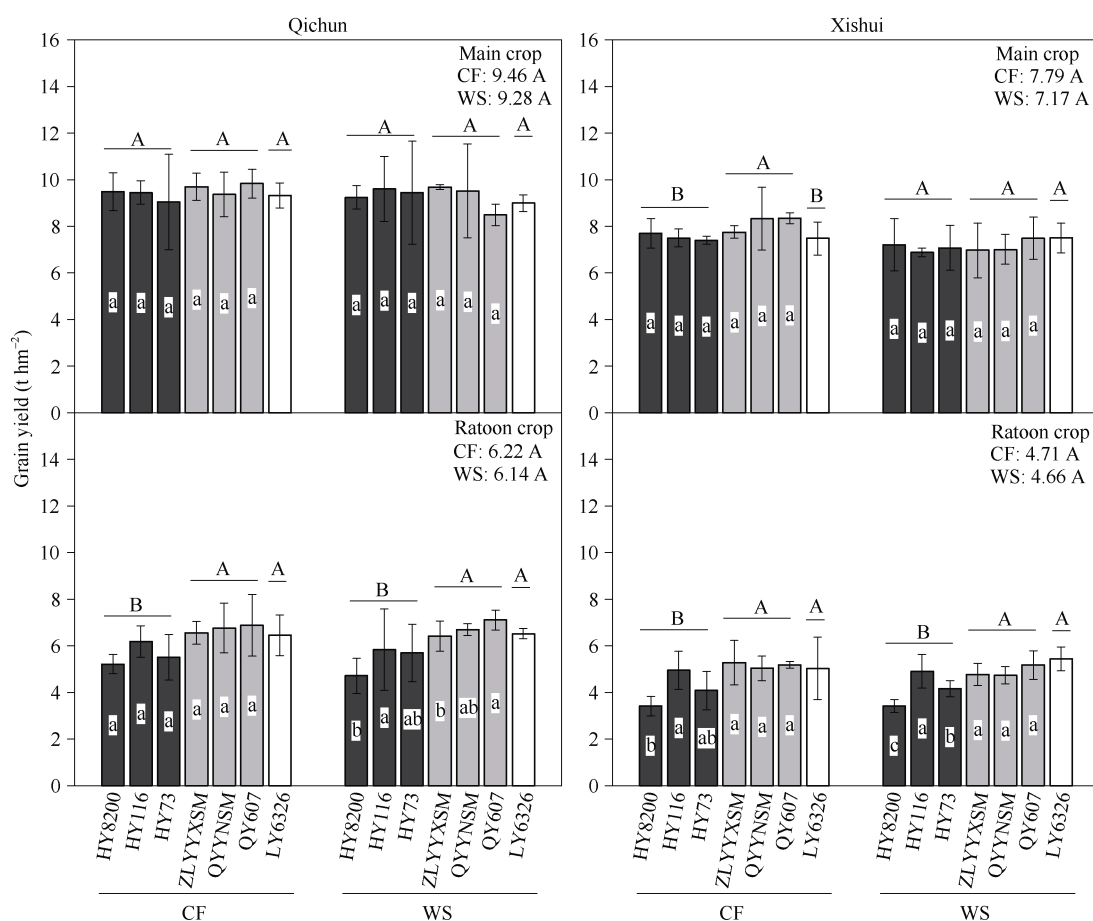


图 2 蕲春和浣水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季产量的差异

Fig. 2 Differences in grain yield of ratoon rice in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

缩写同表 1 和表 2。图中右上角水分处理平均值后不同大写字母表示水分处理间差异显著(LSD_{0.05})。柱子内不同大写字母表示品种类型间差异显著(LSD_{0.05})，柱子内不同小写字母表示同一品种类型不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05})。

Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different uppercase letters in the top-right corner indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}). Different uppercase letters above bars show significant differences among variety types, and different lowercase letters within bars indicate significant differences among varieties within the same variety type (LSD_{0.05}).

积指数相当，高于普通水稻，且在不同试验点和水分处理条件下表现一致。再生季则表现为普通水稻和优质稻齐穗期的总干物质重和叶面积指数相当，高于节水抗旱稻且在 6 个地点-水分管理组合中显著。在同一品种类型中，品种间头季齐穗期总干物质重和叶面积指数的差异较小，而再生季的差异较大。其中，早优 116 和荃优 607 的再生季齐穗期总干物质重和叶面积指数均高于同类型的其他品种。

就成熟期数据来看，试验地点对两季总干物质重没有显著影响，但对收获指数有显著影响(表 3)。水分处理对两季总干物质重和收获指数均没有显著影响，而品种类型对两季总干物质重和收获指数均有显著影响。地点和水分处理、地点和品种类型分别对再生季总干物质重和收获指数有显著的互作效

应。总体上，再生稻头季成熟期总干物质重和收获指数分别为 14.76~19.74 t hm⁻² 和 41.2%~52.5%，再生季分别为 10.24~16.26 t hm⁻² 和 30.4%~45.4% (图 4)。平均来看，再生季成熟期总干物质重和收获指数分别为头季的 80%和 84%。除节水灌溉条件下再生季成熟期总干物质重外，蕲春和浣水试验点间两季成熟期总干物质重的差异较小，而收获指数的差异较大。蕲春试验点头季和再生季收获指数平均分别高出浣水 6.3 个百分点和 7.0 个百分点。在不同试验点和生长季节条件下，除浣水再生季成熟期总干物质重外，各个水分处理间成熟期总干物质重和收获指数没有显著差异。品种类型间的比较发现，头季成熟期总干物质重表现为蕲春常规灌溉和浣水节水灌溉条件下差异显著，而其他 2 个地点-水分处

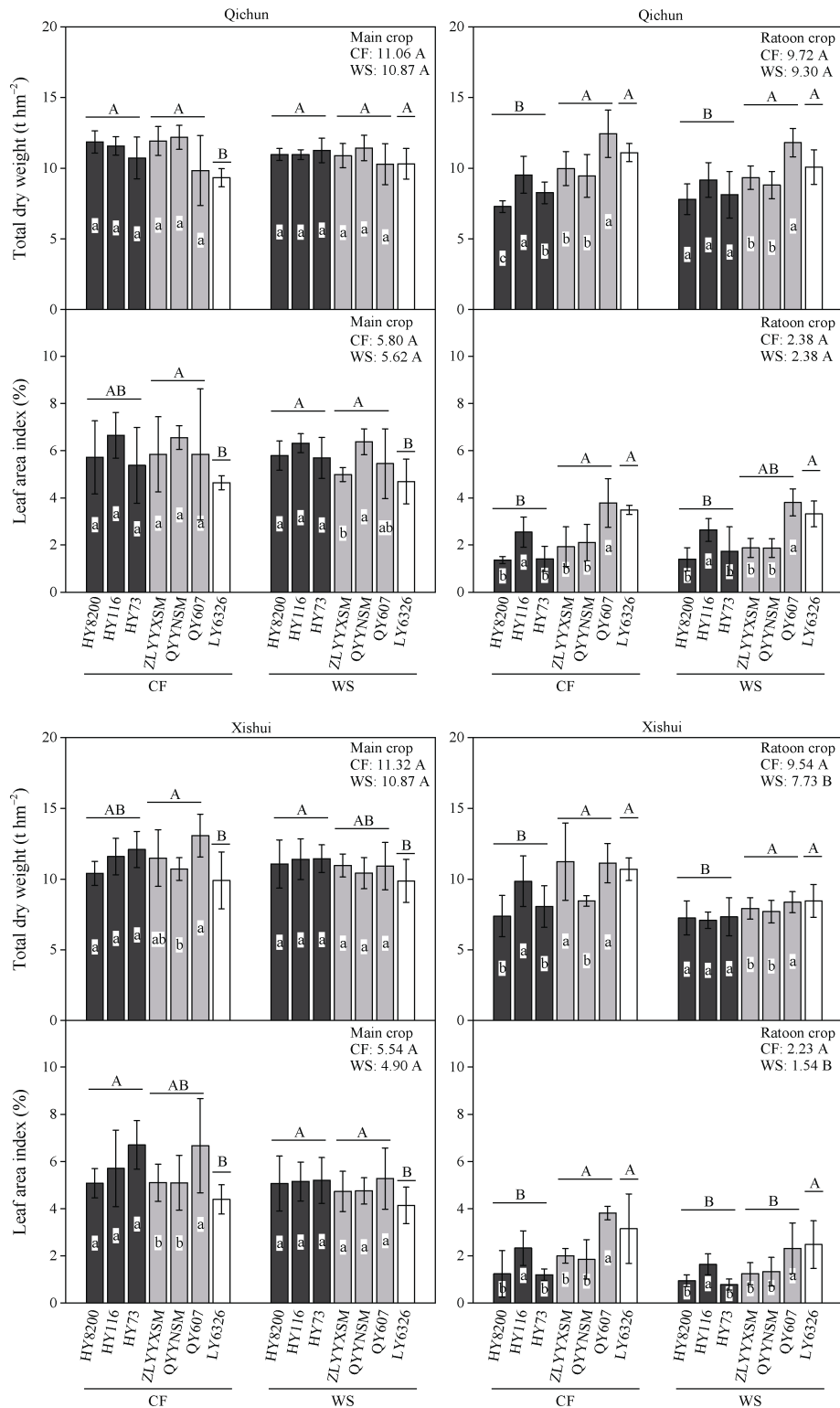


图 3 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季齐穗期干物质重和叶面积指数的差异

Fig. 3 Differences in total dry weight and leaf area index at heading in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

缩写同表 1 和表 2。图中右上角水分处理平均值后不同大写字母表示水分处理间差异显著(LSD_{0.05})；柱子内不同小写字母表示同一品种类型不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05})。

Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different uppercase letters in the top-right corner indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}). Different uppercase letters above bars show significant differences among variety types, and different lowercase letters within bars indicate significant differences among varieties within the same variety type (LSD_{0.05}).

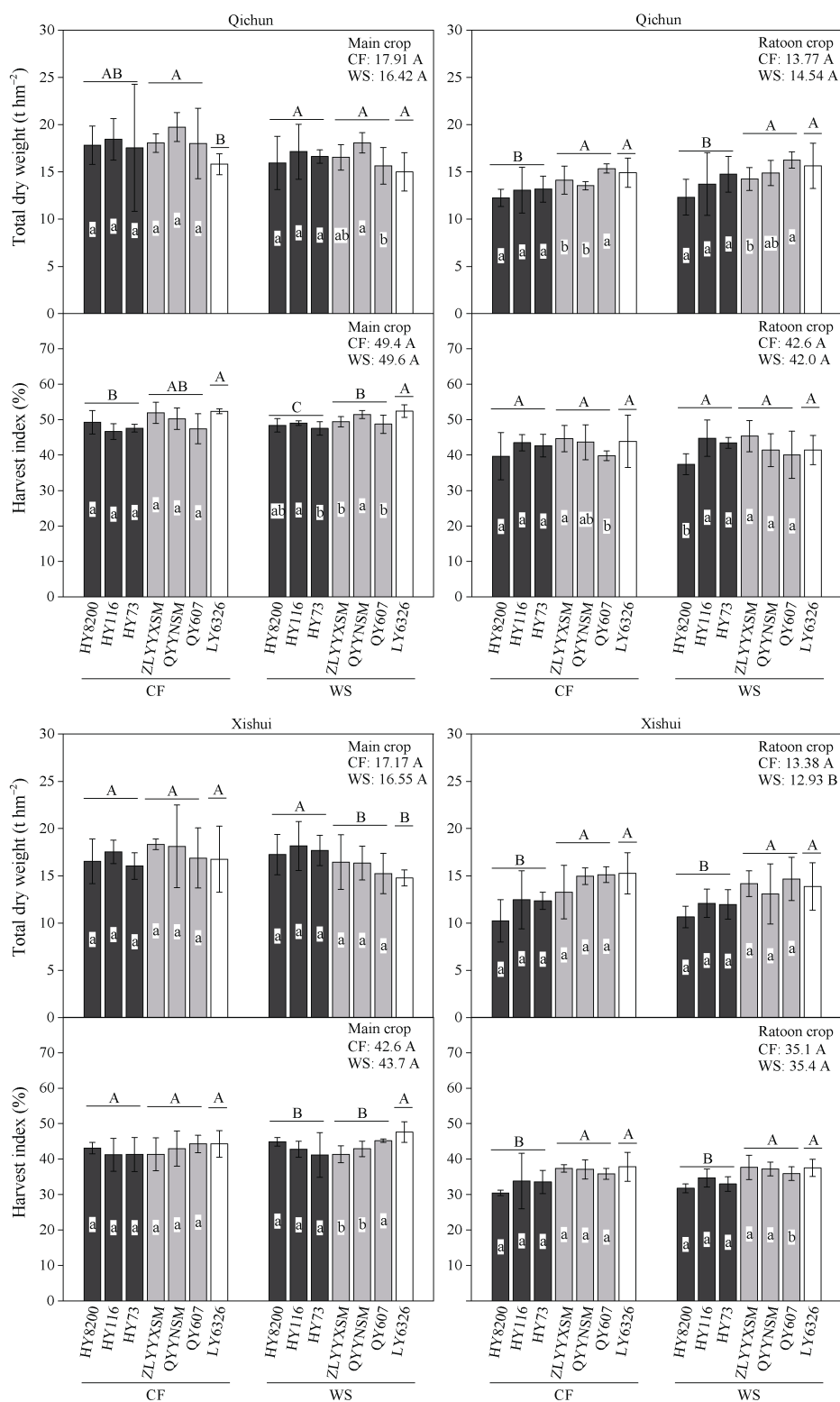


图 4 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季成熟期干物质重和收获指数的差异

Fig. 4 Differences in total dry weight and harvest index of maturity in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

缩写同表 1 和表 2。图中右上角水分处理平均值后不同大写字母表示水分处理间差异显著(LSD_{0.05})。柱子内不同小写字母表示同一品种类型不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05})。

Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different uppercase letters in the top-right corner indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}). Different uppercase letters above bars show significant differences among variety types, and different lowercase letters within bars indicate significant differences among varieties within the same variety type (LSD_{0.05}).

理组合下差异不显著;再生季成熟期总干物质重则表现为优质稻与普通水稻相当,同时显著高于节水抗旱稻,且在不同试验点和水分处理表现一致。收获指数方面,蕲春头季在各品种类型间表现为普通水稻>优质稻>节水抗旱稻,在浠水常规灌溉条件下差异不显著;再生季则在蕲春试验点的品种类型间差异不显著,而浠水试验点表现为优质稻与普通水稻相当,同时显著高于节水抗旱稻,且在不同水分处理表现一致。在品种水平上,同一品种类型内,品种间头季成熟期总干物质重和收获指数均无一致规律,而再生季差异较为明显。其中,早优 8200 的总干物质重和收获指数均最低,而荃优 607 的总干物质重最高,收获指数却低于其他品种。

2.4 再生稻头季和再生季的水分利用效率

试验地点和品种类型分别对头季和再生季水分

利用效率有显著影响,水分处理对两季水分利用效率均有显著影响(表 3)。此外,水分处理和地点、水分处理和品种类型对两季水分利用效率有显著交互作用。在不同试验点、水分处理和品种类型条件下,头季和再生季的水分利用效率分别为 8.99~15.10 kg mm⁻¹ 和 14.58~34.72 kg mm⁻¹,再生季平均水分利用效率较头季提高 115% (图 5)。在 2 个试验点中,与常规灌溉相比,除浠水头季外,节水灌溉较常规灌溉水分利用效率显著提高。其中,在蕲春试验点,节水灌溉处理下头季和再生季水分利用效率分别较常规灌溉处理显著增加 54%和 138%;在浠水,分别提升 15%和 74%。品种类型间水分利用效率的差异在头季较小,而在再生季差异显著,且在不同地点和不同水分处理下均表现为优质稻和普通水稻相当,显著高于节水抗旱稻。在同一品种类型中,不同品

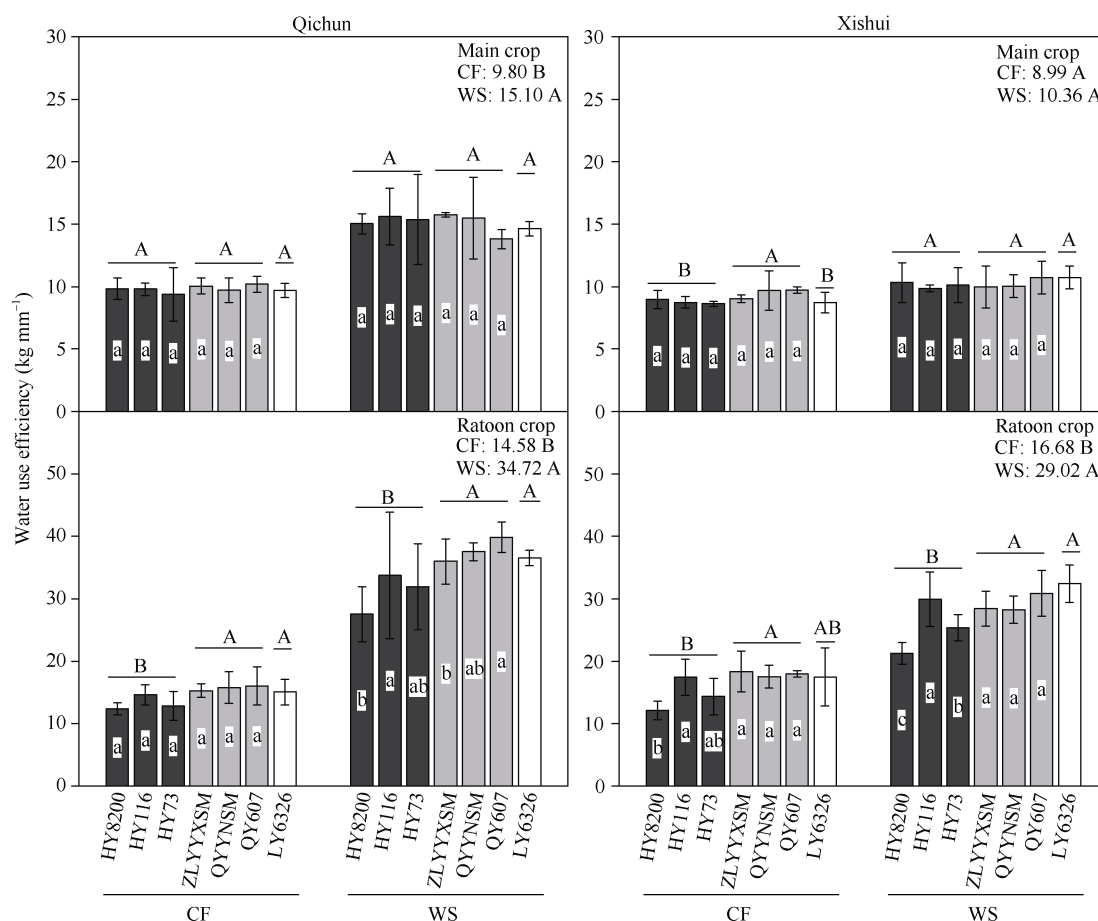


图 5 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季水分利用效率的差异

Fig. 5 Differences in water use efficiency of ratoon rice in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

缩写同表 1 和表 2。图中右上角水分处理平均值后不同大写字母表示水分处理间差异显著(LSD_{0.05})。柱子内不同大写字母表示品种类型间差异显著(LSD_{0.05}), 柱子内不同小写字母表示同一品种类型不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05})。

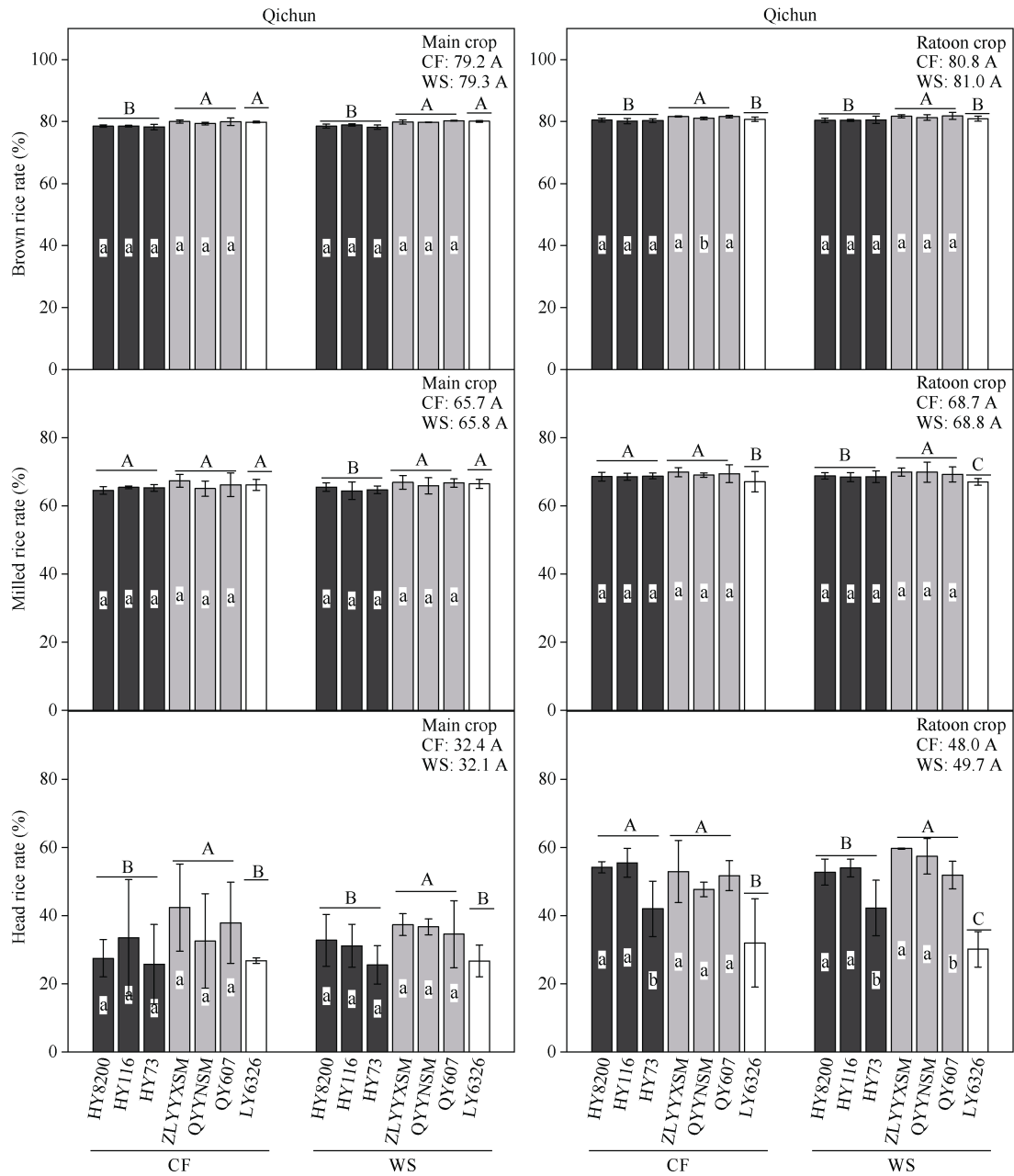
Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different uppercase letters in the top-right corner indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}). Different uppercase letters above bars show significant differences among variety types, and different lowercase letters within bars indicate significant differences among varieties within the same variety type (LSD_{0.05}).

种头季水分利用效率没有显著差异；而在再生季，不同地点和不同水分处理下，旱优 116 的水分利用效率均高于其他节水抗旱早稻品种。

2.5 再生稻头季和再生季的加工品质

试验地点对头季糙米率和再生季整精米率均有显著影响，品种类型对头季和再生季糙米率、精米率和整精米率均有显著影响，水分管理对头季和再生季稻谷加工品质均没有显著影响(表 3)。除地点和品种类型对头季整精米率有显著的互作效应外，地点、水分管理和品种类型对头季和再生季稻谷的加工品质均没有显著的交互作用。整体来看，再生稻

头季糙米率、精米率和整精米率分别为 77.8%~80.2%、64.2%~67.4%和 19.1%~43.5%，再生季的糙米率、精米率和整精米率分别为 78.4%~82.0%、67.0%~70.5%和 30.1%~62.7%。平均来看，再生季糙米率、精米率和整精米率分别较头季提高 1.7 个百分点、3.0 个百分点和 18.8 个百分点(图 6)。不同试验点间，蕲春试验点头季和再生季稻谷整精米率分别为 32.2%和 48.9%，分别较浉水高 1.8 个百分点和低 2.6 个百分点。不同水分管理间稻谷糙米率、精米率和整精米率没有显著差异，且在不同试验点和生长季节之间表现一致。品种类型间的比较发现，



(图 6)

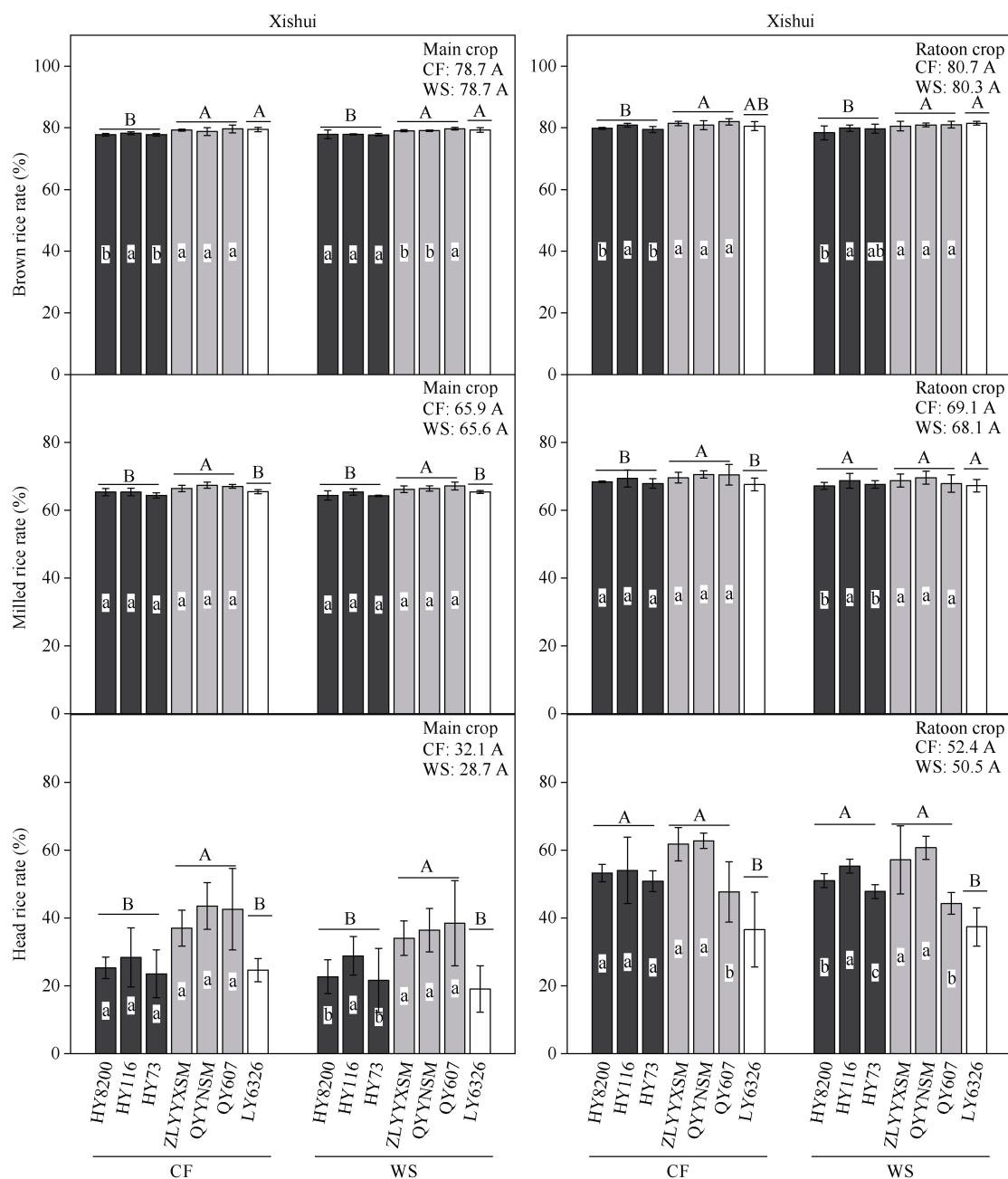


图 6 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季稻米加工品质的差异

Fig. 6 Differences in milling quality of ratoon rice in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

缩写同表 1 和表 2。图中左上角水分处理平均值后不同大写字母表示水分处理间差异显著(LSD_{0.05})。柱子内不同大写字母表示品种类型间差异显著(LSD_{0.05}), 柱子内不同小写字母表示同一品种类型不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05})。

Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different uppercase letters in the top-right corner indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}). Different uppercase letters above bars show significant differences among variety types, and different lowercase letters within bars indicate significant differences among varieties within the same variety type (LSD_{0.05}).

在 4 个地点-水分管理组合中, 头季糙米率均表现为优质稻和普通水稻之间没有显著差异, 但均显著高于节水抗旱稻; 再生季优质稻糙米率显著高于节水抗旱稻且在 2 个试验点表现一致, 同时高于普通水稻, 但差异仅在蕲春试验点显著。不同品种类型的精米率

差异较小, 且在不同试验点和生长季节表现不一致。与品种类型间糙米率(变异系数为 1.4%)和精米率(变异系数为 2.4%)的变异相比, 整精米率在不同品种类型之间存在很大的差异(变异系数为 30.9%)。在头季, 整精米率在普通水稻(19.1%~26.8%)和节水抗旱稻

(24.4%~29.8%)之间没有显著差异,但均显著低于优质稻(36.2%~41.0%),且在不同试验点之间表现一致。在再生季,普通水稻的整精米率(30.1%~37.4%)显著低于其他品种类型,而优质稻(50.8%~57.4%)和节水抗旱稻(49.6%~52.7%)的整精米率没有显著差异(蕲春节水灌溉处理下除外)。同样地,与糙米率和精米率相比,同一品种类型中,整精米率的品种间差异更大。

2.6 再生稻头季和再生季的外观品质

在头季和再生季,品种类型对稻米粒长、粒宽、长宽比、垩白粒率和垩白度等外观品质指标均有显著影响(表 3)。试验地点仅对头季稻米垩白粒率和垩白度以及再生季稻米长宽比有显著影响,水分处理对头季和再生季稻米外观品质均没有显著影响。试验地点和品种类型对头季和再生季垩白粒率均有显著的交互作用。平均来看,再生稻头季和再生季长宽比分别为2.95和3.15,再生季长宽比的增加主要由于粒长由头季的6.55 mm增加到再生季的6.80 mm以及粒宽由头季的2.20 mm缩短到再生季的2.10 mm(表 4)。具体来看,蕲春试验点再生季稻米长宽比为3.10,较浠水低3%。品种类型间的比较发现,头季和再生季稻米长宽比均表现为节水抗旱稻>优质稻>普通水稻。优质稻稻米长宽比大于普通水稻主要归因于其粒宽较小,而节水抗旱稻稻米长宽比大于优质稻和普通水稻主要源于其粒长较长。长宽比在同一品种类型中也表现出显著的品种间差异。例如,在节水抗旱稻中,旱优8200的稻米长宽比显著高于其他品种,这主要

是因为该品种的粒宽最小。

平均来看,再生稻头季垩白粒率和垩白度分别为30.76% (11.97%~57.63%)和8.82% (3.20%~16.73%),均高于再生季的13.52% (6.57%~21.57%)和2.94% (1.60%~4.53%)(图 7)。同时,不同处理条件下再生季的垩白粒率(变异系数为31.8%)和垩白度(变异系数为30.2%)的变异均小于头季(变异系数分别为44.9%和46.9%)。蕲春试验点头季垩白粒率和垩白度分别为35.12%和9.95%,分别较浠水高8.7个百分点和2.2个百分点。稻米垩白粒率和垩白度在不同水分管理之间没有显著差异,且在生长季节和试验点之间保持一致。品种类型间的比较发现,不同试验点和水分处理下,头季垩白粒率均表现为节水抗旱稻(40.74%)和普通水稻(40.17%)间没有显著差异,但均显著高于优质稻(17.64%)。在再生季中,垩白粒率在品种类型间存在显著差异,优质稻垩白粒率(9.73%)最低,普通水稻(20.51%)最高,且在不同水分处理和地点间表现一致。对于垩白度而言,头季品种类型间的差异与垩白粒率类似,均表现为优质稻最低(5.37%),而普通水稻(11.72%)和节水抗旱稻(11.30%)之间没有显著差异。同样地,再生季优质稻的垩白度(2.34%)显著低于普通水稻(4.16%),且在不同水分处理和地点间表现一致。同一品种类型内,不同品种间头季和再生季垩白粒率和垩白度均存在差异。其中,不同处理下旱优8200和荃优粤农丝苗分别在节水抗旱稻和优质稻品种类型中表现出最低的垩白粒率和垩白度。

表 4 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季稻米粒型的差异
Table 4 Differences in grain size of ratoon rice in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

水分处理 Water treatment	品种 Variety	蕲春 Qichun					
		头季 Main crop			再生季 Ratoon crop		
		粒长	粒宽	长宽比	粒长	粒宽	长宽比
		Grain length (mm)	Grain width (mm)	Length/width	Grain length (mm)	Grain width (mm)	Length/width
常规灌溉	HY8200	6.80 a	2.20 b	3.07 a	7.20 a	2.10 b	3.34 a
CF	HY116	6.83 a	2.30 a	2.98 b	7.10 b	2.20 a	3.20 b
	HY73	6.87 a	2.30 a	2.99 b	7.23 a	2.20 a	3.27 ab
	Mean _{WDR}	6.83 A	2.27 A	3.01 A	7.18 A	2.17 A	3.27 A
	ZLYYXSM	6.37 a	2.17 a	2.97 a	6.67 a	2.10 a	3.16 a
	QYYNSM	6.47 a	2.13 b	2.90 a	6.57 b	2.10 a	3.07 b
	QY607	6.40 a	2.10 a	3.07 a	6.33 c	2.13 a	2.96 c
	Mean _{SQR}	6.41 B	2.13 B	2.98 A	6.52 B	2.11 B	3.06 B
	LY6326 _{OPR}	6.43 B	2.20 AB	2.92 A	6.53 B	2.20 A	2.99 B
	Mean _W	6.60 A	2.20 A	3.00 A	6.80 A	2.10 A	3.10 A

(续表 4)

水分处理 Water treatment	品种 Variety	蕲春 Qichun					
		头季 Main crop			再生季 Ratoon crop		
		粒长	粒宽	长宽比	粒长	粒宽	长宽比
		Grain length (mm)	Grain width (mm)	Length/width	Grain length (mm)	Grain width (mm)	Length/width
节水灌溉 WS	HY8200	6.83 a	2.20 b	3.08 a	7.20 a	2.13 a	3.34 a
	HY116	6.70 a	2.27 ab	2.94 b	7.17 a	2.20 a	3.19 b
	HY73	6.90 a	2.30 a	2.98 b	7.13 a	2.17 a	3.25 b
	Mean _{WDR}	6.81 A	2.26 A	3.00 A	7.17 A	2.17 A	3.26 A
	ZLYYXSM	6.37 a	2.20 a	2.98 a	6.70 a	2.10 a	3.18 a
	QYYNSM	6.30 a	2.20 a	2.89 c	6.60 a	2.10 a	3.09 a
	QY607	6.23 a	2.13 a	2.93 b	6.37 b	2.10 a	2.99 b
	Mean _{SQR}	6.30 B	2.18 B	2.93 B	6.56 B	2.10 B	3.09 B
	LY6326 _{OPR}	6.40 B	2.20 AB	2.90 B	6.53 B	2.17 A	2.97 C
	Mean _W	6.50 A	2.20 A	3.00 A	6.80 A	2.10 A	3.10 A
		浠水 Xishui					
		头季 Main crop			再生季 Ratoon crop		
		粒长	粒宽	长宽比	粒长	粒宽	长宽比
		Grain length (mm)	Grain width (mm)	Length/width	Grain length (mm)	Grain width (mm)	Length/width
常规灌溉 CF	HY8200	6.87 a	2.20 b	3.07 a	7.23 a	2.10 b	3.38 a
	HY116	6.70 b	2.30 a	2.92 c	7.13 ab	2.20 a	3.23 b
	HY73	6.87 a	2.30 a	2.98 b	7.10 b	2.17 ab	3.27 b
	Mean _{WDR}	6.81 A	2.27 A	2.99 A	7.16 A	2.16 A	3.29 A
	ZLYYXSM	6.40 a	2.20 a	2.96 a	6.67 a	2.07 a	3.21 a
	QYYNSM	6.40 a	2.20 a	2.94 a	6.60 a	2.10 a	3.13 a
	QY607	6.27 a	2.13 a	2.93 a	6.30 b	2.10 a	3.00 b
	Mean _{SQR}	6.36 B	2.18 B	2.95 AB	6.52 B	2.09 B	3.11 B
	LY6326 _{OPR}	6.47 B	2.23 AB	2.89 B	6.50 B	2.20 A	3.01 B
	Mean _W	6.60 A	2.20 A	3.00 A	6.80 A	2.10 A	3.20 A
节水灌溉 WS	HY8200	6.83 a	2.20 b	3.06 a	7.17 a	2.10 b	3.34 a
	HY116	6.70 b	2.30 a	2.90 c	7.13 a	2.20 a	3.25 b
	HY73	6.83 a	2.30 a	2.96 b	7.13 a	2.20 a	3.27 b
	Mean _{WDR}	6.79 A	2.27 A	2.97 A	7.14 A	2.17 A	3.29 A
	ZLYYXSM	6.37 ab	2.20 a	2.94 a	6.87 a	2.00 b	3.39 a
	QYYNSM	6.40 a	2.20 a	2.94 a	6.60 ab	2.10 a	3.17 b
	QY607	6.27 b	2.10 b	2.94 a	6.27 b	2.10 a	2.99 b
	Mean _{SQR}	6.34 B	2.17 B	2.94 A	6.58 B	2.07 B	3.18 AB
	LY6326 _{OPR}	6.43 B	2.27 A	2.87 B	6.60 B	2.17 A	3.05 B
	Mean _W	6.50 A	2.20 A	2.90 A	6.80 A	2.10 A	3.20 A

缩写同表 1 和表 2。同一列内不同小写字母表示同一品种类型内不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05}); Mean_{WDR}、Mean_{SQR}和 LY6326_{OPR}行的不同大写字母表示品种类型间的差异显著(LSD_{0.05}); Mean_W行的不同大写字母表示水分处理间的差异显著(LSD_{0.05})。

Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different lowercase letters within a column indicate significant differences among varieties within the same type, and different uppercase letters in the Mean_{WDR}, Mean_{SQR}, and LY6326_{OPR} rows indicate significant differences among variety types (LSD_{0.05}). Different uppercase letters in the Mean_W row indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}).

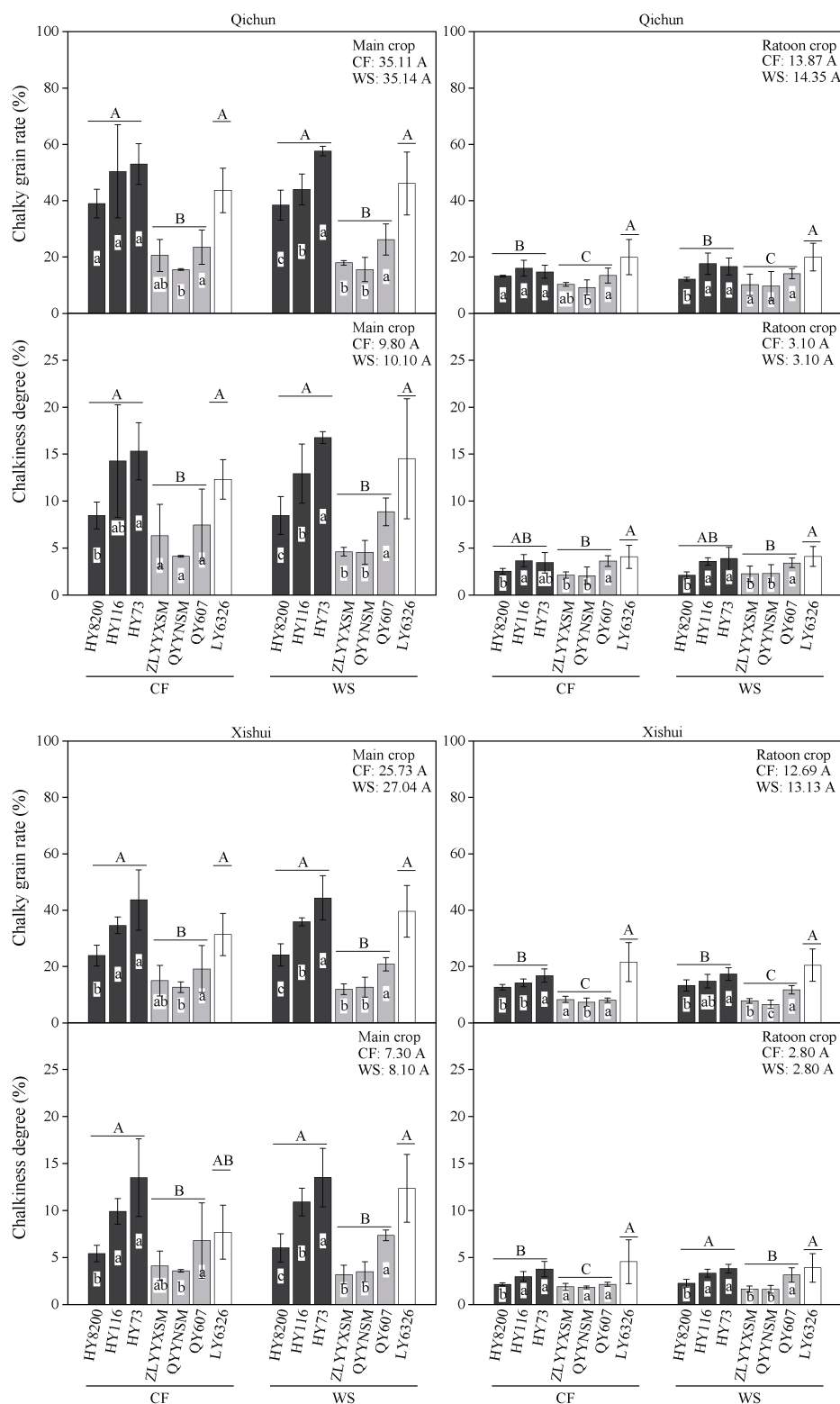


图 7 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季稻米垩白粒率和垩白度的差异

Fig. 7 Differences in chalky grain rate and chalkiness degree of ratoon rice in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

缩写同表 1 和表 2。图中右上角水分处理平均值后不同大写字母表示水分处理间差异显著(LSD_{0.05})。柱子内不同大写字母表示品种类型间差异显著(LSD_{0.05})，柱子内不同小写字母表示同一品种类型不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05})。

Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different uppercase letters in the top-right corner indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}). Different uppercase letters above bars show significant differences among variety types, and different lowercase letters within bars indicate significant differences among varieties within the same variety type (LSD_{0.05}).

2.7 再生稻头季和再生季的蒸煮食味品质

本研究中, 试验地点仅对再生季稻米胶稠度有显著影响, 品种类型对头季和再生季碱消值和胶稠度均有显著影响, 水分处理对两季碱消值和胶稠度均没有显著影响(表 3)。试验地点与品种类型对头季胶稠度和再生季碱消值有显著的交互作用。再生稻头季和再生季胶稠度的差异较小, 分别为 8.57 mm 和 8.43 mm, 而碱消值表现为再生季较头季增加 69% (表 5)。具体来看, 蕲春试验点胶稠度为 8.67 mm, 较

浠水增加 10%。不同水分管理之间胶稠度和碱消值没有显著差异, 且在不同试验点和生长季节表现一致。优质稻与普通水稻头季和再生季碱消值的差异均较小, 仅在浠水头季常规灌溉和再生季节水灌溉处理下显著。同时, 这 2 个品种类型的碱消值均高于节水抗旱稻且差异在再生季显著。品种类型间胶稠度的差异在不同地点、季节和水分管理间表现不一致。同一品种类型内, 品种间碱消值和胶稠度也在不同地点、季节和水分管理间没有表现出一致的规律。

表 5 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻头季和再生季稻米碱消值和胶稠度的差异
Table 5 Differences in alkali spreading value and gel consistency of ratoon rice in the main crop and ratoon crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

水分处理 Water treatment	品种 Variety	蕲春 Qichun				浠水 Xishui			
		头季 Main crop		再生季 Ratoon crop		头季 Main crop		再生季 Ratoon crop	
		碱消值 Alkali spreading value	胶稠度 Gel consistency (mm)	碱消值 Alkali spreading value	胶稠度 Gel consistency (mm)	碱消值 Alkali spreading value	胶稠度 Gel consistency (mm)	碱消值 Alkali spreading value	胶稠度 Gel consistency (mm)
常规灌溉 CF	HY8200	1.61 a	8.45 b	3.22 a	8.73 a	2.11 a	8.80 a	2.83 a	8.50 a
	HY116	1.39 a	8.77 ab	1.72 b	8.93 a	1.22 b	8.93 a	1.61 a	8.07 b
	HY73	1.55 a	9.05 a	2.16 b	8.97 a	1.61 b	8.73 a	1.56 a	8.32 ab
	Mean _{WDR}	1.52 A	8.76 A	2.37 B	8.88 A	1.65 B	8.82 A	2.00 B	8.29 A
	ZLYYXSM	2.00 a	8.90 a	3.94 a	8.78 ab	2.67 a	7.30 b	3.61 a	8.27 a
	QYYNSM	2.06 a	8.27 a	4.33 a	8.35 b	2.44 a	8.35 a	4.56 a	7.92 a
	QY607	1.72 a	8.77 a	1.89 b	8.83 a	2.06 a	9.10 a	4.00 a	8.30 a
	Mean _{SQR}	1.93 A	8.64 A	3.39 A	8.66 AB	2.39 A	8.25 A	4.06 A	8.16 AB
	LY6326 _{OPR}	1.78 A	8.27 A	4.61 A	8.43 B	1.67 B	8.53 A	3.22 A	7.80 B
	Mean _W	1.73 A	8.64 A	3.13 A	8.72 A	1.97 A	8.54 A	3.05 A	8.17 A
节水灌溉 WS	HY8200	1.28 a	8.68 a	3.17 a	8.58 b	2.11 a	8.97 a	2.94 a	8.42 a
	HY116	1.11 a	8.97 a	1.61 b	8.63 b	1.56 a	9.10 a	1.72 b	8.21 a
	HY73	1.39 a	8.63 a	2.17 b	9.15 a	1.33 a	8.60 a	2.06 ab	8.05 a
	Mean _{WDR}	1.26 B	8.76 AB	2.31 B	8.79 A	1.67 B	8.89 A	2.24 C	8.23 A
	ZLYYXSM	2.44 a	8.87 a	3.89 a	8.75 a	2.28 a	7.48 b	3.94 c	8.23 a
	QYYNSM	2.33 a	9.07 a	4.22 a	8.07 b	2.72 a	7.03 c	4.33 b	7.93 a
	QY607	1.67 a	8.83 a	2.61 b	8.75 a	1.78 a	9.00 a	4.83 a	8.32 a
	Mean _{SQR}	2.15 A	8.92 A	3.57 A	8.52 A	2.26 A	7.84 B	4.37 A	8.16 A
	LY6326 _{OPR}	2.17 A	8.38 B	3.61 A	8.32 A	1.94 AB	8.07 AB	3.44 B	8.35 A
	Mean _W	1.77 A	8.78 A	3.04 A	8.61 A	1.96 A	8.32 A	3.32 A	8.22 A

缩写同表 1 和表 2。同一列内不同小写字母表示同一品种类型内不同品种之间的差异显著(LSD_{0.05}); Mean_{WDR}、Mean_{SQR}和 LY6326_{OPR}行的不同大写字母表示品种类型间的差异显著(LSD_{0.05}); Mean_W行的不同大写字母表示水分处理间的差异显著(LSD_{0.05})。Abbreviations are the same as those given in Table 1 and Table 2. Different lowercase letters within a column indicate significant differences among varieties within the same type, and different uppercase letters in the Mean_{WDR}, Mean_{SQR}, and LY6326_{OPR} rows indicate significant differences among variety types (LSD_{0.05}). Different uppercase letters in the Mean_W row indicate significant differences between water treatments (LSD_{0.05}).

2.8 再生稻稻米品质的相关性

本研究分析了头季和再生季稻米品质之间的相关性(表 6)。结果表明, 再生季稻米的加工、外观和蒸煮食味品质与头季对应指标均呈显著正相关, 但胶稠度除外。具体来看, 再生季糙米率、精米率和整精米率与头季相应指标间的相关系数分别为

0.832、0.521 和 0.537; 再生季粒长、粒宽、长宽比、垩白粒率和垩白度与头季相应指标间的相关系数分别为 0.923、0.662、0.537、0.794 和 0.819; 再生季碱消值与头季的相关系数达 0.712, 再生季胶稠度与头季的相关系数仅为 0.338。这一结果表明, 提高头季稻米品质也有利于再生季稻米品质的提升。

表 6 蕲春和浠水试验点不同水分和品种处理下再生稻再生季稻米品质指标与头季的相关性
Table 6 Correlation of ratoon rice quality between the ratoon crop and the main crop under different water and variety treatments at the Qichun and Xishui sites

品质指标 Quality index		头季 Main crop									
		糙米率 BRR	精米率 MRR	整精米率 HRR	粒长 GL	粒宽 GW	长宽比 LWR	垩白粒率 CGR	垩白度 CD	碱消值 ASV	胶稠度 GC
再生季 Ratoon crop	糙米率 BRR	0.832**	0.726**	0.628**	-0.791**	-0.519**	-0.369	-0.389*	-0.290	0.325	-0.143
	精米率 MRR	0.240	0.521**	0.811**	-0.356	-0.293	0.030	-0.570**	-0.546**	0.345	0.007
	整精米率 HRR	-0.188	0.142	0.537**	-0.007	-0.055	0.282	-0.545**	-0.582**	0.296	-0.135
	粒长 GL	-0.868**	-0.742**	-0.527**	0.923**	0.730**	0.460*	0.525**	0.386*	-0.481**	0.188
	粒宽 GW	-0.306	-0.464*	-0.550**	0.472*	0.662**	-0.202	0.806**	0.815**	-0.690**	0.379*
	长宽比 LWR	-0.792**	-0.519**	-0.297	0.723**	0.493**	0.537**	0.136	-0.010	-0.136	-0.064
	垩白粒率 CGR	-0.128	-0.482**	-0.751**	0.349	0.481**	-0.163	0.794**	0.792**	-0.609**	0.256
	垩白度 CD	-0.021	-0.356	-0.586**	0.226	0.406*	-0.240	0.764**	0.819**	-0.620**	0.307
	碱消值 ASV	0.577**	0.638**	0.464*	-0.687**	-0.632**	-0.269	-0.626**	-0.620**	0.712**	-0.389*
	胶稠度 GC	0.021	-0.112	-0.009	0.313	0.021	0.502**	0.445*	0.413*	-0.356	0.338

缩写同表 3。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平相关性显著。
Abbreviations are the same as those given in Table 3. * and ** significant correlation at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

3.1 品种类型和水分管理对再生稻头季和再生季产量的影响

本研究表明, 品种类型对头季产量没有显著影响, 仅对再生季产量影响显著。尽管再生稻专用品种选育工作正逐步推进, 当前适宜用于再生稻种植的品种仍主要从现有品种中筛选^[29]。本研究发现, 由于干物质积累和收获指数较高, 优质稻品种在两季均表现出稳定且较高的产量水平(头季 8.54 t hm⁻², 再生季 5.88 t hm⁻²), 不仅与华中地区当前主推品种的产量相当, 也与以往报道中该地区再生稻产量水平一致^[30]。节水抗旱稻的头季产量与普通水稻无显著差异, 但再生季产量显著降低, 这与前人报道一致^[31]。进一步分析表明, 节水抗旱稻再生季产量低主要是因为其再生季生育期较普通水稻提前, 生育期的缩短不利于干物质积累, 导致成熟期总干物质积累量显著低于其他品种类型。节水抗旱稻再生季生育期提前可能是因为其再生季主要依赖于上部节位再生蘖, 而这些再生蘖萌发早、生育进程快且穗型较小^[4,31]。尽管节水抗旱稻整体再生季产量较低, 但早优 116 在不同条件下均表现出较高的再生季产量, 并且与普通水稻接近。早优 116 相较于其他节水抗旱稻品种的产量优势可能源于再生季齐穗期平

均推迟 6 d 和齐穗期叶面积指数的显著提高促进了干物质的积累。综上表明, 尽管不同类型品种头季产量差异较小, 但再生季产量在品种类型间和品种类型内均表现出差异, 再生特性如再生芽分布部位和萌发、再生季光合效率或根系活力等^[32-33]可能是引起差异的潜在原因, 未来应进一步深入探究。

本研究中, 不同水分管理对头季和再生季产量均没有显著影响, 但节水灌溉处理将头季和再生季的灌水量分别减少 76%和 85%, 进而水分利用效率分别提升了 35%和 106%。这与该地区以往关于节水灌溉对中稻、再生稻和双季稻产量影响的研究结果一致^[34-35]。本研究节水灌溉处理之所以未引起产量下降, 主要源于 2 个因素: 一是节水灌溉处理中关键生育时期(如施用基肥、分蘖肥、促芽肥和提苗肥时期)的补水灌溉, 二是生育期间较高频次的降雨(头季 50~56 次、再生季 19~26 次), 这有效缓解了节水灌溉对水稻生长发育的影响。因此, 在华中以及其他地区湿润气候背景下, 采用“以雨养为主、关键生育期适时灌溉”的策略可实现产量与水分利用效率的协同提升, 为区域高效水稻灌溉管理提供了科学依据, 有助于推动农田灌溉水有效利用系数的提升^[36]。未来研究中可进一步结合土壤水势监测与作物模型模拟, 量化不同水分管理方式下根际水分胁迫程度, 以明确节水阈值与产量响应关系, 从而为

不同生态区再生稻节水模式制定提供理论依据。

3.2 品种类型和水分管理对再生稻头季和再生季稻米品质的影响

再生稻生产过程中可能面临头季高温和再生季寒露风等胁迫风险, 威胁产量和品质的稳定性与协同提升^[9,37]。因此, 通过品种选育和栽培管理不仅要实现再生稻高产, 还要提升稻米品质。在本研究中, 优质稻品种作再生稻种植时, 无论头季还是再生季, 其稻米品质整体优于普通水稻。特别是在直接影响市场接受度和商品价值的垩白性状(垩白粒率和垩白度)方面, 优质稻品种表现突出, 3个品种在两季均达到《优质稻谷》(GB/T 17891-2017)三级及以上标准。节水抗旱稻头季稻米品质与普通水稻没有显著差异, 但在再生季表现出更优的稻米品质, 这可能与其育种过程中将稻米品质作为核心目标性状之一有关^[21], 使其在再生季适宜的气候条件下充分发挥稻米品质潜力。相关性分析进一步揭示, 同一品种的再生季稻米品质与头季呈显著正相关, 说明尽管再生季稻米品质受当季植株生长发育特征的影响^[38-39], 但品种自身的遗传基础仍是决定两季米质稳定性和一致性的核心。因此, 选育兼具高产与优质遗传潜力的品种, 是实现再生稻两季米质同步提升和增强品质可控性的根本途径。

本研究发现, 在不同地点、水分处理和品种类型中, 再生季稻米品质整体优于头季, 其中糙米率、精米率和整精米率提升 1.7~18.8 个百分点, 垩白粒率和垩白度降低 4.5~21.2 个百分点。这主要归因于两季灌浆期温度的差异: 头季平均温度达到 29.5℃, 而再生季平均温度为 24.0℃。环境温度是影响稻米品质的关键因子, 尤其是齐穗后 15 d 内的温度, 这一时期温度高于 26℃或低于 21℃均会导致稻米品质下降^[40-41]。灌浆结实期温度过高, 加快籽粒灌浆速率, 籽粒胚乳淀粉颗粒排列异常, 形成不透明的垩白, 而垩白结构疏松, 易在加工过程中破碎, 导致整精米率下降^[42-43]。这也与本研究头季垩白粒率、垩白度高, 而整精米率低的结果一致。再生季的适宜温度有效减少了垩白形成, 提高整精米率。此外, 再生季粒长增加、粒宽减小的现象在本研究中也较为普遍, 其具体机制尚不明确, 可能涉及灌浆过程中籽粒纵横生长速率变化, 需进一步研究阐明。

水分条件亦是影响稻米品质的重要环境因素。灌浆前中期若遭遇干旱胁迫, 往往通过加速叶片衰老、抑制光合产物积累与转运、干扰蔗糖-淀粉代谢

酶活性及胚乳细胞发育等途径, 导致整精米率下降、垩白增加、品质劣化^[44-45]。不过, 也有研究指出, 结实期土壤轻度干旱胁迫可以显著降低垩白度和碱消值, 改善稻米品质^[46-47]。本研究中, 水分处理对两季稻米品质均没有显著影响。这一方面可能是因为水分处理没有影响稻米品质形成的物质基础, 即水稻的干物质积累; 另一方面可能是因为 2 个试验点头季和再生季灌浆结实期分别发生 7 次和 6 次降雨, 日均降雨量分别为 4.3 mm 和 2.2 mm, 并且头季齐穗后 15 d 为施用促芽肥进行了一次灌溉, 有效缓解了潜在的干旱胁迫对稻米品质形成关键时期的影响。因此, 结合再生稻对水分的时段性敏感特性与区域降雨分布, 采用“以雨养为主、关键生育期适时灌溉”的节水灌溉策略, 不仅能大幅减少灌溉用水, 维持产量稳定, 也有利于两季稻米品质的协同提升, 具有良好的生产应用前景。

致谢: 本研究的开展得到了多个单位的帮助, 特别感谢蕲春县农业农村局方锡文和浠水县农业农村局蔡征。感谢实验室课题组王真梅在实验仪器和稻米品质测定方面提供的支持, 以及其他成员在数据分析与文章写作方面提供的建议。

References

- [1] Bautista R C, Counce P A. An overview of rice and rice quality. *Cereal Food World*, 2020, 65: 0052.
- [2] Pang X T, Zhang D M, Xue H B, et al. Effects of low field temperature on the physicochemical properties and fine structure stability of high-quality rice starch during the grain filling stage. *Foods*, 2024, 13: 3094.
- [3] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44: 845-850.
Peng S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period. *Sci Sin Vitae*, 2014, 44: 845-850 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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. *中国农业科学*, 2015, 48: 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. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 1702-1717 (in Chinese with English abstract).
- [5] Yuan S, Cassman K G, Huang J L, et al. Can ratoon cropping improve resource use efficiencies and profitability of rice in Central China? *Field Crops Res*, 2019, 234: 66-72.
- [6] 莫文伟, 旷娜, 郑华斌, 等. 再生稻与晚稻常规米质及 RVA 谱特征的对比研究. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46: 271-277.
Mo W W, Kuang N, Zheng H B, et al. Comparative study on quality and RVA profile parameters of ratoon rice and late rice. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci)*, 2020, 46: 271-277 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [7] 杨晨, 郑常, 袁坤, 等. 再生稻肥料管理对不同品种产量和品质的影响. 中国水稻科学, 2022, 36: 65–76.
Yang C, Zheng C, Yuan S, et al. Effect of fertilizer management on the yield and quality of different rice varieties in ratoon rice. *Chin J Rice Sci*, 2022, 36: 65–76 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨德生, 黄见良, 彭少兵. 机收再生稻高产优质栽培技术研究进展. 中国稻米, 2023, 29(5): 1–8.
Yang D S, Huang J L, Peng S B. Research progresses of mechanized rice ratooning technology for improving grain yield and quality. *China Rice*, 2023, 29(5): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [9] 唐启源, 青先国. 湖南再生稻技术进步与生产发展对策. 杂交水稻, 2023, 38(1): 1–9.
Tang Q Y, Qing X G. Technological advancement and production development countermeasures of ratooning rice in Hunan province. *Hybrid Rice*, 2023, 38(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张启发. 绿色超级稻培育的设想. 分子植物育种, 2005, 3: 601–602.
Zhang Q F. Strategies for developing green super rice. *Mol Plant Breed*, 2005, 3: 601–602 (in Chinese with English abstract).
- [11] 人均可再生内陆淡水资源(立方米). 世界银行集团(数据). https://data.worldbank.org.cn/indicator/ER.H2O.INTR.PC?name_desc=false.
Per capita renewable internal freshwater resources (cubic meters). World Bank Group (data). https://data.worldbank.org.cn/indicator/ER.H2O.INTR.PC?name_desc=false (in Chinese).
- [12] 张方潇, 陈翥, 黄娜, 等. 长江流域单季稻关键生育期高温、干旱及其复合事件时空分布特征. 中国农业大学学报, 2025, 30(4): 1–14.
Zhang F X, Chen X, Huang N, et al. Spatio-temporal distribution of high-temperature, drought and their compound events during the critical fertility stages of single-season rice in the Yangtze River Basin. *J China Agric Univ*, 2025, 30(4): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [13] 毛紫琳, 宋国庆, 马云静, 等. 杂交稻与常规稻产量受干旱影响的 meta 分析及干物质分配差异. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 1–14.
Mao Z L, Song G Q, Ma Y J, et al. Meta-analysis of effects of drought on yield and differences in dry matter allocation of hybrid rice and inbred rice. *J Huazhong Agric Univ*, 2025, 44(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王成瑗, 王伯伦, 张文香, 等. 土壤水分胁迫对水稻产量和品质的影响. 作物学报, 2006, 32: 131–137.
Wang C A, Wang B L, Zhang W X, et al. Effects of water stress of soil on rice yield and quality. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 131–137 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王平荣, 邓晓建, 高晓玲, 等. 干旱对稻米品质的影响研究. 中国农学通报, 2004, 20(6): 282–284.
Wang P R, Deng X J, Gao X L, et al. Effect of drought on rice quality. *Chin Agric Sci Bull*, 2004, 20(6): 282–284 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张自常, 李鸿伟, 陈婷婷, 等. 畦沟灌溉和干湿交替灌溉对水稻产量与品质的影响. 中国农业科学, 2011, 44: 4988–4998.
Zhang Z C, Li H W, Chen T T, et al. Effect of furrow irrigation and alternate wetting and drying irrigation on grain yield and quality of rice. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 4988–4998 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吕银斐, 任艳芳, 刘冬, 等. 不同水分管理方式对水稻生长、产量及品质的影响. 天津农业科学, 2016, 22(1): 106–110.
Lyu Y F, Ren Y F, Liu D, et al. Effect of different water managements on growth, grain yield and quality of rice. *Tianjin Agric Sci*, 2016, 22(1): 106–110 (in Chinese with English abstract).
- [18] 邱菁华, 薛铸, 孙书洪, 等. 间歇灌溉下不同生育时期喷施水溶性硅肥对水稻产量及品质的影响. 东北农业大学学报, 2022, 53(9): 50–57.
Qiu J H, Xue Z, Sun S H, et al. Effects of water-soluble silicon fertilizer application at different growth stages on rice yield and quality under intermittent irrigation. *J Northeast Agric Univ*, 2022, 53(9): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张宏路, 朱安, 胡昕, 等. 稻田常用节水灌溉方式对水稻产量和米质影响的研究进展. 中国稻米, 2018, 24(6): 8–12.
Zhang H L, Zhu A, Hu X, et al. Research progress on effects of common water saving irrigation methods in paddy field on rice yield and quality. *China Rice*, 2018, 24(6): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- [20] Luo L J. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. *J Exp Bot*, 2010, 61: 3509–3517.
- [21] 罗利军. 节水抗旱稻的培育与应用. 生命科学, 2018, 30: 1108–1112.
Luo L J. Development of water-saving and drought-resistance rice (WDR). *Chin Bull Life Sci*, 2018, 30: 1108–1112 (in Chinese with English abstract).
- [22] 罗利军. 节水抗旱稻的培育与产业发展. 中国稻米, 2022, 28(5): 14–19.
Luo L J. Breeding and industrial development of water-saving and drought-resistance rice. *China Rice*, 2022, 28(5): 14–19 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杨学龙, 张雷, 阚民东, 等. 节水抗旱稻旱优 116 的特征特性及在沿淮地区旱种旱管栽培技术. 农业科技通讯, 2024(2): 175–178.
Yang X L, Zhang L, Kan M D, et al. Characteristics of Water-saving and Drought-resistant Rice Hanyou 116 and its dry cultivation and management techniques in the Huai River Basin Region. *Bull Agric Sci Technol*, 2024(2): 175–178 (in Chinese).
- [24] 周洲, 张莉侠, 贾磊. 农业绿色发展背景下节水抗旱稻经济效益评估. 上海农业学报, 2022, 38(4): 146–152.
Zhou Z, Zhang L X, Jia L. Evaluation of economic benefits of water-saving and drought-resistance rice under the background of agricultural green development. *Acta Agric Shanghai*, 2022, 38(4): 146–152 (in Chinese with English abstract).
- [25] Wang Q, Wang H, Liu Q J, et al. Moderate alternate wetting and drying irrigation enhances drought-resistance abilities by improving structural mesophyll conductance of water-saving and drought-resistant rice under severe drought. *Physiol Plant*, 2024, 176: e14518.
- [26] 杨书婷, 颜泽东, 陈风波. 优质稻品种采用的经济效益评价: 基于广东水稻种植户调研数据的分析. 广东农业科学, 2024, 51(10): 137–149.
Yang S T, Yan Z D, Chen F B. Evaluation on economic benefits

- of adoption of high-quality rice cultivars—a study based on survey data from rice farmers in Guangdong province. *Guangdong Agric Sci*, 2024, 51(10): 137–149 (in Chinese with English abstract).
- [27] 国家水稻数据中心. 2025. <https://www.ricedata.cn/variety/index.htm>. China Rice Data Center. 2025. <https://www.ricedata.cn/variety/index.htm> (in Chinese).
- [28] Wang Y C, Zheng C, Xiao S, et al. Agronomic responses of ratoon rice to nitrogen management in Central China. *Field Crops Res*, 2019, 241: 107569.
- [29] 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. *中国稻米*, 2022, 28(5): 1–6.
Lin Q, Cai Q H, Cui L L, et al. Research progress on screening and breeding of ratoon rice varieties. *China Rice*, 2022, 28(5): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [30] 董华林, 涂军明, 费震江, 等. 再生稻适宜品种筛选试验初报. *湖北农业科学*, 2019, 58(增刊2): 94–98.
Dong H L, Tu J M, Fei Z J, et al. A preliminary report on screening of suitable ratooning rice varieties. *Hubei Agric Sci*, 2019, 58(S2): 94–98 (in Chinese with English abstract).
- [31] Xia F Z, Wang W K, Weng Y L, et al. Productivity and water use of ratoon rice cropping systems with water-saving, drought-resistant rice. *Agron J*, 2022, 114: 2352–2363.
- [32] 黄素华, 林席跃, 雷正平, 等. 强再生力水稻品种碳氮营养与激素生理特征研究. *作物学报*, 2021, 47: 2278–2289.
Huang S H, Lin X Y, Lei Z P, et al. Physiological characters of carbon, nitrogen, and hormones in ratooning rice cultivars with strong regeneration ability. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 2278–2289 (in Chinese with English abstract).
- [33] Zhang Q, Liu X C, Yu G L, et al. Agronomic and physiological characteristics of high-yielding ratoon rice varieties. *Agron J*, 2021, 113: 5063–5075.
- [34] 王若涵. 水肥耦合对杂交中稻生理特性及氮肥利用率的影响. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2009.
Wang R H. Effects of Water and Fertilizer Coupling on Growth and Physiological Characteristics of Hybrid Mid-Rice and Nitrogenous Fertilizer Use Efficiency. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [35] 郑华斌, 陈其敏, 陈元伟, 等. 节水减氮对再生稻和双季稻周年产量及氮肥利用效率的影响. *生态学杂志*, 2019, 38: 2023–2029.
Zheng H B, Chen Q M, Chen Y W, et al. Effects of water-saving and nitrogen-reducing on annual yield and nitrogen use efficiency of ratoon rice and double rice. *Chin J Ecol*, 2019, 38: 2023–2029 (in Chinese with English abstract).
- [36] 水利部发展研究中心. 关于全面构建节水制度政策体系的意见. 2025-05-07. https://www.waterinfo.com.cn/xsyj/zcyj/zycm/202505/t20250507_36845.html.
Development Research Center, Ministry of Water Resources of China. Opinions on the Comprehensive Construction of a Water-Saving Institutional and Policy Framework. 2025-05-07. https://www.waterinfo.com.cn/xsyj/zcyj/zycm/202505/t20250507_36845.html (in Chinese).
- [37] 彭春瑞, 王书华, 涂田华, 等. 优质稻优质丰产协同栽培技术策略. *江西农业学报*, 2020, 32(1): 1–6.
Peng C R, Wang S H, Tu T H, et al. Cooperative cultivation technical strategies of high quality and yield for high quality rice. *Acta Agric Jiangxi*, 2020, 32(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [38] Xiong L, Liu Z B, Wang P, et al. Progress and challenges of rice ratooning technology in Jiangxi province, China. *Crop Environ*, 2023, 2: 87–91.
- [39] Yang C, Yang D S, Xiang H S, et al. Varietal improvement is a feasible approach for achieving high yield and superior quality simultaneously in ratoon rice. *Field Crops Res*, 2025, 322: 109772.
- [40] 沈泓, 姚栋萍, 吴俊, 等. 灌浆期不同时段高温对稻米淀粉理化特性的影响. *中国水稻科学*, 2022, 36: 377–387.
Shen H, Yao D P, Wu J, et al. Effects of high temperature in various phases of grain filling on rice starch physicochemical properties. *Chin J Rice Sci*, 2022, 36: 377–387 (in Chinese with English abstract).
- [41] 肖无为, 朱辰光, 王飞, 等. 再生稻稻米品质研究进展. *中国水稻科学*, 2025, 39: 33–46.
Xiao W W, Zhu C G, Wang F, et al. Research progress on the rice quality of ratoon rice. *Chin J Rice Sci*, 2025, 39: 33–46 (in Chinese with English abstract).
- [42] Yao D P, Wu J, Luo Q H, et al. Influence of high natural field temperature during grain filling stage on the morphological structure and physicochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.) starch. *Food Chem*, 2020, 310: 125817.
- [43] Fitzgerald M A, McCouch S R, Hall R D. Not just a grain of rice: the quest for quality. *Trends Plant Sci*, 2009, 14: 133–139.
- [44] 韦还和, 马唯一, 左博源, 等. 盐、干旱及其复合胁迫对水稻产量和品质形成影响的研究进展. *中国水稻科学*, 2024, 38: 350–363.
Wei H H, Ma W Y, Zuo B Y, et al. Research progress in the effect of salinity, drought, and their combined stresses on rice yield and quality formation. *Chin J Rice Sci*, 2024, 38: 350–363 (in Chinese with English abstract).
- [45] Mumtaz M Z, Saqib M, Abbas G, et al. Drought stress impairs grain yield and quality of rice genotypes by impaired photosynthetic attributes and K nutrition. *Rice Sci*, 2020, 27: 5–9.
- [46] Xu Y J, Gu D J, Li K, et al. Response of grain quality to alternate wetting and moderate soil drying irrigation in rice. *Crop Sci*, 2019, 59: 1261–1272.
- [47] 刘凯, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期土壤水分和灌溉方式对水稻产量与品质的影响及其生理原因. *作物学报*, 2008, 34: 268–276.
Liu K, Zhang H, Zhang S F, et al. Effects of soil moisture and irrigation patterns during grain filling on grain yield and quality of rice and their physiological mechanism. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 268–276 (in Chinese with English abstract).