

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.32014

米粉稻早季与晚季种植品质差异研究

肖正午¹ 胡丽琴¹ 黎 星¹ 解嘉鑫¹ 廖成静¹ 康玉灵¹ 胡玉萍¹
张珂骞¹ 方升亮² 曹放波¹ 陈佳娜¹ 黄 敏^{1,*}

¹ 作物生理与分子生物学教育部重点实验室 / 湖南农业大学, 湖南长沙 410128; ² 衡阳市农业科学院, 湖南衡阳 421101

摘 要: 为探明不同种植季节气候条件对米粉稻米粉蒸煮品质的影响, 于 2020—2022 年在湖南浏阳开展大田试验, 以 5 个米粉稻品种(广陆矮 4 号、中嘉早 17、湘早籼 24 号、中早 39、株两优 729)为材料, 比较米粉稻早季与晚季种植米粉蒸煮品质和稻米品质的差异。结果表明, 米粉稻品种在晚季种植时, 灌浆期平均温度和平均辐射量比在早季种植分别降低 18.7%和 12.7%。米粉稻在晚季种植时, 米粉损失率比在早季种植降低 7.4%; 米粉断条率和吸水率早晚季间差异不显著。与早季种植相比, 米粉稻在晚季种植时稻米 RVA 谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、回复值和糊化温度分别下降 25.8%、22.9%、34.3%、19.7%、14.2%和 2.0%, 而消减值和峰值时间分别上升 11.8%和 2.3%。相关性分析表明, 灌浆期平均温度与稻米峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、回复值和糊化温度呈显著正相关, 与消减值呈显著负相关; 灌浆期平均辐射量与峰值黏度、热浆黏度、最终黏度呈显著正相关, 与消减值呈显著负相关; 米粉蒸煮损失率与最终黏度、糊化温度和峰值时间呈显著正相关。由此可见, 米粉稻在晚季种植有助于米粉蒸煮品质提高。米粉稻 RVA 谱特征值中最终黏度和糊化温度是影响米粉损失率的关键指标。

关键词: 米粉稻; 直链淀粉含量; RVA; 米粉蒸煮品质; 温度; 辐射

Quality differences between noodle rice grown in early and late seasons

XIAO Zheng-Wu¹, HU Li-Qin¹, LI Xing¹, XIE Jia-Xin¹, LIAO Cheng-Jing¹, KANG Yu-Ling¹, Hu Yu-Ping¹, ZHANG Ke-Qian¹, FANG Sheng-Liang², CAO Fang-Bo¹, CHEN Jia-Na¹, and HUANG Min^{1,*}

¹ Key Laboratory of Ministry of Education for Crop Physiology and Molecular Biology / Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; ² Hengyang Academy of Agricultural Sciences, Hengyang 421101, Hunan, China

Abstract: In order to identify the influence of climatic conditions of different rice-growing seasons on cooking quality of the rice noodles, a field experiment was conducted in Liuyang, Hunan Province from 2020 to 2022. Five noodle rice cultivars (Guanglu'ai 4, Zhongjiazao 17, Xiangzaoxian 24, Zhongzao 39, and Zhuliangyou 729), were grown in the early and late seasons to compare the cooking quality of rice noodles and the grain quality of noodle rice. The results showed that the mean temperature and solar radiation at grain-filling stage were 18.7% and 12.7% lower in the late season than in the early season, respectively. The cooking loss rate of rice noodles was reduced by 7.4% in the late season compared to the early season. There were not significant differences in cooked break rate and water absorption rate between early and late seasons. The peak viscosity, through viscosity, breakdown viscosity, final viscosity, consistency viscosity, and pasting temperature were lower by 25.8%, 22.9%, 34.3%, 19.7%, 14.2%, and 2.0%, whereas the setback viscosity and peaking time were higher by 11.8% and 2.3% in the late season compared to the early season, respectively. Correlation analysis showed that the mean temperature at grain-filling stage was positively correlated with peak viscosity, through viscosity, breakdown viscosity, final viscosity, consistency viscosity, and pasting temperature, and negatively correlated with setback viscosity. The mean radiation at grain-filling stage was positively correlated with peak viscosity, through viscosity, final viscosity, and negatively correlated with setback viscosity. The cooking loss rate of rice noodles was

本研究由湖南省自然科学基金区域(衡阳市)联合基金项目(2021JJ50076)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300509)资助。

This study was supported by the Joint Fund of the Natural Science Foundation of Hunan Province and the Government of Hengyang City (2021JJ50076) and the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300509).

* 通信作者(Corresponding author): 黄敏, E-mail: mhuang@hunau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: xiaozhengwx@163.com

Received (收稿日期): 2023-04-23; Accepted (接受日期): 2023-09-13; Published online (网络出版日期): 2023-10-09.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20231007.1704.010>

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

positively correlated with the final viscosity, pasting temperature, and peaking time. Therefore, the cooking quality of rice noodles can be improved by growing noodle rice in the late season. The final viscosity and pasting temperature in the paste properties of noodle rice were the critical factors affecting the cooking loss rate of rice noodles.

Keywords: noodle rice; amylose content; RVA; rice noodles cooking quality; temperature; radiation

米粉是亚洲地区最受欢迎的米制品^[1]。米粉稻是指适合加工米粉的水稻品种。米粉品质很大程度上决定于稻米品质, 稻米品质不仅与水稻品种有关, 同时也受到气候条件的影响^[2-4]。在全球气候变暖, 极端天气频发的大环境下, 研究气候条件对米粉稻稻米品质与米粉品质的影响能够为米粉稻优质栽培提供科学依据。

前人通过稻米品质对米粉品质的影响筛选米粉稻品种, 结果普遍认为稻米直链淀粉含量是评价米粉品质的核心指标^[5-7]。直链淀粉含量高, 稻米淀粉凝胶速度快, 凝胶强度大, 生产出的米粉断条率、损失率低, 米粉品质好^[8]。有研究认为直链淀粉含量在 22.1%~25.5% 范围内时, 加工出的米粉品质较好, 直链淀粉含量过高或过低均会降低米粉品质^[9-10]。此外, 蛋白质与淀粉相互作用会使得米粉凝胶网络结构更加致密稳定。高晓旭等^[5]研究表明, 蛋白质含量在 6.0%~7.0% 范围内时, 米粉品质较好。周显青等^[4]研究认为, 相对于理化指标, 稻米淀粉糊化特性更能反映米粉品质, RVA 谱特征值中峰值黏度、最低黏度、最终黏度和回复值均与米粉品质显著相关。

除品种外, 稻米品质受气候条件影响最大^[11-13]。其中, 灌浆期温度和光照是最关键的 2 个气象因子^[12-14]。不同品种及不同稻米品质指标对气候条件变化的响应不尽相同^[15-16]。多数研究认为, 直链淀粉含量与灌浆期平均温度负相关^[17-19]。但程方民等^[20-21]则认为直链淀粉含量与灌浆期温度的关系因品种而异, 高直链淀粉含量品种在较高温度下直链淀粉含量可达最大, 低直链淀粉含量品种则相反。Liu 等^[22]研究表明, 灌浆期平均温度升高会使稻米 RVA 谱特征值中峰值黏度和崩解值上升, 消减值下降。这与袁继超等^[23]的研究结果一致。光照强度降低或者日照时数减少均会降低稻米品质^[24-27]。陶钰等^[24]研究表明 50% 遮阴处理会导致稻米直链淀粉含量降低, 蛋白质含量升高, 同时使 RVA 谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、最终黏度和崩解值降低, 消减值升高。

以往的研究主要集中在米粉稻品种筛选, 关于气候条件对米粉稻米粉品质的影响鲜见报道。因此, 笔者假设晚季气候条件更有利于米粉稻米粉蒸煮品

质形成, 米粉稻在晚季种植时米粉蒸煮品质提高。

本研究通过早季与晚季种植米粉稻, 比较早、晚季米粉稻米粉蒸煮品质及稻米品质, 旨在明确早、晚季气候条件是如何影响米粉稻关键稻米品质指标, 从而影响米粉品质。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020—2022 年在湖南省浏阳市永安镇坪头村(28°09'N, 113°37'E)进行。试验地属于亚热带季风湿润气候, 种植制度为冬季休闲-早稻-晚稻。供试土壤为黏土, 2020 年试验前取耕层 0~20 cm 土壤, 其基本理化性质为: pH 6.26、有机质 36.67 g kg⁻¹、全氮 1.56 g kg⁻¹、全磷 1.08 g kg⁻¹、全钾 9.79 g kg⁻¹、碱解氮 205.45 mg kg⁻¹、速效磷 35.45 mg kg⁻¹、速效钾 100.00 mg kg⁻¹。2020—2022 年水稻生长季的日平均温度和日平均辐射量数据来自于试验田的小型气象站(Vantage Pro 2, 戴维斯公司, 美国)。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计, 小区面积为 35 m², 每个处理 3 次重复。供试品种为 5 个米粉稻品种: 广陆矮 4 号、中嘉早 17、湘早粳 24 号、中早 39 和株两优 729。采用水育秧方式, 2020—2022 年早季播种日期分别为 3 月 25 日、3 月 25 日和 3 月 26 日, 移栽日期分别为 4 月 20 日、4 月 26 日和 4 月 26 日; 晚季播种日期分别为 6 月 27 日、6 月 28 日和 7 月 10 日, 移栽日期分别为 7 月 18 日、7 月 21 日和 7 月 29 日。早晚季栽插密度均为 16.7 cm × 20.0 cm, 每穴 3 株基本苗, 人工插秧和收获。

早、晚季氮磷钾肥施用量和施用比例相同, 氮肥磷肥和钾肥用量分别为纯氮 150 kg hm⁻²、纯磷 75 kg hm⁻²、纯钾 150 kg hm⁻²。氮肥施用尿素, 分 3 次施用, 基肥、分蘖肥和穗肥施用比例为 5 : 3 : 2; 磷肥施用钙镁磷肥, 全部作为基肥一次性施用; 钾肥施用氯化钾, 分 2 次施用, 基肥和穗肥施用比例为 5 : 5。基肥在移栽前 1 d 施入, 分蘖肥在移栽后 7 d 施入, 穗肥于幼穗分化初期(2 期)施入。全生育期淹水(3~10 cm)灌溉, 收获前 7 d 开始断水。采用化学方法防治病虫害, 大型杂草人工拔除。

1.3 指标测定方法

1.3.1 米粉蒸煮品质 于成熟期在每个小区中部人工收割, 所得稻谷部分用于加工米粉。将收集到的稻谷样品放入挺旺碾米机(6N-4A, 湖南省挺旺机械有限公司, 湖南)中统一碾磨2次得到精米, 将所得精米室温下浸泡10 h, 淘洗3遍去除杂质, 加入多功能一步成型米粉机(5-MFD15B, 湖南省粉师傅机械科技股份有限公司, 湖南)中加工米粉, 挤压成型后将所生产的米粉放入配套的米粉优化箱(6-2YH1015B, 湖南省粉师傅机械科技股份有限公司, 湖南)中优化8 h, 优化后的米粉用于检测米粉蒸煮品质。

米粉蒸煮品质测定: 随机选择30根优化后的米粉, 切成长度为20 cm的米粉条并称重, 重量记为 N_1 , 后将米粉置于约500 mL沸水中煮7 min。煮完后用凉水冷却, 冷却后将所有米粉置于试管架上, 数出未断的米粉根数 n ; 待米粉表面水分沥干后称重, 重量记为 N_2 ; 把剩余的液体定容至1000 mL后摇匀, 取50 mL于三角瓶(三角瓶重记为 W_0)中在105℃下烘干, 烘干后称重, 总重记为 W_1 。米粉蒸煮品质指标参照Tong等^[28]的方法计算。蒸煮时间的确定: 将若干优化后的米粉置于沸水中煮, 放下去的同时开始计时, 从第3分钟开始, 每隔30 s挑出1根, 直至第10分钟, 逐一观测, 最早发现米粉中部无硬芯的时间即为米粉最适的蒸煮时间。断条率(%) = $(30-n)/30 \times 100\%$; 损失率(%) = $(W_1-W_0) \times 20/N_1 \times 100\%$; 吸水率(%) = $(N_2-N_1)/N_1 \times 100\%$ 。

1.3.2 稻米品质 将收割所得稻谷水选出实粒后, 晒干稻谷表面水分, 于室温下保存, 平衡水分3个月后进行稻米品质测定。使用稻谷精米检测机(JGMJ8098, 上海嘉定粮油仪器有限公司, 上海)将稻谷碾磨成精米, 之后把精米粉碎、过筛, 待测。总淀粉含量: 采用旋光法进行测定, 具体操作参照李合生主编的《植物生理生化实验原理和技术》。直链淀粉含量: 采用碘蓝比色法进行测定, 具体操作参照农业部标准NY/T 2639-2014。支链淀粉含量: 总淀粉含量减去直链淀粉含量。蛋白质含量: 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 将水稻精米粉消化, 采用奈氏比色法测定精米含氮量^[29]。蛋白质含量为含氮量乘以换算系数5.95^[30]。含水量: 称取3 g过筛后的精米粉置于已知重量的铝盒中, 将样品置于80℃烘箱中烘干至恒重。最终精米粉含水量即为烘干过程中减少的重量除以样品重量。稻米淀粉和蛋白质含量的含水量

均折算为13.5%。RVA谱特征值: 利用快速黏度分析仪(Rapid viscosity-analyzer super 4, Newport Scientific 仪器公司, 澳大利亚)测定, 采用配套软件TWC进行分析。具体操作参照国标GB/T 24852-2010大米及米粉糊化特性测定-快速粘度仪法。主要参数包括峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值、消减值、回复值、峰值时间和糊化温度。其中崩解值=峰值黏度-热浆黏度; 消减值=最终黏度-峰值黏度; 回复值=最终黏度-热浆黏度。糊化温度为糊化起始温度。淀粉黏度指标可用RVU或者cP为单位, 1 RVU=12 cP。

1.4 统计分析

使用Microsoft Excel 2010对数据进行整理及计算, 采用Statistix 8.0对数据进行统计分析, 多重比较用LSD法。

2 结果与分析

2.1 米粉稻早季与晚季种植灌浆期平均温度和平均辐射量

由图1可知, 2020—2022年早季灌浆期日平均温度随抽穗后天数增加呈上升趋势, 晚季日平均温度随抽穗后天数增加呈下降趋势, 早季灌浆期平均温度均高于晚季(图1-a, c, e)。2020—2022年早季与晚季灌浆期平均温度分别为28.2℃和21.8℃、29.2℃和26.9℃、29.2℃和21.7℃。随着抽穗后天数增加, 2020—2022年早季与晚季灌浆期日平均辐射量无明显变化规律, 早季灌浆期平均辐射量均高于晚季(图1-b, d, f)。2020—2022年早季与晚季灌浆期平均辐射量分别为13.4 MJ m⁻² d⁻¹和9.8 MJ m⁻² d⁻¹、16.3 MJ m⁻² d⁻¹和16.0 MJ m⁻² d⁻¹、16.1 MJ m⁻² d⁻¹和14.2 MJ m⁻² d⁻¹。与早季种植相比, 米粉稻在晚季种植时灌浆期平均温度和平均辐射量分别降低18.7%和12.7%。

2.2 米粉稻早季与晚季种植稻米品质

2020—2022年米粉稻早季与晚季种植稻米品质指标的方差分析表明, 除总淀粉含量外, 其余稻米品质指标均在季节间差异显著(表1)。除支链淀粉含量外, 其余指标均在品种间差异显著。除总淀粉含量和崩解值外, 其余指标均在年份间差异显著。峰值黏度、热浆黏度、崩解值、消减值、峰值时间和糊化温度在季节与品种互作上差异达显著或极显著水平。除支链淀粉含量外, 其余指标均在季节与年份互作上差异达显著或极显著水平。总淀粉含量、直链淀粉含量、支链淀粉含量、峰值黏度、崩解值、

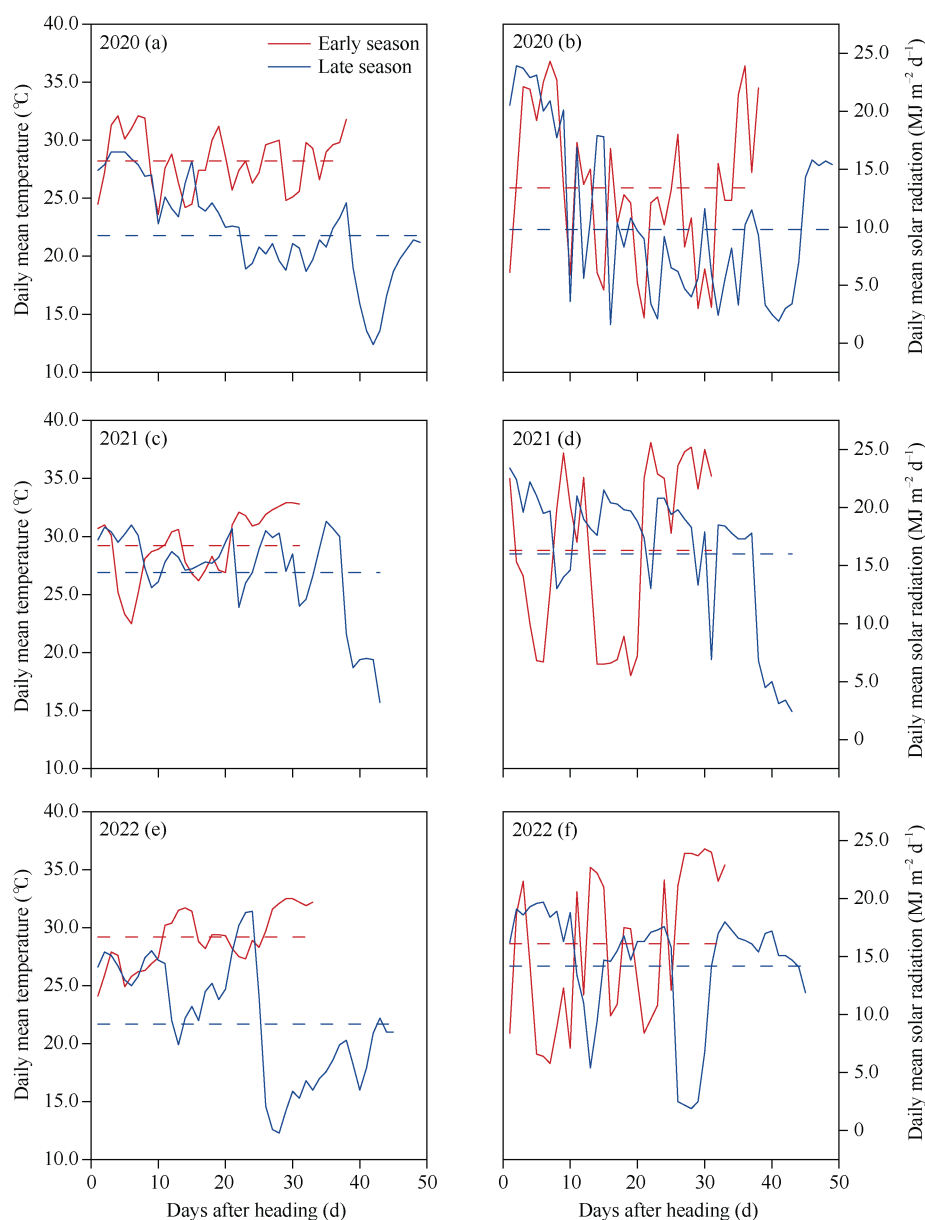


图 1 2020–2022 年米粉稻早季和晚季种植灌浆期日平均温度(a, c, e)和日平均辐射量(b, d, f)

Fig. 1 Daily mean temperature (a, c, e) and daily mean solar radiation (b, d, f) during grain filling period of noodle rice in 2020–2022

虚线表示早晚季灌浆期平均温度和平均辐射量。

The dashed line denotes mean temperature and mean solar radiation at grain filling stage in the early and late seasons.

表 1 季节、品种和年份对米粉稻稻米品质与米粉蒸煮品质的方差分析(F 值)

Table 1 Variance analysis of season, cultivar and year on rice quality and rice noodles cooking quality of noodle rice (F -value)

变异源 Source of variation	季节 Season (S)	品种 Cultivar (C)	年份 Year (Y)	季节×品种 S×C	季节×年份 S×Y	品种×年份 C×Y	季节×品种×年份 S×C×Y
总淀粉含量 Total starch content	0.00 NS	20.20**	2.11 NS	0.82 NS	20.10**	3.38**	1.88 NS
直链淀粉含量 Amylose content	20.87**	15.41**	18.33**	0.84 NS	11.39**	2.14*	0.95 NS
支链淀粉含量 Amylopectin content	10.93**	1.13 NS	11.83**	1.97 NS	1.33 NS	2.83*	2.01 NS
蛋白质含量 Protein content	67.93**	36.99**	111.63**	1.00 NS	33.04**	1.23 NS	1.44 NS
峰值黏度 Peak viscosity	1513.42**	10.02**	125.99**	3.94**	25.01**	5.53**	1.32 NS
热浆黏度 Through viscosity	737.68**	23.01**	126.69**	3.07*	9.12**	1.63 NS	2.84**
崩解值 Breakdown viscosity	216.38**	18.23**	1.60 NS	6.03**	5.76**	2.15*	1.16 NS

(续表 1)

变异源	季节	品种	年份	季节×品种	季节×年份	品种×年份	季节×品种×年份
Source of variation	Season (S)	Cultivar (C)	Year (Y)	S×C	S×Y	C×Y	S×C×Y
最终黏度 Final viscosity	1149.51**	17.45**	60.25**	1.99 NS	23.87**	5.18**	1.58 NS
消减值 Setback viscosity	27.18**	38.22**	35.83**	12.44**	10.33**	1.50 NS	0.31 NS
回复值 Consistency viscosity	173.64**	25.95**	33.12**	2.37 NS	14.56**	2.94**	1.21 NS
峰值时间 Peaking time	68.83**	63.63**	8.29**	5.44**	10.32**	1.50 NS	1.62 NS
糊化温度 Pasting temperature	370.20**	104.32**	64.35**	4.59**	119.06**	10.98**	19.74**
断条率 Cooked break rate	0.13 NS	0.72 NS	1.83 NS	1.17 NS	4.27*	0.99 NS	0.38 NS
损失率 Cooking loss rate	11.48**	70.58**	3.96*	5.15**	4.48*	3.28**	3.88**
吸水率 Water absorption rate	0.06 NS	30.70**	18.86**	4.85**	3.70*	1.27 NS	1.22 NS

*表示在 0.05 概率水平差异显著; **表示在 0.01 概率水平差异显著; NS 表示未达显著水平。
* and ** denotes significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. NS denotes non-significant difference at the 0.05 probability level.

最终黏度、回复值和糊化温度均在品种与年份互作上差异达显著或极显著水平。热浆黏度和糊化温度均在季节、品种与年份三者互作上差异达显著或极显著水平。

稻米直链淀粉、支链淀粉和蛋白质含量早晚季差异在不同年际间规律不一致(表 2)。2020 年直链淀粉含量早晚季间无显著差异, 2021 年和 2022 年晚季直链淀粉含量均显著低于早季。2020 年晚季支链淀粉含量显著高于早季, 2021 年和 2022 年支链淀粉含量早晚季间差异不显著。2021 年蛋白质含量早晚季间无显著差异, 2020 年和 2022 年晚季蛋白质含量显著高于早季。与早季种植相比, 米粉稻在晚季种植时 RVA 谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、回复值和糊化温度分别下降 25.8%、22.9%、34.3%、19.7%、14.2%和 2.0%, 消减值和峰

值时间分别上升 11.8%和 2.3% (表 3)。品种间热浆黏度、最终黏度、峰值时间和糊化温度中嘉早 17 均较低, 而湘早籼 24 号较高。

2.3 米粉稻早季与晚季种植米粉蒸煮品质

2020—2022 年米粉稻早季与晚季种植米粉蒸煮品质指标的方差分析表明, 米粉蒸煮损失率在季节间差异极显著(表 1)。损失率和吸水率均在品种和年份间差异显著或极显著。损失率和吸水率在季节与品种互作上差异达极显著水平。断条率、损失率和吸水率均在季节与年份互作上差异显著。损失率在品种与年份互作上及季节、品种与年份三者互作上差异达极显著水平。

与早季种植相比, 米粉稻在晚季种植时损失率降低 7.4%; 断条率和吸水率两季间差异不显著(表 4)。说明晚季种植米粉稻有助于米粉蒸煮品质

表 2 2020—2022 年米粉稻早季与晚季种植稻米淀粉和蛋白质含量
Table 2 Starch and protein contents in milled rice flours of early and late seasons noodle rice in 2020–2022 (%)

年份	季节	品种	总淀粉	直链淀粉	支链淀粉	蛋白质
Year	Season	Cultivar	Total starch	Amylose	Amylopectin	Protein
2020	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	75.19 a	25.98 a	49.21 a	7.21 bc
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	75.75 a	26.73 a	49.02 a	6.71 c
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	73.07 b	24.57 b	48.50 ab	8.25 a
		中早 39 Zhongzao 39	73.63 b	26.08 a	47.55 b	7.61 ab
		株两优 729 Zhuliangyou 729	76.13 a	26.91 a	49.22 a	7.33 bc
		平均 Mean	74.76 B	26.05 A	48.71 B	7.42 B
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	76.79 ab	26.05 abc	50.74 a	8.89 b
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	76.34 ab	26.91 ab	49.43 a	8.73 b
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	75.00 b	24.77 c	50.23 a	10.60 a
		中早 39 Zhongzao 39	75.06 b	25.78 bc	49.28 a	8.95 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	77.64 a	27.26 a	50.38 a	8.31 b
		平均 Mean	76.17 A	26.15 A	50.02 A	9.10 A

(续表 2)

年份 Year	季节 Season	品种 Cultivar	总淀粉 Total starch	直链淀粉 Amylose	支链淀粉 Amylopectin	蛋白质 Protein
2021	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	76.40 a	27.92 ab	48.48 ab	6.64 b
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	75.99 a	28.42 a	47.57 b	7.02 ab
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	74.14 b	26.22 c	47.92 ab	7.89 a
		中早 39 Zhongzao 39	75.53 a	27.19 b	48.34 ab	6.85 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	76.10 a	27.55 ab	48.55 a	6.84 b
		平均 Mean	75.63 A	27.46 A	48.17 A	7.05 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	76.17 ab	27.28 b	48.89 b	6.90 bc
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	76.93 a	28.76 a	48.17 b	6.57 bc
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	73.35 c	26.29 bc	47.06 b	7.82 a
		中早 39 Zhongzao 39	77.21 a	25.69 c	51.52 a	6.46 c
		株两优 729 Zhuliangyou 729	75.33 b	26.38 bc	48.95 b	7.04 b
		平均 Mean	75.80 A	26.88 B	48.92 A	6.96 A
2022	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	76.09 b	29.70 a	46.39 a	6.09 b
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	77.91 a	28.60 a	49.31 a	6.13 b
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	74.64 b	27.35 a	47.29 a	7.53 a
		中早 39 Zhongzao 39	75.93 b	27.67 a	48.26 a	6.14 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	75.56 b	28.02 a	47.54 a	6.32 b
		平均 Mean	76.03 A	28.27 A	47.76 A	6.44 B
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	75.93 a	26.50 a	49.43 a	6.65 bc
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	74.96 ab	26.92 a	48.04 a	6.35 c
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	73.06 b	25.29 a	47.77 a	8.34 a
		中早 39 Zhongzao 39	73.94 ab	26.18 a	47.76 a	6.86 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	74.29 ab	26.81 a	47.48 a	7.02 b
		平均 Mean	74.44 B	26.34 B	48.10 A	7.05 A

同年同季下同一列数字后相同小写字母表示在 0.05 概率水平差异不显著; 同年同一列数字后相同大写字母表示在 0.05 概率水平差异不显著。

The same lowercase letters behind the number in the same column with the same year and season are non-significant difference according to LSD (0.05). The same uppercase letters behind the number in the same column with the same year are non-significant difference according to LSD (0.05).

表 3 2020–2022 年米粉稻早季与晚季种植稻米 RVA 谱特征值

Table 3 Paste properties in milled rice flours of early and late seasons noodle rice in 2020–2022

年份 Year	季节 Season	品种 Cultivar	黏度 Viscosity (cP)						峰值时间 Peaking time (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
			峰值黏度 Peak	热浆黏度 Through	崩解值 Breakdown	最终黏度 Final	消减值 Setback	回复值 Consistency		
2020	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	3306 a	2389 b	917 ab	4094 bc	788 b	1705 b	5.87 b	80.11 c
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	3277 a	2332 b	945 ab	4029 c	752 b	1697 b	5.82 b	80.10 c
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	3299 a	2555 ab	744 b	4460 a	1161 a	1905 a	6.18 a	81.43 a
		中早 39 Zhongzao 39	3536 a	2498 ab	1038 a	4380 ab	844 b	1882 a	6.07 a	81.31 a
		株两优 729 Zhuliangyou 729	3513 a	2695 a	818 ab	4248 abc	735 b	1553 c	6.22 a	80.88 b
		平均 Mean	3386 A	2494 A	892 A	4242 A	856 A	1748 A	6.03 B	80.76 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	2433 b	1741 c	692 ab	3305 c	872 b	1564 ab	6.09 c	79.70 cd
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	2415 b	1747 c	668 ab	3310 c	895 ab	1563 ab	6.11 c	79.44 d
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	2713 a	2085 b	628 b	3652 ab	939 ab	1567 ab	6.38 a	83.38 a
		中早 39 Zhongzao 39	2877 a	2248 a	629 b	3844 a	967 a	1596 a	6.38 a	81.13 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	2787 a	2080 b	707 a	3533 bc	746 c	1453 b	6.27 b	80.75 bc
		平均 Mean	2645 B	1980 B	665 B	3529 B	884 A	1549 B	6.24 A	80.88 A

(续表 3)

年份	季节	品种 Cultivar	黏度 Viscosity (cP)						峰值时间 Peaking time (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
			峰值黏度	热浆黏度	崩解值	最终黏度	消减值	回复值		
			Peak	Through	Breakdown	Final	Setback	Consistency		
2021	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	4151 a	2970 a	1181 a	4733 b	582 b	1763 a	5.89 c	80.94 c
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	4109 a	2980 a	1129 a	4766 ab	657 b	1786 a	5.95 bc	79.99 d
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	3792 b	3031 a	761 b	4836 ab	1044 a	1805 a	6.26 a	84.59 a
		中早 39 Zhongzao 39	4259 a	3176 a	1083 a	4939 a	680 b	1763 a	6.07 b	83.68 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	4079 a	3165 a	914 ab	4728 b	649 b	1563 b	6.29 a	80.49 cd
		平均 Mean	4078 A	3065 A	1013 A	4800 A	722 A	1735 A	6.09 B	81.94 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	2854 c	2103 b	751 a	3554 c	700 b	1451 a	6.09 c	79.45 b
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	2774 c	2166 b	608 abc	3551 c	777 b	1385 a	6.20 bc	79.05 b
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	2879 bc	2402 a	477 c	3792 ab	913 a	1390 a	6.42 a	80.23 a
		中早 39 Zhongzao 39	3060 a	2408 a	652 ab	3805 a	745 b	1397 a	6.27 abc	80.48 a
		株两优 729 Zhuliangyou 729	2972 ab	2442 a	530 bc	3640 bc	668 b	1198 b	6.38 ab	80.75 a
		平均 Mean	2908 B	2304 B	604 B	3668 B	760 A	1364 B	6.27 A	79.99 B
2022	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	4057 a	2834 bc	1223 a	4578 a	521 b	1744 a	5.91 c	80.77 c
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	3699 b	2653 c	1046 a	4237 b	538 b	1584 ab	6.04 c	80.47 c
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	3858 b	3142 a	716 b	4755 a	897 a	1613 ab	6.45 a	81.55 b
		中早 39 Zhongzao 39	3797 b	2811 bc	986 a	4342 b	545 b	1531 b	6.27 b	82.33 a
		株两优 729 Zhuliangyou 729	3700 b	3033 ab	667 b	4262 b	562 b	1229 c	6.36 ab	81.82 ab
		平均 Mean	3822 A	2894 A	928 A	4435 A	613 B	1541 A	6.21 A	81.39 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	2857 ab	2190 b	667 a	3686 a	829 a	1496 a	6.11 b	77.62 d
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	2777 b	2174 b	603 a	3632 ab	855 a	1458 a	6.13 b	77.85 cd
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	2813 ab	2230 b	583 a	3676 ab	863 a	1446 a	6.24 ab	78.33 bc
		中早 39 Zhongzao 39	2923 a	2349 a	574 a	3683 a	760 a	1334 ab	6.38 a	79.67 a
		株两优 729 Zhuliangyou 729	2766 b	2224 b	542 a	3480 b	714 a	1256 b	6.33 a	78.63 b
		平均 Mean	2827 B	2233 B	594 B	3631 B	804 A	1398 B	6.24 A	78.42 B

同年同季下同一系列数字后相同小写字母表示在 0.05 概率水平差异不显著; 同年同一列数字后相同大写字母表示在 0.05 概率水平差异不显著。

The same lowercase letters behind the number in the same column with the same year and season are non-significant difference according to LSD (0.05). The same uppercase letters behind the number in the same column with the same year are non-significant difference according to LSD (0.05).

表 4 2020–2022 年米粉稻早季与晚季种植米粉蒸煮品质
Table 4 Cooking quality of rice noodles processed from early and late seasons noodle rice in 2020–2022 (%)

年份	季节	品种	断条率	损失率	吸水率
Year	Season	Cultivar	Cooked break rate	Cooking loss rate	Water absorption rate
2020	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	0.00 b	5.02 c	65.97 ab
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	2.22 a	4.89 c	71.70 a
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	0.00 b	7.82 a	66.80 ab
		中早 39 Zhongzao 39	0.00 b	5.92 b	46.70 c
		株两优 729 Zhuliangyou 729	2.22 a	6.04 b	54.27 bc
		平均 Mean	0.89 A	5.94 A	61.09 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	1.11 a	4.06 c	71.80 a
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	1.11 a	4.14 c	66.57 a
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	2.22 a	6.71 b	61.20 ab
		中早 39 Zhongzao 39	2.22 a	8.43 a	54.63 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	3.33 a	5.35 bc	66.70 a
		平均 Mean	2.00 A	5.74 A	64.18 A

(续表 4)

年份	季节	品种	断条率	损失率	吸水率
Year	Season	Cultivar	Cooked break rate	Cooking loss rate	Water absorption rate
2021	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	3.33 a	6.08 b	60.27 b
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	2.22 a	3.95 c	68.47 a
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	2.22 a	6.79 b	50.43 c
		中早 39 Zhongzao 39	0.00 a	7.68 a	47.63 c
		株两优 729 Zhuliangyou 729	3.33 a	6.00 b	51.73 c
		平均 Mean	2.22 A	6.10 A	55.71 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	0.00 a	4.38 c	60.60 a
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	0.00 a	3.98 c	60.77 a
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	0.00 a	5.88 b	52.50 b
		中早 39 Zhongzao 39	1.11 a	7.23 a	46.63 c
		株两优 729 Zhuliangyou 729	1.11 a	4.14 c	57.53 a
		平均 Mean	0.44 A	5.12 B	55.61 A
2022	早季 Early season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	0.00 a	4.67 c	68.75 b
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	1.11 a	3.71 d	74.24 a
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	0.00 a	6.55 ab	60.88 c
		中早 39 Zhongzao 39	1.11 a	6.63 a	54.56 d
		株两优 729 Zhuliangyou 729	0.00 a	5.74 b	61.35 c
		平均 Mean	0.44 A	5.46 A	63.96 A
	晚季 Late season	广陆矮 4 号 Guanglu'ai 4	0.00 b	4.73 bc	62.20 ab
		中嘉早 17 Zhongjiazao 17	1.11 ab	4.01 c	63.31 a
		湘早籼 24 号 Xiangzaoxian 24	0.00 b	5.66 ab	59.43 ab
		中早 39 Zhongzao 39	2.22 a	6.31 a	56.93 b
		株两优 729 Zhuliangyou 729	0.00 b	5.94 a	59.05 ab
		平均 Mean	0.67 A	5.33 A	60.18 B

同年同季下同一列数字后相同小写字母表示在 0.05 概率水平差异不显著; 同年同一列数字后相同大写字母表示在 0.05 概率水平差异不显著。

The same lowercase letters behind the number in the same column with the same year and season are non-significant difference according to LSD (0.05). The same uppercase letters behind the number in the same column with the same year are non-significant difference according to LSD (0.05).

提高。品种间断条率差异不显著。中嘉早 17 损失率最低, 吸水率最高, 米粉品质显著优于其他品种。湘早籼 24 号和中早 39 则损失率高, 吸水率低, 表现较差。

2.4 米粉稻米粉蒸煮品质与稻米品质的相关性

将米粉稻米粉蒸煮品质与稻米淀粉和蛋白质含量及 RVA 谱特征值等指标进行相关分析(图 2), 结果表明米粉断条率与稻米淀粉和蛋白质含量及 RVA 谱特征值相关性均未达显著水平。米粉损失率与总淀粉和直链淀粉含量呈显著负相关关系, 与最终黏度、峰值时间和糊化温度呈显著正相关关系。米粉吸水率仅与峰值时间呈显著负相关关系。

2.5 米粉稻稻米品质与灌浆期气候条件的相关性

将米粉稻灌浆期平均温度、平均辐射量与稻米淀粉和蛋白质含量及 RVA 谱特征值等指标进行相关分析(图 3), 结果表明总淀粉和峰值时间与平均温度和平均辐射量均无显著相关。直链淀粉含量、峰值黏度、热浆黏度和最终黏度与平均温度和平均辐射量呈显著正相关关系。支链淀粉含量与平均温度无显著相关, 与平均辐射量呈显著负相关关系。蛋白质含量和消减值与平均温度和辐射量呈显著负相关关系。崩解值和糊化温度与平均温度呈显著正相关关系, 与平均辐射量无显著相关。回复值与平均温度呈显著正相关关系, 与平均辐射量无显著相关。

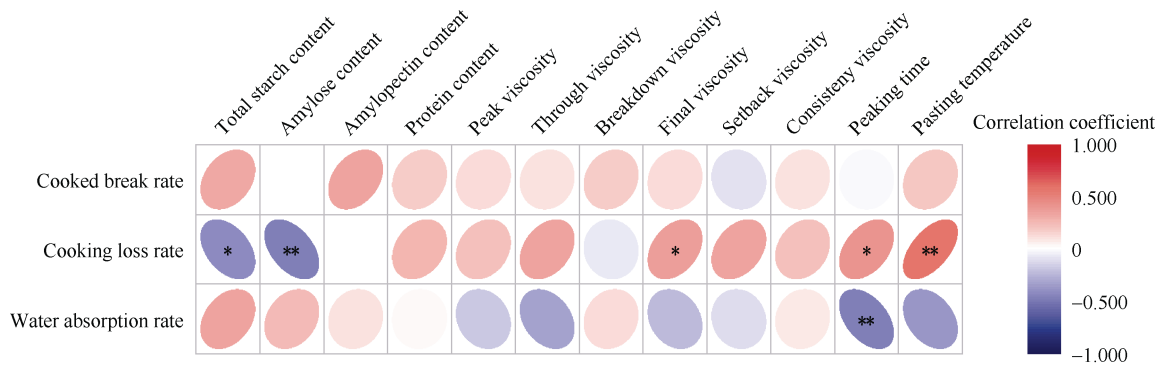


图 2 米粉稻米粉蒸煮品质与稻米淀粉和蛋白质含量及 RVA 谱特征值的相关性热图

Fig. 2 Pearson's correlation coefficients of rice noodles cooking quality against starch and protein contents and paste properties for noodle rice

相关系数使用表 2、表 3 和表 4 中的数据得出($n=30$)。*和**分别表示相关性在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。Data are from Table 2, Table 3, and Table 4 ($n=30$). * and ** denotes significant correlation coefficients at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

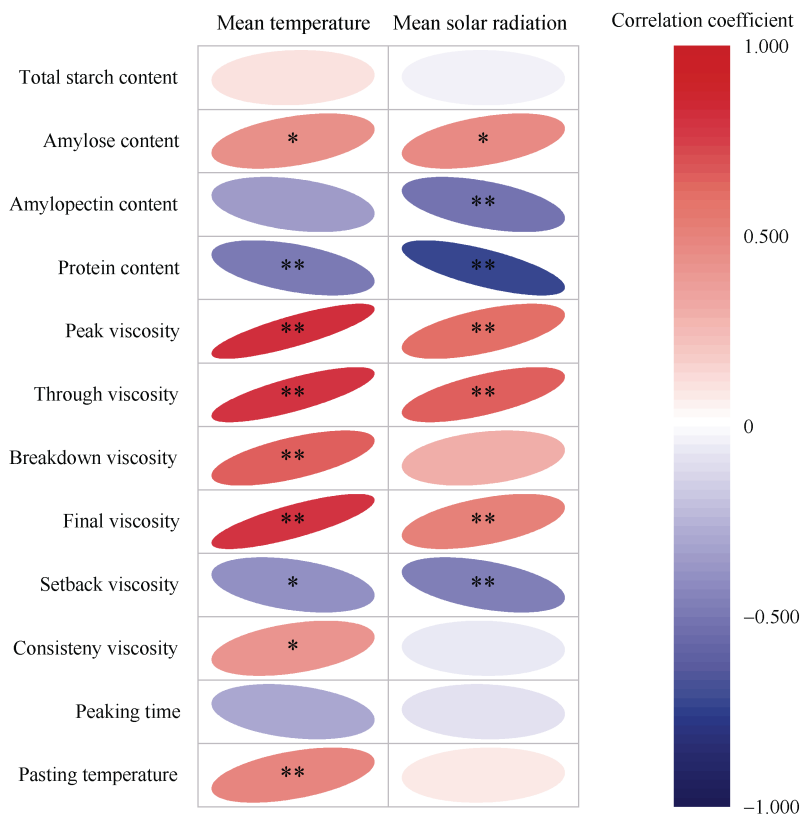


图 3 米粉稻米淀粉和蛋白质含量及 RVA 谱特征值与灌浆期平均温度和平均辐射量的相关性热图

Fig. 3 Pearson's correlation coefficients of starch and protein contents as well as paste properties against mean temperature and mean solar radiation during the grain filling period for noodle rice

相关系数使用表 2、表 3 和图 1 的数据得出($n=30$)。*和**分别表示相关性在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。Data are from Table 2, Table 3, and Fig. 1 ($n=30$). * and ** denotes significant correlation coefficients at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

3.1 米粉稻早季与晚季种植米粉品质与稻米品质的关系

目前，将米粉稻在晚季种植，探究气候条件对

米粉稻稻米品质与米粉品质的影响研究有限。本研究结果表明米粉稻在晚季种植时米粉蒸煮品质提高。与早季种植相比，米粉稻在晚季种植时米粉损失率降低 7.4%，断条率和吸水率两季间差异不显著。可能是因为晚季灌浆期平均温度和平均辐射量

降低,导致稻米品质指标发生改变,从而提高了米粉品质。

直链淀粉含量是评价米粉品质的核心指标,直链淀粉含量高,淀粉凝胶速度快,加工出的米粉断条率和损失率低,米粉品质好^[5-8]。淀粉糊化特性对米粉品质有很大影响,米粉蒸煮损失率与 RVA 谱特征值中的黏度指标呈显著负相关关系^[6,31-32]。本研究米粉稻在晚季种植时,直链淀粉含量降低,支链淀粉含量和蛋白质含量升高;RVA 谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、回复值和糊化温度下降,消减值和峰值时间上升。米粉损失率与直链淀粉含量呈显著负相关关系,与最终黏度、峰值时间和糊化温度呈显著正相关关系。由此可见,本研究中晚季米粉比早季米粉损失率更低主要与最终黏度和糊化温度有关,而直链淀粉含量并非影响米粉稻米粉蒸煮品质的关键指标。这可能与所采用的品种有关,本研究中米粉稻品种的直链淀粉含量均较高(>24%),且各品种在季节间直链淀粉含量的变异远小于最终黏度和糊化温度。因此,米粉稻稻米 RVA 谱特征值中最终黏度和糊化温度是影响米粉损失率的关键指标。

此外,在 5 个供试品种中,中嘉早 17 早季和晚季米粉品质均表现最好,其蒸煮损失率在 2020—2022 年早晚季均比其余 4 个品种更低,而吸水率更高(除 2020 年晚季外)。这可能是因为中嘉早 17 相比于其他 4 个品种稻米直链淀粉含量更高,而最终黏度和糊化温度更低。湘早籼 24 号是湖南省筛选出的饲料稻品种,其蛋白质含量显著高于其余 4 个品种,但其总淀粉和直链淀粉含量相对较低,RVA 谱特征值中最终黏度和糊化温度均较高,使得加工出的米粉损失率相对较高。由此可见,优质米粉稻品种在满足直链淀粉含量较高,最终黏度和糊化温度较低的同时,还需注意蛋白质含量不宜过高。可据此筛选优质米粉稻品种。

3.2 米粉稻早季与晚季种植稻米品质与灌浆期气候条件的关系

稻米品质的形成是灌浆期光合产物在籽粒中积累的过程,稻米品质既受品种基因型影响,也与外界环境因子有关^[33-34]。有研究认为,灌浆期平均温度降低会引起稻米直链淀粉含量增加,蛋白质含量降低^[35]。而本研究中米粉稻晚季种植平均温度降低,直链淀粉含量下降,蛋白质含量升高,这可能与所选用品种的特性、灌浆期辐射或其他气象因子有关。

灌浆期平均辐射降低会导致稻米直链淀粉含量降低,蛋白质含量增加^[26]。丛舒敏等^[36]研究认为,增温处理会使直链淀粉和蛋白质含量增加,低温弱光、增温弱光处理均会使直链淀粉降低,蛋白质含量升高。本研究与丛舒敏等^[36]结果一致。直链淀粉含量与灌浆期平均辐射量显著正相关,蛋白质含量与之相反,且蛋白质含量的变异大于直链淀粉含量。

除季节外,年度间蛋白质含量的变异较大,2020 年比 2022 年蛋白质含量高 22.4%。其中,2020 年早季与晚季蛋白质含量分别比 2022 年高 15.6%和 30.0%,可能是由于 2 年早季与晚季灌浆期平均辐射量差异所致。2 年早季与晚季灌浆期平均温度接近,而 2020 年早季与晚季灌浆期平均辐射量分别比 2022 年低 16.8%和 31.0%。蛋白质的合成与植株体内碳氮代谢密切相关。任万军等^[37]研究表明,弱光下水稻植株含氮量增加,合成碳水化合物能力减弱,且弱光会促进氮素向籽粒转运,使得植株的代谢以碳代谢为主转向氮代谢为主,从而促进蛋白质的合成。可见,2022 年蛋白质含量低主要与之灌浆期平均辐射量高有关。

灌浆期温光条件会影响稻米淀粉和蛋白质的合成,同时也会改变稻米 RVA 谱特征值^[38]。张国发等^[39]通过人工气候室研究认为灌浆期高温会使峰值黏度、热浆黏度和崩解值下降,最终黏度、消减值和回复值和糊化温度升高。陶钰等^[24]研究发现遮光处理淀粉峰值黏度、热浆黏度、最终黏度和崩解值呈下降趋势,消减值呈上升趋势,糊化温度差异不显著。杨帆等^[25]则发现推迟播期导致灌浆期平均温度降低,日照时长与降雨量减少,使得峰值黏度、热浆黏度、最终黏度和崩解值降低,消减值和峰值时间升高。本研究与杨帆等^[25]研究结果基本一致,但与张国发等^[39]研究结果不同。出现不同结果可能是前者只探讨了灌浆期平均温度对 RVA 谱特征值的影响,灌浆期平均辐射量与其余气象因子对稻米 RVA 谱特征值也有影响,且不同水稻品种及不同 RVA 黏度指标对环境条件的敏感性不同^[23]。

包括湖南在内的华中单、双季稻稻作区的大部分地区温光资源丰富,适宜双季稻种植^[40]。随着作物生产目标从以往的仅追求高产到现在的质量与效益并重,直播、机插等轻简化机械化种植方式发展迅速,使得多熟制作物所要求的生育期更短^[41-42]。目前,生产上推广的大部分晚稻品种生育期过长,导致缺乏适宜直播、机插等轻简化机械化搭配的晚

稻品种^[43]。米粉稻品种翻秋种植, 前期生长阶段温度高, 能够显著缩短水稻秧龄期和营养生长期。在没有早熟晚稻品种可供选择的情况下, 使用早稻品种翻秋种植的“早晚兼用”搭配模式是可行的^[43]。但生育期合适的米粉稻品种及其产量表现等还有待进一步研究。

4 结论

米粉稻在晚季种植时灌浆期平均温度和平均辐射量降低, 使得稻米直链淀粉含量降低, 蛋白质含量升高; 同时导致 RVA 谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度回复值和糊化温度下降, 消减值和峰值时间上升。其中, 最终黏度和糊化温度下降有利于减少米粉损失率。因此, 米粉稻在晚季种植有助于米粉蒸煮品质提高。米粉稻稻米 RVA 谱特征值中最终黏度和糊化温度是影响米粉损失率的关键指标。

References

- [1] Fu B X. Asian noodles: history, classification, raw materials, and processing. *Food Res Int*, 2008, 41: 888–902.
- [2] Sanchez B, Rasmussen A, Porter J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Glob Change Biol*, 2014, 20: 408–417.
- [3] Huang M, Cao J L, Liu Y, Zhang M Y, Hu L Q, Xiao Z W, Chen J N, Cao F B. Low-temperature stress during the flowering period alters the source-sink relationship and grain quality in field-grown late-season rice. *J Agron Crop Sci*, 2021, 207: 833–839.
- [4] 周显青, 彭超, 张玉荣, 郭利利, 熊宁. 早籼稻的品质分析与其压榨型鲜湿米粉加工适应性. *食品科学*, 2018, 39(19): 36–43.
Zhou X Q, Peng C, Zhang Y R, Guo L L, Xiong N. Quality analysis of early *indica* rice cultivars and their suitability for processing of pressed fresh noodles. *Food Sci*, 2018, 39(19): 36–43 (in Chinese with English abstract).
- [5] 高晓旭, 佟立涛, 钟葵, 刘丽娅, 周闲容, 周素梅, 王立. 鲜米粉加工专用原料的选择. *中国粮油学报*, 2015, 30(2): 1–5.
Gao X X, Tong L T, Zhong K, Liu L Y, Zhou X R, Zhou S M, Wang L. Raw material selection for fresh rice noodles. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2015, 30(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- [6] 雷婉莹, 吴卫国, 廖卢艳, 倪婷, 张喻. 鲜湿米粉品质评价及原料选择. *食品科学*, 2020, 41(1): 74–79.
Lei W Y, Wu W G, Liao L Y, Ni T, Zhang Y. Quality evaluation of and raw material selection for wet rice noodles. *Food Sci*, 2020, 41(1): 74–79 (in Chinese with English abstract).
- [7] Low Y K, Effarizah M E, Cheng L H. Factors influencing rice noodles qualities. *Food Rev Int*, 2020, 36: 781–794.
- [8] 丁文平, 丁霄霖. 大米品种对其淀粉凝胶特性的影响. *中国粮油学报*, 2003, 18(3): 17–20.
Ding W P, Ding X L. Effects of rice varieties on its starch gels properties. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2003, 18(3): 17–20 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王永辉, 张业辉, 张名位, 魏振承, 唐小俊, 张瑞芬, 邓媛元, 张雁. 不同水稻品种大米直链淀粉含量对加工米粉品质的影响. *中国农业科学*, 2013, 46: 109–120.
Wang Y H, Zhang Y H, Zhang M W, Wei Z C, Tang X J, Zhang R F, Deng Y Y, Zhang Y. Effect of amylose content of different rice varieties on the qualities of rice vermicelli. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 109–120 (in Chinese with English abstract).
- [10] Xuan Y, Yi Y, Liang H, Wei S Q, Chen N P, Jiang L G, Ali I, Ullah S, Wu X C, Cao T Y, Zhao Q, Li T Y. Amylose content and RVA profile characteristics of noodle rice under different conditions. *Agron J*, 2020, 112: 117–129.
- [11] Huang M, Jiang L G, Zou Y B, Zhang W X. On-farm assessment of effect of low temperature at seedling stage on early-season rice quality. *Field Crops Res*, 2013, 141: 63–68.
- [12] Ai X F, Xiong R Y, Tan X M, Wang H X, Zeng Y J, Huang S, Shang Q Y, Pan X H, Shi Q H, Zhang J, Zeng Y H. Low temperature and light combined stress after heading on starch fine structure and physicochemical properties of late-season *indica* rice with different grain quality in southern China. *Food Res Int*, 2023, 164: 112320.
- [13] Zhou N B, Zhang J, Fang S L, Wei H Y, Zhang H C. Effects of temperature and solar radiation on yield of good eating-quality rice in the lower reaches of the Huai River Basin, China. *J Integr Agric*, 2021, 20: 1762–1774.
- [14] 冯向前, 殷敏, 王孟佳, 马横宇, 褚光, 刘元辉, 徐春梅, 章秀福, 张运波, 王丹英, 陈松. 南方稻区“早籼晚粳”栽培模式晚季灌浆期气象因子对晚粳稻品质的影响. *中国农业科学*, 2023, 56: 46–63.
Feng X Q, Yin M, Wang M J, Ma H Y, Chu G, Liu Y H, Xu C M, Zhang X F, Zhang Y B, Wang D Y, Chen S. Effects of meteorological factors on quality of late *japonica* rice during late season grain filling stage under ‘early *indica* and late *japonica*’ cultivation pattern in southern China. *Sci Agric Sin*, 2023, 56: 46–63 (in Chinese with English abstract).
- [15] 徐栋, 朱盈, 周磊, 韩超, 郑雷鸣, 张洪程, 魏海燕, 王珏, 廖校梓, 蔡仕博. 不同类型粳籼杂交稻产量和品质性状差异及其与灌浆结实期气候因素间的相关性. *作物学报*, 2018, 44: 1548–1559.
Xu D, Zhu Y, Zhou L, Han C, Zheng L M, Zhang H C, Wei H Y, Wang Y, Liao A H, Cai S B. Differences in yield and grain quality among various types of *indica/japonica* hybrid rice and correlation between quality and climatic factors during grain filling period. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1548–1559 (in Chinese with English abstract).
- [16] Rehmani M I A, Wei G B, Hussain N, Ding C Q, Li G H, Liu Z H, Wang S H, Ding Y. Yield and quality responses of two *indica* rice hybrids to post-anthesis asymmetric day and night open-field warming in lower reaches of Yangtze River delta. *Field Crops Res*, 2014, 156: 231–241.
- [17] 金正勋, 杨静, 钱春荣, 刘海英, 金学泳, 秋太权. 灌浆成熟期温度对水稻籽粒淀粉合成关键酶活性及品质的影响. *中国水稻科学*, 2005, 19: 377–380.
Jin Z X, Yang J, Qian C R, Liu H Y, Jin X Y, Qiu T Q. Effects of temperature during grain filling period on activities of key

- enzymes for starch synthesis and rice grain quality. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19: 377–380 (in Chinese with English abstract).
- [18] Dou Z, Tang S, Li G H, Liu Z H, Ding C Q, Chen L, Wang S H, Ding Y F. Application of nitrogen fertilizer at heading stage improves rice quality under elevated temperature during grain-filling stage. *Crop Sci*, 2017, 57: 2183–2192.
- [19] Fan X L, Sun X S, Yang R, Chen S, Li R M, Bian X Y, Xia L X, Zhang C Q. Comparative analyses of grain quality in response to high temperature during the grain-filling stage between *Wx^a* and *Wx^b* under *indica* and *japonica* backgrounds. *Agronomy*, 2023, 13: 17.
- [20] Cheng F M, Zhong L J, Zhao N C, Liu Y, Zhang G P. Temperature induced changes in the starch components and biosynthetic enzymes of two rice varieties. *Plant Growth Regul*, 2005, 46: 87–95.
- [21] 程方民, 丁元树, 朱碧岩. 稻米直链淀粉含量的形成及其与灌浆结实期温度的关系. 生态学报, 2000, 20: 646–652.
Cheng F M, Ding Y S, Zhu B Y. The formation of amylose content in rice grain and its relation with field temperature. *Acta Ecol Sin*, 2000, 20: 646–652 (in Chinese with English abstract).
- [22] Liu Q H, Wu X, Ma J Q, Li T, Zhou X B, Guo T. Effects of high air temperature on rice grain quality and yield under field condition. *Agron J*, 2013, 105: 446–454.
- [23] 袁继超, 丁志勇, 蔡光泽, 杨世民, 朱庆森, 杨建昌. 攀西地区稻米淀粉 RVA 谱的影响因子及其垂直变化特点. 作物学报, 2005, 31: 1611–1619.
Yuan J C, Ding Z Y, Cai G Z, Yang S M, Zhu Q S, Yang J C. The factors influencing RVA profile of rice starch and their changes with altitudes in Panxi region. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 1611–1619 (in Chinese with English abstract).
- [24] 陶钰, 姚宇, 王坤庭, 邢志鹏, 翟海涛, 冯源, 刘秋员, 胡雅杰, 郭保卫, 魏海燕, 张洪程. 穗肥氮素用量与结实期遮光复合作用对常规粳稻品质的影响. 作物学报, 2022, 48: 1730–1745.
Tao Y, Yao Y, Wang K T, Xing Z P, Zhai H T, Feng Y, Liu Q Y, Hu Y J, Guo B W, Wei H Y, Zhang H C. Combined effects of panicle nitrogen fertilizer amount and shading during grain filling period on grain quality of conventional *japonica* rice. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 1730–1745 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨帆, 钟晓媛, 李秋萍, 李书先, 李武, 周涛, 李博, 袁玉洁, 邓飞, 陈勇, 任万军. 再生稻次适宜区迟播栽对不同杂交籼稻淀粉 RVA 谱的影响. 作物学报, 2021, 47: 701–713.
Yang F, Zhong X Y, Li Q P, Li S X, Li W, Zhou T, Li B, Yuan Y J, Deng F, Chen Y, Ren W J. Effects of delayed sowing and planting date on starch RVA profiles of different *indica* hybrid rice in the sub-suitable region of ratoon rice. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 701–713 (in Chinese with English abstract).
- [26] Wei H Y, Zhu Y, Qiu S, Han C, Hu L, Xu D, Zhou N B, Xing Z P, Hu Y J, Cui P Y, Dai Q G, Zhang H C. Combined effect of shading time and nitrogen level on grain filling and grain quality in *japonica* super rice. *J Integr Agric*, 2018, 17: 2405–2417.
- [27] 邓飞, 王丽, 叶德成, 任万军, 杨文钰. 生态条件及栽培方式对稻米 RVA 谱特性及蛋白质含量的影响. 作物学报, 2012, 38: 717–724.
Deng F, Wang L, Ye D C, Ren W J, Yang W Y. Effects of ecological conditions and cultivation methods on rice starch RVA profile characteristics and protein content. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 717–724 (in Chinese with English abstract).
- [28] Tong L T, Gao X X, Lin L Z, Liu Y J, Zhong K, Liu L Y, Zhou X R, Wang L, Zhou S M. Effects of semidry flour milling on the quality attributes of rice flour and rice noodles in China. *J Cereal Sci*, 2015, 62: 45–49.
- [29] 吴伟斌, 李佳雨, 张震邦, 凌彩金, 林贤柯, 常星亮. 基于高光谱图像的茶树 LAI 与氮含量反演. 农业工程学报, 2018, 34(3): 195–201.
Wu W B, Li J Y, Zhang Z B, Ling C J, Lin X K, Chang X L. Estimation model of LAI and nitrogen content in tea tree based on hyperspectral image. *Trans CSAE*, 2018, 34(3): 195–201 (in Chinese with English abstract).
- [30] Tsukaguchi T, Taniguchi Y, Ito R. The effects of nitrogen uptake before and after heading on grain protein content and the occurrence of basal- and back-white grains in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod Sci*, 2016, 19: 508–517.
- [31] Bhattacharya M, Zee S Y, Corke H. Physicochemical properties related to quality of rice noodles. *Cereal Chem*, 1999, 76: 861–867.
- [32] Huang M, Xiao Z W, Chen J N, Cao F B. Yield and quality of brown rice noodles processed from early-season rice grains. *Sci Rep*, 2021, 11: 18668.
- [33] Zhou N B, Wei H Y, Zhang H C. Response of milling and appearance quality of rice with good eating quality to temperature and solar radiation in lower reaches of Huai River. *Agronomy*, 2021, 11: 77.
- [34] Huang M, Cao J L, Zhang R C, Chen J N, Cao F B, Liu L S, Fang S L, Zhang M. Delayed sowing does not improve palatability-related traits in high-quality rice. *Food Chem Adv*, 2022, 1: 100096.
- [35] Deng F, Zhang C, He L H, Liao S, Li Q P, Li B, Zhu S L, Gao Y T, Tao Y F, Zhou W, Lei X L, Wang L, Hu J F, Chen Y, Ren W J. Delayed sowing date improves the quality of mechanically transplanted rice by optimizing temperature conditions during growth season. *Field Crops Res*, 2022, 281: 108493.
- [36] 丛舒敏, 余恩唯, 夏陈钰, 薛建涛, 李雯, 李荣凯, 胡雅杰. 结实期温度和光照对不同类型粳稻品种产量和品质的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2022, 43(5): 18–26.
Cong S M, Yu E W, Xia C Y, Xue J T, Li L, Li R K, Hu Y J. Effects of temperature and light on yield and quality of different types of *japonica* rice varieties at seed-setting stage. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci Edn)*, 2022, 43(5): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- [37] 任万军, 杨文钰, 徐精文, 樊高琼, 马周华. 弱光对水稻籽粒生长及品质的影响. 作物学报, 2003, 29: 785–790.
Ren W J, Yang W Y, Xu J W, Fan G Q, Ma Z H. Effect of low light on grains growth and quality in rice. *Acta Agron Sin*, 2003, 29: 785–790 (in Chinese with English abstract).
- [38] Chen H, Chen D, He L H, Wang T, Lu H, Yang F, Deng F, Chen Y, Tao Y F, Li M, Li G Y, Ren W J. Correlation of taste values with chemical compositions and Rapid Visco Analyser profiles of 36 *indica* rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *Food Chem*, 2021, 349: 129176.
- [39] 张国发, 王绍华, 尤娟, 王强盛, 丁艳峰, 吉志军. 结实期不同时段高温对稻米品质的影响. 作物学报, 2006, 32: 283–287.
Zhang G F, Wang S H, You J, Wang Q S, Ding Y F, Ji Z J. Effect

- of higher temperature in different filling stages on rice qualities. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 283–287 (in Chinese with English abstract).
- [40] 邹应斌, 戴魁根. 湖南发展双季稻生产的优势. 作物研究, 2008, 22(4): 209–213.
- Zou Y B, Dai K G. The advantages for promoting double-season rice production in Hunan province. *Crop Res*, 2008, 22(4): 209–213 (in Chinese with English abstract).
- [41] 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).
- [42] 邹应斌, 黄敏. 转型期作物生产发展的机遇与挑战. 作物学报, 2018, 44: 791–795.
- Zou Y B, Huang M. Opportunities and challenges for crop production in China during the transition period. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 791–795 (in Chinese with English abstract).
- [43] 陈佳娜, 曹放波, 谢小兵, 单双吕, 高伟, 李志斌, 黄敏, 邹应斌. 机插条件下低氮密植栽培对“早晚兼用”双季稻产量和氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2016, 42: 1176–1187.
- Chen J N, Cao F B, Xie X B, Shan S L, Gao W, Li Z B, Huang M, Zou Y B. Effect of low nitrogen rate combined with high plant density on yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted early-late season double cropping rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1176–1187 (in Chinese with English abstract).