

寒地水稻叶片 SPAD 值与 稻米蛋白质含量的关系

王志君¹, 李红宇^{1,2,3}, 夏玉莹¹, 范名字^{1,2,3},
赵海成^{1,2,3}, 鲁洁婷¹, 赵朝勇¹, 郑桂萍^{1,2,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 黑龙江 大庆 163319;
3. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为揭示寒地水稻叶片 SPAD 值及其衍生值与稻米蛋白质含量的关系,于 2020—2021 年在水稻拔节期 (T1)、孕穗期 (T2)、齐穗期 (T3) 测定顶部 3 片叶的 SPAD 值,依据盆栽试验 (试验 1 和试验 2) 的数据资料建立 SPAD 值衍生指标与稻米蛋白质含量之间的关系模型,利用大田试验 (试验 3) 数据资料对建立的模型进行验证。结果表明,2020 年氮肥试验中 A8 水平 (氮素施用量 $362.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 稻米蛋白质含量较 A1~A7 水平 (A1~A7 氮素施用量分别为 0、51.72、103.45、155.17、206.90、258.62、310.35 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分别极显著增加 34.55%、27.44%、26.39%、22.19%、18.07%、14.39%、12.23%,而 A8 水平食味值较 A1~A7 水平分别极显著降低 8.10%、5.06%、4.99%、4.10%、3.45%、2.96%、2.28%,2021 年蛋白质含量、食味值变化趋势与前者相同。两年品种试验 6 个品种稻米蛋白质含量比较中,C6 品种 (三江 6 号) 蛋白质含量较 C5 (龙粳 21)、C4 (垦粳 8 号)、C3 (龙稻 203)、C2 (松粳 16)、C1 (松粳 22) 分别极显著提高 2.99%、12.23%、10.43%、5.04%、15.63%,C6 食味值较 C5、C4、C3、C2、C1 分别极显著降低 1.17%、12.09%、3.54%、2.89%、7.93%。品种差异及施氮量对不同生育时期水稻顶部 3 片叶的 SPAD 值分布规律有较大影响,但水稻冠层叶片出现的两次“黑黄交替”现象不受品种的影响,其中单片叶的 SPAD 值受品种差异的影响,与蛋白质含量不存在相关性,借助指标 $\text{SPAD}_{(L1+L2+L3)/3}$ 、 $\text{SPAD}_{L2 \times L3/\text{mean}}$ 可有效降低品种及环境差异对蛋白质含量预测结果的影响,指标 $\text{SPAD}_{(L1+L2+L3)/3}$ 与蛋白质含量在 T1~T3 期 (拔节期、孕穗期、齐穗期) 的拟合方程分别为: $Y=0.24X-1.94$, R^2 为 0.75**、 $Y=0.25X-1.69$, R^2 为 0.74**、 $Y=0.27X-2.45$, R^2 为 0.72**; $\text{SPAD}_{L2 \times L3/\text{mean}}$ 拟合方程分别为: $Y=0.22X-1.05$, R^2 为 0.75**、 $Y=0.27X-2.43$, R^2 为 0.72**、 $Y=0.26X-2.24$, R^2 为 0.72** (Y 为蛋白质含量, X 为 SPAD 衍生值),拟合方程均达到极显著水平。稻米蛋白质含量和食味值评分变观为线性负相关,回归方程为 $Y=-4.21X+113.32$ (Y 为食味值, X 为蛋白质含量),拟合优度 $R^2=0.93$ **,达到极显著水平。综上,借助指标 $\text{SPAD}_{(L1+L2+L3)/3}$ 和 $\text{SPAD}_{L2 \times L3/\text{mean}}$ 能够实现快捷、无损和实时预测稻米蛋白质含量,在一定程度上判定出稻米蒸煮食味品质的优劣,达到按质收获以及对品质实时监测的要求,促进优质寒地水稻的可持续发展。

关键词:寒地水稻; SPAD 值; 稻米蛋白质含量; 食味值

中图分类号:S511; S365; Q945.1 **文献标志码:**A

Relationship between blade SPAD value and protein content of rice in cold region

WANG Zhijun¹, LI Hongyu^{1,2,3}, XIA Yuying¹, FAN Mingyu^{1,2,3},

ZHAO Haicheng^{1,2,3}, LU Jieting¹, ZHAO Chaoyong¹, ZHENG Guiping^{1,2,3}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 3. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: To reveal the relationship between the SPAD value and its derived value of rice leaves and the pro-

收稿日期:2022-08-22

修回日期:2022-11-28

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目 (GA21B002)

作者简介:王志君 (1994-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向为水稻高产优质栽培。E-mail: 970560444@qq.com

通信作者:李红宇 (1979-), 男, 黑龙江方正人, 教授, 博士, 主要从事水稻高产优质生理生态及遗传多样性研究。E-mail: ndrice@163.com

tein content of rice in the cold regions, this study measured the top three leaves at the jointing stage (T1), booting stage (T2) and heading stage (T3) of rice in 2020 and 2021. Based on the data of the pot experiments (Experiment 1 and Experiment 2), the relationship model between the SPAD-derived index and the protein content of rice was established, and the data of the field experiment (Experiment 3) was used to verify the established model. The results showed that in the nitrogen fertilizer experiment in 2020, the protein content of rice at A8 level was significantly increased by 34.55%, 27.44%, 26.39%, 22.19%, 18.07%, 14.39%, and 12.23% compared with A1 to A7 levels, respectively. The taste value of A8 level was higher than that of A1 ~ A7 was significantly reduced by 8.10%, 5.06%, 4.99%, 4.10%, 3.45%, 2.96%, and 2.28%, respectively. The changes in protein content and taste value in 2021 were the same as the former. Compared with C5, C4, C3, C2, and C1, the protein content of C6 was significantly increased by 2.99%, 12.23%, 10.43%, 5.04%, and 15.63%, respectively, and the taste value of C6 was lower than that of C5, C4, C3, C2, and C1 and were significantly reduced by 1.17%, 12.09%, 3.54%, 2.89%, and 7.93%, respectively. Variety differences and nitrogen application rates had a greater impact on the SPAD distribution of the top three leaves of rice at different growth stages, but the two “black and yellow alternation” phenomenon in rice canopy leaves were not affected by the variety, among which the single leaf SPAD value was affected by varietal differences and had no correlation with protein content. With the help of indexes $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$, $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$, the effect of cultivar and environmental differences on the prediction of protein content was effectively reduced. Influence, the fitting equations of index $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ and protein content in T1 ~ T3 period are: $Y = 0.24X - 1.94, R^2 = 0.95^{**}$, $Y = 0.25X - 1.69, R^2 = 0.94^{**}$, $Y = 0.27X - 2.45, R^2 = 0.92^{**}$; $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$ fitting equations were: $Y = 0.22X - 1.05, R^2 = 0.95^{**}$, $Y = 0.27X - 2.43, R^2 = 0.92^{**}$, $Y = 0.26X - 2.24, R^2 = 0.92^{**}$, Y is the protein content, X is the SPAD derived value, and the fitting equations all reached the extremely significant level. The protein content of rice and the taste value score were linearly negatively correlated, the regression equation was $Y = -4.21X + 113.32$ (Y is the taste value, X is the protein content), and the goodness of fit $R^2 = 0.93^{**}$, reaching a very significant level. To sum up, with the help of the indexes $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ and $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$, the purpose of fast, non-destructive and real-time detection of rice protein content was able to be achieved, and to a certain extent, the quality of cooking and eating quality of rice were determined, and the results could be achieved. According to the requirements of quality harvesting and real-time monitoring of quality, the sustainable development of high-quality cold rice was promoted.

Keywords: cold region rice; SPAD value; rice protein content; taste value

蛋白质的含量及构成是影响稻米食味品质的重要因素^[1-2],一般认为稻米的食味值评分与蛋白质含量呈现负相关关系,即在一定范围内,稻米蛋白质含量越高食味值越低^[3-5]。传统的氮含量检测常采用凯氏定氮法,该方法不仅用时长,而且后期需要破坏性取样,致使检测工作较为繁杂、时效性较差^[6]。因此,收获前对稻米蛋白质含量进行快速无损检测能够满足水稻分级分类收获的要求,在水稻优质生产中具有重要意义。

SPAD 叶绿素仪可以通过测量叶片在波长 650 nm 和峰值波长 940 nm 内的透光系数而快速、实时测定叶片叶绿素的相对含量^[7],大量研究表明植株叶片含氮量与 SPAD 值呈正相关关系^[8-11],且与籽粒蛋白质含量具有一定的相关性^[12-14]。由此推测 SPAD 值的变化能够反映出叶片和收获籽粒的氮素营养状况。张丽等^[15]在 SPAD 值与玉米籽粒

蛋白质含量关系的研究中,发现利用叶片 SPAD 递减值可以快速检测出玉米成熟期籽粒蛋白质含量,并建立了相关模型。田永超等^[16]针对小麦的研究发现,借助叶片 SPAD 值可以预测出单位面积上小麦籽粒生长过程中蛋白质的积累动态。王志东等^[17]的研究认为籼稻稻米的蛋白质含量与蜡熟期和黄熟期剑叶 SPAD 值呈极显著负相关,而与始穗期、齐穗期和乳熟期剑叶 SPAD 值相关性不显著。作物品种之间或同一品种植株的不同氮素状态会造成氮素基础值不同^[18],致使 SPAD 诊断结果存在差异。因此,计算归一化 SPAD 等衍生指标作为诊断依据是非常必要的。前人通过构建 $SPAD_{L4 \times L3 / \text{mean}}$ ^[19]、 $SPAD_{L1-L3} / SPAD_{L1+L3}$ ^[20]、 $SPAD_{L1-L3} / SPAD_{L3}$ ^[21]等指标进行植株氮素诊断,但在 SPAD 值测定理想指示叶位的选择存在较多分歧,如李刚华等^[22]研究认为可以利用顶 3 叶 SPAD 值判断水稻氮素营养状况,而

凌启鸿等^[23]研究表明顶 4 叶和顶 3 叶的 SPAD 差值能更好地反映水稻氮素营养状况。

前人关于 SPAD 估测籽粒蛋白质含量的试验设计多为研究不同氮素水平或不同环境中的水稻冠层叶片氮含量差异所导致的蛋白质含量的差异,从而建立估测模型,而水稻品种之间或同一品种植株的不同氮素状态、水稻品种之间基因型差异所导致的叶片颜色、氮肥利用率不同等因素均会造成叶片 SPAD 采集误差,致使研究结果稳定性较差。

本研究对不同施氮量以及多品种试验的不同叶位 SPAD 构建归一化 SPAD 指数 ($SPAD_{ij}$, $INDS-PAD_{ij}$),分析了不同叶位的归一化 SPAD 指数与稻米氮素营养之间的定量关系,通过不同叶位 SPAD 值及其衍生指标与稻米氮素营养状况的相关性高低更能判定稻米氮质量分数的叶位,并应用归一化 SPAD 值估算的稻米氮质量分数与真实值做比较进行指标验证,从而筛选有效指标快速精确地判定稻米蛋白质含量,以期对稻米蛋白质含量的早期预测和调控提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于 2020—2021 年在黑龙江省大庆市(黑龙江八一农垦大学、大庆市王家围子村)以盆栽试验与大田试验相结合的形式进行。该区年日照时数 2 726 h,无霜期 143 d,年平均气温 4.2℃,夏季平均气温 23.3℃,农作物生长发育期气温日差达 10℃以上,年降水量 427.5 mm,年蒸发量 163.5 mm,属半干旱地区。盆栽试验所用盆钵高 30 cm,上直径 30 cm,下直径 25 cm,每盆装黑钙土 12 kg,每处理 12 盆。大田试验小区面积 2 m×2 m=4 m²,共计 20 个小区,大田土壤为盐碱土。黑钙土与盐碱土土壤理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

1.2.1 2020 年试验设计

试验 1:氮肥试验

氮肥盆栽试验于黑龙江八一农垦大学校内盆栽场进行,参试品种为稻花香 2 号,叶龄 $n=14$ 。试

表 1 土壤养分状况 Table 1 Soil nutrient status					
土壤类型 Soil type	速效氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	pH
黑钙土 Chernozem	153.84	22.65	95.85	3.09	6.55
盐碱土 Saline-alkali soil	97.24	13.77	106.10	2.00	8.89

验采用二因素完全随机试验设计,A 因素为前中期氮肥施入量(基肥、分蘖肥、调节肥),8 水平,氮肥施用量分别为 0(A1)、51.72(A2)、103.45(A3)、155.17(A4)、206.90(A5)、258.62(A6)、310.35(A7)、362.07(A8)kg·hm⁻²,按基肥:蘖肥:调节肥=4:3:1 施用;B 因素为后期氮肥施入量(穗肥),3 水平,氮肥施用量分别为 0(B1)、51.72(B2)、103.45(B3)kg·hm⁻²。各处理施肥方式见表 2。氮肥采用尿素(含 N 46.4%),磷肥采用过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%),过磷酸钙用量为 139.54 kg·hm⁻²,100%作为基肥。钾肥采用硫酸钾(含 K₂O 50%),硫酸钾用量为 120.00 kg·hm⁻²,分 2 次施用,基肥和穗肥各占 50%,即 1:1。其中基肥搅浆时一次性施用,分蘖肥分 2 次施用,叶龄 4.1~4.5 时第一次施用分蘖肥的 75%,叶龄 5.1~5.5 时第二次施用分蘖肥的 25%,调节肥在倒 4 叶伸长期施用,穗肥在倒 2 叶伸长期施用。该试验资料用于建立模型。

试验 2:品种试验

品种盆栽试验于校内盆栽场进行,采用单因素完全随机试验设计,供试品种分别为 C1:松粳 22(主茎 14 片叶)、C2:松粳 16(主茎 14 片叶)、C3:龙稻 203(主茎 13 片叶)、C4:垦粳 8 号(主茎 13 片叶)、C5:龙粳 21(主茎 12 片叶)、C6:三江 6 号(主茎 12 片叶),各品种特征特性如表 3 所示。氮肥施用按照基肥:分蘖肥:调节肥:穗肥=4:3:1:2 进行,依据本地水稻高产栽培技术进行施用,氮肥总施入量为 258.62 kg·hm⁻²,氮肥、磷肥和钾肥施用种类和施用时间同试验 1。该试验资料用于建立模型。

1.2.2 2021 年试验设计

试验 3:大田试验

在重复 2020 年试验 1、2 的基础上增加大田试验 3。大田试验于大庆市王家围子村进行,采用单因

表 2 试验处理的氮肥施用量/(kg·hm⁻²)

Table 2 Nitrogen application rate of experimental treatments			
因素 A A Factor	因素 B B Factor	因素 A A Factor	因素 B B Factor
A1=0	B1=0.00	A5=206.88	B1=0.00
	B2=51.72		B2=51.72
	B3=103.44		B3=103.44
A2=51.72	B1=0.00	A6=258.60	B1=0.00
	B2=51.72		B2=51.72
	B3=103.44		B3=103.44
A3=103.44	B1=0.00	A7=310.32	B1=0.00
	B2=51.72		B2=51.72
	B3=103.44		B3=103.44
A4=155.16	B1=0.00	A8=362.04	B1=0.00
	B2=51.72		B2=51.72
	B3=103.44		B3=103.44

表 3 品种特征特性
Table 3 Characteristics of the varieties

品种 Variety	主茎叶片数 Number of leaves on main stem	特征特性 Characteristics
松梗 22 Songjing 22	14	叶色较浅, 香稻 Light-colored leaves, fragrant rice
松梗 16 Songjing 16	14	叶色较深 Darker leaves
龙稻 203 Longdao 203	13	叶色较浅, 香稻 Light-colored leaves, fragrant rice
垦梗 8 号 Kenjing 8	13	叶色较深 Darker leaves
龙梗 21 Longjing 21	12	叶色较深 Darker leaves
三江 6 号 Sanjiang 6	12	叶色较浅, 香稻 Light-colored leaves, fragrant rice

素完全随机试验设计,供试品种分别为绥梗 27(主茎 11 片叶,香稻)、龙梗 31(主茎 11 片叶),每品种 10 个小区。氮肥按照基肥:分蘖肥:调节肥:穗肥=4:3:1:2 施用,依据本地(苏打盐碱地)水稻高产栽培技术进行,氮肥总施入量为 258.62 kg·hm⁻²,氮肥、磷肥和钾肥施用种类和施用时间同试验 1。该试验资料用于检测模型。

试验 1~3 均于 4 月 10 日浸种,4 月 18 日播种,5 月 10 日搅浆,5 月 20 日(秧苗叶龄为 3.1)移栽。盆栽试验每桶 4 穴,每穴 3 苗。大田试验穴距为 15 cm,行距为 30 cm,其他管理措施按照当地水稻高产栽培技术进行。

为排除品种差异对试验结果的影响,本研究选取了当地水稻种植面积相对较大、叶龄不同、同一叶龄品种香味特性不同的水稻品种进行试验。利用试验 1、2 的数据建立 SPAD 与稻米蛋白质含量的相关模型,于大田试验 3 中对基于 SPAD 模型计算出稻米蛋白质含量的预测值和真实值进行比较,验证模型在不同时空下的敏感性和稳定性,以排除环境差异对试验的干扰。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 SPAD 值测定 水稻主茎顶 1、顶 2、顶 3 叶及顶 4 叶的 SPAD 值都被用于水稻氮素研究,但是顶 4 叶出现较晚且位置较低,易被稻田水浸蚀。因此,本次研究选取水稻顶 1、顶 2、顶 3 叶作为研究对象,于天气晴朗时,采用叶绿素仪 SPAD-502(Konica minolta,日本)分别测定拔节期(T1)、孕穗期(T2)和齐穗期(T3)主茎顶部 3 张全展叶片的 SPAD 值。测量部位为主茎叶片上部(近叶尖 1/3 处)、中部(叶片中间位置)、基部(近叶基 1/3 处)和叶宽 1/4 或 3/4 的位置 3 部分,其平均值为所测叶

片的 SPAD 值。测量时叶片置于叶片夹的叶室中,避开主叶脉,然后夹紧叶片,保证叶片水平且被测面积相同,避免背景反射、叶片表面弯曲等造成的光谱波动及叶片内部变异造成的影响。每个处理(小区)标定测量 24 穴,每穴测定 3 个主茎,共计 72 个主茎。

1.3.2 食味品质测定 每处理标定 24 穴水稻收获后各自脱粒(与 SPAD 值相对应),于通风阴干处晾晒 3 个月,待理化性质稳定后,用小型碾米机把稻谷加工为精米。每穴称取 10 g 精米,按米水质量比 1:1.2 将精米隔水蒸煮成米饭。采用日本佐竹公司生产的米饭食味计(SATA1B)测定米饭综合食味值,重复 3 次其平均值为该穴食味值(无氮区 A1B1 产量不够,则每穴重复 2 次)。

1.3.3 蛋白质含量测定 用自动凯氏定氮仪法测定精米的蛋白质含量^[24]。每穴称取 1.5 g 精米粉,分别注入 250 mL 消化管中,注入 12 mL 浓硫酸及 7 g K₂SO₄ 和 0.8 g CuSO₄·5H₂O 的混合催化物,420℃ 下消化 1 h 后,用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec8400,FOSS 公司,丹麦)测定米粉含氮量,再乘以换算系数 5.95,重复 4 次,其平均值为该穴蛋白质含量。

1.3.4 SPAD 值衍生指标 除水稻顶部 3 片叶(L₁、L₂、L₃)SPAD 值外,本试验采用了 5 种 SPAD 值衍生指标,衍生指标通过某种数学关系计算而得,计算过程分别为:

SPAD_n = 顶部 n 张叶片 SPAD 的均值

SPAD_{Li-Lj} = 顶 i 叶 SPAD 值-顶 j 叶 SPAD 值;

SPAD_{(Li-Lj)/Li} = (顶 i 叶 SPAD 值-顶 j 叶 SPAD 值)/顶 i 叶 SPAD 值

SPAD_{Li×1j/mean} = 顶 i 叶 SPAD 值×顶 j 叶 SPAD 值/ i 、 j 两张叶片平均 SPAD 值

INDSPAD_{ij}: SPAD_{ij} = (SPAD_{Li} - SPAD_{Lj})/(SPAD_{Li}+SPAD_{Lj})

其中,SPAD_{Li}和 SPAD_{Lj}分别代表水稻冠层主茎第 i 和 j 叶位的 SPAD 值($i,n,j\leq 3$),L₁、L₂、L₃分别为顶部第 1、2、3 张全展叶。

1.4 SPAD 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 26 统计软件对数据进行整理及统计分析,Origin 2018 64bit 进行绘图作业,利用试验 1 和试验 2 的数据资料分析 SPAD 以及衍生指标与精米蛋白质含量的相关关系,并建立模型。模型的准确性和适用性采用试验 3 的数据资料,利用预测值和实测值的预测精度($P-k$)、根均方差(RMSE)及对称平均绝对百分比误差(SMAPE)等

指标进行评定。

预测精度($P-k$):真实值与预测值回归方程的斜率与真实值等于预测值的回归方程斜率 1 之间差的绝对值, $P-k$ 越小,预测精度越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y_i} - y_i)^2}$$

$RMSE$ 越小,预测精度越高。

$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2|\hat{y_i} - y_i|}{|\hat{y_i}| + |y_i|} \times 100\%$$

$SMAPE$ 越小,预测精度越高。

2 结果与分析

2.1 处理间蛋白质含量的比较

两年间施氮量对稻米蛋白质含量及食味值影响的结果如表 4 所示,在 A 水平下,A 因素对稻米的蛋白质含量和食味值的影响在两年间均达到极显著水平,均以 A1 水平蛋白质含量最低,食味值最高;A8 水平蛋白质含量最高,食味值最低。2020 年 A8 水平蛋白质含量较 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7 水平分别极显著增加 34.55%、27.44%、26.39%、22.19%、18.07%、14.39%、12.23%;A8 水平食味值较 A1~A7 水平分别极显著降低 8.10%、5.06%、4.99%、4.10%、3.45%、2.96%、2.28%。2021 年稻米蛋白质含量大小、食味值大小与 2020 年数据表现为同等趋势,蛋白质含量大小关系为 A1<A2<A3<A4<A5<A6<A7<A8,食味值大小关系为 A1>A2>A3>A4>A5>A6>A7>A8。因此,在水稻前期生长增施氮肥会提高稻米的蛋白质含量,降低食味值评分。在 B 水平中,两年间 B 因素对稻米的蛋白质含量和食味值的影响均为极显著水平,以 B1 水平蛋白质含量最低,食味值最高;B3 水平蛋白质含量最高,食味值最低。因此,提高氮肥在穗肥中的比例会促进稻米蛋白质含量的增加而降低其食味值评分。

综上,在水稻生长过程中,增加氮肥的施入量会提高稻米的蛋白质含量并降低食味值,食味值与蛋白质含量呈现一定的负相关关系。

对年均蛋白质含量与施氮量进行回归,如图 1 所示。在 B1、B2、B3 下,均以 A1 水平蛋白质含量最低,A8 水平最高。在 B1 下,与 A8 蛋白质含量相比,A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7 分别降低 27.78%、21.81%、19.03%、14.86%、12.50%、11.11%、7.64%。在 B2 下,与 A8 水平相比,A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7 分别降低 28.66%、26.11%、25.48%、16.56%、15.29%、14.01%、10.45%。B3 下,与 A8 水平蛋白质

表 4 施氮量对稻米蛋白质含量及食味值的影响

Table 4 Effects of nitrogen application rate on protein content and taste value of rice

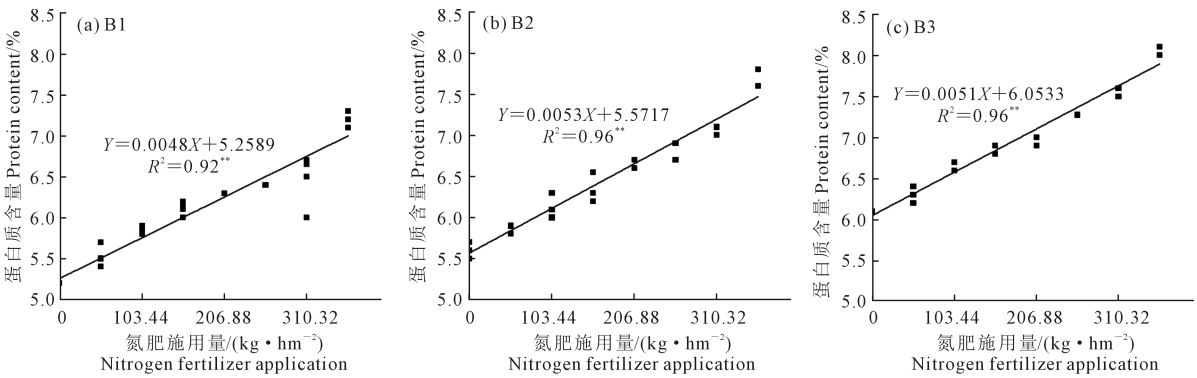
试验处理 Test treatment	2020		2021	
	蛋白质含量/% Protein content	食味值/% Taste value	蛋白质含量/% Protein content	食味值/% Taste value
A1	5.73eE	89.43aA	5.65eE	89.53aA
A2	6.05deDE	86.57bB	6.10dDE	87.07bB
A3	6.10dDE	86.51bB	6.22dDE	86.81bB
A4	6.31cdCD	85.70bcBC	6.43cdCD	86.00bB
A5	6.53bcBCD	85.13cCD	6.65bcBD	85.73bB
A6	6.74bBC	84.70cdCD	6.86bBC	83.92cDC
A7	6.87bB	84.11dD	6.99bB	83.01dD
A8	7.71aA	82.19eE	7.53aA	81.19eE
F_A	25.284 **	38.986 **	27.35 **	29.224 **
B1	6.17cC	88.17aA	6.25cC	87.87aA
B2	6.47bB	85.17bB	6.48bB	84.97bB
B3	6.88aA	83.29cC	6.78aA	83.34cC
F_B	22.968 **	140.982 **	19.30 **	32.442 **
$F_{A \times B}$	6.498 **	9.606 **	10.12 **	10.245 **

注:数据后不同小、大写字母分别表示同一试验因素不同处理间差异显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$);*、**分别表示影响显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)。

Note: Different lowercase and uppercase letters within a column indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) differences among treatments under the same experimental factor, respectively. * and ** indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) influences ,respectively.

含量相比,A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7 分别降低 24.50%、21.66%、18.94%、15.47%、14.23%、12.38%、11.14%。因此,在不同的穗肥下,稻米蛋白质含量与施氮量呈现线性增加的关系,B1、B2、B3 下蛋白质含量与施氮量回归方程的 R^2 (拟合优度)分别为 0.92 **、0.96 **、0.96 **。

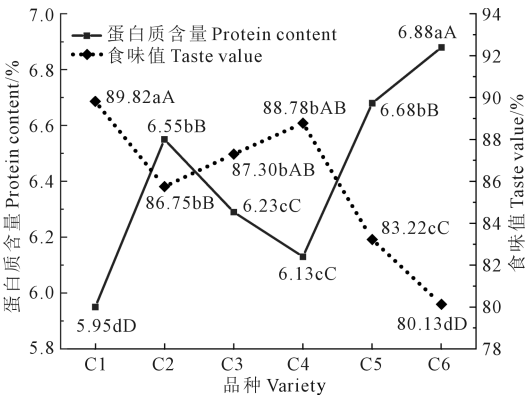
两年间 6 个品种的蛋白质含量及食味值的测定结果相似,以 2021 年的数据为例(图 2)。结果表明,6 个品种之间的蛋白质含量、食味值差异较大,其中 C1 蛋白质含量最低,食味值最高,C6 蛋白质含量最高,食味值最低。6 个品种蛋白质含量由高到低的顺序为 C6>C5>C2>C3>C4>C1,C6 蛋白质含量较 C5、C2、C3、C4、C1 分别极显著提高 2.99%、5.04%、10.43%、12.23%、15.63%,食味值由高到低的顺序为 C1>C4>C3>C2>C5>C6,C6 食味值较 C5、C2、C3、C4、C1 分别极显著降低 1.17%、2.89%、3.54%、7.93%、12.09%。由此可知,不同品种的稻米蛋白质含量及食味值差异较大,蛋白质含量较低的品种其食味值较高。



注：*、* * 分别表示差异显著 ($P<0.05$)、极显著 ($P<0.01$)，下同。
Note: * and * * indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) differences, respectively. The same below.

图 1 不同穗肥下施肥量与蛋白质含量的关系

Fig.1 Relationship between fertilization amount and protein content under different panicle fertilizers



注:数据后不同小、大写字母分别表示同一试验因素不同处理间差异显著 ($P<0.05$)、极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase and uppercase letters indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) differences among treatments under the same experimental factor, respectively.

图 2 不同品种稻米的蛋白质含量及食味值比较

Fig.2 Comparison of protein content and taste value in grains of different varieties

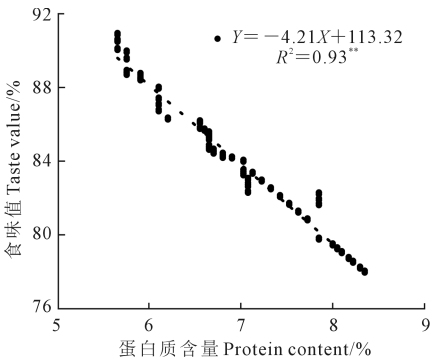


图 3 蛋白质含量与食味值的关系

Fig.3 Relationship between protein content and taste value

2.2 蛋白质含量与食味值的关系

如图 3 所示,食味值与蛋白质含量呈线性递减关系,即稻米蛋白质含量越高,水稻食味值评分越低。线性回归方程的拟合优度 $R^2=0.93^{**}$,达到极显著水平。

2.3 叶片 SPAD 值的比较

2.3.1 氮肥试验中水稻叶片 SPAD 值的比较 如图 4 所示,在施氮量 A 的影响下,水稻顶部 3 片叶 SPAD 值与施氮量呈线性正相关,即随着施氮量的增加,叶片 SPAD 值亦增加,SPAD 值与施氮量的回归方程 R^2 分别为 0.98^{**} 、 0.96^{**} 、 0.98^{**} ,达到极显著水平。各施氮水平下,水稻顶部 3 片叶 SPAD 表现出 $L_2>L_1>L_3$ 的关系。

图 5 结果表明,不同穗肥下,T2 时期水稻顶部 3 片叶的 SPAD 值与施氮量呈线性正相关,其回归方程 R^2 均达到极显著水平。在 B1、B2、B3 下,3 张叶片 SPAD 值大小关系均为: $L_2>L_1>L_3$, B2、B3 水平顶部 3 片叶 SPAD 值高于 B1。

在图 6 中,T3 时期 3 张叶片 SPAD 值大小关系为: $L_1>L_2>L_3$,顶一叶的 SPAD 值为最高值,不同叶片 SPAD 值与施氮量表现为线性正相关,回归方程的 R^2 为极显著水平。在同等施氮量下,T3 时期的叶片 SPAD 值表现出略高于 T2 时期的趋势。

综上,在 T1~T2 时期水稻顶部叶片 SPAD 值呈现降低趋势,T2~T3 时期水稻顶部叶片 SPAD 值动态升高。由此可知,水稻顶部叶片在 T1~T3 时期经历了“黑-黄-黑”叶色交替现象,且不同时期水稻顶部叶片 SPAD 值分布规律差异较大,但与施氮量均表现出线性关系。提高氮肥投入量使叶位之间的 SPAD 值差值减小,在 T2 和 T3 时期变化更为明显。

2.3.2 不同水稻品种冠层叶片 SPAD 值的比较 在图 7 中,6 个供试品种在 T1 时期顶部 3 片叶 SPAD 值大小关系均为: $L_2>L_1>L_3$ 。在 T2 时期,品种 C1

和 C2 顶部 3 片叶 SPAD 值大小关系为: $L_2>L_1>L_3$, 品种 C3、C4、C5 和 C6 顶部 3 片叶 SPAD 值大小关系为 $L_2>L_3>L_1$ 。T3 时期 5 个供试品种顶部 3 片叶 SPAD 值大小关系均为 $L_1>L_2>L_3$ 。由此可知, 6 个供试品种在 T1、T2 时期均为功能叶顶 2 叶 SPAD 值最高, 在 T3 时期以功能叶顶一叶 SPAD 值最高。不同品种 SPAD 值在 T1~T2 时期呈现动态下降趋势, 在 T2~T3 时期表现为动态上升。由此可知, 不同水稻品种顶部叶片 SPAD 值分布规律及数值有较大差异, 但不同水稻品种在 T1~T3 时期会出现“黑-黄-黑”叶色交替现象。

2.4 叶片 SPAD 值及其衍生指标与蛋白质含量的关系

利用试验 1 和试验 2 的两年数据对顶部 3 片叶 SPAD 值与稻米蛋白质含量相关性分析进行指标筛选, 表 5 结果显示, 在氮肥梯度试验中, 3 个时期下单片叶 SPAD 值与蛋白质含量相关性均达到极显著相关, 而在品种试验中单片叶的 SPAD 值与其蛋白质含量的相关性未能达到显著水平。由此可知, 借助单片叶 SPAD 值进行蛋白质含量预测受品种差异的影响具有一定困难。借助衍生指标筛选的结果显示, 在 3 个生育时期共选出 3 个指标 $SPAD_{(L_1+L_2+L_3)/3}$ 、 $SPAD_{L_2\times L_3/\text{mean}}$ 、 $SPAD_{L_1\times L_2\times L_3/\text{mean}}$, 其中 $SPAD_{(L_1+L_2+L_3)/3}$

在氮肥试验中 3 个时期的相关系数分别为 0.81^{**} 、 0.83^{**} 、 0.81^{**} , 在品种试验中相关系数分别为 0.85^{**} 、 0.85^{**} 、 0.86^{**} 。 $SPAD_{L_2\times L_3/\text{mean}}$ 在氮肥试验中 3 个时期的相关系数分别为 0.81^{**} 、 0.82^{**} 、 0.82^{**} ; 在品种试验中相关系数分别为 0.84^{**} 、 0.82^{**} 、 0.86^{**} 。 $SPAD_{L_1\times L_2\times L_3/\text{mean}}$ 在氮肥试验中 3 个时期的相关系数分别为 0.70^{*} 、 0.83^{**} 、 0.84^{**} , 在品种试验中 R^2 分别为 0.72^{*} 、 0.78^{*} 、 0.89^{**} 。3 个指标与蛋白质含量均呈现正相关关系。

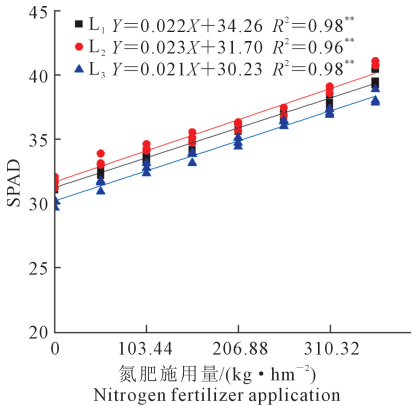


图 4 T1 时期施氮量与顶部叶片 SPAD 值的关系
Fig.4 Relationship between nitrogen application rate and SPAD value of top leaves during T1 period

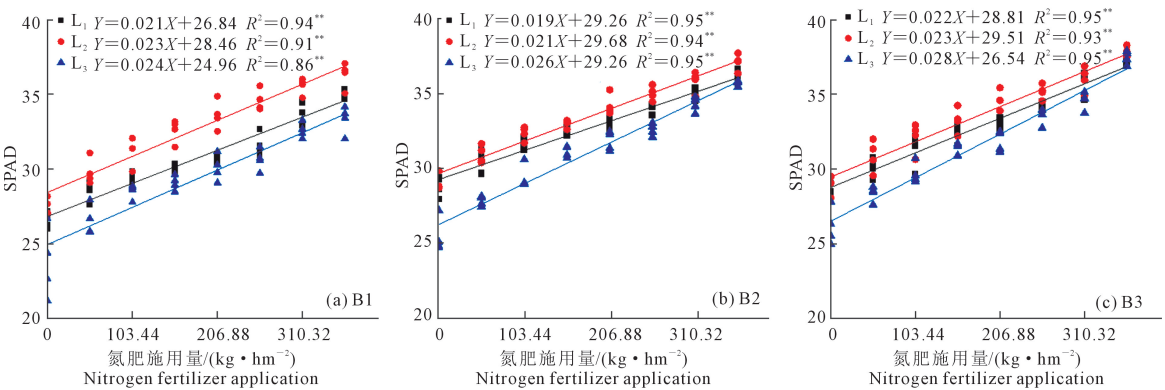


图 5 T2 时期不同穗肥下施氮量与顶部叶片 SPAD 值的关系

Fig.5 Relationship between nitrogen fertilization rate and SPAD value of top leaves under different panicle fertilizers during T2 period

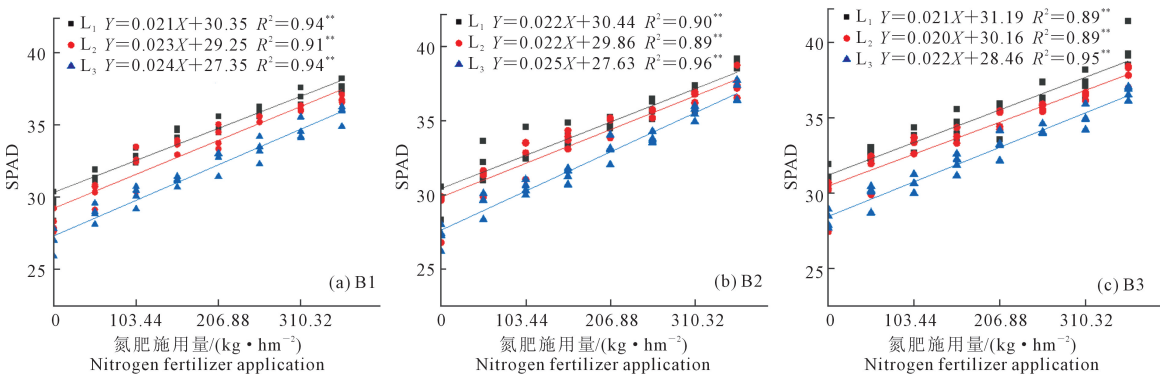


图 6 T3 时期不同穗肥下施氮量与顶部叶片 SPAD 值的关系

Fig.6 Relationship between nitrogen fertilization rate and SPAD value of top leaves under different panicle fertilizers during T3 period

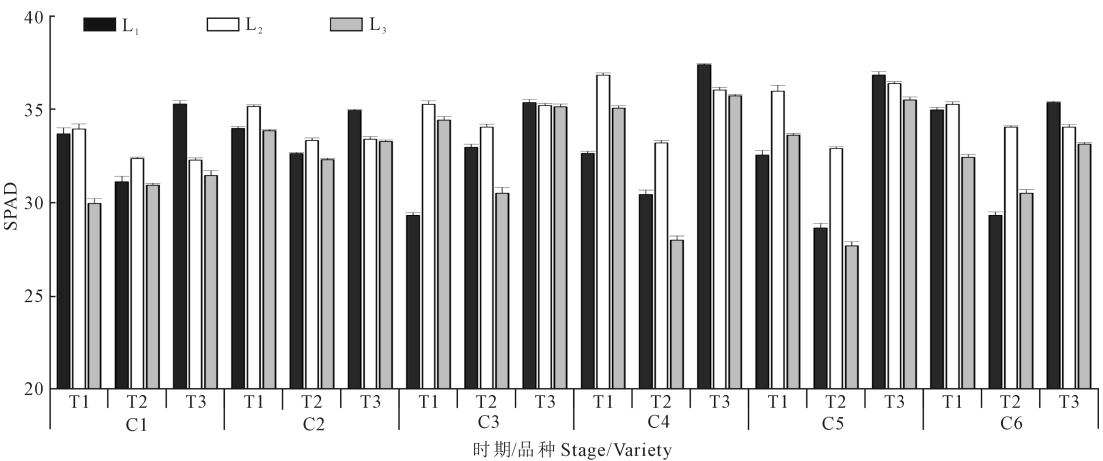


图 7 不同品种不同时期顶部叶片 SPAD 值的比较
Fig.7 Comparison of SPAD values in top leaves of different varieties at different stages

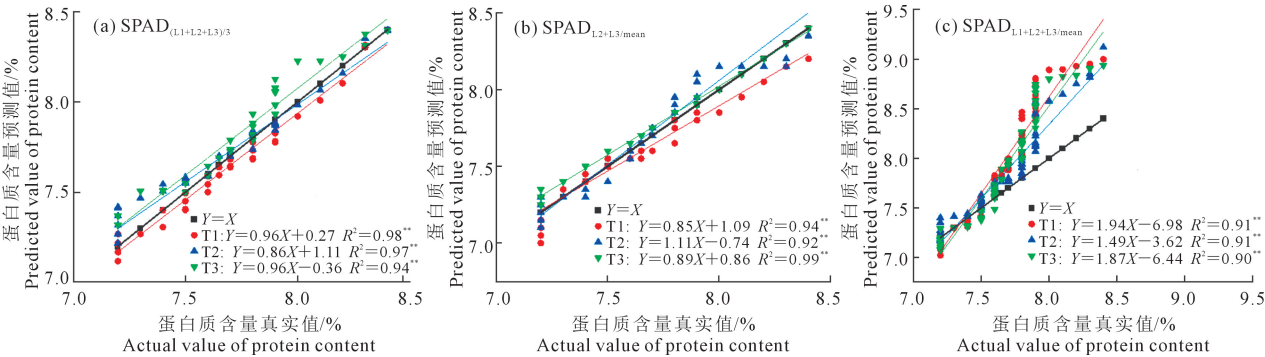
表 5 顶部叶片 SPAD 值及其衍生指标与蛋白质含量的相关性分析						
Table 5 Correlation analysis of canopy leaf SPAD and its derivative indexes and protein content						
指标 Indicator	氮肥梯度试验 Nitrogen fertilizer gradient test			品种试验 Variety test		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
SPAD _{L1}	0.80**	0.78**	0.83**	0.61	-0.56	0.22
SPAD _{L2}	0.79**	0.75**	0.82**	0.68	0.43	0.33
SPAD _{L3}	0.81**	0.83**	0.77**	0.19	0.91	0.65
SPAD _{(L1+L2)/2}	0.81**	0.82**	0.82**	0.69	0.41	0.76
SPAD _{(L1+L3)/2}	0.82**	0.83**	0.80**	0.27	0.47	0.36
SPAD _{(L2+L3)/2}	0.81**	0.83**	0.78**	0.47	0.87	0.87*
SPAD _{(L1+L2+L3)/3}	0.81**	0.83**	0.81**	0.85**	0.85**	0.86**
SPAD _{L2-L1}	0.48**	0.55**	-0.03	0.17	0.62	0.68
SPAD _{L3-L2}	-0.62**	-0.41**	-0.12	-0.57	-0.2	-0.36*
SPAD _{L3-L1}	-0.67**	-0.61**	-0.12	-0.57	-0.2	-0.16
SPAD _{(L2-L1)/(L2+L1)}	0.50**	0.55**	0.08	0.05	0.62	0.69
SPAD _{(L3-L2)/(L3+L2)}	-0.65**	-0.48**	-0.21*	-0.54	-0.27	-0.37
SPAD _{(L2-L1)/L2}	0.50**	0.54**	-0.08	0.03	0.02	-0.69*
SPAD _{(L3-L2)/L3}	-0.80**	0.83*	0.74*	-0.70*	0.28	0.39
SPAD _{(L2-L1)/L1}	0.50**	0.55**	-0.07	0.07	0.83	-0.61*
SPAD _{(L3-L2)/L2}	-0.65**	0.48**	0.2	-0.54*	0.26	-0.37
SPAD _{L1×L2/mean}	0.81**	0.82**	0.82**	0.24	0.62	0.46
SPAD _{L2×L3/mean}	0.81**	0.82**	0.82**	0.84**	0.82**	0.86**
SPAD _{L1×L2×L3/mean}	0.70*	0.83**	0.84**	0.72*	0.78*	0.89**

对表 5 筛选的指标进行回归分析,结果如表 6 所示,不同时期的衍生指标 SPAD_{(L1+L2+L3)/3}、SPAD_{L2×L3/mean}、SPAD_{L1×L2×L3/mean}与蛋白质含量拟合方程均为线性关系,SPAD_{(L1+L2+L3)/3}在 3 个时期的 R^2 分别为 0.75**、0.74**、0.72**,SPAD_{L2×L3/mean} R^2 分别为 0.75**、0.72**、0.72**,SPAD_{L1×L2×L3/mean} R^2 分别为 0.76**、0.77**、0.77**,均达到极显著水平。

表 6 不同时期 SPAD 指标和蛋白质含量的拟合方程					
Table 6 Fitting equations of SPAD index and protein content in different periods					
指标 Index	时期 Stage	回归方程 Regression equation	拟合优度 R^2	95%置信带 95% confidence band	95%预测带 95% prediction band
SPAD _{(L1+L2+L3)/3}	T1	$Y=0.24X-1.94$	0.75**	[5.41 : 7.74]	[5.22 : 8.02]
	T2	$Y=0.25X-1.69$	0.74**	[5.32 : 7.78]	[5.21 : 8.09]
	T3	$Y=0.27X-2.45$	0.72**	[5.54 : 7.69]	[5.43 : 8.00]
SPAD _{L2×L3/mean}	T1	$Y=0.22X-1.05$	0.75**	[5.63 : 7.73]	[5.52 : 8.04]
	T2	$Y=0.27X-2.43$	0.72**	[5.47 : 7.81]	[5.36 : 8.12]
	T3	$Y=0.26X-2.24$	0.72**	[5.31 : 7.82]	[5.21 : 8.13]
SPAD _{L1×L2×L3/mean}	T1	$Y=0.24X-1.78$	0.76**	[5.42 : 7.52]	[5.31 : 7.82]
	T2	$Y=0.18X+0.72$	0.77**	[5.38 : 7.63]	[5.27 : 7.94]
	T3	$Y=0.22X-0.86$	0.77**	[5.46 : 7.83]	[5.35 : 8.14]

2.5 测试与检验

利用试验 3 的试验资料对 SPAD 衍生指标与蛋白质含量的回归方程进行检验,采用根均方差 (RMSE)、对称平均绝对百分比误差 (SMAPE)、预测精度 ($P-k$) 进行定量评估。图 8 结果表明,SPAD_{(L1+L2+L3)/3}在 T1、T2、T3 时期的 $P-k$ 分别为 0.04、0.15、0.04,SPAD_{L2×L3/mean} 分别为 0.15、0.11、0.11,SPAD_{L1×L2×L3/mean} 3 个时期的预测值与真实值呈现一定的线性关系, R^2 达到极显著水平,但其与蛋白质含量基准线 ($Y=X$,预测值与真实值相同) 偏差较远,预测精度较差,其 $P-k$ 分别为 0.94、0.49、0.87。T1、T2、T3 时期 SPAD_{(L1+L2+L3)/3} 的 RMSE 分别为 0.07、0.07、0.11, SMAPE 分别为 0.71%、0.66%、1.16%,SPAD_{L2×L3/mean} 的 RMSE 分别为 0.09、0.10、0.07, SMAPE 分别为 0.98%、1.09%、0.75% (表 7)。因此,SPAD_{(L1+L2+L3)/3} 和 SPAD_{L2×L3/mean} 显示出模拟值和观测值间良好的拟合关系,较指标 SPAD_{L1×L2×L3/mean} 监测具有较高的敏感性和稳定性,指标 SPAD_{L1×L2×L3/mean} 在检测过程中可以排除。



注:预测精度($P-k$)为 $Y=X$ 的斜率 1 和真实值与预测值回归方程斜率之间差的绝对值, $P-k$ 越小,预测精度越高。
Note: The prediction accuracy ($P-k$) is the absolute value of the slope 1 of $Y=X$ and the slope of the regression equation between the real value and the predicted value. The smaller the $P-k$, the higher the prediction accuracy.

图 8 基于 $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ 、 $SPAD_{L2\times L3/mean}$ 、 $SPAD_{L1\times L2\times L3/mean}$ 的籽粒蛋白质含量真实值与预测值的 1 : 1 关系图
Fig.8 1 : 1 relationship between the actual value and predicted value of grain protein content based on $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$, $SPAD_{L2\times L3/mean}$, $SPAD_{L1\times L2\times L3/mean}$

表 7 SPAD 指标的 RMSE、SMAPE 值						
Table 7 RMSE and SMAPE values of SPAD indicators						
指标 Indicator	根均方差 RMSE			对称平均绝对百分比误差 SMAPE/%		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
$SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$	0.07	0.07	0.11	0.71	0.66	1.16
$SPAD_{L2\times L3/mean}$	0.09	0.10	0.07	0.98	1.09	0.75

3 讨 论

3.1 水稻顶部叶片 SPAD 值的动态变化特征

叶绿素是植物进行光合作用的主要化学物质,其含量的高低会直接影响作物的光合能力,而水稻对氮素的吸收、同化与运转能够影响其叶片的叶绿素含量^[23]。本研究结果表明,水稻不同时期和不同叶位的 SPAD 值与施氮量均呈现线性关系,并且提高氮肥的投入量能够减少叶位间 SPAD 的差值,这与李刚华等^[22] 研究结果一致。SPAD 叶绿素仪读数大小和植株氮素之间的关系取决于品种、施氮量及测定时期,氮肥的施用水平、施用时间等不同的田间管理措施不会改变施氮量与 SPAD 值的线性关系^[25],却能够改变水稻冠层叶片“黑黄”出现的时间以及交替变化波动的幅度^[26]。黄影华等^[27] 研究称不同水稻品种叶片 SPAD 值均随生育进程的推进表现为降低趋势,而其他研究认为水稻顶部叶片 SPAD 值的降低呈现的是二次动态下降,并非简单的线性降低,表现为叶片颜色“黑-黄-黑”交替^[28-29]。本试验的研究结果与后者一致,即 SPAD 值从幼穗分化期至孕穗期下降,进入抽穗期后开始回升,随着生育期的推进,齐穗期 SPAD 值又开始降低。通过分析,出现 SPAD 值动态变化的原因可能

是水稻在营养生长期顶部叶片积累了大量的氮素,氮素逐渐增加,致使叶片颜色加深,SPAD 值升高,随着生育期的推进,水稻生殖生长利用前期叶片积累氮素主要进行幼穗分化,叶片颜色变浅,SPAD 值降低。此后叶片持续光合,储存大量氮素,叶片可利用的氮素增加,致使叶片颜色加深,SPAD 值回升^[30]。水稻进入灌浆期直至成熟收获,叶片积累的氮素转移至稻米并合成蛋白质,叶片颜色越来越黄,SPAD 值会显著降低,所以成熟期叶片 SPAD 值越低,则顶部叶片残留的氮素含量较少,说明氮素向稻米转运的较多,从而稻米中的蛋白质含量合成较多^[31]。因此,叶片氮素含量与 SPAD 值和施氮量密切相关,叶绿素计读数在一定程度能够反映植株叶片及籽粒的氮质量分数。

3.2 SPAD 值动态变化特征与蛋白质含量的关系

SPAD 值动态变化很好地反映了水稻的生理代谢特征,SPAD 值较大时,叶片颜色表现为深绿,植株氮素充足,此时植株体内氮代谢较强,蛋白质合成较多^[26]。而 SPAD 值较小时,叶片的颜色表现为浅绿,则表明植株氮素不足,植株以碳代谢为主,氮代谢会衰退,此时蛋白质合成减弱但同化物积累增多^[32]。所以叶片 SPAD 值和蛋白质含量具有密切联系,前人在水稻^[17] 和其他作物中做了相关研究。王增裕等^[33] 发现小麦在花后第 4 周的周期内,籽粒含氮量与叶片含氮量的降低值表现为显著正相关关系。高飞等^[34] 研究表明有效预测小麦籽粒蛋白质含量的媒介是旗叶 SPAD 值的递减速率。张贤等^[35] 发现在白三叶营养生长期,叶片蛋白质含量与 SPAD 值呈正相关;在开花期内,两者之间呈负相关。王文石等^[36] 研究则表明黑麦草拔节期、孕穗期

叶片 SPAD 值与其干草中粗蛋白质含量表现出显著正相关。在本研究中,利用单叶片 SPAD 值预测蛋白质含量受品种差异影响较大,较难实现。而衍生指标 $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ 、 $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$ 、 $SPAD_{L1 \times L2 \times L3 / \text{mean}}$ 均与籽粒蛋白质含量呈正相关关系,3 个指标与蛋白质含量回归方程的 R^2 均达到了极显著水平,所以利用衍生指标可有效降低品种差异带来的影响。通过对指标进一步的测试与检验,指标 $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ 和 $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$ 显示出模拟值和观测值间良好的拟合关系,并且两个指标具有较高的敏感性和稳定性。指标 $SPAD_{L1 \times L2 \times L3 / \text{mean}}$ 预测精度较差的原因可能是 SPAD 值测定的精确度易受水稻品种、生长时期和生长环境等因素的影响^[37-38,28],而蛋白质受田间气候因素及环境影响会发生遗传变异^[39]。因此,借助 $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ 和 $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$ 指标可有效降低品种及环境差异带来的影响,实现在选种或收获前通过顶部叶片的 SPAD 值预测稻米蛋白质含量的目的,达到按质收获的要求。

3.3 稻米蛋白质含量对食味值的影响

蛋白质作为稻米重要组成成分,其含量相对较低,仅占稻米的 8% 左右,但对稻米食味品质有着不可忽视的作用^[40]。大部分学者认为稻米蛋白质含量偏高,会造成米饭硬度变大,黏度降低,色泽变差,稻米食味值显著下降^[41-42],也有学者研究发现稻米的蛋白质含量较高,其食味值不一定降低^[43-44]。本研究通过分析稻米蛋白质含量和食味值的关系(图 3)发现在一定范围内,稻米蛋白质含量与食味值呈线性负相关关系,这与前者的研究一致。而钱春荣等^[45]指出食味值与蛋白质含量并不是简单的线性关系,这与本试验研究结果不同。关于稻米蛋白质含量对食味值的影响机理,有学者提出稻米蛋白质含量影响食味品质的原因是前者能够影响淀粉结构的合成或作用于淀粉糊化过程而产生的间接效应,如 Martin 等^[46]、谢黎虹等^[47]用蛋白酶酶解蛋白质后,发现 RVA (Rapid Viscosity Analyser) 上升段的斜率发生变化,说明蛋白质通过水合改变淀粉的吸水量而影响米饭质地。还有研究认为如果蛋白质含量变高,会促使籽粒结构紧密,大量蛋白体填塞在淀粉体间的空隙而与淀粉紧密结合,打破蛋白质网络使淀粉糊化就需要更多的能量,同样会导致稻米淀粉糊化膨胀受到抑制^[48-49],从而降低蒸煮食味品质。所以稻米蛋白质含量增高致使食味品质降低是直接效应还是蛋白质作用于淀粉而产生的间接效应,还需要更为深入的研究才能确定。

4 结 论

通过分析 2020—2021 年试验处理间蛋白质含量、食味值、SPAD 值的差异,本研究得出以下结论:

(1) 增施氮肥会极显著提高稻米的蛋白质含量并降低其食味值;不同品种蛋白质含量差异较大,蛋白质含量较高的品种食味值偏低,且稻米食味值与蛋白质含量之间存在线性关系。

(2) 不同时期、不同叶位的 SPAD 值与施氮量均呈现线性关系,并且提高氮肥的投入量能减少叶位间 SPAD 值的差值。不同水稻品种的 SPAD 值分布差异较大,冠层叶色“黑黄交替”现象在不同施氮量、不同品种下均会出现。

(3) 筛选出的指标 $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ 、 $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$ 能够有效降低品种及环境差异对预测结果的影响,两个指标与蛋白质含量表现为线性关系。

综上,借助指标 $SPAD_{(L1+L2+L3)/3}$ 、 $SPAD_{L2 \times L3 / \text{mean}}$ 能够快速、无损、实时预测稻米蛋白质含量高低从而判定其蒸煮食味品质的优劣。

参 考 文 献:

- [1] BAXTER G, ZHAO J, BLANCHARD C. Albumin significantly affects pasting and textural characteristics of rice flour[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(3): 250-255.
- [2] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of glutelin and globulin on the physicochemical properties of rice starch and flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(2): 414-420.
- [3] 石吕, 张新月, 孙惠艳, 等. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(6): 541-552.
SHI L, ZHANG X Y, SUN H Y, et al. Relationship of grain protein content with cooking and eating quality as affected by nitrogen fertilizer at late growth stage for different types of rice varieties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(6): 541-552.
- [4] 徐令旗, 郭晓红, 张佳柠, 等. 不同有机肥对旱直播水稻品质的影响[J]. *华北农学报*, 2022, 37(1): 137-146.
XU L Q, GUO X H, ZHANG J N, et al. The effect of organic fertilizer on the quality of dry direct-seeding rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(1): 137-146.
- [5] 薛菁芳, 陈书强, 潘国君, 等. 粳稻不同粒位上粒重和食味与其他品质性状的关系[J]. *华北农学报*, 2015, 30(3): 129-135.
XUE J F, CHEN S Q, PAN G J, et al. Relationship between grain weight, taste quality and other quality traits at different grain positions of Japonica rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(3): 129-135.
- [6] 吕晓超, 封雪, 惠香, 等. 食品中蛋白质检测方法研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2022, (8): 143-145.
LYU X C, FENG X, HUI X, et al. Research progress of protein detection methods in food[J]. *China Food Safety Magazine*, 2022, (8): 143-145.
- [7] 于跃, 于海业, 李晓凯, 等. 优化光谱指数建立水稻叶片 SPAD 的高光谱反演模型[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(4): 1092-1097.

- YU Y, YU H Y, LI X K, et al. Hyperspectral inversion model for SPAD of rice leaves based on optimized spectral index[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(4): 1092-1097.
- [8] 刘井良, 王丽华, 李杰勤, 等. 10 个黑麦草品种叶片 SPAD 值、叶绿素含量和蛋白质含量的相关性研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(27): 83-86.
- LIU J L, WANG L H, LI J Q, et al. The correlation of SPAD, chlorophyll content and protein content in 10 ryegrass varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(27): 83-86.
- [9] CARRERES R, SENDRA J, BALLESTEROS R, et al. Effects of pre-flood nitrogen rate and midseason nitrogen timing on flooded rice[J]. The Journal of Agricultural Science, 2000, 134(4): 379-390.
- [10] 张银杰, 王磊, 白由路, 等. 玉米不同层位叶片生理生化指标与 SPAD 值的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1805-1817.
- ZHANG Y J, WANG L, BAI Y L, et al. Relationship of physiological and biochemical indicators with SPAD values in maize leaves at different layers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(10): 1805-1817.
- [11] 杨虹霞, 龙春瑞, 刘红明, 等. 不同柠檬品种叶片 SPAD 值、氮素含量与叶绿素含量相关性分析[J]. 热带农业科学, 2019, 39(8): 22-28.
- YANG H X, LONG C R, LIU H M, et al. Correlation analysis of different lemon varieties in leaf SPAD value and nitrogen and chlorophyll contents[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2019, 39(8): 22-28.
- [12] 马新明, 王志强, 王小纯, 等. 不同形态氮肥对不同专用小麦叶片氮代谢及籽粒蛋白质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1076-1080.
- MA X M, WANG Z Q, WANG X C, et al. Effects of different types of nitrogen fertilizer on leaves N-metabolism and grain protein of wheat cultivars with specialized end-uses[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1076-1080.
- [13] 王丽华, 曹鑫波, 左师宇, 等. 开花后小黑麦旗叶氮代谢与籽粒蛋白质形成的品种间差异[J]. 植物生理学报, 2018, 54(3): 401-410.
- WANG L H, CAO X B, ZUO S Y, et al. Differences in flag leaf nitrogen metabolism and grain protein formation among triticale varieties after anthesis[J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(3): 401-410.
- [14] 闫艳艳, 胡晨曦, 樊永惠, 等. 冬春季夜间增温对冬小麦植株氮代谢和籽粒蛋白质形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2): 203-212.
- YAN Y Y, HU C X, FAN Y H, et al. Effect of night warming in winter and spring seasons on plant nitrogen metabolism and grain protein formation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(2): 203-212.
- [15] 张丽, 张中东, 陶宏斌, 等. 利用玉米叶片 SPAD 值预测子粒蛋白质含量分析[J]. 玉米科学, 2014, 22(6): 74-79.
- ZHANG L, ZHANG Z D, TAO H B, et al. Analysis of chlorophyll SPAD value and grain protein content in maize[J]. Journal of Maize-Sciences, 2014, 22(6): 74-79.
- [16] 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的积累[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.
- [17] 王志东, 陈宜波, 龚蓉, 等. 优质籼稻剑叶 SPAD 值与稻米品质相关性研究[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(1): 89-97.
- WANG Z D, CHEN Y B, GONG R, et al. Correlation between SPAD value of flag leaf and rice quality of high quality indica rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, 35(1): 89-97.
- [18] ATA-UL-KARIM S T, YAO X, LIU X J, et al. Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches[J]. Field Crops Research, 2013, 149: 149-158.
- [19] 李杰, 冯跃华, 牟桂婷, 等. 基于 SPAD 值的水稻施氮叶值模型构建及应用效果[J]. 中国农业科学, 2017, 50(24): 4714-4724.
- LI J, FENG Y H, MU G T, et al. Construction and application effect of the leaf value model based on SPAD value in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(24): 4714-4724.
- [20] LIN F F, QIU L F, DENG J S, et al. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71, Supplement 1: S60-S65.
- [21] TIAN Y C, YAO X, YANG J, et al. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance[J]. Field Crops Research, 2011, 120(2): 299-310.
- [22] 李刚华, 薛利红, 尤娟, 等. 水稻氮素和叶绿素 SPAD 叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. 中国农业科学, 2007, (6): 1127-1134.
- LI G H, XUE L H, YOU J, et al. Spatial distribution of leaf N content and SPAD value and determination of the suitable leaf for N diagnosis in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, (6): 1127-1134.
- [23] 凌启鸿, 王绍华, 丁艳锋, 等. 关于用水稻“顶 3 顶 4 叶叶色差”作为高产群体叶色诊断统一指标的再论证[J]. 中国农业科学, 2017, 50(24): 4705-4713.
- LING Q H, WANG S H, DING Y F, et al. Re-evaluation of using the color difference between the top 3rd leaf and the 4th leaf as a unified indicator for high-yielding rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(24): 4705-4713.
- [24] 郑倩倩, 欧阳珮珮, 黄诚. 自动凯氏定氮仪测定食品中蛋白质消化条件的改进[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(10): 3209-3214.
- ZHENG Q Q, OU YANG P P, HUANG C. Improvement of digestion condition in determination of protein in food by automatic Kjeldahl apparatus[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(10): 3209-3214.
- [25] PENG S B, GARCÍA F V, LAZA R C, et al. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration[J]. Agronomy Journal, 1993, 85(5): 987-990.
- [26] 宋丽娟. 基于机载多光谱和 SPAD 的寒地梗稻氮素营养诊断研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- SONG L J. Study on nitrogen nutrition diagnosis for cold-terra rice based on airborne multispectral imager and SPAD[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [27] 黄影华, 张华杰, 陈秋玉, 等. 不同生育期水稻叶片 SPAD 值与产量相关性研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2021, 34(1): 1-7.
- HUANG Y H, ZHANG H J, CHEN Q Y, et al. Correlation between SPAD values of rice leaf and yield among different growth stages[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2021, 34(1): 1-7.
- [28] 俞敏祯, 余凯凯, 费聪, 等. 水稻冠层叶片 SPAD 数值变化特征及氮素营养诊断[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 950-956.
- YU M Y, YU K K, FEI C, et al. Characteristics and diagnosis of nitrogen nutrition for rice canopy leaf SPAD value changes[J]. Journal

- of Zhejiang A&F University, 2019, 36(5): 950-956.
- [29] 姜继萍, 杨京平, 杨正超, 等. 不同氮素水平下水稻叶片及相邻叶位 SPAD 值变化特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(2): 166-174.
- JIANG J P, YANG J P, YANG Z C, et al. Dynamic characteristics of SPAD value of rice leaf and adjacent leaf under different N application rates[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2012, 38(2): 166-174.
- [30] 李杰, 冯跃华, 王旭, 等. 水稻叶片 SPAD 值分布特征及其与施氮量的关系[J]. 南方农业学报, 2017, 48(1): 38-45.
- LI J, FENG Y H, WANG X, et al. Distribution characteristics of SPAD value in rice leaf and its relationship with nitrogen application rate[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(1): 38-45.
- [31] 胡柯鑫, 罗尊长, 董春华, 等. 化肥减施有机肥施用及秸秆还田下双季稻产量变化及光合特征研究[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 107-114.
- HU K X, LUO Z C, DONG C H, et al. Study on yield change and photosynthetic characteristics of double-cropping rice under organic fertilizer application and straw returning under reduced fertilizer application[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(5): 107-114.
- [32] 李文秀, 戴力, 王礼煌, 等. 多穗型与大穗型超级稻品种幼穗分化期碳氮代谢与产量构成[J]. 华北农学报, 2022, 37(4): 103-112.
- LI W X, DAI L, WANG L H, et al. Carbon and nitrogen metabolism and yield composition in multi-panicle and large-panicle super rice varieties at young panicle differentiation stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(4): 103-112.
- [33] 王增裕, 王健, 卢少源, 等. 不同类型小麦品种的氮素积累与籽粒灌浆研究——I 氮素积累的动态研究[J]. 河北农业大学学报, 1990, 13(2): 1-5.
- WANG Z Y, WANG J, LU S Y, et al. Study of nitrogen accumulation and grain filling of wheat varieties I kinetics of nitrogen accumulation[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 1990, 13(2): 1-5.
- [34] 高飞, 肖靖, 谷运红, 等. 利用小麦叶片 SPAD 值预测成熟期籽粒蛋白质含量的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1350-1354.
- GAO F, XIAO J, GU Y H, et al. Study on predicting protein content of wheat seeds by using wheat leaves SPAD value[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1350-1354.
- [35] 张贤, 晏荣, 曹文娟, 等. SPAD 及 FT-NIR 光谱法快速筛选白三叶种质蛋白质性状[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2388-2391.
- ZHANG X, YAN R, CAO W J, et al. Rapid selection of white clover germplasms' crude protein traits by SPAD and Fourier transform near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(9): 2388-2391.
- [36] 王文石, 田雨, 娄玉杰. 施用鸡粪对特高多花黑麦草 SPAD 值、干草产量和蛋白质含量的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 240-244.
- WANG W S, TIAN Y, LOU Y J. Effect of chicken manure application on SPAD value, hay yield and protein content of *Lolium multiflorum* cv. Tetragold[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3): 240-244.
- [37] VARINDERPAL-SINGH, BIJAY-SINGH, YADVINDER-SINGH, et al. Need based nitrogen management using the chlorophyll meter and leaf colour chart in rice and wheat in South Asia; a review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(3): 361-380.
- [38] 陈秋玉, 黄影华, 张华杰, 等. 不同生育期水稻叶片 SPAD 值与氮素指标相关关系[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17): 19-24, 27.
- CHEN Q Y, HUANG Y H, ZHANG H J, et al. Correlation between SPAD value and nitrogen indicators in rice leaves at different growth stages[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(17): 19-24, 27.
- [39] CHEN Y, WANG M, OUWERKERK P B F. Molecular and environmental factors determining grain quality in rice[J]. Food and Energy Security, 2012, 1(2): 111-132.
- [40] 王鹏跃, 沈庆霞, 路兴花, 等. 米蛋白及其组分与米饭物性及感官的关联特征研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 24-27.
- WANG P Y, SHEN Q X, LU X H, et al. Relevance features of rice protein and its components to physical and sensory properties of cooked rice[J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 24-27.
- [41] 陈莹莹. 江苏早熟晚粳品种稻米品质对氮肥的响应及其类型[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- CHEN Y Y. The response to nitrogen fertilizer of the quality properties of early-maturing late japonica rice in Jiangsu and its type[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [42] 芮闯, 刘莹, 孙建平. 蛋白质与大米食味品质的相关性分析[J]. 食品科技, 2012, 37(3): 164-167, 171.
- RUI C, LIU Y, SUN J P. The correlation analysis of protein and eating quality of rice[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(3): 164-167, 171.
- [43] 赵春芳, 岳红亮, 田铮, 等. 江苏和东北粳稻米理化特性及 Wx 和 OsSSIa 基因序列分析[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 878-888.
- ZHAO C F, YUE H L, TIAN Z, et al. Physicochemical properties and sequence analysis of Wx and OsSSIa genes in japonica rice cultivars from Jiangsu Province and Northeast of China[J]. Acta Agonomica Sinica, 2020, 46(6): 878-888.
- [44] 张春红, 李金州, 田孟祥, 等. 不同食味粳稻品种稻米蛋白质相关性状与食味的关系[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(6): 1126-1132.
- ZHANG C H, LI J Z, TIAN M X, et al. Relationship between protein-related traits and palatabilities of Japonica rice (*Oryza sativa* L.) with distinct taste[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(6): 1126-1132.
- [45] 钱春荣, 冯延江, 杨静, 等. 水稻籽粒蛋白质含量选择对杂种早代蒸煮食味品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 323-326.
- QIAN C R, FENG Y J, YANG J, et al. Effects of protein content selection on cooking and eating properties of rice in early-generation of crosses[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(3): 323-326.
- [46] MARTIN M, FITZGERALD M A. Proteins in rice grains influence cooking properties! [J]. Journal of Cereal Science, 2002, 36(3): 285-294.
- [47] 谢黎虹, 陈能, 段彬伍, 等. 稻米中蛋白质对淀粉 RVA 特征谱的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(5): 524-528.
- XIE L H, CHEN N, DUAN B W, et al. Effects of proteins on RVA viscosity properties of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(5): 524-528.
- [48] BALINDONG J L, WARD R M, LIU L, et al. Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 35-42.
- [49] NAKAMURA S, CUI J, ZHANG X, et al. Comparison of eating quality and physicochemical properties between Japanese and Chinese rice cultivars[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2016, 80(12): 2437-2449.