

DOI: 10.12357/cjea.20240344

CSTR: 32371.14.cjea.20240344

杨军, 章毅之, 张方亮, 段里成, 邹琳, 王尚明, 李迎春, 田俊, 刘丹, 张清霞, 吴风雨. 灌浆期高温对早稻光合性能和产量品质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 80–94

YANG J, ZHANG Y Z, ZHANG F L, DUAN L C, ZOU L, WANG S M, LI Y C, TIAN J, LIU D, ZHANG Q X, WU F Y. Effects of high temperature during the grain-filling stage on the photosynthetic performance, yield, and quality of early rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 80–94

灌浆期高温对早稻光合性能和产量品质的影响*

杨 军¹, 章毅之^{1**}, 张方亮¹, 段里成², 邹 琳³, 王尚明³, 李迎春¹,
田 俊¹, 刘 丹¹, 张清霞³, 吴风雨³

(1. 江西省气象科学研究所/气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室 南昌 330096; 2. 江西省农业气象中心 南昌 330096; 3. 江西省农业气象试验站/南昌市农业气象重点实验室 南昌 330200)

摘 要: 为研究不同高温条件对灌浆期早稻生长的影响及高温热害发生机理和灾害指标, 以主推品种‘湘早籼 45 号’为材料, 利用人工气候室开展早稻不同高温强度 (35、37、38、39、40 和 42 °C) 和持续天数 (3、5、7 和 10 d) 处理的试验, 以同期田间自然条件为对照, 分析不同高温条件对早稻光合性能和产量品质的影响, 研究早稻高温热害致灾机理和等级指标。结果表明: 与对照相比, 高温处理降低了剑叶叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 增加了秕谷率, 降低了千粒重和产量, 变幅与温度强度和持续天数成正比。高温降低了精米率、整精米率和直链淀粉含量, 增加了垩白粒率、垩白度和蛋白质含量, 改变了淀粉 RVA 谱特征。早稻高温热害等级指标为: $35 \leq \text{日最高气温}(T_{\max}) < 37\text{ °C}$ 且持续天数 (D_n) $\geq 3\text{ d}$ 或 $37 \leq T_{\max} < 38\text{ °C}$ 且 $3 \leq D_n < 6\text{ d}$ 属轻度, 对应 $0 < \text{有害积热}(H_a) \leq 11\text{ °C} \cdot \text{d}$, $0 < \text{产量降幅}(Y_d) \leq 10\%$; $37 \leq T_{\max} < 38\text{ °C}$ 且 $D_n \geq 6\text{ d}$ 或 $T_{\max} \geq 38\text{ °C}$ 且 $3 \leq D_n < 6\text{ d}$ 属中度, $11 < H_a \leq 22\text{ °C} \cdot \text{d}$, $10\% < Y_d \leq 20\%$; $T_{\max} \geq 38\text{ °C}$ 且 $D_n \geq 6\text{ d}$ 为重度, $H_a > 22\text{ °C} \cdot \text{d}$, $Y_d > 20\%$ 。因此, 日最高气温 $\geq 35\text{ °C}$ 持续 3 d 会降低早稻光合性能, 影响产量品质形成, 引起高温热害; 根据灾害指标可预估高温热害程度。研究结果可为早稻高温热害监测评估和农业防灾减灾提供科学参考。

关键词: 早稻; 灌浆期; 高温; 光合速率; 产量; 品质; 灾害指标

中图分类号: S166

Effects of high temperature during the grain-filling stage on the photosynthetic performance, yield, and quality of early rice*

YANG Jun¹, ZHANG Yizhi^{1**}, ZHANG Fangliang¹, DUAN Licheng², ZOU Lin³, WANG Shangming³,
LI Yingchun¹, TIAN Jun¹, LIU Dan¹, ZHANG Qingxia³, WU Fengyu³

(1. Meteorological Science Research Institute of Jiangxi Province / Jiangxi Provincial Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention, Nanchang 330096, China; 2. Agro-meteorological Center of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China; 3. Agro-meteorological Experiment Station of Jiangxi Province / Agro-meteorological Key Laboratory of Nanchang City, Nanchang 330200, China)

* 国家重点研发计划项目 (2022YFD2300203)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J083)、江西省自然科学基金项目 (20242BAB25194)、江西省气象科技项目 (QXKJ20240606) 和江西省重点研发计划项目 (20192BBFL60040) 资助

** 通信作者: 章毅之, 主要从事应用气象研究。E-mail: yizhi-zhang@qq.com

杨军, 主要从事农业气象研究。E-mail: 573286952@qq.com

收稿日期: 2024-06-13 接受日期: 2024-09-24

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2022YFD2300203), the Special Fund for Innovation Development of China Meteorological Administration (CXFZ2023J083), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20242BAB25194), the Meteorological Science and Technology Foundation of Jiangxi Province (QXKJ20240606), and the Key Research and Development Program of Jiangxi Province (20192BBFL60040).

** Corresponding author, E-mail: yizhi-zhang@qq.com

Received Jun. 13, 2024; accepted Sep. 24, 2024

<http://www.ecoagri.ac.cn>

Abstract: High temperatures are detrimental to the growth and development of early rice, particularly during the grain-filling stage. However, the specific responses to varying high temperatures and the related underlying mechanisms as well as the criteria for high-temperature stress in early rice remain unclear. In this study, the dominant rice variety in Hunan Province ‘Xiangzaoxian 45’ was used to investigate these aspects. Potted rice plants at the grain-filling stage were subjected to different high-temperature treatments in artificial climate chambers. The experiment was conducted in two phases, each with three temperature treatments ranging from 35 °C to 42 °C and lasting for four different durations: 3, 5, 7 and 10 days. The first phase (35, 38 and 40 °C) lasted from June 22 to July 1, 2023, while the second phase (37, 39 and 42 °C) lasted from July 2 to July 11, 2023. Each temperature treatment was applied daily from 12:00 to 17:00 under natural sunlight and controlled relative humidity of 80%. After treatment, the climate chambers were ventilated to ensure air circulation. At the end of each treatment cycle, the rice plants were returned to the field to grow naturally. Rice plants grown in the field during the same period served as the control group. The effects of high temperatures on the photosynthetic parameters, chlorophyll content, yield components, and grain quality of early rice were investigated, and the mechanism and grading index of high-temperature stress were analysed. The accuracy of the grading index was verified using meteorological and disaster data from typical years and planting counties. High temperatures resulted in decreases in the chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of flag leaves as well as 1000-grain weight and yield, and an increase in the blighted-grain rate compared with the respective results of the control group. These variations were proportional to the temperature intensity and duration. Furthermore, high-temperature treatments led to decreases in the milled rice and head milled rice rates and amylose content but an increase in the chalky grain rate, chalkiness and protein content. The starch viscosity characteristics (Rapid Visco Analyser profile) of early rice were also altered under different high-temperature treatments. The following grading index for high-temperature stress in early rice was established: a daily maximum temperature ($T_{\max}$) < 35 °C indicates no high-temperature stress; $35 \leq T_{\max} < 37$ °C and the number of consecutive days (D_n) < 3 d indicate no stress; $35 \leq T_{\max} < 37$ °C with $D_n \geq 3$ d or $37 \leq T_{\max} < 38$ °C with $3 \leq D_n < 6$ d represents mild stress, corresponding to $0 < \text{accumulated hot damaging temperature} (H_a) \leq 11$ °C·d and $0 < \text{decrease amplitude of rice yield} (Y_d) \leq 10\%$; $37 \leq T_{\max} < 38$ °C with $D_n \geq 6$ d or $T_{\max} \geq 38$ °C with $3 \leq D_n < 6$ d represents moderate stress, corresponding to $11 < H_a \leq 22$ °C·d and $10\% < Y_d \leq 20\%$; and $T_{\max} \geq 38$ °C with $D_n \geq 6$ d represents severe stress, corresponding to $H_a > 22$ °C·d and $Y_d > 20\%$. Verification using data from typical years and counties revealed an index accuracy of 85.45%. This suggests that a daily maximum temperature of 35 °C or higher for three consecutive days can inhibit photosynthetic performance, affect yield and quality formation, and cause high-temperature stress. We established a grading index for high-temperature stress in early rice on the basis of the daily maximum temperature and number of consecutive days of stress. This index divides stress into none, mild, moderate, and severe categories, with corresponding ranges for accumulated hot damaging temperature and decreased amplitude of rice yield. With this disaster index for early rice, predicting the level of high-temperature stress would be possible. These findings provide a scientific basis for monitoring and evaluating high-temperature stress in early rice, which could aid in reducing agricultural disasters and improving agricultural efficiency.

Keywords: early rice; grain-filling stage; high temperature; photosynthesis rate; yield; quality; disaster index

早稻 (*Oryza sativa*) 作为我国南方的主要粮食作物之一, 其产量与品质的稳定性对于保障国家粮食安全和农民经济收入具有重要意义。然而, 随着全球气候变暖, 高温热害事件频发^[1], 给早稻生产带来了严重的挑战, 特别是高温热害对早稻灌浆期的影响日益凸显^[2]。灌浆期是决定水稻产量和品质的关键时期, 此时的光合作用直接关系到稻谷中淀粉和蛋白质等有机物质的积累^[3]。高温胁迫下, 水稻籽粒灌浆过程受到多种生理生化机制的调控。首先, 高温会破坏水稻叶片的光合系统, 降低光合效率, 进而影响干物质的积累和转运。其次, 高温会加速叶片的衰老和死亡, 缩短叶片功能期, 进一步影响光合产物的供应。此外, 高温条件下, 水稻的呼吸作用会增强, 消耗更多的有机物, 导致籽粒充实不足, 粒重下降。同时, 高温还可能引起水稻生理代谢的紊乱, 如渗透调节能力和抗氧化能力 (超氧化物歧化酶和过

氧化物酶等活性) 降低, 激素平衡破坏, 活性氧生成增多以及细胞膜稳定性下降等, 进而影响籽粒的灌浆和成熟, 导致稻谷品质变差^[3-4]。淀粉的合成与积累是水稻籽粒灌浆过程中的核心环节。高温胁迫会干扰淀粉合成酶的活性, 影响淀粉粒的形成和排列, 进而影响稻米的碾米品质和外观品质。同时, 高温还会影响直链淀粉的积累, 改变稻米的蒸煮食味品质^[3,5]。总之, 籽粒灌浆期是水稻生长发育过程中对高温胁迫较为敏感的时期^[4], 高温胁迫下早稻灌浆期缩短, 成熟期提前, 千粒重和籽粒充实度下降, 秕谷率增加, 产量降低, 品质变差^[4-5]。当前对水稻灌浆期高温危害的作用机理研究较多, 但关于不同程度高温致灾的影响机制尚不够清晰。

建立科学的早稻高温热害等级指标对于指导早稻生产实践具有重要意义。当前, 关于高温热害等级指标的研究已经取得了一定的进展。中华人民共

和国农业行业标准《NY/T 2915—2016》^[6]规定,早稻灌浆期高温热害的温度指标为日平均温度 $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或日最高温度 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 连续 $\geq 3\text{ d}$,且每天高温持续时间 $\geq 5\text{ h}$ 。早稻高温耐性以其高温结实率与对照结实率的百分比大小进行划分,分为强耐热型、耐热型、中间型、不耐热型和极不耐热型 5 级。中华人民共和国国家标准《GB/T 37744—2019》^[7]规定,早稻灌浆期高温热害按强度等级分为单点热害强度等级、区域热害强度等级、致灾因子强度等级 3 类,分别采用有害积热、区域热害强度指数、最高气温或高温持续时间划分;按影响等级分为产量要素影响等级和区域热害影响等级 2 类,分别采用千粒重和区域热害指数划分;按灾损等级分为灾损程度等级,采用结实率和千粒重计算的热害损失率划分。强度等级(除致灾因子)、影响等级和灾损等级均划分为轻度、中度和重度 3 个等级。江西省地方标准《DB36/T 1758—2023》^[8]规定,单站和区域早稻高温热害评价等级各分为 3 个等级,以单站或区域早稻高温热害指数划分热害强度。也有学者们^[9-10]将平均气温 $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 3~4 d 定为轻度热害,持续 5~7 d 为中度热害,持续 8 d 及以上为重度热害。综上所述,早稻高温热害等级指标仍存在问题:一是对高温强度没有较好地分级细化,且灾害等级的影响不清晰;二是根据高温强度和持续时间等因素,结合水稻实际生长发育(如生理、产量和品质影响)情况,综合完善基于致灾机理的等级指标研究不够。

本文以主推早稻品种‘湘早籼 45 号’为材料,利用人工气候室开展不同高温强度和持续天数处理,分析灌浆期不同高温条件对早稻光合性能和产量品质的影响,研究早稻高温热害的致灾机理,综合高温强度、持续时间和水稻生长发育情况,完善基于致灾机理的高温热害等级指标,以期提升水稻高温热害监测评估水平、热害防控和农业防灾减灾能力提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料种植

试验于 2023 年在江西省农业气象试验站(28°31'N, 116°04'E)进行。以常规稻‘湘早籼 45 号’(湘审稻 2007002)为试验材料,该品种为湖南省主推水稻品种,推荐在湖南、湖北、江西、广西和福建等省(自治区)作双季早稻种植。试验于 3 月 25 日和 4 月 15 日进行分期播种。1 个月后挑选生长整齐一致的秧

苗移栽至塑料盆钵(口径 21.50 cm×底径 17.00 cm×深度 20.00 cm)中培育,每盆插秧 1 穴,每穴 1 苗。盆钵中的基质均为质地均一的壤土水稻土。盆钵直接布设在水稻试验田中,种植密度为 22.0 cm×23.0 cm,每期试验约 650 盆,两期共计约 1 300 盆。氮、磷和钾肥分别用尿素、钙镁磷肥和氯化钾,按氮 150 kg·hm⁻²(折合纯 N)、钾 150 kg·hm⁻²(折合 K₂O)和磷 90 kg·hm⁻²(折合 P₂O₅)的用量施肥,氮肥按基肥:蘖肥:穗肥为 5:2:3 施用,磷肥全部作基肥一次性施入,钾肥按基肥:穗肥为 5:5 施用。基肥于移栽前 2 d 施用,分蘖肥于移栽后 10 d 施用,穗肥于移栽后 35 d 施用。其他田间管理和病虫害防治与当地大田生产相同。

1.2 试验处理与环境状况

高温试验分两期进行,第 1 期(播种时间:3 月 25 日)高温试验设计 35、38 和 40 $^{\circ}\text{C}$ 共 3 个温度梯度;第 2 期(播种时间:4 月 15 日)高温试验设计 37、39 和 42 $^{\circ}\text{C}$ 共 3 个温度梯度。两期高温处理持续时间均设计为 3、5、7 和 10 d。每期试验中,在水稻抽穗后选取发育进程与长势基本一致的稻株进行挂牌标记,选取同一天开花的稻穗用红绳标记。当盆钵中稻株的主茎和一次分蘖茎安全齐穗进入灌浆期(抽穗开花后第 11 d)时,将已标记的盆钵随机移入 3 个人工气候室(SL1600F-TH3,浙江微松冷链科技有限公司)分别进行高温处理。气候室建在水稻田中,底部模拟水田环境,顶部为可移动的透明玻璃罩,每个气候室的规格为长 6.00 m×宽 4.00 m×高 3.60 m。每个处理组合约 50 盆,每个气候室约 200 盆。第 I 期高温试验(35、38 和 40 $^{\circ}\text{C}$)处理时间为 6 月 22 日至 7 月 1 日,第 II 期高温试验(37、39 和 42 $^{\circ}\text{C}$)处理时间为 7 月 2 日至 7 月 11 日。

同一温度不同天数处理从同一天开始高温处理,每天高温处理时段均为 12:00—17:00^[6],光照为自然光,相对湿度控制在 80%。每天高温处理结束后(17:00—次日 12:00),打开气候室顶部的玻璃罩和气候室四周玻璃门窗,保持透风透气。高温期间,水稻盆钵保持 2 cm 深的水层。如此循环,分别达到预定处理天数结束,并将水稻(带盆钵)移回水稻大田,让其自然生长。两期试验分别以同期田间盆钵生长的挂牌水稻为对照。在每个气候室中的水稻冠层附近,固定 2 个温湿度记录仪,每 0.5 h 自动记录 1 次数据。水稻生育期内的气温资料和试验期间对照温度数据从试验地附近 100 m 内的国家气象观测站获取。第 I 期和第 II 期试验水稻分别在 7 月 14 日和 7 月 29 日收获。

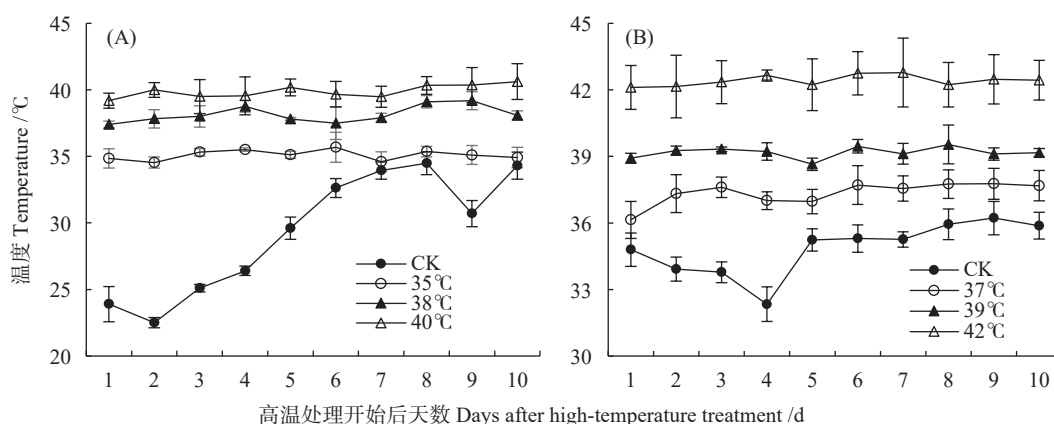
由图 1 可知, 处理时段各高温处理平均温度日变化比较平稳, 第 I 期对照温度整体呈上升趋势, 第 II 期对照温度相对较平稳。对照温度均低于各处理温度。第 I 期中, CK、35、38 和 40 °C 实际温度平均值分别为 29.35、35.10、38.16 和 39.89 °C。第 II 期中, CK、37、39 和 42 °C 实际温度平均值分别为 34.87、37.35、39.18 和 42.42 °C。因此, 各处理的设计温度与实际温度接近。

图 2 显示, 水稻生长季内 (3 月 25 日至 7 月 29 日) 的气温总体呈升高趋势, 日平均气温和日最高气温的均值分别为 24.24 和 28.22 °C。7 月 1 日至 7 月 15 日环境日平均气温和最高气温较高, 分别为 31.74 和

35.70 °C, 其中 7 月 6 日至 7 月 14 日最高气温为 36.00~37.40 °C, 说明第 II 期试验 CK 相当于一个 36~37 °C 9 d 的高温处理。高温最长处理时间为 10 d。第 I 期和第 II 期水稻搬出气候室的日期分别为 7 月 1 日和 7 月 11 日, 因此各高温处理实际为气候室和自然环境两重高温。因第 II 期高温处理设置为 37 °C 以上, 后续可进行结果分析。此外, 第 I 期试验水稻处于灌浆中后期, 7 月 1 日至 7 月 15 日的外界高温对其影响不大。

1.3 测定项目与方法

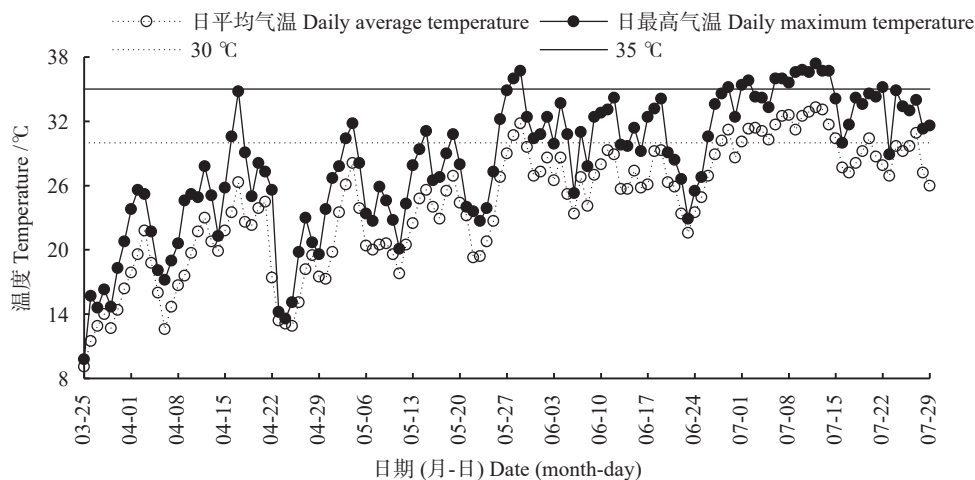
叶绿素含量测定。用 SPAD 值表示叶绿素含量。于高温处理开始后的第 5、10、15、20 天, 随机选取



高温处理的实际温度数据为处理时段气候室内逐小时温度平均值。外界环境 (CK) 温度为试验地附近 100 m 内国家气象观测站逐小时气温平均值。The actual temperature data of high-temperature treatments are shown as the averages of hourly temperature in the climate rooms during high-temperature treatment period. The ambient temperature (CK) data are shown as the averages of hourly temperature retrieved from a national meteorological observation station within 100 m near the experimental field.

图 1 高温处理期间每天 (12:00—17:00) 气候室和环境的温度变化 (A: I 期, 3 月 25 日播种; B: II 期, 4 月 15 日播种)

Fig. 1 Temperature changes of climate rooms and environment (CK) every day (12:00—17:00) during high-temperature treatment period (A: phase I, sowing on March 25; B: phase II, sowing on April 15)



气温数据取自试验地附近 100 m 内的国家气象观测站。The temperature data were retrieved from a national meteorological observation station within 100 m near the experimental field.

图 2 水稻生长季内自然环境的气温变化 (2023 年 3 月 25 日至 7 月 29 日)

Fig. 2 Changes in air temperature during the rice growing season under natural conditions (March 25 to July 29, 2023)

带红绳标记的稻穗,采用 SPAD-502 叶绿素仪开展剑叶叶绿素含量测定,在叶片中部区域附近测定 3 次取平均值,重复 10 次。

光合参数测定。各处理在测定叶绿素含量的同时,选择在上午 8:30—11:30,随机选取带红绳标记的 5 片叶,采用光合仪(Li-6800,美国 Li-COR 公司)测定光合参数,包括净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度。光合仪设置为:进入叶室的气体流速 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$,叶室混合扇转速 $10\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,水分 50%,温度 $30\text{ }^\circ\text{C}$,二氧化碳浓度 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,光强 $1\,800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (人工光源),重复 5 次。

产量构成分析。成熟期选取 12 株水稻带红绳标记的主茎和次二茎穗(约 120 穗)进行考种,统计穗粒数、空粒数和秕谷数以计算结实率和秕谷率,并脱粒晒干以考察千粒重和单株质量,4 次重复,每个重复 3 株(约 40 穗)。单株产量以每个植株红绳标记的主茎和次二茎穗稻谷产量进行计算。另外,计算产量与地上部分干物质总重(茎秆、叶片和种子)的比值。

稻米品质分析。稻米品质委托南昌赐尔极生物科技有限公司进行检测,按照《GB/T 17891—2017》^[11]的方法,测定稻米的碾米品质(糙米率、精米率和整精米率)、外观品质(垩白粒率和垩白度)、营养品质(蛋白质含量)以及蒸煮品质(直链淀粉含量)等指标,重复 3 次。稻谷收获后,放在室内阴凉处自然晾干。约 1.5 个月后,采用砻谷机(THU35C,日本佐竹)将稻谷脱壳碾磨成糙米,利用碾米机(TM05C,日本佐竹)将糙米磨成精米,计算糙米率和精米率。利用大米外观品质检测分析仪系统(SC-E,杭州万深检测科技有限公司)分析整精米率、垩白粒率和垩白度。之后用锤式旋风磨(JFS-13A,杭州钱江仪器设备有限公司)把精米加工成米粉,通过 0.10 mm 筛孔后作为蛋白质含量、直链淀粉含量和淀粉黏滞特性(RVA 谱)测定试样,采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量,利用碘蓝比色法测定直链淀粉含量^[11]。淀粉 RVA 谱可用于表征稻米品质变化。RVA 谱特征参数采用快速黏度分析仪(RVA-TecMaster,瑞典 Perten 波通仪器),按照《GB/T 24852—2010》^[12]进行测定。RVA 谱特征参数主要包括峰值黏度(PKV)、保持黏度(HDV)、最终黏度(FLV)、崩解值(BDV, PKV-HDV)和消减值(SBV, FLV-PKV)等,黏滞值用厘泊(cP)作单位。

高温热害等级指标及验证。基于产量降幅进行聚类分析,结合生理、产量和米质表现,对各高温处

理进行分类。之后,分析产量降幅与有害积热(H_a)的关系, H_a 为高温期间日最高气温高于 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 部分的累积量^[7],单位为摄氏度日($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$)。最后,综合考虑高温强度和持续时间、有害积热和产量降幅,确定早稻高温热害等级指标。根据杨建莹等^[13]和田俊等^[14-15]的研究成果,筛选早稻高温热害典型个例,包括发生地点(县)、灾害时段和实际灾害等级(1 级:轻度;2 级:中度;3 级:重度)。结合江西省气象局提供的灾害时段逐日最高气温资料,根据划定的早稻高温热害等级指标,计算灾害等级;对比印证灾害等级指标,统计指标验证吻合率。

1.4 数据统计方法

采用 SPSS 17.0 和 WPS Office 软件对数据进行统计分析。采用 SPSS 的单因素(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),利用平方欧氏距离进行系统聚类。利用 WPS Office 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同高温处理对早稻叶绿素含量的影响

表 1 显示,随生育进程推进,即随着高温处理下高温持续时间的增加,早稻剑叶叶绿素含量(SPAD 值)逐渐下降。与对照(CK)相比,高温处理降低了叶绿素含量,温度越高、天数越长,降幅越大。同一天数处理下,与 CK 相比,第 I 期的 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 处理使叶绿素含量平均分别降低 13.78%、19.01% 和 19.87%,差异均达显著水平($P<0.05$);第 II 期 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $39\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $42\text{ }^\circ\text{C}$ 处理的叶绿素含量平均降幅分别为 7.22%、8.71% 和 10.91%,差异均显著($P<0.05$)。同一温度下,第 I 期的高温持续 3、5、7 和 10 d 处理的叶绿素含量平均分别降低 12.48%、15.68%、20.62% 和 21.43%,差异均显著($P<0.05$);第 II 期高温持续 3、5、7 和 10 d 处理的叶绿素含量平均降幅分别为 5.74%、6.86%、10.95% 和 12.23%,差异均显著($P<0.05$)。

2.2 不同高温处理对早稻光合参数的影响

由表 2 可知,高温对早稻剑叶光合速率的影响较大。与 CK 相比,高温处理均降低了剑叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率和气孔导度。第 I 期高温处理的胞间 CO_2 浓度在处理 5 和 10 d 高于 CK,第 II 期高温处理的胞间 CO_2 浓度在处理 5 d 高于 CK。整体上,早稻光合性能与高温强度和持续天数成反比。从图 3 可看出,同一天数处理下, P_n 的平均降幅随温度升高而增加。与 CK 相比,第 I 期的 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$

表 1 不同高温处理对早稻剑叶叶绿素含量的影响
Table 1 Effects of different high-temperature treatments on the chlorophyll content of the flag leaves of early rice

期 Phase	处理 Treatment		叶绿素含量 Chlorophyll content (SPAD value)				与CK相比平均降幅 Average decrease amplitude compared to CK /%
	温度 Temperature /℃	持续天数 Duration /d	高温处理开始后天数 Days after high-temperature treatment /d				
			5	10	15	20	
I 期 (3月25日播种) Phase I (sowing on March 25)	35	CK	48.58±1.53a	47.44±1.39a	42.86±1.12a	35.91±1.12a	
		3	48.23±1.53ab	46.41±0.59ab	37.71±1.07b	26.47±1.66b	10.30±0.63 [*]
		5	47.83±1.48ab	45.50±1.29b	36.68±1.27b	26.19±0.23b	11.78±0.54 [*]
		7		45.39±1.20b	35.80±1.12bc	26.05±1.22b	16.08±0.97 [*]
		10		45.08±1.00bc	35.31±1.24c	25.77±1.18b	16.94±0.70 [*]
	38	3	46.86±1.31bc	44.15±0.38bcd	36.63±0.35b	26.18±1.17b	13.02±0.63 [*]
		5	45.69±1.49c	43.33±1.09de	32.96±1.25d	24.40±0.92c	17.45±0.79 [*]
		7		42.50±1.49e	32.28±1.15d	24.34±1.03c	22.44±1.07 [*]
		10		42.43±0.40e	32.01±0.71d	23.87±0.63c	23.14±1.02 [*]
	40	3	46.17±1.55c	43.91±0.55cd	35.93±0.53bc	25.91±0.24b	14.10±0.60 [*]
		5	45.60±1.46c	43.27±1.04de	32.52±0.86d	24.33±0.64c	17.82±0.76 [*]
		7		42.43±1.48e	31.33±1.18d	24.22±1.06c	23.34±1.13 [*]
		10		42.34±0.98e	31.01±0.96d	23.60±0.60c	24.23±0.82 [*]
		CK	46.19±1.52a	43.77±1.34a	39.07±1.12a	34.87±1.12a	
II 期 (4月15日播种) Phase II (sowing on April 15)	37	3	45.33±1.59ab	41.53±1.27b	37.49±1.16b	32.76±1.14b	4.26±0.23 [*]
		5	45.02±1.34ab	40.99±1.24bc	37.33±0.67b	32.25±1.19b	5.21±0.12 [*]
		7		40.33±1.35bc	36.79±0.43bc	30.03±1.12cd	9.19±0.44 [*]
		10		39.95±1.26cd	36.35±0.59bcd	29.67±1.18cde	10.20±0.41 [*]
	39	3	44.85±1.36ab	41.05±1.27bc	36.93±1.02bc	32.41±0.94b	5.41±0.15 [*]
		5	44.63±0.86b	40.95±0.98bc	36.05±0.90cd	31.98±0.62b	6.45±0.21 [*]
		7		39.89±1.33cd	35.71±0.77cde	29.16±1.23def	11.28±0.55 [*]
		10		39.87±1.21cd	35.54±0.39de	28.90±1.19ef	11.69±0.41 [*]
	42	3	44.30±1.35b	40.65±1.11bc	36.60±0.69bcd	30.48±1.13c	7.53±0.34 [*]
		5	44.20±0.77b	40.54±1.32bc	35.33±0.74de	29.83±1.12cde	8.92±0.33 [*]
		7		39.77±0.68cd	34.86±1.36ef	28.86±1.25ef	12.38±0.61 [*]
		10		38.76±0.91d	33.73±1.39f	28.15±1.05f	14.79±0.24 [*]

同期同列不同小写字母表示同期不同处理间差异显著($P<0.05$)。*表示与对照相比差异显著($P<0.05$)。与CK相比平均降幅为高温处理第5、10、15和20天降幅的平均值。Different lowercase letters in the same column in the same phase indicate significant differences among different treatments in the same phase ($P<0.05$). * indicates significant difference from CK ($P<0.05$). Average decrease amplitude compared to CK is the average value of decrease amplitudes at day 5, 10, 15 and 20 of high-temperature treatment.

处理的 P_n 分别平均降低 27.66%、34.06% 和 37.26%，差异均显著 ($P<0.05$)；第 II 期 37、39 和 42 °C 处理的 P_n 平均降幅分别为 16.96%、23.05% 和 28.42%，差异均显著 ($P<0.05$)。同一温度下， P_n 的平均降幅随高温持续天数的增加而升高。与 CK 相比，第 I 期高温持续 3、5、7 和 10 d 处理的 P_n 平均分别降低 23.21%、29.45%、37.18% 和 42.15%，差异均显著 ($P<0.05$)；第 II 期处理持续 3、5、7 和 10 d 处理的 P_n 平均降幅分别为 12.65%、17.71%、27.35% 和 33.51%，差异均显著 ($P<0.05$) (图 3)。

2.3 不同高温处理对早稻产量构成的影响

由表 3 可知，高温影响了早稻产量形成。与 CK 相比，高温处理降低了早稻穗粒数、结实率、千粒重、产量以及产量与地上部干物质重的比值(产量/地上部干物质重)，提高了秕谷率。总体来看，温度越高、持续天数越多，千粒重、产量、产量/地上部干

物质重的降幅越大，秕谷率增幅越大。同一天数处理下，产量的平均降幅随温度升高而增加。第 I 期的 35、38 和 40 °C 处理的产量分别平均降低 16.72%、21.64% 和 26.36%，差异均显著 ($P<0.05$)；第 II 期 37、39 和 42 °C 处理的产量平均降幅分别为 11.67%、13.47% 和 22.46%，差异均显著 ($P<0.05$)。与 CK 相比，同一温度下，产量的平均降幅随高温持续天数的增加而升高。第 I 期高温持续 3、5、7 和 10 d 处理的产量平均分别降低 17.86%、20.03%、22.96% 和 25.45%，差异均显著 ($P<0.05$)；第 II 期处理高温持续 3、5、7 和 10 d 处理的产量平均降幅分别为 10.15%、15.05%、17.12% 和 21.15%，差异均显著 ($P<0.05$)。

结合高温处理下产量的降幅变化，初步判断第 I 期试验中 35 °C 所有处理的高温热害程度相对较轻，38 和 40 °C 所有处理的热害程度相对较重；第 II 期中 37 °C-3 d 和 37 °C-5 d 处理的热害程度相对较

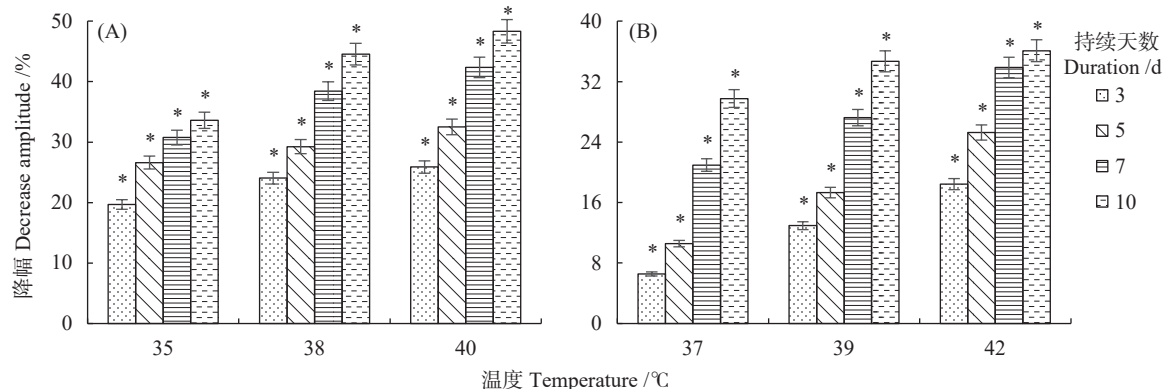
表 2 不同高温处理对早稻剑叶光合参数的影响
Table 2 Effects of different high-temperature treatments on the photosynthetic parameters of the flag leaves of early rice

期 Phase	处理 Treatment		净光合速率 Net photosynthetic rate (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)				蒸腾速率 Transpiration rate (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)			
	温度 Temperature /°C	持续天数 Duration /d	高温处理开始后天数 Days after high-temperature treatment							
			5	10	15	20	5	10	15	20
I 期 (3月25日播种) Phase I (sowing on March 25)	35	CK	26.15±0.71a	23.43±0.91a	18.22±0.42a	12.87±0.36a	18.73±0.14a	18.24±0.33a	15.50±0.06a	12.60±0.08a
			24.07±0.21b	19.99±0.36b	12.34±0.47b	9.80±0.31b	18.15±0.23ab	17.98±0.24a	13.30±0.20b	9.39±0.08b
			21.69±0.38c	18.37±0.76c	12.24±0.35b	8.38±0.32cd	17.66±0.50bc	17.19±0.38b	12.63±0.07bc	8.50±0.07c
				18.33±0.41c	11.94±0.51bc	8.23±0.01cd		16.51±0.22c	12.12±0.05c	8.11±0.01cd
				17.13±0.35d	11.77±0.37bc	7.92±0.32d		16.41±0.53cd	11.92±0.10cd	8.06±0.03cd
	38	CK	22.18±0.47c	19.37±0.12b	11.71±0.14bc	9.28±0.35b	17.57±0.19bcd	17.45±0.46b	11.35±0.08d	8.93±0.11b
			20.53±0.43d	17.80±0.45cd	11.67±0.29bc	8.31±0.28cd	17.42±0.15cd	17.10±0.25b	10.38±0.06e	7.99±0.10cd
				15.38±0.39e	10.05±0.32d	8.22±0.26cd		15.91±0.37de	9.59±0.04f	6.84±0.05e
				14.45±0.16ef	9.29±0.13e	6.92±0.26e		15.78±0.15de	9.45±0.08f	6.69±0.03e
				19.13±0.45b	11.51±0.41bc	8.71±0.32c		17.22±0.10b	10.74±0.14de	7.73±0.06d
II 期 (4月15日播种) Phase II (sowing on April 15)	37	CK	20.34±0.38d	16.99±0.36d	11.45±0.32c	7.32±0.21e	16.96±0.41d	16.93±0.47bc	10.16±0.05e	5.69±0.06f
				15.18±0.22e	9.95±0.40d	6.90±0.08e		15.79±0.32de	9.53±0.11f	5.57±0.03f
				13.82±0.39f	9.13±0.13e	5.92±0.21f		15.69±0.15e	9.37±0.03f	5.42±0.01f
				21.94±0.39a	16.26±0.47a	14.75±0.63a		17.40±0.12a	11.99±0.50a	14.47±0.07a
				21.78±0.32a	15.97±0.17a	11.73±0.21b		16.96±0.22a	11.27±0.20b	12.45±0.59b
	39	CK	23.43±0.29b	21.42±0.81a	15.51±0.05ab	11.05±0.32c	17.66±0.33b	15.79±0.62b	10.75±0.45c	10.93±0.08c
				16.91±0.30d	15.00±0.21b	10.01±0.38d		15.70±0.46b	10.64±0.42c	10.82±0.36c
				16.74±0.45d	11.00±0.25e	9.84±0.38d		14.98±0.29c	7.49±0.08e	8.86±0.44f
				20.42±0.60b	15.81±0.09a	10.99±0.52c		16.59±0.31a	10.53±0.31c	11.13±0.48c
				20.18±0.23b	14.04±0.31c	10.60±0.34c		15.38±0.39bc	8.83±0.25d	10.83±0.41c
42	CK		15.99±0.67e	13.22±0.12d	9.46±0.18d		14.25±0.42d	8.75±0.11d	9.99±0.34de	
			15.60±0.46e	10.46±0.12ef	8.93±0.19e		13.07±0.45e	7.06±0.34e	8.62±0.41f	
			18.42±0.10c	14.33±0.25c	10.90±0.32c		15.78±0.16b	8.59±0.09d	11.09±0.47c	
			18.34±0.19c	11.40±0.32e	9.66±0.44d		14.83±0.24c	5.75±0.23f	10.39±0.39cd	
			15.83±0.45e	10.25±0.29f	9.33±0.37de		13.43±0.66de	5.58±0.27f	9.51±0.41e	
					15.54±0.06e	9.88±0.43f	8.87±0.04e	11.43±0.40f	5.42±0.23f	7.15±0.13g

续表 2

期 Phase	处理 Treatment		气孔导度 Stomatal conductance / (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)					胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration / (μmol · mol ⁻¹)				
	温度 Temperature /°C	持续天数 Duration /d	高温处理开始后天数 Days after high-temperature treatment					treatment / d				
			5	10	15	20	5	10	15	20		
I 期 (3月25日播种) Phase I (sowing on March 25)	35	CK	1 231±21a	1 182±32a	898±24a	619±25a	345±9a	349±5a	351±6a	348±9a		
			1 149±18b	1 132±11b	716±33b	405±18b	350±1a	353±0a	349±8a	345±8a		
			1 133±30b	1 065±32cd	657±30b	313±12c	353±2a	354±11a	350±8a	331±9bcd		
				1 018±17e	604±15c	309±1c		355±6a	351±6a	329±10bcd		
				1 008±45e	593±25c	271±3de		355±4a	349±10a	347±10a		
	38	3	1 149±2b	1 082±26c	588±27c	392±16b	351±2a	354±1a	346±11a	338±11abc		
			1 128±14b	1 031±17de	582±21c	272±10d	354±2a	355±6a	350±6a	341±12ab		
				907±21f	474±14de	254±10def		357±9a	346±10a	323±2d		
				888±10f	466±21de	254±1def		357±4a	345±11a	343±9ab		
			1 147±14b	1 075±20c	527±24d	305±13c	352±3a	355±4a	348±10a	329±12bcd		
II 期 (4月15日播种) Phase II (sowing on April 15)	40	5	1 125±35b	1 022±34e	501±22d	256±7def	355±1a	357±7a	343±10a	325±10cd		
				874±22f	443±11ef	246±1ef		358±5a	345±5a	326±10cd		
				872±5f	407±6f	241±5f		362±2a	346±6a	344±8a		
			1 247±13a	1 119±29a	699±27a	894±11a	322±15b	350±7a	344±11a	360±11a		
			1 093±9b	991±26b	654±4b	769±34b	333±4b	334±12bc	324±16cd	354±12ab		
	37	5	1 013±15c	928±37c	581±5c	605±4c	348±6a	350±4a	338±15ab	339±9c		
				848±29d	515±21d	545±20d		350±11a	341±16a	353±10abc		
				684±25f	363±2f	426±11f		339±11abc	312±13ef	345±13bc		
			935±7d	912±24c	571±18c	598±24c	335±8b	350±7a	339±15ab	349±17abc		
			896±18d	848±26d	507±22d	541±20d	349±5a	341±15ab	319±12de	345±15bc		
	39	7		712±27f	432±6e	469±14e		342±10ab	335±6abc	346±10bc		
				627±27g	344±3f	392±17g		339±12abc	329±15bcd	350±15abc		
				779±29e	417±5e	548±20d	335±6b	329±14cd	328±13bcd	342±13bc		
			806±7e	751±14e	231±9h	527±21d	349±1a	338±9abc	299±13g	348±12abc		
			790±6e	663±24fg	226±9h	441±17f		334±11bc	304±12fg	346±4bc		
		10		473±17h	287±11g	292±5h		321±16d	336±14abc	336±4c		

同期同列不同小写字母表示同期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters in the same column in the same phase indicate significant differences among different treatments in the same phase ($P < 0.05$).



表示与对照相比差异显著 ($P<0.05$)。降幅为高温处理第 5、10、15 和 20 天降幅的平均值。 indicates significant difference from CK ($P<0.05$). The decrease amplitude is the average value of decrease amplitudes at day 5, 10, 15 and 20 of high-temperature treatment.

图 3 不同高温处理下早稻剑叶净光合速率的降幅 (A: I 期, 3 月 25 日播种; B: II 期, 4 月 15 日播种)

Fig. 3 Decrease amplitudes of net photosynthesis rate of flag leaves of early rice under different high-temperature treatments (A: phase I, sowing on March 25; B: phase II, sowing on April 15)

表 3 不同高温处理对早稻产量构成的影响

Table 3 Effects of different high-temperature treatments on the yield components of early rice

期 Phase	处理 Treatment		穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-set rate / %	秕谷率 Blighted-grain rate / %	千粒重 1000-grain weight / g	产量 Yield		产量/地上部干 物质重 Yield / above-ground dry matter mass
	温度 Temperature / °C	持续天数 Duration / d					数值 Value /(g·plant ⁻¹)	降幅 Decrease amplitude / %	
I 期 (3月25日 播种) Phase I (sowing on March 25)	35	CK	100.38±3.29a	92.01±1.76a	1.87±0.11g	26.18±0.15a	30.55±0.63a		2.40±0.07a
		3	100.11±3.06a	88.28±1.77bcd	2.00±0.08f	25.99±0.42ab	26.09±0.53b	14.60±0.58*	2.38±0.06a
		5	96.09±3.07abc	90.45±0.61ab	2.01±0.17f	25.35±0.10abc	25.78±0.50bc	15.62±0.62*	2.35±0.09a
		7	94.85±1.68bcd	89.39±2.14abc	2.10±0.12e	25.20±0.46bc	24.95±0.31cd	18.32±0.73*	2.25±0.02bc
	38	10	98.16±3.21ab	88.02±2.44bcd	2.11±0.17e	25.14±0.42bc	24.94±0.97cd	18.36±0.73*	2.23±0.06bc
		3	94.51±3.05bcd	87.47±1.04bcd	2.05±0.10ef	25.43±0.42abc	25.10±0.35bcd	17.83±0.71*	2.31±0.06ab
		5	94.45±2.79bcd	88.98±2.70abcd	2.11±0.11e	25.24±0.21bc	24.63±0.37cd	19.37±0.77*	2.20±0.06cd
		7	97.28±3.17ab	87.53±1.22bcd	2.41±0.05c	25.14±0.20bc	23.07±0.07ef	24.49±0.98*	2.17±0.06cde
	40	10	95.93±2.17abc	87.54±1.94bcd	2.44±0.28bc	25.11±0.19c	22.95±0.73ef	24.86±0.99*	2.09±0.04ef
		3	91.33±1.87d	89.04±2.30abcd	2.24±0.07d	25.42±0.11abc	24.09±0.73de	21.14±0.85*	2.12±0.09def
		5	91.46±1.94cd	86.92±2.66cd	2.39±0.08c	25.21±0.24bc	22.88±0.51ef	25.11±1.00*	2.10±0.05ef
		7	91.94±2.47cd	85.92±2.06d	2.53±0.23ab	25.10±0.36c	22.59±0.84f	26.06±1.04*	2.07±0.08f
II 期 (4月15日 播种) Phase II (sowing on April 15)	37	10	90.60±1.94d	85.70±1.49d	2.55±0.20a	25.06±0.09c	20.43±0.49g	33.14±1.33*	1.94±0.02g
		CK	83.95±2.03a	90.72±1.06a	0.72±0.02g	25.84±0.55a	26.68±0.75a		2.04±0.05a
		3	83.08±2.06ab	89.72±1.14a	0.76±0.03f	25.19±0.02ab	25.30±0.48b	5.18±0.21*	1.94±0.05b
		5	80.62±2.60bc	88.82±2.13ab	0.80±0.07e	25.12±0.59ab	23.52±0.36c	11.85±0.47*	1.90±0.05b
	39	7	83.80±2.36a	88.35±1.41abc	0.82±0.06e	25.10±0.18ab	23.16±0.15cd	13.19±0.53*	1.88±0.07bc
		10	79.59±2.47c	86.16±1.56bcd	0.94±0.06b	24.89±0.40b	22.29±0.50e	16.46±0.66*	1.82±0.07cd
		3	80.44±1.24bc	88.01±0.48abcd	0.80±0.01e	24.93±0.52b	24.00±0.30c	10.04±0.40*	1.91±0.03b
		5	79.18±2.23c	85.43±2.51cd	0.82±0.08e	24.88±0.33b	23.50±0.67cd	11.91±0.48*	1.87±0.08bc
	42	7	80.94±2.15abc	84.75±2.16d	0.87±0.05d	24.65±0.67bc	22.61±0.39de	15.24±0.61*	1.79±0.05d
		10	82.21±1.69abc	85.52±2.14cd	0.98±0.09b	24.55±0.33bc	22.22±0.62e	16.71±0.67*	1.78±0.04de
		3	82.06±2.22abc	80.23±2.70e	0.91±0.09c	24.90±0.38b	22.61±0.23de	15.24±0.61*	1.82±0.05cd
		5	82.60±2.03abc	80.79±2.19e	0.96±0.08b	24.76±0.08bc	20.98±0.33f	21.38±0.86*	1.81±0.04cd
		7	83.53±2.67a	80.97±2.33e	1.05±0.03a	23.95±0.45cd	20.56±0.18f	22.95±0.92*	1.71±0.07e
		10	83.61±2.23a	79.81±2.67e	1.04±0.02a	23.33±0.72d	18.60±0.42g	30.29±1.21*	1.55±0.06f

同期同列不同小写字母表示同期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示与对照相比差异显著 ($P<0.05$)。产量以每个植株红绳标记的主茎和次二茎穗稻谷产量进行计算。地上部干物质总重包括茎秆、叶片和种子的重量。Different lowercase letters in the same column in the same phase indicate significant differences among different treatments in the same phase ($P<0.05$). * indicates significant difference from CK ($P<0.05$). The yield was calculated based on the rice yield of primary and secondary stems marked by the red rope of each plant. The total above-ground dry matter mass includes the weight of stems, leaves and seeds.

轻, 其余处理的热害程度相对较重。

2.4 不同高温处理对稻米品质的影响

由表 4 和图 4 可知, 高温影响了早稻米品质形成;

总体来看, 高温处理显著提高了垩白粒率、垩白度和蛋白质含量 ($P<0.05$), 温度越高, 天数越长, 影响越大。高温降低了糙米率、精米率、整精米率和直链

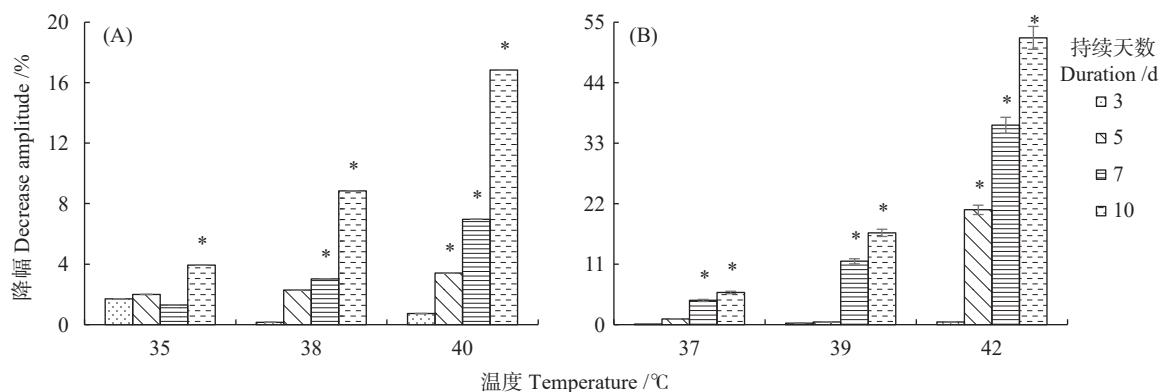
表 4 不同高温处理对早稻稻米品质的影响

Table 4 Effects of different high-temperature treatments on the grain quality of early rice

%

期 Phase	处理 Treatment		糙米率 Brown rice rate	精米率 Milled rice rate	整精米率 Head milled rice rate	垩白粒率 Chalky grain rate	垩白度 Chalkiness	直链淀粉含量 Amylose content	蛋白质含量 Protein content
	温度 Temperature /°C	持续天数 Duration /d							
I 期 (3月25日播种) Phase I (sowing on March 25)	35	CK	80.77±0.19a	68.69±0.39a	57.32±0.12a	17.89±0.51g	5.79±0.36g	14.25±0.31a	6.51±0.14f
		3	80.67±0.28a	68.65±0.21a	56.35±1.11abc	21.06±0.24f	7.04±0.08f	14.18±0.18a	6.93±0.10e
		5	80.72±0.12a	68.40±1.11a	56.17±0.35abc	21.11±0.42f	7.46±0.35f	14.01±0.36ab	7.07±0.06cde
		7	80.67±0.01a	68.65±0.42a	56.58±0.44abc	25.76±0.28e	8.84±0.32d	13.58±0.37bd	7.37±0.01ab
	38	10	80.52±0.24a	67.93±0.16ab	55.07±0.04c	26.87±1.30d	8.98±0.37d	13.28±0.04c	7.40±0.14ab
		3	80.75±0.12a	68.21±0.38ab	57.24±0.19a	24.47±0.61e	7.87±0.15e	13.96±0.09ab	7.00±0.06de
		5	80.74±0.12a	68.21±0.27ab	56.02±0.05abc	28.19±1.06d	8.74±0.14d	14.19±0.28a	7.21±0.04bcd
		7	80.40±0.22a	67.13±0.31ab	55.59±0.04bc	30.74±0.76c	9.02±0.21d	13.30±0.56c	7.39±0.12ab
	40	10	80.58±0.30a	66.38±0.61b	52.25±1.42e	36.06±1.81b	11.18±0.21b	13.21±0.52c	7.53±0.12a
		3	80.55±0.25a	68.24±0.73ab	56.90±0.22ab	32.07±0.96c	9.47±0.04c	14.12±0.44a	7.28±0.12bcd
		5	80.59±0.08a	67.48±0.12ab	55.37±0.14bc	37.20±1.01b	11.48±0.50b	12.64±0.27d	7.38±0.09ab
		7	80.21±0.12a	66.85±0.06ab	53.34±0.48de	39.01±0.03a	12.41±0.27a	12.25±0.09d	7.40±0.14ab
		10	80.03±0.16a	64.19±0.92c	47.68±1.50f	40.52±0.18a	12.77±0.22a	12.20±0.27d	7.61±0.10a
	37	CK	80.87±0.10a	67.98±0.07a	52.56±0.44a	34.08±0.74h	10.18±0.09g	13.85±0.03a	6.25±0.01e
		3	80.75±0.01a	67.90±0.22a	52.53±0.23a	35.21±1.66g	10.47±0.28f	13.75±0.02ab	6.63±0.22d
		5	80.70±0.04a	67.04±0.19ab	52.03±0.82a	38.40±1.31f	11.17±0.21e	13.63±0.49abc	7.05±0.01c
		7	80.74±0.14a	67.17±0.12ab	50.26±0.01b	40.55±1.31ef	11.96±0.44de	13.39±0.54bcd	7.06±0.11c
		10	80.70±0.02a	67.03±0.03ab	49.50±0.50b	44.31±1.58e	12.60±0.44cd	13.18±0.48cd	7.09±0.16c
	39	3	80.64±0.10a	67.92±0.16a	52.43±0.73a	35.24±0.47g	10.55±0.16f	13.68±0.59ab	6.79±0.18d
		5	80.65±0.09a	67.16±0.20ab	52.32±0.20a	38.52±1.35f	11.25±0.22e	13.52±0.35abc	7.47±0.07b
		7	80.13±0.43a	66.02±0.15bc	46.51±0.81c	49.48±0.71d	16.35±0.40b	13.31±0.28bcd	7.51±0.15b
		10	80.31±0.27a	65.85±0.16bc	43.80±0.72d	51.19±0.46d	15.83±0.32b	13.03±0.20d	7.57±0.05b
II 期 (4月15日播种) Phase II (sowing on April 15)	42	3	80.69±0.07a	67.23±0.36ab	52.31±0.83a	41.67±0.13ef	13.46±0.49c	13.60±0.02abc	7.20±0.04c
		5	80.82±0.17a	65.86±0.03bc	41.59±1.44d	64.56±1.61c	24.09±0.50a	13.41±0.23bcd	7.69±0.16b
		7	79.60±0.27a	63.91±0.06cd	33.51±0.68e	72.01±1.74b	29.40±0.47a	13.25±0.04cd	7.74±0.08b
		10	79.09±0.57a	62.99±1.47d	25.14±1.48f	81.43±1.52a	36.14±0.58a	13.02±0.01d	8.05±0.10a

同期同列不同小写字母表示同期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same column in the same phase indicate significant differences among different treatments in the same phase ($P<0.05$).



表示与对照相比差异显著 ($P<0.05$)。 indicates significant difference from CK ($P<0.05$).

图 4 不同高温处理下整精米率的降幅 (A: I 期, 3 月 25 日播种; B: II 期, 4 月 15 日播种)

Fig. 4 Decrease amplitudes of head milled rice rate (A: phase I, sowing on March 25; B: phase II, sowing on April 15) of early rice under different high-temperature treatments

淀粉含量。所有高温处理对糙米率的影响均不显著 ($P>0.05$)。对于精米率,影响较大的处理为 38 °C-10 d、40 °C-7 d、40 °C-10 d、39 °C-7 d、39 °C-10 d、42 °C-5 d、42 °C-7 d 和 42 °C-10 d (表 4)。对整精米率影响显著的处理为 35 °C-10 d、38 °C-7 d、38 °C-10 d、40 °C-5 d、40 °C-7 d、40 °C-10 d、37 °C-7 d、37 °C-10 d、39 °C-7 d、39 °C-10 d、42 °C-5 d、42 °C-7 d 和 42 °C-10 d (图 4A 和 4B)。对直链淀粉含量影响显著的处理为 35 °C-7 d、35 °C-10 d、38 °C-7 d、38 °C-10 d、40 °C-5 d、40 °C-7 d、40 °C-10 d、37 °C-7 d、37 °C-10 d、39 °C-7 d、39 °C-10 d、42 °C-5 d、42 °C-7 d 和 42 °C-10 d。

淀粉 RVA 谱是稻米的一项重要品质特性, RVA 谱特征参数中的崩解值和消减值与稻米蒸煮食味品质关系最为密切^[16]。优质品种普遍表现出崩解值大和消减值小的特点,劣质品种则相反^[17]。表 5 显示,高温影响了淀粉 RVA 谱特征。第 I 期的 38 °C-10 d

和 40 °C 所有处理、第 II 期的 39 °C-10 d 和 42 °C 所有处理表现为 PKV、HDV、FLV 和 BDV (PKV-HDV) 下降, SBV (FLV-PKV) 上升, 表明淀粉黏滞特性变差。第 I 期的 38 °C (3、5 和 7 d) 和 35 °C 所有处理、第 II 期的 39 °C (3、5 和 7 d) 和 37 °C 所有处理表现为 PKV、HDV、FLV 和 BDV 上升, SBV 下降, 表明淀粉黏滞特性表现好。

2.5 早稻高温热害等级指标及验证

因第 II 期试验对照相当于一个 36~37 °C 的高温处理, 以第 I 期对照为基础对照进一步分析发现, 第 II 期对照产量比第 I 期对照下降 12.67%。为更好地进行下一步聚类, 第 II 期各高温处理的降幅分别叠加 12.67%。基于产量降幅进行聚类, 再结合生理、产量和米质表现 (表 1、2、3、4 和图 3、4), 将各高温处理分为 3 个等级 (表 6)。从表中可看出, 叶绿素含量、净光合速率、产量、整精米率和垩白粒率 5 个指标可作为评价早稻高温热害的特征参数。

表 5 不同高温处理对稻米淀粉黏滞特性 (RVA 谱) 参数的影响

Table 5 Effects of different high-temperature treatments on starch viscosity characteristic (RVA profile) parameters of rice cP

期 Phase	处理 Treatment		峰值黏度 Peak viscosity (PKV)	保持黏度 Hold viscosity (HDV)	最终黏度 Final viscosity (FLV)	崩解值 Breakdown value (PKV-HDV)	消减值 Setback value (FLV-PKV)
	温度 Temperature /°C	持续天数 Duration /d					
I 期 (3月25日播种) Phase I (sowing on March 25)	35	CK	3 710±21bc	1 995±18bc	3 003±34a	1 716±39c	-707±27d
		3	3 763±6ab	2 020±1abc	3 055±19a	1 743±8b	-708±13d
		5	3 749±49ab	2 003±32bc	3 026±45a	1 747±18b	-724±5d
		7	3 719±49abc	2 001±36bc	3 006±14a	1 719±155b	-713±25d
	38	10	3 760±1ab	2 039±69ab	3 007±13a	1 721±69b	-753±12c
		3	3 807±47ab	2 041±22ab	3 013±65a	1 766±69ab	-794±18ab
		5	3 798±47ab	2 060±57a	3 010±84a	1 739±50b	-789±17b
		7	3 820±4a	2 016±2abc	3 005±20a	1 805±6a	-815±24a
	40	10	3 490±40de	1 990±10bc	2 909±22bc	1 500±30e	-582±22g
		3	3 625±35c	1 987±57bc	2 993±52ab	1 638±91d	-632±6e
		5	3 521±43de	1 973±35c	2 909±34bc	1 548±78e	-612±17ef
		7	3 424±23ef	1 914±26d	2 830±2c	1 510±3e	-594±21fg
		10	3 340±7f	1 907±7d	2 824±1c	1 433±4f	-516±8h
	37	CK	2 860±5d	1 437±18de	2 169±23cde	1 423±23de	-691±28d
		3	3 389±23b	1 745±23abc	2 541±12ab	1 644±45ab	-849±25ab
		5	3 496±27a	1 816±43ab	2 633±45a	1 681±16ab	-863±18ab
		7	3 537±88a	1 932±63a	2 708±35a	1 606±5bc	-829±7b
II 期 (4月15日播种) Phase II (sowing on April 15)	39	10	3 518±45a	1 852±51ab	2 636±39a	1 666±36ab	-883±24ab
		3	3 344±9b	1 609±22cd	2 409±23abcd	1 735±31a	-935±12a
		5	3 072±35c	1 563±24cd	2 339±34bcd	1 509±11cd	-733±1cd
		7	3 320±15b	1 688±36bc	2 489±42abc	1 632±21abc	-831±27b
	42	10	2 565±92f	1 259±38ef	1 972±22e	1 307±6f	-593±20e
		3	2 708±1e	1 336±17e	2 088±14de	1 372±18ef	-620±16e
		5	2 023±54g	915±32g	1 513±41fg	1 108±23g	-510±13f
		7	2 107±20g	1 021±27f	1 608±23f	1 086±47g	-499±22f
		10	1 882±16h	824±18h	1 425±10g	1 058±34g	-457±15f

同期同列不同小写字母表示同期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same column in the same phase indicate significant differences among different treatments in the same phase ($P<0.05$).

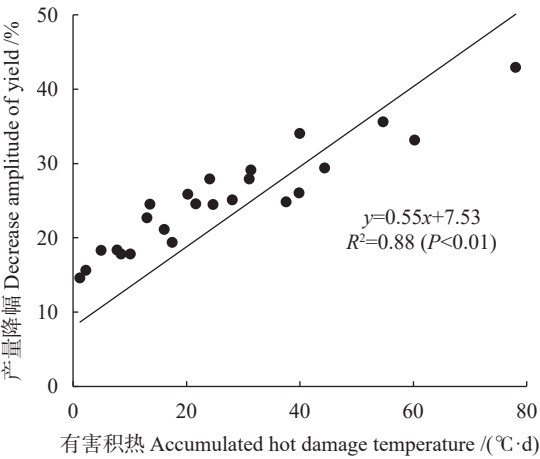
表 6 早稻高温热害等级分类和特征参数筛选
Table 6 Gradation and characteristic parameters screening of high-temperature stress of early rice

灾害等级 Disaster grade	H_a /($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	平均降幅 Decrease amplitude /%				
		叶绿素含量 Chlorophyll content	净光合速率 Net photosynthesis rate	产量 Rice yield	整精米率 Head milled rice rate	垩白粒率 Chalky grain
轻度 Mild	6.90	11.09	21.69	14.54	1.45	-26.09
中度 Moderate	22.79	12.19	25.27	17.22	3.24	-44.94
重度 Severe	50.67	16.93	37.88	25.05	22.66	-105.13

H_a : 有害积热, 为高温期间日最高气温高于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 部分的累积量。平均降幅为同一灾害分类等级内不同高温处理降幅的平均值。 H_a : accumulated hot damage temperature, which is the accumulation of the daily maximum temperature above $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ during high temperature period. The decrease amplitude is the average value of decrease amplitudes of different high-temperature treatments under the same disaster grade.

图 5 显示, 有害积热 (x) 越高, 产量降幅 (y) 越大, 两者关系可用方程 $y=0.55x+7.53$ 表示, R^2 为 0.88 ($P<0.01$)。

结合高温强度和持续天数、有害积热和产量降幅, 进一步划定早稻高温热害等级指标见表 7。假如出现连续 3 d 的 $T_{\max}$ 分别为 35.1 、 36.2 和 $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 根据表 7 的结果无法判别出高温灾害等级。为更好地



降幅=(对照-处理)/对照 $\times 100$ 。有害积热为高温期间日最高气温高于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 部分的累积量。Decrease amplitude=(CK-treatment) / CK $\times 100$. The accumulated hot damage temperature is the accumulation of daily maximum temperature above $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ during high temperature period.

图 5 早稻产量降幅和有害积热的关系
Fig. 5 Relationship between decrease amplitude of rice yield and accumulated hot damage temperature of early rice

将早稻高温热害等级指标应用到水稻实际生产服务中, 本文将表 7 进行了变换和优化。第一步, 以 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为阈值, 考察 $T_{\max}\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数, 如果 $T_{\max}\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $D_n\geq 3\text{ d}$, 则判别该点为轻度高温热害 (1 级), 记为 R_1 ; 第二步, 以 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为阈值, 考察 $T_{\max}\geq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数, 将 $T_{\max}\geq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $3\leq D_n<6\text{ d}$ 判别为轻度高温热害 (1 级), $T_{\max}\geq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $D_n\geq 6\text{ d}$ 为中度高温热害 (2 级), 记为 R_2 ; 第三步, 以 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为阈值, 考察 $T_{\max}\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续日数, 将 $T_{\max}\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $3\leq D_n<6\text{ d}$ 判别为中度高温热害 (2 级), $T_{\max}\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $D_n\geq 6\text{ d}$ 判别为重度高温热害 (3 级), 记为 R_3 ; 第四步, 全部叠加以上 3 个阈值的热害结果, 以最重等级为该点早稻高温热害等级, 即: $R=\max(R_1, R_2, R_3)$ 。对典型年份和典型站点进行灾害指标验证, 发现指标验证吻合率为 85.45% (附表 1)。

3 讨论

3.1 早稻高温热害致灾机理

灌浆期是水稻产量形成的关键时期。高温下光合产物合成、积累、转运及分配过程受阻, 引起源供应和流运转不畅, 进而导致籽粒灌浆不良, 秕谷增加, 千粒重和产量降低。本文也发现早稻灌浆期高温通过降低叶片叶绿素含量、蒸腾速率和气孔导度, 降低了光合性能; 增加了秕谷率, 降低了千粒重, 进而导致产量显著下降, 这与前人^[18]的研究结果一

表 7 早稻高温热害等级指标
Table 7 Grading index of high-temperature stress of early rice

灾害等级 Disaster grade	日最高气温($T_{\max}$) Daily maximum temperature ($T_{\max}$) / $^{\circ}\text{C}$	持续天数(D_n) High temperature duration (D_n) /d	有害积热(H_a) Accumulated hot damage temperature (H_a) /($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	产量降幅(Y_d) Decrease amplitude of yield (Y_d) /%
轻度 Mild	$35\leq T_{\max}<37$	$D_n\geq 3$	$0<H_a\leq 11$	$0<Y_d\leq 10$
	$37\leq T_{\max}<38$	$3\leq D_n<6$		
中度 Moderate	$37\leq T_{\max}<38$	$D_n\geq 6$	$11<H_a\leq 22$	$10<Y_d\leq 20$
	$T_{\max}\geq 38$	$3\leq D_n<6$		
重度 Severe	$T_{\max}\geq 38$	$D_n\geq 6$	$H_a>22$	$Y_d>20$

早稻高温热害等级可用日最高气温和持续天数的组合、有害积热以及产量降幅分别进行判定。The grading index of high-temperature stress of early rice can be determined by the combination of daily maximum temperature and number of consecutive days, accumulated hot damage temperature and decrease amplitude of yield, respectively.

致。本试验发现,第 I 期对照和高温处理的产量总体高于第 II 期。究其原因:一是第 I 期对照灌浆期(抽穗开花后第 11 天)至成熟期的日平均温度均值(29.78 °C)和日最高气温均值(33.46 °C)低于第 II 期的日平均温度均值(30.17 °C)和日最高气温均值(34.31 °C);二是 7 月 1 日至 7 月 15 日环境日平均气温和最高气温较高,平均分别为 31.74 和 35.70 °C,其中 7 月 6 日至 7 月 14 日最高气温为 36.00~37.40 °C。此时,第 I 期水稻处于灌浆后期,该阶段高温对其影响不大;而第 II 期水稻处于灌浆中前期,受高温的影响较大。

水稻齐穗后的前 20 d 是温度影响稻米品质的重要阶段^[19]。高温通过降低籽粒中蔗糖-淀粉代谢酶活性,加速胚乳细胞生长和籽粒充实,使籽粒垩白粒率和垩白度变大,精米率和整精米率降低^[20-22]。研究表明,花后 6~20 d 在 40 °C 高温下处理 10 h 对垩白粒率和垩白度影响大,花后 11~15 d 对精米率和整精米率影响大^[23]。本研究发现,所有高温处理显著提高了稻米垩白粒率和垩白度,降低了精米率和整精米率;总体来看,温度越高,持续时间越长,影响越大(表 4)。由此,灌浆期高温主要降低了精米率和整精米率,增加了垩白粒率和垩白度,导致稻米的碾米品质和外观品质变劣。影响稻米品质的因素很多,除内在基因型品种外,气候、土壤和管理措施(如水肥、播期、种植方式及密度)等因素也具有较大影响^[24-25]。如本试验第 II 期稻米的品质比第 I 期差,究其原因,可能是第 II 期水稻灌浆中前期遭遇了持续的高温天气。本研究中有垩白粒率、垩白度、精米率和整精米率的结果与前人略有不同,推测很可能与试验品种、高温处理和管理措施等有关。

高温对直链淀粉含量的影响因品种而异,低直链淀粉含量品种的直链淀粉含量与灌浆期温度呈负相关,而在中高直链淀粉含量品种中表现为正相关^[26]。本文发现,高温降低了试验品种的直链淀粉含量。灌浆早期,高温显著降低了稻米崩解值,增加了消减值,但在品种间存在差异^[27]。本研究发现,38 °C (3、5、7 d) 处理、39 °C (3、5、7 d) 处理、35 和 37 °C 所有处理淀粉的崩解值上升,消减值下降,黏滞特性表现好,这与前人研究结果不同。高温影响蔗糖-淀粉代谢途径中的酶活性,改变稻米中蔗糖、葡萄糖和果糖等物质的含量比例,影响淀粉生成^[28]。除品种、气候和土壤等直接因素外,糖含量变化是高温影响淀粉黏滞性的一个重要因素,推测较弱的高温处理(较低温度强度和较少持续天数)消减值的降低可能与稻米内较低的糖含量有关^[29]。此外,高温对稻米淀

粉黏滞特性(RVA 谱)的影响与品种、栽培条件和高温持续时间及强度有关。本研究中高温增加了稻米蛋白质含量,这与前人研究结果一致^[30-31],可能是高温影响籽粒的三羧酸循环过程,增加了蛋白质含量^[32]。

3.2 早稻高温热害等级指标

本研究表明,叶绿素含量、净光合速率、产量、整精米率和垩白粒率共 5 个指标可作为评价早稻高温热害的特征参数。本文基于这些特征参数,综合考虑高温强度和持续时间、有害积热及高温对早稻生理指标、产量和品质的影响,通过聚类分析法,完善早稻高温热害等级指标。日最高气温($T_{\max}$) ≥ 35 °C 持续 3 d 就会引起早稻高温热害,早稻高温热害的等级指标为: $35 \leq T_{\max} < 37$ °C 且持续天数(D_n) ≥ 3 d 或 $37 \leq T_{\max} < 38$ °C 且 $3 \leq D_n < 6$ d 属轻度热害,对应 $0 < \text{有害积热}(H_a) \leq 11$ °C·d, $0\% < \text{产量降幅}(Y_d) \leq 10\%$; $37 \leq T_{\max} < 38$ °C 且 $D_n \geq 6$ d 或 $T_{\max} \geq 38$ °C 且 $3 \leq D_n < 6$ d 属中度热害, $11 < H_a \leq 22$ °C·d, $10\% < Y_d \leq 20\%$; $T_{\max} \geq 38$ °C 且 $D_n \geq 6$ d 为重度热害, $H_a > 22$ °C·d, $Y_d > 20\%$ 。我国农业行业标准《NY/T 2915—2016》^[6]中,早稻高温耐性以其高温结实率与对照结实率的百分比大小进行划分,分为强耐热型($\geq 95\%$)、耐热型(75%~95%)、中间型(55%~75%)、不耐热型(35%~55%)和极不耐热型($< 35\%$) 5 级。江西省地方标准《DB36/T 1758—2023》^[8]中,早稻高温热害评价等级分为 3 个等级,以早稻高温热害指数划分热害强度,早稻高温热害指数通过有害积热、热害极端最高气温和高温热害日数进行加权计算得到。国家标准《GB/T 37744—2019》^[7]中,早稻灌浆期高温热害采用有害积热、区域热害强度指数、最高气温或高温持续时间 3 个指标将其划分为 3 类强度等级;采用千粒重和区域热害指数 2 个指标将其划分为 2 类影响等级;采用结实率和千粒重计算的热害损失率划分灾损等级。杨建堂等^[13]构建的基于高温天气过程(发生时间和持续天数)的早稻高温热害动态指标中,持续 3~5 d 早稻轻度、中度和重度高温热害的起始时间阈值分别为抽穗后第 10~12、5~9 和 2~4 d;持续 6~8 d 早稻轻度、中度和重度灾害的起始时间阈值为抽穗后第 11~18、8~10 和 1~7 d;持续 > 8 d 轻度、中度和重度灾害的起始时间阈值分别为抽穗后第 12~18、8~11 和 0~7 d。本研究中,早稻高温热害等级指标,不仅分级和细化了高温强度和高温持续时间,也综合考虑了有害积热和水稻实际生长发育(生理、产量和品质)情况。值得注意的是,假如出现连续 3 d 的 $T_{\max}$ 分别为 35.1、36.2 和 37.5 °C,根据本研究得到的等级指标无法判别出高温灾害等级。为更好地将早稻

高温热害等级指标应用到水稻实际生产服务中,可将其进行变换和优化。第一步,将 $T_{\max} \geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $D_n \geq 3\text{ d}$ 判别为早稻发生了轻度高温热害(1级);第二步,将 $T_{\max} \geq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $D_n \geq 6\text{ d}$ 判别为中度高温热害(2级),叠加到第一步判别中;第三步,将 $T_{\max} \geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $3\text{ d} \leq D_n < 6\text{ d}$ 判别为中度高温热害(2级), $T_{\max} \geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $D_n \geq 6\text{ d}$ 判别为重度高温热害(3级),叠加到前面的两步判别即可。

本研究的水稻高温热害等级指标已在江西省水稻气象服务中试应用,基于该指标制作了早稻高温实时监测和精细风险预警图,编发了早稻气象服务材料。本指标以 10% 和 20% 为产量损失的阈值点,这与前人的研究结果一致^[8]。同时,高温热害等级指标也量化了有害积热,即 $0 < H_a \leq 11\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 为轻度热害, $11 < H_a \leq 22\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 为中度热害, $H_a > 22\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 为重度热害。这与我国农业行业标准《NY/T 2915—2016》^[6]中规定 $0 < H_a \leq 13\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 为轻度、 $13 < H_a \leq 26\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 为中度、 $H_a > 26\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 为重度略有不同,可能与本试验选择的品种和试验区域不同有关。后续研究将增加不同早稻品种、播期和地理试验,完善和验证早稻高温热害的等级指标,并推广应用到早稻高温热害监测评估服务中。

4 结论

早稻灌浆期高温通过降低叶片叶绿素含量、蒸腾速率和气孔导度,降低了光合性能;主要增加了秕谷率,降低了千粒重,进而导致产量显著下降。高温主要降低了精米率和整精米率,增加了垩白粒率和垩白度,导致稻米的碾米品质和外观品质变劣。日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 3 d 会降低早稻光合性能,影响早稻产量和品质形成,引起高温热害。本文综合考虑高温强度和持续时间、有害积热及高温对早稻生理指标、产量和品质的影响,通过聚类分析法,完善了早稻高温热害等级指标,指标验证准确率为 85.45%。研究结果可为早稻高温热害监测评估和农业防灾减灾提供科学参考。

文中附件见电子版资源附件: <http://www.ecoagri.ac.cn/article/doi/10.12357/cjea.20240344>。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change 2021: the Physical Science Basis[R/OL]. [2021-08-06]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/html>
- [2] 陈超, 庞艳梅, 刘佳. 四川省水稻高温热害风险及灾损评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 554–562
CHEN C, PANG Y M, LIU J. Assessment of risk and yield loss

- of rice in Sichuan Province due to heat stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(4): 554–562
- [3] 段骅, 佟卉, 刘燕清, 等. 高温和干旱对水稻的影响及其机制的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 206–218
DUAN H, TONG H, LIU Y Q, et al. Research advances in the effect of heat and drought on rice and its mechanism[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(3): 206–218
- [4] ZHANG C Q, ZHOU L H, ZHU Z B, et al. Characterization of grain quality and starch fine structure of two japonica rice (*Oryza sativa*) cultivars with good sensory properties at different temperatures during the filling stage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(20): 4048–4057
- [5] 季平, 柳浩, 叶世河, 等. 不同生殖生长阶段高温胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(9): 1872–1883
JI P, LIU H, YE S H, et al. Effect of heat stress at different reproductive growth stages on yield and grain quality in rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(9): 1872–1883
- [6] 中华人民共和国农业部. NY/T 2915—2016 水稻高温热害鉴定与分级[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016
Ministry of Agriculture of the PRC. NY/T 2915—2016 Identification and Classification of Heat Injury of Rice[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the PRC, 2016
- [7] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 37744—2019 水稻热害气象等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 37744—2019 Meteorological Grades of Hot Damage to Rice[S]. Beijing: Standard Press of China, 2019
- [8] 江西省市场监督管理局. DB36/T 1758—2023 双季早稻高温热害评价等级[S]. 南昌: 江西省市场监督管理局, 2023
Jiangxi Administration for Market Regulation. DB36/T 1758—2023 Assessment Grades of High Temperature Damage to Double-cropping Early Rice[S]. Nanchang: Jiangxi Administration for Market Regulation, 2023
- [9] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 57–62
ZHANG Q, ZHAO Y X, WANG C Y. Study on the impact of high temperature damage to rice in the lower and middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 57–62
- [10] 杨炳玉, 申双和, 陶苏林, 等. 江西省水稻高温热害发生规律研究[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 615–622
YANG B Y, SHEN S H, TAO S L, et al. Spatial and temporal pattern of rice heat injury in Jiangxi[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 615–622
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17891—2017 优质稻谷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; National Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17891—2017 High Quality Paddy[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24852—2010 大米及米粉糊化特性测定快速粘度仪法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; National Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 24852—2010 Determination of the Pasting Properties of Rice—Rapid Visco Analyzer Method[S]. Beijing: Standard Press of China, 2010
- [13] 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 等. 江西早稻高温热害等级动态识别及时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 199–207
YANG J Y, HUO Z G, WANG P J, et al. Dynamic identification of double-early rice heat and its spatiotemporal characteristics in Jiangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 199–207
- [14] 田俊, 崔海建. 江西省双季早稻灌浆乳熟期高温热害影响评估[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 67–73
TIAN J, CUI H J. Impact assessment on high temperature damage to early rice at filling-milk stage in Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(1): 67–73
- [15] 田俊, 杨军, 姚俊萌, 等. 江西省早稻高温热害灾损评估模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(2): 32–39
TIAN J, YANG J, YAO J M, et al. Loss estimation model of high temperature damage to early rice in Jiangxi Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(2): 32–39
- [16] 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[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(4): 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[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(4): 377–387
- [17] 沈新平, 沈明星, 龚丽萍, 等. 太湖地区晚粳地方种稻米 RVA 谱特征多样性分析[J]. 作物学报, 2006, 32(12): 1902–1908
SHEN X P, SHEN M X, GONG L P, et al. Analysis of RVA profile diversity in local late japonica rice at Taihu Lake area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(12): 1902–1908
- [18] 谭江, 黎用朝, 潘孝武, 等. 高温天气对水稻开花结实和品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(6): 935–940
TAN J, LI Y C, PAN X W, et al. Effect of hot weather on seed-setting and grain quality of rice[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(6): 935–940
- [19] 张国发, 王绍华, 尤娟, 等. 结实期不同时段高温对稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(2): 283–287
ZHANG G F, WANG S H, YOU J, et al. Effect of higher temperature in different filling stages on rice qualities[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 283–287
- [20] 杨军, 章毅之, 贺浩华, 等. 水稻高温热害的研究现状与进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2817–2830
YANG J, ZHANG Y Z, HE H H, et al. Current status and research advances of high-temperature hazards in rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2817–2830
- [21] AI X F, XIONG R Y, TAN X M, et al. Effects of high temperature and strong light combine stress on yield and quality of early indica rice with different amylose content during grout filling[J]. *Phyton*, 2022, 91(6): 1257–1267
- [22] 易晓璇, 刘玮琦, 曾盖, 等. 灌浆期高温胁迫对早籼稻品质性状的影响[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(1): 72–80
YI X X, LIU W Q, ZENG G, et al. Effect of high temperature stress at grain filling stage on early indica rice quality traits[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(1): 72–80
- [23] 盛婧, 陶红娟, 陈留根. 灌浆结实期不同时段温度对水稻结实与稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 396–402
SHENG J, TAO H J, CHEN L G. Response of seed-setting and grain quality of rice to temperature at different time during grain filling period[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(4): 396–402
- [24] 段骅, 杨建昌. 高温对水稻的影响及其机制的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 393–400
DUAN H, YANG J C. Research advances in the effect of high temperature on rice and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(4): 393–400
- [25] YANG J, DUAN L C, HE H H, et al. Application of exogenous KH_2PO_4 and salicylic acid and optimization of the sowing date enhance rice yield under high-temperature conditions[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(4): 1532–1546
- [26] 蔡水文, 陈良碧. 温度对不同类型早籼稻灌浆期间直链淀粉、蛋白质积累的影响[J]. 生命科学研究, 2004, 8(2): 145–149
CAI S W, CHEN L B. Effect of temperature on the amylose and the protein accumulation in different early-indica rice during grain filling stage[J]. *Life Science Research*, 2004, 8(2): 145–149
- [27] 张国发, 王绍华, 尤娟, 等. 结实期相对高温对稻米淀粉粘滞性谱及镁、钾含量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1959–1964
ZHANG G F, WANG S H, YOU J, et al. Effects of relatively high temperature at grain-filling stage on rice grain's starch viscosity profile and magnesium and potassium contents[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1959–1964
- [28] 李天, 刘奇华, 大杉立, 等. 灌浆结实期高温对水稻籽粒蔗糖及降解酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 626–630
LI T, LIU Q H, OHSUGI R, et al. Effect of high temperature on sucrose content and sucrose-cleaving enzymes activity in rice during grain filling stage[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 626–630
- [29] 谢新华, 李晓方, 肖昕, 等. 糖对稻米淀粉黏滞性的影响[J]. 福建农业学报, 2009, 24(5): 475–477
XIE X H, LI X F, XIAO X, et al. Effect of sugars on rheological properties of rice starch[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 24(5): 475–477
- [30] 张桂莲, 廖斌, 汤平, 等. 灌浆结实期高温对水稻剑叶生理特性和稻米品质的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 650–655
ZHANG G L, LIAO B, TANG P, et al. Effects of high temperature stress during grain-filling period on physiological characteristics in flag leaves and grain quality of rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(6): 650–655
- [31] 高焕晔, 王三根, 宗学风, 等. 灌浆结实期高温干旱复合胁迫对稻米直链淀粉及蛋白质含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 40–47
GAO H Y, WANG S G, ZONG X F, et al. Effects of combined high temperature and drought stress on amylose and protein contents at rice grain-filling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 40–47
- [32] 王军可, 王亚梁, 陈惠哲, 等. 灌浆初期高温影响水稻籽粒碳氮代谢的机理[J]. 中国农业气象, 2020, 41(12): 774–784
WANG J K, WANG Y L, CHEN H Z, et al. Mechanism of high temperature affecting carbon and nitrogen metabolism of rice grain at the early stage of grain filling[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(12): 774–784