

吕晓, 张兵兵, 杨璐, 战莘晔, 吴航, 高全, 张慧, 高莉莉. 水稻拔节期和抽穗期低温对稻米品质影响[J]. 广东农业科学, 2020, 47(2): 1-8.

水稻拔节期和抽穗期低温对稻米品质影响

吕晓¹, 张兵兵¹, 杨璐¹, 战莘晔², 吴航¹, 高全¹, 张慧¹, 高莉莉¹

(1. 锦州市生态与农业气象中心, 辽宁 锦州 121000; 2. 鞍山市气象局, 辽宁 鞍山 114004)

摘要:【目的】为了探讨低温冷害对水稻品质的影响, 以便为气候变化背景下辽宁地区水稻的高效栽培和品质认证提供理论依据。【方法】以水稻 90-35 为供试品种, 分别于拔节期和抽穗期通过 TRP-1000D 型人工智能气候箱进行不同低温处理(比外界低 5℃ 和低 3℃, 均持续 5 d), 以正常栽培管理作对照, 5 个处理, 分别记为 CK、A1、A2、B1、B2, 分析拔节期和抽穗期不同等级低温胁迫处理对水稻的营养品质、研磨品质和外观品质的影响。【结果】低温胁迫下 90-35 水稻的蛋白质含量、直链淀粉含量较 CK 显著增加, 处理 A1、A2、B1、B2 的蛋白质含量分别比 CK 增加 3.45%、1.15%、6.90%、8.05%, 除处理 B1 外直链淀粉含量分别比 CK 增加 1.75%、0.44%、0.44%; 脂肪酸含量和精米率较 CK 显著减少, 处理 A1、A2、B1、B2 的脂肪酸含量分别比 CK 减少 17.75%、7.5%、25%、11%, 精米率分别比 CK 减少 2.1%、6.95%、0.22%、7.5%。拔节期低温胁迫下糙米率和垩白粒率显著减少, 处理 A1、A2 的糙米率分别比 CK 减少 0.73%、1.09%, 垩白粒率分别比 CK 减少 33.3%、22.2%; 抽穗期低温胁迫下糙米率和垩白粒率显著增加, 处理 B1、B2 的糙米率分别比 CK 增加 0.6%、3.02%, 垩白粒率分别比 CK 增加 255.6%、133.3%, 即低温胁迫使其营养品质和研磨品质中的精米率受到负面影响, 而拔节期适当低温胁迫处理对其研磨品质中的糙米率和外观品质有益。【结论】水稻 90-35 在不同生育时期经受不同低温胁迫处理后, 水稻的营养品质、研磨品质和外观品质均受到不同程度的影响。

关键词: 水稻; 人工智能气候箱; 低温胁迫; 稻米品质; 不同发育期; 辽宁地区

中图分类号: S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2020)02-0001-08

Effect of Low Temperature on Rice Quality at Jointing and Heading Stages

LYU Xiao¹, ZHANG Bingbing¹, YANG Lu¹, ZHAN Shenye²,

WU Hang¹, GAO Quan¹, ZHANG Hui¹, GAO Lili¹

(1. Jinzhou Ecological and Agricultural Meteorology Center, Jinzhou 121000, China;

2. Anshan Meteorological Bureau, Anshan 114004, China)

Abstract:【Objective】The effects of low temperature and chilling injury on rice quality were discussed in order to provide theoretical basis for the efficient cultivation and quality certification of rice in Liaoning area under the background of climate change.【Method】Taking Rice 90-35 as the tested variety and the normal cultivation and management as control, different low temperature treatments (5℃ and 3℃ lower than the temperature outside, all lasting for 5 days) were simulated through TRP-1000D artificial intelligence climate box with a total of five treatments - CK, A1, A2, B1 and B2 to investigate the effects of different low temperature stress treatments on the rice nutritional quality, milling quality and appearance quality at the jointing and heading stages.【Result】Under low temperature stress, the protein content and the amylose content of Rice 90-35 increased significantly compared with those of CK, the protein contents of A1, A2, B1 and B2 were 3.45%, 1.15%,

收稿日期: 2019-12-11

基金项目: 锦州市气象局科研基金(JQLX201705)

作者简介: 吕晓(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为农业气象, E-mail: 724452793@qq.com

6.90% and 8.05% higher than those of CK, respectively. Except for B1, the amylose contents of A1, A2 and B2 increased by 1.75%, 0.44% and 0.44% respectively compared with those of CK. The fatty acid content and milled rice rate decreased compared with CK, the fatty acid contents in A1, A2, B1 and B2 were 17.75%, 7.5%, 25% and 11% lower than those in CK, and the milled rice rate was 2.1%, 6.95%, 0.22% and 7.5% lower than that of CK respectively. Brown rice rate and chalky rice rate reduced significantly at jointing stage with low temperature stress, compared with CK, the brown rice rates of A1 and A2 decreased by 0.73% and 1.09%, respectively, and the chalky rice rates reduced by 33.3% and 22.2%, respectively. There was a significant difference at heading stage with low temperature stress, compared with CK, the brown rice rates of B1 and B2 increased by 0.6% and 3.02%, respectively, and the chalky rice rates increased by 255.6% and 133.3%, respectively. The nutritional quality and milled rice percentage in milling quality were negatively affected by low temperature stress, while appropriate low temperature stress treatment at jointing stage was beneficial to the brown rice rate and appearance quality of grinding quality. 【Conclusion】 The nutritional quality, grinding quality and appearance quality of rice 90-35 are affected to varying degrees by different low temperature stress treatments at different growth stages.

Key words: rice; artificial intelligence climate box; low temperature stress; rice quality; different developmental stages; Liaoning area

【研究意义】水稻是我国种植面积最广、产量最高的最主要粮食作物之一^[1], 在国民经济中占有非常重要的地位, 其生产状况直接关系到我国粮食安全, 关注水稻安全生产对于我国的可持续发展十分重要^[2]。水稻原产于热带亚热带地区, 其生长发育对低温条件反应非常敏感^[3-5], 热量条件在水稻生产中至关重要, 温度是影响其产量的重要环境因素, 也是影响稻米品质的首要环境因子^[6-7]。夏季低温冷害是作物生长期发生异常低温而造成严重减产的一种灾害, 水稻是喜温作物, 其生长发育过程受温度条件的制约^[8], 各个生育阶段都有一定的最低适宜温度, 若在其生长季出现持续低温且达到一定强度时, 就会发生不同类型的低温冷害^[9]。水稻冷害是一种全球性气象灾害, 近年来, 尽管全球气候有变暖趋势, 但区域性和阶段性的低温冷害仍有发生。辽宁省属于我国北方寒地稻作区, 也是我国水稻主产区之一, 因其地处中、高纬度地区的特殊地理位置, 具有气候寒冷、热量资源不足、无霜期短等气候特点, 因而易发生水稻低温冷害。辽宁地区春季升温慢、秋季降温快且温度日较差大, 即使在夏季 7、8 月份也常出现冷空气活动频繁的突发性低温天气过程, 在水稻生长发育期间低温冷害出现具有普遍性、多发性和严重性等特点, 且水稻低温冷害强度增加, 水稻常常在气温低、水温低、地温低的三低条件下生长, 温度已成为影响辽宁省水稻生长的最主要因素。低温冷害已成为辽宁地区水稻生产中面临的最主要农业气象灾害之一, 是影响水稻高产稳产和品质的重要逆

境因素。

【前人研究进展】在全球气候变化的背景下, 有关低温冷害对水稻影响的研究成为国内外研究学者关注的对象。水稻耐冷性研究最早始于日本^[10], 我国从 20 世纪 70~80 年代才开始学习和参考日本经验, 结合各地区生态条件实情进行抗冷性研究。目前对水稻耐冷性研究开展较深入, 国内外已有很多报道, 涉及研究角度广泛, 诸如低温冷害评价指标、风险评估、对农业的危害机制、对策和影响规律等, 低温冷害区划及预测预报模型等, 冷害监测、鉴定、基因等多个方面^[11-16]。低温冷害对水稻生长发育、产量、生理变化、品质等水稻生产方面影响的研究一直是水稻气象研究的重点, 试验处理方面采用了低温处理程度、低温处理时期、耐冷性品种等不同的试验设计^[17-29]。但是通过调研发现有关低温冷害对水稻生产影响方面的研究多为生长发育、产量和生理生化方向, 且分析评估主要集中于东北地区的黑龙江等地^[30-33], 而对品质影响方面的研究则相对较少^[34-40], 目前就有关文献总体来看, 关于直链淀粉含量同结实期温度的关系目前尚无定论, 温度对稻米品质影响最大的是垩白度和垩白粒率, 水稻低温冷害对其品质性状影响具有种间差异, 尽管各种研究结果略有差异, 但因试验设计、试验品种和试验地点等不同并不矛盾。辽宁地区有关低温冷害对水稻生产的研究则更少, 已有的研究为风险评估、分布特征、作物生理方向^[41-43], 有关辽宁地区低温冷害对水稻品质影响的研究鲜有报道。

【本研究切入点】近年来,随着生活水平逐渐提高,人们对稻米品质的要求越来越高。水稻品质除了受遗传因素控制,更受到气候生态因子的影响^[44]。水稻作为辽宁省第二大主要粮食作物,其种植面积逐年增加。由此可见,当前如何预防和解决水稻低温冷害问题、改善和保障水稻品质对辽宁地区水稻产业的健康发展、保障粮食安全、促进经济发展具有十分重要的现实意义。【拟解决的关键问题】本试验在前人研究基础上,以水稻 90-35 为供试品种,进行低温胁迫处理试验,在相同施肥和管理条件下,分别在拔节期和抽穗期进行不同低温胁迫处理,就低温冷害对水稻的营养品质、研磨品质和外观品质等影响进行系统研究,以期在气候变化背景下辽宁地区水稻的生产栽培、品质认证和抗性育种提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2011 年 5—12 月在沈阳农业大学南地试验田进行。供试水稻品种为 90-35,该品种全生育期 150 d,采用半盆栽半大田的栽培方式,共进行为期 2 年的低温胁迫处理试验。试验盆钵为 PP 方形塑料桶,桶口长 24 cm、宽为 17 cm,桶底长 19 cm、宽 12 cm,桶高 26 cm。试验用土为新鲜的旱地耕层壤土,晾晒粉碎后过 0.8 cm 筛。用孔径 0.180 mm 的沙网袋(形状和大小与盆钵内径一致)置于盆钵内,向沙网袋内装土,每桶装土 8.5 kg,装土的同时施基肥,每桶施尿素 2.0 g、磷酸二铵 2.0 g 作底肥。

1.2 试验方法

水稻采用育秧盘小棚早育苗,4 月 13 日浸种、催芽,4 月 18 日播种,按常规方式育苗,5 月 22 日移栽,选择均匀一致的 4 叶龄健壮秧苗栽入试验盆钵,每个处理 5 盆,每盆 1 穴,每穴 2 株栽于盆钵中央,每个盆钵内保持 2 cm 左右的水层。试验盆钵先置于室外自然返青,5 月 29 日待秧苗成活后将沙网袋连同秧苗从盆钵中取出,移栽到大田统一管理。在水稻 90-35 进入孕穗开花盛期时(8 月 17 日)再将沙网袋连同植株从大田中取出直接放回盆钵中,将盆钵置于人工气候箱内进行低温处理,低温胁迫后再将其放回大田让其自然生长。

试验设 5 个温度处理: A1,拔节期比外界低 5℃低温胁迫; A2,拔节期比外界低 3℃低温胁迫; B1,抽穗期比外界低 5℃低温胁迫; B2,抽穗期比外界低 3℃低温胁迫; CK,自然条件下正常生长。低温胁迫以前 1 d 相同时刻的温度值为基准,每个处理放入气候箱内 3 盆均持续 5 d,5 次重复。

低温胁迫的控制:采用定制的 TRP-1000D 型人工智能气候箱,容积 1 000 L,温度误差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,温度均匀度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,控温范围 0~50℃,光照度为 0~40 000 lx,控湿范围 50%~95%,湿度波动 $\pm 5\%$ 。人工气候箱设置 24 波段,每个波段 1 h,用以体现气象要素的日变化规律,临近日出和日落的两个波段的间距可能不为 1 h,采用天文学方法确定日出、日落时间进行适当调整。各波段相对湿度、光照与中国天气网发布的实时数据一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 营养品质测定 稻谷于 2011 年 10 月 1 日进行收获,每穴为一组,样本风干后利用德国 BRUKER 公司生产的傅里叶变换近红外光谱分析仪测定蛋白质含量、直链淀粉含量、脂肪酸含量。取样本精米粉 30 g 置于分析盘的样品杯中,进行光谱扫描,测定蛋白质、直链淀粉和脂肪酸含量,计算食味评分,每个样品重复测 3 次。

1.3.2 研磨品质测定 利用砻谷机将稻谷脱壳,碾磨成糙米,计算糙米率(%);利用日本生产小型精米机加工成精米,计算精米率(%).

1.3.3 外观品质测定 利用外观品质分析仪测定垩白粒率。

试验数据运用 Microsoft Excel、SPSS 应用程序进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对水稻营养品质的影响

从表 1 可以看出,水稻 90-35 分别经过拔节期和抽穗期比外界低 3℃、低 5℃的低温胁迫后,蛋白质含量较对照有所增加,增幅表现为抽穗期低温胁迫高于拔节期低温胁迫,以抽穗期比外界低 3℃低温胁迫处理后蛋白质含量增幅最大,其中处理 A1、A2、B1、B2 分别比 CK 增加 0.3、0.1、0.6、0.7 个百分点,且处理 A1、B1、B2 与 CK 差异均极显著,处理 A1 与 A2 差异显著,处理 A2 与 CK、B1 与 B2 差异不显著,说明拔节期

和抽穗期低温胁迫使水稻中蛋白质含量增加，导致食味评分显著降低。直链淀粉含量除处理 B1 略有降低外，其余处理均比对照略有增加，具体表现为 A1、A2、B1、B2 分别比 CK 增加 1.75%、0.44%、-1.75%、0.44%，A1、B1 与 CK、A2、B2 差异极显著，A2、B2 与 CK，A2、B2 差异不显著，A2 与 A1、A2 与 B1、B2 与 A1、B2 与 B1 差异极显著；即拔节期、抽穗期低温胁迫会使水稻直链淀粉含量增加，增加幅度为比外界低 5℃ 低温胁迫处理高于比外界低 3℃ 低温胁迫处理，而抽穗期比外界低 5℃ 低温胁迫处理会使水稻直链淀粉含量降低，表明拔节期低温胁迫和抽穗期比外界低 3℃ 低温胁迫处理会促使水稻直链淀粉的合成，可见低温胁迫可以打破稻米中蛋白质、直链淀粉等营养物质的组成和比例进而影响稻米品质。而脂肪酸含量较对照呈现降低的趋势，具体为 A1、A2、B1、B2 分别比 CK 减少 17.75%、7.5%、25%、11%，A1、B1、B2 与 CK 差异极显著，A2 与 CK 差异显著，A1 与 A2、A1 与 B1、A1 与 B2、A2 与 B2 差异不显著，A2 与 B1、B1 与 B2 差异显著；相同的低温胁迫处理下，抽穗期脂肪酸含量降低的幅度高于拔节期。不同发育期不同低温胁迫处理后 A2 食味评分与对照差异最小，低温胁迫下可以保持较好的营养品质。

表 1 不同时期低温处理对水稻营养品质的影响
Table 1 Effects of low temperature treatments at different stages on nutritional quality of rice

处理 Treatment	蛋白质含量 Protein content (%)	直链淀粉含量 Amylose content (%)	脂肪酸含量 Fatty acid content (%)
CK	8.7cC	22.8cC	8.00aA
A1	9.0cC	23.2aA	6.58bcB
A2	8.8bB	22.9bcBC	7.40bAB
B1	9.3aA	22.4dD	6.00bcB
B2	9.4aA	22.9bcBC	7.12bB

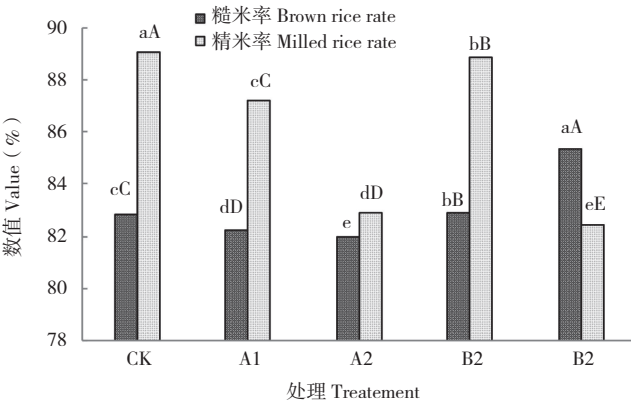
注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著，大写英文字母不同者表示差异极显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences, and different capital letters represent extremely significant differences.

2.2 低温胁迫对水稻研磨品质的影响

糙米率和精米率是衡量稻米研磨品质的重要指标。由图 1 可知，水稻 90-35 经过不同时期不同低温胁迫处理后对糙米率和精米率的影响效果不同，拔节期和抽穗期在比外界低 3℃、低 5℃ 的低温胁迫后，拔节期低温胁迫处理的糙米率比

对照略有降低，而抽穗期低温胁迫处理的糙米率与对照相比呈增加趋势，具体表现为 A1、A2、B1、B2 分别比 CK 增加 -0.73%、-1.09%、0.6%、3.02%，且 CK 与 B1 差异不显著，A1 与 A2 差异显著，其余各处理之间差异均达到极显著，由此可见，水稻糙米率受低温胁迫处理影响最小的为抽穗期进行比外界低 5℃ 的低温胁迫处理，拔节期进行适当低温胁迫处理反而会使水稻糙米率略有降低，其中在拔节期进行比外界低 3℃ 的低温胁迫处理使水稻糙米率降低最多。而精米率与对照相比则呈现减少趋势，具体表现为 A1、A2、B1、B2 分别比 CK 减少 2.1%、6.95%、0.22%、7.5%，且各处理之间均达到极显著差异，可见水稻精米率对低温胁迫非常敏感，拔节期和抽穗期水稻精米率减少的幅度均为比外界低 3℃ 低温胁迫处理高于比外界低 5℃ 的低温胁迫处理，水稻精米率减少最多的为抽穗期进行比外界低 3℃ 的低温胁迫处理。B2 研磨品质受低温胁迫影响较大，表明水稻在抽雄期对低温更敏感。



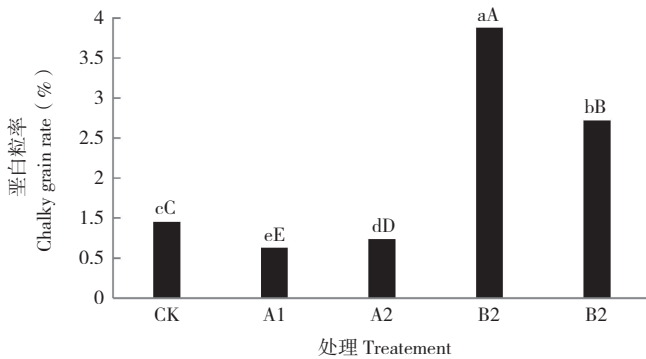
小写英文字母不同者表示差异显著，大写英文字母不同者表示差异极显著
Different lowercase letters represent significant differences, and different capital letters represent extremely significant differences

图 1 不同时期低温处理对水稻糙米率和精米率的影响
Fig. 1 Effects of low temperature treatments at different stages on brown rice rate and milled rice rate

2.3 低温胁迫对水稻外观品质的影响

稻米的垩白粒率是衡量外观品质的主要指标，垩白率越高，外观品质越差，且对透明度也有影响。由图 2 可知，水稻 90-35 经过不同时期不同低温胁迫处理后对垩白粒率的影响效果不同。水稻 90-35 分别经过拔节期和抽穗期的低温胁迫处理后，垩白粒率拔节期比对照略有减少，抽雄期与对照相比有明显增加趋势，且各处理间均为差异极显著，可见低温胁迫处理对水稻

垩白粒率影响很大,具体表现为 A1、A2、B1、B2 分别比 CK 增加 -33.3%、-22.2%、255.6%、133.3%,即水稻 90-35 在拔节期和抽穗期经过低温胁迫处理后,比外界低 3℃低温胁迫处理垩白粒率变化幅度低于比外界低 5℃的低温胁迫处理,对水稻垩白粒率影响最大的为抽穗期比外界低 5℃的低温胁迫处理,影响最小的为拔节期比外界低 3℃低温胁迫处理,拔节期对水稻进行适当的低温胁迫处理对水稻外观品质有利,而抽穗期对水稻进行低温胁迫处理会严重影响水稻外观品质。



小写英文字母不同者表示差异显著,大写英文字母不同者表示差异极显著
Different lowercase letters represent significant differences, and different capital letters represent extremely significant differences

图2 不同时期低温处理对水稻垩白粒率的影响

Fig. 2 Effects of low temperature treatments at different stages on chalky grain rate of rice

3 讨论

水稻在各个生长发育阶段都有一定的最低适宜温度和最高临界温度,温度过高或过低都不利于其生长发育和干物质的积累,进而影响水稻的品质^[45]。稻米品质主要受遗传因子控制和栽培因素的影响^[46],但在诸多因子中,温度对稻米品质影响最大^[47],特别是辽宁地区温度是影响稻米品质的最主要气候因子^[48]。本试验通过人工智能气候箱这一应用创新性的方法,研究了水稻拔节期和抽穗期低温对稻米品质影响,其结果对水稻优质栽培具有指导作用。本试验结果表明,低温胁迫导致蛋白质和直链淀粉含量增加,脂肪酸含量减少,且根据蛋白质、直链淀粉和脂肪酸含量值综合分析得出低温冷害使水稻 90-35 食味评分降低,与王士强等^[49]、宋广树等^[37]的研究结果一致。有研究认为低温胁迫使糙米率和精米率下降^[39,49-50],这与本试验结果部分一致,即低

温胁迫使水稻 90-35 精米率显著减少,抽穗期低温胁迫使其糙米率显著增加,这可能是由于水稻受到低温胁迫后光合作用下降,对籽粒灌浆影响较大,且本试验在辽宁地区进行及水稻种间差异等引起。王连敏等^[50]研究认为不同品种的水稻垩白粒率受到同等程度的低温冷害有的增加有的减少,张荣平等^[40]研究发现水稻低温处理 5 d 垩白粒率有所降低但与对照差异不显著、而低温处理 10 d 垩白粒率显著增加。本试验结果则表明稻 90-35 在抽穗期遭受低温冷害使垩白粒率极显著增加、拔节期低温胁迫使垩白粒率减少,且增减幅度与温度降低程度呈正相关,这可能是由于本试验所研究的发育时期、低温胁迫处理方式与前人研究不同所致。

水稻的品质主要包括营养品质、研磨品质和外观品质。稻米的营养成分包括蛋白质含量、直链淀粉含量和脂肪酸含量,它们是评价稻米品质的主要指标,营养成分含量会影响米饭适口性。依据稻米中蛋白质、直链淀粉和脂肪酸含量得到的食味评分也可以作为一项指标来判断稻米的营养品质,有研究证明食味评分与蛋白质含量、直链淀粉含量呈负相关,与脂肪含量呈正相关,适当提高稻米的脂肪含量可以提高稻米的口感和光泽度。

由于本试验受气候箱本身体积所限,所做样本较少,其内部设定环境与自然条件不尽相同,盆栽水稻生长环境不如大田具有普遍性,水稻营养不能充分运输到稻穗中,这些都可能对水稻生长发育造成一定影响,使得试验结果具有一定的局限性。而且低温冷害对稻米品质的影响是一个复杂多变的过程,再加上品种间的差异,使得目前一些就不同发育期低温胁迫对稻米品质方面的研究结论尚未统一,因此就低温胁迫对水稻营养品质影响的研究有待进一步深入。

4 结论

本试验结果表明,整体上水稻 90-35 在拔节期和抽穗期经受低温冷害对其营养品质有负面影响,蛋白质含量、除处理 B1 外的直链淀粉含量与 CK 相比呈显著增加趋势,而脂肪酸含量则比 CK 显著减少;同等低温胁迫处理下,蛋白质含量和脂肪酸含量对低温冷害的敏感度为抽穗期大于拔节期,而同一个发育期内低温冷害越严重

脂肪酸含量减少幅度越大。研磨品质方面,水稻 90-35 在拔节期和抽穗期经受低温冷害后其精米率较 CK 显著减少,抽穗期的低温冷害会使其糙米率显著增加,拔节期进行适当低温胁迫处理则会使糙米率显著减少,对糙米率有正面影响。外观品质方面,本试验中水稻 90-35 在抽穗期遭受低温冷害对其外观品质影响极大,垩白粒率较 CK 极显著增加,且增加幅度为处理 B1 > B2;而拔节期进行适当的低温胁迫处理反而使其垩白粒率有所减少,垩白粒率减少幅度为处理 A1 > A2,可见水稻 90-35 的外观品质对低温冷害的敏感程度呈正相关。

参考文献 (References):

- [1] 何英彬,陈佑启,唐华俊.水稻冷害研究进展[J].中国农业资源与区划,2008,29(2):33-38.
HE Y B, CHEN Y Q, TANG H J. Progress in research on cold damage of rice [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2008, 29 (2): 33-38.
- [2] 章秀福,王丹英,方福平,曾衍坤,廖西元.中国粮食安全和水稻生产[J].农业现代化研究,2005,26(2):85-88.
ZHANG X F, WANG D Y, FANG F P, ZENG Y K, LIAO X Y. Food safety and rice production in China [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26 (2): 85-88.
- [3] 马树庆,王琪,王春乙,霍治国.东北地区水稻冷害气候风险度和经济脆弱度及其分区研究[J].地理研究,2011,30(5):931-938.
MA S Q, WANG Q, WANG C Y, HUO Z G. Climate risk and economic vulnerability of rice chilling injury and its zoning in Northeast China [J]. *Geographical Research*, 2011, 30 (5): 931-938.
- [4] SUN W, HUANG Y. Global warming over the period 1961-2008 did not increase high-temperature stress but did reduce low-temperature stress in irrigated rice across China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 1193-1201.
- [5] TEIXEIRA E I, FISCHER G, VAN VELTHUIZEN H. Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change [J]. *Agric Forest Meteorol*, 2013, 170: 206-215.
- [6] 孟亚利,高如嵩,张嵩午.影响稻米品质的主要气候生态因子研究[J].西北农业大学学报,1994,22(1):40-43.
MENG Y L, GAO R S, ZHANG S W. Main climate factors affecting rice quality [J]. *Journal of Northwest Agricultural University*, 1994, 22 (1): 40-43.
- [7] 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. Effects of temperature at different stages of grain filling on grain setting and rice quality [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21 (4): 396-402.
- [8] 纪瑞鹏,于文颖,冯锐,武晋雯,张玉书.寒地水稻障碍型冷害指数构建及应用——以辽宁省为例[J].地理科学进展,2017,36(4):437-445.
JI R P, YU W Y, FENG R, WU J W, ZHANG Y S. Construction and application of cold damage index of rice barrier type in cold region—A case study of Liaoning Province [J]. *Progress in Geographic Science*, 2017, 36 (4): 437-445.
- [9] RENATA P D C, RAUL A S, DENISE C, JANETE M A, TATIANA D F T, JANETTE P F. Avoiding damage and achieving cold tolerance in rice plants [J]. *Food and Energy Security*, 2013, 2 (2): 96-119.
- [10] JIN R Y. Studies on identification and inheritance of cold tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Rice Abstracts*, 1990, 9 (3): 1-5.
- [11] 王书裕.农作物冷害的研究[M].北京:气象出版社,1995:97-107.
WANG S Y. Study on chilling injury of crops [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 1995: 97-107.
- [12] 沈柏竹,刘实,廉毅,封国林,李尚锋,龚志强.2009年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系[J].气象学报,2011,69(2):320-333.
SHEN B Z, LIU S, LIAN Y, FENG G L, LI S F, GONG Z Q. Summer low temperature in Northeast China in 2009 and its relationship with the change of Air and Sea system in the early stage [J]. *Journal of meteorology*, 2011, 69 (2): 320-333.
- [13] 马树庆,王琪,沈享文,许英子,李哲.水稻障碍型冷害损失评估及预测动态模型研究[J].气象学报,2003,61(4):507-512.
MA S Q, WANG Q, SHEN X W, XU Y Z, LI Z. Model study on the evaluation and forecast of loss for sterile-type cool injury in rice plants [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61 (4): 507-512.
- [14] 郭晓丽,王立刚,丘建军,李金华,祝必琴,肖金香,高懋芳.基于GIS的东北地区水稻低温冷害区划研究[J].江西农业大学学报,2009,31(3):494-498.
GUO X L, WANG L G, QIU J J, LI J H, ZHU B Q, XIAO J X, GAO M F. An analysis of cold damage on rice in Northeast China based on GIS [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, 31 (3): 494-498.
- [15] 檀艳静,张佳华,姚凤梅, Vijendra BOKEN.中国作物低温冷害监测与模拟预报研究进展[J].生态学杂志,2013,32(7):1920-1927.
TAN Y J, ZHANG J H, YAO F M, VIJENDRA B. Research progress on low-temperature cold injury monitoring and simulation of Chinese crops [J]. *Journal of Ecology*, 2013, 32 (7): 1920-1927.
- [16] 李广旭,陈华民,吴茂森,何晨阳.OsBTF3过量表达和RNAi转基因水稻抗盐和抗低温胁迫鉴定[J].中国水稻科学,2012,26(1):5-8.
LI G X, CHEN H M, WU M S, HE C Y. Overexpression of OsBTF3 and identification of salt tolerance and low temperature stress resistance of RNAi transgenic rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26 (1): 5-8.
- [17] 胡春丽,李辑,林蓉,李晶,王颖.东北水稻障碍型低温冷害变化特征及其与关键生育期温度的关系[J].中国农业气象,2014,35(3):323-329.
HU C L, LI J, LIN R, LI J, WANG Y. Characteristics of rice

- differential low temperature disasters in Northeast China and their relations with temperature in key growth periods [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35 (3): 323–329. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2014.03.014.
- [18] 朱海霞, 王秋京, 闫平, 纪仰慧, 王萍, 姜丽霞. 孕穗抽雄期低温处理对黑龙江省主栽水稻品种结实率的影响 [J]. 中国农业气象, 2012, 33 (2): 304–309. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2012.02.024.
- ZHU H X, WANG Q J, YAN P, JI Y H, WANG P, JIANG L X. Effect of low temperature treatment at heading stage on seeding rate of main rice varieties in Heilongjiang Province [J]. *Agrometeorology in China*, 2012, 33 (2): 304–309. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2012.02.024.
- [19] 宋广树, 孙忠富, 孙蕾, 杜克明, 王夏. 东北中部地区水稻不同生育时期低温处理下生理变化及耐冷性比较 [J]. 生态学报, 2011, 31 (13): 3788–3795.
- SONG G S, SUN Z F, SUN L, DU K M, WANG X. Physiological changes and cold tolerance of rice under low temperature treatment at different growth stages in Central Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (13): 3788–3795.
- [20] WARREN C R, DREYER E. Temperature response of photosynthesis and internal conductance to CO₂: Results from two independent approaches [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57 (12): 3057–3067.
- [21] 邓化冰, 车芳璐, 肖应辉, 唐文帮, 盘毅, 刘志贤, 陈立云. 开花期低温胁迫对水稻花粉性状及剑叶理化特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (1): 66–72. doi:10.13287/j.1001-9332.2011.0022.
- DENG H B, CHE F L, XIAO Y H, TANG W B, PAN Y, LIU Z X, CHEN L Y. Effects of low temperature stress at flowering stage on pollen characters and flag leaf physicochemical characteristics of rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (1): 66–72. doi:10.13287/j.1001-9332.2011.0022.
- [22] HIROYUKI S, MASUMI O, EIJI K, ICHIRO A. Low temperature-induced sterility in rice: Evidence for the effects of temperature before panicle initiation [J]. *Field Crops Research*, 2007, 101: 221–231.
- [23] 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 [J]. *Field Crops Research*, 2013, 141: 63–68.
- [24] 娄伟平, 孙永飞, 吴利红, 毛裕定. 孕穗期气象条件对水稻每穗总粒数和结实率的影响 [J]. 中国农业气象, 2007, 28 (3): 296–299.
- LOU W P, SUN Y F, WU L H, MAO Y D. Effects of meteorological conditions at booting stage on total grain number and seed setting rate per panicle in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28 (3): 296–299.
- [25] 谢伯承, 罗伯良, 殷剑敏, 宋忠华, 李迎春. 我国南方水稻孕穗期适宜温度和全生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温指标鉴定 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (32): 14014–14015, 14219. doi:10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.32.061.
- XIE B C, LUO B L, YIN J M, SONG Z H, LI Y C. Identification of suitable temperature at booting stage and accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ for whole growth period of rice in southern China [J]. *Anhui agricultural science*, 2008, 36 (32): 14014–14015, 14219. doi:10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.32.061.
- [26] 徐福荣, 余腾琼, 严红梅, 汤翠凤, 叶昌荣, 梁斌, 戴陆园. 水稻特定颖花结实率作为孕穗开花期耐冷性鉴定指标 [J]. 中国水稻科学, 2005, 19 (5): 411–416.
- XU F R, YU T Q, YAN H M, TANG C F, YE C R, LIANG B, DAI L Y. The seed setting rate of spikelets in specific position of rice as an indicator of cold tolerance at the flowering stage of booting and flowering stage in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19 (5): 411–416.
- [27] 王连敏, 王立志, 王春艳, 李忠杰, 刘功, 郭建平, 关双红. 花期低温对寒地水稻颖花结实的影响 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13 (2): 92–95. doi:10.13287/j.1001-9332.2011.0022.
- WANG L M, WANG L Z, WANG C Y, LI Z J, LIU G, GUO J P, GUAN S H. Effect of low temperature during flowering on rice spikelets fertility in cold region [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13 (2): 92–95. doi:10.13287/j.1001-9332.2011.0022.
- [28] 朱振华, 金基永, 袁平荣, 赵国珍, 苏振喜, 世荣, 邹茜, 杨世准, 戴陆园. 不同海拔条件下耐冷性粳稻品种的稻米淀粉RVA谱特性 [J]. 中国水稻科学, 2010, 24 (2): 151–156. doi:10.3969/j.issn.1001-7216.2010.02.08.
- ZHU Z H, JIN J Y, YUAN P R, ZHAO G Z, SU Z X, SHI R, ZOU Q, YANG S Z, DAI L Y. RVA spectrum characteristics of rice starch in cold-tolerant japonica rice varieties at different altitudes [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24 (2): 151–156. doi:10.3969/j.issn.1001-7216.2010.02.08.
- [29] 武琦. 不同生育时期低温胁迫下寒地粳稻淀粉积累规律的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- WU Q. Study on starch accumulation of japonica rice in cold region under low temperature stress at different growth stages [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [30] 王雨. 黑龙江省水稻低温冷害发生规律研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- WANG Y. Study on the occurrence of cold damage of rice in Heilongjiang Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [31] 曾宪国, 项洪涛, 王立志, 王连敏. 孕穗期不同低温对水稻空壳率的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2014 (6): 19–22.
- ZENG X G, XIANG H T, WANG L Z, WANG L M. Effects of different low temperature at booting stage on empty shell rate of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2014 (6): 19–22.
- [32] 曲辉辉, 姜丽霞, 朱海霞, 闫平, 宫丽娟, 吕佳佳, 王瞭瞭, 纪仰慧. 孕穗期低温对黑龙江省主栽水稻品种空壳率的影响 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (3): 489–493. doi:10.13292/j.1000-4890.2011.0087.
- QU H H, JIANG L X, ZHU H X, YAN P, GONG L J, LYU J J, WANG L L, JI Y H. Effect of low temperature at booting stage on empty shell rate of main rice varieties in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Ecology*, 2011, 30 (3): 489–493. doi:10.13292/j.1000-4890.2011.0087.
- [33] 刘民. 水稻低温冷害分析及研究进展 [J]. 黑龙江农业科学, 2009 (4): 154–157.
- LIU M. Analysis and research progress of low temperature chilling injury in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009 (4): 154–157.
- [34] 韩龙植, 朴钟泽, 高熙宗. 水稻耐冷性对稻米品质冷水反应的影响 [J]. 中国农业科学, 2003, 36 (7): 757–763.

- HAN L Z, PIAO Z Z, GAO X Z. Effect of cold tolerance on cold water response of rice quality [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7): 757-763.
- [35] 赵国珍, 杨世准, 芮钟斗, 廖新华, 苏振喜, 世荣, 蒋聪, 戴陆园. 冷水胁迫对云南粳稻品质性状的影响[J]. *中国水稻科学*, 2009, 23(1): 36-42.
- ZHAO G Z, YANG S Z, RUI Z D, LIAO X H, SU Z X, SHI R, JIANG C, DAI L Y. Effects of cold water stress on quality characters of japonica rice in Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(1): 36-42.
- [36] 蒋李键. 结实期温度胁迫对水稻产量和品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- JIANG L J. Effects of temperature stress on yield and quality of rice at seeding stage [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.
- [37] 宋广树, 孙忠富, 王夏, 刘妍. 不同生育时期低温处理对水稻品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(18): 174-179.
- SONG G S, SUN Z F, WANG X, LIU Y. Effect of low temperature on rice quality in different growth period [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(18): 174-179.
- [38] 王士强, 宋晓慧, 赵海红, 孙明明, 萧长亮, 顾春梅, 那永光, 解保胜, 曹立勇, 程式华. 孕穗期低温胁迫对寒地水稻产量和品质的影响[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(3): 579-586. doi:10.13872/j.1000-0275.2016.0048.
- WANG S Q, SONG X H, ZHAO H H, SUN M M, XIAO C L, GU C M, NA Y G, XIE B S, CAO L Y, CHENG S H. Effects of low temperature stress at booting stage on yield and quality of rice in cold region [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(3): 579-586. doi:10.13872/j.1000-0275.2016.0048.
- [39] 褚春燕, 王锦冬, 程远, 张宇, 孙桂玉. 孕穗-灌浆期低温对三江平原主栽水稻品种品质的影响[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(11): 751-761. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.11.006.
- CHU C Y, WANG J D, CHENG Y, ZHANG Y, SUN G Y. Effect of low temperature at booting and filling stage on quality of main rice varieties in Sanjiang Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(11): 751-761. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.11.006.
- [40] 张荣萍. 灌浆前期低温胁迫对粳水稻产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(8): 63-68. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.08.021.
- ZHANG R P. Effects of low temperature stress on yield and quality of indica-japonica rice at early filling stage [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(8): 63-68. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.08.021.
- [41] 纪瑞鹏, 于文颖, 武晋雯, 冯锐, 张玉书. 气候平均值变化对辽宁水稻延迟型冷害评估结果的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1695-1703. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150331.006.
- JI R P, YU W Y, WU J W, FENG R, ZHANG Y S. Effect of Climate level change on the evaluation results of delayed chilling injury in rice (*Oryza sativa* L.) in Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1695-1703. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150331.006.
- [42] 李雨鸿, 张微玮, 李琳琳, 李辑, 胡春丽, 王婷, 张晓月. 辽宁水稻低温冷害分布特征及危险性评估[J]. *大麦与谷类科学*, 2018, 35(5): 47-52. doi:org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2018.05.013.
- LI Y H, ZHANG W W, LI L L, LI J, HU C L, WANG T, ZHANG X Y. Distribution characteristics and risk assessment of low temperature chilling injury in Liaoning rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35(5): 47-52. doi:org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2018.05.013.
- [43] 马熙达, 任传友, 王艳华, 徐一丹, 赵东妮, 陈伟, 杨斌, 田平. 孕穗开花期持续低温对不同熟期水稻气孔导度的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(6): 682-690. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2016.06.008.
- MA X D, REN C Y, WANG Y H, XU Y D, ZHAO D N, CHEN W, YANG B, TIAN P. The effect of continuous low-temperature on the stomatal conductance of rice in different ripening stages [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(6): 682-690. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2016.06.008.
- [44] 程方民, 刘正辉, 张嵩午. 稻米品质形成的气候生态条件评价及我国地域分布规律[J]. *生态学报*, 2002, 22(5): 636-642.
- CHENG F M, LIU Z H, ZHANG S W. The evaluation of climatic ecology condition for the rice quality formation and its distribution laws in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 636-642.
- [45] 潘熙曙, 胡定汉, 李迎征, 李儒庆, 张建勋. 水稻低温冷害和高温热害的发生特点及预防措施[J]. *中国稻米*, 2007, 13(6): 52-54.
- PAN X S, HU D H, LI Y Z, LI R Q, ZHANG J X. Occurrence characteristics and preventive measures of rice cold damage and heat damage at low temperature [J]. *China Rice*, 2007, 13(6): 52-54.
- [46] 沈鹏, 金正勋, 罗秋香, 金学泳, 孙艳丽. 水稻灌浆过程中籽粒淀粉合成关键酶活性与蒸煮食味品质的关系[J]. *中国水稻科学*, 2006(1): 23-24.
- SHEN P, JIN Z X, LUO Q X, JIN X Y, SUN Y L. The relationship between key enzyme activities of starch synthesis and cooking and eating quality in Rice during grain filling [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006(1): 23-24.
- [47] TOSHIO T. Relation between mean air temperature during ripening period of rice and amylographic characteristics or cooking quality [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1999, 68(1): 45-49.
- [48] 李秀芬, 贾燕, 黄元财. 沈阳地区气候因子对稻米品质的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2005, 36(5): 523-527.
- LI X F, JIA Y, HUANG Y C. Effect of climate factors on rice quality in Shenyang area [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(5): 523-527.
- [49] 王士强. 寒地水稻孕穗期耐冷性差异及外源物质调控研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- WANG S Q. The difference of low temperature tolerance and regulation of exogenous substances an booting stage of rice in cold region [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [50] 王连敏, 王立志, 李忠杰, 王春艳, 刘功, 杨新春. 灌浆阶段低温对寒地水稻碾米及外观品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2005(6): 1-4.
- WANG L M, WANG L Z, LI Z J, WANG C Y, LIU G, YANG X C. Effect of low temperature during grain filling stage on milling and appearance quality of rice in cold region [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2005(6): 1-4.