

双季优质稻产量和品质形成对开放式主动增温的响应

杨陶陶¹ 胡启星¹ 黄山¹ 曾研华^{1,*} 谭雪明^{1,*} 曾勇军¹ 潘晓华¹ 石庆华¹ 张俊²

(¹作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心/南方粮油作物协同创新中心, 南昌 330045; ²中国农业科学院 作物科学研究所, 北京 100081; *通讯联系人, E-mail: zyh74049501@163.com, txmfy@163.com)

Response of Yield and Quality of Double-cropping High Quality Rice Cultivars Under Free-air Temperature Increasing

YANG Taotao¹, HU Qixing¹, HUANG Shan¹, ZENG Yanhua^{1,*}, TAN Xueming^{1,*}, ZENG Yongjun¹, PAN Xiaohua¹, SHI Qinghua¹, ZHANG Jun²

(¹Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/ Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University/Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Nanchang 330045; ²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; *Corresponding author, E-mail: zyh74049501@163.com, txmfy@163.com)

Abstract: 【Objective】Rice is an important food crop in China, thus it is very important for food security to clarify the influence of global warming on the yield and quality of double-cropping high quality rice cultivars. 【Method】A free air temperature increasing facility (FATI) was constructed in a double-cropping rice system with Jinzao 47 (*indica* inbred) and Liangyou 287 (*indica* hybrid) as early rice and Xiangyaxiangzhen (*indica* inbred), Wanxiangyouhuazhan (*indica* hybrid) and, Yongyou 5550 (*japonica* hybrid) as late rice. The responses of rice yield, yield components, and grain quality to warming were determined. 【Result】The effect of warming (1.3°C—1.6°C) on the yield of early and late *indica* rice was not significant, but the yield of late *japonica* cultivar decreased by 10.2% mainly due to the decrease in grain number per panicle. Under FATI, the plant height of both early and late rice decreased. The growth duration of early rice was shortened by 3—4 days under warming, while that of the late rice did not change significantly. Warming significantly increased the chalky grain percentage and chalkiness for both early and late rice. The brown rice percentage of Liangyou 287 and the head rice percentage of both Liangyou 287 and Yongyou 5550 were significantly increased by warming. The protein content of late rice was significantly increased by warming, whereas the amylose content of late *japonica* rice showed the opposite trend. In contrast, both the protein and amylose contents of early rice were not significantly affected by warming. The characteristic values of RVA of rice varied with cropping seasons and cultivars. 【Conclusion】Warming exerted a greater influence on the yield of high quality late *japonica* rice than that of *indica* rice. Increasing temperature could improve the milling quality, but decrease the appearance quality. Late rice was more sensitive to warming in nutrition quality and eating quality as compared with early rice.

Key words: global warming; double-cropping rice; yield; rice quality

摘 要: 【目的】水稻是我国最重要的口粮作物。明确气候变暖对双季优质稻产量和稻米品质的影响对我国粮食安全至关重要。【方法】采用稻田开放式远红外主动增温系统, 早稻以金早 47(常规籼稻)、两优 287(杂交籼稻), 晚稻以象牙香珍(常规粳稻)、万象优华占(杂交粳稻)和甬优 5550(杂交粳稻)为材料, 设置全生育期增温和全生育期不增温 2 个处理, 分别测定双季优质稻的产量、产量构成和稻米品质。【结果】与不增温相比, 全生育期增温(1.3°C~1.6°C)对早晚籼稻产量影响不显著, 但晚粳稻产量显著下降, 降幅为 10.2%, 主要是因为其每穗粒数下降。全生育期增温降低了早晚稻株高; 早稻生育期缩短了 3~4 d, 而晚稻生育期无明显变化。全生育期增温下, 双季优质稻米垩白粒率和垩白度显著增加, 早稻两优 287 出糙率和整精米率及晚粳甬优 5550 整精米率显著提高; 同时, 晚稻蛋白质含量提高, 但晚粳直链淀粉含量降低, 而早稻蛋白质和直链淀粉含量无明显变化; 此外, 稻米 RVA 谱特征值因季别和品种而异。【结论】全生育期增温对优质晚粳稻产量影响大于籼稻, 不利于外观品质的保优, 但有利于改善优质稻米加工品质, 对晚稻营养品质和食味品质的影响也大于早稻。

收稿日期: 2018-04-23; 修改稿收到日期: 2018-06-29。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300501); 江西省重点研发计划资助项目(20171BBF60030); 江西现代农业科研协同创新专项(JXXTCX2015001, JXXTCX2017001); 江西省水稻产业技术体系专项(JXARS-02-03)。

关键词: 全球变暖; 增温; 双季稻产量; 稻米品质

中图分类号: Q945.78; S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)06-0572-09

过去的一百年我国地表平均气温升高了 1.1°C , 且根据预测, 到2050年我国平均气温将上升 1.2°C ~ 2.0°C ^[1]。水稻是世界上重要的粮食作物之一, 我国是世界上最大的水稻生产国, 稻谷总产量世界第一, 且我国的水稻产量占粮食总产量的 $1/3$ ^[2]。因此, 研究水稻产量对气候变暖的响应具有重要意义。

前人已经开展了许多大田试验来研究增温对水稻产量的影响^[3-6]。运用开放式增温系统(free air temperature increase, FATI)模拟全球变暖比人工气候室或温室更真实^[7]。增温会缩短水稻的生育期, 降低千粒重和每穗粒数, 孕穗期或抽穗开花期高温会降低水稻结实率, 从而使水稻产量降低^[3, 4, 8, 9]。温度增加 1.5°C 以内, 有利于单季稻的生产^[10], 影响稻麦轮作中水稻的产量^[8]; 不利于双季稻早稻的生产, 但增加晚稻产量^[4]。近年来, 随着生活质量的不断提高, 消费者对稻米品质的要求也越来越高。影响稻米品质的环境因素较多, 其中以环境温度最为重要^[11]。戴云云等^[6]研究表明, 灌浆结实期增温会降低稻米的加工品质和外观品质, 增加稻米蛋白质含量, 但蒸煮食味品质和淀粉结构对日间和夜间增温响应差异较大。董文军^[5]发现增温会降低稻米外观品质和直链淀粉含量, 稻米的RVA峰值黏度、热浆黏度、崩解值和糊化温度呈上升趋势, 而最终黏度、消解值和回复值呈下降趋势, 但加工品质和蛋白质含量年度间存在差异。

目前我国有关开放式主动增温对水稻生长发育和产量的研究主要集中在稻麦系统, 而双季稻产量和稻米品质对全生育期增温的响应尚未见报道。因此, 本研究在双季稻区建立了开放式远红外主动增温系统, 以期探明全生育期增温对双季稻产量和稻米品质的影响, 为未来气候变暖下双季稻的优质丰产栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和供试材料

试验于2017年3—11月在江西省上高县泗溪镇曾家村进行($115^{\circ}09'\text{E}$, $28^{\circ}31'\text{N}$), 试验地年降水量为1650 mm, 年平均气温为 17.5°C 。供试优质水稻品种: 早稻为金早47(常规籼稻)和两优287(杂交籼稻); 晚稻为象牙香珍(常规籼稻)、万象优华占(杂交籼稻)和甬优5550(杂交粳稻)。土壤基础理化性质

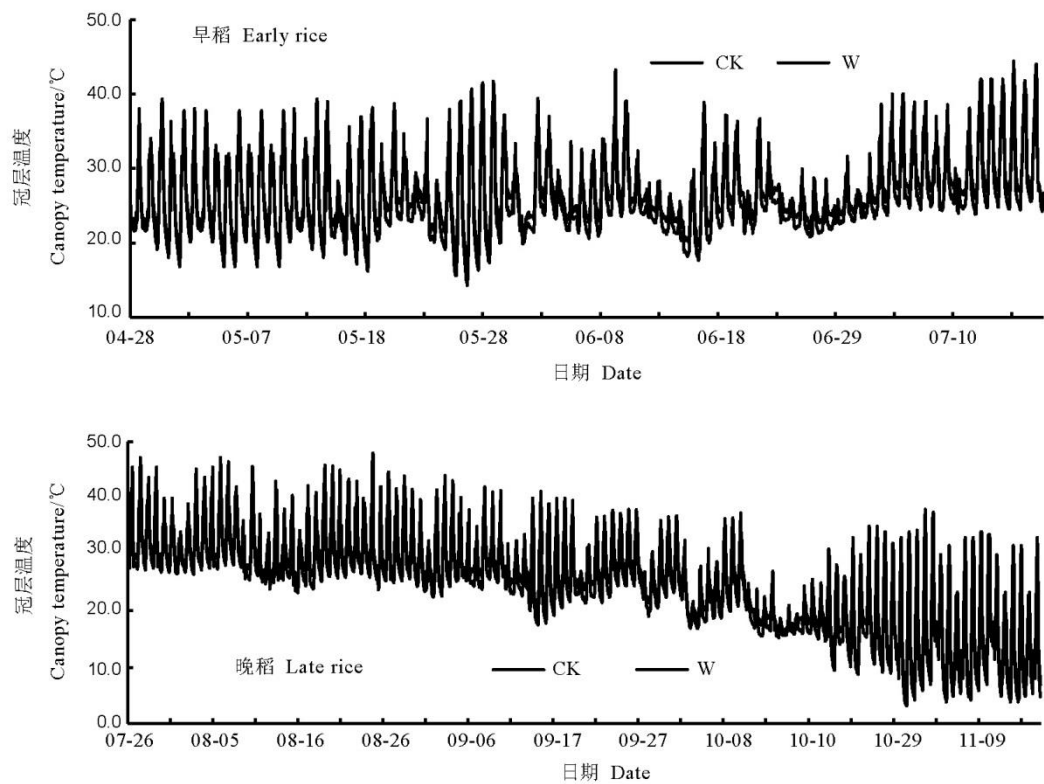
如下: pH 5.5, 有机质 28.60 g/kg, 全氮 2.11 g/kg, 碱解氮 195.10 mg/kg, 有效磷(P_2O_5) 22.10 mg/kg, 速效钾(K_2O) 65.20 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用开放式增温系统(free air temperature increase, FATI)进行增温处理, 该系统参照董文军^[12]的设计方案, 略有修改。该系统由3个单元组成, 分别为动力单元、远红外加热单元和温度监测单元。动力单元为380 V的交流电; 远红外加热单元(购自江苏大德特种光源有限公司)分为用于固定的不锈钢三角支架(高度200 cm, 宽度220 cm)、用于反射红外线的不锈钢反射罩(长200 cm, 宽20 cm)和用于加热的远红外黑体管(额定功率为1500 W, 长180 cm, 直径1.8 cm); 温度监测单元由3个温度传感器(ZDR-41, 杭州泽大仪器有限公司)组成。

水稻冠层温度由温度记录仪自动记录, 记录间隔为30 min。温度探头保持在远红外黑体管中间正下方的水稻冠层中, 随着水稻的生长调节增温装置与冠层之间的距离, 增温装置与温度探头之间的距离为0.75 m, 以保证适当的增温幅度。早晚稻移栽至成熟期间冠层平均温度的变化如图1所示, 增温处理的水稻冠层温度与不增温处理存在明显差异, 且增温处理的早晚稻移栽至成熟期间冠层温度变化动态与不增温处理的变化动态基本一致。早晚稻不同阶段的增温幅度如表1所示。与不增温处理相比, 早稻抽穗前(移栽至抽穗)增温 1.3°C ~ 1.7°C , 抽穗后(抽穗至成熟)增温 0.8°C ~ 1.3°C , 全生育期(移栽至成熟)增温 1.3°C ; 而晚稻抽穗前增温 1.5°C ~ 1.6°C , 抽穗后增温 1.7°C , 全生育期增温 1.6°C 。从白天增温效果来看, 与不增温处理相比, 早稻抽穗前增温 1.1°C ~ 1.7°C , 抽穗后增温 0.4°C ~ 0.5°C , 全生育期增温 0.8°C ~ 1.1°C ; 晚稻抽穗前增温 1.3°C ~ 1.4°C , 抽穗后增温 1.3°C ~ 1.4°C , 全生育期增温 1.4°C 。从夜间增温效果来看, 与不增温处理相比, 早稻抽穗前增温 1.6°C ~ 1.8°C ; 抽穗后增温 1.3°C ~ 1.6°C ; 全生育期增温 1.6°C 。与不增温处理相比, 晚稻抽穗前增温 1.7°C ~ 1.9°C ; 抽穗后增温 2.0°C ; 全生育期增温 1.9°C 。因此, 开放式主动增温能够较好地模拟未来气候变化的基本趋势。

试验设置2个处理: 1)全生育期增温(W), 水稻从移栽到成熟全生育期内昼夜持续增温; 2)全生育期不增温(CK), 安装与增温处理相同的装置, 但



CK—不增温；W—全生育期增温。
CK, Control; W, Warming.

图1 开放式主动增温系统下早晚稻冠层全生育期平均温度变化
Fig. 1. Trends of double-cropping rice canopy temperature variation under FATI.

表1 开放式主动增温下双季稻各生育阶段冠层平均温度增幅
Table 1. Double-cropping rice canopy temperature increment during different growth stages under FATI. °C

季别 Season	品种 Cultivar	全天增温幅度 Canopy temperature increment			白天增温幅度 Daytime canopy temperature increment			夜间增温幅度 Nighttime canopy temperature increment		
		抽穗前 Pre-heading		全生育期 Whole growth duration	抽穗前 Pre-heading		全生育期 Whole growth duration	抽穗前 Pre-heading		全生育期 Whole growth duration
		抽穗后 Post-heading	抽穗后 Post-heading		抽穗后 Post-heading	抽穗后 Post-heading		抽穗后 Post-heading	抽穗后 Post-heading	
早稻 Early rice	金早 47	1.7±0.1	0.8±0.1	1.3±0.1	1.7±0.1	0.4±0.	1.1±0.2	1.8±0.1	1.3±0.2	1.6±0.1
	Jinzao 47									
	两优 287	1.3±0.1	1.3±0.2	1.3±0.1	1.1±0.1	0.5±0.1	0.8±0.1	1.6±0.1	1.6±0.1	1.6±0.1
	Liangyou 287									
晚稻 Late rice	象牙香珍	1.6±0.2	1.7±0.2	1.6±0.3	1.4±0.2	1.3±0.2	1.4±0.2	1.9±0.1	2.0±0.2	1.9±0.2
	Xiangyaxiangzhen									
	万象优华占	1.5±0.1	1.7±0.1	1.6±0.1	1.4±0.1	1.3±0.2	1.4±0.1	1.7±0.2	2.0±0.2	1.9±0.2
	Wanxiangyouhuazhan									
	甬优 5550	1.5±0.2	1.7±0.2	1.6±0.1	1.3±0.2	1.4±0.1	1.4±0.2	1.7±0.2	2.0±0.1	1.9±0.1
	Yongyou 5550									

不供电。小区为随机区组排列，3 次重复。小区长 10 m，宽 5 m，面积为 50 m²。每个品种的实际有效面积为 2 m²。早稻于 4 月 1 日播种，4 月 28 日移栽，栽插规格为 20 cm×12 cm，每穴 3 苗。氮肥为尿素(N 含量为 46%)，施用量为(纯氮)165 kg/hm²， $m_{基肥} : m_{分蘖肥} : m_{穗肥} = 5 : 2 : 3$ ；磷肥为钙镁磷肥(P₂O₅ 含量为 12%)，施用量为(折合 P₂O₅)82.5 kg/hm²，全作基肥；钾肥为氯化钾(折合 K₂O 含量为 60%)，施用量为(K₂O)148.5 kg/hm²， $m_{基肥} : m_{穗肥} = 7 : 3$ 。晚稻于 6 月 27 日播种，7 月 26 日移栽，栽插规格为 25 cm

×13 cm，每穴 2 苗。氮肥为尿素(N 含量为 46%)，施用量为(折合纯氮)210 kg/hm²， $m_{基肥} : m_{分蘖肥} : m_{穗肥} = 2 : 1 : 2$ ；磷肥为钙镁磷肥(P₂O₅ 含量为 12%)，施用量为(折合 P₂O₅)105 kg/hm²，全作基肥；钾肥为氯化钾(K₂O 含量为 60%)，施用量为(折合 K₂O)189 kg/hm²， $m_{基肥} : m_{穗肥} = 7 : 3$ 。其他田间管理措施与高产优质双季稻生产相同。

1.3 测定指标及方法

(1)生育期。记录水稻的移栽期、抽穗期和成熟期的日期。

表 2 开放式主动增温对双季稻生育进程的影响

Table 2. Effects of FATI facility on double-cropping rice growth stage.

季别	品种	处理	移栽	抽穗	抽穗前	成熟	抽穗后	全生育期
Season	Cultivar	Treatment	Transplanting	Heading	Pre-heading/d	Maturity	Post-heading/d	Whole growth duration/d
早稻 Early rice	金早 47	CK	04-28	06-15	48	07-18	33	81
	Jinza0 47	W		06-12	45	07-14	32	77
	两优 287	CK	04-28	06-10	43	07-15	35	78
	Liangyou 287	W		06-08	41	07-12	34	75
晚稻 Late rice	象牙香珍	CK	07-26	09-24	60	11-16	43	103
	Xiangyaxiangzhen	W		09-24	60	11-16	43	103
	万象优华占	CK	07-26	09-14	50	11-13	50	100
	Wanxiangyouhuazhan	W		09-14	50	11-13	50	100
	甬优 5550	CK	07-26	09-13	49	11-15	53	102
	Yongyou 5550	W		09-13	49	11-15	53	102

CK—不增温；W—全生育期增温。

CK, Control; W, Warming.

(2)株高。在收获时每个小区选取连续 20 穴水稻，测量主茎的高度。

(3)产量及其构成。于成熟期在每个小区的远红外黑体管两侧对称位置收取水稻 50 穴用于测定实际产量。每个小区调查 50 穴用于计算平均有效穗数，根据平均有效穗数每个小区取 3 穴用于测定每穗粒数、结实率和千粒重。

(4)稻米品质。出糙率、精米率、整精米率、垩白率、垩白度、透明度、长宽比、直链淀粉含量的测定方法参照中华人民共和国国家标准 GB/T 17891-2017《优质稻谷》。其中，蛋白质含量采用凯氏定氮法测定精米中的含氮量，再乘以换算系数 5.95。

(5)稻米 RVA 特征谱。米粉黏度用快速黏度分析仪(Rapid Viscosity-Analyzer Super3，澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产)测定，快速黏度分析仪自动读出糊化开始温度、峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值、回复值和消减值。

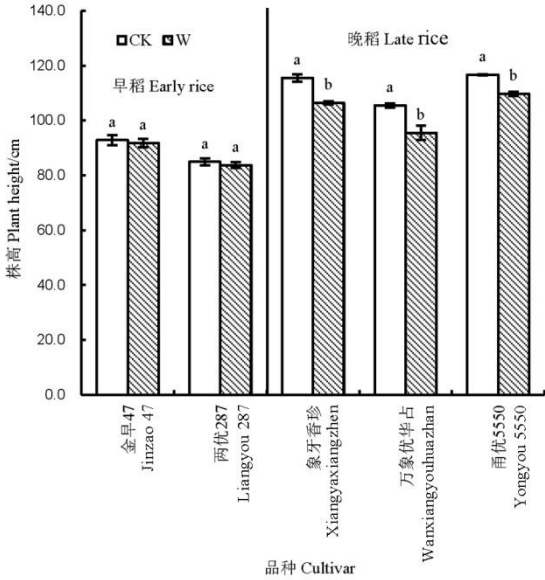
1.4 数据分析

试验数据采用 DPS 7.5 进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 开放式主动增温条件下双季优质稻的生育特性

从表 2 可以看出，与不增温处理相比，增温处理对双季优质早稻生育进程的影响存在显著差异。全生育期增温处理下，供试早稻抽穗前(移栽至抽穗)、抽穗后(抽穗至成熟)及全生育期(移栽至成熟)分别缩短了 2~3 d、1 d 及 3~4 d；而增温处理对晚稻生育进程无明显影响。图 2 表明，增温处理下，



CK—不增温；W—全生育期增温；柱上不同小写字母者表示同一品种不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$, $n=3$ ，最小显著差数法)。

CK, Control; W, Warming; Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments for each cultivar ($P<0.05$, $n=3$, LSD).

图 2 开放式主动增温对双季稻株高的影响

Fig. 2. Effects of FATI on plant height of double-cropping rice.

早晚稻株高均降低，且晚稻株高显著下降，供试品种株高降幅为 6.0%~9.4%。

2.2 开放式主动增温条件下双季优质稻产量及产量构成

由表 3 可知，全生育期增温系统下双季早晚稻产量及产量构成存在明显差异。增温对供试早稻产量无明显影响，但显著影响结实率(两优 287)和千粒重(金早 47)。与常温对照相比，增温对象牙香珍、万象优华占的产量和产量构成均无显著影响，但显著降低甬优 5550 的产量，主要是因为其每穗粒数

表 3 开放式主动增温对双季稻产量和产量构成的影响

Table 3. Effects of FATI on double-cropping rice yield and its components.

季别 Season	品种 Cultivar	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number/($\times 10^4$ hm ²)	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 Grain weight/g	产量 Yield/(t hm ²)
早稻 Early rice	金早 47 Jinzhao 47	CK	266.0 \pm 24.4 a	143.9 \pm 12.4 a	75.2 \pm 0.6 a	26.4 \pm 0.3 a	7.42 \pm 0.58 a
	两优 287 Liangyou 287	W	254.9 \pm 23.4 a	150.3 \pm 7.0 a	76.7 \pm 2.9 a	25.3 \pm 0.1 b	7.37 \pm 0.41 a
		CK	336.1 \pm 22.1 a	130.5 \pm 14.0 a	73.4 \pm 2.6 b	23.2 \pm 0.3 a	7.40 \pm 0.23 a
		W	328.5 \pm 29.7 a	123.3 \pm 4.4 a	80.7 \pm 3.2 a	22.9 \pm 0.2 a	7.47 \pm 0.34 a
晚稻 Late rice	象牙香珍 Xiangyaxiangzhen	CK	331.8 \pm 17.0 a	156.6 \pm 13.4 a	64.2 \pm 2.9 a	18.9 \pm 0.5 a	8.82 \pm 0.56 a
	万象优华占 Wanxiangyouhuazhan	W	345.7 \pm 29.4 a	149.9 \pm 2.9 a	66.7 \pm 6.0 a	18.6 \pm 0.6 a	9.05 \pm 0.58 a
		CK	356.9 \pm 21.7 a	169.8 \pm 14.1 a	76.9 \pm 2.5 a	21.2 \pm 0.1 a	10.03 \pm 0.70 a
		W	358.5 \pm 32.3 a	167.6 \pm 19.7 a	77.6 \pm 7.6 a	21.2 \pm 0.8 a	9.85 \pm 0.50 a
	甬优 5550 Yongyou 5550	CK	239.0 \pm 25.1 a	254.0 \pm 17.4 a	75.5 \pm 6.4 a	25.1 \pm 0.5 a	12.29 \pm 0.97 a
		W	230.3 \pm 24.9 a	224.1 \pm 15.2 b	78.3 \pm 0.8 a	25.7 \pm 0.7 a	11.04 \pm 0.92 b

CK—不增温；W—全生育期增温；不同小写字母者表示同一品种不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$, $n=3$, 最小显著差数法)。

CK, Control; W, Warming; Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments for each cultivar ($P<0.05$, $n=3$, LSD).

表 4 开放式主动增温对稻米外观品质、加工品质、蛋白质和直链淀粉含量的影响

Table 4. Effects of FATI on rice appearance quality, milling quality, protein content and amylose content.

季别 Season	品种 Cultivar	处理 Treatment	长宽比 Length-width ratio	垩白粒率 Chalky grain rate/%	垩白度 Chalkiness /%	出糙率 Brown rice rate/%	精米率 Milled rice rate/%	整精米率 Head rice rate/%	蛋白质含量 Protein content /%	直链淀粉含量 Amylose content/%
早稻 Early rice	金早 47 Jinzhao 47	CK	2.10 \pm 0.00 a	99.3 \pm 0.6 a	43.7 \pm 2.2 b	77.1 \pm 1.3 a	65.7 \pm 0.8 a	47.0 \pm 1.2 a	9.77 \pm 0.58 a	20.39 \pm 0.23 a
	两优 287 Liangyou 287	W	2.13 \pm 0.06 a	100.0 \pm 0.0 a	47.4 \pm 0.6 a	77.5 \pm 0.5 a	66.1 \pm 0.7 a	49.4 \pm 1.8 a	9.95 \pm 0.73 a	19.61 \pm 1.20 a
		CK	3.50 \pm 0.00 a	40.3 \pm 2.1 b	15.1 \pm 1.1 b	75.8 \pm 0.4 b	65.8 \pm 0.5 a	39.4 \pm 0.6 b	10.24 \pm 0.56 a	16.58 \pm 0.11 a
		W	3.53 \pm 0.06 a	45.3 \pm 3.8 a	20.2 \pm 1.9 a	78.8 \pm 1.5 a	66.4 \pm 1.8 a	44.9 \pm 0.6 a	10.04 \pm 0.82 a	16.82 \pm 0.28 a
晚稻 Late rice	象牙香珍 Xiangyaxiangzhen	CK	4.20 \pm 0.00 a	13.7 \pm 1.2 b	3.3 \pm 0.4 b	77.5 \pm 0.9 a	69.1 \pm 0.9 a	59.9 \pm 0.8 a	7.89 \pm 0.37 b	12.69 \pm 0.38 a
	万象优华占 Wanxiangyouhuazhan	W	4.20 \pm 0.00 a	18.0 \pm 3.7 a	4.6 \pm 0.7 a	78.2 \pm 1.3 a	69.6 \pm 0.5 a	61.2 \pm 0.2 a	8.93 \pm 0.12 a	12.47 \pm 0.33 a
		CK	4.07 \pm 0.06 a	18.0 \pm 2.0 b	5.5 \pm 0.6 b	81.5 \pm 0.4 a	72.8 \pm 0.5 a	60.8 \pm 3.5 a	7.52 \pm 0.32 b	13.49 \pm 0.35 a
		W	3.93 \pm 0.06 a	23.3 \pm 1.5 a	6.9 \pm 0.9 a	81.8 \pm 0.2 a	72.9 \pm 0.9 a	59.4 \pm 1.7 a	8.00 \pm 0.12 a	13.46 \pm 0.02 a
	甬优 5550 Yongyou 5550	CK	2.33 \pm 0.06 a	20.3 \pm 1.5 a	5.1 \pm 0.8 a	82.8 \pm 0.6 a	74.9 \pm 1.1 a	65.6 \pm 3.3 b	6.98 \pm 0.16 b	14.39 \pm 0.23 a
		W	2.37 \pm 0.06 a	23.3 \pm 2.9 a	5.7 \pm 0.9 a	83.2 \pm 0.3 a	76.0 \pm 0.6 a	71.9 \pm 1.2 a	7.75 \pm 0.20 a	13.09 \pm 0.12 b

CK—不增温；W—全生育期增温；不同小写字母者表示同一品种不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$, $n=3$, 最小显著差数法)。

CK, Control; W, Warming; Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments for each cultivar ($P<0.05$, $n=3$, LSD).

下降显著。因此，增温对早晚籼稻产量无显著影响，但显著降低晚粳稻的产量。

2.3 开放式主动增温条件下双季优质稻品质

由表 4 可知，与不增温相比，增温对早晚稻稻米的长宽比无影响，但显著增加了早晚稻稻米垩白粒率和垩白度，早稻稻米的垩白粒率和垩白度分别增加了 0.7%~5.0%和 3.7%~5.1%；晚稻稻米的垩白粒率和垩白度分别增加了 3.0%~5.3%和 0.6%~1.4%。因此，增温条件下早晚稻稻米的外观品质均会变差。增温有利于提高早稻稻米的加工品质(表 4)，出糙率、精米率及整精米率分别增加了 0.4%~3.0%、0.4%~0.6%、2.4%~5.5%，且两优 287 的出糙率和整精米率差异均达显著水平；对于晚稻而言，其加工品质趋势与早稻较为相似，但差异总

体未达显著水平，甬优 5550 整精米率除外。与不增温相比，增温对早稻稻米的蛋白质含量和直链淀粉含量无显著影响；而晚稻稻米蛋白质含量显著增加，晚稻稻米蛋白质含量增加了 0.48%~1.04%。与不增温相比，增温对晚籼稻直链淀粉含量无影响，但使甬优 5550 的直链淀粉含量显著降低了 1.30%。

稻米淀粉 RVA 特征谱是指一定的米粉在加热、高温和冷却过程中，米粉的黏滞性发生一系列变化所形成的淀粉糊的黏度谱，它是淀粉热物理特性的反映，是评价稻米蒸煮食味品质优劣的一项重要指标。由表 5 可知，增温处理下，无论是早稻，还是晚稻，稻米 RVA 谱特征值品种间存在明显差异。增温显著影响早稻稻米淀粉崩解值，金早 47 崩解值显著增加，而两优 287 则相反，稻米淀粉 RVA 其他

表 5 开放式主动增温对稻米 RVA 特征谱的影响

Table 5. Effects of FATI on rice RVA characteristics.

季别 Season	品种 Cultivar	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity /cP	热浆黏度 Hot viscosity /cP	崩解值 Breakdown	最终黏度 Final viscosity /cP	消解值 Setback	糊化时间 Peak time /min	糊化温度 Pasting temperature/℃
早稻 Early rice	金早 47	CK	3128.3±52.6 a	2397.7±64.7 a	730.7±12.1 b	4027.0±63.8 a	898.7±28.7 a	6.4±0.0 a	83.4±0.5 a
	Jinzhao 47	W	3154.7±47.9 a	2336.7±50.4 a	818.0±6.1 a	4024.3±56.7 a	869.7±56.5 a	6.2±0.2 a	83.4±0.5 a
	两优 287	CK	3244.7±54.4 a	2348.7±44.5 a	896.0±56.5 a	3855.3±63.3 a	610.7±84.2 a	6.3±0.0 a	83.3±0.9 a
	Liangyou 287	W	3201.7±20.0 a	2410.0±14.0 a	791.7±18.6 b	3838.3±67.3 a	636.7±47.6 a	6.4±0.1 a	84.1±0.4 a
晚稻 Late rice	象牙香珍	CK	3266.3±79.5 a	1660.7±41.2 a	1605.7±43.3 a	2645.0±72.8 a	-621.3±56.9 a	6.0±0.1 a	82.0±0.9 a
	Xiangyaxiangzhen	W	3220.7±61.2 a	1553.7±36.0 b	1667.0±48.7 a	2459.0±93.3 b	-761.7±39.7 b	5.8±0.0 a	82.8±0.5 a
	万象优华占	CK	3376.5±57.3 a	1581.0±19.8 a	1795.5±77.1 a	2541.5±9.2 a	-835.0±66.5 a	5.8±0.0 a	83.5±0.6 a
	Wanxiangyouhuazhan	W	3374.3±119.0 a	1557.0±65.6 a	1817.3±84.0 a	2533.3±46.2 a	-841.0±84.9 a	5.7±0.0 a	83.6±0.4 a
	甬优 5550	CK	3450.7±14.2 b	2157.3±51.6 a	1293.3±52.6 b	3248.0±25.7 a	-202.7±14.6 a	6.3±0.1 a	80.7±2.0 a
	Yongyou 5550	W	3679.0±89.7 a	2195.0±38.6 a	1484.0±68.1 a	3245.7±49.1 a	-433.3±66.0 b	6.2±0.1 a	77.0±1.0 b

CK—不增温；W—全生育期增温；不同小写字母者表示同一品种不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$, $n=3$, 最小显著差数法)。

CK, Control; W, Warming; Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments in each cultivar ($P<0.05$, $n=3$, LSD).

特征值无显著影响。对于晚稻而言，增温显著降低象牙香珍稻米淀粉的热浆黏度、最终黏度和消减值，万象优华占淀粉 RVA 谱特征值则无变化，而晚粳甬优 5550 的峰值黏度和崩解值显著增加，消减值和糊化温度则显著降低。说明全生育期增温对早晚稻稻米 RVA 特征谱影响较大，且早晚稻季别与品种间存在较大差异。

3 讨论

3.1 开放式主动增温条件下双季优质稻冠层增温效果

为了研究农田生态系统对全球变暖的响应特征，国内外设计了大量增温系统^[7, 13, 14]。在农田生态系统中，开放式主动远红外增温系统被广泛应用于模拟全球变暖^[3, 8, 15]。本研究中早稻和晚稻冠层全生育期平均温度分别升高了 1.3℃和 1.6℃，增温效果显著；且增温幅度符合我国 2050 年内的增温预测范围^[1]。从不同生育阶段的增温幅度和白天、夜间的增温幅度可以看出，增温效果也符合气候变暖规律。同时，该系统增温的方式是远红外辐射增温，为非破坏性开放式增温，对农田的光照、湿度和风速影响较小，提高了温度处理因子的可靠性与准确性。此外，本研究中运用开放式主动远红外增温系统可以获得较适宜的增温效果，且不会改变稻田温度的日变化规律，符合稻田增温规律。

3.2 开放式主动增温条件下双季优质稻的生育进程和产量

在一定的范围内，温度的增加会直接影响水稻的生育进程^[3, 16-18]。Dong 等^[8]研究表明，冠层日平均温度增加 1.1℃~2.0℃，水稻抽穗前时间缩短 3.3 d，但对抽穗后时间无影响。Cai 等^[3]研究表明，冠

层温度增加 1.3℃~2.0℃，水稻抽穗前时间缩短 3 d，抽穗后时间缩短 1 d。本研究结果表明，增温下早稻抽穗前缩短 2~3 d，抽穗后缩短 1 d，全生育期缩短 3~4 d，说明全生育期增温对早稻生育期的影响存在非对称性。但全生育期增温对晚稻生育进程并无显著影响。作物抽穗前生育期的长短主要是由于此生长期期间的最高温度和最低温度决定的，作物的成熟主要是由于生长阶段的最高温度决定的^[17, 19]，如果作物生长的环境温度低于其生长的最适温度，其生长速率就会下降，从而导致生育期延迟；反之作物则加速成熟，生育期缩短^[20, 21]。

增温导致作物产量下降的主要原因是生育期缩短，每穗粒数和千粒重降低^[22-25]。不同的增温方式对水稻的产量影响存在较大差异。花后增温降低水稻产量，主要原因是结实率显著下降^[15]。而夜间增温对双季稻产量影响较大，降低早稻产量，与每穗粒数和千粒重下降有关，但提高晚稻产量，主要原因是每穗粒数和千粒重增加^[4]。Cai 等^[3]研究也指出增温降低每穗粒数和结实率，从而显著降低水稻产量。本研究结果与前人结论不尽一致，全生育期增温显著降低晚粳稻产量，与每穗粒数下降有关。粳稻对高温热害的反应差异大约在 3℃左右，小于籼稻的 5℃^[26]，粳稻对温度较为敏感，增温可能会影响其幼穗分化，增加颖花和枝梗的退化程度，减少颖花数量，从而导致其每穗粒数下降。增温会显著降低粳稻叶片光合速率，影响花后后氮素吸收，显著降低抽穗和成熟期的干物质积累量^[3]，影响干物质的转运与分配^[5]。而增温对籼稻产量无显著差异，可能与籼稻耐热性较强有关，一般来说，增温幅度小于 2℃，外界环境温度不会超过水稻生长温度的临界值，对籼稻光合和呼吸作用影响较小，不会影响籼稻干物质的生产与转运。关于全生育期增

温下粳稻产量形成差异机理, 还需进一步研究。

3.3 开放式主动增温条件下双季稻品质

在一定范围内, 日均温、昼温和夜温增加都会降低稻米加工品质^[6, 8, 27], 且灌浆前期温度高于26℃或低于21℃亦降低稻米加工品质^[28], 但增温下稻米加工品质存在年度间差异^[5]。稻米中蛋白质含量高可使淀粉细胞间隙填充更紧密, 籽粒强度增大, 从而提高稻米加工品质^[29]。本研究结果也表明全生育期增温提高早晚稻稻米的加工品质, 可能和蛋白质含量升高有关, 但品种间差异较大, 这可能与当年气候条件和品种遗传特性有关。本研究关于增温对稻米外观品质的影响与前人较为一致, 即增温会增加稻米垩白度和垩白粒率, 使稻米外观品质变差^[3, 5, 6, 27, 30, 31]。这主要是因为增温会加速早期胚乳细胞的生长和灌浆, 导致籽粒灌浆不充实^[28]。同时, 垩白的发生也与灌浆期间日均温和高温天数有关^[5]。

蛋白质是评价稻米营养品质的重要指标, 同时也会影响稻米的食味品质。戴云云等^[6]研究指出, 白天和夜间增温均提高了稻米蛋白质含量。但蛋白质含量也存在年度间差异^[5]。蛋白质合成主要受灌浆前期温度的影响, 而灌浆后期影响较小^[32]。温度偏高或偏低皆不利于蛋白质合成, 以灌浆期24℃时最有利于蛋白质的合成^[33]。不同品种之间蛋白质含量对温度的响应不同, 大多数品种蛋白质含量随温度上升而增加^[11]。本研究结果表明, 增温显著增加晚稻稻米蛋白质含量, 但对早稻稻米蛋白质含量无显著影响, 可能是因为增温条件下, 晚稻灌浆期温度有利于蛋白质合成; 而早稻灌浆期温度不利于蛋白质合成。

直链淀粉含量是评价稻米蒸煮食味品质的重要指标。直链淀粉含量对温度的响应研究结果不一, 且和品种类型(粳、籼)及本身直链淀粉含量有关^[33]。本研究中增温对粳稻稻米直链淀粉含量无显著影响, 但显著降低了晚粳稻直链淀粉含量。稻米RVA谱特征值与食味品质具有较好的相关性, 其中糊化温度、最终黏度、回复值及消减值与食味呈负相关, 最高黏度、热浆黏度和崩解值与食味呈正相关^[6, 34]。不同品种之间的RVA谱特征值对灌浆期温度的响应差异较大^[30]。且蛋白质含量及组分、直链淀粉含量、淀粉颗粒粒径分布和支链淀粉结构都会对淀粉RVA谱特征值产生影响^[35-37]。本研究中, 增温对早稻稻米淀粉崩解值有显著影响, 且两品种间差异较大; 增温对晚稻象牙香珍和甬优5550淀粉RVA影响较大, 但对晚稻万象优华占淀粉RVA

无影响。本研究中增温对稻米RVA谱特征值的影响因季别和品种的差异变化较大, 有待于进一步研究。

4 结论

在FATI系统下, 早晚稻冠层温度提高了1.3℃~1.6℃, 且呈现显著地季节性和昼夜差异。全生育期增温对早晚季优质籼稻产量影响较小, 对优质晚粳稻产量影响较大, 与每穗粒数下降显著相关。增温导致双季优质早晚稻外观品质变差, 对加工品质有改善作用; 同时增加晚稻季蛋白质含量, 并降低优质晚粳直链淀粉含量, 而对早稻蛋白质和直链淀粉含量无影响。此外, 全生育期增温系统下, 稻米淀粉RVA谱特征值存在季别与品种间的差异。

参考文献:

- [1] 秦大河. 气候变化与干旱. 科技导报, 2009, 27(11):3. Qin D H. Climate change and drought. *Sci Technol Rev*, 2009, 27(11):3-3. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张鑫. 夜间增温对水稻生长发育的影响. 北京: 中国农业科学院, 2016. Zhang X. Impacts of nighttime warming on rice growth and development. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [3] Cai C, Yin X Y, He S Q, Jiang W Y, Si C F, Struik P C, Luo W H, Li G, Xie Y T, Xiong Y, Pan G X. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments. *Glob Chan Biol*, 2016, 22(2): 856-874.
- [4] Chen J, Chen C G, Tian Y L, Zhang X, Dong W J, Zhang B, Zhang J, Zheng C Y, Deng A X, Song Z W, Peng C R, Zhang W J. Differences in the impacts of nighttime warming on crop growth of rice-based cropping systems under field conditions. *Eur J Agron*, 2017, 82: 80-92.
- [5] 董文军. 昼夜不同增温对粳稻产量和品质的影响研究. 南京: 南京农业大学, 2011. Dong W J. Effects of asymmetric warming on grain yield and quality of japonica rice. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [6] 戴云云, 丁艳锋, 刘正辉, 王强盛, 李刚华, 王绍华. 花后水稻穗部夜间远红外增温处理对稻米品质的影响. 中国水稻科学, 2009, 23(4): 414-420. Dai Y Y, Ding Y F, Liu Z H, Wang Q S, Li H G, Wang S H. Effects of elevated night temperature by far-infrared radiation at grain filling on grain quality of rice. *Chin J*

- Rice Sci*, 2009, 23(4): 414-420. (in Chinese with English abstract)
- [7] Kimball B A, Conley M M, Wang S P, Lin X W, Luo C Y, Morgan J, Smith D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Glob Chan Biol*, 2008, 14(2): 309-320.
- [8] Dong W J, Chen J, Zhang B, Tian Y L, Zhang W J. Responses of biomass growth and grain yield of midseason rice to the anticipated warming with FATI facility in East China. *Field Crops Res*, 2011, 123(3): 259-265.
- [9] Jagadish S V, Craufurd P Q, Wheeler T R. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *J Exper Bot*, 2007, 58(7): 1627-1635.
- [10] Chen C Q, Lei C X, Deng A X, Qian C R, Hoogmoed W, Zhang W J. Will higher minimum temperatures increase corn production in northeast China? An analysis of historical data over 1965–2008. *Agric & For Meteorol*, 2011, 151(12): 1580-1588.
- [11] 孟亚利, 周治国. 结实期温度与稻米品质的关系. *中国水稻科学*, 1997, 11(1): 51-54.
Meng Y L, Zhou Z G. Relationship between rice grain quality and temperature during seed setting period. *Chin J Rice sci*, 1997, 11(1): 51-54. (in Chinese with English abstract)
- [12] 田云录, 郑建初, 张彬, 陈金, 董文军, 杨飞, 张卫建. 麦田开放式昼夜不同增温系统的设计及增温效果. *中国农业科学*, 2010, 43(18): 3724-3731.
Tian Y L, Zheng J C, Zhang B, Chen J, Dong W J, Yang F, Zhang W J. Design of free air temperature increasing (FATI) system for upland with three diurnal warming scenarios and their effects. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(18): 3724-3731. (in Chinese with English abstract)
- [13] Beier C, Emmett B, Gundersen P, Tietema A, Penuelas J, Estiarte M, Gordon C, Gorissen A, Llorens L, Roda F, Williams D. Novel Approaches to Study Climate Change Effects on Terrestrial Ecosystems in the Field: Drought and Passive Nighttime Warming. *Ecosystems*, 2004, 7(6): 583-597.
- [14] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 万师强. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 262-271.
Niu S L, Han G X, Ma K P, Wan S Q. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research. *J Plant Ecol*, 2007, 31(2): 262-271. (in Chinese with English abstract)
- [15] Rehmani M I, Zhang J Q, Li G H, Ata-Ul-Karim S T, Wang S H, Kimball B A, Yan C, Liu Z H, Ding Y F. Simulation of future global warming scenarios in rice paddies with an open-field warming facility. *Plant Met*, 2011, 7(1): 41-47.
- [16] Zhang T Y, Huang Y, Yang X G. Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice. *Glob Cha Biol*, 2013, 19(2): 563-570.
- [17] Sanchez B, Rasmussen A, Porter J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Glob Chan Biol*, 2014, 20(2): 408-417.
- [18] 董文军, 邓艾兴, 张彬, 田云录, 陈金, 杨飞, 张卫建. 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究. *生态学报*, 2011, 31(8): 2169-2177.
Dong W J, Deng A X, Zhang B, Tian Y L, Chen J, Yang F, Zhang W J. An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(8): 2169-2177. (in Chinese with English abstract)
- [19] Yin X Y, Kropff M J, McLaren G, Visperas R M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agric & For Meteorol*, 1995, 77(1-2): 1-16.
- [20] Takeshi N, Amane M. Differences between rice and wheat in temperature responses of photosynthesis and plant growth. *Plant & Cell Physiol*, 2009, 50(4): 744-755.
- [21] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. *Eur J Agron*, 1999, 10(1): 23-36.
- [22] Morita S, Yonemaru J, Takanashi J. Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). *Ann Bot*, 2005, 95(4): 695-701.
- [23] Prasad P V, Pisipati S R, Ristic Z, Bukovnik U, Fritz A K. Impact of nighttime temperature on physiology and growth of spring wheat. *Crop Sci*, 2008, 48(6): 2372-2380.
- [24] Mohammed A R, Tarpley L. Effects of high night temperature and spikelet position on yield-related parameters of rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Eur J Agron*, 2010, 33(2): 117-123.
- [25] 张同. 昼夜不同增温对水稻生长发育及产量和品质的影响研究. 武汉: 华中农业大学, 2016.
Zhang T. Effects of asymmetric warming on growth yield and quality in rice. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [26] Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Prod Sci*, 2001, 4(2): 90-93.
- [27] Dou Z, Tang S, Chen W, Zhang H, Li G, Liu Z, Ding C, Chen L, Wang S, Zhang H, Ding Y. Effects of open-field warming during grain-filling stage on grain quality of two japonica rice cultivars in lower reaches of Yangtze River delta. *J Cereal Sci*, 2018, 81(6): 118-126.
- [28] 李林, 沙国栋. 水稻灌浆期温光因子对稻米品质的影响. *中国农业气象*, 1989, 10(3): 33-38.

- Li L, Sha G D. Effect of temperature-light factors on rice quality during grain filling stage. *Chin J Agrometeorol*, 1989, 10(3): 33-38. (in Chinese)
- [29] Resurreccion A P, Hara T, Juliano B O, Yoshida S. Effect of temperature during ripening on grain quality of rice. *Soil Sci & Plant Nut*, 1977, 23(1): 109-112.
- [30] 金正勋, 杨静, 钱春荣, 刘海英, 金学泳, 秋太权. 灌浆成熟期温度对水稻籽粒淀粉合成关键酶活性及品质的影响. *中国水稻科学*, 2005, 19(4): 377-380.
- Jin Z X, Yang J, Qian C R, Liu H R, Jin X Y, Qiu T Q. Effects of temperature during grain filling period on activities of key enzymes for starch synthesis and rice grain quality. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19(4): 377-380. (in Chinese with English abstract)
- [31] 沈波, 陈能, 李太贵, 罗玉坤. 温度对早籼稻米垩白发生与胚乳物质形成的影响. *中国水稻科学*, 1997, 11(3): 183-186.
- Shen B, Chen N, Li T G, Luo Y K. Effect of temperature on rice chalkiness formation and changes of materials in endosperm. *Chin J Rice Sci*, 1997, 11(3): 183-186. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陶红娟. 灌浆结实期高温对水稻产量和品质的影响及其生理机制. 扬州: 扬州大学, 2007.
- Tao H J. Grain yield and quality as affected by high temperature during grain filling period and physiological mechanism in rice. Yangzhou: Yangzhou University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [33] 周德翼, 张嵩午, 高如嵩, 朱碧岩. 稻米直链淀粉含量与结实期温度间的关系研究. *西北农业大学学报*, 1994, 22(2): 1-5.
- Zhou D Y, Zhang S W, Gao R S, Zhu B Y. The relationship between amylose content in rice grain and temperature in grain filling stage. *J Northwest Sci-Tech Uni Agric For*, 1994, 22(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [34] Matsue Y, Odahara K, Hiramatsu M. Differences in amylose content, amylographic characteristics and storage proteins of grains on primary and secondary rachis branches in rice. *Jpn J Crop Sci*, 1995, 64(3): 601-606.
- [35] Liu J C, Zhao Q, Zhou L J, Cao Z Z, Shi C H, Cheng F M. Influence of environmental temperature during grain filling period on granule size distribution of rice starch and its relation to gelatinization properties. *J Cereal Sci*, 2017, 76(4): 42-55.
- [36] 贺晓鹏, 朱昌兰, 刘玲珑, 王方, 傅军如, 江玲, 张文伟, 刘宜柏, 万建民. 不同水稻品种支链淀粉结构的差异及其与淀粉理化特性的关系. *作物学报*, 2010, 36(2): 276-284.
- He X P, Zhu C L, Liu L L, Wang F, Fu J R, Jiang L, Zhang W W, Liu Y B, Wan J M. Difference of amylopectin structure among various rice genotypes differing in grain qualities and its relation to starch physicochemical properties. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(2): 276-284. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张敬奇. 花后开放式增温对水稻产量与品质的影响研究. 南京: 南京农业大学, 2012.
- Zhang J Q. Effect of temperature free-air controlled enhancement after flowering on rice yield and quality Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)