

陆佳岚,王 净,马 成,等. 长江流域中稻产量和品质性状差异与其生育期气象因子的相关性[J].江苏农业学报,2020,36(6):1361-1372.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.06.003

长江流域中稻产量和品质性状差异与其生育期气象因子的相关性

陆佳岚^{1,2}, 王 净¹, 马 成^{1,2}, 陶明煊², 赵春芳¹, 张亚东¹, 李 霞^{1,2,3}, 方先文¹,
张 俊⁴, 陈长青⁵, 张巫军⁶, 夏加发⁷, 江学海⁸, 柳开楼⁹, 乔中英¹⁰, 张 彬¹¹

(1.江苏省农业科学院/江苏省优质水稻工程技术研究中心/国家水稻改良中心南京分中心/江苏省农业资源种质保护与平台,江苏 南京 210014; 2.南京师范大学食品与制药学院,江苏 南京 210023; 3.江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心,江苏 扬州 225009; 4.中国农业科学院作物科学研究所,北京 100081; 5.南京农业大学,江苏 南京 210095; 6.重庆市农业科学院,重庆 401329; 7.安徽省农业科学院,安徽 合肥 230001; 8.贵州省水稻研究所,贵州 贵阳 550006; 9.江西省红壤研究所,江西 南昌 331717; 10.苏州市农业科学院,江苏 苏州 215007; 11.广东省农业科学院,广东 广州 510640)

摘要: 为了探讨在不同光温条件下水稻品种产量和品质的响应特点,利用长江流域中稻区多样的气候条件,2017年和2018年分别在长江流域中稻区9个省(市)设立10个和11个试验点,选择各地区代表性品种8~9个,共18个品种,进行大田分期播种试验,以当地最适播种期为基准,前后共分3期播种,分析供试水稻产量和品质的变化,并记录同期的气象特征。结果表明:所有试验点2年3期分期播种水稻品种的光温特征可以分为3个区域,即高温高光区(长江流域中部)、低温低光照区(长江流域西部)以及中温中光照区(长江流域东部);产量高低顺序为低温低光照区(长江流域西部)>中温中光照区(长江流域东部)>高温高光区(长江流域中部),精米率为中温中光照区(长江流域东部)>低温低光照区(长江流域西部)>高温高光区(长江流域中部),垩白粒率和蛋白质含量均为高温高光区(长江流域中部)>中温中光照区(长江流域东部)>低温低光照区(长江流域西部),直链淀粉含量为低温低光照区(长江流域西部)>高温高光区(长江流域中部)>中温中光照区(长江流域东部),胶稠度为中温中光照区(长江流域东部)>高温高光区(长江流域中部)>低温低光照区(长江流域西部),糊化温度区域间差别不大。相关分析结果显示,齐穗后光、温分别与产量和品质均显著相关($P<0.05$),在长江流域中稻区,选择适宜的品种,参照长江流域中部“双减”(齐穗后20 d内的平均温度不超过31℃,日照时数不超过160 h)、长江流域东部“一减(温)一增(光)” (齐穗后平均温度不超过29℃,日照时数不少于90 h)以及长江流域西部“双增”(平均温度不低于20℃,日照时数不少于110 h)等温光原则,均可以种植出高产与优质协调的稻米。

关键词: 水稻; 长江流域; 产量; 品质; 温度; 光照

中图分类号: S162.5⁺3; S511.033 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)06-1361-12

Correlation between the differences in yield and quality traits among various types of middle rice and meteorological factors during growth period in the Yangtze River basin

LU Jia-lan^{1,2}, WANG Jing¹, MA Cheng^{1,2}, TAO Ming-xuan², ZHAO Chun-fang¹, ZHANG Ya-dong¹, LI Xia^{1,2,3},
FANG Xian-wen¹, ZHANG Jun⁴, CHEN Chang-qing⁵, ZHANG Wu-jun⁶, XIA Jia-fa⁷, JIANG Xue-hai⁸,
LIU Kai-lou⁹, QIAO Zhong-ying¹⁰, ZHANG Bin¹¹

收稿日期:2020-02-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300501-03);国家自然科学基金项目(31571585)

作者简介:陆佳岚(1995-),女,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为水稻栽培生理。(E-mail)1361620898@qq.com。王净、马 成和陶明煊为共同第一作者。

通讯作者:李 霞,(E-mail)jspplx@jaas.ac.cn;方先文,(E-mail)243-1240491@qq.com

(1. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu High Quality Rice Engineering Technology Research Center/Nanjing Branch of China National Center for Rice Improvement/The Jiangsu Provincial Platform for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Nanjing 210014, China; 2. School of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Collaborative Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops of Jiangsu Province, Yang-

zhou 225009, China; 4. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 5. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 6. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; 7. Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 8. Guizhou Rice Research Institute, Guiyang 550006, China; 9. Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717, China; 10. Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215007, China; 11. Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Response characteristics of yield and quality to different air temperature and light conditions were investigated in this study. A comparative experiment was carried out by using total 18 medium rice varieties as materials under field conditions to study the differences in yield and quality traits under diverse climatic conditions in the Yangtze River basin. The study was conducted in 10 and 11 sites of nine provinces during 2017 and 2018. The sowing times were set for three groups, divided into three periods before and after the local optimum sowing time. Furthermore, the correlation analysis between rice yield/quality characters and temperature/light condition during the growth periods was studied. The results showed that the light/temperature characteristics of the test sites including three sowing stages could be divided into three areas including high temperature and high light area (HTHLA, main in the middle part of the Yangtze River basin), low temperature and low light area (LTLLA, main in the west part of the Yangtze River basin) and middle temperature and middle light area (MTMLA, main in the east part of the Yangtze River basin). The changes of yield and quality traits in different regions also showed regional characteristics. For yield, it was shown as LTLLA>MTMLA>HTHLA. For quality traits, different traits showed different performance. The milled rice rate was shown as MTMLA > LTLLA > HTHLA. Both the chalkiness rate and protein content were as HTHLA > MTMLA > LTLLA. Amylose content was LTLLA>HTHLA>MTMLA. The gel consistency was MTMLA > HTHLA > LTLLA. Gelatinization temperature among areas was no significant difference. Correlation analysis showed that the light and temperature after full heading were significantly correlated with yield and quality characteristics ($P<0.05$). In whole, choosing suitable varieties according to the conditions within 20 days after heading (the average temperature is no more than 31 °C and sunshine hours are no more than 160 h in the middle part, the average temperature is no more than 29 °C and sunshine hours are no less than 90 h in the east part, and the average temperature is no less than 20 °C and sunshine hours are no less than 110 h in the west part, the rice varieties with high yield and good quality can be planted in all the areas of Yangtze River basin.

Key words: rice; Yangtze River basin; yield; quality; temperature; light

水稻是世界上最重要的谷类作物之一,养活了全世界一半以上的人口^[1]。中国水稻生产先后经历矮化育种、杂种优势利用、超级稻研发和水稻功能基因组研究等重要阶段,促使水稻产量得到大幅提高^[2]。随着人民生活水平的提高,膳食结构和食用习惯发生了重大改变,对稻米品质尤其是食味品质的要求越来越高^[3]。而由于人口数量增长、环境恶化、耕地面积减少以及耕地质量下降等因素,迫切要求育种家们能够选育出广适性强且高产优质的水稻品种。近年来,全球气候异常现象频繁出现,对中国水稻生产时空变动产生重大的影响^[4]。因此,选育和栽培出适于现阶段气候特征的优质高产水稻品种,是中国水稻生产面临的新挑战,将对中国乃至世界粮食安全均具有重要意义^[5]。

水稻的产量和稻米品质受到遗传特性和环境因子的双重调节,而生态环境因子尤其是水稻种植区域气温和光照条件对稻米产量和品质也有较强的调节作用。本世纪初,中国科学家已对水稻优质的气象适

应特征进行了研究和总结,对当时优质水稻的布局 and 区划具有重要意义^[6]。但是,近 10 年的气象特征发生了变化,而且气候异常和气候灾害使农业面临生产不稳定和产量波动大的问题尤为突出^[7]。根据中国农村统计年鉴数据,2012 年长江流域水稻播种面积约 2.000×10^7 hm^2 ,占全国水稻播种面积的 66.7%;总产量 1.38×10^8 t,占水稻总产量的 67.7%;平均产量 6 873 kg/hm^2 ,高于全国平均产量(6 777 kg/hm^2)^[8]。因此,长江流域是中国最大的水稻生产区,但是该区域跨度大,光温条件差异大,而且近年来极端环境对该地区水稻产量和品质的影响也最显著和复杂^[9]。长江流域江苏省、安徽省、湖北省、四川省及重庆市 2005–2016 年国审水稻品种的产量和品质特征与其相近纬度(29.61~33.5°)的气象数据的分析结果表明:长江流域水稻主产的 5 省市近 12 年国审稻米产量逐年增加,稻米品质从东(江苏)到西(四川)品质变差,东部地区避开高温以及西部增加光照时数均有利于该地区获得优良品质^[10]。以上研究结果主要是

通过收集的统计数据获得,在整体长江流域实际大田种植条件下,稻米产量和品质性状对生育期不同光温的响应特性的系统研究尚不多。因此,本研究在2017–2018年,利用长江流域一季中稻区多样的气候条件,选取各地不同类型的中稻品种(常规籼稻、常规粳稻以及两系和三系的籼型杂交稻),在大田条件下进行跨区多点的分期播种试验,分析在不同温光大田种植条件下,供试水稻产量和品质的变化特征,并分析其与实际光温条件的相关性,以期为长江流域优质中稻品种的选择、调整一季中稻的安全播种期以获得优质和高产兼顾的栽培措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验品种及试验设计

选取的供试水稻品种(品系)信息见表1,分为常

规籼稻、常规粳稻以及两系和三系籼型杂交稻。根据长江流域中稻区的气候特点,2017年和2018年分别在9个省市设立10个和11个试验点,以各地区8~9个品种(品系),共18个品种(品系)作为试验材料,每个试验点分3期播种,具体试验点、种植品种以及播种日期见表1。每个试验点分别在当地最适播期及前、后20 d左右3个时期进行大田条件下分期播种,模拟机插,秧龄20 d,各种植点行距和株距均一致(行距为30.0 cm,株距为16.5 cm),双本栽插。氮肥施用量为225 kg/hm²,氮肥按基肥:蘖肥:穗肥=4:3:3施用。各试验点均采用随机区组设计,重复3次,小区面积20 m²,常规水肥管理和病虫害管理。各试验点统一按照《农作物品种区域试验技术规范水稻》(NY/T 1300–2007)^[11]进行性状调查记载。待收获后,进行每小区5 m²测产,并考察主要产量构成因子。

表1 试验点的品种选择及播种期

Table 1 Variety selection and sowing dates of test sites

试验点	坐标和海拔	年份	供试品种(品系)	分期播种日期 (月-日)
江苏淮安	33°63'N, 119°3'E, 15 m	2017	南粳9108, 中粳2503, 黄华占, 9311, 丰两优香1号, 丰两优1号, Y两优4号, 渝优7109	05-05, 05-20, 06-05
		2018	9311, 南粳9108, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	05-01, 05-21, 06-11
江苏南京	31°35'N, 119°11'E, 26 m	2017	淮稻5号, 南粳45, 南粳9108, 南粳5055, 中粳2503, 黄华占, 9311, C两优华占, 丰两优4号, Y两优1号	04-28, 05-13, 05-28
		2018	9311, 南粳9108, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	04-28, 05-18, 06-08
江苏苏州	31°27'N, 120°25'E, 6 m	2018	9311, 南粳9108, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	04-24, 05-15, 06-04
安徽合肥	31°53'N, 117°15'E, 14 m	2017	淮稻5号, 南粳45, 南粳9108, 南粳5055, 中粳2503, 黄华占, 9311, C两优华占, 丰两优4号, Y两优1号	04-25, 05-10, 05-25
		2018	9311, 南粳9108, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	04-25, 05-15, 06-05
江西进贤	28°22'N, 116°11'E, 18 m	2017	淮稻5号, 南粳45, 南粳9108, 南粳5055, 中粳2503, 黄华占, 9311, C两优华占, 丰两优4号, Y两优1号	05-08, 05-23, 06-07
		2018	9311, 黄华占, C两优华占, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	05-03, 05-23, 06-12
湖北京山	30°50'N, 113°6'E, 45 m	2017	中粳2503, 黄华占, 9311, 南粳9108, C两优华占, 丰两优4号, Y两优1号	04-15, 04-30, 05-15
		2018	9311, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	04-25, 05-01, 05-25
四川遂宁	30°15'N, 105°32'E, 275 m	2017	滇屯502, 黄华占, 9311, 南粳9108, C两优华占, 宜香2115, Y两优1号	03-20, 04-05, 04-30
		2018	9311, 南粳9108, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	03-20, 04-10, 04-30
重庆永川	29°26'N, 106°55'E, 417 m	2017	南粳9108, 9311, 宜香优2115, 渝优7109, 渝香203, C两优华占, Y两优1号	04-10, 04-20, 04-30
		2018	9311, 南粳9108, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115, 苏垦118	03-10, 03-30, 04-19
广东广州	23°9'N, 113°22'E, 12 m	2017	宜香优2115, 丰两优4号, 9311, 黄华占, 中粳2503, 丰两优香1号	04-10, 04-25, 05-10
云南芒市	24°37'N, 98°45'E, 882 m	2017	滇屯502, 黄华占, 9311, 南粳9108, C两优华占, 宜香2115, Y两优1号	03-15, 04-01, 04-15
		2018	9311, 黄华占, C两优华占, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	04-04, 04-20, 05-05
贵州贵阳	26°34'N, 106°43'E, 1 150 m	2017	滇屯502, 黄华占, 9311, 南粳9108, C两优华占, 宜香2115, Y两优1号	03-25, 04-10, 04-25
		2018	9311, 黄华占, C两优华占, 淮稻5号, 滇屯502, 中粳2503, 宜香优2115	03-30, 04-19, 05-19

1.2 2017 年和 2018 年试验点气象资料的收集和分析

根据王端等^[10]的方法,本研究中的气象数据来源于中国气象局共享服务网(<http://data.cma.cn/data/cdcindex/cid/6d1b5efbdc9a58.html>)。从该网站下载 2017–2018 年各试验点各气象台站的逐日气象资料,主要包括日照时数和平均气温,各台站的空间位置数据来自中国气象局,基础地理信息数据来自中国测绘局数据中心(<http://www.ngcc.cn>)。分别分析该年份水稻种植期间平均温度以及日照时数等数据。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量及其构成因素 成熟期调查每小区 100 穴,计算有效穗数,取 10 穴调查每穗粒数、结实率和千粒质量,推测理论产量,成熟后每小区实收测产。

1.3.2 稻米品质 各地种植的稻米统一脱粒,晒干,室内贮藏 3 个月后,用 NP-4350 型风选机等风量风选。参照中华人民共和国国家标准《GB/T 17891–1999 优质稻谷》^[12]测定精米率、垩白粒率和胶稠度等。

1.3.3 蛋白质含量的测定 用凯氏定氮法测定蛋白质含量,称取 80 目粉样 1.00 g 于凯氏管中,加入 0.20 g CuSO_4 及 2.00 g K_2SO_4 ,置消煮炉,420 °C 消煮 1.5 h 至淡蓝色透明。放置 0.5 h 至常温,用凯氏定氮仪进行测定并计算出蛋白质含量,大米换算系数为 5.95^[13]。

1.3.4 直链淀粉含量的测定 利用碘比色法进行直链淀粉含量测定^[14]。

1.3.5 糊化温度的测定 参照 GB/T 24852–2010 的方法^[15],采用澳大利 NewportScientific 仪器公司生产的 Super3 型 RVA 快速黏度分析仪测定淀粉谱黏滞特性,用配套软件 TWC 分析,测定糊化温度。

1.4 统计分析

使用 SPSS 19.0 软件对数据进行 One-Way ANOVA 分析,采用 Excel 2016 对数据进行描述和作图。

2 结果与分析

2.1 2017–2018 年各试验点分期播种试验中水稻生育期温光特征

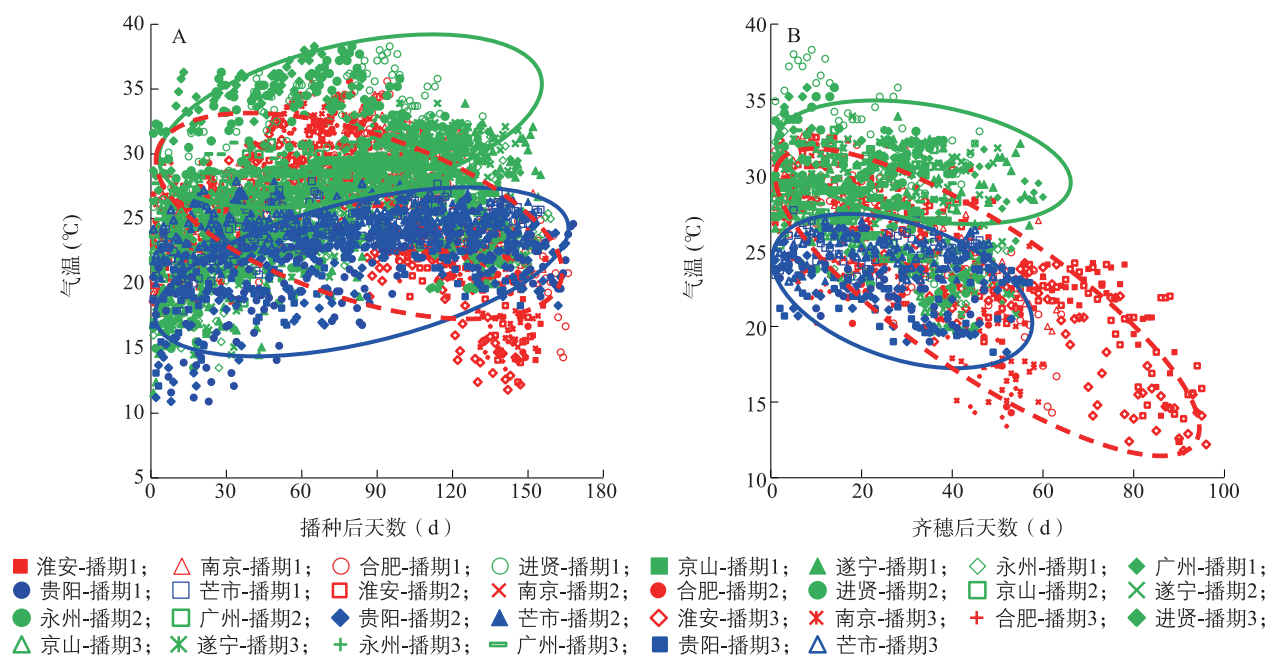
为了设置试验点光温差异的条件,本研究在每个试验点均设置了 3 期分期播种试验。结果显示,同一试验点分期播种对水稻生育期的光温条件造成差异,但各试验点不同播期的水稻生育期的光温条件在最适种植期的上下波动,同一试验点 3 期的光

温差别小于长江流域不同经度试验点的差异。通过分析试验点 2017 年(图 1A)和 2018 年供试材料生育期的平均温度(图 2A),可以看出,本试验的水稻种植区域可以划分为 3 个区域,即高温区、中温区和低温区。高温区主要位于长江流域的中部,包括江西省进贤县、湖北省京山县、四川省遂宁市以及重庆市永川区,其中 2017 年广州市试验点的气温特征与中部地区类似,也划为高温区,与其他 2 个区域相比,这个区域水稻生育期的平均气温最高。低温区主要包括贵州省贵阳市以及云南省芒市,生育期平均气温明显低于长江流域中部的高温区。中温区的平均气温则位于两区域之间,播种后 100 d 左右温度与长江流域中部高温区类似,并略低,而 100 d 后则与长江流域西部低温区重叠,由于该区域水稻生育期较长,后期低温区比长江流域西部还低,该区域包括江苏省淮安市、江苏省南京市、江苏省苏州市以及安徽省合肥市。进一步分析齐穗后至成熟期 2017 年(图 1B)和 2018 年(图 2B)的平均气温,发现长江流域西部低温仍最低,中部高温区最高,东部齐穗的前期平均温度位于两区域之间,齐穗后仍有较长时间的灌浆期,温度最低,于 15 °C 上下波动,该时期的温度变化趋势也与整个生育期的气温类似。

进一步分析水稻种植区的光照特征(表 2),从播种到齐穗期的日照时数累积(ssd1)2 年平均值为 543.18 h,其中 2018 年光照条件较好,光照时间较多,而且各地也有差异,变异系数为 21.30%;同样从齐穗到成熟期的日照时数累积(ssd2)2 年平均为 222.58 h,变异系数为 25.10%;从播种到成熟期的日照时数累积(ssd3)则为 759.36 h,变异系数为 15.80%。可见,成熟期的光照差异最显著。齐穗后 20 d 内的日照时数为 129.99 h,变异系数为 24.00%,可见,试验点光照条件的差异主要为齐穗后的时间段。同样地,根据齐穗后 20 d 的日照时数也可以将试验区域划分为 3 类:高日照区域,主要是长江流域中部,包括江西省进贤县、湖北省京山县、四川省遂宁市以及重庆市永川区;中日照区域主要分布在长江流域东部,而长江流域西部则为低日照区域。结合生育期的平均温度,显然长江流域中部的温光特征是高温高光照[齐穗后的平均温度为 19.4~38.3 °C (2017), 18.0~36.5 °C (2018);日照时数为 173.0~259.4 h (2017), 192.0~311.4 h (2018)],长江流域西部的特征是低温低光照[齐穗

后的平均温度为18.3~27.9℃(2017),15.6~25.9℃(2018年);日照时数为132.1~208.9h(2017),138.8~172.2h(2018)],而长江流域东部光温特征

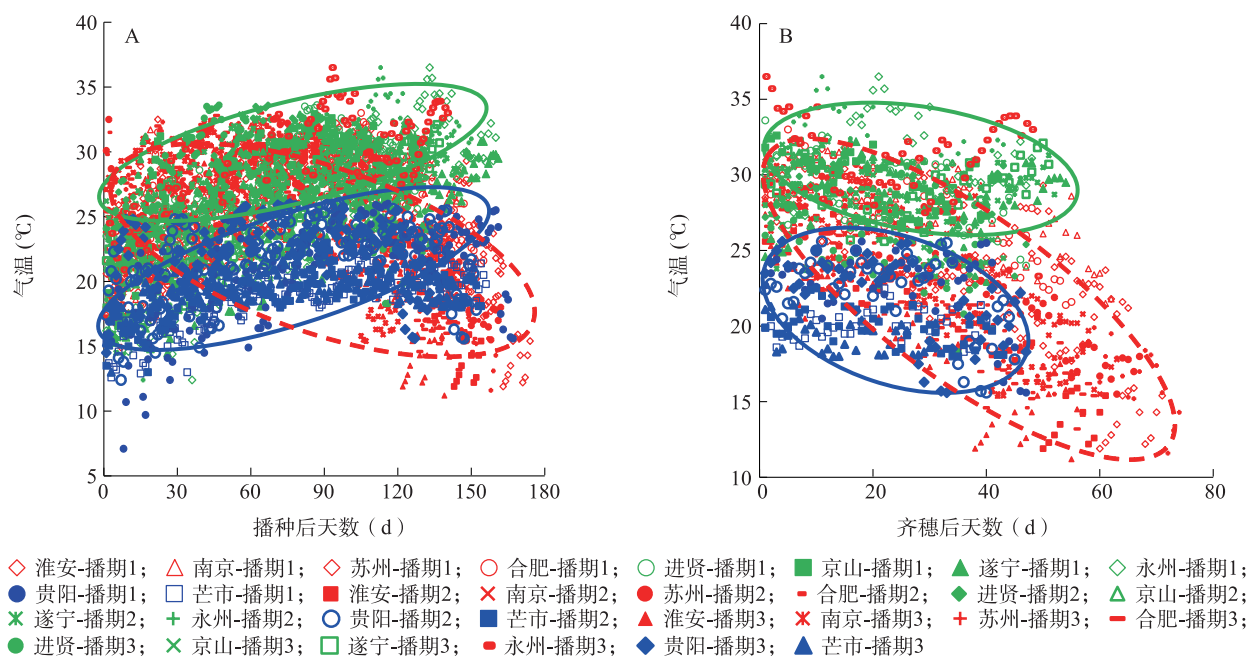
则位于两区域之间[齐穗后的平均温度为11.8~35.2℃(2017),11.2~36.5℃(2018年);日照时数为183.8~284.1h(2017),193.8~288.3h(2018)]。



A:从播种期到成熟期的平均温度;B:从齐穗期到成熟期的平均温度。绿色椭圆区域为高温高光照区,红色椭圆区域为中温中光照区,蓝色椭圆区域为西部低温低光照区域。

图1 不同试验点在2017年水稻种植期的平均气温变化

Fig.1 Changes of average air temperature during rice growing period in 2017 at different test sites



A:从播种期到成熟期的平均温度;B:从齐穗期到成熟期的平均温度。绿色椭圆区域为高温高光照区,红色椭圆区域为中温中光照区,蓝色椭圆区域为西部低温低光照区域。

图2 不同试验点在2018年水稻种植期的平均气温变化

Fig.2 Changes of average air temperature during rice growing period in 2018 at different test sites

表 2 不同试验点 2017 年和 2018 年水稻生育期日照时数的变化

Table 2 Changes of sunshine hours during rice growing period in 2017 and 2018 at different test sites

试验地点	年份	齐穗期 (月-日)	成熟期 (月-日)	日照时数的累积(h)			
				ssd1	ssd2	ssd3	ssd4
江苏淮安	2017	07-11-08-19	08-27-10-22	397.8±65.1	341.8±57.3	732.6±69.5	116.6±16.5
	2018	08-12-09-18	10-05-10-29	586.9±51.6	284.1±32.4	864.0±52.9	114.1±14.5
江苏南京	2017	07-30-09-11	09-04-10-22	665.5±33.3	183.8±46.5	843.7±63.6	109.0±27.2
	2018	07-27-09-22	09-01-10-26	660.0±50.1	252.0±48.6	906.2±62.2	132.8±23.4
江苏苏州	2018	08-01-09-21	09-10-11-10	720.0±44.8	288.3±29.4	1000.0±46.8	141.8±23.0
安徽合肥	2017	08-05-09-02	09-10-10-10	665.5±33.3	183.8±46.5	843.7±63.6	109.0±27.2
	2018	08-03-09-17	09-07-10-30	663.3±58.6	193.8±44.8	850.1±37.2	117.8±17.4
湖北京山	2017	07-23-08-28	08-25-09-28	658.8±33.6	173.0±53.6	825.7±40.7	115.3±22.3
	2018	07-25-08-28	08-19-09-20	600.2±58.4	224.7±39.1	815.9±48.4	181.2±22.1
江西进贤	2017	08-02-08-30	09-03-10-09	546.3±33.1	259.4±30.1	797.1±35.3	161.3±18.0
	2018	07-28-09-10	08-24-10-11	646.8±51.6	192.0±121.2	830.3±121.2	169.7±14.1
四川遂宁	2017	06-30-07-26	08-04-09-04	460.4±21.9	258.2±61.5	709.4±49.6	169.6±14.4
	2018	07-05-07-25	07-29-09-03	337.6±48.5	200.3±73.3	534.0±78.1	132.3±11.9
重庆永川	2017	07-26-08-05	08-24-09-20	505.2±32.1	227.0±36.5	722.9±32.3	159.7±4.5
	2018	06-30-07-25	08-03-09-06	443.0±27.3	311.4±50.0	754.4±37.9	170.4±20.6
广东广州	2017	07-06-08-01	08-08-09-03	337.6±24.9	226.0±18.8	556.6±35.9	135.6±10.9
贵州贵阳	2017	08-03-09-01	09-07-10-06	505.4±27.7	132.1±13.5	632.7±30.1	75.9±16.5
	2018	07-28-09-02	09-06-09-26	483.1±46.3	172.2±47.6	649.9±48.0	116.6±19.1
云南芒市	2017	07-23-08-18	08-29-09-29	498.8±50.0	208.9±35.8	704.2±51.1	96.7±15.0
	2018	07-28-08-18	08-27-09-29	481.3±67.8	138.8±31.4	617.8±50.2	74.3±20.3

ssd1:从播种到齐穗的日照时数; ssd2:从齐穗到成熟的日照时数; ssd3:全生育期的日照时数; ssd4:齐穗后 20 d 的日照时数。表中数据均来自 2017 年或 2018 年不同试验点 3 期播种试验结果。

2.2 不同地区中稻产量与品质性状变化

自然分期播种法是分析水稻光温特性的重要方法。从本试验 2 年自然分期播种的大田试验结果(表 3)看,不同地区的产量与品质性状变化也呈现区域特点。对产量而言,平均产量表现为低温低光照区(长江流域西部)>中温中光照区(长江流域东部)>高温高光照区(长江流域中部),而且高温高光照区的产量变异系数最大,长江流域西部低温低光照区的最小。对于品质性状而言,则不同性状表现不同,精米率是碾米品质的重要指标,精米率的平均值表现为中温中光照区(长江流域东部)>低温低光照区(长江流域西部)>高温高光照区(长江流域中部),变异系数也是高温高光照区最大,长江流域西部低温低光照区最小;垩白粒率是重要的外观品质指标,在所有产量和品质指标中垩白粒率变异系数最大,高达 83.57%,表明受到光温影响最大,其平均值表现为高温高光照区(长江流域中部)>中温中光照区(长江流域东部)>低温低光照区(长江流域西部);2018 年的产量显著高

于同期同地 2017 年的产量,这可能与 2018 年较好的光温条件有关。直链淀粉含量决定稻米的蒸煮品质,3 个区域的差异并不大,平均值为低温低光照区(长江流域西部)>高温高光照区(长江流域中部)>中温中光照区(长江流域东部),而且变异系数也在 20%之内;蛋白质含量差别也不大,变异系数也与直链淀粉含量的表现类似,但是平均值则表现为高温高光照区(长江流域中部)>中温中光照区(长江流域东部)>低温低光照区(长江流域西部),表明高光照和高温均可增加籽粒蛋白质含量。胶稠度显著影响稻米的蒸煮品质,其受光温影响较大,变异系数均高于 20%,平均值为中温中光照区(长江流域东部)>高温高光照区(长江流域中部)>低温低光照区(长江流域西部);稻米淀粉 RVA 谱特征值能较好地反映稻米蒸煮食味品质,特别是区分表现直链淀粉含量相似的水稻品种蒸煮食味品质的差异^[16],糊化温度是其中的重要指标,但从本试验结果看,各区域的差别不大,变异系数最大值为 2.73%。

表 3 2017–2018 年不同地区不同播期水稻品种产量和稻米品质性状比较

Table 3 Comparison of rice yield and quality traits in different areas in 2017–2018

地区	试验	年份	产量		精米率		垩白粒率		直链淀粉含量		蛋白质含量		胶稠度		糊化温度	
			数值 (t/hm ²)	变异 系数 (%)	数值 (%)	变异 系数 (%)	数值 (%)	变异 系数 (%)	数值 (%)	变异 系数 (%)	数值 (%)	变异 系数 (%)	数值 (cm)	变异 系数 (%)	数值 (℃)	变异 系数 (%)
中温中光照区	江苏淮安	2017	8.30	22.70	75.18	5.20	25.25	56.80	14.21	21.00	8.00	8.80	5.29	12.00	85.97	7.90
		2018	9.58	16.30	73.31	4.30	4.51	312.90	16.60	14.20	8.08	10.80	8.72	19.00	78.56	8.50
	江苏南京	2017	8.50	14.10	72.16	3.80	30.52	73.50	16.32	16.70	8.14	8.20	5.07	17.30	79.23	8.40
		2018	8.87	24.80	71.70	4.90	2.89	109.90	16.72	17.90	8.27	11.00	5.02	40.90	79.10	6.90
	江苏苏州	2018	8.04	13.90	69.11	5.10	3.97	107.20	16.52	15.70	7.93	8.70	9.36	12.50	76.62	5.20
	安徽合肥	2017	8.29	18.30	70.80	7.30	31.47	81.20	17.26	18.70	8.19	12.50	5.22	19.60	80.91	9.40
		2018	10.00	20.50	70.83	7.40	6.49	154.00	17.51	16.60	8.20	9.30	4.77	29.50	78.87	6.40
	湖北京山	2017	7.94	28.40	73.63	2.50	26.86	74.70	14.62	20.30	9.07	12.00	5.28	26.90	79.47	4.70
高温高光照区	江西进贤	2018	10.53	22.00	68.31	3.40	3.47	103.90	15.76	17.30	8.63	12.40	5.49	26.40	77.84	5.20
		2017	5.94	28.60	64.88	8.30	20.20	102.50	15.88	21.40	8.07	14.30	5.01	22.90	78.89	5.10
	四川遂宁	2018	8.11	23.50	67.62	7.00	5.65	109.40	16.99	16.20	8.81	18.40	5.84	35.80	77.66	5.10
		2017	8.41	22.20	69.20	0.05	53.93	0.43	17.27	0.15	7.68	0.21	5.28	22.10	77.12	2.40
	重庆重庆	2018	7.17	27.00	64.10	13.10	9.83	112.30	17.15	11.30	7.72	20.40	5.86	21.30	78.14	4.10
		2017	7.99	27.50	56.15	13.10	37.72	82.30	19.03	19.20	7.40	7.50	4.89	16.50	81.28	6.90
	广东广州	2018	7.25	25.40	57.65	15.00	15.48	99.70	16.85	12.60	7.93	15.50	8.97	11.40	78.90	4.00
		2017	5.12	26.00	53.51	11.59	15.33	55.83	16.32	14.81	9.23	12.92	4.67	9.47	79.85	3.81
	云南芒市	2017	9.64	14.80	72.61	2.40	23.00	36.80	16.57	11.80	7.54	6.10	4.54	12.10	79.11	7.40
		2018	9.06	18.80	71.06	2.70	3.42	134.70	17.29	12.00	7.66	14.40	4.60	27.27	77.36	7.20
低温低光照区	贵州贵阳	2017	9.40	19.60	74.34	2.80	20.74	62.20	16.13	20.20	8.21	14.80	4.51	14.70	80.85	10.70
		2018	8.90	16.20	67.27	9.60	3.69	86.70	17.41	14.20	8.20	12.70	7.25	19.30	82.13	10.10

表中数据均来自 2 年不同试验点 3 期分期播种试验的结果。

2.3 不同时期温光与不同类型中稻产量和品质的相关性分析

对水稻产量和品质变化与平均气温和日照时数累积的关系进行相关性分析。由表 4 可知,供试水稻产量和加工品质与生育期温度关系密切,其中 2017 年产量和精米率分别与水稻生育期不同时期的平均温度均呈极显著负相关关系;而 2018 年产量分别与播种到齐穗、整个生育期以及齐穗后 20 d 的平均温度呈显著正相关关系;2018 年精米率与播种到齐穗的平均温度呈极显著正相关关系,其他 3 个时期的温度仍然与 2017 年类似,呈显著或极显著负相关关系。2017 年产量分别与生育后期的日照时数呈显著或极显著负相关关系,而 2018 年则与同期的日照时数呈显著或极显著正相关关系。2 年精米率与日照时数的相关性表现一致,均是前期营养期以及整个生育期呈显著正相关关系,而齐穗到成熟生育后期呈极显著负相关关系。2017 年直链淀粉含

量与齐穗到成熟期的平均温度呈正相关关系,与同期的日照时数呈负相关关系,而 2018 年则与播种到齐穗、播种到成熟以及齐穗后 20 d 的平均气温呈显著或极显著的负相关关系,分别与齐穗到成熟、播种到成熟以及齐穗后 20 d 的日照时数也呈显著或极显著的负相关关系。蛋白质含量主要与前期营养期的平均温度呈正相关关系,而与生育后期的日照时数呈显著负相关关系。2017 年胶稠度与整个生育期的气温和日照时数均呈正相关关系,而 2018 年则与生育后期尤其是齐穗后 20 d 内的气温和日照时数呈极显著的正相关关系。2017 年糊化温度仅与播种到齐穗的日照时数呈负相关关系,2018 年与齐穗后 20 d 内的平均气温以及播种到齐穗日照时数、齐穗到成熟、整个生育期的日照时数均呈显著或极显著的负相关关系。2017 年垩白粒率仅与全生育期的日照时数呈显著正相关关系,2018 年与生育后期的气温和日照时数均呈显著正相关关系。

表 4 供试水稻产量和品质性状指标与光温的相关性

Table 4 Correlation of rice yield and quality traits with light and temperature

年份	参数	产量	精米率	直链淀粉含量	蛋白质含量	胶稠度	糊化温度	垩白率
2017	tavg1	-0.356 **	-0.239 **	-0.007	0.148 *	0.204	0.049	-0.021
	tavg2	-0.326 **	-0.613 **	0.162 *	-0.003	0.025	-0.029	0.071
	tavg3	-0.418 **	-0.430 **	0.062	0.125	0.159 *	0.011	-0.001
	tavg4	-0.323 **	-0.486 **	0.068	-0.023	0.104	0.050	0.130
	ssd1	0.125	0.308 **	0.048	0.060	0.115	-0.132 *	0.092
	ssd2	-0.168 *	-0.133 *	-0.175 **	-0.165 *	0.034	0.100	0.103
	ssd3	0.015	0.257 **	0.089	-0.060	0.158 *	-0.072	0.183 **
	ssd4	-0.338 **	-0.510 **	0.051	-0.111	-0.007	-0.044	0.129
2018	tavg1	0.094 *	0.152 **	-0.089 *	0.151 **	-0.021	-0.050	-0.068
	tavg2	0.048	-0.471 **	-0.046	0.051	0.111 **	-0.067	0.193 **
	tavg3	0.076 *	-0.096 *	-0.096 *	0.163 **	0.015	-0.069	0.025
	tavg4	0.148 **	-0.401 **	-0.082 *	0.047	0.202 **	-0.077 *	0.176 **
	ssd1	-0.070	0.375 **	-0.026	0.231 **	-0.053	-0.127 **	-0.125 **
	ssd2	0.290 **	-0.291 **	-0.211 **	-0.002	0.436 **	-0.093 *	0.076 *
	ssd3	0.085 *	0.167 **	-0.123 **	0.195 **	0.174 **	-0.155 **	-0.061
	ssd4	0.089 *	-0.325 **	-0.076 *	0.157 **	0.173 **	-0.017	0.118 **

tavg: 平均温度; ssd: 不同时期总日照时数; 1: 播种到齐穗; 2: 齐穗到成熟; 3: 全生育期; 4: 齐穗后 20 d。* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** : 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.4 长江流域各种植点中稻获得高产和优质的适宜光温范围

从相关性分析结果看,水稻齐穗后 20 d 内平均温度和日照时长对长江流域中稻产量和品质的影响更大,为此,进一步分析水稻该时期的温度和光照特点,将有利于种植的水稻品种获得产量和优质的平衡。以平均产量、3 个关键品质指标(垩白粒率、直链淀粉含量和胶稠度)达到国标 3 级米标准以及蛋白质含量不超过 8% 为标准,分析中稻合适的生长温度(齐穗后 20 d 的平均温度)和日照时长,将本研究品种的光温表现分为 3 种类型:第 1 类是高产优质型(产量>平均产量的 5% 且达到三级米的品质指标,蛋白质含量小于 8%);第 2 类是稳产优质型(产量介于平均产量的±5%之间且达到三级米的品质指标,蛋白质含量小于 8%);第 3 类为低产优质型(产量低于平均产量的 5% 且达到三级米的品质指标,蛋白质含量小于 8%)。从表 5 可以看出,不同类型的光温范围因种植的地区以及种植的年份而异,相比较而言年份间的差异小于地区间的差异。2 年内长江流域东部(淮安市、南京市、苏州市和合肥市)、

长江流域中部(京山县、进贤县、遂宁市、永州区)和长江流域西部(贵阳市和芒市)所需的光温条件差异很大。以 2018 年高产优质型为例,长江流域东部适宜生长平均温度为 20.09~29.18 ℃,日照时数为 91~165 h,适宜种植的品种(品系)为中粳 2503、黄华占、9311、C 两优华占、宜香优 2115、淮稻 5 号和南粳 9108,种类丰富,既包括常规籼稻和籼型杂交稻,也包括常规粳稻和优良食味的低直链淀粉含量品种南粳 9108;长江流域中部适宜生长平均温度为 27.06~33.34 ℃,日照时数为 156~192 h,适宜种植的品种(品系)为黄华占、9311、中粳 2503、宜香优 2115、C 两优华占以及淮稻 5 号,虽然品种(品系)类型与东部类似,但是南粳 9108 在该地区很难获得高产和优质的协调;长江流域西部适宜生长平均温度为 19.95~23.52 ℃,日照时数为 41~139 h,适宜的品种(品系)只有黄华占和宜香优 2115。实际上,日照时数与产量和品质的高低关系密切,长江流域东部和西部均需增加齐穗后的日照时数,才有利于这 2 个地区中稻获得高产和优质的平衡,长江流域中部则需适当减少齐穗后的日照时数。

表 5 长江流域中稻不同地区高产和优质品种类型的适宜温度和日照时数范围

Table 5 Range of suitable temperature and sunshine hours for the mid-season rice varieties in different areas of the Yangtze River basin

类型	地区	年份	齐穗后 20 d 的平均温度范围 (°C)	齐穗后 20 d 日照时数的累积量范围 g(h)	品种
高产优质型 ^a	东部 ^d	2017	24.06~28.43	78.50~93.30	南梗 49、Y-两优 1 号、C 两优华占
	东部 ^e	2018	20.09~29.18	91.00~165.00	南梗 9108、中粳 2503、淮稻 5 号、C 两优华占、黄华占、宜香优 2115、9311
	中部 ^f	2017	29.63~31.34	147.70~166.40	黄华占、宜香优 2115
	中部 ^g	2018	27.06~33.34	132.00~200.00	淮稻 5 号、C 两优华占、黄华占、宜香优 2115、9311、中粳 2503
	西部 ^h	2017	20.39	116.8	宜香优 2115
	西部 ^h	2018	19.95~23.52	41.00~139.00	宜香优 2115、黄华占
	东部 ^d	2017	28.18	102.70	黄华占
	东部 ^e	2018	21.94~28.87	97.00~162.00	淮稻 5 号、9311
稳产优质型 ^b	中部 ^f	2017	31.09	162.9	宜香优 2115
	中部 ^g	2018	30.21~33.15	156.00~192.00	中粳 2503、黄华占、9311
	西部 ^h	2017			无
	西部 ^h	2018	21.41~23.47	103.00~137.00	中粳 2503、黄华占
低产优质型 ^c	东部 ^d	2017			无
	东部 ^e	2018	25.11~29.85	100.00~174.00	淮稻 5 号、黄华占、9311、中粳 2503
	中部 ^f	2017	26.84~31.19	133.60~165.80	9311、宜香优 2115、Y-两优 1 号、中粳 2503
	中部 ^g	2018	27.70~33.04	101.00~191.00	9311、宜香优 2115、黄华占、C 两优华占、南梗 9108
	西部 ^h	2017	20.33	113.9	9311
	西部 ^h	2018	20.33~21.78	73.00~116.00	黄华占、中粳 2503、9311

a: 高产优质型(产量>平均产量的 105%且达到三级米品质指标^[12], 蛋白质含量小于 8%); b: 稳产优质型(产量介于平均产量的±5%且达到三级米品质指标^[12], 蛋白质含量小于 8%); c: 低产优质型(产量<平均产量的 95%且达到三级米品质指标^[12], 蛋白质含量小于 8%); d: 2017 年的长江流域东部地区包括淮安市、南京市和合肥市; e: 2018 年的长江流域东部地区包括淮安市、南京市、苏州市和合肥市; f: 2017 年的长江流域中部地区包括京山县、进贤县、遂宁市、永州市和广州市; g: 2018 年的长江流域中部地区包括京山县、进贤县、遂宁市和永州市; h: 2017 和 2018 年的西部地区均包括贵阳市和昆明市。表中数据均来自 2017 年或 2018 年不同试验点 3 期分期播种试验结果。

3 讨论

中国水稻种植面积居世界之首,且分布范围较广,北至黑龙江省,南到海南省,西达新疆维吾尔自治区,东至台湾岛^[17]。其中长江流域水稻种植面积总和达 $2.000 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占中国水稻种植面积的 66.7%^[8]。一般而言,水稻生长季的温度条件自北向南逐渐升高,东北、西北较低,为 19~21 °C, 华北平原 21~23 °C, 长江流域东部沿海 23 °C 左右,西部 23~24 °C, 云贵高原 21 °C 以下,四川盆地 21~23 °C, 华南地区 24 °C 以上^[18],但近年来温室效应导致水稻种植区光温特征发生了明显变化,中国水稻生产格局也发生了变动^[4]。从本研究结果可以看出,同一试验点分期播种造成的水稻生育期光温差异,均在各地最适种植播期水稻生育期光温上下波动,同一种植点 3 期的光温差异小于不同试验点的。其中水稻生长季节的平均气温如淮安市 [25.08 °C (2017), 24.44 °C (2018)], 南京市 [26.41 °C (2017), 26.38 °C (2018)], 四川盆地遂宁市 [24.47

°C (2017), 24.54 °C (2018)] 和永州市 [27.51 °C (2017), 26.04 °C (2018)], 尤其是京山县 [26.54 °C (2017), 27.53 °C (2018)] 和进贤县 [27.97 °C (2017), 28.75 °C (2018)], 温度均高于上世纪末的温度,只有云贵高原的变化不大,如昆明市 [19.20 °C (2017), 19.03 °C (2018)] 和贵阳市 [21.16 °C (2017), 21.63 °C (2018)]。因此,这种增加的光温条件显著影响同期水稻产量和品质。本研究实测结果与前期通过统计分析近 10 年国审品种产量与品质的变化趋势^[10]是类似的。

目前对影响水稻产量和品质的气象因素研究,主要集中在特定范围的气候环境,而且具有地域性。其中气温和光照度被认为是影响水稻产量与品质最关键的环境因子,首先是日均温度,其次是光照^[18]。水稻产量对光温响应的区域特征显著,并有较多报道。如利用 1978–2015 年中国 29 个省(自治区、直辖市)的水稻投入产出和气象数据,通过构建“经济-气候”模型,实证分析气候因素对中国水稻产量及其区域差异性的影响,其中日照时数和气温与中

国水稻总产量之间存在倒 U 型关系,日照时数增加对西南和东北地区水稻产量具有促进作用;温度升高对长江中下游、华南、西北地区水稻产量有正向作用,但对西南、东北和黄淮海地区水稻产量则具有显著负向作用^[19]。根据 1978–2010 年江苏省水稻单产数据和同期气象时序数据,水稻分蘖期日照时数的增多有利于水稻单产的增加,水稻开花结实期日照时数的增强、昼夜温差的变大均有利于水稻单产的增加^[20]。高温和弱光均对水稻产量产生不利影响^[21–22]。本研究的中稻品种 2 年大田产量与其同期的光温响应结果也与上述趋势一致,长江流域西部温度对于水稻产量增加最适宜,尤其是齐穗后温度,均在 15~25 ℃,虽然日照时数较少,但其产量仍最高,也表明气温对产量的影响更大;而长江流域中部在水稻生育期尤其是生育后期多处于高光照和高温的环境,产量最低;而长江流域东部虽然齐穗前期的光温条件适宜,但是由于其品种生育期较长,有些地区和晚播种植的水稻后期气温较低(齐穗后温度低于 15 ℃),低于最适的光温条件,因此,该地区水稻产量介于长江流域西部和中部之间。

相对于产量而言,稻米的品质特性更复杂,虽然目前已经对影响稻米的主要组分淀粉以及蛋白质等形成的关键基因作了大量研究^[23–26],但温度和光照仍是最终影响稻米品质的重要生态因素^[18]。稻米品质的光温响应规律很复杂,而且各种指标对光温的响应规律也不一致。相对而言,稻米的垩白度对环境的变化最敏感,粒形和粒长等性状较迟钝,而整精米率、胶稠度和直链淀粉含量等性状居中。糊化温度、胶稠度以及垩白面积分别与日均温度和平均日照时数呈正相关关系^[27]。相比于光照,水稻生育期气温对品质影响更大,且水稻齐穗后 30 d 内的平均气温与稻米品质关系密切且效应系数较大^[28]。籽粒灌浆初期的高温可导致整精米率极显著降低,垩白度极显著增加,透明度变差,蛋白质含量显著升高^[29–30]。稻米品质受环境条件的影响程度因品种而异,同一品种,与早播相比,晚播稻米的垩白度小,整精米率高,碱解值大,而且直链淀粉含量的光温响应规律还与品种本身直链淀粉含量的高低有关^[31]。与早季种植的稻米相比,晚季种植的稻米胶稠度、整精米率以及透明度均增加,而对稻米直链淀粉含量和蛋白质含量则没有显著影响^[30]。以上相关结果均来自较早跨区自然分期播种、盆钵以及人工控温试验。本研究在长江流域 9 个省(市)设立 10 个(2017 年)和

11 个(2018 年)试验点进行大田分期播种试验,结果表明,该地区水稻种植期光温特征可以明显地分为高温高光照区(长江流域中部)、中温中光照区(长江流域东部)以及低温低光照区(长江流域西部),地区间光温特征迥异;相关分析结果显示,水稻齐穗至成熟期的气温以及日照时数对不同地区中稻产量和品质影响更大。通常平均气温越高,产量越低,品质越差,同期的光照时间越长,品质也越差。根据本研究 2 年的变异系数分析结果,垩白率是对光温最敏感的性状,胶稠度次之,精米率、直链淀粉含量和蛋白质含量中度敏感,糊化温度则是受影响最小的性状,其中胶稠度的表现与前人试验结果不一致,可能与前人种植的区域小于本研究有关。

整精米率是最为重要的稻米加工品质指标,决定着稻米的商品性,它对气温的响应可分为灵敏型、中间型以及迟钝型。一般温凉的气温有利于获得较高的整精米率,温度过高过低均降低整精米率^[32]。且齐穗后 15 d 内的平均气温 ≥ 27 ℃(籼稻)或 ≤ 21 ℃(粳稻),以及弱光均会使相应品种稻米的加工品质下降^[33]。并且整精米率与结实中期的日均辐射量呈负相关关系^[34]。本研究结果显示:2017 年气温较高,水稻不同时期的气温与整精米率均呈负相关关系,而 2018 年气温比 2017 年低,则整精米率与 2018 年的气温以及日照时数呈正相关关系。可见,稻米的加工品质是光温互作的结果,存在一定的温度阈值,在温度适宜的条件下,适当的提高温度和延长日照时数有利于稻米加工品质的改善。

稻米最主要成分是淀粉,占稻米干质量的 70% 以上,其中直链淀粉含量为稻米品质定级的决定性指标之一。抽穗结实期的气候条件对稻米的直链淀粉含量影响较大,抽穗结实期相对较高温度使直链淀粉含量增加^[35]。与此同时,品种稻米直链淀粉含量的差异也影响着其结实期光温的响应规律,如水稻结实中期日平均气温(即齐穗到齐穗后 20 d 的气温)和日均辐射量与直链淀粉含量低的品种直链淀粉含量呈负相关关系,而与糯型品种的直链淀粉含量呈正相关关系^[33,36–37]。本研究结果表明:长江流域种植的水稻直链淀粉含量在 2017 年与齐穗期到成熟期的平均温度呈显著正相关关系,与同期的日照时数呈负相关关系;而 2018 年则与播种期到齐穗期、播种期到成熟期以及齐穗后 20 d 的平均气温呈显著或极显著的负相关关系,与齐穗期到成熟期、播种期到成熟期以及

齐穗后 20 d 的日照时数也呈显著或极显著的负相关关系。可见气温增加有利于增加稻米直链淀粉含量,而增加光照度则降低了稻米直链淀粉含量。

稻米中蛋白质含量也是衡量稻米品质的重要生化指标之一^[38-39]。相同试验条件下种植的同一水稻品种因不同试验小区以及不同种植月份,糙米蛋白质含量变化范围为 9%~15%^[40];尤其与灌浆期平均温度、太阳辐射和日较差相关^[27-28]。25℃左右是籼稻蛋白质含量最高的温度,高温(36℃/30℃,昼/夜)和低温(21℃/20℃,昼/夜)均不利于其籽粒蛋白质的形成^[41-42]。灌浆结实期高温胁迫增加了粗蛋白含量,降低了醇溶蛋白含量,并影响稻米的食味和加工特性^[43]。本研究结果表明蛋白质含量主要与前期营养期的平均温度呈正相关关系,而与生育后期的日照时数呈显著负相关关系;2018 年温度对蛋白质含量的影响与 2017 年类似。

影响垩白的主导因子是齐穗后 15 d 内的日平均气温,而且在全国呈现明显的地域特征,即中国自北向南,稻米的垩白随均温的变化由小到大,垩白≤5%的稻区为四川盆地以北、淮河以北及云贵高原地区,即华北、东北以及西北一年一熟单季稻作区,其稻米外观品质好;垩白 5%~10%的稻区为四川盆地、滇南及淮南至沿江江南地区;垩白 10%~20%的稻区为云贵高原以东、长江以南双季稻早稻区,即华中、华南一年三熟双季早稻区;中国华中和华南一年三熟双季晚稻,气温较早稻低,垩白在 5%左右^[18]。高温增加垩白面积,弱光减少垩白粒率^[27]。水稻结实期中期日平均气温和日均辐射量与垩白粒率高、垩白大、透明度高呈正相关关系^[33]。本研究结果表明:垩白是受光温环境影响最大的品质性状,变异系数高达 83.57%,也表现为长江流域东西部垩白粒率较低,长江流域中部高温高光照区垩白粒率较高。其他品质性状如胶稠度和糊化温度与自然温光的关系无规律,此消彼长,表明这些性状比较复杂,自然温光对其影响有限。

中国水稻生产不仅要满足国家粮食安全的需要,也要应对极端气候频发以及耕地面积减少的挑战,这就需要在水稻新品种选育过程中重点选育兼具高产、优质、多抗、广适、适宜机械化以及易制种等多种性状的品种。本研究根据 2 年大田试验中产量和品质对光温响应的表现,以优质优先为前提,将长江流域中稻分为 3 种类型,即高产优质型、稳产优质型和低产优质型。以本试验列出的光温条件以及适

宜的品种,各地均可以获得高产和优质俱佳的稻米。对于稳产优质类型,不同地区光温区域范围更广些,例如长江流域东部地区较高温度或者增加日照时数,对稻米产量潜力影响不大,通过气温或日照时数的补偿均可获得优质的稻米,而长江流域中部地区较高温度和延长日照时数对稻米产量影响不大,对一些适应性广的籼稻品种仍可以获得高品质稻米,但本研究的供试品种中没有适合长江流域西部地区的稳产优质类型。对于低产优质的品种类型,长江流域东部地区采用气温和日照时数补偿的方法虽然严重影响稻米产量,但对于适应性较广的常规粳稻和籼稻,在不良的平均气温或日照时数下,仍可获得优质,如淮稻 5 号和黄华占等;长江流域中部地区平均气温和日照时数虽严重影响稻米产量,但是获得优质的稻米种类增加,例如软米类型南粳 9108 等;长江流域西部地区平均气温和日照时数显著影响稻米产量,但是一些适应性广且抗病的籼稻品种在该地区也可获得优质的稻米。因此,利用各地的光温条件,长江流域中稻区均可以种植高产、优质以及有其他特性的不同类型水稻。

总之,长江流域中稻区水稻生育期光温条件差异显著,即长江流域中部高温高光照、长江流域西部低温低光照以及介于两者之间的长江流域东部地区,产量和品质均显示光温区域特点。长江流域中稻区利用各地的光温条件以及选择适宜品种,按照中部高温高光照地区“双减”(齐穗后 20 d 内平均温度不超过 31℃,日照时数不超过 160 h)、东部中温中光照地区“一减一增”(齐穗后平均温度不超过 29℃,日照时数不少于 90 h)、西部低温低光照地区“双增”(平均温度不低于 20℃,日照时数不少于 110 h)的温光原则,可以种植出高产与优质协调以及具有特殊用途的不同类型稻米。

参考文献:

- [1] KHUSH G S. What it will take to Feed 5.0 Billion Rice consumers in 2030[J]. *Plant Molecular Biology*, 2005, 59(1):1-6.
- [2] 吕 凤,杨 帆,范 滔,等. 1977-2018 年水稻品种审定数据分析[J]. *中国种业*, 2019(2): 29-39.
- [3] 盛文涛,吴 俊,姚栋萍,等. 稻米食味品质的影响因素及中国籼稻食味品质改良存在的问题与策略[J]. *杂交水稻*, 2014, 29(3):1-5.
- [4] 程勇翔,王秀珍,郭建平,等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(17):3473-3485.

- [5] 李广贤,侯恒军,袁守江,等. 2010-2018年黄淮稻区国审水稻品种的基本特性分析[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 13-23, 29.
- [6] 农业部种植业管理司. 中国稻米品质区划及优质栽培[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [7] 周曙东,周文魁,林光华,等. 未来气候变化对我国粮食安全的影响[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2013, 13(1): 56-65.
- [8] 国家统计局. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [9] 杨晓光,刘志娟,陈 阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336.
- [10] 王 端,黄 雅,朱晓妹,等. 长江流域5省市近10年国家审定水稻品种产量和品质与其相应气候特性的分析[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1207-1216.
- [11] 中华人民共和国农业部. 农作物品种区域试验技术规范水稻: NY/T 1300-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 国家质量技术监督局. 优质稻谷: GB/T 17891-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [13] 周丽慧,刘巧泉,张昌泉,等. 2种方法测定稻米蛋白质含量及其相关性分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2009, 30(1): 68-72.
- [14] 徐 栋,朱 盈,周 磊,等. 不同类型籼粳杂交稻产量和品质性状差异及其与灌浆结实期气候因素间的相关性[J]. 作物学报, 2018, 44(10): 1548-1559.
- [15] 国家质量技术监督局. 大米及米粉糊化特性测定快速黏度仪法: GB/T 24852-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [16] 何秀英,程永盛,刘志霞,等. 国标优质籼稻的稻米品质与淀粉RVA谱特征研究[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(3): 37-44.
- [17] 王 兴,刘晶晶,阙苗苗,等. 我国主要粮食作物产量预测模型及分布特征分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(11): 76-79.
- [18] 马国辉. 环境生态对中国稻米品质的影响[J]. 农业现代化研究, 1998, 19(3): 146-149.
- [19] 韩芳玉,张俊彪,程琳琳,等. 气候变化对中国水稻产量及其区域差异性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 283-289.
- [20] 沈陈华. 气象因子对江苏省水稻单产的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4155-4167.
- [21] 吴 超,崔克辉. 高温影响水稻产量形成研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(3): 103-111.
- [22] 杜彦修,季 新,张 静,等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1307-1317.
- [23] TIAN Z X, QIAN Q, LIU Q Q, et al. Allelic diversities in rice starch biosynthesis lead to a diverse array of rice eating and cooking qualities [J]. PNAS, 2009, 106(51): 21760-21765.
- [24] ZHANG Z J, LI M, FANG Y W, et al. Diversification of the *Waxy* gene is closely related to variations in rice eating and cooking quality [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2012, 30(2): 462-469.
- [25] ZHOU H J, WANG L J, LIU G F, et al. Critical roles of soluble starch synthase *SSIIIa* and granule-bound starch synthase *Waxy* in synthesizing resistant starch in rice [J]. PNAS, 2016, 113(45): 12844-12849.
- [26] YANG Y H, GUO M, SUN S Y, et al. Natural variation of *Os-GluA2* is involved in grain protein content regulation in rice [J]. Nature Communications, 2019, 10: 1949.
- [27] 李 欣,顾铭洪,潘学彪. 稻米品质研究 II. 灌浆期间环境条件对稻米品质的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 1989, 10(1): 7-12.
- [28] 唐永红,张嵩午,高如嵩,等. 温度对稻米品质的时段效应分析[J]. 中国农业气象, 1997, 18(1): 9-12.
- [29] 黄英金,罗永锋,黄兴作,等. 水稻灌浆期耐热性的品种间差异及其与剑叶光合特性和内源多胺的关系[J]. 中国水稻科学, 1999, 13(4): 205-210.
- [30] 陶龙兴,王 熹,廖西元,等. 灌浆期气温与源库强度对稻米品质的影响及其生理分析[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 647-652.
- [31] 程方民,钟连进. 不同气候生态条件下稻米品质性状的变异及主要影响因子分析[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 187-191.
- [32] 张嵩午,周德翼. 温度对水稻整精米率的影响[J]. 中国水稻科学, 1993, 7(4): 211-216.
- [33] 李 林,沙国栋,陆景淮. 水稻灌浆期温光因子对稻米品质的影响[J]. 中国农业气象, 1989, 10(3): 33-38.
- [34] 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.
- [35] 高焕晖,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.
- [36] 程方民,丁元树,朱碧岩. 稻米直链淀粉含量的形成及其与灌浆结实期温度的关系[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 646-652.
- [37] 张桂莲,张顺堂,王 力,等. 抽穗结实期不同时段高温对稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(14): 2869-2879.
- [38] 袁 实,卫平洋,魏海燕,等. 穗发芽程度对梗稻稻米品质和蛋白质组分的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 523-530.
- [39] 孔令国,汪永辉,韩晓东,等. 禾稼春叶肥对不同氮素水平下水稻生长及大米品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 790-798.
- [40] RESURRECCION A P, HARA T, JULIANO B O, et al. Effect of temperature during ripening on grain quality of rice [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1977, 23(1): 109-112.
- [41] 梁成刚,陈立平,汪 燕,等. 高温对水稻灌浆期籽粒氮代谢关键酶活性及蛋白质含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(4): 398-402.
- [42] 周广恰,徐孟亮,谭 周,等. 温光对稻米蛋白质氨基酸含量的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 537-542.
- [43] 任万军,杨文钰,徐精文,等. 弱光对水稻籽粒生长及品质的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 785-790.

(责任编辑:张震林)