

气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略

张卫建, 陈长青, 江瑜, 张俊, 钱浩宇

引用本文:

张卫建, 陈长青, 江瑜, 等. 气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 805–811.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1432>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水稻品质对主要气候变化因子的响应

王云霞, 杨连新

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 822–833 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0223>

我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望

夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 834–841 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0108>

[CO₂]升高对粮食作物影响的研究进展

宋练, 蔡创, 朱春梧

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 786–796 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1360>

中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望

夏龙龙, 颜晓元

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 665–672 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0109>

东北低温农区近四十年气温降水变化及其对面源氮磷输出影响

欧阳威, 徐逸, 黄浩波, 杨万新, 王丽

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1285–1292 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0093>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张卫建, 陈长青, 江 瑜, 等. 气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 805–811.

ZHANG Wei-jian, CHEN Chang-qing, JIANG Yu, et al. Comprehensive influence of climate warming on rice production and countermeasure for food security in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 805–811.



开放科学 OSID

气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略

张卫建¹, 陈长青², 江 瑜², 张 俊¹, 钱浩宇¹

(1. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; 2. 南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘 要: 气候变暖已是不争的事实, 预计到21世纪末全球地表平均气温仍将上升1.5℃以上。水稻是我国最重要的口粮作物, 全国80%以上的人口以稻米为主食, 探明气候变暖对我国“口粮绝对安全”的潜在影响意义重大。作者依据多年的田间增温试验及长期观察, 并结合国内外现有研究, 阐明了我国粮食主产区气候变暖的基本态势, 总结发现温度升高1.5℃对我国水稻生产的潜在影响正负参半, 并取决于具体的稻作季节和地区。但是, 随着水稻种植制度调整, 尤其是南方双季稻种植面积下降, 温度升高对我国水稻生产的负面影响将逐步递增。最后, 作者提出了应对气候变暖的气候智慧型稻作技术创新建议, 并展望了该研究领域的重点内容和方向。

关键词: 粮食安全; 气候变化; 温度升高; 水稻; 产量; 品质

中图分类号: S162.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)04-0805-07 **doi:** 10.11654/jaes.2019-1432

Comprehensive influence of climate warming on rice production and countermeasure for food security in China

ZHANG Wei-jian¹, CHEN Chang-qing², JIANG Yu², ZHANG Jun¹, QIAN Hao-yu¹

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The global climate change, mainly characterized by climate warming, is an unequivocal reality. Global average surface temperature is expected to rise by more than 1.5℃ by the end of this century. Rice is the most important ration crop in China, with more than 80% of the population taking rice as the staple food. It is of great significance to explore the potential impact of climate warming on the "100%-self-sufficiency of rice" in China. Based on warming experiments and long-term field observations, the authors further clarified the basic trend of climate warming in Chinese major grain-producing areas, and concluded that the potential impact of warming on Chinese rice production could be positive and negative, depending on growing seasons and regions. However, with the adjustment of rice cropping system (e.g. decrease in double rice cropping system), the negative impact of warming on rice production in China will increase significantly. Finally, the authors put forward some suggestions on the technological innovation of climate-smart rice cultivation for coping with climate warming, and the key contents and directions of this research field.

Keywords: food security; climate change; warming; rice; yield; quality

收稿日期: 2019-12-29 录用日期: 2020-02-21

作者简介: 张卫建(1966—), 男, 博士, 二级研究员, 研究方向为耕作制度与农田生态。E-mail: zhangweijian@caas.cn

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0300501, 2017YFD0300104); 中国农业科学院科技创新工程项目(Y2016PT12, Y2016XT01)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300501, 2017YFD0300104); The Innovation Program of CAAS (Y2016PT12, Y2016XT01)

水稻是全球最重要的口粮作物之一,世界上50%以上的人口以稻米为主食^[1]。随着世界人口的刚性增长,到21世纪中叶全球稻米的需求还将增长30%左右,水稻丰产对全球粮食安全至关重要^[2]。近100多年来,由于人类活动导致的大气温室气体浓度递增,引发了全球性的地表温度升高。大量的科学研究证明,如果人类不采取有效的碳减排措施,到2100年全球地表温度将持续升高0.75~4.0℃^[3]。即使全球能够采取共同措施,将碳排放降低到1990年的水平以下,全球地表温度也仍将升高1.5℃以上^[4]。温度是作物生长的最关键因子,探明气候变暖对水稻生产的潜在影响,可为全球粮食安全战略决策提供重要依据。

我国是世界上最大的水稻生产国、消费国和进口国,全国80%以上的人口以稻米为主食,水稻丰产是我国乃至全球粮食安全的压舱石^[5]。依据中国气象局2018年4月3日发布的《中国气候变化蓝皮书》^[6],我国是全球气候变化的敏感区和影响显著区,1951—2017年间我国地表年平均气温升高了1.6℃。我国不仅升温率高于同期全球平均水平,而且高温热害和低温冷害等极端天气现象也更为频发,气候变暖对我国水稻生产的影响可能更为突出^[7-9]。而且,我国水稻种植区域辽阔,从云贵高原到东部沿海三角洲,从黑龙江漠河到海南三亚,不同地区水稻生长季温度差异显著,气候变暖对我国水稻生产的影响也将存在明显的时空差异^[10-11]。另外,我国水稻种植模式和制度多样,包括南方双季稻、长江流域水旱两熟一季中稻和北方一熟单季稻,几乎囊括了全球所有的稻作模式。由于不同稻作模式下水稻生长季所处的背景温度差异显著,不同稻作模式水稻的生育期和产量对气候变暖的响应也将各具特征^[10-11]。因此,以我国水稻生产系统为案例,全面分析气候变暖的综合影响,对气候变化下的作物适应性栽培理论与技术创新更具指导意义。

到目前为止,关于气候变暖对作物生产的影响已有大量研究,基本阐明了全球粮食生产的响应特征^[8,12]。但是现有的研究多基于模型分析和历史数据挖掘,对田间试验研究和长期观察总结不够,就具体国家(种植区域)以及具体季节作物的影响仍存在较大的不确定性^[13-14]。近年来关于作物生长对气候变暖的响应与适应的试验研究日益受到重视,田间长期观察数据也逐年递增。这些试验和观察不仅提升了学界和公众对气候变暖及作物响应的认识,而且也

综合分析提供了丰富的实证数据。为此,本文依据作者多年多点的田间增温试验及长期观察,并结合国内外现有实证研究进展,根据我国水稻多熟种植的区域特征,综合分析了我典型稻作系统水稻生育期、产量和品质对温度升高的响应特征与适应趋势,拟为应对气候变暖的水稻绿色增产增效提供理论依据和技术建议。

1 我国粮食主产区气候变暖的基本态势

根据历史气象监测,全球气候变暖呈现明显的地区、季节和昼夜差异^[3]。基本态势为:高纬度地区的气温升高幅度明显高于低纬度地区,作物的种植北界将北扩,面积扩大;夏秋季的变暖幅度显著低于冬春季,冬春季作物的低温冷害将可能减少或减轻;白天的气温升高幅度明显低于夜间,昼夜温差将缩小,可能不利于作物产量和品质的形成。由于不同地区和季节作物生长季的背景温度差异,以及相应地区和季节气温升高幅度的不同,气候变暖对作物生产的影响存在明显的时空特征^[8]。因此,掌握具体国家(种植区域)气温变化的时空特征及其趋势,将利于全面了解作物生产对气候变暖的综合响应。

现有的大量气象监测数据和模型预测分析结果表明,近几十年来我国气候变暖的趋势明显高于全球平均水平^[6]。依据1970—2017年我国气象观察站点的监测数据^[15],我国东北、华北、长江三角洲粮食主产区气温升高的时空差异显著。与1970s相比,东北2010s作物生长季日最低温度和最高温度分别升高了1.39℃和0.70℃,华北相应升高了1.35℃和0.86℃,长江三角洲相应升高了1.28℃和1.10℃。相同年代内,东北的冬春季和夏秋季平均气温升高幅度分别达到1.18℃和0.89℃,华北相应季节的平均气温升高幅度分别为1.31℃和0.67℃,长江三角洲的相应升幅分别为1.28℃和0.99℃,增温趋势与全球基本一致,但增幅显著高于全球平均水平。

在整体呈现变暖趋势的同时,我国粮食主产区作物生长季的降水量及其降水日数也发生了明显的区域性变化,即西部降水呈增加趋势,东部降水呈下降趋势。另外,高强度降水的频率增加,尤其是我国东南地区,总降水量呈微弱下降趋势,但大雨和暴雨出现次数呈显著的上升趋势^[16]。总体来看,作物生长季降水总量变化不显著,但降水日数明显减少,日降水强度显著提高,作物关键生育期水热不协调问题更为突出。

在这种气温和降水变化的影响下,季节性干旱、极端性变温等灾害天气的发生频率也呈递增趋势。夏季高温干旱灾害在我国大部分地区(华中地区除外)的发生均呈增加趋势,但不同区域表现有异。Vicente-Serrano 等^[17]提出的标准化降水蒸散指数(SPEI)是通过标准化潜在蒸散与降水的差值表征一个地区干湿状况偏离常年的程度,是分析干旱演变趋势的指标,以1970—2017年我国粮食主产区作物耕种期SPEI为例,东北春耕季的SPEI值提高了0.36,华北夏耕季下降了0.59,而长江三角洲秋耕季提高了0.86,东北、华北和长江三角洲的区域差异明显,分别呈现了明显的暖干化、干热化和湿热化的新趋势。同时气候变暖导致了极端灾害频发,其空间分布也具有显著差异。与东北、西北、华北地区相比,南方地区气候变化幅度较小,但亚热带高压在夏季增强,导致南方极端高温事件增多。另外,西北地区虽表现增温趋势,但自20世纪80年代以来其极端低温事件显著增加^[18]。总体来看,西北和长江中下游地区的极端气候事件较多,东北和长江流域中上游地区则相对较少^[19]。

2 气候变暖对我国水稻生产的影响特征

为了降低模型分析和统计数据挖掘的不确定性,近年来关于气候变暖对水稻生产影响的田间试验研究越来越受到重视,基于田间长期观察的资料也日益丰富。为此,本文在总结作者多年田间增温试验的基础上,综合长期田间观察和省级统计数据,系统分析了我国三大稻作系统水稻产量对温度升高1.5℃的响应特征。

2.1 我国典型稻作系统的背景气温及其变暖趋势

我国的典型稻作系统包括以东北为代表的北方一熟区单季稻、长江中下游的水旱两熟一季中稻和南方双季稻三大系统,三大稻作系统的气候背景差异显著。依据1980—2015年的长年气温变化^[15],北方单季稻水稻生长季日平均气温、日最高气温和日最低气温分别为18.8、24.4、13.6℃,升温幅度分别为0.31、0.29、0.36℃·10a⁻¹。同期水旱两熟一季中稻生长季的日平均气温、日最高气温和日最低气温分别为23.0、28.0、19.3℃,升温幅度分别为0.34、0.39、0.32℃·10a⁻¹。南方双季稻区的早稻季相应背景温度分别为23.3、27.7、20.0℃,升幅分别为0.28、0.29、0.29℃·10a⁻¹;双季稻区的晚稻季相应背景温度分别为26.0、30.7、22.6℃,气温升高幅度分别为0.25、0.26、0.25℃·10a⁻¹。从整体趋势来看(图1),三大稻

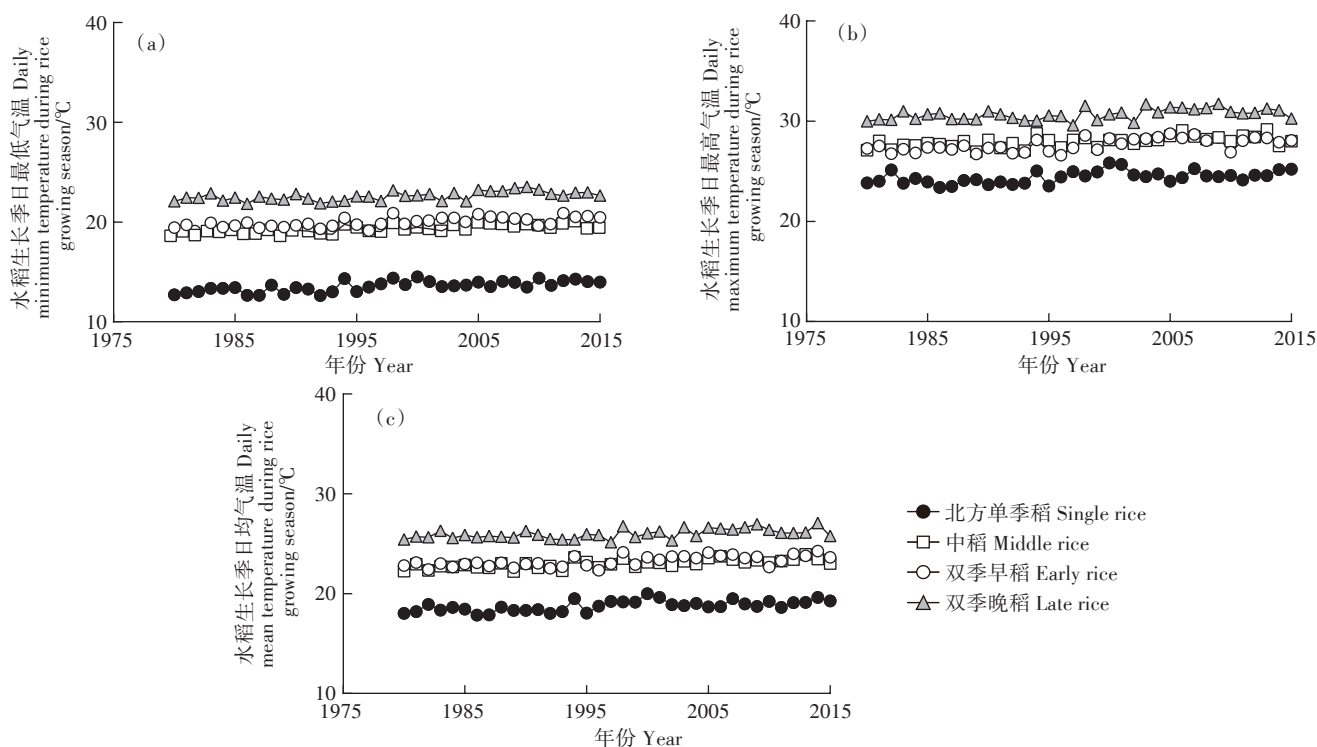


图1 1980—2015年我国主要稻作区水稻生长季日最低气温(a)、日最高气温(b)和日平均气温(c)

Figure 1 Daily minimum(a), maximum(b) and average(c) temperatures during rice growing seasons in the major Chinese rice cropping system over 1980—2015

作系统水稻生长季的气温均呈现明显升高趋势,中稻和南方双季稻早稻的背景温度相似,东北气温升高幅度显著高于其他稻作系统。东北一熟区水稻花后的背景温度与双季稻晚稻的花后背景温度相似,明显低于水旱两熟一季中稻和双季稻早稻的花后温度。由于不同稻作系统背景温度和升温幅度的差异显著,气候变暖对它们的影响也将明显不同。

2.2 水稻生育期和产量对气温升高的响应特征

近年来,作者在我国主要稻作区开展了大量田间开放式增温试验,如2016—2020年在北方一熟单季稻区黑龙江哈尔滨设置全天增温试验,2008年在水旱两熟中稻区江苏南京设置全天、白天、夜间增温试验,2007—2011年在南方双季稻区江西南昌开展夜间增温试验等,以期阐明我国不同稻作系统水稻生育期和生产力对未来气温升高1.5℃的响应与适应差异^[11, 20–22]。总结多年多点的田间增温试验结果发现,温度升高1.5℃,水稻播种到抽穗开花的生育期显著缩短,但籽粒灌浆充实期变化不大,黑龙江一季稻和南昌双季稻晚稻籽粒灌浆期甚至有所延长。总体而言,尽管温度升高明显缩短水稻的全生育期,但需要注意的是,增温会缩短水稻的花前生育期,但花后的生育期基本不变甚至延长,类似的作物物候期变化也在田间长期观察中得到证实^[10]。

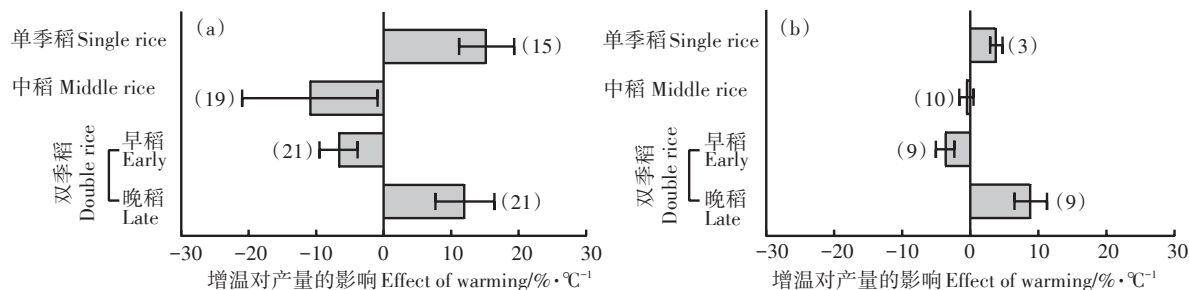
多年的田间增温试验还发现,不同稻作系统下水稻生产力的响应特征也存在显著差异^[23]。气温升高1.5℃时,哈尔滨单季稻的生物产量和籽粒产量均呈显著递增趋势,南京中稻的生物产量和籽粒产量呈下降趋势,而南昌双季稻早稻呈减产趋势、晚稻呈增产趋势。基于目前的水稻种植布局,综合三大稻作系统的响应差异,发现全国水稻的总体单产变化不大。进一步分析区域联合多年多点的播期试验结果,发现水稻生产力主要受开花后的背景温度影响。一方面增

温会使水稻叶面积显著增加,利于群体的干物质积累和产量形成,而水稻在16~35℃温度范围内时,温度越高,分蘖越强;另一方面,当夜温大于29℃或日温大于33℃时,水稻易受高温热害,显著影响水稻结实率^[24]。因此,在水稻花后背景温度高的区域,如南京的中稻和南昌双季稻的早稻,气温升高1.5℃,水稻穗分化和开花受精时更易受热害而影响结实率,穗粒数的下降导致减产;而若背景温度较低,如哈尔滨的单季稻和南昌双季稻的晚稻,气温升高1.5℃,可以促进有效穗数和每穗粒数的提升,有利于增产^[11]。

基于3个稻作系统的长期定位试验以及省级统计数据分析,获得上述类似的气温升高效应(图2)。长期定位试验结果表明,水稻生长季平均气温每升高1.0℃,东北一熟区单季稻单产平均增产15.3%,水旱两熟区中稻平均减产10.9%,南方双季稻早稻平均减产6.7%、晚稻平均增产12.1%。而省级统计数据也表现出相似结果,水稻生长季平均气温升高1.0℃,东北一熟区单季稻平均增产3.8%,水旱两熟区中稻减产0.6%,南方双季稻区早稻和晚稻分别减产3.7%和增产8.9%。总体来看,气候变暖时,我国三大稻作系统水稻生产力有增有减,总体上保持基本稳定。

2.3 水稻种植区域及其总产贡献份额的变化趋势

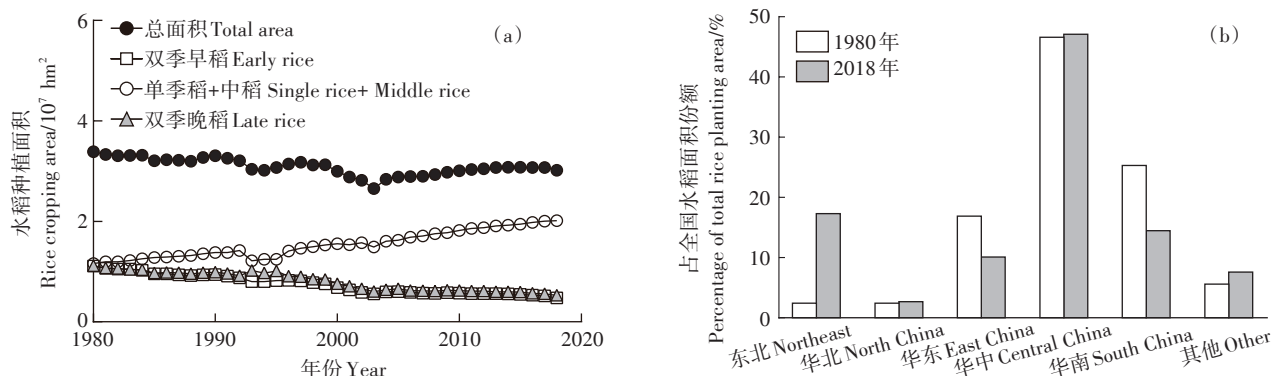
随着气温的升高和社会经济的发展,我国水稻种植区域出现了明显改变,不同区域稻作系统水稻产量对全国水稻总产的贡献份额也发生了明显变化^[25]。在南方水稻种植面积,尤其是双季稻面积大幅下降的同时,北方水稻种植区域快速增加,其水稻种植面积份额从1980年的5%,提高到2018年的20%(图3)。与1980年相比,2015年广东省水稻种植面积缩小了60%以上,只有 $1.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$;而黑龙江省水稻种植面积增长30多倍,达到 $4.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。这除了与南方和北方经济发展差异相关外,也与东北气温显著上升相



(a) 田间长期定位试验的观察数据; (b) 基于省级统计数据的结果。误差线为标准误差
(a) The observational data from long-term field experiments; (b) Analysis results based on provincial statistics. Error bars indicate standard errors

图2 气候变暖对不同稻作系统水稻单产的影响差异

Figure 2 Effects of climate warming on rice yield per unit in different rice cropping systems



(a)不同稻作类型水稻种植面积的变化;(b)不同稻作区水稻种植面积占全国水稻总面积的份额差异

(a)Changes of the rice sown area in different cropping types;(b)Differences in the percentage of total rice planting area in different rice-growing region

图3 近40年我国水稻种植面积的变化

Figure 3 Changes of rice planting area in China during recent 40 years

关,是气候变暖和经济发展的综合效应。

不同稻作系统的产量贡献份额也在发生明显变化。南方双季稻种植面积显著下降,中稻种植面积快速增加,中稻对我国水稻总产的贡献将逐步增加(图3)。1980年我国南方双季稻种植面积和产量分别占全国水稻种植面积和总产的65.8%和61.4%,到2018年其份额分别下降到33.3%和28.3%,变化显著。气温进一步升高增加了我国北方水稻适种区域^[11],国民经济的进一步发展缩减了南方地区稻田面积,不同水稻种植区的区域优势明显改变。由于气候变暖对水稻区划和稻作系统的改变,如未来中稻面积的扩展,而中稻对温度变化最为敏感,这势必会进一步加重温度升高对我国水稻生产的不利影响,危及到国家粮食安全。

2.4 稻米品质对气候变暖的响应特征

随着人类对生活质量要求的提高,优质稻米的需求也越来越大。温度变化会显著影响稻米品质的优劣,水稻籽粒直链淀粉和蛋白质含量是气温升高后响应最为敏感的参数^[26-30],增温显著降低了直链淀粉含量,提高了淀粉颗粒平均粒径,并显著增加了蛋白质含量^[28]。这种淀粉和蛋白质含量的变化会使得稻米在加工过程中易碎,降低稻米的碾米和外观品质,导致糙米率、精米率和整精米率等显著降低,同时增加稻米的垩白度^[26]。Lin等^[29]发现,稻米营养品质对气温升高同样敏感,增温使水稻籽粒中淀粉、贮藏蛋白、脂肪酸等营养成分出现显著变化。增温还会增高稻米淀粉的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值和糊化温度,降低食味品质^[30]。

作者前期研究发现,生长期中气温升高可影响水稻籽粒形成,同时,气候变暖改变了水稻生育进程,进

而导致水稻生育期内发生极端温度,且发生阶段及持续时长也发生了变化^[20,22-23]。通过人工气候室试验发现^[26],抽穗后第2周是温度对稻米品质形成产生影响的关键时期。温度升高,水稻精米率、整精米率、籽粒长宽比显著降低;垩白率、垩白度和垩白粒率均显著增加;糊化温度和蛋白质含量均显著增加,而直链淀粉含量降低。杨陶陶等^[31]的田间开放式增温试验研究认为,花后增温虽导致早、晚稻的外观品质变差,但对晚稻的加工品质有改善作用,同时一定程度提高了早、晚稻的营养品质,如蛋白质含量的提升。通常极端温度对水稻品质的影响更多是在籽粒形成关键期,是籽粒灌浆与物质积累发生不可逆改变而形成的。当水稻灌浆期日均温度超过临界阈值($>33\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,会对水稻产量和品质造成不利的影响^[26];而水稻灌浆期若遭遇极端低温也会降低水稻籽粒品质^[32]。总体来看,气候变暖对稻米品质的影响弊大于利,优质水稻的生产中需要重视研发与推广应对气候变化的稻作措施。

3 应对气候变暖的气候智慧型稻作技术创新建议

虽然近年来国内外已经就气候变暖对作物生产的综合影响及其应对措施进行了大量研究,基本阐明了气候变暖的趋势和作物生育期与生产力的响应特征,并针对性地研发了一些适应性种植技术和应对策略。但是,具体区域和作物对其生长季未来气候变暖的响应与适应认识至今仍存在较大的不确定性,在适应性生产和应对策略层面仍缺乏整体性应对技术,急需开展系统性理论研究和区域适应性关键技术与模式创新。

首先,在作物对气候变暖的响应与适应理论研究层面,今后应进一步加强田间实证研究与区域模型分析的综合。现有的研究多集中在模型分析和历史数据挖掘层面,不多的田间实证研究也主要侧重于温度变化单一因素。但是,事实上气候变暖不是单一的平均温度变化,还包括极端性天气、降水变化,以及伴随的大气组分变化,尤其是大气CO₂和近地表O₃等变化。因此,气候变暖对作物生产的影响是多因子的综合,需要田间综合实证和多因子模型挖掘,以阐明气候变暖乃至气候变化对作物生产的综合影响,降低对未来认识的不确定性。

其次,在研究内容与方法及手段方面也急需创新。已有的研究多集中在作物生育期和生产力方面,对社会日益关注的作物产品品质及其安全性的研究还非常不清楚,研究内容和目标难以满足我国农业提质增效和绿色发展的新要求。在研究对象方面,现有研究多集中在主要粮食作物,且多针对少数品种类型。但是,气候变暖对非粮食作物的影响也非常突出,而且同一作物类型的不同品种差异也非常显著。过少的作物类型和单一品种的研究,很难满足适应性技术和应对策略的创新需求。在研究方法手段层面,尤其是田间实证研究方面,目前多停留在单一因子,部分涉及到两因子,急需创建多因子综合的田间设施,以及相应的综合模型,提升研究手段和方法,模拟真正的气候系统。

最后,在应对气候变暖的水稻生产技术与模式方面,我们还多侧重在策略上,关键技术的系统集成不够,应对技术的适应性和实用性不足。水稻生产应对气候变暖应该考虑多个层面,包括如何提升水稻生产系统的适应能力,以降低气候变暖对水稻有效供给和粮食安全的影响;同时还应该包括如何促进稻田土壤有机碳固存与温室气体减排的协调,尤其是CH₄气体减排,为减缓气候变暖做贡献,创建气候智慧型农业^[33]。

基于已有研究,作者对气候智慧型稻作技术体系的构建提出以下建议:一要加强气候变化的预警预报能力建设、高标准生态稻田建设、丰产抗逆水稻品种选育及抗逆稻作技术配套创新,提升稻田生态系统对气候变暖的综合适应能力,实现水稻周年丰产稳产优质安全;当前的气候变化并不是一个均匀的增温过程,频发的极端气候灾害事件增加了农业生产的风险,需要设立极端天气预警预报体系,如强降水、季节性干旱、极端变温等自然灾害的提前预警,可降低灾

害风险,同时政府牵头建设现代化农田,完善稻田生产设施,选育丰产抗逆水稻品种,并配套现代化稻作技术,普及生态友好型的稻田生产方式^[34]。二要加强水稻生产系统及稻田生态系统的优化与布局,促进产业链延伸和农产品提质增效,实现农业增效和农民增收。如热量资源的增加以及优质稻米需求的提升,在东北地区可适度扩大水稻的生产,并推广生长周期长的优质稻米品种,生产优质稻米,同时建设稻米产业集群,打造品牌,增加经济效益^[11,35]。三是要重视稻作区土地利用规划、稻田土壤有机质提升和农用化学品增效减量,提高农业系统尤其是农田土壤有机碳固存能力,尽量降低农业源温室气体排放;可根据各稻作区实际情况开展适宜的配套栽培耕作措施,如双季稻区可实施冬季绿肥覆盖、石灰改良剂等保护性措施,推广秸秆还田、间歇灌溉等节约型农艺措施,同时扩大测土配方和精准施肥的推广力度,发展固碳减排的稻作模式^[36-38]。笔者认为,气候智慧型稻作技术体系包括三大模块,即水稻生产力提升技术(适应性栽培技术)、土壤有机碳固存技术和稻田温室气体减排技术,通过技术集成,进行模式创新,实现保障粮食安全、改善稻农生计和减缓气候变暖共赢,促进水稻产业可持续发展。

参考文献:

- [1] Maclean J L, Dawe D C, Hardy B, et al. Rice Almanac: Source book for the most important economic activity on earth[M]. 3rd edition. CAB International, 2002.
- [2] Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision[R]. Rome: FAO, ESA Working Paper, 2012.
- [3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [4] Bongaarts J. Intergovernmental panel on climate change special report on global warming of 1.5 °C, Switzerland: IPCC, 2018[J]. *Population and Development Review*, 2019, 45(1):251-252.
- [5] Chen W F, Xu Z J, Tang L. 20 years' development of super rice in China: The 20th anniversary of the super rice in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5):981-983.
- [6] 中国气象局. 中国气候变化蓝皮书[R]. 北京:中国气象局, 2018. China Meteorological Administration. China blue book on climate change[R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2018.
- [7] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(27):9971-9975.
- [8] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. *Science*, 2011, 333(6042):616-620.
- [9] Zhao C, Piao S L, Wang X H, et al. Plausible rice yield losses under fu-

- ture climate warming[J]. *Nature Plants*, 2017, 3(1): 16202.
- [10] Tao F L, Zhang Z, Shi W J, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981—2009 in China, and late rice was just opposite[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 3200–3209.
- [11] Chen J, Chen C Q, Tian Y L, et al. Differences in the impacts of nighttime warming on crop growth of rice-based cropping systems under field conditions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82: 80–92.
- [12] Liu B, Asseng S, Christoph M, et al. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(12): 1130–1136.
- [13] Liu B, Martre P, Ewert F, et al. Global wheat production with 1.5 and 2.0 °C above pre-industrial warming[J]. *Global Change Biology*, 2018, 25: 1428–1444.
- [14] Zhao C, Liu B, Piao S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(35): 9326–9331.
- [15] Chen C Q, van Groenigen K J, Yang H, et al. Global warming and shifts in cropping systems together reduce China's rice production[J]. *Global Food Security*, 2020, 24: 100359.
- [16] Jiang R, Yu X, Xie J, et al. Recent changes in daily climate extremes in a serious water shortage metropolitan region, a case study in Jing-Jin-Ji of China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 134(1/2): 1–20.
- [17] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696–1718.
- [18] Wang B, Zhang M, Wei J, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over northwest china in recent 50 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1720–1733.
- [19] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1698–1706.
- PAN Gen-xing, GAO Min, HU Guo-hua, et al. Impacts of climate change on agricultural production of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1698–1706.
- [20] Dong W J, Chen J, Zhang B, et al. Responses of biomass growth and grain yield of midseason rice to the anticipated warming with FATI facility in east China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(3): 259–265.
- [21] 陈金, 田云录, 董文军, 等. 东北水稻生长发育和产量对夜间升温的响应[J]. *中国水稻科学*, 2013, 27(1): 84–90.
- CHEN Jin, TIAN Yun-lu, DONG Wen-jun, et al. Responses of rice growth and grain yield to nighttime warming in northeast China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(1): 84–90.
- [22] 张鑫, 陈金, 江瑜, 等. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1349–1356.
- ZHANG Xin, CHEN Jin, JIANG Yu, et al. Impacts of nighttime warming on rice growth stage and grain yield of leading varieties released in different periods in Jiangsu Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(5): 1349–1356.
- [23] Deng A X, Chen C Q, Feng J F, et al. Cropping system innovation for coping with climatic warming in China[J]. *The Crop Journal*, 2017, 5(2): 136–150.
- [24] Yang T T, Zeng Y H, Sun Y N, et al. Experimental warming reduces fertilizer nitrogen use efficiency in a double rice cropping system[J]. *Plant and Soil Environment*, 2019, 65: 483–489.
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据库[EB/OL]. [2019–12–10]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.
- National Bureau of Statistics of China. National data [EB/OL]. [2019–12–10]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.
- [26] Siddik M A, Zhang J, Chen J, et al. Responses of indica rice yield and quality to extreme high and low temperatures during the reproductive period[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 106: 30–38.
- [27] Morita S, Wada H, Matsue Y. Countermeasures for heat damage in rice grain quality under climate change[J]. *Plant Production Science*, 2016, 19(1): 1–11.
- [28] Liu J C, Zhao Q, Zhou L J, et al. Influence of environmental temperature during grain filling period on granule size distribution of rice starch and its relation to gelatinization properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 76(7): 42–55.
- [29] Lin C J, Li C Y, Lin S K, et al. Influence of high temperature during grain filling on the accumulation of storage proteins and grain quality in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(19): 10545–10552.
- [30] Dou Z, Tang S, Chen W Z, et al. 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]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81(3): 118–126.
- [31] 杨陶陶, 孙艳妮, 曾研华, 等. 花后增温对双季优质稻产量和品质的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(3): 169–177.
- YANG Tao-tao, SUN Yan-ni, ZENG Yan-hua, et al. Effect of post-anthesis warming on the grain yield and quality of double-cropped high-quality rice cultivars[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(3): 169–177.
- [32] Song G S, Sun Z F, Wang X, et al. Effect of low temperature on rice quality in different growth period[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(18): 174–179.
- [33] FAO, Climate-Smart Agriculture[EB/OL]. [2019–12–10]. <http://www.fao.org/climate-smart-agriculture/en/>.
- [34] Long T B, Blok V, Coninx I. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: Evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 9–21.
- [35] 管大海, 张俊, 郑成岩, 等. 国外气候智慧型农业发展概况与借鉴[J]. *世界农业*, 2017(4): 23–28.
- GUAN Da-hai, ZHANG Jun, ZHENG Cheng-yan, et al. Overview of the development of climate-wise agriculture in foreign countries[J]. *World Agriculture*, 2017(4): 23–28.
- [36] Jiang Y, Qian H Y, Huang S, et al. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition[J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau9038.
- [37] Jiang Y, van Groenigen K J, Huang S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23: 4728–4738.
- [38] Jiang Y, Liao P, van Gestel N, et al. Lime application lowers the global warming potential of a double rice cropping system[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 1–8.