

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.22026

1981—2010 年长江中下游地区单季稻生殖生长期对气候变化和技术进步的响应

刘二华^{1,2,3} 周广胜^{1,2,3,4,*} 武炳义² 宋艳玲^{1,3} 何奇瑾⁴ 吕晓敏^{1,3}
周梦子^{1,3}

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081; ² 复旦大学大气科学研究院, 上海 200439; ³ 中国气象科学研究院与郑州大学生态气象联合实验室, 河南郑州 450001; ⁴ 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

摘 要: 作物生殖生长期长度与作物产量和品质密切相关。为深入探究作物生殖生长期长度(reproductive growth period lengths, RGLs)对气候变化和技术进步的响应, 基于 1981—2010 年长江中下游地区单季稻生殖生长期和气象数据, 量化不同 RGLs (孕穗期—抽穗期(booting to heading, BDHD)、抽穗期—乳熟期(heading to milking, HDMS)、乳熟期—成熟期(milking to maturity, MSMD)和孕穗期—成熟期(booting to maturity, BDMD))对平均温度(mean temperature, TEM)、累积降水量(cumulative precipitation, PRE)和累积日照时数(cumulative sunshine duration, SSD)的敏感性, 并分离气候变化和技术进步对不同 RGLs 的影响。结果表明, 1981—2010 年长江中下游地区单季稻 BDMD 呈延长趋势(0.24 d a^{-1}), 其中, HDMS 延长趋势最明显(0.16 d a^{-1})。气候因子中高温和寡照不利于单季稻不同 RGLs 延长, 其中, TEM 对 BDHD、HDMS 和 MSMD 变化趋势的平均相对贡献分别为 -50.0% 、 -50.7% 和 -21.9% , SSD 对 BDHD、HDMS 和 MSMD 变化趋势的平均相对贡献分别为 -47.2% 、 -48.7% 和 -67.6% 。技术进步弥补了气候变化对不同 RGLs 变化趋势的不利影响。研究表明, 技术进步可能是当前单季稻稳产高产和趋利避害的主要手段, 未来可以采用较长生殖生长期和耐热性品种来适应持续的气候变化。

关键词: 单季稻; 气候变化; 生殖生长期; 技术进步

Response of reproductive growth period length to climate warming and technological progress in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 1981–2010 in single-cropping rice

LIU Er-Hua^{1,2,3}, ZHOU Guang-Sheng^{1,2,3,4,*}, WU Bing-Yi², SONG Yan-Ling^{1,3}, HE Qi-Jin⁴, LYU Xiao-Min^{1,3}, and ZHOU Meng-Zi^{1,3}

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; ² Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200439, China; ³ Joint Eco-Meteorological Laboratory of Chinese Academy of Meteorological Sciences and Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; ⁴ College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Crop growth period length is closely linked to climate change and technological progress. Even though the extensive researches conducting on crop growth period length variation and its response to climate change, particularly temperature change, the response of reproductive growth periods lengths (RGLs) to climate change and technological progress remains unclear. Based

本研究由国家重点研究计划项目(2018YFA0606103), 国家自然科学基金重点项目(42130514, 4213000565)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2020Z004)资助。

This study is supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFA0606103), the National Natural Science Foundation of China (42130514, 4213000565), and the Basic Research Fund of Chinese Academy of Meteorological Sciences (2020Z004).

* 通信作者(Corresponding author): 周广胜, E-mail: zhousg@cma.gov.cn

第一作者联系方式: E-mail: leh4179@163.com

Received (收稿日期): 2022-04-30; Accepted (接受日期): 2022-10-10; Published online (网络出版日期): 2022-10-31.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20221028.1445.002.html>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

on the reproductive growth periods and meteorological data of single-cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLYR) during 1981–2010, the trends of the RGLs (including booting to heading (BDHD), heading to milking (HDMS), milking to maturity (MSMD), and booting to maturity (BDMD)) and climatic variations were analyzed. In addition, to explore the confounding effects of climate change and technological progress on the RGLs, the sensitivities of the RGLs to mean temperature (TEM), cumulative precipitation (PRE), and cumulative sunshine duration (SSD) were measured. The results showed that the BDMD had an extension trend (0.24 d a^{-1}), among which the extension trend in the HDMS (0.16 d a^{-1}) was the most obvious in RGLs, while the extension trends of BDHD (0.03 d a^{-1}) and MSMD (0.05 d a^{-1}) were not significant. High temperature and low sunshine duration were unfavorable to the extension of the RGLs. The mean relative contributions of TEM to the BDHD, HDMS, and MSMD were -50.0% , -50.7% , and -21.9% , which were -47.2% , -48.7% , and -67.6% in terms of SSD, respectively. Technological progress compensated for the adverse impacts of climate change on the trends of different RGLs. These results suggested that cultivar selection and agronomic management were the effective adaptation strategies benefiting for the stable and high yield of single-cropping rice. Single-cropping rice cultivar with longer RGLs and heat-tolerant may be suitable to cope with the continuous climate change in the future.

Keywords: single-cropping rice; climate change; reproductive growth period lengths; technological progress

作物生育期是重要的农业信息,对合理安排作物布局、调控作物生长发育和预测产量具有重要意义^[1-2]。同时,作物生育期在陆面动态过程、生物物理过程中扮演重要角色^[3]。作物关键生育期的相对长短是决定作物产量的关键因素^[4]。气候变暖普遍加快作物生长发育,缩短作物生长期,缩短作物生物量的积累时间,威胁作物的生产力和粮食安全^[5]。因此,随气候变暖的加剧^[6],作物生育期对气候变化的响应已然成为研究的热点^[7]。

作物生育期变化反映了作物生长过程对自然因素和人为因素的综合响应^[8-9],自然因素主要为气候因素(包括温度、水分和光照等),人为因素表现为技术进步(包括品种、种植方式、栽培管理和生产投入等)。作物生育期的变化表现为提前或推迟,生长期缩短或延长^[10]。研究表明中国单季稻生育期呈延长趋势^[11-13],尤其以生殖生长期(reproductive growth periods lengths, RGLs)显著延长为主^[14]。同时,中国玉米、小麦、大豆以及棉花等作物 RGLs 普遍延长^[5,15-19]。已有大量研究通过统计模型和作物模拟模型等多种方法广泛评价了作物生育期对气候变化和技术进步的响应^[20-22]。例如,Zhang 等^[14]的研究表明水稻 RGLs 由温度和品种特性共同决定,温度升高加快水稻抽穗期,品种改变延缓水稻抽穗期。而 Hu 等^[23]认为中国水稻生育期延长主要由播种期和品种改变调节,Bai 等^[24]进一步研究表明播种期显著影响水稻营养生长期,而对 RGLs 影响不明显,品种改变使得水稻 RGLs 每 10 年延长 $0.2\sim 2.8 \text{ d}$ 。然而,气候因素(如降水量和日照时数)对作物生育期的影响也至关重要,但以往研究通常忽略这些气候因素^[19,25-26]。因此,厘清气候变化和技术进步对作物生育期的影响程度对于准确实施适应气候变化的

管理措施具有重要参考价值^[5,25,27-28]。由于技术的不断进步,作物生育期对气候变化的响应难以评估^[8]。当前已有一些研究开展了关于量化气候变化和作物管理对作物生育期的影响研究^[23,26],但是,鲜少有关于气候变化和技术进步对作物不同 RGLs 变化趋势的综合定量评价研究。

水稻(*Oryza sativa* L.)是世界上一半以上人口的主食^[29],长江中下游地区是中国最古老最重要的水稻主产地之一^[30],水稻种植面积和总产量均占全国 45%以上^[31]。长江中下游地区水稻种植制度为单季稻和早、晚双季稻^[32]。1980—2008 年呈现出单季稻种植面积增加和双季稻种植面积减少的态势^[33-35],这表明单季稻在长江中下游地区水稻生产中占有越来越重要的地位。本研究假设单季稻不同 RGLs 是气候变化和技术进步综合作用的结果。基于以上假设,本研究的目标是(1)阐明长江中下游地区单季稻不同 RGLs 时空变化特征;(2)单季稻不同 RGLs 对平均温度(mean temperature, TEM)、累积降水量(cumulative precipitation, PRE)和累积日照时数(cumulative sunshine duration, SSD)的敏感性;(3)分离和量化气候变化和技术进步对单季稻 RGLs 变化趋势影响的贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区域与资料来源

研究区域位于中国长江中下游地区($26^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$),该地区属于雨热同期的亚热带季风气候区。本研究涉及的地区主要包括江苏、河南南部、湖北、重庆和四川东部(图 1)。本研究所用资料主要包括气象资料和单季稻生育期资料,资料均来源于中国气象局。气象资料主要包括 1981—2010 年 10

个气象站点观测的逐日平均温度、降水量和日照时数。根据长期观测资料缺失情况,选取的10个农业气象站位于与上述气象站相同的地点。单季稻生育期主要包括分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期和成熟期,本研究将生殖生长阶段进一步划分为孕穗期

—抽穗期(booting to heading, BDHD)、抽穗期—乳熟期(heading to milking, HDMS)、乳熟期—成熟期(milking to maturity, MSMD)和孕穗期—成熟期(booting to maturity, BDMD),同时探讨了分蘖期—孕穗期(tillering to booting, TDBD)的变化特征。

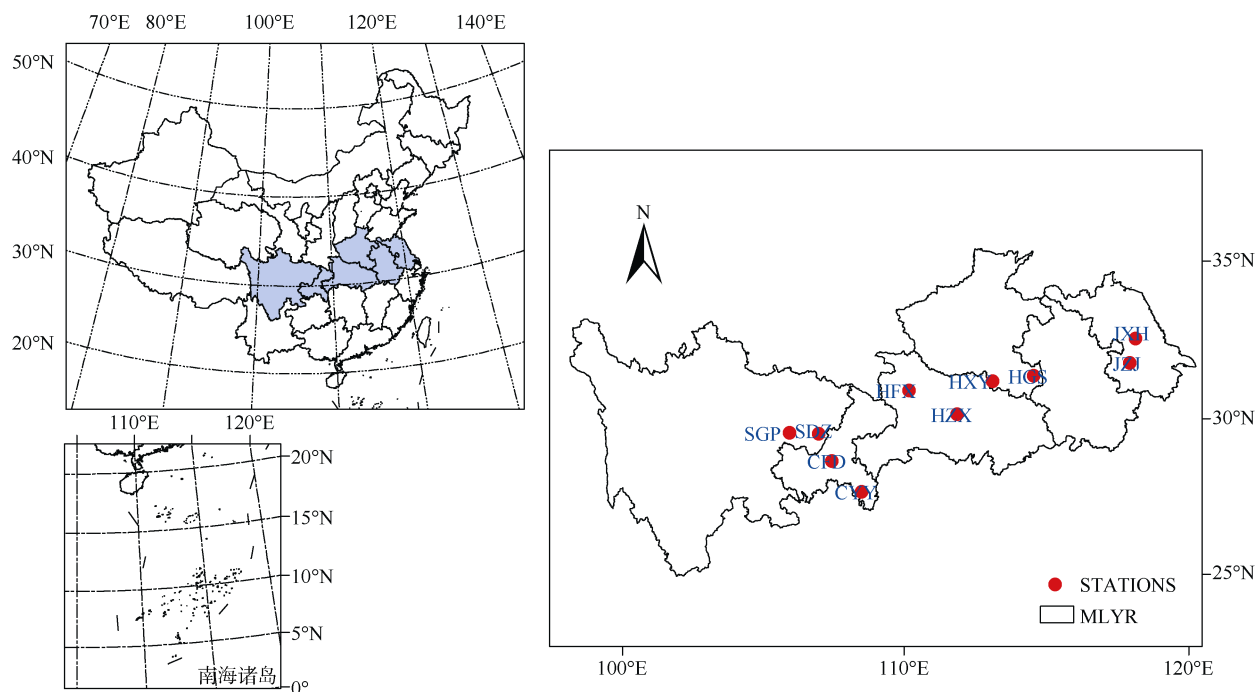


图1 10个气象站点地理位置

Fig. 1 Locations of the 10 meteorological stations used in the study

JXH、JZJ、HGS、HXY、HFX、HZX、SDZ、SGP、CFD和CYY分别表示兴化站、镇江站、固始站、信阳站、房县站钟祥站、大竹站、高坪站、丰都站和酉阳站。矢量地图数据来源: 全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)。

JXH, JZJ, HGS, HXY, HFX, HZX, SDZ, SGP, CFD, and CYY represent Xinghua station, Zhenjiang station, Gushi station, Xinyang station, Fangxian station, Zhongxiang station, Dazhu station, Gaoping station, Fengdu station, and Youyang station, respectively. The above vector map is from the National Catalogue Service for Geographic Information (<https://www.webmap.cn/>).

1.2 分析方法

利用线性回归方法分析单季稻关键生殖生长期和不同RGLs(Booting、Heading、Milking、Maturity、TDBD、BDHD、HDMS、MSMD和BDMD)以及相应时期气候因子(TEM、PER和SSD)的变化趋势,采用双尾t检验分析确定统计显著性。

$$Y_i = T \times X_i + B \quad (1)$$

式(1)中, Y_i 是第 i 年各变量的值; T 为线性回归斜率; X_i 是年份 i ($i = 1, 2, 3, \dots, 30$); B 是截距。

面板回归模型法^[36]已被证明适合气候变化影响的研究^[37]。本研究利用面板回归模型法得到单季稻RGLs对气候因子的响应及其敏感性。为降低气候因子间的多重共线性,本研究根据相关性分析并结合前人研究^[25,38],选取TEM、PRE和SSD三个气候因子作为预测变量。

首先,构建了5个单季稻RGLs(TDBD、BDHD、HDMS、MSMD和BDMD)多元面板回归模型。模型形式如下:

$RGL_{t,s} = \beta_{0,s} + \beta_1 \times TEM_{t,s} + \beta_2 \times PRE_{t,s} + \beta_3 \times SSD_{t,s} + \varepsilon$ (2)
式(2)中, $RGL_{t,s}$ 表示第 s 站点和第 t 年的生殖生长期长度(d), $TEM_{t,s}$ 、 $PRE_{t,s}$ 和 $SSD_{t,s}$ 分别表示第 s 站点和第 t 年的生殖生长阶段的 TEM ($^{\circ}\text{C}$)、PRE (mm)和 SSD (h)。 β_0 表示站点的固定效应。 β_1 、 β_2 和 β_3 分别表示 RGLs 对 TEM、PRE 和 SSD 的敏感性($\text{d } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 、 d mm^{-1} 和 d h^{-1})。 ε 是一个随机误差项,表示气候变化以外的因素对作物生育期的影响。

其次,将各个站点单季稻分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期和成熟期的日期确定为1981—2010年实际观测日期平均值,统计1981—2010年各站点气候因子在不同RGLs的变化趋势,据此分离气候变

化趋势对单季稻 RGLs 变化趋势的影响^[39]。因此, 仅受气候变化影响的单季稻 RGLs 变化趋势的估算方法如下:

$$T_{RGL_cli} = \beta_1 \times T_{TEM} + \beta_2 \times T_{PRE} + \beta_3 \times T_{SSD} \quad (3)$$

式(3)中, T_{RGL_cli} 表示气候变化引起的生殖生长期变化趋势。 T_{TEM} 、 T_{PRE} 和 T_{SSD} 分别表示特定生殖生长阶段的 TEM、PRE 和 SSD 的变化趋势($^{\circ}\text{C a}^{-1}$ 、 mm a^{-1} 和 h a^{-1})。 T_{TEM} 、 T_{PRE} 和 T_{SSD} 均由公式(1)计算得到。

第三, 从气候变化和技术进步的综合影响中消除气候变化的影响, 得到技术进步对单季稻 RGLs 变化趋势的影响:

$$T_{RGL_tec} = T_{RGL_cli_tec} - T_{RGL_cli} \quad (4)$$

式(4)中, T_{RGL_tec} 表示技术进步对单季稻 RGLs 变化趋势的影响(d a^{-1}), $T_{RGL_cli_tec}$ 表示气候变化和技术进步对单季稻 RGLs 变化趋势的综合影响(d a^{-1}), 即实际观测得到的不同 RGLs 变化趋势。 $T_{RGL_cli_tec}$ 可由公式(1)计算得到。

最后, 分离出气候变化和技术进步导致单季稻 RGLs 变化趋势的贡献, 计算式如下:

$$C_{RGL_cli} = \frac{T_{RGL_cli}}{|T_{RGL_tec}| + |T_{RGL_cli}|} \times 100\% \quad (5)$$

$$C_{RGL_tec} = \frac{T_{RGL_tec}}{|T_{RGL_tec}| + |T_{RGL_cli}|} \times 100\% \quad (6)$$

$$RC_{RGL_TEM} = \frac{\beta_1 \times T_{TEM}}{|\beta_1 \times T_{TEM}| + |\beta_2 \times T_{PRE}| + |\beta_3 \times T_{SSD}|} \times 100 \quad (7)$$

式中, C_{RGL_cli} 和 C_{RGL_tec} 分别表示气候变化和技术进步对 RGLs 变化趋势的贡献(%), RC_{RGL_TEM} 表示 TEM 对单季稻 RGLs 变化趋势的平均相对贡献(%), 同样, 利用公式(7)计算 PRE 和 SSD 对单季稻 RGLs 变化趋势的平均相对贡献(RC_{RGL_PRE} 和 RC_{RGL_SSD})。参考 Li 等^[10]研究, 计算气候变化和技术进步对单季稻 RGLs 变化趋势的平均贡献, 以及各个气候因子对单季稻 RGLs 变化趋势的平均相对贡献。

2 结果与分析

2.1 单季稻生殖生长期时空变化

1981—2010 年长江中下游地区单季稻分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期和成熟期以及不同 RGLs 的时空变化趋势如图 2 所示。研究发现, 分蘖期以 0.37 d a^{-1} 的趋势提前, 其中 10 个站点中 9 个呈提前趋势, 7 个显著提前。不同于其他站点, 兴化站分蘖期呈显著推迟趋势(0.39 d a^{-1})。孕穗期和抽穗期时空

变异较大, 平均变化趋势分别为 0.08 d a^{-1} 和 0.11 d a^{-1} 。乳熟期和成熟期主要呈不同程度的推迟趋势, 分别为 0.27 d a^{-1} 和 0.32 d a^{-1} 。以上结果表明生殖生长期前生育期呈提前趋势, 随生育进程推进, 各个生育期逐渐推迟。

图 2-f-j 分别表示长江中下游地区单季稻 TDBD、BDHD、HDMS、MSMD 和 BDMD 时空变化趋势。分蘖期显著提前导致 TDBD 以 0.45 d a^{-1} 的速率延长, 其中 10 个站点中 9 个呈延长趋势, 7 个显著延长, 而钟祥站 TDBD 以 0.34 d a^{-1} 速率缩短。单季稻 BDHD 变化不明显(0.03 d a^{-1})。单季稻 HDMS 以 0.16 d a^{-1} 速率延长, MSMD 变化不明显(0.05 d a^{-1}), BDMD 以 0.24 d a^{-1} 速率延长。综合而言, 长江中下游地区单季稻 RGLs 呈延长趋势, 其中以 HDMS 延长为主。

2.2 单季稻生殖生长期气候因子变化趋势

1981—2010 年长江中下游地区单季稻不同 RGLs 的 TEM、PRE 和 SSD 特征及变化趋势如下图 3。研究发现, 长江中下游地区单季稻分蘖期到成熟期的 TEM 先升高后降低(图 3-a), BDHD 的 TEM 达到最高(27.2°C), MSMD 的 TEM 最低(24.5°C)。生殖生长期前(TDBD)的平均 PRE (120.5 mm)和平均 SSD (245.5 h)最高, BDHD 的平均 PRE (26.6 mm)和平均 SSD (60.1 h)最低(图 3-b, c)。就单季稻整个生殖生长阶段(BDMD)而言, TEM 增加趋势不明显, 而 MSMD 的 TEM 有略微下降趋势($-0.017^{\circ}\text{C a}^{-1}$), 其他 RGLs 的 TEM 均以增加为主。单季稻 MSMD 的 TEM 降低可能是乳熟期和成熟期推迟导致 TEM 季节性降低引起的。单季稻 BDHD 的 TEM 增加趋势最明显($0.027^{\circ}\text{C a}^{-1}$), 其次为 HDMS 的 TEM ($0.013^{\circ}\text{C a}^{-1}$) (图 3-d)。单季稻 BDMD 的平均 PRE 呈增加趋势(1.27 mm a^{-1}), 其中, HDMS 的平均 PRE 增加趋势最明显(0.71 mm a^{-1}), BDHD 和 MSMD 的平均 PRE 变化趋势不明显(图 3-e)。单季稻 BDMD 的平均 SSD 以减小为主(-0.17 h a^{-1}), 其中, BDHD 和 MSMD 的平均 SSD 呈减小趋势(-0.16 h a^{-1} 和 -0.45 h a^{-1}), 而 HDMS 的平均 SSD 呈增加趋势(0.44 h a^{-1}) (图 3-f)。由此可见, 单季稻 BDHD 的气候变暖速率最强, 平均 PER 变化不明显, 平均 SSD 呈减小趋势, HDMS 的气候变暖速率次强, 平均 PRE 和平均 SSD 均主要呈增加趋势, 其他生殖生长阶段气候因子变化趋势各异。

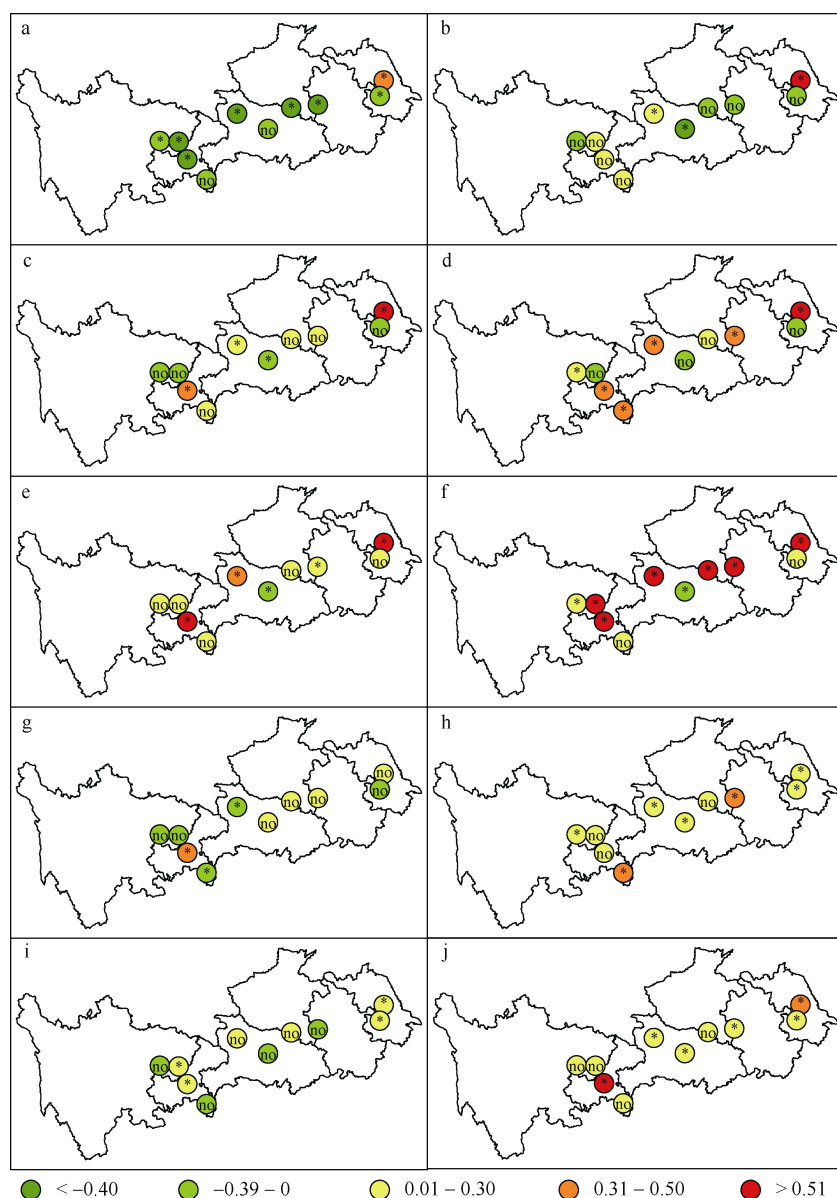


图 2 1981—2010 年长江中下游地区单季稻生殖生长期和生殖生长阶段长度变化趋势

Fig. 2 Trends in reproductive growth periods and lengths of single-cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 1981–2010

a、b、c、d、e、f、g、h、i 和 j 分别表示分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期、成熟期、分蘖期-孕穗期、孕穗期-抽穗期、抽穗期-乳熟期、乳熟期-成熟期和孕穗期-成熟期。各指标变化趋势由 1981–2010 年观测的各生殖生长期时间序列依据公式(1)计算得到。*表示在 0.05 概率水平差异显著, no 表示统计不显著。矢量地图数据来源: 全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)。

a, b, c, d, e, f, g, h, i, and j represent tillering stage, booting stage, heading stage, maturity stage, tillering-booting, booting-heading, heading-milking, milking-maturity, and booting-maturity, respectively. Trends of indexes were calculated according to formula (1) for each reproductive growth period observed from 1981 to 2010. *: $P < 0.05$; no: no significant difference. The above vector map is from the National Catalogue Service for Geographic Information (<https://www.webmap.cn/>).

2.3 单季稻生殖生长期对气候因子的敏感性分析

单季稻不同 RGLs 对气候因子(TEM、PRE 和 SSD)的敏感性如表 1 所示。面板模型回归系数 β_1 、 β_2 和 β_3 分别表示不同 RGLs 对 TEM、PRE 和 SSD 的敏感性, 决定系数(R^2)表示模型回归系数对因变量的解释率。结果表明, TEM 与 RGLs 均呈负相关关系, TEM

每升高 1°C , BDHD、HDMS 和 MSMD 的平均长度分别缩短 0.77、1.00 和 1.17 d, 且 RGLs 对 TEM 的敏感性随生育进程增加。PRE 和 SSD 与不同 RGLs 均呈正相关关系, PRE 每增加 100 mm, BDHD、HDMS 和 MSMD 的平均长度分别延长 1.24、0.86 和 0.71 d, 且 RGLs 对 PRE 的敏感性随生育进程减小; SSD 每增加

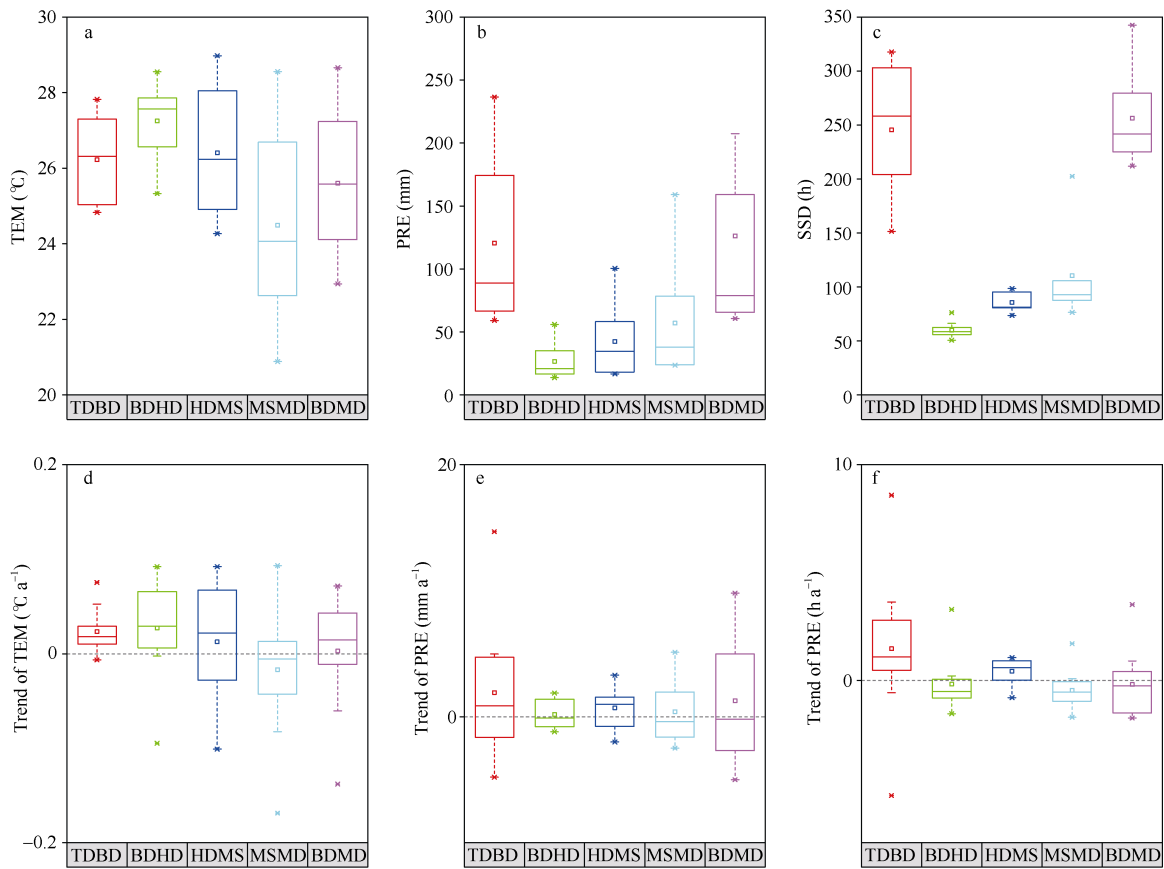


图 3 不同生殖生长期气候因子变化特征

Fig. 3 Characteristics of climatic factors change at different reproductive growth stages

a、b 和 c 分别表示不同生殖生长期的平均温度、累积降水量和累积日照时数; d、e 和 f 分别表示平均温度、累积降水量和累积日照时数的变化趋势。TEM、PRE 和 SSD 分别表示平均温度、累积降水量和累积日照时数。TDBD、BDHD、HDMS、MSMD 和 BDMD 分别表示分蘖期-孕穗期、孕穗期-抽穗期、抽穗期-乳熟期、乳熟期-成熟期和孕穗期-成熟期。各指标变化趋势由 1981–2010 年观测的气象数据时间序列依据公式(1)计算得到。

a, b, and c represent mean temperature, cumulative precipitation, and cumulative sunshine duration of different reproductive growth periods lengths, respectively. d, e, and f represent trends of mean temperature, cumulative precipitation, and cumulative sunshine duration, respectively. TEM, PRE, and SSD represent mean temperature, cumulative precipitation, and cumulative sunshine duration, respectively. TDBD, BDHD, HDMS, MSMD, and BDMD represent tillering to booting, booting to heading, heading to milking, milking to maturity, and booting to maturity, respectively. The change trends of indexes were calculated by the time sequence of meteorological data observed from 1981 to 2010 based on formula (1).

表 1 面板模型中不同生殖生长期对平均温度、累积降水量和累积日照时数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of different reproductive growth periods lengths on mean temperature (TEM), cumulative precipitation (PRE), and cumulative sunshine duration (SSD) in the panel regression models

生殖生长阶段 Reproductive growth periods lengths (RGLs)	平均温度敏感性 Mean temperature sensitivity (β_1)	累积降水量敏感性 Cumulative precipitation sensitivity (β_2)	累积日照时数敏感性 Cumulative sunshine duration sensitivity (β_3)	决定系数 Determination coefficient (R^2)
分蘖期-孕穗期 Tillering-Booting (TDBD)	-3.74**	0.010**	0.09**	0.65
孕穗期-抽穗期 Booting-Heading (BDHD)	-0.77**	0.010**	0.07**	0.59
抽穗期-乳熟期 Heading-Milking (HDMS)	-1.00**	0.008**	0.08**	0.50
乳熟期-成熟期 Milking-Maturity (MSMD)	-1.17**	0.007*	0.07**	0.80
孕穗期-成熟期 Booting-Maturity (BDMD)	-2.08**	0.008**	0.04**	0.72

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

100 h, BDHD、HDMS 和 MSMD 的平均长度分别延长 7.46、8.06 和 6.88 d。总体而言, TEM 增加不利于延长 RGLs, PRE 和 SSD 增加有利于延长 RGLs。标准化处理不同 RGLs 对气候因子的敏感性表明 BDHD、HDMS 和 MSMD 均对 SSD 的敏感性最强, 对 TEM 的敏感性次之, 对 PRE 的敏感性最小(表 2)。

表 2 标准化面板模型中不同生殖生长期对平均温度、累计降水量和累计日照时数的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of different reproductive growth periods lengths on mean temperature (TEM), cumulative precipitation (PRE), and cumulative sunshine duration (SSD) in the standardized panel regression models

生殖生长阶段 Reproductive growth periods lengths (RGLs)	平均温度敏感性 Mean temperature sensitivity (β_1)	累积降水量敏感性 Cumulative precipitation sensitivity (β_2)	累积日照时数敏感性 Cumulative sunshine duration sensitivity (β_3)
分蘖期–孕穗期 Tillering–Booting (TDBD)	-0.40**	0.08*	0.74**
孕穗期–抽穗期 Booting–Heading (BDHD)	-0.47**	0.16**	0.65**
抽穗期–乳熟期 Heading–Milking (HDMS)	-0.43**	0.10*	0.65**
乳熟期–成熟期 Milking–Maturity (MSMD)	-0.52**	0.09*	0.55**
孕穗期–成熟期 Booting–Maturity (BDMD)	-0.54**	0.12**	0.32**

*表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

2.4 气候变化和技术进步对生殖生长期变化趋势的影响以及贡献

气候变化和技术进步对单季稻不同 RGLs 变化趋势的单独影响如图 4。研究发现, 气候变化不利于 RGLs 延长, 对不同 RGLs 均有缩短效应。技术进步有利于延长不同 RGLs, 对 HDMS 延长效应最大, 延长趋势为 0.22 d a^{-1} , 对全生殖生长期的延长趋势为 0.33 d a^{-1} 。气候变化和技术进步对 RGLs 变化趋势的综合作用与技术进步对 RGLs 变化趋势的单独作用相似。

分离后的气候变化和技术进步对单季稻 RGLs 变化趋势的平均贡献如图 5。研究发现, 气候变化和技术进步对单季稻 BDMD 变化趋势的平均贡献分别为 -20.0%和 80.0% (图 5-a)。然而, 气候变化和技术进步的平均贡献在单季稻 BDHD、HDMS 和 MSMD 存在差异。对于 BDHD, 气候变化的平均贡献 (-65.1%)大于技术进步的平均贡献(34.9%), 对于 HDMS, 气候变化的平均贡献(-24.7%)小于技术进步的平均贡献(75.3%), 而对于 MSMD, 气候变化的平均贡献(-48.1%)略微小于技术进步的平均贡献(51.9%)。由此可见, 技术进步对 RGLs 变化趋势的延长起主导作用, 技术进步对 RGLs 变化趋势的贡献弥补了气候变化的不利影响。

TEM、PRE 和 SSD 对单季稻 RGLs 变化趋势的平均相对贡献如图 5-b。PRE 对不同 RGLs 变化趋势的平均相对贡献绝对值最小。TEM 和 SSD 是影响 RGLs 变化趋势的主要气候因子, 两者对不同 RGLs 变化趋势的平均相对贡献差异大。对于 TDBD, TEM 的平均相对贡献最大(-69.9%), SSD 的平均相对贡献

次之(-27.7%), 表明该阶段单季稻生长发育主要受 TEM 的影响。对于 BDHD, TEM 和 SSD 的平均相对贡献相当(-50.0%和-47.2%), HDMS 变化趋势受气候因子的影响与 BDHD 类似, TEM 和 SSD 的平均相对贡献相当(-50.7%和-48.8%), 表明这 2 个阶段单季稻生长发育受制于 TEM 和 SSD。对于 MSMD, SSD 的平均相对贡献最大(-67.6%), TEM 的平均相对贡献次之(-21.9%), 表明该阶段单季稻生长发育

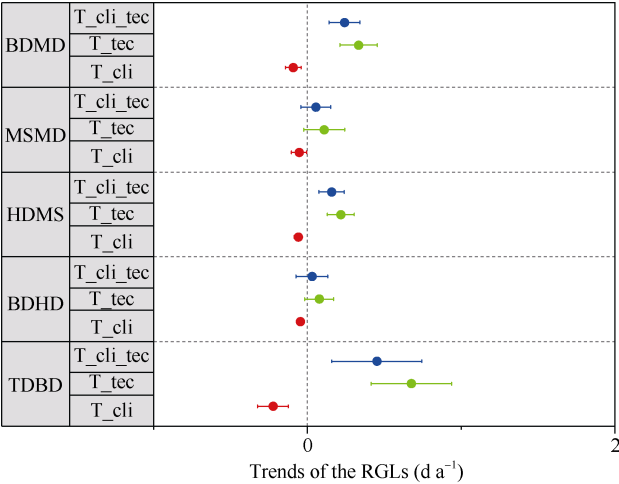


图 4 气候变化和技术进步对单季稻不同生殖生长期变化趋势的影响
Fig. 4 Effects of climate change and technological progress on trends in the RGLs of single-cropping rice

T_{cli} 、 T_{tec} 、 T_{cli_tec} 分别表示气候因素、技术进步、气候因素和技术进步综合作用对不同生殖生长期长度的影响趋势。生殖生长期长度缩写同图 3。

T_{cli} , T_{tec} , and T_{cli_tec} indicate the effect trends of climatic factors, technological progress, and the combined of climatic factors and technological progress on different reproductive growth periods lengths, respectively. Abbreviations of different reproductive growth periods lengths are the same as those given in Fig. 3.

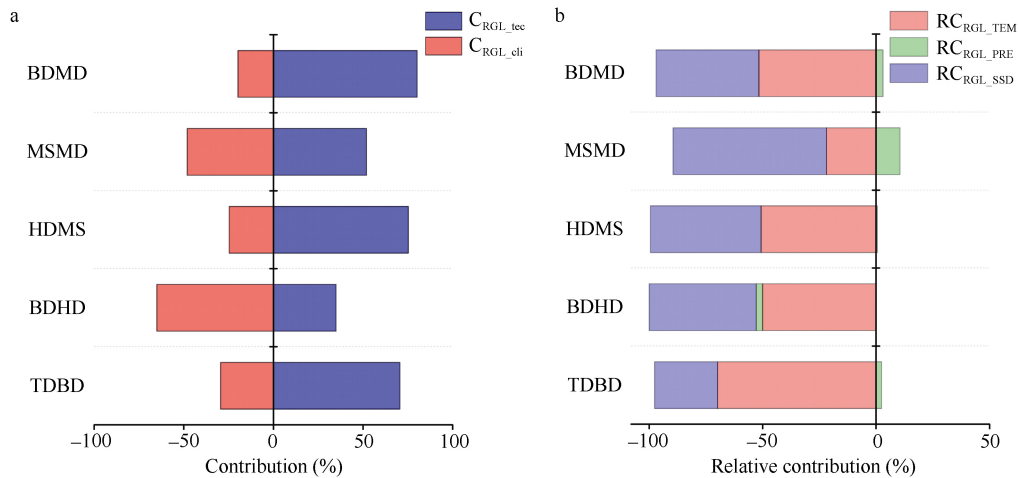


图 5 气候变化和技术进步对单季稻生殖生长期长度的平均贡献

Fig. 5 Mean contributions of climate change and technological progress to RGLs of single-cropping rice

a 表示气候变化和技术进步对不同生殖生长期长度的平均贡献; b 表示气候因子对不同生殖生长期长度的平均相对贡献。C_{RGL_cli} 和 C_{RGL_tec} 分别表示气候因素和技术进步对不同生殖生长期长度的平均贡献; RC_{RGL_TEM}、RC_{RGL_PRE} 和 RC_{RGL SSD} 分别表示平均温度、累积降水量和累积日照时数对不同生殖生长期长度的平均相对贡献。生殖生长期长度缩写同图 3。

a: the mean contributions of climate change and technological progress to different reproductive growth periods lengths; b: the mean relative contributions of climatic factors to different reproductive growth periods lengths. C_{RGL_cli} and C_{RGL_tec} indicate mean contribution of climatic factors and technological progress to different reproductive growth periods lengths, respectively; RC_{RGL_TEM}, RC_{RGL_PRE}, and RC_{RGL SSD} indicate mean relative contribution of mean temperature, cumulative precipitation, and cumulative sunshine duration to different reproductive growth periods lengths, respectively. Abbreviations of different reproductive growth periods lengths are the same as those given in Fig. 3.

主要受 SSD 的影响。因此, TEM 和 SSD 均为影响长江流域地区单季稻 RGLs 变化趋势的主要气候因子。

3 讨论

3.1 单季稻生殖生长期对气候变化和技术进步的响应

中国不同地区水稻生育期和生长阶段长度的变化趋势各不相同^[38]。研究发现, 长江中下游单季稻乳熟期和成熟期显著推迟, 生殖生长期尤其是抽穗期到乳熟期显著延长(图 1), 该研究结果与 Tao 等^[32]的结果一致。抽穗期到乳熟期延长为灌浆期提供了充足的时间, 从而有利于生物量累积和产量提高^[40]。本研究结果表明, 过去 30 年长江中下游地区农民采用了长生殖生长期单季稻品种, 这也表明延长单季稻生殖生长期是适应气候变化的有效措施^[38]。

气候变化对作物生育期的影响效应因研究对象和生育期时段不同而存在差异^[12]。本研究表明单季稻 RGLs 随平均温度的升高而缩短, 随累积降水量和累积日照时数的增加而延长, 该结果与以往一些研究结果一致^[11,25], 而与 Liu 等^[38]的研究不同。其他作物生育期对温度、累积降水量和累积日照时数的响应与本研究结论一致^[7,18,41]。本研究揭示了孕穗期至抽穗期、抽穗期至乳熟期和乳熟期至成熟期对累积日照时数的敏感性最强, 对平均温度的敏感性次

之, 对累积降水量的敏感性最低。平均温度和累积日照时数对不同生殖生长期变化趋势的平均相对贡献占比均较大, 且两者的长期变化趋势均不利于生殖生长期延长, 这进一步表明高温和寡照是长江中下游地区单季稻生殖生长期的主要限制因子。本研究发现气候变化对单季稻生殖生长期的贡献小于技术进步, 并且技术进步在延长生殖生长期变化趋势上占主导作用(图 5), 该结果与 Li 等^[10]、Wang 等^[12]、Liu 和 Dai^[27]利用统计方法和作物模型法的研究结果一致。因此, 采用长生殖生长期品种, 可缓解气候变化带来的生育期缩短的负面影响^[42]。

3.2 单季稻生殖生长期适应气候变化的措施

实施作物管理有利于协调水稻生育进程, 充分利用水稻生长季的有效光温资源, 获得最大的光合生产量, 提高结实率和千粒重, 实现高产、优质和高效栽培^[23]。1981—2010 年中国单季稻主产区高温持续时间和高温强度显著上升^[43]。湖北中东部、安徽中部、江苏西部、浙江北部和湖南东北部均易发生热胁迫, 在未来的 2021—2050 年和 2071—2100 年 2 个时段, 整个区域的热胁迫显著增加^[44]。长江中下游地区热胁迫主要发生在 7 月至 8 月, 该时间段正值单季稻生殖生长阶段, 尤其是单季稻开花期和灌浆期与最高气温时期重叠^[45-46], 张倩等^[47]研究也表明长江中下游地区热胁迫主要影响单季稻孕穗期、

开花期和灌浆期。由本研究各生殖生长阶段气候因子变化特征可知, 长江中下游地区单季稻产量形成关键期处于热胁迫容易发生的时段。且研究表明单季稻乳熟期前后为温度敏感期^[48], 本研究结果也证实了这一点(表2)。而这些关键阶段的热胁迫是导致水稻减产的主要原因^[29]。因此单季稻生殖生长期极易遭受热胁迫的影响, 而避免高温是预防热胁迫的主要策略^[47], 培育耐热品种是保障粮食安全的最有效措施之一^[49]。优化播种期是缓解气候变暖不利影响的另一有效措施, Bai等^[24]研究表明调整播种期主要改变了单季稻的开花期和成熟期, 而对生殖生长期长度没有影响, 因此调整播种期获得不同的光温配置是提高水稻资源利用率和适应气候变化的能力的重要途径^[50]。长江中下游地区适当早播可提高单季稻品种的光温资源利用^[51], 合理的播种期科学配套适宜单季稻品种类型对充分利用当地光温资源、发挥品种潜力、确保高产稳产具有十分重要的意义。因此, 单季稻提前播种以避免花期高温、转向现有耐高温品种以及培育长生殖生长期优良品种等3项适应性措施可在不同程度上有效抵消气候变化的负面影响^[52]。另外, 合理灌溉、施肥和喷洒外源化学物质可以缓解外界环境的不利影响。例如, 灌溉是降低水稻花期冠层温度的一种有效的实时栽培措施^[46], 合理灌溉可以缓解因气候变暖导致的开花期提前^[53], 灌浆期热胁迫影响单季稻品质, 主要通过降低叶片抗氧化酶活性, 从而降低光合作用, 导致光合同化物降低等^[54], 灌浆期前喷洒外源亚精胺可显著提高超氧化物歧化酶和过氧化物酶的活性, 降低丙二醛的积累, 提高热胁迫下水稻叶片的可溶性糖含量, 维持叶片的渗透平衡, 提高光合和蒸腾速率^[55]; 施氮可以增强单季稻生殖生长期对热胁迫的耐受性, 进而增加叶片寿命和生长期长度, 然而, 需肥量应根据当地水稻各生育阶段实际日照状况计算得到, 日照不足时应少施肥。例如, 长江中下游地区分蘖期到孕穗期和抽穗期到乳熟期日照时数呈增加趋势(图3), 这2个关键生长阶段可以适当施肥。

3.3 问题和挑战

研究气候变化和技术进步对作物生育期长度的影响十分关键。气候变化和技术进步对作物生育期的定量影响最大的问题仍然是有效资料的匮乏, 这在理解生育期响应气候变化机制方面仍存在很大的不确定性。现有长期作物生育期观测资料是不同站点不同技术措施下得到的, 每个站点品种类型、施

肥量、灌溉量以及农药使用等相关资料很难准确获得, 因此技术进步的贡献仅是一个综合结果, 不同管理措施难以定量化, 这可能限制了作物适应气候变化的精细化措施的实施。以往研究通常用品种替换代替技术进步的影响, 一定程度上可能高估了品种改变对作物生育期的影响。而基于田间试验的有关品种变化对作物生育期影响的资料是有限的^[5]。因此, 今后应利用田间试验、原位观测和模型模拟等多源数据开展研究^[9,18,25]。

4 结论

本研究详细地分析了1981—2010年长江中下游地区单季稻不同生殖生长期长度时空变化特征, 以及单季稻不同生殖生长期长度对气候变化和技术进步的响应。近30年来长江中下游地区单季稻乳熟期和成熟期推迟, 全生殖生长期延长, 其中以抽穗期到乳熟期延长为主。平均温度升高缩短了单季稻生殖生长期长度, 累积降水量和累积日照时数增加延长了单季稻生殖生长期长度, 且生殖生长期长度对累积日照时数的敏感性最强、对平均温度的敏感性次之, 对降水量的敏感性最小。长江中下游地区高温和寡照不利于单季稻生殖生长期的延长, 而技术进步弥补了气候变化对生殖生长期的缩短效应。因此, 气候变暖背景下, 长江中下游地区采取强耐热型和长生殖生长期单季稻品种仍然是适应气候变化的关键措施。

References

- [1] Liu Y J, Bachofen C, Wittwer R, Silva D G, Sun Q, Klaus V H, Buchmann N. Using PhenoCams to track crop phenology and explain the effects of different cropping systems on yield. *Agric Syst*, 2022, 195: 103306.
- [2] van Vliet A J H, Bron W A, Mulder S, van der Slikke W, Odé B. Observed climate-induced changes in plant phenology in the Netherlands. *Reg Environ Change*, 2013, 14: 997–1008.
- [3] Liu F S, Chen Y, Shi W J, Zhang S, Tao F L, Ge Q S. Influences of agricultural phenology dynamic on land surface biophysical process and climate feedback. *J Geogr Sci*, 2017, 27: 1085–1099.
- [4] Mohapatra S, Tripathy S K, Mohanty A K, Tripathy S. Effect of heat stress on yield and economics of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under different sowing dates. *J Agrometeorol*, 2021, 23: 38–45.
- [5] Wang Z B, Chen J, Tong W J, Xu C C, Fu C. Impacts of climate change and varietal replacement on winter wheat phenology in the North China Plain. *Int J Plant Prod*, 2018, 12: 251–263.
- [6] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on

- water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43–51.
- [7] Liu Y J, Qin Y, Ge Q S, Dai J H, Chen Q M. Responses and sensitivities of maize phenology to climate change from 1981 to 2009 in Henan province, China. *J Geogr Sci*, 2017, 27: 1072–1084.
 - [8] He L, Asseng S, Zhao G, Wu D R, Yang X Y, Zhuang W, Jin N, Yu Q. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agric For Meteorol*, 2015, 200: 135–143.
 - [9] Wang Z, Chen J, Li Y, Li C, Zhang L, Chen F. Effects of climate change and cultivar on summer maize phenology. *Int J Plant Prod*, 2016, 10: 509–526.
 - [10] Li N, Li Y, Biswas A, Wang J H, Dong H Z, Chen J H, Liu C C, Fan X Y. Impact of climate change and crop management on cotton phenology based on statistical analysis in the main-cotton-planting areas of China. *J Clean Prod*, 2021, 298: 126750.
 - [11] Bai H Z, Xiao D P. Spatiotemporal changes of rice phenology in China during 1981–2010. *Theor Appl Climatol*, 2020, 140: 1483–1494.
 - [12] Wang X H, Ciais P, Li L, Ruget F, Vuichard N, Viovy N, Zhou F, Chang J F, Wu X C, Zhao H F. Management outweighs climate change on affecting length of rice growing period for early rice and single rice in China during 1991–2012. *Agric For Meteorol*, 2017, 233: 1–11.
 - [13] Ye T, Zong S, Kleidon A, Yuan W P, Wang Y, Shi P J. Impacts of climate warming, cultivar shifts, and phenological dates on rice growth period length in China after correction for seasonal shift effects. *Clim Change*, 2019, 155: 127–143.
 - [14] Zhang S, Tao F L, Zhang Z. Rice reproductive growth duration increased despite of negative impacts of climate warming across China during 1981–2009. *Eur J Agron*, 2014, 54: 70–83.
 - [15] Li Z G, Yang P, Tang H J, Wu W B, Yin H, Liu Z H, Zhang L. Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990 and 2012. *Reg Environ Change*, 2013, 14: 39–48.
 - [16] Mo F, Sun M, Liu X Y, Wang J Y, Zhang X C, Ma B L, Xiong Y C. Phenological responses of spring wheat and maize to changes in crop management and rising temperatures from 1992 to 2013 across the Loess Plateau. *Field Crops Res*, 2016, 196: 337–347.
 - [17] Wang H L, Gan Y T, Wang R Y, Niu J Y, Zhao H, Yang Q G, Li G C. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. *Agric For Meteorol*, 2008, 148: 1242–1251.
 - [18] Wang Z B, Chen J, Xing F F, Han Y C, Chen F, Zhang L F, Li Y B, Li C D. Response of cotton phenology to climate change on the North China Plain from 1981 to 2012. *Sci Rep*, 2017, 7: 6628.
 - [19] Xiao D P, Zhao Y X, Bai H Z, Hu Y K, Cao J S. Impacts of climate warming and crop management on maize phenology in northern China. *J Arid Land*, 2019, 11: 892–903.
 - [20] Fatima Z, Ur-Rehman A, Abbas G, Iqbal P, Zakir I, Khan M A, Kamal G M, Ahmed M, Ahmad S. Quantification of climate warming and crop management impacts on phenology of pulses-based cropping systems. *Int J Plant Prod*, 2020, 15: 107–123.
 - [21] Li K N, Yang X G, Tian H Q, Pan S F, Liu Z J, Lu S. Effects of changing climate and cultivar on the phenology and yield of winter wheat in the North China Plain. *Int J Biometeorol*, 2016, 60: 21–32.
 - [22] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, Ge Q S, Dai J H, Qin Y, Dai L, Zou X T, Chen J. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China. *Agric For Meteorol*, 2018, 248: 518–526.
 - [23] Hu X Y, Huang Y, Sun W J, Yu L F. Shifts in cultivar and planting date have regulated rice growth duration under climate warming in China since the early 1980s. *Agric For Meteorol*, 2017, 247: 34–41.
 - [24] Bai H Z, Xiao D P, Zhang H, Tao F L, Hu Y H. Impact of warming climate, sowing date, and cultivar shift on rice phenology across China during 1981–2010. *Int J Biometeorol*, 2019, 63: 1077–1089.
 - [25] Chen J, Liu Y J, Zhou W M, Zhang J, Pan T. Effects of climate change and crop management on changes in rice phenology in China from 1981 to 2010. *J Sci Food Agric*, 2021, 101: 6311–6319.
 - [26] 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 Change Biol*, 2013, 19: 563–570.
 - [27] Liu Y J, Dai L. Modelling the impacts of climate change and crop management measures on soybean phenology in China. *J Clean Prod*, 2020, 262: 121271.
 - [28] Wu D R, Wang P J, Jiang C Y, Yang J Y, Huo Z G, Yu Q. Measured phenology response of unchanged crop varieties to long-term historical climate change. *Int J Plant Prod*, 2018, 13: 47–58.
 - [29] Shi P, Tang L, Wang L, Sun T, Liu L, Cao W, Zhu Y. Post-heading heat stress in rice of south China during 1981–2010. *PLoS One*, 2015, 10: e0130642.
 - [30] Rehmani M I A, Ding C Q, Li G H, Ata-Ul-Karim S T, Hadifa A, Bashir M A, Hashem M, Alamri S, Al-Zubair F, Ding Y F. Vulnerability of rice production to temperature extremes during rice reproductive stage in Yangtze River valley, China. *J King Saud Univ Sci*, 2021, 33: 101599.
 - [31] 刘书通. 长江中下游地区水稻生产能力分析. 中国农业科学院硕士学位论文, 北京, 2014.
Liu S T. Analysis of Rice Production Capacity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
 - [32] Tao F L, Zhang Z, Shi W J, Liu Y J, Xiao D P, Zhang S, Zhu Z, Wang M, Liu F S. 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. *Glob Change Biol*, 2013, 19: 3200–3209.
 - [33] Jiang Y L, Yin X G, Wang X H, Zhang L, Lu Z, Lei Y D, Chu Q Q, Chen F. Impacts of global warming on the cropping systems of China under technical improvements from 1961 to 2016. *Agron J*, 2021, 113: 187–199.
 - [34] 陈风波, 马志雄, 陈培勇. 农户水稻种植模式选择现状及其影响因素分析: 对长江中下游地区四个省的调查. 农业经济与管理, 2011, (3): 62–73.
Chen F B, Ma Z X, Chen P Y. Selecting status of farmers' rice cropping patterns and its impact factor analysis: four provinces survey along the Yangtze River. *Agric Econ Manag*, 2011, (3): 62–73 (in Chinese with English abstract).
 - [35] 王旭, 张天山, 刘懂伟, 王晓亮, 李辉. 长江中下游水稻种植

- 影响因素及变化分析. 现代农业科技, 2016, (6): 54–55.
- Wang X, Zhang T S, Liu D W, Wang X L, Li H. Analysis of factors influencing rice cultivation and changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Modern Agric Sci Technol*, 2016, (6): 54–55 (in Chinese with English abstract).
- [36] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agric For Meteorol*, 2010, 150: 1443–1452.
- [37] Zhang S, Tao F L, Zhang Z. Changes in extreme temperatures and their impacts on rice yields in southern China from 1981 to 2009. *Field Crops Res*, 2016, 189: 43–50.
- [38] Liu Y J, Zhou W M, Ge Q S. Spatiotemporal changes of rice phenology in China under climate change from 1981 to 2010. *Clim Change*, 2019, 157: 261–277.
- [39] Zhang Y, Zhao Y X, Sun Q. Increasing maize yields in Northeast China are more closely associated with changes in crop timing than with climate warming. *Environ Res Lett*, 2021, 16: 054052.
- [40] Zhu P, Jin Z N, Zhuang Q L, Ciaes P, Bernacchi C, Wang X H, Makowski D, Lobell D. The important but weakening maize yield benefit of grain filling prolongation in the US Midwest. *Glob Change Biol*, 2018, 24: 4718–4730.
- [41] Guo E L, Zhang J Q, Wang Y F, Alu S, Wang R, Li D J, Ha S. Assessing non-linear variation of temperature and precipitation for different growth periods of maize and their impacts on phenology in the midwest of Jilin province, China. *Theor Appl Climatol*, 2017, 132: 685–699.
- [42] Tao F L, Zhang S L, Zhang Z, Rötter R P. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift. *Glob Change Biol*, 2014, 20: 3686–3699.
- [43] Sun X S, Long Z W, Song G P, Chen C Q. High-temperature episodes with spatial-temporal variation impacted middle-season rice yield in China. *Agron J*, 2018, 110: 961–969.
- [44] Zhang L, Yang B Y, Li S, Hou Y Y, Huang D P. Potential rice exposure to heat stress along the Yangtze River in China under RCP8.5 scenario. *Agric For Meteorol*, 2018, 248: 185–196.
- [45] Meng L, Wang C Y, Zhang J Q. Heat injury risk assessment for single-cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River under climate change. *J Meteorol Res*, 2016, 30: 426–443.
- [46] Wang Y L, Wang L, Zhou J X, Hu S B, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K, Zeng Y J, Shi Q H, Zhu D F, Zhang Y P. Research progress on heat stress of rice at flowering stage. *Rice Sci*, 2019, 26: 1–10.
- [47] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响. 灾害学, 2011, 26(4): 58–62.
- Zhang Q, Zhao Y X, Wang C Y. Study on the impact of high temperature damage to rice in the lower and middle reaches of the Yangtze River. *J Catastrophol*, 2011, 26(4): 58–62. (in Chinese with English abstract).
- [48] Sanchez B, Rasmussen A, Porter J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Glob Change Biol*, 2014, 20: 408–417.
- [49] Wu C, Cui K H, Li Q, Li L Y, Wang W C, Hu Q Q, Ding Y F, Li G H, Fahad S, Huang J L, Nie L X, Peng S B. Estimating the yield stability of heat-tolerant rice genotypes under various heat conditions across reproductive stages: a 5-year case study. *Sci Rep*, 2021, 11: 13604.
- [50] 邓南燕. 中国水稻产量差评估及长江中下游地区增产途径探究. 华中农业大学博士学位论文, 湖北武汉, 2018.
- Deng N Y. Estimation of Rice Yield Gaps in China and Exploration of Approaches to Improve Yield in Middle and Lower Reaches of Yangtze River Valley. PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王文婷. 沿江地区温度要素对优质粳稻产量与品质的影响研究. 扬州大学博士学位论文, 江苏扬州, 2021.
- Wang W T. Study on the Effect of Temperature-Light Factors on the Formation of Quality and Yield of *Japonica* Rice along the Yangtze River. PhD Dissertation of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [52] Xu C C, Wu W X, Ge Q S, Zhou Y, Lin Y M, Li Y M. Simulating climate change impacts and potential adaptations on rice yields in the Sichuan Basin, China. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 2015, 22: 565–594.
- [53] Muleke A, Harrison M, de Voil P, Hunt L, Liu K, Yanotti M, Eisner R. Earlier crop flowering caused by global warming alleviated by irrigation. *Environ Res Lett*, 2022, 17: 044032.
- [54] Liu Q H, Wu X, Ma J Q, Li T, Zhou X B, Guo T. Effects of high air temperature on rice grain quality and yield under field condition. *Agron J*, 2013, 105: 446.
- [55] Tang S, Zhang H X, Li L L, Liu X, Chen L, Chen W Z, Ding Y F. Exogenous spermidine enhances the photosynthetic and antioxidant capacity of rice under heat stress during early grain-filling period. *Funct Plant Biol*, 2018, 45: 911–921.