

广东省水稻产量关键影响气候因子识别与气候影响估算

熊文¹, 刘佳¹, 朱永彬^{2,3*}

1. 北京工商大学 经济学院, 北京 100048

2. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

3. 中国科学院大学 公共政策与管理学院, 北京 100049

摘要:农业是受气候变化影响最显著的国民经济行业,农业生产不仅关乎一个国家粮食供给安全,也为其他产业部门提供基础原材料,因此在全球气候变化的大背景下研究气候变化对农业产量的影响是评估气候变化影响经济的重要方面,受到学界普遍关注。以极端气候多发的水稻主产区之一广东省为例,基于作物生产函数模型并引入月度气候因子变量,综合测度农用物资投入与气候因子对作物单产的影响,利用1992—2016年广东省各地市水稻作物单产以及农用物资投入、月度平均积温和降水的面板数据,对影响水稻单产的关键气候因子进行识别,并在此基础上定量估算了历史气候对广东省水稻单产的气候损失或收益。研究结果发现:(1)有效积温增加有利于水稻单产提高,而降水增多对水稻单产有不利影响;(2)生育期不同阶段的气候因子对水稻单产影响不同,4月和6月的有效积温以及6—7月的降水对早稻单产有显著影响,晚稻全生育期(6—11月)除7月以外其余月份的积温和降水均是影响晚稻单产的关键气候因子;(3)历史气候对水稻单产的影响表现为明显的年际波动现象,而未观察到明显的趋势性特征,且近年来气候变化对广东省水稻单产的影响表现为增产效应;(4)早稻单产的气候损失呈现由北向南逐渐增强的趋势,晚稻单产的气候损失则呈现由东向西逐渐增强的趋势;(5)早稻对气候变化的敏感性高于晚稻,主要原因在于早稻生育期较短,且生育期内的降水及气温的波动幅度更大,早稻难以在较短生育期内对气候进行有效适应,抗风险能力较低。

关键词:气候因子; 影响估算; 月度积温; 月度降水; 水稻单产

Identification of climate factors affecting rice yield and climate impact estimation in Guangdong Province

XIONG Wen¹, LIU Jia¹, ZHU Yongbin^{2,3*}

1. School of Economics, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

2. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

收稿日期: 2021-05-15; 录用日期: 2021-07-29; 网络出版: 2021-08-15

Received Date: 2021-05-15; **Accepted Date:** 2021-07-29; **Online first:** 2021-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602703); 北京市哲学社会科学首都流通业研究基地项目(JD-ZD-2021-022)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (2016YFA0602703); Capital Circulation Research Base Project of Beijing Philosophy and Social Science Foundation (JD-ZD-2021-022)

通信作者: 朱永彬, E-mail: zhuyongbin@casisd.cn

Corresponding Author: ZHU Yongbin, E-mail: zhuyongbin@casisd.cn

引用格式: 熊文, 刘佳, 朱永彬. 2022. 广东省水稻产量关键影响气候因子识别与气候影响估算 [J]. 地球环境学报, 13(1): 110–120.

Citation: Xiong W, Liu J, Zhu Y B. 2022. Identification of climate factors affecting rice yield and climate impact estimation in Guangdong Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(1): 110–120.

Abstract: Background, aim, and scope Climate change has significantly impacted agriculture, which is not only related to food security, but also to industrial production through the harvesting of raw materials. Therefore, it is essential to study the impact of climate change on agricultural production in the context of global climate change. The present study was undertaken to identify the key climate factors that have significant impacts on rice yields and evaluate historical climate effects based on the estimation of the climate—yield relationship. As Guangdong Province is a major rice producing area and experiences frequent extreme climate events, we limited our scope to early and late rice grown in Guangdong. **Materials and methods** Many approaches have been proposed for climate—yield relationship estimation, such as the yield decomposition method, which decomposes yield variation into different parts associated with technique, climate and other random factors, and then regresses the yield with climate factors. This study applied the production function approach, which reflects the relationship between rice yield and material inputs such as fertilizer, and then introduced the monthly climate factors of temperature and precipitation into that function. This approach enabled us not only to estimate the effects of material inputs and climate factors on crop yields simultaneously, but also to identify the key climate factors at a finer time scale. We thus collected data on rice yield, material inputs (such as fertilizer, labor, agrichemicals, and films), and climate factors, including temperature, denoted by growing degree days (GDD), and precipitation at the prefecture-level in Guangdong Province during 1992—2016. With the above data, we performed fixed effect panel regression. **Results** The study successfully identified the key climate factors affecting rice crops and found that the climate effects of monthly GDD and precipitation on the rice yield are distinct between early rice and late rice. (1) The GDD in April and June, as well as precipitation from June to July, have a significant impact on the yield of early rice. (2) The GDD and precipitation during the full growth period (June—November), except July, are the key climatic factors affecting the late rice yield. The analysis indicates that the increase in effective GDD is generally conducive to increases in rice yield, while the increase in precipitation has an adverse effect on rice yield. Moreover, we evaluated the historical climate effects on the rice yield and obtained historical trends in climate losses/gains of rice yield. This analysis shows the following: (1) obvious inter-annual fluctuations of climate-related yield change are observed, but there are no significant long-term trends; (2) the impact of climate change on rice yield has shown a positive effect in recent years. **Discussion** Theoretically, there should exist optimal climate conditions for each crop. However, this study failed to characterize the nonlinear relationship between the yield and climate factors, or to estimate the optimal climatic conditions corresponding to the highest yield. Previous studies that found such a nonlinear relationship have used the mean value of climate factors, while this study introduced climate factors at a finer time scale to identify the key climate factors during different growing stages. Another explanation for this discrepancy is that our model is linear because quadratic terms of climate variables would complicate the model, and the current dataset are insufficient to estimate such a non-linear statistical model. **Conclusions** The main conclusions include the following: (1) the historical aggregated climate effects on rice yield are positive, although the key influencing climate factors are distinct among crop varieties and growing stages; (2) early rice is more sensitive to climate change compared to late rice, and the climate loss gradually increases from north to south for early rice, but gradually increases from east to west for late rice. Therefore, the counter-measures to adapt to climate change should be specific for different rice varieties and regions. **Recommendations and perspectives** This study has proposed a novel method that simultaneously estimates the effects of input factors and climate factors on yields, specifically at a finer monthly time scale. Although some progress has been made, it still failed to provide a thorough picture of all major crops and across the whole scope of China. Therefore, we suggest future research to complete this picture by identifying the key climate factors affecting the yield of all other crops and to evaluate the climate losses or gains of historical as well as future climate change.

Key words: climate factors; impact evaluation; monthly GDD; monthly precipitation; rice yield

全球变暖将使热量资源增多（赵俊芳等，2010），降水资源呈现不规律的变化，且具有明显的地域性特征（冯琳等，2019），而农业是对气候变化最敏感和脆弱的部门（林而达和王京华，1994）。广东地处欧亚大陆南端，南北跨越北热带、南亚热带和中亚热带，光热水资源丰富，是中国双季稻的主产区及 13 个水稻主产省之一（李逸勉等，2013），其水稻产量占粮食总产量的 80% 以上（黄珍珠等，2014）。但广东气象灾害频发在历史上给农业生产造成了很大的危害（王华等，2011），其早稻主要受龙舟水（锋面低槽暴雨）影响，而晚稻则主要受后期冷害和热带气旋暴雨影响（林举宾等，1997）。气候变化是导致气象灾害频发的重要原因，根据 IPCC 第五次评估报告显示：近 100 a（1880—2012 年）全球平均地表温度上升了 0.85°C（IPCC，2013），中国平均气温在 1909—2011 年相应增高了 0.9—1.5°C（杜尧东等，2018），对广东省来说，其平均气温自 1961 年以来也升高了近 1.0°C，并且秋季和冬季升温最为明显。在此背景下，研究气候变化对广东省水稻产量的影响具有重要的现实意义。

针对气候变化对农作物产量的影响，国内外学者从不同空间尺度，对不同作物种类，采取不同研究方法进行了广泛而深入的探索。从研究空间尺度来看，Lobell and Field（2007）在全球尺度上的研究发现：作物生长季的温度和降水等气候因子可以解释作物平均产量年变化率的 30% 甚至更高，并发现 1981—2002 年，气候变暖对小麦、玉米和大麦三种作物产量带来负向影响；国家层面上，Tao et al（2008）研究了中国季节性气候趋势与主要作物产量的关系，发现气候变暖促进了东北水稻及华北、东北大豆产量的增加，并带来了 7 个省（市/区）玉米、3 个省小麦产量的减少；Schlenker and Roberts（2009）对美国玉米、大豆及棉花展开研究，发现气候变化对三种农作物的影响存在一个温度阈值，当气温低于阈值时，气温的升高将带来农作物产量的增加，否则将会带来产量减少；省级层面上，李彩侠等（2014）探讨了 1954—2011 年气候变对黑龙江省主要农作物产量的影响，发现气温每升高 1°C，可导致其玉米、水稻、大豆及小麦单产分别增加约 $541.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $336.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $195.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及 $289.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；Kucharik and Serbin（2008）发现在美国威斯康辛

州，对于夏季气候变冷和变湿的县，其玉米和大豆产量趋势都有所提高，夏季气温（或降水）每增加 1°C（或 50 mm）其产量会分别下降 13% 和 16%（或提高 5%—10%）。此外在县市层面，Zheng et al（2009）利用中国海伦市的长期实验记录探讨全球变暖对不同控肥下大豆产量的影响，发现大豆产量与生长季温度密切相关；刘平和李利伟（2011）利用线性和方差分析法研究濮阳气候变化对农业生产的影响，发现干旱是濮阳小麦和玉米产量减少的最重要因素。

从研究对象来看，冯琳等（2019）对湖南大豆、小麦、稻谷及大豆这四种主要粮食作物展开研究，发现气候变化的影响存在显著的异质性，年平均气温对中产区稻谷具有显著负效应，年平均降水量对低产区稻谷、小麦有显著负效应，而年平均日照时数则对中产区玉米及低产区稻谷、小麦、玉米存在显著正效应；方修琦等（2004）估算了气候变暖对黑龙江水稻单产增加的贡献率，发现 20 世纪 80 年代较 70 年代、90 年代较 80 年代的水稻单产分别增加了 30.6% 和 42.7%，其中气候变化对单产增加的贡献率分别约为 12.8%—16.1% 和 23.2%—28.8%；熊伟等（2011）将区域气候模式与 CERES-Maize 模型结合针对石羊河、大凌河流域玉米展开模拟，发现如果保持生产状况不变，气候变化将加大该地区灌溉玉米稳产风险及低产出现的概率。

从研究方法上看，主要包括以下五类（王亚飞和廖顺宝，2018）：（1）产量分解法是将粮食产量分解为技术产量、气候产量和随机产量三部分，然后利用回归法分析气候因子与粮食气候产量的关系（Thompson，1969）；（2）实验比较法是通过设计多种存在气候差别的实验组，对比不同生长环境下的粮食产量和产量构成差异（宁金花等，2015）；（3）气候生产潜力模型是从光、温、水三个层面，模拟一个地区粮食生产上限，探讨各种气候情景差异（王铮等，2016）；（4）生产函数法是通过构建生产函数模型，探讨综合气候因子、社会经济投入等各种投入要素对粮食产出的作用关系（Kaufmann and Snell，1997；陈帅等，2016）；（5）作物生长模型是以作物生长动力学理论为基础，通过模拟各种自然、生产条件下的作物产量，用以观察人类及气候变化对农作物产量带来的影响差异（王文佳和冯浩，2012）。

广东的气候损失主要来源于突发性的气象灾

害, 其发生频率居全国首位(林举宾等, 1997), 是一种极端气候多发地区类型的典型代表。但对气候变化的作物产量影响研究较少, 其中黄珍珠等(2014)采用实验比较法研究了气候变化对广东水稻产量的影响, 陈新光等(2010)和饶刚顺等(2012)研究了如何通过调整播种期以适应气候变化的影响。在以往研究基础上, 本文的创新点一是基于生产函数引入作物生育期的月度气候因子构建气候影响模型, 不仅可以综合要素投入与气候变化对作物单产的贡献, 同时在更细的尺度上识别出影响水稻单产的关键月份气候因子及其影响方向和程度; 二是基于气候影响统计模型进一步估算了历史气候变化对广东省水稻单产的影响, 即气候损失或收益, 并分析了气候影响的长期趋势和空间差异。

1 研究方法与数据来源

1.1 基础生产函数

以往研究中, 通常将作物产量的变化归因于技术进步带来的趋势性变化和农业气象条件改变带来的波动性变化(方修琦等, 2004)。因此在研究气候变化对作物产量影响时, 首先需要从产量变化中剥离出气候因子导致的产量波动, 进而针对这一气候引致的波动性产量变化与气候变量进行统计分析。

但是, 如何定量区分出气候变化和技术进步对作物产量的影响程度存在一定困难。通常采用的时间序列分析方法, 将实际产量分解为趋势产量和波动产量两部分, 认为前者反映历史时期生产力发展水平的长周期产量, 后者主要反映气象要素影响的气候产量(Chen et al., 2016)。由于气候要素也存在长期趋势, 而农业生产投入变化也影响波动产量, 因此, 上述方法存在明显缺陷。

为此, 本研究参考丑洁明和叶笃正(2006)提出的经济—气候模型思想, 在经典Cobb-Douglas生产函数基础上, 引入气候变化因子建立作物产量影响的统计模型, 由此反映出农业投入、技术进步以及气候变量对作物产量的综合影响和贡献。基础生产函数可以反映产出与各项要素投入之间的关系, 若将水稻产量作为产出指标, 各项要素投入包括土地、劳动力、灌溉、化肥、机械等, 因此一般性生产函数形如:

$$Y=AL^{\alpha}D^{\beta}X_1^{\gamma_1}X_2^{\gamma_2}X_3^{\gamma_3}X_i^{\gamma_i} \quad (1)$$

式中: Y 为水稻总产量, A 表示全要素生产率, L

和 D 分别代表劳动力投入和土地播种面积, X 为其他各项农业要素投入量, α 、 β 、 γ 分别为各项投入要素的产出弹性。为消除播种面积影响, 假设该生产函数具有规模报酬不变性质, 由此可将式(1)简化为单位面积各种要素投入对作物单产的影响:

$$y=al^{\alpha}x_1^{\gamma_1}x_2^{\gamma_2}x_3^{\gamma_3}x_i^{\gamma_i} \quad (2)$$

式中: y 表示作物单产, l 为单位面积劳动力投入, x 为单位播种面积各项要素投入量, a 为对应此生产函数的全要素生产率。对生产函数式(2)两边取对数可得如下统计模型:

$$y'=\alpha'+\alpha l'+\gamma_1 x_1' + \gamma_2 x_2' + \gamma_3 x_3' + \gamma_i x_i' + \varepsilon \quad (3)$$

式中: $y'=\log(y)$, $\alpha'=\log(a)$, $l'=\log(l)$, $x'=\log(x)$, ε 为误差项。

1.2 气候影响模型

已有文献在研究气候变化对作物产量影响时, 通常将作物生长季的平均温度、总降水等指标作为自变量, 因此无法反映作物不同生育期温度、降水等气候因素对作物产量的影响。为此, 基于现有数据, 本文将作物生育期内的温度和降水指标按月度汇总, 作为本研究的气候自变量, 借此对影响作物单产的生育期关键气候变量进行识别:

$$y'=a'+\alpha l'+\gamma_1 x_1' + \gamma_2 x_2' + \gamma_3 x_3' + \gamma_i x_i' + \sum_m [\theta_m T^{(m)} + \varphi_m P^{(m)}] + \varepsilon \quad (4)$$

式中: $T^{(m)}$ 、 $P^{(m)}$ 分别为反映作物生育期内各月的温度和降水指标, m 表示作物生育期内的各个月份。本文采用广东省市级面板数据进行统计分析, 考虑到各市在土壤性质、种植品种和种植方式等方面的差异, 因此利用固定效应面板数据模型来反映不同地区(截面)上的固有差异。

1.3 气候影响估算

基于公式(4), 可以推导得出对应的反映气候变化影响的作物产量函数为:

$$\tilde{y}=y \times e^{\sum_m [\theta_m T^{(m)} + \varphi_m P^{(m)}]} \quad (5)$$

式(5)中指数部分即反映气候因素对农作物单位面积产量的影响, 进而定义气候影响为由于气候变化(温度、降水偏离常年平均值)给作物单产带来的影响:

$$\Omega=\frac{\tilde{y}-\bar{y}}{\bar{y}}=e^{\sum_m [\theta_m \Delta T^{(m)} + \varphi_m \Delta P^{(m)}]} - 1 \quad (6)$$

式中: \tilde{y} 和 \bar{y} 分别为对应真实气候条件的实际产量和对应常年平均气候态的平均产量水平, ΔT 和 ΔP

分别表示各月气温和降水的距平值，当 $\Omega > 0$ 表示带来气候收益， $\Omega < 0$ 代表发生气候损失。

1.4 数据来源

本文采用广东省各地级市 1992—2016 年的面板数据进行统计分析。其中，水稻（区分早稻和晚稻，二者生育期不同）单位面积产量及单位面积各项要素投入通过总产量及各项要素总投入与作物播种面积计算得来，相关数据来自历年《广东统计年鉴》（详见广东统计信息网 <http://stats.gd.gov.cn/gdtjn/>）。

气候数据来自吴佳和高学杰（2013）的格点化数据集（CN05.1）提供的根据中国境内 2400 余个台站的日度观测资料插值得出的格点数据，并根据广东省各市行政区划范围在 ArcGIS 中作平均处理，得到广东省各市的月度气温和降水数据。其中，采用月度有效积温（growing degree days, GDD）指标来反映各月的温度水平，以避免对日平均温度简单算术平均导致无法反映月内气温波

动的情况出现，采用月累积降水量反映各月的降水情况。

2 结果与分析

2.1 关键气候因子识别

基于上述气候影响模型，采用逐步回归法进行统计分析，分别得到基础生产函数模型 m1、单独引入气温变量和降水变量的模型 m2 和 m3、同时引入气温和降水变量的模型 m4 以及剔除不显著变量后的终选模型 m5，由此识别出影响水稻单产的关键生育期气候变量。由于广东省种植的水稻对应不同的生育期，因此接下来对早稻和晚稻分别进行统计分析。

2.1.1 早稻

早稻生育期较短，约为 90—120 d。广东地区早稻种植区播种最早出现在 4 月上旬，收获期最晚出现在 7 月中旬。为此，选定 4—7 月为早稻生育期内对应月份。不同月份气候变量对早稻单产的影响如表 1 所示。

表 1 影响早稻产量的显著气候变量识别结果
Tab. 1 Identification of significant climate variables affecting early rice yield

变量	模型 Models				
	m1	m2	m3	m4	m5
Independent variables					
_cons	1.74092*** (358.65)	0.91466*** (6.03)	1.84284*** (113.71)	1.63021*** (8.78)	1.62912*** (35.78)
lnF	-0.08183*** (-7.64)	-0.09733*** (-8.75)	-0.08473*** (-8.54)	-0.08044*** (-7.42)	-0.07708*** (-8.09)
gdd4		0.00041*** (2.78)		0.00061*** (4.20)	0.00065*** (5.01)
gdd5		0.00027 (1.45)		0.00025 (1.39)	
gdd6		0.00133*** (5.96)		-0.00000 (-0.01)	
gdd7		-0.00003 (-0.14)		-0.00019 (-0.65)	
p4			0.00003 (0.75)	0.00007* (1.82)	0.00008** (2.15)
p5			0.00001 (0.48)	0.00003 (1.07)	
p6			-0.00027*** (-10.91)	-0.00024*** (-7.50)	-0.00024*** (-9.67)
p7			-0.00006* (-1.94)	-0.00010** (-2.39)	-0.00008*** (-2.63)
R ²	0.11701	0.25116	0.31080	0.35238	0.34800

*: $P < 0.1$, **: $P < 0.05$, ***: $P < 0.01$ 。

括号中为 T 统计值。模型 m1 为生产函数基础模型，lnF 为化肥投入的对数值，其余投入要素不显著故从模型中去除；模型 m2 和 m3 分别为引入有效积温和降水的气候影响模型；模型 m4 为同时引入有效积温和降水的气候影响模型；模型 m5 为去除不显著变量后的气候影响模型。gdd4—gdd7 分别表示 4—7 月的月度有效积温，p4—p7 分别表示 4—7 月的降水量。

T statistics in parentheses. Model m1 is the basic production function model, lnF is the log of fertilizer input, other input is not significant and thus eliminated; model m2 and m3 have introduced GDD and precipitation separately; model m4 has introduced all climate factors of GDD and precipitation; model m5 further eliminated those insignificant climate factors. gdd4—gdd7 represent the growing degree days from April to July, and p4—p7 represent the precipitation from April to July, respectively.

水稻是喜高温多湿的作物。统计结果(表1)显示:4月与6月的积温对广东省早稻单产具有显著影响,且温度升高对早稻增产具有促进作用。其中4月早稻正处于播种发芽期,较高的积温有利于水稻发芽;而6月正处于早稻拔节孕穗期,较高积温有利于营养成分积累促进增产增收;5月积温对早稻增产的影响也为正向,但影响不显著;7月进入早稻收获期,较高的温度反而对早稻产量有负面影响,但该影响同样不显著。降水方面,6—7月的降水对早稻单产的影响较为显著,且不利于早稻单产提高;播种期和生长

期的降水对早稻单产提高有促进作用,但影响不显著。从模型m4与模型m2、m3的对比可以看出,积温与降水之间存在相关性,导致多重共线性问题,使得各变量的显著性发生较大变化,但各气候因子对早稻单产的影响方向并未发生较大变化。

2.1.2 晚稻

晚稻的播种期为6月底至7月初,7月中旬插秧,11月中上旬为收获期。因此选定6—11月为晚稻的生育期。不同月份气候因素对晚稻产量的影响如表2所示。

表2 影响晚稻产量的显著气候变量识别结果
Tab. 2 Identification results of significant climate variables affecting late rice yield

自变量 Independent variables	模型 Models				
	m1	m2	m3	m4	m5
_cons	1.71570*** (378.46)	0.95254*** (5.22)	1.79735*** (98.75)	1.66070*** (6.73)	1.77545*** (17.43)
ln F	-0.06229*** (-6.22)	-0.07701*** (-7.33)	-0.05642*** (-5.66)	-0.05960*** (-5.79)	-0.05679*** (-5.70)
gdd6		0.00064*** (3.24)		0.00008 (0.28)	
gdd7		0.00015 (0.63)		0.00046 (1.58)	
gdd8		0.00096*** (3.08)		-0.00018 (-0.47)	
gdd9		-0.00102*** (-4.62)		-0.00107*** (-4.47)	-0.00103*** (-5.09)
gdd10		0.00085*** (6.20)		0.00112*** (7.60)	0.00122*** (9.21)
gdd11		0.00024* (1.76)		0.00022 (1.61)	0.00027** (2.23)
p6			-0.00014*** (-5.49)	-0.00017*** (-4.91)	-0.00018*** (-7.58)
p7			0.00004 (1.40)	0.00003 (0.73)	
p8			-0.00006* (-1.92)	-0.00018*** (-4.17)	-0.00018*** (-5.49)
p9			-0.00011** (-2.53)	-0.00003 (-0.73)	
p10			0.00014** (2.48)	0.00004 (0.63)	
p11			-0.00026*** (-3.25)	-0.00039*** (-5.00)	-0.00038*** (-5.17)
R ²	0.08093	0.22538	0.19198	0.33772	0.33188

*: $P < 0.1$, **: $P < 0.05$, ***: $P < 0.01$ 。

括号中为T统计值。模型m1为生产函数基础模型,ln F为化肥投入的对数值,其余投入要素不显著故从模型中去除;模型m2和m3分别为引入有效积温和降水的气候影响模型;模型m4为同时引入有效积温和降水的气候影响模型;模型m5为去除不显著变量后的气候影响模型。gdd6—gdd11分别表示6—11月的月度有效积温,p6—p11分别表示6—11月的降水量。

T statistics in parentheses. Model m1 is the basic production function model, ln F is the log of fertilizer input, other input is not significant and thus eliminated; model m2 and m3 have introduced GDD and precipitation separately; model m4 has introduced all climate factors of GDD and precipitation; model m5 further eliminated those insignificant climate factors. gdd6—gdd11 represent the growing degree days from June to November, and p6—p11 represent the precipitation from June to November, respectively.

统计结果（表 2）显示：除 7 月以外，晚稻生育期内其余月份的气候条件对其单产均有显著影响。有效积温对晚稻单产的影响总体呈现促进作用，除 9 月的积温不利于晚稻单产提高以外，播种期和收获期的温度升高均有利于晚稻营养成分积累。降水方面，除 10 月降水对提高晚稻单产有促进作用之外，其余月份降水增加将不利于晚稻单产的提高。同样地，由于积温和降水之间存在相关性的缘故，将所有气候因子引入模型后对自变量的显著性有一定影响，但气候因子的作用方向总体保持一致。去除不显著变量的模型如 m5 所示，对晚稻单产有显著影响的气候因子为 9—11 月的有效积温与 6 月、8 月和 11 月的降水。其中 10—11 月有效积温增加有促进作用，其余气候变量均为负面影响。

与以往研究相比，Chen and Tian (2016) 发现日最低气温升高对热带和亚热带地区水稻产量有负面影响，与本文研究发现有效积温对水稻单产有促进作用的结论不一致，可能与选取的气候变量不同有关。Zhang et al (2010) 基于中国 1981—2005 年气候和水稻产量数据发现，气温升高有利于提高水稻产出，而降水的增加则对产出有不利影响；方修琦等 (2004) 通过研究黑龙江省 5—9 月累积降水与月平均气温对水稻单产的影响，同样发现气温升高对单产有正面影响，本文基于广东省早稻和晚稻的气候影响分析，再次验证了上述结论，即升温有利于水稻增产，而降水不利于水稻增产，同时本文在上述研究基础上，进一步识别出对水稻单产有显著影响的月份。

理论上讲，作物都有最适合自身生长的气候条件，偏离该气候条件都将导致产量的降低。一些文献确实印证了这一理论，例如 Schlenker and Roberts (2006, 2009) 以及 Chen et al (2016) 通过分析美国和中国县级尺度上气候变量对作物的影响，发现了两者间的非线性关系，并估算出了对应最高产量的气候条件。但是本文并未得出气候变量与作物单产之间的非线性关系，其原因一方面与选取的市级尺度较大有关，另一方面也与时间跨度较短有关，而非线性关系的识别需要引入气候变量的二次项，从统计有效性角度就需要有更细尺度的大量数据作为支撑，但现有统计数据无法满足这一要求。

2.2 气候影响估算

基于上述气候影响模型（表 1 和表 2 中最后

一列），可以得到早稻和晚稻的气候影响估算式：

$$\begin{aligned}\Omega^{\text{early}} &= e^{(6.5\Delta gdd_4 + 0.8\Delta p_4 - 2.4\Delta p_6 - 0.8\Delta p_7) \times 10^{-4}} - 1 \\ \Omega^{\text{late}} &= e^{(-10.3\Delta gdd_9 + 12.2\Delta gdd_{10} + 2.7\Delta gdd_{11} - 1.8\Delta p_6 - 1.8\Delta p_8 - 3.8\Delta p_{11}) \times 10^{-4}} - 1\end{aligned}\quad (7)$$

式中： Δgdd 和 Δp 分别为对应月份积温和降水的距平值。当距平值以各地的历史平均值为参照，将各地历年气温和降水距平值数据代入上式，计算得到的是当地气候变化导致的偏离长期平均水平的气候损失（收益）；当距平值参照所有产区的平均气候条件，由此计算得到的结果可以反映作物产区内不同地区气候损失（收益）的区域差距。

2.2.1 长期趋势

以各市当地各月的历史平均气温、降水数据为参照，计算得到近年来本地气候变化对广东省早稻和晚稻单产影响的长期趋势（图 1）。从图 1a、图 1b 可以看出，气候变化对两种作物单产的影响呈现出明显的年际波动现象，但是这一影响并未表现出明显的趋势性特征。

以广东省各地市常年平均气候为基准，计算得到各地市相对本地的气候距平值以及由此导致的水稻单产损失（收益）。从图 1c、图 1d 可以看出，气候变化对早稻和晚稻的影响均值都位于横轴上方，表明近年来（1992—2016）气候变化的综合影响促进了广东省水稻单产提高。而从中位数来看，大部分地市的早稻单产在 1993、1996、2000、2002、2006—2007、2009—2010、2012 等年份发生了气候损失，近年来（2013—2016）的气候影响呈现出以增产为主的特征；大多数地市的晚稻单产在 1992—1993、1996—1997、2000、2005、2007—2008、2013—2014、2016 等年份出现气候损失，其余年份的气候影响以增产为主。从气候影响的中位数波动幅度可以看出，早稻相比晚稻对气候变化的响应更为敏感，一方面与早稻生育期较短有关，另一方面也与早稻生育期内的气候波动更加明显有关，这加剧了早稻在较短生育期内抗风险能力较差、缺少适应时间的情况。

此外，气候变化对不同地市水稻单产的影响也存在较大差别。从图 1a、图 1b 中箱线图的跨度与异常值出现的频率来看，气候因素对不同地市两种作物的影响在多数年份跨越横轴，说明同一年份部分产区发生气候增产，部分产区发生气候损失。1998 年和 2008 年气候变化对不同地市早稻单

产的影响差异较大,1996—1997年与2007—2008年气候变化对不同地市晚稻单产的影响的差异较大,表现为箱线图的跨度较长。同时,气候变化

对晚稻影响的异常值出现次数较早稻更为频繁,说明个别地市的晚稻单产受到气候影响的程度较大。

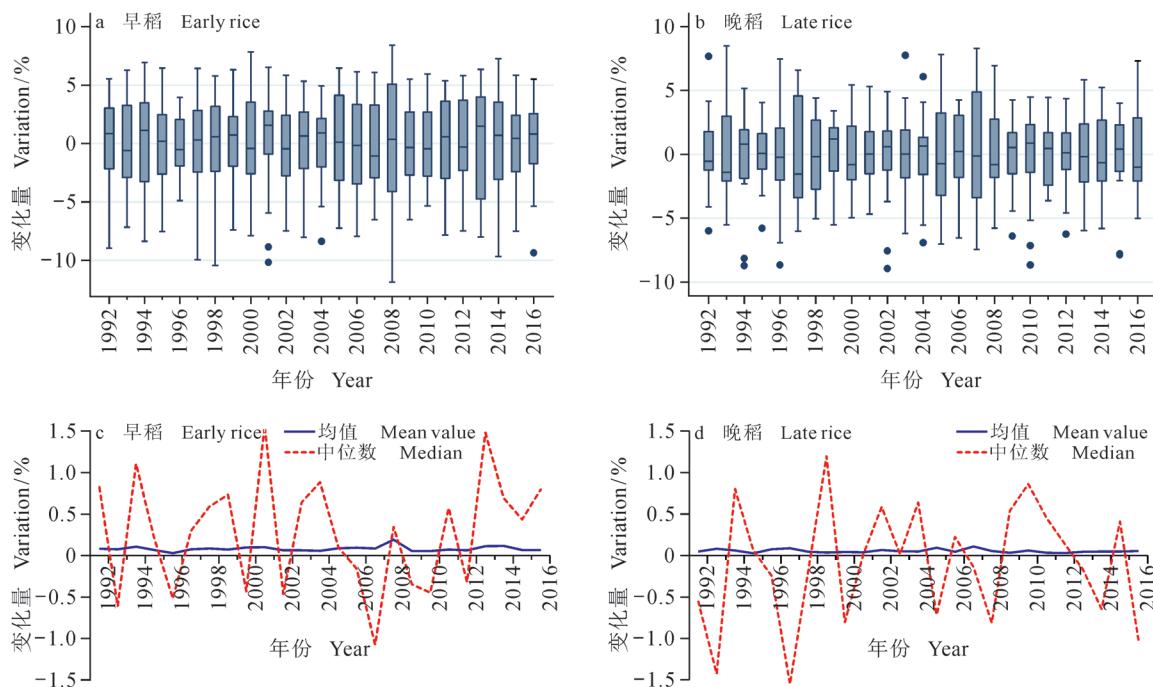


图1 气候变化对广东省早稻和晚稻单产的长期影响(1992—2016年)

Fig. 1 Effects of climate change on yield of early- and late-rice in Guangdong Province from 1992 to 2016

2.2.2 空间差异

以历年各地市平均积温、降水数据为基准,

计算得到气候变化对广东省早稻和晚稻单产影响的空间差异特征,结果如图2所示。

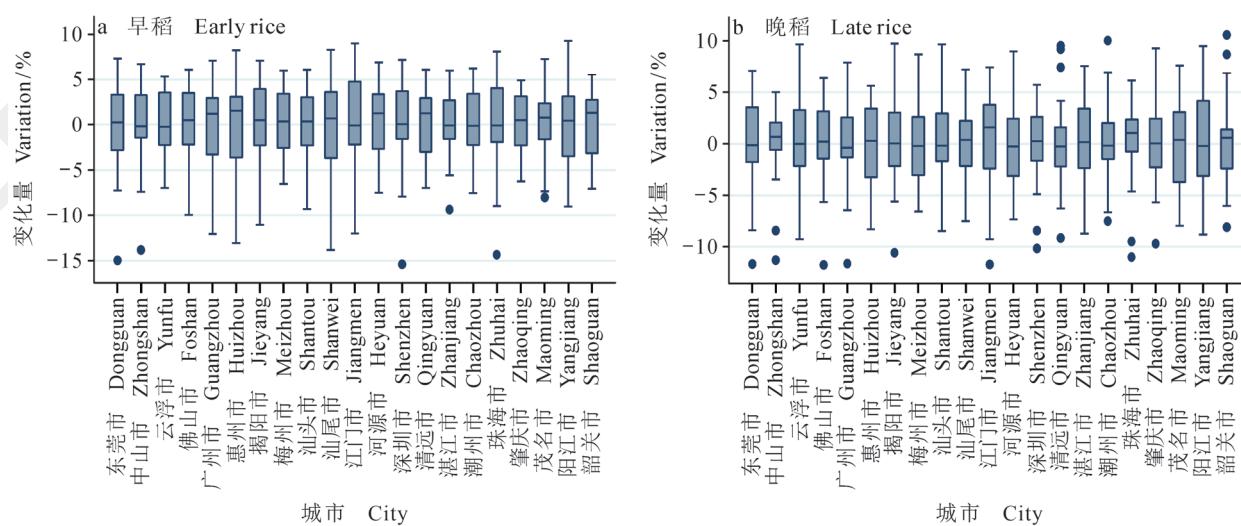


图2 气候变化对各市早稻、晚稻单产的影响
Fig. 2 The effect of climate change on the yield of early rice and late rice in each city

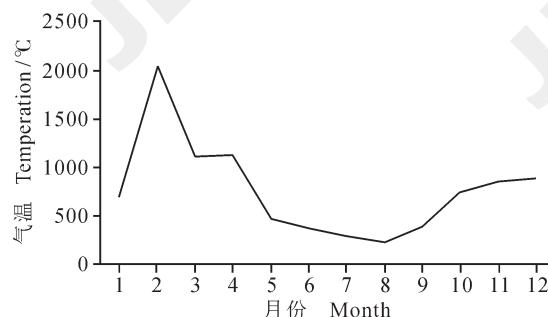
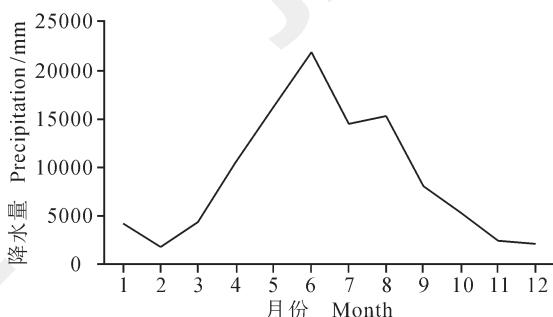
从各市作物单产气候损失(图2)上可以看出,气候变化对早稻单产带来的气候影响波动范

围要大于晚稻,且更偏向于损失面。通过对广东省各市的气候损失进行空间分析可以发现:气候

因素对早稻的影响呈现由北向南损失逐渐增强的特征。其中汕尾市、惠州市气候平均损失最高，分别为 -4.755% 、 -4.753% ；东莞市、广州市次之，平均损失分别为 -4.245% 、 -4.438% ；云浮市、潮州市、湛江市气候平均损失最低，分别为 -2.129% 、 -2.164% 、 -2.285% 。这一结果再次印证了王华等（2011）得出的1997年以来广东南部地区高温危害发生频率增加最多的结论。晚稻气候损失则由东向西逐渐增强，其中江门市气候平均损失最高，为 -4.837% ；潮州市、汕头市、广

州市气候平均损失情况最低，分别为 -2.314% 、 -2.464% 、 -2.477% 。

为寻找气候变化对早晚稻单产影响存在上述差异的原因，进一步计算了1992—2016年广东省各市气候变量的波动值（图3）。很明显，早稻生育期内（4—7月）降水的波动水平要高于晚稻（6—11月），而气温方面早稻生育期内的波动也要高于晚稻。由此表明，在更大的气候波动冲击下，只有较短生育期的早稻，对于气候变化的冲击表现出更困难的适应能力。



纵轴表示广东省各市降水与气温的方差均值，如1月降水波动为4148.79 mm表示各市历年1月降水量方差的均值。

The vertical axes show the mean variance of precipitation and temperature of cities in Guangdong Province. For example, the precipitation fluctuation in January, which is 4148.79 mm, represents the mean value of the precipitation variance among cities in the month of January for all years.

图3 广东省各月份平均降水和气温波动（1992—2016年）

Fig. 3 Fluctuation of average precipitation and temperature in each month of Guangdong Province from 1992 to 2016

3 结论

本文以广东省为研究对象，通过引入月度气候因子（积温和降水），识别出影响水稻单产的关键月份的关键气候因素，进而计算历史时期气候变化对水稻单产的影响方向（损失/收益）与程度，主要结论如下：

(1) 各地历史气候变化对水稻单产的影响呈现明显的年际波动现象，但长期趋势性特征不明显，综合来看为增产效应；(2) 影响广东水稻单产的关键气候因子存在明显的早晚稻差异、月度差异、降水与积温差异，在应对气候变化时需要采取有针对性的措施；(3) 气候影响存在显著空间差异，早稻单产的气候损失呈现由北向南逐渐增强的趋势，晚稻则是由东向西逐渐增强；

(4) 气候变化对早稻单产的影响程度和波动范围均较大，气候敏感性较晚稻更高。

参考文献

陈 帅, 徐晋涛, 张海鹏. 2016. 气候变化对中国粮食生产的影响——基于县级面板数据的实证分析 [J]. 中国农

村经济, (5): 2—15. [Chen S, Xu J T, Zhang H P. 2016. The impact of climate change on China's grain production: an empirical analysis based on county panel data [J]. *Chinese Rural Economy*, (5): 2—15.]

陈新光, 王 华, 邹永春, 等. 2010. 气候变化背景下广东早稻播期的适应性调整 [J]. 生态学报, 30(17): 4748—4755. [Chen X G, Wang H, Zou Y C, et al. 2010. Adaptation and determination of sowing date under climate change in early matured rice in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(17): 4748—4755.]

丑洁明, 叶笃正. 2006. 构建一个经济—气候新模型评价气候变化对粮食产量的影响 [J]. 气候与环境研究, 11(3): 347—353. [Chou J M, Ye D Z. 2006. Assessing the effect of climate changes on grains yields with a new economy—climate model [J]. *Climatic and Environmental Research*, 11(3): 347—353.]

杜尧东, 沈 平, 王 华, 等. 2018. 气候变化对广东省双季稻种植气候区划的影响 [J]. 应用生态学报, 29(12): 4013—4021. [Du Y D, Shen P, Wang H, et al. 2018. Impacts of climate change on climatic division for double

- cropping rice in Guangdong Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(12): 4013–4021.]
- 方修琦, 王媛, 徐锬, 等. 2004. 近20年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献 [J]. *地理学报*, 59(6): 820–828. [Fang X Q, Wang Y, Xu T, et al. 2004. Contribution of climate warming to rice yield in Heilongjiang Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 820–828.]
- 冯琳, 庞玉亭, 钟琪, 等. 2019. 1980—2016年气候变化对湖南省农业产量的影响 [J]. *资源科学*, 41(3): 582–590. [Feng L, Pang Y T, Zhong Q, et al. 2019. Impacts of climate variability on crop yields in Hunan Province during 1980—2016 [J]. *Resources Science*, 41(3): 582–590.]
- 黄珍珠, 王春林, 陈慧华, 等. 2014. 气候变化背景下广东寒露风特征及其对晚稻产量的影响 [J]. *热带气象学报*, 30(2): 382–386. [Huang Z Z, Wang C L, Chen H H, et al. 2014. The characteristics of anomalously lower temperatures in autumn and their impact on the late rice yield under climate change in Guangdong Province [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 30(2): 382–386.]
- 李彩侠, 李俏, 孙天一, 等. 2014. 气候变化对黑龙江省主要农作物产量的影响 [J]. *自然灾害学报*, 23(6): 200–208. [Li C X, Li Q, Sun T Y, et al. 2014. Effect of climate change on major crops yield in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Natural Disasters*, 23(6): 200–208.]
- 李逸勉, 叶延琼, 章家恩, 等. 2013. 广东省水稻产业发展现状与对策分析 [J]. *中国农学通报*, 29(20): 73–82. [Li Y M, Ye Y Q, Zhang J E, et al. 2013. Analysis on the development status and countermeasures of rice industry in Guangdong Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(20): 73–82.]
- 林而达, 王京华. 1994. 我国农业对全球变暖的敏感性和脆弱性 [J]. *农村生态环境*, 10(1): 1–5. [Lin E D, Wang J H. 1994. The sensitivity and vulnerability of China's agriculture to global warming [J]. *Rural Eco-Environment*, 10(1): 1–5.]
- 林举宾, 涂悦贤, 麦建辉. 1997. 农业气象灾害对广东水稻生产的影响及防御对策 [J]. *中国农业气象*, 18(4): 42–45. [Lin J B, Tu Y X, Mai J H. 1997. The impact of agricultural meteorological disasters on rice production in Guangdong and its countermeasures [J]. *Agricultural Meteorology*, 18(4): 42–45.]
- 刘平, 李利伟. 2011. 潢阳气候变化对农业生产的影响 [J]. *中国农学通报*, 27(26): 281–286. [Liu P, Li L W. 2011. The influence of climate change in Puyang on agricultural production [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(26): 281–286.]
- 宁金花, 陆魁东, 宋忠华, 等. 2015. 超级双季晚稻产量构成与温光因子的关系 [J]. *生态学杂志*, 34(3): 688–694. [Ning J H, Lu K D, Song Z H, et al. 2015. Relationship of yield components and temperature and light factors for super double-cropping late rice [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(3): 688–694.]
- 饶刚顺, 肖立中, 甘海梅, 等. 2012. 气候变暖情况下广东水稻最适播种期初探 [J]. *中国农学通报*, 28(5): 300–305. [Rao G S, Xiao L Z, Gan H M, et al. 2012. Study on rice optimum sowing date in Guangdong under climatic warming [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(5): 300–305.]
- 王华, 陈新光, 黄珍珠. 2011. 气候变化背景下广东早稻气象灾害变化 [J]. *热带气象学报*, 27(6): 937–941. [Wang H, Chen X G, Huang Z Z. 2011. Variations of meteorological disasters on early rice production in Guangdong Province under climate change [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 27(6): 937–941.]
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56(4): 1102–1111. [Wu J, Gao X J. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1102–1111.]
- 王文佳, 冯浩. 2012. 国外主要作物模型研究进展与存在问题 [J]. *节水灌溉*, (8): 63–68, 73. [Wang W J, Feng H. 2012. The progress and problems in the development of foreign crop models [J]. *Water Saving Irrigation*, (8): 63–68, 73.]
- 王亚飞, 廖顺宝. 2018. 气候变化对粮食产量影响的研究方法综述 [J]. *中国农业资源与区划*, 39(12): 54–63. [Wang Y F, Liao S B. 2018. Impacts of climate change on grain yield: a review of research methods [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 39(12): 54–63.]
- 王铮, 乐群, 夏海斌, 等. 2016. 中国2050: 气候情景与胡焕庸线的稳定性 [J]. *中国科学: 地球科学*, 46(11): 1505–1514, 1–6. [Wang Z, Yue Q, Xia H B, et al. 2016.

- China 2050: climate scenarios and stability of Hu-line (in Chinese) [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 46(11): 1505–1514, 1–6.]
- 熊伟, 冯颖竹, 高清竹, 等. 2011. 气候变化对石羊河、大凌河流域灌溉玉米生产的影响 [J]. *干旱区地理*, 34(1): 150–159. [Xiong W, Feng Y Z, Gao Q Z, et al. 2011. Impacts of climate change on irrigated maize production in Shiyang and Daling River Basins [J]. *Arid Land Geography*, 34(1): 150–159.]
- 赵俊芳, 郭建平, 马玉平, 等. 2010. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策 [J]. *应用生态学报*, 21(11): 2922–2930. [Zhao J F, Guo J P, Ma Y P, et al. 2010. Change trends of China agricultural thermal resources under climate change and related adaptation countermeasures [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(11): 2922–2930.]
- Chen S, Chen X G, Xu J T. 2016. Impacts of climate change on agriculture: evidence from China [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76: 105–124.
- Chen X G, Tian G P. 2016. Impacts of weather variations on rice yields in China based on province-level data [J]. *Regional Environmental Change*, 16(7): 2155–2162.
- IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaufmann R K, Snell S E. 1997. A biophysical model of corn yield: integrating climatic and social determinants [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 79(1): 178–190.
- Kucharik C J, Serbin S P. 2008. Impacts of recent climate change on Wisconsin corn and soybean yield trends [J]. *Environmental Research Letters*, 3(3): 034003. DOI: 10.1088/1748-9326/3/3/034003.
- Lobell D B, Field C B. 2007. Global scale climate—crop yield relationships and the impacts of recent warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2(1): 014002. DOI: 10.1088/1748-9326/2/1/014002.
- Schlenker W, Roberts M J. 2006. Nonlinear effects of weather on corn yields [J]. *Review of Agricultural Economics*, 28(3): 391–398.
- Schlenker W, Roberts M J. 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U. S. crop yields under climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(37): 15594–15598.
- Tao F, Yokozawa M, Liu J, et al. 2008. Climate—crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends [J]. *Climate Research*, 38: 83–94.
- Thompson L M. 1969. Weather and technology in the production of corn in the U. S. corn belt [J]. *Agronomy Journal*, 61(3): 453–456.
- Zhang T Y, Zhu J, Wassmann R. 2010. Responses of rice yields to recent climate change in China: an empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981—2005) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7/8): 1128–1137.
- Zheng H F, Chen L D, Han X Z. 2009. The effects of global warming on soybean yields in a long-term fertilization experiment in northeast China [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 147(5): 569–580.