

# 生育期气候变化对我国水稻主产区单产的影响 ——基于扩展 C-D 生产函数的实证分析

尹朝静<sup>1,2</sup> 李谷成<sup>3\*</sup> 范丽霞<sup>4</sup> 高雪<sup>3</sup>

(1. 西南大学 经济管理学院, 重庆 400715;

2. 西南大学 农村经济与管理研究中心, 重庆 400715;

3. 华中农业大学 经济管理学院, 武汉 430070;

4. 武汉轻工大学 经济与管理学院, 武汉 430023)

**摘要** 基于扩展的 C-D 生产函数模型, 利用 1984-2014 年 15 个省份的水稻投入产出及气象数据, 探讨了生育期气候变化对水稻单产的影响, 并系统考察了气候因素对水稻单产的非线性及区域差异性影响程度。结果表明: 一方面, 水稻生育期降水增加对水稻单产具有负向影响, 但其对不同地区的具体影响有所不同。同时, 降水变化的二次项对水稻单产具有显著的负向影响。从各区域来看, 水稻全生育期降水增加对西南地区水稻单产的边际影响为正, 而对东北地区、华东地区、华中地区以及华南地区水稻单产的边际影响为负。另一方面, 水稻全生育期内气温升高对水稻单产具有负向影响, 且气温变化与水稻单产之间存在明显的“倒 U 型”关系。从各区域来看, 气温升高对华东地区、华中地区、华南地区以及西南地区水稻单产的边际影响为负, 而对东北地区水稻单产的边际影响为正。

**关键词** 水稻; 气候变化; 单产; C-D 生产函数

中图分类号 F 323.3

文章编号 1007-4333(2018)10-0183-10

文献标志码 A

## Study on the impact of climate change during rice's growing seasons on rice yield in main region: An empirical analysis based on the extended C-D production function

YIN Chaojing<sup>1,2</sup>, LI Gucheng<sup>3\*</sup>, FAN Lixia<sup>4</sup>, GAO Xue<sup>3</sup>

(1. College of Economics & Management, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. The Research Center of Rural Economic & Management, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. College of Economics & Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

4. Economics and Management College, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract** By establishing an extended C-D production function model and using the rice production and meteorological data of China's 15 rice-producing provinces from 1984 to 2014, an empirical analysis of the influence of climate change in rice's growing seasons on rice production was conducted and the nonlinear and regional difference of climate factors' effects was observed. The results showed that increasing precipitation had a significantly negative impact on rice yield. However, the impacts on different regions were different. Meanwhile, quadratic precipitation had a significantly negative impact on rice yield. On the whole, the precipitation had a negative impact on the northeast, eastern, central and southern regions of China, while had a positive impact on the southwest region. Besides, rising temperature had a significantly negative impact on rice yield and there existed a "U" shape relationship between temperature change and rice yield. On the whole, the temperature had a negative impact on the eastern, central, southern and southwest regions of China, while had a positive impact on the northeast region.

**Keywords** rice; climate change; yield; C-D production function

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU1709653); 国家自然科学基金国际合作项目(71461010701); 重庆市人文社科重点研究基地(18SKB033); 教育部人文社会科学研究项目(12YJC790036)

第一作者: 尹朝静, 讲师, 主要从事农业技术经济学研究, E-mail: yinchaojing@163.com

通讯作者: 李谷成, 教授, 主要从事农业技术经济学研究, E-mail: lgcab@foxmail.com

全球气候变暖已是不争的事实,2013年政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告指出,在过去的130年全球升温 $0.85^{\circ}\text{C}$ ,且从20世纪50年代开始,极端天气气候事件开始增多,对粮食生产造成了显著影响<sup>[1]</sup>。水稻作为我国最重要的粮食作物之一,其生长过程与气温、降水、日照等气候因素紧密相关。因此,定量评估气候变化对水稻产量的影响,对于促进我国水稻产业稳定发展和保障我国粮食安全具有重要的现实意义。

在气候变暖背景下,越来越多的学者围绕气候变化对水稻产量的影响展开研究,并形成丰富的研究成果。从研究方法看,目前评估气候变化对水稻产量影响的方法包括作物机理模型和计量经济模型。作物机理模型基于作物生长理论和控制性生产试验,结合试验数据和设定的相关参数,动态模拟水稻的生长发育过程,进而探讨气温、光照、辐射及土壤等生态和环境要素与水稻产量的关系<sup>[2-3]</sup>。不过,由于作物生理过程往往十分复杂,充满不确定性,这些过程的描述往往依靠经验判断,大量参数需要假定并校准,因此势必影响作物机理模型的普适性。此外,作物机理模型通过试验数据或模拟研究展开,并未考虑到生产者的适应行为,难免会高估气候变化所带来的负面效应。

相比于作物机理模型,计量经济模型基于历史统计数据 and 气候情景,在充分考虑农户适应策略的基础上,借助抽样和计量估计技术,从而能更准确地估计气候变化对农业的影响,由此,也越来越受到学者们青睐<sup>[4]</sup>。学者们从国家层面、省级层面及县级层面全面探讨了气候变化对水稻生产的影响。国家层面上,周曙东等<sup>[5]</sup>采用经济-气候模型研究气候变化对南方水稻产量的影响,结果表明降水增加对华南、华中和华东地区有负作用,而对西南地区有正向影响。温度对西南、华南、华东和华中地区都存在负作用。矫梅燕等<sup>[6]</sup>系统探讨了气候变化对中国农业的影响,研究指出,气温、降水等气候因素对水稻单产的影响并不相同,存在正、负2种效应,且对不同地区的影响也具有差异性。Chen等<sup>[7]</sup>利用1961—2010年中国省域面板数据展开气候变化对水稻产量影响的研究,研究表明平均气温上升提高了东北、西北和西南地区一季稻单产,但不利于中部和东部地区一季稻单产提高。而崔静等<sup>[8]</sup>研究气候变化对一季稻单产的影响表明,作物生长期气温升高和降水增长对一季稻单产均具有负向影响,但对不同地

区一季稻单产的影响具有差异性。气温变化的二次项对一季稻单产具有显著负向影响,而降水变化的二次项对一季稻单产的影响并不显著。在省级层面上,陈超等<sup>[9]</sup>对四川单季稻的研究表明,各地单季稻产量对气候变化极为敏感,近30年来的气候变化可以解释约43%的单季稻产量变化。足见,气候变化对水稻产量的影响十分明显。

一些学者以某一具体省份为重点来探讨气候变化对水稻生产的影响,主要从气候变化对水稻产量、气候因素对水稻生产效率以及气候因子贡献率等几个方面展开。许信旺等<sup>[10]</sup>讨论安徽省气候变化对水稻生产影响的研究表明,气候变化对安徽省水稻生长期及水稻产量有明显影响,气候变暖下双季稻生育期明显缩短,在一定程度上对水稻产量产生负向影响。此外,极端气候事件对水稻生产产生了巨大影响。而朱晓莉等<sup>[11]</sup>采用随机前沿超越对数生产函数模型,研究了江苏省气候变化对水稻总产量的影响,结果表明,不同生育期气候因子对水稻总产量的影响不同,且存在地区差异。姜岩等<sup>[12]</sup>利用江苏省8个地区的水稻投入产出和气候数据,探讨气候因子对水稻生产效率的影响表明,气候因素对江苏地区水稻生产技术效率呈现不同的影响效果,6、8、9月份的光温比及7月份的降水对水稻生产技术效率具有提升作用,而7月平均温度及光温比具有抑制作用。另外,付莲莲等<sup>[13]</sup>对江西省水稻生产的研究表明,不同阶段气候因素对水稻产量的贡献率及作用方向不同,1978—1997年气候因子贡献率为5.97%,其中温度和降水贡献率分别为1.51%和4.46%。而1998—2013年气候因子贡献率8.98%,其中温度和降水贡献率分别为4.63%和4.35%。尹朝静等<sup>[14]</sup>采用湖北农村固定观察点数据和气象数据探讨气候因素对水稻单产的影响,研究表明气温上升对水稻单产的影响表现为倒“U”关系,高温热害对水稻单产具有显著的负向影响。

相比之下,县级层面上的研究相对较少,陈帅等<sup>[15]</sup>基于1996—2009年中国县级层面水稻产量、灌溉、气象和社会经济数据,采用经济学方法考察气候变化对中国水稻生产的影响,研究表明气温、降水和日照等对中国水稻的影响均存在“先增后减”的非线性关系,气候变化在未来的长期危害将会急剧增大,到本世纪末,气候变化导致中国水稻单产降低2%~16%。总体上看,学者们普遍倾向于气候变化对水稻产量的影响以负向作用为主,但在具体的影

响程度上存在分歧。这主要是由于稻谷的生长过程受到自然、经济等各方面因素的综合作用,加之研究对象、变量选取以及模型形式设定的不同。

综上所述,已有文献比较全面探讨了气候变化对水稻产量的影响,并取得了丰硕的成果,对深入展开相关研究具有重要的参考价值,但已有研究仍存在两点不足:1)从研究方法看,已有研究通常使用各类农业生产资料的总投入乘以水稻播种面积占总播种面积的比重来估算水稻生产投入,这同实际的水稻生产投入存在较大偏差,从而容易导致模型估计结果的偏误。此外,多数研究将时间维度较大、截面个数较少的考察对象作为短面板进行研究,未考虑到扰动项可能存在异方差与自相关,从而会导致模型估计的偏误。2)从研究内容看,已有研究多集中于某省、市或地区,而以区域或全国作为考察对象展开的研究仍不多。另外,多数研究侧重于考察气温、降水等气候因子对水稻单产的线性影响,很少关注到气候因素对水稻单产的非线性影响。实际上,气候变化对水稻单产的影响更可能是非线性的<sup>[14-15]</sup>。由此,本研究采用1984—2014年间水稻主产区的面板数据,将气候因素引入扩展的C-D生产函数模型,在考虑气候因素的非线性和区域差异性影响的基础上,采用可行广义最小二乘法(FGLS)对水稻生产函数模型进行估计,实证检验水稻生育期内气候变化对中国水稻单产的影响程度。

## 1 模型的构建

Cobb-Douglas生产函数模型自产生以来,对于描述产量与生产要素两者间的关系有着重要作用。水稻生产不仅受到化肥、劳动力等要素投入的影响,还与光、热、水等气候因素密不可分。不仅如此,水稻生产过程中还受到技术进步、政策、区域特征等因素影响<sup>[16-17]</sup>。总之,水稻生产过程是社会因素和自然因素共同作用的结果。因此,建立如下水稻产量影响因素的理论模型:

$$Y = f(A, L, K, P) \quad (1)$$

式中:Y代表水稻总产量,A代表种植面积,L代表劳动投入,K代表资本投入,P代表技术、政策等其他因素。借鉴崔静等的研究<sup>[8]</sup>,使用单产意义上的

平均生产函数,并将气候因素作为外生变量引入C-D生产函数,具体形式如式(2)所示:

$$y = \alpha l^{\beta} k^{\gamma} e^{\gamma C} + \mu \quad (2)$$

式中:C为气候因素,y、l、k表示单位面积水稻产量、单位面积劳动投入和单位面积资本投入,对式(2)两边取对数:

$$\ln y = \alpha + \beta \ln l + \gamma \ln k + \gamma C + \mu \quad (3)$$

考虑到气候因素对水稻单产的非线性以及区域差异性影响,本研究对C-D生产函数进行扩展,最终建立气候—单产模型,具体形式为:

$$\begin{aligned} \ln y_{it} = & \alpha_0 + \beta_1 \ln l_{it} + \beta_2 \ln F_{it} + \beta_3 \ln OM_{it} + \\ & \eta_1 \text{PRE}_{it} + \eta_2 \text{TEM}_{it} + \eta_3 (\text{PRE}_{it})^2 + \\ & \eta_4 (\text{TEM}_{it})^2 + \sum_{m=1}^4 \rho_m D_m \times \text{PRE}_{it} + \\ & \sum_{m=1}^4 \delta_m D_m \times \text{TEM}_{it} + Z_1 + Z_2 + T + \mu_{it} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:i和t表示第i省的第t年份;F、OM相当于式(3)中的k,F表示每单位面积化肥投入,OM为每单位面积其他物质要素投入,包括种子、农药、农膜、机械、灌溉等投入;PRE、TEM为(3)式中C的分解项,其中,PRE表示生育期月平均降水量,TEM表示生育期月平均气温<sup>①</sup>;D<sub>m</sub>为一组表示水稻分布的地区虚拟变量,下标m代表地区;Z<sub>1</sub>用于反映粮食收购价保护政策对水稻生产的影响,Z<sub>2</sub>用于反映粮食直接补贴政策对于水稻生产的影响;T为时间趋势项,用于反映技术进步的程度。

通过扩展的C-D生产函数模型,可进一步展开气候变化对水稻单产边际效应的分析。边际影响表示在其他投入因素不变的情况下,降水和气温每偏离其平均值一个单位,所引起的水稻单产变动百分比(记为c),由式(4)可得边际影响的计算如下:

$$c_p = \frac{\partial \ln y}{\partial \text{PRE}} = \eta_1 + 2\eta_3 \text{PRE} + \sum_{m=1}^4 \rho_m D_m \quad (5)$$

$$c_t = \frac{\partial \ln y}{\partial \text{TEM}} = \eta_2 + 2\eta_4 \text{TEM} + \sum_{m=1}^4 \delta_m D_m \quad (6)$$

式中:c<sub>p</sub>指降水每偏离其平均值一个单位对单产的边际影响,c<sub>t</sub>指气温每偏离其平均值一个单位对单产的边际影响。式(5)和(6)的右边均含有自变量,表明不同的降水量和气温,其变动对单产的边际影响不同,但根据降水量和气温的变动范围,便可求出边际影响的范围。

① 为减少气候因素与化肥、劳动力、灌溉等要素投入的相关性,本研究采用符合气象学对气候变化程度的测度方法,对气象数据进行了标准化处理。

## 2 数据来源及变量处理

### 2.1 数据来源

气象数据包括水稻生育期的月均气温和月均降水量,单位分别为 $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 和 $\text{mm}/\text{月}$ ,通过各省水稻农业气象观测站的气象数据平均得到,数据来自中国气象科学数据共享服务网<sup>①</sup>。其中,水稻包括早稻、中稻和晚稻,并根据《中国农业物候图集》确定各省份水稻的生长周期<sup>[18]</sup>。而水稻投入产出数据,包括每单位面积产量、每单位面积用工量以及每单位面积化肥、种子、农药、机械等费用,均来自《全国农产品成本收益资料汇编》(1985—2015)。需要说明的是,由于部分省份对水稻投入要素统计不全,数据存在较严重缺失,因而本研究选择了15个水稻主产省份<sup>②</sup>作为研究对象,这15个水稻主产区常年播种面积和产量占全国水稻总播种面积和总产量的90%以上,具有高度的代表性。因而,本研究所使用数据为1984—2014年15个水稻主产区的面板数据。

### 2.2 主要变量处理

本研究使用分省份的水稻的每单位面积产量、每单位面积用工量、每单位面积化肥投入、其他物质和服务费用作为投入产出要素。产出变量 $y$ 为每单位面积水稻的主产品产量度量,kg;劳动投入 $l$ ,为水稻种植过程中每单位面积劳动用工数量,标准劳动日;化肥投入 $F$ 为水稻种植过程中每单位面积化肥投入的费用,元;其他物质要素投入 $OM$ 为水稻种植过程中每单位面积除掉化肥投入后剩余的物质和服务费用,元,主要包括种子、农药、机械等的投入费用,涉及到价格的数据均用农业生产资料价格指数折算为2014年的不变价格,且为了消除异常值的影响,对投入产出变量在1%和99%分位上进行了winsorize处理;本研究采用时间趋势项( $T$ )反映技术进步的程度,时间年份对应的取值为1,2,...,31。关于制度政策变量,考虑到任何一项政策都具有时效性,1998年开始实行粮食收购价保护政策,本研究主要测定1998—2005年的制度绩效,当年份属于1998—2005年时, $Z_1 = 1$ ,否则 $Z_1 = 0$ 。而对于粮食直接补贴政策,本研究主要考察2005—2010年粮

食直补政策的制度绩效,当年份属于2005—2010年时, $Z_2 = 1$ ,否则 $Z_2 = 0$ 。对于区域虚拟变量,按照通常的地理分区,将15个省份分为五大区域<sup>③</sup>,并以华中地区作为参照对象,当省份为东北地区时, $D_1 = 1$ ,否则为0。当省份为华东地区时, $D_2 = 1$ ,否则为0。当省份为华南地区时, $D_3 = 1$ ,否则为0。当省份为西南地区时, $D_4 = 1$ ,否则为0。关于气候变量,水稻生育期月均降水量(PRE)为各省份水稻生产季节的月平均降水量;水稻生育期月均气温(TEM)为各省份水稻生产季节的月平均温度。参考魏凤英<sup>[19]</sup>和崔静等<sup>[8]</sup>的研究,本研究对气象数据进行标准化处理,通过计算气候变量偏离正常情况的距平,并用距平除以气候变量的标准差来衡量气候的“变化”程度,具体如下式:

$$C = \frac{C_i - \bar{C}}{S} \quad \text{其中 } S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2} \quad (7)$$

式中, $i$ 表示省份, $C_i - \bar{C}$ 为气候变化的距平。将气候因子标准化后,通过式(5)和(6)可分别计算出降水和气温每偏离其平均值一个单位对水稻单产的边际影响。进一步,气候变化对水稻单产的边际影响为: $(c \times (S + \bar{C}))$ 。主要变量统计结果见表1。

## 3 实证模型结果分析

### 3.1 生育期气候变化对水稻单产影响的模型估计结果

本研究使用数据为1985—2014年的省级单位面板数据,时间跨度很大,扰动项可能存在异方差和自相关。参考尹朝静等<sup>[20]</sup>的研究,采用3种方法对模型进行估计。第一,利用面板普通最小乘法(Pool OLS),并结合“面板校正标准误”(panel-corrected standard error,PCSE)对模型进行估计。第二,假设扰动项服从AR(1)过程,使用Prais-Winsten估计法对模型进行估计。第三,先进行OLS估计,再使用残差来估计扰动项的协方差矩阵,从而进行FGLS估计。表2列出了上述3种估计结果,表中(1)~(3)列分别为Pool OLS估计结果、Prais-Winsten(PW)估计结果以及FGLS估计结果。

① 中国气象科学数据共享服务网: data.cma.cn。

② 这15个省份包括辽宁、吉林、黑龙江、江苏、浙江、安徽、福建、广东、广西、四川、贵州、云南、江西、湖北和湖南。考虑到数据的完整性,将1988年后海南的相关数据和1997年后重庆的相关数据分别并入广东和四川。

③ 根据大多数学者的做法,将辽宁、吉林和黑龙江列为东北地区,江苏、浙江和安徽列为华东地区,福建、广东和广西列为华南地区,四川、贵州和云南列为西南地区,江西、湖北和湖南列为华中地区。

表 1 主要变量的统计结果

Table 1 Statistic results of main variables

变量 Variable	均值 Mean	标准差 Std. Dev	最小值 Minimum	最大值 Maximum
水稻单产/(kg/hm <sup>2</sup> ) Rice yield	6 085.32	1 106.18	3 746.20	9 019.90
劳动投入/(标准劳动日/hm <sup>2</sup> ) Labor inputs	234.53	114.36	57.45	588.00
化肥投入/(元/hm <sup>2</sup> ) Fertilizer inputs	1 974.02	423.02	912.18	3 380.11
其他物质投入/(元/hm <sup>2</sup> ) Other material inputs	2 872.05	1 080.44	960.21	6 010.96
降水量/mm Precipitation	137.86	39.45	61.45	255.95
气温/°C Temperature	22.14	1.96	17.07	25.87
粮食收购价保护政策 Crops' minimum purchase prices	0.26	0.44	0.00	1.00
粮食直接补贴政策 Policy-related grain subsidy	0.23	0.42	0.00	1.00

注：样本观察个数为 465。

Note: The number of observations is 465.

表 2 Pool OLS、Prais-Winsten 及 FGLS 估计结果

Table 2 Estimation results of Pool OLS, Prais-Winsten and FGLS methods

解释变量 Explanatory Variable	OLS(1)		PW(2)		FGLS(3)	
	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev
劳动投入(lnL)	-0.165***	0.026	-0.118***	0.032	-0.167***	0.011
化肥投入(lnF)	0.232***	0.032	0.178***	0.036	0.109***	0.015
其他物质投入(lnOM)	0.008	0.026	0.057	0.034	0.017	0.013
降水(PRE)	-0.063***	0.009	-0.035***	0.006	-0.088***	0.006
气温(TEM)	-0.048***	0.014	-0.053***	0.164	-0.096***	0.010
降水平方(PRE <sup>2</sup> )	0.007**	0.003	0.004**	0.002	0.009***	0.001
气温平方(TEM <sup>2</sup> )	-0.065***	0.0036	-0.039***	0.010	-0.041***	0.005
降水×东北地区(PRE×NE)	0.047**	0.023	-0.011	0.022	0.084***	0.012
降水×华东地区(PRE×EC)	0.013	0.013	0.003	0.008	0.017*	0.009
降水×华南地区(PRE×SC)	-0.048***	0.013	-0.029**	0.011	0.002	0.008
降水×西南地区(PRE×SW)	0.132***	0.035	0.066***	0.023	0.115***	0.014
气温×东北地区(TEM×NE)	-0.028	0.038	0.039	0.043	0.068***	0.021
气温×华东地区(TEM×EC)	-0.015	0.014	0.005	0.017	-0.025***	0.010
气温×华南地区(TEM×SC)	0.002	0.013	-0.021	0.017	0.041***	0.008
气温×西南地区(TEM×SW)	-0.041*	0.045	-0.005	0.044	0.036*	0.021
粮价政策(Z <sub>1</sub> )	0.031***	0.015	0.026	0.017	0.049***	0.006
Grain price policy(Z <sub>1</sub> )						

表2(续)

解释变量 Explanatory Variable	OLS(1)		PW(2)		FGLS(3)	
	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev
粮食直补( $Z_2$ ) Grain direct subsidy( $Z_2$ )	-0.009	0.018	-0.001	0.018	0.009	0.006
时间趋势项 Time trend	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002***	0.000
常数项 Constant term	5.301***	0.167	5.167***	0.212	5.835***	0.094
调整 $R^2$ Adjust $R^2$	0.690		0.965		0.910	
观察值数 Observation	465		465		465	

究竟选择哪种估计结果,可通过组间异方差、组内自相关及组间同期相关的检验结果来确定。通过Greene Wald 检验结果表明面板数据存在组间异方差, Wooldridge Wald 检验进一步说明存在一阶组内自相关。最后, Breusch-Pagan LM 检验结果表明存在组间同期相关<sup>①</sup>。因而,本研究最终选择 FGLS 估计结果。FGLS 估计结果的调整  $R^2$  为 0.910, 表明模型结果总体比较好, 水稻单产影响因素方程的解释能力为 91.00%, 即气候因素加上控制变量劳动投入、化肥投入、其他物质投入、技术进步及制度

政策能够对水稻单产的 91.00% 做出解释。为了进一步保证模型估计结果的稳健性, 本研究通过删减变量的方式进行了稳健性检验, 具体结果见表 3。其中, 模型 1 考察气候因素对水稻单产的线性影响, 而模型 2 考虑了气候因素对水稻单产的非线性影响, 模型 3 则考虑了气候因素对水稻单产的区域性差异影响。这些回归方程中主要解释变量的显著性水平和系数及其符号与表 2 中(3)列的估计结果相比, 基本上没有显著差异。因此, 本研究模型估计结果比较稳健。

表3 FGLS 估计的稳健性检验结果

Table 3 Robustness test's results of FGLS estimate

自变量 Independent variable	模型 1 Model 1		模型 2 Model 2		模型 3 Model 3	
	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev
劳动投入(lnL)	-0.121 9***	0.010	-0.172 9***	0.011	-0.170***	0.013
化肥投入(lnF)	0.362 9***	0.021	0.165 9***	0.020	0.171***	0.021
其他物质投入(lnOM)	-0.099 9***	0.016	0.061 9***	0.016	0.017	0.015
降水(PRE)	-0.024 9***	0.004	-0.054 9***	0.004	-0.049***	0.008
气温(TEM)	-0.083 9***	0.004	-0.047 9***	0.004	-0.158***	0.009
降水平方(PRE <sup>2</sup> )			0.004 9***	0.001		
气温平方(TEM <sup>2</sup> )			-0.070 9***	0.003		
降水×东北地区(PRE×NE)					0.028**	0.013
降水×华东地区(PRE×EC)					0.014	0.009

① Greene Wald 检验的统计量为 1 467.12, 对应的  $P$  值为 0.000 0; Wooldridge Wald 检验的统计量为 3.903, 对应的  $P$  值为 0.068 2; Breusch-Pagan LM 检验的统计量为 221.025, 对应的  $P$  值为 0.000 0。

表 3(续)

自变量 Independent variable	模型 1 Model 1		模型 2 Model 2		模型 3 Model 3	
	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev	系数 Coefficient	标准误 Std. Dev
	降水×华南地区(PRE×SC)					-0.048***
降水×西南地区(PRE×SW)					0.093***	0.017
气温×东北地区(TEM×NE)					0.212***	0.013
气温×华东地区(TEM×EC)					-0.020	0.013
气温×华南地区(TEM×SC)					0.040***	0.010
气温×西南地区(TEM×SW)					0.082***	0.025
粮价政策( $Z_1$ ) Grain price policy( $Z_1$ )	0.036 9***	0.005	0.051 9***	0.006	0.051***	0.006
粮食直补( $Z_2$ ) Grain direct subsidy( $Z_2$ )	-0.049 9***	0.009	0.012	0.008	0.014**	0.007
时间趋势项 Time trend	0.006 9***	0.001	-0.001 9**	0.001	0.001	0.001
常数项 Constant term	4.959***	0.103	5.400 9***	0.099	5.559***	0.107
调整 $R^2$ Adjust $R^2$	0.807		0.879		0.886	
观察值数 Observation	465		465		465	

### 3.2 生育期气候变化对水稻单产的影响

本研究从表 2 的 FGLS 估计结果可以得出以下结论：

从降水变化来看，首先，水稻生育期降水量增加对水稻单产具有显著的负向影响。其次，考察降水变化二次项对水稻单产的影响发现，降水变化二次项对水稻单产具有显著的负向影响。此外，分地区来看，降水增加对东北地区、华东地区、华中地区以及华南地区的水稻单产具有负向影响，而对西南地区水稻单产具有显著的正向影响。从气温变化来看，水稻生育期气温上升对水稻单产具有显著的负向影响，且气温与水稻单产之间存在显著的“倒 U 型”关系。此外，分地区来看，气温上升对华东地区、华中地区、华南地区以及西南地区具有负向影响，而对东北地区水稻单产具有显著的正向影响。

另外，其他控制变量对水稻单产的影响。劳动投入对水稻单产具有显著的负向影响，而化肥投入以及其他物质投入对水稻单产具有积极影响。同时，粮价政策、粮食直补政策以及技术进步等因素对

水稻单产的提高起着促进作用。劳动投入对水稻单产表现出负向影响，这可能与农村仍存在剩余劳动力有关。另外，农户可通过增加化肥施用量和种子、农药、机械等其他物质投入来增长水稻单产，其中化肥投入对水稻单产提高的影响最大。可见，在水稻单产增加过程中，化肥、种子、农药等传统要素投入仍发挥着重要作用。

### 3.3 生育期气候变化对水稻单产的边际影响

根据扩展的 C-D 生产函数参数估计结果，利用式(5)和(6)，结合气候因素的标准差和均值，分别测算出生育期降水和气温的变动对各地区水稻单产的边际影响(如表 4)。

从表 4 可知，水稻生育期降水增加导致全国大部分地区水稻单产减少，这一结论与崔静等的研究结果比较一致<sup>[8]</sup>。具体到各地区来看，生育期内月平均降水量每增加 10 mm，东北地区水稻单产减产 0.386%~0.506%，华东地区水稻单产减产 1.469%~1.743%，华中地区水稻单产减产 1.040%~6.076%，华南地区水稻单产减产 0.968%~1.089%。而月平均降水量每增加 10 mm，西南地

表4 生育期气候变化对各地区水稻单产的边际影响

Table 4 Marginal impact of climate change in rice's growing seasons on rice production in each region %

地区 Region	降水 Precipitation		气温 Temperature	
	下界 Lower bound	上界 Upper bound	下界 Lower bound	上界 Upper bound
	东北地区 Northeast region	-0.506	-0.386	0.454
华东地区 East region	-1.743	-1.469	-4.874	-2.371
华中地区 Central region	-6.076	-1.040	-4.636	-2.305
华南地区 South region	-1.089	-0.968	-4.323	-0.177
西南地区 Southwest region	0.427	0.501	-0.937	-0.807

注:表中数值分别表示月平均降水每增加 10 mm 单产变动的百分数,月平均温度每升高 1 °C 单产变动的百分数。

Notes: The values in the table represent the 10 mm increase of monthly mean precipitation caused the percentage changes of rice yield, the 1 °C increase of monthly mean temperature caused the percentage changes of rice yield.

区水稻单产提高 0.427%~0.501%。这一研究结果与周曙东等<sup>[5]</sup>的研究结果比较一致。西南地区降水增加有利于水稻单产提高,主要原因是气候变化使西南地区高温热害、伏旱等加重,例如,2010 西南地区发生特大干旱,适当的降水增加有利于缓解旱情,有助于水稻单产的提高。

水稻生育期内气温升高导致全国大部分地区水稻单产减少。具体到各地区来看,月平均气温每升高 1 °C,华东地区水稻单产减产 2.371%~4.874%,华中地区水稻单产减产 2.305%~4.636%,华南地区水稻单产减产 0.177%~4.323%,西南地区水稻单产减产 0.807%~0.937%。而月平均气温每升高 1 °C,东北地区水稻单产提高 0.454%~3.439%。南方水稻单产的下降幅度与周曙东等<sup>[5]</sup>及 Chen 等<sup>[7]</sup>的研究结果比较一致,比 Peng 等<sup>[2]</sup>的研究结果要小,而东北水稻单产的增产幅度与侯雯嘉等<sup>[21]</sup>的研究结果比较接近。南方地区水稻生育期内气温上升不利于水稻单产提高,可能的原因是气温上升使得高温、干旱等极端气候更加频繁,对水稻生产造成了不利影响。东北地区气温上升有利于水稻单产提高,可能的原因是气温升高缓解了热量不足对水

稻生长发育的限制,温度的适度升高有助于水稻的物质生产和产量形成,从而东北地区气候变暖有利于增加水稻的单产<sup>[22]</sup>。

#### 4 结论与政策建议

本研究运用降水、气温等气象数据以及水稻投入产出数据,探讨了气候变化对我国水稻单产的影响,并系统考察了气候因素对水稻单产非线性及区域差异性的影响程度,得出以下结论:

第一,总体上看,水稻生育期内降水增加对水稻单产具有负向影响,但不同地区具体影响所有不同。同时,降水变化的二次项对水稻单产具有显著的负向影响。另外,降水增加对西南地区水稻单产的边际影响为正,对东北地区、华东地区、华中地区以及华南地区水稻单产的边际影响却为负。

第二,总体上看,水稻生育期内气温升高对水稻单产具有负向影响,且气温变化的二次项与水稻单产存在“倒 U 型”关系。此外,气温升高对华东地区、华中地区、华南地区以及西南地区水稻单产的边际影响为负,而对东北地区水稻单产的边际影响为正。

根据以上研究结论,本研究提出如下政策建议:第一,水稻生长过程与气候资源条件密切相关,随着全球气候变暖加剧,尽管部分地区热量资源得到改善,但加剧了水分供需矛盾。气候变化对我国水稻生产以不利影响为主,但也存在着正向影响。因此,各地区必须从当地实际出发,结合自身水稻生产现状及气候资源,有针对性地提出适应气候变化的相关举措。第二,气温升高使得高温热害、干旱等极端气候更加频繁,除东北地区外,气温升高对水稻单产具有显著的不利影响。因此,各地区应强化农业气象灾害的预测工作,加强农田水利设施的建设和维护,增强防御气象灾害的能力,减轻高温、干旱等极端气候对水稻生产的不利影响。同时,加大对农业补贴和农业保险的支持力度,减少农户的农业生产风险。第三,化肥、种子、机械等要素投入对水稻增产具有重要作用。因此,要重视化肥、种子、机械等要素投入,更要重视改善传统要素投入的质量和效果。通过开展科学施肥、改良水稻新品种、加强水稻生产管理等举措,真正地发挥要素投入对提高水稻单产的作用。

## 参考文献 References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report (AR5) [EB/OL]. [2014-07-08]. <http://www.ipcc.ch/>
- [2] Peng S, Huang J, Sheehy J E, Laza R C, Visperas R M, Zhong X. Rice yields decline with higher night temperature from global warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(27):9971-9975
- [3] Xiong W, Conway D, Lin E, Holman I. Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production[J]. *Climate Research*, 2009, 40(1): 23-35
- [4] Lobell D B, Field C B, Cahill K N, Bibilils C. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(2):208-218
- [5] 周曙东,朱红根.气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 152-157  
Zhou S D, Zhu H G. Economic impacts of climate change on rice yield in south China and its adaptation strategies[J]. *China Population · Resources and Environment*, 2010, 20 (10): 152-157(in Chinese)
- [6] 矫梅燕,周广胜,陈振林.气候变化对中国农业影响评估报告(No.1)[M].北京:社会科学文献出版社,2014
- Jiao M Y, Zhou G S, Chen Z L. *Assessment Report on the Impact of Climate Change on Agriculture in China (No. 1)* [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2014 (in Chinese)
- [7] Chen C, Zhou G, Li Z. Impacts of climate change on rice yield in China from 1961 to 2010 based on provincial data [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7):1555-1564
- [8] 崔静,王秀清,辛贤,吴文斌.生长期气候变化对中国主要粮食作物单产的影响[J]. *中国农村经济*, 2011(9):13-22  
Cui J, Wang X Q, Xin X, Wu W B. Impacts of climate change in the growing season on the yield of main grain crops in China [J]. *China Rural Economy*, 2011(9): 13-22(in Chinese)
- [9] 陈超,庞艳梅,张玉芳,马振峰.四川单季稻产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(2):331-342  
Chen C, Pang Y M, Zhang Y F, Ma Z F. Sensitivity and vulnerability of single-cropping rice to climate change in Sichuan[J]. *Chinese Journal of Natural Resources*, 2016, 31 (2):331-342(in Chinese)
- [10] 许信旺,孙满英,方宇媛,何小青,薛芳,付伟,毛敏.安徽省气候变化对水稻生产的影响及应对[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9):1755-1763  
Xu X W, Sun M Y, Fang Y Y, He X Q, Xue F, Fu W, Mao M. Impact of climate change on rice production in Anhui Province and its countermeasures [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 30(9):1755-1763(in Chinese)
- [11] 朱晓莉,王筠菲,周宏.气候变化对江苏省水稻产量的贡献率分析[J]. *农业技术经济*, 2013(4):53-58  
Zhu X L, Wang Y F, Zhou H. Analysis on the contribution rate of climate change to rice yield in Jiangsu Province[J]. *Journal of Agricultural Technical Economics*, 2013(4): 53-58(in Chinese)
- [12] 姜岩,朱晓莉,周宏,王筠菲.气候变化对江苏水稻生产效率变动的贡献[J]. *农业技术经济*, 2015(12):109-116  
Jiang Y, Zhu X L, Zhou H, Wang J F. Effects of climate change on the changes of rice production efficiency in Jiangsu Province[J]. *Journal of Agricultural Technical Economics*, 2015(12):109-116(in Chinese)
- [13] 付莲莲,朱红根,周曙东.江西省气候变化的特征及其对水稻产量的贡献:基于“气候—经济”模型[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(4):590-598  
Fu L L, Zhu H G, Zhou S D. The characteristics of climate change and its contribution to the rice yield in Jiangxi Province: Based on "climate-economy" model [J]. *Journal of Resources and Environment in Yangtze River Basin*, 2016, 25 (4):590-598(in Chinese)
- [14] 尹朝静,李谷成,高雪.气候因素对水稻单产影响的实证分析:基于湖北农户层面的分层模型[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(8):1433-1444  
Yin C J, Li G C, Gao X. An empirical analysis of climatic factors impact on rice yield: Based on household level of hierarchical model [J]. *Chinese Journal of Natural*

- Resources, 2017, 32(8):1433-1444. (in Chinese)
- [15] 陈帅,徐晋涛,张海鹏. 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,2016(5):2-15  
Chen S, Xu J T, Zhang H P. Effects of climate change on China's grain production: An empirical analysis based on panel data at county level[J]. *Chinese Rural Economy*, 2016(5):2-15(in Chinese)
- [16] 麻吉亮,孔维升,陈永福. 气候因素对玉米单产影响的实证分析:基于河北农户数据[J]. 农业技术经济,2015(4):19-25  
Ma J L, Kong W S, Chen Y F. An empirical analysis of climatic factors impact on corn yield: Based on household data of Hebei Province [J]. *Journal of Agricultural Technical Economics*, 2015(4):19-25(in Chinese)
- [17] 尹朝静,李谷成,高雪. 气候变化对中国粮食产量的影响:基于省级面板数据的实证[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):89-94  
Yin C J, Li G C, Gao X. Impacts of climate change on China's grain production: Empirical analysis based on provincial panel data [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016,30(6):89-94(in Chinese)
- [18] 张福春,王德辉,丘宝剑. 中国农业物候图集[M]. 北京:科学出版社,1987  
Zhang F C, Wang D H, Qiu B J. *China Agricultural Phenomenon Atlas* [M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese)
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007  
Wei F Y. *Modern Climate Statistic Diagnosis and Prediction Technology* [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007(in Chinese)
- [20] 尹朝静,李谷成,范丽霞,高雪. 气候变化、科技存量与农业生产率增长[J]. 中国农村经济,2016(5):16-28  
Yin C J, Li G C, Fan L X, Gao X. Climatechange, accumulation of science and technology and agricultural productivity growth[J]. *Chinese Rural Economy*, 2016(5):16-28(in Chinese)
- [21] 侯雯嘉,耿婷,陈群,陈长青. 近20年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(1):249-259  
Hou W J, Geng T, Chen Q, Chen C Q. Effects of climate warming on the growth and yield of paddy rice in Northeast China in recent 20 years [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,26(1):249-259(in Chinese)
- [22] Zhang W J, Chen J, Xu Z Y, Chen C Q, Deng A X, Qian C R, Dong W J. Actual responses and adaptations of rice cropping system to global warming in Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012,45(7):1265-1273

责任编辑:王岩