

气候变化对我国农业生产的影响^{*}

——基于多投入多产出生产函数的分析

侯麟科 (山东大学经济研究院 济南 250100)

仇焕广 (中国人民大学农业与农村发展学院 北京 100872)

汪阳洁 (中南大学商学院 长沙 410083)

孙来祥 (美国马里兰大学地理科学系 College Park 20742)

内容提要 本文基于 2005 年 706 县 39551 个农户的农业投入产出数据和气象观测站数据,利用多投入多产出生产函数,估计了气候变化对我国不同区域农业生产的影响。根据模型估计结果进一步模拟了 IPCC 气候情景方案 A2 和 B2 下,气候变化对我国未来不同区域农业生产的影响。计量经济模型估计结果表明,气温升高对土地的农业生产具有负面影响,其中西北地区受温度上升的不利影响最大;降水增加对除南方以外的所有区域都有正面影响。未来气候变化对我国农业生产的影响在区域间存在较大差异,未来气候变化将对华北和华东地区的农业生产产生正面影响,对西北地区的农业生产产生负面影响。

关键词 气候变化 农业生产 多投入多产出生产函数

DOI:10.13246/j.cnki.jae.2015.03.001

一、引言

气候变化对农业生产的影响已经引起各国政府和学术界的广泛关注。政府间气候变化专门委员会(IPCC)撰写的评估报告(International Panel on Climate Change,简称 IPCC,2007)表明,未来全球气候变暖的趋势明显。在全球气候变化背景下,中国的气候与全球表现出类似的变暖趋势,主要表现为气温升高和北方降水减少,而且呈现地区和季节不平衡特征。根据《第二次气候变化国家评估报告》,近 100 年来中国地表气温年均升高 0.5~0.8℃;全国年均降水量在 20 世纪 50 年代以后逐渐减少,平均每 10 年减少 2.9 毫米(第二次国家气候变化评估委员会,2011)。由于气候是影响农业产出最重要的投入要素之一,因此,气候变化对未来我国农业生产特别是种植业生产可能产生重要影响。

气候变化对农业影响的早期研究主要以自然科学家为主,近期经济学者也开始对该问题展开研究,但这些研究无论在方法还是结论上都存在较大争论。例如,Tao 等(2008)关于气候变化对中国水稻影响的研究发现,气候变化有助于提高水稻单产;相反,徐斌等(1999)的研究却认为气候变化会对中国水稻生产带来负面影响。陈怀亮等(2006)对河南小麦单产研究发现,随着气温升高,小麦单产会增加,而 Tao 等(2006)的研究却发现,气温升高将导致小麦单产下降。利用同样的经济计量模型但使用不同的数据,Liu 等(2004)的研究发现气温升高总体上有利于我国的农业生产,而 Wang 等

^{*} 项目来源:国家自然科学基金项目(编号:71222302、71473255)、中国博士后科学基金项目(编号:2014T70656、2013M531570)。仇焕广为本文通讯作者

(2008) 的研究却认为气温升高对农业生产会有负面影响。

从已有研究来看,分析气候变化对农业影响的方法主要分为自然科学家采用的作物模型和经济学家采用的计量经济模型方法两大类。作物模型主要基于作物生长理论和控制性生产实验,探索气候变化对作物生长的影响(Adams 等,1998)。作物模型的优势在于,它完全基于作物生长过程机理,通过控制性试验或模拟研究气候变化对作物生长期生产的影响(Stockle 等,2003; Lobell 等,2013)。但作物模型的缺点在于,第一,由于作物本身生长过程的复杂和动态性,大量参数需要被假定,这可能导致作物模型的结果受模型参数设定偏差的影响(Iizumi 等,2009; Lobell 等,2010);第二,传统作物模型的实验或模拟研究并没有考虑农民对气候变化的适应行为(Mendelsohn 等,1999; Mendelsohn 等,1994),从而可能高估气候变化对农业的负面影响(Mendelsohn 等,1994)。

与自然科学家采用控制性实验或模拟方法不同,经济学家更倾向于采用历史统计观察数据,利用计量经济模型估计气候变化对农业产出的经济影响(杜文献,2011; Wang 等,2012)。计量经济模型的优点在于,能够控制农户适应性行为和其他要素变化对农业生产的影响。最具代表性的经济计量模型是由 Mendelsohn 等(1994)所开创的李嘉图模型,其最大的优势在于可以通过观测数据横截面上的变动识别包含农民适应行为在内的气候变化对农业的影响。目前国内外分析气候变化对农业影响的研究中大多数采用李嘉图模型。然而,针对研究结果出现的差异,李嘉图模型引发了大量的争议。其中面临的最大挑战在于,基于横截面数据的李嘉图模型无法有效控制土壤特征等众多不可观测效应,使模型存在潜在的遗漏变量问题(Deschênes 等,2007)。鉴于李嘉图模型采用横截面数据估计的不足,Deschênes 等(2007)建议气候变化的影响研究应该关注跨时间天气变异,并提出利用面板数据的固定效应估计对李嘉图模型进行估计。李嘉图模型的另外一个缺点在于,被解释变量是土地的总收益或土地价值,因此,利用该模型所得到的估计结果无法分析气候变化对农作物产量的影响,进而制约了运用该模型分析未来气候变化对农作物供需、贸易及粮食安全等问题。针对上述不足,Schlenker 等(2009)运用简化式的计量经济模型估计了气候变化对不同作物单产的影响。该模型的被解释变量是不同作物的单产,解释变量主要是表征气候的各种指标。由于单产能够直接反应当年作物的生长结果,相比李嘉图模型而言,更加适合直接分析气候变化对农业的影响。但与作物模型类似,该模型方法的缺点是没有考虑农民对气候变化的适应行为,因此同样可能高估气候变化对农业的负面影响。与简化式计量模型类似的另一类估计方法是直接将气候变量引入传统生产函数进行估计,该方法同样因缺乏对农民适应的考虑而面临潜在估计偏差(崔静等,2011; 刘天军等,2012)。

国内外文献大多数研究基于宏观数据(如县级数据),无法模拟农户的决策行为。特别是国内研究更加侧重于气候变化机理和作物生长模拟的分析,少数宏观经济的分析(例如基于 CGE 模型的研究)也缺乏微观实证支持,从农户视角出发进行的实证研究较少。事实上,缺乏基于大规模实证调查数据开展的研究,也在很大程度上制约了气候变化影响的宏观模拟分析。

本文试图在研究方法上引入一种新的估计模型——多投入多产出生产函数,以期在一定程度上拓展当前气候变化的影响研究。相比已有的评估模型,多投入多产出生产函数模型具有如下 3 方面的优点:第一,传统的多投入单产出模型(例如生产函数)只能考察气候变化对单一农作物生产的影响,而多投入多产出生产函数能够同时考察多种农作物的产出变化,因而可以考虑农民通过调整作物结构等对气候变化的适应行为;第二,与李嘉图模型只能评估气候变化对土地价值或农业总收益的影响相比,多投入多产出模型能够直接估计气候变化对农作物产量的影响;第三,从实际应用看,可以在一定程度上克服数据的限制,现有农户数据或者县级数据无法将农民的生产性投入从不同作物中分离出来,因此,无法用传统的多投入单产出生产函数估计气候变化的影响。

二、多投入多产出生产函数模型

(一) 基本模型

假定转换函数中投入和产出满足可分离性。函数形式如下:

$$Q(Y) = F(X; IR, T) \times \exp(\varepsilon) \quad (1)$$

其中 $Q(Y)$ 表示作物优化指数, $F(X; IR, T)$ 是投入反应函数, 其中 Y 、 X 、 IR 和 T 分别代表产出(单个作物产量)、投入(化肥、土地和劳动力等)、作物生产条件(如作物耕作区或者灌溉指数)和气候变量(气温和降水)。 ε 是误差项, 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 。作物优化指数 $Q(Y)$ 设定为常替代弹性(Constant Elasticity Substitution)的凸函数:

$$Q(Y_h) = \left(\sum_{m=1}^M \theta_m \times Y_{hc}^{\theta_0} \right)^{\frac{1}{\theta_0}} \quad (2)$$

其中, 下标 h 、 c 代表第 h 个地区第 c 种作物, 其中 θ_m 和 θ_0 为待估参数, 要求 $\theta_m \geq 0$ 和 $\theta_0 \geq 1$ 。 $\theta_1 \geq 1$ 保证了常替代弹性函数的凸性。因此, 作物优化指数是各类作物产量的非线性加权值。

投入反应函数设定为:

$$F_h = \left(\prod_{k=1}^K X_{hk}^{\alpha_k} \right)^{\frac{1}{\alpha_0}} \times \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^J I_{hi} \beta_i) \times \exp(\gamma_0 + \sum_{g=1}^G T_{hg} \gamma_g) \times \exp(\varepsilon_h) \quad (3)$$

其中 F_h 为第 h 个地区作物的产量, X_{hk} 为第 h 个地区第 k 种投入变量, 包括劳动力、机械和化肥投入, I_{hi} 为第 h 个地区第 i 个作物生产条件, 包括灌溉条件和复种指数, T_{hg} 为第 h 个地区的第 g 个气候变量, 包括气温和降水变量, ε 为残差项, 其余 α_k 、 β_0 、 β_i 、 γ_0 和 γ_g 为待估计参数。气温和降水变量采用 4 个季节平均值及其二次项。(3) 式右边第一部分设置为传统的 Cobb-Douglas 生产函数形式, 第二部分控制了灌溉和复种指数, 第三部分为气温和降水变量。

转换函数可以按两步法解释。第一步, 转换函数等式右边包括了投入、灌溉条件和复种指数以及气温和降水等气候指标, 可以理解为将这些投入转换为生产能力; 第二步, 从转换函数等式左边看, 生产能力在作物间最优分配以最大化农户利润。假定农户可以调整投入和选择作物结构以最优其土地收益, 为了估计 (1) 式中的参数, 可以通过对公式两边取对数然后最小化 (4) 式进行参数估计:

$$S = \sum_{h=1}^H [\ln(Q(Y_h)) - \ln(F_h)]^T M^{-1} [\ln(Q(Y_h)) - \ln(F_h)] \quad (4)$$

其中 H 是农户家庭数量, M 是误差项 $\varepsilon_h = [\ln(Q(Y_h)) - \ln(F_h)]$ 的正定协方差矩阵。

(二) 多投入多产出模型的数值估计方法

由于函数非线性以及参数可能是非凸的, 因此采用标准数值优化程序直接估计多投入多产出模型会有难度。本研究利用迭代程序进行参数估计, 具体分如下 5 个步骤:

第一, 分别估计投入方程和产出方程, 得到一组初值 $q_1 = Q/H_1$, 计算 $q_1 = \bar{Q}/H_1$ 。

第二, 由线性回归, 对投入方程 $q_1 = C_1 \times G_1/H_1 + \varepsilon_1$ 进行一阶泰勒展开, 迭代计算投入方程的参数, 直到结果收敛, 得到的初始估计值。

第三, 将第二步初始估计值结果代入原方程, 进一步估计初始非线性的投入方程。

第四, 对固定的替代参数 α_0 , 估计非线性形式的产出方程 $q_1 = Q/H_1 + \varepsilon_2$ 。

第五, 不断重复第三步的迭代计算, 更新指数 q_1 , 直到结果收敛。

总体上看, 第一和第二步赋予初始值, 第三到第五步是实际的估计过程。指数 q_1 起到固定作用, 可以很大程度上提高回归结果的拟合程度。理论上可以同时估计投入方程和产出方程。但由于估计的问题可能是非凸的, 因此有可能只得到局部最优解。也可以检验估计结果的稳健性, 可以对得到的

最优值加以扰动,然后计算出似然比,检验扰动对其他参数的影响,以测试估计结果是否稳健。

(三) 模型参数显著性检验

基于前文估计的参数,土地生产率百分比变化可由下式计算:

$$E_C = \frac{F_s}{F_b} - 1 \quad (5)$$

其中 E_C 定义为县级生产率变化, F_s 表示气候变化情景下的产出指数, F_b 表示基准年 2005 年的产出指数,分别将估计出的参数和相应变量均值代入公式(3)计算可得。

为了验证参数的有效性,此处采用似然比进行诊断检验。模型参数可以表示为 θ_1 和 θ_2 ,其中 θ_1 为待检验参数, θ_2 为除了 θ_1 以外的其他参数。原假设为 $\theta_1 = \bar{\theta}_1$, θ_2 为非限制式下的估计参数。参数的显著性水平可以由 F-检验:

$$F(j, n-m) = \frac{S(\bar{\theta}_1, \theta_2)}{S(\theta_1, \theta_2)} \times \frac{n-m}{j} \quad (6)$$

其中 n 、 m 和 j 分别是观测值、参数和限制式个数。 $S(\bar{\theta}_1, \theta_2)$ 是给定下 $\bar{\theta}_1$ 条件下对应于受限制似然方程的残差平方和, $S(\theta_1, \theta_2)$ 是对应于非限制似然方程的残差平方和。

三、实证分析

(一) 样本选择及数据处理

本文所使用农户农业生产数据来自国家统计局(CNBS) 2005 年农村住户统计数据^{*}。气象数据来自中国地面气候资料月值数据集,模型估算所用气候数据是将气象站点数据插值到样本县所得到的。插值使用了克里金(Kriging)方法,取每个栅格(GRID)周围相邻 8 个栅格气温或降水量的平均值作为该栅格的值,然后再取每个县内全部栅格的平均气温或降水量作为该县月度气温或降水值。

根据各个样本县农业种植结构、自然和社会经济条件的差异,将样本县分为六大区域,分别为东北、华北、华东、南方、西南和西北。^{**} 国家统计局(CNBS) 2005 年共抽取样本 60000 个农户,通过与国家统计局合作,最终随机选取了 706 个县的 39551 个农户样本数据。

调查数据集包括农户种植业生产的详细信息。种植业主要作物分为 12 类,即小麦、稻谷、玉米、其他谷物、薯类、棉花、油料、麻类、糖料、烟草、蔬菜和水果。数据提供了每种作物的播种面积和产量。数据集还提供了农户家庭农业生产方面的信息,包括家庭耕地面积、化肥、农药、机械投入情况。家庭人口信息包括成员年龄、教育程度和农业劳动时间。

六大区域样本农户的种植结构差异较大。华北主要种植作物集中于小麦、稻谷、其他谷物、薯类、棉花、油料和蔬菜;东北地区主要种植作物集中于稻谷、玉米、薯类、油料和蔬菜;华东地区和南方地区种植结构非常类似,主要种植作物集中于小麦、稻谷、玉米、薯类、棉花、油料和蔬菜;西南地区主要种植作物集中于小麦、稻谷、玉米、薯类、油料和蔬菜;西北地区主要种植作物则集中于小麦、玉米、其他谷物、薯类、棉花、油料和蔬菜。

* 本文数据通过作者与国家统计局合作获得,但之后国家统计局的数据不再对外使用,所以难以获得近期的数据。虽然数据为 2005 年的数据,但不会对本文的分析结果和结论产生明显影响,因为本文主要使用截面数据来分析气候变化的影响,即通过区域的气候条件差异来识别其对农业生产的影响。

** 区域划分在地理位置的基础上,按照气候等因素进行了调整。全国六大区域所包含的省份如下:华北地区(包括北京、天津、河北、山西、山东、河南),东北地区(包括辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古),华东地区(包括湖北、江苏、安徽、江西、浙江、福建、上海),南方地区(包括湖南、广东、广西、海南),西南地区(包括四川、云南、贵州、重庆),西北地区(包括宁夏、青海、陕西、甘肃)。西藏和新疆未列入分析。

由于种植业生产基本上是以户为单位,每户是一个决策单位。因此,所收集的数据按户统计了农业主要投入和产出情况,并没有区分不同作物的投入情况。主要农业生产要素投入包括耕地、劳动力、机械投入和化肥投入等(见表 1)。六大区域户均生产规模差异比较大,主要是由于土地资源禀赋的差异。其中,东北户均耕地规模最大,每户经营 22.7 亩土地;户均耕地最少的是西南地区,户均耕地面积 4.5 亩。土地规模影响到机械投入。规模最小的西南地区农户,其机械投入水平也最低,仅为每户 24 元。其他方面的投入,如劳动力和化肥投入的区域间差异相对较小。

复种指数代表每块土地每年实际利用的次数,与气候条件直接相关。热量和水分条件充足的地区,如西南地区,每亩地平均可以种 2.6 次。热量和水分条件差的地区(东北)每亩土地平均种 1.2 次。在北方,一些种植技术推广,如蔬菜冬季温室大棚技术,在一定程度上提高了土地的复种指数。以东北为例,按自然条件,东北应该是一年一熟,数据中复种指数为 1.2,就反映了新技术提高了土地实际利用率(见表 1)。

表 1 2005 年六大区域全年户均种植业生产投入

项目	华北	东北	华东	南方	西南	西北
耕地面积(亩)	12.3	22.7	6.2	5.8	4.5	11.8
播种面积(亩)	15.2	25.6	12.4	11.4	9.7	14.3
劳动力(月)	14.1	12.8	14.3	15.2	17.5	17.4
机械投入(元)	287.3	275.5	138.4	101.8	24	411.4
化肥投入(公斤)	610	860	730	730	530	670
灌溉面积比例(%)	0.6	0.2	0.8	0.7	0.4	0.6
复种指数	1.4	1.2	2.2	2.1	2.6	1.4

数据来源:国家统计局

表 2 列出了六大区域平均季度温度和降水情况。温度和降水按季节进行了平均。无论是季节平均温度还是降水,六大区域气候差异比较大。就温度而言,春季、夏季和秋季温度对大多数作物生长影响比较大,春秋两季区域之间的温度差异要大于夏季差异。就降水而言,六大区域春季降水差别最大,从最多的南方(335.9mm)到降水稀缺的华北地区(67.6mm)和西北地区(71.4mm)。

表 2 2005 年六大区域平均季度温度和降水

项目	华北	东北	华东	南方	西南	西北
冬季温度(度)	-6.4	-14.1	4	6.1	6.6	-5.4
春季温度(度)	11	6	15.9	18	16.1	10.1
夏季温度(度)	23.6	21.5	26.9	26.8	22.8	20.1
秋季温度(度)	10.7	7.7	18.5	19.2	15.9	8.5
冬季降水(mm)	17.9	29.3	193.7	128.1	50	15.8
春季降水(mm)	67.6	137.6	323.6	335.9	227.2	71.4
夏季降水(mm)	289.5	421.9	540.2	568.7	538.8	196
秋季降水(mm)	81.3	75.8	249.6	232.4	206.4	110.3

数据来源:国家气象局

(二) 多投入多产出生产函数模型参数估计

为了估计多投入多产出生产函数(包括 12 种农作物)的各个参数,利用 GAMS 软件,本文构造了

迭代优化程序。由于函数形式比较复杂,本文构造了一套非线性算法,按照上面的方法进行估计。

由于对多投入多产出生产函数的估计采用非线性的拟合方法,因此可以对拟合后的残差进行分析,以判断参数拟合的效果。本研究使用 Shapiro - Wilk 检验残差是否符合正态分布,检验结果报告见表 3。结果显示,所有 6 个地区均不能拒绝残差服从正态分布的原假设,说明模型参数对数据拟合程度较高,可以以此为基础进行气候影响分析。

表 3 模型残差 Shapiro - Wilk 检验

项目	华北	东北	华东	南方	西南	西北
Shapiro - Wilk's W	0.976	0.987	0.989	0.979	0.959	0.988
Prob < W	0.233	0.816	0.876	0.237	0.167	0.82

数据来源: 作者计算

表 4 和表 5 分别给出了多投入多产出模型的要素投入和产出的参数估计结果以及气候要素的参数估计结果。由表 4 的似然比统计量可以看出,除了个别参数外,绝大部分估计的常规生产要素变量参数在 5% 水平上显著异于零。这说明模型函数形式设定较合理,能够很好拟合数据。

本文重点关注气候变量的参数。由表 5 的似然比统计量可以看出,绝大部分估计的气候变量参数在 5% 水平上显著异于零。一方面,这说明模型设置较合理,能够很好拟合数据;同时,也说明参数的估计结果用于气候情景模拟的可信度较高。同一气候参数在各个区域间差异明显,以冬季温度为例,在东北、华东和西南地区为负,在华北、南方、西南和西北则为正值(见表 5)。这说明气温对作物的影响机制有明显的区域差异。同时,这也说明分区域估计参数比较合理,其结果优于将全国数据集在一起的估计结果。后者只能得到估计一套参数,可能会掩盖区域间气候影响机制的差异。

(三) 气候因素对农业生产的边际影响

由于多投入多产出模型函数形式为非线性的,无法直接比较系数大小。基于多投入多产出模型参数的估计结果,估算了气候变化对农户土地生产率的边际影响(见表 6)。除了东北,气温升高对其他地区农户土地生产率的影响均为负。在所有受气候不利影响的区域中,西北区受影响最大,平均气温每升高 1℃,农户土地生产率下降约 3.6%。实际上,这与已有研究表现基本一致。例如,刘颖杰等(2007)发现温度升高抑制了华北、西北和西南地区的粮食总产量增加,对东北地区粮食总产增加有明显的促进作用。You 等(2009)则发现小麦生长季每升高 1℃,小麦单产降低 3% ~ 10%。

与之相对,降水增加对除南方以外的所有区域都有利。其中,华东区和西北区的农户种植业生产从降水增加中的受益最大,平均降水量每增加 10mm,农户土地生产率分别提高 5.9% 和 4%。降水增加对南方则有微弱的负影响,平均降水量每增加 10mm,农户土地生产率下降 0.7%。这可能是南方降水已经比较丰富,降水量再增加,反而带来负面影响。

四、气候变化对我国不同区域农业生产影响的预测分析

(一) 气候情景

为进一步评估未来气候变化的影响,本文进行了气候情景模拟分析。模拟所用气候情景基于国际上公认的 IPCC 第四次报告提出的 A2 和 B2 情景。为了比较不同的气候模型,IPCC 发展了一个标准的气候情景集,其中一些情景被大多数气候模拟所采用。这些情景统一命名为 SRES(the Special Report on Emissions Scenarios),不同情景对应于经济增长和技术进步的一系列假定。其中,A2 和 B2 情景分别对应中一高排放和中一低排放情景。根据 A2 和 B2 情景,预测出未来 30 年和 50 年平均的气候状况,并在县域上平均,得到县级气候情景数据。需要说明的是,所谓未来 30 年和 50 年的预测

气温或降水量,并非是预测该年实际可能值,而是预测年前后多年平均的结果。以 2025 年为例,该年的月度温度和降水,是在预测出 2015—2045 年的月度温度和降水后,经过 30 年平均的数据。

表 4 六大区作物多投入多产出模型参数估计(投入和产出变量部分)

变量	华北	东北	华东	南方	西南	西北
投入方程						
投入截据项	6.114 *** (1325)	2.681 *** (45)	9.607 *** (19)	4.584 *** (11)	2.537 *** (56)	-8.864 ** (8)
劳动力	0.054 (2.5)	0.024 *** (48)	0.039 *** (141)	0.010 *** (123)	0.077 *** (24)	0.032 (3.1)
机械	0.042 *** (61)	0.012 *** (84)	0.042 *** (1692)	0.051 *** (1789)	0.025 *** (652)	0.023 *** (117)
化肥	0.143 *** (1098)	0.08 *** (14)	0.057 *** (245)	0.100 *** (2572)	0.076 *** (29)	0.041 *** (46)
灌溉面积比例	0.64 *** (105)	0.018 *** (115)	0.232 *** (357)	0.302 *** (58)	0.044 *** (794)	0.487 *** (190)
复种指数	0.296 (3.5)	0.34 ** (6.3)	0.287 *** (126)	0.201 *** (110)	0.18 *** (23)	0.305 * (4)
产出方程						
截据项	1.5000 *** (70)	2.000 *** (83)	1.800 *** (1926)	1.500 *** (1993)	1.500 *** (692)	1.500 *** (128)
小麦	0.069 *** (11)	0.037 *** (1417)	0.000 *** (26)	0.066 *** (713)	0.031 *** (75)	0.041 *** (448)
稻谷	0.056 *** (117)	0.004 *** (122)	0.000 *** (37)	0.042 *** (564)	0.010 ** (8)	0.013 *** (198)
玉米	0.022 (4.6)	0.005 ** (7.9)	0.001 *** (118)	0.034 *** (102)	0.022 *** (22)	0.007 * (5)
其他谷物	0.037 *** (79)	0.132 *** (82)	0.001 *** (216)	0.045 *** (22)	0.045 *** (732)	0.018 *** (138)
薯类	0.053 *** (112)	0.013 *** (191)	0.001 *** (18)	0.070 *** (285)	0.031 *** (30)	0.034 *** (436)
棉花	0.134 *** (129)	0.051 *** (129)	0.002 *** (385)	0.136 *** (570)	0.049 *** (27)	0.536 *** (206)
油料	0.097 (3.5)	0.030 *** (15)	0.001 *** (41)	0.120 ** (8)	0.057 *** (83)	0.052 (2.1)
麻类	0.201 *** (17)	0.619 * (6.7)	0.000 *** (29)	0.050 *** (36)	0.702 (4)	0.110 *** (115)
糖料	0.323 * (6)	0.088 *** (58)	0.005 *** (84)	0.09 * (7)	0.047 *** (170)	0.080 *** (55)
烟草	0.001 *** (18)	0.000 * (7.3)	0.000 *** (37)	0.003 *** (41)	0.001 *** (35)	0.001 *** (14)
蔬菜	0.007 (2.7)	0.000 *** (11)	0.000 * (6)	0.003 *** (131)	0.001 *** (31)	0.001 (1.6)
水果	0.000 *** (21)	0.021 ** (9.3)	0.989 *** (35)	0.339 *** (42)	0.005 (4)	0.106 *** (120)

注: 括号中为系数检验的似然比统计量。***、**、* 分别表示在 1%、5% 和 10% 水平上显著。下同

表5 六大区域作物多投入多产出模型参数估计(气候变量部分)

变量	华北	东北	华东	南方	西南	西北
冬季温度(度)	0.928 [*] (4.4)	-0.021 ^{***} (18)	-0.033 ^{***} (13)	0.011 ^{***} (66)	-0.385 [*] (6.5)	0.125 ^{***} (113)
冬季温度平方项	0.299 ^{***} (15)	0.118 [*] (5)	0.03 ^{***} (126)	-0.008 ^{***} (1132)	-0.143 ^{***} (30)	0.086 ^{***} (13)
春季温度(度)	0.464 ^{***} (61)	5.676 ^{***} (250)	2.914 ^{***} (76)	-2.065 ^{***} (1179)	-0.152 [*] (6)	7.372 [*] (7)
春季温度平方项	-0.52 ^{***} (14)	-2.723 [*] (5.3)	-1.41 ^{***} (132)	0.744 [*] (6)	0.175 ^{***} (130)	-2.12 ^{***} (51)
夏季温度(度)	-3.245 ^{***} (115)	-2.309 ^{***} (758)	-10.431 ^{***} (33)	0.156 ^{**} (9)	-0.881 ^{***} (397)	5.332 ^{***} (285)
夏季温度平方项	0.884 ^{***} (491)	5.309 ^{***} (54)	2.326 ^{***} (25)	-0.074 ^{***} (322)	0.304 ^{***} (306)	-0.993 ^{***} (1273)
秋季温度(度)	0.968 ^{***} (61)	-0.825 ^{***} (524)	2.2 ^{***} (76)	0.145 ^{***} (16)	0.878 [*] (6)	-2.543 ^{***} (49)
秋季温度平方项	-0.756 ^{***} (1468)	0.1 ^{***} (563)	-0.75 [*] (8)	-0.026 ^{***} (32)	-0.24 ^{***} (1033)	0.702 ^{***} (27)
冬季降水(mm)	0.591 ^{***} (36)	0.06 ^{***} (14)	-0.148 ^{***} (415)	0.452 ^{***} (87)	-0.372 ^{***} (385)	-0.124 ^{***} (1221)
冬季降水平方项	-0.246 ^{***} (169)	0.383 [*] (8)	-0.285 ^{***} (48)	-0.144 ^{***} (36)	0.059 ^{***} (332)	0.048 ^{***} (145)
春季降水(mm)	0.032 ^{***} (95)	0.372 [*] (5)	0.142 [*] (8)	0.155 [*] (8)	0.143 ^{***} (691)	-0.031 ^{***} (53)
春季降水平方项	-0.07 ^{***} (1691)	-0.153 ^{***} (723)	0.084 ^{***} (3579)	-0.042 ^{***} (95)	-0.011 ^{***} (327)	0.001 ^{***} (150)
夏季降水(mm)	-0.023 ^{***} (21)	-0.086 ^{***} (23)	0.072 ^{***} (517)	-0.14 ^{***} (96)	-0.009 ^{***} (1014)	0.056 ^{***} (180)
夏季降水平方项	0.059 ^{**} (12)	0.003 ^{***} (83)	-0.013 ^{***} (302)	0.014 ^{***} (70)	-0.001 (3)	-0.006 (1.6)
秋季降水(mm)	-0.557 [*] (7)	0.862 ^{***} (119)	0.111 ^{***} (151)	0.17 ^{***} (68)	-0.031 ^{***} (69)	0.008 ^{***} (19)
秋季降水平方项	0.215 [*] (4)	-0.438 [*] (9)	-0.016 ^{***} (32)	-0.037 ^{***} (143)	0.003 ^{***} (36)	-0.001 ^{***} (156)

表 6 气候变化对六大区域农户土地生产率的边际影响 (%)

	华北	东北	华东	南方	西南	西北
温度升高 1℃	-1.4	3.4	-0.2	-1.1	-0.5	-3.6
降水量增加 10mm	1.6	3.7	5.9	-0.7	1.5	4.0

数据来源: 作者计算

(二) 预测结果

利用多投入多产出生产函数估计中得到的系数,本文分别预测了 A2(中—高排放)情景和 B2(中—低排放)情景下 2025 和 2055 年农户土地生产率相对于基年 2005 年的变化率(见表 7)。因为气候模拟在很大程度上依赖于气候情景。事实上最近研究发现,即便同样的计量经济模型,在不同气候情景下预测结果的差异也比较大(Burke 等 2011)。因此,侧重于从两个方面解释预测结果。一是区域间比较。虽然预测结果的绝对值意义不大,但是区域间的相对比较可以表明气候变化对不同区域的影响差异;二是纵向比较,即比较同一地区农户土地生产率随时间的变化以判断影响的趋势,即负向或正向的影响随时间变化的情况。

从区域来看,气候变化对一些区域产生有利影响,而对另外一些区域产生不利影响。预测结果表明,气候变化对西北地区农户土地生产率有比较大的负面影响。其原因可能是,由于温度升高和降水量下降的共同作用,有害于该区域作物生长,对该区域农户土地生产率都有不利影响。气候变化有利于华东地区的农户土地生产率。其中,华东地区农户土地生产率比其他地区都有显著增加。这些区域农户土地生产率提高,降水增加是一个主要促进因素。虽然这些地区气温都有所提高,但是其负面作用被降水增加引致的增产效用抵消。从时间维度看,气候变化的影响,无论是有利的还是不利的,其绝对值随时间推移而增大。就不同气候情景而言,农户土地生产率在 A2(中—高排放)情景下比在 B2(中—低排放)情景下所受到的影响更大。这是因为 A2(中—高排放)情景下气温和降水变化幅度更大。

表 7 A2 和 B2 情景下六个区域农户土地生产率变化 (%)

区域	A2 气候情景		B2 气候情景	
	2025	2055	2025	2055
华北	1.4	18.7	0.2	14.9
东北	18.8	22.6	21.9	26.3
华东	26.4	42.9	28.6	40.9
南方	-5.0	-3.1	-6.2	-5.8
西南	5.2	8.7	4.5	6.4
西北	-11.0	-14.9	-13.3	-17.3

数据来源: 作者根据预测结果整理

五、结 论

本文基于国家统计局 2005 年农村住户调查数据和国家气象观测站数据,利用多投入多产出生产函数,分区域估计了气候变化对农户土地生产率的边际影响,并模拟了未来 A2(中—高排放)和 B2(中—低排放)情景下气候变化对农户土地生产率的影响。

由非线性算法估计出多投入多产出模型参数, Shapiro-Wilk 检验表明残差符合正态分布, 似然比统计量表明绝大部分估计的变量参数在 5% 水平上显著。由此说明, 模型函数形式设立合理, 所估计参数对数据拟合程度较高。气候变化对农户土地生产率的边际影响表明: 除了东北气温升高对农户土地生产率都为负, 其中西北地区受温度上升的不利影响最大。与之相对, 降水增加对除南方以外的所有区域都有利。其中, 华东地区和西北地区农户土地生产率从降水增加中受益最大, 降水量每增加 10mm, 农户土地生产率分别提高 5.9% 和 4%。降水增加对南方则有微弱的负影响, 降水量每增加 10mm, 农户土地生产率下降 0.7%。

模拟未来气候情景下农户土地生产率变化表明, 总体上, 由于气温和降水变化方向不同, 气候变化对一些区域产生有利影响, 而对另外一些区域产生不利影响。具体而言, 气候变化有利于华北地区和华东地区的农户土地生产率, 而不利西北地区。此外, 农户土地生产率变化的绝对值随时间推移而增大。就不同气候情景而言, 农户土地生产率在 A2(中—高排放)情景下比在 B2(中—低排放)情景下所受到的影响更大。

参 考 文 献

1. Adams J.R., Hurd B., Lenhart S., et al. Effects of global change on agriculture: an interpretative review. *Climatic Research*, 1998(11): 19 ~ 30
2. Burke M., J. Dykema, D. Lobell, E. Miguel, and S. Satyanath. 2011. Incorporating climate uncertainty into estimates of climate change impacts with applications to US and African agriculture. NBER Working paper 17092
3. Deschênes O. and Greenstone M. The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather. *The American Economic Review*, 2007, 97(1): 354 ~ 385
4. Iizumi T., Yokozawa M., Nishimori M. Parameter estimation & uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: application of a Bayesian approach. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2009, 149(2): 333 ~ 348
5. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007—the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007
6. Liu H., Lin X., Fischer G., et al. Study on The Impacts of Climate Change on China's agriculture. *Climatic Change*, 2004(65): 125 ~ 148
7. Lobell D., Hammer G., Messina G., et al. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature climate change*, 2013(3): 497 ~ 501
8. Lobell D. and Burke M. On the Use of Statistical Models to Predict Crop Yield Responses to Climate Change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1443 ~ 1452
9. Mendelsohn R. and Dinar A. Climate Change, Agriculture & Developing Countries: Does Adaptation Matter? *The World Bank Research Observer*, 1999(14): 277 ~ 293
10. Mendelsohn R. and Nordhaus W. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis: Reply. *American Economic Review*, 1999, 89(4): 1053 ~ 1055
11. Mendelsohn R., Nordhaus W. and Shaw D. Climate Impacts on Aggregate Farm Value: Accounting for Adaptation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996(80): 55 ~ 66
12. Mendelsohn R., Nordhaus W. and Shaw D. The Impact of Global Warming on Agriculture: a ricardian model. *The American Economic Review*, 1994, 84(4): 753 ~ 771
13. Schlenker W., and Roberts M. Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to U. S. Crop Yields under Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(37): 15594 ~ 15598
14. Stockle C., Marcello D. and Roger N. A Cropping Systems Simulation Model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3~4): 289 ~ 307
15. Tao F., Masayuki Y., Liu J., et al. Climate – crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. *Climate Research*, 2008(38): 83 ~ 94
16. Tao F., Masayuki Y., Xu Y., et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981 –

2000. *Agricultural and Forest Meteorology* 2006(138) : 82 ~ 92
17. Wang J. ,Chang H. ,Chen F. ,et al. How Important are Climate Characteristics to the Estimation of Rice Production Function? *African Journal of Agricultural Research* 2012 7(35) : 4867 ~ 4875
18. Wang J. ,Mendelsohn R. ,Dinar A. ,et al. The impact of climate change on China's agriculture. *Agricultural Economics* 2009 40(3) : 323 ~ 337
19. You L. ,Rosegrant M. ,Wood S. ,et al. Impact of Growing Season Temperature on Wheat Productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 2009 149(6 ~ 7) : 1009 ~ 1014
20. 陈怀亮,张雪芬,赵国强等. 河南省春季气候变化及其对小麦产量构成要素的影响. *河南气象* 2006(1) : 47 ~ 52
21. 第二次国家气候变化评估委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 科学出版社 2011
22. 杜文献. 气候变化对农业影响的研究进展——基于李嘉图模型的视角. *经济问题探索* 2011(1) : 154 ~ 159
23. 刘颖杰,林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响. *气候变化研究进展* 2007(4) : 229 ~ 243
24. 徐斌,辛晓平,唐华俊等. 气候变化对我国农业地理分布的影响及对策. *地理科学进展* 1999 18(4) : 316 ~ 321

责任编辑 段 艳