

# 气候变化视角下中国小麦生产布局演变及生产力预测

陈佩<sup>1</sup> 张为付<sup>2</sup>

(1. 南京财经大学 粮食和物资学院 江苏 南京 210003; 2. 南京财经大学 国际经贸学院 江苏 南京 210023)

**摘要:** 全球性气候变化背景下,研究小麦生产布局演变规律和驱动因素,有利于资源的合理配置,从而保障国家粮食安全。基于1978—2019年中国29个小麦生产省份的面板数据,分析小麦种植面积、产量的区域分布特征及其重心移动轨迹;运用空间杜宾模型,分析气候变化对中国小麦生产重心变迁的影响;结合IPCC第六次气候报告,进一步利用反事实分析方法,预测气候变化对小麦生产的影响。研究得出:小麦生产重心总体上向东南方向演进;日照时数正向促进了小麦生产重心向东南方向演进,气温和降雨量对小麦生产重心布局变迁具有显著负向作用;研究期内气候变化对小麦的综合减产效应为2.68%,未来气候变化将导致中国小麦减产最大达18.14%。应处理好小麦生产重心南移与种植带北移的矛盾,加强培育小麦耐热品种,并尽早采取应对气候变化的措施,减轻气候变化对小麦生产的负面影响。

**关键词:** 生产重心; 气候变化; 空间杜宾模型; 反事实分析

中图分类号: F326.11 文献标志码: A 文章编号: 1672-6049(2023)02-0001-10

## 一、引言与文献综述

“农稳社稷 粮安天下”粮食关乎国家命运,粮食安全是国家安全的基础。对于有着14亿人口的中国而言,保障粮食安全是亘古不变的主题。而粮食生产高度依赖气候条件,气候变化会改变降水量、温度以及日照时数等,进而影响粮食产量和品质。近百年来,中国年平均气温升高了0.5℃至0.8℃,与气候变化及不合理人类活动相关的极端天气和气候灾害事件(干旱、热浪、洪涝等)的频繁发生给中国粮食安全带来了新的挑战,如何在新形势下稳定粮食生产尤为重要。其中,小麦作为重要的商品粮和战略储备粮,在保障粮食安全中起到举足轻重的作用。据联合国估计,到2050年,受气候变化特别是全球变暖的影响,全球小麦的产量将减产40%。此外,气候变化也会导致粮食生产布局发生改变<sup>[1]</sup>,这是由于气候变化导致的光、热、水变化会改变作物生产期内的生态及生理,进而影响作物的生产布局<sup>[2]</sup>,而小麦因生长周期较长,导致其生产布局更易受到气候的影响<sup>[3]</sup>。充分了解小麦的生产布局、变迁及其成因,能够优化资源配置、规划粮食产业布局,推进供给侧结构性改革,进而实现可持续发展。

近年来,小麦生产布局及其影响因素问题受到了众多学者的关注。一方面,部分学者分析了小麦

收稿日期: 2022-10-06; 修回日期: 2023-03-23

基金项目: 国家社会科学基金一般项目“信息技术变革赋能中国对外贸易高质量发展的机制与路径研究”(21BJY052); 江苏省社会科学基金重大项目“江苏以科技创新驱动产业链供应链优化升级研究”(21ZD001); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目“粮食区域公共品牌会替代企业私人质量信息传递吗?——以大米为例”(KYCX22\_1680)

作者简介: 陈佩(1995—),女,安徽池州人,南京财经大学粮食和物资学院博士研究生,研究方向为农业资源环境; 张为付(1963—),男,江苏徐州人,经济学博士,南京财经大学国际经贸学院教授,博士生导师,研究方向为开放经济和全球价值链。

的生产布局及其变化趋势。叶志标和李文娟<sup>[4]</sup>比较全面地介绍了集中度指数、比较优势指数等在中国小麦生产布局研究中的应用。李明辉等<sup>[5]</sup>利用区域比较优势指数,分析了1994—2013年中国小麦区域格局演变,发现中国小麦主产区集中在河南、山东、河北三省。李伟<sup>[6]</sup>采用基尼系数和集中度指数,分析了1978—2016年中国小麦的时空演变,研究结果表明,小麦集中程度不断提高,呈现出由东向西、由南向北的空间变化趋势,且呈现出较强的空间依赖性。作为研究空间布局的重要方法,重心模型与指数分析相比,能够更直观地显示作物生产面积的变化。聂雷等<sup>[7]</sup>分析了中国三大粮食作物的重心移动轨迹,其中小麦重心稳定徘徊。邓宗兵等<sup>[8]</sup>也发现小麦重心移动方向不明显且距离较短。蔡荣和陶素敏<sup>[9]</sup>也认为小麦生产布局变动不大。与此相反,姜会飞等<sup>[10]</sup>通过对1979—2002年小麦在中国粮食产量和播种面积所占百分比的动态分析,发现相比于其他农作物,小麦的生产具有较大的波动性,逐步由分散生产模式向区域集中生产模式转变。另一方面,任频频等<sup>[11]</sup>分析了农作物种植结构演变下的黄淮海旱作区小麦玉米生产时空格局。郝晓燕等<sup>[12]</sup>认为灌溉水平和化肥、机械投入、政策和技术水平、比较收益和非农就业机会对小麦生产布局均有影响。叶志标和李文娟<sup>[4]</sup>认为影响小麦空间布局演变的驱动因素有气候、技术进步、生产投入和其他社会因素。李伟<sup>[6]</sup>认为,农业劳动力非农就业负向影响小麦生产规模,小麦生产的比较效益、农业机械化发展水平以及小麦平均产量正向影响小麦生产规模。总而言之,小麦生产布局演变受到双重影响:其一,受自然、资源条件的影响;其二,受经济、比较利益、技术和国家政策等方面的影响。虽然相关研究表明,小麦生产布局主要受成本收益的影响,气候因素处于附属地位<sup>[13]</sup>。但是近年来,气候变化问题逐渐突出,“温水双增”趋势使农业生产出现较明显的“种植带北移”现象。杨晓光等<sup>[14]</sup>通过研究气候变化对中国华北冬小麦的影响,发现河北省小麦可种植边界平均向北移动50千米。如果河北省冬小麦适应种植边界北移,小麦单位面积产量平均可提高25%。在当前资源有限的情况下,权衡经济收益与资源约束,探析气候变化与小麦生产空间布局的关系及其对小麦生产的长期影响尤为重要。

有鉴于此,本文以受气候影响程度最大的粮食作物——小麦为例<sup>[15]</sup>,基于1978—2019年中国29个小麦生产省份的数据,利用Arcgis软件平台,分析改革开放以来小麦生产布局的变化;利用空间杜宾模型,分析气候变化对小麦生产布局的影响;基于IPCC第六次气候报告,用反事实分析方法,预测气候变化对小麦生产的影响。本文期望得出科学客观、合理的结论,为正确把握小麦发展趋势、优化生产布局提供依据。

文章剩余内容的安排如下:第二部分分析中国小麦生产的时空演变历程,第三部分为研究方法 with 数据,第四部分为结果与分析,第五部分为结论及启示。

## 二、中国小麦生产的时空演变历程

改革开放四十多年来,受城镇化和比较收益等因素的影响,小麦播种面积总体上呈下降趋势,而小麦产量呈上升趋势。小麦播种面积由1978年的29 182.60千公顷下降到2019年的23 380.00千公顷,降幅约为19.88%。而同期小麦产量由5 384.00万吨上升到13 433.39万吨<sup>①</sup>,增幅约为149.51%。虽然小麦播种面积直接影响小麦产量,但是单产提高是小麦增产的主要动力<sup>[16]</sup>。分阶段来看,第一阶段(1978—1997年)中,得益于家庭联产承包责任制改革和粮食流通体制改革释放的制度红利以及改革开放后农机、化肥农药的大量使用,虽然此阶段小麦播种面积变化不大,但是小麦产量却快速增长;第二阶段(1998—2003年)中,1998年,政府进行了农业结构调整,部分农作物退出保护价,农民纷纷改种效益更高的经济作物,同时,经济制度改革重点转向城市和工业,致使小麦播种面积连续6年下降,小麦种植面积减少、农民生产积极性降低、劳动供给不足、生产技术水平落后、自然灾害频发等因素综合导致了此阶段小麦产量的下降;第三阶段(2004年之后)中,中央连续15年出台关于农业、农村和农民的1号文件,不断加大对农业的支持力度,取消农业税,实施加大粮食补贴力

<sup>①</sup>数据来源:国家统计局。

度、放开粮食收购市场、执行托市收购等一系列强农惠农政策,特别是2006年,政府对小麦实行了最低收购价政策,一系列优惠政策大大提高了农民种植粮食的积极性,此后,小麦播种面积和产量均由减转增,实现了复苏增长。

从生产布局层面看,小麦生产空间分布不均,产区集中化趋势明显,主要集中在黄淮海地区,东北地区面积缩减程度最大<sup>[16]</sup>。从省级层面看,1978年,大部分省份小麦播种面积集中在100千公顷~1000千公顷,超过2000千公顷的省份有4个,分别为河北、山东、河南、四川;2019

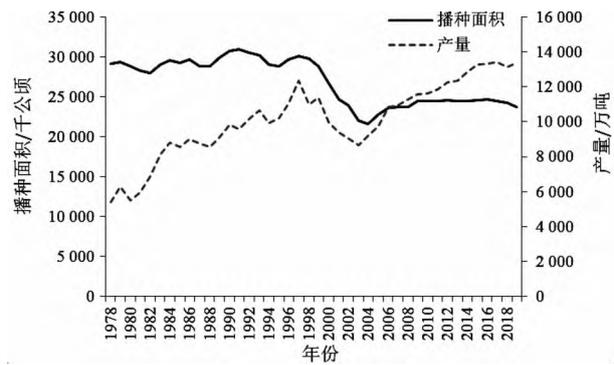


图1 小麦产量、播种面积变化趋势

年,大部分小麦播种面积集中在0~100千公顷,超过2000千公顷的省份为河北、江苏、安徽、山东、河南;1978年,大部分省份小麦产量集中在50万吨~300万吨,超过700万吨的省份只有山东、河南;2019年,大部分省份小麦产量集中在0~50万吨,超过700万吨的省份分别为山东、河南、河北、江苏、安徽。从区域层面看,如表1所示,小麦产量的增长动力主要来源于黄淮海地区,1978—2019年,黄淮海地区小麦产量增加了5396.14万吨,占总增长量的67.72%;其他小麦优势产区的占比不断下降,小麦播种面积减少主要是由于东北地区小麦播种面积大幅度减少,样本期内东北地区小麦播种面积减少了2241.30千公顷,占总减量的40.93%,可能是因为东北地区原有的小麦种植体系被破坏;以黑龙江为例,1996年以来,由于政策改变,“豆麦”产区种植大豆高达4000余万亩,小麦种植面积不足600万亩;此外,个别地块大豆重茬已达10年以上,土壤生态遭到严重破坏,因此无法种植小麦,导致东北地区小麦播种面积进一步减少。

表1 1978—2019年小麦生产区域分布

年份	东北		黄淮海		长江中游		东南沿海		蒙新		西北		西南		青藏	
	产量	面积	产量	面积	产量	面积	产量	面积	产量	面积	产量	面积	产量	面积	产量	面积
1978	319.5	2 302.6	2 426.0	11 007.3	555.0	3 287.8	537.5	2 401.7	271.2	2 117.5	665.0	4 439.8	577.0	3 353.3	72.5	272.8
1983	470.0	2 198.3	3 449.0	10 594.6	946.0	3 709.9	874.5	2 634.9	267.6	2 216.2	1 096.5	4 436.5	844.0	2 994.3	72.5	265.2
1988	260.2	1 306.4	3 837.6	11 474.4	1 116.3	3 603.5	1 029.6	2 763.7	242.3	2 131.1	991.4	4 366.2	704.0	2 895.2	79.8	244.3
1993	437.3	1 633.2	4 924.0	11 837.3	1 140.9	3 607.1	1 070.7	2 728.7	212.2	2 275.8	1 282.4	4 383.9	975.6	3 515.1	93.5	253.5
1998	357.2	1 186.1	5 524.4	12 034.5	1 043.3	3 516.6	872.5	2 746.9	128.3	2 059.3	1 331.5	4 214.2	995.4	3 749.6	109.0	267.0
2003	51.9	271.8	4 930.7	10 216.7	827.6	2 722.1	641.3	1 728.2	174.5	979.1	999.6	3 234.5	710.7	2 695.4	64.0	149.2
2008	95.5	253.3	6 389.8	11 472.5	1 595.4	3 515.0	1 061.1	2 222.1	214.1	1 208.8	954.1	2 901.6	598.0	1 994.6	67.1	135.7
2013	40.2	135.1	7 024.3	11 925.5	1 900.8	3 967.1	1 211.5	2 473.7	205.9	1 693.4	853.5	2 590.1	458.0	1 532.3	60.4	122.5
2018	37.6	113.0	7 587.7	12 276.3	2 029.0	4 018.8	1 338.1	2 511.3	174.9	1 628.2	952.0	2 431.7	363.4	1 143.6	62.1	143.3
2019	22.9	61.3	7 822.1	12 140.1	2 058.2	3 890.1	1 355.9	2 440.1	107.5	1 599.6	924.0	2 360.4	358.5	1 101.3	59.5	134.8

### 三、研究方法与数据

#### (一) 研究方法

##### 1. 重心分析模型

空间重心是描述空间分布中心的指标,重心移动反映地理事物和现象空间分布的变化。该方法最早应用于人口、经济或产业结构重心转移等研究<sup>[17-18]</sup>,近年来在农业领域应用较广泛<sup>[19-20]</sup>。重心分析能够清晰描述生产布局变动方向、移动速度与距离等,突出了生产布局演变的时空特征。生产重心指数是指某个时期小麦生产分布在某个区域上的力矩达到平衡的点(地理重心),计算公式如下:

$$(X_t, Y_t) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n A_{it} X_i}{\sum_{i=1}^n A_{it}}, \frac{\sum_{i=1}^n A_{it} Y_i}{\sum_{i=1}^n A_{it}} \right) \quad (1)$$

其中  $X_t$  和  $Y_t$  分别表示第  $t$  年小麦生产重心的经纬度,  $X_i$  和  $Y_i$  分别为各省地理重心的经纬度坐标,  $A_{it}$  为  $i$  省第  $t$  年的小麦产量。利用 Arcgis 软件平台计算出小麦生产重心之后,借鉴杨万江和陈文佳<sup>[21]</sup>的方法,计算小麦生产的移动距离,公式如下:

$$D = E \times [(\bar{X}_s - \bar{X}_q)^2 + (\bar{Y}_s - \bar{Y}_q)^2]^{1/2} \quad (2)$$

其中  $D$  表示小麦生产重心之间的距离;  $E$  为常数,是把地理坐标(以度为单位)转换为平面距离所对应的值,取值 111.11;  $\bar{X}_s, \bar{X}_q, \bar{Y}_s, \bar{Y}_q$  分别表示第  $s$  年和第  $q$  年小麦生产重心的经度值和纬度值。

## 2. 莫兰指数

莫兰指数(Moran's I)包括全局莫兰指数和局部莫兰指数,能有效检验空间关联性和集聚性。为了分析小麦生产的空间相关关系,本文计算出 1978—2019 年小麦生产集中度的全局 Moran's I 指数,计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (3)$$

其中  $S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n$  为样本方差,  $x_i$  为各省小麦产量,  $\bar{x}$  为小麦产量均值,  $n$  为变量总数,  $\omega_{ij}$  为权重。本文基于各省邻接关系,构建空间权重矩阵。若 Moran's I 指数介于 -1 到 0 之间,则表示空间负相关;若介于 0 到 1 之间,则表明空间正相关。

为度量空间单元属性值的集聚程度和探究空间溢出效应,画出莫兰散点图(见图 2)。散点图中的点代表各个省份,纵轴为标准化后的局部 Moran's I 指数。散点主要集中在第三象限,说明小麦集中度低的地区呈现“L-L”聚集效应。根据式(3)计算出 1978—2019 年小麦集中度的 Moran's I 指数介于 0.276 到 0.404 之间,所有年份的 Moran's I 均通过了 1% 的显著性检验。随着年份增长,小麦生产的空间依赖性不断增加。虽然中国各地自然条件以及经济水平有所差异,然而,地理相邻地区的自然条件和经济条件存在一定的相似性,导致小麦生产具有一定的空间相关性。

## 3. 空间杜宾模型

由于小麦生产集中度在空间上存在较为明显的依赖性,故本文采用空间计量模型进行实证。空间面板计量模型主要包括三种类型:空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)。其中,SLM 模型侧重于考虑区域外空间溢出因子(知识、劳动力、技术等)对研究区域所产生的影响,即相邻区域影响变量对研究区域小麦生产产生的影响;SEM 模型则主要探讨存在于扰动误差项之中的空间依赖作用,用于度量相邻区域因变量的误差冲击或忽视的空间相关因素对研究区小麦生产的影响程度;SDM 模型则是以上两种模型功能的融合,其不仅能够处理样本中的遗漏变量问题,还能将时空滞后变量纳入考量。本文运用空间杜宾模型,分析小麦生产布局的影响因素,设置模型如下:

$$p_{it} = \rho \omega_{it} + \beta_i \sum X_{ij,t} + \delta_i \omega_{it} \sum X_{ij,t} + u_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中  $p_{it}$  为集中度指数,表示某省小麦产量(播种面积)占全国小麦总产量(总播种面积)的比重;  $u_i$  为地区效应,  $\varepsilon_{it}$  为随机误差项,  $\rho, \beta_i, \delta_i$  为估计系数;  $X_{ij,t}$  为自变量,参考现实条件及以往文献<sup>[3,16]</sup>,选取自变量为气候条件(降雨量、日照时数、气温)、小麦受灾面积、农业机械总动力、小麦灌溉面积、道路设施、人均 GDP、劳动力、小麦化肥用量、最低收购价。

### (二) 数据来源和描述性统计

本文选取 1978—2019 年中国 29 个省份的面板数据(2019 年海南省和重庆市小麦产量仅占总产

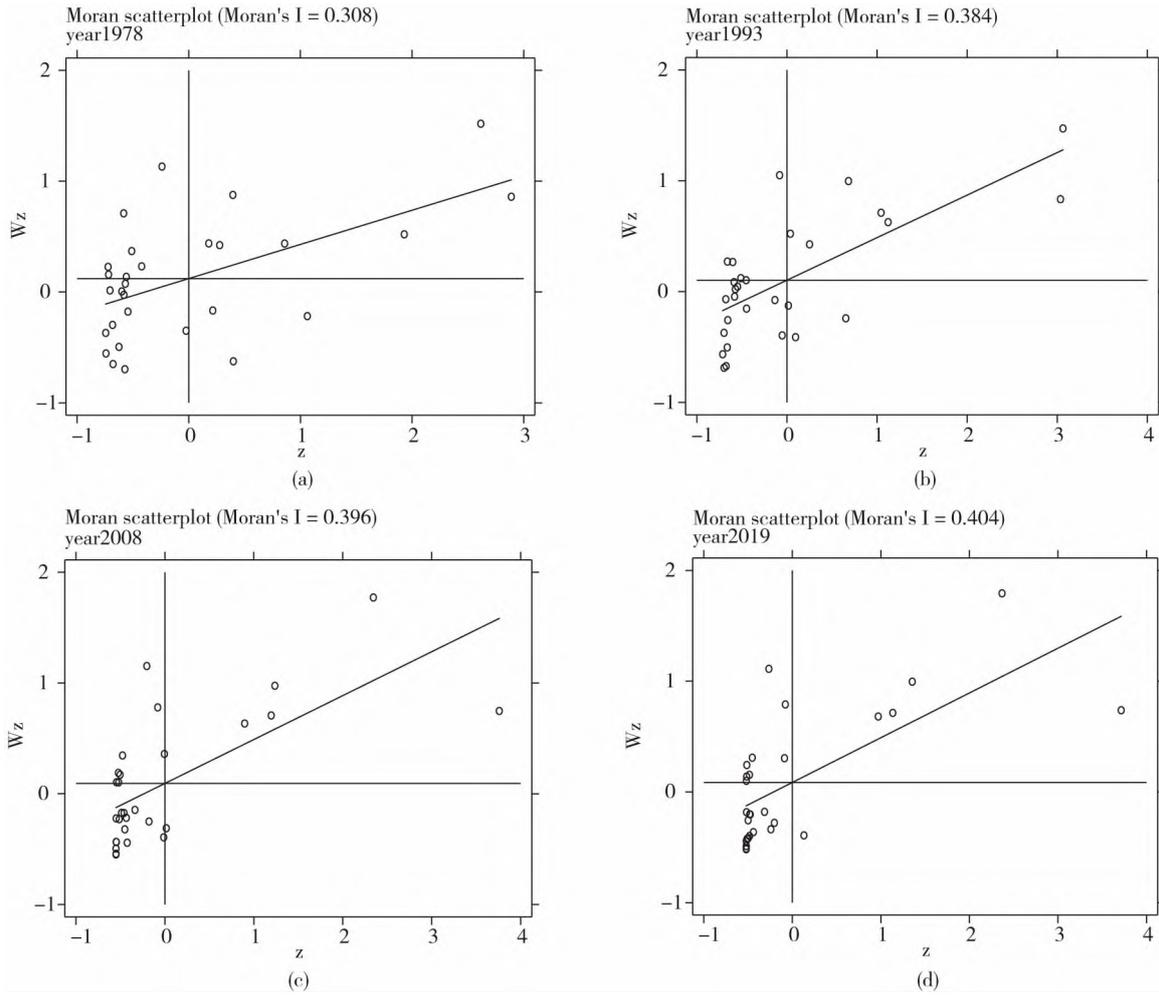


图2 莫兰散点

量的 0.05% (故去除海南省和重庆市)。数据来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《新中国六十年统计资料汇编》和中国气象局气象中心。因变量为小麦产量集中度指数,即各省小麦产量占全国小麦总产量的比重。气候数据来自中国气象局气象中心,该数据库涵盖中国 800 多个气象观测站的历年气候资料。首先,将各个分散的气象观测站根据所在省份进行归类;其次,使用各省小麦生长期的气候指标均值刻画该省小麦生产的气候条件,包括气温、降雨量和日照时数。变量的描述性统计结果如表 2 所示。

表 2 变量的描述性统计结果

变量	变量数	单位	平均值	最小值	最大值
集中度	1 218	%	3.45	0.00	28.01
降雨量	1 218	毫升	875.43	88.90	2 471.22
日照时数	1 218	小时	2 186.02	964.96	3 087.75
气温	1 218	摄氏度	12.36	0.59	22.85
小麦受灾面积	1 218	千公顷	249.28	0.01	2 096.61
农业机械总动力	1 218	万千瓦	1 871.05	17.42	13 353.00
小麦灌溉面积	1 218	千公顷	349.58	0.07	2 066.77
道路设施	1 218	万公里	7.81	0.23	48.49
人均 GDP	1 218	万元	0.32	0.02	2.46
劳动力	1 218	万人	1 048.13	33.38	4 321.30
小麦化肥用量	1 218	万吨	23.30	0.00	271.30
最低收购价	1 218	—	0.07	0	1

#### 四、结果与分析

##### (一) 小麦生产重心区域变化结果与分析

基于1978—2019年中国29个小麦生产省份的面板数据,根据公式(1)和公式(2)计算出小麦产量与面积的重心坐标与移动距离,利用Arcgis软件计算出小麦生产重心的移动路径,如表3所示。改革开放四十多年来,不论是基于产量权重还是面积权重,小麦重心均由山西省沿东南方向转至河南省<sup>①</sup>。

表3 1978—2019年产量与面积重心移动方向和距离

年份	产量				面积			
	东经	北纬	移动方向	移动距离	东经	北纬	移动方向	移动距离
1978	112.90°	35.52°			112.43°	35.71°		
1980	112.96°	35.47°	东南	8.68	112.53°	35.91°	东北	24.84
1982	112.60°	35.05°	西南	61.46	112.36°	35.78°	西南	23.78
1984	113.05°	35.34°	东北	59.48	112.59°	35.82°	东北	25.94
1986	113.27°	35.49°	东北	29.59	112.88°	35.90°	东北	33.43
1988	112.99°	35.30°	西南	37.60	112.50°	35.50°	西南	61.30
1990	113.16°	35.75°	东北	53.45	112.75°	35.66°	东北	32.98
1992	113.26°	35.71°	东南	11.97	112.72°	35.65°	西南	3.51
1994	113.24°	35.40°	西南	34.52	112.62°	35.37°	西南	33.04
1996	113.16°	35.58°	西北	21.89	112.52°	35.40°	西北	11.60
1998	112.76°	35.64°	西北	44.95	112.52°	35.25°	西南	16.67
2000	112.94°	35.25°	东南	47.73	112.45°	35.06°	西南	22.50
2002	112.59°	35.26°	西北	38.90	112.20°	34.85°	西南	36.28
2004	112.91°	35.15°	东南	37.60	112.34°	34.82°	东南	15.91
2006	113.34°	35.18°	东北	47.89	112.70°	34.99°	东北	44.24
2008	113.63°	35.07°	东南	34.46	112.92°	34.94°	东南	25.07
2010	113.26°	35.25°	西北	45.72	112.84°	35.09°	西北	18.89
2012	113.43°	35.17°	东南	20.88	112.90°	35.06°	东南	7.45
2014	113.46°	35.12°	东南	6.48	112.96°	35.04°	东南	7.03
2016	113.46°	35.15°	正北	3.33	112.95°	35.06°	西北	2.48
2018	113.72°	35.13°	东南	28.97	113.20°	35.03°	东南	27.98
2019	113.77°	35.10°	东南	6.48	113.14°	35.01°	西南	7.03

根据Arcgis软件计算得到1978—2019年各年的重心坐标及移动距离(见表3)。具体来看,基于产量权重时,小麦生产重心由1978年的东经112.90°、北纬35.52°转至2019年的东经113.77°、北纬35.10°,移动距离为107.34千米。基于面积权重时,小麦生产重心由1978年的东经112.43°、北纬35.71°转至2019年的东经113.14°、北纬35.01°,移动距离为110.78千米。小麦生产重心一直处于中国几何中心(东经103.50°、北纬36°)的东南方向,说明中国几何中心的东南地区(本文中主要指河南、山西两省)作为传统的小麦生产地区,在中国小麦生产中占据重要地位。改革开放以来,农业结构调整导致中国东北部及西部小麦主产区的作用地位逐渐弱化,而南部及东部小麦主产区的地位逐渐凸显<sup>[15]</sup>。当前气候变化导致小麦种植带北移的情况下,小麦生产重心转移与种植带北移出现了偏差。虽然经济效益等原因不可忽视,但气候变化对小麦的不利影响亦不容小觑。小麦生长分为春化和光反应两个阶段。春化阶段在返青期之前,此时小麦的抗冻性最强,需要一定的低温环境以保证后期开花授粉的进行。但是随着气候变暖,导致南方小麦春化受影响,进而过早发育。同时,气温升高

①由于篇幅限制,重心转移图未画出,备索。

也会导致小麦叶片出现早衰,进而导致粒重下降。而当小麦灌浆所能承受的温度达到极限时,会出现高温逼熟现象,致使小麦产量降低,甚至绝收。此外,温度升高也会加剧病虫害蔓延,从而导致小麦减产。

## (二) 气候变化对小麦生产重心转变影响结果与分析

本文利用空间杜宾模型,分析气候变化对小麦生产的影响,依次采用 LM、LR 及 Hausman 检验法检验模型的适用性,LM 检验值为 4 697.71,且在 1% 的水平下拒绝原假设,故选用 SDM 模型。此外,SAR 模型及 SEM 模型的 LR 检验值分别为 193.75、156.72,在 1% 的水平下拒绝 SDM 模型退化为 SAR 模型或 SEM 模型的原假设,进一步说明应该选择 SDM 模型。Hausman 估计值为 134.80,在 1% 的水平下显著,说明拒绝使用随机效应模型,应使用固定效应模型。表 4 为空间杜宾模型的估计结果。

为直接反映气候变化与小麦生产布局的关系,将空间杜宾模型的估计结果进一步分解为直接效应、间接效应和总效应。直接效应表示气候变化对该地区小麦生产布局的平均影响,间接效应表示气候变化对其他地区小麦生产布局的平均影响,总效应表示气候变化对所有地区造成的平均影响。

从直接效应来看,日照时数对该地区小麦生产集中度有显著正向影响,而气温上升和降雨量的增多不利于本地区小麦产量的增加。气候变化影响了区域的水热资源配比,从而影响各个区域小麦的生产状况,最终作用于小麦的空间布局变迁<sup>[4]</sup>。小麦属于低温长日照生长作物,相关研究表明,光照强度对小麦产量具有重要影响<sup>[22-23]</sup>。日照越长,越有利于小麦抽穗,反之,则抽穗延迟或不能抽穗。蔡剑和姜东<sup>[24]</sup>等研究表明,长期光照不足会使小麦产量降幅达 6.4%~25.8%。弱光降低了光合作用的能量来源,导致净光合速率降低,从而造成小麦产量和籽粒产量下降<sup>[25]</sup>。此外,小麦属于喜凉作物,研究表明,高温胁迫导致灌浆期叶片光合速率下降,光合产物输出受阻,供籽粒灌浆充实物质不足,影响籽粒发育<sup>[26]</sup>。降雨量对该地区小麦生产集中度的影响显著为负,这是因为小麦是喜旱作物,降雨量增加不利于小麦生长。控制变量中,机械总动力、灌溉面积、道路设施、小麦化肥用量、最低收购价政策对该地区小麦生产集中度有显著正向影响,而农业劳动力人数对小麦生产集中度有显著负向影响,说明中国农业劳动力存在剩余<sup>[27]</sup>,小麦受灾面积和人均 GDP 对小麦生产布局的影响不显著。

从间接效应来看,气候变量对小麦生产布局的间接效应与直接效应保持一致。说明本地区的气候变化对相邻地区产生影响。可能是因为逆温现象的存在,逆温与天气条件(特别是温度)高度相关<sup>[28]</sup>。此外,逆温会作用于谷物生产,提高产量和质量。逆温现象使本地区的气候变化,也会对相邻地区的小麦生产产生影响。

从总效应来看,除人均 GDP 以外的变量均通过了显著性检验,说明这些变量变化对全国所有地区的小麦产量都产生了影响。原因可能是,小麦生产布局更加集中,各地区小麦生产条件更加相似,同时在市场化和信息化发展水平不断提高的背景下,农业生产要素流通更有效率,各地区农民在小麦

表 4 空间杜宾模型的估计结果

变量	系数	直接效应	间接效应	总效应
降雨量	-0.12*** (0.04)	-0.12*** (0.04)	-0.16** (0.08)	-0.18** (0.07)
日照时数	0.32*** (0.12)	0.31*** (0.12)	0.27** (0.13)	0.29** (0.13)
气温	-0.30*** (0.05)	-0.30*** (0.05)	-0.28** (0.13)	-0.44*** (0.14)
小麦受灾面积	-0.01 (0.01)	-0.01 (0.01)	0.11*** (0.01)	-0.11*** (0.02)
小麦灌溉面积	0.68*** (0.02)	0.95*** (0.01)	0.07 (0.05)	0.75*** (0.05)
农业机械总动力	0.08*** (0.02)	0.08*** (0.02)	0.26*** (0.07)	0.18** (0.07)
道路设施	0.20*** (0.05)	0.19*** (0.04)	0.29*** (0.06)	0.21*** (0.04)
小麦化肥用量	0.29*** (0.02)	0.28*** (0.02)	-0.27*** (0.04)	0.27*** (0.03)
人均 GDP	0.01 (0.04)	0.01 (0.04)	0.03 (0.04)	0.05 (0.03)
劳动力	-0.08** (0.04)	-0.07* (0.04)	-0.23** (0.11)	-0.08** (0.04)
最低收购价	0.23*** (0.04)	0.25*** (0.09)	-0.06 (0.04)	0.20* (0.11)
样本量			1 218	
R <sup>2</sup>			0.97	

注:\*\*\*、\*\*和\* 分别表示在 1%、5% 和 10% 的显著性水平下显著,括号内为聚类标准误。

生产要素配置方面产生效仿效应<sup>[12]</sup>。

### (三) 气候影响评估与预测

#### 1. 气候影响评估

借助经济学的实证研究,本文得出日照、气温、降雨对小麦生产集中度的影响。鉴于气候变化是所有气候要素整体变化的过程,但是经济学研究结论倾向于未来气候变化对农业生产的影响主要源于气温变化,降水和日照的真实影响将被削弱<sup>[15 22-23]</sup>。为识别气候变化的真实影响,需考虑气温、日照、降水的综合影响,此外,还要剥离其他经济因素以及人类行为对小麦单产的共同作用。借鉴陈帅<sup>[26]</sup>的方法,利用反事实方法,分析气候对小麦生产的影响。

$$\delta = \frac{E(Y | Z_{1978}, A_{it}) - E(Y | Z_{2019}, A_{it})}{E(Y | Z_{2019}, A_{it})} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{1}{i} \sum \frac{(Z_{i,1978} - Z_{i,2019}) \times \alpha_i}{Z_{i,2019} \times \alpha_i + A_{i,2019} \times \beta_i} \quad (6)$$

其中  $Z_{it}$  表示气候变量,  $\alpha_i$  是气候要素的系数,  $A_{it}$  表示其他控制变量,  $\beta_i$  表示其他变量的系数。(5) 式和(6) 式的基本思想是,保持其他因素在基年水平不变,考察仅由气候变量要素导致的生产集中度的变化率。在剥离了经济因素、人类行为及其他因素的共同影响后,根据公式(6) 测算出样本期内气候变化约使小麦减产 2.68%。

#### 2. 气候影响预测

$$\delta_{it} = \frac{E(Y_{it} | Z_{i,t+n}, A_{it}) - E(Y_{it} | Z_{it}, A_{it})}{E(Y_{it} | Z_{it}, A_{it})} \quad (7)$$

(7) 式的基本思想是,保持其他变量在基年(第  $t$  年)水平不变(本文选择 2019 年作为基年),未来气候要素改变所带来的小麦产量变化率。进一步地,利用前述的回归估计系数将上式转化成:

$$\hat{\delta} = \frac{\sum_r [\alpha_i (Z'_{i,t+n} - Z_{it}) A_{it}]}{\sum_r E(Y_{it} | Z_{it}, A_{it})} \quad (8)$$

其中  $Z'_{i,t+n}$  和  $A'_{i,t}$  分别表示未来的气候变量和其他变量。本文基于 IPCC 第六次评估报告提供的五种未来气候变化方案进行反事实预测<sup>①</sup>。报告显示,到 21 世纪前期(2021—2040 年),五种方案下气温分别上升 1.2℃ ~ 1.7℃、1.2℃ ~ 1.8℃、1.2℃ ~ 1.8℃、1.2℃ ~ 1.8℃、1.3℃ ~ 1.9℃;到 21 世纪中期(2041—2060 年),气温分别上升 1.2℃ ~ 2.0℃、1.3℃ ~ 2.2℃、1.6℃ ~ 2.5℃、1.7℃ ~ 2.6℃、1.9℃ ~ 3.0℃;到 21 世纪末期(2081—2100 年),气温分别上升 1.0℃ ~ 1.8℃、1.3℃ ~ 2.4℃、2.1℃ ~ 3.5℃、2.8℃ ~ 4.6℃、3.3℃ ~ 5.7℃。预测出这五种情形下,到 21 世纪前期,小麦减产效应分别为 3.82% ~ 5.41%、3.82% ~ 5.73%、3.82% ~ 5.23%、3.82% ~ 5.73%、4.14% ~ 6.05%;到 21 世纪中期,小麦减产效应分别为 3.82% ~ 6.37%、4.14% ~ 7.00%、5.03% ~ 7.96%、5.41% ~ 8.28%、6.05% ~ 9.55%;到 21 世纪末期,小麦减产效应分别为 3.18% ~ 5.73%、4.14% ~ 7.64%、6.68% ~ 11.14%、8.91% ~ 14.64%、10.50% ~ 18.14%。由图 3 可知,随着气温不断升高,小麦减产程度不断加深。在当前小麦生产布局保持不变的情况下,气候变化最高将导致小麦减

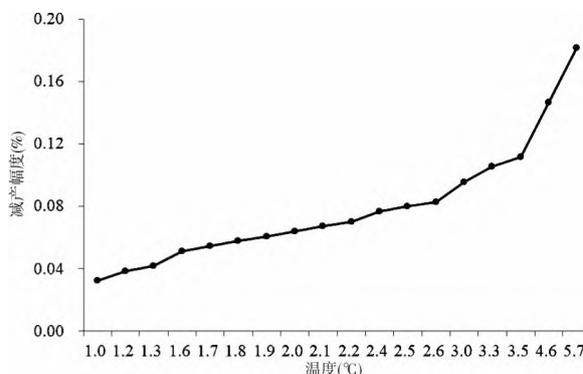


图 3 气候变化造成的小麦减产幅度

①经济学研究结论倾向于未来气候变化对农业生产的影响主要源于气温变化,一旦控制或捕捉了灌溉条件或人类应对气候的行为,降水和日照的真实影响将被削弱<sup>[26]</sup>。

产 18.14%。

总的来看,自改革开放以来,气候变化对中国小麦生产的影响为每 42 年减产约 2.684%。气候变化造成小麦减产是不争的事实。更重要的是,随着全球气候变暖,小麦减产程度不断加深,气候变化最高将导致小麦减产 18.14%。因此需立足当下,重视气候变化对小麦减产的影响。

### 五、结论及启示

本文利用 1978—2019 年中国 29 个小麦生产省份的面板数据和气候数据,借助 ArcGIS 软件平台和空间面板杜宾模型,分析气候变化对小麦生产布局演变的影响,并进一步利用反事实方法,结合 IPCC 第六次报告,预测气候变化对小麦生产的综合影响。研究发现:(1) 改革开放以来,中国小麦生产布局总体呈现出由集中到分散的变化趋势,且存在一定的阶段性特征。小麦生产重心大致向东南方向转移,但种植边界却存在北移的趋势,存在着资源禀赋与小麦生产空间不协调的情况;(2) 气候变量中,日照时数对小麦生产布局变迁具有显著正向作用,气温和降雨量对小麦生产布局变迁具有显著负向作用;(3) 剥离了经济因素和人类行为的共同影响后,1978—2019 年气候变化使中国小麦减产约 2.68%,未来气候情景下,气温升高 5.7℃ 将导致中国小麦减产 18.14%,且小麦减产比例与气温升高成正向关系,应处理好小麦生产重心南移与种植带北移的矛盾。

本文的研究结论对中国小麦生产应对气候变化、实现可持续发展具有重要意义。根据上述研究结论,提出两点政策启示:(1) 地方政府应结合本区域的气候变化特征适度调整小麦种植方案。气候变暖使各省份小麦的种植边界在不同程度上北移。对于中国北部小麦种植省份而言,应合理利用自然资源,提高土地利用率,增加冬小麦的种植面积。对于南方小麦生产种植省份而言,应预防极端天气变化对小麦生产的不利影响,增加特早熟救灾作物的种质储备和灾后抢种,并运用现代信息技术手段,在考虑气候因素的前提下开展精细区划,提升小麦产量与效益。(2) 加强适应气候变化的小麦品种培育力度。随着气候变化的日益加剧,抗旱性、抗病虫害等抗逆性优质小麦品种选育的重要性愈加凸显,虽然对抗逆性品种选育的研究越来越多,但如何综合考虑高产、优质、高效、抗性,开展适应气候变化的育种多目标优化决策研究,将是未来育种研究的重要方向。

### 参考文献:

- [1] LIU Z J, LIU Y S, LI Y R. Extended warm temperate zone and opportunities for cropping system change in the Loess Plateau of China [J]. International journal of climatology, 2018, 39(2): 658 - 669.
- [2] 白秀广, 陈晓楠, 霍学喜. 气候变化对苹果主产区单产及全要素生产率增长的影响研究 [J]. 农业技术经济, 2015(8): 98 - 111.
- [3] 赵茹欣, 王会肖, 董宇轩. 气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析 [J]. 中国生态农业学报, 2020(4): 467 - 479.
- [4] 叶志标, 李文娟. 小麦空间布局演变及驱动因素分析的研究现状 [J]. 中国农业资源与区划, 2019(3): 158 - 165.
- [5] 李明辉, 周玉玺, 周林, 等. 中国小麦生产区域优势度演变及驱动因素分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2015(5): 7 - 15.
- [6] 李伟. 中国小麦生产的时空演变特征及其影响因素分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2019(10): 49 - 57.
- [7] 聂雷, 郭忠兴, 汪险生, 等. 我国主要粮食作物生产重心演变分析 [J]. 农业现代化研究, 2015(3): 380 - 386.
- [8] 邓宗兵, 封永刚, 张俊亮, 等. 中国粮食生产空间布局变迁的特征分析 [J]. 经济地理, 2013(5): 117 - 123.
- [9] 蔡荣, 陶素敏. 中国粮食生产布局演变及空间机制分解: 1978—2018 [J]. 干旱区资源与环境, 2021(6): 1 - 7.
- [10] 姜会飞, 潘学标, 吴文良. 中国小麦生产的时空变异及区域优势分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2005(5): 43 - 46.
- [11] 任频频, 李保国, 黄峰. 农作物种植结构演变下的黄淮海旱作区小麦玉米生产时空格局 [J]. 资源科学, 2022(3): 436 - 449.
- [12] 郝晓燕, 张益, 韩一军. 中国小麦生产布局演化及影响因素研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2018(8): 40 - 48.
- [13] 周力, 周应恒. 粮食安全: 气候变化与粮食产地转移 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011(7): 162 - 168.
- [14] 杨晓光, 孙爽, 赵锦, 等. 气候变化对中国华北冬小麦影响研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2021.

- [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.
- [16]韩一军,韩亭辉.“十四五”时期我国小麦增产潜力分析与实现路径[J].农业经济问题,2021(7):38-46.
- [17]许月卿,李双成.我国人口与社会经济重心的动态演变[J].人文地理,2005(1):117-120.
- [18]唐根年,许紫岳,张杰.产业转移、空间效率改进与中国异质性大国区间“雁阵模式”[J].经济学家,2015(7):97-104.
- [19]张聪颖,畅倩,霍学喜.中国苹果生产区域变迁分析[J].经济地理,2018(8):141-151.
- [20]居祥,肖智.近70年来全球茶叶贸易空间格局演变及其趋势[J].经济地理,2020(8):123-130.
- [21]杨万江,陈文佳.中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[J].经济地理,2011(12):2086-2093.
- [22]SCHLENKER W,ROBERTS M J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U. S [J]. Proceedings of the national academy of sciences,2009,106(37):15594-15598.
- [23]CHEN S,CHEN X G,XU J T. Impacts of climate change on agriculture: evidence from China [J]. Journal of environmental economics and management,2016,76(3):105-124.
- [24]蔡剑,姜东.气候变化对中国冬小麦生产的影响[J].农业环境科学学报,2011(9):1726-1733.
- [25]牟会荣.拔节至成熟期遮光对小麦产量和品质形成的影响及其生理机制[D].南京:南京农业大学,2009.
- [26]陈帅.气候变化对中国小麦生产力的影响——基于黄淮海平原的实证分析[J].中国农村经济,2015(7):4-16.
- [27]李光泗,马学琳.粮食市场开放对我国粮食生产影响的实证研究——基于大豆和大米数据的VAR模型分析[J].南京财经大学学报,2015(3):9-15.
- [28]陈帅,张丹丹.空气污染与劳动生产率——基于监狱工厂数据的实证分析[J].经济学(季刊),2020(4):1315-1334.
- (责任编辑:王顺善;英文校对:谈书墨)

## Wheat Pattern Evolution and Productivity Prediction in China from the Perspective of Climate Change CHEN Pei<sup>1</sup>, ZHANG Weifu<sup>2</sup>

- (1. Institute of Food and Strategic Reserves, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210003, China;  
2. School of International Economics and Trade, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Given the most dramatic climate change in a century, studying the evolution of law and the factors driving the spatial distribution of wheat production is conducive to the rational allocation of resources and ensuring national food security. Based on the data from 29 wheat-producing provinces from 1978 to 2019, this paper analyzes the regional distribution of wheat planting areas, their yield, and the shifting center of gravity of wheat production in China. The Spatial Dubin Model was used to analyze the impact of climate change on the shifting center of wheat production in China. A counterfactual framework was also constructed to predict the impact of climate change on wheat production. The results show that the center of wheat production moved toward the southeast. Further, sunshine duration positively promoted this shift, and temperature and rainfall had significant negative effects on the distribution of wheat production and its center of gravity. The comprehensive yield-reducing effect of climate change on wheat during the study period was 2.68%, and the maximum yield reduction of Chinese wheat due to climate change is projected to reach 18.14%. The negative impact of climate change on wheat production can be mitigated by dealing with the contradiction between the southward shift of the center of wheat production and the northward shift of the planting belt, strengthening the cultivation of heat-resistant wheat varieties, and taking measures to cope with climate change.

**Key words:** production center of gravity; climate change; Spatial Dubin Model; counterfactual analysis