

气候变化下中国粮食生产时空演变及影响因素

温 静¹, 张 超², 张丽君^{1*}, 秦耀辰¹, 王 霞¹

(1. 河南大学 环境与规划学院/黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004;

2. 开封大学 土木建筑工程学院, 河南 开封 475004)

摘 要: 粮食生产是关系国计民生的重大问题, 气候变化对粮食生产稳定性的影响不容忽视. 根据 1987—2016 年中国 31 个省域粮食总产、单产、播种面积和人均粮食产量等粮食生产数据, 采用空间自相关分析法、空间面板杜宾模型及地理加权模型, 对全国粮食生产时空演变及影响因素进行计量分析. 结果表明: (1) 1987—2016 年间我国省域粮食单产、粮食总产、播种面积及人均粮食产量均呈增长态势, 然而不同粮食品种的增有所波动. 其中, 玉米总产量增速明显, 小麦、大豆播种面积不断下降. (2) 粮食总产量、播种面积以及人均粮食产量均呈“中多西少”、“北多南少”的格局, 粮食增产高值省份集中于“38°线”以北及“胡焕庸线”以东地区. (3) 技术进步是推动省域粮食增产的首要因素, 气候变化对省域粮食生产的负向影响更显著. (4) 有效灌溉面积比重提高对于西部内蒙古、中部 2 省(晋豫)以及东部 6 省(京津冀鲁苏沪)粮食生产提升效应最明显, 对西部的新藏 2 省提升微弱. 年均温比重提高对于西部产区的新疆、西藏等省粮食生产提升效应最明显, 对于东北 3 省及东部的苏沪浙等省粮食生产最为不利.

关键词: 粮食生产; 空间 Dubin 模型; GWR; 影响因素; 中国

中图分类号: F326.11

文献标志码: A

文章编号: 1003—4978(2020)06—0652—14

DOI:10.15991/j.cnki.411100.2020.06.003

Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Chinese Grain Production under Climate Change

WEN Jing¹, ZHANG Chao², ZHANG Lijun^{1*}, QIN Yaochen¹, WANG Xia¹

(1. College of Environment and Planning/Key Laboratory of Geospatial Technology for
the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Henan Kaifeng 475004, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Kaifeng University, Henan Kaifeng 475004, China)

Abstract: Grain production is a major issue related to the national economy and people's livelihood. The impact of climate change on the stability of grain production can not be ignored. Based on the grain production data of 31 provinces in China from 1987 to 2016, such as total grain yield, yield, planted area, and per capita grain output, spatial autocorrelation analysis method, spatial panel Dubin model, and geographic weighted model were used to analyze the time and space of national grain production as well as the of evolution and influencing factors. The results show that: (1) from 1987 to 2016, China's provincial grain yield, total grain output, planting area, and per capita grain output show an increase trend, but the growth of different grain varieties fluctuates. Among them, the total production of corn increases significantly, and the sown area of wheat and soybean continues to decline. (2) The total grain output, sown area and per capita grain output are in the pattern of “more in the middle, less in the west” and “more in the north, and less in the south.” (3) Technological progress is the primary factor driving grain production in the province, and the negative impact of climate change on grain production in the province is even more significant. (4) Increasing the proportion of effective irrigation area can significantly increase grain production in Jilin in the northeast, 2 provinces in the middle (Shanxi, Henan), Inner Mongolia in the west, and 6 provinces in the east (Beijing, Tianjin, Hebei, Shandong, Jiangsu and Shanghai). Increasing the annual average temperature

收稿日期: 2020-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501588, 41671536); 中国博士后基金资助项目(2016M600575)

作者简介: 温静(1996—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生. 研究方向: 区域可持续发展.

* 通信作者, E-mail: Zlj7happy@163.com

proportion can significantly promote the increase of grain production in Xinjiang, Tibet and other provinces, but there is an adverse impact on the grain production in the three provinces of Northeast China and the four provinces of Shandong, Jiangsu, Zhejiang and Fujian.

Key words: grain production; spatial Dubin model; GWR; influencing factors; China

“民为国基,谷为民命”,粮食安全是国家安全的重要基础,粮食生产是粮食安全的关键^[1]。由极端气候变化引发的粮食生产空间失衡、产量锐减等问题为粮食安全敲响警钟^[2-3]。中国作为粮食生产大国,在粮食生产逐步实现由“吃不饱”到“吃得饱”并“吃得好”的历史性跨越的同时,耕地锐减^[4-5]、水资源紧缺^[6]、供需结构失衡^[7-8]等粮食生产问题日益突出。尤其在气候复杂多变的背景下,对中国粮食生产研究刻不容缓。那么,气候变化背景下中国粮食生产的时空格局如何演变?气候变化对地区粮食生产是否会产生影响?若有影响,究竟是促进粮食生产还是造成粮食产量下降?回答这些问题,对于摸清中国粮食生产的现状和成因,制定科学合理的粮食安全政策具有重要的指导意义。

学术界对于中国粮食生产及其影响因素开展了一系列研究。研究表明,粮食总产量^[9]、人均粮食产量^[10]、粮食生产结构^[11]、粮食生产效率^[12]的地域分异是影响粮食时空格局变动的重要原因。基于粮食总产量与要素投入、技术进步之间的统计关系推测,耕地、劳动力等生产要素投入是地区粮食增产差异的重要制约因素,而农业机械化水平、有效灌溉面积及化肥施用量等技术投入对于地区粮食总产的积极影响愈加显著^[13-20]。基于粮食生产结构与作物单产、气候变化之间的互动关系研究发现:作物种植结构的调整会通过播种面积的改变,使粮食生产结构发生变化^[11,21]。未来气候变化对于小麦、水稻等作物单产的影响力度逐渐增大,空间分异日益显著,意味着气候变化将成为粮食生产结构空间分异的又一限制性因素^[22-23],且对粮食生产空间格局的变动影响不断增强。基于投入-产出视角对于粮食生产效率的测度表明:自然因素^[24-25]、经济发展水平^[26]、技术进步^[27-29]及粮食种植结构调整均是影响地区粮食生产效率空间分异的重要因素。其中,技术进步是提升地区粮食全要素生产率的主要因素。灌溉、育种及施肥等技术的应用与推广对于地区粮食生产效率的增长效应显著^[27]。

综上可知,要素投入、技术进步与气候变化均是影响粮食生产的主要因素。然而,已有研究往往没有综合考虑技术进步或气候变化的影响,这可能增加了分析结果的不确定性。因而,本研究基于 C-D 函数,在考虑要素投入、技术进步的基础上,将气候变化纳入统一的分析框架,以全面测度技术进步与气候变化下粮食生产的变化趋势。另外,中国各省区气候变化以及粮食生产的要素投入存在空间差异,不同影响因素对省域粮食生产的作用机制存在异质性。因而,本研究采用 GWR 模型分析省域粮食生产的局部参数。具体而言,根据粮食总产、单产、播种面积和人均粮食产量等粮食生产指标数据,采用空间自相关分析方法刻画中国 1987—2016 年 31 个省域粮食生产的时空演变特征,并着重从技术、气候等层面构建空间面板计量模型及 GWR 模型,详细分解中国粮食生产时空格局的影响因素及各因素的空间异质规律,以期气候变化下国家和地方政府制定科学合理的粮食生产政策提供理论依据和决策参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

粮食数据是根据中国粮食统计口径来定,主要包括谷物、豆类和薯类。谷物以稻谷、小麦、玉米为主。粮食生产的测量指标选取能较好表征其变化性质的粮食总产、粮食单产、播种面积及人均粮食产量。研究时域为 1987—2016 年,相关指标数据整理自《中国农业年鉴(1987—2016)》、《中国农村统计年鉴(1987—2016)》及《各省(市)统计年鉴(1987—2016)》。考虑到数据的可获取性,研究区域为中国大陆 31 个省(市)(不含港、澳、台)。

粮食生产分区有 3 种类型。(1) 根据自然地理特点可分为北方和南方粮食产区。其中北方粮食产区包括东北区、黄淮海区、黄土高原区、蒙新区和青藏区,南方粮食产区包括长江中下游区、华南区以及西南区^[30]。(2) 根据经济地理特点可分为东中西以及东北四大粮食产区。(3) 根据《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020 年)》可分为粮食主产区和粮食主销区。其中,粮食主产区包括黑、吉、辽、蒙、冀、豫、鲁、苏、皖、川、湘、鄂和赣 13 个省,粮食主销区包括浙、粤、津、闽、京、琼和沪 7 个省。

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关

引入空间自相关分析方法揭示中国粮食生产空间相关性, 主要包括全局空间自相关和局部空间自相关。

(1) 全局空间自相关

全局空间自相关是对我国粮食生产总体集聚格局及变化特征的刻画, 用于分析其总体空间关联程度及差异程度。测度方法以 Global Moran's I 指数表示, 计算式如下:

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

式中: I 为 Global Moran 指数; n 为省域单元数; x_i 和 x_j 分别为 i 省域和 j 省域粮食生产量, \bar{x} 为粮食生产量的均值; W_{ij} 为基于 Queen 的空间邻接矩阵。Global Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 根据 z 值对 Global Moran's I 指数进行统计检验, z 值计算公式为:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}}$$

若 Z 值 > 0 且显著时, 表明粮食生产存在明显正向空间相关性; 若 Z 值 < 0 , 表明粮食生产存在空间负相关; 若 Z 值 $= 0$, 表明粮食生产呈随机分布。

(2) 局部空间自相关

全局空间自相关分析虽反映了粮食生产整体空间集聚态势, 但不能确定其局部空间集聚情况, 遂采用局部空间自相关弥补其不足, 识别局部空间异质区域, 进一步测度局部空间自相关特征。测度方法以 Local Moran's I 指数表示, 公式如下:

$$I_i = n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

若 I_i 为正, 为粮食生产 H-H(高高)、L-L(低低)空间集聚; 当 I_i 为负, 为粮食生产 H-L(高低)、L-H(低高)空间集聚。借助 ArcGIS 10.3 工具, 将计算结果空间可视化。

1.2.2 空间面板计量模型

(1) 模型构建

鉴于粮食生产影响因素探究中所用数据包含时间序列和横截面两方面数据, 仅采用忽视空间效应的传统 OLS 估计, 可能会使模型设定过程中出现偏差, 导致回归结果有失偏颇^[31]。而空间面板计量模型嵌套空间交互效应, 注重变量间因空间依赖、空间溢出所产生的交互影响, 遂改用空间面板计量模型^[32]对粮食生产的影响因素进行考察。空间面板计量模型主要包括 3 种: 空间滞后模型 (SLM)、空间误差模型 (SEM) 及空间杜宾模型 (SDM)^[33]。

SLM 侧重于探讨区域外空间溢出因子(技术、知识及劳动力等)对研究区域所产生的影响, 即相邻区域粮食生产对研究区域粮食生产产生的影响; SEM 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本身粮食生产的影响程度; 而 SDM 则是以上两者的融合, 并在基于空间溢出效应与误差扰动效应的基础上, 进一步估计自变量对因变量产生的直接效应与间接效应。直接效应用以解释各影响因子对本地区粮食生产影响, 间接效应则估计各影响因子对本地区以外其他地区粮食生产产生的影响或其他地区对本地区粮食生产所带来的影响。考虑到粮食生产可能受内外因素兼互影响, 根据 SDM 模型效应构建中国粮食生产影响因素模型, 公式如下:

$$y_{it} = \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} y_{jt} + \lambda \sum_{j=1}^n W_{ij} U_{jt} + \beta_1 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \beta_0 + \epsilon$$

式中: i, j 表示省份; t 为年份; y_{it} 表示 t 时期 i 省份的粮食生产量; X_{it} 表示 t 时期 i 省份影响粮食生产的一系列因素(见表 1); δ, λ 表示空间滞后值回归系数及空间误差系数; β_0, β_1 表示待估系数; W_{ij} 是空间权重矩阵 W 中的一个元素; U_{jt} 表示 t 时期 j 省份随机误差向量, μ_i 表示空间固定效应; λ_t 表示时间固定效应, ϵ 表示随机扰动项, 模型估计所使用的原始代码来自 Elhorst 的空间计量经济 Matlab 工具箱。

(2)指标选取

粮食生产易受自然、经济、社会以及政策制度等多方面因素影响,在影响因素选择中也要进行多方位思考.基于已有对粮食生产影响因素的探索^[9,13-19],遵循科学性和数据可获取性的原则,本文以柯布—道格拉斯(Cobb-Douglas)生产函数中技术、资本及劳动力等基本投入因素为切入点,扩大因子选取的外延,纳入气候与能源因子,对中国粮食生产影响因素展开分析.鉴于共线性受限的影响,将劳动力变量剔除,着重从技术、资本、气候与能源等方面进行考察(见表1).

表1 变量描述
Tab.1 Variable description

变量	指标	单位	符号
技术	农田有效灌溉面积	万亩	Tec
资本	第一产业固定资产投资	亿元	Cap
	年均温	℃	Tem
气候	年均日照时数	h	Ssd
	年均降水量	mm	Pre
能源	单位面积用电量	亿 kw · h	Elec

注:气温、日照及降水为1987—2016年国家级地面气象观测站站点(包括新址启用的109个站点)逐日气温、降水、日照观测数据,数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/site/index.html>).数据处理中,首先对每省各气象站点逐日数据进行足月处理,分别计算出月均温、月均日照时数及月均降水量,若出现极端异常值,采用中位数进行数据处理.其次,根据月均温、月均降水量和月均日照时数求得各省年均温、年均降水量和年均日照时数.

1) 技术.科技进步是粮食生产的重要推动力量^[34].技术投入的增加,有利于提高粮食单产水平,进而提高总产.由于农用机械总动力、农田有效灌溉面积及化肥施用折纯量等技术投入中部分数据不连续,且仅有农田有效灌溉面积通过共线性检验,遂将其作为技术投入指标.

2) 资本.资本投入作为粮食生产的基础保障之一,其重要性毋庸置疑.本文以第一产业固定资产投资作为资本投入指标.

3) 气候.气候因素在粮食生产中发挥越来越重要的作用.气候变化会改变温度、降水等农作物生长环境,加剧农作物产量波动,造成“粮食安全”忧患^[35].本文以年均温、年均日照时数以及年均降水量作为气候测度指标.

4) 能源.农业机械化设施的高效运行需要充足的能源供给,电力作为环保能源在农业生产中地位日益突出.本文以单位面积用电量作为粮食生产能源测度指标.单位面积用电量=农村用电量/粮食播种面积.

1.2.3 地理加权回归模型

在对粮食生产影响因素探究中,不仅要思索各影响因子通过空间交互作用对粮食生产带来多少影响,还需进一步考量各影响因子在不同的地域范围内对粮食生产的影响程度和影响范围.空间面板计量模型是在全局空间依赖性的基础上对影响因子进行探究,忽视了其空间异质性;而地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)具有反映空间变化,能对变量的空间非平稳性进行探索和分析^[18].因此,本文在空间面板计量模型的基础上,运用地理加权回归模型分析中国粮食生产影响因素的空间异质特征.其模型形式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{\lambda=1}^n \beta_{\lambda}(u_i, v_i) X_{i\lambda} + \varepsilon.$$

式中: Y_i 表示*i*区域粮食生产量; $\beta_0(u_i, v_i)$ 表示常数; $\beta_{\lambda}(u_i, v_i)$ 表示回归系数; (u_i, v_i) 表示*i*省份地理位置; $X_{i\lambda}$ 表示*i*省份λ自变量的参数值,ε表示随机误差.本文运用 ArcGIS 10.3 中的 Geographically Weighted Regression 工具来实现 GWR 模型的构建.

2 结果与分析

2.1 粮食生产时间变化特征

(1) 1987—2016年我国粮食生产总体发展趋势良好,粮食单产增速显著,粮食总产、播种面积、人均粮食产量阶段性特征一致(见图1).从增长速度看,粮食单产由1987年的3 621.7 kg/hm²上升至2016年的5 539.2 kg/hm²,年均增长率为1.48%,与同一时期的粮食总产(1.37%)、粮食播种面积(0.24%)和人均粮食产量(0.55%)相比,显示出较快的增长速度.从阶段变化看,具有3阶段发展变化特征:①1987—1998年为缓

慢增长期,粮食单产、总产增长最快,年均增长 2.0%,分别高出播种面积及人均粮食产量 1.79、1.22 个百分点。②1999—2003 年为波动下滑期,粮食总产、人均粮食产量下滑最为明显,年均降速 4.16%、4.81%,而粮食单产下滑相对较缓,年均降速 0.9%。③2004—2016 年为快速增长期,粮食总产增速最大,粮食单产、人均粮食产量与播种面积相对持平,年均增速分别为 2.14%、1.52%、1.61%、1.34%。究其原因发现:1987—1998 年我国粮食总产、单产平稳增长与我国农业生产结构调整、政策变化(粮食省长负责制实施)、农村基础设施建设投入有关,而 1999—2003 年间粮食总产下滑,一方面由于城镇化、工业化建设以及生态退耕导致耕地面积减少,另一方面则因国家农业结构调整中对粮食生产重视性不足,农民生产积极性较低,二者共同导致粮食产量剧烈下滑,而对粮食单产波及较小。2004 年以来,国家出台中央一号文件,重点关注“三农”问题,推行“一免三补”,完善粮食市场体制机制,极大调动农民生产积极性,推动粮食总产大幅提高,加上农业科技研发的投入,农业基础设施的完善,粮食单产水平也进一步提高,并在粮食生产中的地位日益突出。

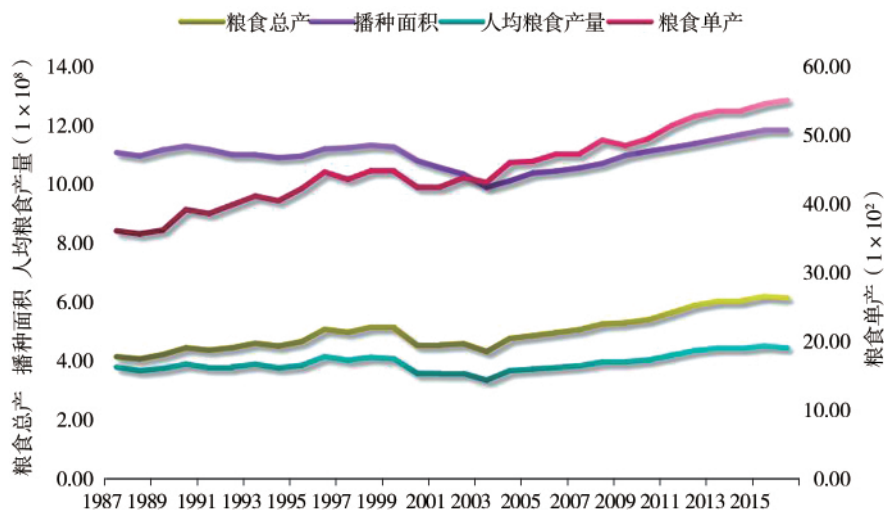


图 1 中国粮食生产发展变化

Fig.1 Development and changes of China's grain production

(2) 1987—2016 年我国粮食生产结构差异显著,玉米产量增速明显,小麦、大豆播种面积下滑趋势显著。从产量看,小麦、玉米、稻米及大豆在研究期间均呈上升趋势。其中,玉米在 1987—2016 年间共增加 3.6 倍,由期初的 0.79 亿 t 增加到期末的 2.2 亿 t,年均增长率 3.58%,与同期的小麦(1.33%)、稻米(0.59%)、大豆(0.13%)相比,增长速度显著。从播种面积看,四种作物中除玉米以外均有下滑。其中,小麦、稻米、大豆分别以 1.98%、1.61%、1.92% 的平均速率持续下滑,而玉米则以 0.67% 的平均增速高出粮食总播种面积 0.43 个百分点,结构差异显著。从作物占比(占粮食生产比重)看,除玉米占比呈上升趋势外,其余作物占比均有不同程度的下滑,大豆下滑最剧烈。总体看来,小麦、水稻产量与粮食总产量走向一致,而玉米产量与粮食单产走向一致。这进一步说明我国粮食生产阶段性变化除与政策、结构调整有关外,与作物结构变化密不可分。

2.2 粮食生产空间变化特征

鉴于粮食总产、播种面积及人均粮食产量空间分布高度切合,而粮食单产分布范围有所差异,故以粮食总产、粮食单产两项指标探究粮食生产空间分布特征与规律。

(1) 粮食总产。①1987—2016 年,我国粮食总产南北差异显著(图 2,图 3a—图 3b)。空间分布呈“北高南低”的特点,且粮食增产高值省份集中于“38 度线”以北地区。其中,粮食总产较高的区域主要集中在蒙新区、东北区、黄淮海区等区域。②我国粮食总产东西差异显著。空间分布呈“中多西少”的特点,粮食增产省份集中于“胡焕庸线”以东地区。“热点区”分布于中部及东北部区域,西部地区虽有个别省份(四川)成为高值中心,但整体来看明显偏低。③我国粮食生产产销不均衡差异显著。空间分布呈现“逆向”发展的特点。其中,黑、豫、吉、冀、内蒙古 5 省在粮食主产区中处于较高水平,鄂、湘、赣等省次之。④我国粮食总产量空间差异变化反映了我国粮食生产重心的移动,也进一步印证了我国粮食生产“南粮北移”“东移中进”的变化趋势。且其空间演变一方面得利于北部地区粮食播种面积不断扩大、单产水平进一步提高,另一方面得利于中部及粮食主产区产业结构转变、粮食生产定位以及固有的种粮传统,二者交互影响,共同推动粮食产量不断上涨。

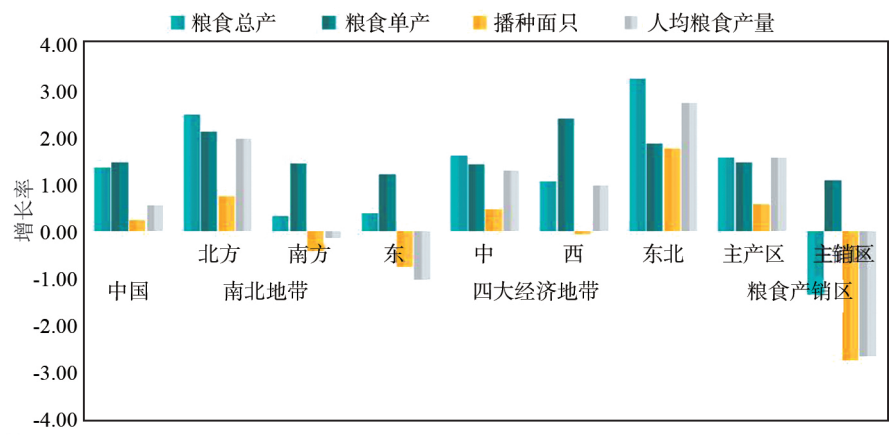


图 2 1987—2016 年中国粮食生产年均增长率变化

Fig.2 Changes in the average annual growth rate of China's grain production from 1987 to 2016

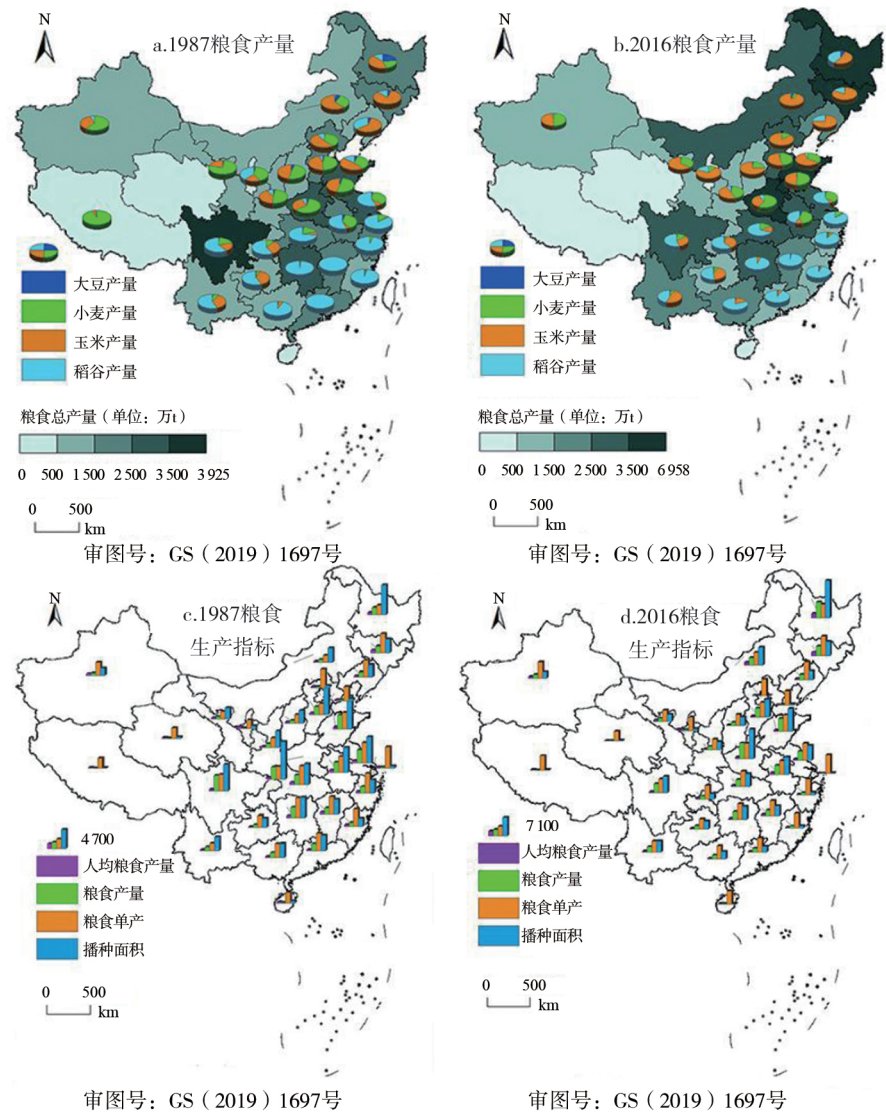


图 3 粮食生产空间分布图

Fig.3 Grain production spatial distribution map

(2) 粮食单产.①1987—2016 年,全国粮食单产均有增长,北部地区增速显著(见图 2).单产水平较高的区域主要位于东北区、黄淮海区及蒙新区,与粮食总产南北格局基本吻合.②粮食单产东西差异明显.空间分布呈“东高西低”的格局特点(图 3c—图 3d).其中,东部区域主要呈线状分布于长江三角洲、闽南三角洲、珠江三角洲及华东地

区,而中西部等内陆地区的粮食单产虽有个别省份成为高值中心(新疆),但整体来看明显偏低.③粮食单产产销不均衡程度有所降低.单产高值区分布于辽、吉、鲁、苏及湘等粮食主产区及京、津、沪、浙及闽等粮食主销区,粮食主产区与主销区单产水平趋于一致.④我国粮食单产空间演变一方面得利于北部地区高产作物种植面积增加、生产条件改善、技术“累积”效应,三重影响下共同推动粮食单产大幅提高,另一方面得利于东部地区农业基础设施完善,技术效率高,基础雄厚,即使其增幅明显小于北方地区,单产仍保持较高水平.

(3)粮食生产结构.①稻米、小麦、玉米、大豆产量与播种面积空间分布趋同,区域差异显著(图 3a—图 3b).②1987—2016 年稻米、小麦产量南北差异显著.其中,稻米呈现由南向北移动、“南高北低”的特点,高值省份主要集中于“长江—淮河以南”,“长江—淮河以北”地区除黑龙江外,其余省份稻米产量均较低.而小麦空间分布与之相反,呈现“由南向北移动、北高南低”的特点.其中,蒙新区及黄淮海平原小麦产量保持较高水平.③玉米、大豆产量东西差异显著.玉米空间分布呈东北向西南演进的变化规律,且高值区集中于东北区、黄淮海区、蒙新区,与粮食总产、单产高值区域基本吻合.大豆空间分布呈由东向西推进的变化规律,高值省份集中在内蒙古、黑、吉 3 省及黄淮平原的豫、皖、鲁、苏 4 省,西部内陆地区中除四川以外均处于低值水平.④我国稻米、小麦生产比重的下降及玉米比重的高度提升是我国粮食生产空间分异的重要结构性因素.

2.3 粮食生产空间集聚格局

图 3 表征了我国粮食生产各指标的空间分布态势,为进一步揭示其空间关联与集聚状况,引入空间自相关分析方法,基于 Geoda 和 ArcGIS 对中国 1987—2016 年粮食生产的空间集聚格局进行研究.

(1)全局空间自相关:空间集聚增强.根据全局空间自相关公式,计算粮食总产、粮食单产、播种面积和人均粮食产量的全局 Moran's I 指数(表 2).

表 2 粮食生产全局 Moran's I 统计值

Tab.2 Global food production Moran's I statistics

指标	年份	Moran's I	$Z(I)$	P
粮食总产	1987	0.145 0	1.635 8	0.101
	2003	0.168 5	1.841 3	0.065
	2016	0.212 2	2.269 6	0.023
粮食单产	1987	0.481 0	4.435 3	0.000
	2003	0.205 2	2.165 6	0.030
	2016	0.208 7	2.222 8	0.026
播种面积	1987	0.235 7	2.461 9	0.013
	2003	0.199 4	2.142 5	0.032
	2016	0.214 4	2.349 1	0.018
人均粮食产量	1987	0.154 8	1.784 8	0.074
	2003	0.282 9	3.032 9	0.002
	2016	0.359 2	3.874 3	0.000

①1987—2016 年粮食生产各指标 Moran's I 指数均为正,2016 年 $Z(I)$ 均大于 1.96 临界值,且 P 值均通过了 5% 显著性水平检验.表明省域粮食生产之间存在着总体空间自相关现象,粮食生产水平相似的地区在空间上呈集聚分布,即粮食生产量比较高(低)的省域,其周边省域的粮食生产量也比较高(低).②不同指标空间相关性有所差异.其中,粮食单产与播种面积 Moran's I 指数呈波动下滑的趋势,但 Z 值仍在 2.0 以上,由“强相关”转变为“弱相关”,主要与我国粮食单产均有提升,而播种面积大范围缩减导致空间分异减弱有关.而粮食总产与人均粮食产量 Moran's I 指数则与之相反,由“弱相关”转变为“强相关”,说明我国粮食总产正向邻近作用不断增强,省域间空间溢出效应不断加深,但空间分异愈加显著.

(2)局部空间自相关:不同粮食生产指标局部集聚特征差异显著.鉴于全局空间自相关未对粮食生产局部集聚特征进行评估,本文引入局部空间自相关分析方法、借助 ArcGIS 空间统计工具进一步探究粮食生产局部空间集聚情况(图 4).①粮食单产局部空间集聚效应减弱(图 4a,4d),由明显的东西倒置格局转变为“西部为主”的单极格局.其中,“H-H”集聚区由东部沿海的苏、浙、沪 3 省及中部地区的江西省演变为上海 1 个市域,“L-L”集聚区由东北向西南逐渐削减,由晋、陕、甘、宁、内蒙古 5 省演变为甘、陕 2 省,东西差异减弱.表明粮食单产较高的省域对邻近省域影响较大,东部及东北地区通过带动中部省域单产水平,致使东中差距逐渐缩小,而西部地区粮食单产水平亟需加

强.②粮食总产、播种面积局部集聚格局整体类似,且“H-H”集聚效应显著(图 4b,4e).集聚区呈现由黄淮平原向东北平原逐渐演变的趋势.集聚省域由豫、鲁、皖、苏演变为黑、吉、豫、鲁等省,其中,黑龙江粮食增产量超过 4 000 万 t 以上,较之其他三省,黑龙江粮食生产“热区”地位愈加凸显.③人均粮食产量由“东北—中部”格局向“北部为主”的单极格局演变,南北分化显著(图 4c,4f).“H-H”集聚区由黑、吉、皖 3 省演变为黑、吉、内蒙古 3 省,与南方形成鲜明对照.其北上趋势与粮食总产基本同步.

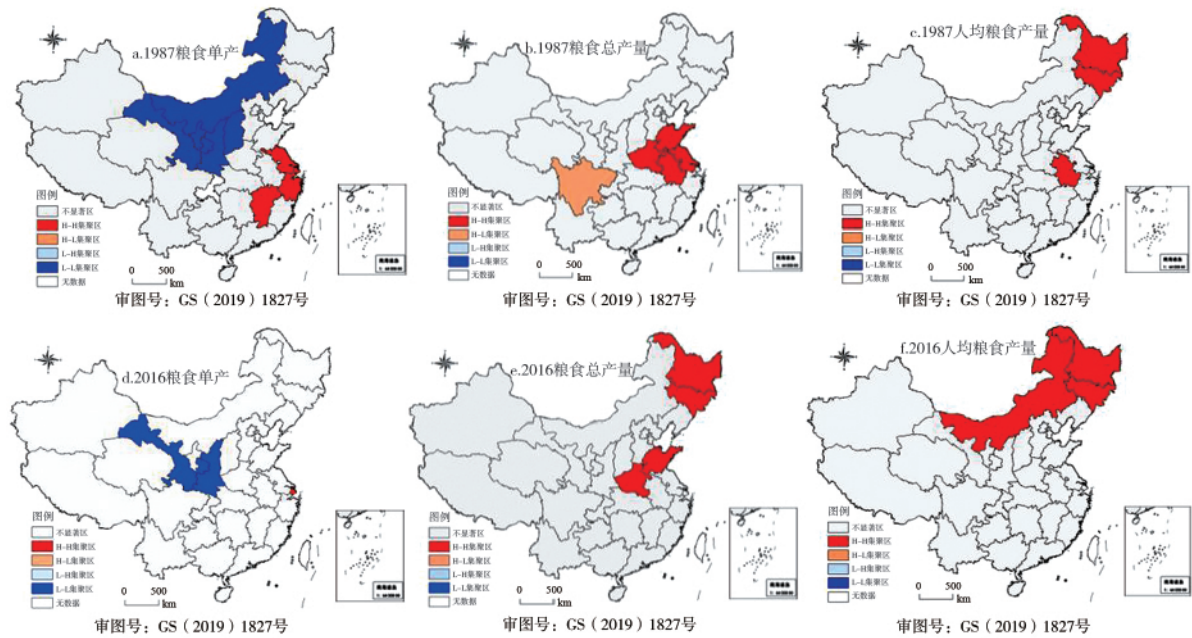


图 4 1987—2016 粮食生产空间格局 Lisa 图

Fig.4 Lisa chart of the spatial pattern of grain production from 1987 to 2016

2.4 粮食生产影响因素分析

以上研究明显发现,我国粮食生产指标中单产时空变化均趋于正向,波动变化小,而总产、播种面积及人均粮食产量时空分布契合程度较高,且空间分异显著.故影响因素探究中以粮食总产作为粮食生产象征指标(因变量),探析各影响因子对粮食生产的影响程度、影响范围.

(1) 空间面板模型检验.鉴于我国粮食生产的空间相关性,采用空间面板模型明显优于传统 OLS 估计.而在空间模型筛选中,为确保其合理性,将传统 OLS 与 SLM、SEM、SDM 进行检验比对,结果如表 3.

表 3 空间面板数据模型估计结果
Tab.3 Spatial panel data model estimation results

变量	OLS	SLM	SEM	SDM
$\ln Elec$	10.03**	10.26**	11.28**	11.91**
$\ln Tec$	35.11**	35.37**	31.37**	31.55**
$\ln Cap$	2.57*	2.39*	-0.18	-0.53
$\ln Tem$	-13.18**	-13.41**	-4.46**	-4.83**
$\ln Ssd$	-8.59**	-8.69**	-3.98**	-3.83**
$\ln Pre$	8.099**	8.094**	0.62	0.13
R^2	0.891	0.893	0.808	0.82
$LM lag$	270.5**	273.68**	68.43**	64.37**
$R-LMlag$	14.1**	14.66**	11.33**	11.88**
$LM error$	530.3**	536.29**	94.33**	85.56**
$R-LMerror$	273.9**	277.27**	37.23**	33.07**
DW	0.686	0.684	1.11	1.13

注: ** 和 * 分别表示 1%、5% 的显著性水平

将无空间效应的 OLS 与空间面板模型中的 SLM、SEM 进行比对.发现 3 个模型中变量通过率大体一致,其中, $\ln Elec$ 、 $\ln Tec$ 、 $\ln Tem$ 、 $\ln Ssd$ 等变量均在 1% 的水平下显著. $LMlag$ 、 $LMError$ 、 $R-LMlag$ 、 $R-$

$LMError$ 等统计量在 1% 的水平上拒绝原假设. 从 R^2 与 DW 值的对比中判断, SEM 结果明显优于 OLS 结果. 将时间固定相效应下的 SEM 模型与双向固定效应下的 SDM 模型进行比较, 发现 LR 检验中 SLM、SEM 模型关于 $H_0: \theta=0$ 和 $H_0: \theta+\delta\beta=0$ 假设条件不充分, 故选定 SDM 模型更优^[36]. 根据 Hausman 检验 (146.7, $P=0.000$) 选定随机效应模型下的 SDM 来识别粮食生产时空演变的关键因素 (见表 4).

表 4 SDM 估计结果

Tab.4 SDM estimation results

变量	弹性系数	t -统计值	P 值	直接效应	t -统计值	间接效应	t -统计值
$\ln Elec$	0.176**	11.44	0.00	0.16	11.64	-0.10	-4.10
$\ln Tec$	0.642**	21.84	0.00	0.67	23.48	0.32	6.36
$\ln Cap$	0.010	1.31	0.18	0.01	1.51	0.00	0.44
$\ln Tem$	-0.233**	-4.20	0.00	-0.26	-5.21	-0.31	-3.30
$\ln Ssd$	-0.223**	-3.38	0.00	-0.27	-3.87	-0.40	-3.15
$\ln Pre$	-0.000	-0.00	0.99	0.02	0.62	0.31	4.62
$W * \ln Elec$	-0.159**	-9.34	0.00				
$W * \ln Tec$	-0.335**	-8.55	0.00				
$W * \ln Cap$	-0.004	-0.41	0.67				
$W * \ln Tem$	0.055	0.88	0.37				
$W * \ln Ssd$	0.025	0.33	0.73				
$W * \ln Pre$	0.105*	2.13	0.03				
$W * \ln Grain$	0.69**	27.80	0.00				
R^2	0.94						
Corrected R^2	0.89						
log-likelihood	-167.93						

注: ** 和 * 分别表示 1%、5% 的显著性水平

SDM 估计结果中包含变量弹性系数、空间滞项系数及直接与间接效应系数. 其中, 变量弹性系数用以解释变量对粮食生产的直接影响程度, 空间滞后系数是对各变量空间溢出效应是否显著的反馈, 而直接与间接效应系数则是对空间溢出效应的详细分解, 更加系统全面.

①粮食生产空间溢出效应明显. 粮食生产空间溢出效应 ($W * \ln Grain$) 弹性系数为 0.69, 且通过 1% 的显著性水平检验, 说明粮食生产每增加 1 个单位, 会导致邻省粮食生产增加 0.69 个单位, 印证了空间分布中的“H-H 集聚”效应, 也进一步阐释了我国粮食生产中技术发展、政策制定等空间溢出因素及气候扰动等随机误差因素皆会突破省域边界, 更大范围地对相邻省域粮食生产产生影响.

②技术进步是推动地区粮食生产的首要因素. 以有效灌溉面积为代表的技术进步对粮食生产的弹性系数 ($\ln Tec$) 及空间滞后系数 ($W * \ln Tec$) 均通过 1% 的显著性水平检验, 直接效应与间接效应系数均显著为正, 分别为 0.67、0.32, 表明技术进步对本省及邻近省域粮食生产均有影响. 且技术进步每正向变化 1%, 会导致本省粮食生产提高 0.67%, 邻省粮食生产提高 0.32%. 技术进步是粮食单产提高的关键因素, 技术溢出可以通过带动邻近省域技术水平提高单产, 进而缩减省域间单产差距, 推动区域整体粮食生产水平的提高. 进一步验证了我国粮食单产空间分异弱化的变动趋势.

③气候是影响地区粮食生产的重要因素. 其中, 年均温、年均日照时数对粮食生产的弹性系数 ($\ln Tem$ 、 $\ln Ssd$) 均通过 1% 的显著性检验, 且直接效应系数均显著为负, 分别为 -0.26、-0.27, 而空间溢出系数不显著. 表明气温、日照仅对本省粮食生产产生影响, 气温、日照每正向变化 1%, 省域内粮食生产分别降低 0.26%、0.27%. 年均降水对粮食生产的空间滞后系数在 5% 的水平下显著, 其间接效应系数为 0.31, 而对粮食生产的直接效应不明显. 表明降水仅对邻省粮食生产产生影响, 降水每正向变化 1%, 会导致邻省粮食生产提高 0.31%. 气温、日照与降水均是粮食生产中不可或缺的关键因素, 三者的时空匹配越好, 越有利于农业生产的发展. 由于我国粮食生产格局呈“T”型分布, 粮食作物结构空间分异显著, 不同地域范围内、不同作物品种对气候条件的要求不同, 导致气候对省区内外粮食生产影响差异显著.

④以单位面积用电量 ($\ln Elec$) 为代表的能源利用可以有效促进本省粮食生产, 而对邻省粮食生产产生负向影响. 其对粮食生产的弹性系数 ($\ln Tec$) 及空间滞后系数 ($W * \ln Tec$) 均显著, 且其直接效应与间接效

应系数分别为 0.160、-0.10。即能源利用每正向变化 1%，省域内粮食生产增加 0.16%，而邻省粮食生产减少 0.1%。其产生的正反效应相对持平。能源利用是粮食生产规模经营和技术进步等成本节约手段的“先行投资”，以电力为主的环保绿色能源更是今后粮食生产用能中的重要一环。我国粮食生产重心南北分异显著，北部与中部地带种粮地位突出，东南沿海地带经济发展属性至上，地狭人稠，用能紧缺。在北部与中部地区通过能源投入提升粮食产量的同时，会对南部沿海地区带来“资源争夺”的负向影响。未来区域粮食生产中还需进一步做好资源调配工作，更大效率地发挥资源利用优势，推进区域整体粮食生产水平的提高。

(2)GWR 模型结果。以上研究发现，技术进步、气候变化、能源利用均会对粮食生产产生影响，但仅从全国范围内展开分析，未能解释该因素对粮食生产的具体影响程度和影响范围，以及由此产生的空间分异规律。因此，引用 GWR 模型考察各因子的空间差异。因单位面积用电量($Elec$)、年均日照时数(Ssd)及年均降水量(Pre)的空间异质性置信水平较低，以下主要分析有效灌溉面积(Tec)及年均温(Tre)的作用规律(图 5)。

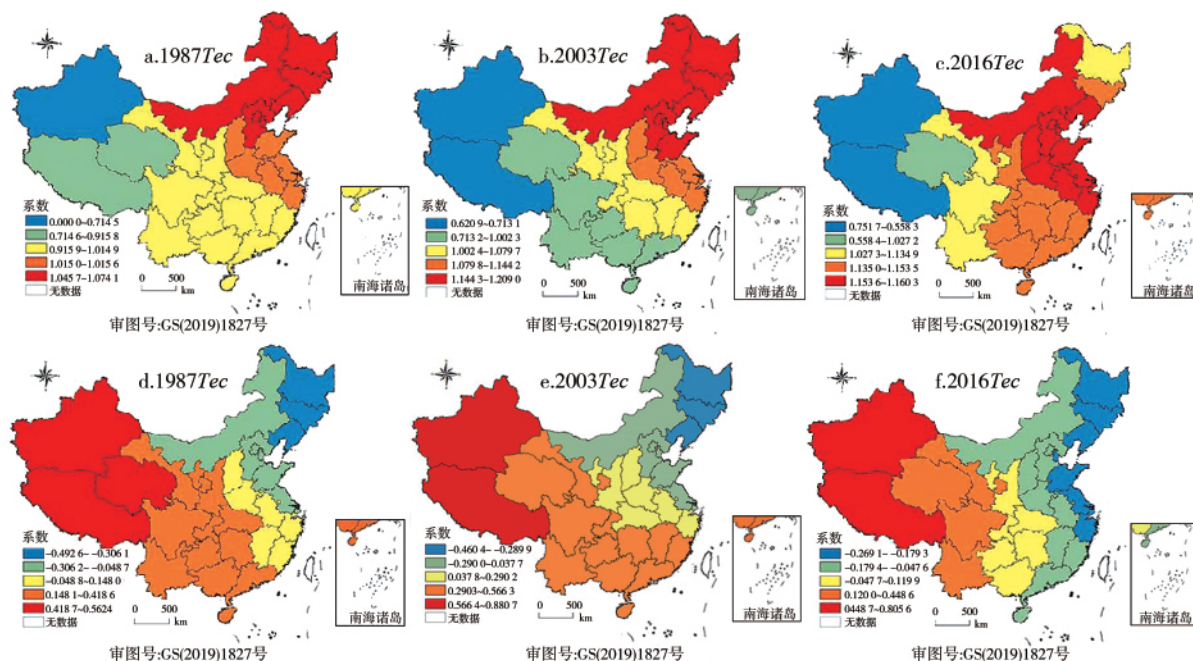


图 5 1987—2016 年变量回归系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variable regression coefficient from 1987 to 2016

①有效灌溉面积(Tec)。有效灌溉面积对粮食生产的影响东西差异显著(图 5a—图 5c)。1987—2016 年，有效灌溉面积影响系数呈现出高值区由东向西推进、低值区范围逐渐缩小的变化特征。其中，高值区逐渐由东北平原向华北平原及长江中下游平原转移，涉及的省份集聚于西部内蒙古、中部 2 省(晋和豫)、以及东部 6 省(京、津、冀、鲁、苏及沪)，其有效灌溉面积每提升 1 个单位，粮食产量均提高 1.6 个单位以上。较高值区呈现由华北向华中、华南演变的趋势，由京津冀 3 省演变为辽、陕、皖、浙、闽、赣及鄂等省，其有效灌溉面积对于粮食产量的提升比为 1:1.5。低值区变动较小，一直呈“半月”状集聚于西部的新藏 2 省，其有效灌溉面积对于粮食产量的提升值均低于 1 个单位。有效灌溉面积对于粮食产量影响系数的空间分异与我国当前粮食单产“H-L”集聚格局演变、粮食总产空间分布格局基本吻合。有力地佐证了灌溉对于我国粮食单产以及粮食总产积极的“连带”影响。也进一步验证了上述模型中技术对本省粮食生产的积极效应以及对邻省的空间溢出效应。今后，灌溉水平较低的省域还需进一步完善农田灌溉工程建设，提高粮食单产水平，夯实粮食生产能力。

②年均温(Tre)。年均温对粮食生产的影响亦东西差异明显，但其与有效灌溉面积影响效应相反(图 5d—图 5f)。1987—2016 年年均温影响系数高值区呈现出由西向东推进、高值区范围逐渐缩小的变化特征。其中，年均温比重提高对于西部产区的新疆、西藏等省粮食生产提升效应最明显，年均温每提升 1 个单位，粮食产量将提高 0.8 个单位。而对中部及东部大部分省域粮食生产均会产生负向影响，尤其对东北三省及东部的苏、沪及浙等省粮食生产影响较大，其年均温每提升 1 个单位，粮食产量将下降 0.2 个单位以上。东北三省作为我国粮食生产重心地，目前已有部分研究发现气候对于该地作物的空间分异影响较大，气候变暖对于东北三省大部分地区粮食产量具有正面影

响^[38].另有部分研究认为气候对于该地区的粮食作物结构影响存在差异,气温升高有利于该地水稻增产,而对于玉米不利影响较大,且气温对于玉米的影响系数远高于水稻^[39-41].本研究中关于气温对于粮食生产的影响是从全国尺度上探讨局部地区的空间分异规律,尚未考虑到局部地区内部的地理差异性.故以当前东北地区的粮食作物结构比例来看,气温升高对于粮食生产的不利影响进一步验证了上述学者的论点.此外,若将东北地区内部的地区差异与作物结构比例结合来看,多数情况下该地的热量与适宜的水分供应条件,是有利于粮食生产的.总体来看,年均温对于粮食产量影响系数的空间分异与我国粮食单产集聚格局演变、粮食总产空间分布格局相悖.且气候对我国大部分省域粮食生产负向影响更显著.进一步验证了上述模型中气候对本地粮食生产以消极效应为主的结论.未来西部产区的农业生产,需在立足本地资源优势的基础上,加大农业科技投入,发展特色农业,提高粮食生产稳定性.而中东部产区还需警惕气候变化对于粮食生产的影响力,建立复杂气候风险应对机制,提升地区粮食生产对于气候的应变能力,巩固粮食安全.

综上所述,技术进步(*Tec*)对我国粮食生产的积极影响远大于气候,且在未来粮食生产中影响力度还会不断扩大.这将成为我国粮食生产的“主力”因素,而气候对粮食生产的负向影响范围虽在不断扩大,但总体影响幅度较小,目前不会对我国粮食生产造成过大阻力.考虑到气候变化的不稳定性,由极端天气造成的自然灾害对粮食生产的影响不容忽视^[37].未来的粮食生产还需扩大技术影响的“趋势面”,减缓由于自然灾害对粮食生产带来的不利影响,确保粮食生产的稳定性.

3 结论及讨论

3.1 结论

基于中国 1987—2016 年 31 个省域粮食总产、单产、播种面积及人均粮食产量等粮食生产数据,采用空间自相关分析方法,空间面板计量模型及 GWR 模型,对中国粮食生产时空演变及影响因素进行探讨.结论如下:

(1) 1987—2016 年我国粮食生产总体发展趋势良好,粮食单产增速显著,粮食总产、播种面积及人均粮食产量阶段性特征一致.粮食生产结构差异显著,玉米产量增速明显,小麦和大豆播种面积下滑趋势显著.

(2) 我国粮食生产空间集聚特征显著,空间分布差异大.粮食总产、单产、播种面积及人均粮食产量存在显著的空间自相关性和空间集聚性.粮食总产“中多西少”、“北多南少”,粮食增产高值省份集中于“38°线”以北地区及“胡焕庸线”以东地区.粮食单产东高西低,北方增速显著.粮食播种面积、人均粮食产量空间分布格局与粮食总产一致.粮食生产结构中稻米、小麦、玉米、大豆产量与播种面积空间分布趋于一致,区域差异显著.

(3) 我国粮食生产空间溢出效应显著,省域粮食生产增加会带动邻省粮食生产增加.另外,技术进步、气候及能源均是我国粮食生产的影响因素.技术进步是推动地区粮食生产的首要因素,气候是影响地区粮食生产的重要因素,能源利用可以有效促进本省粮食生产,而对邻省粮食生产产生负向影响.

(4) 有效灌溉面积比重提高对于西部内蒙古、中部 2 省(晋和豫)、以及东部 6 省(京、津、冀、鲁、苏及沪)粮食生产提升效应最明显,对西部的新藏 2 省提升微弱.年均温比重提高对于西部产区的新疆、西藏等省粮食生产提升效应最明显,对于东北 3 省及东部的苏、沪及浙等省粮食生产最为不利.

3.2 讨论

粮食生产稳定性是维系我国粮食安全的关键.本文通过对我国近 30 a 粮食生产时空格局进行剖析,并从技术与气候层面建构模型,量化二者对粮食生产影响比例,以期气候变化下制定科学合理的粮食安全政策提供参考.从当前我国粮食生产的现状格局以及技术与气候对粮食生产的影响程度来看,今后的粮食生产中,还需因地制宜,因势利导,针对我国中部、东北粮食生产重心区,应充分发挥技术进步的“规模效应”,提高地区粮食生产比较优势,加大科技投入力度,发展现代农业,降低粮食生产的不确定性和风险性,保障粮食安全.而对于西部粮食产销平衡区,需在立足本地资源优势的基础上,完善农业基础设施,发展特色农业,提高粮食生产稳定性.同时,在未来的研究中还需考虑以下几个问题:

(1) 在全球气候变暖的趋势下粮食产量受其波及的范围大小及影响幅度是各界普遍关注的问题.本研究中关于气温对粮食生产的影响分析显示,以新疆、西藏为代表的西部产区粮食生产在气候变化趋势下呈现“不断向好”的表现,未来是否会对当前的粮食生产格局带来一定扭转还尚未可知,但是未来西部产区的粮食生产比重可能会进一步提高,并增加对国家粮食生产的贡献比重.因此,结合粮食作物结构以及地理属性对于西北地区粮食生产与气候变化的互动响应研究还需进一步加深.

(2) 以有效灌溉面积为代表的技术进步在缓和气候变化冲击、提升本地粮食生产稳定性方面发挥着积极影响力,但有效灌溉影响高值区域亦是我国水资源紧缺的地区,未来如何在维持本地粮食生产的基础上加大技术创新,根据创新收益缩小用水限制,进而推进农业的可持续发展也是下一步需要考虑的话题。

(3) 粮食生产过程中除了受到技术与气候等因素的影响,还包含其他外界因素的干扰,如:社会经济因素、人口政策变化等,后续的研究中,还需将这几者结合起来,更加综合全面地探索我国粮食生产的影响因素。

参考文献:

- [1] 国务院新闻办公室.中国粮食安全白皮书[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/2019-10/14/content_5439410.html, 2019-10-14.
State Council Information Office. China Food Security White Paper[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/2019-10/14/content_5439410.html, 2019-10-14.
- [2] KUKAL M S, IRMAK S. Climate-driven crop yield and yield variability and climate change impacts on the US great plains agricultural production[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3450.
- [3] THOMAS F S. Climate change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. IPCC, 2014.
- [4] 罗翔,曾菊新,朱媛媛.谁来养活中国:耕地压力在粮食安全中的作用及解释[J].地理研究,2016,35(12):2216-2226.
LUO X, ZENG J X, ZHU Y Y, et al. Who will feed China: The role and explanation of China's farmland pressure in food security[J]. Geographical Research, 2016, 35(12): 2216-2226.
- [5] 张鹏岩,庞博,何坚坚.耕地生产力与粮食安全耦合关系与趋势分析:以河南省为例[J].地理科学,2017,37(9):1392-1402.
ZHANG P Y, PANG B, HE J J. Coupling relationship and trend of cultivated land productivity and food security: A case study of Henan Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1392-1402.
- [6] 白景锋,张海军.中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J].地理科学,2018,38(10):1653-1660.
BAI J F, ZHANG H J. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660.
- [7] 金涛,夏晴,岳蒙蒙.粮饲兼顾视角下江苏省粮食产需格局及其优化策略[J].经济地理,2016,36(6):136-141.
JIN T, XIA Q, YUE M M. Supply-demand balance evaluation in grain-feed perspective: The case of Jiangsu Province[J]. Economic Geography, 2016, 36(6): 136-141.
- [8] 胡甜,鞠正山,周伟.中国粮食供需的区域格局研究[J].地理学报,2016,71(8):1372-1383.
HU T, JU Z S, ZHOU W. Regional pattern of grain supply and demand in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(8): 1372-1383.
- [9] 王凤,刘艳芳,孔雪松.中国县域粮食产量时空演变及影响因素变化[J].经济地理,2018,38(5):142-151.
WANG F, LIU Y F, KONG X S. Spatial and temporal variation of grain production and its influencing factors at the County Level in China[J]. Economic Geography, 2018, 38(5): 142-151.
- [10] 李亚婷,潘少奇,苗长虹.中国县域人均粮食占有量的时空格局:基于户籍人口和常住人口的对比分析[J].地理学报,2014,69(12):1753-1766.
LI Y T, PAN S Q, MIAO C H. The spatial-temporal patterns of per capita share of grain at the county level in China: A comparison between registered population and resident population[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(12): 1753-1766.
- [11] 刘大千,刘世薇,温鑫.东北地区粮食生产结构时空演变[J].经济地理,2019,39(5):163-170.
LIU D Q, LIU S W, WEN X. Spatial-temporal evolution of grain production structure in Northeast China[J]. Economic Geography, 2019, 39(5): 163-170.
- [12] 杨勇,邓祥征,李志慧.2000—2015年华北平原土地利用变化对粮食生产效率的影响[J].地理研究,2017,36(11):2171-2183.
YANG Y, DENG X Z, LI Z H. Impact of land use change on grain production efficiency in North China Plain during 2000—2015[J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2171-2183.
- [13] 叶妍君,齐清文,姜莉莉.基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析[J].地理研究,2018,37(1):171-182.
YE Y J, QI Q W, JIANG L L. Impact factors of grain output from farms in Heilongjiang reclamation area based on geographical detector[J]. Geographical Research, 2018, 37(1): 171-182.
- [14] 余瑞林,马宗良.2000年~2015年江汉平原粮食生产的时空格局及影响因素[J].世界地理研究,2018,27(3):99-108.

- YU R L, MA Z L. Spatio-temporal patterns and influencing factors of grain production in Jiangnan Plain during 2000—2015[J]. *World Regional Studies*, 2018, 27(3): 99-108.
- [15] 陈玉洁, 张平宇, 刘世薇, 等. 东北西部粮食生产时空格局变化及优化布局研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(9): 1397-1407.
CHEN Y J, ZHANG P Y, LIU S W, et al. The spatio-temporal pattern change and optimum lay out of grain production in the West of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(9): 1397-1407.
- [16] 白景锋. 基于县域的生态脆弱区人均粮食时空格局变动及驱动力分析: 以南水北调中线水源区为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(2): 178-184.
BAI J F. Spatial pattern changes and its driving forces per capita grain possession at County Level in ecologically sensitive region: A case of water source area for the middle route project of South-to-North Water Transfer[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 178-184.
- [17] 徐海亚, 朱会义. 基于自然地理分区的 1990—2010 年中国粮食生产格局变化[J]. *地理学报*, 2015, 70(4): 582-590.
XU H Y, ZHU H Y. Spatial change of China's grain production based on geographical division of natural factors during 1990-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 582-590.
- [18] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 江苏省粮食生产时空格局及其驱动因素[J]. *经济地理*, 2018, 38(12): 166-175.
XIA S Y, ZHAO Y, XU X, et al. Spatiotemporal pattern and driving factors of grain production in Jiangsu Province[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(12): 166-175.
- [19] 蒋敏, 李秀彬, 辛良杰. 南方水稻复种指数变化对国家粮食产能的影响及其政策启示[J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 32-43.
JIANG M, LI X B, XIN L J. The impact of paddy rice multiple cropping index changes in Southern China on national grain production capacity and its policy implications[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 32-43.
- [20] 卢李朋, 张杰, 姜朋辉. 甘肃省粮食产量变化的驱动分析及趋势预测[J]. *经济地理*, 2013, 33(4): 125-131.
LU L P, ZHANG J, JIANG P H. Driven analysis and trend forecasting changes in grain production in Gansu Province [J]. *Economic Geography*, 2013, 33(4): 125-131.
- [21] 刘玉, 蒙达, 周艳兵. 京津冀地区粮食产量变化及其作物结构分析[J]. *经济地理*, 2014, 34(8): 125-130.
LIU Y, MENG D, ZHOU Y B. Contribution factors to grain production increase based on gravity center model and LM-DI model in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1990 to 2010[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(8): 125-130.
- [22] 张学珍, 李侠祥, 张丽娟. RCP 8.5 气候变化情景下 21 世纪印度粮食单产变化的多模式集合模拟[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2314-2328.
ZHANG X Z, LI X X, ZHANG L J. Multi-model ensemble projection of crop yield of India under RCP 8.5 climate change scenario during the 21st century[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2314-2328.
- [23] 方修琦, 郑景云, 葛全胜. 粮食安全视角下中国历史气候变化影响与响应的过程与机理[J]. *地理科学*, 2014, 34(11): 1291-1298.
FANG X Q, ZHENG J Y, GE Q S. Historical climate change impact-response processes under the framework of food security in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1291-1298.
- [24] 闵锐, 李谷成. “两型”视角下我国粮食生产技术效率的空间分异[J]. *经济地理*, 2013, 33(3): 144-149.
MIN R, LI G C. Grain's production efficiency and its spatial distribution in China from the “Two-oriented (Resource and Environment)” Perspective[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(3): 144-149.
- [25] 邹朝晖, 宋戈, 陈黎黎. 黑龙江省粮食主产区土地流转对土地生产率影响效果的实证研究[J]. *地理研究*, 2017, 36(11): 176-181.
ZOU C H, SONG G, CHEN L L. The effect of farmland use right transfer on land productivity in main grain producing area of Heilongjiang Province[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(11): 176-181.
- [26] 张利国, 鲍丙飞. 我国粮食主产区粮食全要素生产率时空演变及驱动因素[J]. *经济地理*, 2016, 36(3): 147-152.
ZHANG L G, BAO B F. Empirical analysis on spatio-temporal evolution and driving forces of food total factor production in major grain Producing areas of our country[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(3): 147-152.
- [27] 周亮, 徐建刚, 张明斗. 粮食增产背景下淮河流域农业生产效率时空变化分析[J]. *地理科学*, 2013, 33(12): 1476-1483.
ZHOU L, XU J G, ZHANG M D. Spatial-temporal variation of agriculture production efficiency under the background of grain production increase in the Huaihe River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1476-1483.
- [28] 伍国勇, 张启楠, 张凡凡. 中国粮食生产效率测度及其空间溢出效应[J]. *经济地理*, 2019, 39(9): 207-212.
WU G Y, ZHANG Q N, ZHANG F F. Research on grain production efficiency and its spatial spillover effects in China [J]. *Economic Geography*, 2019, 39(9): 207-212.

- [29] 张利国,鲍丙飞,董亮.鄱阳湖生态经济区粮食生产技术效率时空演变及环境协调性探究[J].经济地理,2016,36(11): 116-123.
ZHANG L G, BAO B F, DONG L. Spatial and temporal pattern evolution of grain yield and spatial heterogeneity of driving factors in Poyang Lake Economic Zone[J]. Economic Geography, 2016, 36(11): 116-123.
- [30] 刘彦随,翟荣新.中国粮食生产时空格局动态及其优化策略探析[J].地域研究与开发,2009,28(1):1-16.
LIU Y S, ZHAI R X. Spatial-temporal pattern changes and optimal strategy of grain production in China[J]. Areal Research and Development, 2009, 28(1): 1-16.
- [31] 王珏,宋文飞,韩先锋.中国地区农业全要素生产率及其影响因素的空间计量分析:基于1992-2007年省域空间面板数据[J].中国农村经济,2010(8):24-35.
WANG Y, SONG W F, HAN X F. Spatial measurement and analysis of total factor productivity and its influencing factors in China undefineds region: Based on the data of the space-saving panel in the province from 1992 to 2007[J]. Chinese Rural Economy, 2010(8): 24-35.
- [32] ELHORST J P. Specification and estimation of spatial panel data models[J]. International Regional Science Review, 2003, 26(3): 244-268.
- [33] 程叶青,王哲野,张守志.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J].地理学报,2013,68(10):1418-1431.
CHENG Y Q, WANG Z Y, ZHANG S Z. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [34] 张军伟,张锦华,吴方卫.粮食生产中化肥投入的影响因素研究:基于Durbin模型的分析[J].经济地理,2018,38(11):174-182.
ZHANG J W, ZHANG J H, WU F W. The influencing factors of fertilizer input in grain production: Based on the Durbin Model[J]. Economic Geography, 2018, 38(11): 174-182.
- [35] 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.
- [36] 胡志强,苗健铭,苗长虹.中国地市尺度工业污染的集聚特征与影响因素[J].地理研究,2016,35(8):1470-1482.
HU Z Q, MIAO J M, MIAO C H. Agglomeration characteristics of industrial pollution and their influencing factors on the scale of cities in China[J]. Geographical Research, 2016, 35(8): 1470-1482.
- [37] 赵映慧,郭晶鹏,毛克彪.1949—2015年中国典型自然灾害及粮食灾损特征[J].地理学报,2017,72(7):1261-1276.
ZHAO Y H, GUO J P, MAO K B. Spatio-temporal distribution of typical natural disasters and grain disaster losses in China from 1949 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1261-1276.
- [38] 王晓煜,杨晓光,孙爽.气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J].应用生态学报,2015,26(10):3091-3102.
WANG X Y, YANG X G, SUN S. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of Northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3091-3102.
- [39] 赵彦茜,肖登攀,唐建昭.气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施[J].水土保持研究,2019,26(6):317-326.
ZHAO Y Q, XIAO D P, TANG J Z. Impact of climate change on the output of China's major grain crops and adaptation measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 317-326.
- [40] 余文涛,石淑芹,孙晓丽.基于Logistic模型的东北地区粮食生产能力影响因素研究:以宾县为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):124-129.
YU W T, SHI S Q, SUN X L. Analysis on the influence mechanism of food production capacity in Northeast based on logistic model in Bin County for case[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(12): 124-129.
- [41] 姜丽霞,任桂林,李秀芬.作物生长期低温指数演变及对作物产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(10):79-88.
JIANG L X, REN G L, LI X F. Evolution of the cold day index in crop growth period and its effect on crop yield in Heilongjiang during 1971 to 2014[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2018, 46(10): 79-88.

责任编辑:张改素