

# 江苏省粮食生产时空格局及其驱动因素<sup>1</sup>

夏四友<sup>1</sup>, 赵媛<sup>1, 2, 3</sup>, 许昕<sup>1</sup>, 文琦<sup>4</sup>, 孙琪<sup>1</sup>, 王璐玮<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 中国江苏南京 210023; 2. 南京师范大学金陵女子学院, 中国江苏南京 210097; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 中国江苏南京 210023; 4. 宁夏大学资源环境学院, 中国宁夏银川 750021)

**【摘要】**以1996—2015年江苏省粮食产量为指标,采用Theil指数、空间分析相关方法和地理加权回归分析等方法,探究江苏省粮食生产的时空格局及驱动因素。结果表明:①江苏省粮食生产的区域差异总体呈扩大态势,分解后的组内差异对粮食生产总差异的贡献度高于组间差异,但组间差异对粮食生产总差异的贡献度在逐渐增大。②粮食生产全局上存在显著的正相关关系,局部经历了由随机分布到集聚分布的过程,空间格局呈现较为明显的层次结构特征。③粮食生产重心在 $119.3827^{\circ}\text{E} \sim 119.5709^{\circ}\text{E}$ ,  $32.9790^{\circ}\text{N} \sim 33.2299^{\circ}\text{N}$ 之间变动,总体上向西北方向移动,粮食生产大体呈“西北—东南”的空间分布格局。④粮食生产驱动因素的非均衡联动局域性特征显著,化肥使用量、乡村从业人员和农业机械总动力对粮食生产具有正向作用,人口数量和人均GDP回归系数高值区主要集中在苏北地区,乡村从业人员和农业机械总动力回归系数高值区经历了由北向南的转移过程;化肥使用量回归系数高值区主要集中在苏南地区,向北部逐渐递减。

**【关键词】**:粮食安全 粮食生产 乡村从业人数 农业机械与化肥 科技兴农 江苏省

**【中图分类号】**:K902      **【文献标志码】**:A      **【文章编号】**: 1000-8462(2018)12-0166-10

DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2018.12.021

古谚有云:“无农不稳,无粮则乱”,可见粮食安全自古以来便是关系到社会稳定、经济发展的重大战略问题<sup>[1]</sup>,“谁来养活中国”更是一度成为国际社会关注的焦点<sup>[2-3]</sup>。已有研究表明,提高粮食生产综合能力,维持较高的自给率,并保持区域粮食的供需平衡是确保我国粮食安全的重要保障<sup>[4]</sup>。江苏省属于长三角城市群的核心区域,是典型的经济发达地区,同时也是我国主要的粮食主产区和商品粮基地,全省GDP由1996年的6004.21亿元上升至2015年的70116.38亿元。在创造了巨大物质财富的同时,也加剧了人地关系的矛盾,非农建设用地规模不断扩大、农业劳动力也持续向城镇迁移、耕地占补平衡压力日益凸显等问题日趋突出,给实现粮食安全带来诸多挑战<sup>[5]</sup>。全省粮食产量由1996年的3476.35万t下降至2003年的2471.85万t,之后小幅度上升至2015年的3561.34万t,粮食生产呈现徘徊不前态势,且增长幅度远滞后于经济增长。新时期,在经济转型、粮食安全、农业资源紧约束与生态环境持续恶化等多重背景下,研究江苏省粮食生产的时空格局与驱动因素,对确保国家粮食安全,为我国经济社会发展奠定坚实基础具有重大意义。

<sup>1</sup>收稿时间: 2018-05-21;修回时间: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430635);国家自然科学基金项目(41661042)

作者简介: 夏四友(1991—),男,贵州盘县人,硕士研究生。主要研究方向为人文地理学与区域可持续发展。

E-mail:2855453308@qq.com。

通讯作者: 赵媛(1963\_),女,江苏南京人,博士,教授。主要研究方向为能源地理与区域可持续发展。

E-mail:zhaoyuan@njnu.edu.cn。

近年来,不同领域学者基于不同的研究视角,对粮食生产进行了深入探讨。研究尺度上,多集中于全球<sup>[6]</sup>、洲际<sup>[7]</sup>、国家<sup>[4,8]</sup>、区域<sup>[9-10]</sup>、省际<sup>[11-12]</sup>等较大空间尺度粮食生产研究。研究内容上,主要包括粮食生产效率测算<sup>[13-14]</sup>、区域经济发展与粮食生产的耦合分析<sup>[15-16]</sup>、粮食生产与气候变化间的关系<sup>[17-18]</sup>及粮食生产与耕地变化研究<sup>[19-20]</sup>等。研究方法上,多采用重心迁移<sup>[15]</sup>、变异系数<sup>[21]</sup>、空间相关分析<sup>[8]</sup>、灰色系统关联与预测<sup>[12,22]</sup>和小波分析<sup>[23]</sup>等。近年来,采用空间分析和计量经济学等方法研究粮食生产时空格局特征和影响因素的研究成果日益增多。在时空格局方面,范业龙等从多尺度视角对中国粮食生产区域差异进行分析,认为中国粮食生产在省级与地级尺度上均呈现出空间集聚特征,且尺度越小,空间集聚特征表现越明显<sup>[24]</sup>。周立青等对黑龙江省粮食生产的时空格局进行探讨,发现黑龙江省粮食生产具有一定的空间相关性<sup>[25]</sup>。周亮等通过对淮河流域粮食生产的时空变化进行研究,得出淮河流域粮食生产高值和低值区域在空间呈现集聚态势的结论<sup>[26]</sup>。邓宗兵等对中国粮食生产空间布局变迁的特征分析,结果表明,粮食、小麦、玉米生产空间集聚效应增强,稻谷生产空间集聚效应减弱<sup>[8]</sup>。在影响因素方面,周立青等采用多元回归模型对黑龙江省粮食生产驱动因素进行探讨,发现农业投入、经济环境、技术水平和市场要素是影响黑龙江省粮食生产时空变化的主要因素<sup>[25]</sup>。叶妍君等对黑龙江垦区农场粮食生产影响因素进行分析,发现除了播种面积和耕地面积外,农业机械化水平是最显著的影响因子<sup>[27]</sup>。栾健等从自然灾害视角分析山东省粮食生产影响因素,结果表明,山东省粮食总产量受到自然灾害的强力束缚,二者呈现扩张耦合的关系<sup>[28]</sup>。王凤对中国粮食产量的影响因素变化进行研究,发现耕地面积和农业机械总动力是影响粮食产量分布的主要因素<sup>[29]</sup>。

上述研究对厘清我国粮食生产时空格局演变及影响因素具有重大推动作用,但总结发现:①现有研究尺度多集中于较大空间尺度,较少涉及更小尺度上的异质性。县域作为控制粮食生产最基本行政单位<sup>[30]</sup>,厘清县域粮食生产差异的时空演变及作用机制,对制定符合区域粮食安全的宏观政策、因地制宜发展粮食生产具有重要指导作用<sup>[26]</sup>。②既有影响机制研究多是基于长时间序列数据建立起的全局模型,如回归分析、灰色关联分析、因素分解等方法<sup>[19,31]</sup>,缺乏空间考量,对区域内部粮食生产的空间异质性及空间格局动态演化解释力度不足。基于此,本文选取江苏省县域为研究对象,以粮食产量为指标,首先,基于 Theil 指数对江苏省(苏南、苏中及苏北地区)的粮食生产从总差异、组内差异和组间差异三个角度进行分析;其次,运用全局 Moran's I、优化热点分析及标准差椭圆等方法对 1996—2015 年粮食生产格局时空演变特征进行分析;最后,采用地理加权回归研究演化的驱动因素。旨在为提高江苏省粮食生产综合能力、有效保障国家粮食安全提供参考和借鉴。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 Theil 指数

采用 Theil 指数分解法对 1996—2015 年江苏省粮食生产的区域差异进行分析。计算的公式为<sup>[32]</sup>:

$$T = T_{br} + T_{wr} = \sum_{p=1}^n \left[ \left( \frac{1}{N} \times \left( \frac{y_p}{\mu} \right) \times \ln \left( \frac{y_p}{\mu} \right) \right) \right] \quad (1)$$

式中:T 为粮食生产的总差异;N 是所有县域总数;  $y_p$  是 p 县域的粮食产量;  $\mu$  是全省平均粮食产量。根据江苏省区划情况,一般可将江苏省划分为 3 大区域:苏南、苏中和苏北地区。本文按三个区域对江苏省粮食生产进行组间( $T_{br}$ )和组内差异( $T_{wr}$ )分析,区域的组间( $T_{br}$ )和组内差异( $T_{wr}$ )可分别表示为:

$$T_{br} = \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{N_i}{N} \times \left( \frac{y_i}{\mu} \right) \times \ln \left( \frac{y_i}{\mu} \right) \right) \right] \quad (2)$$

$$T_{br} = \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{N_i}{N} \times \left( \frac{y_i}{\mu} \right) \times \ln \left( \frac{y_i}{\mu} \right) \right) \right] \quad (2)$$

式中: $m$ 为区域数量; $N_i$ 是区域*i*中县域的数量; $y_i$ 是所有的县域数量是区域*i*的粮食产量均值。由此, $T_{br}/T$ 为粮食生产的组间贡献度, $T_{ir}/T$ 为粮食生产的组内贡献度。

### 1.1.2 全局自相关和优化的热点分析

本文分别选择全局莫兰指数(Global Moran's I)和优化的热点分析(Optimized Hot Spot Analysis)分别从全局和局部两个维度探讨江苏省粮食生产的空间格局。全局莫兰指数主要用于从全局视角评估粮食生产高值和低值的空间分布与预期的空间分布演进<sup>[33]</sup>,优化的热点分析用于从局部视角识别粮食生产热点和冷点的空间聚类,具体数学模型参照文献<sup>[34-35]</sup>。

### 1.1.3 标准差椭圆

标准差椭圆(Standard Deviation Ellipse, SDE)是用来分析粮食生产的空间分布,并且识别其重心位置变化和移动方向趋势,构成要素包括重心、转角没、长半轴、短半轴等<sup>[36]</sup>。其中,重心表示粮食生产空间分布的相对位置;转角0表示粮食生产空间分布的主趋势方向;长半轴反映粮食生产在主趋势方向上的离散程度;短半轴反映粮食生产在次趋势方向上的离散程度,其计算原理及过程详见文献<sup>[37]</sup>。

### 1.1.4 地理加权回归分析

地理加权回归模型派生于普通线性回归最小二乘法,与传统回归分析相比,该方法具有把空间权重矩阵应用在线性回归模型中,可以形象地展示空间结构分异,反映各研究变量在空间上存在依赖性和空间分异规律等优点<sup>[38]</sup>。本文采用GWR构建江苏省粮食生产驱动因素空间差异回归模型,计算公式为<sup>[39]</sup>:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{m=1}^n \beta_m(u_i, v_i) x_{im} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: $y_i$ 为第*i*空间单元的粮食产量; $(u_i, v_i)$ 是空间单元*i*的地理坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 表示回归方程的截距; $\beta_m(u_i, v_i)$ 为空间单元*i*的第*m*个自变量的回归系数; $x_{im}$ 为空间单元*i*的第*m*个自变量; $\varepsilon_i$ 为误差项。

## 1.2 数据来源

本文的粮食产量及影响因素数据大多数来自1997—2016年《江苏统计年鉴》,少数年份缺失数据来自对应地级市统计年鉴。其中2013—2015年溧水县和高淳县的数据来自《南京统计年鉴》,2015年金坛市数据来自《常州统计年鉴》,2012—2015年吴江市数据来自《苏州统计年鉴》,2014—2015年赣榆县数据来自《连云港统计年鉴》,2015年大丰市数据来自《盐城统计年鉴》,2013—2015年姜堰市数据来自《泰州统计年鉴》。江苏省县级行政区划矢量数据来源于国家测绘局基础地理信息数据库,以2011年行政区划为基准,采用ArcGIS10.2软件平台进行归并处理,最终得到62个县级行政单元。

## 2 江苏省粮食生产时空格局变化特征

## 2.1 粮食生产区域差异呈扩大态势，组内差异对总差异贡献度较大

江苏省粮食生产 Theil 指数由 1998 年的 0.098 上升为 2015 年的 0.175(图 1)，表明江苏省粮食生产的总差异呈扩大态势。从分解结果看，组内差异是江苏省粮食生产差异的主要原因，组内差异变化不明显，呈现在波动中小幅度上升，而组间差异较组内差异上升得更快。其中也有一些年份粮食生产总差异保持较稳定状态，如 1996—1997 年和 2010—2013 年，它们分别稳定在 0.09 和 0.17 左右，而 2005—2006 年、2007—2008 年和 2014—2015 年则出现小幅度下降。从贡献度看，1996 年的总差异中有 0.9189 来自组内差异，0.0811 来自组间差异，2015 年组内差异对总差异的贡献度为 0.5728，而区域间差异的贡献度为 0.4271。表明组内差异对粮食生产总差异的贡献度在下降，而组间差异对粮食生产总差异的贡献度在逐渐上升。

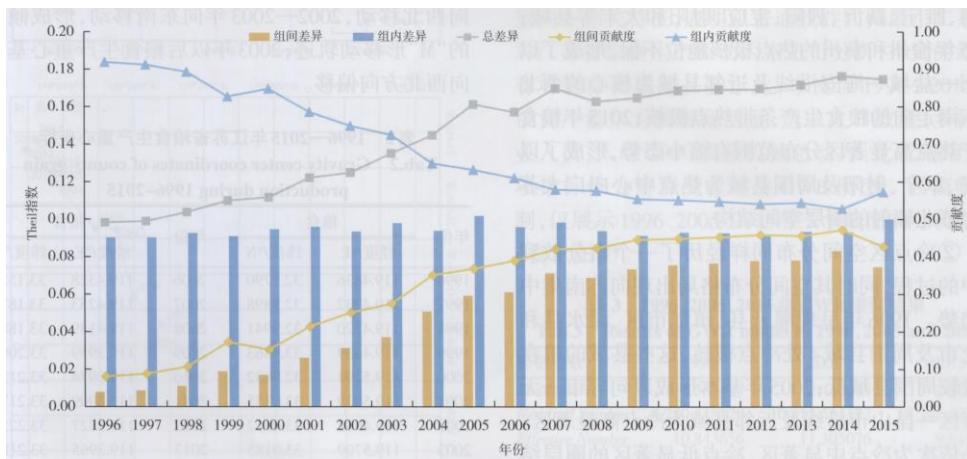


图 1 1996—2015 年江苏省粮食生产区域差异及贡献度  
Fig.1 The grain production regional differences and contribution in Jiangsu Province from 1996 to 2015

江苏省粮食生产差异呈现逐年扩大的趋势，究其原因，江苏省粮食生产与地区经济发展水平有密切关系。苏南地区属于经济发达区，非农产业发达，工业化和城镇化进程快，对粮食生产的挤兑作用明显，加之人口密集，农业耕地面积不断锐减，导致粮食生产水平下降。苏中和苏北地区作为江苏省粮食主产区的核心区域，农作物播种面积大，农业就业机会多，农业收入在其国民收入中占据较大比重，进而导致粮食产量逐年上升；而随着国家支农惠农政策的出台，在较大程度上提升了苏中和苏北地区粮食生产能力。导致原本粮食产量高的地区增加了，而原本粮食产量低的地区降低了，最终拉大了江苏省粮食生产总差异。

表 1 1996—2015 年江苏省粮食生产全局莫兰指数

Tab.1 Global Moran's Index of the grain production in Jiangsu Province from 1996 to 2015

年份	Moran's I	z	P	年份	Moran's I	z	P
1996	0.029596	0.598864	0.549264	2006	0.318250	4.354027	0.000013
1997	0.036630	0.689762	0.490344	2007	0.350122	4.754748	0.000002
1998	0.063425	1.042027	0.297399	2008	0.372863	5.060220	0.000000
1999	0.107541	1.612291	0.106899	2009	0.393345	5.326425	0.000000
2000	0.129257	1.891120	0.058608	2010	0.401115	5.416973	0.000000
2001	0.162986	2.328066	0.019909	2011	0.412504	5.561392	0.000000
2002	0.192717	2.720910	0.006510	2012	0.412688	5.553575	0.000000
2003	0.187407	2.664704	0.007706	2013	0.413670	5.573875	0.000000
2004	0.262923	3.628911	0.000285	2014	0.428798	5.757954	0.000000
2005	0.299530	4.118581	0.000038	2015	0.376606	5.082948	0.000000

## 2.2 粮食生产的空间自相关性不断增强,冷点区与热点区经历了由随机到集聚的演变过程

基于 ArcGIS10.2 软件计算出 1996—2015 年江苏省粮食生产的全局 Moran's I 指数(表 1),从全局考察江苏省粮食生产的空间格局。

1996—2015 年江苏省粮食生产全局 Moran's I 值全部为正,说明江苏省粮食生产存在正的空间正相关关系。从全局 Moran's I 值变化趋势看,1996—1999 年表现为不显著状态,说明在此阶段粮食生产空间依赖程度微弱,呈现并不具有统计学意义的线性趋势;除 2000 年粮食生产全局 Moran's I 指数在 10% 水平上显著外,其余年份均在 5% 水平上高度显著,由此说明江苏省粮食生产在空间集聚表现出显著的空间集聚规律,即具有较高(较低)粮食产量的县域间倾向于相互临近集聚分布。

采用 ArcGIS10.2 软件分别计算出 1996, 2005 和 2015 年江苏省粮食生产的优化 Getis-OrdGf 指数,从局部视角考察江苏省粮食生产空间集聚分布格局。

江苏省粮食生产整体上经历了由随机分布到集聚分布的过程(图 2),除 1996 年外,2005 和 2015 年均有相当数量县域粮食生产在空间上呈集聚分布态势,如 2005 年沭阳—盐城—海安沿线及近邻县域粮食生产整体较高,形成粮食生产条带热极核;而苏南的常州市、无锡市和苏州市等粮食产量较低,形成粮食生产的低值集聚区。此外,江苏省粮食生产整体空间格局呈现较为明显的层次结构特征,大致以苏中及其邻近县域为热点区域,向外至省域边缘依次形成“热点区域—随机分布区域—冷点区域”的圈层分布格局。

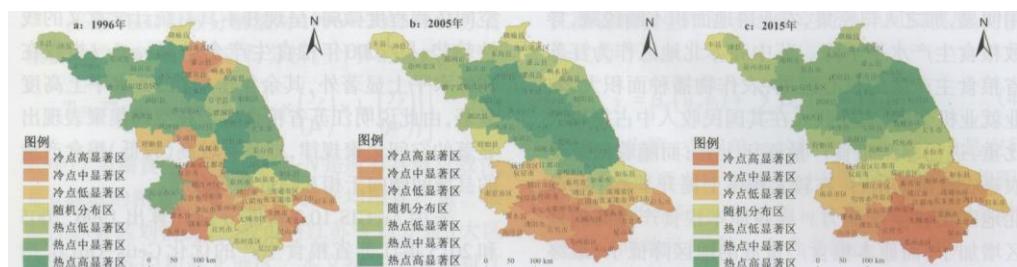


图 2 1996、2005 和 2015 年江苏省县域粮食生产冷热点区域演化  
Fig.2 Evolution of the hotspots and coldspots of grain production at county level in 1996, 2005 and 2015

具体而言:①热点区域辐射范围经历了由随机分布向苏中和苏北周边县域的团块状分布转变,热点高显著区呈现向东偏北迁移的趋势。1996 年表现为以徐州、沭阳县和泰州为多核的热点中心辐射邳州、睢宁、新沂、泗阳、宝应、射阳和大丰等县域;2005 年徐州和泰州的热点极核地位不保,形成了以沭阳—盐城—海安沿线及近邻县域为核心的西北—东南走向的粮食生产条带热点极核;2015 年粮食生产热点高显著区分布范围有缩小态势,形成了以淮安、阜宁、射阳及周围县域为热点中心向广大苏中和苏北辐射的圈层空间结构。

② 冷点区空间分布同样经历了一个由分散到集中的过程,同时其空间分布格局出现向苏南集中的趋势。1996 年呈现灌云县、镇江市区、溧水县和太仓市及周围县域 4 处冷点极核,这些县域的粮食产量较周围县域低;2005 年基本形成以句容市—无锡市区—昆山市沿线及近邻县域为冷点高显著区,向外依次为冷点中显著区、冷点低显著区的圈层结构特征;2015 年完全形成以常州市区、苏州市区、无锡市区、宜兴市、吴江市和昆山市为中心并向北辐射的空间圈层结构。究其原因,这些地区经济发展水平高、城镇化进程快,非农建设用地规模的扩大导致粮食播种面积锐减、农业劳动力向城镇迁移力度大,导致粮食产量低于苏北和苏中地区,形成粮食生产冷点区。

## 2.3 粮食生产重心向西北方向转移,整体呈现“西北—东南”方向分布格局

采用标准差椭圆对 1996—2015 年江苏省粮食生产时空演化轨迹和空间分布进行分析。发现 1996—2015 年江苏省粮食重心变化不大，在  $119.3827^{\circ}$  E— $119.5709^{\circ}$  E,  $32.9790^{\circ}$  N— $33.2299^{\circ}$  N 间变动（表 2），大致位于宝应县南部和高邮市北部地区。从重心移动轨迹看，粮食重心总体上向西北方向移动（图 3）。具体可分为两个阶段：第一阶段为 1996—2003 年，粮食生产重心呈现波动状态向东北方向移动，表现在 1996—1999 年向西北方向移动，1999—2000 年向东南移动，2000—2002 年又向西北移动，2002—2003 年向东南移动，形成倾斜的“M”形移动轨迹；2003 年以后粮食生产重心基本向西北方向偏移。

表 2 1996—2015 年江苏省粮食生产重心坐标

Tab. 2 Gravity center coordinates of county grain production during 1996–2015

年份	粮食 经度/ $^{\circ}$ E	纬度/ $^{\circ}$ N	年份	粮食 经度/ $^{\circ}$ E	纬度/ $^{\circ}$ N
1996	119.4836	32.9790	2006	119.4328	33.1559
1997	119.4732	32.9898	2007	119.4253	33.1877
1998	119.4720	32.9941	2008	119.4149	33.1884
1999	119.4639	33.0363	2009	119.3959	33.2095
2000	119.5194	32.9832	2010	119.3974	33.2138
2001	119.5029	33.0355	2011	119.3909	33.2179
2002	119.4932	33.0552	2012	119.3827	33.2251
2003	119.5709	33.0185	2013	119.3965	33.2180
2004	119.4402	33.1296	2014	119.3870	33.2299
2005	119.4464	33.1429	2015	119.3943	33.2147

从标准差椭圆各参数计算结果和空间分布态势看（图 3），研究期内粮食生产标准差椭圆总体上变化幅度不大，基本上以宝应县中南部和高邮市北部为中心，范围基本上覆盖了苏中地区、苏南和苏北大部分县域，西至泗洪县、盱眙县、仪征市，东接大丰市、射阳市、东台市，南连张家港市、江阴市、无锡市区，北抵新沂市、睢宁县、东海县，基本上覆盖了江苏省国土面积的 80%。从转角  $\theta$  的变化范围来看，1996—2015 年标准差椭圆的转角  $\theta$  基本在  $132.5876^{\circ}$  ~  $135.6039^{\circ}$  之间变动，转角  $\theta$  从 1996 年的  $135.5862^{\circ}$  下降为 2015 年的  $133.1032^{\circ}$ ，表明县域粮食生产“西北—东南”格局有所弱化，有向正北—正南方向转变的趋势。2001—2003 年、2006—2008 年和 2014—2015 年的旋转角有小幅度上升表明“西北—东南”的空间分布格局在这些时间段出现强化趋势。

从主轴方向上看，1996—2015 年江苏省粮食生产主半轴标准差呈现下降态势，由 1996 年的  $1.9048\text{km}$  下降为 2015 年的  $1.7379\text{km}$ ，表明江苏省粮食生产整体上在“西北—东南”方向上出现极化；但 2003—2004、2008—2009 年这两个时间段主半轴标准差由  $1.7664\text{km}$  ( $1.7391\text{km}$ ) 上升到  $1.8028\text{km}$  ( $1.7450\text{km}$ )，表明该时段粮食生产在“西北—东南”方向的差距略有上升，在主要方向上出现分散。从短轴方向上看，短半轴标准差整体呈现波动下降态势，具体可以划分为两个阶段：第一阶段是由 1996 年的  $0.8917\text{km}$  下降到 2005 年的  $0.8556\text{km}$ ，表明粮食生产在“西北—东南”方向上出现极化；第二阶段是由 2006 年的  $0.8625\text{km}$  上升到 2015 年的  $0.8791\text{km}$ ，表明粮食生产在“西北—东南”方向上出现分散。

### 3 江苏省粮食生产驱动因素分析

#### 3.1 GWR 模型构建与参数检验

综上可得，江苏省粮食生产空间分布呈显著的空间正相关特征，表明以普通线性回归最小二乘法对江苏省粮食生产驱动因素进行分析，得到的结果有可能存在偏差。基于此，本文以 1996—2015 年粮食产量作为被解释变量，选取人口数量、乡村从业

人员、人均 GDP、农业机械总动力、化肥施用量 5 项指标作为解释变量建立 GWR 模型。因篇幅限制，仅展示 1996、2005、2015 年 3 个截面的分析结果（表 3、图 4）。

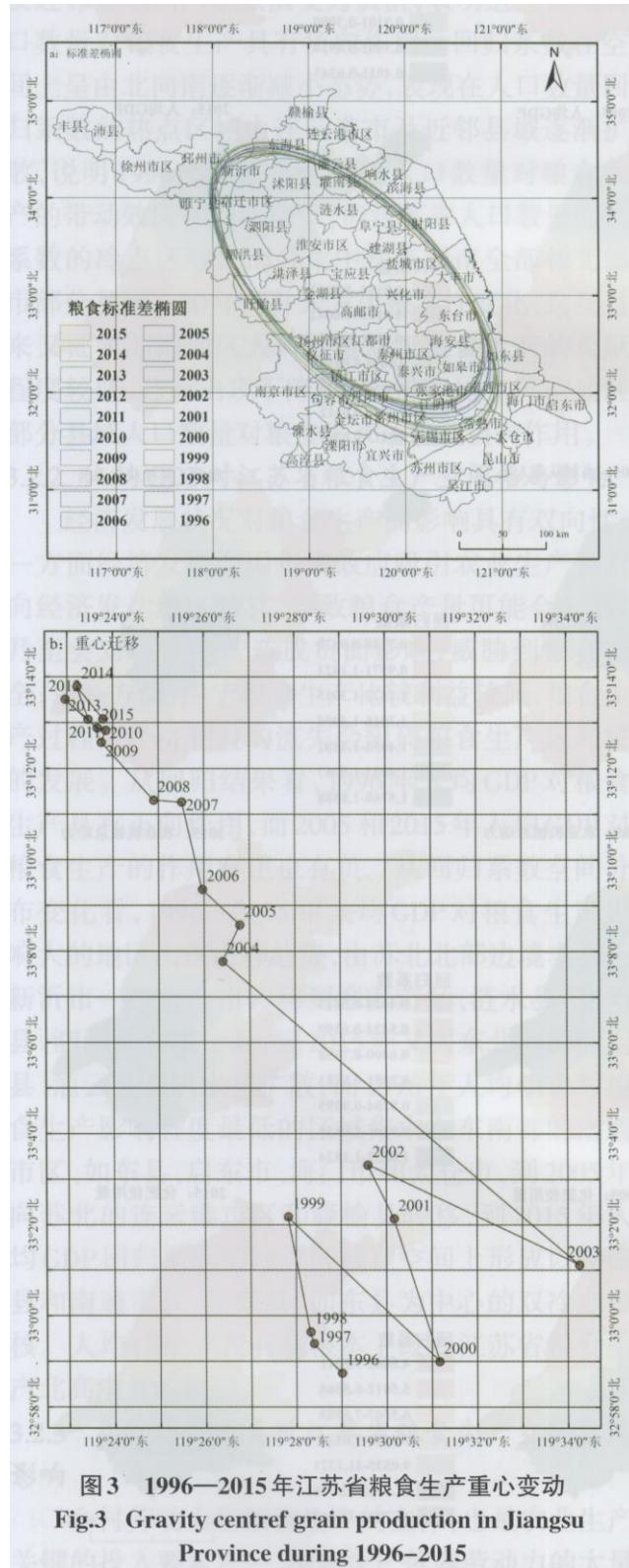


表 3 1996、2005、2015 年 GWR 模型结果

Tab. 3 Results of GWR model in 1996, 2005 and 2015

模型参数	1996	2005	2015
Bandwidth	2. 587437	2. 440043	2. 804751
Residual Squares	4 280. 418129	10 812. 511122	18 246. 423393
Effective Number	10. 843656	11. 305076	9. 648422
Sigma	9. 147309	14. 60431	18. 669126
AICc	462. 638046	520. 941987	550. 183667
R <sup>2</sup>	0. 902951	0. 785493	0. 789048
R <sup>2</sup> Adjused	0. 884277	0. 749856	0. 754199

采用 AIC 信息准则法, 得到 1996, 2005、2015 年影响江苏省粮食生产时空格局演变各变量 GWR 模型参数结果 (表 3), 可知调整后的模型拟合优度 ( $R^2$  Adjused) 基本达到 75%以上, 整个 GWR 估计模型能较好地解释各变量对粮食生产的影响, 这表明用 GWR 模型得到的结论更合理。

### 3.2 各变量对粮食生产空间格局的影响分析 3.2.1 人口数量对江苏省粮食生产空间格局影响

人口数量与粮食生产的关系密切而复杂。一方面人口数量增长可以为粮食生产提供充足的劳动力保障, 保证粮食生产活动得以顺利进行;另一方面人口数量增长占用大量耕地, 对农业生产环境造成威胁和破坏, 进而可能对粮食生产造成负向效应。从回归结果看, 1996 和 2005 年江苏省人口数量对粮食生产的影响呈现正向关系, 2015 年苏州市及近邻县域回归系数演变为负值, 表明这些县域人口数量对粮食生产具有负向作用。回归系数在空间上呈由北向南逐渐减小态势, 表现在人口数量回归系数的热点区域由连云港市及近邻县域逐渐扩散, 说明 1996 年以来苏北地区人口数量对粮食生产的带动效应在不断增强, 但江苏省人口数量回归系数的冷点区域大部分集中在苏州市全部和无锡市部分县域。20 年间并未发生根本性变化, 这反过来又证明苏南地区人口数量对于粮食生产的贡献程度较低, 乃至出现下降趋势, 到 2015 年苏南地区部分县域人口数量对粮食生产还出现负向作用。

### 3.2.2 人均 GDP 对江苏省粮食生产空间格局影响

经济发展状况对粮食生产的影响具有双向性, 一方面经济发展会因集聚效应吸引农业生产要素向经济发达地区转移, 导致粮食产量可能会萎缩, 乃至会对粮食生产造成负面影响, 威胁到粮食安全;另一方面, 由于粮食生产比较利益较低, 粮食生产过程中经济利益的流失会阻碍粮食生产区经济的发展。从回归结果看, 1996 年人均 GDP 对粮食生产具有正向作用, 而 2005 和 2015 年人均 GDP 对粮食生产的作用有正也有负。从回归系数空间分布变化看, 1996—2005 年人均 GDP 对粮食生产影响大的地区出现南移趋势, 由苏北北部边境丰县一新沂市一连云港市转移到淮安市区、涟水县、沭阳县、泗阳县和阜宁县, 到 2015 年又向东北部的灌南县、灌云县和响水县扩散;而 1996 年人均 GDP 对粮食生产影响程度最低的区域集中在东南部的南通市区、如东县、启东市、海门市和太仓市, 到 2005 年向苏北的连云港市区和赣榆县转移, 到 2015 年人均 GDP 回归系数的冷点区域在空间上形成以赣榆县和南通市区、如皋县、如东县为中心的双冷点极核。人均 GDP 并没有从根本上改变江苏省粮食生产北高南低的格局。

### 3.2.3 乡村从业人员对江苏省粮食生产空间格局影响

乡村劳动力是粮食生产的主体, 也是农业生产关键的投入要素之一, 粮食生产依靠劳动力的大量投入, 但随着工业化和城镇化脚步的加快, 大量劳动力涌入城市, 农业劳动力明显减少, 粮食生产对农业劳动力的依赖越来越小。从回归结果看, 江苏省乡村从业人员与粮食生产回归系数为正, 表明二者呈现正相关关系。乡村从业人员回归系数热点区在空间上有向南部游走态势, 而冷点区域则向北部扩散。具体表现在 1996 年苏北的丰县、沛县、赣榆县、连云港市区、灌云县、滨海县和响水县回归系

数较大，由这些县域向南系数逐渐减小，到 2005 年南移到苏中地区的盐城市群、兴化市和高邮市，到 2015 年进一步向南部的江都、泰州市区、泰兴市、如皋市、海安县和东台市扩散；反观 1996 年乡村从业人员回归系数冷点区主要集中分布在东南部的如东县、启东县、南通市区、海门市、常熟市、太仓市、昆山市和吴江市，到 2005 年向西部的苏州市区、无锡市区、宜兴市和高淳县迁移，2015 年又扩散至苏北的邳州市和睢宁县。

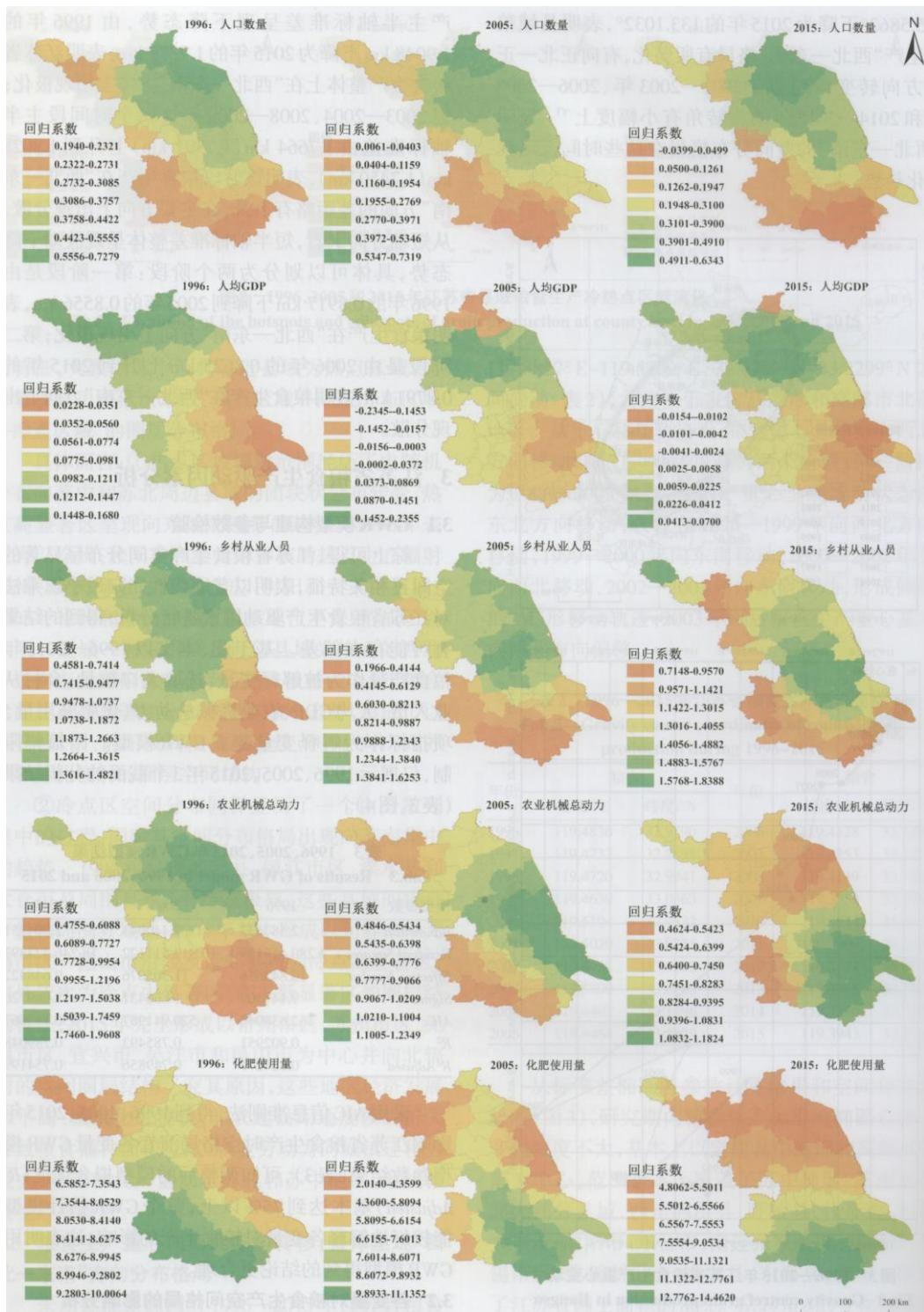


图 4 粮食生产 GWR 模型回归系数空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of the regression coefficients in the GWR model of grain production

### 3.2.4 农业机械总动力对江苏省粮食生产空间格局影响

农业机械总动力投入增加对粮食生产有重要作用，一方面农业机械的使用大大提高了粮食生产的效率和农业生产的现代化水平，另一方面农业机械替代了人工劳动，改变了粮食耕作模式，对粮食生产起到了重要的支撑作用。从回归结果看，农业机械总动力与粮食生产呈正相关关系。高值区与低值区的空间分布变化较为明显，低值区出现先向西扩散，再向北转移的趋势。具体而言：呈现由1996年的南通、无锡和苏州扩散到2005年的宜兴、溧阳和高淳等县域，到2015年偏移到东北部的响水、滨海和阜宁，高值区总体出现南移趋势，反映了面对苏南地区农业耕地面积不断减少的现状，科学技术的有效利用成为提高粮食产量的关键。具体由1996年的灌云县、滨海和建湖等县域南移到2005年的盐城、海安和南通等县域，到2015年出现向无锡和苏州转移态势。说明农业机械总动力投入对粮食生产的影响由灌云县、滨海和建湖等县域—盐城、海安和南通等县域—无锡和苏州逐渐增大，由南通、无锡和苏州—宜兴、溧阳和高淳—响水、滨海和阜阳逐渐减小，反映了1996—2015年农业机械总动力在苏南、苏州和苏北县域间发生明显变化，有力推动了江苏省粮食生产。

### 3.2.5 化肥使用量对江苏省粮食生产空间格局影响

化肥施用总量对粮食产量具有重要影响。化肥作为粮食生产最重要的投入生产要素之一，在一定程度上体现了农业科技进步的水平，促进粮食产量的增加。从结果看，化肥使用量与粮食生产的回归系数在空间上表现出南高北低的分布特征，并且在5个解释变量中，化肥使用量对粮食生产的影响最为显著而且呈现出明显的正相关特性，表明化肥使用量的增加是全省粮食产量增强的最主要原因。从回归系数空间变化上看，化肥使用对粮食生产影响的敏感程度最大值集中在苏州市及周围县域，以此为辐射点向周围逐渐递减，并且高值区范围逐渐减小，说明1996—2015年苏州及近邻县域农业生产对化肥依赖程度大，而影响程度较小的主要集中在丰县、沛县和新沂市等苏北地区，且出现向东北部扩散的趋势，这主要是由于这些地区化肥施用量对粮食生产的影响较弱。值得注意的是，随着农业生产环境污染日趋严重，农用化肥负面作用值得警惕，化肥施用总量过多，会造成土壤质量退化及污染等问题，危及粮食产量的进一步提高。

## 4 结论与讨论

本研究以粮食产量为指标，采用泰尔指数、全局空间自相关分析、优化的热点分析及标准差椭圆等方法对1996—2015年江苏省粮食生产时空演变特征进行研究，并利用地理加权回归模型进一步从空间视角剖析粮食生产差异的驱动因素。结论如下：

① 粮食生产Theil指数总体呈扩大态势。组内差异是江苏省粮食生产总差异的主要原因，组内差异呈现在波动中小幅度上升趋势，而组间差异较组内差异上升得更快。组内差异对江苏省粮食生产总差异的贡献度较组间差异贡献度大，但组内差异贡献度在减小，而组间差异贡献度在增大。组内差异对总差异的贡献度由1996年的0.9189下降为2015年的0.5728，组间贡献度则由0.0811上升为0.4271。

② 粮食生产全局空间上为显著的空间正自相关，表明粮食产量较高或较低的县域在空间上均趋于相邻。从局部视角看，江苏省粮食生产空间分布整体上经历了由随机分布到集聚分布的过程，除1996年外，2005和2015年均有相当数量县域粮食生产在空间上集聚分布。此外，粮食生产的整体空间格局呈较为明显的层次结构特征，大致以苏中及其邻近县域为热点区域，向外至省域边缘依次形成“热点区域—随机分布区域—冷点区域”的圈层分布格局。

③ 粮食生产重心在 $119.3827^{\circ}\text{E} \sim 119.5709^{\circ}\text{E}, 32.9790^{\circ}\text{N} \sim 33.2299^{\circ}\text{N}$ 之间变动，大致位于江苏省中部地区，即宝应县南部和高邮市北部地区。但总体上粮食重心向西北方向移动，表明近年来江苏省西北部粮食产量增速较快。20年内标准差椭圆总体上变化幅度不大，粮食生产的空间分布呈现出“西北—东南”格局，且这种格局有向“正北—正南”方向转变的趋势。

④ 粮食生产驱动因素的非均衡联动局域性特征显著，化肥使用量、乡村从业人员和农业机械总动力是推动江苏省粮食产

量提升的关键影响因素，人口数量和人均 GDP 对粮食生产的影响有正有负，人口数量、人均 GDP 和化肥使用量回归系数的热点区域主要集中在苏北、苏中地区，冷点区域主要集中在苏南地区，20 年间并未发生根本性变化，而乡村从业人员和农机总动力回归系数的高值区和低值区在 20 年间发生明显变化，回归系数高值区经历了由北向南的转移过程。

#### 4.2 讨论

粮食安全问题是全球关注的热点和学术研究前沿领域，本文通过对 1996—2015 年江苏省粮食生产差异的时空演变与驱动因素的分析，较全面地掌握了江苏省粮食生产的时空格局演变特征及主要驱动因素，可为未来江苏省制定粮食安全的宏观政策、因地制宜发展粮食生产提供科学参考。中国是农业大国，在经济转型、粮食安全、农业资源紧约束与生态环境持续恶化等背景下，如何保证粮食生产安全，是我国当前亟待解决的重要科学问题，一方面需要中央和地方政府立足于区域农业发展状况，因地制宜地制定粮食生产激励政策，另一方面更需要学界开展粮食生产过程、格局及作用机理的创新性研究，为提高粮食生产综合能力、有效保障国家粮食安全提供理论支撑和科学依据。

基于以上研究结论，本文得到如下启示：①鉴于江苏省粮食生产在粮食主产区粮食生产中的重要地位，其粮食生产直接关系中国粮食安全状况，因此，要进一步加大对江苏省粮食生产的扶持力度，从根本上稳定江苏省商品粮基地和粮食主产区地位。新时期应该对江苏省粮食生产采取差异化的激励措施，以提升其粮食生产综合水平。②要协调江苏省经济和城市发展与粮食生产的关系，保证一定数量的农业劳动力和耕地供给。2005 和 2015 年苏南地区部分县域的人均 GDP 与粮食生产呈负相关关系，说明近年来苏南地区经济的快速发展，

一定程度上对粮食生产造成负面影响，因此，政府努力协调好经济发展和粮食生产的关系。此外，各地方政府要做好相关的土地利用规划，在城市发展的过程中，优先考虑占用荒地，要最大程度地减少对优质耕地资源的占用，以保证粮食生产过程中的耕地资源保证。③化肥使用量与粮食生产呈正相关关系且影响最大，因此，一方面政府要稳定化肥投入总量，另一方面要积极优化施肥结构，积极推广有机肥的生产和使用，以防止粮食生产中带来的土壤肥力退化、农田土壤以及水体污染、富营养化污染等生态问题。此外，还应着力提升农业科技水平，真正落实“科技兴农”战略，最大限度保证粮食生产的科技条件，提高粮食生产水平。

#### 参考文献：

- [1] 中 国 国 家 发 展 和 改 革 委 员 会 . 国 家 粮 食 安 全 中 长 期 规 划 纲 要 (2008\_2020) [EB/OL]. [http://www.gov.cn/jrzq/2008-11/13/content\\_1148414.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2008-11/13/content_1148414.htm).
- [2] BrownLR. WhowillfeedChina?Wake-upcallforasmallplanet [M]. London:W. W. Norton&Company, 1995.
- [3] 罗翔, 曾菊新, 朱媛媛, 等. 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.
- [4] 徐志宇, 宋振伟, 邓艾兴, 等. 近 30 年我国主要粮食作物生产的驱动因素及空间格局变化研究 [J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(1):79–86.
- [5] ChenJ. RapidurbanizationinChina: Arealchallenge to soil protection and food security [J]. Catena, 2007, 69(1): 1–15.
- [6] 赵霞, 封志明, 杨艳昭. 1961 年至 2007 年全球粮食生产的时空演变特征与地域格局 [J]. 资源科学, 2010, 32(5):907–916.
- [7] 杨艳昭, 吴艳娟, 封志明. 非洲粮食产量波动时空格局的定量化研究 [J]. 资源科学, 2014, 36(2): 361–369.

- 
- [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, 33(5):117-123.
- [9] 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.
- [10] 潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 太湖流域粮食生产时空格局演变与粮食安全评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(6):931-943.
- [11] 刘玉, 潘瑜春, 任旭红, 等. 基于 LMDI 的粮食生产因素分解模型及实证分析——以河南省为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2014, 50(5):887-894.
- [12] 张杰, 卢李朋, 姜鹏辉, 等. 湖北省粮食生产的多尺度及关联动态分析[J]. 经济地理, 2013, 33(7):140-147.
- [13] 贾琳, 夏英. 农户粮食生产规模效率及其影响因素分析——基于黑、豫、川三省玉米种植户的调查数据[J]. 资源科学, 2017, 39(5):924-933.
- [14] 赵丽平, 侯德林, 王雅鹏, 等. 城镇化对粮食生产环境技术效率影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(3):153-162.
- [15] 刘影, 肖池伟, 李鹏, 等. 1978—2013年中国粮食主产区“粮—经”关系分析[J]. 资源科学, 2015, 37(10):1891-1901.
- [16] 邵留长, 乔家君. 河南省经济发展与粮食生产耦合协调分析[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(2):230-237.
- [17] 蔺涛, 谢云, 刘刚, 等. 黑龙江省气候变化对粮食生产的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2):307-318.
- [18] 杨春艳, 沈渭寿, 李海东. 1985—2010年西藏粮食产量对气候和耕地变化的响应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):261-269.
- [19] 杨忍, 任志远, 徐茜. 宁夏粮食生产与耕地压力变化的分析与预测[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8):47-50.
- [20] 金涛, 陶凯俐. 江苏省粮食生产时空变化的耕地利用因素分解[J]. 资源科学, 2013, 35(4):758-763.
- [21] 丁金梅, 杨奎, 马彩虹, 等. 中国粮食产量时空格局演变研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6):1290-1297.
- [22] 刘利花, 尹昌斌. 中国粮食产量的灰色关联分析[J]. 河南农业大学学报, 2013, 47(6):751-756.
- [23] 卢李朋, 张杰, 张胜武, 等. 甘肃省粮食生产的多尺度及关联分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2):397-405.
- [24] 范业龙, 陆玉麒, 赵俊华, 等. 中国粮食生产区域差异的多尺度分析[J]. 经济地理, 2014, 34(10):124-130.
- [25] 周立青, 程叶青. 黑龙江省粮食生产的时空格局及动因分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3):491-501.
- [26] 周亮, 徐建刚, 蔡北溟, 等. 淮河流域粮食生产与化肥消费时空变化及对水环境影响[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6):1053-1064.
- [27] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 等. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产1影响因素分析[J]. 驯研究, 2018, 37(1):171-182.

- 
- [28] 栾健, 周玉玺. 自然灾害对山东省粮食生产影响的实证分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4):127-131.
- [29] 王凤, 刘艳芳, 孔雪松, 等. 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.
- [30] 白景峰. 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[J]. 地理科学, 2014, 34(2):178-184.
- [31] 张利国, 陈苏. 中国人均粮食占有量时空演变及驱动因素[J]. 经济地理, 2015, 35(3):171-177.
- [32] 谢花林, 刘桂英. 1998—2012年中国耕地复种指数时空差异及动因[J]. 地理学报, 2015, 70(4):604-614.
- [33] 熊薇, 徐逸伦, 王迎英. 江苏省县域经济差异时空演变[J]. 地理科学进展, 2011, 30(2):225-230.
- [34] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4):393-400.
- E35] 刘浩, 马琳, 李国平. 京津冀地区经济发展冷热点格局演化及其影响因素[J]. 地理研究, 2017, 36(1):97-108.
- [36] 赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源—汇系统空间格局特征[J]. 地理学报, 2012, 67(4):455-466.
- [37] 陈阳, 李伟芳, 任丽燕, 等. 空间统计视角下的农村居民点分布变化及驱动因素分析:以鄞州区滨海平原为例[J]. 资源科学, 2014, 36(11):2273-2281.
- [38] 肖宏伟, 易丹辉. 基于时空地理加权回归模型的中国碳排放驱动因素实证研究[J]. 统计与信息论坛, 2014, 29(2):83-89.
- [39] 徐建华. 地理建模方法[M]. 北京:科学出版社, 2010.