

黄淮海地区县域粮食生产空间分异格局 及其影响因素探测

刘玉^{1,2} 任艳敏^{1,2} 潘瑜春^{1,2,†}

1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

† 通信作者, E-mail: panyu@nercita.org.cn

摘要 基于累积分布函数和空间自相关分析方法, 系统地分析2015年黄淮海地区县域粮食产量的空间集聚特征, 并借助地理探测器分析18个因子对黄淮海地区及不同类型县域粮食产量的影响及其交互作用, 提炼出主导因素, 得到如下结果。黄淮海地区县域粮食产量呈现“低值集聚、高值离散”的特征, 并在空间上呈现显著的同质集聚性。其中, 显著高值集聚区主要分布在豫东南、皖北和苏北地区, 显著低值集聚区主要分布在京津冀地区和山东临海县域。综合考虑空间约束和粮食产量分布差异, 将黄淮海地区分为粮食高产区、中高产、中低产区和低产4个类型区。18个因子对黄淮海地区县域粮食产量的影响不一, 主要表现为双因子增强型和非线性增强型。其中, 高产的主导因素为第一产业增加值、化肥施用量(折纯)和农业机械总动力, 属于社会经济及要素投入作用型; 中高产的主导因素为耕地面积、区域人口、第一产业增加值和农业机械总动力, 表现为综合作用型; 中低产的主导因素为耕地面积和化肥施用量(折纯), 表现为地理环境及要素投入作用型; 低产的主导因素为植被指数、耕地面积、第一产业增加值、化肥施用量(折纯)和农业机械总动力, 表现为综合作用型。针对不同区域的研究结果, 提出不同的粮食增产增收策略建议。

关键词 黄淮海地区; 粮食生产; 格局; 驱动机制; 地理探测器

Spatial Differentiation Pattern and Influence Factor Detection of County-Level Grain Production in Huang-Huai-Hai Region

LIU Yu^{1,2}, REN Yanmin^{1,2}, PAN Yuchun^{1,2,†}

1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097; † Corresponding author, E-mail: panyu@nercita.org.cn

Abstract Spatial aggregation features of 2015 county-level grain yields of Huang-Huai-Hai Region have been analyzed systematically based on cumulative distribution function and spatial autocorrelation analysis method, and impact of 18 factors on grain yields of different categories of counties in Huang-Huai-Hai Region and their interaction have been analyzed by use of geographical detector. The results indicate that low county-level grain yields in Huang-Huai-Hai Region tend to aggregate and high county-level grain yields tend to scatter, showing significant homogeneous aggregation in space. The areas of significant high yields are mainly distributed in southeast Henan Province, north Anhui Province and north Jiangsu Province and areas of significantly low yields are mainly in Beijing-Tianjin-Hebei Region and coastal counties of Shandong Province. In consideration of spatial constraints and distribution difference of grain yields, Huang-Huai-Hai Region can be classified into 4 areas: high grain yield area, mid-high grain yield area, low-middle grain yield area and low grain yield area. The impacts of 18 factors on county-level grain yields of Huang-Huai-Hai Region vary and mainly manifest dual-factor enhancement type and nonlinear enhancement type. The leading factors of high yield area are added value of primary industry, consumption of fertilizers (total mass percent of nutrients) and total agricultural mechanical power, belonging to

social economy and factor-input acting type. The leading factors of mid-high yield area are cultivated land area, regional registered population, added value of primary industry, gross agricultural mechanical power, showing as the combined acting type. The leading factors of low-middle yield area are cultivated land area and consumption of fertilizers (total mass percent of nutrients), showing as geographical environment and factor-input acting type. The leading factors of low yield area are vegetation index, cultivated land area, added value of primary industry, consumption of fertilizers (total mass percentage of nutrients) and total agricultural mechanical power, showing as a combined acting type. The targeted grain production and income increase strategy shall be formulated in the future based on actual conditions of different areas.

Key words Huang-Huai-Hai Region; grain production; pattern; driving mechanism; geographical detector

粮食生产关乎国计民生。长久以来,我国主要通过稳定和提高粮食产量来实现粮食安全^[1]。现阶段,我国已实现粮食产量连年增长,但仍然面临挑战和考验。一方面,粮食产量增长慢于粮食消费增长^[2],农业的主要矛盾转变为结构性矛盾,突出表现为阶段性供过于求与供给不足并存,既有研究成果不足以支撑新时期国家粮食安全战略决策^[3]。另一方面,在新型城镇化和生态文明建设背景下,粮食生产面临水土资源紧缺、生态环境恶化和生产要素流失等多重压力^[4],进而驱动粮食生产格局发生演变。系统地研究粮食生产的空间分异规律,明晰其驱动机制,是优化粮食生产格局,进而确保粮食安全的客观需要,也是地理学 and 经济学等领域亟待深化研究的重要课题。

学者们基于粮食总产、粮食单产、不同作物产量、粮食增量以及人均粮食占有量等指标,揭示粮食产量的时空格局^[5-9],涉及全国、省、市、县等多种尺度^[10-14]以及尺度间的对比研究^[15-16]。其中,粮食总产量的相关分析比较多。在自然资源、经济投入、国家政策、市场价格、食物消费需求与结构等因素的综合影响下,粮食生产呈现空间异质性,表现为区域粮食生产的空间集聚性^[17-18]、空间关联性^[19-20]以及对周边区域粮食生产的溢出效应^[2]等。一些学者基于气候、水文等单一因素^[21-23]或多因素组合视角^[17,24],探究区域粮食生产影响因素的作用机制,并借助农业机械化、农业劳动力等因素间的交互作用,提出比较合理的粮食生产优化策略^[25]。总体而言,既有研究从不同方面解释我国粮食产量的变化特征及成因,成果较为丰富,但仍有不足:在研究粮食生产空间异质性及其驱动机制时,较少考虑各因素以及因素间耦合作用对粮食生产格局的影响,不利于系统地分析区域粮食生产的作用机制。

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后

驱动力的一组统计学方法^[26],能够解释多因素在空间上对因变量表现的不同影响,评估因素间的交互作用,已应用于自然科学、社会科学、环境科学和人类健康等领域^[27],可为揭示粮食生产的空间差异性及其驱动机制提供方法参考。

黄淮海地区是我国重要的农产品生产基地,在保障全国粮食稳定供应和食品安全方面具有重要作用。本文以黄淮海地区县域为研究单元,综合运用累积分布函数、空间自相关分析和地理探测器等方法,系统地研究区域粮食总产量的空间分异规律,并重点探测影响区域粮食生产的主导因素及其交互作用,以期为新时期区域粮食生产策略的制定提供科学依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究单元处理及数据来源

黄淮海地区包含天津市和山东省全部、河北省和河南省的大部分县域、北京市部分县域以及江苏省和安徽省的淮北地区。为保持区域的完整性和连续性,本文以2015年底行政区划为基础,对市辖区单元合并,共形成342个县域(市、区)单元。采用粮食总产量表征粮食生产,从地理环境、社会经济和要素投入3个方面选取18个因子来分析粮食生产的影响因素^[2,8,17-18](表1)。社会经济因子中,区域人口反映地方对粮食的基本需求,人口越多,对粮食需求越大,扩大粮食生产满足其需求的意愿越强烈;地区生产总值(gross domestic product, GDP)和第二产业增加值分别反映区域总体经济发展和工业发展情况,通常,经济发展将增加农民非农就业机会,种粮的机会成本上升,进而限制粮食生产;第一产业增加值和农民人均纯收入则分别从产业收益和农户收入两个方面反映地方政府及农户自身的种粮意愿。

县域粮食总产量数据来源于2016年《中国县

表 1 粮食生产的影响因素
Table 1 Influencing factors of grain production

类型	指标
地理环境	年均降水量(X_1)、年平均气温(X_2)、土壤有机质含量(X_3)、光温生产潜力(X_4)、植被指数(X_5)、高程(X_6)、坡度(X_7)、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温(X_8)、干燥度(X_9)、耕地面积(X_{10})
社会经济	区域人口(X_{11})、GDP (X_{12})、第一产业增加值(X_{13})、第二产业增加值(X_{14})、农民人均纯收入(X_{15})
要素投入	化肥施用量(折纯)(X_{16})、农村用电量(X_{17})、农业机械总动力(X_{18})

(市)社会经济统计年鉴》，市辖区粮食产量数据由市域粮食总量扣减所辖县域的粮食产量得到。社会经济及要素投入因子分别来自分省统计年鉴、区域经济统计年鉴或农村统计年鉴；年均降水量、年平均气温、土壤有机质含量、光温生产潜力、高程、坡度和耕地面积等地理环境因子基于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的气象要素空间插值、地形地貌和遥感监测(分辨率为 1 km)等栅格数据，利用 ArcGIS 工具，按行政区范围统计得到。

1.2 研究方法

1.2.1 累积分布函数

累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)是概率分布函数的积分 $F(x)$ ，表示在一个数据集中，小于等于某一数值的所有数据的概率分布 $P(x \leq m)$ ，能够直观地显示数据的分布状况^[28]。计算公式为

$$F(x)=P(x \leq m)。(1)$$

本文借助粮食产量分布状况来分析黄淮海地区县域粮食产量的集疏变化趋势。具体做法是，以固定的间隔，将县域粮食产量分成若干份，并统计每一份额内的单元频次和分布概率，然后采用累积频率函数求取处于某一粮食产量范围内的所有单元频次的累积百分比。

1.2.2 空间自相关分析

空间自相关分析是揭示地理事物间的关联动态以及空间关联现象和本质的一种地理方法^[29]，包括全局 Moran's I 和局部 Moran's I 统计量来反映区域粮食产量的空间依赖及差异状况，计算公式如下：

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

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1, j \neq i}^n x_j^2 / (n-1) - \bar{x}^2}, \quad (3)$$

式中， x_i 和 x_j 分别表示 i 县域和 j 县域的粮食产量， $\bar{x}$ 表示黄淮海地区县域粮食产量的平均值； n 为县域个数， w_{ij} 表示空间权重矩阵； I 和 I_i 分别为全局 Moran's I 和局部 Moran's I 指数，取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $I > 0$ 表示观测值在空间上呈现同质集聚(高高或低低集聚)特征， $I < 0$ 表示呈异质集聚(低高集聚或高低集聚)特征， $I = 0$ 表示空间不相关， $|I|$ 越趋近 1，空间集聚特征越显著。

1.2.3 地理探测器

地理探测器的工作原理是以空间分异理论为基础，经过不同的离散分类处理方法，将各类因子转化为类型变量，以便在同一空间尺度下进行分析，获取因子对因变量的解释力 q ^[30]：

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2, \quad (4)$$

式中， L 为自变量 X 的分区(类)数， n_h 和 σ_h^2 分别表示第 h 个分区内的县(市、区)个数和方差， n 和 σ^2 分别为黄淮海地区的县域单元数和方差。 $q \in [0, 1]$ ，主要解释自变量对因变量的影响程度。 q 值越趋近 1，表示因子对因变量变化的解释力越大，影响程度越强。

交互作用探测即分析因子 X_1 和 X_2 共同起作用时是否增加或减弱对粮食产量 Y 的解释力，或这些因素对粮食产量 Y 的影响是否独立。具体做法是，分别计算因子 X_1 和 X_2 对 Y 的解释力 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ ，以及 X_1 与 X_2 交互作用时对 Y 的解释力 $q(X_1 \cap X_2)$ ，然后比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 的大小。根据比较结果，将两因子间的交互作用划分为 5 种类型(表 2)。

表 2 因子交互作用类型

Table 2 Interaction types between factors

交互作用	依据
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
单因子非线性减弱	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
独立作用	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

2 结果与分析

2.1 粮食产量分布格局

2.1.1 县域粮食产量统计特征

由图 1 可知, 2015 年黄淮海地区县域粮食产量介于 0~178.72 万吨之间, 其中 25.74~34.32 万吨范围内分布的县域最多, 共计 54 个; 其次是 34.32~42.90 万吨和 60.05~68.63 万吨范围, 县域单元数分别为 45 个和 41 个。总体而言, 县域粮食产量呈现一定的集聚分布特征, 近 90% 的县域粮食产量低于 111.53 万吨。区域平均粮食产量为 49.30 万吨, 大于中位数(45.36 万吨), 表明县域粮食产量有较多低值集聚分布, 高值较少且分布相对离散; 县域粮食产量的峰度系数和偏度系数分别为 0.93 和 0.99, 表明县域粮食产量呈尖峰右长尾分布, 集中分布程度较明显。

2.1.2 县域粮食产量空间集聚特征

由全局自相关分析可知, 黄淮海地区县域粮食产量在 1% 的显著性水平下呈现明显的同质空间集聚性, Moran's I 指数为 0.555, Z-score 为 16.37, 表明

空间约束在区域粮食生产中具有重要作用。由图 2(a)可知, 县域粮食产量显著高值集聚区主要分布在豫东南地区(周口、漯河、信阳、驻马店和商丘等市)、皖北地区(亳州、淮北、宿州、蚌埠和阜阳等市)和苏北地区(徐州、连云港、盐城和连云港等市), 少量分布在内黄县、昌邑市和禹城市; 显著低值集聚区则主要位于京津冀地区(北京、天津、保定、沧州、廊坊和邢台等市)和山东临海县域(烟台和威海市); 显著低高集聚区主要分布在阜阳界首县、宿州砀山县、青岛胶州市、临沂临沭县、濮阳范县和商丘宁陵县; 显著高低集聚区主要分布在河间、定州和深州市。

2.1.3 基于空间约束的粮食生产分区

为了深入分析粮食生产空间格局的影响因素, 本文借助 ArcGIS 的分组分析工具, 在尽可能保证行政单元空间连续的前提下, 划分黄淮海地区县域粮食产量的分布类型。ArcGIS 分组分析工具采用连通图(最小跨度树)原理查找自然分组, 并根据空间约束方式和分析指标等参数, 生成不同的分组结果, 每组结果的伪 F 统计量不同且唯一, 可用来衡量分组的有效性, 通常选择伪 F 统计量最大或与之邻近的组数作为最佳分组。以“Contiguity_Edges_Concerns”(同一个组的要素与另一个组的另一要素至少共享某条边或某个折点时, 才表示这些要素属于同一个组)为空间约束方式, 结合县域单元的空间位置和粮食产量, 确定区域粮食产量空间的有效分组。结果表明, 2~15 组的伪 F 统计量在 112.63~168.90 之间变化, 其中 3 组(168.90)和 4 组(152.85)

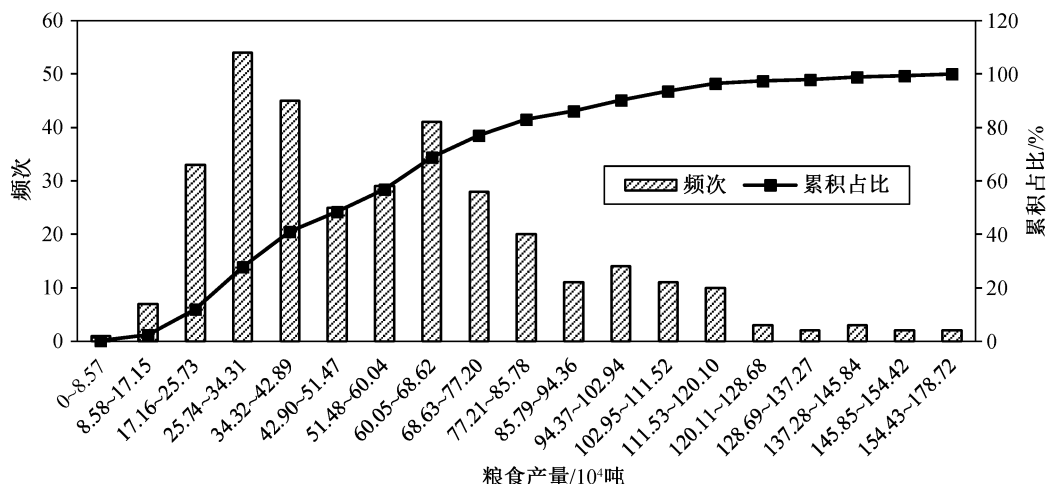


图 1 黄淮海地区县域粮食产量累积频率分布

Fig. 1 Cumulative frequency distribution of grain yield at county level in Huang-Huai-Hai Region

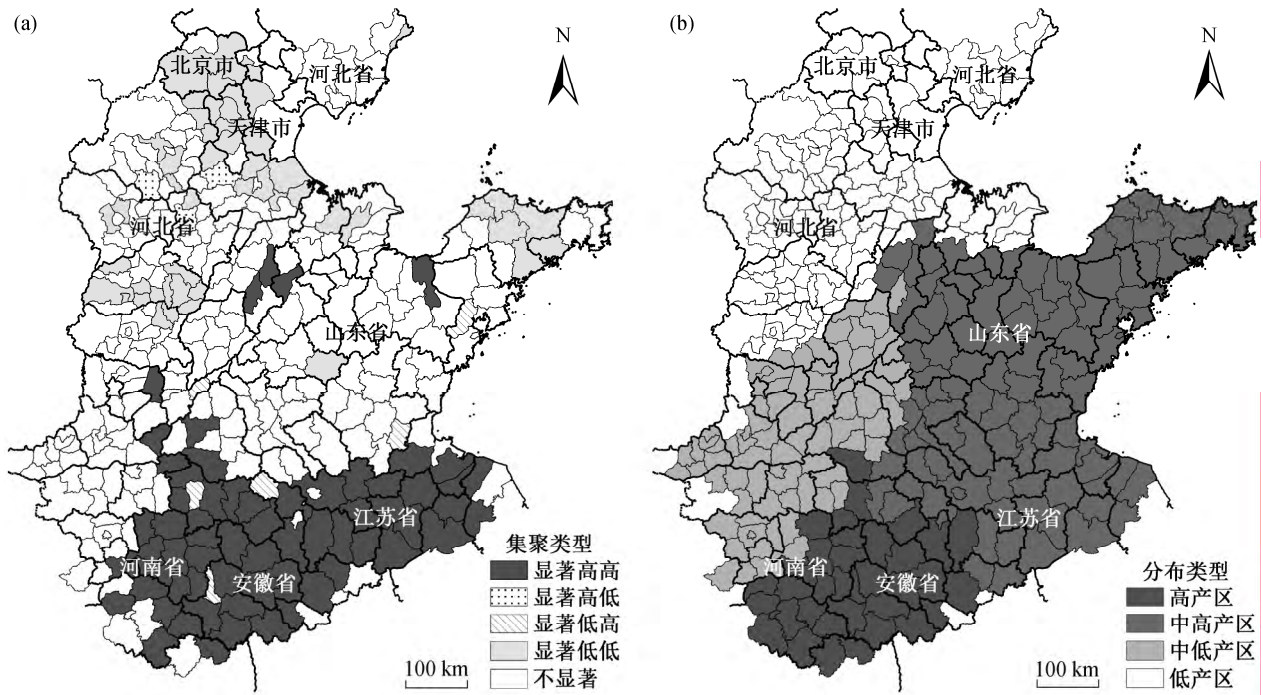


图2 黄淮海县域粮食产量 LISA 图(a)和空间分布类型(b)

Fig. 2 LISA map (a) and spatial distribution type (b) of grain yield in Huang-Huai-Hai Region

的伪 F 统计量较大。结合粮食产量的分布差异, 确定最佳组数为 4, 并根据各组粮食产量特征(表 3)分别命名为高产区、中高产区、中低产区和低产区。由图 2(b) 可知, 粮食高产区和低产区的分布特征与粮食产量空间集聚特征基本上相符, 表明分组结果能够客观地反映区域粮食产量的差异。其中, 高产区集中分布在豫东南及皖北平原一带, 中高产区以苏皖鲁三省为主, 中低产区主要位于豫北和鲁西低山区一带, 低产区则以京津冀地区为主。4 个区粮食产量的空间集聚性总体上弱于黄淮海地区整体水平, 高产区、中高产区和中低产区均在 1% 的显著性水平下表现出较强的空间集聚性, 且中高产区和高产区的集聚性较强, 表明这两个类型区的粮食生产在空间上的集聚模式较突出; 低产区呈现随机分

布状态, 未表现出明显的空间集聚特性。

2.2 区域粮食产量影响因素的地理探测器分析

地理探测器所需的自变量为类型变量, 故借助自然断点法, 将因子划分为低要素水平、中低要素水平、中高要素水平和高要素水平, 并分别以整个黄淮海地区及其 4 个类型区对应的粮食产量为因变量, 探讨各因子对粮食产量的影响作用(表 4)。

2.2.1 不同因素对各类型区的作用

由表 4 可知, 2015 年各类因素对黄淮海地区县域粮食产量的影响程度及显著性存在较大差异。三类因子中, 地理环境类因子的解释力均表现出显著性, 并以耕地面积、年均降水量、植被指数和年平均气温的解释力为最强($q > 0.3$), 表明地理环境因子对黄淮海地区的县域粮食生产格局分异起关键作用; 社

表 3 不同粮食产量类型的空间集聚特征

Table 3 Spatial clustering characteristic of different grain yield types

类型	平均粮食产量/ 10^4 吨	单元数目/个	Moran's I	Z-score
高产区	95.83	37	0.214	2.24
中高产区	57.76	99	0.418	6.59
中低产区	51.68	78	0.195	2.76
低产区	27.85	128	0.073	1.42
黄淮海地区	49.30	342	0.555	16.37

表 4 黄淮海地区及不同类型区内影响因素的 q 值分布

Table 4 q distribution of influencing factors in Huang-Huai-Hai Region and its sub-regions

指标	q				
	高产区	中高产区	中低产区	低产区	黄淮海地区
年均降水量	0.000	0.047	0.246*	0.021	0.413*
年平均气温	0.004	0.015	0.157*	0.001	0.361*
土壤有机质含量	0.047*	0.019	0.036	0.204*	0.089*
光温生产潜力	0.138*	0.045	0.225*	0.214*	0.149*
植被指数	0.153*	0.002	0.239*	0.318*	0.400*
高程	0.072*	0.122	0.219*	0.145*	0.080*
坡度	0.078	0.221*	0.287*	0.147*	0.097*
$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温	0.077	—	0.134	0.022	0.088*
干燥度	0.076	0.031	0.071	0.05	0.241*
耕地面积	0.240*	0.392*	0.317*	0.657*	0.451*
区域人口	0.015	0.382*	0.149*	0.142*	0.309*
GDP	0.01	—	0.029	0.027	0.011
第一产业增加值	0.31*	0.348*	0.147*	0.462*	0.397*
第二产业增加值	0.045	0.148	0.032	0.032	0.010
农民人均纯收入	0.066	0.011	0.038	0.144*	0.048*
化肥施用量(折纯)	0.364*	0.067	0.364*	0.42*	0.477*
农村用电量	0.126	0.025	0.115	0.043	0.011
农业机械总动力	0.485*	0.416*	0.17*	0.518*	0.423*

注: *表示因子的解释力至少在 $p=0.1$ 下显著相关, —表示全区总方差 δ^2 为 0, 无法判断指标与粮食产量的相关性, 故不参与 q 值计算。

会经济类因子中, 仅区域人口、第一产业增加值和农民人均纯收入具有显著性作用, 且以区域人口和第一产业增加值的解释力为最强, 表明区域粮食生产受地方人口增长需求和地方政府增收意愿的推动影响较大。要素投入仅化肥施用量(折纯)和农业机械总动力表现出显著性, q 值大于 0.4, 表明化肥投入和农业机械化水平对研究区的粮食生产格局具有重要影响。

对不同类型区影响因子的解释力分析如下。1) 对于粮食高产区, 要素投入类因子的解释力均具有显著性, 且以农业机械总动力和化肥施用量(折纯)的解释力为最强, 表明较高的农业机械化水平和化肥投入显著地促进该类型区的粮食生产; 社会经济类因子中, 仅第一产业增加值的解释力最强, 且具有显著性, 表明产业收益在一定程度上推动当地粮食产量增长, 地方政府增产意愿较突出; 地理环境类因子中, 耕地面积、植被指数、光温生产潜力和高程和土壤有机质含量 5 个因子具有显著性, 且耕地面积、植被指数、光温生产潜力的影响作用最明显, 但解释力均小于 0.3, 说明地理环境因子并非区

域高产的主要驱动因素。2) 对于粮食中高产区, 耕地面积、区域人口、第一产业增加值和农业机械总动力分别是对粮食生产格局影响最强且具有显著性的地理环境因子、社会经济因子以及要素投入因子, 表明相对丰富的耕地资源、较强的粮食需求和地方政府增收意愿, 叠加较高的农机化水平, 形成较强的粮食产出能力。3) 对于粮食中低产区, 除土壤有机质含量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和干燥度外, 其余 7 个地理环境因子均对粮食生产产生显著影响, 并以耕地面积的解释力为最强; 社会经济因子的解释力总体上弱于要素投入因子, 尽管区域人口和第一产业增加值的解释力也具有显著性, 但解释力较弱; 要素投入因子中, 以化肥施用量(折纯)的解释力最强, 表明耕地面积和化肥投入对中低产区粮食生产格局的影响较突出。4) 对于粮食低产区, 除年均降水量、年平均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和干燥度外, 其余 6 个地理环境因子的解释力均较强且具有显著性, 并以耕地面积、植被指数的解释力为最强; 社会经济因子中, 区域人口、第一产业增加值和农民人均纯收入的解释力均较强且具有显著性, 且以第一产业增加

值的解释力为最强,说明产业收益对当地粮食产量增长具有显著影响;在要素投入因子中,化肥施用量(折纯)和农业机械总动力的解释力最强且具有显著性。

2.2.2 同一因素对各类型区域的作用

由表4可知,同一因素对不同地区粮食产量的影响存在差异,耕地面积、第一产业增加值和农业机械总动力始终对黄淮海地区及其4个类型区的粮食生产格局有较强的解释力,说明这4个因素对粮食生产格局的影响较明显。其他因素对整个黄淮海地区及其4个类型区的解释力表现不同:农村用电量对高产区粮食生产格局的解释力明显高于整个黄淮海地区和其他类型区;区域人口和第二产业增加值对中高产区粮食生产的解释力明显高于其他类型区;光温生产潜力、高程和坡度对中低产区的解释力明显强于其他类型区,说明光温条件和地形地貌对中低产区的约束更强;土壤有机质含量、耕地面积、第一产业增加值、农民人均纯收入和农业机械总动力对低产区的影响程度更高,在一定程度上说明低产区粮食生产的影响因素较多,发展相对受限。

2.2.3 粮食生产影响因素的交互作用

18个因子对整个黄淮海地区及其4个类型区粮食生产的交互作用类型表现为双因子增强或非线性增强,表明各因子对县域粮食产量的影响存在一定的联系,彼此之间并非完全独立。就影响因子而言,耕地面积、第一产业增加值和农业机械总动力间的交互作用在整个黄淮海地区及其4个类型区均表现为双因子增强,说明这3个因子对区域粮食生产有着重要影响。农民人均纯收入与耕地面积、农村用电量和农业机械总动力间的交互作用均表现为非线性增强。就粮食生产类型区而言,高产区中,社会经济类因子间的交互作用均表现为非线性增强,在一定程度上说明社会经济因子间的交互更能促进粮食生产;社会经济类因子(第一产业增加值除外)与要素投入类因子的交互作用均为非线性增强,说明这两类因子的叠加有利于促进粮食增产。中高产区中,土壤有机质含量、农民人均纯收入与要素投入类因子的交互作用均表现为非线性增强。中低产区中,地理环境因子与其他类型因子的交互作用表现为非线性增强类型的比例占3/4,说明地理环境因子的交互对粮食生产影响极大;要素投入类因子中,仅农业机械总动力与农村用电量间的交互作用表现为非线性增强,表明推进农业机械化发展更有利于

促进粮食增产。低产区中,耕地面积与其他因子(与农民人均纯收入的交互作用除外)的交互作用均表现为双因子增强,表明耕地资源与农民收益的叠加对低产区粮食生产的影响更强。要素投入类因子中,仅农业机械总动力与化肥施用量(折纯)的交互作用表现为非线性增强,因此,需重视农业机械化发展与化肥投入的耦合对低产区粮食增产的促进作用。

2.3 区域粮食生产的主导影响因素识别及优化策略

根据各因素的 q 值、显著性和交互作用,选择解释力显著且大于0.3的因子作为类型区的主导因素^[31-32]。粮食高产区的主导因素为第一产业增加值、化肥施用量(折纯)和农业机械总动力,中高产区的主导因素为耕地面积、区域人口、第一产业增加值和农业机械总动力,中低产区的主导因素为耕地面积和化肥施用量(折纯),低产区的主导因素为植被指数、耕地面积、第一产业增加值、化肥施用量(折纯)和农业机械总动力。总体上,可判定粮食高产区的影响类型为社会经济及要素投入驱动型,中高产区和低产区为综合要素驱动型,中低产区则主要为地理环境及要素投入驱动型。

结合上述研究结果,我们建议制定差异化的粮食生产发展策略。1) 粮食高产区的光、温、水土资源丰富,地势平坦,适宜规模化种植。当前,第一产业增加值、农业机械总动力和化肥施用量(折纯)间呈现双因子增强作用,说明三者间的交互作用可有效地促进区域粮食生产,但尚待优化。未来可依托土地综合整治工程,平整田块,加快土地流转,持续推进规模化种植,通过农业机械与耕地面积、化肥投入等的正向耦合交互来提高粮食产量。2) 中高产区耕地资源丰富且地势平坦,适宜机械耕作,并且人口基数较大,产业收益较高,地方具有较强的粮食增产需求和意愿。未来可考虑结合农业机械化与农民人均纯收入间的非线性增强型交互作用,凭借区域农业产业发展优势,依托国家高标准农田建设和粮食生产功能区建设政策,积极发展现代农业产业园,推进机械化生产和规模化种植,以产业促进农业,带动农民增收、粮食增产。3) 中低产区粮食生产受到光温生产潜力、地形地貌等自然地理环境的诸多限制,其产量增长多依赖农业生产资料投入,未来仍应以加大要素投入为主,适当地推动农机化发展,共同促进粮食增产。4) 低产区中,

粮食生产受自然地理环境 and 经济快速发展的双重约束,建议结合地理环境特点和自身发展需求,在京津地区逐步推进全程农业机械化和规模化,借助科技创新,加快优质品种培育,提升粮食品质;在河北平原地区加大规模化经营力度和农业机械化发展水平,加速农机与耕地面积等要素的耦合,提高区域粮食产量;受地形地貌限制较大的其余县域则需考虑粮食生产功能转移或种植结构调整。

3 结论与讨论

本研究综合运用累积分布函数、空间自相关分析和地理探测器等方法,系统地分析2015年黄淮海地区县域粮食产量的空间格局及其影响因素,得到如下主要结论。

1) 2015年,黄淮海地区县域粮食产量总体上呈现“低值集聚、高值离散”的特征,近90%的县域粮食产量低于111.53万吨;县域粮食生产在空间上呈现显著的同质集聚分布,显著高值集聚区主要分布在豫东南、皖北和苏北地区,显著低值集聚区主要分布在京津冀地区和山东临海县域。

2) 综合考虑粮食生产的空间集聚性和空间约束,将黄淮海地区分成4个类型区。除低产区外,高产区、中高产区和中低产区在1%的显著性水平下均表现出较强的空间集聚性,且高产区和中高产区的集聚性较强,但弱于黄淮海地区的整体水平。

3) 地理探测器分析结果表明,18个因子对区域粮食产量的影响存在差异性,因子间的交互作用主要为双因子增强型和非线性增强型。县域粮食高产区属于社会经济及要素投入驱动型,中低产区为地理环境及要素投入驱动型,中高产区和低产区均为综合要素驱动型。

本文研究结果对区域粮食生产及安全管理的启示有两方面。1) 粮食生产格局本质上是区域自然地理要素、经济水平、生产要素投入和市场规律等因素在空间上综合作用的过程,客观地反映了粮食生产的地域分工格局。结合粮食高产区和中高产区的区域分工及协同优势,未来可推进粮食生产功能优势区建设试点,凸显粮食生产功能。2) 不同因素对区域粮食生产的影响存在差异,同一因素对不同区域的粮食生产影响也不同,并且各因素间彼此相联系,其交互作用强化了单因素对区域粮食生产的解释力。因此,可针对性地加强正向促进作用,减弱负向抑制联系,实现区域粮食增产措施的有效衔接和合理匹配,促进粮食增产增收。

接和合理匹配,促进粮食增产增收。

本研究使用地理探测器方法,虽然较为客观地反映了各因子对区域粮食产量的解释力以及各因素间的联系,但仍需结合其他方法,对这些因素的作用机制加以完善。同时,本文仅针对2015年的数据展开研究,结果具有一定的偶然性,未来可尝试采用多年均值的方法,选择更多的时段,分析各因素对粮食产量的解释力及交互作用的动态变化趋势等,以便制定更具针对性的粮食增产策略及建议。

参考文献

- [1] 谢高地,成升魁,肖玉,等.新时期中国粮食供需平衡态势及粮食安全观的重构.自然资源学报,2017,32(6): 895-903
- [2] 刘玉,唐秀美,潘瑜春,等.黄淮海地区县域粮食单产的空间溢出效应及影响因素分析.农业工程学报,2016,32(9): 299-307
- [3] 成升魁,李云云,刘晓洁,等.关于新时代我国粮食安全观的思考.自然资源学报,2018,33(6): 911-926
- [4] 黎东升,曾靖.经济新常态下我国粮食安全面临的挑战.农业经济问题,2015(5): 42-47
- [5] 李政通,姚成胜,梁龙武.中国粮食生产的区域类型和生产模式演变分析.地理研究,2018,37(5): 937-953
- [6] 刘忠,黄峰,李保国.基于经验模态分解的中国粮食单产波动特征及影响因素.农业工程学报,2015,31(2): 7-13
- [7] 刘玉,蒙达,周艳兵,等.京津冀地区粮食产量变化及其作物结构分析.经济地理,2014,34(8): 125-130
- [8] 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量影响因素分析.地理研究,2018,37(1): 171-182
- [9] 黄勇,朱信凯.基于指数分解法的中国粮食增量贡献要素研究.农业技术经济,2014(6): 92-102
- [10] 肖建英,谭术魁.中国粮食产量省级尺度下的空间分异规律.中国土地科学,2013,27(8): 26-32
- [11] 杜国明,马敬盼,张露洋,等.近50年气候驱动下三江平原粮食生产潜力时空演变分析.水土保持研究,2018,25(2): 361-366
- [12] 梁本哲,王占岐.基于粗糙集理论的武汉市农业土地利用数据分析及规划决策研究.中国农业资源与区划,2018,39(3): 64-70
- [13] 丁金梅,杨奎,马彩虹,等.中国粮食产量时空格局演变研究.干旱区地理,2017,40(6): 1290-1297

- [14] 潘竞虎, 张建辉, 胡艳兴. 近 20a 来甘肃省县域人均粮食占有量时空格局及其驱动力研究. 自然资源学报, 2016, 31(1): 124-134
- [15] 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. 经济地理, 2014, 34(10): 124-130
- [16] 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. 干旱区地理, 2014, 37(2): 397-405
- [17] 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分析. 经济地理, 2018, 38(5): 142-151
- [18] 刘玉, 刘彦随, 郭丽英. 环渤海地区县域人均粮食占有量空间格局演化. 地理科学, 2011, 31(1): 102-109
- [19] 王千, 金晓斌, 阿依吐尔逊·沙木西, 等. 河北省粮食产量空间格局差异变化研究. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1525-1535
- [20] 陈丽, 郝晋珉, 艾东, 等. 黄淮海平原粮食均衡增产潜力及空间分异. 农业工程学报, 2015, 31(2): 288-297
- [21] 孙乌仁·图雅, 苏根成, 迟文峰. 农牧交错带耕地数量变化对粮食产量影响的时空关联性——以内蒙古乌兰察布市为例. 水土保持通报, 2016, 36(3): 186-192
- [22] 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. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 89-94
- [23] 陈秧分, 王国刚, 王丽娟. 农户生产决策视角下我国粮食生产格局变化机制. 经济地理, 2016, 36(7): 139-145
- [24] 姚成胜, 李政通, 易行. 中国粮食产量变化的驱动效应及其空间分异研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(9): 72-81
- [25] 黄玛兰, 李晓云, 游良志. 农业机械与农业劳动力投入对粮食产出的影响及其替代弹性. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(2): 37-45
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134
- [27] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策. 地理学报, 2017, 72(1): 161-173
- [28] 李佳洺, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. 地理学报, 2017, 72(1): 148-160
- [29] 姜世国, 滕骏华, 王法辉. 基于 GIS 的数量方法与应用. 北京: 商务印书馆, 2009
- [30] 武鹏, 李同昇, 李卫民. 县域农村贫困化空间分异及其影响因素——以陕西山阳县为例. 地理研究, 2018, 37(3): 593-606
- [31] 杨丰硕, 杨晓梅, 王志华, 等. 江西省典型县域经济差异影响因子地理探测研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 79-88
- [32] 廖颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778