

2000—2021年黄河流域化肥使用量与 粮食产量时空变化特征

张志高¹, 杨佳慧¹, 陈河阳¹, 刘嘉毅¹, 舒馨月², 石玉竹¹, 郭超凡²

(1. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000; 2. 衢州学院, 浙江 衢州 324000)

摘要: [目的] 研究黄河流域化肥使用时空变化特征及其与粮食生产的关系, 为该流域化肥施用管控提供理论依据。[方法] 基于2000—2021年黄河流域化肥使用量和粮食产量相关数据, 采用空间自相关分析、核密度分析和标准差椭圆等方法对黄河流域化肥使用的时空变化特征进行了分析, 并探讨化肥使用量和粮食产量的关系。[结果] 2000—2021年黄河流域粮食产量增长49.55%, 大于化肥使用量增速(24.87%), 2013年后流域化肥使用量开始波动下降, 粮食产量依然保持增长趋势, 化肥使用效率明显提升。近22年来黄河流域化肥使用的区域集聚态势在持续减弱, 黄河流域化肥使用量在空间上具有一定的非均衡性, 热点区域主要集中在河南和山东省, 冷点区域集中在青海和甘肃省, 22年来黄河流域化肥使用热点区域减少, 高值聚集区向西移动, 冷点区域增加。近22年来黄河流域上中下游地区化肥使用量分别增长46.52%, 38.68%和9.50%, 西部地区化肥使用量快速增长, 推动了流域化肥使用重心向北西方向移动57.40 km。近22年来黄河流域粮食产量重心向北北西方向移动22.06 km, 与化肥使用量重心趋于分离。[结论] 黄河流域化肥减量增效行动成效显著, 但整体化肥使用强度仍为超标状态, 未来仍需减少化肥使用。

关键词: 化肥使用量; 时空变化; 冷热点分析; 核密度分析; 标准差椭圆; 黄河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0312-10

中图分类号: S147

文献参数: 张志高, 杨佳慧, 陈河阳, 等. 2000—2021年黄河流域化肥使用量与粮食产量时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 312-321. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.032; Zhang Zhigao, Yang Jiahui, Chen Heyang, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of fertilizer application and grain yield in Yellow River basin from 2000 to 2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 312-321.

Spatial-temporal Distribution Characteristics of Fertilizer Application and Grain Yield in Yellow River Basin from 2000 to 2021

Zhang Zhigao¹, Yang Jiahui¹, Chen Heyang¹, Liu Jiayi¹, Shu Xinyue², Shi Yuzhu¹, Guo Chaofan²

(1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang, Henan 455000, China; 2. Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of chemical fertilizer use in the Yellow River basin and its relationship with grain production were analyzed in order to provide a theoretical basis for the control of chemical fertilizer application in the basin. [Methods] Fertilizer application and grain yield data in the Yellow River basin from 2000 to 2021 were used with spatial autocorrelation analysis, kernel density analysis, and ellipse of standard deviation to analyze the temporal and spatial variation characteristics of fertilizer use in the Yellow River basin, and to explore the relationship between fertilizer use and grain yield. [Results] From 2000 to 2021, grain yield in the Yellow River basin has increased by 49.55%, which was greater than the growth rate of chemical fertilizer application (24.87%). After 2013, chemical fertilizer applications in the basin began to fluctuate and decrease, while grain yield still maintained a growth trend. The efficiency of fertilizer application has significantly improved. During the past 22 years, the regional

收稿日期: 2023-12-02

修回日期: 2024-02-23

资助项目: 河南省哲学社会科学规划项目“气候变化对河南省农业生产率影响效应研究”(2022BJJ003); 河南省科技攻关项目“基于多源数据的河南省农业干旱动态变化与驱动机制研究”(232102320024); 安阳市科技发展计划项目“近62年安阳市气候变化及其对农业生产的影响研究”(2022C01NY019)

第一作者: 张志高(1986—), 男(汉族), 河南省许昌市人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化和农业经济方面研究。Email: zhangzhg06@163.com。

通信作者: 郭超凡(1988—), 男(汉族), 山西省吕梁市人, 博士, 讲师, 主要从事农业经济方面的研究。Email: guochao881016@163.com。

agglomeration trend of chemical fertilizer application in the Yellow River basin has been continuously weakening. The amount of chemical fertilizer use in the Yellow River basin has a certain degree of spatial imbalance, with hot areas mainly concentrated in Henan and Shandong Province, and cold areas concentrated in Qinghai and Gansu Province. During the past 22 years, the number of hot areas of chemical fertilizer use in the Yellow River basin has decreased, high-value aggregation areas have moved westward, and cold areas have increased. During the past 22 years, the use of chemical fertilizers in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River basin has increased by 46.52%, 38.68%, and 9.5%, respectively. The rapid growth of chemical fertilizer use in the western region has moved the center of gravity of chemical fertilizer use in the basin 57.40 km to the northwest. During the past 22 years, the center of gravity of grain production in the Yellow River basin has shifted 22.06 km to the northwest, and it has tended to separate from the center of gravity of fertilizer use. [Conclusion] The action of reducing chemical fertilizer use and increasing fertilizer use efficiency in the Yellow River basin has achieved significant results, but the overall intensity of chemical fertilizer use still exceeds the standard. Therefore, it will still be necessary to reduce chemical fertilizer use in the future.

Keywords: fertilizer usage; spatio-temporal variation; hot and cold spots; kernel density analysis; ellipse of standard deviation; the Yellow River basin

化肥是重要的农业生产资料,在促进农产品增产和保障粮食安全中发挥了不可替代的作用^[1-2]。改革开放以来,中国粮食产量从 1978 年的 3.03×10^8 t 增至 2021 年的 6.83×10^8 t,增长 125.41%,化肥施用量从 8.84×10^6 t 增至 51.91×10^6 t,增长 487.22%,化肥施用量的增速远大于粮食产量的增速。化肥施用一方面促进了农业生产,其对中国粮食增产贡献率高达 50% 以上^[3],是改革开放以来粮食增产的最重要驱动因素^[4],然而随着化肥的大量施用,中国化肥施用强度远超安全施用量上限,化肥的过量施用不仅增加粮食生产成本,对粮食的增产弹性逐渐降低^[5],同时也造成了水土污染和土地肥力下降等生态环境问题^[6-7]。因此,化肥施用及其对粮食生产的影响等相关问题研究成为学术界关注的热点^[8-9]。在化肥投入和利用的区域差异方面,辛良杰等^[10]发现中国化肥施用量呈较高的集聚状态,86.9% 的地市化肥施用总量呈增加趋势。孙兆凯等^[11]发现 1979—2019 年中国化肥施用强度重心向西南方向迁移,施用总量重心向西北方向迁移,化肥施用强度存在显著的空间集聚现象。赵雪雁等^[12]发现 2005—2015 年中国化肥施用量增幅大致呈“东—中—西”阶梯式递增的趋势,粮食产量增幅呈南北分异特征,粮肥耦合关系以“双增型”为主。于元赫等^[13]研究发现 1995—2015 年山东省农业化肥施用总量和施用强度相对较高,县域化肥施用强度存在显著的正向空间相关性。在化肥利用率和增产效应方面,陈同斌等^[14]分析了中国不同区域的化肥利用效率。杨建辉^[15]分析了中国各地化肥投入与农业增长耦合关系,发现以 2001 年为界,化肥投入可以分为“增量管制”和“减量管制”2 个阶段。

王旭等^[16]研究发现中国各生态区化肥增产作用显著,增产效应差异明显。在化肥的环境效应方面,刘钦普等^[17]构建环境风险评价模型,对山东省化肥施用环境风险进行了评价。Bouwman 等^[18]分析了农田氮肥和磷肥等使用对环境的影响。田沛佩等^[19]基于生命周期分析法发现 2013 年后中国化肥施用碳足迹开始下降。在化肥使用的影响因素方面,农业技术^[20]、农业产业结构调整^[21]、土地规模^[22]、化肥价格等^[23]因素对化肥施用具有显著影响。整体来看,已有研究多聚焦在化肥施用效率、影响因素及其环境影响等方面,且多为全国或省级尺度,缺乏对流域尺度化肥使用量和粮食产量的区域差异和动态变化方面的研究。

黄河流域横跨中国北方东、中、西三大地理阶梯,跨越干旱、半干旱和半湿润区,流域上、中、下游地形地貌、植被及气候类型分异显著,为中国重要的农牧业生产区和生态功能区。黄河流域现有耕地 1.30×10^7 hm²,粮食和肉类产量约占全国 1/3,然而长期的高强度生产使流域内农业生产面临着严重的资源环境等问题。因此,本文以黄河流域为研究区域,基于 2000—2021 年流域 9 省份 72 个地市化肥使用量和粮食产量相关数据,采用标准差椭圆、空间自相关分析和核密度分析等方法对流域化肥使用量的时空变化特征及其与粮食生产的关系,以期为流域化肥施用管控、农业面源污染改善和农业高质量发展提供科学参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域横跨中国北方东、中、西部 3 个区域,流域内地势西高东低,气候条件差异大,自西向东分别

为干旱气候、半干旱气候和半湿润气候,降水量由东南向西北递减,黄河支流众多,有渭河和汾河等 16 条支流。流域内青藏高原和内蒙古高原,是中国的主要畜牧业基地,上游地区的宁蒙河套平原、中游地区的汾渭盆地和下游地区的黄淮海平原是中国的主要农业生产基地,流域内的内蒙古、河南及山东等省份为国家核心粮食生产区。流域内部生态系统复杂多样,土地资源丰富,生态环境脆弱,生态环境与经济发展之间的矛盾较突出。参考前人^[24]基于地市尺度对黄河流域范围的界定,本研究以黄河自然流经地区为主体,选取 9 省区 72 个地市(州、盟)作为研究样本。

1.2 数据来源

黄河流域化肥使用量、播种面积、粮食产量等数据来自 2001—2022 年各省区以及各地市统计年鉴和统计公报,流域行政边界数据源自中国科学院资源环境科学数据中心,经纬度坐标数据来自 Maplocation 平台。文中化肥使用量为化肥折纯使用量,因各地统计部门标准存在差异,青海和宁夏地区化肥使用数据用化肥实物量替代。

1.3 全局空间自相关

空间自相关分析能揭示某种属性的空间分布与其临近区域的关联性与差异性,具体可分为全局空间自相关和局部空间自相关^[24]。全局自相关刻画空间整体的分布情况,通过 GMI(global Moran's index)来表示,计算公式为^[25]:

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

式中: x_i, x_j 分别为空间单元上 i 和 j 的属性值; n 为空间单元个数; \bar{x} 为所有 i 和 j 空间单元属性的平均值。GMI 的取值范围为 $[-1 \sim 1]$, GMI 值大于 0 且越接近 1,表明化肥使用量在空间上集聚态势越显著, GMI 值小于 0 且越接近 -1 说明化肥使用量离散态势越显著。采用 Z 检验对 GMI 进行显著性检验,计算公式为^[26]:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}} \quad (2)$$

式中: $Z(I)$ 为 GMI 的 Z 检验值; $E(I)$ 为其数学期望; $V(I)$ 为其方差; Z 得分由 ArcGIS 计算得出。

1.4 局部空间自相关

GMI 反映的是研究对象在空间整体上的分布态势,不能反映局部的情况,局域关联指数 Getis-Ord G_i^* 可以分析属性值在局部空间的关联程度,探测属性值的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚集性。Getis-Ord 局部统计可表示为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (3)$$

式中: x_j 为地市 j 的化肥使用量; $W_{ij}(d)$ 为以空间距离 d 度量的权重; n 为地市总数。如果 $Z(G_i^*)$ 为正,且显著,说明周围属于热点区域,高值聚集,如果 $Z(G_i^*)$ 为负,且显著,说明周围为冷点区域,低值聚集^[10]。

1.5 核密度分析

核密度函数可以借助已知样点,对周围空间区域进行估计,从而描述样本在研究区域内的集聚与分散状态^[25]。2007 年国家生态环境部确立了中国在生态县建设中每年化肥使用量不超过 250 kg/hm² 的参考性指标,据此指标统计流域内化肥使用量超标的地市,结合超标地市政府驻地的经纬度,将其转化为点数据与黄河流域 shp 底图重叠,进行核密度分析,最后分别绘制出 2000, 2007, 2014, 2021 年流域化肥使用量超标地市的密度分布图。核密度 $f_n(x)$ 计算公式为:

$$f_n(x) = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{m}\right) \quad (4)$$

式中: n 为上述 4 个年份化肥使用量超标地市; m 为带宽或搜索半径,在 ArcGIS 中引用系统默认值, $k\left(\frac{x-x_i}{m}\right)$ 为核密度函数。

1.6 标准差椭圆

采用标准差椭圆法^[11]分析化肥使用量和粮食产量重心变迁,标准差椭圆长轴表示数据分布的空间特征,短轴表示数据离散程度。计算公式为:

$$\begin{cases} \bar{X} = \sum_{i=1}^n W_i X_i / \sum_{i=1}^n W_i \\ \bar{Y} = \sum_{i=1}^n W_i Y_i / \sum_{i=1}^n W_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: \bar{X}, \bar{Y} 分别是所求重心坐标的经纬度; X_i, Y_i 为第 i 个区域中心坐标的经纬度; W_i 为第 i 个区域某属性值的空间权重。

2 结果与分析

2.1 黄河流域化肥使用量、粮食产量和播种面积时间变化

2000—2021 年黄河流域粮食产量、播种面积和化肥使用量变化情况如图 1 所示,2000—2021 年黄河流域粮食产量总体呈波动上升趋势,播种面积和化肥使用量呈先升后降趋势,波段性特征明显。粮食产量由 8.20×10^7 t 增至 2020 年的 1.25×10^8 t,随后小幅降至 1.22×10^8 t。播种面积由 2.87×10^7 hm² 增至 2011 年的 3.03×10^7 hm²,之后波动下降。

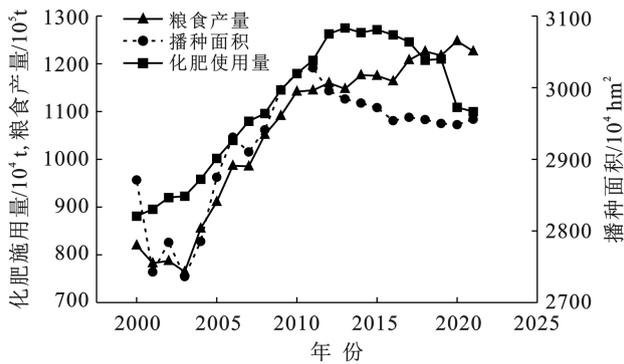


图 1 2000—2021 年黄河流域粮食产量、播种面积与化肥使用量

Fig.1 Grain yield, sown area and fertilizer application in Yellow River basin from 2000 to 2021

化肥使用量整体呈“快速增长—波动下降”两阶段演化特征,由 2000 年的 8.81×10^6 t 增至 2013 年的 1.28×10^7 t,之后呈波动下降趋势。从增速来看,22 a 来黄河流域播种面积和化肥使用量的增长率分别为 2.95% 和 24.87%,化肥使用量的增长率远高于播种面积的增长率,说明化肥使用强度不断提升,单位面积化肥使用量由 306.81 kg/hm^2 增至 372.12 kg/hm^2 ,

增长 21.29%。2000—2021 年黄河流域粮食产量增长 49.55%,大于化肥使用量增速,尤其是 2013 年后黄河流域化肥使用量开始波动下降,但是粮食产量依然保持增长趋势,说明化肥使用效率提升。

2.2 黄河流域上、中、下游地区化肥使用量和粮食产量时间变化

黄河流域上、中、下游地区化肥使用量与粮食产量变化如表 1 所示。22 a 来,上游地区化肥使用量由 2000 年的 1.62×10^6 t 增至 2021 年的 2.37×10^6 t,增长 46.52%,下游地区由 4.61×10^6 t 增至 5.05×10^6 t,增长 9.50%,中游地区化肥使用量增长 38.79%,由 2.58×10^6 t 增至 3.57×10^6 t。上游地区粮食产量由 2000 年的 1.191×10^7 t 增至 2021 年的 1.991×10^7 t,增长 67.15%,下游地区由 4.56×10^7 t 增至 6.85×10^7 t,增幅为 50.13%,中游地区粮食产量增长 39.90%,由 2.45×10^7 t 增至 3.42×10^7 t。总体来看,黄河流域下游地区化肥使用量和粮食产量最多,中游地区次之,上游地区最少,上游地区化肥使用量和粮食产量增速最大,下游地区化肥使用量增速最小,中游地区粮食产量增速最小。

表 1 2000—2021 年黄河流域上、中、下游地区化肥使用量与粮食产量

Table 1 Fertilizer application and grain yield in upper, middle and lower reaches of Yellow River basin

地区	化肥使用量/ 10^4 t				增速/%	粮食产量/ 10^4 t				增速/%
	2000 年	2007 年	2014 年	2021 年		2000 年	2007 年	2014 年	2021 年	
上游地区	161.94	207.51	243.91	237.28	46.52	1 191.30	1 433.30	1 827.96	1 991.26	67.15
中游地区	257.53	306.91	407.49	357.43	38.79	2 445.49	2 736.88	3 541.25	3 421.32	39.90
下游地区	461.39	565.39	613.97	505.23	9.50	4 562.71	5 681.71	6 392.70	6 850.02	50.13

2.3 黄河流域化肥使用量空间变化

将黄河流域各地市化肥使用量分为 5 个等级具体分级情况详见表 2。选取 2000,2007,2014 和 2021 年 4 个年份分析黄河流域化肥使用空间变化,结果如图 2 所示。

表 2 2000—2021 年黄河流域不同等级化肥使用量地市数量

Table 2 Number of cities with different levels of fertilizer application in Yellow River basin from 2000 to 2020

化肥使用量/ 10^4 t	2000 年	2007 年	2014 年	2021 年
0~5	21	17	15	17
5~10	20	21	18	20
10~20	15	10	13	15
20~35	12	17	16	12
35~85	4	7	10	8

由图 2 可知,总体上看,黄河流域化肥使用量空间差异明显,使用量较大地市主要分布在流域中下游河南和山东两省,上游地区青海和甘肃等地较小。

①2000 年黄河流域大部分地市处于 $0 \sim 5.00 \times 10^4$ t 和 $5.00 \times 10^4 \text{ t} \sim 1.00 \times 10^5$ t,化肥使用量较少的地市有果洛、玉树、海南、甘南、阿坝和阿拉善等地,主要分布在青海、甘肃、四川和内蒙古等省区; $1.00 \times 10^5 \sim 2.00 \times 10^5$ t 范围的地市在宁夏地区较为集中;处在 $2.00 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$ t 和 $3.50 \times 10^5 \sim 8.50 \times 10^5$ t 的地级市主要分布在山东和河南地区,其中商丘、菏泽、济宁和潍坊化肥使用量较多,在 3.00×10^5 t 以上。②2014 年黄河流域化肥使用量在 $0 \sim 5.00 \times 10^4$ t, $5.00 \times 10^4 \sim 1.00 \times 10^5$ t 和 $1.00 \times 10^5 \sim 2.00 \times 10^5$ t 的地市数量均呈减少趋势,相比 2000 年分别减少 6,2 和 2 个,在 $2.00 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$ t 和 $3.50 \times 10^5 \sim 8.50 \times 10^5$ t 的地市数量则明显增加,分别增加 4 个和 6 个,说明 2000—2014 年流域化肥使用呈增加趋势。15 a 来黄河流域 65 个地市化肥使用量增加,仅 7 个地市减少,增加较多地市主要位于河南、山东和陕西,部分地市分别由 $1.00 \times 10^5 \sim 2.00 \times 10^5$ t 和 $2.00 \times 10^5 \sim$

3.50×10^5 t 上升为 $2.00 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$ t 级和 $3.50 \times 10^5 \sim 8.50 \times 10^5$ t 级,减少地市主要位于山东和青海。③2021 年黄河流域化肥使用量在 $0 \sim 5.00 \times 10^4$ t, $5.00 \times 10^4 \sim 1.00 \times 10^5$ t 和 $1.00 \times 10^5 \sim 2.00 \times 10^5$ t 的地市数量相比 2014 年均呈增加趋势,增加地市数量均为 2 个,处于 $2.00 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$ t 和 $3.50 \times 10^5 \sim 8.50 \times 10^5$ t 的地市数量呈减少态势,分

别减少 4 个和 2 个,说明 2014—2021 年流域化肥使用呈减少趋势。2014—2021 年黄河流域 64 个地市化肥使用量减少,仅 8 个地市使用量增加,化肥使用量减少较多地市主要位于河南、山东和陕西地区,部分地市分别由 $2.00 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$ t 和 $3.50 \times 10^5 \sim 8.50 \times 10^5$ t 下降为 $1.00 \times 10^5 \sim 2.00 \times 10^5$ t 级和 $2.00 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$ t 级。

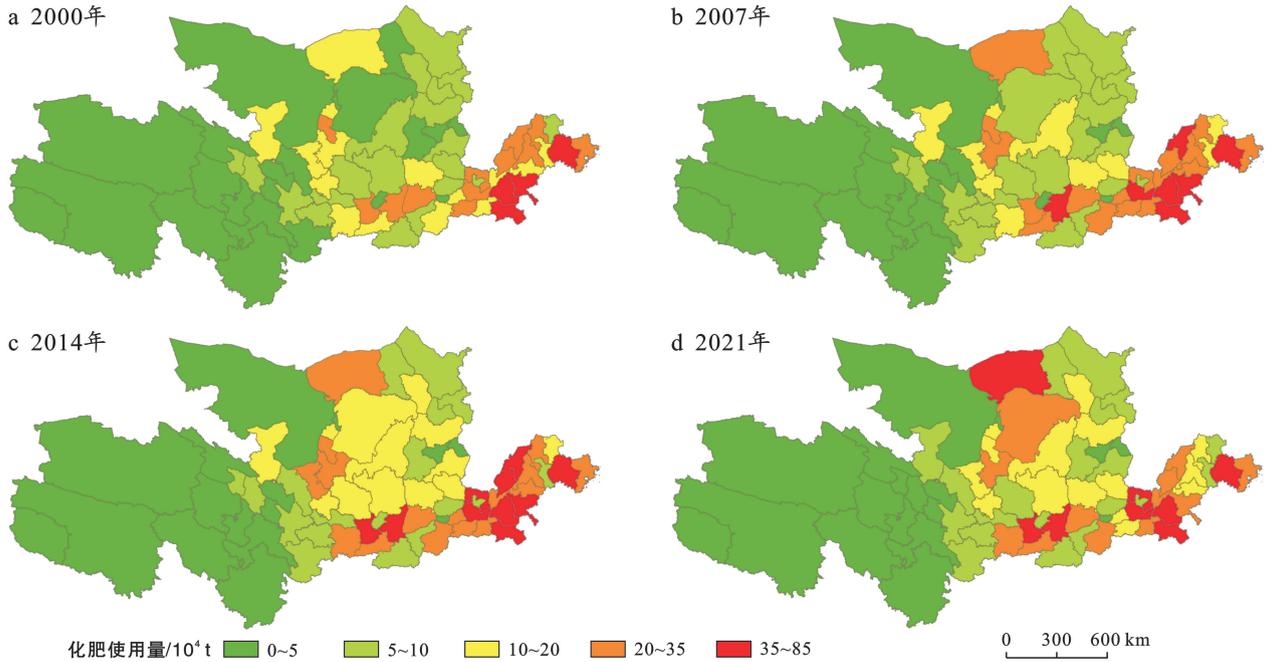


图 2 2000—2021 年黄河流域化肥使用量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of fertilizer application in Yellow River basin from 2000 to 2021

2.4 化肥使用量全局自相关

2000, 2007, 2014 和 2021 年 4 个年份化肥使用量综合得分的全局莫兰指数 (Moran's I) 如表 3 所示, 4 个年份全局莫兰指数均大于 0, Z 值大于 2.58, p 值均小于 0.01, 说明黄河流域化肥使用量存在着空间上的正相关性, 且具有显著的集聚特征。2000 年 Moran's I 值为 0.442, 为 4 个年份最大值, 当中 2000 年化肥使用量与空间的相关性最小, 说明 2000 年黄河流域地市化肥使用量在空间上的集聚态势最强。2000 年以来, Moran's I 值持续下降, 2007 年为 0.427, 2014 年降至 0.328, 2021 年为 0.322, 表明 22 a 来黄河流域化肥使用的区域集聚态势在持续减弱。

2.5 热点区域演化

为进一步地探索黄河流域各地级市化肥使用量局部空间集聚态势, 对上述 4 个时间节点对市域化肥使用量进行冷热点分析, 结果如图 3 所示。2000 年黄河流域化肥使用的次热点区域比例最小, 仅有郑州和焦作 2 地, 热点区域比例最大, 主要分布在河南和山东地区。冷点区域所占比例较少, 主要位于青海省西

宁市、海南和黄南等地区, 次冷点区域主要位于山西北部、青海和甘肃等地。与 2000 年相比, 2021 年黄河流域化肥使用热点区域明显减少, 由 17 个地市减少为 15 个地市, 高值聚集区向西移动, 山东省东营和青岛市由热点区域变为过渡区域, 滨州和潍坊由热点区域变为次热点区域, 郑州和焦作市则由次热点区域变为热点区域。次热点区域仍为 2 个, 但由河南省郑州和焦作市变为山东的滨州和潍坊市。甘肃省兰州、武威市和甘南 3 地由次冷点区域变为冷点区域, 致使 2021 年黄河流域化肥使用次冷点区域减少, 冷点区域增加。

表 3 2000—2021 年黄河流域化肥使用量的 p 值和 Z 值
Table 3 p and Z values of fertilizer application in Yellow River basin from 2000 to 2021

年份	Moran's I	p 值	$E(I)$	Z 值
2000	0.442 008	<0.01	-0.014 085	7.372 881
2007	0.427 393	<0.01	-0.014 085	7.124 189
2014	0.328 383	<0.01	-0.014 085	5.582 105
2021	0.322 341	<0.01	-0.014 085	5.466 169

2.7 化肥使用量与粮食产量重心迁移及标准差椭圆分析

黄河流域化肥使用量重心迁移轨迹及标准差椭圆如表 4 和图 5 所示。黄河流域化肥使用重心变化不大,22 a 来重心一直在山西省境内,2000 年化肥使用重心(69°01'E,39°06'N)在长治市屯留县,2000—2007 年重心向西南方向移动 9.46 km,仍在屯留县境内,移动速率为 1.35 km/a,在 4 个时期中移动最慢;2007—2014 年继续向西南方向移动 37.25 km 至临汾市安泽县,移动速率为 5.32 km/a,移动速度较快;2014—2021 年重心以 2.76 km/a 的速度向西北方向移动 19.29 km。22 a 来黄河流域化肥使用重心总体向西北方向移动 57.40 km,由屯留县移动至安泽县(63°38'E,39°08'N)。黄河流域化肥使用的标准差椭圆 X 轴略呈西北—东南走向,Y 轴略呈东北—西南走向,东—西长轴始终大于南—北短轴,表明黄河流域东西方向上的化肥使用相对南北方向更为集中。22 a 来标准差椭圆 X 轴由 584.03 km 缩短至 549.48 km,Y 轴由 266.19 km 增至 299.67 km,表明黄河流域化肥使用呈逐渐分散趋势,分布方向的明显性降低。2000—2021 年黄河流域粮食产量重心一直在山西长治市境内(图 6),整体呈 S 形轨迹由东南向西北

移动 22.06 km,由长治市平顺县(72°53'E,39°05'N)移动到潞城市(72°04'E,39°17'N)。2000—2007 年粮食生产重心向东北方向移动 7.17 km 至潞城市,移动速率 1.02 km/a,在 4 个时期中移动距离最小;2007—2014 年重心向西北方向移动 22.46 km 至长治市的屯留县,移动速率 3.21 km/a,移动距离最大;2014—2021 年向东北方向移动 12.29 km 至潞城市境内,移动速率 1.76 km/a。黄河流域粮食生产的标准差椭圆 X 轴呈近东—西走向,Y 轴呈近南—北走向,东—西长轴始终大于南—北短轴,表明黄河流域东西方向上的粮食产量相对南北方向更为集中。22 a 来标准差椭圆 X 轴缩短,Y 轴增长,黄河流域粮食产量分布方向的明显性降低。总体来看,近 22 a 黄河流域化肥使用和粮食产量重心趋于分离,化肥使用重心向北西方向移动 57.40 km,粮食产量重心向北北西方向移动 22.06 km,前者主要向西快速移动,后者主要向北迁移。分时段来看二者分离趋势也较为显著,2000—2007 年化肥使用重心向西南移动,粮食产量重心向东北迁移;2007—2014 年化肥使用重心继续大幅向西南移动,粮食产量重心大幅向西北迁移;2014—2021 年化肥使用重心向西北移动,粮食产量重心向东北迁移。

表 4 2000—2021 年黄河流域化肥使用和粮食生产的标准差椭圆参数

Table 4 Standard deviation elliptic parameters of fertilizer application and grain yield in Yellow River basin from 2000 to 2021

项目	年份	椭圆中心经度	椭圆中心纬度	长轴/km	短轴/km	方位角
化肥使用量	2000	69°01'E	39°06'N	584.03	266.19	89.20°
	2007	68°06'E	39°05'N	580.69	268.18	90.18°
	2014	64°31'E	38°59'N	568.25	273.98	90.94°
	2021	63°38'E	39°08'N	549.48	299.67	94.39°
粮食产量	2000	72°53'E	39°05'N	541.03	282.10	86.42°
	2007	73°27'E	39°07'N	537.51	270.97	88.58°
	2014	71°18'E	39°11'N	539.58	276.91	88.78°
	2021	72°04'E	39°17'N	536.06	287.93	90.56°

3 讨论

2000—2021 年黄河流域化肥使用量总体呈“先升后降”趋势,流域化肥使用量由 2000 年的 8.81×10^6 t 增至 2013 年的 1.28×10^7 t,之后呈波动下降趋势,2015 年后下降明显,这与国家化肥使用相关政策调控密切相关。2013 年前,在农业生产过程中化肥等农业要素被大量投入,忽视了农业生态环境,流域化肥施用强度超过中国近几年来化肥年平均施用强度 320 kg/hm^2 [27],同时长期超过安全施用标准 250 kg/hm^2 。2015 年《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》出台,国家层面深入开展农业化肥减量行

动,化肥输入量得到了控制,化肥投入开始减少。2021 年黄河流域化肥使用超过 3.50×10^5 t 的地市由 10 个减为 8 个,22 a 来流域化肥使用热点区域减少,冷点区域增加,表明黄河流域化肥输入零增长行动效果显著。空间分布图和冷热点分布格局表明黄河流域化肥使用量在空间上具有一定的非均衡性,化肥使用量较多的地级市主要集中在东部地区的河南和山东,涵盖了热点区域和次热点区域,这与相关研究结果 [28-29] 相似。自然本底因素是流域农业发展的先决条件,地形、气候和土壤等基本自然要素均对区域农业发展产生显著影响,河南和山东是中国主要的粮食主产区,气候温和、雨热同期具有先天的农作物种植

优势,自然会有更多农业生产资料的投入。流域化肥使用量冷点和次冷点区域主要位于西部青海和甘肃

等地,该区农业发展条件欠佳,化肥等农业投入较少,粮食产量相对较低。

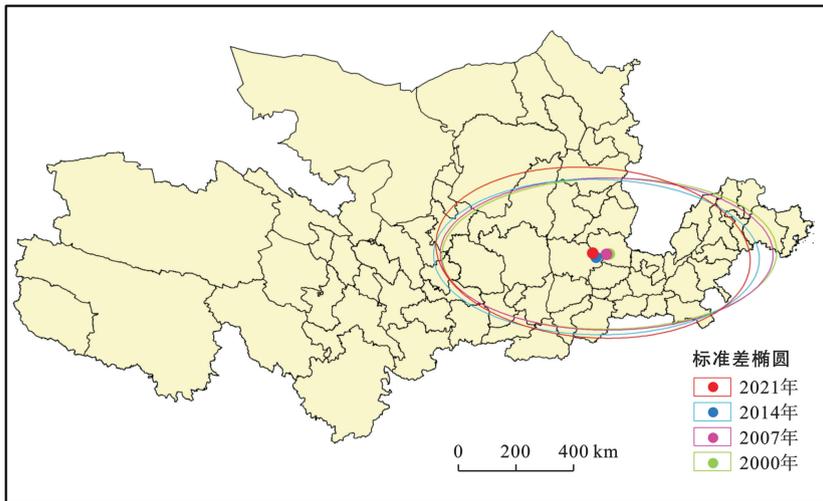


图 5 2000—2021 年黄河流域化肥使用量重心及离散程度分析

Fig.5 Analysis of gravity and dispersion degree of fertilizer application in Yellow River basin from 2000 to 2021

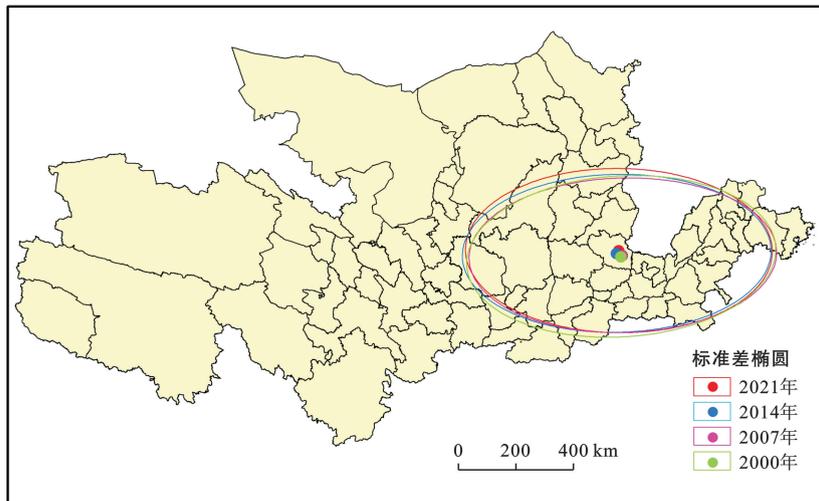


图 6 2000—2021 年黄河流域粮食产量重心及离散程度分析

Fig.6 Analysis of grain yield center of gravity and dispersion degree in Yellow River basin from 2000 to 2021

2000—2021 年黄河流域化肥使用重心向北西西方向移动 57.40 km,粮食产量重心向北北西方向移动 22.06 km,这与中国化肥使用量重心往西部移动的结论一致^[11,28],也与中国粮食生产重心向东北方向移动的趋势一致^[30],南方省份丘陵山地较多,加之“非粮化”问题严峻,北方地区的粮食生产地位越来越重要。近 22 a 来黄河流域上、中、下游地区化肥使用量分别增长 46.52%,38.79%和 9.50%,粮食产量分别增长 67.15%,39.90%和 50.13%,西部地区化肥使用量快速增长,超标趋势明显,推动了流域化肥使用量重心向北西西方向迁移,和粮食产量重心趋于分离。

黄河流域不同地区粮食产量与化肥施用量差异

明显,流域化肥管制政策需注重区域差异,青海和甘肃等上游地区化肥使用量增速最大,同时该区生态环境脆弱,未来该区要加大化肥零增长行动强度,减少化肥施用对生态环境造成的威胁。河南和山东等下游地区化肥使用量增速相对较低,而粮食产量增速较快,该区化肥使用效率较高,未来应总结耕作经验,积极推广。

4 结论

(1) 2000—2021 年黄河流域化肥使用量由 2000 年的 8.81×10^6 t 增至 2021 年的 1.10×10^7 t,增长 24.87%,呈“快速增长—波动下降”两阶段演化特征,2013 年

之后呈波动下降趋势。近 22 a 黄河流域粮食产量由 8.20×10^7 t 增至 2021 年的 1.23×10^8 t, 增长 49.55%, 流域播种面积由 2.87×10^7 hm² 增至 2.96×10^7 hm², 增长 2.95%, 黄河流域粮食产量增速远高于化肥增速, 尤其是 2013 年后黄河流域化肥使用量开始波动下降, 但是粮食产量依然保持增长趋势, 说明化肥使用效率明显提升。

(2) 从空间上来看, 黄河流域下游地区化肥使用量和粮食产量最多, 中游地区次之, 上游地区最少, 上游地区化肥使用量和粮食产量增速最大, 下游地区化肥使用量增速最小, 中游地区粮食产量增速最小。

(3) 2000—2021 年黄河流域化肥使用超标地市整体呈先增后降趋势, 河南、山东和宁夏大部分地市, 陕西南部地市处于超标状态, 西部内蒙古、甘肃和青海省区的大部分地市化肥使用量符合国家标准。22 a 来黄河流域化肥使用量全局莫兰指数由 0.442 减小到 0.322, 化肥使用的区域集聚态势在持续减弱。冷热点分析表明, 黄河流域化肥使用量在空间上具有一定的非均衡性, 热点区域主要集中在河南和山东, 冷点区域集中在青海和甘肃, 22 a 来黄河流域化肥使用热点区域减少, 高值聚集区向西移动, 冷点区域增加。

(4) 2000—2021 年黄河流域上中下游地区化肥使用量分别增长 46.52%, 38.68% 和 9.5%, 西部地区化肥使用量快速增长, 推动了流域化肥使用重心向北西方向移动 57.40 km。近 22 a 来黄河流域粮食产量重心向北北西方向移动 22.06 km, 与化肥使用量重心趋于分离。

参考文献 (References)

- [1] 张灿强, 王莉, 华春林, 等. 中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J]. 资源科学, 2016, 38(4): 790-797.
Zhang Canqiang, Wang Li, Hua Chunlin, et al. Potentialities of fertilizer reduction for grain produce and effects on carbon emissions [J]. Resources Science, 2016, 38(4): 790-797.
- [2] 宋红梅, 李廷亮, 刘洋, 等. 我国近 20 年主要粮食作物产量、进出口及化肥投入变化特征[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 332-339.
Song Hongmei, Li Tingliang, Liu Yang, et al. Temporal variation of main grain crops yield, import and export and fertilizer consumption of China in the past 20 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 332-339.
- [3] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题, 2008, 29(8): 65-68.
Wang Zuli, Xiao Haifeng. Analysis of chemical fertilizer on the growth of grain output [J]. Issues of Agriculture
- Economy, 2008, 29(8): 65-68.
- [4] 龚斌磊. 投入要素与生产率对中国农业增长的贡献研究[J]. 农业技术经济, 2018(6): 4-18.
Gong Binlei. The contribution of inputs and productivity to agricultural growth in China [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2018, 29(6): 4-18.
- [5] 赵志坚, 胡小娟, 彭翠婷, 等. 湖南省化肥投入与粮食产出变化对环境成本的影响分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 2007-2012.
Zhao Zhijian, Hu Xiaojuan, Peng Cuiting, et al. The effect of fertilizer usage on grain output and environmental cost: An empirical study in Hunan Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(12): 2007-2012.
- [6] 刘钦普, 濮励杰. 中国粮食主产区化肥施用时空特征及生态经济合理性分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 142-150.
Liu Qinpu, Pu Lijie. Spatiotemporal variation of fertilizer utilization and its eco-economic rationality in major grain production areas of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 142-150.
- [7] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 201-210.
Kong Fanbin, Guo Qiaolin, Pan Dan. Evaluation on overfertilization and its spatial-temporal difference about major grain crops in China [J]. Economic Geography, 2018, 38(10): 201-210.
- [8] 姚成胜, 李慧贤, 杨一单. 中国水稻生产与化肥施用的脱钩关系及其关联效应分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 63-73.
Yao Chengsheng, Li Huixian, Yang Yidan. Decoupling and correlation effect between rice production and chemical fertilizer application in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(10): 63-73.
- [9] 贺飞, 吕晓. 山东省化肥施用量与粮食产量时空耦合格局研究[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(4): 96-102.
He Fei, Lyu Xiao. Spatial-temporal coupling pattern of fertilizer application rate and grain yield in Shandong Province [J]. Geography and Geo-Information Science, 2023, 39(4): 96-102.
- [10] 辛良杰, 李秀彬, 谈明洪. 2000—2010 年我国农业化肥施用的时空演变格局[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 21-27.
Xin Liangjie, Li Xiubin, Tan Minghong. Spatial and temporal variations of agricultural chemical fertilization in China from 2000 to 2010 [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(5): 21-27.

- [11] 孙兆凯,冯欣,刘洋,等.中国化肥施用强度的时空分异特征[J].中国农业资源与区划,2022,43(9):168-178.
Sun Zhaokai, Feng Xin, Liu Yang, et al. Temporal and spatial differentiation characteristics of fertilizer application intensity in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(9):168-178.
- [12] 赵雪雁,刘江华,王蓉,等.基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的时空耦合关系[J].自然资源学报,2019,34(7):1471-1482.
Zhao Xueyan, Liu Jianghua, Wang Rong, et al. Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7):1471-1482.
- [13] 于元赫,李子君,姜爱霞,等.山东省农业化肥施用强度时空格局演变及驱动力分析[J].中国农业大学学报,2019,24(4):176-186.
Yu Yuanhe, Li Zijun, Jiang Aixia, et al. Spatial-temporal patterns change and driving forces analysis of agricultural chemical fertilization intensity in Shandong Province [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(4):176-186.
- [14] 陈同斌,曾希柏,胡清秀.中国化肥利用率的区域分异[J].地理学报,2002,57(5):531-538.
Chen Tongbin, Zeng Xibo, Hu Qingxiu. Utilization efficiency of chemical fertilizers among different counties of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5):531-538.
- [15] 杨建辉.中国化肥投入管制的时空演化及影响因素分析[J].地理科学,2018,38(9):1516-1524.
Yang Jianhui. Spatio-temporal evolution and drivers of chemical fertilizer input's control in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(9):1516-1524.
- [16] 王旭,李贞宇,马文奇,等.中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J].中国农业科学,2010,43(12):2469-2476.
Wang Xu, Li Zhenyu, Ma Wenqi, et al. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12):2469-2476.
- [17] 刘钦普,林振山,周亮.山东省化肥使用时空分异及潜在环境风险评价[J].农业工程学报,2015,31(7):208-214.
Liu Qinpu, Lin Zhenshan, Zhou Liang. Spatio-temporal differentiation and environmental risk assessment of fertilization in Shandong Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7):208-214.
- [18] Bouwman A F, Beusen A H W, Lassaletta L, et al. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):40366.
- [19] 田沛佩,卢宏伟,李丹,等.2008—2017 年中国地级市化肥施用碳足迹的时空演变格局[J].中国环境科学,2021,41(2):967-973.
Tian Peipei, Lu Hongwei, Li Dan, et al. Spatial-temporal patterns of carbon footprint of fertilizer application in China during 2008 to 2017 [J]. China Environmental Science, 2021, 41(2):967-973.
- [20] Xin Liangjie, Li Xiubin, Tan Minghong. Temporal and regional variations of China's fertilizer consumption by crops during 1998—2008 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4):643-652.
- [21] 潘丹.中国化肥消费强度变化驱动效应时空差异与影响因素解析[J].经济地理,2014,34(3):121-126.
Pan Dan. The spatial-temporal difference of driving effects for fertilizer use intensity change and its determinants in China [J]. Economic Geography, 2014, 34(3):121-126.
- [22] 邹伟,张晓媛.土地经营规模对化肥使用效率的影响:以江苏省为例[J].资源科学,2019,41(7):1240-1249.
Zou Wei, Zhang Xiaoyuan. Effects of land management scale on fertilizer use efficiency: Taking Jiangsu as an example [J]. Resources Science, 2019, 41(7):1240-1249.
- [23] 朱建军,徐宣国,郑军.农机社会化服务的化肥减量效应及作用路径研究:基于 CRHPS 数据[J].农业技术经济,2021(2):1-13.
Zhu Jianjun, Xu Xuanguo, Zheng Jun. Research on chemical fertilizer reduction effect of agricultural machinery socialized service and action path: Based on CRHPS data [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(2):1-13.
- [24] 马丽,田华征,康蕾.黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J].资源科学,2020,42(1):137-149.
Ma Li, Tian Huazheng, Kang Lei. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(1):137-149.
- [25] 熊鹰,黄利华,邹芳,等.基于县域尺度乡村地域多功能空间分异特征及类型划分:以湖南省为例[J].经济地理,2021,41(6):162-170.
Xiong Ying, Huang Lihua, Zou Fang, et al. Multifunctional spatial characteristics of rural areas and their type identification based on county scale: A case of Hunan Province [J]. Economic Geography, 2021, 41(6):162-170.

- Planetary Change, 2013,100:172-182.
- [21] Kendall M. Kendall Rank Correlation Methods [M]. Griffin C. London, UK: Oxford University Press, 1975.
- [22] Ma Bo, Wang Shanshan, Mupenzi C, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes in the Upper White Nile River [J]. Remote Sensing, 2021,13(18):1-30.
- [23] Lipsitz S R, Leong T, Ibrahim J, et al. A partial correlation coefficient and coefficient of determination for multivariate normal repeated measures data [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (the Statistician), 2001,50(1):87-95.
- [24] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):535-554.
- [25] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate [J]. Global Environmental Change, 2005,15(4):394-404.
- [26] Jiang Liangliang, Guli • Jiapaer, Bao Anming, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. Science of the Total Environment, 2017,599:967-980.
- [27] Nzabarinda V, Bao Anming, Xu Wenqiang, et al. A spatial and temporal assessment of vegetation greening and precipitation changes for monitoring vegetation dynamics in climate zones over Africa [J]. International Journal of Geo-Information, 2021(3):1-21.
- [28] Xu Xiaojuan, Liu Huiyu, Jiao Fusheng, et al. Time-varying trends of vegetation change and their driving forces during 1981—2016 along the silk road economic belt [J]. Catena, 2020,195:104796.
- [29] Chen Zefeng, Wang Weiguang, Fu Jianyu. Vegetation response to precipitation anomalies under different climatic and biogeographical conditions in China [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-16.
- [30] Greve M, Lykke A M, Blach O A, et al. Environmental and anthropogenic determinants of vegetation distribution across Africa [J]. Global Ecology and Biogeography, 2011,20(5):661-674.
- [31] Qu Sai, Wang Lunche, Lin Aiwen, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. Ecological Indicators, 2018,90:438-450.
- [32] Yao Rui, Cao Jin, Wang Lunche, et al. Urbanization effects on vegetation cover in major African cities during 2001—2017 [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019,75:44-53.
- [33] Liu Yanxu, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Correlations between urbanization and vegetation degradation across the world's metropolises using DMSP/OLS nighttime light data [J]. Remote Sensing, 2015,7(2):2067-2088.

(上接第 321 页)

- [26] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93-115.
- [27] 刘钦普,孙景荣,濮励杰.中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J].农业工程学报,2020,36(14):9-16.
- Liu Qinpu, Sun Jingrong, Pu Lijie. Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(14):9-16.
- [28] 潘晓东,李品,冯兆忠,等.2000—2015年中国地级市化肥使用量的时空变化特征[J].环境科学,2019,40(10):4733-4742.
- Pan Xiaodong, Li Pin, Feng Zhaozhong, et al. Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015 [J]. Environmental Science, 2019,40(10):4733-4742.
- [29] 李明飞,张海莹,刘向华,等.黄河流域化肥施用强度区域分布及环境风险评价[J].河南大学学报(自然科学版),2022,52(2):146-153.
- Li Mingfei, Zhang Haiying, Liu Xianghua, et al. Regional distribution and environmental risk assessment of chemical fertilizer application intensity in the Yellow River basin [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2022,52(2):146-153.
- [30] 许钰莎,赵颖文.主产区粮食增产影响因素及发展应对研究:基于南北主产区差异视角[J].西南农业学报,2023,36(8):1603-1611.
- Xu Yusha, Zhao Yingwen. Influencing factors and development countermeasures of grain increase in major producing areas: From perspective of differences between the north and the south [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023,36(8):1603-1611.