

长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征

文高辉, 张紫怡, 田雨萌, 方龙俊, 王子诚, 丁学谦, 黄瑶

引用本文:

文高辉, 张紫怡, 田雨萌, 方龙俊, 王子诚, 丁学谦, 黄瑶. 长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 133–142.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0168>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析

刘晓永, 王秀斌, 李书田

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2594–2608 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0626>

农田化肥氮磷地表径流污染风险评估

孙铖, 周华真, 陈磊, 沈珍瑶

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1266–1273 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0800>

我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究

程菁靓, 赵龙, 杨彦, 侯红, 孙在金, 马瑾

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 70–78 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0853>

我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力

柴如山, 王擎运, 叶新新, 江波, 赵强, 王强, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2583–2593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0751>

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究 ——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219–1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文高辉, 张紫怡, 田雨萌, 等. 长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 133–142.

WEN G H, ZHANG Z Y, TIAN Y M, et al. Temporal and spatial characteristics of cultivated land non-point source pollution in the main grain-producing areas of the middle and lower Yangtze region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 133–142.



开放科学 OSID

长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征

文高辉¹, 张紫怡¹, 田雨萌¹, 方龙俊¹, 王子诚¹, 丁学谦², 黄瑶¹

(1. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 2. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘要:为揭示长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空规律,利用长江中下游粮食主产区 58 个市(州、区)统计数据,采用空间分析模型、重心模型、冷热点分析方法分析了 2009—2019 年长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征。结果表明:长江中下游流域整体以及赣湘鄂皖 4 省 2009—2019 年耕地面源污染总量和强度总体均呈现出“先升后降”的变化趋势,其中湖北省的耕地面源污染强度与总量均位于前列。2009—2019 年耕地面源污染强度总体表现为“西高东低”的空间分布特征,其中江西省整体上一直保持为低污染强度,湖北省则为高污染强度聚集区。长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心变化呈现出“区间震荡”的规律,且长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心迁移呈现明显的阶段特征。2009—2019 年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度呈现出明显的空间聚集态势,总体表现为“东冷西热”的空间分布格局。因此,长江流域中游段特别是湖北省和湖南省是未来进一步推进耕地面源污染防治的重点区域,要统筹好国家粮食安全和耕地生态安全双重目标。

关键词:耕地面源污染;空间分异;迁移轨迹;冷热点分析;粮食主产区;长江中下游

中图分类号:X71;X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)01-0133-10 doi:10.11654/jaes.2023-0168

Temporal and spatial characteristics of cultivated land non-point source pollution in the main grain-producing areas of the middle and lower Yangtze region

WEN Gaohui¹, ZHANG Ziyi¹, TIAN Yumeng¹, FANG Longjun¹, WANG Zicheng¹, DING Xueqian², HUANG yao¹

(1. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to reveal the temporal and spatial patterns of non-point source pollution in cultivated land within the main grain-producing areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River, we used statistical data for 58 cities (prefectures and districts) in this area from 2009 to 2019. These data were analyzed using spatial analysis models, barycenter models, cold and hot spot analysis, and other methods. The results revealed that the total amount and intensity of cultivated land non-point source pollution in the middle and lower Yangtze region and the four provinces of Jiangxi, Hunan, Hubei, and Anhui from 2009 to 2019 showed a trend of an initial rise and subsequent fall, among which the intensity and total amount of cultivated land non-point source pollution in Hubei Province were the most pronounced. From 2009 to 2019, the non-point source pollution intensity of cultivated land was generally characterized by a spatial distribution that was high in the west and low in the east, of which Jiangxi Province generally remained a low pollution area, whereas Hubei Province was found to be an area of high pollution concentrations. The change of the center of gravity of the non-point source pollution intensity of the cultivated land is characterized by the law of “interval shock”, and the shift in the center of gravity of the non-point source pollution intensity of the cultivated land shows obvious stage characteristics. From 2009 to 2019, the non-point source pollution intensity of

收稿日期:2023-03-07 录用日期:2023-06-12

作者简介:文高辉(1990—),男,博士,副教授,主要从事土地利用与管理研究。E-mail:wgh@hunnu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41801190);湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30407);国家级大学生创新创业训练计划支持项目(202110542045);湖南师范大学大学生创新创业训练计划项目(2021152)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (41801190); Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2023JJ30407); National Students' Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program (202110542045); Hunan Normal University Undergraduates Innovative Experiment Project and Entrepreneurship Program (2021152)

cultivated land showed an obvious spatial gathering trend, which was generally characterized by a spatial distribution pattern of cold in the east and hot in the west. On the basis of these findings, we established that in order to coordinate the dual goals of national food security and the ecological security of cultivated land, the middle reaches of the Yangtze River Basin, particularly the provinces of Hubei and Hunan, are key areas for further promoting the prevention and control of farmland non-point source pollution in the future.

Keywords: cultivated land non-point source pollution; spatial differentiation; migration trajectory; cold and hot spot analysis; main grain producing areas; middle and lower Yangtze region

耕地面源污染是指在耕地利用过程中,由于农户不合理地使用化肥、农药、农膜以及其他田间有机或无机污染物质,通过地表径流、地下渗漏、挥发或残留等过程,造成的水体富营养化、土壤板结、大气酸化等生态环境污染问题和食品安全危机,现已成为全球水污染与土地退化的主要根源^[1-2]。党中央和国家高度重视耕地面源污染治理,出台了系列政策文件,如2015年原农业部出台了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》《到2020年农药使用量零增长行动方案》,以及后来连续7年中央一号文件均强调要加大农业面源污染治理力度,开展农业节肥节药行动,实现化肥农药使用量负增长。然而,当前中国耕地面源污染形势依然严峻,《第二次全国污染源普查公报》显示,2017年种植业污染物排放(流失)量中,氨氮达8.30万t,总氮达71.95万t,总磷达7.62万t,而地膜使用量达141.93万t,多年累积残留量118.48万t。

点源污染治理可以直接在排污口末端安装污染处理设备对污水进行处理,便可使排放水质达标,但面源污染来源复杂,迁移途径多样化,具有不确定性、分散性、隐蔽性、滞后性和潜伏性的特性,不易监测和防治^[3-7]。鉴于此,学术界非常重视面源污染形成机理以及时空演变规律等方面的研究。梁流涛等^[8]从理论和实证上分析了农业面源污染的形成机制;冯琳等^[9]分析了三峡库区农业面源污染时空变化特征;马军旗等^[10]分析了中国农业面源污染的空间差异与影响因素;杜鹃等^[11]对安徽怀远县农业面源污染的时空分布进行了解析。在此基础上,也有部分学者开始关注面源污染强度的重心轨迹以及集聚特征,如:丁学谦等^[12]分析了洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及冷热点空间格局;肖宇婷等^[13]分析了沱江流域总氮面源污染负荷时空演变及其转移趋势;张广纳等^[14]探究了三峡库区重庆段农村面源污染冷热点空间分布特征。上述学者从不同视角采用不同指标揭示了不同区域的农业面源污染的时空特征,对本文有很好的参考价值,但鲜有文献基于地市尺度来探讨长江中下游粮食主产区耕地面源污染的空间分异特征,揭示其迁

移轨迹及冷热点空间格局。

长江中下游粮食主产区是中国重要的粮食生产基地,保护其耕地生态健康对保障国家粮食安全、生态安全和社会安全具有重大意义。然而当前长江中下游粮食主产区因农户长期不合理的农业生产行为造成了严重的耕地面源污染,使其成为中国重要的面源污染治理区域之一。鉴于此,本文以长江中下游粮食主产区为研究区域,基于市域尺度,采用清单分析法分析2009—2019年长江中下游粮食主产区各省市(州、区)耕地面源污染强度,并结合空间分析模型、重心模型和冷热点分析方法揭示2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征,以期为其面源污染系统防治提供科学参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

长江中下游粮食主产区主要包括湖北、湖南、安徽、江西、江苏5省。长江中下游地区土壤肥沃、水网密布,农业生产资源要素丰富,是中国重要的粮食主产基地和生态功能区,也是长江经济带生态文明建设和生态功能维护的核心区域。但鉴于江苏省各地市缺少氮肥、磷肥、复合肥等关键指标统计数据,故仅以湖南、湖北、安徽、江西4省的58个市(州、区)作为研究区域(图1)。研究区域国土面积为 $7.047 \times 10^5 \text{ km}^2$,仅占全国的7.34%,但2019年研究区内粮食总产量为 $1.19 \times 10^8 \text{ t}$,占全国粮食总产量的17.94%,该区域在保护国家粮食安全方面承担着重要作用。然而高粮食产量也伴随着大量农药化学投入品的施用,导致面源污染问题不断显现,农业生态环境破坏日益严重。中国生态县以及生态乡镇建设要求化肥施用强度不得超过 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14],但研究区域内2019年化肥施用强度高达 $494.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,长江中下游粮食主产区耕地面源污染治理显得尤为迫切。2019年的《中国生态环境状况公报》显示,长江中下游粮食主产区内的太湖、巢湖、鄱阳湖和洞庭湖的水质均为Ⅳ类,水质污染较为严重。因此,揭示2009—2019年长江

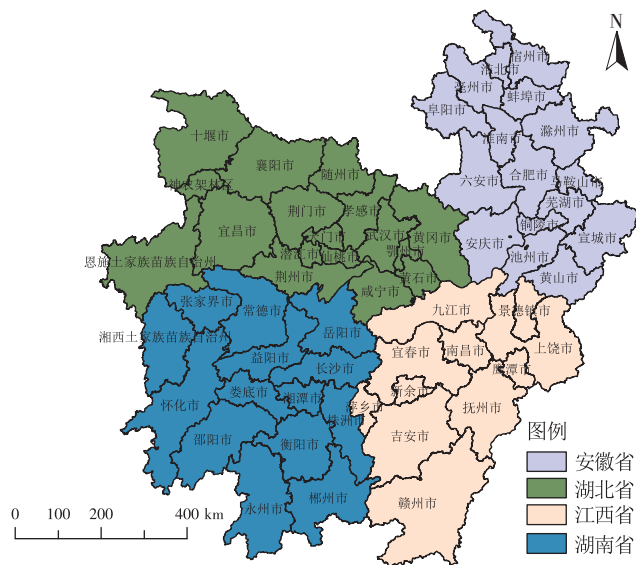


图1 研究区示意图

Figure 1 Schematic diagram of the research area

中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征具有重要现实意义。

1.2 数据来源

2009—2019年湖南、湖北、安徽、江西4省58市(州、区)的耕地、化肥、农药、农膜等数据主要来源于《湖南省农村统计年鉴》(2010—2020)、《湖北省农村统计年鉴》(2010—2020)、《江西省统计年鉴》(2010—2020)、《安徽省统计年鉴》(2010—2020)以及湖南省、湖北省、江西省、安徽省的各市统计年鉴(2010—2020)。

1.3 研究方法

1.3.1 清单分析法

清单分析法是根据不同污染单元分别进行核算后求和的方法,其主要步骤为:确定污染源类型、识别污染单元、搜集污染单元的产排污系数以及污染物的核算^[2]。现今,清单分析法已被广泛地运用于面源污染测算领域^[2,15]。耕地面源污染主要包括农田化肥、农药、农用薄膜3类污染来源。鉴于此,通过测算以上3种污染物的流失或残留量来核算2009—2019年长江中下游粮食主产区各市(州、区)的耕地面源污染总量和污染强度。具体的计算公式参考赖斯芸等^[15]和陈敏鹏等^[16]采用的方法:

$$TE_i = TN_i \times \rho_i + TP_i \times \eta_i + TC_i \times \mu_i + TF_i \times \varepsilon_i \quad (1)$$

$$E_i = \frac{TE_i}{A_i} \quad (2)$$

式中: TE_i 为市(州、区) i 的耕地面源污染排放量, t ; TN_i 、 TP_i 分别为市(州、区) i 的农用化肥中含 N 量和含 P 量, t ; TC_i 、 TF_i 分别为市(州、区) i 的农药施用量和农膜使用量, t ; ρ_i 、 η_i 、 μ_i 、 ε_i 分别表示市(州、区) i 的

氮、磷流失系数及农药、农膜的残留系数,氮、磷流失系数参考赖斯芸等^[15]的研究成果,农药、农膜残留系数参考吴小庆等^[17]、成振华等^[18]和严昌荣等^[19]的研究成果; E_i 为市(州、区) i 的耕地面源污染强度, $t \cdot \text{hm}^{-2}$; A_i 为市(州、区) i 的耕地面积, hm^2 。

1.3.2 重心模型

重心是区域内某种属性值在研究空间范围内某一时刻的力矩平衡点,表征该点前后左右各个方向的力量对比能够维持均衡的情况^[20]。借用重心点及其移动方向、移动距离等指标不仅可以刻画出区域地理现象的空间差异,还可以进一步探寻其动态过程及演化规律^[21]。重心模型的应用也较为广泛,包括经济重心^[20]、土地利用重心^[22-23]以及环境污染重心^[24]等涉及经济、社会、生态等多方面。本文利用重心模型,采用加权平均重心来分析2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度的空间重心坐标及其迁移变化情况,揭示耕地面源污染动态时空演变特征,其具体计算公式为:

$$(X, Y) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n E_i X_i}{\sum_{i=1}^n E_i}, \frac{\sum_{i=1}^n E_i Y_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \right) \quad (3)$$

式中: (X, Y) 为研究区域内耕地面源污染强度重心经度值和纬度值; n 为研究区域市级行政单位个数; E_i 为市(州、区) i 的耕地面源污染强度, $t \cdot \text{hm}^{-2}$; X_i 和 Y_i 为市(州、区) i 的经度、纬度(利用 ArcGIS 10.2 计算几何求得)。

同时,为反映重心偏移程度,引入重心移动距离和重心移动方向公式,其公式为:

$$D = C \sqrt{(X_{t+1} - X_t)^2 + (Y_{t+1} - Y_t)^2} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{k\pi}{2} + \arctan \frac{Y_{t+1} - Y_t}{X_{t+1} - X_t} \quad (5)$$

式中: D 为相邻年份重心移动的相对距离, m ; X_t 、 Y_t 和 X_{t+1} 、 Y_{t+1} 分别为第 t 年和第 $t+1$ 年的耕地面源污染强度重心经度值和纬度值; C 为地球表面坐标单位, $(^\circ)$ 转换为平面距离 (km) 的系数,取值为 111.111^[25]; θ 为相邻年份重心偏移的相对角度; k 为调整系数,以确保 $\theta \in (-180^\circ, 180^\circ)$ 且度数符合移动方向。本文定义逆时针方向为正向,正东方向为 0° ,二维坐标系中,第一象限为东北方向 ($0^\circ, 90^\circ$)。

1.3.3 冷热点分析

冷热点分析是一种空间聚类方法,可展现指标的高值和低值的空间聚集分布规律,并弥补相等断点分

级等对空间特征分析的不足,已应用于生态系统服务价值空间异质性及面源污染空间分布格局研究中。为进一步揭示某市(州、区)的耕地面源污染强度与邻接市(州、区)的耕地面源污染强度之间的关系,引入冷热点分析,以此识别长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度的冷点区域与热点区域,并为各地区针对性治理耕地面源污染提供参考依据。冷热点分析的公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} E_j}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (6)$$

为便于阐述,对其进行标准化处理:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{var}(G_i^*)}} \quad (7)$$

式中: G_i^* 为局部相关性指数; W_{ij} 为空间权重矩阵; E_i 、 E_j 分别为行政区域*i*、*j*的耕地面源污染强度值; $E(G_i^*)$ 、 $\text{var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和方差。

若标准化处理结果 $Z(G_i^*)$ 显著为正值,说明该地区周围的值较高,呈现为高值集聚即热点区;若 $Z(G_i^*)$ 显著为负值,说明该地区周围的值较低,呈现为低值集聚即冷点区。运用 Arcgis10.2 软件工具箱进行冷热点分析,若 GiZScore 值越高,颜色越趋于红色,说明该市(州、区)的耕地面源污染强度在空间上为热点区域;GiZScore 值越低,颜色越趋于蓝色,说明该市(州、区)的耕地面源污染强度在空间上为冷点区域^[26-27]。

2 结果与分析

2.1 长江中下游粮食主产区耕地面源污染时间变化特征

运用式(1)和式(2)计算得到2009—2019年长江中下游粮食主产区各省和58个市(州、区)的耕地面源污染总量和耕地面源污染强度。

图2展示了2009—2019年长江中下游粮食主产区各省耕地面源污染总量时间变化特征。从整体来看,2009—2019年长江中下游粮食主产区各省耕地面源污染总量呈现出先增后降的变化趋势,耕地面源污染总量从2009年的 1.18×10^6 t增至2012年的 1.23×10^6 t,然后稳定降至2019年的 9.97×10^5 t,11年间共降低了15.32%。具体来看,赣湘鄂皖四省中耕地面源污染总量位于前列的为湖北省、湖南省,其次是安徽省,江西省最低;湖北省近11年来耕地面源污染总量

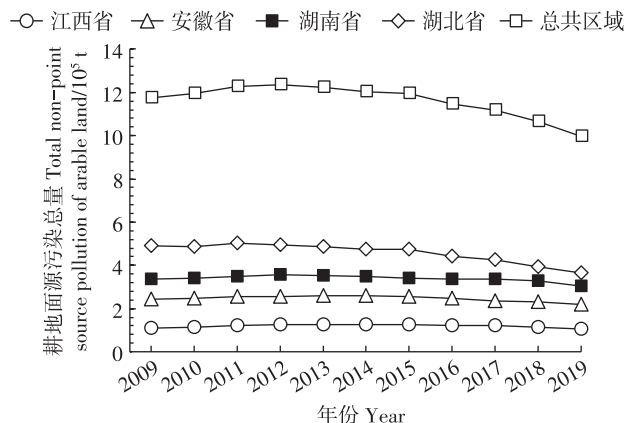


图2 2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染总量

Figure 2 Total non-point source pollution of cultivated land in the main grain producing areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2009 to 2019

波动下降,从2009年的 4.89×10^5 t波动降至2015年的 4.73×10^5 t,下降幅度不大,年平均下降0.52%,然后稳定降至2019年的 3.66×10^5 t,11年间共降低了25.05%;湖南省和整个研究区域的变化规律类似,从2009年的 3.35×10^5 t增至2012年的 3.55×10^5 t,然后稳定降至2019年的 3.05×10^5 t,11年间共降低了9.02%;江西省和安徽省的耕地面源污染总量变化规律类似,分别从2009年的 1.11×10^5 、 2.42×10^5 t增至2013年的 1.28×10^5 、 2.60×10^5 t,然后分别稳定降至2019年的 1.06×10^5 、 2.19×10^5 t,11年间分别共降低了3.81%、9.69%。

图3展示了2009—2019年长江中下游粮食主产区各省耕地面源污染强度时间变化特征。从整体来看,2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度的时间变化趋势与耕地面源污染总量一样,也呈现出先增后降的趋势,耕地面源污染强度由2009年的 $0.082 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至2011年的 $0.084 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后稳定降至2019年的 $0.065 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,11年间共降低了20.94%。其原因可能是2010年原农业部进一步加强了重点流域农业面源污染防治工作,采取的各项措施使得粮食主产区到2015年主要农作物测土配方施肥技术普及率达到80%以上,化肥、农药利用率提高3个百分点;2012年党的十八大提出了生态文明建设,国务院也研究部署了土壤环境保护和农业农村面源综合防治工作,长江中下游各省作为粮食主产区,积极对面源污染进行治理。2009年,湖北省便提出了湖北四湖流域争创农业面源污染控制国家级试验区,开启筹划工作;2016年,湖南省桃源县、华容县、赫山区3个县(区)列入全国农业面源污染治

理试点;2016年,国家发改委、原农业部将安徽省列入国家典型流域农业面源污染综合治理试点省;2014年,江西省便提出了治理农药面源污染的系列措施。因此,随着国家政策的落实和政府相关政策的出台,耕地面源污染强度稳步下降。具体来看,2009—2019年间,赣湘鄂皖四省耕地面源污染强度差异明显,湖北省的耕地面源污染强度均最高,其次是湖南省,再次是安徽省,江西省耕地面源污染强度最低;湖北省近11年来耕地面源污染强度波动下降,从2009年的 $0.148 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 波动降至2017年的 $0.136 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后稳定降至2019年的 $0.113 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,11年间共降低了23.36%;湖南省、安徽省、江西省近11年来耕地面源污染强度均呈现出先增后降的趋势,但各省到达强度顶峰的年份不同,湖南省从2009年的 $0.089 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至2010年的 $0.090 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后稳定降至2019年的 $0.073 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,11年间共降低了17.04%,安徽省和江西省分别从2009年的 0.058 、 $0.036 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,增至2013年的 0.062 、 $0.041 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后分别稳定降至2019年的 0.045 、 $0.034 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,11年间共分别降低了23.00%、3.96%。

2.2 长江中下游粮食主产区耕地面源污染空间分异特征

2.2.1 耕地面源污染空间分布特征

按研究时段的前、中、后选取2009、2014、2019年3个年份来研究长江中下游粮食主产区耕地面源污染空间分布特征(图4)。利用ArcGIS软件,采用相等间隔法将长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度分为5个等级:高污染地区($E_i > 0.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、较高污染地区($0.15 < E_i \leq 0.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、中污染地区($0.10 < E_i$

$\leq 0.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、较低污染地区($0.05 < E_i \leq 0.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、低污染地区($E_i \leq 0.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。由图3可知,随着时间的推移,大多数市的耕地面源污染强度呈现出下降趋势,说明长江中下游地区面源污染问题逐步得到重视,治理效果正在显现,耕地面源污染高污染区、较高污染区的个数分别由2009年的2个(鄂州市、宜昌市)和5个(襄阳市、随州市、荆门市、潜江市、黄冈市)减至2019年的0个,2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度整体较低。总体来看,长江中游的湖北省区域耕地面源污染强度最高且呈现聚集的态势,江西省污染强度一直较低。具体来看,安徽省的淮北市、亳州市、阜阳市和江西省(除抚州市)一直控制在低污染程度范围内,起到面源污染控制的先锋模范作用。2009年,高污染地区有2个(鄂州市和宜昌市),耕地面源污染强度分别达 0.345 、 $0.201 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且鄂州市的耕地面源污染强度是耕地面源污染强度最低市(亳州市 $0.028 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的12.32倍;主产区内67.24%的市处于较低污染区和低污染区,但仍有很大一部分市污染强度较大,耕地面源污染控制迫在眉睫;2014年,鄂州市仍然为高污染地区,成为面源污染攻坚战中“难啃的硬骨头”,安徽省淮北市、亳州市、阜阳市以及江西省等多数地区相继稳定控制面源污染,实现污染程度的降低,而湖北省和湖南省的治理效果不太显著;2019年,伴随政府面源污染治理政策的落实和面源污染治理技术的成熟以及农民环保意识的增强,全域耕地面源污染程度总体呈现下降趋势,由中低污染强度地区转变为较低污染强度地区的数量明显增加,这是因为长江大保护的推进、化肥使用量零增长目标的要求、农业农村污染治理、农业废弃物资源化利用等措施均落地见效。

2.2.2 耕地面源污染重心变化分析

运用式(3)计算出2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心坐标,并运用式(4)和式(5)计算得到2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心移动距离和方向,根据坐标绘制2009—2019年主产区耕地面源污染强度重心迁移轨迹(图5)。

由图5可以看出,2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心变化呈现出“区间震荡”的规律,在东南和西北两个方向上来回变动,最终在东北方向上变动。从经纬度上来说在 $29^{\circ}39'59''\text{N}$ ~ $30^{\circ}12'10''\text{N}$ 与 $113^{\circ}31'01''\text{E}$ ~ $113^{\circ}54'18''\text{E}$ 之间变动,从($30^{\circ}03'36''\text{N}$, $113^{\circ}51'56''\text{E}$)迁移至($30^{\circ}12'10''$

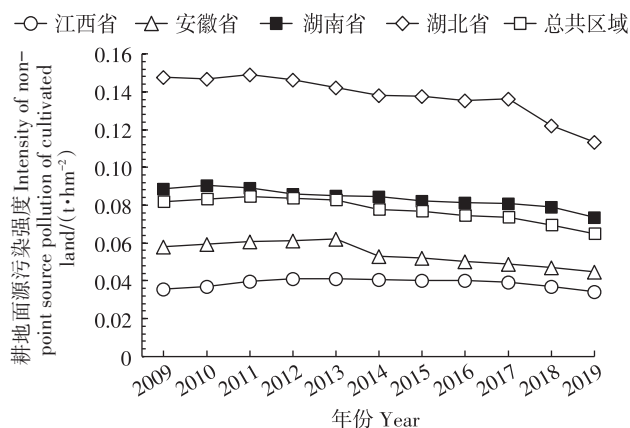


图3 2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度
Figure 3 Non-point source pollution intensity of cultivated land in the main grain producing areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2009 to 2019

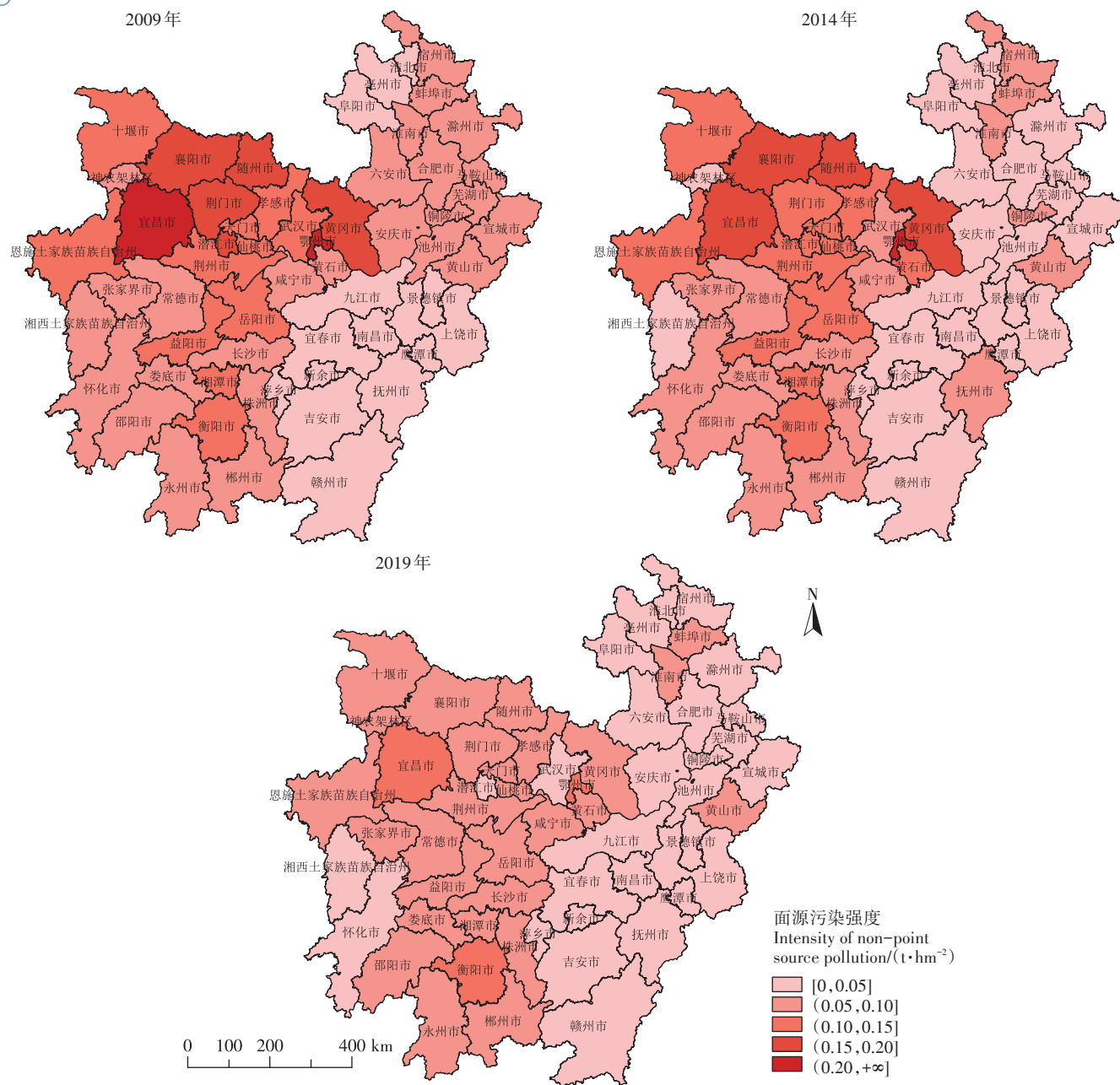


图4 长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度空间分布状况

Figure 4 Spatial distribution of non-point source pollution intensity of cultivated land in the main grain producing areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River

N, 113°40'00"E), 累计向西迁移了0.20°, 向南迁移了0.14°, 说明近11年来, 长江中下游粮食主产区西南方向的耕地面源污染强度下降速度相对其他地区较为缓慢。从重心移动距离来看, 耕地面源污染强度重心年均移动距离为21 413.55 m, 年移动距离最小为2012—2013年的918.52 m, 最大为2013—2014年的38 636.20 m, 说明耕地面源污染强度在2013—2014年向东南方向有高度的聚集。从耕地面源污染强度重心分布的位置来看, 近11年来, 重心均分布在湖

北省的仙桃市、荆门市、咸宁市境内, 说明湖北省耕地面源污染强度较大, 与前文分析一致。

具体来看, 从2009—2013年, 耕地面源污染强度重心整体向西北方向移动, 期间处于西北方向的襄阳市和荆门市等市在耕地复种指数下降情况下, 为了保证粮食产量, 不断提高化肥施用强度; 从2014—2017年, 耕地面源污染强度重心整体向东南方向移动, 向长江中下游粮食主产区的中心移动, 伴随着2015年中国政府提出《到2020年化肥施用量零增长行动方

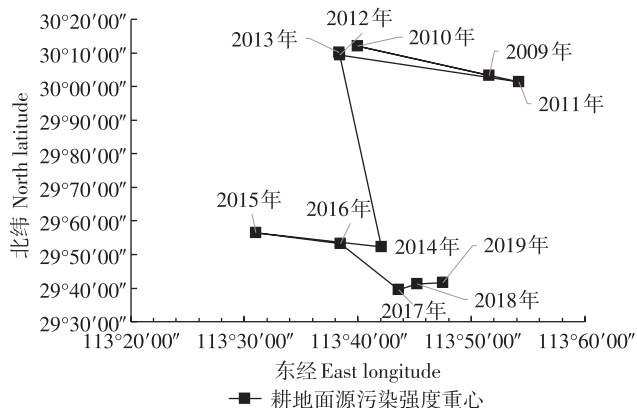


图5 长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心迁移轨迹
Figure 5 Center of gravity transfer track of non-point source pollution intensity of cultivated land in the main grain producing areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River

案》,湖北省西北部的耕地面源污染开始系统化、规模化治理,污染强度稳步下降,但是南部的咸宁市和湖南的岳阳市等耕地复种指数、灌溉指数分别从原来的2.54、0.56下降至2.14、0.46,岳阳市从原来的2.63、0.93下降至2.15、0.90,说明其对面源污染的治理还不够重视,同时为保证粮食产量提高化肥施用强度以及农膜使用强度,使得耕地面源污染强度重心向西南方向移动;从2018—2019年,耕地面源污染强度重心向东北方向移动,鄂州市、黄冈市等市的耕地面源污染强度相对于整体而言一直处于较高水平,与此同时,孝感市的安陆市、宜昌市的兴山县、岳阳市的屈原管理区等地区陆续入选农业面源污染综合治理试点项目,使得长江中下游粮食主产区耕地面源污染治理成果更为显著。

2.2.3 耕地面源污染冷热点分析

图6展示了2009、2014、2019年3个年份长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度冷热点空间格局演化状况。利用ArcGIS软件,采用自然间断分类法将热点分析输出的Z得分划分为5个等级:冷点区、次冷点区、不显著区、次热点区、热点区。由图6可知,长江中下游粮食主产区耕地面源污染呈现出明显的聚集特征,总体表现为“东冷西热”的空间格局。热点区由湖北省向湖南省蔓延,冷点区由江西省向安徽省蔓延。具体来看,安徽省的淮南市、蚌埠市以及江西省的景德镇市、南昌市、上饶市等一直处于冷点区域,并带动周围地区向冷点区与次冷点区方向发展,个数不断增加。湖北省的荆门市、孝感市、武汉市、仙桃市一直处于热点区。就数量而言,随着时间的推移,耕地面源污染强度热点区占主产区的比例逐渐降

低,由15个热点区降低至10个,但次热点区个数在不断递增,主要表现为部分原热点区Z值下降,耕地面源污染得到有效控制,从热点区转变为次热点区,以及不显著区朝次热点区的演化;耕地面源污染强度冷点区占研究区域的比例逐渐升高,且冷点区与次冷点区占比一直高于两热点区的占比,由10个冷点区升高至15个,但次冷点区个数在不断递减,主要表现为次冷点区向冷点区的转化。

2009年,热点区均处于湖北省且与次热点区呈现空间聚集态势,呈团块状分布,其耕地面源污染强度在四省中一直位居高位,原因可能是湖北省是农业大省,气候条件温和,雨水充沛,省内有江汉平原和鄂东沿江平原等平原,土壤肥沃,适宜农作物的种植及生长,为追求更高的粮食产量,故化肥施用量较高,使得TN、TP流失量较多,从而增加了其耕地面源污染强度。2014年,热点区仍全部位于湖北省,且形成了以湖北省北部市级为核心由北向南递减的半环状,省内热点区个数降低,其原因可能为湖北省政府2011—2013年连续3年发布了关于加快全省化肥产业结构调整促进转型升级的意见,控制了化肥施用量的增长,从而在一定程度上降低了部分市级的耕地面源污染强度。但湖南省的次热点区增加了湘潭市和衡阳市,从数据上看,两市的耕地面源污染强度均有所下降,但是下降幅度相对于周围地区较小,从而呈现出从不显著区到次热点区转化的局面。2019年,湖北省的热点区数量进一步减少,形成两个热点核心区,热点核心区由湖北省向湖南省发展,湖南省开始出现热点区,呈现“带状”分布且数量突增为6个,其原因可能为湖南省的耕地面源污染强度虽然在一定程度上有所降低,但其降低比例远小于湖北省,如2019年两省行政中心均处于热点区,但武汉市近10年耕地面源污染强度下降比例为54.3%,而长沙市仅为10.8%,且省内农药、农膜等的使用量仍较高,未得到有效遏制,从而使得湖南省成为新的热点核心区。

3 讨论

3.1 长江中下游粮食主产区耕地面源污染指标分析

耕地面源污染主要受到化肥流失、农药农膜残留等化学投入品的影响,但也会受到人畜排泄和农田固废等的影响。人畜排泄和农田固废等污染源,不仅会产生N、P污染,同时还会产生COD污染。但鉴于当前种植业生产过程中,特别是水稻等大田作物生产过程中,使用人畜粪便的情况已较为少见,人畜

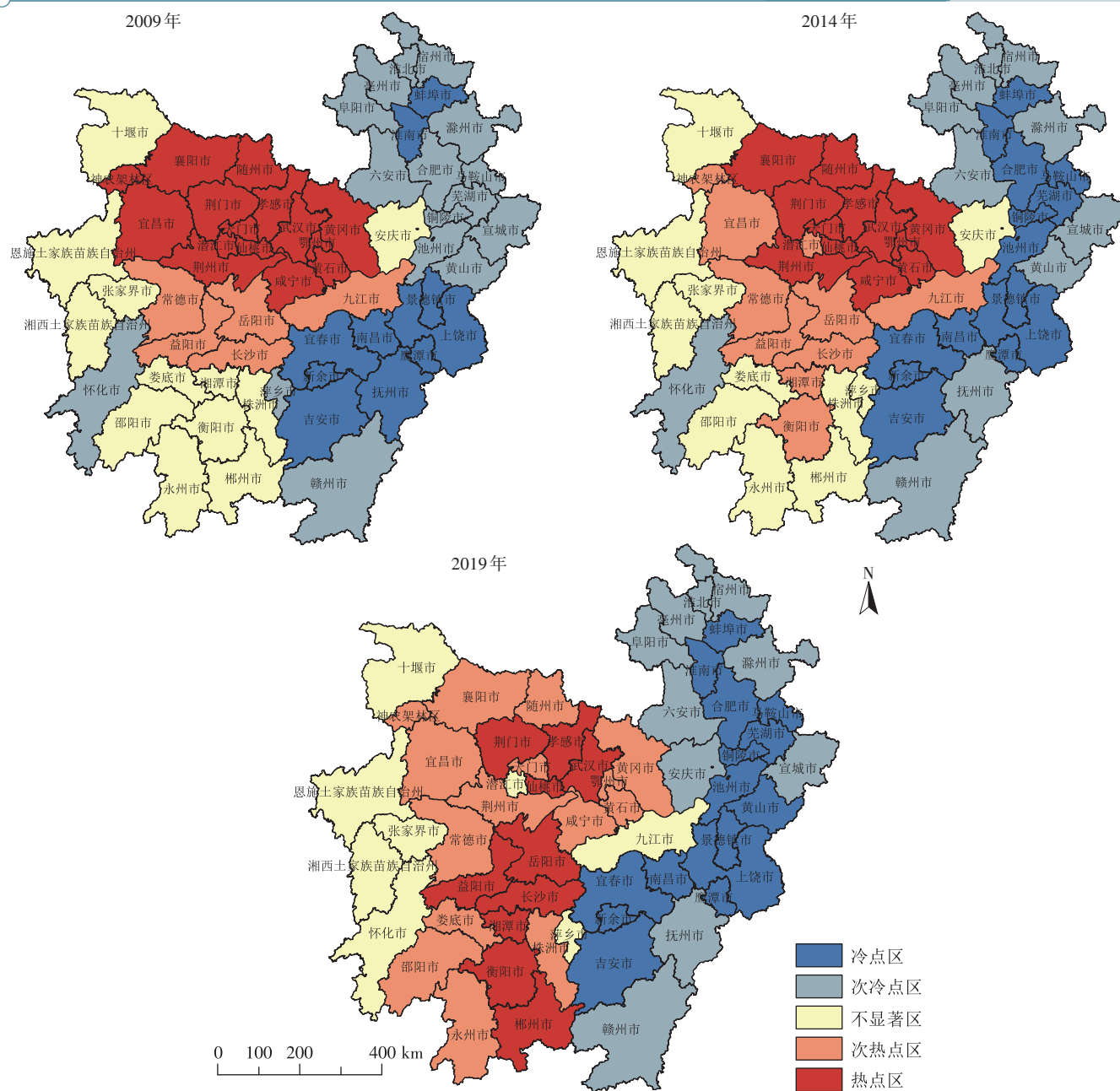


图6 长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度冷热点空间分布状况

Figure 6 Spatial distribution of cold and hot spots of non-point source pollution intensity of cultivated land in the main grain producing areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River

粪便主要通过化粪池等污水处理设施处理后排入河流中,并未直接排入耕地中,故未考虑人畜粪便产生的影响。对于作物秸秆固体废弃物,主要采用还田、作为能源回收等途径进行处理,同时仍有焚烧行为,无法准确掌握固体废弃物对耕地产生的污染,故而不考虑固体废弃物产生的影响,未对COD进行分析。

3.2 长江中下游粮食主产区耕地面源污染等级标准分析

当前对于面源污染等级没有一个统一的标准。

原环境保护部在2014年印发的《国家生态文明建设示范村镇指标(试行)》中规定,农用化肥施用强度(折纯)小于 $220 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,农药施用强度(折纯)小于 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。有学者参考国家生态文明建设示范村镇指标探讨了化肥施用强度安全阈值^[28],但同样是采用等距间隔方法来刻画区域化肥施用强度等级,这也是学界常用的方法,因此本文也采用等间隔法将长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度进行分级,以揭示地区间耕地面源污染强度的差异性。

3.3 耕地面源污染防治建议

(1)稳步推进耕地面源污染防治。整个长江中下游粮食主产区特别是湖北省和湖南省,应该基于省情合理制定本省面源污染防治方案及目标,稳步推进耕地面源污染治理,使化肥、农药、农膜等化学投入品使用量得到有效遏制,夯实化肥农药零增长行动,进一步推广节肥节药技术和测土配方施肥技术,提升地膜回收率。加强耕地面源污染监测能力,“以点带面”,以湖北省安陆市、郧阳区等以及湖南省桃源县、华容县、赫山区等面源污染综合试点区带动流域地区面源污染治理工作。

(2)统筹好国家粮食安全和耕地生态安全双重目标。长江中下游具有优越的粮食生产气候条件和良好的耕地资源,切实保护好长江中下游耕地生态安全,是稳住国家粮食安全的压舱石。强化粮食增产和绿色双重导向,在减量施肥、提高化肥农药利用率的基础上,采取培育良种药加强高标准农田建设、推进耕地集中连片建设、巩固完善农田水利设施、推行保护性耕作模式等措施,防止耕地“非粮化”“非农化”,提高绿色增产增效技术供给能力。

4 结论

本文基于市级尺度,首先利用清单分析法测算2009—2019年长江中下游粮食主产区赣湘鄂皖4省各市(州、区)耕地面源污染总量与强度,进而利用空间分析法、重心模型、冷热点分析等方法揭示2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度时空分异特征,得到以下研究结论:

(1)长江中下游粮食主产区耕地面源污染状况有所减轻。2009—2019年长江中下游粮食主产区耕地面源污染总量和强度总体均呈现出“先升后降”的变化趋势,湖北省的耕地面源污染强度与总量均为最高,江西省最低。

(2)长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度表现出明显的空间差异性和聚集性。2009—2019年耕地面源污染强度总体表现为“西高东低”的空间分布特征,其中,江西省整体上一直保持为低污染强度,湖北省则为高污染强度聚集区。

(3)长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心变化呈现出“区间震荡”的规律,总体累计向西迁移了0.20度,向南迁移了0.14度。受农业生产条件和国家政策等的影响,长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度重心迁移呈现明显的阶段特征:2009—2013

年,耕地面源污染强度重心整体向西北方向移动;2014—2017年,耕地面源污染强度重心整体向东南方向移动;2018—2019年,耕地面源污染强度重心向东北方向移动。

(4)长江中下游粮食主产区耕地面源污染强度呈现出明显的空间聚集态势,总体表现为“东冷西热”的空间分布格局,热点区核心由湖北省向湖南省蔓延,冷点区由江西省向安徽省蔓延,最终均呈现带状分布。

参考文献:

- [1] 李晓平, 谢先雄, 赵敏娟. 耕地面源污染治理: 纳入生态效益的农户补偿标准[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2019, 19(5): 107-114. LI X P, XIE X X, ZHAO M J. Compensation standards for cultivated land non-point pollution control: incorporating ecological benefits[J]. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2019, 19(5): 107-114.
- [2] 丁学谦, 吴群, 文高辉, 等. 2005—2019年洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及空间格局[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 258-266. DING X Q, WU Q, WEN G H, et al. Migration trajectory and spatial pattern of cultivated land non-point source pollution in Dongting Lake Plain from 2005 to 2019[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15): 258-266.
- [3] HE C, ZHANG L, DEMARCHI C, et al. Estimating point and non-point source nutrient loads in the Saginaw Bay watersheds[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40: 11-17.
- [4] JABBA F K, GROTE K. Statistical assessment of nonpoint source pollution in agricultural watersheds in the Lower Grand River watershed, MO, USA[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1487-1506.
- [5] YUAN C, LIU L, YE J, et al. Assessing the effects of rural livelihood transition on non-point source pollution: a coupled ABM-IECM model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(14): 12899-12917.
- [6] ZOU L, LIU Y, WANG Y, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978—2017[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110400.
- [7] 熊昭昭, 王书月, 童雨, 等. 江西省农业面源污染时空特征及污染风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2821-2828. XIONG Z Z, WANG S Y, TONG Y, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of agricultural non-point sources pollution and pollution risk in Jiangxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2821-2828.
- [8] 梁流涛, 冯淑怡, 曲福田. 农业面源污染形成机制: 理论与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 74-80. LIANG L T, FENG S Y, QU F T. Forming mechanism of agricultural non-point source pollution: a theoretical and empirical study[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 74-80.
- [9] 冯琳, 张婉婷, 张钧珂, 等. 三峡库区面源污染的时空特征及EKC分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3325-3333. FENG L, ZHANG W T, ZHANG J K, et al. Analysis on spatial-temporal characteristics and Environmental Kuznets Curve of non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area[J]. *China Environment Science*, 2022, 42

- (7):3325-3333.
- [10] 马军旗, 乐章. 中国农业面源污染的空间差异与影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6):1137-1145. MA J Q, YUE Z. The analysis of the spatial difference and its influencing factors of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(6):1137-1145.
- [11] 杜鹃, 王乐宜, 周皓媛, 等. 农业面源污染时空分布及污染源解析: 以安徽怀远县为例[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(2):139-149. DU J, WANG L Y, ZHOU H Y, et al. Spatial-temporal distribution of agricultural non-point source pollution: a case study of Huaiyuan, Anhui[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(2):139-149.
- [12] 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 等. 沱江流域总氮面源污染负荷时空演变[J]. 环境科学, 2021, 42(8):3773-3784. XIAO Y T, YAO J, CHEN S, et al. Temporal and spatial evolution of non-point source pollution load of total nitrogen in Tuojiang River basin[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8):3773-3784.
- [13] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7):1197-1209. ZHANG G N, SHAO J A, WANG J L, et al. Spatial and temporal variations of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7):1197-1209.
- [14] 国家环境保护总局. 关于印发《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》的通知[EB/OL]. (2007-12-26)[2023-03-03]. http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172492.htm. State Environmental Protection Administration. Notice on the issuance of the "Construction Indicators of Ecological Counties, Ecological Cities and Ecological Provinces(Revised Draft)"[EB/OL]. (2007-12-26)[2023-03-03]. http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172492.htm.
- [15] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(9):1184-1187. LAI S Y, DU P F, CHEN J N. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. *Journal Tsinghua University(Science & Technology)*, 2004, 44(9):1184-1187.
- [16] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6):751-755. CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6):751-755.
- [17] 吴小庆, 王亚平, 何丽梅, 等. 基于AHP和DEA模型的农业生态效率评价: 以无锡市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6):714-719. WU X Q, WANG Y P, HE L M, et al. Agricultural eco-efficiency evaluation based on ahp and dea model: a case of Wuxi City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(6):714-719.
- [18] 成振华, 刘淑萍, 孙占潮, 等. 天津市农用地膜残留状况调查及影响因素分析[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(2):90-94. CHENG Z H, LIU S P, SUN Z C, et al. Investigation of residue status of agricultural mulch film in Tianjin and analysis of influencing factors[J]. *Agro-environment and Development*, 2011, 28(2):90-94.
- [19] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11):269-272. YAN C R, MEI X R, HE W Q, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11):269-272.
- [20] 王泽宇, 卢雪凤, 孙才志, 等. 中国海洋经济重心演变及影响因素[J]. 经济地理, 2017, 37(5):12-19. WANG Z Y, LU X F, SUN C Z, et al. Influence factors and evolution of China's marine economic spatial pattern[J]. *Economic Geography*, 2017, 37(5):12-19.
- [21] 高军波, 谢文全, 韩勇, 等. 1990—2013年河南省县域人口、经济和粮食生产重心的迁移轨迹与耦合特征: 兼议与社会剥夺的关系[J]. 地理科学, 2018, 38(6):919-926. GAO J B, XIE W Q, HAN Y, et al. The evolutionary trend and the coupling relation of gravity center moving of county-level population distribution, economical development and grain production during 1990—2013 in Henan Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6):919-926.
- [22] 杨建宇, 张婷婷, 陈正, 等. 2013—2015年京津冀新增耕地时空特征与来源分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3):205-213. YANG J Y, ZHANG T T, CHEN Z, et al. Spatial-temporal characteristics and source analysis of newly increased cultivated land in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2015[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3):205-213.
- [23] 夏利恒, 刘京, 尉芳, 等. 陕西渭北旱塬区耕地时空格局变化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5):256-264. XIA L H, LIU J, WEI F, et al. Spatiotemporal pattern change of cultivated land in Weibei Dryland of Shaanxi Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5):256-264.
- [24] 焦胜, 吴寿盛, 韩宗伟, 等. 湖南“一湖四水”工业集聚与水污染程度的时空演变及关联机制[J]. 经济地理, 2022, 42(4):132-140. JIAO S, WU S S, HAN Z W, et al. Spatial-temporal evolution and correlation mechanism of industry agglomeration and water pollution degree in "One Lake and Four Rivers" Basins of Hunan[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(4):132-140.
- [25] 罗秀丽, 杨忍, 徐茜. 全球人口与粮食的空间错位演变及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6):1381-1397. LUO X L, YANG R, XU Q. Spatial mismatch evolution of global population and food and its influencing factors[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6):1381-1397.
- [26] 盖兆雪, 詹汶羲, 王洪彦, 等. 耕地利用转型碳排放时空分异特征与形成机理研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7):187-196. GAI Z X, ZHAN W X, WANG H Y, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and formation mechanism of carbon emission from cultivated land use transformation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7):187-196.
- [27] 潘丹, 郭巧苓, 孔凡斌. 2002—2015年中国主要粮食作物过量施肥程度的空间关联格局分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4):187-201. PAN D, GUO Q L, KONG F B. Spatial correlation pattern analysis of overuse fertilization about major grain crops in China from 2002 to 2015[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(4):187-201.
- [28] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6):214-221. LIU Q P. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6):214-221.