湖南省沅江流域农业面源污染时空变化特征研究

丁 鹏[1]，吕星浩[2]，李剑炜[3]，万大娟[1]，袁腾跃[1]，于 澍[1]

（1. 湖南师范大学地理科学学院，长沙 410000；2. 湘西州环境评估服务中心，湖南 湘西 416000；
3. 湖南省怀化生态环境监测中心，湖南 怀化 418000）

摘要：研究流域农业面源污染的迁移轨迹，探讨其影响因素，对于推动流域面源污染防控具有重要的理论和现实意义。分析了 2013—2022 年湖南省沅江流域内农业面源污染负荷的面板数据，探究其时空变化特征。结果显示：2013—2022 年湖南省沅江流域内总氮、总磷污染物负荷量总体呈现下降趋势，在空间上呈现“东多西少”的格局；污染负荷强度呈递减趋势，空间上表现由东北-西南一线向两边递减的格局；污染负荷强度重心迁移轨迹总体呈 V 形并向东迁移。

关键词：沅江流域；农业面源污染；时空特征；重心模型

中图分类号：X524 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2025)10－0134－07

《第二次全国污染源普查公报》显示，农业源氮磷排放量已经超过工业源和生活源，成为威胁水体安全的第一大污染来源[1]。农业面源污染源难以确定，其作用长期存在，整治难度大周期长[2]。目前农业面源污染主要围绕污染发生机制、污染排放测算、污染影响因素和治理途径[3]等方面开展研究。数学模型法、输出系数法、清单分析法和排污系数法[4]是目前测算农业面源污染负荷量的 4 种主要方法。已有研究认为输出系数法在面源污染负荷研究中具有一定的优越性[5]，部分学者运用该方法对岗南水库、黄壁庄水库上游[6]和广东省[7]等地进行了研究；也有学者引入多种修正因子[8]对公式进行优化并分析了十堰市氮、磷营养盐来源和空间负荷分布。与此同时，有学者关注污染物负荷量时空特征及影响因素，发现山东省的农民收入与化肥面源污染之间存在倒“U”形的环境库兹涅茨（EKC）关系[9]，还有学者发现秸秆还田[10]、城镇化[11]等因素也会导致污染物负荷量出现时空分布差异。

目前已有学者对湖南省农业面源污染进行省域尺度的研究，但对湖南省内各子流域研究的文章较少，尤其是西部发展较慢地区，因此根据湖南省沅江流域特点，选用输出系数法分析污染物负荷强度的时空移动轨迹规律。为避免单一污染源导致结论具有偶然性，分别从农村生活、禽畜养殖、农业种植和水产养殖等对农业面源污染贡献较大的污染来源进行测算和分析，旨在探索湖南省沅江流域农业面源污染时空变化特征，以期为该流域农业面源污染治理提供参考。

1 研究区概况

湖南省沅江流域位于湖南省西部（图 1），流域涉及湖南省 23 个县（市、区），面积为 53 059 km^2，约占湖南省总面积的 25.1%。2022 年，湖南省沅江流域总人口为 823.2 万人，其中农村人口 404.2 万人，城镇化率为 49.1%；生产总值为 3 376.4 亿元，其中农林牧渔业总产值为 972.6 亿元，农业和牧业占比为 86.7%。流域西北邻武陵山，东南接雪峰山，东北-西南一线地区地势较低；属于亚热带季风性湿润气候，气候温和，雨量充沛。

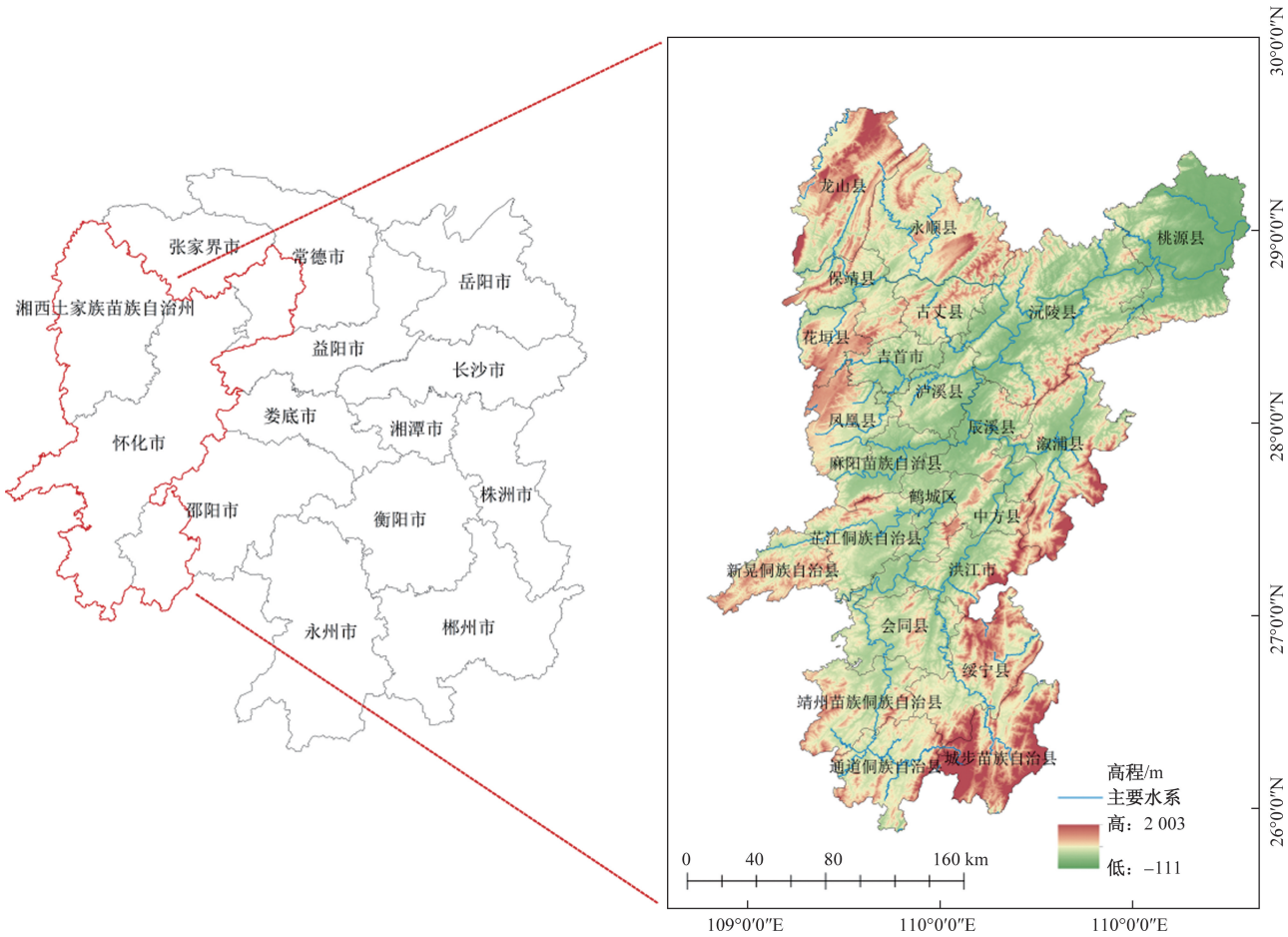
2 研究数据与方法

2.1 数据来源

以湖南省沅江流域为研究区域，数据资料包括人口（年末总人口和乡村人口）、面积（行政区划面积和农作物总播种面积）、禽畜养殖和农业总产值等，数据主要来自 2013—2022 年地方统计年鉴、湖南省统计年鉴与相关统计公报，具体数值如表 1 所示。

收稿日期：2024-11-06

作者简介：丁鹏（1997—），男，江苏南京人，硕士研究生，研究方向为农业水污染研究与治理；吕星浩（1981—），男，吉林伊通人，高级工程师，研究方向为生态环境调查与评价；李剑炜（1974—），男，湖南怀化人，高级工程师，研究方向为生态环境监测与综合评价；通信作者万大娟（1975—），女，湖南安乡人，博士，教授，研究方向为生态环境评价与规划、生态经济与可持续发展；袁腾跃（1982—），男，湖南娄底人，博士研究生，研究方向为生态环境评价与规划；于澍（1998—），男，山东枣庄人，硕士研究生，研究方向为区域环境与生态修复。



基于审图号为 GS(2024)0650 号标准地图制作,底图无修改

图 1　湖南省沅江流域地形

表 1　湖南省沅江流域相关数据统计

年份	乡村人口/万人	猪存栏/万头	家禽存笼/万羽	牛存栏/万头	水产养殖/万 t	农作物播种面积/千 hm^2	人均农业产值/(元·$人^{-1}$)
2013	694.45	482.34	3 888.34	114.48	12.82	1 281.92	3 184.61
2014	686.37	478.51	4 066.55	120.68	14.09	1 299.54	3 337.26
2015	677.85	463.23	4 297.81	125.03	14.93	1 311.44	3 598.56
2016	664.81	448.34	4 193.59	112.62	15.38	1 311.08	4 128.23
2017	656.96	437.00	3 978.01	89.85	15.28	1 237.62	4 288.97
2018	650.33	402.58	3 997.45	91.28	15.01	1 102.15	4 111.74
2019	539.52	423.31	4 350.17	96.57	14.21	1 136.62	4 583.07
2020	437.88	458.50	4 653.43	96.33	12.84	1 137.58	6 711.48
2021	428.24	507.91	4 611.98	96.35	12.98	1 152.36	5 753.26
2022	421.90	498.05	4 524.64	96.35	13.26	1 161.95	6 189.53

2.2　研究方法

2.2.1　输出系数法

使用由 Johns[12] 改进的输出系数法测算农业面源污染负荷量,模型公式为

$$L_i = \sum_{i=1}^{n} E_i[A_i(I_i)] + P \tag{1}$$

$$E_i = \frac{L_i}{A_i} \tag{2}$$

式中:L_i 为第 i 种污染物在该流域的总负荷,kg/a;n 为流域内土地利用类型的种类或牲畜、人口;E_i 为污染物在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数,kg·hm^{-2}/a,或者牲畜、人口的输出系数,kg/a;A_i 为第 i 种土地利用类型的面积,hm^2,或者牲畜、人口数量;I_i 为第 i 种污染物输入量,kg/a;P 为降雨输入的污染物量,kg/a;E_i 为耕地面源污染负荷强度,kg/hm^2,表示农业污染在耕地上的集聚程度。根据

现有研究[13-14]，忽略雨水的污染物输入。

农业面源污染农业种植输出系数取多地平均值[15-25]，其他污染源输出系数参考现有研究成果后结合实际情况得出(表 2)。选取 2013 年、2017 年和 2022 年数据进行分析。

表 2　各污染物输出系数取值

种类		TN	TP
农业种植/(kg·hm^{-2}·a^{-1})		8.28	1.09
水产/(kg·t^{-1}·a^{-1})		2.13	0.18
禽畜/(kg·头羽$^{-1}$·a^{-1})	牛	5.33	1.12
	猪	0.63	0.15
	家禽	0.41×10^{-1}	0.73×10^{-2}
人口(kg·人$^{-1}$·a^{-1})		2.10	0.15

注：TN 表示总氮量；TP 表示总磷量。

2.2.2　重心模型

使用重心模型表述农业面源污染强度迁移轨迹，模型公式如下：

$$X_{ti}=\frac{\sum_{i=1}^{m}C_{ti}X_i}{\sum_{i=1}^{m}C_{ti}} \tag{3}$$

$$Y_{ti}=\frac{\sum_{i=1}^{m}C_{ti}Y_i}{\sum_{i=1}^{m}C_{ti}} \tag{4}$$

式中：(X_t,Y_t)为研究区域第 t 年农业面源污染负荷强度重心的坐标；m 为研究区域内行政单位数目；C_{ti}为第 t 年 i 区污染物负荷强度，kg/hm^2；(X_i,Y_i)为各县(区)的几何重心坐标。

3　湖南省沅江流域农业面源污染时空分析

根据湖南省沅江流域农村生活、禽畜养殖、水产养殖、农业种植四大主要污染来源分析，计算得出总磷和总氮的负荷量和负荷强度。从负荷总量上看，2013 年湖南省沅江流域总氮负荷量为 3.62×10^4 t，2022 年总氮负荷量为 2.88×10^4 t，总体呈下降趋势；2013 年总磷负荷量为 4.72×10^3 t，2022 年总磷负荷量为 4.05×10^3 t，也呈下降趋势，总氮负荷量下降率大于总磷负荷量。

从负荷强度上看，2013 年湖南省沅江流域总氮负荷强度为 1.90×10^2 kg/km^2，2022 年总氮负荷强度为 1.39×10^2 kg/km^2，总体呈下降趋势；2013 年总磷负荷强度为 91.4 kg/km^2，2022 年总磷负荷量为 77.5 kg/km^2，也呈下降趋势。

3.1　农业面源污染负荷量

2013—2022 年，农村生活源、禽畜养殖源和农业种植源的总氮负荷量约占总负荷量的 99.0%，湖南省沅江流域总氮负荷量呈下降趋势(图 2)。其中，各污染源负荷量占比不断变化，农村生活源总氮负荷量占比从 40.3%降为 30.8%，禽畜养殖源负荷量占比从 29.7%上升为 35.2%，农业种植源的负荷量占比从 29.3%上升为 33.4%，水产养殖源负荷量占比维持在 1.0%左右。分析其变化原因，一方面由于人口老龄化和人口流失的持续，导致农村人口不断减少，农村生活源负荷占比降幅较大；另一方面，禽畜养殖源和农业种植源负荷量变化幅度较小，但农业面源污染负荷总量下降幅度较大，导致禽畜养殖源负荷量占比相对提高。

湖南省沅江流域总磷负荷量总体呈下降趋势(图 3)，其中，禽畜养殖总磷负荷量占比从 48.4%波动上升到 53.2%，农业种植源占比从 29.6%波动上升到 31.3%，农村生活污染源负荷量从 21.5%下降到 13.1%。

湖南省沅江流域总氮负荷量总体呈“东高西低、北高南低”的趋势(图 4)，贡献度最高的前三个县为桃源县、溆浦县和沅陵县，主要因为其地域面积较大，农村人口较多，禽畜养殖规模位于研究区

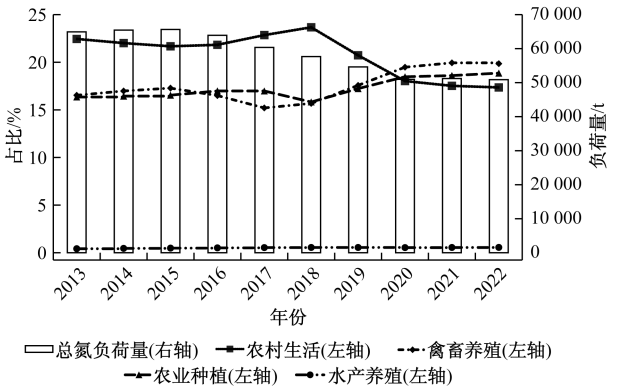


图 2　湖南省沅江流域农业面源污染总氮负荷量

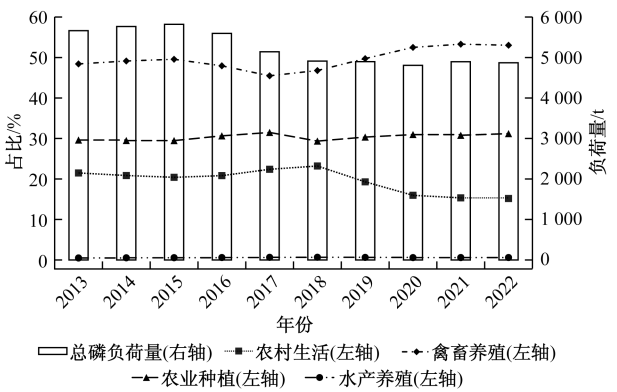
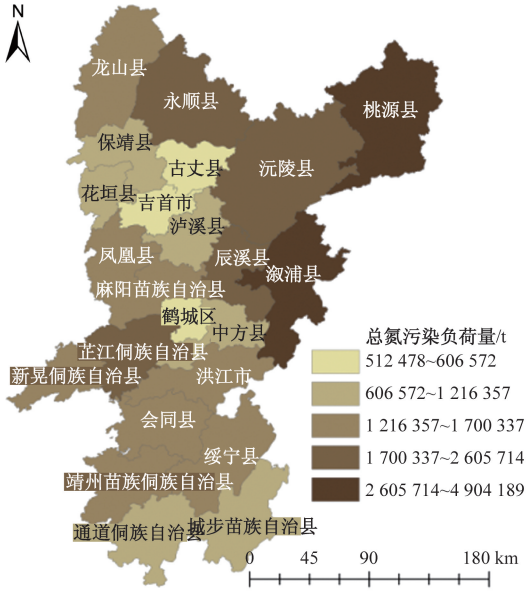
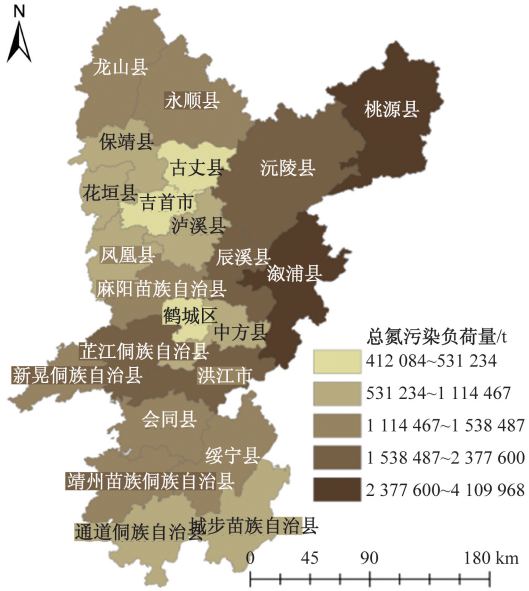


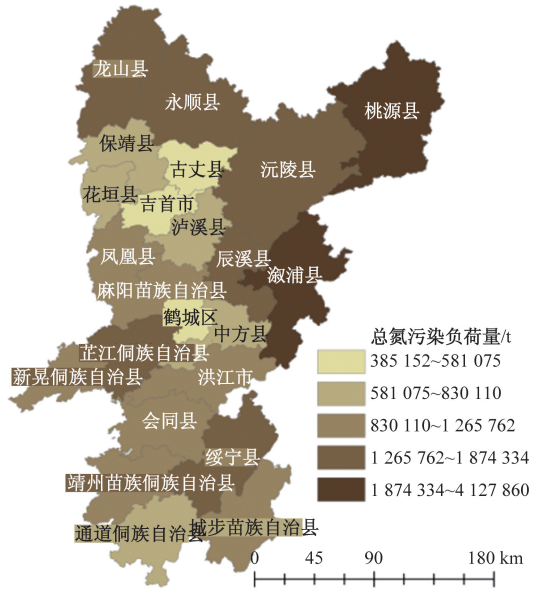
图 3　湖南省沅江流域农业面源污染总磷负荷量



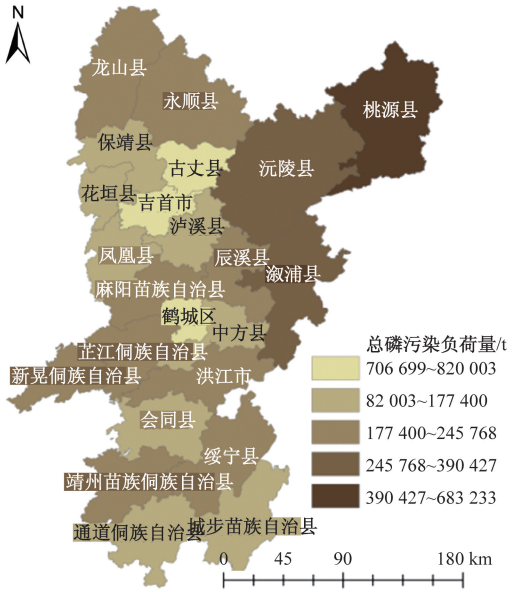
(a) 2013年总氮污染负荷量



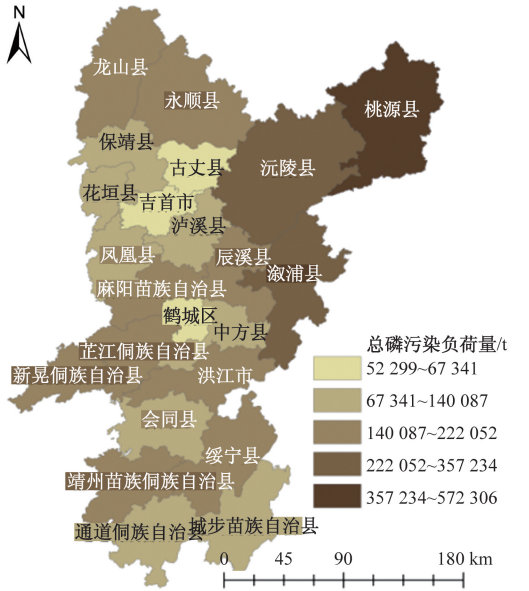
(b) 2017年总氮污染负荷量



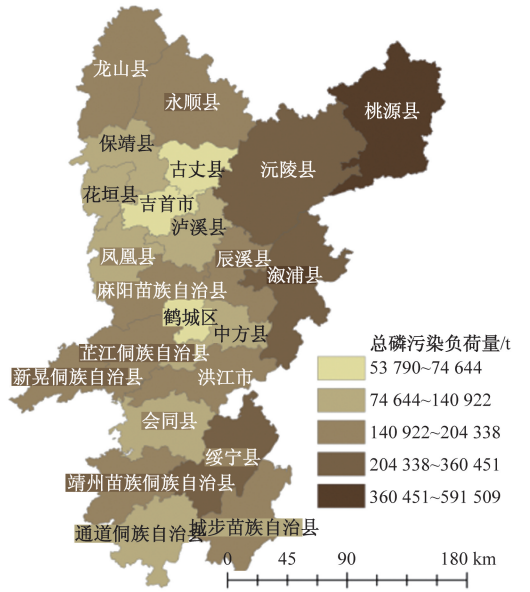
(c) 2022年总氮污染负荷量



(d) 2013年总磷污染负荷量



(e) 2017年总磷污染负荷量



(f) 2022年总磷污染负荷量

基于审图号为GS(2024)0650号标准地图制作，底图无修改

图4　湖南省沅江流域农业面源污染负荷量分布

各县(市、区)内前列,导致污染负荷量较大。2022 年,桃源县、溆浦县和沅陵县总氮贡献率分别为 14.3%、9.4%和 6.5%,且年际变化幅度不大,但由于污染负荷总量的减少,因此污染程度也逐步降低。

湖南省沅江流域总磷负荷量总体呈现“东多西少”的趋势,贡献度最高的三个县为桃源县、沅陵县和溆浦县,这三个县约占总磷负荷量的 30.0%,是主要总磷负荷地区。其中负荷量变化最大的是绥宁县,从 4.2%上升到 6.4%,绥宁县作为全国生猪调出大县,生猪养殖规模不断扩大,使得总负荷量呈不断上升趋势。

3.2　农业面源污染负荷强度

2013—2022 年湖南省沅江流域各县(市、区)农业面源污染总氮负荷强度均呈下降趋势,下降幅度最大的是麻阳苗族自治县,下降幅度约为 34.0%,有 13 个县(市、区)下降幅度超过均值(图 5)。2013 年、2017 年和 2022 年,湖南省沅江流域总氮污染负荷强度高的区域整体上都集中于中部,均呈现出由东北-西南一线向两边递减的空间格局。2013 年,总氮污染负荷强度最高的是桃源县,其主要原因可能是该县禽畜养殖规模和数量相对较大,导致总氮污染导致负荷强度偏大。2017 年,桃源县、花垣县、芷江侗族自治县、靖州苗族侗族自治县、鹤城区和中方县污染负荷强度均有所下降,可能与这些地区的禽畜养殖规模和农村人口降幅较大有关;2022 年,凤凰县和绥宁县污染负荷强度较 2017 年有所增加。古丈县污染负荷强度始终保持在较低层次,主要原因是其农村人口较少,禽畜养殖规模和农业种植规模均较低,污染负荷强度相对较小。

2013—2022 年湖南省沅江流域各县(市、区)农业面源污染总磷负荷强度除绥阳县外均呈下降趋势,绥阳县总磷负荷强度上升 21.4 kg/km^2,下降幅度最大的是中方县,下降幅度约为 27.8%,有 10 个县(市、区)下降幅度超过均值(图 6)。2013 年、2017 年和 2022 年,湖南省沅江流域总磷污染负荷强度空间分布也表现为由东北-西南一线向两边递减的空间格局。2013 年,湖南省沅江流域一共有 11 个县(市、区)污染负荷强度超过平均值,其中桃源县污染负荷强度最高;2017 年,除了洪江市和绥宁县,其余县(市、区)污染负荷强度均有所下降,古丈县下降程度最大;2022 年,有 7 个县(市、区)污染负荷强度较 2017 年上升,其中绥宁县污染强度上升最大,其主要原因是生猪养殖业的发展和农业种植面积的增加。相较于 2013 年,2022 年总磷强度大幅度下降,其主要原因是生态农业技术全面推广、农村生态环境管理逐步加强、农村环境整治力度逐年加大,如推广测土配方施肥、农药化肥减量、农业废弃物科学处置等,农业面源污染负荷不断降低。

3.3　农业面源污染重心迁移轨迹

利用 Arcgis10.7 绘制湖南省沅江流域农业面源污染负荷强度重心迁移轨迹图,通过箭头方向表示年际的空间移动趋势。2013—2022 年,湖南省沅江流域总氮和总磷负荷强度迁移路线方向相似,2013—2017 年,总氮和总磷负荷强度向南迁移,2017—2020 年,总体向北迁移,不同的是,总磷负荷强度 2018—2019 年向南迁移,2020—2022 年,总氮和总磷负荷强度均向南迁移,且有向北迁移的趋势,两种污染物负荷强度迁移轨迹具有一定的协同性(图 7)。不同的是,总氮负荷强度总体向东移动,而总磷负荷强度总体向东南移动,表明研究区东部地区对农业面源污染

图 5　湖南省沅江流域农业面源污染总氮负荷强度

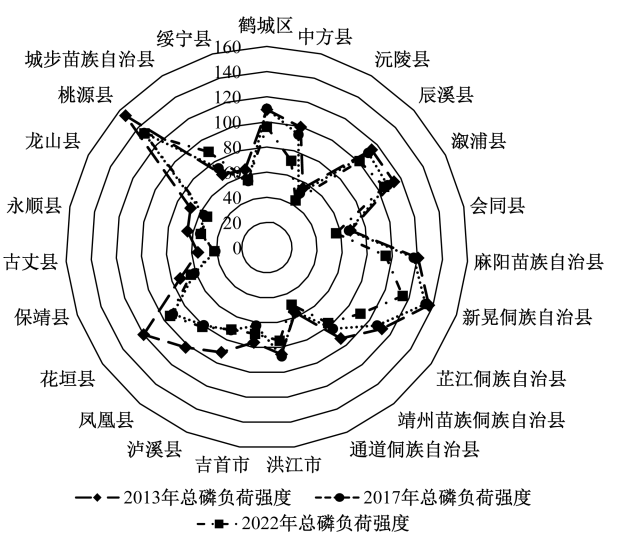


图 6　湖南省沅江流域农业面源污染总磷负荷强度

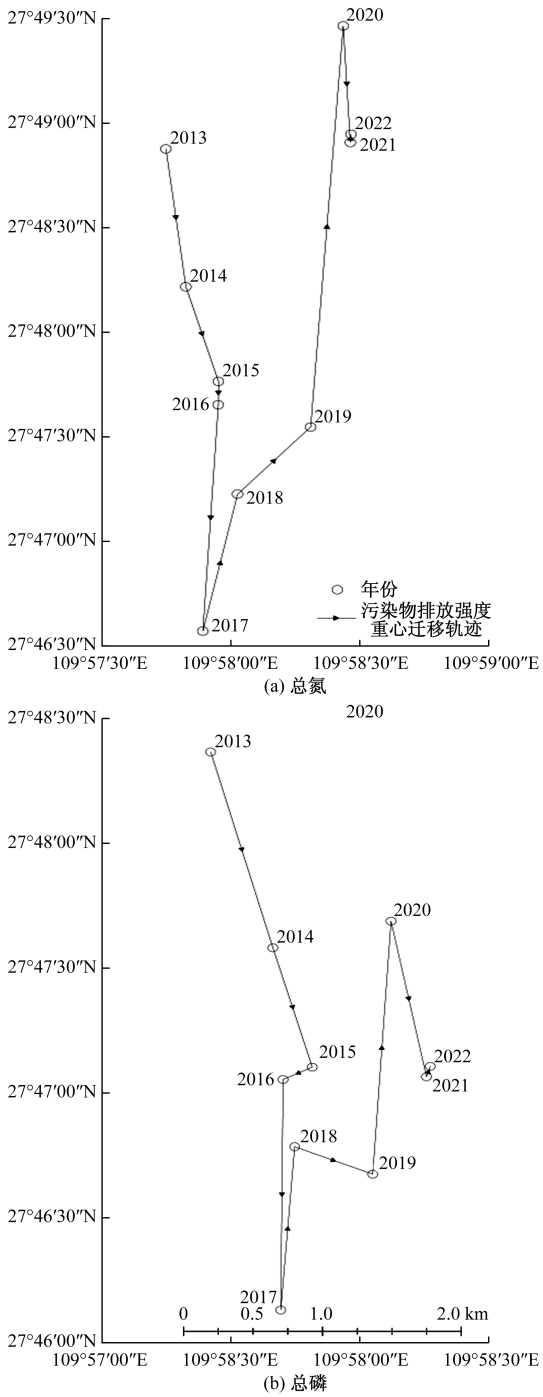


图 7　湖南省沅江流域农业面源污染重心迁移轨迹

的总体影响在加强。造成这一现象的原因可能是由于湖南省沅江流域东部经济更为发达,农村人口的流失相对较少,研究期内桃源县农村人口变化率为25.2%,小于区域内平均变化率 35.0%。

湖南省沅江流域总氮和总磷负荷强度迁移路线均呈现“V”形,表现显著的阶段性特征,2013—2017 年,两者均向南迁移,2017 年绥宁县和城步苗族自治县家禽存笼量较 2013 年分别增加 43.5 万羽和 38.5 万羽,大于湖南省沅江流域同时均值 3.9 万羽,同年,靖州苗族侗族自治县、会同县和通道侗族自治县农作物播种面积较 2013 年分别增加 44.3 km^2、38.3 km^2 和 23.1 km^2,同时期流域内平均减少 19.3 km^2,导致南部地区污染负荷强度持续高于其他地区,南部地区禽畜养殖规模大,农业种植面积增加,导致污染负荷强度相对较高。2017—2020 年湖南省沅江流域总氮和总磷负荷强度迁移路线转向东北,2017—2020 年,桃源县和溆浦县总人口量均位于流域内第一和第二名,由于在区域整体污染负荷强度下降的情况下,东北方向地区人口集中,导致污染负荷强度高于其他地区。2020—2022 年湖南省沅江流域总氮和总磷负荷强度迁移路线有向东南方向迁移趋势,2022 年,桃源县和溆浦县地区生产总值较 2020 年分别增长 62.7 亿元和 29.4 亿元,位于流域内地区生产总值第一和第二名,高于平均值 16.4 亿元,由于经济发展带来的技术进步和环保意识的加强,污染源减少,污染控制得力,使得西部和北部地区方向负荷强度相对降低。

4　结论

本文利用输出系数法,估算了湖南省沅江流域不同污染类型农业面源污染物总氮和总磷的负荷量和负荷强度,并对其重心移动趋势进行分析,研究结果不仅可以为湖南省沅江流域的区域规划和农业污染治理提供依据,也可以给湖南省内其他流域农业面源污染防控提供参考,主要研究结论如下。

(1)湖南省沅江流域农业面源污染负荷量总体呈下降趋势,总氮负荷量从 2013 年的 3.62×10^7 kg 降至 2022 年 2.88×10^7 kg,降幅达 20.5%;总磷负荷量从 2013 年 4.72×10^6 kg 降至 2022 年 4.05×10^7 kg,降幅达 14.2%;总氮和总磷负荷量整体上均呈现“东多西少、北多南少”的空间分布格局,与地势走向吻合。

(2)湖南省沅江流域农业面源污染负荷强度呈下降趋势,其中总氮负荷强度降幅最大的三个地区是麻阳苗族自治县、中方县和会同县,总磷负荷强度降幅最大的三个县是中方县、古丈县和泸溪县。

(3)2013—2022 年,湖南省沅江流域农业面源总氮负荷强度总体向东迁移,总磷负荷强度总体向东南迁移,但都呈现“V”形空间分布。

参考文献

[1]　第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020(18): 8-10.

[2]　罗凡, 罗育池, 陈宇华, 等. 广东沿海城市农业面源氮磷

污染排放特征及控制对策研究[J]. 环境污染与防治，2024，46(11)：1688-1694.
[3] 冀玄玄，姜军松. 中国化肥面源污染的时空特征及其影响因素——基于1997—2020年的省级面板数据[J]. 浙江农业学报，2024，36(5)：1185-1198.
[4] 范长城. 黑龙江省农业面源污染时空特征及影响因素分析[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2023.
[5] 李建勋，李明万，刘晓雨，等. 基于输出系数法的陕西农业面源污染负荷研究[J]. 生态与农村环境学报，2023，39(4)：523-529.
[6] 聂睿，李国强，诸葛亦斯，等. 岗南、黄壁庄水库分区污染贡献率分析[J]. 水生态学杂志，2022，43(4)：71-77.
[7] 贺斌，胡茂川. 广东省各区县农业面源污染负荷估算及特征分析[J]. 生态环境学报，2022，31(4)：771-776.
[8] 付正辉，张扬，姜霞，等. 基于输出系数法及土地利用方式识别的营养盐空间负荷解析——以十堰市为例[J]. 环境工程技术学报，2022(3)：660-665.
[9] 孔令英，王云. 山东省化肥面源污染EKC再检验——基于农户分化的视角[J]. 生态经济，2020(3)：208-213.
[10] 余志刚，王笑田，崔钊达，等. 秸秆还田技术应用是否减少了化肥面源污染？[J]. 农业现代化研究，2023，44(5)：834-844.
[11] 何向育，于法稳. 城镇化对农业面源污染的影响研究[J]. 生态经济，2024，40(8)：192-200.
[12] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters：the export coefficient modelling approach[J]. Journal of Hydrology，1996，183(3/4)：323-349.
[13] 周希，胡光伟. 岳阳市农业面源污染测算与控制对策[J]. 科技和产业，2022，22(7)：321-325.
[14] 曾金凤，潘红，张立楠，等. 东江源头典型山区小流域农业面源污染解析——以定南县东江流域为例[J]. 人民珠江，2023，44(4)：1-9.
[15] 苟婷，裴德富，梁荣昌，等. 基于输出系数模型的东江源头区农业面源氮磷排放特征分析[J/OL]. 中国环境科学，1-13[2024-11-25]. https：//doi.org/10.19674/j.cnki.issn/000-6923.20230802.012.
[16] 高田田，谢晖，万能胜，等. 巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析[J]. 农业环境科学学报，2022(11)：2428-2438.
[17] 郝桂珍，宋凤芝，徐利，等. 基于输出系数模型的清水河上游农业非点源污染负荷估算[J]. 科学技术与工程，2020，20(33)：13919-13927.
[18] 李政道，刘鸿雁，姜畅，等. 基于输出系数模型的红枫湖保护区非点源污染负荷研究[J]. 水土保持通报，2020(2)：193-198.
[19] 贺赟，杨爱江，陈蔚洁，等. 西南喀斯特山区典型流域农业非点源污染负荷及分布特征[J]. 水土保持研究，2022(1)：148-152.
[20] 董文财. 安达市非点源污染研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2009.
[21] 梁常德，龙天渝，李继承，等. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境，2007(1)：26-30.
[22] 段亮，段增强，夏四清. 太湖旱地非点源污染定量化研究[J]. 水土保持通报，2006(6)：40-43.
[23] 刘瑞民，杨志峰，沈珍瑶，等. 土地利用/覆盖变化对长江流域非点源污染的影响及其信息系统建设[J]. 长江流域资源与环境，2006(3)：372-377.
[24] 杨雯，敖天其，王文章，等. 基于输出系数模型的琼江流域(安居段)农村非点源污染负荷评估[J]. 环境工程，2018(10)：140-144.
[25] 宋晓明. 湖南省农业面源污染与水质响应关系及风险区划研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2024.

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Agricultural Non Point Source Pollution in Yuanjiang River Basin of Hunan Province

DING Peng[1]，LÜ Xinghao[2]，LI Jianwei[3]，WAN Dajuan[1]，YUAN Tengyue[1]，YU Shu[1]

(1. School of Geographical Sciences，Hunan Normal University，Changsha 410000，China；
2. Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture Environmental Assessment Service Center，Xiangxi 416000，Hunan，China；
3. Hunan Province Huaihua Ecological Environment Monitoring Center，Huaihua 418000，Hunan，China)

Abstract：The migration trajectory of agricultural surface source pollution in watersheds and the factors influencing it are of great theoretical and practical significance. Further study of these factors would be beneficial in the prevention and control of surface source pollution in watersheds. An analysis of panel data on agricultural surface source pollution loads within the Yuanjiang River Basin in Hunan Province from 2013 to 2022 was analyzed to investigate the spatial and temporal characteristics of this phenomenon. The results demonstrate that the total nitrogen and total phosphorus pollutant loads in the Yuanjiang River Basin of Hunan Province from 2013 to 2022 exhibit a general decreasing trend，with a spatial pattern of "more in the east and less in the west". Additionally，the intensity of pollutant loads demonstrates a decreasing trend，with a spatial decrease from a northeast-southwest line to both sides. The intensity of pollution loads is also observed to be decreasing，exhibiting a pattern of decline from the northeast to the southwest. Additionally，the migration trajectory of the center of gravity of the pollution loads is identified to be generally V-shaped，with an eastward migration.

Keywords：Yuan River Basin；agricultural surface pollution；spatial and temporal characteristics；centre of gravity model