

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变

肖宇婷, 姚婧, 谌书, 樊敏*

(西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010)

摘要: 根据四川省沱江流域水环境受总氮(TN)面源严重污染的现状,采用排污系数法估算2007~2017年该流域来自各面源污染源的TN污染负荷,并利用空间重心统计法和空间分析技术揭示沱江流域TN污染负荷时空分布特征及转移趋势,以期相关部门精准防控和预警沱江流域面源污染提供理论依据。结果表明,2007~2017年畜禽养殖污染源对整个流域的TN污染负荷贡献率每年均在45%以上,是TN面源污染的主要污染源。农村生活和农村生活垃圾污染源的贡献率呈逐年减少趋势,农田固废和农田径流污染源的贡献率则呈增加趋势。TN总污染负荷总体呈下降趋势,2010年污染负荷最大,达到 5.7×10^4 t, 2017年最小,为 4.69×10^4 t。污染负荷在空间上的异质性变化及降雨径流的不均匀分布驱使畜禽养殖、农田固废类和农田径流污染源的TN污染负荷重心由西北向东南方向移动,流域东南部是畜禽养殖、农田固废类和农田径流TN污染的重点防控区域。东南部各区县的农业人口大量向城市人口转化,进而驱动农村生活和农村生活垃圾污染源的TN污染负荷重心由东南向西北方向转移,其转移范围高达66.35 km²,由此确定的最小边界圆是污染源污染负荷变化的重点识别区域,沱江流域西北部则是农村生活和农村生活垃圾TN污染的重点防控区域。本研究拓展了环境科学领域对流域污染负荷时空演变的探究方法,对于改善水环境质量,促进流域经济可持续发展具有重要意义。

关键词: 面源污染; 总氮污染负荷; 重心统计分析法; 时空演变; 沱江流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3773-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011120

Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin

XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, FAN Min*

(School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Currently, the aquatic environment of the Tuojiang River basin in Sichuan Province is severely polluted by non-point sources of total nitrogen (TN). This study adopts the pollution discharge coefficient method to estimate the TN pollution load of non-point sources in this watershed during 2007-2017. The temporal and spatial distribution and transfer trends of the TN pollution load in the Tuojiang River basin were examined, based on center-of-gravity statistical and spatial analysis technology. This study aimed to provide an accurate theoretical basis for the prevention and early identification of non-point source pollution in the Tuojiang River basin. The results indicate that livestock breeding was the main non-point source of TN pollution and contributed more than 45% to the TN pollution load during 2007-2017. The contribution rate of rural life and domestic waste decreased continually during the study period, whereas that of farmland solid waste and farmland runoff exhibited an increasing trend. The total pollution load of TN exhibited a decreasing trend during 2007-2017. The maximum and minimum TN pollution loads occurred in 2010 and 2017 with values of 5.7×10^4 t and 4.69×10^4 t, respectively. Spatial heterogeneity of the pollution load, together with the uneven distribution of rainfall runoff, caused a shift from northwest to southeast in the pollution-load centers of gravity for livestock and poultry breeding, farmland solid waste, and farmland runoff. Southeast of the watershed is the key area for prevention and control of these pollution sources. A shift in the centers of gravity for rural living and household waste pollution, from southeast to northwest, was attributed to agricultural populations transforming to urban populations in the southeastern counties. The maximum transfer range was 66.35 km², and this minimum boundary circle is the key identification area of pollution source pollution load change. Northwest of Tuojiang River basin is the key area in which TN pollution from rural living and rural household waste can be prevented. This research expands the methods for exploring the temporal and spatial evolution of pollution load in the Tuojiang River basin, which is of great significance for improving the aquatic environment and promoting sustainable development of the basin economy.

Key words: non-point source pollution; total nitrogen pollution load; center of gravity statistical analysis; temporal and spatial evolution; Tuojiang River basin

近年来,不合理的人类活动导致了河川径流减少、河流水质恶化和环境退化等一系列环境问题^[1]。其中,由农业活动引起的面源污染是导致国内外流域水环境污染的重要原因之一,据第一次全国污染源普查公报表明,我国农业源排放的TN和TP对氮、磷水污染物总量的贡献率分别占到57%和67%,并且我国经济结构长期为农业粗放型经

济^[2],农田氮素污染已成为农业生态环境最主要的污染源之一^[3],水体氮营养盐增加导致的富营养化

收稿日期: 2020-11-15; 修订日期: 2021-01-21

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2019YFS0057, 2019YFS0055, 2020YFS0306); 国家自然科学基金项目(41601088)

作者简介: 肖宇婷(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为流域水环境管理与规划, E-mail: 893791939@qq.com

* 通信作者, E-mail: firstfanmin@hotmail.com

加剧破坏了水生生态系统^[4],严重影响到我国农业和国民经济的可持续发展.在此背景下,探究流域面源 TN 污染负荷的时空演变特征成为准确把握面源污染负荷时空演变规律的手段之一,对有效治理面源污染,改善流域水环境质量具有重要意义.

面源污染负荷的估算是研究污染负荷时空演变的基础,随着改进输出系数模型(排污系数法^[5]和总氮输出系数改进模型^[6]等)及机制模型(SWAT^[7,8]、HSPF^[9,10]和 AnnAGNPS^[11]等)的相继提出与应用,使面源污染负荷估算问题得到有效解决.各国学者得以在此基础上对面源污染负荷的时空演变展开了大量而深入的研究,如时空分布模拟^[12~14]常用于寻找面源污染高污染区,多元统计分析^[15~17]用于污染物动态聚类 and 划分污染属性类型, GIS 空间技术^[18,19]可分析污染负荷的空间相关性并输出污染分布.此外,丘雯文等^[20]还利用基尼系数分解方法和 Kernel 密度估计法探究了中国面源污染排放的空间和强度差异,吴义根等^[21]使用探索性空间数据分析方法(ESDA)对中国面源污染动态演变进行了相关性分析,张广纳等^[22]利用空间自相关及冷热点分析方法探究了三峡库区重庆段农村面源污染的时空格局演变特征.然而,前人的研究多集中在探寻高污染区域及污染类型的空间相关性,而缺乏利用空间重心统计思想从长时间序列上揭示流域农业面源污染演变格局,反映农业面源污染负荷变化趋势方面的研究.

空间重心统计方法常应用于人口、经济、能源、消费、制造业和城市群等重心变化研究中^[23],这些指标都具有一定的地理空间属性,面源污染同样具有地理空间特征,随着各研究单元污染负荷的不均匀变化,所得到的污染负荷重心较研究单元几何重心会发生移动,移动的大小及方向能够反映污染负荷的空间重心移动特征.基于此,本研究尝试性地将地学中的空间重心统计分析思想运用到沱江流域污染负荷重心的计算上,拓展了环境学领域在污染负荷时空变化上的分析方法,并对连续时间内流域面源污染格局演变及其驱动因素进行了探究,以期相关部门在制定精准防控和预警沱江流域面源污染策略时提供理论依据

1 研究区概况

沱江是长江的一级支流,是四川重要河流之一,地理坐标为 $28^{\circ}49'17'' \sim 31^{\circ}42'3''N$, $103^{\circ}40'57'' \sim 105^{\circ}42'50''E$,面积为 $2.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中四川境内流域面积为 $2.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1).沱江流域是四川省成都平原经济区、川西北生态经济区和川南经济

区等主要经济区的重要水源地,是长江经济带西部的重要组成部分,其水环境遭受污染,并且受 TN 的污染尤为严重^[24~26],不仅影响该地区人民的生产生活,还会制约下游三峡库区甚至整个长江流域的社会经济发展^[27].该流域包括了成都市、德阳市、眉山市、资阳市、内江市、泸州市和自贡市这 7 个市级行政单位的 28 个县级行政单元,地理位置极为重要,流域内工业、城镇生活、畜禽养殖和农业种植等各类污染源众多^[28],畜禽养殖规模大、粮食和经济作物种植力度大、人口密度高、人均耕地面积少且土地利用强度大,导致流域周边面源污染问题非常突出.

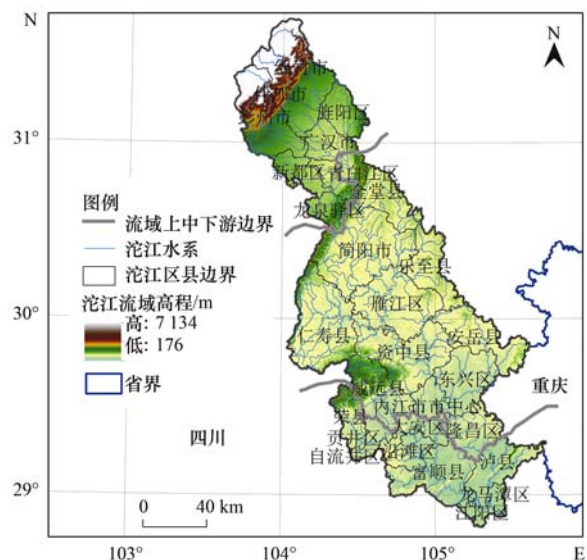


图 1 沱江流域地理位置示意

Fig. 1 Location map of Tuojiang River basin

2 数据与研究方法

2.1 数据

本研究数据主要来自统计年鉴及网络数据平台,具体数据来源及数据特征如表 1 所示.

2.2 面源污染负荷估算

本研究采取的排放系数法是借鉴经典输出系数模型^[29]的思路,将污染物输出系数替换为排放系数,得到污染物排放量的一种污染负荷估算方法^[30].沱江流经四川盆地腹部,多年降雨量均匀,除沱江源头部分,地势较为平坦.此外,该流域的土地利用、气候条件和管理状况等因素变化不显著,各类系数变化较小.因此,本研究采用统一排污系数估算 2007~2017 年沱江流域 TN 污染负荷,其具体计算公式及相关系数见表 2.

2.3 空间重心统计分析法

2.3.1 几何重心

几何重心是区域空间的均衡点,重心移动能够反映地理事物和现象的空间分布变化,计算区域某

表 1 数据来源和数据特征

数据类型	数据来源	数据精度
2007 ~ 2017 年的粮食作物、经济作物产量；畜禽养殖量；旱地和水田面积	2007 ~ 2017 年《四川省农业统计年鉴》	沱江流域 28 个区县
2007 ~ 2017 年的农业人口数量	2007 ~ 2017 年《四川统计年鉴》	沱江流域 28 个区县
2017 年 DEM 栅格数据	地理空间数据云	30 m × 30 m
沱江流域区县矢量边界	地理空间数据云	沱江流域 28 个区县
2007 ~ 2017 年每月年均气象数据(最高温度和降雨量)	四川省气象局和中国气象局同化驱动数据库	沱江流域内 21 个气象监测站点

表 2 各污染源污染负荷计算方法及相关系数

污染源类型	计算公式	相关系数
畜禽养殖	畜禽养殖污染负荷 = 畜禽粪便排泄系数 × 畜禽饲养量 × 畜禽粪便中污染物平均含量 × 畜禽粪便污染物流失率 + 畜禽尿液排泄系数 × 畜禽饲养量 × 畜禽尿液中污染物平均含量 × 畜禽尿液污染物流失率	畜禽粪便流失率依据前人对四川畜禽养殖污染负荷的研究 ^[31] ；畜禽粪便、尿液排泄系数和污染物平均含量源于文献 ^[32]
农田径流	$L = \sum_{i=1}^n a_i S_i F_i$	式中, L 为农田地表径流的污染物排放量; a_i 为修正后农田源强系数, S_i 入河系数, F_i 耕地面积. 标准农田 TN 源强系数为每年 $51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 结合沱江流域地形、气象和农田用地类型等实际情况分别取坡度修正系数为 1.2、农作物类型修正系数(水田为 1.5、旱地为 1.0)、化肥使用量修正系数为 1.1、降水量修正系数为 1.1 和土壤修正系数为 1.0; 根据前人对沱江流域相邻流域的研究 ^[33] , 入河系数取 0.05
农村生活	农村生活污染负荷 = 人均产污系数 × 人数 × 入河系数	文献 ^[34,35] 中人均产污系数的推荐值并结合沱江流域内农村的特点, 确定人均产污系数为 $\text{TN } 5 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$; 根据文献 ^[36] 及沱江流域农村居民住宅区与周围水体的距离, 确定农村污水入河系数取 0.3 ^[37]
农村生活垃圾	农村生活垃圾污染负荷 = 农村人口总数 × 人均垃圾产生量 × 垃圾渗滤液中污染物平均含量 × 入河系数	农村人均产生生活垃圾约为 $0.31 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[38,39] ; 根据文献 ^[34] 每吨积存生活垃圾的 TN 释放负荷分别为 14 kg; 根据沱江流域内农村生活垃圾没有形成相应的收集途径, 生活垃圾不能集中处理, 大部分乱堆乱扔, 最终进入周围环境的特征, 并结合前人研究 ^[40] , 确定入河系数为 0.20
农田固废类	农田固废污染负荷 = 作物产量 × 作物秸秆固废产量比 × 农作物固废污染物含量 × 秸秆养分流失率 × 产污系数	稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类和油料(花生、油菜)的秸秆粮食比分别为 0.97、1.03、1.37、1.71、0.61 和 2.26; 秸秆养分流失率和产污系数取自前人研究 ^[41,42]

种属性的重心,通常借助区域内各子区域的某种属性和地理坐标来表达. 本研究的思路是运用空间重心统计模型,结合 GIS 技术,计算各污染源 TN 污染负荷的空间重心坐标,空间重心统计模型计算公式为:

$$\begin{cases} X = \sum_{j=1}^n E_j x_j / \sum_{j=1}^n E_j \\ Y = \sum_{j=1}^n E_j y_j / \sum_{j=1}^n E_j \end{cases} \quad (2)$$

式中, X 和 Y 分别表示研究区污染负荷分布重心的坐标; n 为研究区内区县的数目; E_j 为区县某污染源的 TN 污染负荷; x_j 和 y_j 各区县所在地的几何重心坐标,本研究利用 ArcGIS 对沱江流域 28 个区县的矢量边界进行计算,得到 28 个区县的几何重心坐标. 将 2007 ~ 2017 年的 TN 污染负荷,按污染源类别代入式(2),计算出各年来自各污染源的 TN 污染负荷重心的坐标值,并将结果导入到 ArcGIS 绘制成图.

2.3.2 污染负荷空间重心年际移动距离

污染负荷空间重心年际移动距离的公式如下:

$$D_{k-l} = R \times \sqrt{(X_k - X_l)^2 + (Y_k - Y_l)^2} \quad (k > l) \quad (3)$$

式中, D_{k-l} 表示从第 l 年到第 k 年污染负荷重心移动的距离(km); X_k 和 X_l 分别表示第 k 年和第 l 年的重心纬度坐标, Y_k 和 Y_l 分别表示第 k 年和第 l 年的重心经度坐标; 在纬线方向上的单位经度长度是变化的,但由于重心移动的距离较小,本研究对此忽略, R 取常数 111.111^[43],表示地球表面经纬度坐标转化为平面距离的系数. 此外,为了反映各污染源污染负荷变化的重点识别区,本研究运用 ArcGIS 最小边界几何分析工具分别计算出 2007 ~ 2017 年间沱江流域各面源污染源的 TN 污染负荷重心最小边界圆,从而确定各污染源 TN 污染负荷变化的重点识别区域.

3 结果与分析

3.1 污染负荷变化特征

通过排污系数法估算得到 2007 ~ 2017 年各面

源污染源的 TN 污染负荷、各污染源的污染负荷贡献率、2007 ~ 2017 年沱江流域 TN 总污染负荷(图 2)和 2007、2012、2017 年沱江流域各区县 TN 总污染负荷空间分布(图 3)。

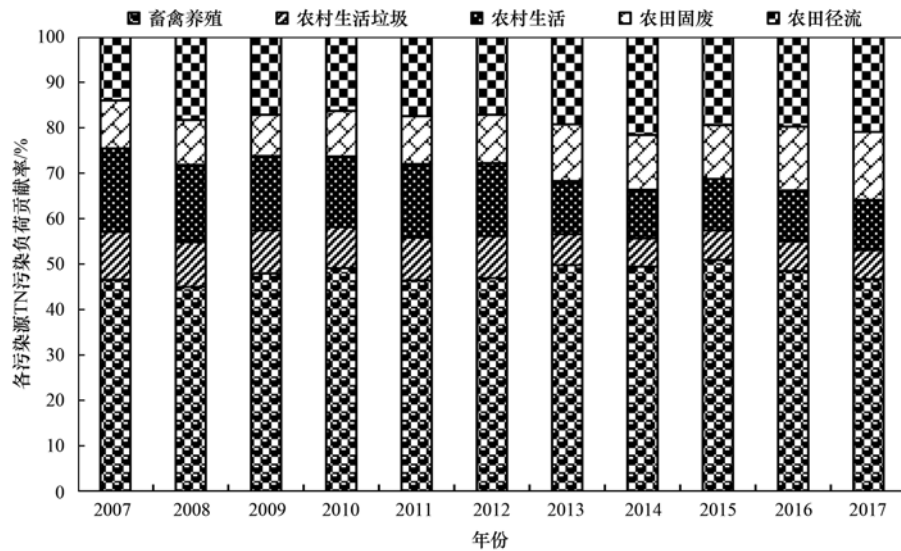


图 2 沱江流域各面源污染源对整个流域 TN 污染负荷的贡献率

Fig. 2 Contribution rate of non-point pollution sources in the Tuojiang River basin to TN pollution loads in the whole watershed

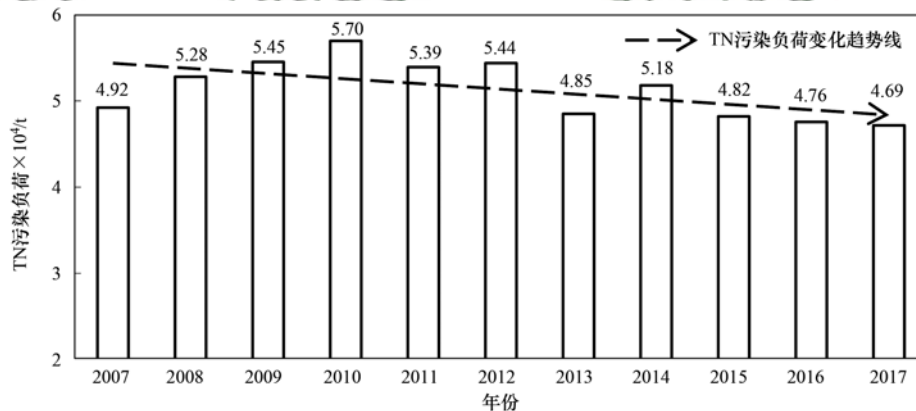


图 3 2007 ~ 2017 年沱江流域 TN 污染负荷

Fig. 3 TN pollution load in the Tuojiang River basin during 2007-2017

如图 2 所示,从总体来看,2007 ~ 2017 年畜禽养殖污染源对 TN 的污染负荷贡献率最高,均在 45% 以上,是沱江流域的主要污染物,并且有研究表明^[44],四川耕地负荷的畜禽 TN 养分量已达到 $202.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远超粪肥氮施用警戒线 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[45],可见畜禽养殖污染源是沱江流域 TN 面源污染的主要污染源.从变化趋势来看,农村生活和农村生活垃圾污染源对 TN 的污染负荷贡献率呈逐年减少趋势,这是由于我国农业人口向城市人口转化,农业人口数量减少,使得农村生活、农村生活垃圾的污染负荷减少,其对沱江流域 TN 面源污染负荷贡献率也随之降低;农田固废和农田径流污染源则呈增加趋势,其原因是农田固废类污染负荷与

粮食、经济作物的产量呈正相关,与 2007 年相比,2017 年沱流域的粮食、经济作物的产量分别增加了 7.81%、42.49%,并且经济作物(油料)的秸秆粮食比为 2.26,秸秆产量高,产污量大,使得农田固废污染源对 TN 的污染负荷贡献率则呈增加趋势。

由图 3 可知,从总体来看,2007 ~ 2017 年沱江流域农业面源 TN 总污染负荷呈下降趋势.从局部变化来看,2007 ~ 2010 年 TN 总污染负荷呈逐年上升趋势,2010 年污染负荷达到最大,为 $5.70 \times 10^4 \text{ t}$,2017 年污染负荷最小,为 $4.69 \times 10^4 \text{ t}$.2011 ~ 2017 年 TN 总污染负荷呈现总体下降,个别年份上升的特征,其中 2013 年的 TN 总污染负荷下降最多,相比 2012 年 TN 的总污染负荷减少了 $0.59 \times 10^4 \text{ t}$.

3.2 污染负荷重心移动

基于 2007 ~ 2017 年沱江流域 TN 污染负荷基础数据,利用式(2) ~ (3)分别计算出 TN 农业面源总污染负荷和 5 种面源污染源的 TN 污染负荷重心及其移动距离,结果如表 3 ~ 5 所示,并通过 ArcGIS

软件制图得到沱江流域中畜禽养殖、农村生活、农村生活垃圾、农田径流和农田固废类污染源的重心转移路径,结果如图 4 ~ 5 所示. 由图 4 可知, 2007 ~ 2017 年沱江流域的污染负荷重心均分布在位于沱江中游的雁江区南部.

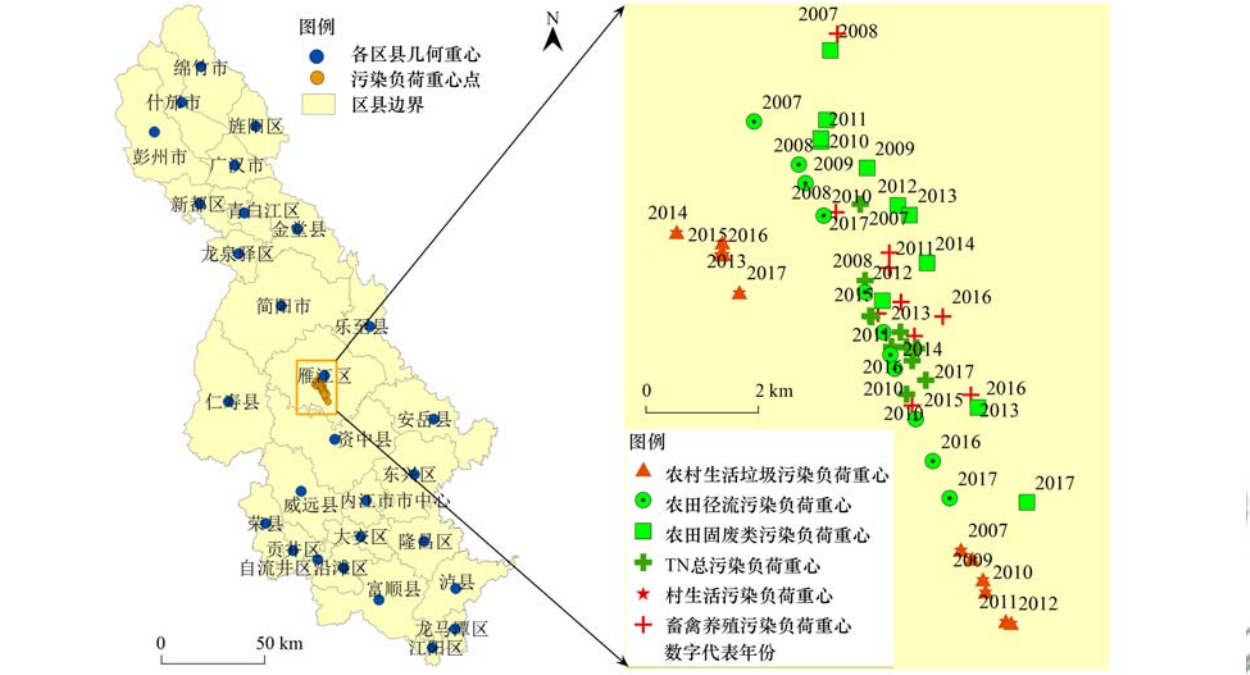


图 4 2007 ~ 2017 年沱江流域面源污染源 TN 污染负荷重心空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of TN pollution load centers from non-point pollution sources in the Tuojiang River basin during 2007-2017

3.2.1 TN 总污染负荷及各污染源 TN 污染负荷重心移动特征

从各污染源 TN 污染负荷重心移动特征来看, 2007 ~ 2017 年, 畜禽养殖、农田固废类和农田径流污染源 TN 污染负荷重心总体均由流域的西北向东南方向移动,农村生活和农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心则由东南向西北方向转移(见图 5), 由于本研究采用排污系数法估算污染负荷,而农村生活垃圾和农村生活污染源污染负荷均是由农业人

口数量为基数计算而来,使两者各年的污染负荷的重心落在同一点,故农村生活垃圾和农村生活污染源的 TN 污染负荷重心移动轨迹重合.

由表 3 ~ 5 可知, 2007 ~ 2017 年, TN 总污染负荷重心落在 104°43'28" ~ 104°44'12"E, 30°01'14" ~ 30°03'04"N 之间; 畜禽养殖污染源 TN 污染负荷重心在 104°43'12" ~ 104°44'42"E, 30°01'07" ~ 30°04'43"N 之间; 农村生活和农村生活垃圾污染源 TN 污染负荷重心落在 104°41'25" ~ 104°45'10"E,

表 3 2007 ~ 2017 年沱江流域 TN 总污染负荷、畜禽养殖污染源 TN 污染负荷重心转移距离
Table 3 Moving distance of total TN pollution load and TN pollution load center of livestock breeding pollution source in the Tuojiang River basin during 2007-2017

年份	TN 总污染负荷地理坐标		移动距离 /m	畜禽养殖污染源 TN 污染负荷地理坐标		移动距离 /m
	东经(E)	北纬(N)		东经(E)	北纬(N)	
2007	104°43'28"	30°03'04"	—	104°43'12"	30°04'43"	—
2008	104°43'32"	30°02'20"	1 368. 49	104°43'12"	30°02'59"	3 200. 25
2009	104°43'50"	30°01'41"	1 276. 05	104°43'41"	30°02'00"	1 963. 06
2010	104°44'00"	30°01'14"	881. 20	104°44'04"	30°01'07"	1 744. 74
2011	104°44'03"	30°01'33"	612. 33	104°43'48"	30°02'27"	2 484. 38
2012	104°44'06"	30°01'40"	226. 39	104°43'48"	30°02'36"	274. 48
2013	104°43'55"	30°01'49"	409. 62	104°44'42"	30°01'13"	2 926. 06
2014	104°43'36"	30°01'58"	584. 75	104°44'04"	30°01'47"	1 453. 42
2015	104°43'35"	30°01'59"	29. 26	104°43'55"	30°02'07"	654. 74
2016	104°43'59"	30°01'41"	853. 12	104°44'23"	30°01'58"	792. 09
2017	104°43'12"	30°01'22"	679. 42	104°43'28"	30°03'04"	2 498. 75

表 4 2007 ~ 2017 年沱江流域农村生活垃圾、农村生活污染源 TN 污染负荷重心转移距离

Table 4 Moving distance of center of gravity of TN pollution load of rural domestic waste and rural domestic pollution source in the Tuojiang River basin during 2007- 2017

年份	农村生活垃圾污染源 TN 污染负荷地理坐标		移动距离/m	农村生活污染源 TN 污染负荷地理坐标		移动距离/m
	东经(E)	北纬(N)		东经(E)	北纬(N)	
2007	104°44'36"	29°59'43"	—	104°44'36"	29°59'43"	—
2008	104°44'43"	29°59'38"	258. 96	104°44'43"	29°59'38"	258. 96
2009	104°44'51"	29°59'26"	416. 76	104°44'51"	29°59'26"	416. 76
2010	104°44'52"	29°59'19"	224. 74	104°44'52"	29°59'19"	224. 74
2011	104°45'06"	29°59'02"	640. 65	104°45'06"	29°59'02"	640. 65
2012	104°45'10"	29°59'01"	98. 60	104°45'10"	29°59'01"	98. 60
2013	104°41'56"	30°02'41"	8 539. 57	104°41'56"	30°02'41"	8 539. 57
2014	104°41'25"	30°02'47"	833. 97	104°41'25"	30°02'47"	833. 97
2015	104°41'57"	30°02'35"	923. 88	104°41'57"	30°02'35"	923. 88
2016	104°41'55"	30°02'34"	51. 57	104°41'55"	30°02'34"	51. 57
2017	104°42'07"	30°02'12"	754. 72	104°42'07"	30°02'12"	754. 72

表 5 2007 ~ 2017 年沱江流域农田固废类、农田径流污染源 TN 污染负荷重心转移距离

Table 5 Moving distance of TN pollution load center of farmland solid waste and farmland runoff pollution source in the Tuojiang River basin during 2007- 2017

年份	农田固废类污染源 TN 污染负荷地理坐标		移动距离/m	农田径流污染源 TN 污染负荷地理坐标		移动距离/m
	东经(E)	北纬(N)		东经(E)	北纬(N)	
2007	104°43'07"	30°03'53"	—	104°42'17"	30°03'52"	—
2008	104°43'10"	30°04'34"	1 252. 63	104°42'48"	30°03'27"	1 111. 02
2009	104°43'34"	30°03'25"	2 205. 43	104°42'52"	30°03'16"	356. 80
2010	104°43'03"	30°03'41"	978. 35	104°43'04"	30°02'57"	664. 98
2011	104°43'03"	30°03'42"	55. 22	104°43'49"	30°01'37"	2 751. 11
2012	104°43'55"	30°03'04"	1 826. 49	104°43'32"	30°02'13"	1 205. 29
2013	104°44'03"	30°02'58"	273. 84	104°43'44"	30°01'49"	795. 45
2014	104°44'15"	30°02'30"	910. 94	104°43'52"	30°01'29"	673. 25
2015	104°43'45"	30°02'08"	1 048. 11	104°44'06"	30°00'59"	977. 28
2016	104°44'49"	30°01'07"	2 555. 80	104°44'17"	30°0'35"	809. 93
2017	104°45'22"	30°00'12"	1 910. 93	104°44'29"	30°00'14"	728. 77

29°59'01" ~ 30°4'43"N 之间; 农田固废类污染源 TN 污染负荷重心落在 104° 43' 03" ~ 104° 45' 22" E, 30°00'12" ~ 30°04'34"N 之间; 农田径流污染源 TN 污染负荷重心落在 104° 42' 17" ~ 104° 44' 29" E, 30°00'14" ~ 30°03'52"N 之间. TN 总污染、畜禽养殖、农村生活和农村生活垃圾、农田固废类和农田径流污染源 TN 污染负荷重心移动最大的年份分别出现在 2008、2008、2013、2016 和 2011 年, 其相应移动距离为 1 368. 46、3 200. 25、8 539. 57、2 555. 80 和 2 751. 11 m, 表明这些年份沱江流域各区县面源污染源 TN 污染负荷变化幅度不均衡, 其中农村生活和农村生活垃圾污染源尤为明显.

3. 2. 2 各污染源 TN 污染负荷重心移动驱动因素分析

畜禽养殖、农田固废类和农田径流污染源的 TN 污染负荷重心移动分别与畜禽养殖、粮食及经济作物和农田径流污染源的 TN 污染负荷在空间上的不均匀变化有关. 如图 6 所示, 上述 3 种污染源 TN 负荷在 2007 ~ 2017 年间的变化率呈现空间差异性, 东

南部各区县的畜禽养殖、农田固废和农田径流污染源 TN 负荷变化幅度分别为 - 32. 4% ~ 21. 9%、13. 9% ~ 184% 和 1. 9% ~ 31. 5%, 西北部各区县的畜禽养殖、农田固废和农田径流污染源 TN 负荷变化幅度分别为 - 74. 7% ~ 6%、- 33. 9% ~ 108% 和 - 49. 7% ~ 0. 78%. 农业生产技术的改进与革新使位于沱江流域东南部区县的畜禽养殖、粮食和经济作物增加幅度较西北地区更大, TN 产污量随之变大, 进而驱动重心由西北向东南方向移动. 农田径流的 TN 污染负荷变化与农业用地面积变化有关, 沱江流域西北部是工业、人口集中地区, 位于沱江流域西北部的新都区和龙泉驿区、旌阳区和广汉市分别隶属于经济、工业发达的成都市和德阳市, 其经济发展迅速, 农业用地被大面积占用, 农田面积急剧减少, 这种空间上所受影响的差异导致了农田径流污染源的 TN 污染负荷重心由西北向东南方向移动.

农村生活和农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心移动与农业人口的不均匀减少有关. 2007 ~ 2017 年沱江流域的农业人口减少率具有明显空间

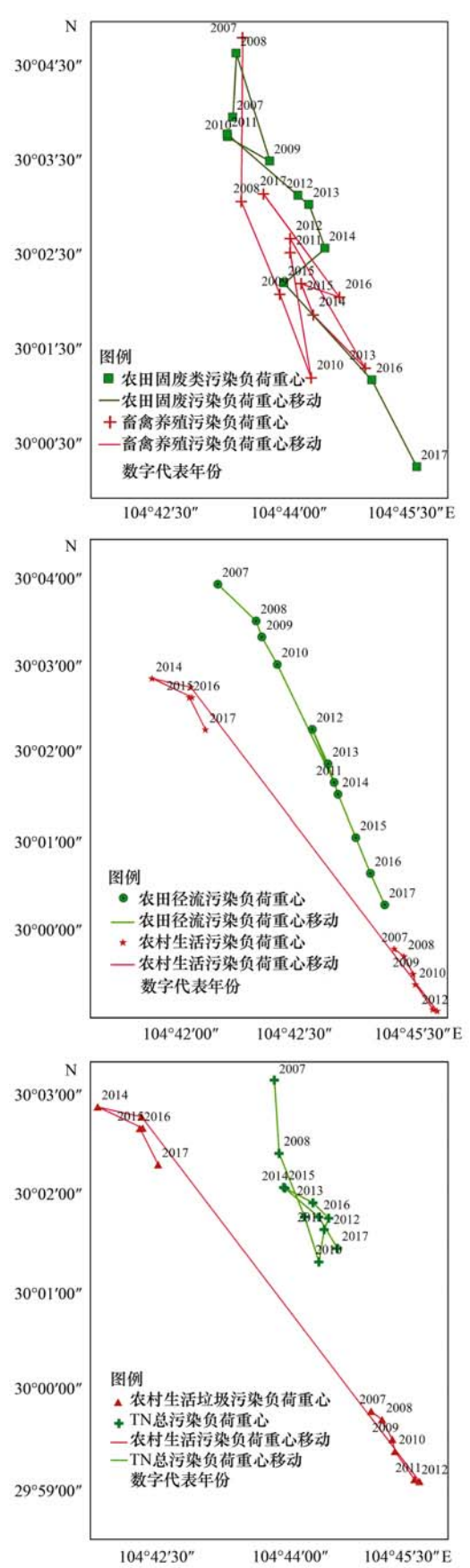


图5 2007~2017年沱江流域面源污染源TN污染负荷重心移动

Fig. 5 Gravity shift of TN pollution load from non-point pollution sources in the Tuojiang River basin during 2007-2017

分布特征,位于沱江流域西北部区县的农业人口减

少率低,例如彭州市、新都区和龙泉驿区的农业人口减少率为20.17%、21.3%和25.19%,农业人口减少率低.而位于东南部区县的农业人口减少率则较高,如龙马潭区和江阳区的农业人口减少率分别达到了59.37%和59.58%,这是由于东南部各区县的农业人口大量向城市人口转化,农业人口急剧减少.而农村生活和农村生活垃圾污染源的TN污染负荷与农业人口呈正相关,农业人口的不均匀减少导致了农村生活和农村生活垃圾TN污染负荷重心由东南向西北方向移动.

除上述社会经济因素对污染负荷重心移动有影响外,降雨径流也是驱动污染负荷重心移动的重要原因.为探究降雨径流与污染负荷重心移动的关系,以Arcgis软件为平台,利用反距离插值法对沱江流域内21个气象监测点监测的2007~2017年最高温度和降雨量均值的月平均值进行插值.结果如图7所示,沱江流域的降雨量呈现西北部>东南部>中部的空间分布特征[见图7(a)],高温地区主要出现在东南部,西北部的温度较低[见图7(b)].由于沱江流域降雨径流量与降雨量呈正相关,与温度呈负相关^[46],尽管东南部有一定降雨量,但高温会蒸发部分雨水,使降雨径流减少,由此可知该流域西北部的降雨径流大于东南部.结合地形分析,沱江流域西北部的地势较高,东南部地势较低[图7(c)],降雨径流由地势较高的地区流向地势较低的地区,即由西北部流入东南部,在此过程中,降雨径流会裹挟各面源TN污染物流入水系,驱动TN污染负荷重心由西北向东南部转移.

3.2.3 TN总污染负荷及各污染源污染负荷重心移动对比分析

由图8(a)可知,在经度方向上,畜禽养殖、农田固废和农田径流污染源TN污染负荷重心迁移总体趋于一致,均出现明显东移趋势.结合TN总污染负荷分析可知,TN总污染负荷与各污染源污染负荷的重心移动具有一定的协同性,2007~2012年间,各污染源污染负荷的重心向东少量移动,TN总污染负荷重心随之向东少量移动,2012~2013年,农村生活和农村生活垃圾污染源污染负荷重心虽向西移动较大距离,但TN总污染负荷重心只向西少量移动,表明农村生活和农村生活垃圾污染源对TN总污染负荷重心移动的影响较小,2014~2017年,各污染源污染负荷的重心总体向东少量移动,TN总污染负荷重心随之向东少量移动.由图8(b)可知,在纬度方向上,畜禽养殖、农田固废和农田径流污染源TN污染负荷重心迁移总体趋于一致,均出现明显的南移趋势.无论是经度还是纬度方向上,畜禽养殖污染

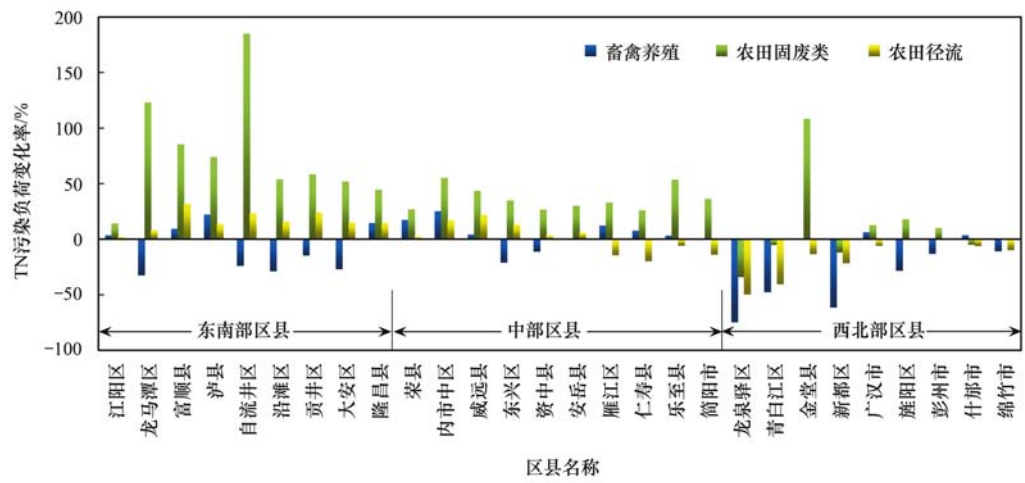


图 6 沱江流域 2007 ~ 2017 年间畜禽养殖、农田固废和农田径流污染源 TN 负荷变化率
Fig. 6 Variation rate of TN load from livestock breeding, farmland solid waste, and farmland runoff pollution sources in the Tuojiang River Basin during 2007-2017

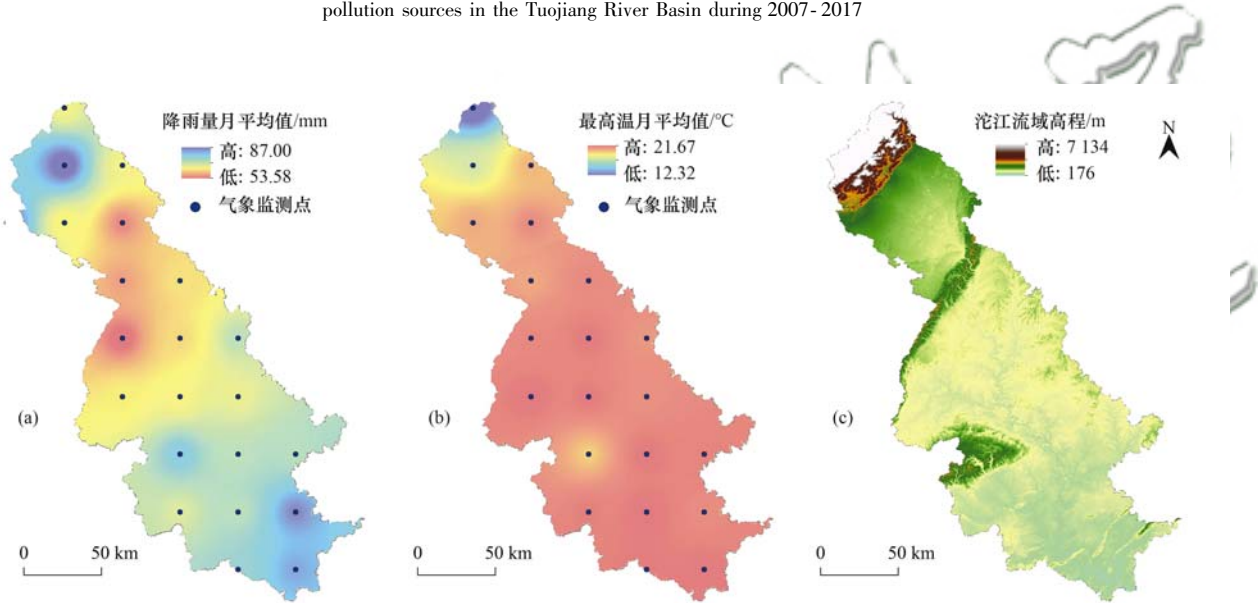


图 7 沱江流域气象及地形特征
Fig. 7 Features of weather and altitude of the Tuojiang River basin

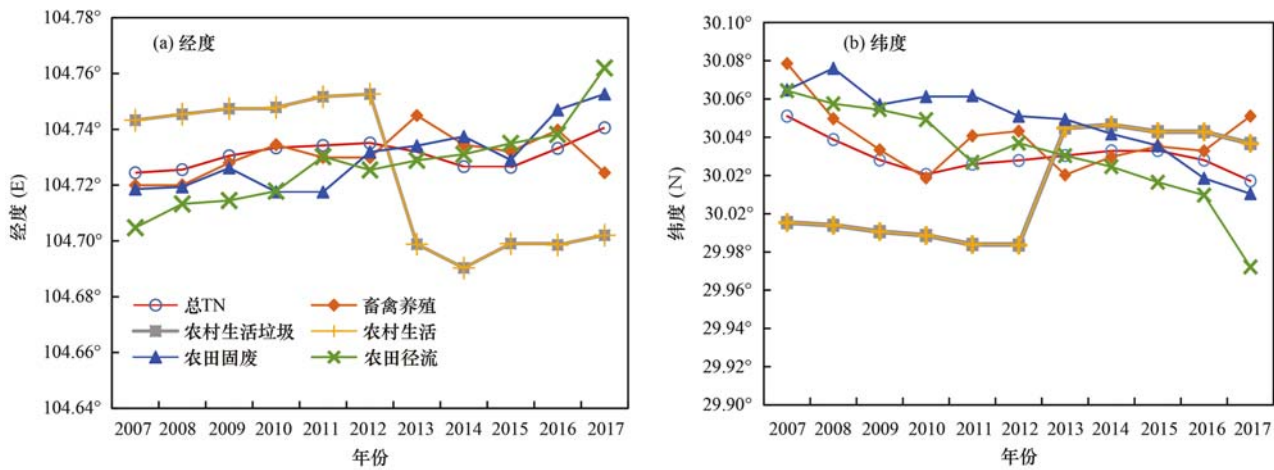


图 8 2007 ~ 2017 年沱江流域面源污染源 TN 污染负荷在经度和纬度上的变化
Fig. 8 Changes in longitude and latitude of the TN pollution load from non-point sources in the Tuojiang River basin during 2007-2017

源 TN 污染负荷重心移动与 TN 总污染负荷重心移动轨迹最接近,表明畜禽养殖源是 TN 面源污染的主要贡献源。

农村生活和农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心无论在经度还是纬度方向上的移动都明显区别于其它面源污染源,其移动趋势在 2012 ~ 2013 年间发生变异,结合表 2 可知,这期间农村生活和农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心由东南向西北转移达 8 539. 57 m. 这与 2012 ~ 2013 年农业人口的不均匀减少有关, 2012 ~ 2013 年沱江流域的农业人口减少率具有明显空间分布特征(图 9),位于沱江流域西北部区县的农业人口减少率低,例如新都区和龙泉驿区的农业人口减少率分别为 - 8. 35% 和 - 3. 64%,农业人口减少率为负数,说明有农村人口增加,而位于东南部区县的农业人口减少率则较高,如龙马潭区和江阳区的农业人口减少率分别达到了 57. 33% 和 52. 58%,这是由于东南部区县的农业人口基数大,大量农业人口向城市人口转化,农业人口急剧下降. 而农村生活和农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷与农业人口呈正相关, 2012 ~ 2013 年农业人口在空间上的不均匀减少导致了沱江流域 TN 污染负荷重心由东南向西北方向移动。

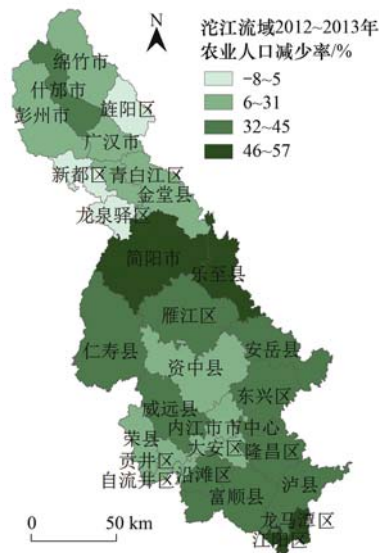


图 9 2012 ~ 2013 年沱江流域各区县农业人口减少率
Fig. 9 Reduction rate of agricultural population in counties of the Tuojiang River basin during 2012-2013

3. 2. 4 TN 总污染负荷及各污染源污染负荷转移范围
本研究运用 ArcGIS 最小几何边界工具分别计算出 2007 ~ 2017 年间沱江流域各污染源 TN 污染负荷重心的最小边界圆,进而反映污染源污染负荷变化的重点识别区域. 结果如图 10 所示,圆圈面积越大,说明累计转移范围越大,其污染源污染负荷变化的重点识别区域也越大. 农村生活和农村生

活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心转移范围达 66. 35 km²,是污染源污染负荷变化的重点识别区域. 城市化进程加快的显著特征是农业人口向城市人口转化,而沱江流域是人口密集区并且各主要城市分别于 2007 年前后进入城市化快速发展期^[47],使得这种转化尤为明显,进而驱动了农村生活、农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心大范围移动. 农田固废类、农田径流和畜禽养殖类污染源的 TN 污染负荷重心转移与沱江流域的农业经济发展有关,“三农”问题在 2004 年受到国家高度重视,减征或免征农业税逐步开始,农业技术投入力度加大,广大农户种粮积极性空前高涨^[48],粮食及经济作物产量及畜禽养殖量实现连年增长,这种变化在沱江东南部尤为明显,进而驱动了污染负荷重心的移动。

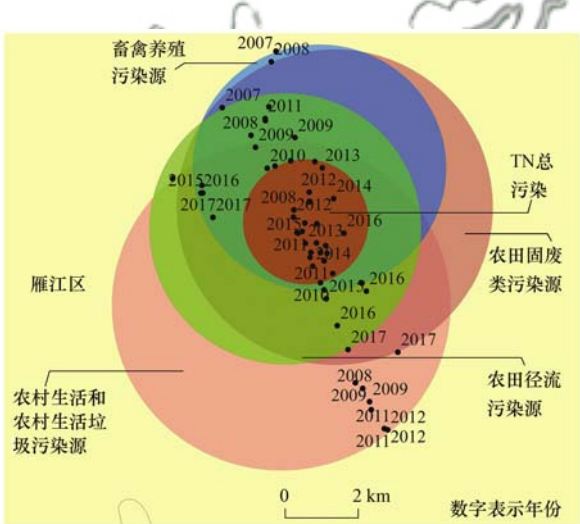


图 10 2007 ~ 2017 年沱江流域面源污染源 TN 污染负荷重心最小边界圆

Fig. 10 Boundary circle of TN pollution load center from non-point sources in the Tuojiang River basin during 2007-2017

4 讨论

本研究尝试性地将地学中的空间重心统计分析思想运用到流域污染负荷重心的计算上,并对连续时间内流域面源污染格局演变进行了研究,拓展了环境学领域在污染负荷时空变化上的分析方法. 该理论框架不仅能够从源头上追溯污染的产生,还更加直观地展示面源污染负荷时空演变特征,由此探明研究区需要进行重点污染治理及防控的区域和污染源,与传统污染负荷时空分布模拟模型相比具有数据要求低、操作简单和可移植性强等优点. 由于沱江流域的农业发达(农田面积占整个流域的 78% 以上),因此本研究利用各区县的几何重心为基准点来进行面源污染负荷重心移动分析,对于个别农田分布较少的区县其基准点的选取可能有一定的偏

差. 因此, 其它流域在应用本研究框架时应充分考虑流域自身的土地利用及其社会经济条件来选取空间重心统计的基准点, 进而更加精准地为水环境污染的预防和管理提供方向.

5 结论

(1) 沱江流域农村生活和农村生活垃圾污染源对整个流域 TN 污染负荷的贡献率呈逐年减少趋势, 农田固废和农田径流污染源的贡献率则呈增加趋势, 畜禽养殖污染源的贡献率每年均在 45% 以上, 是 TN 面源污染的主要污染源. 沱江流域 TN 总污染负荷总体呈下降趋势, 2010 年污染负荷最大, 达到 5.7×10^4 t, 2017 年最小, 为 4.6×10^4 t.

(2) 沱江流域东南部各区县的畜禽养殖、农田固废和农田径流污染源 TN 负荷变化幅度分别为 $-32.4\% \sim 21.9\%$ 、 $13.9\% \sim 184\%$ 和 $1.9\% \sim 31.5\%$, 西北部则分别为 $-74.7\% \sim 6\%$ 、 $-33.9\% \sim 108\%$ 和 $-49.7\% \sim 0.78\%$, 此外, 降雨径流呈现西北多东南少的空间分布特征, 污染负荷在空间上的异质性变化及降雨径流的不均匀分布驱使沱江流域畜禽养殖、农田固废类和农田径流污染源的 TN 污染负荷重心由西北向东南方向移动.

(3) 沱江流域主要城市分别于 2007 年前后进入城市化快速发展阶段, 促使流域东南部各区县的农业人口大量向城市人口转化, 进而驱动农村生活和农村生活垃圾污染源的 TN 污染负荷重心由东南向西北方向转移, 其转移范围达 66.35 km^2 , 由此确定的最小边界圆是污染源污染负荷变化的重点识别区域.

参考文献:

- [1] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 79-93.
Yang S T, Yu X Y, Ding J L, *et al.* A review of water issues research in Central Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 79-93.
- [2] Wu Y H, Liu J Z, Shen R F, *et al.* Mitigation of nonpoint source pollution in rural areas: from control to synergies of multi ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 1376-1380.
- [3] 张丽娟, 马友华, 王桂苓, 等. 农业面源污染中农田氮污染危害及其防治措施[J]. 农业环境与发展, 2010, **27**(4): 48-52.
- [4] 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 等. 水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4980-4986.
Liu S L, Peng H J, Yang J Y, *et al.* Removal of nitrogen and phosphorus from water by biomass carbon of aquatic plants[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4980-4986.
- [5] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(5): 937-946.
Cui C, Liu S, Zhai L M, *et al.* Estimates and spatio-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus discharges from agricultural sources in Xiangxi River Basin, Xingshan county [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(5): 937-946.
- [6] 庞树江, 王晓燕. 流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(18): 213-223.
Pang S J, Wang X Y. Application of modified diffuse total nitrogen export coefficient model at watershed scale [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(18): 213-223.
- [7] Fan M, Shibata H, Chen L. Environmental and economic risks assessment under climate changes for three land uses scenarios analysis across Teshio watershed, northernmost of Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 451-463.
- [8] Pulighe G, Bonati G, Colangeli M, *et al.* Predicting streamflow and nutrient loadings in a Semi-Arid Mediterranean watershed with ephemeral streams using the SWAT model[J]. *Agronomy*, 2020, **10**(1), doi: 10.3390/agronomy10010002.
- [9] 庞树江, 王晓燕, 马文静. 多时间尺度 HSPF 模型参数不确定性研究[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2030-2038.
Pang S J, Wang X Y, Ma W J. Research of parameter uncertainty for the HSPF model under different temporal scales [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2030-2038.
- [10] Yan C A, Zhang W C. Effects of model segmentation approach on the performance and parameters of the Hydrological Simulation Program- Fortran (HSPF) models [J]. *Hydrology Research*, 2014, **45**(6): 893-907.
- [11] 洪华生, 黄金良, 张璐平, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用[J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 63-69.
Hong H S, Huang J L, Zhang L P, *et al.* Modelling pollutant loads and management alternatives in Jiulong River watershed with AnnAGNPS [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 63-69.
- [12] Shen Z Y, Qiu J L, Hong Q, *et al.* Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 138-146.
- [13] Ma G W, Wang S R. Temporal and spatial distribution changing characteristics of exogenous pollution load into Dianchi Lake, Southwest of China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3781-3793.
- [14] Sharma A, Tiwari K N. Predicting non-point source of pollution in Maithon reservoir using a semi-distributed hydrological model [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, **191**(8), doi: 10.1007/s10661-019-7674-y.
- [15] 杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1366-1375.
Yang B, He B H, Wang D B. Hanfeng Pre-reservoir commissioning time variation feature of the hydrology and water quality in Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1366-1375.
- [16] 耿润哲, 李明涛, 王晓燕, 等. 基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(16): 241-250.
Geng R Z, Li M T, Wang X Y, *et al.* Effect of land use/landscape changes on diffuse pollution load from watershed based on SWAT model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(16): 241-250.
- [17] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2296-

- 2306.
- Li M T, Wang X Y, Liu W Z. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohu River Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2296-2306.
- [18] 宋大平, 左强, 刘本生, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(6): 1219-1231.
- Song D P, Zuo Q, Liu B S, *et al.* Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: a case study of the Huaihe River Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **37**(6): 1219-1231.
- [19] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 汉阳非点源污染控制区划[J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 31-36.
- Yang L, Ma K M, Guo Q H, *et al.* Zoning planning in non-point source pollution control in Hanyang district[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(1): 31-36.
- [20] 丘雯文, 钟涨宝, 原春辉, 等. 中国农业面源污染排放的空间差异及其动态演变[J]. *中国农业大学学报*, 2018, **23**(1): 152-163.
- Qiu W W, Zhong Z B, Yuan C H, *et al.* Spatial differences and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, **23**(1): 152-163.
- [21] 吴义根, 冯开文, 李谷成. 我国农业面源污染的时空分异与动态演进[J]. *中国农业大学学报*, 2017, **22**(7): 186-199.
- Wu Y G, Feng K W, Li G C. Spatial-temporal pattern and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, **22**(7): 186-199.
- [22] 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.
- [23] 肖智, 黄贤金, 孟浩, 等. 2009-2014 年中国茶叶生产空间演变格局及变化特征[J]. *地理研究*, 2017, **36**(1): 109-120.
- Xiao Z, Huang X J, Meng H, *et al.* Spatial structure and evolution of tea production in China from 2009 to 2014[J]. *Geographical Research*, 2017, **36**(1): 109-120.
- [24] 胡芸芸, 王永东, 李廷轩, 等. 沱江流域农业面源污染排放特征解析[J]. *中国农业科学*, 2015, **48**(18): 3654-3665.
- Hu Y Y, Wang Y D, Li T X, *et al.* Characteristics analysis of agricultural nonpoint Source Pollution on Tuojiang River Basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(18): 3654-3665.
- [25] 符东, 吴雪菲, 易珍言, 等. 沱江水质模糊综合评价及主要污染物的预测研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(12): 2844-2852.
- Fu D, Wu X F, Yi Z Y, *et al.* Fuzzy comprehensive assessment of water quality and prediction of main pollutants in the Tuo River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(12): 2844-2852.
- [26] 汪嘉杨, 郭倩, 王卓. 岷沱江流域社会经济的水环境效应评估研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1564-1572.
- Wang J Y, Guo Q, Wang Z. Study on the evaluation of water environment effects on society- economy of Mintuo River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1564-1572.
- [27] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- Wang H, Xu Y L, Zhang Q, *et al.* Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical agricultural small watershed in Tuojiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- [28] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J]. *地球科学*, 2020, **45**(6): 1937-1947.
- Xu J, Wang Y G, Chen Y, *et al.* Characteristics on spatiotemporal variations of surface water environmental quality in Tuojiang River in upper reaches of Yangtze River Basin[J]. *Earth Science*, 2020, **45**(6): 1937-1947.
- [29] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1159-1168.
- [30] 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.
- [31] 郭珊珊, 张涵, 杨汝馨. 基于耕地承载力的畜禽养殖污染负荷及环境风险研究——以四川省为例[J]. *水土保持通报*, 2019, **39**(1): 226-232.
- Guo S S, Zhang H, Yang R X. Pollutant loads and environmental risks of livestock production based on arable land carrying capacity—A case study in Sichuan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(1): 226-232.
- [32] 国家环境保护总局. 关于减免家禽业排污费等有关问题的通知: 环发[2004]43号[EB/OL]. <https://hk.lexisn.com/law/law-chinese-1-56218.html? crid=279a6599-8640-37a8-baef-bc32984eed40&prid=2004-03-15>.
- [33] 张鹏远, 苟楚璇, 巫杨, 等. 四川凯江流域农村非点源污染特征分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(5): 398-404.
- Zhang P Y, Gou C X, Wu Y, *et al.* Characteristics of rural non-point source pollution in Kaijiang Basin of Sichuan Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(5): 398-404.
- [34] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[M]. 北京: 中国环境规划院, 2003.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 西南地区农村生活污水处理技术指南[M]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.
- [36] 国家环保总局. 主要水污染物总量分配指导意见: 环发[2005]185号[EB/OL]. http://www.110.com/fagui/law_196504.html, 2006-11-27.
- [37] 钱秀红, 徐建民, 施加春, 等. 杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查和评价[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2002, **28**(2): 147-150.
- Qian X H, Xu J M, Shi J C, *et al.* Comprehensive survey and evaluation of agricultural nonpoint source pollution in Hang-Jia-Hu water-net plain[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2002, **28**(2): 147-150.
- [38] 韩智勇, 费勇强, 刘丹, 等. 中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(15): 1-14.
- Han Z Y, Fei Y Q, Liu D, *et al.* Yield and physical characteristics analysis of domestic waste in rural areas of China and its disposal proposal[J]. *Transactions of the Chinese Society*

- of Agricultural Engineering, 2017, **33**(15): 1-14.
- [39] 岳波, 张志彬, 孙英杰, 等. 我国农村生活垃圾的产生特征研究[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(6): 129-134.
Yue B, Zhang Z B, Sun Y J, *et al.* Characteristics of rural household solid wastes in China[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(6): 129-134.
- [40] 李杰霞, 杨志敏, 陈庆华, 等. 重庆市农业面源污染负荷的空间分布特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, **30**(7): 145-151.
Li J X, Yang Z M, Chen Q H, *et al.* Spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2008, **30**(7): 145-151.
- [41] 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 of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, **44**(9): 1184-1187.
- [42] 李占斌, 张秦岭, 李鹏, 等. 丹汉江流域水土流失非点源污染过程与调控研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [43] 丁镭, 黄亚林, 刘云浪, 等. 1995-2012 年中国突发性环境污染事件时空演化特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(6): 749-760.
Ding L, Huang Y L, Liu Y L, *et al.* Spatiotemporal variability of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China, 1995-2012 [J]. Progress in Geography, 2015, **34**(6): 749-760.
- [44] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(5): 1-11.
Yang F, Yang S Q, Zhu Y Q, *et al.* Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(5): 1-11.
- [45] Henkens P L C M, Van Keulen H. Mineral policy in the Netherlands and nitrate policy within the European Community [J]. NJAS- Wageningen Journal of Life Sciences, 2001, **49**(2-3): 117-134.
- [46] 聂超, 倪福全, 邓玉, 等. 岷沱江流域径流对气候和土地利用变化的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(3): 110-118.
Nie C, Ni F Q, Deng Y, *et al.* Response of runoff to climate and land use change in Minjiang and Tuojiang River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, **31**(3): 110-118.
- [47] 谢贤健. 沱江流域城市化水平的综合评价及其时空演化特征[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(22): 13773-13776.
Xie X J. Synthesized evaluation and tempo-spatial evolution characteristics of Urbanization Level in Tuojiang River Watershed [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(22): 13773-13776.
- [48] 樊蓉. 经济新常态下我国农业政策转型研究[J]. 农业经济, 2019, (6): 6-8.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)