

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精催化 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法：以铜陵市顺安河流域为例

刘国王辰, 陈磊*, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 长江经济带发展是我国重要国家战略,但面临着水环境保护难度大、污染来源不清和措施集成度低等问题. 针对流域尺度多源污染协同治理面临的方法瓶颈,结合资料调研分析、机制模型模拟和智能算法优化,构建了“污染精准溯源-措施效果评价-措施整体优化”为主体的流域水环境保护框架,并以安徽省铜陵市顺安河流域为例进行了方案应用. 结果表明,新框架可精准量化流域内种植业、农村生活、畜禽养殖、水产养殖、工业废水和生活污水的贡献,并评价多种防控措施及其集成的总体效果;多目标优化蛙跳算法通过系统对比多种方案的成本效益,提供了性价比高的流域多源污染协同治理方案,如通过合理投资可使顺安河流域总氮在丰、平和枯水年分别削减1 274.24、855.24和381.96 t·a⁻¹,总磷削减321.42、159.80和42.93 t·a⁻¹,保障水质达到地表Ⅲ类水质标准. 新框架可推广到其他流域,为流域高质量发展背景下的水环境保护提供模式参考.

关键词: 长江经济带; 非点源污染; 点源污染; SWAT模型; 多目标优化; 流域高质量发展

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3835-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207102

Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City

LIU Guo-wangchen, CHEN Lei*, LI Jia-qi, ZHANG Yu-chen, ZHAO Yi-xin, LIU Yan-qi, SHEN Zhen-yao

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The protection of the Yangtze River is an important national strategy in China, but it faces many problems such as difficult water environment protection, unclear pollution sources, and low integration of measures. Aimed at addressing watershed scale multi-source pollution together with facing the bottleneck method, by combining research data analysis, mechanism model, and intelligent algorithm optimization, this study built the framework for accurate pollution apportionment, measures evaluation, and overall measure optimization. Shun'an watershed in Tongling City of Anhui Province was set as an example for the application. The results showed that the new method could accurately quantify the impacts of planting industry, rural life, livestock and poultry breeding, aquaculture, industrial sewage, and domestic sewage in the watershed and evaluate the overall effects of various measures. The multi-objective optimization algorithm provided a cooperative multi-source pollution control scheme with higher cost performance and better environmental benefit by comparing the cost effectiveness of various schemes systematically. The optimization scheme showed that total nitrogen could be reduced by 1 274.24 t·a⁻¹ in wet years, 855.24 t·a⁻¹ in normal years, and 381.96 t·a⁻¹ in dry years. Total phosphorus was reduced by 321.42 t·a⁻¹ in wet years, 159.80 t·a⁻¹ in normal years, and 42.93 t·a⁻¹ in dry years, such that the water quality reached the surface class Ⅲ water quality standard. These research results can be extended to other watersheds and provide a method reference for water environment protection under the background of the high-quality development of watersheds.

Key words: Yangtze River Economic Belt; nonpoint source pollution; point source pollution; SWAT model; multi-objective optimization; high quality development of watershed

长江作为中国第一大河、世界第三大河,拥有丰富的水资源储量和水生生物资源,在国家层面的协调发展总体格局中具有重要战略地位^[1]. 长江流域作为中国人口集聚多、经济体量大、发展潜力足地区,在协调区域发展、培育增长动能、优化空间结构中发挥重要的战略支撑作用^[2~5]. 改革开放以来,长江经济带在经济发展方面取得了巨大成就,伴随而来的是严重的环境污染问题,沿江生态环境承载能力减弱、沿岸居民的生产生活面临严峻挑战,长江经济带发展模式的转变迫在眉睫^[6~8].

在长江经济带流域生态环境治理过程中,这些流域多存在以下问题:①农业生产导致的面源污染仍然严重^[9~11];②点源污染伴随着人口增长而持续增加^[12,13];③环境、生态、水保等多种治理措施协调困难^[14]. 这就导致在实际治理中存在精准污染溯

源难度较大和协同治理缺乏合理方法的技术瓶颈^[15~17]. 污染溯源方法一般分为野外监测法、模拟实验法和模型模拟法^[18,19]. 前两种方法虽然能够提供较为准确的结果,但是由于耗费大量人力物力、难以长期实施和无法进行情景模拟等问题,在实际流域管理中应用较少,大多作为溯源模型构建的数据基础^[20~23]. 常用污染溯源模型中,SWAT(soil and water assessment tool)^[24~28]、SWMM(storm water management model)^[29~31]和HSPF(hydrological simulation program fortran)^[32~34]等机制模型相比于

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-09-12

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(52221003); 国家自然科学基金项目(42277044)

作者简介: 刘国王辰(1996~),男,博士研究生,主要研究方向为流域面源污染与水环境修复, E-mail: liuguowangchen@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: chenlei1982bnu@bnu.edu.cn

经验统计模型具有更准确的模拟效果,适用于不同类型流域的污染精细化溯源.而污染协同治理则需要通过对污染源明确污染源的分布情况,针对重点区域重点污染源采取相应的防控措施^[35~37].无论是场地实验还是模型模拟,流域污染防控已经有了相对成熟的技术体系.如吴鹏等^[38]评价了植被过滤带对于农业径流污染物的截留效率;王沛芳等^[39]通过实地监测探究了水塘湿地系统对于氮的截留效率;Walton 等^[40]探究了不同类型湿地缓冲区对于氮磷的滞留作用.针对点源污染防控问题,刘杰等^[41]利用 MIKE11 模型模拟了重庆肖家河流域各污水厂的提标改造效果对于监测断面的影响;李学科^[42]识别出污水厂尾水、沿河直排污水是肇庆东排渠水污染的主要原因,并提出污水厂提标、截污补水等策略.虽然不同防控方案均有了长足发展,但是针对多污染源溯源模拟集成度不高,其协同防控体系仍然有极大的空缺. Rodriguez 等^[43]用多目标遗传算法(NSGA-II)实现了不同水平最佳管理措施的优化配置; Taghizadeh 等^[44]利用多目标粒子群算法(MOPSO)构建了基于绿色基础设施的城市径流控制模型.总的来说,污染溯源机制模型和多目标优化方法已有较为广泛的应用,但是存在计算方法老旧,防控情景模拟能力弱和“溯源模拟-优化防控”过程

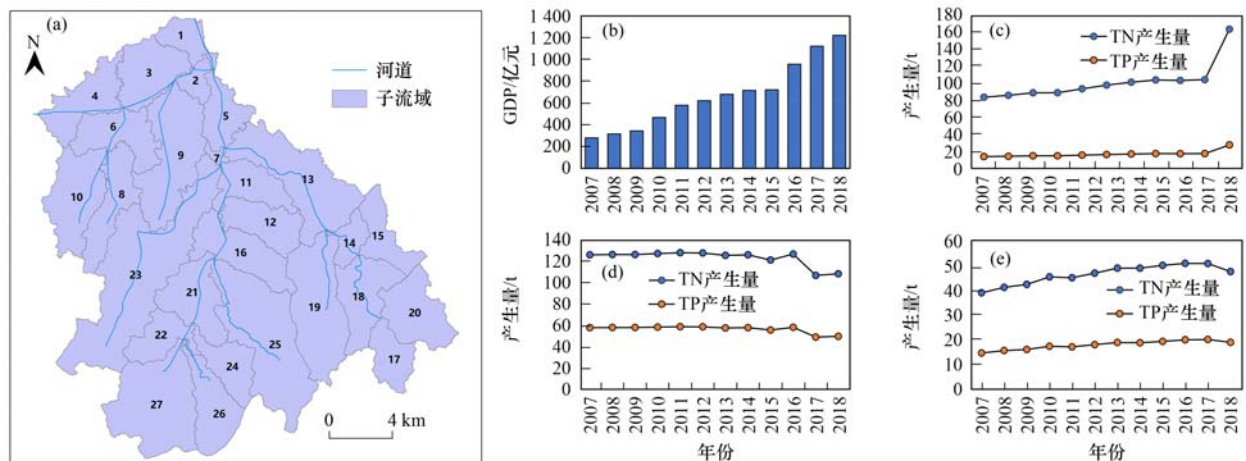
耦合困难等问题.

针对以上问题,本研究以铜陵市顺安河流域为例,构建了以“污染精准溯源-措施效果评价-措施整体优化”为核心的流域管控模式,通过流域氮磷污染特征分析、防控措施效果评价、不同类型措施集成优化,旨在为流域综合治理提供模式参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

顺安河位于安徽铜陵境内,发源于铜陵、青阳两县交界的天门山北麓,流经天门和顺安两镇,从龚家渡经繁昌县境内的荻港河与黄浒河合流入长江.顺安河全长 54 km,流域面积 476 km²,整体位于长江中下游平原与皖南山区的交接地带.本研究将顺安河流域按照水文关系划分为 27 个子流域[图 1(a)].顺安河流域所在的铜陵市近年来发展迅猛,GDP 近 10 年呈现爆发性增长,由 2007 年的 278.79 亿元增长到 1 222.40 亿元[图 1(b)],增长近 5 倍.虽然铜陵市的经济快速发展,但是其水产养殖、农村生活和畜禽养殖[图 1(c)~1(e)]等领域面源污染产生量并没有得到有效控制,再结合流域内工业迅速发展导致点源污染产生量增加,顺安河流域正面临着前所未有的环境压力与生态挑战.



(a) 顺安河流域划分; (b) 铜陵市 GDP 变化; (c) 铜陵市水产养殖氮磷产生量; (d) 铜陵市农村生活氮磷产生量; (e) 畜禽养殖氮磷产生量

图 1 顺安河地图、经济发展和产业发展情况

Fig. 1 Shun'an Watershed map, economic development, and industrial development

模型中模拟所需的 30 m × 30 m 尺度的 DEM 数据来自于国家基础地理信息中心; 1:100 万的土壤类型与土地利用从中国科学院资源环境科学中心获取.水文、水质和气象数据由铜陵市水文局与生态环境局提供; 污染排放涉及的面源核算数据与参数和点源排放数据,以及相应污染防控策略相关数据,通过实地调查获取或由当地生态环境部门提供.

1.2 流域污染溯源防控方法构建

1.2.1 方法框架介绍

针对研究区氮磷污染问题,本研究构建了流域污染溯源防控模型,基本框架如图 2 所示.

该模型主要由 3 部分构成:基础数据库建立、污染核算与情景模拟、流域综合治理优化.首先,搜集流域数据信息,建立空间数据库、属性数据库、措施数据库用以支持后续模型构建.然后,核算流域

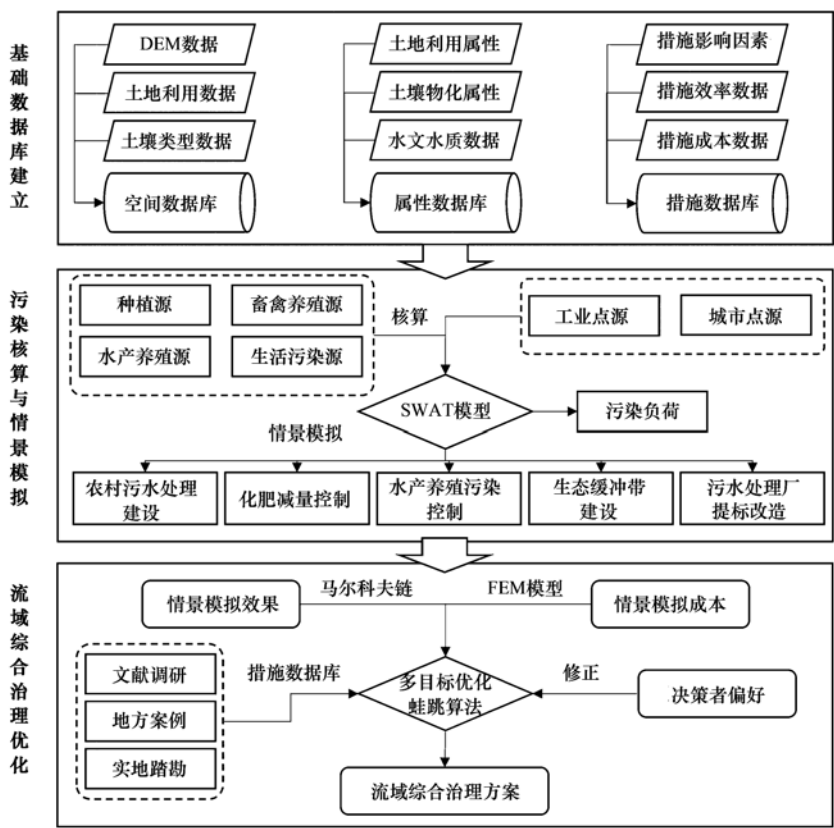


图2 流域氮磷污染溯源防控框架

Fig. 2 Framework of source apportionment and control model of nitrogen and phosphorus pollution in watershed

面源与点源负荷并利用 SWAT 模型量化不同污染源削减效果. 最后,通过多目标优化蛙跳算法作为计算引擎,考虑当地措施数据库与决策者偏好等因素,构建流域综合治理方案.

1.2.2 溯源方法构建

本研究将顺安河流域污染类型主要划分为 6 类,即:种植业污染、水产养殖业污染、畜禽养殖业污染、农村生活污染、城市点源污染和工业点源污染,并通过污染源核算方法确定各来源污染物的排放量及空间分布情况,核算出各污染源所产生的氮磷总量.

(1)种植业污染 基于铜陵统计年鉴,获得各年各区县氮肥、磷肥及复合肥施用量,利用 SWAT 模型进行种植业总氮、总磷流失量的计算. 其中复合肥按照氮磷钾通用比 1:1:1 来计算,即:

$$F_N = N_L + C_L \times 1/3 \tag{1}$$

$$F_P = P_L + C_L \times 1/3 \tag{2}$$

式中, F_N 为氮肥总量; N_L 为氮肥施用折纯量; F_P 为磷肥总量; P_L 为磷肥施用折纯量; C_L 为复合肥施用折纯量; 以上单位均为 kg.

(2)水产养殖业污染 根据全国污染源普查中水产养殖业污染源产排污系数手册,确定水产养殖源的产污系数与流失系数,结合当地水产养殖规模,通过铜陵市统计年鉴(2014、2017 和 2019 年)可获

取铜陵市水产养殖情况,估算出当地水产养殖污染源所产生的氮磷总量. 水产养殖的总氮产污系数为 $4.225\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷产污系数为 $0.722\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 总氮流失系数为 $2.593\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷流失系数为 $0.464\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(3)畜禽养殖业污染 根据当地社会调查结果以及对应年份统计年鉴可获取铜陵市各种类型畜禽存栏情况. 结合相关文献查阅^[45],可获取适用于顺安河流域畜禽养殖的产污、排污和流失系数,最终可确定当地畜禽养殖污染源所产生的氮磷总量.

(4)农村生活污染 通过对应年份统计年鉴可获取铜陵市农村常住人口情况,并结合当地区划确定流域内人口数量. 再结合文献^[46],确定农村生活源的产、排污系数和流失系数,最终可确定当地农村生活污染所产生的氮磷总量.

(5)城市点源污染 基于全国污染源普查结果,调查铜陵市义安区、铜官区和铜陵经济技术开发区城市污水处理厂的个数及生活排口个数,计算城市生活和城市径流所产生的氮磷总量.

(6)工业点源污染 基于全国污染源普查结果,调查铜陵市义安区、铜官区和铜陵经济技术开发区排放企业,以及排污进入污水处理厂和直接排放的个数,计算城市工业所产生的氮磷总量.

1.2.3 防控措施评价

SWAT 模型是由美国农业研究部农业研究中心开发、具有很强物理机制的分布式水文模型^[47]。模型根据流域高程将流域划分为若干子流域,每一个子流域根据土地利用、土壤和坡度的不同进一步划分为不同的水文响应单元。SWAT 模型可用于模拟水质水量、预测土地管理措施对流域的水文、泥沙和氮磷污染物的影响,是当前较为常用的流域氮磷污染防控措施模拟模型之一。

通过上述污染溯源分析,顺安河流域总磷污染主要来自农业面源,因此水环境治理应从以下 4 个方面入手:“点源”污染整治、“线源”污染整治、“面源”污染整治和生态修复措施,筛选出 5 类典型措施,具体方案如下。

(1)农村污水处理建设 农村污水处理参考了 Yang 等^[48]的模拟方法。首先需确定工程所在位置及其对应的流域和子流域。然后,按照 SWAT 模型中子流域点源污染的输入确定削减量,其中对于缺乏具体信息的污水处理建设按照污染源普查结果进行污染削减模拟。最后,通过编写脚本的形式修改 SWAT 模型中的 .dat 文件,实现农村污水处理建设工程的模拟。

顺安河流域内的 48 个建制村中,共有 21 个建制村建设了 43 座分散式污水处理设施(处理规模 $15 \sim 70 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)和 5 座集中式污水处理设施(处理规模 $40 \sim 400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)。针对上述农村小型污水处理设施的调研发现,上述 21 个建制村中,实际建设分散式污水处理设施共 34 座(处理规模 $10 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),集中式污水处理设施 3 座(处理规模 $150 \sim 400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)。其中,21 座设施位于西联镇,9 座设施位于顺安镇,6 座设施位于东联镇,另有 1 座位于天门镇。第一阶段为农村污水初级防控建设方案,主要是对农村现有污水处理设施的处理效果进行评估,模拟当前情景下污水处理设施的最大效能;第二阶段为农村污水高级防控建设方案,主要是对农村污水处理设施较为完备的情况下,模拟核算出氮磷的削减情况。

(2)化肥减量控制 化肥减量控制方法参考了 Yang 等^[48]在 SWAT 模型中对化肥修改的方法。该方法主要通过修改 FERT_ID 参数实现肥料类型的调整,采取减量施肥、有机肥还田等;通过修改 FRT_KG 参数实现施肥量的修改,可完成区域施肥减量的模拟。根据顺安河流域污染总量核算结果显示,种植业污染比重较高。化肥减量控制模拟主要有两种:第一种是假设化肥施用效益提高,减少化肥施用量,评估污染防治效果;第二种是畜禽粪便还田,并且

该方法可行性更强。

根据铜陵市统计年鉴可得,铜陵市主要农作物的类型为水稻,因此本研究仅考虑水稻这一种作物,依据水稻的生长规律,水稻在生长的过程中主要有 3 个阶段需要施肥:在播种前需要施肥(即基肥),在生长期需要施肥(即分蘖肥),在抽穗收割前需要施肥(即穗肥),根据统计结果,顺安河流域基肥的每亩施用量为 300 kg,分蘖肥和幼穗分化肥施用量分别为 150 kg,并且施肥的氮磷比为 3.55。为保持粮食产量的相对稳定,设置肥料的最大减量比例为 60.00%。即将基肥施用量削减到 120 kg,分蘖肥和幼穗分化肥施用量削减到 60 kg。修改 SWAT 模型中 FRT_KG 参数来实现施肥量的削减。

畜禽粪便为有机肥,有机肥通常作为基肥施用,所以有机肥的替代顺序为优先替代基肥中的化肥比例,后者是分蘖肥,在有机肥替代化肥进行施用时,每日输入耕地的负荷需按相应替代量在原始条件下有所减少。根据统计结果,采用的肥料类型氮磷比为 3.54,并构建两个层次的有机肥替代化肥方案:70% 畜禽粪便还田和 100% 畜禽粪便还田。

(3)水产养殖污染控制 水产养殖污染控制参考了李铁军等^[49]的研究思路。首先需确定水产养殖区域所在位置及其对应的流域和子流域。然后,按照 SWAT 模型中子流域点源污染的输入做相应污染削减。最后,通过编写脚本的形式修改 SWAT 模型中的 .dat 文件,实现水产养殖污染控制的模拟。

水产养殖业主要是假设鱼类能够提高饲料的利用效率,朱崇梅等^[50]指出水产养殖饲料投喂有效量占 30%,并且如果施洒的饲料能够完全被鱼类利用,可将水产污染排放削减量提高至 70%,模拟此情况下顺安河流域氮磷污染削减情况。

(4)生态缓冲带建设 生态缓冲带建设参考了 Liu 等^[14]的思路,通过对措施参数 VFS_ops 进行修改或对于 FILTERW 参数(缓冲过滤带宽度)进行修改,实现对于生态缓冲带建设的模拟。模拟过程为在 27 个子流域设置生态缓冲带,耕地面积是缓冲带面积的 40 倍,并且假设每个子流域有 50% 的地表径流至少会经过 10% 的过滤带面积。

(5)城市污水厂提标改造 城市污水处理建设参考了杜娟等^[51]对于点源的模拟方法。首先,需确定城市污水处理建设工程所在位置及其对应的流域和子流域。然后,按照 SWAT 模型中子流域点源污染的输入确定削减量,最后,通过编写脚本的形式修改 SWAT 模型中的 .dat 文件,实现城市污水处理建设工程的模拟。城市污水厂污染防治模拟主要是通过假设污水处理厂经过提标改造后,可以达到地表

水 V 类标准,及 TN 浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 顺安河流域一共有两个污水处理厂,分别为铜陵首创排水有限责任公司和狮子山污水处理厂,并且分别位于 1 号和 16 号子流域,已知经污水厂处理后的污水总磷能够达到地表水 V 类标准,因此对城市污水厂进行提标改造,主要是假设经过这两个污水处理厂处理过后的污水总氮能达到地表水 V 类标准,并且进行模拟评估工作。

1.2.4 措施优化集成

针对流域特点,以混合蛙跳算法(shuffled frog leaping algorithm, SFLA)作为计算引擎,实现流域各类措施的模拟优化. 为了保证计算效率,通过引入马尔可夫链模型加速优化过程。

SFLA 算法综合了模因算法(memetic algorithm, MA)和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)的优点,耦合全局寻优和局部寻优过程,具有概念简单、参数少、计算速度快、寻优能力出色和鲁棒性强等特点,已经在函数优化、生产调度、网络优化和图像处理等方面广泛应用. 本研究结合 Pareto 思想构建了多目标蛙跳算法(MOSFLA),将 SFLA 方法拓展至多目标优化问题. 在实际优化问题中,分别将负荷(L)和措施成本(C)设为两个优化目标进行模拟与优化,即寻求同时满足最小污染负荷与最小措施成本的措施配置模式,具体表达如下:

$$\begin{cases} \text{minimize } L = f(x | y, a, p) \\ \text{minimize } C = g(x | y, a, p) \end{cases} \quad (3)$$

式中, x 为每个措施的配置; y 为措施类型; a 为措施位置; p 为措施性能。

2 结果与讨论

针对铜陵市顺安河流域,本研究首先通过污染源核算方法确定各来源排放量及空间分布,并利用 SWAT 模型作为方法基础构建顺安河溯源模型,进行子流域尺度溯源研究. 通过对顺安河流域降水量进行统计分析,发现 2016 年年均降水量为 2393.70 mm ,为典型的丰水年; 2018 年年均降水量为 1105.00 mm ,为典型的枯水年; 2013 年年均降水量为 1323.00 mm ,为典型的平水年。

2.1 顺安河溯源结果分析

本研究分别从负荷和排放量两个角度分析流域氮磷污染的空间分布情况. 将各子流域的氮磷污染划分为 5 级,颜色越深代表污染越严重. 同时将顺安河流域 2018 年点源氮磷负荷以柱状图的形式展现。

2016 年为典型的丰水年,由图 3(a)可知,顺安河流域总氮负荷最大的区域是 13、23、25 和 27 号子流域,达到 $138.40 \sim 283.59 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,这些子流域分

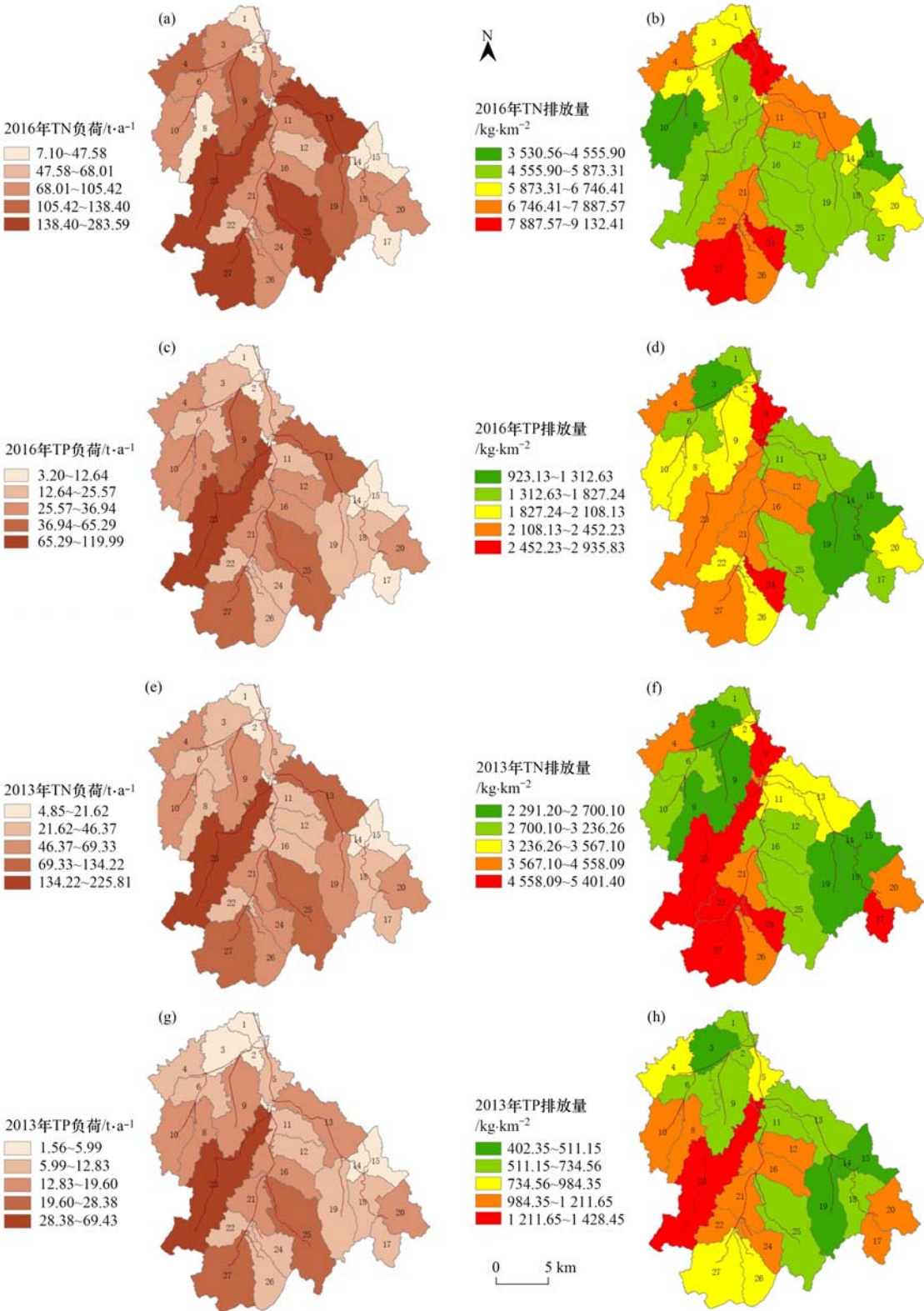
别位于新桥河全段、红星河全段、东边河全段和西边河上游,应加大这些流域的面源污染控制. 图 3(c)表明 2016 年顺安河流域总磷负荷最严重的区域为 23 号子流域,位于红星河全段. 其余污染较为严重的则分别是 9、13、25 和 27 号子流域,主要位于东湖中心河上中游、新桥河全段、西边河上游和东边河全段. 2013 年是典型的平水年,顺安河流域氮磷负荷最大的区域均为 23 号子流域,分别达到 $225.81 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $69.43 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,位于红星河全段. 其余污染较为严重的则分别是 13、25 和 27 号子流域,主要位于新桥河全段、西边河上游和东边河全段. 2018 年为典型的枯水年,可发现 23 号子流域氮磷负荷仍然较高,其次是位于西边河上游区域的 27 号子流域. 城市点源污染主要产生在 1 号子流域,这主要是由于污水处理厂排放的处理后的城市污水,其余的如 10、16、17 和 19 号等子流域也有城市点源污染产生,但污染量不大,其主要是位于该子流域的工业排污口排放废水造成的。

图 3(b)表明丰水年顺安河流域总氮排放量最大的子流域为 2、5、24 和 27 号子流域,达到 $7887.57 \sim 9132.41 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$. 其中 2 号和 5 号子流域的总氮负荷并不是很大;而原本总氮负荷较为严重的 23 号子流域,其排放量较小,这主要和流域面积有关. 2016 年顺安河流域总磷排放量最大的区域为 5 号和 24 号子流域,达到 $2452.23 \sim 2935.83 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,分别位于顺安河干流下游以及西边河中游. 平水年顺安河流域总氮排放量污染最严重的区域是 5、17、22、23、24 和 27 号子流域,其污染等级达到 5 级,排放量达 $4558.09 \sim 5401.40 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$. 分别位于顺安河干流下游、新西河上游、西边河和红星河全程. 顺安河流域总磷排放量污染最大的子流域为 23 号,达到 $1428.45 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,位于红星河全程,8、10、12、16、17、20、21、22 和 24 号污染较为严重,达 $984.35 \sim 1211.65 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,其主要位于西湖大沟上游、顺安河干流中游以及新西河上游. 枯水年顺安河流域总氮排放量污染最大的子流域为 17、22、23 和 24 号,达到 $1587.60 \sim 2485.1 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,分别位于新西河上游、西边河与东边河交汇处以及红星河全程;而 14 号和 19 号子流域污染最轻,主要位于盛冲河全段和新桥河上游. 枯水年总磷排放量污染最大的子流域为 17、22、23 和 24 号,达到 $424.62 \sim 638.52 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,分别位于新西河上游、西边河以及红星河全程;2、3、13、14 和 19 号子流域总磷排放量最小,分别位于钟仓河中下游、新桥河全段和盛冲河全段。

总的来说,无论在丰水年、平水年和枯水年,23

号流域所在的红星河区域面源污染严重,应该加大治理力度.通过污染源分析可知(图4),23号子流域畜禽养殖业污染占比最高,氮、磷占比分别为

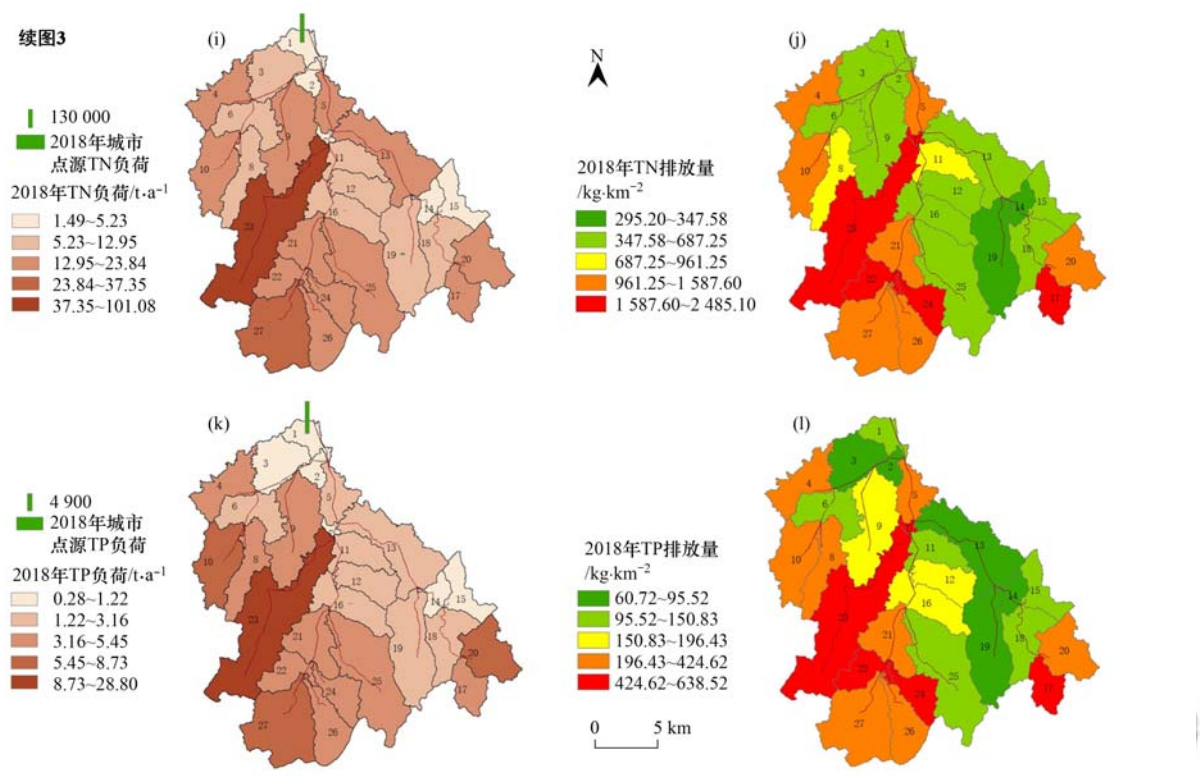
44.62%和56.44%;其次是水产养殖污染,氮磷占比分别为22.50%和14.75%;种植业氮磷占比分别为20.76%和13.77%;农村生活氮磷占比分别



(a)~(d)分别表示丰水年总氮负荷、总氮排放量、总磷负荷和总磷排放量;(e)~(h)分别表示平水年总氮负荷、总氮排放量、总磷负荷和总磷排放量;(i)~(l)分别表示枯水年总氮负荷、总氮排放量、总磷负荷和总磷排放量

图3 顺安河流域丰、平和枯水年氮磷负荷及排放量

Fig. 3 Load and discharge of TN and TP in wet, normal, and dry years in the Shun'an Watershed



为 11.86% 和 14.99%。1 号子流域存在污水处理厂,所以点源污染占比较高,氮磷分别为 69.80% 和 24.00%。由于 1 号子流域靠近顺安河入江口,可以针对该区域的点源污染进行合理控制。同时西边河、东边河和新桥河污染也较为严重,应该提高监管与防控。但从 2018 年的污染源解析结果看,新桥河的污染情况有所改善,但仍然不能松懈。

2.2 顺安河措施效果分析

顺安河流域污染防控措施参考了当地的水质治

理相关文件,并按照点源措施、线源措施、面源措施和生态修复这 4 点进行分析。措施情景效果模拟如表 1 所示。

农村生活污水处理设施的建设主要削减农村生活源污染物,根据现有的农村生活污水处理设施建设情况,将农村生活污染源污染物按各子流域点源形式输入到 SWAT 模型中。模拟结果表明,在枯水年农村生活污染源总氮削减 2.71 t·a⁻¹,削减率为 0.44%,总磷削减 1.44 t·a⁻¹,削减率为 1.63%;平水年总氮削减 3.95 t·a⁻¹,总磷削减 1.92 t·a⁻¹;丰

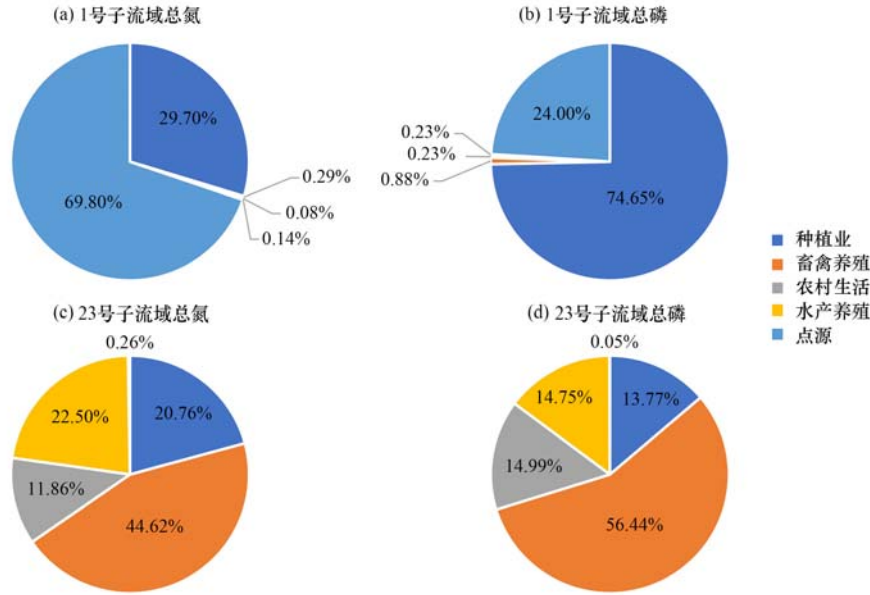


图 4 1 号子和 23 号流域各污染源占比

Fig. 4 Proportion of pollution sources in No. 1 and No. 23 sub-watersheds

水年总氮削减 $5.49 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减 $4.74 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. 假设顺安河流域所有农村建有污水处理设施, 将农村生活污染源污染物分配到顺安河各子流域, 把各子流域按照点源污染情况输入到 SWAT 模型中, 进行 SWAT 模型模拟, 得到顺安河流域出口断面污染物

产生量. 模拟结果表明, 枯水年农村生活污染源总氮削减 $14.37 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 削减率为 2.33% , 总磷削减 $7.67 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 削减率为 8.67% ; 平水年总氮削减 $20.92 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减 $10.21 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 丰水年总氮削减 $29.06 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减 $25.21 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$.

表 1 顺安河流域措施情景效果模拟/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$

类型	丰水年削减量		平水年削减量		枯水年削减量	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP
农村污水初级防控建设	5.49	4.74	3.95	1.92	2.71	1.44
农村污水高级防控建设	29.06	25.21	20.92	10.21	14.37	7.67
化肥减量施用	142.93	106.67	102.90	43.19	70.65	32.44
70% 畜禽粪便还田	211.78	176.46	152.47	71.44	104.69	53.66
100% 畜禽粪便还田	233.61	191.56	168.18	77.56	115.48	58.25
水产养殖防控建设	80.70	36.06	58.10	14.60	39.89	10.97
生态缓冲带建设	162.02	65.59	142.61	57.74	80.09	43.37
污水处理厂提标改造	588.58	— ¹⁾	423.73	—	290.94	—

1) “—”表示污水厂 TP 出水已达到相关标准, 故无需考虑污染削减

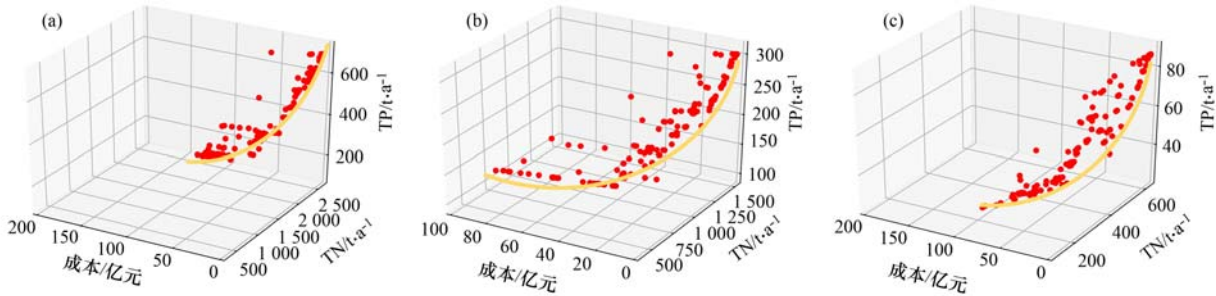
70% 畜禽粪便还田情景下, 枯水年顺安河流域出口断面总氮削减量为 $104.69 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总氮总量的 16.98% , 总磷削减量为 $53.66 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总磷总量的 60.68% ; 丰水年总氮削减量为 $211.78 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减量为 $176.46 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 平水年总氮削减量为 $152.47 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减量为 $71.44 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. 在 100% 畜禽粪便还田的情景下, 枯水年顺安河流域出口断面总氮削减量为 $115.48 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总氮总量的 18.73% , 总磷削减量为 $58.25 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总磷总量的 65.87% ; 丰水年总氮削减量为 $233.61 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减量为 $191.56 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 平水年总氮削减量为 $168.18 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减量为 $77.56 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. 将上述两个情景对氮磷污染的治理具体分配到这两个污染源中.

水产养殖源模拟结果表明, 枯水年水产养殖污染控制措施削减总氮 $39.89 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总氮总量的 6.47% , 削减总磷 $10.97 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总磷总量的 12.40% ; 丰水年削减总氮 $80.70 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 削减总磷 $36.06 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 平水年削减总氮 $58.10 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 削减总

磷 $14.60 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$.

生态缓冲带模拟结果表明, 在枯水年总氮削减量为 $80.087 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总氮总量的 12.99% , 总磷削减量为 $43.37 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总磷总量的 49.04% ; 丰水年总氮削减量为 $162.02 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减量为 $65.59 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 平水年总氮削减量为 $142.61 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 总磷削减量为 $57.74 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. 生态缓冲带的建设能够有效制止农业面源的污染, 即农村生活源、畜禽养殖源和种植业源的污染, 将生态缓冲带建设削减的氮磷量分配到各个污染源中.

城市污水厂提标改造情景模拟结果各子流域按照点源污染削减情况输入到 SWAT 模型中, 进行模型模拟, 得到顺安河流域出口断面污染物产生量. 在枯水年总氮削减量为 $290.94 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总氮总量的 47.19% ; 丰水年总氮削减量为 $588.58 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 平水年总氮削减量为 $423.73 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. 流域内的两个污水厂分别是城镇生活污水厂和工业废水处理厂, 因此将总氮削减量分别分配到城市生活源和工业源上.



(a)、(b)和(c)分别为丰、平和枯水年防控方案优化结果, 红点为污染措施削减方案, 黄线为理想的最优 Pareto 前沿

图 5 顺安河流域丰、平和枯水年防控方案优化结果

Fig. 5 Optimization results of prevention and control strategies in wet, normal, and dry years in the Shun'an Watershed

2.3 顺安河措施优化分析

基于 2.2 节模拟效果所确定的各类措施氮磷削减效率,利用 MOSFLA 算法能够实现在复杂解空间中的快速寻优,顺安河流域综合防控优化方案如图 5 所示,其中每一个红色圆点表示一套污染削减方案,数百套方案共同构成解决流域不同削减目标的方案集.黄色曲线为理想的最优 Pareto 前沿,可以发现针对复杂的大流域、多源措施优化问题,仍有较好的优化效果.

由图 5(a)可知,综合防控方法的实施可以使顺安河丰水年总氮入江负荷变为 374.81 ~ 2 569.63 t·a⁻¹(对应不同方案,下同)、总磷入江负荷变为

106.78 ~ 705.46 t·a⁻¹、对应方案最大成本为 70.03 亿元.由图 5(b)可知,综合防控方法的实施可以使顺安河平水年总氮入江负荷变为 420.73 ~ 1 494.82 t·a⁻¹、总磷入江负荷变为 99.09 ~ 305.35 t·a⁻¹、对应方案最大成本 88.39 亿元.由图 5(c)可知,综合防控方法的实施可以使顺安河枯水年总氮入江负荷变为 114.49 ~ 614.79 t·a⁻¹、总磷入江负荷变为 24.42 ~ 87.81 t·a⁻¹、对应最大成本为 87.88 亿元.该削减方案集在极限状态下可将顺安河氮磷污染削减 60% 以上,入江口水质将稳定在Ⅲ类水平.在此基础上,选择顺安河流域达到目标水质等级要求的方案做进一步分析(表 2).

表 2 顺安河流域氮磷削减目标需求与优化结果对比

Table 2 Comparison of TN and TP reduction targets and optimization results in the Shun'an Watershed

水文年	丰水年	平水年	枯水年
水质目标	顺安河入江口达到地表Ⅲ类水 $\rho(\text{总氮}):1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{总磷}):0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
削减目标	总氮:1 271.40 t·a ⁻¹ 总磷:无需削减	总氮:739.79 t·a ⁻¹ 总磷:无需削减	总氮:304.25 t·a ⁻¹ 总磷:无需削减
削减结果	总氮:1 274.24 t·a ⁻¹ 总磷:321.42 t·a ⁻¹	总氮:855.24 t·a ⁻¹ 总磷:159.80 t·a ⁻¹	总氮:381.96 t·a ⁻¹ 总磷:42.93 t·a ⁻¹
防控成本	62.27 亿元		

顺安河入江口水质目标为达到地表Ⅲ类水,换算为削减目标为:在丰水年,总氮削减 1 271.40 t·a⁻¹、总磷无需削减;在平水年,总氮削减 739.79 t·a⁻¹、总磷无需削减;在枯水年,总氮削减 304.25 t·a⁻¹、总磷无需削减.为实现水质削减目标,通过智能算法优化确定综合防控优化方案.实施方案后,在丰水年,相对于基准情景总氮负荷削减 1 274.24 t·a⁻¹、总磷负荷削减 321.42 t·a⁻¹;在平水年,总氮负荷削减 855.24 t·a⁻¹、总磷负荷削减 159.80 t·a⁻¹;在枯水年,总氮负荷削减 381.96 t·a⁻¹、总磷负荷削减 42.93 t·a⁻¹;措施总成本为 62.27 亿元.其中,农村污水处理建设的重点区域为钟仓河上游、新桥河下游、顺安河干流下游和顺安镇附近,主要涉及 5、7、10 和 13 号等子流域;化肥减量控制重点区域为钟仓河下游、新桥河下游和红星河全段,主要涉及 4、13 和 23 号等子流域;水产养殖污染控制重点区域为顺安河干流下游和顺安镇附近,主要涉及 5、7 和 16 号等子流域;生态缓冲带建设重点区域为钟仓河下游、新桥河下游、顺安河干流下游和顺安镇附近,主要涉及 5、7、10、13 和 23 号等子流域;提标改造重点区域为位于 1 号子流域的城市污水厂.

3 结论

(1)本研究结合资料调研分析、机制模型模拟

和智能算法优化,构建了“污染精准溯源-措施效果评价-措施整体优化”为主体的流域尺度水环境模拟-优化框架,可为流域水污染综合治理提供参考.

(2)新框架可精准量化流域内种植业、农村生活、畜禽养殖、水产养殖、工业废水和生活污水的影响;案例研究表明,23 号流域所在的红星河区域面源污染严重,其中畜禽养殖是主要污染源,1 号子流域距离入江口较近且存在污水处理厂排口,应重点治理.

(3)新框架提供了性价比高的流域多源污染协同治理方案;案例研究表明,通过合理投资可使顺安河流域总氮在丰、平和枯水年分别削减 1 274.24、855.24 和 381.96 t·a⁻¹,总磷削减 321.42、159.80 和 42.93 t·a⁻¹,可保障水质达到地表Ⅲ类水质标准.

参考文献:

[1] 夏军,占车生,曾思栋,等.长江模拟器的理论方法与实践探索[J].水利学报,2022,53(5):505-514.
Xia J, Zhan C S, Zeng S D, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River simulator construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 505-514.

[2] 杨晶晶.长江经济带经济与生态关系演变的历史分析(1979-2015 年)——以水环境为中心[D].武汉:中南财经政法大学,2018.
Yang J J. The historical analysis on the evolution of the relationship between economy and ecology in the Yangtze River Economic Zone (from 1979 to 2015)——taking water environment as the center [D]. Wuhan: Zhongnan University of

- Economics and Law, 2018.
- [3] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1839-1846.
- Li M L, Jia M D, Sun T C, *et al.* spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1839-1846.
- [4] 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 等. 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析: 以秦淮河流域为例[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3291-3303.
- Ma X X, Gong C, Guo J X, *et al.* water pollution characteristics and source apportionment in rapid urbanization region of the lower Yangtze River: considering the Qinhuai River catchment [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3291-3303.
- [5] 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 等. 长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3128-3139.
- Tan S J, Liu Y, Zhu X J, *et al.* output characteristics and driving mechanism of agricultural non-point source (AGNPS) pollutant in plain and valley region of upper Yangtze River, China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3128-3139.
- [6] 刘伟明, 王明, 吴志军, 等. 长江经济带环境质量和经济增长的双向互动关系及空间分异[J]. 经济地理, 2022, **42**(4): 54-64.
- Liu W M, Wang M, Wu Z J, *et al.* Bilateral interaction and spatial differentiation between environmental quality and economic growth in the Yangtze River Economic Belt [J]. Economic Geography, 2022, **42**(4): 54-64.
- [7] 李强, 王亚仓. 长江经济带环境治理组合政策效果评估[J]. 公共管理学报, 2022, **19**(2): 130-141.
- Li Q, Wang Y C. Effect evaluation of the combined policies of environmental governance in the Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Public Management, 2022, **19**(2): 130-141.
- [8] 叶云岭, 吴传清, 周西一敏. 长江经济带制造业集聚对环境污染的门槛效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(6): 1282-1292.
- Ye Y L, Wu C Q, Zhou X Y. Threshold effect of manufacturing agglomeration on environmental pollution in Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(6): 1282-1292.
- [9] 张明睿, 郑俊, 徐力刚, 等. 城市小流域面源污染输出特征及污染负荷分类核算研究[J]. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(4): 25-29.
- Zhang M R, Zheng J, Xu L G, *et al.* Research on non-point source pollution output characteristics and pollution load classification accounting of urban small watershed [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, **33**(4): 25-29.
- [10] 周颖. 丹江口库区流域面源污染输出规律与养分收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- Zhou Y. Research on non-point source pollution export characteristics and nutrient import/export in Danjiangkou Reservoir area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [11] 严坤. 三峡库区农业生产方式改变及其对水土流失与面源污染影响——以万州区五桥河流域为例[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2020.
- Yan K. Changes in agricultural production activity and its impacts on the soil erosion and non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area——A case study of the Wushaohe Watershed in Wanzhou District [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2020.
- [12] 聂欣. 产业集聚视角下中国水污染问题研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- Nie X. Research on water pollution in China from the perspective of industrial agglomeration [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [13] 贾广印. 水污染与经济发展耦合分析及对策研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2013.
- Jia G Y. Coupling analysis and countermeasures research of water pollution and economic development [D]. Ma'an Shan: Anhui University of Technology, 2013.
- [14] Liu G W C, Chen L, Wei G Y, *et al.* New framework for optimizing best management practices at multiple scales [J]. Journal of Hydrology, 2019, **578**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124133.
- [15] Hawks B S, Bolding M C, Aust W M, *et al.* Implementation of forestry best management practices and sediment delivery in three regions of North Carolina and Virginia [J]. Forest Science, 2022, **68**(1): 63-74.
- [16] Hawks B S, Aust W M, Bolding M C, *et al.* Linkages between forestry best management practices and erosion in the southeastern U. S. [J]. Journal of Environmental Management, 2022, **305**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114411.
- [17] Fleming P M, Savchenko O M. Intention versus action: household adoption of best management practices for water quality [J]. Water Resources Research, 2022, **58**(7), doi: 10.1029/2021WR029684.
- [18] 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.
- [19] 刘佳昆. 基于改进输出系数模型的澎溪河流域非点源污染研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Liu J K. An Improved export coefficient model to estimate nitrogen and phosphorus loads in Pengxi River Basin, Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [20] 郭建红. 水源区非点源氮污染的定量溯源、分类减排与景观格局调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- Wu J H. Quantitative tracing, emission reduction and landscape patterns regulation of non-point source nitrogen pollution in a headwater catchment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [21] Shen Z Y, Hong Q, Chu Z, *et al.* A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujian Watershed, China [J]. Agricultural Water Management, 2011, **98**(6): 977-989.
- [22] Shen Z Y, Hou X S, Li W, *et al.* Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China [J]. Ecological Indicators, 2015, **48**: 417-427.
- [23] Smith R A, Schwarz G E, Alexander R B. Regional interpretation of water - quality monitoring data [J]. Water Resources Research, 1997, **33**(12): 2781-2798.
- [24] Yuan Y P, Koropecjy-Cox L. SWAT model application for evaluating agricultural conservation practice effectiveness in reducing phosphorous loss from the Western Lake Erie Basin [J]. Journal of Environmental Management, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114000.
- [25] Lee J, Woo S Y, Kim Y W, *et al.* Dynamic calibration of phytoplankton blooms using the modified SWAT model [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **343**, doi: 10.1016/j.j

- jcleprou. 2022. 131005.
- [26] Rahman K U, Pham Q B, Jadoon K Z, *et al.* Comparison of machine learning and process-based SWAT model in simulating streamflow in the Upper Indus Basin [J]. *Applied Water Science*, 2022, **12**(8), doi: 10.1007/S13201-022-01692-6.
- [27] Chen J S, Du C, Nie T Z, *et al.* Study of non-point pollution in the Ashe River Basin based on SWAT model with different land use [J]. *Water*, 2022, **14**(14), doi: 10.3390/w14142177.
- [28] Mtibaa S, Asano S. Hydrological evaluation of radar and satellite gauge-merged precipitation datasets using the SWAT model: case of the Terauchi catchment in Japan [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, **42**, doi: 10.1016/J.EJRH.2022.101134.
- [29] Ma B Y, Wu Z N, Hu C H, *et al.* Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **605**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127269.
- [30] Lisenbee W A, Hathaway J M, Winston R J. Modeling bioretention hydrology: quantifying the performance of DRAINMOD-Urban and the SWMM LID module [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **612**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128179.
- [31] Zhang B C, Chen M, Ma Z Y, *et al.* An online participatory system for SWMM-based flood modeling and simulation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(5): 7322-7343.
- [32] Kovalenko S, Brown C J, Akan C, *et al.* An examination of extreme floods, effects on land-use change and seasonality in the lower St. Johns River Basin, Florida using HSPF and statistical methods [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, **81**(3), doi: 10.1007/S12665-021-10038-5.
- [33] Zhao X M, Lung W S. Developing a quantitative framework to track the fate and transport of estrogens on a watershed scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **611**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128013.
- [34] Kim J, Kim H, Kim S, *et al.* Development of a simulation method for paddy fields based on surface FTABLE of hydrological simulation program-FORTRAN [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, **271**, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107694.
- [35] Li H E, Zhou X, Huang K, *et al.* Research on optimal control of non-point source pollution: a case study from the Danjiang River basin in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(11): 15582-15602.
- [36] Zuo D P, Han Y N, Gao X X, *et al.* Identification of priority management areas for non-point source pollution based on critical source areas in an agricultural watershed of Northeast China [J]. *Environmental Research*, 2022, **214**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113892.
- [37] Rudra R P, Mekonnen B A, Shukla R, *et al.* Currents status, challenges, and future directions in identifying critical source areas for non-point source pollution in Canadian conditions [J]. *Agriculture*, 2020, **10** (10), doi: 10.3390/agriculture10100468.
- [38] 吴鹏, 付永胜, 彭勃, 等. 植被过滤带阻控农业径流污染特性与机制进展 [J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(2): 91-101.
- Wu P, Fu Y S, Peng B, *et al.* Advances on characteristics and mechanism of vegetative filter strips intercepting agricultural runoff pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(2): 91-101.
- [39] 王沛芳, 王超, 徐海波. 自然水塘湿地系统对农业非点源氮的净化截留效应研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(3): 782-785.
- Wang P F, Wang C, Xu H B. Effectiveness of nutrient retention and purification in natural ponds [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(3): 782-785.
- [40] Walton C R, Zak D, Audet J, *et al.* Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: impacts of soil type, hydrology and vegetation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **727**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138709.
- [41] 刘杰, 邵川, 向星光, 等. 肖家河流域清水绿岸治理水质模拟 [A]. 见: 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(四) [C]. 西安:《环境工程》编辑部, 2019.
- [42] 李学科. 肇庆东排渠水污染现状分析及水质模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- Li X K. Analysis of river water pollution status and water quality simulation of east drainage channel in Zhaoqing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [43] Rodriguez H G, Popp J, Maringanti C, *et al.* Selection and placement of best management practices used to reduce water quality degradation in Lincoln Lake watershed [J]. *Water Resources Research*, 2011, **47** (1), doi: 10.1029/2009WR008549.
- [44] Taghizadeh S, Khani S, Rajaei T. Hybrid SWMM and particle swarm optimization model for urban runoff water quality control by using green infrastructures (LID-BMPs) [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, **60**, doi: 10.1016/j.ufug.2021.127032.
- [45] 郑涛. 巢湖市鸡裕河小流域面源污染综合评价 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- Zheng T. Comprehensive evaluation on non-point source pollution of small watershed in Jiyu River, Chaohu City [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [46] 孙兴旺. 巢湖流域农村生活污染源产排污特征与规律研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- Sun X W. Study on characteristics of polluted fountainhead of rural life in Chao Lake Basin [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010.
- [47] Akoko G, Le T H, Gomi T, *et al.* A review of SWAT model application in Africa [J]. *Water*, 2021, **13**(9), doi: 10.3390/w13091313.
- [48] Yang N, Chen L, Wang W Z, *et al.* The land carrying capacity and environmental risk assessment of livestock and poultry breeding considering crop planting [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(37): 51356-51368.
- [49] 李铁军, 郭远明, 丁跃平, 等. 我国渔业污染损害赔偿体系存在的问题及建议 [J]. *现代农业科技*, 2013, (21): 319-320, 323.
- Li T J, Guo Y M, Ding Y P, *et al.* Existing problems and suggestions of chinese fishery pollution damages compensation system [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2013, (21): 319-320, 323.
- [50] 朱崇梅, 杨亚平. 水产养殖中如何提高饲料利用率 [J]. *河南水产*, 2003, (1): 36, 35.
- [51] 杜娟, 李怀恩, 赵湘璧, 等. 基于 SWAT 模型的渭河流域污染控制效果模拟 [J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(4): 563-569.
- Du J, Li H E, Zhao X B, *et al.* Simulation of pollution control effect in the Weihe River Valley with SWAT model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(4): 563-569.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)