

目次

2018~2020年北京市大气PM_{2.5}污染特征及改善原因 刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)

京津冀城市群冬季二次PM_{2.5}的时空分布特征 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)

COVID-19管控前后不同污染阶段PM_{2.5}中二次无机离子变化特征 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)

基于在线观测的太原市冬季PM_{2.5}中金属元素污染水平及来源解析 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)

青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源 王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)

湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 庞晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小明, 郭送军 (2461)

2021年夏季新乡市区臭氧超标日污染特征及敏感性 侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)

台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 徐金鹤, 徐文帅 (2481)

天津市空气污染的健康影响分析 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)

2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析 杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)

1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析 王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)

长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应 钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)

宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价 李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)

微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析 陆嘉玮, 徐晨晔, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)

三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 张雪, 朱波 (2574)

霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 刘海, 赵国红 (2583)

基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析 刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)

河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)

饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)

镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制 张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandyar Shahab (2622)

纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑 郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)

富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制 何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)

富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制 欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 邝晓彤 (2661)

污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制 周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)

森林生态系统对大气氮沉降降低的响应 谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)

气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响 张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)

西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)

不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)

氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)

互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)

黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)

黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)

短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)

福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应 车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)

中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)

基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)

河北省土壤化学元素的背景值与基准值 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)

非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)

基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价 余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)

长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险 李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)

贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征 马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峥, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)

贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估 马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)

山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价 郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)

P对小麦Cd和As吸收与转运的影响 王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)

施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)

广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析 马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)

五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征 罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)

天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响 于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜璋琳, 王英成 (2928)

紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响 张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)

长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响 胡颖榭, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)

高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)

菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征 赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)

中国碳排放及影响因素的市域尺度分析 吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)

碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验 房琪, 李绍萍 (2983)

垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)

1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量分析 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)

《环境科学》征订启事(2480) 《环境科学》征稿简则(2538) 信息(2766, 2798, 2927)

2002 ~ 2020 年中国河流环境质量演变及驱动因子分析

杨传玺¹, 薛岩², 高畅³, 万孜恒¹, 王小宁⁴, 刘永林¹, 刘琳¹, 刘长青¹, 王炜亮^{1*}

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266520; 2. 青岛理工大学管理工程学院, 青岛 266520; 3. 青岛佳明测控科技股份有限公司, 青岛 266000; 4. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘要: 基于 2002 ~ 2020 年河流环境质量、污染物排放和环境污染治理数据, 采用典型相关分析和 Spearman 相关系数研究我国河流环境质量演变规律及其驱动因子, 以期更科学地分析污染物排放和环境污染治理投资对流域环境影响。结果表明, 2002 ~ 2020 年中国河流环境质量得到明显改善, I ~ III 类水占比由 29.1% 提升至 87.4%, 劣 V 类水占比由 40.9% 下降至 0.2%; 废水排放总量由 439.5 亿 t 增加到 849.1 亿 t, 城镇生活污水排放量由 232.3 亿 t 增加到 659.8 亿 t, 工业废水排放量由 207.2 亿 t 减少到 168 亿 t, 环境治理投资由 1106.6 亿元增加到 10638.9 亿元。七大流域、浙闽片河流域、西南诸河流域和西北诸河流域 I ~ III 类水比例与工业源污染物排放呈负相关, 与环境污染治理投资呈正相关; 七大流域、浙闽片流域和西北诸河流域环境质量改善的首要措施是削减工业源污染物排放, 污染物削减优先顺序均为: COD > NH₄⁺-N > 废水总量; 西南诸河流域水环境质量改善的首要措施是增加环境污染治理投资, 环境治理投资增加优先顺序为: 工业污染源治理投资 > 城市环境基础设施建设投资和建设项目环保投资。研究结果可为“十四五”期间河流环境质量改善提供理论和决策依据。

关键词: 河流环境质量; 污染物排放; 环境污染治理投资; 驱动因子; 相关性

中图分类号: X196; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2502-16 DOI: 10.13227/j.hjkk.202203241

Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020

YANG Chuan-xi¹, XUE Yan², GAO Chang³, WAN Zi-heng¹, WANG Xiao-ning⁴, LIU Yong-lin¹, LIU Lin¹, LIU Chang-qing¹, WANG Wei-liang^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 3. Qingdao Jiaming Measurement and Control Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China; 4. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: According to the river environmental quality, pollutant emission, and investment in environmental pollution control from 2002-2020, the change law and driving factors of river environmental quality in China were evaluated using canonical correlation analysis and the Spearman correlation coefficient to analyze the influence between environmental and pollutant emission/investment in environmental pollution control. The results indicated that the river environmental quality was improved significantly based on the proportion of Class I-III increasing from 29.1% to 87.4% and the proportion of inferior Class V decreasing from 40.9% to 0.2% from 2002-2020. The emission of wastewater and domestic wastewater increased from 4.395×10^{10} tons and 2.323×10^{10} tons to 8.491×10^{10} tons and 6.598×10^{10} tons, respectively. However, emissions of industrial wastewater decreased from 2.072×10^{10} tons to 1.680×10^{10} tons. Investment in environmental pollution control increased from 110.66 billion yuan to 1063.89 billion yuan. The proportion of Class I-III in seven major river basins, river basins in Zhejiang and Fujian, southwest river basins, and northwest river basins showed a negative correlation for industrial pollutant emissions and a positive correlation for investment in environmental pollution control. The primary measure for the seven major river basins, river basins in Zhejiang and Fujian, and northwest river basins cut down the industrial pollutant emissions, in the order of COD > NH₄⁺-N > total wastewater. The primary measure for southwest river basins increased the investment in environmental pollution control, in the order of industrial investment in environmental pollution control > urban environmental infrastructure construction investment and environmental protection investment in construction projects. These results can provide theoretical and policy suggestions for the improvement of river environmental quality during the “14th Five-Year Plan” period.

Key words: river environmental quality; pollutant emission; investment in environmental pollution control; driving factor; correlation

河流是人类生活、生产和生态用水的重要来源, 河流水质是关系到国家饮用水和工业、灌溉用水安全的关键问题^[1,2]。中国正处于工业化进程中后期, 河流水质下降和水生生态系统退化严重, 河流水环境问题凸显, 改善河流水环境质量是中央关心、社会关注和群众关切的热点难点^[3,4]。河流水质演变是自然过程、人类生产生活综合作用的结果, 科学评价河流环境状况是进行河流环境防治及管理的基础^[5,6]。

为了控制和管理河流环境质量, 需要对河流水

质演变规律及其驱动因子相关性进行深入分析^[7,8]。目前, 常规河流环境质量研究主要集中于河流、湖泊和水库等水体环境特征和污染物时空分布特征, 水质评价方法和模型, 污染物排放和环境质量关系模型等^[9~12]。水质评价方法包括单因子评价法、污染指数评价法、模糊数学评价法、人工神经

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-08-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100303); 国家自然科学基金项目(41672340)

作者简介: 杨传玺(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境风险评价和应急管控, E-mail: yangchuanxi1989@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: sunboyhood@163.com

网络评价法和综合水质标识指数法等^[13]。刘彦龙等^[14]利用 Mann-Kendall 趋势检验、层次聚类分析、主成分分析和综合水质标识指数综合评价了黄河干流水质及其时空变化特征,结果表明黄河干流主要污染指标为氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和高锰酸盐指数,污染物来源包括生活源、工业源和农业源,研究结果能够为黄河流域水污染防治及水质综合管理提供科学依据。陈善荣等^[15]从流域主要污染特征和主要超标指标浓度时空变化等方面分析了 2016 ~ 2019 年长江流域水质时空分布特征,结果发现总磷、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和化学需氧量(COD)是长江流域主要污染物,为加强流域内总磷控制和优化长江流域产业结构、加强污染治理和改善流域水质提供支撑。上述研究对了解河流水环境质量提供了数据支持,为河流水环境质量改善提供了理论依据,具有显著的价值。然而目前的研究主要集中在单个流域、湖泊或水库,国家尺度河流环境质量调查及其驱动因子相关性分析尚未开展。

同时,中国“十三五规划”提出了环境保护工作应该以改善环境质量为核心^[16,17]。中国水环境管理目标同样由以排放量削减为导向转变为以环境质量改善为导向,实施更加严格的环境质量标准“倒逼”经济结构调整,实现环境友好型经济增长,更重视公众的感受及环境权益的实现^[18]。李名升等^[19]基于分析污染物排放与环境质量相互影响构建了污染排放-环境质量关系模型,并对 2005 ~ 2010 年中国各地区建立模型,结果表明中国大部分省区属于高污染-低质量类型,污染物减排是中国面临的首要环境问题,研究结果有助于判定中国环境形势和改善环境质量。Guan 等^[20]建立由污染损害补偿模块和污染保护补偿模块组成的生态补偿污染损害-保护双向模型,得出驻马店小洪河流域生态补偿的重点是污染损害补偿,未来需要加强水污染防治,为流域生态补偿量化和流域水环境管理拓宽了思路。Xu 等^[21]基于 2004 ~ 2019 年地级市面板数据和长江、黄河干流水质监测断面,研究农业、工业和家庭活动污染源对整体水质的影响,结果表明工业是环境水污染的主要来源,其次是家庭和农业污染源,工业和家庭生活是长江和黄河流域水污染主要来源。目前,关于河流环境质量演变与经济因素、环境保护治理投资因素的相关性研究较少,亟需阐明国家尺度河流环境质量演变规律及其驱动因子相关性,为国家改善河流环境质量提供数据和理论支撑。

本文以中国尺度河流为研究对象,分析了 2002 ~ 2020 年中国河流环境质量演变规律,结合污染物排放和环境污染治理投资等数据,阐明了环境因素

(废水、COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的排放总量)和经济因素(城市基础设施建设投资、工业污染治理投资、建设项目环保投资)与中国河流环境质量改善的相互关系,定量分析中国河流环境质量演变驱动因子,科学评估中国河流环境质量改善状况,以期为污染物减排、环境治理投资增加和中国河流环境质量管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

2002 ~ 2020 年中国流域水质数据、污染物排放数据和环境治理投资数据来源于中国生态环境状况公报(生态环境部)和中国生态环境统计年报(生态环境部); 2002 ~ 2020 年中国环境污染事故数据来源于环境统计数据(国家统计局)和中国生态环境状况公报(生态环境部); 2002 ~ 2020 年中国 GDP 数据来源于中国统计年鉴(国家统计局)。

1.2 指标构建

本研究范围为七大流域(长江、黄河、珠江、淮河、海河、辽河和松花江流域)、浙闽片河流域、西南诸河流域和西北诸河流域。《地表水环境质量标准》(GB 3838 ~ 2002)将我国地表水水质划分为 I ~ 劣 V 类,本研究中将 I ~ III 类、IV ~ V 类和劣 V 类定义为良好水质、中等水质和劣等水质^[22]。因此水质指标为 I ~ III 类水、IV ~ V 类水和劣 V 类水占比。污染物排放指标由废水排放总量(工业废水、生活污水的排放总量)、COD 排放总量(工业废水、生活污水的 COD 排放量)和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排放量(工业废水、生活污水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的排放量)组成。环境污染治理投资指标由城市环境基础设施建设投资、工业污染源治理投资和建设项目环保投资组成。

1.3 研究方法

1.3.1 典型相关分析

典型相关分析通过不断提取各组变量的各指标线性组合,使其每对线性组合具有最大相关系数而各对线性组合之间互不相关,直至两组变量之间的相关性被提取完毕,典型相关系数显著的典型变量能够反映综合变量的代表性^[23]。典型相关分析过程如式(1)所示:

$$\begin{cases} V_j^{(i)} = a_1^{(i)} X_1^{(i)} + a_2^{(i)} X_2^{(i)} + a_3^{(i)} X_3^{(i)} \\ W_j^{(i)} = a_4^{(i)} X_4^{(i)} + a_5^{(i)} X_5^{(i)} + a_6^{(i)} X_6^{(i)} \\ N_j^{(i)} = b_1^{(i)} Y_1^{(i)} + b_2^{(i)} Y_2^{(i)} + b_3^{(i)} Y_3^{(i)} \\ M_j^{(i)} = b_4^{(i)} Y_4^{(i)} + b_5^{(i)} Y_5^{(i)} + b_6^{(i)} Y_6^{(i)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V 和 W 分别为河流环境质量-污染物排放指标相关性分析中环境质量指标(I ~ III 类、IV ~ V

类、劣V类占比)的典型变量和污染排放指标(废水、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的排放总量)的典型变量, X_1 、 X_2 和 X_3 分别为各流域I~III类水、IV~V类水和劣V类水占比, X_4 、 X_5 和 X_6 分别为各流域的全国废水、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的排放总量; N 和 M 分别为河流环境质量-环境污染治理投资指标相关性分析中环境质量指标(I~III类、IV~V类、劣V类占比)的典型变量和环境污染治理投资指标(城市基础设施建设投资、工业污染治理投资、建设项目环保投资)的典型变量, Y_1 、 Y_2 和 Y_3 分别为各流域的I~III类水、IV~V类水和劣V类水比例, Y_4 、 Y_5 和 Y_6 分别为各流域的城市环境基础设施建设投资、工业污染源治理投资和建设项目环保投资; i 为1、2、3和4时分别代表七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河, $j=1, 2, \dots, n$, n 为各典型相关系数通过威尔克斯检验显著的数量, a 和 b 为标准化典型相关系数。

1.3.2 Spearman 相关系数

Spearman 相关系数是一种非参数相关系数, 适用于呈单调关系但不呈线性相关的数据^[24]。本研究采用 Spearman 相关系数计算各流域I~III类、IV~V类和劣V类水占比与污染物排放指标和环境污染治理投资指标的相关性, 计算过程如式(2)所示:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

式中, r_s 为 Spearman 相关系数, n 为样本容量($n=19$), d_i 为 X_i 和 Y_i 在样本 X 和 Y 自小到大的排序后的等级差, 在计算河流环境质量-污染物排放指标相关性中, X_i 为 i 年I~III类和劣V类水占比, Y_i 为 i 年废水、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的排放总量, 在计算河流环境质量-环境污染治理投资指标相关性中, X_i 为 i 年I~III类和劣V类水占比, Y_i 为 i 年城市环境基础设施建设投资、工业污染源治理投资和建设项目环保投资。

2 结果与讨论

2.1 中国河流环境质量状况

2.1.1 环境污染事故

2002~2020年中国环境污染事故整体呈下降趋势, 如图1所示。2002~2020年环境污染事故分3个阶段: 2002~2007年中国环境污染事故呈快速下降趋势, 环境污染事故数量与时间线性规律为: $y = -295.23x + 2352.5$ ($R^2 = 0.941$); 2008~2013年我国环境污染事故呈缓慢上升趋势, 环境事故数量与时间线性规律为: $y = 48.114x + 349.6$ ($R^2 = 0.672$), 平均每年发生518次环境污染事故; 2014~2020年我国环境污染事故呈缓慢下降趋势, 环境事故数量与时间线性规律为: $y = -34.036x + 445.57$ ($R^2 = 0.811$), 平均每年发生309次环境污染事故。特大和重大环境污染事件数量随时间变化规律与环境污染事故总量趋势一致。

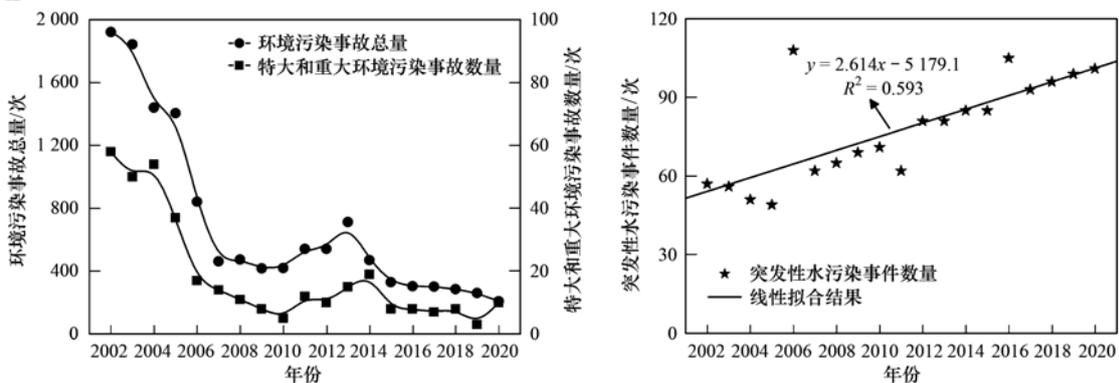


图1 2002~2020年中国环境污染事件和突发性水污染事件数量

Fig. 1 Number of environmental pollution accidents and abrupt water pollution accidents in China from 2002 to 2020

突发性水污染事件仍是我国面临的主要环境安全问题。2002~2020年突发性水污染事件呈上升趋势, 与时间线性规律为: $y = 2.614x - 5179.1$ ($R^2 = 0.593$), 目前突发性水污染事件主要来源于企业违规排污、工厂事故泄漏等人为因素以及自然条件破坏^[25~27]。

2.1.2 中国河流环境质量演变规律

2002~2020年中国河流环境质量显著改善: 中

国七大流域I~III类水占比由2002年的29.1%上升到2020年的87.4%, 而劣V类水占比由2002年的40.9%下降为2020年的0.2%, 如图2所示。2002~2020年中国七大流域主要污染物变化显著, 分为两个阶段: 2002~2010年, 生化需氧量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、高锰酸盐指数和石油类污染物问题突出, 重金属(汞)和酚类(挥发酚)污染改善; 2011~2020年, COD和生化需氧量污染问题突出, 并伴随 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、高锰酸

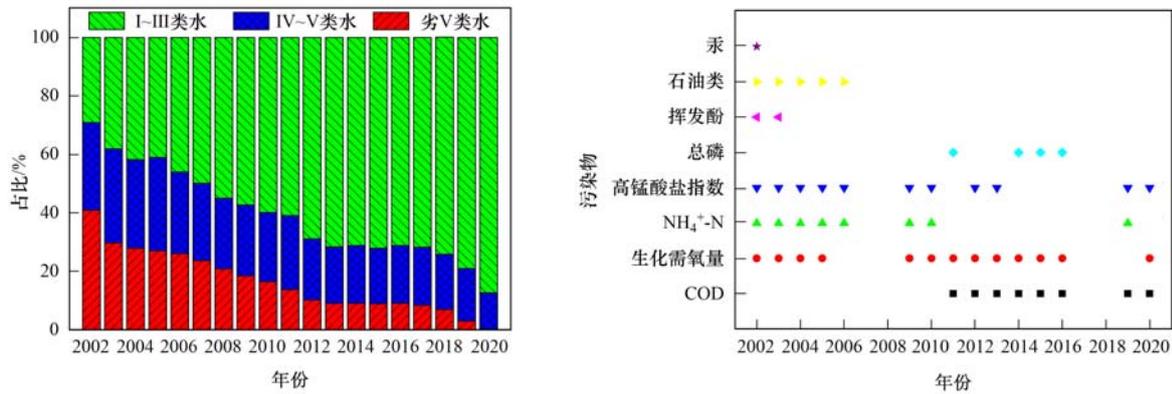


图 2 2002 ~ 2020 年中国河流环境质量变化规律和主要污染物

Fig. 2 Variation law and major pollutants in China's rivers from 2002 to 2020

盐指数和总磷污染随机出现, 没有重金属和酚类污染.

长江流域水资源总量 9 755 亿 m^3 , 约占全国河流径流总量 36%, 是我国水资源最丰富的河流, 长江上游水质演变主要受自然因素影响, 中下游主要受化肥使用量和水库建设驱动^[28]. 2002 ~ 2020 年长江流域 I ~ III 类水占比由 51.5% 提升至 96.7%, 劣 V 类水占比由 25% 下降为 0%, 如图 3(a) 所示. 长江流域污染程度由中度和轻度污染 (2002 ~ 2004 年) 逐步改善为良好 (2005 ~ 2018 年) 和优 (2019 ~ 2020 年), 长江流域总体水质提升与我国近年来实施的长江保护修复攻坚, 水资源保护“三水共治”等系列专项行动密切相关^[29]. 黄河流域是我国第二大流域, 保障黄河流域水质在区域经济社会可持续发展和生态安全方面具有十分重要的地位. 2002 ~ 2020 年黄河流域 I ~ III 类水占比由 22.7% 提升至 84.7%, 劣 V 类水占比由 49.7% 下降到 0%. 2002 ~ 2020 年黄河流域水质得到较大改善, 由重度污染 (2002 年) 逐步改善为中度污染 (2003 ~ 2010 年) 和轻度污染 (2011 ~ 2019 年), 并在 2020 年改善为良好 [图 3(b)]. 文献 [30] 研究表明, 将黄河流域生态

保护和高质量发展上升为国家战略是黄河流域环境质量将得到进一步改善的原因.

2002 ~ 2020 年珠江流域 I ~ III 类水占比由 73.5% 提升为 92.7%, 劣 V 类水比例由 8.2% 下降到 0%, 流域污染程度一直保持在良好和优, 如图 4 所示. 2002 ~ 2020 年淮河流域 I ~ III 类水占比由 16.1% 提升为 78.9%, 劣 V 类水比例由 44.1% 下降到 0%, 流域污染程度由重度污染 (2001 年) 逐步改善为中度污染 (2003 ~ 2008 年) 和轻度污染 (2009 ~ 2019 年), 并在 2020 年水质达到良好, 淮河流域水质改善与南水北调东线工程密切相关. 2002 ~ 2020 年海河流域 I ~ III 类水占比由 14.4% 提升为 64%, 劣 V 类水占比由 71.2% 下降到 0.6%, 海河流域水质污染严重, 污染程度由污染严重 (2002 ~ 2003 年) 和重度污染 (2004 ~ 2010 年, 2016 年) 逐步改善为中度污染 (2011 ~ 2015 年和 2017 ~ 2018 年) 和轻度污染 (2019 ~ 2020 年). 2002 ~ 2020 年辽河流域 I ~ III 类水占比由 17.9% 提升为 70.9%, 劣 V 类水占比由 52.2% 下降到 0%, 辽河流域由污染严重 (2002 年) 和重度污染 (2005 ~ 2007 年) 逐步改善为中度污染 (2008 ~ 2010 年) 和轻度污染 (2011 ~ 2020 年).

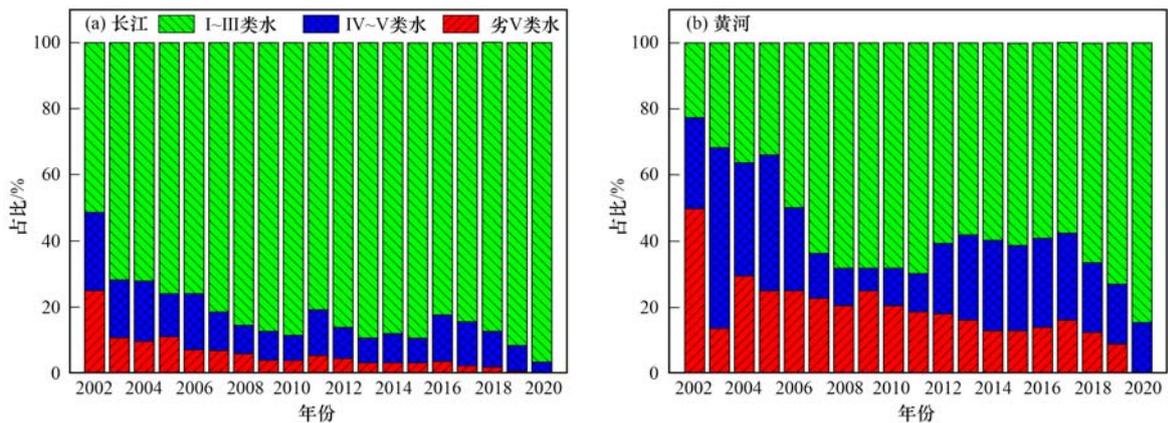


图 3 2002 ~ 2020 年长江和黄河流域环境质量变化规律

Fig. 3 Variation law of environmental quality in Yangtze River and Yellow River basins from 2002 to 2020

2002 ~ 2020 年松花江流域 I ~ III 类水占比由 27.8% 提升为 82.4%, 劣 V 类水占比由 14.8% 下降到 0%, 松花江流域污染程度由中度/轻度污染 (2002 ~ 2019 年) 逐步改善为良好 (2020 年). 2002 ~ 2020 年浙闽片河流域 I ~ III 类水占比由 50% 提升为 96.8%, 劣 V 类水占比由 15.4% 下降到 0%, 浙

闽片河流域污染程度由轻度污染 (2002 ~ 2004 年, 2008 ~ 2009 年) 逐步改善为良好 (2005 ~ 2007 年, 2010 ~ 2015 年, 2017 ~ 2018 年) 和优 (2016 年, 2019 ~ 2020 年). 2002 ~ 2020 年西南诸河流域 I ~ III 类水占比由 87.5% 提升为 95.2%, 劣 V 类水占比由 12.5% 下降到 3.2%, 西南诸河污染程度由轻度污染

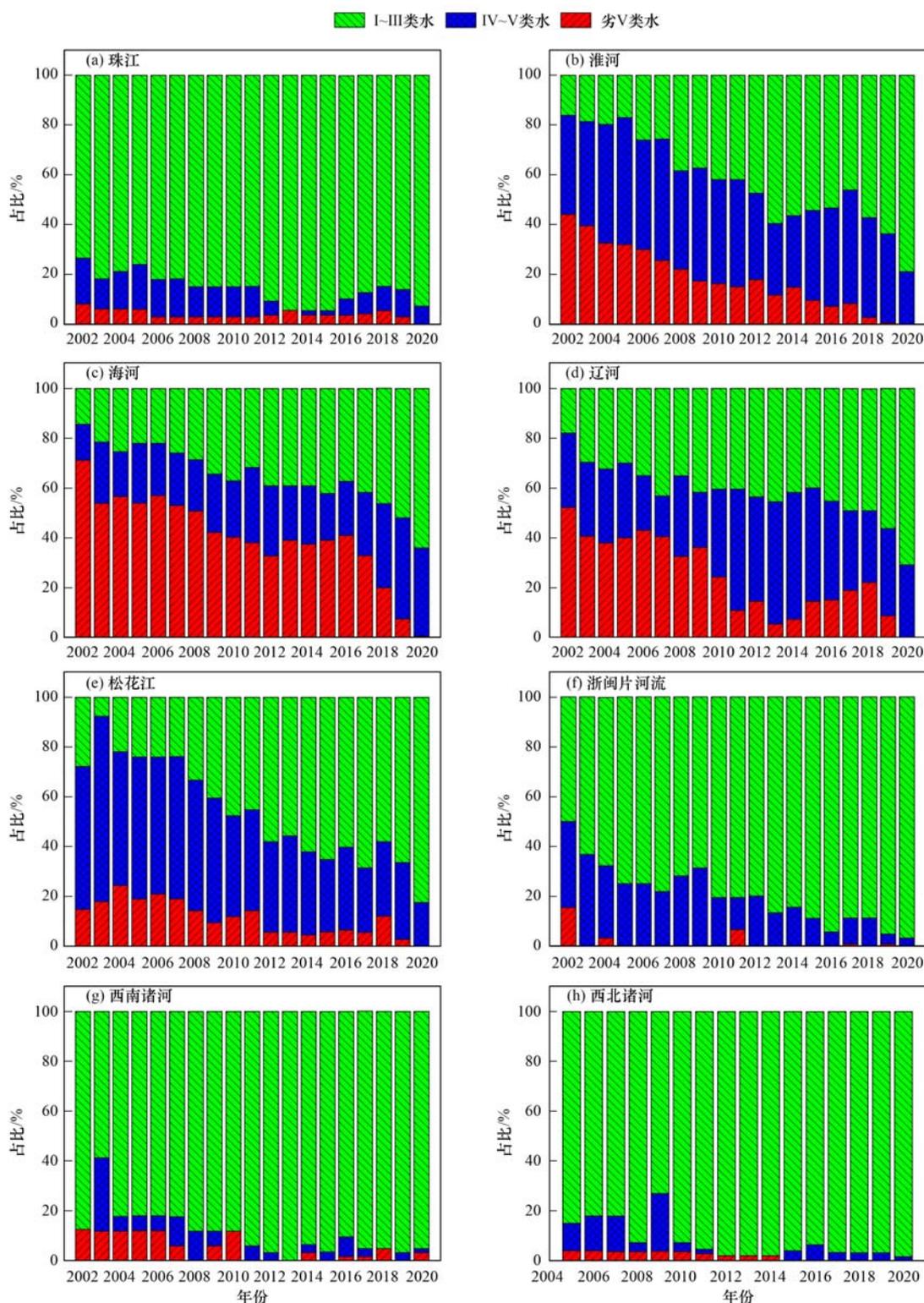


图 4 2002 ~ 2020 年珠江、淮河、海河、辽河、松花江、浙闽片河、西南诸河和西北诸河流域环境质量变化规律

Fig. 4 Variation law of environmental quality in Pearl River, Huaihe River, Haihe River, Liaohe River, Songhua River, river basins in Zhejiang and Fujian, southwest river basins, and northwest river basins from 2002 to 2020

(2003 年) 逐步改善为良好(2004 ~ 2010 年) 和优(2011 ~ 2020 年). 2005 ~ 2020 年西北诸河 I ~ III 类水占比由 85% 提升为 98.4%, 劣 V 类水占比由 4% 下降到 0%, 西北诸河污染程度由轻度污染(2009 年) 逐步改善为优(2010 ~ 2020 年).

2020 年, 长江、珠江、浙闽片河、西北诸河和西南诸河流域水质达到优; 黄河、松花江和淮河流域水质达到良好; 而辽河和海河流域水质为轻度污染, 主要污染物均为 COD、高锰酸盐指数和生化需氧量, 表明辽河和海河流域以好氧有机污染为主, 其中海河流域处于人口和工业密集区域, 污染物排放量大, 是未来改善河流环境质量的重点区域, 有机污染物削减任务突出. 文献[31] 研究表明海河流域及其周边地区面临最严重的水安全压力.

2.2 河流环境质量-污染物排放指标相关性分析

2.2.1 污染排放状况

2016 ~ 2020 年中国生态环境状况公报(生态环境部) 和中国生态环境统计年报(生态环境部) 取消了全国废水、工业废水和生活污水的排放总量数据, 因此本文首先建立最优时间序列预测模型对 2016 ~ 2020 年废水、工业废水和生活污水的排放总量进行预测, 如表 1 所示^[32]. ARIMA 模型中 z_t 和 z_{t-1} 为时间序列, ε_t 为零均值白噪声序列. 一阶指数平滑模型中 s_t 为时间 t 的指数平滑值($t+1$ 期的预测值), y_t 为第 t 期的实际值, s_{t-1} 为时间 $t-1$ 的平滑值, 预测结果如图 5 所示, 2016 ~ 2020 年全国废水排放总量分别为 758.1 亿 t、780.8 亿 t、803.6 亿 t、826.3 亿 t 和 849.1 亿 t, 工业废水排放总量分别为 193.1 亿 t、186.8 亿 t、180.5 亿 t、174.2 亿 t 和 168.0 亿 t, 生活污水排放总量分别为 560.1 亿 t、610.0 亿 t、634.9 亿 t 和 659.8 亿 t.

2002 ~ 2020 年中国废水排放量显著增加, 其中废水排放总量由 439.5 亿 t 增加到 849.1 亿 t, 与时间线性规律为: $y = 22.695x + 419.76$ ($R^2 = 0.997$); 城镇生活污水排放总量由 232.3 亿 t 增加到 659.8

亿 t, 与时间线性规律为: $y = 25.105x + 178.71$ ($R^2 = 0.990$); 而工业废水排放总量由 207.2 亿 t 减少到 168 亿 t, 与时间线性规律为: $y = -3.296x + 246.33$ ($R^2 = 0.560$), 如图 6 所示.

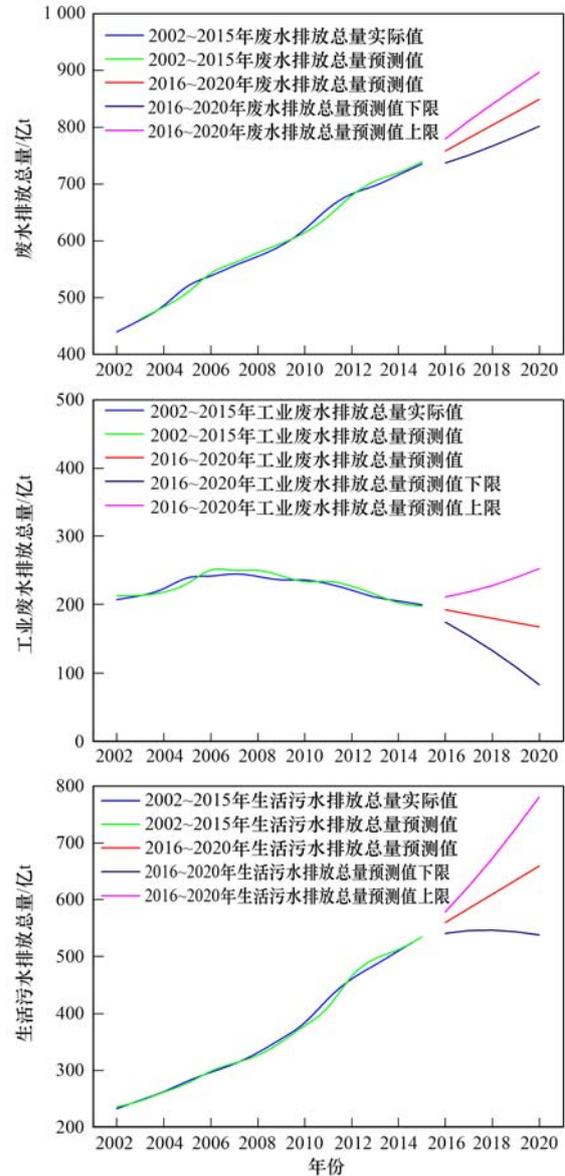


图 5 2016 ~ 2020 年废水、工业废水和生活污水排放总量预测
Fig. 5 Prediction of emission of total wastewater, total industrial wastewater, and total sanitary sewage from 2016 to 2020

表 1 废水排放量预测模型

Table 1 Prediction model of wastewater emission

模拟对象	模型	表达式	拟合优度
废水排放总量	ARIMA(0,1,0)	$z_t - z_{t-1} = 22.754 + \varepsilon_t$	0.976
工业废水排放总量	一阶指数平滑	$s_t = 0.720 y_t + 0.280 s_{t-1}$	0.730
生活污水排放总量	一阶指数平滑	$s_t = 0.907 y_t + 0.093 s_{t-1}$	0.993

COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排放量分为 4 个阶段: 2002 ~ 2010 年 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排放量保持相对稳定, 均由生活污水源和工业废水源组成, COD 排放量中生活污水源和工业废水源平均比例分别为 62.5% 和

37.5%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排放量中生活污水源和工业废水源平均比例分别为 71.7% 和 28.3%. 2011 ~ 2015 年 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排量增加, 其中一个重要原因是增加了农业源和集中式废水处理设施 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排

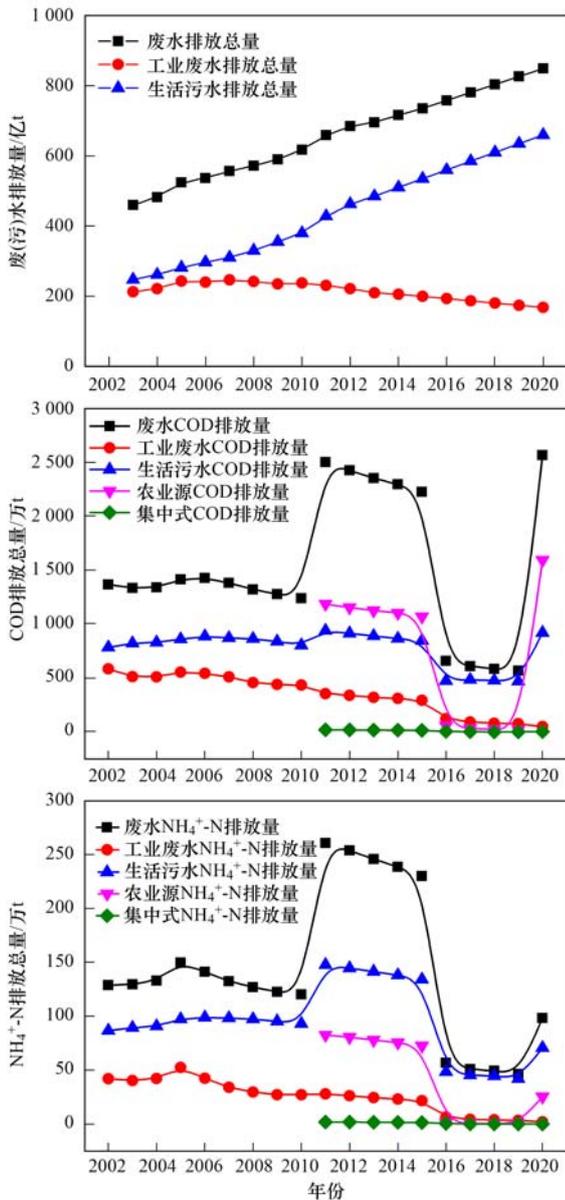


图6 2002~2020年废水、COD和 NH_4^+ -N的排放总量

Fig. 6 Emission of wastewater, COD and ammonia nitrogen from 2002 to 2020

放量,其中COD排放量中农业源平均占比47.8%,生活污水源平均占比37.8%,工业废水源平均占比13.7%,集中式废水处理设施源平均占比0.7%; NH_4^+ -N排放量中农业源平均占比31.7%,生活污水源平均占比57.5%,工业废水源平均占比10.1%,集中式废水处理设施源平均占比0.7%。2016~2019年COD和 NH_4^+ -N排量降低,农业源COD和 NH_4^+ -N排放量分别由2015年1068.6万t和72.6万t下降为2016年57.1万t和1.3万t;COD排放量中农业源平均占比5.3%,生活污水源平均占比79.0%,工业废水源平均占比15.3%,集中式废水处理设施源平均占比0.4%; NH_4^+ -N排放量中农业源平均占比1.4%,生活污水源平均占比89.0%,工业废水源平均占比8.9%,集中式废水处理设施源平均占比0.7%^[33]。2020年COD排放量中农业源平均占比62.1%,生活污水源平均占比35.9%,工业废水源平均占比1.9%,集中式废水处理设施源平均占比0.1%; NH_4^+ -N排放量中农业源平均占比25.8%,生活污水源平均占比71.9%,工业废水源平均占比2.1%,集中式废水处理设施源平均占比0.2%,结果表明2020年COD和 NH_4^+ -N排放量主要来源于生活污水源和农业源,原因可能与新冠疫情有关^[34~36]。

2.2.2 综合指标相关性分析

对七大流域、浙闽片河、西南诸河和西北诸河I~III类、IV~V类和劣V类水占比与废水、COD和 NH_4^+ -N的排放量进行典型相关分析。七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河的环境质量关于污染物排放的典型相关变量中的第一组典型相关系数分别为0.985、0.947、0.884和0.956,各流域第1组之后的典型相关系数均不显著($P > 0.01$),如表2所示。

根据表2结果,共有4对典型相关变量具有统

表2 河流环境质量与污染物排放典型相关性和显著性检验

Table 2 Typical correlation and significance test between river environmental quality and pollutant emission

研究范围	典型检验个数	相关系数	特征值	威尔克检验	F统计量	P值
七大流域	1	0.985	31.901	0.020	13.947	0.000
	2	0.482	0.303	0.671	1.543	0.217
	3	0.353	0.143	0.875	2.141	0.164
浙闽片河流	1	0.947	8.618	0.058	7.871	0.000
	2	0.663	0.786	0.555	2.396	0.074
	3	0.093	0.009	0.991	0.131	0.723
西南诸河	1	0.884	3.583	0.180	3.618	0.003
	2	0.414	0.207	0.824	0.713	0.590
	3	0.076	0.006	0.994	0.087	0.772
西北诸河	1	0.956	10.584	0.049	6.658	0.000
	2	0.627	0.646	0.570	1.785	0.168
	3	0.248	0.066	0.939	0.786	0.393

计学意义,记为 $V_1^{(1)}/W_1^{(1)}$ 、 $V_1^{(2)}/W_1^{(2)}$ 、 $V_1^{(3)}/W_1^{(3)}$ 和 $V_1^{(4)}/W_1^{(4)}$,对应的标准化典型变量分别如表 3 所示。

七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河水环境质量标准化典型系数顺序分别为: $|-35.793| > |-23.395| > |-11.897|$ 、 $|0.169| > |0.110| > |0.079|$ 、 $|24.494| > |18.038| > |14.320|$ 和 $|-16.408| > |-13.955| > |-2.876|$,表明在河流环境质量方面,七大流域环境质量主要由 I ~ III 类水质反映,其次是劣 V 类;浙闽片河流环境质量主要由 IV ~ V 类水质反映,其次是劣 V 类;西南诸河环境质量主要由 I ~ III 类反映,其次是 IV ~ V 类;西北诸河环境质量主要由 I ~ III 类反映,其次是 IV ~ V 类。七大流域、浙闽片河、西南诸河和西北诸河污染排放标

准化典型系数顺序分别为: $|-0.102| > |-0.993| > |-0.014|$ 、 $|0.985| > |0.089| > |0.069|$ 、 $|-1.021| > |-0.716| > |0.315|$ 和 $|-1.038| > |0.193| > |-0.184|$,表明在河流环境质量方面,七大流域环境质量主要由废水排放总量反映,其次是 COD 排放量;浙闽片河流环境质量主要由废水排放总量反映;西南诸河环境质量主要由废水排放总量反映,其次 NH_4^+-N 排放量;西北诸河环境质量主要由废水排放总量反映。

因此,4 对具有统计学意义的典型相关变量 $V_1^{(1)}/W_1^{(1)}$ 、 $V_1^{(2)}/W_1^{(2)}$ 、 $V_1^{(3)}/W_1^{(3)}$ 和 $V_1^{(4)}/W_1^{(4)}$ 最大相关性分别表示为 I ~ III 类水质和废水排放总量(七大流域)、IV ~ V 类水质和废水排放总量(浙闽片河流域)、I ~ III 类水质和废水排放总量(西南诸

表 3 河流环境质量与污染物排放标准化典型变量

Table 3 Standardized canonical variable between river environmental quality and pollutant emission

研究范围	典型变量	表达式
七大流域	$V_1^{(1)}$ 水环境质量	$V_1^{(1)} = -35.739X_1^{(1)} - 11.897X_2^{(1)} - 23.395X_3^{(1)}$
	$W_1^{(1)}$ 污染物排放	$W_1^{(1)} = -0.993X_4^{(1)} - 0.102X_5^{(1)} - 0.014X_6^{(1)}$
浙闽片河流	$V_1^{(2)}$ 水环境质量	$V_1^{(2)} = 0.079X_1^{(2)} + 0.169X_2^{(2)} + 0.110X_3^{(2)}$
	$W_1^{(2)}$ 污染物排放	$W_1^{(2)} = -0.985X_4^{(2)} - 0.089X_5^{(2)} + 0.069X_6^{(2)}$
西南诸河	$V_1^{(3)}$ 水环境质量	$V_1^{(3)} = 24.494X_1^{(3)} + 18.038X_2^{(3)} + 14.320X_3^{(3)}$
	$W_1^{(3)}$ 污染物排放	$W_1^{(3)} = -1.021X_4^{(3)} + 0.315X_5^{(3)} - 0.716X_6^{(3)}$
西北诸河	$V_1^{(4)}$ 水环境质量	$V_1^{(4)} = -16.408X_1^{(4)} - 13.955X_2^{(4)} - 2.876X_3^{(4)}$
	$W_1^{(4)}$ 污染物排放	$W_1^{(4)} = -1.038X_4^{(4)} + 0.193X_5^{(4)} - 0.184X_6^{(4)}$

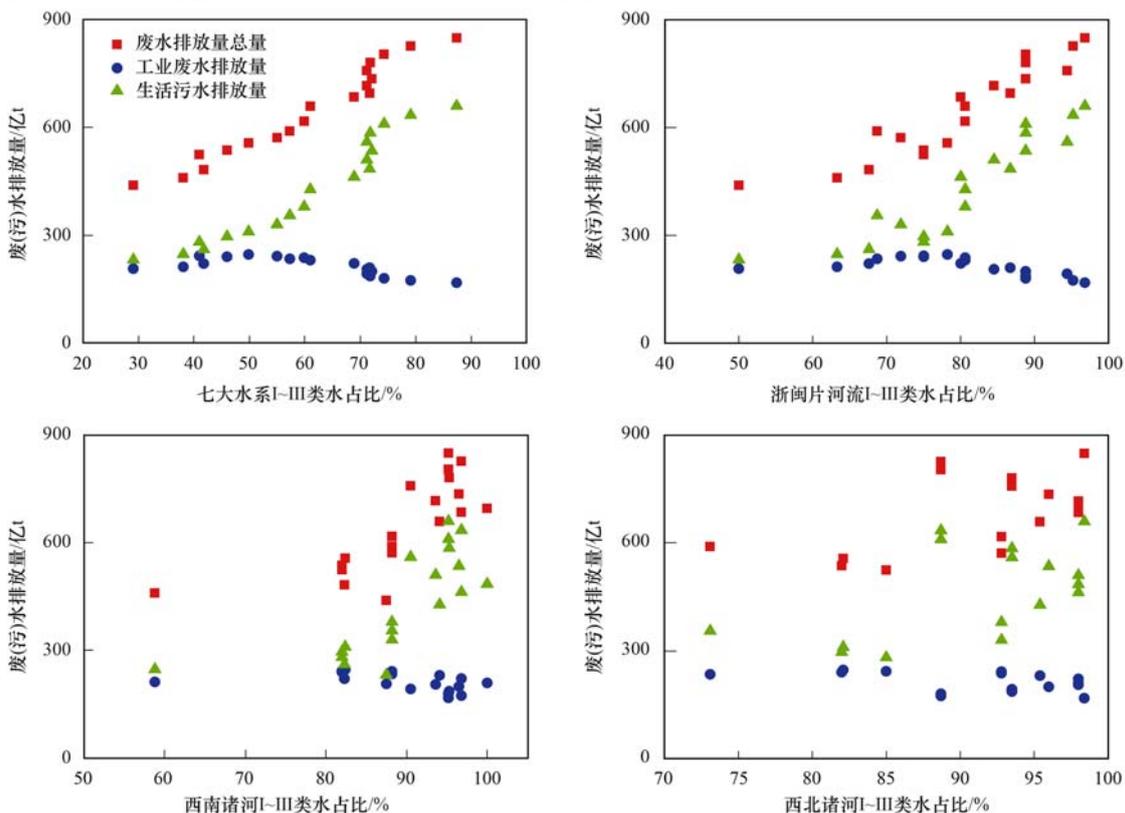


图 7 I ~ III 类水与废水排放相关关系

Fig. 7 Correlation between class I - III and wastewater emission

河流域)和 I ~ III 类水质和废水排放总量(西北诸河流域).

2.2.3 指标内部相关性分析

2002 ~ 2020 年中国废水排放量增加明显(439.5 亿 t → 849.1 亿 t, 其中城镇生活污水排放总量增加(232.3 亿 t → 659.8 亿 t), 而工业废水排放总量减少(207.2 亿 t → 168 亿 t). 2002 ~ 2020 年中国七大流域、浙闽片河、西南诸河和西北诸河流域水质改善明显, I ~ III 类水占比持续增加, 劣 V 类水占比持续下降, 因此七大水系、浙闽片河、西南

诸河和西北诸河 I ~ III 类水占比与废水、生活污水排放量呈正相关趋势, 与工业废水排放量呈负相关趋势, 如图 7 所示; 七大水系、浙闽片河、西南诸河和西北诸河劣 V 类水占比与废水、生活污水排放量呈负相关趋势, 与工业废水排放量呈正相关趋势, 如图 8 所示. 结果表明, 中国在保持经济发展的同时河流环境质量不断改善.

中国河流环境指标(I ~ III 类水和劣 V 类水)与工业源和生活源污染物排放指标 Spearman 相关系数如表 4 所示.

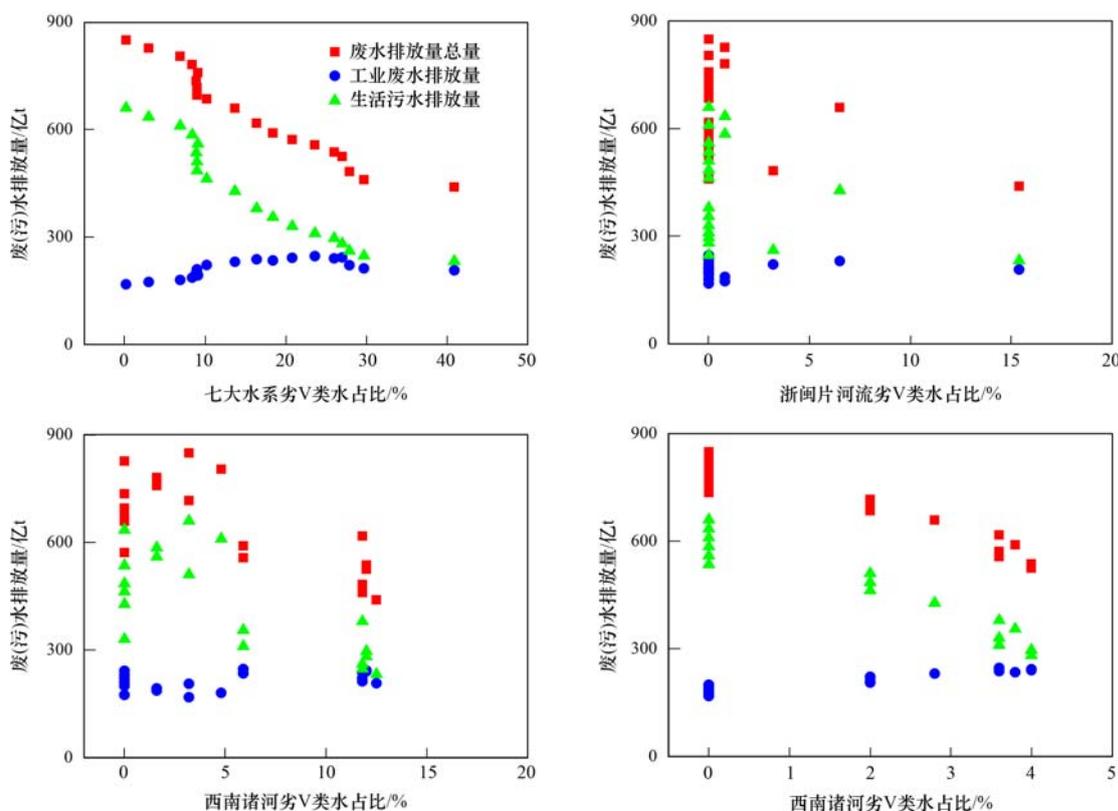


图 8 劣 V 类水与废水排放相关关系

Fig. 8 Correlation between inferior class V and wastewater emission

表 4 I ~ III 类水和劣 V 类水与工业废水污染物排放 Spearman 相关系数¹⁾

Table 4 Spearman correlation coefficient between class I - III water/inferior class V water and industrial wastewater pollutant emissions

因素	七大流域		浙闽片河流		西南诸河		西北诸河			
	R	P	R	P	R	P	R	P		
废水排放量	I ~ III 类	-0.727 ***	0.000	-0.681 ***	0.001	-0.600 ***	0.007	-0.525 **	0.037	
	劣 V 类	0.718 ***	0.000	-0.076	0.756	0.326	0.173	0.903 ***	0.000	
工业源	COD 排放量	I ~ III 类	-0.974 ***	0.000	-0.918 ***	0.000	-0.813 ***	0.000	-0.563	0.232
	劣 V 类	0.970 ***	0.000	0.214	0.379	0.663 **	0.002	0.947 ***	0.000	
NH ₄ ⁺ -N 排放量	I ~ III 类	-0.953 ***	0.000	-0.886 ***	0.000	-0.812 ***	0.000	-0.532 **	0.034	
	劣 V 类	0.952 ***	0.000	0.249	0.305	0.620 **	0.005	0.937 ***	0.000	
污水排放量	I ~ III 类	0.985 ***	0.000	0.955 ***	0.000	0.815	0.000	0.563	0.023	
	劣 V 类	-0.989 ***	0.000	-0.280	0.245	-0.649 ***	0.003	-0.928 ***	0.000	
生活源	COD 排放量	I ~ III 类	-0.048	0.844	-0.091	0.712	0.059 0	0.811	0.314	0.236
	劣 V 类	0.047	0.850	-0.076	0.756	-0.201	0.408	0.381	0.145	
NH ₄ ⁺ -N 排放量	I ~ III 类	-0.204	0.403	-0.244	0.314	0.047	0.848	0.246	0.358	
	劣 V 类	0.209	0.396	-0.069	0.779	-0.238	0.327	0.456	0.076	

1) *** 表示 $P < 0.01$, 99% 的置信水平下相关系数显著, ** 表示 $P < 0.05$, 95% 的置信水平下相关系数显著; 相关系数显著且 $|R| \geq 0.8$ 为高度相关, $0.5 \leq |R| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq |R| < 0.5$ 为低度相关

中国河流环境质量和工业源污染物排放显著相关. 七大流域 I ~ III 类水与工业源污染物排放相关系数为: $|-0.974| > |-0.953| > |-0.727|$, 劣 V 类水与工业源污染物排放相关系数为: $|0.970| > |0.952| > |0.718|$, 表明七大流域 I ~ III 类水与工业源污染物排放呈负相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(高度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(高度负相关) > 工业废水排放量(中度负相关), 七大流域劣 V 类水与工业源污染物排放呈正相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(高度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(高度负相关) > 工业废水排放量(中度负相关). 同理可知, 浙闽片河流域 I ~ III 类水与工业源污染物排放呈负相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(高度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(高度负相关) > 工业废水排放量(中度负相关), 浙闽片河流域劣 V 类水与工业源污染物排放无相关性. 西南诸河流域 I ~ III 类水与工业源污染物排放呈负相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(高度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(高度负相关) > 工业废水排放量(中度负相关), 西南诸河流域劣 V 类水与工业源污染物排放呈正相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(中度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(中度负相关), 与工业废水排放量无

相关性. 西北诸河流域 I ~ III 类水与工业源污染物排放呈负相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(中度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(中度负相关) > 工业废水排放量(中度负相关), 西北诸河流域劣 V 类水与工业源污染物排放呈正相关, 且相关性顺序为: COD 排放量(高度负相关) > NH_4^+ -N 排放量(高度负相关) > 工业废水排放量(高度负相关). 中国河流环境质量和生活源污染物排放相关性较弱. 结果表明, 虽然生活源废水、COD 和 NH_4^+ -N 的排放量均大于工业源排放量, 但是在决定河流环境质量中工业源污染物排放量起到更主要的作用, 因此, 削减工业源污染物排放量对改善中国河流环境质量(特别是污染严重的海河和辽河流域)尤为重要, 工业源污染物削减顺序 COD 排放量优先于 NH_4^+ -N 排放量优先于工业废水排放总量^[37~39].

2.3 河流环境质量-环境污染治理投资指标相关性分析

2.3.1 环境污染治理投资状况

2002 ~ 2020 年, 我国 GDP 增速稳定, GDP 与时间线性规律为: $y = 53\,370x - 40\,050$ ($R^2 = 0.982$), 全国环境污染治理投资占 GDP 比例在 1.32% 上下波动, 如图 9 所示.

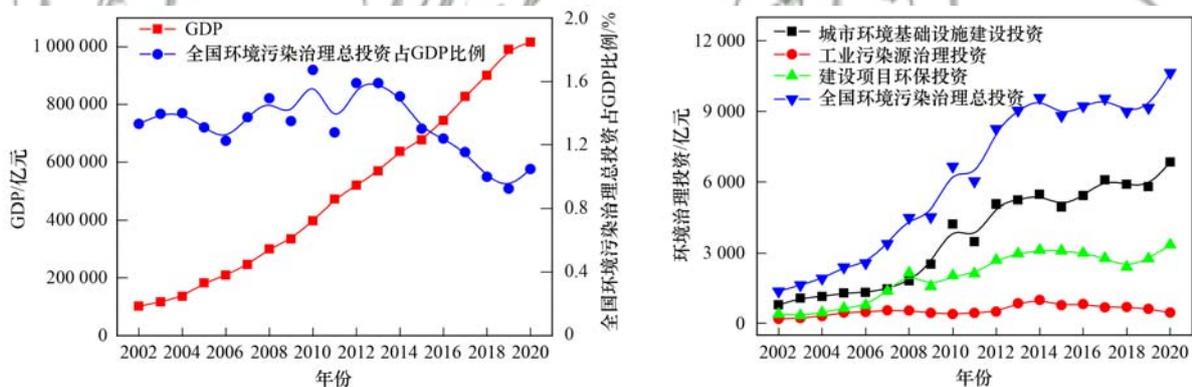


图9 2002 ~ 2020 年 GDP 和环境污染治理投资

Fig. 9 GDP and investment in environmental pollution control from 2002 to 2020

全国环境污染治理投资主要包括城市环境基础设施建设投资、工业污染源治理投资和建设项目环保投资. 2002 ~ 2020 年全国环境污染治理投资持续增长, 其中城市环境基础设施建设投资增长最快, 其次是建设项目环保投资, 而工业污染源治理投资增长最缓慢. 结合河流环境质量-污染物排放指标相关性分析结果, 决定河流环境质量中工业源污染物排放量起到更主要的作用, 因此在环境治理投资中增加工业污染源治理投资数值是改善中国河流水环境质量的重要措施^[40,41].

2.3.2 综合指标相关性分析

对七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北

诸河的 I ~ III 类、IV ~ V 类和劣 V 类水占比与城市环境基础设施建设、工业污染源治理和建设项目环保投资进行典型相关分析. 七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河的环境质量关于污染物排放的典型相关变量中的第一组典型相关系数分别为 0.949、0.912、0.913 和 0.927, 各流域第 1 组之后的典型相关系数均不显著 ($P > 0.01$), 如表 5 所示.

根据表 5 结果, 共有 4 对典型相关变量具有统计学意义, 记为 $N_1^{(1)}/M_1^{(1)}$ 、 $N_1^{(2)}/M_1^{(2)}$ 、 $N_1^{(3)}/M_1^{(3)}$ 和 $N_1^{(4)}/M_1^{(4)}$, 对应的标准化典型变量分别如表 6 所示.

表 5 河流环境质量与环境污染治理投资典型相关性及其显著性检验

Table 5 Typical correlation and significance test between river environmental quality and investment in environmental pollution control

研究范围	典型检验个数	相关系数	特征值	威尔克检验	F 统计量	P 值
七大流域	1	0.949	9.000	0.090	5.988	0.000
	2	0.322	0.116	0.895	0.397	0.809
	3	0.026	0.001	0.999	0.010	0.922
浙闽片河流	1	0.912	4.927	0.109	5.258	0.000
	2	0.596	0.550	0.644	1.720	0.174
	3	0.029	0.001	0.999	0.013	0.912
西南诸河	1	0.913	5.030	0.126	4.732	0.000
	2	0.488	0.312	0.762	1.020	0.414
	3	0.023	0.001	0.999	0.008	0.929
西北诸河	1	0.927	6.080	0.125	3.665	0.005
	2	0.301	0.099	0.888	0.338	0.850
	3	0.156	0.025	0.976	0.298	0.595

表 6 流域环境质量与环境污染治理投资标准化典型变量

Table 6 Standardized canonical variable between river environmental quality and investment in environmental pollution control

研究范围	典型变量	表达式
七大流域	$N_1^{(1)}$ 水环境质量	$N_1^{(1)} = -67.184Y_1^{(1)} - 22.690Y_2^{(1)} - 44.550Y_3^{(1)}$
	$M_1^{(1)}$ 环境污染治理投资	$M_1^{(1)} = -0.659Y_4^{(1)} + 0.020Y_5^{(1)} - 0.375Y_6^{(1)}$
浙闽片河流	$N_1^{(2)}$ 水环境质量	$N_1^{(2)} = -5.944Y_1^{(2)} - 4.148Y_2^{(2)} - 1.702Y_3^{(2)}$
	$M_1^{(2)}$ 环境污染治理投资	$M_1^{(2)} = -0.712Y_4^{(2)} - 0.326Y_5^{(2)} - 0.043Y_6^{(2)}$
西南诸河	$N_1^{(3)}$ 水环境质量	$N_1^{(3)} = 31.144Y_1^{(3)} + 22.684Y_2^{(3)} + 18.049Y_3^{(3)}$
	$M_1^{(3)}$ 环境污染治理投资	$M_1^{(3)} = 0.722Y_4^{(3)} + 0.058Y_5^{(3)} - 1.676Y_6^{(3)}$
西北诸河	$N_1^{(4)}$ 水环境质量	$N_1^{(4)} = -0.249Y_1^{(4)} + 0.166Y_2^{(4)} + 0.691Y_3^{(4)}$
	$M_1^{(4)}$ 环境污染治理投资	$M_1^{(4)} = -0.787Y_4^{(4)} - 0.127Y_5^{(4)} - 0.156Y_6^{(4)}$

七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河水环境质量标准化典型系数顺序分别为： $| -67.184 | > | -44.550 | > | -22.690 |$ 、 $| -5.944 | > | -4.148 | > | -1.702 |$ 、 $| 31.144 | > | 22.684 | > | 18.049 |$ 和 $| 0.691 | > | -0.249 | > | 0.166 |$ ，表明在河流环境质量方面，七大流域环境质量主要由 I ~ III 类水质反映，其次是劣 V 类水质；浙闽片河流环境质量主要由 I ~ III 类水质反映，其次是 IV ~ V 类水质；西南诸河环境质量主要由 I ~ III 类水质反映，其次是 IV ~ V 类水质；西北诸河环境质量主要由劣 V 类水质反映，其次是 I ~ III 类水质。七大流域、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河环境污染治理投资标准化典型系数顺序分别为： $| -0.659 | > | -0.375 | > | 0.020 |$ 、 $| -0.712 | > | -0.326 | > | -0.043 |$ 、 $| -1.676 | > | 0.772 | > | 0.058 |$ 和 $| -0.787 | > | -0.156 | > | -0.127 |$ ，表明在河流环境质量方面，七大流域环境质量主要由城市环境基础设施建设投资反映，其次是建设项目环保投资；浙闽片河流环境质量主要由城市环境基础设施建设投资反映，其次是工业污染源治理投资；西南诸河环境质量主要由建设项目环保投资反映，其次城市环境基础设施建设投资；西北诸河环境质量主

要由城市环境基础设施建设投资反映。

因此，4 对具有统计学意义的典型相关变量 $N_1^{(1)}/M_1^{(1)}$ 、 $N_1^{(2)}/M_1^{(2)}$ 、 $N_1^{(3)}/M_1^{(3)}$ 和 $N_1^{(4)}/M_1^{(4)}$ 最大相关性分别表示为 I ~ III 类水质和城市环境基础设施建设投资（七大流域）、I ~ III 类水质和城市环境基础设施建设投资（浙闽片河流域）、I ~ III 类水质和建设项目环保投资（西南诸河流域）和劣 V 类水质和城市环境基础设施建设投资（西北诸河流域）。

2.3.3 指标内部相关性分析

2002 ~ 2020 年全国环境污染治理投资增加明显（1 363.4 亿元 → 10 638.9 亿元），其中城市环境基础设施建设投资增加最多（785.3 亿元 → 6 842.2 亿元），其次为建设项目环保投资（389.7 亿元 → 3 342.5 亿元），工业污染源治理投资增长最缓慢（188.4 亿元 → 454.3 亿元）。同时，2002 ~ 2020 年中国七大流域、浙闽片河流域、西南诸河流域和西北诸河流域水质改善明显，I ~ III 类水占比持续增减，劣 V 类水占比持续下降，因此七大水系、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河 I ~ III 类水占比与城市环境基础设施建设、工业污染源治理和建设项目环保投资呈正相关趋势，如图 10 所示；而七大水系、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河劣 V 类水占比与城市环境基础设施建设、工业污染源治理和建

设项目环保投资呈负相关趋势,如图 11 所示. 结果表明,2002 ~ 2020 年中国保持经济形式良好,环境

保护治理投资逐步增加,河流水环境质量持续改善,实现了经济发展和环境保护的良性发展.

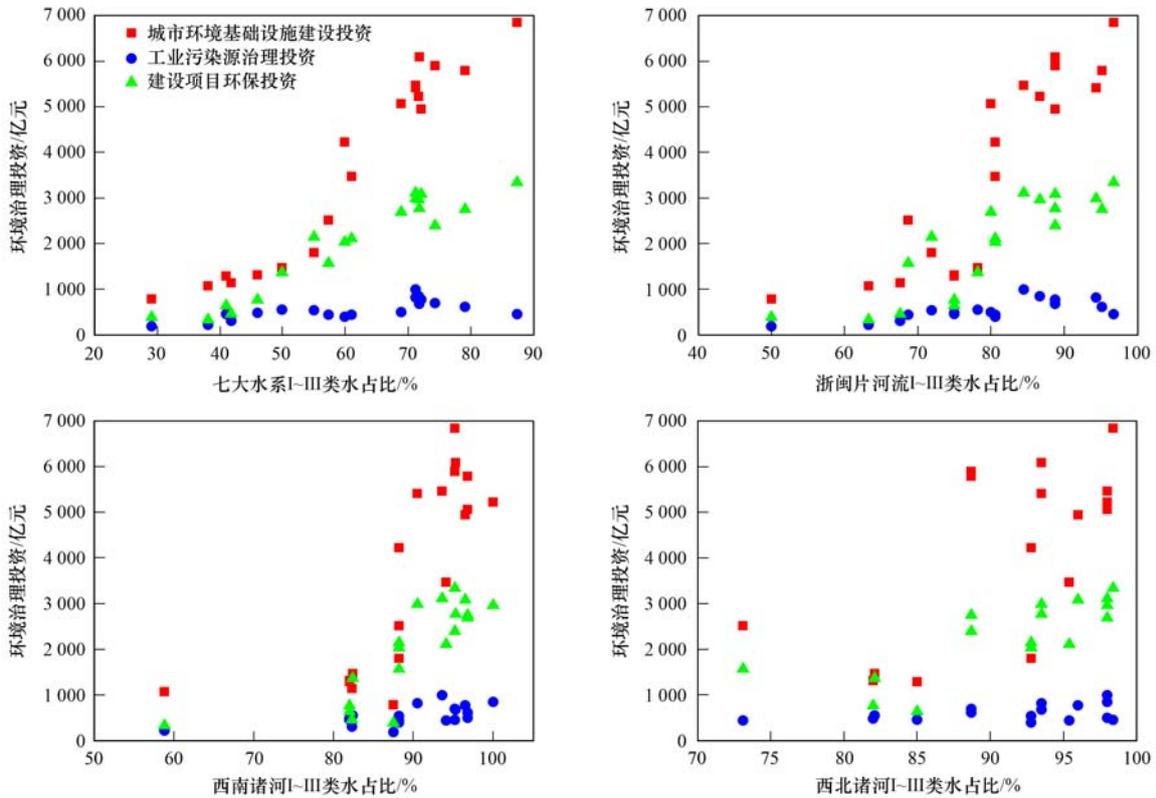


图 10 1 ~ III类水质与环境污染治理投资相关关系

Fig. 10 Correlation between class I-III and investment in environmental pollution control

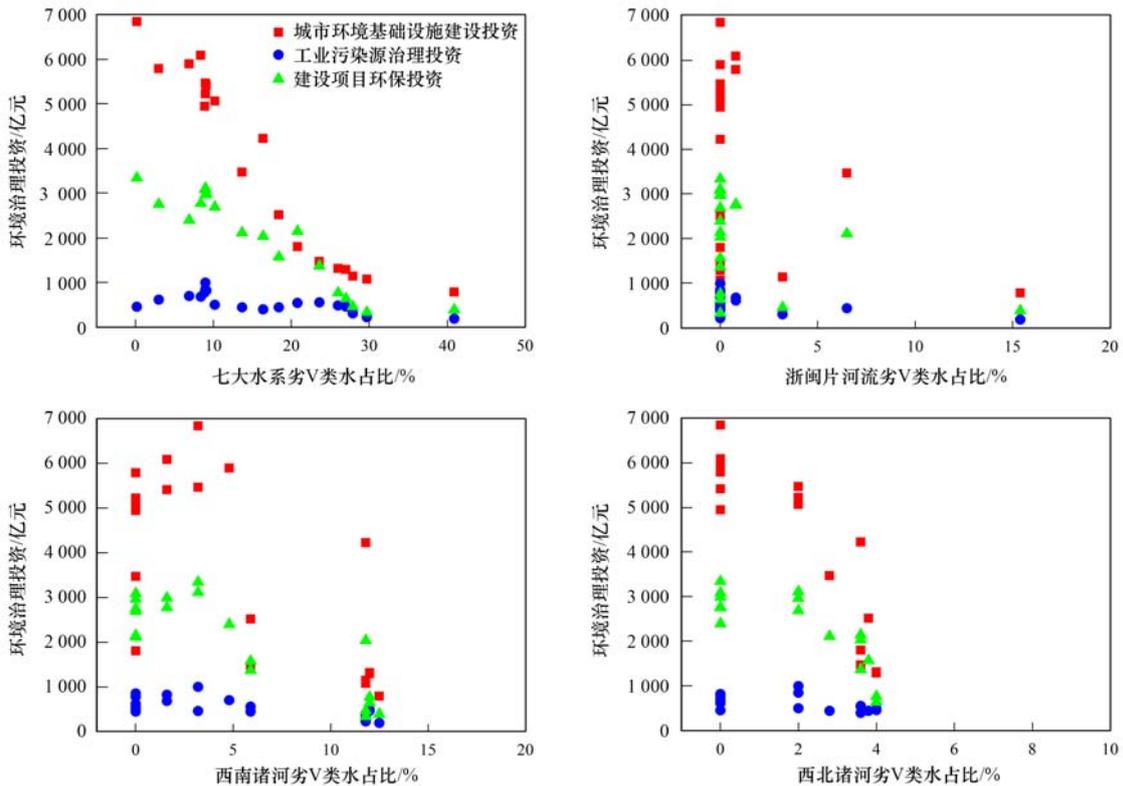


图 11 劣 V 类水质与环境污染治理投资相关关系

Fig. 11 Correlation between inferior class V and investment in environmental pollution control

中国河流环境指标(I~Ⅲ类水和劣V类水)与环境污染治理投资指标(城市环境基础设施建设投资、工业污染源治理投资和建设项目环保投资) Spearman 相关系数如表7所示。

表7 I~Ⅲ类和劣V类水与环境污染治理投资 Spearman 相关系数¹⁾

Table 7 Spearman correlation coefficient between class I-Ⅲ water/inferior class V water and investment in environmental pollution control

投资指标	环境指标	七大流域		浙闽片河流		西南诸河		西北诸河	
		R	P	R	P	R	P	R	P
城市环境基础设施建设投资	I~Ⅲ类	0.954***	0.000	0.916***	0.000	0.800***	0.000	0.825***	0.000
	劣V类	-0.971***	0.000	-0.266	0.272	-0.600***	0.007	-0.868***	0.000
工业污染源治理投资	I~Ⅲ类	0.651***	0.003	0.675***	0.002	0.600***	0.007	0.489*	0.055
	劣V类	-0.659***	0.002	-0.418*	0.075	-0.595***	0.007	-0.507**	0.045
建设项目环保投资	I~Ⅲ类	0.892***	0.000	0.865***	0.000	0.797***	0.000	0.829***	0.000
	劣V类	-0.893***	0.000	-0.317	0.186	-0.713***	0.000	-0.794***	0.000

1) ***表示 $P < 0.01$, 99%的置信水平下相关系数显著, **表示 $P < 0.05$, 95%的置信水平下相关系数显著, *表示 $P < 0.1$, 90%的置信水平下相关系数显著; 相关系数显著且 $|R| \geq 0.8$ 为高度相关, $0.5 \leq |R| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq |R| < 0.5$ 为低度相关

中国河流环境质量和环境污染治理投资指标显著相关. 七大流域I~Ⅲ类水与环境污染治理投资相关系数大小为: $|0.954| > |0.892| > |0.651|$, 劣V类水与环境污染治理投资相关系数大小为: $|-0.971| > |-0.893| > |-0.659|$, 表明七大流域I~Ⅲ类水质与环境污染治理投资呈正相关, 且相关性顺序为: 城市环境基础设施建设投资(高度正相关) > 建设项目环保投资(高度正相关) > 工业污染源治理投资(中度正相关), 七大流域劣V类水质与环境污染治理投资呈负相关, 且相关性顺序为: 城市环境基础设施建设投资(高度负相关) > 建设项目环保投资(高度负相关) > 工业污染源治理投资(中度负相关). 同理可知, 浙闽片河流域I~Ⅲ类水质与环境污染治理投资呈正相关, 且相关性顺序为: 城市环境基础设施建设投资(高度正相关) > 建设项目环保投资(高度正相关) > 工业污染源治理投资(中度正相关), 浙闽片河流域劣V类水质与环境污染治理投资相关性差. 西南诸河流域I~Ⅲ类水质与环境污染治理投资呈正相关, 且相关性顺序为: 城市环境基础设施建设投资(高度正相关) > 建设项目环保投资(中度正相关) > 工业污染源治理投资(中度正相关), 西南诸河流域劣V类水质与环境污染治理投资呈负相关, 且相关性顺序为: 建设项目环保投资(中度负相关) > 城市环境基础设施建设投资(中度负相关) > 工业污染源治理投资(中度负相关). 西北诸河流域I~Ⅲ类水质与环境污染治理投资呈正相关, 且相关性顺序为: 建设项目环保投资(高度正相关) > 城市环境基础设施建设投资(高度正相关) > 工业污染源治理投资(低度正相关), 西北诸河流域劣V类水质与环境污染治理投资呈负相关, 且相关性顺序为: 城市环境基础设施建设投资(高度负相关) > 建设项目环保投资(中度负相关) > 工业污染源治理投资(中度负

相关).

结果表明, 七大流域、浙闽片河流域和西南诸河流域I~Ⅲ类水质主要受城市环境基础设施建设投资(高度正相关)影响, 西北诸河流域I~Ⅲ类水质主要受建设项目环保投资(高度正相关)影响, 结合2002~2020年全国环境污染治理投资增长速度顺序为城市环境基础设施建设投资 > 建设项目环保投资 > 工业污染源治理投资. 因此, 在环境治理投资中增加工业污染源治理投资数值是改善中国河流环境质量的重要措施^[42-44].

2.4 中国河流环境质量演变驱动因子相关性

中国七大流域、浙闽片河、西南诸河和西北诸河流域是中国河流/流域地表水体系主要组成部分, 流域面积超过900万 km^2 , 十大流域环境质量改善对中国的经济发展和社会稳定起到重要作用. 2002~2020年中国河流环境质量改善明显, 2002年长江、黄河、珠江、淮河、海河、辽河、松花江、浙闽片河流、西南诸河和西北诸河流域(西北诸河流域2005年首次统计)中I~Ⅲ类水占比分别为51.5%、22.7%、73.5%、16.1%、14.4%、17.9%、27.8%、50%、87.5%和85%; 2020年十大流域I~Ⅲ类水占比则提高到96.7%、84.7%、92.7%、78.9%、64%、70.9%、82.4%、96.8%、95.2%和98.4%, 如图12所示.

河流环境质量改善与污染物排放和环境污染治理投资密切相关. 七大流域、浙闽片河流和西北诸河流域环境质量指标-污染物排放指标典型相关系数分别为0.985、0.947和0.956, 大于环境质量指标-环境污染治理投资指标典型相关系数0.949、0.912和0.927, 结果表明典型变量 $V_1^{(1)}/W_1^{(1)}$ 、 $V_1^{(2)}/W_1^{(2)}$ 和 $V_1^{(4)}/W_1^{(4)}$ 的相关性大于 $N_1^{(1)}/M_1^{(1)}$ 、 $N_1^{(2)}/M_1^{(2)}$ 和 $N_1^{(4)}/M_1^{(4)}$, 在一定程度上说明污染物排放是影响七大流域、浙闽片河流和西北诸河流域环境质

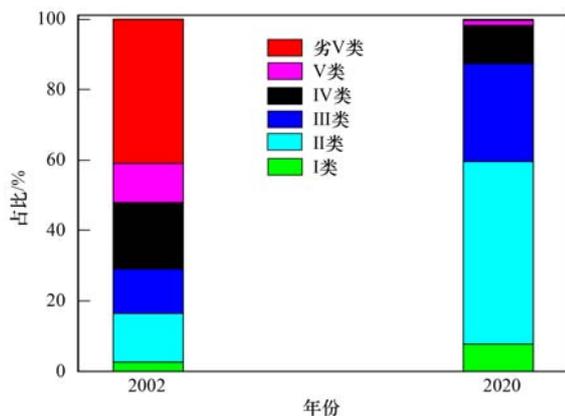


图 12 2002 年和 2020 年中国河流环境质量

Fig. 12 River environmental quality in China in 2002 and 2020

量关键驱动因子^[45]. 因此,改善七大流域、浙闽片河和西北诸河流域环境质量首要措施是削减污染物排放. 根据典型相关分析和 Spearman 相关性分析结果,七大流域、浙闽片河和西北诸河流域污染物削减优先顺序均为:COD > NH₄⁺-N > 废水总量.

西南诸河流域环境质量指标-环境污染治理投资指标典型相关系数为 0.913,大于环境质量指标-污染物排放指标典型相关系数 0.884,表明典型变量 $N_1^{(3)}/M_1^{(3)}$ 相关性大于 $V_1^{(3)}/W_1^{(3)}$,在一定程度上说明环境污染治理投资是影响西南诸河流域环境质量的关键驱动因子,因此,改善西南诸河流域环境质量的首要措施是增加环境污染治理投资^[46]. 根据典型相关分析和 Spearman 相关性分析结果,同时考虑到西南诸河流域水质为优,全国工业污染源治理投资比例较低,西南诸河流域增加环境治理投资优先顺序为:工业污染源治理投资 > 城市环境基础设施建设投资和建设项目环保投资.

3 结论

2002 ~ 2020 年全国河流环境质量改善明显,2002 年 I ~ III 类水占比 29.1%,劣 V 类水占比 40.9%; 2020 年 I ~ III 类水占比 87.4%,劣 V 类水占比 0.2%. 七大流域、浙闽片河流域、西南诸河流域和西北诸河流域 I ~ III 类水质与工业源污染物排放呈负相关,且相关性顺序为:COD 排放量 > NH₄⁺-N 排放量 > 工业废水排放量. 七大流域、浙闽片河流域和西南诸河流域 I ~ III 类水质与环境污染治理投资呈正相关,且相关性顺序为:城市环境基础设施建设投资 > 建设项目环保投资 > 工业污染源治理投资; 西北诸河流域 I ~ III 类水质与环境污染治理投资呈正相关,且相关性顺序为:建设项目环保投资 > 城市环境基础设施建设投资 > 工业污染源治理投资(西北诸河流域). 七大流域、浙闽片河流和西

北诸河流域环境质量改善首要措施是削减污染物排放,污染物削减优先顺序均为:COD > NH₄⁺-N > 废水总量. 西南诸河流域环境质量改善首要措施是增加环境污染治理投资,环境治理投资增加的优先顺序为:工业污染源治理投资 > 城市环境基础设施建设投资和建设项目环保投资.

致谢:感谢青岛理工大学环境与市政工程学院肖宜华教授、李慧颖副教授和王浩策同学在文章修改和绘图方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 韩谓,潘保柱,陈越,等. 黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5786-5795.
Han X, Pan B Z, Chen Y, et al. Characteristics of water environment and spatial-temporal distribution of nitrogen and phosphorus load in the Yellow River [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5786-5795.
- [2] Ma T, Sun S A, Fu G T, et al. Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality [J]. Nature Communications, 2020, 11(1), doi: 10.1038/s41467-020-14532-5.
- [3] 郁达伟,于森,魏源送,等. 1980 ~ 2010 年温榆河的水环境质量时空演变特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2803-2813.
Yu D W, Yu M, Wei Y S, et al. Spatio-temporal evolution of water environment quality in Wenyu River during 1980-2010 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11): 2803-2813.
- [4] Liu B, Zhang F L, Qin X S, et al. Spatiotemporal assessment of water security in China: an integrated supply-demand coupling model[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128955.
- [5] 车蕊,林澍,范中亚,等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4440-4449.
Che R, Lin S, Fan Z Y, et al. Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang River Basin [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4440-4449.
- [6] 李雨欣,薛东前,宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1574-1584.
Li Y X, Xue D Q, Song Y Y. Spatio-temporal characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(7): 1574-1584.
- [7] 高永霞,朱广伟,贺冉冉,等. 天目湖水质演变及富营养化状况研究[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 673-679.
Gao Y X, Zhu G W, He R R, et al. Variation of water quality and trophic state of Lake Tianmu, China [J]. Environmental Science, 2009, 30(3): 673-679.
- [8] 严登华,王坤,李相南,等. 全球陆地地表水资源演变特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 703-712.
Yan D H, Wang K, Li X N, et al. Evolution characteristics of global land surface water resources [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 703-712.
- [9] 熊鸿斌,张斯思,匡武,等. 基于 MIKE11 模型入河污染源处理措施的控制效能分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1573-1581.
Xiong H B, Zhang S S, Kuang W, et al. Control measure efficiency analysis of estuarine water pollution sources based on

- MIKE11 model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1573-1581.
- [10] Yan Z H, Yang H H, Dong H K, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of organic micropollutants in the lower reaches of the Yangtze River, China; a case study of water diversion[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 223-232.
- [11] Zhu Q, Zhang H. Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **609**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127759.
- [12] Luo Z L, Shao Q X, Zuo Q T, *et al.* Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **584**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124655.
- [13] Du Z H, Qi J, Wu S S, *et al.* A spatially weighted neural network based water quality assessment method for large-scale coastal areas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(4): 2553-2563.
- [14] 刘彦龙, 郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1332-1345.
Liu Y L, Zheng Y A. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River Basin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1332-1345.
- [15] 陈善荣, 何立环, 张凤英, 等. 2016—2019 年长江流域水质时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1100-1108.
Chen S R, He L H, Zhang F Y, *et al.* Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016-2019 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1100-1108.
- [16] 田颖, 梁云平, 郭婧, 等. “水十条”对北京市地表水环境质量改善分析[J]. *环境工程*, 2019, **37**(4): 1-6.
Tian Y, Liang Y P, Guo J, *et al.* Analysis on improvement effect of *Ten-Action Plan* for prevention and control of water pollution on surface water in Beijing[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(4): 1-6.
- [17] 张凤英, 周密, 李一龙, 等. “十三五”期间中国生态环境质量变化特征[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(3): 1-8.
Zhang F Y, Zhou M, Li Y L, *et al.* Characteristics of eco-environmental quality changes in China during the 13th Five-Year Plan Period[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(3): 1-8.
- [18] Liu M D, Zhang W, Wang X J, *et al.* Mercury release to aquatic environments from anthropogenic sources in China from 2001 to 2012 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(15): 8169-8177.
- [19] 李名升, 孙媛, 陈远航, 等. 污染排放与环境质量关系模型构建与应用[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1198-1204.
Li M S, Sun Y, Chen Y H, *et al.* Establishment and application of pollutant discharge-environment quality model [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1198-1204.
- [20] Guan X J, Liu M, Meng Y. A comprehensive ecological compensation indicator based on pollution damage-protection bidirectional model for river basin [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **126**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107708.
- [21] Xu H X, Gao Q, Yuan B. Analysis and identification of pollution sources of comprehensive river water quality: evidence from two river basins in China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **135**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108561.
- [22] 张远, 林佳宁, 王慧, 等. 中国地表水环境质量标准研究[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(11): 2523-2528.
- Zhang Y, Lin J N, Wang H, *et al.* Research on environmental quality standard for surface water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(11): 2523-2528.
- [23] Liu S F, Cai H T, Wang J W, *et al.* *In-situ* expressions of comammox *Nitrospira* along the Yangtze River [J]. *Water Research*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117241.
- [24] 稽晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 等. 近年全国地表水水质变化特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4419-4429.
- Ji X Y, Hou H H, Wang S S, *et al.* Variation characteristics of surface water quality in China in recent years [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4419-4429.
- [25] Xu J, Xu M, Zhao Y X, *et al.* Spatial-temporal distribution and evolutionary characteristics of water environment sudden pollution incidents in China from 2006 to 2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149677.
- [26] 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.
- [27] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 中国突发水污染事件时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4566-4575.
Xu J, Wang Y G, Chen Y, *et al.* Spatial distribution and temporal variation of sudden water pollution incidents in China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4566-4575.
- [28] Zhang J, Guo Q J, Du C J, *et al.* Quantifying the effect of anthropogenic activities on water quality change in the Yangtze River from 1981 to 2019 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **363**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132415.
- [29] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1190-1200.
Wang L L, Liu X J, Li D, *et al.* Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1190-1200.
- [30] 李晶晶, 苏鹏飞, 张建国. 黄河流域生态保护和高质量发展规划区水土流失特征与防治对策[J]. *水土保持通报*, 2021, **41**(5): 238-243, 254.
- Li J J, Su P F, Zhang J G. Soil erosion characteristics and prevention countermeasures for ecological protection and high-quality development planning in Yellow River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(5): 238-243, 254.
- [31] Xu Z C, Cheng L, Liu P, *et al.* Investigating the spatial variability of water security risk and its driving mechanisms in China using machine learning [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **362**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132303.
- [32] Li G D, Masuda S, Nagai M. An optimal prediction model for time series prediction in manufacturing systems [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, **67**(9): 2343-2349.
- [33] Sun S K, Yin Y L, Wu P T, *et al.* Geographical evolution of agricultural production in china and its effects on water stress, economy, and the environment: the virtual water perspective [J]. *Water Resources Research*, 2019, **55**(5): 4014-4029.
- [34] 王以斌, 刘军, 邵帅, 等. 连云港近岸海域 2011~2016 年环境变化研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3430-3440.

- Wang Y B, Liu J, Shao S, *et al.* 2011 ~ 2016 marine environment temporal variations research in the Lianyungang coastal area[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3430-3440.
- [35] 王超, 张洪, 唐文忠, 等. 海河流域主要污染物排放强度及其源结构解析——以 2007 年为例[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2345-2353.
Wang C, Zhang H, Tang W Z, *et al.* Structure analysis of river pollution source in the Haihe River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2345-2353.
- [36] Liu D, Yang H, Thompson J R, *et al.* COVID-19 lockdown improved river water quality in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **802**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149585.
- [37] 王子为, 林佳宁, 张远, 等. 鄱阳湖入湖河流氮磷水质控制限值研究[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1163-1169.
Wang Z W, Lin J N, Zhang Y, *et al.* Water quality limits of nitrogen and phosphorus in the inflow rivers of Poyang Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1163-1169.
- [38] 高可伟, 朱元荣, 孙福红, 等. 我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(5): 1400-1414.
Gao K W, Zhu Y R, Sun F H, *et al.* A study on the collaborative control of water quality of nitrogen and phosphorus between typical lakes and their inflow rivers in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(5): 1400-1414.
- [39] Lu J. Can the central environmental protection inspection reduce transboundary pollution? Evidence from river water quality data in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **332**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130030.
- [40] Ayamba E C, Chen H B, Ibn Musah A A, *et al.* An empirical model on the impact of foreign direct investment on China's environmental pollution: analysis based on simultaneous equations[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(16): 16239-16248.
- [41] Liu Q Q, Wang S J, Zhang W Z, *et al.* Does foreign direct investment affect environmental pollution in China's cities? A spatial econometric perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 521-529.
- [42] Liu K, Lin B Q. Research on influencing factors of environmental pollution in China: a spatial econometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **206**: 356-364.
- [43] Zhang D Y, Du W C, Zhuge L Q, *et al.* Do financial constraints curb firms' efforts to control pollution? Evidence from Chinese manufacturing firms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **215**: 1052-1058.
- [44] Zhang M, Liu X X, Ding Y T, *et al.* How does environmental regulation affect haze pollution governance? —An empirical test based on Chinese provincial panel data[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133905.
- [45] 伍健雄, 周侃, 刘汉初. 城市化过程对氨氮排放的驱动作用与空间交互特征——以长三角地区为例[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(10): 3893-3904.
Wu J X, Zhou K, Liu H C. Driving effects and spatial interaction of urbanization on ammonia nitrogen emissions: a case study of the Yangtze River delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(10): 3893-3904.
- [46] 李名升, 周磊, 陈远航, 等. 经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3212-3218.
Li M S, Zhou L, Chen Y H, *et al.* Effect of economic structure adjustment on pollution emission: a case study of COD [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3212-3218.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China; Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite@Activated Carbon Composite Under Batch Experiments; Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity; Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions; A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)