

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝沈, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

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 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

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

马小雪^{1,2}, 龚畅³, 郭加汛⁴, 王腊春^{4*}, 徐蕴韵⁴, 赵春发⁵

(1. 江苏第二师范学院城市与资源环境学院, 南京 210013; 2. Signal Processing in Earth Observation (SiPEO), Technical University of Munich (TUM), 80333 Munich, Germany; 3. 江苏省水文水资源勘测局宿迁分局, 宿迁 223800; 4. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 5. 南京市江宁区水务局, 南京 211100)

摘要: 明晰区域水污染现状及污染物与污染源之间的关系是实施水环境精细化管理和区域水污染治理对策的前提。水质标识指数法(WQI)和聚类分析(CA)被用于研究2015~2019年秦淮河流域29个监测站点的11个水质参数的时空变化特征,并利用PMF模型和SIAR同位素源解析模型解析秦淮河流域的污染物来源及贡献率。结果表明,秦淮河流域河道水体总体为中度污染,TN浓度超标是流域水体污染的主要原因;2015~2019年WQI值呈现下降的趋势;空间聚类和PMF分析结果显示:①高污染区位于秦淮河下游城市化程度较高的城区、溧水主城区和江宁大学城内的河道及牛首山河,污染源主要为生活污水、商服业污水(28.88%)及工业废水排放(27.43%);②中污染区位于秦淮河下游的江宁开发区和秣陵街道及中上游的禄口街道内河道,主要污染源为城乡生活废水和商服污水(31.62%)、工业废水(27.25%)和内源污染(24.76%);③低污染区位于秦淮河流域湖熟街道内河道及二、三千河,主要污染源为农村生活污水和生活垃圾(28.79%)及农业非点源污染(24.3%);云台山河子流域内 NO_3^- -N是氮污染物在子流域接纳水体中的主要存在形式,SIAR溯源结果显示云台山河子流域的 NO_3^- -N主要来源于生活污水(61%)和土壤有机氮(34%)。本研究结果可为秦淮河流域水污染治理和水生态保护措施提供科学依据和基础。

关键词: 水污染; PMF法; SIAR模型; 源贡献; 秦淮河流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3291-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011184

Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment

MA Xiao-xue^{1,2}, GONG Chang³, GUO Jia-xun⁴, WANG La-chun^{4*}, XU Yun-yun⁴, ZHAO Chun-fa⁵

(1. College of Urban Resources and Environment, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China; 2. Signal Processing in Earth Observation (SiPEO), Technical University of Munich (TUM), 80333 Munich, Germany; 3. Suqian Hydrological and Water Resources Management Bureau of Jiangsu Province, Suqian 223800, China; 4. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 5. Water Affairs Bureau of Jiangning District, Nanjing City, Nanjing 211100, China)

Abstract: Clarifying the current situation of regional water pollutants and the relationship between pollutants and pollution sources is considered essential for managing the water environment. Water quality identification index (WQI), cluster analysis (CA), positive matrix factorization (PMF), and stable isotope analysis in R (SIAR) were employed to interpret a large and complex water quality data set of the Qinhuai River catchment generated during 2015 to 2019 to monitor of 11 parameters at 29 different sampling sites. WQI analysis indicated that water quality in Qinhuai River catchment is considered to have "moderate pollution," and an improving trend of water quality was observed at the interannual scale. TN was the most deteriorated of all pollution parameters. CA and PMF results on the spatial scale revealed that sampling sites located at downtown of Nanjing and Lishui District or Jangling University town were highly polluted due to the sewage from domestic sewage and business service sewage (28.88%) as well as industrial wastewater (27.43%), while sampling sites located at Hushu Street Administrative District, Ergan River, and Sangan River were slightly polluted by rural domestic wastewater and garbage (28.79%), and agricultural non-point source pollution (24.3%). The middle-lower reaches (Jiangning Development Zone and Moling Street) and middle reaches (Lukou Street Administrative District) were moderately polluted by industrial wastewater (27.25%), sewage from domestic wastewater and business service wastewater (31.62%) as well as inner sources (24.76%). The SIAR results showed that NO_3^- -N was the main nitrogen form, and the NO_3^- -N mainly originated from sewage (61%) and soil (34%) in the Yuntaishan River sub-catchment. These results will aid in the development of measures required to control water pollution in river catchments.

Key words: water pollution; PMF method; SIAR method; source contribution; Qinhuai River catchment

收稿日期: 2020-11-22; 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目(19KJB170002); 江苏第二师范学院引进高层次人才科研启动经费项目(921001); 南京市水务科技项目(201806); 国家留学基金委项目

作者简介: 马小雪(1986~),女,博士,讲师,主要研究方向为生态水文学和城市水环境,E-mail: maxiaoxue029@126.com

* 通信作者, E-mail: wang6312@263.net.cn

厘清地表水体污染物的时空分布模式是建立高效合理的水环境管理方案的前提。但湖泊、河流和水库等面临的主要水污染问题却随着经济的发展而发生变化。中国环境状况公报显示 1990 年我国河流的主要污染物为氨氮、挥发性酚和好氧有机物, 2000 年主要为有机污染, 2010 年主要污染指标为高锰酸盐指数、BOD 和氨氮, 2015 年主要为 COD、BOD 和总磷^[1]。同时, 污染源的地域差异性也导致了水问题的地域差异性。“三产”废水、农业面源污染和污水处理厂尾水排放等造成浑河沈阳段 COD、氨氮和 TP 严重超标^[2], 城区生活污水、管内沉积物、工业园区废水和地表径流导致武汉市湖溪河流域水体黑臭^[3], 饲料厂、家具和制药厂及畜禽粪便造成天津独流减河营养盐污染^[4], 含氮肥料、土壤有机氮、人畜排泄物和城市生活污水输入造成松花江流域氮污染^[5]。因而, 及时了解区域水体污染特征和来源特征对探索水质的时空分布模式和实现有针对性的污染源治理具有重要意义。

聚类分析(CA)、主成分分析(PCA)和因子分析(FA)等多元统计方法与单因子污染指数、内梅罗污染指数和水质标识指数(WQI)等水质评价方法的结合使从不同时空尺度探索水污染的分布规律成为可能^[6]。溯源技术的发展使污染物溯源分析从定性发展到定量, 其中正定矩阵因子分解模型(PMF)和主成分/因子分析-多元线性回归(PCA/FA-MLR)等受体模型因不需输入确切的污染源排放信息就可鉴别水、土和气环境中的潜在污染源和贡献率而得到较广的应用^[7-9]。而 PCA/FA-MLR 方法因存在未考虑水质参数的不确定性、计算过程繁琐和对污染源的认定存在主观性等缺点^[7, 8]而稍逊于 PMF 模型。PMF 因对源谱信息的依赖性较低、分担率非负、可处理不确定的数据等优点而具有更好的性能^[8, 9]。对于典型氮高污染的区域, 稳定同位素技术在解析氮污染来源方面表现出较强的优越性, 只需监测与氮相关的水质因子, 再根据相应的同位素源解析模型(SIAR)和同位素混合模型(IMM)等就可识别流域氮来源并估算特定污染源贡献^[10, 11]。

秦淮河是长江下游右岸的一条重要支流, 流域包含南京市江宁区、溧水区、主城区一部分和镇江的句容市。不同行政区划经济发展定位和城市化发展程度的差异性, 使流域内的污染源构成日趋复杂。为此, 本文选取水温、DO、pH、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、Zn、氟化物、TN 和 TP 等 11 项水质因子为研究对象, 利用 WQI 和 CA 法分析 2015 ~ 2019 年流域水污染的时空变化特征, 利用 CA 和 PMF 模型分析流域内不同研究区域的水质污染来

源及贡献, 同时利用 SIAR 模型分析流域内典型区域的氮污染来源及贡献, 以期为南京城市化进程中的水污染治理提供指导, 也为长江下游类似区域的水生态保护决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦淮河流域在江苏省西南部, 流域总面积 2 635 km², 全长 110 km(图 1)。流域地处北亚热带向暖温带过渡的季风区, 年均温 15 ~ 16℃, 多年平均年降雨量 1 034 ~ 1 276 mm, 其中 4 ~ 9 月(汛期)降雨量占全年雨量的 70.6%^[6]。流域上游有南北两源, 北源的句容河源自句容市的茅山和宝华山, 长约 41 km, 集水面积 1 260 km²; 南源的溧水河发源于溧水区的东庐山, 集水面积 681 km², 长约 35 km, 两源在江宁区汇合后逶迤北流。流域内各行政区所占面积比例、城市化水平和不透水面增长率都存在差异性。流域内的南京市主城区、江宁区、溧水区和镇江句容市分别占流域总面积的 8.8%、40.1%、33.4% 和 17.7%, 且区域内部城市化水平存在差异性, 2019 年南京市主城区的城市化率在 95% 以上, 江宁区、溧水区和句容区的城市化率分别为 74.32%、62.35% 和 59.27%。2011 ~ 2015 年秦淮河流域的不透水面增加 2.78%, 其中南京城区、江宁、溧水和句容分别增加 0.14%、3.95%、2.71% 和 1.87%, 此期间江宁的不透水面增加最多。2014 ~ 2019 年江宁、溧水和句容城市人口增加 19 万、1.8 万和 3.55 万人, 其中江宁是南京市城镇化进程最快的区域, 2019 年江宁成为南京市常住人口最多的区域。

云台山河子流域位于南京市城市化快速发展的江宁开发区境内, 隶属于秦淮河流域, 全长 9.4 km, 总面积为 183.26 km²。受江宁区开发建设的影响, 云台山河子流域内城市化进程较快, 流域内越靠近江宁主城的区域, 城市化水平越高。目前流域内农业用地、城镇用地、待建设用地、林地和水体分别占比 37.9%、22%、19%、18% 和 2.56%。云台山河子流域目前被划定为农业和渔业用水功能区, 水质控制目标为 IV 类水, 但是氨氮常年处于 V 类水, 总氮含量常年处于劣 V 类水, 氮污染严重。

1.2 数据来源

1.2.1 秦淮河流域水质数据来源

2015 ~ 2019 年秦淮河流域的水质数据来源于江苏省水文水资源勘测局南京分局, 共有 29 个水质监测站点。监测站点主要分布在秦淮河干流与支流、句容河干流与支流、秦淮新河、溧水河干流与支流(图 1)。河流水系原始图来源于江苏省水利厅, 然后

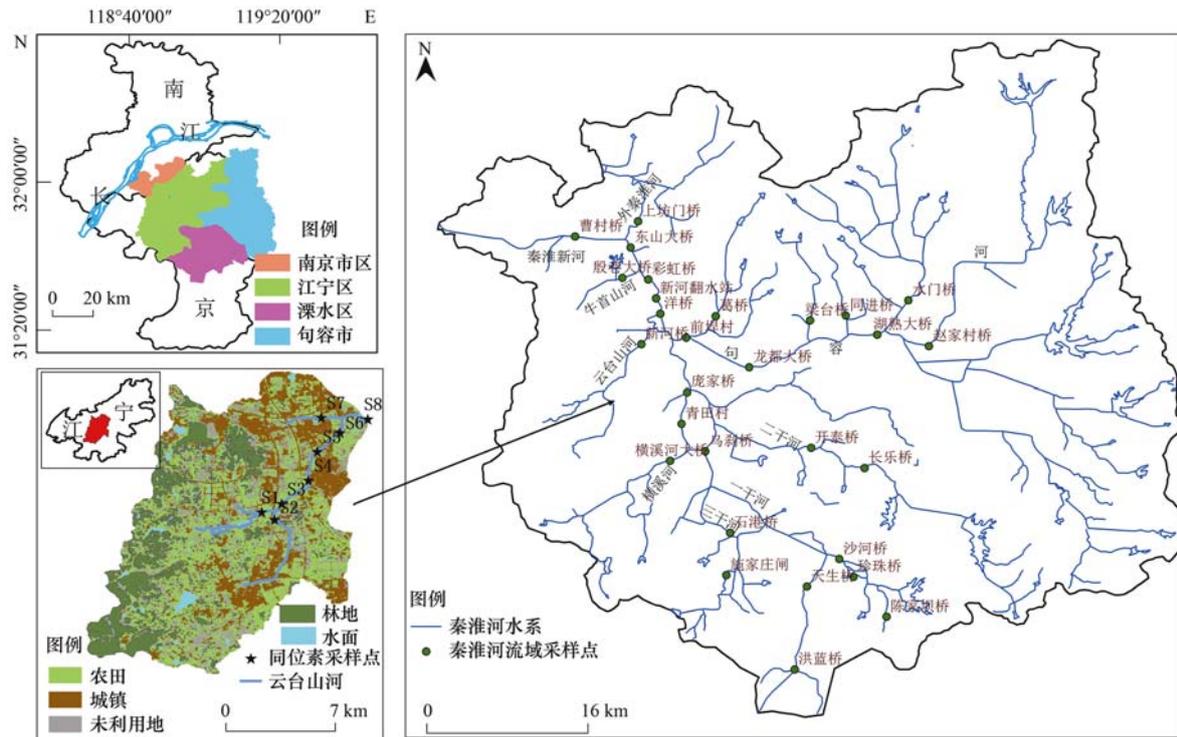


图1 秦淮河流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Qinhuai River catchment

依据 2019 年的 5、9 和 12 月哨兵数据中的水体分布修正原始河流水系数据. 水质监测频次随监测手段的不断完善逐渐过渡为一月一次, 其中湖熟大桥、前埠村、殷巷大桥、施家庄闸、横溪河大桥、葛桥、龙都大桥和梁台桥在 2015 年和 2016 年的水质监测频次为 2 月一次, 其后年份为一月一次; 珍珠桥和陈家坝桥在 2015 年只监测了 1、2 和 12 月这 3 个月, 其后年份为一月一次; 剩余站点的监测频次为一月一次. 在已有的水质监测数据中挑选尽可能每个站点都有值的监测指标, 从中确定了水温、DO、高锰酸盐指数、pH、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、Zn、氟化物、TN 和 TP 等 11 项水质评价指标.

1.2.2 云台山河子流域氮磷样品收集及测试

参照采样方案设计标准^[12], 结合云台山河流域河网特征、土地利用类型以及流域子片区的划分情况等布设 8 个采样点(图 1). 本课题组成员于 2019 年 3 月至 2020 年 1 月的每月中旬在距水面 20 cm 处用无菌采水器进行定点采样, 采集的水样贮存于预先清洗过的聚乙烯样品瓶中, 随即放入冷藏箱内暂时保存. 采集的样品在 24 h 内送至实验室分析, 其中氨氮、硝氮、亚硝氮、总氮、磷酸根及总磷等采用连续注射分析仪(Skalar San++, 荷兰)测定, 而氮氧同位素值($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$)由南京土壤研究所分析测试中心采用稳定同位素比例质谱仪(IsoPrime100)测定得到.

1.3 研究方法

1.3.1 水质标识指数法

综合水质标识指数(WQI)由单因子水质标识指数发展而来, 可对河流综合水质信息进行定性和定量评价, 最早由同济大学徐祖信^[13]提出. WQI 可依据地表水环境标准、水环境功能区水质达标数量等对水质进行归类, 还可对劣 V 类水质进行定性和定量描述^[6].

具体计算公式:

$$\text{WQI} = X_i Y_i Z_i \quad (1)$$

其中:

$$X_i Y_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i \quad (2)$$

而:

$$P_i = S_i F_i \quad (3)$$

式中, P_i 为单因子水质标识指数, $X_i Y_i$ 为单因子水质标识指数法总和的平均值, m 为参加水质评价因子个数, X_i 和 S_i (整数位) 代表了水质类别, Y_i 和 F_i (第一位小数) 代表了同一水质类别中的排序, Z_i (第二位小数) 代表了参评的水质参数类别劣于水环境功能区规定类别的个数. 具体计算过程可参见文献^[13~15]. 依据 $X_i Y_i$ 值可判定水质的级别(表 1), 本研究结合地表水环境质量标准五类水的划分依据以及参阅大量已有研究给出了不同综合水质指标值相应的定性描述^[15]. 为简化计算过程, 本文所

表 1 水质级别的判定

判断标准	综合水质类别	定性评价
$1 \leq XY < 2$	I	极好和水源地
$2 \leq XY < 3$	II	清洁水体
$3 \leq XY < 4$	III	轻污染
$4 \leq XY < 5$	IV	中污染
$5 \leq XY < 6$	V	高污染
$6 \leq XY < 7$	劣 V 类, 不黑臭	严重污染
$XY > 7$	劣 V 类, 黑臭水体	黑臭水体

使用的单因子水质标识指数和综合水质标识指数只计算了前两位。

1.3.2 聚类方法

聚类分析 (CA) 是把个案按其相似性大小或对象间的距离远近程度等特征聚在一起的一种多元统计方法。系统聚类 (Hierarchical Cluster-HCA) 是 CA 中最常用的一种方法, 常被用于探索水质数据在不同月份或空间模式间的相似关系。HCA 首先视各变量各自为一类, 然后将最相似的或距离最近的对象聚类在一起, 在新的类别下再根据距离或相似程度进行合并, 直到所有的相似模式聚成一类^[4,16]。依此, 研究首先求取 2015~2019 年各监测点各水质指标的平均值, 后续聚类分析在 IBM SPSS Statistics 23 中完成, 其中聚类方法选择 Ward's method, 区间度量标准选择 Squared Euclidean distance。

1.3.3 PMF

正定矩阵因子分解算法 (positive matrix factorization, PMF) 是被美国环保署 (EPA) 认可且改进的多变量因子源解析模型^[17], 其基于最小二乘法进行迭代运算以求解组分浓度和污染源之间的化学质量平衡^[18], 原始实测数据 (X_{ij}) 看作是一个由源贡献矩阵 (G_{ik}) 和污染源成分谱矩阵 (F_{ki}) 组成的数据矩阵。

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} \times F_{ki} + E_{ij} \quad (4)$$

式中, i 为样品数, j 为污染物种类, p 为污染源数量, E_{ij} 为残差。

污染源的解析及其贡献率的计算主要在 EPA PMF5.0 软件模型进行, 模型主要输入水质实测浓度和不确定度两个文件。不确定度 (Unc) 的计算方法分两种情况计算。

若实测浓度小于等于方法检出限 (MDL), 则:

$$\text{Unc} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (5)$$

若实测浓度大于方法检出限 (MDL), 则:

$$\text{Unc} = \sqrt{(0.5 \times \text{MDL})^2 + (\text{Urel} \times c)^2} \quad (6)$$

式中, Urel 为误差系数, c 为实测浓度, MDL 为检测各水质指标所采用的具体方法的检出限。EPA PMF5.0

具体原理和操作步骤可参见文献 [17~19]。当 PMF 输出数据中的 Q 值最小 (即 Q_{robust} 与 Q_{true} 差值) 所对应的因子数是 PMF 的最佳因子数, 最终确定不同污染组的因子数为 5 时模型拟合条件最优。

1.3.4 同位素解析模型 (SIAR)

稳定同位素混合模型 (SIAR) 是由 Parnell 等^[20] 开发的基于 R 统计软件的模型。SIAR 混合模型是在贝叶斯框架下, 利用 Dirichlet 作为污染源贡献率的先验逻辑分布, 待同位素信息输入后, 最新的信息即可包含在后验分布信息中, 进而基于贝叶斯方程得到各个污染源的后验分布特征和各个污染源贡献率的概率分布, 最后依据概率分布结果生成各个污染源对污染物的贡献率范围。具体的原理和方法可参见文献 [8, 20~22]。氮同位素的数据处理和分析使用 R3.0.2 统计软件 (R Core Team, 2013) 的稳定同位素分析软件包 (Stable Isotope Analysis in R, SIAR V4)。不同污染源的氮同位素丰度是模型的主要输入参数, 该污染源包括粪肥和污水 (MS)、化肥中的 NH_4^+ (NP)、降雨中的 NO_3^- (AP) 和土壤有机氮 (SN)。AP 中 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$ 为本研究通过实测获得, 其他污染来源的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$ 值均参考文献 [10, 23], 具体数值和相关研究如表 2 所示。

表 2 硝酸盐不同来源 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$ 值¹⁾

污染源	$\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3/\text{‰}$	文献
粪肥和污水 (MS)	16.3 (5.7)	7.0 (2.7)	[23]
化肥中的 NH_4^+ (NP)	-0.2 (2.3)	-2.0 (8.0)	[10]
土壤有机氮 (SN)	7.5 (5.2)	-2.0 (8.0)	[10]
降雨中的 NO_3^- (AP)	0.79 (2.5)	80.01 (1.6)	本研究

1) 数据为平均值 (标准差)

2 结果与分析

2.1 水质特征描述

空间聚类将研究区 29 个监测站点分为高、中和低污染区这 3 个不同组。其中, 高污染区主要位于人口密集、餐饮服务业和旅游点较多的九龙湖和百家湖片区 (GP1)、秦淮河下游南京主城的外秦淮河 (GP2)、江宁大学城内的河道 (GP3) 和溧水主城 (GP4) (图 2), 主要为沙河桥、珍珠桥、葛桥、殷巷大桥、赵家村桥和上坊门桥等监测站点; 中污染区位于正在迅速城市化的秦淮河下游的江宁开发区、秣陵街道和中游的禄口街道内河道 (MP) 及溧水区的一干河 (图 2), 其最大特征在于经济迅速发展、人口迅速增加导致污水厂处理能力与城市发展需求不匹配, 主要为彩虹桥、曹村桥、东山大桥、横溪河大桥、洪蓝桥、庞家桥、前埠村、青田村、天生桥、乌刹桥、新

河翻水站、新河桥和洋桥等监测站点; 低污染区位于句容河的江宁湖熟街道段 (LP1 和 LP2) 和溧水区的二干、三千河 (图 2), 此区主要为城乡过渡区和

农业区, 河道沿线存在大量分散的农村居民点, 主要为陈家坝桥、湖熟大桥、开泰桥、梁台桥、龙都大桥、施家庄闸、石港桥、水门桥和长乐桥等监测站点。

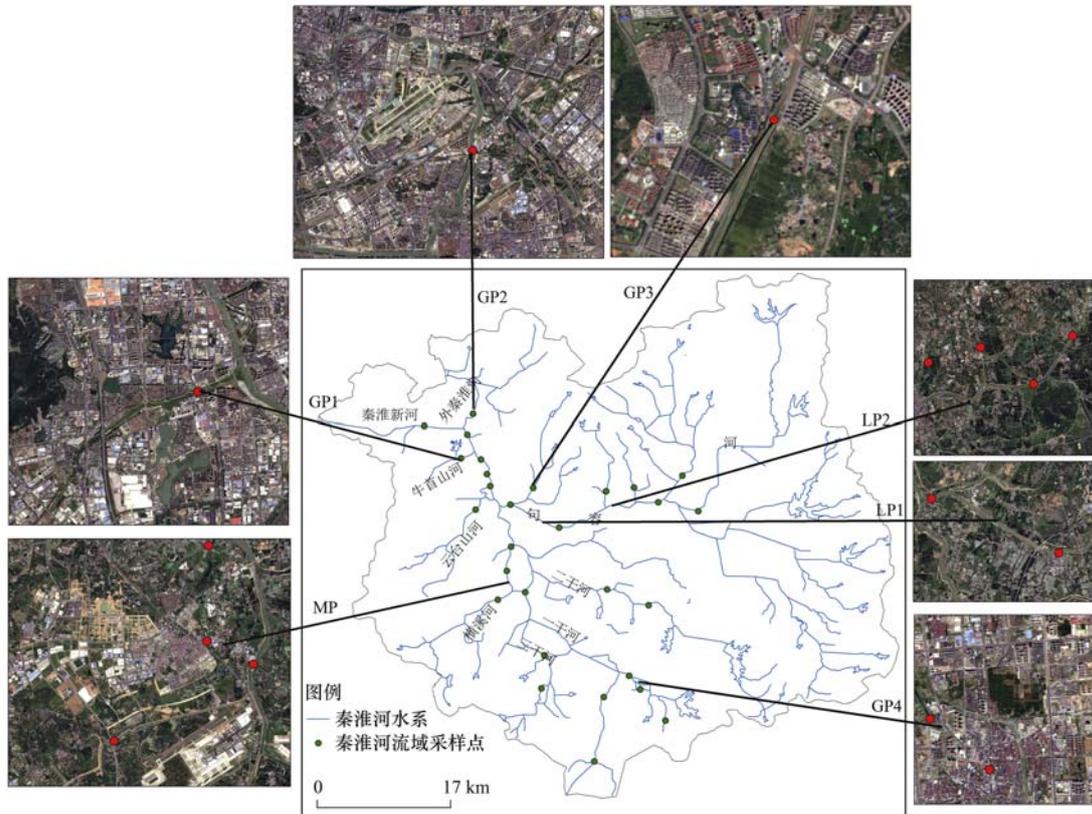


图 2 水质采样点空间聚类对应的典型区域影像

Fig. 2 Image map of typical regions corresponding to spatial clustering of water quality sampling points

2015 ~ 2019 年秦淮河流域高锰酸盐指数、COD、BOD₅ 和 TP 质量浓度均值为 5.54、20.66、3.37 和 0.18 mg·L⁻¹, 为地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 中的 III ~ IV 类水, 而 TN 和 NH₄⁺-N 质量浓度均值为 3.35 mg·L⁻¹ 和 1.59 mg·L⁻¹, 为劣 V 类和 V 类。高污染区各水质指标平均浓度要高于中低污染区的各水质指标平均浓度, 其中 TN 和 NH₄⁺-N 在 3 组的平均监测浓度值都高于地表水环境

质量标准中 V 类水的标准值 (2 mg·L⁻¹), 为劣 V 类 (表 3)。研究期内高、中和低污染区中部分样品的 NH₄⁺-N 浓度在 V 类及其以上的占比分别为 53.7%、32% 和 8.8%, 而 TN 浓度在 V 类及其以上的占比分别为 85.6%、85.2% 和 63.9%, 且 NH₄⁺-N 和 TN 在高、中和低污染区的最高监测值是 III 类水的 23、13 和 9 倍 (表 3)。可推断秦淮河流域受到严重的氮素污染, 其中 TN 污染最为严重。

表 3 秦淮河流域不同污染类别的水质指标统计描述¹⁾

Table 3 Statistical data of water quality indexes in the Qinhuai River catchment

组别	项目	水温	pH	DO	高锰酸盐指数	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	Zn	氟化物	TN	TP
高污染区	Max	36.0	8.82	14.88	13.50	48.30	8.40	23.07	0.23	0.90	23.48	1.82
	Min	3.60	6.97	0.76	2.50	15.00	1.00	0.04	0.00	0.11	0.06	0.01
	Mean	19.08	7.94	6.96	5.73	21.58	3.48	2.70	0.03	0.28	4.80	0.24
中污染区	Max	33.90	8.84	13.44	14.80	39.00	9.10	13.52	0.53	0.59	13.84	3.82
	Min	3.00	6.57	0.92	2.10	15.00	0.30	0.03	0.00	0.10	0.31	0.01
	Mean	18.50	7.93	6.87	5.31	20.06	3.37	1.39	0.03	0.28	3.17	0.19
低污染区	Max	35.50	8.88	15.26	14.50	45.90	7.40	9.29	0.56	0.67	9.73	0.70
	Min	0.50	6.94	2.23	2.10	15.00	0.20	0.03	0.00	0.11	0.11	0.01
	Mean	19.12	7.96	8.14	5.61	20.41	3.27	0.70	0.03	0.28	2.09	0.12
国家 III 类水标准			≥5	≤6	≤20	≤4	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤0.2

1) DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、Zn、氟化物、TN 和 TP 的单位为 mg·L⁻¹, 水温单位为 °C

为反映秦淮河流域水质的时空变化特点,按照公式(3)计算了高、中和低污染组的 DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN 和 TP 这 7 项水质因子的 P_i 值,然后按照公式(1)计算了高、中和低污染组的 WQI 值. 秦淮河流域的 WQI 在 3.2~4.8 之间,依据表 1 可判断综合水质类别为 III~IV 类,定性描述为轻污染和中污染. 2015~2019 年高、中和低污染区的 WQI 值呈现下降趋势(图 3),这说明秦淮河流域水质在逐渐改善,高污染区的水质改善程度要弱于中低污染区,中低污染区的水质类别从中度污染(IV 类)逐渐改善为轻度污染(III 类). 从各指标 P_i 值的年际变化来看,高污染区 NH₄⁺-N 和 TN 的 P_i 值在 2015~2018 年呈现逐渐下降的趋势,在 2019 年有所回升,总体呈下降趋势;中污染区各指标的年际变化趋势具有波动性,无明显的规律性,但 2019 年各指标的 P_i 值较 2015 年各指标的 P_i 值有所降低;低污染区 DO、NH₄⁺-N 和 TP 的 P_i 值在 2015~2019 年呈现下降趋势,而其余指标呈现先上升后下降的趋势. 从季节性分布来看,冬春季各水质因子的 P_i 值要高于夏秋季的 P_i 值,也就是流域内各水质指标 P_i 值具有季节性分布特征.

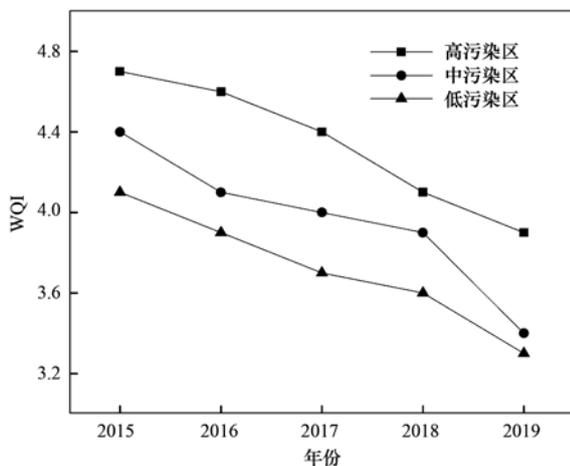


图 3 秦淮河流域不同污染区的 WQI 值的年际变化

Fig. 3 Interannual variation in WQI in different polluted regions of the Qinhuai River catchment

2.2 污染源溯源分析

2.2.1 基于 PMF 的秦淮河流域污染源贡献分析

2.2.1.1 高污染区的污染源解析

PMF 模型解析出高污染区 5 种污染因子成分谱及贡献率(图 4),其中 DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅ 和氟化物在因子 1(G1)上有较高的贡献率,分别为 54.1%、31.2%、36.2%、26.4% 和 42%. BOD、COD 和 DO 被认为是有机污染因子的重要指标^[24],并主要归因于人为活动引起的生活污水和工业废水排放^[25~27]. 高污染区主要位于城市化水平较

高的区域,区域人口密集,商业服务业也较发达,产生的市政污水中含有较高的有机物^[8]. 日常生活中含氟牙膏、含氟塑料以及空调制冷剂和灭火剂中氟的使用增加了生活污水中的氟含量. 综合衡量,G1 为城市市政污水排放的有机污染,其对高污染区的源贡献率为 28.88%(表 4).

NH₄⁺-N、TN 和 TP 在因子 2(G2)上的贡献率较高,分别为 65.8%、42.5% 和 40.9%,可认为氨氮是 G2 的重要标识元素. Mir 等^[25]的研究认为氨氮代表来自城市垃圾和废水的营养盐污染. Boyacioglu 等^[28]的研究认为氮磷既可来源于工业废水、生活污水和污水处理厂等点源污染,也可能来源于受降雨淋洗产生的农业和城市等面源污染. 流域氨氮污染主要来自于化工、石油和化学纤维制造业(化纤企业)等的工业废水、城镇居民生活污水以及农业污染源^[6]. 由于高污染区主要位于秦淮河下游城市化程度较高的区域、溧水主城及江宁大学城内,且 BOD 和 COD 的贡献率较小,这降低了农业面源和生活污水污染的可能性. 因而,G2 为工业废水排放的营养盐污染,其对高污染区的源贡献率为 27.43%(表 4).

因子 3(G3)对 TP 和 BOD₅ 有较大的贡献. 杨德敏等^[29]对厦门和衡水不同功能区的降雨径流污染的研究发现,商业区、居住区和文教区的磷污染要大于工业区. 考虑到高污染区主要集中在秦淮河下游城市化程度较高的区域、溧水主城和江宁大学城内,以商业区、居住区和文教区为主. 加之老城区截污截沟不彻底,造成雨季城镇生活及三产污水外溢直接入河. 因此,G3 可归为非点源污染,其对高污染区的源贡献率为 15.74%(表 4).

因子 4(G4)对 Zn 的贡献率高达 56%,而对其他元素的影响较小,具有明显的重金属污染特征. 秦淮河流域中下游的老城区、新城区和城乡过渡区受化工、建材和机械等企业生产过程中产生的含 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的“三废”污染物影响,河流沉积物和土壤中 Zn 含量都较高^[30,31]. 经实际调查发现流域下游的汽车厂和钢桶封闭器厂等都有不同程度的 Zn 排放. 因而,G4 为重金属企业排放的重金属污染,其对高污染区的源贡献率为 15.57%(表 4).

水温在因子 5(G5)的成分谱和贡献率明显高于其他几个因子,这代表了温度的理化影响. 其次为 pH、高锰酸盐指数、COD 和 BOD₅,贡献率在 14%~17.7% 间. 秦淮河下游河道底泥有机污染严重,存在内源释放,河道沿线管网存在污水渗流^[32,33]. 水温和 pH 的变化会影响河道底泥中污染物的释放和水体的物理化学变量,例较高的水温会降低水中溶解氧的溶解度,有机物的厌氧发酵就会产生氨和有机

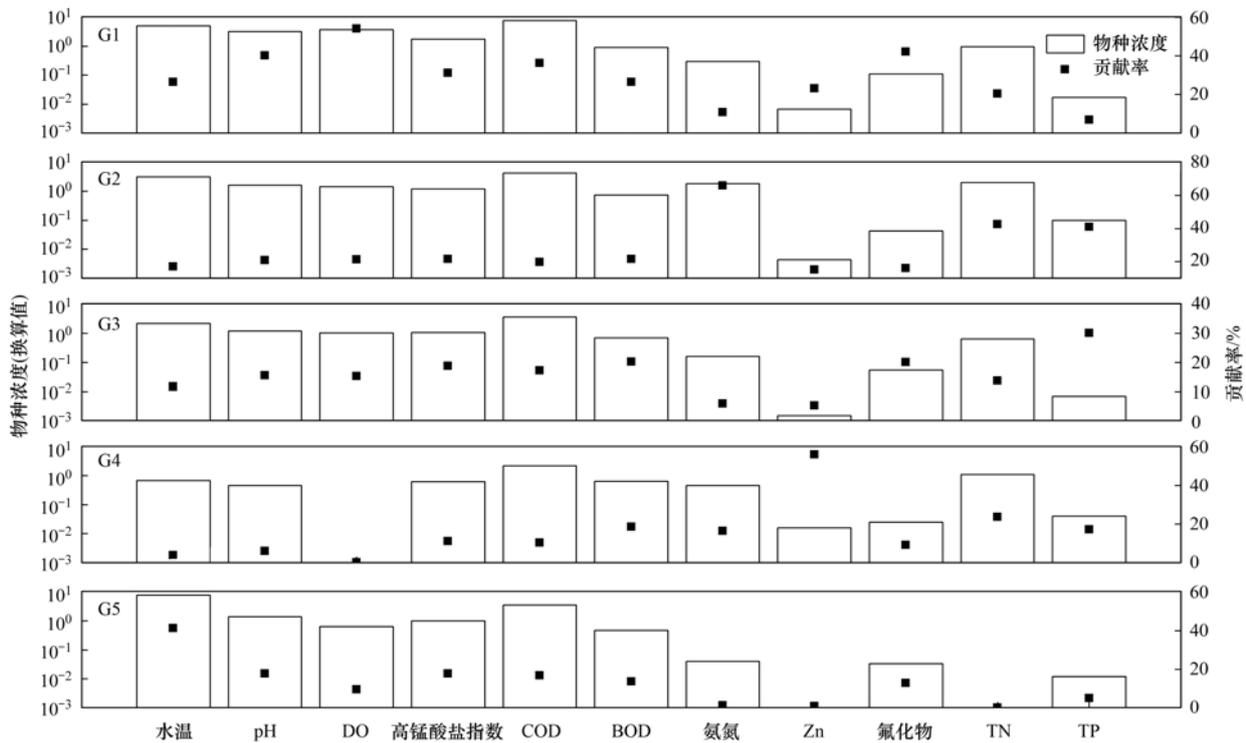


图4 基于PMF的高污染区源解析贡献

Fig. 4 Source contributions of different water quality indexes at HP based on PMF

酸导致水体 pH 值降低, 水温的高低还会影响生活在水中的微生物在分解可生物降解有机物时的耗氧量^[34~37]. 因此, G5 为内源污染, 其对高污染区的源贡献率为 12.37% (表 4).

表4 秦淮河流域污染源贡献率

Table 4 Source appointment of water pollution in the Qinhuai River catchment

污染组别	污染源	缩写	污染源	贡献率 / %
高污染区 (G)	因子 1	G1	市政污水	28.88
	因子 2	G2	工业废水	27.43
	因子 3	G3	非点源污染	15.74
	因子 4	G4	金属类企业排污	15.57
	因子 5	G5	内源污染	12.37
中污染区 (M)	因子 1	M1	混合源	31.62
	因子 2	M2	工业废水	27.25
	因子 3	M3	内源污染	24.70
	因子 4	M4	畜禽粪便和养殖废水污染	8.73
	因子 5	M5	金属类企业排污	7.75
低污染区 (L)	因子 1	L1	城乡生活污水和农村垃圾污染	28.79
	因子 2	L2	农业面源污染	24.30
	因子 3	L3	内源污染	20.94
	因子 4	L4	金属类企业排污	14.95
	因子 5	L5	工业废水	10.99

2.2.1.2 中污染区的污染源解析

PMF 模型解析出中污染区 5 种污染因子成分谱及贡献率 (图 5): ①因子 1 (M1) 在 DO 的贡献高达 58%, 其余因子的贡献率从大到小依次为氟化物、

COD、高锰酸盐指数、BOD₅ 和 TN, 且贡献率均超过 30%. 该因子可解释为来自城乡生活污水、餐饮服务业和工业废水排放的有机污染, 其对中污染区的源贡献率为 31.62% (表 4). ②因子 2 (M2) NH₄⁺-N 和 TN 的贡献率分别为 74.1% 和 44.56%, 可解释为工业废水排放的营养盐污染, 其对中污染区的源贡献率为 27.25% (表 4). ③水温在因子 3 (M3) 的贡献率为 52%, pH、BOD₅、高锰酸盐指数和 COD 的贡献率为 30% 左右. 此因子特点与 G5 特点相似, 但 M3 对中污染区的 pH、BOD₅、高锰酸盐指数和 COD 的贡献率要明显高于 G5 对高污染区相应水质变量的贡献率. 受城市化迅速发展的影响, 经济开发区和秣陵街道内人口和工业迅速集聚, 但污水厂处理污水能力不够, 污水被迫排入雨水管道, 同时雨水管道中的杂物、泥土也会随之进入河流, 加重底泥中的污染物含量^[38]. 已有研究也表明秦淮河底泥释放对水质有一定影响^[39,40]. 因而, M3 为内源污染, 其对中污染区的源贡献率为 24.7% (表 4). ④TP 在因子 4 (M4) 的贡献率明显高于其他几个因子, 邱雨等^[41]和陈诗文等^[42]的研究发现畜禽粪便和养殖废水对水体磷污染具有较大的贡献. M4 对 Zn 也有一定的贡献, 付传城等^[30]和李冬林等^[43]的研究发现研究区内部分 Zn 污染与渔业发展有关, 且中污染区内存在部分水产养殖区 (例如云台山河子流域等). M4 可解释为畜禽粪便和养殖废水污染, 其对中污染区

的源贡献率为 8.73% (表 4). ⑤ 因子 5 (M5) 对 Zn 贡献率最高, 而对其他元素影响较小. 中污染区主要集中在秦淮河中下游的经济开发区、城乡过渡区, 区

内化工、建材和机械等企业生产过程中会产生重金属污染^[30]. M5 为重金属工业废水排放的重金属污染, 其对中污染区的源贡献率为 7.75% (表 4).

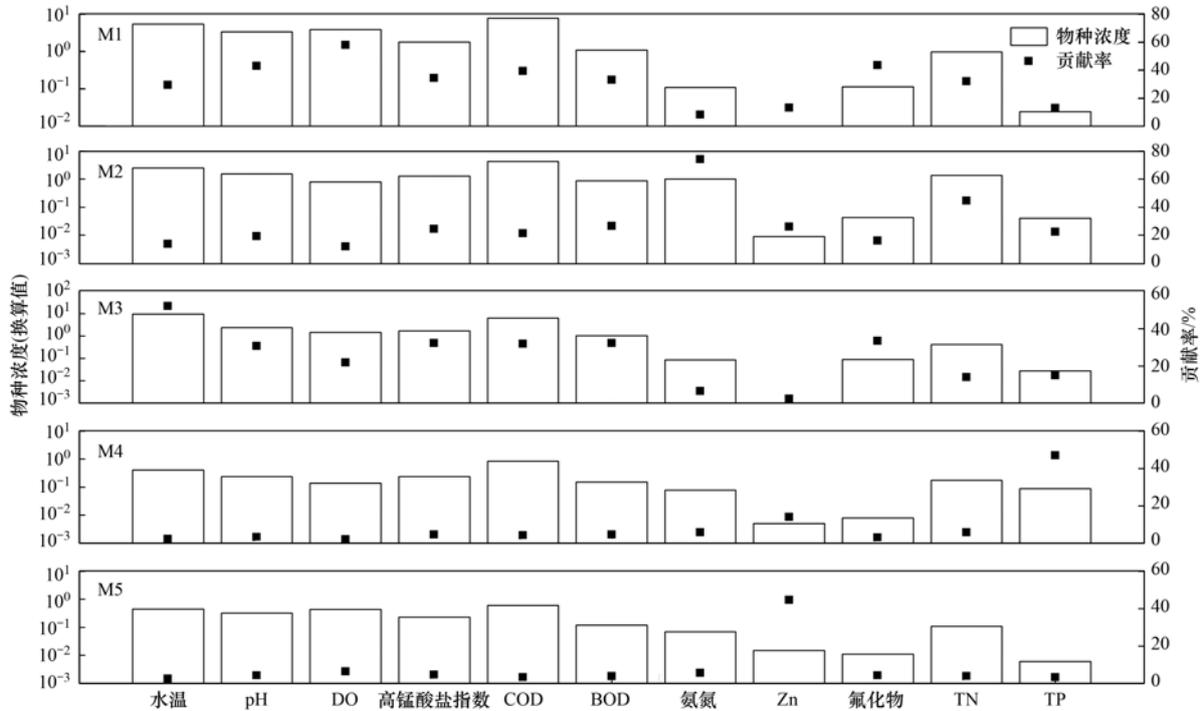


图 5 基于 PMF 的中污染区源解析贡献

Fig. 5 Source contributions of different water quality indexes at MP based on PMF

2.2.1.3 低污染区的污染源解析

PMF 模型解析出低污染区 5 种污染因子成分谱及贡献率 (图 6): ① DO、COD、高锰酸盐指数、TN、BOD₅ 和氟化物在因子 1 (L1) 的贡献率较高, 可解释为有机污染. 低污染区主要位于句容河的江宁湖熟街道段, 区内主要为城乡过渡区和农业区. 由于农村居民点分散和基础建设薄弱, 大量厨房用水、淋浴和洗涤用水、冲厕所用水等农村生活污水会产生分散源, 未经处理直排入河, 其携带大量的氮、COD 等污染物, 导致此区域水体水质恶化^[44,45]. 此外, 句容河湖熟街道范围内的河流沿线和二干河沿线河滨带零星分布有垃圾站 (点), 垃圾渗滤液或雨水淋溶直排入河^[45]. ② 因子 2 (L2) 对 TP 的贡献率为 53.8%, 对 BOD₅、NH₄⁺-N 和 TN 的贡献率在 32% 左右, 可解释为农药、化肥、畜禽养殖和水产养殖废水等农业面源污染, 其对低污染区的源贡献率为 24.3% (表 4). 低污染区的河流沿线农田面积广, 且以水稻田为主, 生产方式较粗放, 农药、化肥、水产养殖废水和畜禽粪便等农业面源污染会随降雨径流经由泵站排入句容河主河道和三干河, 从而对水质造成影响^[44]. 有研究指出句容河流域内畜禽养殖点普遍存在粪便露天堆放、养殖废水直接排放等问题^[46,47]. 邱雨^[41]的研究发现畜禽粪便是造成句容河

水体磷含量偏高的主要原因. ③ 水温在因子 3 (L3) 的贡献率为 54%, pH、BOD₅、高锰酸盐指数和 COD 的贡献率为 25% 左右, 可解释为内源污染, 其对低污染区的源贡献率为 20.94% (表 4). ④ Zn 在因子 4 (L4) 的贡献率较高, 贡献率为 44.5%, 可解释为重金属工业废水排放的重金属污染, 其对低污染区的源贡献率为 14.95% (表 4). ⑤ 因子 5 (L5) 对 NH₄⁺-N 和 TN 的贡献率均高于其他参数, 可解释为低污染区内工业园区废水排放的营养盐污染, 其对低污染区的源贡献率为 10.99% (表 4).

2.2.2 基于双同位素的氮污染溯源及贡献率分析

通过分析可知, 云台山河子流域内 TN 污染严重, 为地表水环境质量的劣 V 类水 (GB 3838-2002, 表 5). 且非汛期 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 占 TN 的比值分别为 68.6%、22.1% 和 1%, 而汛期三者的比值分别为 58.9%、17.1% 和 2.4% (表 5). 虽然地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 基本项目标准限值中并未规定 NO₃⁻-N, 但上述分析可知 NO₃⁻-N 是氮污染在子流域受纳水体中的主要存在形式, 识别 NO₃⁻-N 污染来源对云台山河氮污染的治理和控制至关重要. 氮、氧稳定同位素分析结果表明, 非汛期云台山河水体中 δ¹⁵N-NO₃ 变化范围为 3.0‰~20.5‰, 平均值为 13.2‰, δ¹⁸O-NO₃ 变化范围为 -5.8‰~

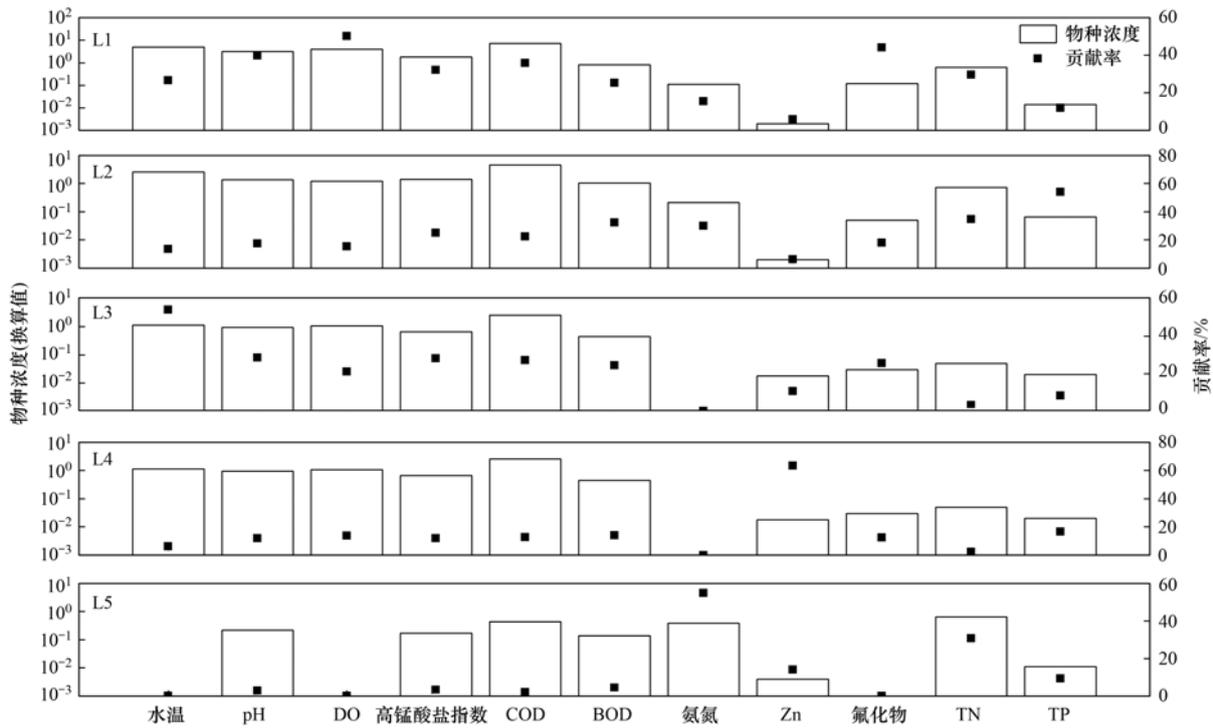


图 6 基于 PMF 的低污染区源解析贡献

Fig. 6 Source contributions of different water quality indexes at LP based on PMF

27.6‰, 平均值为 3.0‰; 汛期云台山河水体中 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 变化范围为 0.8‰~21.7‰, 平均值为 13.1‰, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 变化范围为 -3.9‰~10.7‰, 平均值为 3.5‰. 统计分析结果表明, 非汛期和汛期云台山河水体中 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值均无显著性差异 ($P > 0.05$). 氮、氧同位素图显示非汛期和汛期样品的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的散点主要落在动物粪便与污水范围内, 初步推断河流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要来源于动物粪便和生活污水(图 7). 由于研究区内无规模化畜禽养殖, 动物粪便来源稀少, 且 Xue 等^[48] 的研究发现生活污水中的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值低于动物粪便为 4‰~19‰, 因而可推断云台山河水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要来源于生活污水. 部分样品的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的散点还分布在土壤有机氮范围内(图 7), 表明土壤有机氮也是云台山河水体中硝酸盐的重要来源. $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的散点几乎未落在农业化肥和降雨范围内, 说明云台山河水体中的氮受农业

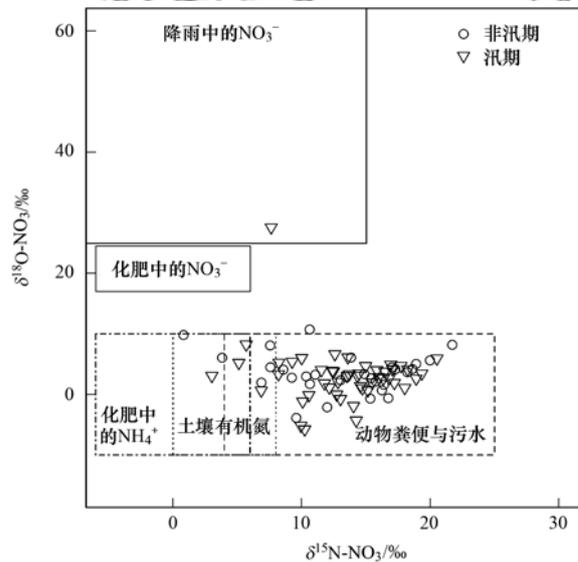


图 7 云台山河非汛期和汛期硝酸盐来源识别

Fig. 7 Distribution of $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ values from different sources in dry and wet seasons

表 5 云台山河子流域水体中氮磷质量浓度均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 5 Nitrogen and phosphorous concentration in Yuntaishan River sub-catchment/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

类别	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	TP
汛期	0.73	2.44	0.091	4.05	0.04	0.13
非汛期	1.46	4.55	0.08	6.62	0.07	0.16
国家Ⅲ类水标准	≤ 1	/	/	≤ 1	/	≤ 0.2

化肥和降雨的影响较小. 利用贝叶斯同位素混合模型估算汛期和非汛期不同污染来源对研究区河流水

体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的贡献率, 结果显示河流水体中有 61% 和 34% 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别来源于生活污染源和土壤有

机氮,其中非汛期河流中 61%、32% 和 6% 的 NO_3^- -N 分别来源于生活污染源、土壤有机氮和化肥中的 NH_4^+ ,汛期河流中 61%、36% 和 4% 的 NO_3^- -N 分别来源于生活污染源、土壤有机氮和化肥中的 NH_4^+ .

3 讨论

秦淮河流域水污染的年际和季节分布特征具有不平衡性. 2015 ~ 2019 年秦淮河流域高锰酸盐指数、COD、 BOD_5 、TP 和 NH_4^+ -N 等水质指标的浓度均值、最高值较 1995 ~ 2014 年^[6] 的相应值都有所降低,而 TN 浓度均值却较 1995 ~ 2014 年的浓度均值要高^[6],但相较于 2010 ~ 2011 年流域 TN 浓度均值却有所降低^[49]. 水质改善的原因在于南京市不但实施“省控入江支流水质提升领导挂钩负责制”和“断面长制”^[50],全面推进涵盖工农业、生活、船舶水污染治理、水环境综合整治和水生态保护等政策措施^[50],同时还适时采取流域调水改善水质措施^[51]. 季节变化上,冬春季 WQI 值和 P_{TN} 值偏高的结果也与李跃飞等^[49] 和 Zhao 等^[52] 的研究结果类似. 冬春季降水稀少,加之下游的秦淮新河闸和三汊河口闸在冬春季长期处于关闸状态,水体流动性差等原因造成流域冬春季水质较差. 因而,未来秦淮河流域水污染治理的重点在冬春季的氮污染控制,未来研究可借助同位素和分布式水文模型等手段研究氮素的来源和不同形态氮的迁移转化.

城市化水平的高低影响污染源类型和贡献率. 城市化水平较高的高污染区的主要污染源为城市市政污水排放的有机污染(28.88%)和工业废水排放的氮磷污染(27.43%). 中污染区正在经历迅速的城市化过程,随着江宁开发区和秣陵街道内上市企业和世界 500 强企业的不断入驻及禄口街道内航空港的建设和发展,产业集群正在形成,人口迅速集聚,同时城乡生活污水、餐饮服务业和工业废水排放的有机污染(31.62%)和氮磷污染(27.25%)等也迅速增加. 但区内污水处理能力并未跟上经济发展步伐,污水面临无处可去的问题,被迫进入雨水管道^[38,53,54]. 江宁开发区、东山街道和禄口街道内都存在黑臭河道,雨污合流加重了河道黑臭现象^[38,53,54]. 目前,中污染区水污染治理的首要任务在于污水处理厂的新建和扩建以尽快解决污水的排放去向,推进雨污分流工程建设. 而低污染区主要位于城乡过渡带和农村地区,其污染源主要为城乡生活污水和农村生活垃圾(28.79%)、农业面源污染(24.3%),这与湖熟街道人工委的水环境污染治理工作的调研报告结果一致^[45]. 随着湖熟街道内工业园区的发展,此区域也面临污水处理力不足和雨污合流的困

境. 未来几年低污染区的治理重点应在农村面源污染,应加快集中式污水收集处理系统的建设和运行管理. 总体而言,在后续污染物溯源研究中应考虑不同的经济发展水平带来的影响,在制订流域水环境治理对策时应考虑区域污染特征.

秦淮河流域的污染源类型与其他流域的污染源既有相似性又有差异性. 秦淮河流域与浙江省温瑞塘河、广东省深圳河的高氮污染特征和污染源类型相似,温瑞塘河 TN 污染也最为严重,主要的污染源有工业污染源、城乡生活污染源、降雨径流污染、市政污染和农业非点源等^[8,56],71% 的深圳河断面水体中氨氮和总氮浓度超出地表水质 V 类标准,生活和工业废水及河道底泥是水体污染的主要来源^[57]. 而太湖的补给水系西苕溪的污染源仅有农田径流、养殖废水和生活污水等 3 类^[42]. 另外,在云台山河子流域氮污染溯源中得出生活污水是其主要来源. 可发现城乡生活污水、工业废水、农业面源是大多数区域水污染的主要污染来源,但区域间的污染贡献率存在差异,这种差异性可能与城市化发展水平和城市发展定位相关.

4 结论

(1) 基于 WQI 值评价秦淮河水水质总体为中等污染, TN 是主要污染因子. 空间聚类将秦淮河流域分为高、中和低这 3 个污染区,其 WQI 值排序为: $\text{WQI}_{\text{高污染区}} > \text{WQI}_{\text{中污染区}} > \text{WQI}_{\text{低污染区}}$. 2015 ~ 2019 年秦淮河流域的 WQI 值呈现下降趋势,中低污染区的水质类别从中度污染(IV 类)逐渐改善为轻度污染(III 类). 高锰酸盐指数、COD、 BOD_5 、TN、 NH_4^+ -N 和 TP 等水质指标的 P_i 值在冬春季要高于夏秋季.

(2) 不同城市化水平地区的污染源类型及贡献率不尽相同. 城市化水平较高的高污染区主要受生活污水、商服业废水(28.88%)和工业废水(27.43%)的影响,此区控制重点在生活污水、商服业污水和工业废水的收集和处理. 城市化进程较快的中污染区主要受城乡生活废水、商服污水(31.62%)、工业废水(27.25%)和内源污染(24.76%)的影响,此区应新建和扩建污水处理厂以解决污水出路问题. 城市化水平较低的低污染区主要受农村生活污水及生活垃圾(28.79%)和农业非点源污染(24.3%)的影响,此区控制的重点在农村面源污染和集中式污水收集处理系统的建设.

(3) 云台山河子流域水体中 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的浓度变化区间为 0.53 ~ 18.0, 0.01 ~ 15.4 和 0.06 ~ 9.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 硝氮是氮污染在典型子流域接纳水体中的主要存在形式,且主要来自生活

污水(61%)和土壤有机氮(34%)。

致谢: 感谢江苏省水文水资源勘测局南京分局和慕尼黑工业大学(Technical University of Munich) Xiaoxiang Zhu 教授及其团队给予的帮助和对本研究的支持, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境状况公报(1990-2015) [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkqb/lnzghjzkqb/>, 2019-05-29.
- [2] 刘博, 张展, 许增贵, 等. 河流水体污染空间分布及污染源解析——以浑河沈阳段为例[J]. 环境保护科学, 2020, **46**(3): 56-61.
Liu B, Zhang Z, Xu Z G, *et al.* Spatial distribution and pollution source apportionment of river pollutants—A case study of Hun River in Shenyang [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, **46**(3): 56-61.
- [3] 涂茜, 黄浩, 陆谢娟, 等. 基于 PMF 模型的城市黑臭水体污染源解析——以武汉市湖溪河为例[J]. 环境保护科学, 2019, **45**(6): 59-63.
Tu X, Huang H, Lu X J, *et al.* Analysis of pollution sources of urban black-odor water based on PMF model—A case study of the Huxi River in Wuhan [J]. *Environmental Protection Science*, 2019, **45**(6): 59-63.
- [4] Sun X W, Zhang H Y, Zhong M F, *et al.* Analyses on the temporal and spatial characteristics of water quality in a Seagoing River using multivariate statistical techniques: a case study in the Duliujian River, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(6), doi: 10.3390/ijerph16061020.
- [5] 叶匡旻, 孟凡生, 张铃松, 等. 松花江流域氮时空分布特征及源解析研究[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(4): 901-910.
Ye K M, Meng F S, Zhang S L, *et al.* Spatial-Temporal variation characteristics and source analysis of nitrogen pollution in the Songhua River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 901-910.
- [6] Ma X X, Wang L C, Yang H, *et al.* Spatiotemporal analysis of water quality using multivariate statistical techniques and the water quality identification index for the Qinhuai River Basin, East China [J]. *Water*, 2020, **12**(10), doi: 10.3390/w12102764.
- [7] 杜展鹏, 王明净, 严长安, 等. 基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(3): 1130-1137.
Du Z P, Wnag M Z, Yang C A, *et al.* Pollution source apportionment of Lake Dianchi based on absolute principal component score-multiple linear regression [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1130-1137.
- [8] 杨丽萍. 浙江省两个典型流域水体污染特征及污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Yang L P. Water pollution characteristics and source apportionment in two representative watersheds in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] Salim I, Sajjad R U, Paule-Mercado M C, *et al.* Comparison of two receptor models PCA-MLR and PMF for source identification and apportionment of pollution carried by runoff from catchment and sub-watershed areas with mixed land cover in South Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 764-775.
- [10] Yang Y Y, Toor G S. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ reveal the sources of nitrate-nitrogen in urban residential stormwater runoff [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(6): 2881-2889.
- [11] Ji X L, Xie R T, Hao Y, *et al.* Quantitative identification of nitrate pollution sources and uncertainty analysis based on dual isotope approach in an agricultural watershed [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 586-594.
- [12] HJ 495-2009, 水质 采样方案设计技术规范[S].
- [13] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, **33**(4): 482-488.
Xu Z X. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, **33**(4): 482-488.
- [14] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, **33**(3): 321-325.
Xu Z X. Single Factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, **33**(3): 321-325.
- [15] Ma X X, Shang X, Wang L C, *et al.* Innovative approach for the development of a water quality identification index—a case study from the Wen-Rui Tang River watershed, China [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, **55**(5): 1400-1410.
- [16] Mena-Rivera L, Salgado-Silva V, Benavides-Benavides C, *et al.* Spatial and seasonal surface water quality assessment in a tropical urban catchment: Burio River, Costa Rica [J]. *Water*, 2017, **9**(8), doi: 10.3390/w9080558.
- [17] Taghvaei S, Sowlat M H, Mousavi A, *et al.* Source apportionment of ambient $\text{PM}_{2.5}$ in two locations in central Tehran using the Positive Matrix Factorization (PMF) model [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 672-686.
- [18] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [19] 李振. 沈阳市某典型区域空气质量分析及污染源解析[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
Li Z. Air quality analysis and pollution source analysis of a typical region in Shenyang [D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [20] Parnell A C, Phillips D L, Bearhop S, *et al.* Bayesian stable isotope mixing models [J]. *Environmetrics*, 2013, **24**(6): 387-399.
- [21] 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 等. 稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 [J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3095-3101.
Gu M N, Pan Y P, He Y X, *et al.* Source apportionment of atmospheric ammonia: sensitivity test based on stable isotope analysis in R language [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3095-3101.
- [22] 康萍萍. 滨海地下水氮的同位素溯源及其源贡献率研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Kang P P. Identifying nitrogen sources and quantifying the contributions of nitrate source in Coastal zone [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [23] Zhang Y, Shi P, Li F D, *et al.* Quantification of nitrate sources and fates in rivers in an irrigated agricultural area using environmental isotopes and a Bayesian isotope mixing model [J]. *Chemosphere*, 2018, **208**: 493-501.
- [24] Kazi T G, Arain M B, Jamali M K, *et al.* Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(2): 301-309.

- [25] Mir R A, Gani K M. Water quality evaluation of the upper stretch of the river Jhelum using multivariate statistical techniques [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(14), doi: 10.1007/s12517-019-4578-7.
- [26] Singh H, Singh D, Singh S K, *et al.* Assessment of river water quality and ecological diversity through multivariate statistical techniques, and earth observation dataset of rivers Ghaghara and Gandak, India [J]. *International Journal of River Basin Management*, 2017, **15**(3): 347-360.
- [27] Isiyaka H A, Mustapha A, Juahir H, *et al.* Water quality modelling using artificial neural network and multivariate statistical techniques [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, **5**(2): 583-593.
- [28] Boyacioglu H, Boyacioglu H. Water pollution sources assessment by multivariate statistical methods in the Tahtali Basin, Turkey [J]. *Environmental Geology*, 2008, **54**(2): 275-282.
- [29] 杨德敏, 曹文志, 陈能汪, 等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(6): 625-628.
Yang D M, Cao W Z, Chen N W, *et al.* Nitrogen and phosphorus pollution from urban stormwater runoff in Xiamen City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(6): 625-628.
- [30] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析——以南京市柘塘镇为例[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(5): 1066-1077.
Fu C C, Wang W Y, Pan J J, *et al.* Spatial-temporal variation and source apportionment of soil heavy metals in Peri-Urban Area—A case study of Zhetang Town, Nanjing [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(5): 1066-1077.
- [31] 尹爱经, 高超, 刘勇华, 等. 秦淮河表层沉积物毒害微量元素分布特征及污染评价[J]. *环境化学*, 2011, **30**(11): 1912-1918.
Yin A J, Gao C, Liu Y H, *et al.* Distribution and contamination evaluation of toxic trace elements in surface sediments of Qinhuai River in eastern China's Jiangsu province [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(11): 1912-1918.
- [32] 马俊. 外秦淮河水生植物生态修复研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
Ma J. Study on aquatic plant in ecological rehabilitation of Waiqinhuai River [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [33] 南京市建邺区人民政府. 南河赛虹桥断面水体达标整治方案 [EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1114/8006034024001133.shtm>, 2018-11-14.
- [34] Alves D D, Riegel R P, De Quevedo D M, *et al.* Seasonal assessment and apportionment of surface water pollution using multivariate statistical methods: Sinos River, southern Brazil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(7), doi: 10.1007/s10661-018-6759-3.
- [35] Jha R, Ojha C S P, Bhatia K K S. Development of refined BOD and DO models for highly polluted Kali river in India [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, **133**(8): 839-852.
- [36] Vega M, Pardo R, Barrado E, *et al.* Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis [J]. *Water Research*, 1998, **32**(12): 3581-3592.
- [37] Dutta S, Dwivedi A, Kumar M S. Use of water quality index and multivariate statistical techniques for the assessment of spatial variations in water quality of a small river [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(12), doi: 10.1007/s10661-018-7100-x.
- [38] 江宁开发区人大工委. 关于江宁开发区水环境污染治理情况的调研报告 [EB/OL]. <http://www.njjnrd.gov.cn/gzyj/280828.htm>, 2018-10-27.
- [39] 周灵辉. 外秦淮河底泥释放对上覆水水质的影响 [J]. *环境监测管理与技术*, 2003, **15**(5): 41-42.
Zhou L H. Effect of boottom studge releasing in the Waiqinhuai River to the quality of upper water [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2003, **15**(5): 41-42.
- [40] 高俊, 汤莉莉, 徐建强, 等. 施用秦淮河底泥对田间土壤及小麦生长的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(15): 6402-6403, 6411.
Gao J, Tang L L, Xu J Q, *et al.* Effects of applying the sediments of Qinhuai River on the soil and wheat growth in the field [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(15): 6402-6403, 6411.
- [41] 邱雨. 句容小流域污染物分布特征及其风险评价 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [42] 陈诗文, 袁旭音, 金晶, 等. 西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4179-4186.
Chen S W, Yuan X Y, Jin J, *et al.* Characteristics and pollution source analysis of nutrients in tributary outlets of Xitiaoxi watershed [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4179-4186.
- [43] 李冬林, 金雅琴, 张纪林, 等. 秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价 [J]. *浙江林学院学报*, 2008, **25**(2): 228-234.
Li D L, Jin Y Q, Zhang J L, *et al.* Heavy metal soil pollution in the Qinhuai River riparian zone [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, **25**(2): 228-234.
- [44] 许见梅, 周飞. 务实推进一体化, 宁镇扬这么做 [N]. *南京日报*, 2020-07-09 (A08).
- [45] 湖熟街道人大工委. 关于湖熟街道水环境污染治理工作的调研报告 [EB/OL]. <http://www.njjnrd.gov.cn/gzyj/281101.htm>, 2018-12-03.
- [46] 句容市人民政府办公室. 句容市 2019-2020 年突出环境问题清单 [EB/OL]. <http://www.jurong.gov.cn/jurong/tzgg/201901/9925bc64bfb4552af084112a9027b38.shtml>, 2019-01-30.
- [47] 镇江市人民政府. 关于《2019-2020 年镇江市突出环境问题清单》的公示 [EB/OL]. <https://kuaibao.qq.com/s/20190111A010S700?refer=spider>, 2019-01-10.
- [48] Xue D M, Botte J, De Baets B, *et al.* Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface-and groundwater [J]. *Water Research*, 2009, **43**(5): 1159-1170.
- [49] 李跃飞, 夏永秋, 李晓波, 等. 秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 91-97.
Li Y F, Xia Y Q, Li X B, *et al.* Temporal and spatial variations of total Nitrogen and total Phosphorus in the typical reaches of Qinhuai River [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 91-97.
- [50] 南京市生态环境局. 南京市环境状况公报(2015-2019) [EB/OL]. http://hbj.nanjing.gov.cn/njshjbhj/202006/t20200603_1903785.html, 2020-06-03.
- [51] Yang H H, Lu G H, Yan Z H, *et al.* Occurrence, spatial-temporal distribution and ecological risks of pharmaceuticals and personal care products response to water diversion across the rivers in Nanjing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113132.
- [52] Zhao Z H, Mi T F, Xia L L, *et al.* Understanding the patterns and mechanisms of urban water ecosystem degradation: phytoplankton community structure and water quality in the Qinhuai River, Nanjing City, China [J]. *Environmental Science*

- and Pollution Research, 2013, **20**(7): 5003-5012.
- [53] 秣陵街道人大工委. 关于秣陵街道水环境污染治理情况的调研报告 [EB/OL]. <http://www.njjnrd.gov.cn/gzyj/281106.htm>, 2018-12-03.
- [54] 禄口街道人大工委. 关于禄口街道水环境污染治理情况的调研报告 [EB/OL]. <http://www.njjnrd.gov.cn/gzyj/280970.htm>, 2018-11-13.
- [55] 东山街道人大工委. 关于东山街道水环境污染治理情况的调研报告 [EB/OL]. <http://www.njjnrd.gov.cn/gzyj/281105.htm>, 2018-12-03.
- [56] 马小雪, 王腊春, 廖玲玲. 温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 64-71.
Ma X X, Wang L C, Liao L L. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in Wenruitang River watershed[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 64-71.
- [57] 全晓辉, 汪银龙, 刘晓宁, 等. 深圳河水体污染特征分析及整治措施[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(7): 52-59.
Tong X H, Wang Y L, Liu X N, *et al.* Pollution characteristics analysis and control measures of Shenzhen River [J]. China Water & Wasterwater, 2020, **507**(7): 60-67.

环境科学

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)