

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物
机动车
扬尘
工业
燃煤
生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析

马玉坤^{1,2}, 朱翔¹, 庞晴晴¹, 孔明¹, 韩天伦¹, 彭福全^{1*}, 谢磊^{1,3}, 汪龙眠¹, 徐斌¹, 何斐¹

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 河海大学环境学院, 南京 210098; 3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 211800)

摘要: 针对黄河上游河库连通背景下水库的污染源解析不足的问题, 基于薄膜梯度扩散和高分辨率孔隙水采样, 分析了黄河上游典型水库——沈家河水库的污染特征和扩散通量。结果表明, 清水河入库口水质为劣 V 类, 沉积物为重度污染状态。各点位上覆水可溶性磷酸盐 (SRP) 平均值低于孔隙水, 表明沉积物 SRP 因浓度梯度向上扩散。各点位 DGT-P 与 DGT-Fe 的相关性及沉积物-水界面浓度差存在空间异质性, 1 号的沉积物 DGT-P 释放受 Fe-P 还原释放主导, 2 号的表层沉积物 DGT-P 释放能力较差, 3 号的表层沉积物 DGT-P 的释放能力较强, 可根据释放机制采取不同治理措施。沉积物-水界面附近 1 号 (4~8 mm)、2 号 (8~20 mm) 和 3 号 (-8~8 mm) 发生 NH_4^+ -N 浓度减小和 NO_3^- -N 浓度增加的现象。沉积物释放导致的 TP、TN 和 NH_4^+ -N 负荷增加量分别占总量的 100%、78.3% 和 56.5%, 表明沉积物释放是负荷的主要来源, 但是清水河输入对氮的影响不可忽略。结果为黄河上游水库污染源解析和治理提供了参考。

关键词: 黄河上游; 薄膜梯度扩散; 沉积物-水界面; 扩散通量; 污染源解析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2527-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108109

Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology

MA Yu-shen^{1,2}, ZHU Xiang¹, PANG Qing-qing¹, KONG Ming¹, HAN Tian-lun¹, PENG Fu-quan^{1*}, XIE Lei^{1,3}, WANG long-mian¹, XU Bin¹, HE Fei¹

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 211800, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient analysis of the pollution sources of the reservoir under the river-reservoir connectivity of the upper reaches of the Yellow River, this study analyzed the pollution characteristics and diffusion flux of a typical reservoir in the upper reaches of the Yellow River (Shenjiache Reservoir) based on the DGT and HR-Peeper technology. The results showed that the water quality at the entrance of the reservoir was inferior to Class V, and the reservoir sediments were under heavy pollution. The average concentration of soluble phosphate (SRP) in the overlying water at each point was lower than that of the pore water, indicating that the SRP of sediment diffused upward due to the concentration gradients. The correlations between DGT-P and DGT-Fe and the concentration difference at the sediment-water interface were spatially heterogeneous. The sediment DGT-P release was dominated by Fe-P reduction release at point 1, the ability of surface sediment DGT-P release was poor at point 2, and surface sediment DGT-P had strong release ability; thus, different governance measures could be taken according to the release mechanisms. The concentrations of NH_4^+ -N decreased and the concentrations of NO_3^- -N increased at point 1 (4~8 mm), point 2 (8~20 mm), and point 3 (-8~8 mm) near sediment-water interface. The increase in TP, TN, and NH_4^+ -N loading mainly came from the sediments release, and the impact of external input from the Qingshui River on nitrogen cannot be ignored. These results provide a reference for the analysis of pollution sources and the management of river reservoirs in the upper reaches of the Yellow River.

Key words: upper reaches of the Yellow River; diffusive gradients in thin-films (DGT); sediment-water interface; diffusion flux; pollution source analysis

水库是广泛分布于世界各地的水利工程构筑物, 随着我国近 40 年的经济发展和对水资源需求的不断攀升, 大量的大中小型水库建立起来, 同时, 我国的水库和河流也面临着愈发严重的水体污染^[1]。水库与河流不同, 河流污染主要来自岸边的点源排放和非点源污染, 污染源较为单一, 以外源污染物汇入为主, 污染治理主要依靠控流截污, 防止外源污染^[2,3]。水库水体流动性较差, 水力停留时间较长, 水库接纳各类污染物, 仅开闸放水期间可以转移污染物, 因而水库易成为各类水体污染物的汇^[4,5]。水库积累了大量上游河流和人为排放输入的污染物, 直接导致了水体污染物向沉积物迁移,

在控源截污治理和水体水质改善后, 水库沉积物内源释放往往会产生第二次污染^[6]。因此, 水库污染治理需要多管齐下, 不仅需要控制上游污染物汇入和岸边人为排放, 更需要摸清底泥污染情况, 进行水库沉积物释放研究^[7,8]。薄膜梯度扩散 (DGT) 和高分辨率孔隙水采样 (HR-Peeper) 技术

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-10-01

基金项目: 生态环境部南京环境科学研究所创新团队项目 (GYZX200101); 宁夏回族自治区重点研发项目 (2019BFG02028); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07208006-004); 国家自然科学基金项目 (51778265)

作者简介: 马玉坤 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为河库沉积物污染治理与修复, E-mail: 201605010017@hhu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: pfq@nies.org

作为新兴起的孔隙水采集技术,因其具有高分辨率和简便快捷等优点,逐渐成为沉积物氮磷释放测定的主要方法.崔会芳等^[9]的研究使用薄膜扩散梯度(DGT)技术探究了宜兴市横山水库的底泥释放机制,发现横山水库沉积物氮磷释放能力和沉积物污染物含量呈显著的相关关系,氧化还原状况、沉积物污染状况和底栖微生物强弱直接决定了沉积物氮磷的释放.Norgbey等^[10]的研究利用高分辨剖面技术和DGT技术结合探究天宝水库SWI的Fe-P-S在缺氧状态下的变化特征,发现在缺氧条件下沉积物Fe-P-S的释放受到硫酸盐和 Fe^{3+} 的影响较大,且受到 Fe^{3+} 还原的主导.水库污染源解析可以针对污染源特征给出合理的治理措施,对水库治理意义重大.李亚娟等^[11]的研究利用MIKE21核算得到了妫水河对官厅水库的影响较大,枯水期氨氮、总磷和总氮的贡献率分别为45.76%、1.17%和67.56%,认为控制来流水质和加强流域治理是关键.国内外对水库的研究多集中于单一外源解析或P、Fe和S结合下的内源释放规律研究,但水库通常和河流具有连通性,单一内源的研究并不能全面反映水库污染的总体特征,并不能解决水库污染的问题,水库污染研究应当充分考虑河库连通性,将沉积物释放规律和源解析相结合.

黄河上游处于西北干旱和半干旱地区,水资源普遍短缺背景下,水库不仅具有泥沙调节的作用,生态基流保障和水源地水质保障等功能显得尤为重要.宁夏是典型的黄河上游区域,生态环境较为脆弱,加上宁夏山区在开发利用水资源过程中忽视生态环境的重要性,大量水体面临水资源短缺、水体污染严重和水土流失等问题^[12,13].有研究表明,宁夏山区水库水源不仅面临严重的点源和面源的污染,沉积物磷释放污染也日益严重,已经影响了该地区高质量发展^[14].当前,对黄河上游水库的研究多集中于水库的水沙调节、水土保持和调水能力等水文功能,对于水库沉积物污染和富营养化等生态问题的研究较少^[15,16].

针对河库连通背景下水库污染及其特征、来源分析研究不足的问题,以污染来源、污染特征和底泥特性均不明晰的黄河上游典型水库——沈家河水库为例,将DGT技术、HR-Peeper和源解析方法相结合,研究了沈家河水库沉积物释放特征和SWI污染特征,核算量化该水库内河流输入污染,以期制定沈家河水库污染治理方案提供科学依据,并为黄河上游河库连通背景下的水库内源污染特征及源解析提供参考.

1 材料和方法

1.1 研究区域

沈家河水库(图1)隶属宁夏回族自治区固原市原州区,位于宁夏境内黄河最大的一级支流清水河上游,属典型的农灌中型水库,总库容约4 749万 m^3 ,防洪库容931万 m^3 ,最大水深4 m,流域面积313 km^2 .清水河流经固原市原州区城区后进入该水库,出水下游为清水河干流,是全流域水量调剂主要水库.直接汇入沈家河的河流有清水河和清水河一级支流清静沟.

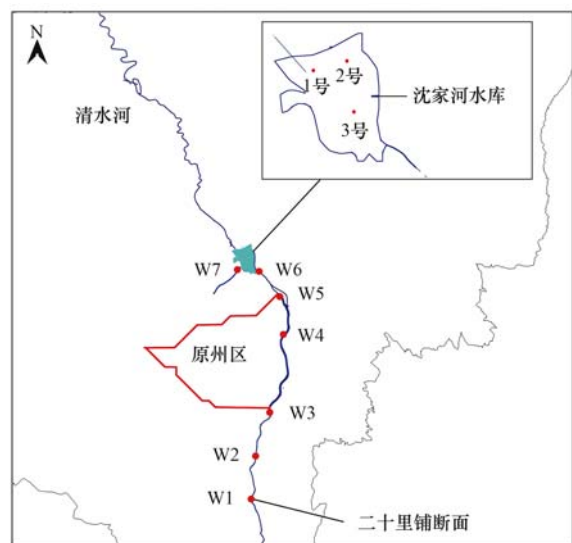


图1 流域概况和水样监测点位示意

Fig. 1 Overview of the basin and water sample collection sites

1.2 研究方法

1.2.1 水样采集

2020年6月17~19日,从清水河上游二十里铺断面(W1)至沈家河水库沿线进行现场调研采样,调研河道长度约为20km.调研涵盖沈家河水库、水库上游清水河干流及直接汇入沈家河水库的清静沟,清水河监测点位共7个,包括清水河干流6个(W1~W6)和清静沟入库口(W7),沈家河水库面积较小,选取3个监测点均匀分布于沈家河水库,分别为1、2和3号,具体监测点位如图1所示.水样使用1 L黑色PVC瓶盛装,共采集2L,水样冷冻后带回实验室测定化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮(NH_4^+-N),测定方法分别为重铬酸钾法(GB 11914-89)、过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 1193-89)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)和纳氏试剂比色法(GB 7479-87).

1.2.2 沉积物采集和前处理

沈家河水库沉积物采集点为1、2和3号.使用

柱状采样器采集各个点位的沉积物,将现场采集的沈家河水库柱状样品及时带回实验室进行分层处理,柱状样品按 0~5、5~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 分层,每层样品取其具有代表性混合样或中间部位;分层底泥样品进行冷冻干燥或者低温烘干,测定 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$),TN 和 TP 测定方法见文献[17], $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别采用氯化钾溶液提取-分光光度法和紫外分光光度法(GB/T 32737-2016)测定。每个调查点位选择 2 根柱状样,1 根用于放置 HR-Peeper,另外一根用于放置薄膜扩散取样器。其中,薄膜扩散取样器放置 24 h 取出,HR-Peeper 放置 48 h 后取出。取出的水样用于分析 SWI 理化指标,包括 SRP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,测定方法见文献[18]。

1.2.3 水质和底泥污染评估方法

沈家河水库富营养化状态采用综合营养状态指数法计算,方法来自文献[19]。

国内对于沉积物氮磷污染评价没有较为统一的方法,使用较多的有污染指数法、有机指数法和富集系数法等^[20]。本文采用综合污染指数评价沈家河水库表层沉积物 TN 和 TP 污染程度,评价方法和污染程度分级见文献[21]。

各污染物在上覆水-沉积物界面的扩散通量 F 可通过 Fick 第一定律估算获得,计算方法见文献[22]。

1.2.4 数据处理方法

文章采用 Origin 2019 进行作图分析,数据 Pearson 相关性分析通过 SPSS 完成。

1.2.5 内源和河流输入污染负荷核算方法

沈家河水库的内源输入主要为底泥释放,河流输入主要为清水河和清静沟。假设支流汇入沈家河水库后混合均匀流出,出流与入流流量相等,不计沈家河水库自净作用的影响。清水河和清静沟支流汇入对沈家河水库 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 负荷的影响由公式(1)~(4)计算:

$$m_i = c_i \times Q_i \times t \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$V = S \times h \quad (2)$$

$$m_0 = c_0 \times V \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$\Delta m = m_i - \int_0^t \frac{c_i \times Q_i \times t + m_0}{V + Q_i \times t} \times Q_i \times 10^{-6} \times dt \quad (4)$$

式中, m_i 为某一支流一个月汇入沈家河水库的营养盐的质量(t); c_i 为该支流营养盐的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q_i 为该支流的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); t 为汇入时间,以一个月计(2 592 000 s); V 为沈家河水库的容积(m^3); S 为沈家河水库面积(3 030 000 m^2); h

为沈家河水库的平均水深(2 m); m_0 为沈家河水库营养盐的本底质量(t); c_0 为沈家河水库营养盐的本底浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Δm 为支流汇入一个月的负荷增加量。

内源释放对沈家河水库 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 负荷的影响由公式(5)计算,TN 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之和计,TP 以 SRP 计:

$$\Delta m_s = F \times S \times t \times 10^{-14} -$$

$$\int_0^t \frac{F \times S \times t}{V + Q_w \times t} \times Q_w \times 10^{-14} \times dt \quad (5)$$

式中, Δm_s 为在水库持续出流的情况下,底泥释放一个月后沈家河水库营养盐质量的增加量(t); F 为释放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$]; S 为水库表面积(m^2); Q_w 为水库出流的流量,以 0.244 3 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 计; V 为沈家河水库的容积(m^3)。

2 结果与讨论

2.1 沈家河水库及其上游清水河水质特征

沈家河水库上游清水河及其支流的 2020 年 6 月水质指标如图 2 所示。清水河 TP 浓度波动小,可稳定达到Ⅳ类水标准。清水河 TN 浓度从 W1 点到沈家河水库入库口 W6 点逐渐升高,尤其自 W3 点以后,主要原因可能是固原市原州区城镇居民生活污水收集处理能力不强,2020 年城镇污水收集率不到 70%,加上农村地区生活污水处理率低,面源污染截留控制工程少,导致清水河 TN 浓度升高;在清水河 W1~W5 点,COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较为稳定,可以达到Ⅳ类水标准,但在沈家河水库入库口 W6 点急剧升高,这可能是由于原州区工业发达,2019 年工业占比达 27.9%,且 W6 点距污水处理厂排口较近,周边又分布着较多村庄,入河污染负荷较高。原州区产生的污染负荷对清水河水质影响较大,间接影响了位于下游的沈家河水库。

沈家河水库 1、2 和 3 号的水质均为劣Ⅴ类,富营养化评价结果分别为 68.71、72.06 和 72.06。沈家河水库 TN 浓度最高,超Ⅳ类水标准 1.85~2.04 倍;其次为 TP 和 COD,分别超Ⅳ类水标准 0.15~0.8 倍和 0.28~0.52 倍。沈家河水库富营养化情况严重,其中 1 号为中度富营养,其余两个点位为重度富营养,全湖平均为重度富营养。总体来看,沈家河水库 TN 可能受到河流输入和内源释放的双重影响,对比沈家河水库和入库河流的 TP 浓度,可以推测沈家河水库 TP 主要来源于沉积物内源释放。

2.2 沈家河水库沉积物污染特征

沈家河水库沉积物污染分布特征见图 3。TP 含量随深度的变化并不明显,2 号和 3 号的深层(30

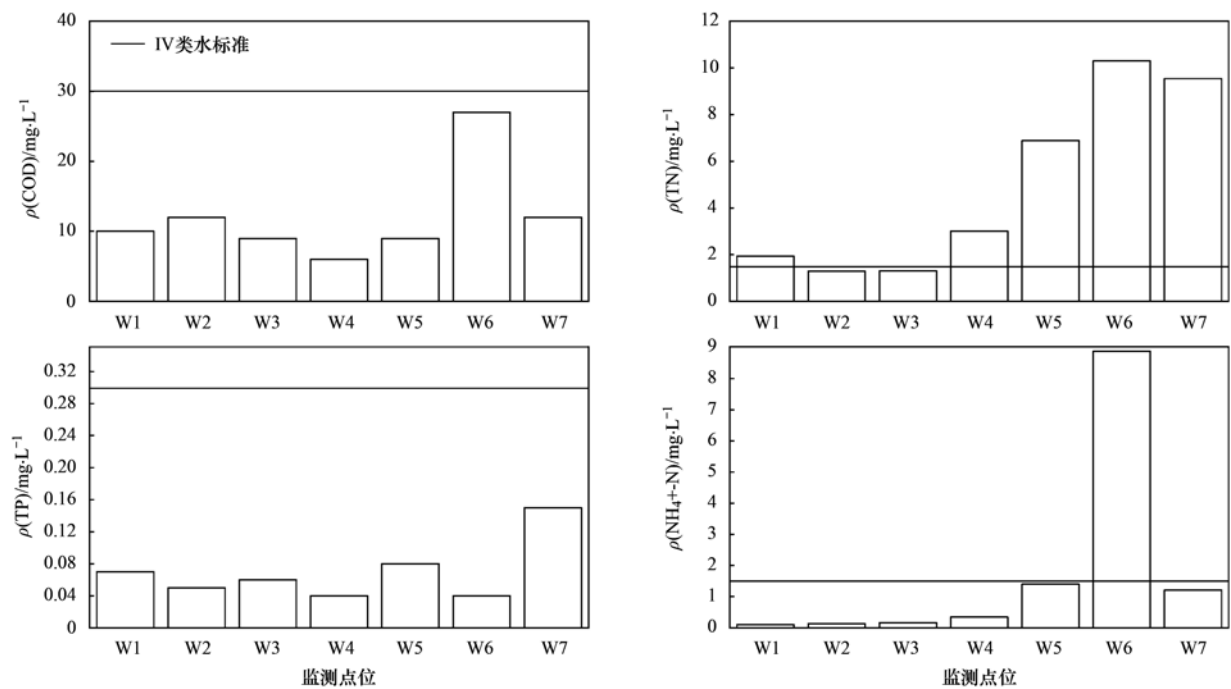


图2 清水河上游及其支流水质

Fig. 2 Water quality in the upper reaches of Qingshui River and its tributaries

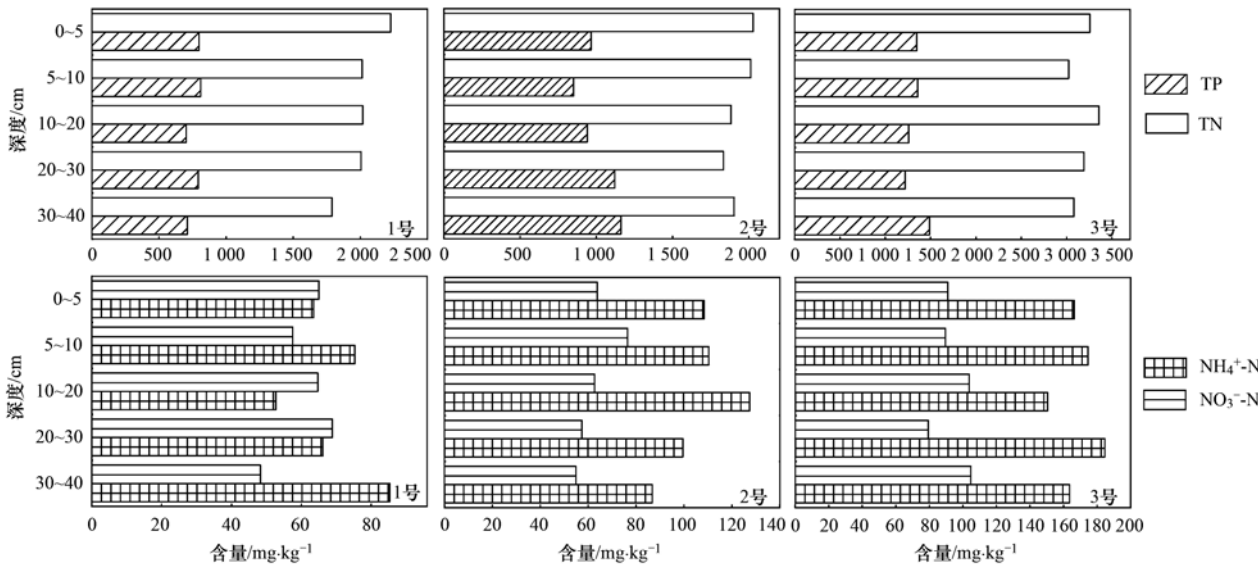


图3 沉积物污染分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of pollution in sediments

~40 cm) TP 含量较高,揭示了 2 号和 3 号深层沉积物有较强的磷释放潜力^[23]. 3 个点位表层沉积物(0 ~ 10 cm)的 TN 含量均较高,说明表层沉积物对氮的吸附. 3 个点位的综合污染指数分别为 2.14、2.23 和 3.24,皆为重度污染,3 号的表层沉积物各项污染指标均为最高,评价结果符合沉积物污染分布特征. 沈家河水库 3 号出现峰值主要原因是 3 号靠近清水河入库口,水体接纳了大量河流输入污染,水体中的污染物沉淀进入沉积物,沉积物成为污染物的汇,富集了较多污染物^[5];而 1 号和 2 号靠近水库出水口,不直接接纳河流输入,由水质分析也可

看出,1 号水体富营养化较轻,污染物超标倍数也较低,因此由水体向沉积物输送的污染物较少. 沈家河水库各点位表层沉积物(0 ~ 5 cm) $\omega(\text{TP})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\omega(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的平均值分别为 1 036.43、2 503.21、112.75 和 73.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沈家河水库沉积物 $\omega(\text{TP})$ 与陕西的金盆水库^[24]相似(1 132 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), $\omega(\text{TP})$ 比同样位于半干旱区的巴西 Forquilha 水库^[25](368.17 ~ 998.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)略高;与国内其他相似功能水库相比,沈家河水库沉积物 TN 含量偏高^[26,27]. 这与沈家河水库所处地理环境有关,沈家河水库位于半干旱的温带大陆气候

区,流域全年水量匮乏,蒸发量大,加上清水河流域禽畜养殖产生较高磷负荷,种植业面源污染造成较高氮负荷,造成水库河流输入的氮磷负荷高^[28,29].

2.3 基于 SWI 污染分布的沉积物扩散通量分析

由 HR-Peeper 测量的各点位 SWI 的 SRP 和溶解性 Fe 分布特征如图 4 所示. 各点位孔隙水 ($-20 \sim 0$ mm) $\rho(\text{SRP})$ 平均值分别为 1.657、1.997 和 3.142 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上覆水 ($0 \sim 20$ mm) $\rho(\text{SRP})$ 平均值分别为 1.026、1.324 和 2.067 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 3 号在 $-20 \sim 20$ mm 内 SRP 浓度平均值最高,这与 3 号沉积物 TP 含量最高有关,3 号靠近清水河入库口,在丰水期大量上游清水河水体携带较高的磷负荷进入水库,上覆水磷浓度显著升高,SWI 附近 SRP 呈现由上覆水向孔隙水转移,进而被沉积物吸附,富集了较多 SRP 的沉积物在枯水期时,向孔隙水和上覆水释放,造成了 3 号较高的 SRP 浓度平均值^[4]. 各点位孔隙水与上覆水间 SRP 平均值存在较大浓度差,这是由沈家河水库沉积物磷含量高造成的,符合表层

沉积物磷污染较重的特征;有研究表明,较大的孔隙水与上覆水浓度差能直接影响沉积物与上覆水的氮磷交换速率^[30],结合清水河入库口 TP 浓度达标,但水库水体 TP 超 IV 类标准,可以推测沈家河水库存在较强的沉积物 SRP 释放,SRP 从沉积物中向孔隙水中释放,进而造成上覆水 P 浓度增加^[31,32]. 沉积物中铁结合态磷(Fe-P)的 Fe^{3+} 还原反应导致 Fe-P 以磷酸盐的形式释放是沉积物 SRP 释放的主要控制因素,沉积物中的 Fe^{2+} 与 SRP 的相关性可以指示 Fe-P 还原释放的发生^[33,34],HR-Peeper 获取的各点位 SRP 与溶解性 Fe 浓度在各个深度范围内均不存在较为明显的相关关系($P > 0.05$),可能是由于沉积物 SRP 的释放受到其他因素的影响. 有研究表明,湖库沉积物 Fe-P 还原释放还会受到 SO_4^{2-} 还原的影响,被还原后的游离态 Fe^{2+} 会迅速与被还原为游离态的 S^{2-} 结合形成 FeS,这可能是各点位溶解性 Fe 浓度低,且溶解性 Fe 与 SRP 浓度相关性小的主要原因^[33].

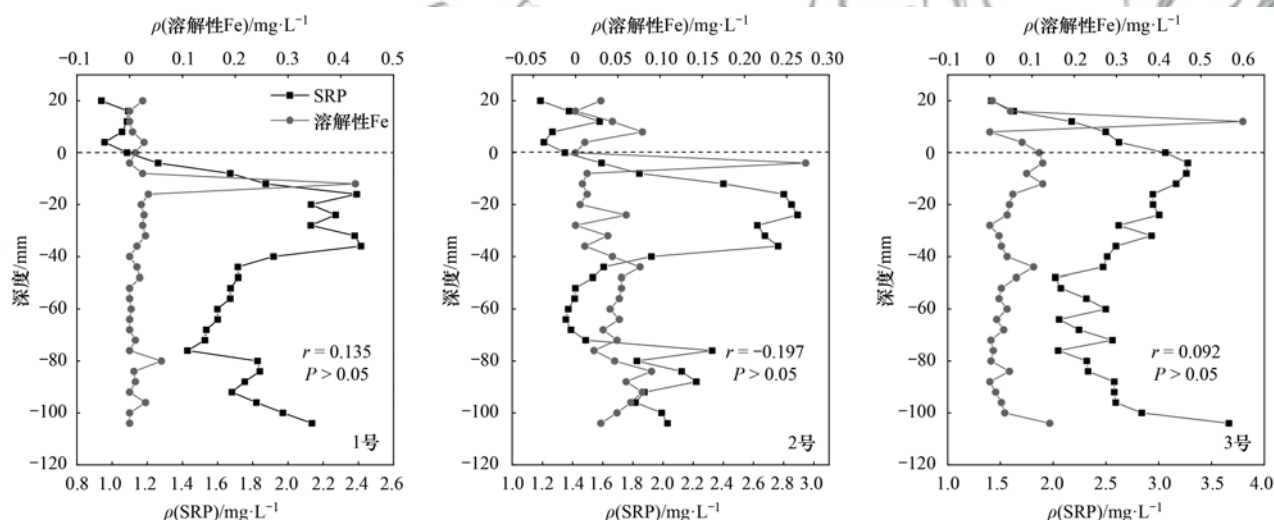


图4 SWI 的 SRP 与溶解性 Fe 分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of SRP and soluble Fe at the sediment-water interface

各点位 SWI 的 DGT-P 和 DGT-Fe 分布特征见图 5. DGT-P 与 DGT-Fe 是由薄膜扩散取样器获取到的活性 P 和活性 Fe,其可更加直观地反映 Fe-P 还原释放的深度、强度等指标,因而被广泛地应用于 Fe-P 释放研究^[22]. 3 个点位 SWI 中 DGT-P 和 DGT-Fe 的浓度关系、浓度差存在空间异质性,1 号的 SWI 中 DGT-P 和 DGT-Fe 浓度存在显著的正相关性($r=0.577$, $P<0.01$),并未在 2 号和 3 号的 SWI 中观察到 DGT-P 和 DGT-Fe 浓度存在显著的相关性($P>0.05$),说明 1 号沉积物 DGT-P 释放受 Fe-P 还原释放主导,2 号和 3 号的 DGT-P 释放受 Fe-P 还原释放机制影响较小. 有研究表明,DGT-P 仅是沉积物磷的形态之一,性质较为活跃,易释放进入孔隙水,

沉积物中仍含有较多非活性磷不易释放^[35],且 DGT-P 的性质较为活跃,除了 Fe-P 还原释放外,还会受到 Al-P、Ca-P、藻类和氧化还原电位等的影响^[25,33,36],这是可能是造成 2 号和 3 号的 DGT-P 释放受 Fe-P 还原机制影响小的主要原因;2 号的上覆水与孔隙水 $\rho(\text{DGT-P})$ 平均差值最小(0.791 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且孔隙水平均值最低(1.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),说明 2 号的表层沉积物($0 \sim -40$ mm) DGT-P 释放能力较差,这可能是由于 2 号的沉积物磷以非活性磷和中活性磷形态为主^[34];而 3 号的上覆水与孔隙水间 $\rho(\text{DGT-P})$ 平均差值最大(1.183 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\rho(\text{DGT-Fe})$ 平均差值最小(0.002 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),上覆水 $\rho(\text{DGT-P})$ 平均值最大(0.931 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),3 号的表

层沉积物 DGT-P 向孔隙水和上覆水的释放能力较强,这是由于 3 号靠近水库入库口,在入库口易形成垂向环流,造成沉积物磷的再悬浮,增大了沉积物磷的释放^[37,38]. 各个点位 DGT-P 和 DGT-Fe 浓度峰值出现的深度都不同,其中 1 号的深度最大(−40 mm 左右),3 号的深度最浅(−20 ~ −10 mm),表明不同点位沉积物氧化还原电位性质不同,1 号的氧化还原发生的深度大,3 号的氧化还原释放发生的深度小. 各个点位沉积物磷释放机制、沉积物性质和氧化还原发生的深度的不同,揭示了沈家河水库沉积物磷释放能力、应采取的治理对策的不同;1 号的沉积物 DGT-P 与 SRP 浓度

峰值均出现在 −40 mm 左右,生态清淤深度最大,而 1 号的沉积物 DGT-P 释放受到了 Fe-P 还原机制影响,沉积物的原位控制技术可以通过投加化学药剂(铝盐、铁盐和石灰等)改变沉积物性质(溶解氧含量和氧化还原电位),进而抑制 Fe-P 的还原反应,达到控制沉积物磷释放的效果^[5],因此可以通过原位控制技术治理 1 号的沉积物污染;2 号的沉积物 DGT-P 和 SRP 浓度峰值分别出现在 −20 mm 和 −30 mm 左右,生态清淤深度应在 30 mm 左右;3 号的沉积物 DGT-P 和 SRP 浓度峰值出现在 −20 ~ 0 mm,建议生态清淤深度应在 20 mm 左右.

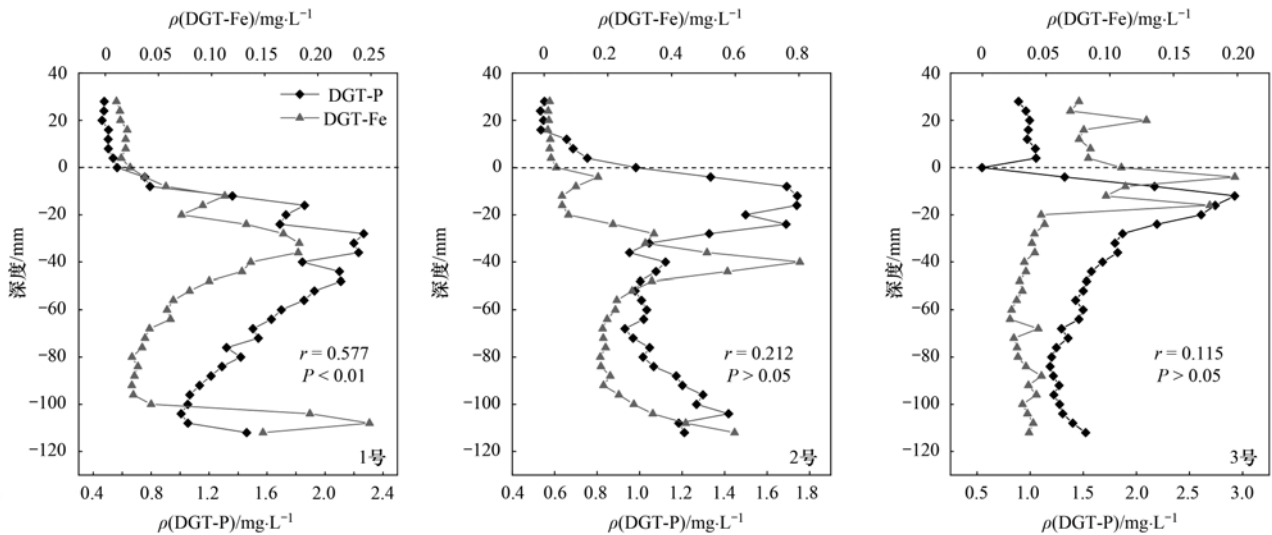


图 5 SWI 的 DGT-P 和 DGT-Fe 分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of DGT-P and DGT-Fe at the sediment-water interface

各点位 SWI 的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分布特征如图 6 所示. 1 号的 NH_4^+ -N 浓度在 −8 ~ 8 mm 逐渐减小, NO_3^- -N 浓度在 −16 ~ 4 mm 内逐渐减小,在 4 ~ 12 mm 内逐渐增大($1.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $3.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),说明 1 号的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 存在孔隙水向上覆水的扩散作用; NO_3^- -N 浓度在 4 ~ 8 mm 增大, NH_4^+ -N 浓度在 4 ~ 8 mm 减小,可能是上覆水中广泛存在的好氧氨氧化细菌主导了这一过程,好氧氨氧化细菌将 NH_4^+ -N 转化为亚硝氮(NO_2^- -N), NO_2^- -N 又极易被氧化为 NO_3^- -N^[39],造成了水体 NH_4^+ -N 浓度降低和 NO_3^- -N 浓度升高. 2 号的 NH_4^+ -N 浓度在 8 ~ 20 mm 逐渐减小, NO_3^- -N 浓度在 8 ~ 20 mm 逐渐增大,原因与 1 号的类似. 3 号的 NH_4^+ -N 浓度在 −8 ~ 8 mm 逐渐减小, NO_3^- -N 浓度在 −8 ~ 8 mm 升高,但是幅度小于 1 号和 2 号的,说明 3 号的 NH_4^+ -N 在 SWI 存在向上扩散作用,上覆水受氨氧化细菌转化影响较小. 上覆水中好氧氨氧化细菌的分布与含氧量等水环境条件有关,造成了 3 个点位好氧氨氧化细菌分布深度

和活性不同,进而导致了 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度变化的不同^[40]. 3 个点位 NH_4^+ -N 浓度在 −8 mm 以下波动较大,3 号的波动最大,可能与沉积物中微生物及沉积物本身性质有关. 3 个点位 NO_3^- -N 浓度在 SWI 界面以下部分整体较为稳定,仅 1 号和 2 号的浓度在部分深度突然增加,推测与微生物活动有关.

由 SWI 污染特征计算得到的沈家河水库沉积物扩散通量见表 1. 3 个点位的 SRP 和 NH_4^+ -N 的扩散通量均为正,而 NO_3^- -N 扩散通量仅在 1 号为正,说明 SRP 和 NH_4^+ -N 物质从沉积物向上覆水中释放,印证了 SRP 和 NH_4^+ -N 在 SWI 附近的浓度变化. 其中,1 号的 NO_3^- -N 扩散通量最大,为 $15.06 \text{ mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$; 2 号的 SRP 和 NH_4^+ -N 扩散通量最大,分别为 $17.26 \text{ mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 和 $26.84 \text{ mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$. 总体来看,1 号的沉积物 NO_3^- -N 的释放能力最强, NH_4^+ -N 释放能力较强,2 号的沉积物的 SRP 和 NH_4^+ -N 释放能力最强,3 号沉积物的磷释放能力较强. 各类污染指标的平均扩散通量与其他

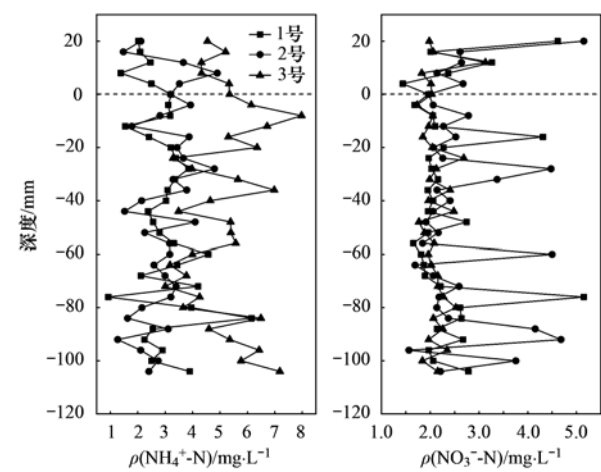


图6 SWI的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N at the sediment-water interface

湖库的对比见表2。与白洋淀和潘大水库相比,沈家河水库SRP的扩散通量较高,最高可达其他湖库的近百倍,这可能与沈家河水库内源污染严重且河流输入的污染未得到有效控制有关;与同处半干旱区冰封期的乌梁素海相比,沈家河水库沉积物SRP较

高的扩散通量可能与温度有关,在10~30℃内,较高的温度对沉积物P释放起促进作用^[5];与国外两个湖库相比,沈家河水库的SRP扩散通量仍略高,仅与Forquilha河水库极值相似,这可能与两个水库建造年代较长造成P的长期沉积有关。与国内其他湖库相比,沈家河水库的NH₄⁺-N扩散通量不高,NO₃⁻-N总体呈吸附趋势,通量与于桥水库类似。经计算,全库底泥每个月向上覆水中释放0.83 t的SRP和1.33 t的NH₄⁺-N,并吸收1.29 t的NO₃⁻-N。由此可见,沈家河水库沉积物磷释放能力强,水库的内源可能已经成为了水库污染的主要来源。

表1 沈家河水库沉积物扩散通量

Table 1 Diffusion flux of sediment pollutants in Shenjiahe Reservoir

点位	扩散通量 $F/\text{mg}\cdot(\text{d}\cdot\text{m}^2)^{-1}$		
	SRP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
1	2.98	10.19	15.06
2	17.26	26.84	-40.75
3	6.87	7.72	-16.30
平均值	9.04	14.91	-14.00

表2 沈家河水库和其他湖库沉积物扩散通量

Table 2 Diffusion flux of sediments from Shenjiahe Reservoir and other lakes and reservoirs

湖库名称	地理位置	扩散通量 $F/\text{mg}\cdot(\text{d}\cdot\text{m}^2)^{-1}$			文献
		SRP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	
沈家河水库	宁夏固原市	9.04	14.91	-14.00	本研究
潘大水库	河北省唐山市	0.10~2.86	3.5~156.8	-7.37~161.78	[41,42]
白洋淀(清淤后)	河北省保定市	2.33	12.42	—	[43]
乌梁素海	内蒙古巴彦淖尔市	0.033~0.147	1.282~4.269	—	[44]
于桥水库	天津市	—	20.6~250.5	-20.4~33.4	[45]
伊利湖	State of Ohio, U. S.	0.71~1.90	—	—	[5]
Forquilha 河水库	Ceará state, Brazil	0~11	—	—	[25]

2.4 基于沉积物释放和河流输入的污染负荷核算

根据沉积物扩散通量和河流输入核算结果,内源和河流输入一个月对沈家河水库污染负荷的影响如表3所示。沉积物释放是导致沈家河水库TN、NH₄⁺-N和TP负荷升高的最主要原因。沉积物释放导致的TP负荷增加量占TP总增加量的100%,TP污染完全来自沉积物释放,说明沉积物TP污染严重且释放能力强。清水河和清静沟入库TP污染轻,与清水河入库口水质分析结果相同,SWI污染特征和SRP释放通量也印证了这一结论;清水河和清静沟的汇入虽然降低了沈家河水库的TP浓度,但是沉积物释放是沈家河水库TP污染的最主要来源,且水库沉积物释放能力强,底泥生态清淤或抑制释放可以有效治理沈家河水库的TP污染。沉积物释放导致的TN和NH₄⁺-N负荷增加量分别占TN和NH₄⁺-N增加量的78.3%和56.5%,TN和NH₄⁺-N污染主要来自沉积物释放,清水河输入影响也不容

忽视。

表3 污染输入对沈家河水库的影响(按月计)

Table 3 Impact of pollution input on Shenjiahe Reservoir(per month)

污染来源	负荷增量 $\Delta m/t$		
	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
清水河汇入	0.614	1.017	-0.011
清静沟汇入	0.069	0.015	0
沉积物释放	2.458	1.342	0.814
总计	3.141	2.374	0.803

3 结论

(1)清水河从上游到沈家河水库入库口COD和NH₄⁺-N浓度逐渐升高,仅TP浓度稳定达标。沈家河水库总体处于重度富营养状态,TN超Ⅳ类水1.85~2.04倍,TP和COD分别超Ⅳ类水标准0.15~0.8倍和0.28~0.52倍。

(2)越靠近清水河入库口,沈家河水库沉积物氮磷含量越高。沈家河水库沉积物综合污染指数在

2.14~3.24 之间,为重度污染。

(3)各点位孔隙水-上覆水间浓度差较大。3 个点位 SWI 中 DGT-P 和 DGT-Fe 浓度分布不同,存在空间异质性,仅 1 号的 DGT-P 释放受 Fe-P 还原反应主导。SWI 附近 1 号(4~8 mm)、2 号(8~20 mm)和 3 号(-8~8 mm)发生 NH_4^+ -N 浓度减小、 NO_3^- -N 浓度增加的现象。沈家河水库沉积物释放导致的 TP、TN 和 NH_4^+ -N 负荷增加量分别占总增加量的 100%、78.3% 和 56.5%。

(4)西北旱区水库在面临上游氮负荷高、水量少的问题的同时,也要积极应对沉积物营养盐释放,因此西北旱区水库水质提升不仅需要保证入库断面水质稳定以减轻河流输入的影响,也要通过合理地生态清淤或者抑制措施降低沉积物氮磷释放风险。

参考文献:

- [1] He J, Charlet L. A review of arsenic presence in China drinking water[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **492**: 79-88.
- [2] Chen Y P, Fu B J, Zhao Y, *et al.* Sustainable development in the Yellow River Basin: issues and strategies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121223.
- [3] 胡明,刘心远,严玉林,等. 不同入河排水口降雨径流污染特征识别[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 164-173.
Hu M, Liu X Y, Yan Y L, *et al.* Recognition of rainfall runoff pollution characteristics of different river drainage outlets[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 164-173.
- [4] Paytan A, Roberts K, Watson S, *et al.* Internal loading of phosphate in Lake Erie Central Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 1356-1365.
- [5] Gibbons K J, Bridgeman T B. Effect of temperature on phosphorus flux from anoxic western Lake Erie sediments[J]. *Water Research*, 2020, **182**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116022.
- [6] Yuan H Z, Wang H X, Zhou Y W, *et al.* Water-level fluctuations regulate the availability and diffusion kinetics process of phosphorus at lake water-sediment interface[J]. *Water Research*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117258.
- [7] Wetzel M A, Wahrenndorf D S, von der Ohe P C. Sediment pollution in the Elbe estuary and its potential toxicity at different trophic levels[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **449**: 199-207.
- [8] 邱祖凯,胡小贞,姚程,等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
Qiu Z K, Hu X Z, Yao C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
- [9] 崔会芳,陈淑云,杨春晖,等. 宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5400-5409.
Cui H F, Chen S Y, Yang C H, *et al.* Endogenous pollution and release characteristics of bottom sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5400-5409.
- [10] Norgbey E, Li Y P, Ya Z, *et al.* High resolution evidence of iron-phosphorus-sulfur mobility at hypoxic sediment water interface: an insight to phosphorus remobilization using DGT-induced fluxes in sediments model[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138204.
- [11] 李亚娟,杜彦良,刘培斌,等. 奶水河入官厅水库水污染成因及减排措施评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, **19**(2): 325-333.
Li Y J, Du Y L, Liu P B, *et al.* Causes of water pollution from Guishui River to Guanting Reservoir and assessment of loads reduction measures[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, **19**(2): 325-333.
- [12] 彭少明,尚文绣,王煜,等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J]. *水利学报*, 2018, **49**(10): 1187-1198.
Peng S M, Shang W X, Wang Y, *et al.* Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(10): 1187-1198.
- [13] 李卫明,艾志强,刘德富,等. 基于水电梯级开发的河流生态健康研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(6): 957-964.
Li W M, Ai Z Q, Liu D F, *et al.* Research on river eco-health based on hydropower cascade development[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(6): 957-964.
- [14] 陈世贵. 宁夏山区水库污染水体生态修复研究[J]. *人民黄河*, 2020, **42**(12): 66-69.
Chen S G. Study on ecological restoration of polluted water in reservoirs in Ningxia Mountainous areas[J]. *Yellow River*, 2020, **42**(12): 66-69.
- [15] 贾一飞,董增川,卞佳琪,等. 黄河上游水库群多目标优化调度研究[J]. *人民黄河*, 2019, **41**(1): 41-45, 50.
Jia Y F, Dong Z C, Bian J Q, *et al.* Research on multi-objective optimal operation of the cascade reservoirs of the upper Yellow River[J]. *Yellow River*, 2019, **41**(1): 41-45, 50.
- [16] 姚文艺,侯素珍,丁赟. 龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J]. *水科学进展*, 2017, **28**(1): 1-13.
Yao W Y, Hou S Z, Ding Z. Effects on flow and sediment in the upper Yellow River by operation of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2017, **28**(1): 1-13.
- [17] 任静雯,王佳俊,周磊,等. 拉鲁湿地沉积物碳氮磷分布及污染风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(2): 172-181.
Ren J W, Wang J J, Zhou L, *et al.* Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of Lhalu Wetland in dry and wet seasons and its pollution risk assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(2): 172-181.
- [18] 张甜娜,周石磊,陈召莹,等. 白洋淀夏季入淀区沉积物孔隙水-上覆水水质特征及交换通量分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3176-3185.
Zhang T N, Zhou S L, Chen Z Y, *et al.* Analysis of water quality and exchange flux of interstitial water-overlying water in sediments of Baiyangdian entrance area in summer[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3176-3185.
- [19] 丁洋,赵进勇,张晶,等. 松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2232-2239.
Ding Y, Zhao J Y, Zhang J, *et al.* Spatial differences in water quality and spatial autocorrelation analysis of eutrophication in Songhua Lake[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2232-2239.
- [20] 黄廷林,刘飞,史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 166-172.

- Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 166-172.
- [21] 于坤, 张坤, 孙庆业, 等. 董铺水库及入库河流表层沉积物污染状况评价[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(10): 2045-2052.
- Yu K, Zhang K, Sun Q Y, *et al.* Assessment of surface sediment pollution in Dongpu Reservoir and its inflow rivers[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(10): 2045-2052.
- [22] 李财, 任明漪, 石丹, 等. 薄膜扩散梯度 (DGT)——技术进展及展望[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(12): 2613-2628.
- Li C, Ren M Y, Shi D, *et al.* Diffusive gradient in thin films (DGT): technological progress and prospects [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(12): 2613-2628.
- [23] 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 等. 基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4781-4788.
- Zhou Y T, Chen X H, Li L Q, *et al.* Identification of dredging depths based on sediment vertical distribution profiles of total nitrogen and total phosphorus and their adsorption-desorption equilibria[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4781-4788.
- [24] 王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(3): 659-665.
- Wang Y P, Huang T L, Zhou Z Z, *et al.* Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(3): 659-665.
- [25] Moura D S, Neto I E L, Clemente A, *et al.* Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs[J]. *Chemosphere*, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125686.
- [26] 苏青青, 宋林旭, 刘德富, 等. 三峡水库香溪河沉积物氮含量和氨氮释放特征[J]. *水生态学杂志*, 2019, **40**(3): 1-7.
- Su Q Q, Song L X, Liu D F, *et al.* Total nitrogen content and ammonia nitrogen release from surface sediments of Xiangxi River, Three Gorges Reservoir Region [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(3): 1-7.
- [27] 兰建洪, 刘丰, 郭晓玮, 等. 清林径水库表层沉积物营养盐分布特征及污染评价[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, **19**(2): 269-275.
- Lan J H, Liu F, Guo X W, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nutrients in surface sediments of Qinglinjing Reservoir[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, **19**(2): 269-275.
- [28] 邱小琮, 王德全, 尹娟, 等. 宁夏农业面源污染及其影响因子解析[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(5): 190-194.
- Qiu X C, Wang D Q, Yin J, *et al.* Analysis of agriculture non-point source pollution and its influence factors in Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(5): 190-194.
- [29] 陶园, 徐静, 任贺靖, 等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(4): 257-264.
- Tao Y, Xu J, Ren H J, *et al.* Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(4): 257-264.
- [30] 向速林, 吴涛哲, 龚聪远, 等. 鄱阳湖沉积物与水界面氮的迁移特征及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(4): 781-786.
- Xiang S L, Wu T Z, Gong C Y, *et al.* Transportation features and pollution evaluation of nitrogen at the sediment-water interface of Poyang Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(4): 781-786.
- [31] Li R, Gao L, Wu Q R, *et al.* Release characteristics and mechanisms of sediment phosphorus in contaminated and uncontaminated rivers: a case study in South China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115749.
- [32] 林建宇, 苏雅玲, 韩超, 等. 基于 DGT 技术的骆马湖沉积物-水界面磷-铁-硫同步变化与交换通量特征研究[J/OL]. *中国环境科学*: 1-10[2021-07-16]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210706.018>.
- Lin J Y, Su Y L, Han C, *et al.* Combined distributions and exchange characteristics of phosphorus, iron and sulfur across the sediment-water interface of Lake Luoma [J/OL]. *China Environmental Science*: 1-10[2021-07-16]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210706.018>.
- [33] Chen J, Zhang H G, Liu L X, *et al.* Effects of elevated sulfate in eutrophic waters on the internal phosphate release under oxic conditions across the sediment-water interface[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **790**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148010.
- [34] Wu Z H, Wang S R. Release mechanism and kinetic exchange for phosphorus (P) in lake sediment characterized by diffusive gradients in thin films (DGT) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **331**: 36-44.
- [35] 马晓阳, 牛凤霞, 肖尚斌, 等. 高磷沉积物有机磷形态分布及释放动力学特征研究-以宜昌西北口水库为例[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(1): 293-301.
- Ma X Y, Niu F X, Xiao S B, *et al.* Distribution and release kinetics of organic phosphorus in phosphorus-rich sediments: a case study of Xibeikou Reservoir in Yichang [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 293-301.
- [36] 陈茜, 宁成武, 汪杰, 等. 巢湖沉积物磷铁硫形态记录及其环境变化指示[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2853-2861.
- Chen X, Ning C W, Wang J, *et al.* Fractions of phosphorus, iron and sulfur in lake sediments of Chaohu and its implication for environmental changes[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2853-2861.
- [37] 张怡辉, 胡维平, 彭兆亮, 等. 洪泽湖湖流空间特征的实测研究[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2020, **35**(4): 541-549.
- Zhang Y H, Hu W P, Peng Z L, *et al.* Practical measure research on the spatial characteristics of lake currents in Lake Hongze[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, **35**(4): 541-549.
- [38] 刘园园, 褚克坚, 陆滢, 等. 垂向环流作用下湖泊沉积物磷迁移行为[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2843-2852.
- Liu Y Y, Chu K J, Lu Y, *et al.* Migration of phosphorus in lake sediments under vertical circulations [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2843-2852.
- [39] 王彤, 文刚, 黄廷林, 等. 水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5027-5036.
- Wang T, Wen G, Huang T L, *et al.* Characteristics of organic matter in sediments during the thermal stratification of a reservoir and effects on an aerobic denitrifier[J]. *Environmental Science*,

- 2020, **41**(11): 5027-5036.
- [40] 刘卓, 杨代琼, 李姣, 等. 沉积物氮模拟释放过程中氨氧化菌群落变化[J]. 应用化工, 2021, **50**(10): 2677-2682.
- Liu Z, Yang D Q, Li J, *et al.* Changes of community structure of ammonia oxidizing bacteria during the simulation of nitrogen release in sediment[J]. Applied Chemical Industry, 2021, **50**(10): 2677-2682.
- [41] 文帅龙, 吴涛, 杨洁, 等. 冬季大黑汀水库沉积物-水界面氮磷赋存特征及交换通量[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(3): 1217-1225.
- Wen S L, Wu T, Yang J, *et al.* Distribution characteristics and exchange flux of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface of Daheiting Reservoir in winter [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(3): 1217-1225.
- [42] 王洪伟, 王少明, 张敏, 等. 春季潘家口水库沉积物-水界面氮磷赋存特征及迁移通量[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(9): 4284-4293.
- Wang H W, Wang S M, Zhang M, *et al.* Occurrence characteristics and transport fluxes of nitrogen and phosphorus at sediment-water interface of Panjiakou Reservoir in Spring[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(9): 4284-4293.
- [43] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- [44] 姜涛. 冰封期乌梁素海 N、P 和 TDS 在水体和沉积物中的分布及迁移特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [45] 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 等. 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2154-2164.
- Wen S L, Gong W Q, Wu T, *et al.* Distribution characteristics and fluxes of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface of Yuqiao Reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2154-2164.



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)