

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, 褚咏晰, 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)	

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¹, 于会彬², 宋永会^{2*}

(1. 福建省农业科学院农业工程技术研究所, 福州 350003; 2. 中国环境科学研究院流域水环境污染综合治理研究中心, 北京 100012)

摘要: 为探究河流底泥中的溶解性有机物(DOM)和营养盐对重金属迁移转化的影响,以沈阳市新穆河、南小河和老背河为研究对象,利用三维荧光光谱,结合平行因子(PARAFAC)、主成分分析(PCA)和结构方程模型(SEM)研究了底泥中的DOM、营养盐与重金属的空间分异特征及DOM与营养盐对重金属的响应关系。结果表明,3条河流底泥中的总氮(TN)和总磷(TP)呈重度污染状态。南小河底泥中的 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别是辽宁省土壤背景值的2.48、1.02、3.45、3.00和39.05倍,老背河的 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别是背景值的2.56、1.92和8.00倍,新穆河的 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Cu})$ 分别是背景值的1.40和1.10倍,总体上3条河流均存在重金属累积现象,累积严重程度为:南小河>老背河>新穆河,其中南小河和老背河Cd污染严重。应用PARAFAC共解析出5类DOM组分,分别为类色氨酸、酚类络合物、微生物代谢产物、类富里酸和类胡敏酸,其中类富里酸和类胡敏酸丰度较高;基于PCA分析,新穆河底泥污染的主控因子为TN、TP、类富里酸和类胡敏酸等,主要来源于农业面源污染和农村生活污水;南小河的主控因子为TP、Zn、Cu、As和类胡敏酸等,主要来源于工业废水和城市生活污水;老背河的主控因子为TN、TP、Zn、类富里酸和类胡敏酸等,主要来源于城市生活污水和建筑废弃物等。基于SEM分析,DOM、营养盐和pH对重金属影响的路径系数分别为0.52、0.36和0.11,表明DOM的影响最大、营养盐次之、pH最小。显然,类富里酸、类胡敏酸和TP是底泥重金属迁移转化的主要影响因素,这将为河流底泥重金属原位/异位修复提供基础支撑。

关键词: 城市河流; 底泥; 重金属; 平行因子分析(PARAFAC); 主成分分析(PCA); 结构方程模型(SEM)

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2489-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107215

Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments

XIAO Yan-chun¹, YU Hui-bin², SONG Yong-hui^{2*}

(1. Institute of Agricultural Engineering Technology, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350003, China; 2. Watershed Research Center for Comprehensive Treatment of Water Environmental Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to investigate the environmental impact of dissolved organic matter (DOM) and nutrients on heavy metals in river sediments, this study examined the spatial differentiation characteristics of DOM, nutrients, and heavy metals and the relationship between DOM and nutrients in response to heavy metals. Focusing on three important tributaries, the Xinmu River, Nanxiao River, and Laobei River in the Shenyang section of the Hunhe River Basin, which have obvious differences in the dominant ways of human production and living activities, this experiment employed three-dimensional excitation-emission matrices (EEMs), combined with parallel factor analysis (PARAFAC), principal component analysis (PCA), and structural equation modeling (SEM). The results indicated that total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the three rivers showed a severe contamination state. Mean heavy metal contents showed a change trend of $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cd}$. Among them, the contents of Zn, As, Cu, Ni, and Cd in the sediments of the Nanxiao River were 2.48, 1.02, 3.45, 3.00, and 39.05 times the soil background value in Liaoning Province. The contents of Zn, Cu, and Cd in the Laobei River were 2.56, 1.92, and 8.00 times the background value, respectively, and the contents of Zn and Cu in the Xinmu River were 1.40 and 1.10 times the background value. This indicated that there was an accumulation of heavy metals in the three rivers, and the accumulation severity was Nanxiao River > Laobei River > Xinmu River. Additionally, the Cd content of the Nanxiao River and Laobei River strongly exceeded the standard. Five types of DOM components were analyzed using PARAFAC, which were tryptophan-like, phenolic complexes, microbial metabolites, fulvic-like acid, and humic-like acid. Among them, the abundance of humus-like substances (fulvic-like acid and humic-like acid) was relatively high, followed by tryptophan-like, phenolic complexes, and microbial metabolites, with average proportions of 65.88%, 14.22%, 10.07%, and 9.82%, respectively. The results showed that the DOM composition of the three rivers was affected by both external input and endogenous sources, and the proportion of humic acid-like components was significantly higher than that of protein-like components, and the degree of humification was higher. Based on PCA analysis, the main controlling factors of Xinmu River sediment pollution were TN, TP, fulvic-like acid, and humic-like acid, mainly from agricultural non-point source pollution and rural domestic sewage; the main controlling factors of the Nanxiao River were TP, Zn, Cu, As, and humic acid, mainly from industrial wastewater and urban domestic sewage; the main controlling factors of the Laobei River were TN, TP, Zn, fulvic-like acid, and humic-like acid, which mainly came from urban domestic sewage and construction waste. Based on SEM analysis, the path coefficients of the influence of DOM, nutrients, and pH on heavy metals were 0.52, 0.36, and 0.11, respectively. DOM had the largest impact, followed by nutrients and pH. The order of the influence of DOM components on heavy metals was fulvic-like acid (0.97) > tryptophan (0.82)

收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-09-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111001); 福建省自然科学基金项目(2020J011374); 福建省省属公益类科研专项(2020R1032002, 2020R1032006); 福建技术师范学院近海流域环境测控治理福建省高校重点实验室开放基金(S1-KF1903)

作者简介: 肖艳春(1984~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染治理与修复技术, E-mail: 523913032@qq.com

* 通信作者, E-mail: songyh@cares.org.cn

> microbial metabolites (0.78) > humic-like acid (0.73) > phenolic complexes (0.55). The order of the influence of nutrients on heavy metals was TP (0.54) > TN (0.51). DOM and nutrients had a greater impact on the migration of heavy metals. Thus, it is recommended to strengthen the source control and emission reduction of organic matter, nutrients, and heavy metals to avoid the potential ecological risk of "external input + internal release" of heavy metals in sediments.

Key words: urban river; sediment; heavy metal; parallel factor analysis (PARAFAC); principal component analysis (PCA); structural equation model (SEM)

底泥是河流生态系统的重要组成部分,长时间通过固相吸附及沉降作用接纳并蓄积了大量的溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)、营养盐和重金属等污染物,成为记录河流周边人类生产、生活的档案^[1]. 重金属作为典型的累积性污染物,其显著的生物毒性和持久性,对生态环境构成潜在威胁^[2]. DOM 或营养盐可通过吸附络合、离子交换等作用富集/释放重金属,从而影响底泥中重金属的生态毒性和环境迁移能力^[3,4]. 因此,阐明 DOM 与营养盐对重金属的响应关系对有效控制或去除底泥中潜在的重金属污染具有重要意义.

目前,针对 DOM、营养盐与重金属的相关性及溯源分析已有大量研究^[5-7]. 孙文等^[5]研究了北运河沙河水库沉积物中营养盐与 DOM 的相关性,结果表明营养盐与 DOM 相关性显著($P < 0.01$),TN 和 TP 可能来源于有机质中的有机氮和有机磷,或是吸附于有机质的颗粒性氮、磷. Njuguna 等^[6]的研究分析了 Nairobi 河的重金属与营养盐的相关性,结果表明 NO_3^- 与重金属 Cu 和 Zn 表现出显著负相关($P < 0.05$),磷与 Cu、Zn 和 As 表现出显著正相关($P < 0.05$, $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$). 席玥等^[7]研究了黄河干流 DOM 组分含量与 Pb、Zn、Cu、Cr 和 As 这 5 种重金属离子之间的相关性,结果表明 DOM 与重金属离子呈现出不同程度的相关性,其中与 Cu 离子相关性最为显著. 然而,相关性分析难以阐释 DOM 与营养盐对重金属的响应关系. 结构方程模型(structural equation modeling, SEM)是一种建立、估计和检验因果关系的方法^[8]. 模型中既包含可观测的显在变量,也包含无法直接观测的潜在变量. SEM 可替代多重回归、通径分析、因子分析和协方差分析等方法,分析单项指标对总体的作用和单项指标间的相互关系,可精确估计 DOM 与营养盐对重金属的响应关系^[9].

由于区域经济和城市建设的快速发展,产生了大量的污染物进入水体,导致水质恶化,底泥污染严重,制约了城市经济、社会和生态的可持续发展. 因此,本文选取沈阳市典型重污染河流(新穆河、南小河和老背河)为研究对象,分析 3 条河流底泥中营养盐和重金属的空间分异特征;采用三维荧光激发-发射矩阵(excitation-emission matrices, EEMs)结合平行因子分析(parallel factor analysis, PARAFAC)和主成分分析(principal component analysis, PCA)法

提取 DOM 荧光组分和辨识污染源;运用 SEM 确定 DOM 与营养盐对重金属影响的路径系数,揭示 DOM 与营养盐对重金属的响应关系,以期为河流污染控制与修复提供基础支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及样品采集

新穆河、南小河和老背河位于沈阳市建成区,为浑河流域的重要支流,属北温带半湿润大陆性气候,全年气温在 $-35 \sim 36^\circ\text{C}$ 之间,年平均气温和降水量分别为 $6.2 \sim 9.7^\circ\text{C}$ 和 720 mm. 新穆河流经沈北新区的农村地区,接纳了部分生活污水及农田退水等;南小河流经沈北新区的产业园区,沿途接纳了大量未经处理或经过简单处理的工业和生活污水等. 老背河位于和平区的经济开发区,人口密度大,加之河道上游被侵占严重,与原有补充水源分离,因此,水量补给主要来源于降水与周边建筑工地和居民生活污水的排放等. 3 条河流的位置见图 1.

近年来,由于工农业废水及生活污水等入河的影响,3 条河流黑臭问题日益突出^[10]. 根据河流的水质、水动力及其潜在污染源分布特征,在研究区域内共设置 16 个采样点,其中新穆河设置 5 个采样点(S1 ~ S5),南小河设置 6 个采样点(S6 ~ S11, S6 和 S8 分别位于第一和第二污水处理厂排污口附近),老背河设置 5 个采样点(S12 ~ S16). 于 2018 年 11 月,利用抓斗式采样器在各采样点采集底泥样品,所有采样点均以 GPS 定位,具体采样点分布如图 1 所示.

1.2 样品处理与数据分析

采集后的底泥样品放入 -20°C 冰箱冷冻后进行冷冻干燥处理,去除样品中大块沙石和动植物残体,研磨过 100 目筛,装袋以供分析. pH 采用上海雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定; $\omega(\text{TN})$ 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[11]; TP 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定^[11];底泥样品加入王水后在电热板 240°C 的条件下消解,所得消解液中的重金属 Pb、Zn、As、Cu、Ni 和 Cd 总量采用美国 Agilent 7700x 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定^[12]. 为保证测定结果的准确度和精度,对样品进行了重复分析(重复率为 20%)和标样分析(加标回收率在 85% ~ 115% 之间),所有样品分析误差均小

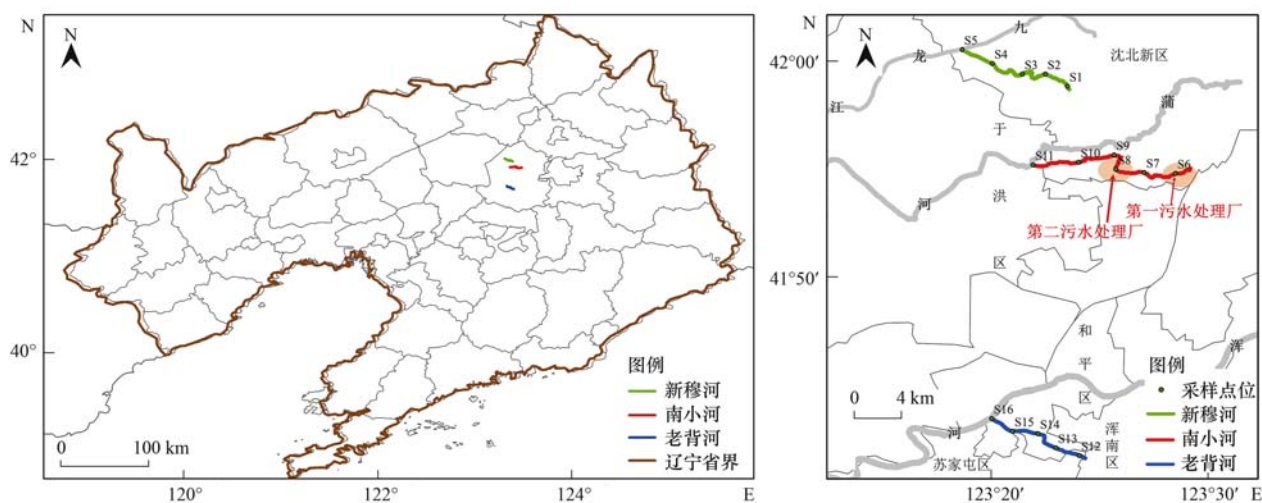


图1 研究区域及采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of study area and sampling sites

于20%,符合 HJ 803-2016 质量控制要求;底泥 DOM 经水浸提法^[13]提取后采用日本 HITACHI 公司的 F-7000 荧光分光光度计测定 EEMs,平行测定 3 次.具体实验参数^[14]如下:激发光源为 150 W 氙灯,光电倍增电压为 700 V,激发波长(E_x)为 220~450 nm,发射波长(E_m)为 260~550 nm, E_x 和 E_m 狭缝宽度均为 5 nm,响应时间 0.5 s,扫描速度为 2400 nm·min⁻¹,扫描间隔为 5 nm,光谱进行仪器自动校正.检测后通过扣除空白水样、手动置零方式消除拉曼散射及瑞利散射.

采用 Arcgis10.4 对底泥 pH、营养盐及重金属含量进行反距离加权插值分析,比较三者在这 3 条河流中的空间分布特征;利用 MATLAB 2017b 软件中的 DOMFlour 工具箱对光谱数据进行平行因子分析,并使用半分裂分析和残差分析验证 PARAFAC 模型的可靠性,从而确定 DOM 荧光组分的最优数量,所得最大荧光强度(F_{max})代表各组分的相对浓度或强度^[14];利用皮尔逊相关性分析和 PCA 法辨识 3 条河流底泥中的 DOM、营养盐和重金属的污染来源;运用 SEM 阐明 DOM 和营养盐对重金属的响应关系^[15].

2 结果与分析

2.1 底泥营养盐与重金属含量的空间分布特征

氮、磷是造成环境质量恶化并产生异臭,使河流发生富营养化的主要原因^[16].3 条河流底泥中 pH 值和营养盐含量的空间分布如图 2 所示.底泥 pH 值均值变化趋势为:南小河(7.69 ± 0.25) > 新穆河(7.58 ± 0.36) > 老背河(6.98 ± 0.90),老背河的 pH 变幅较大. $\omega(TN)$ 总体呈现新穆河 [$(2669.21 \pm 1648.63) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] > 南小河

[$(2383.02 \pm 2102.72) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] > 老背河 [$(2180.02 \pm 982.65) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 的变化趋势; $\omega(TP)$ 变化趋势与 $\omega(TN)$ 相反,具体表现为:老背河 [$(1106.02 \pm 330.71) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] > 南小河 [$(962.81 \pm 399.54) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] > 新穆河 [$(716.22 \pm 184.71) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] (表 1).3 条河流底泥的 $\omega(TN)$ 均值均大于 $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(TP)$ 均值均大于 $650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于重度污染状态^[17].新穆河、南小河和老背河底泥 $\omega(TN)$ 的变异系数分别为 0.62、0.88 和 0.45, $\omega(TP)$ 的变异系数分别为 0.26、0.42 和 0.30,显然南小河的 TN 和 TP 的变异系数较大,表明受点源污染程度较高.3 条河流的 $\omega(TN)$ 和 $\omega(TP)$ 高值均位于南小河的 S6 和 S7,分析其主要原因可能是 S6 位于南小河第一污水处理厂排污口附近,未处理或经过简单处理的工业废水及生活污水排放导致南小河氮、磷污染严重^[1,5].

人类生活和工业生产活动是造成河流底泥重金属污染的直接原因^[18].由图 2 和表 2 可知,新穆河的 $\omega(Zn)$ 和 $\omega(Cu)$ 是辽宁省土壤背景值^[19]的 1.40 和 1.10 倍,最高值分别为 $150.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $57.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,位于 S3(新穆河中游),靠近交通要道和居民住宅区;南小河的 $\omega(Zn)$ 、 $\omega(As)$ 、 $\omega(Cu)$ 、 $\omega(Ni)$ 和 $\omega(Cd)$ 是背景值的 2.48、1.02、3.45、3.00 和 39.05 倍,其中 $\omega(Zn)$ 、 $\omega(As)$ 和 $\omega(Cu)$ 在空间分布上具有一致性,总体呈现从上游至下游逐渐递减的趋势,最高值分别为 430.12、15.07 和 $152.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,位于 S6(南小河上游),靠近第一污水处理厂排污口, $\omega(Ni)$ 和 $\omega(Cd)$ 的最高值分别为 $223.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,位于 S8(南小河中游),靠近第二污水处理厂排污口;老背河的 $\omega(Zn)$ 、 $\omega(Cu)$ 和 $\omega(Cd)$ 是背景值的 2.56、1.92 和

8.00 倍,其中 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Cu})$ 在空间分布上呈现从上游至下游逐渐增加的变化趋势,最高值分别为 $284.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $95.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,位于S16(老背河下游),靠近居民区, $\omega(\text{Cd})$ 的最高值为 $7.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,位于S14(老背河中游),靠近交通要道和居民住宅区.与《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控》(GB 15618-2018)中重金属含量标准相比($\text{pH}>7.5$),3条河流的重金属中仅南小河和老背河的 $\omega(\text{Cd})$ 超标,分别超标准值12.02和1.67倍.综上所述,总体上3条河流均存在重金属累积现象,累积严重程度表现为:南小河>老背河>新穆河,其中南小河和老背河的Cd受人为污染影响极为严

重.Cd污染主要与交通、冶炼、化石燃料燃烧和涂料颜料业有关^[20,21].因此,南小河的Cd污染可能与污水处理厂排污口及周边工矿企业排放的污水有关;老背河的Cd污染可能与交通污染及周边建筑废水的排放和建筑垃圾的随意丢弃有关.为了揭示6种重金属在整个研究区域的离散程度,计算了各样点底泥中重金属含量的变异系数,除Pb(0.25)外,其余重金属(Zn、As、Cu、Ni和Cd)的变异系数为0.40~0.93,表明 $\omega(\text{Pb})$ 在各采样点分布相对较均匀,可能来自于自然源,而 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 的空间分异较大,受外界干扰较显著,存在点源污染现象^[22,23].

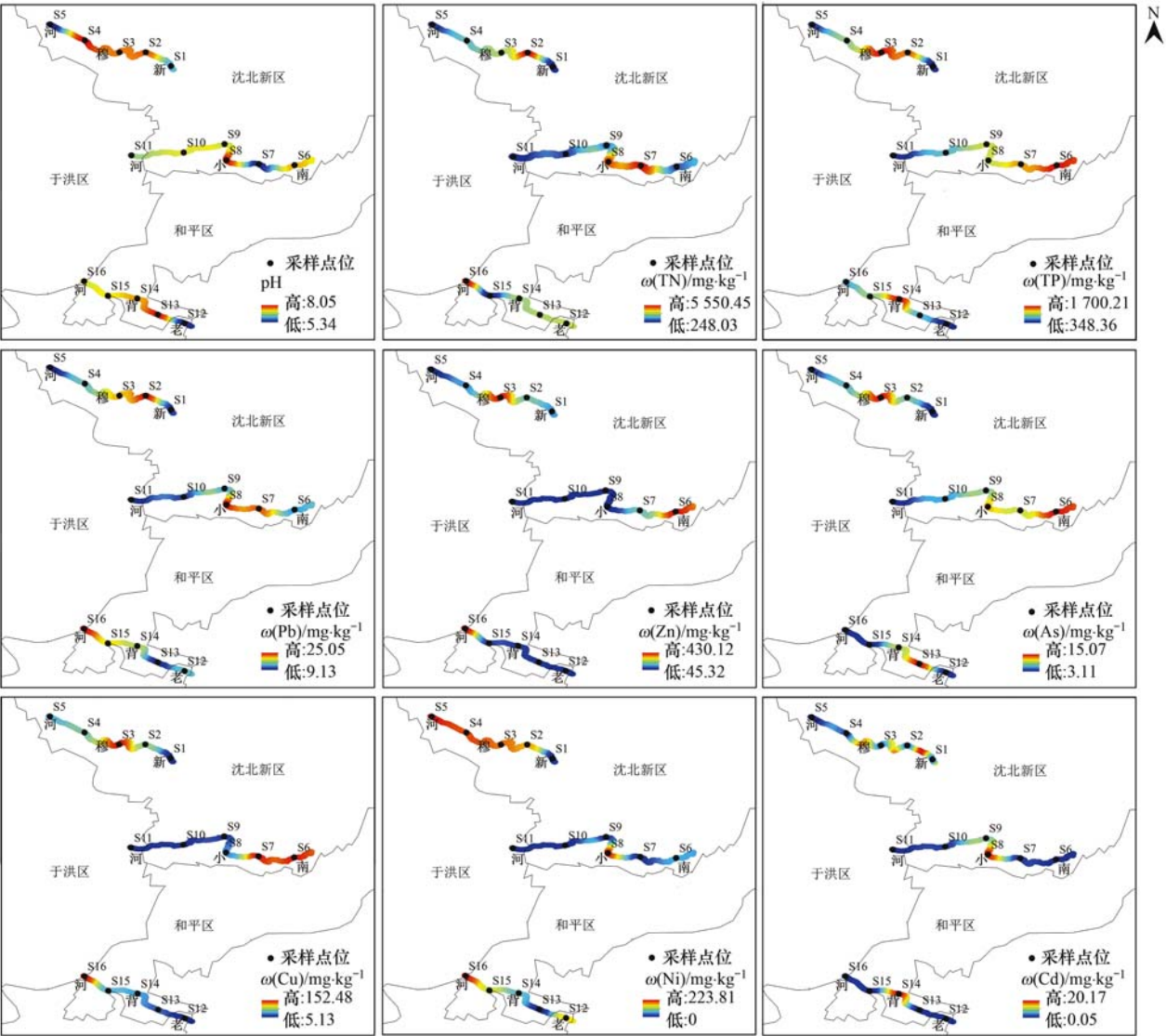


图2 应用 Arcgis 分析 3 条河流的理化参数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of chemical and physical parameters in three rivers via Arcgis

表 1 3 条河流底泥中的营养盐含量及 EPA(环保署)评价标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Contents of nutrients in sediment of the three rivers and EPA evaluation criteria/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

营养盐种类	新穆河	南小河	老背河	EPA 分类标准
$\omega(\text{TN})$	$2\ 669.21 \pm 1\ 648.63$	$2\ 383.02 \pm 2\ 102.72$	$2\ 180.01 \pm 982.65$	>2 000 重度污染
$\omega(\text{TP})$	716.22 ± 184.71	962.81 ± 399.54	$1\ 106.02 \pm 330.71$	>650 重度污染

表 2 3 条河流底泥中各重金属含量及标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Contents of heavy metals in sediments of the three rivers and criteria/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

组别及标准	$\omega(\text{Pb})$	$\omega(\text{Zn})$	$\omega(\text{As})$	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{Ni})$	$\omega(\text{Cd})$
新穆河	13.63 ± 3.01	83.97 ± 35.43	6.41 ± 1.82	27.03 ± 16.91	21.01 ± 10.80	0.10 ± 0.02
南小河	12.28 ± 3.03	148.21 ± 135.42	8.98 ± 3.92	84.79 ± 47.41	76.83 ± 67.54	7.81 ± 5.92
老背河	17.63 ± 5.01	153.03 ± 65.90	5.99 ± 2.93	47.21 ± 25.02	23.99 ± 15.63	1.60 ± 2.93
辽宁省土壤背景值	21.2	59.8	8.8	24.6	25.6	0.2
《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控》标准	50	300	20	100	90	0.6

2.2 DOM 荧光组分解析

对底泥样品的 DOM 三维荧光图谱数据进行 PARAFAC 解析,共识别出 7 种荧光组分(图 3).由已有研究可知(表 3),组分 C1(285/340 nm)为类色氨酸(T2),与微生物降解或外来生活污水输入有关^[24, 25]; C2(225/330 ~ 420 nm)与类色氨酸(T1)(225/342 nm)和酚类物质(230/425 nm)形成的络合物相似,可定义为酚类络合物^[14, 26]; C3 在 E_x/E_m 为 295/410 nm 处出现的峰,与 He 等^[27]研究相似,

属于微生物代谢产物,可用于表征底泥中微生物的活动强度^[28]; C4(335/415 nm)和 C5(245/440 nm)指示可见光区类富里酸和紫外光区类富里酸,C4 + C5 统称为类富里酸,被认为是分子量相对较小的类腐殖质,可能来源于大分子类腐殖质的降解与转化^[29, 30]; C6(385/500 nm)和 C7(260/480 nm)分别为可见光区类胡敏酸和紫外光区类胡敏酸,C6 + C7 统称为类胡敏酸,被认为是分子量较大的类腐殖质,来自于植物残体和土壤有机物^[14, 31].

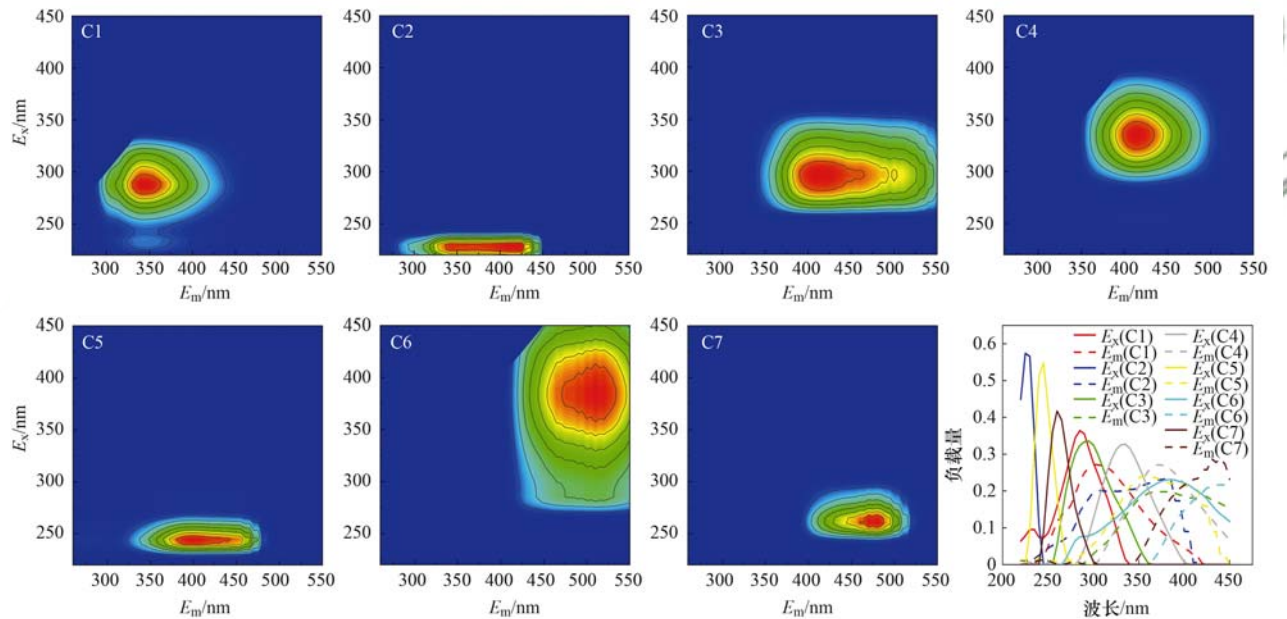


图 3 PARAFAC 技术提取出各采样点 DOM 的 7 个荧光组分

Fig. 3 Seven fluorescence components extracted by PARAFAC of DOM at each sampling site

表 3 3 条河流底泥的 7 种荧光组分光谱特征

Table 3 Spectral characteristics of seven fluorescence components in sediments of the three rivers

荧光组分	$E_x/E_m/\text{nm}$	荧光类型	同类研究比较/ nm
C1	285/340 nm	类色氨酸	290/342 ^[24]
C2	225/330 ~ 420 nm	酚类络合物	225/342 ^[26] ; 230/425 ^[14]
C3	295/410 nm	微生物代谢产物	300 ~ 320/380 ~ 420 ^[27]
C4	335/415 nm	可见光区类富里酸	310 ~ 360/370 ~ 450 ^[29]
C5	245/440 nm	紫外光区类富里酸	240 ~ 270/370 ~ 440 ^[30]
C6	385/500 nm	可见光区类胡敏酸	370/490 ^[14]
C7	260/480 nm	紫外光区类胡敏酸	270/470 ^[31]

2.3 DOM 荧光组分空间分异特征

DOM 组分的荧光强度(F_{max})分布差异可揭示 DOM 的空间分布^[32].从 F_{max} 的空间变化趋势来看,

3 条河流底泥 DOM 的总 F_{max} 及各组分 F_{max} 空间分布差异较大[图 4(a)].总 F_{max} 均值由高到低依次为:南小河[($2\,307.16 \pm 648.29$) a. u.] > 老背河

$[(1\,434.80 \pm 633.68) \text{ a.u.}] > \text{新穆河}[(1\,262.71 \pm 504.88) \text{ a.u.}]$, 南小河底泥中 DOM 荧光强度最大, 老背河次之, 新穆河最小. 新穆河底泥中类色氨酸的 $F_{\max}$ 均值为 $(172.68 \pm 95.67) \text{ a.u.}$, 酚类络合物为 $(154.68 \pm 96.79) \text{ a.u.}$, 微生物代谢产物为 $(98.87 \pm 84.58) \text{ a.u.}$, 类富里酸为 $(503.69 \pm 167.52) \text{ a.u.}$, 类胡敏酸为 $(332.80 \pm 95.81) \text{ a.u.}$. 总体而言, 类富里酸丰度最大, 且变幅最大; 类胡敏酸、类色氨酸和酚类络合物丰度较小, 且变幅较小; 微生物代谢产物含量最低, 且变幅最小. 南小河底泥中类富里酸的 $F_{\max}$ 均值 $[(850.23 \pm 305.84) \text{ a.u.}]$ 约为微生物代谢产物 $[(276.95 \pm 117.64) \text{ a.u.}]$ 的 3.0 倍, 约为类色氨酸 $[(338.94 \pm 182.57) \text{ a.u.}]$ 和酚类络合物 $[(299.22 \pm 138.17) \text{ a.u.}]$ 的 2.5 倍, 约为类胡敏酸 $[(541.81 \pm 74.96) \text{ a.u.}]$ 的 1.5 倍; 相比于新穆河, 南小河底泥 DOM 中的酚类络合物含量明显升高, 说明南小河受工业废水排放影响较大. 老背河各荧光组分 $F_{\max}$ 均值由高到低依次为: 类富里酸 $[(546.05 \pm 230.04) \text{ a.u.}] > \text{类胡敏酸}[(436.99 \pm 252.75) \text{ a.u.}] > \text{类色氨酸}[(205.07 \pm 93.45) \text{ a.u.}] > \text{微生物代谢产物}[(187.51 \pm 143.43) \text{ a.u.}] > \text{酚类络合物}[(59.18 \pm 39.74) \text{ a.u.}]$. 相比于新穆河, 老背河底泥 DOM 中的类色氨酸和微生物代谢产物含量明显升高, 说明南小河受生活污水排放影响较大.

从各荧光组分占比来看[图 4(b)], 类腐殖质(C4 + C5 + C6 + C7)占绝对优势, 其次是类色氨酸、酚类络合物和微生物代谢产物, 占比分别在 53.17%~85.28%、5.76%~23.66%、0%~19.72%

和 0%~19.08% 之间, 占比平均值分别为 65.88%、14.22%、10.07% 和 9.82%. 类腐殖质组分一般被认为主要与外源输入有关, 包括径流输入和农田退水等^[33]; 类蛋白组分一般被认为来源于生活污水或微生物降解藻类或水生植物的残留物等^[34]. 上述结果显示 3 条河流的 DOM 组成受外源输入和内源自生的共同影响, 类腐殖酸组分占比显著高于类蛋白组分. 结合 2.1 节的研究结果表明 3 条河流的面源或点源污染不仅携带了大量的营养盐, 可能还包括土壤淋溶带来或径流输入类腐殖质等大分子有机物^[35]. 从单一荧光组分在 3 条河流中的占比来看, 类腐殖质在新穆河、南小河和老背河中的占比平均值分别为 68.91%、61.03% 和 68.67%, 说明新穆河和老背河的腐殖化程度高于南小河; 类色氨酸在新穆河、南小河和老背河的占比平均值分别为 13.23%、13.99% 和 15.48%, 空间分布特征表现为: 老背河 > 南小河 > 新穆河, 表明老背河生活污水的排放造成类蛋白质占比增加^[24]. 酚类络合物在新穆河、南小河和老背河的占比平均值分别为 11.36%、13.23% 和 5.00%, 说明酚类物质主要来源于工农业废水的排放, 生活污水中的占比相对较低; 微生物代谢产物在新穆河、南小河和老背河的占比平均值分别为 6.49%、11.75% 和 10.84%, 这可能是由于采样时间为秋冬季, 微生物活性较弱, 造成微生物代谢产物占比较低, 但总 $F_{\max}$ 较高的南小河和老背河底泥中的微生物活性明显强于总 $F_{\max}$ 较低的新穆河底泥中的微生物活性, 这在一定程度上解释了 DOM 含量越高, 底物越丰富, 微生物活性越强的现象^[34].

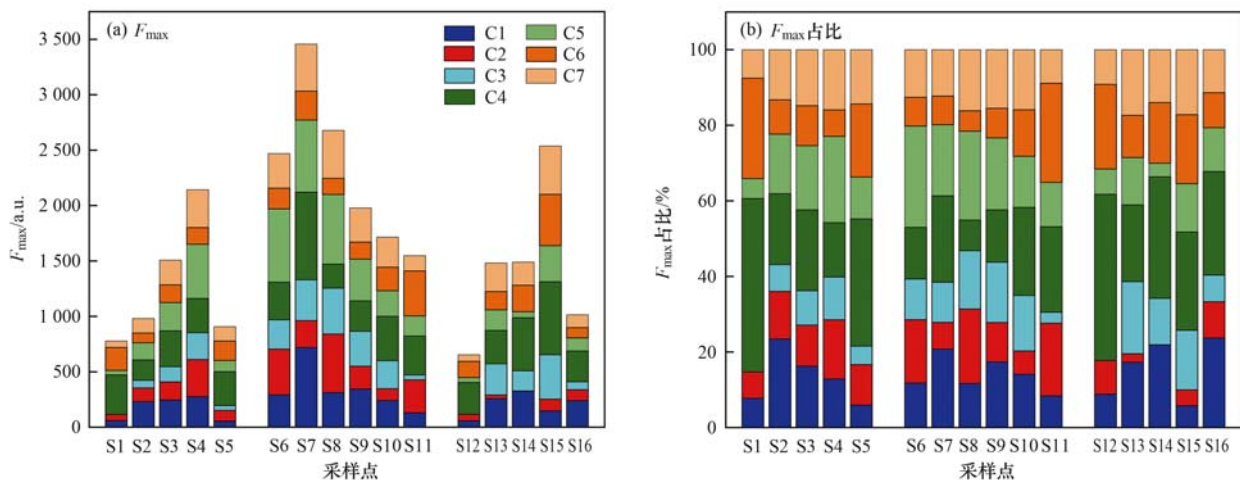


图 4 各采样点 DOM 组分的 $F_{\max}$ 与 $F_{\max}$ 占比

Fig. 4 Maximum fluorescence intensity and relative proportion of DOM components from different sites

2.4 DOM、营养盐与重金属的相关性及来源分析

2.4.1 DOM、营养盐与重金属相关性分析

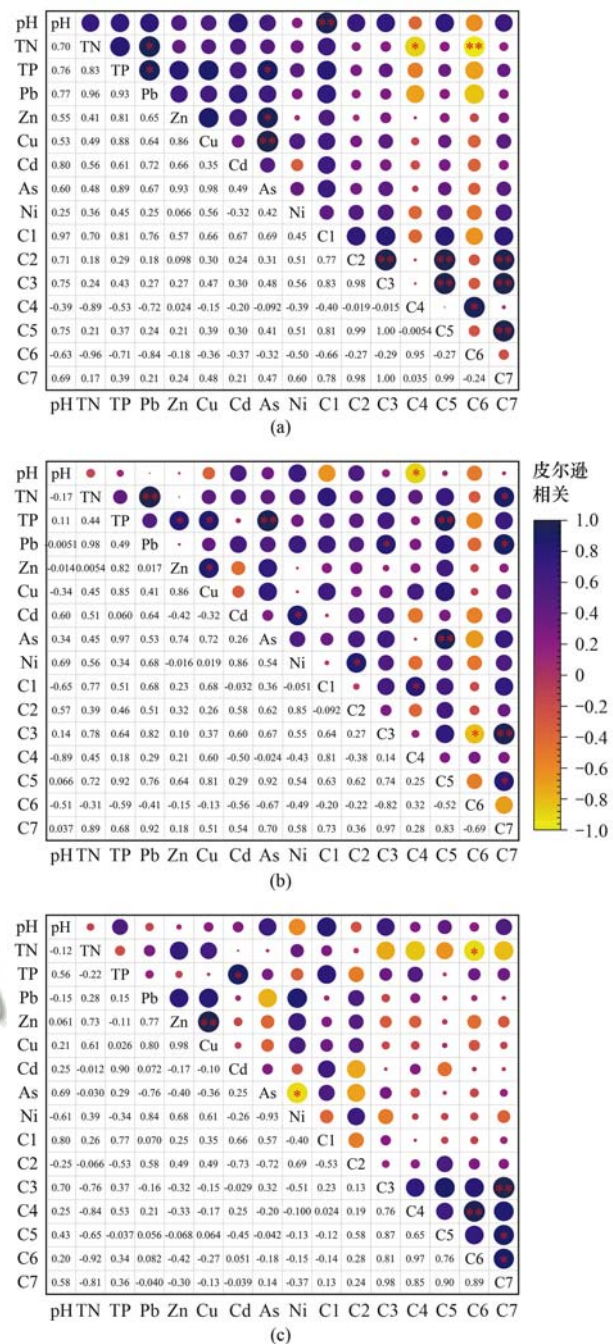
皮尔逊相关性分析可用来指示污染源和内在作用机制, 相关关系越显著, 同源性越好, 即可能存在

相同的污染源或产生了复合污染^[30]. 由图 5(a) 可知, 新穆河底泥中 TN 与 Pb ($r = 0.96$, $P < 0.05$)、TP 与 Pb ($r = 0.93$, $P < 0.05$) 和 TP 与 As ($r = 0.89$, $P < 0.05$) 呈显著正相关, 说明磷与重金属累积程度

较 TN 关系更为密切^[36]; TN 与 C4($r = -0.89$, $P < 0.05$)和 TN 与 C6($r = -0.96$, $P < 0.01$)呈极显著或显著负相关,表明氮营养盐浓度随类富里酸和类胡敏酸浓度的降低而升高,说明 TN 的来源可能与类富里酸和类胡敏酸的降解或转化有关^[31]; As 与 Cu($r = 0.98$, $P < 0.01$)和 As 与 Zn($r = 0.93$, $P < 0.05$)呈极显著或显著正相关,说明 As、Cu 和 Zn 可能具有相同的污染来源^[37]. 由图 5(b)可知,南小河底泥中 TN 与 Pb($r = 0.98$, $P < 0.01$)、TP 与 Zn($r = 0.82$, $P < 0.05$)、TP 与 Cu($r = 0.85$, $P < 0.05$)和 TP 与 As($r = 0.97$, $P < 0.01$)呈显著或极显著正相关,说明磷与重金属的累积程度较 TN 关系更为密切^[38]; Cu 与 Zn($r = 0.86$, $P < 0.05$)和 Cd 与 Ni($r = 0.86$, $P < 0.05$)呈显著正相关,表明 Cu 与 Zn、Cd 与 Ni 可能具有同源性. 由图 5(c)可知,老背河底泥中 TP 与 Cd($r = 0.90$, $P < 0.05$)显著正相关, TN 与重金属相关性不大,说明磷与重金属累积程度较 TN 关系更为密切; Zn 与 Cu($r = 0.98$, $P < 0.01$)呈极显著正相关,说明两者高度同源; TN 与 C6($r = -0.92$, $P < 0.05$)显著负相关,说明 TN 可能与类胡敏酸的降解或转化有关^[31]. 综上所述,3 条河流的 Cu 与 Zn 具有伴生关系,可能受铜矿开采、冶炼等工业废水汇入的影响^[39]; TP 与重金属的累积程度较 TN 关系更为密切.

2.4.2 DOM、营养盐与重金属的来源分析

为了准确判断底泥中 DOM、营养盐与重金属的来源,需进一步通过主成分分析进行解析^[40]. 新穆河提取出 2 个主成分,解释了总方差的 99.60% [图 6(a)]. 其中第一主成分的贡献率为 97.67%,特征表现为 TN、TP、Pb、C4 和 C6 有较高的载荷,对应含量较高点主要分布在 S2 附近,据调查该样点附近主要以农业灌溉为主,说明第一主成分主要受农业生产的影响;第二主成分的贡献率为 1.93%,特征表现为 C1、C2、C3、C5 和 C7 有较高的载荷,对应含量较高点主要分布在 S4 附近,靠近村民生活区,说明第二主成分主要受生活污染的影响. 南小河提取出 2 个主成分,解释了总方差的 98.50% [图 6(b)],其中第一主成分的贡献率为 94.93%,特征表现为 TP、Zn、Cu、As 和 C5 有较高的载荷,对应含量较高点主要分布在 S6 附近,靠近第一座污水处理厂排污口,说明第一主成分主要受工业活动的影响;第二主成分的贡献率为 3.57%,特征表现为 TN、Pb、C1 和 C7 有较高的载荷^[41,42],对应含量较高点主要分布在 S7 附近,靠近交通要道和居民生活区,将其定义为交通、生活源. 老背河提取出 2 个主成分,解释了总



(a)新穆河,(b)南小河,(c)老背河; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;圆圈越大代表相关性越高,圆圈越小代表相关性越低

图 5 底泥 DOM、营养盐与重金属的相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis of DOM, nutrient salt, and heavy metals in sediments

方差的 97.52% [图 6(c)],其中第一主成分的贡献率为 87.77%,特征表现为 TN、Zn、C3、C4、C6 和 C7 有较高的载荷,对应含量较高点主要分布在人口密集区和建筑工地,因此将其定义为生活、建筑源. 第二主成分的贡献率为 9.75%,特征表现为 TP、Cd 和 C1 有较高的载荷^[43],对应含量较高点主要分布在 S14 附近,靠近交通要道和居民生活区,因此将其定义为交通、生活源.

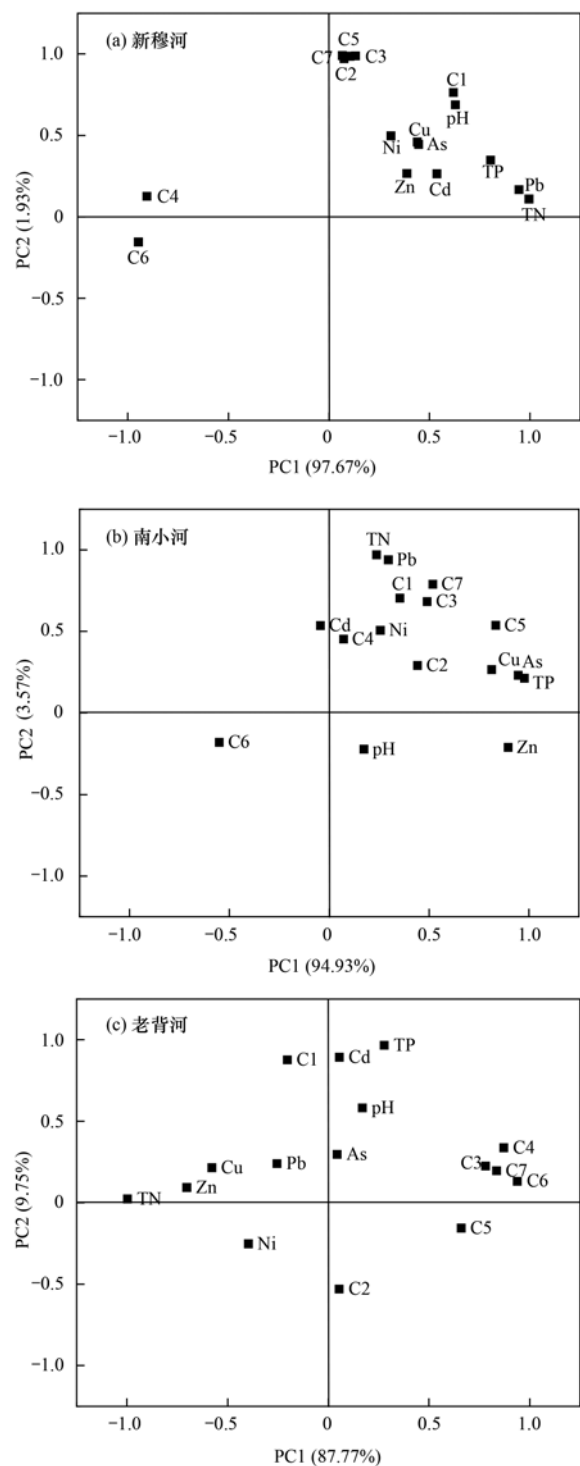


图6 底泥理化指标的二维因子载荷

Fig. 6 Loading plot of physico-chemical parameters in sediments

2.5 DOM 与营养盐对重金属的响应分析

基于主成分分析结果,选取营养盐和 DOM 作为结构方程模型的潜变量,pH、TN、TP、色氨酸、酚类络合物、微生物代谢产物、类富里酸和类胡敏酸为观测变量,以对重金属的影响作为输出值,构建结构方程概念模型.通过 AMOS 22.0 软件的数据拟合,得到模型评价指标及路径系数.模型卡方/自由度(CMIN/DF)为 2.81(小于 3),表明模型的拟合度

良好^[44].SEM 模型运行结果显示(图 7):DOM、营养盐和 pH 对重金属均有直接正向影响,路径系数分别为 0.52、0.36 和 0.11,表明 DOM 的直接影响最大,营养盐次之,pH 最小.

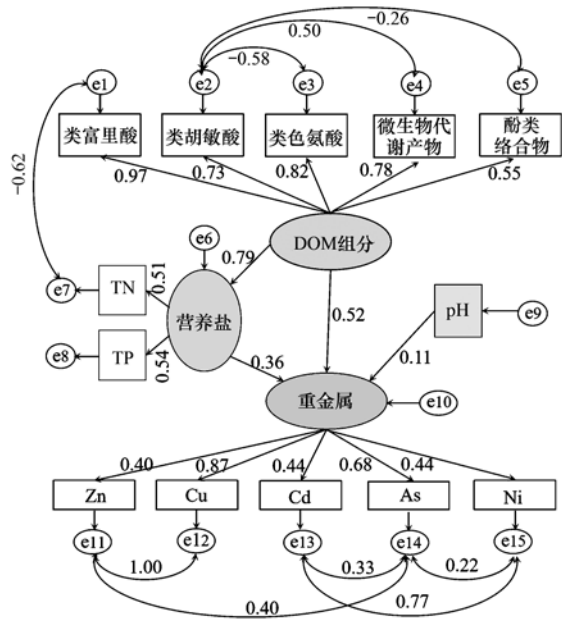


图7 影响因素路径系数

Fig. 7 Path coefficient diagram of influencing factors

从重金属的 5 个观测变量来看,Cu、As、Cd、Ni 和 Zn 的路径系数分别为 0.87、0.68、0.44、0.44 和 0.40,表明对 Cu 的影响最大,As、Cd 和 Ni 次之,Zn 最小.从 DOM 组分的 5 个观测变量来看,类富里酸、类色氨酸、微生物代谢产物、类胡敏酸和酚类络合物的路径系数依次为 0.97、0.82、0.78、0.73 和 0.55,各组分对重金属的影响大小为:类富里酸 > 类色氨酸 > 微生物代谢产物 > 类胡敏酸 > 酚类络合物,这可能与 DOM 的共轭主链结构密切相关,如官能团的种类和分子组成.DOM 分子量被认为是控制重金属迁移、毒性和生物有效性的重要因素之一,DOM 分子量越小,对重金属的影响效应越大^[45].从营养盐的两个观测变量来看,TP 和 TN 的路径系数分别为 0.54 和 0.51,TP 对重金属的影响略高于 TN,这可能是由于磷营养盐(如 PO_4^{3-})比氮营养盐(如 NO_3^-)所带电荷更高,在电荷平衡的驱动下,对重金属离子的静电作用更强所致^[46].Cu 与 Zn、Zn 与 As、Cd 与 As、As 与 Ni、Cd 与 Ni 和类胡敏酸与微生物代谢产物间的正相关性进一步验证了它们具有同源性,其中 Cu 和 Zn 观测变量间的相关性系数高达 1.00,说明两者高度同源,具有伴生关系;TN 与类富里酸以及类色氨酸、酚类络合物与类胡敏酸间的负相关性,说明 TN 与类富里酸的降解或转化有关,不稳定的类色氨酸和酚类络合物具

有向类胡敏酸转化的趋势,与相关性分析结果一致。

3 结论

(1)3 条河流底泥中的营养盐均呈重度污染状态,TN 污染严重程度为:新穆河 > 南小河 > 老背河,TP 污染严重程度为:老背河 > 南小河 > 新穆河;与辽宁省土壤背景值相比,总体上 3 条河流的重金属均存在累积现象,累积严重程度为:南小河 > 老背河 > 新穆河,其中南小河和老背河的 Cd 污染严重。初步判断,人为扰动是 3 条河流底泥营养盐和重金属含量存在差别的主要驱动力。

(2)DOM 共含有 5 类荧光组分,分别为类色氨酸、酚类络合物、微生物代谢产物、类富里酸和类胡敏酸,其中类腐殖质(类富里酸和类胡敏酸)占绝对优势。新穆河类腐殖质占比为 68.91%,主要受农业面源污染和农村生活污水输入的影响;南小河类腐殖质占比为 61.03%,主要受工业废水和城市生活污水汇入的影响;老背河类腐殖质占比为 68.67%,主要受城市生活污水和建筑废弃物输入的影响。

(3)DOM、营养盐和 pH 对重金属迁移转化的影响顺序为:DOM (0.52) > 营养盐 (0.36) > pH (0.11),DOM 对重金属的影响最大,营养盐次之,pH 最小。其中 DOM 组分对重金属的影响顺序为:类富里酸(0.97) > 类色氨酸(0.82) > 微生物代谢产物(0.78) > 类胡敏酸(0.73) > 酚类络合物(0.55);营养盐对重金属的影响顺序为 TP (0.54) > TN (0.51)。

参考文献:

- [1] 蒋豫, 吴召仕, 赵中华, 等. 阳澄湖表层沉积物中氮磷及重金属的空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1590-1599.
- Jiang Y, Wu Z S, Zhao Z H, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of Lake Yangcheng, Jiangsu Province, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(11): 1590-1599.
- [2] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 186-193.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 186-193.
- [3] Li M M, Kong F L, Li Y, *et al.* Ecological indication based on source, content, and structure characteristics of dissolved organic matter in surface sediment from Dagou River estuary, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(36): 45499-45512.
- [4] 杨兰琴, 胡明, 王培京, 等. 北京市中坝河底泥污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 181-189.
- Yang L Q, Hu M, Wang P J, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of sediment in Zhongba River, Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 181-189.
- [5] 孙文, 王理明, 刘吉宝, 等. 北运河沙河水库沉积物营养盐分布特征及其溯源分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1581-1589.
- Sun W, Wang L M, Liu J B, *et al.* Nutrients distribution and its sources analysis of sediments in Shahe reservoir of Northern Canal [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1581-1589.
- [6] Njuguna S M, Yan X, Gituru R W, *et al.* Assessment of macrophyte, heavy metal, and nutrient concentrations in the water of the Nairobi River, Kenya [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(9), doi: 10.1007/s10661-017-6159-0.
- [7] 席玥, 王婷, 倪晋仁, 等. 黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4114-4121.
- Xi Y, Wang T, Ni J R, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fractions in the Ning-Meng section of the Yellow River and relationship with metal ions [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4114-4121.
- [8] 崔丹, 李瑞, 陈岩, 等. 基于结构方程的流域水环境承载力评价——以湟水流域小峡桥断面上游为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 624-632.
- Cui D, Li R, Chen Y, *et al.* An evaluation of the water environmental carrying capacity using structural equation modeling: a case study of the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(2): 624-632.
- [9] 李慧, 汪景宽, 裴久瀚, 等. 基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 517-525.
- Li H, Wang J K, Pei J B, *et al.* Equilibrium relationships of soil organic carbon in the main croplands of northeast China based on structural equation modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 517-525.
- [10] 闫晓寒, 韩璐, 文威, 等. 辽河保护区水体溶解性有机质空间分布与来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1419-1427.
- Yan X H, Han L, Wen W, *et al.* Spectral characteristics and spatial distribution of DOM in surface water of Liaohe reservation zone [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(4): 1419-1427.
- [11] 王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2336-2344.
- Wang Y R, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2336-2344.
- [12] 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 等. 巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 712-722.
- Yang P, Yang C H, Ma X Y, *et al.* Sediment pollution characteristics and dredging in the Nanfei River estuary, Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 712-722.
- [13] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 土壤中水溶性有机质的结构特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 731-735.
- Zhou J M, Dai J Y, Pan G X. Characterization of dissolved organic matters in soil and its significance for environment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(6): 731-735.
- [14] 刘东萍, 高红杰, 崔兵, 等. 白塔堡河底泥 DOM 组成结构的

- 荧光光谱与多元统计模型表征[J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(2): 249-257.
- Liu D P, Gao H J, Cui B, *et al.* Fluorescence spectra and multivariate statistical model characterization of DOM composition structure of Baitapu River sediment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, **11**(2): 249-257.
- [15] Ryberg K R. Structural equation model of total phosphorus loads in the Red River of the North Basin, USA and Canada[J]. Journal of Environmental Quality, 2017, **46**(5): 1072-1080.
- [16] 邓延慧, 王正文, 丁润楠, 等. 太湖湖体沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 环境生态学, 2020, **2**(12): 67-72.
- Deng Y H, Wang Z W, Ding R N, *et al.* Study on pollution characteristics of nutrient salts and heavy metals in sediment of Taihu Lake[J]. Environmental Ecology, 2020, **2**(12): 67-72.
- [17] 于佳佳, 尹洪斌, 高永年, 等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- Yu J J, Yin H B, Gao Y N, *et al.* Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- [18] 刘玮晶, 黄顺生, 金洋, 等. 江苏省中部城镇河流底泥重金属污染评价及来源分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, **32**(2): 97-102.
- Liu W J, Huang S S, Jin Y, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in river sediment of a town in central Jiangsu Province [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, **32**(2): 97-102.
- [19] Liu D P, Wang J, Yu H B, *et al.* Evaluating ecological risks and tracking potential factors influencing heavy metals in sediments in an urban river[J]. Environmental Sciences Europe, 2021, **33**(1), doi: 10.1186/s12302-021-00487-x.
- [20] 何宇, 洪欣, 闭潇予, 等. 九洲江流域水环境重金属污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2021, **40**(1): 240-253.
- He Y, Hong X, Bi X Y, *et al.* Characteristics and sources of heavy metal pollution in water environment of Jiuzhou River basin [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(1): 240-253.
- [21] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, **42**(2): 267-277.
- Zhao Y. Characteristics and risk assessment of heavy metal Cd pollution of shallow groundwater and surface water in main stream of Weihe River, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, **42**(2): 267-277.
- [22] 陈亦妍, 郭媛媛, 吕政霖. 沂河临沂段表层沉积物重金属污染特征与生态风险评价[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, **42**(2): 66-72.
- Chen Y Y, Guo Y Y, Lyu Z L. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments from the Linyi section of Yi River[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2021, **42**(2): 66-72.
- [23] Liu Y Z, Engel B A, Collingsworth P D, *et al.* Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: case study in Spy Run Creek watershed, Indiana[J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1400-1411.
- [24] Li W, Jia X X, Li M, *et al.* Insight into the vertical characteristics of dissolved organic matter in 5-m soil profiles under different land-use types on the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, **692**: 613-621.
- [25] 石玉, 李元鹏, 张柳青, 等. 不同丰枯情景下长江三角洲非通江湖泊(太湖、淀山湖和阳澄湖)有色可溶性有机物组成特征[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 168-180.
- Shi Y, Li Y P, Zhang L Q, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Gehu, Lake Dianshan and Lake Yangcheng in different hydrological seasons[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(1): 168-180.
- [26] 洪志强, 熊瑛, 李艳, 等. 白洋淀沉水植物腐解释放溶解性有机物光谱特性[J]. 生态学报, 2016, **36**(19): 6308-6317.
- Hong Z Q, Xiong Y, Li Y, *et al.* The spectra characterization on dissolved organic matter of submerged plant decomposition in Lake Baiyangdian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(19): 6308-6317.
- [27] He W, Hur J. Conservative behavior of fluorescence EEM-PARAFAC components in resin fractionation processes and its applicability for characterizing dissolved organic matter [J]. Water Research, 2015, **83**: 217-226.
- [28] Burns M A, Barnard H R, Gabor R S, *et al.* Dissolved organic matter transport reflects hillslope to stream connectivity during snowmelt in a montane catchment [J]. Water Resources Research, 2016, **52**(6): 4905-4923.
- [29] Xu H C, Guo L D. Intriguing changes in molecular size and composition of dissolved organic matter induced by microbial degradation and self-assembly[J]. Water Research, 2018, **135**: 187-194.
- [30] 胡晓明, 崔骏, 裴元生. 秋冬交替季节白洋淀沉积物有机质特性研究[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(4): 636-646.
- Hu X M, Cui J, Pei Y S. Organic matter characteristics of sediment in Lake Baiyangdian in autumn-winter alternate season [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(4): 636-646.
- [31] 靳百川, 蒋梦云, 白文荣, 等. 三维荧光光谱-平行因子法解析再生水补给人工湿地 DOM 的光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, **41**(4): 1240-1245.
- Jin B C, Jiang M Y, Bai W R, *et al.* Fluorescence spectra characteristics of reclaimed water to replenish constructed wetlands using EEM-PARAFAC[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, **41**(4): 1240-1245.
- [32] 崔兵, 高红杰, 郑昭佩, 等. 基于三维荧光和二维相关光谱的城市河流溶解性有机质组成及其空间分异特征[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(3): 369-377.
- Cui B, Gao H J, Zheng Z P, *et al.* Applying EEM coupled with 2D-COS to character structural composition of DOM and its spatial variations in an urban river[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(3): 369-377.
- [33] 李程遥, 黄廷林, 温成成, 等. 汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1391-1402.
- Li C Y, Huang T L, Wen C C, *et al.* Influence of storm runoff on the spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in a drinking water reservoir during the flood season [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1391-1402.
- [34] Zhou Y Q, Zhang Y L, Jeppesen E, *et al.* Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake[J]. Water Research, 2016, **100**: 211-221.
- [35] Sardana A, Cottrell B, Soulsby D, *et al.* Dissolved organic matter processing and photoreactivity in a wastewater treatment constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2019, **648**: 923-934.
- [36] Li W J, Lin S, Wang W C, *et al.* Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface sediments of the Xiashan

- stream, eastern Guangdong Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27** (21): 25908-25924.
- [37] 白冬锐, 张涛, 包峻松, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3206-3214.
- Bai D R, Zhang T, Bao J S, *et al.* Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3206-3214.
- [38] Shen D L, Huang S H, Zhang Y P, *et al.* The source apportionment of N and P pollution in the surface waters of lowland urban area based on EEM-PARAFAC and PCA-APCS-MLR[J]. *Environmental Research*, 2021, **197**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111022.
- [39] Wang X J, Kong F L, Li Y, *et al.* Effect of simulated tidal cycle on DOM, nitrogen and phosphorus release from sediment in Dagu River-Jiaozhou Bay estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147158.
- [40] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1751-1759.
- Li Y, Wei H J, Wang K, *et al.* Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed Land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1751-1759.
- [41] Dong Q Q, Wang F, Xiao Y H, *et al.* Effects of elevated production of autochthonous dissolved organic matter on the freely dissolved concentration of cadmium[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2018, **20**(9): 1254-1261.
- [42] Wei Y Q, Zhang H, Yuan Y, *et al.* Indirect effect of nutrient accumulation intensified toxicity risk of metals in sediments from urban river network [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(6): 6193-6204.
- [43] 高中原, 肖荣波, 王鹏, 等. 融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 343-352.
- Gao Z Y, Xiao R B, Wang P, *et al.* Improved regression Kriging prediction of the spatial distribution of the soil cadmium by integrating natural and human factors [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 343-352.
- [44] 吴明隆. 结构方程模型 - AMOS 的操作与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010.
- [45] 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 等. 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2856-2867.
- Xue X D, Yang C H, Yu J L, *et al.* Coadsorption of heavy metal and antibiotic onto humic acid from Polder River sediment[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2856-2867.
- [46] 陈姗, 许凡, 谢三桃, 等. 合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4932-4943.
- Chen S, Xu F, Xie S T, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrients and heavy metals in surface sediments from Shibalianwei wetland in Hefei, Anhui Province, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4932-4943.

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)