

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄舍舍, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析

李悦昭, 陈海洋*, 孙文超

(北京师范大学水科学研究院, 教育部地下水污染控制与修复工程研究中心, 北京 100875)

摘要:以府河及其受纳湖泊为研究对象, 辨识“河-湖”系统沉积物中重金属的空间分布、地球化学特征和生态风险, 利用正定矩阵因子分解模型(PMF)解析沉积物中重金属的潜在来源。结果表明, 该“河-湖”系统沉积物中主要金属污染物为 Cd、Cu 和 Zn, 且 Cd 存在生态风险。与受纳湖体相比, 府河污染水平及风险程度更高。湖体空间分析显示, 河流入口呈现更高的金属含量及风险水平。PMF 分析表明, 研究区沉积物重金属主要受到人为活动的影响(55.7%), 包括工业排放(20.3%)、化肥施用(19.5%)和水产养殖(15.9%)。

关键词:重金属; 正定矩阵因子分解(PMF); 地球化学特征; 生态风险; 河-湖系统

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2646-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201910215

Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System

LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang*, SUN Wen-chao

(Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this study, the geochemical characteristics and ecological risks of heavy metals in the sediments of a river-lake system were comprehensively identified and the spatial distribution was analyzed. Meanwhile, the potential sources of heavy metals in the sediments were apportioned using the positive matrix factorization model (PMF). The elements Cd, Cu, and Zn were identified as the main pollutants in the sediments of the river-lake system; in particular, Cd indicated an ecological risk. Compared with receiving lakes, the river is more polluted and poses a more significant risk. Spatial analysis of the lake suggested that the entrance of rivers had a relatively higher pollution degree and risk, indicating that rivers may be an important channel to transfer pollutants into the lake. PMF modelling showed that the heavy metals in the sediments were mainly associated with human activities (55.7%), including industrial emissions (20.3%), fertilizer application (19.5%), and aquaculture (15.9%).

Key words: heavy metals; positive matrix factorization (PMF); geochemical characteristics; ecological risk; river-lake system

随着社会经济的快速发展,工业化和城镇化进程加快,由人类活动产生的重金属通过工业废物排放、农药和化肥施用、居民生活垃圾以及交通污染等多种途径进入水环境,水生态系统安全面临威胁^[1,2]。重金属不易降解,进入生态系统后通过多种方式蓄积在沉积物中^[3,4],且部分重金属的毒性在生物累积性的作用下可通过水生动植物和微生物中积累进入食物链并沿食物链经富集作用在动物、人体内蓄积,严重威胁人类健康^[5]。因此,系统辨识水体中重金属的污染分布、环境风险及其排放来源,对有效预防和控制水体重金属污染具有重要意义。

府河是白洋淀各支流中唯一一条常年流动的入淀河流,它主要接纳来自保定市的生活和工业废水^[6]。近年来随着淀区旅游业和养殖业的迅速发展,入淀水量减少、污水增多,农业面源污染加剧,区域水环境形势不容乐观^[7-9]。杨卓等^[10]采用地累积指数和潜在生态危害指数对白洋淀污染和生态危害进行评价;李经纬等^[11]对白洋淀底泥重金属污染进行了分析;Ji 等^[12]对白洋淀沉积物中重金属的空间分布和生态风险进行了研究;Zhang 等^[13]也对白洋

淀沉积物中重金属含量进行了评估分析。

虽然研究者开展了白洋淀重金属污染调查和风险评价工作,但针对入淀河流的研究报道较少,而府河作为白洋淀主要污染入湖河流,系统分析它们之间的关系,是缓解和治理白洋淀污染的重要基础。本文针对府河及其受纳湖体,在辨识该“河-湖”系统沉积物重金属地球化学特征的基础上,利用多种风险评价指数,结合地统计方法分析污染物的潜在生态风险,并利用正定矩阵因子分解模型(positive matrix factorization, PMF)解析重金属的主要来源,探讨府河和白洋淀的源汇关系。本研究的结果对流域污染防治具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

府河是白洋淀一条重要的供水河,也是保定市

收稿日期: 2019-10-28; 修订日期: 2019-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406502); 国家水环境监测监控及业务化平台技术研究课题项目(2017ZX07302002); 北京市地表科学高精尖项目

作者简介: 李悦昭(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属源解析, E-mail: 364632963@qq.com

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

的排污河道. 府河上游有一亩泉河、侯河和白草沟等支流, 一亩泉河为主流, 与众多支流汇合后称府河. 府河在灵雨寺东分出一支护城河, 主流向东有黄花沟和金线河汇入, 与唐河汇合后入藻杂淀.

1.2 样品采集与实验室分析

2019 年 4 月中旬, 采集府河及其受纳湖体沉积物, 共 65 份样品, 其中府河布设 37 个采样点(沿河岸采样), 淀区布设 28 个采样点, 如图 1. 每个采样点采集 0 ~ 20 cm 表层沉积物约 1 kg 混合, 装于密封袋中, 低温保存(4℃)送至实验室.

在实验室中, 将样品干燥、过筛、粉碎后储存在酸和去离子水冲洗的玻璃瓶中. 加入 5 mL 硝酸、2 mL 氢氟酸和 1 mL 高氯酸, 于 ST-60 型自动消解仪中于 120℃ 加热 1 h, 升温至 140℃ 加热 1 h, 升温到 160℃ 加热 1 h, 升温到 180℃ 加热 45 min 后取下回流漏斗, 赶酸至近干. 冷却后用高纯水定容至 25 mL, 用 ICP-AES 光谱仪测定包括 As、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、V 和 Zn 共 11 种元素含量. 实验分析在北京师范大学分析测试中心完成, 质控过

程参考《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004), 测试中进行了试剂空白分析、标准校准和重复分析, 结果表示为平均值.

1.3 地球化学指数

分别采用地累积指数 [$I_{geo} = \log_2 (C_i/1.5B_i)$] 和单项污染指数 ($PI = C_i/C_{io}$) 对研究区各重金属的累积程度和污染程度进行评价^[14], 采用内梅罗综合污染指数:

$$NIPI = 0.5 \sqrt{I_{Avg}^2 + I_{Max}^2}$$

评估综合污染水平^[15], 同时应用富集因子法:

$$EF = (C_i/C_{ref})_{sample}/(C_i/C_{ref})_{background}$$

识别环境系统中的重金属元素的人为扰动情况^[16]. 式中, C_i 为样品中重金属元素实测含量, B_i 为各元素的地球化学背景值, C_{io} 为重金属含量的评价标准, I_{Avg} 和 I_{Max} 分别为单项污染指数的平均值和最大值, C_{ref} 为参比元素(选择较稳定的 Mn 元素)的含量. 各评价指标分级程度见表 1.

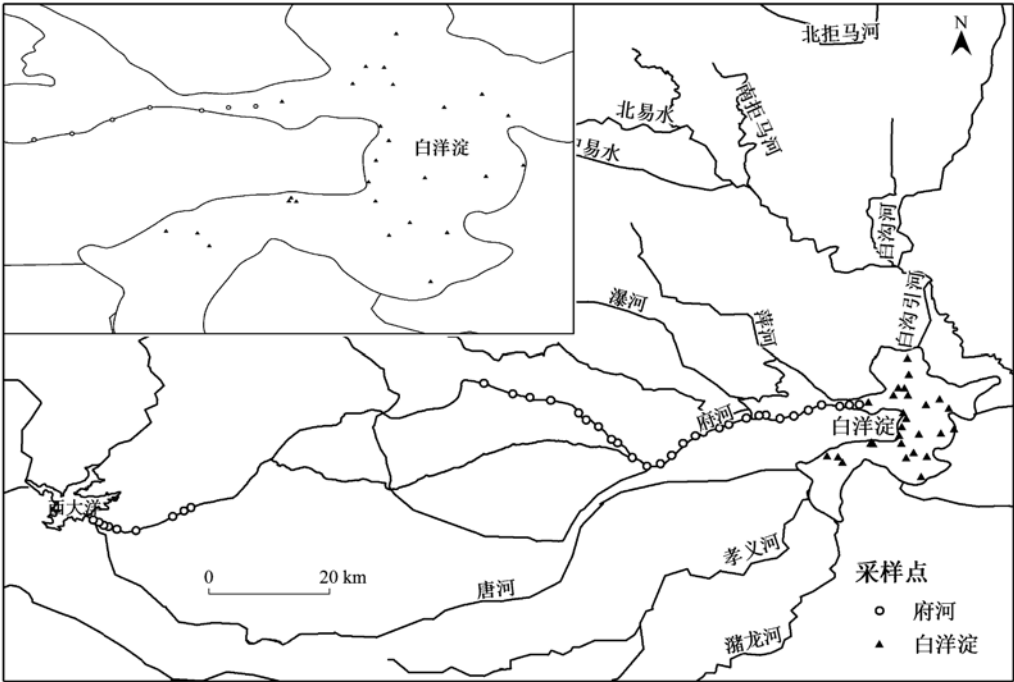


图 1 研究区采样点位示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

表 1 污染评价指标与污染程度对照

Table 1 Corresponding relationship between value and classification level for the pollution evaluation index

单项污染指数	内梅罗综合指数	污染程度	富集因子	富集程度
$PI \leq 0.7$	$NIPI \leq 0.7$	安全	$EF < 2$	轻微富集
$0.7 < PI \leq 1$	$0.7 < NIPI \leq 1$	警戒限	$2 \leq EF < 5$	中度富集
$1 < PI \leq 2$	$1 < NIPI \leq 2$	轻污染	$5 \leq EF < 20$	显著富集
$2 < PI \leq 3$	$2 < NIPI \leq 3$	中污染	$20 \leq EF < 40$	强烈富集
$PI > 3$	$NIPI > 3$	重污染	$EF \geq 40$	极强富集

1.4 改进的生态风险评价方法

潜在生态风险指数 (potential ecological risk index, RI) 是由 Hakanson^[17] 提出用来评价重金属污染及生态危害的方法, 综合考虑了元素含量及其生态及环境效应来划分潜在危害程度. 在此基础上, 有研究考虑了人类活动, 提出改进的生态风险指数 (modified potential ecological risk index, MRI), 以评估一个地点的污染程度^[18]. 在改进的生态风险评价方法中, 应用富集因子作为基本计算单位.

$$MRI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \cdot EF^i \quad (1)$$

式中, EF 为富集因子, E_r 是给定金属的单项潜在生态风险因子, T_r 是金属的毒性响应因子. 本研究以 Hakanson 标准化重金属毒性系数为评价依据对 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等 7 种重金属进行风险评价.

1.5 正定矩阵因子分解模型

PMF 是由 Paatero^[19] 提出的一种改进的因子分析方法, 被广泛应用于污染源解析研究^[20~22]. 该模型将样品浓度数据矩阵分解成两个因子矩阵及一个残差矩阵, 并在求解过程中对因子载荷和得分做非负约束时引入不确定性估计. 计算公式如下所示:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ki} f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的浓度, g_{ki} 为源 k 对第 i 个样品的贡献, f_{kj} 为源 k 中第 j 个元素的浓度, e_{ij} 为残差矩阵. PMF 法基于最小二乘法进行限定和迭代计算, 以使目标函数 Q 最小来获得最优的矩阵 G 和 F . 目标函数 Q 为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

式中, u_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素浓度的不确定性大小. 浓度不确定性采用公式计算:

$$Ucn = \sqrt{(EF \times \text{concentration})^2 + (0.5 \times MDL)^2}$$

式中, MDL 为浓度检测限, EF 为不确定参数 (本次用 0.15).

此外, 采用自举法 (bootstrapping, BS)、扰动法 (displacement, DISP) 和自举-扰动法 (bootstrapping with displacement, BS-DISP) 这 3 种误差估计方法讨论 PMF 解析的不确定性^[23]. 其中, BS 法通过重采样方式扰动原始数据集而生成多组新数据集并运行 PMF; DISP 法进行位移误差估计, 将拟合矩阵的每个参数中的拟合值依次扰动 (置换) 后重复拟合模型以获得矩阵中每个参数的不确定性; BS-DISP 方法是 BS 和 DISP 方法的组合, 综合来自重采样、因子分解和置换过程中的所有结果的集合, 估计不确定性, 来分析 PMF 应用于重金属源解析时产生的不确定性.

2 结果与讨论

2.1 “河-湖”沉积物重金属基本情况

该“河-湖”系统沉积物中重金属含量统计结果见表 2. 府河沉积物中, Cd、Cu、Fe、Pb 和 Zn 元素的平均含量均超过背景值, 其中 Cd、Zn 和 Cu 分别是背景值的 8.22、4.18 和 3.51 倍. Cd 和 Zn 元素的单项污染在轻污染及以上的样品分别达 32.4% 和 48.6%, Cu 和 Pb 元素有个别点有污染. 综合来看,

表 2 沉积物样品重金属元素含量统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Heavy metal concentrations in the sediments of study area/mg·kg⁻¹

区域	项目	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn
府河	最大值	9.99	4.35	16	86.4	780	3.99 × 10 ⁴	1 270	49.9	166	97.2	1 312
	最小值	1.86	0.09	9	33.1	18.9	2.28 × 10 ⁴	396	19.7	16.8	60	73.7
	平均值	6.03	0.8	11.6	58.3	80.8	3.06 × 10 ⁴	609	29.6	44.8	74.4	328
	中值	6.06	0.35	11.6	58.2	50	3.04 × 10 ⁴	549	28.9	32.9	72.4	246
	标准偏差	2.07	0.97	2.05	15.1	129	4.42 × 10 ³	186	6.94	34.9	9.29	274
	变异系数/%	0.34	1.22	0.18	0.26	1.6	0.14	0.3	0.23	0.78	0.12	0.84
	偏态系数	0.1	2.22	0.58	0.24	4.82	0.36	1.41	0.68	1.98	0.58	1.51
府河受纳湖体	最大值	16.1	1.73	15.7	78.5	154	3.88 × 10 ⁴	925	111	48.9	118	366
	最小值	4.56	0.096	7	35.9	24.9	1.83 × 10 ⁴	420	20.3	16.8	56.8	67.2
	平均值	8.96	0.4	11.9	57.7	44.9	3.06 × 10 ⁴	655	35.1	25.1	83.9	127
	中值	8.25	0.3	11.7	58.6	37.5	3.07 × 10 ⁴	621	28.7	23.6	82.7	105
	标准偏差	3.26	0.33	2	8.93	29.1	4.97 × 10 ³	141	21.8	6.53	14.6	65.4
	变异系数/%	0.36	0.81	0.17	0.15	0.65	0.16	0.22	0.62	0.26	0.17	0.51
	偏态系数	1.02	2.69	-0.16	-0.34	2.93	-0.55	0.58	3.19	2	0.11	2.12
标准一		30	0.3	—	250	150	—	—	60	80	—	200
标准二		30	0.6	—	300	200	—	—	100	140	—	250
背景值		14.2	0.097	16.7	72.6	23	2.82 × 10 ⁴	616	34.1	25.1	80.1	78.4

1) 标准一和标准二为风险筛选值为 pH ≤ 5.5 和 6.5 < pH ≤ 7.5 下的污染物浓度标准; 背景值为河北 C 省层土壤各元素背景值的算术平均值

府河 Cd、Zn、Cu 和 Pb 含量超标,且 Cd 超标严重,这与已有研究结果较为一致^[24]。

受纳湖体中,除 Co、Cr 和 Fe 外,其余重金属均呈正偏态分布,其中 Cu 元素含量在 24.9~154 mg·kg⁻¹,与太湖^[25]及鄱阳湖^[26]相比,含量水平存在一定差异。相较于区域土壤背景值,除 As、Co 和 Cr 外,其余元素平均含量高于背景值。而依据国家土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)^[27]的不同污染风险筛选值,约 15% 样品中的 Cd 元素处于轻微污染。

2.2 “河-湖”沉积物重金属地球化学特征

利用地累积指数(I_{geo})^[28]法进一步辨析该“河-湖”系统沉积物中重金属的环境特征(图 2)。可以看出,府河中仅 Cd、Cu、Zn 存在累积性污染($I_{geo} > 0$),其中 Cd、Zn 处于中等污染($1 <$

$I_{geo} < 2$)。从地累积指数分级频率看,受 Cd、Cu、Zn 和 Pb 污染样品比例达 40.54%~86.49%。依据内梅罗综合污染指数(NIPI)分析,过半数点达轻度污染以上,个别达重度污染。应用富集因子(EF)法分析,除 Cd、Cu 和 Zn 外,其他金属元素均处于轻微富集($EF < 2$),其中 Cd 元素达显著富集($5 \leq EF < 20$)。

受纳湖体中,仅 Cd、Cu 有累积($I_{geo} > 0$),其中 Cd 元素达中度累积($1 < I_{geo} < 2$)、Cu 为轻-中度累积($0 < I_{geo} < 1$)。从重金属地累积指数分级频率来看,仅 Cd、Cu、Zn 有累积。根据内梅罗综合污染指数(NIPI)分析,28.5%的点达警戒线,仅 1 个点达中度累积。富集因子(EF)^[29]法分析结果显示,大部分元素均处于轻微富集($EF < 2$),仅 Cd 元素为中度富集($2 \leq EF < 5$)。

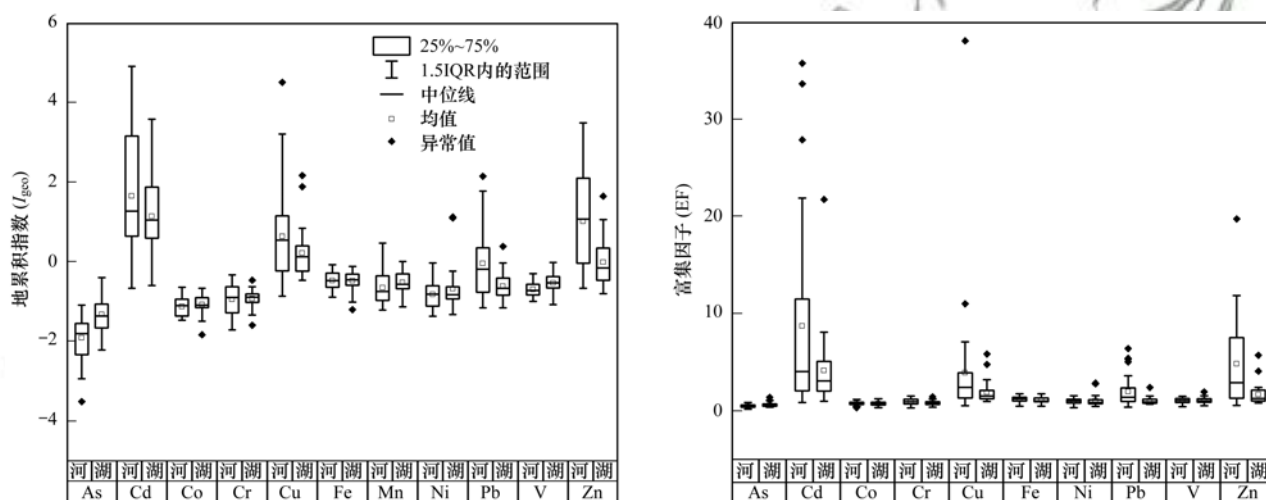


图2 河-湖系统沉积物重金属地累积指数

Fig. 2 Geo-accumulation index of heavy metals in the sediments of the river-lake system

2.3 “河-湖”沉积物重金属风险特征

应用改进生态风险指数对该“河-湖”系统沉积物重金属的潜在生态风险进行评价。结果表明,府河中 Cd 元素单项风险因子达轻微以上($E_r \geq 40$),其中 27.03% 样品达极强风险($E_r \geq 320$),其主要原因为 Cd 在沉积物中的含量较高,且 Cd 具有较高的毒性系数。从综合潜在生态危害指数来看,府河的平均值为 311.81,处于强风险($300 \leq MRI < 600$),局部区域达较强风险($600 \leq MRI < 1200$)。而对受纳湖体来说, Cd 元素单项风险因子达轻微以上($E_r \geq 40$)。综合来看,该“河-湖”系统主要生态风险污染物为 Cd 元素。相对地,府河沉积物中重金属处于较高单项风险等级的样品数更多、污染程度更强,总的生态风险也更高。

2.4 “河-湖”沉积物重金属差异分析

进一步,利用 t 检验,对该“河-湖”系统沉积物

中重金属的地球化学特征和生态风险进行了差异分析,包括地累积指数、单项污染指数、富集因子、内梅罗综合指数和潜在风险指数。结果表明,地累积指数的方差及均值差异均不显著($P > 0.05$),可见该河湖系统受到相似的人类活动影响。而单项污染指数、富集因子、内梅罗综合指数、潜在风险指数的方差差异显著($P < 0.05$),但单项污染指数及富集因子的均值差异不显著($P > 0.05$),表明府河及其受纳湖泊的污染程度和富集情况总体接近,但部分重金属的强度差异较大(主要为 Cd 元素)。结合空间分析来看,内梅罗综合指数和潜在生态风险指数的空间分布大体相似(图 3),但方差与均值差异较大。

综上,该“河-湖”系统沉积物中的主要特征元素较为一致, Cd、Cu 和 Zn 累积性污染程度更高,且 Cd 存有生态风险。相对而言,府河沉积物中重金属含

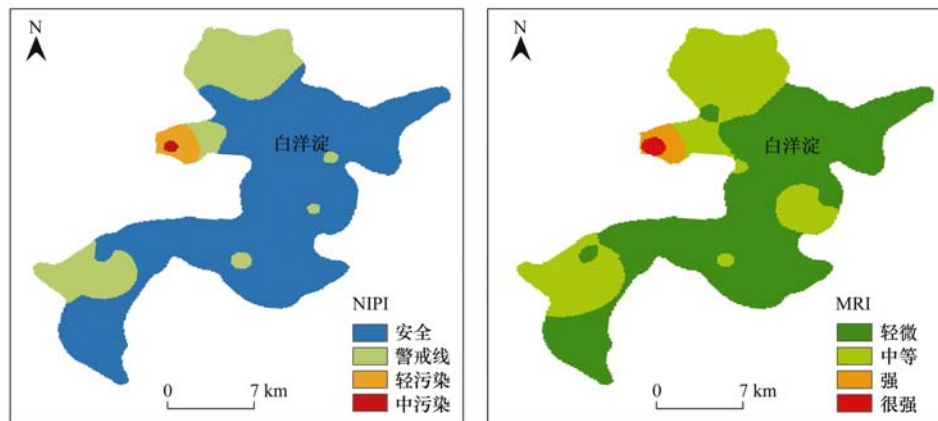


图3 府河受纳湖体内梅罗综合指数 (NPI) 及潜在风险指数 (MRI) 分布

Fig. 3 Spatial distribution of NPI and MRI of heavy metals in the lake sediments

量、污染水平、富集程度及生态风险均高于其受纳湖泊. 结合流域基本情况, 府河主要承接城市生产和生活污水, 为入淀河流中唯一一条常年流动河流, 是受纳湖泊的主要负荷输入通道.

2.5 “河-湖”沉积物重金属来源解析

应用 PMF 模型对该“河-湖”系统沉积物重金属 ($n=65$) 的来源进行解析. 各元素的信噪比 (S/N) 均在 4.7 以上, 符合模型计算要求. 在 Robust 模式下设置不同因子数 (3~5) 运行, 其中因子数 3~4 时 $Q_{\text{robust}}/Q_{\text{true}}$ 下降明显, 最佳因子个数为 4. 对结果进行旋转运算, 运算后因子共线性问题有所降低. 根据各因子贡献, 旋转后的因子 2 和 3 贡献增加, 因子 1 和 4 贡献有所下降, 因子贡献见图 4.

因子 1 是 As 元素的主要来源, 对其他元素贡献较小. 目前我国施用的化肥中, 磷肥约占 20%, 磷肥的生产原料为磷矿石, 含有大量有害元素 As, 且磷矿石的加工过程还会带进其他重金属^[30]. 另外有研究表明, 重金属元素是肥料中报道最多的污染物质, 是重金属污染的重要来源^[31], 因此因子 1 来源可能

为化肥施用.

因子 2 对除 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 外的元素贡献均在 50% 以上. 结合前述分析知, Cd、Cu 和 Zn 为区域的主要污染物, 其他重金属元素含量较背景值差别不大, 说明这些元素的浓度主要受控于自然地质背景的影响, 与因子 2 的构成相似, 因此因子 2 可能是自然源.

因子 3 是 Zn 元素的主要来源, 另外对 Cu 有一定贡献. 有研究表明, 饲料中的 Cu 可以促进动物生长、提高饲料的利用率, 而高 Zn 对疾病控制和动物发育有较好作用, 因此动物饲料中含有大量 Zn 和 Cu^[32], 且淀中存在的大量水产养殖区域, 易产生大量 Cu 和 Zn 污染. 因子 3 的构成可能代表了水产养殖.

因子 4 对 Cd 元素的贡献最高, 另外对 Cu、Pb 和 Zn 元素有一定贡献. 据调查, 淀上游有大量重点排污企业, 其中排放废水量大的是造纸、印染、化工和电力等行业, 这些工业废水中主要污染物包含了 Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 等^[33~36], 与因子 4 的构成相似,

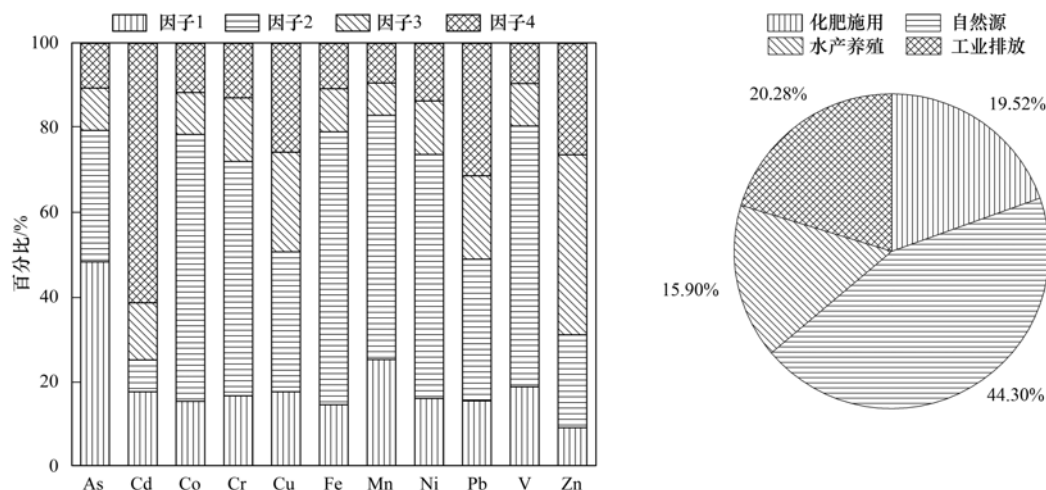


图4 PMF 解析出的河-湖系统沉积物中重金属的源指纹谱及其贡献比例

Fig. 4 PMF analysis showing the source profiles and contributions of heavy metals in the sediments of the river-lake system

因此认为因子 1 为工业排放。

进一步分析上述 4 个因子的平均贡献比例(见图 4)。结果表明,人为源对该“河-湖”系统沉积物重金属贡献比例较大,占比 55.7%。其中工业排放、化肥施用和水产养殖,贡献率分别为 20.28%、19.52% 和 15.90%。此外,自然源也占有一定比例(44.30%)。注意到,研究区中主要存在污染的重金属为 Cd、Cu 和 Zn,其中超标最严重且风险最大的 Cd 元素主要来源于因子 4 工业排放(61.38%);Cu 元素主要来源于人为因素共同影响(66.9%);Zn 元素主要来源于因子 3 水产养殖(42.6%)。可以看出,该“河-湖”系统沉积物中高风险的 Cd、Cu 和 Zn 主要受包括工业排放、化肥施用和水产养殖在内的人类活动的共同影响。

采用 BS、DISP 和 BS-DISP 法捕捉随机误差和因子旋转不确定性。DISP 结果中, Q 的下降幅度在 1% 以内,表明得到的 Q 是全局最小值,且不存在因子交换,表明源解析结果误差较小,源谱的各个因子定义明确。污染来源的 BS 结果显示,除因子 2 外,各因子匹配程度均在 95% 以上,因子 2 的匹配度为 76%,且其中有 19% 的情况映射到了其他因子,与上述分析因子 2 为自然源对多种金属元素(无污染物质)都有较大贡献相呼应。BS-DISP 结果表明存在因子交换,可能源于个别因子的主要载荷不够稳定,也可能是样本量及其代表性有待加强。综合不确定性分析结果可知,源解析结果有较高的可靠性。

3 结论

(1) 研究区沉积物中, Cd、Cu、Zn 为主要污染物,存在轻度-中等以上累积性污染,其中 Cd 达中度污染和显著富集。解析结果表明,沉积物重金属分布受人类活动影响,主要来源于工业排放、化肥施用和水产养殖。

(2) 该“河-湖”系统沉积物中重金属分布相似但污染程度存在差异,相对而言,府河污染水平及风险程度均更高,是受纳湖泊的主要负荷输入通道。

(3) 府河作为保定市内的主要河流,是保定市生产生活污水排放的主要接受水体,人类活动是该地区污染的主要来源,加强对入河排污口和污水灌溉等的监管和控制有利于加强周边地区生态环境建设,以更好达到改善流域水质安全的目标。

参考文献:

- [1] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [2] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(6): 88-96.
- [3] 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 等. 溧湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 925-934.
- [4] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [5] 沈志勇. 南京市郊土壤重金属形态特征及生物累积研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [6] Wei Q W, Li H B, Liu L J, et al. The influences of pollutants distribution for the ecological water transfer based on the spatial differentiation in Baiyangdian Lake[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **518-523**: 2912-2919.
- [7] 门漱石, 崔秀丽, 赵芳. 白洋淀富营养化成因分析[J]. *环境科学*, 1995, **16**(S1): 35-36, 39.
- [8] 王瑜, 刘录三, 舒俭民, 等. 白洋淀浮游植物群落结构与水质评价[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 575-580.
- [9] Hu G C, Dai J Y, Xu Z C, et al. Bioaccumulation behavior of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the freshwater food chain of Baiyangdian Lake, North China[J]. *Environment International*, 2010, **36**(4): 309-315.
- [10] 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(5): 945-951.
- [11] 李经伟, 杨路华, 夏辉, 等. 白洋淀底泥重金属污染地累积指数法评价[J]. *人民黄河*, 2007, **29**(12): 59-60, 88.
- [12] Ji Z H, Zhang Y, Zhang H, et al. Fraction spatial distributions and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Baiyangdian Lake[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **174**: 417-428.
- [13] Zhang C, Shan B Q, Zhao Y, et al. Spatial distribution, fractionation, toxicity and risk assessment of surface sediments from the Baiyangdian Lake in northern China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 633-642.
- [14] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 108-115.

- Zhang L, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil of relocation areas from the Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (1): 108-115.
- [15] 何绪文, 房增强, 王宇翔, 等. 北京某污水处理厂污泥重金属污染特征、潜在生态风险及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1092-1098.
- He X W, Fang Z Q, Wang Y X, *et al.* Pollution characteristics, potential ecological risk and health risk assessment of heavy metal in a sewage treatment plant in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1092-1098.
- [16] Karageorgis A P, Katsanevakis S, Kaberi H. Use of enrichment factors for the assessment of heavy metal contamination in the sediments of Koumoundourou Lake, Greece [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, **204**(1-4): 243-258.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [18] Zhang H, Wan Z W, Ding M J, *et al.* Inherent bacterial community response to multiple heavy metals in sediment from river-lake systems in the Poyang Lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**: 314-324.
- [19] 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.
- [20] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- Chen X D, Lu X W. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [21] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 1658-1668.
- [22] 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于PMF模型的准东煤矿周围土壤重金属污染及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(9): 185-192.
- Bilal Y, Abdugheni A, Shi Q D, *et al.* Pollution and source identification of heavy metals in surrounding soils of eastern Junggar Coalfield based on PMF model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(9): 185-192.
- [23] 李娇. PMF模型用于土壤重金属解析不确定性研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2017. 71-77.
- [24] 胡国成, 许木启, 许振成, 等. 府河-白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(1): 146-153.
- Hu G C, Xu M Q, Xu Z C, *et al.* Pollution characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediment from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(1): 146-153.
- [25] 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.
- [26] 杨期勇, 曾明, 谢琪, 等. 鄱阳湖北部湖区沉积物重金属分布及其潜在生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(3): 556-564.
- Yang Q Y, Zeng M, Xie Q, *et al.* The distribution of heavy metals and potential ecological risk in the northern Poyang Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(3): 556-564.
- [27] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-375.
- [28] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [29] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2422-2429.
- Zhang Z Y, Jilili A, Jiang F Q. Pollution and potential ecology risk evaluation of heavy metals in river water, top sediments on bed and soils along banks of Bortala River, northwest China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2422-2429.
- [30] 邹兰, 姚芝茂, 江梅. 磷肥生产过程中伴生元素的回收与污染控制[A]. 见: 2014 中国环境科学学会学术年会(第一章) [C]. 成都: 中国环境科学学会, 2014.
- [31] 李树辉. 北方设施菜地重金属的累积特征及防控对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [32] Chen T, Liu X M, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(1): 67-78.
- [33] Chen X D, Lu X W. Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in topsoil from an area in Xi'an city, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **151**: 153-160.
- [34] Men C, Liu R M, Wang Q R, *et al.* The impact of seasonal varied human activity on characteristics and sources of heavy metals in metropolitan road dusts [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 844-854.
- [35] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [36] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)