

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.1  
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM<sub>2.5</sub>污染演变的时空过程 ..... 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 ..... 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM<sub>2.5</sub>中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 ..... 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM<sub>2.5</sub>污染特征 ..... 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析 ..... 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM<sub>2.5</sub>污染来源解析 ..... 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM<sub>2.5</sub>中砷污染特征 ..... 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 ..... 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子季节特征及来源解析 ..... 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM<sub>2.5</sub>稳定碳同位素特征分析 ..... 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 ..... 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 ..... 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 ..... 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 ..... 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 ..... 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 ..... 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 ..... 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 ..... 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 ..... 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 ..... 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 ..... 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 ..... 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 ..... 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 ..... 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析 ..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 ..... 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 ..... 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 ..... 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 ..... 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒锋, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 ..... 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 ..... 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 ..... 廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 ..... 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 ..... 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 ..... 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 ..... 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 ..... 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 ..... 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 ..... 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 ..... 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 ..... 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 ..... 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 ..... 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 ..... 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 ..... 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 ..... 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 ..... 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 ..... 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 ..... 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 ..... 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 ..... 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 ..... 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 ..... 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 ..... 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 ..... 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

# 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析

汪敬忠<sup>1,2,3</sup>, 刘卓<sup>1</sup>, 魏浩<sup>1</sup>, 吴玉会<sup>1</sup>, 占水娥<sup>2\*</sup>, 朱迟<sup>4\*</sup>, 张益淼<sup>1</sup>

(1. 河北地质大学实验实践教学中心, 石家庄 050031; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061; 4. 江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036)

**摘要:** 对白洋淀流域表层沉积物中营养元素(N和P)、重金属(Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Co、Ni及Sn)及粒度进行研究, 分析元素的空间变化并进行污染和风险评价, 在此基础上结合河流的沉积特征, 利用多元统计方法分析淀内沉积物元素的来源及其变化规律。结果表明, 白洋淀和河流表层沉积物重金属平均含量均高于背景值, 淀内空间上呈现营养元素“西北高东南低”, 重金属“中部高南北低”的特征; 表层沉积物中元素综合污染指数( $I$ )大小顺序为:  $Cd > Pb > Cr > Cu = Zn > Ni > Sn > Co$ , 其中Cd为重度污染, 其它重金属为中度污染, 枣林庄地区Cr为重度污染; 潜在生态危害系数( $E_p^i$ )大小顺序为:  $Cd > Pb > Cu > Cr > Ni > Zn$ , 其中Cd除采蒲台地区具有强潜在生态风险, 其他元素具有轻度潜在生态风险。淀内沉积物质地差异较小, 流域河流入淀后的面源污染是影响白洋淀表层沉积物元素空间变化的主要原因, 但淀内村庄的点源污染也不容忽视, 尤其是元素N、P、Pb及Cr。

**关键词:** 白洋淀; 营养元素; 重金属; 空间分布; 污染风险评价; 来源分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0224-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907005

## Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake

WANG Jing-zhong<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhuo<sup>1</sup>, WEI Hao<sup>1</sup>, WU Yu-hui<sup>1</sup>, ZHAN Shui-e<sup>2\*</sup>, ZHU Chi<sup>4\*</sup>, ZHANG Yi-miao<sup>1</sup>

(1. Experiment and Practice Teaching Center, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. State Key Laboratory of Lake and Environmental Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 4. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** In this paper, nutrient elements (N and P), heavy metals (Pb, Cu, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, and Sn), and grain size in surface sediments of Baiyangdian Lake, northern China, are studied. We also analyze the spatial variation in elemental characteristics and undertaken a pollution risk assessment. By combining data with information on the river sediment characteristics, we use multivariate statistical methods to reveal the sources and variation of elements in sediments. The results showed that the average contents of heavy metals in surface sediments from the lake and associated rivers were higher than background values. Within the area of the lake, nutrient elements are relatively high in the northwest region but low in the southeast region, and heavy metals are relatively high in the middle of the lake but low in the southern and northern areas. The sequence of comprehensive pollution index ( $I$ ) in sediments was  $Cd > Pb > Cr > Cu = Zn > Ni > Sn > Co$ , with Cd being assessed as severe pollution and other elements as moderate pollution, although severe pollution of Cr was found in the Zaolinzhuang area. The order of potential ecological risk coefficients ( $E_p^i$ ) was determined as  $Cd > Pb > Cu > Cr > Ni > Zn$ , whereby Cd was associated with a strong potential ecological risk (except in the Caiputai area) and other elements were associated with a slight potential ecological risk. Differences in the lake sediment texture were found to be slight. Non-point source pollution after rivers flow into the lake was determined as the main reason for the spatial variation of elements in the surface sediments of Baiyangdian Lake, although point source pollution in the villages surrounding the lake should not be ignored, especially with respect to N, P, Pb, and Cr.

**Key words:** Baiyangdian Lake; nutrient elements; heavy metals; spatial distribution; pollution and risk assessment; source analysis

随着人类工农业活动的加剧, 重金属污染已成为水体生态环境最突出的问题之一, 沉积物作为湖泊生态系统重要的一部分, 是元素N、P和重金属的重要载体, 但水文过程的变化可能使其成为重要的二次污染源<sup>[1,2]</sup>。白洋淀是中国北方最具典型性和代表性的湖泊和草本沼泽湿地, 对维持华北地区的生态环境有着不可替代的重要作用, 被誉为“华北

明珠”。但近几十年来, 由于人类活动的影响, 大量工业、农业及生活污水排入淀内, 使得湖区污染愈

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2019-08-19

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2018403115); 河北省水利科技计划项目(2017-61); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1717)

作者简介: 汪敬忠(1986~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为湖泊沉积与环境, E-mail: myjingzhong@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhanshuie@126.com; 499942133@qq.com

加严重,水质恶化、富营养化及重金属污染等日趋严重,再加上气候变干,白洋淀正面临着不同程度的污染、收缩甚至干涸等生态环境威胁<sup>[3~5]</sup>. 自 2017 年中共中央、国务院决定成立河北雄安新区以来,白洋淀作为其核心水系,湖区生态环境的建设与保护显得更为重要.

目前,关于白洋淀流域水体和沉积物方面的研究已取得一定的成果,尤其是在有机污染物<sup>[6,7]</sup>、沉积物重金属污染评价<sup>[8~10]</sup>以及与底栖动物群落的关系<sup>[11]</sup>、水体富营养化<sup>[12,13]</sup>、湿地景观格局演变<sup>[14]</sup>、水文、水质变化及其原因<sup>[3,5,15]</sup>以及府河重金属<sup>[16]</sup>、营养盐<sup>[17]</sup>和有机污染物<sup>[18]</sup>变化对白洋淀的影响等方面,但结合沉积物中营养盐和重金属共同分析其空间变化特征和来源,以及运用数学方法定性区分来自河流的面源污染和淀内村庄的点源污染等方面报道不多. 为此,本研究通过对白洋淀流域表层沉积物营养元素 N、P 及重金属含量的分析,描绘其空间变化,评价其污染状况,在此基础上,结合河流沉积物,利用多元统计方法揭示白洋淀污染物的主要来源及其分布规律,并与相关结果进行对比,以期对白洋淀表层沉积物质量管理、针对性的预防和控制区域工农业污染以及当前新区的生态文明建设等提供参考,具有重要的科学和实际意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白洋淀是华北地区最大的淡水湖型湿地,位于海河流域大清河水系中游,淀区地势自西北向东南倾斜,主体在安新县境内. 白洋淀流域总面积约 366 km<sup>2</sup>,淀内构成了淀中有村,村中有淀,沟壕相连的地貌特征,其中水域面积约占 18.4%,居民面积约占 6.0%,而芦苇面积接近 41.4%<sup>[19]</sup>. 入淀河流主要有府河、唐河、孝义河、潴龙河以及 1970 年人工开挖的白沟引河等,出水口自赵王新河入大清河(图 1). 该区域受东亚季风影响,属于暖温带半干旱区,大陆性气候显著,多年平均气温 7.3~12.7℃;年均降水量约 563.9 mm,但时间分布不均;年均蒸发量约 1 369 mm,年均蒸发量远超于年均降水量<sup>[15]</sup>.

近年来,白洋淀上游和周边经济发展迅速,人口数量逐年增长,到 2013 年保定市常住人口已超过一千万人,府河发源于河北保定市西部,是白洋淀最重要补给水源,但约 1960 年以来,就已成为保定市生活污水和工业废水排污、纳污的河流,之后虽然建立污水处理厂,但污水处理量不及污水排放量,导致废水由府河入淀,污染严重;另外几条流入淀内的河流如唐河、孝义河及潴龙河等也位于保定市境

内,同样受到工农业活动的污染<sup>[5,11]</sup>. 同时,白洋淀湖区内部人口也增加迅速,包括 6 个乡镇 45 个行政村,留守人口约 10 万人,对湖区生态环境的威胁也越来越明显<sup>[20]</sup>.

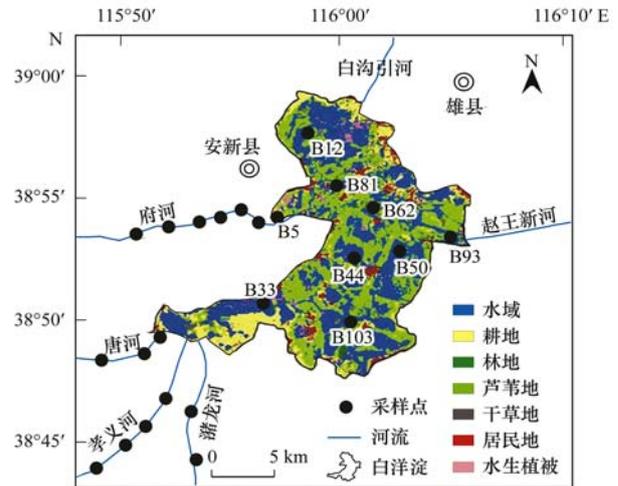


图 1 白洋淀土地利用类型及采样点分布示意

Fig. 1 Land use patterns surrounding Baiyangdian Lake and sampling sites

### 1.2 样品采集与实验分析

2018 年 7 月,对雄安新区白洋淀进行调研,并依据白洋淀国家控制位点<sup>[21]</sup>、河流入淀的分布特征、湖区水域面积及居民地人类活动的影响程度<sup>[12]</sup>,选择淀内 9 个地区作为代表,包括南刘庄(B5)、烧车淀(B12)、端村(B33)、圈头(B44)、东淀(B50)、光淀张庄(B62)、王家寨(B81)、枣林庄(B93)和采蒲台(B103),运用彼得森采泥器采集 9 个湖泊表层沉积物样品,并在区域主要河流(包括府河、唐河、孝义河及潴龙河)的下游至入淀口采集 15 个表层样品,所采集的每个样品是在样点周围的 3 次取样混合而成(图 1). 获得的样品运回实验室后经冷冻干燥,除去动植物残体等杂物,200 目过筛,利用凯氏定氮法(K1100F)测定总氮(TN),碱熔-钼锑抗分光光度(HJ 632-2011)测定总磷(TP),样品经消解后,电感耦合等离子体原子发射质谱仪(ICP-MS, iCAPQ)测定 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Co 和 Sn 元素. 上述所有样品做 2 个平行,数值取平均值,平行样消解后的测量误差结果小于 2%.

### 1.3 数据处理

采用 ArcGIS 10.2 软件绘制白洋淀流域采样点的空间位置及元素空间分布特征;采用加拿大安大略省环境和能源部 1992 年制定的标准评价白洋淀表层沉积物的营养盐状况;运用内梅罗指数法和潜在生态危害指数法评价沉积物重金属的污染和生态风险状况;SPSS 19.0 for windows 软件对相关数据进行相关性分析和系统聚类分析.

## 2 结果与分析

区域河流和白洋淀表层沉积物元素变化特征见表 1. 对于研究区河流表层沉积物, TN 和 TP 平均值分别为  $2.30 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.91 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其中府河最高, 分别约是潞龙河的 4 倍和 3 倍; Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Co、Ni 及 Sn 平均数值均高于全国土壤背景值, 前 4

种重金属也高于流域背景值, 其中 Pb、Co 及 Sn 元素在孝义河沉积物中富集显著, 含量最高, 尤其是 Pb, 数值高达  $389.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 约是流域背景值的 37.5 倍, 全国背景值的 16.6 倍, 而其它元素 Cu、Zn、Cd、Cr 及 Ni 在府河表层沉积物中数值最大, 含量分别是全国背景值的 2.8、4.7、13.8、1.7 及 1.8 倍. 此外, 不同河流中值粒径(Md)数值变化较小.

表 1 区域河流和白洋淀表层沉积物理化指标含量变化<sup>1)</sup>

Table 1 Changes in physicochemical indexes in surface sediments from rivers and Baiyangdian Lake

序号	区域	TN	TP	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Sn	Md
R1	府河	4.83	1.56	57.46	57.93	318.10	1.09	96.54	16.62	45.38	5.42	23.35
R2	唐河	1.44	0.63	144.00	24.34	67.38	0.20	70.69	12.88	30.12	3.67	21.75
R3	孝义河	1.29	0.76	389.51	35.40	91.32	0.30	90.83	17.10	40.06	6.56	18.28
R4	潞龙河	1.22	0.56	24.15	32.94	75.93	0.22	77.63	14.48	32.94	2.70	21.22
	河流平均值	2.30	0.91	155.17	38.19	148.30	0.49	85.82	15.61	38.13	4.72	21.15
	河流标准差	1.75	0.47	233.57	14.85	117.54	0.43	13.00	2.10	7.51	2.44	2.15
B5	南刘庄	3.80	0.73	24.44	24.85	89.04	0.23	68.18	13.30	29.99	2.61	9.16
B12	烧车淀	6.91	0.71	15.54	27.81	88.58	0.29	58.18	10.06	38.44	2.04	7.45
B33	端村	4.39	0.85	27.07	36.81	94.40	0.27	79.58	14.09	35.20	3.18	8.31
B44	圈头	2.62	0.68	68.37	31.13	94.63	0.29	85.57	15.12	45.27	3.41	7.67
B50	东淀	2.90	0.68	45.40	38.86	116.93	0.41	89.64	15.06	37.00	3.35	8.25
B62	光淀张庄	6.86	0.87	47.24	37.24	130.21	0.41	85.81	15.67	42.09	3.39	9.92
B81	王家寨	3.08	0.82	38.74	30.89	117.18	0.28	86.20	15.38	37.41	2.84	9.08
B93	枣林庄	2.77	0.62	65.18	27.60	87.87	0.27	141.74	13.56	33.37	3.18	8.85
B103	采蒲台	2.88	0.60	34.51	24.57	69.96	0.21	65.01	11.41	27.51	2.65	7.36
	湖泊平均值	4.02	0.73	40.72	31.08	98.76	0.30	84.43	13.74	35.14	2.96	8.45
	湖泊标准差	1.71	0.10	17.87	5.42	18.84	0.07	24.16	1.92	6.04	0.46	0.87
	流域背景值 <sup>[8]</sup>	—	—	10.39	30.50	71.37	0.074	—	—	—	—	—
	全国背景值 <sup>[22]</sup>	—	—	23.5	20.7	68.0	0.079	57.3	11.6	24.9	2.3	—

1) TN 和 TP 单位为  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其它元素单位为  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; R1 ~ R4 分别代表府河、唐河、孝义河及潞龙河的平均值; Md 为中值粒径, 单位为  $\mu\text{m}$

对于湖泊表层沉积物, 营养元素 TN 和 TP 的平均值分别为  $4.02 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.73 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其中烧车淀和光淀张庄 TN 数值较大, 超出  $6.80 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 圈头最小, 大小为  $2.62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 端村、光淀张庄及王家寨 TP 数值达  $0.80 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  以上, 采蒲台最小, 大小为  $0.60 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 湖区表层沉积物 Pb、Cu、Zn、Cd 平均含量高于流域背景值, 约是其 3.9、1.01、1.4 及 4.1 倍, 所有重金属平均含量同样均高于全国土壤背景值, 分别约是其 1.7、1.5、1.5、3.8、1.5、1.2、1.4 及 1.3 倍, 其中 Pb、Ni 及 Sn 在圈头地区数值相对较高, 分别为  $68.37$ 、 $45.27$  及  $3.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Cu、Zn 及 Cd 含量在东淀和光淀张庄地区高于淀内其他地区, 最大值分别为  $38.86$ 、 $130.21$  及  $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 元素 Cr 在枣林庄地区含量最高, 约是全国背景值的 2.5 倍. 另外, 淀内不同地区表层沉积物  $< 2 \mu\text{m}$  的粒径占 50% 以上, Md 平均值为  $8.45 \mu\text{m}$ , 标准差为 0.87, 说明研究区各位点表层沉积物粒径较为相似, 沉积物质地偏细、差异较小.

总体而言, 白洋淀表层沉积物的 TN、TP 和

重金属含量呈现不同的空间分布格局(图 2), 整体上呈现出营养元素“西北高东南低”, 而重金属“中部高南北低”的特点, 其中光淀张庄(B62)及王家寨(B81)地区表层沉积物元素含量相对较高; 烧车淀(B12)重金属含量相对较低, 但 TN 偏高, 而东淀却相反; 采蒲台(B103)地区为静水区, 人类活动影响相对较小, 营养元素和重金属含量均较低.

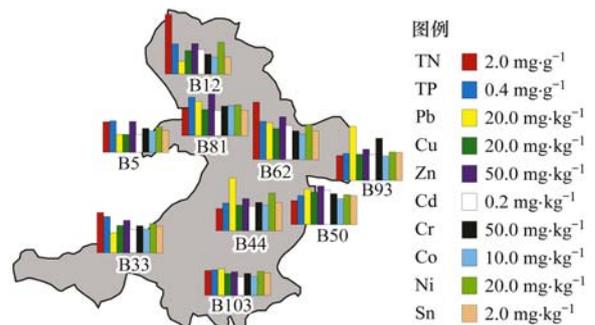


图 2 白洋淀表层沉积物元素含量的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of elemental contents in surface sediments from Baiyangdian Lake

### 3 讨论

#### 3.1 白洋淀表层沉积物的污染和生态风险评价

##### 3.1.1 营养盐的污染评价

根据加拿大安大略省环境和能源部 1992 年发布沉积物中营养盐的环境质量标准, TN 和 TP 能够引起最低级别生态毒性效应的含量分别为  $0.55 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.60 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 严重级含量分别为  $4.80 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $2.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ <sup>[23]</sup>. 白洋淀表层沉积物营养盐的评价结果见表 2, TN 和 TP 的最低级污染指数 ( $P_i$ ) 均  $\geq 1$ , 表明沉积物已受到污染, 其中烧车淀和光淀张庄地区污染更为严重, TN 的  $P_i$  数值已超过严重级, 底栖生物群落已遭受明显地危害.

##### 3.1.2 重金属的污染评价

内梅罗指数法<sup>[24,25]</sup> 突出了污染最严重的参评

因子, 同时也一定程度上兼顾其他较好的评价因子对总体结果的贡献, 避免计算过程中各因子权重人为赋值的主观影响. 本研究中, 运用内梅罗指数法对 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Ni、Co 及 Sn 进行评价, 参比值均采用中国土壤元素背景值<sup>[26]</sup>, 评价结果见表 3. 整个淀内表层沉积物综合污染指数 ( $I$ ) 大小顺序为  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} = \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Sn} > \text{Co}$ , 其中 Cd 数值为 4.54, 介于  $3 \leq I < 6$ , 综合污染程度评价为重度污染, 但淀内圈头和光淀张庄地区污染更强, 其 Cd 污染指数 ( $P_i$ ) 均大于 4, 为严重污染级别; 其它元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co 及 Sn 的  $I$  数值位于  $1 \leq I < 3$  之间, 综合污染程度为中度污染级别, 而圈头、光淀张庄及枣林庄地区沉积物中元素 Pb 的  $P_i$  数值均大于 2, 表现为重度污染; 枣林庄地区 Cr 也不可忽视, 其  $P_i$  数值达 2.47, 为重度污染.

表 2 白洋淀表层沉积物营养盐的污染指数 ( $P_i$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Pollution index of nutrients in surface sediments of Baiyangdian Lake

编号	区域	TN 最低级	TN 严重级	TP 最低级	TP 严重级
B5	南刘庄	6.91	0.79	1.21	0.36
B12	烧车淀	12.56	1.44	1.18	0.36
B33	端村	7.97	0.91	1.41	0.42
B44	圈头	4.76	0.55	1.14	0.34
B50	东淀	5.27	0.60	1.14	0.34
B62	光淀张庄	12.46	1.43	1.45	0.43
B81	王家寨	5.60	0.64	1.36	0.41
B93	枣林庄	5.04	0.58	1.04	0.31
B103	采蒲台	5.23	0.60	1.00	0.30
平均值		7.31	0.84	1.21	0.36

1) 当沉积物中  $P_i \geq 1$ , 表明已达到相应的污染级别, 其中, 最低级表示沉积物已受污染, 但大多数底栖生物可以承受; 严重级表示底栖生物群落已遭受明显的损害<sup>[23]</sup>

表 3 内梅罗指数法评价表层沉积物的重金属元素<sup>1)</sup>

Table 3 Heavy metals in surface sediments using the Nemerow index method

编号	区域	污染指数 ( $P_i$ )							
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni	Co	Sn
B5	南刘庄	1.20	1.04	1.31	2.91	1.19	1.20	1.15	1.13
B12	烧车淀	1.34	0.66	1.30	3.66	1.02	1.14	0.87	0.89
B33	端村	1.78	1.15	1.39	3.39	1.39	1.41	1.21	1.38
B44	圈头	1.50	2.91	1.39	3.70	1.49	1.82	1.30	1.48
B50	东淀	1.88	1.93	1.72	5.20	1.56	1.49	1.30	1.46
B62	光淀张庄	1.80	2.01	1.91	5.22	1.50	1.69	1.35	1.47
B81	王家寨	1.49	1.65	1.72	3.59	1.50	1.50	1.33	1.23
B93	枣林庄	1.33	2.77	1.29	3.40	2.47	1.34	1.17	1.38
B103	采蒲台	1.19	1.47	1.03	2.65	1.13	1.10	0.98	1.15
平均值		1.50	1.73	1.45	3.75	1.47	1.41	1.18	1.29
综合污染指数 ( $I$ )		1.70	2.39	1.70	4.54	2.04	1.63	1.27	1.39
综合污染程度		中度	中度	中度	重度	中度	中度	中度	中度

1) 当沉积物中  $P_i < 0.5$  或  $I < 1$ , 表明对应某元素污染级别为轻度污染;  $0.5 \leq P_i < 2$  或  $1 \leq I < 3$  为中度污染;  $2 \leq P_i < 4$  或  $3 \leq I < 6$  为重度污染;  $P_i \geq 4$  或  $I \geq 6$  为严重污染<sup>[24]</sup>

##### 3.1.3 潜在生态危害评价

Hakanson 潜在生态风险指数法<sup>[11,26]</sup> 优点在于考虑重金属元素对生物的毒性, 揭示多种污染物的

综合效应, 并能够定量划分潜在生态危害的程度. 本研究运用 Hakanson 生态风险指数法评价白洋淀表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Ni 元素, 采用的

背景值同上,其评价结果见表4.从白洋淀单个重金属潜在生态危害来看,潜在生态危害系数( $E_r^i$ )大小顺序为  $Cd > Pb > Cu > Cr > Ni > Zn$ ,表层沉积物中除Cd外,元素Cu、Pb、Zn、Cr及Ni的 $E_r^i$ 数值均小于40,表明具有轻微的潜在生态风险;除采蒲台外,其他地区Cd的 $E_r^i$ 数值位于80~160之间,具有强的潜在生态风险.

### 3.2 白洋淀表层沉积物元素来源分析

将白洋淀表层沉积物元素数据进行标准化处理后,应用SPSS for windows 19.0软件对元素含量进行相关性分析(表5).淀内沉积物中的Cu、Zn、Cd三者之间以及Co、Ni、Sn三者之间在 $P < 0.01$ 水平上均具有显著相关性,说明有相同的来源或者沉积特征,空间分布特征较为相似;营养元素N、P之间以及与重金属之间无明显相关性( $P < 0.01$ ),此外元素Pb和Cr与其他元素也无明显相关性( $P < 0.01$ ).

为进一步探讨沉积物中元素的来源及其空间变化规律,对研究区河流和白洋淀沉积物元素数据进行系统聚类分析,分析结果见图3(a)和3(b).在组间平均距离为“20”处,河流和白洋淀表层沉积物在分组结果上具有很好地相似性,元素均可分为两大类,第I类包括Zn、Cd、TP、Cu及TN,第二类包括Cr、Ni、Co、Pb及Sn,表明河流和白洋淀沉积物中的元素地球化学作用存在关联或者具有共同的来源.由于研究区沉积物的元素值均高于背景值,府河、唐河、孝义河及潞龙河是白洋淀主要的水源补给,且两者沉积物元素聚类结果相似可以说明河流带来的营养元素和重金属是影响白洋淀表层沉积物元素空间变化的主要因素.但如果在组间平均距离为“5”处进行分类,出现不同的结果,白洋淀沉积物中的元素尤其是TN、TP、Pb及Cr存在变异,与上述相关性分析结果一致,说明淀内存在点源污染.

表4 白洋淀表层沉积物潜在生态危害系数( $E_r^i$ )及危害等级<sup>1)</sup>

Table 4 Potential ecological risk coefficients ( $E_r^i$ ) and hazard rating of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake

编号	区域	潜在生态危害系数( $E_r^i$ )					
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni
B5	南刘庄	6.00	5.20	1.31	87.35	2.38	2.41
B12	烧车淀	6.72	3.31	1.30	109.83	2.03	2.28
B33	端村	8.89	5.76	1.39	101.57	2.78	2.83
B44	圈头	7.52	14.55	1.39	110.92	2.99	3.64
B50	东淀	9.39	9.66	1.72	156.12	3.13	2.97
B62	光淀张庄	8.99	10.05	1.91	156.67	3.00	3.38
B81	王家寨	7.46	8.24	1.72	107.81	3.01	3.01
B93	枣林庄	6.67	13.87	1.29	101.89	4.95	2.68
B103	采蒲台	5.93	7.34	1.03	79.38	2.27	2.21
	平均值	7.51	8.66	1.45	112.39	2.95	2.82
	危害等级	轻微	轻微	轻微	强	轻微	轻微

1) 当沉积物中 $E_r^i < 40$ ,对应某元素或该区域生态危害程度为轻微;  $40 < E_r^i < 80$ 为中等;  $80 < E_r^i < 160$ 为强;  $160 < E_r^i < 320$ 为很强;  $E_r^i > 320$ 为极强<sup>[26]</sup>

表5 白洋淀表层沉积元素相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analysis of elements in surface sediments from Baiyangdian Lake

	TN	TP	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Sn
TN	1.000									
TP	0.548	1.000								
Pb	-0.437	-0.261	1.000							
Cu	0.352	0.778*	0.179	1.000						
Zn	0.163	0.449	0.195	0.765*	1.000					
Cd	0.417	0.619	0.266	0.825**	0.857**	1.000				
Cr	-0.266	-0.288	0.746*	0.129	0.150	0.162	1.000			
Co	-0.267	0.271	0.580	0.655	0.756**	0.553	0.407	1.000		
Ni	-0.193	0.221	0.677*	0.639	0.669*	0.597	0.292	0.848**	1.000	
Sn	-0.269	0.338	0.762*	0.669*	0.499	0.527	0.564	0.853**	0.800**	1.000

1) \*表示 $P < 0.05$ ; \*\*表示 $P < 0.01$

图3(c)为白洋淀不同区域采样点之间的聚类分析结果,南刘庄(B5)、烧车淀(B12)、端村(B33)、东淀(B50)、光淀张庄(B62)、王家寨

(B81)在聚类树形图上成为一个亚类,根据淀中村庄的位置和河流入淀口的分布特征,表明这些区域主要受河流影响;而圈头(B44)、采蒲台(B103)及

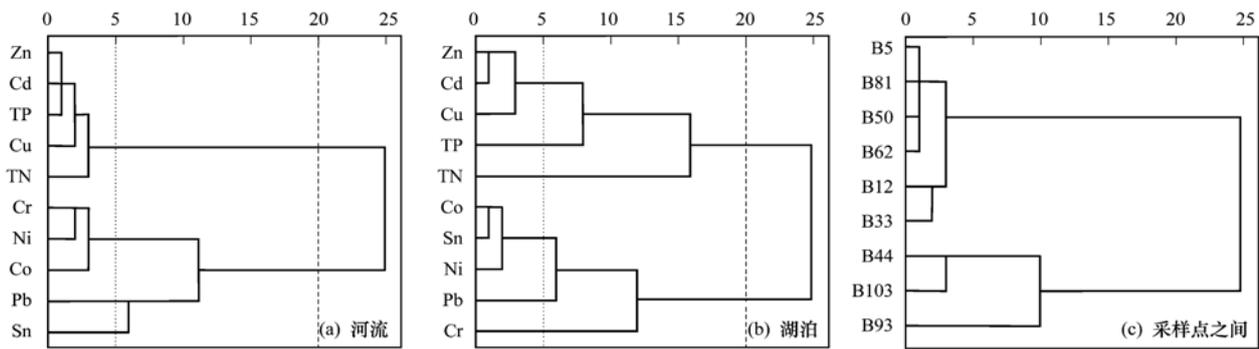


图3 河流、湖泊表层沉积物的元素及采样点之间的系统聚类分析树状图

Fig. 3 Hierarchical clustering dendrogram of elements in river and lake sediments, and sampling sites

枣林庄(B93)分布在另一树簇上,如枣林庄(B93)沉积物的Cr含量高于河流,圈头(B44)Pb含量较高,进一步表明除受河流影响外,由于白洋淀独特的淀-村相间的地貌特征,淀内村庄的点源污染也是导致沉积物元素空间变化的重要因素。

在沉积物重金属方面,杨卓等<sup>[8]</sup>对白洋淀底泥中Cd、Pb、Cu及Zn进行评价,指出底泥受到重金属不同程度的污染,尤其Cd和Pb污染较普遍;Su等<sup>[9]</sup>对表层沉积物中As、Hg、Cd、Cr、Pb、Cu及Zn进行分析,同样认为Cd污染最强,尤其是白洋淀的中部地区,与文本研究结果一致。此外,Zhang等<sup>[11]</sup>通过主成分分析表明Cr与其他重金属在 $P < 0.01$ 水平上无显著相关性,指示Cr可能来源不同或者具有不同的沉积特征,进一步证实了沉积物中Cr在淀内存在变异,但元素Pb分析结果有差异,由于Pb主要来源于含铅汽油的燃烧、含铅工业和生活污水的排放等<sup>[27]</sup>,根据研究区的自身特点,推测可能与取样点位置的不同有关。

在元素来源方面,长期以来,保定市污水处理厂废水通过府河入淀,保定市生产电池的废水排入唐河入淀,印染工业废水通过孝义河进入淀内<sup>[11]</sup>。胡国成等<sup>[16]</sup>采用相关性分析方法对沉积物重金属进行分析,指出府河和白洋淀重金属污染具有相似污染源,保定市工业废水、生活污水及府河沿岸金属冶炼企业很可能是白洋淀地区重金属的主要来源;王珺等<sup>[17]</sup>应用 $\delta^{15}\text{N}$ 示踪法揭示保定市生产生活废水是府河氮污染物的主要来源。由此可以说明通过河流入淀的生活污水和工业废水是淀内营养元素和重金属的主要来源,也是导致元素空间变化的主要因素,这与本文应用多元统计方法得出的结果一致。另外,白洋淀内常住人口约10万人,其生活污水、垃圾溶淋、禽畜养殖排放以及旅游开发等<sup>[20]</sup>对淀内不同地区沉积物中的元素含量变化也不可忽视,尤其是N、P、Pb及Cr。

此外,有研究表明沉积物的粒径对元素含量的

空间变化也有一定的影响,不同粒度的沉积物具有不同的比表面积、质量、有机质含量等,粒径小的颗粒物一般富集营养盐和重金属的能力更强<sup>[28,29]</sup>。但通过白洋淀不同地区沉积物中的粒度分析,粒径 $< 2\ \mu\text{m}$ 的黏土成分占50%以上,说明淀内质地差异较小,对元素含量空间上的变化影响不大。

湖泊表层沉积物中营养盐的释放会引起水体富营养化,重金属的释放则会影响水生生物,最终通过食物链对人类造成危害<sup>[2,30]</sup>。对白洋淀表层沉积物元素进行相关性分析(表5),结果表明总氮、总磷与重金属之间无明显相关性( $P < 0.01$ ),可能是由于白洋淀流域特殊的淀中有村、村中有淀的地貌特征,不同区域的人类活动使得营养盐与重金属的显著相关性很难表现出来。聚类分析结果进一步表明营养元素、Pb及Cr在淀内存在变异,表层沉积物营养盐和重金属含量空间变化的相似性与差异性进一步证实了除区域河流污染外,淀内不同地区人类活动对湖泊营养盐和重金属污染的方式存在空间差异。

#### 4 结论

(1) 白洋淀和河流表层沉积物重金属平均含量高于背景值,淀内整体上呈现出营养元素“西北高东南低”,重金属“中部高南北低”的空间变化特征。

(2) 整个淀内表层沉积物Cd评价为重度污染,其它元素Cu、Zn、Cr、Ni、Co及Sn为中度污染,但枣林庄地区Cr为重度污染;Cu、Pb、Zn、Cr及Ni具有轻微潜在生态风险,而元素Cd除采蒲台地区,具有强潜在生态风险。

(3) 多元统计分析表明,区域河流的面源污染是影响白洋淀表层沉积物元素空间变化的主要原因,但淀内村庄的点源污染引起N、P、Pb及Cr元素的变异也需重视。白洋淀表层沉积物粒径 $< 2\ \mu\text{m}$ 的黏土成分均占50%以上,淀内质地差异较小,对元素含量空间上的变化影响不大。

## 参考文献:

- [1] 国家林业局. 中国湿地保护行动计划[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. 1-6.  
State Forestry Administration. China national wetlands conservation action plan[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000. 1-6.
- [2] Christophoridis C, Dedepsidis D, Fytianos K. Occurrence and distribution of selected heavy metals in the surface sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment using pollution indicators[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2-3): 1082-1091.
- [3] Yuan R Q, Wang S Q, Wang P, *et al.* Changes in flow and chemistry of groundwater heavily affected by human impacts in the Baiyangdian catchment of the North China Plain [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(16): 571.
- [4] Guo W, Huo S L, Ding W J. Historical record of human impact in a lake of northern China: magnetic susceptibility, nutrients, heavy metals and OCPs [J]. Ecological Indicators, 2015, 57: 74-81.
- [5] Zhuang C W, Ouyang Z Y, Xu W H, *et al.* Impacts of human activities on the hydrology of Baiyangdian Lake, China [J]. Environmental Earth Science, 2011, 62(7): 1343-1350.
- [6] 高秋生, 焦立新, 杨柳, 等. 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1616-1627.  
Gao Q S, Jiao L X, Yang L, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1616-1627.
- [7] Dai G H, Liu X H, Liang G, *et al.* Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) and poly chlorinated biphenyls (PCBs) in surface water and sediments from Baiyangdian Lake in North China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10): 1640-1649.
- [8] 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.  
Yang Z, Li G B, Wang D W, *et al.* Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(5): 945-951.
- [9] Su L Y, Liu J L, Christensen P. Spatial distribution and ecological risk assessment of metals in sediments of Baiyangdian wetland ecosystem [J]. Ecotoxicology, 2011, 20(5): 1107-1116.
- [10] 高秋生, 田自强, 焦立新, 等. 白洋淀重金属污染特征与生态风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 66-75.  
Gao Q S, Tian Z Q, Jiao L X, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Baiyangdian Lake [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(1): 66-75.
- [11] 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.
- [12] 高楠楠, 李晓文, 诸葛海锦. 白洋淀台田结构与水体富营养化程度变化的关系研究[J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 259-265.  
Gao N N, Li X W, Zhuge H J. Relationship between raised field structure and eutrophication extent change of water in Baiyangdian Lake[J]. Wetland Science, 2013, 11(2): 259-265.
- [13] Zhao Y, Xia X H, Yang Z F, *et al.* Temporal and spatial variations of nutrients in Baiyangdian Lake, North China [J]. Journal of Environmental Informatics, 2011, 17(2): 102-108.
- [14] 白军红, 房静思, 黄来斌, 等. 白洋淀湖沼湿地系统景观格局演变及驱动力分析[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1634-1644.  
Bai J H, Fang J S, Huang L B, *et al.* Landscape pattern evolution and its driving factors of Baiyangdian lake-marsh wetland system [J]. Geographical Research, 2013, 32(9): 1634-1644.
- [15] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477.  
Gao Y C, Wang J F, Feng Z M. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467-477.
- [16] 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估[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.
- [17] 王珺, 高高, 裴元生, 等. 白洋淀府河中氮的来源与迁移转化研究[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2905-2910.  
Wang J, Gao G, Pei Y S, *et al.* Sources and transformations of nitrogen in the Fuhe River of the Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 2010, 31(12): 2905-2910.
- [18] Hu G C, Luo X J, Li F C, *et al.* Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: concentrations, sources profiles and potential risk [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 22(2): 176-183.
- [19] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4780-4791.  
Zhang M, Gong Z N, Zhao W J, *et al.* Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [20] 张浩, 刘明喆, 缪萍萍, 等. 汛期前后白洋淀主要污染物空间特征及来源分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 28-31.  
Zhang H, Liu M Z, Miao P P, *et al.* Analysis of spatial characteristics and source of main pollutants in Baiyangdian before and after flood season [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(5): 28-31.
- [21] 张婷, 刘静玲, 王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 261-267.  
Zhang T, Liu J L, Wang X M. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(2): 261-267.
- [22] 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. 329-492.
- [23] Leivuori M, Niemistö L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia [J]. Chemosphere, 1995, 31(8): 3839-3856.
- [24] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis [M]. Washington: Scripta Book Co, 1974.
- [25] 郭海全, 杨志宏, 李宏亮, 等. 河北平原表层土壤重金属环境质量及污染评价[J]. 中国地质, 2011, 38(1): 218-225.

- Guo H Q, Yang Z H, Li H L, *et al.* Environmental quality and anthropogenic pollution assessment of heavy metals in topsoil of Hebei Plain[J]. *Geology in China*, 2011, **38**(1): 218-225.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] Duzgoren-Aydin N S. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **385**(1-3): 182-195.
- [28] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [29] 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 等. 太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.
- Xiong C H, Zhang R L, Wu X D, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in southern Jiangsu Province, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 925-934.
- [30] 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.



## CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM <sub>2.5</sub> Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i>	( 1 )
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i>	( 14 )
Characteristics and Sources of Elements in PM <sub>2.5</sub> During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	( 23 )
PM <sub>2.5</sub> Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i>	( 31 )
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i>	( 39 )
Modeling Studies of Source Contributions to PM <sub>2.5</sub> in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo	( 50 )
Chemical Characteristics of Arsenic in PM <sub>2.5</sub> in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i>	( 57 )
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i>	( 65 )
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	( 75 )
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Summer and Winter Season in Xixiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	( 82 )
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i>	( 90 )
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i>	( 98 )
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i>	( 106 )
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	( 115 )
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i>	( 125 )
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i>	( 133 )
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	( 139 )
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaicol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i>	( 146 )
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i>	( 155 )
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i>	( 166 )
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwalli, <i>et al.</i>	( 173 )
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i>	( 183 )
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i>	( 194 )
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	( 205 )
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i>	( 213 )
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i>	( 224 )
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i>	( 232 )
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i>	( 242 )
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	( 253 )
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i>	( 262 )
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	( 273 )
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i>	( 284 )
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i>	( 293 )
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i>	( 304 )
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i>	( 313 )
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i>	( 321 )
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i>	( 330 )
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i>	( 337 )
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i>	( 345 )
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i>	( 353 )
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i>	( 360 )
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i>	( 368 )
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i>	( 377 )
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i>	( 385 )
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	( 394 )
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i>	( 403 )
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i>	( 412 )
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i>	( 420 )
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i>	( 430 )
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i>	( 438 )
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i>	( 449 )
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i>	( 460 )
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i>	( 469 )
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i>	( 479 )
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i>	( 489 )