

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.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铎鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笄文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系	李敏, 唐剑峰, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧彬, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马蛟蛟, 徐颂军 (2496)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征

刘鑫^{1,2}, 史斌^{2*}, 孟晶², 周云桥^{2,3}, 可欣^{1*}, 王铁宇²

(1. 沈阳航空航天大学能源与环境学院, 沈阳 110136; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 雄安新区成立以后,在白洋淀流域实施了一系列污染综合整治措施.为评估白洋淀污染状况并识别主要污染来源,本文在淀内采集了30个水体样品和29个沉积物样品,分析了水体中的COD、TP、TN、NH₄⁺-N和Chla这5项指标和沉积物中TN、TP和重金属(Cd、Zn、Cu、Pb、Ni、As和Cr),结合历史监测数据分析了白洋淀污染时空分布特征及其影响因子.结果表明,2019年白洋淀淀内水体整体处于富营养化状态,30个采样点中“轻度富营养化”点位8个,“中度富营养化”16个,“重度富营养化”6个,与1991~2017年相比,淀区北部地区多数点位的营养程度明显下降,污染整治措施基本上遏制了水体污染加重趋势.沉积物营养盐污染依然严重,TN含量在1 483.7~14 234.1 mg·kg⁻¹之间,平均值为5 054.9 mg·kg⁻¹,变异系数高达46.5%,TP含量在360.3~1 964.4 mg·kg⁻¹之间,平均值为925.4 mg·kg⁻¹,变异系数为25.7%.重金属地累积指数计算表明沉积物中I_{geo}平均值均小于1,属于清洁或轻度污染,主要污染物为Cd、Zn和Cu.重金属生态风险除部分点位(L3、L21、L28和L29)处于重度和严重生态风险等级外,淀区整体处于中等风险水平.整体上,白洋淀水体污染区域正在从北部向南部转移,主要影响因素从外源污染向淀中村和沉积物污染引起的内源污染转变.

关键词: 白洋淀; 富营养化; 时空变化; 沉积物; 生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2127-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909263

Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake

LIU Xin^{1,2}, SHI Bin^{2*}, MENG Jing², ZHOU Yun-qiao^{2,3}, KE Xin^{1*}, WANG Tie-yu²

(1. College of Energy and Environment, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Since the establishment of Xiong'an New District, a series of comprehensive pollution control measures have been implemented in Baiyangdian Lake. To evaluate the pollution status and identify the main sources of pollution of Baiyangdian Lake, 30 water samples and 29 sediment samples were collected in the lake. Five water quality indexes (i.e., concentrations of chemical oxygen demand, total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), NH₄⁺-N, and chlorophyll-a) and three sediment quality indexes (i.e., concentrations of TN, TP, and heavy metals) were measured. Along with historical monitoring data, the spatio-temporal pollution characteristics and their influencing factors in Baiyangdian Lake were analyzed. The results show that the Baiyangdian Lake water is eutrophicated. Of the 30 sampling sites, 8 are “mildly eutrophicated” (accounting for 26.7%), 16 are “moderately eutrophicated” (accounting for 53.3%), and 6 are “severely eutrophicated” (accounting for 20%). Compared with the periods between 1991 and 2017, the water quality of most sampling sites, especially in the northern parts, has improved a lot. This shows that the pollution control measures have basically curbed the gradually increasing trend of pollution in the waterbody. The nutritive pollution in sediment is severe. The concentrations of TN are between 1 483.7 and 14 234.1 mg·kg⁻¹, with a mean value of 5 054.9 mg·kg⁻¹, and the concentration coefficient variation in different sites is as high as 46.5%. The concentrations of TP are between 360.3 and 1 964.4 mg·kg⁻¹, with a mean value of 925.4 mg·kg⁻¹, and the concentration coefficient variation in different sites is 25.7%. Geoaccumulation index calculation shows that the mean I_{geo} value of heavy metals in sediments is less than 1, which indicates cleanliness or slight pollution. The main contributions to heavy metal pollution are Cd, Zn, and Cu. Regarding ecological risk of heavy metals, only some sites (i.e., L3, L21, L28, and L29) are at high and very high risk level, while the remaining sites are at moderate risk level. Overall, the pollution of Baiyangdian Lake changes from the northern part to the southern part, and the main influencing factors also change from external pollution to endogenous pollution caused by the discharge of villages in the lake and the sediments.

Key words: Baiyangdian Lake; eutrophication; spatio-temporal variation; sediments; ecological risk

白洋淀是海河流域大清河南支流流域重要的湖泊,是河北省最大的湖泊,对整个华北地区的生态环境和区域小气候的调节具有非常重要的作用,有“华北之肾”之称.随着流域经济社会的发展,白洋淀水环境和水生态压力增大,2000~2009年间白洋淀出现了严重的富营养化现象,其年度富营指数高

达60~70^[1].2010年后,随着水环境治理力度的加

收稿日期: 2019-09-29; 修订日期: 2019-12-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-002); 国家自然科学基金项目(41807493, 41877509)

作者简介: 刘鑫(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染效应及风险评估, E-mail: 2467238699@qq.com

* 通信作者, E-mail: binshi@rcees.ac.cn; kex@iae.ac.cn

大白洋淀水环境逐渐改善. 特别是雄安新区成立以后, 各级政府通过外源污染管控、内源污染治理、生态补水等措施治理白洋淀水体, 极大地改变了白洋淀的水文、水生态环境^[2]. 科学评估白洋淀水质的时空变化规律, 是评价白洋淀水环境质量、分析污染来源和进一步改善水环境的基础与前提^[3].

目前, 国内外常见的河流水质评价方法包括单因子指标法^[4]、综合污染指数法^[5-7]、主成分分析法^[8]、灰色聚类方法^[9]和人工神经网络^[10,11]等. 综合污染指数法综合考虑多种污染指标的同时具有操作简单、结果精确等特点, 在国内外水环境评价尤其在河流水体营养程度的评价上得到了广泛地应用^[12,13]. 沉积物作为污染物质的最终受体同时也是上覆水域主要的内源污染源^[14]. 其中的有机质矿化后会向水体中释大量氮磷, 成为湖泊富营养化的驱动因素^[15]. 同时沉积物中的重金属也会随水体理化性质的变化存在着向水体中迁移释放的潜在风险^[16]. 沉积物作为水中重金属的重要归宿地又是底栖生物的主要生活场所和食物来源, 存在重金属直接或间接进入食物链并危机人体健康的风险^[17,18]. 因此, 评估沉积物中营养盐和重金属污染程度及潜在生态风险也成为水环境状态评价关注的焦点^[19-21].

本文结合历史监测数据及相关研究, 基于流域水体及沉积物监测数据, 运用改进的综合营养指数法评估白洋淀水环境的时空变化特征; 结合人类活动变化特征, 分析造成白洋淀水环境时空变化的主要原因; 针对淀区沉积物污染依旧严重的现状, 结合综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法评估沉积物污染状况及生态风险水平. 通过探讨白洋淀生态环境整治工程对白洋淀水环境改善效

果, 识别分析目前白洋淀存在的潜在污染源, 以期为进一步生态环境整治工程的实施提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

白洋淀(38°43' ~ 39°02' N, 115°38' ~ 116°07' E)位于河北省中部平原, 淀区平均水深约 2.5 m, 东西长 39.5 km, 南北宽 28.5 km^[22]. 四周以堤为界, 整体地势由西北向东南倾斜, 总面积 366 km², 年平均蓄水量 13.2 亿 m³. 淀区景观由水体、芦苇群落、淀中村三者交错构成^[23]. 白洋淀作为大清河水系中游重要的缓洪滞洪区, 一直承担着上游 9 条河流的洪水调蓄任务, 近年来由于上游修建了许多防洪、除涝、调节和灌溉工程, 部分入淀河流常年干枯断流, 实际入淀河流只有 4 条, 且入淀流量不断降低^[24]. 为了保障白洋淀生态水源和缓解水污染问题, 雄安新区成立后, 各级政府组织实施了引黄入冀补淀、入淀河流综合整治和淀区污染治理等重大工程, 极大地改善了白洋淀的水生态环境.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样点布设

根据淀区地理位置特征, 将整个白洋淀分为 7 个区域: 藻荇淀区、烧车淀区、王家寨区、枣林庄区、圈头区、采蒲台区和端村区. 在不同区域较为开阔的水域结合水文条件进行样点布设, 对水功能相似的区域采用网格补点法进行布点, 共布设 30 个采样点, 平均每 12 km² 布设一个采样点(图 1). 2019 年 5 月, 采集表层水体样品 30 个, 沉积物样品 29 个(L25 点位无沉积物), 采集过程中记录水体 pH、水温、电导率、浊度等指标和沉积物颜色、气味等指标, 并描述周边环境状况.

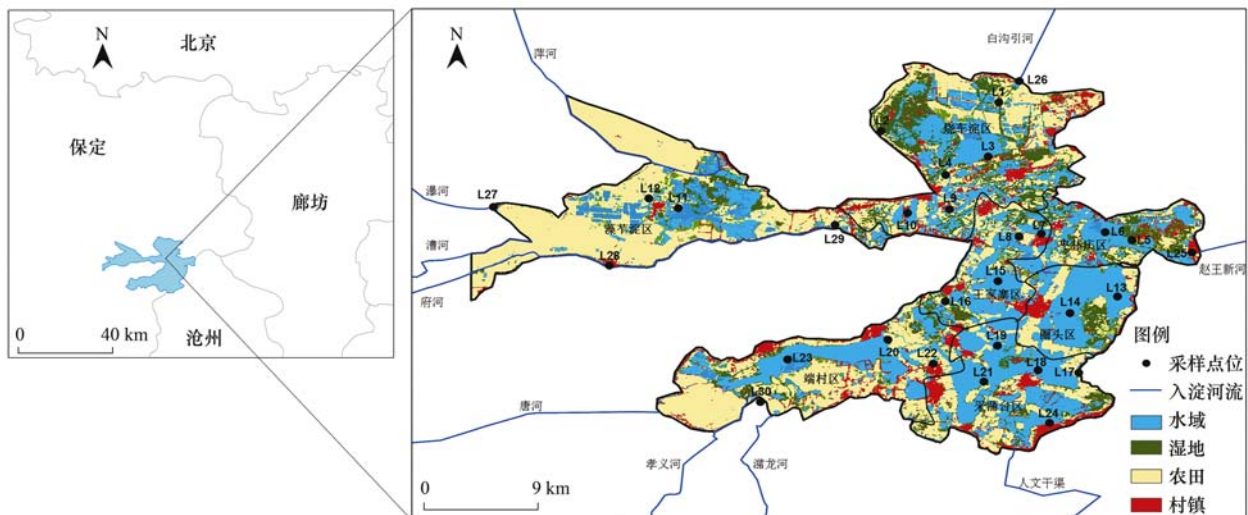


图 1 研究区域及采样点位分布示意

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

1.2.2 样品采集

采用定深采样器采集水面以下 0.5 m 处地表水,样品存储于 1 L 的聚丙烯 (PP) 采样瓶中. 现场取出 500 mL 水样使用 0.45 μm 滤膜进行抽滤,收集剩余滤液 50 mL,加入适量硝酸将酸度调至 pH < 2,用于重金属含量的测定. 得到的滤膜于 -20℃ 避光保存,其余水样置于 4℃ 车载冰箱内避光保存,运输回实验室后进行下一步测定.

采用不锈钢沉积物采样器采集表层沉积物样品,记录沉积物颜色、气味,保存于 300 mL 的聚氯乙烯采样罐中,置于 4℃ 车载冰箱内避光保存,运回实验室进行下一步的分析.

1.2.3 样品分析

水体样品主要测定水温、pH、DO、电导率、COD、TP、TN、NH₄⁺-N、Chla 和重金属含量. 水温、pH、DO、电导率通过美国 HACH 公司的 HQ40D 便携式水质参数仪现场测定. COD 含量测定采用快速消解分光光度法 (HJ/T 399-2007), TP 含量测定采用钼酸铵分光光度法 (GB/T 11893-1989), TN 含量测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB/T 11894-1989), NH₄⁺-N 含量测定采用纳氏试剂分光光度法 (GB/T 7479-1987), 重金属含量采用美国

PerkinElmer 公司的 ICP-MS (型号: NexION 300) 测定 (HJ 700-2014). 抽滤得到的滤膜于 -20℃ 避光保存,在 14d 内采用丙酮-分光光度法测定水样中的 Chla 含量 (HJ 897-2017).

沉积物样品主要测定 TN、TP 和重金属含量. 样品运送回实验室后使用冷冻干燥机干燥,通过球磨研磨至通过 100 目的尼龙筛. 采用德国 Elementar 的 vario EL III 元素分析仪测定沉积物中的 TN 含量,采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解 ICP-OES (美国 Teledyne Leeman Labs 公司,型号: Prodigy 7) 方法测定 TP 含量 (LY/T 1232-2015),采用王水消解 ICP-OES 方法测定重金属含量 (HJ 803-2016).

1.2.4 质量控制及保证

为保证数据的可靠性和精确性,采集过程设置场地空白和运输空白,实验过程中设置程序空白. 所有空白样品中相关指标均低于仪器检出限,说明采集和实验过程中样品未受到污染. 每 10 个样品设置一个平行样品进行同步分析,所有平行样品的分析误差 RSD < 20%,均符合质控要求. 当样品分析结果低于检出限 (LOD) 时,用 0 代替;分析结果低于方法定量限 (LOQ) 时,结果用 0.5 LOQ 代替. 具体分析指标的方法检出限、定量限及回收率见表 1.

表 1 白洋淀各监测指标的检出限 (LOD)、定量限 (LOQ) 与回收率

Table 1 Detection limit (LOD), limit of quantitation (LOQ), and recovery rate of measurement indicators in Baiyangdian Lake

指标类别	指标名称	LOD	LOQ	回收率/%	参考标准
水质指标	COD/mg·L ⁻¹	3.0	20.0	96.2 ± 6.2	HJ/T 399-2007
	TP/mg·L ⁻¹	0.002	0.025	92.5 ± 4.9	GB/T 11893-1989
	TN/mg·L ⁻¹	0.00	0.05	94.2 ± 6.2	GB/T 11894-1989
	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.011	0.050	88.4 ± 7.4	GB/T 7479-1987
	Chla/μg·L ⁻¹	2.0	8.0	89.2 ± 10.8	HJ 897-2017
沉积物指标	营养盐/mg·kg ⁻¹	TN	110.0	440.0	— ¹⁾
		TP	0.066	0.209	93.1 ± 4.7
	重金属/mg·kg ⁻¹	As	0.6	2.4	84.1 ± 17.1
		Cd	0.07	0.28	81.5 ± 4.8
		Cr	2.00	8.00	66.7 ± 1.3
		Cu	0.5	2.0	87.2 ± 2.7
		Ni	2.0	8.0	98.9 ± 3.1
		Pb	2.0	8.0	72.2 ± 5.9

1) “—”表示文章中没有相关数据

1.3 评估方法

1.3.1 水体富营养化评价方法

综合污染指数法 (TLI) 是根据我国各大湖泊数据的统计结果推导而得,在国内富营养化评价中应用广泛^[25]. 选取与富营养化直接相关的 COD、NH₄⁺-N、TN、Chla 和 TP 等 5 项指标作为水体营养程度的评价因子,对白洋淀各个淀区水体营养程度进行评价,综合营养状态指数公式为:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^n W_j \times TLI(j) \tag{1}$$

式中,TLI(∑)为综合营养状态指数;TLI(j)为第 j 种参数的营养状态指数;W_j为第 j 种参数的营养状态指数权重,本研究通过熵权法确定;n 为评价参数的个数.

根据中国湖库主要水质参数相关性分析统计经验值^[26],得到单个指标营养状态指数计算公式(2)

~(6):

$$TLI(COD) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln COD) \quad (2)$$

$$TLI(NH_4^+-N) = 10 \times (7.77 + 1.649 \ln NH_4^+-N) \quad (3)$$

$$TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (4)$$

$$TLI(Chla) = 10 \times (2.46 + 1.086 \ln Chla) \quad (5)$$

$$TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (6)$$

综合营养状态指数越高,富营养状态越高.其中 $TLI(\sum) < 30$ 为贫营养; $30 \leq TLI(\sum) \leq 50$ 为中营养; $TLI(\sum) > 50$ 为富营养.其中, $50 < TLI(\sum) \leq 60$ 为轻度富营养; $60 < TLI(\sum) \leq 70$ 为中度富营养; $TLI(\sum) > 70$ 为重度富营养^[1].

熵权法对指标权重的确立更加客观,本研究在综合营养指数法的基础上通过熵权法确定各营养指标的权重,计算步骤如下:

(1) 确定采样点个数 n , 水质指标个数 m , 构造标准化矩阵: $A = (x_{ij})_{mn}$.

(2) 对矩阵中数据进行标准化处理, 由于评价指标均为极小型指标, 故标准化处理公式为:

$$\frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

得到标准化矩阵 $R = (e_{ij})_{mn}$.

(3) 计算各指标的熵值 H_j :

$$H_j = - \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij} \times \ln P_{ij}}{\ln n}$$

式中, P_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个备选对象指标的权重:

$$P_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sum_{i=1}^n e_{ij}}$$

(4) 确定各营养状态指数的相关权重 W_j :

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)}$$

1.3.2 沉积物污染评价方法

1.3.2.1 营养盐污染评价

采用综合污染指数法评价白洋淀沉积物中营养盐的污染程度,并以1992年加拿大环境部制定的沉积物质量评价指南中能够引起最低级别生态毒性效应的TN和TP浓度为评价标准^[27].沉积物营养盐的评价等级见表2,评价公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (7)$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (8)$$

式中, P_i 表示污染物 i 的污染指数; C_i 表示沉积物中污染物 i 的实际含量; S_i 表示污染物 i 的评价标准, $S_{TN} = 550 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $S_{TP} = 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; FF 表示综合污染指数; F 为 S_{TN} 与 S_{TP} 的平均值; $F_{\max}$ 为 S_{TN} 与 S_{TP} 的最大值.

表2 沉积物营养盐污染程度等级

等级划分	$P_i(TP)$	$P_i(TN)$	FF	污染等级
1	$P_i < 0.5$	$P_i < 1.0$	$FF < 1.0$	清洁
2	$0.5 \leq P_i < 1.0$	$1.0 \leq P_i < 1.5$	$1.0 \leq FF < 1.5$	轻度污染
3	$1.0 \leq P_i < 1.5$	$1.5 \leq P_i < 2.0$	$1.5 \leq FF < 2.0$	中度污染
4	$P_i \geq 1.5$	$P_i \geq 2.0$	$FF \geq 2.0$	重度污染

1.3.2.2 重金属含量评价

采用地累积指数法评估沉积物中重金属污染程度.公式如下^[28]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{k B_n} \right) \quad (9)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_n 表示沉积物中重金属的含量; k 为修正系数,取 $k = 1.5$; B_n 表示地壳中重金属元素含量的背景值,本研究选用我国大陆沉积物地球化学背景值^[29].

地累积指数的评价结果可分:(0)清洁($I_{\text{geo}} < 0$)、(1)轻度污染($0 < I_{\text{geo}} < 1$)、(2)偏中度污染($1 < I_{\text{geo}} < 2$)、(3)中度污染($2 < I_{\text{geo}} < 3$)、(4)偏重度污染($3 < I_{\text{geo}} < 4$)、(5)重度污染($4 < I_{\text{geo}} < 5$)和(6)严重污染($I_{\text{geo}} > 5$)这7个等级.

1.3.2.3 重金属生态风险评价

采用潜在生态风险指数法评估沉积物中重金属风险,计算公式为^[30]:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_n^i}{C_s^i} \quad (10)$$

式中, RI 表示沉积物中重金属的潜在生态风险指数; E_i 表示潜在生态风险系数,重金属 Pb、Ni、Cd、As、Cu、Zn 和 Cr 的毒性系数分别为 5、5、30、10、5、1 和 2; C_r^i 为污染因子; T_r^i 表示单一重金属的毒性系数; C_n^i 表示沉积物中重金属 i 的实测含量; C_s^i 为重金属 i 的参比值,本研究以我国大陆沉积物地球化学背景值作为参比值^[31].潜在生态风险划分标准如表3所示.

表3 重金属生态风险等级划分标准

E_i 范围	RI 范围	生态风险等级
$E_i < 40$	$RI < 150$	低
$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_i < 320$	$600 \leq RI < 1200$	严重
$E_i \geq 320$	$RI \geq 1200$	极严重

2 结果与讨论

2.1 白洋淀水体富营养化时空分布及变化特征

20 世纪 70、80 年代白洋淀水质基本属于Ⅱ类、Ⅲ类水质. 从 90 年代开始, 随着上游水库的修建以及周边区域地下水的超采, 造成了入淀河流的季节性断流, 入淀水量减少^[24]. 而周边地区的工业废水、

生活废水和水产畜禽养殖废水通过各种途径不断汇入淀区, 多种因素共同导致了白洋淀水生态环境的不断恶化. 从 1991 ~ 2010 年, 白洋淀水体富营养化严重, 出现了多次死鱼事件, 严重危害生态系统安全. 2011 ~ 2017 年, 大部分区域水质为 V 类或劣 V 类, 淀区北部的藻荇淀、枣林庄、端村这 3 个区域为重度富营养化水平(表 4).

表 4 白洋淀历史污染状况 (1991 ~ 2017)

Table 4 Historical pollution status of Baiyangdian Lake (1991-2017)			
年份	淀内水体污染状况	沉积物污染状况	文献
1991 ~ 2000	水质开始恶化, 淀区多为Ⅳ、Ⅴ类水, COD、NH ₄ ⁺ -N 和 TP 平均浓度分别为 7.56、0.71 和 0.12 mg·L ⁻¹ ; 烧车淀、王家寨等北部淀区出现富营养化; 发生了多次大面积死鱼事件	沉积物淤积, 污染逐渐升高, 沉积物中 TN 和 TP 的平均含量分别为 1 060.0 ~ 3 610.0 mg·kg ⁻¹ 和 520.0 ~ 990.0 mg·kg ⁻¹	[32 ~ 37]
2001 ~ 2005	上游筑坝拦截和地下水超采导致淀区水量减少, 污水排放量增加, 导致水质恶化加剧, COD、TN 和 TP 平均浓度分别为 9.41、5.45 和 0.49 mg·L ⁻¹	沉积物中营养盐污染严重, 部分点位开始发现 Cd 和 Pb 重金属累积, 存在重金属危害风险	[1, 38 ~ 41]
2006 ~ 2010	淀区水体全面呈现富营养化状态, COD、NH ₄ ⁺ -N 和 TP 平均浓度分别为 9.80、1.80 和 0.96 mg·L ⁻¹ , 发生了一次大规模死鱼事件	沉积物中 TP 含量高达 544.4 ~ 808.2 mg·kg ⁻¹ ; Cd 和 Pb 等重金属开始富集, 为低至中度生态风险	[42 ~ 45]
2011 ~ 2017	多数点位为Ⅴ类和劣Ⅴ类水质, COD、TN 和 TP 平均浓度分别为 13.13、4.52 和 0.87 mg·L ⁻¹ ; 藻荇淀、枣林庄、端村 3 个区域为重度富营养化水平	沉积物严重污染, 主要污染物 TN 和 TP 含量分别为 1 230.8 ~ 9 559.0 mg·kg ⁻¹ 和 344.4 ~ 915.4 mg·kg ⁻¹ ; 重金属中 Cd、Pb 和 As 为重度生态风险	[2, 23, 46 ~ 48]

通过收集 20 世纪 90 年代以来的水质监测数据, 选取与富营养化直接相关的 COD、NH₄⁺-N、TN、Chla 和 TP 这 5 项指标, 进一步分析了白洋淀水体富营养化演变特征(图 2). 整体上, 从 1991 年开始淀内水体富营养化程度一直处于上升趋势, 1991 ~ 2005 年淀内以中营养和轻度富营养为主, 2006 年后, 随水质的恶化加剧淀内 7 个区域营养指数均有升高, 呈全面富营养化状态. 2011 ~ 2017 年, 藻荇淀区、枣林庄区和端村区等 3 个区域已达到重度富营养化水平. 由于北部府河、瀑河等大量生活污水及工业废水排入, 淀区北部富营养化水平普遍高于南部.

这一时期外源河流的输入应是水体富营养化的主要原因之一, 这与王珺等学者的研究结论一致^[49].

雄安新区成立后, 各级政府在白洋淀流域实施了入淀河流污染治理、淀区污染综合治理和污染控制等多项流域综合治理重大工程(表 5), 使得白洋淀水体的生态环境有显著改善. 从图 2 中可以看出, 与 2011 ~ 2017 年相比, 2019 年水体污染程度有所好转, 尤其藻荇淀区、烧车淀区和枣林庄区等北部淀区的营养程度明显下降, 白洋淀水体治理效果显著. 处于淀区中部的王家寨区和圈头区的综合营养指数稍有上升, 但整体上仍处于轻度富营养化水平. 淀区

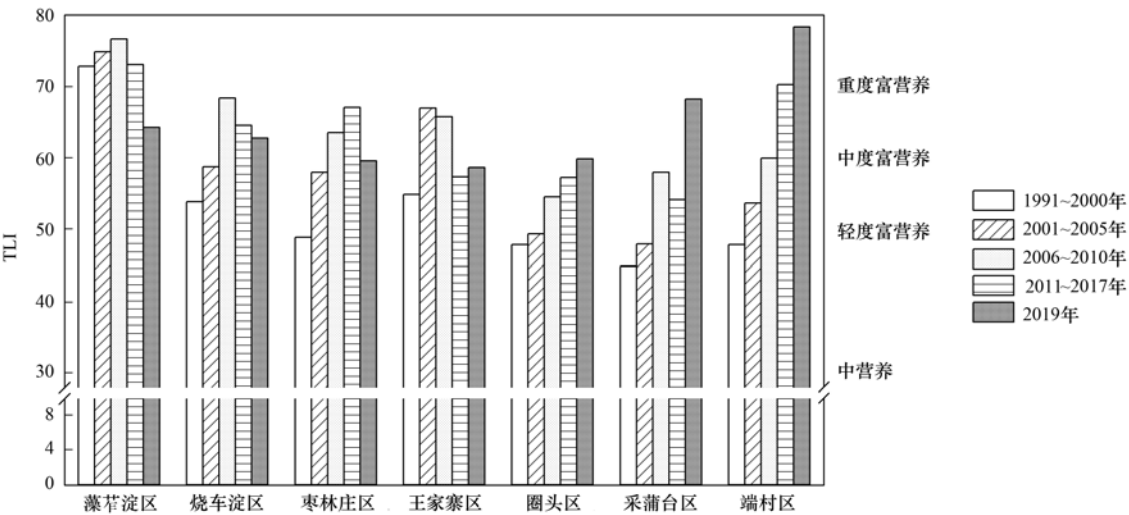


图 2 白洋淀水体营养程度时空变化

Fig. 2 Spatio-temporal variations in water nutrient levels in Baiyangdian Lake

南部采蒲台区和端村区等区域部分点位富营养化程度依然较高,淀中村引起的内源污染问题依然严重.

目前,淀区所有区域水体重金属浓度均满足地表水环境质量标准(GB 3838-2002)Ⅲ类水质要求.

表 5 白洋淀流域主要的污染整治工程(雄安新区成立后)

Table 5 Pollution remediation projects of Baiyangdian watershed after the approval of Xiongan New Area

年份	工程名称	工程内容	水环境改善效果
2017	引黄入冀补淀工程	年均补水量 1.1 亿 m ³	提升新区水利设施保障能力、改善白洋淀生态环境
	淀区及入淀河道垃圾专项整治行动	清理河道内和环淀沿岸居民生活垃圾,清理淀内水面漂浮物垃圾,集中无害化处理	建立淀区水面打捞长效机制,实现入淀河流两岸无垃圾、水面无漂浮物
	唐河污水库污染治理与生态修复工程	北库 7.5 km 内存污水库原位达标治理、固体废物清运与处置,南北库区约 107 万 m ² 生态恢复	清除了存余污水对淀内生态环境威胁,恢复了唐河污水库北库地被植物系统,提升了该区域的生态服务价值
2018	重点纳污坑塘综合治理项目	对白洋淀周边 606 个有水纳污坑塘进行废水废弃物综合治理	所有坑塘水质稳定达到地表 V 类水质要求,消除了坑塘水质对淀内及地下水的威胁
	重污染企业、“散乱污”企业、畜禽养殖清出整治	强化 133 家涉水企业监管,关停取缔类 915 家“散乱污”企业,取缔或搬迁 257 家,整治 121 个畜禽养殖场	从源头上遏制工业废水及畜禽养殖污水对地下水、入淀河流以及淀内水体的污染
2019	府河、孝义河河口湿地水质净化工程	工程包括引配水工程、水质净化工程、物联网工程及配套设施等	实现入淀水质的净化处理以及淀区生态景观品质的提升
	保定市白洋淀上游污水处理厂设施的提标改造	更新淀区上游污水处理厂设施、优化处理工艺、加强管理	出水水质达到“大清河流域水污染物排放标准”重点区域排放限值

由于淀区人类活动产生的生活废水、废弃物的排放,水体中营养盐污染问题依然严重.通过综合营养指数法评价结果显示白洋淀水体整体处于富营养化状态,淀内 30 个采样点中“轻度富营养化”点位 8 个,“中度富营养化”16 个,“重度富营养化”6 个.从富营养化指标分析看,COD 对富营养化贡献率最大占 33.1%,NH₄⁺-N 贡献率为 19.1%,TN 和 Chla 贡献率均为 16.1%,TP 贡献最小为 15.6%.富营养化空间分布差异显著,30 个采样点中 5 个重度富营养化点位(L19、L20、L23、L24 和 L30)及多数中度富营养

化点位均处于端村区和采蒲台区的淀南区域,淀南区域水体营养程度显著高于其他区域(图 3),这一区域中主要污染指标为 COD 和 TP,其贡献率分别为 37.1% 和 17.5%.该区域村落密集、人口众多,污染排放集中,且该区域地势较低,水系连通性与流动性较差,存在污染物的累积风险.样品采集过程中发现越靠近村庄水质越差,与村落周边的水域富营养化更严重的分析结果一致.另外,孝义河作为淀南区域主要的外源输入河流,有着长期接纳蠡吾镇、辛兴镇等制革工业大镇的污染历史,历史水质长期处于

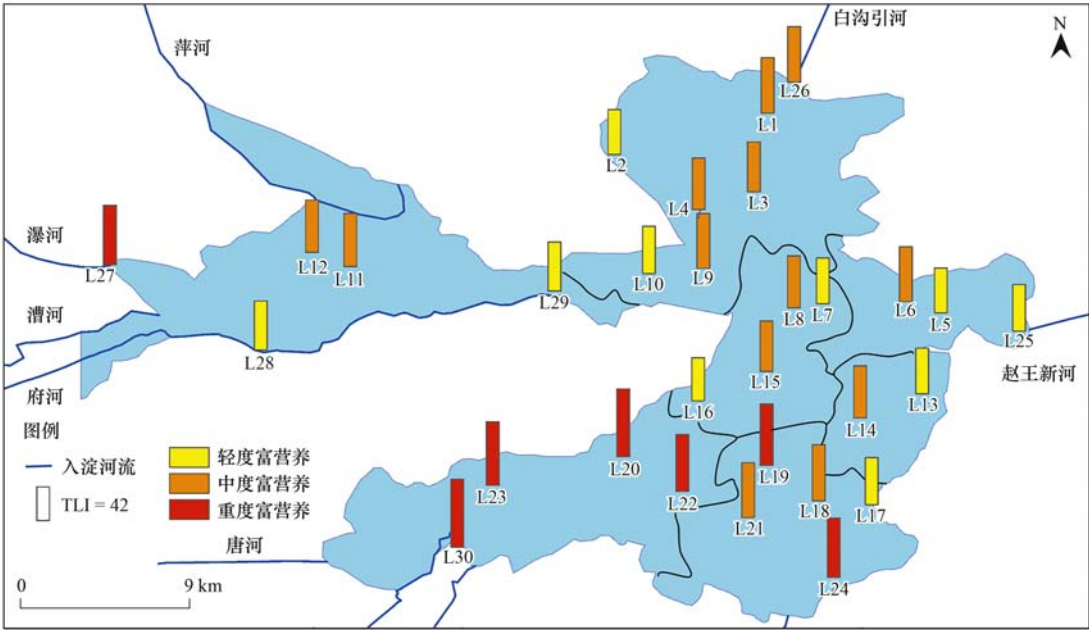


图 3 白洋淀水体富营养化程度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water eutrophication in Baiyangdian Lake

劣 V 类. 新区对入淀河流进行污染管控后, 孝义河水质指标虽有改善, 但本次采样的孝义河入淀处 (L30) 的 COD 值到达 $371.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远超地表 V 类水质标准. 其他水质指标仍处于 IV、V 类水质标准, 外源河流对淀区污染物的输入也是不可忽视的原因之一.

2.2 白洋淀沉积物污染时空分布及变化特征

在白洋淀漫长的污染历史进程中, 淀区沉积物作为污染物的主要汇, 累积了大量的污染物. 随着水体水质的逐渐好转, 含有大量污染物的沉积物将是淀区水体主要的潜在污染源. 通过本次表层沉积物样品分析数据表明: 白洋淀沉积物中主要污染物为 TN 和 TP. 本次采集的所有沉积物样品中 TN 含量均在 $1483.7 \sim 14234.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $5054.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同点位之间 TN 含量变异系数 (CV) 高达 46.5%. TP 含量在 $360.3 \sim 1964.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $925.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同点位之间 TP 含量 CV 为 25.7%. 不同区域营养盐的平均含量也有所不同, TN 含量的最高值点位出现在圈头区, 其平均含量为 $7614.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次为采蒲台区 (TN = $7063.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 最小为枣林庄区 (TN = $2493.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). TP 含量的最高值点位出现在端村区, 其平均含量为 $1206.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次为藻荇淀区 (TP = $1117.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 最小为圈头区 (TP = $704.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

综合污染指数法的评价结果显示白洋淀沉积物营养盐污染严重 (图 4), TN 污染等级高于 TP 污染. 所有点位的 P_i (TN) 得分均处于重度污染等级, 沉积物中 P_i (TP) 得分中 58.3% 的点位处于重度污染水

平, 25% 的点位处于中度污染水平, 仅 3 个点位处于轻度污染 (L2、L5 和 L13). 所有点位 FF 得分均处于重度污染水平, 圈头区最高, 其 FF 得分为 9.79, 其次为采蒲台区 (FF = 9.08), 最小为枣林庄区 (FF = 3.21).

通过地累积指数法计算淀内沉积物中重金属含量水平, 29 个采样点 I_{geo} 值均小于 1, 属于清洁或轻度污染水平. 从重金属种类来看, 平均 I_{geo} 值由高到低依次为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Cr}$ (图 5). 所有重金属中 Cd 的污染程度最高, 其污染等级为 3 级, L3 和 L29 点位 Cd 处于偏重度污染水平, L7、L10、L13、L17、L21 和 L28 等点位处于中度污染, 中度污染以上点位占比为 24.1%. Zn、Cu 总体上处于 2 级污染水平, 其中, 在 L26 点位 Cu 处于中度污染, L3、L22、L28 和 L29 等点位为偏中度污染, 偏中度污染以上点位占比为 17.2%, 轻度污染点位占比为 37.9%, 其余采样点为清洁状态. 在 L20 点位 Zn 处于中度污染, L22、L28 和 L29 等点位为偏中度污染, 偏中度污染以上点位占比为 13.8%, 其余点位 Zn 处于轻度污染以下水平. 所有点位中 Pb、As、Ni 和 Cr 污染大部分处于清洁或轻度污染状态, 均低于 3 级中度污染水平.

采用潜在风险指数法计算了沉积物中 7 种重金属元素的潜在生态风险指数. 总体上, 潜在风险指数平均值为 180.79 (图 6), 生态风险等级整体处于中等风险水平. 从元素组成上来看, Cd 的潜在生态危害最大, 其贡献率高达 76.7%, As 和 Cu 次之, 其贡献率分别为 6.8% 和 6.1%, Cr 的潜在生态危害最小. 从区域来看, 藻荇淀区潜在风险指数值最高, 其

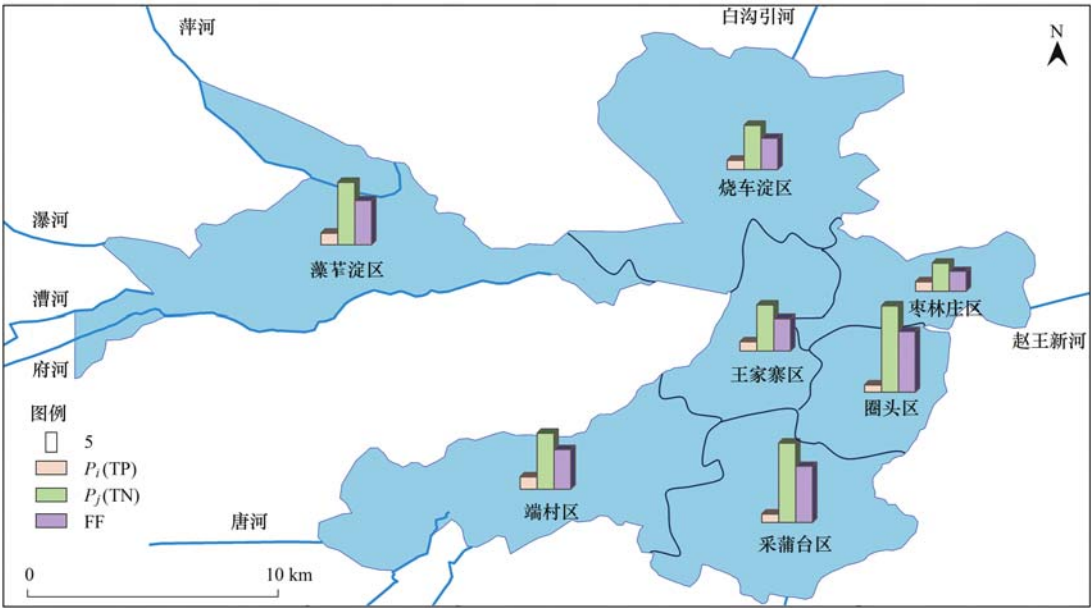


图 4 白洋淀沉积物分区域污染指数 P_i (TP)、 P_i (TN) 和 FF

Fig. 4 Pollution indexes P_i (TP), P_i (TN), and FF in sediments of different area in Baiyangdian Lake

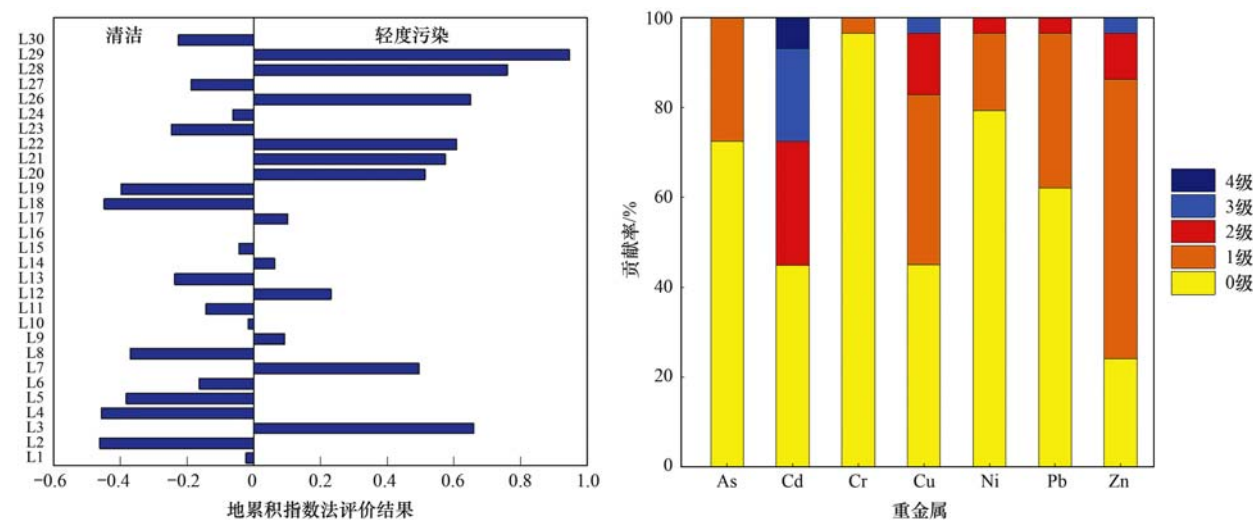


图 5 沉积物中重金属污染等级与不同重金属污染贡献率

Fig. 5 Pollution level of heavy metals in sediment and the contribution rates of different kinds of heavy metals

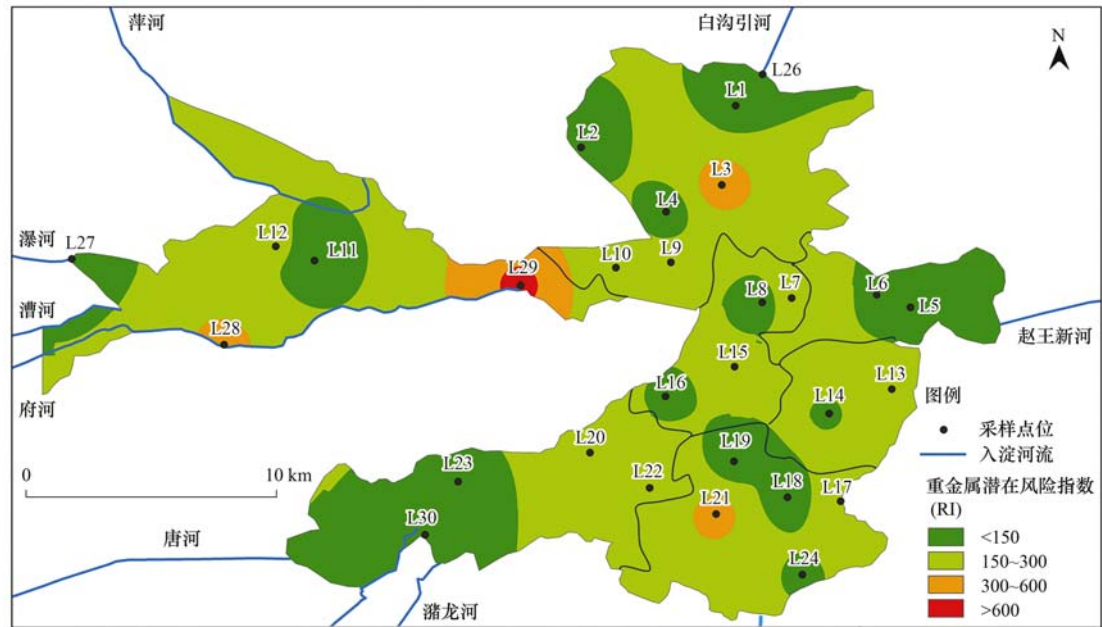


图 6 白洋淀沉积物重金属潜在生态风险分布

Fig. 6 Potential ecological risk distribution of heavy metals in sediments of Baiyangdian Lake

RI 值为 232.08,其次为圈头区 (RI = 216.16),最小为枣林庄区 (RI = 81.09). 其中,藻荇淀区 L28、L29 点位 RI 值分别为 365.76 和 603.03,处于重风险和严重风险等级,该区域位于府河入淀口,府河沿岸曾有大量的“散乱污”企业废水直排现象,工业废水的排放为该区域重金属生态风险较高的主要原因. 另外,部分点位 (L3、L7、L13 和 L21) 潜在风险指数较高,其中 L7 和 L13 的 RI 值接近重风险水平 ($RI_{L7} = 285.74$ 和 $RI_{L13} = 290.33$),而 L3 和 L21 已处于重风险水平. 这些点位分布于淀区内较大的淀中村光淀张庄村、王家寨、圈头、采蒲台附近,曾经为白洋淀主要的水产养殖基地,沉积物样品为黑色有很重的鱼腥味,主要含有过量的饲料和鱼类代谢物,重金属含

量较高与水产饲料中的重金属添加剂有关^[50]. 为进一步分析淀区内重金属污染变化规律,选择了 2010 年淀内 7 个区域的重金属生态风险水平进行对比^[45],从图 7 中可以看出,7 个区域均有不同程度改善. 其中淀区北部烧车淀改善效果最为显著,RI 值从 2010 年的 529.2 降到 172.3,其次为枣林庄区,RI 值从 354.3 降到 81.1. 淀区南部端村、圈头和采蒲台这 3 个区域改善效果较差,RI 值分别减少了 42.7、52.4、6.2. 这与水体营养程度的比较结果一致,由于地势、入淀河流水质改善等原因对白洋淀北部的污染程度改善效果更明显. 沉积物中重金属的生态风险虽有显著改善,但仍有部分点位 (L3、L21、L28 和 L29) 处于重度和严重生态风险等级.

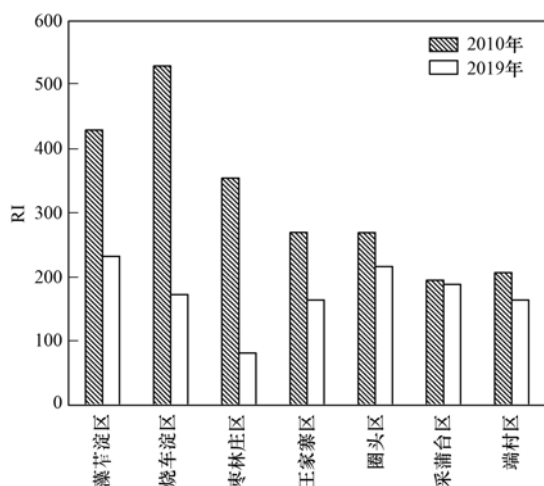


图7 2010年和2019年白洋淀沉积物生态风险变化

Fig. 7 Ecological risk changes of sediments in Baiyangdian Lake between 2010 and 2019

3 结论

(1) 2019年,白洋淀水体整体处于富营养化状态,其中73.3%的点位处于重度和中度富营养化水平,主要分布在淀区南部的端村区和圈头区。与历史研究对比发现,从1991年至2017年之间白洋淀水体呈逐渐恶化的趋势,雄安新区成立后随着白洋淀外源污染整治工程的实施,水体富营养化程度有所改善,重度污染区域从淀北区域转移到淀南区域。

(2) 从白洋淀沉积物分析结果来看,沉积物中营养盐污染严重,所有点位TN污染指数和综合污染指数处于重度污染水平,58.3%的点位TP污染水平处于重度污染水平。沉积物中重金属为清洁或轻度污染水平,主要由Cd、As和Cu这3种重金属贡献。沉积物重金属潜在风险指数表明,除L3、L21、L28和L29等点位处于重度 and 严重生态风险等级外,淀区整体处于中度风险水平。

(3) 雄安新区成立后,多项流域综合治理工程的实施,显著改善了白洋淀水体生态环境,但淀区南部区域部分点位富营养化程度依然较高,淀中村和沉积物污染引起的内源污染问题依然严重。引起白洋淀污染的主要原因正在从外源污染向内源污染转变,白洋淀的下一步治理应重点落在对淀中村的污染管控以及削减沉积物污染程度的生态清淤上。

参考文献:

[1] 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.

[2] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1537-1551.

Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1537-1551.

[3] 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, *et al.* Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(2): 261-267.

[4] 张微微, 孙丹峰, 李红, 等. 北京密云水库流域1980~2003年地表水质评价[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1483-1491.

Zhang W W, Sun D F, Li H, *et al.* Surface water quality assessment in Miyun reservoir watershed, Beijing in the period 1980-2003[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1483-1491.

[5] Bordalo A A, Teixeira R, Wiebe W J. A water quality index applied to an international shared river basin: the case of the Douro River[J]. *Environmental Management*, 2006, **38**(6): 910-920.

[6] Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M, *et al.* River quality analysis using fuzzy water quality index: ribeira do Iguape river watershed, Brazil[J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(6): 1188-1197.

[7] Zhang Y, Guo F, Meng W, *et al.* Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **152**(1-4): 105-121.

[8] Wałtor K, Kmiecik E, Lipiec I. The use of principal component analysis for the assessment of the spatial variability of curative waters from the Busko-Zdrój and Solec-Zdrój region (Poland)-preliminary results[J]. *Water Supply*, 2019, **19**(4): 1137-1143.

[9] Zhou L F, Xu S G. Application of grey clustering method in eutrophication assessment of wetland[J]. *Journal of American Science*, 2006, **2**(4): 53-58.

[10] Xia R, Chen Z. Integrated water-quality assessment of the Huai River Basin in China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, **20**(2): 05014018.

[11] Sarkar A, Pandey P. River water quality modelling using artificial neural network technique[J]. *Aquatic Procedia*, 2015, **4**: 1070-1077.

[12] Zotou I, Tsihrintzis V A, Gikas G D. Performance of seven water quality indices (WQIs) in a mediterranean river[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, **191**(8): 505.

[13] Xiang B, Song J W, Wang X Y, *et al.* Improving the accuracy of estimation of eutrophication state index using a remote sensing data-driven method: a case study of Chaohu Lake, China[J]. *Water SA*, 2015, **41**(5): 753-761.

[14] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰. 太湖重金属和营养盐污染特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 649-657.

Yuan H Z, Shen J, Liu E F. Assessment and characterization of heavy metals and nutrients in sediments from Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 649-657.

[15] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(12): 2120-2125.

Miao H, Shen Z, Jiang Y, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2120-2125.

[16] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2202-2210.

Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2202-2210.

[17] Hickey C W, Clements W H. Effects of heavy metals on benthic

- macroinvertebrate communities in New Zealand streams [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(11): 2338-2346.
- [18] 钟宇, 付广义, 向仁军, 等. 湘江沉积物重金属生态风险及释放通量研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3933-3940.
- Zhong Y, Fu G Y, Xiang R J, *et al.* The ecological risk assessment and releasing flux estimation of heavy metal in the Xiangjiang River sediments[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3933-3940.
- [19] Ke X, Gui S F, Huang H, *et al.* Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China [J]. *Chemosphere*, 2017, **175**: 473-481.
- [20] Varol M, Şen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *CATENA*, 2012, **92**: 1-10.
- [21] Vu C T, Lin C, Nguyen K A, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals sampled in sediments and water of the Houjing River, Taiwan [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(10): 388.
- [22] 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.
- [23] 朱曜曜, 金鑫, 孟鑫, 等. 白洋淀沉积物氨氮释放通量研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2435-2444.
- Zhu Y Y, Jin X, Meng X, *et al.* Study on ammonia nitrogen release flux in the sediment-water interface of Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2435-2444.
- [24] 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.
- [25] Xu M J, Yu L, Zhao Y W, *et al.* The simulation of shallow reservoir eutrophication based on MIKE21: a case study of Douhe Reservoir in North China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**: 1975-1988.
- [26] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 25-27.
- [27] Leland H V, Dean Jr W E. Manual of aquatic sediment sampling. A. Mudroch, J. M. Azcue[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, **16**(1): 296-297.
- [28] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [29] 赵一阳, 郑明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 12-15.
- [30] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [31] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. *中国环境监测*, 1991, **7**(1): 1-6.
- [32] 范兰池, 李漱宜. 白洋淀富营养化评价及防治对策[J]. *河北水利*, 1997, (6): 57-58.
- [33] 刁淑荣. 白洋淀富营养化水平综合评价[J]. *环境科学*, 1995, **16**(S1): 28-29.
- [34] 王朝华, 崔慧敏. 白洋淀水质综合评价[J]. *河北水利科技*, 1995, **16**(2): 46-51.
- [35] 张国峰, 于世繁, 董志民, 等. 白洋淀底质现状及对水体富营养化的影响[J]. *环境科学*, 1995, **16**(S1): 24-27.
- [36] 文丽青. 白洋淀水生态环境的变迁及影响因素[J]. *环境科学*, 1995, **16**(S1): 50-52.
- [37] 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.
- [38] 王旭东. 白洋淀富营养化评价与数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [39] 李经纬. 白洋淀水环境质量综合评价及生态环境需水量计算[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- [40] 齐丽艳. 白洋淀水域环境质量演变评价及防治对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [41] 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.
- [42] 杨丽伟, 陈诗越. 白洋淀水环境质量评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, **13**(3): 457-462.
- Yang L W, Chen S Y. Assessment of water environment quality of Baiyang Lake[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, **13**(3): 457-462.
- [43] 高芬. 白洋淀生态环境演变及预测[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- [44] 申世刚, 乔子路, 秦哲, 等. 白洋淀沉积物中磷的存在形态及垂直变化规律研究[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(9): 2112-2116.
- Shen S G, Qiao Z L, Qin Z, *et al.* Investigation of phosphorus species and vertical variation in the sediments of Lake Baiyangdian[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(9): 2112-2116.
- [45] 赵钰, 董黎明, 张艳萍, 等. 白洋淀沉积物中重金属的形态分布及污染评价[A]. 见: 农业环境与生态安全——第五届全国农业环境科学学术研讨会论文集[C]. 南京: 农业部环境保护科研监测所, 中国农业生态环境保护协会, 2013. 529-537.
- [46] 程磊. 白洋淀水环境现状分析[J]. *水科学与工程学报*, 2016, (5): 50-52.
- Cheng L. Analysis of Baiyangdian water environment situation [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2016, (5): 50-52.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 王珺, 裴元生, 杨志峰. 营养盐对白洋淀草型富营养化的驱动与限制[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(S1): 7-13.
- Wang J, Pei Y S, Yang Z F. Effects of nutrients on the plant type eutrophication of the Baiyangdian Lake [J]. *China Environmental Science*, 2010, **38**(S1): 7-13.
- [50] 周德庆, 李晓川. 我国渔用饲料生产、质量现状与对策[J]. *海洋水产研究*, 2002, **23**(1): 79-83.
- Zhou D Q, Li X C. Status quo of production and quality and developing countermeasure of fishery feed in China[J]. *Marine Fisheries Research*, 2002, **23**(1): 79-83.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Staw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yang, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)