

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析

张甜娜, 周石磊*, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 为揭示白洋淀夏季入淀区上覆水-间隙水氮磷营养盐相互作用, 本研究于2019年7月对白洋淀主要6条入淀河流取样, 通过分析上覆水、间隙水水质特征以及营养盐在沉积物-水界面的扩散通量, 评估了营养盐扩散对沉积物与上覆水的影响。结果表明白洋淀水质呈弱碱性; 溶解氧(DO)含量较低, 为沉积物内源污染物的释放提供了厌氧环境; 氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)浓度在 $0.35 \sim 1.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 作为主要给水来源的潞龙河淀区最高; 硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)浓度在 $0.75 \sim 1.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 溶解性总氮(TDN)浓度在 $0.99 \sim 2.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 位于自然区的S2瀑河含量最高; 溶解性总磷(TDP)浓度在 $0.03 \sim 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 靠近居民区的白沟引河含量最高。间隙水氨氮浓度在 $5.24 \sim 10.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是上覆水体的10倍, 内源污染严重; 硝氮浓度在 $0.36 \sim 0.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 溶解性总氮浓度在 $5.36 \sim 12.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是上覆水体的5倍; 溶解性总磷浓度在 $0.03 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。应用综合污染指数法对水质进行评价发现间隙水污染程度远高于上覆水, 各采样点呈现出严重污染状态。对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TDN和TDP进行交换通量分析显示, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的扩散通量在 $1.71 \sim 7.43 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 作为保定市纳污河流的府河采样点内源氨氮向上覆水扩散速率最快; TDN的扩散通量除白沟引河较低, 其余5个采样点均值达到 $9.11 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 夏季水体中溶解氧含量较低且沉积物-水界面TDN浓度差较大, 导致沉积物中含氮营养盐在厌氧条件下大量释放到上覆水中, 对水质造成严重污染; 萍河采样点TDP的扩散通量是负值表示上覆水体的磷污染物向沉积物聚集的状态, 剩余5个采样点的扩散通量范围在 $0.03 \sim 0.16 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 表现出磷营养盐向上覆水释放的状态。扩散通量显示内源污染物是上覆水污染物的重要来源, 为有效治理入淀区水质, 沉积物氮磷营养盐的清淤处理迫在眉睫。

关键词: 白洋淀; 入淀区; 上覆水; 间隙水; 水质特征; 氮磷营养盐; 扩散通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3176-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011136

Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer

ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei*, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, SUN Yue, YAO Bo, CUI Jian-sheng, LI Zai-xing, LUO Xiao

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In order to reveal the interaction of overlying water-interstitial water nitrogen and phosphorus nutrient salt in summer at the entrance region of Baiyangdian Lake, this study sampled six main rivers in the region during July 2019. An analysis of the overlying water and interstitial water quality characteristics and the diffusion flux of applied nutrients at the sediment-water interface revealed the effects of nutrient diffusion on sediments and overlying water. The overlying water analysis showed that the water quality was slightly alkaline in the Baiyangdian Lake. The content of dissolved oxygen (DO) was lower, which provided an anaerobic environment for the release of endogenous pollutants from sediments. The ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ranged from 0.35 to $1.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the content of ammonia nitrogen was the highest in the Zhulong River, which was the main source of water supply. The nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) content ranged from 0.75 to $1.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The total dissolved nitrogen (TDN) ranged from 0.99 to $2.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the content of TDN was the highest in Puhe River. The content of total dissolved phosphorus (TDP) was 0.03 to $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the content of TDP was the highest was Baigouyin River, which is near the residential area. The results indicated that the content of ammonia nitrogen in the interstitial water was between 5.24 and $10.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was 10 times that of the overlying water, and endogenous pollution in the former was severe. The nitrate nitrogen content ranged from 0.36 to $0.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The total dissolved nitrogen content was between 5.36 and $12.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was 5 times higher than that of the overlying water. The total dissolved phosphorus was between 0.03 and $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. According to integrated pollution index, the degree of interstitial water pollution was much higher than that of overlying water, and the sampling points are seriously polluted. The exchange flux analysis of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TDN, and TDP demonstrated that the diffusion flux of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was between 1.71 and $7.43 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, and the diffusion rate of endogenous ammonia nitrogen to the overlying water was fastest in Fu River, the absorbing river in Baoding. The diffusion flux of total dissolved

收稿日期: 2020-11-17; 修订日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909056); 河北科技大学引进人才科研启动基金资助项目(1181278)

作者简介: 张甜娜(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为天然水体水质演变特征解析, E-mail: ztn1004@163.com

* 通信作者, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

nitrogen was lower in the Baigouyin River, and the other five sample points averaged $9.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. In summer, the dissolved oxygen was lower and the water-sediment had a larger concentration difference, which led to massive nitrogen nutrient of sediment in anaerobic conditions released to the overlying water in great quantities that caused the serious pollution. The diffusion flux of dissolved total phosphorus showed that the sediment of Pinghe River acted as a “sink” of phosphorus nutrients, and the other sampling points ranged from 0.03 to $0.16 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, showing the state of phosphorus nutrient released upward to the overlying water. Finally, diffusion flux indicated that endogenous pollutants are crucial sources of overlying water pollutants. In order to effectively control the water quality in the entrance area, desilting the nitrogen and phosphorus nutrient salt of sediment is urgently required.

Key words: Baiyangdian Lake; entrance area; overlying water; interstitial water; water quality characteristics; nitrogen and phosphorus nutrients; diffusion flux

氮和磷污染物含量超标是水体富营养化的直接威胁因子^[1],随着湖泊富营养化程度的日趋严重,水体中的氮和磷营养盐不断积累并通过沉降汇入沉积物中,使得沉积物成为湖泊水体中氮和磷的重要储存库.当水体流动、季节更替和氧化还原电位改变时,沉积物中的氮和磷营养盐将会以内源污染物的形式向水体释放,从而加剧湖泊的富营养化程度^[2-4].沉积物作为氮磷营养盐的“源”与“汇”^[5],随着夏季水文条件改变释放出的内源污染物将对湖泊水质产生巨大威胁,因此深入探明夏季沉积物上覆水-间隙水营养盐特征与交换通量对于湖泊内源污染物治理意义重大.

白洋淀位于河北省中部,属海河流域大清河南支水系湖泊,总面积为 388 km^2 ,流域面积达 $31\,200 \text{ km}^2$,是华北地区最大的淡水湖泊^[6].随着雄安新区的设立,白洋淀被赋予了重要的地位,其生态环境越来越引起重视;作为华北平原第一大内陆湖,淀区来水主要依靠现存的六大入淀河流,入淀区作为淀区水质的重要节点,上游河流不同且区内水文环境复杂多变,因此控制入淀区氮磷污染物浓度,探明沉积物对上覆水体的影响程度是治理淀区水质的前提,但现今对入淀区河流沉积物氮磷污染物浓度及对上覆水体影响研究较少,主要集中在测定淀区水体和沉积物中典型持久性有机污染物浓度,分析部分淀区存在生态风险的可能性^[7],探究水体富营养化程度^[8]以及北部河口区域和府河沉积物氮磷内源负荷突出需要进行重点整治^[9]等方面.

白洋淀作为雄安新区重要的生态屏障,本实验室对白洋淀的研究发现:白洋淀入淀区水体氮素含量最高,水体中好氧反硝化菌群差异明显^[10];冬季各淀区间隙水 DOM 的相对浓度差异显著,以低腐殖质成分为主^[11];白洋淀冬季沉积物氮磷营养盐污染严重^[12].随着夏季的来临,淀区水文条件变化及底栖扰动等影响,沉积物中的氮磷营养盐极易通过间隙水释放到上覆水中对水质产生巨大威胁.一方面,6条入淀区河流自身水体的污染物含量随着外源污染物输入相对增多;另一方面,夏季水底溶解氧含量较低,沉积物在厌氧条件下可能向上覆水

释放出内源污染物,带来水体水质恶化的风险.然而,目前关于白洋淀入淀河口区沉积物间隙水-上覆水的水质特征及其交换通量却鲜有报道.本研究于2019年夏季,对白洋淀六大入淀河流的入淀河口沉积物-上覆水间营养盐的交换通量进行分析,通过探明沉积物-水界面氮磷营养盐分布规律及交换通量,以期更好地对入淀区污染物进行精准治理,进而保护白洋淀的生态环境.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样点设置

白洋淀属于封闭性湖泊,是华北平原最大的淡水浅湖型湿地^[13],内部主要由淡水湖和湿地组成,保定市环保监测站对白洋淀8个国控监测点监测数据显示:总氮和总磷已成为淀区最主要的水质污染指标,且沉积物内源氮磷释放是导致水体中营养盐浓度较高的重要原因之一.白洋淀地势平坦,淀区水主要是通过六条入淀区河流与外界河流连通^[14],且6个入淀河口上游来水不同^[15],白沟引河将淀区与大清河北支的水系相连通;瀑河与萍河入淀口位置相近,流经容城县;位于西部的唐河通过切断清水河流入淀区;南刘庄府河承担了保定市生活污水;潞龙河上游为黄河,为淀区补充大量水资源.因此该研究分别将采样点设置在白沟引河(S1)、瀑河(S2)、萍河(S3)、端村唐河(S4)、南刘庄府河(S5)和潞龙河(S6)这6条具有代表性的河流入淀河口处(图1).于2019年7月对6个采样点的水样及沉积物进行采集,通过实验室测定上覆水及间隙水的水质,明确白洋淀入淀口水质的基本情况,为从源头上治理白洋淀生态环境提供数据支持;通过明确沉积物营养盐扩散通量,为白洋淀的内源污染的定向治理提供理论基础.

1.2 样品采集与水质测定方法

利用彼得森采泥器采集沉积物样品,采泥器原理为依靠自身重力垂直采集沉积物样品,避免了上覆水和沉积物的相互扰动.采集的沉积物用聚乙烯自封袋密封保存,上覆水装入2L的聚乙烯采样瓶,5℃密封保存带回实验室;采集回的沉积物利用离

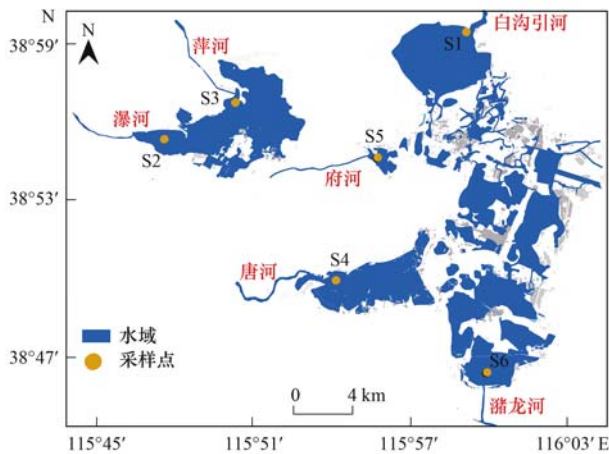


图1 白洋淀水样及沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Distribution map of sediment sampling sites in the Baiyangdian Lake

离心机离心获取实验所需的间隙水。

水体的温度、pH、DO 和 OPR 等环境因子在采样现场利用多参数水质分析仪测定,待测的上覆水和间隙水在进行各项指标测定前均需用孔径 $0.45\mu\text{m}$ 的混合膜进行过滤,氨氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂光度法测定,硝态氮(NO_3^--N)采用紫外分光光度法,溶解性总氮(TDN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,溶解性总磷(TDP)采用钼锑抗分光光度法测定,高锰酸盐指数采用酸性法测定^[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 综合污染指数(P)法

综合污染指数(P)法反映不同河段水体的水质污染程度,便于分级分类;在时间上可以表示一个河段,一个地区水质污染的总的变化趋势,其表达式是^[17]:

$$P = \frac{1}{n} \sum P_i, \quad P_i = \frac{c_i}{c_0}$$

式中, P_i 表示某一评价指标的相对污染指数; c_i 表示某一污染物的实测浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); c_0 表示某一污染物在地表水中的最高允许标准值($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); n 表示参与评价的污染物种类。综合污染指数法评价分级标准包括6个标准: $P \leq 0.20$ 表示水质级别好、 $0.20 < P \leq 0.40$ 表示水质级别较好、 $0.40 < P \leq 0.70$ 属于轻度污染水体、 $0.70 < P \leq 1.00$ 属于中度污染水体、 $1.00 < P \leq 2.00$ 属于重度污染水体和 $P > 2.00$ 属于严重污染水体。

1.3.2 Fick 第一定律

沉积物与上覆水进行物质交换主要是依靠浓度梯度所引起的分子扩散作用。若界面附近水相中的某化学物质浓度随沉积物深度变化近似于直线,其净通量可以用 Fick 第一定律进行计算^[18, 19, 21],公

式如下:

$$F = \Phi \times D_s \times \partial c / \partial x$$

式中, F 表示沉积物-水界面的释放通量 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]; Φ 表示沉积物的孔隙度; $\partial c / \partial x$ 代表沉积物-水界面的浓度梯度($\text{mg}\cdot\text{m}^{-4}$),此处采用沉积物间隙水和上覆水 5 cm 左右的营养盐与深度拟合指数曲线求导所得; D_s 表示沉积物中溶质的扩散系数($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)。由于 D_s 是考虑了沉积物的弯曲效应,但实际中沉积物的弯曲度测量比较困难,通常根据其与孔隙度之间的关系来进行推导^[22],关系式如下:

$$D_s = \Phi D_0 \quad (\Phi < 0.7)$$

$$D_s = \Phi^2 D_0 \quad (\Phi \geq 0.7)$$

式中, D_0 表示无限稀释溶液的理想扩散系数^[20]。对于 NH_4^+-N , $D_0 = 9.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; TDN, $D_0 = 14.21 \times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; TDP, $D_0 = 6.12 \times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; 其计算方法如下:

$$\Phi = \frac{(W_w - W_d) \times 100\%}{(W_w - W_d) + W_d / \rho}$$

式中, W_w 表示沉积物鲜重(g), W_d 表示沉积物干重(g); ρ 表示表层沉积物平均密度与水密度比值,一般取 2.5^[23]。

1.3.3 沉积物营养盐释放对水体贡献率

为了更明确地说明沉积物内源氮磷营养盐的释放对上覆水的影响,在水体充分混合,沉积物向上覆水体释放仅考虑分子扩散的作用下,应用下述公式可以计算出沉积物营养盐在沉积物-上覆水界面的扩散迁移对湖泊水质的影响程度^[20]:

$$a = \frac{F \times T_w / H}{c}$$

式中, a 表示溶质扩散对上覆水的贡献率(%); F 表示沉积物-水界面的释放通量 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]; T_w 表示淀区水体的滞留时间(d),白洋淀作为封闭性湖泊,本研究在进行计算时默认淀区水位的停留时间接近相同; H 为水深(m); c 表示上覆水体营养盐浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

2 结果与讨论

2.1 上覆水-间隙水水质特征

2.1.1 上覆水水质特征

表1为夏季白洋淀入淀区上覆水环境因子数据,各采样点上覆水 pH 值范围为 7.40 ~ 8.71,呈现弱碱性;各采样点夏季溶解氧为 0.41 ~ 1.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,含量较低,有研究表明当 DO 含量较低时,将会威胁到生物生长^[24, 25],影响到碳、氮和磷等循环过程^[26, 27];各采样点氧化还原电位基本呈现出

负值,表明水体呈现出还原状态.综合溶解氧及水体氧化还原电位可知,夏季入淀区水质在水环境出现厌氧、温度升高及降水量增大等变化下,沉积物极有可能释放出内源污染物,造成上覆水体污染严重.各采样点铁和锰的平均含量分别为 $0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,等于或略高于地表水Ⅲ类水体的标准限制.高锰酸盐指数作为地表水体受有机污染物和还原性无机物质污染程度的综合指标,平均含量为 $8.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变化范围在 $6.07\sim10.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,大部分采样点高锰酸盐指数高于地表水Ⅲ类水体的标准限制,其中 S6 潞龙河采样点高锰酸盐指数最高,表明该采样点水体受到的有机物污染物较多.

表 1 白洋淀夏季入淀区上覆水采样点环境参数
Table 1 Environmental parameters of sampling sites in Baiyangdian Lake

采样点	pH	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	OPR / mV	Fe / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mn / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
S1	8.18	0.41	-254	0.17	0.31	9.57
S2	7.40	1.55	-146	0.16	0.39	9.49
S3	8.12	1.87	-116	0.17	0.32	9.58
S4	8.56	0.46	-227	0.23	0.26	7.45
S5	8.71	1.78	45	0.19	0.17	6.07
S6	8.67	0.99	-317	0.17	0.52	10.28

入淀区上覆水体氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、溶解性总氮(TDN)和溶解性总磷(TDP)的浓度如图 2 所示,上覆水 NH_4^+-N 浓度在 $0.35\sim1.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生活污水中含氮有机物受微生物作用的分解产物是 NH_4^+-N 的主要来源,夏季随着人为活动的频繁,白洋淀入淀区上覆水体 NH_4^+-N 较其它季节污染严重^[28];部分淀区呈现出 V 类水质的状态, S6 潞龙河采样点的 NH_4^+-N 值最高,潞龙河作为白洋淀淀区主要的一条给水河流,上游汇入的污染物含量较多^[29],污染物含量增多导致水体 NH_4^+-N 浓度

增加.由黄晓艺等对太湖出入湖河口水质分析可知,白洋淀 NH_4^+-N 浓度高于太湖 NH_4^+-N 浓度,是由于白洋淀地区水生植物错综复杂,周围居住大量居民,人为干扰大,水体污染严重^[30].上覆水 NO_3^--N 浓度在 $0.75\sim1.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 S5 府河和 S6 潞龙河含量最高,可能是夏季外源污染物输入增多导致上覆水体硝氮含量升高.上覆水 TDN 浓度在 $0.99\sim2.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,位于自然区的 S2 瀑河含量最高,瀑河位于自然区,人为干扰较少,淀区内大型芦苇生长茂盛,严重阻碍了水体流动,因此在外界水汇入瀑河时,由于错综复杂的芦苇生长不规则导致水体流动缓慢,造成水体中氮污染物在此处汇集,污染严重. TDP 浓度在 $0.03\sim0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,靠近居民区的 S1 白沟引河含量最高,根据现场采样发现,白沟引河周边居民较多,夏季居民活动频繁,有可能是周边生活污水的排入,导致该采样点水质 TDP 含量较高.

2.1.2 间隙水水质特征

采用离心法获取各入淀口沉积物中实验所需的间隙水,各采样点间隙水的氮磷营养盐指标如图 3 所示. NH_4^+-N 分布如图 3(a) 所示,平均浓度为 $7.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,浓度范围在 $5.24\sim10.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是上覆水 NH_4^+-N 浓度的 10 倍以上; S3 萍河采样点 NH_4^+-N 浓度最高,现场对其采样发现,该入淀河流水深较浅,水生植物杂乱生长且水体溶解氧含量较低,沉积物在此处可能会释放出内源氨氮污染物,因此造成 NH_4^+-N 浓度较高;由于夏季人为活动频繁,生活污水的排放导致水体中 NH_4^+-N 污染物含量较高^[31],白洋淀入淀区沉积物-水界面较高的浓度差,也极易造成 NH_4^+-N 向上覆水释放. NO_3^--N 分布如图 3(b) 所示, NO_3^--N 平均浓度为 $0.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,浓度变化范围

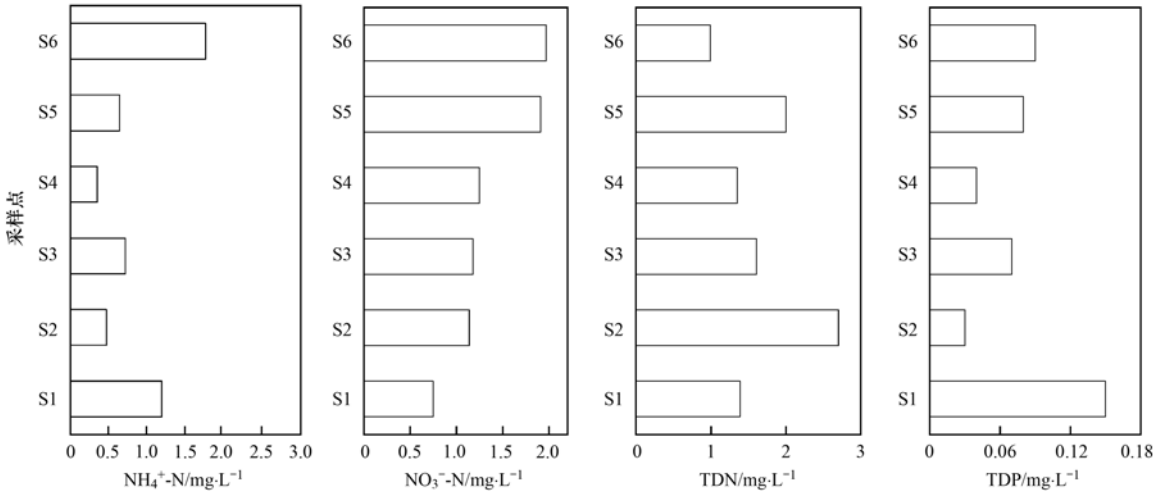


图 2 白洋淀采样点上覆水水质基本指标
Fig. 2 Basic water quality indicators in sampling points of Baiyangdian Lake

在 $0.36 \sim 0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各采样点含量较低. TDN 分布如图 3(c) 所示, 平均浓度为 $8.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度变化范围在 $5.36 \sim 12.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各采样点上覆水与间隙水的 TDN 含量存在较大差异, 其中 TDN 的最大值出现在 S6 潞龙河入淀口, 现场对潞龙河入淀口采样时发现, 该采样点虽远离居民生活区, 但沉水植物较多, 可能是夏季随着沉水植物的生长腐烂, 沉水植物根茎中的含氮污染物释放到沉积物中^[32], 潞龙河由于长时间容纳各污染物, 造成该入淀河流沉积物中氮污染物含量升高, 对水质产生潜在的风险. TDP 分布如图 3(d) 所示, TDP 的浓度范围在 0.03

$\sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 和 TDN 呈现的结果相似, 依旧是潞龙河入淀口的 TDP 值最大, 可能是由于潞龙河周边即为养殖业为主的淀区, 历史投加的饵料过多造成沉积^[33, 34]; 导致潞龙河入淀口汇集了大量的含磷污染物, 长时间的积累下造成自身沉积物中磷营养盐含量较高^[35]. 通过实验室对白洋淀间隙水各项氮磷指标的测定分析可知, 白洋淀夏季各入淀区沉积物氮磷污染物浓度均比上覆水体高, 上覆水与间隙水二者间的浓度差较大, 可能会造成氮磷污染物在二者间的迁移转化, 因此应加紧对六大入淀口沉积物氮磷污染物的治理.

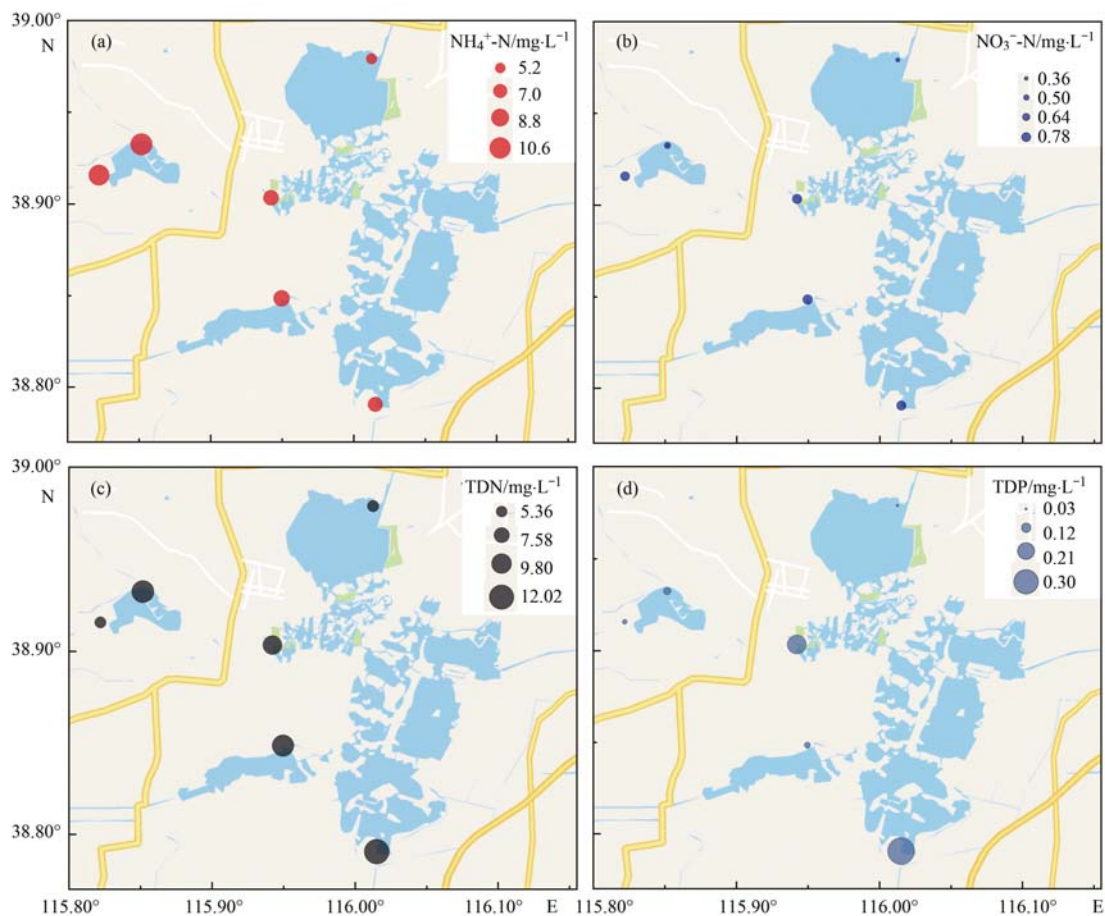


图 3 白洋淀采样点间隙水水质指标

Fig. 3 Interstitial water quality indicators in sampling points of Baiyangdian Lake

2.2 水质综合污染指数评价法

为了明确 6 条河流入淀区上覆水及间隙水的水质污染状况, 应用综合污染指数法对水质进行评价. 如图 4(a) 所示, 虚线为重度污染状态和严重污染状态分界线 (综合污染指数值为 2.00), 6 条河流入淀区间隙水综合污染指数法得分在 3.85 ~ 7.72 间, 均在分界线之上处于严重污染状态, 其中 S6 潞龙河采样点综合得分最高, 若不及时进行治理, 潞龙河间隙水污染状态极易恶化, 向严重污染水体转化; 潞龙河入淀口沉积物污染物较多, 大多呈现黑臭特征, 随

着夏季水文环境的变化, 水体溶解氧含量较低, 沉积物在厌氧条件下通过间隙水向上覆水释放出内源污染物, 潞龙河上游是黄河来水, 作为白洋淀主要给水河流^[36], 因内源释放会严重影响入淀水质, 因此继续开展河口的内源治理. 如图 4(b) 所示, 从下到上两条虚线分别为轻度污染状态和中度污染状态 (综合污染指数值为 0.70)、中度污染状态和中度污染状态分界线 (综合污染指数值为 1.00), 上覆水除 S4 唐河水质为中度污染状态, 其余均为重度污染状态; 其中白引沟河采样点综合得分最高, 白引沟河

历史上周边居民较多,由于环保意识较差导致白沟引河历史上汇入的生活污水较多,导致水体污染较

重. 通过综合污染指数评分可知,间隙水的污染程度远高于上覆水.

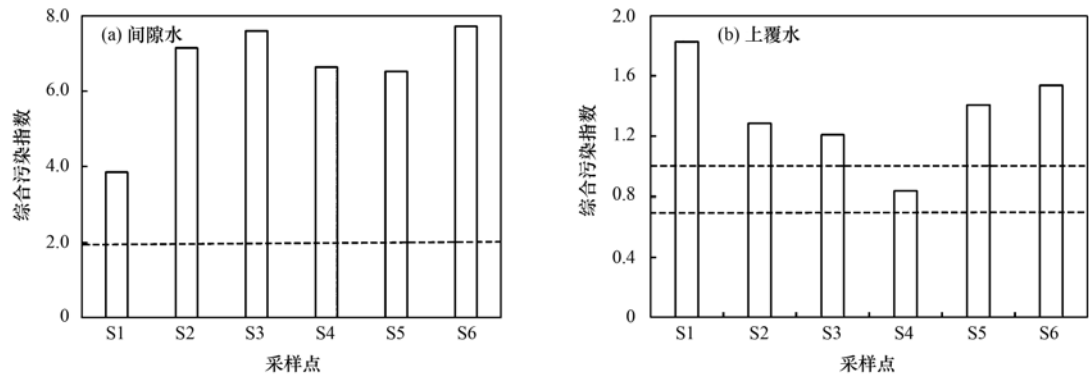


图4 入淀区综合污染指数评价

Fig. 4 Evaluation of comprehensive pollution index at entrance area

2.3 沉积物-水界面营养盐交换通量分析

2.3.1 沉积物-水界面氮磷营养盐扩散通量

沉积物作为湖泊水体营养盐的“源”或“汇”,在湖泊水体流动等情况下,沉积物与上覆水中的氮磷营养盐会相互影响,从而影响湖泊水质^[37].由上述对6个采样点上覆水以及间隙水中氮磷营养盐浓度分析可知存在明显的浓度差异,在一定条件下沉积物与上覆水中的营养盐会通过间隙水这一媒介进行扩散而互相影响.

Fick 第一定律表明,当扩散通量为正值时代表营养盐从沉积物向上覆水扩散,负值时表示营养盐由上覆水向沉积物扩散.上述水质分析表明白洋淀入淀区 TDN 和 TDP 含量严重超标且 NH_4^+ -N为入淀区夏季主要污染指标,为探明间隙水-上覆水氮磷营

养盐的交换通量,对3个基本指标进行扩散通量分析,如表2所示.结果显示, NH_4^+ -N的扩散通量均为正值,6个采样点的扩散通量范围在 $1.71 \sim 7.43 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,均值为 $4.32 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,其中S5府河采样点的扩散速率值最高,证明府河沉积物中 NH_4^+ -N污染物向上覆水扩散现象明显;现场对府河采样发现水体透明度低且沉积物呈现出黑臭状态,作为流经保定市且接受市区排放的工业及生活污水的纳污河流^[38],与同处于河北境内的滏阳河沉积物污染状况类似^[39],相关部门应该对府河入淀口沉积物污染严重的情况给与高度重视,防止大量内源 NH_4^+ -N污染物释放对水质造成更严重的污染.6个采样点的TDN扩散通量与内源 NH_4^+ -N的扩散趋势一致,表明白洋淀6条入淀区的沉积物是含氮营养

表2 沉积物-水界面 NH_4^+ -N、TDN和TDP的孔隙度、扩散系数和扩散通量¹⁾

Table 2 Porosity, diffusion coefficient, and flux of NH_4^+ -N, TDN, and TDP at the sediment-water interface							
指标	采样点	拟合曲线	R^2	Φ	$D_0 \times 10^{-6}$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$D_s \times 10^{-6}$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	F / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
NH_4^+ -N	S1	$y = 0.269e^{0.566x}$	0.650	0.72	9.80	5.08	1.71
	S2	$y = 0.457e^{0.695x}$	0.792	0.80	9.80	6.27	4.61
	S3	$y = 0.489e^{0.536x}$	0.920	0.84	9.80	6.91	4.88
	S4	$y = 0.153e^{0.938x}$	0.612	0.88	9.80	7.59	2.60
	S5	$y = 0.181e^{2.219x}$	0.750	0.77	9.80	5.81	7.43
	S6	$y = 0.324e^{1.163x}$	0.851	0.77	9.80	5.81	4.66
TDN	S1	$y = 0.58878e^{0.4688x}$	0.550	0.72	14.21	7.37	1.85
	S2	$y = 2.07598e^{0.4681x}$	0.670	0.80	14.21	9.09	8.93
	S3	$y = 0.75993e^{0.8768x}$	0.600	0.84	14.21	10.03	8.70
	S4	$y = 0.81947e^{0.7879x}$	0.590	0.88	14.21	11.00	9.27
	S5	$y = 0.75125e^{1.2997x}$	0.780	0.77	14.21	8.43	9.48
	S6	$y = 0.65657e^{1.1862x}$	0.890	0.77	14.21	8.43	9.15
TDP	S1	$y = 0.04214e^{0.236x}$	0.700	0.72	6.12	3.17	0.03
	S2	$y = 0.01747e^{0.9548x}$	0.670	0.80	6.12	3.92	0.08
	S3	$y = 5.02653e^{-3.7461x}$	0.860	0.84	6.12	4.32	-0.01
	S4	$y = 0.11888e^{-0.2053x}$	0.770	0.88	6.12	4.74	0.06
	S5	$y = 0.12184e^{-0.3809x}$	0.62	0.77	6.12	3.63	0.12
	S6	$y = 0.12835e^{-0.5847x}$	0.73	0.77	6.12	3.63	0.16

1) 自沉积物向上覆水扩散则F为正值,自上覆水向沉积物扩散即沉积物吸收则F为负值

盐的“源”且间隙水向上覆水的扩散速率不同, S1 白沟引河采样点扩散通量最小, 其余 5 个采样点的扩散通量范围在 $8.70 \sim 9.48 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 且均值达到了 $9.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, S5 的扩散速率依旧最快; 通过表 2 对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 及 TDN 扩散通量的计算结果可知, 虽然各采样点的扩散速率不同, 但白洋淀入淀区作为氮污染物的“源”, 要及时对沉积物氮污染物进行治疗, 防止造成内源污染物大面积污染淀区水质. 6 个采样点 TDP 的扩散通量中, S3 萍河采样点为负值, 表明 S3 萍河采样点为磷污染物的“汇”, 可能是萍河采样点水生植物较多, 在外界河流流经该采样点时, 由于淀区内的大型水生植物长时间无人管理, 造成水体连通性和流动性较差^[40], 导致该区域上覆水体污染物含量较高, 从而导致磷污染物由上覆水扩散到沉积物中; 其余 5 个采样点的扩散通量范围在 $0.03 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 均值为 $0.09 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 表现为磷污染物的“源”. 随着雄安新区治理速度的提升, 外源污染物已经得到了有效治理管控, 因此沉积物内源污染物作为水质污染的主要来源, 白洋淀入淀区沉积物的清淤治理已迫在眉睫.

2.3.2 沉积物氮磷扩散特性及影响分析

间隙水是连接沉积物与上覆水的重要媒介^[41], 界面间的浓度差可以造成氮磷营养盐在沉积物与上覆水间释放扩散. 针对夏季水体主要的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 污染物, 白洋淀入淀区上覆水-间隙水界面 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度差较大, 间隙水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度高达上覆水体的 10 倍, 内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 扩散通量均值为 $4.32 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 整体呈现出向上覆水释放的趋势. 由 TDN 在两个界面的浓度进行分析可知, 间隙水的 TDN 浓度范围在 $5.36 \sim 12.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上覆水的 TDN 浓度范围在 $0.99 \sim 2.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 间隙水的 TDN 浓度远高于上覆水, 二者的浓度差异表明, 沉积物中的氮营养盐有向上覆水扩散的潜在趋势; 表 2 显示 6 个采样点的扩散通量在 $1.85 \sim 9.48 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 表明 TDN 在各采样点虽然存在沉积物向上覆水扩散的趋势, 但扩散速率不同, 一方面是因为白洋淀的 6 条入淀口河流分别对应不同的上游水系^[42,43], 上游水系水质可直接影响入淀口水质; 另一方面可能是 6 条入淀口水质所处水环境不同^[36], 其中 S5 府河采样点的扩散速率最快, 现场采集的府河沉积物呈现出黑臭状态, 表明该条入淀河流随着历史的积累, 沉积物所受污染程度越来越严重, 随着夏季来临, 下覆水体的溶解氧含量降低^[44], 沉积物在厌氧条件下向水体中释放大量的污染物, 从而导致府河沉积物的内源污染物向上覆水扩散速率加快. 大量内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和

TDN 释放将会为后期淀区水体与沉积物中氮素污染治理与修复带来困难, 亟待相关治理部门的重视并考虑沉积物氮污染特征, 采取分区和分期治理的相关措施.

通过对 TDP 的扩散通量计算可知, 6 条入淀区河流是磷营养盐的“源”与“汇”. S3 萍河采样点的扩散通量为负值, 表示此采样点夏季上覆水体会向沉积物释放磷营养盐; 其余采样点扩散通量为正值, 显示沉积物是磷营养盐的“源”. 刘佳等在黄柏河流域沉积物磷释放通量分析中, 三座水库沉积物都表现为磷的“源”, 且含量处于高浓度污染水平^[45], 明显高于白洋淀流域磷含量. 氮磷污染物作为水质富营养化的主要污染物^[46], 若不加紧对入淀区沉积物磷污染物的治理, 对于上覆水乃至整个淀区的生态环境将是一个严重的隐患.

2.3.3 沉积物氮磷扩散对白洋淀水质影响

为进一步明确白洋淀入淀区沉积物氮磷营养盐对上覆水的影响, 通过对白洋淀入淀区内源污染物扩散对上覆水的影响结果可知(表 3), 内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 扩散对上覆水污染物的影响范围在 $7.5\% \sim 76.00\%$, 各采样点间的扩散影响差异悬殊; S1 白沟引河采样点沉积物内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 对上覆水的影响最小, 由表 3 数据可知, 虽然间隙水与上覆水间的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度在该点形成了浓度差且扩散通量为 $1.71 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 但由于该点水体深度最大, 从而减弱了此处内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 释放对上覆水体的影响; S2 瀑河、S3 萍河和 S5 府河这 3 个采样点沉积物内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 对上覆水的影响均高于 73% , 其中 S2 瀑河和 S3 萍河扩散通量值相近, 虽浓度差较小但由于 S2 水深较浅, 因此内源 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 释放对上覆水体的影响最大, S5 府河影响范围达 75.69% 主要因素为此点 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 扩散通量远高于其他 5 个采样点. 沉积物 TDN 对淀区水质的影响程度中, 虽然 S6 潞龙河采样点的浓度差不是最大的, 但对上覆水的污染确是最严重的, 达到了 73.64% , 主要是因为该点沉积物与上覆水的 TDN 扩散通量值偏大, 二者形成了较大的扩散梯度, 导致沉积物对该点水质的影响最大; S2 瀑河和 S3 萍河影响范围分别为 59.59% 和 58.74% , 虽然 TDN 扩散通量值不是最大, 但由于水深较浅, 浓度差也较大, 因此此 2 个采样点内源 TDN 释放对上覆水产生较大影响. TDP 分析中沉积物对水体磷污染的影响范围在 $-3.89\% \sim 14.17\%$, 扩散通量、水深和界面浓度同样对其贡献率产生影响. 通过对白洋淀入淀区沉积物内源营养盐对水体贡献率的分析可知, 影响沉积物营养盐扩散的因子, 与扩散通量、水深和界面浓度差相关. 当白洋淀的外部污染

源得到控制时,沉积物间隙水和上覆水体的营养浓度差异将驱动沉积物内源营养负荷的释放,因此在扩散通量低的地方,也要注意其上覆水体浓度和水深等因素,关注其对水体的影响程度。

表 3 白洋淀入淀区沉积物-水界面扩散通量和浓度差及营养盐扩散对水体的贡献率

Table 3 Diffusion flux and concentration difference at the sediment-water interface and contribution of nutrients diffusion from sediment to water body in Baiyangdian Lake

指标	采样点	F $/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	H/m	c $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$a/\%$
NH_4^+-N	S1	1.71	3.81	1.19	7.50
	S2	4.61	1.11	0.47	76.00
	S3	4.88	1.84	0.72	73.67
	S4	2.60	2.50	0.35	59.42
	S5	7.43	2.24	0.64	75.69
	S6	4.66	2.51	1.76	21.10
TDN	S1	1.85	3.81	1.39	6.99
	S2	8.93	1.11	2.70	59.59
	S3	8.70	1.84	1.61	58.74
	S4	9.27	2.50	1.35	54.93
	S5	9.48	2.24	2.00	42.32
	S6	9.15	2.51	0.99	73.64
TDP	S1	0.03	3.81	0.15	1.05
	S2	0.08	1.11	0.03	8.05
	S3	-0.01	1.84	0.07	-3.89
	S4	0.06	2.50	0.04	12.00
	S5	0.12	2.24	0.08	13.40
	S6	0.16	2.51	0.09	14.17

3 结论

(1)白洋淀入淀区夏季水体呈弱碱性,溶解氧含量较低,间隙水氮磷污染物含量严重超标,与上覆水形成了明显的浓度差,表明沉积物营养盐存在向上覆水释放的潜在趋势;综合污染指数显示间隙水呈现出重度污染状态,上覆水除白沟引河为中度污染,其余均为轻度污染状态;入淀区间隙水严重的氮磷污染应引起相关部门的重视,及时对其进行治理。

(2)氮磷作为白洋淀夏季入淀区主要的污染指标,对内源 NH_4^+-N 、TDN 和 TDP 进行扩散通量研究显示,各淀区内源污染物的扩散通量值存在差异,内源 NH_4^+-N 和 TDN 扩散值都是正值,表明白洋淀入淀区沉积物是内源氮污染物的“源”,南刘庄府河的扩散通量值最大,说明该点沉积物向上覆水释放的内源氮污染物速率最快;TDP 扩散通量显示入淀区既是磷污染物的“源”也是“汇”,潞龙河的扩散通量值最大,污染物的释放最快。

(3)通过对沉积物内源污染物对上覆水的贡献率估算显示,白洋淀 6 条入淀河流河口内源营养盐

对上覆水的影响主要依据间隙水的分子扩散作用,同时与各点水深和浓度相关,因而白洋淀在外源污染物得到有效控制后,应重点关注内源营养盐释放对上覆水环境的影响。

参考文献:

[1] Conley D J, Paerl H, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication by reducing both nitrogen and phosphorus [J]. Science, 2009, **323**(5917): 1014-1015.

[2] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. Hydrobiologia, 2003, **506-509**(1-3): 135-145.

[3] Bhagowati B, Ahamad K U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, **19**(1): 155-166.

[4] Yao J P, Wang G Q, Xue B L, *et al.* Assessment of lake eutrophication using a novel multidimensional similarity cloud model [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **248**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109259.

[5] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **254**(1-3): 241-248.

[6] Yang W, Yan J, Wang Y, *et al.* Seasonal variation of aquatic macrophytes and its relationship with environmental factors in Baiyangdian Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135112.

[7] 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.

[8] 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.

[8] 刘鑫, 史斌, 孟晶, 等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 [J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2127-2136.

[9] Liu X, Shi B, Meng J, *et al.* Spatio-temporal variations in the characteristics of water eutrophication and sediment pollution in Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2127-2136.

[9] 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.

[10] 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.

[10] 周石磊, 孙悦, 岳翥丞, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 [J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2177-2187.

[11] Zhou S L, Sun Y, Yue G C, *et al.* 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 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2177-2187.

[11] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于 UV-vis 和 EEMs 解析白洋淀冬季冰封期间隙水 DOM 的光谱特征及来源 [J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 604-614.

[12] Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based

- on UV-Vis and EEMs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 604-614.
- [12] 李再兴, 孙悦, 张艺冉, 等. 白洋淀冰封期沉积物中氮赋存形态及分布特征[J]. *环境工程*, 2019, **37**(12): 29-33.
Li Z X, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Occurrence and distribution characteristics of nitrogen in sediments of baiyangdian lake during the icebound period[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(12): 29-33.
- [13] 向语兮, 王晓, 单保庆, 等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(6): 2237-2246.
Xiang Y X, Wang X, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution, fractionation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(6): 2237-2246.
- [14] Wang W J, Yi Y J, Yang Y F, *et al.* Impact of anthropogenic activities on the sediment microbial communities of Baiyangdian shallow lake[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, **35**(2): 180-192.
- [15] Yan S J, Wang X, Zhang Y L, *et al.* A hybrid PCA-GAM model for investigating the spatiotemporal impacts of water level fluctuations on the diversity of benthic macroinvertebrates in Baiyangdian Lake, North China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **116**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106459.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [17] 龙睿, 许云海, 刘亚宾, 等. 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水质变化及其评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(8): 1882-1890.
Long R, Xu Y H, Liu Y B, *et al.* Change of water quality and evaluation of Wangcheng drinking water sources after water storage in Changsha Integrated Hub [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(8): 1882-1890.
- [18] Martinova M V. Nitrogen and phosphorus compounds in bottom sediments: mechanisms of accumulation, transformation and release[J]. *Hydrobiologia*, 1993, **252**: 1-22.
- [19] 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 等. 洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 734-742.
Liu S R, Zhao J D, Xiao S B, *et al.* Spatio-temporal variation of release flux of sediment nitrogen and phosphorus in high-risk period of algal bloom in Lake Erhai[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 734-742.
- [20] 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
Niu F X, Xiao S B, Wang Y C, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorous in the three gorges reservoir during late autumn and early winter[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- [21] Bolalek J, Graca B. Ammonia nitrogen at the water-sediment interface in Puck Bay (Baltic Sea)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, **43**(6): 767-779.
- [22] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, central Great Barrier Reef lagoon (Australia) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, **24**(3): 289-303.
- [23] 汪森, 严红, 焦立新, 等. 滇池沉积物氮内源负荷特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 218-226.
Wang M, Yan H, Jiao L X, *et al.* Characteristics of internal nitrogen loading and influencing factors in Dianchi Lake sediment [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 218-226.
- [24] Rabouille C, Conley D J, Dai M H, *et al.* Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins: the Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhône rivers [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(12): 1527-1537.
- [25] Chen C C, Gong G C, Shiah F K. Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low-oxygen areas in the world[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, **64**(4): 399-408.
- [26] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, **321**(5891): 926-929.
- [27] Breitburg D, Levin L A, Oschlies A, *et al.* Declining oxygen in the global ocean and coastal waters[J]. *Science*, 2018, **359**(6371), doi: 10.1126/science.aam7240.
- [28] 李娜, 周绪申, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(3): 772-783.
Li N, Zhou X S, Sun B W, *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Science*, 2020, **32**(3): 772-783.
- [29] 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 and Water Engineering*, 2016, **27**(5): 28-31.
- [30] 黄晓艺, 胡湛波, 叶春, 等. 太湖出入湖河口水质和水生植物中氮、磷含量及其相关性分析[J]. *环境工程*, 2019, **37**(9): 74-80, 102.
Huang X Y, Hu Z B, Ye C, *et al.* Nitrogen and phosphorus contents of aquatic plants and correlation analysis with water quality in confluence areas of rivers and Lakes of Taihu Lake, China[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(9): 74-80, 102.
- [31] 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5047-5055.
Lian H S, Liu H B, Li X D, *et al.* Characteristics of nitrogen variation and its response to rainfall: a case study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5047-5055.
- [32] 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.
Wang Y, Liu L S, Shu J M, *et al.* Community structure of phytoplankton and the water quality assessment in Lake Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Science*, 2011, **23**(4): 575-580.
- [33] 周石磊, 孙悦, 岳胥丞, 等. 白洋淀养殖区春季沉积物垂向微生物群落特征及驱动因素[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(5): 1722-1733.
Zhou S L, Sun Y, Yue G C, *et al.* Vertical distribution characteristics and driving factors of microbial community of spring culture area sediments in Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1722-1733.
- [34] 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.
- [35] 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 等. 白洋淀表层沉积物元素的空间特

- 征、风险评价及来源分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 224-231.
- Wang J Z, Liu Z, Wei H, *et al.* Spatial characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 224-231.
- [36] 易雨君, 林楚翘, 唐彩红. 1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1333-1347.
- Yi Y J, Lin C Q, Tang C H. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s [J]. Journal of Lake Science, 2020, **32**(5): 1333-1347.
- [37] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- [38] Qi Y, Wang Z Y, Pei Y S. Evaluation of water quality and nitrogen removal bacteria community in Fuhe River[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **13**: 1809-1819.
- [39] 张淑珍, 赵钰, 单保庆, 等. 滏阳河表层沉积物氮分布特征和界面无机氮扩散通量估算[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1774-1781.
- Zhang S Z, Zhao Y, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution characteristics of nitrogen in surface sediments and estimation of the inorganic fluxes in Fuyang River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(5): 1774-1781.
- [40] 向速林, 陶术平, 吴代赦. 鄱阳湖沉积物和水界面磷的交换通量[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 326-333.
- Xiang S L, Tao S P, Wu D S. Exchange fluxes of phosphorus at the sediment-water interface in Lake Poyang[J]. Journal of Lake Science, 2017, **29**(2): 326-333.
- [41] 王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2336-2344.
- Wang Y R, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2336-2344.
- [42] Han Q, Tong R Z, Sun W C, *et al.* Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in North China over the last decade[J]. Science of the Total Environment, 2020, **701**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134929.
- [43] 王珺, 高高, 裴元生, 等. 白洋淀府河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.
- [44] 马建薇, 刘俊良, 李燕, 等. 物理因素对白洋淀溶解氧的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013, (8): 21-24.
- Ma J W, Liu J L, Li Y, *et al.* Effect of physical factors on dissolved oxygen in Baiyang Lake[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (8): 21-24.
- [45] 刘佳, 雷丹, 李琼, 等. 黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1608-1615.
- Liu J, Lei D, Li Q, *et al.* Characteristics of phosphorus fractions and phosphate diffusion fluxes of sediments in cascade reservoirs of the Huangbai River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1608-1615.
- [46] 郝文超, 王从锋, 杨正健, 等. 氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 640-648.
- Hao W C, Wang C F, Yang Z J, *et al.* Speciation and transformation of phosphorus in sediments during the redox cycle [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 640-648.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)