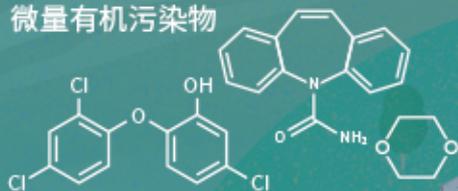


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期

Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM_{2.5} 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例

文艳^{1,2}, 单保庆^{1,2*}, 张文强^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文以我国华北地区最大的浅水湖泊白洋淀为研究对象, 探究其低温期沉积物-水界面无机氮的分布特征, 分析沉积物孔隙水中无机氮扩散通量对上覆水水质的影响。结果表明, 低温期白洋淀表层水总氮(TN)平均浓度范围为4.83~8.23 mg·L⁻¹, 氨氮(NH₄⁺-N)平均浓度维持在0.21~0.34 mg·L⁻¹之间, 硝氮(NO₃⁻-N)平均浓度在0.01~2.75 mg·L⁻¹之间。TN污染较严重, 超过地表水V类水质标准。表层沉积物TN平均含量在681~4365 mg·kg⁻¹之间, 其中有机氮(TON)为氮素的主要存在形式, 占总氮比例61.6%~93.1%。NH₄⁺-N为无机氮(TIN)的主要存在形式, 平均含量范围为28.9~116.3 mg·kg⁻¹, NO₃⁻-N含量整体较低, 平均值范围为5.2~23.7 mg·kg⁻¹。低温期白洋淀0~30 cm沉积物孔隙水中NH₄⁺-N浓度是上覆水中的3~16倍, 呈现逐渐累积趋势。沉积物-水界面NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N扩散通量范围分别为-0.55~4.09、-1.44~3.67和-0.88~0.04 mg·(m²·d)⁻¹, 冬季低温期仍具有潜在释放风险。低温期沉积物中积累大量的NH₄⁺-N, 可能会在温度升高后影响白洋淀上覆水体水质。因此研究低温期白洋淀沉积物-水界面氮的分布特征和沉积物中无机氮的内源释放风险对于改善白洋淀水质和认识浅水湖泊内源氮污染具有重要意义。

关键词: 低温期; 浅水湖泊; 白洋淀; 无机氮; 扩散通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2839-09 DOI: 10.13227/j.hjlx.202011122

Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake

WEN Yan^{1,2}, SHAN Bao-qing^{1,2*}, ZHANG Wen-qiang^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The distribution of inorganic nitrogen across the sediment-water interface in Baiyangdian Lake, the largest shallow lake in North China, was examined during the low temperature period. Furthermore, the influence of inorganic nitrogen diffusion flux in sediment porewater on the overlying water quality was analyzed. The results showed that the mean TN concentration in the surface water ranged from 4.83 to 8.23 mg·L⁻¹, the mean NH₄⁺-N concentration ranged from 0.21 to 0.34 mg·L⁻¹, and the mean NO₃⁻-N concentration ranged from 0.01 to 2.75 mg·L⁻¹. TN exceeds the Class V water quality standard for surface water, indicating serious pollution. The mean TN content of the sediments ranged from 681 to 4365 mg·kg⁻¹, of which TON was the main form of TN, accounting for 61.6%~93.1%. NH₄⁺-N was the main form of TIN, with a mean content ranging from 28.9 to 116.3 mg·kg⁻¹, and a mean NO₃⁻-N content of between 5.2 and 23.7 mg·kg⁻¹, which is relatively low. The NH₄⁺-N concentration in the porewater was 3 to 16 times that of the overlying water, showing a gradual accumulation trend. The diffusion flux ranges of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and NO₂⁻-N across the sediment-water interface were -0.55~4.09, -1.44~3.67, and -0.88~0.04 mg·(m²·d)⁻¹, respectively. There was still a potential release risk during the low temperature period. A large amount of NH₄⁺-N accumulated in the sediments during the low-temperature period, which may affect the quality of the overlying water after the temperature rises. Therefore, studying the distribution of nitrogen across the sediment-water interface, and the risk of internal release of inorganic nitrogen during the low temperature period, is of great significance for improving water quality in Baiyangdian Lake and understanding the internal nitrogen pollution of shallow lakes.

Key words: low temperature period; shallow lake; Baiyangdian Lake; inorganic nitrogen; diffusion flux

湖泊水环境中的氮是富营养化暴发的主要限制因子之一^[1]。湖泊水环境中的氮可分为有机氮(TON)和无机氮(TIN), 其中无机氮更易于在沉积物-水界面迁移转化从而被水生动植物吸收利用^[2], 是氮在水环境中的重要转化形态^[3]。湖泊上覆水体和沉积物中的溶解态无机氮主要包括氨氮和硝态氮, 沉积物中的溶解性无机氮主要通过孔隙水的分子扩散作用向上覆水体释放^[4]。湖泊水环境中无机

氮的分布及其释放受到温度、溶解氧或氧化还原条件、pH值、盐度、水动力条件和生物扰动等因素影响^[5]。其中温度会对微生物活性和化学反应速率产

收稿日期: 2020-11-15; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2018058); 广东省重点领域研发计划项目(2019B110205002)

作者简介: 文艳(1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水环境水生态, E-mail: wenyanyan1992163.com@163.com

* 通信作者, E-mail: bqshan@cees.ac.cn; wqzhang@cees.ac.cn

生较大的影响,从而影响溶解性无机氮在溶液介质中的迁移扩散^[6,7].

我国北方区域冬季低温期漫长,由于冰盖的阻隔作用,浅水环境水温层结构较稳定,湖泊沉积物-水界面受人为扰动影响较小^[8].因此,研究低温期沉积物-水界面氮的分布特征和无机氮的潜在释放风险对于科学有效控制氮的内源污染至关重要.白洋淀属于北方区域典型浅水湖泊,冬季平均气温 -2.3°C ,每年冰封期为 90 d.已有研究结果提出白洋淀冬季水体氮污染较严重,沉积物容纳较多氮污染物^[9,10].低温期白洋淀沉积物-水界面无机氮的扩散通量尚无研究.本文以低温期白洋淀水环境中氮的赋存及转化为研究对象,分析其在表层水和表层沉积物中的分布特征,考察沉积物-水界面无机氮纵向变化趋势,并利用沉积物孔隙水扩散通量模型估算无机氮的扩散通量,探明沉积物中无机氮的内源释放风险特征.本研究将扩展对浅水湖泊氮尤其是无机氮循环过程及转化机制的认识,以期对浅水湖泊水体内源污染治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

白洋淀(东经 $115^{\circ}39' \sim 116^{\circ}11'$,北纬 $38^{\circ}48' \sim$

$38^{\circ}57'$)位于华北平原中部,属于海河流域大清河水系,是华北最大的浅水湖泊湿地^[11].白洋淀总面积为 366 km^2 ,总淀区由白洋淀、羊角淀、藻乍淀和烧车淀等 143 个面积不等的淀泊和 3 700 条沟壕构成.白洋淀地处暖温带大陆性季风气候区,年均气温 $7 \sim 12^{\circ}\text{C}$,冬季平均气温 -2.3°C ,年平均降雨量为 552.7 mm ^[12].自 2017 年设立雄安新区以来,退耕还淀促使湿地面积逐渐增大,白洋淀成为促进雄安新区发展的重要生态水体^[13].为探究低温期白洋淀氮素分布特征及沉积物-水界面无机氮扩散通量,以尽量降低水体扰动对沉积物-水界面的影响为原则,分别在烧车淀区、枣林庄区、南刘庄区、捞王淀区、圈头东区、小白洋淀区、采蒲台区和藻乍淀区的开阔水域布设 8 个采样点(S1~S8),研究区域及采样点位置如图 1 所示.

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集

本试验样品采集于 2019 年 1 月,共设置 8 个采样点,每个样点采集淀面表层水样(10~30 cm)盛于 100 mL 聚乙烯储样瓶,保存于 4°C 冷藏箱运输至实验室.并使用水质分析仪(美国 YSI Professional Plus)现场测定水样温度(T)、pH 和氧化还原电位(ORP),使用便携式溶解氧测定仪(哈希 HQ30d)测

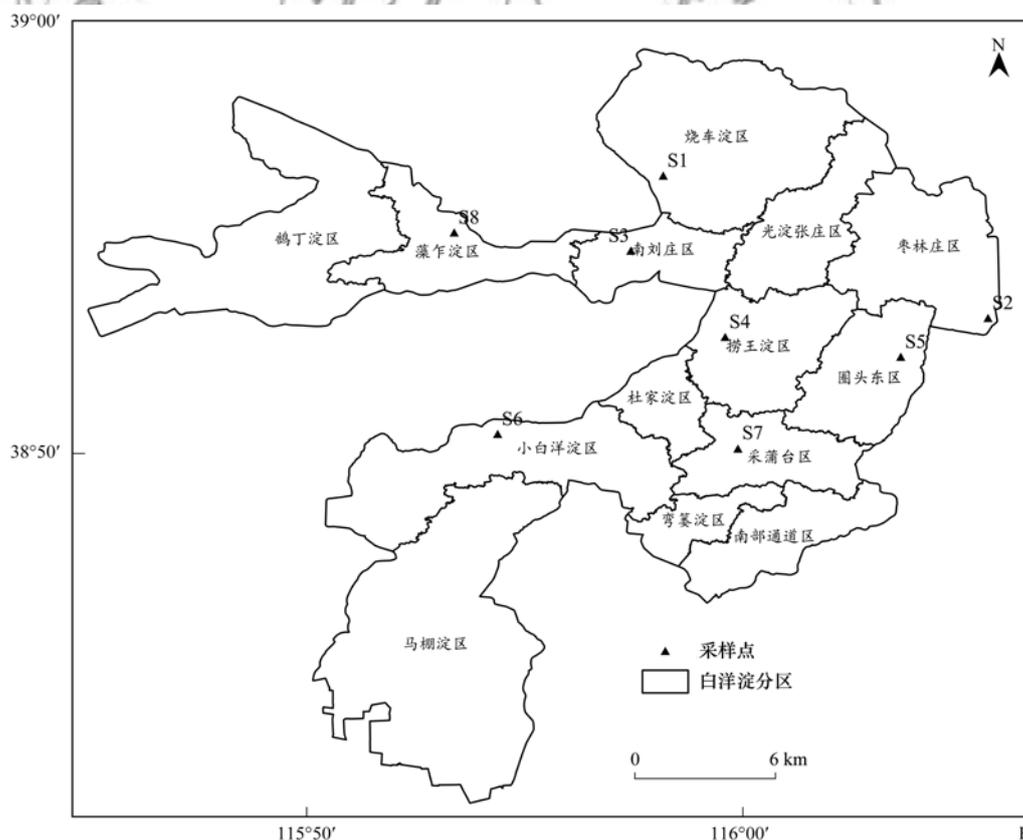


图 1 研究区域及采样点位置分布示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

定溶解氧(DO). 利用彼得森采样器采集表层 10 cm 处沉积物样品, 储存于聚乙烯自封袋, 并于 4℃ 低温储藏运输至实验室后, 冷冻干燥、研磨和过 100 目尼龙筛, 密封避光储存待分析. 利用自重力采样器(Corer 60, Uwitec, Austria)采集沉积物柱状样品, 静置 1 h 后, 现场使用虹吸管抽取沉积物-水界面以上 20~40 cm 处上覆水, 按每层 5 cm 进行分层, 保存于聚乙烯储样瓶. 使用亚克力分层仪器对沉积物柱状样品自上而下进行分层, 按每层 1 cm 进行分层, 分层后的上覆水样品及柱状沉积物样品 4℃ 低温储藏运输至实验室.

1.2.2 样品分析

表层水及上覆水样品用 0.45 μm 滤膜过滤后,

参照文献[14]测定样品中氨氮(NH₄⁺-N)和硝氮(NO₃⁻-N), 总氮(TN)采用未过滤水样测定; 孔隙水样品中溶解性无机氮(DIN)含量均使用全自动化学分析仪(AMS Smart Chem 2000)测定. 沉积物样品用 2 mol·L⁻¹的氯化钾溶液振荡提取 1 h, 0.45 μm 滤膜过滤后测定提取液中氨氮(NH₄⁺-N)和硝氮(NO₃⁻-N), 测定方法同上. 采用元素分析仪测定沉积物样品中 TN 及碳氮比(C/N), 沉积物中总有机氮(TON)为总氮与无机氮(氨氮、硝氮和亚硝氮之和)测定值之差. 白洋淀各采样点表层水和表层沉积物基本理化性质如表 1 所示. 采样点分布用 ArcGIS 10.0 绘制; 数据制图在 Origin 9.0 上完成.

表 1 白洋淀各采样点表层水和表层沉积物基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physicochemical properties of the surface water and sediment from different sampling sites

点位编号	淀区	表层水				表层沉积物		
		水温/℃	pH	ORP/mV	DO/mg·L ⁻¹	密度/g·mL ⁻¹	含水率	C/N
S1	烧车淀区	3.0 ± 0.6	8.61 ± 0.2	86 ± 25	9.93 ± 1.6	1.16 ± 0.2	0.40 ± 0.06	18.12 ± 2.5
S2	枣林庄区	5.5 ± 0.3	8.46 ± 0.4	107 ± 32	9.31 ± 2.3	1.18 ± 0.16	0.32 ± 0.02	30.34 ± 10.5
S3	南刘庄区	2.0 ± 0.6	8.65 ± 0.1	95 ± 40	7.75 ± 0.8	1.25 ± 0.03	0.47 ± 0.02	11.52 ± 8.7
S4	捞王淀区	5.5 ± 0.2	8.85 ± 0.2	117 ± 24	8.82 ± 3.8	1.33 ± 0.01	0.51 ± 0.02	11.64 ± 2.3
S5	圈头东区	4.3 ± 0.3	8.7 ± 0.3	154 ± 12	7.31 ± 4.6	1.29 ± 0.06	0.32 ± 0.04	10.19 ± 4.6
S6	小白洋淀区	1.7 ± 1.2	8.48 ± 0.4	104 ± 30	8.29 ± 5.7	1.12 ± 0.12	0.56 ± 0.03	11.87 ± 8.5
S7	采蒲台区	1.2 ± 1.5	8.54 ± 0.4	91 ± 48	7.46 ± 1.2	1.41 ± 0.02	0.60 ± 0.04	11.67 ± 2.7
S8	藻乍淀区	3.1 ± 0.6	8.85 ± 0.2	142 ± 10	9.87 ± 1.8	1.55 ± 0.25	0.54 ± 0.01	12.79 ± 12.1

1) 数据为平均值 ± 标准偏差

1.3 低温条件下无机氮扩散通量模型

运用 Fick 第一定律^[15,16]对冬季低温期白洋淀沉积物-水界面无机氮扩散通量进行估算:

$$F = \varphi \times D_s \times \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

式中, F 为扩散通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; $\frac{\partial c}{\partial z}$ 为沉积物-水界面物质浓度梯度 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$]; D_s 为基于沉积物弯曲效应的实际扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); φ 为沉积物孔隙度; 实际扩散系数 D_s 与沉积物孔隙度 φ 之间的关系式^[17]为:

$$D_s = \varphi D_0 \quad (\varphi < 0.7) \quad (2)$$

$$D_s = \varphi^2 D_0 \quad (\varphi > 0.7) \quad (3)$$

式中, D_0 为无限稀释条件下的理想扩散系数^[18], 计算孔隙度 φ 的关系式为^[19]:

$$\varphi = (W_w - W_d) / BV \quad (4)$$

式中, W_w 为湿重, W_d 为干重, BV 为沉积物的容重. BV 根据以下关系式确定^[20]:

$$BV = W_w + [(1/\rho_D) - 1] W_d \quad (5)$$

式中 ρ_D 为固体沉积物密度, 一般取值为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

由于低温条件下扩散系数不同于参考温度

(25℃), 应用斯托克-爱因斯坦方程对温度效应下的扩散系数进行了修正, 关系式如下:

$$D_1 \eta_1 / T_1 = D_2 \eta_2 / T_2 \quad (6)$$

式中, D_1 为参考温度 (T_1 , 25℃) 水体粘滞性 η_1 时的扩散系数; D_2 为原地水温 (T_2) 水体粘滞性 η_2 时的扩散系数. 水体粘滞性与温度关系式如下^[21]:

$$\lg \frac{\eta_1}{\eta_2} = [1.37023(T_2 - T_1) + 8.36 \times 10^{-4}(T_2 - T_1)^2] \cdot (109 + T_2)^{-1} \quad (7)$$

式中, T_1 为参考水温 25℃, T_2 为实际测量水温平均值 3.3℃. 修正得到 D_0 计算值如表 2.

表 2 不同温度下氨氮和硝氮的理想扩散系数 $\times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Table 2 Ideal diffusion coefficients of ammonia and nitrate

at different temperatures $\times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

温度/℃	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N
25	19.8	19.0	19.1
3.3	10.1	9.7	9.7

2 结果与讨论

2.1 白洋淀各采样点氮素组成及空间分布特征

白洋淀各淀区表层水 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的分析结果如图 2 所示. 所有采样点表层水中 TN 浓

度范围为 $4.83 \sim 8.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NH_4^+ -N 浓度总体较低, 浓度范围为 $0.21 \sim 0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NO_3^- -N 平均浓度在 $0.01 \sim 2.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 不同采样点处表层水中 NO_3^- -N 浓度具有差异性. 结合图 2(a) 可知冬季白洋淀表层水中总有机氮 (TON) 占 TN 百分比比较高, 比值范围为 $61.6\% \sim 93.1\%$, 与夏季表层水中 TON/TN 比值变化范围一致^[22]. 表层水中 TN 主要组分为 TON, 无机氮主要组分为 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N.

结合图 2(b) 可知冬季白洋淀各采样点 NO_3^- -N 浓度变化趋势与 TN 一致, 采样点 S1、S3 和 S8 处 NO_3^- -N 浓度明显高于 NH_4^+ -N 浓度. 这是由于这 3 个采样点溶解氧含量相对较高, 有利于水体中硝化反应进行. 冬季白洋淀表层水中 NO_3^- -N 浓度变化范围较大, 这与硝化速率具有较明显的季节差异有关. 冬季与夏季相比微生物呼吸作用有所减弱, 表层水体中溶解氧浓度增加利于硝化细菌的生长^[23]. 冬季白洋淀各采样点表层水中 TN 浓度均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类水质标准 ($2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 位于南刘庄区的采样点 S3 TN 浓度高达 $8.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这与孙悦等^[10] 对于白洋淀冰封期水质评价结果一致. 冬季低温期白洋淀表层水中 TN 呈现较严重的污染状态, 而 TN 主要组分为 TON, 这可能是由于湖泊中藻类、底栖生物和浮游生物新陈代谢过程释放大量溶解性有机氮所致^[24-26].

沉积物中 TN 的组成及其含量变化与表层水密切相关, 图 3 为冬季白洋淀各采样点表层沉积物 TN、TON、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量变化情况. 结合图 3(a) 可知, 冬季白洋淀各点位表层沉积物中 TN 含量范围为 $681 \sim 4365 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $2370 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过美国环保署 (EPA) 制定的沉积物总氮污染重污染标准 $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[27]. 各采样点表层沉积物中 TON 含量变化趋势与 TN 一致, TON 占 TN 比例高达 $94.4\% \sim 98.2\%$, 是白洋淀表层沉积物中 TN 主要存在形式. 湖泊中 TON 主要来源于水生

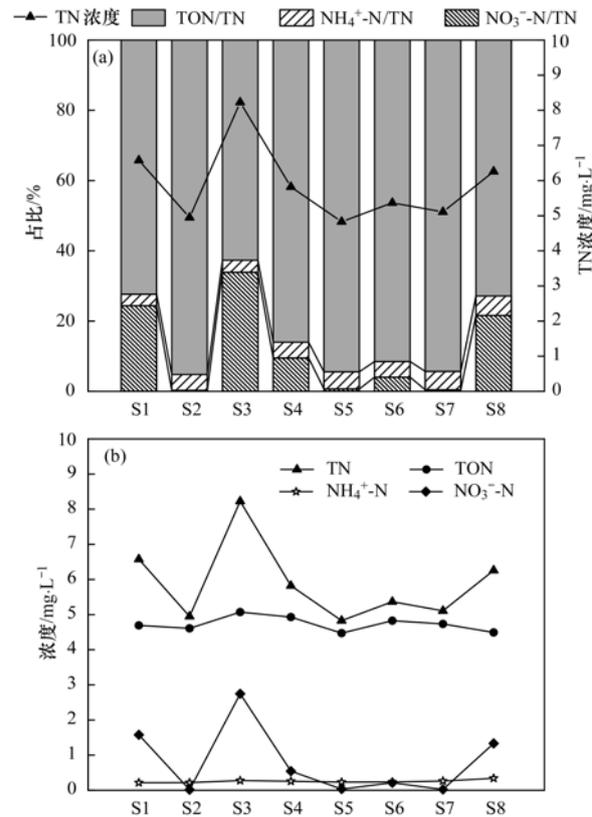


图 2 白洋淀表层水氮素分布特征

Fig. 2 Characteristics of nitrogen distribution in the surface water of Baiyangdian Lake

物的分泌及腐烂分解, 以及随外源入淀水体一同输入的颗粒态氮和溶解性有机氮^[28]. 结合图 3(b) 可知, 冬季各采样点表层沉积物中 NH_4^+ -N 平均含量范围为 $28.9 \sim 116.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TN 比例达 $1.6\% \sim 4.9\%$. 各采样点沉积物中 NO_3^- -N 含量整体较低, 平均值范围为 $5.2 \sim 23.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 冬季溶解氧向下扩散受阻, 缺氧条件有利于氨氧化细菌将有机氮矿化为 NH_4^+ -N^[29], 导致表层沉积物中 NH_4^+ -N 累积从而使其具有较高的潜在释放风险.

2.2 沉积物-水界面无机氮分布特征

冬季白洋淀各采样点无机氮浓度在沉积物-水

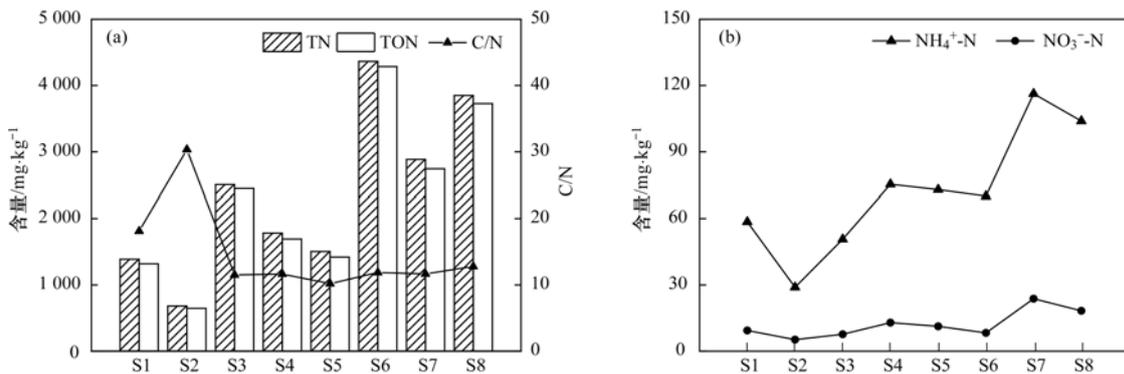


图 3 白洋淀表层沉积物氮素分布特征

Fig. 3 Characteristics of nitrogen distribution in the surface sediment of Baiyangdian Lake

界面垂直剖面上呈现较大的空间差异性. 如图 4 所示无机氮浓度具有不同的分布趋势, 8 个采样点 NH_4^+ -N 浓度均随深度而逐渐增加, 仅有采样点 S7 孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度在逐渐累积后呈递减的趋势. 以位于烧车淀的采样点 S1 为例, 孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度呈递增趋势最高可达 $13.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

冬季低温条件下白洋淀沉积物-水界面处 NH_4^+ -N 浓度变化相比夏季波动较小^[22]. 这是由于 NH_4^+ -N 扩散速率对温度具有一定的依赖性^[5], 低温导致沉积物中 NH_4^+ -N 通过孔隙水向上覆水的迁移会减弱^[30]. 上覆水中 NO_3^- -N 浓度较低且分布趋势较平稳, 在沉积物-水界面处呈现明显的波动趋势. 位于

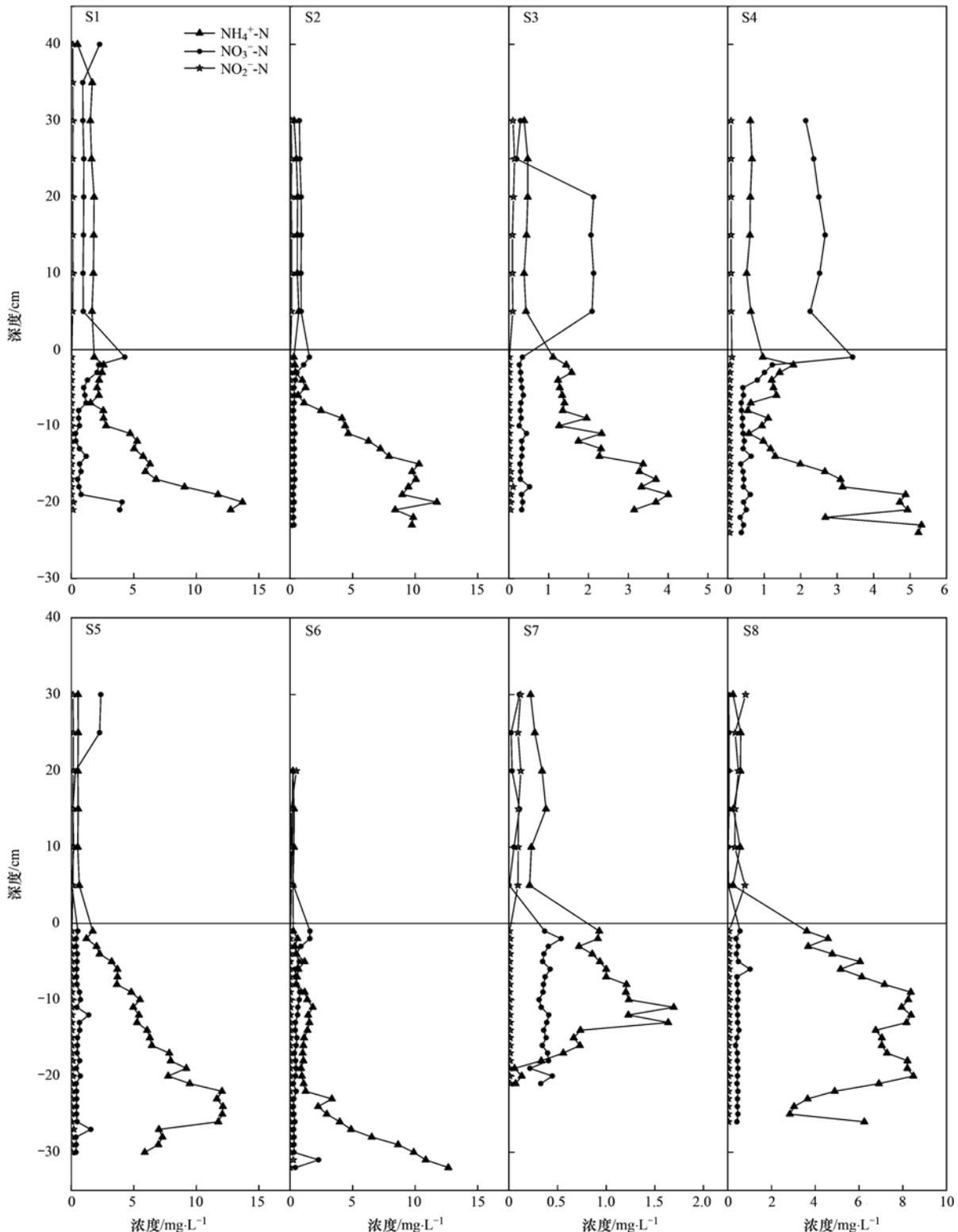


图 4 白洋淀沉积物-水界面无机氮纵向分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of inorganic nitrogen at the sediment-water interface in Baiyangdian Lake

端村区的采样点 S4 变化趋势较为明显,上覆水中 NO_3^- -N 浓度平均值为 $2.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在孔隙水中降至 $0.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这与沉积物中氮循环过程密切相关^[31]. 由于冬季冰封期表层沉积物处于厌氧状态,硝化细菌在沉积物中的垂直分布局限于溶解氧扩散深度^[32],沉积物中硝化作用受到抑制导致 NH_4^+ -N 逐渐累积无法转化为 NO_3^- -N. 而 NO_2^- -N 作为硝化过程中间产物形态较不稳定,浓度始终较低(本文不做过多赘述). 随沉积物-水界面纵向深度变化 NH_4^+ -N 呈现为逐渐累积趋势, NO_3^- -N 浓度呈递减趋势.

结合图 5(a) 和 5(b) 可知,沉积物-水界面上覆水中 NH_4^+ -N 浓度范围为 $0.27 \sim 1.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度范围为 $0.85 \sim 6.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $3.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 0 ~ 30 cm 沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度是上覆水中的 3

~ 16 倍. 沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度较高的采样点,相对应的上覆水中 NH_4^+ -N 浓度也呈现较高水平. 以采样点 S1 和 S2 为例,采样点 S1 处沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度范围为 $1.54 \sim 13.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,上覆水平均浓度为 $1.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 采样点 S2 处沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度范围为 $0.06 \sim 1.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,上覆水平均浓度为 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此可知,沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 的累积对上覆水体中 NH_4^+ -N 浓度变化影响显著^[33]. 由图 5(c) 和 5(d) 可知,白洋淀沉积物孔隙水中 NO_3^- -N 浓度范围为 $0.32 \sim 1.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 上覆水中 NO_3^- -N 浓度范围为 $0.05 \sim 2.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $0.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这可能是由于上覆水体中溶解氧浓度高于沉积物,更利于硝化过程产生 NO_3^- -N^[34]. 冬季白洋淀沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度明显高于上覆水,孔隙水中 NH_4^+ -N 具有较高的潜在释放风险.

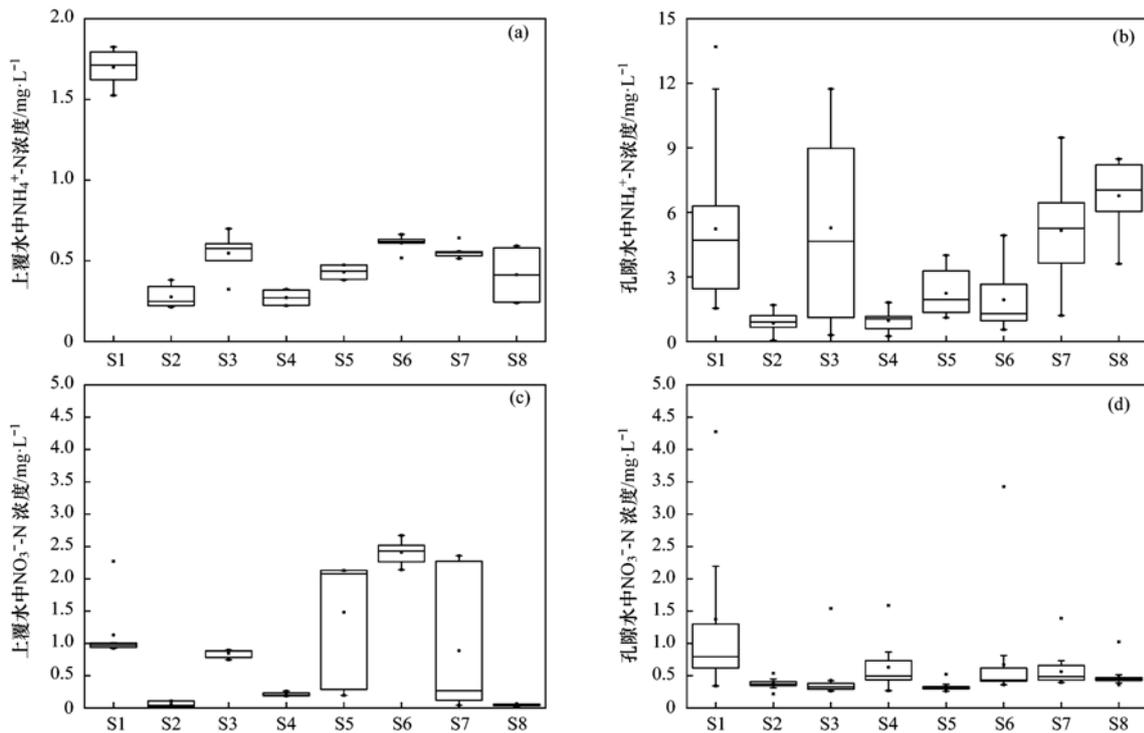


图 5 白洋淀上覆水和沉积物孔隙水中氨氮和硝氮浓度

Fig. 5 Concentration of ammonia nitrogen and nitrate in the overlying water and sediment porewater of Baiyangdian Lake

2.3 沉积物-水界面无机氮扩散通量

白洋淀作为大型封闭性浅水湖泊,冬季沉积物-水界面水体流动速度较为缓慢^[35],上覆水和孔隙水无机氮浓度存在明显差异,浓度差会引起孔隙水中高浓度无机氮向上覆水体扩散^[36]. 利用 Fick 第一扩散定律对沉积物-水界面无机氮扩散通量进行估算,结果如图 6 所示. 冬季白洋淀各采样点沉积物-水界面 NH_4^+ -N 扩散通量范围为 $-0.55 \sim 4.09 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,与夏季沉积物-水界面 NH_4^+ -N 扩散

通量 $[-9.3 \sim 38.3 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}]$ 相比差异较大^[22],这是由于低温抑制了冬季沉积物-水界面分子扩散作用^[37]. 沉积物-水界面 NO_3^- -N 扩散通量范围为 $-1.44 \sim 3.67 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, NO_2^- -N 扩散通量范围为 $-0.88 \sim 0.04 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 冬季低温条件下,多数采样点(除点位 S3 和 S5 外) NH_4^+ -N 扩散通量均为正值, NH_4^+ -N 整体呈现由孔隙水向上覆水体扩散的趋势^[38].

白洋淀各采样点沉积物-水界面处无机氮扩散

通量存在空间差异性. 位于烧车淀区采样点 S1 沉积物-水界面 NO_3^- -N潜在释放风险较大, 而位于藻乍淀区采样点 S8 沉积物-水界面 NH_4^+ -N潜在释放风险较大. 2 个采样点均靠近安新县城, 因其更易受到扰动而增加无机氮潜在释放风险. 采样点 S1 位于白洋淀旅游码头附近, 冬季冰面破碎程度较大, 溶解氧水平高于其他采样点, 有利于沉积物-水界面硝化作用释放 NO_3^- -N. 藻乍淀区沼泽化严重, 沉积物中 TN、TON 浓度及 C/N 较高, 氮循环过程中矿化速率大于硝化速率, 导致表层沉积物中 NH_4^+ -N的累积^[39]. NH_4^+ -N和 NO_3^- -N扩散速率与水温^[40]具有较高的相关性, 夏季高温条件下扩散通量高于冬季^[22], 而冬季白洋淀水体冻结过程中, 沉积物能够接纳大量来自上覆水体中的可溶性无机氮成为内源污染源, 会在温度升高后成为白洋淀上覆水体的主要污染源^[9]. 在冬季白洋淀外源污染负荷骤减的情况下, 依旧存在沉积物中 NH_4^+ -N的累积及无机氮具有潜在释放风险的内源污染问题. 相关治理部门可利用冬季低温期这一特点, 对白洋淀沉积物进行修复从而改善上覆水水质.

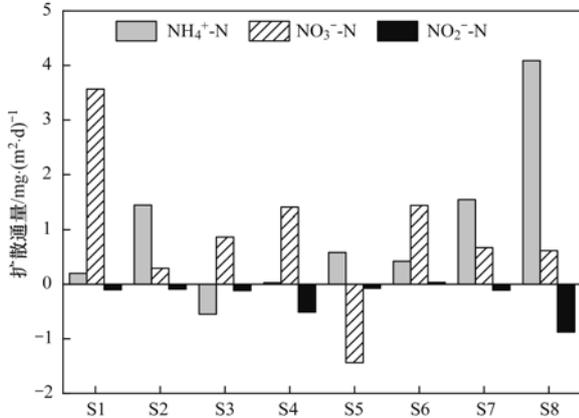


图6 白洋淀无机氮扩散通量分布示意

Fig. 6 Distribution of inorganic nitrogen diffusion flux in Baiyangdian Lake

3 结论

(1) 低温期白洋淀各采样点表层水 TN 浓度范围为 4.83 ~ 8.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类水质 TN 浓度标准 (2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 低温期 TN 污染呈现较严重的态势. 其中 TON 所占比例达 61.6% ~ 93.1%, 为表层水中氮素主要存在形式; NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 为 TIN 主要存在形式, 各采样点表层水 NH_4^+ -N 浓度范围为 0.21 ~ 0.34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 浓度范围为 0.01 ~ 2.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2) 低温期白洋淀各采样点表层沉积物中 TN 平均含量范围为 681 ~ 4365 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为

2370 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过美国环境保护署制定的沉积物 TN 污染重污染标准 2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (US EPA, 2002), 冬季白洋淀表层沉积物总体处于 TN 重污染状态. 各采样点表层沉积物中 NH_4^+ -N 平均含量范围为 28.9 ~ 116.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TN 比例达 1.6% ~ 4.9%; NO_3^- -N 含量整体较低, 平均值范围为 5.2 ~ 23.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. NH_4^+ -N 为表层沉积物中 TIN 的主要存在形式.

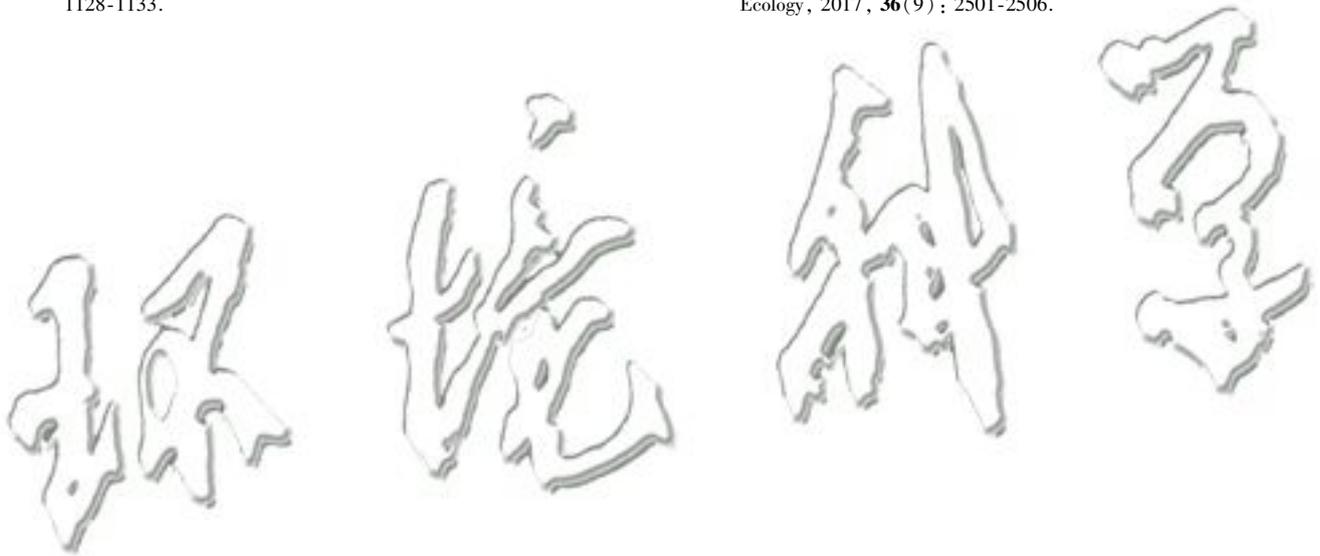
(3) 低温期白洋淀沉积物-水界面 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 扩散通量范围分别为: -0.55 ~ 4.09、-1.44 ~ 3.67 和 -0.88 ~ 0.04 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 多数采样点 NH_4^+ -N 扩散通量均为正值, 表明冬季低温条件下仍具有 NH_4^+ -N 潜在释放风险. 沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度是上覆水中的 3 ~ 16 倍, 孔隙水中 NH_4^+ -N 浓度明显高于上覆水, 较大的浓度差导致 NH_4^+ -N 具有较高的潜在释放风险. 随沉积物-水界面纵向深度变化 NH_4^+ -N 呈现逐渐累积趋势. 探明低温期沉积物中无机氮潜在释放风险, 为改善白洋淀上覆水体水质提供帮助.

参考文献:

- [1] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1229-1243.
Qin B Q. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1229-1243.
- [2] 王亚琼, 薛培英, 耿丽平, 等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 304-309.
Wang Y Q, Xue P Y, Geng L P, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments-submerged macrophytes-water systems of Baiyangdian Lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 304-309.
- [3] 王娟, 王圣瑞, 金相灿, 等. 沉水植物黑藻对沉积物氮氨吸附/释放特征的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 336-341.
Wang J, Wang S R, Jin X C, et al. Effect of submerged aquatic plant *Hydrilla verticilla* on the sorption/release characteristic of ammonia nitrogen on sediment[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 336-341.
- [4] Hu W F, Lo W, Chua H, et al. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong[J]. Environment International, 2001, 26(5-6): 369-375.
- [5] 雷沛, 张洪, 王超, 等. 沉积物-水界面污染物迁移扩散的研究进展[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1489-1508.
Lei P, Zhang H, Wang C, et al. Migration and diffusion for pollutants across the sediment-water interface in lakes: a review[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1489-1508.
- [6] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Effects of light on sediment nutrient flux and water column nutrient stoichiometry in a shallow lake[J]. Water Research, 2008, 42(4-5): 977-986.
- [7] 周成. 湖泊受污底泥营养物质释放机理及水质影响试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
Zhou C. Experimental study on mechanism of nutrient release from Lake polluted sediment and impact on water quality[D].

- Wuhan; Wuhan University, 2017.
- [8] 张文慧. 水动力对太湖营养盐循环及藻类生长的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2017.
Zhang W H. Effects of hydrodynamics on nutrient cycling and algal growth in Lake Tai [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2017.
- [9] 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.
- [10] 孙悦, 李再兴, 张艺冉, 等. 雄安新区—白洋淀冰封期水体污染特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 952-963.
Sun Y, Li Z X, Zhang Y R, *et al.* Water pollution characteristics and water quality evaluation during the freezing period in Lake Baiyangdian of Xiong'an New Area[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(4): 952-963.
- [11] 武士蓉, 徐梦佳, 赵彦伟, 等. 白洋淀湿地水质与水生物相关性研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 3160-3165.
Wu S R, Xu M J, Zhao Y W, *et al.* Correlation between water quality and aquatic life in Baiyangdian wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(11): 3160-3165.
- [12] 张良玉, 魏丽欣, 王欢, 等. 1960~2017年雄安新区冬季气温变化特征研究[J]. 河北农业科学, 2018, **22**(6): 80-84.
Zhang L Y, Wei L X, Wang H, *et al.* Research of change characteristics of winter temperature in Xiongan New Area from 1960 to 2017 [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2018, **22**(6): 80-94.
- [13] 杨苗, 龚家国, 赵勇, 等. 白洋淀区域景观格局动态变化及趋势分析[J]. 生态学报, 2020, **40**(20): 7165-7174.
Yang M, Gong J G, Zhao Y, *et al.* Analysis of dynamic changes and trends in the landscape pattern of the Baiyangdian region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(20): 7165-7174.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] Kuwae T, Kibe E, Nakamura Y. Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an intertidal sandflat in Tokyo Bay [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, **57**(5-6): 929-940.
- [16] Müller B, Wang Y, Dittrich M, *et al.* Influence of organic carbon decomposition on calcite dissolution in surficial sediments of a freshwater lake [J]. Water Research, 2003, **37**(18): 4524-4532.
- [17] D'Hondt S, Rutherford S, Spivack A J. Metabolic activity of subsurface life in deep-sea sediments [J]. Science, 2002, **295**(5562): 2067-2070.
- [18] Krom M D, Berner R A. The diffusion coefficients of sulfate, ammonium, and phosphate ions in anoxic marine sediments [J]. Limnology and Oceanography, 1980, **25**(2): 327-337.
- [19] Boudreau B P. The diffusive tortuosity of fine-grained un lithified sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, **60**(16): 3139-3142.
- [20] Warnken K W, Gill G A, Santschi P H, *et al.* Benthic exchange of nutrients in Galveston Bay, Texas [J]. Estuaries, 2000, **23**(5): 647-661.
- [21] Atkins P, de Paula J. Physical chemistry for the life sciences [M]. New York: Oxford University Press, 2006.
- [22] 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.
- [23] Rütting T, Boeckx P, Müller C, *et al.* Assessment of the importance of dissimilatory nitrate reduction to ammonium for the terrestrial nitrogen cycle [J]. Biogeosciences, 2011, **8**(7): 1779-1791.
- [24] Thorén A K, Legrand C, Tonderski K S. Temporal export of nitrogen from a constructed wetland; influence of hydrology and senescing submerged plants [J]. Ecological Engineering, 2004, **23**(4-5): 233-249.
- [25] Varela M M, Bode A, Fernández E, *et al.* Nitrogen uptake and dissolved organic nitrogen release in planktonic communities characterised by phytoplankton size-structure in the Central Atlantic Ocean [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2005, **52**(9): 1637-1661.
- [26] Li X, Rao N R H, Linge K L, *et al.* An evaluation of measurement techniques for algal-derived organic nitrogen [J]. Water Research, 2019, **165**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114998.
- [27] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(1): 20-31.
- [28] Kaushal S S, Delaney-Newcomb K, Findlay S E G, *et al.* Longitudinal patterns in carbon and nitrogen fluxes and stream metabolism along an urban watershed continuum [J]. Biogeochemistry, 2014, **121**(1): 23-44.
- [29] 高效江, 张念礼, 陈振楼, 等. 上海滨岸潮滩水沉积物中无机氮的季节性变化 [J]. 地理学报, 2002, **57**(4): 407-412.
Gao X J, Zhang N L, Chen Z L, *et al.* Seasonal variation of inorganic nitrogen in water and sediment of intertidal flats on the Shanghai Coast [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, **57**(4): 407-412.
- [30] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——1. 铵态氮释放速率的空间差异及源-汇通量 [J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 11-21.
Fan C X, Zhang L, Qin B Q, *et al.* Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: I. spatial variation of the ammonium release rates and its source and sink fluxes [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, **16**(1): 11-21.
- [31] 王超, 单保庆. 子牙河水系水和沉积物好氧氨氧化微生物分布特征 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2943-2950.
Wang C, Shan B Q. The distribution of aerobic ammonia oxidizing microorganisms in Ziya River, Haihe Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(12): 2943-2950.
- [32] 王超, 单保庆, 赵钰. 滏阳河水系沉积物硝化速率分布及溶解氧的限制效应 [J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1735-1740.
Wang C, Shan B Q, Zhao Y. Spatial distribution of nitrification rate and the restriction effect of oxygen in the Fuyang River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1735-1740.
- [33] 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.
- [34] 王若冰, 赵钰, 单保庆, 等. 海河流域典型重污染河流滏阳河沉积物氨化和硝化速率研究 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 858-866.

- Wang R B, Zhao Y, Shan B Q, *et al.* Ammonification and nitrification rates in sediment of typical heavy polluted river (Fuyang River) in the Haihe River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 858-866.
- [35] 张铁坚, 王朦, 彭艳侠, 等. 白洋淀上游城市内河浮游动物群落调查与水质评价 [J]. *环境工程*, 2016, **34**(3): 166-169, 132.
- Zhang T J, Wang M, Peng Y X, *et al.* Survey of zooplankton communities and evaluation of water quality in the upstream urban inland river of Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(3): 166-169, 132.
- [36] 吴文成, 吴群河, 梁明易, 等. 珠江广州河段沉积物无机氮的分布特征和界面交换通量 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(3): 1128-1133.
- Wu W C, Wu Q H, Liang M Y, *et al.* Distribution characteristics of inorganic nitrogen in core sediments and diffusion fluxes in interface from Guangzhou Reach of the Pearl River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(3): 1128-1133.
- [37] 古小治, 张雷, 柏祥, 等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 939-945.
- Gu X Z, Zhang L, Bo X, *et al.* Characteristics of sediments and pore water in Lake Nansi wetland [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 939-945.
- [38] Wang P F, Zhao L, Wang C, *et al.* Nitrogen distribution and potential mobility in sediments of three typical shallow urban lakes in china [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(10): 1511-1521.
- [39] Yang Z P, Wang L Q, Liang T, *et al.* Nitrogen distribution and ammonia release from the overlying water and sediments of Poyang Lake, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(1): 771-778.
- [40] 韩志伟, 张水, 吴攀, 等. 贵州草海氮磷分布特征及沉积物释放通量估算 [J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(9): 2501-2506.
- Han Z W, Zhang S, Wu P, *et al.* Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in waters and release flux estimation in the sediment of Caohai basin, Guizhou [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(9): 2501-2506.



CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)