

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.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水処理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析

赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航*

(中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012)

摘要: 通过 2018 ~ 2019 年调查数据及历史相关监测资料, 分析了岱海上覆水中氮、磷时空分布特征及主要影响因素, 并探讨了氮形态、磷形态的时空分布差异性。结果表明, 岱海上覆水总氮和总磷常年处于较高水平, 尤其是总氮浓度明显高于全国其他湖泊。岱海上覆水总氮浓度在 $3.29 \sim 4.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(3.93 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 总磷浓度在 $0.063 \sim 0.163 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(0.111 \pm 0.023) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。上覆水中总氮和总磷浓度在春季、夏季呈现湖心深水区明显高于周边, 秋季呈自东向西递减的趋势, 而在冬季则呈现南部浅水区高于北部区域的趋势。上覆水中氮和磷营养盐均以溶解态为主, 溶解态总氮和溶解态总磷占总氮和总磷的比例高达 86.62% 和 77.84%, 且溶解态氮以硝态氮为主导、溶解态磷则以有机磷为主要形态。研究中发现, 湖水浓缩和内源营养盐释放是造成水体高总氮和总磷的主要原因, 建议结合工程措施进行内源治理和生态修复, 以防止水质进一步恶化。

关键词: 岱海; 总氮; 总磷; 形态; 时空分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1676-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909090

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake

ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, ZHENG Shuo-fang, WANG Shu-hang*

(National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the historical monitoring survey data from 2018 to 2019, the temporal and spatial distribution characteristics and main influencing factors of nitrogen and phosphorus in the overlying water in Daihai Lake were analyzed, and the differences of the temporal and spatial distribution were discussed. The results showed that the content of total nitrogen and total phosphorus in the overlying water was at a high level, especially the total nitrogen content was obviously higher than that in other lakes in China. The content of total nitrogen ranged from $3.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $4.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with a mean value of $(3.93 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; the content of total phosphorus ranged from $0.063 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.163 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with a mean value of $(0.111 \pm 0.023) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In spring and summer, the content of total nitrogen and total phosphorus in the overlying deep water from the middle of the lake was significantly higher than that in the surrounding area. In autumn, the contents decreased from east to west, and in winter, the contents in the shallow water of the southern area were higher than that in the northern area. Nitrogen and phosphorus in the overlying water were mainly in the dissolved state, and the proportions of total dissolved nitrogen and phosphorus were 86.62% and 77.84%, respectively. The dissolved nitrogen was dominated by nitrate, whereas dissolved phosphorus was dominated by organic phosphorus. The concentration of lake water and the release of endogenous nutrient salts are the main reasons for the high total nitrogen and phosphorus. To prevent further deterioration of water quality, it is suggested to carry out endogenous treatment and ecological restoration in combination with engineering measures.

Key words: Daihai Lake; total nitrogen; total phosphorus; form; temporal and spatial distribution

水体中超负荷的氮和磷等生源要素会直接引起湖泊水生生态系统初级生产力的异常增加, 进而导致湖泊富营养化的发生^[1,2]。湖泊的营养物浓度水平取决于湖泊的形态、水力特征、周围土地利用情况和湖泊所在的地理区域^[3]。岱海是我国半干旱区的一个典型内陆湖, 近年来, 随着自然气候变化和人类活动的影响, 岱海生态环境发生了很大变化, 湖泊水位持续下降, 湖面不断萎缩, 湖泊水质也呈现出明显的恶化趋势, 年水质监测结果显示全湖水质达到劣 V 类水平, 岱海湖泊富营养化程度不断加剧^[4,5]。文献[6~10]对岱海流域气候变化进行了分析, 结果表明近 50 年来, 岱海流域的气候在全球气候变化和区域人类活动的双重影响下, 气温升高, 降水略有减

少, 干旱有所加强; 文献[11,12]研究岱海水面积变化特征, 发现岱海湖面重心从西南向东北方向不断移动, 是自然因素与人类活动共同作用的结果; 文献[13~16]研究岱海水质咸化过程发现由于流域内人类活动的加剧, 特别是人口的增加和工农业生产的发展, 截流了大量的低盐度的地表水和地下水, 减少了岱海低盐度水的补给, 同时, 流域内土地高强度的开发利用, 造成土壤盐份淋溶加剧等, 导致了岱海水位及库容量下降, 湖水盐容量降低, 大量的盐份

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-11-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07206)

作者简介: 赵丽(1987~), 女, 硕士, 主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: ml18511322130@163.com

* 通信作者, E-mail: shuhang125126@163.com

累积于湖体是造成岱海湖水水质咸化的主要原因; 文献[17~20]对岱海沉积物中氮磷分布及内源释放进行了研究, 结果表明岱海沉积物中氮和磷浓度较高, 尤其是氮已经对底栖生物群落及生态环境构成了威胁, 同时水体 pH、溶解氧水平和扰动等因素均会对内源氮和磷的释放产生一定的影响。

综上, 学者们的研究多集中在岱海气候变化、水域面积减小、水质咸化及沉积物内源释放等方面, 系统地分析岱海水体氮磷时空分布特征的研究较少, 本文以岱海为研究对象, 对其上覆水中氮和磷营养盐的空间分布特征及差异性进行分析, 在半干旱区湖泊富营养化的研究中具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县境内 ($112^{\circ}37'20'' \sim 112^{\circ}46'4.05''\text{E}$, $40^{\circ}32'27.38'' \sim 40^{\circ}36'37.09''\text{N}$), 是我国半干旱区一个典型的封闭型内陆湖, 东西长约 25 km, 南北宽约 10 km, 平均水深约 4 m, 湖面面积约 55 km² (2018 年)。流域四周环山, 北部为蛮汉山, 南部为马头山, 中间为断陷盆地。有 8 条较大的河沟直接汇入岱海, 分别为索岱沟、水草沟、大河沿河(苜花河)、天成河、步量河、土城子河、五号河和弓坝河, 其中只有弓坝河、天成河和大河沿河为常年河流, 其余均为季节性河流, 湖水补给方式主要为降水^[21] (图 1)。

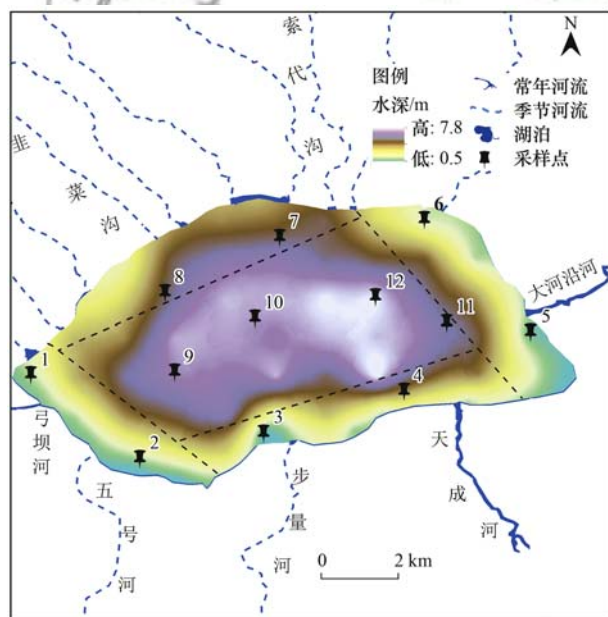


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Sampling points and location of Daihai Lake

1.2 样品采集与处理

全湖共设置 12 个采样点, 其中岱海东、西、南、北分别布置 2 个采样点, 中部均匀布置 4 个采样点, 并

用 GPS 进行定位导航, 分别于 2018 年 9 月 20 日 (秋季)、2019 年 2 月 25 日 (冬季)、2019 年 5 月 5 日 (春季)、2019 年 7 月 10 日 (夏季)、用有机玻璃采水器采集表层 0.5 m 处上覆水样品, 水质样品放入 2~8℃ 保温箱中保存, 并在 48 h 内进行分析测试。

取适量原水经 0.45 μm 混合纤维素膜过滤, 过滤水用于测定溶解性总氮 (DTN)、氨氮 (NH_4^+-N)、硝氮 (NO_3^--N)、溶解性总磷 (DTP) 和无机磷 (IP), 取适量混合均匀的原水样进行总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的测定。

1.3 样品的测定

样品 TN、DTN 的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB 11894-89), NH_4^+-N 的测定采用纳氏试剂比色法 (GB 7479-87), NO_3^--N 的测定采用紫外分光光度法 (HJ/T 346-2007), 由于 NO_2^--N 较不稳定且浓度较低, 这里不予考虑, 故溶解性有机氮 $\text{DON} = \text{DTN} - \text{NH}_4^+-\text{N} - \text{NO}_3^--\text{N}$, 颗粒态氮 $\text{PN} = \text{TN} - \text{DTN}$; TP、DTP 的测定采用过硫酸钾氧化钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89), IP 的测定采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89), 溶解性有机磷 $\text{DOP} = \text{DTP} - \text{IP}$, 颗粒态磷 $\text{PP} = \text{TP} - \text{DTP}$ 。

1.4 数据分析

上覆水总氮、总磷历史数据参考了相关文献[4, 22, 23], 所有实测指标均做 3 次平行, 试验结果以 3 次样品测定的平均值表示 (误差范围 < 5%), 相关分析采用皮尔逊 (Pearson) 相关系数法, 不同季节氮磷时空差异显著性检验采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), 空间差值采用克里格插值法 (Kriging)。实验数据采用 Excel 2010、Origin 2017、Suffer 14 和 SPSS 19.0 软件进行统计检验、绘图和分析。

2 结果与分析

2.1 岱海上覆水理化参数特征

岱海上覆水温度在 0.1 ~ 25.6℃, 平均值 15.6℃; 溶解氧 (DO) 在 6.30 ~ 8.32 mg·L⁻¹ 之间, 平均值 7.30 mg·L⁻¹, 溶解氧水平较高 (表 1); pH 在 8.93 ~ 8.97 之间, 平均值 8.95, 呈碱性; 电导率在 15.74 ~ 19.95 mS·cm⁻¹ 范围内, 平均值 17.96 mS·cm⁻¹, 平均矿化度约 12.15 g·L⁻¹, 已经达到强矿化水的浓度范围, 岱海上覆水盐碱化程度十分严重。

2.2 岱海上覆水氮时空变化特征

岱海上覆水氮、磷季节性差异较明显, 总氮季节变化趋势表现为冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季, 冬季高于其它季节, 见图 2; 上覆水中总氮在春季、夏季、秋季和冬季的浓度分别为 (3.74 ± 0.13)、(4.03 ± 0.34)、(3.74 ± 0.24) 和 (4.23 ± 0.29) mg·L⁻¹, 全年处于地表

水劣V类水水平,总氮污染较严重;冬季水体总氮浓度高是因为湖水结冰,总氮发生浓缩作用,对比发现冬季冰中总氮平均浓度在 $(1.19 \pm 0.50) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,不足水体的三分之一,总氮浓缩程度较强.从不同氮赋存形态来看,上覆水中主要以溶解态氮为主,春季、夏季、秋季和冬季占比分别为85.86%、82.78%、86.43%和91.39%,冬季占比最大,且各季节均以硝氮为主,溶解态有机氮次之,氨氮浓度始终处于较低水平,全年在 $0.15 \sim 0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $(0.21 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,处于地表水Ⅱ类水水平.

表 1 岱海上覆水理化参数
Table 1 Physical and chemical parameters of overlying water in Daihai Lake

季节	水温/℃	pH	DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	电导率/ $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$
春	18.6	8.93	7.98	19.26
夏	25.6	8.97	6.58	19.95
秋	18.1	8.94	6.30	16.90
冬	0.1	8.96	8.32	15.74
均值	15.6	8.95	7.30	17.96

从历史变化来看,根据金相灿^[22]等学者研究成果,早在1989年时岱海上覆水中总氮已经达到 $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而且在2006年高兴东^[4]的研究中发现,岱海上覆水总氮浓度为 $2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,20年间岱海总氮浓度基本保持不变,但2013年在侯兆洁^[23]的研究中,岱海上覆水总氮浓度上升为 3.02

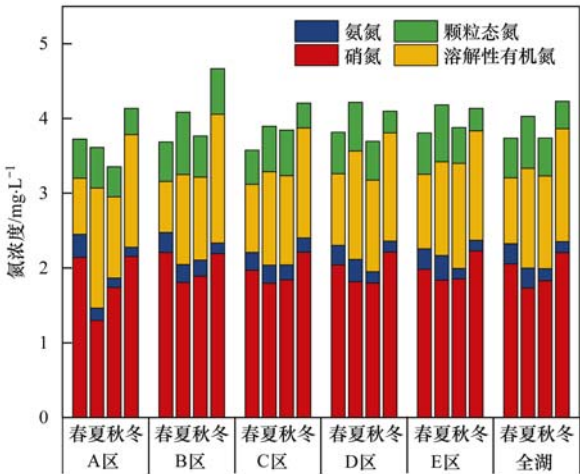


图 2 岱海上覆水氮浓度季节变化特征
Fig. 2 Seasonal variation characteristics of nitrogen concentration in overlying water

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而本研究中,据2019年5月监测数据显示,岱海总氮浓度高达 $3.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,近10年总氮浓度增加速度较快,这可能是因为近年来岱海周边农业发展迅速,化肥使用量明显增长,大量未被利用的养分通过降雨径流、淋溶和农田灌溉回归水等方式汇入湖泊之中,另外多年沉积在湖底的底泥营养盐会发生内源释放,从而导致上覆水中总氮浓度升高.

从空间分布特征来看(图3),春季和夏季总氮呈现湖心深水区明显高于周边,秋季总氮浓度呈自东向西递减的趋势,而在冬季则呈现南部浅水区高

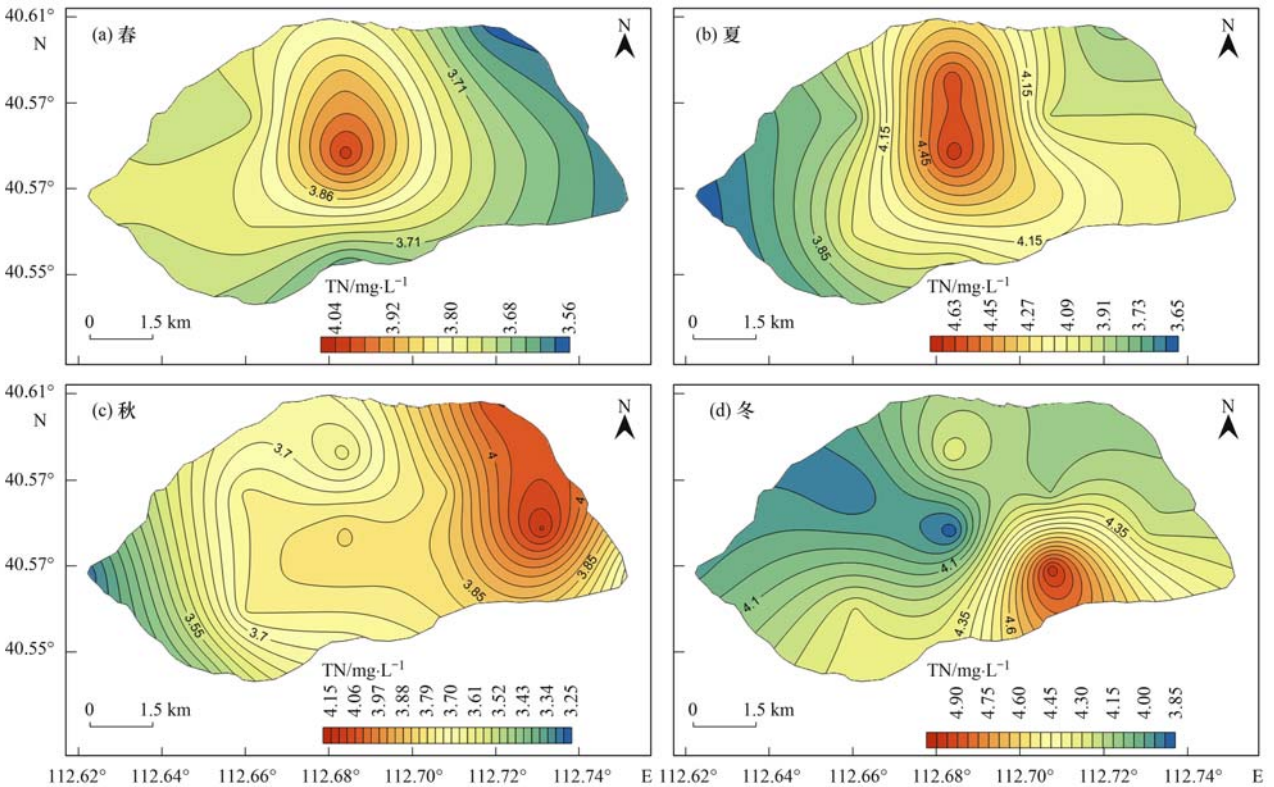


图 3 岱海上覆水 TN 在春、夏、秋和冬季空间分布特征
Fig. 3 Spatial distribution characteristics of total nitrogen in different seasons

于北部区域的趋势,可能是因为,春季夏季周边浅水区生长有沉水植物,对水质起到了一定的净化作用,而到了秋季,植物开始死亡腐烂,从而造成局部沿岸水质变差,而到了冬季温度低湖水结冰,周边浅水区总氮浓缩作用更强,因而在南部沿岸区总氮浓度较高,而西北部冬季总氮浓度低是因为有泉水流入。

2.3 岱海上覆水总磷时空变化特征

总磷季节变化趋势表现为夏季>春季>冬季>秋季,和总氮不同,总磷夏季高于其它季节。上覆水中总磷在春季、夏季、秋季和冬季的浓度分别为(0.116±0.022)、(0.136±0.014)、(0.094±0.014)和(0.098±0.011)mg·L⁻¹,春季、夏季处于地表水Ⅴ类水水平,秋、冬季节稍低达到地表水Ⅳ类标准范围,与总氮相反,总磷冬季浓度相对较低,而冬季冰中总磷浓度平均为0.077mg·L⁻¹,也存在一定的浓缩作用,但总磷的浓缩强度较总氮低,且此时水体流动性较差,部分颗粒态磷会随悬浮物沉积于湖底,从而造成冬季总磷浓度偏低。从不同磷赋存形态来看,上覆水中磷也是以溶解态为主,见图4,春季、夏季、秋季和冬季占比分别为72.77%、75.14%、77.95%和85.48%,冬季占比明显高于其它季节,各季节溶解态有机磷浓度占比例较大且较稳定,基本维持在(0.086±0.016)mg·L⁻¹,无机磷浓度全年处于较低水平,相对而言,夏季稍高;颗粒态磷浓度在春、夏季明显高于秋、冬季节,可能是因为春、夏季风浪扰动作用强,造成底泥再悬浮。

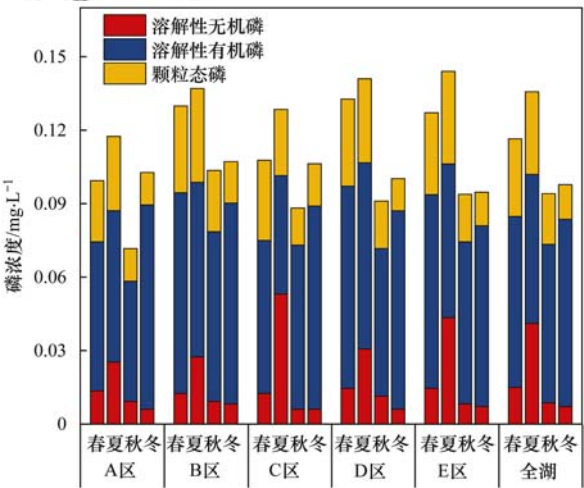


图4 岱海上覆水磷浓度季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variation characteristics of phosphorus concentration in overlying water

从历史变化来看,1989年岱海总磷高达0.22mg·L⁻¹,2006年岱海总磷为0.20mg·L⁻¹,已经超过地表水Ⅴ类水标准限值,处于劣Ⅴ类水状态,而2019年5月本研究监测数据显示,总磷浓度平均为0.116mg·L⁻¹,总磷浓度呈现降低的趋势,达到地表

水Ⅴ类水水平,有研究表明Ca²⁺的存在能促进沉积物对磷的吸附作用^[24],而抑制释放作用,且在碱性和弱酸性条件下,Ca²⁺促进沉积物中的磷吸附,Ca²⁺浓度越大沉积物对磷的吸附量越大。本研究中,岱海水体pH在9左右,较20世纪90年代有所升高,Ca²⁺的平均浓度为22.5mg·L⁻¹,说明岱海沉积物会表现出一定的磷吸附作用,且吸附于沉积物中的磷随着岱海面积的萎缩固定在干涸的底泥中,从而使得水体总磷浓度降低。

从空间分布特征来看(图5),不同季节总磷的空间分布特征与总氮相似,春季、夏季中部深水区总氮浓度高于沿岸浅水区,秋季湖心和沿岸部分区域出现高值,冬季则呈现南部湖区高于北部湖区的趋势。

3 讨论

3.1 岱海水体总氮、总磷浓度与全国湖泊对比分析

岱海是我国位于半干旱区典型内陆湖,湖水有进无出,且受地形、气候和人类活动的影响岱海水域面积萎缩严重,水体盐碱化程度日益加剧,水生态恶化已成为社会关注的焦点。本次研究所监测的数据中,水体总氮和总磷的平均值分别为3.93mg·L⁻¹和0.111mg·L⁻¹,总氮常年处于地表水劣Ⅴ类水平,总磷处于Ⅴ类水平,近两年在高温天气局部区域出现蓝藻暴发现象,水体富营养化形势十分严峻。

将岱海与全国其它湖区水体氮磷浓度对比发现(表2),岱海水体总氮浓度明显高于其它湖区,同时高于自治区内的呼伦湖和乌梁素海,岱海水体总氮

表2 岱海与五大湖区主要湖泊水体近年总氮和总磷平均浓度对比
Table 2 Average content of total nitrogen and phosphorus in the main lakes of the five great lakes in recent years

湖区	湖泊名称	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
东部湖区	太湖 ^[25]	1.80	0.06
	鄱阳湖 ^[26]	1.52	0.14
	洞庭湖 ^[27]	2.25	0.14
	巢湖 ^[28]	2.00	0.10
东北湖区	小兴凯湖 ^[29]	2.12	0.12
	镜泊湖 ^[30]	0.79	0.02
	查干湖 ^[31]	1.40	0.10
	松花湖 ^[32]	1.56	0.03
青藏湖区	可鲁克湖 ^[33]	1.54	0.01
	青海湖 ^[34]	0.87	0.05
	羊卓雍错 ^[35]	0.12	0.05
	洱海 ^[36]	0.62	0.03
云贵湖区	滇池 ^[37]	2.20	0.14
	抚仙湖 ^[38]	0.19	0.01
	万峰湖 ^[39]	2.05	0.36
	乌梁素海 ^[40]	2.15	0.08
蒙新湖区	呼伦湖 ^[41]	1.94	0.19
	岱海	3.93	0.11

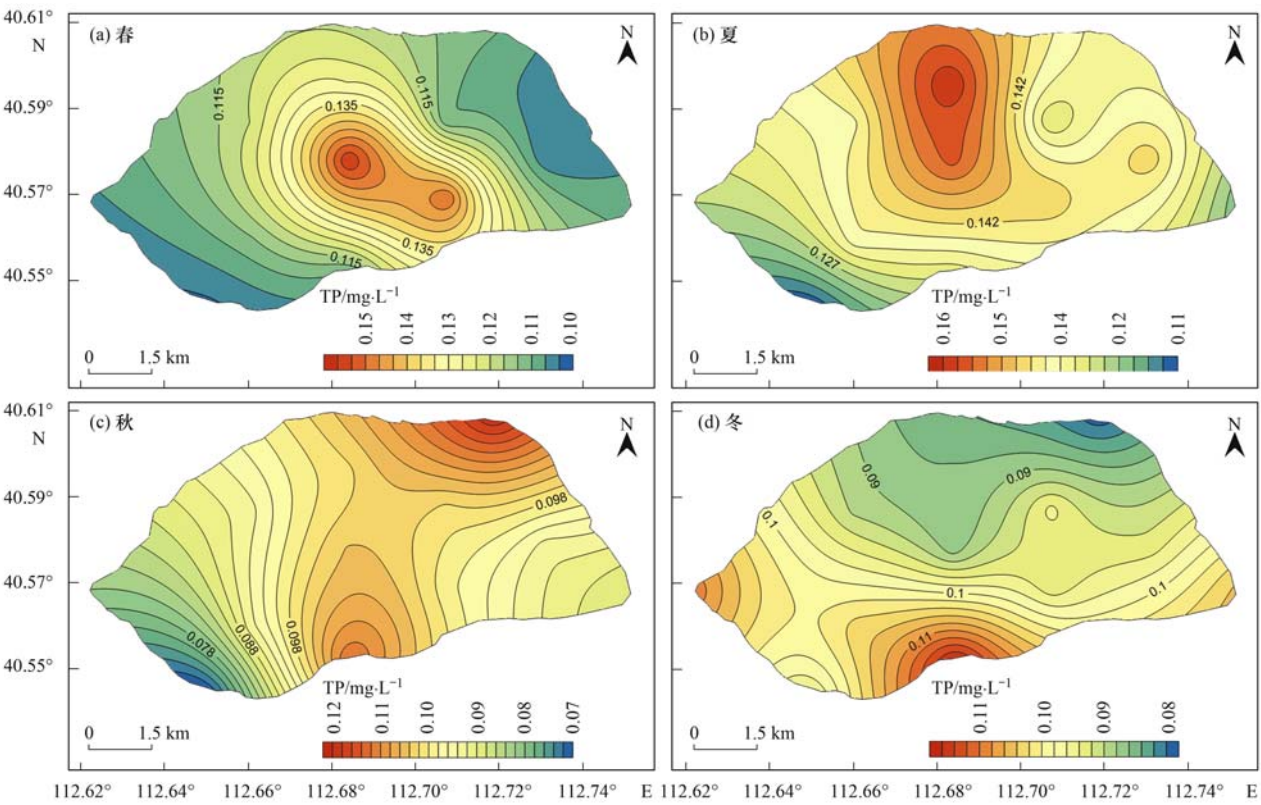


图5 岱海上覆水 TP 在春、夏、秋和冬季空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of total phosphorus in different seasons

已经处于全国较高水平;对于总磷,虽然从历史变化来看,岱海水体总磷浓度有降低的趋势,但在全国湖泊中仍处于中等偏高水平,总体高于东北湖区和青藏湖区湖泊,与东部湖区的鄱阳湖、洞庭湖、巢湖和云贵湖区的滇池总磷浓度相近,不容忽视.

3.2 岱海水体氮、磷形态赋存特征分析

结合岱海水体氮、磷及其形态的时空变化特征,可以看出岱海水体总氮、总磷在空间分布上保持一致,各形态氮、磷空间分布上也无明显的差异性(图6),且总氮、总磷均以溶解态为主. 水体中 DTN 占

TN 的百分比在 82.78% ~ 91.39% 之间,平均为 86.61%,两者之间呈显著的正相关($r = 0.83, P < 0.01$),另外 PN 与 TN 也存在一定的相关性,但相比于 DTN 和 TN,相关系数小得多;水体中 DTP 占 TP 的百分比在 72.77% ~ 85.48% 之间,平均为 77.84%,水体中 DTP 与 TP、PP 与 TP 均呈显著正相关,相关系数分别为 0.93 和 0.83,相关性系数均较大,说明通过各种途径进入水中的 DTP 是岱海水体磷的主要贡献者,其次是悬浮颗粒物吸附态的磷和浮游生物态的磷.

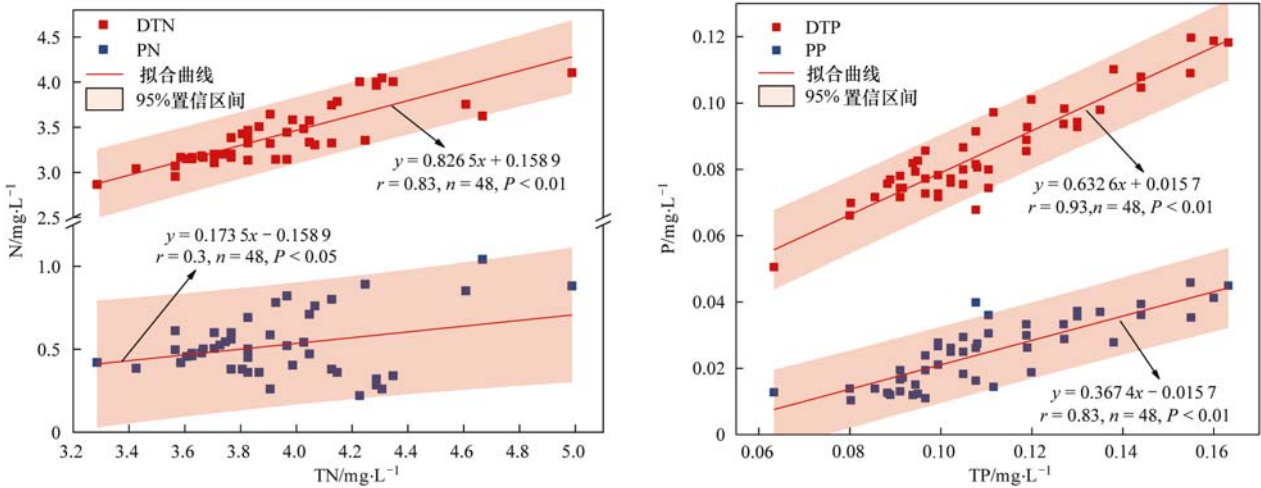


图6 岱海上覆水氮和磷不同赋存形态相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of different occurrence forms of nitrogen and phosphorus in overlying water

综上可知,岱海水体中氮和磷转化机制存在一定的差异性,通常情况下水中氮的去除通过反硝化作用在厌氧($\text{DO} < 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)环境中将水体中的氮转化为气态氮脱离水体,而在本次调查研究中,岱海水体中溶解氧水平并不低,一般在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,因而水中的氮素很难发生反硝化作用,而随着岱海水域面积减小,水中氮势必发生浓缩;另一方面影响水中氮浓度水平的就是底泥内源释放,然而随着岱海水域面积的减少,大面积沉积物裸露于空气中干化,沉积物内源释放量也会随之减少,当浓缩的强度高于内源释放减少的强度时,水体总氮就会表现出增加的现象,这可能是近年岱海水体总氮增加的原因之一. 对于磷而言,易与钙结合形成钙磷沉积于底

泥中,随着水面减少,内源释放量也在减少,当磷的沉积作用大于释放作用时,水中磷就会呈现降低的趋势.

3.3 冰封对岱海水体氮、磷赋存特征的影响

每年的 11 月岱海水面开始结冰进入冰封期,一直持续到次年 4 月开始融化,冰封期长达半年. 从图 7 可以看出冰封对总氮的影响较大,冰封期的总氮和溶解性总氮均高于非冰封期,这主要是因为岱海水体因结冰而发生浓缩作用;对于磷而言,既存在浓缩作用又存在沉积作用,颗粒态磷更容易发生沉积,从而导致冰封期总磷稍低于非冰封期,而溶解性总磷无明显变化. 由此可见,冰封对岱海水体总氮浓度的影响较大.

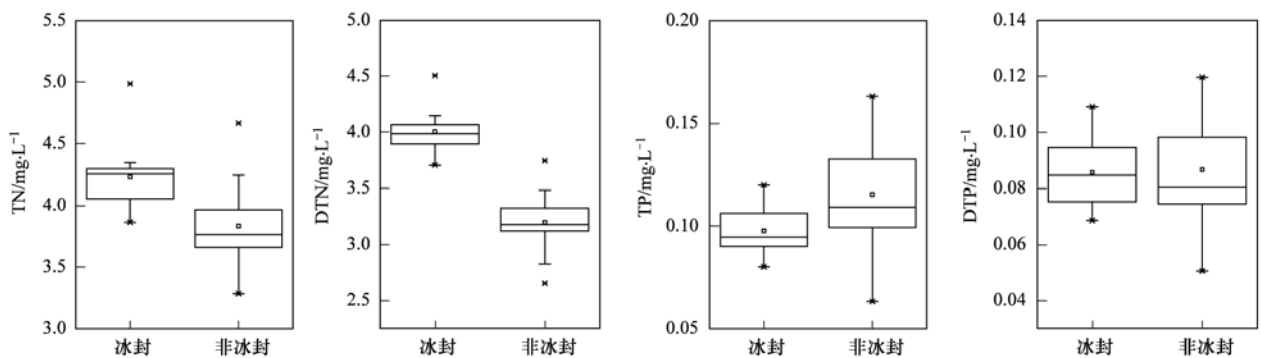


图7 冰封期非和冰封期氮磷浓度对比

Fig. 7 Comparison of nitrogen and phosphorus concentrations in icebound and non-icebound periods

岱海为农牧交错带尾间湖,湖泊本身没有出流,使得入湖外源污染物长期积累于湖内,加之湖内藻类和水草等大量生长,随季节消亡后腐烂于湖底,导致内源污染相对较为严重. 因此在防治岱海水质恶化时需着重考虑控制内源污染,加强底泥污染的范围、深度、污染程度和释放通量的调查,摸清底泥中污染物的蓄积量,结合工程可行性、必要性制定内源治理和生态修复方案.

4 结论

(1) 岱海水体总氮浓度在 $3.29 \sim 4.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $(3.93 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,常年处于地表水劣 V 类水平,受冰封影响冬季总氮明显高于其它季节,空间上因季节的变化存在一定的差异.

(2) 岱海水体总磷浓度在 $0.063 \sim 0.163 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $(0.111 \pm 0.023) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,处于地表水 V 类水平,在夏季的浓度明显高于其它季节,空间分布随季节变化而不同.

(3) 岱海上覆水中氮和磷均以溶解态为主,溶解态氮在春季、夏季、秋季和冬季上覆水总磷中占比分别为 85.86%、82.78%、86.43% 和 91.39%,平均为 86.62%,主要以硝态氮形态存在;溶解态磷在春

季、夏季、秋季和冬季上覆水总磷中占比分别为 72.77%、75.14%、77.95% 和 85.48%,平均为 77.84%,且溶解性有机磷占主导.

(4) 与五大湖区主要湖泊水体近年总氮、总磷平均浓度比较,岱海水体总氮和总磷均值已处于较高水平,湖水浓缩和内源营养盐释放是造成水体高总氮和总磷的主要原因,建议结合工程措施进行内源治理和生态修复,以防止岱海水质继续恶化.

参考文献:

- [1] Carpenter S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(32):11039-11040.
- [2] Reitzel K, Ahlgren J, Gogoll A, *et al.* Effects of aluminum treatment on phosphorus, carbon, and nitrogen distribution in lake sediment: a ^{31}P NMR study [J]. *Water Research*, 2006, **40**(4): 647-654.
- [3] Shan L N, He Y F, Chen J, *et al.* Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, **159**: 255-263.
- [4] 高兴东. 岱海湖泊营养盐的环境地球化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2006. 74-76.
Gao X D. Environmental geochemical characteristics of nutrient in Daihai Lake [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2006. 74-76.
- [5] 孙英. 岱海内源氮磷的释放特性及富营养化研究[D]. 呼和

- 浩特; 内蒙古大学, 2008. 37-42.
- [6] 周云凯, 姜加虎. 近 43 年岱海湖区气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(7): 8-13.
Zhou Y K, Jiang J H. Analysis on characteristics of climatic change in the region of lake Daihai in recent 43 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, **23**(7): 8-13.
- [7] 张丽艳. 利用孢粉资料定量恢复岱海盆地近 600 年的植被和气候变化[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009. 22-25.
Zhang L Y. Pollen-based quantitative reconstruction of about 600a climate changes in the Daihai Lake area, Inner Mongolia, China[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2009. 22-25.
- [8] 孙占东, 姜加虎, 黄群. 近 50 年岱海流域气候与湖泊水文变化分析[J]. 水资源保护, 2005, **21**(5): 16-18, 26.
Sun Z D, Jiang J H, Huang Q. Analysis of climate and lake hydrological change in Daihai basin in the late 50 years [J]. Water Resources Protection, 2005, **21**(5): 16-18, 26.
- [9] 金章东, 王苏民, 沈吉, 等. 全新世岱海流域化学风化及其对气候事件的响应[J]. 地球化学, 2004, **33**(1): 29-36.
Jin Z D, Wang S M, Shen J, *et al.* Watershed chemical weathering and its response to climate events in Daihai area during Holocene[J]. Geochimica, 2004, **33**(1): 29-36.
- [10] 张振克, 吴瑞金. 近 300 年来岱海流域气候干湿变化与人类活动的湖泊响应[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2001, **22**(3): 70-76.
Zhang Z K, Wu R J. Climatic variation and human activities recorded by lake sediment in the catchment of Daihai Lake during the Past 300 Years[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2001, **22**(3): 70-76.
- [11] 陈海英, 安莉娟, 张锦龙. 岱海湖水面积演变特征及与气象因子关联度分析研究[J]. 环境科学与管理, 2018, **43**(12): 62-65.
Chen H Y, An L J, Zhang J L. Characteristics of water surface area evolution and correlation analysis with meteorological factors in Daihai Lake[J]. Environmental Science and Management, 2018, **43**(12): 62-65.
- [12] 赵辉, 郭田保. 基于 GIS 的岱海湖面面积动态变化分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2014, (23): 55-57.
- [13] 周云凯, 姜加虎, 黄群, 等. 内蒙古岱海水质咸化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(12): 51-55.
Zhou Y K, Jiang J H, Huang Q, *et al.* Analysis on water salinization process of Daihai Lake in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, **22**(12): 51-55.
- [14] 赵斌, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 岱海水质咸化过程中若干生态因子的变化[J]. 水生生物学报, 2000, **24**(5): 502-508.
Zhao B, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Studies on the changes of several ecological factors during the process of water salinization in Daihai Lake, China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, **24**(5): 502-508.
- [15] 赵斌, 蔡庆华, 黎道丰, 等. 岱海水质咸化过程中营养状况的变化[J]. 水生生物学报, 2000, **24**(5): 509-513.
Zhao B, Cai Q H, Li D F, *et al.* Preliminary study on the changes of trophic state during the process of water salinization in Daihai Lake, China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, **24**(5): 509-513.
- [16] 黄文钰, 姜加虎, 黄群. 岱海水质咸化及其原因分析[J]. 贵州环保科技, 1997, **3**(3): 32-36.
- [17] 吕昌伟, 何江, 毛海芳, 等. 乌梁素海和岱海的水-沉积物系统中有机磷分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(3): 541-545.
Lv C W, He J, Mao H F, *et al.* Distribution characters of organic phosphorus in the overlying water-sediment system of the Wuliangsu Hai and Daihai in the Inner Mongolia Plateau, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(3): 541-545.
- [18] 何江, 孙英, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中内源磷的释放[J]. 生态学报, 2010, **30**(2): 389-398.
He J, Sun Y, Lü C W, *et al.* Research on phosphorus release from the surface sediments in the Daihai Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(2): 389-398.
- [19] 孙英, 何江, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中影响氨氮释放的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1464-1468.
Sun Y, He J, Lv C W, *et al.* The simulation research of ammonium nitrogen release from the surface sediments of the Daihai Lake [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(7): 1464-1468.
- [20] 吕昌伟, 何江, 高兴东, 等. 岱海表层沉积物中氮素的水平分布及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(6): 2305-2308.
Lü C W, He J, Gao X D, *et al.* Spatial distribution of nitrogen in surface sediments of Daihai Lake and its environmental significance[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(6): 2305-2308.
- [21] 王丽, 马桂芬, 翟俊峰, 等. 岱海富营养化评价与分析[J]. 内蒙古水利, 2013, (3): 40-41.
- [22] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 557-558.
- [23] 侯兆洁. 内蒙古高原典型湖泊氮的地球化学特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013. 12-14.
Hou Z J. The study on the geochemical characteristics of nitrogen in four typical lakes of Inner Mongolia Plateau, China [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013. 12-14.
- [24] 金晓丹, 吴昊, 王启明, 等. 钙离子和 pH 对长江河口青草沙水库水体磷浓度的影响[J]. 环境工程技术学报, 2016, **6**(5): 462-468.
Jin X D, Wu H, Wang Q M, *et al.* Impact of calcium and pH on content of phosphorus in water of Qingcaosha reservoir of Yangtze Estuary[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, **6**(5): 462-468.
- [25] 戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉, 等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985-2015 年)[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.
Dai X L, Qian P Q, Ye L, *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(5): 935-943.
- [26] 胡春华, 周文斌, 王毛兰, 等. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 723-728.
Hu C H, Zhou W B, Wang M L, *et al.* Inorganic nitrogen and phosphate and potential eutrophication assessment in Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 723-728.
- [27] 田琪, 李利强, 欧伏平, 等. 洞庭湖氮磷时空分布及形态组成特征[J]. 水生态学杂志, 2016, **37**(3): 19-25.
Tian Q, Li L Q, Ou F P, *et al.* Temporal-spatial distribution and speciation of nitrogen and phosphorus in Dongting Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2016, **37**(3): 19-25.
- [28] 丁虹. 巢湖 2005—2014 年湖水水质状况[J]. 水资源开发与管理, 2016, (3): 57-59.
Ding H. Water quality conditions of Chaohu Lake during 2005—2014 [J]. Water Resources Development and Management,

- 2016, (3): 57-59.
- [29] 于珊珊. 小兴凯湖水质变化及驱动力因子分析[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015. 15-42.
- Yu S S. The water quality change and driving force analysis in Xiaoxingkai Lake [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, China, 2015. 15-42.
- [30] 刘玉勇, 周绪申. 镜泊湖水质及富营养化状况分析[J]. 东北水利水电, 2013, **31**(8): 57-58, 70.
- [31] 张天翼. 查干湖水质迁移转化规律及污染成因分析[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2015. 31-34.
- Zhang T Y. Water quality transport-transformation regulations and pollution reasons analysis for Chagan Lake [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2015. 31-34.
- [32] 邹继颖, 刘辉, 郑建伟, 等. 松花湖水质富营养化现状研究[J]. 吉林化工学院学报, 2014, **31**(5): 80-82.
- Zou J Y, Liu H, Zheng J W, *et al.* Studies on the status of eutrophication and countermeasures in Songhua Lake[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2014, **31**(5): 80-82.
- [33] 周小平, 杨晓丽. 青藏高原湖区可鲁克湖富营养化评价——基于灰色聚类法[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2016, **32**(3): 63-70.
- Zhou X P, Yang X L. Eutrophication evaluation of Keluke Lake based on grey clustering method[J]. Journal of Qinghai Normal University (Nature Science), 2016, **32**(3): 63-70.
- [34] 祁玥, 王维, 周双喜, 等. 应用综合水质标识指数法评价分析青海湖水质[J]. 湖北农业科学, 2015, **54**(6): 1331-1334.
- Qi Y, Wang W, Zhou S X, *et al.* Assessing water quality of Qinghai Lake based on a comprehensive identification index of water quality[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, **54**(6): 1331-1334.
- [35] 者萌, 张雪芹, 孙瑞, 等. 西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 287-294.
- Zhe M, Zhang X Q, Sun R, *et al.* Assessment of water quality and the pollution factors of waters in Yamzhog Yumco Basin, Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 287-294.
- [36] 张态. 洱海氮磷时空分布特征及其外源负荷研究[D]. 大理: 大理学院, 2011. 32-34.
- Zhang T. Research on the spatio-temporal distribution of the concentrations of nitrogen and phosphorus and exogenous fluxes in Erhai Lake[D]. Dali: Dali University, 2011. 32-34.
- [37] 王杰, 毛建忠, 谢永红, 等. 2008~2014年滇池水质时空变化特征分析[J]. 人民长江, 2018, **49**(5): 11-15.
- Wang J, Mao J Z, Xie Y H, *et al.* Water quality variation characteristics of Dianchi Lake during 2008 to 2014[J]. Yangtze River, 2018, **49**(5): 11-15.
- [38] 胡晓英, 王杰, 曹言, 等. 2008—2014年抚仙湖水质变化特征[J]. 人民珠江, 2018, **39**(5): 1-7.
- Hu X Y, Wang J, Cao Y, *et al.* The variation characteristics of water quality in the upper water column of Lake Fuxian from the year of 2008 to 2014[J]. Pearl River, 2018, **39**(5): 1-7.
- [39] 王青松. 万峰湖水质以及经济可持续发展研究[J]. 当代经济, 2018, (4): 114-115.
- [40] 李红悦, 李兴, 管超, 等. 乌梁素海水质变化特征[J]. 安徽农业科学, 2018, **46**(14): 82-85.
- Li H Y, Li X, Guan C, *et al.* Variation characteristics of water quality in Wuliangsuhai Lake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, **46**(14): 82-85.
- [41] 梁丽娥, 李畅游, 孙标, 等. 内蒙古自治区呼伦湖水质变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(2): 102-106.
- Liang L E, Li C Y, Sun B, *et al.* Impact factors and Characteristics of water quality variation of Hulun Lake in Inner Mongolia Automous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(2): 102-106.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)