

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



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚	(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣	(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰	(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚	(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余	(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉	(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰	(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊	(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀	(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰	(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲	(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣	(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰	(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超	(1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任	(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰	(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌	(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新	(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬	(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫	(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高	(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠	(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民	(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中	(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳	(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪	(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安	(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生	(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏	(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳	(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华	(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲	(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓	(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe) 可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永	(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞	(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政	(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖	(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕	(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂	(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟	(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚	(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启	(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹	(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良	(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳	(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand	(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔	(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪	(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波	(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋	(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹	(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣	(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥	(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青	(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏	(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)	信息(1663, 1796, 1833)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异

龚佳健^{1,2,3}, 倪兆奎^{2,3,4}, 肖尚斌¹, 赵海超^{3,4,5}, 席银¹, 王圣瑞^{1,2,3,4*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4. 云南省环境科学研究院, 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 昆明 650034; 5. 河北北方学院农林科技学院, 张家口 075131)

摘要: 通过模拟实验探讨了4种覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态总磷(DTP)、溶解态有机磷(DOP)和溶解态无机磷(SRP)释放影响及差异。结果表明: ①与无覆盖对照相比, 覆盖材料通过改变洱海沉积物pH和Eh及溶解性有机质(DOM)特征, 降低了沉积物DTP最大释放量, 其中, 覆盖氧化铁对洱海北部和南部沉积物DTP释放控制效果较好, 与无覆盖对照相比, 释放量分别减少了44.3%和35.71%; 而覆盖氧化铝对中部湖区沉积物DTP释放控制效果较好, 与无覆盖对照相比, 释放量减少了29.6%。②覆盖铁铝氧化物对洱海不同湖区沉积物SRP和DOP释放量影响差异明显, 北部湖区沉积物覆盖氧化铁后, SRP和DOP释放量分别降低了35.6%和36.2%, 主要是因为其降低了沉积物pH和Eh, 而增加了DOM活性所致; 中部湖区沉积物覆盖氧化铝后, SRP和DOP释放量分别降低了28.9%和31.6%, 与氧化铝促进了该湖区DOM活性密切相关; 南部湖区沉积物覆盖氧化铁后, 沉积物SRP和DOP释放量分别降低了47.4%和16.5%。则与覆盖氧化铁降低了该湖区沉积物pH和Eh有关。因此, 如选择覆盖材料控制洱海不同湖区沉积物磷释放, 北部和南部湖区应选择覆盖氧化铁, 而中部湖区应选取氧化铝作为覆盖材料。

关键词: 沉积物; 覆盖材料; 溶解态有机磷; 溶解态无机磷; 磷释放

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1826-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807243

Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake

GONG Jia-jian^{1,2,3}, NI Zhao-kui^{2,3,4}, XIAO Shang-bin¹, ZHAO Hai-chao^{3,4,5}, XI Yin¹, WANG Sheng-rui^{1,2,3,4*}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed, Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China; 5. College of Agricultural and Forestry Science and Technology, Hebei North University, Zhangjiakou 075131, China)

Abstract: In this work, the effects of four covering materials on the release of total dissolved phosphorus (DTP), dissolved organic phosphorus (DOP), and soluble reactive P (SRP) in different sediments of Erhai Lake were simulated. The results showed that the max release of DTP was reduced in covering material, which attributed to the changes of pH, Eh and characteristics of dissolved organic matter (DOM) by the effect of covering material. The application of iron oxide material significant reduced the release of DTP in the northern and southern part of the lake, with decrease rate of 44.3% and 35.7%, respectively. by contrast, the application of aluminum oxide material significant reduced the release of DTP in the middle part sediment, with decrease rate of 29.6%. Furthermore, the release of SRP and DOP in different sediments has significant difference after added different material. In northern part of sediment, the release of SRP and DOP reduced by 35.6% and 36.2% after added iron oxide material. This is because iron oxide can reduce the pH and Eh but increase the availability of DOM in northern, and then benefits for inhibiting the release of SRP and DOP. In the middle, the release of sediment SRP and DOP reduced by 28.9% and 31.6% after added aluminum oxide material. This is because the aluminum oxide can facilitate the availability of DOM in middle, and then inhibits the release of SRP and DOP. In southern part of the lake, the release of sediment SRP and DOP reduced by 47.4% and 16.5% after added iron oxide material. This is largely attributed to the effect of iron oxide on the pH and Eh. Therefore, to control the release of P in the sediment from Lake Erhai, iron oxide material should be selected in the northern and southern parts, whereas aluminum oxide should be selected in the middle part of the lake.

Key words: sediment; covering material; dissolved organic phosphorus; dissolved inorganic phosphorus; phosphate release

收稿日期: 2018-07-28; 修订日期: 2018-10-28

基金项目: 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室开放基金项目(230200069); 国家万人计划项目(312232102)

作者简介: 龚佳健(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化过程与机制, E-mail: 1223414859@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangsr@bnu.edu.cn

沉积物磷释放是湖泊营养盐的重要来源^[1],浅水湖泊沉积物磷释放量可占湖泊内负荷的 60% ~ 80%^[2]. 沉积物-水界面间磷的迁移转换主要包括颗粒态磷的沉降与再悬浮,溶解态磷的吸附与解析等物理、化学过程及相互作用^[3]. 沉积物溶解态磷主要分为溶解态有机磷和溶解态无机磷,现有关沉积物磷释放的研究主要集中在沉积物总磷及活性磷释放影响,而对于沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异的研究较少. 有研究表明,溶解态有机磷在一定条件下可转化为溶解态无机磷,进而被生物所利用,参与磷的生物地球化学循环,并加剧湖泊富营养化进程^[4]. 因此,探讨沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异,对湖泊沉积物不同形态磷释放研究具有重要意义.

控制湖泊沉积物磷负荷的方法主要有原位处理和异位处理,其中,原位覆盖技术是一种广泛应用于沉积物磷负荷阻控的修复技术,该技术主要通过沉积物表面覆盖一层或多层材料,使沉积物与上覆水分隔,从而阻止沉积物磷释放^[5,6]. 磷负荷控制材料主要分为化学钝化剂、天然矿物、工业副产物、改性(合成)材料等 4 种类型^[7]. 目前国内外已经展开了大量有关湖泊沉积物磷释放控制材料的研究,并取得较好的结果. Lu 等^[8]通过室内模拟,研究了不同类型聚合氯化铝对滇池沉积物磷释放控制效果,结果表明,随着药剂投加量的增加,其对界面磷酸盐的控释效果增强; Hayes 等^[9]在 Foxcote 水库使用 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸铁后一个月,水体中 SRP 从 $7 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $3 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 也从 $30 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $16 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,但大多数研究集中在单个材料性能方面研究,而沉积物磷负荷控制材料的对比研究以及控制材料对不同特征沉积物磷释放影响等方面的研究相对不足.

洱海位于云南省大理白族自治州境内,是云贵高原第二大淡水湖泊,湖泊水质总体较好,稳定在 II ~ III 类^[10],但沉积物中磷负荷较高,总磷含量明显高于太湖、巢湖等富营养化湖泊^[11],其中无机磷含量明显比有机磷较高,且环境条件的变化对活性有机磷的影响较大^[12]. 近年来,随外源磷输入得到有效遏制,沉积物磷释放对洱海水污染及富营养化影响日益凸显. 基于此,本文以洱海北、中、南区域沉积物为研究对象,选择常用的氧化铝、氧化铁、氧化锰和湖沙这 4 种覆盖材料,分析覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放的影响及差异,从控制沉积物磷释放角度探讨洱海不同区域沉积物适合的覆盖材料,以期对洱海富营养化控制提供技术储备.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据地形地貌和污染物输入的差异性,洱海可分为北部、中部和南部这 3 个区域. 由于 9 月是洱海沉积物释放量较大的月份,本研究于 2016 年 9 月利用彼得森采样器采集了 E1、E2 和 E3 这 3 个代表性的表层沉积物,采样点具体位置如图 1 所示.

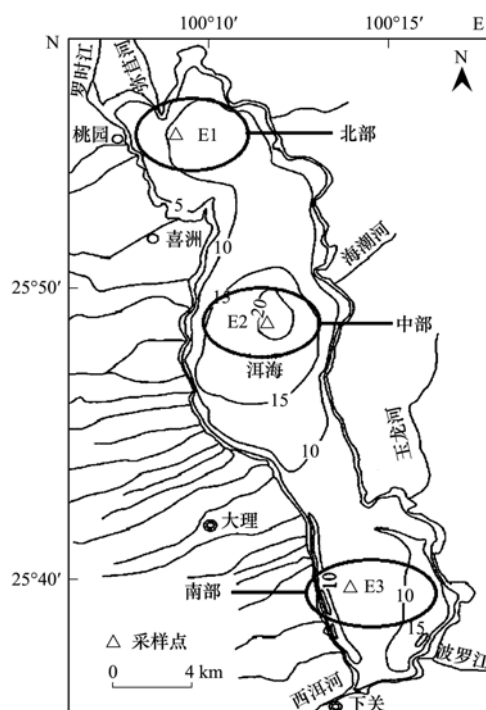


图 1 洱海沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites on Erhai Lake

洱海各采样点沉积物的基本理化特征如表 1 所示. 洱海表层沉积物 $\omega(\text{TOM})$ 总体呈北部 > 中部 > 南部、 $\omega(\text{TN})$ 总体呈北部 > 南部 > 中部、 $\omega(\text{TP})$ 总体呈北部 > 南部 > 中部.

1.2 实验方法

采集后的表层沉积物,去除杂质后分别放置于自制的圆柱形培养箱(高:25 cm,直径:15 cm)中,沉积物厚度为 10 cm,分别在每个培养箱覆盖相同厚度、相同粒径(5 ~ 10 目)的氧化铝(Al 组)、氧化铁(Fe 组)、氧化锰(Mn 组)和湖沙(湖沙组),同时做不添加组(CK 组)为对照组,加去离子水 2 L,在 25℃ 下静态放置,定期补水,保持上覆水 2 L,每隔一个月测定上覆水不同形态磷的含量,同时分别采用 pHS-25 型和 250A 型氧化还原点位测量仪测定上覆水体的 pH 和 Eh 值. 培养一年后,去除覆盖物,取各组沉积物进行冷冻、干燥,研磨过后先进行沉积物溶解性有机质(DOM)的提取,然后测定其紫外-可见吸收光谱及三维荧光光谱.

表 1 洱海沉积物基本理化特征

Table 1 Basic physicochemical characteristics of the surace sediment in Erhai Lake

采样点	$\omega(\text{TOM})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Eh/mV	pH
E1	97.24	1 032.54	6 347.02	134.42	7.82
E2	82.40	625.13	2 540.11	171.25	8.62
E3	44.91	820.90	5 252.99	158.76	8.13

其中沉积物溶解性有机质的提取,通过取 3 g 过 1.149 mm 筛的沉积物样品于 50 mL 离心管中,加 Milli-Q 超纯水[$V(\text{水}):m(\text{土})=10:1$],恒温振荡 24 h,10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,上清液过 0.45 μm 的玻璃纤维膜(预先于 450℃ 灼烧 5 h)后,收集滤液在 4℃ 下冷藏;沉积物中 DOM 利用紫外-可见吸收光谱(Varian UV-Vis spectrophotometer DR 5000, 哈希, 美国)测定,扫描波长范围为 200 ~ 900 nm,步长为 1 nm,以 Milli-Q 超纯水为参考,中速扫描,自动扣除空白测定其光谱;沉积物中 DOM 的三维荧光光谱利用 Hitachi F-7000 型荧光光谱分析仪扫描,激发波长为 5 nm,发射波长为 5 nm,扫描速度为 2 400 $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$,扫描光谱进行仪器自动校正,以 Milli-Q 超纯水做空白测定其光谱。

沉积物向上覆水体释放磷主要以溶解态为主,即为溶解态总磷(DTP).大多数研究普遍认为沉积物释放的溶解态总磷(DTP)主要包括溶解态有机磷(DOP)和以溶解态活性磷(SRP)为主的溶解态无机磷,溶解态总磷(DTP)和溶解态活性磷(SRP)参照文献[13]的钼锑抗-分光光度法测定,其中 $\text{DOP} = \text{DTP} - \text{SRP}$ 。

1.3 数据处理

本实验基本数据采用 Sigmaplot 10 进行一级动力学方程拟合,荧光组分分析采用 Matlab-2015 处理,然后再用 Origin 8.5 和 Excel 软件绘制图表并进行分析。

2 结果与分析

2.1 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 DTP 释放影响

洱海沉积物 DTP 释放动力学过程如图 2 所示,可分为快速释放、慢速释放以及释放平衡阶段.快速释放主要发生在 1 个月内,慢速释放过程主要发生在 1 ~ 4 个月内,4 个月之后释放过程基本趋于平衡.覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DTP 释放动力学曲线影响趋势基本相同,相比 CK 组,覆盖不同材料后各湖区沉积物 DTP 释放量均有明显的降低.为定量分析沉积物磷的释放动力学过程,采用一级动力学方程进行拟合^[14]:

$$Q_t = Q_{\max} \cdot (1 - e^{-kt})$$

式中, Q_t 为 t 时刻磷的释放量(以干质量计,下同), $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $Q_{\max}$ 为释放平衡时磷的释放量(即最大释放量), $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; k 为磷的释放速率(常数); t 为释放时间(以月计).一级动力学方程很好地拟合了洱海表层沉积物磷释放的动力学过程, $R^2 > 0.76$, 达到显著相关水平($P < 0.05$). $Q_{\max}$ 表示本研究条件下沉积物磷的释放能力,也是本文研究覆盖材料对沉积物溶解态总磷及其组分磷释放影响及差异的一个重要参数。

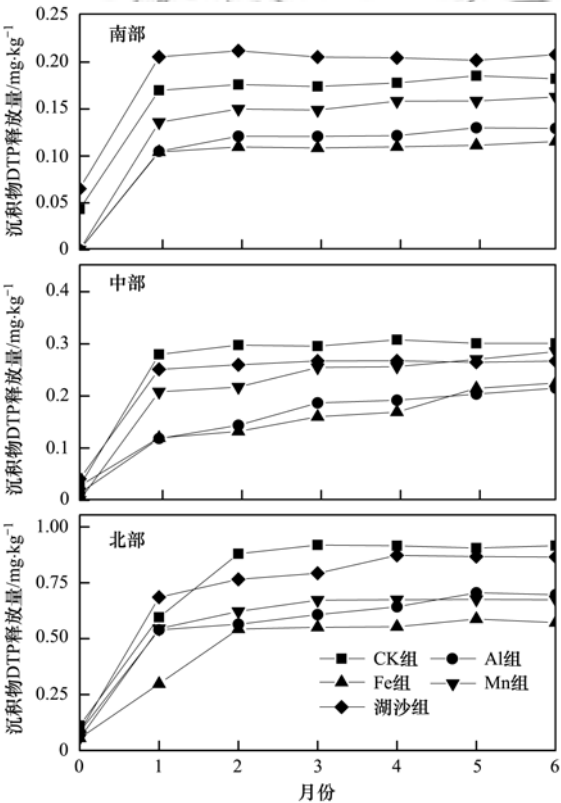


图 2 覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DTP 释放动力学过程
Fig. 2 Release kinetics curve of DTP in the different sediments of Erhai Lake covered by different materials

覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DTP 的最大释放量如图 3 所示.洱海北部沉积物各处理组 DTP 的最大释放量在 0.57 ~ 1.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,覆盖不同材料对北部沉积物 DTP 的阻控效果为 Fe 组 > Mn 组 > Al 组 > 湖沙组,比 CK 组分别减少了 44.30%、33.28%、32.99% 和 6.53%;中部沉积物各处理组 DTP 的最大释放量在 0.22 ~ 0.32

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对中部沉积物 DTP 的阻控效果为 Al 组 > Fe 组 > 湖沙组 > Mn 组, 比 CK 组分别减少了 29.56%、25.56%、16.38% 和 10.92%; 南部沉积物各处理组 DTP 的最大释放在 $0.12\sim0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对南部沉积物 DTP 的阻控效果为 Fe 组 > Al 组 > Mn 组 > 湖沙组, 比 CK 组分别减少了 35.71%、30.47%、13.04% 和 -16.83%。

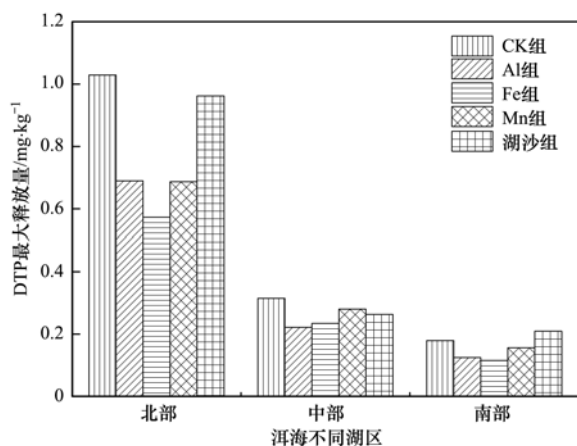


图3 覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DTP 最大释放量的影响差异

Fig. 3 Maximum release of DTP from the different sediments of Erhai Lake covered by different materials

总体上, 覆盖材料对洱海沉积物 DTP 释放均有一定的阻控效果, 与 CK 组相比, DTP 的最大释放量减少了 6.53% ~ 44.30%, 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 DTP 最大释放量的阻控效果总体表现为北部 > 中部 > 南部. 对于不同材料的阻控效果而言, 总体表现为金属材料 > 非金属材料, 其中氧化铁对北部和南部沉积物 DTP 释放的阻控效果较好, 与 CK 组相比, DTP 的最大释放量分别减少了 44.30% 和 35.71%; 而氧化铝对中部沉积物 DTP 释放的阻控效果较好, 与 CK 组相比, DTP 的最大释放量减少了 29.56%。

2.2 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 SRP 和 DOP 释放影响及差异

2.2.1 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 SRP 释放影响及差异

SRP 是总磷中活性最高的磷组分, 沉积物 SRP 的释放将直接影响上覆水体富营养化进程. 覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 SRP 的最大释放量如图 4 所示, 洱海北部沉积物各处理组 SRP 的最大释放量在 $0.30\sim0.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对北部沉积物 SRP 释放的阻控效果为 Fe 组 > Al 组 > 湖沙组 > Mn 组, 比 CK 组分别减少了 35.57%、31.46%、26.90% 和 26.22%; 中部沉积物各处理

组 SRP 的最大释放在 $0.17\sim0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对中部沉积物 SRP 的阻控效果为 Al 组 > Fe 组 > 湖沙组 > Mn 组, 比 CK 组分别减少了 28.95%、25.21%、13.36% 和 5.84%; 南部沉积物各处理组 SRP 的最大释放在 $0.06\sim0.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对南部沉积物 SRP 的阻控效果为 Al 组 > Fe 组 > Mn 组 > 湖沙组, 比 CK 组分别减少了 48.57%、47.40%、45.70% 和 11.11%。

很明显, 覆盖材料对洱海沉积物 SRP 释放均有一定的阻控效果, 与 CK 组相比, SRP 的最大释放量减少了 5.84% ~ 49.94%, 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 SRP 最大释放量的阻控效果总体表现为北部 > 南部 > 中部. 对于不同材料的阻控效果而言, 总体表现为金属材料 > 非金属材料, 其中覆盖氧化铁对北部沉积物 SRP 释放的阻控效果较好, 与 CK 组相比, SRP 的最大释放量减少了 49.94%; 覆盖铁、铝氧化物对中部和南部沉积物 SRP 释放的阻控效果较好, 与 CK 组相比, SRP 的最大释放量分别减少了 25% 和 50% 左右。

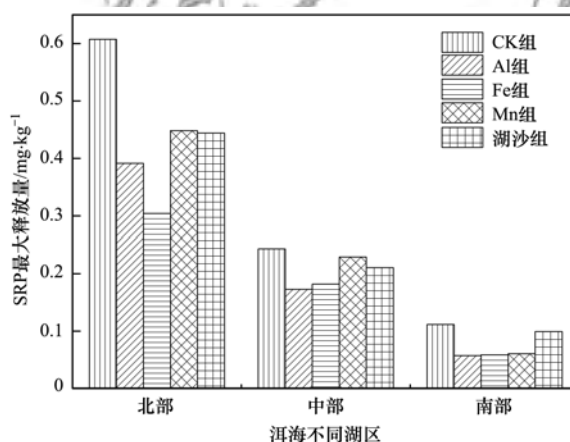


图4 覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 SRP 最大释放量的影响差异

Fig. 4 Maximum release of SRP from different sediments of Erhai Lake covered by different materials

2.2.2 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 DOP 释放影响及差异

覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DOP 的最大释放量如图 5 所示, 洱海北部沉积物各处理组 DOP 的最大释放量在 $0.24\sim0.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对北部沉积物 DOP 的阻控效果为 Mn 组 > Fe 组 > Al 组 > 湖沙组, 比 CK 组分别减少了 43.44%、36.16%、29.26%、-22.79%; 中部沉积物各处理组 DOP 的最大释放量在 $0.05\sim0.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 覆盖不同材料对中部沉积物 DOP 的阻控效果为 Al 组 > Mn 组 > Fe 组 > 湖沙组, 比 CK

组分别减少了 31.62%、28.13%、26.74% 和 26.60%；南部沉积物各处理组 DOP 的最大释放在 $0.06 \sim 0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，覆盖不同材料对南部沉积物 DOP 的阻控效果为 Fe 组 > Al 组 > Mn 组 > 湖沙组，比 CK 组分别减少了 16.49%、8.10%、3.53% 和 -62.74%。

覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DOP 释放的阻控效果差异较大。总体上，覆盖金属材料对洱海沉积物 DOP 释放均有一定的阻控效果，与 CK 组相比，DOP 的最大释放量减少了 3.53% ~ 43.44%；与金属材料相比，湖沙对中部沉积物 DOP 释放的阻控效果较好，与 CK 组相比，DOP 的最大释放量减少了 26.60%。对不同湖区而言，氧化锰对洱海北部沉积物 DOP 释放的阻控效果较好，与 CK 组相比，DOP 的最大释放量减少了 43.44%；覆盖不同材料对中部沉积物 DOP 释放的阻控效果差异较小，与 CK 组相比，DOP 的最大释放量均减少了 30% 左右；覆盖氧化铁对南部沉积物 DOP 释放的阻控效果较好，与 CK 组相比，DOP 的最大释放量减少了 16.49%。

综上所述，覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 SRP 和 DOP 最大释放量差异明显，其中对洱海北部湖区沉积物 SRP 和 DOP 释放影响差异较小，除湖沙处理外，覆盖材料沉积物 SRP 最大释放量减少了 25% ~ 50%；DOP 的最大释放量减少了 30% ~ 45%；覆盖材料对洱海中部湖区沉积物 SRP 和 DOP 释放影响差异较小，覆盖材料沉积物 SRP 的最大释放量减少了 5% ~ 30%，DOP 的最大释放量减少了 30% 左右；覆盖材料对洱海南部湖区沉积物 SRP 和 DOP 释放影响的差异较大，覆盖材料沉积物 SRP 的最大释放量减少了 50% 左右，而 DOP 最大释放量的减少量低于 15%。因此，对北部和中部湖区而

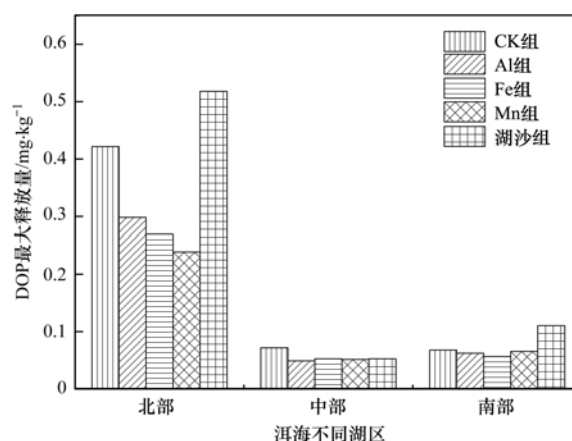


图5 覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 DOP 最大释放量的影响差异

Fig. 5 Maximum release of DOP from different sediments of Erhai Lake covered by different materials

言，覆盖材料通过共同影响沉积物 SRP 和 DOP 的释放来控制其沉积物磷的释放；而对于南部湖区，覆盖材料主要是通过影响沉积物 SRP 的释放来控制其沉积物磷的释放。

3 讨论

3.1 影响理化特征是覆盖材料影响洱海沉积物磷释放的重要基础

pH 和 Eh 是影响沉积物磷释放的重要理化特征因素。pH 主要通过影响金属 Fe、Al、Mn 与磷的结合状态进而影响沉积物磷释放^[15]，pH 的变化会影响沉积物 OH^- 溶度及磷酸盐形态从而影响沉积物磷的释放；Eh 的变化会影响沉积物中金属离子价态的转变，进而增加溶解态金属离子对 PO_4^{3-} 的吸附能力^[16]。覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 pH 和 Eh 的变化如图 6 所示，与无覆盖 CK 组对比，覆盖材料均降低了洱海不同湖区沉积物的 pH 和 Eh 值，这主要是由于覆盖金属氧化物后，金属离子与

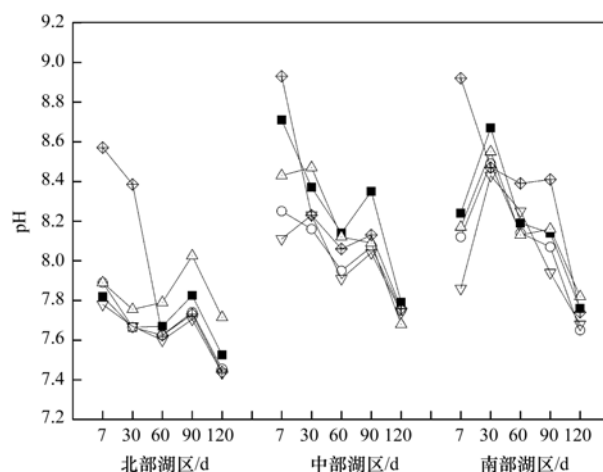
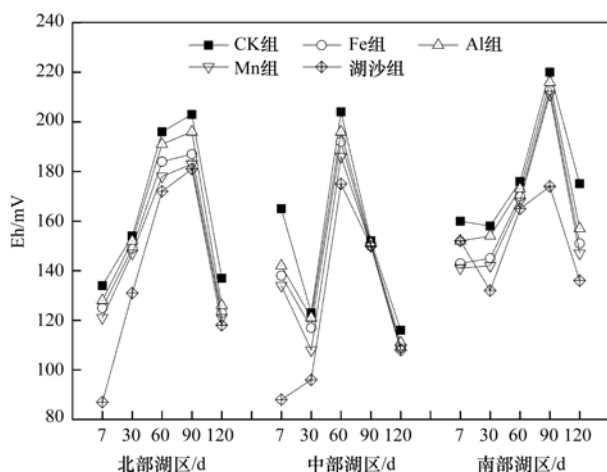


图6 覆盖不同材料对洱海不同湖区沉积物 pH、Eh 的变化

Fig. 6 Changes in the pH and Eh of the different sediments of Erhai Lake covered by different materials

其它离子结合发生反应从而影响沉积物上覆水的 pH，如 Fe^{3+} 和 Cl^- 相结合影响沉积物上覆水的 pH，并且金属离子的水解也会降低沉积物上覆水的 pH。有研究表明，在碱性条件下，随着 pH 的降低，沉积物中 OH^- 与 SRP 竞争黏土矿物和金属氢氧化物表面吸附点位的能力下降，导致沉积物对 SRP 的吸附能力增强^[17]；Eh 的降低会增加沉积物中 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 转换，导致磷酸铁溶解而使得 BD-P 和 NaOH-P 含量降低，同时释放出 PO_4^{3-} 又被其它复合体吸附和固定，进而减少沉积物中 DOP 和 SRP 的释放^[18]。因此，覆盖铁铝氧化物通过降低沉积物的 pH 和 Eh，进而影响沉积物 SRP 和 DOP 的释放。

覆盖铁铝氧化物对洱海不同湖区沉积物 pH 和 Eh 的影响不同，沉积物 pH 和 Eh 下降的幅度总体表现为南部 > 北部 > 中部，这也在一定程度影响着沉积物中溶解态有机磷向无机磷以及铁磷、铝磷向钙磷、闭蓄态磷转化的趋势程度，从而导致覆盖铁铝氧化物后，南部湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷在释放量上的差异明显比北部和中部湖区沉积物较大。

3.2 影响 DOM 特征是覆盖材料影响洱海沉积物磷释放的重要机制

有机质不仅是沉积物中主要的磷库之一，也是影响沉积物磷释放的重要机制。研究表明，沉积物中有机质与无胶体结合形成有机无机复合胶体，其中腐殖质能和铁、铝形成的有机无机复合体提供重要的磷酸盐吸附位点，从而增强沉积物对磷的吸附

作用^[19]；有机质释放出的 H^+ 可使矿物表面基团质子化，还能抑制无定性铁铝氧化物的晶质化过程，从而提高其对磷酸盐的吸附能力^[20]；沉积物中疏水性 DOM 苯环上羟基、羧基和羰基等官能团结构的变化也能影响沉积物 BD-P、NaOH-RP 和 HCl-P 的含量，进而影响沉积物中不同形态磷的释放^[21]。

荧光指数 (fluorescence index, FI) 可用来表征微生物来源有机质占总有机质的比例，用于判别 DOM 中腐殖质的陆源和生物来源^[22]；腐殖质指数 (humus index, HIX) 可用来表征有机质腐殖化程度^[23]； A_{253}/A_{203} 值与 DOM 中芳环的取代程度及取代基的种类呈正比^[24]。覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 DOM 特征 (FI、HIX、 A_{253}/A_{203}) 影响如表 2 所示，与无覆盖 CK 组相比，覆盖铁铝氧化物后洱海沉积物 FI、HIX、 A_{253}/A_{203} 值明显升高，说明覆盖铁铝氧化物能促进沉积物微生物活动，加速沉积物 DOM 由陆源向生物源转变，促进沉积物 DOM 腐殖化，并且使沉积物 DOM 芳环上含有更多的酯类、羟基、羧基、羰基等取代基，从而增强磷酸盐在沉积物上的吸附和共沉淀作用，同时提高沉积物中 BD-P、NaOH-RP 和 HCl-P 含量，进而减少了沉积物中 SRP 和 DOP 的释放。并且随着金属离子的增加，金属离子成为了金属与 DOM 复合胶体粒子新的中心，从而使多个 DOM 分子衔接在一起，而沉积物中 DOM 的粒径明显增加也会增加沉积物对磷的吸附作用^[25]。

表 2 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物 DOM 特征 (FI、HIX 和 A_{253}/A_{203}) 的影响

Table 2 Influences on the DOM characteristics (FI, HIX, and A_{253}/A_{203}) of the Erhai sediments covered different materials

区域	特征	CK 组	Al 组	Fe 组	Mn 组	湖沙组
北部	FI	2.27	2.30	2.32	2.33	2.28
	HIX	2.23	2.37	2.26	2.63	2.22
	A_{253}/A_{203}	0.19	0.23	0.22	0.25	0.24
中部	FI	2.16	2.29	2.22	2.17	2.15
	HIX	3.54	3.79	3.80	3.24	3.70
	A_{253}/A_{203}	0.20	0.22	0.23	0.22	0.21
南部	FI	1.63	1.70	1.71	1.61	1.61
	HIX	3.42	3.47	3.77	2.86	3.25
	A_{253}/A_{203}	0.21	0.23	0.22	0.24	0.24

覆盖铁铝氧化物对洱海不同湖区沉积物 DOM 活性影响差异较大，其中 FI 的均值呈现北部 (2.31) > 中部 (2.26) > 南部 (1.71)，与无覆盖对照组相比，覆盖铁铝氧化物后，北部和中部湖区沉积物 FI 的均值明显大于南部，这是由于北部和中部湖区水生植物严重退化，导致其生物来源增加，微生物活性增强，从而有利于沉积物中溶解态有机磷向无机磷转换的矿化分解，进而表现为上覆水 SRP 的溶度增加，释放量减少；而南部湖区相反，

主要是其靠近市中心，城市面源引起的有机污染相比较严重，从而导致铁铝氧化物对沉积物 SRP 的释放影响明显大于 DOP，进而表现为覆盖铁铝氧化物主要影响该湖区沉积物 SRP 的释放。

综上所述可见，覆盖铁铝氧化物对洱海不同湖区沉积物 SRP 和 DOP 释放影响差异较大，北部湖区，覆盖氧化铁主要通过降低沉积物 pH 和 Eh 及增强 DOM 活性影响 SRP 和 DOP 释放，且 SRP 和 DOP 释放差异较小；中部湖区，覆盖氧化

铝主要通过增强沉积物 DOM 活性影响 SRP 和 DOP 释放,且 SRP 和 DOP 释放差异较小;对于南部湖区,覆盖氧化铁主要通过降低沉积物 pH 和 Eh 影响 SRP 和 DOP 释放,且 SRP 和 DOP 释放差异较大。

4 结论

(1)与无覆盖对照相比,覆盖材料通过影响洱海沉积物 pH 和 Eh 及 DOM 特征,降低沉积物 DTP 最大释放量 6.53% ~ 44.30%;其中覆盖氧化铁对北部和南部沉积物 DTP 释放控制效果较好,而覆盖氧化铝对中部沉积物 DTP 释放控制效果较好,且与无覆盖对照相比,释放量分别减少了 44.30%、35.71% 和 29.6%。

(2)覆盖铁铝氧化物洱海不同湖区沉积物 SRP 和 DOP 释放量影响差异较大,其中北部湖区沉积物覆盖氧化铁,SRP 和 DOP 释放量分别降低了 35.6% 和 36.2%,其主要是因为降低了沉积物 pH 和 Eh,增加了 DOM 活性,导致 SRP 和 DOP 释放量降低;中部湖区沉积物覆盖氧化铝,SRP 和 DOP 释放量分别降低了 28.9% 和 31.6%,与覆盖氧化铝促进了该湖区 DOM 活性相关;南部湖区沉积物覆盖氧化铁,其沉积物 SRP 和 DOP 释放量差异较大,分别降低了 47.4% 和 16.5%,与覆盖氧化铁降低该湖区沉积物 pH 和 Eh 有关。

参考文献:

- [1] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C, *et al.* Reducing phosphorus to Curb Lake eutrophication is a success [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (17): 8923-8929.
- [2] Penn M R, Auer T, van Orman E L, *et al.* Phosphorus diagenesis in lake sediments: investigations using fractionation techniques [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1995, **46** (1): 89-99.
- [3] Haygarth P M, Condon L M, Heathwaite A L, *et al.* The phosphorus transfer continuum: linking source to impact with an interdisciplinary and multi-scaled approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **344**(1-3): 5-14.
- [4] Wu G F, Zhou X P. Characterization of phosphorus-releasing bacteria in a small eutrophic shallow lake, Eastern China [J]. *Water Research*, 2005, **39**(19): 4623-4632.
- [5] 张卫,熊邦,林匡飞,等. 不同覆盖方式对底泥内源营养盐释放的控制效果[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(6): 1677-1681.
Zhang W, Xiong B, Lin K F, *et al.* Control effect of different covering patterns on indigenous nutrient release from sediment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(6): 1677-1681.
- [6] 叶恒朋,陈繁忠,盛彦清,等. 覆盖法控制城市河涌底泥磷释放研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 262-268.
Ye H P, Chen F Z, Sheng Y Q, *et al.* Suppressing phosphate liberation from urban river sediment using capping method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(2): 262-268.
- [7] 黎睿,汤显强,李青云. 沉积物-水界面磷负荷控制材料研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2018, **35**(1): 16-22.
Li R, Tang X Q, Li Q Y. Research progress of phosphorus load capping material on sediment-water interface [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(1): 16-22.
- [8] Lu S Y, Jin X C, Liang L L, *et al.* Influence of inactivation agents on phosphorus release from sediment [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(4): 1143-1151.
- [9] Hayes C R, Clark R G, Stent R F, *et al.* Control of algae by chemical treatment in a eutrophic water supply reservoir [J]. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, 1984, **38**: 149-162.
- [10] 李文章,张莉,王圣瑞,等. 洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2801-2809.
Li W Z, Zhang L, Wang S R, *et al.* Characteristics of water extractable organic nitrogen from Erhai Lake Sediment and its differences with other sources [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2801-2809.
- [11] 张仕军,齐庆杰,王圣瑞,等. 洱海沉积物有机质、铁、锰对磷的赋存特征和释放影响[J]. *环境科学研究*, 2011, **24** (4): 371-377.
Zhang S J, Qi Q J, Wang S R, *et al.* Effects of organic matter, manganese and iron on phosphorus fractions and release in the sediments of Erhai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(4): 371-377.
- [12] 王忠威,王圣瑞,戴建军,等. 洱海沉积物中磷的赋存形态[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(6): 652-658.
Wang Z W, Wang S R, Dai J J, *et al.* Fractions of phosphorus in sediments of Lake Erhai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(6): 652-658.
- [13] Boström B. Potential mobility of phosphorus in different types of lake sediment [J]. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1984, **69**(4): 457-474.
- [14] Hou L J, Liu M, Jiang H Y, *et al.* Ammonium adsorption by tidal flat surface sediments from the Yangtze Estuary [J]. *Environmental Geology*, 2003, **45**(1): 72-78.
- [15] 金相灿,王圣瑞,庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(6): 707-711.
Jin X C, Wang S R, Pang Y. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake [J]. *China environmental science*, 2004, **24**(6): 707-711.
- [16] Lijklema L, Koelmans A A, Portielje R. Water quality impacts of sediment pollution and the role of early diagenesis [J]. *Water Science & Technology*, 1993, **28**(8-9): 1-12.
- [17] House W A, Jickells T D, Edwards A C, *et al.* Reactions of phosphorus with sediments in fresh and marine waters [J]. *Soil Use and Management*, 1998, **14**(s4): 139-146.
- [18] 席银,王圣瑞,赵海超,等. 覆盖不同材料对湖泊沉积物磷释放影响机制[J]. *环境化学*, 2017, **36**(3): 532-541.
Xi Y, Wang S R, Zhao H C, *et al.* Impact of different capping materials on the phosphorus release from lake sediment [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(3): 532-541.
- [19] Gerke J, Hermann R. Adsorption of orthophosphate to Humic - Fe - Complexes and to amorphous Fe - Oxide [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1992, **155**(3): 233-236.
- [20] Torrent J, Schwertmann U, Barrón V. Phosphate sorption by natural hematites [J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, **45**(1): 45-51.
- [21] Huang Q Y, Zhao Z H, Chen W L. Effects of several low-

- molecular weight organic acids and phosphate on the adsorption of acid phosphatase by soil colloids and minerals [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(3): 571-579.
- [22] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. *环境化学*, 1996, **15**(1): 15-19.
Wang X R, Hua Z Z, Xu L, *et al.* The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments [J]. *Environmental Chemistry*, 1996, **15**(1): 15-19.
- [23] Caraco N F, Cole J J, Likens G E. Evidence for sulphate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems [J]. *Nature*, 1989, **341**(6240): 316-318.
- [24] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 229-244.
- [25] Yang Y, Ma X P, Yang X X, *et al.* Influence of heavy metal ions on the spectra and charge characteristics of DOM of municipal sewage secondary effluent [J]. *Water Science & Technology*, 2017, **77**(4): 1098-1106.

《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)