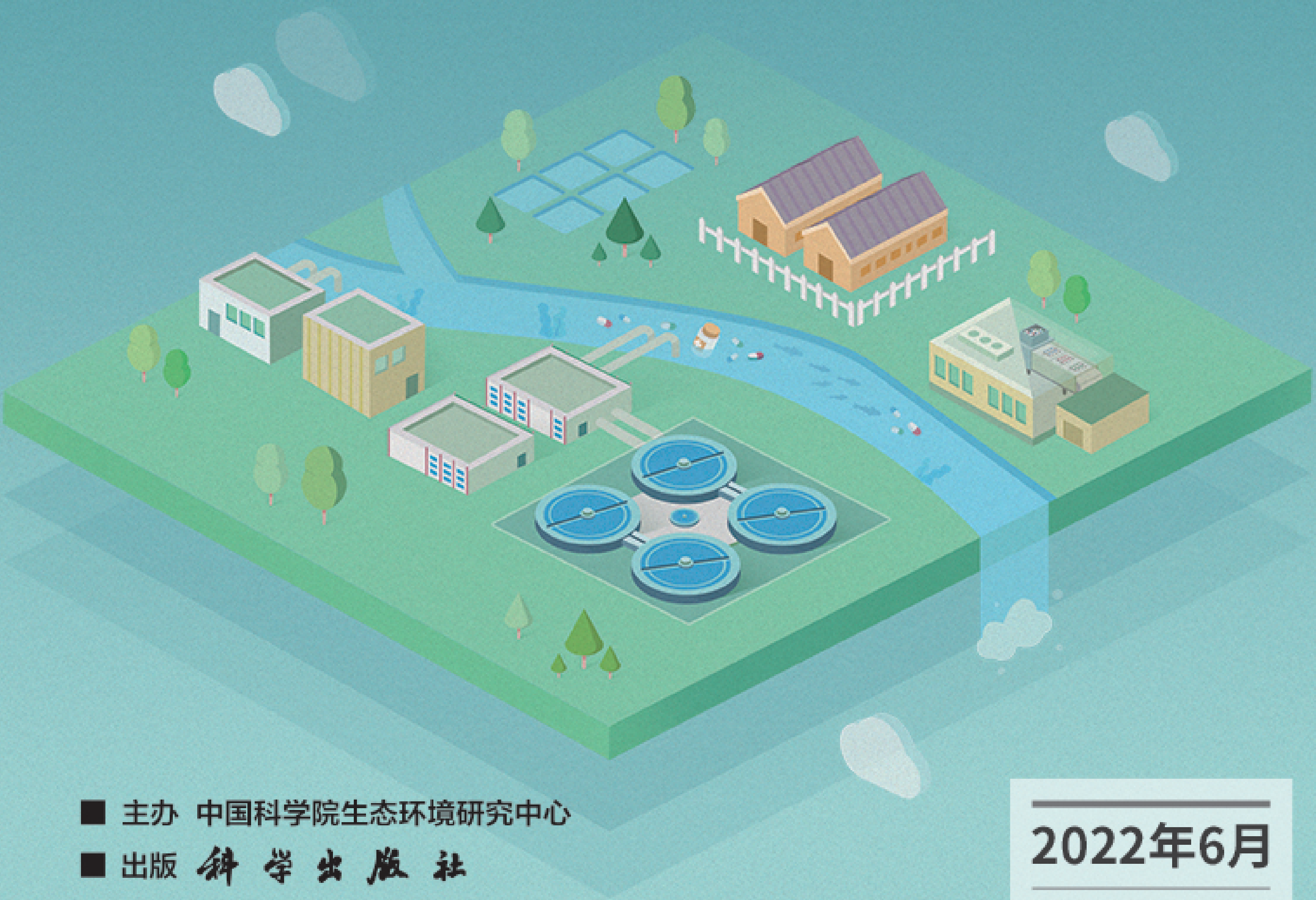
易方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅，魏琳，彭晶倩，何鹏，施鸿媛，汤冬梅，吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年6月
第43卷 第6期
Vol.43 No.6

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷　第6期
2022年6月15日

目　次

COVID-19管控期间气象条件变化对京津冀$PM_{2.5}$浓度影响 …… 邱雨露，陈磊，朱佳，马志强，李梓铭，郭恒，唐颖潇(2831)
新冠疫情管控措施对郑州市$PM_{2.5}$浓度、粒径分布、组分和来源的影响 …… 黄兵役，王申博，和兵，薛若雨，高更宇，张瑞芹(2840)
COVID-19管控期间苏州市$PM_{2.5}$中金属元素浓度变化及来源解析 …… 缪青，杨倩，吴也正，魏恒，周民锋，张晓华，邹强(2851)
2015~2019年南京北郊碳质气溶胶组成变化 …… 谢添，曹芳，章炎麟，林煜棋，范美益，宋文怀，鲍孟盈，项妍琨，赵祝钰，杨笑影，谢锋，张煜娴，俞浩然，张子金，邢佳莉(2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆$PM_{2.5}$来源 …… 彭超，李振亮，曹云擎，蒲茜，方维凯，王晓宸，汪凌韬(2867)
保定市冬季$PM_{2.5}$的氧化潜势特征及其影响来源分析 …… 吴继炎，杨池，张春燕，范美益，吴爱坪，章炎麟(2878)
南京江北新区$PM_{2.5}$中水溶性有机氮的污染特征及其来源 …… 关璐，丁铖，张毓秀，胡建林，于兴娜(2888)
广西十万大山背景点$PM_{2.5}$中非极性有机气溶胶组成及来源解析 …… 邢佳莉，曹芳，王谦，张煜娴，章炎麟(2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素：以京津冀地区为例 …… 张馨露，刘世杰，韩美丽，苏超，张志鹏，马琳琳，李洋，程苗苗(2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 …… 唐颖潇，姚青，蔡子颖，丁净，樊文雁，杨旭，韩素芹(2917)
天津市$PM_{2.5}$-O_3复合污染特征及气象影响分析 …… 肖致美，李源，孔君，李鹏，蔡子颖，高璟赟，徐虹，戢运峰，邓小文(2928)
2016~2020年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 …… 周梦鸽，杨依，孙媛，张凤英，李永华(2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 …… 晏洋洋，尹沙沙，何秦，秦凯，张瑞芹(2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 …… 赵伟，吕梦瑶，卢清，高博，梁小明，刘明，孙家仁，陈来国，范绍佳(2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 …… 苏维峰，孔少飞，郑煌，陈楠，祝波，全继宏，祁士华(2966)
运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 温肖宇，赵文婷，罗淑贞，张强，王妘涛，马俊杰，刘新罡(2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 …… 范丹丹，刘红玲，杨柳燕(2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 …… 武俊梅，魏琳，彭晶倩，何鹏，施鸿媛，汤冬梅，吴振斌(2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 …… 张坤锋，昌盛，付青，樊月婷，王恩瑞，孙兴滨，王山军(3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 …… 宋静雯，张学霞，姜东旸，赵丞豪，李鹏飞(3016)
高原湖泊周边浅层地下水：氮素时空分布及驱动因素 …… 李桂芳，杨恒，叶远行，陈清飞，崔荣阳，陈安强，张丹(3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 …… 张雅然，车霏霏，付正辉，许野，李薇(3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 …… 赵晓亮，李响，卢洪斌，卢少勇，王涛，张森霖，国晓春，张静，弥启欣，刘晓贺，宋书峰(3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 …… 刘哲哲，倪兆奎，刘思儒，李晓秀，王圣瑞(3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 …… 张智博，段艳平，涂耀仁，罗鹏程，高峻(3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 …… 陈圣盛，李卫明，张坤，熊伟唯，张续同，刘子健(3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 …… 陈玉芳，闫振华，张燕，赵海洲(3088)
2015~2020年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 …… 屈宁，邓建明，张祯，蔡永久，龚志军，李明(3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游动植物群落结构特征与环境因子关系 …… 王雅雯，李迎鹤，张博，郭云艳，陈俊伊，韩松(3106)
近20年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 …… 葛小君，黄斌，袁再健，王栋栋，王泉泉，陈佳村，谢真越(3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 …… 谭少军，刘洋，朱小婕，刘荷，邵景安，邓华(3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 …… 顾晶晶，冶运涛，董甲平，蒋云钟，曹引，赵红莉(3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 …… 陈旭东，高良敏(3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 …… 石雷，杨小丽，吴青宇，王亦铭，徐佳莹(3160)
不同水力扰动强度对老化PSMPs在泥水两相间迁移的影响 …… 吴香香，艾萍，李大鹏(3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 …… 席玥，郭婧，陶蕾，田颖，陈吉吉，吴悦，徐蘇士，荆红卫，刘保献(3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 …… 章孙逊，张守红，葛德，闫婧，杨航，王任重远，魏良怡，张成玉(3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 …… 曹丝雨，许路，付权超，金鑫，石烜，金鹏康(3195)
4种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 …… 唐佳，陈茜，覃牧川，唐溪，唐崇俭(3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 …… 龚沛云，孙丽娟，宋科，孙雅菲，秦秦，周斌，薛永(3211)
腐殖酸-重金属对ANAMMOX菌脱氮性能的影响及其动力学分析 …… 李芸，崔楠，熊星星，黄志远，李泽兵，王东亮，李朝明，许丹，李军(3221)
2000~2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征 …… 徐勇，黄雯婷，窦世卿，郭振东，李欣怡，郑志威，靖娟利(3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 …… 孙德斌，栗云召，于君宝，杨继松，杜朝红，孙丹丹，凌越，马元庆，周迪，王雪宏，赵佳怡(3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 …… 温祥洁，陈朝辉，徐维新，吴小娟，郝云庆，刘伟，印红玲，方淑红(3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 …… 刘永林，刘属灵，吴梅，田兴磊，刘双燕(3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 …… 张倩，韩贵琳(3269)
南阳盆地东部山区土壤锗分布特征及其影响因素分析 …… 董秋瑶，赖书雅，宋超，温皓天，严明疆，杨振京(3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 …… 严佳莉，于紫玲，余辉亮，向明灯，王传华(3288)
石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 …… 许璐，周春海，刘梅，孔辉，李元，黄志红(3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 …… 谭文韬，霍洋，周航，仇银燕，曾鹏，辜娇峰，廖柏寒(3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 …… 罗会龙，陈娟，张云慧，袁贝，杨宾，张昊，杜平(3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 …… 罗正明，赫磊，刘晋仙，胡砚秋，周妍英，郑庆荣，柴宝峰(3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 …… 靳海洋，岳俊芹，闫雅倩，张德奇，杨程，张素瑜，李向东，邵运辉，方保停，王汉芳，秦峰(3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 …… 廖宇琴，龙娟，木志坚，文首鑫，李翠莲，杨志敏，赵秀兰(3348)
长江三角洲2018年土壤NO排放特征 …… 廖加强，薛金，王文锦，朱永慧，朱安生，黄凌，王杨君，李莉(3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 …… 梁建设，白永平，杨雪荻，高祖桥，李玲蔚，张春悦，王倩(3365)
《环境科学》征订启事(3004)　《环境科学》征稿简则(3047)　信息(3252，3298，3327)

万方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第6期 2022年6月
Vol.43, No.6 Jun., 2022

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险

刘哲哲[1,2,3], 倪兆奎[2,3], 刘思儒[4], 李晓秀[1*], 王圣瑞[2,3,5*]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100084; 2. 北京师范大学珠海校区水科学研究中心, 粤港水安全保障联合实验室, 珠海 519087; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 广州市环境保护科学研究院, 广州 510620; 5. 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 昆明 650034)

摘要：为揭示湖泊沉积物有机磷释放特征及对水质影响,选取我国云南高原及长江中下游6个湖泊沉积物,研究了溶解态有机磷(DOP)和溶解态无机磷(SRP)释放动力学差异及有机磷形态与溶解性有机质(DOM)特征对沉积物磷释放影响,并探讨了沉积物DOP释放的水质风险.结果表明:①沉积物DOP和SRP释放动力学过程相似,均遵循二级动力学模型,首先是快速释放阶段,随后慢速释放,释放曲线逐渐平缓并达到最大释放量.②沉积物有机磷释放与有机磷形态和有机质有关.活性有机磷(LOP)和中活性有机磷(MLOP)是快速释放阶段主要向上覆水释放的DOP形态.释放后期LOP和MLOP占总有机磷(DTP)比例下降,而非活性有机磷(NLOP)比例增加;同时DOM腐殖化程度和芳香性随磷释放过程逐渐升高,DOM活性不断降低,导致DOP释放速率呈先快后慢趋势.③与SRP相比,DOP释放量较大,占DTP总释放量的47%~77%,释放风险较高;湖泊营养水平较高,沉积物DOP释放量较大,水质下降风险也较高.因此,湖泊沉积物磷释放不仅应关注无机磷释放,也应关注有机磷释放,否则会低估沉积物磷释放量及水质风险.

关键词:沉积物; 有机磷; 释放动力学; 磷形态; 水质风险

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)06-3058-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202110121

Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks

LIU Zhe-zhe[1,2,3], NI Zhao-kui[2,3], LIU Si-ru[4], LI Xiao-xiu[1*], WANG Sheng-rui[2,3,5*]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100084, China; 2. Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory for Water Security, Center of Water Research, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai 519087, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Guangzhou Research Institute of Environmental Protection, Guangzhou 510620, China; 5. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed, Kunming 650034, China)

Abstract: To reveal the characteristics of organic phosphorus release from lake sediments and its potential impact on water quality, six lake sediments from Yunnan Plateau and the middle and lower reaches of the Yangtze River in China were selected. We studied the differences in the kinetics of dissolved organic phosphorus (DOP) and dissolved inorganic phosphorus (SRP) release from sediments. The effects of organic phosphorus morphology and dissolved organic matter (DOM) characteristics on sediment phosphorus release were investigated, and the water quality risks of sediment DOP release were discussed. The results showed that: ① the release kinetics of sediment DOP and SRP were similar; both followed the second-order kinetic model, starting with a rapid release phase, followed by a slow release, and the release curve gradually leveled off and reached the maximum release. ② The release of organic phosphorus was related to organophosphorus morphology and organic matter. Active organic phosphorus (LOP) and medium active organic phosphorus (MLOP) were the DOP forms mainly released into the overlying water during the rapid release phase. The proportion of LOP and MLOP to total organic phosphorus (DTP) decreased in the late release stage, whereas the proportion of non-active organic phosphorus (NLOP) increased; further, the degree of humification and aromaticity of organic matter gradually increased with phosphorus release, and its activity decreased, resulting in a slower release rate at the later stage. ③ Compared with that of SRP, the risk of DOP release was higher, accounting for 47%-77% of the total amount of DTP. It was also found that the higher the nutrient level of the lake, the greater the release of DOP and the higher the water quality risk. Therefore, not only the release of inorganic phosphorus but also that of organic phosphorus should be of concern in the process of phosphorus release from lake sediments to prevent the underestimation of phosphorus release and water quality risk.

Key words: sediment; organic phosphorus; release kinetics; phosphorous forms; water quality risks

沉积物磷释放是影响湖泊水质的重要因素[1~3],磷释放特征是研究磷生物地球化学循环及湖泊水质风险关注的重点之一[4].近年来随沉积物外源磷负荷得到有效防控,其沉积物内源磷释放正不断成为水体磷负荷的重要贡献来源[5~7].以往湖泊沉积物磷释放研究主要针对总磷和无机磷[8~10],而很少关注沉积物有机磷释放及其形态变化和对水质影响等问题.但有研究发现,湖泊沉积物释放溶解性有机磷(DOP)占总磷比重较高,可转化为溶解态无机磷(SRP)而被生物利用,从而加重湖泊水污染及富营养化[11,12].沉积物DOP是湖泊水体一种重要磷源,其释放的水质风险较大[12,13]. Ni等[14]在研究沉积物有机磷(OP)组成对湖泊营养状况响应时发现,沉积物OP可能较总磷(TP)更能反映湖泊营养

收稿日期: 2021-10-15; **修订日期**: 2021-11-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(U1902207); 云南省高原湖泊流域污染过程与治理重点实验室项目(2020-02-2-W2, 2020-124A-W2); 国家高层次人才支撑计划项目(312232102)
作者简介: 刘哲哲(1994~),女,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:924850809@qq.com
* 通信作者,E-mail:lxiaoxiu0548@sina.com; wangsr@bnu.edu.cn

状况；Wang 等[15]在不同营养水平湖泊沉积物磷释放动力学研究中也认为，虽然 SRP 释放占比较高，但 DOP 释放也不容忽视. 因此，综合考虑沉积物有机和无机磷释放特征及差异，解析沉积物有机磷释放特征及对水质影响，对深入揭示沉积物磷释放特征及湖泊富营养化机制具有重要意义.

湖泊沉积物有机磷释放主要受有机磷形态和有机磷矿化作用等影响[16]. DOP 转化为活性有机磷释放进入水体，或转化生成无机磷，进而影响湖泊水质[17,18]. 根据以往研究，并不是所有的磷组分都能从沉积物中释放到上覆水体[19]，表明沉积物 DOP 释放和其形态之间存在一定的关联[20]. DOP 是溶解性有机质（DOM）的重要组分，Long 等[21]通过实验发现 DOM 和磷吸附解析过程密切相关，是影响沉积物磷释放的重要机制. 基于此，本研究选择长江中下游及云南高原 6 个典型湖泊，利用化学连续提取法，结合沉积物磷释放动力学模型，对比研究湖泊沉积物 DOP 和 SRP 释放动力学差异，揭示沉积物有机磷释放特征，以期阐明沉积物有机磷释放影响因素及机制，并探讨其水质风险.

1　材料与方法

1.1　样品采集

长江中下游和云南高原是我国湖泊水污染及富营养化严重区域[22]. 本研究选取长江中下游受流域经济和人类活动影响较大的湖泊：太湖（TH）、巢湖（CH）、鄱阳湖（PYH）和云南高原受农业、藻类和外源污染影响的湖泊：洱海（EH）、滇池（DC）、异龙湖（YLH）；用彼得森采泥器采集表层（0 ~ 5 cm）沉积物样品，装在密封袋中，带回实验室真空冷冻干燥机冷干处理，研磨混匀后过 100 目筛，装入封口袋后冷藏密封保存备用.

1.2　沉积物磷释放动力学实验

准确称取 10 份 2.0 g 冷冻干燥的沉积物样品于离心管中，加 50 mL 超纯水，放入恒温振荡器振荡（25℃，200 $r\cdot min^{-1}$），分别于 5、15、30、60、90、120、180 和 300 min 取一份样品，5 000 $r\cdot min^{-1}$下离心 15 min 后用 0.45 μm 滤膜过滤，上清液用于测定 DTP 与 SRP 浓度. 将振荡 24 h 后的沉积物再次冷冻干燥、研磨过筛，测定不同形态 OP 含量[23].

磷释放动力学模型可用于定量研究湖泊沉积物磷释放行为[24,25]. 根据初始浓度与平衡浓度之差，计算沉积物磷释放量[26]，选用二级动力学模型拟合沉积物磷释放动力学过程[27]：

$$dq/dt = k(q_e - q_t)^2$$

式中，q_t 为 t 时刻湖泊沉积物磷释放量（$mg\cdot kg^{-1}$）；t 为释放时间（min）；k 为磷释放速率常数[$mg\cdot(kg\cdot min)^{-1}$]，可指示沉积物磷释放强度[28]；$q_e$ 为平衡时沉积物磷释放量（$mg\cdot kg^{-1}$）. 另外，以 q_{max} 表示磷最大释放量（$mg\cdot kg^{-1}$），二者均可表示本研究条件下沉积物磷释放能力[11]，是表示沉积物磷释放动力学特征的重要参数.

1.3　测定方法

为掌握沉积物磷释放过程中不同活性有机磷形态变化特征，采用基于 Ivanoff 等[29]改进的顺序提取法. 将沉积物有机磷分为活性有机磷 LOP，即碳酸氢钠提取态有机磷（$NaHCO_3$-P_o）；中活性有机磷 MLOP，包括盐酸提取态有机磷（HCl-P_o）和富里酸提取态有机磷（Ful-P_o）；以及非活性有机磷 NLOP，包括胡敏酸提取态有机磷（Hum-P_o）和残渣态有机磷（Res-P_o）. 沉积物溶解性总磷 DTP 含量测定用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法，SRP 用钼酸铵分光光度法，DOP 为二者之差. 实验中所有样品测定重复 3 次并取其平均值，实验误差控制在 5% 以内.

DOM 的紫外可见光谱是利用紫外分光光度计（Hach DR-5000，美国），在 1 cm 石英比色皿及 190 ~700 nm 的扫描波长范围内测定的. 紫外参数主要有 3 个：A_{253}/A_{203} 是 253 nm 与 203 nm 吸光度的比值；E_2/E_3 表示 250 nm 处与 365 nm 处吸光度的比值；$SUVA_{254}$ 为 254 nm 的吸光度乘以 100 除以该溶液的 TOC 值.

1.4　数据处理

本研究数据采用 Origin 2018（Origin Lab，USA）软件进行二级动力学方程拟合，利用 SPSS 21（IBM，Armonk，New York，USA）和 R 语言软件进行图、表绘制与分析.

2　结果与分析

2.1　湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及与无机磷差异

本研究湖泊沉积物 DOP 是释放磷的主要组成部分，其释放量为 3.41 ~ 13.35 $mg\cdot kg^{-1}$，占 DTP 释放量的 47% ~ 77%（图 1）. 和 SRP 相比，两者释放动力学过程基本一致，均经历快速释放阶段和缓慢释放阶段，并逐步达到释放平衡（图 2），这与前人研究结果相似[17,21,30,31]. 其中 DOP 的快速释放阶段主要在 60min 内完成，释放了约 90%，释放量达到 3.04 ~10.99 $mg\cdot kg^{-1}$；相比而言，与 SRP 释放存在一定差异，其快速释放阶段发生在 0 ~ 90 min，各沉积物样品 SRP 释放量较 DOP 低，为 1.5 ~ 6.13 $mg\cdot kg^{-1}$；之后释放较为缓慢. 在 180 min 沉积物 DOP 和 SRP

释放量达到最大值，DOP 为 3.26 ~ 13.33 $mg \cdot kg^{-1}$，SRP 为 1.61 ~ 6.71 $mg \cdot kg^{-1}$，之后释放过程基本趋于平衡.

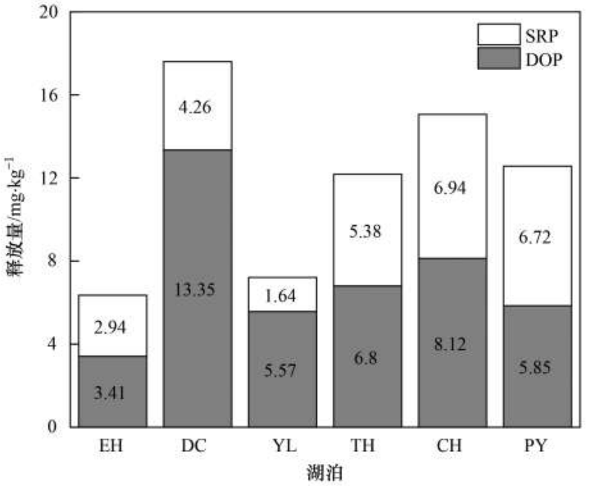


图 1　湖泊沉积物 DOP 和 SRP 释放量比较

Fig. 1　Comparison of DOP and SRP releases from lake sediments

为探究湖泊沉积物磷释放特征，选用二级动力学模型拟合磷释放动力学过程，发现拟合效果较好（R^2_{DOP}为 0.69 ~ 0.94，R^2_{SRP}为 0.71 ~ 0.93），均达到了显著相关水平（$P < 0.05$）. 本研究湖泊沉积物 DOP 与 SRP 释放动力学参数值存在差异，其中 DOP 释放动力学参数值较大，结果见表 1. 本研究各湖泊沉积物 SRP 释放速率常数 k[(0.015 ± 0.003) ~ (0.402 ± 0.130) $mg \cdot (kg \cdot min)^{-1}$] 大多高于 DOP [(0.015 ± 0.004) ~ (0.139 ± 0.030) $mg \cdot (kg \cdot min)^{-1}$]，是 DOP 释放速率常数 k 的 1.49 ~ 24.20 倍，说明 DOP 释放强度略低于 SRP；而 DOP 释放量则均高于 SRP，在 DTP 中占比较高，且较快达到最大释放量，DOP 模型参数 q_e 和 q_{max} 均高于 SRP，分别为 SRP 释放模型参数 q_e 和 q_{max} 的 1.12 ~ 3.70 倍和 1.07 ~ 3.40 倍. 因此，与 SRP 相比，本研究湖泊沉积物 DOP 释放动力学参数值均较高，即再悬浮过程中湖泊沉积物 DOP 释放可更快达平衡，且释放量较大.

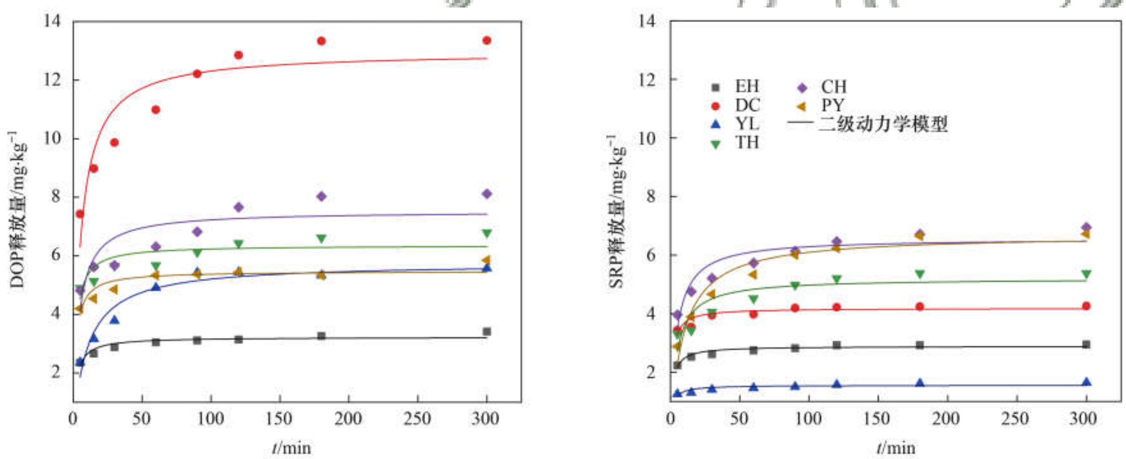


图 2　湖泊沉积物 DOP 和 SRP 释放动力学曲线

Fig. 2　Release kinetics curve of DTP and SRP in lake sediments

表 1　湖泊沉积物 DOP 和 SRP 释放准二级动力学模型参数

Table 1　Kinetic parameters of quasi-second-order kinetic model of DOP and SRP release from lake sediments

湖泊	DOP 二级动力学模型				SRP 二级动力学模型			
	q_{max} /$mg \cdot kg^{-1}$	q_e /$mg \cdot kg^{-1}$	k /$mg \cdot (kg \cdot min)^{-1}$	R^2	q_{max} /$mg \cdot kg^{-1}$	q_e /$mg \cdot kg^{-1}$	k /$mg \cdot (kg \cdot min)^{-1}$	R^2
洱海	3.41	3.22 ± 0.06	0.139 ± 0.030	0.87	2.94	2.88 ± 0.04	0.207 ± 0.037	0.90
滇池	13.35	12.96 ± 0.49	0.015 ± 0.004	0.85	4.26	4.18 ± 0.07	0.174 ± 0.045	0.79
异龙湖	5.57	5.75 ± 0.21	0.017 ± 0.004	0.94	1.64	1.56 ± 0.04	0.402 ± 0.130	0.71
太湖	6.8	6.36 ± 0.20	0.079 ± 0.028	0.69	5.38	5.20 ± 0.23	0.042 ± 0.015	0.77
巢湖	8.12	7.53 ± 0.38	0.032 ± 0.013	0.70	6.94	6.57 ± 0.22	0.034 ± 0.009	0.86
鄱阳湖	5.85	5.47 ± 0.12	0.097 ± 0.026	0.79	6.72	6.69 ± 0.24	0.015 ± 0.003	0.93

2.2　湖泊沉积物磷释放动力学过程中磷形态变化

为进一步了解沉积物有机磷释放，采用顺序提取法得到 5 种提取态有机磷[30]，发现沉积物 DOP 释放动力学过程与 DOP 形态关系密切[32,33]. 而本研究各湖泊沉积物磷释放动力学过程中各形态 DOP 含量也发生一定变化（图 3），其中快速释放阶段（0 ~ 60 min）HCl-P_o 与 Ful-P_o 含量呈增加趋势，$NaHCO_3$-P_o 和 Hum-P_o 含量递减，Res-P_o 含量有增加趋势；而慢速释放阶段（60 ~ 180 min）$NaHCO_3$-P_o、HCl-P_o 和 Ful-P_o 总体呈降低趋势，Hum-P_o 和

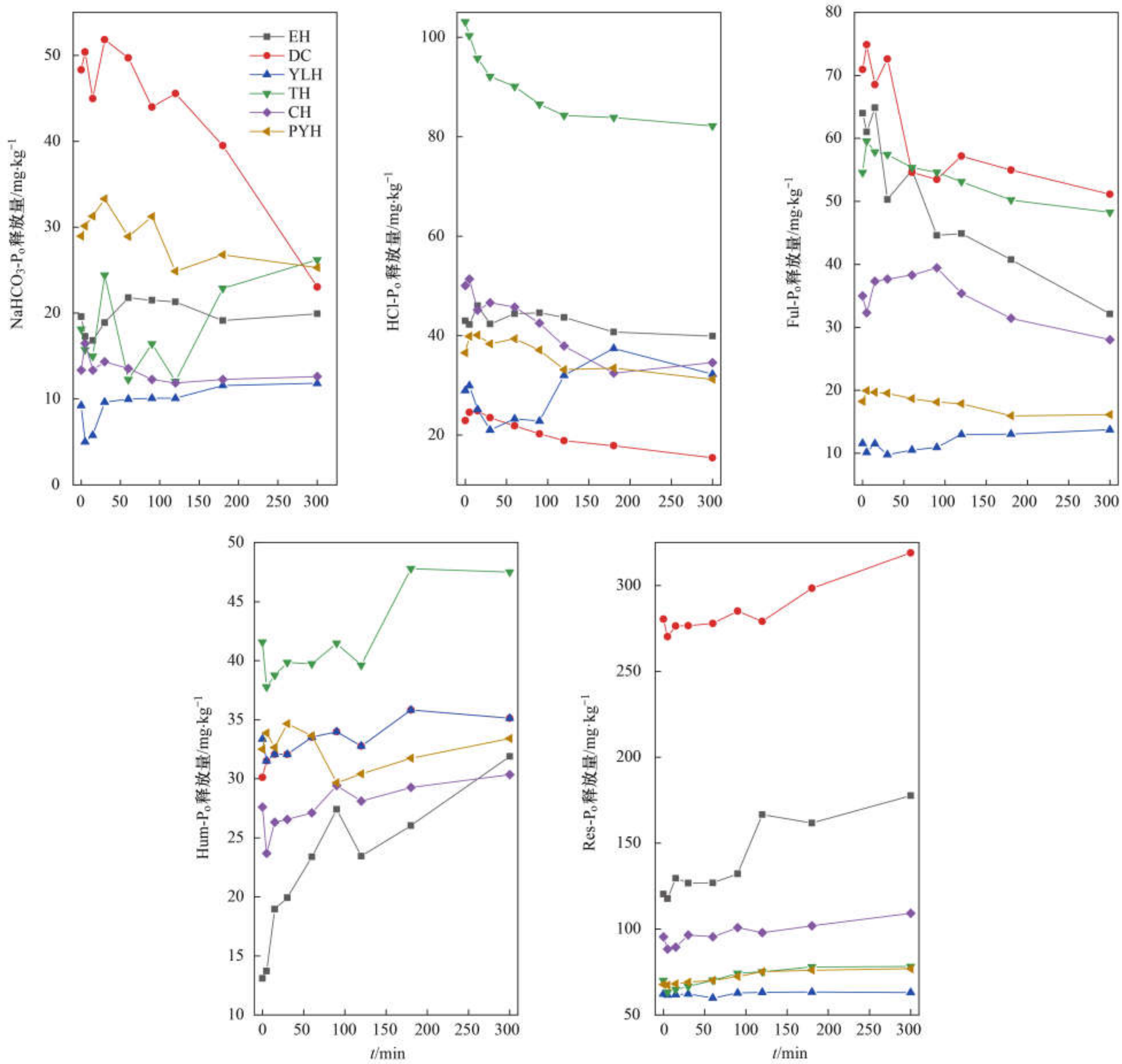


图 3　湖泊沉积物磷释放动力学过程中各有机磷形态含量变化

Fig. 3　Change in organic phosphorus forms in the process of release dynamics

Res-P_o 则与之相反. 具体来看，$NaHCO_3$-P_o 最先被释放[23]，其含量在释放初期(0 min)占总有机磷的6.3%~15.7%，在0~15 min 和15~60 min 时间段内先降后升，60 min 后下降到6.0%~15.2%，整个释放过程呈明显下降趋势. HCl-P_o 和 Ful-P_o 稳定性较差[34]，其含量先升后降，释放初期(0 min) HCl-P_o 占总有机磷的5.1%~35.9%，释放5 min 后其含量上升至5.4%~36.3%，之后的5~300 min 其含量整体呈下降趋势. Ful-P_o 含量也从释放初期的9.9%~24.6%上升再下降至平衡时的8.8%~14.1%. Hum-P_o 释放过程中含量整体呈上升趋势，从5.0%~17.7%上升到10.6%~18.2%. Res-P_o 在释放有机磷中占有最大比例(35.2%~72%)，相较其他活性磷稳定，释放过程中浓度变化不大.

本研究湖泊沉积物各 DOP 形态含量差异较大，磷释放过程中大部分湖泊沉积物 LOP 含量减少，NLOP 含量波动性增加，MLOP 含量波动性减少，但含量大小顺序相同，均呈现 NLOP > MLOP > LOP 的趋势，这与已有的研究结果一致[14,22,32]. 同时，相关性分析也表明湖泊沉积物各 DOP 形态含量与其磷释放显著正相关(图4).

3　讨论

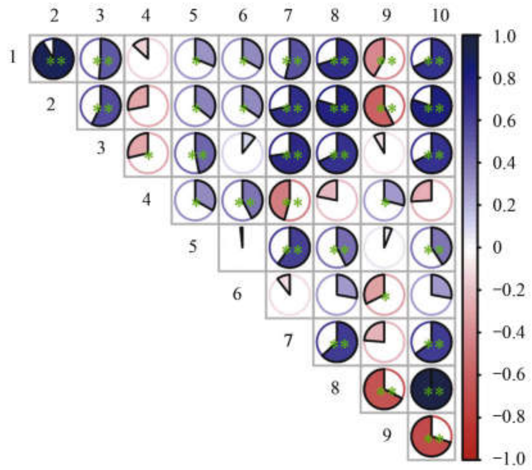
3.1　湖泊沉积物有机磷释放影响因素

湖泊沉积物磷释放过程受沉积物 pH、有机质含量、黏土颗粒大小和有机磷形态等多种因素影响[11,35]. 其中，DOP 形态和 DOM 对研究磷释放动力学特征及其机制具有重要意义，本研究沉积物各形态 DOP 释放量与释放参数 k 和 q_e 显著相关，其形态是影响各阶段释放速率和释放量差异的重要原

因[33]；除此之外，沉积物 DOM 苯环上羟基、羧基和羰基等官能团结构的变化也会影响沉积物磷的释放[36].

3.1.1 磷形态对湖泊沉积物有机磷释放影响

已有研究发现湖泊沉积物磷释放很大程度取决于有机磷形态特征变化[23,33,37]，本文在磷释放动力学特征研究中也得到了类似结果. 湖泊沉积物磷释放呈现先快后慢趋势，且释放过程中 DOP 形态组成均发生了一定变化，其原因可能是各形态有机磷释放及转化所致[38]. 水体扰动可促进活性和中活性有机磷释放，影响沉积物 DOP 形态分布，最终影响湖泊沉积物磷释放动力学过程[4,39,40]. 因此本文分析了 DOP 形态与其释放特征参数间的相关性(图 4).



1. DTP, 2. DOP, 3. $NaHCO_3$-P_o, 4. HCl-P_o, 5. Ful-P_o, 6. Hum-P_o, 7. Res-P_o, 8. q_{max}, 9. k, 10. q_e; 圆面积占比和颜色深浅对应相关性的大小; 不同星号表示相关性显著, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

图 4 湖泊沉积物磷形态和有机磷释放特征参数指标皮尔森相关性分析

Fig. 4 Pearson's correlation analysis between phosphorus forms and characteristic parameters of organic phosphorus release

沉积物 $NaHCO_3$-P_o 与 DOP 及释放参数 q_e 显著相关($R = 0.572$, $P < 0.01$; $R = 0.677$, $P < 0.01$)，且作为一种活性物质，$NaHCO_3$-P_o 被松散地吸附在沉积物颗粒表面或者吸收进沉积物间隙水中，易矿化释放进入水体[38, 41]，转化为生物有效磷，被微生物、植物等吸收利用[38]. 快速释放阶段(0 ~ 60 min)湖泊沉积物-水界面的相互作用较为强烈[22]，即使活性 $NaHCO_3$-P_o 含量较低，其释放依旧会影响沉积物 DOP 的释放速率 k[27]，在湖泊沉积物磷释放过程中起重要的释放作用.

Ful-P_o 在磷释放过程具有中等占比，与 $NaHCO_3$-P_o 相比其与磷释放参数 q_e 相关性较为显著($R = 0.408$, $P < 0.01$)，表明其对 DOP 的释放也发挥着重要作用(图 4). Ful-P_o 在整个释放阶段的含量先增后降，总体含量降低，显著影响了上覆水体的磷含量[41]. 这种趋势可能与 MLOP 与其他 OP 形态释放转化有关[22]，MLOP 易水解或矿化，溶解并易通过孔隙水扩散[42]，释放后期含量逐渐下降. 这也解释了前期释放速率 k 快，释放量 q 较大的原因.

即使 Res-P_o 与 DOP 及释放特征参数 q_e 相关性显著($R = 0.714$, $P < 0.01$; $R = 0.649$, $P < 0.01$)，NLOP 对沉积物有机磷释放影响依旧很小. 一个原因是 NLOP 总量占 DOP 含量比例最高(39% ~ 69%)，且在释放过程中含量变化不大; 另一个原因是 Res-P_o 和 Hum-P_o 主要为大分子有机磷或其他难溶性磷，难以被生物利用，不能轻易转化或释放[43].

综上，磷释放前期沉积物各形态 DOP 均有贡献，各形态磷释放量占比为 LOP(35%) > MLOP(25.5%) > NLOP(21%)，即 LOP 和 MLOP 是主要影响沉积物有机磷释放速率和释放量的 OP 形态; 释放后期 LOP 和 MLOP 占 DOP 比例下降，而 NLOP 占比增加，导致后期释放速率减慢[23].

3.1.2 沉积物 DOM 特征对其有机磷释放影响

DOM 可在活性基团作用下促进沉积物磷释放[5,14]，是影响沉积物磷释放关键因素之一[44]，也是 DOP 在快速释放阶段较慢速释放阶段更易释放、释放速率 k 更大的另一原因. 本研究发现，沉积物疏水性 DOM 苯环上羟基、羧基和羰基等官能团结构的变化会影响沉积物磷的释放[33]，沉积物 DOM 的特征参数 $SUVA_{254}$、A_{253}/A_{203} 和 E_2/E_3 值均发生一定变化，导致磷释放过程中释放速率和释放量产生差异.

$SUVA_{254}$ 值已被证实是估算 DOM 中芳香族化合物比例的有效指标，$SUVA_{254}$ 值越高，DOM 的腐殖化和芳香性越大，分子量越小[45]. A_{253}/A_{203} 的值可以反映 DOM 取代基的浓度，比值越大，说明芳香环取代基的浓度越高[44]. 沉积物磷释放动力学过程中，$SUVA_{254}$ 和 A_{253}/A_{203} 值呈稳定上升趋势，且 $SUVA_{254}$ 值 < 3(表 2)，说明 DOP 快速释放阶段 DOM 腐殖化程度、取代基及芳香性均低于慢速释放阶段，利于前期 DOP 释放，解释了其释放速率 k 及释放量 q 较慢速释放阶段大的原因. 表征 DOM 的另一紫外特征参数 E_2/E_3 与 DOM 腐殖化水平和分子量有关，比值越低，其分子量越高[45,46]. 本实验 E_2/E_3 值从释放开始到平衡后数值变小(表 2)，表明沉积物 DOM 分子量随释放增大，DOM 结构更为复杂. 这也解释了释放前期大分子 Hum-P_o 所占比例较小，以小分子量的 Ful-P_o 为主[42]，同时，由于小分子物质稳定性低，且前期 DOM 腐殖化程度和疏水性(矿化程度)较低，活性更强; 更易于沉积物磷释放，

表 2　湖泊表层沉积物 DOP 释放过程紫外可见光光谱特征参数

Table 2　Characteristic parameters of UV-vis spectra of DOP release process in surface sediments of each lake

紫外可见光光谱指数	时间/min	采样点					
		洱海	滇池	异龙湖	太湖	巢湖	鄱阳湖
A_{253}/A_{203}	5	0.22	0.16	0.04	0.32	0.26	0.28
	60	0.24	0.18	0.04	0.48	0.29	0.31
	180	0.24	0.21	0.05	0.42	0.36	0.31
	300	0.24	0.22	0.05	0.47	0.37	0.35
E_2/E_3	5	5.44	5.06	8.57	3.75	5.09	5.81
	60	5.36	4.73	8.33	3.67	4.71	5.83
	180	5.24	4.95	8.23	3.55	4.69	4.4
	300	5.22	4.88	8.13	3.33	4.66	4.11
$SUVA_{254}$	5	0.28	0.37	0.13	0.02	0.05	0.08
	60	0.31	0.39	0.14	0.05	0.05	0.09
	180	0.34	0.43	0.15	0.07	0.08	0.11
	300	0.33	0.45	0.15	0.08	0.09	0.12

与 $SUVA_{254}$ 和 A_{253}/A_{203} 得出的结论一致.

3.2　沉积物有机磷释放的水质风险

沉积物磷释放是影响上覆水磷浓度的重要因素[47]，也是导致富营养化湖泊持续富营养化的重要原因[3]. 过量磷输入会导致水体富营养化；湖泊营养化程度较重情况下，即使减少或控制外部污染负荷，湖泊水质也较难恢复[48,49]. 有研究发现湖泊营养水平较高，其沉积物 SRP 释放水平也较大[15]，Guo 等[50]的研究也发现湖泊营养的水平增加会导致 DOP 积累，造成更多的 SRP 释放. 同时也有研究表明不同营养水平湖泊沉积物 DOP 释放能力可能存在较大差异[15,22,38,47]，本研究也得到相似结果，长江中下游与云南高原 6 个不同营养水平湖泊沉积物 DOP 均以 NLOP 为主，但两湖区营养水平较高的湖泊 LOP 和 MLOP 占比相较低营养湖泊高. 同时，营养水平高的湖泊沉积物 DOP 释放量要高于低营养湖泊. 如表 3，处于富营养水平的太湖、巢湖和中营养水平的鄱阳湖分别释放了 55.79%、53.93% 和 46.52% 的 DOP，云南高原湖区的异龙湖为重度营养水平，其沉积物释放了 77.31% 的 DOP，高于中营养和富营养水平的滇池（75.81%）和洱海（53.69%）. 由此可见，湖泊富营养化程度越高，其沉积物有机磷释放的水质风险越大.

湖泊沉积物释放 DOP 占 DTP 比例较高，其水质风险较 SRP 高；其中 DOP 最大释放量较 SRP 更大，本研究 DTP 总释放量为 6.35 ~ 17.61 mg·kg^{-1}，沉积物释放 3.41 ~ 13.35 mg·kg^{-1} DOP 进入水体，磷释放占比较初始阶段明显上升（62% ~ 70%），其中有 90% 会水解为无机磷释放出来，并最终被生物利用[11]. 同时 DOP 与 DTP 含量间的关系达到极显著水平，相关系数最高，$R = 0.912$（$P < 0.01$），表明扰动条件下 DOP 的释放在湖泊沉积物磷的释放过程中发挥着重要作用，同时也表明沉积物磷释放过程 DOP 不容忽视[15]. 综上所述，DOP 作为湖泊沉积物 DTP 释放的主要部分，在湖泊沉积物磷释放过程中占主导作用，对湖泊沉积物内源磷负荷作用及贡献不容忽视. 随着外源磷负荷逐步得到控制，环境条件变化及微生物等作用，可能会进一步提高湖泊沉积物 DOP 的释放风险. 因此，在湖泊沉积物磷释放过程中不仅要关注无机磷的释放，有机磷释放特征的研究也是很有必要的，否则会低估沉积物磷释放的水质影响及风险.

表 3　长江中下游湖泊和云南高原湖泊沉积物有机磷释放特征比较

Table 3　Comparison of organic phosphorus release characteristics from sediments of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River and Yunnan Plateau

项目	长江中下游湖泊			云南高原湖泊		
	太湖	巢湖	鄱阳湖	洱海	滇池	异龙湖
营养水平	富营养	富营养	中营养	中营养	富营养	重度营养
DOP 释放量/mg·kg^{-1}	6.80	8.12	5.85	3.41	13.35	5.57
MLOP/DOP/%	46.20	29.14	25.88	23.89	15.00	29.49
DOP/DTP/%	55.79	53.93	46.52	53.69	75.81	77.31

4　结论

（1）沉积物 DOP 与 SRP 释放动力学过程相似，遵循二级动力学模型，释放速率均呈现先快后慢的变化趋势；DOP 快速反应阶段主要发生在前 60 min，SRP 则主要在 0 ~ 90 min，DOP 最大释放量和

总释放量较 SRP 更大.

(2)沉积物 DOP 形态及 DOM 是影响磷释放动力学过程的重要因素. LOP 释放量最大(16%～54%),其次为 MLOP(18%～33%),NLOP 最小,增加了约 5%～37%,表明 LOP 和 MLOP 是主要向上覆水体释放的 DOP 形态. DOM 腐殖化程度和芳香性随磷释放过程逐渐升高, DOM 活性不断降低,且有机质活性较低,导致 DOP 释放速率先快后慢.

(3)湖泊沉积物 DOP 较 SRP 释放风险高,其释放量占 DTP 总释放量的 47%～77%;且通过对比长江中下游和云南高原 6 个不同营养水平湖泊表明,湖泊营养水平较高,其沉积物 DOP 释放量也较大,表现出较大的水质风险.

参考文献:

[1] Azam H M, Alam S T, Hasan M, *et al*. Phosphorous in the environment: characteristics with distribution and effects, removal mechanisms, treatment technologies, and factors affecting recovery as minerals in natural and engineered systems [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26** (20): 20183-20207.

[2] Norton S A, Coolidge K, Amirbahman A, *et al*. Speciation of Al, Fe, and P in recent sediment from three lakes in Maine, USA[J]. Science of the Total Environment, 2008, **404**(2-3): 276-283.

[3] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake[J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(3): 391-399.

[4] Cui Y, Xiao R, Xie Y, *et al*. Phosphorus fraction and phosphate sorption-release characteristics of the wetland sediments in the Yellow River Delta[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2018, **103**: 19-27.

[5] 张巧颖, 杜瑛珣, 罗春燕, 等. 镧改性膨润土钝化湖泊中的磷及其生态风险的研究进展[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1499-1509.
Zhang Q Y, Du Y X, Luo C Y, *et al*. Advances in researches on phosphorus immobilization by lanthanum modified bentonite in lakes and its ecological risk[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(6): 1499-1509.

[6] Paytan A, Roberts K, Watson S, *et al*. Internal loading of phosphate in Lake Erie central basin[J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 1356-1365.

[7] Søndergaard M, Bjerring R, Jeppesen E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes [J]. Hydrobiologia, 2013, **710**(1): 95-107.

[8] Shinohara R, Hiroki M, Kohzu A, *et al*. Role of organic phosphorus in sediment in a shallow eutrophic lake[J]. Water Resources Research, 2017, **53**(8): 7175-7189.

[9] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1537-1543.
Zhang L, Fan C X, Wang J J, *et al*. Space-time dependent variances of ammonia and phosphorus flux on sediment-water interface in Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2006, **27** (8): 1537-1543.

[10] Petticrew E L, Arocena J M. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings[J]. Science of the Total Environment, 2001, **266**(1-3): 87-93.

[11] 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1826-1833.
Gong J J, Ni Z K, Xiao S B, *et al*. Effects and differences of the release of dissolved organic and inorganic phosphorus in different sediments covered by different materials of Erhai Lake[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1826-1833.

[12] 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.

[13] Zhu Y R, Feng W Y, Liu S S, *et al*. Bioavailability and preservation of organic phosphorus in lake sediments: insights from enzymatic hydrolysis and ^{31}P nuclear magnetic resonance [J]. Chemosphere, 2018, **211**: 50-61.

[14] Ni Z K, Wang S R, Zhang B T, *et al*. Response of sediment organic phosphorus composition to lake trophic status in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **652**: 495-504.

[15] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al*. Effects of organic matter on phosphorus release kinetics in different trophic lake sediments and application of transition state theory[J]. Journal of Environmental Management, 2008, **88**(4): 845-852.

[16] Lü C W, He J, Zuo L, *et al*. Processes and their explanatory factors governing distribution of organic phosphorous pools in lake sediments[J]. Chemosphere, 2016, **145**: 125-134.

[17] Kong M, Liu F F, Tao Y, *et al*. First attempt for in situ capping with lanthanum modified bentonite (LMB) on the immobilization and transformation of organic phosphorus at the sediment-water interface[J]. Science of the Total Environment, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140342.

[18] Joshi S R, Kukkadapu R K, Burdige D J, *et al*. Organic matter remineralization predominates phosphorus cycling in the mid-bay sediments in the Chesapeake Bay[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(10): 5887-5896.

[19] Katsaounos C Z, Giokas D L, Leonardos I D, *et al*. Speciation of phosphorus fractionation in river sediments by explanatory data analysis[J]. Water Research, 2007, **41**(2): 406-418.

[20] Kaiserli A, Voutsa D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia, N. Greece[J]. Chemosphere, 2002, **46**(8): 1147-1155.

[21] Long Y C, Hu X J, Jiang J, *et al*. Phosphorus sorption-Desorption behaviors in the sediments cultured with *Hydrilla verticillata* and *Scripus triqueter* as revealed by phosphorus fraction and dissolved organic matter[J]. Chemosphere, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129549.

[22] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al*. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China[J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(2): 366-372.

[23] 马晓阳, 牛凤霞, 肖尚斌, 等. 高磷沉积物有机磷形态分布及释放动力学特征研究——以宜昌西北口水库为例[J]. 中国环境科学, 2021, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210709.009.
Ma X Y, Niu F X, Xiao S B, *et al*. Distribution and release kinetics of organic phosphorus in phosphorus-rich sediments: a case study of Xibeikou Reservoir in Yichang[J]. China Environmental Science, 2021, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210709.009.

[24] Cao X Y, Zhu J M, Lu M, *et al*. Phosphorus sorption behavior

on sediments in Sanggou Bay related with their compositions by sequential fractionation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **169**: 144-149.

[25] León J G, Pedrozo F L, Temporetti P F. Phosphorus fractions and sorption dynamics in the sediments of two Ca-SO_4 water reservoirs in the central Argentine Andes [J]. International Journal of Sediment Research, 2017, **32**(3): 442-451.

[26] 赵海超, 王圣瑞, 张莉, 等. 有机质含量及其组分对洱海沉积物磷吸附-释放影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2346-2354.
Zhao H C, Wang S R, Zhang L, *et al*. Effect of OM content and constituents on phosphorus adsorption-release of the sediment from Erhai Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(9): 2346-2354.

[27] Aydtn Y A, Aksoy N D. Adsorption of chromium on chitosan: optimization, kinetics and thermodynamics [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **151**(1-3): 188-194.

[28] 晏维金, 亢宇, 章申, 等. 磷在土壤中的解吸动力学[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(2): 97-101.
Yan W J, Kang Y, Zhang S, *et al*. The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China [J]. China Environmental Science, 2000, **20**(2): 97-101.

[29] Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected Histosols [J]. Soil Science, 1998, **163**(1): 36-45.

[30] 金丹越, 王圣瑞, 步青云. 长江中下游浅水湖泊沉积物磷释放动力学[J]. 生态环境, 2007, **16**(3): 725-729.
Jin D Y, Wang S R, Bu Q Y. Phosphate release kinetics characteristics of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze Rive [J]. Ecology and Environment, 2007, **16**(3): 725-729.

[31] 王悦敏, 倪兆奎, 冯明雷, 等. 鄱阳湖枯水期沉积物磷释放特征及对水位变化响应[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(10): 3804-3812.
Wang Y M, Ni Z K, Feng M L, *et al*. Characteristics of phosphorus release in sediment and its response to the change of water level in Poyang Lake in dry season [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(10): 3804-3812.

[32] 霍守亮, 李青芹, 昝逢宇, 等. 我国不同营养状态湖泊沉积物有机磷形态分级特征研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1000-1007.
Huo S L, Li Q Q, Zan F Y, *et al*. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes, China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1000-1007.

[33] 王庭健, 苏睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, **7**(4): 12-19.
Wang T J, Su R, Jin X C, *et al*. The effects to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban Eutrophic Lakes [J]. Research of Environmental Sciences, 1994, **7**(4): 12-19.

[34] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Science, 1978, **125**(2): 95-101.

[35] Xu G, Song J W, Zhang Y, *et al*. Enhancement of phosphorus storage capacity of sediments by coastal wetland restoration, Yellow River Delta, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **150**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110666.

[36] 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.

[37] Murphy T, Lawson A, Kumagai M, *et al*. Release of phosphorus from sediments in Lake Biwa[J]. Limnology, 2001, **2**(2): 119-128.

[38] Yuan H Z, Tai Z Q, Li Q, *et al*. Characterization and source identification of organic phosphorus in sediments of a hypereutrophic lake[J]. Environmental Pollution, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113500.

[39] Ni Z K, Wang S R, Wu Y, *et al*. Response of phosphorus fractionation in lake sediments to anthropogenic activities in China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134242.

[40] Bai J H, Ye X F, Jia J, *et al*. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions[J]. Chemosphere, 2017, **188**: 677-688.

[41] Fang T H. Partitioning and behaviour of different forms of phosphorus in the Tanshui estuary and one of its tributaries, northern Taiwan [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, **50**(5): 689-701.

[42] Ni Z K, Wang S R, Wu Y, *et al*. Influence of exposure time on phosphorus composition and bioavailability in wetland sediments from Poyang lake, since the operation of the Three Gorges Dam [J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114591.

[43] Zhu Y R, Wu F C, Liu Y, *et al*. Microbial biomass and community composition involved in cycling of organic phosphorus in sediments of Lake Dianchi, Southwest China [J]. Geomicrobiology Journal, 2017, **34**(3): 249-260.

[44] Li Y P, Wang S R, Zhang L, *et al*. Composition and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter extracted from the sediment of Erhai Lake in China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(9): 1599-1611.

[45] Zhang Y, He F, Liu Z S, *et al*. Release characteristics of sediment phosphorus in all fractions of West Lake, Hang Zhou, China[J]. Ecological Engineering, 2016, **95**: 645-651.

[46] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. Analytica Chimica Acta, 1997, **337**(2): 133-149.

[47] 张润宇, 吴丰昌, 刘丛强, 等. 长江中下游与西南高原不同营养水平湖泊沉积物中机磷的形态特征[A]. 见: 第三届贵州省自然科学优秀学术论文评选获奖论文集(2010年)[C]. 贵州省科学技术协会, 2010.

[48] Ahlgren J, Tranvik L, Gogoll A, *et al*. Sediment depth attenuation of biogenic phosphorus compounds measured by ^{31}P NMR[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(3): 867-872.

[49] Feng W Y, Yang F, Zhang C, *et al*. Composition characterization and biotransformation of dissolved, particulate and algae organic phosphorus in eutrophic lakes [J]. Environmental Pollution, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114838.

[50] Guo M L, Li X L, Song C L, *et al*. Photo-induced phosphate release during sediment resuspension in shallow lakes: A potential positive feedback mechanism of eutrophication [J]. Environmental Pollution, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113679.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 6

Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2022

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on $PM_{2.5}$ Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region …… QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, *et al.* (2831)

Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China …… HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, *et al.* (2840)

Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in $PM_{2.5}$ During COVID-19 Control in Suzhou …… MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, *et al.* (2851)

Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 …… XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, *et al.* (2858)

Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing …… PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, *et al.* (2867)

Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of $PM_{2.5}$ in Baoding City in Winter …… WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, *et al.* (2878)

Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in $PM_{2.5}$ in Jiangbei New Area, Nanjing …… GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (2888)

Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi …… XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, *et al.* (2895)

Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example …… ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, *et al.* (2906)

Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis …… TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, *et al.* (2917)

Characteristics and Meteorological Factors of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin …… XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, *et al.* (2928)

Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 …… ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, *et al.* (2937)

Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province …… YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, *et al.* (2947)

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn …… ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, *et al.* (2957)

Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan …… SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (2966)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City …… WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, *et al.* (2979)

Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China …… FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)

Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River …… WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, *et al.* (2996)

Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia …… ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, *et al.* (3005)

Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism …… SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, *et al.* (3016)

Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors …… LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, *et al.* (3027)

Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai …… ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, *et al.* (3037)

Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake …… ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, *et al.* (3048)

Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks …… LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, *et al.* (3058)

Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area …… ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, *et al.* (3066)

Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin …… CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, *et al.* (3077)

Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water …… CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, *et al.* (3088)

Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 …… QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, *et al.* (3097)

Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City …… WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, *et al.* (3106)

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years …… GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, *et al.* (3118)

Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China …… TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, *et al.* (3128)

Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data …… GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, *et al.* (3140)

Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution …… CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)

Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution …… SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, *et al.* (3160)

Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water …… WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing …… XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, *et al.* (3177)

Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation …… ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, *et al.* (3187)

Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron …… CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, *et al.* (3195)

Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System …… TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, *et al.* (3204)

Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions …… GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, *et al.* (3211)

Effect of HumicAcid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis …… LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, *et al.* (3221)

Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 …… XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, *et al.* (3230)

Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland …… SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, *et al.* (3241)

Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau …… WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, *et al.* (3253)

Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China …… LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, *et al.* (3262)

Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province …… ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin …… DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, *et al.* (3278)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (*Rhinopithecus roxellana*) Habitat in Shennongjia Mountains …… YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, *et al.* (3288)

Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation …… XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, *et al.* (3299)

Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice …… TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, *et al.* (3308)

Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments …… LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, *et al.* (3315)

Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai …… LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, *et al.* (3328)

Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops …… JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, *et al.* (3338)

Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing …… LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, *et al.* (3348)

Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 …… LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, *et al.* (3357)

Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data …… LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, *et al.* (3365)