Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带$PM_{2.5}$空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽，刘笑杰，李丁，孙颖琦

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

双奖期刊

2022年3月
第43卷 第3期
Vol.43 No.3

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第3期
2022年3月15日

目 次

2000~2020年天津 $PM_{2.5}$ 质量浓度演变及驱动因子分析 …… 蔡子颖, 郝囝, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)
天津市 $PM_{2.5}$-O_3 复合污染特征及来源分析 …… 肖致美, 徐虹, 高璟赟, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气 $PM_{2.5}$ 来源解析 …… 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 …… 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)
"大气十条"实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 …… 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秣麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)
郑州市典型污染过程 PM_1 中重金属浓度、来源及健康风险评估 …… 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝囡, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)
长江经济带 $PM_{2.5}$ 空间异质性和驱动因素的地理探测 …… 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)
长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 …… 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)
"2+26"城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 …… 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谞, 王帅, 陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素 …… 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 …… 赵楠, 卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 …… 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志炯, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)
山东半岛近地面 O_3 浓度时空变化及潜在源区解析 …… 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安地区 VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 …… 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐堃, 宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的 VOCs 污染特征与来源解析 …… 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点 VOCs 污染特征比较 …… 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 …… 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 …… 李源漣, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李莺(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 …… 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 …… 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析 …… 刘彦龙, 郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 …… 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄燚, 杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 …… 黄伟, 张钘, 罗晓佼, 张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 …… 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张浏, 郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中 Cd 形态空间分布特征及其影响因素 …… 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价 …… 龚润强, 赵华珅, 高占啟, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 …… 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)
百年来北方湖泊沉积物 PAHs 的变化特征及其对人类活动的响应 …… 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 …… 胡愈炘, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 …… 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 …… 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 …… 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 …… 陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 …… 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附 …… 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)
天津市滨海河流 N_2O 扩散通量及控制因子 …… 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 …… 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法 …… 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 …… 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制 …… 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)
F/M 对活性污泥微生物生态网络的影响 …… 张冰, 孙晨翔, 文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 …… 刘书淮, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 …… 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统锑迁移转换特征及污染评价 …… 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土矿区土壤中重金属的阻控效应 …… 杨士, 刘祖文, 龙焙, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 …… 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物质炭材料对镉和砷的吸附机制 …… 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 …… 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙约兵, 赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 …… 任超, 任彧仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 …… 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)
蚯蚓/铈锰改性生物炭对 As 污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 …… 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)
DA-6 和 EDDS 施用对龙葵生长、Cd 吸收和土壤细菌群落结构的影响 …… 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 …… 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸的影响 …… 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田 N_2O 和 N_2 排放的影响 …… 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)
基于 Meta 分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氨挥发的影响 …… 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 …… 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)
《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第3期 2022年3月
Vol.43, No.3 Mar., 2022

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响

黄伟[1,2], 张钶[1,2], 罗晓佼[1,2], 张磊[1,2*]
(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 国家级三峡库区水环境监测与模拟国际科技合作基地, 重庆 400715)

摘要: 三峡大坝独特的调度运行方式决定了三峡库区支流在水动力方面显著区别于自然河流. 为探究库区特殊调水机制下支流沉积物内源磷的动态变化, 于2016年在库区北岸最大支流澎溪河中游的高阳平湖段进行了8次(1、3~8和10月,每月一次)水体和沉积物样品采集,分析其不同形态磷含量,并对流速、水深和沉积物碱性磷酸酶活性等进行了一系列分析. 结果表明,高阳平湖段水体类型可分为5、6月前的深水湖泊及5、6月后至三峡大坝秋季再次蓄水间的典型河流两种水文状态; 湖泊状态下上覆水中可溶性磷浓度比河流状态高42.48%,利于沉积物表层沉积物中弱结合态磷(NH_4Cl-P)处于吸附-释放的平衡状态; 春季水华初期,随着上覆水温度的升高和沉积物中碱性磷酸酶活性的提高,沉积物中潜在可移动磷含量升高,而稳定形态磷含量降低,表现出向潜在可移动磷形态转变的趋势,这可能是春季水华可利用的磷源之一; 高阳平湖沉积物中稳定形态磷含量约占总磷含量的81.79%,变异系数相对较小(2.90%~4.21%),并且存在显著随时间累积趋势($P<0.05$). 揭示了沉积物不同磷形态转化及其与水体存在类型的关系,为三峡库区其它支流或存在类似调水机制的水库支流内源磷的研究提供借鉴.

关键词:三峡库区; 磷形态; 河湖指数; 沉积物; 上覆水
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)03-1356-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202106176

River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment

HUANG Wei[1,2], ZHANG Xing[1,2], LUO Xiao-jiao[1,2], ZHANG Lei[1,2*]
(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. National Base of Water Environmental Monitoring and Simulation in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China)

Abstract: The unique operation mode of the Three Gorges Dam has determined that the tributaries of the Three Gorges Reservoir (TGR) are significantly different from natural rivers in terms of hydrodynamics. The aim of this study was to explore the dynamic changes of internal phosphorus in tributary sediments under special water transfer mechanisms in the reservoir area. In 2016, we conducted samplings eight times (January, March-August, and October, once a month) in the Gaoyang Lake, which is located in the middle section of the Pengxi River, the largest tributary in the northern bank of the TGR. Samples of the adjacent overlying (AOL) water and sediment were collected, and a series of analyses were carried out on the flow velocity, water depth, and alkaline phosphatase activity (APA) of sediments. The results indicated that the waterbody types of the Gaoyang Lake can be divided into two hydrological states: deep lakes before May and June and typical rivers from May and June until the Three Gorges Dam re-flooding in autumn. The concentration of dissolved phosphorus in the AOL water during the lake state was 42.48% higher than that in the river state, which was beneficial for the weakly bounded phosphorus (NH_4Cl-P) in the sediment surface to be in an adsorption-releasing equilibrium state. At the beginning of the spring algal bloom, with the increase in water temperature and APA in the sediments, the content of potential mobile phosphorus (PMP) in the sediments increased; however, the stable-form phosphorus content decreased, showing a tendency of transformation between these two forms of phosphorus, which may be one of the available phosphorus sources for algal blooms. The stable-form phosphorus content in the sediments of the Gaoyang Lake accounted for approximately 81.79% of the total phosphorus content, its coefficient of variation was relatively small (2.90%-4.21%), and there was a significant trend of accumulation over time ($P<0.05$). The study revealed the transformation of different phosphorus forms in sediments and their relationship with the state shift of the waterbodies, and provided a reference to understand the internal phosphorus cycle in other tributaries of the TGR area or other reservoir tributaries under similar situations.

Key words:Three Gorges Reservoir; phosphorus forms; river-lake index; sediment; adjacent overlying water

磷被普遍认为是水体富营养化限制性元素,具体可分为外源和内源两大类,其中内源磷是蓄存于沉积物中的磷,外源磷则是外界环境输入到水体中的磷[1,2]. 近年来随着关于全面加强生态文明建设和长江流域保护修护政策的全面实施,三峡库区(TGR)外源磷负荷得到了全面且有效地控制[3],但库区水体富营养化程度并未因此明显好转,至2020年,库区仍有50%一级支流断面呈中-重度富营养化[4]. 有研究表明,三峡库区水体沉积物吸附磷的再释放所形成的内源磷负荷,是在切断外源负荷后相当长时期水质依旧得不到有效改善的重要原因[5,6]. 因此,关注三峡库区沉积物中内源磷沉积与释放的循环过程十分必要.

收稿日期: 2021-06-22; **修订日期**: 2021-08-01
基金项目: 科技部国际科技合作基地项目(2016D01027); 国际科技合作与交流专项(2013DFG92520)
作者简介: 黄伟(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为三峡库区水体富营养化防控与治理,E-mail: 1135493087@qq.com
* 通信作者,E-mail:echozhanglei@swu.edu.cn

三峡大坝独特的调度运行方式决定了三峡库区支流在水动力方面区别于自然河流. 以库区北岸最大支流澎溪河(又名小江)为例,与三峡大坝建成前相比,除需要负担流域内营养盐的留存与消化外,还存在蓄水期长江干流水体回流,加剧营养负荷的情况[7,8]. 此外,冬季蓄水也造成澎溪河每年 9 月至来年 2、3 月极为缓慢的水体流速(0.02 m·s^{-1})和漫长的水体滞留时间(>180 d)现象,此时澎溪河中段的高阳平湖整体呈现深水湖泊(水深可达 40 m)的水文状态; 而每年的 6 月中下旬至 8 月末,库区完全以 145 m 低水位运行,此时高阳平湖水体流速又趋近自然河流状态,水深也相对较浅(约 10 m)[9,10]. 库区支流这种极为特殊的水文状态,形成其独特的内源负荷动态. 目前关于库区内源磷赋存形态的研究多集中于消落带土壤和表层(0 ~ 10 cm)沉积物,其中三峡库区一级支流澎溪河、寸滩、大宁河和香溪河沉积物表层沉积物磷赋存形态均以无机磷为主[11~13],而对于上述特殊水文状态下库区支流内源磷的动态积累过程的研究尚少,不利于库区支流水质改善的整体进程. 本研究假设当三峡库区支流水体处于湖泊模式下时,水文及生物条件导致水体中外源磷沉降并转化为生物有效性低的稳定赋存态内源磷,在沉积物贮存,为之后的水华暴发提供磷源; 当支流水体处于典型河流模式下时,内源磷赋存态的转化则相反,即磷的生物有效性提高; 长时间尺度下,内源磷呈蓄积趋势. 为了验证这些假设,本研究于 2016 年在澎溪河中游的高阳平湖段采集了 8 个月(1、3 ~ 8 和 10 月,每月一次)的水体和沉积物样品,并进行了流速、水深和沉积物碱性磷酸酶活性等一系列分析,从水文、水质和生物角度剖析了控制沉积物磷形态变化的内外因素. 通过增进对特殊水文状态下三峡库区支流内源磷与水体富营养化之间的认识,以期为更好防控三峡库区支流水体富营养化提供科学理论依据.

1　材料与方法

1.1　研究区域

三峡库区(29° ~ 31°50′N, 106°20′ ~ 110°30′E)位于长江中段,属亚热带季风气候,四季分明,年平均降水量在1 000 ~ 1 350 mm 之间,库区年平均水温为 16 ~ 18℃[14]. 自建成后每年三峡水位均在 145 ~ 175 m 之间波动, 2016 年水位变化如图 1 所示.

澎溪河(30°49′ ~ 31°42′N, 107°56′ ~ 108°54′E)是三峡库区北岸最大的一级支流,流域面积5 173 km^2,长度 182 km,平均坡度为 1.25%. 三峡建成前,其水流湍急,河面宽约 2 ~ 3 m,鲜见水华的报道[15],但库区蓄水后,河面平均宽度约 1 km,高水位期流速 0.030 ~ 0.074 m·s^{-1},低水位期流速 0.014 ~ 0.026 m·s^{-1},成为三峡库区水华最为严重的支流之一[16,17].

高阳平湖(31°05′27.4″N, 108°40′41.6″E)位于澎溪河中段,地势开阔平坦. 在三峡大坝完成蓄水后,在这里形成了一个最大宽度约 1.5 km、面积 25 km^2 的开阔水面. 澎溪河水体经上游峡谷流入此处,流速减缓形成具有类似湖泊的地貌环境及水文水力特征,是澎溪河中水华暴发最为严重的区域[18]. 该水域在夏季低水位阶段平均水深不足 15 m,而冬季高水位阶段平均水深超过 40 m,这一系列因素造成高阳平湖形成了典型的“河流-湖泊”的水体类型季节性交替特征.

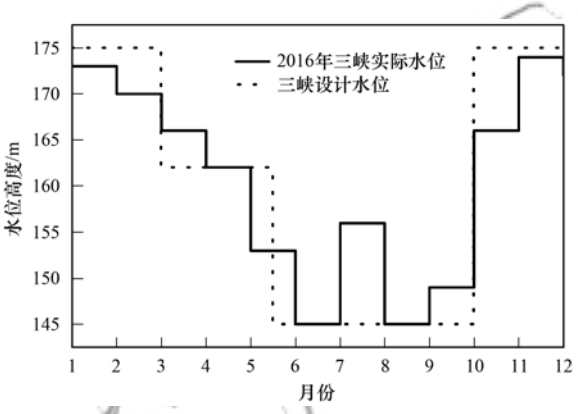


图 1　2016 年三峡库区水位变化情况

Fig. 1　Changes in the water level of TGR in 2016

1.2　样品采集

本研究在高阳平湖选取了 4 个采样位点(图 2),以反映湖泊的整体沉积物状况. 4 个采样点的 GPS 坐标(eXplorist GPS300, 美国)及位置说明见表 1. 采样时间为 2016 年的 1、3、4、5、6、7、8 和 10 月,每月一次. 采样过程中,利用旋桨式流速仪(LJ12-1A)测量各采样点的流速,取均值以代表采样期间高阳平湖的整体流速情况,使用 RBR maestro^3(RBR. Ltd, 加拿大)水质多参仪,现场记录采样断面水温(water temperature, WT)及溶氧参数(dissolved oxygen, DO). 沉积物采用改良的 SWB-1 型柱状采泥器采集(中科院地球化学研究所,贵阳)[19],该采泥器的主体为直径 65 mm,高度 600 cm 的有机玻璃柱,可同时采集柱状沉积物及其上覆水(adjacent overlying, AOL)样品,沉积物采集深度为 0 ~ 30 cm,上覆水高度约 30 cm. 每个采样点平行采样 3 次. 沉积物样品采集后立即按照 0 ~ 10、11 ~ 20、21 ~ 30 cm 划分为表、中、底 3 层,将对应层次的平行样混合后进行低温保存; 上覆水同样是将 3 次平行水样混合后装入容积 1 L 的棕色有机玻璃瓶

中保存,并在采样后 24 h 内转移至实验室进行分析. 到达实验室后,从每份沉积物样品中称出 100 g,用铝箔纸包裹,在冷冻干燥机(FD-1)中干燥 3 ~ 5 d,研磨,过筛(100 目),装入聚乙烯瓶置于冰箱中保存备用[20].

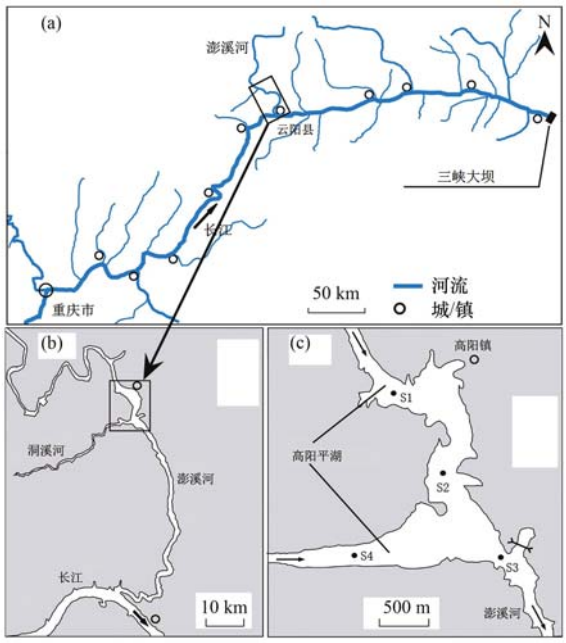


图 2 采样位点分布示意

Fig. 2 Schematic of sampling sites distribution

表 1 采样点的 GPS 坐标及位置说明

Table 1 GPS data and description of sampling sites

采样位点	GPS 坐标(N,E)	位点描述
S1	31°07′16.158″, 108°38′46.326″	上游来水区
S2	31°05′54.324″, 108°40′17.238″	平湖中心区
S3	31°04′6.396″, 108°41′12.642″	下游出水区
S4	31°05′27.4″, 108°40′41.6″	支流洞溪河汇入区

1.3 样品分析

采用连续分级提取法[21]将沉积物中的无机磷分为 5 种形态:①弱结合态磷用 1 mol·L^{-1} NH_4Cl 溶液提取,称为 NH_4Cl-P; ②对氧化还原条件敏感的磷,用 0.11 mol·L^{-1} $Na_2S_2O_4$/$NaHCO_3$ 提取,称为 BD-P(bicarbonate/dithionite phosphorus),主要为铁结合态磷[22]; ③用 0.1 mol·L^{-1} NaOH 提取的铝结合态磷,称为 NaOH-P; ④用 0.5 mol·L^{-1} HCl 提取的钙结合磷,称为 HCl-P; ⑤残渣态磷(residue phosphorus, Res-P),包含有机磷和无机磷,由总磷与上述提取的无机磷总和之差来确定. 为了保证提取效率,每一步提取都要重复多次,直到该步骤的最后一次提取量小于总提取量的 10.00%. NH_4Cl-P 和 BD-P 通常被认为是潜在可移动磷(potential mobile phosphorus, PMP),NaOH-P 和 HCl-P 则是较稳定的磷形态[21,23].

沉积物总磷(TP)的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法[24],上覆水的溶解性总磷(DTP)按文献[25]提供的方法测定. 叶绿素 a 采用丙酮萃取法测定[26],沉积物碱性磷酸酶活性(alkaline phosphatase activity, APA)采用对硝基苯磷酸二钠(*p*-NPP)提取法进行测定[27].

1.4 数据处理

采用水力滞留时间计算公式(1)[28]计算高阳平湖各采样月份平均水体滞留时间.

$$T_R = \frac{V_M}{Q_M} \tag{1}$$

式中, T_R 为月均水体滞留时间, V_M 为高阳平湖月均库容,库容为每月湖面面积大小[29]与平均水深的乘积, Q_M 为月均径流量.

水体类型由式(2)确定[30]. 河湖指数(river-lake index, RLI)是判断水体类型的分类指数,RLI = 0 表示水体处于典型河流状态,RLI = 1 表示处于典型湖泊状态,RLI 介于 0 ~ 1 之间,则表示水体处于典型河流和典型湖泊之间类型[31].

$$RLI = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i F_i \tag{2}$$

式中, α_i 为第 i 个特征指标的权重系数,权重系数之和为 1. 本文参考文献[31]得出的三峡水库敏感分区指标及其权重大小,即选用三峡水库水体滞留时间和水体流速 2 个指标来划分水体类型并且确定其权重系数分别为 0.6 和 0.4. F_i 为第 i 个特征指标的无量纲数值. 其计算如下:对月滞留时间,按其发生概率分区间加权计算,取月滞留时间 < 20 d 的加权系数为 0, 20 ~ 120 d 的加权系数为 0.5, > 120 d 的加权系数为 1; 对流速,按流速的发生概率分区间加权,取月平均流速 < 0.01 m·s^{-1} 的加权系数为 1, 0.01 ~ 0.03 m·s^{-1} 的加权系数为 0.5, > 0.03 m·s^{-1} 的加权系数为 0.

所有数据统一录入 Excel 2019 软件整理分类,并通过 SPSS 13.0 和 Origin 2018 软件进行统计和图形分析,采用 Pearson 相关性分析说明数据间变化的线性相关性,磷含量月际差异采用 Duncan 多重比较法. 变异系数(CV)值用来表征数据离散程度. 高阳平湖沉积物表层的 NH_4Cl-P 含量和上覆水中 DTP 浓度数据用 origin 2018 软件进行数值拟合分析.

2 结果与分析

2.1 2016 年高阳平湖月平均水流速度和水力滞留时间变化趋势

依据月平均水流速度和水力滞留时间(表 2),

2016 年高阳平湖水体类型在采样月份内，可大致划分为两个阶段：第一阶段为 1 月和 3 ~ 5 月，这段时间内高阳平湖整体水流速度较慢，特别是 3 月流速低至 0.015 m·s^{-1}，水力滞留时间长达 259.7 d，呈现出深水湖泊特征；第二阶段为 6 ~ 10 月，与前一阶段相比，此时水流速度明显加快. 8 月水流速度达全年最高值 0.072 m·s^{-1}，滞留时间也缩短到 7.0 d. 这几个月的 RLI 值均为 0，表明此阶段高阳平湖表现出较为典型的河流特征. 而 5 月的 RLI 值为 0.5，10 月的 RLI 值为 0.3，表明此时水体处于湖泊-河流两种水体类型的过渡阶段. 10 月之后三峡库区持续进入高水位运行（图 1）. 因此，在采样月份内高阳平湖水体类型包括深水湖泊型和典型河流型这 2 种.

表 2　2016 年三峡库区澎溪河高阳平湖月平均水流速度和水力滞留时间

Table 2　Water velocity and retention time of the Gaoyang Lake, Pengxi River, TGR in 2016

项目	采样位点	1 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	10 月
流速/m·s^{-1}	S1	0.015	0.015	0.023	0.017	0.030	0.050	0.070	0.053
	S2	0.016	0.017	0.025	0.018	0.040	0.042	0.074	0.054
	S3	0.019	0.014	0.026	0.021	0.038	0.048	0.071	0.048
	S4	0.014	0.014	0.022	0.020	0.036	0.047	0.073	0.049
	均值	0.016	0.015	0.024	0.019	0.036	0.046	0.072	0.051
水体滞留时间/d	均值	242.8	259.7	170.2	79.1	12.5	9.0	7.0	70.1
河湖指数（RLI）		0.8	0.8	0.8	0.5	0	0	0	0.3

2.2　沉积物中不同形态磷含量月际变化

各形态磷的年平均含量排序依次为：NaOH-P > Res-P > HCl-P > BD-P > NH_4Cl-P. 其年平均含量（干重）分别为：431.46、94.30、54.86、12.52 和 1.46 mg·kg^{-1}.

2.2.1　沉积物中 TP 和 Res-P 的月平均含量变化趋势

在所有采样月份中，沉积物中 ω(TP) 和 ω(Res-P) 的分布范围分别为 520.556 ~ 664.283 mg·kg^{-1} 和 42.634 ~ 156.713 mg·kg^{-1}（图 3）. 从月平均含量变化来看，Res-P 和 TP 的变化趋势基本一致. 两者均在 3 月含量最低，而 5 月达到峰值，且年末值高于年初，整体呈“W”形变化. 对表、中、底 3 层沉积物中 Res-P 和 TP 的含量进行 Pearson 相关性分析，结果显示两者之间存在极显著正相关关系（$r = 0.974$，$P < 0.01$，$n = 24$）.

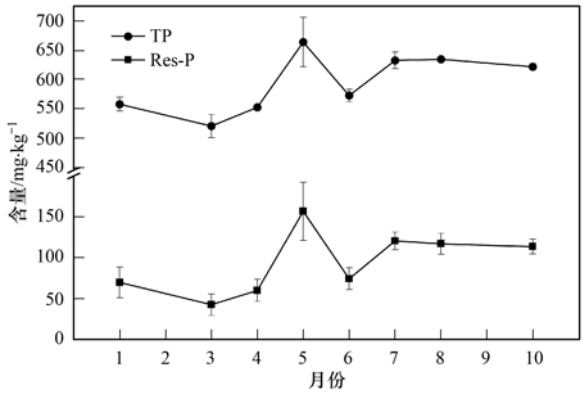


图 3　沉积物中 Res-P 和 TP 含量月际变化

Fig. 3　Monthly variation in Res-P and TP content in sediments

2.2.2　沉积物潜在可移动磷（PMP）含量月际变化

沉积物中 ω(NH_4Cl-P) 范围为 1.06 ~ 1.76 mg·kg^{-1}，变异系数高达 15.00%，平均含量为 1.46 mg·kg^{-1}，占沉积物 TP 的 0.24%. 如图 4(a) 所示，3 月和 6 月为 NH_4Cl-P 含量的两个峰值月份. 如图 4(b) 所示，ω(BD-P) 范围为 11.07 ~ 13.99 mg·kg^{-1}，均值为 12.52 mg·kg^{-1}，在沉积物中众多磷形态中其含量仅略高于 NH_4Cl-P，变异系数为 7.20%，占沉积物 TP 的 2.10%. 在 8 次取样过程中，沉积物中的 BD-P 经历了先增加、后减少和再增加的过程[图 4(b)].

2.2.3　沉积物中稳定形态磷含量月际变化

沉积物中 ω(NaOH-P) 范围为 409.71 ~ 448.58 mg·kg^{-1}，均值为 431.46 mg·kg^{-1}，变异系数仅为 2.90%，在各形态磷中含量最高，占沉积物 TP 的 72.55%，变化幅度远小于上述两类潜在可移动磷. ω(NaOH-P) 在整个采样周期内存在显著随时间累积趋势（$P < 0.05$），显示高阳平湖沉积物中存在一定的磷蓄积的态势，含量最低值出现在 3 月[图 4(c)]，表明此时沉积物中可能存在磷释放现象. ω(HCl-P) 的范围为 51.75 ~ 57.74 mg·kg^{-1}，均值为 54.86 mg·kg^{-1}，占沉积物 TP 的 9.23%，变异系数为 4.20%，略高于 NaOH-P. 与其它形态磷相比，其稳定上升趋势最为明显[图 4(d)].

2.3　垂直尺度下沉积物中潜在可移动磷含量月际变化

2.3.1　垂直尺度下沉积物中 NH_4Cl-P 含量月际变化

由于 PMP 在采样期间的显著变异性，本研究进一步研究了沉积物不同层次的 PMP 时间变异性. 如图 5(a) 所示，1 月至 7 月表层沉积物（0 ~ 10 cm）中 ω(NH_4Cl-P) 维持在 1.6 mg·kg^{-1} 左右. 而 7 月后 ω(NH_4Cl-P) 在两个月内持续下降至 10 月的 0.92

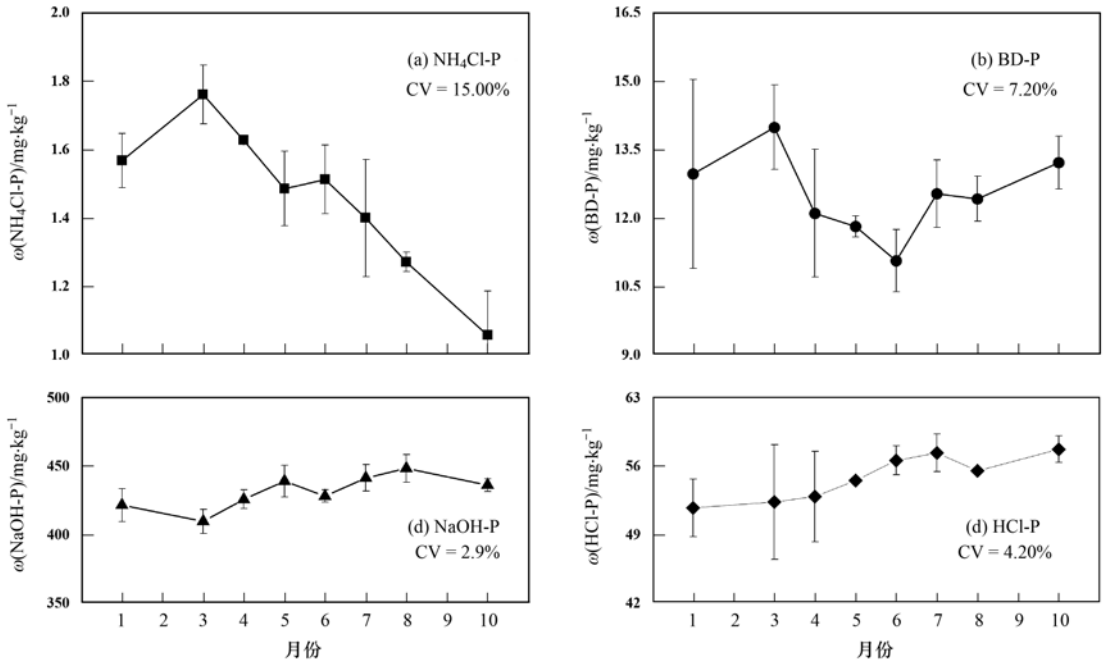


图 4 沉积物中潜在可移动磷与较稳定形态磷含量月际变化

Fig. 4 Monthly variation in the content of PMP and relatively stable phosphorus in sediments

mg·kg^{-1},降幅高达 42.50%. 同时,中层(10 ~ 20 cm)和底层沉积物(20 ~ 30 cm)中的 NH_4Cl-P 含量均在 3 月上升到最高值,其后至 10 月逐渐下降,期间中层 NH_4Cl-P 含量在 6 月和 8 月分别有小幅回升.

2.3.2 垂直尺度下沉积物中 BD-P 含量月际变化

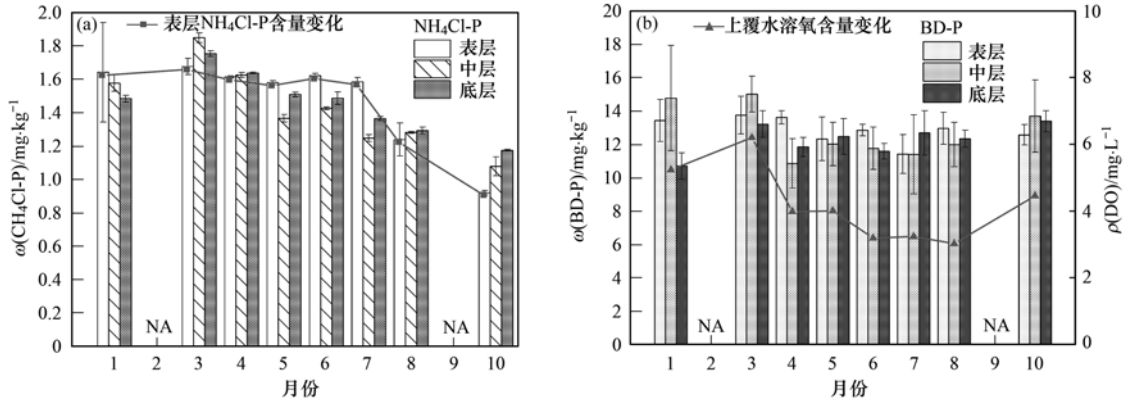
如图 5(b)所示, 1 月和 3 ~ 4 月表层沉积物中 BD-P 含量也相对较为稳定. 但在 5 月出现了 1.29 mg·kg^{-1}的大幅下降,而至 6 月又有所回升. 以 7 月为转折点, 7 月前整体变化规律与 NH_4Cl-P 相类似; 7 月后 BD-P 变化规律则与 NH_4Cl-P 完全相反. 垂直尺度下各层 BD-P 含量无显著差异($P > 0.05$). 但全年 3 层 BD-P 的含量均值经历了连续 3 个月的下降后在 6 月达到最低值,并且从 7 月开始进入持续增加阶段. BD-P 与上覆水中溶氧含量显著正相关($r = 0.556$, $P < 0.05$).

2.4 上覆水中 DTP 与表层沉积物 NH_4Cl-P 的关系

选用对数函数曲线对沉积物表层的 NH_4Cl-P 含量(均值)和上覆水中 DTP 浓度(均值)进行数值拟合,得到的相关模型为: $y = a - b\ln(x + c)$, $a = 2.03 \pm 0.51$、$b = -0.14 \pm 0.15$、$c = -0.026 \pm 0.006$,拟合优度(R^2)为 0.543,表明采样期间表层沉积物中 NH_4Cl-P 含量和上覆水中 DTP 浓度存在同步增长关系, 1 月和 3 ~ 6 月这些月份上覆水中 DTP 浓度相对较高,有利于维持表层沉积物中 NH_4Cl-P 含量在较高水平.

2.5 高阳平湖表层沉积物中 APA 与上覆水中 DTP 浓度月际变化

图 7 显示了表层沉积物中 APA 的月际变化. 在



NA 表示该月份数据缺失

图 5 沉积物垂直分层尺度下潜在可移动磷含量月际变化

Fig. 5 Monthly variation in the PMP content in the vertical stratification scale of sediments

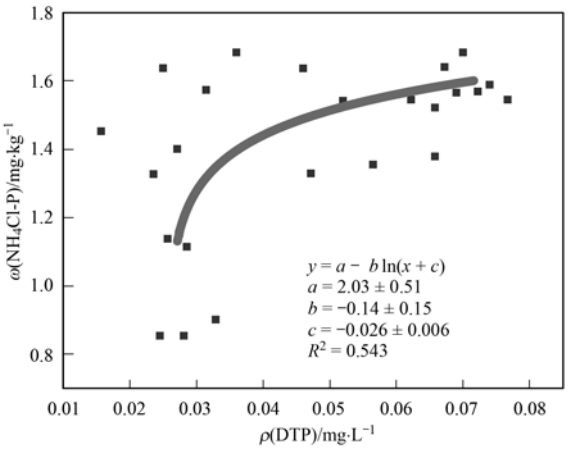


图 6　表层沉积物中 NH_4Cl-P 含量和上覆水中 DTP 浓度拟合曲线

Fig. 6　Fitting curve of NH_4Cl-P content in surface sediments and DTP concentration in AOL water

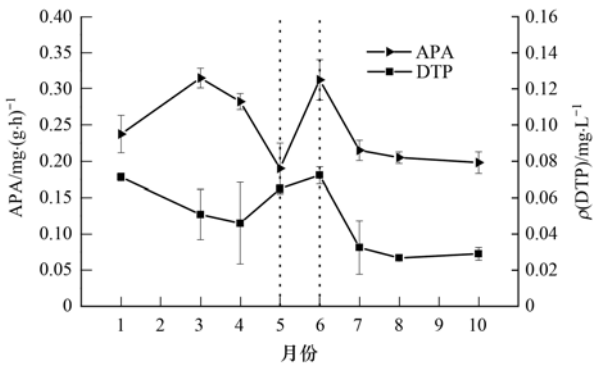


图 7　表层沉积物中碱性磷酸酶活性与上覆水 DTP 浓度月际变化

Fig. 7　Monthly variation in APA in the surface sediments and DTP concentration in AOL water

所有取样月份中，APA 的变化范围为 0.190 ~ 0.315 mg·(g·h)$^{-1}$，最高值出现在 3 月，次峰值 0.312 mg·(g·h)$^{-1}$出现在 6 月，最低值出现在 5 月. APA 的总体分布呈“M”型，与沉积物 TP 含量的变化趋势极显著负相关($r = -0.870$, $P < 0.01$). 以 5 月为界，5 月前 APA 与上覆水中 DTP 浓度变化趋势相反，而 5 月后二者变化趋势相同(图 7).

由表3可知，上覆水中溶氧浓度与PMP含量呈显著正相关，其中与 NH_4Cl-P 显著正相关($r = 0.442$, $P < 0.05$)，与 BD-P 极显著正相关($r = 0.556$, $P < 0.01$)；与稳定形态磷显著负相关，其中与 HCl-P 显著负相关($r = -0.447$, $P < 0.05$)，与 NaOH-P 极显著负相关($r = -0.597$, $P < 0.01$)，而上覆水温度与 PMP 含量关系则与之相反，与 PMP 呈现负相关，其中与 NH_4Cl-P 极显著负相关($r = -0.646$, $P < 0.01$)；而与稳定形态磷均呈极显著正相关，其中与 HCl-P 极显著正相关($r = 0.588$, $P < 0.01$)，与 NaOH-P 极显著正相关($r = 0.741$, $P < 0.01$).

表 3　沉积物中各形态磷含量与上覆水溶氧和水温之间的 Pearson 相关性分析[1)]

Table 3　Pearson's correlation analysis between the content of phosphorus in the sediment and the DO and temperature of AOL water

	NH_4Cl-P	BD-P	HCl-P	NaOH-P	DO	WT
NH_4Cl-P	1					
BD-P	0.184	1				
HCl-P	−0.446 *	−0.406 *	1			
NaOH-P	−0.682 **	−0.239	−0.239	1		
DO	0.442 *	0.556 **	−0.447 *	−0.597 **	1	
WT	−0.646 **	−0.383	0.588 **	0.741 **	−0.880 **	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上极显著相关

3　讨论

3.1　深水湖泊状态利于沉积物表层沉积物中 NH_4Cl-P 处于吸附-释放的平衡状态

已有研究表明较慢的水流速度以及较长的水体滞留时间有利于外源磷沉积[32,33]，低流速(低扰动)下，各形态磷发生以水体为媒介的转化的可能性会降低[34]. 本研究中，1 月和 3 ~ 5 月表层沉积物中潜在可移动磷含量都相对较稳定，尤其是 NH_4Cl-P[图 5(a)]. 表明高阳平湖处于深水湖泊状态时，沉积物表层(0 ~ 10 cm)处于吸附-释放近似平衡的稳定环境，这一时期沉积物上覆水中 DTP 浓度相对较高(图 6)，有利于维持表层沉积物中 NH_4Cl-P 含量处于较高水平. 受夏季汛期降雨和大坝放水影响，流域来水增加，水流速度加快(水体扰动增加)，水体中 DTP 浓度呈降低的趋势，这可归因外源补给水体对 DTP 的稀释、悬浮物对 DTP 的吸附和水体中微生物对 DTP 的快速利用[35,36]，从而造成 6 月之后沉积物表层 NH_4Cl-P 含量的极速下降.

3.2　河-湖交替促进潜在可移动磷成为内源磷源

弱结合态磷(NH_4Cl-P)一般认为是被沉积物中氧化物或粘土矿物颗粒吸附的磷[37]，生物活性高，结构松散，特别容易溶解在沉积物的间隙水中，从而释放到湖水中，直接参与湖泊生态系统循环[38]. 各形态磷之间相互转化迁移，最终以 NH_4Cl-P 的形式通过间隙水扩散到上覆水体，为藻类的大量繁殖提供有利的条件[33]. 氧化还原敏感磷(BD-P)主要指结合到铁锰氧化物上的磷，对水体溶氧和氧化电位

敏感,也能直接参与沉积物-水界面磷的生物性交换[39].

本研究中, PMP 含量的变异系数远大于另两种稳定磷形态,这直接体现出 PMP 的活跃性及敏感性[40]. 其含量变化均以 3 月和 6 月为转折点. 3 月是澎溪河水华暴发的前中期[15],藻类生长需要消耗大量的氮磷等营养元素,此时含量占比最高的 NaOH-P 和 Res-P 处于全年含量的最低值,而此时 NH_4Cl-P 和 BD-P 的含量却处于含量的高点. 李大鹏等[34]的研究表明流速缓慢(RLI = 0.8, 深水湖泊),水深增加有利于稳定形态磷向 PMP 转化. 因此推测在藻类生长的前中期,沉积物含量最高的 NaOH-P 和成分复杂的 Res-P 与 PMP 之间会发生较为复杂的转化,即此时较难被藻类或其它微生物直接利用的 NaOH-P 和 Res-P 被部分转化成能被直接或极容易利用的 PMP.

高阳平湖在 6 月(RLI = 0)之后表现出典型河流特征,与 5 月(RLI = 0.5)所处的湖泊状态相比水文环境发生了重大变化(表 2). 而沉积物中 NH_4Cl-P 的含量在 6 月经历了小幅上升,随后进入持续下降阶段,且下降趋势十分明显. 而 BD-P 含量却在 7 月达到最低值后,开始缓慢增加. NH_4Cl-P 与水温极显著负相关、与溶氧显著正相关(表 3),并且水流速度能加速沉积物中活跃磷的释放[41]. 因而, 6、7 月夏季高温、低溶氧和高流速会导致 NH_4Cl-P 从沉积物释放,而沉积物 BD-P 受溶氧影响显著,随河流状态下溶氧的升高,其值在 7 月后升高[图 5(a)].

3.3 沉积物中碱性磷酸酶活性能影响不同磷形态之间的转化

微生物分泌的磷酸水解酶可以将有机磷矿化,同时其分泌的有机酸能降低沉积物 pH,从而促进磷的溶解[42]. 碱性磷酸酶在许多生物体中普遍存在,其水解有机磷的产物正磷酸盐能被水生生物直接利用,在沉积物的生物释磷过程中起着重要作用[43]. 表层沉积物中碱性磷酸酶活性(APA)随时间而发生改变,与分解有机磷的微生物的活性与种类有关[44]. 同时,水体中可溶性磷酸盐(DTP)浓度升高,也可以抑制碱性磷酸酶的活性[45]. 本研究中一个有趣的现象是当高阳平湖为接近湖泊的湖泊-河流过渡态时,DTP 与 APA 变化趋势相反,当 6 月高阳平湖成为典型河流状态后,该相反趋势转为同步下降,再次显示河流的冲刷效应. 图 8 显示了在不同水文状态下内源磷动态变化的差异,APA 在两种水文状态下均扮演重要角色,在今后研究中将着重探究 APA 活性在不同水文状态下的差异性及其变化机制.

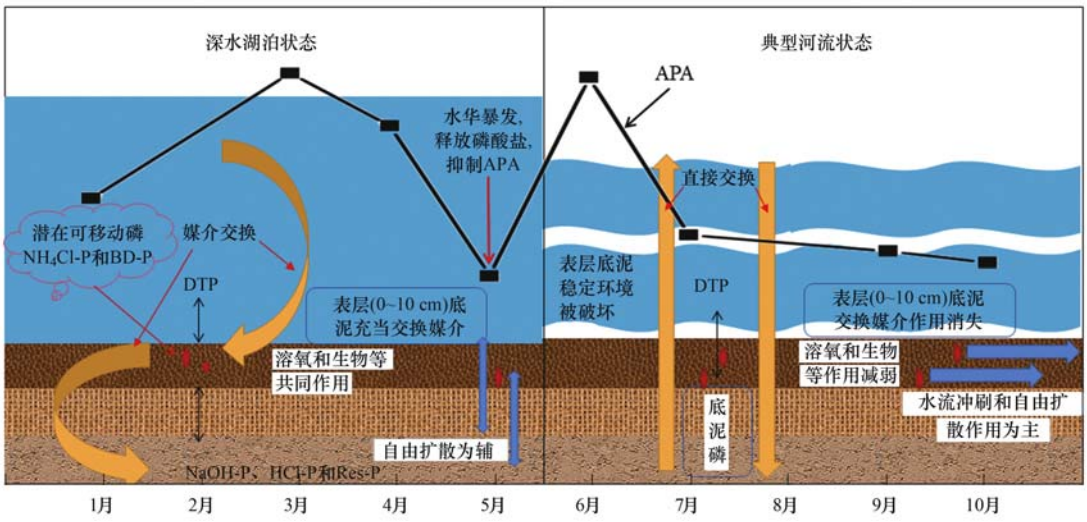


图 8 不同水文状态(河-湖)下高阳平湖内源磷动态变化差异示意

Fig. 8 Schematic diagram of dynamic changes in internal phosphorus under different hydrological states (river-lake) of Gaoyang Lake

4 结论

(1)水流速度及水体滞留时间的变化能明显影响水体存在类型. 受三峡水位调度影响,三峡库区支流在水动力方面明显区别于自然河流或湖泊,澎溪河高阳平湖段水体存在 5、6 月前的深水湖泊和 5、6 月后的典型河流两种状态,因此不能单纯以湖泊模式或河流模式对其进行简单认识.

(2)当水体以不同类型存在时,其下部沉积物中磷的释放或赋存形态会存在不同响应模式,潜在可移动磷形态在沉积物内源磷供给方面扮演重要角色. 湖泊状态下, 上覆水中 DTP 浓度较高,有利于维持表层沉积物中 NH_4Cl-P 处于吸附-释放的平衡状态; 春季水华初期,上覆水温度的升高和沉积物中碱性磷酸酶活性的提高,利于沉积物中稳定形态磷向潜在可移动磷形态转变; 河流状态时,受夏季汛

期降雨和大坝放水影响,沉积物-上覆水交界面的稳定环境被打破,沉积物表层潜在可移动磷极速下降,这种现象在底泥 NH_4Cl-P 上体现得尤为明显.

参考文献：

[1] 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 等. 三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2615-2623.
Pan C J, Li R, Tang X Q, *et al*. Assessment of physico-chemical properties and phosphorus fraction distribution characteristics in sediments after impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2615-2623.

[2] 方芳, 李哲, 田光, 等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3488-3493.
Fang F, Li Z, Tian G, *et al*. Seasonal variation of phosphorus in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3488-3493.

[3] 吕平毓, 张钸, 熊中福, 等. 三峡库区成库前后干流万州段水体总磷特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, **42**(7): 162-167.
Lv P Y, Zhang X, Xiong Z F, *et al*. Characteristics of total phosphorus in Changjiang mainstream at Wanzhou section before and after Three Gorges Reservoir impoundment[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, **42**(7): 162-167.

[4] 陈昭明, 王伟, 赵迎, 等. 三峡水库支流水体富营养化现状及防治策略[J]. 环境工程, 2019, **37**(4): 32-37.
Chen Z M, Wang W, Zhao Y, *et al*. Water eutrophication status and control strategy of tributaries in the three gorges reservoir region[J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(4): 32-37.

[5] 方博. 三峡库区澎溪河流域消落带土壤磷形态及吸附与释放特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Fang B. Phosphorus fractions and phosphate adsorption-desorption characteristics in the soil of water-level-fluctuating zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[6] Marsden M W. Lake restoration by reducing external phosphorus loading: the influence of sediment phosphorus release [J]. Freshwater Biology, 1989, **21**(2): 139-162.

[7] Li D Y, Lai X J, Dong Z C, *et al*. Effects of the Three Gorges Project on the environment of Poyang Lake[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, **25**(6): 2477-2490.

[8] 范成新. 湖泊沉积物—水界面研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1191-1218.
Fan C X. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes: a review[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1191-1218.

[9] 李哲, 张曾宇, 杨中华, 等. 三峡澎溪河回水区流速对藻类原位生长速率的影响[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 880-886.
Li Z, Zhang Z Y, Yang Z H, *et al*. Effects of flow speed on the change of in situ growth rates of algae in Pengxi River back-water zone, Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(5): 880-886.

[10] 胡正峰. 三峡库区澎溪河回水区营养盐分布变化及富营养化成因初探[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
Hu Z F. Study of nutrient distribution and causes of eutrophication in backwater area of Pengxi River as a tributary of the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Southwest University, 2010.

[11] 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1107-1113.
Sun W B, Du B, Zhao X L, *et al*. Fractions and adsorption characteristics of phosphorus on sediments and soils in water level fluctuating zone of the Pengxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 1107-1113.

[12] Zheng B H, Zhao Y Y, Qin Y W, *et al*. Input characteristics and sources identification of nitrogen in the three main tributaries of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(17), doi: 10.1007/s12665-016-6028-0.

[13] 郭念, 闫金龙, 魏世强, 等. 三峡库区消落带典型土壤厌氧呼吸对铁还原及磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 271-276.
Guo N, Yan J L, Wei S Q, *et al*. Iron (Ⅲ) reduction and phosphorous releases in typical flooded soils from water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoirs Areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(3): 271-276.

[14] Li Y H, Huang S J, Qu X X. Water pollution prediction in the Three Gorges Reservoir Area and countermeasures for sustainable development of the water environment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(11), doi: 10.3390/ijerph14111307.

[15] Zhang L, Xia Z Q, Zhou C, *et al*. Unique surface density layers promote formation of harmful algal blooms in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir[J]. Freshwater Science, 2020, **39**(4): 722-734.

[16] 姜伟. 三峡库区澎溪河高阳平湖水环境及内源磷释放关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
Jiang W. Relationship of water environment and internal sediment nutrient release in Gaoyang Lake of Pengxi River, Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.

[17] Shi Y Y, Xu G H, Wang Y G, *et al*. Modelling hydrology and water quality processes in the Pengxi River basin of the Three Gorges Reservoir using the soil and water assessment tool[J]. Agricultural Water Management, 2017, **182**: 24-38.

[18] 张磊, 夏志强, 周伟, 等. 三峡水库春季营养盐和浮游植物空间分布及其影响机制[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(7): 1069-1077.
Zhang L, Xia Z Q, Zhou W, *et al*. Spatial distribution of nutrients and phytoplankton and causes for their differences in Three Gorges Reservoir in spring[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(7): 1069-1077.

[19] 王雨春, 黄荣贵, 万国江. SWB-1 型便携式湖泊沉积物—界面水取样器的研制[J]. 地质地球化学, 1998, (1): 94-96.
Wang Y C, Huang R G, Wan G J. A newly developed sampler for collecting samples near the lacustrine sediment-water interface [J]. Geology-Geochemistry, 1998, (1): 94-96.

[20] Petrovic M, Fernández-Alba A R, Borrull F, *et al*. Occurrence and distribution of nonionic surfactants, their degradation products, and linear alkylbenzene sulfonates in coastal waters and sediments in Spain [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, **21**(1): 37-46.

[21] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.

[22] Ruban V, Brigault S, Demare D, *et al*. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, **1**(4): 403-407.

[23] Zhang J Z, Lanning N T. Ascorbic acid as a reductant for extraction of iron-bound phosphorus in soil samples: a method comparison study[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, **49**(17): 2155-2161.

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[26] Marker A F H. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin[J]. Freshwater Biology, 1972, **2**(4): 361-385.

[27] Sayler G S, Puziss M, Silver M. Alkaline phosphatase assay for freshwater sediments: application to perturbed sediment systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1979, **38**(5): 922-927.

[28] Nogueira R, Melo L F, Purkhold U, *et al*. Nitrifying and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon[J]. Water Research, 2002, **36**(2): 469-481.

[29] 徐其勇. 基于遥感影像三峡大坝蓄水对库区水域面积的变化分析——以坝前至江津段为例[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.
Xu Q Y. The analysis of the change of water area in reservoir area based on the remote sensing image of the Three Gorges Dam-a case study of pre-dam to Jiangjin section[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018.

[30] 富国. 湖库富营养化敏感分级指数方法研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(6): 85-88.
Fu G. Study of the methodology of sensitivity classification index on eutrophication of lakes and reservoirs[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, **18**(6): 85-88.

[31] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1022-1030.
Zheng B H, Zhang Y, Fu G, *et al*. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(6): 1022-1030.

[32] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1223-1229.
Sun X J, Qin B Q, Zhu G W, *et al*. Release of colloidal n and p from sediment of lake caused by continuing hydrodynamic disturbance[J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1223-1229.

[33] 俞林伟. 广东省城市湖泊底泥磷形态及其与富营养化的关系[D]. 广州: 暨南大学, 2006.
Yu L W. The Phosphorus forms in surface sediments and their relation to the eutrophication of urban lakes in Guangdong province, South China [D]. Guangzhou: Jinan University, 2006.

[34] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1289-1294.
Li D P, Huang Y, Li W G. Transformation of phosphorus forms in the sediments under the conditions of sediments re-suspension [J]. Environmental Science, 2008, **29**(5): 1289-1294.

[35] Cyr H, Mccabe S K, Nürnberg G K. Phosphorus sorption experiments and the potential for internal phosphorus loading in littoral areas of a stratified lake[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1654-1666.

[36] Saxena G, Bharagava R N, Kaithwas G, *et al*. Microbial indicators, pathogens and methods for their monitoring in water environment[J]. Journal of Water & Health, 2015, **13**(2): 319-339.

[37] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al*. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 229-244.

[38] Wen S L, Wang H W, Wu T, *et al*. Vertical profiles of phosphorus fractions in the sediment in a chain of reservoirs in North China: implications for pollution source, bioavailability, and eutrophication[J]. Science of the Total Environment, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135318.

[39] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al*. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, **273**(1-3): 109-116.

[40] McDowell R W, Condron L M, Mahieu N, *et al*. Analysis of potentially mobile phosphorus in arable soils using solid state nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(2): 450-456.

[41] House W A, Denison F H, Smith J T, *et al*. An investigation of the effects of water velocity on inorganic phosphorus influx to a sediment[J]. Environmental Pollution, 1995, **89**(3): 263-271.

[42] Zhou Y Y, Li J Q, Zhang M. Vertical variations in kinetics of alkaline phosphatase and P species in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Donghu)[J]. Hydrobiologia, 2001, **450**(1-3): 91-98.

[43] Huang B Q, Hong H S. Alkaline phosphatase activity and utilization of dissolved organic phosphorus by algae in subtropical coastal waters[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, **39**(1-12): 205-211.

[44] Patel A B, Fukami K, Nishijima T. Extracellular proteolytic activity in the surface sediment of a eutrophic inlet[J]. Microbes and Environments, 2001, **16**(1): 25-35.

[45] 高光, 秦伯强, 朱广伟, 等. 太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 245-251.
Gao G, Qin B Q, Zhu G W, *et al*. Seasonal variation of alkaline phosphatase activity in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, **16**(3): 245-251.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 3

Mar. 15, 2022

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of $PM_{2.5}$ Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020 ····· CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, *et al.* (1129)

Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, *et al.* (1140)

Source Analysis of Ambient $PM_{2.5}$ in Wuhan City Based on Random Forest Model ····· ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, *et al.* (1151)

Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China ····· REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, *et al.* (1159)

Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan ····· WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, *et al.* (1170)

Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM_1 Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou ····· ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, *et al.* (1180)

Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt ····· WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, *et al.* (1190)

Spatial Heterogeneity of $PM_{2.5}$ Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region ····· ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, *et al.* (1201)

Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities ····· ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, *et al.* (1212)

Pollution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ in Shanxi Province Based on Wavelet Transform ····· ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, *et al.* (1226)

Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China ····· ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)

Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province ····· LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, *et al.* (1246)

Temporal and Spatial Variation in O_3 Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas ····· LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-rui, *et al.* (1256)

Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an ····· LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, *et al.* (1268)

Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City ····· WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, *et al.* (1277)

Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo ····· QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, *et al.* (1286)

Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province ····· QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, *et al.* (1296)

Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking ····· LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, *et al.* (1307)

Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants ····· YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, *et al.* (1315)

Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China ····· LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, *et al.* (1323)

Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin ····· LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)

Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing ····· WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, *et al.* (1346)

River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment ····· HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, *et al.* (1356)

Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries ····· ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, *et al.* (1365)

Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors ····· CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)

Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers ····· GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, *et al.* (1384)

Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia ····· LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, *et al.* (1394)

Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years ····· GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, *et al.* (1404)

Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin ····· HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, *et al.* (1414)

Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangsu Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain ····· SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, *et al.* (1424)

Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River ····· SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, *et al.* (1434)

Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the *Grus leucogeranus* Reserve of Poyang Lake ····· LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, *et al.* (1447)

Influence of Microplastics on the Development of Proteus Biofilm ····· TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, *et al.* (1455)

Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangsu Lake ····· LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, *et al.* (1463)

Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics ····· SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, *et al.* (1472)

Diffusive Fluxes and Controls of N_2O from Coastal Rivers in Tianjin City ····· TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, *et al.* (1481)

Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland ····· CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, *et al.* (1492)

Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level ····· QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, *et al.* (1500)

Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network ····· JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, *et al.* (1512)

Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism ····· ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qiang, *et al.* (1521)

Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge ····· ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)

Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District ····· LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, *et al.* (1535)

Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas ····· WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)

Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province ····· ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, *et al.* (1558)

Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide ····· YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, *et al.* (1567)

Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM ····· MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, *et al.* (1577)

Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ) ····· LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, *et al.* (1584)

Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionomic Traits Among Different Winter Wheat Varieties ····· LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, *et al.* (1596)

Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress ····· REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, *et al.* (1606)

Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River ····· LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, *et al.* (1620)

Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil ····· SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, *et al.* (1630)

Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by *Solanum nigrum* L. and on the Soil Bacterial Community Structure ····· LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, *et al.* (1641)

Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland ····· HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, *et al.* (1649)

Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions ····· WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, *et al.* (1657)

Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N_2O and N_2 Emission in a Winter Wheat Field ····· PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, *et al.* (1668)

Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis ····· ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, *et al.* (1678)

Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis ····· RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, *et al.* (1688)