

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.5  
第40卷 第5期

目次

|                                                    |                                                        |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律                     | 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)                               |
| 餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征                         | 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)                                      |
| 泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征                             | 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)                            |
| 郑州-新乡冬季PM <sub>2.5</sub> 中元素浓度特征及其源分析              | 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027) |
| 我国PM <sub>2.5</sub> 浓度分阶段改善目标情景分析                  | 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)                                |
| 安阳市典型工业源PM <sub>2.5</sub> 排放特征及减排潜力估算              | 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)                            |
| 郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单                               | 赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)                          |
| 2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性                        | 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)                                    |
| 兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势                    | 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)                                 |
| 12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征                            | 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)                                   |
| 我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布                             | 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)                           |
| 我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价                        | 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)                          |
| 我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价                             | 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)                         |
| 大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征                       | 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)                                    |
| 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义                           | 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)                                  |
| 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素                               | 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)                              |
| 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素                             | 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)                          |
| 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析                             | 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)                   |
| 三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力                       | 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)                           |
| 不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素                               | 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)                                  |
| 巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险                         | 李如忠,鲍琴,戴源(2178)                                        |
| 闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析                           | 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)                            |
| 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应                          | 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)                  |
| 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估                                | 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)                                    |
| 三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征                               | 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)                           |
| 多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析                            | 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)                              |
| 不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征                                 | 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)                    |
| 微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响                                | 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)                            |
| 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析                           | 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)                      |
| 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系                          | 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)                            |
| 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析                               | 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)                         |
| 绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应                              | 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)                       |
| 紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能                                | 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)                                      |
| UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制                                | 吕娟,许志伟,王言(2278)                                        |
| 铝代水铁矿协同吸附砷的机制                                      | 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)                         |
| 新型材料磁性氧化铁的除氯效能                                     | 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)                                   |
| 羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制                          | 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)                          |
| 基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化                        | 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)                       |
| 不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征                              | 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)                        |
| 15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能                             | 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)                         |
| 长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响              | 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)                        |
| 厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响                           | 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)                          |
| HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液                             | 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)                      |
| 温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响                 | 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)                            |
| 城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异                            | 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)                                |
| 三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响                              | 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)                              |
| 亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制                            | 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)                            |
| 生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响                             | 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)                               |
| 地膜覆盖和施肥对菜地CH <sub>4</sub> 排放的影响                    | 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)                           |
| 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响                                | 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)                                |
| 不同施肥模式对热区晚稻田CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O排放的影响 | 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)                    |
| 周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响                                  | 曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)                            |
| 广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价                           | 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)                              |
| 超富集植物藿香蓓(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力        | 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)                            |
| 种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险                               | 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)                          |
| 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应                               | 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)                              |
| 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价                  | 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)                        |
| 《环境科学》征订启事(2018)                                   | 《环境科学》征稿简则(2042)                                       |
| 信息(2114, 2348, 2393)                               |                                                        |



## 闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析

徐健<sup>1</sup>, 袁旭音<sup>1,2\*</sup>, 叶宏萌<sup>1,2</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>, 周慧华<sup>1</sup>, 韩年<sup>1</sup>

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 武夷学院生态与资源工程学院, 武夷山 354300)

**摘要:** 为探究闽江上游土地利用方式对溪流沉积物磷的分布及潜在释放能力的影响, 利用 IVANOFF 法, 重点研究闽江上游不同流域沉积物有机磷形态及其空间分布特征, 探讨沉积物的理化性质对有机磷(OP)形态含量分布的影响。结果表明: ①建溪和沙溪流域的沉积物总氮(TN)和总磷(TP)含量要高于富屯溪流域, 这应与建溪和沙溪流域附近农田和居民区较多、富屯溪流域周围多以林地为主有关; ②3个流域沉积物中TN含量及建溪和富屯溪流域沉积物中的TP含量均有上游<中游<下游的规律, 显然是溪流上游多山地、林地, 而中下游人类活动多造成的; ③3个流域沉积物有机磷形态都以非活性有机磷(NLOP)为主, 表明闽江上游总体受外源污染影响较小, 其形态相对比例在不同流域的沉积物中的变化较大, 而在同一河流的不同地段中变化则较小; ④沉积物的理化性质对有机磷形态与分布有明显影响, 其中有机质(OM)、TP和TN的影响最为明显, 但对不同流域沉积物的影响程度存在差异。因此, 为保障闽江上游水质, 应加强对流域附近的生活污染源及农业污染源的控制。

**关键词:** 沉积物; 有机磷; 影响因素; 溪流; 闽江上游

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2186-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809225

## Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River

XU Jian<sup>1</sup>, YUAN Xu-yin<sup>1,2\*</sup>, YE Hong-meng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>1</sup>, ZHOU Hui-hua<sup>1</sup>, HAN Nian<sup>1</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of land use pattern on phosphorus distribution and the potential release capacity of stream sediment in the upper Minjiang River, this paper presented organic phosphorus forms and their spatial distribution characteristics of sediments in the upper Minjiang River by using the IVANOFF method and discussing the effects of physicochemical properties of sediments on the distribution of organic phosphorus forms. The results show that: ①nitrogen and phosphorus contents of sediments in Jianxi and Shaxi catchments are higher than those in the Futunxi catchment, probably related to the large number of farmland runoff and municipal sewage near the Jianxi and Shaxi catchments and the large forest area around the Futunxi catchment; ②contents in the sediments from three catchments and TP contents in the sediments from Jianxi and Futunxi catchments showed the order of upper reaches < middle reaches < lower reaches, which may be caused by the mountainous and forested areas in the upper reaches and the intensive human activities in the middle and lower reaches; ③nitrogen phosphorus in sediments of the three catchments were mainly non-active organic phosphorus, which indicated that upper reaches of the Minjiang river were generally less affected by external pollution, and the relative proportion of organic phosphorus in the sediments of different catchments was relatively large, while the change in different sections of the same river was relatively small; ④physicochemical properties of sediments had a significant impact on the morphology and distribution of organic phosphorus, among which the effects of organic matter, TP, and TN were the most obvious, but the effects on sediments in different river basins were different. Therefore, to protect the water quality of the upper Minjiang River, it is necessary to strengthen the control of the living and agricultural pollution sources near the catchments.

**Key words:** sediment; organophosphorus; influencing factors; stream; upper Minjiang River

近年来, 水环境质量問題日益受到重视, 由于氮、磷等营养元素进入水体会造成水体富营养化, 因而导致水质变差<sup>[1]</sup>。磷是水体富营养化的关键元素, 通常情况下陆地的磷被水体中的颗粒物吸附、结合, 进而通过沉降等方式进入沉积物, 使得水体中的沉积物成为磷的汇<sup>[2]</sup>, 而在外界条件改变的情况下沉积物也会变成磷的源<sup>[3]</sup>。环境中的磷进入沉积物后并不是简单地累积富集, 而是随着环境条件的改变, 磷的形态组成相应地发生变化<sup>[4]</sup>。内源有机磷是沉积物磷的重要组份, 其分解过程是沉积物磷形态转化的重要环节<sup>[5]</sup>。有研究表明, 沉积物中

有机磷的含量约占总磷的20%~80%, 其作用无法忽视<sup>[6]</sup>。尽管沉积物中有机磷在大多数水环境中的重要作用已被认识, 但其水体循环机理还不清楚<sup>[7]</sup>。近年来, 对于有机磷形态的研究大多集中在湖泊沉积物上<sup>[6,8,9]</sup>, 而对于有众多小流域的河流(尤其是河流源头)沉积物的有机磷形态的研究比

收稿日期: 2018-09-29; 修订日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372354, 41601540); 福建省教育厅A类科技项目(JAT170591); 南平市重点科技计划项目(N2017T02)

作者简介: 徐健(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境保护, E-mail: hhu\_xj0502@126.com

\* 通信作者, E-mail: yxy\_hjy@hhu.edu.cn

较有限,同时将其与土地利用类型相联系的分析则更少.闽江上游流域种植业和养殖业有所增加,促进了流域沉积物中磷的累积,尤其是在植被分布密集的地方含量高,同时,有机磷会在微生物的作用下,能够向植物易利用的无机磷转变<sup>[10]</sup>,因此研究沉积物磷形态分布(尤其是有机磷)及其与土地利用的关系<sup>[11]</sup>,对于流域的水环境保护具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

闽江上游流域为研究区域,上游溪流的干流和支流沉积物为研究对象,采样点分布如图1所示.闽江是福建省最大独流入海(东海)河流,发源于福建、江西交界的建宁县均口镇.上游有建溪、富屯溪、沙溪3大支流水系,在南平市附近汇合后称闽江,整个流域面积共计41 922 km<sup>2</sup>,占全流域的68.7%.上游流域成土母岩多种多样,其中火山岩和花岗岩占比最大<sup>[12]</sup>.土壤类型主要为黄红壤、红壤和水稻土,土壤一般呈碎块状或屑粒状疏松结构,其中建溪流域附近以暗红棕壤多见,且有少量的黑色石灰土;富屯溪流域附近常见酸性石质土,且酸性粗骨土相对较多;而沙溪流域多覆盖石灰岩土、酸性紫色土且红壤性土相对较多.土地利用以林地为主、草

地次之,覆盖面积约为70%以上,地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,目前渐渐被以马尾松为主的人工针叶林取代<sup>[13]</sup>.人类活动的强度在区域上存在差异,建溪流域的农田较多,沙溪流域城镇和道路工矿占地较多,而富屯溪则人工林较多.

### 1.2 样品的采集与处理

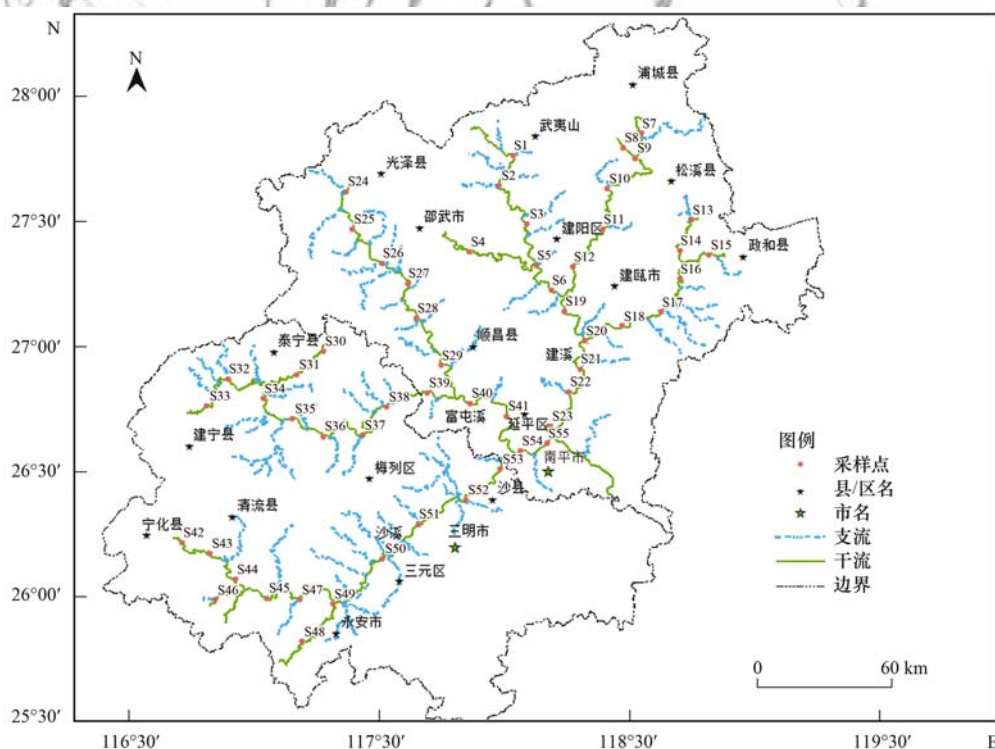
根据闽江上游流域水系特点,本研究设置55个采样点,用S1~S55表示(见图1).分别于2016年10月和2017年7月用抓斗式采样器采集沉积物样品,采样深度为0~10 cm.采集的样品立即装入聚乙烯塑料自封袋中,放在保温箱(约4℃)中带回实验室.通过自然风干,去除样品中的小石子、贝壳、杂草和腐根等杂物,然后碾磨样品,过100目尼龙筛,密封保存以供分析.

### 1.3 样品的测定指标与测定方法

沉积物样品的分析指标包括常量元素、pH、有机质(OM)、总氮(TN)、总磷(TP)、无机磷(IP)以及有机磷(OP).

#### 1.3.1 沉积物主要理化性质测定

常量元素含量使用荷兰帕纳科公司的PW2440型射线荧光分析仪测定;pH采用电极法测定;OM、TP、TN、OP等指标采用土壤农业化学分析方法测定<sup>[14]</sup>,具体方法为OM采用重铬酸钾容量法测定,TP含量采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定,



建溪流域采样点:上游 S1、S2、S7~S10、S13~S15,中游 S3~S6、S11~S12、S16,下游 S17~S23;富屯溪流域采样点:上游点 S24~S25、S30~S33,中游 S26、S27、S34~S37,下游 S28、S29、S38~S41;沙溪流域采样点:上游 S42~S46,中游 S47~S50,下游 S51~S55

图1 研究区域与采样点分布示意

Fig. 1 Map of study area showing sampling site distribution



TN 含量采用凯氏消煮法测定, OP 含量采用灼烧法,  $\omega(\text{IP})$  由  $\omega(\text{TP})$  与  $\omega(\text{OP})$  的差值算出。

### 1.3.2 沉积物有机磷的分级提取

本文采用 IVANOFF 等提出的 OP 形态提取方法<sup>[15]</sup>, 对沉积物样品中的 OP 进行分级提取, 并将沉积物中有机磷分为 3 类形态: 活性有机磷 (LOP) 为碳酸氢钠有机磷 ( $\text{NaHCO}_3\text{-OP}$ )、中等活性有机磷 (MLOP) 为盐酸提取有机磷 ( $\text{HCl-OP}$ ) 和富里酸结合态有机磷 (Fulvic-OP), 非活性有机磷 (NLOP) 为腐殖酸结合态有机磷 (Humic-OP) 和残渣态有机磷 (Residual-OP)。

### 1.4 数据统计与分析方法

利用 Excel 2016 对由实验分析测定所得到的数据进行整理统计, 并使用 Origin 9.0 分别对 3 个流域沉积物的总磷 (TP)、无机磷 (IP) 及有机磷 (OP) 含量绘制柱形图; 同样, 使用 Origin 9.0 分别对 3 个流域沉积物有机磷形态含量作图, 最后再通过 Canoco 4.5 软件分析沉积物的主要理化性质与有机磷形态的相关性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同流域沉积物的理化性质比较分析

由表 1 可知, 3 个流域的沉积物均呈现出弱酸

性特点, 其 pH 均值从小到大分别为建溪、富屯溪、沙溪, 但建溪沉积物的 pH 值变化幅度相对较大。建溪、富屯溪及沙溪 3 个流域沉积物中的有机质含量分别为 1.74%、1.32% 和 1.69%, 富屯溪沉积物中较低, 而在沙溪和建溪沉积物中相对较高, 这可能与建溪与沙溪流域有较多外源污染输入有关。SiO<sub>2</sub> 含量在 3 个流域沉积物中均属最高, 而 MnO<sub>2</sub> 含量为最低, 5 个常量元素中 Ca 和 Mg 的空间变化较大, Fe 次之, 这与不同流域的土壤类型有关<sup>[16]</sup>。建溪、富屯溪沉积物及沙溪沉积物中的总氮 (TN) 和总磷 (TP) 平均含量分别为 2 081.50、1 872.63、2 060.92  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 624.68、472.76、515.06  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 由此可见, 建溪和沙溪沉积物的营养元素含量相对富屯溪较高, 会影响到中下游的水质状况<sup>[17]</sup>, 含量较高的原因可能是建溪和沙溪流域附近外来污染源较多, 如居民生活污水、养殖业及农业用地的施肥等<sup>[18]</sup>。C/N 在某些程度上反映了营养盐来源<sup>[19]</sup>, 建溪、富屯溪、沙溪沉积物的 C/N 比分别在 9.6~30.5、9.6~24.3、12.5~27.3 且均值分别为 16.9(>10)、7.9(<10)、8.5(<10), 表明建溪沉积物有机质受陆源物质与水生生物残体的共同影响, 另外富屯溪和沙溪沉积物的有机质主要来自水生生物残体<sup>[20]</sup>。

表 1 不同流域沉积物的主要理化性质

Table 1 Major physicochemical properties of river sediments in different catchments

| 指标                                 | 建溪                |          |        | 富屯溪               |          |        | 沙溪                |          |        |
|------------------------------------|-------------------|----------|--------|-------------------|----------|--------|-------------------|----------|--------|
|                                    | 范围                | 平均值      | 变异系数/% | 范围                | 平均值      | 变异系数/% | 范围                | 平均值      | 变异系数/% |
| pH                                 | 4.53~6.30         | 5.39     | 9.16   | 5.12~6.62         | 5.86     | 6.48   | 5.74~6.75         | 6.13     | 4.71   |
| OM/%                               | 0.62~2.15         | 1.74     | 28.30  | 0.77~2.56         | 1.32     | 23.24  | 0.79~1.98         | 1.69     | 19.53  |
| SiO <sub>2</sub> /%                | 40.32~51.51       | 44.67    | 6.94   | 37.28~50.80       | 45.95    | 8.77   | 42.50~52.68       | 47.31    | 6.81   |
| MnO/%                              | 0.02~0.20         | 0.10     | 53.02  | 0.02~0.20         | 0.06     | 64.26  | 0.00~0.08         | 0.05     | 52.38  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%  | 2.12~5.36         | 4.39     | 17.89  | 1.21~5.66         | 3.75     | 25.85  | 1.62~4.68         | 3.83     | 21.46  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%  | 10.73~13.89       | 12.68    | 5.64   | 10.83~14.56       | 12.67    | 8.31   | 11.71~14.17       | 12.89    | 5.55   |
| CaO/%                              | 0.09~2.88         | 0.38     | 80.68  | 0.07~0.37         | 0.34     | 72.68  | 0.25~0.39         | 0.31     | 13.90  |
| TN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 1 268.70~2 421.17 | 2 081.50 | 19.68  | 1 047.34~3 105.73 | 1 872.63 | 26.76  | 1 239.72~3 197.55 | 2 060.92 | 28.00  |
| TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 264.01~1 045.40   | 624.68   | 32.27  | 271.24~794.56     | 472.76   | 30.85  | 337.89~808.90     | 515.06   | 19.53  |
| C/N                                | 9.63~30.52        | 16.90    | 35.31  | 9.56~24.31        | 17.93    | 26.44  | 12.49~27.31       | 18.51    | 24.03  |

### 2.2 不同流域沉积物的磷形态的空间分布特征

#### 2.2.1 总磷 (TP) 的分布特征

不同流域沉积物的无机磷、有机磷及总磷结果统计如图 2 所示。从中可知, 就流域整体而言, 总磷平均含量显示, 建溪 > 沙溪 > 富屯溪, 这是由于建溪和沙溪流域农田面积大, 或城镇人口多, 而富屯溪流域的环境受人类干扰少的缘故。从流域的上中下游来看, 建溪和富屯溪沉积物 TP 含量呈现出上游 < 中游 < 下游的现象, 这是因为通常溪流上游 (源头) 区域主要为山地、人为活动少, 而下游人口

相对密集, 城市化水平也更高; 但有例外, 如富屯溪上游 S24 点和沙溪上游 S42 点 TP 含量都相对较高, 这可能与二者附近恰有居民区及城镇有关; 但沙溪流域沉积物的 TP 在中游更少, 这可能是因为中游有大片的林地, 而上游附近又恰有城镇分布。其中, 建溪流域在 S8 点的 TP 含量最低, 这可能跟附近是大片林地分布有关; 而 S18 点附近是茶园菜地且不远处有养殖业, 这些可能是造成该点 TP 含量最高的原因; 在富屯溪流域 S24 点 TP 含量最高, 是因为周边有大量的生活垃圾, 而 S25 周围都是草

地和林地, 环境极佳, 所以其 TP 含量最低; 对沙溪流域而言, S49 点的 TP 含量最低, 而 S54 点的含量最高, 这是由于在 S49 点附近没有人类的污染源, 而 S54 点周围有饭店、居民区等, 生活污染造成沉积物 TP 含量较高。

### 2.2.2 无机磷(IP)和有机磷(OP)的组成

图 2 还显示了无机磷和有机磷的含量组成, 建溪和沙溪沉积物中无机磷所占比例较高, 而富屯溪恰好相反, 或许是因为富屯溪主要流经山区, 沉积物具有典型的山区性特点。从整体来看, 3 个流域沉积物的有机磷含量基本和该点的 TP 含量呈现出较好的正比例关系, 但也有例外。如建溪流域的 S4 点, 该点的总磷含量并不是最低, 而其 OP 含量却为最低, 这可能是因为该点附近水生植物较多, 其根系分泌的有机酸类物质会改变沉积物周围的理化特性, 促进活性有机磷的矿化<sup>[21]</sup>, 同时水体流速较快, 部分活性有机磷易被分解为小分子化合物和磷酸盐, 进而释放到上覆水体中<sup>[22]</sup>。

### 2.3 沉积物有机磷形态含量的空间分布特征

由图 3 可以看出, 建溪、富屯溪及沙溪沉积物有机磷形态均以非活性有机磷为主, 二者共同分别占上述不同溪流沉积物有机磷的 51.26%、45.61% 和 48.55%, Residual-Po 主要成分为植酸态磷, 最不易被矿化和降解<sup>[20]</sup>, 但一定条件下可被植物或微生物利用<sup>[23]</sup>, Humic-Po 由肌醇磷酸类物质组成, 受微生物影响较大<sup>[24]</sup>。活性有机磷 ( $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ ) 是土壤有机磷中最先被矿化部分, 主要由核酸、磷脂类和磷酸糖类化合物组成, 在沉积物中结合较为松散<sup>[8]</sup>, 其在富屯溪沉积物有机磷中占比最低可能是由于其流经的地方水位落差较大, 沉积物-水界面波动大, 使附着在沉积物上的一部分  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  被分解为小分子化合物或磷酸盐, 释放到上覆水体中, 进而被水生动植物吸收<sup>[25]</sup>。中活性有机磷 ( $\text{HCl-Po}$  和  $\text{Ful-Po}$ ) 占建溪沉积物、富屯溪沉积物及沙溪沉积物有机磷形态分别为 28.42%、41.73% 和 32.21%;  $\text{HCl-Po}$  其化学组分主要以磷酸酯、磷脂、核酸、磷蛋白和磷酸糖类为主, 多为易分解的生物大分子, 稳定性差, 在一定条件下可水解或矿化为溶解性的小分子有机磷或溶解性磷酸根, 通过孔隙水迁移扩散, 具有潜在的生物有效性<sup>[26]</sup>, 建溪和沙溪流域营养相对充分, 微生物活动较为频繁, 而富屯溪多草地、山地且水体流动性大, 微生物活动少, 故而富屯溪沉积物中活性有机磷较多。在建溪沉积物中, 活性有机磷在中游占比最多, 可能是因为中游水体的流动性较小和水生动植物较少造成的; 中活性有机磷在

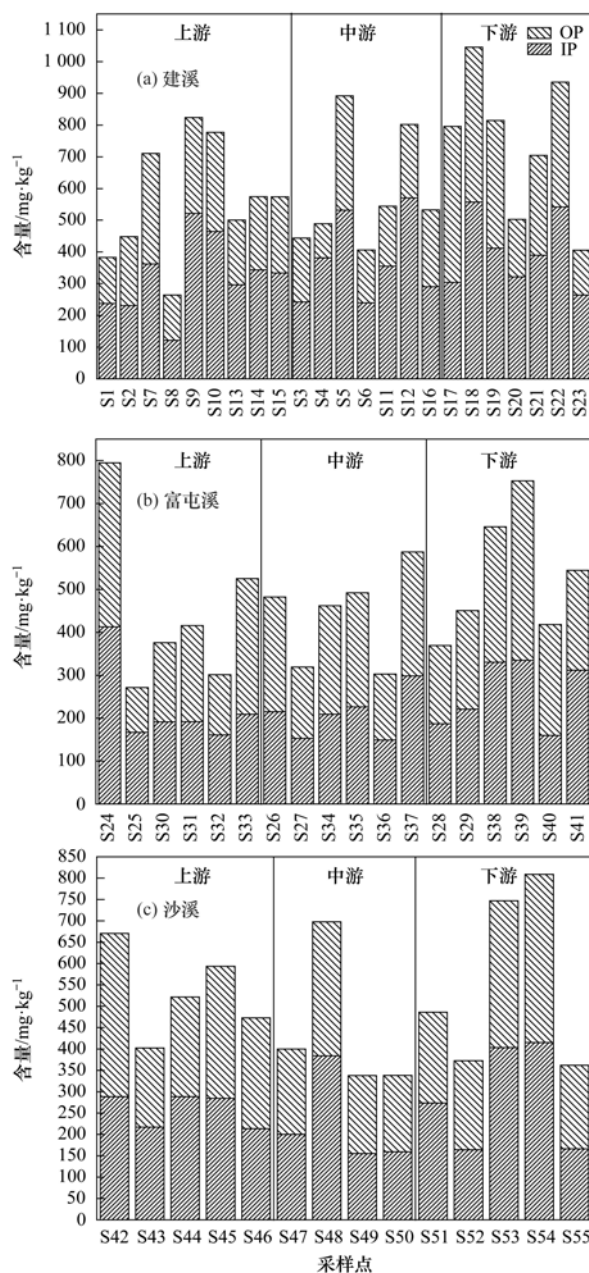


图 2 闽江上游沉积物中有机磷 (OP) 和无机磷 (IP) 含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of OP and IP concentrations in the upper stream sediments of the Minjiang River

上游占比最少, 是因为某些微生物的作用使得上游非活性有机磷向着中活性有机磷转化; 非活性有机磷在下游占比最多, 也许是外源输入的缘故。在富屯溪沉积物中, 活性有机磷、中活性有机磷及非活性有机磷在不同地段占总有机磷含量比例变化较小, 表明其整体环境类似。在沙溪沉积物中, 中活性有机磷向着活性和非活性有机磷转化; 非活性有机磷在沙溪不同地段占比变化较小, 但中下游略高, 可能是中下游人类活动增多的缘故。因此, 有机磷组成的变化与土地利用与人类活动关系密切<sup>[27]</sup>。



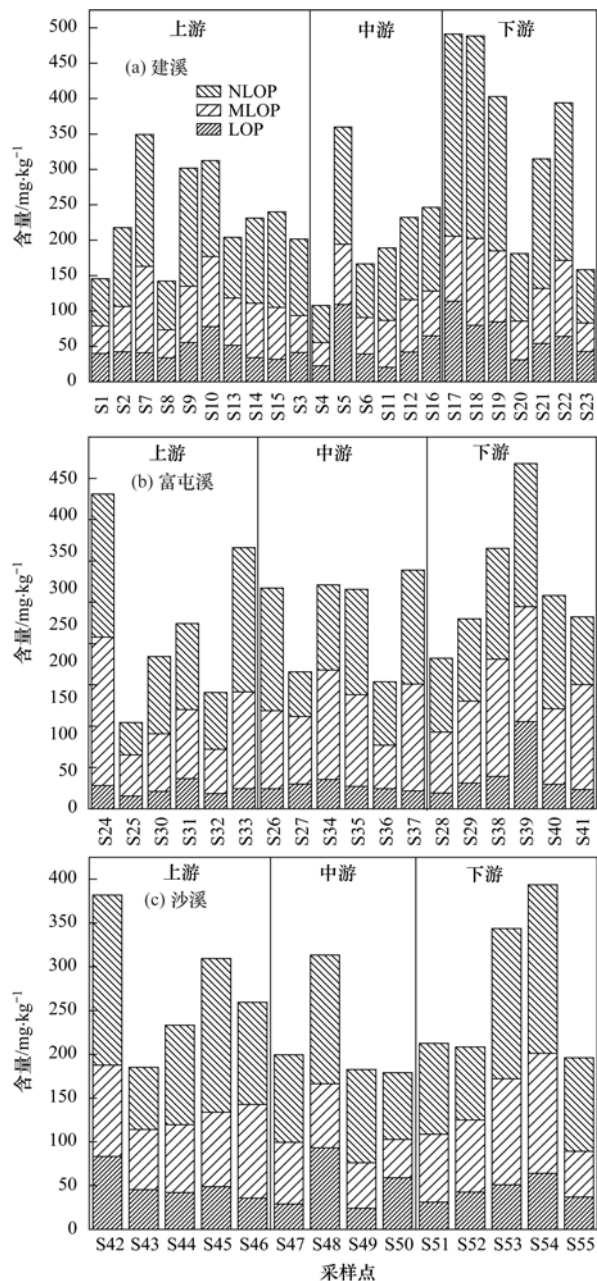


图3 闽江上游沉积物中3种形态有机磷的含量及空间分布

Fig. 3 Concentrations and spatial distribution characteristics of three OP components in the upstream sediments of the Minjiang River

## 2.4 沉积物的基本理化性质对有机磷形态的影响

为了分析不同流域沉积物的基本理化性质对有机磷形态的影响,采用冗余分析(RDA)方法结果讨论沉积物主要理化性质与有机磷形态的关系(见图4)。

图4(a)显示, pH 对建溪沉积物磷形态的影响较大,说明该流域沉积物 pH 随时间变化较大,缺乏稳定性; OM 对磷形态影响较小; 常量元素对磷形态影响较大的是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 有研究表明, 有机磷的吸附作用主要依赖于铁铝氧化物<sup>[28]</sup>; TN 与 TP 与磷形态均呈正相关性, 但 TP 的影响更大些。图4(b)显示, pH 对富屯溪沉积物磷形态的影响较

小, 说明该流域沉积物 pH 常年较稳定; 而 OM 对磷形态影响较大, 说明有机质是有机磷的重要载体, 有机质的含量决定有机磷的含量<sup>[9]</sup>; 沉积物有机磷形态受常量元素中 CaO 影响最大; TN 和 TP 都对沉积物有机磷形态产生了较大的正影响。图4(c)显示, 沙溪沉积物有机磷形态受 pH 和 OM 影响较大, 但前者大体是负影响, 而后者是正影响, 说明沙溪沉积物 pH 相对变化较大。金属氧化物是有机磷的主要结合介质, 相较于建溪和沙溪沉积物中常量元素对有机磷形态的影响程度不一致, 富屯溪沉积物中的常量元素对有机磷形态的影响较一致。3个流域沉积物中有机磷形态与 OM、TN 和 TP 都有正相关性, 而富屯溪沉积物最为显著。

根据以上分析可知, 沉积物的理化性质对有机

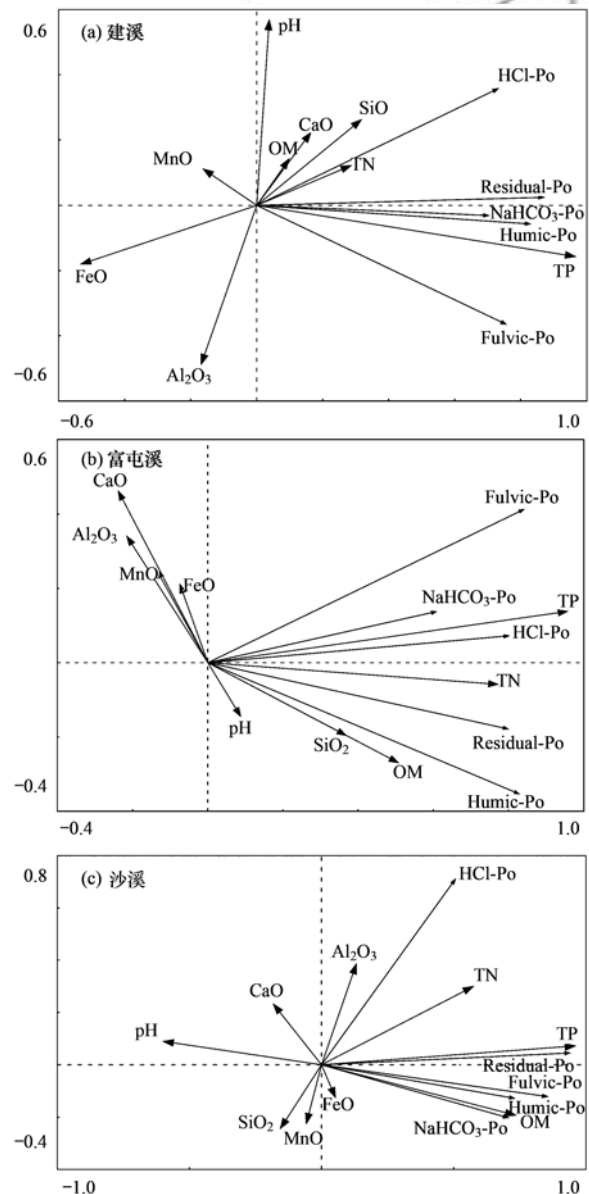


图4 闽江上游沉积物有机磷形态与理化性质的 RDA 分析结果

Fig. 4 RDA results of the relation between physicochemical properties and OP components in upstream sediments of the Minjiang River

磷形态的分布有明显的影响, 其中有机质、总氮和总磷最为显著, 表明营养元素是控制有机磷分布的重要因素. 沉积物 pH 和常量元素对有机磷形态均存在影响, 但不同流域有一定差异, 说明流域的地质地理环境是控制有机磷分布的重要因素<sup>[29]</sup>.

## 2.5 闽江上游沉积物有机磷分布的环境意义分析

建溪、富屯溪及沙溪是闽江上游的主要水系, 其水体的营养状况对周边城镇居民的生活环境和社会经济的发展会造成一定的影响, 因此, 通过分析该 3 个流域中沉积物磷形态的差异性, 可为应对其水质状况变化提供可靠的理论依据. 如前所述, 3 个流域沉积物中总磷含量由高到低依次为建溪、沙溪、富屯溪, 建溪主要流经沿途的武夷山市、建阳区、建瓯区这 3 个人口相对密集的城镇, 且沿河有较多的农业用地如茶地、菜地等, 故而总磷含量最高; 而富屯溪流域沿线城镇规模较小, 且主要流经山地、林地, 故而营养元素水平较低, 可见人类活动的干扰对流域水体水质状况存在明显影响. 虽然 3 个流域间沉积物有机磷含量存在差异, 但就非活性有机磷、中活性有机磷、活性有机磷来说, 却呈现出由高到低变化的相同规律. 其活性有机磷低的原因可能是流域的沉积物-水界面间的相互作用比较强烈, 导致活性有机磷扩散到水体中<sup>[30]</sup>; 非活性有机磷高可能是受采样点周边人类活动的影响, 进而导致外源输入增多的缘故<sup>[31]</sup>. 对建溪、沙溪、富屯溪 3 个流域来说, 总有机磷的含量均在下游最高、中游次之, 上游最低, 因为下游人口更为密集, 经济水平更高, 中上游地区山脉多, 适宜人类居住生活的地方较少. 建溪沉积物中, 活性有机磷在中游占比最多, 可能是因为中游的水体的流动性较小和水生动植物较少造成的; 非活性有机磷在下游占比最多, 应该是生活污水、农业径流等外源输入的缘故. 富屯溪沉积物中, 活性有机磷、中活性有机磷及非活性有机磷在不同地段占总有机磷含量比例变化均较小, 表明富屯溪流域的整体水环境相对比较稳定. 沙溪沉积物中活性有机磷在不同地段沉积物中总体上占比相对较高, 在中下游更明显, 这主要是中下游人类活动增多的缘故. 3 个流域沉积物中的有机磷形态均与 TP 呈显著正相关性, 说明沉积物中 TP 和 OP 在来源上具有较好的一致性<sup>[32]</sup>; 同时有机磷形态与 OM 和 TN 也呈正相关性, 一般而言, 河湖生态系统内有机磷主要来自于陆源和自生相有机磷的混合输入, 因此沉积物中的有机磷受 OM 的控制<sup>[33]</sup>.

## 3 结论

(1) 闽江上游沉积物的 pH 均呈弱酸性. 建溪

沉积物  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}_2$  及 CaO 含量高于沙溪和富屯溪, 沙溪的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  含量却高于另外 2 个流域. 建溪和沙溪沉积物 N、P 含量高于富屯溪沉积物, 且建溪沉积物的 OM 含量高于富屯溪和沙溪. 这与建溪和沙溪流域附近生活污水排放较多、农业径流的污染有关.

(2) 闽江上游沉积物的有机磷形态的相对含量因流域不同而呈现出一定的差异性, 但均以非活性有机磷为主. 建溪沉积物中, 活性有机磷在中游占比最多, 中活性有机磷在上游占比最少; 富屯溪沉积物中, 3 种有机磷形态相对含量变化不大, 且活性磷含量较低, 表明该流域整体上受人类活动影响较小; 沙溪沉积物, 在中下游活性有机磷含量要明显高于上游, 显示中下游的外源污染较多及人类活动干扰较大.

(3) 沉积物理化性质会影响有机磷形态的含量组成及分布. 建溪沉积物磷形态受 pH 影响较大, OM 对其影响较小; 富屯溪沉积物磷形态受 pH 影响较小, 反而受 OM 影响较大; 沙溪沉积物有机磷形态受 pH 和 OM 影响均较大. 3 个流域沉积物中 TN 和 TP 都与有机磷形态有正相关性, 其中富屯溪沉积物最为显著. 沉积物有机磷形态与常量元素均有一定的相关性, 但相关的程度在不同流域存在差异, 表明流域地质背景也是影响沉积物磷形态分布的重要因素.

## 参考文献:

- [1] 诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1531-1539.  
Zhuge X Z, Bi C J, Chen Z L, et al. Phosphorus adsorption characteristics of soils and sediments surrounding Dishui Lake in Shanghai[J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1531-1539.
- [2] Wan J, Wang Z, Li Z J, et al. Critical velocity in phosphorus exchange processes across the sediment-water interface[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(10): 1966-1971.
- [3] 黄蓉, 杨文斌, 程俊杰, 等. 菹草、伊乐藻对水-沉积物界面磷迁移转化的影响[J/OL]. 环境科学研究, 2018, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.11.07.  
Huang R, Yang W B, Cheng J J, et al. Effects of *Potamogeton crispus* L. and *Elodea nuttallii* on phosphorus migration and transference between water and sediment[J/OL]. Research of Environmental Sciences, 2018, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.11.07.
- [4] 王婷, 王坤, 姜霞. 东洞庭湖沉积物覆水后磷形态变化及其释放量[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 937-947.  
Wang T, Wang K, Jiang X. Influence of rewetting process on distribution and release of phosphorus in sediments of East Lake Dongting[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 937-947.
- [5] 刘凯, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖不同高程沉积物中磷形态特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 856-861.



- Liu K, Ni Z K, Wang S R, *et al.* Distribution characteristics of phosphorus in sediments at different altitudes of Poyang Lake [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3): 856-861.
- [6] 董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 等. 太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4194-4202.
- Dong D P, Zhang T X, Zhang D Y, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in the sediments of the black water aggregation in Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4194-4202.
- [7] 李强, 尹俊华, 席北斗, 等. 巢湖入湖河流沉积物中有机磷的形态分级研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 441-447.
- Li Q, Yin J H, Xi B D, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of inflow rivers of Lake Chaohu, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(2): 441-447.
- [8] 马双丽, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3607-3614.
- Ma S L, Ni Z K, Wang S R, *et al.* Organic phosphorus forms in sediments and their relationship with the change of water level in Poyang Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3607-3614.
- [9] 严玉鹏. 几种土壤有机磷在铁铝氧化物表面的吸附、解吸与沉淀[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [10] Cha H J, Lee C B, Kim B S, *et al.* Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea)[J]. *Marine Geology*, 2005, **216**(3): 127-143.
- [11] 刘超, 朱淮武, 王立英, 等. 滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(4): 1073-1079.
- Liu C, Zhu H W, Wang L Y, *et al.* Comparative study on the geochemical characteristics of phosphorus in sediments from Lake Dianchi and Hongfeng [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(4): 1073-1079.
- [12] 岳琦, 张林波, 刘成程, 等. 基于 GIS 的福建闽江上游山洪灾害风险区划[J]. *环境工程技术学报*, 2015, **5**(4): 293-298.
- Yue Q, Zhang L B, Liu C C, *et al.* GIS-based risk zoning of flood disasters in upstream of the Minjiang River[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, **5**(4): 293-298.
- [13] 张国防, 陈瑞炎, 曾建荣, 等. 闽江流域洪灾与生态环境脆弱性研究[J]. *水土保持通报*, 2000, **20**(4): 51-55.
- Zhang G F, Chen R Y, Zeng J R, *et al.* A study on floodwater and fragility of environment in Minjiang valley [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **20**(4): 51-55.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 22-28.
- [15] Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols[J]. *Soil Science*, 1998, **163**(1): 36-45.
- [16] 狄贞珍, 张洪, 单保庆. 太湖内源营养盐负荷状况及其对上海水质影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3872-3882.
- Di Z Z, Zhang H, Shan B Q. Status of internal nutrient loads and their effects on overlying water quality in Taihu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3872-3882.
- [17] Liang T, Tong Y L, Wang X H, *et al.* Release of reactive phosphorus from sediments in Dongting Lake linked with the Yangtze River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **14**(1): 48-54.
- [18] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3064-3069.
- Gan S, Lu S Y, Qin P F, *et al.* Spatial distribution and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments from western lakeside belt of Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3064-3069.
- [19] 吴强亮, 谢从新, 赵峰, 等. 沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 对沉积物中磷赋存形态的影响[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 228-234.
- Wu Q L, Xie C X, Zhao F, *et al.* Effects of *Vallisneria natans* on the occurrence characteristic of phosphorus fractions in sediment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(2): 228-234.
- [20] Tang X Q, Wu M, Dai X C, *et al.* Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking water source reservoir and its relation with sediment compositions[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **64**: 276-284.
- [21] 王健康, 王亚茹, 杨广, 等. 玉渊潭人工湿地沉积物有机磷形态分级特征研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(S1): 932-935, 940.
- Wang J K, Wang Y R, Yang G, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of Yuyuantan artificial wetland [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(S1): 932-935, 940.
- [22] Bai X L, Ding S M, Fan C X, *et al.* Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2507-2513.
- [23] Jin X C, Wang S R, Chu J Z, *et al.* Organic phosphorus in shallow lake sediments in middle and lower reaches of the Yangtze River area in China[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(3): 394-400.
- [24] Gao Y L, Liang T, Tian S H, *et al.* High-resolution imaging of labile phosphorus and its relationship with iron redox state in lake Sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 466-474.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
- Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [28] 刘婉清. 湖泊沉积物有机磷沉积特征研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [29] Ni Z K, Wang S R, Zhang L, *et al.* Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(13): 10116-10129.
- [30] 张友, 宋佳伟, 吕迎春, 等. 荣成天鹅湖沉积物有机磷的生物有效性及其时空动态[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(12): 4629-4635.
- Zhang Y, Song J W, Lü Y C, *et al.* Bioavailability and variations of organic phosphorus in sediments of Swan Lake,

- Rongcheng[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(12): 4629-4635.
- [31] 王雯雯, 王书航, 赵丽, 等. 丹江口水库表层沉积物有机/无机磷形态特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 808-818.
- Wang W W, Wang S H, Zhao L, *et al.* Identification of inorganic and organic species of phosphorus and its bio-availability by aequential extraction method in surface sediments of Danjiangkou Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 808-818.
- [32] 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- Xiong Q, Jiao L X, Wang S R, *et al.* Characteristics and bioavailability of organic phosphorus from different sources of sediments in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- [33] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流沉积物中磷形态的垂向分布特征[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 55-63.
- Ji F, Wang G X, Han R M, *et al.* Vertical distribution characteristics of phosphorus fractions in the sediments of a rural malodorous black river in Taihu Lake area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 55-63.

环境科学



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                   |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016                                      | ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)       |
| Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering                                             | WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)                   |
| Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China                                                  | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)         |
| Concentration Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang                                                    | YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027) |
| Scenario Analysis of PM <sub>2.5</sub> Concentration Targets and Milestones in China                                                                              | HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)             |
| PM <sub>2.5</sub> Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang                               | DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)              |
| Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City                                           | ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)    |
| Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China                                            | QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)       |
| Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City                                                    | LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)            |
| Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees                                                         | LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)      |
| Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China                                | HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)          |
| Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments                                          | LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)               |
| Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China                                                     | FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)             |
| Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China         | CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)            |
| Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin                                       | YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)      |
| Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment                                                                            | HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)       |
| Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo                                                                   | ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143) |
| Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir           | QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)    |
| Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m                      | LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)       |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods                                                | LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)           |
| Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin | LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)                              |
| Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River                                    | XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)           |
| Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed                                           | JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)    |
| Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin                                                            | ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)                |
| Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area                          | MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)        |
| Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland                                                                      | LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)       |
| Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands                                                                                   | FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)             |
| Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments                                                                                    | HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)         |
| Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai                                                  | WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)                |
| Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China            | WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)           |
| Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification                                                    | LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)         |
| Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>                | BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)        |
| Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite                                                                                                     | FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)                     |
| Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV                                                                                 | LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)                               |
| Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites                                                                 | HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)         |
| Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite                                                                        | FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)          |
| Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems                                                  | QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)      |
| Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control                                             | WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)          |
| Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations                                                             | MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)     |
| Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR                                                                                           | SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)                  |
| Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System                                                      | WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)            |
| Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics                                                   | YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)        |
| Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria                                                                   | LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)          |
| Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater                                 | HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357) |
| Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants                                                       | QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)      |
| Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain                                                                        | WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)                   |
| Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes                                                                  | LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)         |
| Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System                                                                 | LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)           |
| Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH <sub>4</sub> Emissions from a Vegetable Field                                          | NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)      |
| Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods                                                                           | WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)        |
| Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas                                                  | TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)       |
| Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil                                                                      | ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)           |
| Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi                                                   | SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)             |
| Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland                                                                           | ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)             |
| Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.                          | JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)    |
| Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil                                                                                    | SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)                     |
| Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant                         | LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)     |