

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布
..... 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析
..... 张奎,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力
..... 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价
..... 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV 协同 ClO₂ 去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中 As(V) 的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中 Cr(VI) 的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中 Cr(VI) 研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO₂@ 酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL 的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO₂/CFP 复合电极的制备及电吸附 Pb²⁺ 特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂 TiO₂ 催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁 TiO₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚 A 的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载 Fe/Co 催化 H₂O₂ 氧化降解阳离子红 3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红 3R 废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O 池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响
..... 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应
..... 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田 N₂O 排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1 株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS 量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对 Cu²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中 Na⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

茗溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析

陈海龙,袁旭音*,王欢,李正阳,许海燕

(河海大学环境学院,南京 210098)

摘要: 磷是控制水体营养状态和诱发富营养化的重要因素,不同形态的磷对水体富营养贡献不同. 以东西茗溪干流为研究对象,采用连续提取法获得磷形态,对悬浮物和表层沉积物中磷形态的分布进行分析,并探讨了悬浮物和沉积物的物质组分与磷形态的相关性. 结果表明,西茗溪水质状况劣于东茗溪,而东茗溪中游水体的水质状况好于上游和下游;悬浮物中营养物质含量普遍高于沉积物,其弱吸附态磷、还原态磷和金属氧化物结合态磷所占比例较表层沉积物大,钙结合态磷则在沉积物中占较高比例. 相关性分析表明,西茗溪悬浮物和沉积物的组分对磷形态的影响较弱,而东茗溪的物质组分对磷形态有显著的影响,有机质和黏土矿物对悬浮物和沉积物中形态磷的影响最为显著,这与河流的地质背景及物质来源有关.

关键词: 悬浮物; 表层沉积物; 磷形态; 成因分析; 茗溪流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0464-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.02.013

Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis

CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin*, WANG Huan, LI Zheng-yang, XU Hai-yan

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Phosphorus is a primary nutrient showing the water quality status of river and inducing eutrophication, and a different phosphorus fraction can make diverse contributions to water quality. Four phosphorus forms of suspended sediments and surface sediments in Tiaoxi mainstreams were measured using a sequential extraction procedure, and the distributions of their forms were discussed. The results showed that the trophic status of Xitiaoxi River was inferior to that of Dongtiaoxi River as a whole, and the water quality in the middle reach of Dongtiaoxi River was better than that in the upper and lower reaches. The contents of nutrient elements in suspended sediments were significantly higher than those in surface sediment, which indicated an enrichment of nutrient in fine sediment. The percentages of the loosely absorbed phosphorus ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$), the reductant phosphorus (BD-P) and the metal oxide bound phosphorus (NaOH-P) in the suspended sediment were higher than those in surface sediment, while the percentage of the calcium bound phosphorus (HCl-P) showed a reverse trend. Correlation analyses between phosphorus forms and chemical compositions of suspended sediments and surface sediments were performed. The results showed the phosphorus forms in suspended sediments and surface sediments of Xitiaoxi River had weak relationships with mineral components, while those in the Dongtiaoxi River had strong relationships with mineral, especially OM and clay mineral. The cause was associated with the geological setting and material sources in Tiaoxi watershed.

Key words: suspended sediment; surface sediment; phosphorus forms; cause analysis; Tiaoxi watershed

磷是河湖生态系统中初级生产力的主要营养因子之一,过多的磷可导致湖泊水体富营养化^[1]. 由于外源磷的长期输入和水生生物残渣的沉积导致河流、湖泊等水体的沉积物形成一个磷库,其中的磷在条件适合的时候将释放到水体中^[2],会造成水体的二次污染. 悬浮物是水体的重要物质成分之一,在河湖生源要素磷的迁移转化过程中起着传输媒介的作用. 悬浮物对水体中的可溶性磷有着非常积极的影响,悬浮物中的生物可利用磷成为制衡水体营养状态和诱发富营养化的重要因素^[3],研究沉积物和悬浮物中磷对流域水污染控制具有重要的现实意义.

磷的形态决定了其在环境中的迁移、转化、沉积规律^[4],不同形态磷对水体富营养化贡献不同,

因此认识沉积物和悬浮物的磷形态分布及其变化时评价水质的关键^[5,6]. 目前,国内外很多学者已经对沉积物中磷形态的分布做了大量研究^[7-11],而对于悬浮颗粒物中的磷形态的研究则相对较少. 对沉积物中磷及其形态的研究大多都集中在湖泊、水库、海湾等相对宽广的水域,而在流域范围磷形态的研究相对不足^[12]. 本文采用了磷的分级分离方法,对茗溪悬浮物中的磷形态分布展开研究,且和对应的表层沉积物中磷的形态分布进行对比,分析流域环

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372354); 科技部国际科技合作专项(2012DFA60830)

作者简介: 陈海龙(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: hailongben@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xyx_hjy@hhu.edu.cn

境特点对沉积物和悬浮物分布的影响,探究不同磷形态与悬浮物和沉积物物质组分间关联性,通过了解悬浮物和沉积物中磷形态分布的异同以及影响因素,以期为理解磷的迁移转化规律提供科学依据,进而为控制流域水污染奠定理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域

苕溪流域位于浙江西北部,包括了次一级的东苕溪和西苕溪流域,是太湖重要的补给水系. 东苕溪发源于东天目山北部平顶山南麓,介于东经 $119^{\circ}28' \sim 120^{\circ}08'$ 和北纬 $30^{\circ}05' \sim 30^{\circ}57'$ 之间,其干流长 143 km,流域面积 $2\,267\text{ km}^2$ ^[13]. 西苕溪发源于安吉县永和乡的狮子山,介于东经 $119^{\circ}14' \sim 120^{\circ}29'$ 和北纬 $30^{\circ}23' \sim 31^{\circ}11'$ 之间,总干流长度为 157 km,其流域面积约为 $2\,200\text{ km}^2$. 苕溪流域整个地势是西南高,东北低,地形以低缓丘陵为主,而且流域内土地利用类型较为齐全,主要以林地和耕地为主,其次是

草地、工矿及城镇用地等^[14].

1.2 样品的采集与处理

在 2012 年夏季,采集了东苕溪干流 10 个断面悬浮物和相应的表层沉积物,西苕溪干流 13 个断面悬浮物和相应的表层沉积物. 东苕溪流域的样点分布从临安到与西苕溪汇合处,西苕溪流域的样点分布从安吉西南部的河流上游到西苕溪下游的湖州分叉河道,研究区域及采样点分布图如图 1.

采集悬浮物时,于河中心处在河面水下大约 20 cm 处用干净的塑料桶采集河水. 河水采集后要立即用真空泵进行抽滤,以防止悬浮物絮凝,抽滤的滤膜采用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜,抽滤完成后,滤膜上过滤的固体小颗粒物就是实验所需的悬浮物,待滤膜自然干燥后,带回实验室. 对分离出来的悬浮物样品进行烘干 (40°C),烘干后进行称重,待测. 沉积物用自制的抓斗采样器进行采集,采集后进行烘干,剔除碎石和植物根系,低温保存用于测定.

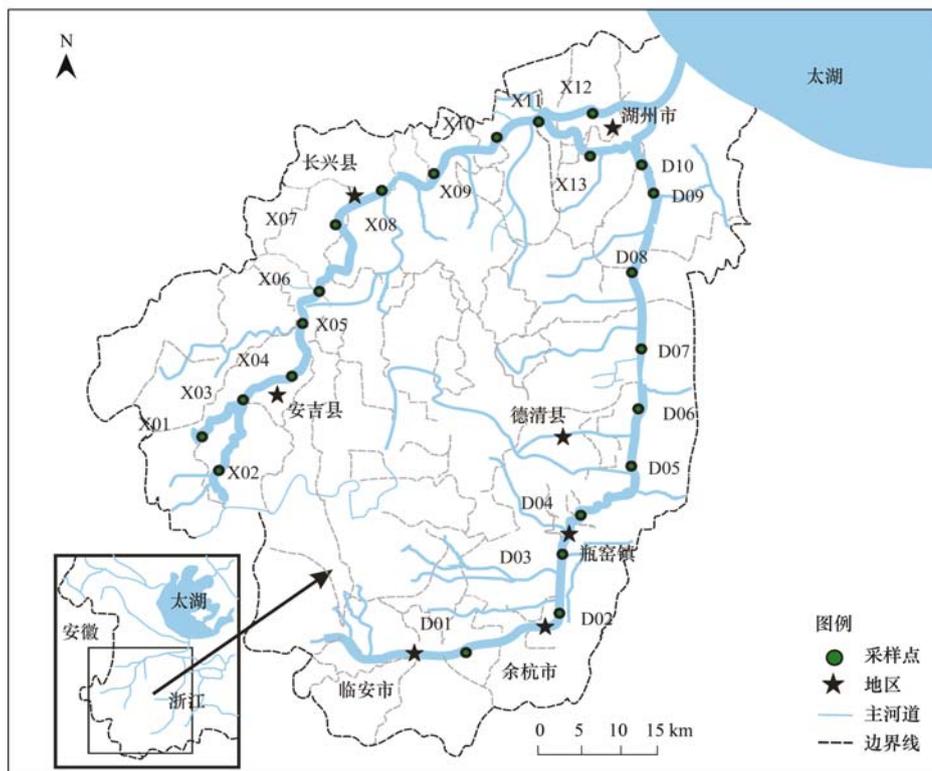


图 1 研究区域和采样点分布示意

Fig. 1 Map of Tiaoxi river with sampling sites

1.3 样品的测定

沉积物和悬浮物中总磷(TP)的测定采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法^[15],无机磷形态的顺序提取采用 Hupfer 等^[16]修改后的方法. 此方法用

NH_4Cl ($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 NaHCO_3 ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 NaOH ($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 HCl ($0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 依次对样品进行提取,提取上清液用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后用钼蓝比色测

定磷浓度,即对应各形态的含量. 本方法将无机磷分为弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$),还原态磷(BD-P),金属氧化物结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)^[17].

有机质(OM)的测定采用水合热重铬酸钾氧化-比色法^[18]. Al、Fe、Ca、Mn、Si用型号为PW2440的X射线荧光分析仪(XRF)测定. 为了保证实验所得数据结果的精度,取3组平行样品进行重复实验,

表1 东西苕溪干流悬浮物和表层沉积物中营养元素的分布

Table 1 Distribution of nutrient elements in suspended sediment and surface sediment of Tiaoxi River

项目	西苕溪		东苕溪	
	悬浮物	沉积物	悬浮物	沉积物
TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1 239 ~ 1 514	587 ~ 1 067	935 ~ 1 948	833 ~ 1 794
OM/%	1.20 ~ 6.37	0.49 ~ 2.06	1.45 ~ 3.76	0.87 ~ 2.21
TN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1 109 ~ 2 450	1 281 ~ 2 305	1 421 ~ 2 310	1 178 ~ 1 953

由表1可知东西苕溪悬浮物中的TP、OM和TN含量大于表层沉积物中的含量,尤其是西苕溪悬浮物中TP和OM的含量显著高于沉积物中的含量. 对比东西苕溪的数据可知,西苕溪悬浮物和沉积物中的TP含量略低于东苕溪,而OM和TN含量高于东苕溪,这主要是由于西苕溪沿岸缺少宽广的河堤,农田径流和生活污水容易进入河流,而东苕溪沿岸城镇区密度大,导致其沉积物和悬浮物磷的含量

要求其测量得到结果的相对偏差均小于5%,则可表明实验总体的结果是可靠的.

2 结果与分析

2.1 悬浮物和表层沉积物中营养元素的基本特征

河流水体中营养元素的含量可以反映水质的状况,对东西苕溪干流悬浮物和表层沉积物中营养元素含量测定分析结果见表1.

稍高.

2.2 悬浮物和表层沉积物中不同形态磷的对比

与TP、OM和TN一样,悬浮物和沉积物中各形态磷的含量(质量分数)也是不同的,为了研究各形态磷在苕溪悬浮物和表层沉积物中的分布特征,作了悬浮物和表层沉积物中各形态磷的相对含量比例见如图2和图3,以下针对4种磷形态的分布分别作出讨论.

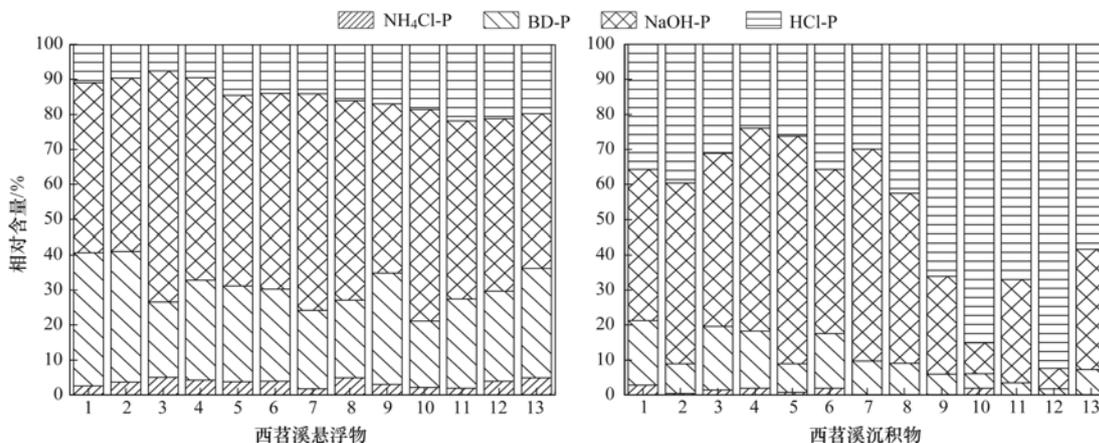


图2 西苕溪形态磷在悬浮物和表层沉积物中相对含量比例

Fig. 2 Relative contribution of P fractions in the suspended sediment and surface sediment of Xitiaoxi River

2.2.1 弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)的分布特征

弱吸附态磷即松散型吸附态磷,包括孔隙水中的溶解性磷^[17]. 对于苕溪,悬浮物和表层沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的含量在4种形态中是最低的,占总磷的比例范围为0.03%~6.87%.

根据图2和图3显示,悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的含量远远大于表层沉积物中的含量. 刘敏等^[19]曾对河口沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量与粒度的相关性进行了

系统研究,结果表明沉积物中颗粒越细, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量也就越高,即越有利于 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的吸附. 悬浮物颗粒的平均粒径小、比表面积较大,对 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的吸附能力也就比沉积物强. 生活污水是河流细颗粒物的主要来源之一,西苕溪上游至下游沿岸都有居民,生活污水未经处理直接排入河流,所以 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 分布相对均一;而东苕溪的上游有临安、余杭等大型城镇,中下游沿岸居民相对较少,所以上游

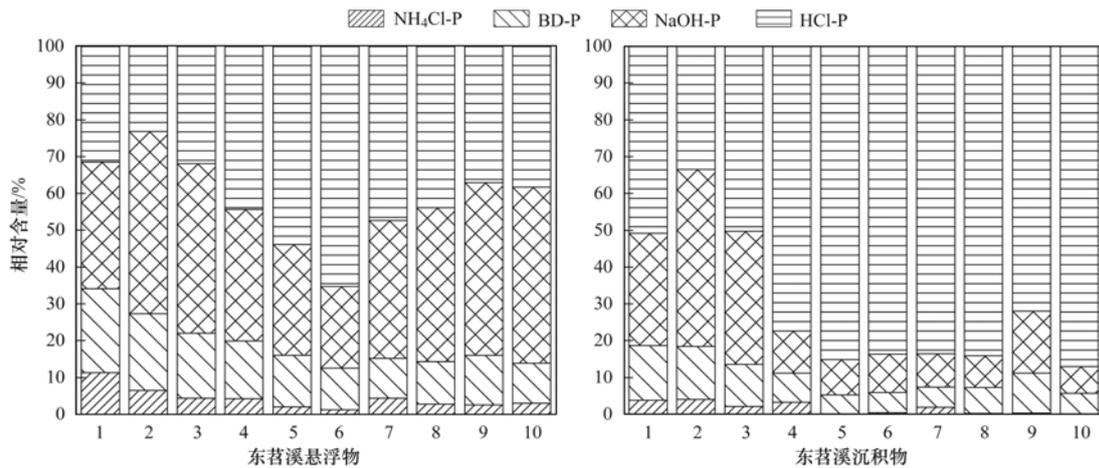


图3 东苕溪形态磷在悬浮物和表层沉积物中相对含量比例

Fig. 3 Relative contribution of P fractions in the suspended sediment and surface sediment of Dongtiaoxi River

NH₄Cl-P 含量明显较高. 另外, 在风浪等外力的搅动作用下, 沉积物中的 NH₄Cl-P 也会向上覆水体释放, 然后吸附到悬浮物上^[20~22]. 苕溪流域来往船只较多, 加剧了对沉积物的搅动, 增强了沉积物中 NH₄Cl-P 的释放.

2.2.2 还原态磷(BD-P)的分布特征

BD-P 表示氧化还原敏感磷, 主要包括与铁氢氧化物和锰化合物结合的磷^[23], 这种形态的磷具有潜在移动性, 是藻类可以利用的磷. 沉积物中 BD-P 会在缺氧的条件下释放进上覆水体, 成为水体的内部磷源^[24].

对比悬浮物与表层沉积物中 BD-P 含量可知, 除了东苕溪 9 号点之外, 悬浮物中 BD-P 的含量都是表层沉积物中含量的几倍, 西苕溪尤为突出, 有些采样点甚至达到 4 倍以上. Rydin^[25] 对沉积物中各形态磷的释放潜力研究表明, 沉积物中 BD-P 不稳定, 很容易释放出来. 由于 BD-P 的生物可利用性以及沉积物中的 BD-P 极易释放入上覆水体, 成为藻类的动态营养源, 这会加剧河流水质的恶化. 与东苕溪相比, 西苕溪流域砂岩和粉砂岩分布较广泛, 而砂岩和粉砂岩中铁锰含量较高, 这就在一定程度上造成了西苕溪 BD-P 的相对含量比例较东苕溪高. 另外, 东西苕溪上游地区石英的含量都比中下游地区高, 由下面的相关性分析可知, 石英对 BD-P 含量有影响, 因此, 东西苕溪上游地区 BD-P 的相对含量比例较大.

2.2.3 金属氧化物结合态磷(NaOH-P)的分布特征

NaOH-P 主要是指铝和铁氧化物结合的磷^[17]. 在沉积物中, NaOH-P 可用于生物可利用磷的评估, 也可用于指示藻类可利用磷^[26].

对比悬浮物和表层沉积物中 NaOH-P 的含量可以发现, 其在悬浮物中所占总磷的比例大于其在沉积物中所占的比例, 说明悬浮物中磷的生物可利用性较高. Wang 等^[27] 研究表明对于重度污染的沉积物而言, 释放入水体的生物可利用磷主要来自无机磷形态中的 NaOH-P. NaOH-P 在 4 种形态中是最高的, 尤其是西苕溪, 黏土矿物对此形态影响较大. 样品采集时处于丰水期, 降雨量较大, 西苕溪黏土矿物比较丰富, 沿岸缺少连续的人工岸坡, 细颗粒物容易进入河流, 致使河流内黏土矿物增多; 另外下游该形态比例降低, 主要是因为下游岸坡植被发育, 截留了部分细颗粒物.

2.2.4 钙结合态磷(HCl-P)的分布特征

HCl-P 表示对低 pH 值较敏感的磷, 主要包括自然存在的和碎屑状的磷灰石磷、与碳酸盐结合的磷和少量有机磷水解产生的磷^[28]. 这种形态的磷被认为是无机磷形态中最稳定的^[29], 且是生物难以利用的磷形态, 一般可看作永久性的磷汇, 通常状况下对富营养化的贡献较小.

对比图 2 和图 3 悬浮物和表层沉积物中 HCl-P 占总磷的比重可知, 表层沉积物中 HCl-P 的相对含量是明显大于悬浮物中的相对含量值的. 这应该是由于 HCl-P 的稳定性和生物不可利用性. 沉积物中的 HCl-P 较稳定, 在一般的水力环境下是不会释放进上覆水体的. 在短期时间内, HCl-P 对环境危害是很小的, 但是如果长远来看, 或者当水力环境发生变化(例如微生物活性增强)时, HCl-P 还是会由沉积物释放进上覆水体造成水体污染的^[30, 31]. 碎屑颗粒即粗颗粒物质是 HCl-P 的来源之一, 而粗颗粒物质易于沉淀, 所以在沉积物中该形态的比例明显

高于悬浮物; 苕溪上游沿岸林地分布广泛, 阻挡了碎屑物质进入河流, 而中下游地区耕地等较多, 受人类活动影响较强, 进入河流的碎屑物质也就较多, 因此下游 HCl-P 的含量明显高于上游。

2.3 悬浮物中各形态磷的空间变化

根据样品分布的地理位置, 西苕溪 1~4 号采样点位于上游, 5~9 号采样点位于中游, 10~13 号采样点位于下游。东苕溪 1~3 号采样点位于上游, 4~7 号采样点位于中游, 8~10 号采样点位于下游。苕溪上中下游各形态磷相对含量见图 4。

对比图 4 东苕溪上中下游悬浮物中各形态磷的相对含量可知, 上游和下游各形态磷含量相对大小顺序为: NaOH-P > HCl-P > BD-P > NH₄Cl-P, 而中游为 HCl-P > NaOH-P > BD-P > NH₄Cl-P。已有研究表明颗粒物中 NaOH-P 和 HCl-P 含量的相对大小可以在一定程度上反映河流的营养状态, 当 NaOH-P > HCl-P 时, 河流处于重污染状态, 会产生富营养的现象, 例如水华, 水质较恶劣; 反之, 河流的营养状态相对较稳定, 水质较好^[11]。由此可知, 东苕溪中游的水质状况相比于上游和下游较好一些。西苕溪上

中下游悬浮物中各形态磷的相对大小是一致的, 为 NaOH-P > BD-P > HCl-P > NH₄Cl-P, 表明西苕溪整个流域的生物可利用磷含量相对较低。

对比悬浮物中磷各形态的空间分布可知东西苕溪存在着差异, 且东苕溪 HCl-P 的相对含量明显高于西苕溪中 HCl-P 的相对含量, NaOH-P 相对含量则呈相反的趋势, 由此可推测东苕溪的水质状况好于西苕溪。这可能是与东西苕溪土地利用类型分布不同、土壤地质背景不同等因素有关。西苕溪流域村庄和城镇上游至下游都是依河而建, 且西苕溪是重要的水上交通要道, 来往船只络绎不绝, 河流排入的废水废渣等污染物较多。东苕溪流域石灰性土壤比西苕溪分布广泛^[32], 河流周边土壤在地表径流等情况下进入水体, 石灰性土壤可以形成相对稳定的钙磷, 减少磷的生物有效性。其中东苕溪的中游德清县河段有较多的采石采矿场, 大部分依河而建, 废水废渣直接排入水体, 致使河流磷灰石和碳酸盐类增多, 而这些矿物质中含量最多的磷形态为 HCl-P, 从而导致了东苕溪中游悬浮物中 HCl-P 显著的增加。

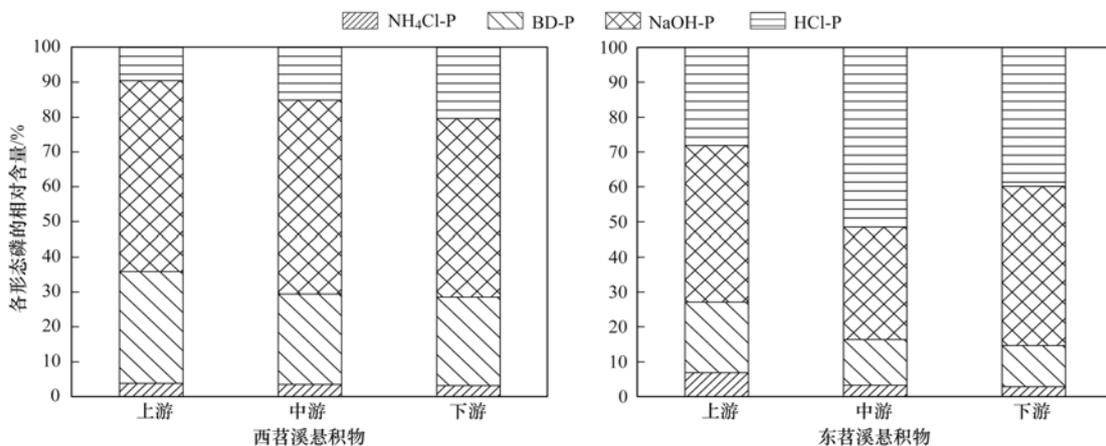


图 4 东西苕溪悬浮物中各形态磷相对大小的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of relative contribution of P fractions in suspended sediment of Tiaoxi River

2.4 悬浮物和沉积物物质组分对形态磷影响

悬浮物的来源很广泛, 悬浮物和沉积物间存在着沉淀与再悬浮的动态过程, 之间可以相互转化^[33]。磷形态与组分间的相关性可以反映两者之间的关联程度, 即能在一定程度上反映悬浮物磷各形态的来源。为了解影响悬浮物中磷形态分布的因素, 做了悬浮物和沉积物中形态磷与有机质、Al₂O₃、SiO₂、CaO、MnO₂ 和 Fe₂O₃ 的 Spearman 相关性分析, 分析结果见表 2 和表 3。

由表 2 可知, 西苕溪悬浮物中物质组分与各形

态磷的关联不强, 只有有机质对 HCl-P 有影响, 说明西苕溪的来源比较分散; 而沉积物中组分对 BD-P 的影响相对较明显, Al₂O₃、CaO 和 Fe₂O₃ 与 BD-P 间的显著相关性表明, 黏土矿物、碳酸盐和铁氧化物都对 BD-P 有影响, 黏土矿物和铁氧化物能够吸附 BD-P, 而碳酸盐不能增加 BD-P。

由表 3 可知东苕溪悬浮物组分对形态磷有较大的影响, 表明东苕溪的来源相对一致。有机质、黏土矿物和硅酸盐都对 NH₄Cl-P 和 BD-P 有影响, 尤其是有机质与 NH₄Cl-P 和 BD-P 呈极显著的相关

性,对二者的影响很大. 沉积物中的有机质与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-P 这 3 种形态呈显著的相关性,说明对这 3 种形态影响也很大. 沉积物中的

SiO_2 和 CaO 都与 BD-P 和 NaOH-P 表现出显著的负相关,这是由于沉积物中硅酸盐和碳酸盐基本不能吸附 BD-P 和 NaOH-P ^[29].

表 2 西苕溪形态磷与各组分间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between P fractions in suspended sediment and other components of Xitiao River

形态	悬浮物						沉积物					
	OM	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MnO_2	Fe_2O_3	OM	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MnO_2	Fe_2O_3
$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	0.143	-0.049	0.044	0.181	0.269	-0.17	0.445	0.346	-0.016	-0.495	0.148	0.121
BD-P	0.11	-0.099	-0.016	-0.308	0.209	0.335	0.231	0.775**	-0.214	-0.610*	-0.159	0.582*
NaOH-P	-0.237	-0.481	0.358	-0.388	-0.542	-0.184	-0.192	0.374	0.319	-0.544	-0.275	0.346
HCl-P	-0.593*	0.484	0.434	0.28	-0.401	-0.357	0.027	-0.588*	0.011	0.775**	0.28	-0.324

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ (双尾检验),下同

表 3 东苕溪形态磷与各组分间的相关性

Table 3 Correlation between P fractions in suspended sediment and other components of Dongtiaoxi River

形态	悬浮物						沉积物					
	OM	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MnO_2	Fe_2O_3	OM	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MnO_2	Fe_2O_3
$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	0.855**	-0.673*	0.745*	-0.261	0.43	-0.273	0.942**	0.213	-0.274	-0.34	-0.395	-0.286
BD-P	0.806**	-0.733*	0.745*	-0.406	0.273	-0.139	0.758*	0.697*	-0.636*	-0.685*	-0.333	-0.018
NaOH-P	0.612	-0.564	0.745*	-0.648*	0.055	0.055	0.855**	0.576	-0.673*	-0.636*	-0.224	0.042
HCl-P	-0.285	-0.042	-0.188	0.285	-0.588	0.248	-0.455	-0.418	0.588	0.297	0.285	0.03

对比东西苕溪的相关性分析可发现东苕溪悬浮物和沉积物中物质组分对各形态磷的影响较大,尤其是有机质,因为有机质可以吸附 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-P 这 3 种形态,从而影响三者的含量. 另外发现黏土矿物对各形态磷有着显著的影响,在悬浮物中有着负的相关,而在沉积物中有着正的相关,这是由于含磷物质的粒度分布效应引起的^[19].

3 结论

苕溪干流悬浮物中 TP、OM 和 TN 的含量显著大于沉积物中的含量,其中西苕溪的 OM 和 TN 含量高于东苕溪,而 TP 含量略低于东苕溪. 东西苕溪悬浮物中弱吸附态磷、还原态磷和金属氧化物结合态磷的含量整体大于表层沉积物中的含量,而钙结合态磷则表现出相反的趋势,表明稳定形态磷在沉积物中的比例高. 东苕溪总体水质状况好于西苕溪,其中中游水体的水质状况好于上游和下游,而西苕溪从上游到下游水质呈现变差的趋势. 物质组成对磷的形态影响并不一致,西苕溪悬浮物和沉积物的物质组分对其磷形态的影响较弱,而东苕溪则比较显著,在主要物质组分中,有机质和黏土矿物对磷形态的影响显著强于其他组分. 所有这些结果表明,流域周围的地质背景和物质来源对磷形态的变化有明显的控制作用.

参考文献:

[1] 骆伙仁. 湖库沉积物中磷的化学形态研究综述[J]. 广州环

境科学, 2012, 27(1): 6-8.

- [2] Zhang B, Fang F, Guo J S, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 53-59.
- [3] 杨逸萍, 胡明辉. 河口悬浮物中磷的化学形态分布与转化[J]. 台湾海峡, 1995, 14(4): 313-319.
- [4] 吉芳英, 曹琳, 林茂, 等. 三峡库区新生消落区沉积物磷形态分析[J]. 环境科学研究, 2009, (8): 882-886.
- [5] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 370(2-3): 224-228.
- [6] Golterman H L. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: a simplification, and comparison with other methods[J]. *Hydrobiologia*, 1996, 335(1): 87-95.
- [7] Aydin I, Aydin F, Saydut A, *et al.* A sequential extraction to determine the distribution of phosphorus in the seawater and marine surface sediment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(2): 664-669.
- [8] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 279-285.
- [9] 杨学芬, 熊邦喜, 杨明生. 武汉南湖水体及沉积物不同形态磷的季节变化[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2029-2034.
- [10] 尹起范, 孙建, 金都, 等. 洪泽湖沉降物中磷的形态分布及其对水体的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(12): 5631-5633.

- [11] Sun S J, Huang S L, Sun X M, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 291-295.
- [12] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [13] 胡海英, 黄国如. 东苕溪流域暴雨洪水变化趋势分析[J]. *水力发电*, 2012, **38**(8): 14-16.
- [14] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 西苕溪典型小流域土地利用对氮素输出的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(6): 678-681.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Hupfer M, G Chter R, Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis[J]. *Aquatic Sciences-Research across Boundaries*, 1995, **57**(4): 305-324.
- [17] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1455.
- [18] 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.
- [19] 刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征[J]. *海洋通报*, 2001, **20**(5): 10-17.
- [20] Enell M, Löfgren S. Phosphorus in interstitial water: methods and dynamics[J]. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 103-132.
- [21] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark[J]. *Hydrobiologia*, 1992, **228**(1): 91-99.
- [22] 石晓勇, 史致丽, 余恒, 等. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨——I. 黄河口悬浮物对磷酸盐的吸附-解吸研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, **30**(2): 192-198.
- [23] Kozerski H P, Kleeberg A. The sediments and Benthic-Pelagic exchange in the shallow lake Müggelsee (Berlin, Germany)[J]. *International Review of Hydrobiology*, 1998, **83**(1): 77-112.
- [24] Kleeberg A, Kozerski H P. Phosphorus release in Lake Großer Müggelsee and its implications for lake restoration [J]. *Developments in Hydrobiology*, 1997, **119**: 9-26.
- [25] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [26] Zhou Q, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 221-225.
- [27] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, *et al.* Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River region, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **60**(7): 1491-1498.
- [28] 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.
- [29] Gonsioreczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District (Germany)[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(3): 51-58.
- [30] Kim L H, Chio E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 53-61.
- [31] Kim L H, Chio E, Gil K I, *et al.* Phosphorus release rates from sediments and pollutant characteristics in Han River, Seoul, Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **321**(1-3): 115-125.
- [32] 高常军. 流域土地利用对苕溪水体 C, N, P 输出的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [33] Hu J, Liu J T, Liu Y D. Phosphorus in suspended matter and sediments of a hypertrophic lake. A case study: Lake Dianchi, China[J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(4): 833-841.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行