

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国 2000 ~ 2010 年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区 VOCs 特征及 O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的 A ² O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状 Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N ₂ O 产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)	

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征

朱佳美¹, 曹晓燕^{1,2*}, 刘素美², 王丽莎¹, 杨桂朋^{1,2}, 葛成凤¹, 路敏¹

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 通过研究桑沟湾表层沉积物对磷的吸附动力学曲线和吸附等温线, 并结合沉积物的表面电荷性质及磷的形态分析, 考察了沉积物对磷的吸附性能和吸附机制. 结果表明, 桑沟湾表层沉积物对磷的吸附过程包括快吸附过程和慢吸附过程, 可用快慢二段一级动力学方程描述, 等温线符合 Langmuir 交叉式模型. 夏季沉积物样品的最大吸附量高于春季样品, 粒径较小的沉积物吸附能力较强. 沉积物样品对磷的最大吸附量 Q_m 在 $0.0471 \sim 0.1230 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 吸附/解吸平衡磷浓度 (EPC_0) 范围在 $0.0596 \sim 0.1927 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 沉积物充当“磷源”的作用. 不同站位表层沉积物中无机磷 (IP) 是磷在沉积物中的主要赋存形态, 吸附后的沉积物样品中弱吸附态磷 (Ex-P)、铁结合态磷 (Fe-P) 明显增加. 吸附过程包括物理吸附和化学吸附, 以物理吸附为主.

关键词: 沉积物; 磷; 吸附; 表面电荷; 赋存形态; 桑沟湾

中图分类号: X131.2; X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0558-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.021

Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay

ZHU Jia-mei¹, CAO Xiao-yan^{1,2*}, LIU Su-mei², WANG Li-sha¹, YANG Gui-peng^{1,2}, GE Cheng-feng¹, LU Min¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Kinetic curves and isotherms were investigated to study the sorption mechanism of phosphorus onto the sediments of Sanggou Bay, together with the surface charge properties of sediments and the forms of phosphorus studied. The results showed that the sorption including a fast process and a slow one, and could be described by a two-compartment first order equation. The thermodynamic isotherms were well fitted with a modified Langmuir equation. The maximum adsorption capacity was larger in summer than in spring, and the smaller particle size was favorable to the sorption. The maximum adsorption capacities (Q_m) were $0.0471 \sim 0.1230 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and the zero equilibrium phosphorus concentration (EPC_0) of the sediments ranged from $0.0596 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.1927 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which indicated that the sediments from Sanggou Bay were sources of phosphorus. Inorganic phosphorus (IP) was the main form of total phosphorus (TP). The contents of exchangeable or loosely absorbed P and Fe-bound P increased significantly in the samples after sorption. The sorption process involved physical sorption and chemical sorption, with the former being the predominant.

Key words: sediments; phosphorus; sorption; surface charge; speciation; Sanggou Bay

磷是影响藻类生长、水体富营养化的重要营养元素之一, 而沉积物是海洋中氮、磷等营养盐蓄积、释放的重要场所^[1,2]. 桑沟湾位于山东半岛东端, 北、西、南为陆地环绕, 湾口向东, 为半封闭海湾, 平均水深约 7.5 m, 是我国北方重要的水产品基地, 主要养殖品种有贝类和海带等, 其生物活动影响营养盐在沉积物-水界面的通量^[3,4], 同时, 风浪扰动可引起沉积物再悬浮^[5], 影响着沉积物中磷源的释放, 对水体营养化水平也有重要的贡献. 养殖水体底质与上覆水的物质交换是初级生产者营养要素的主要来源之一, 已有的研究表明桑沟湾养殖水域表层沉积物起“磷源”的作用^[5], 影响养殖生物的生长繁殖. 与非养殖区相比, 养殖海域的沉积物组成及理化性质的时空分布均存在显著特点^[4,6,7], 而沉积

物对磷的吸附特性与其组成及理化性质有密切的联系^[1,8~10]. 另外沉积物与磷的结合形式多样复杂^[11~13], 对沉积物中磷的形态分析有助于认识沉积物内源磷负荷机制和沉积物-水界面磷的交换机制, 但在海水养殖环境中, 结合沉积物表面特性及吸附过程中磷的形态变化研究磷的吸附机制的报道较少. 因此从以上入手研究养殖海域沉积物界面上磷的迁移行为是很有必要的.

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2011CB409802); 山东省自然科学基金项目 (ZR2013DM018); 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 (中国海洋大学) 访问学者基金项目; 山东省“泰山学者”建设工程专项

作者简介: 朱佳美 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋界面化学, E-mail: A1293300641@126.com

* 通讯联系人, E-mail: caoxxy@ouc.edu.cn

本研究在室内模拟条件下,考察了桑沟湾表层沉积物对磷的吸附动力学和热力学等温线,采用酸碱电位滴定技术测定了沉积物的表面电荷性质,与表面络合理论相结合,探讨了固体表面电荷和表面羟基位对吸附的影响;同时利用连续提取法^[13,14],对桑沟湾表层沉积物吸附磷前后的样品分别进行磷赋存形态分析,讨论了磷在沉积物-水界面的迁移、转化机制。以上结果有助于为桑沟湾养殖环境质量控制提供技术支撑,促进桑沟湾水产养殖业的稳定、健康发展。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

实验所用沉积物样品于 2011 年 4 月(春季)、8 月(夏季)分别取自桑沟湾养殖区,取回后冷冻保存。使用前室温解冻、自然风干,研磨,分别过 40、200 目尼龙筛,封于聚乙烯袋中备用。采用 X 射线

粉末衍射法测定沉积物矿物组成,灼烧法测定有机质(OM)含量^[15],其部分理化性质列于表 1。实验所用天然海水(NSW)取自青岛石老人海域,经陈化后,抽滤过 0.45 μm 滤膜,调节 pH 至 8.0。其中无机磷含量小于 0.001 mg·L⁻¹。

1.2 实验方法

1.2.1 吸附实验

采用批量法,称取一系列(0.500 0±0.000 2) g 沉积物样品于 100 mL 磨口带塞锥形瓶中,然后加入 40 mL 1.0 mg·L⁻¹的磷溶液(由 KH₂PO₄ 和 NSW 配制,调整 pH=8.0),于(25±1)℃恒温水浴振荡器中 150 r·min⁻¹振荡,定时取样,离心分离,用磷钼蓝分光光度法^[16]测定上清液磷的浓度,根据吸附前后水样中磷的浓度差,计算磷在 *t* 时间段内的吸附量 *Q_t*(mg·g⁻¹),绘制吸附动力学曲线。根据所确定的吸附平衡时间,过程同上,改变磷酸盐初始浓度(0~2.0 mg·L⁻¹)进行吸附等温线测定。

表 1 沉积物样品的组成
Table 1 Compositions of the sediment samples

站位 编号	站位信息	矿物组成/%										OM/%	
		石英	长石	方解石	黏土矿物 ¹⁾	辉石	黄铁矿	菱锰矿	赤铁矿	文石	其它	4 月	8 月
1	122.598°E, 37.114°N	48.02	23.61	2.91	7.06	0	0.89	5.69	0.98	1.66	9.18	3.58	2.91
2	122.532°E, 37.145°N	36.55	30.33	4.04	14.14	0	0.82	1.76	7.14	0	5.21	3.87	5.20
3	122.484°E, 37.100°N	46.76	14.83	4.02	12.45	9.17	1.36	2.60	3.11	0	5.71	4.54	4.78

1) 黏土矿物包括伊利石、高岭石、绿泥石、蒙脱石等

以上实验均在相同条件下作 2 个平行样。空白实验表明器壁吸附可以忽略不计。

1.2.2 表面酸碱性质测定实验

采用瑞士万通 809 自动电位滴定仪进行测定。准确称取 0.1 g 沉积物样品(过 200 目筛),加入 40 mL 0.7 mol·L⁻¹ NaNO₃ 溶液,水化充分后进行滴定。滴定过程中通 N₂,排除 CO₂ 的干扰,温度控制在(25.0±0.2)℃。等量等当点滴定法控制酸碱加入量,所使用的 NaOH 和 HNO₃ 溶液均为标定后的标准溶液。先滴加 HNO₃ 至 pH=3 左右(酸量滴定),然后用 NaOH 滴定至 pH=10 左右(碱返滴定),再用 HNO₃ 返滴定至第一次酸量滴定的 pH(酸返滴定)。以第二次滴酸的体积换算滴定过程所需要的酸,消除了基体溶解带来的误差。借助 FITEQL 4.0 软件,采用恒定容量模型对表面酸碱反应平衡常数进行计算。

1.2.3 沉积物中磷形态的分离提取

称取一系列(0.500 0±0.000 2) g 沉积物样品于 100 mL 磨口带塞锥形瓶中,然后加入 40 mL 浓度

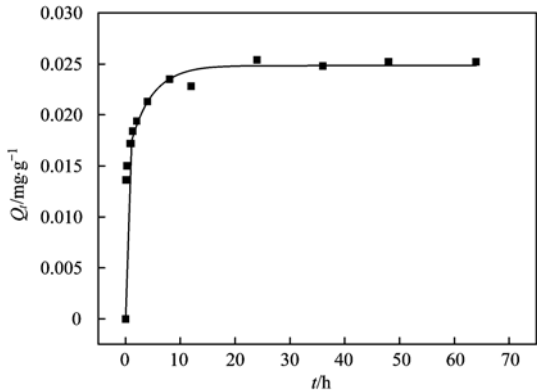
为 16.0 mg·L⁻¹的磷溶液,于(25±1)℃恒温水浴振荡器中振荡 48 h 后平衡,离心分离,吸附磷后的沉积物样品烘干备用。

分别称取 5 份(0.150 0±0.000 2) g 沉积物原样及以上吸附后的沉积物样品于 50 mL 离心管中,进行如下逐级分离提取^[13,14]:分别用 MgCl₂ 溶液、柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-碳酸氢钠混合溶液(CDB)、醋酸钠-醋酸缓冲液、盐酸溶液提取无机磷中的弱吸附态磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、自生和生物磷灰石碳酸钙结合磷(ACa-P)、原生碎屑及其它无机磷(DAP);然后将提取无机磷后的沉积物在 550℃下灰化,用盐酸提取有机磷(OP)。

2 结果与讨论

2.1 吸附动力学

沉积物对磷的吸附通常包括快吸附过程和慢吸附过程。图 1 为 P 在桑沟湾 1 号站位沉积物样品(8 月,过 200 目筛)的吸附动力学曲线。在初始 2 h 内吸附较快,之后吸附量增长缓慢,到 36 h 时吸附反



图内曲线为快慢二段一级动力学方程拟合曲线
图1 1号站位沉积物对P的动力学吸附曲线

Fig. 1 Sorption kinetic curve for phosphorus onto 1 sediment

应基本达到平衡,为保证吸附充分,平衡时间确定为48 h.

利用伪二级动力学方程(1)和快慢二段一级动力学方程(2)对吸附动力学曲线进行拟合.

表2 1号站位沉积物对P的动力学吸附拟合参数

站 位	伪二级动力学方程			快慢二段一级动力学方程						$Q_e(\text{exp})$ /mg·g ⁻¹
	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$k_2/\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$	r^2	F_{rap}	F_{slow}	$k_{\text{rap}}/\text{h}^{-1}$	$k_{\text{slow}}/\text{h}^{-1}$	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	r^2	
1	0.023 1	345.510	0.882	0.612	0.388	24.690	0.228	0.025 1	0.992	0.025 9

2.2 吸附热力学

对1、2、3号站位沉积物样品(40目)分别进行磷的吸附热力学实验.由图2可见,磷初始浓度较低时,研究范围内样品对磷的吸附存在负吸附现象,原因是天然沉积物中存在内源磷,即原先结合在沉积物上的磷(NAP),当介质中磷浓度小于某一临界值时,这部分磷就会释放进入介质,吸附等温线符合Langmuir交叉型等温式^[2].

$$Q_e = \frac{Q_m K_L (c_e - \text{EPC}_0)}{(1 + K_L c_e)(1 + K_L \text{EPC}_0)} \tag{3}$$

$$\text{NAP} = \frac{Q_m K_L \text{EPC}_0}{1 + K_L \text{EPC}_0} \tag{4}$$

式中, c_e (mg·L⁻¹)为溶液中磷的平衡浓度, Q_e (mg·g⁻¹)为磷在沉积物上的吸附容量, Q_m (mg·g⁻¹)为磷的最大吸附容量, K_L (L·mg⁻¹)为Langmuir吸附常数,反映沉积物对磷的吸附能.

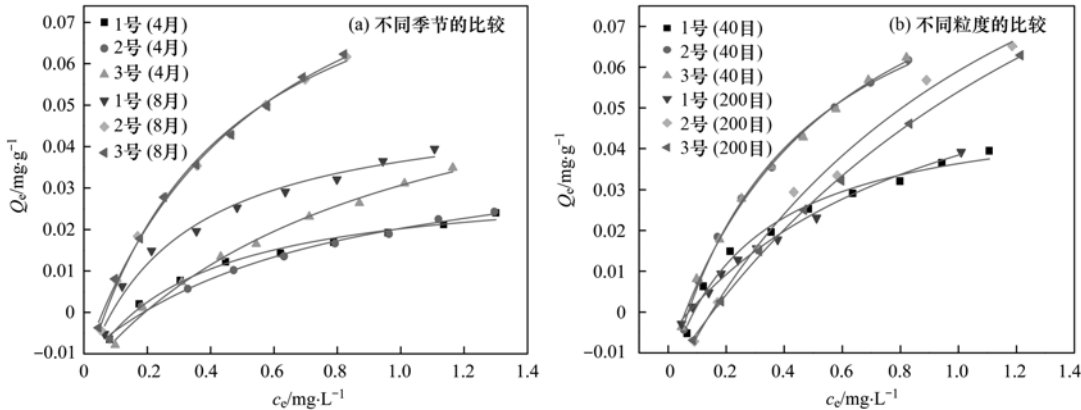


图2 不同季节、粒度的沉积物对P的吸附等温线

Fig. 2 Phosphorus sorption isotherms of different particle size fractions from various sediments in different seasons

EPC_0 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为吸附等温线与平衡浓度轴的交叉点所对应的磷平衡浓度, 即吸附/解吸平衡磷浓度。

拟合计算结果见表 3, 拟合相关系数 r^2 在 0.986 ~ 0.998 之间, 3 个站位在 4、8 月沉积物样品对磷的最大吸附量 Q_m 在 0.047 1 ~ 0.123 0 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 春、夏季均表现为 3 号站位最大, 1 号最小, NAP 值在 0.010 6 ~ 0.016 1 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, EPC_0 在 0.059 6 ~ 0.192 7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 3 个站位的 EPC_0 在春季均明显高于夏季, 且均大于相应上覆水中磷浓度 (约 0.006 5 ~ 0.058 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[5,6], 因此可以认为桑沟湾沉积物有向上覆水中释放磷的能力, 即充当“磷源”的作用, 与蒋增杰等^[5]的研究结论一致。

沉积物对磷的吸附行为受沉积物组成的影响。由 XRD 结果 (表 1) 可见, 1 号站位样品赤铁矿、黏土矿物、方解石及有机质含量相对较少, 以上组分作为沉积物中的吸附活性组分对磷的吸附性能起着重要作用, 因此可认为是导致 1 号站位的 Q_m 最小的原因之一。 Q_m 与沉积物中具有较高比表面积 Fe、Al 氧化物有密切的关系, 铁氧化物含大量的表面羟基位, 并且可以粘附于黏土矿物表面, 对磷具有较强的吸附能力^[19,20]; 黏土矿物是由硅 (铝) 氧四面体片和金属-氧 (羟基) 八面体片构成的层状结构, 表面存在大量的 Si—OH、Al—OH 等基团, 具有较大表面积, 且常带有不饱和电荷, 对水体中磷元素有较好的吸附能力^[21]; 方解石对磷的吸附作用较强且迅速^[22]。除此之外, 有机质作为沉积物重要的组

成部分, 在沉积物吸附磷的过程中也有重要作用: 腐殖质能和铁、铝形成有机无机复合体, 抑制铁、铝氧化物结晶, 从而增强对磷的吸附^[9,19], 另外有机质还可以释放出氢离子, 引起沉积物表面基团质子化而有利于磷的吸附^[23]。但由于有机质结构复杂, 除了能促进磷的吸附之外, 部分有机质也可以抑制磷的吸附, 例如富里酸聚阴离子与磷酸盐阴离子可产生吸附竞争, 促进磷的释放^[23]。

作为养殖海域的桑沟湾, 春季 (4 月) 海带、贝类处于生长阶段, 2011 年 5 月桑沟湾发生大规模赤潮, 造成海带腐烂, 贻贝、牡蛎及滩涂贝发生大规模死亡^[24]。死亡的残体、碎屑变成水体中悬浮有机颗粒物, 沉于沉积物表层, 以致本实验中 2、3 号站位夏季样品中有机质含量比春季高 (表 1), 对磷的吸附有一定的促进作用^[9,19], 另外, 生物残体中微生物的作用也是增强沉积物吸附磷的重要因素^[25], 以上可能是磷最大吸附量表现为夏季大于春季的原因之一。1 号站位在湾外, 受到海浪的不断冲击, 沉降有机颗粒发生再悬浮, 可能是导致其夏季样品中有机质含量比春季低 (表 1) 的原因。

为了了解粒度对沉积物吸附磷的影响, 选用 8 月沉积物样品, 过 200 目筛, 进行对比吸附实验 (图 2), 以 Langmuir 交叉型模型拟合的结果见表 3。各站位沉积物样品对磷的 Q_m 均表现出过 40 目筛小于过 200 目筛的沉积物样品。随着沉积物颗粒粒径的减小, 比表面增大, 可以提供大量的沉积物矿物表面, 为磷提供吸附位点, 吸附量增大^[19,26]。

表 3 4、8 月沉积物对 P 的等温吸附曲线拟合参数

Table 3 Fitted isotherm parameters of the sorption of phosphorus in April and August

目数	月份	站位	Q_m / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	K_L / $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	EPC_0 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NAP / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$Q_m\cdot K_L$ / $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$	r^2
40	4	1	0.047 1	2.895	0.158 6	0.014 8	0.136 7	0.991
		2	0.055 1	1.279	0.186 5	0.010 6	0.070 6	0.992
		3	0.088 2	1.088	0.192 7	0.015 3	0.096 0	0.996
	8	1	0.067 1	3.377	0.088 3	0.015 4	0.226 7	0.986
		2	0.116 5	2.332	0.068 8	0.016 1	0.271 7	0.998
		3	0.123 0	1.799	0.059 6	0.011 9	0.221 3	0.998
200	8	1	0.085 2	1.093	0.070 4	0.006 1	0.093 2	0.994
		2	0.169 2	0.864	0.150 0	0.019 4	0.146 2	0.993
		3	0.188 0	0.586	0.153 1	0.015 5	0.110 1	0.999

2.3 沉积物的表面酸碱性质

沉积物的表面电荷量受沉积物中铁锰氧化物、腐殖酸等组分的影响。这些成分表面所带的可离子化功能团如—OH、—SH、—COOH 等, 在水溶液中, 通过不同程度的加质子 [式 (5)] 或脱质子 [式

(6)] 反应改变沉积物的表面电荷量^[27]。

将沉积物样品看作均一表面 $\equiv\text{SOH}$, 在沉积物 $\equiv\text{SOH}$ 表面上可以发生两种反应:

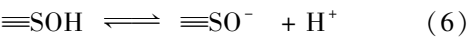
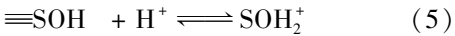


图 3 是 1、2、3 号三站沉积物样品(8 月)分别进行酸碱电位滴定所得滴定曲线及 pH- H_t 图(H_t 表示酸的总浓度). 表 4 是应用恒定容量模式(CCM), 以 FITEQL 4.0 程序对滴定曲线进行拟合的结果. 由于沉积物组成复杂, 不可能准确地区分不同表面活性位的数量, 假定极限 pH

值条件下, 所有的有效表面位被吸附的 H^+ 或 OH^- 占据, 即完全离子化, 此时吸附或释放的最大质子量即为表面羟基位浓度 H_s , 由碱返滴定的实时 Gran 图, 确定等价点处消耗碱的体积, 按照公式(7) 计算 H_s .

$$H_s = [(V_{eb2样品} - V_{eb1样品}) \times C_b] / V_0 \quad (7)$$

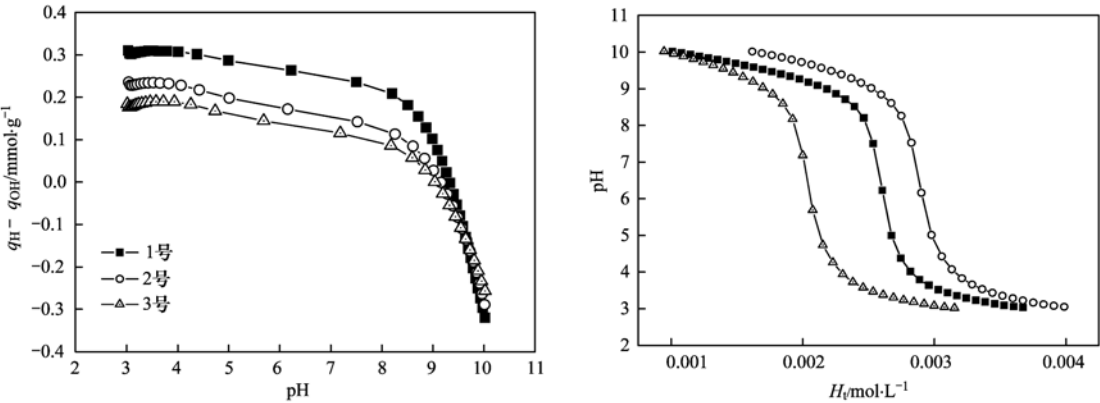


图 3 不同站沉积物样品电位滴定曲线及 pH- H_t 图

Fig. 3 Titration curves and pH vs. H_t plots of the sediments from different sites

表 4 沉积物电位滴定曲线拟合结果¹⁾

Table 4 Fitting result for titration curve of the sediments samples

站 位	$\lg K_{a1}^{int}$	$\lg K_{a2}^{int}$	pH _{PZNPC}	H_s 计算 /mmol·L ⁻¹	H_s 拟合 /mmol·L ⁻¹	WSOS/DF
1	2.362 3	-9.410 6	5.89	0.857 1	1.672	106.402
2	2.783 5	-9.238 7	6.01	0.609 6	1.127	155.125
3	2.737 6	-9.159 8	5.95	0.550 8	0.943	145.965

1) K_{a1}^{int} 表示质子化反应平衡常数, K_{a2}^{int} 表示去质子化反应平衡常数, 零净质子电荷点 $PZNPC = (\lg K_{a1}^{int} + \lg K_{a2}^{int}) / 2$ ^[28]; WSOS/DF 为拟合的总体方差

由图 3 可见, 3 个站沉积物对 pH 均表现出一定的缓冲作用, 零净质子电荷点 PZNPC 在 pH=6 左右, 在零净质子电荷点时带有一定量负电荷. pH 决定着水体中磷酸根和沉积物表面羟基的存在形态^[28,29]: pH=8 时, 沉积物表面荷负电, 表面羟基趋于脱去质子, 表面净电荷量随 1、2、3 号站依次减小, 而介质中磷酸根离子主要以 HPO_4^{2-} 形式存在 ($pK_{a1}=2.12, pK_{a2}=7.20, pK_{a3}=12.36$), 沉积物表面的负电荷会阻滞其对水体中同样荷负电的磷酸根离子的吸附, 与前文中磷吸附能力的研究结果一致. 虽然此时静电吸附难以发生, 磷酸根离子可以通过范德华力以及置换沉积物表面的羟基进行配体交换, 后者将形成单齿或双齿形态的表面络合物. K_L 随 $H_{s计算}$ 的增大而增大, 说明随着表面羟基位浓度的增大, 表面吸附活性增强, 沉积物对磷的吸附能力增强. 然而随 $H_{s计算}$ 的增大, Q_m 却没有表现出增加的趋势, 说明磷在沉积物上的吸附量除受沉积物表面

羟基位浓度影响外, 还与羟基类型等相关; 沉积物中金属氧化物的裸露晶面及晶面上金属离子的分布与配位情况影响着表面羟基的数量和类型, 进而影响其配体交换反应的活性, 对磷在沉积物上的吸附产生显著的影响. 如: 单配位羟基 Lewis 酸性比双配位羟基高、更易于参与配体交换反应, 而三配位的羟基则只具有质子酸碱反应活性^[28]. 由于沉积物中铁铝氧化物除了通过配体交换, 还可以通过范德华力等作用进行吸附, 也会导致 Q_m 随着 $H_{s计算}$ 的变化较为复杂.

2.4 沉积物中不同磷的形态

对 1、2、3 号三站 8 月沉积物原样(吸附前样品)和吸附 $16.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷溶液后样品进行磷形态分析. 由图 4 可见, 在该 3 个站原样中, 总磷(TP) 含量在 $16.12 \sim 21.12 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 其中 3 号站含量最大, 2 号最小; 作为 TP 主要部分的无机磷(IP) 占 TP 的 84%~89%. 吸附后样品中, TP 含量

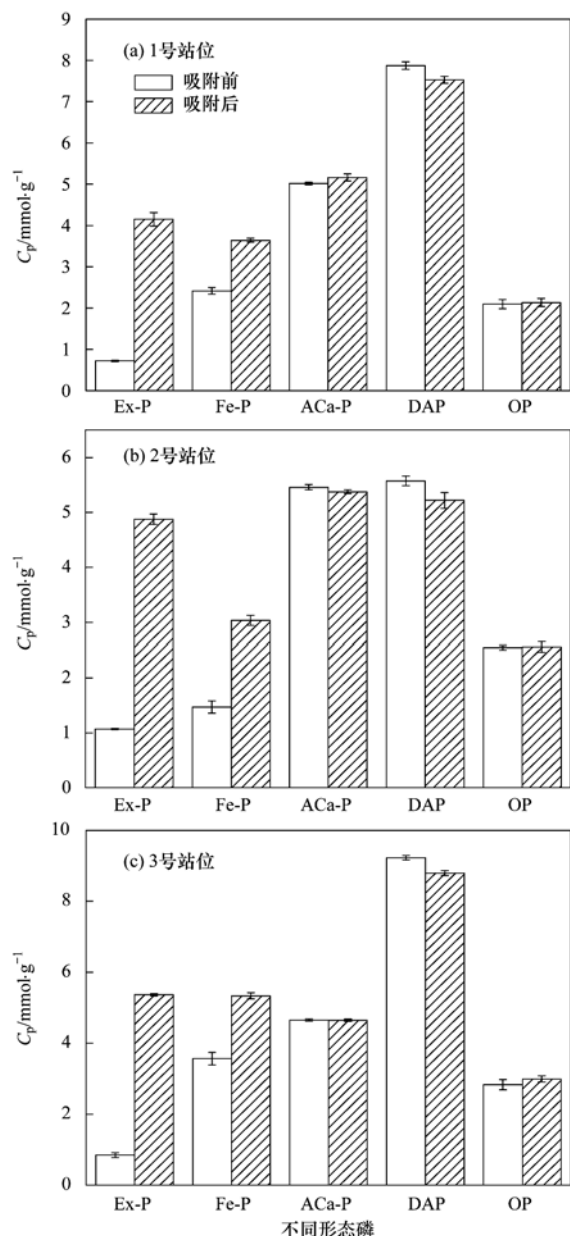


图4 不同沉积物吸附前后磷形态分布

Fig. 4 Contents of Ex-P, Fe-P, Aca-P, DAP, OP from sediments before and after adsorption

在 $21.07 \sim 27.13 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 3 号站位含量最大, 2 号最小, 其中 IP 占 TP 的 $88\% \sim 91\%$, 与原样相比, IP 含量显著增多. Ex-P 主要是指沉积物中的 Fe、Mn 氧化物或氢氧化物以及黏土矿物等颗粒表面吸附的磷, 很容易释放进入水体^[13]; 原样中 Ex-P 含量最少, 含量在 $0.72 \sim 1.07 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间; 吸附后的样品中 Ex-P 含量显著增多, 在 $4.15 \sim 5.36 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间. Fe-P 包括铁铝结合态磷和 Fe_2O_3 胶膜包裹的磷酸铁及磷酸铝 (闭蓄态磷), 亲和力较强^[13]; 原样中 Fe-P 含量在 $1.47 \sim 3.56 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 占 IP 的 $10\% \sim 20\%$, 3 号站位的 Fe-P 含量最

多, 2 号最少. 吸附后样品的 Fe-P 含量在 $3.04 \sim 5.33 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 占 IP 的 $16\% \sim 23\%$, 比吸附前有所增加. 沉积物中铁氧化物含有大量可吸附磷的活性羟基位, 沉积物中的 Fe-P 被认为比其它自生矿物 (如碳酸氟磷灰石) 结合 P 更容易转化, 在吸附过程中具有重要作用^[13,30].

ACa-P 是指自生成因和生物成因的自生磷灰石磷, 以及与自生碳酸钙共同沉淀的磷 (包括生物残骸), 或者沉积物早期成岩过程中内生过程形成或生物成因的钙结合态磷^[14]; 3 个站位原样中所含 Aca-P 相差不大. DAP 主要来源于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑等^[14]; 3 号站位沉积物原样含 DAP 最多, 2 号最少. 吸附前后 Aca-P 与 DAP 的含量变化不大. OP 主要来自陆源排放物质及海洋浮游生物的排泄物或死亡残体, 该部分磷一般不能被植物利用. 3 号站位含 OP 稍高一些, 1 号最少, OP 与有机质含量及种类有密切的联系.

吸附磷前后的沉积物相比, 吸附后样品中 Ex-P、Fe-P 含量明显增多, 其中 Ex-P 含量变化最大, 占总磷变化量的 $75\% \sim 77\%$, 表明吸附到沉积物中的磷主要以 Ex-P、Fe-P 的形式呈现. Ex-P 容易在沉积物表面进行可逆性的吸附和解吸, Ex-P 的形成主要通过物理吸附为主, 过程迅速且可逆, Fe-P 主要是通过化学吸附, 这种吸附一般不可逆, 由此可见, 研究范围内, 沉积物对磷的吸附中物理吸附和化学吸附同时存在, 但物理吸附为主.

3 结论

(1) 桑沟湾表层沉积物对磷的吸附可用快慢二段一级动力学方程描述, 等温线符合 Langmuir 交叉式; 夏季沉积物样品的 Q_m 大于春季样品, 粒径较小的沉积物吸附能力较强.

(2) 1、2、3 号站位沉积物样品的表面电荷量依次减少. 随表面电荷量的减少, Q_m 增大, K_L 随表面羟基位浓度的增大而增大. 沉积物表面羟基位的数量影响表观吸附量, 表面位点的类型等由于反应活性的差异对吸附能力也有重要的作用.

(3) 3 个站位不同形态磷的含量不同, 受所处地域的影响. 原样中总磷 (TP) 含量在 $16.12 \sim 21.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, IP 占 TP 的 $84\% \sim 89\%$. 吸附磷后的样品与原样比较, 吸附后的样品中 Ex-P、Fe-P 含量明显增多, 其中 Ex-P 含量变化最大, 沉积物对磷的吸附过程中, 物理吸附和化学吸附同时存在, 以物理吸附为主.

参考文献:

- [1] Jalali M, Peikam E N. Phosphorus sorption-desorption behaviour of river bed sediments in the Abshineh river, Hamedan, Iran, related to their composition[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 537-552.
- [2] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 38-43.
- [3] 孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物-水界面扩散通量研究[J]. *海洋学报*, 2010, **32**(6): 108-117.
- [4] 蔡立胜, 方建光, 董双林. 桑沟湾养殖海区沉积物-海水界面氮、磷营养盐的通量[J]. *海洋水产研究*, 2004, **25**(4): 57-64.
- [5] 蒋增杰, 王光花, 方建光, 等. 桑沟湾养殖水域表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3405-3409.
- [6] 万玲. 春季桑沟湾海域贝类养殖营养盐对海水中营养盐的影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(6): 62-66.
- [7] 杨茜, 杨庶, 宋娴丽, 等. 桑沟湾夏、秋季悬浮颗粒物的沉降通量及再悬浮的影响[J]. *海洋学报*, 2014, **36**(12): 85-90.
- [8] Zhu H W, Wang D Z, Cheng P D, *et al.* Effects of sediment physical properties on the phosphorus release in aquatic environment [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(2): 1-8.
- [9] Wang S R, Yi W L, Yang S W, *et al.* Effects of light fraction organic matter removal on phosphate adsorption by lake sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(3): 286-292.
- [10] Wei S Y, Tan W F, Liu F, *et al.* Surface properties and phosphate adsorption of binary systems containing goethite and kaolinite[J]. *Geoderma*, 2014, **213**: 478-484.
- [11] Jin X D, He Y L, Kirumba G, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River estuary reservoir [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **55**: 62-66.
- [12] Peryer-Fursdon J, Abell J M, Clarke D, *et al.* Spatial variability in sediment phosphorus characteristics along a hydrological gradient upstream of Lake Rotorua, New Zealand [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(4): 1573-1585.
- [13] 朱媛媛. 东、黄海沉积物中各形态磷的分布特征及其生物地球化学初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [14] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(7): 1460-1482.
- [15] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, **254**(1-3): 241-248.
- [16] GB 17378. 4-2007, 中华人民共和国国家标准海洋监测规范第4部分: 海水分析[S].
- [17] 江永春, 吴群河. 磷的沉积物-水界面反应[J]. *环境技术*, 2003, (增刊): 16-19.
- [18] Lookman R, Freese D, Merckx R, *et al.* Long-term kinetics of phosphate release from soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(6): 1569-1575.
- [19] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, *et al.* Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **128**(2-3): 95-105.
- [20] Brinkman A G. A double-layer model for ion adsorption onto metal oxides, applied to experimental data and to natural sediments of Lake Veluwe, The Netherlands[J]. *Hydrobiologia*, 1993, **253**(1-3): 31-45.
- [21] 张宪伟, 潘刚, 王晓丽, 等. 内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 172-177.
- [22] Sørensen H U, Postma D, Jakobsen R, *et al.* Sorption of phosphate onto calcite; results from batch experiments and surface complexation modeling[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, **75**(10): 2911-2923.
- [23] 赵海超, 王圣瑞, 张莉, 等. 有机质含量及其组分对洱海沉积物磷吸附-释放影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2346-2354.
- [24] 张继红, 王巍, 韩婷婷, 等. 桑沟湾春季营养盐分布特征及赤潮暴发诱因[J]. *水产学报*, 2012, **36**(1): 132-139.
- [25] Jin C W, Du S T, Dong W Y, *et al.* Aquatic plant debris improve phosphorus sorption into sediment under anoxic condition [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(11): 8237-8244.
- [26] Fan J Y, He X Y, Wang D Z. Experimental study on the effects of sediment size and porosity on contaminant adsorption/desorption and interfacial diffusion characteristics[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, **25**(1): 20-26.
- [27] 汤鸿霄. 环境水质学的进展——颗粒物与表面络合(上)[J]. *环境科学进展*, 1993, **1**(1): 25-41.
- [28] Yang X F, Wang D S, Sun Z X, *et al.* Adsorption of phosphate at the aluminum (hydr) oxides-water interface: Role of the surface acid-base properties [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, **297**(1-3): 84-90.
- [29] Jalali M, Matin N H. Sorption of phosphorus in calcareous paddy soils of Iran: effects of soil/solution ratio and pH [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(5): 2047-2059.
- [30] Huerta-Diaz M A, Tovar-Sánchez A, Filippelli G, *et al.* A combined CDB-MAGIC method for the determination of phosphorus associated with sedimentary iron oxyhydroxides[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, **20**(11): 2108-2115.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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