

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜巨昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岫璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析

刘涛¹, 胡志新¹, 杨柳燕¹, 肖琳^{1*}, 席北斗², 许其功²

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210046; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 为了探索湖泊沉积物对上覆水中氮磷营养盐特别是磷(P)浓度的影响, 研究了江苏西部 10 个湖泊沉积物 P 形态、吸附解吸作用和间隙水、上覆水之间扩散通量。对 P 形态的分级提取研究表明, 各湖泊沉积物中 P 以无机磷为主, 无机磷中生物可利用 P 占总磷(TP)比例较低。与苏北西部湖泊相比, 苏南西部湖泊沉积物中 Fe-P 含量相对较高。江苏西部湖泊沉积物中氮主要以 NH_4^+ -N 扩散为主, 且大部分湖泊氮由上覆水向沉积物扩散, 而洪泽湖、石臼湖和玄武湖 NO_3^- -N 由沉积物向上覆水扩散。偏酸(pH < 4)和偏碱(pH > 10)条件下均有利于湖泊沉积物 P 的释放, 除玄武湖外, 其他湖泊在偏碱条件下 P 的释放量大于偏酸条件。沉积物对 P 吸附量随着温度的升高而增大, 通过修正的 Langmuir 方程对湖泊沉积物磷吸附等温线进行拟合得到最大吸附量(Q_m)、Langmuir 吸附常数(k)与原有吸附态 P(Q_{NAP})参数, 结果显示洪泽湖和玄武湖沉积物对 P 的最大吸附量较小, 较易发生内源 P 释放。

关键词: 沉积物; 磷形态; 扩散通量; 释放; 吸附

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3057-07

Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province

LIU Tao¹, HU Zhi-xin¹, YANG Liu-yan¹, XIAO Lin¹, XI Bei-dou², XU Qi-gong²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: To probe the effect of nitrogen and phosphorus (P) in sediment on aqueous nutrient concentrations, forms of phosphorus, sediment water interface diffusion fluxes and phosphorus release and adsorption of 10 lakes in the west Jiangsu province were studied. Sediments were sequentially extracted by the modified Ruttenberg's method, and the result showed that inorganic phosphorus in sediments of the lakes was the major fraction of total phosphorus, but the proportion of bioavailable phosphorus was relatively low. Compared with the lakes in northern Jiangsu, the Fe-P was relatively high in sediments of lakes in southern Jiangsu. The diffusion fluxes of lakes were mainly based on NH_4^+ -N diffusion in the west Jiangsu, and ions of most of lakes diffused from overlying water to sediment, NO_3^- -N diffused from sediment to overlying water in lakes except for Lake Hongze, Lake Shijiu and Lake Xuanwu. The condition leaning to acidic (pH < 4) or alkaline (pH > 10) was beneficial to phosphorus release, and except for Lake Xuanwu, the least amount of phosphorus released from sediment was higher in acidic condition than that in alkaline condition. The amount of phosphorus adsorption was increasing with temperature increase. Considering the phosphorus adsorption on native phosphorus polluted (NAP-polluted) sediments. All data of P adsorption on sediment samples collected from 7 lakes were fitted to the modified Langmuir model. And the values of the maximum adsorption capacity (Q_m), phosphorus binding constant (k), native adsorbed exchangeable phosphorus (Q_{NAP}), were subsequently obtained. The results showed that the adsorption amount of P in Lake Hongze and Lake Xuanwu was relatively low, which were liable to release P from sediments.

Key words: sediment; phosphorus forms; diffusion fluxes; release; adsorption

近几十年来,我国湖泊富营养化日趋严重,沉积物是湖泊主要的营养盐储存库,在一定条件下,沉积物中的营养盐向上覆水释放。当外源氮磷输入得到有效控制后,湖泊沉积物内源氮磷释放将成为影响湖泊富营养化状态的关键因素^[1,2]。磷(P)是湖泊水体富营养化的重要控制元素之一,湖泊沉积物对 P 的吸附与解吸作用使之成为上覆水 P 的“汇”或者“源”^[3,4]。关于江苏湖泊沉积物 P 形态,已在若干湖泊有所研究,但多为江苏南部富营养化较严重

的湖泊^[5,6]。沉积物-水界面营养元素的扩散对于水环境中氮磷的循环具有非常重要的作用,营养元素的交换和扩散对上覆水的水质具有重要的影响^[7]。影响 P 在沉积物上吸附与释放过程的因素很

收稿日期: 2011-11-19; 修订日期: 2012-01-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001)

作者简介: 刘涛(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: leotorres@126.com

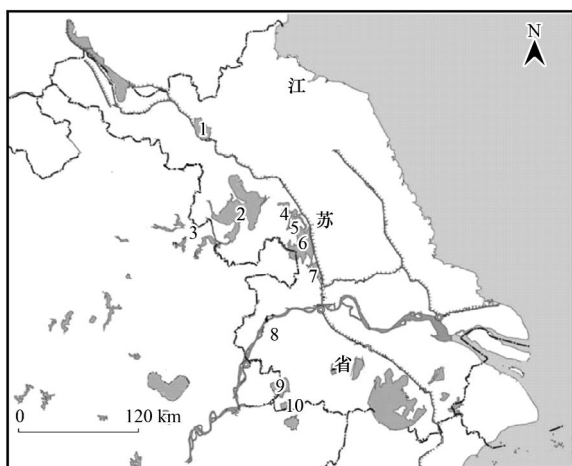
* 通讯联系人, E-mail: xiaolin@nju.edu.cn

多^[8,9],主要包括沉积物性质、P 赋存形态和环境条件(温度、pH、水力条件等)等^[10],沉积物 P 的赋存形态直接决定着参与吸附与释放过程的有效磷含量. 江苏是我国淡水湖泊分布最集中的省区之一,境内水网纵横,有大小湖荡 200 余个,湖泊面积占全省国土面积 6%,居全国首位^[11]. 本研究于 2011 年 2、5 和 7 月对江苏 10 个湖泊进行水环境与沉积物成分分析,探索不同湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力之间的差异性,以期对不同湖泊制定湖泊营养盐水环境基准和标准提供基础数据.

1 方法与材料

1.1 研究区域

本次调查的江苏西部湖泊一共有 10 个,以长江为界,位于苏北的湖泊有骆马湖、洪泽湖、天岗湖、白马湖、宝应湖、高邮湖和邵伯湖;位于苏南的湖泊分别为玄武湖、石臼湖和固城湖(见图 1). 在湖泊水环境调查过程中,根据湖泊功能与面积大小,洪泽湖设置 9 个采样点,固城湖设置 4 个采样点,高邮湖、玄武湖与石臼湖各设置 3 个采样点,白马湖与骆马湖各设置 2 个采样点,邵伯湖、宝应湖与天岗湖各设置 1 个采样点.



1. 骆马湖; 2. 洪泽湖; 3. 天岗湖; 4. 白马湖; 5. 宝应湖;
6. 高邮湖; 7. 邵伯湖; 8. 玄武湖; 9. 石臼湖; 10. 固城湖

图片来自国家测绘局,审图号为 GS(2008)1382 号

图 1 江苏省西部湖泊分布示意

Fig. 1 Distribution of lakes in the west Jiangsu province

1.2 研究方法

湖泊上覆水样品采集后装于聚乙烯塑料瓶中,经 Millipore 0.45 μm PES 微孔滤膜过滤后测定. 沉积物采自表层 0 ~ 7 cm,一部分沉积物用柱状采样器采集,在 4 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 15 min,经 0.45 μm

滤膜过滤用于间隙水测定,另一部分在阴凉处风干过 100 目筛用于沉积物无机磷形态分析和 P 释放与吸附试验.

间隙水主要测定 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 与 PO_4^{3-} -P 营养盐浓度,用铈-镉还原法和分光光度法测定 NO_3^- -N,用靛蓝比色法测定 NH_4^+ -N,用磺胺和盐酸萘乙二胺法测定 NO_2^- -N,用钼锑抗分光光度法测定 PO_4^{3-} -P^[12].

1.3 沉积物性质测定

1.3.1 沉积物含水率、容重、孔隙度的测定

采用烘干法在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下对沉积物进行干燥至 2 次测量重量相一致为止,含水率(见表 1)为沉积物烘干前后质量差值与原有湿沉积物质量的比值. 沉积物密度为单位体积的固体土粒质量与同体积的水质量之比. 容重采用环刀法测定. 利用柱状采样器,采集表层沉积物柱样,保持原始结构不被破坏,将湿沉积物填满容积为 100 cm^3 的钢制环刀,容重为干沉积物的质量与小环体积的比值,干沉积物质量利用含水率得出. 孔隙度按下式计算^[13,14]:

$$\text{孔隙度}(\%) = \left(1 - \frac{\text{容重}}{\text{密度}}\right) \times 100\%$$

1.3.2 有机质的测定

过筛后沉积物样品在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下灼烧 2 h 计算差值为有机质含量^[15]. 各湖泊沉积物的有机质含量见表 1.

1.3.3 孔隙水扩散通量模型

如果只考虑沉积物-上覆水界面处的营养盐交换通量,通过表层沉积物的氮磷扩散通量就可运用 Fick 第一定律来求得沉积物-上覆水界面处的交换通量^[16,17]:

$$F = \varphi D_s \delta_c / \delta_x$$

式中, F 为沉积物-水界面营养盐扩散通量 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; φ 为孔隙度; δ_c / δ_x 为界面浓度梯度,用表层间隙水与上覆水浓度的差分进行计算. D_s 为考虑了沉积物弯曲效应的实际分子扩散系数, Ullman 等^[18]曾经给出了真实扩散系数 D_s 与孔隙度 φ 之间的经验关系式: $D_s = \varphi^n D_0$ ($\varphi < 0.7$ 时, $n = 1$, 当 $\varphi \geq 0.7$ 时, $n = 2$), D_0 为 25 $^{\circ}\text{C}$ 理想溶液的扩散系数^[19]. Li 等^[20]认为,在 0 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内自由粒子的扩散系数与水的黏度有关,可用 Stokes-Einstein 关系式表示:

$$(D_0 \eta_0 / T)_{T1} = (D_0 \eta_0 / T)_{T2}$$

式中, η_0 为水的黏度; T 为绝对温度,下标 $T1$ 和 $T2$ 表示不同温度条件下的取值. 对于扩散比氟离子快

表 1 江苏西部湖泊常规理化指标
Table 1 Physicochemical parameters in sediments of the lakes in the west Jiangsu province

湖泊	上覆水温度/℃	上覆水 pH	上覆水盐度/g·L ⁻¹	沉积物含水率/%	沉积物有机质/% ¹⁾
骆马湖	31.12±0.27	8.69±0.09	0.38±0.00	50.16±1.51	14.29±5.92
洪泽湖	31.67±0.53	8.55±0.21	0.26±0.05	40.77±3.60	8.00±0.60
天岗湖	33.17±0.05	8.92±0.05	0.23±0.00	32.96±0.05	17.03±5.54
白马湖	33.76±0.29	8.44±0.22	0.21±0.01	75.90±4.69	17.13±2.41
宝应湖	33.17±0.05	7.56±0.05	0.24±0.00	70.94±0.05	14.02±0.33
高邮湖	32.60±0.81	8.61±0.11	0.18±0.00	50.48±10.40	11.96±2.54
邵伯湖	29.30±0.05	6.87±0.05	0.16±0.00	76.20±0.05	5.60±0.57
玄武湖	31.93±0.10	9.21±0.40	0.11±0.01	47.56±5.00	9.96±4.78
石臼湖	32.53±0.27	8.71±0.20	0.10±0.00	66.57±7.38	11.06±4.06
固城湖	32.34±0.22	8.01±0.14	0.10±0.00	64.16±14.79	13.04±1.38

1) 有机质含量为 2、5 与 7 月平均值,其他指标均为 7 月平均值

的离子关系式可简化为:

$$(D_0\eta_0)_{t_1} = (D_0\eta_0)_{t_2}$$

根据上述公式可求出不同温度下的 D_0 与 D_s 值.

1.3.4 沉积物磷释放与吸附

(1) pH 对沉积物 P 释放的影响

取 0.2 g 风干研磨后的沉积物样品放入 50 mL 离心管中,加入约 40 mL 去离子水. 为向各离心管中加入 NaOH 溶液或 HCl 溶液使 pH 调为 2、4、6、8、10 和 12. 以 0.04 mol·L⁻¹ NaCl 溶液调节离子强度为各湖泊盐度,各湖泊盐度见表 1. 加入 1 滴 1% 氯仿作为抑菌剂^[21]. 补充去离子水使最终溶液体积为 40 mL,放入振荡器恒温(20℃)振荡 48 h. 离心,取上清液测定 P 的平衡浓度.

(2) 温度对 P 吸附影响模拟试验

取 0.5 g 风干研磨后的沉积物样品放入 50 mL 离心管中,P 浓度梯度设为 0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 和 10.0 mol·L⁻¹. 以 0.04 mol·L⁻¹ NaCl 溶液调节离子强度为各湖泊盐度(见表 1). 加入 1 滴 1% 氯仿作为抑菌剂. 最终离心管中溶液的体积均为 40 mL. 分别在 5、20 和 30℃ 振荡 48 h. 平衡后将悬浊液离心,取上清液测定 P 的平衡浓度.

2 结果和讨论

2.1 江苏西部湖泊沉积物磷形态分析

湖泊沉积物中主要分为无机磷和有机磷(Or-P). 无机磷又分为交换态磷(Ex-P)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、自生钙磷(ACa-P)和碎屑钙磷(De-P). 相对 Oc-P、ACa-P 和 De-P,Ex-P、Al-P 和 Fe-P 较容易被生物利用,称为“活性磷”^[5]. 对于沉积物中无机磷的提取方法,朱广伟^[5]、李悦^[22]等改进了 Ruttenberg^[23]提出的磷提

取方法,使无机磷提取方法更有目的性,本研究采用改进的方法进行沉积物磷形态的分析.

2011 年 2、5 和 7 月对江苏西部湖泊沉积物中各形态 P 进行了分析,其结果见表 2. 从中可以看出,各湖泊沉积物中无机磷含量较高,在无机磷中 Oc-P 的含量最高,其次是 De-P 与 ACa-P. 江苏西部各湖泊沉积物中生物可直接利用的活性磷所占比例不高,均不超过 10%. 与苏北湖泊比较,苏南 3 个湖泊(玄武湖、石臼湖和固城湖)沉积物中活性磷比例略高. 相比其他形态 P,Ex-P 较易被水生植物利用,因此,一般情况下,草型湖泊的 Ex-P 含量较低,从测定的结果来看,骆马湖、高邮湖、石臼湖与固城湖等草型湖泊显示了较低的 Ex-P 含量;但草型湖泊白马湖却显示较高的 Ex-P 含量,可能原因为白马湖水生植物腐烂较多,释放的 Ex-P 较多,也有可能是受其他环境因素影响,江苏西部湖泊大部分与江河相连,Ex-P 含量可能受江河的影响. 但总的来看,水生植物是影响湖泊 Ex-P 含量的重要因素之一^[5]. 从江苏北部到南部,各湖泊沉积物中 Fe-P 含量基本呈现增加的趋势,原因可能为苏南土壤呈酸性,利于铁离子的形成,土壤中铁离子通过地表径流等途径进入湖泊随后沉积,造成苏南 3 个湖泊的 Fe-P 含量大大高于苏北湖泊. ACa-P 主要反映了沉积物中动物残体引入的 P,比如鱼类、贝类和螺类等水生动物死亡残体引入的钙磷,白马湖与高邮湖 ACa-P 含量高于其他湖泊,主要原因为 2 个湖泊内围网养殖量较大^[24],从现场监测的结果来看,2 个湖泊沉积物中贝类与螺类较多. 虽然各湖泊沉积物中 Or-P 含量较低,较难为水生植物与藻类利用,但目前也有较多学者研究证明 Or-P 在沉积物中扮演了重要角色^[25],通过磷酸酶的水解与微生物作用,也会被水生植物吸收^[26, 27].

表 2 江苏西部湖泊沉积物磷形态/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Table 2 Forms of phosphorus in sediment of lakes in the west Jiangsu province/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

湖泊	Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	ACa-P	De-P	Or-P	活性磷所占 质量分数/%
骆马湖	4.21	6.23	2.69	494.05	64.00	95.61	136.89	1.63
洪泽湖	24.86	7.31	8.97	430.68	67.12	210.43	147.96	4.58
天岗湖	8.76	5.09	3.71	68.31	59.59	118.90	102.02	4.80
白马湖	18.02	7.50	3.19	306.75	108.52	171.99	157.36	3.71
宝应湖	12.86	5.00	10.98	209.77	61.15	172.82	198.60	4.30
高邮湖	7.64	7.05	2.57	304.52	75.56	204.09	143.26	2.32
邵伯湖	10.58	5.42	22.05	170.61	37.79	252.22	162.98	5.75
玄武湖	18.00	7.61	79.52	481.77	46.33	312.24	170.72	9.42
石臼湖	0.79	8.22	51.36	301.78	58.41	218.68	103.41	8.13
固城湖	1.19	7.61	41.40	309.59	67.34	93.56	216.22	6.81

2.2 江苏西部各湖泊扩散通量

江苏西部各湖泊沉积物中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 与 PO_4^{3-} -P 扩散通量分别为 $-7.22 \sim 10.11$ 、 $31.30 \sim 952.76$ 、 $0.20 \sim 23.54$ 与 $2.06 \sim 62.77$ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ (表 3)。可以看出,江苏西部各湖泊沉积物中氮的扩散主要以 NH_4^+ -N 为主, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 与 PO_4^{3-} -P 扩散方向均是由沉积物向上覆水中扩散,除洪泽湖、石臼湖和玄武湖中 NO_3^- -N 由上覆水

向沉积物中扩散外,其他湖泊均由沉积物向上覆水扩散。不同湖泊沉积物营养盐扩散通量不同,白马湖沉积物营养盐扩散通量较高。7 月湖泊底层温度高加速了有机物的降解,使沉积物中溶解氧浓度下降,有机物发生厌氧分解,分解产物为 CO_2 和 NH_4^+ 等。从沉积物现场分析来看,扩散通量较高的湖泊沉积物明显呈灰黑色,有机质含量较高,而扩散通量较低的湖泊沉积物则呈土黄色,有机质含量较低。

表 3 江苏西部湖泊沉积物营养盐扩散通量/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ Table 3 Nutrient fluxes in the sediment-water interface of lakes in the west Jiangsu province/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

湖泊	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	PO_4^{3-} -P
骆马湖	4.26 ± 1.21	52.86 ± 52.31	0.79 ± 0.42	3.48 ± 3.45
洪泽湖	-7.22 ± 5.62	31.30 ± 34.52	1.74 ± 1.11	2.06 ± 2.27
白马湖	7.63 ± 0.41	952.76 ± 345.58	23.54 ± 17.07	62.77 ± 22.77
高邮湖	10.11 ± 2.04	100.70 ± 92.35	0.42 ± 0.46	6.63 ± 6.08
玄武湖	-4.98 ± 0.05	166.08 ± 0.05	3.03 ± 0.05	10.94 ± 0.05
石臼湖	-1.42 ± 7.63	275.84 ± 130.52	0.31 ± 0.00	16.49 ± 10.98
固城湖	1.78 ± 4.79	322.41 ± 166.55	0.20 ± 0.11	17.52 ± 6.73

2.3 不同 pH 对沉积物 P 释放的影响

在 25°C 环境条件下不同 pH 对江苏西部 7 个湖泊沉积物中磷释放的影响见图 2,从中可以发现,较高或者较低的 pH 有利于沉积物 P 的释放,pH 直接影响沉积物磷的吸附和离子交换作用^[28]。在酸性条件下,沉积物 P 发生溶解,形成磷酸根。在中性条件下,沉积物中 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 易于与沉积物中重金属结合而被吸附。在碱性条件下,P 的释放以离子交换为主,体系中 OH^- 与 Fe-P、Al-P 中的磷酸盐发生交换,使磷酸盐的解析过程增强,增加了沉积物中 P 向上覆水释放的速率。但不同湖泊沉积物 P 的释放对 pH 变化响应优势有差异,在较低的 pH 下玄武湖沉积物 P 释放大于较高 pH 的环境,其他湖泊均呈现为较高 pH 对沉积物 P 释放影响大于较低 pH 环境条件,因此,中性范围沉积物 P 释放量最小,

酸性条件能促进 P 释放,碱性条件能大幅度提高 P 的释放量^[29]。在富营养化湖泊中,藻类大量繁殖时湖水 pH 值高,由于藻类繁殖,光合作用增强,水中 CO_2 减少,改变水中 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 的平衡,使水体 pH 值可升至 10,甚至更高^[30]。在湖泊沉积物中磷与 Fe、Al 盐发生相互作用,其中 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 对磷的吸附作用尤为重要,这种吸附作用明显受到 pH 的影响。低 pH 值时,溶解性的 H_2PO_4^- 含量增多,有利于沉积物中 P 的释放;在高 pH 值时,由于 OH^- 与铁铝氧化物表面对磷酸根吸附力降低, OH^- 更易占据矿物表面的吸附位,使沉积物中的 P 释放出来^[31]。

2.4 温度对沉积物磷吸附的影响

描述吸附等温线的模型主要有 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 方程等。Langmuir 吸附模型被

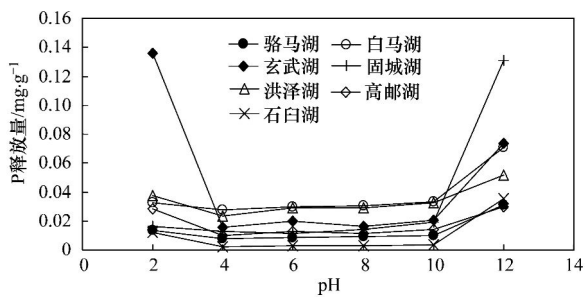


图2 pH对于江苏西部湖泊沉积物磷释放的影响
Fig. 2 Effects of pH on P release from the sediment samples from the west Jiangsu province

广泛用于描述磷在黏土矿物上吸附. 对均匀表面的单分子层吸附,Langmuir 方程可表示为:

$$Q = \frac{Q_m \cdot c}{k + c}$$

式中, Q 为吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), c 为平衡浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Q_m 为最大吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), k 为吸附常数 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 但在描述 P 在已含有 P 污染的天然沉积物上吸附时,简单的 Langmuir 方程则忽略了已吸附在沉积物上的可交换态 P. 因此,很多研究者对 Langmuir 方程进行修正,将原有吸附态 P 考虑到

吸附过程中. 其中,Zhou 等^[32]修正 Langmuir 方程后的表达式为:

$$Q = \frac{Q_m \cdot c}{k + c} - \left[\frac{Q_m \cdot c_0}{k + c_0} + c_0 \cdot V/w \right]$$

式中, V 是溶液的体积 (L); k 是吸附平衡常数 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Q_m 指最大吸附容量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); c_0 指初始 P 浓度为 0 时溶液中 P 平衡浓度; w 为沉积物干重 (g). 湖泊沉积物中原有吸附态 P (Q_{NAP}) 可由以下公式得出:

$$Q_{\text{NAP}} = \frac{Q_m \cdot c_0}{k + c_0} + c_0 \cdot V/w$$

EPC_0 (临界 P 平衡浓度) 是指吸附试验中所加入的初始可交换态 P,从表观上看在沉积物表面未发生吸附,同时也没有 P 从沉积物表面解吸,即体系处于动态平衡时溶液中 P 的浓度. 当 $c = c_{\text{add}} = \text{EPC}_0$, c_{add} 指吸附试验中加入 P 的初始浓度, EPC_0 可由以下公式得出^[33]:

$$\text{EPC}_0 = c = \frac{k \cdot Q_m \cdot c_0 / (k + c_0) + k \cdot c_0 \cdot V/w}{k \cdot Q_m / (k + c_0) - c_0 \cdot V/w}$$

利用修正的 Langmuir 方程对不同温度下 7 个湖泊沉积物磷吸附等温线进行拟合(表 4),可以发

表 4 不同温度下 Langmuir 修正方程拟合的湖泊沉积物磷吸附等温线参数

Table 4 Parameters of phosphorus adsorption isotherm under different temperature conditions						
湖泊	温度/℃	$Q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k	$\text{EPC}_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$Q_{\text{NAP}}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2
骆马湖	5	0.426	0.856	0.034	0.016	0.957
	20	0.639	1.098	0.039	0.022	0.963
	30	0.737	2.486	0.116	0.033	0.991
洪泽湖	5	0.250	0.784	0.141	0.038	0.994
	20	0.330	0.874	0.155	0.050	0.996
	30	0.382	0.977	0.157	0.052	0.999
白马湖	5	0.316	0.654	0.172	0.052	0.993
	20	0.393	0.926	0.190	0.074	0.998
	30	0.409	1.231	0.202	0.085	0.996
高邮湖	5	0.354	0.841	0.029	0.012	0.999
	20	0.487	0.987	0.039	0.014	0.994
	30	0.508	1.547	0.044	0.019	0.994
玄武湖	5	0.210	0.613	0.049	0.011	0.987
	20	0.215	1.089	0.063	0.016	0.990
	30	0.284	1.113	0.069	0.025	0.993
石臼湖	5	0.310	0.680	0.011	0.005	0.986
	20	0.314	1.017	0.017	0.005	0.992
	30	0.406	1.389	0.020	0.008	0.982
固城湖	5	0.373	0.889	0.014	0.006	0.979
	20	0.560	0.943	0.016	0.006	0.990
	30	0.581	1.728	0.018	0.009	0.997

现,在 5~30℃ 之间,各湖泊沉积物对 P 的最大吸附量和吸附常数随温度升高而增大,骆马湖、洪泽湖、白马湖、高邮湖、玄武湖、石臼湖和固城湖沉积物对磷最大吸附量分别为 0.426~0.737、0.250~

0.282、0.316 ~ 0.409、0.354 ~ 0.508、0.210 ~ 0.284、0.310 ~ 0.406 和 0.373 ~ 0.581 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。通过 EPC_0 与间隙水中可交换态 P 浓度比较,可以推断沉积物中磷是“源”还是“汇”,当间隙水中 P 浓度大于 EPC_0 时,沉积物就会吸收水体中磷,沉积物充当“汇”的角色,反之,则沉积物释放磷,充当“源”的角色^[33]。洪泽湖与高邮湖的 EPC_0 大于间隙水 P 浓度(分别为 0.130 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 0.031 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),因此,洪泽湖与高邮湖较易发生 P 的释放。骆马湖在温度较高时易发生 P 的释放造成二次污染。江苏西部各湖泊沉积物原有吸附态磷 Q_{NAP} 值相差较大,与其他湖泊相比,江苏西部的石臼湖和固城湖 Q_{NAP} 较小,只有 0.005 ~ 0.009 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

3 结论

(1)与其他江苏西部湖泊(洪泽湖、邵伯湖与玄武湖)相比,江苏西部草型湖泊沉积物有机质含量较高。所有湖泊沉积物中生物较易利用的活性 P 含量不高,苏南西部湖泊沉积物中 Fe-P 含量明显高于苏北西部湖泊。白马湖和高邮湖围网养殖量较大,造成 A Ca-P 含量较高。

(2)各湖泊沉积物中扩散的营养盐主要以 NH_4^+ -N 形态为主,在洪泽湖、石臼湖和玄武湖中 NO_3^- -N 由沉积物向上覆水扩散,而其他湖泊营养盐均为由上覆水向沉积物扩散。

(3)湖泊上覆水 pH 值影响沉积物中 P 的释放。中性条件下 P 释放量最低,偏酸和偏碱条件下有利于沉积物 P 的释放。

(4)从江苏湖泊沉积物最大吸附量与沉积物 TP 含量比较来看,江苏西部湖泊沉积物中 P 含量均未达到最大吸附量,而洪泽湖与玄武湖沉积物中 TP 含量与最大吸附量较接近,较易发生营养盐内源释放,因此江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力具有区域差异性。

参考文献:

- [1] 古小治, 张雷, 柏祥, 等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 939-945.
- [2] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(S2): 33-44.
- [3] Slomp C P, Malschaert J F P, Van Raaphorst W. The role of adsorption in sediment-water exchange of phosphate in North Sea continental margin sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(5): 832-846.
- [4] Lopez P, Lluch X, Vidal M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic Islands (Spain) related to their composition[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, **42**(2): 185-196.
- [5] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 381-388.
- [6] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. 地球化学, 2004, **33**(4): 423-432.
- [7] Callender E, Hammond D E. Nutrient exchange across the sediment-water interface in the Potomac River estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982, **15**(4): 395-413.
- [8] Huang Q H, Wang L, Wang Z J. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 199-206.
- [9] 潘成荣, 张之源, 叶琳琳, 等. 环境条件变化对瓦埠湖沉积物磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(6): 148-152.
- [10] 吴根福, 吴雪昌, 金承涛, 等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(2): 107-110.
- [11] 中国科学院南京地理研究所湖泊室. 江苏湖泊志[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-281.
- [13] 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, 1999. 269.
- [14] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996. 5.
- [15] Jensen H S, Kristensen P, Jeppesen E, et al. Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 1992, **235/236**(1): 731-743.
- [16] Teasdale P R, Batley G E, Apte S C, et al. Pore water sampling with sediment peepers [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1995, **14**(6): 250-256.
- [17] Roychoudhury A N. Spatial and seasonal variations in depth profile of trace metals in saltmarsh sediments from Sapelo Island, Georgia, USA[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, **72**(4): 675-689.
- [18] Ullman W J, Sandström M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, Central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1987, **24**(3): 289-303.
- [19] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1997. 65.
- [20] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1974, **38**(5): 703-714.
- [21] Detenbeck N E, Brezonik P L. Phosphorus sorption by sediments from a soft-water seepage lake. 1. An evaluation of kinetic and equilibrium models[J]. Environmental Science and Technology, 1991, **25**(3): 395-403.
- [22] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改

- 进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, **17**(1): 15-20.
- [23] 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.
- [24] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 2003, **14**(6): 714-719.
- [25] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(2): 366-372.
- [26] Jansson M, Olsson H, Pettersson K. Phosphatases; origin, characteristics and function in lakes [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 157-175.
- [27] Ahlgren J, Tranvik L, Gogoll A, *et al.* Sediment depth attenuation of biogenic phosphorus compounds measured by ^{31}P NMR [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(3): 867-872.
- [28] 周来, 冯启言, 王华, 等. 南四湖表层底泥磷的化学形态及其释放规律[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(6): 37-39.
- [29] 隋少锋, 罗启芳. 武汉东湖底泥释磷特点[J]. 环境科学, 2001, **22**(1): 102-105.
- [30] Boers P C M. The influence of pH on phosphate release from lake sediments [J]. Water Research, 1991, **25**(3): 309-311.
- [31] Provini A, Premazzi G, 张萌华, 译. 环境科学与技术(国际湖泊污染与恢复研究译文集)[C]. 1987. 56-68.
- [32] Zhou A M, Tang H X, Wang D S. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition [J]. Water Research, 2005, **39**(7): 1245-1254.
- [33] 周爱民, 王东升, 汤鸿霄. 磷(P)在天然沉积物-水界面上的吸附[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(1): 64-69.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发售