

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲,谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范嫻,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣,程品,张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭,季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)
1 株铁基自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁,高品,薛翌,何梦琦,吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏,邓琦,邹华,梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼,李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征

诸葛祥真, 毕春娟*, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡

(华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 采集滴水湖沉积物及其引水河与排水河沉积物、湿地沉积物以及周边农田土壤进行磷的等温吸附实验, 探讨不同来源物质对磷吸附特性的差异。结果表明, 滴水湖沉积物的吸附/解吸平衡质量浓度 (EPC_0 值) 为 $0.11 \sim 0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于其他来源土壤和沉积物, 更容易向上覆水体释放磷。Langmuir 模型和 Freundlich 模型对磷的等温吸附都有较高的拟合程度。由 Langmuir 模型计算的最大吸附量 (Q_m) 表明, 不同来源土壤和沉积物对磷的吸附能力由高到低为河流沉积物 ($1\,003.05 \sim 2\,977.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 滴水湖沉积物 ($669.77 \sim 1\,717.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 湿地沉积物 ($368.60 \sim 1\,145.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 农田土壤 ($441.36 \sim 702.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这表明农田土壤对磷的吸附能力最弱, 当过量使用化肥时, 农田会成为滴水湖磷的源。

关键词: 滴水湖; 土壤; 沉积物; 磷; 吸附特征

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1531-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.048

Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai

ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, ZHANG Huan-huan, NI Wei-yi

(Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Soils and sediments of different origins were collected, which included the cropland soils surrounding Dishui Lake, the sediments from rivers, the sediments of wetland and the sediments in Dishui Lake. These samples were used for the experiment of phosphorus isothermal adsorption. The results of this experiment were analyzed and fitted. It shows that, the adsorption-desorption equilibrium mass concentration (EPC_0 value) of the sediments in Dishui Lake ($0.11 \sim 0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) is higher than that of the soils and sediments from other sources, which indicates that it is easier to release phosphorus to overlying water. Both the Langmuir model and Freundlich model have a high fitting degree to the isothermal adsorption of phosphorus. The maximum adsorption capacity (Q_m) calculated by Langmuir model demonstrate that the adsorption capacity of soils and sediments from different sources follows the order: sediments from rivers ($1\,003.05 \sim 2\,977.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > sediments in Dishui Lake ($669.77 \sim 1\,717.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > sediments of wetland ($368.60 \sim 1\,145.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > cropland soils ($441.36 \sim 702.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). It shows that the adsorption capacity of cropland soils is the weakest. Cropland soils can be a source of phosphorus in Dishui Lake when extra fertilizer is used.

Key words: Dishui Lake; soil; sediment; phosphorus; adsorption characteristics

近年来,水环境污染问题日趋严重,由于氮、磷等营养元素排入江河湖泊等水体,使水体中的藻类大量繁殖,造成水体富营养化。磷是构成生物组织和细胞的重要元素,在陆地和水域生态系统中都起着重要的作用,也是植物生产力的重要限制因子^[1,2]。在一般情况下污染物被水体中颗粒物吸附、络合、沉降等进入底泥,水体中的沉物会成为磷的汇^[3],但在条件改变的情况下沉积物也会变成磷的源^[4],Surridge 等^[5]也指出在表层水和浅层地下水中沉积物既可以是磷的源也可以是磷的汇。目前已有大量关于磷的吸附行为的研究,卢英等^[6]对南京城市土壤进行了磷的吸附行为研究,他们认为土壤对磷的吸附量低是城市地下水磷浓度偏高的原因之一。关于农田土壤对磷的吸附行为也有大量的研究,且对农田磷的淋失风险做出了评价,农田土壤中过量的

磷肥施入是水体水质恶化的潜在因素^[7,8],长期施用磷肥的土壤向环境释放磷的能力会显著提高^[9]。王圣瑞等^[10]和王振华等^[11]的研究表明沉积物对磷的释放存在很高的风险。Yoo 等^[12]对湿地除磷的研究发现,湿地沉积物对磷的吸附为最初溶解态活性磷的-21%,不能仅以沉积物评价湿地的除磷能力。很多湖泊富营养化的治理都是以控制外源磷的输入为主,但是有些水体的富营养化并没有得到有效地控制,其原因可能是底泥向水体中磷的释放^[3]。研究发现,沉积物对不同形态磷的吸附解吸累积是湿

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-09-18

基金项目: 上海市自然科学基金项目(12ZR1409000); 国家自然科学基金项目(41271472); 上海市科委社会发展重点项目(12231201900); 公益性行业(农业)科研专项(200903056)

作者简介: 诸葛祥真(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市水资源与水环境, E-mail: zhuge0539@126.com

* 通讯联系人, E-mail: cjbi@geo.ecnu.edu.cn

地生态系统对磷去除的主要途径^[13]. 因此, 研究土壤和沉积物对磷的吸附行为具有非常重要的意义.

滴水湖是中国目前最大的人工湖, 在滩涂上人工开挖而成, 经由引水河引入大治河水体, 其沉积物既有河流的输入, 又受到周边农田和湿地的影响. 汪海英等^[14]调查发现, 2005~2006 年间滴水湖总体呈轻度富营养化状态并有向中度富营养化状态发展的趋势, 并指出对滴水湖富营养化的调控要控制氮、磷的污染, 且以控制磷的污染为重点. 王延洋等^[15]对滴水湖的浮游生物现状进行了分析, 认为滴水湖水质为中度富营养化水平. 弄清不同沉积物和土壤对磷的吸附特征, 对滴水湖水质改善有重要的意义. 因此, 本研究对比分析了滴水湖不同来源土壤和沉积物对磷的吸附行为, 探讨了影响磷吸附性能的主要因素, 以期对滴水湖富营养化治理和控制提供依据.

1 研究区域概况

滴水湖位于东海之滨的上海市临港新城, 所在区域属北亚热带季风气候区, 是典型的海洋性气候. 湖泊呈圆形, 直径为 2.66 km, 面积 5.56 km², 平均水深 3.7 m, 最深处 6.2 m. 滴水湖在滩涂上开挖而成, 湖内有 3 个岛屿, 分别为西岛、南岛和北岛, 与滴水湖相连的河流有 A 港、B 港、C 港、D 港、E 港、F 港和 G 港, 除 A 港为排水河外其他均为引水河, 但目前仅 C 港承担着引水功能 (如图 1). 滴水湖于 2003 年 10 月完成开挖蓄水, 水源为大治河水, 作为新建的人工湖泊, 滴水湖承担着临港新城防汛排涝、置换水体和塑造城市景观生态的功能和作用.

2 材料与方法

2.1 样品的采集与处理

采集滴水湖不同来源的表层沉积物与土壤样品 (0~15 cm), 包括滴水湖附近农田土壤 (NT-1、NT-2、NT-3)、湿地沉积物 (SD-1、NH-1、NH-2)、滴水湖沉积物 (DS-1、DS-6、DS-7、DS-26、DS-27) 和滴水湖排水河和引水河沉积物 (A-1、A-2、HS-1、HS-2、C-1、C-2). 滴水湖水系及采样点分布如图 1 所示. 滴水湖内及河流表层沉积物用德国 HYDRO-BIOS 公司的 437200 型箱式采泥器采集, 表层农田土壤及湿地沉积物用塑料小铲采集. 采样点用手持 GPS 定位, 所采集样品装入自封袋中带回实验室, 于 35℃ 条件下在烘箱中烘干后研磨过 120 目筛, 得到的样品装入自封袋中保存待用. 所采集沉积物样品的 pH 值用美国 IQ150 土壤酸度计在现场测定, 农

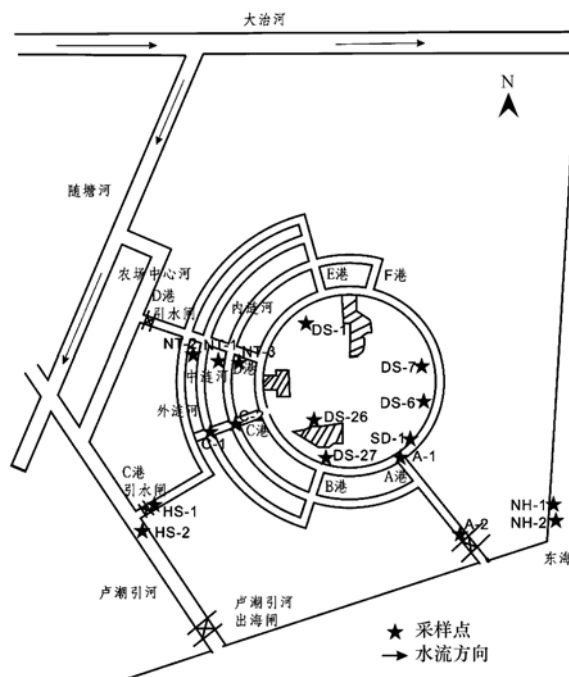


图1 滴水湖水系及采样点分布示意

Fig. 1 Water system of Dishui Lake and distribution of sampling sites

田土壤的 pH 在实验室用磁力搅拌器搅拌 1 min 后静置测定, 水土比为 2.5:1.

2.2 等温吸附实验与样品测试

用过 120 目筛后的样品进行等温吸附实验, 以超纯水 (电阻率 $>18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$) 和 NaH_2PO_4 配制初始浓度不等的溶液 (含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$), 初始磷浓度分别为 0、0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1、5、10、50、100、150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 分别称取不同来源的土壤或沉积物 1.0 g (精确到 0.000 1 g) 于 50 mL 离心管中加入上述各溶液 25 mL, 在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下恒温振荡 24 h 后取出, 在 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 5 min, 取上清液用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后测定磷浓度.

总磷 (TP) 含量用 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3$ 消解后按照钼锑抗分光光度法测定, 有效磷 (Olsen-P) 含量用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ (pH 8.5) 溶液提取后按照钼锑抗分光光度法测定^[16]. 溶解态活性磷 (SRP) 含量用 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 溶液提取后按照钼锑抗显色法测定^[17]. 土壤有机质的测定方法为重铬酸钾氧化-外加热法 (LY/T 1237-1999)^[18]. 土壤粒度使用 LS13 320 型激光粒度分析仪 (美国 Beckman Coulter 公司) 测定.

2.3 质量控制与数据处理

实验过程中对样品分析测试进行了全程的 QC/QA 分析来保证实验数据的准确性和可靠性, 实验

所用玻璃仪器均以 10% 的 HCl 充分浸泡后用自来水和超纯水清洗后使用. 实验所用试剂均为分析纯以上, 总磷、有机质的测定采用国家标准土壤样品 GSS-6 进行分析质量控制, 分析结果符合质量控制要求. 所得的实验结果用 Excel、SPSS 18 和 Origin 8.1 软件进行处理, 分别用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程对磷的吸附进行拟合分析.

Langmuir 模型认为固体表面是由大量的活性吸附中心构成的, 当吸附中心全部被占满后吸附量会达到饱和^[19], 其方程表示为:

$$Q = KQ_m c / (1 + Kc) \tag{1}$$

式中, Q 为沉积物对磷的吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Q_m 为最大吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c 为平衡溶液浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); K 为吸附强度因子 ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Freundlich 模型的应用比 Langmuir 模型更早, 其表达式为:

$$Q = Kc^{1/n} \tag{2}$$

式中, Q 为沉积物对磷的吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c 为平衡溶液浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); K 为分配系数 ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$); $1/n$ 为吸附强度.

磷的缓冲能力是指土壤抑制溶解相中磷浓度发生变化的能力, 可用低浓度初始磷浓度来进行线性拟合, 其方程为:

$$Q = Kc_0 - \text{NAP} \tag{3}$$

式中, Q 为沉积物对磷的吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), c_0 为溶液的初始磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), NAP 为沉积物本底

的吸附磷量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 最佳拟合线与 x 轴的截距为 EPC_0 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 此时沉积物对磷表现为既无吸附也无解吸, 斜率 K ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) 代表土壤的磷缓冲能力.

3 结果与讨论

3.1 不同来源土壤和沉积物的基本理化性质

对所采集样品的理化性质进行测定, 结果如表 1 所示. 样品的 pH 值在 6.69 ~ 8.35 之间, 变异系数为 6.19%, 差异性较小, 除 HS-1 略呈中性偏酸外, 其他样品均为中性偏碱. 样品的有机质变异系数为 70.66%, 含量有较大差异, 滴水湖沉积物为 3.21 ~ 11.16 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 农田土壤为 4.05 ~ 12.29 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 湿地沉积物为 6.04 ~ 22.49 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 河流沉积物为 6.04 ~ 32.68 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 粒度是影响磷吸附的重要因素, 滴水湖沉积物、农田土壤、湿地沉积物样品机械组成主要以粉粒和沙粒为主, 黏粒所占的比例较小, 而河流沉积物的机械组成粉粒所占的比例较大, 黏粒和沙粒的比例较小. 农田土壤和河流沉积物中 TP 及 Olsen-P 的含量较高, 各自为 517.40 ~ 610.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、487.98 ~ 952.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 9.71 ~ 28.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、15.20 ~ 53.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这是由于滴水湖引水河途经众多工业区和生活区, 沿途会有污水排入, 河流沉积物在沉积过程中吸附了水相中部分磷, 而农田受到人为施肥的影响, 所以河流沉积物和农田土壤中 TP 及 Olsen-P 含量水平相对较高. 通过统

表 1 土壤和沉积物样品基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil and sediment samples

样品名称	样品编号	pH 值	有机质 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	粒度/%			TP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Olsen-P / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	SRP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
				黏粒 ($< 2 \mu\text{m}$)	粉粒 ($2 \sim 63 \mu\text{m}$)	沙粒 ($63 \sim 200 \mu\text{m}$)			
滴水湖沉积物	DS-1	7.96	3.21	5.39	53.11	38.8	518.70	10.45	0.23
	DS-6	7.68	6.33	2.97	17.93	78.9	672.61	8.16	0.77
	DS-7	7.04	11.16	12.4	66.6	19.5	402.00	14.99	0.23
	DS-26	7.54	3.21	5.95	27.15	57.6	522.39	15.78	1.60
	DS-27	7.81	7.18	6.39	52.91	40.6	561.19	12.55	0.34
农田土壤	NT-1	8.30	8.04	6.8	52.4	36.5	572.73	9.71	0.34
	NT-2	8.30	12.29	12.1	70.3	16.4	610.50	28.90	0.40
	NT-3	8.21	4.05	4.25	46.05	49.4	517.40	10.27	0.37
湿地沉积物	SD-1	7.59	14.55	3.69	29.51	34.4	566.65	14.05	0.29
	NH-1	7.51	22.49	3.39	45.51	30.8	447.74	8.94	0.54
	NH-2	8.14	6.04	7.42	78.28	12.8	515.04	11.41	0.57
河流沉积物	A-1	7.92	7.47	6.81	66.49	25.9	554.77	15.20	0.37
	A-2	8.35	6.04	5.87	27.93	57.6	487.98	15.57	0.17
	HS-1	6.69	32.68	9.97	69.33	17.8	952.03	52.00	0.31
	HS-2	7.06	19.64	12.8	64.7	18.3	731.08	53.40	0.20
	C-1	7.75	12.29	11	76.8	12	573.65	21.08	0.12
	C-2	7.95	10.58	13.2	76.6	10.2	539.39	16.71	0.09

计学分析,所测样品中 TP 和 Olsen-P 含量相关系数达到 0.783 ($P < 0.01$),两者之间呈现极显著的正相关关系. TP 和 Olsen-P 的最大值均出现在 HS-1,其原因可能是由于该点在上海海事大学内,受到生活排污等人为因素的影响. Olsen-P 对作物生长具有非常重要的作用,若其含量处于较低水平就会有更多磷肥使用,从而加剧农田土壤磷的流失. 在本研究中,农田土壤和湿地沉积物 SRP 含量均较高,而滴水湖沉积物和河流沉积物存在个别

点 SRP 含量较低. 在土壤或沉积物中,当 SRP 含量较高时,其淋失的风险会增加或容易向上覆水体释放磷.

3.2 不同来源物质对磷的等温吸附特征

分别用方程(1)和(2)对等温吸附结果拟合,图 2 为 Freundlich 方程对等温吸附拟合的曲线. 从中可以看出不同来源物质对磷的吸附量不同,河流沉积物对磷吸附量最高,其次是滴水湖沉积物,农田土壤对磷的吸附量最低.

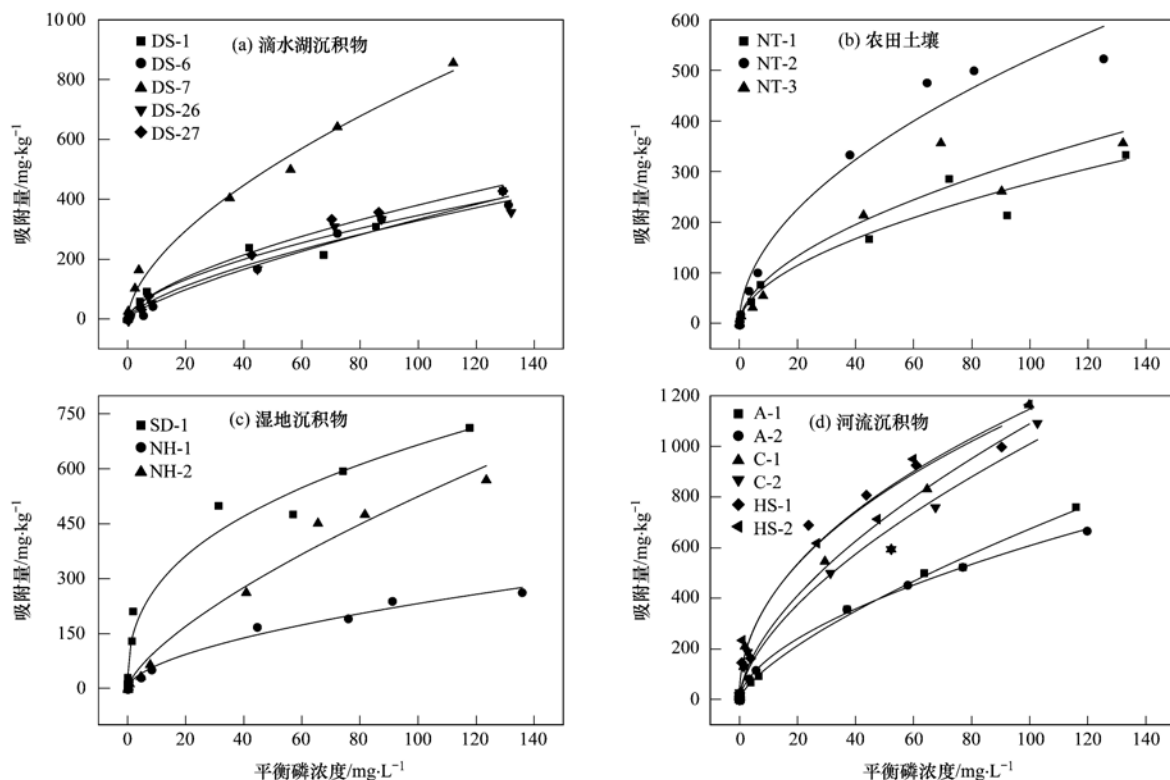


图 2 Freundlich 等温吸附曲线

Fig. 2 Freundlich isothermal adsorption curves

Langmuir 方程和 Freundlich 方程对磷的等温吸附拟合相关性达到极显著的水平 (R^2 分别为 0.948 ~ 0.995 和 0.936 ~ 0.998),说明这两个方程可以用来描述磷的吸附特征并用来计算其他相关参数. 所得方程的拟合参数如表 2 所示. 土壤最大吸附量 Q_m 值能够反映土壤胶体吸附点位的多少^[20],由 Langmuir 方程所得参数可以看出,河流沉积物的 Q_m 值最高,滴水湖沉积物的 Q_m 值也较高,湿地沉积物和农田土壤 Q_m 值相对较低. 这说明河流沉积物和滴水湖沉积物有较多的吸附点位,可以吸附大量的磷,而湿地沉积物和农田土壤吸附点位少,对磷的吸附量低. 由于农田土壤对磷的吸附能力较弱,施入农田的磷容易随径流流失,因此周边农田可能会是滴

水湖磷的源. 沉积物和土壤对磷的吸附量随着溶液浓度的升高而增加并逐渐趋于平衡,不同来源土壤和沉积物吸附量趋于平衡的浓度不同,反映了不同来源土壤和沉积物对磷的吸附能力的差异.

用(3)式对低浓度下 ($0 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 磷的吸附数据拟合,求得不同来源土壤和沉积物对磷吸附的 EPC_0 值,结果如表 2 所示. 滴水湖中的沉积物 (DS-1、DS-6、DS-7、DS-26、DS-27) EPC_0 值为 $0.11 \sim 0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,湿地沉积物 (SD-1、NH-1、NH-2) EPC_0 值为 $0.08 \sim 0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,农田土壤 (NT-1、NT-2、NT-3) 的 EPC_0 值为 $0.07 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,从所得数据分析,滴水湖中的沉积物 EPC_0 值比其他来源土壤和沉积物的 EPC_0 值高,说明与其他土壤

和沉积物相比较,滴水湖沉积物中的磷更容易向上覆水体释放,尽管在控制外源磷输入方面采取了措施,滴水湖内源磷的释放没有得到控制,这可能是滴水湖水质中度富营养化的一个重要原因.此外,滴水湖附近湿地沉积物和农田土壤的 EPC_0 值也比较高,虽然滴水湖附近湿地沉积物和农田土壤比滴水湖沉积物的 EPC_0 值低,但是也存在较高的淋失风险,其中的磷也会随降雨径流由河流进入滴水湖.

滴水湖引水河沉积物(HS-1、HS-2、C-1、C-2)

的 EPC_0 值最小,范围为 $0.06 \sim 0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,引水河中沉积物经滴水湖进入排水河后 EPC_0 值升高,A-1 和 A-2 的 EPC_0 值分别为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.可见,沉积物由一个源进入另外一个源会由于环境不同而改变 EPC_0 的值,滴水湖中的沉积物与 A 港中的沉积物相比较 SRP 含量要高,所以滴水湖沉积物的 EPC_0 值也较高,更容易发生解吸.Wang 等^[21] 在研究中指出,运河和湖泊中沉积物会由于与周围含活性磷较高的水体联系密切使得 EPC_0 值升高,本研究结果与其类似.

表 2 不同拟合方程的参数值

Table 2 Parameter values of different fitting equations

样品名称	样品编号	Langmuir 方程			Freundlich 方程			Linear 方程			
		Q_m / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	K / $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	R^2	K / $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	n	R^2	K / $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	NAP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	EPC_0 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	R^2
滴水湖沉积物	DS-1	736.58	0.01	0.951	21.51	1.66	0.970	15.31	3.25	0.21	0.994
	DS-6	915.57	0.01	0.991	9.91	1.31	0.983	10.29	3.37	0.33	0.995
	DS-7	1717.94	0.01	0.976	48.70	1.66	0.992	27.28	2.91	0.11	0.994
	DS-26	669.77	0.01	0.981	14.36	1.47	0.967	12.08	7.63	0.63	0.956
	DS-27	725.19	0.01	0.995	21.09	1.59	0.993	18.87	4.51	0.24	0.996
农田土壤	NT-1	441.36	0.02	0.948	22.12	1.82	0.957	20.48	3.27	0.16	0.998
	NT-2	702.30	0.03	0.995	47.43	1.92	0.974	21.44	3.82	0.18	0.997
	NT-3	487.04	0.02	0.956	25.20	1.80	0.936	15.95	1.04	0.07	0.970
湿地沉积物	SD-1	629.68	0.18	0.961	116.16	2.64	0.973	29.88	2.37	0.08	0.992
	NH-1	368.60	0.02	0.992	16.86	1.76	0.985	20.51	4.44	0.22	0.972
	NH-2	1 145.51	0.01	0.993	20.64	1.42	0.984	15.17	3.61	0.24	0.994
河流沉积物	A-1	1 702.33	0.01	0.993	24.92	1.40	0.996	21.51	5.87	0.27	0.985
	A-2	1 003.05	0.02	0.994	42.50	1.73	0.998	23.12	3.46	0.15	0.967
	HS-1	1204.89	0.05	0.992	132.21	2.15	0.976	29.34	3.36	0.11	0.992
	HS-2	1 738.30	0.02	0.958	129.85	2.11	0.983	28.60	2.48	0.09	0.990
	C-1	2 977.65	0.01	0.954	66.90	1.65	0.972	28.86	3.45	0.12	0.978
	C-2	2 757.02	0.01	0.967	59.24	1.62	0.984	28.30	1.81	0.06	0.991

Langmuir 方程 K 值最小的是滴水湖沉积物,说明滴水湖沉积物对磷的吸附强度最弱. MBC 是 Langmuir 方程中最大吸附量 Q_m 和与 K 的乘积,被称为土壤最大缓冲容量,可以综合反映沉积物和土壤对磷的吸持强度和容量因素, MBC 越大表示土壤和沉积物贮存磷的能力越强^[22,23].滴水湖周边不同来源土壤和沉积物中,滴水湖沉积物、农田土壤、湿地沉积物和河流沉积物的 MBC 值分别为 $7.2 \sim 17.18$ 、 $8.83 \sim 21.07$ 、 $7.32 \sim 113.34$ 和 $17.02 \sim 60.24$ 之间,河流沉积物比其他介质的 MBC 值都要高,说明河流沉积物有较强的贮存磷的能力.滴水湖沉积物对磷的吸附强度弱,贮存磷的能力最差,这可能是滴水湖水质内源污染的原因. MBC 值最高值为湿地沉积物 SD-1,其原因是该沉积物对磷吸附的 Langmuir 方程 K 值远大于其他介质,SD-1 吸附后磷的生成物更加稳定.将 MBC 、Langmuir 方程参数

Q_m 、 K 与土壤的理化指标做相关分析,结果如表 3 所示, MBC 仅与有机质含量呈明显的负相关关系,这可能是由于有机质产生的有机酸会活化土壤中的磷降低土壤对磷的吸附^[23].夏瑶等^[23] 和韩景超等^[24] 的研究中也表明 MBC 值与 Olsen-P 和土壤黏粒含量不存在显著相关关系.

3.3 不同来源物质吸附性能的影响因素

磷的吸附和沉淀是从水体中除磷的主要机制,土壤和沉积物对磷的吸附受到很多因素的影响,主要包括有机质含量、pH 值、粒径和沉积物的化学组成等.

相关性分析发现(图 3),滴水湖周边土壤或沉积物的黏粒含量与磷最大吸附量 Q_m 之间相关系数达到 $0.697(P < 0.01)$,粉粒含量与最大吸附量 Q_m 之间相关系数为 $0.599(P < 0.05)$,沙粒含量与最大吸附量 Q_m 之间相关系数为 $-0.553(P < 0.05)$,说

表 3 磷的吸附参数与土壤和沉积物性质的关系¹⁾

Table 3 Relationship between phosphorus adsorption parameters and properties of soils and sediments

参数	pH 值	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Olsen-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	黏粒含量/%	粉粒含量/%	沙粒含量/%
Q_m	-0.234	-0.123	0.278	0.076	0.697 **	0.599 *	-0.533 **
MBC	-0.366	-0.495 *	0.367	0.383	0.056	-0.05	-0.243
K	-0.168	0.303	0.086	0.168	-0.238	-0.286	-0.029

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

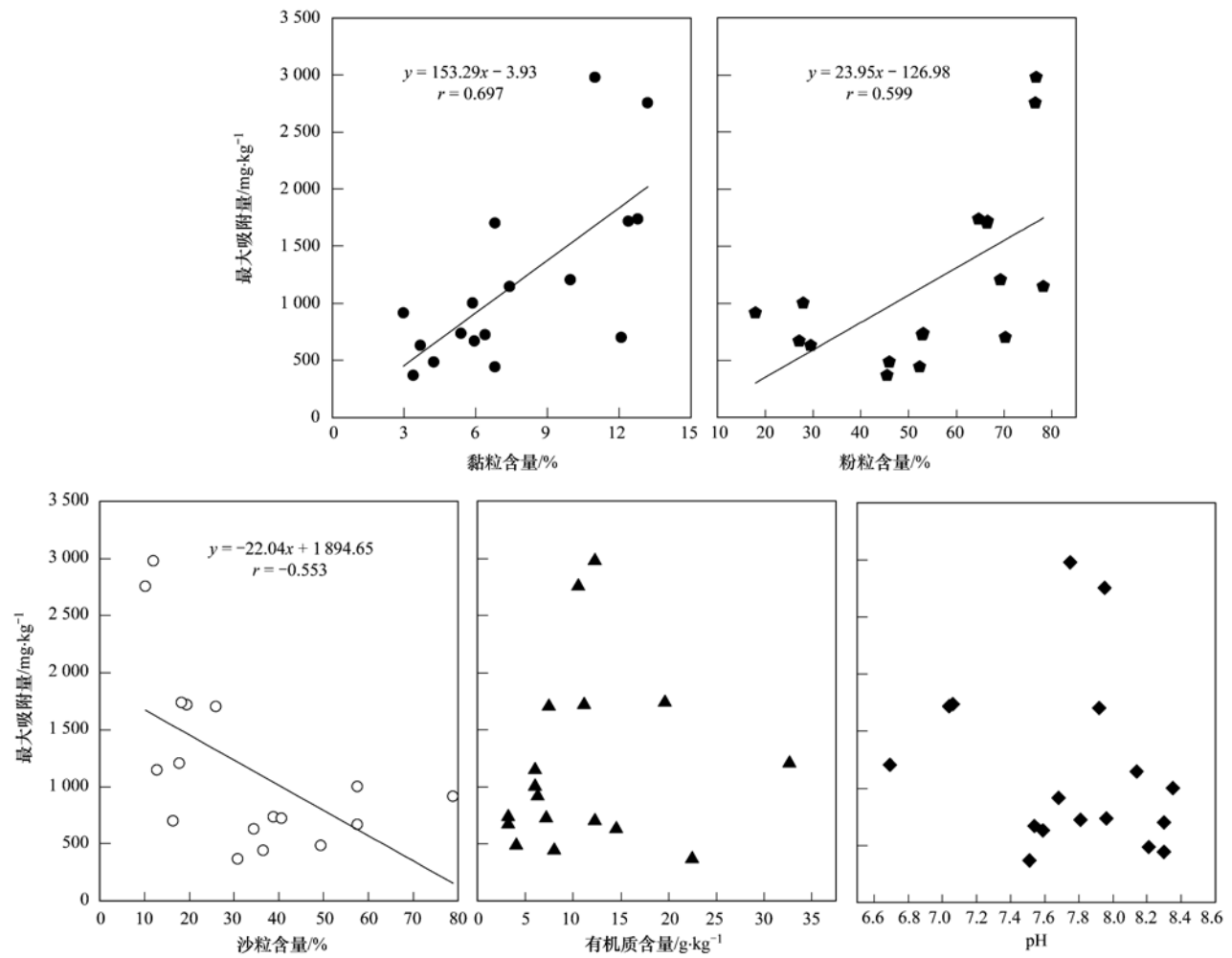


图 3 最大吸附量与影响因子之间的关系

Fig. 3 Relationship between the maximum adsorption capacity and impact factors

明土壤或沉积物中黏粒和粉粒含量越高,沙粒含量越低, Q_m 就越大.可见,土壤和沉积物的粒径是影响磷吸附量的重要因素,磷的吸附量会随着粒径的减小而增大^[25,26].有机质对磷吸附的影响尚无定论,有研究发现有机质可以占据吸附点位,阻碍磷的吸附^[27],而另有研究指出去除有机质后沉积物对磷的吸附能力大大降低^[28,29].滴水湖周边土壤或沉积物中的有机质含量与磷最大吸附量 Q_m 相关系数为 0.123,两者并无显著相关性,说明滴水湖周边沉积物与土壤的 Q_m 并不受有机质含量的影响.文献中

所报道的 pH 对土壤吸附磷的影响结果也不尽一致,马良等^[30]的研究结果表明砖红壤和水稻土对磷的吸附量随 pH 值的升高而降低,而对于红壤的影响很小. Barrow^[31]认为土壤对磷的吸附量随 pH 值的增加而减小,Zhou 等^[32]对较大范围的 pH 值做了研究,认为 pH 对磷的吸附曲线的影响表现为“帽状”,随着 pH 值的增加,吸附量先增加后减少.在本研究中,滴水湖周边土壤和沉积物对磷的最大吸附量 Q_m 值与 pH 值之间的相关系数为 -0.204,并没有表现出显著的相关关系,说明滴

水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附量不受 pH 值的影响. 也有可能是由于滴水湖周边土壤和沉积物 pH 值差异性较小(变异系数为 6. 19%), 在这一 pH 值范围内磷的吸附量不会受到制约, 导致本研究结果有别于其他研究, 此外, 不同介质 pH 值的测定方法不同也可能是两者相关关系不显著地原因. 除了土壤的机械组成、有机质含量和 pH 值外, 一些金属离子和金属氧化物也对磷的吸附起重要的作用^[33~35], 黄清辉等^[36]对太湖表层沉积物的研究表明无定型铁铝氧化物是控制磷吸附的主要因素, Lin 等^[37]的研究认为磷主要是与铁的氧化物结合, 其次是与铝的氧化物结合.

3. 4 周边环境对滴水湖沉积物磷吸附特征的影响
将滴水湖沉积物与国内其他湖泊或河流沉积物

对磷的吸附特征相比, 其结果如表 4 所示. 与其他湖泊或河流沉积物相比较, 滴水湖沉积物的最大吸附量 Q_m 值和 EPC_0 值较高, 而滴水湖沉积物对磷的本底吸附量只高于张宪伟等^[39]所研究的黄河沉积物的本底吸附量, 其他湖泊沉积物的本底吸附量都大于滴水湖沉积物. 虽然滴水湖沉积物对磷的本底吸附量小于其他湖泊或河流的沉积物, 但是其释放磷的潜力要大于其他湖泊, 本研究得出的 EPC_0 值远大于其他湖泊和河流沉积物, 相对来讲, 其他湖泊和河流沉积物的 EPC_0 值都不会超过 $0. 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 甚至远小于这一值, 但是滴水湖沉积物普遍高于这一值. 由此可见, 滴水湖内源磷的释放潜力远高于其他湖泊, 在滴水湖富营养化治理过程中应该重视内源磷释放的治理.

表 4 国内关于湖泊或河流沉积物对磷吸附的研究¹⁾

Table 4 Domestic study of lake or river sediments on phosphorus adsorption				
研究湖泊或河流	最大吸附量 Q_m / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	EPC_0 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	NAP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	文献
黄河	—	0. 003 1 ~ 0. 109 3	3. 2 ~ 104. 2	[38]
黄河	43. 64 ~ 85. 46	0. 000 3 ~ 0. 013 2	0. 03 ~ 3. 39	[39]
贡湖	321. 8	0. 033	18. 34	[40]
东太湖	307. 7	0. 037	23. 35	[40]
五里湖	798. 3	0. 143	323. 23	[40]
洪泽湖	50. 67 ~ 85. 17	0. 06 ~ 0. 11	7. 23 ~ 32. 26	[41]
岱海	422. 904	0. 154	23. 03	[42]
乌梁素海	349. 818	0. 016	7. 98	[42]
白洋淀	208. 77 ~ 450. 45	0. 055 ~ 0. 235	4. 78 ~ 111. 59	[43]
滴水湖	322. 58 ~ 1 250. 00	0. 18 ~ 0. 42	4. 12 ~ 6. 87	[44]
滴水湖	669. 77 ~ 1717. 94	0. 11 ~ 0. 63	2. 91 ~ 7. 63	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据

滴水湖和其周边农田、湿地、河流作为一个系统, 四者之间联系密切, 滴水湖水体的水质状况也与它们息息相关. 农田土壤在施肥后只有少部分的营养元素能够被作物利用, 作物对磷的当季利用率只有不足 20%^[45], 这样就会导致更多磷肥的使用, 不能被作物利用的部分就会对周边河流湖泊等水体造成威胁. 农田土壤中多余的磷素一部分被土壤吸附, 另外一部分会随降雨径流进入滴水湖和引水河, 进入引水河的磷最终又被引入滴水湖. 通过统计分析沉积物中 SRP 的含量与 EPC_0 之间的相关系数为 0. 923 ($P=0 < 0. 01$), 两者之间显著正相关, 两者之间的关系如图 4, 土壤或沉积物中 SRP 含量越高其释放磷的风险也就越高, SRP 含量与 EPC_0 之间的正相关关系可进一步证明 EPC_0 值也可以表征磷的释放风险. 农田土壤进入引水河后沉积, 后又经引水河进入滴水湖, 这一过程中, 滴水湖沉积物最大吸附

量 Q_m 会减小, 吸附能力降低, 沉积物中的 SRP 含量会升高, EPC_0 值也升高, 导致滴水湖沉积物释放磷的风险增加. 另一方面, 由于滴水湖是在潮滩上人工

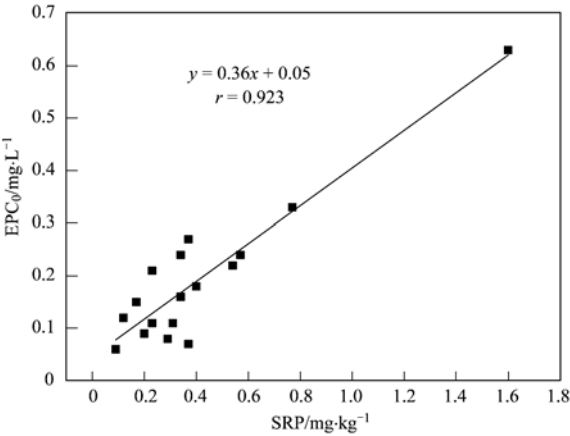


图 4 EPC_0 与 SRP 之间的关系

Fig. 4 Relationship between EPC_0 and SRP

开挖而成,还属于较年轻的湖泊,其沉积物的性质与湿地沉积物密切相关,湿地沉积物中相对于其他来源物质 SRP 含量较高,这就决定了在一段时间内滴水湖沉积物主要还是以释磷为主.虽然滴水湖沉积物具有较大的 Q_m 值,吸附潜力仅次于河流沉积物,但是由 Langmuir 方程的拟合参数 K 和最大缓冲容量 MBC 值可以看出滴水湖沉积物对磷的吸附强度和最大缓冲容量不大,这也就说明通过沉积物吸附的磷素并没有转化为稳定的形态,在一定条件下容易释放出来.

4 结论

(1)滴水湖地区不同来源土壤和沉积物 TP 含量为 402.03 ~ 952.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Olsen-P 含量为 8.16 ~ 53.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以农田土壤和河流沉积物中居高,SRP 含量为 0.09 ~ 1.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有淋失的风险.

(2)Langmuir 方程和 Freundlich 方程对磷的等温吸附都具有较高的拟合程度.滴水湖地区不同来源土壤和沉积物对磷的吸附 Q_m 值由高到低为河流沉积物 > 滴水湖沉积物 > 湿地沉积物 > 农田土壤.滴水湖沉积物虽然最大吸附量仅次于河流沉积物,但是对磷的吸附强度最弱,贮存磷的能力较差.

(3)滴水湖地区土壤和沉积物对磷的吸附性能与土壤的机械组成关系密切,黏粒和粉粒含量越高,吸附能力越强,沙粒含量越高,吸附能力越弱.

(4)滴水湖沉积物与国内其他一些自然河流和湖泊沉积物相比较,对磷的本底吸附量相对较低,但是释放风险较高.在滴水湖水体富营养化的治理过程中,应重视对于内源磷释放的控制.

参考文献:

- [1] Condon L M, Newman S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(5): 830-840.
- [2] Fortune S, Lu J, Addiscott T M, *et al.* Assessment of phosphorus leaching losses from arable land[J]. *Plant and Soil*, 2005, **269**(1-2): 99-108.
- [3] 王宇, 马宁, 史春梅, 等. 水体底泥中磷的吸附-解吸研究进展[J]. *现代农业科技*, 2010, (19): 248-249.
- [4] Huang L, Fu L, Jin C W, *et al.* Effect of temperature on phosphorus sorption to sediments from shallow eutrophic lakes[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(10): 1515-1522.
- [5] Surridge B W J, Heathwaite A L, Baird A J. The release of phosphorus to porewater and surface water from river riparian sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(5): 1534-1544.
- [6] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤磷的形态和吸附-解吸特征[J]. *土壤通报*, 2003, **34**(1): 40-43.
- [7] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. *环境科学*, 2001, **22**(4): 67-72.
- [8] 高超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析[J]. *农村生态环境*, 2000, **16**(4): 24-27.
- [9] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(2): 248-256.
- [10] 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.
- [11] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(1): 154-160.
- [12] Yoo J H, Ro H M, Choi W J, *et al.* Phosphorus adsorption and removal by sediments of a constructed marsh in Korea[J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(2): 109-117.
- [13] Tomenko V, Ahmed S, Popov V. Modelling constructed wetland treatment system performance[J]. *Ecological Modelling*, 2007, **205**(3): 355-364.
- [14] 汪海英, 周敏杰. 临港新城: 滴水湖富营养化现状评价及调控对策[J]. *上海水务*, 2006, **22**(4): 24-26.
- [15] 王延洋, 李晓波, 吴波, 等. 上海滴水湖浮游动物研究初报[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2008, **37**(2): 167-172.
- [16] Carter M R. Soil sampling and methods of analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [17] Stutter M I, Langan S J, Lumsdon D G. Vegetated buffer strips can lead to increased release of phosphorus to waters: A biogeochemical assessment of the mechanisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(6): 1858-1863.
- [18] LY/T 1237-1999, 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S].
- [19] Ghabbour E A, Davies G. Environmental insights from Langmuir adsorption site capacities[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, **381**(1): 37-40.
- [20] 赵庆雷, 王凯荣, 谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(1): 355-362.
- [21] Wang Q R, Li Y C. Phosphorus adsorption and desorption behavior on sediments of different origins[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(6): 1159-1173.
- [22] 冯跃华, 胡瑞芝, 张杨珠, 等. 几种粉煤灰对磷素吸附与解吸特性的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(9): 1756-1760.
- [23] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. *中国农业科学*, 2002, **35**(11): 1369-1374.
- [24] 韩景超, 毕春娟, 陈振楼, 等. 温州市黑臭河道河岸土对磷的吸附特征[J]. *上海环境科学*, 2013, (1): 1-6.
- [25] Walter L M, Morse J W. Reactive surface area of skeletal carbonates during dissolution: effect of grain size[J]. *Journal of*

- Sedimentary Research, 1984, **54**(4): 1081-1090.
- [26] Zhang J Z, Huang X L. Relative importance of solid-phase phosphorus and iron on the sorption behavior of sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(8): 2789-2795.
- [27] 黄利东, 柴如山, 宗晓波, 等. 不同初始磷浓度下湖泊沉积物对磷吸附的动力学特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, **38**(1): 81-90.
- [28] 王而力, 王嗣淇. 西辽河沉积物有机组分对磷的吸附影响[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 687-694.
- [29] Wang S, Jin X, Bu Q, *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): 95-105.
- [30] 马良, 徐仁扣. pH 和添加有机物料对 3 种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(6): 596-599.
- [31] Barrow N J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil[J]. Journal of Soil Science, 1983, **34**(4): 733-750.
- [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] Del Bubba M, Arias C A, Brix H. Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm[J]. Water Research, 2003, **37**(14): 3390-3400.
- [34] Bedore P D, David M B, Stucki J W. Mechanisms of phosphorus control in urban streams receiving sewage effluent[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, **191**(1-4): 217-229.
- [35] Lair G J, Zehetner F, Khan Z H, *et al.* Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River[J]. Geoderma, 2009, **149**(1): 39-44.
- [36] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 97-104.
- [37] Lin C Y, Wang Z G, He M C, *et al.* Phosphorus sorption and fraction characteristics in the upper, middle and low reach sediments of the Daliao river systems, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **170**(1): 278-285.
- [38] 王晓丽, 包华影, 郭博书. 黄河沉积物对磷的吸附行为[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2076-2080.
- [39] 张宪伟, 潘纲, 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.
- [40] 王圣瑞, 金相灿, 庞燕. 湖泊沉积物对磷的吸附特征及其吸附热力学参数[J]. 地理研究, 2006, **25**(1): 19-26.
- [41] 杨文澜, 蒋功成, 王兆群, 等. 洪泽湖不同湖区表层沉积物对磷的吸附特征[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 985-991.
- [42] 吕昌伟, 孟婷婷, 张细燕, 等. 磷在不同类型湖泊沉积物上的吸附特征及形态再分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(2): 402-409.
- [43] 刘冠男, 董黎明. 水体中 Ca^{2+} 对湖泊沉积物磷吸附特征的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(2): 36-41.
- [44] 江敏, 刘金金, 胡文婷, 等. 滴水湖沉积物对磷的吸附特性初探[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(5): 18-23.
- [45] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行