

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

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

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气CH ₄ 和CO在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为MUCT工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中PCNs的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用PCR-DGGE分析未开发油气田地表微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与AMF群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7)	
《环境科学》征订启事(19)	
信息(47,70,202,304)	

硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究

吕昌伟^{1,2}, 崔萌¹, 高际玫³, 张细燕¹, 万丽丽¹, 何江^{1,2}, 孟婷婷¹, 白帆¹, 杨旭¹

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021; 3. 内蒙古环境监测中心站, 呼和浩特 010011)

摘要: 以乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)表层沉积物为吸附剂, 开展了硅在沉积物上的等温吸附及形态再分布实验研究. 结果表明, 在低浓度梯度范围内($\leq 3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 硅在乌梁素海和岱海沉积物上的吸附行为均可用线性模型描述, 且2个湖泊沉积物分别处于吸附硅和解吸硅的吸附/解吸反应的不同阶段; Langmuir交叉型吸附等温式、Freundlich交叉吸附等温式和Temkin交叉型吸附等温式均能较好地描述硅在2个湖泊沉积物上的吸附行为, 结合沉积物自身吸附硅(NAS)和吸附/解吸平衡浓度(ESC_0), 阐释了2个湖泊沉积物对硅的源汇作用; 以硅的形态再分布为基础, 揭示沉积物中离子交换态(IEF-Si)释放硅能力, 同时也不能忽视铁锰氧化物结合态(IMOF-Si)和有机物硫化物结合态(OSF-Si)的可持续释硅能力, 可为探讨真实环境体系中硅的吸附/解吸机制, 阐释湖泊富营养化的营养盐限制机制及营养盐耦合作用对碳循环拉动机制等提供理论依据和基础数据.

关键词: 吸附特征; 形态分布; 硅; 沉积物; 湖泊

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)01-0135-07

Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments

LÜ Chang-wei^{1,2}, CUI Meng¹, GAO Ji-mei³, ZHANG Xi-yan¹, WAN Li-li¹, HE Jiang^{1,2}, MENG Ting-ting¹, BAI Fan¹, YANG Xu¹

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2. Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 3. Inner Mongolia Environment Monitoring Center Station, Hohhot 010011, China)

Abstract: Taking surface sediments from the Wuliangsuhai Lake and Daihai Lake as adsorbent, the isothermal adsorption experiments of silicate on sediments were carried out and the adsorption behavior was explained by Langmuir, Freundlich and Temkin crossover-type equations, then the form distribution characters of silicate were studied after adsorption in this work. The results showed that the adsorption behavior of silicate on the two lakes sediments can be linear fitting in the lower concentration dose ($\leq 3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); the sediments from the Wuliangsuhai Lake behaved adsorbing silicate while the sediments from the Daihai Lake behaved releasing silicate under the experimental dose; all of the Langmuir, Freundlich and Temkin crossover-type equations can be used to explain the adsorption behavior of silicate on the two lakes sediments, and the native adsorption silicate (NAS) and equilibrium silicate concentration(ESC_0) calculated by the three equations could be used to explain the sink and source effects of the sediments from the two lakes; the silicate form distribution in the sediments after adsorption indicated that silicate adsorbed on particles were mainly added on the form of IEF-Si, CF-Si, IMOF-Si and OSF-Si, and the IMOF-Si and OSF-Si had important potential bioavailability.

Key words: adsorption behavior; form distribution; silicate; sediment; lakes

吸附等温模型是描述吸附平衡特征及吸附动力学过程的有效手段^[1], 如Langmuir等温模型已被广泛应用于真实环境体系中吸附过程的描述^[2~6]. 实际上, 天然沉积物含有一定量的内源物质, 对某种物质的吸附等温线不是过原点而是过浓度坐标的. 近20年的研究也发现, 许多自然水体中吸附等温线亦存在一些反常变化^[7,8]. 因此, 在描述实际环境体系中天然沉积物的吸附特征时, 需对吸附等温式进行修正^[1,9]. 潘纲等提出了实际环境体系中交叉型吸附等温式, 并成功的用于描述磷在颗粒物上的吸附特征^[1,2,9,10]. 目前, 有关交叉型吸附等温式的推导和应用研究主要集中于Langmuir和Freundlich吸附

等温式, 对Temkin吸附等温式的研究较少, 且主要将交叉型吸附等温式应用于颗粒物对磷的吸附特征的描述, 还未见用交叉型吸附等温式描述硅在颗粒物上吸附特征的研究.

作为植物生长的“准必需元素”, 硅在土壤上的吸附特征及生物有效性得到了农学、土壤学和植物营养学等领域的广泛关注^[11~16]. 目前, 有关硅在土

收稿日期: 2011-03-26; 修订日期: 2011-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003049); 内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601); “国家大学生创新性实验计划”项目(20081012614)

作者简介: 吕昌伟(1979~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境地球化学和污染生态学, E-mail: lcw2008@imu.edu.cn

壤颗粒物上的吸附热力学和动力学研究中,处理浓度梯度设置的均较宽泛,达 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,甚至更高^[15,17~20],而在低浓度梯度下探讨硅在颗粒物上吸附行为的研究更是鲜见.本研究以乌梁素海和岱海沉积物为吸附剂,考虑到湖泊上覆水中硅酸盐含量的实际情况,开展了低浓度梯度下湖泊沉积物对硅的吸附行为研究,并尝试用3种交叉型吸附等温式描述了硅在沉积物上的吸附特征,探讨了吸附后硅的形态再分布特征,以期探讨真实环境体系中硅的吸附/解吸机制,阐释湖泊富营养化的营养盐限制机制及营养盐耦合作用对碳循环拉动机制等提供理论依据和基础数据.

1 研究区概况

乌梁素海($40^{\circ}47'\sim 41^{\circ}03'\text{N}$, $108^{\circ}43'\sim 108^{\circ}57'\text{E}$; WLSH)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,系黄河改道后形成的牛轭湖,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊,是亚洲湿地公约组织名录中的大型湿地生物多样性保护区,是我国北方候鸟的重要栖息和繁殖地.湖区现有水域面积 333.48 km^2 ,湖面高程 $1\,018.5\text{ m}$,库容量 $2.5\times 10^8\sim 3\times 10^8\text{ m}^3$,80%水域水深 $0.8\sim 1.0\text{ m}$.湖中有大型水生植物共6科6属11种,以芦苇、龙须眼子

菜和穗花狐尾藻为优势种.受河套灌区农田退水的影响,近10年来乌梁素海富营养化进程加剧^[21],加速了湖泊富营养化和沼泽化进程.

岱海($40^{\circ}29'27''\sim 40^{\circ}37'6''\text{N}$ 、 $112^{\circ}33'31''\sim 112^{\circ}46'40''\text{E}$; DH)位于内蒙古凉城县境内,是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊,地处温带半干旱区向干旱区的过渡带.湖区现有水域面积约 80.72 km^2 ^[22],湖面高程 $1\,223\text{ m}$,最大水深 16.05 m ,平均水深 7.41 m .湖中有藻类共76属,其中绿藻门28属、硅藻门21属、蓝藻门16属、裸藻门16属,甲藻门、隐藻门、黄藻门、金藻门各2属;有浮游动物共29种,其中原生动物1种,轮虫14种,枝角类9种,桡足类5种.近年来因气候干旱,湖泊水位逐年下降、水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高,富营养化加剧,使本区环境问题日益突出,成为我国全球变化研究中备受重视的地区.

从湖泊水化学特征来看,乌梁素海和岱海的水均属蒸发-浓缩型,湖泊水的离子组分明显受控于蒸发-浓缩作用;2个湖泊上覆水中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量明显较高, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量则较低, $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 比例相对较高,揭示2个湖泊的水化学组成均表现出受蒸发盐岩的风化作用控制的特征^[23].从水质现状来看(表1),目前2个湖泊均已处于富营养化状态.

表1 乌梁素海和岱海水质现状

Table 1 Water quality of the Wuliangsuhai Lake and Daihai Lake							
湖泊	pH	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SD/m	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SiO_3^{2-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Chla/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
乌梁素海	7.6	6.43	1.21	1.78	0.15	3.0	4.45
岱海	8.9	7.18	0.61	2.25	0.20	1.0	32.56

2 材料与方法

2.1 样品采集

于2009年8月对乌梁素海、岱海进行沉积物样品采集,依据湖泊生态系统观测方法^[24],针对各湖泊现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点(图1).表层沉积物视湖泊深度分别用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A och B 型无扰动采样器或荷兰 Eijkelpamp 公司产 SA Beeker 型沉积物原状采样器采集;沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于 -24°C 冷冻保存.

2.2 实验方法

考虑到不同湖区沉积物的非均质性,本研究系统采集了乌梁素海不同湖区的沉积物(图1),自然风干后充分混匀.以混匀后的沉积物为吸附剂,开展沉积物对硅的吸附行为研究.岱海沉积物样品的处

理方法同上.

在一系列 50 mL 离心管中加入 0.5000 g 表层沉积物样品,然后加入用 $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 配制的初始质量浓度分别为 0 、 0.10 、 0.40 、 0.60 、 0.80 、 1.00 、 1.50 、 2.00 、 2.50 、 $3.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液 20 mL ,于室温下振荡 24 h ($260\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),取样后立即离心提取上清液,过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜后用硅钼蓝比色法测定上清液中硅酸盐的含量.同时用 Tessier 连续提取法^[25]分析测定等温吸附后沉积物中硅的形态分布.

3 结果与讨论

3.1 交叉型吸附等温式的推导

Temkin 吸附等温式^[26,27]如下:

$$Q = \frac{RT}{b} \ln(Ac)$$

(1)

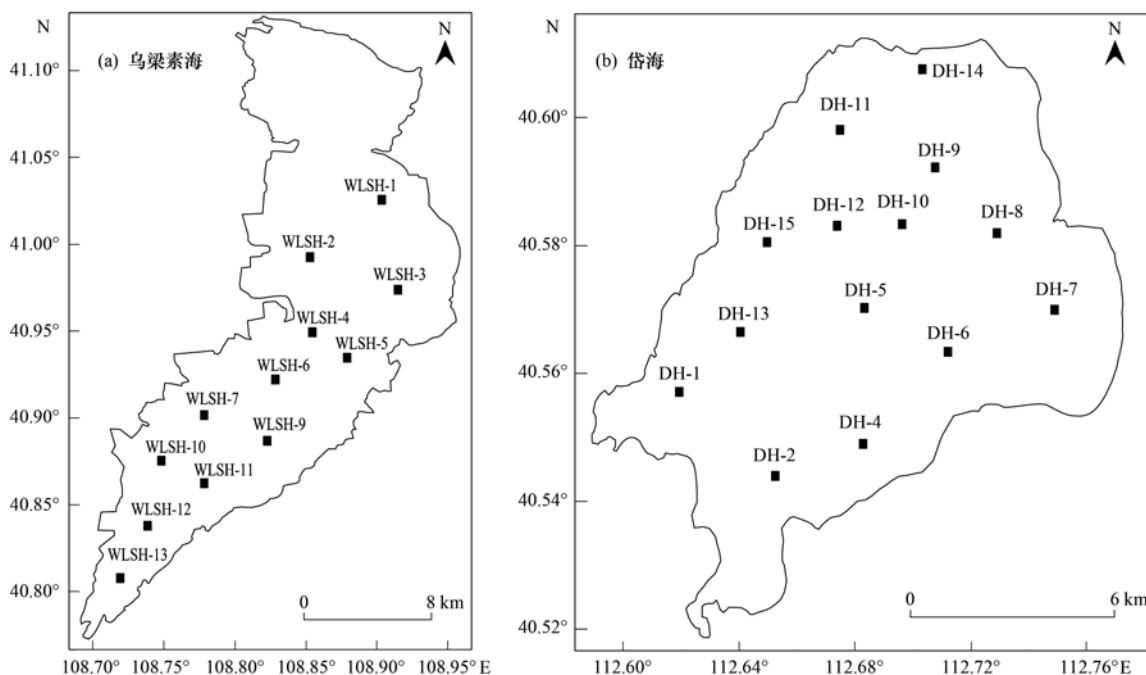


图 1 乌梁素海和岱海采样站位分布示意

Fig. 1 Locations of sampling points in the Wuliangsu Lake and Daihai Lake

其线性形式如下:

$$Q = \frac{RT}{b} \ln A + \frac{RT}{b} \ln c \quad (2)$$

令: $\frac{RT}{b} = k$, 则式(2)可写为:

$$Q = k \ln A + k \ln c \quad (3)$$

天然沉积物一般含有内源硅(NAS), 对硅的吸附等温线不过原点而是与浓度坐标有交点. 将吸附等温线与平衡浓度轴的交叉点对应的硅平衡浓度值定义为 ESC_0 (吸附/解吸平衡硅浓度). 故:

$$Q = Si_{sor} + NAS \quad (4)$$

且 $c = ESC_0$ 时, $Si_{sor} = 0$.

将式(4)代入式(3)得:

$$Si_{sor} + NAS = k \ln A + k \ln c \quad (5)$$

故将 $c = ESC_0$ 时, $Si_{sor} = 0$ 及式(4)代入式(3)得:

$$NAS = k \ln A + k \ln ESC_0 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得:

$$Si_{sor} = k \ln c - k \ln ESC_0 \quad (7)$$

式(7)为修正 Temkin 方程后得到的 Temkin 交叉型吸附等温式, 可用式(6)计算 NAS.

潘纲等推导了实际环境体系中磷吸附的 Langmuir 交叉型吸附等温式^[9]和 Freundlich 交叉型吸附等温式^[1]. Langmuir 交叉型吸附等温式如下:

$$Si_{sor} = \frac{Q_m k (c - ESC_0)}{(1 + kc)(1 + k \cdot ESC_0)} \quad (8)$$

$$NAS = \frac{Q_m k \cdot ESC_0}{1 + k \cdot ESC_0} \quad (9)$$

Freundlich 交叉型吸附等温式如下:

$$Si_{sor} = k \cdot c^{1/n} - k \cdot ESC_0^{1/n} \quad (10)$$

$$NAS = k \cdot ESC_0^{1/n} \quad (11)$$

式(4)中, $Si_{sor} (mg \cdot kg^{-1})$ 为沉积物对硅的吸附量, $NAS (mg \cdot kg^{-1})$ 为沉积物自身吸持的、实验条件下可解吸的硅; 式(6)中, ESC_0 为吸附等温线与平衡浓度轴的交叉点所对应的硅平衡浓度值即吸附/解吸平衡硅浓度; 式(8)中, $Q_m (mg \cdot kg^{-1})$ 为最大吸附量, k 为吸附常数; 式(10)中, k 值表示吸附容量, 反映颗粒物表面的吸附点位数是与最大吸附量有关的常数; n 表示沉积物的束缚强度, n 值越大沉积物的束缚能力越强, 反映吸附反应的非线性 ($n = 1$ 时, 方程为线性; $n > 1$ 时方程为非线性)^[28]. 因此, 当水体硅浓度小于沉积物的 ESC_0 值时, 吸附量 (Si_{sor}) 为负值, 沉积物向水体释放硅, 表现为硅“源”; 反之, 吸附量为正值, 沉积物表现为硅“汇”^[9]. 可见, ESC_0 点是吸附等温线上的关键点, 考察它对研究沉积物的吸附特征有重要意义.

3.2 吸附等温实验

吸附等温实验结果显示 (图 2), 在低浓度梯度

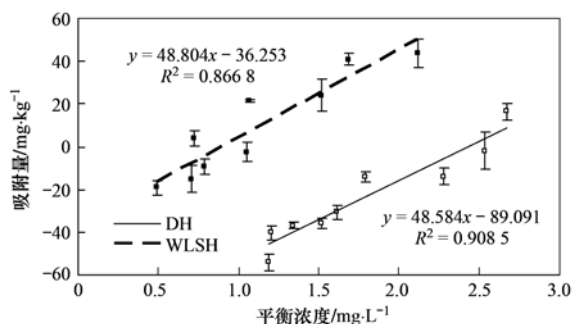


图2 乌梁素海和岱海沉积物对硅的吸附等温线
Fig. 2 Description of adsorption isotherms of silicate on the lakes sediments

范围内,硅在乌梁素海和岱海沉积物上的吸附行为均可用线性模型描述,回归系数分别达到0.866 8和0.908 5。从2个湖泊沉积物对硅的等温吸附实验过程来看,在实验设定的浓度梯度内,尽管2个湖泊沉积物的等温实验均存在解吸和吸附2个阶段,但2个湖泊沉积物对硅的吸附/解吸平衡存在明显差异。

表2 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 交叉型吸附等温方程的拟合参数

Table 2 Parameters of crossover-type equations for Langmuir, Freundlich and Temkin for the Si adsorption isotherm

湖泊	Langmuir 交叉型方程					Freundlich 交叉型方程					Temkin 交叉型方程			ΔG^0 /kJ·mol ⁻¹
	k	Q_m	ESC ₀	NAS	R^2	k	ESC ₀	n	NAS	R^2	k	ESC ₀	R^2	
岱海	0.162	371.925	2.459	105.952	0.834	83.800	2.461	1.803	138.091	0.834	64.183	2.466	0.820	-20.518
乌梁素海	0.226	286.052	0.856	46.368	0.773	64.472	0.855	1.538	58.228	0.771	42.936	0.811	0.752	-21.329

ΔG^0 为自由能,反映沉积物的吸附能级与反应的自发程度,其值越小,反应的自发程度就越强,生成物则越稳定,对硅的吸附能力就越强。岱海和乌梁素海沉积物吸附硅的 ΔG^0 分别为 -20.518 和 -21.329 kJ·mol⁻¹,揭示2个湖泊沉积物对硅的吸附反应均能自发进行。乌梁素海吸附硅的 ΔG^0 略小于岱海,表明乌梁素海沉积物与单硅酸间的吸附力、吸附能级及吸附反应的自发程度略高于岱海沉积物,相应地吸附反应的生成物较稳定,对硅的吸附能力相对较强,这从一个侧面反映了2个湖泊沉积物在来源、粒度及矿物组成等方面的差异^[32]。

硅酸可通过—OH 吸附于沉积物各种氧化物及铁硅酸盐类矿物表面形成吸附位点。Freundlich 交叉型吸附等温式中, k 为吸附容量常数,表示沉积物表面的吸附位点数量。岱海沉积物的 k 值明显高于乌梁素海,表明岱海沉积物对硅的饱和吸附量大于乌梁素海,这与由 Langmuir 交叉型吸附等温式拟合所得的 Q_m 值相吻合。乌梁素海沉积物对硅的最大吸附量(Q_m) 低于岱海沉积物,可能与乌梁素海为黄河改道后形成的牛轭湖,沉积物砂质成分较高及有机质含量相对较低有关^[32],也可能与由沉积物粒度、

平衡浓度低于 0.89 mg·L⁻¹ 时,乌梁素海沉积物向上覆水释放硅,平衡浓度 > 0.89 mg·L⁻¹ 时,该湖泊沉积开始从上覆水中吸附硅;平衡浓度低于 2.44 mg·L⁻¹ 时,岱海沉积物向上覆水释放硅,平衡浓度 > 2.44 mg·L⁻¹ 时,该湖泊沉积开始从上覆水中吸附硅。总体上,在实验设定的低浓度梯度内,岱海和乌梁素海沉积物分别处于解吸硅和吸附硅的吸附/解吸反应的不同阶段,与本研究小组前期得出的岱海沉积物中生源硅含量远高于乌梁素海的结论相一致^[29~31],也反映了不同类型湖泊中硅的生物地球化学循环的差异性^[30]。

利用推导的 Temkin 交叉型吸附等温式,结合 Langmuir 交叉型吸附等温式和 Freundlich 交叉型吸附等温式,拟合了硅在乌梁素海和岱海沉积物上的等温吸附特征。结果显示,此3种交叉型吸附等温式均能较好地描述硅在岱海和乌梁素海沉积物上的吸附行为, R^2 均在 0.75 以上(表2)。

矿物组成(活性铁、活性铝)^[33] 等引起的多重吸附点位差异有关^[15]。与我国西南地区的峨土、黄褐土和紫水稻土^[15],以及辽宁省的淹育型水稻土^[19]、淹育型棕壤、草甸土和沼泽土^[18] 相比,岱海和乌梁素海沉积物对硅的最大吸附量(Q_m) 较低。

表2还表明,3种交叉型吸附等温式对2个湖泊沉积物的 NAS 和 ESC₀ 的拟合结果一致性较好,均体现了岱海沉积物的 ESC₀ 和 NAS 显著高于乌梁素海沉积物的特征,岱海是以硅藻为优势种之一的藻型富营养化湖泊,湖泊生态系统中硅的生物地球化学循环速率较快,沉积物中硅的含量显著高于乌梁素海的前期研究成果相一致^[29~31]。

自然水体中,硅作为主要生源要素通常以溶解态单体正硅酸盐 Si(OH)₄ 形态存在,它是水生植物(特别是硅藻类)生长繁殖所必需的营养成分。前期研究表明,岱海有藻类 76 属,其中硅藻门 21 属^[34],硅藻类浮游植物的生长需求是造成岱海上覆水中 SiO₃²⁻ 浓度偏低(SiO₃²⁻ 的平均浓度仅为 1.0 mg·L⁻¹) 的主要原因^[29]。吸附等温实验结果显示,在较低的浓度梯度内(≤ 3 mg·L⁻¹),岱海沉积物基本处于释放阶段;在岱海真实环境体系中(上覆水

中 SiO_3^{2-} 浓度介于 $0.7 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 沉积物内较高的 NAS 将为硅藻类浮游植物的生长提供重要营养硅源, 这也从另一侧面佐证了岱海硅藻类浮游植物初级生产力主要受 Si 限制的结论^[29]. 硅藻不是乌梁素海的优势浮游植物^[35], 硅从上覆水转移至沉积物的生物泵功能相对较弱, 使得乌梁素海上覆水中 SiO_3^{2-} 维持在较高的含量水平 (平均值为 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而沉积物中生源硅的含量较低 (平均值为 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[30]. 因此, 在实验设定的浓度梯度内 ($\leq 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 该湖泊沉积物处于吸附阶段, 沉积物成为上覆水中硅的“汇”.

3.3 吸附后形态再分布

沉积物中硅的形态分布是影响其生物有效性的关键因素, 被沉积物吸附硅的形态再分布是评价水环境中硅的再循环能力和潜在释放风险的重要判据. 按照 Tessier 连续提取法^[25]的操作步骤可依次定义出 5 种沉积硅的形态: 离子交换态 (IEF-Si)、碳酸盐结合态 (CF-Si)、铁锰氧化物结合态 (IMOF-Si)、有机物硫化物结合态 (OSF-Si)、残渣态 (Residual). 由于残渣态硅不具生物地球化学活性, 不易参与再循环, 本研究重点探讨前 4 种形态 (生物有效性硅) 的形态再分布及其环境地球化学意义.

一般而言, 沉积物中 IEF-Si 和 CF-Si 对环境变化反应敏感, 易于从沉积物中释放进入到上覆水体中, 成为浮游植物的重要营养源. 研究表明, 吸附实验对沉积物中不同形态硅的影响程度不同. 实验结果显示, 随浓度梯度升高, 岱海和乌梁素海沉积物中 IEF-Si 含量有先降低后升高至平衡的趋势, 且吸附平衡后其含量略高于吸附前 (图 3). 当处理浓度 $< 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 即上覆水中硅的含量低于 ESC_0 时,

岱海沉积物中 IEF-Si 含量低于吸附前, 表明沉积物向上覆水体释硅, 成为上覆水的硅源. 当处理浓度 $< 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 即上覆水中硅的含量低于 ESC_0 时, 乌梁素海沉积物中 IEF-Si 含量低于吸附前, 表明沉积物向上覆水体释硅, 成为上覆水的硅源; 当处理浓度 $> 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 即上覆水中硅的含量高于 ESC_0 时, 乌梁素海沉积物中 IEF-Si 含量高于吸附前, 表明沉积物从上覆水体中吸附硅, 成为上覆水中硅的汇. 随浓度梯度升高, 2 个湖泊沉积物中 CF-Si 含量也有先降低后升高至平衡的趋势, 但吸附平衡后其含量均低于吸附前 (图 3), 揭示实验条件下 CF-Si 可持续向上覆水体释放硅. 上述研究揭示岱海沉积物中自身结合的可解吸硅较高, 这与用 3 种交叉型吸附等温方程对 ESC_0 和 NAS 的拟合结果相一致.

IMOF-Si 和 OSF-Si 是 2 个湖泊沉积物中生物有效性硅的主导形态 (图 3 和图 4), 且 IMOF-Si 的含量高于 OSF-Si, 可能与 2 个湖泊沉积物中矿物组成^[7]及有机质和铁锰氧化物对 Si 的吸附特性有关. 结果显示, 在实验设定的浓度梯度内, 随处理浓度升高, 2 个湖泊沉积物中 IMOF-Si 和 OSF-Si 含量均有明显升高趋势; 吸附后, 岱海沉积物中 IMOF-Si 和 OSF-Si 含量低于吸附前, 而乌梁素海沉积物中 IMOF-Si 和 OSF-Si 含量高于吸附前. 吸附前后, IMOF-Si 和 OSF-Si 的形态再分布特征与前文述及的 2 个湖泊在实验条件下分别处于吸附和释放阶段有关. 这一实验事实与前文拟合结果相吻合, 揭示当上覆水中硅的浓度小于 ESC_0 时 (如岱海), 沉积物中的 IMOF-Si 和 OSF-Si 也可成为上覆水可观的硅源; 当上覆水中硅的浓度大于 ESC_0 时 (如乌梁素海), 沉积物中的活性铁、活性铝等矿物及有机质等均可

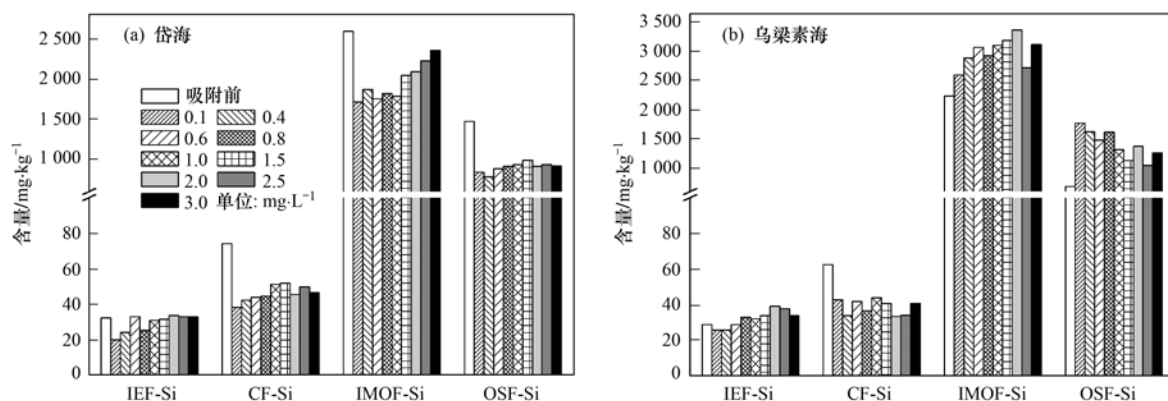


图 3 岱海和乌梁素海吸附后各形态硅含量

Fig. 3 Form distribution of silicate after adsorption in the sediments from the two lake

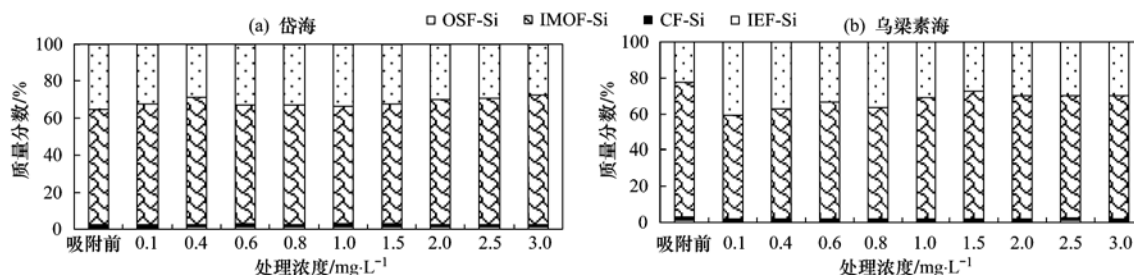


图4 岱海和乌梁素海吸附后各形态硅所占质量分数

Fig. 4 Mass fraction of silicate forms after adsorption in the sediments from the Daihai Lake and Wuliangsu Lake

成为吸附硅的基质,使上覆水中的硅向沉积物中转移。

总体上,在实验设定浓度梯度范围内,2个湖泊沉积物对硅的源汇作用与前期研究成果^[29~31]相一致。吸附前后,IMOF-Si和OSF-Si形态再分布的差异性可能反映了2个湖泊在富营养化类型、沉积物有机质来源及矿物组成等方面的差异。

4 结论

(1)在低浓度梯度范围内,硅在乌梁素海和岱海沉积物上的吸附行为均可用 Temkin、Langmuir 和 Freundlich 交叉型吸附等温式描述,且2个湖泊沉积物分别处于吸附硅和解吸硅的吸附/解吸反应的不同阶段。

(2)结合 Langmuir 交叉型吸附等温式和 Freundlich 交叉吸附等温式,推导了 Temkin 交叉型吸附等温式,并用此3种交叉型吸附等温式较好地描述了硅在2个湖泊沉积物上的吸附行为。结果表明,3种交叉吸附等温式对2个湖泊沉积物的 NAS 和 ESC_0 的拟合结果一致性较好,均体现了岱海沉积物的 ESC_0 和 NAS 显著高于乌梁素海沉积物的特征;在岱海真实环境体系中,沉积物内较高的 NAS 将为硅藻类浮游植物的生长提供重要营养硅源,佐证了岱海硅藻类浮游植物初级生产力主要受 Si 限制的结论;在实验设定的浓度梯度内,乌梁素海沉积物处于吸附阶段,是上覆水中硅的“汇”。

(3)形态再分布结果表明,当上覆水中硅的浓度小于 ESC_0 时,沉积物中的 IEF-Si 会向上覆水释放硅,而 IMOF-Si 和 OSF-Si 的可持续释硅能力也不容忽视;当上覆水中硅的浓度大于 ESC_0 时,沉积物中的活性铁、活性铝等矿物及有机质等均可成为吸附硅的基质,使上覆水中的硅向沉积物中转移。

参考文献:

[1] Pan G, Krom M D, Herut B. Adsorption-desorption of phosphate

on airborne dust and riverborne particulates in East Mediterranean seawater [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36** (16): 3519-3524.

[2] An W C, Li X M. Phosphate adsorption characteristics at the sediment-water interface and phosphorus fractions in Nansi Lake, China, and its main inflow rivers [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **148**(1): 173-184.

[3] Bajpai A K, Rajpoot M, Mishra D D. Static and kinetic studies on the adsorption behavior of Sulfadiazene [J]. Adsorption, 2000, **6**(4): 349-357.

[4] Agyei N M, Strydom C A, Potgieter J H. An investigation of phosphate ion adsorption from aqueous solution by fly ash and slag [J]. Cement and Concrete Research, 2000, **30**(5): 823-826.

[5] Ho Y S, McKay G. Competitive sorption of copper and nickel ions from aqueous solution using peat [J]. Adsorption, 1999, **5** (4): 409-417.

[6] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems [J]. Water Research, 1998, **32**(2): 393-399.

[7] O'Connor D J, Connolly J P. The effect of concentration of adsorbing solids on the partition coefficient [J]. Water Research, 1980, **14**(10): 1517-1523.

[8] Honeyman B D, Santschi P H. Metals in aquatic systems [J]. Environmental Science & Technology, 1988, **22**(8): 862-871.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Miyake Y, Takahashi E. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1983, **29**(1): 71-83.

[12] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. London: Academic Press, 1995.

[13] Wiese J, Wiese H, Schwartz J, et al. Osmotic stress and silicon act additively in enhancing pathogen resistance in barley against barley powdery mildew [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, **168**(2): 269-274.

[14] Liang Y C, Wong J W C, Wei L. Silicon-mediated enhancement

- of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(4): 475-483.
- [15] Qiu L P, Zhang X C, Cheng J M, *et al.* Isotherms and kinetics of Si adsorption in soils [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 2010, **60**(2): 157-165.
- [16] Ma J F, Takahashi E. The effect of silicic acid on rice in a P-deficient soil [J]. *Plant and Soil*, 1990, **126**(1): 121-125.
- [17] 刘鸣达, 张玉龙, 李军, 等. 应用等温吸附曲线判断水稻土供硅能力 I 等温曲线方程参数与水稻相对产量的关系 [J]. *土壤通报*, 2003, **34**(4): 312-314.
- [18] 许屹, 韩春兰, 刘阳, 等. 吸附等温线方程参数对不同 pH 水稻土供硅能力的评价 [J]. *中国农学通报*, 2006, **22**(6): 237-239.
- [19] 胡克伟, 颜丽, 关连珠, 等. 施磷对水稻土硅素吸附与解吸特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, **9**(3): 299-302.
- [20] Huang L Y, Li H X, Zhang X M, *et al.* Silicate adsorption in paddy soils of Guangdong Province, China [J]. *Pedosphere*, 2006, **16**(5): 654-659.
- [21] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局 [J]. *地理研究*, 2006, **25**(6): 1003-1012.
- [22] 周云凯, 姜加虎, 黄群, 等. 内蒙古岱海水体营养状况分析 [J]. *干旱区地理*, 2006, **29**(1): 42-46.
- [23] 吕昌伟, 何江, 梁英, 等. 乌梁素海和岱海上覆水中碳的形态分布及其制约机制 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(2): 330-338.
- [24] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [25] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [26] Choy K K H, McKay G, Porter J F. Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, **27**(1-2): 57-71.
- [27] Özacar M. Equilibrium and kinetic modelling of adsorption of phosphorus on calcined alunite [J]. *Adsorption*, 2003, **9**(2): 125-132.
- [28] 蒋以超, 张一平. 土壤化学过程的物理化学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [29] 吕昌伟, 何江, 梁英, 等. 岱海硅藻类浮游植物初级生产力 Si 限制初探 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 639-644.
- [30] Lü C W, He J, Liang Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of biogenic silica and its significance in the Wuliangsuhai Lake and Daihai Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(2): 100-105.
- [31] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海和岱海沉积磷形态分布的差异性研究 [J]. *沉积学报*, 2008, **26**(3): 508-512.
- [32] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮, 磷, 硅)的地球化学特征 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [33] 李孝良, 于群英, 许箴. 土壤磷、硅吸附性能研究 [J]. *安徽农业技术师范学院学报*, 1999, **13**(2): 43-47.
- [34] 王苏民, 吴瑞金, 余源盛. 岱海-湖泊环境与气候变化 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [35] 李畅游, 武国正, 李卫平, 等. 乌梁素海浮游植物调查与营养状况评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(z1): 283-287.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 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

国内外公开发行