

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚A的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响

张景环^{1,2}, 陈春溶³, 张玮航³, 栗桂州³

(1. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 青岛 266061; 2. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(北京师范大学), 北京 100875; 3. 中国药科大学分析化学教研室, 南京 210009)

摘要: 通过静态吸附实验,研究了3种不同类型的表面活性剂(阳离子:十六烷基三甲基溴化铵, CTAB; 阴离子:十二烷基苯磺酸钠, SDBS; 非离子:曲拉通 100, TX100)对苯并[a]芘(BaP)在黑炭表面吸附解吸的影响。结果表明,3种表面活性剂的存在在均会增加 BaP 在黑炭表面吸附的非线性程度。CTAB 的存在可以促进 BaP 在黑炭表面的吸附同时抑制了 BaP 的解吸,然而 SDBS 的存在降低了 BaP 在黑炭表面的吸附并增加了吸附过程的可逆性。与 CTAB 和 SDBS 不同, TX100 对 BaP 在黑炭表面吸附解吸的影响取决于其添加浓度。低浓度的 TX100 (50 mg·L⁻¹) 能够促进 BaP 在黑炭上的吸附并抑制 BaP 的解吸, 吸附能力参数 K_d 值(在 $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下)从 188 062 mL·g⁻¹ 增大到 264 179 mL·g⁻¹, 解吸滞后指数 HI 从 0.44 降低到 0.39。随着 TX100 浓度增加到 150 mg·L⁻¹ 和 200 mg·L⁻¹, TX100 对 BaP 的吸附表现出抑制作用并能够促进 BaP 的解吸, K_d 值(在 $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下)从 188 062 mL·g⁻¹ 分别降低到 182 751 mL·g⁻¹ 和 178 730 mL·g⁻¹, 解吸滞后指数从 0.44 分别升高到 0.65 和 0.70。本研究为预测多环芳烃在表面活性剂污染的环境中的分布特征和最终归宿提供了理论依据。

关键词: 表面活性剂; 黑炭; 苯并[a]芘; 吸附; 解吸

中图分类号: X131.2; X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1639-07

Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon

ZHANG Jing-huan^{1,2}, CHEN Chun-rong³, ZHANG Wei-hang³, LI Gui-zhou³

(1. College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Department of Analytical Chemistry, China Pharmaceutical University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Sorption and desorption of benzo[a]pyrene (BaP) onto black carbon (BC) extracted from sediment were studied in the presence of three types of surfactants (cetyltrimethylammonium bromide, CTAB; sodium dodecylbenzene sulfonate, SDBS; Triton X-100, TX100) to examine the role of surfactants in sorption and desorption. Nonlinearity of the sorption isotherms of BaP increased in the presence of surfactants. CTAB enhanced the sorption capacity and irreversibility of BaP on BC. However, the presence of SDBS reduced the sorption capacity and desorption hysteresis. Unlike CTAB and SDBS, the influence of TX100 on sorption and desorption was concentration dependent. Low levels of TX100 (50 mg·L⁻¹) enhanced BaP sorption and reduced desorption. The sorption capacity parameter K_d value (at $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) increased from 188 062 mL·g⁻¹ to 264 179 mL·g⁻¹, and the hysteresis index HI decreased from 0.44 to 0.39. When the TX100 concentration increased to 150 mg·L⁻¹ and 200 mg·L⁻¹, TX100 reduced the sorption of BaP to BC and promoted desorption. The K_d value (at $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) decreased from 188 062 mL·g⁻¹ to 182 751 mL·g⁻¹ and 178 730 mL·g⁻¹, respectively, and the HI value increased from 0.44 to 0.65 and 0.70. Our finding can provide more information for predicting the distribution and fate of PAH in the surfactant polluted environment.

Key words: surfactant; black carbon; benzo[a]pyrene; sorption; desorption

人类排放的生活、医疗和工业废水中含有大量的表面活性剂和有机物,通过各种途径进入土壤/沉积物环境后,不仅会造成环境的有机复合污染^[1,2],同时表面活性剂对共存的有机污染物的吸附/解吸行为也会产生强烈的影响^[3~5]。黑炭是土壤/沉积物有机质中“硬碳”的主要组成部分,黑炭对有机污染物的吸附能力是其他天然有机质吸附能力的 10 ~ 1 000 倍^[6]。研究表明,凝聚态有机质包括干酪根、煤和黑炭,占有有机污染物总吸附的 90% 以上^[7]。Lohmann 等^[8]报道海港沉积物中黑炭对 PAHs、

PCBs 和 PCDDs 总吸附的贡献率在 80% 以上,黑炭的这种超强吸附能力在很大程度上影响着有机污染物在环境中的分布和最终归宿。

表面活性剂对有机污染物在土壤/沉积物中吸附/解吸行为的影响主要包括 2 个方面:一方面,由于表面活性剂胶束和单体对有机物具有增溶作用,

收稿日期: 2011-05-08; 修订日期: 2011-12-06

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(北京师范大学)开放课题专项(10K05ESPCN)

作者简介: 张景环(1982~),女,博士,讲师,主要研究方向为环境染化学, E-mail: zhangjinghuan@mail.bnu.edu.cn

提高了有机污染物在水中的溶解度,从而降低了有机污染物在土壤/沉积物上的吸附量^[9,10];另一方面,有机污染物可以分配到吸附在土壤/沉积物表面的表面活性剂分子中,从而增加了有机污染物吸附量^[11]. 目前,有关表面活性剂对疏水性有机污染物在土壤/沉积物中吸附/解吸的影响报道较多. 研究表明,直链烷基苯磺酸钠(LAS)能够抑制萘和菲在土壤表面的吸附,而低浓度的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)促进了萘和菲的吸附^[12]. CTAB和十二烷基苯磺酸钠(SDBS)的存在都可以降低甲苯和莠去津在土壤和沉积物中的吸附^[4,13]. 非离子表面活性剂曲拉通 100(TX100)抑制了土壤对扑草净的吸附且促进了扑草净从土壤表面的解吸^[14]. 而有关表面活性剂对疏水性有机污染物在黑炭表面吸附/解吸的影响报道较少. 鉴于此,本研究以黑炭和苯并[a]芘为对象,选择了3种表面活性剂(CTAB、SDBS

和TX100),分析不同类型表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸特征的影响,以期预测多环芳烃在土壤/沉积物环境中,尤其是表面活性剂污染严重的环境中的分布和迁移特征提供一定的理论依据.

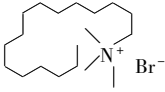
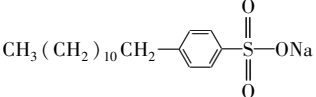
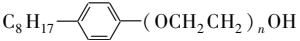
1 材料与方法

1.1 试剂

苯并[a]芘(BaP,纯度>98%)为Fluka公司生产(美国),BaP在25℃下水中的溶解度是 $3.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,其辛醇-水分配系数 $\lg K_{ow}$ 是 $5.9^{[15]}$. 阳离子表面活性剂CTAB、阴离子表面活性剂SDBS和非离子表面活性剂TX100为分析纯,其理化性质如表1所示^[16,17]. BaP的标准储备液利用色谱级甲醇制备,过程中需要保证甲醇所占体积分数低于0.2%,避免可能出现的共溶剂效应^[18].

表1 3种表面活性剂的主要理化性质

Table 1 Selected physiochemical properties of three surfactants

表面活性剂	分子式	相对分子质量	临界胶束浓度 CMC / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	HLB ¹⁾	分子结构式
CTAB	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	364	335	15.8	
SDBS	$\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$	348	418	11	
TX100	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4\text{O}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_{9.5}\text{H}$	625	181	13.5	

1) 亲水亲油平衡系数

1.2 黑炭样品的制备

表层(0~20 cm)沉积物样品采自大辽河水系的太子河,将采集的样品放在冷冻干燥仪(FD-1A,中国)中冷冻干燥,研磨过100目筛后,装入棕色广口瓶中低温-20℃保存备用. 沉积物中黑炭的分离采用热氧化方法^[19],具体步骤如下:取50 g沉积物样品放入1000 mL塑料瓶中,加入500 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸,室温振荡24 h,然后以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心30 min,弃去上层溶液,去除沉积物中的碳酸盐矿物. 向塑料瓶中的残余物中加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸+10%氢氟酸溶液,室温振荡5 d,离心分离,弃去上层清液,去除沉积物中的硅酸盐矿物,这个过程重复4次. 将残余物放入马弗炉中,在375℃下加热24 h,即可得到黑炭样品,过程中要保证空气流通,空气流速为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 样品用去离子水清洗直至中

性,冷冻干燥,研磨过100目筛后储存于干燥器中备用. 黑炭样品的傅里叶红外光谱分析、¹³C固相核磁分析和扫描电子显微镜分析的结果参照文献[20].

1.3 吸附解吸实验

吸附实验:分别取适量的黑炭样品和一系列不同浓度的BaP溶液($50 \sim 500 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)放入50 mL玻璃离心管(带Teflon盖子)中,加入 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液调节溶液的离子强度,加入 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NaN_3 抑制微生物的生长^[6,21],控制固液比(20 mL:5 mg)使吸附百分比为30%~80%,密封后置于振荡器中于25℃下恒温避光振荡7 d,以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心30 min,取上清液用 $0.45 \mu\text{m}$ 尼龙滤膜过滤,测定上清液中BaP的浓度. 每组实验做2组平行实验,并做不加吸附剂的空白对照实验,测定BaP的回收率. 实验结果表明,添加不同浓度的BaP,测得BaP

的回收率均在 95% 以上,所以实验过程中由容器壁造成的损失可忽略不计. BaP 的吸附量用原始溶液浓度与平衡后水相浓度的差计算求得,表面活性剂对 BaP 在黑炭表面吸附解吸的影响实验中,CTAB 和 SDBS 的添加浓度分别为 50、100 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TX100 的添加浓度分别为 50、150 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以下过程同吸附等温线的测定.

解吸实验:在吸附平衡实验后,取出 10 mL 的上层清液,用相同体积不含 BaP 的 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaN_3 混合溶液替换,其他条件同吸附实验,恒温 (25℃) 避光振荡 24 h,平衡后 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心分离,取上清液用 0.45 μm 尼龙滤膜过滤,测定上清液中 BaP 的浓度,以上过程重复 5 次.

1.4 表面活性剂对 BaP 的增溶实验

在 50 mL 离心管(带 Teflon 盖子)中,加入过量的 BaP 固体和一定浓度的 CTAB、SDBS 或 TX100 溶液(0~200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),确保 BaP 溶解达到饱和,溶液总体积为 40 mL. 密封后置于振荡器中以 150 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速恒温 (25℃) 避光振荡 48 h,然后以 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 30 min,用 0.45 μm 尼龙滤膜过滤,取出上清液稀释后测定 BaP 的浓度.

1.5 分析检测和数据处理

BaP 的测定采用高效液相色谱法,仪器为美国 Waters 1525,检测器为 Waters 474 荧光检测器. 色谱柱为 C18 反相色谱柱(4.6 mm $\times$ 150 mm);流动相为甲醇:水=95:5;流动相流速为 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;激发波长和发射波长分别为 296 nm 和 408 nm. TX100 和 SDBS 浓度的测定采用紫外分光光度法,测定波长分别为 223 nm 和 224 nm^[22],CTAB 浓度的测定方法参照文献[23].

本研究的吸附解吸数据用 Freundlich 吸附方程拟合:

$$q_e = K_F \cdot c_e^n$$

$$\lg q_e = \lg K_F + n \lg c_e$$

式中, c_e 为液相平衡浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), q_e 为固相吸附量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), K_F 为 Freundlich 吸附能力参数 [$(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})^n$], n 为吸附等温线的非线性因子. 黑炭对 BaP 的解吸滞后性可用解吸滞后指数(HI)来表示^[24]:

$$\text{HI} = n_{\text{des}}/n_{\text{ads}}$$

式中, n_{ads} 和 n_{des} 分别为吸附和解吸过程的非线性指数.

2 结果与讨论

2.1 表面活性剂对 BaP 在黑炭表面吸附特征的影响

在 CTAB、SDBS 和 TX100 存在的情况下,BaP 在黑炭表面的吸附/解吸等温线如图 1 所示. Freundlich 方程对 BaP 的吸附/解吸数据的拟合效果较好,拟合参数见表 2. 表 2 表明,CTAB、SDBS 和 TX100 的存在均增加了黑炭对 BaP 吸附等温线的非线性程度. 当 CTAB、SDBS 和 TX100 的浓度从 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,BaP 的吸附非线性因子 n 值分别从 0.343 降低到 0.278、0.310 和 0.317. 黑炭对 BaP 的吸附机制主要是表面吸附和孔隙填充理论^[25],吸附非线性的增加表明吸附在黑炭上的表面活性剂增加了黑炭的非均质性和孔隙度. Nadeem 等^[26]曾报道用表面活性剂改性过的活性炭具有更大的比表面积、孔径和孔体积,使活性炭对有机污染物更具有亲和力,并可以给有机污染物提供更多的吸附位. 不同类型表面活性剂对 BaP 在黑炭表面吸附/解吸行为的影响差别较大,这主要取决于它们的化学结构、临界胶束浓度和添加浓度. 从图 1 (a)可以看出,阳离子表面活性剂 CTAB 能够促进黑炭对 BaP 的吸附,并且其吸附能力随着 CTAB 添加浓度的增大而增大. 当 CTAB 的浓度从 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 50、100 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,黑炭对 BaP 的吸附能力参数 K_d 值(在 $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下)分别从 188 062 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 升高到 220 292、304 556 和 423 049 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 与 CTAB 正好相反,阴离子表面活性剂 SDBS 的存在抑制了 BaP 在黑炭表面的吸附[图 1 (b)]. 当 SDBS 的浓度从 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 50、100 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, K_d 值(在 $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下)分别从 188 062 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低到 184 743、178 754 和 175 060 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$,这说明黑炭对 BaP 的吸附能力随着 SDBS 添加浓度的增大而减小. 与 CTAB 和 SDBS 不同,非离子表面活性剂 TX100 对黑炭吸附 BaP 的影响主要取决于 TX100 的添加浓度[图 1 (c)]. 在低 TX100 浓度(50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下,TX100 能够促进 BaP 在黑炭上的吸附, K_d 值(在 $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下)从 188 062 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增大到 264 179 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 随着 TX100 的浓度增加到 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TX100 对 BaP 的吸附表现出抑制作用, K_d 值(在 $c_e = 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下)分别降低到 182 751 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 178 730 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$.

在 BaP、表面活性剂、黑炭和水共存的体系中,主要存在以下 4 种作用:①表面活性剂与 BaP 在黑

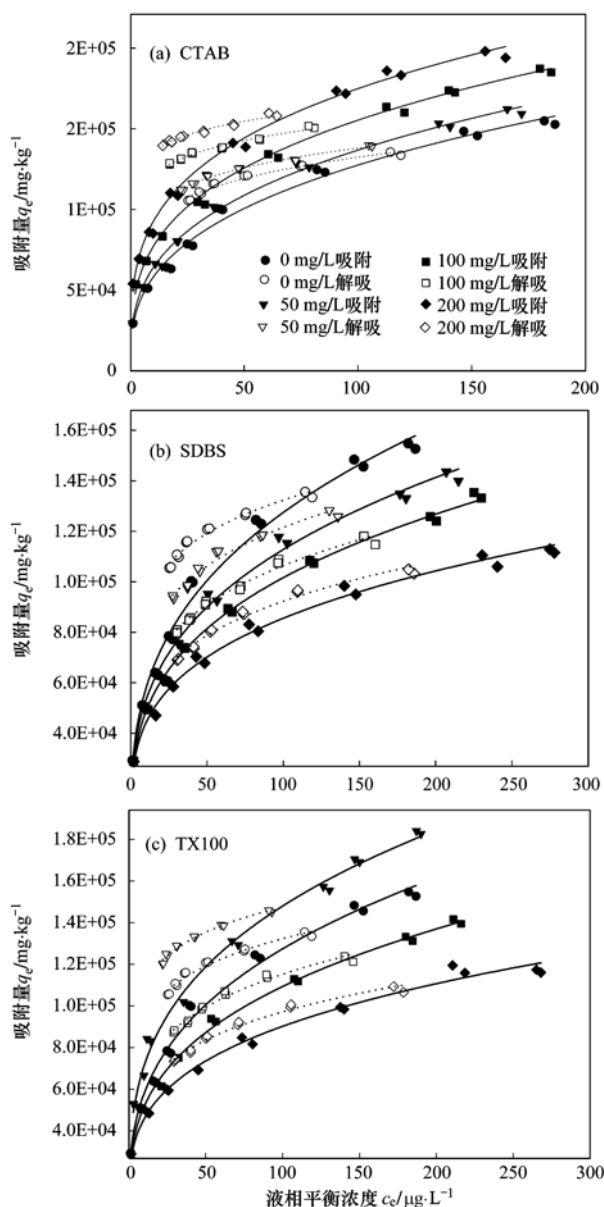


图1 在CTAB、SDBS和TX100存在下，BaP在黑炭表面的吸附解吸等温线

Fig. 1 Sorption and desorption isotherms of BaP onto BC in the presence of CTAB, SDBS and TX100

炭表面的竞争吸附作用；②不同形态表面活性剂（单体、胶束和半胶束）之间的平衡作用；③BaP在表面活性剂单体和胶束中的分配作用（增溶作用）；④吸附在黑炭表面的半胶束对BaP的吸附作用^[9,10,27]。黑炭对BaP的吸附是这4种作用共同作用的结果。因此，CTAB、SDBS和TX100对BaP在黑炭表面吸附/解吸的不同影响主要取决于表面活性剂在黑炭表面的吸附作用以及它们对BaP的增溶作用。以下讨论造成这种差异的原因。

2.2 表面活性剂在黑炭表面的吸附特征

图2为CTAB、SDBS和TX100在黑炭表面的吸

附等温线，3种不同类型表面活性剂在黑炭表面的吸附能力顺序为：CTAB > TX100 > SDBS。表面活性剂在含碳物质表面的吸附机制主要包括以下5种作用：离子交换、疏水键结合、氢键结合、分散力和静电吸引作用^[28]。CTAB在黑炭表面的吸附量最高，这主要是因为CTAB分子中的亲水性基团 $[(CH_3)_3NR]^+$ 由于带正电荷，通过静电吸引作用更容易吸附在带负电荷的黑炭表面^[29]。吸附在黑炭表面的CTAB可形成半胶束，更多的BaP可以分配到半胶束中，从而使总吸附量增加^[30]。另外，在CTAB存在的情况下，BaP在水中的溶解度变化不大（图3）。因此，由于CTAB在黑炭表面的吸附能力较强，而对BaP的增溶作用很弱，CTAB最终可以促进BaP在黑炭表面的吸附。阴离子表面活性剂SDBS由于带负电荷，在黑炭表面吸附能力远远低于CTAB，这使得分配到SDBS半胶束中的BaP明显减少。同时，SDBS的存在很大程度上增加了BaP在水中的溶解度（图3），当SDBS的浓度从 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增

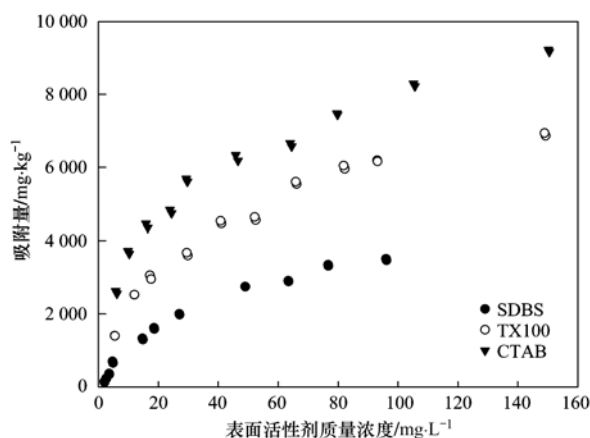


图2 CTAB、TX100和SDBS在黑炭表面的吸附等温线

Fig. 2 Sorption isotherms of CTAB, TX100 and SDBS onto BC

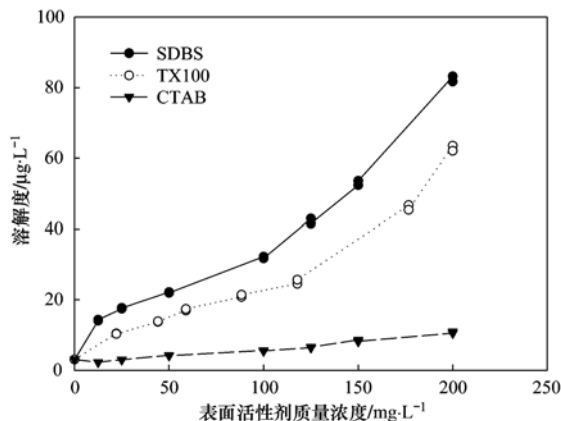


图3 CTAB、TX100和SDBS对BaP的溶解度的影响

Fig. 3 Solubility of BaP as a function of CTAB, TX100 and SDBS concentration

加到 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, BaP 的溶解度增高了接近 27 倍. SDBS 对 BaP 的这种强增溶作用以及 SDBS 分子与 BaP 在黑炭表面的竞争吸附作用最终降低了 BaP 在黑炭表面的吸附量. 与 CTAB 和 SDBS 不同, 低浓度非离子表面活性剂 TX100 ($<50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对 BaP 的溶解度影响不大(图 3), 此时黑炭对 BaP 的吸附主要取决于 TX100 在黑炭表面的吸附作用. 吸附态 TX100 对 BaP 的分配作用最终导致 BaP 的吸附量增加. 随着 TX100 的浓度增加到 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, BaP 的溶解度发生了明显变化, 升高到原来的 20 倍(图 3). 高浓度 TX100 能够抑制 BaP 在黑炭上的吸附主要是由于 TX100 对 BaP 的这种强增溶作用.

2.3 表面活性剂对 BaP 解吸滞后性的影响

在 CTAB、SDBS 和 TX100 存在下, 黑炭对 BaP 的解吸滞后指数如表 2 所示. 滞后指数是吸附不可逆程度的量化指标. 当 HI 接近 1 时, 解吸速率和吸附速率接近, 其吸附和解吸附等温线重合, 说明吸附过程是可逆的; 当 $\text{HI} < 1$ 时, 解吸速率小于吸附速率, 说明存在滞后作用, 吸附过程是不可逆的^[31]. 从表 2 可以看出, BaP 在黑炭表面的滞后指数 $\text{HI} = 0.44$, 说明吸附是完全不可逆的, 并且 CTAB、SDBS

和 TX100 的存在强烈影响了 BaP 的解吸滞后性. CTAB 的存在在很大程度上增加了 BaP 在黑炭表面解吸的滞后性. 当 CTAB 的浓度从 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 50 、 100 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 滞后指数 HI 分别从 0.44 减小到 0.40 、 0.34 和 0.30 . 这说明随着溶液中 CTAB 浓度的增加, BaP 更难从黑炭表面解吸下来, 这主要是由于 BaP 可以分配到吸附态 CTAB 中. Parker 等^[32]也曾报道吸附态的表面活性剂较天然沉积物有机质对疏水性有机污染物的吸附能力更强, 从而可以抑制有机污染物的解吸. 然而, 阴离子表面活性剂 SDBS 能够大大增加 BaP 在黑炭表面的吸附可逆性, 并且吸附可逆程度随着 SDBS 浓度的升高而升高. 随着 SDBS 浓度的增加, 滞后指数 HI 最高可升高到 0.76 , 这是因为 SDBS 对 BaP 的增溶作用促使 BaP 从黑炭相进入水相中. 与 CTAB 和 SDBS 不同, 低浓度的 TX100 ($50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 能够抑制 BaP 在黑炭表面的解吸, 滞后指数 HI 从 0.44 降低到 0.39 , 而高浓度的 TX100 ($150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 能够促进 BaP 的解吸, 滞后指数 HI 从 0.44 分别升高到 0.65 和 0.70 . 如上所述, 阳离子表面活性剂 CTAB 既可以提高 BaP 在黑炭表面的吸附量同时也可以增加吸附过程的不可逆性, 从而能够有效

表 2 在 CTAB、SDBS 和 TX100 存在下, BaP 在黑炭表面的吸附/解吸等温线的 Freundlich 拟合参数和滞后指数

Table 2 Freundlich sorption and desorption parameters of BaP onto BC in the presence of different surfactants											
项目	表面活性剂浓度		n	K_F	$\lg K_F$	R^2	$N^{1)}$	$K_d^{3)})/\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$			
	$/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							$c_e=50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_e=100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		
吸附	对照	0	$0.343\pm0.003^{2)}$	26 274	4.42 ± 0.010	0.991	18	188 062	119 268		
		50	0.331 ± 0.002	29 690	4.47 ± 0.014	0.996	18	220 292	138 551		
	CTAB	100	0.305 ± 0.004	37 971	4.58 ± 0.011	0.993	18	304 556	188 127		
		200	0.278 ± 0.002	48 646	4.69 ± 0.009	0.992	18	423 049	256 476		
		50	0.318 ± 0.005	34 245	4.53 ± 0.016	0.989	18	264 179	164 663		
	TX100	150	0.327 ± 0.003	24 337	4.39 ± 0.008	0.993	18	182 751	114 621		
		200	0.310 ± 0.006	23 126	4.36 ± 0.013	0.991	18	178 730	113 266		
		50	0.335 ± 0.005	25 199	4.40 ± 0.012	0.992	18	184 743	116 515		
	SDBS	100	0.319 ± 0.004	23 371	4.37 ± 0.010	0.993	18	178 754	112 118		
		200	0.317 ± 0.006	22 935	4.36 ± 0.017	0.991	18	175 060	110 534		
项目	表面活性剂浓度		n	K_F	$\lg K_F$	R^2	$N^{1)}$	$K_d^{3)})/\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$			HI ⁴⁾
	$/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							$c_e=5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_e=50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_e=100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	
吸附	对照	0	0.151 ± 0.002	65 952	4.82 ± 0.020	0.973	12	5 926 556	839 078	465 830	0.44
		50	0.133 ± 0.003	74 559	4.87 ± 0.021	0.985	12	7 370 434	1 001 136	548 908	0.40
	CTAB	100	0.103 ± 0.004	95 251	4.98 ± 0.024	0.978	12	11 038 077	1 399 243	751 397	0.34
		200	0.082 ± 0.002	111 985	5.05 ± 0.012	0.973	12	14 504 587	1 751 884	927 171	0.30
		50	0.125 ± 0.002	82 994	4.92 ± 0.010	0.981	12	8 559 491	1 141 426	622 367	0.39
	TX100	150	0.214 ± 0.005	43 037	4.63 ± 0.009	0.978	12	2 769 820	453 368	262 931	0.65
		200	0.216 ± 0.004	35 844	4.55 ± 0.007	0.98	12	2 282 569	375 339	217 979	0.70
		50	0.194 ± 0.002	49 826	4.70 ± 0.013	0.97	12	3 565 218	557 296	318 754	0.58
	SDBS	100	0.227 ± 0.002	37 436	4.57 ± 0.014	0.981	12	2 248 980	379 302	221 967	0.71
		200	0.240 ± 0.005	32 142	4.51 ± 0.018	0.981	12	1 802 418	313 224	184 957	0.76

1) 数据点; 2) 标准偏差; 3) 不同浓度下的吸附能力参数 $K_d = K_F \cdot c_e^{n-1}$; 4) HI 为解吸滞后指数

地将 BaP 固定在黑炭表面,不利于 BaP 在环境中的迁移.然而,阴离子表面活性剂 SDBS 和高浓度的非离子表面活性剂 TX100 可以将吸附态 BaP 移动到水相中,从而增加了 BaP 在环境中的迁移性.

3 结论

(1)阳离子表面活性剂 CTAB、阴离子表面活性剂 SDBS 和非离子表面活性剂 TX100 的存在都能够增加 BaP 在黑炭表面吸附的非线性程度.

(2)CTAB 的存在可以促进 BaP 在黑炭表面的吸附同时抑制了 BaP 的解吸.这是由于带正电荷的 CTAB 更容易吸附在黑炭表面,更多的 BaP 可以分配到吸附态 CTAB 中,从而导致吸附量增加.与 CTAB 相反,SDBS 的存在降低了 BaP 在黑炭表面的吸附量并增加了吸附过程的可逆性,这主要是因为 SDBS 对 BaP 的增溶作用促使 BaP 从黑炭相进入水相.

(3)与 CTAB 和 SDBS 不同,TX100 对 BaP 在黑炭表面吸附/解吸的影响取决于其添加浓度.当 TX100 浓度较低时($< 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),TX100 对 BaP 的溶解度没有明显的影响,吸附态 TX100 对 BaP 的分配作用增加了 BaP 在黑炭表面的吸附能力和解吸滞后性.随着 TX100 浓度的增加到 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TX100 对 BaP 的增溶作用加剧,促使吸附在黑炭表面的 BaP 迁移到水相中,从而抑制了 BaP 的吸附,同时促进了 BaP 的解吸.上述结果表明,CTAB 能够有效地将 BaP 固定在黑炭表面,而 SDBS 和高浓度 TX100 的存在有利于 BaP 在环境中的迁移.

参考文献:

- [1] Brownawell B J, Chen H, Zhang W J, *et al.* Sorption of nonionic surfactants on sediment materials[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(6): 1735-1741.
- [2] 戴树桂,董亮,王臻. 表面活性剂在土壤颗粒物上的吸附行为[J]. *中国环境科学*, 1999, **19**(5): 392-396.
- [3] Rodriguez-Cruz M S, Sanchez-Martin M J, Sanchez-Camazano M. Surfactant-enhanced desorption of atrazine and linuron residues as affected by aging of herbicides in soil[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **50**(1): 128-137.
- [4] 张景环,曾溅辉. 北京土壤对甲苯和萘的吸附及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1889-1894.
- [5] 张景环,曾溅辉. 表面活性剂对柴油在土壤中吸附的影响[J]. *环境化学*, 2007, **26**(5): 610-613.
- [6] Cornelissen G, Gustafsson Ö. Sorption of phenanthrene to environmental black carbon in sediment with and without organic matter and native sorbates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(1): 148-155.
- [7] Cornelissen G, Gustafsson Ö, Bucheli T D, *et al.* Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(18): 6881-6895.
- [8] Lohmann R, Macfarlane J K, Gschwend P M. Importance of black carbon to sorption of native PAHs, PCBs, and PCDDs in boston and New York harbor sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(1): 141-148.
- [9] Edwards D A, Luthy R G, Liu Z B. Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in micellar nonionic surfactant solutions [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(1): 127-133.
- [10] Jafvert C T. Sediment- and saturated-soil-associated reactions involving an anionic surfactant (dodecyl sulfate). 2. partition of PAH compounds among phases [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(6): 1039-1045.
- [11] Edwards D A, Adeel Z, Luthy R G. Distribution of nonionic surfactant and phenanthrene in a sediment/aqueous system [J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28**(8): 1550-1560.
- [12] Zhang J H, Zeng J H, He M C. Effects of temperature and surfactants on naphthalene and phenanthrene sorption by soil[J]. *Journal of Environmental Science*, 2009, **21**(5): 667-674.
- [13] Tao Q H, Wang D S, Tang H X. Effect of surfactants at low concentrations on the sorption of atrazine by natural sediment [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(7): 653-660.
- [14] Cao J, Guo H, Zhu H M, *et al.* Effects of SOM, surfactant and pH on the sorption-desorption and mobility of prometryne in soils [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(11): 2127-2134.
- [15] Mackay D, Shiu W Y, Ma K C. Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals [M]. Chelsea: Lewis Publishers, 1992.
- [16] Shen X Y, Sun Y L, Ma Z Y, *et al.* Effects of mixed surfactants on the volatilization of naphthalene from aqueous solutions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **140**(1-2): 187-193.
- [17] Pan G, Jia C X, Zhao D Y, *et al.* Effect of cationic and anionic surfactants on the sorption and desorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on natural sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 325-330.
- [18] Wauchope R D, Koskinen W C. Adsorption-desorption equilibria of herbicides in soil: a thermodynamic perspective [J]. *Weed Science*, 1983, **31**(4): 504-512.
- [19] Gélinais Y, Prentice K M, Baldock J A, *et al.* An improved thermal oxidation method for the quantification of soot/graphitic black carbon in sediments and soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(17): 3519-3525.
- [20] Zhang J H, He M C. Effect of structural variations on sorption and desorption of phenanthrene by sediment organic matter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **184**(1-3): 432-438.
- [21] Wen B, Zhang J J, Zhang S Z, *et al.* Phenanthrene sorption to

- soil humic acid and different humin fractions[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(9): 3165-3171.
- [22] Rao P H, He M. Adsorption of anionic and nonionic surfactant mixtures from synthetic detergents on soils [J]. Chemosphere, 2006, **63**(7): 1214-1221.
- [23] Simón M M B, Cózar A D E, Díez L M P. Spectrophotometric determination of cationic surfactants in frozen and fresh squid by ion-pair formation with methyl orange[J]. Analyst, 1990, **115**(3): 337-339.
- [24] Barriuso E, Laird D A, Koskinen W C, *et al.* Atrazine desorption from smectites[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(6): 1632-1638.
- [25] James G, Sabatini D A, Chiou C T, *et al.* Evaluating phenanthrene sorption on various wood chars [J]. Water Research, 2005, **39**(4): 549-558.
- [26] Nadeem M, Shabbir M, Abdullah M A, *et al.* Sorption of cadmium from aqueous solution by surfactant-modified carbon adsorbents[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **148**(2-3): 365-370.
- [27] Liu Z B, Laha S, Luthy R G. Surfactant solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in soil-water suspensions[J]. Water Science & Technology, 1991, **23**(1-3): 475-485.
- [28] Cheremisiöff P N, Ellerbusch F. Carbon adsorption handbook [M]. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1978. 241-279.
- [29] Langley L A, Villanueva D E, Fairbrother D H. Quantification of surface oxides on carbonaceous materials [J]. Chemistry of Materials, 2006, **18**(1): 169-178.
- [30] Park J W, Jaffe P R. Partitioning of three nonionic organic compounds between adsorbed surfactants, micelles, and water [J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(12): 2559-2565.
- [31] Pusino A, Pinna M V, Gessa C. Azimsulfuron sorption-desorption on soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, **52**(11): 3462-3466.
- [32] Parker S K, Bielefeldt A R. Aqueous chemistry and interactive effects on non-ionic surfactant and pentachlorophenol sorption to soil[J]. Water Research, 2003, **37**(19): 4663-4672.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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

国内外公开发行人