

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾潮滩重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

Triton X-100 在黄土上的吸附行为及影响因素

钟金魁^{1,2}, 赵保卫^{1,2*}, 朱琨¹, 钱小龙¹, 张杰西¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 兰州 730070)

摘要: 水土体系下,应用批实验法研究了 Triton X-100 在天然黄土上的吸附行为与平衡时间、Triton X-100 浓度、溶液离子强度和 pH 值的关系。结果表明, Triton X-100 在黄土中的吸附平衡时间约为 30 min, 其吸附动力学符合一级动力学模型, 相应拟合参数 Q_e 、 k_1 、 r^2 分别为 $3.041 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 0.102 min^{-1} 、 0.9934 。吸附等温线明显为非线性, 在利用的 4 种等温吸附模型中, Sips 模型对实验数据提供了最佳的拟合, 其拟合参数 $Q_{\max}$ 和 r^2 分别为 $3.202 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.9987 。溶液离子强度和 pH 值对 Triton X-100 在黄土上的吸附有显著的影响, 其吸附量随 NaCl 浓度的增加而明显增加, 随 pH 增加而降低。

关键词: 黄土; 吸附; Triton X-100; 动力学; 等温线; 离子强度; pH 值

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1114-06

Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors

ZHONG Jin-kui^{1,2}, ZHAO Bao-wei^{1,2}, ZHU Kun¹, QIAN Xiao-long¹, ZHANG Jie-xi¹

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Batch experiments involving soil-aqueous systems were conducted to determine sorption of Triton X-100 onto natural loess as a function of equilibrium time, Triton X-100 concentration, ionic strength, and pH value. The results showed that the equilibration time for sorption of Triton X-100 onto loess was about 30 min. The sorption kinetics of Triton X-100 fitted well to the pseudo-first-order kinetic model and the corresponding parameters Q_e , k_1 , and r^2 were $3.041 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 0.102 min^{-1} , and 0.9934 , respectively. Sorption isotherm was found to be distinctly nonlinear. The Sips model provided the best fitting to the experimental data among the four isothermal models tested. $Q_{\max}$ and r^2 of Sips model were $3.202 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and 0.9987 , respectively. It was found that the ionic strength and the pH of the solution had a significant influence on the sorption of Triton X-100 onto loess. The amount of Triton X-100 sorbed onto the loess increased significantly with increasing concentration of NaCl. Sorption of Triton X-100 onto loess was influenced greatly by pH, the amount of Triton X-100 sorbed decreased as the pH increased.

Key words: loess; sorption; Triton X-100; kinetics; isotherm; ionic strength; pH value

疏水有机化合物 (hydrophobic organic compounds, HOCs), 如多环芳烃、多氯联苯、二噁英、有机卤化物、农药等, 在环境中的广泛分布和缓慢释放会造成地下水和土壤的持久性污染, 已引起全世界的广泛关注^[1]。HOCs 的憎水性高, 在土壤颗粒上的吸附性强, 故从土壤中去除难度大^[2, 3]。近年来, 研究人员发现, 表面活性剂 (surface active agent, SAA) 的增溶特性以及降低表面张力的作用, 能够增加土壤中 HOCs 的流动性, 为从土壤中消除 HOCs 提供了一条新途径, 即表面活性剂增效修复技术 (surfactant-enhanced remediation technology, SERT)。该方法因去除率相对高, 费用相对低, 修复时间相对短, 已成为一种非常有前景的污染土壤修复技术^[1, 4]。

然而, 在 SERT 修复过程中, 土壤对 SAA 的吸附会造成 SAA 质量损失, 使其难于形成有效增溶 HOCs 的胶团, 从而降低其对 HOCs 的解吸能力, 这是 SERT 中一个主要的限制因素。另外, 吸附在土

壤上面的 SAA 对 HOCs 具有很强的吸持能力, 自然会降低其对目标污染物的修复效率, 延长修复时间, 增加修复成本。所以, 在土壤修复中, 所选用的 SAA 除考虑其对 HOCs 的增溶和增流能力外, 还要尽可能减少 SAA 在土壤颗粒上的吸附, 以提高其利用率^[5]。

有机质和黏土矿物对土壤吸附非离子表面活性剂 (non-ionic surface active agent, NASS) 的影响, 国内外已有不少研究^[6~14], 但对 NSAA 在黄土上的吸附行为及其与土壤 pH、离子强度等的关系问题, 还鲜见报道。黄土是一种由风力搬运沉积的富含粉质碳酸钙的疏松状沉积物, 其颗粒物大小介于黏土与细砂之间, 具有均质和大孔隙特征, 其主要分布在陕

收稿日期: 2012-07-08; 修订日期: 2012-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41261077); 甘肃省自然科学基金项目 (1010RJZA068, 1010RJZA070); 兰州交通大学科技支撑基金项目 (ZC2012002)

作者简介: 钟金魁 (1968~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为污染土壤修复, E-mail: zhongjk@mail.lzjtu.cn

* 通讯联系人, E-mail: baoweizhao@mail.lzjtu.cn

西、山西、甘肃及宁夏,面积达 64 万 km^2 ^[15],然而,随着工农业的发展,黄土受到了严重的污染^[12,16]. 在污染土壤的修复技术中,SERT 是优先考虑的技术之一,但由于黄土对非离子表面活性剂的吸附机制和作用规律还不清楚,这对 SERT 技术的应用必然产生制约. 为此,开展 NSAA 在黄土上的吸附行为及影响因素的研究,对了解 NSAA 在黄土中的吸附机制及污染土壤的修复具有重要的意义.

本研究选取应用广泛的聚氧乙烯辛基苯酚醚 (Triton X-100) 为非离子表面活性剂代表,分析了 Triton X-100 在黄土上的吸附行为及作用规律,探讨了离子强度和 pH 值对其吸附的影响,以期为非离子表面活性剂强化土壤修复提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

1.1.1 土壤样品及制备

本研究所用土壤为黄土,采自兰州市郊区未受污染区域,采样深度 0~20 cm,去除碎石、败叶等杂物,经风干、研磨,过 60 目尼龙筛,于室温下保存备用. 所选土壤有机质含量 2.43%; $m(\text{土}):V(\text{水}) = 1:1$ 时的 pH 为 8.11; 阳离子交换容量 (cation exchange capacity, CEC) 为 $2.585 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; BET- N_2 比表面积 $9.759 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,孔体积 $0.023 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. 土壤类型为粉黏壤土.

1.1.2 试剂及仪器

Triton X-100 (分析纯, Acros Organic, USA); 甲醇 (色谱纯); 超纯水; 其余试剂和化学品均为分析纯.

DG 超声波清洗器; SHZ-82 气浴恒温振荡器 (江苏太仓实验设备厂); Anke TDL80-2B 离心机 (北京医用离心机厂); pHS-25 型 pH 计 (上海雷磁仪器厂); MilliQ 去离子水发生器.

1.2 吸附实验

称取土样 2 g 置于 50 mL 碘量瓶中,加入 20 mL 含一定浓度的 Triton X-100 溶液 (其中背景电解质 NaCl 的浓度为 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,微生物生长抑制剂 NaN_3 的浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),塞上玻璃塞,置于旋转恒温振荡器中,于 25°C 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下进行振荡.

1.2.1 Triton X-100 吸附动力学实验

Triton X-100 初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (初步实验表明,Triton X-100 初始浓度在 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其在黄土上的吸附基本达到饱和),分别在 5、10、

15、20、25、30、40、60、120、180、240 min 时取样,将土水悬浮液转入 15 mL 离心管,以 $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 30 min,使固液分离. 准确吸取一定量上清液于 25 mL 比色管中,用去离子水定容后在 HPLC 上测定 Triton X-100 的浓度. 在同样的条件下,进行空白和对照实验,以减小挥发损失和玻璃管壁等对吸附的影响,其中未含 Triton X-100 的处理作为空白,未含土壤的处理作为对照. 结果发现,Triton X-100 的吸附损失可忽略不计. 以上处理均做 2 个平行. 土壤对 Triton X-100 的吸附量 (Q) 可根据式(1)进行计算.

$$Q = (c_0 - c_e)V/m \quad (1)$$

式中, Q 是黄土对 Triton X-100 的吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); c_0 和 c_e 分别是 Triton X-100 溶液的起始和残留浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 是溶液体积 (L); m 是土壤的质量 (g).

1.2.2 Triton X-100 在黄土上的等温吸附实验

Triton X-100 的起始浓度分别设为 100、200、400、500、800、1000、1200、1400、1800、2000、2500、3000、3500、4000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,振荡 2 h (动力学实验表明,2 h 内足够达到饱和吸附),取样测定. 其余过程同 1.2.1 节.

1.2.3 离子强度对 Triton X-100 吸附的影响实验

Triton X-100 起始浓度为 $1200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NaCl 浓度分别为 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,振荡 2 h,取样测定,其余实验过程同 1.2.1 节.

1.2.4 pH 对 Triton X-100 吸附的影响实验

Triton X-100 起始浓度为 $1200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,用 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 或 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 调节溶液的 pH,初始 pH 值分别调节为 2、4、6、7、8、10、12,振荡 2 h,取样测定. 其余过程同 1.2.1 节.

1.3 Triton X-100 的测定

采用高效液相色谱法测定 Triton X-100 的浓度. 仪器为 Thermo Fisher LCQ Advantage 4000 液质联用仪的 Surveyor 高效液相色谱系统 (美国),配置有光电二极管阵列检测器 (PDA),自动进样器和载样泵; C18 反相色谱分离柱 ($4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m}$, AT-LICHROM ODS2); 流动相为 $V(\text{甲醇}):V(\text{水}) = 80:20$; 流速 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 柱温 30°C ; 进样量 $10 \mu\text{L}$; 检测波长 275 nm.

1.4 数据处理

采用 OriginPro 8.5 进行数据统计分析、作图等.

2 结果与讨论

2.1 Triton X-100 在黄土上的吸附动力学

吸附动力学是确定吸附速率和平衡时间的一种很好的方法,可以揭示表面活性剂的吸附过程和机制. 如图 1 所示, Triton X-100 在黄土上达到吸附的平衡时间约 30 min, 这比憎水性有机污染物在黄土上的吸附平衡时间短, 吸附速率快^[17], 这主要是因为表面活性剂和环境其它有机污染物不同. 虽然大多数憎水性有机污染物进入水体或土壤后, 主要归趋是被吸附于土壤、底泥或悬浮颗粒物上, 但达到平衡的时间相对比较长, 而表面活性剂具有在界面间迅速分配的特性, 因此达到吸附平衡的时间短^[18]. 为了保证吸附达到充分平衡, 后续实验的振

荡时间均设为 2 h.

用 OriginPro 8.5 软件对 Triton X-100 在黄土上的吸附动力学实验数据进行了一级^[19]、二级^[19]和 Elovich^[19]模型的非线性拟合, 拟合曲线如图 1 所示, 拟合参数见表 1. 从表 1 看出, 一级和二级动力学模型拟合后的相关系数 r^2 分别为 0.993 4 和 0.973 1, 拟合平衡吸附量 Q_e 分别为 3.041 和 3.151 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 显然用一级动力学模型拟合的饱和吸附量比二级动力学模型拟合的饱和吸附量更接近 Q_e 的实验值 3.040 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 拟合后的 r^2 也是一级动力学的比二级动力学的大. 用 Elovich 模型拟合后的相关系数 $r^2 = 0.913 6$, 比一级和二级动力吸附模型的拟合效果差. 所以 Triton X-100 在黄土上的吸附动力学可用一级动力学模型进行很好地描述.

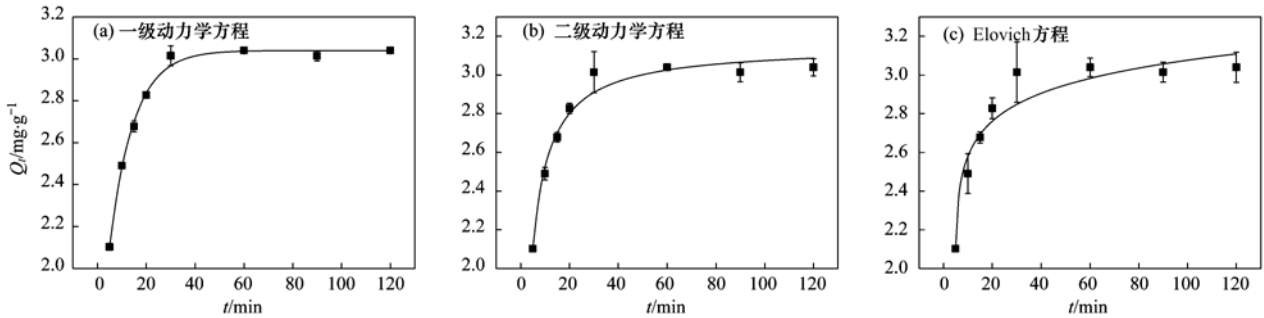


图 1 Triton X-100 在黄土上的吸附动力学

Fig. 1 Sorption kinetics of Triton X-100 on loess

表 1 Triton X-100 在黄土上吸附的动力学拟合参数¹⁾

Table 1 Fitted kinetic parameters for the sorption of Triton X-100 on loess

一级动力学方程 $Q_t = Q_e [1 - \exp(-k_1 t + C)]$				二级动力学方程 $Q_t = Q_e t / [t + 1 / (k_2 Q_e)]$			Elovich 方程 $Q_t = a + b \ln(t + C)$			
$Q_e / \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_1 / min^{-1}	C	r^2	$Q_e / \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$k_2 / \text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$	r^2	a	b	C	r^2
3.041	0.102	-0.667	0.993 4	3.151	0.128	0.973 1	2.309	0.172	-4.710	0.913 6

1) Q_t 和 Q_e 分别表示 Triton X-100 在时间 t 时和平衡时的吸附量; t 是土水悬浮液振荡时间; k_1 和 k_2 分别为一级和二级动力学速率常数; a 和 b 为 Elovich 吸附动力学常数; C 为积分常数

2.2 Triton X-100 在黄土上的吸附等温线

Triton X-100 在黄土上的吸附等温线如图 2 所示. 开始时 Triton X-100 在黄土上的吸附量随其溶液平衡浓度的增加而急剧升高, 当浓度增至表面活性剂临界胶束浓度 (critical micelle concentration, CMC) 以后, 吸附量的增加又逐渐减缓, 最后趋于饱和.

一般地, 非离子表面活性剂在土壤上的吸附涉及 2 个方面: 一方面是非离子表面活性剂在土壤矿物上的吸附, 它是基于非离子表面活性剂的高极性和大分子量; 另一方面是非离子表面活性剂通过疏水链在土壤有机质中的分配而吸附^[20]. 在 Triton

X-100 浓度较低时, 其在黄土上的吸附主要是由其亲水基 (乙氧基链或末端羟基) 与土壤粒子表面的 Si—OH 或 Al—OH 形成氢键而吸附到土壤表面上^[8, 21], 其疏水尾伸向液相, 在土壤表面形成疏水的单分子层, 或称为半胶束; 随着 Triton X-100 浓度的增加, 相邻分子的憎水基之间的侧面相互作用增强, 在土壤表面形成双层吸附, 随后 Triton X-100 在土壤上的吸附基本饱和, 使 Triton X-100 的吸附等温线表现为非线性^[22, 23]. 李克斌等^[24]认为非离子表面活性剂可通过疏水链在土壤有机质中的分配而吸附, 在低有机质含量的土壤中它们除通过氢键吸附外, 还能通过乙氧基的质子化基团 (EOH^+) 与带

负电荷的铝硅酸盐间的静电作用吸附. 因此, Triton X-100 在黄土上的吸附可能是土壤有机质与矿物质共同作用的结果.

用 OriginPro 8.5 软件对 Triton X-100 在黄土上的等温吸附实验数据分别进行了 Sips、Langmuir、Freundlich 和 Temkin 模型^[25]的非线性拟合, 拟合曲线分别如图 2 所示, 拟合参数及相关系数见表 2. 从

相关系数看, 对吸附等温线实验数据的最佳拟合模型为 Sips, 其相关系数 $r^2 = 0.998\,7$, 最大吸附量 $Q_{\max} = 3.202\,\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 这与实验结果基本一致. Temkin 模型对实验数据的拟合程度也较好, $r^2 = 0.996\,6$, 吸附热 $\Delta Q = RT/B$ 表明, Triton X-100 在黄土上的吸附属于吸热反应^[25]. 与 Sips 和 Temkin 模型相比, Freundlich 和 Langmuir 对实验数据的拟合程度较差.

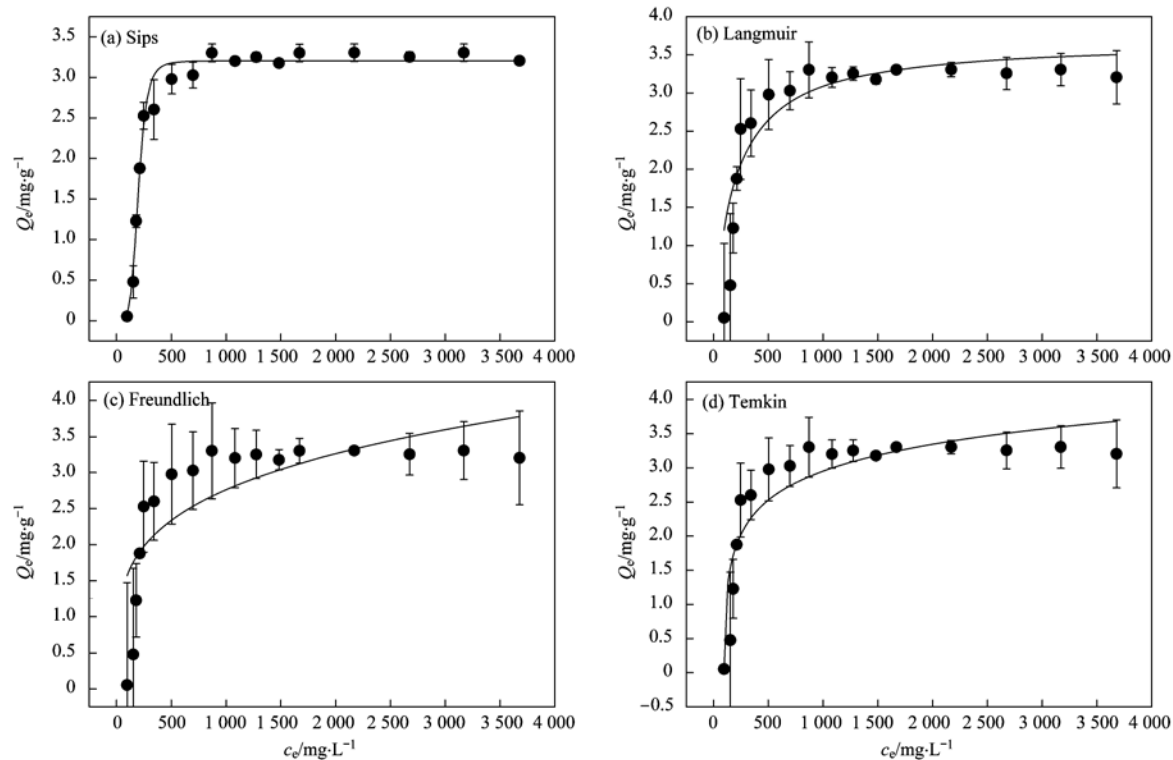


图 2 TX-100 在黄土上的吸附等温线

Fig. 2 Sorption isotherms of Triton X-100 on loess

表 2 Triton X-100 在黄土上吸附的等温线拟合参数¹⁾

Table 2 Fitted isothermal parameters for the sorption of Triton X-100 on loess

模型	方程式	r^2	参数	数值
Sips	$Q_e = Q_m (K_s c_e)^\alpha / [1 + (K_s c_e)^\alpha]$	0.998 7	$Q_m / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	3.202
			$K_s / \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	0.005
			α	5.198
Langmuir	$Q_e = Q_m K_L c_e / [1 + K_L c_e]$	0.909 5	$Q_m / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	3.690
			$K_L / \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	0.005
Freundlich	$Q_e = K_F c_e^{1/n}$	0.962 8	$K_F / \text{L} \cdot \text{g}^{-1}$	0.526
			$1/n$	0.240
Temkin	$Q_e = B \ln [K_T (c_e + C)]$	0.996 6	$B / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.531
			$K_T / \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	0.287

1) Q_e 和 Q_m 分别是黄土对 Triton X-100 的平衡吸附量和饱和吸附量; K_s 、 K_L 、 K_F 和 K_T 分别为 Sips、Langmuir、Freundlich、Temkin 等温吸附模型常数; α 为 Sips 模型指数; n 为 Freundlich 模型指数; B 为 Temkin 模型常数; C 为积分常数

2.3 溶液离子强度对 Triton X-100 吸附的影响

图 3 给出了在水土体系中加入不同浓度的 NaCl 后, Triton X-100 在黄土上的吸附情况. 在所研

究的离子强度范围内, 随着 NaCl 浓度的增大, Triton X-100 在黄土上的吸附量与 NaCl 浓度呈线性增加 (线性方程为: $Q = 2.785\,0\,c_{\text{NaCl}} + 1.963\,4$, $r^2 =$

0.961 4),这与孙晓慧等^[26]的报道一致.关于这种实验现象的解释可能存在多种机制.其中一种解释为盐析作用,即增加盐的浓度,能够对非离子表面活性剂起到盐析作用,使其 CMC 降低,有利于非离子表面活性剂的吸附,盐析作用随电解质浓度的增加而增强^[8, 27].另外,对于以聚氧乙烯链为极性头的非离子表面活性剂,链中的氧原子可通过氢键与 H_2O 和 H_3^+O 结合,使非离子表面活性剂分子带有一定的正电性,随离子强度增加,非离子表面活性剂的聚氧乙烯醚亲水基双电层受到压缩,表面活性剂 CMC 降低,从而增加了它们与原先通过氢键等作用吸附的表面活性剂分子间的侧面疏水作用,这有利于表面活性剂的吸附^[24].

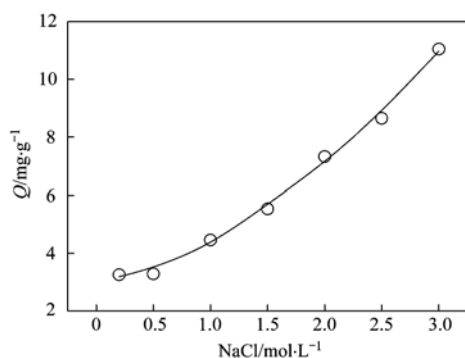


图3 离子强度对 TX-100 在黄土上吸附的影响

Fig. 3 Effect of ionic strength on the sorption for Triton X-100 on loess

2.4 溶液 pH 对 Triton X-100 吸附的影响

pH 对黄土吸附 Triton X-100 的影响如图 4 所示.从中看出,pH 值对 Triton X-100 的吸附影响很大,即随着 pH 增加,Triton X-100 在黄土上的吸附量降低.这可能是 Triton X-100 亲水基乙氧链上的氧原子作为氢键的受体,与土壤表面的腐殖质上的羧基、羟基或层状硅铝酸盐中的硅/铝醇(Si/Al—OH)基上的质子发生作用而形成氢键^[11].随着溶液 pH 值增大,Si/Al—OH 基团发生去质子反应,使 Si/Al—OH 与聚氧乙烯链之间的氢键作用减弱,从而使 Triton X-100 的吸附量降低;相反,在 pH 较低时,羧基、羟基或 Si/Al—OH 发生质子化作用,这种作用有利于氢键的形成,使 Triton X-100 在黄土上的吸附量随之增大^[11].

3 结论

(1)Triton X-100 在黄土上的吸附速率很快,约 30 min 基本达到吸附平衡,其吸附动力学符合一级

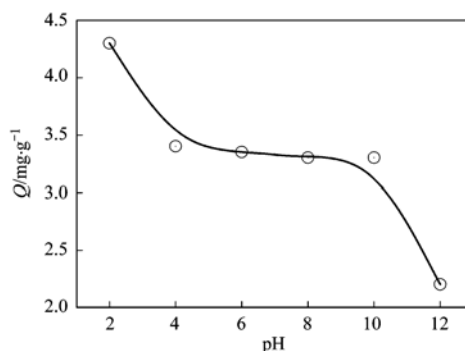


图4 pH 对 TX-100 吸附的影响

Fig. 4 Effect of pH on the sorption for Triton X-100

动力学模型,其相应拟合参数 $Q_e = 3.041 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $k_1 = 0.102 \text{ min}^{-1}$, $r^2 = 0.993 4$.

(2)Triton X-100 在黄土上的吸附等温线为非线性,在利用的 4 种等温吸附模型中,实验数据的最佳拟合模型为 Sips,其拟合最大吸附量为 $3.202 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $r^2 = 0.998 7$.

(3)溶液离子强度和 pH 值是影响 Triton X-100 在黄土上吸附的重要因素,随着离子强度的增加,Triton X-100 的吸附量不断增加;对于 pH 值来说,Triton X-100 在黄土上的吸附量随 pH 增加而减小.

参考文献:

- [1] Peng S, Wu W, Chen J J. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness[J]. Chemosphere, 2011, **82**(8): 1173-1177.
- [2] Bernardez L A, Ghoshal S. Solubilization kinetics for polycyclic aromatic hydrocarbons transferring from a non-aqueous phase liquid to non-ionic surfactant solutions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, **320**(1): 298-306.
- [3] Gao Y Z, Ling W T, Zhu L Z, et al. Surfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated with hydrophobic organic contaminants: potential and assessment[J]. Pedosphere, 2007, **17**(4): 409-418.
- [4] Rouse J D, Morita T, Furukawa K, et al. Solubilization of mixed polycyclic aromatic hydrocarbon systems using an anionic surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **325**(3): 180-185.
- [5] Zhou W J, Zhu L Z. Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons by anionic-nonionic mixed surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **255**(1-3): 145-152.
- [6] Cano M L, Dorn P B. Sorption of two model alcohol ethoxylate surfactants to sediments[J]. Chemosphere, 1996, **33**(6): 981-994.
- [7] Urano K, Saito M, Murata C. Adsorption of surfactants on sediments[J]. Chemosphere, 1984, **13**(2): 293-300.
- [8] Brownawell B J, Chen H, Zhang W J, et al. Sorption of nonionic surfactants on sediment materials[J]. Environmental Science and

- Technology, 1997, **31**(6): 1735-1741.
- [9] Podoll R T, Irwin K C, Brendlinger S. Sorption of water-soluble oligomers on sediments [J]. Environmental Science and Technology, 1987, **21**(6): 562-568.
- [10] Paterson I F, Chowdhry B Z, Carey P J, *et al.* Examination of the adsorption of ethylene oxide-propylene oxide triblock copolymers to soil[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1999, **40**(1): 37-51.
- [11] 孙晓慧, 卢瑛莹, 陈曙光, 等. 膨润土对复合污染中表面活性剂的吸附及机理[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 838-842.
- [12] Zhou W, Zhu K, Zhan H, *et al.* Sorption behaviors of aromatic anions on loess soil modified with cationic surfactant[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, **100**(1-3): 209-218.
- [13] Muherei M A, Junin R, Merdhah A B B. Adsorption of sodium dodecyl sulfate, Triton X100 and their mixtures to shale and sandstone: a comparative study[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, **67**(3-4): 149-154.
- [14] 杨成建, 曾清如, 张静, 等. 非离子表面活性剂在土壤/沉积物中的吸附模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1396-1401.
- [15] Wang Y, Tang X W, Chen Y M, *et al.* Adsorption behavior and mechanism of Cd(II) on loess soil from China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(1): 30-37.
- [16] Tang X W, Li Z Z, Chen Y M, *et al.* Removal of Zn(II) from aqueous solution with natural Chinese loess: behaviors and affecting factors[J]. Desalination, 2009, **249**(1): 49-57.
- [17] 钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 等. 菲和 Cu^{2+} 在黑垆土上的吸附及其交互影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 1985-1990.
- [18] 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.
- [19] Wang L Y, Yang L Q, Li Y F, *et al.* Study on adsorption mechanism of Pb(II) and Cu(II) in aqueous solution using PS-EDTA resin[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, **163**(3): 364-372.
- [20] 万卷敏, 杨亚提, 刘霞, 等. 壤土对阴-非离子表面活性剂的吸附特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(4): 690-696.
- [21] Hari A C, Paruchuri R A, Sabatini D A, *et al.* Effects of pH and cationic and nonionic surfactants on the adsorption of pharmaceuticals to a natural aquifer material[J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(8): 2592-2598.
- [22] 张景环, 曾澍辉. 表面活性剂在北京碱性土壤中的吸附行为研究[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(8): 571-574, 582.
- [23] 高月英, 顾卫民, 卢三燕, 等. 自溶液中的吸附——XTV 硅胶自 Triton X-100 和几种烷基硫酸钠的混合水溶液中的吸附[J]. 中国科学 B 辑, 1986, (2): 130-136.
- [24] 李克斌, 刘惠君, 马云, 等. 不同类型表面活性剂在土壤上的吸附特征比较研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(11): 2067-2071.
- [25] Oubagaranadin J U K, Murthy Z V P. Isotherm modeling and batch adsorber design for the adsorption of Cu(II) on a clay containing montmorillonite[J]. Applied Clay Science, 2010, **50**(3): 409-413.
- [26] 孙晓慧, 卢瑛莹, 沈学优. 复合污染中 Triton X-100 在膨润土/水界面上的吸附行为[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(4): 648-654.
- [27] 赵澍, 张路, 罗澜, 等. 添加剂对 Triton X-100 在高岭土上吸附的影响[J]. 油田化学, 1994, **11**(3): 253-256.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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

国内外公开发行人