

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

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

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究

何龙, 邱兆富*, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟

(华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评估与控制重点实验室, 上海 200237)

摘要: 吸附作用是影响三氯乙烯(TCE)在土壤环境中迁移、归趋的主要过程。采用有机碳含量不同的 2 种天然土壤以及用 H_2O_2 去除低聚合“软碳”和高温灼烧去除全部有机碳后所得到的 4 种土壤为吸附剂, 考察了有机碳含量及组成、矿物质、TCE 初始浓度、溶液 pH、土壤含水率、离子强度等因素对吸附 TCE 的影响。结果表明, TCE 在 6 种土壤上的吸附等温线呈非线性, 随有机碳含量增加, 土壤对 TCE 的吸附量增加; 但矿物质的吸附贡献率却减小。土壤对 TCE 的吸附是土壤中有机碳和矿物质的共同作用, 以有机碳为主, 但矿物质的作用不可忽略; 且 TCE 初始浓度越高, 矿物质的贡献率相对越低。土壤中“软碳”的吸附等温线线性较好; 而“硬碳”的吸附等温线为非线性。此外, 增大离子强度对吸附具有促进作用, 而 pH 和含水率对吸附几乎没有影响。

关键词: 三氯乙烯; 有机碳; 矿物质; 土壤吸附; 影响因素

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3976-07

Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types

HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, LU Zhi-chang, WANG Zhi-li, SUI Qian, LIN Kuang-fei, LIU Yong-di

(State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Adsorption plays an important role in the transport and the fate of trichloroethylene (TCE) in soil. Six types of soil, including two types of natural soil with different organic carbon content and four types of soil with the low aggregation of “soft carbon” pre-treated by hydrogen peroxide or with all organic carbon removed by high temperature ignition from the original soil, were adopted as adsorbents. The effects of parameters (organic carbon content and composition, minerals, the initial TCE concentration, solution pH, moisture content and ionic strength) on TCE adsorption capacity were examined. The results showed that the soil adsorption isotherm was non-linear within the experimental range. The TCE adsorption capacity was increased and the contribution rate of the minerals to the sorption was reduced with the increase of the organic carbon content. The adsorption of TCE in the soil was the result of the combined action of both organic carbon and minerals, in which organic carbon played a major part, whereas the role of minerals could not be neglected. As the initial TCE concentration increased, the contribution rate of the minerals to the sorption went down. The adsorption isotherm of “soft carbon” was linear, while the “hard carbon” was non-linear. Moreover, the adsorption capacity was increased by increasing the ionic strength. In contrast, neither pH nor moisture content had any influence on TCE adsorption.

Key words: trichloroethylene (TCE); organic carbon; minerals; soil adsorption; influencing factor

地下水中的许多挥发性有机化合物污染已经成为国际问题, 而三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)是最常见的地下水污染物, 其在服装干洗及金属清洗等行业应用广泛^[1~3]。TCE 被认为是最危险和最毒的有机化合物之一, 在地下水中的浓度高达几个 $mg \cdot L^{-1}$ ^[4]。

为了评估 TCE 对人类和环境的暴露风险以及开发高效低成本的治理技术, 必须了解它的迁移、归趋过程。而吸附是影响挥发性有机化合物迁移、归趋的主要化学过程, 对污染地下水的修复具有重要的指导作用^[5]。近年来, 国内外对 TCE 在土壤中的吸附的报道越来越多, 但外界环境因素对其在土壤中的吸附的影响却鲜有报道。影响疏水性有机物吸附的主要因素有溶质的疏水性、有机碳含量、矿

物组成等^[5~7]。土壤对有机物的吸附实际上是由土壤中的矿物组分和土壤有机碳两部分共同作用的结果^[8], Weber 等^[9]提出有机碳分为高聚合的“硬碳(hard carbon)”和低聚合的“软碳(soft carbon)”, 其中软碳对有机物的吸附是线性的, 硬碳对有机物的吸附是非线性的^[10]。此外, 有研究表明, 土壤中的有机碳对疏水性有机化合物(如 TCE)的吸附占主导因素^[6,11], 仅在有机碳含量很低($< 0.1\%$)或不含有有机碳的情况下^[5,12], 矿物质才能影响疏水性有机化合物的吸附, 也有可能成为唯一的吸附行

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-05-23

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109013)

作者简介: 何龙(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水污染与修复, E-mail: helong70110@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zfqiu@ecust.edu.cn

为^[13,14]; 国内张坤峰等^[15]也认为当有机碳含量 < 0.1% 时, 无机矿物对 TCE 的吸附占主导因素; 但韩璐等^[16]通过向高岭土和石英砂中添加不同质量分数的腐殖质来配置模拟土样, 对有机碳和矿物质对 TCE 的吸附贡献进行了研究, 认为有机碳含量 > 0.1% 时对吸附作用的贡献只取决于有机碳的含量的说法是不全面的. 因此有必要对土壤中不同组分及其有机碳含量对有机污染物的吸附进行研究. 另外, 离子强度^[17,18]、溶液 pH^[19,20] 以及含水率^[21~26] 等因素对疏水性化合物的吸附迁移也有重要作用. 为了较彻底地了解影响 TCE 吸附过程的因素, 本研究分析了不同有机碳含量及种类(软碳和硬碳)、矿物质(高温灼烧后的土壤)、TCE 初始浓度、溶液 pH、土壤含水率、离子强度等因素对 TCE 吸附的影响. 考虑到一般实际地下水的温度变化范围在 10 ~ 22℃^[27,28] 之间, 因此实验时选择了中间的 16℃.

表 1 土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土样	pH	含水量/%	原土 $f_{oc}/\%$	H ₂ O ₂ 处理后 $f_{oc}/\%$	高温灼烧后 $f_{oc}/\%$	主要矿物成分/%
校园土	7.30	2.8	0.82	0.35	0.00	SiO ₂ (66.62)、Al ₂ O ₃ (15.96)、Fe ₂ O ₃ (5.78)
场地土	7.15	2.6	0.52	0.28	0.00	SiO ₂ (65.80)、Al ₂ O ₃ (14.50)、Fe ₂ O ₃ (5.01)

1.2 实验仪器

HZQ-F160 振荡培养箱(哈尔滨东联电子技术开发有限公司); DF-101S 集热式磁力加热搅拌器(金坛文华仪器有限公司); XW-80A 涡旋振荡器(上海青浦沪西仪器厂); TDL-40B 低速离心机(上海安亭科学仪器厂); GZX-9070MBE 数显鼓风干燥箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); SX2-4-10 箱式电阻炉(马弗炉, 上海一恒科技有限公司); AL204 电子天平、DELTA 320 pH 计(Mettler-Toledo, Switzerland); ARL ADVANTX-2290 X 射线荧光光谱仪(赛默飞世尔科技有限公司); 7890A 气相色谱仪(Agilent, USA).

1.3 实验过程

本实验采用批次实验的实验方法. 先将 TCE 配置成高浓度的甲醇储备液(甲醇的体积分数不超过 0.1%, 以避免共溶效应), 然后根据需要用超纯水稀释成不同浓度作为吸附液. 为了使土样尽可能均匀, 每次称取土样前都采用四分法称取土样, 准确称取样品 10.000 g 于 43.2 mL 螺纹口棕色瓶中, 瓶盖内衬聚四氟乙烯/硅胶隔垫, 分别加入不同浓度的 TCE 溶液后密封, 顶部不留空间. 每一 TCE 浓度组设置一个不加土样的空白控制样. 置于恒温振荡培养箱, 吸附在 16℃ 条件下进行, 转速 110 r·min⁻¹, 待

1 材料与方法

1.1 实验材料

TCE(纯度 ≥ 99.5%, 上海晶纯实业有限公司); 甲醇(纯度 ≥ 99.9%, 上海天莲精细化工有限公司); 氯化钠、硝酸、浓硫酸、双氧水、重铬酸钾、氢氧化钠、正己烷(均为分析纯, 上海凌峰化学有限公司); 高岭土、硫酸亚铁铵(均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司). 实验土壤分别取自华东理工大学校园(校园土)、上海某 TCE 污染场地(场地土), 取样深度为 0 ~ 50 cm, 土壤样品自然风干, 拣去动、植物残体和石块等, 研磨后经 60 目筛网筛滤备用, H₂O₂ 处理和高温灼烧过的土壤同样经过研磨和筛分处理, 土壤理化性质见表 1. 目标污染物本底溶出实验结果表明, 两种原土土样中的 TCE 质量浓度均小于 0.005 mg·L⁻¹, 目标污染物背景浓度可忽略不计.

到吸附平衡时间 48 h(吸附动力学实验表明, 48 h 吸附足以达到平衡)后取出样品瓶, 2 000 r·min⁻¹ 离心 30 min, 取上清液 1 mL 进行分析. 测定 pH、含水率、离子强度、有机碳含量等对吸附的影响时方法亦同. 采用 0.1 mol·L⁻¹ 的稀 HNO₃ 和稀 NaOH 调节溶液的 pH; 将风干和 105℃ 烘干以及向土中加入一定去离子水的土作为不同含水率的土样; 分别以 0.000、0.001、0.010、0.100、0.500 mol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液来配置不同离子强度的 TCE 溶液; 为了去除土壤中的软碳^[29], 将 40 g 干燥的土加入 500 mL 烧杯中, 同时加入质量分数为 10% 的双氧水混合, 直到不再产生 CO₂ 气体才停止加入双氧水; 采用马弗炉高温灼烧至恒重以完全去除土壤中的有机碳. 土壤吸附的 TCE 的量通过 TCE 初始浓度减去平衡状态时上清液的浓度来计算. 所有的吸附实验重复两次.

1.4 分析方法

与吸附行为密切相关的土壤物化性质主要有 pH、含水率、总有机碳含量及土壤矿物, 分析方法如下. pH 采用玻璃电极法, 土样: 水(体积比) = 1: 5, 测定仪器为 DELTA 320 pH 计. 含水率用烘干法测定. 总有机碳含量(f_{oc})采用重铬酸钾外加热-容量法测定, 具体原理为: 将重铬酸钾和浓硫酸的混合

溶液加入制备好的土样中,立即放入 180℃ 的油浴中消解 5 min,取出冷却后,用标准硫酸亚铁铵溶液滴定多余的重铬酸钾,从而求得土样的有机碳含量. 土样矿物成分分析采用 X 射线荧光光谱法. 采用 Agilent 7890A 自动进样气相色谱仪测定 TCE 的含量. 色谱柱型号为 DB-VRX(长 60 m; 内径 250 μm ; 厚度 1.4 μm),检测器为 ECD. TCE 进样条件:进样口温度为 240℃,柱温 75℃,色谱柱流量 5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,检测器温度为 260℃,分流比 20:1,载气为 N_2 .

2 结果与讨论

2.1 吸附等温线

土壤对污染物的等温平衡吸附是一个动态平衡过程,污染物在土壤上的吸附量 $Q(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 与达

到平衡状态时其液相浓度 $c_e(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 之间的关系常用线性吸附、Freundlich 吸附等^[3,5,30].

线性吸附等温方程:

$$Q = K_d c_e + b \quad (1)$$

式中, K_d 为分配系数; b 为常数.

Freundlich 吸附等温方程:

$$Q = K_f c_e^{1/n} \quad (2)$$

式中, K_f 为与吸附剂的种类、特性、温度有关的常数; $1/n$ 为经验常数,当 $1/n = 1$ 时,方程为线性.

图 1 为 16℃ 时,6 种土壤对 TCE 的吸附等温线. 利用线性方程和 Freundlich 方程对 TCE 在土壤上的吸附等温数据进行拟合,结果如表 2 所示.

由图 1 和表 2 可以看出, Freundlich 方程的相关系数 r^2 大于线性方程,说明在实验浓度范围内, TCE 在土壤上的吸附可以用 Freundlich 方程加以描述.

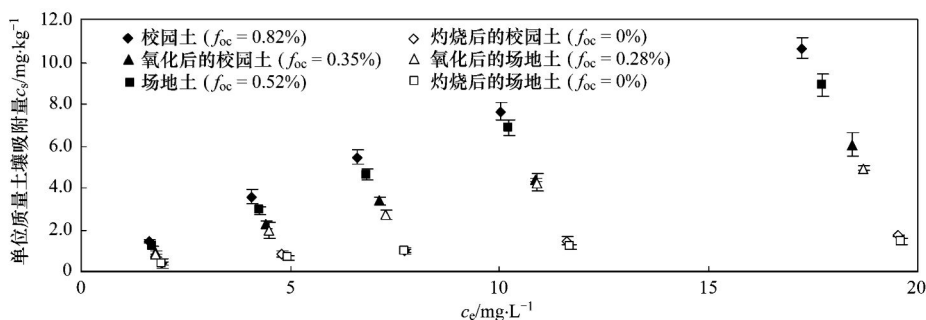


图 1 校园土和场地土对 TCE 的等温吸附曲线

Fig. 1 Adsorption isotherms of TCE on campus soil and site soil

表 2 等温吸附曲线的模型拟合数据

土样	线性等温线		Freundlich 等温线		
	K_d	r^2	K_f	$1/n$	r^2
校园土	0.581 8	0.97	0.990 5	0.87	0.99
H_2O_2 处理后的校园土	0.298 5	0.97	0.633 4	0.81	0.99
灼烧处理后的校园土	0.075 3	0.92	0.257 1	0.67	0.97
场地土	0.481 2	0.95	0.7932	0.88	0.98
H_2O_2 处理后的场地土	0.243 1	0.91	0.558 2	0.79	0.97
灼烧处理后的场地土	0.059 6	0.92	0.252 5	0.61	0.98

2.2 环境因素的影响

2.2.1 土壤成分及 TCE 初始浓度对 TCE 吸附行为的影响

校园土和场地土以及它们去除不同比例有机碳后的吸附行为如图 1 所示. 从中可知,6 种土样对 TCE 的吸附量都随有机碳含量的增加而增加,使用 H_2O_2 去除软碳和高温灼烧去除全部有机碳后,吸附量都出现了不同程度的下降,高温灼烧后吸附量的下降尤为明显,说明土壤中的有机碳对吸附起主要

作用.

高温灼烧去除 2 种土壤的全部有机碳后,矿物质成为土壤对 TCE 吸附的唯一因素,从图 1 可看出 TCE 在矿物质表面的吸附随着浓度的升高很快就达到饱和. 与高温灼烧后的土壤相比,在使用 H_2O_2 去除土壤中的软碳后,土壤对 TCE 的吸附量是硬碳和矿物质共同作用的结果. 在相同的液相平衡浓度下,比较不同土壤的固相吸附浓度,通过差减法,计算出相应有机碳在系统中的固相吸附浓度,进而评价矿物质、有机碳以及 TCE 初始浓度 c_0 对 TCE 吸附行为的影响(图 2). 另外,采用同样的处理方法来比较软碳和硬碳在土壤中的吸附行为(表 3).

图 2 表明在本实验范围内,矿物质对 TCE 的吸附都起了一定的作用,且矿物质对 TCE 的吸附贡献率随有机碳含量的增加而减小,未处理过的土壤有机碳和矿物质的平均贡献率分别为 82% 和 18%,而采用 H_2O_2 氧化过的土壤,有机碳和矿物质的贡献率平均值为 74% 和 26%. 由此可见以往普遍认为

仅当有机碳含量 < 0.1% 时矿物质才能影响吸附的说法是不全面的. 另外, 从表 3 还可以看出有机碳的组成不同, 对吸附的影响也会不同. 对土壤中的

软碳和硬碳进行 Freundlich 拟合后发现软碳的 n 值接近于 1, 即软碳的吸附线性较好, 而硬碳的吸附为非线性, 这与文献[9,10]的研究结果相吻合.

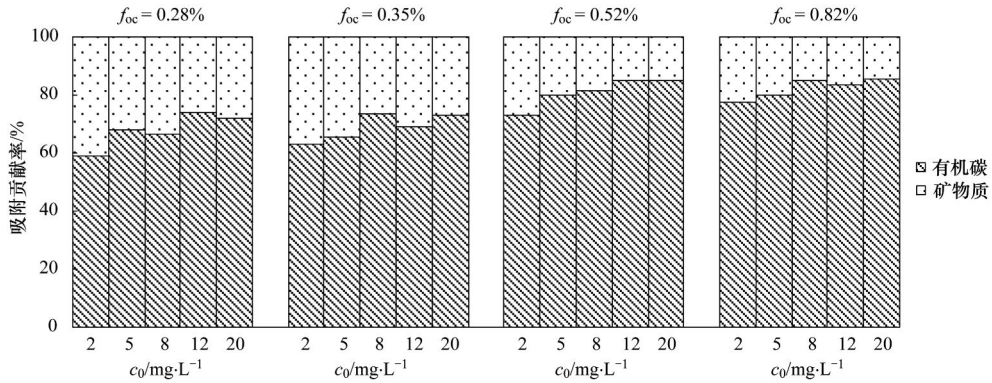


图2 TCE 初始浓度对有机碳和矿物质的 TCE 吸附贡献率的影响

Fig. 2 Effects of initial TCE concentration on the individual TCE adsorption contributions of organic carbon content and mineral

表3 不同有机碳类型条件下 Freundlich 等温
吸附曲线的回归数据

Table 3 Regression of Freundlich adsorption isotherm data
under different organic carbon types

吸附剂	K_f	$1/n$	r^2
校园土软碳	0.323 4	0.97	0.99
校园土硬碳	0.335 9	0.88	0.98
场地土软碳	0.220 2	1.03	0.99
场地土硬碳	0.288 9	0.88	0.97

TCE 在土壤中的吸附行为不仅与有机碳含量和矿物质有关, TCE 的初始浓度 c_0 也会影响吸附行为^[16]. 如图 2 所示, 有机碳含量相同而 c_0 不同时, 有机碳和矿物质的贡献率也不同, c_0 越高有机碳的贡献率呈上升的趋势, 而矿物质则呈下降的趋势. 这可能是由于矿物质的吸附容量有限, 随着 c_0 的升高, 矿物质表面很快就达到吸附饱和(图 1), 而有机碳的含量较高, 吸附容量也较大, 更多的 TCE 分子被吸附到有机碳中, 所以 c_0 越高, 矿物质的贡献率

呈下降的趋势.

不同的土壤, 由于有机碳和矿物质的物理化学特性不同, 对吸附的影响也会有很大的差异; 高温灼烧会影响土壤的物理结构, 进而可能影响土壤的吸附行为; 另外, 实际土壤中有机碳和矿物质的结合方式非常复杂, 其吸附行为与单纯的矿物质也有所区别, 在研究土壤对 TCE 的吸附时要综合考虑各种因素的复合效应.

2.2.2 溶液 pH 对土壤吸附 TCE 的影响

pH 是土壤的基本性质, 它直接影响有机物在土壤中的状态及其迁移、转化^[24]. 溶液 pH 对吸附的影响主要是通过改变吸附剂和吸附质所带的电荷, 进而影响吸附剂和吸附质之间的静电作用来实现的^[31]. 这里考察了在 16℃ 时, TCE 初始浓度为 2 mg·L⁻¹, 溶液 pH 分别为 4、5、7、9、10 时对吸附量的影响, 结果如图 3 所示, pH 在 4~10 这个范围内, 对土壤吸附 TCE 几乎没有影响.

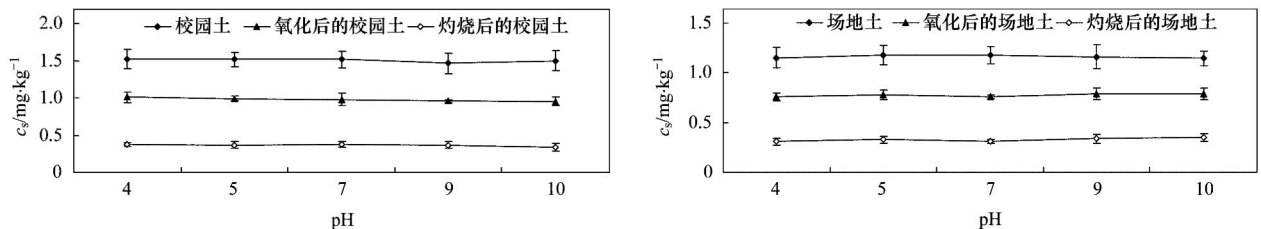


图3 溶液 pH 对土壤吸附 TCE 的影响

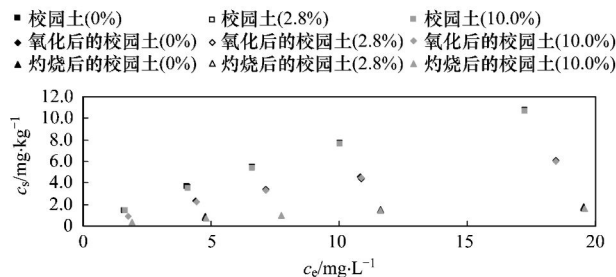
Fig. 3 Effects of solution pH on TCE adsorption by soils

pH 虽然是影响吸附的一个重要因素, 但它只是对那些易于电离的物质, 如离子型有机物, 有比较显著的影响, 对中性化合物的影响则很小^[32]. 由于

TCE 为非离子型不带电高脂溶性化合物, 所以溶液 pH 对吸附的影响较小.

2.2.3 土壤含水率对土壤吸附 TCE 的影响

在 16℃ 下, TCE 初始浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 考察了土壤在不同含水率条件下对其吸附 TCE 的影响, 结果如图 4 和表 4. 由图 4 可以看出含水



率对土壤吸附 TCE 几乎没有影响, 这说明在本实验范围内土壤含水率对土壤吸附 TCE 的影响可以忽略不计.

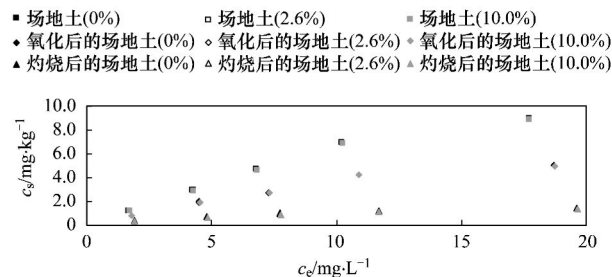


图 4 含水率对土壤吸附 TCE 的影响

Fig. 4 Effects of moisture contents on TCE adsorption by soils

表 4 不同含水率条件下 Freundlich 等温吸附曲线的回归数据

Table 4 Regression of Freundlich adsorption isotherm data under different moisture contents

土样	含水率/%	K_f	$1/n$	r^2
校园土	0.0	1.015 6	0.86	0.99
	2.8	0.990 5	0.87	0.99
	10.0	0.974 8	0.87	0.99
氧化后的校园土	0.0	0.649 9	0.80	0.99
	2.8	0.633 4	0.81	0.99
	10.0	0.610 5	0.82	0.99
灼烧后的校园土	0.0	0.283 6	0.64	0.97
	2.8	0.257 1	0.67	0.97
	10.0	0.242 6	0.68	0.97
场地土	0.0	0.817 5	0.88	0.99
	2.6	0.793 2	0.88	0.99
	10.0	0.780 2	0.89	0.99
氧化后的场地土	0.0	0.573 6	0.79	0.98
	2.6	0.558 2	0.79	0.98
	10.0	0.533 4	0.80	0.98
灼烧后的场地土	0.0	0.289 4	0.57	0.98
	2.6	0.252 5	0.61	0.99
	10.0	0.228 1	0.63	0.99

不同含水率条件下的 Freundlich 拟合结果如表 4 所示. 从中可看出含水率较低土壤的 K_f 值要稍大于含水率较高土壤的 K_f 值, 这可能是由于与湿润条件相比, 在干燥条件下矿物质对有机物的吸附起了一定的促进作用. Chiou 等^[21] 认为在水饱和条件下, 矿物质对有机物的表面吸附相对于有机碳的吸附作用是不重要的, 因为水分子与矿物质表面之间具有相当强的偶极作用, 在水饱和条件下这种偶极作用使有机物无法与矿物质接触, 只有在非水饱和或干燥条件下, 这种有机物-矿物质作用才会起作用.

通过比较不同含水率条件下不同土壤的 K_f 和 $1/n$ 值时发现, 与不含有有机碳的土壤相比, 有机碳含

量较高的土壤的 K_f 和 $1/n$ 值受含水率的影响更小且有机碳含量越高 K_f 和 $1/n$ 值的变化越小. 这可能是由于有机碳含量越高, 矿物质对吸附的作用越小, 从而有机碳含量较高土壤的 K_f 和 $1/n$ 值受含水率的影响也就越小, 说明土壤对 TCE 的吸附量不仅与含水率有关, 还可能与有机碳的含量有关. 但无论是含有有机碳还是不含有有机碳的土壤, 在本实验范围内土壤含水率对 TCE 吸附量的影响都可忽略不计.

2.2.4 溶液离子强度对土壤吸附 TCE 的影响

地下水水中存在各种离子, 这里选取较常见的 Na^+ 和 Cl^- , 在 16℃ 条件下, TCE 初始浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 配置离子强度分别为 0.000、0.001、0.010、0.100、0.500 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液来考察离子强度对 TCE 吸附的影响, 结果如图 5 所示.

随着离子强度的增加, 6 种土壤对 TCE 的吸附都得到不同程度的增加. 当离子强度较小时, 吸附量增加较小, 当离子强度大于或等于 0.100 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸附量明显增大. 目前离子强度对吸附的影响机制尚不十分清楚, 在水溶液吸附体系中, 离子强度对吸附剂和吸附质都会产生影响, 主要表现在对表面电荷、离子交换以及盐析或盐溶等方面的影响^[33]. 因为 TCE 为非离子型不带电高脂溶性化合物, 表面电荷和离子交换等方面的影响可以忽略不计, 所以离子强度对它的影响主要表现在盐析或盐溶效应. 在这里随着离子强度增加, 吸附量都增大, 可能和盐析效应有关, 由于盐析效应的存在, 吸附质也就是 TCE 在水溶液中的溶解度减小, 亲水性减弱, 使吸附质更容易靠疏水作用被吸附^[34]. 离子强度越大盐析效应越明显, 所以对吸附的影响也就越大. 唐常源等^[17] 在研究 TCE 在饱和黏土中的迁移特性时,

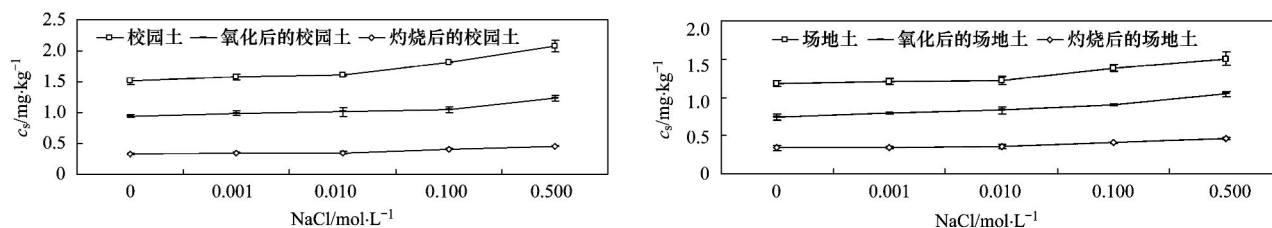


图5 离子强度对土壤吸附 TCE 的影响

Fig. 5 Effects of ionic strengths on TCE adsorption by soils

得出 NaCl 的存在减小了 TCE 在水中的溶解度,促进了黏土对 TCE 的吸附的结论. 另外, Peng 等^[35]在研究离子强度对 TCE 等挥发性有机化合物的亨利常数的影响时也发现, 离子强度对亨利常数有显著的影响, 尤其当离子强度 $> 0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亨利常数增加了 10% 以上, 更多的有机物将从液相进入气相或固相, 进一步说明了随着离子强度的增加, TCE 吸附量也随之增加.

3 结论

(1) 吸附实验表明 6 种土壤对 TCE 的吸附等温线均为非线性, 吸附量随着有机碳含量的增加而增加, 吸附等温线可以用 Freundlich 方程进行描述.

(2) 实验条件下, 土壤对 TCE 的吸附是土壤中有机碳和矿物质共同作用的结果, 以有机碳为主, 但矿物质的作用不可忽略. 矿物质对 TCE 吸附的贡献率随土壤中有机碳含量的增加而减少, 另外浓度对 TCE 的吸附也有一定的影响, TCE 初始浓度越高, 矿物质的贡献率相对越低.

(3) 通过比较土壤中软碳和硬碳对吸附的影响时发现, 软碳的吸附线性相对较好, 而硬碳的吸附为非线性.

(4) 溶液 pH 和土壤含水率对吸附 TCE 几乎没有影响. 对有机碳含量相对较低的土壤, 在干燥条件下矿物质对有机物的吸附有一定的促进作用.

(5) 溶液离子强度对 TCE 的吸附具有促进作用, 离子强度越大, 促进作用越明显.

参考文献:

- [1] Ma C W, Wu Y Q, Sun C X, *et al.* Adsorption characteristics of perchloroethylene in natural sandy materials with low organic carbon content [J]. *Environmental Geology*, 2007, **52**(8): 1511-1519.
- [2] Yang J S, Baek K, Kwon T S, *et al.* Adsorption of chlorinated solvents in nonionic surfactant solutions with activated carbon in a fixed bed [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, **15**(6): 777-779.
- [3] Lu C, Bjerg P L, Zhang F J, *et al.* Sorption of chlorinated solvents and degradation products on natural clayey tills [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(11): 1467-1474.
- [4] Erto A, Andreozzi R, Di Natale F, *et al.* Experimental and statistical analysis of trichloroethylene adsorption onto activated carbon [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **156**(2): 353-359.
- [5] Akyol N H, Yolcubal I, Yuksel D I. Sorption and transport of trichloroethylene in caliche soil [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(6): 809-816.
- [6] Ruffino B, Zanetti M. Adsorption study of several hydrophobic organic contaminants on an aquifer material [J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2009, **5**(4): 507-515.
- [7] Wang L L, Yang Z F, Niu J F. Temperature-dependent sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on natural and treated sediments [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(6): 895-900.
- [8] Mader B T, Uwe-Goss K, Eisenreich S J. Sorption of nonionic, hydrophobic organic chemicals to mineral surfaces [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, **31**(4): 1079-1086.
- [9] Weber W J Jr, Huang W L. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 4. Intraparticle heterogeneity and phase-distribution relationships under nonequilibrium conditions [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(3): 881-888.
- [10] Huang W J, Young T M, Schlautman M A, *et al.* A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 9. General isotherm nonlinearity and applicability of the dual reactive domain model [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, **31**(6): 1703-1710.
- [11] Brusseau M L, Reid M E. Nonequilibrium sorption of organic chemicals by low organic carbon aquifer materials [J]. *Chemosphere*, 1991, **22**(3-4): 341-350.
- [12] Curtis G P, Roberts P V, Reinhard M. A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer. 4. Sorption of organic solutes and its influence on mobility [J]. *Water Resources Research*, 1986, **22**(13): 2059-2067.
- [13] Schwarzenbach R P, Westall J. Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater. Laboratory sorption studies [J]. *Environmental Science and Technology*, 1981, **15**(11): 1360-1367.
- [14] Piwoni M D, Banerjee P. Sorption of volatile organic solvents

- from aqueous solution onto subsurface solids [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1989, **4**(2): 163-179.
- [15] 张坤峰, 何江涛, 刘明亮, 等. 土壤中有机碳含量对三氯乙烯的吸附影响实验[J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, **28**(6): 649-652.
- [16] 韩璐, 何江涛, 张晶, 等. 模拟土样有机碳和矿物质对 TCE 吸附贡献的实验研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, **30**(6): 1118-1124.
- [17] 唐常源, 新藤静夫, 大桥弦子. 饱和粘土中的三氯乙烯迁移特性[J]. *应用生态学报*, 1996, **7**(1): 94-98.
- [18] Heo J H, Lee D H, Koh D C, *et al.* The effect of ionic strength and hardness of trichloroethylene-contaminated synthetic groundwater on remediation using granular activated carbon[J]. *Geosciences Journal*, 2007, **11**(3): 229-239.
- [19] 罗雪梅, 刘昌明, 何孟常. 土壤与沉积物对多环芳烃类有机物的吸附作用[J]. *生态环境*, 2004, **13**(3): 394-398.
- [20] Behera S K, Oh S Y, Park H S. Sorption of triclosan onto activated carbon, kaolinite and montmorillonite: effects of pH, ionic strength, and humic acid [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 684-691.
- [21] Chiou C T, Porter P E, Schmedding D W. Partition equilibria of nonionic organic compounds between soil organic matter and water [J]. *Environmental Science and Technology*, 1983, **17**(4): 227-231.
- [22] Goss K U. Effects of temperature and relative humidity on the sorption of organic vapors on quartz sand [J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, **26**(11): 2287-2294.
- [23] Goss K U. Effects of temperature and relative humidity on the sorption of organic vapors on clay minerals [J]. *Environmental Science and Technology*, 1993, **27**(10): 2127-2132.
- [24] 徐嵩, 冯流. 三氯乙烯在天然土壤中的吸附行为及其影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(增刊): 65-68.
- [25] 孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 等. 挥发性氯代烃在干燥土壤中的平衡吸附研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 3121-3127.
- [26] 孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 等. 挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1361-1368.
- [27] 曲云霞, 张林华, 方肇洪, 等. 地源热泵名义工况探讨[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2003, **35**(3): 221-225.
- [28] 郭建辉, 韩玲. 地下水源热泵系统性能的试验与模拟研究[J]. *制冷空调与电力机械*, 2005, **26**(4): 8-11.
- [29] 张坤峰, 何江涛, 刘明亮, 等. 土壤有机质形态对有机污染物三氯乙烯(TCE)的吸附影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(1): 286-288.
- [30] 马长文. 地下水中四氯乙烯迁移归宿与修复技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 46-47.
- [31] Wu Z J, Joo H, Lee K. Kinetics and thermodynamics of the organic dye adsorption on the mesoporous hybrid xerogel [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, **112**(1-3): 227-236.
- [32] 王连生. 有机污染化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 47-56.
- [33] 吴志坚, 刘海宁, 张慧芳. 离子强度对吸附影响机理的研究进展[J]. *环境化学*, 2010, **29**(6): 997-1003.
- [34] Sennerfors T, Solberg D, Tiberg F. Adsorption of polyelectrolyte-nanoparticle systems on silica: influence of ionic strength [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, **254**(2): 222-226.
- [35] Peng J, Wan A. Effect of ionic strength on Henry's constants of volatile organic compound [J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(13): 2713-2740.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbenazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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