

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

**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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究 ..... 陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)

天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究 ..... 王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)

兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究 ..... 赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)

不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征 ..... 杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)

南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析 ..... 王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)

西北干旱区降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征及其水汽输送 ..... 李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雷宁(711)

海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化 ..... 曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)

大辽河口痕量元素砷的河口混合行为 ..... 简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)

渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价 ..... 徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)

青岛近岸表层海水中PAHs的分布特征及物源初步解析 ..... 李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)

广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降 ..... 孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)

上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别 ..... 董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)

溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用 ..... 王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)

地下水污染风险评估中特征污染物量化方法探讨 ..... 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)

用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究 ..... 高滢滢,张薛,赵璇,赵刚(777)

菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响 ..... 邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)

南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响 ..... 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,安静(794)

上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征 ..... 王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)

不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化 ..... 何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)

新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究 ..... 何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)

改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制 ..... 李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)

卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究 ..... 江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)

芽孢杆菌B1胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究 ..... 李蕾,赵玲,尹平河(838)

底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究 ..... 储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)

新型无极准分子光源深度处理水相中含N-杂环化合物 ..... 叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)

La/Ce掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究 ..... 郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)

DTT对三苯基甲烷染料脱色的研究 ..... 潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)

pH及络合剂对亚铁活化 $S_2O_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究 ..... 张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)

臭氧降解高浓度腐殖酸动力学 ..... 郑可,周少奇,杨梅梅(879)

采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制 ..... 李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)

活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系 ..... 李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)

不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究 ..... 周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)

颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响 ..... 李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)

氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较 ..... 郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)

生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响 ..... 朱海凤,周立祥,王电站(916)

2种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物研究 ..... 钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锬(922)

微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响 ..... 范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)

干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征 ..... 贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)

密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究 ..... 王淑芳,王效科,欧阳志云(946)

外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响 ..... 莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)

低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用 ..... 姚佳佳,康福星,高彦征(958)

液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响 ..... 吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)

基于PPI的土地利用优化研究 ..... 武晓峰,李婷(971)

若尔盖高原湿地藻类多样性研究 ..... 陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)

3种杀真菌剂对AM真菌侵染和黄芩生长的影响 ..... 贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)

崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征 ..... 郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)

厌氧条件下2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解 ..... 卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)

重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响 ..... 熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)

有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究 ..... 林玉珍,曾光明,张娉,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)

高效木薯渣分解复合菌群RXS的构建及其发酵特性研究 ..... 何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)

四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征 ..... 童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)

上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究 ..... 陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刘,孔垂雪(1033)

《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)

# 改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制

李宇, 刘贤君, 张兴旺, 雷乐成\*

(浙江大学工业生态与环境研究所, 杭州 310028)

**摘要:** 用长碳链季铵盐阳离子表面活性剂改性膨润土, 研究其对典型液态有机物(苯、氯苯、硝基苯、柴油)的截留性能及作用机制, 并进行了中试规模的模拟应急处置试验. 改性膨润土对液态有机物的单位截留量( $2.83 \sim 9.01 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ )明显高于常规截留剂( $0.28 \sim 1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ). 表面活性剂的性质、添加量及有机物本身的黏度是影响改性膨润土对液态有机物截留性能的重要因素, 其中以溴化十六烷基三甲基铵(CTMAB)为改性剂且其添加量为 100% CEC 的改性膨润土的截留性能最佳. 在液态有机物泄漏模拟处置中, 改性膨润土应急截留装置可在短时间内(30 min)完成对液态有机物 90% 以上的就地截留. 研究表明改性膨润土截留液态有机物的主要作用机制是表面活性剂的改性处理增强了改性膨润土的疏水性, 并增大了其层间距, 从而提高了其对液态有机物的截留性能.

**关键词:** 改性膨润土; 阳离子表面活性剂; 液态有机物; 泄漏; 截留

**中图分类号:** X507; X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)03-0825-07

## Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism

LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, LEI Le-cheng

(Institute of Industrial Ecology and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

**Abstract:** In this study, the property and mechanism of modified bentonites synthesized by long chain quaternary ammonium compounds which would be used in the emergent retention of typical organic liquid (benzene, chlorobenzene, nitrobenzene and diesel) were investigated and a pilot-scale simulation experiment was conducted. The unit retention capacity of modified bentonites for organic liquid ( $2.83\text{-}9.01 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) was much higher than that of conventional retention agents ( $0.28\text{-}1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ). The property and amount of the surfactants used and viscosity of organic liquid had a significant influence on the retention capacity of modified bentonites for the organic liquid, for example, the bentonites modified by cetyltrimethylammonium (CTMAB) with an adding quantity of 100% CEC showed the highest efficiency in the retention of organic liquid. In the simulation experiment, organic liquid could be retained effectively within 30 min by emergent retention device with modified bentonites and the retention efficiency might reach positively up to 90%. Results indicated that modifications using surfactants could enhance the hydrophobicity and interlayer space of the modified bentonites and make their retention capacities for organic liquid improved.

**Key words:** modified bentonite; quaternary ammonium cation; organic liquid; spill; retention

近年来,我国重大液态有机物泄漏事故频发,如 2010 年的大连“7·16”输油管道原油泄漏事故和南京“7·28”液态丙烯泄漏事故,不仅导致当地生态环境的破坏,而且使人民群众的生命安全受到严重威胁.因而,如何快速、有效处置突发的液态有机物泄漏事故已成为全社会关注的热点问题之一.研究表明,在液态有机物泄漏事故处置中,使用截留剂是一种可靠有效的应急处置手段<sup>[1-3]</sup>.目前,常用的截留剂主要包括三大类<sup>[4]</sup>:无机矿物材料(黏土、沸石等)、天然有机材料(稻草、木屑等)和人工合成材料(聚氨酯泡沫、聚丙烯等).但以上截留剂都存在一定的缺陷<sup>[5-7]</sup>,如无机矿物和天然有机材料疏水性差、截留容量小;而人工合成材料则存在成本过高且本身可能对环境产生二次污染的缺点,难以满足现场应急处置要求<sup>[4,8]</sup>.

膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的价格低廉的黏土矿物,具有优良的膨胀性能和阳离子交换性能<sup>[9]</sup>.研究表明,膨润土经表面活性剂改性处理,可以显著提高对有机物的吸附能力<sup>[10-13]</sup>.目前改性膨润土被广泛应用于工业废水的处理和填埋场的废物处置等领域<sup>[14-17]</sup>,然而关于改性膨润土在液态有机物泄漏事故中的应用还少见报道,有待深入研究.

本研究采用长碳链季铵盐阳离子表面活性剂改性膨润土,分析其对化工行业典型的液态有机物(苯、氯苯、硝基苯、柴油)的截留性能及作用机制,并通过中试试验的验证,以期为其大规模应用于液

收稿日期: 2011-04-28; 修订日期: 2011-06-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06A409)

作者简介: 李宇(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染应急处置, E-mail: yuli.zju@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: lclei@zju.edu.cn

态有机物泄漏事故的应急处置提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用膨润土取自内蒙古,为钙基膨润土,阳离子交换容量(CEC)为  $1.084 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 活性炭,比表面积为  $654 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ; 石灰,活性度为  $360 \text{ mL}$ ; 沙土取自杭州某建筑工地. 以上材料均过  $100$  目筛,烘干备用. 膨润土改性剂: 溴化十二烷基三甲基铵(DTMAB)、溴化十四烷基三甲基铵(TTAB)、溴化十六烷基三甲基铵(CTMAB). 特征污染物: 苯、氯苯、硝基苯、柴油,其性质见表 1,其中  $\lg K_{ow}$  代表辛醇-水分配系数. 实验所用其他试剂均为分析纯或优于分析纯.

表 1 特征污染物性质

Table 1 Property of selected target compounds

物质	$\lg K_{ow}$	动力黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
苯	2.13	0.65	0.879
氯苯	2.89	0.80	1.106
硝基苯	1.85	1.80	1.204
柴油	8.25	0.23	0.774

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 改性膨润土的制备

将干燥、过  $100$  目筛的  $30 \text{ g}$  原土倒入  $250 \text{ mL}$  一定浓度的表面活性剂溶液中,在  $60^\circ\text{C}$  下搅拌  $2 \text{ h}$  后于  $70^\circ\text{C}$  下陈化  $12 \text{ h}$ ; 离心分离后,用去离子水冲洗至无氯离子; 在  $80 \sim 90^\circ\text{C}$  下烘干,再在  $105^\circ\text{C}$  下活化  $1 \text{ h}$ ,研磨后过  $100$  目筛,制得一系列改性膨润土.

用相应的表面活性剂的英文缩写-膨润土表示同一类的改性膨润土,如使用 CTMAB 改性的膨润土可统称为 CTMAB-膨润土; 用相应表面活性剂的英文缩写加一个数字前缀表示不同表面活性剂添加量的改性膨润土,数字代表改性时每  $100 \text{ g}$  原土所加入的表面活性剂的  $\text{mmol}$  数. 例如 100CTMAB 表示在  $100 \text{ g}$  原土中加入  $100 \text{ mmol}$  的 CTMAB 制得的改性膨润土.

#### 1.2.2 截留性能的测定

实验采用单位质量的截留剂能够有效截留液态有机物的质量来表征截留剂的性能,具体步骤如下: 将  $200 \text{ mL}$  有机物纯液倒入  $250 \text{ mL}$  烧杯中; 称取  $5 \text{ g}$  截留剂置于圆柱体铜制筛网( $\phi 5.0 \text{ cm} \times 8.0 \text{ cm}$ )中; 将筛网放入烧杯中,使其完全浸没于液体中  $15 \text{ min}$ ; 将筛网及截留剂移出,晾  $5 \text{ min}$ ,称量浸没后截

留剂的质量,截留剂对液态有机物的单位截留量( $Q, \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )可通过以下公式计算得:

$$Q = (S_1 - S_0) / S_0 \quad (1)$$

式中, $S_1$  表示浸没后截留剂的质量,  $\text{g}$ ;  $S_0$  表示浸没前截留剂的质量,  $\text{g}$ .

#### 1.2.3 液态有机物泄漏模拟与就地截留

为考察改性膨润土对液态有机物实际的截留效果,进行了中试规模的研究. 基于保护环境的考虑,中试试验选取柴油为特征污染物,采用改性膨润土应急截留装置进行应急处置,如图 1 所示.

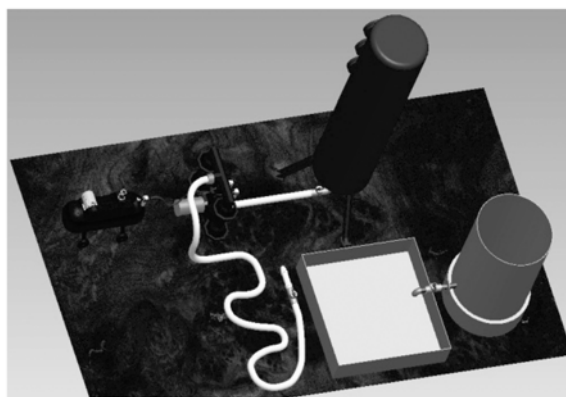


图 1 改性膨润土应急截留装置

Fig. 1 Emergent retention device of modified bentonites

改性膨润土应急截留装置由膨润土储罐、粉体输送泵、空压机、喷射枪等组成. 中试试验具体过程如下: 打开储油罐底部控制阀,调节柴油流速使其流入截留反应池( $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ),以模拟常规储油罐泄漏的场景; 启动粉体喷射装置,对泄漏的柴油进行截留,时间控制在  $30 \text{ min}$ ; 待应急处置完毕,收集截留产物,称重并计算截留量( $Q, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和截留率( $R, \%$ )并迅速将截留产物收集至废物收集桶,转运,进行后续处理.

$$R = [(S_1 - S_0) / S] \times 100\% \quad (2)$$

式中, $S_1$  表示截留后改性膨润土的质量,  $\text{kg}$ ;  $S_0$  表示截留前改性膨润土的质量,  $\text{kg}$ ;  $S$  表示泄漏柴油的质量,  $\text{kg}$ .

### 1.3 测试方法

用日立 S-4800 型场发射扫描电镜分析膨润土的微观形貌; 用重铬酸钾容量法测定膨润土的有机碳含量; 用日本理学 D/max-rA X-射线衍射仪对膨润土进行 X-射线衍射分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同截留剂的截留性能比较

实验研究了 100DTMAB 对液态有机物的截留性能,并与 4 种常规截留剂的截留性能进行了比较。由图 2 可知,同一截留剂对不同液态有机物的截留效果不一样,具体为:硝基苯 > 氯苯 > 苯 > 柴油。对于相同的特征污染物,不同截留剂的截留性能相差较大。石灰和沙土对液态有机物的截留性能最差,单位截留量均小于  $1 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 活性炭和原土的单位截留量略高于前两者,分别为  $0.52 \sim 1.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.63 \sim 1.31 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由此可见,4 种常规截留剂对液态有机物的截留容量小,难以满足应急处置快速高效的要求。而膨润土经 DTMAB 改性后对有机物的截留能力显著增强,单位截留量高达  $2.83 \sim 7.91 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,较常规截留剂提高了 3 ~ 22 倍,在液态有机物泄漏事故应急处置中具有替代常规截留剂的应用前景。

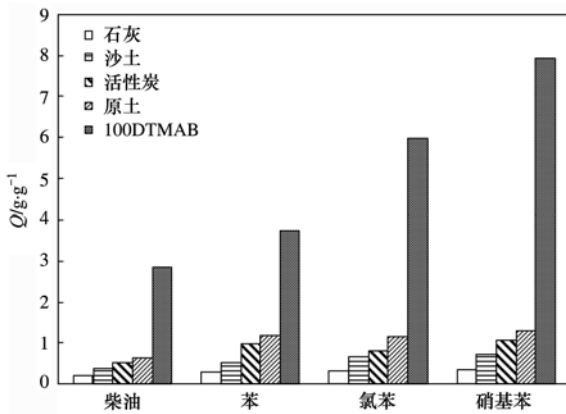


图 2 不同截留剂的截留性能

Fig. 2 Retention capacity of different retention agents

## 2.2 影响改性膨润土截留性能的因素

以往的研究表明,改性膨润土对有机物的截留能力不仅与改性时所用的表面活性剂性质、添加量有关,还与有机物本身的性质相关<sup>[18,19]</sup>。

### 2.2.1 表面活性剂性质的影响

实验研究了 DTMAB、TTAB、CTMAB 共 3 种长碳链表面活性剂改性的膨润土对液态有机物的截留性能。如图 3 所示,随着表面活性剂的烷基碳链由十二增加到十六,改性膨润土对有机物的单位截留量也在逐渐增加:100CTMAB ( $2.71 \sim 9.01 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 100TTAB ( $2.68 \sim 8.63 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 100DTMAB ( $2.64 \sim 7.91 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ )。产生这一现象的主要原因是由于长碳链季铵盐阳离子易通过离子交换作用取代无机阳离子进入膨润土层间,阳离子端(N 端)被吸附在带负电的膨润土表面,烷基链互相堆积形成有机介质相,因而改性膨润土较原土截留性能有了显著提升。

而这一有机介质相的厚度取决于烷基链的长短,表面活性剂烷基链越长,所形成的有机介质相越厚<sup>[9]</sup>,越有利于其对液态有机物的截留,而 3 种阳离子表面活性剂中 CTMAB 的烷基链最长(16 碳),所以对有机物的截留效果最佳。

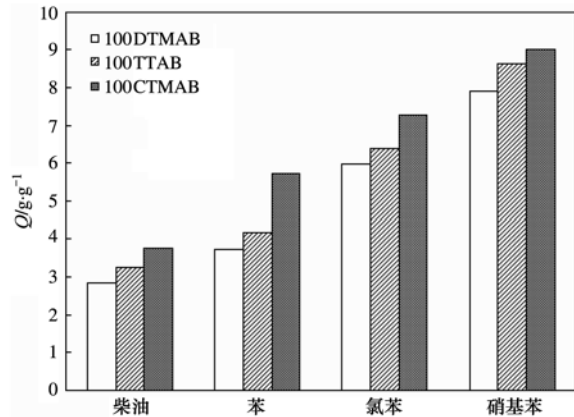


图 3 不同改性膨润土的截留性能

Fig. 3 Retention capacity of different modified bentonites

### 2.2.2 表面活性剂添加量的影响

实验以筛选出的 CTMAB 为改性剂,研究了表面活性剂添加量对 CTMAB-膨润土截留有机物性能的影响(如图 4)。当表面活性剂添加量为 30% CEC 时,CTMAB-膨润土对有机物的截留性能较原土有所提高,单位截留量为  $2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  左右;当添加量在 30% ~ 100% CEC 范围内,CTMAB-膨润土对有机物的单位截留量随着表面活性剂添加量的增加而迅速上升;当添加量由 100% CEC 增加到 150% CEC,CTMAB-膨润土的单位截留量略有增加;而添加量由 150% CEC 增加到 200% CEC 时,改性膨润土的截留性能基本保持不变。考虑到应急处置成本,100%

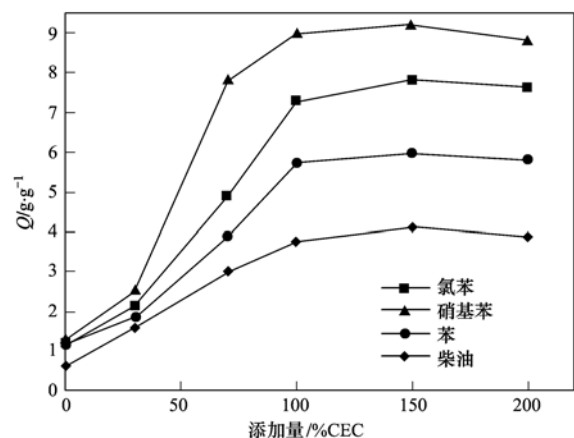


图 4 表面活性剂添加量对 CTMAB-膨润土截留性能的影响

Fig. 4 Effect of surfactant amount on retention capacity of CTMAB-bentonites

CEC 是较合适的表面活性剂添加量。

### 2.2.3 有机物本身性质的影响

文献[20,21]研究了不同截留剂对油类的截留性能,认为疏水性较强的截留剂对油类的截留效果较好且单位截留量与油类本身的黏度呈相关性.本研究分析了改性膨润土对液态有机物的单位截留量与其本身黏度(柴油 0.23 mPa·s、苯 0.65 mPa·s、氯苯 0.8 mPa·s、硝基苯 1.8 mPa·s)之间的关系(如图5).改性膨润土的单位截留量与有机物黏度呈一定的线性关系:

$$Q_{\text{DTMAB}} = 3.2439x + 2.2863 \quad (n = 4, R^2 = 0.8919) \quad (3)$$

$$Q_{\text{TTAB}} = 3.4471x + 2.6111 \quad (n = 4, R^2 = 0.9091) \quad (4)$$

$$Q_{\text{CTMAB}} = 3.1662x + 3.6854 \quad (n = 4, R^2 = 0.8896) \quad (5)$$

式中  $Q_{\text{DTMAB}}$ 、 $Q_{\text{TTAB}}$ 、 $Q_{\text{CTMAB}}$  分别表示 DTMAB、TTAB、CTMAB 改性膨润土的单位截留量.良好的正相关性说明有机物的黏度是影响改性膨润土对液态有机物单位截留量的重要因素.由于本研究选取的液态有机物都具有较强的疏水性(见表1),而经长碳链阳离子表面活性剂改性后的膨润土其疏水性也得到了显著增强,因而改性膨润土能够有效被疏水性的液态有机物润湿,截留住于自身质量数倍的液态有机物.而有机液体有效润湿膨润土表面的作用效果取决于液态有机物在膨润土表面的黏滞性,即有机物的自身黏度.黏度高的有机液体,在润湿过程中,易黏滞在膨润土表面,形成一层黏滞液体膜,黏度越高,液体膜越厚<sup>[20]</sup>.所以,在黏度为 0.23 ~ 1.8 mPa·s 范围内,液态有机物的黏度越高,改性膨润土对其的单位截留量越大.

### 2.3 液态有机物泄漏事故模拟与应急截留

中试研究分别模拟了 0 ~ 50、50 ~ 200、200 ~ 400 kg 这 3 种柴油泄漏规模,采用改性膨润土应急截留装置,以实验室筛选出的 100CTMAB 作为截留剂,对泄漏的柴油进行应急截留.考虑到应急处置的时效性,处置时间控制在 30 min 内,结果见表2.当柴油的泄漏量为 0 ~ 50 kg 时,选择以较低喷射强度(100 kg·h<sup>-1</sup>)进行应急处置,改性膨润土的单位截留量为 1.5 ~ 2.5 kg·kg<sup>-1</sup>,30 min 内截留率为 91%;当泄漏量扩大为 50 ~ 200 kg,喷射强度应提高到 500 kg·h<sup>-1</sup>,此时改性膨润土的单位截留量为 1.0 ~ 1.2 kg·kg<sup>-1</sup>,截留率为 93%;当泄漏量增大为 200 ~ 400 kg,则需提高喷射强度到 1 000 kg·h<sup>-1</sup>,

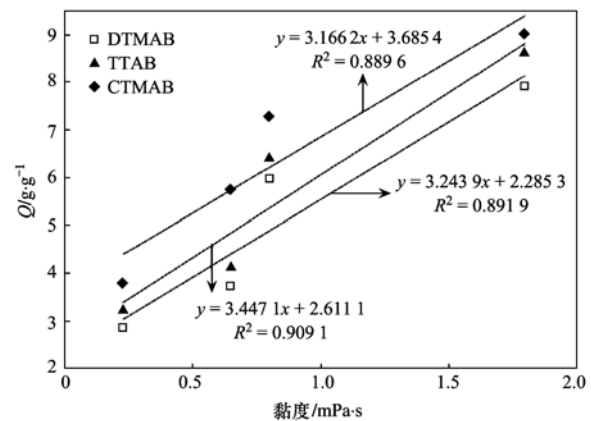


图5 黏度-截留性能的线性相关

Fig. 5 Relationship of viscosity with retention capacity

改性膨润土对柴油的截留率提高为 96%,单位截留量为 1.0 kg·kg<sup>-1</sup>.综上所述,改性膨润土应急截留装置可以实现对液态有机物快速高效截留.

表2 中试试验结果

泄漏量 /kg	喷射强度 / kg·h <sup>-1</sup>	Q /kg·kg <sup>-1</sup>	R /%
0 ~ 50	100	1.5 ~ 2.5	91
50 ~ 200	500	1.0 ~ 1.2	93
200 ~ 400	1 000	1.0	96

### 2.4 改性膨润土截留液态有机物的作用机制

#### 2.4.1 改性膨润土的结构与截留性能分析

对原土和 100CTMAB 的颗粒(粒径为 120 ~ 150 μm)进行电镜扫描分析(图6).图6(a)为原土,表面大部分为片状结构,颗粒结构紧密,呈无序堆积状,主要是由于原土的亲水性强,含水量高,表面片层结构易发生团聚且表面平整,几乎看不到空隙,孔道结构较少也不深.图6(b)是经过 CTMAB 改性处理的膨润土,表面特性发生明显变化.改性膨润土颗粒表面致密地包裹了一层有机物,有效增强了其疏水性,不易吸潮因而颗粒表面较为松散.相比原土,改性膨润土颗粒表面较不均匀,沟状结构较多且孔道较深,因而有利于液态有机物进入层间<sup>[22]</sup>,从而提高改性膨润土对液态有机物的截留性能.

对原土和 CTMAB-膨润土进行有机碳含量和 X-射线衍射分析,结果见图7和表3.膨润土原土在  $2\theta = 5.88^\circ$  位置上出现衍射峰,层间距  $d_{(001)}$  为 1.54 nm.当表面活性剂添加量较低时(30% CEC),CTMAB-膨润土的(001)面网的衍射强度和峰位均产生变化, $d_{(001)}$  变为 1.51 nm,主要是因为表面活性剂在低添加量时在膨润土上形成一层表面吸附

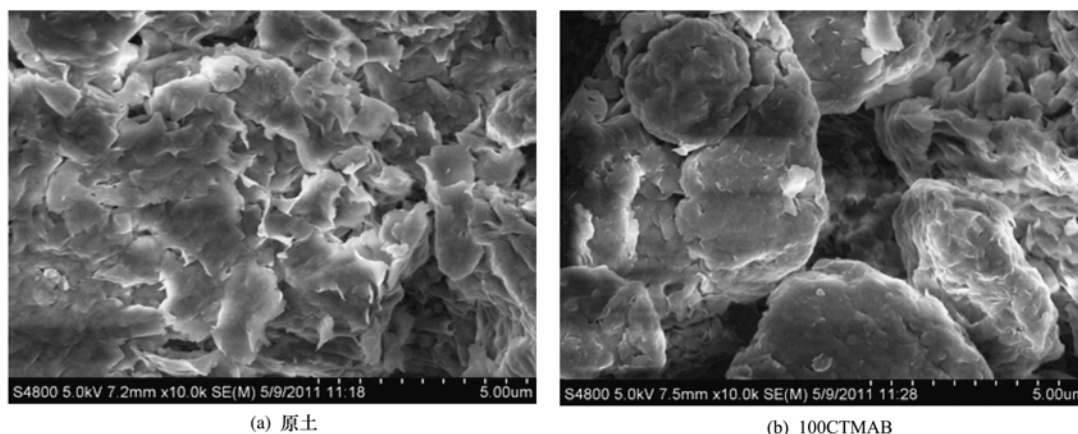
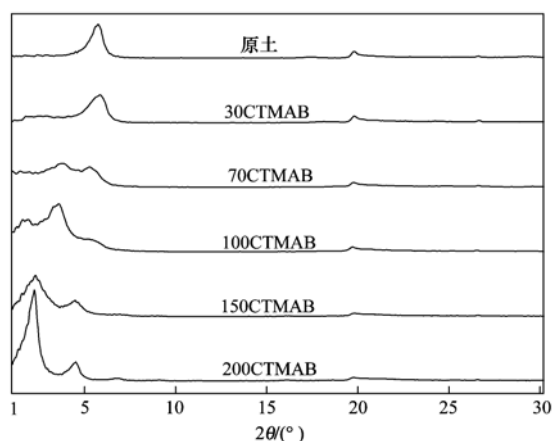
图6 原土和 100CTMAB 的 SEM( $\times 10\ 000$ )Fig. 6 SEM of natural bentonite and 100CTMAB( $\times 10\ 000$ )

图7 原土和 CTMAB-膨润土的 X 射线衍射分析

Fig. 7 XRD of natural bentonite and CTMAB-bentonites

表3 原土及 CTMAB-膨润土的有机碳含量和层间距

Table 3 Organic carbon content and interlayer spacing of natural bentonite and CTMAB-bentonites

膨润土	有机碳含量/%	$d_{(001)}/\text{nm}$
原土	0.2	1.54
30CTMAB	7.1	1.51
70CTMAB	14.7	1.68
100CTMAB	20.1	2.45
150CTMAB	25.8	3.81
200CTMAB	30.3	3.90

膜<sup>[23]</sup>,提高了其有机碳含量(0.2%→7.1%),有效增强了改性膨润土的疏水性,从而对有机物的截留性能较原土有所提高;而随着添加量的增加(30%~150% CEC),改性膨润土的有机碳含量逐渐增加(7.12%→14.7%→25.8%),同时其主衍射峰峰位逐渐向小角度方向偏移,层间距  $d_{(001)}$  值明显增大(1.51 nm→1.68 nm→2.45 nm),层间的表面活性

剂将形成固相胶束<sup>[24]</sup>,大幅提高了改性膨润土对有机物的单位截留量( $3.76 \sim 9.01 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ );而当添加量较高时(200% CEC),有机碳含量和层间距虽有增加,但部分表面活性剂以分子形式吸附到膨润土上,层间容纳有机物的可利用空间减少且破坏了原先表面活性剂的堆积结构<sup>[25]</sup>,从而降低了改性膨润土对有机物的截留能力.

#### 2.4.2 改性膨润土截留液态有机物的机制探讨

基于改性膨润土的结构与截留性能的研究,探讨改性膨润土截留液态有机物的作用机制,如图8所示<sup>[10,23-25]</sup>.

原土存在大量可交换的亲水性  $\text{Ca}^{2+}$  等无机阳离子,使表面存在一层水膜,不能有效截留液态有机物,如图8(a).经表面活性剂的改性处理,长碳链的季铵盐离子可通过离子交换作用置换出无机阳离子,逐渐在膨润土表面形成一层疏水介质膜如图8(b),使膨润土由亲水性逐渐变为疏水性,成为较好的疏水截留介质;随着表面活性剂添加量的增加,进入层间的长碳链季铵盐阳离子将增多,层间的烷基有机相将逐渐形成,层间距也逐渐增大如图8(c),此时改性膨润土主要通过分配作用截留进入层间的液态有机物如图8(d),从而有效提高了其对液态有机物的截留性能.

### 3 结论

(1) 改性膨润土对液态有机物的单位截留量( $2.64 \sim 9.01 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ )明显高于常规截留剂( $0.28 \sim 1.17 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ),在液态有机物泄漏事故应急处置中具有替代常规截留剂的应用前景.改性膨润土对液态有机物的截留性能主要与表面活性剂的性质、添加

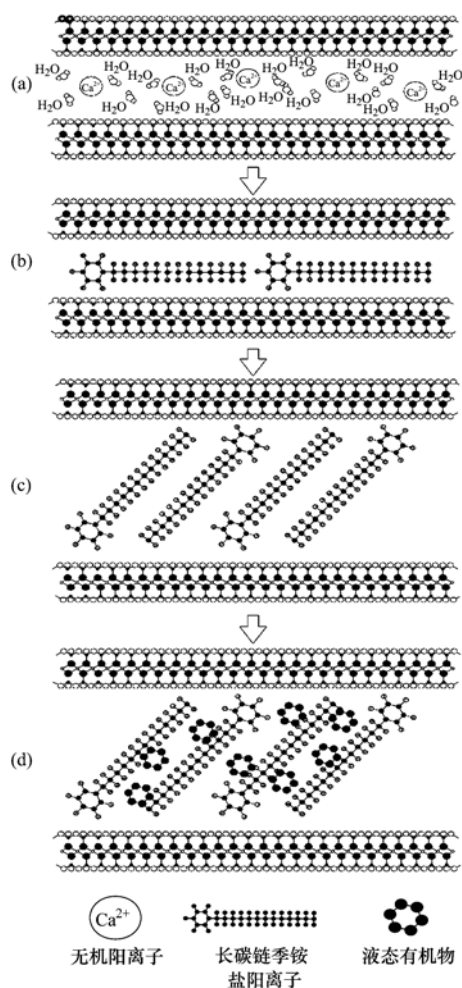


图 8 改性膨润土截留液态有机物的作用机制

Fig. 8 Mechanism of organic liquid retention by modified bentonites

量及有机物本身的黏度有关。不同表面活性剂改性膨润土对有机物的截留性能具体为:100CTMAB > 100TTAB > 100DTMAB, 表面活性剂烷基链越长, 其改性的膨润土对有机物的截留性能越好; 表面活性剂添加量为 0 ~ 150% CEC 时, CTMAB-膨润土对有机物的单位截留量随表面活性剂添加量的增加而增加, 100% CEC 是较合适的表面活性剂添加量; 改性膨润土对有机物的单位截留量与有机物的黏度 (0.23 ~ 1.80 mPa·s) 呈良好的线性相关, 液态有机物的黏度越高, 改性膨润土对其的单位截留量越大。

(2) 中试试验表明, 在泄漏规模为 0 ~ 400 kg 时, 改性膨润土应急截留装置以不同喷射强度 (100 ~ 1 000 kg·h<sup>-1</sup>) 可在短时间内 (30 min) 实现对柴油的高效截留, 截留率可达 90% 以上。

(3) 改性膨润土截留液态有机物的主要作用机制可表述为表面活性剂的改性处理使膨润土由亲水性转变疏水性并在层间形成有机相, 增大了层间距,

从而有效提高了其对液态有机物的截留性能。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Adebajo M O, Frost R L, Klopogge J T, *et al.* Porous materials for oil spill cleanup: a review of synthesis and absorbing properties[J]. *Journal of Porous Materials*, 2003, **10**(3): 159-170.
- [ 2 ] Radetic M M, Jocić D M, Jovančić P M, *et al.* Recycled wool-based nonwoven material as an oil sorbent[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(5): 1008-1012.
- [ 3 ] Carmody O, Frost R, Xi Y F, *et al.* Adsorption of hydrocarbons on organo-clays-implications for oil spill remediation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, **305**(1): 17-24.
- [ 4 ] Choi H M, Cloud R M. Natural sorbents in oil spill cleanup[J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, **26**(4): 772-776.
- [ 5 ] Suni S, Kosunen A L, Hautala M, *et al.* Use of a by-product of peat excavation, cotton grass fibre, as a sorbent for oil-spills[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **49**(11-12): 916-921.
- [ 6 ] Kumagai S, Noguchi Y, Kurimoto Y, *et al.* Oil adsorbent produced by the carbonization of rice husks [J]. *Waste Management*, 2007, **27**(4): 554-561.
- [ 7 ] Lim T T, Huang X F. Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(5): 955-963.
- [ 8 ] Wei Q F, Mather R R, Fotheringham A F, *et al.* Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **46**(6): 780-783.
- [ 9 ] 王晓蓉, 吴顺年, 李万山, 等. 有机粘土矿物对污染环境修复的研究进展[J]. *环境化学*, 1997, **16**(1): 1-13.
- [ 10 ] Kwolek T, Hodorowicz M, Stadnicka K, *et al.* Adsorption isotherms of homologous alkyldimethylbenzylammonium bromides on sodium montmorillonite[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, **264**(1): 14-19.
- [ 11 ] 吴平霄. 黏土矿物材料与环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 300-330.
- [ 12 ] Yilmaz N, Yapar S. Adsorption properties of tetradecyl- and hexadecyl trimethylammonium bentonites [J]. *Applied Clay Science*, 2004, **27**(3-4): 223-228.
- [ 13 ] 朱利中, 陈宝梁. 有机膨润土及其在污染控制中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 69-77.
- [ 14 ] Tahir S S, Rauf N. Removal of a cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(11): 1842-1848.
- [ 15 ] Marsal A, Bautisat E, Ribosa I, *et al.* Adsorption of polyphenols in wastewater by organo-bentonites [J]. *Applied Clay Science*, 2009, **44**(1-2): 151-155.
- [ 16 ] Veli S, Alyüz B. Adsorption of copper and zinc from aqueous solutions by using natural clay [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(1): 226-233.
- [ 17 ] Guyonnet D, Touze-Foltz N, Norotte V, *et al.* Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill



- applications[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, **27**(5): 321-331.
- [18] Teas C, Kalligeros S, Zanikos F, *et al.* Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up[J]. *Desalination*, 2001, **140**(3): 259-264.
- [19] Carmody O, Frost R, Xi Y, *et al.* Selected adsorbent materials for oil-spill cleanup-a thermoanalytical study [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, **91**(3): 809-816.
- [20] Broje V, Keller A A. Interfacial interactions between hydrocarbon liquids and solid surfaces used in mechanical oil spill recovery [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, **305**(2): 286-292.
- [21] Carmody O, Frost R, Xi Y F, *et al.* Surface characterisation of selected sorbent materials for common hydrocarbon fuels [J]. *Surface Science*, 2007, **601**(9): 2066-2076.
- [22] Ramos F G R, Mélo T J A, Rabello M S, *et al.* Thermal stability of nanocomposites based on polypropylene and bentonite [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, **89**(3): 383-392.
- [23] Zhu L Z, Chen B L, Tao S, *et al.* Interactions of organic contaminants with mineral-adsorbed surfactants [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(17): 4001-4006.
- [24] Bonczek J L, Harris W G, Nkedi-Kizza P. Monolayer to bilayer transitional arrangements of hexadecyltrimethylammonium cations on Na-montmorillonite [J]. *Clay and Clay Minerals*, 2002, **50**(1): 11-17.
- [25] Zhu L F, Zhu R L. Surface structure of CTMA<sup>+</sup> modified bentonite and their sorptive characteristics towards organic compounds [J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochem and Engineering Aspects*, 2008, **320**(1-3): 19-24.

## CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China .....	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-pei, <i>et al.</i> ( 673 )
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains .....	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> ( 679 )
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou .....	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> ( 687 )
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions .....	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> ( 694 )
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010 .....	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> ( 701 )
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> ( 711 )
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> ( 720 )
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary .....	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> ( 727 )
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay .....	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> ( 732 )
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment .....	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> ( 741 )
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi .....	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> ( 746 )
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai .....	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> ( 754 )
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification .....	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 760 )
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment .....	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> ( 771 )
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge .....	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> ( 777 )
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay .....	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> ( 782 )
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing .....	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> ( 794 )
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai .....	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> ( 802 )
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff .....	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> ( 810 )
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland .....	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> ( 817 )
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism .....	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> ( 825 )
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain .....	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> ( 832 )
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i> .....	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he ( 838 )
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir .....	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> ( 844 )
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution .....	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> ( 849 )
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes .....	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> ( 857 )
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT .....	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> ( 866 )
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate .....	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> ( 871 )
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances .....	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei ( 879 )
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy .....	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> ( 885 )
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage .....	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> ( 889 )
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age .....	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> ( 896 )
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification .....	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> ( 903 )
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch .....	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> ( 910 )
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching .....	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan ( 916 )
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance .....	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> ( 922 )
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity .....	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> ( 932 )
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem .....	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> ( 938 )
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China .....	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun ( 946 )
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients .....	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> ( 952 )
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids .....	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng ( 958 )
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil .....	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> ( 965 )
Study on the Land Use Optimization Based on PPI .....	WU Xiao-feng, LI Ting ( 971 )
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland .....	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> ( 979 )
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi .....	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> ( 987 )
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer .....	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> ( 992 )
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition .....	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> ( 1000 )
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus .....	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 1008 )
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation .....	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 1015 )
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics .....	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> ( 1020 )
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines .....	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> ( 1028 )
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor .....	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> ( 1033 )

# 《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3月15日 33卷 第3期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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