ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第3期
2012年3月15日

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,吴烨,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,马雪宁(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,虢新运,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)
地下水污染风险评价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 …… 高淯湍,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,万金泉,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 …… 李蔷,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,万金泉,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态研究 …… 钱殷,全向春,裴元生,马景赟,陶锟(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,刘如锢,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,张娱,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,刘刈,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)

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[1],康福星[2],高彦征[1*]

(1. 南京农业大学土壤有机污染控制与修复研究所, 南京 210095; 2. 南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210090)

摘要: 采用振荡平衡法研究了相对分子质量 <3 500的低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素(AFB_1)的吸附作用及机制. 吸附动力学实验结果表明,0 ~ 24 h 内,蒙脱土原土快速吸附 AFB_1,在 2 h 处吸附量即至最大值,而后吸附量持续降低,12 h 后趋于稳定、吸附量为 1.01 $\mu g \cdot g^{-1}$; 0 ~ 24 h 内,改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量则持续增加,12 h 时吸附量达最大值(1.60 $\mu g \cdot g^{-1}$),其后吸附达平衡. 用腐殖酸改性后,蒙脱土对 AFB_1 的等温吸附曲线由 Langmuir 型转变为 Freundlich 型,平衡浓度较高条件下, AFB_1 在改性蒙脱土上的吸附量明显高于蒙脱土原土. 蒙脱土改性后晶层坍塌,出现不规则和絮状松散结构,与其表面聚集的腐殖酸形成较为稳定的"矿物-腐殖酸"复合体,增强了其对疏水性 AFB_1 的吸附能力. 随溶液 pH 值的增大,原土和改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量均增大,但 AFB_1 在改性蒙脱土上吸附量的增加幅度较大,这可能主要与溶液碱性的提高促进了 AFB_1 与蒙脱土矿物的氢键及电性结合有关. 研究结果可为进一步阐明 AFB_1 在土壤中的界面过程和环境归趋提供依据.

关键词:蒙脱土; 低分子量腐殖酸; 生物毒素; 黄曲霉毒素; 吸附

中图分类号: X131.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)03-0958-07

Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids

YAO Jia-jia[1], KANG Fu-xing[2], GAO Yan-zheng[1]

(1. Institute of Organic Contaminant Control and Soil Remediation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210090, China)

Abstract: The adsorption of a typical biogenic toxin aflatoxin B_1 on montmorillonite modified by low-molecular-weight humic acids (M_r <3 500) was investigated. The montmorillonite rapidly adsorbed the aflatoxin B_1 until amounting to the maximal capacity, and then the adsorbed aflatoxin B_1 slowly released into solution and reached the sorption equilibrium state after 12 h. The sorption isotherm of aflatoxin B_1 by montmorillonite could be well described by Langmiur model, while the sorption isotherm by humic acid-modified montmorillonite was well fitted by using the Freundlich model. The modification of the montmorillonite with humic acids obviously enhanced its adsorption capacity for aflatoxin B_1, and the amounts of aflatoxin adsorbed by modified montmorillonite were obviously higher than those by montmorillonite. The sorption enhancement by humic acid modification was attributed to ① the enlarged adsorption sites which owed to the surface collapse of crystal layers induced by organic acids, and ② the binding of aflatoxin with the humic acid sorbed on mineral surface. In addition, the adsorption amounts of aflatoxin by montmorillonite and modified montmorillonite increased with the increase of pH values in solution, and more significant enhancement was observed for the latter than the former, which attributed to the release of humic acids from the modified montmorillonite with the high pH values in solution. This indicates that increasing the pH values resulted in the enhanced hydrophilic property and the release of the organic acids presented in modified montmorillonite, and more sorption sites were available for aflatoxin on the modified montmorillonite. Results of this work would strengthen our understanding of the behavior and fate of biological contaminants in the environment.

Key words: montmorillonite; low-molecular-weight humic acid; biogenic toxin; aflatoxin; adsorption

致病微生物在土壤环境中普遍存在,这些微生物分泌的毒素可直接或间接影响植物生长,降低粮食质量,破坏土壤生态环境,危害人群健康. 黄曲霉是土壤中常见的病原菌,它产生的黄曲霉毒素(AF)是一类结构和理化性质相似的真菌次级代谢物,因其所具有的强烈致癌、致畸、致突变性被列为最重要的致癌物质之一[1,2],其中黄曲霉素(AFB_1)的毒性很强,分别是氰化钾、砒霜的 10 倍、68 倍[3,4]. 污染、耕作方式等因素导致的土壤微生物种群结构失衡往往使土壤中 AF 含量增加, AF 也是自然界中已经发现的理化性质最为稳定的一类霉菌毒素,对土壤环境、生态安全、人群健康等威胁很大. 然而,目前人们对 AF 在土壤中的迁移、转化等环境行为还知之甚少.

收稿日期: 2010-12-09; **修订日期**: 2011-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171193, 21077056); 霍英东教育基金项目(122045)

作者简介: 姚佳佳(1987 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学,E-mail: 2010103077@njau.edu.cn

* 通讯联系人,E-mail:gaoyanzheng@njau.edu.cn

土壤颗粒对污染物的吸附-解吸作用影响其在土壤环境中的迁移转化[5]. AFB_1 是一类非离子疏水性有机化合物，有机组分对其有较强的吸附能力. 土壤矿物特别是蒙脱石对 AFB_1 亦具有选择性吸附作用，二者可通过氢键、电子转移、配位螯合等机制结合[6]. AFB_1 在土壤中的吸附过程必然同时受到有机、无机组分的影响. 目前有关研究主要通过向矿物-有机污染物体系中加入腐殖酸试剂，考察腐殖酸对矿物吸附污染物的影响，其侧重点是溶液中腐殖酸对疏水性有机污染物在固相矿物表面的竞争吸附作用[7,8]. 实际上，土壤中有机、无机组分往往相互结合，形成“有机-无机复合体”，改变了无机矿物的表面性质，这理论上会影响矿物对污染物的吸附性能. 然而，有关腐殖酸-土壤矿物复合体对 AFB_1 的吸附作用，国内外至今仍少有报道. 本研究以腐殖酸改性蒙脱土为吸附剂，分析了“腐殖酸-矿物”复合体对 AFB_1 的吸附行为，以期为进一步阐明 AF 在土壤中的界面过程和环境归趋提供依据.

1　材料与方法

1.1　材料

蒙脱土采自南京市江宁区汤山镇，为钠基蒙脱土. 其有机质含量为 587.3 $mg\cdot kg^{-1}$，pH 值为 9.90，阳离子交换量(CEC)为 55.1 $mg\cdot(100\ g)^{-1}$，晶体层间距为 1.19 nm.

腐殖酸购于上海巨枫化学科技有限公司. 取适量腐殖酸溶解于 4 L 超纯水中，至饱和，8 000 $r\cdot min^{-1}$转速、4℃条件下高速冷冻离心 15 min. 上清液为粗腐殖酸液，将粗腐殖酸液和水按 1∶10 的比例充分混合，在 4℃下条件下用截留分子质量为3 500 的透析袋透析 24 h. 透析出的产物为低于3 500相对分子质量的溶解性腐殖酸(95 $mg\cdot L^{-1}$).

黄曲霉毒素 B_1(AFB_1)购于上海泉岛生物化学有限公司，纯度为 99%.

1.2　蒙脱土的制备和改性[9~15]

首先采用自然水洗沉降法对钠基蒙脱土进行提纯. 以 15 g∶100 mL 的土水比分散蒙脱土颗粒，静置 20 min 后，取悬浮液，以4 000 $r\cdot min^{-1}$转速离心 25 min，去除上清液，将沉积物烘干，研磨过 300 目筛，制得蒙脱土原土.

在上述钠基蒙脱土、水混合液静置 20 min 后取出的悬浮液中，加入相对于悬浮颗粒质量 4% 的 Na_2CO_3(用来扩增蒙脱土矿物晶层)，60℃下充分搅拌 1 h，再以4 000 $r\cdot min^{-1}$转速离心 20 min，移去上清液，向土中加水至原体积以洗涤矿物表面 CO_3^{2-} 和 Na^+，再次以4 000 $r\cdot min^{-1}$转速离心 25 min，除去上清液，取出残土. 将残土烘干、研磨过 300 目土壤筛制得充分钠化的蒙脱土. 取上述钠化后的蒙脱土 180 g，加入上述制备好的低分子量腐殖酸溶液 5 L(95 $mg\cdot L^{-1}$)，搅拌 1 h，80℃下烘干、研磨至 300 目后，获得低分子量腐殖酸改性蒙脱土.

1.3　吸附实验

AFB_1 在蒙脱土上等温吸附曲线的测定：用苯和乙腈混合液(98∶2)溶解 AFB_1，制成 100 $mg\cdot L^{-1}$储备液[16,17]. 在两组 20 mL 具塞试管中分别加入 0.50 g 蒙脱土原土和改性蒙脱土，再加入 10 mL 去离子水充分振荡摇匀，调节溶液 pH 值至 7.0. 用微量注射器向每支试管中加入不同体积的 AFB_1 储备液，使各管中 AFB_1 的初始浓度为 30、50、100、200、400、800 $\mu g\cdot L^{-1}$，然后在 25℃、120 $r\cdot min^{-1}$条件下振荡吸附 24 h，以4 000 $r\cdot min^{-1}$转速离心 25 min，用高效液相色谱仪(HPLC)测定上清液中 AFB_1 浓度.

吸附动力学实验：分别在两组 20 mL 具塞试管中加入 0.50 g 蒙脱土原土和改性蒙脱土，10 mL 去离子水充分振荡，调节 pH 值至 7.0，加入储备液使各试管中 AFB_1 浓度均为 100 $\mu g\cdot L^{-1}$，然后在 25℃、120 $r\cdot min^{-1}$条件下，分别振荡吸附 2、4、6、8、12、16、20 和 24 h. 取样及测定方法同上.

溶液 pH 值对吸附的影响：另取两组 20 mL 具塞试管，加入 0.50 g 蒙脱土原土或改性蒙脱土，再加入 10 mL 去离子水充分振荡，分别调节 pH 值为 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0 和 8.5，加入储备液使各试管中 AFB_1 浓度为 100 $\mu g\cdot L^{-1}$，在 25℃、120 $r\cdot min^{-1}$条件下振荡吸附 24 h. 取样及测定方法同上.

溶解性有机质(DOM)的释放：两组 20 mL 具塞试管中分别加入 0.50 g 蒙脱土和改性蒙脱土，加入 10 mL 去离子水后充分振荡，调节 pH 值至 5.0、6.0、7.0、8.0. 在 25℃、120 $r\cdot min^{-1}$条件下振荡 24 h，4 000 $r\cdot min^{-1}$转速下离心 25 min. 通过测定上清液中溶解性有机碳(DOC)，表征 DOM 含量.

1.4　分析测定方法[18,19]

用 HPLC 对溶液中 AFB_1 进行检测. HPLC 型号为岛津 LC-20AT，配有 4.6 mm × 150 mm 的烷基 C_{18} 反相柱，荧光检测器(RF-10Axl). 测定条件为：柱温 40℃，流动相为甲醇与水(比例 45∶55)，流速为 1 $mL\cdot min^{-1}$，进样量为 20 μL，激发波长和发射波长

分别为 365 nm 和 435 nm.

溶液中 DOC 的测定采用比色法[20].

分别将改性前后的蒙脱土原土和改性蒙脱土碾磨制样,进行 X 射线扫描. X 射线衍射仪测定的管电压为 35 kV,电流为 30 mA,扫描范围(2θ)为 2° ~ 50°,铜靶辐射. 同时,将改性前后的蒙脱土颗粒制片,在电子显微镜下放大5 000倍观察,比较蒙脱土改性后结构的变化.

1.5 数据处理

文中各数据点均为 3 组平行数据的均值,采用 Origin 8.0 进行数据处理和制图.

2 结果与讨论

2.1 改性蒙脱土的性质

蒙脱土原土经低分子量腐殖酸改性后,其有机质含量从 587.3 $mg\cdot kg^{-1}$ 增至1 032.3 $mg\cdot kg^{-1}$,pH 值从 9.90 增加到 10.58,CEC 则从 0.55 增加到 0.65 $mg\cdot(100\ g)^{-1}$. 图 1 为蒙脱土原土和改性蒙脱土的 X 射线衍射图谱. 从图 1(a)中可以看到:蒙脱土在 $2\theta = 6.235°$左右出现了很明显的衍射峰,经计算,蒙脱土层间距离为 1.187 nm. 经改性后,蒙脱土层间结构发生改变,如图 1(b)所示,在 $2\theta = 6.235°$ 位置未出现衍射峰. 可见,低分子量腐殖酸参与下的改性过程明显改变了蒙脱土矿物晶层结构. 一般认为,加入的有机物质主要通过化学成键和物理吸附 2 种方式与蒙脱石形成复合体. 例如,有机季铵盐阳离子与蒙脱石层间钠或钙离子基于化学交换的成键方式结合,其结合力主要为共价键和离子键; 极性有机化合物置换蒙脱石层间的吸附水而发生了非离子反应,通过范德华力吸附在单位晶层底面上[21]. 也有文献提出,含有可聚合性基团的季铵盐可插层至蒙脱石层间,层间季铵盐的可聚合性基团能够与一系列有机单体在层间接枝聚合,或与聚合物的不饱和双键发生交联,可实现插层原位聚合并将蒙脱石晶片剥离,制得有机-无机纳米复合材料[14]. 然而,本研究中的 X-射线衍射图谱表明,矿物晶层被腐殖酸破坏,相互近似于平行的有序晶层发生坍塌,这种改变完全不同于季铵盐与蒙脱土之间的插层作用,腐殖酸的加入很可能建立了“矿物-腐殖酸”之间新键体系.

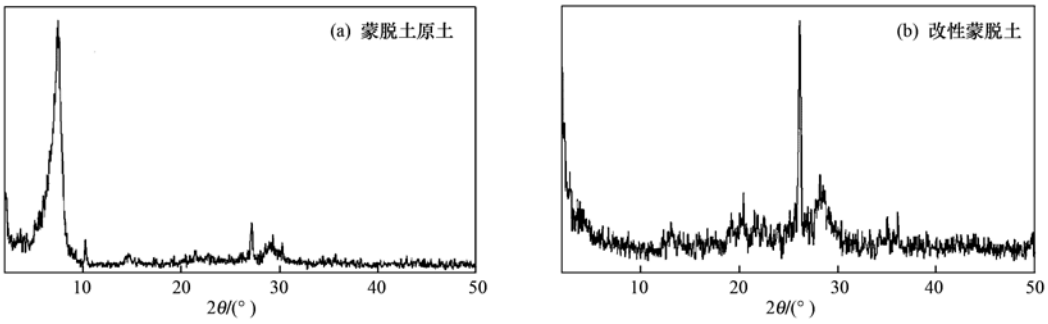


图 1 改性前后蒙脱土 X 射线衍射图谱

Fig. 1 XRD spectra of montmorillonite and modified montmorillonite

2.2 改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附作用

2.2.1 吸附动力学

供试时间内,AFB_1 在蒙脱土原土和改性蒙脱土上呈现了截然不同的两种吸附动力学曲线,如图 2 所示. 2 h 内,AFB_1 在原土上的吸附量达最大值 1.77 $\mu g\cdot g^{-1}$,随着时间延长,吸附量逐渐下降,8 h 时达最小值 0.82 $\mu g\cdot g^{-1}$,然后在 24 h 内趋于稳定、吸附量约为 1.01 $\mu g\cdot g^{-1}$. 而改性蒙脱土的吸附过程与原土不同,4 h 处的吸附量仅为 0.63 $\mu g\cdot g^{-1}$,远小于原土; 但随着吸附时间延长,其吸附量呈上升趋势,12 h 时达最大值为 1.60 $\mu g\cdot g^{-1}$,其后 24 h 内吸附量趋于稳定(约 1.4 $\mu g\cdot g^{-1}$).

进一步计算了 AFB_1 在蒙脱土原土和改性蒙脱土上的吸附速率,它们与时间的关系如图 2(b)所示. 在第 4 ~ 11 h 附近,原土吸附 AFB_1 的速率显示为负值,表明其表面发生了急剧的脱附现象,脱附速率从 0.36 $\mu g\cdot(g\cdot h)^{-1}$ 下降至 0.07 $\mu g\cdot(g\cdot h)^{-1}$. 而改性蒙脱土在 24 h 内速率均为正值,表明该过程以吸附为主,在第 2 ~ 4 h 之间吸附速率最大,然后迅速下降,16 h 后吸附速率下降至 0.08 $\mu g\cdot(g\cdot h)^{-1}$ 并趋近于零,吸附达饱和.

随着时间延长,吸附在蒙脱土原土上的 AFB_1 很容易发生解吸,从而导致最终(24 h)吸附量小于初始(2 h)吸附量. 而腐殖酸改性不但改变了 AFB_1 在土壤矿物上的吸附容量,还改变了其吸附方式. 从

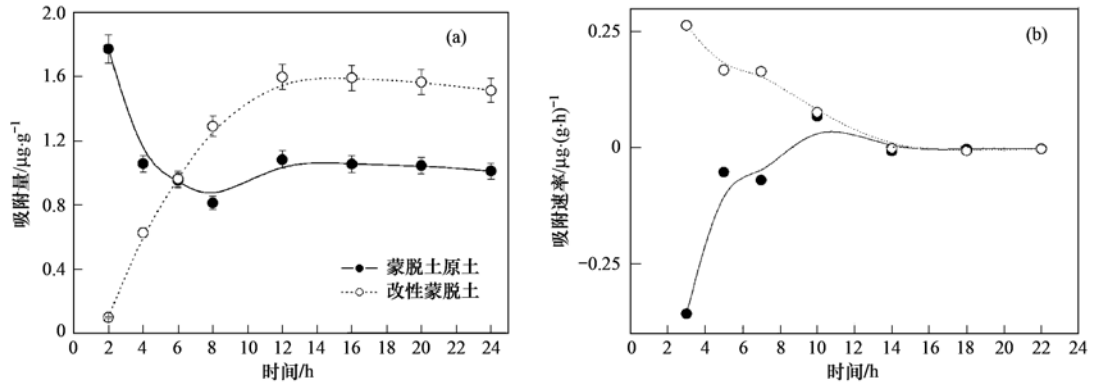


图 2　不同时间下蒙脱土原土和改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量和吸附速率

Fig. 2　Temporal adsorption amounts and adsorption rate of AFB_1 on montmorillonite and modified montmorillonite

吸附方式来看，一方面，改性后矿物表面腐殖酸促进了对 AFB_1 的吸附，这是由于疏水性有机物的分配作用所致[22~26]，因为与矿物结合的腐殖酸的疏水基团易形成局部疏水性微环境，促进 AFB_1 等疏水性有机物的分配，进而提高了改性矿物对 AFB_1 的吸附能力；另一方面，受有机物的异质性影响，腐殖酸与矿物表面结合使得已吸附的 AFB_1 解吸速率减慢且解吸量(率)降低. 任丽丽等[27]研究了外源有机质对土壤中菲的增强固定作用，认为土壤有机质含量越高，疏水性有机污染物从有机质中的解吸量越小，解吸滞后现象越明显.

2.2.2　等温吸附曲线

图 3 为 AFB_1 在蒙脱土原土和改性蒙脱土上的等温吸附曲线. AFB_1 在 2 种蒙脱土上的吸附量均随其溶液平衡浓度的增加而增大，但二者的吸附量和吸附曲线存在很大差异. AFB_1 初始浓度为 50 $\mu g \cdot L^{-1}$时，AFB_1 在原土上的平衡浓度为 12.97 $\mu g \cdot L^{-1}$，吸附量为 0.74 $\mu g \cdot g^{-1}$，在改性蒙脱土上的平衡浓度为 20.82 $\mu g \cdot L^{-1}$，吸附量为 0.58 $\mu g \cdot g^{-1}$，前者略高于或接近后者；但当 AFB_1 初始浓度 > 50 $\mu g \cdot L^{-1}$，改性蒙脱土的吸附量迅速增加，明显高于原土上的吸附量. AFB_1 平衡浓度为 100 $mg \cdot L^{-1}$时，原土对 AFB_1 的吸附趋于饱和，为 L 型吸附过程；在供试浓度范围内，改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附显然没有达到最大值，为 F 型或 H 型吸附过程. 对于 L 型等温吸附，随着吸附剂中吸附位被覆盖，吸附质分子越来越难接触到表面吸附位上. 改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附表明矿物表面的腐殖质促进了毒素吸附，改性蒙脱土在供试 AFB_1 浓度条件下对 AFB_1 吸附未达饱和[28].

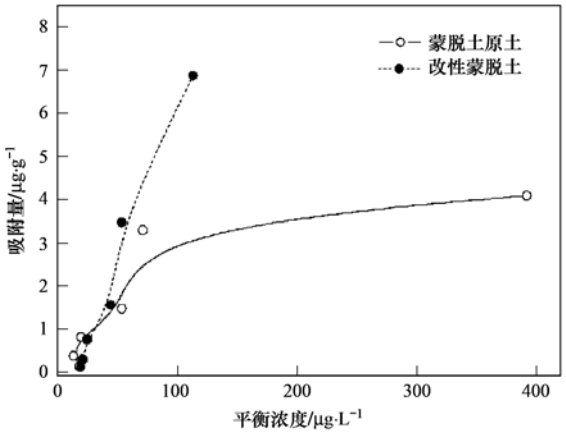


图 3　25℃时 AFB_1 在蒙脱土原土和改性蒙脱土上的等温吸附曲线

Fig. 3　Adsorption isotherms of the AFB_1 by the montmorillonite and modified montmorillonite at 25℃

分别用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线来拟合上述吸附过程，吸附参数列于表 1. 如表 1 所示，对于改性前后的 2 种蒙脱土，Langmuir 模型的拟合结果显示 R 值分别为 0.66 和 0.81，但改性蒙脱土上计算获得的吸附最大值 Q_m 和吸附常量 K_L 均为负值. 本实验 AFB_1 浓度范围内，改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量随 AFB_1 平衡浓度的增加而增加，均为正值，因此计算结果与实际情况不符，AFB_1 在改性蒙脱土上的吸附过程不能用 Langmuir 模型描述. Freundlich 模型的拟合结果显示 R 值分别为 0.84 和 0.94，此吸附过程符合 Freundlich 模型. 蒙脱土原土上用 Freundlich 模型计算出的 N 值 > 1，表明它的吸附曲线偏离线性，改性蒙脱土上获得的 K_F 值是原土上获得的 K_F 值的 40 倍，表明改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附能力和强度远大于原土. 一般 Langmuir 等温

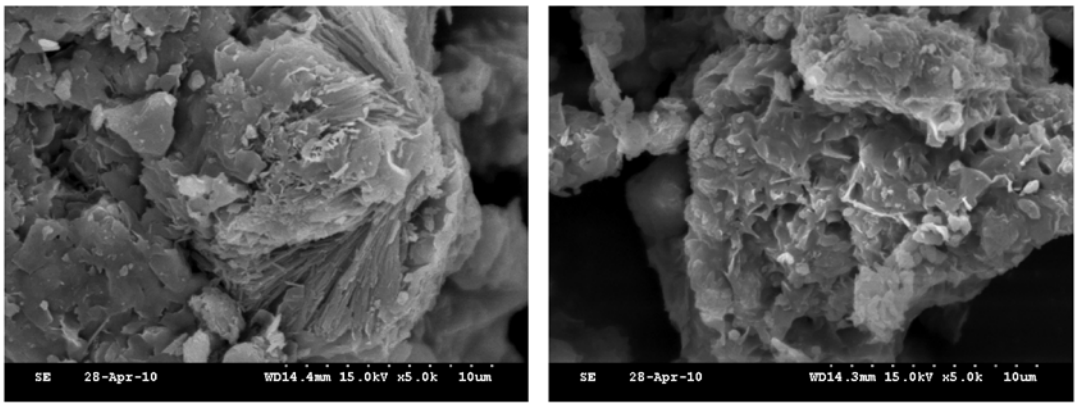
表 1 蒙脱土原土和改性蒙脱土吸附 AFB_1 的 Freundlich 和 Langmuir 模型相关参数

Table 1 Adsorption parameters of the Freundlich and Langmuir model for the sorption AFB_1 by montmorillonite and modified montmorillonite

类型	Freundlich 模型	R	K_F	N	Langmuir 模型	R	K_L	Q_m
蒙脱土原土	$Q=0.043c^{0.95}$	0.84	0.043	1.06	$Q=0.03c/(1+0.003c)$	0.66	0.003	11.10
改性蒙脱土	$Q=0.001c^{2.10}$	0.94	0.001	0.48	$Q=0.017c/(1-0.016c)$	0.81	-0.02	-0.83

吸附方程描述的吸附表面是均一的情况,Freundlich 方程描述的是吸附表面不均一时的情况[28]. 从蒙脱土对 AFB_1 的吸附曲线由 Langmuir 变为 Freundlich 型推断,改性后的蒙脱土矿物吸附 AFB_1 的行为并不仅仅是简单的单分子层覆盖行为,而是矿物和矿物表面有机质共同参与下所导致的吸附质在矿物表面的分子叠加行为,或者吸附-分配共同作用行为.

通过电子显微镜放大5 000倍观察蒙脱土表面结构,所获图像见图 4. 图 4(a)中蒙脱土原土呈明显的晶体结构,符合典型的层状矿物结构特征; 图 4(b)为经改性处理后的蒙脱土,其表面结构不规则,呈现卷曲形态,结构松散,舒展程度较小. 说明通过低分子量腐殖酸改性后,蒙脱土晶层坍塌且结构被破坏,形成絮状结构,这与图 1 中 X 射线衍射测定所推知的晶层消失的结果一致. 同时,由于改性后矿物表面絮状结构松散,孔隙率大,导致矿物表面更多的裸露表面暴露在溶液中,这将直接导致了蒙脱土矿物表面吸附能力的增强. 因此,晶层破碎化暴露在溶液中的更多吸附位是导致改性蒙脱土吸附 ABF_1 增强的又一因素.



(a) 蒙脱土原土 (b) 改性蒙脱土

图 4 蒙脱土原土和改性蒙脱土扫描电镜照片(×5 000)

Fig. 4 Scanning electron micrographs (×5 000) of montmorillonite and modified montmorillonite

综上可见,腐殖酸主要通过表面成键的方式与矿物形成复合体. 这是因为,一方面矿物晶层的消失说明矿物晶层被破坏,晶层作用力发生了改变,这种改变应是由于腐殖酸打破了原有的成键体系、建立"矿物-腐殖酸"新键体系的结果; 另一方面,腐殖酸是由芳香族及多种官能团构成的高分子有机酸,具有良好的生理活性和吸收、络合、交换等功能,因而在通过腐殖酸对蒙脱石进行改性的过程中,化学改性和物理改性并存,其间既存在离子键、共价键,又存在范德华力. 腐殖酸中的聚合性基团发生接枝聚合或与聚合物的不饱和双键发生交联,实现插层原位聚合并将蒙脱土晶片剥离,从而也破坏了蒙脱土原有的晶层结构.

2.3 pH 对 AFB_1 吸附的影响

pH 值对蒙脱土吸附 AFB_1 的影响如图 5 所示. 改性与否蒙脱土对 AFB_1 的吸附均受 pH 值的影响,AFB_1 的吸附量均随着 pH 值的升高而增大. 当 pH <6.0 时,改性前后蒙脱土对 AFB_1 的吸附量增加相当明显,pH 值由 5.0 增加到 6.0,吸附量分别从 0.04 $\mu g\cdot g^{-1}$和 0.22 $\mu g\cdot g^{-1}$增加到 0.82 $\mu g\cdot g^{-1}$和 1.06 $\mu g\cdot g^{-1}$. 在 pH 7.0 条件下,改性蒙脱土吸附量达到最大值,为 1.51 $\mu g\cdot g^{-1}$; 在 pH 7.5 ~ 8.5 范围内,AFB_1 吸附量略有下降并趋于稳定. 在 pH 8.0 条件下,蒙脱土原土吸附量达到最大值,为 1.19 $\mu g\cdot g^{-1}$; pH 7.5 ~ 8.5 范围内,AFB_1 吸附量趋于稳定.

图 5 结果表明,中性略偏碱性的条件有利于腐殖酸改性前后矿物对 AFB_1 的吸附. AFB_1 主要通过羰基基团与蒙脱土矿物表面可交换性阳离子的水合外层以氢键结合[7],pH 值的增加有利于蒙脱石层

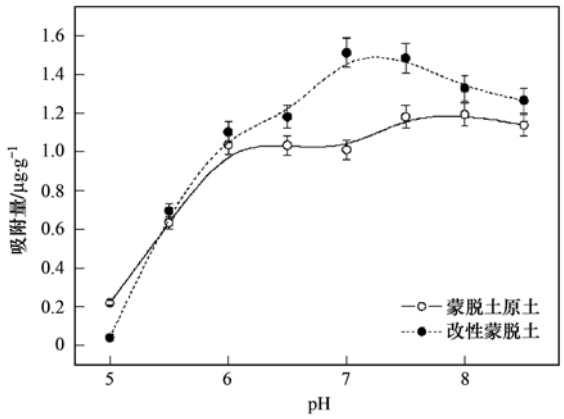


图 5　不同 pH 条件下蒙脱土原土和改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附

Fig. 5　Adsorption isotherms of AFB_1 on montmorillonite and modified montmorillonite at different pH values

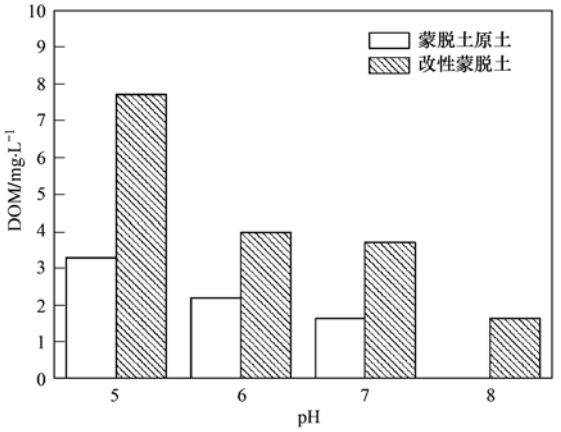


图 6　蒙脱土原土和改性蒙脱土中溶解性有机质(DOM)释放与 pH 值的关系

Fig. 6　Release of dissolved organic matter from montmorillonite and modified montmorillonite at different pH values

间阳离子和水分子进行配位,从而促使围绕在这些阳离子周围的水分子吸附更多 AFB_1 分子. 此外,AFB_1 等电点为 4.17,反应体系 pH > 4.17 时,它带负电荷,也可以通过静电与蒙脱土边缘表面存在的正电荷及层间阳离子作用,随着 pH 值的增大,静电作用进一步增强,蒙脱石对 AFB_1 的吸附将达到最大值. 2.2 节的研究结果表明,改性蒙脱土具有较大的孔隙率,更为松散的结构,形成的“矿物-腐殖酸”新键体系可大大促进矿物对 AFB_1 的吸附,由此可以推论,pH 值的增加将更有利于改性蒙脱土吸附 AFB_1. 但是在 pH = 5 时,改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量低于原土的吸附量,这可能与矿物表面腐殖酸在水溶液中的部分溶出有关. 根据 24 h 内改性前后蒙脱土在水溶液中释放出的溶解性有机质(DOM)含量,绘制了 pH-DOM 关系图(图 6). 由图 6 可以看出,在 pH 5 ~ 8 范围内,随着 pH 值的升高,DOM 的析出量呈减少的趋势. 在 pH = 5 时,改性蒙脱土析出的 DOM 的量最多,比其他 pH 条件下释放的 DOM 量高 2 ~ 4 倍,是相同条件下原土释放 DOM 的 2.35 倍. DOM 的释放使矿物表面有机质的减少,从而降低了改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量. 另一方面,DOM 还可能与 AFB_1 在溶液中结合,进一步减少 AFB_1 在矿物表面的吸附. 在 pH 较低的条件下,改性蒙脱土释放了较多的 DOM,这可能是改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量低于原土的重要原因. 随着 pH 升高,DOM 释放量减少,DOM 对 AFB_1 吸附的抑制作用减弱,固相有机质损失减少,矿物表面吸附作用相对增强,pH 升高对 AFB_1 吸附的影响则主要表现为促进作用.

3　结论

(1) 经低分子量腐殖酸改性后,蒙脱土有机质含量、pH 值、CEC 值均有所增加,电镜(SEM)结果表明,腐殖酸改性导致其晶体结构坍塌,形成结构不规则、絮状且结构松散的改性蒙脱土.

(2) 供试时间内,蒙脱土原土和改性蒙脱土吸附 AFB_1 的动力学曲线不同. 原土能快速吸附 AFB_1 至最大值,然后吸附量随时间增加而减少,吸附速率为负值,存在急剧脱附现象,至 12 h 时吸附量不再减少,24 h 内趋于稳定. AFB_1 在改性蒙脱土上的吸附量则随时间增加而持续增大,约 12 h 时达最大值,其后吸附达平衡; 供试时间内其吸附速率均为正值.

(3) 供试条件下,AFB_1 在蒙脱土原土上的等温吸附曲线可用 Freundlich 或 Langmuir 模型拟合,而其在改性蒙脱土上的等温吸附曲线适用 Freundlich 模型. AFB_1 平衡浓度 < 49.49 $\mu g \cdot L^{-1}$ 时,原土对 AFB_1 的吸附量略高于改性蒙脱土,而后改性蒙脱土上的吸附量快速增加,且明显高于原土. 腐殖酸改变了矿物晶层结构,使其表面呈现晶层破碎化的絮状体,进而促进改性矿物对 AFB_1 的吸附.

(4) pH 5 ~ 9 范围内,随 pH 的升高蒙脱土原土和改性蒙脱土对 AFB_1 的吸附量均提高,且后者的增加幅度更大.

参考文献:

[1] Rustom I Y S. Aflatoxin in food and feed: occurrence, legislation and inactivation by physical methods [J]. Food Chemistry, 1997, **59**(1): 56-67.

[2] Sidhu O P, Chandra H, Behl H M. Occurrence of aflatoxins in

mahua (*Madhuca indica* Gmel.) seeds: synergistic effect of plant extracts on inhibition of *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production[J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, **47**(4): 774-777.

[3] Cotty P J, Mellon J E. Ecology of Aflatoxin producing fungi and biocontrol of Aflatoxin contamination[J]. Mycotoxin Research, 2006, **22**(2): 110-117.

[4] Oberheu D G, Dabbert C B. Aflatoxin contamination in supplemental and wild foods of northern bobwhite [J]. Ecotoxicology, 2001, **10**(2): 125-129.

[5] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.21-28, 32-41, 70-77.

[6] Deng Y J, Velázquez A L B, Billes F, *et al*. Bonding mechanisms between aflatoxin B_1 and smectite[J]. Applied Clay Science, 2010, **50**(1): 92-98.

[7] Jiang J Q, Cooper C, Quki S. Comparison of modified montmorillonite adsorbents: part I: preparation, characterization and phenol adsorption[J]. Chemosphere, 2002, **47**(7): 711-716.

[8] Ling W T, Ren L L, Gao Y Z, *et al*. Impact of low-molecular-weight organic acids on the availability of phenanthrene and pyrene in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(10): 2187-2195.

[9] 潘竟军, 杨冠英, 韩布兴, 等. 铝在钠蒙脱土上的吸附研究[J]. 土壤学报, 1999, **36**(1): 83-90.

[10] Chen D, Zhu J X, Yuan P, *et al*. Preparation and characterization of anion-cation surfactants modified montmorillonite [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2008, **94**(3): 841-848.

[11] 朱利中, 李益民, 张建英, 等. 有机膨润土吸附水中萘胺、萘酚的性能及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, **17**(4): 445-449.

[12] Khan A H, Nurnabi M, Bala P. Studies on thermal transformation of Na-montmorillonite-glycine intercalation compounds[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, **96**(3): 929-935.

[13] Zhao F, Wan C Y, Bao X J, *et al*. Modification of montmorillonite with aminopropylisooctyl polyhedral oligomeric silsequioxane[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, **333**(1): 164-170.

[14] 彭先佳. 蒙脱石无机层间化合物的制备及其对废水中 Cr(Ⅵ)的吸附行为与机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.

[15] Foster N S, Day J W, Filby R H, *et al*. The role of Na-montmorillonite in the evolution of copper, nickel, and vanadyl geoporphyrins during diagenesis [J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(8): 907-919.

[16] 史莹华, 许梓荣, 冯建蕾, 等. 高效液相色谱法测定动物组织样品中黄曲霉毒素的残留量[J]. 分析化学, 2005, **33**(6): 850-852.

[17] 马渭萍, 吕焕明, 马慧宁, 等. 柱后衍生高效液相色谱法测定酱油、醋中黄曲霉素 B_1 的含量[J]. 光谱实验室, 2004, **21**(3): 518-521.

[18] 马良. 黄曲霉毒素 B_1 高灵敏度检测技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.

[19] 张雪辉, 陈建民. 高效液相色谱法与荧光光度法检测中药材中黄曲霉毒素的比较[J]. 药学学报, 2004, **39**(12): 997-1000.

[20] 占新华, 周立祥. 土壤溶液和水体中水溶性有机碳的比色测定[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(5): 433-437.

[21] 陶志强. 改性膨润土的制备及其在水处理中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

[22] 凌婉婷, 徐建民, 高彦征, 等. 溶解性有机质对土壤中有机污染物环境行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(2): 326-330.

[23] Elahd H, Jury W A, Cliath M M. Spatial variability of pesticide adsorption parameters [J]. Environmental Science and Technology, 1986, **20**(3): 256-260.

[24] Sposito G, Martin-Neto L, Yang A. Atrazine complexation by soil humic acids[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, **25**(6): 1203-1209.

[25] Ling W T, Xu J M, Gao Y Z. Effects of dissolved organic matter from sewage sludge on the atrazine sorption by soils[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2005, **48**(1): 57-66.

[26] Gao Y Z, Ren L L, Ling W T, *et al*. Effects of low-molecular-weight organic acids on sorption-desorption of phenanthrene in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, **74**(1): 51-59.

[27] 任丽丽, 凌婉婷, 高彦征. 外源有机质对土壤中菲的增强固定作用[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(3): 647-652.

[28] 近藤精一, 石川达雄, 安部郁夫. 吸附科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.135-137.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 3

Mar. 15, 2012

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China ····· CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-pei, *et al.* (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains ····· WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, *et al.* (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou ····· ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, *et al.* (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions ····· YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, *et al.* (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010 ····· WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, *et al.* (701)
Characteristics of $\delta^{18}O$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China ····· LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, *et al.* (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, *et al.* (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary ····· JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, *et al.* (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, *et al.* (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment ····· LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, *et al.* (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi ····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, *et al.* (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai ····· DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, *et al.* (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification ····· WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, *et al.* (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment ····· WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, *et al.* (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge ····· GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, *et al.* (777)
Influence of *Ruditapes philippinarum* Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay ····· DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, *et al.* (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing ····· HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland ····· HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, *et al.* (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism ····· LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, *et al.* (825)
Production of Peroxide Hydrogen in *Chattonella ovata* Hong Kong Strain ····· JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, *et al.* (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of *Bacillus* sp. B1 on *Phaeocystis globosa* ····· LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of *Microcystis* and *Anabaena* in Yanghe Reservoir ····· CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, *et al.* (844)
New-Type Electrodeless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution ····· YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, *et al.* (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes ····· ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, *et al.* (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT ····· PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage ····· LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, *et al.* (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age ····· ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, *et al.* (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification ····· LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity ····· FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of *Scutellaria baicalensis* Georgi ····· HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, *et al.* (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, *et al.* (992)
Microbial Degradation of 2,2′,4,4′-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition ····· LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, *et al.* (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus ····· XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, *et al.* (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation ····· LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, *et al.* (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, *et al.* (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines ····· TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, *et al.* (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor ····· CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, *et al.* (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