

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

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

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放 何吉成(1)

北京上甸子站气相色谱法大气 CH₄ 和 CO 在线观测方法研究 汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)

2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子 朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)

广东东江流域多氯萘的大气沉降研究 王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)

塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征 段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)

紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究 王灿,席劲瑛,胡洪管,姚远(32)

春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征 丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)

春季胶州湾海水汞的形态研究 许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)

丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素 蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)

塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化 陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)

某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟 马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)

北京市城市降雨径流水质评价研究 侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)

重庆市路面降雨径流特征及污染源解析 张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)

沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究 陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)

Pd/TiO₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究 张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)

pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响 冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)

给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究 陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)

安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价 宋大平,庄大方,陈巍(110)

染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析 曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)

间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究 谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)

pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响 庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)

硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)

农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用 徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)

高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究 廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)

活性污泥对四环素的吸附性能研究 陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)

加油站油类污染物自然衰减现场试验研究 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)

生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法 宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)

利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数 王晓玲,尹军,高尚(175)

数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响 董峰,张捍民,杨凤林(181)

不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响 刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)

间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究 曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)

鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究 陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)

北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估 陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)

外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究 杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)

赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建 朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究 别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)

纳米 TiO₂ 对短裸甲藻的毒性效应 李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)

苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险 李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)

电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析 王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)

洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险 刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)

湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)

广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律 项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)

缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究 吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)

可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复 付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)

胡敏酸对汞还原能力的测定和表征 江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)

Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响 黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)

油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究 张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)

利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)

黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究 封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)

鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析 张健,关连珠,颜丽(323)

杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响 赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)

《环境科学》征稿简则(7) 《环境科学》征订启事(19) 信息(47,70,202,304)

缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究

吴锡^{1,2}, 许丽英^{1*}, 张雪霞¹, 宋雨^{1,2}, 王新¹, 贾永锋^{1*}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采集张士污灌区 0~100 cm 深的土壤并在实验室里负载低浓度的砷, 采用不加硫和加硫对比研究了厌氧条件下土著微生物对土壤中砷的形态转化、环境行为影响及其机制。结果表明, 在不外加硫酸盐条件下厌氧培养 8 d 后, 微生物还原作用造成砷的大量还原和释放, 释放的砷 70% 以上是以 As(III) 形式存在, 尤其 20~40 cm 深度土壤砷的释放量明显高于其它层土壤, As(III) 和 As(T) 分别达到 892.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1 240.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与非生物对照相比每层土中盐酸可提取的砷总量都大大降低, 且盐酸提取的 As(T) 几乎全部转化为 As(III)。伴随砷的释放, 铁发生还原和释放, 溶解态的亚铁基本都在 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 不同土层固相中亚铁离子的量都在 9.0~13.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内, 固相盐酸可提取态总铁中亚铁离子所占的比例基本都在 50% 以上, 说明微生物还原作用造成固相中铁氧化物发生还原性溶解和矿物结构转化。当体系中添加 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸盐时, 每层土的生物培养体系中铁的释放几乎完全被抑制, 砷和铁浓度也减少了 50%。与不加硫生物培养体系相比, 固相中盐酸可提取的砷量减少了 50%, 一部分砷被转化为稳定的硫化物 As_2S_3 而固定。可见在硫酸盐不足条件下微生物还原作用可造成砷被还原、活化和释放, 而补充土壤中硫酸盐的量可促使微生物还原/活化的砷转化成更加稳定的形态, 稳定的硫化物矿物 As_2S_3 是土壤微生物固定砷的重要途径。

关键词: 土壤; 砷; 微生物还原; 环境行为; 机制

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0273-07

Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions

WU Xi^{1,2}, XU Li-ying¹, ZHANG Xue-xia¹, SONG Yu^{1,2}, WANG Xin¹, JIA Yong-feng¹

(1. Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The soil of 0-100 cm depth was collected from the wastewater-irrigated farmland in Zhangshi, Shenyang and was amended with low concentration of arsenic. Microbial-mediated speciation transformation and environmental behavior of arsenic were investigated with and without addition of sulfate. The results showed that without addition of sulfate, arsenate was significantly reduced and released into soil solution after eight days of anaerobic incubation. Above 70% of arsenic presented as arsenite. More arsenic was released from the soil of 20-40 cm depth with arsenite and total arsenic concentration of 892.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 1 240.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively. Compared with abiotic control, the amount of arsenic dissolved in hydrochloric acid decreased greatly in each layer of soil, moreover, almost all of arsenic was reduced to arsenite. Ferric iron was also significantly reduced to ferrous and released into soil solution simultaneously. The concentration of ferrous iron in soil solution was above 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in solution and was 9.0-13.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in soil solid. Above 50% of the iron dissolved in hydrochloric acid was presented as ferrous. This indicates that microbial reduction leads to reductive dissolution of iron oxides and transformation of mineral configuration in soil solid. The release of arsenic and iron was notably suppressed after addition of 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ sulfate, with the concentration reduced by 50%. The amount of HCl-dissolvable arsenic in soil solid decreased by 50%, compared to the treatment without sulfate addition, which probably due to precipitation of arsenic sulfide. It is obvious that microbial reduction leads to reduction and release of arsenic when sulfate is absent. In the presence of sulfate, microbes may transform mobile arsenic into more stable species. Formation of arsenic sulfide mineral was probably the mechanism for arsenic fixation in soil by microbes.

Key words: soil; arsenic; microbial reduction; environmental behavior; mechanism

砷污染是一个全球性的环境问题^[1~3], 由于自然因素和人为因素的影响, 土壤、地下水和地表水等环境的砷污染严重危害人类的健康和生态环境^[2~4]。据调查, 我国重金属污染的耕地面积达 2 000 万 hm^2 , 约占我国耕地总面积的 1/5, 许多城市和工矿区的土壤都受到不同程度的砷污染^[5], 对我

收稿日期: 2011-01-27; 修订日期: 2011-03-24

基金项目: 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-446); 国家杰出青年科学基金项目(40925011); 国家自然科学基金项目(40803032)

作者简介: 吴锡(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物作用下土壤砷的迁移和固定, E-mail: wuxi_1@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xuliying@iae.ac.cn; yongfeng.jia@iae.ac.cn

国的食品安全、环境质量和人们的健康构成严重威胁^[6-11]. 砷的毒性与生物有效性在很大程度上由砷的赋存形态决定,而砷的形态转化直接关系到砷的环境行为及其环境效应.

通常土壤中的砷主要包括As(V)和As(III)这2种形态,二者可因环境条件改变或在环境微生物作用下相互转化^[12,13]. 土壤微生物对砷的还原作用可以直接或间接地影响其赋存形态与环境行为. 在土壤中砷大部分与铁、锰、铝氧化物矿物、黏土矿物及腐殖质等结合,不同形态的砷与矿物的亲和力有所区别,当五价砷被还原为三价砷后,土壤矿物对其吸持能力明显降低,可引起砷的活化和释放^[14-16]. 另一方面矿物中铁的氧化物或氢氧化物矿物是固定砷最重要的基质,微生物对铁的形态转化同样是影响砷的形态与环境行为的关键因素. 国内外已有大量研究证实微生物对砷和铁的还原作用强烈地影响土壤中砷的赋存形态与环境行为. 例如, Vaxevanidou^[17]和 Wang^[18]等发现土壤中砷的环境行为是由微生物对铁和砷的还原作用共同调控,微生物引起的铁的还原性溶解驱动了砷的释放行为. 在微生物对砷的活化与释放过程中,硫酸盐还原过程是调控砷的另一重要因素,硫酸盐还原产物H₂S可直接或间接地影响砷的环境行为及稳定性. 一方面,在溶解态硫离子与土壤溶液中亚铁离子沉淀的过程中,游离的砷可以被硫化亚铁吸附或共沉淀;另一方面,水相中的H₂S也可以与释放的亚砷酸盐

反应沉淀为硫化砷. 因此当微生物作用下土壤中的砷、铁、硫同时被还原时,砷的形态转化与环境行为将受到多种物理化学和生物因素的控制,其环境行为机制也更加复杂.

尽管国内外学者针对上述砷的地球化学循环的一般性机制和一些砷污染土壤开展了大量研究,并取得了很多重要成果^[14-21],但对于土壤中多元素共同调控下砷的环境行为及其形态转化的微生物学与化学机制仍需要进一步研究. 本研究利用清洁土壤负载低剂量砷来模拟砷污染土壤,开展缺氧条件下土壤微生物作用对砷的形态转化与环境行为的影响,并探讨砷释放与固定的机制,旨在为评价砷土壤的环境风险及建立污染修复方法提供依据.

1 材料与方 法

1.1 土壤砷的负载

土壤样品采自沈阳张士污灌区,0~100 cm深,样品每20 cm为一层,分层装入自封袋,当天带回实验室-4℃冰箱冷冻. 土壤消解后测定其中主要元素,如表1所示. 其中砷的本底值为10 mg·kg⁻¹. 采用1:5的固液比进行砷的负载(6.6 mg·L⁻¹的Na₃AsO₄溶液砷酸钠溶液),35℃,170 r·min⁻¹,避光,平衡24 h. 4 000 r·min⁻¹离心10 min,倾出上清,并用蒸馏水振荡离心洗涤2次固体,测液相砷的残留浓度,保留固体. 负载后,土壤体系砷含量为40 mg·kg⁻¹.

表1 供试土壤的主要元素

Table 1 Major element in soil

参数	As	Fe	Mn	Cd	Cu	Pb	Ni
质量分数/mg·kg ⁻¹	10.3	34 187.5	670.5	2.3	32.7	60.0	36.1

1.2 细菌的富集培养

基础盐培养基(MSM, g·L⁻¹): KH₂PO₄ 0.14, NH₄Cl 0.25, KCl 0.5, CaCl₂·2H₂O 0.13, NaCl 1.0, MgCl₂·6H₂O 0.62, 酵母提取物 0.5, 乳酸钠 2 mL·L⁻¹, 外加硫源无水 Na₂SO₄ 10 mmol·L⁻¹, 用1 mol·L⁻¹ NaOH 调节 pH 为 7.0~7.2.

向载砷土壤中加入培养基,以1:20的固液比,在35℃下170 r·min⁻¹恒温振荡器中避光培养8 d. 培养基采用无氧水配制,配制过程氮气保护,将培养基在厌氧手套箱中加入载砷土壤,于厌氧瓶中培养,以保证厌氧条件. 用高压灭菌锅将土壤灭菌,作为对照组. 非生物对照组实验的固液比、温度等所有培养条件与生物培养组相同.

1.3 分析方法

为避免样品氧化,取样与样品处理在厌氧手套箱中进行. 样品摇匀后取5 mL培养液用0.45 μm的滤膜过滤,滤液用于分析溶解态的Fe(II)、Fe(T)(总铁)、As(III)和As(T)(总砷)的浓度. 滤后固体用1 mol·L⁻¹ HCl 170 r·min⁻¹振荡提取2 h, 4 000 r·min⁻¹离心10 min,上清液用于分析HCl提取态的Fe(II)、Fe(T)(总铁)、As(III)和As(T)(总砷)的含量. 另取土壤培养液5 mL,加入5 mL 6 mol·L⁻¹ HCl,170 r·min⁻¹提取5 d,分析不同层土壤酸挥发态的S(Acid-Volatile Sulfide 即AVS)^[23]. 其中Fe(II)和AVS立即进行厌氧显色并测定,而用于测定As(III)的样品用0.4 mol·L⁻¹的柠檬酸钠-柠

檬酸缓冲液(pH 4.5)1:1稀释后在冰箱中保存48 h内测定。

砷的形态测定^[22]: As(Ⅲ)和As(T)浓度测定采用原子荧光光谱仪(AFS-2202,北京海光公司)进行。其中As(Ⅲ)样品先用 $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的柠檬酸钠-柠檬酸缓冲液(pH 4.5)作为样品稀释液和载液; As(T)的样品中加入10%体积的预还原剂(含5%硫脲和5%抗坏血酸的混合溶液),用5% HCl定容,反应数小时后用原子荧光光谱仪测定As(T)。As(T)与As(Ⅲ)的差值即为体系中As(V)的浓度。

总铁Fe(T)采用原子吸收光谱法分析^[22],亚铁离子采用邻菲罗啉分光光度法^[22], S^{2-} 离子采用亚甲基蓝比色法测定^[23]。

2 结果与讨论

2.1 微生物作用下砷的释放

在微生物作用下无外加硫的培养体系中各层土壤均见明显的砷还原与释放,但不同深度土壤砷的释放程度有所不同,如图1。20~40 cm深度土壤砷的释放量明显高于其它层土壤,As(Ⅲ)和As(T)分别达到 $892.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1240.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,与对照组相比,分别增加了 $856.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $995.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在不同深度土壤的培养体系,液相中超过70%的砷是以As(Ⅲ)形式存在,非生物对照中几乎没有亚砷酸盐。可见是微生物的作用造成土壤中砷的释放。

在外加硫体系中,溶解态的As(Ⅲ)和As(T)较无外加硫体系均明显降低,其中20~40 cm深度土壤As(Ⅲ)和As(T)分别降低了 $499.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $676.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,降低幅度最大,而在60 cm以下深度土壤的培养组中,砷的释放量变化都不大,As(Ⅲ)和As(T)释放大约减少 $300 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $160 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明土壤中微生物的数量和活性强烈的影响体系中硫酸盐的还原过程以及砷的环境行为。与深层土相比,表层土中的微生物在数量和活性都占有优势,表层土中补加硫酸盐后明显抑制了砷的释放行为。体系中补充适量的硫酸盐可以大大抑制了砷的释放行为,在硫酸盐微生物作用下体系中硫酸盐还原产物-硫离子可通过产生铁的硫化物以吸附或共沉淀方式重新固定被释放的砷,或者直接产生砷的硫化物沉淀,使被释放的砷再次被固化,回到固相中。

从图1可以看出非生物对照组中也有部分溶解态砷释放,但大多以As(V)形式存在,几乎没有As(Ⅲ)释放,只有无硫培养体系中少量的As(Ⅲ),可能是原有土壤中存在少量As(Ⅲ)被释放出来。

这可能由于培养基中的乳酸盐对砷具有一定的解吸附作用,—COOH与As(V)竞争吸附后位点,造成砷有一定量的释放^[24]。尽管培养液本身也可引起固相少量的砷溶解,但土壤微生物作用是造成砷的还原与释放的根本因素。

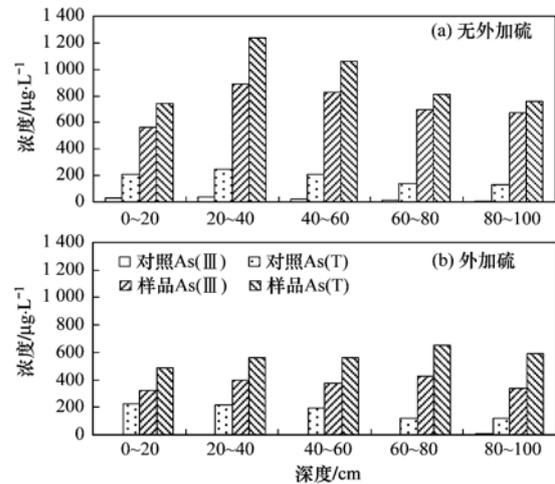


图1 微生物作用下As的释放

Fig. 1 Release of arsenic by microbes

2.2 微生物作用下盐酸可提取态砷的形态分析

砷在土壤中的结合形态决定砷的环境效应和生物有效性。盐酸可提取的砷形态主要指盐酸可以溶解的无定形铁锰氧化物、部分结晶度很差的结晶态铁氧化物结合的砷以及酸挥发硫吸附或共沉淀的砷^[25]。图2给出了在微生物作用下不同土层固相中盐酸可提取态As的形态与含量情况。从图2中可以看出,与对照培养组相比无论培养体系中是否外加硫酸盐,每层土中盐酸可提取的砷总量都大大降低,而且固相中盐酸提取的As(T)几乎全部转化为As(Ⅲ)。其中在没有外加硫源的体系中,0~20 cm表土的培养组中固相中盐酸提取态的砷中As(Ⅲ)升高了约 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但盐酸可提取的As(T)大大减少,As(T)约减少了 $9.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着深度增加,盐酸提取态As(Ⅲ)和As(T)略有增加。

与未加硫的培养体系相比,在外加硫酸盐的培养体系中经过微生物还原后无论是表层土壤还是深层土壤中盐酸可提取的总砷量均进一步降低,其中表层土0~20 cm盐酸可提取态As(T)约为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与不加硫的体系相比约降低了50%,约占非生物对照组盐酸可提取砷总量的11.4%,而加硫与未加硫的非生物对照组相比变化不大。由表2中数据可以看出,与未加硫的体系相比加硫体系中液相被释放的砷和固相中盐酸可提取的As(T)的量都

大大降低,液相中砷和固相盐酸提取的砷总量减少了 16.5%,相当于不加硫生物培养组中释放的砷和盐酸可提取砷总量的 37.1% 转化为盐酸不可提取的形态,可见在不加硫条件下,微生物还原作用造成了砷被还原、活化和释放,而外源硫的加入促使微生物还原/活化的砷转化成更加稳定的形态。

在前期研究中发现微生物的还原作用可以将砷转化为稳定的矿物形式固定下来,如砷还原菌 *Desulfotomaculum auripigmentum* 能够将体系中的 As(V) 和硫酸盐同时还原形成 As_2S_3 沉淀,因此增加砷的稳定性^[26]. 而 Kirk 等^[27] 的研究也发现硫酸盐还原菌可通过生成硫化物固持砷. 同时在长期的培养过程中新生的和老化的硫化亚铁或者次生的黄铁矿等都是具有较强的固砷能力^[28, 29]. 因此,砷的形态可伴随着体系中其它元素的形态转化而转化,在本研究中也发现硫酸盐还原过程促进砷转化为更

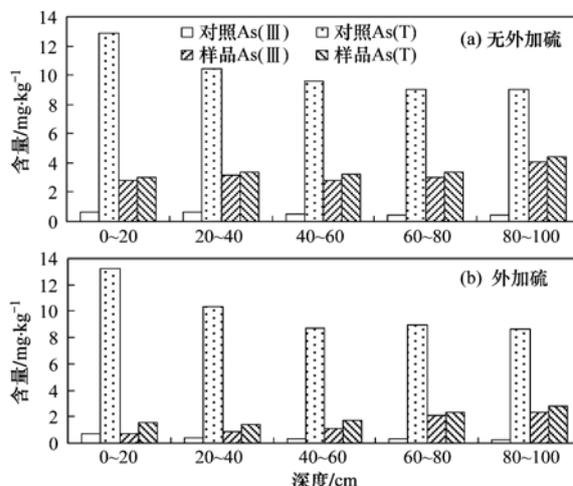


图2 微生物作用盐酸提取态 As 形态分析

Fig. 2 Speciation analyzing of arsenic dissolved by hydrochloric acid

表2 微生物作用下体系中砷在固液相的分配比例¹⁾

Table 2 Distribution of arsenic in solid and aqueous phase by microbes

指标		As(T) _{-D} / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	As(T) _{-HAE} / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	As(T) _{-D} + As(T) _{-HAE} /As(T) /%
不外加硫	非生物对照	211.8	12.9	42.8
	生物培养	739.8	3.0	44.5
外加硫源	非生物对照	221.6	13.2	44.1
	生物培养	485.5	1.5	28.0

1) As(T)_{-D}即为 Dissolved As(T); As(T)_{-HAE}即为 Hydrochloric acid extract As(T)

稳定的盐酸不可提取态,可能与新生的矿物黄铁矿相结合,或者被转化为砷的硫化物。

2.3 微生物作用下铁的形态转化

在本研究中,微生物的还原作用不仅引起砷的形态转化,同时微生物作用下铁的还原和释放,以及相伴随的硫酸盐还原过程强烈的影响着砷的环境行为. 图3给出了微生物作用下铁的形态转化,并采用盐酸提取土壤中的无定形铁氧化物和弱结晶度的结晶态铁氧化物以及酸挥发性硫化物中的铁,研究固相中铁的形态转化与砷的环境行为的关联. 由图3可知,未加外源硫的培养体系中,各层土壤铁的释放量有所不同,大部分释放的铁都以还原态的Fe(II)形式存在,而非生物对照组中几乎没有溶解态Fe(II)存在,可见体系中微生物还原作用引起了土壤矿物中铁的还原性溶解. 在微生物作用下固相中盐酸可提取的总铁量大大增加,其中在表层0~20 cm土壤盐酸提取态的Fe(II)和Fe(T)分别增加了约4956.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2248.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,还原态的亚铁离子约占盐酸可提取态总铁的50%. 而且与非生

物对照组相比较各层土壤中盐酸提取态总铁的量大约都增加了30%,说明微生物的作用造成土壤固相中的铁的活化。

当外加硫酸盐后,体系中溶解态的亚铁离子大大降低. 与不添加硫酸盐的培养组相比,表层0~20 cm土壤的培养组溶解态的Fe(II)从40.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,深层60~80 cm土培养组中溶解态Fe(II)从50.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到1.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 可见添加硫酸盐后液相中亚铁离子的释放过程大大降低,微生物作用下的还原产生的Fe(II)与硫酸盐的还原产生的硫离子结合沉淀进入固相. 在微生物作用下培养8 d后无论哪一层土中盐酸可提取的总铁量进一步大大增加,是非生物对照组盐酸可提取铁量的2~3倍. 同时,添加与未添加硫酸盐的培养组相比,表层0~20 cm土中盐酸可提取的总铁含量增加最多,从9036.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到15996.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这部分亚铁的增长主要是来自于液相中被硫离子沉淀下来的Fe(II),说明通过添加硫酸盐可以促进体系中被释放的铁的再固定过程,减少固

相的铁流失。

固相中盐酸提取的亚铁离子中可能包括土壤中原有的极少量亚铁矿物中的亚铁,微生物直接催化铁还原产生的亚铁离子与体系中硫酸盐的还原产物硫化氢发生沉淀而固定下来的亚铁,以及硫化氢所参与固相中铁的还原产生的亚铁^[30]。本研究中培养 8 d 后的体系中,无硫体系中硫离子(浓度约为 $335.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)与亚铁离子的离子积 K_{IAP} (约为 7.6×10^{-9})远远大于硫化亚铁的溶度积 K_{sp} (约为 1.59×10^{-19})。因此可以确定体系中产生了硫化亚铁,砷可以被新生的硫化亚铁以吸附、包裹、沉淀或共沉淀等途径固持。不过从盐酸可提取的总铁数据中可以看

出,亚铁所占的比例大约在 50% 左右,体系中还有较多高铁矿物,体系中还原产生的亚铁离子可以再次被吸附到铁氧化物表面,因此体系中应存在部分的 Fe_3O_4 ,新生的 Fe_3O_4 也可以结合部分的砷。一些学者研究认为^[28, 29],新生的硫化亚铁矿物在培养过程中会逐渐老化生成黄铁矿(FeS_2),作为盐酸不可提取的形态之一,黄铁矿所固定的砷的形态更加稳定。不过硫化亚铁向黄铁矿转化过程比较慢,在本研究培养的 8 d 内即使形成了黄铁矿,它的比例也非常低,因此在盐酸不能提取的砷中,黄铁矿结合的砷不会是主要形态,这部分砷的赋存形态很可能是主要以硫化物的形式存在。

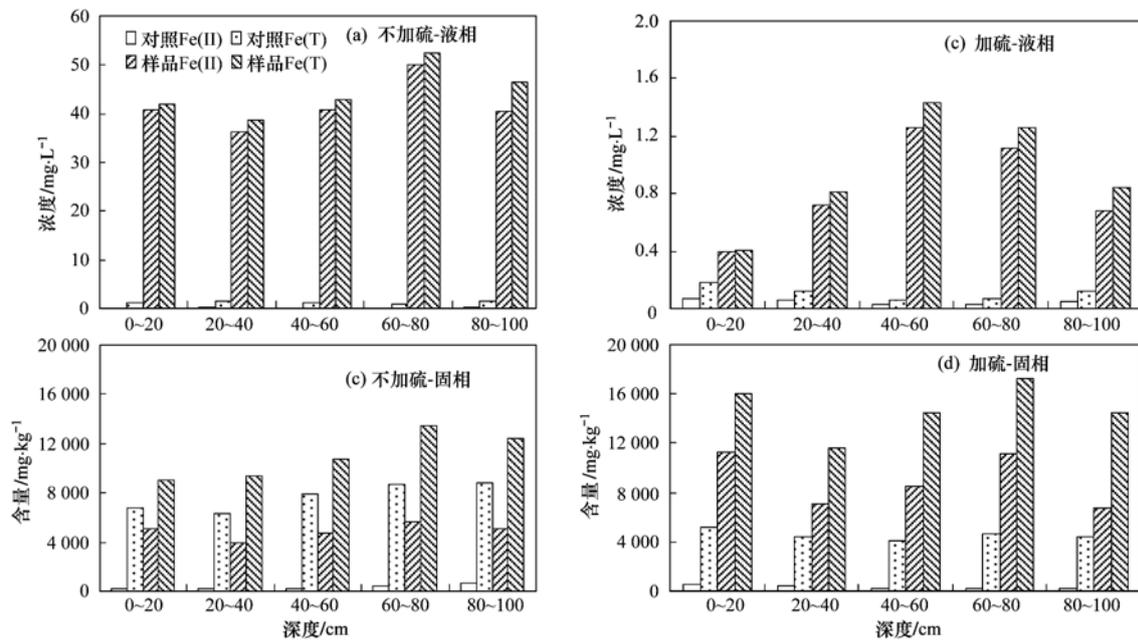


图 3 微生物作用下 Fe 的形态转化

Fig. 3 Speciation transformation of Fe by microbes

2.4 微生物作用下硫酸盐还原与砷、铁的环境行为的关联

在天然混合微生物群的作用下,除了发生砷酸盐还原过程外,通常也伴随着铁和硫的还原过程。硫酸盐还原作用下产生的硫化氢可与体系中产生的亚铁离子或亚砷酸盐离子相结合,产生铁的硫化物或砷的硫化物。形成硫化亚铁沉淀时可以同时沉淀或共沉淀体系中释放的砷酸盐和亚砷酸盐。这一过程在地下水或河流沉积物中多有发生,因此硫化亚铁等酸挥发硫化物对固持重金属离子具有很重要的作用^[31, 32]。本研究采用盐酸提取酸挥发性的硫化物,研究硫化物与砷的环境行为的关联。图 4 给出了在缺氧培养的 8 d 内体系中硫酸盐的还原与硫化物的

产量变化情况。从图 4 可以看出,不同土层酸挥发硫的产量有所不同。可能由于表层土壤中有机质含量较高,因此无论是否外加硫酸盐表土 0~20 cm 土的培养组中 AVS 产量总是比其他土壤层的产量高很多。在未加硫酸盐的培养体系中,酸挥发硫的产量都在 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,在外加 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸盐后每层土壤的培养物中盐酸 AVS 的量都超过 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于其他几层的土壤而言,外加的硫酸盐也大大促进了体系中硫化物的产量。

图 4 与图 2 和图 3 比较可以看出,盐酸提取态的 $\text{Fe}(\text{II})$ 与各土层 AVS 变化趋势成正相关,硫化亚铁是固相中盐酸可提取的亚铁离子的主要以形态。而在酸挥发硫或者说硫化亚铁含量较高的培养组中

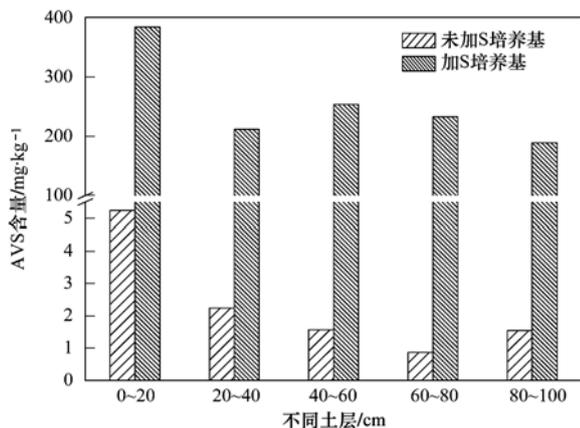


图4 不同层土壤 AVS 含量

Fig. 4 Concentration of AVS in different layers of soil

盐酸可提取的砷的量较低,二者呈负相关.体系产生的酸挥发硫越多,砷的释放越少.可见土壤中原有的硫酸盐含量不足,当外源提供足够的硫酸盐条件下微生物的作用硫酸盐还原更见明显,可以在很大程度上促进砷的固定.特别是微生物丰富的表层土中,加硫培养促进了体系中释放的和盐酸提取态的砷大大降低,以降低的总量计算相当于无硫体系中释放的和盐酸可提取的砷总和的 37.1% 的砷再次被转化为盐酸不能提取的稳定的形态.

体系中硫离子和亚砷酸盐在液相中的浓度及其离子浓度积,可作为判断产生硫化物的依据.例如在表土 0~20 cm 的不加硫的生物培养体系中,培养 8 d 后体系中硫离子与三价砷的平衡浓度分别为 $335.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $562.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而加硫的体系中硫离子与三价砷的平衡浓度 $69.85 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $318.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,根据液相中 S^{-2} 及 $\text{As}(\text{III})$ 的平衡浓度进行估算,不加硫系统的 $\lg K_{\text{IAP}}$ 约为 -25.2 ,加硫体系中 $\lg K_{\text{IAP-S}}$ 约为 -18.7 ,无论那个体系培养 8 d 后三价砷及硫离子的离子积的 $\lg K_{\text{IAP}}$ 都大于 $\lg K_{\text{SP}}$ (约为 -46.22 ^[33],其中 K_{IAP} 表示液相中三价砷与硫离子的离子积, K_{SP} 表示 As_2S_3 的容度积),说明无论是否补加硫酸盐,体系中产生了 As_2S_3 沉淀.不过由于土壤中矿物成分太复杂,新生矿物的含量相对较低,目前还没有更直接的光波谱数据加以证实,这部分仍有待进一步的表征和研究.

3 结论

(1) 在张士污灌区的土壤中,土著微生物具有较强的砷、铁和硫的还原能力.

(2) 微生物对铁和硫的还原作用及其还原产物

共同调控砷的环境行为,在不加硫条件下,微生物对铁氧化物的还原性溶解造成了砷的活化和释放,补加硫酸盐可以抑制砷的释放过程,使已活化的砷再次被固定.

(3) 在硫酸盐还原作用下形成非常稳定的硫化物矿物 As_2S_3 是土壤微生物固定砷的主要途径.

参考文献:

- [1] Nordstrom D K. Worldwide occurrences of arsenic in ground water [J]. *Science*, 2002, **296**(5576): 2143-2144.
- [2] 庄金陵. 砷对世界地下水源的污染 [J]. *矿产与地质*, 2003, **17**(2): 177-178.
- [3] 肖唐付,洪冰,杨中华,等. 砷的水地球化学及其环境效应 [J]. *地质科技情报*, 2001, **20**(1): 71-76.
- [4] 赵新华,沈雁峰,孙殿军,等. 中国饮水型砷中毒重病区病情调查报告 [J]. *中国地方病学杂志*, 2005, **24**(6): 639-644.
- [5] 崔岩山,陈晓晨,付瑾. 污染土壤中铅、砷的生物可给性研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(2): 480-486.
- [6] 翁焕新,张宵宇,邹乐君. 中国土壤中砷的自然存在状况及其成因分析 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2000, **34**(1): 88-92.
- [7] National Research Council of Canada. Effects of arsenic in the Canadian environment [C]. Canada: Pub No. 15391, 1978. 117-119.
- [8] Leonard A. Arsenic [A]. In: Merian E, Clarkson T W, (eds.). *Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance* [M]. (2nd ed). New York: Weinheim, VCH, 1991. 751-773.
- [9] Nriagu J O. Arsenic: historical perspectives [A]. In: Nriagu J O, (ed.). *Arsenic in the environment: Part I. cycling and characterization* [C]. New York: Wiley & Sons, 1994. 3-15.
- [10] 吴攀,刘丛强,杨元根,等. 矿山环境中(重)金属的释放迁移地球化学及其环境效应 [J]. *矿物学报*, 2001, **21**(2): 213-218.
- [11] Kaiser J. Toxicologists shed new light on old poisons [J]. *Science*, 1998, **279**(5358): 1850-1851.
- [12] 陈同斌. 土壤溶液中的砷及其与水稻生长效应的关系 [J]. *生态学报*, 1996, **16**(2): 147-153.
- [13] Islam F S, Gault A G, Boothman C, et al. Role of metal-reducing bacteria in arsenic release from Bengal delta sediments [J]. *Nature*, 2004, **430**(6995): 68-71.
- [14] Dobran S, Zagury G J. Arsenic speciation and mobilization in CCA-contaminated soils: Influence of organic matter content [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **364**(1-3): 239-250.
- [15] Hartley W, Dickinson N M, Riby P, et al. Arsenic mobility and speciation in a contaminated urban soil are affected by different methods of green waste compost application [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(12): 3560-3570.
- [16] Hartley W, Dickinson N M, Clemente R, et al. Arsenic stability

- and mobilization in soil at an amenity grassland overlying chemical waste (St. Helens, UK) [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 847-856.
- [17] Vaxeavidou K, Papassiopi N, Paspaliaris I. Removal of heavy metals and arsenic from contaminated soils using bioremediation and chelant extraction techniques [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(8): 1329-1337.
- [18] Wang X J, Chen X P, Yang J, *et al.* Effect of microbial mediated iron plaque reduction on arsenic mobility in paddy soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(11): 1562-1568.
- [19] 阎秀兰, 廖晓勇, 于冰冰, 等. 药用植物三七对土壤中砷的累积特征及其健康风险 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 880-885.
- [20] 王焰新, 苏春利, 谢先军, 等. 大同盆地地下水砷异常及其成因研究 [J]. *中国地质*, 2010, **37**(3): 771-780.
- [21] 郭华明, 唐小惠, 杨素珍, 等. 土著微生物作用下含水层沉积物砷的释放与转化 [J]. *现代地质*, 2009, **23**(1): 86-93.
- [22] 张雪霞, 贾永锋, 潘蓉蓉, 等. 微生物作用引起的铁铝氢氧化物吸附砷的还原与释放机制研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 755-760.
- [23] Hsieh Y P, Shieh Y N. Analysis of reduced inorganic sulfur by diffusion methods: improved apparatus and evaluation for sulfur isotopic studies [J]. *Chemical Geology*, 1997, **137**(3-4): 255-261.
- [24] 石荣, 贾永锋, 王承智, 等. 溶解性有机酸对砷在土壤矿物质表面吸附-解吸行为的影响 [J]. *土壤通报*, 2009, **40**(4): 761-766.
- [25] Keon N E, Swartz C H, Brabander D J, *et al.* Validation of an arsenic sequential extraction method for evaluating mobility in sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(16): 2778-2784.
- [26] Newman D K, Deveridge T J, Morel F M M. Precipitation of arsenic trisulfide by desulfotomaculum auripigmentum [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(5): 2022-2028.
- [27] Kirk M F, Holm T R, Park J, *et al.* Bacterial sulfate reduction limits natural arsenic contamination in groundwater [J]. *Geology*, 2004, **32**(11): 953-956.
- [28] Farquhar M L, Charnock J M, Livens F R, *et al.* Mechanisms of arsenic uptake from aqueous solution by interaction with goethite, lepidocrocite, Mackinawite, and pyrite: an X-ray absorption spectroscopy study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(8): 1757-1762.
- [29] Wolthers M, Charlet L, Van der Weijden C H, *et al.* Arsenic mobility in the ambient sulfidic environment: Sorption of arsenic (V) and arsenic (III) onto disordered mackinawite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(14): 3483-3492.
- [30] O'Day P A, Vlassopoulos D, Root R, *et al.* The influence of sulfur and iron on dissolved arsenic concentrations in the shallow subsurface under changing redox conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2004, **101**(38): 13703-13708.
- [31] 梁涛, 陶澍, 林键枝, 等. 沉积物中酸挥发硫对上覆水中重金属含量的影响 [J]. *环境化学*, 1998, **17**(3): 212-217.
- [32] Ankley G T, Phipps G L, Leonard E N, *et al.* Acid-volatile sulfide as a factor mediating cadmium and nickel bioavailability in contaminated sediments [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1991, **10**(10): 1299-1307.
- [33] Kirk M F, Roden E E, Crossey L J, *et al.* Experimental analysis of arsenic precipitation during microbial sulfate and iron reduction in model aquifer sediment reactors [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, **74**(9): 2538-2555.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, YIN Jun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 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

国内外公开发刊