

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

# 目次

|                                                        |                                                              |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 2016年京津冀地区红色预警时段PM <sub>2.5</sub> 污染特征与浓度控制效果          | 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)                                     |
| 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析                                     | 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)                            |
| 合肥市PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>10</sub> 中元素组成特征及重污染成因分析 | 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)                                          |
| 濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析                                  | 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)        |
| 关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析                                     | 康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)                       |
| 长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源                                   | 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)                            |
| 中国城市扩张及空间特征变化对PM <sub>2.5</sub> 污染的影响                  | 王桂林, 张炜 (3447)                                               |
| 不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM <sub>2.5</sub> 排放的影响                   | 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)                                 |
| 浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数                                | 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)                                 |
| 生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征                                  | 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)                            |
| 青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征                                    | 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)                                          |
| 广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价                             | 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)                                 |
| 截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征                              | 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501) |
| 黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析                         | 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)                                  |
| 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响                                  | 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)             |
| 向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应                                    | 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)                 |
| 外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响                                 | 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)                       |
| 新疆喀什三角洲地下水SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 化学特征及来源        | 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)                             |
| 黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析                                   | 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)                                       |
| 北京市河流秋季浮游动物群落特征分析                                      | 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)                |
| 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系                               | 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)                      |
| 渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测                                 | 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)                                 |
| 汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系                             | 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)                                         |
| 饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析                                 | 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)                                |
| 基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果                             | 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)                            |
| 植被对绿色屋顶径流量和水质影响                                        | 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)                                     |
| 光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制                           | 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)                                     |
| 多种材料对水中氨氮的吸附特性                                         | 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)                            |
| 不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响                                 | 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)                                |
| 3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程                                | 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)                  |
| 铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制                                   | 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)                                 |
| 缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮                            | 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)                            |
| 连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响                           | 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)                                    |
| FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制                                  | 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)                          |
| ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件                                 | 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)                                      |
| 全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析                                   | 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)                                          |
| 不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比                                 | 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)                                    |
| 异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析           | 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)                         |
| Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现                             | 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)                     |
| 高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N <sub>2</sub> O产生特征                    | 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)                                      |
| 生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响                                         | 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)                                         |
| 两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响                                     | 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)                     |
| 承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征                             | 孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)                       |
| 厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析                               | 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)                      |
| 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析                                 | 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)                                 |
| 铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果                                  | 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)                                          |
| 铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用                               | 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)                               |
| 生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响                         | 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)                                |
| 有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响                                | 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)                                          |
| 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响                               | 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)                             |
| 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响                             | 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)                                  |
| 不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律                                 | 何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)                                |
| 基于成组生物毒性测试的PM <sub>2.5</sub> 毒性                        | 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)                     |
| 《环境科学》征订启事 (3587)                                      |                                                              |
| 《环境科学》征稿简则 (3595)                                      |                                                              |
| 信息 (3611, 3705, 3745)                                  |                                                              |

# 铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果

林龙勇<sup>1,2</sup>, 阎秀兰<sup>1\*</sup>, 杨硕<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 广东省环境科学研究院生态环境与土壤修复研究所, 广州 510045; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 本文以铁铈氧化物(Fe-Ce, FC)为研究对象, 评估其对中国3种典型砷(As)污染土壤的稳定化修复效果, 并通过电子扫描显微镜能谱X线分析仪(SEM-EDS)和X射线光电子能谱仪(XPS)等光谱学技术探索FC对As(V)的微观吸附特征。结果表明, FC能使土壤毒性浸出As含量显著降低84.1%~98.3%, 且在碱性土壤中表现出较强的高pH适应性, 能显著增加吸附态As(F1+F2)向水合铁铝氧化物结合态(F3+F4)的稳定化。FC能使不同类型土壤的有效态P含量显著下降47.13%~60.32%, 不仅能缓解P竞争土壤As(V)吸附位点, 而且能有效预防周边水体的面源污染。通过SEM-EDS和XPS分析, 发现As(V)吸附产物表面均检测到Fe、Ce和As这3种元素, 且As主要吸附于Fe原子表面。FC在我国土壤砷污染稳定化修复领域具有较好地应用前景。

**关键词:** 铁铈氧化物; 土壤; 砷; 稳定化; 光谱学技术

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3785-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201901266

## Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P

LIN Long-yong<sup>1,2</sup>, YAN Xiu-lan<sup>1\*</sup>, YANG Shuo<sup>3</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Eco-environment & Soil-remediation, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The mining and smelting of arsenic-containing metal minerals, and the large-scale use of chemicals and pesticides, has resulted in the widespread pollution of soils in southwestern and southern China. In this study, the stabilizing effect of Fe-Ce oxide (FC) on three representative arsenic-contaminated soils was evaluated. The microscopic adsorption characteristics of FC and As(V) were explored by scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results showed that FC can significantly reduce arsenic concentrations by 84.1%~98.3% during the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), and showed strong pH adaptability in alkaline soil. It efficiently transformed (non-) specifically sorbed arsenic (F1+F2) into hydrous oxides phases of Fe and Al (F3+F4). FC also significantly reduced available P by 47.13%~60.32% in different types of soil. FC can not only release As(V) adsorption sites occupied by P in soils, but also effectively prevents non-point source pollution of the surrounding water. SEM-EDS and XPS analysis detected Fe, Ce, and As on the surface of As(V) adsorption products, and As was mainly adsorbed on the surface of Fe atoms. The results of this study provide a scientific basis for soil arsenic stabilization in China.

**Key words:** Fe-Ce oxide (FC); soil; arsenic; stabilization; spectroscopy

砷(As)是自然界中广泛存在的一种非金属元素, 常被应用于农药、除草剂、杀虫剂和合金等行业生产中<sup>[1]</sup>。随着含As金属矿产的开采冶炼、化学制品及农药的大规模使用, 导致我国西南、华南等区域出现大面积土壤As污染问题<sup>[2, 3]</sup>。文献[4]显示, 全国土壤环境状况总体不容乐观, As元素的点位超标率达2.7%, 已对居民身体健康和社会稳定发展造成威胁。

一般而言, 除了部分极端氧化还原或pH条件, 在绝大多数氧化性土壤环境中, As主要以As(V)形式存在<sup>[1]</sup>。因此, 应用铁氧化物、硫酸铁盐和零价铁等对As(V)具有较强吸附能力的含铁材料, 已成为近年来土壤As污染稳定化修复领域的热点<sup>[5, 6]</sup>。大量研究表明, 含铁材料对As(V)的最优pH吸附条件较低且较窄(pH约为3~5), pH升高

则会显著降低其吸附容量<sup>[7]</sup>, 从而限制了含铁材料的实际应用范围。近年有学者发现, 将Ce嵌入铁基氧化物合成Fe-Ce(FC), 能显著拓宽其最优pH吸附范围至7左右, FC对溶液中As(V)的吸附容量仍稳定维持在15 mg·g<sup>-1</sup>左右, 远超常规含铁材料<sup>[8]</sup>。目前, FC主要被应用于含As废水的处理研究, 本团队前期研究发现, 添加FC对酸性As污染土壤的稳定化修复是可行且有效的, 能使土壤(pH=5, As含量100 mg·kg<sup>-1</sup>)毒性浸出As浓度显著降低40.6%~67.0%<sup>[9, 10]</sup>。

收稿日期: 2019-01-31; 修订日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571309); 广州市科技计划项目(201804010424)

作者简介: 林龙勇(1986~), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: ecolinly@163.com

\* 通信作者, E-mail: yanxl@igsrr.ac.cn

P 和 As 属同族元素,化学性质相似,在土壤环境中常表现出与 As(V) 相近的环境化学行为<sup>[11]</sup>. 近 30 年来,由于磷肥的过量施用,使中国部分地区土壤处于富磷状态,土壤有效态 P 含量相对较高<sup>[12]</sup>. 一方面, P 比 As 更容易吸附到土壤颗粒表面,有效态 P 含量过高会抑制土壤对 As 的吸附,增加 As(V) 对地下水的污染风险<sup>[13]</sup>. 另一方面,有效态 P 含量超过一定标准(约  $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),磷素会淋溶迁移,增加对周边水体的面源污染风险<sup>[12]</sup>. 近年来,已有学者应用磁铁矿、针铁矿、富铁沉积物等含铁材料稳定化吸附土壤有效态磷,从而有效降低其向周边水体的迁移<sup>[14, 15]</sup>. 综上所述,对于我国普遍富磷的 As 污染土壤, FC 如果可以同时稳定化 As(V) 和 P, 则既可以降低 As 污染风险,还可以避免对周边水体的面源污染风险.

本文拟在前期工作基础上,进一步研究 FC 对我国几种不同 pH 条件 As 污染土壤的毒性浸出、有效态 As 和 As 结合态等赋存状态的影响,评估其对土壤有效态 P 的影响,并采用电子扫描显微镜能散 X 线分析仪 (SEM-EDS)、X 射线光电子能谱仪 (XPS) 等光谱学技术研究 FC 对 As(V) 的微观吸附特征,以期为我国土壤 As 污染稳定化修复提供重要的科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料制备

参照 Lin 等<sup>[10]</sup> 合成铁铈氧化物 (FC) 的方法,依次添加  $0.2 \text{ mol FeCl}_3$ 、 $0.1 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $0.08 \text{ mol Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  至 1 L 去离子水中,采用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH 调节 pH 至 7~8,室温下连续搅拌 1 h ( $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ),静置老化 12 h. 然后过滤使固液分离,并将固体粉末洗涤 3 次,放入  $40^\circ\text{C}$  烘箱中通风干燥. 将粉末材料充分研磨后,过 200 目筛,置于干燥器中保存备用.

参照文献<sup>[16]</sup>,合成铁锰氧化物 (FM) 和氧化铁 (FO) 两种常见铁基氧化物. 具体为:依次添加  $0.3 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $0.1 \text{ mol KMnO}_4$  或直接添加  $0.3 \text{ mol FeCl}_3$  至 1 L 去离子水中,采用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH 调节 pH 至 7~8,室温下搅拌 1 h ( $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ),静置老化 12 h,过滤,洗涤,  $40^\circ\text{C}$  烘箱中通风干燥,充分研磨后过 200 目筛,置于干燥器中保存备用.

### 1.2 批处理实验

土壤稳定化实验:土壤分别取自云南省文山州某砷霜厂、湖南省郴州市某砷霜厂、辽宁省大连市某化工厂周边 As 污染土壤,过 20 目筛,基本理化

性质测定参考文献<sup>[17]</sup> (见表 1). 将 50 g 供试土壤与 1 g 铁基氧化物添加至 200 mL 的玻璃瓶,通过翻转式振荡器  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  充分混合 1 h,调节含水率 30%,用疏水透气膜密封玻璃瓶,连续培养 30 d,至吸附达到稳定.

表 1 供试土壤的基本理化性质

| 项目                                         | 大连    | 郴州    | 文山    |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|
| pH                                         | 3.61  | 7.18  | 5.00  |
| 有机质/%                                      | 0.93  | 3.08  | 5.26  |
| 阳离子交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 258   | 277   | 317   |
| 总磷/%                                       | 0.250 | 0.155 | 0.100 |
| 总氮/%                                       | 0.023 | 0.165 | 0.223 |
| 总钾/%                                       | 0.25  | 0.90  | 1.52  |
| 总 As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$     | 1400  | 200   | 800   |
| 总铁/%                                       | 10    | 1     | 4     |
| 砂粒 ( $>0.05 \text{ mm}$ )                  | 58    | 47    | 40    |
| 质地/% 粉粒 ( $0.01 \sim 0.05 \text{ mm}$ )    | 22    | 28    | 22    |
| 黏粒 ( $<0.01 \text{ mm}$ )                  | 20    | 25    | 38    |

### 1.3 土壤毒性浸出、有效态 As 和 As 结合态的测定

土壤毒性浸出参考文献<sup>[18]</sup>,对土壤样品进行 TCLP (toxicity characteristic leaching procedure) 浸提. 土壤有效态 As 的浸提参考于冰冰等<sup>[19]</sup> 的方法. 土壤 As 结合态参照 Wenzel 等<sup>[20]</sup> 的方法,对土壤进行连续分级提取,依次提取非专性吸附态 (F1)、专性吸附态 (F2)、无定形和弱结晶水合铁铝氧化物结合态 (F3)、结晶水合铁铝氧化物结合态 (F4) 和残渣态 (F5). 上述土壤毒性浸出、有效态、结合态的 As 含量均采用原子荧光分光光度计 (AFS-9130) 分析.

### 1.4 土壤有效态 P 测定

土壤有效态 P 测定参考文献<sup>[17]</sup>. 大连和文山为酸性土壤,其有效态 P 采用  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$  法:称取  $2.5 \text{ g}$  20 目风干土样,加入  $12.5 \text{ mL}$  提取液 [ $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 和  $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $1/2 \text{ H}_2\text{SO}_4$ )],恒温振荡 5 min 后,吸取滤液  $1 \text{ mL}$ ,加入  $8 \text{ mL}$   $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  抗坏血酸,加入  $16 \text{ mL}$  硫酸-钼酸铵溶液 ( $8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  钼酸铵、 $4 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  酒石酸氧锶钾和  $0.224 \text{ mL}$  浓硫酸),摇匀静置 30 min 后,用紫外可见分光光度计于  $700 \text{ nm}$  波长处测定有效态 P 含量.

此外,郴州土壤偏碱性,其有效态 P 采用  $\text{NaHCO}_3$  法:称取  $2.5 \text{ g}$  20 目风干土样,加入  $50 \text{ mL}$   $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaHCO}_3$  溶液,恒温振荡 30 min 后,吸取滤液  $10 \text{ mL}$ ,加入  $35 \text{ mL}$  去离子水和  $5 \text{ mL}$  钼锑抗试剂 ( $0.45 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $1/2 \text{ H}_2\text{SO}_4$  和  $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  钼酸铵),静置 30 min 后用紫外可见分光光度计 (Unico UV-2800) 于  $700 \text{ nm}$  波长处测定有效态 P 含量.

1.5 光谱学分析

将 50 g 合成的 FC 材料和 12 g  $\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  依次加入 200 mL 的玻璃瓶中( $\text{Fe}/\text{As}$  约为 1/2), 通过翻转式振荡器  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  充分混合 1 h, 调节含水率 30%, 用疏水透气膜密封玻璃瓶, 连续培养 30 d, 至吸附达到稳定.

针对 As 吸附前后的 FC, 通过 SEM-EDS (Hitachi S400)测定材料表面的 Fe、Ce 和 As 元素分布. 其次, 通过 XPS(ESCALab250)表征材料表面元素及其化学状态. 具体为, 通过 XPS 检测材料的结合能和原子比, 激发源为单色化 Al  $\text{K}\alpha$  X 射线, 功率为 150 W, 分析时的基础真空约为  $6.5 \times 10^{-12}$  Pa, 结合能用烷基碳或污染碳的 C 1s 峰(284.8 eV)

校正, XPS 数据处理及峰拟合均采用 Avantage 4. 15 软件.

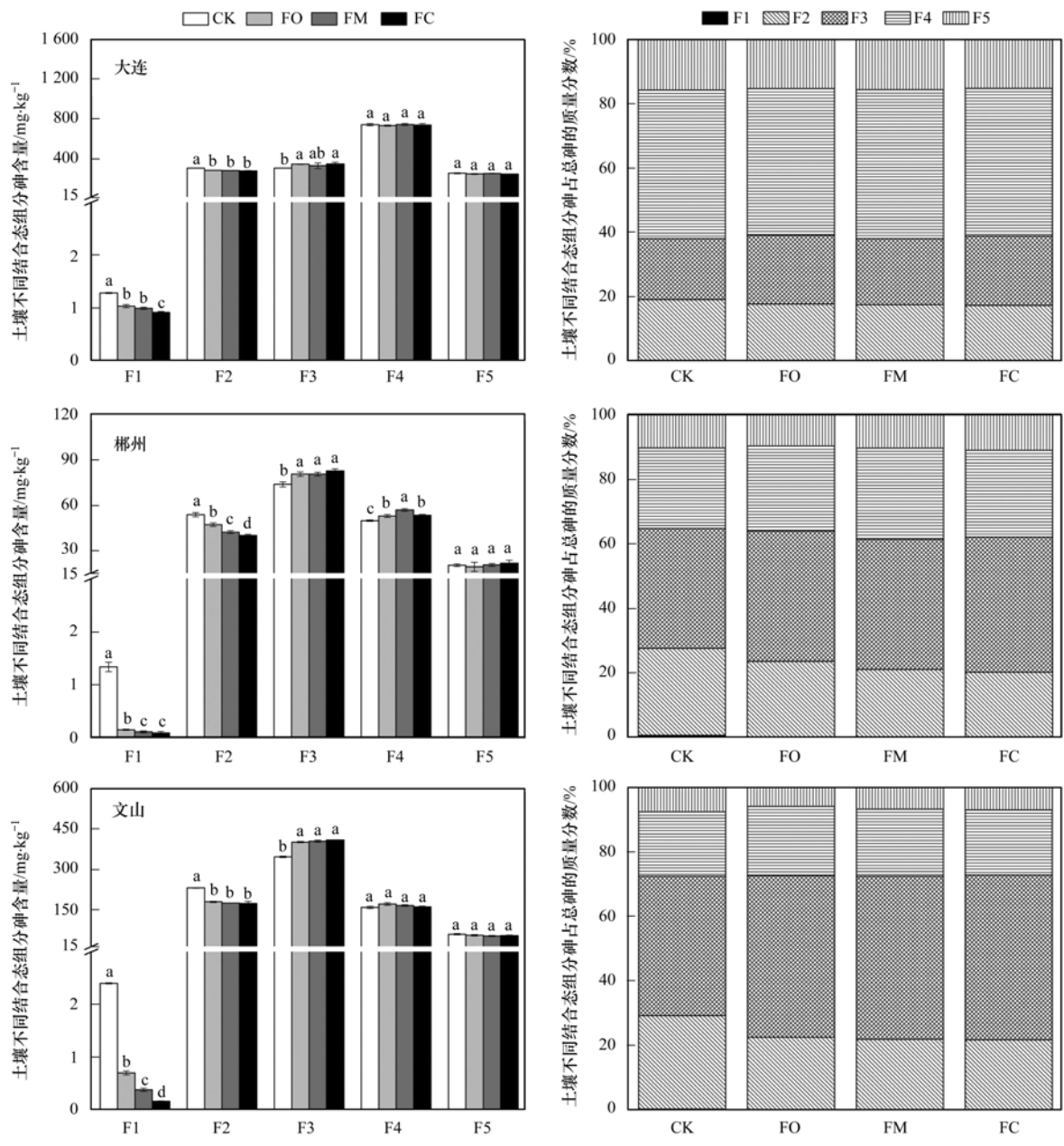
1.6 数据处理

数据采用 Origin 8. 5 及 SPSS 22. 0 for Windows 软件进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 铁铈氧化物对土壤 As 结合态的影响

图 1 给出了 FC 对土壤 As 结合态的影响. 一般而言, As 在土壤中常以水合铁铝氧化态(F3 + F4)为主, 对生物体危害最大的非专性吸附态(F1)和具有潜在移动风险的专性吸附态(F2)的含量相对较少<sup>[20]</sup>. 从中可知, 本研究中, 3 种供试土壤 F3 +



图中小写字母代表相同组分、不同稳定剂处理间的显著性检验结果( $P < 0.05$ ), 下同

图1 不同稳定剂对土壤As结合态的影响

Fig. 1 Effect of different stabilizers on As fractions in soils

F4 占总 As 的质量分数约为 62.13% ~ 65.18%, F1 约为 0.08% ~ 0.68%, 而 F2 却高达 18.99% ~ 28.93%, 表现出了较高的潜在释放风险. 常规含铁材料能促使可交换态 As 向水合铁铝氧化态转化, 但其在实际应用中仍然存在 pH 适用范围较窄的问题<sup>[7]</sup>. Hafeznezhani 等<sup>[21]</sup>的研究发现, 高土壤 pH 将引起铁基氧化物表面吸附 As 的热力学不稳定, 导致 As(V) 在溶液中的游离性显著提高. 本研究中, 针对具有潜在移动风险的 F2 组分, 3 种铁基氧化物对酸性土壤(大连和文山)的影响差异并不明显; 但在碱性土壤(郴州)中, FC 不仅能使 F1 组分 As 含量显著下降 93.6%, 而且能使 F2 组分 As 含量显著下降 25.1%, 远高于 FO 和 FM 两种材料, 表明 FC 具有更大的土壤 pH 适用范围.

## 2.2 铁铈氧化物对土壤有效态 As 的影响

土壤有效态 As 是衡量 As 元素迁移性的重要参数, 对判断土壤 As 的生物有效性和评价土壤环境风险具有重要意义<sup>[19]</sup>. Han 等<sup>[22]</sup>对我国山东、吉林、江西等地典型砷污染土壤调研发现, 有效态 As 含量约为 1.3 ~ 10.9 mg·kg<sup>-1</sup>. 于冰冰等<sup>[19]</sup>对我国云南文山州 9 个典型区域土壤研究, 发现土壤总 As 含量约为 14.8 ~ 79.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效态 As 占总 As 的质量分数可达 3% ~ 10%. 本研究中, 3 种土壤有效态 As 含量表现出大连 > 文山 > 郴州的趋势, 占总 As 含量比例约为 2.3% ~ 5.1% (图 2). 通过添加 FO、FM 和 FC 均能显著降低 3 种土壤有效态 As 含量, 其中 FC 处理的影响最为显著, 能分别使大连、文山和郴州土壤的有效态 As 下降 12.30%、31.78% 和 30.35%.

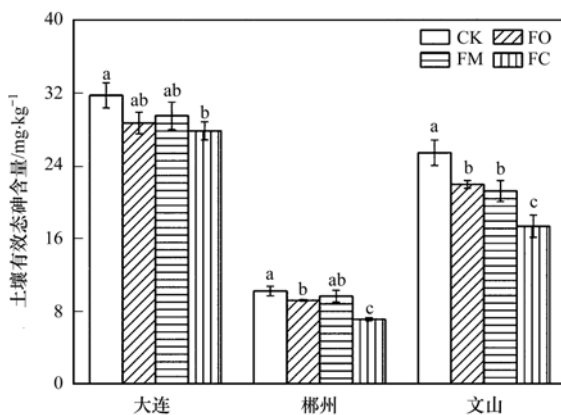


图 2 不同稳定剂对土壤有效态 As 的影响

Fig. 2 Effect of different stabilizers on available As in soils

## 2.3 铁铈氧化物对土壤毒性浸出 As 浓度的影响

TCLP 是一种常见的污染物提取方法, 能评估土壤污染物毒性浸出对周边水体的污染风险<sup>[10, 23]</sup>. 由图 3 可知, 大连、郴州和文山这 3 种土壤的 TCLP 浸出均高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-

2006) 的 10 μg·L<sup>-1</sup>, 其中郴州土壤 As 的浸出甚至超过了地下水环境质量 III 类标准 (50 μg·L<sup>-1</sup>), 超标率达 17.8%. 由表 2 可知, 大连、郴州和文山这 3 种土壤 As 的 TCLP 浸出质量浓度与 pH 呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 与总 As 含量和 Fe 含量呈显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ). 一般而言, 当土壤总 As 含量较高时, 其 TCLP 浸出质量浓度也会相对较高, 但铁的存在会显著抑制 As 的溶出<sup>[6, 24]</sup>. 因此, 虽然大连和文山土壤 As 含量远远高于郴州, 但由于郴州土壤含铁量非常低且 pH 含量较高, 导致其 TCLP 浸出质量浓度反而最高. 此外, 有研究表明, 土壤有机质 (OM)、阳离子交换量 (CEC)、总磷、总氮、总钾和土壤质地等对于土壤 As 的浸出也具有一定的影响, 但本研究发现, 相对于总 As、总 Fe 和 pH 而言, TCLP 与上述因子的相关性并不显著. 本研究通过添加 FO、FM 和 FC 均能显著降低 3 种土壤的 TCLP 浸出质量浓度, 降低率分别为 82.9% ~ 92.9%、80.3% ~ 94.6% 和 84.1% ~ 98.3%. 在大连和文山两种酸性土壤中, 3 种铁基氧化物的差异性并不显著; 而在碱性土壤(郴州)中, FC 的稳定化效果却显著高于 FO 和 FM 两种材料 ( $P < 0.05$ ).

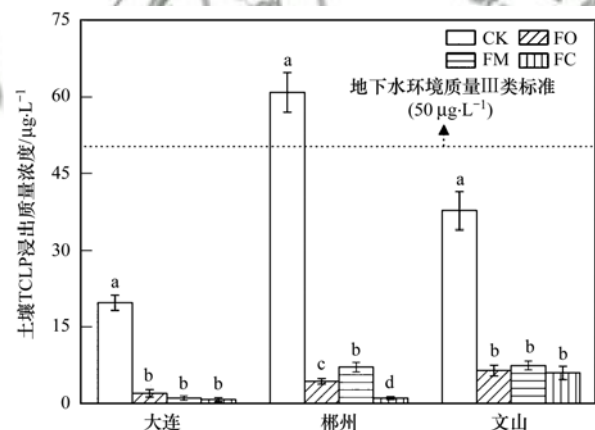


图 3 不同稳定剂对土壤 TCLP 浸出质量浓度的影响

Fig. 3 Effect of different stabilizers on soil TCLP

## 2.4 铁铈氧化物对土壤有效态 P 的影响

一般而言, 当有效态 P 含量超过一定标准时 (约 60 mg·kg<sup>-1</sup>), 磷素就会通过淋溶损失, 对周边水体造成一定的面源污染风险<sup>[12]</sup>. 由图 4 可知, 本研究中, 郴州土壤有效态 P 已接近淋溶标准, 而大连和文山土壤则远高于这一标准值, 表现出了非常强的磷素淋失风险. 由于 P 和 As 在元素周期表中为同族元素, 具有相似结构和性质, 有效态 P 过高将大量竞争土壤中带正电荷胶体吸附 As(V) 的位点, 使土壤中 As 被释放出来<sup>[25]</sup>. 本研究发现, 3 种铁基氧化物均能显著降低土壤有效态 P 浓度, 其中

表 2 TCLP 与土壤基本理化性质间的相关性分析<sup>1)</sup>

|        | TCLP     | 总 As     | 总铁       | pH      | 有机质     | 阳离子交换量  | 总磷     | 总氮     | 总钾      | 砂粒      | 粉粒     | 黏粒      |
|--------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|
| TCLP   | 1.000    | -0.997 * | -1.000 * | 0.999 * | 0.432   | 0.245   | 0.018  | 0.635  | 0.448   | -0.547  | 0.900  | 0.198   |
| 总 As   | -0.997 * | 1.000    | 0.999 *  | -0.992  | -0.497  | -0.315  | -0.091 | -0.690 | -0.512  | 0.606   | -0.866 | -0.269  |
| 总铁     | -1.000 * | 0.999 *  | 1.000    | -0.997  | -0.458  | -0.273  | -0.047 | -0.657 | -0.473  | 0.570   | -0.887 | -0.226  |
| pH     | 0.999 *  | -0.992   | -0.997   | 1.000   | 0.383   | 0.193   | -0.036 | 0.593  | 0.399   | -0.500  | 0.922  | 0.145   |
| 有机质    | 0.432    | -0.497   | -0.458   | 0.383   | 1.000   | 0.980   | 0.909  | 0.971  | 1.000 * | -0.991  | -0.004 | 0.970   |
| 阳离子交换量 | 0.245    | -0.315   | -0.273   | 0.193   | 0.980   | 1.000   | 0.974  | 0.905  | 0.977   | -0.946  | -0.201 | 0.999 * |
| 总磷     | -0.567   | 0.626    | 0.762    | -0.552  | -0.988  | -0.937  | 1.000  | -0.996 | -0.990  | 1.000 ± | 0.152  | -0.920  |
| 总氮     | 0.635    | -0.690   | -0.657   | 0.593   | 0.971   | 0.905   | 0.783  | 1.000  | 0.975   | -0.994  | 0.236  | 0.883   |
| 总钾     | 0.448    | -0.512   | -0.473   | 0.399   | 1.000 * | 0.977   | 0.902  | 0.975  | 1.000   | -0.994  | 0.014  | 0.965   |
| 砂粒     | -0.547   | 0.606    | 0.570    | -0.500  | -0.991  | -0.946  | -0.847 | -0.994 | -0.994  | 1.000   | -0.127 | -0.929  |
| 粉粒     | 0.900    | -0.866   | -0.887   | 0.922   | -0.004  | -0.201  | -0.419 | 0.236  | 0.014   | -0.127  | 1.000  | -0.249  |
| 黏粒     | 0.198    | -0.269   | -0.226   | 0.145   | 0.970   | 0.999 * | 0.984  | 0.883  | 0.965   | -0.929  | -0.249 | 1.000   |

1) \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

FC 处理效果最为显著,能使 3 种土壤的有效态 P 浓度下降 47.13% ~ 60.32%,这对于抑制磷素淋溶、预防周边水体面源污染将具有重要作用. 稳定化处理后,3 种土壤中有效态 P 含量仍然高于 20 mg·kg<sup>-1</sup>,为农作物生长提供高水平的土壤磷库. 此外,由于 P 比 As 更容易吸附到土壤颗粒表面,有效态 P 含量显著降低将有效缓解 P 竞争土壤As(V)吸附位点,降低As(V)对地下水的污染风险.

2.5 铁铈氧化物的As(V)吸附机制

本研究发现,FC 对我国 3 种不同 pH 条件 As 污染土壤均具有较好的稳定化效果,为了进一步揭示 FC 对 As(V) 的微观吸附特征,本研究应用 SEM-EDS 和 XPS 等光谱学方法对其As(V)吸附

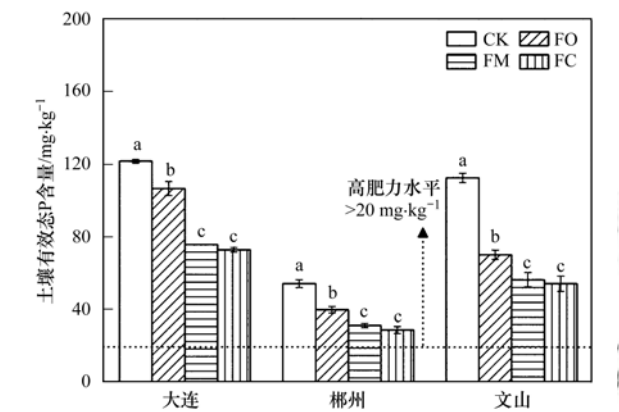


图 4 不同稳定剂对土壤有效态磷的影响

Fig. 4 Effect of different stabilizers on available P in soils

产物的表面元素分布进行研究. 图 5 给出了 FC-

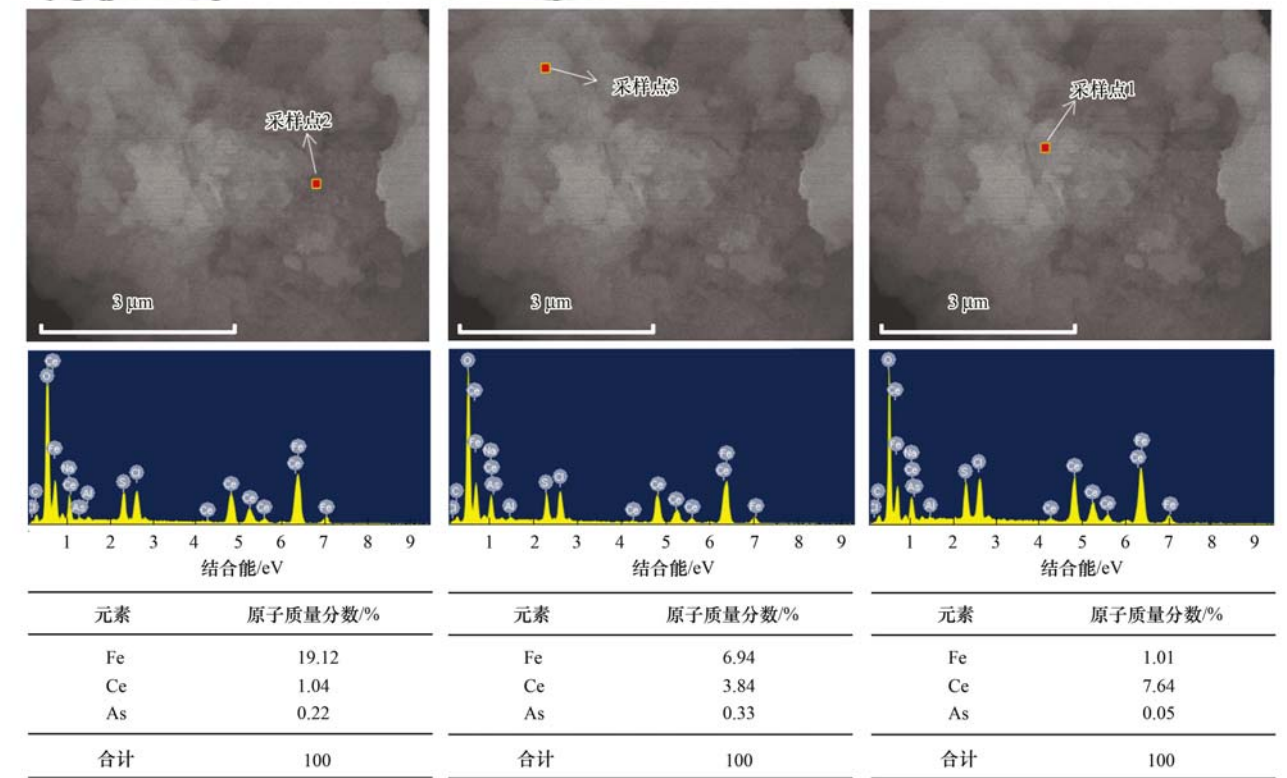


图 5 As(V) 吸附后 FC 材料 3 个不同采样点的 SEM-EDS 检测结果

Fig. 5 SEM-EDS results for the three different sampling points on FC after As(V) adsorption

As 的 SEM-EDS 分析结果, 结果表明 FC 吸附 As( V )后, 其产物的不同区域均检测到 Fe、Ce 和 As 这 3 种元素, 表明 As( V )已吸附于 FC 表面. 图 6 分别表征了 Ce 3*d* 和 Fe 2*p* 结构的 XPS 光谱, FC 氧化物在 Ce 3*d*<sub>5/2</sub> (883.4 eV) 和 Fe 2*p*<sub>3/2</sub> (711.8 eV) 结合能点出现波峰, 表明该材料主要以 Ce( III )和 Fe( III )形式存在, 且稳定化吸附 30

d 后并未出现明显的价态变化. 表 3 给出了 As 吸附前后 FC 的表面原子比. 由表 3 可知, 30 d 吸附实验后, Ce、Fe、As 和 O 原子比分别从 4.5%、16.8%、0% 和 73.5% 变化为 4.5%、11.3%、12.6% 和 66.5%. 这与 Dou 等<sup>[26]</sup>的研究结果非常类似, 表明虽然经过了 30 d 的稳定化吸附, As 仍然主要吸附于 Fe 原子表面.

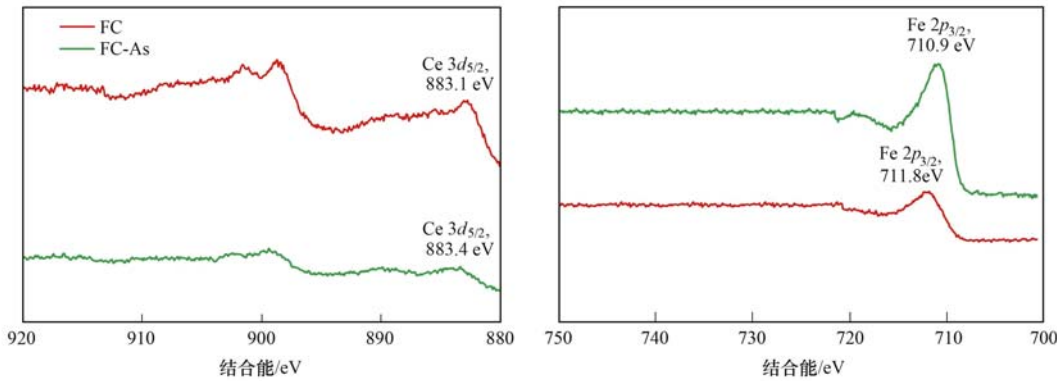


图 6 As( V ) 吸附后 FC 的 XPS 光谱

Fig. 6 XPS spectra of FC after As( V ) adsorption

表 3 As( V ) 吸附前后 FC 的表面原子比/%

Table 3 Surface atomic ratios of FC after As( V ) adsorption/%

| 项目    | Ce  | Fe   | As   | O    |
|-------|-----|------|------|------|
| FC    | 4.5 | 16.8 | 0    | 73.5 |
| FC-As | 4.5 | 11.3 | 12.6 | 66.5 |

3 结 论

(1)本研究将铁铈氧化物应用于我国不同 pH 值 As 污染土壤修复, 发现其具有更强的 pH 适应性, 能高效抑制 TCLP 溶出, 并显著增加吸附态 As 向水合铁铝氧化物结合态的稳定化.

(2)针对我国存在的大面积高肥力水平土壤, 添加铁铈氧化物能大量固定土壤有效态 P, 不仅能缓解 P 竞争土壤 As( V )吸附位点, 而且能有效预防周边水体的面源污染.

(3)通过综合应用 SEM-EDS 和 XPS 等光谱学技术, 发现 As( V )吸附产物表面均检测到 Fe、Ce 和 As 3 种元素, 且 As 主要吸附于 Fe 原子表面. 铁铈氧化物在我国土壤砷污染稳定化修复领域, 具有较好的应用前景.

参考文献:

[ 1 ] Nazari A M, Radzinski R, Ghahreman A. Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic [ J ]. Hydrometallurgy, 2017, **174**: 258-281.

[ 2 ] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题 [ J ]. 地理研究, 2008, **27** ( 1 ): 201-212.

Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, *et al.* Regional distribution of

arsenic contained minerals and arsenic pollution in China [ J ]. Geographical Research, 2008, **27** ( 1 ): 201-212.

[ 3 ] Duan Q N, Lee J C, Liu Y S, *et al.* Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: a graphical review [ J ]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, **97** ( 3 ): 303-309.

[ 4 ] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [ EB/OL ]. <http://www.gov.cn/foot/site1/20140417/782bec88840814ba158d01.pdf>, 2014.

[ 5 ] Suda A, Makino T. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: a review [ J ]. Geoderma, 2016, **270**: 68-75.

[ 6 ] Singh R, Singh S, Parihar P, *et al.* Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: a review [ J ]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **112**: 247-270.

[ 7 ] Masue Y, Loeppert R H, Kramer T A. Arsenate and arsenite adsorption and desorption behavior on coprecipitated aluminum: iron hydroxides [ J ]. Environmental Science & Technology, 2007, **41** ( 3 ): 837-842.

[ 8 ] Sahu U K, Sahu M K, Mohapatra S S, *et al.* Removal of As ( V ) from aqueous solution by Ce-Fe bimetal mixed oxide [ J ]. Journal of environmental chemical engineering, 2016, **4** ( 3 ): 2892-2899.

[ 9 ] Lin L Y, Yan X L, Liao X Y, *et al.* Migration and arsenic adsorption study of starch-modified Fe-Ce oxide on a silicon-based micromodel observation platform [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **338**: 202-207.

[ 10 ] Lin L Y, Zhong L R, Yan X L, *et al.* Reducing arsenic concentration in *Panax notoginseng* via contaminant immobilization in soil using Fe-Ce oxide [ J ]. Journal of Environmental Quality, 2018, **47** ( 2 ): 312-317.

[ 11 ] Arco-Lázaro E, Agudo I, Clemente R, *et al.* Arsenic ( V ) adsorption-desorption in agricultural and mine soils: effects of organic matter addition and phosphate competition [ J ]. Environmental pollution, 2016, **216**: 71-79.

- [12] 龚娟, 马友华, 胡宏祥, 等. 农田土壤磷的环境指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(2): 112-117.  
Gong J, Ma Y H, Hu H X, *et al.* Research advances on environmental indicator of soil phosphorus in Farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, **32**(2): 112-117.
- [13] 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 等. 砷污染土壤复合淋洗修复技术研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1147-1155.  
Chen X F, Li X M, Chen C, *et al.* Mixture leaching remediation technology of arsenic contaminated soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1147-1155.
- [14] Baken S, Verbeeck M, Verheyen D, *et al.* Phosphorus losses from agricultural land to natural waters are reduced by immobilization in iron-rich sediments of drainage ditches [J]. Water Research, 2015, **71**: 160-170.
- [15] Fink J R, Inda A V, Tiecher T, *et al.* Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability [J]. Ciência e Agrotecnologia, 2016, **40**(4): 369-379.
- [16] An B, Zhao D Y. Immobilization of As (Ⅲ) in soil and groundwater using a new class of polysaccharide stabilized Fe-Mn oxide nanoparticles[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **211-212**: 332-341.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] US EPA. Method 1311: Toxicity characteristic leaching procedure[S]. EPA SW-846: Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, 1992.
- [19] 于冰冰, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 用于表征三七种植区土壤中可利用态砷的化学提取剂的筛选[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1573-1579.  
Yu B B, Yan X L, Liao X Y, *et al.* Screening of chemical extracting agents for characterizing soil bio-effective arsenic on *Panax Notoginseng* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(8): 1573-1579.
- [20] Wenzel W W, Kirchbaumer N, Prohaska T, *et al.* Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure[J]. Analytica Chimica Acta, 2001, **436**(2): 309-323.
- [21] Hafeznezami S, Zimmer-Faust A G, Dunne A, *et al.* Adsorption and desorption of arsenate on sandy sediments from contaminated and uncontaminated saturated zones: kinetic and equilibrium modeling[J]. Environmental Pollution, 2016, **215**: 290-301.
- [22] Han Y H, Yang G M, Fu J W, *et al.* Arsenic-induced plant growth of arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata*: impact of arsenic and phosphate rock[J]. Chemosphere, 2016, **149**: 366-372.
- [23] 田桃, 雷鸣, 周航, 等. 两种钝化剂对土壤 Pb、Cd、As 复合污染的菜地修复效果[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2553-2560.  
Tian T, Lei M, Zhou H, *et al.* Effects of two amendments on remedying garden soil complexly contaminated with Pb, Cd and As[J]. Environmental Science, **38**(6): 2553-2560.
- [24] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2530-2537.  
Zhong S X, Yin G C, Chen Z L, *et al.* Influencing mechanism of Eh, pH and Iron on the release of arsenic in paddy soil[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2530-2537.
- [25] 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 等. 含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3149-3154.  
Lei M, Zeng M, Liao B H, *et al.* Effects of phosphorus-containing substances on arsenic uptake by rice [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 3149-3154.
- [26] Dou X M, Zhang Y, Zhao B, *et al.* Arsenate adsorption on an Fe-Ce bimetal oxide adsorbent: EXAFS study and surface complexation modeling [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, **379**(1-3): 109-115.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                           |                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 .....             | ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397) |
| Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter .....                                 | XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)        |
| Elemental Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> , and Heavy Pollution Analysis in Hefei .....                                             | LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)                        |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China .....                                                 | CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)         |
| Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM <sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area .....                                                         | KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)    |
| Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun .....                                                                      | WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)             |
| Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM <sub>2.5</sub> Pollution in China .....                                                             | WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)                                    |
| Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM <sub>2.5</sub> from Coal-Fired Power Plants .....                                                  | DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)          |
| Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province .....                         | XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)       |
| Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site .....                                                | MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470) |
| Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao .....                                                                          | GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)                        |
| Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou .....                                                               | SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)          |
| Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project .....                        | HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)            |
| Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta .....  | QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)         |
| Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China .....                                       | YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)      |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir .....                                                    | WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)       |
| Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging .....                                                   | LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)             |
| Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang .....                                                                          | WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)        |
| Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands .....                                                        | LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)                |
| Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing .....                                                                                        | WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)        |
| Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors .....                                        | LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)                |
| Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin .....                                                 | WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)          |
| Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen ..... | WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)              |
| Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water .....                                                        | HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)      |
| Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling .....                                                     | PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)               |
| Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs .....                                                                                            | ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)  |
| Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process .....                                                  | FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)          |
| Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials .....                                                                                  | JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)           |
| Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains .....                                              | CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)      |
| Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials .....                                                        | LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)     |
| Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid .....                                                      | HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)                |
| Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR .....                                                                        | YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)       |
| Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System .....                                     | XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)  |
| Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX .....                                             | MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)         |
| Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems .....                                                                                        | DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)        |
| Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China .....                                                             | ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)                      |
| Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations .....                                    | LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)     |
| Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1 .....                                  | YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)         |
| Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification .....                       | GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)                |
| Nitrification, Denitrification, and N <sub>2</sub> O Production Under Saline and Alkaline Conditions .....                                                                | DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)      |
| Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil .....                                                                                                   | WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)                    |
| Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields .....                                                                                             | ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)      |
| Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde .....                                           | SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)    |
| Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City .....                                                              | ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)     |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils .....                                                                                  | ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)        |
| Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As( V ) and P .....                                                                                                            | LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)                      |
| Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions .....                                                                      | ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)   |
| Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils .....                                       | LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)          |
| Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils .....                                           | WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)                     |
| Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates .....                                                                          | LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)       |
| Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia .....      | GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)                   |
| Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents .....                                                                           | HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)     |
| Toxicity of PM <sub>2.5</sub> Based on a Battery of Bioassays .....                                                                                                       | JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)     |