

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_{2.5}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_{2.5}和PM₁₀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, 陈璞琬, 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, 刘立志, 刘煊武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春秋季节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_{2.5}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_{2.5}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SO₄²⁻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N₂O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, 卫晓锋, 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)

生物质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溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}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¹, 邓一荣¹, 林龙勇^{1*}, 曹梦华², 钟立荣³

(1. 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; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 西北太平洋国家实验室, 里奇兰 WA99354)

摘要: 本文以铁锰氧化物(Fe-Mn, FM)为研究对象, 评估其不同水分条件下对我国南方3种砷(As)污染土壤的稳定化修复效果. 结果表明, 添加一定比例(质量分数30%)水分对于抑制土壤As的毒性浸出具有积极作用, 但水分过高(淹水条件)则会引发As的大量活化释放. 淹水条件下, FM对As污染土壤具有明显的应用优势, 能使韶关、河池和常德这3种土壤毒性浸出质量浓度均显著下降99.00%以上, 使其土壤有效态As含量分别显著降低55.40%、40.05%和16.92%, 并增加专性和非专性吸附态As向水合铁铝氧化物结合态的稳定化. FM能使韶关、河池和常德土壤有效态磷(P)含量分别降低0.60%~6.67%、15.74%~50.00%和32.48%~40.39%, 这有可能会限制缺P区域农产品对酸性或中性土壤的P摄取. FM对3种供试土壤pH值影响的变化幅度仅为0.04~0.07, 对土壤环境的影响非常小. FM在我国淹水As污染土壤稳定化修复领域具有较好的应用前景.

关键词: 铁锰氧化物(FM); 土壤; 砷; 水分条件; 稳定化

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3792-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903119

Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions

ZHOU Hai-yan¹, DENG Yi-rong¹, LIN Long-yong^{1*}, CAO Meng-hua², ZHONG Li-rong³

(1. Institute of Eco-environment & Soil-remediation, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Pacific Northwest National Laboratory, Richland WA99354, USA)

Abstract: Fe-Mn oxide (FM) was used to evaluate its stabilization effects on three typical arsenic (As)-contaminated soils in southern China under different water conditions (dry soil, moist soil, and flooded soil). With an increase in moisture content, the toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) results for As decreased by 34.78%, 47.62%, and 13.64%, respectively, in Shaoguan, Hechi, and Changde, and then increased by 310.34%, 185.22%, and 23.38%, respectively. The results showed that adding a certain amount of water (30%) had a positive effect on decreasing the As concentration in the TCLP, but excessive amounts (80%) led to As re-release into the soil. The application of FM under flooding conditions has obvious advantages. In the three soils of Shaoguan, Hechi, and Changde, FM significantly reduced the As concentration in the TCLP by more than 99.00%, and reduced the soil available As content by 55.40%, 40.05%, and 16.92%, respectively. FM increased the specific and non-specific adsorption of As to stabilize the bound fractions of hydrated iron-aluminum oxide, thus significantly reducing the biological effectiveness of soil As and soil environmental risk. FM reduced the available P in the soil in Shaoguan, Hechi, and Changde by 0.60%-6.67%, 15.74%-50.00%, and 32.48%-40.39%, respectively. Our study revealed that FM can absorb a small amount of available P, which may limit P uptake by agricultural products in P-deficient areas, while effectively inhibiting the non-point source pollution of soil to surrounding water bodies in P-rich areas. The variation in pH after FM application in the three soils was only 0.04-0.07, which had little effect on the soil environment. FM has good prospects for stabilization of flooded As-contaminated soil. The results of this study provide an important scientific basis for soil As stabilization in China.

Key words: Fe-Mn oxide (FM); soil; arsenic; water condition; stabilization

砷(As)是一种非金属元素,是最常见、对公众健康危害最严重的污染物之一^[1]. 截止目前,中国已成为最大的As制品生产国,占全球市场份额的50.00%左右^[2]. 由于土壤背景值高、含As矿产资源的无序开采、含As制剂的过度使用,导致我国南方的湖南、广东、广西等大面积区域出现土壤As污染问题,并已严重威胁居民身体健康及经济社会快速发展^[3,4].

As在土壤中主要结合于(弱)结晶态铁氧化物表面,因此铁氧化物成为了As污染土壤稳定化修

复领域的首要选择^[5]. 一般而言,土壤As在铁氧化物表面的螯合特征受溶液Eh、pH值等因素的影响^[1,6]. 其中,Eh过低(淹水条件)能促进铁矿物还原溶解,使被土壤颗粒吸附的弱吸附态As(V)还原为As(III),并大量释放至土壤溶液^[7]. 对于淹水

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-04-15

基金项目: 广州市科技计划项目(201804010424); 广州市科技计划项目(201707010144)

作者简介: 周海燕(1987~),女,博士研究生,工程师,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: ecozhouhy@163.com
* 通信作者, E-mail: ecolinly@163.com

土壤, 常规铁氧化物很难实现对土壤 As 的高效稳定化。

近年来, 有研究发现铁锰双金属氧化物 (Fe-Mn, FM) 对 As(III) 有着较强的氧化和吸附能力^[8]。例如, An 等^[9]将人工合成的 FM 添加至 As(III) 污染土壤, 发现 FM 能通过直接吸附 As(III) 和将 As(III) 先氧化后吸附两种机制修复土壤 As 污染。McCann 等^[10]将富含 FM 的污泥添加至 As(III) 污染土壤, 发现 FM 的氧化作用能使 Mn(IV) 被还原为 Mn(II) 并附着于材料表面形成锰氧化物, 从而显著增加 As 的吸附位点。费杨等^[11]的研究发现, 添加质量分数 5.00% 的 FM 可使土壤 pH 值升高, 并能够提高土壤的酸缓冲能力。

本文拟在前人研究的基础上, 针对我国广东韶关、广西河池、湖南常德这 3 个土壤污染综合防治先行区, 各选取 1 种当地典型的 As 污染土壤, 探讨 FM 在不同水分条件下对 As 污染土壤的毒性浸出、有效态 As、As 价态和 As 结合态等赋存状态的影响, 并评估其对土壤有效态 P 含量和 pH 值的影响, 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

参考 An 等^[9]的方法, 略加修改, 合成 FM。具体为按照摩尔比 Fe(II): Mn(VII) = 3:1 称量 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 KMnO_4 (国药集团化学试剂有限公司, AR) 至 1 000 mL 烧杯中, 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 调节体系 pH 至 7~8, 搅拌 1 h, 室温条件下静置老化 12 h, 过滤, 洗涤, 40°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

土壤分别取自广东韶关某化工厂周边农田、广西河池某砒霜厂周边农田、湖南常德某化工厂周边抛荒土地, 土壤自然风干后过 20 目筛, 基本理化性质测定见表 1。将 50.00 g 供试土壤与 1.00 g FM 添加至 200 mL 的玻璃瓶, 通过翻转式振荡器 (LY-YKZ-12, 常州金坛良友仪器有限公司) $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 充分混合 1 h, 分别添加 0 mL、15.00 mL 和 40.00 mL 的去离子水 (分别模拟风干土壤、湿润土壤和淹水土壤), 用疏水透气膜密封玻璃瓶, 连续培养 30 d, 至吸附达到稳定。

1.3 土壤毒性浸出、有效态 As、As 价态和 As 结合态的测定

土壤毒性浸出质量浓度分析参考文献^[13], 对土壤样品进行 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching

表 1 供试土壤的基本理化性质^[12]

项目	韶关	河池	常德
pH	8.12	3.04	6.87
有机质/%	2.17	3.54	1.46
阳离子交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	321.04	356.89	301.27
总磷/%	0.10	0.15	0.19
总氮/%	0.20	0.25	0.21
总钾/%	1.38	1.62	0.64
总 As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	254.59	645.76	1 020.03
总 Mn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	204.78	369.85	475.46
总铁/%	2.27	5.06	9.31

Procedure) 浸提。土壤有效态 As 浸提参考于冰冰等^[14]的方法。土壤 As(V) 和 As(III) 含量分析参考 Wongrod 等^[15]的方法。土壤 As 不同结合态含量分析参照马玉玲等^[16]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/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, 北京吉天仪器有限公司) 分析, 土壤 As 价态采用液相-原子荧光联用仪 (LC-AFS, 北京吉天仪器有限公司) 分析。

1.4 土壤 pH 和有效态 P 测定

土壤 pH 值测定参照费杨等^[11]的方法, 土壤有效态 P 含量测定参考文献^[12]。河池为酸性土壤, 其有效态 P 含量测定采用 HCl + H_2SO_4 法: 称取 2.50 g 20 目风干土样, 加入 12.50 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 1.00 mL, 加入 8.00 mL $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 抗坏血酸, 加入 16.00 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、0.224 mL 浓硫酸), 摇匀静置 30 min 后, 用紫外可见分光光度计 (DR6000, 美国哈希) 于 700 nm 波长处测定有效态 P 含量。

此外, 韶关和常德土壤为中性或石灰型, 其有效态 P 含量测定采用 NaHCO_3 法: 称取 2.50 g 20 目风干土样, 加入 50.00 mL $0.50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 溶液, 恒温振荡 30 min 后, 吸取滤液 10.00 mL, 加入 35.00 mL 去离子水和 5.00 mL 钼锑抗试剂 ($0.45 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $1/2 \text{ H}_2\text{SO}_4$ 和 $1.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 钼酸铵), 静置 30 min 后用紫外可见分光光度计 (DR6000, 美国哈希) 于 700 nm 波长处测定有效态 P 含量。上述所有药剂均来源于国药集团化学试剂有限公司 (GR)。

1.5 数据处理

数据采用 Origin 8.5 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 铁锰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^[17]. 本研究中,韶关和河池这 2 种供试土壤均处于当地的饮用水源地,但其 TCLP 浸出质量浓度均高于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类标准 $50.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (见图 1),对周边水体存在较大的污染风险,而常德土壤的 TCLP 浸出质量浓度则仅为 $22.86 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 随着水分质量分数的增加,韶关、河池和常德这 3 种土壤的 TCLP 浸出浓度均先分别显著下降 34.78%、47.62% 和 13.64%,然后再分别显著升高 310.34%、185.22% 和 23.38%. Catalano 等^[18]的研究发现,界面水的存在能通过静电吸附、氢键和结构性稳定等方式显著增加含铁材料表面对 As 的吸附. 王欣等^[7]的研究发现,淹水条件能促进铁矿物还原溶解,从而使其土壤吸附的 As 释放进入土壤溶液. 本研究中,添加一定比例的水分对于抑制土壤 As 浸出具有积极作用,但水分过高则会导致 As 的大量释放.

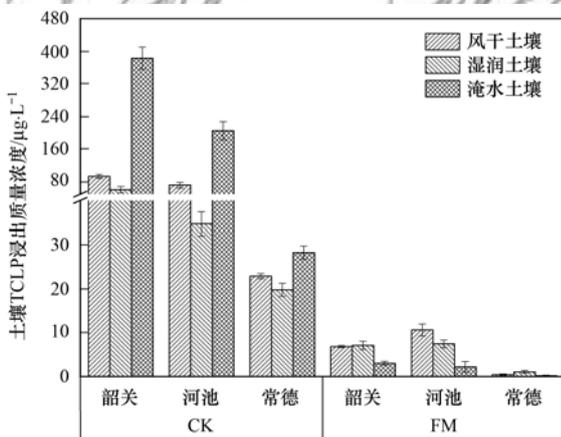


图 1 FM 对不同水分条件土壤 TCLP 浸出质量浓度的影响

Fig. 1 Effect of Fe-Mn oxide (FM) on soil toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) results under different water conditions

添加 FM 能显著降低韶关、河池和常德这 3 种土壤的 TCLP 浸出质量浓度,降低率分别为 88.31% ~ 99.21%、80.26% ~ 98.92% 和 94.57% ~ 99.27%. 针对风干和湿润这 2 种水分条件,FM 对 3 种土壤的 TCLP 浸出质量浓度的影响差异并不显著 ($P < 0.05$). 然而,在淹水条件中,添加 FM 后,3 种土壤的 TCLP 浸出质量浓度反而最低,仅分别为风干土壤的 44.44%、20.93% 和 47.52%. Zhang 等^[19]和 Ociński 等^[20]发现,FM 对 As(III) 的吸附容量远大于 As(V). McCann 等^[10]的研究发现,FM 对 As(III) 的氧化作用会使 Mn(II) 大量产

生并附着于材料表面形成锰氧化物,从而显著增加 As 的吸附位点. 本研究结果表明,虽然淹水土壤的 As 浸出质量浓度远高于其他水分条件,但添加 FM 后可使淹水土壤毒性浸出质量浓度大幅下降,甚至低于风干土壤和湿润土壤,充分体现了 FM 在淹水 As 污染土壤中的应用优势.

2.2 铁锰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^[14]. Wang 等^[21]对我国九类典型土壤的 As 含量研究发现,总 As 含量约为 $4.2 \sim 37.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而有效态 As 含量所占比例均远低于 1.00%. Huang 等^[22]的研究发现,土壤 As 的有效性受到水分含量的显著影响,高土壤湿度会引起土壤有效态 As 含量的显著升高. Liu 等^[23]的研究发现,土壤持水量从 35% 升至 110% 后,有效态 As 含量显著增加了 2.8% ~ 26.7%. 本研究中,随着水分添加质量分数的增加,韶关、河池和常德这 3 种土壤的有效态 As 含量分别显著增加 40.14%、7.16% 和 14.73% (见图 2, $P < 0.05$).

在风干和湿润 2 种水分条件中,添加 FM 与不添加 FM 对 3 种土壤的有效态 As 含量的影响差异并不显著 (见图 2, $P < 0.05$). 在淹水条件下,添加 FM 能显著降低韶关、河池和常德 3 种土壤的有效态 As 含量,降低率分别为 55.40%、40.05% 和 16.92%. Wan 等^[24]认为,土壤有效态 As 涵盖了水溶态和弱吸附态 2 种外表面螯合态 As. 淹水条件能促进铁矿物还原溶解,使被土壤颗粒吸附的弱吸附态 As 大量释放^[7]. 本研究结果表明,在淹水条件中,FM 能有效吸附这部分弱吸附态 As,从而显著降低土壤 As 的生物有效性和土壤环境风险.

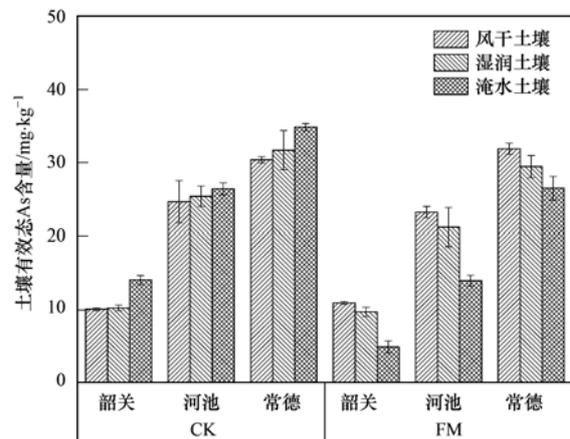


图 2 FM 对不同水分条件土壤有效态 As 的影响

Fig. 2 Effect of Fe-Mn oxide (FM) on soil available As under different water conditions

2.3 铁锰氧化物对土壤 As 价态和结合态的影响

表 2 给出了 FM 对不同水分条件土壤 As 价态的影响. 从中可知, 风干和湿润两种水分条件土壤的 As 均以 As(V) 形态赋存, 淹水能使韶关、河池和常德这 3 种供试土壤的 As(III) 所占比例分别升高至 27.83%、11.49% 和 18.57%. 添加 FM 能使上述 3 种土壤的 As(III) 所占比例分别下降至 12.56%、6.31% 和 9.84%, 表明 FM 确实能使淹水条件下土壤 As(III) 大量氧化为 As(V). 图 3 给出了 FM 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^[16]. 从中可知, 本研究中, 韶关、河池和常德 3 种供试土壤 F3 + F4 组分占总 As 的质量分数约为 68.50%、67.12% 和 72.94%, F1 组分分别为 0.82%、0.53% 和 0.11%, 而 F2 组分却高达 26.14%、25.72% 和 24.56%, 表现出了较高的潜在释放风险. 当水分质量分数从 0% 升高至 30% 后, 韶关、河池和常德这 3 种供试土壤的 F1 组分分别显著下降了 10.81%、42.13% 和 33.32%, F2 组分则出现了升高的趋势, 但差异并不显著 ($P < 0.05$). 结合 Catalano 等^[18] 的界面水吸附 As 理论, 本研究结果表明, 添加适当的水分能将非专性吸附态 As 转化为专性吸附态, 对土壤 As 的溶出起到一定程度的抑制作用. 当土壤为淹水条件时, 韶关、河池和常德这 3 种供试土壤的 F1 组分并未出现明显的升高, F2 组分分别升高了 19.97%、10.02% 和 9.36%, F3 + F4 组分则分别下降了 7.34%、10.05% 和 2.31%. 如 2.1 和 2.2 节所述, 王欣等^[7] 和 Wan 等^[24] 均认为, 淹水条件能促进土壤铁矿物还原溶解, 使被土壤颗粒吸附的弱吸附态 As 大量释放. 本研究结果表明, 高含水率可能并不会将弱吸附态

As 全部转化为非专性吸附态 As, 而是更容易将其转化为具有潜在移动风险的专性吸附态.

大量研究表明, 土壤 As 在铁氧化物表面的整合特征受 pH、Eh 等因素的影响, 高 pH 和淹水条件均会显著影响铁氧化物对 As 的吸附稳定性^[1,6]. 本研究中, 针对韶关土壤 (碱性土壤, pH = 8.1), 在风干、湿润和淹水这 3 种水分条件中, 添加 FM 能使 F1 组分分别下降 93.03%、92.07% 和 94.83%, 使 F2 组分分别下降 14.21%、25.37% 和 38.92%, 使 F3 组分分别升高 2.24%、13.13% 和 25.62%, 使 F4 组分分别升高 7.37%、10.43% 和 7.85%. 针对河池土壤 (中性土壤, pH = 6.8), 在风干、湿润和淹水这 3 种水分条件中, 添加 FM 能使 F1 组分分别下降 89.81%、79.76% 和 97.42%, 使 F2 组分分别下降 24.92%、35.16% 和 55.84%, 使 F3 组分分别升高 11.25%、14.22% 和 22.96%, 使 F4 组分分别升高 8.28%、15.53% 和 28.35%. 针对常德土壤 (酸性土壤, pH = 3.0), 添加 FM 能使 F1 组分分别下降 62.33%、22.67% 和 71.59%, 使 F2 组分分别下降 16.81%、26.21% 和 31.87%, 使 F3 组分分别下降 8.68%、0.43% 和 2.25%, 使 F4 组分分别升高 73.32%、51.87% 和 35.53%. 上述结果表明, 在碱性和中性土壤环境中, 添加 FM 能促使专性吸附态 As (F1) 和非专性吸附态 As (F2) 向水合铁铝氧化态转化 (F3 和 F4), 但在酸性土壤环境中则能促使 (非) 专性吸附态 As 和无定形/弱结晶水合铁铝氧化物结合态 As (F3) 向结晶水合铁铝氧化物结合态 (F4) 转化. 此外, 在淹水条件下, 添加 FM 对 3 种土壤 F2 组分的降低影响最显著, 远高于风干和湿润这 2 种水分条件. 这与有效态 As 部分内容较为契合, 表明 FM 能有效吸附弱吸附态 As, 并促使其向水合铁铝氧化态转化.

表 2 FM 对不同水分条件土壤 As 价态的影响¹⁾/%

Table 2 Effect of Fe-Mn oxide (FM) on soil As speciations under different water conditions/%

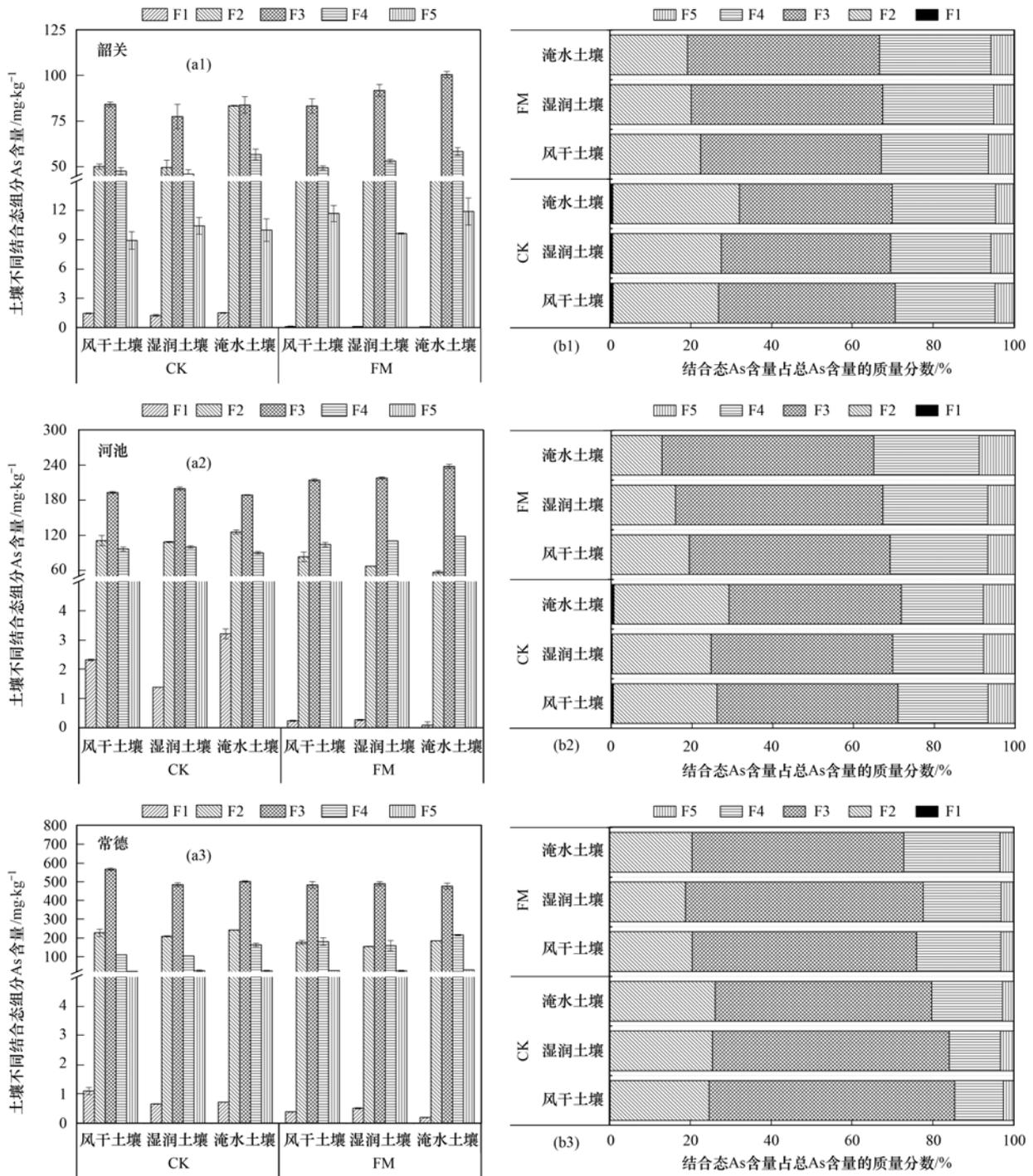
项目		风干土壤		湿润土壤		淹水土壤	
		As(V)	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)	As(III)
韶关	CK	100	0	100	0	72.17	27.83
	FM	100	0	100	0	87.44	12.56
河池	CK	100	0	100	0	88.51	11.49
	FM	100	0	100	0	93.69	6.31
常德	CK	100	0	100	0	81.43	18.57
	FM	100	0	100	0	90.16	9.84

1) 表内数值表示土壤中 As(V) 或 As(III) 含量占总 As 含量的质量分数

2.4 铁锰氧化物对土壤 pH 和有效态 P 的影响

图 4 给出了 FM 对土壤有效态 P 的影响. 有效态 P 含量能一定程度地表征土壤肥力情况, 土壤高

产量肥力水平一般在 $20.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上^[25]. 从中知, 韶关、河池和常德这 3 种供试土壤的有效态 P 含量均远低于高产量肥力水平标准, 且表现出常



(a) 不同水分条件土壤中 5 种 As 结合态含量, (b) 不同水分条件土壤中 5 种结合态 As 含量占总 As 含量的质量分数

图 3 FM 对不同水分条件土壤 As 结合态的影响

Fig. 3 Effect of Fe-Mn oxide (FM) on soil As fractions under different water conditions

德 > 河池 > 韶关的趋势. 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^[26,27]. 针对韶关碱性土壤, 有效态 P 含量并不受水分添加质量比和 FM 添加的显著影响. 但在河池和常德这 2 种土壤中, 淹水条件可使土壤有效态 P 含量分别显著降低 38.57% 和 38.12% ($P < 0.05$). 这可能是由于 P 比 As 更容易吸附到土壤颗粒表面, 淹水条件下 As(V) 被还原, 土壤 As 吸附位点暴露出来, 被 P 大量吸附. 本研

究中, 在淹水条件下, 添加 FM 能使河池和常德这 2 种土壤的有效态 P 含量显著下降 15.75% 和 32.54%, 低于风干和湿润这 2 种水分条件, 这可能会限制缺 P 区域农产品摄取土壤 P, 但在富 P 区域则可能有效抑制土壤对周边水体的面源污染. 图 5 给出了 FM 对土壤 pH 值的影响. 费杨等^[11]研究发现, 添加 FM (质量分数 5%) 可使土壤 pH 值升高 0.20 ~ 0.38, 适当提高了土壤的酸缓冲能力. 本研究中, FM 的添加质量比为 2.00%, 3 种土壤的 pH

值变化幅度仅为 0.04 ~ 0.07, 且差异并不显著 ($P < 0.05$), 对土壤环境的影响非常小。

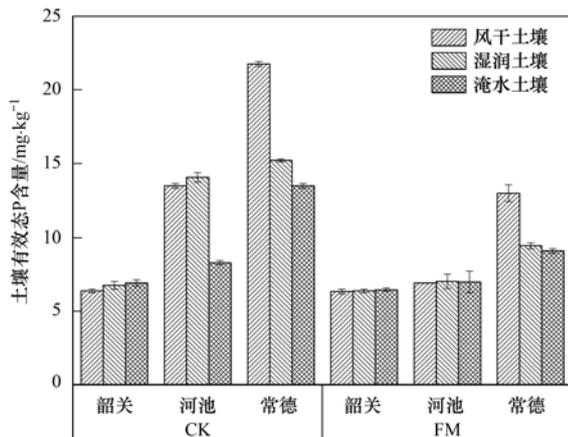


图 4 FM 对不同水分条件土壤有效态 P 的影响

Fig. 4 Effect of Fe-Mn oxide (FM) on soil available P under different water conditions

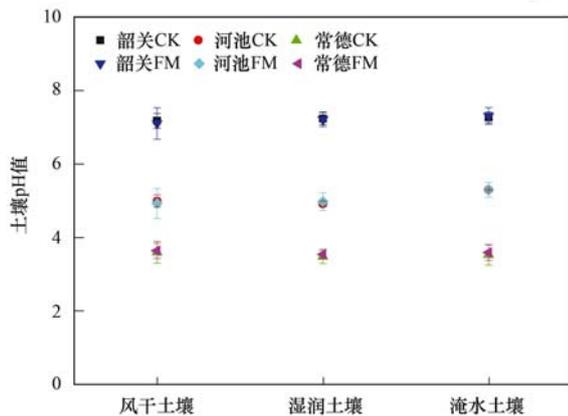


图 5 FM 对不同水分条件土壤 pH 值的影响

Fig. 5 Effect of Fe-Mn oxide (FM) on soil pH under different water conditions

3 结论

(1) 添加水分对于抑制土壤 As 的毒性浸出具有积极作用, 但水分过高则会引发 As 的大量释放。

(2) FM 在淹水 As 污染土壤中具有明显的优势, 能显著降低土壤 TCLP 毒性浸出和土壤有效态 As 含量, 并增加吸附态 As 向水合铁铝氧化物结合态的稳定化。

(3) FM 会少量吸附土壤有效态 P, 这可能会限制缺 P 区域农产品摄取土壤 P, 但在富 P 区域则可能有效抑制土壤对周边水体的面源污染。

参考文献:

[1] 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.

[2] Shi Y L, Chen W Q, Wu S L, *et al.* Anthropogenic cycles of arsenic in mainland China: 1990-2010 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1670-1678.

[3] Zhou Y T, Niu L L, Liu K, *et al.* Arsenic in agricultural soils

across China: distribution pattern, accumulation trend, influencing factors, and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 156-163.

[4] 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.

[5] Xu X W, Chen C, Wang P, *et al.* Control of arsenic mobilization in paddy soils by manganese and iron oxides [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 37-47.

[6] 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.

[7] 王欣, 钟松雄, 陈志良, 等. 厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2911-2918.

Wang X, Zhong S X, Chen Z L, *et al.* Effect of iron on the release of arsenic in flooded paddy soils [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2911-2918.

[8] Zhang G S, Qu J H, Liu H J, *et al.* Preparation and evaluation of a novel Fe-Mn binary oxide adsorbent for effective arsenite removal [J]. *Water Research*, 2007, **41**(9): 1921-1928.

[9] 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.

[10] McCann C M, Peacock C L, Hudson-Edwards K A, *et al.* In situ arsenic oxidation and sorption by a Fe-Mn binary oxide waste in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **342**: 724-731.

[11] 费杨, 阎秀兰, 李永华. 铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1430-1437.

Fei Y, Yan X L, Li Y H. Stabilization effects of Fe-Mn binary oxide on arsenic and heavy metal co-contaminated soils under different pH conditions [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1430-1437.

[12] 南京农业大学. 土壤农化分析 [M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 1981.

[13] SW-846, Method 1311: toxicity characteristic leaching procedure [S].

[14] 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.

[15] Wongrod S, Simon S, van Hullebusch E D, *et al.* Assessing arsenic redox state evolution in solution and solid phase during As(III) sorption onto chemically-treated sewage sludge digestate biochars [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **275**: 232-238.

[16] 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 等. 水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 179-186.

Ma Y L, Ma J, Chen Y L, *et al.* Arsenic adsorption and its species on ferrihydrite and ferrihydrite colloid [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 179-186.

[17] 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.

- [18] Catalano J G, Park C, Fenter P, *et al.* Simultaneous inner-and outer-sphere arsenate adsorption on corundum and hematite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72** (8): 1986-2004.
- [19] Zhang G S, Qu J H, Liu H J, *et al.* Removal mechanism of As(III) by a novel Fe-Mn binary oxide adsorbent; oxidation and sorption[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (13): 4613-4619.
- [20] Ociński D, Jacukowicz-Sobala I, Mazur P, *et al.* Water treatment residuals containing iron and manganese oxides for arsenic removal from water - Characterization of physicochemical properties and adsorption studies [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **294**: 210-221.
- [21] Wang Y A, Zeng X B, Lu Y H, *et al.* Dynamic arsenic aging processes and their mechanisms in nine types of Chinese soils [J]. *Chemosphere*, 2017, **187**: 404-412.
- [22] Huang G X, Chen Z Y, Zhang Y, *et al.* Changes of arsenic fractionation and bioaccessibility in wastewater-irrigated soils as a function of aging; influence of redox condition and arsenic load [J]. *Geoderma*, 2016, **280**: 1-7.
- [23] Liu CY, Tian H X, Li H Y, *et al.* The accuracy in the assessment of arsenic toxicity using soil alkaline phosphatase depends on soil water contents[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **102**: 457-465.
- [24] Wan X, Dong H C, Feng L, *et al.* Comparison of three sequential extraction procedures for arsenic fractionation in highly polluted sites[J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 402-410.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.



CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} and PM ₁₀ , 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 _{2.5} 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 _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} 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> NPI	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 ₂ 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 _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)