

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学

何沅洁¹, 刘江¹, 江韬^{1,2,3}, 黄京晶¹, 成晴¹, 陈宏^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715; 3. Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå SE-90183, Sweden)

摘要: 三峡库区消落带落干期时会生长大量植被, 其根系分泌的低分子量有机酸会对消落带土壤中重金属的活化带来一定影响, 为此, 本研究通过水培法以及利用去离子水直接浸提其根际土测出三峡库区优势植物狗牙根和稗草根分泌的低分子量有机酸种类和含量, 并模拟优势植物所分泌的单一有机酸和混合有机酸分别对消落带土壤中的铅(Pb)进行解吸, 探究其对消落带土壤中铅的解吸动力学。结果表明, 狗牙根根系分泌的低分子量有机酸种类和含量均大于稗草, 其中柠檬酸、丙二酸、乙酸、苹果酸是两种植株根系均分泌的有机酸, 且乙酸含量最高, 分别为 $0.765 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.261 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而在狗牙根和稗草根际土中均检测到柠檬酸、丙二酸、乙酸; 选取柠檬酸、丙二酸、乙酸对消落带土壤中铅进行解吸时, 发现当有机酸浓度 $\leq 1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 有机酸解吸量由高到低为: 丙二酸 > 柠檬酸 > 乙酸; 而当有机酸浓度 $> 1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 有机酸解吸量由高到低为: 柠檬酸 > 丙二酸 > 乙酸, 且低分子量有机酸在土壤中含低时, 抑制土壤对 Pb 的解吸; 含量高时, 促进土壤对 Pb 的解吸。在解吸过程中, 0~240 min 为快反应阶段, 240 min 后为慢反应阶段, 准二级动力学方程拟合效果最好。

关键词: 消落带; 优势植物; 低分子量有机酸; 铅; 动力学

中图分类号: X131; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0600-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607167

Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir

HE Yuan-jie¹, LIU Jiang¹, JIANG Tao^{1,2,3}, HUANG Jing-jing¹, CHENG Qing¹, CHEN Hong^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China; 3. Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå SE-90183, Sweden)

Abstract: Vegetations grow vigorously in the water-level-fluctuating zone (WLFZ) of Three Gorges Reservoir (TGR) during the non-flooded period. Low molecular weight organic acids (LMWOAs) excreted from the roots of these plants may active the heavy metals in soil. In order to investigate the desorption kinetics of Pb in the vegetation covered soil of TGR, the LMWOAs released from *Cynodon dactylon* and *Echinochloa crusgalli* roots, which are the dominant species in WLFZ, were analyzed both qualitatively and quantitatively. Furthermore, single and mixed species of LMWOAs were also used in the simulation. The results showed that the variety and content of LMWOAs secreted from *Cynodon dactylon* roots were larger and higher than those of *Echinochloa crusgalli*. Citric acid, malonic acid, acetic acid and malic acid were the same LMWOAs released from the two types of plants. The contents of acetic acid were the highest among all LMWOAs, which were 0.765 and $0.261 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ in *Cynodon dactylon* and *Echinochloa crusgalli* roots, respectively. Citric acid, malonic acid and acetic acid were the same LMWOAs detected from their rhizosphere soils. In the citric acid, malonic acid and acetic acid desorption test, the desorption captivities of Pb were inhibited when the concentration of LMWOAs was lower than $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. The desorption ability displayed a decreasing order of malonic acid > citric acid > acetic acid. However, the three LMWOAs promoted the desorption of Pb in soil when their concentrations were higher than $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The desorption ability displayed a decreasing order of citric acid > malonic acid > acetic acid. During the entire process of desorption, 0-240 min was the fast reaction stage, and the remaining time was the slow reaction stage. The pseudo-second order kinetics equation could fit best for the kinetic process.

Key words: the water-level-fluctuating zone; dominant plants; low molecular weight organic acids; lead; kinetics

三峡水库属特大型年调节水库, 在水位波动期间, 库区沿岸形成了垂直高度达 30 m, 面积约为 350 km² 的消落区^[1]。水位降低后裸露的消落带土壤会生长出大量以一年生草本植物为主的植被, 其主要

收稿日期: 2016-07-25; 修订日期: 2016-09-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2016D064)

作者简介: 何沅洁(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: hyuanjie0416@163.com

* 通信作者, E-mail: chen hong@swu.edu.cn

类型包括狗牙根、稗草、狗尾草、苍耳、空心莲子草等^[2,3]。

植物在生长过程中,根系会不断分泌出有机酸、氨基酸、糖类物质、酚酸类等低分子量有机物^[4],而低分子量有机酸(LMWOAs)主要包括甲酸、乙酸、丙酸、苹果酸、琥珀酸、酒石酸、柠檬酸、草酸等,在植物根系中其含量为10~20 mmol,占植株干重的1%~4%^[5],而植物根际土中LMWOAs含量一般为1~10 mmol^[6]。这一类低分子量弱酸会对土壤重金属的活化、重金属赋存形态的转化^[7,8]、根际土壤的pH值、氧化还原电位^[9]及根际微生物的组成与活性等起重要作用^[10]。大量研究证实LMWOAs能影响土壤对重金属的吸附、解吸。游蕊等^[11]通过探究LMWOAs对消落带土壤汞的活化作用,发现柠檬酸、酒石酸、草酸均能明显地增强土壤中汞的生物有效性,且随着LMWOAs浓度的增加,汞形态变化越显著。Jiang等^[8]用LMWOAs解吸稻田土中的Cd和Pb,发现当有机酸浓度 $< 0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,LMWOAs抑制土壤对Cd和Pb的解吸,而当柠檬酸浓度 $\geq 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、苹果酸和草酸浓度 $\geq 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,LMWOAs又促进土壤对Cd和Pb的解吸。Evangelou等^[12]指出,LMWOAs在活化重金属和矿质营养中发挥主要作用,且LMWOAs在解吸与活化重金属时,其所携带的质子和配体均能够改变重金属的生物有效性。

铅(Pb)是一种有毒的元素,能在生物体内蓄积,会对生物体内器官造成损害,也会对机体的生化和生理活动进行干扰^[13,14]。有研究表明,三峡水库水体Pb含量超出了世界卫生组织建议含量,也超出了中国饮用水标准和美国环保局饮用水标准^[15]。而三峡库区消落带作为库区径流的汇集地带,也就成为了污染物的汇集区^[16];同时也是水生生态系统和陆地生态系统的衔接过渡地带^[17],则消落带既是污染物的汇,又是污染物的源。有研究表明,三峡库区消落带的植被生物量可达 $(0.83 \pm 0.11) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[3],其根际分泌物中的LMWOAs,年复一年地参与到淹水落干主导的物质循环与交换,并改变赋存在土壤/沉积物体系中重金属元素的生物有效性。

目前,对三峡库区消落带上优势植物根系分泌的LMWOAs的含量和种类分析较少^[11,18,19],消落带优势植物分泌的有机酸对土壤/沉积物中重金属的解吸机制还没有系统研究,因此,本研究通过采集两种三峡库区消落带优势植物,利用水培法以及去离

子水直接浸提其根际土测出植物根系分泌的LMWOAs的种类和含量,并模拟优势植物所分泌的单一有机酸和混合有机酸分别对消落带土壤中的Pb进行解吸,以期评估消落带植物根系分泌物对土壤重金属活化的影响及其带来的生态风险提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集及实验材料

供试土样于10月初期采自重庆开县厚坝镇(N31°11'26.0",E108°27'21.0")消落区0~20 cm表层土壤,土壤类型为紫色潮土,土壤样品经去除砾石、根系等杂质,自然风干,过2 mm筛后备用。其pH值为 8.42 ± 0.03 ,CEC为 $(16.71 \pm 0.31) \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $(8.31 \pm 0.39) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,铅的本底值为 $(46.66 \pm 3.14) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

采集的优势植物为狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]、稗草[*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.]。将土层上的狗牙根和稗草与其周围的土一并采摘,轻轻抖落土壤至附着在根系上1~2 mm厚的土壤,用细毛刷轻轻刷下黏附在须根上的根际土,将其收集在自封塑料袋中封好并在4℃冰箱中保存^[20]。

供试有机酸为柠檬酸、丙二酸、乙酸、草酸、苹果酸、酒石酸、琥珀酸(成都市科龙化工试剂厂)均为分析纯试剂。

1.2 实验方法

1.2.1 土壤培养

按土壤含铅量为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21]添加外源铅[Pb(NO₃)₂粉末],制成含铅的模拟土样,按含水率20%加水老化30 d,风干后过60 mm筛,备用。后测其含铅量为 $(480.18 \pm 5.16) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2.2 植物根际土和根系分泌的LMWOAs的提取

(1)植物根系分泌的有机酸^[22~24] 将所采摘植物的根须先用自来水冲洗,再用去离子水冲洗,然后分别选取5株生长发育基本一致的狗牙根和稗草放在装有200 mL超纯水的烧杯中,然后在光照为3000 lx、温度为25℃、湿度为98%的恒温培养箱中培养12 h,并在培养时滴加2~3滴0.05%百里酚以抑制微生物活动,培养完后将根系分泌溶液用旋转蒸发仪浓缩至10 mL,0.45 μm滤膜过滤后,-20℃下保存备用。

(2)根际土中的有机酸^[25,26] 取5 g根际鲜土于离心管中,加入10 mL超纯水,振荡60 min后,以

5 000 r·min⁻¹ 的转速离心 5 min, 过 0.45 μm 滤膜后, -20℃ 下保存备用。

水培完后将植株烘干, 测其干重。

1.2.3 LMWOAs 的测定

使用岛津 LC-20A 型高效液相色谱分析仪, 配 SPD-20A 紫外检测器, 色谱柱: Inertsil ODS-SP 色谱柱(250 mm×4.6 mm; 5 μm), 柱温为 25℃, 流动相为 22% 的甲醇-KH₂PO₄ 溶液(0.01 mol·L⁻¹, 并用 H₃PO₄ 调节 pH 为 2.6); 进样量为 20 μL; 紫外检测波长为 210 nm; 流速为 0.5 mL·min⁻¹, 对低分子量有机酸进行测定。

1.2.4 LMWOAs 对土壤铅的解吸动力学实验

狗牙根在三峡库区总盖度达到 80% ~ 100%, 高于稗草在消落带的总盖度, 且多为单优种群落^[27,28], 固选取在狗牙根根际土检测到的有机酸浓度进行 LMWOAs 解吸土壤中 Pb 的动力学研究。单酸所添加含量为 0.01、0.1、1、10 和 20 mmol·L⁻¹ 共 5 个梯度, 混酸所添加含量分别为狗牙根根际土所测混酸浓度的 1 倍、3 倍和 5 倍。称取 1 g 模拟土样于 100 mL 离心管中, 分别加入不同种类与不同浓度有机酸各 10 mL, 背景电解质为 0.01 mol·L⁻¹ 的 NaNO₃。振荡 10、30、60、120、240、360、480、600、720、1 440 和 2 880 min 后, 离心, 过滤上清液并移入 25 mL 容量瓶定容。分别设置对照、空白和重复, 对照不添加 LMWOAs, 重复上述过程; 空白在无土的条件下, 直接加入背景电解质振荡 2 880 min 后重复上述过程; 实验设置 3 个重复。利用火焰原子吸收分光光

度法测定上清液中 Pb 含量。

1.2.5 数据分析

本实验数据采用 Excel 2007、SPSS 17、Origin 8.1 进行分析处理。

2 结果与讨论

2.1 消落带植物根系分泌物中 LMWOAs 的成分与含量

由表 1 可见, 通过对消落带的狗牙根和稗草的水培实验, 狗牙根根系分泌物中共检测出 6 种 LMWOAs, 分别为草酸、丙二酸、柠檬酸、乙酸、丁二酸、苹果酸, 其中乙酸、草酸、柠檬酸为主要有机酸, 含量分别为 0.765、0.478、0.199 mmol·kg⁻¹, 占所测出的总有机酸含量的 95.31%; 稗草根系分泌物中检测出 4 种 LMWOAs, 为丙二酸、柠檬酸、乙酸、苹果酸, 其中乙酸和柠檬酸为主要有机酸, 含量分别为 0.261 mmol·kg⁻¹ 和 0.075 mmol·kg⁻¹, 占稗草根系所测出的总有机酸含量的 86.82%。

除通过水培检测优势植物根系直接分泌的 LMWOAs 外, 狗牙根根际鲜土中的 LMWOAs 经过直接提取后也进行了测定, 检出丙二酸、柠檬酸、乙酸 3 种有机酸, 其中乙酸为主要有机酸, 占所测出的总有机酸含量的 88.17%; 稗草根际土共检测出了 4 种有机酸, 为丙二酸、柠檬酸、乙酸、苹果酸, 其中乙酸和柠檬酸为主要有机酸, 含量分别为 0.179 mmol·kg⁻¹ 和 0.035 mmol·kg⁻¹, 占所测出的总有机酸含量的 84.92%。

表 1 狗牙根、稗草(干重)根系分泌物及其根际土中有机酸含量¹⁾/mmol·kg⁻¹

Table 1 Organic acid contents of *Cynodon dactylon* and *Echinochloa crusgalli* in their root (dry weight) exudates and rhizospheric soil/mmole·kg⁻¹

植物种类	草酸	丙二酸	柠檬酸	乙酸	丁二酸	苹果酸	酒石酸	总酸
狗牙根	0.478	0.045	0.199	0.765	0.015	0.011	/	1.513
稗草	/	0.042	0.075	0.261	/	0.009	/	0.387
狗牙根根际土	/	0.030	0.012	0.313	/	/	/	0.355
稗草根际土	/	0.019	0.035	0.179	/	0.019	/	0.252

1) “/”表示未检出

2.2 LMWOAs 对土壤中 Pb 的解吸动力学曲线

由表 1 可知, 狗牙根根际土共测出 3 种有机酸, 分别为丙二酸、柠檬酸和乙酸, 则选取该 3 种单一有机酸对消落带土壤中的 Pb 进行解吸。当消落带土壤中含 Pb 量较高时, 其根系分泌的有机酸含量会明显增加, 且有机酸种类不同, 其增加倍数从 1 ~ 5 倍不等^[29,31]。根据实测有机酸含量, 分别设置 3 个混酸浓度梯度, 梯度 1 为消落带狗牙根根际土测得

的丙二酸、柠檬酸、乙酸这 3 种有机酸含量分别为 0.003、0.001 和 0.03 mmol·L⁻¹; 梯度 2 为所测得有机酸含量的 3 倍, 其含量分别为 0.009、0.003 和 0.09 mmol·L⁻¹; 梯度 3 为所测得有机酸含量的 5 倍, 其含量分别为 0.015、0.005 和 0.15 mmol·L⁻¹。单一有机酸和混合有机酸对消落带土壤中 Pb 的解吸动力学曲线由图 1 所示。

3 种 LMWOAs 及混酸的解吸动力学曲线趋势基

本相同(图 1),即解吸量先是随着振荡时间的增加快速上升,随后再缓慢上升趋于平稳,基本上在 720 min 处解吸达到平衡. 有机酸浓度不同,对消落带土壤中 Pb 的解吸量也不同. 随着有机酸浓度的增加,Pb 的解吸量也在增加. 与未加酸的对照相比,1 mmol·L⁻¹ 是一个分界点,有机酸浓度 ≤ 1 mmol·L⁻¹ 时,抑制土壤对 Pb 的解吸,而当有机酸浓度 > 1 mmol·L⁻¹ 时,促进土壤对 Pb 的解吸,这与低浓度有机酸促进土壤吸附重金属,高浓度促进土壤解吸重金属的研究结果一致^[8]. 当少量的 LMWOAs 加入后吸附在土壤表面上^[32],则游离在土壤溶液中的 Pb 与土壤表面上未成键的官能团有机酸发生络合作用,从而降低了 Pb 的

解吸^[33]; 同时,由于羧基和羟基等含氧官能团可以解离出氢离子,使含氧官能团带负电,所以 LMWOAs 的加入增加了土壤负电荷和 CEC,增大了土壤对阳离子的静电吸附量^[10]. 当高浓度的 LMWOAs 加入土壤后,土壤溶液中有机配体增加,由于—COOH 和—OH 中的氧有未成键电子,会和金属离子的空轨道配合,形成配位键吸附,使得 LMWOAs 有足够强的能力对土壤表面的重金属离子进行竞争配位,以至于生成重金属有机酸复合体,从而引起重金属离子在固-液相间的吸附平衡向液相移动^[34]. 同时,有机酸也会解离出质子,与重金属竞争土壤表面上的吸附位点,从而促进土壤对 Pb 的解吸^[35].

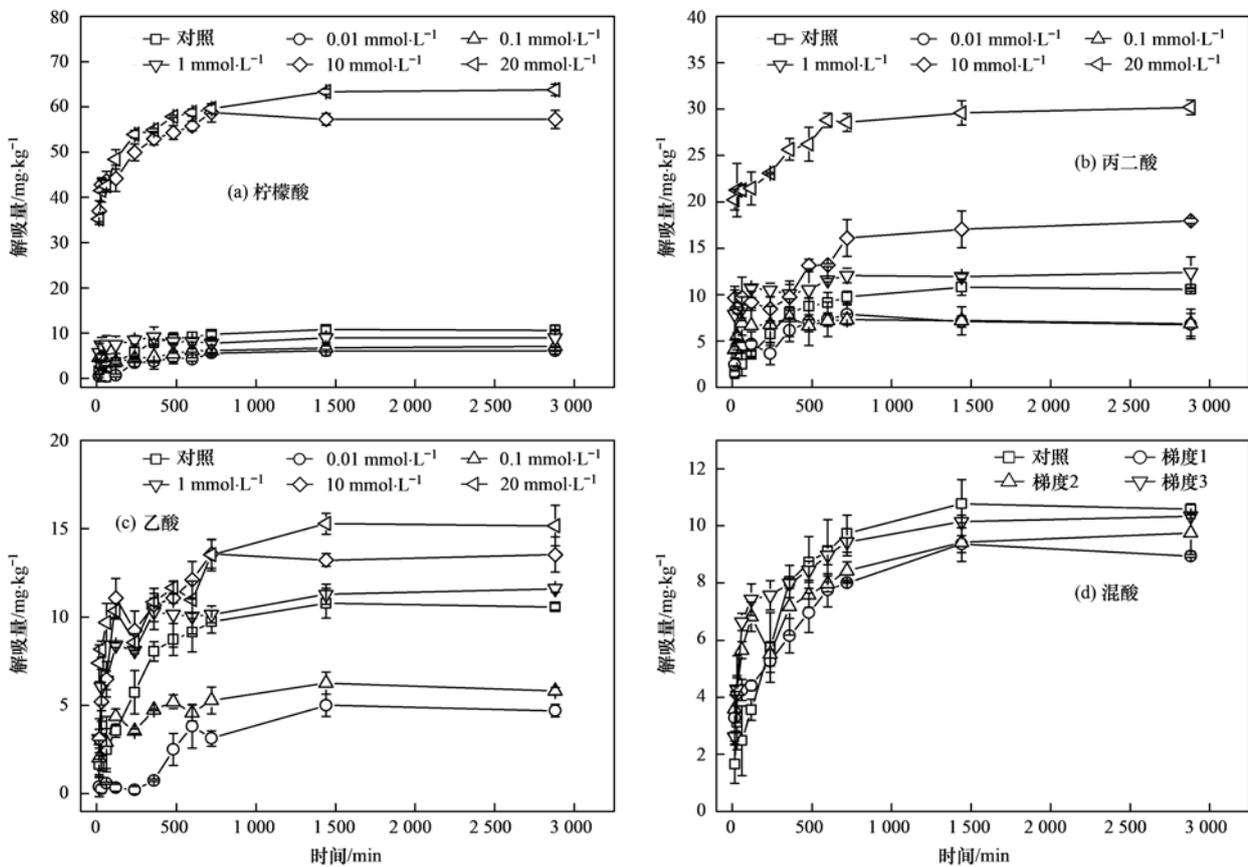


图 1 低分子量有机酸对消落带土壤中铅的解吸动力学曲线

Fig. 1 Desorption kinetics curves of Pb in the soil of the WLFZ by LMWOAs

对于混酸而言,随着混酸浓度的提高,消落带土壤中铅的解吸量也随之加大,但其解吸量增加幅度不明显,且均低于对照的解吸量,说明当土壤中 Pb 的浓度较高时,植物根系虽会增加所分泌的有机酸含量和种类,但在消落带土壤中所起作用作用是促进土壤对铅的吸附. 将混酸 1、混酸 2、混酸 3 分别和 0.1 mmol·L⁻¹ 的乙酸相比,可以看到,3 种混酸的解吸量均高于 0.1 mmol·L⁻¹ 的乙酸,说明在混酸中虽

然柠檬酸、丙二酸含量低,但是对消落带土壤中 Pb 的解吸贡献率远大于乙酸.

有机酸种类不同,对消落带土壤中铅的解吸量也不同. 当有机酸浓度 ≤ 1 mmol·L⁻¹ 时,丙二酸的解吸量为最高,而当有机酸浓度 > 1 mmol·L⁻¹ 时,柠檬酸对 Pb 的解吸量大于丙二酸和乙酸. 当所加有机酸的浓度较小时,由于丙二酸的解离常数 pK_a = 2.85 小于柠檬酸 pK_a = 3.13,小于乙酸 pK_a = 4.76,

丙二酸与柠檬酸、乙酸相比,更易离解出质子和有机酸根,且其酸性更大,会使土壤铁铝氧化物固定的重金属以及和腐殖质结合的重金属重新活化,使土壤中 Pb 的解吸量增加^[36]。随着有机酸浓度的增加,3 种有机酸对 Pb 的解吸量的大小顺序为:柠檬酸 > 丙二酸 > 乙酸。由于柠檬酸有 3 个羧基、一个羟基,在同等浓度下,其配位基团的种类、数量都大于其余两种酸,而且柠檬酸与铅的配合物稳定常数大于丙二酸和乙酸,从而柠檬酸对土壤中 Pb 的络合作用更明显。

2.3 LMWOAs 对消落带土壤中 Pb 的解吸速率影响

LMWOAs 对消落带土壤中 Pb 的解吸速率与时间关系见图 2。在反应初期,解吸速率急剧下降,随着时间的增加,LMWOAs 对 Pb 的解吸速率不断降低最后缓慢趋近于零,且解吸速率随着有机酸含量的增加而增加。LMWOAs 对 Pb 的解吸反应分为两个阶段:快反应与慢反应,0 ~ 240 min 为快反应阶段,解吸速率快,随时间的变化也大;240 min 后为慢反应阶段,解吸速率慢,随时间的变化小。由于静电吸附态 Pb 可被碱金属或碱土金属盐溶液解吸且解吸速率较快,而专性吸附态 Pb 不易被解吸,所以

解吸动力学的快反应阶段主要为静电吸附态 Pb 的解吸,而慢反应阶段以专性吸附态 Pb 的解吸为主^[37];也有研究认为^[38],重金属既可以吸附于土壤的低能量吸附位点,也可以吸附于土壤的高吸附位点,快反应阶段解吸的 Pb 主要来自于土壤表面的低能量吸附位点,而慢反应阶段解吸的 Pb 来自于土壤的高能量吸附位点。在 240 min 处柠檬酸、丙二酸、乙酸和混酸在各浓度下的平均解吸量分别是平衡解吸量的 77%、72%、52% 和 63%,说明 Pb 在消落带紫色潮土中以静电吸附态为主或者是主要吸附于土壤的低能量吸附位点。同时,可以看出 3 种有机酸对 Pb 的解吸速率由大到小为:柠檬酸 > 丙二酸 > 乙酸,这是因为柠檬酸为三羧酸,能提供 3 个羧基和一个羟基,而丙二酸能提供两个羧基,乙酸只有一个羧基,在同等浓度下,其配位能力都低于柠檬酸;且 LMWOAs 含量越高,解吸速率越快,当柠檬酸含量为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,最初的解吸速率高达 $2.463 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{min})^{-1}$,而当柠檬酸含量为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可以观察到其解吸速率只是略高于 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的解吸速率,说明当 LMWOAs 浓度高于 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,土壤溶液中已有足够多的未成键官

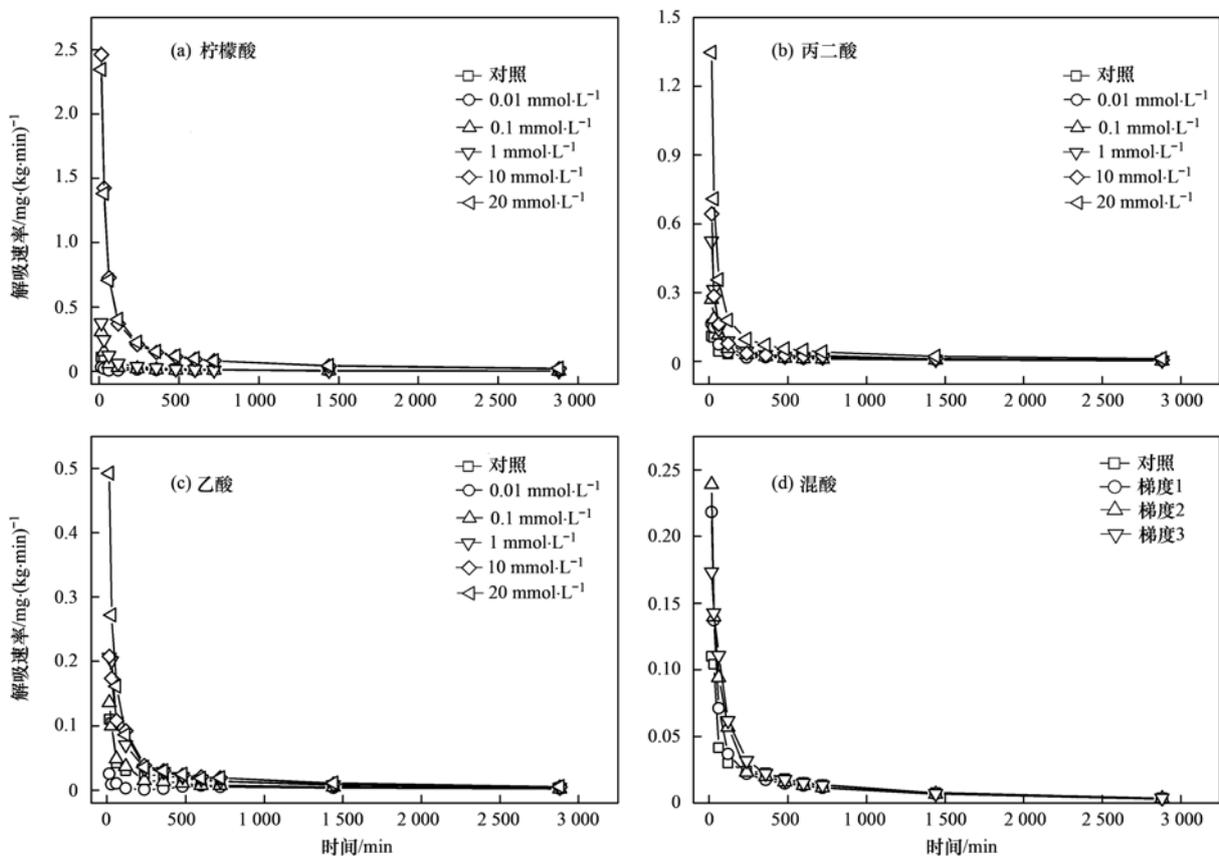


图 2 铅的解吸速率与时间的关系曲线

Fig. 2 Relation curves between the desorption rate of Pb and time

能团和游离的金属离子发生络合作用。

2.4 LMWOAs 对消落带土壤中 Pb 的解吸动力学方程拟合

LMWOAs 对消落带土壤中 Pb 的解吸行为通过 4 种动力学方程进行拟合, 结果见表 2。结果表明, 除了准二级动力学方程对 $0.01 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乙酸解吸 Pb 的拟合、抛物线方程对 $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的丙二酸解吸 Pb 的拟合外, 4 种动力学方程对 LMWOAs 解吸消落带土壤中 Pb 的拟合结果均达到了显著、极显著水平, 即 3 种 LMWOAs 以及 3 种不同浓度的混酸对土壤中 Pb 的解吸均可以用 4 种动力学方程

进行描述。结合相关系数和标准误差的大小可知, 准二级动力学方程的拟合效果最佳, 其次为双常数方程、Elovich 方程, 抛物线方程拟合效果次之。说明 LMWOAs 对消落带土壤中 Pb 的解吸是以化学过程为主, 也伴随着非均相扩散和颗粒内扩散的影响^[39], 这是因为 LMWOAs 的加入会给土壤溶液提供大量的羧基、羟基活性基团, 会和土壤中的 Pb 发生络合作用, 有机酸也会解离出质子, 和重金属发生质子交换作用等一系列的化学过程, 同时, 由于土壤的非均一性, 这也就造成对 Pb 的解吸能力的不均性和复杂性。

表 2 铅解吸动力学方程的拟合特征¹⁾

Table 2 Fitting characteristics of desorption kinetic equation of Pb

有机酸种类	浓度梯度 / $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	准二级动力学方程 $t/y = A + Bt$		双常数方程 $\ln y = A + B\ln t$		Elovich 方程 $y = A + B\ln t$		抛物线方程 $y/y_{\max} = A + Bt^{1/2}$	
		<i>r</i>	SE	<i>r</i>	SE	<i>r</i>	SE	<i>r</i>	SE
对照	0	0.997 **	0.002	0.954 **	0.041	0.959 **	0.202	0.880 **	0.003
	0.01	0.921 **	0.019	0.916 **	0.093	0.942 **	0.160	0.888 **	0.004
	0.1	0.998 **	0.003	0.753 **	0.033	0.784 **	0.157	0.871 **	0.002
柠檬酸	1	0.999 **	0.002	0.828 **	0.016	0.833 **	0.112	0.698 **	0.002
	10	1.000 **	0.000	0.954 **	0.009	0.956 **	0.441	0.827 **	0.002
	20	1.000 **	0.000	0.979 **	0.008	0.988 **	0.301	0.875 **	0.002
	0.01	0.996 **	0.004	0.840 **	0.041	0.843 **	0.196	0.718 *	0.004
	0.1	1.000 **	0.001	0.746 **	0.024	0.755 **	0.134	0.518	0.003
丙二酸	1	0.999 **	0.001	0.916 **	0.012	0.921 **	0.118	0.846 **	0.001
	10	0.993 **	0.002	0.819 **	0.034	0.824 **	0.417	0.904 **	0.002
	20	1.000 **	0.000	0.949 **	0.010	0.944 **	0.257	0.910 **	0.001
	0.01	0.234	0.126	0.816 **	0.149	0.840 **	0.212	0.892 **	0.004
	0.1	0.997 **	0.004	0.936 **	0.025	0.940 **	0.093	0.858 **	0.002
乙酸	1	0.999 **	0.001	0.911 **	0.033	0.962 **	0.145	0.830 **	0.003
	10	0.999 **	0.001	0.917 **	0.039	0.946 **	0.237	0.808 **	0.003
	20	0.996 **	0.002	0.917 **	0.020	0.903 **	0.235	0.917 **	0.002
	梯度 1	0.997 **	0.003	0.971 **	0.018	0.954 **	0.129	0.922 **	0.002
混酸	梯度 2	0.998 **	0.002	0.956 **	0.019	0.963 **	0.112	0.905 **	0.002
	梯度 3	0.999 **	0.001	0.913 **	0.035	0.967 **	0.124	0.839 **	0.003

1) *y* 为 Pb 的解吸量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); *t* 为时间 (min); *r* 为相关系数; SE 为标准误差; * 表示 $P < 0.05$ 显著水平; ** 表示 $P < 0.01$ 极显著水平

3 结论

(1) 通过水培实验测得狗牙根根系分泌的 LMWOAs 种类、含量均大于稗草, 主要有柠檬酸、丙二酸、苹果酸、乙酸, 且乙酸含量最高, 狗牙根根系还检测到草酸和丁二酸; 而在狗牙根和稗草根际土中均检测到柠檬酸、丙二酸、乙酸。

(2) LMWOAs 在消落带土壤中含量低 ($\leq 1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 抑制土壤对 Pb 的解吸, 有机酸解吸量由高到低为丙二酸 > 柠檬酸 > 乙酸; 含量高 ($> 1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 促进土壤对 Pb 的解吸, 有机酸解吸量由高到低为柠檬酸 > 丙二酸 > 乙酸。

(3) 当消落带土壤中含 Pb 量约为 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 所模拟的消落带优势植物根系分泌的混酸会促进消落带土壤对 Pb 的吸附。

(4) LMWOAs 对消落带土壤中 Pb 的解吸是以化学过程为主, 同时, 也伴随着非均相扩散和颗粒内扩散的影响, 是一个复杂的动力学过程。解吸动力学方程拟合效果由大到小为: 准二级动力学方程 > 双常数方程 > Elovich 方程 > 抛物线方程。

参考文献:

- [1] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorge Reservoir, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,

- 191(1-3): 366-372.
- [2] 王业春, 雷波, 张晨. 三峡库区消落带不同水位高程植被和土壤特征差异[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 206-212.
Wang Y C, Lei B, Zhang S. Differences in vegetation and soil characteristics at different water-level altitudes in the drawdown areas of Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(2): 206-212.
- [3] 梁丽, 王永敏, 李先源, 等. 三峡水库消落带植物汞的分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4103-4111.
Liang L, Wang Y M, Li X Y, *et al.* Distribution of mercury in plants at water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4103-4111.
- [4] Ryan P R, Delhaize E, Jones D L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2001, **52**(1): 527-560.
- [5] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere-a critical review[J]. Plant and Soil, 1998, **205**(1): 25-44.
- [6] 丁永祯, 李志安, 邹碧. 土壤低分子量有机酸及其生态功能[J]. 土壤, 2005, **37**(3): 243-250.
Ding Y Z, Li Z A, Zou B. Low-molecular-weight organic acids and their ecological roles in soil[J]. Soils, 2005, **37**(3): 243-250.
- [7] Debela F, Arocena J M, Thring R W, *et al.* Organic acid-induced release of lead from pyromorphite and its relevance to reclamation of Pb-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2010, **80**(4): 450-456.
- [8] Jiang H, Li T Q, Han X, *et al.* Effects of pH and low molecular weight organic acids on competitive adsorption and desorption of cadmium and lead in paddy soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(10): 6325-6335.
- [9] Xiao M, Wu F C. A review of environmental characteristics and effects of low-molecular weight organic acids in the surface ecosystem[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(5): 935-954.
- [10] Xu R K, Zhao A Z, Ji G L. Effect of low-molecular-weight organic anions on surface charge of variable charge soils [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, **264**(2): 322-326.
- [11] 游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 等. 低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 173-179.
You R, Liang L, Qin C Q, *et al.* Effect of low molecular weight organic acids on the chemical speciation and activity of mercury in the soils of the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 173-179.
- [12] Evangelou M W H, Ebel M, Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents[J]. Chemosphere, 2007, **68**(6): 989-1003.
- [13] Rodríguez-Estival J, Barasona J A, Mateo R. Blood Pb and δ -ALAD inhibition in cattle and sheep from a Pb-polluted mining area[J]. Environmental Pollution, 2012, **160**: 118-124.
- [14] Martínez-Haro M, Green A J, Mateo R. Effects of lead exposure on oxidative stress biomarkers and plasma biochemistry in waterbirds in the field[J]. Environmental Research, 2011, **111**(4): 530-538.
- [15] Gao Q, Li Y, Cheng Q Y, *et al.* Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013 [J]. Water Research, 2016, **92**: 262-274.
- [16] 梁丽, 王永敏, 张成, 等. 三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 955-962.
Liang L, Wang Y M, Zhang C, *et al.* Effect of soil and dominant plants on mercury speciation in soil and water system of Water-Level-Fluctuation zone in the Three Gorges Area [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 955-962.
- [17] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1035-1039.
Ma L M, Zhang M, Teng Y H, *et al.* Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- [18] 覃蔡清, 梁丽, 游蕊, 等. 柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4494-4500.
Qin C Q, Liang L, You R, *et al.* Effects of citric acid on activation and methylation of mercury in the soils of water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4494-4500.
- [19] 杨茜, 蒋珍茂, 石艳, 等. 低分子量有机酸对三峡库区消落带典型土壤磷素淋溶迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(1): 126-131.
Yang X, Jiang Z M, Shi Y, *et al.* Effect of low molecular weight organic acids on phosphorus leaching from typical soils in water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(1): 126-131.
- [20] 罗燕, 樊卫国. 不同施磷水平下 4 种柑橘砧木的根际土壤有机酸、微生物及酶活性[J]. 中国农业科学, 2013, **47**(5): 955-967.
Luo Y, Fan W G. Organic acid content, microbial quantity and enzyme activity in rhizosphere soil of four citrus rootstocks under different phosphorus levels [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, **47**(5): 955-967.
- [21] GB 15168-1995, 土壤环境质量标准[S].
GB 15168-1995, Environmental quality standard for soils[S].
- [22] Techer D, D'Innocenzo M, Laval-Gilly P, *et al.* Assessment of *Miscanthus* \times *giganteus* secondary root metabolites for the biostimulation of PAH-utilizing soil bacteria [J]. Applied Soil Ecology, 2012, **62**: 142-146.
- [23] 兰忠明, 林新坚, 张伟光, 等. 缺磷对紫云英根系分泌物产生及难溶性磷活化的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **45**(8): 1521-1531.
Lan Z M, Lin X J, Zhang W G, *et al.* Effect of P deficiency on the emergence of *Astragalus* L. root exudates and mobilization of sparingly soluble phosphorus [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **45**(8): 1521-1531.
- [24] 徐国伟, 李帅, 赵永芳, 等. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究[J]. 草业学报, 2014, **23**(2): 140-146.

- Xu G W, Li S, Zhao Y F, *et al.* Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on root secretion and nitrogen utilization of rice[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, **23**(2): 140-146.
- [25] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 等. 间作小麦蚕豆不同生长期根际有机酸和酚酸变化[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(3): 685-693.
- Xiao J X, Zheng Y, Tang L, *et al.* Changes in organic and phenolic acids in rhizosphere of interplanted wheat and faba bean with growth stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 685-693.
- [26] 乔冬梅. 基于黑麦草根系分泌有机酸的铅污染修复机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. 54-60.
- Qiao D M. Phytoremediation mechanism of lead pollution base on organic acid exudation from ryegrass root[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. 54-60.
- [27] 王强, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响[J]. *自然资源学报*, 2011, **26**(10): 1680-1693.
- Wang Q, Yuan X Z, Liu H, *et al.* Effect of initial impoundment on the vegetation and species diversity in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(10): 1680-1693.
- [28] 穆建平. 三峡库区消落带植被的生态学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. 11-27.
- Mu J P. Ecological studies of vegetation in Three Gorges Reservoir hydro-fluctuation zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. 11-27.
- [29] 曾宗梁. 铅对鱼腥草根系生理的影响与鱼腥草对铅的抗性机理研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007. 26-29.
- Zeng Z L. Study on effects of lead on root system physiology of *Houttuynia cordata* Thunb and resistance mechanism of it [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007. 26-29.
- [30] 杨菊云. 根系分泌物对苔草铁膜形成及铅胁迫下对根际环境的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2014. 22-25.
- Yang J Y. Impact of root exudates of *Carex Cinerascens* on iron plaque formation and the rhizosphere under lead stress [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. 22-25.
- [31] 乔冬梅, 庞鸿宾, 齐学斌, 等. 不同质量浓度铅对黑麦草根系分泌物和铅吸收富集的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, **31**(2): 43-47.
- Qiao D M, Pang H B, Qi X B, *et al.* The effect of different concentration of Pb^{2+} on root exudates and Pb^{2+} accumulation of ryegrass[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, **31**(2): 43-47.
- [32] Ström L, Owen A G, Godbold D L, *et al.* Organic acid behaviour in a calcareous soil: sorption reactions and biodegradation rates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(15): 2125-2133.
- [33] Huang P M. Soil mineral-organic matter--microorganism interactions: fundamentals and impacts [J]. *Advances in Agronomy*, 2004, **82**: 391-472.
- [34] Ruby M V, Davis A, Kempton J H, *et al.* Lead bioavailability-dissolution kinetics under simulated gastric conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(6): 1242-1248.
- [35] 刘江, 江韬, 黄容, 等. 小分子有机酸对紫色土及其溶液中Pb的赋存影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1523-1530.
- Liu J, Jiang T, Huang R, *et al.* Effects of low-molecular-weight organic acids on the speciation of Pb in purple soil and soil solution [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1523-1530.
- [36] 许端平, 李晓波, 孙璐. 有机酸对土壤中Pb和Cd淋洗动力学特征及去除机理[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(3): 261-266.
- Xu D P, Li X B, Sun L. Washing kinetics and mechanism of removing Pb and Cd from the contaminated soil with the organic acids[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(3): 261-266.
- [37] 谢丹, 徐仁扣, 蒋新, 等. 2种水稻土中Cu(II)和Pb(II)的解吸动力学[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, **22**(3): 65-69.
- Xie D, Xu R K, Jiang X, *et al.* Desorption kinetics of Cu(II) and Pb(II) in two paddy soils[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, **22**(3): 65-69.
- [38] Kandpal G, Srivastava P C, Ram B. Kinetics of desorption of heavy metals from polluted soils: influence of soil type and metal source[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, **161**(1-4): 353-363.
- [39] Aharoni C, Levinson S, Ravina I, *et al.* Kinetics of soil chemical reactions: relationships between empirical equations and diffusion models[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**(5): 1307-1312.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172