

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                           |                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 .....                                                | 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935) |
| 北京大气 PM <sub>2.5</sub> 与惰性 SiO <sub>2</sub> 的生物毒性比较 .....                 | 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)                             |
| APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 .....                                      | 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)                  |
| 2000~2014 年北京市 SO <sub>2</sub> 时空分布及一次污染过程分析 .....                        | 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)          |
| 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 .....                                     | 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)           |
| 长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 .....                                                | 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)           |
| 珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 .....                                                 | 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)                                  |
| 春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 .....                                              | 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)                                |
| 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 .....                                                | 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)                        |
| 大辽河主要污染源营养盐输入特征 .....                                                     | 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)         |
| 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 .....                                       | 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)                            |
| 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 .....                                          | 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)               |
| 周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 .....                                        | 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)             |
| 华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 .....                                        | 孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)                            |
| 某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 .....                                          | 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)                       |
| 乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 .....                                             | 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)                    |
| 青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 .....                                              | 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)    |
| 多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配 .....                                                | 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)                                |
| 降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 .....                                           | 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)          |
| 重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 .....                                           | 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)                    |
| 三峡水库消落带植物汞的分布特征 .....                                                     | 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)               |
| 物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 .....                                                | 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)                         |
| 超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 .....                                                | 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)                    |
| 载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 .....                                                  | 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)                      |
| TiO <sub>2</sub> 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 .....                                   | 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)                   |
| 单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 .....                                               | 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)                                 |
| 间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 .....                                         | 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)         |
| 单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 .....                                        | 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)                  |
| 水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 .....                                          | 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)                           |
| 氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 .....                                                    | 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)                         |
| 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 .....                                                 | 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)                        |
| 同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 .....                                            | 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)               |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 .....               | 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)                     |
| ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 .....                                 | 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)                  |
| 活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 .....                                                  | 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202) |
| 温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 .....                                          | 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)                 |
| 污染场地修复技术筛选方法及应用 .....                                                     | 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)                   |
| 基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评估与案例分析 .....                                  | 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)                     |
| 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评估 .....                                                 | 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)                       |
| 缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 .....                                          | 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)                                |
| 不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 .....                                          | 兰木岭, 高明 (4252)                                      |
| 生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 .....                                                  | 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)             |
| 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 .....                                           | 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)                  |
| 组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 .....                                            | 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)      |
| 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 .....                                              | 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)                                 |
| 大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 .....                                         | 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)                   |
| 覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 .....                                                | 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)                   |
| 阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能 .....                                     | 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)                                   |
| 应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚 .....                                          | 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)                                  |
| 《环境科学》征订启事 (4224)      《环境科学》征稿简则 (4318)      信息 (4080, 4173, 4290, 4301) |                                                     |

# 组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究

朱维<sup>1</sup>, 刘丽<sup>1,2</sup>, 吴燕明<sup>1</sup>, 周航<sup>1</sup>, 邓贵友<sup>1</sup>, 杨文弢<sup>1</sup>, 彭佩钦<sup>1</sup>, 曾敏<sup>1</sup>, 廖柏寒<sup>1\*</sup>

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 长沙环境保护职业技术学院, 长沙 410004)

**摘要:**以组配改良剂LS(石灰石:海泡石=2:1)为试验材料,通过对湖南某矿区附近铅镉复合污染旱地土壤进行现场改良钝化,研究施加不同量的LS(0、2、4、8 g·kg<sup>-1</sup>)对茄子和苋菜植株吸收累积Pb和Cd的影响以及对Pb和Cd在2种蔬菜植株各部位间转运的调控。结果表明:①施加LS能够显著提高土壤pH,降低土壤中交换态Pb和Cd的含量。②施加LS能显著降低2种蔬菜植株各部位中Pb和Cd的含量。LS施加量为2~8 g·kg<sup>-1</sup>时,茄子果实中Pb和Cd的含量分别降低44.7%~78.6%和36.0%~78.7%;苋菜植株茎叶中Pb和Cd的含量分别降低45.8%~59.1%和40.0%~87.2%。③LS的施加降低了2种蔬菜植株各部位间Pb和Cd的转运系数。2种蔬菜植株在根-茎-果实间或根-茎叶间转运Cd的能力大于Pb,且施加LS各处理下,同种蔬菜相同部位对Pb和Cd的转运能力大小关系保持不变。

**关键词:**组配改良剂; 土壤-蔬菜系统; 铅镉; 转运系数; 场地研究

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4277-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.044

## *In-situ* Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System

ZHU Wei<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1,2</sup>, WU Yan-ming<sup>1</sup>, ZHOU Hang<sup>1</sup>, DENG Gui-you<sup>1</sup>, YANG Wen-tao<sup>1</sup>, PENG Pei-qin<sup>1</sup>, ZENG Min<sup>1</sup>, LIAO Bo-han<sup>1\*</sup>

(1. College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Changsha Environmental Protection Vocational College, Changsha 410004, China)

**Abstract:** An *in-situ* study aiming at remedying arid land complexly polluted with Pb and Cd by using combined amendment LS (a mixture of limestone and sepiolite with a ratio of 2:1) was conducted in a mining area in southern Hunan, China. The main objectives of this study were to discuss the effects of LS application at different amounts (0, 2, 4, 8 g·kg<sup>-1</sup>) on the adsorption and accumulation of Pb and Cd in eggplant and amaranth, and to control the translocation and transportation of Pb and Cd among different parts of eggplant and amaranth. The results showed that: ① Application of LS significantly increased soil pH values and decreased contents of exchangeable Pb and Cd in soil. ② Application of LS led to an obvious reduction in contents of Pb and Cd in different parts of eggplant and amaranth. Compared with the control group, the contents of Pb and Cd in edible part of eggplant were decreased by 44.7% - 78.6% and 36.0% - 78.7%, and those reductions for amaranth were 45.8% - 59.1% and 40.0% - 87.2%, respectively, when the LS applying ratios ranged 2-8 g·kg<sup>-1</sup>. ③ Application of LS reduced the translocation factors of Pb and Cd among different parts of these two kinds of vegetables. The translocation ability of Cd among root, stem, and fruit (in eggplant) or leave (in amaranth) in these two vegetables was greater than that of Pb. However, application of LS with different amounts did not change the sequence of translocation factors of Pb and Cd among different parts of these two kinds of vegetables.

**Key words:** combined amendment; soil-vegetable system; Pb and Cd; translocation factor; *in-situ* study

近年来,由于受工业污染、采矿、冶炼及施用含重金属的农药和化肥等因素的影响,农用地土壤环境受到日益严重的重金属污染<sup>[1~3]</sup>,尤其是城郊的蔬菜地<sup>[4]</sup>。研究表明,我国菜地尤以镉(Cd)和铅(Pb)的污染最为严重<sup>[5]</sup>。蔬菜是人们的常用食品,也是重要的经济作物。在土壤-蔬菜系统中,重金属不仅会抑制蔬菜的生长,还会在根系的吸收和输送作用下被输送到蔬菜的各个器官组织中进行再分配,再通过食物链进入人体,对人体健康造成一定的危害<sup>[6,7]</sup>。研究表明<sup>[8]</sup>,施加适量的石灰能显著减少小白菜对重金属的吸收,抑制重金属在蔬菜中由地下部分向地上部分的转运。海泡石是一种具有较强

的表面吸附和离子交换能力的黏土矿物,李明德等<sup>[9]</sup>的盆栽试验结果显示,施用海泡石可降低土壤有效态Cd含量,进而降低空心菜对Cd的吸收。当前考虑用改良剂对重金属污染土壤进行综合治理的研究工作大都局限于室内试验或盆栽试验,在实际大田环境下进行实地修复的研究相对较少。此外,关于改良剂在农田-水稻方面的研究较深,而对于旱

收稿日期: 2015-05-26; 修订日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201530); 湖南省农业厅项目(湘农业联 2014-137-2); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 朱维(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属土壤污染与控制, E-mail: 15173128264@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: liaobh1020@163.com

地-蔬菜系统的研究较少. 本研究以石灰石和海泡石组配,通过野外田间试验,分析组配改良剂对重金属复合污染土壤中 Pb 和 Cd 生物有效性的影响以及对 Pb 和 Cd 在茄子和苋菜植株内迁移转运的影响,以期为我国重金属复合污染旱地修复的场地研究提供案例.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试蔬菜品种为茄子(紫红长茄,广州市绿霸种苗有限公司)、苋菜(红圆叶苋菜,湖南省冷水江市蔬菜种子分公司). 供试材料石灰石( $\text{CaCO}_3$ )是由湖南省宁乡县道林镇尚杰矿石粉厂提供的分析纯石

灰石;海泡石(主要成分是含水富镁硅酸盐)由湖南省浏阳市永和海泡石厂提供. 根据前期改良剂的筛选结果<sup>[10]</sup>,将石灰石和海泡石按 2:1 的比例混合成组配改良剂.

田间试验位于湘南某铅锌矿区附近(北纬 25°848',东经 113°807'),土地利用类型为菜地. 此区常年平均气温在 15.6~18.3℃之间,当地气候为中亚热带季风湿润气候区,平均降水量在 1 400~1 700 mm 之间. 该区由于 1985 年发生的铅锌矿区尾砂坝倒塌事件而受到较严重的重金属 Pb 和 Cd 复合污染<sup>[11,12]</sup>. 施加组配改良剂之前,用取土器采集耕作层(0~20 cm)土壤样品,然后均匀混合装入样品袋里. 土壤基本理化性质及供试材料基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤及材料基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil and materials

| 供试材料        | pH   | OM/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 重金属总量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |        |
|-------------|------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|
|             |      |                                    |                                       | Cd                                    | Pb     |
| 供试土壤        | 6.03 | 21.5                               | 13.29                                 | 2.83                                  | 627.50 |
| 石灰石         | 9.13 | —                                  | —                                     | 0.002                                 | 1.63   |
| 海泡石         | 5.54 | —                                  | —                                     | 0.004                                 | 2.75   |
| 土壤国家 II 级标准 | —    | —                                  | —                                     | 0.3                                   | 250    |

### 1.2 试验设计

每个蔬菜品种设置 4 个组配改良剂 LS 的添加量水平:0(CK:不施加改良剂)、2、4、8  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 组配改良剂均匀地撒施于土壤表面,通过多次翻耕使其与耕作层土壤充分混合,每个添加水平设置 3 个重复,每个试验样方面积为  $2\times 4\text{ m}^2$ ,总计 24 块小区,各样方中间设置田埂间隔,所有样方随机区组排列. 耕作管理措施与农民正常耕作生产保持一致. 2 种蔬菜苗均于当年 3 月下旬种植,4 月底移栽,至 7 月下旬收获.

### 1.3 测定方法和数据分析

土壤 pH 值用酸度计(pHs-3C,上海精密科学仪器有限公司)测定,固液比值为  $W(\text{固}):V(\text{液})=1:2.5$ ;土壤重金属总量测定采用王水-高氯酸消解<sup>[13]</sup>;土壤交换态重金属含量采用  $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  溶液提取;蔬菜各部位重金属总量测定采用干灰化法硝酸消解;用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP 6300,Thermo)和石墨炉原子吸收分光光度计(iCE-3500,Thermo)测定样品中 Pb 和 Cd 的浓度;所有样品分析过程中以国家标准物质土壤(GBW(E)-070009)和生物成分标准物质(GBW-10010)进行质量控制分析,同时全程做空白试验. 重金属分析试验过程中 Pb 和 Cd 的回收率为 90%~105%.

### 1.4 数据处理

应用 OriginPro 8.5 和 Excel 2010 分析数据,且数据结果均为平均值 $\pm$ 标准偏差;应用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析和 LSD 多重比较( $P<0.05$ ),检测不同处理间差异程度,进行相关数据的统计分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 LS 对 2 种蔬菜种植土壤的 pH 值及交换态 Pb 和 Cd 含量的影响

施用 LS 能显著提高 2 种蔬菜种植土壤的 pH 值,随着 LS 施用量的增加,土壤的 pH 值均逐渐升高(表 2). 与对照相比,施用 LS 2~8  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,茄子和苋菜种植土壤的 pH 值分别升高了 0.69~1.21 和 0.69~1.13 个单位. 2 种蔬菜种植土壤 pH 值各处理均与对照之间存在显著差异( $P<0.05$ ). 由表 2 可知,LS 的施加能显著降低 2 种蔬菜种植土壤中交换态 Pb 和 Cd 的含量,随着 LS 施加量的增加,土壤交换态 Pb 和 Cd 含量逐渐降低. 当 LS 的施加量为 2~8  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,种植茄子和苋菜的土壤中交换态 Pb 含量与对照相比分别降低 80.4%~87.8% 和 97.0%~98.1%,交换态 Cd 含量分别降低 38.0%~80.0% 和 73.6%~95.4%. 2 种蔬菜种植土壤各处理间交换态 Pb 含量无显著差异( $P>0.05$ ),但与

表 2 组配改良剂 LS 对土壤 pH 值及交换态 Pb 和 Cd 含量的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of the combined amendment LS on soil pH values and exchangeable contents of Pb and Cd

| LS 施加量<br>/g·kg <sup>-1</sup> | pH 值         |              | 交换态 Pb 含量/mg·kg <sup>-1</sup> |              | 交换态 Cd 含量/mg·kg <sup>-1</sup> |              |
|-------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
|                               | 茄子           | 苋菜           | 茄子                            | 苋菜           | 茄子                            | 苋菜           |
| 0                             | 5.58 ± 0.17c | 5.78 ± 0.16c | 1.07 ± 0.07a                  | 7.25 ± 2.05a | 0.50 ± 0.11a                  | 1.10 ± 0.49a |
| 2                             | 6.27 ± 0.06b | 6.47 ± 0.11b | 0.21 ± 0.05b                  | 0.22 ± 0.02b | 0.31 ± 0.18ab                 | 0.29 ± 0.04b |
| 4                             | 6.72 ± 0.11a | 6.76 ± 0.10a | 0.14 ± 0.02b                  | 0.13 ± 0.01b | 0.14 ± 0.06b                  | 0.10 ± 0.08b |
| 8                             | 6.79 ± 0.14a | 6.91 ± 0.10a | 0.13 ± 0.01b                  | 0.14 ± 0.01b | 0.10 ± 0.02b                  | 0.05 ± 0.06b |

1) 表中数据均为平均值 ± 标准差(n = 3); 同列数据后字母不同表示差异具有统计学意义(P < 0.05), 下同

对照存在显著差异(P < 0.05)。土壤交换态 Cd 的结果与交换态 Pb 的结果相似。

2.2 LS 对 2 种蔬菜植株各部位中 Pb 和 Cd 含量的影响

LS 对 2 种蔬菜各部位中 Pb 和 Cd 含量的影响见表 3。LS 的施加能有效地抑制 Pb 和 Cd 向 2 种蔬菜地上部分的迁移转运,随着 LS 施加量的增加,地上部分 Pb 和 Cd 含量均呈下降趋势。与对照相比,茄子植株茎、叶、果实中 Pb 含量降幅分别为 37.7% ~ 47.8%、44.3% ~ 81.7%、44.7% ~ 78.6%,Cd 含量降幅分别为 40.1% ~ 43.2%、36.4% ~ 80.0%、36.0% ~ 78.7%;苋菜植株茎叶(即地上部位)中 Pb 含量降幅为 45.8% ~ 59.1%,Cd 含量降幅为 40.0% ~ 87.2%。各处理 2 种蔬菜地上各部位 Pb 和 Cd 含量均与对照之间存在显著

差异(P < 0.05)。随着 LS 施加量的增加,茄子地下部分 Pb 和 Cd 含量下降不显著(P > 0.05),且出现了少许的富集现象;苋菜地下部分 Pb 和 Cd 含量有下降趋势,各处理 Cd 含量与对照之间存在显著差异(P < 0.05)。高施用量(8 g·kg<sup>-1</sup>)时,茄子和苋菜地下部分 Pb 含量均与对照之间存在显著差异(P < 0.05)。

比较 2 种蔬菜可食部位中重金属 Pb 和 Cd 含量的变化趋势可知,高施用量(8 g·kg<sup>-1</sup>)时,茄子和苋菜可食部位重金属 Pb 含量分别降低 78.6% 和 59.1%,Cd 含量分别降低 78.7% 和 87.2%,能使茄子果实中 Pb (0.093 mg·kg<sup>-1</sup>) 和苋菜茎叶中 Cd (0.195 mg·kg<sup>-1</sup>) 含量达到国家食品中污染物限量标准(G 2762-2012)(茄子 Pb ≤ 0.1 mg·kg<sup>-1</sup>; 苋菜 Cd ≤ 0.2 mg·kg<sup>-1</sup>)。

表 3 组配改良剂 LS 对蔬菜植株各部位 Pb 和 Cd 含量的影响

Table 3 Effects of the combined amendment LS on the contents of Pb and Cd in different parts of two vegetables

| 蔬菜品种 | LS 施加量<br>/g·kg <sup>-1</sup> | Pb 含量/mg·kg <sup>-1</sup> |               |               |               | Cd 含量/mg·kg <sup>-1</sup> |              |                |               |
|------|-------------------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------|----------------|---------------|
|      |                               | 地下部分                      | 地上部分          |               |               | 地下部分                      | 地上部分         |                |               |
|      |                               |                           | 茎             | 叶             | 果实            |                           | 茎            | 叶              | 果实            |
| 茄子   | 0                             | 7.47 ± 1.45a              | 2.57 ± 0.04a  | 7.78 ± 0.33a  | 0.434 ± 0.00a | 0.32 ± 0.07a              | 0.44 ± 0.05a | 0.75 ± 0.06a   | 0.216 ± 0.00a |
|      | 2                             | 9.09 ± 1.42a              | 1.60 ± 0.25ab | 4.33 ± 0.66b  | 0.240 ± 0.02b | 0.37 ± 0.01a              | 0.25 ± 0.13b | 0.48 ± 0.12b   | 0.131 ± 0.02b |
|      | 4                             | 9.17 ± 1.28a              | 1.55 ± 0.42ab | 2.75 ± 0.42c  | 0.180 ± 0.02c | 0.40 ± 0.06a              | 0.25 ± 0.05b | 0.30 ± 0.12c   | 0.063 ± 0.01c |
|      | 8                             | 6.02 ± 1.38b              | 1.34 ± 0.42b  | 1.42 ± 0.74d  | 0.093 ± 0.04d | 0.37 ± 0.12a              | 0.26 ± 0.06b | 0.16 ± 0.10c   | 0.058 ± 0.03c |
| 苋菜   | 0                             | 18.67 ± 1.90a             |               | 4.490 ± 0.40a |               | 2.62 ± 0.60a              |              | 1.518 ± 0.38a  |               |
|      | 2                             | 17.85 ± 1.30a             |               | 2.433 ± 0.34b |               | 1.83 ± 0.34b              |              | 0.912 ± 0.17ab |               |
|      | 4                             | 16.21 ± 0.92a             |               | 1.987 ± 0.30b |               | 1.31 ± 0.22c              |              | 0.603 ± 0.01bc |               |
|      | 8                             | 13.28 ± 2.79b             |               | 1.838 ± 0.43b |               | 1.07 ± 0.31c              |              | 0.195 ± 0.02c  |               |

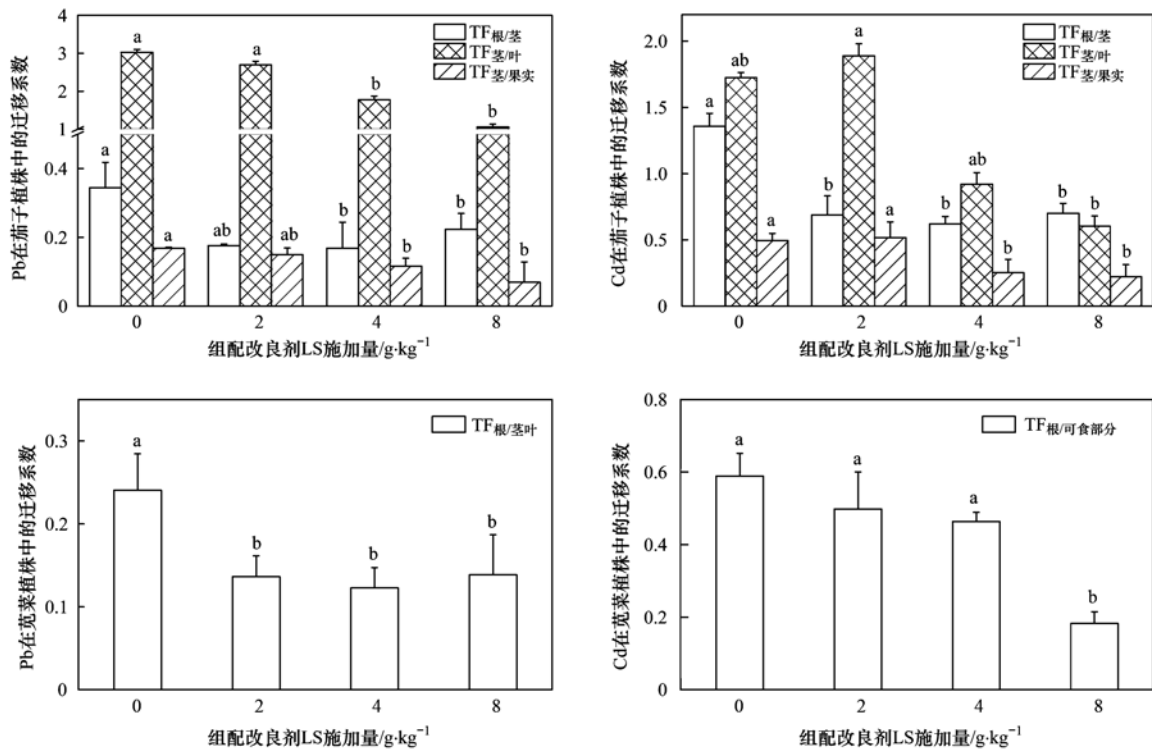
2.3 LS 对 Pb 和 Cd 在 2 种蔬菜植株各部位间转运系数的影响

转运系数 TF(translocation factor)指蔬菜后一部位中重金属含量与前一部位中重金属含量的比值(包括根系到茎、茎到叶、茎到果实以及根系到茎叶)。蔬菜各部位对重金属的转运能力差异很大,转运系数越大,表明蔬菜该部位对重金属的转运能力越强<sup>[14]</sup>。图 1 为施加 LS 各处理茄子中 Pb 和 Cd 根系到茎、茎到叶、茎到果实以及苋菜中 Pb 和 Cd 根系到茎叶的转运系数。LS 的施加降低了 2 种蔬菜

植株各部位间 Pb 和 Cd 的转运系数,说明 LS 的施加增强了根系阻隔 Pb 和 Cd 转运到茄子茎、叶、果实或苋菜茎叶的作用。施加 LS 各处理苋菜植株中 Pb 的转运系数 TF<sub>根/茎叶</sub>均与对照之间存在显著差异(P < 0.05);LS 高施加量(8 g·kg<sup>-1</sup>)时,Cd 的转运系数 TF<sub>根/茎叶</sub>才与对照之间存在显著差异(P < 0.05)。对于茄子植株,当 LS 施加量 ≥ 4 g·kg<sup>-1</sup>时,Pb 和 Cd 在其植株各部位间的转运系数分别与对照之间存在显著差异(P < 0.05)。对比茄子茎到果实以及苋菜根到茎叶的 Pb 和 Cd 转运系数可知,LS 不

同施加量下  $TF_{\text{茎/果实}} \leq TF_{\text{根/茎叶}}$  (LS 施加量为  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,对 Cd 的转运系数除外),而苋菜根系 Pb

和 Cd 含量显著高于茄子茎中 Pb 和 Cd 含量(表 3),可见,苋菜茎叶比茄子果实更易富集 Pb 和 Cd.



柱状图上不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 相同字母表示不显著

图1 LS 对 Pb 和 Cd 在 2 种蔬菜植株各部位间转运系数的影响

Fig. 1 Effects of the combined amendment LS on the translocation factors of Pb and Cd among different parts of two vegetables

#### 2.4 Pb 和 Cd 的转运系数与其土壤交换态含量及在蔬菜可食部位中含量的关系

LS 的施加能使 2 种蔬菜种植土壤中交换态 Pb 和 Cd 含量显著下降(表 2), 且导致 2 种蔬菜植株各部位间 Pb 和 Cd 的转运系数减小(图 1). 为研究 LS 施加后, 土壤交换态 Pb 和 Cd 含量对 2 种蔬菜植株各转运系数的影响, 对两者进行了相关性分析(表 4). 对于茄子植株, 其种植土壤中交换态 Pb 含量与植株  $TF_{\text{根/茎}}$ 、 $TF_{\text{茎/叶}}$ 、 $TF_{\text{茎/果实}}$  之间均存在极显著或显著的正相关关系, 相关系数  $R^2$  分别为  $0.594^{**}$ 、 $0.475^{*}$ 、 $0.371^{*}$  ( $n = 12$ ,  $R_{0.05}^2 = 0.332$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$ ); 土壤中交换态 Cd 含量与植株  $TF_{\text{根/茎}}$  之间存在显著的正相关关系, 相关系数  $R^2 = 0.468^{*}$  ( $n = 12$ ,  $R_{0.05}^2 = 0.332$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$ ), 而与  $TF_{\text{茎/叶}}$ 、 $TF_{\text{茎/果实}}$  之间不存在显著相关关系. 这说明, 由于 LS 的施加, 土壤中交换态 Pb 含量逐渐下降, 能显著降低 Pb 在茄子植株各部位间的转运能力; 土壤中交换态 Cd 含量的降低, 能有效地抑制根系将 Cd 转运到茎, 而对茎将 Cd 分别转运到叶及果实的能力的抑制效果不显著, 这可能与植株阻隔果实吸收 Cd

的主要场所发生在茎-果实界面上有关. 对于苋菜植株, 其种植土壤中交换态 Pb 含量与植株  $TF_{\text{根/茎叶}}$  之间存在极显著的正相关关系, 相关系数  $R^2 = 0.521^{**}$  ( $n = 12$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$ ), 土壤中交换态 Cd 含量与植株  $TF_{\text{根/茎叶}}$  之间不存在显著相关关系.

分别对 Pb 和 Cd 在 2 种蔬菜植株各部位间的转运系数和可食部位中对应的 Pb 和 Cd 含量进行了相关性分析(表 4). Pb 在茄子植株各部位间的转运系数  $TF_{\text{根/茎}}$ 、 $TF_{\text{茎/叶}}$ 、 $TF_{\text{茎/果实}}$  均与果实中 Pb 含量之间存在极显著或显著的正相关关系, 相关系数  $R^2$  分别为  $0.385^{*}$ 、 $0.716^{**}$ 、 $0.624^{**}$  ( $n = 12$ ,  $R_{0.05}^2 = 0.332$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$ ); Cd 在其植株的转运系数  $TF_{\text{根/茎}}$ 、 $TF_{\text{茎/果实}}$  与果实中 Cd 含量之间存在显著的正相关关系, 相关系数  $R^2$  分别为  $0.472^{*}$ 、 $0.398^{*}$  ( $n = 12$ ,  $R_{0.05}^2 = 0.332$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$ ), 而  $TF_{\text{茎/叶}}$  与果实中 Cd 含量之间不存在显著相关性, 这说明茄子果实中 Cd 含量只与 Cd 在根-茎-果实间的转运显著相关. 苋菜植株各部位间 Pb 和 Cd 的转运系数均与茎叶中相应的 Pb 和 Cd 含量间存在极显著的相关关系, 相关系数  $R^2$  分别为  $0.829^{**}$ 、 $0.729^{**}$  ( $n = 12$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$ ).



表 4 植株中重金属迁移系数与土壤交换态重金属含量、可食部位中重金属含量的关系<sup>1)</sup>  
Table 4 Correlations between translocation factors of heavy metals in vegetables and exchangeable contents of heavy metals in soil, and/or heavy metal contents in edible parts of vegetables

| 项目          | 茄子                  |                     |                     | 苋菜                  |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|             | TF <sub>根/茎</sub>   | TF <sub>茎/叶</sub>   | TF <sub>茎/果实</sub>  | TF <sub>根/茎叶</sub>  |
| 土壤交换态 Pb 含量 | 0.594 <sup>**</sup> | 0.475 <sup>*</sup>  | 0.371 <sup>*</sup>  | 0.521 <sup>**</sup> |
| 土壤交换态 Cd 含量 | 0.468 <sup>*</sup>  | 0.097               | 0.186               | 0.255               |
| 果实中 Pb 含量   | 0.385 <sup>*</sup>  | 0.716 <sup>**</sup> | 0.624 <sup>**</sup> | 0.829 <sup>**</sup> |
| 果实中 Cd 含量   | 0.472 <sup>*</sup>  | 0.248               | 0.398 <sup>*</sup>  | 0.729 <sup>**</sup> |

1) \* 和 \*\* 分别表示  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著水平,  $n = 12$ ,  $R_{0.05}^2 = 0.332$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.501$

### 3 讨论

LS 的施加能显著降低土壤交换态 Pb 和 Cd 含量(表 2), 有效地抑制 Pb 和 Cd 向 2 种蔬菜地上部分的转运(表 3). 土壤中交换态 Pb 和 Cd 的含量与土壤的 pH 值之间均呈极显著负相关关系( $R_{Pb}^2 = 0.632$ ;  $R_{Cd}^2 = 0.632$ ;  $n = 24$ ,  $R_{0.01}^2 = 0.246$ ). 一方面石灰石的强碱性能使土壤 pH 值明显上升, 这不仅可以增加土壤表面的可变负电荷而增加对重金属离子的吸附, 还能促进重金属氢氧化物和碳酸盐沉淀的生成<sup>[15,16]</sup>. 此外, pH 值的上升能导致重金属阳离子羟基态的形成, 这种形态的重金属离子与土壤吸附点位的亲和力要比自由态重金属离子强<sup>[17]</sup>. 另一方面, 海泡石是一种层链状结构的含水富镁硅酸盐黏土矿物, 具有较大的内表面积和较高的吸附性能, 层状结构单元之间含有大量的水分子和可交换的阳离子, 可以将重金属离子吸持在层间的晶架结构内, 而且海泡石八面体边缘的镁可以与土壤溶液重金属离子发生置换作用<sup>[18]</sup>, 从而降低土壤中重金属的有效性<sup>[19]</sup>.

未施加 LS 时, Pb 和 Cd 在茄子植株各部位间转运系数大小均为:  $TF_{茎/叶} > TF_{根/茎} > TF_{茎/果实}$ (图 1), 说明茄子的茎具有较强的将 Pb 和 Cd 转运到叶中的能力, 这种现象可能与茄子作物的蒸腾作用有关, 也可能与植株自我解毒作用即叶片衰老自然凋落有关<sup>[20]</sup>. 茄子植株不同部位对 Pb 的转运能力关系随着 LS 施加量的增加而保持不变, 但在 LS 高施加量( $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )时, Cd 在茄子植株各部位间转运能力关系改变为:  $TF_{根/茎} > TF_{茎/叶} > TF_{茎/果实}$ , 这与施加 LS 并不改变 Pb 在茄子植株各部位间的转运能力关系是不同的. 施加 LS 各处理下, 茄子植株根系到茎的转运系数以及茎到果实的转运系数 Cd 均明显强于 Pb, 苋菜根系将 Pb 和 Cd 转运到茎叶的能力也是  $Cd > Pb$ ; 但是, 茄子茎将 Pb 和 Cd 转运到叶的能力则相反, 是  $Pb > Cd$ (图 1). 这说明 Cd 在蔬菜根-茎-果

实或根-茎叶间的转运能力大于 Pb, 且 LS 的施加并未改变同种蔬菜相同部位对不同重金属 Pb 和 Cd 的转运能力大小. 这可能是由于 Cd 能与土壤中的  $\text{OH}^-$  和  $\text{Cl}^-$  形成易于移动的络离子而进入植物体内<sup>[21]</sup>, 而 Pb 进入土壤后易与土壤中有有机物和矿物质相结合, 形成难溶物质性铅化合物, 使得吸收进入植物体内的 Pb 主要累积在根部, 难以向茎、叶移动<sup>[22~24]</sup>. 未施加 LS 时, 茄子植株 Cd 的  $TF_{根/茎}$  大于 1, 说明根系吸收 Cd 后, 对其转运到茎基本没有阻隔作用, 这与李非里等<sup>[25]</sup>研究结果一致; 施加 LS 后,  $TF_{根/茎}$  均小于 1, 可知 LS 的施加显著增强了茄子根系对 Cd 转运到茎的阻隔作用.

### 4 结论

(1) LS 的施加能够显著提高 2 种蔬菜种植土壤的 pH 值, 降低其交换态 Pb 和 Cd 的含量; 施加量  $2 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 能使茄子种植土壤交换态 Pb 和 Cd 含量分别降低 80.4% ~ 87.8%、38.0% ~ 80.0%, 苋菜种植土壤交换态 Pb 和 Cd 含量分别降低 97.0% ~ 98.1%、73.6% ~ 95.4%.

(2) LS 的施加能够不同程度地抑制重金属 Pb 和 Cd 向 2 种蔬菜植株各部位间的转运. 施加量  $2 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 茄子果实中 Pb 和 Cd 的含量分别降低 44.7% ~ 78.6%、36.0% ~ 78.7%; 苋菜植株茎叶中 Pb 和 Cd 的含量分别降低 45.8% ~ 59.1%、40.0% ~ 87.2%.

(3) LS 的施加降低了 2 种蔬菜植株各部位间 Pb 和 Cd 的转运系数. 茄子植株不同部位对 Pb 和 Cd 的转运能力不同, 转运系数顺序一般为  $TF_{茎/叶} > TF_{根/茎} > TF_{茎/果实}$ , 说明茎具有较强的将 Pb 和 Cd 转运到叶中的能力; 2 种蔬菜植株在根-茎-果实间或根-茎叶间转运不同重金属的能力大小为  $Cd > Pb$ , 且 LS 各处理下, 同种蔬菜相同部位对不同重金属 Pb 和 Cd 的转运能力大小关系保持不变.

(4) 土壤中交换态 Pb 含量与 Pb 在 2 种蔬菜植

株中的各转运系数之间存在显著的正相关性;土壤中交换态 Cd 含量与茄子从根系向茎和苋菜从根系到茎叶的转运系数之间均存在显著的正相关性. 2 种蔬菜可食部位中 Pb 和 Cd 含量与其在根-茎-果实间或根-茎叶间的转运系数存在显著相关性.

#### 参考文献:

- [1] 王多加, 金肇熙, 钟娇娥, 等. 深圳市永久性菜地蔬菜重金属污染状况分析[J]. 广东农业科学, 2000, (1): 20-22.
- [2] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 366-370.
- [3] Cao H B, Chen J J, Zhang J, *et al.* Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(11): 1792-1799.
- [4] 沈彤, 盛穗, 马赛平. 长沙市蔬菜中铅、镉含量状况及控制对策[J]. 湖南农业科学, 2005, (4): 62-63.
- [5] 孙铁珩, 李培军, 周启星. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 14-84.
- [6] Li Z W, Li L Q, Pan G X, *et al.* Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: soil type versus genotype effects[J]. Plant and Soil, 2005, 271(1-2): 165-173.
- [7] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79-84.
- [8] 肖细元, 杨森, 郭朝晖, 等. 改良剂对污染土壤上蔬菜生长及吸收重金属的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 41-46.
- [9] 李明德, 童潜明, 汤海涛, 等. 海泡石对镉污染土壤改良效果的研究[J]. 土壤肥料, 2005, (1): 42-44.
- [10] 曾卉, 徐超, 周航, 等. 几种固化剂组配修复重金属污染土壤[J]. 环境化学, 2012, 31(9): 1368-1374.
- [11] Liu H Y, Probst A, Liao B H, *et al.* Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. Science of the Total Environment, 2005, 339(1-3): 153-166.
- [12] Lei M, Zhang Y, Khan S, *et al.* Pollution, fractionation, and mobility of Pb, Cd, Cu, and Zn in garden and paddy soils from a Pb/Zn mining area [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 168(1-4): 215-222.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 334-336.
- [14] 吴慧梅. 大棚种植方式对蔬菜中重金属迁移及富集的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [15] 徐明岗, 张青, 曾希柏. 改良剂对黄泥土镉锌复合污染修复效应与机理研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1361-1366.
- [16] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 437-444.
- [17] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1241-1249.
- [18] 丁永祯, 宋正国, 唐世荣, 等. 大田条件下不同钝化剂对空心菜吸收镉的影响及机理[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1758-1763.
- [19] 王林, 徐应明, 孙扬, 等. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2093-2098.
- [20] 周航. 组配改良剂在稻田系统中重金属迁移累积的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [21] 袁波, 傅瓦利, 蓝家程, 等. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 130-134.
- [22] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469(9): 843-853.
- [23] 吕建波, 徐应明, 贾堤, 等. 土壤镉、铅污染对油菜生长行为及重金属累积效应的影响[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(2): 107-110.
- [24] 袁列江, 杨梦昕, 李萌立, 等. 湘江长沙段叶菜类蔬菜重金属富集规律及污染评价[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 59-63.
- [25] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 52-56.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                           |                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing .....                                                                   | LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)     |
| Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM <sub>2.5</sub> from Beijing and Inert Particle SiO <sub>2</sub> .....                 | LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)                 |
| Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...                                 | GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)            |
| Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO <sub>2</sub> and An Ambient SO <sub>2</sub> Pollution Process in Beijing During 2000-2014 .....                    | CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)       |
| Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS) .....                  | ..... ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)         |
| Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta .....                                                                                   | ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)                 |
| Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta .....                                                          | LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)                                   |
| Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring .....                                         | LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)                     |
| Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin .....                                                                        | PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)              |
| Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River .....                                           | MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)              |
| Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area .....                 | ..... ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021) |
| Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China .....                  | ..... LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)      |
| Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms .....                                               | WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)              |
| Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County .....                           | ..... KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)       |
| Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City .....                                          | CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)             |
| Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay .....                                                            | HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)                       |
| Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River .....                                                                              | LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)       |
| Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River .....                                                                             | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)                       |
| Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events .....                                        | JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)            |
| Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing ..... | ..... REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)     |
| Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....                                                                     | LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)             |
| Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance .....                                                       | WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)                  |
| Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System .....                                                                        | WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)              |
| Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon .....                                                                   | WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)     |
| Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO <sub>2</sub> .....                                                                             | CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)                 |
| Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater .....                                                                    | ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)                                |
| Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater .....                                           | DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)                   |
| Advanced Treatment of Incineration Leachate with O <sub>3</sub> -BAC and Double O <sub>3</sub> -BAC .....                                                                 | DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)                  |
| Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier .....                                                                 | WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)          |
| Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule .....                                                                                                              | CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)               |
| Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage .....                                                                                | ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)            |
| Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics .....                              | LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)                         |
| Effect of HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process .....                                                       | LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)             |
| Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor .....                                                                 | WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)             |
| Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning .....                                                                               | XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)                   |
| Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community .....                                                                 | XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)                |
| Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application .....                                                           | BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)                      |
| Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study .....                                                                   | YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)                    |
| Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment .....                                                                      | ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)      |
| Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain .....                                                | LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)                     |
| Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming .....                                             | LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)                                            |
| Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage .....                                                  | DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)            |
| Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance .....                                      | YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)            |
| <i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System .....                                                | ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)                      |
| Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains .....                                                                   | WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)                              |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes .....                                                              | WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)        |
| Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover .....                                                 | XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)          |
| Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells .....                                         | MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)                                    |
| Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection .....                                                             | LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)                                 |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

( HUANJING KEXUE )

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行