

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

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

|                                                        |                                                |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| PM <sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 .....          | 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)                           |
| 北京地区近35年大气污染扩散条件变化 .....                               | 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)                      |
| 北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 .....                           | 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)                     |
| 北京山谷风环流特征分析及其对PM <sub>2.5</sub> 浓度的影响 .....            | 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)                        |
| 北京市建筑施工扬尘排放特征 .....                                    | 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)                  |
| 生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 .....                              | 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)                |
| 广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O <sub>3</sub> 与SOA的生成潜势 .....     | 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)                            |
| 南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 .....                                 | 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)                    |
| 亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 .....                            | 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)                 |
| 宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 .....                         | 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)          |
| 垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 .....                           | 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)    |
| 重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 .....                                  | 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)                |
| 轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 .....                | 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)                     |
| 不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 .....                           | 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)                       |
| 西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义 .....                             | 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)                        |
| 基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 .....                   | 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)                         |
| 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 .....                      | 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326) |
| 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 .....                              | 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)                    |
| 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 .....                          | 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)                   |
| 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 .....                          | 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)            |
| 海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 .....                 | 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)                    |
| 两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 .....                           | 王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)                            |
| 高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验 .....                           | 金建荣,李田,时珍宝(2379)                               |
| 稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 .....                           | 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)                         |
| 超声、紫外增强H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI降解磺胺甲基嘧啶 ..... | 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)                           |
| 不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 .....                         | 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)                |
| 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 .....                         | 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)               |
| 组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 .....                          | 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)                          |
| 温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 .....                                 | 张玲,彭党聪,常蝶(2429)                                |
| 海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 .....                              | 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)                        |
| 不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 .....                          | 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)                   |
| 磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 .....                             | 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)                    |
| 碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 .....                            | 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)            |
| 外源Ca <sup>2+</sup> 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 .....         | 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)                              |
| 膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 .....                               | 张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)                   |
| 反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 .....                            | 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)                       |
| 硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 .....                         | 李欢,王磊,王亚楠(2496)                                |
| 关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 .....                            | 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)                        |
| 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 .....                       | 陈秀端,卢新卫(2513)                                  |
| 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 .....                      | 佟瑞鹏,杨校毅(2522)                                  |
| Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制 .....                              | 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)    |
| 典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 .....                            | 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)                     |
| 复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 .....                            | 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)                   |
| 两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 .....                      | 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)                  |
| 大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 .....                            | 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)                    |
| 源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 .....                    | 杨宁伟,毕二平(2568)                                  |
| 地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 .....                       | 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)                     |
| 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N <sub>2</sub> O排放的影响 .....   | 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)                  |
| 基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 .....                     | 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)                         |
| 广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 .....                          | 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)          |
| 活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 .....                           | 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏芫,周俊(2607)            |
| 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 .....                       | 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)                              |
| 《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384) |                                                |

# 复合改良剂对 Cd 污染稻田早晚稻产地修复效果

陈立伟, 杨文弢, 辜娇峰, 周航, 高子翔, 廖柏寒\*

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:** 选取湖南省长沙市北山镇某中重度 Cd 污染稻田, 连续种植早晚两季水稻, 研究复合改良剂(石灰石 + 硅藻土 + 硫酸铁)对稻田土壤重金属 Cd 的生物有效性和水稻各部位累积 Cd 的影响。结果表明, 施用复合改良剂提高了早、晚稻土壤 pH 值、CEC 值, 降低了早稻土壤中有机质含量(OM 值)。Cd 的 TCLP 提取态与交换态 Cd 含量分别降低了 18.0% ~ 33.0%、5.4% ~ 57.9%, 但对晚稻土壤中 Cd 的 2 种提取态含量与 OM 值影响不显著。施用复合改良剂显著降低早稻糙米、谷壳、茎叶、根系中的 Cd 含量, 分别降低了 29.6% ~ 56.1%、52.1% ~ 54.0%、18.1% ~ 80.7%、24.4% ~ 41.6%。早稻与晚稻之间对 Cd 的转运能力呈现明显差异, Cd 在晚稻植株体内的转运过程更为通畅。晚稻除谷壳中的 Cd 含量在  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的添加量下有所上升外, 复合改良剂对水稻各部位 Cd 含量影响不显著( $P > 0.05$ )。糙米中 Cd 含量与土壤中 TCLP 可提取态含量和 Cd 的交换态含量存在显著正相关关系。复合改良剂有效地抑制了早稻植株对土壤中 Cd 的吸收, 糙米中的 Cd 含量显著降低; 晚稻期间复合改良剂随水分流失, 不能持续地固化土壤中的 Cd, 建议在各季稻之间补加一次。

**关键词:** 改良剂; Cd 污染; 水稻; 产地修复; 转运系数

中图分类号: X171.1; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2546-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201611112

## Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice

CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, ZHOU Hang, GAO Zi-xiang, LIAO Bo-han\*

(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** An *in-situ* paddy experiment was conducted to study the remedying effects of a combined amendment (calcium carbonate + diatomite + ferric sulfate) on Cd bioavailability in soil and Cd accumulation in rice for spring and autumn rice planted in a certain Cd contaminated paddy soil in Beishan Town, Changsha, Hunan Province. The results showed that: Application of the combined amendment significantly increased soil pH and CEC values in both cultivated seasons, but decreased soil OM contents for the spring rice. During the experiment, the contents of TCLP-extractable Cd and  $\text{CaCl}_2$ -extractable Cd in soil were reduced by 18.0% - 33.0% and 5.4% - 57.9%, respectively. The Cd contents in brown rice, husk, leave and root for the spring rice decreased by 29.6% - 56.1%, 52.1% - 54.0%, 18.1% - 80.7% and 24.4% - 41.6%, respectively, due to application of the combined amendment. There were significant differences in Cd transport capacity between spring rice and autumn rice, and the transportation of soil Cd in autumn rice was smoother than that in spring rice. For the autumn rice, the effects of the combined amendment were not significant ( $P > 0.05$ ), except that the Cd content in husk increased a little after applying  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  of the combined amendment. Significant positive correlations were found between the Cd contents in brown rice and the contents of TCLP-extractable Cd or  $\text{CaCl}_2$ -extractable Cd in soil. Application of the combined amendment effectively inhibited Cd uptake by rice root and reduced Cd content in brown rice for the spring rice; however, these remedying effects were significantly weakened for the autumn rice due to loss of the combined amendment with the movement of irrigation water in the spring season. Therefore, we suggest that supplement of the combined amendment is necessary between two rice cultivated seasons.

**Key words:** combined amendment; cadmium pollution; rice; *in-situ* remediation; translocation factors

重金属污染是我国主要的土壤环境污染问题。我国不同区域土壤重金属污染类型多样, 以镉、砷、铅、铜、铬、汞等污染为主<sup>[1]</sup>。全国土壤总的超标率为 16.1%, 其中 Cd 的污染最为严重, 超标率为 7.0%<sup>[2]</sup>。镉(Cd)在土壤中是一种移动性很强的重金属, 易被植物吸收进入食物链<sup>[3]</sup>。水稻作为主要的粮食作物是一种典型的富集重金属的作物, Cd 易于在稻米中累积, 即使在低污染的土壤中, 稻米中 Cd 含量也很容易超过国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的限制。因此, 治理

土壤重金属污染, 抑制重金属在农作物中的迁移转运已成为亟待解决的环境问题。

我国耕地资源十分紧张, 粮食安全形势十分严峻, 重金属超标土壤的农业利用是一种不得已的选择。在此前提下, 人们需要寻求边利用边修复的有

收稿日期: 2016-11-14; 修订日期: 2016-12-29

基金项目: 农业部财政部科研专项(农办财函 2016); 国家自然科学基金项目(41501344); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 陈立伟(1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与控制, E-mail: clwd163yx@163.com

\* 通信作者, E-mail: liaobh1020@163.com

效途径<sup>[4]</sup>。化学改良技术或化学稳定化技术都属于原位化学固定修复技术,其原理是通过向污染土壤中施加改良剂,降低重金属在土壤中的生物有效性<sup>[5]</sup>,缓解重金属污染对农作物生长的毒害作用,减少农作物对重金属的吸收和积累。徐峰等<sup>[6]</sup>在盆栽试验中使用改良剂显著降低了玉米叶片中的 Cd 含量。有研究表明,石灰石能通过提高土壤 pH,降低重金属有效性和迁移性<sup>[7]</sup>。硅藻土孔隙度高、内外表面积大、吸附能力强,能有效固定土壤有效态 Cd<sup>[8]</sup>。硫酸铁水解产生新的铁氧化物,伴随着其形态转化,对土壤中重金属产生吸附作用<sup>[9]</sup>。本课题组的前期工作表明<sup>[10]</sup>,当添加  $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的石灰石和硅藻土时,与对照组相比,供试土壤中 Cd 的浸出量分别降低 95.0% 和 80.0%;当石灰石与硅藻土进行混合施用、添加量为  $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,与对照组相比,供试土壤浸提液中的 Cd 含量低于检测限, Cd 的浸出量降低 95.0% 以上。不同改良剂的组配能有效修复重金属污染土壤,但是这些研究大多数都是以水稻盆栽试验为主,在田间的试验研究较少。同时,施加同一改良剂后连续耕种,观察土壤重金属生物有效性和水稻中重金属迁移转运影响的研究报道还较少。本试验以石灰石 + 硅藻土 + 硫酸铁进行组配,选取湖南省长沙市北山镇某中重度 Cd 污染稻田进行田间试验,连续种植早晚两季稻,观察土壤理化性质的变化,以及水稻植株对重金属 Cd 的累积和转运,研究复合改良剂对土壤 Cd 污染的修复效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试水稻品种早稻为株两优 819,由湖南亚华种业科学研究院提供。晚稻为湘晚粳 12 号,由湖南省水稻研究所提供。

田间试验选址为湖南长沙市北山镇( $113^{\circ}3'55''\text{E}$ ,  $28^{\circ}26'7''\text{N}$ ) 某中重度 Cd 污染稻田,土壤类型为红黄壤。石灰石为重质碳酸钙,由桂林市红星化工有限责任公司提供。硅藻土、硫酸铁为分析纯。将以上物质按照不同质量比例进行组配,得到供试复合改良剂。供试稻田土壤基本理化性质如下: pH 值: 5.01; 有机质(OM):  $31.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 阳离子交换量(CEC):  $48.55 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 土壤 Cd 总量:  $1.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; TCLP 提取态 Cd 含量:  $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 交换态 Cd 含量:  $0.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

试验地点北山镇属于亚热带季风性气候,气候

温和,降水充沛,雨热同期,四季分明,年均降水量  $1\,358.6 \sim 1\,552.5 \text{ mm}$ , 年平均气温  $16.8 \sim 17.3^{\circ}\text{C}$ 。改良剂设置 4 个施加水平分别为: 0、150、300、600  $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ 。在种植水稻前将复合改良剂(石灰石 + 硅藻土 + 硫酸铁)均匀撒施于稻田土壤表面,通过多次翻耕使其与耕作层土壤充分混合。每个处理设置 3 个重复,每个试验样方面积为  $9 \text{ m}^2$  ( $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ), 总计 12 块小区。所有样方随机区组排列,且每个样方四周均设置 3 行水稻作为保护行,种植密度参照农业生产的实际情况。2 种水稻的耕作管理与当地农民的耕作管理保持一致。农田水分管理方式为: 苗期深水保苗,表层土以上水层 3~4 cm; 分蘖期浅水促分蘖,表层土以上水层 1.5 cm,达到常规茬数排水晒田控制分蘖; 育穗抽穗期足水壮苞,表层土以上水层 3~4 cm; 早稻扬花至成熟期降水多,稻田保持湿润。晚稻扬花至成熟期降水少,干湿壮籽,灌溉时使表层土以上水层 2 cm,然后自然落干,至表层无水,2 d 后再次灌溉。早稻于 2015 年 4 月中旬下种,至 2015 年 7 月上旬收获; 晚稻作物于 2015 年 7 月中旬下种,至 2015 年 10 月下旬收获。

### 1.3 水稻和土壤样品分析

在水稻收获后采集根系附近的根际土壤,自然风干后碾压,过 2 mm 尼龙筛,混匀备用。收获的水稻样品各部分分别用去离子水洗净后,于  $105^{\circ}\text{C}$  下杀青 30 min,在  $70^{\circ}\text{C}$  下烘至恒重。水稻分根系、茎叶、谷壳、糙米这 4 个部位采集备用。粉碎后采用干灰化法(GB/T 5009-2003)消解。

土壤 pH 值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,溶液为去离子水,固液比为  $m(\text{固}):V(\text{液}) = 1:2.5$ <sup>[11]</sup>; 土壤阳离子交换量用氯化钡-硫酸法测定,OM 采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定<sup>[12]</sup>; 采用美国环保署 TCLP 毒性浸出试验浸提 Cd 的 TCLP 提取态<sup>[13]</sup>,采用修正的 Tessier 连续提取法第一步( $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ )溶液提取 Cd 的交换态<sup>[14]</sup>。水稻根表铁膜采用 dithionite-citrate-bicarbonate(DCB)试剂提取<sup>[15,16]</sup>。用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP 6300, Thermo)测定土壤部分和水稻中各不同形态 Cd 含量。所有样品分析过程中以国家标准物质土壤[GBW(E)-070009]和湖南大米[GBW 10045(GSB-23)]进行质量控制分析, Cd 的回收率分别为 91.5%~98.6% 和 96.2%~103.8%,同时做空白试验。

### 1.4 数据处理

应用 SPSS 19.0 统计和分析数据,各处理间差

异分析采用显著性  $F$  测验和 Duncan 多重比较 ( $P < 0.05$ ) 进行,图形采用 OriginPro 8.5 进行绘制. 文中数据结果为平均值  $\pm$  标准偏差. 应用 Excel 2010 处理数据,且数据结果均为平均值  $\pm$  标准偏差. 转运系数定义为水稻后一部位中 Cd 含量与前一部位中 Cd 含量的比值(包括根到茎叶、茎叶到谷壳、谷壳到糙米、根系到糙米).

2 结果与分析

2.1 稻田土壤 pH、CEC、OM 变化

施用复合改良剂显著提高了早稻与晚稻稻田土壤 pH 值和 CEC 值(表 1). 与对照组相比,施用 ( $0 \sim 600 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ ) 复合改良剂,早稻土壤 pH 增加了  $0.24 \sim 1.13$  单位、晚稻升高了  $0.10 \sim 0.29$  单位. 与早稻土壤相比,同一处理下晚稻土壤 pH 值均低

于早稻. 施加复合改良剂使得早稻与晚稻土壤 CEC 呈现上升趋势,且同一处理下晚稻 CEC 均低于早稻. 复合改良剂显著降低了早稻土壤 OM 含量,但对晚稻土壤 OM 含量的影响不显著.

2.2 复合改良剂对稻田土壤中 Cd 生物有效性的影响

复合改良剂有效降低了早稻土壤的 TCLP 提取态 Cd 含量与交换态 Cd 含量;然而,在晚稻时虽然有下降趋势,但无显著影响(图 1). 与对照组相比,施用  $0 \sim 600 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$  复合改良剂,早稻土壤中 TCLP 提取态 Cd 和交换态 Cd 含量分别降低了  $18.0\% \sim 33.0\%$ 、 $5.4\% \sim 57.9\%$ . 各处理组与对照组相比,存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ). 与早稻不同,施用复合改良剂对晚稻土壤中 2 种提取态 Cd 含量无显著影响.

表 1 复合改良剂对稻田土壤基本理化性质的影响

Table 1 Effects of the combined amendment on basic physical and chemical properties of the tested paddy soil

| 时期 | 改良剂添加量<br>/ $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ | pH 值                     | CEC<br>/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ | OM<br>/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|----|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| 早稻 | 0                                           | $5.09 \pm 0.16\text{b}$  | $55.5 \pm 10.8\text{b}$                     | $31.4 \pm 0.9\text{a}$                   |
|    | 150                                         | $5.34 \pm 0.12\text{b}$  | $59.6 \pm 10.9\text{b}$                     | $31.2 \pm 0.7\text{a}$                   |
|    | 300                                         | $5.67 \pm 0.72\text{ab}$ | $77.0 \pm 22.8\text{ab}$                    | $29.7 \pm 0.9\text{ab}$                  |
|    | 600                                         | $6.22 \pm 0.18\text{a}$  | $88.7 \pm 5.46\text{a}$                     | $27.9 \pm 1.3\text{b}$                   |
| 晚稻 | 0                                           | $4.90 \pm 0.06\text{c}$  | $42.5 \pm 10.6\text{b}$                     | $29.5 \pm 1.2\text{a}$                   |
|    | 150                                         | $5.00 \pm 0.04\text{bc}$ | $48.8 \pm 3.6\text{ab}$                     | $30.6 \pm 2.0\text{a}$                   |
|    | 300                                         | $5.12 \pm 0.07\text{ab}$ | $41.8 \pm 5.7\text{b}$                      | $28.5 \pm 3.2\text{a}$                   |
|    | 600                                         | $5.29 \pm 0.16\text{a}$  | $58.3 \pm 11.8\text{a}$                     | $31.1 \pm 0.8\text{a}$                   |

1) 数据后不同字母表示处理间差异显著,小写字母表示显著差异 ( $P < 0.05$ ),下同

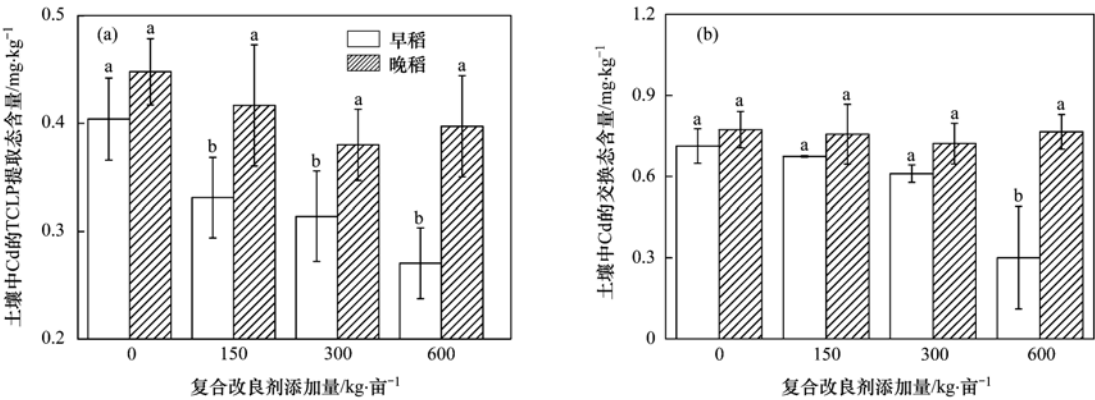


图 1 复合改良剂对土壤中 Cd 的两种提取态含量的影响

Fig. 1 Effects of the combined amendment on contents of TCLP-extractable Cd and  $\text{CaCl}_2$ -extractable Cd in soils

2.3 复合改良剂对水稻累积 Cd 影响

2.3.1 水稻植株各部位 Cd 含量

图 2(a) ~ 2(d) 是复合改良剂对两季水稻各部位中 Cd 含量的影响. 与对照组相比,随着复合改良剂施加量的增大,早稻糙米、谷壳、茎叶、根系中 Cd 含量显著降低 ( $P < 0.05$ ),分别降低了  $29.6\% \sim$

$56.1\%$ 、 $52.1\% \sim 54.0\%$ 、 $18.1\% \sim 80.7\%$ 、 $24.4\% \sim 41.6\%$ . 与早稻影响相反,除谷壳在高施用量下出现的少量上升外,对晚稻水稻各部位 Cd 含量影响不显著. 这与早晚稻土壤中 Cd 的生物有效性变化趋势一致.

图 2(e)、2(f) 显示了水稻根表铁膜数量和根



表铁膜中 Cd 含量的变化. 与对照组相比, 早稻根表铁膜数量显著增加, 复合改良剂 150 ~ 600 kg·亩<sup>-1</sup>添加组使根表铁膜数量增加了 25.4% ~ 59.1%, 而晚稻变化不明显. 早稻根表铁膜中的 Cd 含量随着改良剂添加量的增加降低, 降低了 37.7% ~ 63.6%. 晚稻根表铁膜中 Cd 含量的变化

不明显.

分析水稻各部位 Cd 含量可知, 早稻植株各部位 Cd 的含量大小依次是: 根系 > 茎叶 > 糙米 > 谷壳; 晚稻植株各部位 Cd 的含量大小依次是: 根系 > 谷壳 ≈ 茎叶 > 糙米; 糙米和谷壳中 Cd 含量均为晚稻 > 早稻, 茎叶和根系中是早稻 > 晚稻.

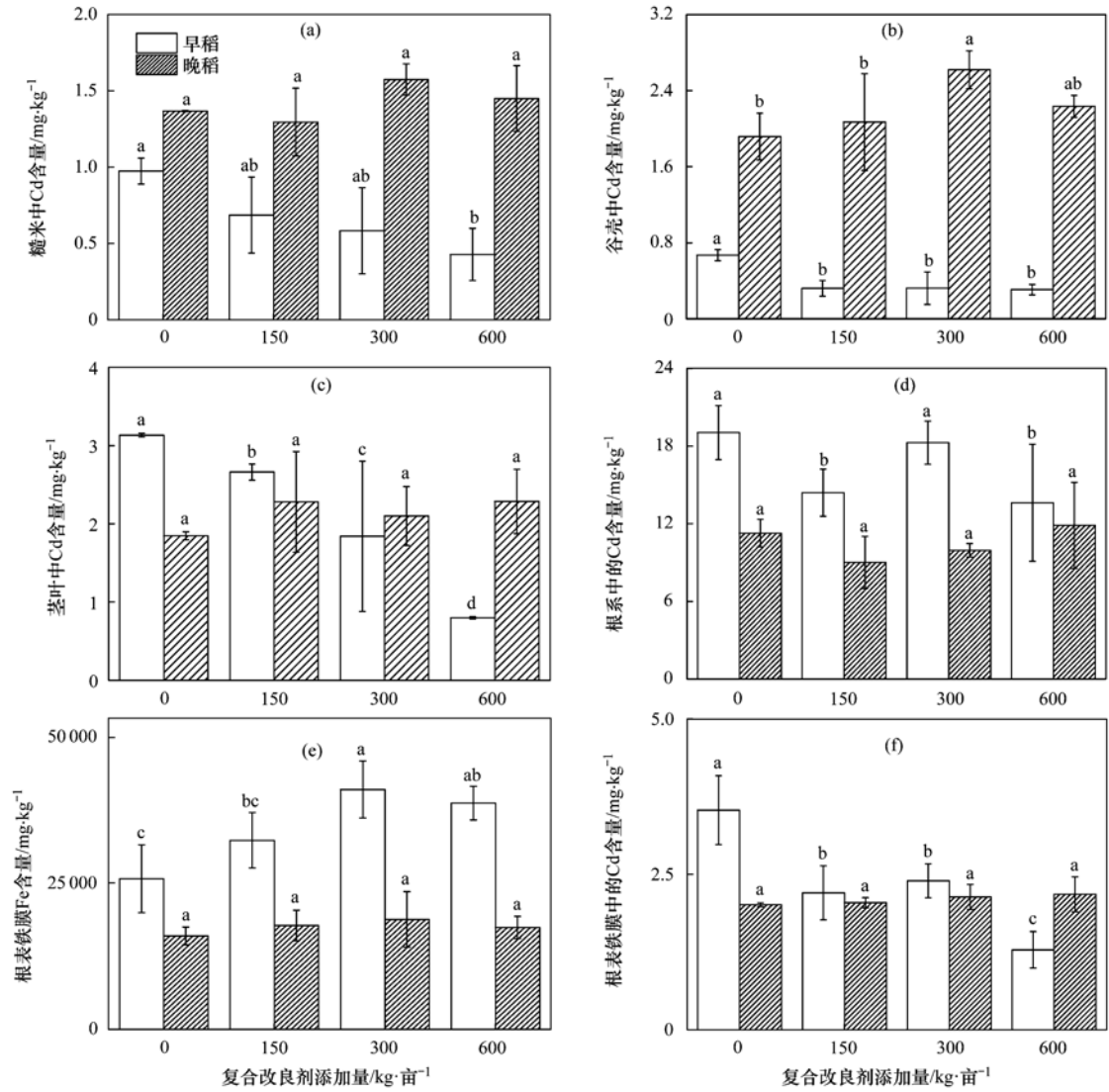


图 2 复合改良剂不同添加量对水稻各部位 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effects of the addition amount of combined amendment on Cd contents in different rice tissues

### 2.3.2 Cd 在水稻各器官间转运系数

转运系数用来表示 Cd 在植株内由根系向茎叶、谷壳、糙米迁移转运的能力. 土壤 Cd 通过水稻根系吸收后富集在根系内, 再从根系通过水稻木质部运输到水稻地上部分, 这个过程是土壤 Cd 从水稻地下部分迁移到地上部分的关键<sup>[17]</sup>. 表 2 为复合改良剂不同添加量对早稻和晚稻中 Cd 从根系到茎叶、茎叶到谷壳、谷壳到糙米、根系到糙米的转运系数.

从表 2 可见, 复合改良剂对水稻根系到茎叶、

茎叶到谷壳、谷壳到糙米的 Cd 转运系数影响不显著, 但两季水稻各部位间的 Cd 转运系数存在明显差异. 对于早稻而言, 谷壳到糙米的转运系数最大, 根系到茎叶次之, 茎叶到谷壳最小, 这表明谷壳至糙米的转运通道比较畅通, 茎叶对 Cd 的截留能力强. 对晚稻而言, 茎叶到谷壳的转运系数最大, 谷壳到糙米次之, 根系到茎叶最小, 这表明 Cd 从茎叶至谷壳的转运较为流畅, 根系到茎叶的截留能力强; Cd 从根系到糙米的转运系数是水稻各部位之间 Cd 转运

系数的综合指标. 早稻品种株两优 819 与晚稻品种湘晚粳 12 号不同品种间差异显著,各添加组晚稻根系到糙米的转运系数均显著高于早稻,这是晚稻糙米 Cd 含量高于早稻的原因.

表 2 复合改良剂对水稻各部位中 Cd 的转运系数的影响

Table 2 Effects of the combined amendment on Cd translocation factors in different rice tissues

| 时期 | 改良剂添加量<br>/kg·亩 <sup>-1</sup> | 根系到茎叶           | 茎叶到谷壳          | 谷壳到糙米          | 根系到糙米           |
|----|-------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 早稻 | 0                             | 0.215 ± 0.054a  | 0.174 ± 0.059a | 1.460 ± 0.201a | 0.051 ± 0.004a  |
|    | 150                           | 0.172 ± 0.006a  | 0.107 ± 0.051a | 2.160 ± 0.655a | 0.048 ± 0.017a  |
|    | 300                           | 0.168 ± 0.043a  | 0.114 ± 0.027a | 1.880 ± 0.276a | 0.030 ± 0.001b  |
|    | 600                           | 0.171 ± 0.119a  | 0.256 ± 0.161a | 1.700 ± 0.474a | 0.049 ± 0.004a  |
| 晚稻 | 0                             | 0.147 ± 0.016b  | 1.110 ± 0.427a | 0.790 ± 0.141a | 0.122 ± 0.012b  |
|    | 150                           | 0.254 ± 0.062ab | 1.180 ± 0.709a | 0.580 ± 0.228a | 0.146 ± 0.026ab |
|    | 300                           | 0.245 ± 0.040a  | 1.140 ± 0.577a | 0.530 ± 0.113a | 0.165 ± 0.012a  |
|    | 600                           | 0.199 ± 0.052ab | 0.994 ± 0.138a | 0.649 ± 0.059a | 0.126 ± 0.021b  |

3 讨论

由水稻植株转运系数可见,水稻植株将大量的 Cd 累积在茎叶与根部,进而减小了在糙米中的 Cd 含量. 但不同水稻品种对 Cd 的转运能力呈现出明显的差异,晚稻 Cd 从根系到糙米的转运能力显著强于早稻. 相较于早稻品种,Cd 在晚稻品种内从根系转移到茎叶,茎叶转移到谷壳进而转运至糙米的转运过程更为通畅,水稻品种间转运能力的差异可能是早晚稻糙米中的 Cd 含量差异的影响因素之一.

3.1 复合改良剂对早稻和晚稻土壤-水稻系统中 Cd 生物有效性的影响

随着复合改良剂施加量的增大,早稻种植土壤中 TCLP 提取态与交换态 Cd 含量呈现显著的下降趋势,其原因可能是复合改良剂显著提高了土壤 pH 值(图 1). 土壤 pH 是影响土壤中重金属的生物有效性的重要因素之一. 在酸性土壤上,pH 上升能增加土壤对 Cd 的固定能力,减少土壤溶液中 Cd 浓度. 复合改良剂中含有硫酸铁,土壤中的 Fe<sup>3+</sup> 离子与 OH<sup>-</sup> 结合形成羟基化合物,为 Cd 离子提供了更多的吸附位点,从而降低了 Cd 的生物有效性<sup>[18, 19]</sup>. 复合改良剂中石灰石和硅藻土均能提高土壤 pH 值<sup>[8, 20]</sup>,同时硅藻土可交换吸附大量的 Cd 离子<sup>[21]</sup>. 另外,在实际的场地修复过程中,早稻时水分充足,稻田多为淹水情况,而淹水土壤中 Fe 的存在形式繁多复杂[如 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>(OH)<sub>8</sub>·nH<sub>2</sub>O、α-FeOOH、Fe<sub>3</sub>(OH)<sub>8</sub>等]<sup>[22]</sup>. Lindsay 认为,淹水土壤中一种铁氧化物发生还原溶解的同时,另外一种新的铁氧化物将生成. 这导致了新的无定形或微晶形结构的产生,使土壤对 Cd 表现出很大的吸附容量<sup>[23, 24]</sup>,Cd 的溶解度下降,伴随着铁氧化物的形态转化,Cd 与

其发生沉淀和共沉淀<sup>[25]</sup>.

在本场地修复试验中,晚稻种植土壤中 TCLP 提取态与交换态 Cd 含量较对照没有显著变化. 这可能是因为早稻期间施用(0 ~ 600 kg·亩<sup>-1</sup>)复合改良剂显著提高土壤 pH,土壤 pH 值提高了 0.24 ~ 1.13;晚稻期间,复合改良剂提高土壤 pH 值的能力显著弱于早稻时期,土壤 pH 值仅提高了 0.10 ~ 0.38. 晚稻期间 pH 值偏酸性,土壤中的 Cd 较难被固定.

3.2 土壤中 Cd 的 TCLP 提取态含量、交换态含量与糙米中 Cd 含量的相关性分析

随着复合改良剂施用量的增加,早稻土壤及水稻各部位中 Cd 含量均变化明显. 为进一步探讨水稻各部位中 Cd 含量与其土壤中 Cd 各形态含量的关系,将其分别进行相关性分析. 结果表明,早稻糙米中 Cd 含量与土壤 Cd 的 TCLP 提取态含量、土壤 Cd 的交换态含量之间存在显著的正相关关系,相关系数分别为  $R_{\text{TCLP-Cd}} = 0.577$  和  $R_{\text{Ex-Cd}} = 0.627$  ( $n = 12, R_{0.05} = 0.576$ ) [图 3(a)];晚稻糙米中的 Cd 含量与土壤 Cd 的 TCLP 提取态含量、土壤 Cd 的交换态含量的相关性较差 ( $R_{\text{TCLP-Cd}} = -0.042$  和  $R_{\text{Ex-Cd}} = 0.111$ ) [图 3(b)]. 这说明,复合改良剂可能是通过降低早稻土壤中 Cd 的这 2 种提取态含量,进而降低水稻糙米中 Cd 的含量. 晚稻糙米中 Cd 含量无显著变化,晚稻土壤中 Cd 的生物有效性没有得到有效抑制是重要原因(图 1).

晚稻种植过程中,由于前期灌溉水的流动,复合改良剂部分流失,提高土壤 pH 值的能力逐渐减弱,对土壤中 Cd 的生物有效性控制能力减弱. 此外,硅藻土通过调节土壤 CEC 来调节土壤有效态 Cd 的含量,再通过离子交换吸附而固定住部分有效态 Cd;当土壤理化性质发生改变时这一部分 Cd 很容易重

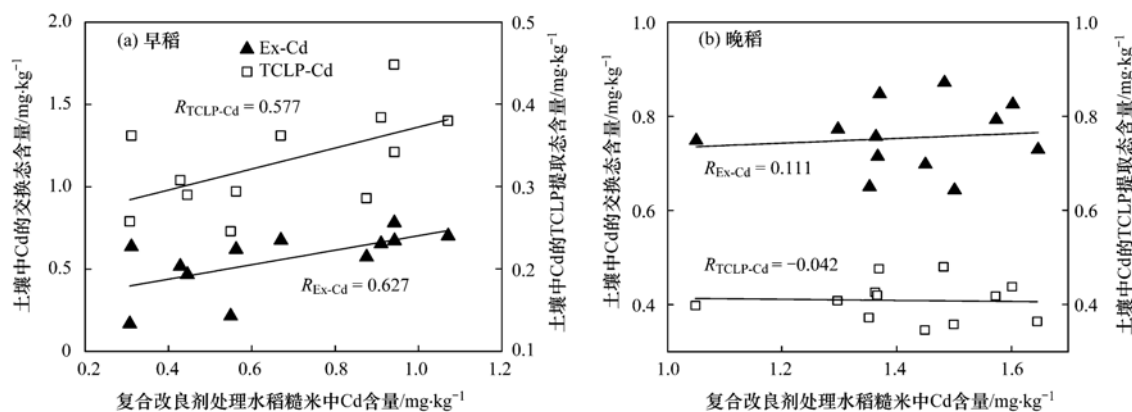


图3 水稻糙米中 Cd 含量与土壤中 TCLP 提取态 Cd 含量、交换态 Cd 含量之间的相关性

Fig. 3 Correlations of the Cd contents in brown rice and the contents of TCLP-extractable Cd or  $\text{CaCl}_2$ -extractable Cd in soil

新回到土壤,这使得硅藻土通过调节土壤 CEC 去控制土壤 Cd 污染存在一定的时效性<sup>[8]</sup>.

### 3.3 田间水分影响

复合改良剂对早晚稻糙米 Cd 含量的影响出现差异,与晚稻和早稻所处的气候条件不同有关. 晚稻期间降水少,稻田水分依靠人工灌溉,水稻不可能处于长时间淹水的环境下. 而早稻期间雨水多,稻田长期淹水. 土壤淹水导致土壤中氧气不足,还原性增强,土壤 Eh 值下降, $\text{Fe}^{3+}$ 被还原成 $\text{Fe}^{2+}$ ,增强了土壤-水稻系统的还原性<sup>[26]</sup>. 有研究表明,在淹水还原作用下,土壤 Cd 由活性较高的交换态转化为活性较低的碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态,从而使得土壤中 Cd 活性降低,水稻吸收 Cd 的量下降<sup>[27~29]</sup>. 另外,植物根系呼吸作用过程中部分氧气从根中渗出,与 $\text{Fe}^{2+}$ 结合,将其氧化成 $\text{Fe}^{3+}$ 并形成沉降在根系表面的根表铁氧化物胶膜,根际土壤提供充足的 $\text{Fe}^{2+}$ 促进了根表铁膜的形成<sup>[30]</sup>,图 2(e)中根表铁膜的量随着复合改良剂施用量的增加显著上升,从而阻隔了 Cd 从水稻根系进入水稻体内. 这是早稻各组份土壤中 Cd 的交换态与糙米中的 Cd 含量均低于晚稻的原因.

本研究中早稻土壤 Cd 的生物有效性和水稻各部位 Cd 含量显著降低,糙米 Cd 含量最多降低 56.1%. 但由于复合改良剂随着灌溉水的流动而流失,以及早晚稻不同的气候条件导致干湿交替,晚稻土壤 Cd 的生物有效性并没有得到有效降低,水稻各部位的 Cd 含量没有得到有效控制. 因此,建议在实际应用中各季稻之间补加一定量的复合改良剂,或者寻找一种更好的水分管理模式与复合改良剂共同使用.

## 4 结论

(1)随着复合改良剂施加量的增大,早稻土壤 pH 值提高了 0.24 ~ 1.13 单位;土壤中 Cd 的 TCLP 提取态含量和交换态含量逐渐下降,分别降低 18.0% ~ 33.0%, 5.4% ~ 57.9%. 水稻糙米中 Cd 含量与土壤中 Cd 的 TCLP 提取态含量存在极显著的正相关性关系,与 Cd 的交换态存在显著的正相关性关系.

(2)早稻植株各部位 Cd 含量依次是根 > 茎叶 > 糙米 > 谷壳,晚稻植株各部位 Cd 含量依次是根 > 茎叶 ≈ 谷壳 > 糙米. 水稻从土壤中吸收 Cd,将其大量地累积在根部和茎叶部. 晚稻对 Cd 的转运能力强于早稻.

(3)复合改良剂显著降低早稻糙米中的 Cd 含量(降低幅度为 29.6% ~ 56.1%),能有效抑制水稻对 Cd 的吸收. 晚稻期间由于复合改良剂随着灌溉水的流动而流失,以及早晚稻不同的气候条件导致干湿交替,复合改良剂不能再有效抑制水稻对重金属 Cd 的吸收.

### 参考文献:

- [1] 周建军,周桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350.  
Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(3): 315-320, 350.
- [2] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [3] 赵步洪,张洪熙,奚岭林,等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 306-312.  
Zhao B H, Zhang H X, Xi L L, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(3): 306-312.
- [4] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干



- 思考[J]. 土壤学报, 2013, **50**(1): 186-194.
- Zheng X B, Xu J M, Huang Q Y, *et al.* Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(1): 186-194.
- [5] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 409-417.
- Hang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 409-417.
- [6] 徐峰, 黄益宗, 蔡立群, 等. 不同改良剂处理对玉米生长和重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 463-470.
- Xu F, Huang Y Z, Cai L Q, *et al.* Effects of different amendments on corn growth and accumulation of heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 463-470.
- [7] 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.
- Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of two combined amendments on heavy metal bioaccumulation in paddy soil[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 437-444.
- [8] 朱健, 王平, 林艳, 等. 不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 717-725.
- Zhu J, Wang P, Lin Y, *et al.* Differential effect and mechanism of *in situ* immobilization of cadmium contamination in soil using diatomite produced from different areas[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 717-725.
- [9] 卢明, 屠乃美, 胡华勇. 氯化铁和硫酸铁对酸性土壤中有效态镉和铅污染的修复作用[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 469-476.
- Lu M, Tu N M, Hu H Y. Remediation of available Cd and Pb contamination in acidic soil by ferric chloride and ferric sulfate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(1): 469-476.
- [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.
- Zeng H, Xu C, Zhou H, *et al.* Effects of mixed curing agents on the remediation of soils with heavy metal pollution[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(9): 1368-1374.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Chang E E, Chiang P C, Lu P H, *et al.* Comparisons of metal leachability for various wastes by extraction and leaching methods[J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(1): 91-99.
- [14] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57-61.
- [15] Taylor G J, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants[J]. *American Journal of Botany*, 1983, **70**(8): 1254-1257.
- [16] Otte M L, Dekkers I M J, Rozema J, *et al.* Uptake of arsenic by *Aster tripolium* in relation to rhizosphere oxidation[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1991, **69**(12): 2670-2677.
- [17] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, *et al.* Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar, Jarjan[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **62**(7): 2265-2272.
- [18] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(4): 847-851.
- Zhu Q H, Huang D Y, Liu G S, *et al.* Effects and mechanisms of amendments on remediation of cadmium contaminated acid paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(4): 847-851.
- [19] 杨文戮, 周航, 邓贵友, 等. 组配改良剂对污染稻田中铅、镉和砷生物有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 257-263.
- Yang W T, Zhou H, Deng G Y, *et al.* Effects of combined amendment on bioavailability of Pb, Cd, and As in polluted paddy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 257-263.
- [20] Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **101**: 226-232.
- [21] Zhu J, Wang P, Lei M J, *et al.* Analysis of the adsorption behaviour of cadmium on aluminium-pillared diatomite in a solid/liquid system using classical adsorption theory[J]. *Adsorption Science & Technology*, 2013, **31**(8): 659-670.
- [22] Lindsay W L. Chemical equilibria in soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979. 129-149.
- [23] Randall S R, Sherman D M, Ragnarsdottir K V, *et al.* The mechanism of cadmium surface complexation on iron oxyhydroxide minerals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(19-20): 2971-2987.
- [24] Tack F M G, Van Ranst E, Lievens C, *et al.* Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: the role of hydrous oxides of Fe and Mn[J]. *Geoderma*, 2006, **137**(1-2): 83-89.
- [25] Davranche M, Bollinger J C. Release of metals from iron oxyhydroxides under reductive conditions: effect of metal/solid interactions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, **232**(1): 165-173.
- [26] Yu H Y, Liu C P, Zhu J S, *et al.* Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: the effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **209**: 38-45.
- [27] Kashem M A, Singh B R. Transformations in solid phase species of metals as affected by flooding and organic matter[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, **35**(9-10): 1435-1456.
- [28] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **61**(3): 247-255.
- [29] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫酸镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2837-2846.
- Zhang X X, Zhang X X, Zheng Y J, *et al.* Accumulation of S, Fe and Cd in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2837-2846.
- [30] 于晓莉, 傅友强, 甘海华, 等. 干湿交替对作物根际特征及铁膜形成的影响研究进展[J]. 土壤, 2016, **48**(2): 225-234.
- Yu X L, Fu Y Q, Gan H H, *et al.* Impacts of drying-wetting cycles on changes of rhizosphere characteristic and the formation of iron plaque: a review[J]. *Soil*, 2016, **48**(2): 225-234.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                             |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Comparison of Models on Spatial Variation of PM <sub>2.5</sub> Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                  | WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)              |
| Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years .....                                                                    | GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)            |
| Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer .....                                               | HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)            |
| Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing .....                                                               | DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)           |
| Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing .....                                                                    | XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)               |
| Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers .....                                                              | WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)               |
| Effect of VOCs on O <sub>3</sub> and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station ..... | ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)                     |
| Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O <sub>3</sub> in Northern Suburb of Nanjing .....                                              | WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)               |
| Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....                    | WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)             |
| Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential .....                                          | WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)        |
| Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator .....                                                 | DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)             |
| Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing .....                                                            | ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)          |
| Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems .....                                                       | WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)            |
| Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel .....                     | LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)              |
| Spatial Variation and Environmental Significance of δ <sup>18</sup> O and δD Isotope Composition in Xijiang River .....                                     | XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)                  |
| Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed .....                                                           | HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)                |
| Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir .....                               | JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)                 |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake .....           | WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)            |
| Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River .....                                       | LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)          |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake .....                                                    | ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)              |
| Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination .....              | QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)                    |
| Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters .....                           | WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)             |
| Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level .....                              | JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)                             |
| Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron .....                                                                | ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)              |
| Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation .....                             | WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)              |
| Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels .....                                         | JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)          |
| Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis .....          | ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)             |
| Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater .....                                                    | ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419) |
| Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition .....                                                                                       | ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)                            |
| Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....                                                       | FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)                     |
| Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater .....                                   | ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)           |
| Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....                                                                               | ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)                     |
| Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress .....                                | QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)                |
| Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors .....   | REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)                         |
| Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge .....                                                  | ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)         |
| Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers .....                                                                 | TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)                          |
| Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism .....                                            | LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)                                   |
| Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains .....                                                     | QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)         |
| Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics .....                                     | CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)                                        |
| Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs .....                                                 | TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)                                      |
| Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil .....                                                                      | ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)   |
| Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice .....                                           | CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)                     |
| Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice .....                                                  | CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)           |
| Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As .....                                                          | TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)                     |
| Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene .....                                                    | WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)               |
| Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil .....                     | YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)                                        |
| Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions .....                                                      | LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)                  |
| Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain .....            | HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)           |
| Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling .....                                                             | YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)                 |
| Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi .....                            | WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)       |
| Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions .....                             | GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)                |
| Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review .....                                        | WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)                       |