

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

|                                                                   |                                        |                       |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| 中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示                                              | 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康                        | (1141)                |
| 2013年1月北京市PM <sub>2.5</sub> 区域来源解析                                | 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松                        | (1148)                |
| 2013年1月北京市一次空气重污染成因分析                                             | 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅                 | (1154)                |
| 上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征                                               | 常燕,冯冲,瞿建国,张经                           | (1164)                |
| 厦门春季PM <sub>10</sub> 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析                       | 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成                       | (1173)                |
| 硫氧同位素示踪南京北郊大气PM <sub>2.5</sub> 中硫酸盐来源                             | 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝                | (1182)                |
| 结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程                                       | 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠                       | (1187)                |
| 春季华东高山背景区域PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>2.5-10</sub> 中水溶性无机离子特征      | 苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇             | (1195)                |
| 落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究                                             | 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹                       | (1202)                |
| 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征                                           | 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪                       | (1208)                |
| 深圳市船舶排放清单与时空特征研究                                                  | 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏                 | (1217)                |
| 超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性                                                   | 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗                      | (1227)                |
| 空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征                                                | 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹                     | (1234)                |
| 基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应                                            | 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽             | (1241)                |
| 黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响                                              | 张永领,王明仕,董玉龙                            | (1249)                |
| 调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响                               | 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远                     | (1256)                |
| 春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响                                            | 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚              | (1263)                |
| 降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析                                          | 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春              | (1270)                |
| 北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价                                              | 钟惠舟,韦朝海                                | (1277)                |
| 丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析                                              | 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏                | (1285)                |
| 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例                                    | 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺                  | (1293)                |
| 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响                                          | 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪                     | (1301)                |
| 一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究                                           | 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏                      | (1309)                |
| 昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析                                           | 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明         | (1317)                |
| 河道曝气提升河流水质的WASP模型研究                                               | 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽                       | (1326)                |
| γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究                                                  | 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静                | (1332)                |
| 电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收                                             | 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼                | (1338)                |
| Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水                                              | 孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳         | (1345)                |
| 生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素                                                | 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪                      | (1352)                |
| 308 nm光作用下α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 表面HNO <sub>3</sub> 的光解 | 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强                  | (1359)                |
| L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚                                     | 何家洪,徐强,丁武泉,李强                          | (1365)                |
| 酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究                               | 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博              | (1374)                |
| 枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性                                        | 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用                    | (1379)                |
| 喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理                                                | 李静,李文英                                 | (1385)                |
| Fe <sup>3+</sup> 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N <sub>2</sub> O释放的影响          | 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建                   | (1392)                |
| 内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究                                           | 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉       | (1399)                |
| 利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻                                        | 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东                      | (1406)                |
| 进水渗滤液总氮和BOD <sub>5</sub> /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响               | 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰                          | (1412)                |
| 重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析                                        | 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先                      | (1417)                |
| 湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析                                     | 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰                         | (1425)                |
| 沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响                                              | 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春                    | (1431)                |
| 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响                                               | 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月                         | (1437)                |
| 不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复                                           | 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提              | (1445)                |
| 陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价                                     | 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞                     | (1453)                |
| 有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响                                          | 王菲,袁婷,谷守宽,王正银                          | (1461)                |
| 玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究                                               | 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云              | (1468)                |
| 硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响                                               | 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐 | (1474)                |
| 丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响                                          | 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新              | (1481)                |
| 滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究                                            | 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁                         | (1489)                |
| 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系                                     | 吴静,陈书涛,胡正华,张旭                          | (1497)                |
| 工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析                                            | 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮                      | (1507)                |
| 《环境科学》征订启事                                                        |                                        | (1216)                |
| 《环境科学》征稿简则                                                        |                                        | (1248)                |
| 信息                                                                |                                        | (1163,1194,1248,1424) |

# 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响

王秀丽, 梁成华\*, 马子惠, 韩月

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 本试验在室内模拟外源 Cd 污染土壤, 研究了磷酸二氢钾、磷酸氢二铵和沸石单独施用, 以及沸石和磷酸氢二钾、沸石和磷酸氢二铵二者配施, 对 Cd 污染土壤形态变化的影响。结果表明, 施用不同改良剂后, 土壤交换态 Cd 含量出现不同程度降低, 而碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 Cd 含量增加。与对照相比, 单独施用磷酸二氢钾、磷酸氢二铵和沸石, 以及沸石和磷酸氢二钾配施、沸石和磷酸氢二铵配施分别使土壤有效 Cd 含量降低 25.2% ~ 51.7%、21.6% ~ 46.8%、6.4% ~ 23.2%、38.6% ~ 61.4% 和 34.1% ~ 56.4%。各处理均能提高土壤速效磷含量, 且土壤速效磷含量与有效态 Cd 含量呈极显著负相关, 相关系数  $r = -0.9026$ , 各处理之间土壤 pH 值与有效态 Cd 含量存在负相关关系。由此可知, 在施用磷酸盐和天然沸石条件下, 土壤速效磷含量的变化是降低土壤镉有效性的主要因素。

**关键词:** 磷酸二氢钾; 磷酸氢二铵; 速效磷; 有效态 Cd; 污染土壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1437-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.042

## Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil

WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua\*, MA Zi-hui, HAN Yue

(College of Soil and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** The test simulated exogenous Cd contaminated soil indoors, and studied separate application of potassium dihydrogen phosphate, diammonium hydrogen phosphate and zeolite, and combined application of zeolite and dipotassium hydrogen phosphate, zeolite and diammonium hydrogen phosphate, as well as the effect on the morphological changes of Cd contaminated soil. The results showed that soil exchangeable Cd contents were reduced in different degrees after the application of different modifiers, and the carbonate bound and Fe-Mn oxide bound, organic bound and residual Cd contents increased. By comparison, the separate application of potassium dihydrogen phosphate, diammonium hydrogen phosphate and zeolite, and the combined application of zeolite and dipotassium hydrogen phosphate, zeolite and diammonium hydrogen phosphate respectively reduced the soil available Cd contents at 25.2%-51.7%, 21.6%-46.8%, 6.4%-23.2%, 38.6%-61.4%, and 34.1%-56.4%. All treatments could increase the soil available phosphorus contents, making the soil available phosphorus contents negatively correlated with the available Cd contents significantly, with the correlation coefficient  $r = -0.9026$ , and the soil pH values had a negative correlation with the available Cd content during the treatments. Therefore, it could be known that the changes of soil available phosphorus contents were the major factor in reducing the availability of soil cadmium under the conditions of the application of phosphate and natural zeolite.

**Key words:** potassium dihydrogen phosphate; diammonium hydrogen phosphate; available phosphorus; available Cd; contaminated soil

我国的镉、铬、铅等污染耕地面积近2 000万  $\text{hm}^2$ , 约占耕地面积的  $1/5$ <sup>[1]</sup>, 耕地重金属污染土壤治理与修复受到高度重视, 一些学者开展了大量的研究工作<sup>[2~5]</sup>。重金属污染土壤原位钝化修复是一种低投入、高效果的治理重金属污染的方法, 因满足了治理污染土壤和农产品安全生产的需求, 而广泛被人们采用。它主要是向污染土壤中施入一些改良剂, 如石灰、沸石、磷酸盐、有机物料等, 改变土壤 pH 值, 增加吸附点位以及促进重金属离子与其它离子发生共沉淀等来降低重金属的移动性、毒性和生物有效性。本试验用的改良剂为沸石和磷酸盐。由于沸石较强的离子交换性能和较大的比表面积, 可作为土壤改良剂, 对盐碱地和酸性土壤有显著效果<sup>[6,7]</sup>。磷酸盐是一种廉价有效的化学固定剂被用于镉污染土壤的修

复<sup>[8~10]</sup>。在国内外研究中, 探讨沸石和磷酸盐单独施用治理重金属污染的文章有很多, 但对二者混施的研究却很少。对此, 本研究分析了二者混施对 Cd 污染土壤 pH 值、有效态 Cd 含量、速效磷含量以及 Cd 存在状态的变化, 以期治理重金属污染选取最廉价有效的方法, 也为降低污染物对人类的潜在危害提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤: 采自沈阳市近郊未被污染的土壤,

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171997); 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B03)

作者简介: 王秀丽(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为污染土壤修复与利用, E-mail: wxl20122429@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: liang110161@163.com

土壤类型为草甸土,按常规标样法取样,采样深度为 0~20 cm,自然风干后过 2 mm 筛,放入塑料袋中保 存备用. 土壤基本理化性质见表 1,按照文献[11]的方法测定.

表 1 供试土壤的基本理化性质

| Table 1 Physical and chemical properties of tested soils |      |                            |                             |                           |                             |                             |                            |
|----------------------------------------------------------|------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 土壤类型                                                     | pH   | 有机质<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 碱解氮<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 全磷<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 速效磷<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 全镉<br>/mg·kg <sup>-1</sup> |
| 草甸土                                                      | 5.81 | 11.36                      | 60.44                       | 0.36                      | 40.01                       | 72.78                       | 0.25                       |

供试沸石: 采自辽宁省法库县秀水河地区包家屯乡水泉村的天然沸石矿,含有片斜发沸石 70.0%,长石 15.0%,其他矿物 15.0%,阳离子交换量 162.31 cmol·kg<sup>-1</sup>,总比表面积 579.6 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,全镉 0.75 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 8.24.

供试磷酸盐: KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 是化学药品分析纯.

1.2 试验设计

Cd 污染土壤制备: 将分析纯 CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 作为镉源,以溶液的形式加入供试土壤中,使土壤外源 Cd 含量达到 10 mg·kg<sup>-1</sup>,即是国家土壤环境质量 Cd 三级污染水平的 10 倍. CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 与土壤充分混匀,在室温(25℃±2℃)和土壤含水量为田间持水量的 70.0% 的条件下,培养一个星期,一个星期后风干、储存、备用.

沸石与磷酸二氢钾、磷酸氢二铵配施的施用

量: 沸石施用量过少,可能会造成对土壤环境的影响有限,修复重金属污染土壤的效果不明显;而施用量过多,可能会对土壤中有效养分吸收过大,造成植物所需养分急剧减少,还会产生一些负面影响. 综合考虑,选定沸石配施施用量为 3.0%.

本试验采用室内培养法,共设 16 个处理,不同处理的改良剂配比见表 2. 试验分别在培养第 0、5、15、30、50 d 分 5 次取样,每个处理重复 3 次.

具体试验步骤: 称取过 1 mm 筛的风干污染土样 50 g 放入塑料杯(6 cm×7 cm)中,再放入不同种类和剂量的改良剂,充分混匀后,调节土壤含水量为田间持水量的 70.0%,将塑料杯放在恒温箱中在 25℃±2℃下培养,依据称重法保持土壤含水量为田间持水量的 70.0%,分别在培养的第 0、5、15、30、50 d 分 5 次取样,称取适量自然风干的土样,测定土壤 pH 值、速效磷、有效态 Cd 以及 Cd 5 种形态的含量.

表 2 不同种类和剂量的改良剂配比方案

| 处理代号                | 改良剂施用量      |          |
|---------------------|-------------|----------|
|                     | 占供试土壤质量分数/% | P/Cd 摩尔比 |
| 对照 CK               |             |          |
| 低量磷酸二氢钾 P1          |             | 1:1      |
| 中量磷酸二氢钾 P2          |             | 2:1      |
| 高量磷酸二氢钾 P3          |             | 4:1      |
| 低量磷酸氢二铵 D1          |             | 1:1      |
| 中量磷酸氢二铵 D2          |             | 2:1      |
| 高量磷酸氢二铵 D3          |             | 4:1      |
| 低量沸石 Z1             | 1.0         |          |
| 中量沸石 Z2             | 3.0         |          |
| 高量沸石 Z3             | 6.0         |          |
| 中量沸石 + 低量磷酸二氢钾 Z2P1 | 3.0         | 1:1      |
| 中量沸石 + 中量磷酸二氢钾 Z2P2 | 3.0         | 2:1      |
| 中量沸石 + 高量磷酸二氢钾 Z2P3 | 3.0         | 4:1      |
| 中量沸石 + 低量磷酸氢二铵 Z2D1 | 3.0         | 1:1      |
| 中量沸石 + 中量磷酸氢二铵 Z2D2 | 3.0         | 2:1      |
| 中量沸石 + 高量磷酸氢二铵 Z2D3 | 3.0         | 4:1      |

1.3 测定内容与方法

1.3.1 土壤 pH 值、有效态 Cd 和速效磷含量的测定

土壤 pH 值,采用 1.0:2.5 水土比, pH 计测定<sup>[12]</sup>; 土壤有效态 Cd,采用 DTPA 法对土壤有效态

Cd 进行浸提<sup>[13]</sup>; 土壤中速效磷含量的测定,则采用 0.5 mol 碳酸氢钠浸提.

1.3.2 土壤镉形态的测定

镉形态采用 Tessier 的连续提取方法<sup>[14]</sup>. 它把

重金属分为 5 种形态:交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态。

#### 1.4 数据处理与分析

所有数据均测定 3 次,采用 Microsoft Excel 2003 软件进行分析与制图,数据显著性检验和相关性分析均由 SPSS 17.0 统计软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同改良剂对土壤 pH 的影响

试验结果表明,施入不同改良剂对土壤 pH 的变化有一定的影响(图 1)。在本试验室内培养 50 d 的过程中,pH 值有一定的变化规律。与对照相比,单独施用磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理能提高土壤 pH 值,在同一剂量水平下,随着培养时间的增加,土壤 pH 值先增加后减少,在 15 d 时达到最大值;而在培养 50 d 时,随着剂量水平的增加,土壤 pH 值从 5.25 增加到 5.73 ~ 5.87,土壤 pH 值先增后减,在 2:1 剂量水平时达到最大值,这可能是由于磷酸氢根竞争土壤中的吸附点位引起的,因为磷酸二氢钾是强碱弱酸盐,添加到土壤后,主要是以  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  离子形态存在, $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  交换解吸了吸附在土壤胶体上的  $\text{OH}^-$  而引起土壤 pH 的增加;而 pH 值降低,是因为土壤中的一价阳离子  $\text{K}^+$  的浓度增大,交换解吸了吸附在土壤胶体上的  $\text{H}^+$ 。单独施用磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理却降低了土壤 pH 值,在同一剂量水平下,随着培养时间的增加,土壤 pH 值逐渐降低;而在培养 50 d 时,随着剂量水平的增加,土壤 pH 值的降低幅度逐渐增大,其变化范围是 0.38 ~ 1.26 个单位,在剂量水平为 4:1 时,pH 值达到最小值 3.99,理论上,1 mol  $\text{NH}_4^+$  经消化作用后,可释放 2 mol 的

$\text{H}^+$ <sup>[15]</sup>;虽然  $\text{PO}_4^{3-}$  能使 pH 升高,但由于 K 的移动性强于 P,而  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{K}^+$  的性质极为相似,导致  $\text{NH}_4^+$  在土壤中的移动性可能较  $\text{PO}_4^{3-}$  强,因此,磷酸氢二铵能降低土壤 pH 值。单独施用沸石 Z1 ~ Z3 处理的土壤 pH 值,在同一剂量水平下,随着培养时间的增加,土壤 pH 值先增加,后减少,再趋于稳定,在 15 d 时出现最大值;而在培养 50 d 时,随着剂量水平的增加,土壤 pH 值逐渐增加,土壤 pH 值从 5.25 增加到 5.96 ~ 7.36,在用量水平为 6.0% 时达到最大值 7.36。沸石能提高土壤 pH 值的原因可能是:一方面因为沸石本身的 pH 值很高,因此用量越多,pH 的增加幅度就越大;另一方面,陈梅等<sup>[16]</sup>认为猪粪提高土壤 pH 值与猪粪含有较高的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  有关,这些阳离子能提高土壤的盐基饱和度,从而提高土壤的 pH 值。而沸石中也含有  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等碱土金属离子,这也是沸石能提高土壤的 pH 值的原因。沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理的土壤 pH 值和沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理的土壤 pH 值,在沸石施用量一定的情况下,随着磷酸二氢钾和磷酸氢二铵用量的增加,土壤 pH 也呈现增加的趋势,在 50 d 时,与对照相比,分别提高了 1.60 ~ 1.97 个单位和 1.12 ~ 1.23 个单位,与单施沸石相比,分别提高了 0.50 ~ 0.87 个单位和 0.02 ~ 0.13 个单位。这表明沸石和磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理的土壤 pH 值比沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理的土壤 pH 值增加的大,且均大于沸石单施对土壤 pH 值的影响效果。

### 2.2 不同改良剂对土壤中重金属 Cd 有效态含量的影响

从图 2 可以看出,培养 50 d 时,施用不同改良剂

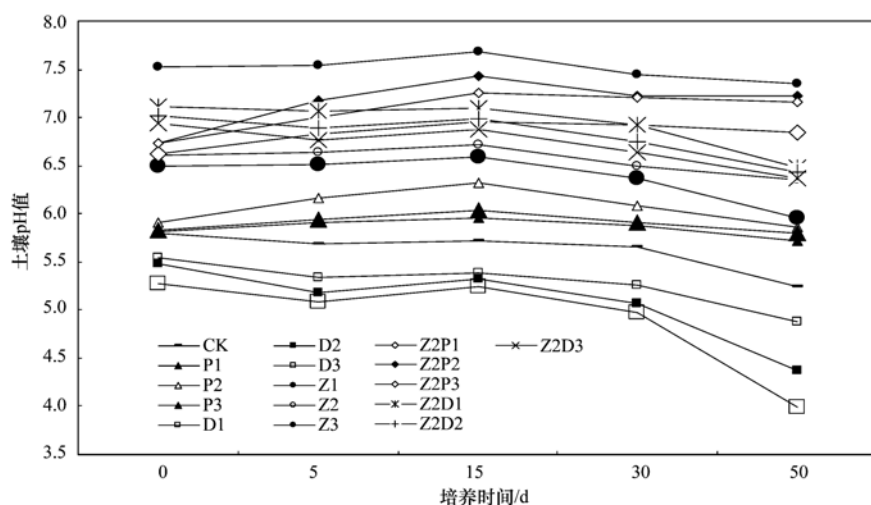
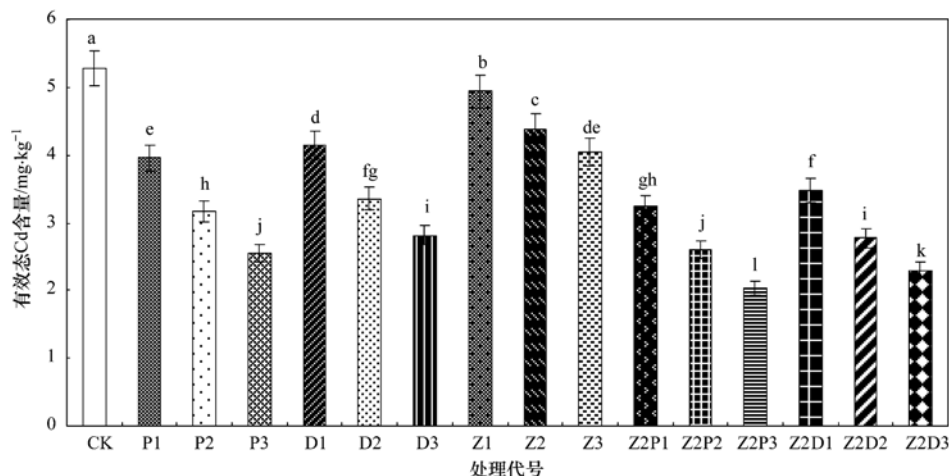


图 1 施用不同改良剂对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effects of application of different modifiers on soil pH value

都能降低土壤中重金属 Cd 有效态含量,并且随着改良剂施用剂量的增加,Cd 有效态含量降低幅度越大.与对照相比,磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理的 Cd 有效态降低了 25.2% ~ 51.7%,磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理的 Cd 有效态降低了 21.6% ~ 46.8%,沸石 Z1 ~ Z3 处理的 Cd 有效态降低了 6.4% ~ 23.2%,沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理的 Cd 有效态降低了 38.6% ~ 61.4%,沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理 Cd

有效态降低了 34.1% ~ 56.4%.由此可见,对重金属 Cd 的稳定效果是沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理 > 沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理 > 磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理 > 磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理 > 沸石 Z1 ~ Z3 处理.试验结果表明,施用磷酸二氢钾、磷酸氢二铵和沸石均能修复 Cd 污染土壤,且沸石和磷酸二氢钾、沸石和磷酸氢二铵配施对 Cd 污染土壤修复效果更佳.



柱上标字母相同表示处理间无显著差异,字母不同表示有显著性差异( $P < 0.05$ ),Duncan 检验,下同

图2 施用不同改良剂对土壤中有效态 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effects of application of different modifiers on the content of available Cd in soil

### 2.3 不同改良剂对土壤中速效磷含量的影响

图3为培养50 d过程中,不同改良剂对土壤中速效磷含量的影响.与对照相比,磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理的土壤在同一时期时,随着剂量水平的增加,速效磷含量逐渐增加;在同一剂量水平时,随着时间的变化,速效磷含量先逐渐降低,在30 d时略有升高.在50 d,最大剂量水平时,速效磷含量是  $426.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理的土壤在同一时期时,随着剂量水平的增加,速效磷含量也在逐渐增加;在同一剂量水平时,随着时间的增长,速效磷含量却在逐渐降低.在施用最大剂量,培养50 d时,土壤速效磷含量为  $412.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .沸石 Z1 ~ Z3 处理的土壤在同一剂量水平时,随着培养时间的增长,速效磷含量先逐渐增加,在50 d时略有降低;在同一时期时,随着剂量水平的增加,速效磷含量逐渐降低.在50 d,最大剂量水平时,速效磷含量是  $43.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理的土壤与磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理的土壤所含有的速效磷含量变化趋势基本一致,在施用最大剂量,培养50 d时,土壤速效磷含量为  $501.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .而沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3

处理的土壤也与磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理的土壤所含有的速效磷含量有相同的变化趋势,在50 d,最大剂量水平时,速效磷含量是  $468.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .由试验结果而知,不同改良剂对土壤中速效磷的处理效果依次是:沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理 > 沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理 > 磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理 > 磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理 > 沸石 Z1 ~ Z3 处理.施用磷酸二氢钾和磷酸氢二铵之所以会增加速效磷含量,是因为它们都是水溶性磷肥,是纯磷试剂;而施用沸石增加速效磷含量的原因是沸石对磷素的吸附结合能低于土壤,吸附的磷素比土壤更容易解吸.

### 2.4 土壤中有有效态 Cd 含量与土壤 pH 值和速效磷含量的相关性分析

分别对土壤 pH 值、速效磷含量与土壤中有有效态 Cd 含量做相关分析,结果见图4.可以看出,土壤 pH 值与有效态 Cd 含量的相关系数仅为  $-0.2216$ ;而土壤速效磷含量与有效态 Cd 含量呈极显著负相关,相关系数是  $-0.9026^{**}$  ( $P < 0.01$ ).

另外,分析结果表明,土壤 pH 值与有效态 Cd



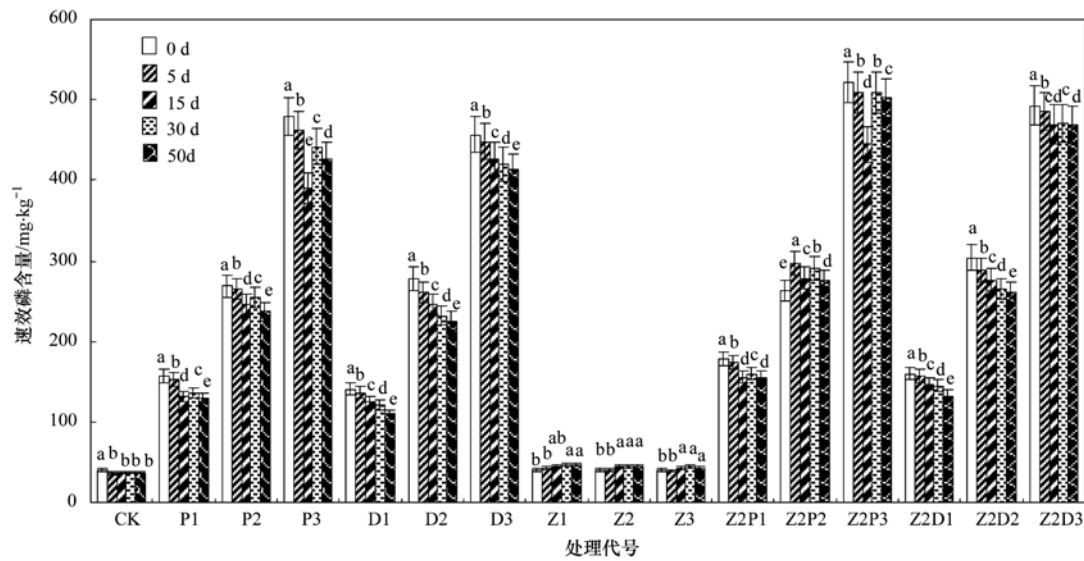


图3 不同改良剂对土壤中速效磷含量的影响

Fig. 3 Effects of application of different modifiers on the content of available phosphorus in soil

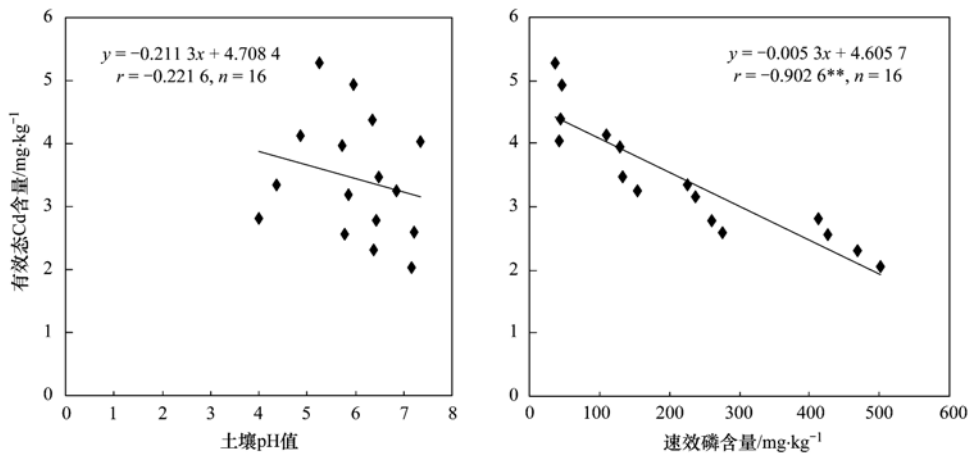


图4 土壤中有效态 Cd 含量与土壤 pH 值和速效磷含量的相关性分析

Fig. 4 Correlation between available Cd content and soil pH value, available phosphorus content

含量存在负相关关系,说明随着土壤 pH 值的升高,有效态 Cd 含量在降低,即 pH 值对降低 Cd 含量起到了一定的作用,是影响 Cd 有效性的因素之一. 土壤速效磷含量与有效态 Cd 含量呈极显著负相关,说明不同改良剂施入土壤后产生的速效磷含量越多,有效态 Cd 的活性越小. 也就是说明了,施用不同改良剂之所以会影响 Cd 的有效性,是因为它们改变了土壤中的磷素含量.

2.5 不同改良剂对土壤中重金属形态的影响

本试验采用研究者在 1979 年提出的五步连续提取法测定重金属 Cd 的 5 种形态. 它是全世界公认的分析土壤和沉积物中重金属形态的最权威的方法之一,并且已广泛应用于土壤中重金属的形态

分析<sup>[17]</sup>及其毒性、生物可利用性等研究<sup>[18,19]</sup>. 它把重金属分为 5 种形态,即交换态 (EXE)、碳酸盐结合态 (CAB)、有机结合态 (OM)、铁锰氧化物结合态 (FMO) 和残渣态 (RES).

重金属的生物有效性包括生物毒性和生物可利用性. 土壤中重金属元素能否被植物所吸收,主要取决于重金属的有效态 (有效性), 重金属的有效态是一个动态平衡的过程,不是某一种形态决定的. 土壤中重金属的生物毒性不但与其总量有关,而且最主要的影响因素是重金属存在的形态和各形态所占的比例<sup>[20]</sup>. 在土壤-植物系统中,各形态 Cd 的生物有效性高低顺序是: 交换态 > 碳酸盐结合态 > 有机结合态 > 铁锰氧化物结合态 > 残渣态<sup>[21]</sup>. 其中,

交换态属于生物可利用态,具有很大的移动性,最易被生物吸收利用. 碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态属于生物潜在可利用态,它们在适当环境条件下,可以释放出来,变为生物可利用态. 残渣态属于生物不可利用态,它极其稳定,对重金属的迁移和生物可利用性贡献不大.

图 5 为培养 50 d 时,施用不同改良剂对土壤中重金属 Cd 形态的影响. 由图可以看出,CK 处理的土壤中重金属 Cd 的主要存在形态是交换态,所占比例为(80.0%),其次是有机结合态(8.0%),残渣态(7.3%),碳酸盐结合态(3.7%)和铁锰氧化物结合态(1.0%). 说明未施用改良剂的外源 Cd 污染的土壤 CK,因土壤自身含有矿物质、有机质和土壤胶体等物质,对 Cd 有一定的吸附效果,土壤有一定的自净能力.

与对照相比,施用不同改良剂后,交换态 Cd 的含量逐渐下降,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 Cd 含量逐渐增加. 随着施用改良剂的剂量水平的增加,重金属 Cd 的 5 种形态含量增减幅度就越大. 在不同改良剂施用最大剂量水平时,土壤中极不稳定的交换态 Cd 的含量下降比

例为:磷酸二氢钾处理(5.2%)、磷酸氢二铵处理(6.1%)、沸石处理(33.1%)、沸石与磷酸二氢钾配施处理(48.5%)和沸石与磷酸氢二铵配施处理(49.8%). 而重金属 Cd 的碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态的含量却在增加. 其中,土壤中最稳定的残渣态 Cd 的含量增加比例是:磷酸二氢钾处理(13.9%)、磷酸氢二铵处理(7.6%)、沸石处理(65.7%)、沸石与磷酸二氢钾配施处理(89.2%)和沸石与磷酸氢二铵配施处理(82.4%). 重金属 Cd 的交换态含量在下降,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态含量在增加,说明对环境变化敏感、生物活性和毒性较大、极易被植物吸收的 Cd 的存在状态逐渐向能够在环境中稳定存在、活性和毒性较小、不易为植物所吸收的存在状态转化. 也说明了施用不同改良剂都能在一定程度上稳定重金属,降低重金属 Cd 的生物有效性和可移动性. 不同改良剂对重金属的稳定效果不同. 其稳定效果的大小为:沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理 > 沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理 > 磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理 > 磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理 > 沸石 Z1 ~ Z3 处理.

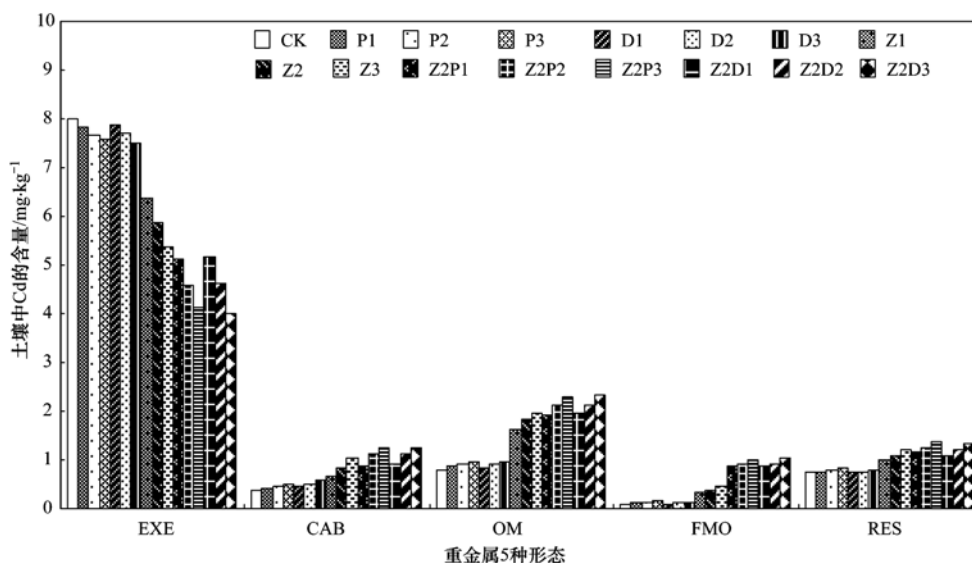


图 5 施用不同改良剂对土壤中重金属形态的影响

Fig. 5 Effects of application of different modifiers on heavy metal speciation in soil

## 2.6 本研究与他人研究成果的对比分析

大量试验表明,增加 pH 值,降低有效态 Cd 含量和增加交换态 Cd 向残渣态 Cd 的转化程度,对修复 Cd 污染土壤有一定的作用.

刘昭兵等<sup>[22]</sup>发现,在  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  施磷水平下,与对照相比,磷酸二氢钾处理的土壤

pH 值分别提高了 0.17 和 0.32. 王永强等<sup>[23]</sup>的研究表明,施加沸石、骨粉、沸石和骨粉配施,使土壤 pH 分别提高了 1、2.8 和 2.9 个单位.

刘昭兵等<sup>[22]</sup>的研究表明,在  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  施磷水平下,磷酸二氢钾使有效态镉含量分别降低了 7.8% 和 9.8%. 李明遥等<sup>[24]</sup>发现,沸石使



有效态 Cd 含量降低了 7.94%、8.67% 和 21.77%。徐峰等<sup>[25]</sup>的研究说明,沸石、骨炭和沸石配施使有效态 Cd 降低了 2.33 和 5.85 个单位。

谢飞等<sup>[26]</sup>发现,与对照相比,施加高剂量沸石,使土壤交换态镉降低了 25.99%,残渣态增加了 10.57%。王永强等<sup>[23]</sup>的研究表明,沸石、骨粉、沸石和骨粉配施,也降低了交换态 Cd 的含量。

本试验研究与他人研究成果相比可知,磷酸盐和沸石是修复重金属 Cd 污染土壤较为明显的改良剂,值得进一步推广。

### 3 结论

(1) 培养 50 d 过程中,土壤的 pH 值发生了一定的变化。其中单独施用的沸石 Z1 ~ Z3 处理的土壤 pH 值 > 磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理的土壤 pH 值 > 磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理的土壤 pH 值。而中量沸石 Z2 及其与磷酸二氢钾、磷酸氢二铵配施后的 pH 值大小为:沸石和磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理的土壤 pH 值 > 沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理的土壤 pH 值 > 沸石 Z1 ~ Z3 处理的土壤 pH 值。土壤 pH 值与有效态 Cd 含量存在负相关关系,相关系数  $r = -0.2216$ 。

(2) 培养 50 d 时,磷酸二氢钾、磷酸氢二铵和沸石均能修复 Cd 污染土壤,但是沸石和磷酸二氢钾、沸石和磷酸氢二铵配施对 Cd 污染土壤修复效果更佳。

(3) 培养 50 d 过程中,施用不同改良剂均能增加土壤中速效磷的含量,但处理效果不同。依次是:沸石与磷酸二氢钾配施 Z2P1 ~ Z2P3 处理 > 沸石与磷酸氢二铵配施 Z2D1 ~ Z2D3 处理 > 磷酸二氢钾 P1 ~ P3 处理 > 磷酸氢二铵 D1 ~ D3 处理 > 沸石 Z1 ~ Z3 处理。土壤速效磷含量与有效态 Cd 含量呈极显著负相关,相关系数  $r = -0.9026$ 。且土壤速效磷含量与交换态 Cd 含量存在负相关关系,相关系数  $r = -0.2850$ 。

(4) 施用不同改良剂后,交换态 Cd 的含量逐渐下降,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 Cd 含量逐渐增加。说明施用不同改良剂都能在一定程度上稳定重金属,降低重金属 Cd 的生物有效性和可移动性。

#### 参考文献:

- [1] 杨科璧. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究[J]. 世界农业, 2007, (8): 58-61.
- [2] 屠乃美, 郑华, 邹永霞, 等. 不同改良剂对铅镉污染稻田的改良效应研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(6): 324-326.
- [3] 刘晓婷, 吕金印, 邸丽俊, 等. 改良剂对镉污染土壤芹菜生长及镉积累的影响[J]. 北方园艺, 2011, (15): 194-197.
- [4] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 314-320.
- [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.
- [6] 吴景贵, 姜岩, 姜亦梅, 等. 天然沸石改良冷浆型水稻土机制的初步研究[J]. 吉林农业大学学报, 1994, 16(3): 63-66.
- [7] 张继宏, 颜丽, 关连珠, 等. 沸石的增产效果及对土壤淋溶水离子的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(3): 123-125.
- [8] Raicevic S, Kaludjerovic-Radoicic T, Zouboulis A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: Theoretical prediction and experimental verification[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 117(1): 41-53.
- [9] McGowen S L, Basta N T, Brown G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 493-500.
- [10] Zwonitzer J C, Pierzynski G M, Hettiarachchi G M. Effects of phosphorus additions on lead, cadmium, and zinc bioavailabilities in a metal-contaminated soil[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 143(1-4): 193-209.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-200.
- [12] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 12-139.
- [13] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有有效态铅和镉的测定[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S1): 300-302.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [15] 张宏彦, 刘全清, 张福锁. 养分管理与农作物品质[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. 216-230.
- [16] 陈梅, 陈亚华, 沈振国, 等. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 173-176.
- [17] Kaasalainen M, Yli-Halla M. Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils[J]. Environmental Pollution, 2003, 126(2): 225-233.
- [18] Arunachalam J, Emons H, Krasnodebska B, et al. Sequential extraction studies on homogenized forest soil samples[J]. Science of the Total Environment, 1996, 181(2): 147-159.
- [19] Morera M T, Echeverría J C, Mazkiarán C, et al. Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, 113(2): 135-144.
- [20] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 89-92.
- [21] Krishnamurti G S R, Huang P M, Van Rees K C J, et al.

Speciation of particulate-bound cadmium in soils and its bioavailability[J]. Analyst, 1995, **120**(3): 659-665.

[22] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(6): 1585-1590.

[23] 王永强, 肖立中, 李伯威, 等. 不同改良剂对复合污染重金属形态与再分配的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(34): 17027-17029, 17037.

[24] 李明遥, 张妍, 杜立宇, 等. 生物炭与沸石混施对土壤 Cd 形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 249-252.

[25] 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.

[26] 谢飞, 梁成华, 孟庆欢, 等. 添加天然沸石和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(8): 3506-3510.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                              |                                                              |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....                                                                                                    | GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>       | (1141) |
| Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....                                                                                                          | LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>                     | (1148) |
| Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....                                                                                                            | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>   | (1154) |
| Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....                                                                                                                                               | CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>            | (1164) |
| Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....                                         | ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>              | (1173) |
| Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....                                                                                         | WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>               | (1182) |
| Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....                                                                                                            | BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>              | (1187) |
| Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....                                    | SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>          | (1195) |
| Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....                                                                                             | YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>           | (1202) |
| Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....                                                                        | HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>                 | (1208) |
| Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....                                                                                         | YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>             | (1217) |
| Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....                                                                                                          | SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>         | (1227) |
| Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....                                                                                        | ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>    | (1234) |
| Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....                                               | JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> | (1241) |
| Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....                                                                                                     | ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long                 | (1249) |
| Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....                             | WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>     | (1256) |
| Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....                                                                | YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>   | (1263) |
| Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....                                                                       | REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>          | (1270) |
| Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....                                                         | ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai                                 | (1277) |
| Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....                                                              | LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>                | (1285) |
| Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....                                         | CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>              | (1293) |
| Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....                                                                                       | WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>    | (1301) |
| Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....                                                                                        | YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>          | (1309) |
| Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....                                                                                   | LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>      | (1317) |
| Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....                                                                                                                       | ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>            | (1326) |
| Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....                                                                                 | ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>    | (1332) |
| Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....                                                                                   | CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>    | (1338) |
| Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....                                                                                                                  | SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>     | (1345) |
| Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....                                                                                     | KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>              | (1352) |
| Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....                                                                     | LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>           | (1359) |
| Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....                                               | HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>           | (1365) |
| Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....                                                                     | XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>          | (1374) |
| Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....                                                                                   | MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>       | (1379) |
| Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....                                                                         | LI Jing, LI Wen-ying                                         | (1385) |
| Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....                                  | LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>               | (1392) |
| Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System .....                                                                                             | ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>     | (1399) |
| Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                                      | WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>              | (1406) |
| Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....       | YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>          | (1412) |
| Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing .....                                                                          | SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>        | (1417) |
| Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....                                                 | ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>          | (1425) |
| Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....                                                                                                                       | SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>        | (1431) |
| Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....                                                                                                        | WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>       | (1437) |
| Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....                                                                                    | DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>            | (1445) |
| Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....                           | QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>              | (1453) |
| Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....                                                                     | WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>             | (1461) |
| Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....                                                                                                                   | CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>      | (1468) |
| Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....                                                                             | XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>         | (1474) |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....                                                                            | GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>                | (1481) |
| A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area ..... | CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>       | (1489) |
| Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....                                             | WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>           | (1497) |
| Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....                                                                                                             | WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>         | (1507) |

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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