2019，38(2): 249-256

农业 环境科 学学报 ***Journal of Agro-Environment Science***

2019年2月

王进进，杨行健，胡 峥，等.基于风险等级的重金属污染耕地土壤修复技术集成体系研究[〕]•农业环境科学学报,2019,38(2)： 249-256.

WANG Jin-jin, YANG Xing-jian, HU Zheng, et al. Research on the risk level-based technology integration for the remediation of heavy metals polluted farm- land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38( 2) : 249-256.

基于风险等级的重金属污染耕地土壤

修复技术集成体系研究

王进进1，2，杨行健1，2，胡 峥1，2，张玉龙1，2，徐会娟 1，2，李永涛1，2\*

(1. 华南农业大学资源环境学院，广州 510642；2.中英环境科学研究中心，华南农业大学，广州 510642)

摘 要：重金属单项控制技术在我国农田土壤修复中已有很多应用，但是面对复杂的土壤污染现状，缺乏基于不同风险等级的控 制技术和治理体系，难以应对污染日益严重的不利局面，因此需要将各种单项修复技术进行合理的集成，形成污染耕地修复处理 技术的筛选与集成方法体系。本研究基于适用于农田土壤修复的单项技术，包括植物修复技术、农艺修复技术、间套种技术、土 壤淋洗技术和土壤钝化技术等，归纳和总结出不同类型技术的技术特性，形成土壤单项修复技术知识库，根据土壤污染风险等 级、土壤理化性质、技术特性和人为因素等提出一种适宜的土壤修复技术筛选与集成的方法，为我国农田土壤修复/安全利用和可 持续利用管理提供技术支撑。

关键词：土壤修复；风险等级；技术集成

中图分类号：X53 文献标志码：A 文章编号：1672-2043(2019)02-0249-08 doi:10.11654/jaes.2018-1584

Research on the risk level-based technology integration for the remediation of heavy metals polluted farmland

WANG Jin-jin1,2,YANG Xing-jian1,2, HUZheng1,2, ZHANG Yu-long1,2, XU Hui-juan1,2, LIYong-tao1,2\*

(1.College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China；2.Joint Institute for En­vironmental Research & Education, LEC-SCAU-GIG, Guangzhou 510642, China)

Abstract：Soil remediation measures have been applied extensively in heavy metal polluted farmland in China. Because the control technol­ogy and remediation system are insufficient basing on different risk levels, it is difficult to deal with the soil pollution which has increasing­ly and seriously negative effects. Thus, it is necessary to integrate reasonably remediation technologies to find out a systematic method which is effective for the remediation of heavy metal polluted farmland . This study is conducted to summarize and make conclusion the characteristics of various technologies which are suitable for polluted soil remediation, including phytoremediation, agronomic measure, in­terplanting, soil leaching and soil passivation, etc. On this basis, we are trying to propose an integration between methodology and technolo­gy considering risk levels of pollution, physical and chemical properties of soil, technical characteristics and human activities, etc. This re­search provides an effective approach to technical support for the remediation and sustainable utilization of heavy metals polluted farm - lands in China.

Keywords：soil remediation; risk level; technology integration

当前世界各国对土壤污染修复技术均进行了广 泛的研究，但与欧美等发达国家相比，我国土地污染 研究起步较晚，且一般为单一的物理、化学与工程方

法，缺乏基于不同风险等级的控制技术、分级管理和 治理体系，难以应对污染日益严重的不利局面，不足 以支撑农产品安全生产和产地环境可持续发展的现

收稿日期：2018-12-13 录用日期：2019-01-28

作者简介:王进进(1988—),男，安徽颍上人，讲师，主要从事重金属污染与修复模式研究。E-mail: [wangjinjin@scau.edu.cn](mailto:wangjinjin@scau.edu.cn)

\* 通信作者 ：李永涛 E-mail：[yongtao@scau.edu.cn](mailto:yongtao@scau.edu.cn)

基金项目：国家科技支撑计划项目(2015BAD05B05)；国家自然科学基金青年科学基金项目⑷601533)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD05B05)； The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41601533)

250 实需求，难以成为保障农田农产品安全生产的主导技 术，而且大部分研究成果尚未进行大规模生产实践。 我国地域辽阔，不同地区土壤类型、气候、水文等有较 大差异，耕地污染类型多样，生态环境风险不等，因此 我国耕地土壤污染防控技术的研究是一项长期、复 杂、艰巨且极其迫切的任务。

由于土壤环境的复杂性，用原有的物理、化学、植 物及微生物等单一的方法对复合污染进行修复，都很 难达到较好的效果，因此需要将各种单项修复技术进 行合理的集成，形成污染耕地过程控制技术体系。耕 地土壤修复技术的集成需要基于不同风险等级的控 制技术，综合考虑各个单项技术的特点、资金投入、分 级管理和治理模式。根据不同地区农业资源实际问 题，针对不同类型农田污染开展安全利用技术研究， 形成相应的技术体系与模式，使这部分耕地的持续安 全利用成为可能，是应对人口迅速增长、耕地面积减 少、环境日趋恶化局面的必然选择，其生态效益、环境 效益和社会效益将十分巨大。

1. 适用于耕地土壤修复的单项技术入库

重金属污染耕地修复的技术集成首先需要对现 有的、适用于农田土壤修复的单项技术进行总结、归

**4**农业环境科学学报卩第38卷第2期

纳和入库。我们选取了植物修复技术、农艺修复技 术、间套种技术、土壤淋洗技术和土壤钝化技术等几 大类技术，通过国内外文献调研、相关国家环境保护 部门门户网站查阅以及专家咨询、研讨等方式，系统 收集和整理现行的耕地土壤修复技术进行入库。根 据现有的各项重金属单项控制技术的研究及工程应 用案例，我们凝练出适用于农田土壤修复的单项技术 推荐及其相应的技术特性，具体如表1~表6。

1. 不同污染风险等级农田土壤的单项修复治 理技术归纳

现阶段污染修复项目资金投入较大，试验技术繁 杂，鉴于有些技术的投资与运行参数不完整、实际应 用时间不长、推广价值有待检验等原因，试点选取的 技术可偏向于植物修复、微生物修复、电化学修复等 原位修复技术。经济条件宽裕的省区，可因地制宜地 开展各类修复技术的试点示范。表7归纳了适用于 不同污染风险等级农田土壤的修复治理技术。

1. 重金属污染耕地修复技术集成总体思路及 筛选步骤

依据农田污染的生态净化功能与机制建立农田

农业环境科学学报

表 **1** 植物修复技术推荐及技术特性

Table 1 Recommendation and technical characteristics of phytoremediation technology

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 植物 Plants | 技术开发程度 Degree of technological development | 适合的 重金属 Heavy metals | 污染程度/污 染风险 Pollution level/risks | 去除效率 Removal efficiency | 修复时间  Remediation period | 成本 Cost | 适合土层 厚度 Soil layer/cm | 生长条件  Growth conditions | 适合的 土壤pH  Soil pH | 技术体系可信程度 及可维护性 Credibility and maintainability | 二次污染 Secondary pollution | 参考文献 References |
| 东南景天 | I | Cd 和 Zn | 中和高 | I | V | I | 0~100 | <1400m的阴湿地带;常见于  华南地区 | 范围较宽；偏  酸性土壤对 | W | I | [1] |
| 蜈蚣草 | I | As、b 和  Hg | 中和高 | I | V | I | 0~20 | 喜温暖潮湿，常见于广西、 广东、云南等地 | 修复有一定 促进作用 | W | I | [2] |
| 龙葵 | I | Cd 和 Ph | 中和高 | I | V | I | 0~80 | 适宜温度2.2~30t，对土壤环境  要求低，喜生于田边，全国均可见 |  | W | I | [3] |
| 天蓝遏兰菜 | I | Cd | 中和高 | I | V | I | — | — |  | W | I | [1] |
| 伴矿景天 | I | Cd 和 Ph | 中和高 | I | V | I | 0~100 | — |  | W | I | [4-6] |
| 海州香薷 | I | Cu | 中和高 | I | V | I | — | 生于山坡路旁或草丛中，常见于 辽宁、山东、河南、江西和广东 |  | W | I | [7-8] |
| 苎麻 | W | Hg | 中和高 | I | V | I | — | 适宜温度15~32t,生于草坡或 | 酸性（pH< | W | I | [9-10] |

山谷，雨量要求800 mm以上，常4.4）影响生长

见于广西、广东、云南和贵州

注:表中“I ”表示最优“『'表示优“皿”表示良好“W”表示一般，V”表示略低“一”表示没有相关数据。技术开发程度表示技术目前的应 用规模;适合土层厚度由植物根系长度范围确定;适合的土壤pH指除过酸或过碱外，以上植物均可用于修复，其中偏酸环境利于重金属浸出，进而 有利于植物修复；技术体系可信程度及可维护性指与其他技术相比，此技术的可信度及是否便于维护。下同。

Note： ' I ' means the best，' II ' means the better，'皿'means good，' W ' means general，' V ' means slightly lower, ' —' means that there is no revelant data. Degree of technological development meant represents the current application scale of the technology；Soil layer means determined by the length range of plant roots；Soil pH means all phytoremediation measures can be used except for in peracid or alkali soils， more suitable in acidic environment since heavy metals are more labile；Credibility and maintainability means the credibility and maintainability of the technology ， compared with other technologies. The same below.

王进进，等:基于风险等级的重金属污染耕地土壤修复技术集成体系研究 251

2019年2月

表 2 低累积作物技术推荐及其技术特性

Table 2 Recommendation and technical characteristics of low accumulation crop technology

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 植物  Plants | 技术开发程度  Degree of technological development | 适合的重金属 Heavy metals | 污染程度/污染风险  Pollution level/risks | 成本  Cost | 技术体系可信程度及可维护性  Credibility and maintainability | 二次污染  Secondary pollution | 参考文献  References |
| 玉米 | I | Cd、Cu 和 Pb | 中和低 | I | 皿 | I | [11-12] |
| 大豆 | II | Cd 和 Pb | 中和低 | I | 皿 | I | [12-13] |
| 甘蓝 | II | Cd | 低 | I | w | I | [14] |
| 白菜 | 皿 | Pb | 低 | I | w | I | [13，15-16] |
| 芹菜 | I | Pb 和 Cu | 低 | I | w | I | [14] |
| 胡萝卜 | 皿 | Cd | 低 | I | w | I | [17] |
| 莴苣 | 皿 | Pb、Cd 和 Cu | 低 | I | w | I | [12，16] |

表 3 间作套种技术推荐及其技术特性

Table 3 Recommendation and technical characteristics of intercropping technology

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 植物  Plants | 技术开发程度 Degree of technological development | 适合的重金属  Heavy metals | 污染程度/ 污染风险 Pollution level/ risks | 去除效率 Removal efficiency | 修复时间  Remediation period | 成本 适合土层厚度 Cost Soil layer/cm | 适合的  土壤pH  Soil pH | 对作物产量 的影响 Effects on crop yield | 技术体系可信程度 及可维护性 Credibility and maintainability | 二次污染  Secondary pollution | 参考文献  References |
| 伴矿景天+玉米间作 | I | Cd 和 Pb | 中和低 | I | V | I 0~100 | 范围较宽； | 增产 | w | I | [4，6] |
| 三叶鬼针草+生菜套种 | I | Pb | 低 | I | V | I 0~20 | 偏酸性土壤 | — | w | I | [18] |
| 东南景天+玉米间作 | I | Cd 和 Pb | 中和低 | I | V | I 0~80 | 对修复有一 定促进作 用，但也增 | 增产 | w | I | [19-21] |
| 东南景天+大豆间作 | I | Cd 和 Pb | 中和低 | I | V | I 0~80 | 增产 | w | I | [21] |
| 龙葵+大葱间作 | I | Cd | 中和低 | I | V | I 0~20 | 加作物的污 | 无影响 | w | I | [22] |
| 鸡眼草+番茄或萝卜 | w | Cd、b 和 As | 中和低 | I | V | I 0~20 | 染风险 | — | w | I | [2] |

表 4 水肥管理技术推荐及技术特性

Table 4 Recommendation and technical characteristics of water and fertilizer management technology

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 肥料  Fertilizers | 技术开发程度  Degree of technological development | 适合的重金属 Heavy metals | 污染程度/污染风险  Pollution level/risks | 成本  Cost | 技术体系可信程度及可维护性 Credibility and maintainability | 二次污染  Secondary pollution | 参考文献  References |
| 有机肥 | I | Cd 和 Pb | 低和中 | I | I | w | [9，23-26] |
| 腐植酸肥 | I | Hg、Cd和Pb | 低和中 | I | I | I | [10，27] |
| 氮磷钾肥 | I | Cd 和 As | 低和中 | I | I | w | [22-24，28-31] |
| 富硒叶面肥 | I | Cd | 低和中 | I | I | I | [22，27] |
| 叶面硅肥 | I | 重金属 | 低和中 | I | I | I | [32] |

表 5 土壤淋洗技术推荐及技术特性

Table 5 Recommendation and technical characteristics of soil leaching technology

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 淋洗剂  Eluants | 技术开发程度 Degree of technological development | 适合的  重金属 Heavy metals | 污染程度/ 污染风险 Pollution level/ risks | 去除效率 Removal efficiency | 修复时间  Remediation period | 成本 适合土层厚度 Cost Soil layer/cm | 适合的  土壤pH  Soil pH | 适合的土壤传导率  Soil conductivity/  (:m・s-1 | 适合的有机质 技术体系可信程度 含量 及可维护性  Organic matter Credibility and content/% maintainability | | 二次污染  Secondary pollution | 参考文献  References |
| EDDS | I | As、b 和 Hg | 中和高 | I | I | V 均可 | 范围较宽； | >10-5 | <10 | I | w | [33-35] |
| 柠檬酸 | I | Cd 和 Pb | 中和高 | I | I | V | 偏酸性土 壤对修复 有一定促 |  |  | I | I | [33，36-41] |
| 皂素 | I | Hg、：d 和 Pb | 中和高 | I | I | V |  |  | I | I | [39，42-43] |
| 茶皂素 | w | Cd | 中和高 | I | I | V | 进作用 |  |  | I | I | [44] |
| 清水 | I | 重金属 | 轻 | V | I | I |  |  |  | I | I | — |

污染的分级分类管控技术模式具有重要意义。根据 各项单项过程控制技术进行不同风险等级耕地过程  
污染源和污染物情况，确定污染农田风险等级，基于 控制技术的组合集成，针对不同风险等级的污染耕地

252

农业环境科学学报

第38卷第2期

表 6 钝化技术推荐与技术特征

Table 6 Recommendation and technical characteristics of immobilization technology

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 钝化剂  Passivants | 技术开发程度  Degree of technological development | 适合的重金属 Heavy metals | 污染程度/ 污染风险  Pollution  level/risks | 去除效率  Removal efficiency | 修复时间  Remediation period | 成本  Cost | 土壤pH  Soil pH | 技术体系可信程度  及可维护性  Credihility and maintainahility | 二次污染  Secondary pollution | 参考文献  References |
| 石灰 | I | 重金属 | 中和高 | I | I | I | 2~5 | I | I | [45] |
| 石灰石 | I | 重金属 | 低 | I | I | I | 4~7 | I | I | [45] |
| 堆肥 | I | Ph、Cd、Cu 和 Zn | 低 | W | I | I | 均可 | I | I | [46] |
| 磷矿粉 | I | Pb | 中和高 | I | I | I | 均可 | I | I | [47-48] |
| 沸石 | I | Ph、Cd、Cu、Zn、Hg 和 Ni | 高和中 | I | I | I | 均可 | I | I | [49] |
| 生物炭 | I | Ph、Cd、Cu 和 Zn | 中和低 | I | I | I | 4~8 | I | I | [50-54] |
| 凹凸棒石 | I | Ph.Cd 和 Hg | 中和低 | I | I | I | 均可 | I | I | [55-57] |
| 钢渣 | I | Cd、As 和 Cr | 中和低 | I | I | I | 均可 | I | W | [58-59] |
| 羟基磷灰石 | I | Ph | 中 | I | I | I | 6~9 | I | I | [60-63] |
| 针铁矿 | W | Cd、As 和 Cr | 中 | I | I | I | 均可 | I | I | [64] |
| 赤泥 | I | 重金属 | 中和高 | I | I | I | 均可 | I | W | [65-67] |
| 微生物 | W | 重金属 | 低 | W | I | W | 6~8 | W | I | [68] |

表 7 不同污染风险等级农田土壤修复治理技术汇总

Table 7 Summary of soil remediation techniques for farmland of different pollution risk levels

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 污染风险等级  Pollution level/risks | 大类技术 Types of technology | 潜在技术  Potential technologies |
| 高 | 植物修复技术 | 东南景天、伴矿景天、龙葵、天蓝遏蓝菜、海州香薷和苎麻超富集技术 |
|  | 工程物理技术 | 客土法、换土法、隔离包埋技术 |
|  | 土壤淋洗技术 | EDDS、柠檬酸、皂素和茶皂素淋洗技术 |
|  | 土壤钝化技术 | 石灰、磷矿粉、沸石和赤泥钝化技术 |
| 中 | 植物修复技术 | 东南景天、伴矿景天、龙葵、天蓝遏蓝菜、海州香薷和苎麻超富集技术 |
|  | 低累积作物技术 | 低累积玉米和大豆技术 |
|  | 水肥管理技术 | 有机肥、腐植酸肥、氮磷钾肥、富硒叶面肥、叶面硅肥 |
|  | 间作套种技术 | 伴矿景天+玉米间作、东南景天+玉米间作、东南景天+大豆间作、龙葵+大葱间作、 鸡眼草+番茄或萝卜技术 |
|  | 土壤淋洗技术 | EDDS、柠檬酸、皂素和茶皂素淋洗技术 |
|  | 土壤钝化技术 | 石灰、磷矿粉、沸石、生物炭、凹凸棒石、羟基磷灰石、针铁矿和赤泥钝化技术 |
| 低 | 低累积作物技术 | 低累积玉米、大豆、甘蓝、白菜、番薯、芹菜、胡萝卜和莴苣技术 |
|  | 水肥管理技术 | 有机肥、腐植酸肥、氮磷钾肥、富硒叶面肥、叶面硅肥 |
|  | 间作套种技术 | 三叶鬼针草+生菜套种、伴矿景天+玉米间作、东南景天+玉米间作、东南景天+大豆间作、  龙葵+大葱间作、鸡眼草+番茄或萝卜技术 |
|  | 土壤钝化技术 | 石灰石、堆肥、生物炭、凹凸棒石、微生物 |
|  | 土壤淋洗技术 | 清水 |

需要因地制宜地选取合适的过程控制组合技术体系。 耕地土壤污染的风险管控模式和技术集成体系的选 择需要考虑污染风险等级、污染源、污染途径、污染土 壤特性、单项技术体系特性五个影响因素。在修复技 术的选择上需要确保污染农田的修复效果以及农田 安全利用和风险控制的要求，优先选择能够降低污染 物毒性、迁移性和含量的技术。

在选取的单项过程控制技术入库后，需要建立单 项过程控制技术的筛选机制。根据耕地污染风险等 级，结合影响区域耕地土壤环境质量的因素，并考虑 耕地土壤污染修复的单项过程控制技术主要受土壤 特性、单项技术的适用性等方面因素的影响。在两个 影响因素中选取特征因子如土壤pH、土壤机械组成 等，开展典型案例分析、专家经验论证，将各个单项过 程控制技术的特点与特征因子对应。构建单项过程 控制修复技术体系中单项技术的筛选机制，以为后续

土壤环境保护和综合管控模式和技术集成体系做基 石铺垫。

技术选取的基本原则是：（1）短期效果；（2）长期 效果；（3）对污染物毒性、迁移性和数量减少的程度； （4）可操作性；（5）成本；（6）符合应用与其他相关要 求；（7）全面保护人体健康与环境；（8）政府的接受程 度；（9）公众接受程度。

上述内容中推荐了一些可行的技术，而技术的选 择需要结合具体的农田土壤环境质量特征来进行。 因此，重金属污染农田土壤修复技术的筛选步骤应如 图1进行。

（1） 基于污染风险筛选：根据第2部分提到的待 修复农田土壤环境质量调查，提取出污染农田土壤污 染风险等级和重金属等信息，在表1~表5中初步筛选 出符合污染等级和重金属类型的技术群1。

（2） 基于土壤理化性质筛选：在技术群1中，按照 技术开展所对应的农田土壤相关性质指标（如土壤 pH、土壤传导系数、土壤污染的深度等），筛选出技术 群2。

（3） 基于技术特性筛选：在技术群 2中，依据小类 技术的技术特性（如开发程度、可维护性、修复效率 等），筛选出技术群 3。

耕地土壤修复技术筛选

基于污染风险筛选

污染风险等级  
重金属种类

技术开发程度  
修复效率  
可维护性等

「至二二

: 技术群组1 -

L j

…………\_

基于土壤理化性质筛选

二至二二

: 技术群组2 I

L *j*

基于技术特性筛选：

二至二二

i 技术群组3 !

;基于人为因素筛选"  
二二至 「

i 潜在备选技术 1

图 1 重金属污染农田土壤修复技术的筛选步骤

土壤pH  
土壤传导系数

资金成本

进度安排

Figure 1 Screening steps of remediation techniques for heavy  
metal contaminated farmland soils

（4）基于人为因素筛选：在技术群 3中，按照修

复过程进度安排、资金成本等因素，筛选出技术群 4，即潜在备选技术，相关人员可在本技术群中选出 合适的技术。若技术群4中包含两种以上的技术， 则需要进一步开展实验论证。

1. 重金属污染农田集成修复技术展望

综上可知，单项修复治理技术都有各自的技术特 点和适用范围，它们在重金属类型相对单一的农田土 壤上可以发挥良好的效果。然而，随着工业的不断发 展，投入农田中的污染物类型日趋复杂。不同污染源 作用下，农田土壤中重金属的类型、浓度和价态均有 差异。因此，很难仅靠单项技术完成大面积的农田修 复。在单项技术无法达到修复目标时，应考虑进行有 效的技术集成。可根据污染源、污染物类型和浓度， 确定农田污染等级，并基于各单项修复治理技术进行 合理的技术集成，形成几套针对于不同风险等级的且 具有潜在推广价值的组合技术。

参考文献：

1. 何启贤.镉超富集植物筛选研究进展[J].环境保护与循环经济,

2013, 33（1）： 46-49.

HE Qi-xian. Advances in screening of cadmium hyperaccumulators[J].

*Environmental Protection and Circular Economy*, 2013, 33（1）： 46-49.

1. 叶文玲,樊 霆,鲁洪娟,等.蜈蚣草的植物修复作用对土壤中砷总 量及形态分布的影响研究[J]. 土壤通报,2014,45（4）: 1003-1007. YE Wen-ling, FAN Ting, LU Hong-juan, et al. The effects of phytore­mediation with *Pteris vittata* on arsenic concentration and morphologi­cal distrihution in arsenic contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45（4）：1003-1007.
2. Zou X L. Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil hy co­cropping *Solanum nigrum* L. with ryegrass associated with endophytic hacterium[J]. *Separation Science and Technology*, 2015, 50（12）： 1806­1813.
3. Deng L, Li Z, Wang J, et al. Long-term field phytoextraction of zinc / cadmium contaminated soil hy *Sedum plumbizincicola* under different agronomicstrategies[J].*InternationalJournalofPhytoremediation*,2016, 18（ 2）： 134-140.
4. Luo K, Ma T, Liu H, et al. Efficiency of repeated phytoextraction of cadmium and zinc from an agricultural soil contaminated with sewage sludge[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17（6）： 575-582.
5. 赵 冰,沈丽波,程苗苗,等.麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦- 水稻生长及锌镉吸收性的影响[J].应用生态学报,2011, 22（10）: 2725-2731.

ZHAO Bing, SHEN Li-ho, CHENG Miao-miao, et al. Effects of inter­cropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat­rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (10)：2725-2731.

1. 刘婷婷, 彭 程,王 梦, 等. 海州香薷根细胞壁对铜的吸附固定机 制研究[J].环境科学学报,2014, 34(2):514-523.

LIU Ting-ting, PENG Cheng, WANG Meng, et al. Mechanism of fixa­tion and adsorption of copper on root cell wall of *Elsholtzia splendens* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 514-523.

1. 潘 澄,滕 应,骆永明,等. 紫花苜蓿、海州香薷及伴矿景天对多 氯联苯与重金属复合污染土壤的修复作用[J]・土壤学报,2012, 49 ( 5): 1062-1067.

PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, et al. Effects of *Medicago sativa*, *Elsholtzia splendens* and *Sedum plumbizincicola* remedying soils contaminated with both polychlorinated biphenyls and heavy metals[J].

*Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49( 5): 1062-1067.

1. 马铁铮，马友华,付欢欢，等.生物有机肥和生物炭对Cd和Pb污染 稻田土壤修复的研究[J].农业资源与环境学报,2015, 32(1)： 14-19. MA Tie-zheng, MA You-hua, FU Huan-huan, et al. Remediation of bi­ological organic fertilizer and biochar in paddy soil contaminated by Cd and Pb[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32 (1)：14-19.
2. 徐 升,弓晓峰.苎麻修复重金属污染土壤及强化措施研究进展 [J].广东农业科学,2014, 41(17): 153-159, 169.

XU Sheng, GONG Xiao-feng. Research progress in ramie remediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals[J].

*Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(17)：153-159, 169.

1. 郭晓方,卫泽斌,丘锦荣,等. 玉米对重金属累积与转运的品种间

差异[J].生态与农村环境学报,2010, 26(4)： 367-371.

GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, QIU Jin-rong, et al. Differences be­tween corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals

[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4)：367- 371.

1. 谭 玲.菜心Cd低累积品种对Cd、Pb、Cr多种重金属的吸收特性 [D]. 广州：暨南大学, 2014.

TAN Ling. Absorption characteristics of Cd, Pb, Cr heavy metals in Cd low-accumulation varieties[D]. Guangzhou：Jinan University, 2014.

1. 智 杨.大豆品种间镉铅低积累性与品质差异性的评估与相关性 [D]. 沈阳：东北大学, 2015.

ZHI Yang. Evaluation and correlation of low accumulation and quality differences of cadmium and lead in soybean varieties[D]. Shenyang： Northeastern University, 2015.

1. 黄志亮.镉低积累蔬菜品种筛选及其镉积累与生理生化特性研究 [D]. 武汉：华中农业大学, 2012.

HUANG Zhi-liang. Screening of cadmium low accumulation vegeta­ble varieties and their cadmium accumulation and physiological and biochemical characteristics[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural Uni­versity, 2012.

1. 刘维涛,周启星,孙约兵,等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异 研究[J].中国环境科学,2009, 29(1)：63-67.

LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety differ­ence of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage[J].

*China Environmental Science*, 2009, 29(1)： 63-67.

1. 毛海立,余荣龙. 铅锌矿渣堆周围农田土壤中铜和铅的分布分析

[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(25)：7884-7885, 8010.

MAO Hai-li, YU Rong-long. Distribution of copper and lead in soil around lead - zinc tailing[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(25)：7884-7885, 8010.

1. 娄 伟.镉铅低累积萝卜、胡萝卜、茄子品种筛选及萝卜镉累积规 律研究[D].武汉:华中农业大学,2010.

LOU Wei. Screening of cadmium and lead low accumulation radish, carrot and eggplant varieties and accumulation of cadmium in radish [D]. Wuhan： Huazhong Agricultural University, 2010.

1. Cid C V, Rodriguez J H, Salazar M J, et al. Effects of co-cropping *Bidens pilosa*( L.) and *Tagetes minuta*( L.) on bioaccumulation of Pb in *Lactuca sativa(L.)*growing in polluted agricultural soils[J]. *Interna­tional Journal of Phytoremediation*, 2016, 18( 9)： 908-917.
2. Jiang C, Wu Q T, Sterckeman T, et al. Co-planting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to mono-cropping from contami­nated soils[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4)： 391-395.
3. 黑 亮，吴启堂,龙新宪，等.东南景天和玉米套种对Zn污染污泥 的处理效应[J].环境科学,2007, 28(4): 852-858.

HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect ofco-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4) 852-858.

1. 蒋成爱,吴启堂,吴顺辉,等.东南景天与不同植物混作对土壤重 金属吸收的影响[J].中国环境科学,2009, 29(9)：985-990.

JIANG Cheng-ai, WU Qi-tang, WU Shun-hui, et al. Effect ofco- cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *Chi­na Environmental Science*, 2009, 29(9)： 985-990.

1. 冯子龙,卢 信,张 娜,等. 农艺强化措施用于植物修复重金属 污染土壤的研究进展[J].江苏农业科学,2017, 45(2): 14-20.

FENG Zi-long, LU Xin, ZHANG Na, et al. Advances in research on agronomic intensification measures for phytoremediation of heavy met­al contaminated soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(2)： 14-20.

1. 于祎飞,李保国,齐国辉,等.土壤农艺调控措施对苹果和果园土 壤镉污染的影响[J].水土保持学报,2010, 24(2): 197-200, 204.

YU Yi-fei, LI Bao-guo, QI Guo-hui, et al. Effects of several agrono­my regulations on soil cadmium pollution in the apple orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24( 2)：197-200, 204.

1. 窦春英.施肥对东南景天吸收积累锌和镉的影响[D].杭州：浙江 林学院, 2009.

DOU Chun-ying. Effect of fertilization application on soil heavy metal phytoremediation by *Sedum alfredii*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2009.

1. 李 贺.不同农艺措施对黑麦草、地肤、遏蓝菜修复Cd污染土壤 的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.

LI He. The effects of *Perennial ryegrass*, *Kochia scoparia*, *Thlaspi ar- vense* on Cd contaminated soil with different agronomic measures[D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2013.

1. 李廷强,杨肖娥,龙新宪.东南景天提取污染土壤中锌的潜力研究 [J].水土保持学报,2004, 18(6):79-83.

LI Ting-qiang, YANG Xiao-e, LONG Xin-xian. Zinc phytoextraction ability from polluted soil of hyperaccumulating ecotype of *Sedum al- fredii* Hance[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18( 6)：79-

L 王进进,等:基于风险等级的重金属污染耕地土壤修复技术集成体系研究

2019年2月

83.

1. 汤海涛,李卫东,孙玉桃,等.不同叶面肥对轻度重金属污染稻田 水稻重金属积累调控效果研究[J].湖南农业科学,2013(1):40-44. TANG Hai-tang, LI Wei-dong, SUN Yu-tao, et al. Controlling effects of different foliar fertilizers on heavy metal accumulation in rice plant in mild heavy metal polluted paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sci­ences*, 2013( 1)：40-44.
2. 苟文龙,李元华,万勤明,等.尿素不同施用量对多花黑麦草产草 量及经济效益的影响[J].草业与畜牧,2015(6):20-21, 59.

GOU Wen-long, LI yuan-hua, WAN Qin-ming, et al. Effects of addi­tional urea application levels on grass yield and economic henefits of italian ryegrass[J]. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2015(6)：20- 21, 59.

1. 廖晓勇,陈同斌,谢 华,等.磷肥对砷污染土壤的植物修复效率 的影响：田间实例研究[J].环境科学学报,2004, 24(3):455-462. LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-hin, XIE Hua, et al. Effect of applica­tion of P fertilizer on efficiency of As removal from As contaminated soil using phytoremediation：Field study[J]. *Acta Scientiae Circumstan- tiae*, 2004, 24(3)：455-462.
2. 丁凌云,蓝崇钰,林建平,等.不同改良剂对重金属污染农田水稻 产量和重金属吸收的影响[J].生态环境,2006, 15(6): 1204-1208. DING Ling-yun, LAN Chong-yu, LIN Jian-ping, et al. Effects of dif­ferent amendments on rice yield and heavy metal ahsorption in heavy metal contaminated farmland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15 (6)：1204-1208.
3. 于祎飞.土壤镉污染及农艺调控对苹果树体镉积累影响的研究 [D]. 保定：河北农业大学, 2011.

YU Wei-fei. Effects of soil cadmium pollution and agronomic regula­tion on cadmium accumulation in apple trees[D]. Baoding：Agricultur- al University of Hehei, 2011.

1. 王世华,罗群胜,刘传平,等.叶面施硅对水稻籽实重金属积累的 抑制效应[J].生态环境,2007, 16(3): 875-878.

WANG Shi-hua, LUO Qun-sheng, LIU Chuan-ping, et al. Inhihitory effect of foliar application of silicon on accumulation of heavy metals in rice seeds[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3)：875-878.

1. 刘 霞,王建涛，张 萌，等.螯合剂和生物表面活性剂对Cu、Ph 污染塿土的淋洗修复[J].环境科学,2013, 34(4)： 1590-1597.

LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, et al. Remediation of Cu- Ph-contaminated loess soil hy leaching with chelating agent and hio- surfactant[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4)：1590-1597.

1. Yang R, Luo C, Zhang G, et al. Extraction of heavy metals from e­waste contaminated soils using EDDS[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(11)：1985-1994.
2. 赵 娜,崔岩山，付 彧,等.乙二胺四乙酸(EDTA)和乙二胺二琥 珀酸(EDDS)对污染土壤中Cd.Ph的浸提效果及其风险评估[J]. 环境化学,2011,30(5) 958-963.

ZHAO Na, CUI Yan-shan, FU Yu, et al. Extraction of Cd and Ph from contaminated soil hy ethylenediaminetetraacetic acid( EDTA) and ethylenediamine disuccinic acid(EDDS) and its risk assessment[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30( 5)：958-963.

1. Zhang H, Gao Y, Xiong H. Removal of heavy metals from polluted soil using the citric acid fermentation hroth：a promising washing agent[J].

255

*Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24( 10)：9506- 9514.

1. Wang J, Jiang J, Li D, et al. Removal of Ph and Zn from contaminated soil hy different washing methods：The influence of reagents and ultra- sound[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22 (24)：20084-20091.
2. 平 安，南 绘.有机酸对土壤重金属的浸提效果研究[J].农业科 技与装备,2011(6)：24-25,28.

PING An, NAN Hui. Effect of organic acids on the extraction of heavy metals[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2011, ( 6) 24-25, 28.

1. 许中坚,许丹丹,郭素华,等.柠檬酸与皂素对重金属污染土壤的 联合淋洗作用[J].农业环境科学学报,2014, 33(8): 1519-1525.

XU Zhong-jian, XU Dan-dan, GUO Su-hua, et al. Comhined leach­ing of heavy metals in soil hy citric acid and saponin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33( 8)：1519-1525.

1. 许端平，李晓波.有机螯合剂对污染土壤中Ph和Cd淋洗修复研 究[J].地球环境学报,2015, 6(2): 120-126.

XU Duan-ping, LI Xiao-ho. Removing Ph and Cd from soil hy organ­ic chelators[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(2)：120-126.

1. 魏世强,木志坚,青长乐.几种有机物对紫色土镉的溶出效应与吸 附-解吸行为影响的研究[J]. 土壤学报,2003, 40(1):110-117.

WEI Shi-qiang, MU Zhi-jian, QING Chang-le. Effects of several or­ganic suhstances on the soluhility and adsorption-desorption hehav- iors of cadmium in purplish soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (1) 110-117.

1. Maity J P, Huang Y M, Hsu C M, et al. Removal of Cu, Ph and Zn hy foam fractionation and a soil washing process from contaminated in­dustrial soils using soapherry-derived saponin：A comparative effec­tiveness assessment[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(10)：1286-1293.
2. 常 红,李利芬，黄 丽.皂角苷对红壤和黄褐土中Ph2 +、Zn2+的解 吸特征[J].农业环境科学学报,2017, 36(1): 93-100.

CHANG Hong, LI Li-fen, HUANG Li. Desorption characteristics of Ph2+ and Zn2+ from red soil and yellow-cinnamon soil hy saponin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1) 93-100.

1. 张中文.茶皂素对土壤重金属污染淋洗修复的影响研究[D].泰 安：山东农业大学, 2009.

ZHANG Zhong-wen. Study on the effect of tea saponin on the leach­ing and repair of heavy metal pollution in soil[D]. Taian：Shandong Agricultural University, 2009.

1. Han D H, Lee J H. Effects of liming on uptake of lead and cadmium hy *Raphanus sativa*[J]. *Archives of environmental contamination and Toxicology*, 1996, 31(4) 488-493.
2. Ruttens A, Colpaert J V, Mench M, et al. Phytostahilization of a metal contaminated sandy soil. II : Influence of compost and / or inorganic metal immohilizing soil amendments on metal leaching[J]. *Environ­mental Pollution*, 2006, 144(2)：533-539.
3. Yang J, Moshy D. Field assessment of treatment efficacy hy three methods of phosphoric acid application in lead-contaminated urhan soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 366(1)：136-142.
4. Zhu J, Cai Z, Su X, et al. Immohilization and phytotoxicity of Ph in contaminated soil amended with Y — polyglutamic acid, phosphate

rock, and Y — polyglutamic acid-activated phosphate rock[J]. *Environ­mental Science and Pollution Research*, 2015, 2(4)：2661-2667.

1. Yao A, Wang Y, Ling X, et al. Effects of an iron-silicon material, a synthetic zeolite and an alkaline clay on vegetable uptake of As and Cd from a polluted agricultural soil and proposed remediation mecha- nisms[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 39(2)：353- 367.
2. 张 燕,铁柏清,刘孝利,等.玉米秸秆生物炭对稻田土壤砷、镉形 态的影响[J].环境科学学报,2018, 38(2)：715-721.

ZHANG Yan, TIE Bo-qing, LIU Xiao-li, et al. Effects ofwaterlogging and application of bio-carbon from corn stalks on the physico-chemi­cal properties and the forms of arsenic and cadmium in arsenic and cadmium-contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2)：715-721.

1. 石红蕾,周启星. 生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展 [J].生态学杂志，2014, 33(2):486-494.

SHI Hong-lei, ZHOU Qi - xing. Research progresses in the effect of biochar on soil - environmental behaviors of pollutants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2) 486-494.

1. 郭文娟,梁学峰,林大松,等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉 的吸附特性研究[J].环境科学,2013, 34(9):3716-3721.

GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, et al. Adsorption of Cd2+ on biochar from aqueous solution[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9)：3716-3721.

1. Qiu Z, Chen J, Tang J, et al. A study of cadmium remediation and mechanisms：Improvements in the stability of walnut shell-derived biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636：80-84.
2. Jung K W, Lee S Y, Lee Y J. Facile one-pot hydrothermal synthesis of cubic spinel-type manganese ferrite / biochar composites for envi­ronmental remediation of heavy metals from aqueous solutions[J]. *Bio­resource Technology*, 2018, 261 ：1-9.
3. 杜志敏,郝建设,周 静,等.四种改良剂对铜和镉复合污染土壤 的田间原位修复研究[J]. 土壤学报,2012,49(3)：508-517.

DU Zhi-min, HAO Jian-she, ZHOU Jing, et al. Field *in-situ* remedia­tion of Cu-Cd polluted soil by four amendments[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3) 508-517.

1. 陈展祥,陈传胜,陈卫平,等. 凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生 物有效性的影响与机制[J].环境科学,2018, 39(10)：4744-4751.

CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, et al. Ef­fect and mechanism of attapulgite and its modified materials on bio­availability of cadmium in soil[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 ( 10) 4744-4751.

1. Mao X, Wang L, Gu S, et al. Synthesis of a three-dimensional net­work sodium alginate-poly( acrylic acid) /attapulgite hydrogel with good mechanic property and reusability for efficient adsorption of Cu2+ and Pb2+[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 16(2) 653-658.
2. 邓腾灏博,谷海红,仇荣亮.钢渣施用对多金属复合污染土壤的改 良效果及水稻吸收重金属的影响[J].农业环境科学学报,2011, 30 ( 3)：455-460.

DENG Teng-hao-bo, GU Hai-hong, QIU Rong-liang. Ameliorative effects of steel slag application on multi-metal contaminated soil and heavy metal uptake of rice[J]. *Journal of Agro -Environment Science*, 2011, 30(3)：455-460.

1. 陈 晓，侯文华,汪群慧.电炉钢渣对水中Cu2 +、Cd2+和Pb2 +的去除 作用[J].环境科学,2009, 30(10):2940-2945.

CHEN Xiao, HOU Wen - hua, WANG Qun-hui. Removal of metal ions Cu2+, Cd2+and Pb2+ from solutions by sorption on slag[J]. *Environ­mental Science*, 2009, 30(10)：2940-2945.

1. 董黎静,朱志良,仇雁翎,等.羟基磷灰石及其复合材料对重金属 的吸附研究进展[J].化学通报,2013, 76(5):405-410.

DONG Li-jing, ZHU Zhi-liang, QIU Yan-ling, et al. Advance in re­search of heavy metals removal by hydroxyapatite and its composite [J]. *Chemistry*, 2013, 76(5) 405-410.

1. 邢金峰,仓 龙,葛礼强,等.纳米羟基磷灰石钝化修复重金属污 染土壤的稳定性研究[J].农业环境科学学报,2016, 35(7): 1271- 1277.

XING Jin-feng, CANG Long, GE Li-qiang, et al. Long-term stability of immobilizing remediation of a heavy metal contaminated soil with nano-hydroxyapatite[J]. *Journal of Agro -Environment Science*, 2016, 35(7)：1271-1277.

1. Zhang Z, Li M, Chen W, et al. Immobilization of lead and cadmium from aqueous solution and contaminated sediment using nano-hy- droxyapatite[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2)：514-519.
2. Mavropoulos E, Rossi A M, Costa A M, et al. Studies on the mecha­nisms of lead immobilization by hydroxyapatite[J]. *Environmental Sci­ence & Technology*, 2002, 36(7)：1625-1629.
3. Hartley W, Lepp N W. Remediation of arsenic contaminated soils by iron-oxide application, evaluated in terms of plant productivity, arse­nic and phytotoxic metal uptake[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(1)：35-44.
4. 杨俊兴, 陈世宝, 郭庆军. 赤泥在重金属污染治理中的应用研究进 展[J].生态学杂志,2013, 32(7)： 1937-1944.

YANG Jun-xing, CHEN Shi-bao, GUO Qing-jun. Application of red mud in the remediation of heavy metals pollution：A review[J]. *Chi­nese Journal of Ecology*, 2013, 32(7)：1937-1944.

1. 黄蔼霞,许 超,吴启堂,等.赤泥对重金属污染红壤修复效果及 其评价[J].水土保持学报,2012, 26(1):267-272.

HUANG Ai-xia, XU Chao, WU Qi-tang, et al. Remediation effects and their evaluation of red mud amendment in heavy metal polluted red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation,* 2012, 26( 1)：267- 272.

1. Gray C W, Dunham S J, Dennis P G, et al. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red- mud[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3) 530-539.
2. 李韵诗,冯冲凌,吴晓芙,等.重金属污染土壤植物修复中的微生 物功能研究进展[J].生态学报,2015, 35(20):6881-6890.

LI Yun-shi, FENG Chong-ling, WU Xiao-fu, et al. A review on the functions of microorganisms in the phytoremediation of heavy metal- contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20)：6881 - 6890.