污染场地土壤修复技术及其产业经营模式分析

李社锋 李先旺 朱文渊 覃 慧 刘更生

( 武汉都市环保工程技术股份有限公司，武汉 430071 )

摘要: 基于我国土壤污染形势及污染场地土壤修复市场现状，介绍了几种典型的污染场地土壤修复技术，结合各种污 染场地土壤修复项目特点，系统地分析了现阶段国内染污场地土壤修复产业的经营模式。

关键词:土壤污染; 重金属; 土壤修复; 产业经营模式

DOI**:**10. 13205 / jhjgc201306024

**ANALYSIS OF REMEDIATION TECHNOLOGIES AND INDUSTRY BUSINESS**

**MODEL OF CONTAMINATED SOIL SITES**

Li Shefeng Li Xianwang Zhu Wenyuan Qin Hui Liu Gengsheng

( Wuhan City Environment Protection Engineering Limited Company，Wuhan 430071 ，China)

Abstract: On account of the grim situation of soil pollution and the huge market potential of contaminated soil remediation demand in China ，several typical contaminated soil remediation technologies are introduced in this paper． According to the characteristics of contaminated soil remediation projects in contaminated site ，several feasible industry business models of contaminated soil remediation are discussed systematically．

Keywords : soil pollution ; heavy metal ; soil remediation ; industry business model

1. 产业背景

**1. 1** 土壤污染形势严峻

随着我国工业化、城市化进程的加快和环保要求 的提高**，**部分工矿企业的搬迁、停产或倒闭遗留了大 量的污染场地**，**农药、杀虫剂和化肥的大量使用**，**工业 “三废”的不断增加**，**使土壤污染问题日趋严重。

土壤污染涉及化工、采矿、冶金、电镀、炼油等行 业的点源污染或面源污染**，**主要污染物包括重金属 **(** Heavy Metals**)** 、挥发性有机物 **(** VOCs**)** 、半挥发性有 机物**(** SVOCs**)** 、多环芳烃**(** PAHs**)** 、多氯联苯**(** PCBs**)** 、 石油烃**(** TPHs**)** 、农药**(** Pesticides**)** 等**，**对人体健康具有 极大威胁**［**1**］**。

目前,我国受污染的耕地面积已达2 000万hm2**,** 每年产出受重金属污染的粮食约1 200万t**,**尤其是 近年来频繁发生的土壤污染事件**,** 如2004 年北京地 铁毒地事件**(** 农药污染**)** 、2007 年苏州古城区毒地事 件**(** 化工污染**)** 、2008 年云南阳宗海砷污染事件、2009

\*国家火炬计划项目(2013GH061656,国科发计2013］ 571号)；中国中 冶“三五”重大科技专项( 0012012010,中冶科［2012］5 号)。 年南京乐居雅毒地事件**(** 化工污染**)** 、2010 年安庆儿 童血铅超标事件、2011 年云南曲靖铬渣污染事件等**,** 直接和间接经济损失巨大**［**2**］,** 土壤污染问题成为社 会各界广泛关注的焦点。

**1. 2** 各级政府日益重视

针对逐渐突显的土壤污染问题**,**各级政府日益重 视**,**相关政策陆续出台**:**

《国家环境保护“十二五”规划》中已将加强土壤 环境保护纳入“十二五”期间需要切实解决的突出环 境问题**,** 要求强化土壤环境监管**,** 加强重点行业和区 域重金属污染防治**,**开展污染场地再利用的环境风险 评估**,** 将场地环境风险评估纳入建设项目环境影响评 价**,** 禁止未经评估和无害化治理的污染场地进行土地 流转和开发利用。

国务院批复的《重金属污染综合防治“十二五” 规划》中**,**18 个省区的 4 452 家企业被纳入重点监控 名单**,**138 个区域被列为重点治理区域。内蒙古、江 苏、浙江、江西、河南、湖北、湖南、广东、广西、四川、云 南、陕西、甘肃、青海14 个省区被列为重点治理省区。 同时要求到2015 年**，**重点区域的重点重金属污染排 放量要比 2007 年减少 15% **，**非重点区域的重点重金 属污染排放量不超过2007 年的水平。这是第一次将 重金属排放作为约束性指标**，**同时限定总量排放。

各级地方政府有关重金属污染综合防治的“十 二五”规划也纷纷出台**，**治理项目多**，**投入资金量大。 如《湖北省重金属污染综合防治“十二五”规划》中涉 重金属企业332 家**，**其中纳入国家规划内项目166 个 **（** 投资额31. 71 亿元**） ，**属于湖北省内规划项目164 个 **（** 投资额 110. 71 亿元 **） ，**总投资额 142. 42 亿元。 **1. 3** 相关法规、标准体系有待健全

目前**，**美国、英国、荷兰、加拿大、澳大利亚和新西 兰等发达国家基于多种污染土壤修复技术及其大规模 商业化应用经验**，**已经形成相对完善的法规和标准体 系**，**包括土壤环境质量标准和污染土壤修复标准**［**3**］**。

我国对于有关土壤污染防治及污染土壤治理相 关技术的研究起步较晚**，**法律法规尚待建立**（** 《土壤 污染防治法》草案和编制说明至今仍未被全国人大 审议**） ［**4**］，**土壤质量标准和污染土壤修复技术标准体 系尚有待健全**［**5**］，**如 GB 15618—1995《土壤环境质量 标准》中指标偏少**，**不能满足土壤污染控制和农产品 质量安全要求**;** HJ/T 25—1999《工业企业土壤环境质 量风险评价基准》适用于工业企业选址阶段及生产 活动发生后界区内土壤的环境质量风险评价**，**而居住 类项目选址阶段则没有土壤环境质量风险评价基准**，** 居住用地土壤安全存在隐患**;** 《污染场地环境监测技 术导则》、《场地环境调查技术规范》、《污染场地风险 评价导则》、《污染场地土壤修复技术导则》等技术标 准仍在征求意见**，**尚未发布实施。

1. 污染土壤修复技术研究进展

污染场地修复可采用原位修复和异位修复**，**主要 包括物理修复、化学修复、生物修复及联合修复等典 型技术。

**2. 1** 物理修复

物理修复是常用的污染土壤修复技术之一**，**主要 包括热驱脱附、隔离封存、电动修复、净土置换等典型 工艺。

热驱脱附技术**，**主要针对含有热敏性污染物污染 的土 壤**，**采用加热升温方法**，**将挥发性污染物**（** 如 VOCs、SVOCs、Hg、As、Se 等**）** 从 土 壤 中 驱 出**，**配 套 气 体净化控制二次污染**，**实现污染土壤治理。该方法可 以实施原位修复**，**具有修复速度快、周期短等优点**，**但 同时存在能耗大、易使土壤有机质和结构水遭到破坏 等问题。

隔离封存技术**，**主要针对高浓度、难降解的重度 惰性污染土壤**，**采用物理措施将污染土壤与环境隔离 开**，**防止污染扩散**，**如安全填埋。该技术多用于异位 修复**，**主要特点是工艺相对简单、处理速度快、施工周 期短**，**但是封存厂址选址要求苛刻**，**且审批周期长。

电动修复技术**，**主要针对低渗透性土壤中的铅、 砷、镉、铜等污染土壤修复**，**是在电场作用下通过电迁 移、电渗流或电泳的方式将土壤中的污染物带到电极 两端**，**经工程化的收集系统收集起来集中处理**［**6**］**。 电动修复具有能耗低、修复彻底、经济效益好等优点**，** 但受限于电场建立及影响控制能力**，**在大规模、大体 量污染土壤修复应用中有一定的局限性。 **2. 2** 化学修复

化学修复是通过向土壤中加入固化剂、有机质、 化学试剂、天然矿物等，改变土壤的pH值、Eh等理 化性质**，**经氧化、还原、沉淀、吸附、抑制、络合或螯合 等作用来降低污染物的生物有效性**，**主要包括药剂淋 洗、稳定固化和有机质改良等典型工艺。

药剂淋洗技术**，**是通过具有提高重金属可溶性的 药剂溶液来淋洗污染土壤**，**使吸附或固定在土壤颗粒 上的重金属形成溶解性的离子或金属—药剂络合物 **（** 或螯合物**） ，**把土壤中的重金属转移到溶液中去**，** 配 合重金属废液净化处理工艺**，**实现污染土壤修复。常 用的淋洗药剂包括有机或无机酸、 碱、 盐和 螯 合 剂**［**7**］**。如应用较多的 EDTA**，** 对土壤中多种重金属有 较高的螯合作用**，** 其金属螯合物在环境中稳定**，** 且对 生物的毒性较小**［**8**］**。

稳定固化技术**，**是在污染土壤中加入化学药剂来 改变土壤的理化性质**，**通过重金属的吸附或矿化作用 改变其在土壤中的存在形态**，**降低其生物有效性和迁 移性。稳定固化普遍应用于原位修复和异位修复**，** 具 有修复效果好、速度快、周期短等特点**，**与隔离封存工 艺配套使用**，**尤其适用于重金属重度污染的污染土壤 治理**［**9**］**。

**2. 3** 生物修复

生物修复是指利用土壤中的植物、动物、微生物 以及植物与微生物的综合体**，** 吸收、富集或转化土壤 中的污染物质**，**最终达到清除土壤中污染物。包括植 物修复、动物修复和微生物修复。植物修复主要利用 植物对污染物的吸收、降解、转化和挥发**［**10**］;** 微生物修复机理包括生物吸附、细胞代谢、表面生物大分子 吸收转运、生物吞饮、沉淀和氧化还原等。同物理化 学方法相比**,** 生物修复具有可基本保持土壤的理化特 性、污染物降解完全、处理成本低等优点**,**但也存在修 复时间长、受环境因素的影响大、一般情况下超累积 植物对污染物的选择性强等问题。

**2. 4** 联合修复

联合修复是组合利用多种修复技术**,**或者以一种 修复技术为主**,** 辅以其他方法将土壤中的污染物去 除**,** 具有较高的污染土壤修复效率、效益。

多数污染土壤中的污染物不是单一和孤立存在 的**,**针对有机物和重金属、重金属和重金属等多种污 染物并存形成的复合污染土壤特性**,** 结合物理修复、 化学修复、生物修复技术的不同修复机理所具有的工 艺特点**,** 联合修复不仅具有单一修复方式往往不能达 到的修复效果**,**而且处理效率更高、技术经济效益更 好**,** 实际工程应用中也较多。

1. 工程特点分析

**3. 1** 工程特点

**3.1.1** 针对性强**,**一地一策

污染场地土壤修复技术涉及多种污染因子治理、 不同污染场地特点、不同土地开发要求等**,** 没有一种 通用的修复工艺技术流程能满足各种类型的污染土 壤评价与修复项目。每一个污染场地的污染成因、特 征污染物组成及其分布特点都直接影响或决定着污 染土壤治理的工艺、成本和效果。因此污染场地土壤 修复技术必须具有极强针对性。

**3. 1. 2** 时效性强**,** 一时一策

理论上**,** 只要时间足够长**,** 污染土壤均能通过自 有修复能力实现功能再造。但实际治理项目涉及开 发利用周期要求、场区地质地形限制、行政管理权限、 技术经济效益等复杂影响**,**而且不同时段的修复标准 也有差异**,** 不论采取原位修复、异地修复或者多种处 理技术联合修复等修复方案**,**都有极强的时效性。 **3.1.3** 二次污染**,**严格控制

污染土壤修复的同时**,**必须严格控制修复过程中 存在或潜在的二次污染。生态修复或工程治理不仅 要保障恢复土壤功能的目标**,**而且要保障污染物的有 效消解或安全转移**,**避免水体**（** 地表水和地下水**）** 、气 体**（** 大气环境**）** 和修复区域周边的土壤受到直接或间 接污染。因此**,** 土壤修复技术、工艺必须保证所用药 剂的使用安全**,**必须周密考虑尾气、尾水的有组织控 制和安全处理。

**3. 2** 典型案例

某市城区改造工程中**,** 拟利用铅冶炼厂搬迁遗留 厂址建设学校**,**属于重金属污染场地开发利用**,** 采用 物理 －化学联合修复技术。

通过现场检测发现**,** 厂区墙体不同标高处重金属 含量不同**,**且有一定的规律性。图 1、图 2 给出了该 铅厂某厂房外墙不同标高处 Pb 和各种重金属的浓度 分布。由图1、图2 可见**:**厂房外墙外表面 +0.5 m 处 Pb 含量达 1 574. 45 mg/kg**,** +1.0 m 处为97.11 mg/ kg**,** + 1. 5m 处为 77. 21 mg/kg**,**从 + 0. 5 m 到 +1.0 m**,** 随着标高的增加**,** Pb 浓度迅速降低**;** 从 + 1. 0 m 到 +1. 5 m**,** Pb 浓度逐渐降低**,** 但降低趋势变缓。这是 因为厂房外墙外表面的 Pb 污染源主要是漂浮在空气 中的铅尘、含铅废水等**,** 靠近地面处**,** Pb 污染源源强 较强**,**导致靠近地面处 Pb 污染比较严重**,**随着墙体标 高的增加含 Pb 污染物的源强逐渐减弱**,** Pb 污染物浓 度随之逐渐降低**,** 其他重金属污染物随墙面标高的分 布与 Pb 大体相似。明晰这些规律对场地重金属污染 修复治理方案的制定有重要指导意义。

1800

1600

1400 石 1200 g 1000 5 800 £ 600

400

200

图 1 厂房外墙不同标高处的 Pb 浓度分布

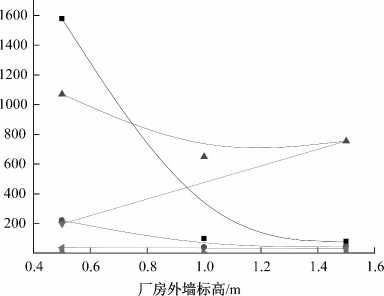
0.5 1.0 1.5

厂房外墙标高/m

Fig． 1 The distribution of Pb concentration at different  
elevations on workshop exterior wall

由于该污染场地拟用于建设学校**,**因此应选用比 较严格的标准**,** 如 HJ 350—2007《展览会用地土壤环 境评价标准**（** 暂行**）** 》A 级标准。 根据污染土壤的空 间分布**,** 结合勘测网格点位坐标、标高参数定位**,** 利用 专业软件分析**,** 计算出该场地超过 HJ 350—2007 中 A 级标准限值的污染土壤的三维分布如图3 所示。

根据污染场地后续用途**,**基于污染场地的土壤污 染特点和外部条件**,** 结合工艺实施要求**,** 本项目决定 采用“净土置换+污染土壤固化稳定后异地封存”修



■ Pb； • As ； Ba

(一，空MUI)、\*袒與端刪

图 2 厂房外墙不同标高处的重金属浓度分布 Fig． 2 The distribution of heavy metals concentration at different elevations on workshop exterior wall

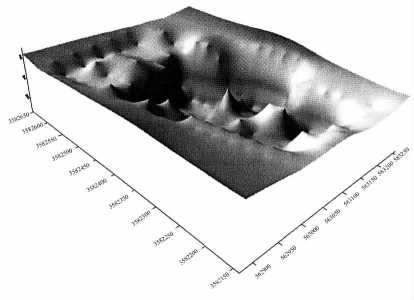


图3超过HJ 350—2007中A级标准限值的污染物空间分布三维图

Fig． 3 The 3 -D diagram of spatial distrbution of pollutants exceeded class-A standard limit in HJ 350—2007

复治理方案。

1. 产业经营模式分析 污染场地土壤修复涉及污染场地普查、环境影响 评价、修复工程建设和土地二次开发等环节**，** 包括创 新技术研究、关键工艺开发、装备和材料制造、工程项 目设计和施工、过程监督控制和后评估等构建的产业 链**，**在我国具有巨大的市场潜力**，** 但尚处于市场培育 阶段**，** 属于新兴产业。

但限于污染场地土壤修复的工程特点**，**如污染物 在土壤中的滞留时间长**，** 具有难降解性、隐蔽性和不 可逆性等**，** 导致污染场地多存在历史遗留问题**，** 致使 修复工程必须面对修复工艺复杂、成本较高等技术难 题**，** 同时必须面对责任主体追溯难度大、 修复治理工 程资金筹措困难等管理难题**[**11**]，** 污染场地修复产业 经营模式属于“摸着石头过河”**，** 机遇与风险并存。

参考国外发达国家的土壤修复技术研究和产业 发展经验**，** 结合我国国情及现阶段有限的修复治理工 程经验**，** 我国污染场地治理的产业经营模式包括但不 限于**:**

1. “谁污染**，**谁治理”模式**:** 对于污染责任主体明 确的污染场地**，**可采用此模式。此模式由污染责任主 体筹措或主要承担污染场地土壤修复工程费用**，**通过 具有相应资质的专业工程公司实施修复治理**，**政府相 关职能部门监督、验收。
2. “谁使用**，**谁治理”模式**:** 对于污染责任主体不 明确**，**具有一定的高值化潜力的污染场地**，** 可采用此 模式。此模式由污染场地的开发使用者筹措或主要 承担污染场地土壤修复工程费用**，**通过具有相应资质 的专业工程公司实施修复治理**，**政府相关职能部门监 督、 验收。
3. “政府出资”模式**:** 对于污染责任主体不明确**，** 修复后作为公益用途的污染场地**，**可采用此模式。此 模式由所在地区的政府负责筹措或主要承担污染场 地土壤修复工程费用**，**通过具有相应资质的专业工程 公司实施修复治理**，**政府相关职能部门监督、验收。
4. RT (Remedy-Transfer**)**模式：即垫资修复模 式。由污染场地所有者授权具有相应资质的专业工 程公司实施修复治理**，**政府相关职能部门监督、验收**;** 修复治理费用由专业工程公司先行垫付**，**达到污染场 地所有者规定的土地使用质量要求后**，**污染场地所有 者按修复合同约定价格及支付条件履约。
5. ROT **(** Remedy-Operate-Transfer**)** 模式**:** 即“修 复 － 开发 － 移交”模式。
6. ROO **(** Remedy-Operate-Own**)** 模式**:** 即“修复 － 开发 －拥有”模式。
7. TRT **(** Transfer-Remedy-Transfer**)** 模 式**:** 即“受 让－修复 －转让”模式。

参考文献

1. 徐良将，张明礼，杨浩． 土壤重金属污染修复方法的研究进展

[J]． 安徽农业科学，2011，39( 6) : 3419-3422．

1. 白彦真，谢英荷，张小红． 重金属污染土壤植物修复技术研究

进展J .山西农业科学，2012, 40(6) : 695-697.

1. 王虹，马娜，叶露，等． 国外土壤污染防治进展及对我国土壤

保护的启示J .环境监测管理与技术，2006, 18(5): 51-53.

1. 徐应明.污染土壤修复、诊断与标准体系建立的探讨J].农 业环境科学学报， 2007， 26(2):413-418.
2. 崔芳， 袁博. 污染土壤修复标准及修复效果评定方法的探讨

[J]. 中国农学通报， 2010， 26(21): 341-345.

( 下转第 **103** 页 )

与垃圾组分主成分进行拟合**,** 其回归方程为**:**

灰 分 = － 1. 495F1 － 0. 089F2 + 0. 044F3 + 0. 692F4 +59. 742 **(** 8**)**

该方程F = 1. 704 <2. 96 = F°.9**,**回归效果不显 著。 表6 是通过模型计算出的理论值与实际值的比 较情况。 由表6 可以看出**:**理论值与实际值存在一定 偏差**,**偏差范围在10%以内**,** 说明该模型在一定程度 上反映了垃圾灰分比例的变化情况**,**但仍需进一步修 改完善。

表 6 灰分比例计算值与实际值比较

Table 6 Comparison of the calculated value of ash  
proportion with the actual one

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 月份 | 灰分实  际值/% | 灰分计  算值/% | 偏差 | 相对偏差/% |
| 9 | 57. 53 | 62. 93 | 5. 40 | 9. 39 |
| 10 | 61.10 | 63. 11 | 2. 01 | 3. 29 |
| 11 | 55. 15 | 53. 76 | -1.39 | - 2. 52 |
| 12 | 55. 13 | 55. 41 | 0. 28 | 0. 51 |
| 1 | 55. 60 | 58. 66 | 3. 06 | 5. 50 |
| 2 | 58. 01 | 56. 80 | - 1. 21 | - 2. 09 |
| 3 | 55. 62 | 58. 21 | 2. 59 | 4. 66 |
| 4 | 59. 68 | 58.19 | - 1. 49 | - 2. 50 |
| 5 | 60. 62 | 58. 75 | -1.87 | - 3. 08 |
| 6 | 70. 37 | 64. 01 | - 6. 36 | - 9. 04 |
| 7 | 64. 85 | 61.58 | - 3. 27 | - 5. 04 |
| 8 | 58. 20 | 60. 46 | 2. 26 | 3. 88 |

**3** 结论

1. 本研究运用主成分分析法**,** 有效地提取生活 垃圾组分的信息**,** 用 4 个主成分代替原有的众多指 标**,**消除指标间的相关影响**,** 实现了高维变量的降维 处理。
2. 通过生活垃圾含水率模型计算出的理论值与 实际值拟合情况良好**,** 该模型对生活垃圾含水率的预

>« »O« »O« »O« »O« »O« »O« »O« »O« »O« »O« »O« 3

( 上接第 **99** 页 )

1. 王义，黄先飞，胡继伟，等.重金属污染与修复研究进展JJ].

河南农业科学,2012,41( 4) : 1-6．

[7 ] Dermont G,Bergeron M,Mercier G,et al. Soil washing for metal

removal: A review of physical / chemical technologies and field applications [J ] . Journal of Hazardous Materials,2008,152: 1-31.

[8 ] Wu L H, Luo Y M, Xing X R, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk [J ] . Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 102: 307-318.测和估计具有一定推广价值和实用价值**,**也为今后研 究渗滤液产量与垃圾组分、垃圾含水率之间的关系提 供一定的理论依据。

1. 通过生活垃圾灰分比例模型计算出的理论值 与实际值有一定的偏差**,**计算结果具有一定的参考价 值**,** 但模型尚需进一步修改完善以提高拟合准确性。 该模型对今后垃圾焚烧厂炉渣产量预测有一定借鉴 意义。

参考文献

[1 ] 李睿，李帆.城市生活垃圾成分分析的重要性J].环境卫生工

程,2009,17( S1):108-109.

1. 刘东,江丁酉,喻晓,等. 武汉市城市生活垃圾组分变化的主成 分分析J .环境卫生工程,2001,9(4): 173-174.
2. 荣波,卫潘明,李彦富,等.北京市生活垃圾成分分析及对应处

理方式对策研究J .污染控制,2004( 10):30-31.

1. CJ/T 3039—95城市生活垃圾采样和物理分析方法S].
2. 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件

[J .统计研究,2005(3):65-69.

1. 徐雅静，汪远征.主成分分析应用方法的改进J].数学的实践 与认识,2006,36( 6) :68-75.
2. 范通达.基于主成分分析的生活垃圾产生量模型研究J].环 境卫生工程,2009,17(2):41-42.
3. 唐家富，李国建.城市垃圾填埋场渗滤液处理工艺比较J .环 境卫生工程,1995(2):15-19.

[9 李海红,巩雪松,同帜.多元线性回归预测模型在农村生活垃圾

产量预测中的应用J .西南农业学报，2010,23 (4) : 1325- 1328.

作者通信处 陈朱蕾 430074 湖北省武汉市华中科技大学环境科 学与工程学院环境楼南 209 室

电话 ( 027) 87792151

E-mail czlgroup@ yeah. net

2012-12-15 收稿

[10 Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-

contaminated land by trees-a review [ J . Environment International, 2003, 29: 529-540.

[11 蒙莉娜, 郑新奇, 王淑晴. 发达国家污染场地再开发实践经验

对北京市的启示J .资源与产业，2007, 9(5): 91-96.

作者通信处 李社锋 430071 武汉武昌区中北路122 号东沙大厦 15 楼武汉都市环保工程技术股份有限公司

E-mail lishefeng@ ccepc. com

2013 -05 -01 收稿

9 郝汉舟, 陈同斌, 靳孟贵, 等. 重金属污染土壤稳定/固化修

复技术研究进展J .应用生态学报，2011, 22(3): 816-824.