多级筛分式淋洗设备在复合污染土壤修复  
项目中的工程应用

熊惠磊 王 璇 马 骏 夏凤英 刘渊文 杨远强 王亚晨

（ 北京建工环境修复股份有限公司，北京 100015 ）

摘要: 以受重金属、多环芳烃复合污染的工业遗留场地为修复对象，运用多级筛分式淋洗设备对复合污染土壤进行工 程化实施，综合考虑场地污染土壤理化性质、污染物分布规律与污染物存在形态等因素，对污染土壤进行 7 级筛分和 淋洗。运行结果表明: 该设备操作简单、处理效率高、运行费用低，淋洗出料可达到修复标准，处理达标的石块和砾石 可用于场地回填; 砂砾、粗砂、中粗砂和细砂可作为建筑材料; 仅有泥饼需要进行后续固化稳定化处理。该设备实现了 我国自主研发土壤修复淋洗技术装备在应用层面从无到有的突破。

关键词: 多级筛分; 土壤淋洗; 复合污染; 土壤修复

DOI: 10. 13205 /j． hjgc． 201607037

ENGINEERING APPLICATION OF MULTIL~SIEVING SOIL WASHING EQUIPMENTS

IN CO-CONTAMINATED SOIL REMEDIATION PROJECT

XIONG Hui-lei，WANG Xuan，MA Jun，XIA Feng-ying，LIU Yuan-wen，YANG Yuan-qiang，WANG Ya-chen  
( BCEG Environmental Remediation Co． ，Ltd，Beijing 100015 ，China)

Abstract : A multi-sieving equipment was designed and put into operation for a soil remediation project with commingled heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbon ( PAHs ) contamination． Considering the basic characteristic of contaminated soil ， distribution and existing froms of the existing contaminants and so on ，the T-stage separation and wash was adapted to remedy this co-contaminated field． The running results for the soil washing equipment demonstrated that it was a high-efficiency ，low- cost system that was easy to operate． The treated soil can meet the specific remediation standards． After separating and washing ，the stone and gravel could be backfilled; grit ，thick sand ，medium thick sand ，and fine sand could be used as building materials ; only mud cake should be treated by the solidfication / stabilization process． It is an important breakthrough for the full-scale engineering application of soil washing technology in China．

Keywords : mutil-sieving; soil washing ; commingled contamination; soil remediation

**0** 引 言

国家环保部和国土资源部于 2014 年联合发布的 《全国土壤污染调查公报》显示: 全国土壤污染总体超 标率为 16. 1% ，迫切需要可工程应用的土壤修复技 术［1］。目前，在土壤修复领域中可采用生物、物理、化 学或联合技术，但是这些技术普遍存在修复周期长且 成本高昂的缺点［2-3］。土壤淋洗技术具有工艺简单、处 理范围广、修复效率高和治理费用相对低廉的优 点［4-8］，已成为当前国外应用较广的土壤修复方法之 一，尤其是日本、欧盟和美国已拥有成熟的技术、设备

收稿日期: 2015 －11 －03 与工程案例。如美国新泽西州的 Vineland Chemical 超 级基金场地使用淋洗技术在 2003—2007 年期间处理 了 410 000 t 砷污染土壤，淋洗系统最大处理能力为 70 t /h; 英国伦敦奥运园区所在地含石油、 汽油、 氰化 物、 砷、 铅、低含量放射性物质和有毒工业溶剂等多种 污染物，2006—2009 年由阿特金斯公司主导完成了土 壤淋洗修复工程，处理污染土壤方量达到 100 万 m3［9］。 与此同时，我国的土壤淋洗修复仍处于起步阶 段，可规模化应用的土壤淋洗技术及成套设备研制相 对滞后［10-11］，已有的研究多集中于淋洗剂的筛选、 设 备研发或实验样机中试、 污染物去除等方面，难以应 对当前土壤污染的严峻形势［12］。因此，自主研发多 级筛分式淋洗设备的工程化应用，不仅可推动土壤淋 洗技术的产业化和市场化，更将对我国的土壤修复行 业具有积极影响。

**1** 污染土壤检测

**1. 1** 主要污染物辨识

污染土壤来自辽宁省大连市某化工厂遗留场地， 采样深度0 ~2.5 m,污染土壤基本理化性质及其风 险筛选标准见表1。

据表 1 所示: 该土壤属重金属和多环芳烃复合型 污染, 检出的污染物主要包括 3 种重金属和 7 种多环 芳烃类( PAHs) , 分别是砷、铅、汞、萘、苯并( a) 蒽、苯 并( k) 荧蒽、苯并( a) 芘、茚并( 1, 2, 3-cd) 芘和二苯并 ( a, h) 蒽, 其中以重金属砷和铅超标最为严重, 并伴 有苯并( a) 蒽、苯并 ( b) 荧蒽、苯并 ( a) 芘和茚 并 芘 ( 1, 2, 3-cd) 4 种多环芳烃类有机物超标。

1. **2** 粒径分布与污染物分布

污染土壤中粒径为＞100 mm和W0. 06 mm的土壤 颗粒的质量分数较大( 详见表 2) , 分别为 19. 68% 和 30. 82% 。重点分析了关注污染物在土壤粒径分布。 重金属检测结果表明: 随着粒 径 减小, 土 壤颗粒 吸

表 1 污染土壤基本理化性质及其风险筛选标准

Table 1 Basic characteristics of the contaminated soil and

screening values

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 检测项目 | 原状土污染物浓度 | 筛选值 |
| pH 值 | 9. 70 | — |
| 含水率/% | 14. 78 | — |
| w(砷)/ (mg\*kg\_1) | 624 | 20. 00 |
| w(汞)/ (mg\*kg\_1) | 0. 99 | 10. 00 |
| w(铅)/ (mg・kgJ ) | 3690. 00 | 400. 00 |
| w(萘)/ (mg^kg-1) | 0. 35 | 50. 00 |
| *w(*苯并(a)蔥)/ ( mg'kg-1) | 8. 20 | 0. 50 |
| w(苯并(b)荧蔥)/(mg・kg-1) | 10. 40 | 0. 50 |
| w(苯并(k)荧蔥)/(mg・kg-1) | 3. 87 | 5. 00 |
| w (苯并(a)芘)/ (mg'kg-1) | 8. 07 | 0. 20 |
| w (二苯并(a, h)蔥)/ (mg'kg-1 ) | 1. 36 | 0. 05 |
| w (茚并(1,2,3-cd)芘)/ (mg'kg-1) | 6. 07 | 2. 00 |

注: 国内尚无统一的土壤污染物风险筛选标准,本场地土壤关注 污染物风险筛选标准采用目前国内唯一已正式颁布的北京 DB11 /T 811—2011《场地土壤环境风险评价筛选值》。

附重金属铅和砷的质量浓度逐渐增加, 且不同粒径级 别土壤颗粒的铅、砷浓度都超过筛选值; PAHs 关注污

染物质量分布与重金属相似, 随着粒径减小, 土壤颗  
粒吸附 PAHs 类污染物的质量浓度逐渐增加, 且粒径

较细的土壤颗粒上 PAHs 污染物多数超过筛选值。

表 2 土壤粒径比例与污染物分布

Table 2 The soil particles proportion and the pollutants distribution

粒径区间 / mm

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | >100 | 10-100 | 2. 0 - 10 | 1. 0 - 2. 0 | 0. 25 - 1. 0 | 0. 06 - 0. 25 | W0.06 | W100 |
| 土质类型 | 石块 | 石块 | 砂子 | 砂子 | 砂子 | 砂子 | 黏土 | 原状土 |
| 颗粒百分比/% | 19. 68 | 6. 27 | 11. 22 | 8. 95 | 9. 36 | 13.7 | 30. 82 | 100 |
| *w(*砷)/ (mg'kg-1) | 160 | 177 | 236 | 258 | 410 | 530 | 843 | 624 |
| w(铅)/(mg・kg-1) | 942 | 808 | 1 220 | 1 630 | 2 830 | 4 080 | 5 100 | 3 690 |
| w (苯并(a)蔥)/ (mg・kg-1) | 1.1 | 3. 35 | 4. 4 | 6. 32 | 6. 84 | 7. 77 | 12.3 | 8. 2 |
| w (苯并(b)荧蔥)/ (mg'kg -1) | 1. 57 | 4. 13 | 5. 25 | 7. 36 | 8 | 10.4 | 18. 8 | 10.4 |
| w(苯并(a)芘)/ (mg・kg-1) | 1.12 | 2. 94 | 3. 96 | 5. 85 | 6. 16 | 7. 96 | 13.9 | 8. 07 |
| *w(*茚并(1,2,3-cd)芘)/ (mg'kg-1) | 0. 86 | 1. 99 | 2. 75 | 4. 06 | 4. 46 | 5. 94 | 11.2 | 6. 07 |

注: 由于重金属和 PAHs 污染物集中于小粒径物料中,原状土与各粒径范围物料的污染物检测值存在偏差。

**2** 工程设计

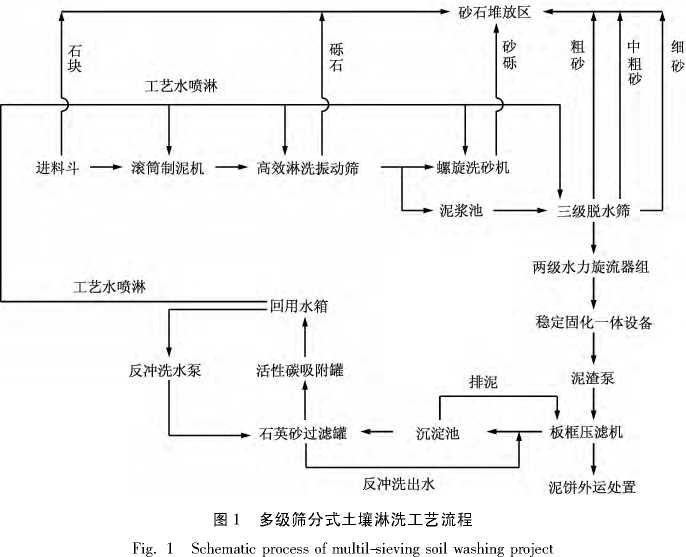
**2. 1** 土壤修复技术比选

目前, 适用于现场应用的有效物化修复技术主要 包括土壤固化 /稳定、土壤气提、土壤淋洗、化学氧化 / 还原、热脱附等［13-14］。

按照处置地点分类, 土壤修复技术通常包括原位 和异位两种修复方式。两类方法在长期应用过程中 显示了其各自的优缺点。针对该项目场地的土壤污 染特性、水文地质条件以及场地开发要求, 决定采用 多级筛分式淋洗设备对污染土壤进行原地异位修复。

**2. 2** 工艺流程 该项目场地中的典型污染物为多环芳烃和重金 属, 其中污染土壤细颗粒含量较高, 且污染物主要以 附着态形式黏着在细颗粒表面, 所以适合采用多级筛 分式土壤淋洗技术。

多级筛分式土壤淋洗技术主要使用清水作为淋 洗液, 依靠物理淋洗将污染土壤按照其粒径将砾石、 砂土和黏土等组分分开, 将粗颗粒土壤表面松散附着 的污染物洗除。淋洗后污染物浓度低于修复目标值 的粗颗粒土壤被筛分出来可直接回用, 污染物富集的

细颗粒土壤压成滤饼后进行深度处理，富集了污染物 的淋洗废液经过水处理单元后可再次回用，详见 图 1 。

**2. 3** 处理单元与设备

本工程处理污染土壤能力为20 t/h,总装机容量 为270 kW；实际运行容量为200 kW,平均单位耗电 量为9.5 kW-h/t,占地面积约600 m2*。*

2. 3. 1 土壤淋洗单元

根据减量浓缩的设计理念, 污染土壤进入土壤淋 洗单元后, 采用清水进行淋洗, 并经过多级筛分装置, 依据土壤粒径和污染程度差异将土壤分成 7 个等级 进行分类处理, 详见表 2。

1 ) 进料斗。

进料斗用于截留粒径>100 mm的石块，确保后 续设备稳定运行。 设置网格状栅条: 栅槽宽 3 m, 栅 距 90 mm, 栅条宽 8 mm。 使用挖掘机填加污染土壤, 并采用人工方式清渣。

1. 滚筒制泥机。

污染土壤含水率为11% -15%，考虑到干法筛 分时粗颗粒表面吸附黏粒的剥离率较低, 所以使用滚 筒制泥机, 使污染土壤和清水在其中充分混合, 将粗 颗粒表面吸附的黏粒剥离。 其 中, 制 泥 机 直 径 为 1. 5 m, 长度为 5. 0 m, 电机功率 20 kW。

1. 高效淋洗振动筛。

高效淋洗振动筛的主要作用是通过偏心轴激振 器有效分离出 3 种不同粒径的物料, 分别是 > 10 mm、 2-10 mm和<2 mm,其中>10 mm的砾石通过传送 带送至砾石堆场； 2 - 10 mm 粗砂输送至螺旋洗砂机； < 2 mm 的细颗粒输送至直线脱水筛和水力旋流器。

振动筛尺寸为4. 1 m X 1. 7 m X 1. 5 m,电机功率 11 kW； 内设两层滤网, 上层滤网孔径 10 mm, 下层滤 网孔径 2 mm, 滤网层间距 0. 75 m。

1. 螺旋洗砂机。

螺旋洗砂机借助物料和清水的密度差异, 可清洗 粒径为 2 - 10 mm 的砂砾上的污染物。 洗砂机尺寸 为 7. 8 m X 0. 8 m X 1. 5 m, 电机功率 5. 5 kW。

1. 三级直线脱水筛和两级水力旋流器组。

粒径小于 2 mm 的 物料 中 包含 1 - 2 mm 的 粗 砂、 0. 25 - 1 mm 的中粗砂、 0. 06 - 0. 25 mm 的细 砂 以及 < 0. 06 mm 的 黏土。 为了减轻后续设备的处 理负荷, 设计了三级直线脱水筛和两级水力旋流器 组的耦合, 实 现 4 种粒径物料的有效分离, 设 备 型 号详见表 3 。

1. 稳定固化一体设备。

通过投加一定量的双氧水和硫酸亚铁形成最佳 芬顿( Fenton) 氧化条件, 去除溶于水相中的有机污染 物( 有机物去除率为 80% - 90% ) ； 随后再投加聚丙 烯酰胺( PAM) 形成较大的氢氧化铁矾花, 凭借吸附 架桥原理, 实现粒径 < 0. 06 mm 污染土壤中的重金属 的稳定固化( 固化率为 90% - 95% ) 。

表 3 直线脱水筛和水力旋流器组设备表 Table 3 Device list of straight dewatering screens and hydrocyclones

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 设备名称 | 设备尺寸 |  | 功率/kW | 备注 |
| I级直线脱水筛 | 3. 5 m x 2. 2 m x 1. | 9m | 6 | 筛网直径 1 mm |
| I级水力旋流器组 | : 0. 6 m x 1. 5 m |  | — | 分级粒度 0. 25 ~1 mm |
| U级直线脱水筛 | 3. 5 m x 2. 2 m x 1. | 9m | 6 | 筛网直径 0. 25 mm |
| H级水力旋流器组 | : 0. 8 m x 1. 5 m |  | — | 分级粒度 0. 06 ~ 0. 25 mm |
| 皿级直线脱水筛 | 3. 5 m x 2. 2 m x 1. | 9m | 6 | 筛网直径 0. 06 mm |

稳定固化一体设备由4个：2. 2 m x2. 5 m的搅 拌罐组成, 采用间歇运行方式, 反应时间 0. 5 - 1. 0 h。

7 ） 板框式压滤机。

充分反应的污染土壤经渣浆泵输送至板框式压 滤机, 通过降低泥饼含水率, 实现污染土壤减量。现 场采用 2 台压滤机, 1 用 1 备, 过滤压力 0. 6 MPa。 **2. 3. 2** 水处理单元

收集板框式压滤机过滤液, 泵送污水至后续水处 理单元, 污水经沉淀、过滤和活性碳吸附, 去除其中的 悬浮物和有机物, 并作为喷淋水循环使用, 实现喷淋 水“零排放”。

1 ） 沉淀池。

沉淀池的作用, 一是去除板框式压滤机过滤液中 的悬浮物（ SS） , 去除率为 30% - 40% ; 二是去除过滤 液中部分悬浮性有机物, 去除率为 15% - 30% , 并降 低后续构筑物处理 SS 和悬浮性有机物的处理负荷。

沉淀池前端设置 pH 调节区和混凝反应区, 酸碱 调节药剂和混凝剂分别为稀硫酸、氢氧化钠和聚合氯 化铝（PAC）。pH调节区和混凝反应区尺寸均为

1. 1 m x 1. 0 m x 1. 0 m, 沉 淀 区 尺 寸 为 10. 0 m x
2. 2 m x 3. 0 m。

2） 石英砂过滤罐。

石英砂过滤罐利用滤料对沉淀池出水中细小的

SS、胶体等进行截留和吸附。运行流量20 m3/h,反 冲洗强度15 L/（m2 • s），反冲洗时间5 ~ 10 min。滤 罐直径 1. 7 m, 有效高度 2. 0 m, 填料层总高度 1. 2 m, 共有 3 层, 由下至上分别为 2 ~ 3 mm 砂砾（ 装填高度 20 cm） 、1 ~ 2 mm 粗砂 （ 装填高度 20 cm） 和 0. 5 ~ 1. 0 mm石英砂（装填高度80 cm）*。*

3） 活性碳吸附罐。

活性碳吸附罐借助活性碳吸附水体中的有机物和 金 属 离 子。 运 行 流 量 20 m3 /h, 反 冲 洗 强 度 10 L/（m2・s）,反冲洗时间3 ~6 mine滤罐直径1. 7 m, 有效高度 2. 0 m, 活性碳装填高度 1. 0 m。

4） 回用水箱。

回用水箱的主要作用是贮存工艺水, 即可用作土 壤淋洗液, 也可用于石英砂滤罐和活性碳吸附罐的反 冲洗用水。 回用水箱尺寸为 5. 0 m x 2. 8 m x 2. 8 m。 **3** 运行结果

工程建成后经过调试和试运行, 设备达到稳定状 态, 表 4 为连续运行 1 个月的跟踪监测值［15］（ 数据均 为平均值）。

土壤淋洗的大规模运用过程中 , 淋洗药剂使用量 大, 运行成本高, 其原因包括无需处理的物料进入反 应器消耗大量淋洗药剂。 因此, 本项目提出“先减 量、 后浓缩”, 即大部分复合污染物附着在石块和砂 子等粗颗粒的表面, 经过自来水喷淋即可洗净。 由 表 4可知: 淋洗后石块和砂子等粗颗粒的重金属和 PAHs 去除率达到 85% 以上, 污染物检测值达标率 100%。

表 4 淋洗后出料中污染物浓度

Table 4 The contaminat concentration of

the washed soil particles mg /kg

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 污染物 | 修复标准 | 原状土 | 石块 | 淋洗后出料 砂子 | 泥饼 |
| 砷 | 80 | 624 | 43 | 60 | 700 |
| 汞 | 10 | 0. 99 | 0. 11 | 0. 87 | 0. 87 |
| 铅 | 400 | 3690 | 100 | 200 | 4900 |
| 萘 | 50 | 0. 35 | 0. 105 | 0. 035 | 0. 07 |
| 苯并（a）蔥 | 6. 40 | 8. 2 | 0. 105 | 2. 4 | 4. 4 |
| 苯并（b）荧蔥 | 6. 40 | 10.4 | 0. 105 | 2 | 3. 7 |
| 苯并（k）荧蔥 | 64. 20 | 3. 87 | 0. 105 | 2 | 3. 6 |
| 苯并（a）芘 | 2 | 8. 07 | 0. 105 | 0. 5 | 4 |
| 二苯并*（*a, h）蔥 | 6. 40 | 1.36 | 0. 105 | 0. 31 | 0. 65 |
| 茚并(1, 2, 3-cd) 芘 | 2 | 6. 07 | 0. 105 | 0. 98 | 2. 1 |

注: 修复标准分析比较按照 HJ 25. 3—2014《污染场地风险评估技 术导则》计算出的土壤风险控制值, 场地所在区域土壤目标污 染物的背景含量和国家有关标准中规定的限值, 合理提出土 壤目标污染物的修复目标值。

“减量”过程中附着形式的复合污染物随清水转 移至泥浆中 , 采用 Fenton 氧化法可以有效去除细颗 粒中 PAHs, 其 去 除率 达到 50% 以 上; 再通 过投 加 PAM, 细颗粒中吸附的重金属得以浓缩。 由表 4 可 知: 重金属主要“浓缩”在泥饼中 , 浓缩率达到 87% 以 上, 浓缩污染物的泥饼外运后采用固化稳定化处理, 同样可达到修复标准。

**4** 工程运行分析

**4. 1** 水土体积比

喷淋水与土壤的体积比是整个土壤淋洗工艺运 行的核心参数, 在工程试运行阶段, 设定了一系列的 水土体积比, 通过对淋洗出料的实时监测, 最终选择 水土体积比=2：1为合理参数。

**4. 2** 反冲洗强度 反冲洗是保持石英砂滤罐和活性碳吸附罐高效 运行的重要工序, 根据实际运行工况, 仅采用升流式 水反冲洗方式, 当罐体进出水口压差 > 0. 05 MPa 时, 对石英砂过滤罐或活性碳吸附罐进行反冲洗,其中吸 附罐的反冲洗强度低于过滤罐。 石英砂过滤罐和活 性碳吸附罐的反冲洗周期分别为 20, 60 d。

**4. 3** 运行问题及应对方法 高效淋洗振动筛淋洗出料中发现部分砾石（ 粒径

10 - 100 mm） 和砂砾（ 粒径 2 - 10 mm） 未达到修复目 标。 主要是由于含水率较低的污染土壤在制泥机中遇 到大量喷淋水浸泡时, 黏土易附着在砾石和砂砾表面, 即便利用高效淋洗振动筛也无法将黏土从砾石和砂砾 表面剥离, 所以导致淋洗后的砾石和砂砾重金属和 PAHs 超标。 因此, 在高效淋洗振动筛上层滤网（ 孔径

10 mm） 布置了 100 个高压水喷淋头, 利用高压水（ 压 力控制为 0. 1 - 0. 3 MPa） 冲洗砾石和砂砾表面, 经过 设备改造后淋洗后的砾石和砂砾均达到修复指标。

板框式压滤机滤饼中细砂成分较多: 一方面造成 了稳定一体化设备投加药剂的浪费, 另一方面增加泥 饼的处置费用 。 其主要原因在于其前端的水力旋流 器组运行效率不高, 当水力旋流组溢流阀门开启度固 定时, 进水流速越快, 越易造成部分细砂随黏土溢出 进入稳定一体化处理单元。 通过在水力旋流器组进 水端加装回流管, 适当降低进水流速, 可有效防止细 砂进入后续处理单元。

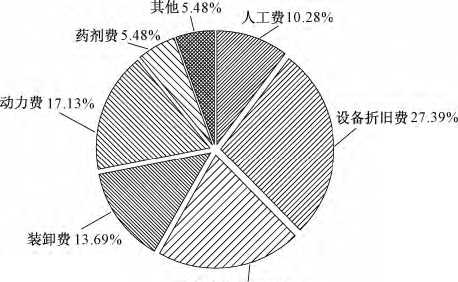
沉淀池出水中 SS 较多, 给后续过滤罐带来较高 的处理负荷, 导致其频繁进行反冲洗。 其原因是为满 足喷淋水和污染土壤体积比的淋洗要求, 人为加大了 循环工艺水的用量, 导致污水在沉淀池的水力停留时 间被缩短至 1. 5 h。 通过在沉淀池中填装乙丙共聚材 质（ PP） 的六角蜂窝斜管, 提高了沉淀池截留 SS 的效 率, 保证了沉淀池的出水水质稳定。

**5** 经济效益分析

本工程总投资 600 万元, 占地面 积 600 m2, 经核 算每吨污染土壤处理成本为 370 元, 分别由人工费、 设备折旧费、 设备维护费、 装卸费、 动力费、 药剂费等 组成, 各部分费用比例如图 2 所示。

**6**结论

1 ） 淋洗后粗颗粒的重金属和 PAHs 去除率达到



设备维护费20.55%

图 2 多级筛分式土壤淋洗工艺处理成本构成

Fig． 2 The cost structure of the multil-sieving soil washing process

85% 以上, 污染物检测值均达到修复标准, 达标率为 100%。

2) 细颗粒中 PAHs 去除率达到 50% 以上, 重金属 在泥饼中的浓缩率在 87% 以上, 泥饼外运后采用固 化稳定化处理后可达到修复标准。

2) 工程实践证明, 多级筛分式淋洗设备运用于 土壤修复工程具有工艺简单、 占地面积小, 修复效率 高的特点, 并实现了我国土壤淋洗设备自主研发和工 程应用“零的突破”。

参考文献

[1 ] 环保部和国土资源部.全国土壤污染状况调查公报EB/OL .

http: / /www. zhb. gov. cn/gkml /hbb/qt/201404/t20140417\_270670. htm. 2014.

[2 ] Majone M. In situ groundwater and sediment bioremediation:

Barriers and perspectives at European contaminated sites[J]. New

Biotechnology,2015,32( 1) : 133-146. 2014.

[3 ] Tang W Z. Physicochemical Treatment of Hazardous Wastes[M]

Roca Boton: CRC Press. 2005 :

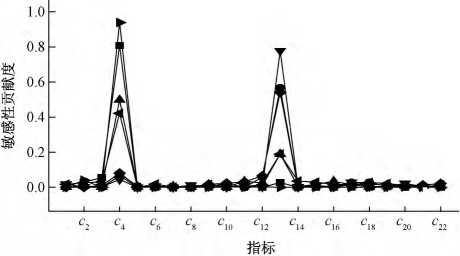
[4 ] Huguenot D,Mousset E,Hullebusch E D V,et al. Combination of surfactant enhanced soil washing and electro-Fenton process for the treatment of soils contaminated by petroleum hydrocarbons[J]. Journal of Environmental Management,2015,153: 40-47.

[5 ] Im J,Yang K,Jho E H,et al. Effect of different soil washing solutions on bioavailability of residual arsenic in soils and soil properties[J]. Chemosphere,2015,138: 253-258.

[6 ] Khalladi R, Benhabiles O, Bentarha F, et al. Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,164( 2 /3) : 1179-1184.

[7 ] Lee M, H Kang, Do W. Application of nonionic surfactant- enhanced in situ flushing to a diesel contaminated site[J]. Water Research,2005,39( 1) : 139-146.

( 下转第 **170** 页 )



—■—1 号; —•—2 号; —▲—3 号; —#—4 号;

—♦—5 号；一+—^6 号；一o—7 号。

图 3 评价指标敏感性贡献度分布

Fig． 3 Sensitivity contribution of indexes 程( c4) 的敏感性次之。 可得出结论: 库水位高程和滩 顶高程是对尾矿库安全状态影响较大的敏感因素, 在 对尾矿库的安全状态进行改善的过程中可以重点改 善这两个因素的安全等级, 加强针对性与有效性。 同 时, 从结果也可看出不同尾矿库的具体情况并不一 致, 需进行具体分析, 找出符合实际状况的敏感因素, 并采取措施改善安全状况。

**3**结语

1 ) 本文提出了一套基于 5 个二级指标、 22 个三 级指标的尾矿库安全状态综合评价指标体系, 克服了 以往指标选取系统性和完善性的缺乏; 将尾矿库分为 正常库、 病库、 险库、 危库 4 级, 同时将危险性指标分 为 A, B, C, D4 级, 将各等级量化, 加强等级划分和量 化的可信度和实用性。

2) 提出基于可拓集和 EAHP 的尾矿库安全综合评 定方法, 并将其用于对集团公司尾矿库的综合评价中 , 发现该矿区尾矿库安全等级偏低, 有待改善。

3 ) 根据蒙特卡洛原理, 基 于 Crystal Ball 软 件进

X： ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C ^~0~C A

( 上接第 **185** 页)

[8 ] Mao Y, Sun M, Liu Z, et al． Evaluation of enhanced soil washing process and phytoremediation with maize oil, carboxymethyl—3— cyclodextrin, and vetiver grass for the recovery of organochlorine pesticides and heavy metals from a pesticide factory site [J]． Journal of Environmental Management, 2014, 141 : 161 -168.

1. 李实, 张翔宇, 潘立祥． 重金属污染土壤淋洗修复技术研究进展 [J]． 化工技术与开发, 2014, 43(11) : 27-31.
2. 李玉双, 胡晓钧, 孙铁珩, 等． 污染土壤遴选修复技术研究进展 [J]． 生态学杂志, 2011, 30(3) : 596-602.
3. 杨勇, 何艳明, 栾景丽, 等． 国际污染场地土壤修复技术综合分 析J ■环境科学与技术,012,5(10):92-98.

12 骆永明.污染土壤修复技术研究现状与趋势J •化学进展，

2009, 21(2 /3) : 558-565.

行敏感性分析, 得出库水位高程和滩顶高程是对安全 状态影响较大的敏感因素, 在后期安全管理中需加强 对这两个因素的控制, 增强针对性和有效性, 保证尾 矿库安全。

参考文献

1. 王英博，李仲学.基于AHP的矿山尾矿库安全评价J •辽宁 工程技术大学学报． 自然科学版, 2011, 30(1) : 21-24.
2. 董龙洋, 周宇, 徐文强, 等． 基于证据理论的尾矿库安全评价

[J]． 安全与环境工程, 2012, 19(4) : 74-77.

[3 ] 罗飞飞, 李庆军． 基于灰色模糊理论的尾矿库安全评价方法

研究J ■工业安全与环保，2009,5(8) :46-48.

[4] 李全明, 陈仙, 王云海, 等． 基于模糊理论的尾矿库溃坝风险 评价模型研究J .中国安全生产科学技术，2008, (6) :57- 61.

[5 ] 王少伟, 包腾飞, 任姣, 等． 改进的物元可拓模型在大坝安全 综合评价中的应用J ■水电能源科学，2012,30 (2) :66-68.

[6 ] Qiu C, Qian J, Wu Z． Evaluation of public transport priority development based on extension method [C] *//* 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals ( ICCTP ) ． 2011.

[7] 阎善郁, 董阳, 潘科． 多级可拓理论在尾矿库溃坝风险评价中 的 应 用 [C]/ Proceedings of 2012 ( Shenyang ) International Colloquium on Safety Science and Technology． Northeastern University, 2012: 6.

[8 ] 尹君, 王玉杰, 吕林, 等． 基于模糊层次和集对分析的尾矿库 安全评价及预测J ■金属矿山，2010(10): 159-461.

[9 Wen X, Xu Y, Li H, et al． Monte carlo method for the uncertainty evaluation of spatial straightness error based on new generation geometrical product specification [ J ． Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5) : 875-881.

[10 Yang J, Li G, Wu B, et al． Comparison of GUF and Monte Carlo

methods to evaluate task-specific uncertainty in laser tracker measurement[J ． Journal of Central South University, 2014, 21 : 3793-3804.

第一作者: 姜洲(1985 - ) , 男, 博士研究生, 主要研究方向为尾矿库安 全监督管理。35881373@ qq． com

通信作者: 黄艳华(1991 - ) , 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地铁施

工安全管理研究。[HYHhust@126.com](mailto:HYHhust@126.com)

[13 李广贺, 李发生, 张旭, 等． 污染场地环境风险评价与修复技术

体系M -北京：中国环境科学出版社,010： 152-163.

[14 杨思琴, 陆泗进, 王红旗. 污染土壤的物料化学修复技术研究进

展J -环境保护科学,008,4(5) :42-45.

[15 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水

监测分析方法[M].北京：中国环境科学出版社,2002：354- 370.

第一作者: 熊惠磊(1983 - ) , 男, 博士, 主要研究方向为污泥资源化技 术及复合污染场体修复技术。xionghuilei@ bceer. com 通信作者: 马骏(1974 - ) , 男, 博士, 主要研究方向为复合污染场地修 复技术。majun@ bceer. com