

# 污染土壤淋洗修复技术研究进展\*

李玉双<sup>1,2</sup> 胡晓钧<sup>1\*\*</sup> 孙铁珩<sup>1,2</sup> 侯永侠<sup>1</sup> 宋雪英<sup>1</sup> 杨继松<sup>1</sup> 陈红亮<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044; <sup>2</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

**摘要** 土壤淋洗修复技术是一种行之有效的污染土壤治理技术, 适合于快速修复受高浓度重金属和有机物污染土壤与沉积物。本文综述了土壤淋洗修复技术的特点、技术流程、土壤淋洗剂的研究与应用进展, 指出异位土壤淋洗修复技术因修复效果稳定, 易于实现系统控制和废弃物减量化等优点而具有更广阔的应用前景, 天然螯合剂和生物表面活性剂等环境友好型淋洗剂正逐渐取代人工螯合剂和化学表面活性剂成为土壤淋洗剂研究的主流方向, 而现代超分子化学的引入和发展有可能对复合污染土壤的高效淋洗修复研究产生新的影响。

**关键词** 污染土壤; 土壤淋洗修复技术; 淋洗剂

**中图分类号** X53 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)3-0596-07

**Soil washing/flushing of contaminated soil: A review.** LI Yu-shuang<sup>1,2</sup>, HU Xiao-jun<sup>1\*\*</sup>, SUN Tie-heng<sup>1,2</sup>, HOU Yong-xia<sup>1</sup>, SONG Xue-ying<sup>1</sup>, YANG Ji-song<sup>1</sup>, CHEN Hong-liang<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Regional Environment and Eco-Remediation, Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China; <sup>2</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(3): 596-602.

**Abstract:** Soil washing/flushing is an efficient technology for rapid remediation of soils or sediments highly contaminated by heavy metals and/or organic pollutants. In this paper, the characteristics, technical processes, and cleaning agents for soil washing/flushing remediation were reviewed. The ex-site soil washing has broad application prospects, due to its stable remediation efficiency, easy control, and waste reduction. Environment-friendly cleaning agents, such as natural chelating agents and bio-surfactants, have gradually replaced artificial chelating agents and chemical surfactants, and become the main cleaning agents for soil washing/flushing. Modern supramolecular chemistry will have significance in the washing/flushing remediation of soils contaminated by combined pollutants.

**Key words:** contaminated soil; soil washing/flushing; cleaning agent.

土壤污染不仅导致农产品的食品安全问题, 还可以通过淋滤作用污染地下水, 进而通过食物链危及人类的生命和健康(黄昌勇, 2000)。随着我国工业化和城市化进程的不断加快, 土壤环境污染问题日趋严峻, 污染农田土壤约 10%, 企业搬迁遗留污染场地达数十万公顷, 对土地资源可持续利用与农产品生态安全构成了威胁。

污染土壤修复方法与技术研究起步于 20 世

纪 70 年代后期, 经过 30 多年全球范围的研究与应用, 得到了快速发展, 逐渐形成了物理修复、化学修复、生物修复以及联合修复方法与技术体系(Singh *et al.*, 2003; 骆永明, 2009)。目前, 对于严重污染土壤的修复技术主要有固定-稳定化技术(solidification/stabilization)(Conner, 1990)、热处理技术(thermal treatment)(Taube *et al.*, 2008)、土壤淋洗修复技术(soil washing/flushing)(Peters, 1999; Mulligan *et al.*, 2001)、化学氧化修复技术(Rivas, 2006; Pignatello *et al.*, 2006)等。其中, 土壤淋洗修复技术可快速将污染物从土壤中移除, 短时间内完成高浓度污染土壤的治理, 而且治理费用相对较低廉, 现已成为污染土壤快速修复技术研究的热点和发展方向之

\* 国家自然科学基金项目(20807029)、辽宁“百千万人才工程”培养经费(2010921004)、辽宁省科技计划项目(2009223004)、国家科技支撑计划课题(2011BAJ06B02)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-009-005)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: hu-xj@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2010-10-09 接受日期: 2010-12-21

一。本文介绍了土壤淋洗技术的概念及特点、技术流程、土壤淋洗剂的种类与特性等研究现状,并对该技术的发展趋势进行展望。

## 1 土壤淋洗修复技术特点

土壤淋洗属于物化修复技术,通常是指借助能促进土壤环境中污染物溶解/迁移的液体或其他流体来淋洗污染土壤,使吸附或固定在土壤颗粒上的污染物脱附、溶解而去除的技术(Semer & Reddy, 1996;周启星和宋玉芳,2004)。土壤淋洗的作用机制在于利用淋洗液或化学助剂与土壤中的污染物结合,并通过淋洗液的解吸、螯合、溶解或固定等化学作用,达到修复污染土壤的目的。主要通过以下2种方式去除污染物:1)以淋洗液溶解液相、吸附相或气相污染物,2)利用冲洗水力带走土壤孔隙中或吸附于土壤中的污染物。淋洗剂可以是水、化学溶剂或气体等能把污染物从土壤中淋洗出来的流体(Sleep & McClure,2001)。近年来,围绕着土壤淋洗已经做了大量的理论研究工作,并且业已开展了一些工程应用。研究表明(Dermont *et al.*,2008),土壤淋洗修复技术具有如下优点:1)可去除大部分污染物,如半挥发性有机物、多环芳烃(PAHs)、重金属、氰化物及放射性污染物等;2)操作灵活,可原位(in-situ)进行也可异位(ex-situ)处理,异位修复又可进行现场修复(on site remediation)或离场修复(off site remediation);3)应用灵活,可单独应用,也可作为其他修复方法的前期处理技术;4)修复效果稳定、彻底,周期短,效率高。但是,与此同时,土壤淋洗也存在一定的局限性,主要表现在:对质地比较粘重、渗透性比较差的土壤修复效果相对较差;目前去除效率较高的淋洗剂价格都比较昂贵,难以用于大面积的实际修复;洗脱废液的回收处理问题;淋洗剂在土壤中的残留可能造成的土壤和地下水的二次污染问题(周启星,2002;Dermont *et al.*,2008)。

## 2 土壤淋洗修复技术流程

在进行土壤淋洗修复之前,应先对污染场地的土壤质地特征和污染物分布特性进行系统调查,根据调查结果确定淋洗修复的实现形式。土壤淋洗修复的实现形式主要分为原位淋洗和异位淋洗,其中,异位淋洗又可分为现场修复和离场修复。土壤淋洗技术实现形式不同,其技术流程具有很大区别。

### 2.1 原位土壤淋洗修复技术

原位土壤淋洗修复技术(soil flushing)主要用于去除弱渗透区以上的吸附态污染物,包括重金属、易挥发卤代有机物和非卤代有机物。在原位修复时,主要根据污染物分布的深度,让淋洗液在重力或外力的作用下流过污染土壤,使污染物从土壤中迁移出来,并利用抽提井或采用挖沟的办法收集洗脱液(FRTR,2002a)。洗脱液中的污染物经合理处置后,淋洗液可以进行回用或达标排放,处理后的土壤可以再安全利用。土壤渗透性对原位土壤淋洗修复效率影响较大(Ellis *et al.*,1985;Nash & Traver,1986)。原位土壤淋洗修复技术适用于水力传导系数大于 $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的多孔隙、易渗透的土壤(NAV-FAC,2003),如沙土沙砾土壤、冲积土和滨海土等,在地下水也同时受到污染时,此法更有针对性(Sturges *et al.*,1991)。

### 2.2 异位土壤淋洗修复技术

异位土壤淋洗修复技术(soil washing)源于采矿与选矿的原理,通过物理与化学方式从土壤中分离污染物(Mann,1999)。美国联邦修复技术圆桌组织(FRTR,2002b)推荐的异位土壤淋洗技术流程主要包括如下步骤:1)污染土壤的挖掘;2)土壤颗粒筛分,即剔除杂物如垃圾、有机残体、玻璃碎片等,并将粒径过大的砾石移除,以免损害淋洗设备;3)淋洗处理,在一定的土液比下将污染土壤与淋洗液混合搅拌,待淋洗液将土壤污染物萃取出后,静置,进行固液分离;4)淋洗废液处理,含有悬浮颗粒的淋洗废液经过污染物的处置后,可再次用于淋洗步骤中;5)挥发性气体处理,在淋洗过程中产生的挥发性气体经处理后可达标排放;6)淋洗后土壤的处置,淋洗后的土壤如符合控制标准,则可以进行回填或安全利用;淋洗废液处理过程中产生的污泥经脱水后可再进行淋洗或送至终处置场处理。异位土壤淋洗修复技术适用于土壤粘粒含量低于25%,被重金属、放射性核素、石油烃类、挥发性有机物、多氯联苯和多环芳烃等污染的土壤。

## 3 土壤淋洗剂的种类及特性

### 3.1 无机淋洗剂

水、酸、碱、盐等无机溶液是土壤淋洗早期常用的淋洗剂,主要用于淋洗土壤中的重金属,其作用机制主要是通过酸解、络合或离子交换作用来破坏土壤表面官能团与重金属形成的络合物,从而将重金

属交换解吸下来,进而从土壤中溶出(可欣等,2004)。常用的无机淋洗剂主要有 HCl、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、NaOH、CaCl<sub>2</sub>、NaNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、FeCl<sub>3</sub> 等。研究表明,0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 对重金属具有较好的去除效果,Cu、Ni、Pb、Zn 的去除率分别为 92%、77%、79%、75% (Tuin & Tels,1990)。Tokunaga 和 Hakutu (2002) 研究表明,H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 是土壤 As 污染最有效的淋洗剂,质量分数为 9.4% 的磷酸淋洗 6 h 对 As 的去除率可达到 99.9%。

大量研究表明,无机酸淋洗可以有效去除土壤中的重金属污染物,但通常在酸浓度>0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的条件下才能得到较高的去除效率,然而,较高的酸度同时也会破坏土壤的物理、化学和生物结构,并致使大量土壤养分流失 (Pichtel *et al.*,2001);且强酸性条件对处理设备的要求也较高,因此,在实际应用中受到限制。

### 3.2 螯合剂

为了克服无机酸淋洗强酸性的危害,越来越多的螯合剂被应用于重金属污染土壤的淋洗修复研究和实践中,且其在土壤淋洗中的地位越来越重要。螯合剂能够通过螯合作用与多种金属离子形成稳定的水溶性络合物,使重金属从土壤颗粒表面解吸,由不溶态转化为可溶态,从而为土壤淋洗修复创造有利条件。目前,在土壤淋洗修复研究及实践中常用的螯合剂主要有 2 类,一类是氨基多羧酸类 (aminopolycarboxylic acids,APCAs) 人工合成螯合剂;另一类是天然小分子有机酸类 (natural low molecular weight organic acids,NLMWOAs) 天然螯合剂。

**3.2.1 人工合成螯合剂** 氨基多羧酸类螯合剂具有较强的金属活化能力,因而被广泛应用,如乙二胺四乙酸(EDTA)、二乙三胺五乙酸(DTPA)、羟乙基乙二胺三乙酸(HEDTA)、乙二醇双四乙酸(EGTA)、氨三乙酸(NTA)、N-(2-乙酰胺)亚氨基二乙酸(ADA)、2,6-吡啶二羧酸(PDA)、S,S-乙二胺二琥珀酸(S,S-EDDS)、亚氨基二琥珀酸(IDSA)等。研究表明,人工螯合剂能在很宽的 pH 范围内与重金属形成稳定的复合物,不但可溶解不溶性的重金属化合物,同时也可解吸被土壤吸附的重金属,是一类非常有效的土壤淋洗剂。如,EDTA:Pb 摩尔比为 2:1 的淋洗液,在最优条件下可以去除 85%~95% 的 Pb (Tawinteung *et al.*,2005)。用 10~2、10~3 mol·L<sup>-1</sup> 的 EDTA 淋洗人工污染土壤,可以去除 85% 以上的 Cu (Tsang *et al.*,2007)。不同的人工螯

合剂对各金属元素的活化能力差异很大,同一种螯合剂对不同的金属元素络合能力也不相同。Tandy 等(2004)研究表明,在 pH 为 7 的条件下,各种螯合剂对 Cu 的去除效率由大到小依次为 EDDS>NTA>IDSA>MGDA>EDTA;而对 Zn 则为 NTA>EDDS>EDTA>MGDA>IDSA。

然而,大多数人工合成螯合剂自应用以来,就因其自身的化学稳定性、难生物降解性及缺乏离子选择性所带来的环境和健康风险而受到质疑。NTA 现已被认定为 II 级致癌物 (Peters,1999),DTPA 也被 Sigma 公司 (St. Louis, MO) 证实是潜在的致癌物。有研究表明,EDTA 能够和土壤中的放射性元素钴等形成可溶性络合物从而提高其活动性,导致环境和健康风险 (Baik & Lee,1994;McArdell *et al.*,1998)。此外,由于人工螯合剂对金属元素络合的非专一性,在活化重金属的同时也活化了土壤中的其他矿质元素,如 Ca、Mg、Fe、Mn、Al 等,使这些土壤养分淋失量增加,从而可能导致植物营养缺失 (Sun *et al.*,2001;Hauser *et al.*,2005;Tsang *et al.*,2007)。Wu 等(2004)研究表明,进入土壤中的 EDTA 有 68% 与目标金属离子结合,剩下的 32% 则与其他金属离子结合。因此,一些在土壤中矿化速度较快,对土壤中 Ca、Mg 等结合能力较低,对重金属离子具有专性络合能力的螯合剂,如 S,S-EDDS 逐渐受到重视。研究表明,S,S-EDDS 易于生物降解,在土壤中的半衰期仅为 2.5 d,28 d 后即可完全降解 (Jaworska *et al.*,1999)。同时,S,S-EDDS 对重金属具有较强的络合能力,其与 Cu、Zn、Pb 的络合常数分别为 18.4、13.4 和 12.7,而对营养元素 Ca、Mg 的络合常数只有 4.7、5.8 (Knepper,2003)。

**3.2.2 天然螯合剂** 天然小分子有机酸类螯合剂包括柠檬酸、草酸、苹果酸、酒石酸、乙酸、胡敏酸、富里酸、丙二酸等,能通过金属离子形成可溶性的络合物促进金属离子的解吸作用,增加金属离子的活动性。Lee 等(2007)采用 0.2 mol·L<sup>-1</sup> 柠檬酸淋洗含 As 的河流底砂,反应 1 h 后,所有土壤样品中 As 的去除率均高达 95% 以上。可欣等(2009)采用土柱淋洗法,使用 2.5 L 0.4 mol·L<sup>-1</sup> 的酒石酸通过 5 次加样淋洗能去除 91.3% 的 Cd,11.1% 的 Pb,39.2% 的 Zn,11.1% 的 Cu。Helen 和 William (1978) 研究表明,草酸对重金属具有较高的去除率,0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的草酸 (pH 3.3) 对 Pb、Cd、Zn 的去除率为 90%~95%,对 Cu 的去除率为 80%~85%;

0.01 mol · L<sup>-1</sup>的柠檬酸钠(pH 7.8)对Cd、Zn的去除率高达90%~95%,而对Pb、Cu的去除率为50%~65%。

不同的螯合剂对各金属元素的络合能力差异很大。魏世强等(2003)研究表明,在相同浓度下,各种螯合剂对Cd的提取效率依次为EDTA ≥ DTPA > 柠檬酸 > 胡敏酸 > 草酸 > 富里酸 > 酒石酸 ≥ 水杨酸。Neilson等(2003)总结了常用螯合剂对多种重金属的条件稳定常数,总体上人工螯合剂具有较强的金属络合能力,小分子有机酸的作用则弱得多。

### 3.3 表面活性剂

表面活性剂是指少量加入就能显著降低溶剂表(界)面张力,并具有亲水、亲油和特殊吸附等特性的物质。表面活性剂可通过强化增溶和增流作用,增强土壤污染物在水相的溶解度和流动性,进而影响有机物在水体表面的挥发及其在土壤、沉积物、悬浮颗粒物上的吸附与解吸作用。阳离子表面活性剂可以改变土壤表面性质,通过离子交换作用促进金属阳离子从固相转移到液相中;阴离子表面活性剂能够吸附到土壤颗粒表面,然后再与金属发生络合作用,使金属溶于土壤溶液中。因此,根据表面活性剂的性质不同,可以用于去除有机污染物,也可以用于重金属污染土壤的淋洗修复。目前,在土壤淋洗研究和实践中使用的表面活性剂主要分为化学表面活性剂和生物表面活性剂2类。

**3.3.1 化学表面活性剂** 目前常用的化学表面活性剂主要有十二烷基苯磺酸钠(LAS)、十二烷基硫酸钠(SDS)、吐温80(Tween80)和曲拉通100(Triton X-100)等,主要用于有机污染物的去除。国内外对化学表面活性剂去除难溶有机物进行了大量研究,结果表明化学表面活性剂应用于有机污染土壤和地下水修复具有良好的前景,而对于重金属污染土壤的淋洗修复则作用不佳。Park和Bielefeldt(2005)研究发现,五氯苯酚(PCP)在土壤中的含量为200 mg · kg<sup>-1</sup>时,采用5 g · L<sup>-1</sup>的非离子表面活性剂迪恩普-10(DNP10)溶液能洗脱71%~79%的PCP,而不用表面活性剂的对照处理只能洗脱0.7%~2%。Zhu等(2005)研究表明,LAS和SDS在浓度高于临界胶束浓度(critical micelle concentration, CMC)时,对黄土中柴油的增溶作用随着表面活性剂用量的增加而线性增强。何泽能等(2006)使用含表面活性剂的混合淋洗剂采取化学热洗法对老化的石油污染土壤进行处理,经二次淋洗处理后,污染

土壤含油率从26.34%~29.90%降到4.05%~4.85%,洗油率达88.06%~88.19%。卢媛等(2009)研究了阴离子-非离子混合表面活性剂对重度石油污染土壤的淋洗修复效果,结果表明,使用LAS与TX2100质量比为8:2的组合表面活性剂,对石油烃的去除率达到76.9%。

**3.3.2 生物表面活性剂** 生物表面活性剂(biosurfactants, BS)是由植物、动物或微生物产生的具有表面活性的代谢产物(Soubes & Bonilla, 2001)。目前,用于土壤淋洗修复研究的生物表面活性剂主要有皂角苷、沙凡婷、鼠李糖脂、槐糖脂、环糊精等。Hong等(2002)对皂角苷去除3种不同土壤(粘土、沙土和含有大量有机质的土壤)中的重金属进行了研究,结果表明,皂角苷对Cu<sup>2+</sup>和Zn<sup>2+</sup>的去除率分别达到了90%~100%和85%~98%,重金属去除量在6 h左右达到最高值,且保持稳定。Juwarkar等(2007)用鼠李糖脂去除污染土壤中的Pb和Cd,淋滤36 h后,Cd和Pb的去除率分别达到92%和88%。Mulligan和Eftekhari(2003)研究表明,污染土壤中PcP含量为1000 mg · kg<sup>-1</sup>时,Triton x-100能洗脱85%的PcP,而鼠李糖脂只能洗脱61%。大量研究表明,生物表面活性剂对重金属具有较好的去除能力,而对有机污染物的去除能力却低于化学表面活性剂(Khodadoust *et al.*, 2005; Mulligan, 2005; 蒋煜峰等, 2006)。

与化学表面活性剂相比,生物表面活性剂不仅具有化学表面活性剂具有的各种表面性能,而且还拥有下列优点:易于降解,对环境友好;分子结构类型多样,具有许多特殊的官能团,专一性强;原料易得价廉,发酵生产是典型的“绿色”工艺等。因此,对于污染土壤的淋洗来说,生物表面活性剂是一个更好的选择。

### 3.4 氧化剂

在受难降解有机物,如多环芳烃、多氯联苯或部分难降解无机物(如酚类、氰化物等)污染的土壤淋洗中,还经常通过加入氧化剂,将液态或气态的无机物和有机物转化成微毒或无毒的物质,或将其转化成易于分离的形态,从而达到去除污染物的目的。所用氧化剂主要有臭氧、二氧化氯、过氧化氢、Fenton试剂及高锰酸钾(钠)等,尤其适用于地下水也同时受到污染的情况。Kao和Wu(2000)在泥浆反应器中研究了Fenton试剂处理2,3,7,8-四氯二苯并-对-二噁英(TCDD)浓度为96 μg · kg<sup>-1</sup>的污染土

壤,当双氧水和亚铁离子浓度分别为 10 和 26  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 3.5 时,TCDD 可降解 99%。Schnarr 等(1998)用高锰酸钾作氧化剂对受 PCE 及 TCE 污染的土壤进行了原位淋洗实验。当高锰酸钾浓度为 10  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,流量为 100  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ,120 d 可完全去除 PCE 污染物;而流量改为 50  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ,处理受 TCE 和 PCE 污染土壤时,290 d 后 62% 的污染物被氧化。

#### 4 展 望

土壤淋洗修复技术的研究目前主要集中在对重金属和有机污染物的治理上,欧洲、美国、日本等发达国家起步较早,且在 20 世纪 90 年代进入工程应用阶段(Griffiths,1995;周加祥和刘铮,2000)。大量的工程实践表明,土壤淋洗修复技术是污染土壤治理过程中一种快速、高效的方法,尤其对由于工业活动引起的重金属(Ko *et al.*,2005;Moutsatsou *et al.*,2006)、半挥发性有机物(SVOC)(Khan *et al.*,2004)、石油烃及卤代芳烃等(Bhandari *et al.*,1994;Bartolo *et al.*,2008)严重污染场地治理具有明显的优势。

土壤淋洗修复技术发展早期,主要关注污染物的最大去除效率,近年来随着环境保护和可持续发展的要求在追求高污染物去除率的同时逐步向绿色、环境友好型发展。天然螯合剂和生物表面活性剂由于具有良好的生物降解性和生物适应性,没有或只有较小的次生生态风险等优点,正逐渐取代人工螯合剂和化学表面活性剂成为土壤淋洗剂研究的主流方向。此外,现今土壤无机物与有机物复合污染特点日益突出,现有的关于无机-有机复合污染土壤淋洗修复的研究报道主要采用复合淋洗剂或分步淋洗的方法(Khodadoust *et al.*,2005;Ehsan *et al.*,2007),这使得淋洗工艺较为复杂,并且给淋洗液的回收和再生带来更大的难度。近年来,随着超分子化学研究工作的快速发展,一种新型的超分子受体化合物磺化硫杂杯芳烃(thiacalix[n]arenetetrasulfonate,TCAS)的出现为这一难题解决提供了新的途径。磺化硫杂杯芳烃的分子空腔上沿,能借助  $\pi$ - $\pi$  堆积作用和疏水相互作用包含烷烃和芳烃类有机分子(Kon *et al.*,2003;Liu *et al.*,2005),下沿分子空腔能借助酚羟基原子与桥联硫原子的协同配位作用选择性地络合重金属(胡晓钧等,2004),而对碱金属和碱土金属没有结合作用(Matsumiya *et al.*,

2003)。如果把磺化硫杂杯芳烃用作淋洗剂,将有可能实现重金属和有机物复合土壤污染物的同时高效淋洗去除。

在土壤修复实践中,应综合土壤质地特征、污染物类型、污染程度及污染物在土壤中的分布规律等因素选择适宜的淋洗剂及修复方式。异位土壤淋洗修复技术虽然较原位修复需要一定的土壤采掘、运输费用,但是处理过程便于实现系统控制、修复效果稳定、易于实现废弃物的减量化、能限制有害废弃物的扩散范围,且相关设备一般为组装式和移动式可重复利用,因此有着更为广阔的应用前景。

随着我国工业的发展和产业结构的不断调整,高污染、高耗能企业转产,土地利用功能发生转化,这一过程必然会产生大量有待于进行土壤修复的场地。在欧美环保产业发达国家,土壤修复产业已占到整个环保产业的 50% 以上,而土壤淋洗修复技术在土壤修复产业中占有相当大的比重。然而,目前我国关于土壤淋洗修复尚处于实验室研究阶段,而可规模化应用的土壤淋洗技术及成套设备研制相对滞后,亟待进一步提高和完善。随着相关研究的逐步深入,我国土壤淋洗修复技术必然会向着实用化的方向快速发展。

#### 参考文献

- 何泽能,李振山,籍国东. 2006. 老化石油污染土壤的清洗处理. 环境污染与防治, **28**(12): 884-887.
- 胡晓钧,王 丽,任 杰,等. 2004. 硫杂杯芳烃:一类新型的分子受体化合物. 化学通报, **67**(2): 90-95.
- 黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京:中国农业科技出版社.
- 蒋煜峰,展惠英,张德懿,等. 2006. 皂角苷络合洗脱污灌土壤中重金属的研究. 环境科学学报, **26**(8): 1315-1319.
- 可 欣,李培军,巩宗强,等. 2004. 重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展. 生态学杂志, **23**(5): 145-149.
- 可 欣,张 昀,李培军,等. 2009. 利用酒石酸土柱淋洗法修复重金属污染土壤. 深圳大学学报(理工版), **26**(3): 240-244.
- 卢 媛,马小东,孙红文,等. 2009. 表面活性剂清洗处理重度石油污染土壤. 环境工程学报, **3**(8): 1483-1487.
- 骆永明. 2009. 污染土壤修复技术研究现状与趋势. 化学进展, **21**(2/3): 558-565.
- 魏世强,木志坚,青长乐. 2003. 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. 土壤学报, **40**(1): 110-117.
- 周加祥,刘 铮. 2000. 铬污染土壤修复技术研究进展. 环境污染治理技术与设备, **1**(4): 52-56.
- 周启星,宋玉芳. 2004. 污染土壤修复原理与方法. 北京:

科学出版社.

周启星. 2002. 污染土壤修复技术再造与展望. 环境污染处理技术与设备, **3**(8): 36-40.

Baik MH, Lee KF. 1994. Transport of radioactive solutes in the presence of chelating agents. *Annals of Nuclear Energy*, **21**: 81-96.

Bartolo B, Elena NM, Elvira RL. 2008. Enhanced desorption of lindane from an agricultural soil assisted by cyclodextrin aqueous solutions. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco: Academic Press; 22-24.

Bhandari A, Dove DC, Novak JT. 1994. Soil washing and biotreatment of petroleum contaminated soils. *Journal of Environmental Engineering*, **120**: 1151-1169.

Conner JR. 1990. Chemical fixation and solidification of hazardous wastes. New York: Van Nostrand Reinhold.

Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. 2008. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials*, **152**: 1-31.

Ehsan S, Prasher SO, Marshall WD. 2007. Simultaneous mobilization of heavy metals and polychlorinated biphenyl (PCB) compounds from soil with cyclodextrin and EDTA in admixture. *Chemosphere*, **68**: 150-158.

Ellis WD, Payne JR, McNabb GD. 1985. Treatment of contaminated soils with aqueous surfactants. EPA-600/2-85-129. U. S. EPA, Cincinnati, Ohio.

Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). 2002a. 3.2 *In situ* physical/chemical treatment, soil flushing. [2010-7-20]. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-6.html>.

Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). 2002b. 3.5 *Ex situ* physical/chemical treatment, soil washing. [2010-7-20]. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html>.

Griffiths RA. 1995. Soil-washing technology and practice. *Journal of Hazardous Materials*, **40**: 175-189.

Hauser L, Tandy S, Schulin R, et al. 2005. Column extraction of heavy metals from soils using the biodegradable chelating agent EDDS. *Environmental Science & Technology*, **39**: 6819-6824.

Helen F, William FP. 1978. Extraction of heavy metal ions sorbed on clays. *Water, Air, & Soil Pollution*, **9**: 491-498.

Hong KJ, Tokunaga S, Kajiuchi T. 2002. Evaluation of remediation process with plant-derived biosurfactant for recovery of heavy metals from contaminated soils. *Chemosphere*, **49**: 379-387.

Jaworska JS, Schowanek D, Fejtel TCJ. 1999. Environmental risk assessment for trisodium[s,s]-ethylene diamine disuccinate, a biodegradable chelator used in detergent applications. *Chemosphere*, **38**: 3597-3625.

Juwarkar AA, Nair A, Dubey KV, et al. 2007. Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contamina-

ted soils. *Chemosphere*, **68**: 1996-2002.

Kao CM, Wu MJ. 2000. Enhanced TCDD degradation by Fenton's reagent preoxidation. *Journal of Hazardous Materials*, **74**: 197-211.

Khan F, Husain T, Hejazi R. 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Engineering and Management*, **71**: 95-122.

Khodadoust AP, Reddy KR, Maturi K. 2005. Effect of different extraction agents on metal and organic contaminant removal from a field soil. *Journal of Hazardous Materials*, **B117**: 15-24.

Knepper TP. 2003. Synthetic chelating agents and compounds exhibiting complexing properties in the aquatic environment. *Trends in Analytical Chemistry*, **22**: 725-733.

Ko I, Lee CH, Lee KP, et al. 2005. Remediation of soil contaminated with arsenic, zinc, and nickel by pilot-scale soil washing. *Environmental Progress*, **25**: 39-48.

Kon N, Iki N, Miyano S. 2003. Inclusion behavior of water-soluble thiocalix- and calix[4]arenes towards substituted benzenes in aqueous solution. *Organic & Biomolecular Chemistry*, **1**: 751-755.

Lee M, Pai IS, Do W, et al. 2007. Soil washing of As-contaminated stream sediments in the vicinity of an abandoned mine in Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, **29**: 319-329.

Liu Y, Yang EC, Chen Y, et al. 2005. Molecular selective binding of pyridinium guest ions by water-soluble calix[4]arenes. *European Journal of Organic Chemistry*, **21**: 4581-4588.

Mann MJ. 1999. Full-scale and pilot-scale soil washing. *Journal of Hazardous Materials*, **66**: 119-136.

Matsumiya H, Masai H, Terazono Y, et al. 2003. Chelating adsorbent for heavy metal ions prepared by loading anion-exchange resin with thiocalix[4]arenetetrasulfonate. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **76**: 133-136.

McArdell CS, Stone AT, Tian J. 1998. Reaction of EDTA and related aminocarboxylate chelating agents with Co<sup>III</sup>OOH (Heterogenite) and Mn<sup>III</sup>OOH (Manganite). *Environmental Science & Technology*, **32**: 2923-2930.

Moutsatsou A, Gregou M, Matsas D, et al. 2006. Washing as a remediation technology applicable in soils heavily polluted by mining-metallurgical activities. *Chemosphere*, **63**: 1632-1640.

Mulligan CN, Eftekhari F. 2003. Remediation with surfactant foam of PCP-contaminated soil. *Engineering Geology*, **70**: 269-279.

Mulligan CN, Yong RN, Gibbs BF. 2001. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: A review. *Engineering Geology*, **60**: 371-380.

Mulligan, CN. 2005. Environmental applications for biosurfactants. *Environmental Pollution*, **133**: 183-198.

Nash J, Traver RP. 1986. Field evaluation of in-situ washing of contaminated soils with water/surfactants: In land disposal, remedial action, incineration and treatment of hazardous

- waste. Proceedings of the 12th Annual Research Symposium, EPA 600/9-86-022. Cincinnati, Ohio.
- NAVFAC. 2003. Surfactant-Enhanced Aquifer Re-mediation (SEAR) Design Manual, NFESC Technical Report TR-2206-ENV, 110 pp. [http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/erb\\_a/restoration/technologies/remed/phys\\_chem/sear/tr-2206-sear.pdf](http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/erb_a/restoration/technologies/remed/phys_chem/sear/tr-2206-sear.pdf).
- Neilson JW, Artiola JF, Maier RM. 2003. Characterization of lead removal from contaminated soils by nontoxic soil-washing agents. *Journal of Environmental Quality*, **32**: 899–907.
- Park SK, Bielefeldt AR. 2005. Non-ionic surfactant flushing of pentachlorophenol from NAPL-contaminated soil. *Water Research*, **39**: 1388–1396.
- Peters RW. 1999. Chelant extraction of heavy metals from contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, **66**: 151–210.
- Pichtel J, Vine B, Kuula-Väisänen P, *et al.* 2001. Lead extraction from soils as affected by lead chemical and mineral forms. *Environmental Engineering Science*, **18**: 91–98.
- Pignatello JJ, Oliveros E, MacKay A. 2006. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **36**: 1–84.
- Rivas FJ. 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons sorbed on soils; A short review of chemical oxidation based treatments. *Journal of Hazardous Materials*, **138**: 234–251.
- Schnarr M, Truax C, Farquhar G, *et al.* 1998. Laboratory and controlled field experiments using potassium permanganate to remediate trichloroethylene and perchloroethylene DNAPLs in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, **29**: 205–224.
- Semer R, Reddy KR. 1996. Evaluation of soil washing process to remove mixed contaminants from a sandy loam. *Journal of Hazardous Materials*, **45**: 45–47.
- Singh OV, Labana S, Pandey G, *et al.* 2003. Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **61**: 405–412.
- Sleep BE, McClure PD. 2001. Removal of volatile and semivolatile organic contamination from soil by air and steam flushing. *Journal of Contaminant Hydrology*, **60**: 21–40.
- Soubes M, Bonilla M. 2001. Production and characterization of a new biosurfactant from *Pseudomonas* ML2. *Abstracts of the General Meeting of the American Society for Microbiology*, **101**: 550.
- Sturges JSG, McBeth JP, Randy CP. 1991. Performance of soil flushing and groundwater extraction at the United chrome superfund site. *Journal of Hazardous Materials*, **29**: 59–78.
- Sun B, Zhao FJ, Lombi E, *et al.* 2001. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA. *Environmental Pollution*, **113**: 111–120.
- Tandy S, Bossart K, Mueller R, *et al.* 2004. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents. *Environmental Science & Technology*, **38**: 937–944.
- Taube F, Pommer L, Larsson T, *et al.* 2008. Soil remediation-mercury speciation in soil and vapor phase during thermal treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*, **193**: 155–163.
- Tawinteung N, Parkpian P, DeLaune RD, *et al.* 2005. Evaluation of extraction procedures for removing lead from contaminated soil. *Journal of Environmental Science and Health*, **A40**: 385–407.
- Tokunaga S, Hakuta T. 2002. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil. *Chemosphere*, **46**: 31–38.
- Tsang DC, Zhang W, Lo IM. 2007. Copper extraction effectiveness and soil dissolution issues of EDTA-flushing of artificially contaminated soils. *Chemosphere*, **68**: 234–243.
- Tuin BJW, Tels M. 1990. Removing heavy metals from polluted clay soils by extraction with hydrochloric acid, EDTA or hypochlorite solutions. *Environmental Technology*, **11**: 1039–1052.
- Wu LH, Luo YM, Xing XR, *et al.* 2004. DTA enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **102**: 307–318.
- Zhu K, Hart W, Yang J. 2005. Remediation of petroleum-contaminated loess soil by surfactant-enhanced flushing technique. *Journal of Environmental Science and Health*, **40**: 1877–1893.

---

作者简介 李玉双,女,1978年生,讲师,博士研究生。主要从事环境地球化学及污染生态学方面的研究。E-mail: ysli\_syu@163.com  
责任编辑 魏中青

---