

# 固定/稳定化土壤修复技术的应用与优化分析<sup>①</sup>

刘甜甜<sup>1</sup>, 陈剑雄<sup>2</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 张海林<sup>1\*</sup>, 毛旭辉<sup>2</sup>

(1 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 2 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072)

**摘要:** 固定/稳定化技术是污染土壤修复的常用方法之一, 具有费用低、无毒、综合效益好等优点, 非常适合我国典型土壤污染区的修复。本文介绍了固定/稳定化方法的作用原理与修复材料, 分析了此技术的适用范围及优缺点。文章归纳了近年来固定/稳定化技术在污染土壤修复中的应用成功案例, 并结合我国土壤污染的实际状况和修复需求, 从加强工程技术与装备研发、优化费用结构和发展环境友好型固定/稳定化技术等角度, 提出了固定/稳定化技术应用的优化建议。

**关键词:** 固定/稳定化; 土壤污染; 土壤治理与修复; 优化分析

**中图分类号:** X53

随着社会经济的快速发展, 工农业生产过程中出现大量的资源利用和废弃物排放不合理的问题, 造成了严重的水、大气、土壤污染。为解决土壤污染的问题, 土壤修复作为一门新兴土壤分支学科日渐兴起, 污染土壤修复技术的方法理论、实验研究以及工程实践在国内外也已经大量开展<sup>[1]</sup>。土壤修复从 20 世纪中期起在欧美等国开展起来, 到目前已形成了完备的技术方法体系, 主要土壤修复方法有土壤气体抽提法、固定/稳定化(solidification/stabilization, S/S)、土壤淋洗、氧化还原、电动力学修复、植物修复、生物堆肥等等。其中固定/稳定化方法能有效地降低土壤中污染物质的溶解性和可移动性, 而且使用方便、成本较低, 成为广泛使用的土壤修复技术之一。美国环境保护署(EPA)2010 年的土地修复项目报告中显示, 2005—2008 年的 Superfund 土地站点修复项目中, 使用固定/稳定化技术的项目数约占总数的 21%, 其中原位固定/稳定化修复占 7%, 异位固定/稳定化修复占 14%<sup>[2]</sup>。

## 1 固定/稳定化技术

### 1.1 固定/稳定化技术的定义与范畴

固定/稳定化技术在应用中包括两种方式, 即固定化与稳定化。固定化(solidification), 是指将污染物质和黏合剂混合, 污染物不与黏合剂发生化学反

应, 只是使污染土壤固定成一个固体块状物质, 并向其表面加盖防渗透材料以减少污染物质向外渗透, 从而实现污染土壤修复; 稳定化(stabilization), 是向污染物中混入黏合剂, 黏合剂与污染物质发生化学反应或热反应形成一个稳定的、难溶的固体形态, 减少污染物的毒性、沥出性和可溶性以达到修复目的<sup>[3-4]</sup>。在实际修复实践中固定化和稳定化过程同时存在, 通过黏合剂和添加剂对被处理物质的吸附、络合和螯合等作用, 使污染物质固定在固体块中, 并达到化学性质的稳定<sup>[5]</sup>。固定/稳定化技术实际操作简单, 应用方便, 只需按比例将污染土壤与固化材料混合凝固成固体块, EPA 在其土壤修复中的应用方式如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

固定/稳定化包括原位固定/稳定化和异位固定/稳定化, 常用的处理方式有水泥基固定/稳定化、石

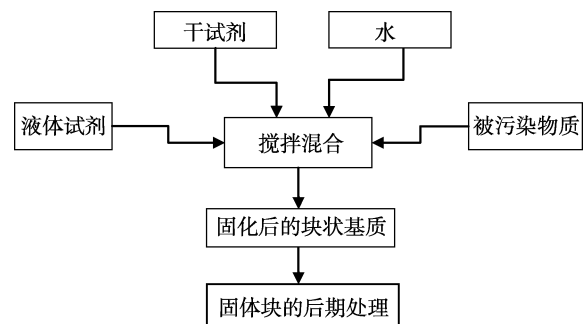


图 1 固定/稳定化技术的主要应用方式

Fig. 1 Primary application mode of S/S technology

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108353)、湖北省自然科学基金项目(2012FFB03101)和武汉大学地理科学理科基地科研能力训练项目(J1103409)资助。

\* 通讯作者(hailzhang@sina.com)

作者简介: 刘甜甜(1990—), 女, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事环境生态研究。E-mail: ltt0403@163.com

灰火山灰材料固定/稳定化、热塑性材料固定/稳定化、玻璃化、有机聚合物固定/稳定化、囊封和自胶结固定/稳定化等<sup>[7]</sup>。对固定/稳定化技术的修复效果通常用毒性特性浸出(TCLP)法进行检验,其原理是污染土壤在经过固定/稳定化之后,污染物的迁移性和可溶性降低,向外渗透减少,沥出液的污染物浓度 TCLP 值相应减少。

### 1.2 应用与修复材料

固定/稳定化技术能够有效地应用于多种污染类型的修复,包括土壤、淤泥、固体废弃物中的有机和无机污染物。无机污染物主要是各类金属污染物,包括 As、Cr、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni、Se、Sb、U、Zn 等;有机污染物则包括农药、除草剂、石油及其裂解产物、半挥发性有机物、多氯联苯、二噁英、呋喃等<sup>[4]</sup>。使用固定/稳定化技术对重金属污染土壤进行修复,目前在国内外都有较多的研究与实践,并且取得很好的修复效果<sup>[6, 8-11]</sup>;用于有机污染土壤修复的研究相对较少,主要集中在石油烃类和苯酚类污染物的修复<sup>[3-4, 12]</sup>。

固定/稳定化技术使用的修复材料,根据其化学性质分为 3 类:无机黏合剂、有机黏合剂和专用添加剂。无机黏合剂是最主要的黏合剂,有水泥、火山灰质材料、石灰、磷灰石和矿渣等,目前报道的固定/稳定化项目约有 90% 是使用无机黏合剂;有机黏合剂包括有机黏土、沥青、环氧化物、聚脂和蜡类等;专用添加剂包括活性炭、pH 调节剂、中和剂和表面活性剂等<sup>[3, 13-14]</sup>。针对不同类型的污染物质,有机黏合剂和无机黏合剂会单独使用也可混合使用,专用添加剂通常与其他两种黏合剂混用以加速修复过程、稳定修复结果。

### 1.3 优缺点及影响因素

相较于其他土壤修复技术,固定/稳定化技术具有明显的优势:操作简单,费用相对较低;修复材料多是来自自然界的原生物质,具有环境安全性,如较为典型的一个固化剂配方是 67% CaO + 22% SiO<sub>2</sub> + 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 3% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 3% 其他物质,基本不存在次生污染;固定后土壤基质的物化性质具有长期稳定性,综合效益好;固化材料的抗生物降解性能强且渗透性低<sup>[14]</sup>。同样的,这种方法也存在一些局限性,如虽然降低了污染物的可溶性和移动性,但并没有减少土壤中污染物的总含量,反而增加了污染土壤的总体积;固定化后的土壤难以进行再利用;土壤的 pH 会影响修复材料的耐久性和污染物的溶解性;修复后的残留物需要进行后续处理等<sup>[10, 15]</sup>。

由于污染土壤的性质不同,使用固定/稳定化技术的修复效果也会有很大的差异,影响效果的主要因

素有:污染物的化合价态:主要污染物的化合价态不同,其溶解性也不同,溶解性低的固化效果更好,特别是重金属污染物,如 As(V) 的可溶性较 As(III) 可溶性和毒性均低,要修复砷污染土壤通常需要先先将 As(III) 氧化为 As(V); pH 和氧化还原势:这二者会影响污染物的沥出性,而且在不同的 pH 和氧化还原条件下,不同污染物的可溶性不同,这就加大了固化难度;污染物的性质:一些酚类或挥发性有机物的存在会降低修复材料的耐受性,而细颗粒物的存在又会降低黏合性,对于污染物的稳定还需要有特定的环境湿度;修复材料的选择和混合状态:针对不同污染物质有不同的材料及使用量,且要使污染颗粒完全被黏合剂所囊封才能达到效果<sup>[6, 10, 16-18]</sup>。

## 2 固定/稳定化技术的应用

### 2.1 金属污染物

固定/稳定化技术是目前重金属污染土壤修复中使用最多的技术<sup>[19]</sup>。水泥和石灰是最常用的无机黏合剂,在实际应用中通常是作为固化的基础材料存在。Bilge 等<sup>[20]</sup>用石灰、活性碳、黏土、沸石、沙子和水泥等为原料来修复被 Pb 污染的土壤,结果表明,在调整 pH 和湿度条件下,1:21 的石灰和土的比例下 Pb 的 TCLP 值降低了 88%,而 1:15 的水泥和土比例的修复效率高达 99%。将有机黏合剂和特定的添加剂混合使用,能够有效地降低污染物的毒性和沥出性,修复效果更好,如 2004 年 EPA 超级基金项目曾用水泥和 pH 调节剂为原料修复 As 污染严重的土壤,修复后测得土壤沥出液的 TCLP 值为远低于 EPA 规定的 As 的最大环境容量值 5.0 mg/L<sup>[6]</sup>;在 20 世纪的美国家能源部土地修复项目中有用高分子玻璃聚合物和二硫代氨基甲酸酯(DTC)作黏合吸附剂修复 Hg 污染土壤,污染物沥出液的 TCLP 值从 1 060 mg/L 降低到 0.001 2 ~ 0.016 9 mg/L<sup>[21]</sup>。

固定/稳定化技术的取材广泛,还可以用日常生活中产生的部分工矿业废弃物、生活垃圾等作为修复原材料,这样不仅能减少污染物的排放,还可有效地治理重金属污染土壤,实现废弃物资源化再利用和环境修复的双重效益。如 Rabindra 等<sup>[22]</sup>使用皮革厂和染料厂的有机淤泥(TSC、DSC)和磷酸氢二铵(DAP)、石灰等用于修复 Zn、Cu、Ni 等复合型重金属污染土壤,效果显著,而 Shi 等<sup>[23]</sup>研究用各种粉煤灰、窑灰、钢渣、磷渣等碱化的水泥对一些有毒的放射性污染物固化效果比单一使用水泥固化效果提高很多。尽管我国在土壤固定/稳定化修复方法方面的研究尚处于实验室研究阶段,但也取得了阶段性成

果,如薛永杰等<sup>[24]</sup>、蒋建国等<sup>[25]</sup>、王川等<sup>[26]</sup>研究利用固定/稳定化技术修复土壤、淤泥和城市垃圾焚烧物中的重金属污染物,效果良好,表明固定/稳定化技术在我国土壤修复中有很大的利用空间。表1列举了固定/稳定化技术应用于重金属污染土壤的部分修复案例以及修复材料。

## 2.2 有机污染物

土壤中有有机污染物在自然条件下降解缓慢,对环境的危害较大,对有机物污染土壤的修复极为迫切<sup>[34]</sup>。使用固定/稳定化技术修复有机物污染土壤,修复材料对有机物的水解、氧化、还原和成盐作用机理是修复成功的关键,所以修复材料的选择至关重要,通常需要向水泥基中加入有机黏合剂,同时要注意避免污染物对修复材料可能会造成的损害。Thornburg<sup>[35]</sup>以硅酸盐水泥为基础原料混合热固性黏合剂来修复被石油烃类物质严重污染的淤泥,结果显示固化后沥出液中多环芳烃和脂肪族碳氢化合物的 TCLP 值均大大降低。Bates 等<sup>[36]</sup>研究发现在水泥基固定/稳定化技

术修复二噁英、五氯苯酚和杂酚油等有机污染物的过程中加入活性碳或一些专有添加剂,能更有效地降低沥出液中污染物的浓度。使用固定/稳定化技术对有机物污染土壤的修复难度较大,而且修复过程中发生的物化反应和自然界的降水过程对修复材料会存在一定程度上的侵蚀,需要选择影响较小的材料,研究发现有机黏土(膨润土、蒙脱石等)的抗侵蚀性能较好,被认为是修复有机污染物最有效的黏合剂之一,有很好的应用前景。Paria 和 Yuet<sup>[14]</sup>总结了较多的应用有机黏土修复有机物污染土壤的成功案例,如 Vipulanandan 研究发现有有机黏土和高分子聚合物混合物能更好地固定苯酚类污染物,Boyd 使用有机黏土和 QAS(季铵盐)固化修复烷烃类污染物。有机污染物的物化性质复杂,而且通常是呈现复合型污染,单一的修复方法不能达到理想的修复效果,所以对有机污染土壤的固定/稳定化修复还需要与其他的修复方法联合使用。表2展示了固定/稳定化技术应用于有机污染土壤修复的部分案例和使用的修复材料。

表1 固定/稳定化技术修复重金属污染土壤实例  
Table 1 Examples of used S/S for remediation of heavy metal contaminated soil

主要污染物	修复地背景	修复材料	修复规模	修复效果(TCLP 值)	参考文献
As	美国某饲料添加剂厂	10%水+10%硫酸铁+5%水泥	场地修复	< 5.0 mg/L	[6]
Cu、Cr、As、Zn	瑞典某木材浸胶工业基地	1%零价铁离子混合物+水泥+玻璃化,膨润土+专用试剂+水泥	实验室研究	As 减少 98%, Cr 减少 45%	[27-28]
Hg	实验室配置土样	硅酸盐水泥+二硫代氨基甲酸钠,硅酸盐水泥+液态硫化物+高分子聚合物	实验室研究	Hg 由 0.282 mg/L 分别减少到 0.013 9 mg/L 和 0.002 mg/L	[10,29]
Pb、Cu、Cd、Cs、Sr	土耳其某垃圾焚烧厂	红泥+粉煤灰+水泥+玻璃化	场地修复	总浓度降低 20%	[30]
Cu、Cr 等金属	芬兰东南部沼泽地	泥炭+水泥+高炉矿渣	场地修复	固化后抗压强度大	[31]
Cu、Zn、Pb、COD	南京污水厂淤泥	水泥基材料+膨润土	实验室研究	Zn : 6.9% 降至 0.25% Pb : 9.6% 降至 5%	[32]
Cu、Zn、Pb、Cd	株洲工业区河道淤泥	50%水泥+2%二硫氨基甲酸盐	实验室研究	Cu :0.105 mg/L、Zn :4.65 mg/L、 Pb :0.232 mg/L、Cd :0.123 mg/L	[26]
Hg、Cu、As 等	加拿大某氯碱厂旧址	铁或木质素的衍生物+硅酸盐水泥	场地修复	Hg 从 0.188 mg/L 降到 0.017 mg/L	[33]

表2 固定/稳定化技术修复有机污染土壤实例  
Table 2 Examples of used S/S for remediation of organic contaminated soil

主要污染物	修复地背景	修复材料	修复规模	修复效果(TCLP 值)	参考文献
氯代烃、多环芳烃、苯及其派生物、酚醛、有机硫化物	英国多处隔离存储仓	季铵盐+蒙脱石+水泥基材料	站点修复	多环芳烃<10 μg/L, 苯类<0.5 μg/L	[30]
多环芳烃(萘、蒽)、杂酚油、二噁英、五氯苯酚	美 EPA 杂酚油污染场地	1.3%碳粉+5%硅酸盐水泥+4%飞灰	场地修复	多环芳烃<4.4 μg/L、杂酚油<10 μg/L、五氯苯酚<200 μg/L、二噁英<30 pg/L	[5, 36-37]
苯酚、二氯酚等酚类化合物	实验室配置土样	水泥基材料+1%活性碳+1%过氧化氢	实验室研究	约为原来 3%	[38]
含硫有机物、石油及其裂解产物	波多黎各某石化厂址	50%硅酸盐水泥+5%专用添加剂	场地修复	固体块抗压强度大,无 TCLP 测试	[39]
COD	四川气田钻井废泥浆	13%水泥+9%粉煤灰+1.6%石灰+2%石膏	实验室研究	由 46 147 mg/L 降至 85 mg/L	[40]
烷烃类、多环芳烃	希腊炼油厂淤泥	配比不同的水泥基	实验室研究	烃类减少 60%~70%	[41]

### 3 固定/稳定化技术在我国优化应用分析

土壤污染已成为一个制约我国社会经济和环境生态可持续发展的重大问题,全国性土壤污染状况调查工作已经结束,根据《全国土壤污染状况调查公报》,我国的土壤污染状况不容乐观,部分地区污染严重,Cd、Hg、As、Cu等重金属和六六六、滴滴涕、多环芳烃等有机物超标率较高,大范围的土壤修复治理工作即将展开。固定/稳定化作为技术成熟、效果良好的修复方法,在我国的土壤修复中必然具有广泛的应用前景,而我国目前对于土壤修复技术方法的研究主要停留在实验室研究和试点修复阶段,大范围的场地应用较少,推广应用固定/稳定化技术要结合我国土壤污染的实地情况,进行适应性调整。

#### 3.1 加强工程技术和设备的研发

固定/稳定化技术在应用中有输送、灌浆、搅拌等多个环节,需要使用泥浆搅拌机、传送管、钻孔机等机器设备,同时修复材料和污染土壤的混合程度会导致修复效果存在很大的差异<sup>[20, 42]</sup>。在使用固定/稳定化技术进行污染土壤修复之前,必须要加强工程技术和设备的研发,使技术能够适用我国特有的自然条件(如地质、气候及土壤条件等)和资源特点。引进国外技术和设备时,要根据我国土壤污染特点进行适应性分析,加强修复材料和设备的有效性、安全性、经济性的研究,早日形成我国自主知识产权的工程技术、修复材料和装备。我国土壤修复相关的企业多数还处于起步阶段,研发力量还比较薄弱,亟需在土壤修复市场中引入竞争机制,使企业成为土壤修复技术研究和应用的主体,促进土壤修复市场的兴起与繁荣,从而反哺土壤修复工程技术和设备的研发。

#### 3.2 优化修复费用结构

固定/稳定化技术的费用包括黏合剂材料费、预处理过程、设备操作与运行、后期处理、机器设备的维护以及修复后监测等部分。根据EPA修复项目的分析报告,不同类型的土壤污染物、不同的场地站点条件,所需要的修复费用不同,超级基金项目中国固定/稳定化技术的平均修复费用都比较高,每吨几十到几百美元不等<sup>[4, 6, 12, 42]</sup>。我国目前在污染土壤修复方面的投资相对较少,要有效地应用此项技术,必须要优化费用结构,在保证效果的前提下节约资金。具体来说,可以从以下几方面着手: 扩展融资渠道,在政府投入的基础上,还需多方面筹措资金,如征收环境税、污染企业承担主要修复责任、以“谁修复谁受

益”为原则向社会筹集资金等; 研发费用低、取材范围广的“本土”修复材料,我国的石灰水泥制造业比较发达,同时还要充分利用各类工矿建筑废弃物和开发可利用的农业、生活废弃物,达到废弃物资源化、再利用的目标; 改进技术、提高工作效率,完善项目运营和维护的措施,加强成本管理<sup>[43]</sup>。

#### 3.3 向环境友好方向发展

向绿色与环境友好的方向发展是土壤修复技术的一大发展趋势<sup>[44]</sup>。从修复材料的选取来说,可对安全可靠的有机淤泥、草木灰、建筑废弃物等材料进行循环再利用,既降低费用又可保护环境;同时,进一步研发低能耗、低排放、可持续利用的新型固化材料,使固定/稳定化技术得以持续和推广<sup>[22, 45]</sup>。另一方面,要改善环境修复施工过程的环境友好性。对修复施工过程中产生的有毒有害物质,例如修复材料与污染物混合过程中排放的废气、废渣,必须加以收集和处理,防止造成二次污染;同时要加强对修复后土壤的生态监测,防止修复材料被侵蚀出现污染物浸出,对其他土地或水源造成污染。

#### 3.4 与其他修复技术联合

我国大部分土壤污染区呈现复合污染的特点,使用单一的修复方法很难达到有效的修复,因此必须要发展多种技术联合的综合修复技术<sup>[44]</sup>。对于复合有机污染物的修复,可将固定/稳定化技术与淋洗法、热处理法、化学氧化法等结合使用,在转化和降解污染物的同时,防止污染物发生渗透、扩散。例如,土壤淋洗法在固定/稳定化修复的预处理阶段使用,可有效除去污染物中的一些挥发性和半挥发性有机污染物,使固化效果更佳。将植物修复技术应用于固定/稳定化后期,能够降低污染物含量,还能恢复修复地的生态功能,美化景观<sup>[11, 27, 40]</sup>。与其他技术的联合使用,能够提高固定/稳定化技术修复效率,扩展其应用范围。

## 4 结语

我国土地资源短缺,土壤污染加重了用地供给的紧张程度,甚至威胁我国的粮食安全。今后一定时期内,土壤恢复工作显得尤为重要。我国土壤修复的固定/稳定化研究宜将重点放在: 借鉴国外经验,并根据我国具体场地污染状况进行适应性调整; 加强技术研究,研制成本节约、适用范围广的修复材料和机器设备; 在典型污染区域内进行修复示范工程,推广适用的土壤修复工程技术; 对固定/稳定化修复技术开展可持续评价和修复后评估。

## 参考文献：

- [1] 骆永明, 滕应, 过园. 土壤修复——新兴的土壤科学分支学科[J]. 土壤, 2005, 37(3): 230–235
- [2] EPA. Superfund Remedy Report: Thirteenth Edition[R]. EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, 2010, EPA-542-R-10-004
- [3] EPA. Solidification/Stabilization Use at Superfund Sites[R]. EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, 2000, EPA-542-R-00-010
- [4] ITRC. Development of Performance Specifications for Solidification/Stabilization[R]. ITRC S/S team, Technical/Regulatory Guidance, 2011, www.itrcweb.org.
- [5] Environment Agency. Review of Scientific Literature on the Use of Stabilisation/Solidification for the Treatment of Contaminated Soil, Solid Waste and Sludges[R]. Environment Agency, Science Report, SC980003/SR2, 2004, www.environment-agency.gov.uk
- [6] EPA. Arsenic Treatment Technologies for Soil, Waste, and Water[R]. EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, 2002, EPA-542-R-02-004
- [7] Ilic MR, Polic PS. Solidification/stabilization technologies for the prevention of surface and ground water pollution from hazardous wastes[J]. Handb. Environ. Chem., 2005, 5(3): 159–189
- [8] Federal Register. Land Disposal Restrictions: Advanced Notice of Proposed Rulemaking[R]. Federal Register, 2000, 37 944–37 946
- [9] 邵学新, 黄标, 孙维侠, 顾志权, 钱卫飞, 邓西海, 骆永明. 长江三角洲典型地区工业企业的分布对土壤重金属污染的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 397–404
- [10] EPA. Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water[R]. EPA, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2007, EPA-68-W-02-034
- [11] Kalb PD, Adams JW, Milian LW. Sulfur Polymer Stabilization/Solidification (SPSS) Treatment of Mixed-Waste Mercury Recovered from Environmental Restoration Activities at BNL[R]. 2001, BNL-52614
- [12] EPA. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil[R]. EPA, Engineering Forum Issue Paper, 2006, EPA-542/F-06/013
- [13] 郝汉舟, 陈同斌, 靳孟贵, 雷梅, 刘成武, 祖文普, 黄莉敏. 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
- [14] Paria S, Yuet PK. Solidification/stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: A literature review[J]. Environmental Reviews, 2006, 14: 217–255
- [15] DOE. Innovative Technology Summary Report: Mercury Contamination—Amalgamate (contract with NFS and ADA) Demonstration of DeHg Process: DOE[R]. DOE, 1999, DOE/EM-0471
- [16] Rieser LA, Bishop P, Suidan MT. Stabilization and Testing of Mercury Containing Wastes: Borden Catalyst [R]. EPA, 2001, EPA/600/R-02/019
- [17] EPA. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (Eleventh Edition) [R]. EPA, 2004, EPA-542-R-03-009
- [18] 卢聪, 李青青, 罗启仕, 刘莉莉, 张长波. 场地土壤中有效态砷的稳定化处理及机理研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 298–304
- [19] 郭观林, 周启星, 李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1 990–1 996
- [20] Alpaslan B, Yukselen MA. Remediation of lead contaminated soils by stabilization/solidification[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002(1/4): 253–263
- [21] DOE. Innovative Technology Summary Report: Stabilize High Salt Content Waste Using Polysiloxane Stabilization[R]. DOE, Mixed Waste Focus Area, 1999, OST/TMS ID-1683
- [22] Li F, Bade R, Oh S, Shin WS. Immobilization of heavy metals in a contaminated soil using organic sludge char and other binders[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(10): 1 362–1 372
- [23] Shi C, Fernández-Jiménez A. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements [J]. J. Hazard Mater, 2006, 137(3): 1 656–1 663
- [24] 薛永杰, 朱书景, 侯浩波. 石灰粉煤灰固化重金属污染土壤的试验研究[J]. 粉煤灰, 2007(3): 10–12
- [25] 蒋建国, 赵振振, 王军, 张妍, 杜雪娟. 焚烧飞灰水泥固化技术研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 230–235
- [26] 王川, 杨朝晖, 曾光明, 汪理科, 徐海音, 谢华明. DTCR 协同水泥固化/稳定化重金属污染底泥的研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2 060–2 066
- [27] Kumpiene J, Ore S, Renella G, Mench M, Lagerkvist A, Maurice C. Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper, and arsenic in soil[J]. Environ. Pollut., 2006, 144(1): 62–69
- [28] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review[J]. Waste Manage, 2008, 28(1): 215–225
- [29] EPA. Stabilization of Mercury in Waste Material from the Sulfur Bank Mercury Mine[R]. EPA, Innovative Technology Evaluation Report, 2004, EPA/540/R-502 a
- [30] NATO/CCMS. Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment and Clean Up of Contaminated Land and Groundwater[R]. NATO, Pilot Study, 1998, NO.219, www.nato.int/ccms
- [31] Maijala A, Forsman J, Dr. Lahtinen P. Cement Stabilization and Solidification – STSO: Review of Techniques and Methods[R]. Project: Binders, Methods and Techniques to Stabilize/Solidify Polluted Soil and Sediment, 2008, NO. 1060339
- [32] 朱伟, 林城, 李磊, 大木宜章. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2007, 28(05): 1 020–1 025
- [33] EPA. E-mail from Larry Kimmel, U.S EPA to Danielle Wohler, Tetra Tech EM Inc., Regarding S/S of Mercury at the Rocky Mountain Arsenal site[Z]. EPA .2004, November 18

- [34] 周启星. 土壤环境污染化学与化学修复研究最新进展[J]. 环境化学, 2006, 25(3): 257–265
- [35] Thornburg T. Effectiveness of in situ cement stabilization for remediation of sediment containing coal tar derived hydrocarbons[C]. The Annual International Conference on Contaminated Soils, Sediments, and Water, October 17-20, 2005, University of Massachusetts, Amherst. <http://www.aehsfoundation.org/west-coast-conference.aspx>
- [36] Bates ER, Akindele F, Sprinkle D. American creosote site case study[J]. Environ. Prog., 2002, 21: 79–84
- [37] Bates ER, Sahle-Demessie E, Grosse DW. Solidification/stabilization for remediation of wood preserving sites: Treatment for dioxins, PCP, creosote and metals[J]. Remediation, 2000, 10(3): 51–65
- [38] Rho H, Arafat HA, Kountz B, Buchanan RC, Pinto NG, Bishop PL. Decomposition of hazardous organic materials in the solidification/stabilization process using catalytic-activated carbon[J]. Waste Manage, 2001, 21(4): 343–356
- [39] EPA. Engineering Bulletin: Solidification/Stabilization of Organics and Inorganics[R]. EPA, 1993, EPA/540/S-97/500
- [40] 李瑞龙, 夏素兰, 朱家骅, 吴汉玉, 周芳. 磷石膏与粉煤灰用于钻井废泥浆固化处理的实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(3): 225–227
- [41] Karamalidis AK, Voudrias EA. Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: Leaching behavior of alkanes and PAHs[J]. J. Hazard Mater, 2007, 148(1/2): 122–135
- [42] EPA. Recent Developments for In Situ Treatment of Metal Contaminated Soils[R]. EPA, 1997, EPA-68-W5-0055
- [43] EPA. Final Report: Pilot Region-Based Optimization Program For Fund-Lead Sites[R]. EPA, 2007, EPA 542-R-07-011
- [44] 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(3): 558–565
- [45] 李青青, 罗启仕, 郑伟, 李小平. 土壤修复技术的可持续性评价——以原位稳定/固化技术和异位填埋技术为例[J]. 土壤, 2009, 41(2): 308–314

## Application and Optimization Analysis of Solidification/ Stabilization for Soil Remediation

LIU Tian-tian<sup>1</sup>, CHEN Jian-xiong<sup>2</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, ZHANG Hai-lin<sup>1\*</sup>, MAO Xu-hui<sup>2</sup>

(1 School of Urban & Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2 School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Solidification/stabilization (S/S) is one of the commonly used physicochemical remediation technologies of contaminated soil, with a wide range of application prospects in the site remediation in China due to its advantages of being inexpensive, nontoxic and good comprehensive effect. This paper introduced the basic principles and materials of S/S technology, and analysed its application scope, merits and drawbacks. Reported cases of S/S remediation on heavy metals and organic pollutants were summarized in the present study. Based on the actual demand of soil remediation in China, the strategies for optimizing the S/S remedial technology were proposed: Promoting the research on engineering technology and equipment; lowering the cost of remediation; developing environment-friendly S/S remediation technologies.

**Key words:** Solidification/stabilization, Soil contamination, Soil remediation, Optimization strategies