

# 土壤固化/稳定化修复技术应用研究进展

张汝壮<sup>1,2</sup>

1. 上海污染场地修复工程技术研究中心, 上海 200232
2. 上海环境卫生工程设计院有限公司, 上海 200232

**摘要** 固化/稳定化(S/S)技术作为一种高效的固体废物处理技术近年来在污染土壤修复领域备受关注。本文介绍了土壤S/S修复技术的概况,其针对的污染物不仅包括重金属,也包括其他有机污染物。常用的土壤S/S修复材料主要有硅酸盐水泥类材料及各类添加剂;常用的土壤S/S修复技术分为异位和原位2种操作方式。结合美国超级基金修复项目报告,对土壤S/S修复技术在国内外污染土壤修复领域的应用情况进行介绍和分析。针对土壤S/S修复技术的优缺点,对该技术未来的发展需求进行了展望。

**关键词** 污染土壤修复;土壤固化/稳定化修复技术;硅酸盐水泥;原位;异位;应用情况

近年来,污染土壤问题日渐突出,《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)的出台标志着国家对污染场地修复的重视力度越来越强。土壤固化/稳定化(solidification/stabilization, S/S)修复技术作为一种常用的污染土壤修复技术备受关注。土壤S/S是指通过将S/S材料与受污染土壤混合,运用物理或化学的方法将土壤中的污染物固定起来,或者将污染物转化成化学性质不活泼的形态,进而阻止污染物在土壤环境中迁移、扩散等过程,从而降低土壤中污染物的毒害程度的修复技术<sup>[1-2]</sup>。

其中,土壤固化技术主要是通过土壤与一种或多种S/S材料的机械混合实现的,通过吸附、拦截等作用将污染物控制在颗粒固化体内,降低污染物在土壤环境中的迁移性,进而降低其环境风险。稳定化技术是从污染物的有效性出发,通过吸附、沉淀或共沉淀、离子交换等作用改变污染物在土壤中的存在形态,将污染物转化为不易溶解、迁移能力或毒性更小的污染物,以降低其溶解迁移性、浸出毒性和生物有效性。虽然固化和稳定化的定义有所不同,但是S/S材料通常能够同时起到固定和稳定污染物的作用,因此两种技术合二为一统称为S/S技术<sup>[3-4]</sup>。根据S/S修复技术在污染土壤修复中的应用方式,该技术可以分为原位S/S修复技术和异位S/S修复技术<sup>[4-6]</sup>。

土壤S/S修复技术在污染土壤修复领域被广泛应用,1982—2008年,有259个超级基金污染土壤修复项目采用了

S/S修复技术。与欧美等国相比,中国的土壤S/S修复技术起步较晚,技术不够成熟,工程应用案例相对较少。为深入理解土壤S/S修复技术,进而推进中国土壤S/S修复技术、设备的研究开发,本文阐述了土壤S/S修复技术的主要适用范围、常用的土壤S/S修复材料以及S/S的两种操作方式,结合美国的超级基金修复项目报告对S/S在污染土壤修复领域的应用情况、优缺点进行介绍,并对该技术未来发展进行展望。

## 1 土壤S/S修复技术的适用范围

土壤S/S修复技术的对象主要是受无机污染物和有机污染物污染的土壤。无机污染物主要为重金属污染物(砷、镉、铬、铜、铅、汞、镍、硒、锑、铀、锌等),有机污染物主要有杀虫剂、除草剂、石油、多环芳烃、挥发性有机污染物、多氯联苯和二噁英/呋喃等。早期文献报道指出,有机污染物与养护后的水泥基土壤混合物有可能相互影响,难以达到控制有机污染物的目的,因此大部分的土壤S/S修复工程主要用于控制无机污染物,这一现象误导人们认为土壤S/S修复技术不适用于有机污染物。但是,近年来的研究结果表明,土壤S/S修复技术对多种污染物具有效果或潜在效果<sup>[4]</sup>。

通常情况下,同一污染场地内同时含有有机和无机污染物,常见的场地包括天然气生产厂场地、木材处理厂、炼油厂、石油回收设施、杀虫剂和除草剂制造厂等。多种污染物的存在可能会影响土壤S/S修复技术的应用有效性。

收稿日期:2017-01-20;修回日期:2017-03-07

基金项目:上海市国有资产监督管理委员会项目(2015019)

作者简介:张汝壮,博士,研究方向为污染场地调查评估和修复技术,电子信箱:qdzrz123@126.com

引用格式:张汝壮. 土壤固化/稳定化修复技术应用研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 81-86; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.09.010

美国国家环境保护局(EPA)公布的超级基金修复工程报告列出了土壤S/S修复技术能够应对的多种有机和无机污染物。对于该技术的有效性,在具体的污染物治理方面,EPA的报告与其他参考资料有时存在差异性。部分文献中提及

土壤S/S修复技术对EPA报告中未提及的污染物具有有效性,比如杂酚油、煤焦油(表1)。另外,EPA报告指出,S/S对卤代和非卤代挥发性有机污染物没有作用,但Paria等<sup>[9]</sup>指出,对挥发物进行预处理后S/S表现出一定的功效。

表1 S/S对不同污染物的作用效果<sup>[9-5]</sup>

Table 1 Effects of S/S technology for different contaminants

污染物种类	是否有效及参考材料		
	参考EPA报告	参考其他材料	
有机污染物	卤代挥发性污染物	无效	有效
	非卤代挥发性污染物	无效	有效
	卤代半挥发性污染物	有效	—
	非卤代半挥发性污染物、非挥发性有机污染物	有效	—
	多氯联苯	有效	—
	农药	有效	—
	二噁英/呋喃	潜在效果	有效
	有机氰化物	潜在效果	有效
	有机腐蚀物	潜在效果	有效
	五氯苯酚	—	有效
	杂酚油、煤焦油	—	有效
	重油	—	有效
	无机污染物	挥发性金属	有效
不挥发性金属		有效	—
石棉		有效	—
放射性物质		有效	—
无机腐蚀物品		有效	—
无机氰化物		有效	—
水银		有效	—
活性物质	氧化剂	有效	—
	还原剂	有效	—

注:表中卤代挥发性污染物包括卤代溶剂和气体污染物;非卤代挥发性污染物包括酮/呋喃,芳烃;卤代半挥发性污染物包括多氯联苯、农药、氯化苯、氯代酚类;非卤代半挥发性污染物包括多环芳烃、非氯代酚类;无机腐蚀物品包括盐酸、硫酸、氢氧化钠、氢氧化钾;无机氰化物包括氰化物(CN<sup>-</sup>)盐。

## 2 常用土壤固化/稳定化修复材料

土壤S/S修复材料是影响S/S效果的主导因素,S/S材料通常分为黏结剂材料和添加剂材料。黏结剂材料主要包括水泥类和火山灰类材料(粉煤灰、炉渣等),能够将污染物固化在固化体内部;添加剂包括活性炭、碳酸盐、混凝土添加剂(缓凝剂、防水剂等)、铁铝化合物等,能够进一步提高S/S技术对污染物的固化和稳定化效果<sup>[7]</sup>。

### 2.1 黏结剂材料

黏结剂材料是最常见的土壤S/S修复材料,主要包括硅酸盐水泥、粉煤灰、炉渣、沥青、窑灰等,而且在实际工程中,两种黏结剂材料经常被同时用于固化稳定化过程中。

1) 硅酸盐水泥。水泥能够通过和重金属污染物形成不溶性氢氧化物、碳酸盐和硅酸盐进而降低污染物的流动性,

达到稳定污染物的目的;另外,水泥能够形成一个固化封装体,达到固化污染物的目的。虽然填充剂和火山灰可能在S/S过程中用量最多,但是水泥的应用最为广泛,尤其是硅酸盐水泥。硅酸盐水泥也经常与其他黏结剂材料混合使用,比如水玻璃、粉煤灰等。在水泥的应用过程中经常添加一些添加剂,主要目的是控制固化体成形、提高固化体的耐久性、提高固化体的物理性能、固定金属和有机污染物。除水泥黏结外,采用的较多的黏结剂材料是石灰或窑灰<sup>[3,8]</sup>。

2) 水泥-粉煤灰。硅酸盐水泥和粉煤灰在混凝土中使用了许多年,围绕这一应用衍生出了很多技术。粉煤灰不仅能够提高混凝土的性能,而且在S/S应用过程中,粉煤灰的使用还能够提高经济性能,主要是因为粉煤灰通常能够取代25%~30%的硅酸盐水泥。在硅酸盐水泥/粉煤灰的应用过程

中,粉煤灰充当填充剂和火山灰。使用硅酸盐水泥/粉煤灰的不足之处是,由于粉煤灰的大量引入导致固化体的体积增大。在S/S过程中,粉煤灰:水泥的比例(质量比)为2~4,总质量增加量为50%~150%,总体积增加量为25%~75%<sup>[9]</sup>。

3) 石灰-粉煤灰。石灰、粉煤灰和水三者之间反应的最初产物是一种非结晶的凝胶,最终演变为硅酸钙水合物。通常情况下,上述反应的速度比水泥和粉煤灰对应的速度慢,且不会生成理化性质一样的产物。同水泥/粉煤灰一样,石灰/粉煤灰中采用的粉煤灰主要来源于火力发电厂的副产物,粉煤灰的组成和反应特性与燃煤的组成和电厂的运行情况有关。由于石灰/粉煤灰作为黏结剂材料能够固化稳定多种有机污染物和无机污泥,因此,石灰/粉煤灰常被用于含油废物和其他有机污染物(有机物含量大量20%)的固定稳定化。

4) 窑灰。在过去的几十年间,美国有上百个土壤S/S修复项目采用了石灰窑灰和水泥窑灰。窑灰通常作为吸附剂或膨胀剂广泛应用在危险废物处置中,另外,石灰窑灰可以作为酸性废物的中和剂使用。窑灰的特殊功效主要归因于其含有的大量氧化钙,氧化钙提高了窑灰的碱度,同时其水合过程能去除水分。通常情况下,窑灰和粉煤灰S/S的产物具有脆性,甚至产物为颗粒产品,如果修复后土壤拟运至垃圾填埋场,那么窑灰是一种很好的选择。

5) 其他材料。除上述黏结剂材料外,还有一些黏结剂材料黏结用于土壤S/S修复过程中,常见的黏结剂材料有以下几种。(1) 石膏:半水合硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )作为主要作用成分在专利和文献中报道的较多,但在实地的土壤S/S修复过程中应用较少。(2) 炉渣:高炉渣既可以单独使用也可以作为添加剂加入水泥中用于污染物的固定稳定化过程,还能用于还原高价态的金属污染物。(3) 乳化沥青:沥青固化过程在常温下进行,进而避免了沥青过热,挥发性污染物释放引发的二次污染问题。当乳化沥青的结构遭到破坏或者乳化沥青失掉其中的水分形成一个连续的沥青相后,该疏水性有机相通过沉淀作用围绕固体废物形成一个连续的固体壳,进而生成固态的、低渗出性的能够满足填埋场理化性质要求的固化产物。沥青已成功应用于石油污染土壤的治理中<sup>[1]</sup>。

## 2.2 添加剂

S/S添加剂的种类还有很多,常用的添加剂有活性炭、碳酸盐、混凝土添加剂(缓凝剂、防水剂等)、铁铝化合物、中和剂、氧化剂、有机黏土、磷酸盐、还原剂、橡胶颗粒、硅粉、炉渣、溶解性硅酸盐、吸收剂(粉煤灰、黏土、矿物)、有机和无机硫化物、表面活性剂、有机溶剂等。添加剂的作用可分为3种:金属稳定化、有机成分固定化、提高耐久性。其中,金属稳定化药剂具有多种功能:pH控制与缓冲、形成新产物、氧化/还原和吸附;酸、碱和盐(如石灰、烧碱、硫酸亚铁),可用于控制系统的pH值。缓冲剂(如碳酸钙和氧化镁)能够将pH控制在期望的范围。碳酸盐、硫化物、磷酸盐和铁化合物可以通过共沉淀等方式将污染物转为难溶形态。硫酸亚铁、金属铁、次氯酸钠和高锰酸钾可以降低或提高金属的价态。吸

附剂(如活性炭、离子交换树脂)也可以固定金属,特别是复杂难沉淀的金属。

众多添加剂中应用最为广泛的是磷酸盐,磷酸盐很早就被广泛用作污水处理药剂,直到20世纪80年代末才被广泛用作稳定化添加剂。磷酸盐主要用于固体污染物,如受污染的土壤和焚烧炉飞灰,经过磷酸盐处理后上述固体废物能够保留原有颗粒性质。磷酸盐和水泥基材料配合使用能够提高固化物的物理性能。磷酸盐对铅的固定化效果较好<sup>[11-17]</sup>。

## 3 土壤S/S修复技术的操作方式

与其他修复技术类似,土壤S/S修复工程的实施同样需要一系列的物理操作过程。根据土壤S/S修复技术在污染土壤修复中的操作方式,该技术可以分为原位土壤S/S修复技术和异位土壤S/S修复技术。原位土壤S/S修复技术通常是将S/S材料添加入受污染的土壤中,需要时可以加些水,然后采用机械搅拌设备在原位对土壤进行重复性地搅拌,使S/S材料与污染土壤、污染物发生物理、化学作用,将污染物固封在结构完整的具有低渗透系数的固态材料中,或将污染物转化为化学性质不活泼的形态,降低污染物在环境中迁移和扩散。异位土壤S/S修复过程包括土壤的开挖和运输、筛分、S/S材料与土壤的混合、处理后土壤的堆存与处置等过程,作用原理与原位土壤S/S修复相同<sup>[4-5]</sup>。

### 3.1 异位操作方式

异位土壤S/S修复需要用到搅拌机、材料存储和输送设备和辅助设备等,实际的操作设备视实际的处理和处置方案而定。异位土壤S/S修复操作过程中基本上所有的异位S/S都会用到混合设备,在混合体系中,通过泵、机械输送机或其他手段把固体废物运至进料槽中,然后固体废物再被运至混合器中,在混合器中受污染土壤与S/S材料混合,最后进行固化养护操作。上述混合体系既可以进行批次混合也可以进行连续混合。最早期的批次土壤S/S修复混合设备采用的是混凝土搅拌机,但是这种搅拌器存在一定的限制,对于黏性土壤的处理效果差<sup>[4-5]</sup>。异位固定稳定化操作常用的修复设备如图1所示,该设备为常用的一体化土壤S/S修复设备。



图1 异位S/S混合修复设备

Fig. 1 Schematic and device used for ex-situ S/S process

另外,还有一种基于喷涂的异位S/S修复方法,是将液体药剂喷到传送带上的土壤表面。尽管这种方法的操作相对简单,但是这种方法只能应用在少量特殊项目中。由于这一技术不能直接将土壤与药剂混合,S/S效果主要取决于液体药剂湿润土壤的程度。

### 3.2 原位操作方式

早期的原位S/S主要针对液态或半液态的废物,随着修复难度的加大以及经验的积累,原位S/S技术和设备不断更新,应用范围越来越广。常见的原位操作方式分为两种:基于农业耕作设备的区块法和钻井/螺旋钻法/挖沟方法<sup>[6]</sup>。

1) 基于农业耕作设备的区块法。对于很多污染场地,受污染土壤的深度很浅,通常只有1.5 m或更浅,而且污染面积大,比较适合采用区块法进行原位修复。区块法首先将药剂撒到待处理土壤表面,然后采用铲斗机或耙机等设备将土壤与药剂混合。另外,还可以将注射器、耙形设备或高能混合器安装在铲斗机的反铲臂或耙机上,进而提高药剂的分散程度。但是这一方法的有效性很难控制,而且主要用于固定化。常见的一种设备为拖拉机悬挂磁盘耙(图2)<sup>[14]</sup>。



图2 原位区块式S/S设备

Fig. 2 Device used for in-situ block S/S process

2) 钻井/螺旋钻法。大型钻探施工设备的出现为S/S材料的原位注入、土壤深层混合提供了机会,常用的原位注入搅拌设备见图3。首先利用钻机配套的注入设备将药剂注入受污染土壤中,然后施以大扭动力进行混合搅拌,最后形成巨大的排列整齐的柱状固化体。该方法混合效果好,而且混合深度比较深,能够到达30 m。深层原位混合需要使用大型的、带螺旋叶片、直径1.5~2.5 m的旋转螺旋钻机进行,能够利用螺旋叶片将泥浆状的S/S材料注入地下,混合完成后,螺旋钻撤出,固定稳定的土壤留在原地。



图3 原位S/S设备及示意

Fig. 3 Schematic and device used for in-situ S/S process

## 4 土壤S/S修复技术的应用情况分析

自20世纪80年代,土壤S/S修复技术逐步应用在污染土壤修复项目中,其中,美国的应用案例较多。美国EPA的超级基金报告中列出了2005—2011年不同修复技术在众多修复项目中的应用情况(表2)。因为同一项目可能采取多种修复技术,所以项目总数小于各项技术的应用数量之和。其中,采用原位修复技术的项目共有131项,其中采用原位S/S修复技术的项目有25项;采用异位修复技术的项目共有178项,其中采用异位土壤S/S修复技术的项目有44项。原位土

表2 2005—2011年不同修复技术在美国超级基金修复项目中的应用情况<sup>[2]</sup>

Table 2 Different remediation technologies selected in superfund projects (2005—2011)

序号	原位修复技术(131项)		异位修复技术(178项)	
	修复技术	项目数量	修复技术	项目数量
1	气相抽提技术	57	物理筛分技术	64
2	化学处理技术	28	S/S技术	44
3	S/S技术	25	抽出-处理技术	31
4	热处理技术	21	不确定的异地修复技术	22
5	生物修复技术	14	回收利用技术	27
6	多项抽提技术	9	不确定的原地修复技术	8
7	人工湿地处理	2	植物修复技术	5
8	地下水循环井	2	化学处理技术	9
9	淋洗技术	3	生物修复技术	7
10	压裂技术	2	热脱附技术	2
11	植物修复技术	2	其他异位处理技术	15

注:部分超级基金修复项目采用了两种或多种修复技术。

壤 S/S 修复技术的使用率位列第三,异位土壤 S/S 修复技术的使用率位列第二,表明土壤 S/S 修复技术在污染土壤修复领域的使用率很高<sup>[2]</sup>。

根据美国 EPA 的超级基金报告,1982—2004 年有 170 个超级基金项目采用了异位土壤 S/S 修复技术,41 个超级基金修复项目采用了原位土壤 S/S 修复技术。在 2005—2008 年又有 33 个项目采用了异位土壤 S/S 修复技术,15 个项目采用了原位土壤 S/S 修复技术。

美国超级基金项目中土壤 S/S 修复技术针对的污染物不同,而且部分项目中涉及的污染物不止一种。1982—2005 年,采用土壤 S/S 修复技术的修复项目有 207 项,其中,180 个项目针对的污染物中有重金属,35 个项目针对的污染物中有多环芳烃和其它非氯代半挥发性有机污染物,16 个项目针对的污染物中有有机农药,35 个项目针对的污染物中有多氯联苯,还有 53 个项目针对的污染物中存在其他有机污染物。

与美国相比,中国的污染土壤修复业务起步较晚,已完成的修复项目很少,绝大多数重金属污染土壤修复采用 S/S 修复技术,通过受污染土壤与水泥混合达到控制污染物的目的。有机污染土壤修复基本上都采用热脱附、氧化等技术,较少涉及 S/S 修复技术。

## 5 土壤 S/S 修复技术的优缺点

土壤 S/S 修复技术具备诸多优点,能够用于土壤的原位和异位修复,针对的污染物包括有机污染物和重金属,在污染土壤修复领域获得了很大程度的应用。但是,S/S 修复技术也存在很多缺点,在一定程度上限制了其应用和发展。土壤 S/S 修复技术的主要优点是:能够处理多种无机污染物、部分有机污染物和难处理的混合污染物;可以处理 NAPL(非水相液体,所有不溶于水的液态污染物的总称);在相对较短的一段时间达到修复目标;原位和异位均可;能够提高土壤的结构强度,实现土壤的资源化利用;在干湿条件下均适用,减少脱水 and 固废处置问题;现场处理污染物,既节约了填埋场的空间,又避免了污染物的场外运输;经常采用简单、快速、现成的设备和材料;与挖掘和场外处理相比性价比更高。其缺点是:大部分土壤 S/S 修复技术不能降低污染物毒性,不能削减污染物总量;不能破坏或移除污染物,需要进行长期监管;处理后的土壤体积增大;在工程实施前需要去除碎石或地下障碍物;污染物与黏结剂混合不均匀;土壤的原位 S/S 修复会抑制未来更全面的修复;对于挥发性有机污染物或六价铬等,水泥基材料的 S/S 效果不好;对于原位 S/S 修复,地下水流动等场地特征会改变;S/S 效果的长期稳定性不确定。

## 6 结论与展望

综上所述,土壤 S/S 修复技术是一种高效的污染土壤修

复技术,该技术适用的污染物种类广泛,主要包括重金属和有机污染物,常用的土壤 S/S 修复材料主要包括硅酸盐水泥类材料和各类添加剂,土壤 S/S 修复技术有异位和原位两种操作方式,所采取的设备类型因操作方式不同存在差异。近年来,土壤 S/S 修复技术在国内外获得了不同程度的应用,应用案例较多。

尽管土壤 S/S 修复技术的应用非常广泛,但是该技术仍然存在一些缺点,而且该技术在中国应用案例较少、技术不够成熟。因此,有必要围绕下面几个方向开展进一步的工作,弥补其缺陷,为其应用提供支持。1) 围绕高效黏结剂材料、作用机理、干扰因素等开展基础研究工作。2) 土壤中污染物的浸出和转移模型的开发应用研究。3) 土壤 S/S 修复工程有机污染气体的收集和处置研究。4) S/S 处理后受污染土壤的资源化再利用研究。5) 土壤 S/S 修复技术对不同污染物的应用有效性研究。

## 参考文献(References)

- [1] Conner J R, Hoeffner S L. The history of stabilization/solidification technology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1998, 28(4): 325-396.
- [2] United States Environmental Protection Agency. Superfund remedy report, 14th Edition[Z]. Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 542-R-13-016, 2013, 11.
- [3] Paria S, Yuet P K. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: A literature review[J]. *Environmental Reviews*, 2006, 14(4): 217-255.
- [4] The Interstate Technology & Regulatory Council Solidification/Stabilization Team. Development of performance specifications for solidification/stabilization[Z]. Technical/Regulatory Guidance, S/S-1, 2011, 11.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Technology performance review: selecting and using solidification/stabilization treatment for site remediation[Z]. Office of Research and Development, EPA 600-R-09-148, 2009, 11.
- [6] 林志坚, 毕薇. 重金属污染土壤固化稳定化修复技术及设备研究进展[J]. *广东化工*, 2016, 43(14): 119-120.  
Lin Zhijian, Bi Wei. Research progress in solidification/stabilization technology and equipment of heavy metal contaminated soils[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(14): 119-120.
- [7] 王加华, 张峰, 马烈. 重金属污染土壤稳定化修复药剂研究进展[J]. *中国资源综合利用*, 2016, 34(2): 49-52.  
Wang Jiahua, Zhang Feng, Ma lie. Research progress of stabilization binder for heavy metals contaminated soil remediation[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2016, 34(2): 49-52.
- [8] Chen Q Y, Tyrer M, Hills C D, et al. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review[J]. *Waste Management*, 2009, 29(1): 390-403.
- [9] Moon D H, Grubb D G, Reilly T L. Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(2/3): 944-951.

## Research progress in solidification/stabilization technology for contaminated soil remediation

ZHANG Ruzhuang<sup>1,2</sup>

1. Shanghai Engineering Research Center of Contaminated Sites Remediation, Shanghai 200232, China
2. Shanghai Environmental Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China

**Abstract** Solidification/stabilization (S/S) technology is a well-established remediation technology for contaminated soil. In this paper, the contaminant types, remediation ingredients, and delivery methods related to this technology are described. S/S technology is applicable to both organic and inorganic pollutants. Portland cement materials and various additives are the widely applied remediation ingredients used in S/S processes. On the other hand, S/S technology is applicable not only to in situ process but also to ex situ process. What's more, according to the Superfund Remedy Report of EPA, the application of S/S in soil remediation is introduced and analyzed. Finally, the need for further research and development of S/S is emphasized in order to overcome different challenges.

**Keywords** remediation of contaminated soil; solidification/stabilization remediation technology for soil; portland cement; in situ; ex situ; application

(责任编辑 田恬)