杨勇，可艳明，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**,012,5l0）：2-98.YangYong,HeYan-m ng, Luan Jing-li, etal. Com prehens ive ana lys is on soilremediation technologiesof internationalcontam inatedsites［J］. EnvironmentalScience&Technology，2012，35（10）：92-98.**

国际污染场地土壤修复技术综合分析

杨勇 1， 何艳明 1， 栾景丽 1， 刘景洋 2， 郭玉文 2（1.昆明冶金研究院，云南 昆明 650031； 2.中国环境科学研究院，北京 100012）

摘 要：针对土壤污染日益严重的问题，我国《重金属污染综合防治“十二五”规划》明确将重金属污染土壤列为主要整治内容之一。 文章综合分析了国内外污染场地土壤修复技术的研发历程、运用现状；指出了国际土壤修复技术现已进入黄金期；比较了欧美国家运用 于污染场地土壤修复主要技术的优缺点；介绍了最新的污染土壤植物修复技术的发展与应用；同时结合“十五”和“十一五”国家“863”计 划，给出了我国污染场地土壤修复技术研发现状示意图，以及我国土壤修复技术研发和应用路线图；在此基础上提出了污染场地土壤修 复技术的四大需求、四大发展方位和六大发展方向，并从六方面指出我国与发达国家土壤修复技术存在的差距，初步提出了我国污染场 地土壤修复技术发展建议。

关键词：污染场地； 污染物； 土壤修复技术； 综合分析

中图分类号：X53 文献标志码:A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2012.10.020 文章编号：1003—6504（2012）10—0092—07

Comprehensive Analysis on Soil Remediation Technologies of  
International Contaminated Sites

YANG Yong1， HE Yan-ming1， LUAN Jing—li1， LIU Jing-yang2， GUO Yu-wen2

(1.Kunming Metallurgical Research Institute，Kunming 650031，China；

2.Chinese Research Academy of Environmental Science，Beijing 100012，China)

**Abstract**：To the question of contaminated soil，the soil contaminated by heavy metals has been listed as one of the main improvement content in Comprehensive Prevention and Control of Heavy Metal Pollution in 12th Five -Year Plan in China. The research and development process，using the status quo of soil remediation technologies(SRTs)at home and abroad were analyzed to indicate that international SRTs have entered into gold period. SRTs in the Occident were compared to evaluate their superiority and inferiority. Development and application of the latest phytoremediation technologies were introduced. In combination with national 10th Five-Year and 11th Five -Year “863”Plan，research status scheme and research -application roadmap of SRTs of contaminated sites in China were designed ，based on which the demands，development orientations and development directions of SRTs were proposed. The gap of SRTs between China and developed countries were illustrated ， and then some advices of SRTs in China were proposed.

**Key words**：contaminated site；pollutant；soil remediation technology；comprehensive analysis

近年来，世界土壤污染问题日益凸现，尤其在发 展中国家，对生态环境、食品安全和人体健康构成严 重威胁［1-4］。其中，汞、镉、铅、铬和砷等重金属污染物导 致的土壤污染尤为突出［1-5］。根据《中国环境年鉴》 2002-2009 年），2001—2008 年，我国关停并转迁企业 数由6 611迅速增加到22 488个,增速为1 984个/a, 总数达到 10 万以上，仅 2007 年就约有 2.5 万个。由于 关停转迁,我国现已有大量工业场地遗址,对污染严 重的工业场地遗址进行技术修复是改善土壤环境质

量的迫切要求,也是世界科技的研究热点［1-5］。欧美发 达国家的污染场地修复产业占整个环保产业的 50% 以上［1］。2011 年 2 月,《重金属污染综合防治“十二五” 规划》通过国务院正式批复,重金属污染土壤被列为 主要整治内容之一［5］,污染场地土壤修复技术必将受 到更多关注。本文对国际污染场地土壤修复技术进行 综合分析,并结合我国国情提出场地污染土壤修复技 术未来发展方向,以期为我国土壤修复技术产业发展 及政府决策提供借鉴。

《环境科学与技术》编辑部：（网址**http：fks.chinajoumal.netcn** （电话）**027-87643502** （电子信箱**hjkxyjs@ 126.com** 收稿日期：2011-11-24；修回 2012-02-10

基金项目：国家环境保护科技项目但-2007-06 ；云南省环境保护专项项目（2007［262］

作者简介:杨勇（1981-，男，助理工程师，硕士，开究方向为固体废物和污水处理，（电话）0871-5181919（电子信箱yy05\_06@126.com。

1. 土壤修复技术研发历程

1.1 欧美研发历程

欧美土壤修复技术的研发历程分为3 个阶段［6］： 1)20 世纪 80 年代以前，土壤治理方式为物理、化学 修复，修复技术主要采用挖掘填埋、客土法、固化/稳定 化、土壤气提、化学萃取；(2)20 世纪 80 年代至 21 世 纪初，土壤治理方式为物理、化学和生物修复，修复技 术主要采用IMC (隔离、维护和控制)、淋洗、化学萃 取、化学氧化还原、玻璃固化和热脱附；(3) 21 世纪以 来，土壤治理方式为物理、化学和生物修复，但已开始 广泛关注高效低费的修复方法，研究重点为植物修复 及自然转移和衰减。

1.2 我国研发历程

我国土壤修复技术的研发历程分为4 个阶段［1］： 1) 20 世纪 60 年代以前，土壤治理方式为物理修复， 主要通过填埋、刮土、复土等措施治理退化土地；(2) 20 世纪 70-80年代，土壤治理方式为物理修复，主要是土 地资源的稳定利用，相关基本环境工程的配套；(3) 20 世纪 90年代，土壤治理方式为物理、化学和生物恢复， 但主要修复技术是土地复垦，选用先锋植物、耐性植物 恢复土壤特性；(4) 21 世纪以来，土壤治理方式为物理、 化学和生物恢复，修复技术主要采用植物、微生物、动 物、固化/稳定化、土壤气提、化学氧化还原、热脱附、淋 洗、化学萃取等，其中以植物修复为研发应用重点。

1. 土壤修复技术运用现状

2.1 美国运用现状

美国约存在 294 000 个污染场地［7］，其中，1982- 2005年间，共有1 536个场地列入NPL。仅2007年,美 国超级基金项目耗费 3.8 亿美元用于土壤修复项目［8］。 据估计，美国完成所有污染土壤的修复将需要投资 2 089 亿，且大部分修复需要经过30~35 a［7］。 美国于 20世纪80年代之后进行了大量土壤修复工程［6］。 美 国超级基金计划所实施的土壤修复技术已成为世界 各国了解最新土壤修复技术变化的重要窗口。 2002­2005 年财政年度中［6］， 60%的污染源处理工程项目采 用的是原位修复技术，比1982-2005年财政年度高了 13个百分点。 这主要是因为原位修复技术具有无需挖 运土壤、修复成本低、适宜对深层污染介质修复、对施 工人员健康影响小等特点。

对美国1982-2005 年间， 977项土壤修复项目进 行统计，如图1 所示［4，6］，图1 中浅色部分表示原位修 复技术，深色部分表示异位修复技术。 原位修复技术 462 项，占项目总数的 48%，异位修复技术 515 项，占 总数的52%。在所有污染修复项目中，26%采用原位蒸 发提取，18%采用异位固化/稳定化，11%采用异位离场 焚烧。近几年多项萃取和化学处理技术受到更多关注， 而焚烧技术因可能产生二次污染越来越少被采用。

物理分离(21) 2%

土壤蒸发提取(248)  
26%

生物修复(53)  
5%

固化/稳定化(44)

5%

化学处理(20)

2%

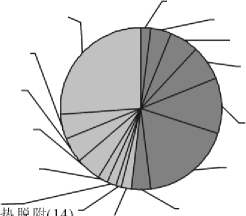
冲洗(］7)

2%

现场焚烧(42) 4%  
生物修复(60)  
6%

热脱附(71)

7%

固化/稳定化(173) 18% 其它离位技术(43) )) 4%

多相萃取(4&)

5%

离场焚烧(105)

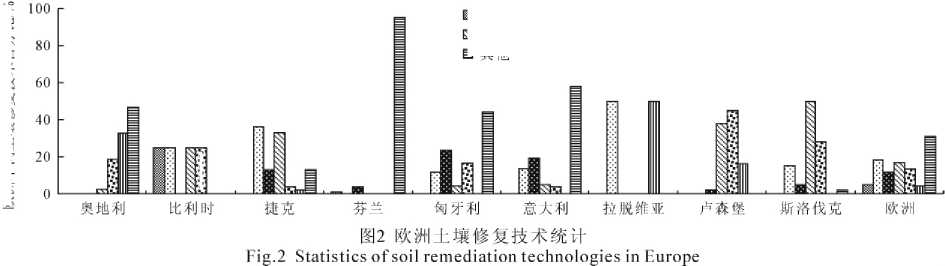
11%

2%

图1养国土壤修复技术统计

Fig. 1 Statistics of soil remediation technologies in America

2.2 欧洲运用现状

据估计［9］，欧洲每年约有 21.1 亿欧元用于污染土 壤的修复及管理工作。 图2［9］给出了1978-2007年间， 欧洲部分国家及整个欧洲不同土壤修复技术的运用 现状。 由图2可知，欧洲各国根据本国国情，所采用的 土壤修复技术存在明显的较大差异。 欧洲运用原位和 异位热脱附、原位和异位生物处理、原位和异位物化 处理技术修复污染场地的项目占所有统计项目的 69.17%，其中原位热脱附、原位生物处理和原位物化处 理修复技术占35%，异位热脱附、异位生物处理和异位 物化处理修复技术占34.17%，二者比重相当，其他修 复技术占30.83%。在实际工程中，生物处理技术运用最 多，达到35%，其中原位生物处理占18.33%，异位生物 处理占16.67%。 另外，将污染土壤作为废弃物而非可 再生资源处理(包括挖掘处置技术、污染场地管制等) 的工程项目在欧洲仍然占有较大比重，达到37%。

S原位物理/化学处理 哑异位热脱附

豳原位热脱附 □原位生物处理 凶异位生物处理 □异位物理/化学处理 目其他

SBS

2.3 我国运用现状

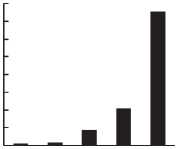
我国土壤修复技术研究起步较晚,加之区域发展 不均衡性,土壤类型多样性,污染场地特征变异性,污 染类型复杂性,技术需求多样性等因素,目前主要以 植物修复为主,已建立许多示范基地、示范区和试验 区,并取得许多植物修复技术成果［1］,以及修复植物资 源化利用技术成果［1］。

物理/化学修复技术中研究运用较多的是［1］：（1 固 化-稳定化；（2 淋洗；（3 化学氧化-还原；（4 土壤电 动力学修复。目标是污染场地土壤的原位修复技术。

联合修复技术中研究运用较多的是［1］：（1 微生物/ 动物-植物联合修复技术；（2 化学/物化-生物联合修 复技术；（3 物理-化学联合修复技术。目标是混合污 染场地土壤修复技术。

1. 土壤修复技术研究进展
   1. 土壤修复文献检索

通过检索ISI （美国科学情报研究所数据库，对 污染场地土壤修复文献进行统计,结果如图 3 所示, 其中图 3（b 是对所有年份的检索文献进行统计。

I.植物修复

2 500

1-1990年以前

2.1991-1995 年

3.1996-2000年

4.2001-2005 年

5.2006-2010年

1 *600*

I 400

I 200

1 000

800

600

400

200

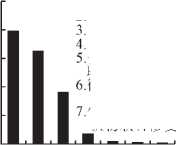
1 2 3 4 5

年份

（a）按年份检索文献数量

2-化V修复

•微牛物修复 .施定/向定化 化V-微生物 联合修复 微生物-植物

（b）按修复种类检索文献数量 图3 土壤修复技术文献检索

2 000

I 500

1 000

500

植物联合修复

1 2 3 4 5 6 7

Fig.3 Literatures search of soil remediation technologies

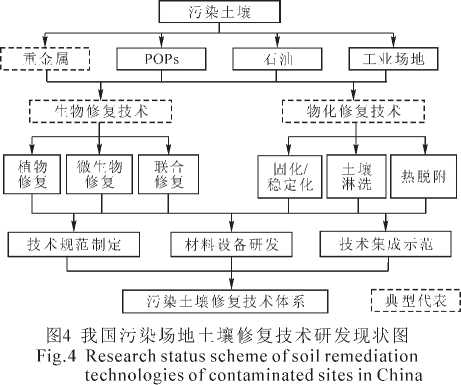
由图 3（a 可知, 1995 年以前,各国对污染场地 土壤修复技术研究相对较少。1996－2005 年属于过 渡期,世界各国对土壤修复技术研究的关注逐渐升 温。2006－2010 年呈迅猛发展趋势, 2005 年以前发表 的所有文献数量仅约为 2006－2010 年的一半,说明 从 2006 年开始,土壤修复技术研究已进入黄金期, 产生了大量科研成果。由图 3（b 可知,不同土壤修 复技术研究情况,显然联合修复技术科研成果较少, 主要原因是联合修复技术近几年才开始兴起, 2006 年以前对单项修复技术研究较多,而统计文献是针 对所有年份。由于污染土壤的复杂性,联合修复技术 已成为土壤修复的发展趋势。我国近年已开始联合 修复技术研究。

* 1. 常用土壤修复技术

污染场地土壤修复技术是决定污染场地修复成 败的关键环节。土壤修复技术的选择不仅受场地污染 特征的影响,还受到政治、经济、社会等多种因素影 响。目前,土壤修复方法虽多,但部分技术因修复周 期、二次风险、或其他限制条件而不适宜在污染土壤 中使用。如植物修复技术因其修复深度和修复周期的 局限很少应用于工业污染土壤。对于城市污染场地, 受到城市土地经济价值的驱动,修复技术应该具有周 期短、二次风险小、稳定性高、对土壤结构破坏性小等 特点。表 1 是几种常见污染土壤修复技术［10-19］。

* 1. 我国土壤修复技术研究现状 根据我国污染物类型大致可将土壤污染分为有 机污染、无机污染及二者均存在的复合污染,其中有 机污染物主要有磷肥厂、炼焦厂、钢铁厂、化工厂、采 油区、工业区、氮肥厂、电子厂、焦化厂的PAHs［20-26］,农 药厂的六六六、滴滴涕［27-28］,焦化厂、石油化工厂的 BTEX［31］,化工厂的氯丹和灭蚁灵［32-33］，氯碱厂、石油化 工厂的VOC、SVOC和TPH （总石油烃［32-36］；无机污 染物主要有磷肥厂、炼焦厂、钢铁厂、船厂、机械制造 厂、电子厂、冶炼厂、化工厂的 Cu、As、Zn、Cd、Pb、Hg、 Ni、 Cr 等重金属元素［20,35-36］。

根据我国主要土壤污染物,“十五”和“十一五” 国家“863”计划污染场地土壤修复技术研发现状示 意图 4［1］,其中生物修复技术为主导研究方向,物化修 复技术仅在部分科研机构和企业研究,具有明显区 域性,同时开展技术规范制定、材料设备研发和技术 集成示范,并以建立我国污染土壤修复技术体系为最 终目标。



* 1. 最新植物修复技术发展与应用

植物修复技术在我国污染场地土壤修复中有重 要地位。植物稳定修复技术被认为是一种更易接受、 大范围应用、并利于矿区边际土壤生态恢复的修复技 术,也被视为一种植物固碳技术和生物质能源生产技 术［37］；为寻找多污染物复合或混合污染土壤的净化方

案，分子生物学和基因工程技术应用于发展植物杂交 修复技术［38］；利用植物的根圈阻隔作用和作物低积累 作用，发展能降低农田土壤污染的食物链风险的植物 修复技术［39］；随着修复植物的收集和资源化利用技术 的研究发展，修复植物不仅可以治理污染的土壤，而 且还能创造经济价值［40］。

| 表 1 常用土壤修复技术  Table 1 Common soil remediation technologies | | | | | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 方法 | 类型 | 适用范围 | 适应对象 1) | 优点 | 缺点 | 投资  /美元 | 修复周期  /月 |
| 1 | 挖掘填埋 | 原位/异位 | 高污染区 | 任何 | 对设备和操作要求低 | 不能去除污染物 | 250 | <3 |
| 2 | 客土法 | 原位/异位 | 大部分污染 | 任何 | 修复方法简单且速率快 | 不能去除污染物 | 20~50 | <3 |
| 3 | 土壤气提/ 生物提气 | 原位/异位 | 具有挥发性的 污染物 | SVOCs,VOCs,PAHs | 针对挥发性有机物效 果好、可与生物降解方 法联用 | 要求污染土层渗透性 强，地下水位影响修复 | 80~230 | 6~24 |
| 4 | 淋洗法 | 原位/异位 | 可溶性的污染物 | PAHs, PCBs,H.M.,  Diox/Fur. | 适于污染严重的土壤  治理 | 土壤须具有高渗透能 力；带来的次生污染 问题；土壤肥力减弱 | 55~165 | <12 |
| 5 | 植物修复 | 原位/异位 | 矿区、农田土壤等 | Inorg.,H.M.,PAHs,  PCBs | 费用低，易操作，二次 风险低，易大范围应 用，修复植物可资源化 利用 | 修复速率慢，需要时 间较长，难以处理深 层污染 | <20 | >12 |
| 6 | 微生物修复 | 原位/异位 | 农田土壤等 | SVOCs,VOCs,PAHs | 操作简便、修复效果 好、环境友好 | 不宜处理高浓度污染  物(>5%) | 50~140 | 6~24 |
| 7 | 化学萃取 | 原位/异位 | 可溶性的污染物 | PAHs, PCBs,H.M.,  Pest.,Diox/Fur., | 适于重污染土壤治理 | 处理费用昂贵，对土  壤有破坏性 | 65~300 | <6 |
| 8 | 化学氧化还原 | 原位/异位 | 能发生氧化 还原反应的污染物 | VOCs, SVOCs,PAHs,  PCBs,Pest., Diox/Fur. | 适于重污染土壤治理 | 处理费用昂贵，对土  壤有破坏性 | 150~450 | <6 |
| 9 | 低温热脱附 | 原位/异位 | 具有挥发性的 污染物 | VOCs,SVOCs,PAHs,  PCBs,Pest.,Diox/Fur.,  Hg | 有效去除土壤中挥发 破坏土壤中的有机质 性物质，并收集其蒸气 和水分，能耗较大 | | <150 | 6~12 |
| 10 | 高温热脱附 | 原位/异位 | 具有挥发性的 污染物 | VOCs,SVOCs,PAHs,  PCBs,Pest.,Diox/Fur.,  Hg | 有效去除土壤中挥发 破坏土壤中的有机质 性物质，并收集其蒸气 和水分，能耗很大 | | 150~450 | 6~12 |
| 11 | 固化/稳定化 | 原位/异位 | 高污染区 | H.M.,PAHs,PCBs,  Pest.,Diox/Fur.,Inorg., | 所用物料价格便宜，易 购得，操作简单，处理 效果较好 | 不能去除污染物，修  复后需要长期监测 | 70~200 | <6 |
| 12 | 玻璃固化 | 原位/异位 | 高污染区 | PCBs, Pest.,H.M., Diox/Fur. | 稳定性高，可确保长期  稳定 | 不能去除污染物 | 770 | <5 |

注：Pest.(pesticides),Diox/Fur.(dioxin/furin),Inorg.(inorganic compounds),H.M.(heavy metals)。

* 1. 我国土壤修复技术研发与应用

我国污染场地土壤修复技术研发与应用路线见 图5。由图4、5可知，目前我国污染土壤修复技术体系 主要由生物和物化修复技术组成，其中，植物修复技 术研究始于20世纪90年代，发展于2000年以后，是 目前研究最多，发展最快，应用最广的修复技术。“十 一五”后期，国家“863”计划和北京市等地方政府才开 始支持土壤气提、化学氧化还原、热脱附、淋洗等物化 修复设备的研发。 至今为止，我国污染场地修复设备 多停留在科研装备开发或实验样机中试阶段，修复设 备的产业化应用甚少。 关于自然转移和衰减的土壤修 复技术目前鲜见相关报道。

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年份 | | 2000-2005 | 2006-2010 | 2011-2015 | 2016-2020 | 2021-2030 | 2031-2050 |
| 发展阶段 | | 研究 | 研究 | 研究+丿"用 | 研究+丿"用 | 研究+丿"用 | 研究+应用 |
| 生物修 复技术 | 植物 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 微牛物 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 动物 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| 联合 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| 物化修 复技术 | 物理 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| 化学/物化 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| 联合 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| n然修复(基于监测) | |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |

图5我国十•壤修复技术研发与应用路线图

Fig.5 Research and application roadmap of soil remediation technologies in China

1. 土壤修复技术发展趋势

4.1 原位土壤修复技术 对美国1982-2005年间，运用原位土壤修复技术 的项目进行统计，如图6 所示［4，6］。 原位修复技术的运 用呈波动式稳步增长总趋势，并以平均每年 1.5 % 的速 度增长。由图 1 已知, 1982-2005 年间,异位土壤修复 项目总数比原位土壤修复项目总数多 4%。计算知,约 到 2010 年,美国运用原位土壤修复的项目总数将超 过运用异位土壤修复项目总数。随着原位土壤修复技 术运用的逐年增加,未来更多的原位修复技术将逐渐 取代异位修复技术。

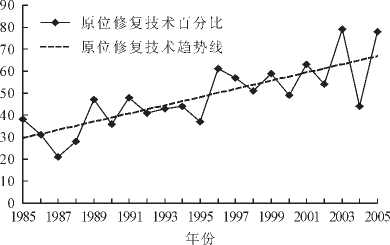
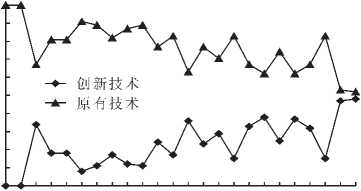


图6原位土壤修复技术增长趋势

Fig.6 Growth trend of *in situ* soil remediation technologies

4.2 创新与原有土壤修复技术比较

对美国 1982-2005 年间,运用创新和原有土壤修 复技术的项目进行统计,如图 7 所示［4,6］。创新修复技 术的运用呈波动式稳步增长趋势,原有修复技术的运 用呈波动式稳步减少趋势。从 2004 年开始,创新修复 技术的运用几乎与原有技术相等。随着更多的创新修 复技术运用于污染场地土壤修复,未来几年美国创新 修复技术的运用将超过原有修复技术。



1982 1W 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004

%/±Q肛風塗肛趣irs石

年份

图7创新与原有土壤修复技术增长趋势

Fig.7 Growth trend of innovation and original  
soil remediation technologies

1. 创新土壤修复技术运用

对美国 1982-2005 年间,运用创新土壤修复技术 的项目进行统计,如图 8 所示［4,6］。生物修复、多项萃取 和化学处理技术是运用创新技术的主要组成部分,其 中生物修复仍是最具普遍性的创新技术,占到所有运 用创新技术的 47%,近几年多项萃取和化学处理技术 的运用也正逐渐增多。

1. 土壤修复技术四大需求［1,6-7］

（1 发展能广泛应用、安全、低成本的原位农田生 物修复技术和物化稳定技术。（2 发展安全、土地能再 开发利用、针对性强的工业场地快速物化修复工程技

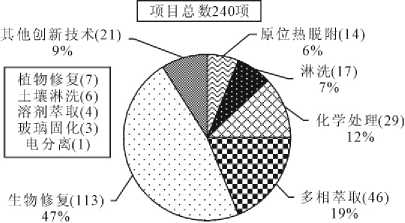


图8创新技术土壤修复项目统计

Fig.S Statistics of soil remediation project  
on innovation technologies

术与成套设备。（3 发展能控制水土流失与污染物扩 散的矿区植物稳定化与生态工程修复技术。（4 建立 污染土壤修复技术规范、评价标准和管理政策。

1. 土壤修复技术发展趋势

四大发展方位［1,4,6-7］：（1 在决策导向上,从基于污 染物总量控制转变到基于污染风险评估；（2 在技术 上,从单一的修复技术发展到多技术联合的原位修复 技术、综合集成的工程修复技术；（3 在设备上,从固 定式设备的异位修复发展到移动式设备的原位修复； 4 在应用上,发展到多种污染物复合或混合污染土 壤的组合式修复技术；从单一厂址场地走向特大场地； 从单项修复技术发展到大气、水体同步监测的多技术 多设备协同的场地土壤-地下水一体化修复。

六大发展方向［1,4,6－7］：（1 绿色、环境友好的生物修 复技术；（2 从单一的向联合/杂交的综合修复技术； 3 从异位向原位修复技术；（4 基于环境功能修复材料 纳米 的修复技术；（5 基于设备化的快速场地修复技 术；（6 土壤修复决策支持系统及修复后评估技术。

1. 我国与发达国家差距

与发达国家相比,我国落后 20 多年,主要存在以 下六方面差距：（1 技术种类单一,缺乏体系,尤其是 原位、快速、适用于场地土壤（包括地下水 的物化技 术；（2 技术装备严重缺乏,缺产业；（3 技术规范缺标 准,缺法规,技术难以应用；（4 工程化修复案例极少, 缺市场化；（5 缺乏自身实践积累的经验,公司少；（6 关键是投入少,缺乏实用技术。

1. 我国土壤修复技术发展建议 我国污染场地土壤修复蕴含巨大市场需求,然 而,针对污染场地土壤修复技术、工程化应用和设备 研发起步较晚,现阶段无论是引进国际上的先进技术, 还是自主研发都需要理性思考。欧美等发达国家,现 已开发出与修复技术配套的先进装备,但成套引进现 成的技术装备,费用昂贵,受到国外知识产权保护的 制约。考虑到我国土壤类型多样、污染场地复杂、污染 特征各异，这对修复设备提出了更多更高的要求，现 成的技术装备可能缺乏适宜性，不一定适合在我国应 用，开发适合国情的修复设备应是我国污染场地土壤 修复领域的工作重心之一。 应该在借鉴国外成熟修复 技术和先进装备的基础上，从我国场地污染特征、国 家经济社会发展、国家科研水平及现阶段技术储备等 多方面综合考虑修复技术的选择和发展方向。

[参考文献]

1. 中国科学院南京土壤研究所. 重金属污染土壤修复技术

[C]. 长沙：重金属污染综合防治技术研讨会，2010.

Institute of Soil Science， Chinese Academy of Sciences. Remediation Technologies of Heavy Metal Contaminated Soil [C]. Changsha：Heavy Metal Pollution Comprehensive Prevention and Control Technology Seminar，2010(. in Chi－ nese)

1. Friesl W，Friedl J，Platzer K，et a1.Remediation of con－ taminated agricultural soils deal a former Pb -Zn smelter in Austria：batch，pot and field experiments[J]. Environmental Pollution，2006，l44(1)：40-50.
2. Vazquez S，Agha R，Granado A，et a1. Use of white Lupin plant for phytostabilization of Cd and As polluted acid soil [J].Water Air and Soil Pollution，2006，177：349-365.
3. Maja Orberg. Innovative in-situ Remediation Techniques in the Netherlands Opportunities and Barriers to Application in Sweden[D]. Sweden：Lulea University of Technology，2007.
4. 重金属污染综合防治“十二五”规划获国务院批复J].特种 铸造及有色合金，2011(5).

12th Five-Year Heavy Metal Pollution Comprehensive Pre－ vention and Control Plan Approved by the State Council[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2011(5)(. in Chinese)

1. Office of Solid Waste and Emergency Response. Treatment Technologies for Site Cleanup Annual Status Report [R]. 12th Edition. Washington DC：US Environmental Protection Agency，2007.
2. Office of Solid Waste and Emergency Response. Cleaning up the Nation's Waste Sites：Markets and Technology Trends[R]. 2004 Edition. Washington DC：US Environmen－ tal Protection Agency，2004.
3. US EPA. Building on Success：Protecting Hunman Health and the Environment(FY 2007 Superfund Annual Repor)t [R]. Washington DC：US Environmental Protection Agency，2008.
4. EEA. Progress in Management of Contaminated Sites[EB/OL]. http：//[www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/pro- gress-in-management-of-contaminated](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/pro-gress-in-management-of-contaminated) -sites/progress -in- management-of-contaminated-1，2007.
5. Canada Environment Protection Agency. In-Situ Remedia－ tion Technologies for Contaminated Sites[EB/OL]. http：// [www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab22-e.html](http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab22-e.html).
6. Canada Environment Protection Agency. Ex-Situ Remedia－ tion Technologies for Contaminated Sites [EB/OL]. http：// [www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab23-e.html](http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab23-e.html).
7. 廖晓勇，崇忠义，阎秀兰，等. 城市工业污染场地：中国环境 修复领域的新课题[J].环境科学，2011, 32 (3 ：784-794.

Liao Xiao-yong，Chong Zhong-yi，Yan Xiu-lan，et a1.Ur－ ban industrial contaminated sites：a new issue in the field of environmental remediation in China [J].Environmental Sci－ ence， 2011， 32(3)：784-794(. in Chinese)

1. Liu Dan， Islam Ejazu1.Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phy－ toexaction of heavy metals by two ecotypes of Sedum Al － fredii Hance[J]. Journal of Hazardous Materials， 2008， 153 (2)：114-122.
2. Macdonald A. Performance standards for in situ bioremedia－ tion[J]. Environmental Science and Technology， 1993， 27 (10)：1974-1979.
3. Mueller J G， Lin J E R， Lantz S E. Recent developments in clean-up technologies[J]. Remediation， 1993， 4 (3)：369- 381.
4. Overcash M. European soil remediation research：1992 - 1994[J]. Environmental Science and Technology， 1996， 26： 337-368.
5. Chang L W. Application of plant and earthworm bioassays to evaluate remediation of a lead - contaminated soil [J] . Archives of Environmental Contamination and Toxicology， 1997， 32：166-171.
6. Haimi J. Decomposer animals and bioremediation of soils [J]. Environmental Pollution， 2000， 107(2)：233-238.
7. 张溪，周爱国，甘义群，等. 金属矿山土壤重金属污染生物 修复研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(3 ： 106-112.

Zhang Xi， Zhou Ai-guo， Gan Yi-qun， et al. Advances in bioremediation technologies of contaminated soils by heavy metal in metallic mines[J]. Environmental Science & Tech－ nology, 2010, 33(3)： 106-112(. in Chinese)

1. 俞飞林玉锁.城市典型工业生产区及附近居住区土壤中PAHs 污染特征[J].生态环境，2005, 14(1 ：6-9.

Yu Fei, Lin Yu -suo. Pollution characteristics of PAHs in the soils of typical urban industrial production areas and their neighboring residential areas[J]. Ecology and Environ－ ment, 2005, 14(1)： 6-9(. in Chinese)

1. 焦文涛,吕永龙,王铁宇,等. 化工区土壤中多环芳烃的污 染特征及其来源分析[J].环境科学,2009,30(4 ： 1166-1172.

Jiao Wen-tao, Lv Yong-long, Wang Tie-yu, et al. Char－ acteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil from chemical industrial areas[J]. Environ－ mental Science, 2009, 30(4)： 1166-1172(. in Chinese)

1. Chung M K, Hu R, Cheung K C, et al. Pollutants in Hong Kong soils： polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Chemo－ sphere, 2007, 67(3)： 464-473.
2. 杨秀虹,李适宇,李岚,等.广州市工业、交通区表层土壤中 多环芳烃分布特征初探[J].中山大学学报：自然科学版， 2008, 47(1)： 93-97.

Yang Xiu -hong, Li Shi -yu, Li Lan, et al. Preliminary study on the composition characteristics of polycyclic aro－ matic hydrocarbons in surface soils of industrial sites and traffic sites in Guangzhou[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(1)： 93-97(. in Chinese)

1. 李慧,蔡信德,罗琳,等.某氮肥厂场地土壤 PAHs 污染特征

研究[J].农业环境科学学报,2009, 28(4 ：702-706.

Li Hui, Cai Xin-de, Luo Lin, et al. Characteristics of PAHs in typical chemical venues in Guangzhou[J]. Agricultural Environment Science, 2009, 28(4)： 702-706(. in Chinese)

1. Maskaoui K, Hu Z, Zhou J, et al. Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in some agricultural, industrial and urban areas along Xiamen coastal waters, China [J]. Journal of Environmental Science, 2006, 18(2)： 318-322.
2. 芦敏,袁东星,欧阳通,等.厦门岛表土中多环芳烃来源分析 及健康风险评估J].厦门大学学报:自然科学版，2008, 47 (3)： 451-456.

Lu Min, Yuan Dong-xing, Ouyang-Tong, et al. Source analy－ sis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydro － carbons in the topsoil of Xiamen Island[J]. Xiamen Univer－ sity:Natural Science Edition, 2008, 47(3)：451-456(. in Chinese)

1. 丛鑫,薛南冬,梁刚,等.某有机氯农药企业搬迁遗留场地表

层土壤中污染物残留特征研究[J].农业环境科学报,008, 27(3)： 850-854.

Cong Xin, Xue Nan -dong, Liang Gang, et al. Residual characteristics of pollutants in topsoil of a former organochlo－ rine pesticide manufacturing enterprise [J] . Agricultural En－ vironment Science, 2008, 27(3)： 850-854(. in Chinese)

1. 马运,黄启飞,王琪,等.六六六在典型污染场地中空间分布 研究[J].农业环境科学学报,2009, 28(8 ： 1562-1566.

Ma Yun, Huang Qi -fei, Wang Qi, et al. Spatial distribu － tion of HCH in a typical contaminated site [J] . Agricultural Environment Science, 2009, 28(8)： 1562-1566(. in Chinese)

1. 谌宏伟,陈鸿汉,刘菲,等.污染场地健康风险评价的实例研

究[J].地学前缘,2006,13 ①：230-235.

Chen Hong-wei, Chen Hong-han, Liu Fei, et al. Health­based risk assessment of contaminated sites： a case study[J]. Earth Science Frontiers , 2006, 13(1)： 230-235 (. in Chi－ nese)

1. 张瑜，吴以中，宗良纲，等.POPs污染场地土壤健康风险评 价[J].环境科学与技术,2008,31(7 : 135-140.

Zhang Yu, Wu Yi-zhong, Zong Liang-gang, et al. Health risk assessment： case study of a brownfield contaminated by POPs at Changzhou[J]. Environmental Science & Technolo－ gy, 2008, 31(7 ： 135-140(. in Chinese

1. 王琪,赵娜娜,黄启飞,等.氯丹和灭蚁灵在污染场地中的空 间分布研究[J].农业环境科学学报,2007,26 (5 : 1630-1634.

Wang Qi, Zhao Na-na, Huang Qi-fei, et al. Spatial distri－ bution of chlordane and mirex in typical POPs contaminated site in China[J]. Agricultural Environment Science, 2007, 26 (5 ： 1630-1634(. in Chinese

1. 郭观林,王翔,关亮,等.基于特定场地的挥发/半挥发有机 化合物(VOC/SVOC空间分布与修复边界确定[J].环境科 学学报, 2009, 29(12 ： 2597-2605.

Guo Guan-lin, Wang Xiang, Guan Liang, et al. Site-spe－ cific spatial distribution of VOC/SVOC and determination of the remediation boundary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(12 ： 2597-2605(. in Chinese

1. 马运,黄启飞,赵秀兰.六氯苯在中国典型持久性有机污染 物污染场地中空间分布研究[J].环境污染与防治,009,1 (3 ： 32-35.

Ma Yun, Huang Qi-fei, Zhao Xiu-lan. Spatial distribution of HCB in a typical contaminated sites[J]. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(3 ： 32-35(. in Chinese

1. 李凌波,林大泉,籍伟,等.某石油化工厂区有机污染物的表 征II .地下水[J].石油学报:石油加工,00117 (6 ：84-90.

Li Ling -bo, Lin Da -quan, Ji Wei, et al. Characterization of organic contamination at a petrochemical site I . ground－ water[J]. Acta Petrolei Sinica:Petroleum Processing Section, 2001, 17(6 ： 84-90(. in Chinese

1. 张厚坚,王兴润,陈春云,等.高原地区铬渣污染场地污染特 性研究[J].环境工程学报，2010, 4(4 ：915-918.

Zhang Hou-jian, Wang Xing-run, Chen Chun-yun, et al. Study on the polluting property of chrome residue contami－ nated sites in plateau section[J]. Chinese Journal of Envi－ ronmental Engineering, 2010, 4(4 ： 915-918(. in Chinese

1. 龚惠红,邓泓,邓丹,等.城市工业遗留地土壤重金属污染及 修复研究[J].城市环境与城市生态,2008,21 (2 ： 30-33.

Gong Hui-hong, Deng Hong, Deng Dan, et al. Metal con－ tamination and remediation of urban soils in typical indus－ trial area[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2008, 21 (2 ： 30-33(. in Chinese

1. Fredrickson J K. In situ and on situ bioremediation[J]. En－ vironmental Science and Technology, 1993, 27(9 ：1711- 1716.
2. McGrath S P, Lombi E G, Caillc C W, et a1.Field evalua－ tion of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperac－ cumulators thlaspicaerulescens and arabidopsis Halleri [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2 ： 115-125.
3. Clfstenes Williams Arafjo do Nascimento, Baoshan Xing. Phytoextraction： a review on enhanced metal availability and plant accumulation[J]. Scientia Agricola , 2006, 63(3 ： 299-3l1.
4. Murakami, Masaharu. Phytoextraction by a high Cd accu－ mulating rice： reduction of Cd content of soybean seeds [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42：6167- 6172.