环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

污染土壤修复技术预测

郭书海1，\* ，吴波1 ，胡清2，杜晓明3，马晓敏4 ，胡承志5，李喜青6，仇荣亮7

1．中国科学院沈阳应用生态研究所，沈阳 110016

2．南方科技大学工程技术创新中心，北京 100083

3．中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室，北京 100012

4．中国科学院文献情报中心，北京 100190

5．中国科学院生态环境研究中心，北京 100085

6．北京大学城市与环境学院，北京 100871

7．中山大学环境科学与工程学院，广州 510275

摘 要 土壤污染已成为世界性环境问题，我国土壤污染现状更为严峻。 污染土壤修复技术已成为全球科技的研究重点。 本研究基于该领域国内外的相关研究论文与专利，采用文献计量学的统计方法，结合国内外相关项目、计划和法规等信息， 对比分析了国内外论文/专利发文量阶段变化、技术研究的首篇报道年、专利景观图等。研究结果表明，我国污染土壤修复 技术研发起步较晚，与发达国家总体水平存在10~15年的差距，在产业化领域更为突出。提出了在兼顾系统集成与技术 原创的条件下，我国污染土壤修复的重点研发技术，为我国土壤修复技术的发展布局与政策制定提供决策依据。

关键词 污染土壤修复;文献计量学;研究论文;专利

中图分类号 X53 文献标识码 文章编号 1673-9108(2017)06-3797-08 DOI 10. 12030/j． cjee．201609065

Forecast of remediation technology of contaminated soil

GUO Shuhai1'[[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3) , WU Bo1 ,HU Qing2 ,DU Xiaoming3, MA Xiaomin4, HU Chengzhi5, LI Xiqing6, QIU Rongliang7

1. ． Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences Shenyang 110016 China
2. ． Engineering Innovation Center of South University of Science and Technology Beijing 100083 China
3. ． Department of Soil Pollution Control Chinese Research Academy of Environmental Sciences Beijing 100012 China
4. ． National Science Library Chinese Academy of Sciences Beijing 100190 China
5. ． Research Center for Eco-Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences Beijing 100085 China
6. ． College of Urban and Environmental Sciences Peking University Beijing 100871 China
7. ． School of Environmental Science and Engineering Sun Yat-Sen University Guangzhou 510275 China

Abstract Soil pollution has become a global environmental problem and it's more serious in China． Remedia­tion technology of contaminated soil was the focus of research in the world． Based on the research papers and pa­tents in the related field of domestic and international this study used the literature metrology and analyzed the quantity of research papers and patents publication year and patents landscape map． The results demonstrated the research on contaminated soil remediation technology started relatively late in China． There are 10-15 years gap of contaminated soil remediation technology between domestic and foreign especially in industrial field． Within system integration and original technology the key technologies for contaminated soils remediation were proposed in China． The researches could provide the decision-making basis for soil pollution remediation technol­ogy's industrial and policy．

Key words contaminated soil remediation;literature metrology;research papers;patent

土壤污染已成为世界性环境问题。20 世纪70 年代开始 欧美等工业化国家为解决工矿企业遗留、搬 迁等形成的“棕色地块” 陆续启动了污染场地、农田土壤、矿业开发污染土壤的治理项目 污染土壤修复 技术应运而生。美国于20世纪80年代建立了“超级基金(Superfund) ”项目用以支持土壤污染治理,研发

了一系列污染土壤治理与修复技术，并逐渐进入产业化阶段［1-2］。

与西方发达国家相比，我国土壤污染现状更为严峻。《全国土壤污染状况调查公报》显示，耕地土壤 点位超标率近 20%，重污染企业用地、工业废弃地、采矿区等土壤污染点位超标率高于30%[[3]](#footnote-4) [[4]](#footnote-5) [[5]](#footnote-6)，严重威胁 人体健康和农产品质量安全。上世纪改革开放初期，由于我国对土壤污染问题重视程度不够，技术发展起 步较晚，目前设备化能力薄弱，产业化程度很低，与国际上先进的污染土壤修复技术水平相比存在较大差 距[[6]](#footnote-7)。但由于其在城市发展转型、区域产业布局与农产品质量安全保障中的重要作用，已引起了政府和 全社会的广泛关注。

本研究采用文献计量学方法[[7]](#footnote-8) [[8]](#footnote-9)，以经验统计规律为核心，重点对比国内外技术发展水平、发展阶段及 差距，实现土壤修复技术体系的量化与系统分析，阐述我国污染土壤修复技术的未来发展情况。

1 数据与方法

1. 1 技术初选

目前，污染土壤修复的技术体系已基本形成，如采用物理方法的气体抽提/热脱附等有机物分离技术， 采用化学方法的固化/稳定化等重金属污染物钝化技术，采用生物方法的功能微生物降解等有机物削减技 术，还有很多对各种方法进行组合的集成技术［6-8］。同时，适合不同地区及国家的土壤环境管理政策与法 规也陆续实施［9-11］，逐渐形成了以风险控制为核心的制度管理体系。

根据国内外文献与专利报道，检索到的污染土壤修复技术类型很多，但大多数是在原创技术基础上经 过改进和调整的衍生技术［7］。因此，参照国内外的技术分类方法，对改进、调整及组合了的衍生技术进行 归类和剔除，并兼顾各类技术的重要性和典型性，筛选出12 种重要技术，其技术主要特点和应用范围详见 表1。

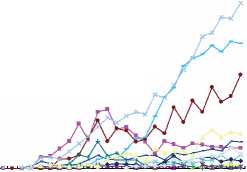
表 1 主要污染土壤修复技术特点

Table 1 Characteristics of main remediation technologies of contaminated soil

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 污染物 | 原理方法 | 作业方式 |
| 1 | 挥发性有机污染物污染土壤气体抽提技术 | 有机 | 物理 | 原位/异位 |
| 2 | 半挥发性有机污染物污染土壤热脱附技术 | 有机 | 物理 | 异位为主 |
| 3 | 有机污染场地土壤焚烧技术 | 有机 | 物理 | 异位为主 |
| 4 | 有机污染土壤原位氧化技术 | 有机 | 化学 | 原位为主 |
| 5 | 有机物污染土壤生物修复技术 | 有机 | 生物 | 原位/异位 |
| 6 | 污染土壤电动力修复技术 | 有机 /重金属 | 化学 | 原位/异位 |
| 7 | 重金属污染土壤化学淋洗技术 | 重金属 | 化学 | 原位/异位 |
| 8 | 重金属污染土壤固化/稳定化技术 | 重金属 | 化学 | 原位/异位 |
| 9 | 重金属污染土壤植物修复技术 | 重金属 | 生物 | 原位为主 |
| 10 | 可变价态重金属污染土壤氧化/还原调控技术 | 重金属 | 化学 | 原位/异位 |
| 11 | 重污染土壤异位填埋/原位封装技术 | 重金属 | 物理 | 原位/异位 |
| 12 | 污染场地/土壤制度控制技术 | 有机 /重金属 | 管控 | 原位/异位 |

tion and Soil) OR TS = ( Incineration and soil) OR TS = ( In Situ Chemical Oxidation and soil) OR TS = ( Elec- trokinetic Remediation and ( heavy metal or organic) ) OR TS = ( Bioremediation and soil and pollution) OR TS = ( ( soil flushing or soil washing or soil leaching) and ( heavy metal or chrome or Cr or cadmium or Cd or lead or Pb or nickel or Ni or arsenic or As or mercury or Hg or copper or Cu or zinc or Zn) ) OR TS = ( ( solidifi­cation or stabilization) and soil and ( heavy metal or chrome or Cr or cadmium or Cd or lead or Pb or nickel or Ni or arsenic or As or mercury or Hg or copper or Cu or zinc or Zn) ) OR TS = ( phytoremediation and soil and ( heavy metal or chrome or Cr or cadmium or Cd or lead or Pb or nickel or Ni or arsenic or As or mercury or Hg or copper or Cu or zinc or Zn) ) OR TS = ( ( oxidation or deoxidization or reduction or redox) and heavy metal and soil) OR TS = ( ( contaminated sites or contaminated soil or contaminated land) and ( Guidance Document or reference manual or ordinance or Guidelines or guide) and ( protection or management or Environmental protec­tion act) ) ，及其中文形式。

检索1982—2012 年间污染土壤修复的相关研究论文与专利。 检索结果中需剔除中英文重复、一稿多 发、会议论文及非学术类的查询结果。 共检索到研究论文共18015篇，其中，(英文论文11990篇，中文论 文6 025篇) ，专利共11 000 件，其中，(英文专利 10 234 件，中文专利 766 件) ，并针对各单项技术进行分



类统计。

2 结果与分析

2. 1 国内外技术发展历程

2. 1. 1 国际技术发展历程

污染土壤修复技术从20 世纪80 年代开始一直 保持了持续发展，但不同种类技术的发展历程有所 差异。从国际研究论文数量的绝对增长量来看( 图

1. ，植物修复从90年代末成为研究热点［12］，近10年 增幅超过 10%。气体抽提、焚烧等技术在经历了一 个技术高峰期后，研发投入持续减少。而生物修复 化学淋洗等技术一直维持相对稳定的研究数量。

40

2

o o O

8 2 .6

亠气体抽提

-\*焚烧

-亠电动力修复 —化学淋洗 \_栢物修复

\_ 填埋/封装

热脱附 \*原位氧化 亠生物修复 一固化/稳定化

氧化还原

制度控制

寸 **9 00001** 寸 **9 8001** 寸 **98OCN 8800 6 6 6 6 6 0000011**

**6 6 6 6 6 6 6 6 O O O O O O O**

**'—I** 、—■ **l •~I (Si cs cs** cn **cs <Si** cn

图 1 不同技术研究论文的年度发文量( 1982 —2012 年)  
Fig． 1 Annual number of research papers of different  
technologies ( 1982 —2012 )

如图2所示，基于近10 年的发文量与发文增幅

的比较分析，植物修复［12-14］、固化/稳定化［15］、电动力修复［16-17］是近10 年的新增热点;生物修复、化学淋洗 和制度控制作为传统修复技术，其论文量增幅不大，但累计发文量较大，说明该类技术一直受到关注。

美国作为污染土壤修复技术的领先国家，其技术发展趋势最值得关注。对美国污染场地管理与修复 基金资助的污染土壤修复项目进行总结( 《Superfund Remedy Report》) 2 ，可以看出发达国家的技术发展 趋势、应用程度与成熟度。 7r ,

从污染物分类的治理技术来看，重金属污染修 复技术逐渐成为热点，比重超过 60% 。这一方面是 由于有机污染场地不断减少，另一方面是有机污染 物的自然降解使得低浓度污染场地集中治理的必要 性减轻。但重金属污染持续性加重，新增污染面积 扩大，使得重金属修复技术得到大幅度发展和应用 同时，物理技术减少，化学 /生物及协同技术比重增 加，原位修复技术应用数量不断增加［18］。

2. 1. 2 国内技术发展历程

对国内技术逐年的文献统计结果来看，国内技 术主要从20世纪90年代开始，先期发展的技术包括

I •固化

|稳定化

电动力修复1

植物修复

°0

-氧化还原 丨

原仿-角装/填埋制度控制生物修复 卩髓融•焚烧;...化学淋洗.

) 600

1 200

累计发文量/篇

1 800

图 2 国际不同技术研究论文的增幅与累计发文量  
(2003—2012 年)

Fig． 2 Increases and accumulated number of research  
papers of different technologies ( 2003—2012 )

图 3 美国污染场地管理与修复基金技术种类的阶段性变化

Fig. 3 Remediation technology category of contaminated site in different stage of  
Superfund Remedy in the United States

化学淋洗、固定化、氧化/还原调控等以药剂研发为主的技术，以及焚烧、气体抽提等以设备或工艺引进的 技术。本世纪初，随着国际植物修复成为研究热点，以及国内土壤修复相关政策与指导意见的出台，植物 修复与制度控制成为国内关注的主要技术［13，19-20］。

从近10 年的绝对发文量来看，从2000 年之后，植物修复、生物修复等技术的研究较为集中。从研究 论文的相对增速来看，除论文总量相对较少的电动力修复、固化/稳定化技术外，植物修复技术是目前国内 主要关注的研究热点，论文增幅远远高于其他技术与总体平均水平（图5）。

热脱附 \*原位氧化 亠生物修复 —固化/稳定化

550

500

450

400

350

300

250

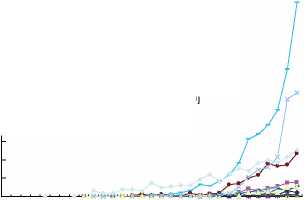
200

150

100

50

氧化还原 \*制度控制

**CN** 寸 98OCN］寸 **98OCN］**寸 **9000CN1 000000006 6 6 6600000 — 1 6 6 6 66 6 6 6600000OO**

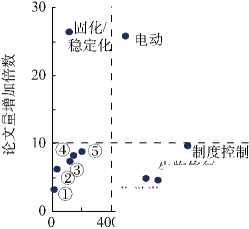
-亠气体抽提

-\*焚烧

-―电动力修复

.♦化学淋洗

\_ —卅i物修复 填埋/封装

**■—I ■—■ '■—1 ■—I ■—I 1—■ 1—■ ■—I ■—I CN CN CN CN CN CN CN**

牛物修复

I化学淋洗•氧化还原

累计发文量/篇

1. 热脱附
2. 原位氧化
3. 封装/填埋
4. 焚烧
5. 气体抽提.

800 1 200 1 600 2000

植物修复

图 4 国内不同技术研究论文的年度发文量  
(1982—2012 年)

Fig. 4 Annual number of research papers of different  
technologies in China ( 1982—2012 )

图 5 国内不同技术研究论文的增幅与累计发文量  
(2003—2012 年)

Fig. 5 Increases and accumulated number of research  
papers of different technologies in China ( 2003 —2012 )

2. 2 技术水平评价

2. 2. 1 技术发展阶段

国内外研究论文与专利数量的总体趋势体现了污染土壤修复领域的发展趋势及阶段性变化。因此， 根据污染土壤修复的主要12 项技术检索结果，国际上从20世纪80年代末开始有污染土壤修复相关研究 论文的集中发表，截至2012 年共发表了 11 990 篇，年发文量呈逐年上升发展趋势，且可划分为3 个阶段 （ 图 6 ） 。

阶段一，国际研究为滞涨期，相关论文从1989 年的1 篇增长到1997 年的398 篇，年均增长约为58 篇/年，国内研究此时开展很少;阶段二，从1997—2002 年，国际研究进入成熟期，期间论文的发表量相对 稳定;阶段三，从2002—2012 年，国际研究又进入一个快速增长期，增幅为58 篇/年，该阶段，中文研究也 进入了一个快速发展期，论文增幅为92 篇/年，并在2012 年发表总量与国际研究论文数量持平。这与该 时期我国科研投入力度加大有关，且受到科研考评机制等因素的影响。可以看出，我国已跨越第一阶段， 直接进入快速成长期。

从相应技术专利的年获得数量来看，与技术研 究相对应，国际技术的推广与应用也存在3 个阶段: 阶段一，20 世纪80 年代初研发的气体抽提及热脱附 技术，专利数量快速增加;阶段二，在90 年代中期进 入实用阶段，此时我国仍存于技术追踪与基础研究; 阶段三，部分新兴技术开始应用后，从21 世纪初期 开始，国际技术专利年获得数量呈现递减的趋势，技 术步入产业化阶段，同阶段中文专利数量尽管较少， 但已进入到了一个相对的快速发展期。

2. 2. 2 技术研究程度比较

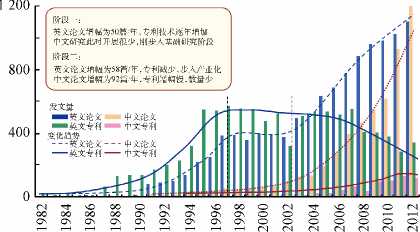
基于污染土壤修复的 12 项主要技术国内外首 篇研究论文报道年份的统计分析（图7），国际研究 时间平均超国内约12 年，根据技术研发投入、成熟程度、产业化情况，大致可分为三类研究方向。

图 6 中英文论文和专利年发表数量比较 (1982—2012 年)

Fig． 6 Annual number of research papers and patents in English and Chinese ( 1982 —2012 )

(逹S、旧遷哽4总职.

第一类研究方向，起 步早 （ 20 世纪 90 年代之 前），时间间隔长（＞15年），该类研究相对成熟，已 实现产业化和设备化，如气体抽提;第二类研究方 向，时间间隔较短（＜10年）、原理简单、技术难度不 大、研究成本低、易于追踪，仅从论文数量开看，该类 研究国内外差别不大，如生物修复、化学淋洗;第三 类方向，时间间隔约10-15年，具有新的思路和方 法，便于实施应用，有可能实现产业化突破，如矿化 稳定化，电动力修复等技术，值得大力跟踪研发。

从中英文专利的首篇报道年份的时间差距来 看，国际相关专利始于 20 世纪 80 年末。 经 10 余年 的发展，在20 世纪90 年代已经形成完整的修复技术 体系，涵盖了工艺、材料和设备等。 而我国专利发展 是始于本世纪初期，技术均有一定程度的发展，但发 展程度不均，尚未形成技术体系（图8） 。

2. 2. 3 技术应用程度比较

我国针对污染土壤修复的国际专利数量相对较 少。 从在中国优先权使用的国际专利的聚类分析看 来，结果并无显著的聚类特征。 但在工艺与装备方 面，热脱附及相关热处理技术的专利较多，一方面该 类技术在国际上已完全步入产业化阶段，另一方面 该类技术是目前我国有机污染场地修复的首选技术 （图10） 。 在药剂与功能材料方面，以重金属淋洗、稳 定化等药剂为主［21］，也包括部分有机污染场地生物

——l-

植物富集 **Q**

电动苹.术**0 r**

稳定化**O** 氣化还原调控 Q

：热脱附& '

制度控制

气相抽提**6\_**固化

化学淋》 **—0**

焚烧**——O**

1970年

1980年

**£>**

1990年

2000年

*-o*

2012年

注:1985年之前的原创技术研发并未针对土壤污染问题,  
后期移用到污染土壤修复中，因此，技术诞牛-年代早于  
技术应用在污染土壤修复的年代「下文专利分析同。

图 7 中英文论文首篇报道年比较  
Fig． 7 Publication year of research papers  
in English and Chinese

**O tel**外首次报道

**O tel**内首次报道

封装填埋

6—

烫烧

1970年

制度控制**0**

顶位氧化**I**

电动分离**O** 1 **0**

电动氧化**0 i o**

氧化述原调控 10

稳庞化**O ko**

植物富集**o** i **O**

化学淋洗**G i O**

化学修复q :\_Q

热脱祸q i

固化*Q-*

气相抽提*Q-*

1980年

1990年

**-0**

2000年

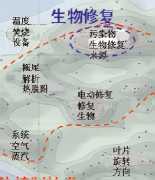
2012年

图 8 中英文专利首篇报道年份比较

Fig． 8 Publication year of patents in English and Chinese

修复中的功能菌株与菌剂。 这是由于研究投入相对较小，应用与产业化程度较低的药剂与材料研发占据 了主要地位。 虽然国内植物修复技术论文研究数量最多，但多集中在理论研究，工程实用性不足，产业化 仍有待发展。 国内污染土壤修复技术的专利技术要点少、应用范围窄，这已成为我国污染土壤修复技术发 展的瓶颈。

从专利景观图的分布来看（图10），国际专利的技术体系已经成型，基本上涵盖了有机污染物降解与 重金属钝化的主流修复技术，包括传统的物化技术和生物修复技术，以及新型的有机污染电动力修复



技术。

与国际技术发展态势有所不同，国内专利技术 主要集中在有机物的热脱附工艺以及重金属的稳定 化药剂方面。虽然有机物污染土壤的生物修复和 重金属污染土壤植物修复的研究论文年发表量远 高于其他技术，但这两类的专利数量较少（图10） 。 这表明我国对生物修复技术与植物修复技术的研 究更侧重于理论探索或室内实验，实用性缺乏，并 且重复性工作较多。导致本现象的深层次原因可 能还与我国的科研投入体制和成果考核体系有关， 如这 2 项技术的科研条件要求不高，研究成本较 低，容易刊发研究论文。整体而言，越是需要高标 准、高投入、大团队来进行研发的技术，国内与国外 的差距越大。

虽然生物修复技术等是国际重要的主流修复技 术，但是国内研发出的技术仍有很多缺欠，如理论上 创新不足，产业化方面实用性较差。为改善生物技 术效率不高的问题，我国应重点发展组合型强化生 物修复技术，即将其他的高效修复方法与生物技术 相结合，形成协同性生物修复技术。

:管 井气备 油.通设

鬻M

1

侖SS

化学药剂

，'含a .-•

--去號.

制訝泊f物材料

图 9 国内技术专利景观图

Fig. 9 Landscape map of patents in China

风赁层•

通檸表

**有机物污染控制技术**

碍层B 阻表底

还原、特性.

生物可利用性 7

石油 . 比率

］**重金属■污染控制技术** r' '• x--7—*•、*

”弭予.

**■总、' 固化/ 稳定化**

: 重金属 • / .

*■..钟T、.*

植物修兽-

此外，我国是农业大国，但耕地近 1/5 的超标 率［3］，这要求我国修复技术发展与选择时，要充分重 视农田土壤的修复与风险防控。近年来，以钝化（ 稳

图 10 国际技术专利景观图

Fig. 10 Landscape map of international patents

定化） 、植物修复、生物修复为代表的农田污染土壤修复技术研发［22-24］，论文发表量较高（图1 和图4） ，且

随着我国科技部、环保部和农业部等对农田污染土壤修复技术研发提供了持续性资助，国内外在技术

研发上差距不大。但根据相关文献报道［25］，国内外农田污染土壤修复技术，普遍存在成熟度低、技术

实用性差、成本较高等问题，技术研发仍处于实验室研究阶段，辅以小规模田间实验，尚未进入产业化 阶段。因此，针对我国农田污染土壤面积大、土壤理化性质与污染物差别显著等问题，应以风险防控与

安全利用为目标，着重解决技术的适用性与成本等难题。

2.3 我国技术发展态势评价

根据上述国际技术的研究现状、技术发展的阶 段性，以及技术的起始时间、发展历程、产业化程度 和应用推广范围的分析，可以将主要的污染土壤修 复技术分为三大类（表2） :I类技术相对成熟，已经 实现产业化，该类技术包括有机污染物治理的气体 抽提、热脱附和生物（通风） 堆，以及重金属治理的 固化/稳定化和氧化/还原调控等技术；II类技术正 逐渐成熟，开始进入产业化阶段，该类技术包括有机

| 分类 | I类技术 | U类技术 | **皿**类技术 |
| --- | --- | --- | --- |
| 有机污染物 | 气体抽提/热脱附  生物（通风）堆 | 原位氧化  植物降解 | 物化强化  化学淋洗 |
| 重金属 | 固化稳定化  氧化/还原 | 化学清洗  植物萃取 | 植物阻隔  电动力学 |

表 2 国际技术发展分类

Table 2 Classification of international remediation technologies

污染物治理的原位氧化和生物修复，以及重金属治理的化学清洗和植物萃取等技术；III类技术目前已有 研究基础，但仍处于探索阶段，包括有机污染物的物化强化修复和化学淋洗技术，以及重金属植物阻隔和 电动力学修复技术。

借鉴国际污染土壤修复技术的发展经验，基于 国内技术的研发能力与水平(表3)，考虑我国污染 农田和污染场地大量并存的国情与技术需求，应该 (1)发展针对有机污染的气体抽提/热脱附和生物 修复、针对重金属污染的稳定化和化学清洗等推广 技术;(2)发展针对有机污染治理的植物降解、针对 重金属治理植物萃取等示范技术;(3)引领针对有 机污染的物化强化修复、针对重金属污染的植物阻 隔等储备技术。 同时，研发高级氧化、脱附增溶、微 生物调控、氧化/还原调控、化学活化和电动力修复 等关键技术，与重点发展技术相互组合，进而形成强 化型、协同型的高效技术，以此构建适合我国国情的 污染土壤修复技术体系。

| Table 3 Key remediation technologies in China | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| 分类 | I类技术 | U类技术 | **皿**类技术 |
| 有机污染物 | 生物修复日  气体抽提/热脱附 | 植物降解》 | 物化强化。 |
| 重金属 | 稳定化d  化学清洗 | 植物萃取° | 植物阻隔 |

表 3 国内重点发展技术

注:a.生物修复:包含脱附、增溶等强化技术；b.植物降解：包 含微生物、营养制剂等强化技术;c物化强化：包括电动力修复、高 级氧化等技术；d.稳定化:包含氧化/还原调控等强化技术;e.植物 萃取:包括化学活化强化技术。

3 结论

1. 我国污染土壤修复技术研究始于20 世纪90 年代末期，由于起步较晚，无论是理论探索，还是技术 研发，均与国外发达国家有较大差距，且在产业化领域更为突出。
2. 发达国家污染土壤修复的技术成熟期始于20 世纪90 年代，因此中外技术的绝对差距并不十分巨 大，制定和建立合理的国家鼓励政策与市场引导机制，有可能在10 -15 年内接近或赶上发达国家的总体 水平。
3. 与水、气介质相比，土壤具有更显著的生态环境特征，因此在未来技术体系构建中，应更注重考虑 我国的国情要素，在技术范围选择时，要充分体现农田土壤的修复与生态风险防控。
4. 在国外技术走向成熟、国内水平快速提高的大形势下，我国的污染土壤修复技术研发应并重系统 集成与技术原创，既要重点支持适合产业应用的协同性系统技术，又要着眼于战略发展的原始性创新 技术。
5. 在今后一段时间内，我国应重点研发抽提脱附、生物修复、植物降解、电动力修复、稳定化、化学清 洗、植物萃取、植物阻隔等污染土壤修复技术，分别满足推广、示范和储备等层面的需求。

致谢 本文属于科技部部署的环境领域技术预测的工作内容总结，研究过程受中国科学院生态环境研究中心曲久辉院士的 建议与指导，在此致以衷心感谢。

参考文献

1. 谷庆宝，颜增光，周友亚，等.美国超级基金制度及其污染场地环境管理J].环境科学研究，2007, 20(5): 84-88
2. USEPA ( United States Environmental Protection Agency ) . Superfund remedy report ( 1 st-13 th) . Contaminated Site Clean-Up Information[OL] . 2013. http: / /www. clu-in. org /asr
3. 中华人民共和国环境保护部和中华人民共和国国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[OL] 2014. http: //www. zhb. gov. cn/gkml/hbb/qt/201404 /t20140417\_270670. htm
4. 高彦鑫，王夏晖，李志涛，等.我国土壤修复产业资金框架的构建与研究J].环境科学与技术，2014, 37 (120): 597-601
5. 丁学东.文献计量学基础[M].北京：北京大学出版社,1993

B]徐应明，李军幸，孙国红，等.新型功能膜材料对污染土壤铅汞镉钝化作用研究J].农业环境科学学报，2003, 22

(1): 86-89

[7]谷庆宝，郭观林，周友亚，等.污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨J].环境科学研究，2008, 21 (2): 197-202

[8]王立群，罗磊，马义兵，等.重金属污染土壤原位钝化修复研究进展CJ1.应用生态学报，2009, 20(5): 1214-1222

1. CCME ( Canadian Council of Ministers of Environment) ． A Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines (CCME-EPC-101E)[Z] . Winnipeg Manitoba： The National Contaminated Sites Remediation Program， 1996
2. FMEG (Federal Ministry for the Environment of Germany) . Nature Conservation and Nuclear Safety. Federal Soil Protection Act. Federal Law Gazette I， 502[Z] . 1998
3. DEFRA， Environment Agency. The Contaminated Land Exposure Assessment Model ( CLEA) : Technical Basis and Algo­rithms. R＆D Publication CLR10[R] . Bristol: Environment Agency， 2002a
4. CHANEY R L， MALIK M， LI Y M， et al. Phytoremediation of soil metals[J] . Current Opinion in Biotechnology， 1997， 8 (3) : 279-284

[13]陈同斌，韦朝阳，黄泽春，等.砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[].科学通报，2002, 47(3): 207-210

1. WU LH， LUO YM， XING XR， et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk[J] . Agriculture Ecosystems ＆ Environment， 2004， 102(3):307-318
2. RAICEVIC S， KALUDJEROVIC-RADOICIC T， ZOUBOULIS A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: Theoretical prediction and experimental verification[J] . Journal of Hazardous Materials， 2005， 117(1): 41-53
3. LI Fengmei ， GUO Shuhai， HARTOG Niels. Electrokinetics-enhanced biodegradation of heavy polycyclic aromatic hydrocar­bons in soil around iron and steel industries[J] . Electrochimica Acta， 2012， 85: 228-234
4. GUO Shuhai， FAN Ruijuan， LI Tingting， et al. Synergistic effects of bioremediation and electrokinetics in the remediation of petroleum-contaminated soil[J] . Chemosphere， 2014， 109: 226-233
5. 杨宾，李慧颖，伍斌，等.污染场地中挥发性有机污染工程修复技术及应用J].环境工程技术学报，2013, 3 (1): 78-84
6. 张胜田，林玉锁，华小梅，等.中国污染场地管理面临的问题及对策J].环境科学与管理，2007, 32⑹:5-7
7. 郝汉舟，陈同斌，靳孟贵，等.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
8. 朱利中.土壤及地下水有机污染的化学与生物修复[J].环境科学进展，1999, 7⑵：66-2
9. 李剑睿，徐应明，林大松，等.农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J].生态环境学报，2014, 23 (4) : 721-728
10. 徐应明.污染土壤修复、诊断与标准体系建立的探讨[].农业环境科学学报，2007, 26(2) : 413-118
11. 谢景千，雷梅，陈同斌，等.蜈蚣草对污染土壤中As、Pb、Zn、Cu的原位去除效果J].环境科学学报，2010, 30 (1): 165-171

125]国土资源部土地整治中心.中国土地整治发展研究报告[M].2版.北京：社科文献出版社,2015

1. 收稿日期:2016 －09－07;录用日期:2016－10－17

   第一作者：郭书海(1964—)，男，研究员，研究方向：污染土壤修复技术。E-mail: shuhaiguo@ iae. ac. cn [↑](#footnote-ref-2)
2. 通信作者 [↑](#footnote-ref-3)
3. 2 文献统计方法 [↑](#footnote-ref-4)
4. 本研究以 ISI Web of Science 的 Science Citation Index Expanded 引文索引数据库与作为外文相关文献 [↑](#footnote-ref-5)
5. 检索的数据源，以 CNKI 中国期刊全文数据库、万方数据库及维普数据库作为中文相关文献检索的数据 [↑](#footnote-ref-6)
6. 源，以 ISI Derwent Innovations Index 专利创新索引数据库作为外文专利检索的数据源，以中国知识产权局 [↑](#footnote-ref-7)
7. 数据库与 CNKI 中国期刊全文数据库作为中文专利检索的数据源。 [↑](#footnote-ref-8)
8. 利用关键词设计检索式，检索式如下:TS = (Soil Vapor Extraction and Soil) OR TS = (Thermal Desorp- [↑](#footnote-ref-9)