土壤及地下水污染修复技术、专利与行业发展分析*

张　涛　丁贞玉#
（环境保护部环境规划院，北京 100012）

摘要　中国土壤及地下水污染问题日益凸显。比较了截至2015年国内外有关土壤和地下水污染修复技术的发展状况，对相关专利进行检索和分析，为中国修复产业发展提供战略性基础意见。最终提出，在工程实践过程中，需要将物理、化学和生物的多种方法统筹考虑，架构适合中国污染场地的技术体系，健全行业标准，扶持自主创新及自主研发，以高效、低耗的方式解决技术效果难题。同时，应该推进企业在此领域积极创新，并发挥重要作用，采取更多措施，将高校和科研院所的专利尽快产业化，促进产业的健康快速发展。

关键词　土壤　地下水　生态修复　产业发展
DOI：10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.07.017

Analysis of the technology, patents and industry development for the remediation of soil and groundwater pollution

ZHANG Tao, DING Zhenyu. (*Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing* 100012)

Abstract: Soil and groundwater pollution problems are becoming increasingly prominent. The development of soil and groundwater pollution remediation technology was reviewed, and the relevant repair patents were retrieved and analysed to provide strategic basis for the development of China's remediation industry. In engineering practices, the physical, chemical and biological methods should be considered synthetically. Technology system which was suitable for China's contaminated sites was needed as well, asking for incorporating of sound industry standards, independent innovation and efficient solution for problems of technical effect. Besides, enterprises should be encouraged to blaze new trails in soil and groundwater pollution remediation field, and taking steps to assist patents in academes and institutes achieve industrialization, spurring on the industry to develop rapidly and healthy.

Keywords: soil; groundwater; ecological remediation; industrial development

2016年初，发生在江苏的常隆化工原厂址污染事件将中国土壤及地下水污染及修复问题推向风口浪尖。事实上，根据2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，全国土壤环境质量状况不容乐观，很多地区土壤污染严重，总的超标率为16.1%，其中耕地土壤环境质量超标率达到19.4%，而类似常隆等工矿业废弃地土壤环境问题更突出，超标率高达36.3%[1]。再回顾"全国地下水基础环境状况调查（环保、国土、水利、财政）"的初步结果，2011—2013年，地下水质量状况极差水质比例达到15%左右。可见，土壤及地下水污染已对公众健康和生存环境构成严重威胁，并将成为地方经济发展的瓶颈[2-5]。自2006年以来，中国环境保护相关部门及从业人员已逐步开展土壤及地下水污染修复示范项目，在修复技术选择方面，一般采用物理、化学和生物等方法转移、吸收、降解和转化土壤及地下水中的污染物，使其浓度降低到可接受水平，或将有毒有害的污染物转化为无害的物质，但很多技术目前在中国仍未得到商业化的广泛应用。中国土壤类型丰富、水文地质条件复杂，目前亟需在引进、消化、吸收国外先进修复技术的基础上，建立适合中国不同污染类型场地的调查及修复技术体系，并在大规模实践中对修复体系进行不断修正和完善，以推动行业的快速发展。本研究比较了截至2015年国内外有关土壤和地下水污染修复技术的发展及应用状况，并对相关专利进行检索和分析，以期为中国修复产业发展提供基础性参考或建议。

1　国外修复技术发展现状

20世纪初，随着发达地区工农业经济的迅猛发展，很多国家都遭遇了土壤及地下水污染的问题[6]。20世纪50年代以来，已有部分国家制定并开展了土壤及地下水污染治理修复行动计划，有一些国家还利用先进的技术与严格的法规进行生态治理，也

第一作者：张　涛，男，1987年生，硕士，助理研究员，主要从事饮用水保护与地下水污染防治、水环境管理政策研究工作。# 通讯作者。
* 华北平原典型地区地下水污染防控技术体系研究项目（No.201309004）；全国地下水基础环境状况调查评估项目（No.1441100022）。

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

积累了大量经验[7-8]。国外常用的方法主要分为物理、化学及生物修复 3 种[9]559。物理方法一般分为电动力学法、热处理法、蒸汽提法；化学方法分为固化/稳定化法、土壤淋洗法、化学氧化还原法、光催化法；生物方法主要包括植物、动物以及微生物法。部分重要修复技术对比具体见表 1[9]559-562,[10]61,[11]。

1.1　美　国

在污染场地修复技术应用方面，美国可以说居于世界领先地位。针对不同类型的土壤及地下水污染物和污染源，因地制宜采取不同的管理规范，并成立不同管理部门，多方筹措治理经费。1980 年以来，美国利用当时先进的技术手段有效地治理了一大批污染场地[12]。以地下水治理为例，美国各州常见的治理技术方案包括：(1)隔离污染物；(2)将污染物移出含水层；(3)将土壤及含水层中的污染物进行固定或无害化；(4)在使用前对受污染的地下水进行水质处理；(5)停止使用受污染含水层中的地下水，寻找替代水源。

首先，在 1982—2005 年，共 977 项美国土壤修复项目的统计结果显示，原/异位修复技术所占项目总数的比例分别为 48%和 52%，主要技术应用比例依次为原位蒸发提取(26%)＞异位固化/稳定化(18%)＞异位焚烧(11%)＞异位热脱附(7%)＞异位生物修复(6%)＞原位固化/稳定化(5%)、原位生物修复(5%)、原位萃取(5%)＞现场焚烧(4%)，说明当时美国修复工程侧重于异位修复，除原位蒸发提取外，多侧重于异位固化/稳定化、异位焚烧和异位热脱附等修复技术。2002—2005 年，美国年度财政支出中 60%污染源处置工程采用的是原位修复技术，比 1982—2005 年高出 12 百分点，而原位修复具备无需开挖、成本低、施工影响较小等优点，可以预测美国未来会尽量以原位修复工程为主、异位为辅，并会逐步降低可能产生二次污染的技术应用比例(如焚烧等)[13]93。

其次，将 1986—2008 年美国超级基金修复地下水污染场地所采用的技术及比例变化进行统计，结果见图 1。由图 1 可见，采用抽出处理技术的比例从 1986 年的 68%下降到 2008 年的 17%；采用监测自然衰减技术的比例从 1986 年的 6%增加到 2008 年的 17%；采用原位修复技术的比例从 1986 年的 0 增加到 2008 年的 17%。监测自然衰减和原位修复技术的应用比例显著提升。同时，制度控制及其他技术在 1993—2000 年大幅增加，2000 年达到 49%；2000—2008 年一直维持在 50%左右。

在美国超级基金计划中，2005—2008 年总共有 702 个地下水修复决策文件。其中，绝大多数场地采用了抽出处理、监测自然衰减和原位修复技术以外的其他污染控制技术手段，主要是风险管理控制制度和长期监测，共有 328 个案例；监测自然衰减案例为 140 个；原位修复技术案例共 119 个；抽出处理案例仅为 98 个。各种原位修复技术中，又以原位微生物修复和原位化学处理技术为主。

从各种土壤及地下水修复技术的应用趋势来看，未来美国污染场地治理仍会以各种污染风险管理控制制度及修复技术联合使用为主。原位微生物修复和原位化学处理技术会逐渐替代抽出处理技术。各种修复技术的联合使用尤其是各种修复技术同监测自然衰减技术联合使用会在未来的修复选择策略中占主要地位。

1.2　其他发达国家

其他发达国家的土壤及地下水修复工程开展以来，也结合各自特点各有侧重。英国奉行科技治污，将土壤修复较规范地分为物理、化学、生物修复技术 3 个方面；德国则强调对污染场地需进行详细摸底

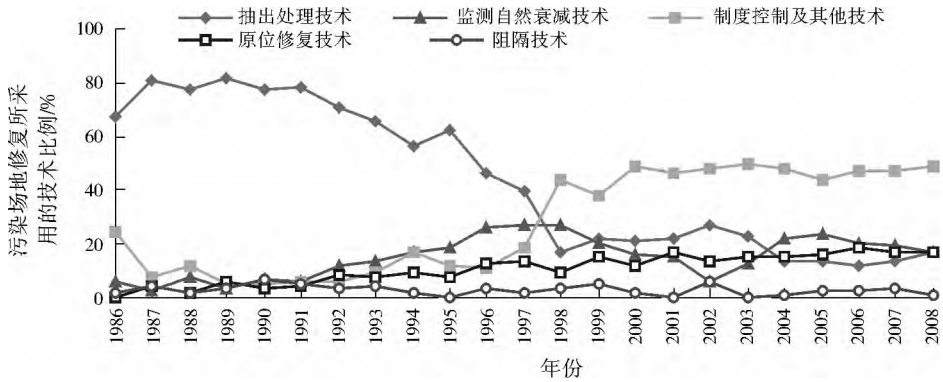

图 1　1986—2008 年美国超级基金修复地下水污染场地所采用的技术及比例变化

Fig.1　The variations in technologies ratios of groundwater remediation in superfund of America in 1986-2008

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　部分重要修复技术对比

Table 1　The comparison of some important remediation techniques

修复技术	优点	缺点/局限	修复效率	修复时间	治理成本	环境风险
固化/稳定化技术（物理化学）	适用于污染土壤。可处理金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物及砷化合物等无机物；农药/除草剂、石油或部分重质非水相液体（如多环芳烃类、多氯联苯类、二噁英等有机化合物）	不适用于部分挥发性有机化合物（如轻质非水相液体）和以污染物总量为验收目标的项目。当需要添加较多的固化/稳定剂时，对土壤的增容效应较大，会显著增加后续土壤处理处置费用	较高	数月	中至高	中
热脱附技术（物理化学）	可处理挥发及半挥发性有机化合物（如石油烃、农药、多氯联苯）和汞	不适用于无机物污染土壤（汞除外），也不适用于腐蚀性有机物、活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤	较高	数周至数年	较高	较高
土壤淋洗技术（物理化学）	适用于污染土壤。可处理重金属及半挥发性、难挥发性有机化合物	不宜用于土壤细粒（黏/粉粒）高于 25%（质量分数）的土壤	较高	数月	较高	中
空气喷射技术（物理）	对修复场地干扰小；设备简单，安装方便；修复效率较高；治理时间短；运行和维护费用较低	对于非挥发性的污染物不适用；不适合在低渗透率或高黏土含量的地区使用；不能应用于承压含水层的污染物治理；控制不当可能导致地下水中污染羽迁移；蒸气可能会迁移和释放到地表，造成二次污染	较高	数月至数年	中	较高
自由产品回收（物理化学）	可在短时间内去除非水相液体中大量污染物，从而加快地下水修复效率	受场地水文地质条件限制，特定情况下需与表面活性剂联合使用以提高回收效率；残留污染物需要进一步处理；重质非水相液体的回收较困难	一般	数月至数年	中	中
原位化学氧化修复技术（化学）	反应速度快，清除时间短；反应强度大，对污染物性质和浓度不敏感；有机化合物彻底氧化后，只产生水、二氧化碳等无害产物，二次污染风险较小	在渗透性较差区域（如黏土层中），氧化剂传输速率可能较慢；土壤中存在的一些腐殖酸、还原性金属等，会消耗大量氧化剂，从而增加氧化剂需要量，由于成本限制通常只应用于污染源或残余污染源的处理	较高	数月至数年	中至高	较高
原位化学还原技术（化学）	反应速度快，清除时间短；反应强度大	场地水文地质条件可能会限制化学物质的传输；一些含氯有机化合物的降解产物仍有一定的毒性；固定的污染物在某些特定的条件下可能会重新释放出来；一些危险化学物质的使用可能会引起安全问题	较高	数月至数年	中至高	低至中
可渗透反应墙技术（物理化学）	工程设施较简单，可一次完成，后期运转及维护费用较低；反应介质消耗较慢，具备几年甚至几十年的处理能力	工程设施投资较大，工程措施较复杂；难以保证拦截所有污染物；可渗透反应墙填料需要适时更换；需要对地下水的 pH 等进行控制；深度限制在 3～12 m；可能存在二次污染	一般至较高	通常需持续监测 2 年或以上，可渗透反应墙体可持续使用 5～10 年	中	低至中
双相抽提技术（物理）	对于非均质黏土和细砂中污染物的处理效果比单独使用抽取处理或气相抽提高	场地水文地质条件和污染物分布可能会影响修复效率；需要对液相和气相进行后续处理	一般至较高	数年	中	较高
原位热处理技术（物理化学）	通过大幅提升处理区域内地下水及饱和土壤温度以促进挥发性有机化合物的解吸及挥发，在非水相液体存在时还可大幅增加其迁移性（通过降低其黏度）以便收集	设备及运行成本较高，对系统施工及运行专业化程度要求高	高	数月至数年	高	中
电动力修复技术（物理）	对低渗透性土壤修复具有一定优势；受水文地质条件和污染深度限制相对较小	受污染物溶解和解吸的影响；不适用于酸性条件；只适用于污染范围小的区域	高	60～120 d	高	低至中
原位微生物修复技术（生物）	适用于大面积污染区域的治理；成本较低；对环境影响较低，属于生态友好型的环境治理技术	地下水环境需适宜所需微生物的生长，在非均质性介质中难以覆盖整个污染区	适合条件下较高	数年至数十年	中至高	中
植物修复技术（生物）	施工简单，成本相对较低；不破坏地质结构，生态风险小	效果受地下水埋深、环境因素、污染物性质和浓度影响；修复周期较长；需考虑富集了污染物的植物的后续处理处置	低	数年至数十年	低至中	低
监测自然衰减技术（包含物理、化学、生物等过程）	修复费用低于其他修复技术；不产生二次污染，对生态环境干扰小	一般仅适用于污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的区域；实施前需要详细评估地下水自然衰减能力，后期需要较长监测时间	低至中	较长	低	低
阻隔技术（物理化学）	泥浆墙施工相对简单，使用的泥浆及回填材料较普遍，可有效将污染物阻隔在特定区域中	泥浆墙深度受限制，泥浆墙底部须进入到低渗透性土层（如黏土）足够深度，一般情况下需要与地下水抽出处理系统联合使用；效果受地下水中酸碱组分，污染物类型、活性、分布，泥浆墙体的深度、长度和宽度，场地水文地质条件等影响	较高，可有效阻隔地下水污染	较长	低至中	低

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

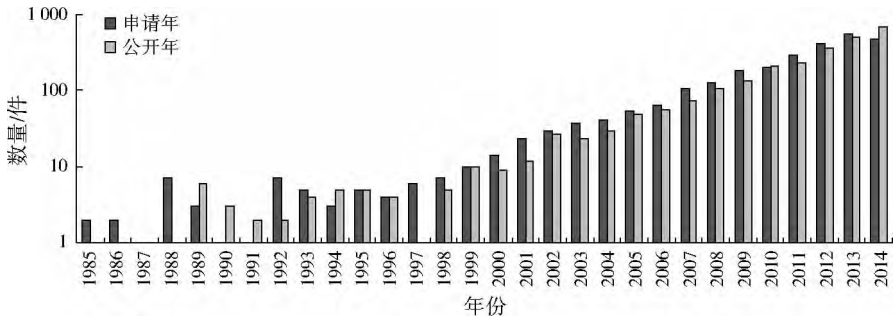

图 2　按申请年和公开年统计的中国土壤及地下水修复技术专利(1985—2014)

Fig.2　Patents of soil and groundwater remediation technologies for years according to apply for patent and public in China from 1985 to 2014

调查后进行优先等级排序，针对不同的污染场地应采用不同的修复技术；日本则侧重于风险管理控制为主要方向，并制定相关法律法规[14]。

根据杨勇等[13]93 的统计结果，在 1978—2007 年，欧洲实际工程中侧重于应用原位生物修复技术，技术应用比例高达 35%，并愿意将污染土作为非可再生资源进行废弃处理(比例约 37%)。

2　土壤及地下水修复产业现状及专利分析

2014—2015 年，中国环境修复工程领域也逐步加大投资成本及科学技术应用。从技术方法上，2007 年工业场地污染土壤的处理处置主要技术为水泥窑混烧、安全填埋两种，分别占 67%和 33%。2010 年采用的修复技术主要为水泥窑混烧 28%、热脱附 20%、固化/稳定化 20%、化学氧化 27%，能源高度消耗的技术占比 97%以上。到 2014 年前后，土壤污染修复技术在中国主要为水泥窑混烧 40%，固化/稳定化 30%，热脱附、化学氧化和土壤淋洗分别占 10%左右。但是，污染土壤的异位高能耗工程化措施在国内场地修复技术选择中一直处于主导地位。

据不完全统计，2014、2015 年中国环境修复的资金分别投入约 25 亿～35 亿、45 亿～60 亿元人民币，包括工业企业污染场地、农田污染修复示范和河流底泥清理的试点工程，其中大部分来自国家重金属专项资金、地下水专项资金(约 30 亿～40 亿元人民币)。在这逐年增加的资金投入上，技术的创新也得到了有效支持。

根据中国国家知识产权数据库查询，分别以“土壤污染调查”、“土壤调查”、“土壤修复”、“地下水调查”、“地下水修复”、“地下水治理”“污染场地”为关键词进行检索，共取得 5 691 条数据样本，后经过仔细核实，最终得到有效数据 2 684 条。由图 2 可以看出，中国土壤及地下水修复技术专利最早申请时间从 1985 年开始，到 1999 年发展一直较平稳，申请数量也并不多，平均 3.8 件/年；2000 年后，专利申请数量呈快速增长趋势，平均每年的增长幅度高达 30%以上，部分年份甚至达到 60%，其中 2013、2014 年专利申请数量已分别达到了 558、479 件。根据部分资料的专利分析情况显示，包括日本、美国、德国在内的世界上大多数国家，在土壤修复技术领域的技术开发高潮期均在 2004 年前，2004 年后都有不同程度下降。只有中国在该领域的专利申请数量自 1994 年以来稳步上升，并在 2009 年达到 183 件，升至第 1 位。此后，同期中国的专利申请数量不断增长，而同时世界大部分国家专利申请数量均有不同程度下降，中国稳居第一。这与何欢等[10]61 分析结果类似。这些表明，随着中国土壤和地下水修复领域逐渐成为科研热点，国家越发重视生态环境，修复市场前景广阔，技术研发目前正处于新的高潮期。

中国土壤及地下水修复技术前 16 名竞争者综合实力比较见表 2。由表 2 可见，中国科学院沈阳应用生态研究所专利数排第一；清华大学具有最长的活动年数，从 2000 年至 2015 年已有 15 年的申请历史。大学和研究单位在此领域占支配地位，前 16 名中只有江苏上田环境修复有限公司和江苏盖亚环境工程有限公司两家公司。中国的专利权人活动年数较短，平均只有 8 年左右，国际上前 15 位平均为 10 年。这表明，中国专利权人较分散，研究主体主要为高校，企业尚未成为研究主体。中国在此领域发展较快，投入较大，具有巨大的潜力。

对部分年份国内专利中关键技术分布频率进行分析。结果表明，中国专利多集中在植物和微生物修复方面，其次是物理化学修复。在修复设备方面，中国具有自主知识产权的分析、检测和施工设备相对落后，种类有限，大多依赖进口。日本专利技术则

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　截至 2015 年中国土壤及地下水修复技术前 16 名竞争者综合实力比较

Table 2　Soil and groundwater remediation technology major competitors in terms of comprehensive strength in China (Top 16th) due to year of 2015

序号	专利权人	专利数/件	所占比例/%	活动年数
1	中国科学院沈阳应用生态研究所	58	2.38	13
2	浙江大学	41	2.38	13
3	中国科学院南京土壤研究所	35	1.44	10
4	华北电力大学	35	1.44	4
5	南开大学	35	1.44	9
6	江苏上田环境修复有限公司	34	1.40	2
7	中国环境科学研究院	32	1.32	6
8	上海市环境科学研究院	24	0.99	5
9	四川农业大学	24	0.99	6
10	中国科学院生态环境研究中心	23	0.95	13
11	中国地质大学(武汉)	19	0.78	6
12	江苏盖亚环境工程有限公司	19	0.78	3
13	华东理工大学	19	0.78	8
14	南京大学	19	0.78	9
15	清华大学	17	0.70	15
16	南京农业大学	16	0.66	10

覆盖面广，除淋洗、电动和固化/稳定化技术专利外，在污染监测和施工设备方面同样占据优势；美国则侧重于化学和热解修复技术方面。这与赵婉雨等[15]分析结果类似。

针对污染类型不一的具体场地，单一技术和设备往往无法满足修复需求。与国外相比，中国缺乏完整而系统的修复技术和产品产业链，目前亟需将工作重点放在修复技术体系研发和修复产品设备的产业化发展上，侧重于物理、化学和生物联合修复方式，实现全过程污染防控，在借鉴国外先进经验的基础上，努力促进技术本土化，加强工程应用和推广力度，提高污染场地修复产业的快速发展水平，政府、科研机构、企业和社会等也应对土壤及地下水修复产业加大资本的投入。

3　中国土壤及地下水污染修复行业发展

(1) 土壤及地下水环境保护服务逐渐成为环保产业的重点。

据业内专家分析，污染场地修复行业主要分为 3 大类：咨询服务；工程服务；药剂与设备生产和供应。其中，咨询服务类主要分为场地调查与风险评价、修复方案与设计、监理与修复验收。除这 3 大类外，还会带动采样与实验室分析及培训服务行业。在工业化和城市化的过程中，欧美等发达国家较早关注了工业污染场地的修复问题。美国、日本的环境修复产业占本国环保产业的市场份额高达30%～50%。日本从 20 世纪 70 年代已开始土壤污染的治理研究，美国在 20 世纪 90 年代用于污染土壤修复方面的投资近 1 000 亿美元。

2016 年是“十三五”的开端，预计在土壤污染加密调查、农用地和建设用地治理试点、土壤污染防治先行区建设、受污染耕地修复和风险管理控制以及持续推进重金属污染防治方面会有新的进展。参照大气治理行动计划，伴随着“水十条”和“土十条”的实施，一旦修复市场打开，将是几十万亿的规模，远超过大气治理。但是，目前国内修复技术及装备还停留在“拿来主义”阶段，自主知识产权的修复技术和设备成为制约中国修复行业发展的瓶颈。即便是中国土壤及地下水修复技术不断提高，但总体上重金属污染修复发明专利授权比例较高，授权比例约 40%，其中植物修复技术发明专利授权比例接近 50%，而化学固定与钝化技术发明专利授权比例低于 30%。因此，中国需尽快提高自主研发水平，尽快提高多种污染物处理处置技术能力，才能有效抢占该产业的国内市场。

(2) 土壤及地下水污染修复行业需要国家政策支持。

目前，中国污染场地土壤修复工作形势严峻，需逐步健全国家污染场地土壤环境管理与修复管理支撑体系。

十一届全国人大四次会议于 2011 年 3 月 14 日批准实施的《国民经济和社会发展第十二个五年规

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

划纲要》和国务院于2012年7月20日正式发布的《"十二五"国家战略性新兴产业发展规划》(国发[2012]28号)中首次在国家级战略规划中为土壤修复"正名",并将之作为环保产业重点独立分支发展。2014年,环境保护部出台了《场地环境调查技术导则》(HJ 25.1—2014)、《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2—2014)、《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)、《污染场地土壤修复技术导则》(HJ 25.4—2014)、《污染场地术语》(HJ 682—2014)、《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》、《关于印发〈地下水环境状况调查评价工作指南(试行)〉等6个工作指南的通知》(环办[2014]99号)等一系列规范指南,极大推动了产业的发展及技术评估和应用。

同时,污染场地修复试点有序推动。2006年,环境保护部启动了"污染土壤修复与综合治理试点"专项研究,完成修复试点示范工程12个。国家"863计划"资源环境技术领域对"典型工业污染场地土壤修复关键技术研究与综合示范"进行了立项,开展有机氯农药类、挥发性有机物、多氯联苯类、铬渣污染场地土壤修复技术设备研发与示范。2013年1月23日,国务院办公厅发布了土壤环境保护与综合治理的"十二五"规划文件——《近期土壤环境保护和综合治理工作安排》(国办发[2013]7号),明确以大中城市周边、重金属污染防治重点区域、集中式饮用水水源地周边等为重点,开展土壤污染治理与修复试点示范;在长三角、珠三角、西南、中南等地区,选择被污染地块集中分布的典型区域,实施土壤污染综合治理;有关地方要在2013年年底前完成综合治理方案的编制工作并开始实施。2014年4月,财政部、农业部对外宣布,将在2014年启动重金属污染耕地修复综合治理工作,并在湖南长株潭地区率先启动试点,计划3～5年内实施。中央财政在2014年拨款11.5亿元,湖南财政亦相应投资。2015年,全国重金属"十三五"规划138个防控区竞争立项,最终30个重点防控区获得国家支持。

4　结　语

随着中国污染场地修复工程的逐步启动,也激发了土壤及地下水修复产业市场,潜力巨大。实现绿色意义的污染场地修复、加大环保科技创新,是修复行业良性发展的重要基石,也是促进中国新的经济增长和绿色发展的重要组成部分,能最终实现人和环境的和谐统一。因此,在工程实践过程中,需要将物理、化学和生物的多种方法统筹考虑,架构适合中国污染场地的技术体系,健全行业标准,扶持自主创新及自主研发,以高效、低耗的方式解决技术效果难题。同时,应该推进企业在此领域积极创新,并发挥重要作用,采取更多措施,将高校和科研院所的专利尽快产业化,促进产业的健康快速发展。

参考文献:

[1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京:环境保护部,2014.

[2] 赵其国,骆永明,滕应.中国土壤保护宏观战略思考[J].土壤学报,2009,46(6):1140-1145.

[3] 张敏,蔡五田.污染场地土壤与地下水调查的关键思路和方法介绍——以示范项目调查为例[J].环境科学与管理,2011,36(6):31-35.

[4] 陈梦舫.我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J].中国科学院院刊,2014,29(3):327-335.

[5] 陈梦舫,骆永明,宋静,等.中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示[J].环境监测管理与技术,2011,23(3):14-16.

[6] 龚宇阳.国际经验综述:污染场地管理政策与法规框架[R].北京:世界银行,2010.

[7] EPA.Superfund remedy report[R/OL].[2015-12-01].https://brownfieldstsc.org/pdfs/SRR_14th_MainDocument.pdf.

[8] 陈炼钢.土壤地下水污染治理健康风险分析系统研究[D].北京:清华大学,2005.

[9] 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(2/3).

[10] 何欢,肖强.基于Orbit专利分析系统的我国污染土壤修复技术与产业发展分析[J].情报探索,2015(1).

[11] 吴耀楣.中国土壤重金属污染修复技术的专利文献计量分析[J].生态环境学报,2013,22(5):901-904.

[12] Office of Solid Waste and Emergency Response.Treatment technologies for site cleanup annual status report[R].12th ed.Washington,D.C.:US Environmental Protection Agency,2007.

[13] 杨勇,何艳明,栾景丽.国际污染场地土壤修复技术综合分析[J].环境科学与技术,2012,35(10).

[14] EEA.Progress in management of contaminated sites[EB/OL].[2015-12-01].http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites/progress-inmanagement-of-contaminated-1.

[15] 赵婉雨,杨雨.土壤重金属污染修复技术分析[J].高科技与产业化,2015,11(9):64-69.

编辑:黄　苇　(收稿日期:2016-05-15)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net