

# 地下水污染修复技术综合评价

张文静,董维红,苏小四,柳富田

(吉林大学环境与资源学院,吉林 长春 130026)

**摘要** 结合当前国内外地下水修复研究现状,针对地下水污染修复的三种典型技术(抽出处理技术、监测天然衰减技术、原位修复技术)进行概要介绍,分别论述各种修复技术的修复机理、修复对象及其技术特点,并就基于以上修复技术的工程投资、运行成本及治理时间等方面进行综合对比评价,为开展实施地下水污染修复提供必要的理论依据。最后展望了地下水污染修复技术的发展方向。

**关键词** 地下水;污染修复;抽出处理技术;监测天然衰减技术;原位修复技术

中图分类号:X523 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2006)05-0001-04

## Comprehensive evaluation of groundwater remediation technologies

ZHANG Wen-jing, DONG Wei-hong, SU Xiao-si, LIU Fu-tian

(College of Environment and Resources, Institute of Water Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract** According to present research status of groundwater remediation at home and abroad, three kinds of typical treatment technologies were discussed, i. e. pump-and-treat technology, monitoring natural attenuation technology, and in-situ remediation technology. Their remedy mechanisms, application conditions and technology characteristics were presented respectively. In addition, the project costs, running costs and treatment time of these technologies were compared and evaluated, which provide theoretical bases for groundwater remediation practices. Finally, the developing direction of groundwater treatment technologies was prospected.

**Key words**: groundwater; contamination remediation; pump-and-treat technology; monitoring natural attenuation technology; in-situ remediation technology

近年来,由于大量工农业废弃物不合理地进行填埋,污染物事故性排放以及地下储油设施泄漏,各种有机物、重金属及放射性有害物质进入地下系统,地下水污染状况日益严重。修复已被污染的地下水,加强地下水环境的保护,已成为当前国内外环保研究的热点。以美国为代表的一些西方发达国家,自 20 世纪 80 年代开始就已经开展了地下水污染修复工作,并在该领域取得了较好成绩。例如,美国 1980 创立的“超级基金”联邦计划<sup>[1]</sup>,每年投入 3~8 亿美元的高额资金用于治理已污染的有害废弃物。截止 2004 年,该基金已完成地下水污染修复工程 864 个,治理有害液体、地下水、地表水超过 14 亿 m<sup>3</sup>。

自开展地下水污染治理至今,地下水修复技术在大量的实践中得以不断改进和创新。目前,较典型的地下水污染修复技术主要有以下 3 种<sup>[2]</sup>:

①抽出处理(Pump-Treat)技术,简称 P&T 技术;②监测天然衰减(Monitor Natural Attenuation)技术,简称 MNA 技术;③原位(In-Situ)修复技术。本文结合当前国内外研究现状,针对以上典型修复技术进行概要论述和综合对比分析,为在我国实施地下水污染修复提供必要的理论依据。

### 1 抽出处理修复技术

P&T 技术是最早出现的地下水污染修复技术,也是地下水异位修复的代表性技术。自 20 世纪 80 年代开展地下水污染修复至今,地下水污染治理仍以 P&T 技术为主。传统的 P&T 技术是把污染的地下水抽出来,然后在地面上进行处理。近年来,随着污染治理研究的不断深入,该技术已有了更广泛的含义,只要在地下水污染治理过程中对地下水实施

了抽取或注入的,都归类为 P&T 技术。P&T 技术概念模型见图 1。

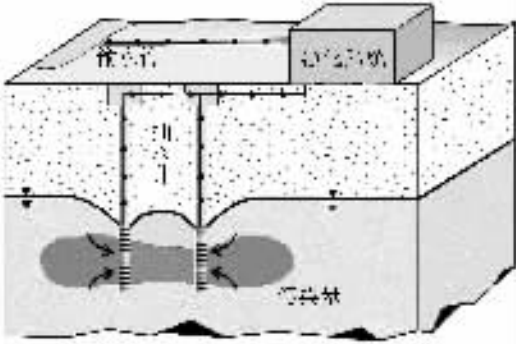


图 1 P&T 技术概念模型

P&T 技术的修复过程一般可分为两大部分:地下水动力控制过程和地上污染物处理过程。该技术根据地下水污染范围,在污染场地布设一定数量的抽水井,通过水泵和水井将污染了的地下水抽取上来,然后利用地面净化设备进行地下水污染治理。在抽取过程中,水井水位下降,在水井周围形成地下水降落漏斗,使周围地下水不断流向水井,减少了污染扩散。最后根据污染场地的实际情况,对处理过的地下水进行排放,可以排入地表径流、回灌到地下或用于当地供水等。

P&T 技术适用范围广,对于污染范围大、污染晕埋藏深的污染场地也适用。但其自身也存在一些局限性:①当非水相溶液出现时,由于毛细张力而滞留的非水相溶液几乎不太可能通过泵抽的办法清除;②该技术开挖处理工程费用昂贵,而且涉及地下水的抽提或回灌,对修复区干扰大;③如果不封闭污染源,当停止抽水时,拖尾和反弹现象严重;④需要持续的能量供给,以确保地下水的抽出和水处理系统的运行,同时还要求对系统进行定期的维护与监测。

## 2 监测天然衰减修复技术

MNA 技术出现的时间较晚,于 20 世纪 90 年代才开始正式用于地下水污染治理。该技术基于污染场地自身理化条件和污染物自然衰减能力进行污染修复,从而达到降低污染物浓度、毒性及迁移性等目的。另外, MNA 技术还必须根据污染区域的治理目标,采用相应的监测控制技术,对地下水的自然修复过程进行监测评价。实施监测的目的主要有以下几方面<sup>[3]</sup>:①证明污染物的自然衰减与预测相符合;②能够监测影响自然衰减能力的环境变化因素(如水文地质条件、地球化学条件、微生物等);③能够监测出所有潜在的有毒或易迁移转换的污染产物;④证实污染晕在纵、横、垂向上没有进一步扩展;⑤确定该修复过程对下游不会造成不良影响;⑥验证该修复是否达到修复目标。

采用 MNA 技术进行地下水污染修复,一般不会产生次生污染物,对生态环境的干扰程度较小,并且该技术工程设施简单,修复费用远远低于其他修复技术。但该技术适用范围较窄,对区域环境和污染物自然衰减能力要求较高,一般仅适用污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的区域。

## 3 原位修复技术

近年来,地下水原位修复技术的兴起受到人们的广泛关注。较典型的地下水原位修复技术有<sup>[4]</sup>:空气注入(Air Sparging)修复技术(简称 AS 技术)、渗透性反应墙(Permeable Reactive Barrier)修复技术(简称 PRB 技术)、原位生物(Bioremediation)修复技术、多相抽提(Multi-Phase Extraction)修复技术、原位化学修复(Chemical Treatment)技术、植物修复(Phytoremediation)技术以及多种方法相结合的修复技术等。

本文仅选择了目前最为广泛应用的 AS 技术和 PRB 技术为例,对地下水原位修复的机理及技术特点进行概要论述。

### 3.1 空气注入修复技术

AS 技术是在土壤气相抽提 Soil Vapor Extraction 技术(简称 SVE 技术)的基础上发展起来的,20 世纪 80 年代中期最早应用在德国<sup>[5]</sup>,随后迅速发展至美国以及欧洲的其他国家。近年来,AS 技术已成为地下水原位处理技术的首选。其概念模型见图 2。

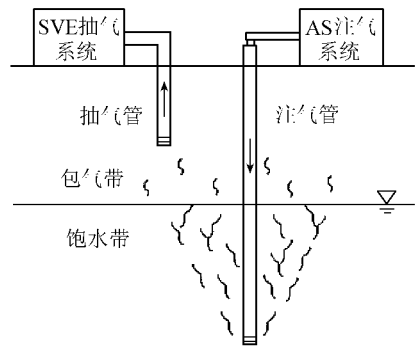


图 2 AS 修复技术概念模型

AS 技术有时也被定义为原位生物曝气技术,两者之间没有明确的划分界线,一般取决于在不同条件和操作阶段下各控制因素的主导地位<sup>[6]</sup>。其控制因素主要包括挥发、解吸和生物降解等几大部分。在修复过程中,当物理挥发占主导地位时,定义为 BS 技术;当生物降解占主导地位时,定义为生物修复(Biosparging)技术(简称 BS 技术)。一般情况下,在治理初期以物理挥发为主,而在治理后期则以生物降解为主。

该技术通常用来治理地下饱和带(饱和带及毛细饱和带)的有机污染,一般与 SVE 技术联合使用,

其修复原理为:通过向地下注入空气,在污染晕下方形成气流屏障,防止污染晕进一步向下扩散和迁移,在气压梯度作用下,收集地下可挥发性污染物,并以供氧作为主要手段,促进地下污染物的生物降解。修复过程中发生的质量迁移转化机制较复杂,在不同的修复阶段,控制修复速率和效率的机理也不同。另外,随着场所地质条件的变化,各种机理对 AS 技术修复作用的贡献也不同。

AS 技术具有如下特点:①设备简单,安装方便,易操作;②修复效率高,治理时间短,一般情况下修复期为 1~4 d<sup>[6]</sup>;③更适于消除地下水中难移动处理的污染物(如 Dense Non-aqueous Phase Liquid,简称 DNAPL,密度大于 1 的非水相溶液);④现场原位修复,对修复点干扰小。该技术的局限性主要有以下几点:①对于非挥发性的污染物不适用;②受地质条件限制,不适合在低渗透率或高黏土含量的地区使用;③不能应用于承压含水层及土壤分层情况下的污染物治理。

### 3.2 渗透性反应墙修复技术

PRB 技术的修复原理是:沿地下水流动方向,在污染场地下游安置连续或非连续的渗透性反应墙,使含有污染物质的地下水流经渗透墙的反应区,通过地下水与反应墙中添加剂的化学反应达到去除污染物质的目的,并利用 PRB 物理屏障阻止污染晕向下游进一步扩散。其概念模型见图 3。

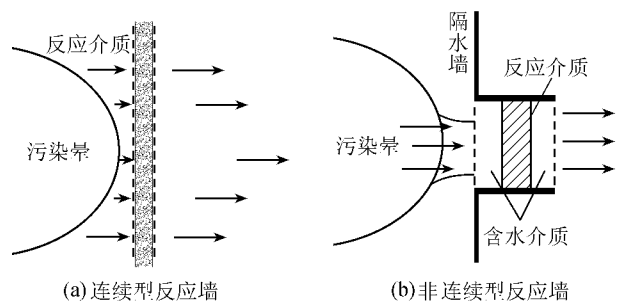


图 3 PRB 技术概念模型

PRB 技术一般根据不同污染场地特点,在反应墙中添加相应的化学试剂。通常情况下,Fe 是最为广泛应用的反应剂,其对常见的有机污染物及无机污染物去除效果较好。另外,国外许多研究机构<sup>[7]</sup>还针对一些特殊污染物进行了 PRB 技术添加剂的实验研究。例如,采用 Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 或不含 Fe 的添加剂进行放射性污染物、重金属、采矿酸水治理等。由此可见,针对 PRB 技术所采用的反应剂种类,其修复过程的控制机理也不同。在采用 PRB 技术修复过程中,控制因素一般有 6 种:化学脱氯、pH 值控制、氧化还原反应、吸附过程及生物增强控制。

PRB 技术的工程设施较简单,安装操作可一次完成,大大降低了修复后期的运转及维护费用。并

且,可根据污染场地特点及治理目标选择相应的修复设计方案,优化修复过程,提高修复效率。但是,该技术也存在一些局限性。与 P&T 技术相比较,工程设施投资较大。抽出处理工程所采用的钻井等设备在污染治理完毕以后还可以用于其他方面,如地下供水、人工回灌等,而渗透性反应墙设施则不具备这一条件。另外,渗透性反应墙修复工程一经投入,其设施就已固定在地下,很难再对治理方案做出修改或改动。

## 4 地下水修复技术综合分析

### 4.1 各种修复技术主要治理目标对比分析

根据国外多年研究总结<sup>[2,4]</sup>,目前 P&T 技术的治理对象主要有 12 种污染物。其典型治理目标为三氯乙烯(TCE),此外还有一些卤化挥发性有机物,如四氯乙烯(PCE)、氯乙烯(VC)等。对于非卤化挥发性有机物 BTEX(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)以及铬、铅、砷等也可采用 P&T 技术进行治理。不同污染物在 P&T 技术应用中所占比例见图 4。

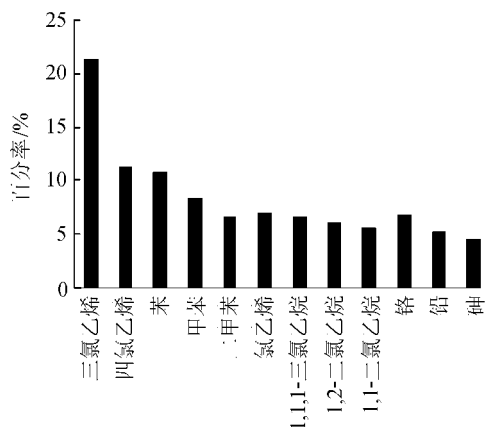


图 4 目标污染物在 P&T 技术应用中所占比例

对于原位修复技术,治理对象主要以卤化挥发性有机物、非卤化挥发性有机物、非卤化半挥发性有机物、卤化半挥发性有机物、BTEX、多环芳烃、杀虫剂以及金属、非金属等为主。其中,AS 技术的治理对象主要以卤化挥发性有机物、非卤化挥发性有机物、非卤化半挥发性有机物及 BTEX 为主。而 PRB 技术则主要用于金属、非金属、卤化挥发性有机物、BTEX、杀虫剂、除草剂以及多环芳烃的治理。不同目标污染物在 AS 技术以及 PRB 技术应用中所占比例见图 5。

### 4.2 各种修复技术修复成本对比分析

基于各种修复技术对不同目标污染物的适用程度不同,现选取 MTBE(甲基叔丁基醚,一种常见汽油添加剂)为以上修复技术共同的治理对象,为综合对比分析各种技术的工程投资、运行成本、治理时间以及修复效果等提供一个统一平台。

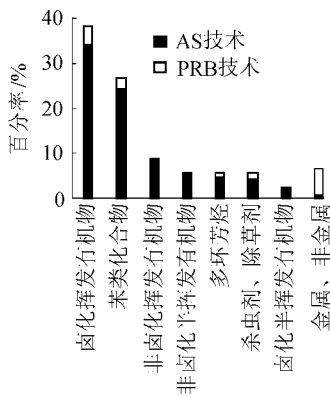


图5 目标污染物在 AS 技术和 PRB 技术应用中所占比例  
 据最新报道<sup>[8]</sup>,在区域调查方面,MNA 技术投资最大,其次为 PRB 技术;在工程设备投资方面,P&T 技术造价最高,而 MNA 技术造价最低;在系统运转维护方面,MNA 技术与 PRB 技术相当,成本最低,而 P&T 技术成本最高;在监测分析方面,MNA 技术花费最高,而 AS 技术花费较低。综合以上各项投资最后得出,P&T 技术修复总成本最高,AS 技术修复总成本最低。在治理时间方面,除了 MNA 技术修复时间较长以外,其他修复技术没有明显优劣之分。其修复效果由好到差依次为:P&T 技术——AS 技术——PRB 技术——MNA 技术。各种修复技术综合对比分析情况见表 1。

表 1 不同修复技术治理 MTBE 的相对修复成本对比

修复技术	区域调查	工程投资	运转维护	监测分析	治理时间	修复效果
P&T	居中	较高	较高	居中	月-年	好
MNA	最高	最低	最低	较高	年	差
PRB	较高	较低	最低	居中	月-年	一般
AS	较低	较低	较低	最低	月-年	一般

注:表中各项修复费用均以相对值表示。

### 4.3 地下水修复技术发展趋势分析

据美国污染治理年度报告<sup>[4]</sup>,自美国开展地下水污染修复以来,P&T 技术的使用比例一直位居榜首。在 1982~2002 年,P&T 技术历年累积使用比例高达 68%,远远超过其他修复技术。其中,修复的污染场地共计 851 个,采用 P&T 技术的场地有 713 个,采用 MNA 技术和 In-Situ 技术的污染场地分别有 201 个和 135 个。其中,对采用多种修复技术的污染场地进行了重复计算。P&T 技术、MNA 技术以及 In-Situ 原位修复技术在 1982~2002 年地下水污染修复中历年累积使用比例见图 6。

但由于 P&T 技术涉及地下水的抽提或回灌,对修复区干扰较大,该技术的使用比例已呈下降趋势。在 P&T 技术开展应用期间,其使用比例已由 90%(1990 年)下降到 40%(2002 年)。而原位修复技术在近年来的理论研究与实际应用中逐步成熟,其使用比例呈逐年递增趋势,已由零(1986 年)迅速上升

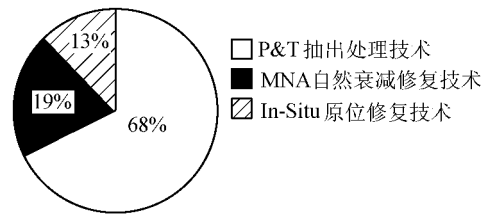


图 6 P&T、MNA、In-Situ 技术的历年累积使用率(1982~2002,U.S.EPA)

至 24%(2002 年)。基于对各种技术修复特点的综合考虑,现提倡将 P&T 技术与 MNA 技术或原位修复技术联合使用,使其进一步提高修复效率。而在美国‘超级基金’<sup>[2]</sup>项目中,P&T 技术与 MNA 技术或原位修复技术的联合使用比例也已由零(1986 年)上升至 18%(1999 年)。

由此可见,地下水原位修复技术以及其他多种修复技术的联合应用已成为当前地下水污染治理发展的主要趋势。

### 参考文献:

- [1] US Environmental Protection Agency. Cleaning up the nation's waste sites:markets and technology trends[M]. Washington DC:National Service Center for Environmental Publications, 2004 50-63.
- [2] US Environmental Protection Agency. Groundwater remedies selected at superfund sites[M]. Washington DC:National Service Center for Environmental Publications, 2002 8-45.
- [3] POPE D,HURT K,WILSON B,et al. Performance monitoring of MNA remedies for VOC in ground water[M]. Washington DC:National Service Center for Environmental Publications, 2004 22-30.
- [4] US Environmental Protection Agency. Treatment technologies for site cleanup:annual status report[M]. Washington DC:National Service Center for Environmental Publications, 2004: 45-53.
- [5] US Environmental Protection Agency. Analysis of selected enhancements for soil vapor extraction[M]. Washington DC:National Service Center for Environmental Publications, 1997: 36-74.
- [6] Battelle Memorial Institute Columbus. Multi-Site air sparging [M]. Columbus: Environmental Security Technology Certification Program 2002 :15-72.
- [7] The Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC) of United States. Permeable reactive barriers lessons learned/new directions [M]. Washington DC: Interstate Technology & Regulatory Council 2005 3-25.
- [8] The Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC) of United States. Overview of groundwater remediation technologies for MTBE and TBA[M]. Washington DC: Interstate Technology & Regulatory Council 2005 26-50.

(收稿日期 2005-05-23 编辑 徐娟)