

[美] 马文·海曼
[美] R. 瑞安·杜邦 著
Marve Hyman
R. Ryan Dupont

四川省污染场地环境修复工程技术中心 / 译

Groundwater and Soil Remediation:
Process Design and Cost
Estimating of Proven Technologies

地下水与土壤修复： 成熟技术的工艺设计 和成本估算

地下水与土壤修复： 成熟技术的工艺设计和成本估算

Groundwater and Soil Remediation:
Process Design and Cost Estimating of Proven Technologies

[美] 马文·海曼 著
[美] R. 瑞安·杜邦

Marve Hyman

R. Ryan Dupont

四川省污染场地环境修复工程技术中心 译

原出版者：ASCE PRESS

著作权合同登记号：图字 01 - 2016 - 6820

Translated and published by China Environment Publishing Group Company Limited with permission from ASCE. This translated work is based Groundwater and Soil Remediation: Process Design and Cost Estimating of Proven Technologies by Marve Hyman and R. Ryan Dupont. © 2001 ASCE. All Rights Reserved. ASCE is not affiliated with China Environment Publishing Group Company Limited or responsible for the quality of this translated work. Translation arrangement managed by RussoRights, LLC on behalf of the American Society of Civil Engineers.

图书在版编目 (CIP) 数据

地下水与土壤修复：成熟技术的工艺设计和成本估算/(美) 马文·海曼, (美) R. 瑞安·杜邦著; 四川省污染场地环境修复工程技术中心译. —北京: 中国环境出版集团, 2019. 7

书名原文: Groundwater and Soil Remediation: Process Design and Cost Estimating of Proven Technologies

ISBN 978-7-5111-4049-4

I. ①地… II. ①马… ②R… ③四… III. ①地下水污染—修复②土壤污染—修复 IV. ①X52②X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 144206 号

出版人 武德凯
责任编辑 李卫民
责任校对 任丽
封面设计 岳帅

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2019 年 7 月第 1 版
印 次 2019 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 24.75
字 数 584 千字
定 价 120.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换。

四川省污染场地环境修复工程技术中心

翻译组成员

组 长：安世泽

副组长：陈 倩 甘 平

组 员：郭 森 秦 佳 林勇征 左 蔚 李方明
庞 亮 于晓冬 杨丽红 孙晋玉 魏 莉
刘 勇 王承俊 王晓东 刘 真 龙高飞
周 维 张济龙 张 颖 杨 放 辛 成
姚雪倩 李美玲 周 磊

译者序

《中共中央 国务院关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见》中要求，扎实推进净土保卫战。全面实施土壤污染防治行动计划，突出重点区域、行业和污染物，有效管控农用地和城市建设用地土壤环境风险。而城市建设用地中，场地土壤、地下水环境质量与人居环境安全休戚相关，是土壤污染防治攻坚战中的难点与重点。

四川省污染场地环境修复工程技术中心在中心学术委员会成员的建议及参与下，秉承土壤、地下水污染协同防治的理念，选择翻译《土壤与地下水修复：成熟技术的工艺设计和成本估算》一书，与业内同行分享。

本书以修复工程设计及成本估算基础开篇，着眼工艺流程的设计与开发，在论述地下水、土壤修复的主要成熟技术之后，以成本估算和生命周期分析结束，可供污染场地修复的从业人员和相关专业学生参考。如作者所言，设计和成本估算是本书的重点，具有很强的实用性，这也是我们选择在现阶段翻译此书的主要原因。

本书的翻译工作，经过中心技术人员及同行在繁忙工作之余细致认真、坚持不懈的努力，历时三年完成。其间经多次校对，甚至为了一个词的准确翻译数天穷究美国环保局（US EPA）的官网资料，至今记忆犹新。

在此，对参与本书翻译出版的翻译组全体成员、中节能大地环境修复有限公司、亿利生态研发设计总院、中国地质大学王鹤立教授课题组以及王建刚、孙峻青、熊振、周伦等同仁表示衷心的感谢！

2019年，随着《土壤污染防治法》的实施及《地下水污染防治实施方案》的出台，我国土壤、地下水污染防治工作进入了新的阶段。衷心希望本书此时的出版，能对污染场地修复工作有所助益，这将对我们的团队莫大激励。

由于译者的经验和水平有限，书中难免存在错漏之处，恳请读者批评指正。



2019年7月

前 言

拉夫运河事件以来，美国人日益关注受污染地下水和土壤修复工作的重要性。《地下水与土壤修复：成熟技术的工艺设计和成本估算》一书探讨了适用于修复的各种技术，提供了结合修复技术进行方案设计的系统方法，并介绍了修复技术的成本估算方法。本书对地下水和土壤修复技术的方法工艺及其应用的描述满足了当前的迫切需求。

本书的主要特点包括：（1）将化工技术与土木工程技术相结合，依据水文地质条件修复地下水与土壤污染；（2）介绍了工艺流程的设计与开发；（3）采用有效的软件进行设计和成本估算；（4）成本估算方法包括对处理方法以及相关工作（如修复、开挖）的估算。

本书介绍的方法一方面可以识别和量化工艺参数，另一方面可以依据有限的地质信息准确估算成本。

本书可以作为从事环境修复工作的工程师和科学家的参考资料。本书的重点是对现行成熟技术的介绍以及如何选择可行的修复方案。本书详细描述了系统设计、控制和过程监控的步骤，以及投资成本和年度费用的估算方法。

目 录

第 1 章 修复过程设计及成本估算基础	1
1.1 成本分析的重要性	1
1.2 自然衰减	2
1.3 竞争性修复技术的选择	3
1.4 工艺设计和成本估算方法	22
第 2 章 修复系统的工艺和概念设计	23
2.1 基本原则	24
2.2 可行性研究和工作计划	25
2.3 可处理性研究	27
2.4 工艺流程图	28
2.5 场地平面图和初步布置图	30
2.6 管线及设备图 (P&ID) 和操作顺序	31
2.7 逻辑图	40
2.8 电脑控制和过程监控	41
2.9 设计依据、权衡分析及初步规范	44
第 3 章 从地下水去除金属	47
3.1 基本原理	48
3.2 化学沉淀	50
3.3 膜分离溶解离子	55
3.4 离子交换	56
3.5 吸附	57
3.6 强制蒸发	58
3.7 主要系统设计参数	58
3.8 金属清除可行性研究	66
3.9 金属清除的成本估算	70
3.10 金属清除工艺的要点	76

第4章	地下水污染的活性炭吸附	78
4.1	活性炭吸附基本原理	78
4.2	吸附等温线	80
4.3	吸附容量的测定方法	80
4.4	穿透曲线	81
4.5	活性炭吸附床的尺寸和使用寿命	81
4.6	有机吸附系统的结构与性能	84
4.7	主系统设计参数	86
4.8	液相吸附可处理性研究	91
4.9	活性炭吸附工艺的成本估算	93
4.10	炭吸附的要点	96
第5章	地下水吹脱	98
5.1	吹脱的基本原理	98
5.2	填料吹脱塔	103
5.3	填料塔的替代	107
5.4	鼓风机的安排和雾分离	110
5.5	调节和液体分布	111
5.6	循环吹脱塔	112
5.7	加热吹脱	112
5.8	尾气减排	114
5.9	主要系统设计参数	120
5.10	地下水吹脱的可行性研究	127
5.11	地下水吹脱的成本估算	127
5.12	地下水吹脱的要点	131
第6章	水化学氧化技术	134
6.1	基本原理	134
6.2	湿式氧化技术与超临界氧化技术	136
6.3	芬顿试剂	137
6.4	氧化剂紫外光联合氧化技术	137
6.5	系统主要设计参数	138
6.6	水化学氧化技术可行性研究	141
6.7	地下水氧化技术的成本估算	142
6.8	水化学氧化技术的要点	143
第7章	生物修复系统	145
7.1	基本原理	145

7.2	水相处理	154
7.3	固相污染物的生物处理	182
7.4	生物修复系统的可行性研究	213
7.5	生物修复系统的成本估算	216
7.6	生物修复技术的要点	225
第8章	土壤通风	229
8.1	土壤气相抽提基本原则	230
8.2	真空制备	232
8.3	气体处理和排放	235
8.4	主要系统设计参数	239
8.5	土壤通风的可行性研究	245
8.6	土壤通风的成本估算	245
8.7	土壤通风的要点	252
第9章	土壤和污泥热处理技术	254
9.1	基本原理	255
9.2	焚烧炉	259
9.3	热解吸设备	263
9.4	供料处理和经热处理后土壤的处理	264
9.5	空气污染控制	264
9.6	热处理系统的主要设计参数	272
9.7	可行性研究与燃烧试验	287
9.8	土壤热处理的成本估算	289
9.9	热处理技术的要点	295
第10章	土壤淋洗	299
10.1	土壤淋洗的基本原则	300
10.2	原位土壤冲洗	301
10.3	土壤淋洗和溶剂萃取	303
10.4	土壤淋洗系统设计参数	310
10.5	土壤淋洗的可治理性研究	318
10.6	土壤淋洗的成本估算	323
10.7	土壤淋洗的要点	325
第11章	稳定化和固化技术	327
11.1	稳定化和固化技术的基本原理	327
11.2	原位固化及区域混合技术	328

11.3	微囊化技术	329
11.4	硅酸类吸附剂	331
11.5	主要系统设计参数	331
11.6	稳定化和固化技术的可行性研究	332
11.7	稳定化和固化的成本估算	333
11.8	稳定化和固化技术的要点	337
第 12 章	成本估算和生命周期分析	339
12.1	基本原理	339
12.2	投资成本	340
12.3	估算年度费用	346
12.4	计算机在成本估算中的应用	351
12.5	生命周期分析	352
12.6	成本估算的要点	356
	第 12 章附录 投资成本和年度费用示例	357
	参考文献	363
	专业名词中英文对照表	379

修复过程设计及成本估算基础

修复工作者备感兴奋的是过去 10 年里新的修复技术得到快速发展，现在场地修复从业者们有更多的修复技术可以选择，包括成熟技术（proven technologies）和新兴技术（emerging technologies）。

虽然本书重点在于介绍成熟技术，但新兴技术在某些章节中将以案例形式加以描述。本书不涉及场地评价与调查（采用自然衰减法作为修复技术时除外），也不涉及修复目标的确定。但本书所涉及的修复设计，是在已经充分掌握场地目标污染物的性质、分布以及浓度的条件下进行的。另外，污染深度以及土壤岩性也是土壤修复系统设计的基础，地下水抽出 - 处理修复设计还需通过建井进行抽水试验的方法获得地下水流速。

1.1 成本分析的重要性

一些辅助工艺设计和成本估算的计算机软件随着新技术的兴起而发展起来。较出名的有来自佐治亚州亚特兰大的建筑系统设计公司（Building Systems Design）的 COMPOSER GOLD 和科罗拉多州恩格尔伍德的塔利斯曼伙伴公司（Talisman Partners Ltd.）的 RACER/ENVEST™。成本控制永远是技术选择中的一个重要因素。确定主要设备的尺寸或额定值是成本核算的关键。若设备规格型号未知，COMPOSER GOLD 和 RACER/ENVEST™ 中的成本估算模块对相关参数取默认值。其结果是修复项目的初步工艺设计，其有助于项目的可行性分析，进而进行成本分析，做工艺比选。

第 3 章至第 11 章的成本估算部分将描述不同 ENVEST 模块的其他信息。每种工艺费用是根据 1989 年以来公布的数据计算的。这些数据目前在可行性研究所需的成本估算中也是有效的。从麦克劳·希尔公司（McGraw-Hill）出版的杂志《化学工程》（*Chemical Engineering*）发布的月度工厂成本指数（plant cost index）看出，自 1989 年以来这些成本增加不超过 10%。

在选择可行的修复方案时，需要及早进行一定的费用分析。美国环保局（US EPA）（1988）指出初始成本比较可基于相对成本。地下水处理的相对成本通常以每单位体积的处理成本（如美元/1 000 L）来表示，而土壤处理的费用则按每吨或每单位体积的处理成本来表示。以这种方式，可以根据相关的处理费用在可行性研究早期筛选出可实施

和有效的技术。

作为正式的可行性研究的一部分，从最初筛选阶段选择的每一个方案都需要完整的成本估算。完整的成本估算可以用传统的估算方法或商业化的修复成本估算计算机程序完成。

传统的估算方法将在第 12 章做详细介绍，包括以下内容（以精度递减的顺序）：（a）确定性估算，（b）系数估算法和（c）使用历史修复总量或单位时间最大修复量数据与待估项目数据的比率法估算。确定性估算一般以已经完成的相当数量的设计为基础。采用系数估算法或比率法估算可以较快达到资金投资需求。

系数估算法是在主要设备成本上乘以一个系数。这个系数涵盖了设备安装和次要设备、管道及支架等方面。主要设备包括塔、罐、换热器、水泵等。正如 Lang（1948）所描述的，总的主要设备费用乘以数值为 3.1 ~ 4.74 的一个系数。系数的取值取决于是否涉及固体或者液体的处理。

Hand（1958）描述了一种适用于每种主要设备的单个系数的更精确的分解方法。Hand 系数表取值范围为 2 ~ 4，参见第 12 章。

当旧的处理过程或设备与正在考虑的新的处理过程或设备类似，且已知旧的处理过程或设备的处理成本和处理能力时，可用比率法来估算成本。用式（1-1）表示：

$$\text{Cost}_n / \text{Cost}_o = (\text{Index}_n / \text{Index}_o) (\text{Size}_n / \text{Size}_o)^{\text{exp}} \quad (1-1)$$

式中，n 代表新，o 代表旧的，Index 指已经考虑通货膨胀的成本指数，exp 是指数，Size 是资产规模。第 12 章会详细描述。整个处理厂的指数在 0.6 ~ 0.8，主要设备类型列出了 12 个指数，从 0.5 到 0.8 不等。详细数据参见 Perry 和 Green 的表 25 ~ 表 49（1984）。

1.2 自然衰减

如果一个场地选择被动处理，那么工作人员必须仔细考虑如何定量计算土壤或地下水的污染源、特征、分布及污染程度，并且量化在无人为干扰的状态下污染物在自然状态下的降解。一种比较成熟的场地管理手段称为自然衰减，在第 7 章有详细论述。本章中自然衰减主要指对地下水影响的评价。本书描述了场地评价、数据处理与解读过程，重点是如何定量计算地下水系统通过物理、化学和生物过程降解污染物的能力。虽然许多文献（Wiedemeier et al., 1996; Wilson et al., 1994）提到了数据收集和分析的方法，可以说明对于一个给定的场地自然衰减的过程正在发生，但是如何将降解监测数据与污染源清除相关决策、污染源剩余寿命估计联系起来并没有阐述。

美国环保局（US EPA）和美国空军（US Air Force）（Dupont et al., 1996, 1998）提出了从数据收集到污染源清除、污染源剩余寿命计算的可行的自然衰减概念，形成了第 7 章自然降解评价过程的基础。这个过程包括：①判断污染羽是否处于稳定状态；②估算污染降解速率；③估计污染源总量；④估算污染源剩余寿命；⑤预测在污染源清除和不清除情况下的长期污染羽行为；⑥决定是否利用自然降解法以及确定给定场地下污染源清除的必要性和影响；⑦制定长期监测策略（如果选择自然衰减法来管理污染羽）。

一旦场地稳态条件已经确定（污染物释放速率等于污染物在地下水含水层中生物和

非生物手段下的降解速率), 剩余的问题就是污染源区域污染物彻底降解或清除所需的时间。量化污染源生命周期非常重要, 因为这关系到确保公众健康和环境保护所需的最终监测时间, 并证明自然衰减的有效性。污染源彻底降解或清除所需的时间(污染源剩余寿命)直接影响修复成本, 同时, 也决定了是否需要对污染进行控制和修复。

如果单凭自然衰减可以实现污染羽控制、污染源较小、现场情况下很快风化(weather), 则可能没有必要做源头处理, 就可以满足规定场地修复时间的要求, 修复成本也可以为业主接受。相反, 如果在源区有大量污染物, 溶解污染羽将在现场存在几十年, 则业主可作出决定, 或由监管机构要求采取污染源主动修复措施, 以减少监测周期, 进而也将减少漫长自然衰减过程中所连带的环境责任。

第7章中描述的自然衰减方法可用于是否进行污染源治理以及涉及治理活动对场地污染计划修复时间影响的管理决策。如果从整个项目生命周期成本-收益管理的角度分析, 需要对污染源进行治理, 那么就可以考虑实施本书描述的各种土壤和地下水处理技术。当然对于一个给定的场地, 最佳污染源修复技术的选择要基于该场地的特定条件和污染物的特性限制进行。

1.3 竞争性修复技术的选择

1.3.1 工艺选项

当场地需要人为干预修复时, 需要从考虑适用的工艺方案开始。美国环保局1988年提出了一般响应行动(general response actions), 系统列出了可能适用的工艺选项。不同的工艺按照技术类型来分。例如, 空气吹脱和活性炭吸附(以下简称炭吸附)归为地下水的物理处理技术类型; 化学沉淀和紫外线氧化归为化学处理。在编制污染场地一般响应行动时, 最好的方法是将原位与异位处理分开, 将地下水和土壤处理分开。一些技术可以用于两种介质(例如, 生物修复既可以用于地下水, 也可以用于土壤)。表1-1列出了被有机物和金属污染的场地的一般响应行动范例。美国环保局(US EPA, 1994)和美国陆军环境中心(US Army Environmental Center, 1997)给出了一般响应行动的适用工艺选项的信息(表1-2)。

关于工艺选项的更多信息见计算机程序ReOpt(remediation option的缩写)[贝特乐纪念研究所(Battelle Memorial Institute), 1995]。ReOpt介绍了100多种工艺, 给出了400多种污染物的物理参数值, 并给出了流程图。ReOpt可以从EnviroWin软件(伊利诺斯州芝加哥), 或从Battle出版社(俄亥俄州哥伦布)获取。有关清除碳氢化合物污染的工艺选择问题, 美国石油学会(American Petroleum Institute, 1990)是一个很好的资料来源。

表 1-1 一般响应行动和相关技术类型及工艺选择

一般响应行动	修复技术类型	工艺选择	主要解决的场地问题
无行动	无	无	
制度行动	出入限制	围挡	减少人体暴露
		契约限制	
	监测	地下水监测	指示地下水是否受影响

续前表

一般响应行动	修复技术类型	工艺选择	主要解决的场地问题
阻隔封锁	覆盖	合成膜材料	减少挥发的暴露途径和减少浸出
		黏土	
		沥青/混凝土	
		多介质覆盖	
	水平屏障	水泥浆注入	减少向地下水渗滤
	垂直屏障	泥浆墙	减少渗滤和侧向迁移
板桩			
灌浆帷幕			
原位土壤处理	物理过程	固化	减少浸出可能
		土壤通风	去除污染物
		蒸气吹脱	
	化学过程	土壤冲洗	去除、破坏污染物
	生物过程	生物降解	破坏有机污染物
	热处理	玻璃化	破坏、去除或固定污染物
射频加热		去除污染物	
土壤去除、处理和处置	挖掘	反铲挖土机	去除污染物
		戽斗钻	
	物理过程	土壤淋洗	去除污染物
		通风曝气	去除挥发性污染物
	化学过程	稳定化	减少污染物的迁移性或毒性
	生物处理	好氧生物反应器	破坏有机污染物
		厌氧生物反应器	
		土地农耕	
	热处理	低温吹脱	去除挥发性或半挥发性污染物
		焚烧	去除和/或破坏污染物
	处置	填埋	减少或消除对敏感人群的暴露
		回填	
沥青融化			

更多工艺路线的网络信息来源可参考 http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html。这个网页也提供工艺路线筛选矩阵。Katz (1997) 列出了其他网络资源。约翰·威立国际出版公司 (John Wiley and Sons) 向用户提供修复数据图书馆 RIMS2000 (修复信息管理系统), 可以通过 www.enviroglobe.com 登录。全球环境和技术基金 (弗吉尼亚南达尔) 维护和管理着一个环境技术数据库, 叫作 TechKnow™, 其中涵盖多种修复工艺, 可以在 GNET™ 的网站上进行搜索 (www.gnet.org)。

1.3.2 工艺选择比较

美国《综合环境反应、补偿与责任法》(CERCLA) 场地 (超级基金场地) 要求对技术有效性和成本进行筛选 (US EPA, 1988)。当有多种评估选项时, 一般基于相对成本 (单位成本) 的筛选法要好于基于总成本的筛选法。

表 1-2 处理技术筛选矩阵

注意：特定场地与污染物特性会限制表中所列技术和处理方法的适用性和有效性。此矩阵本质上是乐观的，应该注意参考相应的测试章节，借助更多信息以识别潜在技术是否适用。

土壤、沉积物和淤泥	发展状态	可获得性	残留物的产生	处理序列（不包括尾气处理）	处理的污染物				系统可靠性与维护	清理时间	总成本	运行维护或资本密集型	
					挥发性有机物 (VOC)	半挥发性有机物 (SVOC)	燃料	无机物					爆炸物
3.1 ^① 原位生物处理													
4.1 生物降解	全尺度	■	无 ^②	无	■	■	△	■	△	△	●	运行维护型	
4.2 生物通风	全尺度	■	无	无	■	■	△	I	■	●	■	都不用	
4.3 白腐真菌	中试	△	无	无	△	△	△	■	△	△	●	运行维护型	
3.2 原位物理化学处理													
4.4 气体压裂（增强）	中试	△	无	是	●	●	●	●	■	NA	■	都不用	
4.5 土壤冲洗	中试	■	液体	无	■	●	■	△	●	△	I	运行维护	
4.6 土壤蒸气抽提（原位）（soil vapor extraction, SVE）	全尺度	■	液体	无	■	●	△	△	■	●	■	运行维护	
4.7 固化/稳定化	全尺度	■	固体	无	△	●	△	■	■	■	■	资本密集型	
3.3 原位热处理													
4.8 热增强的土壤蒸气抽提（thermally-enhanced SVE）	全尺度	●	液体	无	●	■	△	△	●	■	●	都用	
4.9 玻璃化	中试	△	液体	无	●	●	■	△	△	■	△	都用	
3.4 异位生物处理（假设挖掘）													
4.10 堆肥化	全尺度	■	无	无	■	●	△	■	■	●	■	都不用	
4.11 控制的固相生物处理	全尺度	■	无	无	■	●	△	■	■	●	■	都不用	
4.12 土地农耕	全尺度	■	无	无	■	●	△	■	■	△	■	都不用	
4.13 泥浆相生物处理	全尺度	●	无	无	■	●	△	■	●	●	●	都用	

① 表 1-2 摘录自美国环保局报告《修复技术筛选矩阵和指南》（Remediation Technologies Screening Matrix And Reference Guide）第 2 版，序号依从原报告。——译者注。
 ② “无”指没有残留物产生。——译者注。

续前表

	发展状态	可获得性	残留物的产生	处理序列 (不包括尾气处理)	处理的污染物				系统可靠性与维护	清理时间	总成本	运行维护或资本密集型
					挥发性有机物 (VOC)	半挥发性有机物 (SVOC)	燃料	无机物				
3.5 异位物理/化学处理 (假设挖掘)												
4.14 化学还原/氧化	全尺度	■	固体	是	●	●	●	■	△	■	●	都不用
4.15 去卤化 (base-catalyzed decomposition, BCD)	全尺度		蒸气	无	●	■	△	△	△	I	I	I
4.16 去卤化 (羟基乙酸盐)	全尺度	●	液体	无	●	■	△	△	△	△	△	都用
4.17 土壤淋洗	全尺度	●	液体、固体	是	●	■	■	■	■	■	●	都用
4.18 异位土壤蒸气抽提	全尺度	■	液体	无	■		△	△	△	●	■	都不用
4.19 固化/稳定化	全尺度	■	固体	无	△	●	△	■	△	■	■	资本密集型
4.20 溶剂提取 (化学提取)	全尺度	●	液体	是	●	■	●	△	△	△	△	都用
3.6 异位热处理 (假设挖掘)												
4.21 高温热解吸	全尺度	■	液体	是	●	■	●	●	△	■	●	都用
4.22 热空气清污	中试	●	无	无	△	△	△	△	△	■	■	都用
4.23 焚烧	全尺度	■	液体、固体	无	●	■	■	■	△	■	△	都用
4.24 低温热解吸	全尺度	■	液体	是	■	●	■	■	△	■	■	都用
4.25 露天燃烧/露天爆炸	全尺度	■	固体	无	△	△	△	■	△	■	■	都用
4.26 热解	全尺度	△	液体、固体	无	●	■	△	△	I	■	△	都用
4.27 玻璃化	全尺度	●	液体	无	●	●	●	●	△	●	△	都用
3.7 其他处理												
4.28 挖掘、收回和异地处置	NA	■	NA	无	●	●	●	●	●	■	△	都不用
4.29 自然衰减	NA	■	无	无	■	■	△	△	△	△	■	都不用

续前表

	发展状态	可获得性	残留物的产生	处理序列 (不包括尾气处理)	处理的污染物					系统可靠性与维护	清理时间	总成本	运行维护型或资本密集型
					挥发性有机物 (VOC)	半挥发性有机物 (SVOC)	燃料	无机物	爆炸物				
地下水、地表水和渗滤液													
3.8 原位生物处理													
4.30 协同代谢	中试	△	无	无	■	■	●	△	●	△	●	●	运行维护型
4.31 硝酸盐增强	中试	△	无	无	■	■	■	△	●	△	●	■	都不用
4.32 采用空气喷射手段增加地下水中的氧气	全尺度	■	无	无	■	■	■	△	●	△	●	■	都不用
4.33 添加过氧化氢以增加地下水中的氧气	全尺度	■	无	无	■	■	■	△	●	△	●	●	运行维护型
3.9 原位物理/化学处理													
4.34 空气喷射	全尺度	■	蒸气	是	■	△	■	△	△	△	■	■	都不用
4.35 定向井 (增强)	全尺度	△	NA	是	●	●	●	●	●	●	■	I	都不用
4.36 双向抽提	全尺度	■	液体、蒸气	是	■	△	■	△	△	△	●	●	运行维护型
4.37 自由相回收	全尺度	■	液体	无	△	■	■	△	△	△	■	■	都不用
4.38 热水或蒸气冲洗/吹脱	中试	●	液体、蒸气	是	●	■	■	△	△	△	■	●	资本密集型
4.39 水力压裂 (增强)	中试	I	无	是	●	●	●	●	●	●	■	●	都不用
4.40 被动处理墙	中试	△	固体	无	■	■	●	■	■	I	△	I	资本密集型
4.41 泥浆墙 (阻隔)	全尺度	■	NA	NA	●	●	●	●	●	■	■	■	资本密集型
4.42 真空蒸气抽提	中试	△	液体、蒸气	无	■	■	●	I	△	■	●	●	资本密集型
3.10 异位生物处理 (假设抽出)													
4.43 生物反应器	全尺度	■	固体	无	■	■	■	△	●	△	NA	■	资本密集型