

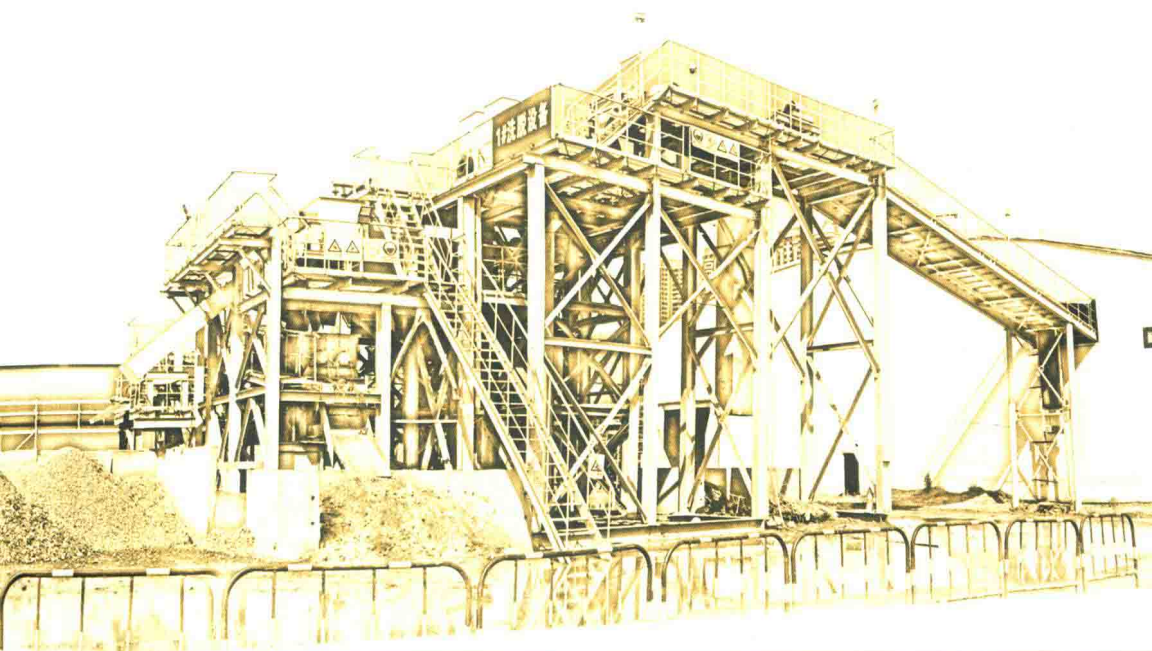
土壤及地下水 修复工程设计

第2版

Practical Design Calculations for
Groundwater and Soil Remediation, Second Edition

[美] 杰夫·郭 (Jeff Kuo) 编著

北京建工环境修复股份有限公司翻译组 译



土壤及地下水修复工程设计

(第2版)

Practical Design Calculations for Groundwater and
Soil Remediation, Second Edition

[美] 杰夫·郭 (Jeff Kuo) 编著
北京建工环境修复股份有限公司翻译组 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书内容丰富翔实,涵盖了场地修复工程计算的多个方面,包括场地调查、反应器设计、土壤和地下水修复等的计算,是一本具有指导意义的设计计算说明书。

场地修复工程涉及地质、水文、化学、土木、环境等学科,这使得具有单一学科背景的人员难以完成系统的场地修复设计计算。本书“烹饪书式”的写作手法解决了以上难题。本书从原理引出公式,再过渡到工程案例计算,循序渐进,使非相关学科背景的人员也能很快读懂,适合作为地下水和土壤修复领域的工程师们的工作手册使用,也可作为高年级大学生或环境修复方向的研究生们的补充教材或参考书使用。

Jeff Kuo: Practical Design Calculations for Groundwater and Soil Remediation, Second Edition, ISBN 1-46658-523-2

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, an imprint of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;

Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。本书中文简体翻译版授权由电子工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2015-4559

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

土壤及地下水修复工程设计:第2版/(美)杰夫·郭(Jeff Kuo)编著;北京建工环境修复股份有限公司翻译组译. —北京:电子工业出版社,2016.11

书名原文:Practical Design Calculations for Groundwater and Soil Remediation, Second Edition

ISBN 978-7-121-30135-3

I. ①土… II. ①杰… ②北… III. ①土壤污染—污染防治 ②地下水污染—污染防治 IV. ①X53②X523.06

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第248378号

责任编辑:李敏

印刷:三河市华成印务有限公司

装订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:720×1000 1/16 印张:18.5 字数:342千字

版次:2016年11月第2版

印次:2016年11月第1次印刷

定价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至zits@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:010-88254753或limin@phei.com.cn。

北京建工环境修复股份有限公司翻译组成员

组 长：高艳丽

副组长：李书鹏

组 员：杨乐巍 李静文 刘 鹏 韦云霄 王文峰

刘 阳 徐海珍 于宏旭

译者序

在我国工业化、城市化和农业集约化的快速发展过程中，大量人为排放的污染物进入土壤和地下水，造成的环境影响日益凸显。土壤和地下水污染已成为限制我国经济结构转型、威胁粮食和饮用水安全、危害人民群众身体健康、阻碍社会和经济可持续发展的重大隐患。根据《国家环境保护“十三五”规划》、《土壤污染防治行动计划》等文件，土壤和地下水污染修复工作是目前亟待解决的突出环境问题之一，未来市场潜力巨大。

20世纪80年代以来，欧美发达国家逐步推进污染场地修复工作，在土壤和地下水的治理方面积累了丰富的经验。我国的场地修复起步较晚，直至2007年，国内以北京宋家庄交通枢纽污染场地为代表的修复工程项目开始实施，我国场地修复正式进入大规模的工程化阶段。2007—2015年，国内公开招标的工业场地修复工程类项目近150个。但是，目前国内污染场地修复技术的研究与应用处于起步阶段，缺乏将多领域、交叉学科的理论知识应用于工程实践的经验，设计工作也缺乏系统性和规范性。译者认为，其中的原因包括但不限于以下两点。首先，在中文资源检索范围内，各类图书、论文等都对污染场地修复的现有或前沿知识理论体系有了比较全面、详细的介绍，奠定了修复行业发展的基础，但均难以指导实际工程应用。其次，污染场地修复工程涉及环境、土木、地质、水文、化学、生物、材料、机械等领域，若没有经过专门的综合培训，技术/设计人员很难独立完成一整套方案的设计或计算工作。

一方面，污染场地修复工作任重而道远；另一方面，修复工程设计缺乏相关的指导。如何解决“供”、“需”矛盾，提高从业人员的设计水平，确保设计质量、

效率及可行性是我们一直思考并致力于解决的问题。译者在杰夫·郭的 *Practical Design Calculations for Groundwater and Soil Remediation* 中找到了答案,并决定翻译此书,与行业同仁或学生共享。该书的特点与各章节主要内容已在内容简介和第1章中介绍,在此不再赘述。

2013年6月,在李书鹏、马骏、杨乐巍、张秋子、于宏旭、徐海珍、王翔等同仁的努力下,《土壤及地下水修复工程设计》中文版第1版出版,并获得了广大读者的一致好评。2014年,原著第2版一经面世后,北京建工环境修复股份有限公司旋即组织翻译小组,开展此书的翻译工作。此外,为方便广大读者阅读与使用,在征得原著作者同意的前提下,译者们将书籍中的相关公式、经验参数、案例中的美制单位全部统一换算为国际标准单位。为了确保书籍翻译的专业性、计算的准确性,翻译组进行了反复多次的校对、验算工作,为此付出了大量宝贵的时间和精力。

在此,对参与本书翻译与出版的同仁表示衷心的感谢!

如果本书对污染场地修复的业内同仁或有志于从事修复事业的学生有所帮助,译者将感到莫大的欣慰。由于翻译的水平和时间有限,文中难免存在错漏,恳请读者指正和原谅。

译者

2016年9月

作者序

近年来，人们对危险废弃物管理行业的关注已从诉讼、场地评价放眼至场地修复。场地修复阶段工作繁多，需要各方充分协调，通力合作。因此，修复专业人员的专业背景往往多种多样——地质学、水文学、化学、微生物学、气象学、毒理学和传染病学等科学学科，以及化学、机械、电力、土木、环境等工程学科。不尽相同的教育背景，使得他们进行或审核场地修复设计计算的能力差异很大。对他们中的一些人来说，做出精准的设计计算似乎是一个难以完成的任务。

绝大多数的场地修复书籍仅给出了描述性的修复措施，在我看来，还没有一本书能提供具有指导意义的设计计算说明。应土壤和地下水修复领域同行们——受聘于工业行业、咨询公司、律师事务所和管理部门的现场工程师、科学家和法律专家，以及高校在校生的现实需要，特编此书。本书涵盖了修复领域中关键设计计算工作的重要方面，并提供了相关实用的工作信息，这些信息均来自前人著作文献及我个人在咨询和教学工作中的亲身实践经验。本书也可以作为打算从事场地修复领域工作的本科生或研究生的教科书或参考书。我真挚地希望，该书能成为场地修复领域专家和学生们有用工具。

本书在 1999 年发行了第 1 版，距今已有 15 年的时间。此间我收到了来自世界各地读者的反馈，在此我表示真诚的感谢。在被多次鼓动之后，我最终完成了第 2 版的编写。我真挚地希望，该书能成为场地修复领域人员的有用工具。如果您有什么意见或建议，欢迎来信至我的邮箱 jkuo@fullerton.edu。

最后，请允许我借此机会感谢洛杉矶郡卫生区的 Tom Hashman 和 Ziad El Jack，他们为原稿修订提出了许多宝贵意见。

作者简介

杰夫·郭 (Jeff Kuo) 于 1995 年受聘于加利福尼亚州立大学 (位于美国加州富勒顿) 土木与环境工程系, 在此之前, 他已在环境工程领域从业十余载。他在地下水科技股份有限公司 (现在的 Flour-GTI)、戴姆斯摩尔公司 (Dames & Moore)、詹姆斯·蒙哥马利咨询工程公司 (现在的 Montgomery-Watson)、南亚塑胶公司和洛杉矶郡卫生区的工作中积累了丰富的从业经验。杰夫·郭在环境工程领域的实践经验包括: 空气吹脱装置、活性炭吸附器、土壤气相抽提系统、火焰/催化焚烧炉及土壤和地下水修复生物系统的设计与安装; 场地评价和环境中有毒物质的归趋分析; 填埋场和超级基金场地的修复调查、可行性研究工作; 应对日趋严格的无组织排放要求的特殊设计; 污水处理系统的尾气排放; 污水处理。此外, 他还完成了多项研究: 卤代芳烃的超声波脱氯、粉剂/菌剂在多孔介质内的迁移、沥青的生物可降解性、复合矿物氧化物的表面特征、活性炭吸附动力学、污水过滤、离子交换树脂的三氯甲烷生成势、紫外消毒、连续性氯化、硝化、脱硝、纳米粒子去除目标化合物、过硫酸盐氧化难降解化学制品、污水微波氧化、垃圾填埋气回收利用、温室气体和甲烷排放的控制技术和雨水径流处理。

杰夫·郭在“国立”台湾大学取得化学工程学士学位, 在美国怀俄明州立大学取得化学工程硕士学位, 后在南加利福尼亚州立大学获得石油工程硕士学位及环境工程的硕士、博士学位。杰夫·郭是加利福尼亚注册土木工程师、注册机械工程师、注册化学工程师。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 背景和目标	1
1.2 本书结构	2
1.3 如何使用本书	3
第 2 章 场地评价及修复调查	4
2.1 概述	4
2.2 污染程度的确定	6
2.2.1 质量和浓度关系	6
2.2.2 储罐移除或污染区域挖掘产生的土壤量	16
2.2.3 包气带中污染土壤的量	19
2.2.4 汽油中各组分的质量分数和摩尔分数	23
2.2.5 毛细带高度	25
2.2.6 计算自由漂浮相的质量和体积	27
2.2.7 确定污染范围——一个综合计算案例	29
2.3 土壤钻孔及地下水监测井	32
2.3.1 土壤钻孔的钻屑量	32
2.3.2 填料和膨润土密封材料	33
2.3.3 地下水采样的井体积	35
2.4 不同相态中污染物的质量	36
2.4.1 自由相与气相的平衡	36

2.4.2	液-气平衡	40
2.4.3	固-液平衡	44
2.4.4	固-液-气平衡	48
2.4.5	污染物在不同相中的分配	50
	参考文献	59
第3章	污染羽在含水层和土壤中的迁移	60
3.1	概述	60
3.2	地下水运动	61
3.2.1	达西定律	61
3.2.2	达西流速和渗流速度	62
3.2.3	固有渗透率与渗透系数的比较	64
3.2.4	导水系数、给水度和释水系数	67
3.2.5	确定地下水径流的水力梯度和方向	69
3.3	地下水抽水	70
3.3.1	承压含水层的稳态流	70
3.3.2	非承压含水层的稳态流	73
3.4	含水层试验	76
3.4.1	泰斯 (Theis) 方程	76
3.4.2	Cooper-Jacob 直线法	78
3.4.3	距离-降深方法	80
3.5	溶解羽的迁移速度	82
3.5.1	对流-弥散方程	82
3.5.2	扩散系数和弥散系数	83
3.5.3	地下水迁移的阻滞因子	88
3.5.4	溶解羽的迁移	90
3.6	包气带污染物的迁移	93
3.6.1	包气带中的液体运动	93
3.6.2	包气带中气体扩散	95
3.6.3	包气带中气相迁移的阻滞因子	97
	参考文献	99

第 4 章 物质平衡概念和反应器设计	101
4.1 概述	101
4.2 物质平衡概念	102
4.3 化学动力学	104
4.3.1 速率方程	105
4.3.2 半衰期	107
4.4 反应器类型	109
4.4.1 序批式反应器	110
4.4.2 连续流搅拌式反应器 (CFSTR)	114
4.4.3 活塞流反应器 (PFR)	116
4.5 确定反应器尺寸	118
4.6 反应器组合	120
4.6.1 串联反应器	121
4.6.2 并联反应器	127
第 5 章 包气带土壤修复	133
5.1 概述	133
5.2 土壤气相抽提	133
5.2.1 土壤通风技术介绍	133
5.2.2 抽提气体浓度	134
5.2.3 影响半径和压强分布	143
5.2.4 气体流量	146
5.2.5 污染物去除速率	151
5.2.6 清理时间	154
5.2.7 温度对 SVE 的影响	158
5.2.8 气体抽提井的数量	159
5.2.9 真空泵 (风机) 的规格	160
5.3 土壤洗脱/溶剂浸提/土壤冲洗	162
5.3.1 土壤洗脱 (Soil Washing) 技术介绍	162
5.3.2 土壤洗脱系统设计	162
5.4 土壤生物修复	166

5.4.1	土壤生物修复技术介绍	166
5.4.2	水分需求量	167
5.4.3	营养物需求量	168
5.4.4	氧气需求量	170
5.5	生物通风	172
5.5.1	生物通风技术介绍	172
5.5.2	生物通风技术设计	173
5.6	原位化学氧化	175
5.6.1	原位化学氧化技术介绍	175
5.6.2	常用氧化剂	175
5.6.3	氧化剂需求量	176
5.7	热裂解	179
5.7.1	热裂解技术介绍	179
5.7.2	焚烧单元设计	180
5.7.3	危险废物焚烧的法规要求	181
5.8	低温加热解吸	183
5.8.1	低温加热解吸技术介绍	183
5.8.2	低温加热解吸技术设计	184
	参考文献	186
第6章	地下水修复	187
6.1	概述	187
6.2	地下水抽出	188
6.2.1	降落漏斗	188
6.2.2	捕获区分析	192
6.3	活性炭吸附	199
6.3.1	活性炭吸附技术介绍	199
6.3.2	吸附等温线和吸附容量	200
6.3.3	活性炭吸附系统设计	202
6.4	空气吹脱	206
6.4.1	空气吹脱技术介绍	206
6.4.2	空气吹脱系统设计	207

6.5 异位生物修复	212
6.5.1 异位生物修复技术介绍	212
6.5.2 地上生物修复系统设计	212
6.6 原位地下水修复	214
6.6.1 原位生物修复技术介绍	214
6.6.2 基于增加溶解氧的强化生物降解	214
6.6.3 基于添加营养物质的强化生物降解	218
6.7 空气注入	219
6.7.1 空气注入技术介绍	219
6.7.2 空气注入的增氧效果	219
6.7.3 空气注入压力	221
6.7.4 空气注入供电要求	223
6.8 生物曝气	224
6.9 化学沉淀法去除重金属	225
6.10 原位化学氧化	226
6.11 高级氧化工艺	228
参考文献	230
第7章 VOCs 富集气体处置	231
7.1 概述	231
7.2 活性炭吸附	231
7.2.1 活性炭吸附技术介绍	231
7.2.2 颗粒状活性炭吸附系统规模设计	232
7.2.3 吸附等温线与吸附量	232
7.2.4 活性炭吸附器的常用横截面积和高度	235
7.2.5 计算活性炭吸附器的污染物去除速率	237
7.2.6 更换(或再生)频率	238
7.2.7 活性炭需求量(现场再生)	239
7.3 热氧化	239
7.3.1 气体流量与温度的关系	240
7.3.2 气体的热值	241
7.3.3 稀释空气	243

7.3.4 助燃空气	245
7.3.5 补充燃料用量	247
7.3.6 燃烧室体积	248
7.4 催化焚烧	250
7.4.1 稀释空气	250
7.4.2 补热需求	251
7.4.3 催化反应床的体积	252
7.5 内燃机	253
7.6 土壤生物滤床	254
参考文献	255
案例索引	256
专业名词中英文对照	262

概 述

1.1 背景和目标

从 20 世纪 70 年代中期开始，随着公众的关注，美国颁布了一系列环境法规，危险废弃物管理业务得到了稳定的增长。在这个时期的大部分时间里，各方花费了大量的时间和经费研究污染场地，其中大部分用于确定财政责任方，然而，近些年来关注的焦点从诉讼和场地评价转移到了修复工程上。场地修复通常需要多个阶段来实现，并需要多学科协同努力。因此，修复专业人员的专业背景往往多种多样——地质学、水文学、化学、微生物学、气象学、毒理学和传染病学等科学学科，以及化学、机械、电力、土木、环境等工程学科。不尽相同的教育背景，使得他们进行或审核场地修复设计计算的能力差异很大。对他们中的一些人来说，做出精准的设计计算似乎是一件难以完成的任务。

由于土壤性质和地下的地质、水文特征极大地影响着一个给定技术的可实施性和有效性，土壤和地下水修复比传统的水处理、污水处理更为复杂。随着修复技术的不断发展，受过正规训练的修复专业人员的短缺情况进一步加剧。虽然最新的设计信息在文献上零星出现过，但通常是纯理论性的，很少能提供实际应用的例证。此外，大部分关于场地修复的书籍仅仅提供对修复技术叙述性的描述。以作者的观点，目前尚没有一本书对阐述设计计算提供有帮助的指导。

选择一个合适的修复方案是由具体的场地情况决定的。在做出一个正确的决定之前，人们需要了解每个技术的适用性和局限性。与了解一个修复技术是如何工作相比，更重要的是我们需要认识到为什么这个技术不适用于当前的污染场地。

可以这样说,若没有适当的培训,环境专业人员只能努力地做无用的重复性工作,并在他们的设计计算中犯错。本书涵盖了土壤和地下水修复领域主要设计计算的重要方面,同时提供了来自文献和作者自己经验的实用的、有重大作用的工作信息。丰富的实际案例阐述了修复设计计算的应用,其中很多案例旨在帮助读者建立正确的观念和常识。这本书的编写是为了给在土壤和地下水修复领域相关的咨询公司、律师事务所和监管机构从业的现场工程师、科学家和法律专家解决当前的需求;同时,本书也可以作为打算从事场地修复领域工作的本科生或研究生的教科书或参考书。

1.2 本书结构

除了概述章节,本书分为以下6个章节。

第2章 场地评价及修复调查。本章举例说明了在场地评价和修复调查过程中需要的工程计算。本章以简单的计算开始,计算污染土壤挖掘量、包气带中剩余受污染的土壤量及含水层中污染羽的尺寸。本章也包括通过必要的计算,确定污染物在不同相态间的质量分配,这对修复系统的设计和实施至关重要。

第3章 污染羽在含水层和土壤中的迁移。本章介绍了如何估算地下水运动和污染羽迁移的速率。读者也可学习如何解释含水土层测试数据和估计地下水污染羽的年代。

第4章 物质平衡概念和反应器设计。本章首先介绍了物质平衡概念,然后介绍了反应动力学及反应器的类型、结构和尺寸。读者将学会如何为专门的应用实践确定速率常数、去除率、反应器的优化组合,需要的停留时间及反应器尺寸。

第5章 包气带土壤修复。本章对于常用的原位和异位土壤修复技术,如土壤气相抽提、土壤清洗和土壤生物修复、原位化学氧化、低温热脱附、热裂解等,提供了重要的设计计算。以土壤气相抽提为例,本书将指导读者通过设计计算确定影响半径、井距、空气流量、抽提污染物浓度、温度对抽提蒸气流量的影响、净化时间及真空风机规格。

第6章 地下水修复。本章以捕获区和优化井距的设计计算开始,其余部分集中在常用的原位和异位地下水修复技术的设计计算,包括活性炭吸附、空气注入和吹脱、原位/异位生物修复、空气曝气、生物曝气、化学沉淀、原位化学氧化及高级氧化工艺。

第7章 VOCs 富集气体处置。污染土壤和地下水修复常导致有机污染物迁移至空气相。空气排放控制策略的制定和实施是整个修复计划的主要组成部分。本章举例说明了常用的尾气治理技术的设计计算，包括活性炭吸附、直接焚烧、催化焚烧、内燃机焚烧及生物过滤的设计计算。

1.3 如何使用本书

本书的结构编排全面地覆盖了常用的土壤及地下水修复技术，以用户友好的“烹饪书”风格进行编写。在翻译过程中，译者将整本书采用的美国通用单位换算为了国际单位制（SI 制），避免了读者不断进行单位换算。在设计公式之后提供了具体案例，其中一些案例用于说明重要的设计概念。使用本书最好的方法之一是首先跳过问题描述和讨论，阅读标题浏览全书，当遇到相关设计计算之后再详细翻阅相关具体问题。