

「十五」国家科技攻关计划项目
《重大环境问题对策与关键支撑技术研究》系列丛书

污染场地环境风险评价 与修复技术体系

TECHNOLOGIES ON ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT AND
REMEDIATION OF CONTAMINATED SITES

李广贺 李发生 张旭 刘志全 等著
吴龙华 陈吉宁 何江涛 赵勇胜

中国环境科学出版社

“十五”国家科技攻关计划项目
《重大环境问题对策与关键支撑技术研究》系列丛书

污染场地环境风险评价与 修复技术体系

李广贺 李发生 张旭 刘志全 等著
吴龙华 陈吉宁 何江涛 赵勇胜

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

污染场地环境风险评价与修复技术体系/李广贺等著. —北京:
中国环境科学出版社, 2010.1

(“十五” 国家科技攻关计划项目系列丛书)

ISBN 978-7-5111-0138-9

I. 污… II. 李… III. ①场地—环境污染—风险分析 ② 场
地—环境污染—污染防治 IV. X820.4 X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 217853 号

策 划 沈 建
责任编辑 沈 建
责任校对 刘凤霞
封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2010 年 1 月第 1 版
印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 14.75
字 数 330 千字
定 价 50.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

“十五” 国家科技攻关计划项目
《重大环境问题对策与关键支撑技术研究》系列丛书

领导小组成员名单

组 长：吴晓青

副组长：赵英民 尹 改 罗 毅

成 员：孟 伟 高振宁 张剑鸣 刘志全 刘舒生

魏晓琳 王泽林

编著委员会人员名单

组 长：赵英民 孟 伟

成 员：罗 毅 刘舒生 魏晓琳 王泽林 冯 波

王开宇 王金南 段 宁 张世秋 柴发合

欧阳志云 王长永 黄业茹 李广贺 王 琪

郑丙辉 康玉峰 高增林 郭振仁 丁一汇

本书编著委员会名单

李广贺 李发生 张旭

刘志全 吴龙华 陈吉宁

何江涛 赵勇胜 杜晓明

贾建丽 张应华 宋静

李绪谦 徐慧纬 梁玉婷

序 言

国家“十五”科技攻关计划项目“重大环境问题对策与关键支撑技术研究”，是在我国环境总体形势依然十分严峻，生态系统和环境质量恶化、核和电磁辐射污染等重大环境问题日益凸显的社会大背景下设立的。2003年，在原国家环保总局科技标准司的组织领导下，中国环境科学研究院联合了20余家在环境领域具有较强影响的科研和教学单位，开始了“重大环境问题对策与关键支撑技术研究”项目研究。该项目设立了15个课题，着重研究我国环境领域急需的管理政策、管理手段和相关支撑技术。

通过近3年的研究，项目组完成了项目计划任务书设定的总体目标和任务，提出了一系列重大环境技术政策，为完善国家环境技术政策体系和环境管理决策提供了支持；建立了区域大气污染物、面向水生态安全的流域水污染物总量控制理论与技术方法体系，为我国实施污染物总量控制管理制度提供了科学依据和技术支持；构建了区域生态环境质量及生物多样性评估理论与方法体系，为我国生态保护管理提供了技术支撑；突破了一批重大环境监控技术，为我国环境污染控制和监督管理提供了可操作手段和工具。本项目建立了18项具有国际水平的重大环境技术（体系），取得了20项重大环境科技成果，形成了8项技术标准，52项技术导则与规范，16项技术指南，以及若干技术政策、战略研究专题报告，大大提升了我国环境管理的整体技术水平，为“十一五”期间环境管理提供了强有力的科学技术支撑。

本丛书全面总结、归纳了国家“十五”科技攻关计划项目“重大环境问题对策与关键支撑技术研究”在重要环境政策、污染防治管理支撑技术、生态保护管理支撑技术、环境监管技术等领域所取得的关键技术和重大成果，同时对成果转化和推广应用前景进行了详细的分析和评估，总结了项目组织管理过程中得到的宝贵经验，分析了项目研究中存在的问题，并对今后的研究提出了技术和组织管理方面的建议。

本丛书涉及内容大多是国家当前重要的环境保护技术政策和环境管理制度。在当前推进环境保护历史性转变、环保工作进入国家政治经济社会生活主干线、主战场和大舞台的重要历史时期，该丛书的出版将对我国制定新的环境技术政策、完善环境管理制度、

理顺环境保护管理体制起到很好的推动作用，使环保科技在环保工作中真正发挥先导性、基础性、支撑性和保障性作用，同时对今后我国环保科学技术的进一步研究和创新提供宝贵的经验。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。环境问题的复杂性决定了环境科技的重要性和艰巨性。当前，尚有许多环境领域的问题需要环境科研工作者艰苦探索、不断攻克。在此，我祝愿我国环境保护科学事业不断取得新的进步，创造繁花似锦、硕果累累的未来。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2008年5月10日

前 言

基于我国污染场地环境管理的重大需求,在国家“十五”科技攻关“受污染场地环境风险评价与修复技术规范研究”(2003BA614A—10)支持下,结合国家“十一五”科技支撑“典型工业污染场地分类管理、风险评估与土壤修复技术筛选研究”等课题研究内容,以我国重点地区污染场地调查为基础,结合我国污染场地类型与污染物特点,研究并构建了场地信息、污染物筛选、风险评估和修复技术等多环节、多要素的场地环境管理支撑体系,在污染场地分类、污染源识别、污染场地调查与环境风险评价、修复技术规定等方面取得重要研究进展。在此基础上,完成了《污染场地环境风险评价与修复技术体系》的写作。

全书共分14章。第1章全面论述了国内外污染场地风险管理研究现状、研究前沿与发展趋势;第2章阐述了污染场地概念,提出基于活动类型、产业结构类型、场地属性和污染物属性的污染场地树形分类方法;第3章重点分析了典型污染场地特征与危害;第4章论述了石油开采、机械工业和垃圾填埋场地污染过程与途径;第5、6章论述了污染场地调查方法与技术程序、质量保证/质量控制(QA/QC)和场地调查案例;第7~9章论述了污染场地环境风险评价指标体系、多介质暴露评价模型和不确定性分析,土壤基准值与风险值的关系,污染场地环境风险土壤质量指导值;第10~13章论述了污染场地修复技术适用条件、经济技术要素和可实施性,以及污染场地修复技术构成要素与修复技术程序;第14章分析了污染场地环境风险管理技术要点与技术体系构成。

本书所构建的具有指导性和普适性的污染场地监测技术规范,污染场地环境风险评价导则和修复技术规范,为污染场地环境风险评价和场地功能恢复决策的规范化和标准化管理提供了可供参考的理论与方法。

本书可作为环境管理、环境科学、环境工程、地下水科学与工程、土壤学等专业的教学参考书,也可供相关管理和工程技术人员参考。

著 者

2008年8月8日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景分析	1
1.2 污染场地风险管理研究现状与趋势分析	2
第 2 章 污染场地概念及其分类方法	10
2.1 污染场地概念及其界定	10
2.2 国内外污染场地概况	11
2.3 污染场地的分类方法	16
第 3 章 我国重点地区污染场地调查与评价	20
3.1 重点地区调查布局	20
3.2 石油开采污染场地特性与危害	21
3.3 化工类污染场地特征	24
3.4 农业活动污染场地特征	28
3.5 垃圾填埋场污染场地特征	30
3.6 纳污地面水体分布区污染特性	32
第 4 章 场地污染过程分析	34
4.1 石油开采场地污染过程分析	34
4.2 机械化工污染场地污染过程分析	39
4.3 城市垃圾填埋场污染场地污染过程分析	46
第 5 章 污染场地环境调查技术与规范研究	52
5.1 污染场地环境调查基本流程	52
5.2 污染场地环境调查环节和内容	54
5.3 污染场地采样点布设方法	56
5.4 污染场地样品采集方法及技术的研究	60
5.5 样品的保存与运输	64
5.6 污染场地样品分析方法	65
5.7 实验室分析质量控制	69
5.8 资料整编和污染场地调查评估报告编制	70

第 6 章 污染场地环境调查技术规范案例研究	71
6.1 典型污染场地的选择	71
6.2 污染场地基本信息	72
6.3 污染场地初步评估	74
6.4 污染场地环境调查过程	74
6.5 分析结果	81
第 7 章 污染场地环境风险评价体系构建	94
7.1 污染场地环境风险评价框架结构与核心要素	94
7.2 环境风险评价模型	104
7.3 环境风险水平影响因素分析	110
7.4 环境风险评价的不确定性分析	115
第 8 章 污染场地环境风险土壤质量指导值研究	118
8.1 土壤质量标准分析	118
8.2 污染场地环境风险土壤质量指导值构建	121
第 9 章 石油污染场地环境风险评价案例研究	129
9.1 污染场地概况	129
9.2 石油污染场地信息分析	129
9.3 环境风险评价与不确定分析	132
第 10 章 污染场地修复技术规范框架分析	145
10.1 修复规范的法律依据与规范框架	145
10.2 场地评估	146
10.3 修复技术选择与方案制订	149
10.4 场地修复行动与效果评估	150
10.5 技术体系与规范的关系	151
第 11 章 修复技术体系与有效性评价	152
11.1 国内外修复技术体系现状分析	152
11.2 修复技术体系的构建与有效性评价	164
第 12 章 污染场地修复技术规范研究	176
12.1 污染场地修复流程模式构建	176
12.2 场地评估阶段划分与评价要点	176
12.3 修复技术选择与方案制订	182
12.4 修复效果评价	187

第 13 章 污染场地修复案例研究.....	188
13.1 石油开采污染场地修复案例研究.....	188
13.2 杭州郊区重金属污染场地修复案例.....	200
第 14 章 污染场地环境风险管理分析.....	212
14.1 污染场地环境风险管理内涵.....	212
14.2 污染场地环境风险管理决策流程.....	212
14.3 污染场地风险控制与管理影响因素分析.....	216
参考文献.....	218

第1章 绪论

1.1 背景分析

基于我国污染场地所引起的生态环境破坏、食品安全降低和人体健康危害等突出问题，开展污染场地调查和污染途径分析，制定受污染场地环境监测分析方法与技术规范，建立适应我国国情的环境风险评价技术与方法体系，构建典型受污染场地修复技术规范，对于我国污染场地风险管理是十分重要和迫切的。“十五”期间，由科技部立项，国家环境保护总局主持，清华大学负责，中国环境科学研究院、中国科学院南京土壤研究所、中国地质大学、吉林大学、中国矿业大学参加，开展了“受污染场地环境风险评价与修复技术规范研究”。

污染场地（Contaminated site）是因堆积、储存、处理、处置或其他方式（如转移）承载有害物质，对人体健康和环境产生危害，或具有潜在风险的区域。近年来，伴随着经济的高速发展，城市规模的扩大，污染场地及其严重危害事件时有发生，污染场地分布与污染程度呈现上升趋势。矿产资源开发加工，农药、化肥的过量施用，生活污水、工业“三废”的不合理处置或任意排放，工业生产过程中的跑冒滴漏和突发事件等，是构成我国区域或局部场地污染的重要原因。污染场地所造成的植被破坏，地下水水质恶化，最终对人类健康产生危害^[1]，严重影响土地使用功能，影响水资源保护与经济社会可持续发展，已经成为世界性的环境问题^[2, 3]。

在长期工业化过程中，发达国家的工业土地污染比例达 20%以上。据不完全统计，瑞士约有 50 000 块污染场地；新西兰约有 12 648 块已知污染场地；美国 10%~30%的地下储油罐都存在不同程度的泄漏；英国 30%以上的加油站以及几乎所有的化工厂、炼油厂、化学物质存放点等均存在严重的污染^[4]。美国五大湖区仅修复污染最严重的污染场地需耗资 74 亿美元，全球污染场地的修复费用将高达千亿美元。调查研究表明，污染场地有害物质能长期存留于土壤，或扩散下渗，污染地下水源^[5, 6]，其治理和恢复投资巨大，技术要求高。

发达国家经过几十年的努力，基本摸清了其国内场地环境污染的现状，广泛开展了污染场地控制与治理研究，在污染场地的风险评价与风险管理体系建立方面取得了重要的进展。同时，通过提高公众环境意识和实施激励政策，促进了公众对环境保护的参与，也保障了对环境重大事件和事故的快速应急反应能力。

与发达国家相比，我国存在污染场地基础资料匮乏，污染场地基本类型、空间分布、性质特征、环境影响程度不清，缺乏统一、完善的风险评价与风险管理的理论与技术体

系等问题。因此，为了适应国家在污染场地管理方面巨大的技术需求，迫切需要开展为国家环境管理服务的污染场地风险管理技术研究，包括完善污染场地分类方法，量化污染土壤和水体对人体健康影响的科学评价方法体系，构建基于环境风险评价的土壤质量指导值，建立污染场地环境风险管理体系，为场地污染控制与功能恢复提供重要的理论和技术支撑。

本研究结合国家在污染场地环境管理方面的重大技术需求，针对我国污染场地开发、建设及使用过程中对生态环境、人体健康的影响与危害，构建污染场地调查与环境风险评价体系，量化污染水平与人体健康之间的风险关系，制定基于环境风险的土壤质量指导值、环境风险评价和污染场地修复等相关技术标准与规范，构建了适合我国国情的污染场地环境风险管理技术体系，提高我国应对场地污染环境风险的能力和環境管理决策水平。

1.2 污染场地风险管理研究现状与趋势分析

由于污染场地对人体和环境的重大危害性，欧美等发达国家在污染场地风险管理方面构建了比较完善的相关标准、规范、法律法规体系，并在污染场地控制和修复方面开展了大量的研究工作^[7-9]，建立了比较完善的污染修复技术与方法体系，在修复目标和标准、修复技术选择原则和评价标准、修复行动的实施过程、修复方案设计程序和过程等方面，取得了大量的研究成果。

1.2.1 污染场地管理决策体系的构成

由于污染场地的管理决策基于场地调查和场地评价，并根据场地的风险级别或土地利用规划的特殊需要，作出不同的管理决定。因此，风险管理决策需要有坚实的场地监测和评价基础，通过反复论证和分析，作出不同阶段、不同等级的判断和决策。目前许多国家已构建了适合于本国实际需要的污染场地管理决策系统，其中以英国环境食品农村事务部（DEFRA）和英国环保局共同推出的基于风险的污染土地管理模式最为详尽^[10]。该系统由风险评价和管理两大模块组成，具体划分为规划、风险评价、管理和决策四个方面。决策过程分等级、分阶段进行，但具有较高的灵活性，可根据现实条件和最新的发展跨越阶段。

污染场地环境风险管理决策涉及场地风险识别和判断、风险评价、场地管理决策、场地修复方案选择和评估。修复行动的实施和运行。场地的修复效果评价和后期管理等，场地的环境风险评价构成污染场地环境风险管理技术体系的核心内容。

1.2.2 环境风险评价内涵

环境风险评价（Environmental Risk Assessment, ERA）是量化污染土壤和水体对人体健康和生态系统影响的科学方法，为场地污染控制与功能恢复提供依据。污染场地环境风险评价目的是针对不同类型场地的污染现状和场地信息，通过污染场地风险水平的量化评价，确认场地污染的风险程度，基于根据环境风险评价结果，兼顾社会经济和政治因素，提出合理可行的场地修复目标与建议，确定科学合理的污染控制和功能恢复措施，为污染场地管理和场地污染的监测、控制和修复提供科学依据，最终实现环境风

险水平的降低或消除，保护人体健康与生态系统安全。

环境风险评价是污染场地环境管理体系的重要组成部分，为管理决策的执行提供科学基础，主要内容包括：①为决策者提供量化环境风险的方法；②评价可能或已出现的环境风险源，加强对源的控制。污染场地环境风险评价的合理性与可行性是建立在对评价区域信息的全面系统调查了解、评价技术与方法有效运用的基础上，评价方法的选取要科学合理，能很好涵盖污染场地条件的复杂性，准确量化环境风险，并严格执行国家、地方相关法律、法规、标准的有关规定。

环境风险评价通常包括生态环境风险评价和健康环境风险评价。两者的区别是评价终点对象不同，健康环境风险评价的终点选择，只有一个物种（评价对象为人），而生态环境风险评价的终点不止一个，不仅考虑到生物个体和群体，还要考虑到群落、甚至整个生态系统，包含了健康环境风险评价终点对象。无论何种风险评价，不确定性贯穿于环境风险评价的整个过程，是由于对各种各样的物理及生化过程缺乏足够的认识，同时也缺乏足够的实测数据而造成。因此在风险表征时必须进行评价结果的不确定性分析，运用综合的专业判断、类比分析等推理技巧，获得更多的风险评价所需的数据和资料，采用技术处理手段以尽量减少不确定性，从而使风险管理者了解风险评价数据来源的方式和可靠程度，提供给环境管理者或决策者相对准确的信息，便于科学指导风险管理。

1.2.3 环境风险评价研究进展

污染场地环境风险评价是场地土壤和水体污染对人体健康、生态系统和环境潜在影响的客观、科学的量化方法。鉴于污染场地对人类健康和生态系统安全的重要性，发达国家在 20 世纪 80 年代陆续针对污染场地开展环境风险分析和研究，为国家对污染土地的管理、恢复和再开发提供决策依据。

1975 年美国核管会完成了对核电站（所）及其系统进行的安全研究^[11]，建立并完善了概率风险评价方法，此后，环境风险评价概念进入了其他各个领域。20 世纪 80 年代，在美国的部分州，环境风险评价成为环境影响评价的一个组成部分。美国已建立了较为完善的法律体系及场地环境风险评价程序^[12]、有关测试和风险补救方法，用以规范不动产交易、明确责任及制定净化和补救措施等，并建立了全面的数据库和模型软件系统 (<http://www.epa.gov>)。1987 年欧盟通过立法的方式，规定对有可能发生化学事故风险的工厂必须进行环境风险评价。英国建立了污染场地相关污染信息网 (<http://www.environment-agency.gov.uk>) 和评价模型，食品农业事务部和环境署提出污染场地对人类健康的风险评价科学框架^[13]。K. Chandra Sekhar 等^[14]系统地研究了印度 Hyderabad 地区工业污染场地砷的暴露途径和风险评价方法，该地区由于大量兽药厂、制药厂和农药厂等企业的运行导致严重的砷污染，该案例中明确了砷的污染途径，采集了水体、土壤、母乳、生物和蔬菜等样品，分析了砷在这些介质中的含量水平，同时分析监测了居民血液、尿液和头发中砷的含量，所获取的污染途径和污染物水平数据成为场地风险评价重要参数。基于场地风险评价中的多因子和复杂影响要素的不确定性尤其受到关注，M. Thorsen 等^[15]在场地硝酸盐渗滤评价中重点考虑 Monte Carlo 分析技术，分析地下含水层硝酸盐渗滤过程和渗滤通量及其不确定性。由于随着定性、定量和概率等输入参数的不同，造成输出目标各异，故风险评价方法种类繁多，J. Tixier 等^[16]描述了多达 62 种有关工业企业环

境风险评价的方法。由此可见，环境风险评价正逐步地发展成为一种强大的分析工具，用于指导政府环境管理和决策，作为依靠专家和专家建议预测环境损益的重要途径。

我国在 20 世纪 80 年代中期开始重视事故风险并开展应对措施的研究工作。国家环保局于 1990 年下发 057 号文件，要求对重大环境污染事故隐患进行环境风险评价。90 年代以后，我国重大建设项目特别是世界银行和亚洲银行贷款项目的环境影响报告中均要求开展环境风险评价。目前，我国在对煤矿区、石油化工和石油勘探开发、垃圾填埋场、表土磷库的环境风险评价中有了初步的探讨^[17-19]，但总体上表现为污染场地风险评价技术与标准体系不完善，缺乏系统的污染场地风险管理技术体系。基于此，需逐步加强污染场地环境风险评价方面的研究工作，突出场地污染控制和管理的科学性^[20-23]。

1.2.3.1 环境风险评价的种类

污染场地环境风险评价主要包括人体健康风险评价和生态风险评价。

(1) 人体健康风险评价 (Health Risk Assessment, HRA)

基于化学物的风险评价程度与准则，评价污染物通过各种迁移转化和暴露途径对人体健康产生的风险水平^[24]，包括数据收集与评价、暴露评价、毒性评价与风险表征。

(2) 生态风险评价 (Ecological Risk Assessment, ERA)

生态风险评价是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新的环境风险评价方法，是应用定量的方法来评估各种环境污染物（包括物理、化学和生物污染物）对人类以外的生物系统可能产生的风险及评估该风险可接受程度的模式^[25, 26]，主要包括问题的提出、暴露评价、生态效应评价和风险表征。

生态风险评价构成要素复杂，风险水平难以有效量化，直接或间接影响生态风险评价开展与实施。污染场地所引起的环境介质污染而导致的人体健康风险成为关注的重点，环境风险水平的识别与量化方法和技术体系成为研究的重点。

1.2.3.2 环境风险评价模型

环境风险评价模型类型多样，概括起来主要包括：有机物地下运移的复合数值模型 EPACMOW、MOFT，利用有限差分法模拟地下水流系统的模型 MODFLOW，水源保护区评价模型 WHPA，评价溶解有机溶质由包气带到地下水的垂向迁移模型 PESTAN，填埋场设置的水文地质评估模型 HELP，一维非饱和带地下水运动和化学物迁移模型 CHEMFLO，土壤有机物归宿和运移的暴露模型 Emsoft，评价石油烃污染场地的自然衰减的 Plume box model、BIOPLUME-III 和 BIOSCREEN 模型，综合水生系统生态风险的系统模型 CASM，用于人体暴露评价的集成数据库和分析模拟软件系统 THERdbASE，交互式软件工具集、场地数据管理工具 Geo-EAS、GEOS 和 GRITS/STAT。

1996 年英国纽卡斯尔大学在 DRASTIC 模型的基础上，开发出污染土地评价系统模型 (CLASS)^[27]，用来确定可能需要监控、调查和修复的场地。CLASS 可辨识潜在污染场地，对潜在风险进行初步评价。其主要有两个作用：① 识别和描述污染源、污染途径和污染物归宿的综合数据库；② 根据污染趋势给每个场地进行分类。

英国环境署还建立了污染场地暴露评价系统，包括 CLEA 模型 (Contaminated land exposure assessment)、污染物的毒理学数据库 (TOX) 和土壤指导值 (SGVs)^[28]，基于

SGVs 评价污染场地对暴露的人群产生健康的风险水平。SGVs 的制定对于场地污染调查、环境风险评价和修复目标确定具有重要的指导作用。

暴露评价是研究污染物进入水体后的迁移、转化等过程。早期的暴露评价仅涉及物理、化学过程。20 世纪 80 年代中期随着生态模型的发展，不仅表述污染物的时空分布，并且试图将这些物质所引起的生态危害（或称生物学效应）耦合到数学模型中。环境风险暴露评价模型包括地下水模型、地表水模型、食物链模型和多介质模型，具体模型介绍见表 1-1。

表 1-1 U.S.EPA 暴露评价模型列表

类型	模型
地下水模型	FEMWATER/ LEWASTE、PATRIOT、PRZM3、WhAEM
地表水模型	EXAMS、GCSOLAR、HSCTM2D、HSPF、PLUMES、QUAL2EU、SED3D、SMPTOX3、SWMM、TMDL USLE、WASP
食物链模型	LC50、FGETS
多介质模型	MINTEQA2、3MRA、MMSOILS、MULTIMED

环境风险评价模型的选择依据包括评价目的、污染物输移过程、介质与水动力条件等因素。针对不同的非饱和带风险评价模型，考虑模型类型、污染物归宿和输移过程，以及水动力学条件和不确定性分析等因子，如表 1-2 所示。目前，由于石油烃污染场地分布面广，污染危害严重，受到关注，其环境风险评价模型开发较为完善，如表 1-3 所示。

表 1-2 非饱和带评价模型的特征

模型	类型			考虑的归宿和输移过程											其他					
	解析	半解析	数值解	土壤分层	径流	腐蚀	根部区域吸收	有限源	油相分离	蒸发	气相运移	水动力弥散	扩散	吸附	不均衡分离	水解 (一级)	生物降解	考虑饱和带	蒙特卡罗分析	水量平衡计算
RITZ	●							●	●			●	●		●	●				
VIP			●					●	●	●	●		●	●	●					
CMLS	●			●				●					●		●					●
HYDRUS			●	●			●	●				●	●		●					●
MULTIMED		●		●					●			●	●	●	●	●	●	●	●	
SUMMERS	●												●					●		
PRZM-2			●	●	●	●	●	●	●			●	●		●	●			●	●
SESOIL			●	●	●	●		●	●			●	●	●	●	●	●			●
VLEACH			●	●				●	●	●		●	●	●						

表 1-3 石油烃污染场地相关评价模型的比较分析

模型	用途	优点	缺点
Leaking Underground Fuel Tank Manual	处理储油罐泄漏事故以保护场地工作人员	将可能被储油罐泄漏污染的场地分类；为化学物质指明确实实验程序	仅处理汽油和柴油产品，而不考虑废油或溶剂
EPACMOW	估算油类污染物和化学组分地下运移的复合数值模型	可模拟 NAPL 在饱和带和非饱和带三维流动和运移；水-NAPL-空气系统中，有毛细管作用和气相运移，还包括链式衰减反应和转化产物的生成	具有极其复杂的数据要求，计算强度大
3MRA	多介质、多路径、多受体暴露和风险评价模型	因长期（慢性）暴露于特定化学物引起的潜在在人类健康和生态风险的风险评价	缺乏精确的地下水计算模块
MODFLOW/MT3D	用有限差分法模拟地下三维水流和溶质运移模型	可模拟有限的、无限的或两者结合的水文地质环境；外部输入包括井、面状注入、蒸发蒸腾、水渠和河流等；可模拟地下水系统溶解组分的对流、弥散和化学反应	不能很好地模拟非饱和带水流分布
MULTIMED	预测污染物通过地下、地表水和空气途径从废物处置场迁移到受体场地的浓度	模拟沉淀、径流、渗透、蒸发蒸腾、隔水层和侧向排泄；非饱和带瞬时垂向运移（考虑纵向弥散、线性吸附和一级衰减）；地表水模块模拟基于稳流饱和污染羽的完全拦截的地表水流污染；气相散发和大气弥散模块模拟大气化学物输移	仅模拟一维稳定流
MMSOILS	根据污染物从危害废物场所的释放评价人体暴露和健康风险	描述地下水、地表水、土壤侵蚀和大气中化学物归宿、运移、暴露和食物链积累的多介质模型；考虑的人体暴露途径有土壤摄取、大气的挥发物和颗粒吸入、皮肤接触、饮用水摄入、动植物的食用。基于化学物特定毒性数据计算与总暴露剂量相关的风险评价；用蒙特卡罗分析作不确定性分析	风险的不确定性可能很大（由场地特征和可得数据而定）；注意结果要在适当的框架下解释

1.2.3.3 风险评价的不确定性分析

不确定性贯穿于环境风险评价的整个过程。不确定性的产生原因在于缺乏足够的实测数据，以及对各种各样的物理及生化过程缺乏足够的认识。因此，不确定性分析对于风险表征的可靠性具有重要意义，评价结果的不确定性，就是运用综合的专业判断、类比分析等推理技巧，获得更多的风险评价所需的数据和资料，采用技术处理手段以尽量减少不确定性，从而了解风险评价数据来源的方式和可靠程度。

环境风险评价过程中不确定性分析是指对数据收集、毒性评价和暴露评价的不确定性进行定性或定量表达，如所收集数据的可靠性，评价模型中某些假设、输入参数的不确定性和可能发生的概率事件等。不确定性的类型可分为客观与主观的不确定性。具体而言，不确定性包括参数的不确定性（测量误差、取样误差和系统误差）、模型的不确定性（由于对真实过程的必要简化，模型结构的错误说明、模型误用、使用不当的替代变量）和情景的不确定性（描述误差、集合误差、专业判断误差和不完全分析）^[31-33]。上述不确定性直接影响环境风险评价结果的可靠性。