

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨

廖晓勇¹, 陶欢^{1,2}, 阎秀兰¹, 赵丹^{1,2}, 林龙勇¹, 李尤¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 场地土壤和地下水环境污染问题已成为近年来我国环境保护领域关注的焦点和热点。污染场地修复决策支持系统是在场地勘察与风险评估基础上, 筛选最佳的修复技术, 以制定经济高效的场地污染治理方案。本文探讨与分析修复决策系统的框架、模型、方法等关键环节, 评估与总结了国际上现有 40 多种修复决策软件的模块及功能。针对我国场地污染问题, 综合国际前沿的思想与理念, 提出适合我国现阶段经济社会发展水平的决策支持系统开发思路。

关键词: 污染场地; 决策支持系统; 修复; 模型; 软件

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1576-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.054

Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites

LIAO Xiao-yong¹, TAO Huan^{1,2}, YAN Xiu-lan¹, ZHAO Dan^{1,2}, LIN Long-yong¹, LI You¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The problem of site contamination has become a focus in the environment protection field in the recent years. Decision support system (DSS) for remediation of contaminated sites is used for selecting the optimal remediation technologies and formulating economic and efficient remediation plans based on site investigation and risk assessment. This paper reviewed and analyzed the key steps in the decision-making process, including frames, models and methods. In addition, the modules and functions of more than 40 types of decision-making software in the world were evaluated and summarized. Aimed at the demand of site contamination in our country, a skeleton frame and feature were proposed in the paper, where the international experience in developed countries has been absorbed and learned.

Key words: contaminated site; decision support system; remediation; model; software

“污染场地”是指因堆积、储存、处理、处置等方式承载了有害污染物质, 并对人体健康和周边环境产生危害或具有潜在风险的空间区域^[1]。近十年来, 由于城市化发展以及产业结构升级调整等原因, 我国 10 万个以上污染企业关停或搬迁, 产生了大量的污染或潜在污染场地^[2], 威胁着周边居民的身体健康, 并显著影响土地和地下水资源的安全使用。近年来, 湖南、广西、河北等地的工业场地土壤和地下水污染环境事故频发, 使得污染场地的治理与安全再利用问题引起社会各界的广泛关注。

污染场地治理是一项复杂的、耗资、耗时的艰巨工程, 发达国家每年要投入大量资金来对这些场地进行管理、控制和修复^[3]。经过几十年的不断发展, 这些国家的场地修复领域已经取得了显著的进步, 出现了很多物理、化学或生物的修复技术, 新型的组合修复技术也时有出现^[4]。面对数量众多且条件各异的污染场地与修复技术, 政府部门、场地拥有者、或其它可能牵涉其中的个人、团体或机构等利益相关者存在着如何选择最佳场地修复技术的问

题。他们需要一套能够帮助提高决策效率的专业工具, 在正确与合理评估污染场地对人体健康和生态环境影响的基础上, 提出有针对性且经济高效的修复方案。

我国污染场地修复的研究主要集中在污染场地管理制度和风险评估的探讨^[5~7], 在污染场地调查和修复技术方面^[8,9]也已开展了系列研究, 但针对我国污染场地修复的决策研究相对较少。如何根据我国场地污染特征和国内外研究现状提出适合我国修复决策思路仍需进一步探索。本文介绍了污染场地修复决策支持系统(简称“修复决策系统”, decision support system for remediation of contaminated sites, DSSRCS)的概念、历史沿革、作用和意义, 阐述修复决策系统中常用的决策框架流程、模型方法及常用的修复决策软件, 并结合我国的实际情况提

收稿日期: 2013-07-27; 修订日期: 2013-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271339); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA06A201, 2013AA06A206); 北京市产业技术创新战略联盟专项(Z121109003112077)

作者简介: 廖晓勇(1977~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为场地污染评估与修复, E-mail: liaoxxy@igsnrr.ac.cn

出适合我国的修复决策系统开发思路。

1 修复决策系统概述

1971 年,国外学者首先提出“决策支持系统”的概念^[10]。场地污染修复的决策支持系统是指采用专家评判、软件模拟的方法,为决策者在启动耗资巨大的修复行动之前,筛选合理的污染控制与修复技术,制定经济高效的场地修复方案的综合评估系统^[11,12]。决策过程涉及场地基础数据的管理分析、修复目标的确定和修复工程量计算、场地修复技术的筛选、场地修复方案的优化等环节。其中场地风险评价和修复技术筛选需要借助统计分析方法和专业的数学模型来实现,这些方法和模型能够改善管理决策的有效性,扩大和增强决策者处理问题的能力和范围。

最初的污染场地修复多采用封装技术,即采用挖掘-填埋的方式。20 世纪 90 年代后期,人们对污染场地修复的方式从原来的“简单填埋”、“挖掘-焚烧”转变为考虑更多的现实因素,如经费来源、修复措施的环境、未来土地利用方式、经济效益等^[13~15],这便增加了修复决策的复杂性、多样性和不确定性。传统的场地修复决策成功与否,在很大程度上取决于决策者的主观判断。而事实上决策者由于认识上的局限性,使决策具有很大程度的不确定性。研究者开始开发基于 PC 机的修复决策系统,将计算机技术应用到污染场地修复决策中。如 1988 年美国环境保护署基于综合环境反应、补偿与债务法案 (CERCLA) 提出了一套修复方案筛选流程,并开发出相应的软件应用平台^[16,17]。在污染场地修复过程中引进决策支持系统能够为场地修复决策者的管理提供科学依据^[18]。决策者使用决策支持系统记录和查看系统中的模型假设、模型参数和预测的结果,决策过程中的每个步骤都是开放的、透明的,并且整个过程可以重复测试。此外,决策支持系统通过测试模型参数的变化对决策结果影响,可以处理决策过程中的不确定性,以期对决策者提供更加可靠的辅助。

2 修复决策框架的构建与分析

决策框架是修复决策系统决策流程图,能直观、全面地跟踪和规划修复决策的整个过程,了解每一步决策的动态。尽管场地的环境及污染特征不同,对不同场地分析和决策过程中的基本步骤是相似的^[19,20],USEPA 超级基金计划较早提出场地修复决策系统框架^[17],主要包括资料收集和污染场地调

查、修复目标的确定、修复技术筛选、确定修复方案等几个环节。目前国际上提出的修复决策框架较多,根据框架的构建方式主要分为三类:一是按照场地调查评估和管理的步骤构建;二是将修复决策过程视为数学建模过程,按照数学建模的思想和方法构建;还有就是针对某特定场地问题构建的修复决策框架。现选取 5 个有代表性的修复决策框架,分析其构建特征和决策模式。

2.1 NATO/CCMS 试点工程开发的修复决策框架

Bardos 等^[18]提出的典型污染场地修复决策框架包括决策前修复目标和评价指标的确定、决策过程和最终决策这 3 个步骤,决策过程又细分成 5 个环节(图 1);第①个环节是收集特定场地相关信息和数据,包括与污染源、暴露途径和污染受体相关的信息,土壤性质数据,水文地质数据等;第②个环节是使用这些信息开发简单的场地概念模型;第③个环节是进行地统计分析、地下水流场和地下水中污染物传输分析、人体健康风险评价等数据分析;第④个环节是对决策变量进行解译和分析,从数据分析得出的结果中解译和分析出有用的决策信息;第⑤个环节是对解译和分析出的决策信息存储到专家知识库中并以简洁的计算机语言辅助决策者进行最终的决策。在决策之前首先需要确定修复目标和评价指标,然后通过决策支持过程识别出在评价指标的约束下满足修复目标的最优方案,其中①和②属于资料收集和污染场地调查阶段,③、④和⑤属于修复技术筛选阶段。该框架是 2000 年 6 月北大西洋公约组织成立的现代社会挑战委员会(简称 NATO/CCMS)决策支持专题会议的产物,集成了修复决策方面的专家知识,使修复决策过程透明化、标准化。

2.2 意大利威尼斯研究联合会与威尼斯大学开发的 DESYRE 修复决策框架

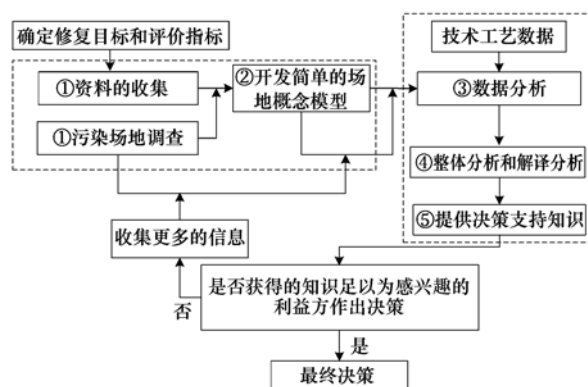


图 1 典型污染场地修复决策框架

Fig. 1 Decision framework of remediating typical contaminated sites

Critto^[3] 和 Carlon 等^[21,22] 针对大型污染场地进行综合管理和修复决策提出了基于 GIS 的 DESYRE 修复决策框架,并开发出相应的软件. DESYRE 框架是由 6 个模块组成^[23] (图 2):在场地描述模块中,主要是收集场污染数据和水文地质数据的建立基础数据库,然后使用 GIS 工具对场地的污染物信息和水文地质信息可视化;社会经济模块是使用模糊逻辑分析方法筛选出最佳土地利用方式;风险评估模块分为两个阶段,前一阶段称为修复前风险评估,主要是评估场地中污染物在土壤和地下水中对人体健康的风险,后一阶段称为剩余风险评估,主要是模拟修复后场地的剩余风险图及不确定性;在技

术评估模块中,专家们通过执行多目标决策分析工具选择合适的修复技术或修复技术组合;最后在决策模块中,根据评价指标对备选修复方案进行比较和分析. 其中①和②属于资料收集和污染场地调查阶段,③、④和⑤属于修复目标的确定和修复技术筛选阶段,⑥属于修复方案分析阶段. DESYRE 软件提供了污染场地修复过程中几乎所有的评估与决策功能,它集成了风险评估和社会经济分析以及技术评估. 该软件包括几个分析工具,例如地统计,模糊逻辑,风险评估和地理信息系统(GIS),其中社会经济评估模块使用的模糊数学方法和两次风险分析所使用的概率分析方法都是该框架的特色.

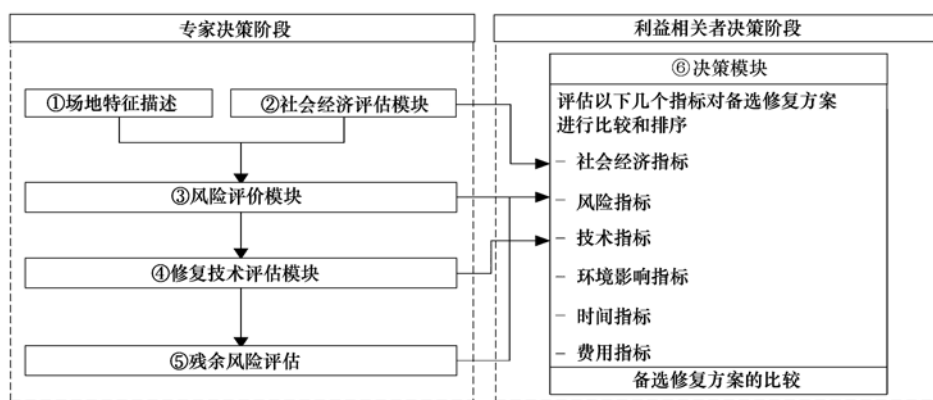


图2 DESYRE 修复决策框架

Fig. 2 DSSRCS framework of DESYRE

2.3 加拿大里贾纳大学开发的 URREM 修复决策框架

加拿大里贾纳大学针对石油场地修复中的大多数问题,包括场地污染物的识别、数据库的管理、污染迁移转化模拟、风险评估和修复设计等,提出了 URREM 修复决策框架(图 3),该框架是按照场地调查评估和管理的步骤构建,也是专门针对石油场地开发的. 依此框架开发的软件^[24],是通过将污染物传输模型、风险评估和修复系统设计集成到一个通用的框架,封装复杂的数据分析和建模任务来为决策者简化修复设计过程,从而让决策者可以专注于备选修复方案的开发和比较. URREM 修复决策框架能够解决从场地调查评估到修复设计中的大多数石油污染场地问题. 在建立三维多相多组分模型为下一步风险评估提供分析基础上,使用不同方法来分析计算场地污染风险,根据风险评估结果决定场地是否急需修复. 如果场地确实需要修复,系统将推荐几种场地修复方案,最后对这些备选的修复方案进行分析和比较得出最优决策,其中①属于

污染调查、②属于风险评估、③属于修复方案的选择.

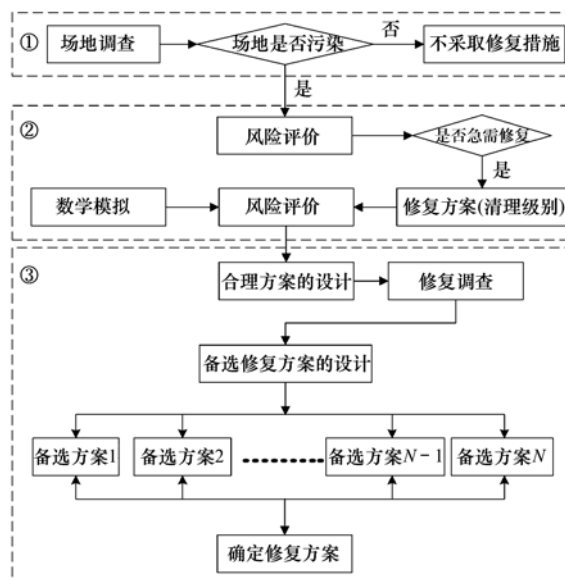


图3 URREM 修复决策框架

Fig. 3 DSSRCS framework of URREM

2.4 美国能源部(DOE)、Linkov 等分别开发的修复决策框架

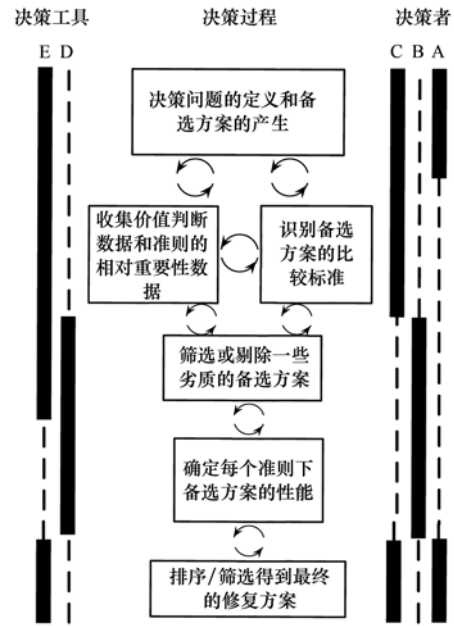
Baker 等为美国能源部(DOE)开发的《决策分析方法指南》中提出的修复决策框架^[25](图4)和 Linkov 等^[26]提出的基于多目标决策分析方法(MCDA)的修复决策框架(图5)非常相似。前面提到的3种修复决策框架是按照场地调查评估和管理的步骤构建的,这2个框架都是按照数学建模步骤与过程构建的,它们都包括决策问题的定义、备选修复方案的选取、建立方案的评价标准,然后通过决策工具从备选修复方案中筛选出最佳修复方案。DOE 框架中推荐的决策方法包括 Pro-Cons 分析法、Kepner-Tregeo(K-T)决策分析法、AHP 层次分析法、多属性效用理论法(MAUT)、成本-效益分析方法(CBA)。这些方法能够适应于很多情形,考虑问题的复杂度、可用的时间长度和有效的资源等因素,决策者可以针对①中问题的定义不同而选择不同的方法来优化方案。Linkov 框架中的决策工具能够使用层次结构法(AHP)、多属性效用理论(MAUT)、级别不低于方法(Outranking)分析方法来对修复方案进行排序,还提供一些有用的图形化技术和可视化方法对收集到的信息进行直观的表达。此外,Linkov 开发的决策框架中还给出了不同决策阶段不同决策者在决策过程中的参与情况和不同决策工具在决策过程中应用程度。



图4 DOE 修复决策框架
Fig. 4 DSSRCS of DOE

2.5 国内有关修复决策框架的研究

国内有关污染场地修复决策的框架研究多是参考 USEPA 超级基金场地修复决策经验,如罗程钟等^[27]参照 USEPA 超级基金污染场地治理修复技术



A 为政策制定者,B 为科学家/工程师,C 为利益相关者,D 为环境评价/建模(风险/生态/环境评价和模拟模型),E 为决策分析(群决策技术/决策方法和软件)。决策者直接用粗的黑线表示,间接参与的用虚线来表示。在决策工具中粗实线表示决策工具在此阶段使用的程度比较高,虚线符号用来表示使用程度较低

图5 Linkov 修复决策框架

Fig. 5 DSSRCS of Linkov

筛选的基本方法,提出了我国 POPs 污染场地修复技术筛选的基本路线。谷庆宝等^[28]以美国超级基金场地修复为例,阐述了目前不同污染场地修复技术的应用状况。陶锟等^[29]参考 USEPA 超级基金场地修复技术筛选经验,研究提出了一套适用于我国的城市工业污染场地修复技术筛选基本流程。也有研究者从数学模型或者风险评价的角度出发提出一些修复决策框架,如张倩等^[30]在基于层次分析法(AHP)和逼近理想解排序(TOPSIS)法的研究基础上提出污染场地修复技术筛选决策流程。潘云雨等^[31]和姜林等^[32]提出基于层次性人体健康风险评估污染场地风险管理与决策框架体系。

3 模型与方法在修复决策系统中的应用

修复决策系统是以数据为基础,以模型为驱动的系统,选取合适的数学模型或方法影响修复决策系统的科学性和高效性。修复决策系统中常用的方法有修复多目标决策分析方法(MCDA)、成本-效益分析法(CBA)、生命周期评价法(LCA)、技术筛选矩阵(Matrix)、费用效果分析法(CEA)、环境效益净值分析法(NEBA)、环境技术评价法等,其中使用的比较多的主要有前4种(表1)。通过这些方法实

现修复技术筛选、修复费用估算、修复方案优化等应用功能。

污染场地修复技术筛选矩阵是研究者在对场地修复技术市场、新型技术研发及应用情况的调查基础上,将每种修复技术的技术参数汇集到一张表格中,以供修复决策者进行查询。针对某个特定的污染场地,根据场地污染特征和修复目标从修复技术筛选矩阵中排除不满足条件的修复技术,达到初步筛选修复技术的目的。Critto 等^[33]在波尔图·马尔盖拉工业区进行修复技术筛选就是采用联邦修复技术圆桌会议(FRTR)提供的修复技术筛选矩阵进行初筛。但是如何从初筛结果的备选修复技术中综合考虑修复行为的影响,从社会、经济、技术、环境综合最优角度出发对修复方案进行比较评判,确定最佳修复方案,是一个多层次多目标的决策问题。

多目标决策分析方法(MCDA)是解决多层次多目标的决策问题最好的方法,它为修复决策提供一种科学工具。已有大量关于多目标决策问题的研究,并开发出相关的模型方法,应用于场地修复决策的 MCDA 方法主要包括 MAVT/MAUT、AHP 层次分析法和 Outranking 级别高于关系法 3 种。MAVT/MAUT 有 SMART 法和 TOPSIS 法两种派生。SMART

方法可与 AHP 方法结合能弥补 AHP 方法的排序颠倒性问题,如 Bezama 等^[34]将 SMART 和 AHP 方法结合应用于支持污染场地修复决策平衡计分卡系统中的指标权重确定。TOPSIS 与 AHP 方法结合既能克服 AHP 在不易量化指标上的主观性,又能避免 TOPSIS 对指标权重的忽视,如张倩等^[30]将 AHP 和 TOPSIS 结合运用于解决污染场地修复技术筛选问题。与 MAUT 相似,AHP 能聚合不同层面的决策问题形成目标函数,主要是筛选出使目标函数达最大值的备选方案,罗程钟等^[27]针对 POPs 污染场地修复技术从经济指标、环境指标和技术指标 3 方面,采用 AHP 筛选出适合特定 POPs 污染场地的修复技术。Critto 等^[33]建立了一套综合考虑修复技术特征和污染场地具体状况的两阶段污染场地修复技术筛选决策支持体系,先从修复技术库中初筛出可行的技术列表,然后采用 MCDA 方法对列出的可行技术进行评分和排序。级别高于关系法的一个优点是不需要统一评价标准的单位,主要包括 ELECTRE 方法和 PROMETHEE 方法两种。李安婕等^[35]运用 PROMETHEEⅡ偏好排序法对当前场地修复技术以及典型场地条件进行了客观分析和综合评价,实现基于具体修复目标的污染场地土壤修复技术择优筛选。

表 1 修复决策系统中常用的模型方法¹⁾

Table 1 Models and methods commonly used in DSSRCS

模型方法	场地类型	主要功能	文献
MCDA	危险废物填埋场	修复技术筛选	[44~47]
MCDA	萨瓦那河场地(核和化学工业)	修复费用评估	[48]
MCDA	混合废物地下垃圾处理场	修复方案优化	[49]
MCDA	垃圾填埋场	修复方案优化	[36,50]
MCDA	密苏里河	修复方案优化	[51]
MCDA	工业场地	修复费用评估	[52]
MCDA	—	修复技术筛选	[31]
MCDA	POPs 污染场地和 PCBs 污染场地	修复技术筛选	[27,53]
CBA	—	修复技术筛选	[54]
CBA	—	修复工程的环境影响评估	[55]
LCA	加拿大某铅污染场地	修复方案优化	[37]
LCA	—	修复工程的环境影响评估	[38]
LCA	某原油污染场地	修复工程的环境影响评估	[39]
LCA	LNAPL 污染场地	修复方案优化	[42]
LCA	地下水污染场地	修复工程的环境影响评估	[56]
LCA	三氯乙烯污染场地	修复工程的环境影响评估	[57]

1) “—”表示文章中没有相关数据

CBA 和 LCA 方法分别从污染场地修复策略的费用效益角度和修复工程全过程的环境影响角度来量化污染场地修复方案评估。CBA 是一种环境经济学方法,能够比较不同贴现率水平下污染场地修复的费用效益情况^[36]。LCA 可对污染场地修复工程的环境影响进行后评估^[37~39];为污染场地修复方案的筛选和优化设计提供环境影响基准^[40~42]等。

国内学者针对生命周期评价法在污染场地修复中的应用也开展了研究,如胡新涛等^[43]应用生命周期评价(LCA)结合影响评价 2002 + 方法(IMPACT 2002 +),分析比较了碱性催化分解(BCD)和红外高温焚烧(IRI)技术在处理 PCBs 污染土壤全过程的环境影响,研究结果表明,处理1 000 kg PCBs 污染土壤,BCD 和 IRI 技术的综合环境影响分别为 0.147

Pt 和 0. 279 Pt.

4 主要修复决策系统软件的功能分析

在决策框架和模型方法的基础上,可以结合计算机技术将整个修复决策过程软件化,为场地修复决策提供技术支持. 一个完整的修复决策系统程序应包括多个相互联系的模块,各个模块完成各自独立的功能,并且能为其它模块提供参数输入,这些模

块为最终的决策提供支持. 在一些早期开发的决策支持软件(DSS)中,许多软件都是为了重点解决一些具体的问题,而很少有包含场地修复过程中所有的评估与决策功能,如 RAAS 虽然包括污染场地修复过程的各模块,但是却不包括用于管理和分析空间数据功能^[58]. 表 2 中列出了在场地修复中用到较多且具有代表性的软件,这些软件经过大范围的验证,能为修复决策者提供帮助. SMART Sampling、

表 2 污染场地修复决策系统软件¹⁾

Table 2 Software for DSSRCS		
软件名称	开发者	主要功能
^U ABA	欧盟	—
^{&} AMDTreat	—	g
^{&} ARAMS	—	a, f
[*] API-DSS	美国石油学会	b, f
^{&} BIOCHLOR	—	a, d
^{&} BIOPLUME III	美国赖斯大学	a, d
^{&} BIOSCREEN	Air Force	d
^U BIOSVE	美国科学软件集团	d
^{&} CURE	美国桑迪亚国家实验室环境风险评价和监管分析部	g
^{&} DARTS	联合国工业发展组织 UNIDO	a, g
[*] DECERNS	佛罗里达大学、剑桥环境公司	f, g
[*] DESYRE	意大利威尼斯研究联合会与威尼斯大学	a, b, d, f
^{&} DQO-PRO	美国西北太平洋国家实验室	a
^{&} ELIPGRID-PC	美国西北太平洋国家实验室	a
^{&} FIELDS	EPA	a, f, g
^{&} FSPLUS	—	a
^{&} GANDT	美国桑迪亚国家实验室环境风险评价和监管分析部	e
^{&} GeoSEM	—	a
^{&} HSSM	—	a
^{&} MAPER	新墨西哥州立大学	b
^{&} MARS	DAEM	a, b, e, d
^{&} MNAtoolbox	美国桑迪亚国家实验室	d
^{&} MODLP	地下水修复设计研究中心	e
^{&} NAS	弗吉尼亚理工大学、美国地质调查局、海军设施工程司令部	a, e
^{&} OPTMAS	美国桑迪亚国家实验室环境风险评价和监管分析部	e
^U PLANET	伯克利国家实验室	a, b
^{&} PLUME	美国阿贡国家实验室	a
^{&} PRECIS	美国桑迪亚国家实验室环境风险评价和监管分析部	b, f
[*] RAAS	美国西北太平洋国家实验室	d, f
[*] RACER	美国三角洲研究公司	a, g
[*] REC	荷兰原位生物修复研究计划(NOBIS)	d, f
^{&} RESRAD	—	c, f
^U ROAM	美国电力研究院(EPRI)	d
^{&} SADA	美国田纳西州大学	a, f, g
^{&} SCRIBE	美国 EPA 的环境应急响应工作组(ERT)	a
^{&} SEDSS	美国桑迪亚国家实验室环境风险评价和决策分析部	a, b, c, d
^{&} SELECT	伯克利国家实验室	a, b, f, g
^U SitePlanner	阿贡国家实验室	a, b
^{&} SMARTe	美国环保部	a, c, f, g
[*] Smart Sampling	美国桑迪亚国家实验室	a
^{&} SourceDK	—	d
^{&} VSP	美国西北太平洋国家实验室	a, g

1) & 表示免费, * 表示商用, U 表示不确定; a 为场地特征描述, 包括数据质量目标的定义和采样设计, 场地概念模型的建立; b 为污染物性质和污染程度分析, 污染物的性质和污染范围, 包括污染物的归趋和迁移模拟; c 为数据价值分析, 优化样品采集; d 为修复方案分析, 基于场地特征数据, 识别出最佳修复方案; e 为修复设计优化; f 为人类健康与生态风险评价; g 为成本利益分析, 不同修复方案或不同修复目标的成本; “—”表示文章中没有相关数据

GeoSEM、SADA 和 FIELDS 软件主要是关注于污染场地的特征描述和场地风险评估,其中以 SADA 软件应用较多,如 Purucker 等利用 SADA 软件评估田纳西州的一个废弃金属冶炼厂的生态风险,并结合场地特征描述确定详细修复设计方案^[59]. USEPA 的 Land Research Program 开发的 BSAF、PCBRes 和 ECOTOX 这 3 个软件^[60]只关注生态风险评估. USEPA 的 Environmental Response Team (ERT) 开发的 Scribe 软件只提供了对场地环境采样数据和场地监测数据进行集中管理,缺乏对这些数据进行空间分析的能力. ARAMS 是一个多环境介质系统的风险分析框架^[61,62],软件包括对人类健康和生态的风险评估模块,以及一些统计分析功能,能够针对某个特定的污染场地快速地建立起场地的概念模型. 然而,最新版本的 ARAMS 软件基本上就是一个风险评估软件,而不包括社会经济和技术评估模块. 在风险评价功能上,一些系统(如 DESYRE, SADA)软件结合 GIS 的空间分析能力和可视化技术以风险分级图的形式提供给决策者,让决策者更加直观形象地理解决策结果.

联合国工业发展组织开发的 DARTS 修复技术筛选辅助决策系统^[4,63]和 RACER 修复行动成本估计^[64]这两个软件只关注修复技术的筛选. DESYRE 软件将修复技术筛选功能集成到整个决策支持系统中作为一个子模块,并建立修复技术数据库和修复技术筛选方法库,而在评价时通过建立一套指标评价体系对修复方案进行评分. 张海博等^[11]利用 DESYRE 软件对中国北方某污染场地的修复问题进行研究,结果表明,该场地的最佳用地方式为居住用地或娱乐用地,清挖处理技术与土壤固化稳定技术(异位)配合应用修复效果较好. REC 系统通过成本、环境影响和风险等因素分析备选修复技术的综合效益,然后确定最佳修复方案.

5 适合我国国情的修复决策系统开发思路

发达国家早在 20 世纪 90 年代初期就开发了环境决策支持系统^[3],后来一些决策框架和数学模型应用到污染场地修复决策中,并逐渐发展目标和作用各异的多类修复决策系统. 我国的污染场地修复属于战略性新兴产业,市场需求巨大且迫切,然而由于各项研究均属起步阶段,标准规范体系亟待构建,实用技术有待研发与完善,因此,急需建立适合于我国国情的修复决策系统,为政府与业主所面临的各类污染场地提供决策依据. 通过系统研究发达国家

修复决策系统,针对我国场地污染特征和市场需求,在我国现阶段场地修复技术储备的基础上,提出我国修复决策系统的总体框架(图 6)以及开发思路. 本框架是在场地调查与资料收集的基础上综合考虑污染场地修复技术筛选的社会、经济、环境等因素,合理选择修复技术,科学制定修复方案,确保修复工程切实可行. 以下 4 个方面是框架设计过程中考虑的关键问题.

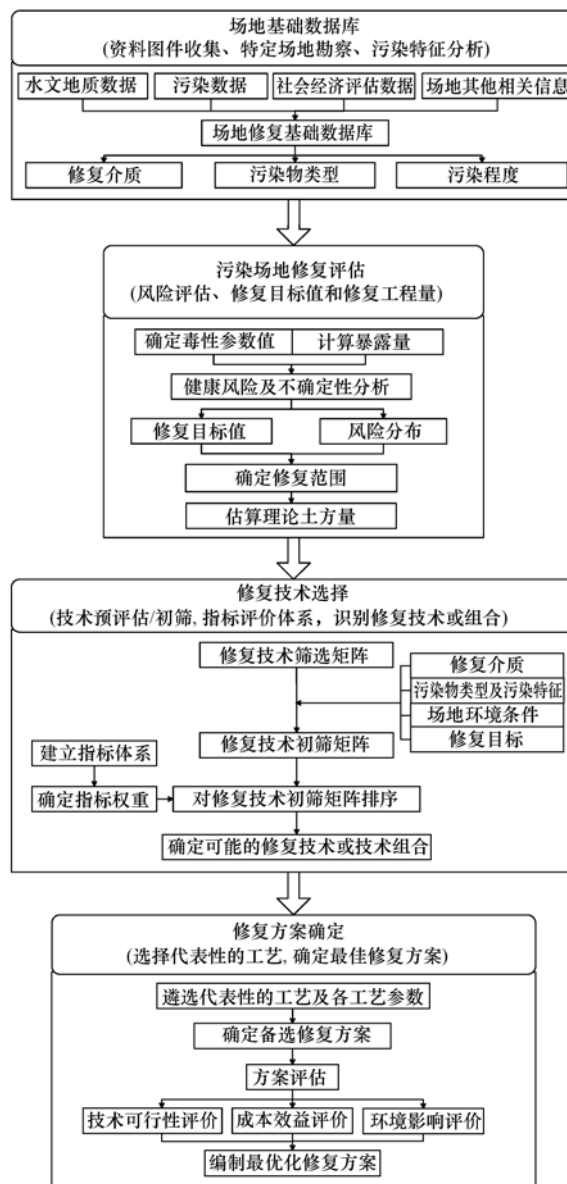


图 6 我国修复决策系统开发框架

Fig. 6 DSSRCS framework in China

5.1 在基础数据库建设方面

场地基础数据的管理分析不可避免地会涉及地理空间位置,可以利用 GIS 的空间数据存储分析能力及其在空间可视化方面的优势,帮助决策者直观了解场地概念模型,为宏观决策提供快而准的科学

依据,提高决策判断的准确性^[65,66]。此外,从整个系统的角度考虑将 GIS 和修复决策系统结合能够组织污染场地专题数据库和数学模型之间的信息流,控制系统运行序列和模型间的自动联合应用。

5.2 在场地修复评估方面

修复目标的确定和修复工程量计算都需要对场地进行风险评价,风险评价涉及的参数较多,且大多数需要用户从界面输入,软件的界面是否容易被用户掌握和便于使用,直接影响决策结果的准确度。理论土方量应根据关注污染物种类、浓度水平和修复范围、修复目标值来估算,估算方法主要有断面法、格网法和不规则三角网法(TIN),其他的一些方法(如散点法和表格法)都是这3种方法的简化、变形或综合。基于这些方法开发的土方量计算软件主要包括 AutoCAD 扩展软件,ERDAS 遥感软件和 ArcGIS 软件^[67~70]。其中 ArcGIS 是从地统计的角度出发,基于格网法结合修复目标确定修复范围,再根据修复范围结合断面法对土方量进行计算,具有计算精度和计算效率都比较高的特点。如在某大型苯污染场地,姜林等^[32]以健康风险评估计算的土壤苯修复目标为基准,采用 ArcGIS 进行空间插值得到不同土层的修复区域,然后将各层待修复土方量相加即得总量。阳文锐等^[71]利用地统计法使用 IDW 法进行插值结合标准阈值确定土壤修复范围,计算修复土方量。

5.3 在修复技术筛选方面

欧美发达国家构建的场地修复技术筛选矩阵已成为污染场地修复技术初筛最常用的决策支持工具,我国需对国内污染场地修复技术市场、新型技术研发和使用情况全面调查的基础上,构建基于我国修复技术水平及潜力的场地修复技术筛选矩阵。在我国修复技术筛选矩阵的基础上,可以根据污染物类型、场地条件和最终修复目标等因素实现修复技术的初筛。但是筛选出来的结果主观性较大,需要应用合适的模型方法对初筛的结果进行综合评估决策出更加经济有效的修复技术。目前国内需要的是构建我国场地修复技术筛选矩阵,下一步还需要结合模型方法进行综合评价。从表1中可以看出,很多修复技术筛选综合评价的方法主要是采用 AHP 方法来确定评价指标的权重,使用 MCDA 对场地修复技术优选和排序,这样既能克服 AHP 在不易量化指标上的主观性,又能避免多目标决策分析方法对指标权重的忽视。

5.4 在制定修复方案方面

根据确定的修复技术或技术组合和风险评价制定详细的污染场地修复技术方案,主要包括修复技术的可行性评价和成本效益评价、确定工艺参数、分析成本效益等。为量化修复方案评估结果,可以选用成本效益分析法 CBA、费用效果分析法(CEA)对污染场地修复策略的费用效益进行分析。在评估修复工程的实施对周边区域产生的负面影响时候,可选用 LCA 来全面评估项目全过程的环境影响。

参考文献:

- [1] 李发生,颜增光. 污染场地术语手册[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 7.
- [2] 廖晓勇,崇忠义,阎秀兰,等. 城市工业污染场地: 中国环境修复领域的新课题[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 784-794.
- [3] Critto A, Nadal N, Samiolo M, *et al.* DESYRE-Decision support system for rehabilitation of contaminated sites: objectives and structure[A]. In: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society. Integrated Assessment and Decision Support (3) [C]. Manno Switzerland: The International Environmental Modelling and Software Society, 2002. 211-216.
- [4] Vranes S, Gonzalez V E, Lodolo A, *et al.* Decision support tools: applications in remediation technology evaluation and selection[A]. In: NATO/CCMS, Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of and Clean-up of Contaminated Land and Groundwater (Phase III) (special session: decision support tools No. 245) [C]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2001. 42-57.
- [5] 赵娜娜,黄启飞,易爱华,等. 我国污染场地的管理现状与环境对策[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12): 39-48.
- [6] 谷庆宝,颜增光,周友亚,等. 美国超级基金制度及其污染场地环境管理[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 84-88.
- [7] 单艳红,林玉锁,王国庆. 加拿大污染场地的管理方法及其对我国的借鉴[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(3): 90-93.
- [8] 叶腾飞,龚育龄,董路,等. 环境地球物理在污染场地调查中的现状及展望[J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(3): 23-27.
- [9] 张华,蒋鹏,许石豪,等. 有机污染场地环境初步调查与风险评估[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(6): 64-68.
- [10] Scott M M S. Management decision systems: computer-based support for decision making [M]. Boston: Harvard University Press, 1971. 25-28.
- [11] 张海博,张林波,李岱青,等. 基于 DESYRE 模型的污染场地修复决策研究[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(4): 339-348.
- [12] 蒋栋,路迈西,李发生,等. 决策支持系统在污染场地管理中的应用[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 170-174.
- [13] Quarles J, Steinberg M W. The superfund program at its 25th anniversary [J]. Environmental Law Reporter News and Analysis, 2006, 36(5): 10364-10369.

- [14] 张红振, 於方, 曹东, 等. 发达国家污染场地修复技术评估实践及其对中国的启示[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(2): 105-111.
- [15] Vlk E A, Bardos P, Brogan J, *et al.* Towards of framework for selecting remediation technologies for contaminated sites [J]. Land Contamination and Reclamation, 2001, **9**(1): 119-127.
- [16] Sullivan T M, Gitten M, Moskowitz P D. Evaluation of selection environmental decision support software [R]. New York: Brookhaven National Laboratory, 1997. 22-41.
- [17] EPA/540/G-89/004, Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under Cercla[S].
- [18] Bardos R P, Mariotti C, Marot F, *et al.* Framework for decision support used in contaminated land management in Europe and North America [A]. In: NATO/CCMS, Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of and Clean-up of Contaminated Land and Groundwater (Phase III) (special session: decision support tools No. 245) [C]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2001. 9-30.
- [19] Sullivan T. Evaluating environmental decision support tools[R]. New York: Brookhaven National Laboratory, 2004. 2-12.
- [20] Critto A, Agostini P. Using multiple indices to evaluate scenarios for the remediation of contaminated land: the Porto Marghera (Venice, Italy) contaminated site[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2009, **16**(6): 649-662.
- [21] Carlon C, Giove S, Agostini P, *et al.* The role of multi-criteria decision analysis in a decision support system for rehabilitation of contaminated sites (the DESYRE software) [A]. In: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society. Complexity and Integrated Resources Management[C]. Manno Switzerland: The International Environmental Modelling and Software Society, 2004. 1-6.
- [22] Carlon C, Critto A, Ramieri E, *et al.* DESYRE: Decision support system for the rehabilitation of contaminated megasites [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2007, **3**(2): 211-222.
- [23] Marcomini A, Suter II G W, Critto A. decision support systems for risk-based management of contaminated sites [M]. US: Springer, 2009. 157-178.
- [24] Li J B, Huang G H, Zeng G M. An integrated decision support system for the management of petroleum-contaminated sites[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2001, **36**(7): 1163-1186.
- [25] WSRC-IM-2002-00002, Guidebook to decision-making methods [S].
- [26] Linkov I, Varghese A, Jamil S, *et al.* Multi-criteria decision analysis: a framework for structuring remedial decisions at contaminated sites[A]. In: Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making [M]. Netherlands: Springer, 2005, **38**: 15-54.
- [27] 罗程钟, 易爱华, 张增强, 等. POPs 污染场地修复技术筛选研究[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(4): 569-573.
- [28] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 污染场地修复技术的分类, 应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(2): 197-202.
- [29] 陶锟, 全向春, 李安婕, 等. 城市工业污染场地修复技术筛选方法探讨[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(8): 69-74.
- [30] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(6): 1088-1094.
- [31] 潘云雨, 宋静, 骆永明. 基于人体健康风险评估的冶炼行业污染场地风险管理及决策流程[J]. 环境监测管理技术, 2010, **22**(3): 55-61.
- [32] 姜林, 钟茂生, 梁竞, 等. 层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1034-1043.
- [33] Critto A, Cantarella L, Carlon C, *et al.* Decision support-oriented selection of remediation technologies to rehabilitate contaminated sites[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2006, **2**(3): 273-285.
- [34] Bezama A, Szarka N, Wolfbauer J, *et al.* Application of a balanced scorecard system for supporting decision-making in contaminated sites remediation [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, **181**(1-4): 3-16.
- [35] 李安婕, 全向春, 王龔, 等. 基于 PROMETHEE II 法的污染场地土壤修复技术筛选及应用[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3767-3773.
- [36] Van Wezel A P, Franken R O G, Drissen E, *et al.* Societal cost-benefit analysis for soil remediation in the Netherlands [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2008, **4**(1): 61-74.
- [37] Page C A, Diamond M L, Campbell M, *et al.* Life-cycle framework for assessment of site remediation options: Case study [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(4): 801-810.
- [38] Lesage P, Ekvall T, Deschênes L, *et al.* Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, **12**(7): 497-513.
- [39] Suer P, Andersson S Y. Biofuel or excavation? -life cycle assessment (LCA) of soil remediation options [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, **35**(2): 969-981.
- [40] Diamond M L, Page C A, Campbell M, *et al.* Life-cycle framework for assessment of site remediation options: Method and generic survey [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(4): 788-800.
- [41] Volkwein S, Hurtig H W, Klopffer W. Life cycle assessment of contaminated sites remediation [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, **4**(5): 263-274.
- [42] Cadotte M, Deschenes L, Samson R. Selection of a remediation scenario for a diesel-contaminated site using LCA [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, **12**(4): 239-251.

- [43] 胡新涛, 朱建新, 丁琼. 基于生命周期评价的多氯联苯污染场地修复技术的筛选[J]. 科学通报, 2012, **57**(2-3): 129-137.
- [44] Accorsi R, Apostolakis G, Zio E. Prioritizing stakeholder concerns in environmental risk management[J]. Journal of Risk Research, 1999, **2**(1): 11-29.
- [45] Accorsi R, Zio E, Apostolakis G E. Developing utility functions for environmental decision making [J]. Progress in Nuclear Energy, 1999, **34**(4): 387-411.
- [46] Bonano E J, Apostolakis G E, Salter P F, *et al.* Application of risk assessment and decision analysis to the evaluation, ranking and selection of environmental remediation alternatives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, **71**(1-3): 35-57.
- [47] Apostolakis G E. Assessment and management of environmental risks[M]. Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 2001. 211-220.
- [48] Deschaine L M, Breslau B, Ades M J, *et al.* Decision support software to optimize resource allocation-theory and case history [J]. Simulation Series, 1998, **30**(3): 139-144.
- [49] Parnell G S, Frimpon M, Barnes J, *et al.* Safety risk analysis of an innovative environmental technology [J]. Risk Analysis, 2001, **21**(1): 143-155.
- [50] Promentilla M A B, Furuichi T, Ishii K, *et al.* A fuzzy analytic network process for multi-criteria evaluation of contaminated site remedial countermeasures [J]. Journal of Environmental Management, 2008, **88**(3): 479-495.
- [51] Prato T. Multiple-attribute evaluation of ecosystem management for the Missouri River system[J]. Ecological Economics, 2003, **45**(2): 297-309.
- [52] Ramanathan R. A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2001, **63**(1): 27-35.
- [53] 邢颖, 吕永龙, 史雅娟, 等. 焚烧、水泥窑和安全填埋法处置 PCBs 污染物技术优选[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 673-678.
- [54] Goldammer W, Nusser A, Systemplanung B, *et al.* Cost-benefit analyses as basic for decision-making in environmental restoration [R]. London: Environment Agency, 1999. 1-14.
- [55] Kenney M, White M. A cost-benefit model for evaluating remediation alternatives at superfund sites incorporating the value of ecosystem services[M]. US: Springer, 2007. 169-196.
- [56] Higgins M R, Olson T M. Life-cycle case study comparison of permeable reactive barrier versus pump-and-treat remediation [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(24): 9432-9438.
- [57] Lemming G, Hauschild M Z, Chambon J, *et al.* Environmental impacts of remediation of a trichloroethene-contaminated site: Life cycle assessment of remediation alternatives [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(23): 9163-9169.
- [58] Streng D L, Chamberlain P J. Multimedia environmental pollutant assessment system (MEPAS): Exposure pathway and human health impact assessment models[R]. US: Department of Energy, 1995. 1-19.
- [59] Stewart R N, Purucker S T. An environmental decision support system for spatial assessment and selective remediation [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, **26**(6): 751-760.
- [60] USEPA. Contaminated Site Clean-Up Information [EB/OL]. www.clu-in.org/software. 2013-02-26.
- [61] Zakikhani M, Brandon D L, Dortch M S, *et al.* Demonstration applications of ARAMS for aquatic and terrestrial ecological risk assessment [R]. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 2006. 40-50.
- [62] Whelan G, Buck J, Gelston G, *et al.* Framework for risk analysis in multimedia environmental systems [R]. Richland (WA): BATTELLE Pacific Northwest National Laboratory, 1999. 1-15.
- [63] Khelifi O, Zinovyev S, Lodolo A, *et al.* Decision support tools for evaluation and selection of technologies for soil remediation and disposal of halogenated waste [J]. Organohalogen Compounds, 2004, **66**: 1226-1232.
- [64] Delta Research Corporate. Remedial Action Cost Estimation (RACER) [EB/OL]. <http://infohouse.p2ric.org/ref/01/00047/4-02.htm>, 2013-02-26.
- [65] 侯继雄, 贾海峰, 程声通. 信息技术支持下的环境决策支持系统开发研究[J]. 环境科学进展, 1998, **6**(6): 42-47.
- [66] 荆平, 王祖伟. 环境决策支持系统的设计技术及发展趋势[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(3): 50-52.
- [67] 林观土. CASS7.0 软件在土方量计算中的应用[J]. 农业网络信息, 2007, (8): 143-145.
- [68] 胡振琪, 高永光, 李江新, 等. ERDAS 在土地整理土方量计算中的运用[J]. 中国土地科学, 2006, **20**(1): 50-54.
- [69] 陈勇. 利用 ArcGIS 地统计分析进行土地平整土方量计算的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(1): 70-71.
- [70] 王先鹏, 曹荣林. 土方量计算的原理与方法及 ArcGIS 的应用前景[J]. 地理空间信息, 2009, **7**(4): 139-141.
- [71] 阳文锐, 王如松, 黄锦, 等. 反距离加权插值法在污染场地评价中的应用[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(9): 2013-2018.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd (II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe (II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行