



水资源与水环境 风险评价方法及其应用

郑德凤 孙才志 著

中国建材工业出版社

水资源与水环境风险 评价方法及其应用

郑德凤 孙才志 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水资源与水环境风险评价方法及其应用 / 郑德凤,
孙才志著. —北京: 中国建材工业出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-5160-1655-8

I. ①水… II. ①郑… ②孙… III. ①水资源—风险
评价—研究②水环境—风险评价—研究 IV. ①TV211
②X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 221541 号

内 容 简 介

本书从水资源与水环境风险评价的理论、方法和实例研究三个方面, 系统地介绍了风险评价理论及量化分析方法在水资源和水环境领域的应用。本书以地下水资源为主要对象, 综合运用水文水资源、风险分析、系统工程、不确定性理论、多目标决策与分析、计算数学等相关理论与方法对地下水资源开发利用、饮用水环境健康、地下水污染、水资源短缺等方面的风险评价进行了实证研究。主要内容包括水资源与水环境风险评价理论与方法、水环境健康风险评价、地下水环境风险评价、地下水开发风险评价、地下水污染风险评价、水资源短缺风险预测、水资源短缺风险评价等。

本书可供从事水文学及水资源、地下水科学与工程、环境科学、环境管理及相关专业的科研人员 and 高校师生参考使用, 也可供相关管理和工程技术人员参考。

水资源与水环境风险评价方法及其应用

郑德凤 孙才志 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 15

字 数: 358 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次

定 价: 78.80 元

本社网址: www.jccbs.com 微信公众号: zgjcgychs

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

伴随人口增长、社会经济快速发展和城市化进程的推进，作为人类生存的物质基础之一的水资源面临着日益紧缺和水环境质量恶化的态势，进而威胁到居民饮用水安全和身心健康。解决水资源短缺与水环境污染问题一直是国家重点关注问题，也是学术界的研究热点。风险评价是水资源利用与水环境评价中的重要内容，近 20 年来得到迅速发展。一些重大水利建设项目和其他生产项目的环境影响报告中均需开展环境风险评价，因此对水资源与水环境风险评价的理论与方法进行探讨具有重要的理论意义和实际应用价值。

风险评价把数学、计算机、卫生学、毒理学、水文学、水资源学、地理学、环境学、化学等自然科学和部分社会科学多学科融合在一起，是一门综合性较强的跨学科理论。本书以地下水资源为主要对象，综合运用水文水资源、风险分析、系统工程、不确定性理论、多目标决策与分析、计算数学等相关理论与方法对地下水资源开发利用、饮用水环境健康、地下水污染、水资源短缺等方面的风险评价进行了实证研究。取得的风险评价结果可为研究区水资源可持续开发利用、水资源科学规划与管理、水环境保护奠定理论基础，可为水利、环保管理部门制定相应的水资源优化配置方案与管理对策提供参考依据。

本书是在我们课题组成员多年来从事水文水资源与环境科学领域的研究成果和研究生学位论文基础上发展起来的，部分成果尚未公开发表过。全书由郑德凤、孙才志统稿，课题组研究生李晓研、王平富、苏琳、赵锋霞、邵艳莹、陈相涛、朱静、张卓、魏秋蕊、郝帅等等相关专题研究中进行了具体的计算工作，为本书的顺利出版做出了贡献。

在本书稿完成之际，感谢辽宁省重点实验室“自然地理与空间信息科学重点实验室”、辽宁师范大学水文与水资源工程系各位同仁给予的关心和帮助。感谢城市与环境学院李永化教授、张戈教授、张威教授、张华教授、曹永强教授、王耕教授、盖美教授一直以来对作者工作和科研上的大力支持。感谢课题组研究生李晓研、王平富、苏琳、赵锋霞、邵艳莹、陈相涛、朱静、张卓、魏秋蕊等等相关专题研究中做出的贡献。尤其感谢郝帅为书稿的编排付出的辛勤工作。本书能够顺利出版，还要感谢大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目（No. LP1512）、国土资源部资源环境承载力评价重点实验室开放课题资助项目（No. CCA2015. 04）以及辽宁省特聘教授资助经费。特别感谢中国建材工业出版社的领导和责任编辑贺悦的大力支持。

目前水资源与水环境领域的风险评价尚不成熟，各种新的评价方法还在不断发展和探索中，一些理论和认识还有待深入和完善。鉴于著者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请专家和读者批评指正。对本书中参考的著作与论文，作者对主要引用文字在书中进行了标注，并给出了相应的参考文献，但由于时间仓促，可能存在个别观点未有明确标注，在此恳请广大专家学者海涵，对于书中所引用文献的众多作者表示诚挚谢意！

著者

2017 年 1 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	4
1.2.1 环境健康风险评估研究进展	4
1.2.2 地下水开发风险评估的研究进展	7
1.2.3 地下水污染风险评估研究进展	7
1.2.4 地下水环境风险评估	15
1.2.5 水资源短缺风险评估研究现状	16
1.3 本书的主要内容	17
第2章 水资源与水环境风险评估理论与方法	20
2.1 风险评估理论	20
2.2 不确定性理论	21
2.3 多目标决策与分析方法	25
2.3.1 模糊物元理论	25
2.3.2 突变理论与突变模型	30
第3章 水环境健康风险评估方法及在地下饮用水源地的应用	35
3.1 环境健康风险评估基本理论	35
3.1.1 健康风险评估基本概念	35
3.1.2 健康风险评估过程与内容	36
3.1.3 风险评估中不确定性分析	37
3.1.4 风险表征标准	38
3.2 水环境健康风险评估方法	39
3.2.1 水环境健康风险评估概念	39
3.2.2 水环境健康风险评估“四步法”	40
3.2.3 蒙特卡罗方法	42
3.2.4 预期寿命损失法	43
3.3 研究区自然概况、区域地质及水文地质条件	44
3.3.1 自然地理概况	44
3.3.2 地形地貌	44
3.3.3 区域水文地质条件	45

3.3.4	气候特征	48
3.3.5	水资源概况	48
3.3.6	饮用水源地概况	50
3.4	地下饮用水源地水环境健康风险评价模型	51
3.4.1	致癌性与非致癌性风险评价模型	51
3.4.2	不同暴露途径污染物摄入量计算模型	52
3.4.3	污染物毒性评估	52
3.5	水环境健康风险的不确定性分析	54
3.5.1	暴露参数随机模拟	55
3.5.2	基于蒙特卡罗方法的水环境健康风险评价结果	56
3.6	基于预期寿命损失法的水环境健康风险评价	60
3.6.1	基于预期寿命损失的水环境健康风险评价模型	60
3.6.2	基于预期寿命损失法的水环境健康风险计算及结果分析	61
第4章	基于不确定参数的水环境健康风险评价方法与应用	70
4.1	水环境健康风险评价模型	70
4.1.1	致癌物风险率的计算模型	70
4.1.2	非致癌物质的风险率计算模型	71
4.1.3	放射性物质的风险率计算模型	71
4.1.4	暴露剂量计算方法	71
4.2	评价参数的模糊数确定与区间转化	73
4.2.1	评价参数的模糊数确定	73
4.2.2	三角模糊数定义与运算法则	75
4.2.3	评价参数的区间数转化	76
4.3	盘锦市饮用水源地水环境健康风险评价	76
4.3.1	研究区水质数据分析	76
4.3.2	致癌物健康模糊风险率计算	78
4.3.3	非致癌物健康模糊风险率计算	81
4.4	健康风险评价的不确定性分析	87
第5章	地下水开发风险评价理论、方法与应用	89
5.1	地下水开发风险系统的基础理论及评价方法	89
5.1.1	地下水开发风险系统的内涵及特征	89
5.1.2	地下水开发风险的评价内容及影响因素	91
5.1.3	地下水开发风险评价指标体系的建立	92
5.1.4	基于突变理论的地下水开发风险评价模型	97
5.2	基于突变理论的辽宁中南部地区地下水开发风险评价	98
5.2.1	辽宁中南部地区概况	98
5.2.2	辽宁中南部地区地下水开发风险评价计算过程	104

5.2.3	辽宁中南部地区地下水开发风险评价结果分析	108
5.3	基于突变模型的下辽河平原地区地下水开发风险评价	110
5.3.1	评价指标体系的构建	110
5.3.2	突变隶属度的计算	112
5.3.3	下辽河平原各地区地下水开发风险评价结果分析	113
5.3.4	突变模型的改进与应用	115
5.4	地下水开发风险管理对策	116
第6章	下辽河平原各行政分区地下水污染风险评价与应用	118
6.1	下辽河平原自然概况、区域地质及水文地质条件	118
6.1.1	区域自然地理概况	118
6.1.2	区域地质地貌条件	119
6.1.3	区域水文地质条件概况	123
6.2	下辽河平原各区地下水固有脆弱性评价	128
6.2.1	地下水固有脆弱性评价方法	128
6.2.2	研究区地下水固有脆弱性评价结果与分析	131
6.3	下辽河平原各区地下水资源价值评价	134
6.3.1	地下水资源价值评价指标体系的建立	134
6.3.2	研究区地下水资源价值评价指标选取	137
6.3.3	基于突变理论的下辽河平原地下水资源价值评价与结果分析	138
6.4	下辽河平原各区地下水污染风险评价	142
6.4.1	地下水污染风险评价过程	142
6.4.2	评价结果分析	143
6.5	地下水污染风险管理建议	143
第7章	下辽河平原浅层地下水污染风险评价及空间热点分析	145
7.1	地下水污染风险评价理论	145
7.1.1	地下水污染风险的内涵	145
7.1.2	地下水污染风险的属性内涵	145
7.1.3	地下水污染风险与污染事故的辩证关系	146
7.2	下辽河平原浅层地下水污染风险评价	146
7.2.1	地下水污染风险评价方法与模型构建	146
7.2.2	数据处理与遥感影像解译	148
7.2.3	地下水污染风险评价结果与分析	149
7.2.4	评价结果合理性检验	154
7.3	下辽河平原地下水污染风险空间热点识别与分析	155
7.3.1	空间热点分析方法简介	155
7.3.2	下辽河平原地下水污染风险空间热点分布识别与度量分析	156
7.4	小结	159

第 8 章	下辽河平原浅层地下水环境风险评价及其空间关联格局分析	160
8.1	地下水环境风险评价理论	160
8.1.1	地下水环境风险的概念	160
8.1.2	地下水环境风险的内涵	161
8.1.3	环境风险评价模型及研究方法	162
8.1.4	空间自相关分析方法	163
8.2	地下水环境风险评价指标体系及权重确定	170
8.2.1	地下水环境风险的影响因素	170
8.2.2	评价指标体系的构建	171
8.2.3	评价指标权重的确定	172
8.2.4	评价指标数据来源与遥感影像处理	172
8.3	下辽河平原浅层地下水环境风险综合评价	173
8.3.1	地下水环境风险评价模型	173
8.3.2	下辽河平原浅层地下水环境风险评价结果分析	174
8.4	下辽河平原地下水环境风险的空间关联格局分析	177
8.4.1	基于空间自相关的下辽河平原地下水环境风险分析	177
8.4.2	下辽河平原地下水环境风险空间关联格局研究	177
第 9 章	水资源短缺风险预测方法与应用	179
9.1	水资源短缺风险预测理论与方法	179
9.1.1	水资源短缺与风险概念界定	179
9.1.2	马尔科夫链预测模型	181
9.1.3	故障树分析模型	182
9.2	研究区水资源短缺风险预测	184
9.2.1	研究区水资源短缺概况	184
9.2.2	研究区水资源短缺故障树模型建立	186
9.2.3	研究区水资源短缺基本事件分析	186
9.3	基于故障树模型的研究区水资源短缺状况分析	190
9.3.1	基于马尔科夫链的研究区水资源短缺预测	190
9.3.2	研究区水资源短缺的定性分析	195
9.3.3	研究区水资源短缺定量分析	195
9.4	研究区水资源短缺预测结果分析与建议	197
9.4.1	研究区水资源短缺风险预测结果	197
9.4.2	研究区对水资源短缺现状采取的措施和预测结果验证	197
9.4.3	解决研究区水资源安全问题建议	198
第 10 章	水资源短缺风险评价理论与应用	199
10.1	研究区概况	199
10.1.1	自然地理概况	199

10.1.2	社会经济概况	199
10.1.3	水资源概况	200
10.2	水资源短缺风险评价方法	202
10.2.1	常用的水资源短缺风险评价方法	202
10.2.2	模糊物元模型	204
10.3	水资源短缺风险评价指标的选取与评价标准确定	204
10.3.1	评价指标的选取与权重的确定	204
10.3.2	评价标准	208
10.4	基于模糊物元模型的水资源短缺风险评价	208
10.4.1	研究区水资源短缺风险评价	208
10.4.2	评价结果分析	209
10.5	研究区水资源短缺风险管理对策	210
10.5.1	开展节水工程	210
10.5.2	改善水资源管理	212
10.5.3	优化经济产业布局	212
10.5.4	完善水价制度	213
10.5.5	构建节水型社会建设良好的软环境	213
参考文献		214

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

水是生命赖以生存的基本条件之一，随着人口增长、经济发展和城市化进程的不断加快，水资源消耗量急剧增加，水资源匮乏已成为全球普遍关注问题，全世界正面临水资源危机。到 2025 年，全世界将有 35 亿人缺少健康的饮水资源。水资源短缺对人类生产生活有两方面的影响：一方面是资源性缺水，水资源呈现分布不均的状态，部分地区因来水量过少而导致水资源不足；另一方面是水质型缺水，水体由于人们使用不当而遭到一定程度的污染，表现为水体恶化、水体功能下降。水量不足和水质型缺水已成为制约社会经济发展、生态良性循环，引发军事冲突的重要因素之一。近年来，由于城市化进程加快、人口增长、生活质量提高、工农业生产发展等一系列问题导致需水量的不断增加，而供水量的增长有限，进而加剧了水资源短缺问题。目前世界上有 100 多个国家缺水，其中严重缺水的国家和地区达 43 个，占全球陆地面积的 60%。随着全球经济的一体化，水问题不再局限于某一地区或某一时段，而成为全球性、跨世纪的焦点，因而如何有效地开发和利用水资源是保证社会经济可持续发展以及人与自然和谐共处的重要因素（王磊，2009）。

水资源是人类赖以生存的生命线。随着人类对自然资源的肆意开发利用，导致水资源匮乏和水环境质量恶化。目前我国大部分地区的地下水都已受到不同程度的污染，且呈现越演越烈的态势，严重威胁到居民饮水安全和人类身心健康状况。同时经各种途径排放到环境中的污染物不断增加，进入环境中的污染物在介质中迁移、转化或沉积，最终构成对人体健康的威胁。

当前，我国面临的水环境问题形势十分严峻（赵彦红，2005）。洪灾频繁发生，水污染、干旱缺水现象严重，造成经济损失不计其数，水环境的好坏直接影响着国家的经济发展（彭静等，2004）。据调查，我国江河大都受到不同程度上的污染，一些河川的生态功能正在退化，甚至有些水质污染严重到不能用于灌溉（张杰，2002）。全国淡水湖无一幸免均达到中度以上污染，而且污染增长趋势速度惊人。近年来，全国部分近海海域有机污染严重，多次发生赤潮现象。上述问题正在警示我们，水环境恶化严峻，必须建立起健康的良性水循环（张杰等，2005），恢复水环境健康（张杰等，2003），防止水环境问题进一步扩大。

地下水作为水资源的重要组成，供水稳定、水质良好，在农业灌溉、工业和城市生活用水中占重要份额，我国约 2/3 的城市把地下水作为主要水资源（唐克旺等，2009），在保障居民生活用水，支撑社会经济发展和维持生态平衡等方面具有十分重要的意义。近 30 年来，我国有 400 多个城市开发利用地下水，且开采量逐年增加。我国地下水资源量约占水资源总量的 1/3，地下水供给水量平均达到全国总供水量的 20%，其中，在地表水资源相对匮乏的

北方地区, 65%的生活用水、50%的工业用水以及33%的农业灌溉用水来自地下水(中华人民共和国环境保护部, 国土资源部, 水利部, 2011), 地下水供给水量已占其总供水量的52%, 在华北和西北地区已高达72%和66%, 这种用水结构在短时期内不会改变。地下水与生态地质环境密切相关, 长期持续过量开采地下水, 开采量大于补给量, 地下水资源得不到及时补充与恢复, 就会引发一系列的水文地质环境地质问题, 如地下水位持续下降、地面沉降、塌陷、裂缝、建筑物倾斜、植被退化、海水入侵等。近60年来, 随着人口增长, 城镇化进程的加快, 人民生活水平不断提高, 工农业快速发展, 导致城市需水量不断增加, 在大力开发地表水资源潜力的同时, 也加大了地下水资源的开发与利用。目前, 我国有46个城市出现明显的地面沉降, 主要分布在我国北方地区, 天津、上海、太原等城市最大沉降量均已超过2m, 并且北方地区土地荒漠化面积不断增加(高夏辉等, 2005)。

伴随着地下水开采量的增加, 我国地下水污染问题也日益突出, 地下水污染对环境和经济发展的影响也日趋严重, 《2014年环境状况公报》数据显示: 2014年全国202个城市的4896个地下水水质监测点中较差级别的监测点比例为45.4%, 极差级别的监测点比例为16.1%。主要超标指标为溶解性总固体、铁、锰、总硬度、“三氮”(亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和氨氮)、氟化物、硫酸盐等, 个别监测点有砷、铅、六价铬、镉等重(类)金属超标现象, 对人类的身体健康构成极大威胁。目前我国地下水污染的基本态势是: 由单一污染向复合污染转变, 由点状、条带状向面状扩散, 由浅层向深层渗透, 由城市向周边蔓延(中国科学院可持续发展战略研究组, 2007), 地下水广泛存在于岩土孔隙中, 运移过程缓慢, 这也决定了地下水污染具有隐蔽性与难以治理的特点(钟秀等, 2014)。在地下水资源的开发利用过程中, 地下水污染的程度也日益加重, 严重影响了地下水资源的利用价值, 引发与水有关的一系列生态环境问题, 不仅威胁到人类健康而且也严重制约城市经济和社会发展(李君等, 2006)。据统计, 我国已有130多个地区及城市的地下水遭受污染, 其中沈阳、兰州、西安等北方缺水地区污染较为严重, 污染现象由浅层地下水逐步向深层地下水转移, 并由城市向农村扩展。由于地下水流速慢、稀释自净时间长, 具有隐蔽性、长期性和难以逆转性, 因此地下水一旦遭受污染, 很难恢复与治理, 并危及社会生产生活的用水安全。

随着人们安全用水意识的不断增强, 对饮用水的质量日益重视。1970年代以来, 我国卫生部门开展了广泛的水环境水质监测, 环境保护部门也开展了水环境水质监测工作。监测结果表明, 我国水资源不仅在数量上严重短缺, 而且质量也存在很大安全隐患。水质安全的威胁主要来自化学物的污染, 对大部分化学性污染物, 目前常规的污水处理技术还不能完全清除, 其中一些有毒污染物对人体健康构成潜在威胁。为确保人们安全用水, 保持水环境健康, 对饮用水环境健康风险评价十分必要。水环境健康风险评价的目的包括: 第一, 掌握水体中含有污染物的性质、浓度及分布特征等; 第二, 定量分析水体中污染物所致人体健康危害概率及风险概率大小; 第三, 为政府和有关环保部门对水源地的管理提供重要参考依据, 提高对水源地的治理与管理能力; 第四, 完善与保护水源相关的法律法规; 第五, 实现水资源的安全可持续利用。

此外, 随着社会经济的迅猛发展, 环境问题日益受到关注, 雾霾、PM_{2.5}也频繁挑动大众的敏感神经, 环境保护与治理引起人们的高度重视。环境污染已成为影响人类健康或死

亡的主要因素之一。水环境作为人类生活环境的一个必要组成部分受到严重的污染,特别是饮用水环境,污染物通过饮水、皮肤接触和呼吸等途径进入人体,给人们生命安全带来很大威胁。如日本著名的“水俣病”和“骨痛病”事件,河南沈丘河水中砷和镉超标引起高发癌症病发事件,陕西凤翔铅超标引起174名儿童铅中毒事件,以及欧洲一些国家发生的水体污染事件,使水体污染的防治工作备受关注。据资料统计,城市居民因患癌症死亡的人数中90%是由环境中的污染物引起的。因此,为维护水环境健康,确保人们能饮用到水质良好的水,相关部门和水源地保护机构应该执行统筹规划、综合治理、治污为本、因地制宜的方针与政策,定期对饮用水源地进行水环境健康风险评价与管理。

环境影响评价与风险评价交叉发展形成的环境风险评价,是环境科学发展的必然趋势,是人们对于环境保护的迫切需求(杜锁军,2006)。健康风险评价将环境污染与人体健康影响进行定量化研究。水环境健康风险评价重点是对水体中的污染物与人体健康损害程度的关系进行定量计算,多以风险度作为指标。

国际上,健康风险评价研究多沿用风险评价“四步法”模式,并借此构建适合本国的健康风险评价体系。水环境健康风险评价重点是评价水体污染物与人体健康的影响关系,定量估算不同暴露条件下对人体健康的损害程度,对饮用水源地风险评价及预测具有深远的意义和现实的应用价值。目前水环境健康风险评价研究已广泛开展,其研究成果可供相关部门参考,并用于水环境健康风险预警监控、风险削减和风险控制,为水环境风险管理方案提供科学合理的决策与依据。

2014年“两会”上提出落实“四严”要求守护“舌尖安全”,“四严”同样适用于地下水资源管理,制定最严谨的标准和最严厉的处罚,实施最严格的监管和最严肃的问责,为大众“饮水安全”保驾护航。加强地下水监管工作,履行监管义务对保障饮水安全,实现“美丽中国”的发展目标,具有重要的现实意义和深远的影响。因此,进行地下水污染的风险评价研究十分必要且意义重大。其意义主要体现在以下几个方面:

(1) 通过地下水污染风险评价研究可以了解当地地下水污染状况,为研究区受污染场地的修复和治理提供依据;对未受到污染但存在潜在污染威胁的场地,可以提醒管理者及时制定并实施地下水保护计划,减少污染的可能性。

(2) 科学合理地开展地下水污染的风险评价工作可以识别该区当前地下水环境现状,并预测未来变化趋势,有利于该区地下水的合理开发与高效利用,达到地下水资源的持续利用、生态环境良性发展和人水和谐共处的目标。因此,地下水污染风险研究可以定性、定量、定位地反映地下水发生污染的可能性及其危害程度,为防治地下水污染提供高效、科学的信息支持。

(3) 地下水污染风险研究不仅需要相应的技术支持,也需要经济上的付出,但是地下水污染风险研究的经济投入远比修复含水层和治理地下水污染对社会发展、生态环境造成的不良影响所付出的代价要少得多。而且在各种各样的地下水修复案例中,尽管投资巨额并长期实施,但几乎没有经修复后地下水水质达标的案例。

(4) 地下水污染风险评价可以提高公众的防患意识,树立人与自然和谐共处的新概念,提高公众参与地下水保护的意识,有利于地下水保护工作的进行。因此,应加大力度在研究区进行地下水污染风险研究工作。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 环境健康风险评价研究进展

健康风险评价开始于20世纪30年代,1960年以前以定性研究为主。起初以报道有关职业流行病和剂量—反应关系的有关实验等形式出现,主要针对一些风险较大的有毒物或急性中毒事件。20世纪40年代后期开始研究一些较小的风险、潜在的风险及慢性风险等,一些专家通过分析职业流行病学和剂量—反应关系的实验资料,将人体暴露剂量与人体健康效应之间的关系用一定的数学公式表达出来,即开始对人群接触污染物剂量与健康风险之间的关系进行定量研究。

20世纪70~80年代,健康风险评价研究进入高峰时期。1976年EPA颁布的“致癌风险评价准则”标志着健康风险评价体系基本形成。1983年NAS出版的红皮书《联邦政府的风险评价:管理程序》中提出的危害鉴别、剂量—反应评价、暴露评价和风险表征被作为环境风险评价的指导性文件,并被荷兰、日本等国家和一些组织所采用。1985年以来,EPA根据红皮书又颁布了一系列技术指导性文件、准则和指南,主要包括《致癌风险评价指南》、《化学混合物的健康风险评价指南》、《暴露风险评价指南》、《神经毒性风险评价指南》等(王晨晨,2010;马传莘,2007)。1987年欧盟立法规定,对存在化学事故隐患的工厂开展环境风险评价。1988年联合国环境规划署(UNEP)制定阿佩尔计划(APELL),来应付对人体健康危害效应的环境污染事故(毛小苓等,1998)。

19世纪末至20世纪中期,环境污染导致的中毒事件频发,毒理学家采用定性的方法开展健康影响分析。20世纪80年代中期,毒理学家进行低浓度暴露下的定量化的健康风险评价。Cuddihy R. G. (1983)对健康风险评价中环境污染物污染程度和人类接触污染程度之间的联系和暴露剂量反应进行研究。Gold等(1984)建立致癌强度系数数据库,开展致癌物定量化风险评价。Brown S. L. (1985)通过外推模型和风险预测对环境污染进行定量风险评估。

国外的环境风险评价产生于20世纪70年代的一些工业发达国家,并对此展开了一系列的研究,美国是最先开展环境风险评价、风险评价体系最为完善的国家之一。美国环境风险评价进程:1969年~1982年为起步时期,风险评价内涵尚不明确;1983年~1988年为准备阶段,美国国家科学院提出风险评价模式,形成了一套环境风险评价的指导性文件、标准;1989年~至今为完善阶段,环境风险的基本框架成型。美国国家原子能委员会(USNRC)提出的“大型核电站中重大事故的理论可能性和后果”的研究报告,作为环境风险评价的开篇和最具代表性之作(NRC National Research Council(U. S), 1994)。此后,以美国为代表的西方工业化发达国家及世界各地的不同组织机构、学者都对环境风险评价展开了一系列研究。如1974年加拿大环境问题科学委员会主席R. E. Munn同来自世界各地的专家学者一起提出了用概率的方法探讨“最佳方案”的准则;在1975年人类环境国际科学家大会上,Walter提出政策的意外失误的影响分析应被纳入到环境影响评价之中,并阐述适宜的应急计划;此后Hil. born把Walter提出的这一理论应用到渔业发展中的政策失败后的后果分析中(U. S. A. E. C, 1975)。这成为环境分析评价领域的重大突破。近年来一些重大污染事故的

出现,环境风险评价作为环境影响评价的重要组成部分逐步被纳入到环境影响评价。1975年美国核管委会编制了事故风险评价的代表作《WASH-1400 报告》,该报告系统地建立了概率风险评价方法,并于1976年形成系统(王宝贞等,1985)。自进入20世纪80年代,美国和国际机构与组织相继颁布了风险评价的标准,规范和评价技术。1983年,美国国家科学院提出健康风险评价“四步法”(胡二邦,2000),并对各部分做出了明确定义。在此基础上,美国EPA制定和颁布了一系列有关健康风险评价的技术性文件或指南。随后联合国环境规划署、世界银行环境和科学部以及美国等国际组织和机构相继制定颁布、出台出版了许多有关风险评价的指南、导则和计划。环境风险评价的科学体系和框架基本形成,并不断发展和完善。此外,20世纪初期的日本工厂职工健康隐患和环境公害事件的爆发,让日本开始重视环境风险的评价,从而有针对性地开展环境健康评价及管理工作,并随之颁布一些补偿法规。日本的环境风险评价主要围绕化学物质的污染展开。欧盟在对人体健康评价和生态风险评价进行深入分析的基础上,将其应用于工业风险评价之中并取得了一定的成果;环境的污染引发人体健康危害成为欧盟2002~2006年环境风险评价关注的焦点。一些专家学者在20世纪90年代后期,开始认识到健康风险评价和事故风险评价孤立的发展带来的缺陷,提出了应采用“综合风险评价”。WHO/UNEP(2001)将其定义为“基于科学的方法,在一个评价下统一对人类,生物区和自然资源进行风险评估的过程”(Jim Bridges, 2003)。

随着计算机技术的发展,水文学、毒理学和化学等与环境相关的学科快速发展,一些国家着手对环境风险评价指南进行修订和补充,风险评价日渐完善,健康风险评价也在人们的生活中开展起来。Ihedioha J. N. 等(2014)对尼日利亚人牛肉中摄取的锌、铬和镍进行健康风险评价,结果表明铬的摄入量已经超过世界卫生组织规定的日摄入量。Claus E. B. (2000)阐述了在遗传流行病学领域比较常用风险评价方法,并介绍了疾病风险评估中的乳腺癌风险模型。Chappell 等(1997)对美国地区进行砷风险评价研究,并建议研究建立饮用水风险等级。

从总体上来看,当前国外的环境风险评价大多是针对人体健康评价(Steinemann, 2000; Kentel K, 2005; Ma J, 2012; Nadal MN, 2011)、事故风险评价(VanBaardwijk F. A. N, 1994; Norreys R, 1996; Suter, 1987)以及作为环境影响评价的重要组成部分被广泛应用于各种建设项目的环境风险评价,评价方法多以定性评价为主,随着环境风险评价的发展,生态风险评价(Wayne G, 2003; Hanson Mark L, 1997; Power M, 1997; Fernandez MD, 2005)成为近年来研究的热点问题。

环境健康风险评价是把风险度作为评价指标,把环境污染与人体健康定量联系的一种评价(曾光明等,1998;王秋莲等,2009;邹滨等,2009)。我国环境风险评价研究起步于20世纪80年代,初期以介绍和应用国外的研究成果为主。1990年以后,环境风险评价工作逐渐得到重视,国家环境保护局发布第057号文件,要求对可能存在重大环境污染事故隐患的建设项目进行环境健康风险评价(胡二邦,2000)。1990年中国在核工业系统开展环境健康风险评价研究;1993年国家环境保护局颁布《环境影响评价技术导则》规定:存在环境风险隐患的建设项目必须进行风险分析与评价;中国环境科学学会举办的“环境风险评价学术研讨会”初次探讨在中国开展风险评价的方法与步骤(毛小苓等,2003)。1997年,国家环境保护局、农业部和化工部联合发布《关于进一步加强对农药生产单位废水排放监督管理的通知》中有“规定对农药生产建设项目必须进行风险评价”的相关内容(余彬等,

2010)。2001 年国家经贸委发布《职业安全监控管理体系指导意见》和《职业安全管理体系审核规范》；2004 年国家环保局颁布我国环境保护行业标准，对环境风险评价起到了积极的推动作用；2005 年底国家环保局对石化化工项目的环境风险提出更为严格的要求。此后，国内专家学者开始逐步地在许多领域开展环境风险评价，如土壤污染、石油工业化工建设项目、流域污染、灾害风险评价、生态风险评价等（吕建树等，2010；王勇等，1995；韩严和等，2010；刘卫国等，2008；张会等，2005；付在毅等，2001），为此后的环境风险评价奠定了理论基础。

胡二邦（2000）在关于环境风险一书中详细阐述了环境风险的定义、研究重点、内容与评价程序；田裘学（1997）介绍了健康风险评价的“四步法”及基本概念；陈炼钢等（2008）采用“四步法”对水源地水质风险进行评价；张晓平等（2011）运用区间模糊集对东昌湖 21 孔桥处的水质进行综合评价。曾光明（1997）通过健康风险评价方法定量描述污染物对人体健康危害效应的概率，并简要阐述了水环境健康风险模型及其定量化实例（1998）；王永杰等（2003）、曾光明等（1998）研究环境风险评价中的不确定性定义、类型并展开了降低不确定性的方法研究；王宗爽，武婷等（2009）根据我国居民的基本特征及调查的相关统计数据，参考美国环保署推荐的暴露参数，研究了我国居民的饮食、呼吸、皮肤等暴露参数；王喆，刘少卿等（2008）估算了我国成人及儿童的皮肤暴露面积；许海萍，张建英等（2007）运用预期寿命损失法对 6 种致癌和非致癌物造成的人体预期寿命损失做了评价；邹滨等（2009）评价了某水源地污染物对人体健康危害的时空差异和污染源特点；倪彬，王洪波等（2010）对某湖泊水环境健康风险进行了评价；李如忠（2007）用盲数理论评价了城市水源的水环境健康风险；钱家忠（2004）对城市供水水源地水质进行了风险评价；王大坤，李新建等（1995）对岷江乐山段的水质进行了健康风险评价；苏伟，刘景双（2006）对第二松花江干流中的重金属污染物进行了健康风险评价；陈敏健等（2007）评价和对比了某河中的污染物质在汛期和非汛期的健康风险；何星海，马世豪等（2006）对再生水利用进行了健康风险评价；许川，舒为群等（2007）对三峡库区水环境中的多环芳烃和邻苯二甲酸酯类进行了健康风险评价；杨全锁，郑西来等（2008）针对污染物经饮水和皮肤接触等途径进入人体所致人体危害进行了风险评价；陈鸿汉，湛宏伟等（2006）探讨了污染场地的健康风险评价理论和方法；丁昊天、袁兴中等（2009）根据国际上公认的风险评价标准，利用模糊理论探讨了长株潭三市地下水重金属健康风险；耿福明，薛联青等（2006）针对部分地区部分污染物做了健康风险评价。李如忠（2007）运用模糊集理论建立了水环境健康风险模糊模型，降低了不确定性因素对评价结果的影响。许海萍等（2007）借助预期寿命损失法对杭州地区进行环境健康风险定量化评估，并进行人群差异性研究。段小丽等（2012）介绍了暴露参数的调查研究方法，同时比较了我国与国外暴露参数在调查和科研方面的差距和不足，为我国暴露参数的发展方向提出了建议。

迄今为止我国环境健康风险评价已取得一定的研究成果，但较其他发达国家还存在一定差距，尤其在水环境健康风险评价方面还有待提高。目前，该领域主要依据传统的国外环境风险理论与方法，加之自然现象的复杂性、多变性和随机性，对于环境风险的不确定性难以控制，我国仍没有一套适合我国国情的环境风险评价程序及方法的技术性指导文件。

1.2.2 地下水开发风险评价的研究进展

目前,水文水资源系统风险的定义与理论非常多。在随机水文学中,风险定义为一个失事事件发生的概率;在地下水开发领域中,地下水开发风险指在特定时空环境条件下,人类活动过程中对地下水系统及其周围环境造成的损失程度。具体来说,是指在开发利用地下水的过程中出现失事事件或事故,对人的生命、财产以及环境造成的不利影响或危害(冶雪艳,2006)。在地下水开发风险评价上,Banhan 最早开始了水文风险的研究,1976年 Colorni A 等讨论了洪水和干旱两个可靠度约束的单目标优化问题。1979年 Goicoechea A 等研究了不确定性下的多目标问题。1982年 Simonovic S P 等研究了多用途水库管理问题的可靠度规划问题。1983年 Molostvovo VS 讨论了不确定性下的多判据优化概念和充分条件,其中多值向量函数的极值点、鞍点和均衡点及其充分条件的理论研究成果是相当重要的。1985年 Haimes Y 提出了代用风险函数的概念。Sergeldin 等(1998)在文章中讨论了地下水开发的风险问题。Hilienbrand 等(2002)利用 GIS 技术对纽约的地下水污染进行了风险分析。Coicoechea 等(1982)提出了将风险和不确定性的方法应用于水资源工程收益—成本分析中。Hashimoto(1982)从数学角度上定义了可靠性、可恢复性、脆弱性3个评价指标等。这些都对多目标决策学科的发展起到了一定的积极作用。另外,也有人试图利用社会科学原理去认识和处理极值事件,以达到减灾增效的目的。

国内有许多专家在水资源风险问题研究方面已取得初步成果。叶秉如研究了机遇约束法的原理及其求解方法并进行了实际应用;朱元铎利用风险综合分析方法并综合考虑了安全水位和演算误差两种风险因子对长江南京段进行防洪效益计算;胡振鹏和冯尚友采用分解聚合方法建立了多目标分析模型系统,并具体应用到水库防洪、发电和灌溉等领域,指出在研究多层次多目标问题时可以将向量变为多维状态的单层次目标问题。徐宗学利用随机点过程理论建立了两种模型即 GPP 模型和 GPB 模型,并将此模型应用到洪水风险计算中得到了较好的成效。近年来,在地下水开发风险评价上,李如忠等(2004)利用盲数理论对地下水允许开采量进行了风险分析。王昭等(2009)对华北平原地下水中有有机物淋溶迁移性及污染性进行风险分析。王丽萍等(2008)对饮用水源污染进行了风险分析。栗石军等(2008)对长沙黄兴镇地下水重金属污染进行了风险分析。束龙仓等(2000)根据参数取值的随机性,定量地分析了地下水资源评价结果的可靠性。Camara 等(2003)分析了地下水开发利用过程中的不确定性因素,在此基础上进行了区域地下水开采方案的风险评价。冶雪艳等(2007)采用突变理论对黄河下游悬河段的风险等级进行了评估。韩京龙等(2011)运用突变评价法对吉林西部地下水进行了开发风险评价。地下水开发风险评价为水资源保护规划提供了科学依据。

1.2.3 地下水污染风险研究进展

地下水在自然资源中具有不可替代的重要地位,是水资源的重要组成部分之一,对人类健康和社会经济发展具有重要意义。在地下水资源的开发利用过程中,地下水污染的程度也日益加重,地下水污染正呈现由浅层逐步向深部含水层转移、由城市向农村扩展的严重局面。因此,地下水污染现象不容忽视,有效防治地下水污染问题至关重要,其最根本的解决办法是对区域地下水系统实施保护战略方针。地下水污染风险评价是保护区域地下水资源的

重要依据和有效工具之一。

1.2.3.1 地下水污染风险评价研究历程

20 世纪 60 年代法国学者 Margat 提出的地下水脆弱性自诞生以来一直处于不断发展中 (NATIONAL R C, 1993; VRBA J, 1994), 从早期的仅考虑地质、土壤、气象、水文等因素的自然属性条件的固有脆弱性评价发展到后来的考虑人类土地利用活动因素的特殊脆弱性评价。有些研究也将这种考虑到造成不同程度污染强度的人类土地利用活动影响因素的脆弱性评价称为地下水污染的风险评价, 并将其评价成果直接应用于水源保护和土地利用中, 指导人类合理的土地利用活动。如以色列学者 Martin L. Collin 等 (2001)、英国学者 Secundas 等 (1998) 开展的地下水污染风险评价与编图的理论研究和实践探讨。然而, 这些地下水污染风险评价研究所提出的理论与方法还是初步的、不完善的。世界银行于 2002 年出版的《地下水质量保护用户指南》中, 对地下水脆弱性与风险性评价给出了全面系统的介绍 (Stephen Foster, 2002)。由此可知, 地下水污染风险评价是在地下水脆弱性研究的基础上得到不断深化和发展的。地下水污染风险评价研究的发展主要经历了以下三个阶段:

第一阶段: 地下水固有脆弱性因素与人类土地利用因素的简单叠加关系。早期的地下水污染风险评价的特点是将土地利用因素作为地下水污染脆弱性评价的一个影响因素, 最终的评价结果是将不同地下水的固有脆弱性与人类土地利用活动影响之间的复杂关系处理为简单的叠加关系 (张丽君, 2006)。如 1992 年, 美国怀俄明州政府配合联邦政府针对农业面源污染开展了地下水对农药的污染风险评价项目研究 (SDVC, 1998)。评价中主要考虑地下水的固有脆弱性和杀虫剂对地下水的污染影响两个方面, 将其评价结果进行简单叠加得到地下水污染风险评价图。在美国和匈牙利的合作下, 基于 GIS 环境, 应用改进的 DRASTIC 法以及莠去津农业除草剂一维渗滤过程模型法, 在美国中西部和匈牙利喀尔巴拉阡盆地农业主产区, 对农业土地政策的可行性以及使用除草剂和化肥等农业化学品的替代方案的潜力进行了评估 (Navulur KCS, 1995)。意大利以威尼斯泻湖流域为研究区域对农业非点源污染的水资源脆弱性开展了评估 (Sappa GS, 2001)。在 GIS 环境下, 通过水质模拟模型, 建立了不同农业化学品输入的污染影响图, 并通过对关键参数的不同筛选分别评价了地表水和地下水的脆弱性, 最后将污染影响图和污染脆弱性图两图叠加, 便可生成污染风险图。Michael R 等 (1999) 对美国中西部地区农业面源污染条件下的区域地下水脆弱性评价开展了研究。

第二阶段: 地下水固有脆弱性因素与人类土地利用因素的组合叠加关系。早期的地下水污染风险评价将地下水固有脆弱性与人类土地利用因素简单叠加, 掩盖了很多矛盾和问题。事实上地下水系统在具有高脆弱性的地区如果没有明显的污染负荷则不存在污染风险; 即便在脆弱性低但污染负荷高的地区仍存在较大的污染风险 (张丽君, 2006)。而脆弱性高且污染程度也高的地区污染风险更大。基于这种思路, 地下水脆弱性的影响与土地利用的污染影响就不应该是简单的叠加, 而应该是多种不同的组合关系。英国和以色列开展的地下水污染风险评价是体现这种理念的典型案例。在地下水污染风险评价中, Collin 和 Melloul 将土地利用情况分为农业用地、保护用地、娱乐用地、居住用地、商业和工业用地 5 个类别, 结合水文、地貌、土壤及植被四个基本环境因素, 以以色列海岸带含水层为例, 综合考虑土地利用强度和关键环境因素的影响。将地下水污染脆弱性与不同土地利用对地下水的污染潜势加以综合评价。不同的地下水脆弱性和污染潜势的组合, 产生了不同的地下水污染风险水平。英