



贺 涛 彭晓春 魏东洋 著



YINYONGSHUI SHUIYUAN HUANJING  
FENGXIAN PINGGU YU GUANLI

# 饮用水水源环境 风险评估与管理



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 饮用水水源环境 风险评估与管理

贺 涛 彭晓春 魏东洋 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书从理论层面分析了饮用水水源面临的各类风险、归纳了相应的评估模型,提出了基于产业布局优化、环境监控改善等的风险控制策略和分级分类管理方法,并结合自身实践,以典型饮用水水源为案例,介绍了污染物风险(环境健康风险、生态风险)和污染源风险评价和管理的具体应用。全书理论结合实际,突出技术性和应用性,反映了我国现阶段饮用水水源环境保护的工作重点。

本书适用于水环境管理人员及高等院校和科研院所从事环境水利学、环境科学、环境生态学、水文学及水资源、城市科学等科研工作的人员阅读,也可以作为高等院校研究生和本科生的专业辅助教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

饮用水水源环境风险评估与管理 / 贺涛, 彭晓春,  
魏东洋著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 12  
ISBN 978-7-5170-2732-4

I. ①饮… II. ①贺… ②彭… ③魏… III. ①饮用水  
—水源保护—研究 IV. ①X52

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第293117号

|      |                                                                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 饮用水水源环境风险评估与管理                                                                                                                |
| 作 者  | 贺涛 彭晓春 魏东洋 著                                                                                                                  |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                  |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                               |
| 印 刷  | 北京瑞斯通印务发展有限公司                                                                                                                 |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 9.5印张 225千字                                                                                                  |
| 版 次  | 2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷                                                                                                     |
| 印 数  | 001—500册                                                                                                                      |
| 定 价  | 36.00元                                                                                                                        |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

饮用水水源安全是饮水安全的关键和基础保障，是人类生存和社会经济发展的重要物质保障，是涉及国计民生的重大问题。随着我国社会经济快速发展和工业化进程加快，水质污染、水量衰竭、水污染源多样化、水源结构单一、应急监测系统不健全、管理体制存在弊端等已成为一个全国性问题，加之频繁发生的水源突发性污染事故，致使区域发展乃至国家安全受到严重威胁，不利于社会持续、稳定、和谐发展。因此开展饮用水水源环境风险评估，识别污染源和污染物风险，逐步建立制度化的饮用水水源环境风险管理体系，是水源水质安全的重要保障。

本书共分 10 章，按照风险评估和管理过程来组织章节，即基本方法、三类风险评估方法应用、三种风险管理方法应用。第 1 章为总论，介绍了饮用水水源环境风险的定义和研究进展，提出需要解决的问题。第 2 章从污染源和污染物的角度介绍了饮用水水源的外部污染源、环境健康和生态风险评价方法，第 3 章总结饮用水水源环境风险管理方法。第 4~第 9 章为著者实践应用，第 4 章为典型水库饮用水水源保护区交通穿越风险源评价，第 5 章为饮用水水源集水区酞酸酯类 (PAEs) 污染物环境健康风险评价，第 6 章为东江流域饮用水水源生态风险评价。第 7 章为饮用水水源集水区污染源分级分类管理的具体应用，第 8 章为饮用水水源环境应急管理的具体应用，第 9 章为跨界饮用水水源生态补偿制度的具体应用。第 10 章为风险管理及其发展方向，指出现行水源环境风险评价的主要问题以及风险管理的新方向，以使环境风险管理变得更加有效。

本书写作分工如下：前言由贺涛完成；第 1 章由贺涛、彭晓春、魏东洋完成；第 2 章由贺涛、任明忠、魏东洋完成；第 3 章由许慧、贺涛、彭晓春完成；第 4 章由贺涛、白中炎、洪滨完成；第 5 章由贺涛、陈隽、魏东洋完成；第 6 章由任明忠、贺涛、李泰儒完成；第 7 章由陆俊卿、贺涛、曾思远完成；第 8 章由许慧、李泰儒、李玉文完成；第 9 章由贺涛、郭梅、周丽旋完成；第 10 章由贺涛、魏东洋、彭晓春完成。全书由贺涛、魏东洋统稿，白小舰协助进行内容校正。

在本书的写作和研究的开展过程中，得到了国家水专项《潼湖水系面源污染防治技术与示范》(2012ZX07206-004-02)、《东江流域生态补偿与污

染赔尝试点研究》、环保公益性行业科研专项《饮用水源地外源污染风险识别与控制管理技术》(201109015)和《全国饮用水水源环境状况评估与管理》专项的支持,得到了许振成研究员、胡洪营教授、张玉环研究员的指导,还得到了环境保护部华南环境科学研究所岳建华所长、李远书记、谢文彰主任、董家华副主任的指导和支持,相关课题组人员也给予了诸多帮助,在此深表谢意。参加课题研究和书稿整理工作的成员还有周建民、蒋晓璐、孙姣姣、张杏杏、洪雷、马宏林、伍文豪、陈志良、胡小英、钟义、房巧丽、陆颖、欧阳丽洁、吴锡坚、杨乐亮、王钉、刘芸、马啸宙、黄晓彬、田云慧等研究人员,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请批评指正。

**贺涛**

环境保护部华南环境科学研究所

2014年9月

# 目 录

## 前言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第1章 总论 .....                         | 1  |
| 1.1 饮用水水源 .....                      | 1  |
| 1.2 环境风险 .....                       | 4  |
| 1.3 饮用水水源环境风险研究进展 .....              | 7  |
| 1.4 饮用水水源环境风险研究趋势 .....              | 14 |
| 第2章 饮用水水源环境风险评价技术方法 .....            | 15 |
| 2.1 污染源风险评价技术方法 .....                | 15 |
| 2.2 污染物环境健康风险评价技术方法 .....            | 20 |
| 2.3 污染物生态风险评价技术方法 .....              | 25 |
| 第3章 饮用水水源环境风险管理方法 .....              | 31 |
| 3.1 风险管理策略 .....                     | 31 |
| 3.2 风险管理相关法律制度 .....                 | 36 |
| 3.3 风险管理指南 .....                     | 41 |
| 3.4 风险管理其他方法 .....                   | 43 |
| 第4章 饮用水水源保护区交通穿越环境风险评价 .....         | 46 |
| 4.1 问题概述 .....                       | 46 |
| 4.2 交通工程概况 .....                     | 51 |
| 4.3 水库环境风险识别 .....                   | 54 |
| 4.4 水库环境风险评价 .....                   | 54 |
| 4.5 水环境风险防范对策和措施 .....               | 58 |
| 4.6 小结 .....                         | 63 |
| 第5章 饮用水水源集水区 PAEs 类污染物环境健康风险评估 ..... | 64 |
| 5.1 邻苯二甲酸酯类 (PAEs) 污染物 .....         | 64 |
| 5.2 研究方法 .....                       | 66 |
| 5.3 环境健康风险评价 .....                   | 71 |
| 5.4 结论与对策 .....                      | 75 |
| 5.5 小结 .....                         | 77 |
| 第6章 饮用水水源河流生态风险评估 .....              | 78 |
| 6.1 研究区概述 .....                      | 78 |

|                   |                                       |            |
|-------------------|---------------------------------------|------------|
| 6.2               | 地表水中金属的风险评估和高风险区划 .....               | 79         |
| 6.3               | 地表水中 EDCs 的风险评估和高风险区划 .....           | 83         |
| 6.4               | 地表水中 PPCPs 的风险评估和高风险区划 .....          | 89         |
| 6.5               | 地表水中农药 (Pesticides) 的风险评估和高风险区划 ..... | 97         |
| <b>第 7 章</b>      | <b>饮用水水源分类分级风险管理 .....</b>            | <b>99</b>  |
| 7.1               | 点源风险分类分级管理 .....                      | 99         |
| 7.2               | 面源风险分区分级管理 .....                      | 101        |
| 7.3               | 综合环境风险分类分级管理 .....                    | 102        |
| 7.4               | 基于圈层保护的环境风险分区管理 .....                 | 104        |
| 7.5               | 基于集水区风险筛查的环境风险管理体系 .....              | 105        |
| 7.6               | 小结 .....                              | 111        |
| <b>第 8 章</b>      | <b>典型饮用水水源环境应急管理 .....</b>            | <b>112</b> |
| 8.1               | 研究区概况 .....                           | 112        |
| 8.2               | 突发性水源污染事故应急预案 .....                   | 113        |
| 8.3               | 环境应急能力建设工程 .....                      | 120        |
| 8.4               | 饮用水水源预警监控体系 .....                     | 120        |
| 8.5               | 小结 .....                              | 123        |
| <b>第 9 章</b>      | <b>跨界饮用水水源生态补偿制度研究 .....</b>          | <b>124</b> |
| 9.1               | 饮用水水源生态补偿 .....                       | 124        |
| 9.2               | 研究区概况 .....                           | 128        |
| 9.3               | 跨省饮用水水源生态补偿方案 .....                   | 129        |
| 9.4               | 生态补偿决策的制度建设 .....                     | 134        |
| 9.5               | 小结 .....                              | 137        |
| <b>第 10 章</b>     | <b>结语及新方向 .....</b>                   | <b>138</b> |
| 10.1              | 饮用水水源环境风险研究的重要性 .....                 | 138        |
| 10.2              | 饮用水水源环境风险评价的主要问题 .....                | 138        |
| 10.3              | 饮用水水源环境风险管理方向 .....                   | 140        |
| <b>参考文献 .....</b> |                                       | <b>141</b> |

# 第 1 章 总 论

## 1.1 饮用水水源

### 1.1.1 定义

一般地，饮用水水源是指提供居民生活及公共服务用水（如政府机关、企事业单位、医院、学校、餐饮业、旅游业等用水）取水工程的水源地域，包括河流型饮用水水源、湖库型饮用水水源和地下水型饮用水水源。按照服务区域，可以分为城镇饮用水水源和农村饮用水水源；按照分布方式，可以分为集中式饮用水水源和分散式饮用水水源。集中式饮用水水源是指进入输水管网送到用户的和具有一定供水规模（供水人口一般大于 1000 人）的水源<sup>①</sup>。按使用阶段，饮用水水源可划分为在用、备用或规划的饮用水水源。加强饮用水水源保护，保障饮用水安全对于维护人民群众生命安全和健康具有重要作用。

对于一个饮用水水源而言，其基本情况包括：饮用水水源名称、水源类型、设计供水量、实际供水量、服务人口、服务年限、饮用水水源保护区及其划定情况、饮用水水源水质状况、饮用水水源保护区管理状况（如标志设置、排污口取缔、违法建筑物清拆、违法行为及其处罚情况）、饮用水水源保护区污染源状况、风险源及应急预案等。

《中华人民共和国水污染防治法》（2008 年）第五章规定了饮用水水源环境保护的具体要求，是我国进行饮用水水源环境保护的基本准则。其中第五十六条为：国家建立饮用水水源保护区制度。饮用水水源保护区分为一级保护区和二级保护区；必要时，可以在饮用水水源保护区外围划定一定的区域作为准保护区。第五十七条：在饮用水水源保护区内，禁止设置排污口。第五十八条：禁止在饮用水水源一级保护区内新建、改建、扩建与供水设施和保护水源无关的建设项目；已建成的与供水设施和保护水源无关的建设项目，由县级以上人民政府责令拆除或者关闭。禁止在饮用水水源一级保护区内从事网箱养殖、旅游、游泳、垂钓或者其他可能污染饮用水水体的活动。第五十九条：禁止在饮用水水源二级保护区内新建、改建、扩建排放污染物的建设项目；已建成的排放污染物的建设项目，由县级以上人民政府责令拆除或者关闭。在饮用水水源二级保护区内从事网箱养殖、旅游等活动的，应当按照规定采取措施，防止污染饮用水水体。第六十条：禁止在饮用水水源准保护区内新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量。这些条文均表明了我国对于饮用水水源环境保护的严格要求，在现有许多建设项目中饮用水水源均是不可忽略的环境敏感点。

① 见环境保护部环办〔2011〕4 号文《关于开展全国城市集中式饮用水水源环境状况评估工作的通知》。



由于饮用水水源对于人类活动的重要性及其自身的生态环境敏感性,我国在饮用水水源环境保护方面出台了一系列的法律法规和政策标准。除了前述的《中华人民共和国水污染防治法》外,《关于实行最严格水资源管理制度的意见》《国家突发环境事件应急预案》(2006年)、《饮用水水源保护区污染防治管理规定》(1989年)、《城市供水水质管理规定》(2007年)、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、《地下水质量标准》(GB/T 14848—93)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)、《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)、《饮用水水源保护区标志技术要求》(HJ/T 433—2008)、《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T 338—2007)、《集中式饮用水水源环境保护技术指南(试行)》《分散式饮用水水源地供水水质安全保障技术指南》《分散式饮用水水源地环境保护指南》《全国城市饮用水水源地环境保护规划(2008—2020年)》《全国地下水污染防治规划(2011—2020年)》《良好湖泊生态环境保护规划(2011—2020年)》等一系列国家法律法规和标准规范均做出了严格要求。相应地,各地也出台了地方性法规、地方标准加以保护。诸如《太湖流域管理条例》《广东省饮用水水源水质保护条例》《浙江省饮用水水源保护条例》《成都市饮用水水源保护条例》为具体的饮用水水源环境保护提供了依据。

### 1.1.2 我国饮用水水源环境状况

我国水资源在全国范围内分布极其不均,长江以南地区拥有全国4/5的水量,但是其国土面积却只占全国面积的1/3,而面积广阔的北方地区却只拥有不足1/5的水量,尤其是西北内陆,水资源量只有全国的4.6%。从总量上,我国面临区域分布不均和水质性缺水等问题,很多城市水域受到不同程度的污染。水环境的恶化破坏了生态系统,而生态系统的破坏又进一步加剧了水资源的紧缺。

根据《2012年全国水环境质量状况》,全国113个环境保护重点城市共监测387个集中式饮用水水源地,其中地表水源地240个,地下水源地147个。环境保护重点城市年取水总量为229.6亿t,服务人口1.62亿人,达标水量218.9亿t,水质达标率为95.3%。与2011年年底相比,上升4.7个百分点。尽管这113个重点城市水源地水质达标率超过95%,但2012年全国地表水国控断面总体为轻度污染,长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河及浙闽片河流、西北诸河和西南诸河等十大流域的国控断面中,I~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为68.9%、20.9%和10.2%,主要污染指标为化学需氧量、高锰酸盐指数和五日生化需氧量。62个国控重点湖泊(水库)中,I~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类的比例分别为61.3%、27.4%和11.3%,主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。

2012年全国198个地市级行政区开展了地下水水质监测,监测点总数为4929个,其中国家级监测点800个。依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—93),综合评价结果为水质呈优良级的监测点580个,占全部监测点的11.8%;水质呈良好级的监测点1348个,占27.3%;水质呈较好级的监测点176个,占3.6%;水质呈较差级的监测点1999个,占40.5%;水质呈极差级的监测点826个,占16.8%。主要超标指标为铁、锰、氟化物、三氮、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物等,个别监测点存在重(类)金属超标现象。

根据《2012年全国水资源公报》,对全国20.1万km<sup>2</sup>的河流水质状况进行了评价。全

年Ⅰ类水河长占评价河长的5.5%，Ⅱ类水河长占39.7%，Ⅲ类水河长占21.8%，Ⅳ类水河长占11.8%，Ⅴ类水河长占5.5%，劣Ⅴ类水河长占15.7%。全年Ⅰ～Ⅲ类水河长比例为67.0%，与2011年相比，增加2.8个百分点。对521座水库的营养状态进行评价，贫营养水库3座，中营养水库有348座，轻度富营养水库144座，中度富营养水库25座，重度富营养水库1座。由于水库是一类典型的饮用水水源，从上面可以看出存在一定的营养化。地下水方面，水质适用于各种用途的Ⅰ类、Ⅱ类监测井占评价监测井总数的3.4%；适合集中式生活饮用水水源及工农业用水的Ⅲ类监测井占20.6%；适合除饮用外其他用途的Ⅳ～Ⅴ类监测井占76.0%。

总体上，我国水质状况形势严峻，饮用水水源环境状况不容乐观。同时，近年来我国突发环境事件不断发生，对群众饮水安全造成严重威胁。在环境保护部《关于进一步加强饮用水水源安全保障工作的通知》（环办〔2009〕30号）指出，仅2008年，环境保护部直接调度处理的突发环境事件就高达135起，其中威胁群众饮用水源安全的事件高达46起。2009年以来，又相继发生了江苏省盐城饮用水水源酚污染、广东省韶关市水源水华暴发等事件，对饮水安全构成了很大威胁。在环境保护部《关于进一步加强分散式饮用水水源地环境保护工作的通知》（环办〔2010〕132号）中指出，加强应急预案，及时消除分散式饮用水水源环境安全威胁。编制分散式饮用水源污染事故应急预案，为处理突发污染事件提供管理及技术储备，有效防范风险。加强对可能影响水源安全的制药、化工、造纸、冶炼等重点行业、重点污染源的监督管理，建立风险源名录，从源头控制隐患。2014年以来，发生在浙江杭州、江苏靖江、甘肃兰州的饮用水水源污染事件，引起了广泛关注，饮用水水源环境风险成为公众的焦点。

在常规污染物未得到有效控制的情况下，一些新型毒害污染物在饮用水水源中不断被检出，饮用水水源环境风险不容忽视。王静等（2010）对浙江省98个县级以上饮用水源地水体中有机毒物污染进行了调查，结果表明在98个饮用水源地水体中共检出7种有机毒物，分别为微囊藻毒素-LR（MC-LR）、微囊藻毒素-RR（MC-RR）、草甘膦、邻苯二甲酸二异辛酯（DEHP）、邻苯二甲酸二丁酯、多环芳烃、呋唑，这些污染物给饮用水水源带来了一定的环境风险。王丽（2012）选出江苏省淮安地区和徐州地区的4个典型乡镇作为研究区域，采集了典型乡镇的地表水源、浅层地下水源、深层地下水源和经管道输送后的末梢水样品和相关沉积物样品，检出了有机氯农药18种、多氯联苯12种、酞酸酯类7种、多环芳烃、酚类、重金属等，在淮安地下水水源中部分指标存在一定的健康风险。王若师等（2012）检出了东江流域典型饮用水水源中存在的酞酸酯类、有机氯农药等毒害污染物。

### 1.1.3 我国饮用水水源环境安全问题

近些年来，尽管我国出台了许多法律法规、标准规范来保护环境，但全国环境形势依然十分严峻，水污染问题突出，许多地区各类型饮用水水源受到不同程度的污染，制约了可持续发展战略的实施，不利于人民生活质量的改善。在今后的很长时间内，水环境安全尤其是饮用水水环境安全仍需要着力保障。

我国目前的饮用水水源环境安全问题主要体现在集水区污染源和水体污染物两个方面。

集水区污染源的环境风险易于带来突发性污染事故，水体污染物的超标或毒害污染物的检出可能带来环境风险。我国饮用水环境安全面临的形势体现在以下方面：

(1) 部分地区饮用水水源不能满足标准要求。石效卷(2012)指出我国有90%的城市河段受到不同程度的污染，有约一半城市的市区地下水污染比较严重，在农村有近2亿农民喝不上符合标准的饮用水。发达国家二三百年的工业化历程带来的环境问题在我国二三十年之内呈压缩型地出现，而且这种情况是任何一个国家都没有遇到的。

(2) 污染源风险带来的突发性饮用水水源污染事件频发。从2005年的松花江污染事故、2007年的江苏无锡蓝藻暴发，到2009年后的陕西省凤翔县、安徽省安庆市怀宁县、浙江省台州市路桥区等地的多起重特大重金属污染事件，再到2014年的江苏靖江、浙江杭州、甘肃兰州饮用水污染事件，都给我国饮用水水源环境安全带来了严重威胁。

(3) 水源水体新型毒害污染物带来的环境风险问题。在我国开展饮用水水质109项指标全分析后，一些纳入《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)特定项目的水质指标相继被检出，并给人体健康和生态系统带来风险。从我国与世界卫生组织、美国和欧盟水质标准的接轨要求上，新型毒害污染物带来的环境健康或生态风险不容忽视。

(4) 饮用水水源环境风险管理有待加强。目前纳入法律的我国饮用水水源环境安全保障的基本制度为饮用水水源保护区制度，明确写入了《中华人民共和国水污染防治法》。而关于饮用水水源生态补偿制度、饮用水水源基础环境状况评估制度、饮用水水源档案与巡查制度尚未纳入其中，饮用水水源环境风险管理制度尚处于研究之中，面对未来的水源环境安全形势有必要充实环境风险的管理体系。

## 1.2 环境风险

### 1.2.1 风险

现时学术界对风险的内涵没有统一的定义，由于对风险的理解和认识程度不同，或对风险的研究的角度不同，不同的学者对风险概念有着不同的解释。从广义上讲，只要某一事件的发生存在着两种或两种以上的可能性，那么就认为该事件存在着风险，识别风险与否的关键在于“不确定性”。

“风险”一词在词典中的定义为“危险，遭受损失、伤害、不利或毁灭的可能性”(王同亿，1992)。在《辞海》中的定义是：“人们在建设和日常生活中遭遇能导致人体伤亡，财产受损及其他经济损失的自然灾害、意外事故和其他不测事件的可能性。”郭沫若《李白与杜甫·杜甫的阶级意识》写到：“店老板躲过了风险之后，逃回来了。”马烽西戎《吕梁英雄传》第十一回：“说时，皮鞭在王臭子身上、头上，好像捶泥一样的响起来。这等风险，王臭子却还是头一次遇到。”这些都表明了风险是指一个事件产生我们所不希望的后果的可能性。

风险(risk)的真正语源是意大利古语“riscare”，法语中写成“risqué”，意思为“run into danger of uncertain origin”(在未知由来下，遇到危险)。一些国外学者将风险强调为损失或结果的不确定性，如美国学者小阿瑟·威廉姆斯和理查德·M. 汉斯将风险定义为



“在给定条件下和特定时间内，那些可能发生的结果间的差异”（毕军等，2006）。还有一些学者定义为在给定的条件和某一特定的时期，未来结果的变动或者不利事件或事件集发生的机会，我国学者胡二邦（2009）将风险定义为“不确定危害的度量”。

现代意义上的风险一词，已经大大超越了“遇到危险”的狭义含义，经过多年的演化，风险一词已经逐步进入社会科学、自然科学等多个领域，且与人类的决策紧密联系，成为人们日常生活中频率很高的词汇。但无论如何定义风险一词，其关键含义是“未来结果的不确定性或损失”这一点始终没有变化。

以上风险强调的是损失，事实上风险在很多情况下也代表着收益。风险是生产目的与劳动成果之间的不确定性，这种风险属于广义风险，强调了风险表现为收益不确定性，说明风险产生的结果可能带来损失、获利或是无损失也无获利，金融风险属于此类。而风险表现为损失的不确定性，没有从风险中获利的可能性，则属于狭义风险。由于风险和收益成正比，所以一般积极进取的投资者偏向于高风险是为了获得更高的利润，而稳健型的投资者则着重于安全性的考虑。在本书中饮用水水源的环境风险更趋向于损失的不确定性，属于狭义的风险。

风险具有客观性、普遍性、可识别和控制性、不确定性等特征，由于风险的存在需要规避风险、降低风险而采取的措施带来风险成本。按照风险的产生原因可以分为自然风险、社会风险、技术风险、政治风险、经济风险等，本书中以自然风险为主。一般说来，形成风险有三个基本要素：风险因素、风险事故和损失。由风险因素导致风险事故，风险事故可能造成损失。一个完整的风险过程需要对这三个基本要素进行分析，提出风险识别、风险评价、风险对策、实施决策、检查反馈的要求，实现将风险损失降低到最低程度的目标。

### 1. 风险因素

风险因素是指引起或增加风险事故发生的机会或扩大损失幅度的条件，是风险事故发生的潜在原因，是风险损失的间接原因。我们在饮用水水源日常环境管理中建立的风险源名录就是典型的风险因素。根据性质不同，可以将风险因素分为有形风险和无形风险两大类。有形风险指的是某一标的本身所具有的足以引起风险事故发生或增加损失机会或加重损失程度的因素，无形风险指的是与人的心理或行为有关的风险因素，通常包括道德风险和心理风险。在饮用水水源环境风险管理中，通常指的是有形风险因素，而诸如企业责任人风险意识不强等在内的无形风险也是通过有形风险体现出来的。

### 2. 风险事故

风险事故是造成损失的偶发事件，是造成损失的直接原因，是损失的媒介。在饮用水水源环境风险中，水质污染是典型的风险事故。风险通过风险事故的发生才会导致损失。风险事故具有一定的相对性，如果风险事故是造成其他事故的原因，那么就成为风险因素。例如下冰雹路滑发生车祸，造成人员伤亡，这时冰雹是风险因素。冰雹直接击伤行人，它是风险事故。

### 3. 风险损失

损失是指非预期性价值的减少，损失可以分为直接损失和间接损失。直接损失是指风险事故导致的财产本身损失和人身伤害，又称为实质损失，如水污染事件导致的停水经济损失；间接损失则是指由直接损失引起的其他损失，包括额外费用损失、收入损失和责任



损失。如果这种损失无法用经济来衡量,就需要建立一种计算方法来进行评价。

就损失而言,存在损失频率和损失程度两个概念。损失频率是指在确定的时间内发生风险事故的次数;损失程度则是风险事故导致标的损害程度,例如可以通过损失价值的百分比来体现。损失频率与损失程度没有必然的联系,根据损失的确定方法,决定了不同风险评价的过程。

### 1.2.2 环境风险基础

目前,我国在实际应用中将环境风险与生态风险未能统一对待,因而环境风险和生态风险的定义也不一致。毕军等(2006)将环境风险定义为由自然原因或人类活动引起的,通过降低环境质量,从而能对人类健康、自然生态产生损害的事件,可以用其发生的概率及其后果来表示。环境风险的概念包括了两个方面的内容,一是不利环境事件发生的可能性(概率),二是该事件发生后的后果。

殷浩文(2001)将生态风险评价定义为研究一种或多种压力形成或可能形成的不利生态效应的可能性的过程,是一个预测污染物对生态系统或其中某些部分产生有害影响可能性的过程。生态风险评价的目的是使用有效的毒理学与生态学信息估计有害的生态事件发生的可能性。从这样的定义上可以看出,其与一般环境风险的主要区别体现在风险受体上,这直接关系到后续的评价终点。

一般地,环境风险是由人类活动直接或间接引起通过环境介质传播的,能对人类社会及其生态环境产生破坏、损失等不利后果的事件的发生可能性。环境风险具有两个主要特点,即不确定性和危害性。基于以上的考虑,环境风险包括了生态风险的概念,在本书中使用环境风险统一说明。

基于前述风险的定义,除了不确定性特征外,环境风险还具备系统性和关联性特征,因而系统理论、控制理论和法律基础是环境风险的基础理论。基于系统理论,要将环境风险看成一个系统进行整体分析,风险因素、风险事故和损失是一个密不可分的统一整体。由于风险因素的不确定性、风险事故的不确定性和损失的差异,也会给风险受体带来很多不确定性,任何一个系统环节都会因为其他系统环节的不确定性而导致结果的差异。从系统科学的观点来看,环境风险系统也是一个复杂的动态系统,环境风险需要考虑这种特征来进行管理。

基于控制理论,也就是人类通过对系统的认识,了解系统运行的客观规律,可以采取一定的控制方法来调控系统。由于一些环境风险存在可控性,因此环境风险管理的一个主要工作是需要进行调控。如毕军等(2006)指出了可以借助环境风险比较分析理论和环境风险控制水平优化模型来进行区域环境风险的调控,通过认识环境风险规律我国出台很多的管理办法也是一种调控的手段,调控的目标在于将环境风险减少到最低水平。

基于法律基础,除了前述的《中华人民共和国水污染防治法》《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ/T 169—2004)为代表的一系列法律法规和标准规范要求环境风险管理外,国外很多国家和地区也将其纳入了法律体系之中。例如1993年欧盟就颁布了对化学品进行生态风险的规定和技术指导文件(EC1993),次年又修订了现存化学品的生态风险评价规定(EC1994)以及相关的评价纲要。美国出台了清洁水法(FWPCA/CWA)、清洁



空气法 (CAA)、毒物控制法 (TSCA) 等一系列环境风险评价有关的法律, 并于 1998 年发布了生态风险评价指南。

因此, 环境风险研究具备了法律基础, 基于其理论基础可以在研究风险因素、风险事故和损失之上提出识别、评价、对策、决策和响应的整体环境管理要求。

### 1.2.3 饮用水水源环境风险分析

基于风险三要素, 饮用水水源环境风险需要从风险因素和风险事故两个方面来分析风险损失, 这样就可以分为污染源风险和污染物风险两大类。由于污染物风险与风险受体关系更加直接, 根据风险受体的不同可以分为环境健康风险和生态风险, 前者的受体为人群健康, 后者的受体为生态系统。目前这些风险研究均有涉及, 本书将在后续的章节中提供相应的案例加以说明。污染源的风险损失通常采用概率损失方法来进行计算, 而污染物的风险损失则难以用价值量予以估计, 而是通常采用风险评价的结果来反映评价终点。而后续的饮用水水源环境风险评价与管理均要以风险分析为基础。

无论是概率损失评价还是环境健康风险评价、生态风险评价对于环境管理的决策意义都非常明显。这些年来环境管理实践表明, 一旦污染形成, 消除污染的费用很高而且效果有时候也不明显。因此在出现环境风险之前防微杜渐, 有助于帮助决策者合理制定措施。从这个意义上饮用水水源环境风险分析、评价是进行饮用水水源环境保护决策的基础, 可以为饮用水水源环境管理政策和规章制定提供支持, 也可以基于风险因素分析为企业制定监管办法。环境风险分析和评价对于饮用水水源集水区或流域管理、化学品立法、工业污染源管理等一系列环境战略或决策意义重大。环境风险分析与评价中的不确定性、备选方案有助于决策者根据多种因素进行综合决策。

尽管饮用水水源环境风险分析与评价有助于环境决策, 但由于目前我国的环境风险评价方法还不完善, 受到评价参数和污染物影响效应等的影响, 评价结果参与环境决策的程度有限, 这也是我国未来饮用水水源环境风险管理中需要加强的方面。

## 1.3 饮用水水源环境风险研究进展

### 1.3.1 污染源风险评估

污染源风险即针对风险因素的风险。造成松花江水污染事件的吉林石化厂、造成沱江水污染的四川大型化肥厂、造成甘肃兰州水污染事件的兰州石化均是这种风险源。随着我国工业化程度的加深和规模的扩大, 以及行业的关联程度增加, 过去一段时间内发达国家的重污染企业转移到了中国, 尽管饮用水水源保护区受到严格管控, 但是在利益驱使下一些重污染企业进入了饮用水水源保护区, 还有些企业落户到饮用水水源准保护区。一旦这些企业发生泄漏、爆炸等事故, 都会给饮用水水源带来风险。

环境风险起源于对自然灾害的认识、评估与防治, 20 世纪 50 年代开始对核风险的恐惧使全球很多国家制定了污染源风险评估的方法指南, 故障树分析、事件树分析方法得到了迅速发展。20 世纪 70 年代中期美国开始将这种污染源风险评估方法应用于农药管理、石油



化工领域,一些国际组织和大型企业建立了化工领域风险评价方法和指标体系,美国科学院在1983年首次提出了完整的环境风险评价程序(US EPA, 1990)。

与此同时,学术研究也开始活跃起来,出现了许多风险分析的学术团体和期刊。1987年国际影响评估学会(IAIA)第七届年会开始将风险评价单独列为一个专题,世界银行、亚洲开发银行、经济合作与发展组织(OCED)等国际组织出版了一系列的环境风险分析指南。针对这种风险源的定量分析程序通常包括4个步骤:①危害识别;②事故频率和后果估算;③风险估计;④风险防范和管理(Contini & Servada, 1992)。

具体到水环境及饮用水水源方面, Van Baardwijk (1994) 提供了一套污染源排放的风险分析方法,用于荷兰水质污染事故的发生概率、危害后果计算和预防对策工作。Hengel & Kruitwagen (1996) 采用风险分级方法确定了内陆河流流动运输风险源带来的事故风险,并以污染物浓度值来表示危害后果。美国环保局基于GIS运用优先设置法,利用水源井被污染的可能性和严重性的加和值,对美国Gaston County某水源地保护区内潜在污染源进行了评价,前者包括污染源释放污染物的可能性和污染物到达水源井的可能性,后者包括污染源释放的量、污染物的衰变能力和污染物的毒性(Hillenbrand, 2002); Ducci (1999) 基于土壤和污染物的性质评价了污染源对地下水的潜在污染。这种从风险识别、源项分析、危害后果到风险计算和风险管理的污染源风险评价过程多用于特定研究区域(如保护区)内工业应用的风险评价,其中以可能造成污染事故的固定源或流动源为多,例如欧洲莱茵河流域突发性水污染事故的风险评价与管理就是一个典型的例子。

20世纪80年代西方发达国家在环境风险评价领域取得了丰硕的研究成果,评价体系逐步完善,之后在定量评价的基础上逐步发展到生态风险评价(费尔曼等, 2012)。而在我国除核电风险之外,20世纪80年代我国才开始在项目建设中重视环境风险的研究。1990年国家环境保护局发布文件,要求对重大环境污染事故隐患进行风险评价,2004年制定了《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ/T 169—2004),通过松花江、靖江、兰州重大水污染事件,环境风险逐步受到重视,并成为包括饮用水水源环境保护在内的各类环境科研、环境影响评价不可缺少的内容。20世纪80年代到现在,污染源风险评价、管理研究和实践也是我国饮用水水源环境保护的热点。

《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ/T 169—2004)的适用对象包括涉及有毒有害和易燃易爆物质的生产、使用、储存等的新建、扩建、改建和技术改造项目(不包括核建设项目),规定了评价的5个基本内容,是现阶段饮用水水源保护区和准保护区建设项目环境风险评价的基本标准。胡二邦(1999)详细阐述了环境风险评价的技术方法。毕军等(2006)将建设项目环境风险评价和突发性环境风险管理界定为当前环境风险应用的主要领域之一。利用故障树分析,计算风险发生的概率是污染源环境风险分析的主要方法之一(邓春朗, 1996; 石剑荣, 2000; 吴宗之等, 2001; 程春生等, 2011),此外也有学者通过建立指标体系进行污染源的环境风险评估(金爱芳等, 2012)。

对于在饮用水水源保护区或集水区存在环境风险的污染源,除了根据《中华人民共和国水污染防治法》进行管理外,针对突发性的水污染事故各地都出台了一些相应的管理办法或制定应急预案。如2009年武汉市环境保护局出台了《农村集中式饮用水水源地突发环境事件应急预案》,2010年西宁市出台了《西宁市饮用水源突发环境事件应急预案》,2013

年浙江省绍兴市出台了《绍兴市集中式饮用水源突发污染事件应急预案》。根据全国饮用水水源环境状况评估工作的要求,很多饮用水水源都建立了自身的风险源名录,用建立相应的数据库加以监管。总体上各类饮用水水源对可能存在的风险源均采取了严格的防范措施,但频发的水污染事故仍然暴露出了污染源环境风险研究的不足。

### 1.3.2 污染物风险评估

#### 1. 饮用水水源环境健康风险评估

随着我国社会经济的发展和人民群众对于饮用水安全的重视,饮用水水源环境健康风险评估逐步得到开展。健康风险评价作为一种将饮用水水源环境与人体健康联系起来的評價方法,其目标在于为风险管理和决策支持提供依据。由于饮用水为人体所必需,即使一些物质的含量很低,也有可能导致环境健康危害。即使某一种污染物的健康危害不大,多种污染物的叠加或长期的暴露也有可能严重危害人体健康。国际上对于很多污染物质的致癌或非致癌效应都进行了界定,是进行健康危害识别的基础。

例如,长期砷暴露会对神经系统、皮肤、动脉血管等产生不良影响,同时还有致癌性;铬(六价铬的化合物)具有致突变性和致癌性,它可以使蛋白质变性、核酸和核蛋白沉淀、酶系统受干扰;铅会危害造血功能,影响免疫功能、内分泌系统和消化系统;汞中毒严重的可产生中枢神经系统损伤和失明等,甚至会造成终身残疾或死亡;铜是人体必需的微量元素,但是过量的摄入会对人体许多器官,如肝、肾、消化系统和大脑等产生不良影响(杨全锁等,2008)。邻苯二甲酸酯类是一类危害较严重的环境激素,在一些包含有大量使用增塑剂(塑化剂)的产业(如家具、塑料制造业)的水源集水区,易于造成水源PAEs含量偏高,可能造成水源存在一定的健康风险(CALL et al., 2001)。污染饮用水源的有机毒物主要包括持久性有机污染物(POPs)、挥发性有机物(VOC)、半挥发性有机物(SVOC)、农药类、内分泌干扰素、藻毒素等,大部分为难降解有机物,可被生物富集,通过食物链间接进入人体,或通过饮用水直接进入人体,严重影响人体健康(王静等,2010)。

对于化学物质的环境健康风险评价程序,使用最普遍的是1983年美国科学院(US National Academy of Sciences, USNAS)公布的四步法,即危害鉴别(Hazard Identification)、暴露评价(Exposure Assessment)、剂量反应分析(Dose-response Analysis)以及风险表征(Risk Characterization)(胡二邦,2009)。饮用水水源环境健康风险评价主要是针对人体有害的物质,包括基因毒物质和躯体毒物质,前者包括放射性污染物和化学致癌物;后者则指非致癌物。根据国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)通过全面评价化学有毒物致癌性可靠程度而编制的分类系统,以及有害物质通过饮水途径对人体健康产生的危害效应研究,建立致癌物和非致癌物所致健康危害的风险模型(USEPA, 2005, 2009; 周国宏等, 2011)。

我国目前的饮用水水源环境健康风险评价实践主要源自于上述美国四步法模型,早期污染物以重金属为主,近期逐渐拓展到其他持久性有机污染物,如农药类、多环芳烃类、激素类、邻苯二甲酸酯类、藻毒素类等,目标污染物逐步增加,健康风险评价逐步深入,并基于自身实际发布了我国的评价暴露系数(段小丽,2012)。



高继军等(2004)对北京市城区8个区和郊区10个区(县)120个样点的饮用水中铜(Cu)、汞(Hg)、镉(Cd)和砷(As)的浓度进行了调查研究,并应用美国环保局推荐的健康风险评价模型对北京市各区(县)饮用水中重金属所引起的健康风险作了初步评价。结果表明在北京市通过饮水途径引起的非致癌健康风险中,汞(Hg)的风险最大,铜(Cu)次之,但是两者风险水平均在 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ ,远低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平。

杨全锁等(2008)结合山东地区人群状况,对青岛市黄岛区饮用水源地中污染物通过饮水和皮肤接触进入人体产生的危害进行了风险计算和评价。2006年黄岛区各饮用水源地中污染物所致健康危害的个人年总风险最大为 $1.54 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 。其中化学致癌物质所致健康危害的个人年风险按从大到小排列为:铬、砷。而非致癌物质所致健康危害的个人年风险按从大到小排列为:氟化物、铅、铜、氨氮、氰化物、挥发酚。并且化学致癌物质所致健康危害远大于非致癌物质。另外,通过饮水途径所致健康危害的个人年风险要远大于通过皮肤接触途径所致的风险。

周国宏等(2011)计算深圳市生活饮用水源水中致癌重金属砷(As)、六价铬( $\text{Cr}^{6+}$ )和镉(Cd)对人体健康危害的个人年风险分别为 $3.08 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $3.91 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $5.97 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ;非致癌重金属铅(Pb)、汞(Hg)和硒(Se)所引起的健康危害的个人年风险水平是 $8.50 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ 、 $7.94 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.46 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 。按健康风险大小排列为 $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Se} > \text{Pb} > \text{Hg}$ 。6种重金属对人体健康危害的年总风险达 $7.58 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 。深圳市生活饮用水源水中重金属污染物对人体健康产生的潜在危害的个人年总风险高于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受值( $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ),主要健康风险来自于 $\text{Cr}^{6+}$ 和As。

王静等(2010)在98个饮用水源地水体中共检出7种有机毒物,分别为微囊藻毒素-LR(MC-LR)、微囊藻毒素-RR(MC-RR)、草甘膦、邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)、邻苯二甲酸二丁酯、多环芳烃、呋唑;各饮用水源地水体中检出的有机毒物引起的健康风险大小依次为多环芳烃 $>$ DEHP $>$ 呋唑 $>$ MC-LR $>$ 草甘膦 $>$ 邻苯二甲酸二丁酯;存在有机毒物检出的饮用水源地水体的总健康风险约为 $10^{-13} \sim 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ ,与部分国际机构制定的饮用水源地水质健康风险水平判断标准相比,浙江省饮用水源地水体中有机毒物污染引起的健康风险远低于可接受水平,大部分饮用水源地水体的健康风险甚至达到可忽略水平。

此外,还有众多学者应用美国环保局的这个模型进行了饮用水水源环境健康风险评估,在此不再赘述(许川等,2007;胡冠九等,2009;孙超等,2009;于云江等,2011;李祥平等,2011;王若师等,2012;贺涛等,2014)。

## 2. 饮用水水源生态风险评估

生态风险评价在20世纪80年代由安全风险和健康风险评价发展而来,美国、欧盟等发达国家和地区得到广泛应用,被视为环境决策的重要基础。作为风险评价的最新阶段,关于生态风险评价的研究很多,国内对于生态风险评价的述评也不少(李国旗等,1999;毛小苓和倪晋仁,2005;陈辉等,2006;阳文锐等,2007;张思锋和刘晗梦,2010)。

目前,生态风险评价方法以美国的“三步法”为主。1998年美国国家环保局正式颁布了《生态风险评价指南》,提出生态风险评价的“三步法”,即问题形成、分析和风险表征,