

Risk Assessment of Chemicals in the  
Environment:  
Principles, Methods, and Practice

# 化学物质环境风险评价 原理、方法与实践

王德高 王莹/著



科学出版社

# 化学物质环境风险评价： 原理、方法与实践

王德高 王莹 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以国家自然科学基金面上项目“氟系阻燃剂得克隆的源、归趋以及人体暴露评价研究”(21077015)为依托,以环境中典型的化学污染物为主要研究对象,通过环境监测和风险评价方法,开展相关的人体健康和生态风险评价。本书主要内容分为三部分:第一部分包括前3章,是环境风险评价的研究内容、发展历史和使用方法;第二部分包括第4章至第8章,主要内容是化学物质的人体健康风险评价;第三部分包括第9章至第17章,涉及化学物质的生态风险评价。本书各章自成体系,都是目前本领域研究的热点。

本书可以作为化学品管理、生态保护、环境健康、环境科学、环境监测、环境影响评价等领域科研技术人员的参考书,也适用于高等院校环境、生态以及健康管理相关专业的本科生和研究生。本书使用的研究方法对于其他污染物的人体健康和生态风险评价的实施也具有一定的借鉴价值。

图书在版编目(CIP)数据

化学物质环境风险评价:原理、方法与实践/王德高,王莹著. —北京:科学出版社,2015.6

ISBN 978-7-03-044230-7

I. ①化… II. ①王… ②王… III. ①化学物质-环境质量评价-风险评价-评估方法 IV. ①06 ②X820.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第093658号

责任编辑:孟莹莹 张震/责任校对:朱光兰

责任印制:赵博/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:390 000

定价:116.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

人类历史上生产和制造的化学物质种类超过几千万，绝大多数化学物质没有经过人体健康和生态风险评价，甚至缺乏相关基础科学数据。为了更有效地管理化学产品，特别是大量生产的毒性较高的危险物质，世界各国和国际组织制定了相关的法律和政策。化学物质的环境风险评价是随着化学品管理而发展起来的一门科学，主要研究内容是通过化学物质危害人体健康和生态系统的可能程度进行概率估计，并在此基础上提出减小风险的办法和政策。

危险化学品及其污染物的人体健康和生态风险评价在我国起步较晚，研究报告和实际案例较少，缺乏基于我国国情的基础参数资料，尚有许多不完善之处。本书围绕我国环境中存在的典型持久性有机污染物、新型化学污染物和高产量化学产品，开展了相关的人体健康和生态风险评价。在人体健康风险评价中，涉及致癌性风险评价和非致癌性风险评价，根据评价人群不同，包括职业暴露和一般人群暴露。本书涉及的化学物质种类广泛，包括有机氟表面活性剂、有机氯农药、有机氯阻燃剂、有机磷阻燃剂、有机溴阻燃剂、多氯联苯、有机硅氧烷、硝基苯以及多环芳烃。这些化学物质作为阻燃剂、增塑剂、农药、绝缘油、表面活性剂、化工原料、反应中间体应用于橡胶、塑料、护肤品、化妆品、油漆、染料等中。这些化学物质在环境介质和生物体中广泛存在，包括土壤、灰尘、大气、沉积物、自然水体、中水，还包括水生生物、粮食作物等。

本书共有 17 章，王莹博士负责第 9 章~第 12 章的撰写，本人负责本书其余章节的撰写，张令高级工程师负责本书主审。感谢研究生杜鹃、马志伟、吴倩、杨萌、王洁、高向春、赵志刚、孙铁英、宋毅民、申凯等的贡献，在此对所有付出辛勤劳动的人表示感谢。感谢国家自然科学基金委员会和教育部中央高校基本科研业务费对科研工作的持续资助，也感谢加拿大国家科学和工程研究理事会奖学金的资助。由于笔者的知识和经验有限，研究中难免存在不足之处，希望能够得到各位专家和朋友的指导、支持和帮助。

王德高

2014 年 12 月 25 日

# 目 录

<b>第 1 章 环境风险评价发展</b> .....	1
1.1 风险评价的定义.....	1
1.2 环境风险评价的定义.....	1
1.3 风险管理过程.....	2
1.4 风险表达和认知.....	2
1.5 世界主要国家和地区化学品管理和风险评价的发展.....	3
1.5.1 美国工业化学品管理发展.....	3
1.5.2 加拿大工业化学品管理发展.....	6
1.5.3 欧盟工业化学品管理发展.....	8
1.5.4 国际组织化学品管理.....	10
1.6 我国化学品管理的发展.....	11
1.6.1 化学品管理机构.....	11
1.6.2 有关化学品管理的国家法律.....	12
1.6.3 化学品国际公约.....	13
1.7 我国化学品风险评价的发展.....	13
1.7.1 我国化学品的人体健康和生态风险评价发展.....	13
1.7.2 我国新兴化学物质的环境风险评价发展.....	14
<b>第 2 章 人体健康风险评价方法</b> .....	16
2.1 风险评价概述.....	17
2.2 危害性评估.....	17
2.3 剂量-效应关系评估.....	19
2.3.1 剂量-效应关系定义.....	19
2.3.2 有阈值化学物质安全值评估.....	19
2.3.3 无阈值化学物质剂量-效应关系评估.....	25
2.3.4 预期寿命损失评价法.....	28
2.4 暴露评价.....	28

2.4.1	污染源的描述和暴露人群分析	28
2.4.2	暴露途径分析	28
2.4.3	估算暴露浓度	29
2.4.4	综合暴露量分析	29
2.4.5	暴露量计算	30
2.5	风险分析	32
2.5.1	定性估算	32
2.5.2	定量估算与表达有害因子的风险大小	32
2.5.3	评价的不确定性分析	33
2.5.4	敏感度分析	36
2.5.5	多种物质的暴露风险分析	36
	参考文献	38
<b>第3章</b>	<b>生态风险评价方法</b>	<b>40</b>
3.1	生态风险评价步骤	40
3.2	生态风险评价终点	42
3.3	个体水平上的生态风险评价	42
3.4	生态风险表征	43
3.4.1	商值法	43
3.4.2	概率法	44
3.4.3	物种敏感性分析	47
3.5	不确定性分析	48
	参考文献	50
<b>第4章</b>	<b>氟系阻燃剂得克隆的职业暴露风险评价</b>	<b>53</b>
4.1	得克隆简介	53
4.2	环境分布和污染来源	54
4.3	研究地点和人群概况分析	56
4.4	得克隆危害性评估	57
4.5	得克隆剂量-效应关系	57
4.6	暴露量评估	58
4.6.1	暴露数据的获取	58
4.6.2	暴露假设	63
4.6.3	人体通过呼吸暴露剂量	63

4.6.4	人体通过皮肤接触土壤暴露剂量	64
4.6.5	人体通过饮食摄入	65
4.7	风险分析	65
4.8	不确定性分析	66
4.9	敏感性分析	67
	参考文献	68
<b>第 5 章</b>	<b>有机氯农药硫丹的职业暴露风险评价</b>	<b>72</b>
5.1	硫丹简介	72
5.2	环境分布和污染来源	74
5.3	研究地点和人群概况分析	74
5.4	危害性评估	75
5.4.1	急性毒性	75
5.4.2	亚急性毒性	75
5.4.3	慢性毒性	75
5.4.4	影响水生生物	76
5.4.5	影响蛋白质代谢	76
5.4.6	母婴传播	76
5.4.7	硫丹基因毒理	76
5.5	硫丹剂量-效应关系	76
5.6	暴露量评估	77
5.6.1	暴露数据的获取	77
5.6.2	暴露假设	81
5.6.3	人体通过呼吸暴露剂量	82
5.6.4	人体通过皮肤接触土壤暴露剂量	82
5.6.5	人体通过饮食摄入	83
5.7	风险分析	83
5.8	不确定性分析	84
5.9	敏感性分析	85
	参考文献	85
<b>第 6 章</b>	<b>有机磷阻燃剂和增塑剂的人体健康风险评价</b>	<b>88</b>
6.1	有机磷阻燃剂和增塑剂介绍	90
6.1.1	环境介质和人体分布	90

6.1.2	环境来源	90
6.1.3	环境特征	91
6.2	危害性评估	91
6.3	剂量-效应关系评估	92
6.4	研究地点和人群概况分析	92
6.5	数据获得	92
6.5.1	样品采集和分析	92
6.5.2	生物样品前处理	93
6.5.3	气相色谱/质谱分析	93
6.5.4	质量保证/质量控制	94
6.5.5	生物样品浓度	94
6.6	暴露量评估	96
6.7	风险分析	96
6.8	不确定性分析	97
6.9	敏感性分析	99
	参考文献	99
<b>第7章</b>	<b>有机硅氧烷的人体健康风险评价</b>	<b>103</b>
7.1	有机硅氧烷简介	104
7.2	环境分布和污染来源	105
7.3	研究人群概况分析	106
7.4	危害性评估	107
7.4.1	急性毒性	107
7.4.2	短期重复剂量毒性	107
7.4.3	亚慢性毒性	107
7.4.4	慢性毒性	108
7.4.5	发育毒性	108
7.4.6	繁殖毒性	108
7.4.7	内分泌干扰毒性	108
7.4.8	基因毒性	108
7.5	剂量-效应关系评估	108
7.6	暴露量评估	109
7.6.1	暴露数据的获取	109



7.6.2	暴露假设	112
7.6.3	人体通过呼吸暴露剂量	113
7.6.4	人体通过食物和饮用水摄入	113
7.6.5	人体通过土壤摄食	114
7.6.6	人体通过皮肤接触润肤液暴露剂量	114
7.7	风险分析	115
7.8	不确定性分析	116
7.8.1	蒙特卡罗分析	116
7.8.2	模型参数敏感性分析	117
	参考文献	119
<b>第 8 章</b>	<b>大连地区多环芳烃致癌性人体健康风险评价及源识别防治对策研究</b>	<b>124</b>
8.1	PAHs 简介	124
8.1.1	PAHs 的物化性质	124
8.1.2	环境来源	126
8.1.3	毒理学性质	126
8.2	大气和土壤浓度测定	127
8.2.1	研究地点和人群概况分析	127
8.2.2	样品采集和分析	128
8.2.3	气相色谱/质谱分析	129
8.2.4	质量保证/质量控制	129
8.2.5	大气浓度	129
8.2.6	土壤和灰尘浓度	130
8.3	PAHs 危害性评估方法	131
8.3.1	PAHs 的致癌等效浓度	131
8.3.2	大气 PAHs 终身致癌超额危险度	131
8.3.3	预期寿命损失	132
8.4	暴露量评估	132
8.4.1	人体通过呼吸摄入	133
8.4.2	人体通过皮肤接触	134
8.4.3	人体通过土壤摄食	134
8.5	风险分析	134
8.6	不确定性分析	135

8.7	敏感性分析	136
8.8	源识别	138
8.8.1	排放因子特征	138
8.8.2	正矩阵因子模型土壤中 PAHs 的污染来源	139
	参考文献	142
<b>第 9 章</b>	<b>全氟辛烷磺酸/全氟辛酸的水环境生态安全阈值及生态风险评价</b>	<b>145</b>
9.1	全氟类化合物简介	145
9.2	ICE 模型简介	146
9.3	应用 ICE 模型推导生态安全阈值	146
9.3.1	毒理学数据的收集和筛选	146
9.3.2	毒理学数据的处理	147
9.3.3	阈值推导方法	148
9.3.4	log-triangular 和 FACR 方法	149
9.3.5	ICE 方法	150
9.3.6	应用不同方法推导并比较 PFOS 的 PNEC	151
9.3.7	应用不同方法推导并比较 PFOA 的 PNEC	152
9.3.8	PNEC 与微宇宙研究结果比较	154
9.4	暴露评估	155
9.5	PFOS 和 PFOA 的初步生态风险评价	156
	参考文献	156
<b>第 10 章</b>	<b>硝基苯的水环境生态安全阈值及其生态风险</b>	<b>159</b>
10.1	硝基苯简介	159
10.2	生态安全阈值推导	160
10.2.1	毒理学数据的收集和筛选	160
10.2.2	阈值推导方法	160
10.2.3	硝基苯对水生生物的毒性数据	161
10.2.4	硝基苯海水环境生态安全阈值的确定	164
10.3	暴露评估	165
10.3.1	硝基苯的监测数据的评估、筛选和收集	165
10.3.2	硝基苯的暴露评估	165
10.4	我国地表水中硝基苯的生态风险	166
10.5	椒江口海水中硝基苯的生态风险	167

10.5.1	概率生态风险评估方法介绍	167
10.5.2	硝基苯在椒江口的概率生态风险评估	167
10.5.3	生态风险的不确定性分析	169
	参考文献	170
<b>第 11 章</b>	<b>渤海辽东湾海水中 PAHs 的生态安全阈值及生态风险评价</b>	<b>172</b>
11.1	PAHs 类化合物简介	172
11.2	渤海及其石油污染	172
11.3	暴露评估	173
11.3.1	PAHs 的样品采集和分析	173
11.3.2	PAHs 的暴露评估	173
11.4	水环境中 PAHs 的生态安全阈值推导	177
11.4.1	毒理学数据的收集和筛选	177
11.4.2	阈值推导方法	178
11.4.3	8 种 PAHs 对水生生物的毒性数据	178
11.4.4	PAHs 海水环境生态安全阈值的确定	183
11.5	生态风险表征	184
11.5.1	商值法	184
11.5.2	商值概率分布法	185
11.5.3	联合概率曲线法	186
	参考文献	187
<b>第 12 章</b>	<b>应用 QSAR 模型预测 PAHs 的水环境生态安全阈值及其联合生态风险</b>	<b>190</b>
12.1	QSAR 简介	190
12.2	暴露评估	191
12.2.1	PAHs 的样品采集和分析	191
12.2.2	PAHs 的暴露评估	191
12.3	应用 QSAR 推导水环境中 PAHs 的生态安全阈值	194
12.3.1	阈值推导方法	194
12.3.2	QSAR 模型	194
12.3.3	PAHs 海水环境生态安全阈值的确定	196
12.4	生态风险表征	198
12.4.1	商值法	198
12.4.2	商值概率分布法	199

12.4.3	联合概率曲线法	200
12.4.4	联合生态风险	201
12.4.5	不确定性分析	202
	参考文献	204
<b>第 13 章</b>	<b>我国近海典型航线水体中 PAHs 生态风险评价</b>	<b>206</b>
13.1	海洋环境中的 PAHs	207
13.2	PAHs 生态风险发展	207
13.3	PAHs 的调查	209
13.3.1	采样航线和时间	209
13.3.2	海水样品前处理	211
13.3.3	气相色谱/质谱分析	212
13.3.4	质量保证/质量控制	212
13.3.5	船舶航线中 PAHs 的含量分布特征分析	213
13.4	PAHs 的毒理学评估	214
13.4.1	剂量-效应评估	214
13.4.2	毒性数据选择	215
13.4.3	数据分组和处理	215
13.4.4	SSD 曲线拟合	215
13.4.5	评价终点值 $NOE_{CMS}$ 和 $PNEC$ 计算	217
13.5	风险表征	218
13.5.1	商值法	218
13.5.2	商值法概率分布法	219
	参考文献	221
<b>第 14 章</b>	<b>大连近海沉积物环境中多溴联苯醚生态风险评价</b>	<b>225</b>
14.1	PBDEs 简介	226
14.2	环境来源和归趋	226
14.2.1	环境污染源	226
14.2.2	环境介质分布	227
14.2.3	环境转化和归趋	228
14.3	研究地点	230
14.4	危害性鉴定	230
14.5	剂量-效应关系评估	231

14.6	暴露量评估	232
14.6.1	暴露数据的获取	232
14.6.2	前处理	234
14.6.3	仪器分析	234
14.6.4	质量控制/保证	235
14.6.5	PBDEs 浓度	235
14.6.6	PBDEs 空间分布	236
14.6.7	有机质含量对 PBDEs 浓度影响	236
14.7	风险分析	237
	参考文献	239
<b>第 15 章</b>	<b>大连城市环境土壤中多氯联苯生态风险评价</b>	<b>243</b>
15.1	PCBs 简介	243
15.2	危害性鉴定	244
15.3	PCBs 的环境风险评价研究进展	245
15.3.1	潜在生态危害指数法	245
15.3.2	环境质量标准中的风险评价	246
15.3.3	毒性当量因子方法	247
15.4	土壤浓度分析	248
15.4.1	土壤采样方法	248
15.4.2	样品前处理	250
15.4.3	仪器分析	251
15.4.4	质量控制/保证	251
15.4.5	含水率和有机质含量测定	252
15.5	土壤中 PCBs 的浓度和分布	252
15.5.1	夏、冬两季土壤中 PCBs 的浓度和分布	252
15.5.2	PCBs 组成特征	255
15.5.3	有机质含量对 PCBs 浓度影响	258
15.6	风险分析	258
15.6.1	环境风险质量评价标准方法	258
15.6.2	潜在生态危害指数法	259
15.6.3	毒性当量因子方法	260
	参考文献	262

<b>第 16 章 有机硅氧烷在市政污水处理厂的归趋及生态风险评价</b> .....	265
16.1 市政污水工厂介绍.....	266
16.1.1 污水处理厂规模和服务范围.....	266
16.1.2 处理工艺和效果.....	266
16.1.3 工艺优点.....	267
16.1.4 工艺设备和运行过程.....	267
16.1.5 污水处理厂工艺设备参数.....	269
16.2 采样和样品分析.....	270
16.2.1 水和污泥样品.....	270
16.2.2 样品前处理.....	270
16.2.3 气相色谱/质谱分析.....	272
16.2.4 质量保证/质量控制.....	273
16.3 浓度分析.....	273
16.3.1 水样品浓度和分布.....	273
16.3.2 污泥样品浓度.....	275
16.4 基于逸度的市政污水处理厂模型模拟有机硅氧烷归趋.....	275
16.4.1 逸度介绍.....	275
16.4.2 多介质环境模型介绍.....	275
16.4.3 模型参数.....	276
16.4.4 CWSBR 逸度模型.....	276
16.4.5 逸度模型的不确定性和敏感性分析.....	281
16.4.6 模型结果同实验测定结果比较.....	283
16.5 有机硅氧烷生态危害性评估.....	284
16.6 生态风险表征.....	285
参考文献.....	286
<b>第 17 章 新型有机氯阻燃剂的食物链生物蓄积性评价</b> .....	289
17.1 研究地点介绍.....	290
17.2 环境中生物样品前处理和分析.....	290
17.2.1 采样方法.....	291
17.2.2 样品前处理.....	291
17.2.3 气相色谱/质谱分析.....	291
17.2.4 稳定同位素分析和生物链放大因子计算.....	292

17.2.5 质量保证/质量控制 (QA/QC) .....	293
17.3 生物样品浓度 .....	293
17.3.1 DP 和脱氯产物 .....	293
17.3.2 灭蚁灵 .....	294
17.3.3 DPMA .....	294
17.3.4 chlordene plus .....	294
17.3.5 Dec 602、Dec 603 和 Dec 604 .....	295
17.4 食物链营养级放大因子 .....	295
参考文献 .....	297

# 第 1 章 环境风险评价发展

## 1.1 风险评价的定义

风险就是对不确定危害的度量，表达事故造成的危害程度。目前风险的定义已经发生了变化，摆脱了传统的定义风险为纯损失的模式，从而直接改变了风险管理方式，降低损失，使利益和机遇最大化。通常用一个事件的后果和对应的发生可能性这二者的结合来表示风险，也就是：

$$\text{风险} = \text{事故造成后果} \times \text{事故发生概率}$$

风险评价是指对系统存在的潜在危害进行定性和定量分析，从而降低事故概率，保证系统安全的过程。风险评价过程需要解决的 5 个基本问题包括：分析现状、趋势和可能原因；事故产生后果和影响；事故发生概率；降低风险的因素；风险等级评定和采取措施。

## 1.2 环境风险评价的定义

环境风险是自然环境或人类活动引起的通过环境介质传播，并对人类社会及生态环境产生危害事件的后果及其概率。因为人类生产和生活方式的复杂化，自然环境现象的多样化，由此引起的环境风险的性质和表现方式复杂多变。总体来说，可以根据风险来源和风险承受对象进行分类。

按照风险来源，环境风险可以分为：自然灾害（火山爆发、地震、海啸等）、化学物质（汞、农药、多氯联苯、二噁英等）、物理过程（电磁辐射、放射性物质等）。按照风险承受对象，环境风险评价可包括建设项目（化学化工厂建设）、生产设备（火电站）、人体健康以及生态环境等。目前，狭义上主要包括人体健康风险评价和生态风险评价两个方面。

环境风险评价是对有毒化学物质危害人体健康和生态系统的可能性的概率估计，并在此基础上提出减小风险的措施。人体健康风险评价是指对环境中某物质对人体健康产生已知或潜在的危害结果的科学评价。生态风险评价是指评价由一



种或多种外界因素导致可能发生或正在发生的不利生态影响的过程。风险评价的主要目的是为不确定条件下决策的制定提供技术支持。

### 1.3 风险管理过程

风险评价是随着化学品管理发展起来的，化学品管理的一个中心主题就是风险评价。最初，风险评价关心的是人类健康，而随着环境污染的加剧，造成大规模的生态灾难，风险评价也逐渐开始关注生物多样性和生态系统的完整性。

### 1.4 风险表达和认知

人们使用不同方法来评价个体风险和环境风险。一般来说，风险可以表达为在某一特定情况下暴露于某一化学物质，对人类或生态系统产生不利影响的概率。风险有 3 个特征变量：危害类型、规模和概率。风险概率数值可以定量地表达为由 0 到 1，即从不发生危害到一定发生危害。

通常来说安全与风险是相伴而生的，不存在绝对的安全。不同的人群和团体对相同事件的风险认知是不一样的，这种认知区别主要来源于利益、知识、文化、教育水平等。地处高纬度的北欧和加拿大等地区和国家对持久性有机污染物引起的风险比较关注，因为该类物质可以通过长距离传输在极地等寒冷地区富集；地处热带地区的国家则关注全球气候变暖带来的风险，因为全球气候变暖对它们的影响最大。表 1.1 列出了人们可能暴露的各种风险。有些风险是人们自愿承担的风险，如吸烟、喝酒等；有些风险是非自愿的风险，如空气污染、车祸、火灾。吸烟引起的死亡率是最高的，但是因为属于自愿风险，所以吸烟的人们能够承受。而空气污染引起死亡的概率比吸烟要低，但是因为属于非自愿风险，所以公众无法轻易接受，这就是目前我国公众对灰霾比较关心的原因。

表 1.1 日常活动的风险水平

常见活动	每年发生死亡危险的概率
吸烟	$5.00 \times 10^{-3}$
空气污染	$9.49 \times 10^{-4}$
车祸	$2.50 \times 10^{-5}$
喝酒	$2.00 \times 10^{-5}$