

大气环境风险控制的

优化理论与应用

刘 峰 黄顺祥 著

$$\frac{\partial L_a}{\partial C^*} = 0, \frac{\partial L_a}{\partial r_i} = 0$$



气象出版社
China Meteorological Press

项目支持:国家自然科学基金项目(编号:40975089)

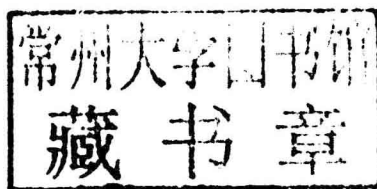
国家高技术研究发展计划(863计划,编号:2006AA06A306)

公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201106033)

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题
(编号:LAPC-KF-2008-10 和 LAPC-KF-2011-05)

大气环境风险控制的优化理论与应用

刘 峰 黄顺祥 著



 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

由于工业污染、核事故、化学事故等造成有毒有害物质排放到大气中,对人类生命、健康和生态环境都造成了严重的威胁。从对大气环境风险的评价到对其进行有效的控制,是大气环境科学研究的新领域。本书深入论述了大气环境风险控制中的各种典型优化控制问题,其中较多地收录了作者最近的研究成果。本书包含大量大气环境风险模拟、评价和控制的理论模型,根据问题的特点,引入了多种优化方法,尤其是对伴随方法在不同优化问题中的运用有新颖的思路,并通过实例进行应用演示。

本书具有前沿性、理论性和系统性的特点,并紧密联系实际,属于大气环境、安全科学和控制论的交叉学科范畴,可供大气污染控制、环境规划、安全管理等领域的科研人员、管理人员、高校教师和研究生阅读,也可作为复杂系统控制论领域科研人员的有益参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气环境风险控制的优化理论与应用/刘峰,黄顺祥著.

—北京:气象出版社,2010.6

ISBN 978-7-5029-4999-0

I. ①大… II. ①刘…②黄… III. ①大气环境-风险管理-研究
IV. ①X16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 105531 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:简学东

封面设计:博雅思企划

责任校对:赵 媛

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:300 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版

定 价:30.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:11.25

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

序

大气环境是包括人类在内的地球生物赖以生存的重要环境之一。当大气环境遭到一定程度的破坏,就可能构成危害,影响我们的生存和发展。本书是两位青年作者近几年对该领域发展的贡献,从大气环境风险控制的角度,研究了一系列优化问题。

对于来自大气环境这个庞大系统的风险,应对方式多种多样,大致可分为三类:一是针对风险源的控制,从根源上降低产生危害的可能;二是针对危害发展过程的干预,在某些关键的环节采取有效措施以遏制风险;三是对风险的规避,当人们尚缺乏克制某些风险的手段时,就需要撤离或疏散以保障人员安全。一般地,对于一个系统的控制,总是基于一定的前提,即对系统的动力学规律有足够的了解,用可行的方式来干预系统的运行,使其按照人们所希望的轨迹演变。而且,为了使得控制的代价可以接受,常常需要审慎地考虑多种控制方式,对其进行优化。

本书作者刘峰还在研究生学习期间,就对大气污染的优化控制理论进行了系统而深入的研究,现供职于中国人民解放军防化学院,更专注于化学、放射性物质导致的大气环境风险控制研究。另一位作者黄顺祥(也供职于上述单位)则在环境风险预测与评估领域有深广的研究。两位作者的研究视角相当开阔,对大气环境风险的多个方面均加以关注,研究成果丰硕。本书主要集中于当前迫切需要而又有能力加以解决的问题,使之成为理论紧密联系实际的有机整体。本书包括了空气污染的短期和长期控制,一次污染物和二次污染物的控制,化学、核事故的风险控制等内容,下面就是本书作者的几个重要而独到的研究成果。

(1)工业污染源优化布局的问题,该问题在自然控制论中作为典型

应用的一个例子提出,而在本书中得到广泛研究和很好的解决。由于该问题是以工厂的选址为控制变量,与以污染源排放量为控制变量的污染控制问题有显著的不同。作者用伴随算子方法导出计算经济目标函数梯度的公式,根据梯度信息对布局进行优化,使之同时满足环境约束和经济优化的目标。数值试验验证了这一方法有较高的效率。该问题的解决,为新工业区布局的环境规划提供了有力的工具。

(2)从销毁日本遗弃化学武器和国家核安全领域的研究实践中提炼出一系列风险控制问题,将有毒有害气体的扩散模式、风险评估模型、预测预警和应急救援决策技术等多个领域研究成果相结合,具有理论上的创新,又与实践联系很密切地结合。同时它也是自然控制论研究对象的延伸,是多学科交叉的新的增长点。

(3)大气中多种成分的复杂物理化学过程的调控是更为复杂的问题,这类问题又是必须严肃对待的。为解决其实际问题,作者构建了全新的基于大气化学传输模式的伴随模式,并应用于珠江三角洲的复合大气污染治理研究,对于排放源削减效果进行了模拟和敏感性分析。该伴随模式用于大气环境的长期规划和短期控制策略分析,可望在区域大气环境问题研究中发挥更大的作用。

(4)研究了不利天气条件下对污染源进行动态的优化减排,以避免严重污染事件。这其实是上述第一方面的另一种提法和求解方法。通过对二氧化硫污染的控制案例分析,发现优化控制方案中只需对少数污染源进行重点控制即可达到空气质量标准,总削减量只占全区域总排放量的一小部分,明显优于“一刀切”式的同比例削减。这充分体现了对控制方案进行优化的价值。

不难看出,作者在所从事的大量、各类实际业务的基础上,提炼出科学问题,进行细致的定量化和数学化,寻求解决问题的方法,兼顾理论高度和实用需求。这种思路是正确的,很值得提倡,需知实践永远是科学发展的强大促进力量,也是理论研究生命力的源泉。由于大千世界中诸多因素相互关联的极端复杂性,这些问题的完全解决还需要更多的理论探索和实践检验。科学探索永无止境,本书的内容是开拓性

的,为该研究领域进一步的丰富和发展提供了十分重要的范例。

当前,人类对自然界环境的干预已经达到很广很深的程度,以至全世界都在热议要“拯救地球”。毫无疑问,这不应是一个政治斗争的口号,而应实事求是地解决实际的问题。因此,重要的是要在正确的科学指导下对具体的调控问题加以认识 and 解决。自然控制论就是为此而产生的。而今天我们所做的许许多多大气污染治理和工业灾害防范的工作,实际上都是在自觉或不自觉地对大气环境风险进行控制,与人们的生活息息相关。本书的出版正得其时,相信本书将为相关科技人员提供富于启发性的思路,相信越来越多的人将关注和参与到大气环境风险控制的领域中来。

曾庆存

2011年5月

注:曾庆存,中国科学院院士,第三世界科学院院士,俄罗斯科学院外籍院士,原中国科学技术协会副主席,主要从事大气科学、地球流体力学、自然控制论等领域的研究。

前 言

大气环境是指地球大气的各种物理、化学和生物学特性,这些特性与人类的生存和发展息息相关。亿万年来,大气环境和地球生态的演变过程中发生着十分密切而复杂的相互作用。人类近代工业化的迅速发展和化石燃料消耗量的激增,对大气环境产生了巨大而深远的影响。当大气环境的改变达到威胁人们的身体健康、恶化生存条件的地步时,就构成了大气环境风险。大气环境风险的形式是多种多样的,从全球尺度的气候突变、臭氧洞到区域尺度的酸雨,再到城市尺度的大气污染,以及核事故、化学泄漏事故等,都得到各国政府部门和专家学者的密切关注和深入研究。

本书针对由于工业污染排放、核事故、化学事故等造成的大气环境风险,结合实际特点,研究对其进行控制中的优化问题。其中,关于工业污染的控制,本书对已经发展为成熟技术体系的总量控制优化方法不作详细阐述,而是在前人理论工作基础上,着重研究多个工业污染源优化布局和不利天气条件下对排放源的动态控制等新问题。为了研究包含复杂化学反应的二次污染物控制问题,建立了 CAMx 模式的伴随模式,并进行了排放源消减敏感性试验。而关于化学事故、核事故造成的大气环境风险控制,则是源于作者所从事业务工作中实际问题的提炼,经过定量化和数学化,建立优化控制模型,再应用到实践中,以提高事故处置的效率。就在本书出版的过程中,日本福岛核电站由于地震、海啸而引发严重的核事故,作者希望本书阐述的方法能够有助于提高核事故应急处置能力。

本书力求清晰地表述优化控制问题的求解思路,对数学工具的运用以能够清楚地表述所研究的问题为限,尽量避免过于繁复的数学推导。本书中大量地用到数值天气预报模式和大气化学传输模式,关于这些模式的原理,已有许多专著做了详细的描述,本书将不加赘述,而代之以文献索引,供读者参考。

感谢中国科学院大气物理研究所曾庆存院士、洪钟祥院士、胡非研究员、朱江研究员,北京大学陈家宜教授、桑建国教授、张远航教授,中国人民解放军防化学院陈海平教授等前辈导师对作者的指导和鼓励。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号:40975089)、国家高技术研究发展计划(863 计划,编号:2006AA06A306)、公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201106033)、中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题(编号:LAPC-KF-2008-10 和 LAPC-KF-2011-05)的资助,在此一并致谢。作者还要特别感谢防化学院各级领导和相关专家多年以来的鼓励和支持。气象出版社蔺学东编辑等各位同仁为本书的出版提供了大量的帮助和中肯的建议,作者在此表示衷心的感谢。

最后,由于本书部分理论还处于发展阶段,加之时间仓促和作者水平有限,错误和遗漏之处在所难免,衷心地希望读者批评指正。

作者

2011 年 5 月

目 录

序

前言

第 1 章	大气环境风险控制概述	(1)
1.1	大气环境简介	(1)
1.2	大气环境风险的含义	(2)
1.3	大气环境风险控制的历史	(3)
1.4	大气环境风险控制的基本途径	(7)
1.5	自然控制论与大气环境风险控制	(11)
1.6	大气环境风险控制的优化问题	(15)
第 2 章	大气环境风险研究的理论模型	(17)
2.1	大气污染源的描述	(17)
2.2	大气污染物传输过程中的数理模型	(21)
2.3	基本方程的求解	(24)
2.4	环境风险评价模型	(31)
第 3 章	大气环境风险控制的优化理论和算法	(38)
3.1	大气环境风险控制优化问题的数学表述	(38)
3.2	最优化方法简介	(39)
3.3	伴随方法和伴随模式的基本原理	(49)
第 4 章	大气污染化学事故风险的优化控制	(62)
4.1	引言	(62)
4.2	化学风险函数的数学表述	(63)
4.3	毒气扩散基本方程与正向模拟方法	(63)
4.4	评价化学风险的伴随方法	(65)
4.5	伴随方程的离散形式	(66)
4.6	模式系统简介	(68)
4.7	数值模拟与讨论	(68)
4.8	化学风险优化控制问题的求解	(72)
4.9	小结	(83)
第 5 章	复合大气污染过程的敏感性分析	(84)
5.1	引言	(84)
5.2	敏感性分析的基本原理	(84)
5.3	CAMx 的伴随模式之构建	(86)

5.4	珠江三角洲地区 SO ₂ 敏感性模拟	(90)
5.5	珠江三角洲地区对流层臭氧敏感性分析	(93)
5.6	小结	(102)
第 6 章	不利天气条件下大气污染动态控制	(103)
6.1	引言	(103)
6.2	问题的数学表述	(103)
6.3	求解方法	(105)
6.4	理想试验——优化算法效率分析	(107)
6.5	济南市模拟控制试验	(110)
6.6	结论与展望	(118)
第 7 章	大气污染源的优化布局理论与数值研究	(119)
7.1	引言	(119)
7.2	优化布局问题的表述	(120)
7.3	优化布局问题的求解方法	(121)
7.4	数值试验及结果分析	(123)
7.5	小结	(126)
第 8 章	核事故危害预测预警与风险控制	(127)
8.1	引言	(127)
8.2	影响核事故危害的主要因素分析	(127)
8.3	核事故危害的预测、预警	(131)
8.4	核事故危害预测预警系统 GIS 集成技术	(137)
8.5	核事故风险控制措施	(143)
8.6	核事故风险优化控制模型与应用	(149)
8.7	小结	(153)
参考文献		(154)
附录	Lorenz 系统模式及其伴随模式源代码	(161)

第1章 大气环境风险控制概述

1.1 大气环境简介

地球大气是由于重力吸引而积聚在地球表面附近的气体的统称,它的存在和演变已经有数十亿年的历史。大气厚度超过 1000 km,但主要集中在距离地面 50 km 以下的圈层内,而高层大气非常稀薄。根据温度的变化特点,大气层从下到上可分为对流层、平流层、中间层、热层和外逸层。由于受地表热力驱动、摩擦阻滞及地球自转等作用,它处于永不停息的复杂流动和循环中,并与地表进行着质量、动量和能量的交换。相对于地球的尺度来说,大气是相当薄的一层,只相当于地球总质量的百万分之一,但它对于包括人类在内的地球生物的生存实在是太重要了。它不仅维持着适宜的温度,屏蔽致命的紫外线,也为生物体与外界的物质和能量交换提供条件。

大气各层中对生物的生存起直接作用的是对流层,这一层包括了大气的大部分质量。对流层中气温主要变化趋势是随着高度升高而下降,垂直方向容易发生对流,上下混合比较迅速,主要天气现象如云、雨、雪、雹、雷电均出现在此层。对流层厚度(其顶部离地面高度)在赤道及低纬度区为 17~18 km,中纬度区为 10~12 km,两极和高纬度区为 8~9 km。此外,对流层还呈现出夏季较厚、冬季较薄的变化规律。

对流层大气中,如果不考虑水汽,则其化学成分稳定,由氮(78.09%)、氧(20.94%)、氩(0.934%)、二氧化碳(0.033%)等气体组成,这四种气体约占总体积的 99.99%以上,其他气体称为微量气体,总和不到总体积的万分之一,详见表 1.1.1。我们看到,这些微量气体中有些是惰性气体,如氦、氖、氩等,而有些是我们常说的污染物,如二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、氨等,它们的本底浓度很低,因人类活动向大气中排放而使它们的浓度增加,或者由于大气中化学反应而生成。这些物质浓度达到有害的程度,可改变大气的化学、物理、生物等方面的特性,影响人们的生活、工作,危害人体健康,影响或威胁生物的生存,直接或间接地损害设备、建筑物等,就构成了大气污染。对流层大气中水汽的体积比变化很大,一般在 0%~4%,在热带低层可能达到 6%之多。

对流层底部直接受地表影响的一层,称为大气边界层。大气边界层厚度随着时间和空间而变化,薄时仅为几百米,最大可达二三千米,平均厚度约 1 km,占对流层厚度的十分之一左右。大气边界层是自由大气和地表之间活跃的联系纽带。在这一层里,风速、温度等气象要素的垂直梯度很大,动量、热量、水汽及大气污染物在这一层里的交换非常强烈。由于风速切变、热力对流和地形强迫导致的湍流使得边界层气象学的内容极其丰富而复杂。人类的生产与生活绝大部分都是在大气边界层中进行的,污染物的排放和输送、扩散,也主要是在边界层中开始的。大气边界层中的各种过程和效应,还会进一步影响着天气和气候系统的演变。

大气环境是指生物赖以生存的大气的物理、化学和生物学特性。大气环境学把地球大气看做人类和其他生物生存和发展的基础,研究各种大气组分的物理、化学和生物过程,以及它们与人类活动的相互作用。大气环境学是大气科学和环境科学的交叉学科,与自然科学和社会科学的多个学科均有密切联系。

表 1.1.1 海平面高度上干燥清洁空气中微量化学成分的组成

成分	体积比(ppm)	成分	体积比(ppm)
氖(Ne)	18	氦(He)	5.2
甲烷(CH ₄)	1.72	氪(Kr)	1.1
氢(H ₂)	0.58	一氧化二氮(N ₂ O)	0.31
氙(Xe)	0.09	一氧化碳(CO)	0.06~0.12
臭氧(O ₃)	10 ⁻² ~10 ⁻¹	一氧化氮(NO)	10 ⁻⁶ ~10 ⁻²
氨(NH ₃)	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	二氧化硫(SO ₂)	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴

1.2 大气环境风险的含义

在工业和安全领域常常提到危险、危害、风险等概念。危险是指事物所处的不安全状态,在这种状态下,可能导致一些不利的事件,最终造成损失或损害,如人员伤亡、财产损失或环境破坏等;危害指由于危险事件发生所导致的具体后果;风险是危险发生的可能性及造成危害的综合体现。当一个危险事件发生的概率越大,可造成的损失越大,那么它的风险也就越大。

危险和风险是两个意思相关、但并不相同的概念(罗云等, 2004)。危险通常指一种正在进行的状态,例如,交通违章是危险的,暴露在剧毒气体中是危险的,不加防护地处于高温或低温环境中是危险的等。风险则不是那样显而易见,它是对潜在的、可能发生的、将要发生的危险的描述和度量。有风险不一定就危险,例如,长期吸烟有致癌的风险,罹患癌症是危险的,但我们不能说一个正在吸烟的人处于危险状态。反之,危险很大时,风险也不一定就大。例如,化工厂的有毒原料是危险的,核电站的辐射也很危险,但在严格的工艺流程和生产规范的约束下,操作人员处于危险状态的可能性很低,也就是说,风险并不如想象的那样大。总而言之,危险是我们尽量要避免的状态,而风险是客观存在的,现代生活中,生产、饮食、出行等活动都不可能完全避免风险。我们所能做的,是在充分享受现代化带来的各种便利的同时,采取适当的措施,对风险进行有效的控制,降低受到伤害或损失的可能。

大气环境风险特指由于大气环境要素被破坏,导致对人类和生态的直接伤害、财富损失和生活质量下降等。例如,大气污染物的事故性集中排放,可导致人们急性中毒产生伤亡;大气污染物的长期排放,使生活在恶劣空气质量下的人们体质下降,诱发各种疾病,导致劳动能力下降,医疗支出增加;酸雨造成生态破坏,农、林、牧、渔业减产,文化景观损坏等。以上都属于大气环境风险的具体例子。

大气环境风险可能是突然爆发的,也可能是缓慢积累的,可能表现为对健康的损害,也可能表现为财富的损失。而且这些风险大多与人们的生产活动直接相关,如果能够合理地规划和约束各种行为,则可有效地控制大气环境风险。

1.3 大气环境风险控制的历史

1.3.1 农业时代

大气环境风险的产生与发展的历史是与社会经济发展的历程密切相关的。

人类自来到这个世界上起,就开始了漫长的发展自己和改造环境的历程。在人类文明的早期,认识自然和影响自然的能力不强,对大气环境的破坏力也很有限,为了生存和发展,在很大程度上要听命于天,要被动地顺应自然界的各种约束。

农业社会也要消耗自然资源,也会排放废弃物而造成污染,但是由于当时生产力水平低下,消耗的资源 and 排放的污染物总量较小,可以因自然界(大气圈、水圈、生态圈等)的自我净化机制(稀释和分解等)而逐渐消除。农业时代的大气环境风险,主要是由于自然的原因,如火山爆发、森林大火等造成毒烟的扩散,曾经伤害过许多来不及逃脱的生命。我国古代劳动人民很早就知道在采矿时要用竹管将矿井中的毒气引出,以防范毒气伤人的风险。总的来说,当时人类虽然在科技上蒙昧落后,但是恰恰由此而迫使他们懂得要与自然界(天、地、生态环境等)和谐相处,所谓“勿焚林而猎,勿竭泽而渔”正是这种观念的生动表述。

1.3.2 工业化时代

近代工业革命和城市化的浪潮,打破了这一原始的和谐。工业革命以其巨大的生产规模而能迅速地在—个地区集中大量的资本和人口,形成工业化城市。城市的经济发达,人口密集,交通便捷,繁忙而充满活力。城市是社会经济的—增长中心,它以前所未有的速度创造财富,带动周边地区发展,也以前所未有的速度扩张规模,吸引农村人口向城市聚集。统计数据表明,在1801—1901年这100年间,伦敦人口由100万增长到650万,巴黎人口由50万增长到300万,而纽约更是由3300人增长到350万人。人口和产业规模的激增,给城市带来了一系列问题,如市内交通拥挤、居住条件恶化、环境污染突出等。

在19世纪下半叶时,一些有识之士就开始关注工业化时代化石燃料消耗激增所导致的大气环境问题。最迟在20世纪初,城市规划者们在进行工业布局时已经意识到要考虑气象因素,提出应该把工业区布置在盛行风的下风方向,以减轻对生活区的空气污染。

政府部门真正重视空气污染治理并制定严格的法规和标准,是在第二次世界大战之后。各国经济发展迅猛,城市继续扩张,但是随之而来的环境污染也十分严重。由于缺乏切实可行的环境法规,工厂排放污染物没有定量的约束,加之工业集中在市区,发生了许多空气污染事故。其中最著名的当属1952年12月发生在英国伦敦的烟雾事件,当时地处泰晤士河河谷地带的伦敦城市上空处于高压中心,一连几日无风,又赶上冬季大量使用燃煤取暖,烟气不能扩散出去而不断积聚,致使城市空气中连续四五天烟雾弥漫,能见度极低。飞机被迫取消航班,汽车即使白天行驶也须打开车灯,剧院的演出也因观众看不清舞台而被迫中止。行人走路都极为困难,只能沿着人行道摸索前行。恶劣的空气质量严重损害了市民的健康,仅仅一周时间,就有4000多人死亡。严峻的大气环境问题促使英国政府于1956年通过了清洁空气法,采取了一系列措施,对民用和工业燃煤进行严格限制,将工业区迁出市中心,不断增加电力和天然气的使用比例,使伦敦烟尘污染状况得到显著改善(顾向荣,2002)。

当今发达国家的大气环境污染问题已经由煤烟型污染转变为氮氧化物型(NO_x)污染。这主要是由于机动车数量激增而造成的。虽然近年来尾气控制技术取得了长足的进步,但是还赶不上机动车数量增加的速度。 NO_x 污染的一个严重后果是光化学烟雾。 NO_x 污染也是酸雨的一个重要来源。

我国是最大的发展中国家,最近30年来经济保持了高速发展,城市化过程明显加快,人口和资源迅速向大城市和城市群聚集,大气环境污染问题也日益突出。我国政府始终重视环境保护工作,但是由于工业规模和能源消耗增长很快,环保技术和法规相对滞后,城市空气质量恶化,在30年时间内出现了发达国家近百年所经历的各种环境污染问题。

据世界资源研究所和中国环境监测总站测算,1999年全球污染最严重的10个大城市中,中国就占了8个,并呈现区域性和复合型特征,存在发生严重大气污染事件的隐患,形势非常严峻(樊元生,1999)。经过大力治理,2008年的单位GDP二氧化硫、烟尘、工业粉尘排放量比2000年分别下降了57%、76%和82.8%。

根据2009年4月22日环境保护部向十一届全国人大常委会所作的《国务院关于大气污染防治工作进展情况的报告》,与2000年相比,2008年全国城市空气中 SO_2 、可吸入颗粒物和二氧化氮(NO_2)年均浓度比2000年分别下降28.5%、33.3%和31.5%,空气质量达到国家二级以上标准的城市比例也大幅提高。但全国仍有23.2%的城市空气质量未达到国家二级标准,113个重点城市中有48个城市空气质量达不到二级标准,城市空气中的可吸入颗粒物、 SO_2 浓度依然维持在较高水平。煤在我国主要能源中占了很大比例,煤烟型污染一直是我国大气污染的重要特征,与此同时,灰霾和光化学污染也已成为东部城市空气污染的突出问题。此外,机动车污染问题突出,使大中城市空气污染开始呈现煤烟型和汽车尾气复合型污染的特点,加剧了大气污染治理的难度(谢绍东等,2000)。上述事实表明,大气环境污染形势依然严峻,治理任务仍很艰巨。

1.3.3 酸雨——大气污染物的远距离传输

在20世纪60年代,环境规划者推崇采用高烟囱来排放废气,因为它可以有效地减轻局部的污染。但是在70年代初期新的问题出现了,北欧一些国家的渔民吃惊地发现,虽然本地没有排放多少污染物,可是湖泊里的鱼类资源却越来越少。后来查明是由于硫化物的远距离输送造成湖泊中水质酸化,以致生物无法生存。瑞典境内约有4000个湖泊已成为无鱼的“死水”,挪威约有1700个湖泊鱼类绝迹(唐大为,2000)。美国科学家们发现,污染问题的空间尺度远远超出了特定的都市尺度范围。尽管产生硫化物和氮氧化物的主要工业区处于美国中部,但是形成的酸雨影响了整个美国和加拿大。大气中的污染物可以随着盛行风输送上千千米,高烟囱政策试图将本地产生的大气污染引向高空并稀释,但如果总的排放量太大,其污染终将超过区域大气环境的容量,对空气质量的危害将转化为酸雨的沉降并威胁更大范围的生态环境。

1972年斯德哥尔摩环境大会后,人们认识到大气污染在许多方面是洲际尺度的大问题,并形成了一个经济上更全面深刻的认识,即空气污染控制的益处远大于所花费用,并且最终对经济的发展是正面的影响(Amann,1999)。欧洲各国国土面积较小,它们遇到污染物跨国输送的问题也比较早。1979年11月,在日内瓦由包括苏联、美国、加拿大在内的35个国家签署了《远程跨国界大气污染公约》,即著名的《日内瓦公约》。由于欧洲各国致力于 SO_2 的减排工

作,30年来 SO_2 排放量减少了50%以上,这一成就应归功于技术上的进步,如大量烟气脱硫装置投入运行,而各国在环境问题上的协调一致也是很重要的原因。其他发达国家如美国和日本的 SO_2 排放从60年代中后期开始也呈逐年下降趋势(许春丽和李保新,2001)。

酸雨也是我国面临的严重环境问题。从20世纪70年代起,我国就开展了系统的酸雨研究。1995年提出在全国范围划定酸雨控制区和 SO_2 污染控制区(以下简称两控区),在“两控区”内对 SO_2 排放进行控制。随着我国城市化进程的加速,形成酸雨的另一种重要污染物 NO_x 的排放量迅速上升,在一些发达地区已经出现硫酸—硝酸混合型酸雨。与此同时,光化学污染加重,大气氧化性增强,对酸雨的形成也有不可忽略的影响。

以酸雨为代表的区域性大气污染问题日趋明显。据国家环保部统计,2008年我国长江三角洲、珠江三角洲和京津冀地区三大城市群虽仅占全国6.3%的国土面积,却消耗了全国40%的煤炭、生产了50%的钢铁,大气污染物排放集中,重污染天气在区域内大范围同时出现,呈现明显的区域性特征。此外,在辽宁中部城市群、湖南长株潭地区及成渝地区等城市密度大、能源消费集中的区域也出现了区域性大气污染问题。

1.3.4 大气环境突发化学污染和放射性污染

化学工业和核能工业给我们带来巨大利益的同时,其隐藏的风险也不容忽视。

1984年12月3日凌晨,印度博帕尔(Bhopal)农药厂的储气罐发生突然泄漏,毒雾从厂区冒出,并在深夜的稳定大气中紧贴地面扩散,笼罩了 50 km^2 的区域,其中有11个居民区,创下了人类历史上化工事故伤亡最为惨重的纪录,约有3000人很快死亡,30万人中毒,5万人双目失明。调查表明,事故泄漏物为剧毒的甲基异氰酸盐,泄漏量达40吨之多,对生态和水源也造成了严重破坏,经济损失高达55亿美元。该事件造成的生态环境影响延续至今,使当地居民患癌率和儿童夭折率依然远高于印度其他城市。

我国是一个化工大国,大气污染化学事故是直接威胁人们生命健康和社会稳定的严重安全隐患。首先,我国化工行业规模增长迅速,化工原料的消耗量巨大,其中相当一部分具有强烈毒性。在生产、储存、运输等过程中,由于人为或自然原因,造成有毒化学品爆炸或泄漏的事故,近年来时有发生。其次,反恐怖主义形势严峻(Fitch等,2003),民用化学设施遭受恐怖袭击的可能性增大,有预谋的化学恐怖袭击可能会造成灾难性的后果(黄顺祥等,2004;Huang等,2005)。此外,我国还需要尽快处置入侵日本军队第二次世界大战期间遗弃在我国领土上数百万枚(件)化学武器,其埋藏状况异常复杂,分布在19个省市,对这些剧毒化学武器的挖掘回收和集中销毁过程中,一旦发生事故,造成的危害将十分严重(石建华和周学志,2007)。当泄漏有毒化学品为气态,或者由于挥发、燃烧、爆炸等原因形成有毒气体或气溶胶,便容易在大气中扩散,严重污染周围环境,并直接威胁其影响范围内人群的生命和健康。对于以上所述大气污染化学事故的风险,必须进行客观评价和有效控制。

1986年4月26日01时23分,苏联切尔诺贝利核电站进行试验计划时,反应堆的功率突然变大,并有大量蒸汽排放,随即发生剧烈反应引发爆炸,反应堆严重破坏,大量放射性物质泄漏。造成当地直接死亡31人,而受到高剂量放射性照射的人员达数万人之多,这些受害者不仅健康严重受损,预期寿命缩短,还可能殃及后代。与此同时,放射性尘埃随着大气环流而扩散到北欧各国,导致这些国家空气中的放射性元素含量急剧增加到正常标准的5~10倍,由于其长远后果难以估量,造成了严重的心理恐慌。这次震惊世界的核泄漏事故,影响十分深远,

至今未能消除。

我国目前正在大力发展核能工业,核电站的数目和规模将有一个很大的增长,因此,对于核安全提出了很高的要求(胡二邦和陈家宜,1999)。如何对核泄漏风险进行有效的控制,是关系到我国长治久安和子孙后代幸福的重大课题。

1.3.5 全球尺度的大气环境风险

1.3.5.1 南极臭氧洞

臭氧的分子式是 O_3 ,是氧元素的一种存在形态。臭氧在大气中的含量很少,其中大气对流层臭氧是光化学烟雾的主要成分之一。臭氧具有强氧化性,高浓度臭氧能刺激人的眼睛,伤害植物叶子,使橡胶等制品开裂,等等。大部分大气臭氧聚集在离地面 10~50 km 高度的平流层中。臭氧含量虽少,却对地球生命的生存和演化具有极其重要的意义。它可以吸收来自太阳的波长为 200~320 nm 的紫外线 UV-C 和 UV-B,这些紫外线对地球生命可造成致命的伤害。

臭氧在大气中的分布并不固定,具有一定的时空变化规律。但近年来科学家发现平流层臭氧的含量变得越来越少了,尤其在高纬度地区更加明显,南极上空由于臭氧严重减少而出现了“臭氧洞”。这一现象引起了科学界的极大关注,成为全球性的大气环境热点问题(黄美元等,2005)。

臭氧层破坏造成的主要后果有:

①危害人体健康,使晒斑、角膜炎、皮肤癌等疾病增加。据联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)1986 年报道,若臭氧总量减少 1%,皮肤癌发生率将增加 4%。

②破坏生态系统、影响植物光合作用,导致农作物减产。紫外线还可导致某些生物物种基因突变。

③过量紫外线照射,使塑料、高分子材料容易老化和分解。

当前科学家们认为,人为排放的氯氟烃类化合物(CFCs)对平流层臭氧造成了严重的破坏。这些物质(如氟利昂)广泛地用作制冷剂、发泡剂、清洗剂等,它们的化学性质稳定,可以在大气中长期存留,并最终进入平流层,在平流层分解成为活泼的原子氯或含氯的自由基,能以很高的效率破坏臭氧分子。研究表明,一个氯原子可以破坏数万个臭氧分子。为保护臭氧层,在联合国环境规划署推动下,1985 年签署了《保护臭氧层维也纳公约》,1987 年签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》,1989 年通过了《保护臭氧层赫尔辛基宣言》。各国已制订并实施 CFCs 替代物的计划,已于 2000 年前基本停止了氯氟烃类物质的生产和使用。

近来一种含溴的烷烃——溴甲烷(CH_3Br)得到广泛的关注,它是一种用于防治病虫害的熏蒸剂,目前的消耗量很大,而溴原子对臭氧的破坏能力更甚于氯原子,因此对类似的其他破坏臭氧的物质,控制其使用,或进行有效的回收,是在停止氟利昂生产的同时必须注意的。

1.3.5.2 全球气候变化

全球气候变化是另一个得到严重关注的大气环境问题。地球气候在亿万年来由于自然原因,一直处于缓慢地变化之中,但观测事实表明,最近 100 年来气候变化有突然加速的趋势,这被认为是与人类的活动有直接关系。由于人类工业活动消耗了大量的化石燃料,而排放出的

二氧化碳等温室气体加强了大气对长波辐射能量的吸收,造成了全球变暖的趋势。大量研究表明,大气中二氧化碳的含量从18世纪的280 ppm到现在的360 ppm,增长了约30%,现在还以每年0.5%的速率增加。

全球迅速变暖可能造成的后果尚难以准确地预测,一般认为其总体后果是不利的,对于某些国家和地区而言甚至是灾难性的。

气候变暖引起的问题:

①冰川退缩。从19世纪后半期起,几乎世界各地的冰川都发生了明显退缩。

②海平面上升。近100年来,极地冰川融化造成海平面上升,对沿海国家和地区构成严重威胁。

③影响农业生产。据估计,气温升高 2°C 时,即使降水量不变,全世界粮食生产亦可能下降3%~17%,并能使害虫的危害增加10%~13%。

④可能造成人类和动物的流行疾病增加。研究表明,气候变化促进动物传染病的发生与传播,改变危险病原体的分布,可能引起社会恐慌和严重的经济问题。

目前,对解决全球气候变暖问题在国际上已达成共识,即控制 CO_2 和其他温室气体的排放量,提高森林植被覆盖率以增大二氧化碳的汇,等等。许多国家在1992年联合国环境与发展大会上签署了《气候变化框架公约》。

科学家们致力于研究全球变暖的根本原因、预测模型和控制策略,研究发现,虽然二氧化碳是最重要的温室气体,但其他温室气体的作用也不可忽略。与此同时,由于自然界存在许多尚不清楚的源和汇,目前对大气中 CO_2 和 CH_4 等温室气体浓度的预测也很困难。这些事实促使科学家们对全球气候变化风险的原因分析更加谨慎。一方面,大多数科学家认可是人类活动造成全球增温这一趋势;但另一方面,对于全球气候变化的定量预测和控制措施尚有许多分歧,因为影响因素太多,对它们的研究尚未达到透彻的程度,预测结果有较大的不确定性。

1.4 大气环境风险控制的基本途径

前面列举了我们当前面临的各种大气环境风险。在认识到它们的共同点即都与大气运动和循环密切相关等之外,必须要注意,这些环境风险中,有的是局地尺度的,有的是区域尺度的,有的是全球尺度的,有的可快速致人伤亡,有的则是长期积累构成伤害。我们不可能用一种手段、一个规则来控制所有的大气环境风险,而是要根据各自的具体特征,分析控制的可能途径、代价和效果,并在此基础上进行优化控制的探索。

需要特别注意的是,表面上看,近、现代各种科学技术的应用增加了大气环境风险,但本质上恰恰是因为我们对科学的认识不够深入,现有技术水平不够高,或者对科技运用不当才导致了大气严重污染和各种安全事故的发生。在我们不断地改进生产工艺、提高安全生产水平、发展替代能源、健全法律规章、减少有害物质的排放后,将会逐步地改善大气环境的现状。

目前对于大气环境风险的控制,主要从三个方面入手,一是制定各种大气环境法规和政策,它属于宏观的控制;二是大气环境风险控制技术,它属于微观的控制;三是大气环境规划理论和方法,它是基于对宏观和微观措施定量分析而将二者相结合的控制。