

气象学与原子能

〔美〕 D. H. 斯莱德

原子能出版社

13.27

13

气象学与原子能

〔美〕 D. H. 斯莱德

张永兴 胡二邦 汪佳明
任培薛 程冠生 卢正永

译

内 容 简 介

本书是美国环境科学服务管理局气象组（原为美国气象局理论组）受美国原子能委员会反应堆安全咨询委员会的委托而编写的。全书内容分为两部分，第一部分（第一章到第六章）介绍与大气输送和扩散有关的基本知识（可称为扩散气象学），包括基本理论、计算模型、实验方法和结果以及气象观测仪器。第二部分（第七、八章）介绍大气放射性污染的安全评价方法，即核工业向大气排放放射性物质后各种照射剂量的计算方法和举例。

本书可供辐射防护、大气污染控制与评价、环境保护、扩散气象等专业和部门的有关同志参考，也可作为大气扩散与空气质量评价等专业大学生的参考书。

Meteorology and Atomic Energy

(1968)

气象学与原子能

〔美〕D. H. 斯莱德

张永兴 胡二邦 汪佳明 译
任培薛 程冠生 卢正永

☆

原子能出版社出版

（北京 2108 信箱）

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $25\frac{1}{2}$ · 字数 580 千字

1979 年 7 月北京第一版 · 1979 年 7 月北京第一次印刷

印数 001—6,400 · 定价：3.65 元

统一书号：15175·146

譯 者 說 明

随着核工业的迅速发展，放射性有害物质对环境污染的问题逐渐引起了人们的重视。1955年，美国原子能委员会反应堆咨询委员会请美国环境科学服务管理局气象组为从事核工业的工程技术人员编写了《气象学与原子能》。该书问世后，得到了有关人员的广泛应用。

本书是根据该书的第二版(1968年)翻译的。它与第一版相比，在内容上有了很大的改变。在第二版中增补了扩散气象学理论及其发展状况的内容，系统地综述了扩散实验的主要结果，充实了扩散实验的方法和常用的观测仪器，删去了核爆炸放射云的剂量估算等章节。书中所介绍的扩散气象学的理论、公式、参数、图表和实验方法等，不仅对从事核工业的工程技术人员有用，而且可供其它工业以及大气环境保护等工程技术人员参考。

本书译者为：汪佳明(第一、五章)，程冠生(第二章)，任培薛(第三章)，张永兴(第四章、附录)，卢正永(第六章)，胡二邦(第七、八章)。李德平同志，北京大学地球物理系殷宗昭、陈家宜、张鹤琛、孙国英、王淑芳、桑建国、朱方竞等同志作了初校；张永兴同志作了全书的复校。

翻译过程中，译者对原文中个别有误的句段和公式等作了修改。

译者 1979年1月

序

《气象学和原子能》第一版问世后，得到了全世界核工业和非核工业工艺人员的广泛应用；其使用时间比当初写这本书时所设想的要长得多。然而，在这个领域内的研究工作一直是突飞猛进的，因而本版较第一版就面貌全新了。本版的绝大多数材料，特别是大气扩散和沉积估算的实验基础，都是在第一版出版后的时期内研究建立的。

美国原子能委员会向参与编写本书的科学家们致以深切的谢意，并以能支援他们的辛勤工作而引以为荣。我们希望这新的一版将在和平应用核动力的未来发展中象以前第一版那样有用，也希望它在保护我们的大气环境方面起到广泛作用。

美国原子能委员会主席 G. T. 西博格

前 言

在计划写这本书时，产生了这样一个问题：这本书的主要特点应该是什么？当时，对这本书在内容和体裁上应该相当于一本入门书、手册，还是教科书这一点，是不够清楚的。在写作过程中，逐渐明确了这本书应同时具有三者的一些特征。

需要了解关于大气和核工业方面一般知识的读者可将这本书作为一本入门书，它将介绍一些气象专业和保健物理专业的概念和术语，使读者在有必要时可能与专家们进行较进一步的探讨。当多种专门训练涉及到气象学和核工业的关系时，这本书更可作为入门书来参考。

核工业中各个方面的专业工作者都可把这本书当作手册使用，因为它包括有方程式、图解辅助方法和广泛的书名目录。

这本书包含研究课题的一些原理的概要，在这个意义上，学生能将它当作课本来用。但是本书又不能完全当作教科书用，因为它并不包括这个方面的完整和全面的讨论，所以必须与同一领域或类似领域内各种其它出版物一起使用。

最后，除了同时兼有入门书、手册和教科书等特色之外，本书还具有研究报告的特点。许多章节中的资料包括了最近工作的报告，但这些工作的意义尚未完全评价。

从事本书工作的许多作者承认他们的观点和态度有某些不同。这种不同反映了一门边缘技术领域确切的面貌。在这领域内，方法和观点经常是不一致的。说实在的，作为一般规律，它们也不可能是一致的。

对于评价特定的问题，读者不应指望在本书中找到严格的规则。处理一个实际情况，通常要应用专门的定量技术和根据大气与致污染装置的不完全的资料提出各种各样的假设。虽然这些假设在科学的基础上证明是合理的，但是由经验丰富和知识渊博的人去选择这些假设要比通过精读本书来找到办法更为合理。

D. H. 斯莱德

1968年4月于马里兰州，银泉

目 录

序	iii
前言	iv
第一章 气象学和原子能的关系	1
1-1 引言	1
1-2 气象学, 扩散和大气污染物	1
1-3 其他章节的梗概	10
第二章 大气输送和扩散研究的气象学基础	11
2-1 引言	11
2-2 局地气候的物理基础	11
2-3 天气系统	16
2-4 气候学与常规的天气资料	24
2-5 底层大气的垂直温度结构	29
2-6 局部风的结构	34
2-7 大气扩散	48
第三章 低层大气扩散理论概要	56
3-1 在低层大气内的平均流动	58
3-2 扩散理论	71
3-3 大气扩散模式及其应用	89
第四章 扩散和输送实验	107
4-1 概要	107
4-2 资料的代表性	107
4-3 估算扩散的方法	112
4-4 连续源	113
4-5 空气浓度的极大值(峰值)和平均值的比值	140
4-6 评价研究	142
4-7 等值线内所围的面积	146
4-8 迁移的速度和方向	147
4-9 空气浓度长期平均的测量结果	148
4-10 瞬时源的扩散	149
4-11 轨迹和扩散估计(定高气球)	162
4-12 要点复述	173
第五章 影响排放物浓度的非自然湍流过程	175
5-1 引言	175
5-2 动量和浮力效应(Gray A. Briggs)	175
5-3 微粒和气体的沉积(Isaac Van der Hoven)	188
5-4 降水清洗的计算(Rudolf J. Engelmann)	195
5-5 建筑物附近的气体扩散 (James Halitsky)	209

第六章 原子能工业中所用的气象仪器	242
6-1 引言	242
6-2 原子能工业中各种气象参数的测量	243
6-3 气象测量平台	243
6-4 风的测量	244
6-5 温度的测量	262
6-6 太阳辐射与地球辐射的测量	270
6-7 降水量的测量	271
6-8 气压的测量	272
6-9 大气湿度的测量	274
6-10 气象数据处理装置	276
6-11 扩散测量装置	278
6-12 用气球进行的大气测量	284
第七章 放射云剂量计算	286
7-1 引言	289
7-2 气载物质来源	291
7-3 放射学概念	304
7-4 β 外照射	313
7-5 γ 外照射	319
7-6 吸入放射性物质的剂量	345
7-7 食入物质的剂量	351
第八章 环境安全分析	357
8-1 引言	357
8-2 瞬时排放	358
8-3 中等排放时间	363
8-4 长期排放	367
附录	372
参考文献	384

第一章 气象学和原子能的关系

1-1 引言

现代社会所产生的废物是必须处理的。接受这些废物碎屑的地方是地球的陆地、水体和大气。在研究废物在大气中的处置方面，气象科学是重要的。

释放到大气的废物包括微粒和气体。其中一些物质在大气中存留时间十分短，例如只有几小时甚至是几分钟。而有些物质的存留时间则以年计。不考虑存留时间问题，那么大气中气体和微粒的运动主要取决于大气的运动状况。有些大气运动决定了空气中污染物移动的路径，而另一些运动则决定污染物的稀释程度。大气运动对悬浮污染物的影响的研究是气象学的一个分支，有的划为“空气污染气象学”，有人称它为“大气扩散”。

原子工业在常规运行期间和事故中可能释放的碎屑总量与世界上所有燃烧过程中产生的污染物质总量相比是很少的。但是，由于涉及的放射性物质毒性极大，因此，即使要处理的量很少也必须慎重。例如，反应堆中某些放射性物质的毒性，估计是工业上最普通的毒物(氯气)的 $3 \times 10^6 - 2 \times 10^9$ 倍。曾经有人计算，如果一个高功率反应堆的控制和安全装置全部失灵致使发生灾难性的放射性释放的话，那末它将毁灭数以千计的人的生命和造成几十亿美元的经济损失。虽然，这种事故的发生几率很小，然而在理论上，除了裂变或聚变武器的爆炸之外，这种事故的严重性比人类的任何一种事故的后果都大。

美国的核安全准则，是经过精心考虑制订的，并且是综合性的，它对安全问题的每一个侧面都要求进行严格的审查，基调是保守的。按照这个准则，审查工作应从核设施的设计开始，一直延续到场址选择、建造和实际运行。对常规运行和实验性运行申请的审查，都是非常慎重的，要求由许多专业人员或工作组具体执行。物理和化学专业人员和各种工程师，在设计 and 建造阶段，对核设施进行安全分析；法学家则着重于监督是否有违反核能计划所必须遵循的规程的情况，以及是否有侵犯公共健康和安全的行为。此外，保健物理学、生物学、水文学、地质学和气象学等方面的专家则负责审查原子能设施的环境问题。全面的安全分析至少要分两步进行：先由申请组织提出详细的资料，再由发执照机关严格地审查每个步骤。

《气象学与原子能》的第一个版本，以及现在发表的版本所要回答的主要问题依然是：“如何把已有的大气知识用于帮助解决在核裂变和聚变过程的和平利用中产生的卫生、安全和经济问题？”虽然对这些问题的回答只部分是肯定的，尚有一部分是初步的，甚至是猜测性的。

1-2 气象学，扩散和大气污染物

几世纪前，人们对于人类活动引起的空气污染的度和影响方面已有过记载。在英国，家庭取暖和工业动力用煤量的猛增导致了例如伦敦这类城市的极端污染事件。一位写

过若干本研究伦敦地区气候的书籍的作者 Luke Howard 曾经对发生在 1812 年的一例严重污染情况做了如下描绘：

“是日，伦敦笼罩于黑暗之中达数小时。商店和办公室必须点灯，无照明的街道如同黑夜一般，行人为了找路和避免事故必须非常小心。阳光浅照的天空呈现古铜色。这是由于两股相反的微弱气流之间烟云的积累效应或无风雾天所造成。据称，当时在 40 英里之外有人看到了这片乌黑的云雾。要不是我们的大气非常容易流动的话，这个犹如有成千上万个喷口的火山的地方在冬季简直是无法居住了。”

由“成千上万个喷口”源产生的空气污染问题随着大城市面积的继续增大而越加严重。本世纪开始不久，大城区就成为这些污染的初级源和接受者。在我们现代社会里，工业加工规模之大和种类之繁多，致使已经污浊不堪的城市空气中令人讨厌的、甚至是有毒的污染物的数量还在不断地增加。

人们对环境空气污染水平的增长并不是没有看到的。在过去的几百年中，曾有过不少实例，试图用立法手段通过在污染源处限制污染物的排放来控制污染水平。然而，仅在最近的半个世纪，气象学家才直接插手这个领域的大气问题的研究。在这个时期出现的原子能工业成为发展空气污染气象学的一个重要焦点，因为在这个新的领域中，事故出现之前的预测和控制是重要的。

空气污染气象学家和其他气象学家一样，关心的是：从几分之一秒到几年，从几分之一米到地球的周围的范围内的大气运动。他们关心大气的平均运动，即指示大气污染物整体输送的速率和方向的运动，也关心围绕着平均值的湍流起伏。当污染物随平均运动一起移动时，这些湍流的湍涡是弥散污染物的一种运动。

大气污染源是相当广泛的。英属哥伦比亚森林的烟火曾遮暗了西欧的上空。1883 年克拉卡托埃(Krakatoa)火山爆发的灰尘在数月时间内还能在大气中观察到；在此期间，灰尘从赤道附近的源头散播到北半球的大部分地区。由于人类聚居生活造成的污染物累积可以遮暗城市的上空，有时候引起流行性疾病，并造成死亡。由小的工业群，甚至是从一个烟囱发散出来的有害物质也会引起人体的不适和经济上的损失。

空气污染气象学考虑的是向大气释放物质的规模和类型。研究原子能工业空气污染的气象工作者利用更广阔的空气污染领域提供的经验和实验依据，但他们的注意力和精力集中于特殊的问题方面。这些问题是由现有的或筹建中的设施在有计划或事故情况下释放放射性核素的特点所决定的。在下面的章节里将介绍与核能设施的污染物散入大气有关的一些特殊问题。

大多数(当然不是全部)原子能设施的污染物排放可近似地认为是从一个点源或小体积源喷出来的连续流或瞬时喷烟团。这些源的构形已成为讨论下风向浓度分布和曝污量(即浓度对时间积分)型式的理论和实验的研究课题。以后各章节的大部分资料将属于这个论题。与大尺度或更复杂的源相联系的问题，例如城市污染的特征等，在核领域里还不常遇到。

大多数排放源位于地面以上一百米以内，并且，几乎所有的大气污染物的接受体也都在这一层里。大气中抑制垂直扩散的天然盖子常常使地面排放的污染物在相当长的时间内保持在地面附近。所以毫不奇怪，原子能领域内许多气象学的研究总是涉及最底下的数千

米大气,并特别着重在最底下的数百米大气。在第三章内将讨论到,由于纯气象学的原因,大气的最低层在其它方面也是特别重要的。原子能作为空间运载工具的辅助能源自然也会产生高空源的问题,这是未来空气污染气象学发展的一个领域。

由于各种工程上和设计思想上的安全考虑,要求即使在最坏的设想条件下,原子能设施的地面的排放总是足够的小,以使值得注意的浓度不扩展到离源远的地方。因此,注意力较多地集中于离源最近的几千米内的排放过程。近年来对远距离传播的关注增加了,但是这些远距离(大于10—20公里)问题的研究仍然处在比较落后的状态。

这样,过去和现在原子能工业的许多要求使气象学的研究大部分局限于有限的水平、垂直范围和有限时间内的输送和扩散。但是在后面有关的章节中也可以看到,这个概括判断也有例外的情况。

1-2.1 原子能工业中的气象学家的任务

从气象学的观点看,所有的原子能设施分成两大类:一类设施向大气排放是有计划进行的,排放物是可预计的;另一类设施只有在事故情况下才释出大量的排放物。在第一类中是这样一些完全不同的设施,例如:沸水堆、燃料加工厂和大量的原子能实验系统中的任意一个。第二类的主要的典型是良好密闭的压水堆。释放的数量在理论上有很大的变化,虽然实际上未必是这样。简单地说,气象学家的任务是估价排放物从源传播到探测器的过程中,天气和地形对排放物浓度的影响。假使对释放的放射性核素浓度已确定了限制水平,则参与工程的气象学家应对第一类设施回答如下问题:“大气在多大程度上能有效地用于处置污染物?”对第二类设备应回答:“大气能提供的安全因数有多大?”

在原子能领域内首先考虑到气象学的要算是华盛顿州汉福特地区的“气象哨”——现在是巴特尔研究所太平洋西北实验室的所在地。芝加哥大学冶金实验室的阿瑟·康普顿(Arthur Compton)博士曾邀请现为华盛顿大学大气科学系主任菲尔·丘奇(Phil Church)博士对汉福特地区进行气象评价,以准备建造生产反应堆。该请求是在1943年1月提出的。到同年3月,完成了该地区的第一个评价,研究了手头的的数据,并为实验研究制订了计划。在该研究的准备中,设置了一个风和稳定度的观测站,并进行了达1000米高度的气球测风。不久,又设置了油雾发生器,开始了大规模的扩散实验。到1944年12月,安装了120米的塔,该塔至今还在使用着。

可能出现的问题早就在美国的计划中估计到了,并且很早就开始了研究和预报放射性核素在大气、土壤和水中的运动的地球物理学问题的活动。

涉及原子能领域的气象学科,在任何典型设施的生命史中有三个相当明显的起作用阶段:(1)在厂址选择和采纳适合厂址的特殊性质的设计和实施程序期间;(2)常规运行期间;(3)异常事故时。

核反应堆堆址的选择是一个复杂的问题,它不仅取决于普通工业选址的因素,例如土地利用、水、劳力以及所考虑的广大地区内产品的市场,而且还取决于下列因素,诸如特定设施在常规和事故情况下放射性核素排放的特点、堆址周围的居民分布以及周围地区的环境特征等等。这些特征包括气象、水文和地震等方面。堆址的最后选定通常不是单单依据某一个特征。举例来说,某个堆址单从气象学观点来看它是很不理想的。然而,只要该地区既不是居民区,又不是耕作区,或者这种类型的反应堆在其它地方已有多年的丰富的运行经验,并且它固有的稳定性和安全性已确定无疑,那末事故排放的危害可以是很小的。

况且,附加的工程安全措施能弥补堆址的缺陷。再则,如果堆址靠近最近的居民区是一个重要的经济因素,那末气象学则是一种工具,用以确定反应堆和居民之间需要多大的距离,以保证在最严重的可信事故情况下的安全。

地址的选择也可能取决于核设备的放射性核素的常规排放,而不是事故释放。当地大气的弥散能力可决定该址是否合用。而且,在正常情况下排放物的释放有时能在有把握的气象控制下执行,即按照当时大气的状态调节释放,使排放物被稀释到预先确定的安全水平。由于大气稀释排放物的效率极高,所以在一定限度内完全忽视或者未能适当地利用这个弥散能力,在经济上将是非常愚蠢的。

从上面关于这个问题的粗浅论述看来,评价一个给定地址的环境所需的计划项目不能用一套简单的条条来规定。许多已有运行先例的常规设计的小设施,其地址评价计划最为简单。这些评价时常没有气象学专家直接参加。反之,某些大的反应堆、或者具有独特的居民分布问题或非常规设计的那些反应堆的堆址评价研究,就要有较多的气象学家参与,并在所选地址进行长期观测,同时对某些环境特征做比较详细的研究。这些研究往往在反应堆运行真正开始之前持续数年之久。

一旦原子能设施建成并开始常规运行,气象学家的任务就大大地减轻。对于许多较小的或者较为常用的反应堆,没有气象学手段也完全可以。在这些情况下,堆运行得到的经验表明,常规排放物的影响可以忽略。因此,反应堆对环境的影响是小的。然而,有些原子能设施,主要是各种国立研究所和试验场,它们的常规排放量相当大,就需要不断地听取气象方面的意见。具有特别强的排放的过程或实验,通常是置于气象控制下进行的。在这样的情况下,在该地址的气象学家通常要事先准备出可以迅速计算风向和扩散条件的预报方案。大多数民用动力反应堆或试验反应堆,在设计时就要使它在运行之后不再需要气象学方面的进一步帮助了。

气象工作者的第三个职能是必须准备执行核系统发生放射性核素的非计划排放期间的安全任务。假若排放物质未超过选址评价中的估计,并且事故时的天气条件不比假设的情况差,则不会危及周围居民和环境的安全。然而,即使在这样的情况下,为了帮助放射性监测机构迅速而完全地确定环境污染的实际程度,及时地预报出污染物的运动方向和扩散速率也是极其有用的。这些数据常常可以由气象学家在现场根据最简单的仪器测得的资料,甚至根据最邻近的美国气象局台站提供的天气资料来估算。由受过起码气象培训的工作人员使用这样粗糙的资料,总比一点气象资料也没有要好。在有良好设备的气象站的条件下,气象学家在事故情况时往往可以起相当大的作用,他能迅速地对污染的范围和严重性作出定量的估算,并有效地利用平时的放射监测的结果重新评价事故情况。况且,他的工作,对事故细节的事后分析,包括根据观测到的污染型式推测排放的量级,有很大的作用。在真正严重的事故中,气象学家的工作对执行大规模的对策计划更是非常重要的。

气象学在事关安全的三个方面的用途中,最初的选址评价通常是所涉及的最大方面。其部分原因是由于有关的安全法规要求对所拟议的地址的环境做仔细的审查,并要求拟定一份正式的危害评价报告呈交原子能委员会。

1-2.2 气象学和原子能关系的简史

1-2.2.1 原子能工业的历史 原子能工业始于1938年哈恩(Hahn)和Strassman以及1939年Meitner和Frisch关于发现裂变的公开的报告。到1942年,在恩里科·费米

(Enrico Fermi)和其他一些科学家的帮助之下，在芝加哥斯坦格(Stagg)运动场的看台下面，一个石墨和铀的反应堆达到了“临界”(由中子裂变引起持续的链式反应)。这个由于其功率低而通称临界装置的第一个反应堆，叫作芝加哥反应堆1号(CP-1)。以后，它被移到阿贡国立实验所。最初的工作是在曼哈顿工程(Manhattan Engineer District)这一代号下进行的。由于功率低(约200瓦)，该反应堆产生的裂变产物总量不大，所以它的固有的隐患是不大的。但是，考虑到设计者缺乏知识和经验，以及该反应堆是实验性质的，所以事故的几率应视为比较大的。

1943年，仍旧用曼哈顿工程这个代号在田纳西州的橡树岭建成了空气冷却石墨反应堆X-10。该反应堆运行功率为1.0—2.0兆瓦，它是次年在华盛顿州汉福特兴建的钚生产反应堆的原型堆。这个反应堆的裂变产物总量比较大，并且由于它的实验性质以及缺乏知识和经验，事故的几率比较大。然而，由于这类反应堆的固有的慢响应特性和控制系统设计得使响应更慢，从开始起就着重考虑了安全运行的问题。

1944年开始建造生产钚的汉福特反应堆。由于这些反应堆是为在短时间内通过形成一个原子来制出成磅数量的某一种元素而设计的，所以必须在比较高的功率下运行。这些反应堆与橡树岭的石墨堆稍有不同；因而工程师没有足够的知识基础和经验，对反应堆的运行状况没有把握。与此同时建造了汉福特305试验堆，它是一个30瓦石墨试验堆，用来进行石墨减速剂和铀棒的试验。

从钚生产反应堆卸出燃料时，存在着大量的气体排放的问题。为了从铀和其它裂变产物中提取钚，需要借助各种化学反应来溶解燃料。在这个过程的初期，释放出所有的稀有气体裂变产物，特别是放射性同位素氙和氪。它们不可能用过滤系统除去，所以大量地散入大气。

在上述分离过程中，还放出大量的放射性碘。当时曾研究了用过滤或其它方法除去排放物中的大部分碘。就生物效应来说，碘是排放物中最重要的元素之一。由于碘的氧化物挥发性很高，所以碘也偶尔地夹在气体中从汉福特的化学分离工厂大量地释出。

汉福特的反应堆运行方式是使在正常运行期间，燃料中裂变产物的释出最少。在反应堆发展的不同阶段，用来冷却石墨的气体中多少会产生一些 ^{14}C 和 ^{41}Ar 。然而，这些排放物从未占有重要地位，因为不会发生意外的大量释放。 ^{14}C 和 ^{41}Ar 经常是一生成就释放，其生成率是已知的和可控制的。

汉福特反应堆换装燃料的过程中也有放射性排放物释出。燃料换装过程是这样的：把新的燃料棒推进到水平工艺管的一端，并把用过的燃料由另一端推出而落入水沟。然而，由于裂变产物产生的热和燃料中铀和钚具有易自燃的性质，当释热元件从工艺管落向水沟时偶尔会自燃起火。当燃料着火时，氙、碘和其它裂变产物元素被驱出，这种释放发生在很难实行通风控制和有效过滤的区域。所以必须非常注意防止燃料着火。

1944年建成两个实验堆以研究产生链式反应的其它的构形。其中一个是在洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)的一个均匀沸水堆(HYPO)，它的运行功率是5.5千瓦。在这样的反应堆中，当超过了水溶解氙、氪的能力时，氙、氪一生成就释放出来。由于这些气态的核素的体积极小，可以把它们长时间贮存起来，让其衰变。这样，在最后的排放物中剩余的放射性是极微的。

1944年，在伊利诺斯州的帕洛斯克(Palos Park)还建成了一座重水慢化反应堆(CP-

3), 它的运行功率为 300 千瓦。因为该反应堆采用有包壳的燃料, 在燃料发热期间, 它是从不移出水外的, 所以从燃料出来的排放物很少。然而, 裂变产物的量是与其功率水平成正比的, 到卸出燃料时, 元件中的裂变产物总量自然累积得很多。由于国际关系, 在那时接受该种危险认为是必要的。从该反应堆学到的东西帮助了 1950 年萨凡那河(Savannah River)生产堆的设计和建造。

为了研究和发展从原子能得到有用的动力, 1946 年成立了原子能委员会。这一年洛斯阿拉莫斯科学实验所建成了第一座生产动力的反应堆, 叫作“克列门丁”(Clementine)。它以钚为燃料, 汞作冷却剂, 其运行功率为 20 千瓦。以今天的标准来衡量, 它仍是一个非凡的、具有未知性质的先进设计的反应堆。对这种未知性质要格外小心谨慎。洛斯阿拉莫斯的地点所具备的隔离程度在那时认为是合适的。事故的潜在排放物包括钚、放射性汞和挥发性的裂变产物。虽然钚一点也不挥发, 但是它的相对生物危害如此之大, 以致它的有效的危害性往往与裂变产物的危害不相上下。

1948 年, 一个称为 PPA 的装置建于纽约州斯克内克塔迪(Schenectady)附近的诺尔斯原子动力实验所(KAPL), 这是军用反应堆计划中的第一个临界实验装置。同年, 原子能委员会设立了反应堆安全谘询委员会, 以评价新反应堆的堆址, 从此气象学在原子能计划中的作用更为重要了。

1950 年, 原子能委员会的反应堆计划大大地扩大。那年建成一些反应堆, 计有洛斯阿拉莫斯沸水堆(SUPO)、布鲁克海文国立实验所的 20 兆瓦气冷石墨反应堆、低中子通量密度培训用反应堆(LITR)、整体屏蔽反应堆, 以及橡树岭国立实验所的均匀临界装置。

1951 年, 诺尔斯原子动力实验所建成热中子试验反应堆 1 号(TTR-1), 阿贡实验所在爱达荷(Idaho)的国立反应堆试验站(NRTS)建成实验性增殖反应堆 1 号(EBR-1), 它是美国最早用原子能发电的反应堆。洛斯阿拉莫斯于同年建成了“小伊娃”反应堆(Little Eva)。

1952 年, 在国立反应堆试验站建成了材料试验反应堆(MTR), 这座反应堆除了能做物理试验之外, 还能做工程试验。同年, 两个另外的小的均匀反应堆建成, 其中一个在新的地址, 即加利福尼亚州圣苏萨娜(Santa Susana)的国际原子公司临界实验所(Atomic International Critical Experiment Laboratory)。至此原子能工业的基础已经奠定, 并准备迅速发展。在同一时期, 海军的反应堆计划在诺尔斯原子动力实验所和位于贝提斯(Bettis)的西屋原子动力部开始施行; 在国立反应堆试验站同时执行海军和航空反应堆计划。一些大学在建造研究性反应堆, 在萨凡那河在建造更多的生产反应堆。堆址的数量、反应堆的类型都在增多, 每一个装置的功率水平也在增大。在反应堆正常运行和发生事故的情况下, 它的排放物对居民的危害性增加了。

在美国政府反应堆工作的气象学家取得的经验使他们能对私人厂家建造的反应堆新堆址的情况提供有见解的评价资料。由于运行特性, 这些反应堆大多数对环境放射性的影响甚微。由于需要由一次回路系统中排除空气及辐射分解产生的气体, 在某些反应堆中产生了防止在这一过程中释出裂变产物的问题。在排放物排到烟囱的途中采用延时的方法来控制裂变产物的释放仅有部分成效; 当延迟时间只有几分钟时, 仍有相当多的短寿命裂变产物释放出来。用贮存罐延迟释放一至两天, 则问题基本上得到解决。

在过去的十年中, 反应堆的数量和类型继续增加, 更重要的是功率水平显著增加。对

于为发电而设计的反应堆来说, 500—1000 兆瓦或更高的热功率是很平常的。此外, 与美国原子能委员会的各地址无任何联系的私人用于发电的大型反应堆也在大量建造。

除了反应堆数目和功率水平的直线上升之外, 反应堆的类型也大有增加, 特别是在原型动力堆功率范围方面, 类型更为繁多。这些类型反应堆的冷却剂包括有高温气体、液态金属、有机物和重水等等。已设计出使用液体或泥浆状燃料并具有裂变产物连续清除系统的先进堆型。这些新型反应堆的气态排放物在种类方面没有什么不同, 而在数量和释放方式方面却有差异。

看来, 对大气输送和稀释反应堆排放物的知识的需求将受到未来三个重要方面的进展的影响: (1) 位于大居民中心附近的大功率反应堆数目的增加和随之而来潜在污染源的迅速增长; (2) 在美国的几个地方私人工业加入燃料处理领域; (3) 非常大的, 特别是热功率超过一千万千瓦的反应堆, 在兼有海水淡化和发电这样一些应用方面是有利的。对废物处置 (包括安全而正确地运用大气弥散) 的要求定将增加。

1-2.2.2 扩散理论的发展 早期的大气扩散理论体系是建立在热及动量输送的分子过程的宏观类比的基础上的。在这样的系统内, 一个特征量的扩散输送是用该特征量的梯度和扩散系数的乘积来描述的。认为输送是沿着梯度方向从特征量的高值区到低值区进行的。这样, 扩散的估算成为寻求有代表性的扩散系数值和寻求表示特征量的空间分布和随时间变化的微分方程的解。梯度输送方法的运用, 揭示了扩散系数随现象的空间尺度、距地面高度和大气的物理状态而变化。尽管有这样和那样的缺点, 用梯度输送过程来描写扩散, 在调查和研究实际问题方面有大量的应用。

在二十年代初, 英国科学家泰勒 (G. I. Taylor) 引入了连续运动引起扩散的概念。他认为湍流介质中的一个元粒子的最终位置可以由从源到终止点运动期间作用于它的湍流速度来确定。假若粒子是烟云里的粒子, 并紧密地随着携带它们的空气运动, 则云内的烟浓度的统计过程史可以用当时的大气湍流谱的知识来预报。虽然这本质上是运动学-统计学的方法, 本身与湍流运动的动力学和热力学起因无关, 但它是本书其它部分讨论的许多实用扩散方法的依据。著名的萨顿 (Sutton) 扩散方程是泰勒理论的直接结果。应用扩散研究中新近得到的另一种较好的方法是, 用风速和风向变化的测量值和泰勒假设, 给出大气扩散的直接参数。由梯度-输送考虑和根据泰勒定理产生的两种方法将在第三章中详尽地讨论。

扩散气象学的发展总是与大气湍流的基本研究的发展紧密地联系在一起的。在经典扩散理论的整个发展期间, 认识到这些湍流的半经验的和统计的表述最终将会产生更为直接的物理方法。最近对大气湍流的产生、分布和衰减的动力学和热力学的机理有更大的兴趣。直接研究一些基本物理量, 诸如热通量、动能和地面构形等的湍流专家们今天正在迅速地构成一个理论体系, 可以预料这将产生崭新的实用扩散技术。

1-2.2.3 扩散实验的发展 在扩散实验方面, 第一次大规模有组织的工作, 开始于 1921 年英国的防化实验站气象局在波顿 (Porton) 成立的时候。在此以前, 对于通过气体和烟在大气中的弥散所测得的扩散率, 还没有精确和全面的评价。这个气象局采用烟柱和喷烟团方面的早期工作直接得到了在扩散实验的头十年内发表的最重要的研究结果: 测定从点源释放的物质的横截风向分布的形状。运用了以今天的标准来衡量是十分原始的技术, 很快就建立了横截风向平均浓度分布的高斯特性。

最近二十年内,扩散过程的实验测定在数量上和采用先进技术的类别方面都大大地增加了。这些实验通常有三种类型。第一种是非常大尺度的扩散和输送的研究,它运用射入对流层或平流层的核爆炸产物或地壳自然激变的产物作为源材料;第二种是对比较小的人工源进行观测研究。这些源包括瞬时的或连续的点、线或面源,观测的水平距离通常为10公里左右,其典型代表是工业生产中经烟囱或容器的裂缝释放出来的排放物;第三种是基本的微气象学实验,它的目的是弄清楚基本的大气过程。虽然本书内容着重于第二种,但要指出,微气象学的成果对于发展理论和提出大量应用性研究的实践方法是重要的。

由第四章的详细讨论将清楚地看到,人工源实验的一个显著特点是有大的取样网,它包含有数百个置于塔上或在地面上的取样器。所以可以定量地测出烟柱或喷烟团下风向整个地面上和垂直方向上示踪物的浓度。为了鉴别和测量这些浓度,发展了极为灵敏的监测技术。与此同时,对许多气象变量的观测提供了验证各种理论或经验公式所需要的数据。大部分扩散测量是在离源头几公里内进行的,然而有一些实验离源远达100公里。大于10公里距离的输送和扩散仍然是进一步实验的领域,距离大于100公里的详尽的研究仍需进行。

美国和其它国家已经进行了许多大规模的扩散实验。它们分成两种主要类型:(1)测定某一场址气象特征的实验;(2)为了获得基本的气象知识的实验。某些实验提供了更多的萨顿系数数值。而另一些实验增进了对风的起伏和污染弥散之间的关系的了解。气载物质在地面上的沉积速率也是某些实验的课题。为了弄清大气湍流的某些基本的物理过程,已经进行了若干重要的实验。对于很大的尺度,则以各种核武器试验在大气上层产生的碎屑来描述平流层内的输送和扩散特性。在这种情况下,空间尺度是全球,时间尺度是几年。

从各种实验中虽然知道了许多东西,但对某些方面仍注意不够。将来,地面源的长距离扩散实验工作仍然很多。那些地形不均匀的区域,例如水陆边界或不规则地形附近的扩散,都需要加以实验研究。把动力堆设在完全由经济需要而决定的地点的兴趣与日俱增,从而对城市的大气特征的实验的注意亦必将随之增加。

1-2.2.4 估计湍流和扩散的感应元件的发展 用于大气扩散研究的设备在近二十年左右更加先进了。可以这样说,在这段时间内基本上没有研制新的气象感应元件。然而,在感应元件的制造工艺方面有明显的进展。今天作为商品出售具有高度精确度和灵敏度的仪器,在几年前还仅由特殊加工单位才能提供。此外,已经设计出许多可以连续使用、而不太需要重新校正和修理的高精密度仪器。

在积累和处理由数量庞大,并且还在迅速增加的仪表系统所产生的数据的方法方面,已做了大量的研究。电子学的新进展进入了数据处理问题的每一方面。直接读出某一应用所需的处理过的数据,而不是由感应元件提供原始数据的仪表系统已不罕见。电子计算机已用于理论研究和扩散实验研究的各种数据处理。

1-2.2.5 实用技术的发展 本节标题所论及的实用技术,为本书主要课题之一。这些技术讨论如何从容易得到的气象数据来估计大气的潜在扩散能力。

在许多估算大气低层扩散的方法之中,只有萨顿的方法和最近的帕斯奎尔(Pasquill)方法得到了比较广泛的采用。两者都采用高斯内插公式,把烟柱或烟团下风浓度与水平和垂直浓度分布函数的关系表示成迁移时间或距离的函数。在这两种方法中,这些浓度分布函数是通过实际的示踪物释放试验来求得的,并与烟云释放时所做的气象测量联系起来。萨

顿的方法把下风向浓度值和风速的垂直梯度、大气“风阵性”以及地面粗糙度的测量联系起来。而帕斯奎尔方法仅仅使浓度与风向变化和风速有关。这个方法被愈来愈多的读者所采用。有关帕斯奎尔方法的理论讨论列在第三章内；在第四章内列有许多证实他的理论的测量。

不幸的事实是，理论并没有发展到能直接从气象测量作出精确的扩散估算的程度。所以常常需要进行前节所述的扩散实验，以验证符合理论假设前题时理论预言的正确性，并估算出其余情况下扩散参数的数值。按这种方法测得的扩散参数已依照实验时候的气象条件进行分类，使这些实测值在作为“实用技术”应用时，除了用比较简单的仪表设备得到的气象资料外，不再需要其它什么气象资料。当运用这些参数的条件与测得这些参数时的条件相似时，则能十分精确的估算下风向浓度。倘若估算在一些异常条件下的扩散，就需要有相当高的工作技巧和辨明基本的气象资料的能力。

相当多的扩散估算方法建立于扩散理论的主观理解，并用经验方法确定实际的扩散参数。虽然上述的技术常常是成功的，但随着大气扩散的物理理论的发展，可以指望将逐渐不需要这样的技术。

1-2.2.6 普通气象学的进展 非专业或专业的团体向气象学家提出的最通常的问题是未来的天气状况。虽然这个问题仅是原子能工业提出的许多问题之一，但它却是一个基本而重要的问题。可以这样说，在最近的二十年内，虽然在更有效地运用预报资料的能力方面有相当程度的提高，但是对未来 24 小时以内的典型的预报的精确性没有任何显著的改善。

然而，总的情况并不象单单从这一点看起来那样坏。其中一个原因是原子能工业强烈地依赖于地面和高空大气参数的气候学的估算，在这方面，自第二次世界大战以来有很大的进展。美国目前地面天气观测站有 14000 个以上，得到的数据编制成气候学图。其中 1000 个观测站收集全部的正常气象观测资料，其余的观测站收集较少的样品。假若没有某些情报交换中心加以贮存的话，则这样大量的资料是用处很小的。好在美国环境科学服务管理局 (Environmental Science Services Administration) 的国立气象记录中心不仅贮存，而且用许多对原子能气象学问题有用的方式处理大量的天气数据。

每日天气预报未表明有很多的改进，但其它许多气象学方面则有改进。十五年以前，灾害性天气、龙卷风和猛烈雷暴的预报只是最一般性的和初步的。今天这个预报分支已经高度发展，它的精度在时间方面达到几个小时，空间方面在 150 公里以内。采用最新计算机的数值技术预报高空大气流型，在精确度方面有很显著的增高。这些资料可能对核空间运行方面有相当的帮助。最后，数据传播技术已显著地改进。可以简单、且花钱不多地用有线电话收集国内任何地点的原始和分析形式的数据。

1-2.2.7 需要多少气象学知识 对本节标题所提出的问题的答复取决于各自的厂址和运行设施的性质。在核工业的早期，原子能设施的运行和环境评价方面积累的经验比今天少，所以总认为需要对每一新设施进行长时间的、昂贵的选址评价。当第一次从事不熟悉的事业时，通常总得谨慎对待，因此这样做是有道理的。随着原子设施运行和扩散气象学经验的增加，可以看出这样的趋势，即气象学家的作用是在设计阶段初期，判定该厂址突出的气象特点并着重分析这些特点。大气湍流和扩散领域的实践经验和理论进展已从气象学上证明了这种反映了更大可信度的合理化的分析程序是可行的。