

前 言

近 20 年来,中国辐射防护研究院与北京大学地球物理系密切合作共同承担完成了泰山核电厂一期、二期、三期、福建核电厂、江苏连云港核电厂选址大气弥散试验、泰山核电厂实时剂量评价系统及 404 厂大气扩散试验研究等工程研究项目。此外,中辐院单独承担完成了“动态食物链模式与程序”、“建筑物屏蔽因子的估算”、“600MW 核电厂气态排出物环境大气弥散模式与程序”等有关研究项目。北京大学地球物理系和环境科学中心单独完成了几个沿海经济开发区和城市的大气环境研究和评价。

著者作为上述诸项目(除泰山一期)的负责人,和各项目组的同事曾共同编写了上述诸项目的总结报告并发表了若干相关的论文。本书可以说是上述诸项研究工作的一个总结,其内容主要基于上述诸项研究工作的成果之上。

在本书出版之时,作者为了表达对参加上述诸项目同事的尊重,除了在各章参考文献中列出所引用的与上述诸项目有关的论文与报告外,在这里再次向参加上述诸项研究工作的下列同事,对他们在工作中所作出的努力与贡献表示衷心的感谢与致敬:中国辐射防护研究院的高占荣、张茂栓、王守恕、姚仁太、李正德、姜钢、阎江雨、温联中、王书献、王寒、陈晓秋、许光隆、张志勇、姜耀强、张和原、卫为强、马红友、周洪贵、姜玲、乔清党、刘兴增等;北京大学的刘宝章、潘乃先、张伯寅、王新英、宣捷、杜金林、徐金宝、张宏升、陈重、乔劲松、潘林林、康凌、刘吉成等。本书 4.7、4.8 两节分别由林官明、蔡旭辉执笔撰写。

此外,特别要对中科院院士李德平先生多年来对作者的指导和支持,以及任阵海(中国工程院院士)、张永兴、陈竹舟、张镛琛、桑建国、雷孝思、王文海、方栋、邢馥吏、张洪光、贾沛荣、廖其林等专家及教授的指导、帮助和协作,表示由衷的感谢。

由于作者水平有限,各项研究工作也需要进一步的深入与改进,因此,本书也只能作为一个阶段的总结,还需要补充和完善,也难免有许多不妥与错误之处,谨请读者不吝指正。

著 者

1999 年 4 月

著 者 简 介



胡二邦,研究员,博士研究生导师(兼),1940年生于上海。1964年毕业于清华大学工程物理系,后分配至中国辐射防护研究院工作至今。30多年来主要从事核电厂大气扩散、核事故后果评价及环境影响、环境风险评价领域的研究。曾主持秦山核电厂二期、三期,福建及连云港核电厂选址大气扩散试验研究。主持项目中,获国家科技进步三等奖1项,部级二等奖4项、三等奖3项;参与项目中获部级一等奖及全国科学大会奖各1项。主要著作有《环境风险评价实用技术和方法》;在国内外杂志、学术会议上发表论文70余篇。曾以“大气扩散与风险评价”专家受聘于德国卡尔斯鲁厄核研究中心,曾被亚洲开发银行与世界银行聘为中国环评培训教师,并多次赴IAEA总部,美、日、法、德、俄、加、澳大利亚等10余个国家进行学术交流和访问。曾任研究室主任、研究所所长。现为院学术委员会委员、研究所顾问,复旦大学、同济大学兼职教授,国家环保局核环境审评专家委员会、中国核工业总公司及广东省核事故应急专家组成员,中国环境评价学会常务副主任兼环境风险委员会主任,中国大气环境学会副主任,太原市清洁生产专家委员会主任。1992年获国务院特殊津贴,1994年被授予“部级有突出贡献中青年专家”。



陈家宜,北京大学地球物理系教授并兼职于北京大学环境科学中心,1936年1月出生于福建省漳州市。1957年毕业于北京大学物理系气象专业并留校任教至今。1981年经国务院学位委员会特批升任教授,具博士生导师资格。除担任教学工作和指导硕士、博士生外,主要研究领域为大气湍流和扩散、边界层气象学、大气扩散模式及其在大气环境影响评价与大气环境规划中的应用。曾承担并还在进行微气象学、边界层气象学、地面-大气相互作用过程等由科学基金会和攀登项目资助的多项应用基础项目研究。在大气环境领域曾主持404厂大气扩散试验研究,北京市大气污染的动态规律及其预测预报,宁波市区域性大气环境质量评价和大气环境规划研究等项目,并参加秦山一期、二期,广东岭澳、福建、连云港核电厂大气弥散试验等。获全国科学大会奖1项,部委级成果一等奖两项,二等奖4项。在国内外发表学术论文60余篇。曾任北京大学校系学术委员会委员,教研室主任,北京大学环境科学中心副主任等行政职务。现为北京环境科学学会理事,中国环境科学学会环境评价分会副主任,大气环境分会常务委员,国际科联环境问题中国委员会委员,《中国环境科学》,《城市环境与城市生态》杂志编委。

目 录

第 1 章 核能发电及其环境影响	(1)
1.1 核能发电及中国的核电发展	(1)
1.2 核电厂源项	(1)
1.3 核安全与排放限值	(4)
1.4 核电厂环境影响	(5)
1.5 环境影响报告书及其审评	(6)
参考文献	(8)
第 2 章 大气边界层与大气扩散	(9)
2.1 大气污染物的弥散过程、大气湍流扩散	(9)
2.2 大气边界层	(14)
2.3 大气湍流的统计描述	(48)
2.4 大气边界层运动的基本方程	(62)
2.5 湍流扩散理论	(69)
参考文献	(84)
第 3 章 核素在大气环境中的弥散、沉积与冲洗	(86)
3.1 核素在大气环境中的运动	(86)
3.2 核素在大气环境中的扩散	(88)
3.3 大气稳定度分类与扩散参数	(103)
参考文献	(110)
第 4 章 大气扩散实验研究	(111)
4.1 气象资料收集和大气扩散实验研究的目的和内容	(111)
4.2 气象台站观测简介	(113)
4.3 气象塔观测和资料分析	(117)
4.4 热内边界层及其观测	(126)
4.5 湍流测量与扩散参数计算	(130)
4.6 示踪物扩散实验	(141)
4.7 物理模拟实验研究	(145)
4.8 中尺度数值模拟及其应用	(153)
参考文献	(169)
第 5 章 核电厂正常运行工况下的大气弥散及其环境影响评价	(170)
5.1 核电厂正常运行工况下的大气弥散	(170)
5.2 核电厂正常运行工况下的年均干沉积因子和年均冲洗因子	(179)
5.3 核电厂正常运行工况下大气途径剂量估算	(184)
5.4 应用实例	(185)
参考文献	(206)
第 6 章 核电厂事故工况下的大气弥散及其环境影响评价	(208)

6.1	不同评价(或分析)阶段对大气弥散的不同要求	(208)
6.2	申请审批厂址(可行性阶段)或厂址踏勘阶段事故大气扩散与剂量估算	(210)
6.3	核电厂厂址评价阶段或申请建造许可证阶段(设计阶段)事故大气扩散和剂量估算	(217)
6.4	不同稳定度分类方法对事故扩散因子的影响	(232)
	参考文献	(234)
第 7 章	核电厂事故应急后果评价	(236)
7.1	概述	(236)
7.2	应用于核事故应急评价中的大气弥散及剂量估算	(238)
7.3	半动态食物链模式与参数	(245)
7.4	动态食物链模式、参数与程序	(248)
7.5	建筑物对表面沉积放射性及飘过放射性烟羽的屏蔽因子	(264)
7.6	应用实例	(277)
附录 A	有效排放高度的计算公式	(292)
附录 B	归一化大气扩散因子及相应参数计算公式	(292)
附录 C	烟羽浸没 γ 外照射剂量估算公式	(294)
附录 D	核素有效能量 E_{eff} 的计算公式	(295)
	参考文献	(295)
第 8 章	模式有效性检验与参数不确定性分析	(298)
8.1	模式的有效性检验	(298)
8.2	关于高斯烟羽模式在高架源、大粗糙度地形条件下的有效性研究	(302)
8.3	扩散参数的不确定性分析	(307)
	参考文献	(311)

第1章 核能发电及其环境影响

1.1 核能发电及中国的核电发展

1.1.1 核能发电

核能发电是指利用反应堆中核裂变所释放的热能进行电力生产的电能转换方式。在20世纪60年代初,美、英、法、苏等国在军用生产堆和潜艇动力堆的技术基础上,广泛地利用火电厂技术建成一批原型核电厂。至90年代前期,核电厂迅速达到实用化、大型化要求,并开始系列化,从而使核电成为安全、可靠且具有经济竞争力的能源。

核电容量的增长极为迅速。1993年全世界的发电量中有17.5%来自核电厂。核发电量份额超过50%的国家有立陶宛、法国、比利时和斯洛伐克。表1-1给出1993年各国的核发电量在其总发电量中所占份额。

1.1.2 中国的核电发展

中国目前已有两座核电厂投入运行。其一是秦山核电厂一期工程。该厂堆型为压水堆,总电功率为30万kW,位于浙江省海盐县秦山脚下。1991年8月反应堆首次装料,于1991年12月15日首次并网发电,从此结束中国大陆无核电的历史。其二为大亚湾核电厂,也为压水堆型,两个机组,总电功率为 2×90 万kW,位于深圳大亚湾畔的大鹏半岛上。一号机组反应堆于1993年5月首次装料,8月并网,1994年2月投入商业运行,二号机组于1994年5月投入商业运行。

目前正在建设的将于21世纪初正式投入运行的有4座核电厂:其一为秦山核电二期工程,规划装机容量为两台50万kW电功率压水堆型核电机组,厂址位于海盐县杨柳山,秦山一期南面约2km处。1996年6月2日该工程一号反应堆浇灌第一罐混凝土,标志着秦山核电二期主体工程正式开工;其二为秦山三期核电工程,拟建两座加拿大重水堆CANDU6型70万kW电功率核电机组,厂址位于一期东侧约1km处的螳螂山上。该工程已于1996年2月获国家批准、正式立项,目前正在审查该工程的安全报告与设计阶段的环境影响报告,拟于1998年6月初正式破土动工;其三为广东岭澳核电厂,拟建电功率 2×90 万kW压水堆核电机组,与大亚湾核电厂相邻。1997年5月浇灌第一罐混凝土,预计2002年7月第一台机组运行,2003年3月第二台机组投入运行;其四为江苏连云港核电厂,拟建两座百万千瓦级的压水堆核电机组,由俄罗斯引入,已于1997年10月通过可行性阶段环境影响评价报告。此外,广东省三河县、浙江省三门县、福建省惠安县、山东省海阳县都进行了核电厂的前期论证。

1.2 核电厂源项

核电厂源项指核电厂在正常运行期间或发生事故时,释入环境的放射性物质的形态、数量、组分以及释放随时间变化的其他释放特征。通常可分为常规源项和事故源项两类。常规源项是核电厂进行常规环境评价、环境监测与管理的依据。事故源项则是核电厂事故管理和应急

计划的基础。确定源项的方法主要有下述三种:①根据电厂状况通过计算获得;②根据流出物的监测结果估算;③根据环境监测数据反推。

表 1-1 各国 1993 年核发电量在其总发电量中所占份额

国 别	核电份额, %	国 别	核电份额, %
立陶宛	87.2	芬 兰	29.0
法 国	77.7	英 国	26.3
比利时	59.0	美 国	21.2
斯洛伐克	53.6	加拿大	17.3
匈牙利	43.3	阿根廷	14.2
瑞 典	42.0	俄罗斯	12.5
韩 国	40.3	荷 兰	5.1
瑞 士	37.9	南 非	4.7
保加利亚	36.9	墨西哥	3.0
西班牙	36.0	印 度	1.9
斯洛文尼亚	35.5	巴基斯坦	0.9
乌克兰	32.9	哈萨克斯坦	0.5
日 本	30.9	中国(大陆部分)	0.3
德 国	29.7	巴 西	0.2
捷 克	29.2		

1.2.1 常规源项

包括极限设计工况排放量和实际排放量。极限设计工况表示允许该核电厂继续运行的极限工况。一旦发生超过此极限工况条件时,电厂将停止运行或降低功率运行。极限工况下的排放量仅作为安全设计的依据,以确保在该工况下核电厂仍能正常运行。以我国第一个自己设计、建造的秦山核电厂(一期,电功率为 300MW)为例,极限设计工况下,液态放射性年排放总量为 $2.63 \times 10^{11} \text{Bq}$ 。气载放射性年排放总量为 $7.13 \times 10^{14} \text{Bq}$ 。事实上,核电厂不可能全年都在极限设计工况下运行。其实际排放量远小于极限设计工况排放量。仍以秦山核电厂为例,正常运行工况下预期的液态放射性排放量 ^3H 为: $2.11 \times 10^5 \text{Bq/a}$,其他核素为 $3.99 \times 10^5 \text{Bq/a}$ 。其气载放射性总排放量为 $5.76 \times 10^5 \text{Bq/a}$,主要核素有 ^3H , ^{14}C , ^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{137}Cs 等。

1.2.2 事故源项

人们最关心的核电厂事故为设计基准事故和超设计基准事故。前者主要应用于核电厂的选址。后者主要应用于核电厂的应急计划。设计基准事故是用于评估厂址和专设安全设施的一种假想的事故。其定义为:依照规定,一个核设施在设计阶段必须考虑设置防护装置的一种事故。设计基准事故有很多类型。对轻水堆来说,厂外后果最严重的设计基准事故是在反应堆的一回路中最大的冷却剂管道突然地双端断裂(称为 DBA-LOCA 事故)。超设计基准事故是指比设计基准事故更为严重的事故。目前应用最广的是 RSS 压水堆假想事故。这是把美国萨里(Surry)和桃花谷(Peach Bottom)两个核电厂分别作为压水堆和沸水堆的代表,用电厂的可靠性分析和源项分析,得出的 9 类压水堆事故和 5 类沸水堆事故。作为例示,表 1-2 给出按设计基准事故(LOCA)的保守模型得出的秦山核电二期事故各时段放射性核素的释放源项。

表 1-2 泰山核电厂(二期)LOCA 事故各时段核素释放量(GBq)

核素	0~2 h	0~8 h	8~24 h	24~96 h	96~720 h
$^{83}\text{Kr}^m$	4.35E+4	7.86E+4	4.18E+3	5.39E+0	0.0
$^{85}\text{Kr}^m$	4.13E+5	3.01E+5	1.09E+5	4.78E+3	0.0
^{85}Kr	3.47E+3	1.39E+4	2.77E+4	6.23E+4	5.27E+5
^{87}Kr	1.57E+5	2.36E+5	3.35E+3	0.33	0.0
^{88}Kr	2.84E+5	0.26E+5	9.82E+4	9.53E+2	0.0
$^{131}\text{Xe}^m$	5.29E+3	2.10E+4	4.07E+4	8.21E+4	3.28E+5
$^{133}\text{Xe}^m$	2.99E+4	1.15E+5	1.98E+5	2.64E+5	1.78E+5
^{133}Xe	9.70E+5	3.81E+6	7.13E+6	1.27E+7	2.49E+7
$^{135}\text{Xe}^m$	3.53E+4	3.55E+4	0.0	0.0	0.0
^{135}Xe	2.03E+5	6.56E+5	5.55E+5	1.18E+5	5.20E+2
^{138}Xe	1.65E+5	1.66E+5	0.0	0.0	0.0
^{131}I	5.36E+4	2.12E+4	4.05E+4	7.79E+4	2.33E+5
^{132}I	5.86E+3	1.18E+4	1.15E+3	4.67E+0	0.0
^{133}I	1.07E+4	3.89E+4	5.28E+4	3.44E+4	3.50E+3
^{134}I	0.14E+5	7.74E+3	1.46E+1	0.0	0.0
^{135}I	9.35E+3	2.81E+4	1.76E+4	2.08E+3	1.20E+0

表 1-3 三里岛核电厂事故放射性释放量

堆芯放射性释放量, Bq	释放份额		
	从燃料元件释放的份额	进入安全壳和汽轮机厂房 空气中的份额	进入大气环境的份额
^{85}Kr	3.6×10^{17}	0.47~0.70	0.6
^{133}Xe	5.2×10^{18}	0.42~0.62	0.6
^{131}I	2.4×10^{18}	0.41~0.55	7×10^{-5}
^{137}Cs	3.1×10^{16}	0.45~0.60	—
^{90}Sr	2.9×10^{17}	$< 8 \times 10^{-4}$	—
^{140}Ba	5.2×10^{18}	0.001~0.002	—

表 1-4 IAEA 估计的切尔诺贝利核电厂事故期间 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的日释放量

时间间隔(UTC)	^{137}Cs , TBq/d	^{131}I , TBq/d	有效烟羽高度, m
00:00 26/04~24:00 26/04	2.2×10^4	1.9×10^5	600
00:00 27/04~24:00 27/04	7.0×10^3	5.5×10^4	600
00:00 28/04~24:00 28/04	5.5×10^3	4.1×10^4	300
00:00 29/04~24:00 29/04	4.1×10^3	2.8×10^4	300
00:00 30/04~24:00 30/04	3.0×10^3	1.9×10^4	300
00:00 01/05~24:00 01/05	3.0×10^3	1.7×10^4	300
00:00 02/05~24:00 02/05	5.5×10^3	2.8×10^4	300
00:00 03/05~24:00 03/05	6.3×10^3	3.0×10^4	300
00:00 04/05~24:00 04/05	8.1×10^3	3.5×10^4	300
00:00 05/05~24:00 05/05	8.9×10^3	3.6×10^4	300
00:00 06/05~24:00 06/05	1.1×10^2	7.4×10^2	300

历史上实际发生的较为严重的核电厂事故有两起：美国三里岛核电厂事故和前苏联切尔诺贝利核电厂事故。表 1-3 列出了三里岛核电厂事故放射性释放量。表 1-4 列出了切尔诺贝利核电厂事故期间¹³⁷Cs 和¹³¹I 的日释放量。

1.3 核安全与排放限值

1.3.1 核安全

核电安全技术的基础及总的指导思想是纵深防御原则。纵深防御可分为 5 个保护层次。

(1)第一层：保守设计、质量保证和监督活动以及人员安全素质的综合，使得限制放射性释放的一系列屏障都得到加强。

(2)第二层：对运行工况的全面监督措施。这些措施能测出偏离正常运行工况及系统失效情况，并作出响应以限制反应堆的功率、温度、压力、水位和流量等参数超过限值的变化，使反应堆运行在安全限度所允许的范围内，确保燃料基体、燃料包壳和一回路冷却剂系统边界的完整性。

(3)第三层：设置保护系统和专设安全设施。保护系统能及时地实施停堆、防止设备失效和人因差错演变成设计基准事故。

(4)第四层：事故处置的各项措施。在事故的严重程度已超越设计技术规范的情况下，采用特定的运行对策，以常规或非常规的方式最佳利用各种设备来恢复对电厂的控制。

(5)第五层：厂外应急设施和措施。人们尽了最大努力提供的保护一旦被突破，可用厂外对策作补救。在这样的情况下，采取一些保护行动来缓解对周围居民及环境的影响。这些保护行动包括居民的掩蔽、撤离和治疗，以及防止放射性物质通过食物链或其他途径传给人体等等。

为防止放射性物质的逸出，轻水堆核电厂还普遍采用四道实体屏障，即燃料基体、燃料元件包壳、反应堆冷却剂压力边界和安全壳。此外，还有两道可视为非实体屏障，即燃料元件芯块本身和核电厂的防护距离。

1.3.2 正常运行工况下的剂量限值和排放量控制值

GB6249—86 在《核电厂环境辐射防护规定》中规定“每座核电厂向环境释放的放射性物质对公众中任何个人(成人)造成的有效剂量当量，每年应小于 0.25mSv。”此外“每座压水堆型核电厂气载和液体放射性流出物的年排放量，一般还应低于表 1-5 所列控制值。”

表 1-5

气载放射性流出物	控制值
惰性气体	$2.5 \times 10^{15} \text{Bq} (7 \times 10^4 \text{Ci})$
碘	$7.5 \times 10^{10} \text{Bq} (2 \text{Ci})$
粒子(半衰期 $>8\text{d}$)	$2 \times 10^{11} \text{Bq} (5 \text{Ci})$
液体放射性流出物	控制值
氚	$1.5 \times 10^{14} \text{Bq} (4 \times 10^3 \text{Ci})$
其余核素	$7.5 \times 10^{11} \text{Bq} (20 \text{Ci})$

注：其他堆型根据具体情况另外确定。

1.4 核电厂环境影响

核电厂环境影响指核电厂在建造阶段和建成后的正常运行期间以及发生事故和退役期间可能对环境造成的辐射和非辐射影响。核电厂辐射环境影响系指核电厂在上述各阶段所释出的放射性流出物对周围公众直接造成的照射或通过环境介质间接造成的照射。其基本评价指标是向环境排放的放射性核素造成的公众中最大个人有效剂量当量和集体有效剂量当量。核电厂非辐射环境影响则指核电厂对周围环境造成的除了辐射影响以外的其他影响。

1.4.1 正常情况下的环境影响

指核电厂正常运行期间对环境造成的影响。

(1) 辐射环境影响 核电厂正常运行时反应堆核燃料内的核裂变过程中会产生大量裂变产物,堆内结构材料、腐蚀产物及反应堆冷却剂中杂质由于辐照而被活化。这样,在反应堆内会出现大量的各种放射性核素。这些放射性核素的绝大部分通常都被严密地密封在堆芯和反应堆冷却剂系统(一回路)中,微量逸出的放射性核素经废物处理系统处理,所剩无几。残存的放射性核素或经烟囱排入大气环境,或与冷却水混合后排入水环境中。核电厂排放的气载放射性物质主要有 ^{85}Kr , ^{133}Xe 等惰性气体, ^3H , ^{14}C , ^{131}I 同位素以及放射性Co等活化产物。液体放射性流出物中除 ^3H 外,主要有 ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I 和 ^{60}Co 等。释放到环境中的放射性核素将对生物圈产生辐射照射。

辐射照射分外照射和内照射两类。当辐射源处于人体外部时会产生外照射,例如放射性物质沉积于地表或含放射性物质的烟羽在人的上空飘过时的情况。如果释放的放射性物质被摄入体内,会产生内照射,例如直接吸入放射性核素或食入被放射性物质污染的食物。具体照射途径示于图1-1。

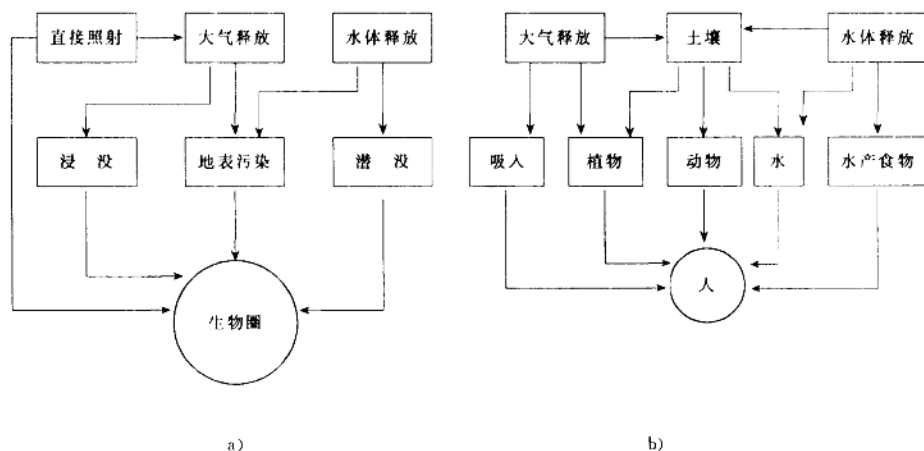


图 1-1 辐射照射途径

a)——外照射途径; b)——内照射途径。

在居民所受的剂量中,核电厂排放出来的放射性惰性气体贡献最大。典型的电功率1000MW的沸水堆和压水堆,放射性惰性气体的总排放量分别约为 $4.07 \times 10^{16} \text{Bq}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 和 $5.55 \times 10^{16} \text{Bq}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 。在一定的环境条件下,居住在100km范围内的居民集体有效剂量当量分别约为 $5 \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 和 $1.4 \times 10^{-2} \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 。核电厂排放出来的 ^{131}I 可能有多种形态:微粒、元素碘、有机碘或次碘酸。元素碘能很快沉积在农作物上,经饲料—牛—牛奶—人或蔬菜—人食物链进入人体。沸水堆排放的 ^{131}I 约为 $1.85 \times 10^{11} \text{Bq}/(\text{GW} \cdot \text{a})$,对甲状腺产生的集体剂量当量约为 $1.1 \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$,压水堆比此数值约低两个数量级。放射性废液中除 ^3H 以外的放射性核素产生的集体有效剂量当量如下:向海水排放,压水堆和沸水堆都约为 $2 \times 10^{-4} \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$;向淡水排放,压水堆和沸水堆则分别约为 $6 \times 10^{-4} \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 和 $8 \times 10^{-4} \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 。

就正常运行期间的辐射环境影响而言,核电厂比燃煤电厂“干净”。由于煤中含有天然放射性,燃煤电厂在正常运行期间也会造成辐射环境影响,燃煤电厂与核电厂在正常运行期间对周围80km范围内居民造成的归一化集体有效剂量当量分别约为 $50 \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$ 和 $1.6 \text{人} \cdot \text{Sv}/(\text{GW} \cdot \text{a})$,前者远高于后者。

(2)非辐射环境影响 非辐射环境影响包括:①土地需求。核电厂对土地的需求量取决于与厂址相关的露天水源、居住区、核反应堆的类型和功率大小以及气象条件等。核电厂周围应设置非居住区,其半径(以核反应堆为中心)不得小于0.5km。②热排放。反应堆堆芯中核裂变过程产生的热量,约有2/3必须排放到核电厂附近环境中去。一座电功率1000MW、热效率为33%的轻水堆核电厂,在凝汽器中放出的热量相当于2000MW(热功率)。如果冷却水的流量为 $50 \text{m}^3/\text{s}$,那么凝汽器出口处的水温约增高 10°C ,由此产生的热污染有可能影响水生生态系统,影响一切生物学活动,从经由新陈代谢影响鱼类进食习惯和繁殖率到改变营养水平、光合作用、富营养化过程和有机物质的降解率。温度的升高也会对水栖有机体产生多种效应,例如热致死,改变生长方式,破坏正常生物节律等。热量的额外增加还会影响水质,最重要的是导致水中含氧量减少。但迄今为止的实验研究表明,热污染并不会对水生生态构成明显影响。此外,核电厂在正常运行和事故条件下,还会向环境释放一定量的非放射性有毒物质。

1.4.2 事故工况下环境影响

这是指当核电厂的工作状态发生重大偏离时,如果有关专设安全设施的功能不能完全达到设计要求,则这种偏离可导致不可接受的大量放射性物质的释放,将可能造成对周围公众的过量照射。世界上曾发生的严重的核电厂事故有两起:1979年3月美国三哩岛核电厂事故和1986年4月前苏联切尔诺贝利核电厂事故。两次事故造成的后果估计如下:三哩岛核电厂事故未对周围居民产生明显的辐射影响,关键居民组所受照射不超过天然辐射所致年剂量;切尔诺贝利核电厂事故,据联合国原子辐射效应科学委员会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)等组织估计,影响最大的东南欧地区的平均有效剂量负担约为 12mSv ,相当于该区域居民今后30年所受天然本底辐射剂量的17%;半径30km范围内严重污染,导致13万人迁离。

1.5 环境影响报告书及其审评

根据国家环保局核环境管理办公室于1997年11月颁发的放射环境管理文件(NEPA—

DRP-9702-017)《核环境审评制度及要求》的规定,核电站的环境影响报告审批不像非放项目那样只审一次,而是分阶段提交报告书,分阶段审批。通常分下述4个阶段,每个阶段的审批要求也不相同:

(1)选址阶段。主要确定厂址的适宜性。仅当选址阶段环境影响报告书被批准后,厂址才算被认可,在初始阶段假定的厂址只是意向性的。确定厂址是否适宜,要考虑:①正当排放对厂址周围公众的影响十分微小,在事故时,公众可以受到有效保护;②厂址周围的环境条件不会对电厂的安全运行带来不能接受的影响。

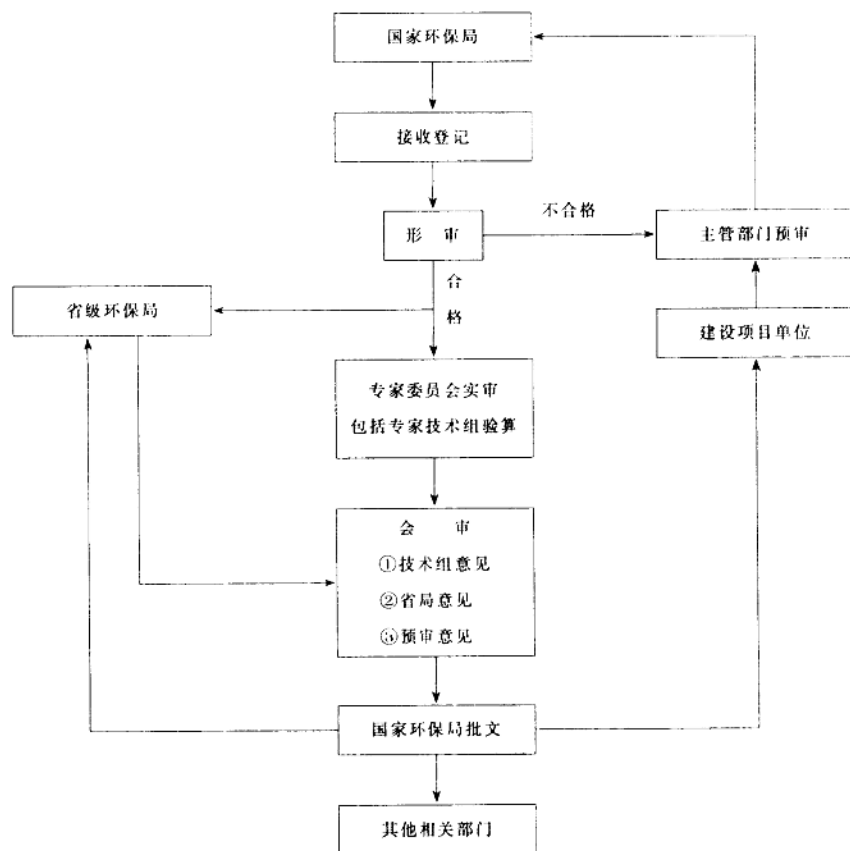


图1-2 核电站环境影响报告书的审评机构和程序

(2)设计建造阶段。①确认环境保护“三同时”在设计阶段已得到落实;②与国家核安全局一起颁发建造许可证。

(3)首次装料阶段。①审查环境保护设施的效能;②与国家核安全局一起颁发首次装料许

可证。

(4)运行阶段。①确认实际运行的环境影响；②与国家核安全局一起颁发运行许可证。

当核电厂退役时，还需要提交关于退役的环境影响报告书。

上述文件还给出核电厂环境影响报告书的审评机构和程序图(见图 1-2)。由图可见，核电厂环境影响报告书先经主管部门预审通过后，提交国家环保局。国家环保局形审通过后，提交国家环保局核环境审评专家委员会进行终审。核环境审评专家委员会由国内各部门著名核环境专家组成，任期 3 年。它由专家委员、技术组专家和秘书处三部分组成。本届专家技术组：清华大学核能院、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院、中核总二院、中核总四院。报告书终审通过后，由国家环保局批文给其他相关部门。国家计委在收到国家环保局关于选址阶段环境影响报告书批准文件后，才正式立项，批准建设项目设计任务书。国家核安全局只有在收到国家环保局各个阶段的环境影响报告书的批文后，才可签发各阶段的执照或许可证。

参 考 文 献

- 1 国家环保局. 核电厂环境辐射防护规定. GB6249-86. 北京: 中国标准出版社, 1986
- 2 胡二邦. 核电厂环境影响. 中国电力百科全书——核能及新能源发电卷. 北京: 中国电力出版社, 1995. 171~172
- 3 胡二邦. 核电厂源项. 中国电力百科全书——核能及新能源发电卷. 北京: 中国电力出版社, 1995. 195~196
- 4 姜锡驹, 俞尔俊. 纵深防御原则. 中国电力百科全书——核能及新能源发电卷. 北京: 中国电力出版社, 1995. 412~413
- 5 连培生. 核能发电. 中国电力百科全书——核能及新能源发电卷. 北京: 中国电力出版社, 1995. 207~209
- 6 赵亚民. 核环境审评制度及要求. 国家环保局核环境管理办公室. NEPA-DRP-9702-017. 1997

第2章 大气边界层与大气扩散

气载污染物自源头释放出来进入大气之后一般地要经由在大气中的迁移和转化这一阶段,最终导致该气载污染物或次生污染物浓度在时间上和空间上具有一定形态的分布,并造成对人群和动植物及其他环境客体的影响。图2-1定性地表示污染物的排放,大气中的迁移转化和环境影响三者的联系和顺序。要定量地计算或预测大气环境质量并在此基础上进一步估算气载物的环境影响,如气载核素的外照射,经食物链吸收的内照射等,对大气中的迁移转化过程必须有较透澈的了解,并能定量地描述这些过程。通常把气载污染物质在大气中的迁移转化过程统称为大气弥散或大气散布(atmospheric dispersion)。有时简单借用湍流扩散(turbulent diffusion)一词而称为大气扩散(atmospheric diffusion)。大气弥散包含着诸多的子过程,其中有物理的,也有化学的,有时还有生物过程;有仅出现在大气中,也有出现在大气和地面或水面的界面过程,这些过程常常是相互交叉,过程自身或过程之间有着高度的非线性作用。要严谨定量地描述气载污染物在大气中的输送转化是很难的事。为了实用起见,人们常常是通过简化,突出最主要的过程和因子。借助于一套公式和相应的参数组来反映各输送转化的子过程及其交叉作用。这样建立起来的定量模型简称为大气弥散模式或大气扩散模式。显然,大气弥散模式所表达的是气载污染物排放特征和环境中污染物浓度之间的定量关系。在模式中反映污染物排放特征的强度和时空分布称为源项或源场,环境大气中气载污染物浓度的时空分布相应地称为浓度场。

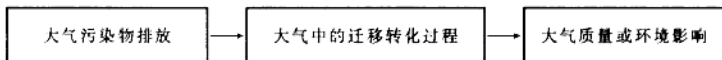


图 2-1 大气污染物释放和迁移转化及环境影响

本章首先概述大气弥散的各主要子过程,往下各节着重讨论对核素烟云小尺度和中尺度搬运扩散起重要作用的大气湍流和大气边界层。作为核电厂环境影响评价模式的基础之一的大气扩散理论也在本章列出一节介绍。

2.1 大气污染物的弥散过程、大气湍流扩散

2.1.1 大气污染物的弥散过程

影响大气污染物的迁移转化的因素是多方面的。有排放源的特点,污染物的性质,地形地物状况及气象因子和过程等等。概括起来包括以下几个方面过程(见示意图2-2)。

(1)随风向下风向的搬运 搬运方向取决于风向。搬运速度取决于风速大小。

(2)大气湍流扩散 在大气湍流作用下沿顺风方向上下左右扩散开去。

(3)大气边界层风向风速切变对污染物输送扩散的影响;大气混合层的特殊影响等。

(4)干沉积 大气污染物通过重力沉降或湍流扩散作用传输至地球或其他环境物体表面,被表面吸收、吸附、滞留。与干沉积相反是再悬浮或叫做吹扬。它是由于风和地面相互作用,或是由于机械力的作用使颗粒物离开地表面随气流输运扩散。颗粒物和气态污染物都会有干沉

积。再悬浮一般只讨论颗粒污染物。

(5)湿沉积 指大气污染物被云雨水滴或冰晶吸收、溶解、捕获后随降水物降落至地面的过程。如果是过程本身,通常叫做降水冲刷。如果是讨论污染物向地面的输送即叫湿沉积。统称湿沉降。

(6)化学转化 大气污染物吸收太阳紫外辐射光子而引起原子激活,产生了一系列的光化学反应,无机化学和有机化学反应。对一特定的污染物,其数量(浓度)发生了增减。

参与化学反应的污染物可以是特定污染物自身,更多情况下包括大气固有成分和其他污染物成分。化学转化通常与一定的温度、湿度条件有联系。

(7)烟云抬升 在污染物释入大气的最初阶段,由于废气初始速度(动量)和温度(浮力)的作用,废气烟云往往经历一段时间的抬升。

(8)烟囱或建筑物的下洗和尾流混合 废气自建筑物邻近排出,烟囱或发散管在建筑物顶部高度不够高或烟囱出口速度不大,在这几种情形下建筑物或烟囱口对气流的扰动会使废气离开排放口后在邻近的下风向下沉,称为下洗。障碍物下风向污染物混合很强,甚至出现污染物随气流打转返回,称为尾流混合。

(9)迎风坡抬升,背风坡下洗 污染烟云在搬运过程中遇到山坡即有强迫抬升,在背风坡伴随气流下沉而下洗和尾流混合。如果是侧向伸展的山地,在迎风坡抬升的同时常有烟云撞山的现象发生。如果是较孤立的山丘,烟云较常出现绕山而过,在背风区产生一定程度的尾流混合。地形对污染物散布的作用也是非常复杂,在山区与丘陵河谷的大气环境影响评价工作中是必须重视的过程。

(10)中大尺度气象过程 显然中尺度和大尺度的气象过程直接支配了该尺度污染物烟云的搬运扩散行为,同时对局地性的扩散也有直接或间接作用。此类气象过程包括气象条件的日变化、山谷风、海陆风、中大尺度的环流场等等。

以上所列诸项迁移转化过程定性地示于图 2-2。其中有气象学过程,有空气动力学过程,也有污染物的物理化学性质等等因素,在散布全过程中它们往往相互作用着。现有知识发现各项子过程和要素随着排放特征,污染物性质,地形气象条件和扩散时间的差异其重要性也不一样。因此我们尚有可能突出其中一个或几个主要作用给出定量表达式和模式,供大气污染研究和环境影响评价应用。

2.1.2 大气湍流

在日常生活中人们都可以亲身体验到风是一阵一阵地吹的。风速时大时小。风向忽左忽右。敏感的人在野外会觉察到温度一会儿高一会儿低。这些现象就是大气湍流的表现。如果用响应非常快,灵敏度很高的仪器,例如三分量超声风速仪,小惯性白金丝温度表和 Layman-a 湿度表置于离地面一定高度的地方进行观测,便可以得到类似于图 2-3 的结果。其中图 a,b,c,d,e 依次是风向,沿平均风方向(纵向)的瞬时风速,垂直方向的风速,瞬时温度和湿度随时间

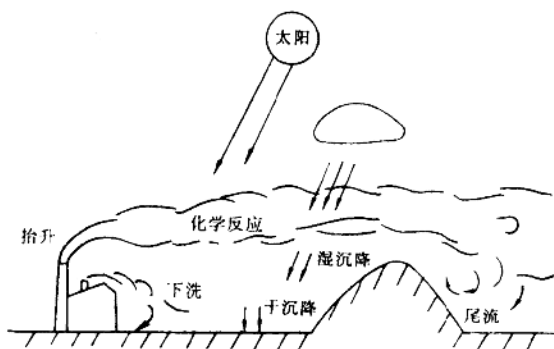


图 2-2 大气污染物的散布

的变化过程。可以发现,低层大气中各种气象要素时时刻刻表现为无规则的变化,通常称为涨落或脉动。这种涨落是由各种各样周期成分无规则叠加而成的。周期可以短至 10^{-3} 秒甚至更短。长的可达小时甚至更长。

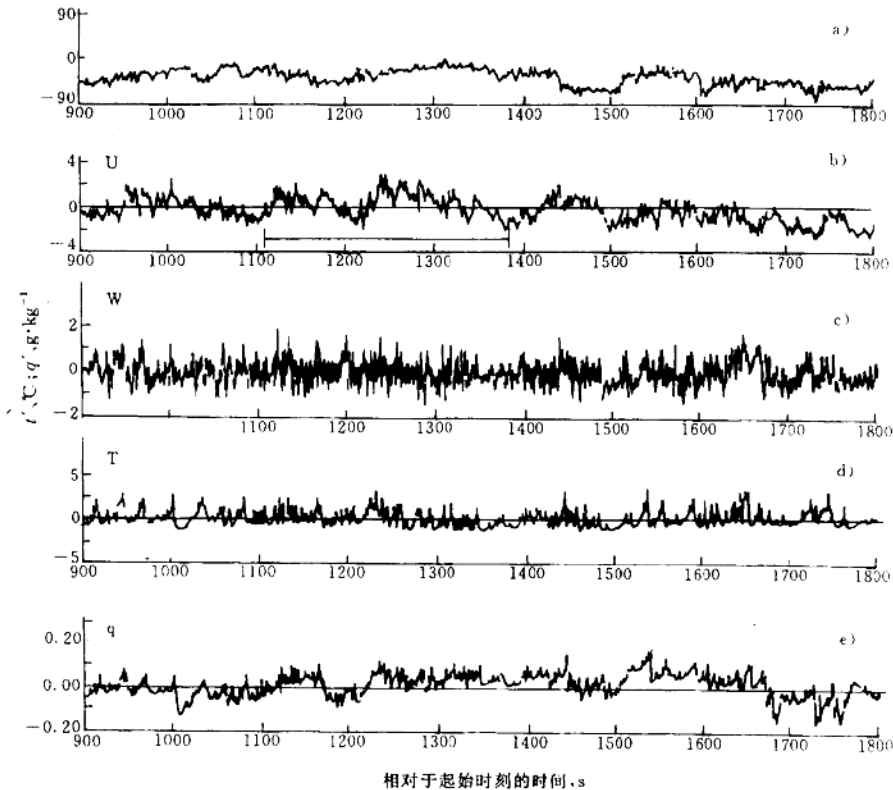


图 2-3 1992 年 8 月 13 日北京时 12:45 始,超声风速仪测量得到的水平速度脉动 u' ,垂直速度脉动 w' ,白金丝温度仪测得的温度脉动 t' ,Layman- α 湿度表测得的湿度脉动 q' ,以及由这些记录计算出的瞬时风向

如果同时有另一组仪器在相距不远的另一地方进行观测,同样得到一组与图 2-3 的涨落相类似,但不相同的记录。不难想象,如果有办法以某一点为起点沿某方向摆满测量仪器。在同一瞬间对所有各点同时进行观测,那么便得到各要素涨落随空间位置的变化图,其涨落型式类似于图 2-3,只是横坐标变成为空间距离罢了。大气湍流涨落的空间小尺度可小至毫米,大尺度与高度同数量级,并随高度增高而增大。

所谓大气湍流就是气流在三度空间内随空间位置和时间的不规则涨落。伴随着流动的涨落,温度、湿度乃至大气中各种物质属性的浓度及这些要素的导出量都呈现为无规则的涨落。我们把这些看作为大气湍流现象,也可以作为大气湍流的定义。根据这些现象或定义来判断,大气边界层的运动形态一般是湍流的,积云活动的小尺度部分是湍流的,对流层上部的急

流层上下也是湍流的(晴空湍流)。很稳定大气边界层有时候不是湍流,常表现为波动和湍流在不同时刻交替出现,或空间上有些地方是湍流有些地方是波动,或湍流与波动共存的状态。不管大气边界中的稳定度如何,接近地面处的近地面层大气由于风速切变所带来的机械能的补充,能给始终保持湍流运动状态。

大气湍流是大气的基本运动形式之一,对大气运动的发展与演化,大气能量的传输和再分配有着极其重要的作用。湍流扩散是空气污染物局地性散布的主要过程,因此也是中小尺度弥散模式必须体现的。

如同一般的湍流问题一样,大气湍流发生的机理极端复杂,现今仍未得到圆满解决。尽管如此,我们还是能够从能量学的观点对大气湍流的存在和维持作出一定程度的诊断分析。大气湍流的能量源自机械运动做功和浮力做功两方面。前者是在有风向风速切变的场合湍流切应力对空气微团做功。后者是指不稳定层结大气中浮力对垂直上下运动的空气微团做功,从而增强湍流。假如大气层结是稳定的。空气微团上下运动时应反抗重力做功消耗自身的动能,湍流趋于减弱。按照这种观点来判断,大气湍流的存在和维持有如图 2-4 所示的三大类型:

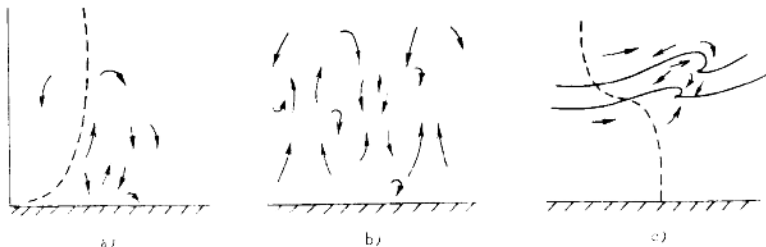


图 2-4 大气湍流的产生和维持

a)——边界层的切变不稳定性,虚线为风速廓线;b)——热力对流;
c)——Kelvin-Helmholtz 波不稳定性。虚线为密度廓线。

(1)风切变产生的湍流 在接近地面的大气中地面边界阻滞空气运动起着不滑动底壁的作用。这里的风速切变很大,涡度因而也大,流动是不稳定的,有利于湍流的形成。湍流一旦形成即通过湍流切应力做功源源不断地将平均运动的动能转化为湍流运动的动能,湍流就能维持下去。在最靠近地面的近地面大气层,不论日夜都是湍流运动。

在地形有起伏的场合,例如树林,建筑物或山地和丘陵河谷的地方,不滑动边界是三维的。而且由于这些障碍物对气流的阻挡作用所产生的流动脱离和涡旋,始终具备发生湍流的触发条件和能量补充,因此流动始终是湍流的,而且往往很强。

(2)对流湍流 白天地面强烈加热的结果在大气边界层中会产生对流泡或烟流。对于特定的对流泡或烟流,表面上它的流动是有组织的。然而各个单体的出现时间和地点却几乎是完全随机的,表现为湍流状态的流动。由于流动的不稳定性和上升过程的卷夹,热泡也会部分地“破碎”为小尺度湍流。对流湍流的能量来源是直接或间接地通过浮力做功取得的。

除了大气边界层的对流以外,积云的对流也是对流湍流的一种。后者的出现和相变过程有密切联系。

(3)波产生湍流 稳定层结的大气中空气微团的上下运动因反抗重力而消耗自己的动能,

湍流通常较弱或消失掉。稳定层结的大气流动经常存在着上下层风的切变。流体动力学的分析发现这时候会产生波动。当上下层风切变够大时运动变成不稳定的,随着波动振幅增大并破碎,破碎波的叠加便构成为湍流。湍流一旦形成,上下层混合加强,风的切变随之减弱,流动又恢复到无湍流的状态,如此往复不已。波动产生的湍流往往在空间上是离散的,在时间上是间歇的。它经常出现于夜间的稳定边界层中和白天的混合层顶,也是晴空湍流的一种重要原因。此类湍流的动能最初来自波动的能量(位能)。湍流出现以后也可通过湍流切应力做功直接自平均运动动能获取。

2.1.3 湍流扩散

湍流是极端大量分子所组成的流体团的整体运动。伴随着速度的时空涨落流体团所携带的物理属性将很快地在空间散布开,逐渐与周围的流体混合而实现湍流扩散。湍流的混合(扩散)能力远远强于没有湍流的流动(层流)。在大气湍流扩散问题中通常只考虑湍流扩散而忽略分子扩散的作用。

图 2-5 表示干净大气中一团携带大量气溶胶粒子的空气在湍流作用下包络范围的变化。从图中所示的现象不难体会到湍流扩散与分子扩散的本质区别及两者的扩散能力有悬殊差异的原因。

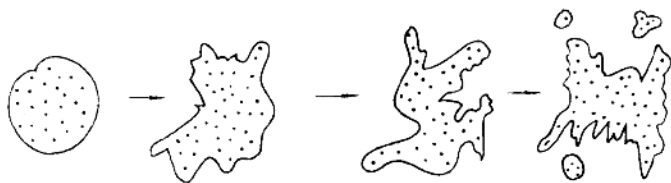


图 2-5 湍流扩散示意图

为了便于直观理解湍流扩散的具体过程,不妨将湍流想像成由大小不同的旋涡构成的流动。这些涡旋叫做湍涡。一个大湍涡包含着许多较小的湍涡,较小的湍涡又包含着很多更小的湍涡,大湍涡套着小湍涡构成了湍流运动。烟云或烟团的扩散稀释就是由这些湍涡来完成的。图 2-6 表示一个烟团在大小不同的湍涡中的扩散状态。其中图 2-6 a) 表示烟团处于比它的尺度小的湍涡中。烟团随风向下风向移动的同时受到小尺度湍涡的来回搅动,边缘缓慢与周围空气混合,大小缓慢膨胀,浓度也缓慢地降低。此例说明比烟团小得多的湍涡对扩散稀释作用不大。图 2-6 b) 表示一个比烟团大得多的旋涡或流场扰动对扩散的作用,这时烟团主要被湍涡运动挟带,表现为位置的摆动,本身的分散也不大。图 2-6 c) 表示尺度大小与烟团相仿的湍涡的作用。这时烟团被湍涡拉开,撕碎且产生变形,具有较强的扩散。

不同尺度的湍流对连续排放的烟流的扩散与上述情况有共同的地方,不同点是大尺度湍流或流场扰动引起的烟流位置的上下左右摆动也起着污染物在空间上的分散作用,也属于湍流扩散的范畴。

2.1.4 大气扩散状态与气象条件的关系

对应于大气湍流的强弱,污染物在大气中的扩散也呈现三种基本状态。以连续排放的烟云为例分别示于图 2-7。它们的名称分别是环链形扩散,锥形扩散和扇形扩散。