

第二卷

放射生态学

—核能与环境

[美] F.W.魏切尔 著
V.舒尔茨

原子能出版社

放射生态学

——核能与环境

第二卷

[美] F. W. 魏切尔

V. 依尔曼

卜石 陈竹舟

宋妙发 汪家贵

原子能出版社

Radioecology (Vol. I):
Nuclear Energy and the Environment
F. Ward Whicker, Vincent Schutzl
CRC Press, Inc., 1982

放 射 生 态 学

——核能与环境

第二卷

[美] F. W. 魏切尔

V. 舒尔茨

卜 石 陈竹舟

宋妙发 江家贵

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32·印张11·字数247千字

1991年7月北京第一版·1991年7月北京第一次印刷

印数1—1000

ISBN7-5022-0278-1

X·10 定价: 6.80元

内 容 简 介

《放射生态学》为两卷集的专著，旨在阐明核能和环境的许多复杂问题。本书为第二卷，在第一卷的基础上，它对数学模式及其在迁移速率和在生态系统组分中浓集程度预测中的应用作了适当的论述。第一章重点讨论了单库室和多库室系统中线性、一阶动力学过程；第二章涉及电离辐射对各种生物体、天然种群以及陆地和水圈环境群落的影响；第三章探讨了人类活动产生的环境放射性的后果问题。

本书可供从事核能开发、环境保护和辐射防护工作的有关科技人员、大专院校师生、企业管理人员和律师等参考。

2676/18

放射生态学

——核能与环境

第 一 卷

第一章

引言与历史的回顾

第二章

放射生态学中应用的生态学原理

第三章

辐射学基本原理

第四章

环境放射性

第五章

放射性核素在生态系统中的行为

第 二 卷

第一章

放射性核素迁移的定量问题

第二章

电离辐射对物种、种群、群落和生态系统的效应

第三章

环境中放射性的后果

附 录 A

资 料 来 源

附 录 B

环境中特定放射性核素的文献综述

附 录 C

放射性核素表——物理半衰期及主要辐射类型

目 录

第一章 放射性核素迁移的定量问题	(1)
I. 引言	(1)
II. 迁移过程	(2)
A. 弥散	(2)
1. 大气	(2)
2. 水圈	(13)
B. 沉积	(19)
1. 重力沉降	(20)
2. 干沉积	(25)
3. 烟云损耗	(32)
4. 湿沉积	(34)
C. 再悬浮	(37)
D. 吸着	(44)
E. 食入	(52)
F. 吸入	(65)
G. 滞留和损失	(73)
H. 经验的浓度比	(89)
III. 库室系统动力学	(96)
A. 术语	(97)
1. 系统	(97)
2. 库室	(97)
3. 稳态	(97)
4. 被示踪物 (母质)	(98)
5. 示踪物 (污染物)	(98)
6. 迁移途径	(99)
7. 理想模型	(99)
8. 数学模式	(100)
9. 一些常用符号	(101)
B. 具有恒定输入速率的单库室系统	(103)
C. 具有随时间变化的输入速率的单库室系统	(108)

D.	卷积分在单库室中的应用	(115)
E.	双库室一阶系统	(121)
F.	具有三个或多个库室的一阶系统	(130)
G.	实验数据的分析	(140)
1.	滞留曲线	(142)
2.	积累曲线	(145)
IV.	放射性核素迁移模式	(151)
A.	迁移模式的应用	(152)
B.	迁移模式的局限性	(154)
C.	方法和文献资料	(156)
	参考文献	(157)
	补充读物	(167)
第二章 电离辐射对物种、种群、群落和生态系统的效应		(175)
I.	引言	(175)
II.	电离辐射的生物学效应: 概论	(177)
A.	辐射及其对生物学反应的影响	(177)
B.	生物学因素与辐射反应	(180)
C.	环境因素与辐射反应	(182)
D.	放射生物学效应的类型	(184)
E.	有关文献	(187)
III.	种群、群落和生态系统电离辐射效应的研究方法	(188)
A.	电离辐射源	(188)
B.	剂量测量方法	(194)
IV.	急性照射研究	(197)
A.	无脊椎动物	(198)
B.	脊椎动物	(202)
1.	鱼类	(202)
2.	两栖动物和爬行动物	(204)
3.	鸟类	(205)
4.	小哺乳动物	(206)
C.	植物	(212)
D.	一般说明	(215)
V.	慢性照射研究	(217)
A.	实验室研究	(217)

B. 野外研究	(229)
1. 高天然本底地区	(229)
2. 废物处置区	(231)
3. 模拟落下灰研究	(233)
4. 大的 γ 点源	(235)
a. 植物群落	(235)
b. 动物种群	(249)
C. 关于慢性照射研究的小结	(254)
参考文献	(256)
补充读物	(281)
第三章 环境中放射性的后果	(290)
I. 引言	(290)
II. 天然放射性本底	(292)
III. 人类的放射性常规排放	(297)
IV. 放射性的事故排放	(301)
V. 核战争	(305)
VI. 结束语	(310)
参考文献	(313)
附录 A 资料来源	(316)
附录 B 环境中特定放射性核素的文献综述	(330)
附录 C 放射性核素表——物理半衰期及主要辐射类型	(333)
换算系数表	(343)

第 一 章

放射性核素迁移的定量问题

I. 引 言

是否能对一个事物或过程进行准确的预测是对该事物或过程的理解程度的重要检验。本章是对第一卷第五章关于放射性核素迁移的定性描述的扩展，给出若干比较重要的迁移过程的定量表达。这样的定量表达对于这一课题的组织与理解，以及对于因环境释放造成的生物组织中的放射性核素负荷量的预测，都是极其有用的。1969年美国国家环境政策法（NEPA）的通过与执行，要求政府机构和工业部门在准许采取可能招致环境释放的行动之前说明放射性核素释放的环境后果。遵守这个要求就需要使用模式预测放射性核素在生态系统中的迁移和对关键生物组织产生的辐射剂量。

迁移模式的建立与应用要求对影响放射性核素在环境中运动的物理、化学和生物学过程有理性的认识，并给出这些过程的数学描述。它还要求对一些过程公式加以综合，以便能够预测所关心的生态系各组成部分中的放射性核素含量。象土壤、植物、动物等这样的生态系组分，一般被看作为系统的库室。库室系统中的各个库是通过迁移过程连结的，要对库室系统进行数学描述。随着库室数目及库室间的流动的

变化，数学公式的复杂性迅速增加。而且，计算方法实际上也可能随系统的复杂性而改变。

本章试图介绍一些普遍使用的定量预测放射性核素迁移的方法。它是这样编排的：一节讨论各个迁移过程，一节讨论库室系统动力学，最后一节则是与迁移模式的建立和应用有关的一般评论。关于放射性核素的迁移已经采用了复杂程度不同的很多方法描述。但是，作者们只能论及其中的少数几个方法，而且在很多情况下是以浅显和实用的方式加以叙述的。他们介绍了为建立模式而进行的各种尝试所需要查阅的大量文献。理解了本章的材料，读者将能够基本独立地着手建立简单系统的模式，并能就较复杂的系统，或在特殊情况下，就诸如关键的判断可能取决于模式的准确性的那些系统，与专家们交换意见。

II. 迁移过程

放射性核素的迁移过程指的是引起物质由一个地方往另一个地方，或由一种介质往另一种介质运动的任何自然现象。一个过程，本质上可以是纯物理的，化学的或生物学的，或者可能是由物理、化学或生物学机制的某种结合引起的。下面描述的，一般说来是最重要的一些迁移过程。

A. 弥散

1. 大气

由于不断增加的空气污染问题，大气弥散问题的重要性也大大增加了。大气弥散指粒子或气体由释放源的散开，它通常要引起粒子或气体浓度随离源的距离的增大而减小，大

气弥散过程是由包括周围气团的大规模物理位移、湍流扩散以及分子扩散在内的自然现象的共同作用产生的。分子扩散在大气弥散中一般是个次要的因素。大气的性质和运动对气体或气溶胶粒子的行为有着决定性的影响，因此，气象学是预测大气弥散的主要基础^[1-3]。

气体或极小粒子在大气中的正常快速弥散的基本原因是湍流，湍流是无规则的混乱运动，也就是气体或液体的大多数自然流动所特有的。这个过程在影响弥散的重要性方面通常比分子扩散大几个数量级。只要人们简单地对灵敏风向标观察一段时间，就很容易认识湍流。除静风时间外，风向标经受了大小、频率和平均方向不同的持续脉动。湍流是个可以分解为三个方向分量的三维物理量。

已经建立了湍流扩散理论，这些理论对基本了解大气弥散过程及其影响是有用的。但是，扩散理论对弥散问题的实际应用并不方便。幸而，已经提出了比较容易用于实际问题的简单公式。这些公式一般具体化为正态或“高斯”分布函数，它不仅给出了 Fick 扩散方程的基本解，而且还令人满意地模拟了大部份实际的资料。这样的公式常常被称为“高斯”烟羽模式，这里，作者将介绍其中的某些比较简单的形式，并讨论它们的应用。方法的主要依据是 Turner^[4]和 Smith^[5]编写的手册。这些手册又是根据更早期的一些著作编写的^[6-9]。

在介绍弥散公式之前，回忆一下三维坐标系是重要的（图1.1）。离开点源的下风向距离为 x 坐标，离开烟羽中心线或 x 轴的垂直距离为 y 坐标， z 坐标表示地面上方的高度或离开 xy 平面的距离。烟羽中心线的高度为 H ，它是源高 h 和烟

: 3 :

羽抬升 Δh 的和。

在 x, y, z 坐标处，来自连续点源，沉降速度可以忽略的气体或气溶胶粒子（一般指直径 $< 20 \mu\text{m}$ 的粒子）的浓度 X 由下式给出：

$$\begin{aligned}
 X(x, y, z) = & \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \\
 & \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right. \\
 & \left. + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

此公式假定，烟羽为地表所反射，即，在表面不存在沉积，沉积的问题将在以后考虑。在(1)式中， $X(x, y, z)$ 是在坐标 x, y, z 处的空气浓度， $\mu\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ ①； Q 为源强， $\mu\text{Ci}\cdot\text{s}^{-1}$ ； \bar{u} 为高度 H 处的平均风速， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； σ_y 为 x 坐标处的水平弥散系数， m ； σ_z 为 x 坐标处的垂直弥散系数， m ； H 为有效烟柱高度 (m) = 源高 + 烟羽抬升。

在讨论特定问题中的这些参数及它们的确定之前，作者想介绍一下(1)式的一些简化形式。在大部分情况下，我们关心的是烟羽中心线（即 z 和 $y=0$ 处）的地面空气浓度。对于地面空气浓度，(1)式简化为：

$$\begin{aligned}
 X(x, y, 0) = & \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \\
 & \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

① 居里 (Ci) 为非国际单位制单位，与SI单位的换算见换算表。——译者

对于沿烟羽中心线的地面空气浓度， y 和 $z=0$ ，

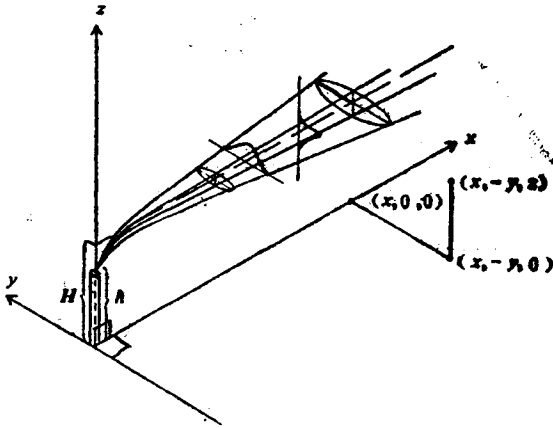


图1.1 大气弥散计算的坐标系

$$X(x,0,0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (3)$$

最后，对于没有有效烟羽抬升 ($H=0$) 的地面点源，

$$X(x,0,0; H=0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \quad (4)$$

为了把前面的方程应用于实际问题，必须确定合适的参数值，这并不总是简单的，因为这些值是随气象条件和源项的性质而变化的。

参数 \bar{u} 代表作用在烟羽上的平均风速，多数情况下，可以取为高度 H 处的平均风速。如果仪器处于高度 H 处，则可将其读数对所关心的时间范围取平均，并用于适当的弥散公式。但是，如果仪器读数是在某个高度而不是 H 处得到的，则必须进行校正。地球表面施加给风一阻力或摩擦力，它将

引起随高度变化的剪切。这形成了可以粗略地由下式估算的风速廓线^[5]：

$$\bar{u}_H = \bar{u}_1 \left(\frac{H}{z_1} \right)^p \quad (5)$$

式中 \bar{u}_H 为高度 H 处的平均风速； \bar{u}_1 为高度 z_1 处测量的风速； p 值由稳定条件的 0.5 变化到不稳定条件的 0.25。 p 值随大气稳定度变化，大气稳定度基本由温度廓线确定。照例，通常可以认为夜间逆温时，大气是“稳定”的，而白天则是“不稳定”的，如果认为大气是“中性”的，也可采用 $p=0.25$ ，只要是多云条件占优势和一定的其他条件（表 1.1）时，就认为大气是中性的。

参数 σ_y 和 σ_z 分别称为对于 y 和 z 坐标的“弥散系数”，它们表示在水平或垂直平面（图 1.1）里污染物浓度对烟羽中心的标准差，因此，它们是烟羽展宽程度的度量。弥散系数是下风向距离（ x ）和大气稳定度的函数（图 1.2 和图 1.3）。注意，下风向距离（ x ）在（1）式～（4）式中的作用反映在它对其 σ_y 和 σ_z 的影响上。

正如前面提到的那样，大气稳定度主要由大气的垂直温度廓线确定。大气稳定度是指空气柱阻止或加强垂直运动的趋势。用十分普遍的话说，当空气温度随高度降低时，由于地表面附近热的空气比它上面的冷空气的密度低，所以它有上升的趋势。相反，在逆温期间，空气温度可以随高度而上升，垂直运动的趋势很小或没有。第一种情形导致不稳定，而第二种情形提高了稳定性，因而存在几种可区分的不同温度廓线^[5]。这些廓线通常是参照大约为 $-1^\circ\text{C}/100\text{m}$ 的“干绝热递减率”加以判断的。

: 6 :

表1.1 与风速及太阳辐射有关的帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类

地面风速 ($m \cdot s^{-1}$)	白天太阳辐射			夜间状况	
	强	中	弱	浓阴天 ^① 或 云量 $\geq 4/8$	薄云阴天或 云量 $\leq 3/8$
<2	A	A-B	B		
2	A-B	B	C	E	F
4	B	B-C	D	D	E
6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

注：A——极不稳定条件；B——中等不稳定条件；C——稍不稳定条件；
D——中性天气（适于浓阴的白天或夜晚）；E——稍稳定条件；F——
中等稳定条件。

a 云量的大小是指云覆盖的范围占当地视水平上方天空的成数。

摘自 Turner, D.B., *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates* (revised 1970), Rep. AP-26, Office of Air Programs, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C., 1971.

实际上，人们很少测量空气温度随高度的变化，因此，提出了一种更实际的确定大气稳定度的方案^[6,9]。这种方案用风速和得到的太阳辐射确定稳定度类别（表1.1）。这些稳定度类别经常称为“帕斯奎尔稳定度类别”，并用于确定图1.2和图1.3中的弥散系数。注意，当空气柱变得较不稳定时，弥散系数增大，这有效地降低了气载物质的空气浓度。表1.1反映了这样的事实：在接受最强太阳辐射的白天，大气弥散通常是加强了，而在静风的夜晚，大气弥散受抑制。如果是浓阴天，不论白天或者是晚上，都呈现中性条件(D)。

6

① 原文为“薄云阴天或云量 $\geq 4/8$ ”。——译者注

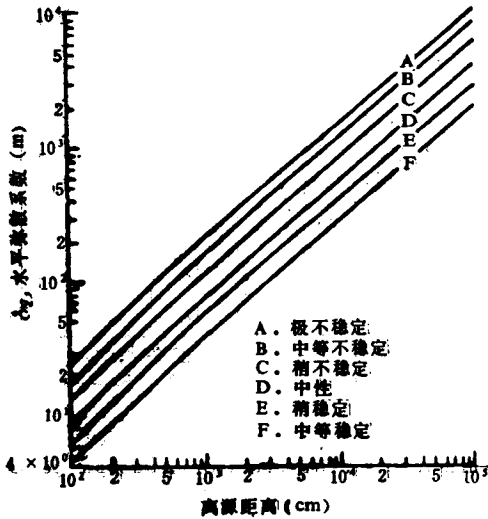


图1.2 按帕 斯奎尔稳定度分类的水平弥散系数和下风向距离的关系^[4]

有效烟羽高度 H 是烟囱实际高度（或释放点高度）和烟羽抬升之和。烟羽抬升主要由它的出口速度和浮力（如果它比周围温度高时）产生，它受到某些参量的影响，而且本身是一个复杂的课题。已经使用了估计各种条件下的烟羽抬升的大量公式^[2,4,5]。一般采用Holland^[10]提出的半经验公式：

$$\Delta h = \frac{v \cdot d}{\bar{u}} \left[1.5 + 2.68 \times 10^{-3} p \left(\frac{T_s + T_a}{T_s} \right) d \right] \quad (6)$$

式中， v 为烟气出口速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； d 为烟囱内径， m ； \bar{u} 为平均风速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； p 表示大气压力， mb ； T_s 是烟气温度， K ； T_a 是周围温度， K 。考虑到大气稳定度的影响，建议对于不稳

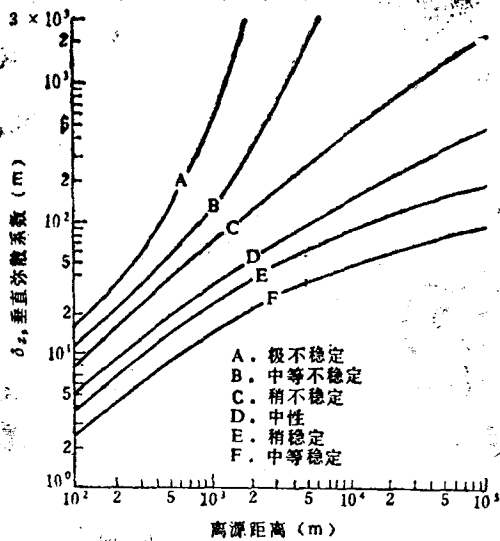


图1.3 按帕斯奎尔稳定度分类的垂直扩散系数和风向距离的关系

定条件, (6)式的 Δh 增加10~20%,而对于稳定条件,减少10~20%。有效烟羽高度对近源处的空气浓度及预期可能出现最大浓度的距离具有重要的影响。当 H 增加时,近源处的空气浓度减小,而出现最大浓度的距离增大^[4]。

当不稳定空气层的上面有一稳定的空气层存在时,一种特殊的情况出现了。常常称这种条件为“高层逆温”,它阻止在不稳定层产生的气溶胶扩散进入高处的稳定层。在这些空气层之间的界面常常称为“盖子”。因为“盖子”有效地限制了垂直扩散,所以,地面空气浓度将不象没有逆温“盖子”那样随距离迅速减小。Turner^[4]提出了用于计算逆温“盖