

CNIC-01286

CIRP-0024

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

滨海核电厂址事故大气扩散因子
与冲洗因子计算方法探讨

THE STUDY OF METHOD FOR CALCULATING
THE ACCIDENT ATMOSPHERIC DISPERSION
FACTOR AND ACCIDENT WASHOUT FACTOR
FOR COASTAL NUCLEAR POWER PLANT

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01286 CIRP-0024: 滨海核电厂
址事故大气扩散因子与冲洗因子计算方法探讨/胡二邦等
著. —北京: 原子能出版社, 1998. 12

ISBN 7-5022-1887-4

I. 中... II. 胡... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-

2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第25434号

滨海核电厂址事故大气扩散因子与冲洗因子计算方法探讨

胡二邦等著

©原子能出版社, 1998

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1029 1/16 • 印张1 • 字数27千字

1998年12月北京第一版 • 1998年12月北京第一次印刷

定价: 5.00 元



胡二邦：研究员，中国辐射防护研究院环境科学所所长。中国环境评价学会常务副主任，中国大气环境学会副主任，中国环境评价学会环境风险专业委员会主任，国家环保局核环境专家技术委员会成员。享受政府特殊津贴，被授予部级“有突出贡献的中青年专家”称号。作为主持人完成的科研项目中，获国家级科技进步三等奖一项，部级二等奖三项，部级三等奖三项，在国内外杂志及学术会议上发表论文 70 余篇，1964 年毕业于清华大学工程物理系。

Hu Erbang: Professor, director of Environmental Science Institute, China Institute for Radiation Protection; executive deputy president of Chinese Association for Environment Assessment (CAEA); deputy president of Chinese Association for Atmospheric Environment (CAAE); director of Speciality Committee of Environment Risk, CAEA; Member of Specialist Committee for Nuclear Environment, NEPA. Enjoy special government allowance and being granted the Ministry-level Outstanding Young and Middle-aged Specialist, CNNC. Win some prizes for progress of science and technology of third class at national-level, second and third class at ministry-level respectively in these research projects which he took charge of. More than 70 papers were published in international or domestic journals and symposiums. Graduated from Department of Engineering Physics, Tsinghua University in 1964.

CNIC-01286

CIRP-0024

滨海核电厂址事故大气扩散因子 与冲洗因子计算方法探讨

胡二邦 高占荣 姜 钢 王书献

王守恕 张茂栓

(中国辐射防护研究院, 太原, 030006)

陈家宜

(北京大学环境科学中心)

贾沛荣

(北京核工程研究设计院)

摘 要

参照当前国内外导则给出的估算事故扩散因子的模式, 推荐了一套考虑内边界层影响的估算核电站事故概率扩散因子的模式, 并尝试提出了一套估算事故冲洗因子的确定论模式与概率论模式, 根据我国东部某待建滨海厂址的实测气象资料, 分别估算了事故概率扩散因子、事故后各时段的冲洗因子(确定论模式)、事故概率冲洗因子以及相应的各途径剂量。计算表明, ①该模式估算的事故概率大气扩散因子是常用模式估算的 5.9 倍, ②对事故后 0~8 h 的剂量言, 确定论给出的冲洗沉积外照射剂量是相应的干沉积外照射剂量的 5.50 倍, 保守概率论给出的上述比值为 9.56 倍(考虑内边界层影响)和 56.7 倍(不考虑内边界层影响), 现实概率论给出的比值为 1.93 倍(考虑内边界层)和 11.4 倍(不考虑内边界层影响)。

The Study of Method for Calculating the Accident Atmospheric Dispersion Factor and Accident Washout Factor for Coastal Nuclear Power Plant

(In Chinese)

HU Erbang GAO Zhanrong JIANG Gang WANG Shuxian
WANG Shoushu ZHANG Maoshuan

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan , 030006)

CHEN Jiayi

(Peking University, Beijing)

JIA Peirong

(Beijing Institute of Nuclear Engineering)

ABSTRACT

A model to estimate the accident probabilistic dispersion factor in which the effect of internal boundary layer is considered and a set of deterministic and probabilistic models to estimate the accident washout factor are set up based on the models of accident dispersion factor given by current guides. The accident probabilistic dispersion factor, the deterministic washout factor for different time interval after accident release, the accident probabilistic washout factor and the dose corresponding to various pathway are estimated based on the measured meteorological data on the site of a coastal nuclear power plant to be built in the east part of China. The result shows that: the value of accident probabilistic dispersion factor given by the proposed model are 5.9 times of those given by the common model; for the dose obtained during 0 to 8 h after accident release, the external exposure dose from washout deposition given by deterministic model is about 5.50 times of those from dry deposition; the ratio between external exposure dose from washout and dry deposition given by conservative probabilistic model with and without considering the effect from internal boundary layer is 9.56 and 56.7 respectively; for the realistic probabilistic model the value of above ratio is 1.93 and 11.4.

引 言

我们于 1995 年 4 月到 1996 年 4 月在我国东部沿海某待建核电厂址进行了为期一年的大气弥散野外试验,为编写选址环评报告提供有关基础数据。主要实验内容包括百米气象铁塔整年风、温逐时观测;地面风场、海陆风与内边界层的观测与分析;湍流与扩散参数测量;风洞模拟实验等,实验结果表明,该核电厂址出现海陆风与内边界层的频率较高。在进行分析与计算中发现,目前国内外计算核电厂事故扩散因子的有关导则^[1-3]中均未考虑内边界层的影响。在类似本核电厂址那样的内边界层出现频率不能忽略的滨海核电厂址,在计算事故概率扩散因子中,如何考虑内边界层的影响,考虑内边界层影响的模式与目前国内外常用模式给出的事故概率扩散因子及最终的事故剂量有多大区别,本文作了有益的探索。

在我国的核电发展史上,绝大多数核电厂选址阶段与设计阶段环境影响报告书中在“电厂事故的环境影响”一章中都避而不讨论在发生设计基准事故期间(30 d)假定发生下雨事件的剂量贡献,而都只考虑地表干沉积造成的外照射剂量。这显然是偏不保守的,也不符合我国沿海厂址的实际情况。造成这种情况的主要原因是:我国目前事故评价计算中所依据的主要导则是 USNRC 1.4^[1]及 1.145^[2],前者给出计算事故扩散因子的确定论模式,后者给出计算事故扩散因子的概率论模式,但在这些导则中都未给出如何考虑事故冲洗因子的计算方法和相应模式。在我国前阶段编写的核设施环评报告中得到广泛应用的“中国核工业三十年辐射环境质量评价”^[3]及 IAEA 的有关导则^[4]中也未明确给出事故冲洗因子的计算方法与模式。

德国在它的核电厂事故环境影响导则^[5]中给出了设计基准事故冲洗因子的确定论公式。但其一,这一套计算公式是与其独特的计算扩散因子的一套公式相对应的,很难与目前在我国广泛应用的 USNRC 1.4 及 1.145 的扩散因子计算公式相对应,因此很难应用于目前我国的核电厂选址实践,除非全套搬用德国导则;其二未给出计算事故冲洗因子的概率论方法与公式,而在核电厂设计阶段环评报告中,更重视事故概率冲洗因子及其相对应的剂量贡献。

基于上述历史情况,作者在国家八五攻关项目“600 MWe 核电站事故工况下气态排出物环境弥散模式、参数与程序”^[6]中,基于 USNRC 1.4 给出的一套计算设计基准事故各时段事故扩散因子计算模式与冲洗系数模式,尝试给出了一套相应的计算事故冲洗因子的确定论计算模式。在 1994 年至 1996 年我们在进行东南沿海某核电厂选址大气弥散试验研究中,根据当地的降水实测资料对上述确定论模式作了修正与改进,并尝试提出了计算事故冲洗因子的概率论公式以与 USNRC 1.145 导则的事故概率扩散因子的计算公式相对应,并根据该待建滨海核电厂址降水与其他气象参数的实测资料计算了事故期间降水造成的地表外照射的剂量贡献。本文就以上几项作一简单介绍,以供今后编制核电厂事故环境影响时参考。

1 滨海核电厂址事故大气扩散因子与冲洗因子计算模式

1.1 考虑内边界层影响的滨海核电厂址事故概率扩散因子估算模式

1.1.1 估算模式

假定事故时,安全壳完好,污染物从烟囱释放,考虑到烟囱高度 (62.3 m) 低于反应堆安全壳 (56.4 m) 高度的 2.0 倍,其事故扩散因子可由下述一组公式决定:

$$\left[\frac{\chi}{Q} \right] = \frac{1}{\bar{u}_{10} (\pi \sigma_y \sigma_z + A/2)} \quad (1)$$

$$\left[\frac{\chi}{Q} \right] = \frac{1}{\bar{u}_{10} (3\pi \sigma_y \sigma_z)} \quad (2)$$

$$\left[\frac{\chi}{Q} \right] = \frac{1}{\bar{u}_{10} (\pi \Sigma_y \sigma_z)} \quad (3)$$

式中: $\bar{u}_{10}$ 表示 10 m 高度测得的平均风速, A 为与风速垂直的反应堆面积,本待建核电厂的 A 值为 2400 m². Σ_y 由下式给出:

$$\Sigma_y = (\sigma_y^2 + \sigma_0^2)^{1/2} \quad (4)$$

式中, σ_0 表示建筑物扰动引起的初始扩散参数。

(1) 对于 D, E, F 类天气, 且 $\bar{u}_{10}$ 小于 6 m/s 时, (χ/Q) 由 (1) 式与 (2) 式两者中的大者与 (3) 式相比, 取此中小者, 则由下式给出:

$$(\chi/Q) = \min \left\{ \frac{1}{\bar{u}_{10} \pi \Sigma_y \sigma_z}, \max \left[\frac{1}{\bar{u}_{10} (\pi \sigma_y \sigma_z + A/2)}, \frac{1}{\bar{u}_{10} (3\pi \sigma_y \sigma_z)} \right] \right\} \quad (5)$$

(2) 当 $\bar{u}_{10} \geq 6$ m/s 时, 或天气类型为 A, B, C 且风向为离岸流时, (χ/Q) 由 (1) 式与 (2) 式两者中的大者给出, 其表达式为:

$$(\chi/Q) = \max \left\{ \frac{1}{\bar{u}_{10} (\pi \sigma_y \sigma_z + A/2)}, \frac{1}{\bar{u}_{10} (3\pi \sigma_y \sigma_z)} \right\} \quad (6)$$

(3) 对于 A, B, C 类天气, 且风向为向岸流时, 应考虑内热边界层造成的薰烟型污染, (χ/Q) 应由 (1) 和 (2) 式中的大者与薰烟浓度比较中的大者给出, 其表达式为:

$$(\chi/Q) = \max \left\{ \frac{1}{\bar{u}_{10}(\pi \sigma_y \sigma_z + A/2)}, \frac{1}{\bar{u}_{10}(3\pi \sigma_y \sigma_z)}, \frac{2.032\sqrt{2\pi}}{\bar{u}_{10} x H_{fj}(x)} \right\} \quad (7)$$

式中, $H_{fj}(x)$ 为内边界层高度。

1. 1. 2 各扇形方位不同距离处 99.5% 累积概率水平短时(小时)事故扩散因子 $(\chi/Q)_{ifh}$ 的计算

利用气象铁塔实测的一年逐时气象学数据(风向、风速、大气稳定度), 按上述公式计算一年中每个小时在其下风向 12 个下风距离处 (0.5, 1.5, 2.5, 4.0, 7.5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75 km) 的短期事故扩散因子。在计算每个小时的短期事故扩散因子中首先应根据该小时的风速与稳定度判断是采用 (5) 式还是 (6) 式, 若是 A, B, C 类, 则还应根据风向判断是采用 (6) 式还是 (7) 式。这样每个方位每个距离上可获得 $f_i \times 8760$ 个事故扩散因子值(此中, f_i 系指 10 m 高处 i 方位的年风频), 然后对每个方位每个距离上的所有扩散因子, 按大小顺序排队, 取出其 99.5% 概率(由小到大的次序算)的值, 此值则为该方位该下风向距离处的 99.5% 累积概率水平短时(小时)事故扩散因子值, 依次类推, 可得到 16 个方位不同下风距离处的 99.5% 累积概率水平短时(小时)事故扩散因子 $(\chi/Q)_{ifh}$ (共 $16 \times 12 = 192$), 此中 i 表示方位 ($i = 1, 2, \dots, 16$)、 f 表示下风向子区数 ($f = 1, 2, \dots, 12$)、 h 表示小时事故扩散因子。因此 $(\chi/Q)_{ifh}$ 表示 i 方位 f 下风向子区 99.5% 累积概率水平小时事故扩散因子。这意味着, 对于每个方位每个下风距离而言, 一年中短期事故扩散因子超过此值的可能性为 0.5%, 每个方位中 12 个 $(\chi/Q)_{ifh}$ 中的最大值则取出作为该方位的代表值

$$(\chi/Q)_{ifh^0}$$

1. 1. 3 事故释放不同持续时间各方位不同距离处的 99.5% 累积概率水平事故概率扩散因子 $(\chi/Q)_{if, \Delta T_i}$

对于释放持续时间长于 1 h 的事故 (对于设计基准事故更应考虑不同的释放时间段 0~8 h, 8~24 h, 1~4 d, 4~30 d), 因为不同时间段释放源强不同, 因而应求出不同释放时间长度的事故概率扩散因子。设事故释放时间为 ΔT_i ($\Delta T_i > 1$ h), 各方位不同距离处的 99.5% 累积概率水平事故扩散因子 $(\chi/Q)_{if, \Delta T_i}$ 可由该处的小时事故概率扩散因子

$(\chi/Q)_{ifh}$ 与此处的年均扩散因子 $(\chi/Q)_{if}$ 对数线性内插求取, 计算公式如下:

$$(\chi/Q)_{if, \Delta T_i} = \exp \left\{ \left[\ln \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{if, h} - \ln \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{if, f} \right] \frac{(8760 - \Delta T_i)}{8760} + \ln \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{if, f} \right\} \quad (8)$$

式中, $(\chi/Q)_{if}$ 表示 i 方位下风向 f 子区的年均扩散因子。

1.1.4 整个厂址 95% 累积概率水平事故扩散因子的计算

国家导则“核电厂环境辐射防护规定”^[7]中第 25 条规定“在发生最大可信事故条件下, 非居住区边界上的任何个人(成人), 在事故发生后 8 h 内所接受的有效剂量当量应不大于 0.25 Sv……”, 第 23 条规定“……非居住区的半径(以反应堆为中心)不得小于 0.5 km。”因而我们主要关心非居住区边界 0.5 km 处的事故扩散因子及其剂量。

(1) 整个厂址非居住区边界 95% 累积概率水平小时事故扩散因子 $(\chi/Q)_{T,1,h}$

根据一年中每小时的风向、风速、及大气稳定度资料, 计算非居住区边界 0.5 km 处的小时扩散因子, 然后对 8760 个数据按大小顺序排列, 从中选出累积出现频率(由小到大)为 95% 的值, 作为整个非居住区边界的小时事故扩散因子代表值。

(2) 释放持续时间为 ΔT_i 时, 整个厂址非居住区边界 95% 累积概率水平事故扩散因子 $(\chi/Q)_{T,i,\Delta T_i}$ 。

与前面同理, 可以由整个厂址非居住边界区边界 95% 累积概率水平小时事故扩散因子 $(\chi/Q)_{T,1,h}$ 与 16 个方位非居住区边界 (0.5 km) 处的年均扩散因子中的最大值进行对数内插求得, 其计算公式如下:

$$(\chi/Q)_{T,i,\Delta T_i} = \exp \left\{ \left[\ln \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{T,1,h} - \ln \left(\left(\frac{\chi}{Q} \right)_{il} \right)_{\max} \right] \frac{(8760 - \Delta T_i)}{8760} + \ln \left(\left(\frac{\chi}{Q} \right)_{il} \right)_{\max} \right\} \quad (9)$$

式中 $\left(\left(\frac{\chi}{Q} \right)_{il} \right)_{\max}$ 表示 (0.5 km) 处第一子区 ($f=1$) 16 个方位中的最大年均扩散因子,

即:

$$\left(\left(\frac{\chi}{Q} \right)_{il} \right)_{\max} = \max \left\{ \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{1,1}, \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{2,1}, \dots, \left(\frac{\chi}{Q} \right)_{16,1} \right\} \quad (10)$$

1.1.5 整个厂址最终评价用事故扩散因子的计算

在环境评价中, 作为整个厂址用于下一步剂量估算的最终事故扩散因子, 由 16 个方位 99.5% 累积概率水平事故扩散因子中的最大值与整个厂址 95% 累积概率水平事故扩散因子相比较, 取其大者为之。

因此, 用于评价个人最大有效剂量也即非居住区边界的最终小时事故扩散因子 $(\chi/Q)_h$ 和相应于 ΔT_i 释放持续时间的事事故扩散因子 $(\chi/Q)_{\Delta T_i}$ 分别由下述两式表示。

$$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_h = \max\left\{\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{T,l,h}, \max\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{i,l,h}\right\} \quad (11)$$

式中, $\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{i,l,h}$ 表示 i 方位第一子区 (0.5 km) 99.5% 累积概率水平小时事故扩散因子,

($i=1, 2, \dots, 16$)。

$$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{\Delta T_l} = \max\left\{\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{T,l,\Delta T_l}, \max\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{i,l,\Delta T_l}\right\} \quad (12)$$

1.2 估算事故冲洗因子的确定论模式

目前描述核素沉积的方法有两类: 冲洗系数 (Λ) 方法与冲洗比 (ω) 方法。

冲洗系数 (Λ) 方法假定, 高斯分布的放射性烟羽中的核素因冲洗而沉积于地面的速率 W ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 与烟羽中核素浓度 x 的垂直积分成正比, 其比例常数即为冲洗系数 (Λ)。

$$W = \int_0^{\infty} \Lambda \chi dz = \frac{\Lambda Q}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (13)$$

冲洗比方法认为冲洗沉积速率 W 正比于降水强度 I 及雨水中的核素浓度 c , 即 $W = Ic$ 。冲洗比 ω 则定义为雨水中的核素浓度 c 与空气中的平均浓度 $\bar{\chi}$ 之比, 即

$\omega = \frac{c}{\bar{\chi}}$ 。因此

$$W = \omega I \bar{\chi} \quad (14)$$

冲洗因子 W_b (m^{-2}) 定义为单位源强下的冲洗沉积速率。我们基于冲洗系数方法 (13) 式与 USNRC 1.4 给出的扩散因子确定论公式, 提出一组计算不同时段的事事故冲洗因子计算公式,

$$0 \sim 8 \text{ h} \quad W_{b1} = \frac{\sqrt{2} \Lambda_3}{\sqrt{\pi u} \Sigma_{rf}} \exp\left(-\frac{\Lambda_3 x}{u}\right) \quad u=1 \text{ m/s} \quad (15)$$

$$8 \sim 24 \text{ h} \quad W_{b2} = \frac{2.032 \sqrt{2\pi} \Lambda_3}{xu} \exp\left(-\frac{\Lambda_3 x}{u}\right) \quad u=1 \text{ m/s} \quad (16)$$

$$1 \sim 4 \text{ d} \quad W_{b3} = \sum_{l=1}^3 F_{wl} f_l \frac{2.032 \sqrt{2\pi} \Lambda_l}{x} \left[\frac{0.4}{u_D} \exp\left(-\frac{\Lambda_l x}{u_D}\right) + \frac{0.6}{u_F} \exp\left(-\frac{\Lambda_l x}{u_F}\right) \right] \quad (17)$$

$$4\sim 30\text{ d} \quad W_{b4} = \sum_{l=1}^3 F_{w2} f_l \frac{2.032\sqrt{2\pi}A_l}{9x} \left[\frac{1}{u_C} \exp\left(-\frac{A_l x}{u_C}\right) + \frac{1}{u_D} \exp\left(-\frac{A_l x}{u_D}\right) + \frac{1}{u_F} \exp\left(-\frac{A_l x}{u_F}\right) \right] \quad (18)$$

式中, A_l 是指相应于 l 组降水强度冲洗系数值(见表 1), A_1 , A_2 和 A_3 的值即表 1 中相应于 $l=1$, $l=2$, $l=3$ 三组降水强度即降水强度小于 1、1 至 3 和大于 3 mm/h 的 A 值; f_l 称为“降水强度分配比”表示降水强度为第 l 组的发生频率, 即计算时间段中降水强度为 l 类的小时数占降水总小时数的比例。 F_w 称为降水频率, 表示某计算时间段中降水小时数占小时总数的份额; F_{w1} 和 F_{w2} 则分别表示在 1~4 d 中和 4~31 d 中发生降水的时间百分频率, 作为偏保守的估算, 在上述模式中, 我们假定事故期间在 0~8 h 或 8~24 h 期间都发生全过程的降水事件即假定 $F_w = 1$, 强度假定都大于 3 mm/h, 因而都取 A_3 值。

表 1 碘和其它粒子态核素的冲洗系数 A / s^{-1}

降水强度 / mm·h ⁻¹	冲洗系数/ s^{-1}	
	碘	其它粒子态核素
<1 ($l=1$)	3.7×10^{-5}	2.9×10^{-5}
1~3 ($l=2$)	1.1×10^{-4}	1.22×10^{-4}
>3 ($l=3$)	2.37×10^{-4}	3.4×10^{-4}

1.3 估算事故冲洗因子的概率论模式

1.3.1 各风向 95%累积概率水平小时事故冲洗因子的计算模式

USNRC 1.145 导则中关于事故概率扩散因子的计算方法是: 先计算各方位 99.5%累积概率水平事故扩散因子, 超过此值的概率为 0.5%。再计算整个厂址 95%累积概率水平事故扩散因子, 然后取前者 (共 16 个) 中的最大值与后者相比中的大者作为该下风距离 (主要考虑核电厂非居住区边界 0.5 km 及限制区边界 5 km 两个距离) 处用于计算事故剂量的最终事故扩散因子。考虑到我国东部沿海降雨时数一般占一年小时数的 10%左右, 降水时数与 8760 h 相比, 相差约一个数量级 (本文讨论的某待建滨海厂址降雨时数为 668 h), 若模拟事故扩散因子那样估算各方位 99.5%的概率冲洗因子, 数据总量太少, 统计误差太大, 故取 95%累积概率水平为宜 (超过此值的概率为 5%, 与事故扩散因子的 0.5%相比, 也恰好差一个数量级)。

其计算模式采用下述轴线最大冲洗因子公式

$$W_b = \frac{\sqrt{2}A}{\sqrt{\pi u} \Sigma_{yF}} \exp\left(-\frac{Ax}{u}\right) \quad (19)$$

式中, u 为排放高度处的风速。根据全年每一个降水小时的实测风速和降水强度 (决定 A 的取值), 估算了每个风向每个子区的 95%累积概率水平小时事故冲洗因子 (篇幅所限, 计算结果表略)。

1.3.2 各风向各时段 95%累积概率水平事故冲洗因子的估算

与估算事故释放不同时间段的扩散因子类同, 采用对数内插方法由小时事故冲洗因子和年均冲洗因子的数值进行对数内插, 估算出不同时间段相应的事故冲洗因子值。

某方位年均冲洗因子 $W_i(\text{m}^{-2})$ 由下式给出:

$$W_i = \frac{N}{2\pi x} \sum_{jkl} f_{ijkl} \frac{\Lambda_l}{u_{jk}} \quad (20)$$

式中, N 为方位数 ($N = 16$), f_{ijkl} 为出现 i 风向、 j 稳定度、 k 风速组、 l 降水强度组的四维联合频率。我们由百米铁塔与地面气象站的雨量计一年实测数据获得了 f_{ijkl} (因篇幅所限, 本文略)。

1.3.3 最终评价用的事故冲洗因子的估算

(1) 保守的估算方法

考虑到事故剂量计算中主要关心非居住区边界居民所受的最大剂量, 故非居住区边界 (0.5 km) 各时段 16 个方位中的 95% 累积概率水平事故冲洗因子中的最大值被选出作为评价用的事故冲洗因子计算地面冲洗沉积外照射剂量, 其计算公式如下:

$$W_{b,\Delta T_i} = \exp \left\{ \left[\ln(W_{b,i})_{\max} - \ln(W_i)_{\max} \right] \frac{8760 - \Delta T_i}{8760} + \ln(W_i)_{\max} \right\} \quad (21)$$

式中, $W_{b,\Delta T_i}$ 为 ΔT_i 时段最终评价用事故概率冲洗因子; $W_{b,i}$ 为 i 风向 95% 累积概率水平小时事故冲洗因子。

(2) 现实估算方法

考虑到 95% 累积概率水平事故冲洗因子最大值的出现方位 (本待建滨海核电厂址出现在 S 方位) 与 99.5% 累积概率水平事故扩散因子最大值的出现方位 (本待建核电厂址出现在 NE 方位) 往往不在同一方位, 在计算厂址边界最大个人剂量时, 无论是浸没剂量、吸入剂量与干沉积剂量都与最大事故扩散因子同一个方位, 那么冲洗沉积剂量也应计算该方位的值, 而不应该计算出现最大冲洗因子方位的冲洗沉积剂量。因此, 事故冲洗因子的现实估算值是指概率事故扩散因子最大值出现方位非居住处边界的 95% 累积概率水平事故冲洗因子。

2 有关参数的实验测定

2.1 向岸流和离岸流的出现频率

我们在待建厂址的百米气象铁塔的四个高度 (10 m, 30 m, 70 m, 100 m) 悬臂上安装了风、温传感器, 进行了为期一年 (1995 年 4 月 16 日至 1996 年 4 月 15 日) 逐时观测, 其观测数据的有效率分别高达 99.92% (温度数据) 和 99.86% (风数据)。根据厂址地形特征, 我们把 N, NE, NNE, WSW, W, WNW, NW 和 NNW 定为离岸流, 把 ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW 和 SW 风定为向岸流。表 2 给出 70 m 和 10 m 高度测得的向岸流与离岸流的月、季和年出现频率。

表 2 待建核电厂址向岸流、离岸流的月、季、年出现频率/%

高度 m	岸 风	月 份											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
70	向岸风	32.78	49.32	66.30	73.45	55.22	31.48	12.79	12.00	5.24	17.90	15.68	22.00
	离岸风	67.22	50.68	33.70	26.55	44.78	68.52	87.21	88.00	94.76	82.10	84.32	78.00
10	向岸风	32.82	45.32	64.29	76.65	56.93	32.29	8.38	7.94	4.44	17.30	14.57	21.54
	离岸风	67.18	54.68	35.71	23.35	43.07	67.71	91.62	92.06	95.56	82.70	85.43	78.46
高度 m		春季			夏季		秋季		冬季		全年		
70	向岸风	34.71			65.04		18.82		12.88		32.96		
	离岸风	65.29			34.96		81.18		87.12		67.04		
10	向岸风	33.23			65.99		16.04		12.04		31.80		
	离岸风	66.77			34.01		83.96		87.96		68.20		

2.2 内边界层出现频率及其高度

待建厂址所在地区的海陆热差、山地和平地的热差使得中尺度风场的扰动和日夜演变成通常的现象。这些海陆风和上下坡风及山谷风都可使污染物出现往复搬运, 这里我们把它们都视为有污染气象学意义的“海陆风事件日”。表 3 给出 1995 年 4, 7, 10 月和 1996 年 1 月的“海陆风事件日”(包括山谷风效应) 出现频率。除铁塔测量外, 我们于 1995 年 7 月 5 日至 8 月 15 日在离海岸不同距离的三个地点同步进行大气边界层低空探测。冬季只在其中一处进行为期 15 d 的观测。每天观测 8 次。此外还利用 NOVA-12 和 NOVA-14 极轨卫星遥感信息反演海面 and 陆面区域性表面温度。

表 3 海陆风日出现频率 F_m

月 份	频 率/%	备 注
1995, 1996 年 4 月	30	可作为春季平均值
1995 年 7 月	35.5	可作为夏季平均值
1995 年 10 月	6.5	可作为秋季平均值
1996 年 1 月	49.0	可作为冬季平均值

根据上述观测数据分析, 获得本地区内热边界层 (TIBL) 的高度实用公式如下:

$$H_f^2 = 25x[1 - \exp(-x^{1/2}/50)] \quad (22)$$

2.3 扩散参数的实验测定

本项目主要根据湍流测量数据应用 Draxler 方法估算扩散参数。本项目的塔层湍流特征测量分冬、夏两季进行。夏季 (1995 年 7 月 4 日至 19 日) 在气象塔顶平台和 27 m 高度处横臂上各安装一台三轴风速仪和超声风温仪, 获 356 组数据, 冬季 (1996 年 1 月 3 日至 11 日), 只在 27 m 处安装超声风温仪, 获 183 组数据。

由实验结果获得了分别相应于向岸流与离岸流的扩散参数推荐值, 但对于事故释放而言, 因视为地面源, 因而无论是向岸流还是离岸流公式中的 σ_y, σ_z 都取离岸流扩散参数, 表 4 给出待建厂址离岸流推荐扩散参数。

2.4 σ_0 的实验测定

表 5 给出根据 24 组风洞模拟数据获得的扩散参数与现场获得的扩散参数以及 P-G 曲线相比较所得到的 σ_{y0} 和 σ_{z0} 的数据, 为简化计算, 又考虑取值合理的偏保守, 本文取 $\sigma_{y0} = \sigma_{z0} = 20 \text{ m}$

表 4 离岸流扩散参数 $\sigma_{z\text{离}} = P_{z\text{离}} \cdot \chi^{q_{z\text{离}}}$, $\sigma_{y\text{离}} = P_{y\text{离}} \cdot \chi^{q_{y\text{离}}}$

稳定度	$P_{z\text{离}}$	$q_{y\text{离}}$	$P_{y\text{离}}$	$q_{z\text{离}}$
B(A)	0.351	0.87	0.260	0.85
C	0.305	0.86	0.240	0.81
D	0.271	0.85	0.220	0.78
E	0.239	0.83	0.320	0.65
F	0.215	0.79	0.420	0.54

表 5 σ_{y0} 和 σ_{z0} 的平均值和标准差

	σ_{y0}		σ_{z0}	
	与 P-G 曲线比较	与现场实验比较	与 P-G 曲线比较	与现场实验比较
平均值	16.53	14.99	13.34	12.80
标准差	3.83	5.62	4.59	4.88

2.5 关于降水频率 F_w 与降水强度分配比 f_i

降水频率 F_w 与降水强度分配比 f_i 是与厂址密切相关的参数, 应根据核电厂址实测资料选取。表 6 给出待建滨海核电厂厂址 1995 年 5 月至 1996 年 4 月各月的降雨持续时间统计值, 由表可见, 最长的降雨持续时间可长达 30 h, 因而作为略偏保守的估算, 取 $F_{w1} = 0.5$ 。对于 4~31 d 期间的事事故冲洗因子, 由表 6 可见, 降雨最多的月份发生在 3 月份, 其降雨总时数为 105 h, 占全月总时数的 14.6%, 作为略偏保守的假定, 取 $F_{w2} = 0.2$ 。表 7 则给出 1995 年 4 月 16 日至 1996 年 4 月 15 日一年间不同月份小雨 ($\leq 2.5 \text{ mm/h}$)、中雨 ($2.5 \sim 8.0 \text{ mm/h}$)、大雨 ($8.0 \sim 15.9 \text{ mm/h}$) 及暴雨 ($\geq 15.9 \text{ mm/h}$) 降水持续时间的统计。对应于表 2, 基本上可把中雨、大雨及暴雨归类为 $l=3$ 。由表 6 又可见, 降水的总小时数中, 中、大、暴雨的小时数为 95 h, 约占总降水时间 668 h 的约 15%, 据此, 我们略偏保守地假定 $f_3 = 0.2$; 其余 80% 的为小雨。对此, 我们再偏保守地假定都大于 1.0 mm/h , 因此计算中取 $f_1 = 0$, $f_2 = 0.8$ 。

3 计算结果及其与常用模式的比较

3.1 事故概率因子计算结果

表 8 给出采用本模式算得的某待建核电厂厂址非居住区边界 (500 m) 16 个风向 99.5% 累积概率水平事故扩散因子中的最大值与整个厂址 95% 累积水平事故扩散因子的比较, 比较结果表明, 前者大于后者, 故被选为最终评价用事故扩散因子。

表 6 待建滨海核电厂址各月降水次数及持续时间

持续 小时数	1995 年 各 月								1996 年 各 月				年累积
	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	
1	9	4	15	10	2	3	1	5	1	6	13	16	85
2	2	10	18	4	1	1	1	1	3	2	1	5	49
3	4	3	2	2	2	0	0	1	0	3	1	0	18
4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	1	0	6
5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4
6	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	2	1	8
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
8	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	2	6
9	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	3
10	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	4
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2
12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
14	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
最长持续时数	30	21	14	12	10	2	2	3	6	14	26	13	30
降水总时数	89	81	98	87	20	5	3	10	13	76	105	81	668

3.2 事故冲洗因子计算结果

3.2.1 确定论模式计算结果

根据上述有关参数实测值,应用确定论模式计算了事故各时段碘与其它粒子态核素
的事故冲洗因子,作为示例,表 9 给出某待建核电厂址碘的事故冲洗因子。

表 7 某待建滨海核电厂址各月不同降水强度持续时间(1995.4.16~1996.4.15)

持 续 小 时 数	小 雨											
	月						份					
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1	9	10	19	13	4	3	1	7	1	8	15	18
2	6	10	14	4	1	1	1	0	4	3	3	6
3	4	3	3	3	1	0	0	0	1	4	2	1
4	0	0	3	3	0	0	0	0	0	1	2	3
5	0	1	0	3	0	0	0	0	0	1	3	0
6	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3	1
7	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1
9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
最长持续时数	15	7	6	9	10	2	2	1	3	10	8	11

续表 7

中 雨

持 续 小 时 数	月 份											
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1	4	8	11	5	1	0	0	3	1	3	4	5
2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	2	2	1
3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1
最长持续时数	1	3	2	3	1	0	0	1	1	2	3	3

大 雨

持 续 小 时 数	月 份											
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1	1	5	2	3	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
最长持续时数	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	1	0

暴 雨

持 续 小 时 数	月 份											
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
最长持续时数	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

表 8 某待建核电厂非居住区边界(500 m)整个厂址 95%累积概率水平事故
扩散因子及最终评价用事故扩散因子(考虑内边界层影响)

时间段	整个厂址 95%累积概 率水平事故 扩散因子	16 个风向 99.5%累积 概率水平事故扩散因 子中的最大值	16 个风向 99.5%累积 概率水平事故扩散因 子中的最大值所在风 向	最终评价用事故 扩散因子
	$s \cdot m^{-3}$	$s \cdot m^{-3}$		$s \cdot m^{-3}$
小时事故扩散因子	3.76E-4	3.94E-3	SW	3.94E-3
0~8 h	3.74E-4	3.91E-3	SW	3.91E-3
8~24 h	3.73E-4	3.89E-3	SW	3.89E-3
1~4 d	3.63E-4	3.70E-3	SW	3.70E-3
4~30 d	2.66E-4	2.14E-3	SW	2.14E-3

表 9 待建滨海核电厂的事故冲洗因子/ m^{-2}

释放时间	距 离/m					
	500	1500	2500	4000	7500	15000
0~8 h	4.75E-06	1.83E-06	9.88E-07	4.82E-07	1.29E-07	1.26E-08
8~24 h	2.14E-06	5.64E-07	2.67E-07	1.17E-07	2.72E-08	2.30E-09
1~4 d	1.47E-07	4.48E-08	2.46E-08	1.36E-08	5.41E-09	1.51E-09
4~30 d	1.16E-08	3.62E-09	2.04E-09	1.17E-09	5.08E-10	1.68E-10

续表 9

释放时间	距 离/m					
	25000	35000	45000	55000	65000	75000
0-8h	7.88E-10	5.65E-11	4.33E-12	3.45E-13	2.83E-14	2.36E-15
8-24h	1.29E-10	8.61E-12	6.26E-13	4.79E-14	3.79E-15	3.07E-16
1-4d	4.54E-10	1.75E-10	7.74E-11	3.77E-11	1.96E-11	1.06E-11
4-30d	6.07E-11	2.70E-11	1.34E-11	7.13E-12	3.97E-12	2.29E-12

3.2.2 概率论模式计算结果

表 10 和表 11 分别给出按偏保守估算方法即(21)式及现实估算方法算得的某待建核电厂址非居住区边界(500 m)最终评价用的 95%累积概率水平事故冲洗因子, 由两表比较可见, 对于某待建核电厂偏保守估算值约为现实估算值的 6.3 倍。

表 10 非居住区边界 (0.5 km) 最终评价用的 95%累积概率水平事故
冲洗因子 $W_{b,\Delta T_i}$ (偏保守估算值)

时 间 段	$W_{b,\Delta T_i} / \text{m}^{-2}$	出现风向
0~8 h	7.57E-05	N
8~24 h	7.43E-05	N
1~4 d	6.92E-05	N
4~30 d	3.18E-05	N

表 11 非居住区边界 (0.5 km) 最终评价用的 95%累积概率水平事故
冲洗因子 $W_{b,\Delta T_i}$ (现实估算值)

时 间 段	$W_{b,\Delta T_i} / \text{m}^{-2}$	出现风向
0~8 h	1.20E-05	SW
8~24 h	1.18E-05	SW
1~4 d	1.11E-05	SW
4~30 d	5.70E-06	SW

3.3 本模式与常用模式给出的事故概率扩散因子的比较

3.3.1 事故扩散因子常用概率模式

对于 D, E, F 类天气, 且 $\bar{u}_{10}$ 小于 6 m/s 时, 采用(5)式; $\bar{u}_{10}$ 大于 6 m/s 时, 或天气类型为 A, B, C 时, 采用 (6) 式。

3.3.2 不同模式计算结果的比较

表 12 给出按常用模式算得的非居住区边界 (0.5 km) 处 16 个风向 99.5%累积概率水平事故扩散因子中的最大值、整个厂址 95%累积概率水平事故扩散因子及最终用评价的事故扩散因子。

由表 8 与表 12 相比可见, 对于非居住区边界 (0.5 km) 整个厂址 95%累积概率水平事故扩散因子而言, 考虑内边界层影响的值约为不考虑内边界层影响时的 1.8 倍。而对于最终评价用的事故扩散因子 (这里也是 16 个风向 99.5%累积概率水平事故扩散因子的最