

# 高低层风向差异对核电厂长期大气弥散因子计算的影响

王一川, 盛青, 熊小伟, 魏新渝, 魏国良, 商照荣

环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

**摘要** 为比较风场上下不一致时计算大气弥散因子的差异, 使用 CAirDos 模式计算福建某沿海核电厂的长期大气弥散因子, 并与 CEIRA 模式的计算结果进行对比, 结果显示两种模式计算出的最大长期弥散因子出现的方位相同, 均对应于低层最多风向(东北东, 23.2%)的下风向, 而次大值出现的方位不同。其中, CAirDos 计算的长期大气弥散因子的次大值出现在低层(10 m)次多风向(北东, 10.4%)的下风向; 而 CEIRA 模式计算的长期大气弥散因子的次大值出现在高层(80 m)主导风向(北, 16.5%)的下风向。CAirDos 使用的是单层风速数据, 高层风速经风廓线修正得到, 风向保持不变, 保证了高、低层风向的一致, 而 CEIRA 需要使用高层及低层两层的风速数据, 当高层及低层风向不一致时, 将影响长期大气弥散因子的计算结果。

**关键词** 核电厂; 长期大气弥散因子; 风场

核电厂正常运行时, 流出物排入环境有气态和液态两种途径。气载流出物经核电厂烟囱排入大气环境, 液态流出物通过核电厂排水口进入水体环境。在对核电厂气态途径造成的公众个人有效剂量的计算中, 长期大气弥散因子是对计算结果影响较大的一个关键参数。方栋等<sup>[1]</sup>比较了不同气象参数获取方法、大气稳定度联合频率变化、大气弥散模式调整、剂量转换因子选用等因素对长期大气弥散因子计算的影响, 姚仁太等<sup>[2]</sup>也通过对涉及排放条件、气象条件、下垫面条件及污染物性质等有关参数和修正方法的分析, 得到了年均大气弥散因子的影响范围和程度。

尽管欧拉和拉格朗日模型有诸如高的空间分辨率、全三维的气象描述等优势, 但高斯烟羽模式有一定的保守性且其运算速度更快, 仍被广泛使用<sup>[3-5]</sup>。目前, 核电厂长期大气弥散因子的计算主要依据国家核安全导则(HAD101/02)推荐的高斯直线烟羽模型, 具体的应用主要有两种方法, 一种为 CAirDos 模式<sup>[4,6]</sup>, 使用低层气象数据, 按照风廓线幂指数规律推导出排放口高度处的风速; 另一种为 CEIRA 模式<sup>[7-9]</sup>, 使用高层和低层两层气象数据进行计算。

本文采用两种基于高斯烟羽模式的软件计算同一核电厂的长期大气弥散因子, 说明风场的一致性对核电厂长期大气弥散因子计算的影响。通过 CAirDos 模式计算某沿海核电厂的长期大气弥散因子, 并与 CEIRA 模式的计算结果进行

对比分析, 以探讨高低层风场差异对核电厂长期大气弥散因子计算的影响。

## 1 材料与方法

CAirDos 是由陈晓秋<sup>[6]</sup>等基于 AIRDOS-EPA<sup>[10]</sup>程序而自主研发的, 用于计算核设施气载流出物释放所致公众辐射影响的可视化界面程序, 其开发遵循美国核管理委员会(NRC)发布的管理导则 RG1.111<sup>[11]</sup>。

该程序在大气弥散计算中考虑了静风、混合层高度、建筑物尾流的影响并作了修正, 并对放射性衰变及干、湿沉积引起的烟羽耗减作了校正, 被广泛应用于核设施正常运行工况下的大气弥散因子、公众个人有效剂量及关键居民组个人剂量的计算<sup>[4]</sup>。程序设计的计算点按扇形方位布置, 以 16 个方位和以核电厂烟囱为中心、不同距离为半径的同心圆将评价区划分为 192 个子区。通过输入排放源高和邻近建筑物高度, 计算排放方式(有高架排放、地面排放和混合型排放 3 种排放方式), 计算中考虑了烟羽的抬升和下洗修正。对于扩散参数可以选择缺省值, 程序也提供了两种格式的自定义值。气载流出物排放允许有 3 个排放点, 程序可分别设置排放点的横纵坐标, 通过坐标转换确定计算点下风向的距离。

CEIRA 程序由苏州热工研究院有限公司研制开发, 可用于计算厂址半径 80 km 范围内各评价子区的长期大气弥散

收稿日期: 2016-04-16; 修回日期: 2016-06-15

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201509074)

作者简介: 王一川, 硕士研究生, 研究方向为辐射防护与环境影响评价, 电子信箱: lv1018@163.com; 魏国良(通信作者), 高级工程师, 研究方向为环境影响评价, 电子信箱: weiguoliang78@163.com

引用格式: 王一川, 盛青, 熊小伟, 等. 高低层风向差异对核电厂长期大气弥散因子计算的影响[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 89-93; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.012

因子和地面沉积因子,以及厂址周围各种陆上环境介质的放射性核素浓度。程序计算中的大气弥散因子采用国家核安全导则(HAD101/102)推荐的高斯直线烟羽模型,可根据烟流出口速度与烟囱高度处的风速比值分配地面及高架排放的时间,考虑大气弥散过程中建筑物尾流、混合层高度的影响并作修正,对放射性衰变及干、湿沉积引起的烟羽耗减加以校正。

本文选取的两种模式均基于高斯直线烟羽模型<sup>[12,13]</sup>,在计算长期大气弥散因子时主要有4点不同:1) CAirDos 模式有效排放高度处的风速,基于 10 m 高度处不同风速组的年均风速,按照风廓线幂指数规律推导得出,而 CEIRA 模式则取最接近排放高度的铁塔上测风高度处的实测风速;2) 当  $X_m \leq X \leq 2X_m$  时,CAirDos 模式在计算此距离内的地面浓度时,取  $X = X_m$  和  $X = 2X_m$  两点浓度的对数内插值, $X_m$  由式(1)求得;而 CEIRA 模式则假定烟流在地面和混合层之间多次反射,采用式(2)进行计算;3) 对于降雨量的处理,CAirDos 模式将年降水量按各风向频率处理为风向降雨量,而 CEIRA 模式则使用实测的逐时降雨量;4) 对于气象数据的使用,CAirDos 模式只需输入某一高度的联合频率,而 CEIRA 模式则需同时输入低层及高层两层逐时的风速、风向等数据。

$$\sigma_z(X_m) = \frac{H_m - h}{2.15} \quad (1)$$

其中, $X_m$ 为受大气混合层影响的初始距离,m; $\sigma_z$ 为垂直扩散参数,m; $h$ 为有效排放高度,m; $H_m$ 为混合层高度,m。

$$\left(\frac{X}{Q}\right)_{H_m} = \frac{2.032}{X U_{H_m} \sigma_z} \cdot f_{H_m} \cdot R_m \cdot \exp\left(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_{H_m}}\right) \cdot \sum_{n=-2}^2 \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2nH_m - H_c}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)$$

其中, $X$ 为计算点到释放点的距离,m; $Q$ 为排出物释放的速率,Bq/s; $U_{H_m}$ 为第  $m$  小时烟流有效高度处的风速,m/s; $f_{H_m}$ 为高架释放情况下第  $m$  小时干沉降和湿沉降引起的烟流耗减校正因子,无量纲; $R_m$ 为计算点处第  $m$  小时的沿海熏烟校正因子,无量纲; $\lambda_i$ 为核素  $i$  的放射性衰变常数, $s^{-1}$ ; $H_c$ 为烟流的有效高度,m。

本文对福建某沿海核电站 2010—2011 年的整年现场气象数据进行统计分析。该厂址的气象观测系统包括厂址气象塔和 10 m 气象桅杆,气象桅杆位于厂址气象塔南侧,距离气象塔 50 m 左右(图 1)。由于气象桅杆避开山体一定距离,其观测结果比气象塔 10 m 高度有更好的气象代表性。10 m 气象桅杆最多风向为东北东,风频 23.2%,次多风向北东,风频 10.4%;气象塔 80 m 高度最多风向为北,风频 16.5%,次多风向北北东,风频 12.3%,其风向玫瑰图如图 2 所示。

大气混合层高度取自于 2005 年 12 月和 2006 年 7—8 月厂址地区进行的冬、夏两季低空风向、风速和温度廓线的大气探测试验结果(表 1),扩散参数采用 2010 年 5 月在厂址气象塔 30 m 高度的湍流观测结果(表 2),其中,水平扩散参数  $\sigma_y = ax^b$ ,垂直扩散参数  $\sigma_z = cx^d$ 。

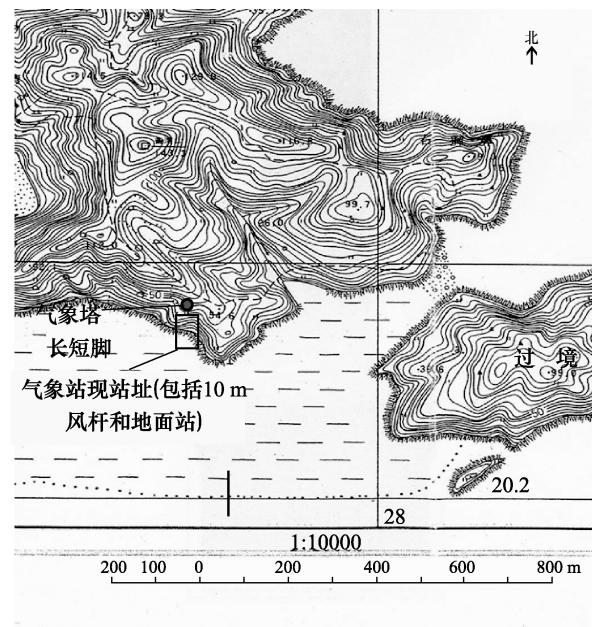


图 1 气象塔及 10 m 桅杆周围等高线地形

Fig. 1 Contour map around meteorological tower and 10 meters meteorological mast

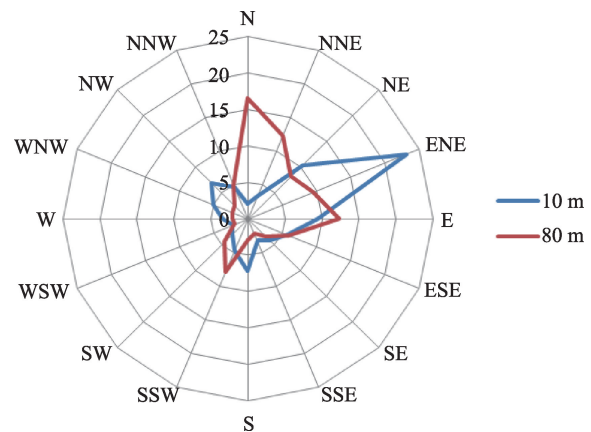


图 2 厂址 10 m 气象桅杆及气象塔 80 m 高度处的年平均风向玫瑰图

Fig. 2 Annual average wind rose at the sites of 10 meters meteorological mast and 80 m meteorological tower

表 1 厂址各稳定度下的混合层高度  
Table 1 Mixed layer height

大气稳定度类别	A	B	C	D
混合层高度/m	927	724	695	570

表2 厂址各稳定度下的扩散参数系数  
 Table 2 Dispersion parameters

系数	大气稳定度类别					
	A	B	C	D	E	F
a	0.38	0.34	0.32	0.30	0.23	0.17
b	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.83
c	0.40	0.32	0.28	0.28	0.51	0.44
d	0.82	0.82	0.82	0.80	0.57	0.49

厂址 10 m 气象桅杆静风频率为 1.2%，气象塔各高度静风频率分别为 2.4% (10 m)、1.3% (30 m)、1.2% (80 m) 和 1.4% (100 m)。风速计启动风速  $\geq 0.5$  m/s。CAirDos 模式中，风速小于 0.5 m/s 的作为静风处理并取值 0.5 m/s，风频按照邻近风速级 0.5 ~ 1.9 m/s 所对应的各风向风频进行分配；CEIRA 模式中，风速小于 0.5 m/s 的同样作静风处理并取值 0.5 m/s，风频则为实际观测结果。

## 2 结果与分析

选取惰性气体核素  $^{85}\text{Kr}$  作为代表核素，利用 CAirDos 与 CEIRA 两种模式分别计算出厂址半径 0.5~1 km 范围内 16 个方位的  $^{85}\text{Kr}$  的长期大气弥散因子 (图 3)。惰性气体不受干湿沉积的影响，排除了降水造成的影响，且在 0.5 ~ 1 km 范围内大气弥散因子是未受混合层高度影响的<sup>[6]</sup>，上述两个模式在此范围内的计算公式相同。此外，根据吕明华等<sup>[14]</sup>的比对结果，使用逐时气象数据和经统计的三维联合频率两种输入数据计算，得到的大气弥散因子值相同。

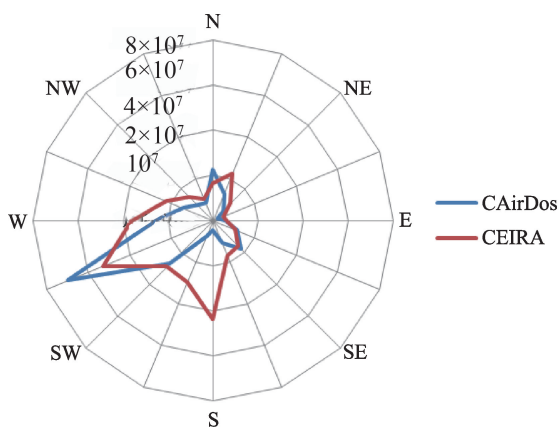


图3 CAirDos 模式及 CEIRA 模式计算出的  $^{85}\text{Kr}$  0.5~1 km 16 个方位的长期大气弥散因子

Fig. 3 Long term atmospheric dispersion factor of  $^{85}\text{Kr}$  at 0.5~1 km around the site in 16 directions calculated by using CAirDos model and CEIRA model

校核计算结果表明，两种模式计算的长期大气弥散因子次大值出现的方位不同，主要是由于所使用的高低层风向数据不一致所造成的。CEIRA 模式在计算大气弥散因子时输入高层及低层 2 层风向，而本文所选取的 2 层风向存在差异，在计算长期大气弥散因子时使用垂直扩散参数，本身已经体现了风场实际的分布情况，此时再使用实测的高层风向数据，将导致高层风向被重复计算；CAirDos 输入单层联合频率，保证了上、下层风向的一致性。而两种模式计算结果数值上的差异则来源于二者在计算有效排放高度处风速时采用了不同的方法，风速值有差异。

本厂址 2 台机组共用的气载放射性流出物的排放烟囱高度为 62.3 m，邻近建筑物的高度为 56.4 m，由于烟囱的排放高度低于邻近建筑物高度的两倍，根据核安全导则 HAD101/02 的判别方法，该核电厂两台机组气载流出物可按地面和高架的混合排放方式考虑。根据混合排放情况下地面释放时间份额的计算公式，本厂址烟流出口速度为 14.6 m/s，10 m 气象桅杆年平均风速为 3.2 m/s，气象塔 30 m 高度处的年平均风速为 3.3 m/s，80 m 高度处的年平均风速为 3.9 m/s，据此计算厂址长期大气弥散因子，则高架释放所占比例较大，超过 70%。

地面释放时间份额  $E_i$  的计算公式为

$$\text{当 } W_0/U_s < 1 \text{ 时, } E_i = 1 \quad (3)$$

$$\text{当 } 1 \leq W_0/U_s \leq 1.5 \text{ 时, } E_i = 2.58 - 1.58(W_0/U_s) \quad (4)$$

$$\text{当 } 1.5 \leq W_0/U_s \leq 5 \text{ 时, } E_i = 0.3 - 0.06(W_0/U_s) \quad (5)$$

$$\text{当 } W_0/U_s > 5 \text{ 时, } E_i = 0 \quad (6)$$

其中， $W_0$  为烟流出口速度，m/s； $W_s$  为烟囱高度处的风速，m/s。

从风向上看，厂址 10 m 高度最多风向为东北东，风频 23.2%；次多风向为北东，风频 10.4%，而 N 方向风频仅为 2.0%；气象塔 80 m 高度最多风向为北，风频 16.5%；次多风向为北北东，风频 12.3%，东北东方位风频 9.5%。CAirDos 模式只需输入单层联合频率，本文选用 10 m 高度的联合频率。CEIRA 模式需输入高、低两层逐时风速风向数据，本文选用低层 10 m 和高层 80 m 的风速风向数据。

由计算结果 (图 3) 可以看出，长期大气弥散因子的最大值基本对应于最多风向的下风向，其中，CAirDos 计算的最大值及次大值分别出现在西南西和南西方位，为 10 m 高度的最多风向及次多风向的下风向；而 CEIRA 模式计算的最大值及次大值分别出现在西南西和南方位，为 10 m 高度的最多风向的下风向及 80 m 高度最多风向的下风向。

CAirDos 因其只需输入 10 m 高度的联合频率，计算的大气弥散因子的最大值及次大值必然对应于 10 m 高度最多风向及次多风向的下风向；CEIRA 模式的结果则决定于 10 m 及 80 m 两个高度上较大风频的风向，虽然 80 m 高度对长期大气弥散因子的贡献较大，但其最多风向北在 10 m 高度的风频较低，仅为 2.0%，而 10 m 高度的最多风向东北东 (风频 23.2%) 在 80 m 高度出现的频率也达到了 9.5%。表 3 给出了

厂址 2010—2011 两整年 10 m 桅杆及气象塔 80 m 年平均风向频率, 根据其中数值, 按照 80 m 风向频率占 70%、10 m 桅杆风频占 30% 进行求和, 得出东北方位频率之和最大, 北方位次之。与之对应, CEIRA 模式计算的大气弥散因子的最大值出现在东北风向的下风向, 即西南西方位, 次大值出现在北风向的下风向, 即南方位。

虽然 10 m 及 80 m 的最多风向有所不同, 两种模式计算的大气弥散因子的最大值出现的方位仍然相同, 均为东北风向的下风向, 西南西方位 0.5~1 km 处; 次大值出现的方位不同, CAirDos 模式计算的次大值出现在南西方位 0.5~1 km 处, CEIRA 模式计算的次大值出现在南方位 0.5~1 km 处。

表 3 厂址 10 m 桅杆及气象塔 80 m 年平均风向频率

Table 3 Annual average wind direction frequency of 10 m meteorological mast and 80 m meteorological tower

高度/m	风向频率/%															
	北	北北东	北东	东北东	东	东南东	南东	南南东	南	南南西	南西	西南西	西	西北西	北西	北北西
10	2.0	3.4	10.4	23.2	9.4	5.8	4.2	3.3	7.2	4.7	3.0	2.3	3.5	5.0	7.0	4.7
80	16.5	12.3	8.2	9.5	12.3	5.9	3.4	2.2	3.0	8.0	4.4	1.9	2.1	2.2	2.5	5.0

### 3 结论

选取惰性气体核素  $^{85}\text{Kr}$  作为代表核素, CAirDos 与 CEIRA 两种模式计算的长期大气弥散因子次大值出现方位不同, 主要因为使用的高、低层风向数据存在差异: CAirDos 使用的是单层风向数据, 而 CEIRA 需要使用高、低 2 层的风向数据, 导致大气弥散因子计算的次大值出现在不同方位; CAirDos 使用单层风速, 通过风廓线幂指数将低层风速递推得到高层风速, 高层风向则与低层一致, 而 CEIRA 模式同时输入高层和低层风向, 计算弥散因子时仍使用垂直扩散参数, 导致高层风向的偏转被重复考虑。

计算长期大气弥散因子输入的风向风速参数由厂址气象塔实际观测得到, 核电厂气象塔的选址是保证上、下层风向的一致性、得到合理计算结果的前提。因此, 减少高、低层风向差异对大气弥散因子计算的影响需要重视气象塔位置的选择。

#### 参考文献 (References)

[1] 方栋, 李红. 核设施正常工况下放射性气态流出物对公众影响评价的现状与建议[J]. 辐射防护, 2000, 20(6): 333-340.  
Fang Dong, Li Hong. Status and suggestions about the assessment of public impacts of radioactive gaseous effluents under normal condition of nuclear facilities[J]. Radiation Protection, 2000, 20(6): 333-340.

[2] 姚仁太. 核电厂年均大气弥散因子估算中有关参数和修正方法的影响分析[J]. 辐射防护通讯, 2000, 20(6): 1-7.  
Yao Rentai. Analysis of relevant parameters and modified methods in estimating annual mean atmospheric dispersion factor for nuclear power plant[J]. Radiation Protection Bulletin, 2000, 20(6): 1-7.

[3] Pecha P, Pechova E. An unconventional adaptation of a classical Gaussian plume dispersion scheme for the fast assessment of external irradiation from a radioactive cloud[J]. Atmospheric Environment, 2014, 89: 298-308.

[4] Zhang Qiong, Guo Ruiping, Zhang Chunming, et al. Radioactive air-

borne effluents and the environmental impact assessment of CAP1400 nuclear power plant under normal operation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280: 579-585.

[5] Leroy C, Maro D, Hebert D, et al. A study of the atmospheric dispersion of a high release of krypton-85 above a complex coastal terrain, comparison with the predictions of Gaussian models (Briggs, Doury, AD-MS4)[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 937-944.

[6] 陈晓秋. CAIRDOS 的模式与参数[R]. 北京: 环境保护部核与辐射安全中心, 2004.  
Chen Xiaoqiu. CAIRDOS Program Instructions Book[R]. Beijing: Nuclear and Radiation Safety Center, 2004.

[7] 孙立志. 为验证遵守辐射防护规定的剂量限值, 计算气态和液态放射性物质排放时引起的照射剂量采用的模式、假定和参数[R]. 北京: 国家核事故应急办公室, 1995.  
Sun Chengzhi. Models, assumptions and data for estimating the exposure to gaseous and liquid radioactive effluents for the purpose of evaluating compliance with the dose limit according to radiation protection regulations[R]. Beijing: National Nuclear Accident Emergency Office, 1995.

[8] 李智, 李华. 核电站气载放射性流出物环境辐射剂量计算[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 119-123.  
Li Zhi, Li Hua. Calculation of environmental radiation dose resulted from radionuclides in gaseous effluent from daya bay nuclear power plant[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(6): 119-123.

[9] 方栋, 张洪猷. 核设施正常工况气载放射性排出物辐射后果计算程序比对[J]. 辐射防护, 1997, 17(4): 260-268.  
Fang Dong, Zhang Hongyou. Intercomparison of calculation program for the radiological consequences of normal airborne effluent from a nuclear facilities[J]. Radiation Protection, 1997, 17(4): 260-268.

[10] Moore R E, Baes III C F, McDowell-Boyer L M, et al. AIRDOS-EPA: A computerized methodology for estimating environmental concentrations and dose to man from airborne releases of radionuclides[R]. Washington D.C.: U S Environmental Protection Agency, 1979.

[11] United States Nuclear Regulatory Commission. Methods for estimating atmospheric transport and dispersion of gaseous effluents in routine

- discharges from light-water-cooled reactors: Regulatory guide 1.111 [S]. Washington D.C.: United States Nuclear Regulatory Commission, 1977.
- [12] 潘自强, 王志波, 陈竹舟, 等. 中国核工业三十年辐射环境质量评价[M]. 北京: 中国原子能出版社, 1990: 30-45.  
Pan Ziqiang, Wang Zhibo, Chen Zhuzhou, et al. Radiological environmental quality assessment of the nuclear industry in China over the past 30 years[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990: 30-45.
- [13] 胡二邦, 陈家宜. 核电厂大气扩散及其环境影响评价[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 170-179.  
Hu Erbang, Chen Jiayi. The atmospheric diffusion of nuclear power plant and its environmental impact assessment[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 170-179.
- [14] 吕明华, 范丹, 郝宏伟, 等. 核设施气载放射性排出物辐射后果计算模型及正常工况评价程序比对[C]//中国辐射防护学会 2014 年学术年会论文集. 太原: 中国辐射防护学会, 2014: 453-458.  
Lü Minghua, Fan Dan, Hao Hongwei, et al. Intercomparison of calculation program for the radiological consequences of normal airborne effluent from a nuclear facilities and some calculation models[C]//China Proceedings of National Annual Conference on Society of Radiation Protection 2014. Taiyuan: Society of Radiation Protection, 2014: 453-458.

## Impact of wind directions on different levels on long term atmospheric dispersion factor of a nuclear power plant

WANG Yichuan, SHENG Qing, XIONG Xiaowei, WEI Xinyu, WEI Guoliang, SHANG Zhaorong

Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing 100082, China

**Abstract** This paper uses the CAirDos model to calculate the long-term air dispersion factor of a coastal nuclear power plant in Fujian Province, and the results are compared with those of the CEIRA model. It is shown that, with the two models, the maximum values are in the same direction, but the sub-maximum values are not. The second maximum value calculated by the CAirDos model corresponds to the downwind in the secondary prevailing wind direction(NE,10.4%) at the 10 meters height, while that calculated by the CEIRA model corresponds to the downwind in the prevailing wind direction(N,16.5%) at the 80 meters height. One layer wind data are used in the CAirDos model to make sure that the wind direction in the high layer is consistent with that in the lower layer. The wind speed in the high layer is revised by the wind profile in the low layer, so the wind direction is consistent with that in the low layer. In the CEIRA model, on the other hand, the wind data in the two layers are both used. When the wind directions in the two layers are inconsistent, the results of the long term atmospheric dispersion factor will be affected.

**Keywords** nuclear power plant; long term atmospheric dispersion factor; wind field

(编辑 韩丹岫)