

Calculation of the Radionuclides Concentration in Gaseous Effluents from Yangjiang Nuclear Power Plant

Zhiyuan Zhang, Hua Li*

Department of Physics on Technology Institute, Jinan University, Guangzhou Guangdong
Email: *tlihua@jnu.edu.cn

Received: Jul. 8th, 2016; accepted: Jul. 26th, 2016; published: Jul. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

According to the practical situation of Yangjiang nuclear power plant and based on the specific ground wind field, the Gaussian model is taken to simulate the transport and diffusion of the radionuclide cloud in atmosphere, which come from an instantaneous point source from Yangjiang nuclear power plant (112.27° east longitude, 21.72° north latitude). The obtained calculated results are about the trajectory of the radionuclide cloud core, the relative concentration of the radionuclide cloud center on the ground, the distribution of the relative concentration of the radionuclides and its isopleths. Further, the relative concentration of the radionuclides at Yangjiang nuclear power plant and the nearby cities, such as Yangjiang city, Maoming city, Yunfu city and Jiangmen city, have been evaluated. All these results not only can provide information for studying the radioactive effect on Yangjiang area and those nearby cities because of the radionuclides in gaseous effluents from Yangjiang nuclear power plant, but also can provide reference information for monitoring the possible nuclear incidents in nuclear power plant.

Keywords

Concentration Calculation, Gaussian Model, Transport and Diffusion, Radionuclide in Gaseous Effluents

*通讯作者。

阳江核电站放射性气态流出物浓度计算

张志远, 李 华*

暨南大学理工学院物理系, 广东 广州

Email: tlihua@jnu.edu.cn

收稿日期: 2016年7月8日; 录用时间: 2016年7月26日; 发布时间: 2016年7月29日

摘 要

针对阳江核电站的实际情形, 基于阳江核电站区域的已知地面风场, 通过高斯模型模拟计算了源于阳江核电站(东经112.27°, 北纬21.72°)的放射性气态流出物点源瞬时释放后放射性核素云团的迁移和扩散过程, 得到了放射性核素云团中心的运动轨迹、放射性核素云团中心地面相对浓度、放射性核素云团地面相对浓度分布及其等值线分布, 同时给出了阳江市及邻近城市茂名市、云浮市、江门市放射性核素地面相对浓度随时间的变化。这些结果为源于阳江核电站的放射性气态流出物对整个阳江地区以及邻近城市的辐射环境影响提供参考信息, 为可能发生的核电站事故下的监测提供参考数据。

关键词

浓度计算, 高斯模型, 迁移和扩散, 放射性气态流出物

1. 引言

为了大力发展核能资源, 国家推出了核电建设几大项目, 阳江核电站就是其中之一。阳江核电站规划建设六台百万千瓦级核电机组, 其中一期工程拟建设4台由中国广东核电集团开发的CPR1000压水堆核电机组, 每台额定功率为1080 MW [1]。核电站在正常运行的情况下, 将不可避免地排出含有放射性核素的废气和废液, 因此, 在积极开发利用核能的同时, 需探索核电站对周边区域可能引起的辐射环境安全影响及其相应技术对策的多条途径。本文针对源于阳江核电站的气载放射性核素在大气中迁移扩散过程中对阳江地区的影响给出计算模拟结果。

当前, 对放射性核素迁移扩散过程的计算通常采用空气污染物理学中所应用的4类污染扩散模式: 高斯模式、拉格朗日模式、欧拉模式和CFD湍流模式, 根据描述方法和应用尺度的不同而选用[2]-[5]。实际应用中, 高斯模型因具有模型简单、容易理解、计算量小以及方法较为成熟等优点而被广泛采用。由于不同情形下的研究对象和条件不同, 高斯模型往往有多种形式。针对不同情形, 正确选择大气扩散模式以及相应的特性参数是准确模拟计算放射性气态流出物浓度及其分布、以进行环境影响评价的关键。

2. 高斯模型及坐标系建立

假设放射性核素是源于核电站烟囱排放点, 建立局地直角坐标系XYZ, 铅直方向为Z轴, 与Z轴垂直的平面内Y轴垂直于X轴, X、Y和Z轴的正方向符合右手螺旋规则, 直角坐标系原点取为阳江核电站, 即为 $(x_0, y_0, 0)$ 。放射性核素是源于 (x_0, y_0, z_c) 的瞬时点源, 初始时间为 t_0 , 一定高度下风的平均速度为 $\vec{u} = (u, v, 0)$, 地面 $z = 0$ 为总反射面。假设放射性核素的分子扩散相对于湍流可忽略, 大气是不可压缩的,

忽略放射性核素云团的沉积, 不计及放射性核素的化学反应及衰变, 考虑到无界区域内放射性核素在扩散曲面上满足的连续性方程[6], 采用像源法处理地面的全反射作用, 放射性核素云团扩散过程不依赖于水平方向和垂直方向只与时间相关, 扩散系数是常数, 即水平方向 $K_x = K_y = K_r$, 垂直方向为 K_z , 则在地面上距离放射性核素云团中心水平距离 R 处的放射性核素的相对浓度(归一化浓度)为[7]:

$$C(R, t) = \frac{e^{-\frac{1}{4t}\left(\frac{R^2}{K_r}\right)} e^{-\frac{1}{4t}\frac{z_c^2}{K_z}}}{4(\pi t)^{1.5} (K_x K_y K_z)^{0.5}} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} R^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ x_1 &= u(t - t_0) + x_0 \\ y_1 &= v(t - t_0) + y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $C(R, t)$ 是地面上放射性核素的相对浓度, m^{-3} ; R 是 t 时刻计算点与放射性核素云团中心的水平距离, m ; $t - t_0$ 是从放射性核素云团释放时刻起到浓度计算时刻的时间间隔, h ; $z_c = z_0$ 是放射性核素云团中心离地面的高度, m ; K_r 是径向扩散系数, K_z 是垂直扩散系数; x_1 和 y_1 为 t 时刻放射性核素云团中心在 $z_c = z_0$ 平面上的位置, m 。计算放射性核素云团中心地面浓度时, 取 $x = x_1$, $y = y_1$, 即 $R = 0$ 代入(1)式即可。

3. 特定风场和扩散系数的选定

3.1. 地理位置及特定风场的选定

阳江市地处广东省西南沿海, 紧邻珠三角, 扼粤西要冲, 东与江门市相接, 北与云浮市相接, 西与茂名市相接, 南临南海。全市经纬度范围在北纬 $21.47^\circ \sim 22.69^\circ$, 东经 $111.27^\circ \sim 112.35^\circ$ 之间, 东西长 112.5 公里, 南北距 132.75 公里。而阳江核电站处于东经 112.27° , 北纬 21.72° , 位于阳江最东南侧。图 1 给出阳江地区区域图。

本文主要考虑核电站放射性气态流出物对阳江地区及阳江邻近城市的影响, 因此主要考察沿东南吹向西北方向的风场。又由于阳江核电站对阳江市及邻近城市的影响属于中小尺度距离上污染物的迁移和扩散, 所以在计算中主要考虑近地 100 m 处的风场, 计算选用由阳江核电站提供的近地 100 m 高的 2013 年 3 月的气象监测风场数据。

图 2 给出 2013 年 3 月监测的风矢量图和该月 23 日~24 日的风矢量图。可以看到, 3 月份的监测数据风向较为集中, 沿东南方向。通过对 3 月份每 2 日的风矢量数据的筛选, 选取 3 月 23~24 日的风矢量用以计算。在 2013 年 3 月 23~24 日里, 风矢量方向集中于吹向西北方向, 且风速普遍在 2~6 m/s, 较适用于分析放射性气态流出物对阳江地区的影响, 而且由监测数据可知 2013 年 3 月份天气质量比较好, 全月几乎无降雨, 可近似满足计算中不考虑放射性核素沉积和冲刷的情况。

3.2. 扩散系数的选取

本计算采取二种方法得到的扩散系数进行模拟计算, 其一是采用大亚湾核电站的扩散系数[8] $K_r = 3.6 \times 108 \text{ m}^2/\text{h}$, $K_z = 1.8 \times 104 \text{ m}^2/\text{h}$; 其二是通过气象监测数据分析得到大气稳定度, 再通过 Briggs 扩散系数表, 估算阳江地区的扩散系数[9], 该过程为通过云量和太阳高度角算得太阳辐射等级, 考虑太阳辐射等级和地面风速确定大气稳定度, 再由稳定度等级查算扩散系数。表 1 列出了二种计算方法中采用的扩散系数。



Figure 1. The regions of Yangjiang City
图 1. 阳江地区区域图

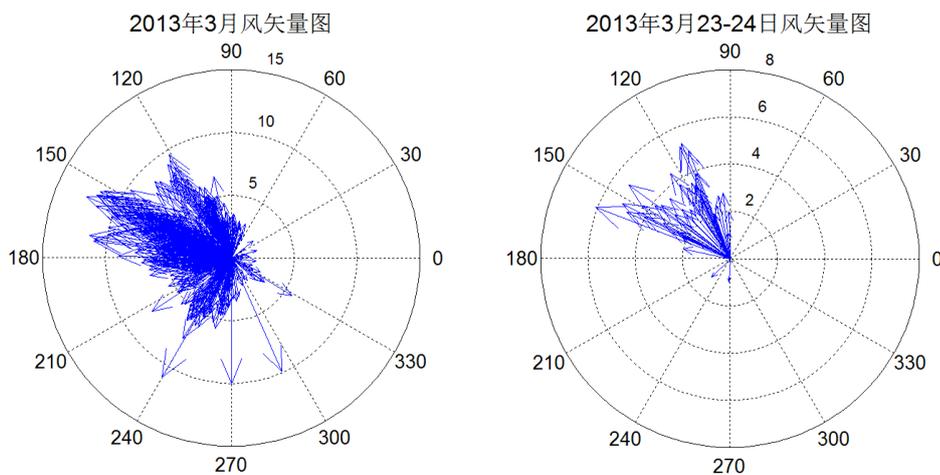


Figure 2. The wind vector diagram of March 2013 and March 23 to 24
图 2. 2013 年 3 月风矢量图及其 23~24 日风矢量图

Table 1. The diffusion coefficient adopted for calculation
表 1. 计算中采用的扩散系数

扩散系数	径向 K_r (m^2/h)	垂直 K_z (m^2/h)
方法一	3.6×10^8	1.8×10^4
方法二	1.2×10^6	3.4×10^5

4. 放射性核素浓度计算

4.1. 计算过程

在特定风场下放射性核素云团的迁移和扩散可视为其中心随风迁移,同时核素云团在风场作用下做湍流扩散。在对放射性核素云团迁移和扩散的计算过程中,以阳江核电站经纬度位置为起始点,取经纬度轴分别为 X 轴和 Y 轴,近似地沿 X 轴以北纬 25 度的纬线上经度 1° 的弧长为标准($1^\circ \approx 107,840 \text{ m}$)、沿 Y 轴以纬度 1° 的弧长为标准($1^\circ \approx 111,644 \text{ m}$),将经纬度为单位和米为单位的距离进行换算。

在对阳江核电站放射性气态流出物浓度的计算中,以 3 月 23 日零时为计时起点,以 1 小时为间隔,在二种不同的扩散参数下,通过式(1)和(2)计算出放射性核素云团中心随风迁移的位置、核素云团中心地面相对浓度、放射性核素地面相对浓度分布及其等值线分布,另外通过阳江市(东经 111.98° ,北纬 21.87°)以及邻近城市茂名市(东经 110.91° ,北纬 21.67°)、云浮市(东经 112.04° ,北纬 22.91°)、江门市(东经 113.08° ,北纬 22.57°)的经纬度坐标,利用式(1)计算这四个城市的放射性核素地面相对浓度随时间的变化,以此考察阳江核电站对邻近城市的辐射环境安全的影响。

4.2. 放射性核素云团中心位置及其地面相对浓度

图 3 给出了在选定风场作用下,随着时间的变化放射性核素云团中心所处经纬度的变化。可以看到,核素云团中心在迁移中经度是一直在减小,而纬度几乎是一直呈增长状态。这说明,随着风场的作用,源于阳江核电站的放射性核素云团从东南到西北方向迁移。放射性核素云团的迁移扩散可视为核素云团中心在风场下随风的运动而迁移,同时核素云团在风场作用下做湍流扩散,因此扩散参数的变化只影响核素云团扩散的快慢,对其中心位置的迁移不影响。

图 4 给出了二种扩散参数下放射性核素云团中心地面相对浓度随时间的变化。由图 4 可知,二种扩散参数下,放射性核素云团中心的地面相对浓度先增加,到极大值后呈指数衰减。采用扩散参数 A,整个考察区域内放射性核素云团中心地面相对浓度值量级在 $10^{-15} \sim 10^{-11} \text{ m}^{-3}$ 之间,0.1 h 时刻达到极大值 $7.3 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3}$;采用扩散参数 B 时整个考察区域内放射性核素云团中心地面相对浓度值量级在 $10^{-13} \sim 10^{-8} \text{ m}^{-3}$ 之间,在极短的时间内达到极大值。这是因为扩散参数 B 相对于 A 较小,因而发生湍流扩散的过程比较慢,核素较集中,使得相对浓度较高。

4.3. 放射性核素地面相对浓度的分布

图 5 给出两种扩散参数下, $t = 1 \text{ h}$ 、 5 h 时刻放射性核素地面相对浓度在经纬度上分布的三维图。可以看到:在特定扩散参数下,随着时间的增长,整个放射性核素云团覆盖区域的面积逐渐增大,随之相对浓度的峰值减小。比较二种不同的扩散参数,同一时刻从覆盖区域经纬度的值可以看到:扩散参数 A 下,整个核素云团覆盖区域的面积较大,这说明在较大的扩散参数下,核素湍流扩散的速度比较快。

4.4. 放射性核素地面相对浓度等值线分布

图 6 和图 7 分别给出扩散参数 A 和 B 下,在 0.025 h、1 h 和 5 h 时刻放射性核素地面相对浓度等值线分布。可以看出,核素云团中心从东南向西北迁移,大约在 8 h 后核素云团中心移出阳江地区。在核素云团中心迁移的同时,放射性核素做湍流扩散,随着时间的增长, $10^{-19} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-3}$ 等值线分布面积越来越大。结合图 3、图 4 结果可知,在 8 h 后,放射性核素云团对阳江地区影响越来越小,整个阳江地区的放射性核素地面相对浓度值低于 10^{-14} m^{-3} (扩散参数 A)和 10^{-12} m^{-3} (扩散参数 B)。

图 6 和图 7 还分别给出了放射性核素云团在两种扩散参数下不同时刻下的等值线分布。比较图 6 和图 7 可见,扩散参数 B 下,浓度等值线分布更密集,同一时刻的相对浓度值更高。由此可知:扩散参数

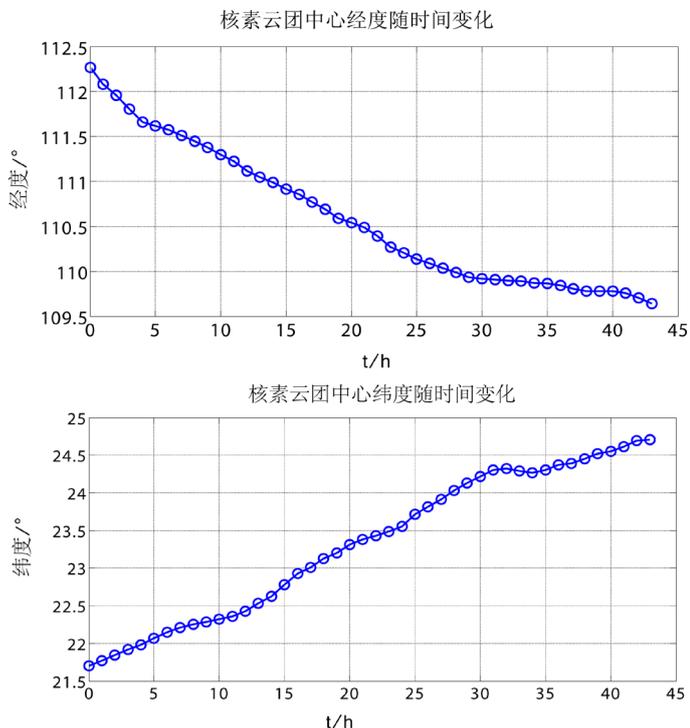


Figure 3. The change of longitude and latitude of radionuclide cloud center over time

图 3. 放射性核素云团中心经纬度随时间的变化

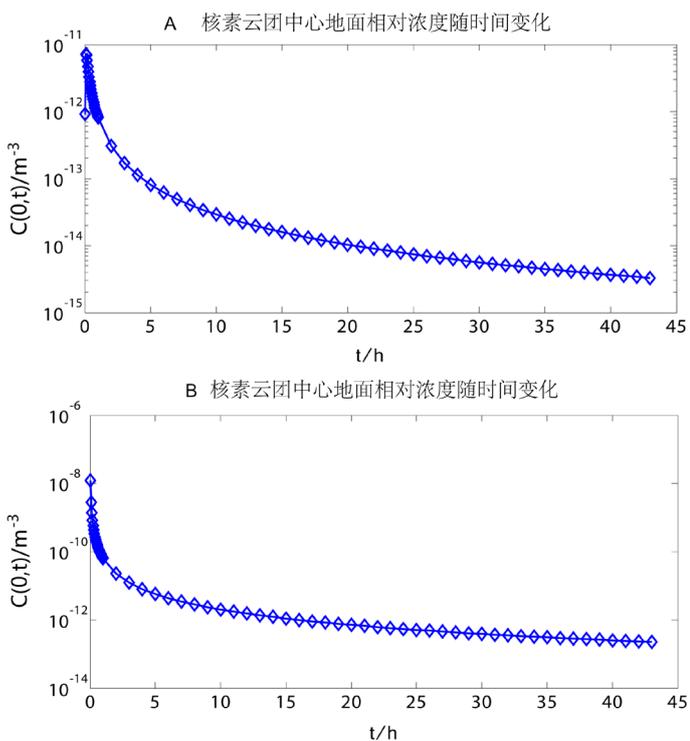


Figure 4. The change of ground relative concentration of radionuclide cloud center over time

图 4. 放射性核素云团中心地面相对浓度随时间的变化

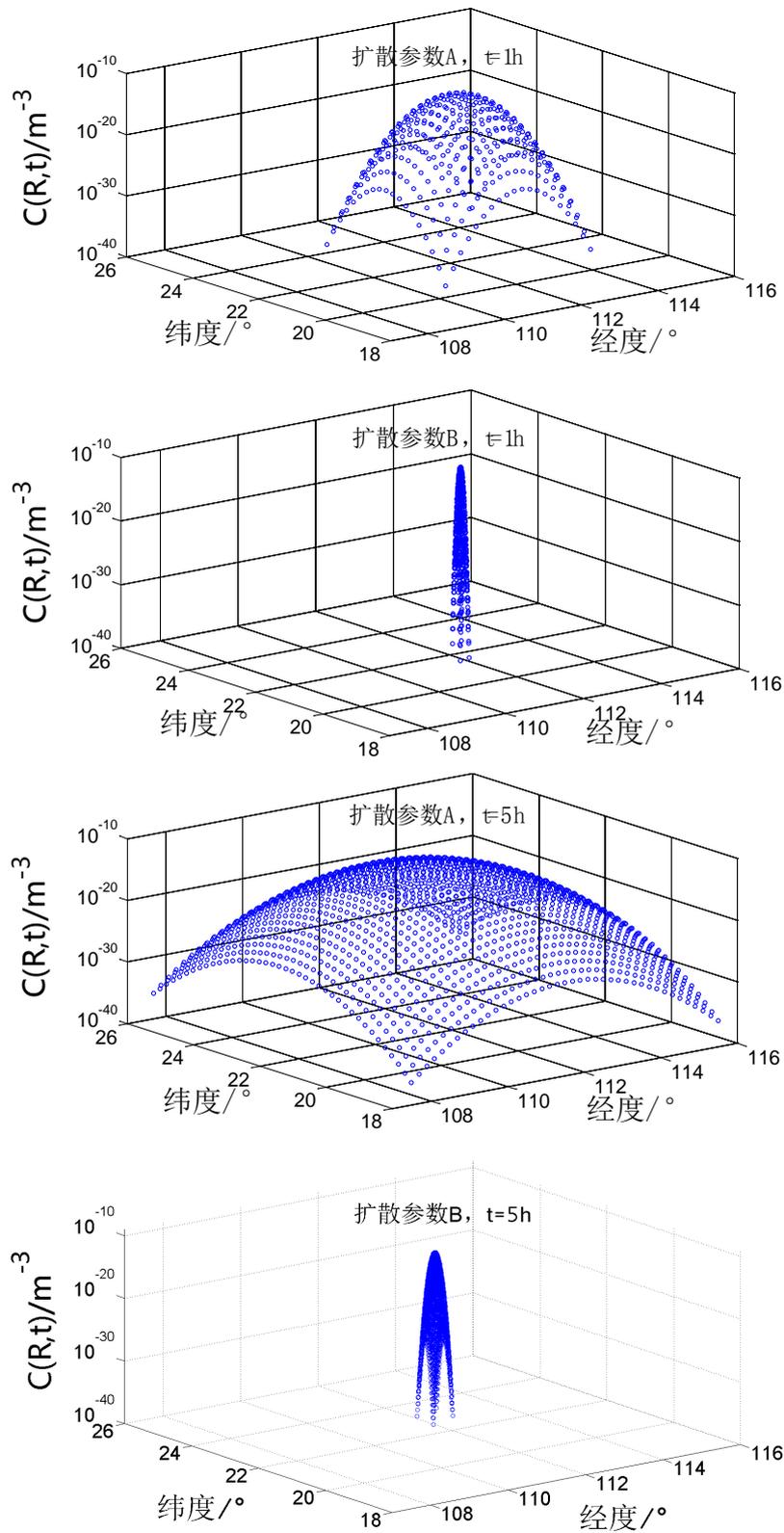


Figure 5. The three-dimensional figure of radionuclide ground relative concentration distribution at h = 1, 5 h

图 5. 时间 $t = 1, 5$ h 时放射性核素地面相对浓度分布的三维图

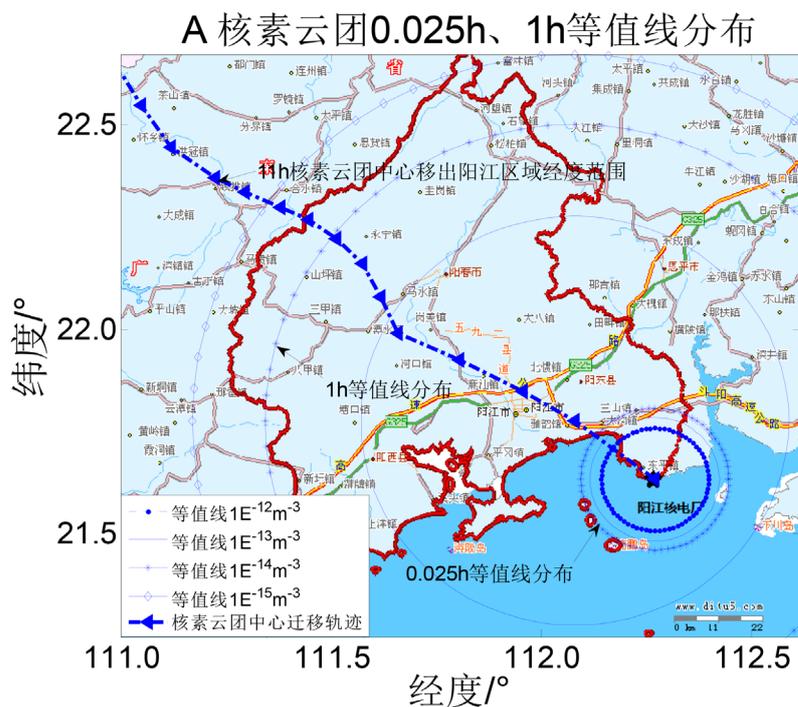


Figure 6. The concentration isoline distribution of radionuclide cloud at 0.025, 1 h for diffusion parameter A
图 6. 扩散参数 A, 放射性核素云团在 0.025、1 h 时刻浓度等值线分布

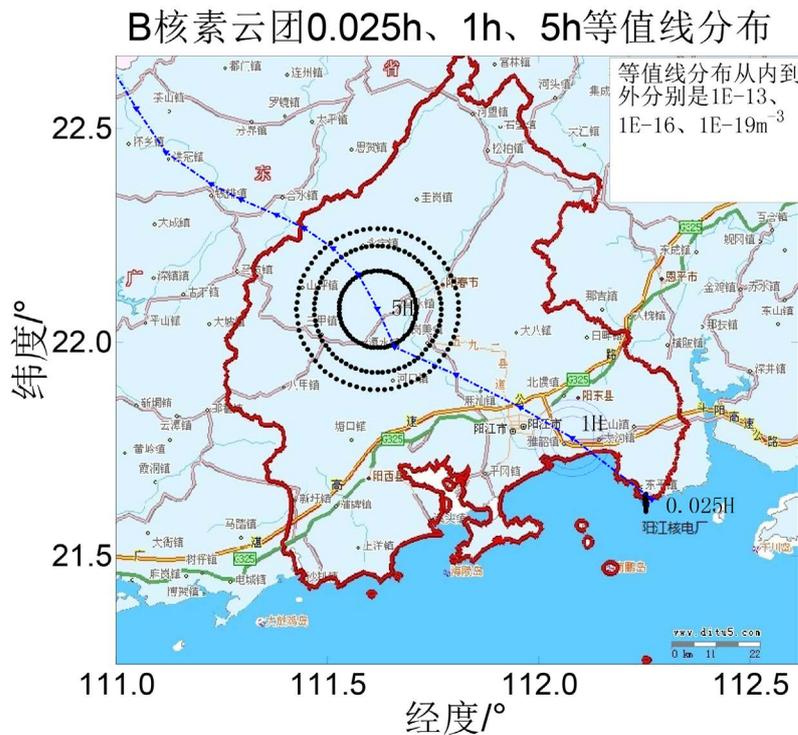


Figure 7. The concentration isoline distribution of radionuclide cloud at 0.025, 1, 5 h for diffusion parameter B
图 7. 扩散参数 B, 放射性核素云团在 0.025、1、5 h 时刻浓度等值线分布

不仅影响整个放射性核素云团扩散的速度, 而且影响放射性核素浓度值的大小。因此, 在考虑放射性核素的扩散过程时, 扩散参数的选定十分重要。

4.5. 阳江核电站放射性气态流出物对周边城市的影响

图 8 给出了扩散参数 A 下, 源点阳江核电站及四个城市中心位置的放射性核素地面相对浓度随时间变化的计算结果。由于扩散参数 B 较 A 小 1 至 2 个数量级, 核素云团扩散速度较慢, 其地面相对浓度值小范围内更高更均匀; 在同一时刻, 周边城市区域内放射性核素地面相对浓度较扩散系数 A 下大大减小。因此, 在考察周边城市的核素浓度时采用扩散参数 A 的相关结果。

从图 8 还可以看到, 扩散参数 A 下, 源点阳江核电站、阳江市、茂名市、云浮市以及江门市的放射性核素浓度呈先增长, 达到极大值后再不断减小, 分别在 0.1 h、1 h、4 h、6 h、7 h 时刻达到峰值, 相应的相对浓度峰值分别为 7.103×10^{-12} , 6.857×10^{-13} 、 2.941×10^{-14} , 1.995×10^{-14} , $2.458 \times 10^{-15} \text{ m}^{-3}$ 。

5. 结果分析

本文采用高斯模型计算得到的放射性核素地面浓度是相对浓度, 若已知阳江核电站气态排出物的总量, 则由相对浓度可直接得到放射性核素的浓度值。2014 年阳江核电厂放射性废气排放的预估年累计数据中, 单台机组惰性气体排放量为 $5.28 \times 10^{11} \text{ Bq}$, 以此作为阳江核电站正常工况下参考排放量, 可以得到阳江市区放射性核素浓度峰值为 $3.620 \times 10^{-1} \text{ Bq/m}^3$ 。

根据 γ 剂量率与核素浓度相互转换关系(表 2): 剂量率 1 Gy 等于 1 kg 受照物质吸收 1 J 的辐射能量; 核素浓度 1 Bq 即 1 s 时间内核素发生 1 次衰变; 能量单位 $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$; 干空气密度为 $1.293 \times 273/(273 + T) \times P/0.1013 \text{ kg/m}^3$, 其中: P 为气压(MPa), T 是摄氏温度。取温度为 25°C , 惰性气体 γ 辐射

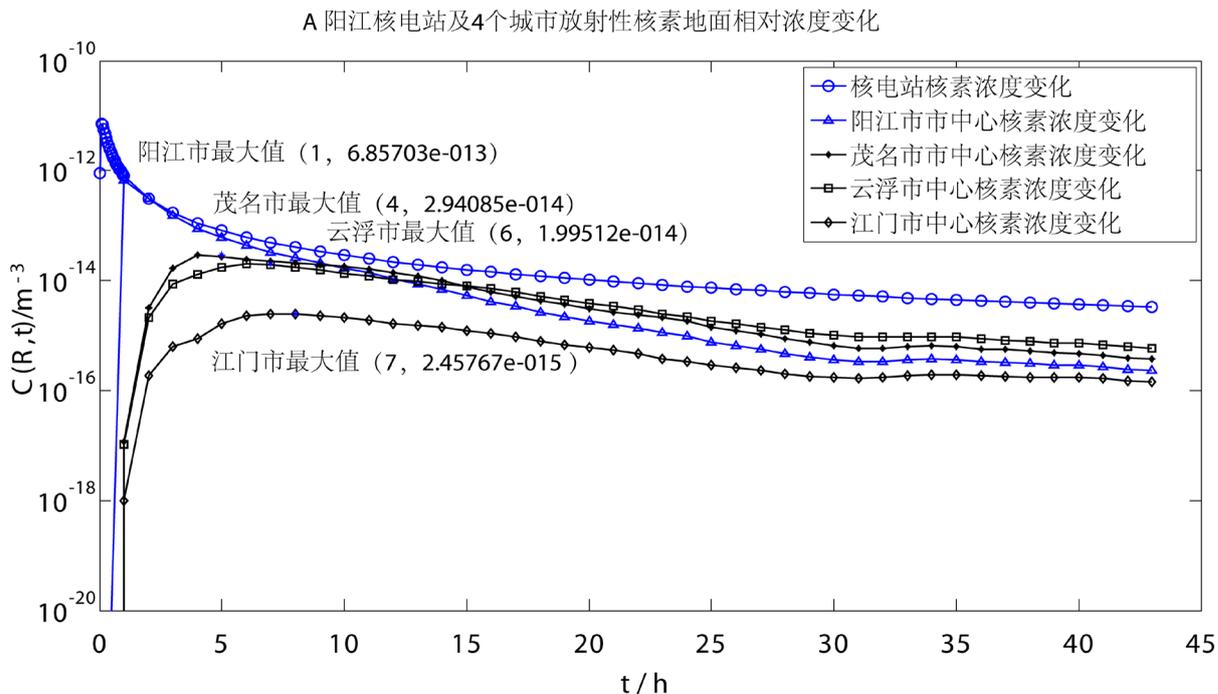


Figure 8. The change of radionuclide ground relative concentration of Yangjiang nuclear power station and four cities over time

图 8. 阳江核电站及四个城市放射性核素地面相对浓度随时间的变化

Table 2. The conversion relationship of gamma rate and nuclide concentration
表 2. γ 剂量率与核素浓度相互转换关系

剂量率 1 Gy	=1 kg 受照物质吸收 1 J 的辐射能量
核素浓度 1 Bq	=1 s 时间内核素发生一次衰变
能量单位 1 Mev	= 1.602×10^{-13} J
γ 辐射衰变能	kev 到 Mev 量级之间
干空气密度	= $1.293 \times 273 / (273 + T) \times P / 0.1013$ kg/m ³

衰变能取 10 MeV, 常压下干空气密度为 1.185 kg/m³。按照以上关系可以得到 1 Bq/m³ 相当于 1.185 kg 空气中 γ 衰变释放能量 1.602×10^{-12} J/s, 相应的 γ 剂量率为 0.4867×10^{-2} μ Gy/h。因此, 计算得到的阳江市区的核素浓度峰值 3.620×10^{-1} Bq/m³ 相当于 1.762×10^{-3} μ Gy/h。

广东省环境辐射监测中心粤西分部位于阳江市市区, 其在 2014 年 3 月 23~24 日的 γ 剂量率监测数据为 0.1059~0.1111 μ Gy/h。由此可得, 本文计算得到的阳江市区的核素浓度相应的 γ 剂量率为 1.762×10^{-3} μ Gy/h 在监测值范围内, 即阳江核电站正常工况下放射性气态流出物对阳江市市区辐射环境影响在本底范围内。

本文针对阳江核电站的实际情形, 基于一定地域内的已知地面风场, 采用瞬时点源的高斯模型, 对源于阳江核电站的放射性气态流出物在大气中迁移和扩散进行了计算模拟。计算中采用了二种参考的扩散参数, 得到了放射性核素云团迁移扩散中地面相对浓度和分布, 阳江市区和邻近城市的放射性核素地面相对浓度随时间的变化等结果, 进而分析了放射性核素对阳江市市区辐射环境安全的影响, 这些结果可为源于阳江核电站的放射性气态流出物对阳江地区及其邻近城市辐射环境的影响提供参考信息。

参考文献 (References)

- [1] 深圳中广核工程设计公司. 广东阳江核电站一期工程可行性研究报告. 中国核电网, 2004.
- [2] 魏东, 董法军, 董希琳. 核事故中放射性核素扩散浓度的理论预测[J]. 中国安全科学学报, 2006, 11(3): 107.
- [3] 刘爱华, 蒯琳萍. 放射性核素大气弥散模式研究综述[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 59.
- [4] 崔慧玲, 姚仁太, 徐向军. 放射性核素长距离迁移模拟研究进展[J]. 辐射防护, 2012, 32(4): 240.
- [5] 迟妍妍, 张惠远. 大气污染物扩散模式的应用研究综述[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5): 376.
- [6] Seinfeld, J.H. (1985) Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Wiley & Sons, New York.
- [7] 李华, 邓继勇, 等. 用高斯模型计算大气中放射性核素云团的扩散[J]. 辐射防护, 2004, 24(2): 93.
- [8] 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.
- [9] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 4.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>