

核泄漏事故污染定量分析及处理措施优化

陈雷艳¹, 刘培江², 朱聿铭¹, 王浩华^{1*}

¹海南大学理学院, 海南 海口

²广东财经大学统计与数学学院, 广东 广州

Email: *huazi8112@hainanu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月29日; 录用日期: 2020年10月13日; 发布日期: 2020年10月20日

摘要

针对核泄漏事件中放射性粉尘扩散污染问题, 高斯烟团模型可以模拟瞬时泄漏。为克服高斯烟羽模型的局限性, 在复杂条件下更真实的模拟出放射性粉尘的时空分布, 本文通过改进高斯烟团模型对扩散问题进行考察, 以实际地点对改进模型进行数值求解; 并对各项抢救措施进行了权重分析, 运用层次分析法建立数学模型, 提出行之有效的解决方案。

关键词

高斯烟团模型, 数值求解, 权重分析, 层次分析法(AHP)

Quantitative Analysis of Pollution and Optimal Solutions in the Nuclear Accident

Leiyan Chen¹, Peijiang Liu², Yumin Zhu¹, Haohua Wang^{1*}

¹School of Sciences, Hainan University, Haikou Hainan

²School of Statistics and Mathematics, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou Guangdong

Email: *huazi8112@hainanu.edu.cn

Received: Sep. 29th, 2020; accepted: Oct. 13th, 2020; published: Oct. 20th, 2020

Abstract

For the spread of radioactive dust in the nuclear accident, we can simulate transient leakage by Gaussian Smoke Group model. In order to overcome the limitations of the Gaussian Plume model, and simulate the spatial and temporal distribution of the radioactive dust realistically under com-

*通讯作者。

plex conditions, we examine diffusion problem by the improved Gaussian Smoke Group model, solve the numerical problem of the improved model in the actual location; at the same time, we analyze the weight of rescue measures to provide the more effective Optimal Solutions by AHP model.

Keywords

Gauss Smoke-Roll Model, Numerical Solution, Weight of Rescue Measures, AHP

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

能源短缺已成为现在社会的一大难题,核能作为一种高效能源,带来了人们的巨大利益。但由于一些技术风险和管理纰漏,核泄漏问题屡屡发生。如日本福岛核电站,在发生特大地震时由于备用系统的不充分和急救措施的不及时,引起了核泄漏,对人类和自然环境都造成了极大的伤害,引起了人们对核问题的深思。

由于重大的突发性核泄漏紧急灾害事件具有爆发性、空间分布不连续性、对周边地形和气象条件的敏感性等特点,研究核事故所释放的物质的时空分布需要高度精确的技术。该技术的研究对于更好地减轻核辐射危害、保护环境和降低损失等方面有着极其重要的意义。

2. 核辐射粉尘扩散模型

2.1. 模型概况

国内有许多专家学者对于核辐射粉尘的扩散问题进行研究,如乔方利[1]等人对日本福岛核泄漏扩散路径进行模拟和预测,但其没有考虑粉尘的沉降问题;张斌才[2]等人用高斯烟羽模型来研究大气污染扩散,虽然可以快速模拟出扩散过程但模型的参数和实用性需要随着温度地形等因素不断修正,可靠性不高;黄文宏[3]等人用三维传递现象来模拟气体扩散,但模型的方法复杂计算困难,张振华[4]等用有限差分计算与模拟放射性气体在介质中扩散,但在进行隐式有限差分计算时,若所选的时间差分增量较大,计算的误差相对较大,误差不可忽略,导致计算和模拟不够精确,陈坤[5]等人研究了高斯烟羽模型的山区含硫天然气泄漏的扩散,由于在地势起伏的山地、丘壑等地面特征较复杂的地区,将地形因子引入计算模型来降低预测值与实际值的差距,才能使普适性增强,Denise Hertwig [6]等建立的高斯模型仅考虑了风速度的影响,影响因素考虑不全面。基于此,本文通过改进的高斯烟团模型来考察,不但充分考虑到沉降、风力、地势等条件,能够对放射线粉尘的扩散进行模拟,而且克服了高斯烟羽模型对流动条件的局限性使对粉尘的时空分布的模拟结果更加真实可靠。

2.2. 粉尘扩散模型

假设核泄漏速率恒定,且放射性粉尘在无风情况下向各个方向的扩散速度相等且扩散过程中不发生化学反应。令放射性气体发生泄漏的时刻 $t = 0$,在上述理想状态下粉尘扩散模型如下:

$$C = C_0 - C_0 \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\beta \exp(-\beta^2) d\beta = C_0 - C_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (1)$$

其中 $erf(\beta)$ 为高斯误差函数; C_0 为初始浓度; β 为积分时间; D 为扩散强度; r 为扩散系数; t 为时间。

上述模型仅是一个理想状态下的预测浓度模型, 没有考虑实际天气条件, 以及有效泄漏源等实际因素的影响, 预测结果十分粗糙。

基于实际情况, 粉尘扩散受外界因素影响, 综合考虑这些因素, 构建高斯烟团模型的粉尘扩散修正模型。假设泄漏源有效高度为 H , 取其地面投影为坐标原点, x 轴指向风向, 由高斯烟团模型[4]得到点源泄漏的浓度分布:

$$c(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi k \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2)$$

其中, Q 为源强; c 为污染物质量浓度; k 为环境风速; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为用浓度标准差表示的 x, y, z 轴上的扩散参数; H 为泄漏有效高度。

如考虑风速对辐射的影响, 令风速 $V_s = 6.7 \text{ m/s}$, 假设风速风向在采取数据阶段恒定不变, 那么

$$\Delta h = \frac{(0.92V_s D + 0.792Q^{0.4}h^{0.6})}{u_s} \quad (3)$$

风速随高度升高的变化[7]:

$$u = u_{10} \left(\frac{H_e}{10} \right)^m \quad (4)$$

上述各式中, T_s 为扩散物温度; T_a 为环境温度, K; P 为气压; u_{10} 为离地面 10 m 处的平均速度; H_e 为核反应堆泄漏点距地面的几何高度; u_s 为核反应堆泄漏点高度处的平均风速; D 为核反应堆泄漏处直径; V_s 为粉尘扩散速度; m 为风速廓线系数, 其值与大气稳定度有关。

由 Matlab 计算得, 当 $H_e = 20 \text{ m}$ 时, $u = 9.475 \text{ m/s}$ 。

由放射性物质的衰变规律[1][3], 其浓度随时间的变化公式为:

$$c = c_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

其中 c_0 为初始浓度; λ 衰变常数; t 经过的时间。

记 $T_{0.5}$ 为放射性核素的半衰期, 有

$$Q_d(x) = Q \exp\left(-\frac{0.693x}{3600T_{0.5}\bar{u}}\right) \quad (6)$$

其中 Q_d 为衰变下的源强。

由于 ^{131}I 的半衰期为 8.04 天[8][9], 上述方程为:

$$Q_d(x) = \exp(-0.00358t)$$

含碘放射性核素的干沉积速度[10]为 $V_d = 1.1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, 其沉积轨迹如图 1。

从而沉积量为:

$$W_d = V_d \times c(x, y, z, H) \quad (7)$$

模型(2)变化为:

$$c(x, y, z, H)(1 - 0.011) = \frac{Q_d(x)}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{\left(z - H_e + \frac{0.011x}{\bar{u}}\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \alpha \exp\left[-\frac{\left(z - H_e - \frac{0.011x}{\bar{u}}\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (8)$$

其中 α 为反射系数，放射性核素一般取 0.5 [11] [12]。

假设在 $t = 0$ 时刻，在 origin 释放的一个气团将随风飘动，并因扩散不断胀大。得到经粒子衰变与重力沉降(干沉积)修正后的浓度变化模型：

$$c(x, y, z, H) = \frac{Q_d(t)}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{\left(z - H_e + \frac{0.011x}{\bar{u}}\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] + 0.5 \exp\left[-\frac{\left(z - H_e - \frac{0.011x}{\bar{u}}\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

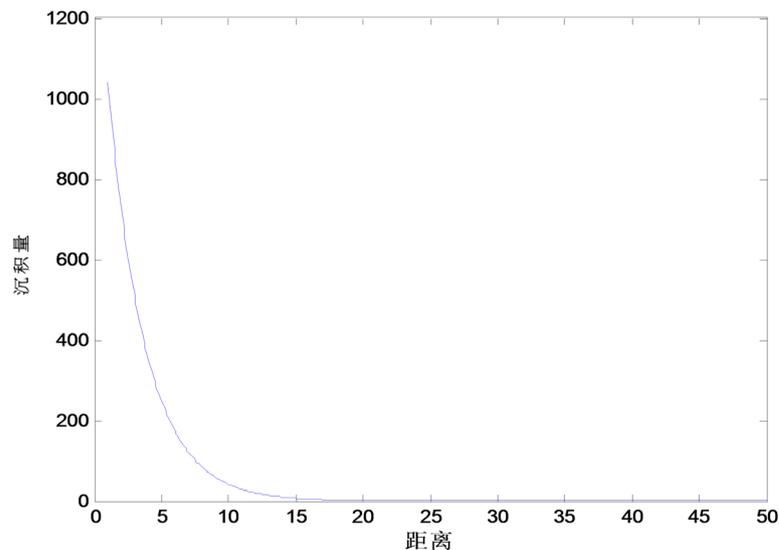


Figure 1. Depositional trajectories of ^{131}I
图 1. ^{131}I 的沉积轨迹图

2.3. 实际观测位置辐射污染模型及数值求解

取核辐射源 $H_e = 20 \text{ m}$ ，直径 $D = 7 \text{ m}$ ，环境温度为 $T_a = 300 \text{ K}$ ，温差 $T_s - T_a = 1200 \text{ K}$ 。

选取观测地点为距核电站 62 km 的福岛市，其合扩散速度为：

$$V_h = (V_x + u) + V_y + (V_z - V_d) \quad (9)$$

假设 $V_y = 0$ ，则 $V_h = 10.036 \text{ m/s}$ 。由于假设了 x 轴与平行风向平行，因而可以得到 $Q = 5390V_h$ ，继而 $\Delta h = 89.3 \text{ m}$ ， $u = 9.475 \text{ m/s}$ 。

记开始监测放射性的时刻为 0 时刻, 考虑风速作用, 由反射倾斜云模式[13][14], 得出瞬时点源浓度变化方程

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q_d(t)}{(2\pi)^{1.5} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \zeta_1 \cdot \zeta_2$$

$$\zeta_1 = \exp\left\{\frac{(x - V_{xh}t)^2}{-2\sigma_x^2} + \frac{(V_y t)^2}{-2\sigma_y^2}\right\}$$

$$\zeta_2 = \left\{\exp\left\{\frac{(H_e - V_{zh}t)^2}{-2\sigma_z^2}\right\} + 0.5 \exp\left\{\frac{(H_e - V_z t + 0.011t)^2}{-2\sigma_z^2}\right\}\right\}$$

其中 ζ_1, ζ_2 表示水平和竖直方向; V_{xh}, V_{zh} 分别表示合扩散速度在 x 轴和 z 轴的分速度。

取放射源强 $Q = 7.7 \times 10^{18}$ Bq/h [9], 故实际观测位置辐射污染模型(数值)可表示如下:

$$c(t) = 1.49 \times 10^3 Q \exp(-0.00358t) \zeta_1 \cdot \zeta_2$$

$$\zeta_1 = \exp\left\{\frac{(6.2 \times 10^4 - V_{xh}t)^2}{-0.1458} + \frac{y^2}{-0.000968}\right\}$$

$$\zeta_2 = \exp\left\{\frac{(20 + \Delta h + 0.109t)^2}{-0.000512}\right\} + 0.5 \exp\left\{\frac{(20 + \Delta h - 0.109t)^2}{-0.000512}\right\}$$

由 Matlab 软件进行编程计算, 得 $t = 4899$ h (约 204 天后)。考虑到实际情况, 核电站在福岛县内距福岛市并不远, 因此受辐射强度大, 此值可以接受。沿风向方向初始放射源强度为 Q 辐射污染扩散仿真图, 如图 2。

如考虑 ^{137}Cs 等放射性元素的衰变, 则有:

$$\begin{cases} Q_{\text{总}} = Q_I + Q_{\text{Cs}} + \dots \\ c(t) = \alpha c_I(t) + \beta c_{\text{Cs}}(t) + \dots \\ c_I(t) = Q_{Id}(t) \zeta_1 \cdot \zeta_2 \\ c_{\text{Cs}}(t) = Q_{Csd}(t) \zeta_1 \cdot \zeta_2 \\ \dots \end{cases} \quad (\text{其中 } \alpha, \beta \text{ 均为常数})$$

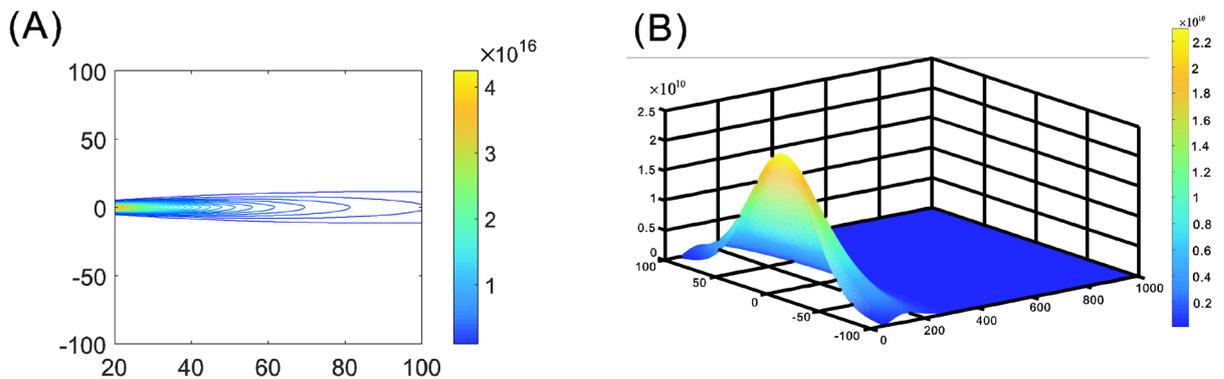


Figure 2. The initial radiation source intensity along the direction of wind direction is the simulation diagram of Q radiation pollution diffusion, where (A) is the equipotential diagram and (B) is the diffusion diagram along the direction of wind direction

图 2. 沿风向方向初始放射源强度为 Q 辐射污染扩散仿真图, 其中(A)为等势图, (B)为沿风向方向扩散图

3. 基于层次分析法的处理措施优化模型

核泄漏事故不仅会造成经济损失, 更会危害到附近居民的健康和产生较大的社会影响。对核电站抢修可最大程度的降低人群受放射污染的计量, 保护人民群众的安全。人们对核污染的恐慌心理会造成股市波动, 土地废弃等, 从而直接或间接地对各个产业造成影响。因此有关部门应及时公布相关信息降低群众的恐慌。

为了在核事故中最大限度地减少辐射伤害和降低损失, 在评估处理措施时考虑三个最重要的因素, 即时间, 距离, 庇护场所。

综合上述因素, 大致有以下 4 种基本方案:

方案一: 以疏散人群为首要任务(尽快将核电站工人及附近居民疏散到安全地带);

方案二: 以阻断污染源为首要任务(对核泄漏威胁进行全面客观分析, 不惜一切代价防止核泄漏);

方案三: 以及时准确的公布信息为首要任务(公布放射性物质变化真实情况, 消除不必要的恐慌, 也让避难的人们提前做好心理准备, 以便紧急情况下的避难行动);

方案四: 以切断放射性物质的传播途径及控制传染源为首要任务(对已受核污染的人群及牲畜进行去污处理, 防止二次污染)。

通过以上的方案及准则, 构造决策层次图如下图 3。

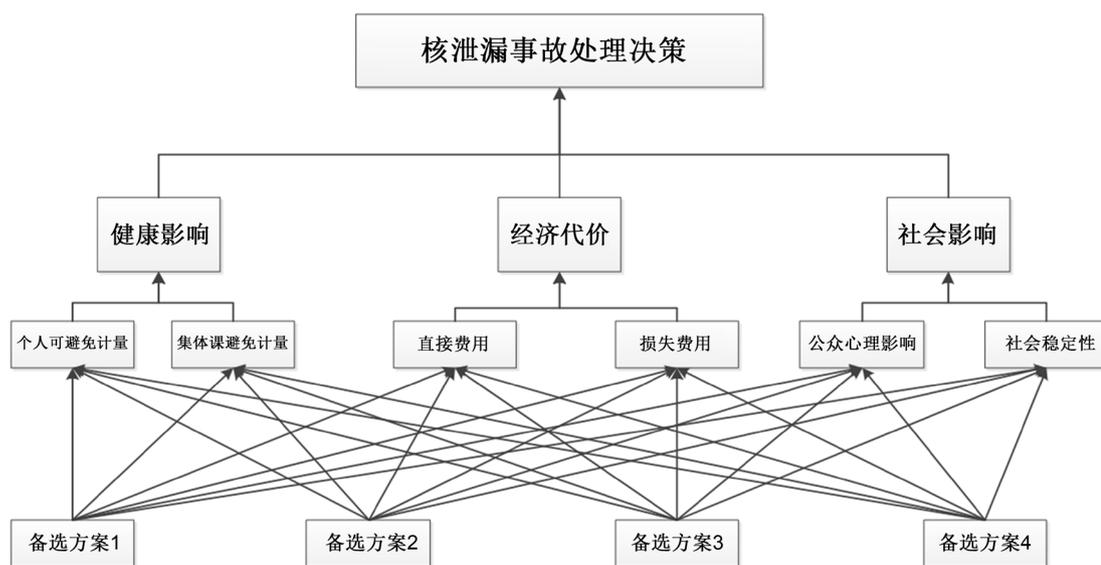


Figure 3. Nuclear leakage incident management decision hierarchy diagram

图 3. 核泄漏事故处理决策层次图

根据 Saaty 等人提出的 1~9 尺度[7], 分别确定各层对上层每一因素的成对比较阵以及方案。

子准则层对父准则层的属性判断:

$$\text{健康影响 } A = \begin{pmatrix} 1 & 8 \\ 1/8 & 1 \end{pmatrix}; \text{经济代价 } B = \begin{pmatrix} 1 & 9 \\ 1/9 & 1 \end{pmatrix}; \text{社会影响 } C = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}。$$

父准则层对目标层的属性判断:

$$O = \begin{pmatrix} 1 & 1/9 & 1/2 \\ 9 & 1 & 1/7 \\ 2 & 7 & 1 \end{pmatrix}$$

子准则层对目标层的判断矩阵

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/7 & 2 \\ 1 & 1 & 1/7 & 1/3 \\ 7 & 7 & 1 & 5 \\ 1/2 & 3 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/6 & 1/5 \\ 1 & 1 & 1/4 & 1/4 \\ 6 & 4 & 1 & 1/2 \\ 5 & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix}, A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/6 & 1/3 & 1/2 \\ 6 & 1 & 1/4 & 2 \\ 3 & 4 & 1 & 3 \\ 2 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1 & 1/4 & 1/5 \\ 1 & 4 & 1 & 2 \\ 1/3 & 5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, A_5 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 4 & 2 \\ 1/3 & 1/4 & 1 & 1/4 \\ 1 & 1/2 & 4 & 1 \end{pmatrix}, A_6 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 4 & 1 \\ 1/3 & 1/4 & 1 & 1/3 \\ 2 & 1 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

经过 Matlab 编程，得到一致性指标[9]比例数 CR 如下表 1:

Table 1. The proportion of consistency index of each parameter

表 1. 各参数的一致性指标比例数

<i>O</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i> ₁	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>A</i> ₄	<i>A</i> ₅	<i>A</i> ₆
1.418	0	0	0	0.117	0.034	0.221	0.0445	0.0327	0.0327

由上表可以看出矩阵 *O*, *A*₁, *A*₃ 的 CR 值大于 0.1, 即不满足一致性, 采用最大方向改进方法进行一致性调整后, 得到方案对总目标的权重如下表 2:

Table 2. Weight of each alternative to the target

表 2. 各备选方案对目标的权重

备选方案	备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D
对总目标的权重	0.1717	0.3062	0.2603	0.2617

由上表看出各方案对总目标的权重排序为 B > D > C > A。

根据上述模型, 得到的解决方案如下:

第一: 为了将核辐射危害降到最低, 将损失减到最小, 阻断核污染源是当务之急;

第二: 对于已受污染及可能受污染影响的人群, 牲畜及食品作物等进行全面的核辐射检查及去污处理, 并进行有效地控制, 防止二次污染;

第三: 要及时向公众公开核泄漏相关信息, 以及当局和东电公司的核处理计划, 尽量降低公众的恐慌以及避免因为焦虑等引起的愤怒情绪对社会稳定造成的影响;

第四: 疏散人群也是不容忽视的, 尽可能的将辐射区人群安置到相对安全的地方, 将人们的经济损失及健康危害降到最低。

基金项目

国家自然科学基金(11761025, 11901114), 广东省教育厅青年创新人才类(2017KQNCX081), 广州市科技创新一般项目(201904010010), 中山大学广东省计算科学重点实验室开放课题基金资助(2018001), 海南省研究生创新科研课题项目(Hys2019-59)。

参考文献

- [1] 乔方利, 王关锁, 赵伟, 赵杰臣, 戴德君, 宋亚娟, 宋振亚. 2011年3月日本福岛核泄漏物质输运扩散路径的情景模拟和预测[J]. 科学通报, 2011(12): 887-894.

-
- [2] 张斌才, 赵军. 大气污染扩散的高斯烟羽模型及其 GIS 集成研究[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 15-19.
- [3] 黄文宏, 章保东, 包其富, 朱建新. 重质气体泄漏扩散模型研究综述[J]. 浙江化工, 2009, 40(7): 18-22.
- [4] 张振华, 姜林, 杨广婷, 程芬. 放射性气体在介质中扩散的有限差分计算与模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(3): 279-284.
- [5] 陈坤, 刘德欢, 李开放, 魏鑫. 基于高斯烟羽模型的山区含硫天然气泄漏扩散研究[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(4): 156-157.
- [6] Hertwig, D., Soulhac, L., Fuka, V., Auerswald, T., Carpentieri, M., Hayden, P., Robins, A., Xie, Z.-T. and Cocca, O. (2017) Evaluation of Fast Atmospheric Dispersion Models in a Regular Street Network. *Environmental Fluid Mechanics*, **18**, 1007-1044. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9587-7>
- [7] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 167-170, 224-243.
- [8] 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(3): 107.
- [9] Sokhi, R.S., Jose, R.S., Kitwiroon, N., *et al.* (2006) Prediction of Ozone Levels in London Using the MM5-CMAQ Modeling System. *Environmental Modelling & Software*, **21**, 566-576. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.07.016>
- [10] 中国统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [11] 叶奇蓁. 从福岛第一核电站事故看我国核能利用与核安全[C]//2011 中国科协热点问题学术报告会论文集. 2011.
- [12] 王鹏飞, 费建芳, 程小平, 黄小刚. 福岛核泄漏物质在大气中输送扩散的数值模拟[C]//第 28 届中国气象学会年会——S17 第三届研究生年会. 2011.
- [13] 辛晶. 基于区间层次分析法的核事故应急决策方案优选[J]. 辐射防护, 2007, 27(5): 282-285, 313.
- [14] Song, Z.Y., Qiao, F.L. and Wang, C.Z. (2011) The Correctness to the Spuriously Simulated Semi-Annual Cycle of the Sea Surface Temperature in the Equatorial Eastern Pacific. *Science China Earth Sciences*, **54**, 438-444. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4176-3>

附录

附录 1:

Briggs 扩散参数

大气稳定度	σ_y	σ_z
A	$0.22x(1+0.0001x)^{1/2}$	$0.2x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)$

附录 2: 层次分析法的权重比较表

1. 日本核泄漏事故处理决策 判断矩阵一致性比例: 0.1701; 对总目标的权重: 1.0000

日本核泄漏事故

处理决策	健康影响	经济代价	社会影响	Wi
健康影响	1.0000	1.0000	0.5000	0.2130
经济代价	1.0000	1.0000	0.1429	0.1403
社会影响	2.0000	7.0000	1.0000	0.6467

2. 健康影响 判断矩阵一致性比例: 0.0000; 对总目标的权重: 0.2130

健康影响	个人可避免计量	集体可避免计量	Wi
个人可避免计量	1.0000	8.0000	0.8889
集体可避免计量	0.1250	1.0000	0.1111

3. 经济代价 判断矩阵一致性比例: 0.0000; 对总目标的权重: 0.1403

经济代价	直接费用	损失费用	Wi
直接费用	1.0000	9.0000	0.9000
损失费用	0.1111	1.0000	0.1000

4. 社会影响 判断矩阵一致性比例: 0.0000; 对总目标的权重: 0.6467

社会影响	公众心理影响	社会稳定性	Wi
公众心理影响	1.0000	0.2500	0.2000
社会稳定性	4.0000	1.0000	0.8000

5. 个人可避免计量 判断矩阵一致性比例: 0.0451; 对总目标的权重: 0.1893

个人可避免计量	备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	Wi
备选方案 A	1.0000	1.0000	0.1429	1.0000	0.1039
备选方案 B	1.0000	1.0000	0.1429	0.3333	0.0789
备选方案 C	7.0000	7.0000	1.0000	5.0000	0.6685
备选方案 D	1.0000	3.0000	0.2000	1.0000	0.1487

6. 集体可避免计量 判断矩阵一致性比例: 0.0345; 对总目标的权重: 0.0237

集体可避免

计量

	备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	Wi
备选方案 A	1.0000	1.0000	0.1667	0.2000	0.0806
备选方案 B	1.0000	1.0000	0.2500	0.2500	0.0943
备选方案 C	6.0000	4.0000	1.0000	0.5000	0.3509
备选方案 D	5.0000	4.0000	2.0000	1.0000	0.4742

7. 直接费用 判断矩阵一致性比例: 0.0361; 对总目标的权重: 0.1262

直接费用备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	Wi	
备选方案 A	1.0000	1.0000	0.3333	2.0000	0.1910
备选方案 B	1.0000	1.0000	0.2500	2.0000	0.1777
备选方案 C	3.0000	4.0000	1.0000	3.0000	0.5177
备选方案 D	0.5000	0.5000	0.3333	1.0000	0.1136

8. 损失费用 判断矩阵一致性比例: 0.0449; 对总目标的权重: 0.0140

损失费用备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	Wi	
备选方案 A	1.0000	7.0000	1.0000	3.0000	0.4223
备选方案 B	0.1429	1.0000	0.2500	0.2000	0.0574
备选方案 C	1.0000	4.0000	1.0000	2.0000	0.3318
备选方案 D	0.3333	5.0000	0.5000	1.0000	0.1885

9. 公众心理影响 判断矩阵一致性比例: 0.0327; 对总目标的权重: 0.1293

公众心理

影响 备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	Wi	
备选方案 A	1.0000	0.3333	3.0000	1.0000	0.2091
备选方案 B	3.0000	1.0000	4.0000	2.0000	0.4628
备选方案 C	0.3333	0.2500	1.0000	0.2500	0.0794
备选方案 D	1.0000	0.5000	4.0000	1.0000	0.2487

10. 社会稳定性 判断矩阵一致性比例: 0.0327; 对总目标的权重: 0.5174

社会稳定性备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	Wi	
备选方案 A	1.0000	0.3333	3.0000	0.5000	0.1799
备选方案 B	3.0000	1.0000	4.0000	1.0000	0.3981
备选方案 C	0.3333	0.2500	1.0000	0.3333	0.0873
备选方案 D	2.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.3347

附录 3:

%%%%%%%%%通过 Matlab 模拟辐射污染扩散

Q=7.7*10^18;%输入强源

u=9.475;%输入风速

d=1;%迭代步长

Z=0.5;%放射性核素强度

```

x=20:d:100;%沿风向距离
y=-100:d:100;%垂直风向距离
[x,y]=meshgrid(x,y);
by0=0.08*x.*(1+0.0001*x).^(-1/2);
bz0=0.06*x.*(1+0.0015*x).^(-1/2);
by=by0.*(1+0.38*Z);
fz=(2.53-0.13*log(x)).*(0.55+0.042*log(x)).^(-1).*Z.^(0.35-0.03*log(x));
bz=bz0.*fz;
tempy1=-y.*y./by./by./2;
tempy2=2.718282.^(tempy1);
c=Q/pi/u*((by.*bz).^(-1)).*tempy2
Cs=40;
contour(x,y,c,Cs);
shading interp;
colorbar;
grid off;

```

附录 4:

通过 Matlab 模拟辐射污染扩散 2

Q=input('泄露源: ');%%泄露源强度为 7.7×10^{18}

d=input('计算机精度: ');%%计算精度为 1

Z0=input('地面粗糙长度: ');%%取 0.5

H=input('源高度: ');%%源高度为 20

t=100;

z=0;

[x,y]=meshgrid(50:d:1000,-100:d:100);

by0=0.08.*x.*(1+0.0001*x).^(-1/2);

bz0=0.06.*x.*(1+0.0015*x).^(-1/2);

by=by0.*(1+0.38*Z0);

bx0=0.08.*x.*(1+0.0001*x).^(-1/2);

bx=bx0.*(1+0.38*Z0);

fz=(2.53-0.13*log(x)).*(0.55+0.042*log(x)).^(-1).*Z0.^(0.35-0.03*log(x));

bz=bz0.*fz;

n=Q/((4*pi*t).^3/2).*(bx.*bz.*by).^(1/2);

m=exp(-x.^2./(4.*bx.*t)-y.^2./(4.*by.*t)-(z-H).^2./(4.*bz.*t));

c=n.*m;

l=input('输入条数: ');%%条数为 20

%contour(x,y,c,l)

mesh(x,y,c)

附录 5: 层次分析法 Matlab 程序

```
function [ W,ahpResult] = ahp(C)
n=length(C);
ahpResult=cell(n,1);
for k=1:n
    m_n=size(C{k},2);%k 层的元素个数
    ahpResult{k}=cell(m_k,1);
    for kk=1:m_k%求 k+1 各元素对 k 层 kk 元素的成对比较矩阵的特征值和特征向量
        [V,D]=eig(C{k}{1,kk});
        [maxD,ind]=max(diag(D));%求最大特征值和其位置
        %为存储第 k+1 层所有元素相对 k 层 kk 元素的权重预留出空间,长度应等于 C{k}{2,kk} 的长度
        ahpResult{k}{1,kk}=zeros(length(C{k}{2,kk}),1);
        %将相应正互反矩阵属于最大特征值的特征向量归一化后赋给 ahpResult{k}{1,kk} 中相应位置,
        %这些位置由逻辑术组 C{k}{2,kk} 决定
        ahpResult{k}{1,kk}(C{k}{2,kk})=V(:,ind)/sum(V(:,ind));
        ahpResult{k}{2,kk}=maxD;%正互反矩阵的最大特征值
        nn=size(C{k}{1,kk},1);%C{k}{1,kk} 的阶数
        ahpResult{k}{3,kk}=(maxD-nn)/(nn-1)/RI(nn);%相应的一致性比例
    end
end
W=ahpResult{1}{1,1};
for k=2:n
    W=cat(2,ahpResult{k}{1,:}) * W;%cat(2,ahpResult{k}{1,:})是把 k+1 层所有元素相对 k 层各个元素的权重向量横向
    排在一起生成的权重矩阵
end
```