

# 聚变堆失真空事故下氚的大气扩散模拟研究

姜京华 曹学武

(上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

**摘要** 聚变反应堆发生失真空事故的情况下氚会泄漏到环境中,氚大气扩散模拟是聚变堆事故后果评价的重要内容。基于高斯烟团模型以及 Pasquill 稳定度分类方法,考虑重力沉降、烟气抬升、风速等因素的影响,建立了适用于事故下瞬态分析的大气扩散模型,在高斯烟团模型中加入修正了像源贡献的地面反射系数,提高了模型对于地面边界处于沉降的计算效果。选取加拿大氚气释放实验和美国萨凡那河工厂氚释放事故验证了所建立模型的准确性,模型的计算结果与 HotSpot 3.0 和 UFOTRI 软件的精度相当。选取国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 的失真空事故作为研究对象,分析了氚的分阶段释放、风速以及释放高度对氚扩散分布的影响。结果表明:氚的分阶段释放会导致沿下风向出现两个高放射性区域;释放高度和风速的增加会强化氚在大气中的扩散行为,从而减弱放射性在近场的积聚。

**关键词** 聚变堆, 氚, 大气扩散, 放射性后果

中图分类号 TL732

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020605

## Simulation study of tritium atmospheric dispersion of loss of vacuum accident of a fusion reactor

JIANG Jinghua CAO Xuewu

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** [Background] Tritium can be released into the environment in a loss of vacuum (LOVA) scenario in a fusion reactor. The simulation of the atmospheric dispersion behaviour of tritium is one of the core components of the assessment of the radioactive consequences. [Purpose] This study aims to analyse the behaviour of tritium dispersion in the atmosphere after a fusion reactor accident. [Methods] Based on the Gauss model and the Pasquill stability classification method, an analytical model of tritium dispersion was developed for transient cases considering the effects of gravitational settling, smoke lifting, and wind speed, etc. The calculation of the model for dry settling at the ground boundary was improved by adding ground reflection coefficients to the Gauss model. Finally, the Canadian tritium release experiment and the tritium release accident at the Savannah River plant in the United States were used to verify the applicability of the model. [Results] Verification results show that the accuracy of the developed model is the same as that of UFOTRI and the HotSpot 3.0 code. For the LOVA scenario of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), the atmospheric dispersion behaviour of tritium is obtained for multiple release heights, different wind velocities and tritium phased releases. [Conclusions] The phased release of tritium results in two highly radioactive regions along the downwind direction, and the increase in release height and wind speed will

国家磁约束核聚变能发展研究专项(No.2019YFE03110002)资助

第一作者: 姜京华, 男, 1997 年出生, 2019 年毕业于哈尔滨工程大学, 现为博士研究生, 专业领域为核反应堆安全

通信作者: 曹学武, E-mail: caoxuewu@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-16, 修回日期: 2022-10-25

Supported by National Research Special Project for Development of Magnetic Confinement Fusion Energy (No.2019YFE03110002)

First author: JIANG Jinghua, male, born in 1997, graduated from Harbin Engineering University in 2019, doctoral student, focusing on nuclear reactor safety

Corresponding author: CAO Xuewu, E-mail: caoxuewu@sjtu.edu.cn

Received date: 2022-06-16, revised date: 2022-10-25

enhance the atmospheric diffusion behaviour of tritium and thus reduce the accumulation of radioactivity in the near field.

**Key words** Fusion reactor, Tritium, Atmospheric dispersion, Radioactive consequences

氚在传统裂变堆中的产生率(压水堆约为 $0.075 \text{ g}\cdot\text{a}^{-1}$ )、盘存量(克量级)和放射性轻度都明显低于比Cs<sup>[1]</sup>、I<sup>[2]</sup>等放射性核素,因此,在以往的针对裂变堆的放射性后果评价中<sup>[3-4]</sup>,氚的大气扩散行为并没有引起很大关注。而对于聚变反应堆,氚是重要的原料<sup>[5]</sup>,以国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)为例<sup>[6]</sup>,系统中氚的总贮存量达到3~4 kg,其中真空室内的氚存量达到1 kg,一旦发生事故导致聚变反应堆的放射性屏障遭到破坏,大量的氚会泄漏到环境中并随大气扩散,威胁公众安全,对于氚的大气扩散行为的计算是聚变堆事故后果评价的重要内容<sup>[7]</sup>。

近年来,国内外针对聚变堆事故下氚的大气扩散行为开展了一系列研究:德国卡尔斯鲁厄中子物理与技术研究所的Raskob<sup>[8-9]</sup>采用UFOTRI软件对释放高度分别为10 m和150 m、风速为 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下,短期均匀释放氚的大气扩散在1 km范围造成的放射性后果进行了评估。ITER联合中心的Cortes和Taylor等<sup>[10-11]</sup>采用UFOTRI、COSYMA以及CERES软件,对释放高度为0 m、10 m、30 m和60 m、风速为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下,短期均匀释放氚的大气扩散对下风向0.2 km、1.2 km、2.5 km和3.5 km造成的放射性后果进行了评估。中国科学院核能安全技术研究所的聂保杰等<sup>[12-13]</sup>建立了TAS3.0程序,评估了聚变堆发生假设严重事故时,释放高度为10 m、风速为 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下,短期均匀释放氚的大气扩散对下风向1 km处造成的放射性后果进行了评估。

目前,针对聚变堆氚的大气扩散行为的模拟研究均假设氚在短期内均匀释放,无法反映出实际事故进程中沉积层氚的分阶段释放。现有研究指出,需要考虑地面的反射作用,但镜面全反射会导致计算结果低估粒子在地面的沉降作用。此外,现有的研究未能阐释典型因素对氚大气扩散时空分布的影响规律。本研究建立了修正地面反射的氚大气扩散计算模型,对比加拿大氚气释放实验数据和HotSpot 3.0软件的计算结果验证模型的准确性。以ITER失真空事故为对象,研究了真空室内材料沉积层中氚的分阶段释放、风速和有效释放高度对氚大气扩散时空分布的影响规律。

## 1 分析模型

### 1.1 大气扩散理论模型

目前,模拟气态污染物扩散分布的模型主要有拉格朗日模型、高斯模型和计算流体力学模型。高斯模型由于响应速度快、输入条件简单、适用于中小尺度(20 km以内)的放射性分布计算,被广泛应用于核电厂放射性物质在环境中扩散的计算。高斯模型可以分为适用于稳态工况的高斯烟羽模型和适用于瞬态事故工况的高斯烟团模型。

### 1.2 高斯烟团模型

聚变堆事故后氚从烟囱出口释放到环境中可以考虑为瞬时的高架点源释放,通常采用高斯烟团模型来计算这种形式的放射性物质扩散行为考虑地面全反射的高架瞬时点源高斯烟团模型的一般形式如式(1),其详细的推导过程可见参考文献[14]。

$$C(x,y,z,T,H) = \int_0^{\infty} \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(T) \sigma_y(T) \sigma_z(T)} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{(x - uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} \right) \right] \cdot \left\{ \exp \left[ - \frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2(T)} \right] + \exp \left[ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2(T)} \right] \right\} dT \quad (1)$$

式中: $C$ 为气态氚的浓度, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $Q_i$ 为每个释放出来的烟团活度, $\text{Bq}$ ;  $u$ 为烟囱出口处的风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $H$ 为源高, $\text{m}$ ;  $T$ 为烟团扩散的时间, $\text{s}$ ;  $\sigma_x(T)$ 、 $\sigma_y(T)$ 、 $\sigma_z(T)$ 分别为 $T$ 时刻下风向、侧风向和垂直方向的大气扩散系数。

另外,氚在大气中的浓度分布与源项、气象条件及地形特征等均有一定关系,为较真实地模拟氚的浓度分布,必须对模型进行相关修正,包括地面反射、源项、源高、风速、扩散参数、大气稳定度、干沉降、湿沉降等。

### 1.3 地面反射修正

在实际大气扩散过程中,地面不是全吸收表面,应该考虑地面的反射作用,但简单地将地面考虑为镜面全反射会低估粒子在地面的沉降作用,因此本文在反射导致的像源项设置反射系数 $\theta$ 来表征地面的部分反射作用。

采用像源法分别计算实源和像源的浓度贡献,其中实源的位置为 $(x,y,z,T,H-z)$ ,浓度贡献为:

$$C(x,y,z,T,H) = \int_0^\infty \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(T) \sigma_y(T) \sigma_z(T)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{(x-uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(T)}\right)\right] dT \quad (2)$$

其中像源的位置为 $(x,y,z,T,H+z)$ ,浓度贡献为:

$$C(x,y,z,T,H) = \int_0^\infty \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(T) \sigma_y(T) \sigma_z(T)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{(x-uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} + \frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(T)}\right)\right] dT \quad (3)$$

在像源项添加地面反射系数 $\theta$ ,以修正氙在地面处的沉降强度,得到考虑地面反射率的高斯烟团模型:

$$C(x,y,z,T,H) = \int_0^\infty \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(T) \sigma_y(T) \sigma_z(T)} \cdot \left\{ \exp\left[-\left(\frac{(x-uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(T)}\right)\right] + \theta \cdot \exp\left[-\left(\frac{(x-uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} + \frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(T)}\right)\right] \right\} dT \quad (4)$$

#### 1.4 风速修正

从高斯烟团模型的表达式可以看出,风速是影响放射性物质在大气环境中迁移快慢的重要因素,由于一般气象观测给出的风速数据是离地面10 m高度处的风速,氙释放位置处的风速会随高度变化而不同,需要根据不同地面条件的风廓线幂指数对风速进行修正<sup>[15]</sup>,修正公式如式(5):

$$u = u_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^m \quad (5)$$

式中: $u_{10}$ 为10 m高度处的风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $H$ 为有效释放高度, $\text{m}$ ;  $u$ 为有效释放高度 $H$ 处的平均风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $m$ 为风速廓线系数,无量纲,取值见表1。

表1 风廓线系数 $m$ 值<sup>[15]</sup>  
Table 1 Wind profile coefficient  $m$  value<sup>[15]</sup>

下垫面 Underpad surface	大气稳定度 Atmospheric stability					
	A	B	C	D	E	F
农田 Farmland	0.10	0.15	0.20	0.25	0.35	0.40
城市/丘陵 Urban/hilly	0.11	0.12	0.14	0.25	0.39	0.44

#### 1.5 有效释放高度修正

氙的初始释放速度会产生动力抬升效应,释放温度高于环境温度也会导致热力抬升效应,使氙的有效释放高度高于释放点的物理高度。因此,需要考虑烟气的抬升效应对有效释放高度进行修正,根

据已有学者对烟气抬升公式的对比与分析<sup>[16]</sup>,本文采用的修正方法如式(6):

$$H = H_0 + \Delta H \quad (6)$$

式中: $H$ 为有效释放高度, $\text{m}$ ;  $H_0$ 为烟囱出口的物理高度, $\text{m}$ ;  $\Delta H$ 为抬升高度, $\text{m}$ 。

当释放温度与环境温度 $\geq 35^\circ\text{C}$ 时,释放方式为热释放,抬升高度为:

$$\Delta H = \frac{1}{u_0} (0.92V_0D + 0.792Q_{h0}^{0.4} H_0^{0.6}) \quad (7)$$

式中: $u_0$ 为烟囱出口高度处的平均风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,由式(5)计算得出; $V_0$ 为气体释放速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D$ 为排气烟囱直径, $\text{m}$ ;  $H_0$ 为烟囱距地面的物理高度, $\text{m}$ ;  $Q_{h0}$ 为热排放率, $\text{kW}$ 。

$$Q_{h0} = 0.275PD^2V_0 \frac{T_0 - T_a}{T_0} \quad (8)$$

式中: $T_0$ 为气体释放温度, $\text{K}$ ;  $T_a$ 为环境温度, $\text{K}$ ;  $P$ 为气压, $\text{hPa}$ 。

当释放温度与环境温度 $\leq 35^\circ\text{C}$ 时,释放方式为冷释放,抬升高度为:

$$\Delta H = 2(1.5V_0D + 0.01Q_{h0})/u_0 \quad (9)$$

当风速 $u \leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,取 $u = 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

#### 1.6 耗减修正

耗减修正包括干沉降修正和湿沉降修正。对于干沉降的影响,采用部分反射的倾斜烟云模型<sup>[14]</sup>进行计算,考虑烟团的沉降行为是作用在运行过程中的,实源以 $V_s(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 速度向下移动,故得到考虑干沉降的高斯烟团模型:

$$C(x,y,z,T,H) = \int_0^\infty \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(T) \sigma_y(T) \sigma_z(T)} \cdot \left\{ \exp\left[-\left(\frac{(x-uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} + \frac{(z-H + \frac{V_s x}{u})^2}{2\sigma_z^2(T)}\right)\right] + \theta \exp\left[-\left(\frac{(x-uT)^2}{2\sigma_x^2(T)} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2(T)} + \frac{(z+H - \frac{V_s x}{u})^2}{2\sigma_z^2(T)}\right)\right] \right\} dT \quad (10)$$

降雨对烟团中粒子具有清洗作用,通常采用冲洗系数 $\lambda(\text{s}^{-1})$ <sup>[17-18]</sup>来描述清洗作用的大小。湿沉降导致的烟团耗减可以对源强进行修正:

$$Q(x) = Q \exp\left(-\frac{\lambda x}{u}\right) \quad (11)$$

## 1.7 扩散系数和大气稳定度

划分大气稳定度的方法是采取帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类法,该方法将大气稳定度分为A、B、C、D、E和F。计算过程主要包括以下几个步骤:

- 1) 根据地理和时间信息计算太阳倾角;
- 2) 根据太阳倾角计算太阳高度角;
- 3) 根据云量和太阳高度角计算太阳辐射等级;
- 4) 根据地面风速和太阳辐射等级计算大气稳定度。

扩散系数采用国家标准 GB/T 3840—1991<sup>[15]</sup>中扩散系数的计算方法,烟团模型中下风向扩散系数等同于侧风向扩散系数。

## 2 模型验证

### 2.1 稳态计算结果验证

氚大气扩散模型的稳态计算验证选取1987年6月加拿大恰克河国家核实验室开展的氚气(HT)大气释放实验的数据<sup>[19]</sup>,并与美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室开发的HotSpot3.0软件对比<sup>[13]</sup>,程序的输入参数见表2。其中: $Q$ 为源项放射性浓度; $H$ 为源项出口高度; $u$ 为风场速度(0.9 m高度处); $v_d$ 为干沉降速度; $K$ 为大气稳定度; $\theta$ 为地面反射率; $v_0$ 为源项出口速度; $\alpha$ 为地面粗糙度。

加拿大氚气释放实验数据<sup>[19]</sup>、本模型的计算结果以及参考文献中HotSpot3.0计算结果<sup>[13]</sup>见表3。

表2 稳态计算模型的输入参数  
Table 2 Input parameters of the steady-state computational model

参数 Parameter	$Q / \text{GBq}\cdot\text{s}^{-1}$	$H / \text{m}$	$u / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_d / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$K$	$\theta$	$v_0 / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\alpha$
数值 Value	1.967	1	2.25	0.000 4	BC	0.3 <sup>[18]</sup>	4	0.3

表3 稳态计算结果和实验数据对比  
Table 3 Comparison of steady-state calculation results and experimental data

测量点坐标 Coordinates / m	实验数据 Experimental data / $\text{MBq}\cdot\text{m}^{-3}$	HotSpot 3.0 / $\text{MBq}\cdot\text{m}^{-3}$	本模型 Developed model / $\text{MBq}\cdot\text{m}^{-3}$
(50,16,1)	0.707	—	0.703
(50,8,1)	1.12	—	2.77
(50,0,1)	1.64	4.5	4.37
(183,70,1)	0.063 3	—	0.016 7
(183,0,1)	0.135	0.46	0.418
(400,35,1)	0.011 7	—	0.081 1
(400,0,1)	0.015 4	0.098	0.098 2

表3结果表明,建立的大气扩散模型的计算结果能够反映加拿大氚气释放实验的放射性分布规律,各测点的计算结果与实验数据均在同一数量级,计算精度与HotSpot 3.0软件相当,模型可以较为准确地预测氚在空间中的分布情况,可用于聚变堆事故中的氚扩散分布的稳态计算。

### 2.2 瞬态计算结果验证

氚大气扩散模型的稳态计算验证选取1974年

表4 瞬态计算模型输入参数  
Table 4 Transient calculation model input parameters

参数 Parameters	$Q / \text{TBq}$	$H / \text{m}$	$u / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_d / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$K$	$\theta$	$D / \text{m}$	$v_0 / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\alpha$
数值 Value	73.86	60	2.44	0.000 4	D	0.3	2.4	13.5	1.0

萨凡那河工厂氚释放事故数据<sup>[20]</sup>、本模型的计算结果以及参考文献中UFOTRI的计算结果<sup>[20]</sup>见表5。

表5结果表明,建立的大气扩散模型的计算结

果与参考文献中的数据在同一数量级,模型可以较为准确地预测氚的瞬态分布情况,可用于聚变堆事故中的氚扩散分布的瞬态计算。

表5 瞬态计算结果和实验数据对比  
Table 5 Comparison of transient calculation results and experimental data

事故后时间 Time after the accident / h	实验数据 Experimental data / MBq·m <sup>-3</sup>	UFOTRI / MBq·m <sup>-3</sup>	本模型 Developed model / MBq·m <sup>-3</sup>
5	0.014 4	2.48	0.042 1

### 3 失真真空事故下氚大气扩散分析

以ITER失真真空事故为研究对象,从共沉积层中氚的分阶段释放、风速以及释放高度对事故后氚扩散分布进行了分析。失真真空事故分析选取的模型输入参数见表6。

表6 失真真空事故分析模型输入参数  
Table 6 Input parameters for loss of vacuum accident analysis model

参数 Parameters	$Q$ / TBq·s <sup>-1</sup>	$v_d$ / m·s <sup>-1</sup>	$K$	$\theta$	$\alpha$
数值 Value	65.14(0≤t≤1 h)	0.000 4	$D$	0.3	0.3
	7.54(0≤t≤6 h)				

#### 3.1 氚的分阶段释放对氚扩散分布的影响

根据ITER安全分析报告<sup>[6]</sup>,真空中氚的限值为1 kg,其中,面对等离子体的真空室部件共沉积层中880 g,低温泵中120 g。事故分析中假设低温泵中的氚质量120 g和共沉积层中质量440 g在事故后1 h内匀速释放,剩余的共沉积氚质量440 g会在事故后6 h内匀速释放。保守假设全部的氚最终都会以HTO的形式进入环境中,给出氚的释放特性见表7。计算选取出现概率较大的中性大气稳定度 $D$ ,风速选取2 m·s<sup>-1</sup>,烟囱出口高度参考ITER的设计选取58 m。

表7 氚的释放特性  
Table 7 Release characteristics of tritium

类型 Type	释放量 Release amount / g	释放时间 Release time / h
低温泵和共沉积层中的氚 Tritium in cryogenic pumps and co-deposited layers	440+120	0≤t≤1
共沉积层中的氚 Tritium in co-deposited layers	440	0≤t≤6

混合释放阶段,沿下风向近地面处的放射性浓度分布如图1所示,可以看出,随着释放时间的增加,近地面最大放射性浓度减小,氚的扩散范围更广。但近地面的最大放射性浓度出现的位置不随释放时改变,氚始终在沿下风向950 m处积聚,形成一个明显的高浓度区。

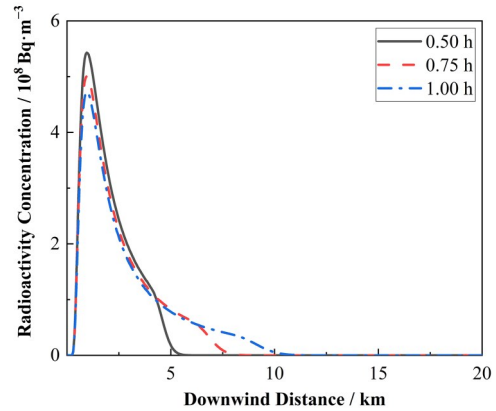


图1 混合释放阶段沿下风向近地面放射性浓度分布  
Fig.1 Distribution of near-surface radioactivity concentration along the downwind direction during the mixed release phase

单独释放阶段,沿下风向地面放射性浓度分布如图2和图3所示,可以看出,沿下风向出现两个高放射性浓度区域。共沉积层中氚的释放会在950 m处形成一个放射性浓度的积聚区,同时,混合释放阶段已排放的烟团会在下风向形成第二个放射性浓度积聚区。随着释放时间的增加,下风向950 m处由单独释放导致浓度峰值逐渐下降,已释放烟团形成的第二个浓度积聚区的峰值会逐渐下降,且其峰值产生的位置会更远,浓度在空间上的分布更加均匀。

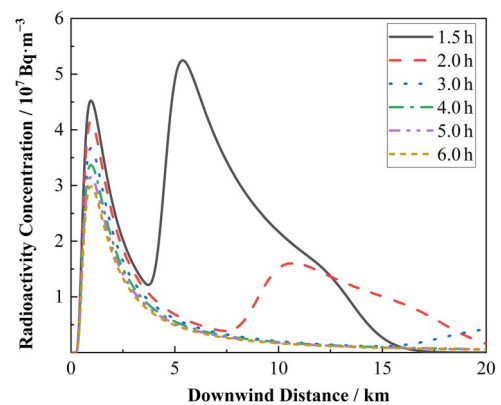


图2 单独释放阶段沿下风向近地面放射性浓度分布  
Fig.2 Distribution of near-surface radioactivity concentrations along the downwind direction during the individual release phase

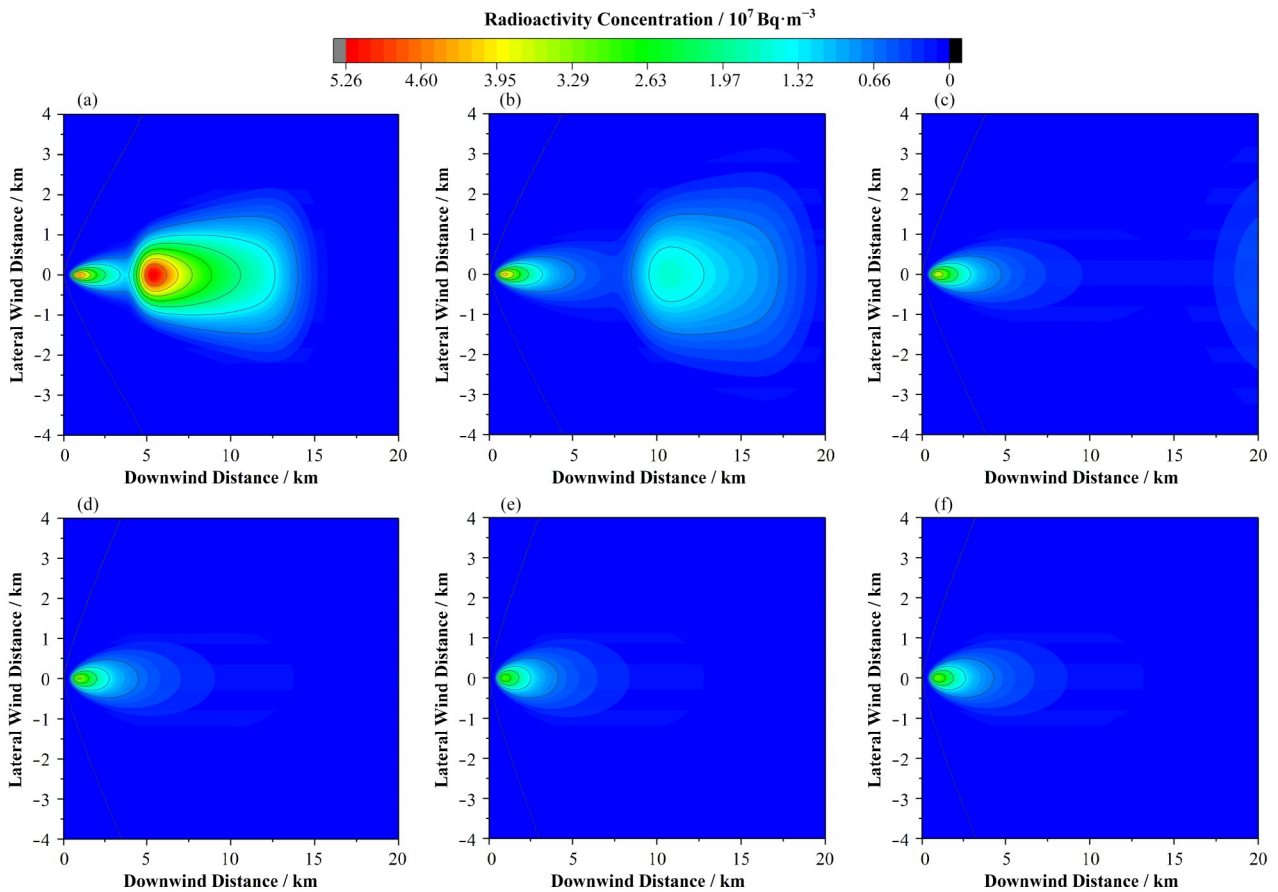


图3 近地面放射性浓度二维分布云图 (a) 1.5 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h, (e) 5 h, (f) 6 h  
 Fig.3 Nephogram of radioactive concentration distribution (a) 1.5 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h, (e) 5 h, (f) 6 h

### 3.2 风速对氙大气扩散的影响

选取出现概率较大的中性大气稳定度  $D$ , 烟囱出口高度为 58 m (参考 ITER), 计算了不同风速条件下的放射性分布情况。图 4 表明, 在事故后的各个阶段, 随着风速的增加, 下风向第一个放射性浓度峰值 (950 m 处) 逐渐下降。图 5 表明, 单独释放阶段,

随着风速的增加, 两个高浓度区的浓度峰值均明显下降, 但单独释放导致的近场放射性浓度峰值的位置没有发生改变, 混合释放的烟团放射性浓度峰值的位置逐渐变远。风速较小时, 已释放的放射性烟团在近场的滞留会导致该范围内出现极高的放射性浓度。

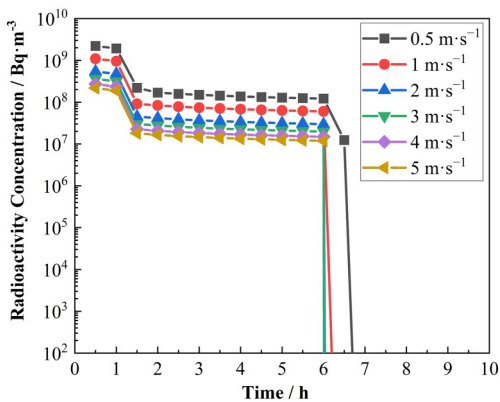


图4 不同风速近地面放射性浓度变化(950 m)  
 Fig.4 Variation of near ground level radioactivity concentration at different wind speeds (950 m)

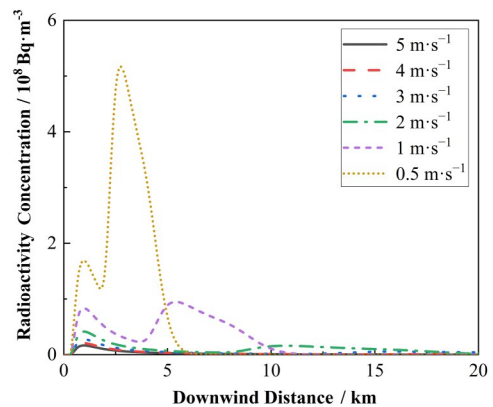


图5 不同风速近地面放射性浓度分布( $t=2$  h)  
 Fig.5 Distribution of near-surface radioactivity concentration at different wind speeds ( $t=2$  h)

### 3.3 释放高度对氙大气扩散的影响

考虑建筑物尾流效应和烟气抬升效应的影响, 烟团释放高度与烟囱出口高度存在差距。Cortes<sup>[11]</sup> 在开展 ITER 厂址特征对氙释放后果的敏感性研究时, 选取考虑尾流效应的烟团释放高度为 30 m。Raskob<sup>[9]</sup> 认为受动力抬升影响, 烟团的有效释放高度会高于烟囱出口高度。选取 30 m、58 m、70 m、90 m 的释放高度对环境中放射性分布的影响进行研究。模拟中考虑中性大气稳定度  $D$ , 风速  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

事故发生后 2 h 的结果如图 6 所示, 在单独释放阶段, 随着烟气释放高度的增加, 单独释放导致的近场放射性浓度峰值逐渐下降, 且峰值出现位置逐渐变远, 分别为 450 m、950 m、1 200 m 和 1 600 m, 且放射性浓度在空间的分布趋于均匀。但有效释放高度对单独释放阶段下风向较远处的近地面放射性浓度影响不大。选取 500 m、1 000 m、2 000 m、5 000 m 几处典型位置, 计算不同释放阶段不同有效释放高

度近地面放射性浓度如图 7 所示, 提高有效释放高度可以强化放射性烟团的扩散能力, 显著降低近距离的放射性浓度, 削弱放射性烟团在近场的滞留。

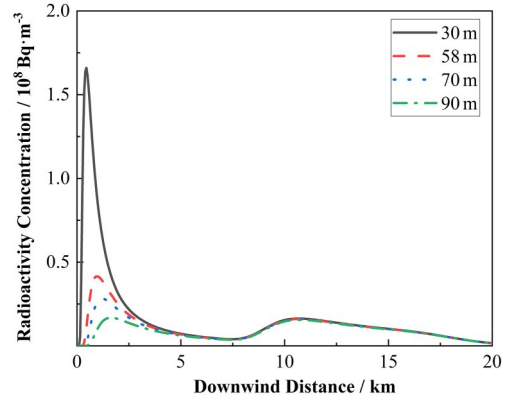


图 6 不同释放高度近地面放射性浓度分布 ( $t=2 \text{ h}$ )  
Fig.6 Distribution of near-surface radioactivity concentration at different release heights ( $t=2 \text{ h}$ )

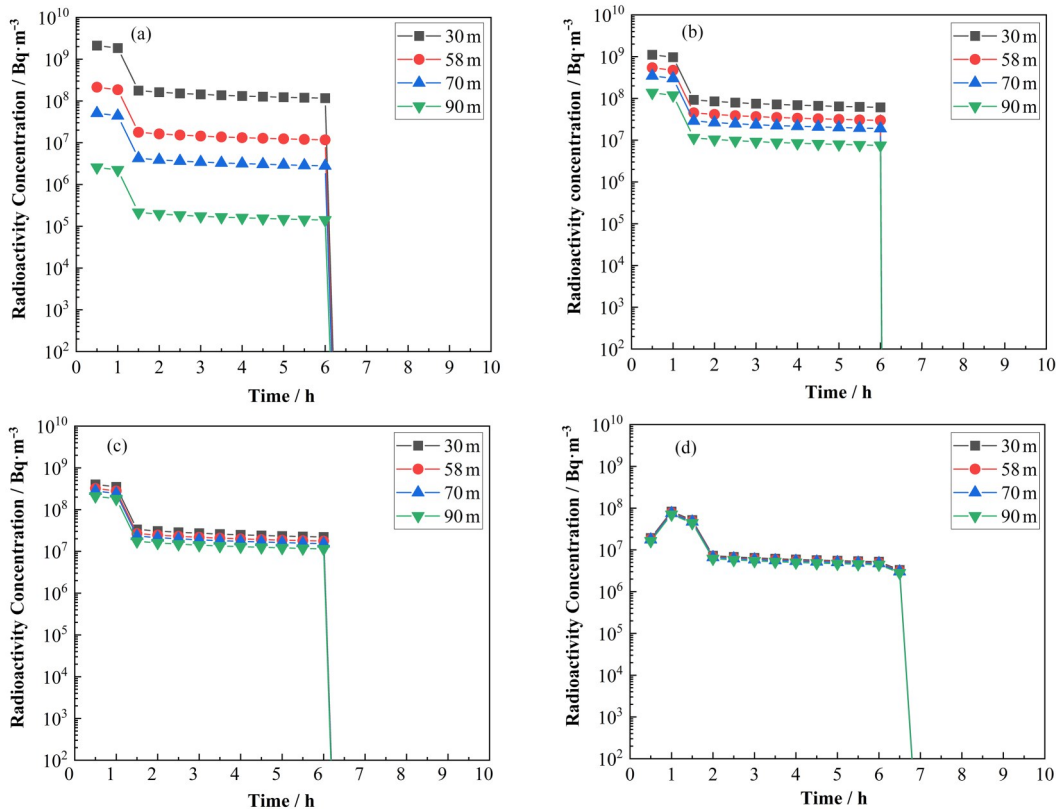


图 7 不同释放高度下各位置处的近地面放射性浓度  
(a) 下风向 500 m, (b) 下风向 1 000 m, (c) 下风向 2 000 m, (d) 下风向 5 000 m  
Fig.7 Near-ground radioactivity concentration at various locations at different release heights  
(a) Downwind 500 m, (b) Downwind 1 000 m, (c) Downwind 2 000 m, (d) Downwind 5 000 m

## 4 结语

基于高斯烟团模型以及 Pasquill 稳定度分类方法, 建立了氙大气扩散计算模型, 考虑了重力沉降、

烟气抬升、风速修正、地面反射等因素的影响。选取加拿大氙气释放实验和美国萨凡那河工厂氙释放事故验证了所建立模型的准确性, 该模型的计算精度与 HotSpot 3.0 和 UFOTRI 软件相当, 模型可用于事

故后氚扩散分布的计算分析。

氚的分段释放会导致单独释放阶段(1~6 h)沿下风向的近地面处出现两个放射性浓度积聚区,且随着时间的增加,两个放射性浓度峰值均呈下降趋势,但单独释放导致的近场峰值的位置保持不变,第二个放射性浓度峰值的位置随着混合释放阶段排放的烟团逐渐向远方移动。

有效释放高度和风速的增加均会强化氚在大气中的扩散行为,但二者的作用效果存在差异。风速的增加会同时削弱下风向的两个放射性峰值,使得沿下风向第二个的高放射性浓度区向下风向移动,放射性分布趋于均匀。但风速的改变不影响近场高放射性浓度峰值的位置。释放高度的增加会显著影响近场的放射性浓度分布,随着释放高度的增加,近场放射性浓度峰值显著降低,削弱放射性烟团在近场的滞留。

**作者贡献声明** 姜京华:负责数据的收集和整理、文章的起草和修订;曹学武:负责研究的提出及设计、最终版本的修订、项目的监督和管理。

#### 参考文献

- 1 Yamaguchi M, Kitamura A, Oda Y, *et al.* Predicting the long-term  $^{137}\text{Cs}$  distribution in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: a parameter sensitivity analysis[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, **135**: 135 - 146. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.04.011.
- 2 宁莎莎,单征,刘爱华,等. 拟建桃花江 AP1000 核电站 LOCA  $^{131}\text{I}$ 源项分析[J]. *核技术*, 2012, **35**(1): 69 - 73. NING Shasha, SHAN Zheng, LIU Aihua, *et al.* LOCA I-131 source term analysis for the proposed Taohuajiang AP1000 NPP[J]. *Nuclear Techniques*, 2012, **35**(1): 69 - 73.
- 3 闫政,吴信民,邓磊,等. 使用蒙特卡罗方法模拟核事故气载放射性污染物大气扩散[J]. *核技术*, 2011, **34**(3): 193 - 198. YAN Zheng, WU Xinmin, DENG Lei, *et al.* An M-C model to simulate airborne radioactive material dispersion in nuclear accident[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, **34**(3): 193 - 198.
- 4 Leelóssy Á, Mészáros R, Lagzi I. Short and long term dispersion patterns of radionuclides in the atmosphere around the Fukushima Nuclear Power Plant[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011, **102**(12): 1117 - 1121. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.07.010.
- 5 Sawan M E, Abdou M A. Physics and technology conditions for attaining tritium self-sufficiency for the DT fuel cycle[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, **81** (8 - 14): 1131 - 1144. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2005.07.035.
- 6 Taylor N. Preliminary safety report (RPrS) [R]. French: ITER, 2011.
- 7 OGAWA Y. Assessment on safety and security (reassurance) for fusion plant[C]//Proceedings of the 2nd IAEA DEMO Programme Workshop. Vienna, Austria, 2013: 1 - 27.
- 8 Raskob W. Doses from accidental releases of tritium and activation products into the atmosphere[J]. *Journal of Fusion Energy*, 1993, **12**(1): 149 - 156. DOI: 10.1007/BF01059371.
- 9 Raskob W, Hasemann I. Results of dose calculations for NET accidental and normal operation releases of tritium and activation products[M]. *Kernforschungszentrum Karlsruhe*, 1992.
- 10 Taylor N P, Raskob W. Updated accident consequence analyses for ITER at cadarache[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, **52**(3): 359 - 366. DOI: 10.13182/fst07-a1514.
- 11 Cortes P, Iseli M, Taylor N. Sensitivity studies on the accidental impact of 1 G of tritium for ITER site specific characteristics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, **60**(3): 865 - 868. DOI: 10.13182/FST11-A12555.
- 12 Nie B J, Ni M Y, Jiang J Q, *et al.* A dynamic modeling  $^3\text{H}$  transfer to the environment under accidental release from the fusion reactor[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, **34** (4): 739 - 745. DOI: 10.1007/s10894-015-9878-7.
- 13 聂保杰,倪木一,廉超,等. 基于湍流扩散理论的氚大气弥散程序开发与校验[J]. *原子能科学技术*, 2013, **47** (S2): 541 - 546. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.S1.0541. NIE Baojie, NI MUYI, LIAN Chao, *et al.* Development and verification of tritium atmospheric dispersion program based on turbulent diffusion theory[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, **47**(S2): 541 - 546. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.S1.0541.
- 14 童志权. 大气环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. TONG Zhiquan. *Atmospheric environmental impact assessment*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991.
- 15 国家技术监督局, 国家环境保护局. 制定地方大气污染物排放标准的技术方法: GB/T 3840—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.



- State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China, State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical methods for making local emission STANDARDS of air pollutants: GB/T 3840—1991[S]. Beijing: Standards Press of China, 1991.
- 16 谷清, 李云生. 大气环境模式计算方法[M]. 北京: 气象出版社, 2002.  
GU Qing, LI Yunsheng. Calculation method of atmospheric environment model[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.
- 17 宋妙发, 强亦忠. 核环境学基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.  
SONG Miaofa, QIANG Yizhong. Fundamentals of nuclear environmentology[M]. Beijing: Atomic Press, 1999.
- 18 罗正明. 氢、氘和氚离子在固体表面上的反射[J]. 物理学报, 1990, 39(9): 1520 - 1530.  
LUO Zhengming. The reflection of H<sup>+</sup>, D<sup>+</sup> and T<sup>+</sup> from surface of solids[J]. Acta Physica Sinica, 1990, 39(9): 1520 - 1530.
- 19 Brown R M, Ogram G L, Spencer F S. Field studies of HT behaviour in the environment: 1. dispersion and oxidation in the atmosphere[J]. Fusion Technology, 1988, 14(2P2B): 1165 - 1169. DOI: 10.13182/fst88-a25296.
- 20 O'kula K R, East J M, Marx D R. A posteriori verification and validation of a tritium dispersion & consequence model 1[ED/OL]. [2022-05-06]. <https://www.semanticscholar.org>, Corpus ID: 110339176.