

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.009

# Calpuff 模式在核电厂事故对水体影响分析中的应用

蔺洪涛, 纪运哲, 刘新建

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:** 利用某厂址全年逐时的气象观测数据, 通过 Calpuff 模式模拟计算了不同事故工况下核电厂放射性流出物对周边水资源可能造成的污染情况。计算表明: 利用真实的风向、降水等气象条件模拟计算结果更加合理, 选址假想事故和 IC 释放类工况造成的水库沉积核素浓度远低于 GB 18871-2002 规定的食品通用行动水平。尽管采用了更真实的气象条件, BP 释放类造成的核素沉积浓度仍高于国标中规定的食品通用行动水平, 因此在设计上应避免此类严重事故的发生。

**关键词:** Calpuff 模式; 事故; 干沉积; 湿沉积; 行动水平

中图分类号: X591

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0057-05

## Impact Analysis of Nuclear Power Plant Accidents on Reservoir Using Calpuff Model

LIN Hongtao, JI Yunzhe, LIU Xinjian

(China Nuclear Power Engineering, Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** Using whole year hourly meteorological data of one site, water contamination caused by radioactive plume release after accidents of NPPs was modeled using Calpuff model. The results showed that, it was more reasonable using realistic meteorological data like wind direction and precipitation etc, and concentration of radioactivity in the reservoir caused by postulated accidents for sitting and IC release category was much lower than the genetic action levels for foodstuffs in GB 18871-2002. But the concentration of radioactivity caused by BP release category was still higher than the genetic action levels for foodstuffs in GB18871-2002 despite using realistic meteorological data, so such sever accidents should be avoid in design.

**Key words:** calpuff model; accident; dry deposition; wet deposition; action level

核电厂发生大量放射性污染物释放时, 通过干、湿沉积会导致周边水体的污染进而对公众造成内照射。1986 年的苏联切尔诺贝利核事故以及 2011 年的日本福岛核事故都表明, 核事故的发生均在不同程度上对周边的水资源造成了严重的放射性污染<sup>[1-3]</sup>。这也给我国的核电水资源管理提出了新的警示。

由于核电厂的设计特点, 对水资源有一定的要

求, 所以核电站一般布设在水资源丰富的区域, 如滨海、湖泊, 河流区等。我国的核电发展战略是“加快沿海核电发展, 积极推进内陆核电项目”, 而内陆核电所依托的水系, 一般还承担着重要的饮用、灌溉等功能, 因此在事故应急时必须考虑核电厂事故对周边水体的影响, 并采取相应的应急干预措施<sup>[4-5]</sup>。

近年来, 核事故对水资源安全的影响越来越受到人们的重视, 开展了各种理论及数值分析等研究。但从调研结果来看, 在数值模拟分析计算中, 一般都采用了各种保守的假设, 如在计算放射性烟羽干湿沉积对水源的影响中假定在整个事故期间水面及径流区域上都存在降水且在计算时段内风向不变、降水速率为常数等<sup>[6-7]</sup>。这种情形是一种过于

收稿日期: 2015-09-17

基金项目: 压水堆核电厂严重事故与应对措施的分析评价及验收准则研究(FKY1519ZHB001)

作者简介: 蔺洪涛(1982), 男, 山东菏泽人, 助理工程师, 学士, 主要从事核辐射与应急方面的工作(e-mail)lyonlht@126.com。

保守的假设,在真实情况下,风向、风速和降水等气象要素的变化非常的迅速和频繁。

本文利用某厂址实际观测的逐时气象数据,通过 Calpuff 模式进行放射性烟羽大气浓度场的模拟,利用真实的风速、风向、降水数据计算事故情况下放射性烟羽干、湿沉积对核电厂周边水库的影响。

## 1 Calpuff 模式简介<sup>[8]</sup>

Calpuff 模式是美国国家环保局推荐的导则模式,是一个多层、多物种、非稳态拉格朗日高斯烟团模式,通过跟踪从排放源释放的离散烟团的运行来模拟烟团移动路径上的扩散、转化和清除,直至烟团离开模拟区域。模式包括边界层气象模式 Calmet、污染物扩散模式 Calpuff 和后处理模块 Calpost 三个部分及地理数据和气象数据的前处理接口程序。

Calmet 通过质量守恒连续方程对风场进行诊断,在输入模式所需的常规气象观测资料或者大型中尺度气象模式输出后,可以计算并生成包括逐时风场、大气稳定性和微气象学参数等的三维风场和微气象资料,作为 Calpuff 模式后续计算的输入场。

Calpuff 为输送和扩散模式,在 Calpuff 烟团扩散模型中,采用积分烟团方法来计算某受体点在模拟时段内的平均污染物浓度。单个烟团在某受体的浓度计算公式为:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot g \cdot \exp\left[-\frac{d_a^2}{(2\sigma_x^2)}\right] \cdot \exp\left[-\frac{d_c^2}{(2\sigma_y^2)}\right] \quad (1)$$

$$g = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-(H_e + 2nh)^2 / (2\sigma_z^2)\right] \quad (2)$$

式中:  $C$  为地面浓度 ( $g/m^3$ );  $Q$  为烟团中污染物的质量 ( $g$ );  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  为扩散系数在三个方向上的分量 ( $m$ );  $d_a$ 、 $d_c$  为监测点到烟团的距离分量 ( $m$ );  $g$  为高斯分布垂直项 ( $m$ );  $H_e$  为烟团的有效高度 ( $m$ );  $h$  为混合层高度 ( $m$ )。

Calpost 是用来处理浓度场和沉降通量的后处理模块,输出选定时间的平均浓度场、统计浓度的最大值、某一阈值浓度的超出率等。

## 2 干、湿沉积计算方法<sup>[8-9]</sup>

事故条件下核电厂气载放射性流出物对水库的影响,主要考虑两种途径计算水库水体内的核素浓度:

一是放射性核素直接干、湿沉积到水库区域的核素量,二是放射性核素干、湿沉积到水库的径流区域,经过降水冲刷而最终被径流带入库区的核素量。

### 2.1 干沉积计算

干沉积的产生包括如下过程:重力沉积、湍流和分子扩散、惯性碰撞。通常处理干沉积的方法是假定地面浓度与近地面的空间积分浓度成正比,即:

$$C_d(x, y) = v_d C(x, y, z) \quad (3)$$

式中:  $C_d(x, y)$  为由于干沉积导致的放射性污染物的地面浓度 ( $Bq/m^2$ );  $v_d$  为干沉积速率 ( $\frac{m}{s}$ );  $C(x, y, z)$  为近地面放射性污染物的时间积分空气浓度 ( $Bq \cdot s/m^3$ )。

### 2.2 湿沉积的计算

湿沉积的计算参考 MACCS 和 CALPUFF 中关于湿沉积的处理方法,在有降水的情况下,湿沉积的地面污染物浓度由下式计算:

$$C_w(x, y) = \int_0^{z_w} \Lambda C(x, y, z) dz \quad (4)$$

$$\Lambda = aI^b \quad (5)$$

式中:  $C_w(x, y)$  为湿沉积导致的放射性污染物的地面浓度 ( $Bq/m^2$ );  $\Lambda$  为冲洗因子 ( $s^{-1}$ );  $z_w$  为降水影响的高度 ( $m$ );  $a$ 、 $b$  为经验系数;  $I$  为降水强度 ( $mm/h$ );  $C(x, y, z)$  为放射性污染物的时间积分空气浓度 ( $Bq \cdot s/m^3$ )。

### 2.3 径流流域影响计算

流域面积上的干、湿沉积,经径流最终汇入水库的放射性核素浓度采用下式计算:

$$C_w(i) = (C_g(i) \cdot S \cdot F) / V \quad (6)$$

式中:  $C_w(i)$  为流域面积上沉积导致的水库中放射性核素  $i$  的浓度 ( $Bq/kg$ );  $C_g(i)$  为流域面积上核素  $i$  的地面沉积浓度 ( $Bq/m^2$ );  $S$  为流域控制面积 ( $m^2$ );  $F$  为冲刷系数;  $V$  为水库的库容 ( $m^3$ )。

## 3 个例模拟计算

### 3.1 模拟区域及网格划分

水库位于厂址北面约 1 km 处,占地面积 10.9 km<sup>2</sup>,围堤长度 1 2077 m,库容 6 568 万 m<sup>3</sup>。考虑到模拟水库的范围,模拟区域为以厂址为中心,边长 20 km 的区域,见图 1。模拟网格 100 × 100,网格分辨率 200 m,浓度场网格分辨率 100 m,模拟时间为 2014 年 3 月至 2015 年 2 月。模拟时根据网

格设置可以确定水库的位置如图 2 中黑线所示。



图 1 Calpuff 模拟区域

Fig. 1 The Modeling Area of Calpuff

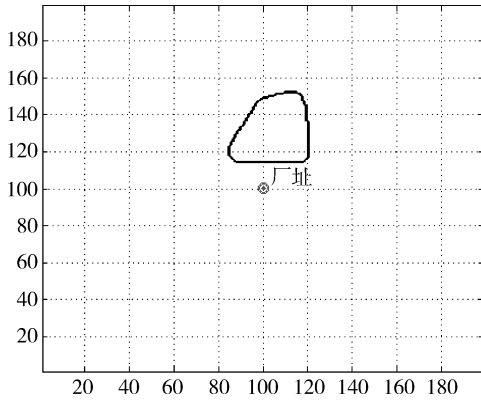


图 2 水库模拟示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Reservoir

### 3.2 气象数据处理

模拟所用气象数据为厂址 2014 年 3 月至 2015 年 2 月的单点逐时观测数据, 包括风速、风向、温度、降水等。由于厂址数据为单点观测数据, 且模拟厂址区域相对平坦, 所以采用 ISCMET 单点气象场输入方式运行 Calpuff。

### 3.3 滑动平均处理

核电厂事故的发生并不是瞬时完成的, 事故的排放都会持续一定的时间。针对不同的核电厂事故类型, 其持续时间不同, 采用滑动平均的方法计算相应的平均小时浓度, 进而确定不同概率水平对应的小时平均核素浓度。

本文主要考虑三种事故类型: 选址假想事故、严重事故 IC 释放类及 BP 释放类。根据事故进程, IC 释放类事故持续时间为 24 h, BP 释放类持续时间为 72 h, 选址假想事故持续时间较长, 但是保守假定事故持续时间为 72 h。表 1 给出了三种类型事

故下各核素的释放率。

表 1 不同工况下各核素释放速率

Table 1 Release Rate of Radionuclides Under Different Accidents (Bq/s)

核素	选址假想事故	IC 释放类	BP 释放类
I-131	5.76E+08	5.00E+08	5.80E+12
Cs-134	8.19E+07	1.14E+08	8.35E+11
Cs-137	4.77E+07	6.15E+07	4.51E+11
Sr-89	2.80E+07	4.22E+08	4.37E+10
Sr-90	2.41E+06	4.14E+07	4.28E+09
Ru-103	5.26E+06	8.31E+08	8.81E+11
Ru-106	1.73E+06	2.96E+08	3.15E+11
Am-241	3.63E+01	1.25E+03	3.75E+04
Pu-238	2.79E+03	1.17E+02	1.98E+04
Pu-239	2.45E+02	3.04E+01	5.14E+03

## 4 计算结果及讨论

### 4.1 持续时间分析

由图 2 可以看出, 能够影响水库的风向为 SSW-S-SSE, 表 2 给出了该方位区间风向的持续时间及降水的持续时间。从表中可以看出, 风向连续 2 h 以上影响库区的频次为 266 次, 4 h 以上频次为 122 次, 而 8 h 以上的频次仅为 28 次; 对于降水而言, 整年只出现过一次持续时间大于 12 h 的降水, 持续时间 4 h 以上的也仅有 30 次; 同时发生降水且风向吹向库区的情况(此时湿沉积才会直接影响库区), 持续时间在 4 h 以上的整年只出现一次, 持续时间在 2 h 以上的也仅仅出现 4 次。因此, 假设整个事故期间风向不变, 且一直有降水是一种极端保守的假设, 采用实际的气象观测资料能更加真实的反映事故对水体的影响。

表 2 风向和降水不同持续时间频次统计表

Table 2 Frequency Statistics of Wind Direction and Precipitation Duration

持续时间	>2 h	>4 h	>8 h	>12 h
风向	266	122	28	4
降水	69	30	5	1
风向 & 降水	4	1	0	0

### 4.2 直接干湿沉积导致的核素浓度

Calpuff 模拟中, 将释放类型设置为点源释放, 排放高度 10 m, 模拟厂址区域近地面的相对浓度

场。利用浓度场模拟结果及前文介绍的干、湿沉积计算方法,计算全年逐时的干、湿沉积结果。图3、图4分别给出了全年中对水库影响最严重的干、湿沉积小时相对浓度场。

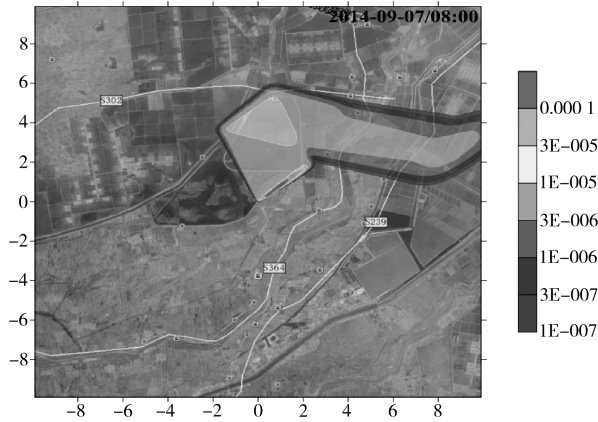


图3 发生最严重干沉积时的相对浓度场  
Fig. 3 Relative Concentration Field with the Worst Dry Deposition

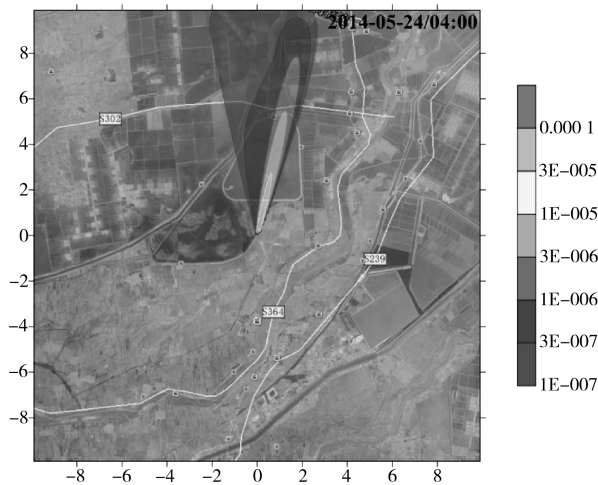


图4 发生最严重湿沉积时的相对浓度场  
Fig. 4 Relative Concentration Field with the Worst Wet Deposition

以IC释放类的核素I-131为例,最严重的干沉积小时沉积量为 $6.30 \times 10^{11} \text{Bq}$ ,其中落在水库库区的干沉积量为 $2.47 \times 10^{11} \text{Bq}$ ,出现时刻为2014年9月7日09点,此时的风速为 $0.84 \text{ m/s}$ ,大气稳定度为F类稳定度。而最严重的湿沉积小时沉积量为 $1.04 \times 10^{12} \text{Bq}$ ,其中落在库区的湿沉积量为 $4.82 \times 10^{11} \text{Bq}$ ,出现在2014年5月24日05点,此时的降水强度为 $3.2 \text{ mm/h}$ ,并不是最大雨强 $47.5 \text{ mm/h}$ 对应的时间,因为最大雨强时的风向NNW,烟羽并不会影响库区,见图5。

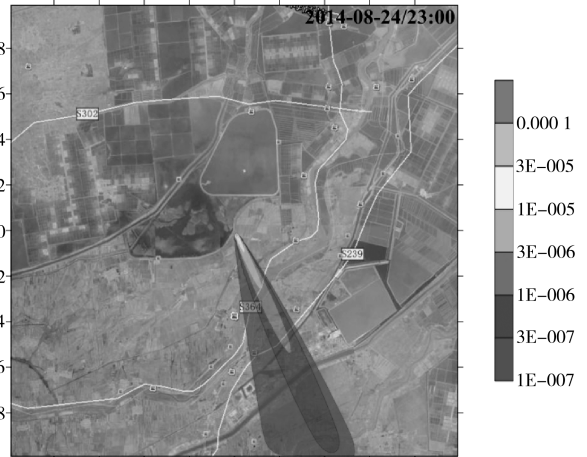


图5 最强降水时相对浓度场

Fig. 5 Relative Concentration Field with the Heaviest Precipitation

#### 4.3 径流流域导致的库区沉积核素浓度

由于汇入水库的河流及支流多数位于西南方位,保守考虑将整个西南方位作为径流流域。同样以IC释放类核素I-131为例,整年逐时计算结果显示,对于径流流域最严重的干沉积出现在2014年4月20日05点,小时沉积量为 $7.42 \times 10^{11} \text{Bq}$ ;而最严重的湿沉积出现在2014年9月2日17点,小时沉积量为 $1.75 \times 10^{12} \text{Bq}$ ,此时的降水强度为 $19.8 \text{ mm/h}$ 。表3给出了各核素的冲洗系数,利用上文给出的计算方法可以得出流域经径流最终汇入水库的核素浓度。

表3 计算中各参数取值

Table 3 Parameters Used in Calculation

$V_d/$ ( $10^{-3} \text{ m/s}$ )	$a/$ $10^{-5}$	$b$	$F$					
			Sr	Cs	Pu	I	Ru	Am
$1.5 \times 10^{-3}$	9.5	0.8	0.01	0.005	0	0.01	0.001	0.005

#### 4.4 水库各核素沉积浓度计算结果

为了计算水库中的核素浓度,假定沉积的核素在水库中均匀分布,计算其平均浓度。不同事故工况下,水库中核素的沉积浓度见表4,表5给出了GB 18871—2002<sup>[10]</sup>中的通用行动水平。计算结果表明,在95%概率水平条件下,选址假想事故和IC释放类事故在事故工况下气载流出物沉积到水库的核素浓度远小于GB 18871—2002中通用行动水平的要求;而对于严重事故BP释放类,即使在50%的概率水平条件下,水库中放射性核素的沉积

浓度仍超过了 GB 18871—2002 中通用行动水平的要求。但是, 相对于采用极端保守方法(整个事故期间存在降水, 且风向保持不变, 降水速率为常数)的计算结果, 要小 3~4 个量级<sup>[6]</sup>。

表 4 不同工况下水库中各核素沉积浓度

Table 4 Concentration of Radionuclides in Reservoir

Caused by Different Accidents (kBq/kg)

核素	选址假想	IC 类	BP 类
Cs134, Cs137, Ru103, Ru106, Sr89	0.01	0.042	59.9
I131	0.034	0.012	140.4
Sr90	1.42E-4	0.001	0.1
Am241, Pu238, Pu239	1.79E-7	3.37E-8	1.48E-6

表 5 食品通用行动水平 (GB 18871—2002)

Table 5 The Genetic Action Levels of Foodstuffs

(GB 18871—2002) (kBq/kg)

放射性核素	一般消费品	牛奶、婴儿 食品和饮水
Cs134, Cs137, Ru103, Ru106, Sr89	1	1
I131	1	0.1
Sr90	0.1	0.1
Am241, Pu238, Pu239	0.01	0.001

## 5 结论

利用 Calpuff 模式能够很好的模拟风速、风向、降水的变化, 能够更加真实的反应空气中烟羽轨迹的变化, 对事故工况下风向和降水等气象条件的考虑也更加合理。利用某厂址整年逐时的气象数据, 计算了事故工况下气载放射性流出物对厂址周边水库的影响, 初步结论如下:

1) Calpuff 模式能够较好的模拟风向、风速等变化引起的烟羽轨迹的变化, 给出空气中放射性核素浓度场的分布。利用模拟的浓度场计算水库中核素的沉积浓度比单一情形假设下的计算结果更加合理。

2) 选址假想事故和 IC 释放类工况下, 水库中的放射性核素沉积浓度远低于 GB18871—2002 中的食品通用行动水平。

3) 严重事故 BP 释放类事故工况下, 水库中的放射性核素沉积浓度高于 GB18871—2002 中的食品通用行动水平。考虑到 BP 释放类的发生频率为  $1.05 \times 10^{-8}$ , 参考我国 GB/T 17680.1—2008<sup>[11]</sup> 中

的规定, 对于这种发生概率极小的事故, 在确定核电厂应急计划区时不予考虑, 但在制定应急计划时应采取相应的应急干预措施。

### 参考文献:

- [1] BURAGLIOA N, ALDAHANB A, POSSNERTA G. <sup>129</sup>I in Lakes of The Chernobyl Fallout Region and Its Environmental Implications [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 55 (5): 715-720.
- [2] IAEA. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group Environment [R]. 2006.
- [3] 张淑玲, 陈庆伟. 日本福岛核泄漏事故对我国核电水资源管理的警示 [J]. 水利发展研究, 2011, 11(8): 89-93. ZHANG Shuling, CHEN Qingwei. Alarm to Management of Nuclear Power Water Resource in China Caused by Fukushima Nuclear Crisis [J]. Water Resources Development Research. 2011, 11 (8): 89-93.
- [4] 靳顶, 曹淑敏, 丁晓雯, 等. 核电站事故对水资源安全的影响研究 [J]. 中国水利, 2012(15): 15-18. JIN Ding, CAO Shumin, DING Xiaowen, et al. Studies of Impacts of Nuclear Power Plant Accidents on Water Security [J]. China Water Resources, 2012(15): 15-18.
- [5] 刘达, 黄本胜, 邱静, 等. 内陆核电站建设对水资源安全影响的问题及研究现状 [J]. 广东水利水电, 2010(10): 12-15. LIU Da, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Studies and Status of Impacts of In-land NPPs on Water Security [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower. 2010(10): 12-15.
- [6] 李红, 方晟, 方栋. 内陆核电厂严重事故时放射性烟羽造成水源污染的估算 [J]. 辐射防护, 2013, 33(3): 139-143. LI Hong, FANG Sheng, FANG Dong. Estimation of Water Pollution by Domestic In-land Nuclear Power Plant Under Severe Accident [J]. Radiation Protection, 2013, 33 (3): 139-143.
- [7] FANG D, XIAO N. Impacts of Atmospherical Deposited Radionuclides on Drinking Water Supply After a Nuclear Power Plant Accident [J]. Health Physics, 1993, 64 (1): 82-85.
- [8] CALPUFF Modeling System Version 6: User Instructions [K]. 2011.
- [9] Code Manual for MACCS2; Volume1, 2 [K]. 1998.
- [10] GB 18871—2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 [S]. GB18871—2002, Basic Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources [S].
- [11] GB/T 17680.1—2008, 核电厂应急计划与准备准则第一部分: 应急计划区的划分 [S]. GB/T 17680.1—2008, Criteria for Emergency Planning and Preparedness for Nuclear Power Plants -Part I: The Dividing of Emergency Planning Zone [S].