

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.10.023

核电站大气核污染扩散预警技术

沈越^{1,2}, 胡筱敏¹, 马云峰³, 陈国平⁴

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 辽宁省环境保护厅, 辽宁沈阳 110033;
3. 沈阳航空航天大学能源与环境学院, 辽宁沈阳 110136; 4. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要: 基于环境保护指挥自动化系统 C4ISRE, 提出了核电站大气核污染扩散预警方法. 首先, 构建红沿河核电站“海/陆/空/天一体化”仿真环境. 其次, 根据核污染扩散想定应用气象数据驱动 HYSPLIT4.9 模型, 模拟大气核污染物输送特征, 进而推演模拟各个重点区域的预警应急处置时间. 推演结果表明: 核污染扩散气团经过 71.885 s 到达常规岛废液贮存罐厂房; 79.306 s 扩散至热机修车间和仓库; 91.596 s 抵达废水处理站和车库; 132.267 s 扩散至厂界海区边界; 655.337 s 扩散至烟羽应急区 5 km 边界; 712 s 进入黄泥洞村空界; 1240.535 s 扩散至烟羽应急区 10 km 边界; 2527.945 s 扩散至长兴岛镇空界; 3468.65 s 扩展至烟羽应急区 30 km 边界.

关键词: C4ISRE; 核电站; 大气核污染扩散; 海陆空天一体化; HYSPLIT

中图分类号: X 591 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)10-1482-05

Warning Technology for Air Nuclear Pollution Diffusion of Nuclear Power Plant

SHEN Yue^{1,2}, HU Xiao-min¹, MA Yun-feng³, CHEN Guo-ping⁴

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Department of Environmental Protection of Liaoning Province, Shenyang 110033, China; 3. College of Energy and Environment, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 4. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China. Corresponding author: HU Xiao-min, professor, E-mail: rcdxph@126.com)

Abstract: Based on environmental protection automatic command system (C4ISRE), the early warning technology for air nuclear pollution diffusion of the nuclear power plant was proposed. Firstly, an integration simulation environment of sea, land, sky and space for Hong Yanhe Nuclear Power Plant was constructed. Secondly, nuclear pollution diffusion scenario was set up and the HYSPLIT4.9 model was drove by meteorological data according to the scenario. Then, the atmospheric nuclear pollutant transport characteristics were simulated, and the early warning emergency response times for key areas were simulated and deduced. The deduction results showed that nuclear pollution air mass spreads into the waste storage tank factory building of conventional island after 71.885 s, the airspace of heat engine repair shop and warehouse after 79.306 s, the airspace of wastewater treatment plant and garage after 91.596 s, the airspace of the boundary of the plant boundary and sea after 132.267 s, plume boundary of emergency region 5 km after 655.337 s, the airspace of Wong Tung Village after 712 s, plume boundary of emergency region 10 km after 1240.535 s, the airspace of Changxing Island town after 2527.945 s, and plume boundary of emergency region 30 km after 3468.65 s.

Key words: C4ISRE; nuclear power plant; air nuclear pollution diffusion; integration of sea, land, space and sky; HYSPLIT

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 辽宁省教育厅一般项目(L2015405); 沈阳航空航天大学博士启动基金资助项目(16YB17).

作者简介: 沈越(1971-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生; 胡筱敏(1958-), 男, 江西婺源人, 东北大学教授, 博士生导师.

随着我国核电建设的发展,对核事故应急工作提出了更严峻的挑战和更高的要求.针对新的挑战与要求,开展与核事业发展新形势相适应的核应急预测预警技术研究,已成为当前作好核事故应急工作的一项重要课题.

环境保护指挥自动化系统 C4ISRE 是指以计算机为核心,具有环境指挥控制、环境污染态势侦察、灾难预警探测、通信、仿真演练和其他环境保护信息保障功能的环保领域的综合信息系统.它的主要功能是信息获取、处理、决策支持和对环保队伍实施指挥与控制,以及环境污染应急事件模拟、演练、指挥、处理等^[1-3].

本文基于 C4ISRE 系统整合 HYSPLIT, AGI STK, Arcgis 等技术实现对大气核污染扩散事故的预警、评估,力求为核电站核污染预警技术的发展开拓一种新的方法.

1 实验方法

1.1 混合单粒子拉格朗日积分轨迹算法

混合单粒子拉格朗日积分轨迹(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)模式 4.9 是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局在过去 20 年间联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型.该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式,已经被广泛地应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中.

假设大气核污染气团随风飘动,那么它的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分,即通过初始位置 $P(t)$ 和第一猜测位置 $P'(t + \Delta t)$ 的三维速度矢量的平均值来计算.速度矢量在空间和时间上进行线性内插,计算公式如下^[4-6].

第一猜测位置:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + v(P, t) \Delta t. \quad (1)$$

最后位置:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 [v(P, t) + v(P', t + \Delta t)] \Delta t, \quad (2)$$

$$v_{\max} \Delta t < 0.75, \quad (3)$$

$$U_{\max} \Delta t < 0.75, \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}}{Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}}. \quad (5)$$

式中: P 为质点的初始位置; P' 为质点的第一预测位置; t 为仿真时间; s, v 为风速, m/s; v_{\max} 为最大

风速, m/s; Z_{top} 为轨迹模式坐标系统的顶部, m; Z_{gl} 为地形高度, m; Z_{msl} 为坐标下边界高度, m.

1.2 污染气团扩散轨迹迭代聚类算法

空间变异 (spatial variance, SV) 是指在污染气团扩散轨迹迭代聚类过程中,计算簇内沿着轨迹的端点的空间变异,计算公式为^[7]

$$V_{i,j}^s = \sum_k (P_{j,k} - M_{i,k})^2. \quad (6)$$

式中: Σ 为沿着轨迹的端点数量的总和; P 为轨迹端点的向量; M 为这个簇的平均轨迹的端点的向量; i 为簇的数量; j 为污染气团扩散轨迹数; k 为气团扩散轨迹上的端点数.

簇空间变异 (cluster spatial variance, CSV) 是在这个簇内所有污染气团扩散轨迹的空间变异的总和,计算公式为

$$V_i^c = \sum_j V_{i,j}^s. \quad (7)$$

总空间变异 (total spatial variance, TSV) 是所有簇的空间变异的总和,计算公式为

$$V_i^t = \sum_j V_{i,j}^c. \quad (8)$$

1.3 核污染事故剧情想定

辽宁红沿河核电站拟以日本福岛核电站发生情况为仿真实想定^[8-12]: I¹³¹ 在 2014 年 4 月 3 日 0 点 ~ 4 日 0 点之间发生扩散,总的扩散量为 150 PBq,即每小时的排放量为 5 PBq,主要的仿真实想定参数如下:污染源模拟高度为 500 m,污染气团扩散方向为前向,总仿真时间为 96 h,污染源平均释放速率为 5×10^{15} /h,释放时间为 24 h,初始释放时间为 2014 年 4 月 3 日 0 点,污染物状态为气态,弥散速度为 0.01 m/s, Henry' s 指数为 $30 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$,核素的半衰期为 8 d.

1.4 C4ISRE 系统功能组成

C4ISRE 的“海/陆/空/天一体化”仿真系统功能组成^[13-14]见图 1.

1.5 基于 C4ISRE 系统的污染气团模拟推演方法

应用 HYSPLIT 仿真数据,基于 C4ISRE 系统综合仿真引擎 AGI STK^[15],对核污染气团进行仿真推演.推演仿真过程分为三个部分:核素污染气团扩散轨迹数据输入、基于 STK 内核的仿真控制、STK 仿真内核计算及核素污染气团扩散数据推演显示.

核素污染气团扩散轨迹数据输入:仿真前需要将由 HYSPLIT 模拟出的核素污染气团扩散轨迹数据构建成 STK 需要的仿真控制数据文件格式,本文采用 GreatArc 格式,这种格式是一种扩展名为 *.ga 的仿真数据驱动格式,采用仿真时

间、经度、纬度、高度组合的方式对实体进行仿真推演,控制文件格式见图 2。

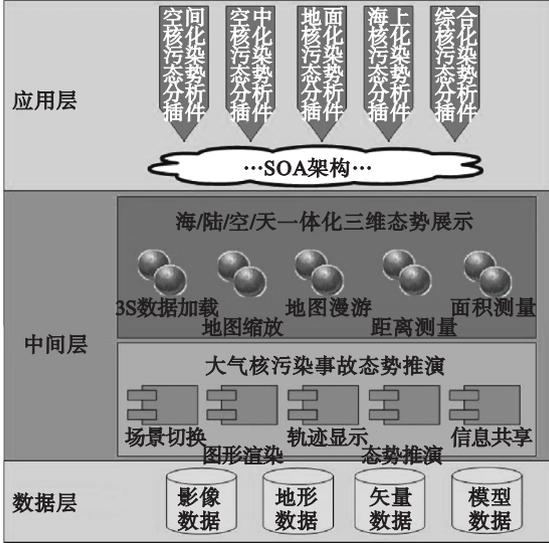


图 1 “海/陆/空/天一体化”仿真环境功能组成
Fig. 1 Functional components of “integration of sea, land, space and sky” simulation environment

stk; v:4.0

```

BEGIN GreatArc
TimeOfFirstWaypoint 3 Apr 2014 00:00:00.0
NumberOfWaypoints 50
Method DetTimeAccFromVel
BEGIN Waypoints
0 39.797 121.474 0 8.333333333 0
1 39.797 121.474 453 8.333333333 0
:
49 30.91 126.6223 8.333333333 0

```

END Waypoints
END GreatArc

图 2 气团扩散仿真控制文件

Fig. 2 Simulation control file of air mass diffusing

2 结果与讨论

基于 C4ISRE/STK 模拟推演后的核素 I^{131} 大气扩散仿真图见图 3。

重要安置点、居民区、应急路线分布见图 4。

综合图 3、图 4 和模拟推演可得到厂址应急预案中重要的安置点和居民区空中 500 m 处核污染气团的扩散情况。具体分析如下(截选):核污染气团从模拟起始时间 2014 年 4 月 3 日 0 时 0 分 0 秒开始由 1 号反应堆位置(39.769 N,121.47 E)经过 71.885 s (Lat 39.796, Lon 121.474, Alt 0.45;高度, km)到达常规岛废液贮存罐厂房东

北面;75.696 s (Lat 39.795, Lon 121.474, Alt 0.452)经过常规岛废液贮存罐厂房上空,全程历时 3.811 s;79.306 s (Lat 39.795, Lon 121.474, Alt 0.452)扩散至热机修车间和仓库,85.636 s (Lat 39.795, Lon 121.474, Alt 0.452)经过热机

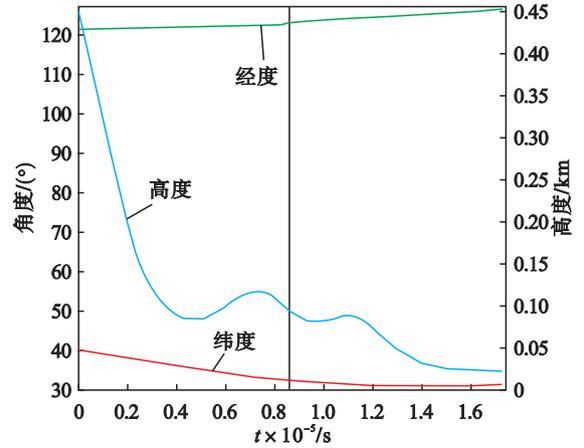


图 3 I^{131} 扩散的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of I^{131} spreading

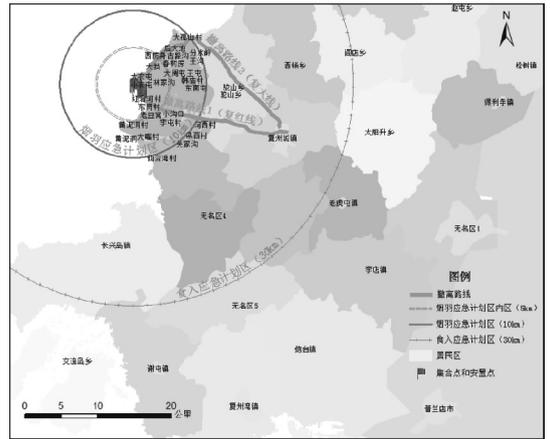


图 4 重要安置点、居民区、应急路线分布
Fig. 4 Distribution of important placement point, residential area and emergency line

修车间和仓库,全程历时 6.33 s;91.596 s (Lat 39.794, Lon 121.474, Alt 0.452)抵达废水处理站和车库,93.896 s (Lat 39.896, Lon 121.474, Alt 0.452)扩散离开这两个建筑区,全程历时 2.3 s;132.267 s (Lat 39.791, Lon 121.474, Alt 0.452)扩散至厂界海区边界;655.337 s 扩散至烟羽应急区交界 (Lat 39.752, Lon 121.472, Alt 0.445),712 s 进入黄泥洞村空界 (Lat 39.747, Lon 121.472, Alt 0.444) 经过 33.41 s 扩散出黄泥洞村空界 (Lat 39.745, Lon 121.472, Alt 0.444);1240.535 s 扩散至烟羽应急区 10 km 交界处 (Lat 39.706, Lon 121.470, Alt 0.437);2527.945 s 扩散至长兴岛镇空界 (Lat 39.604, Lon 121.465, Alt 0.421) 经过 79.54 s 于 2607.485 s 扩散出长兴岛

镇空界 (Lat 39. 597, Lon 121. 465, Alt 0. 419); 3 468. 65 s 扩展至烟羽应急区 30 km 交界处 (Lat 39. 526, Lon 121. 462, Alt 0. 407). 各个相关区域的预警处置时间见图 5.

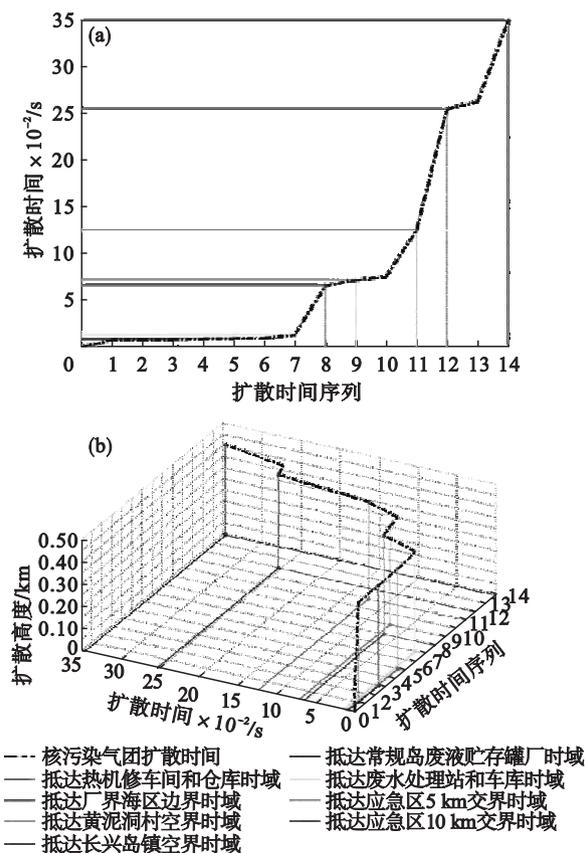


图 5 区域预警及应急处置时间

Fig. 5 Early warning and emergency response times for relevant area

在图 5 的横坐标中:0 代表 1 号反应堆;1 抵达常规岛废液贮存罐厂房东北面;2 抵达常规岛废液贮存罐厂房上空;3 抵达热机修车间和仓库;4 经过热机修车间和仓库;5 抵达废水处理站和车库;6 扩散离开这两个建筑区;7 扩散至厂界海区边界;8 扩散至烟羽应急区 5 km 交界;9 抵达黄泥洞村空界;10 扩散出黄泥洞村空界;11 扩散至烟羽应急区 10 km 交界处;12 扩散至长兴岛镇空界;13 扩散出长兴岛镇空界;14 扩展至烟羽应急区 30 km 交界处.

3 结 论

1) 将 HYSPLIT 的分析数据转化成 STK 需要的仿真控制文件,并对核污染扩散态势进行推演模拟,进而得到了以秒计算的核污染气团扩散态势.在 STK 中通过整合相关的 *.shp 数据及 Arcgis 专题分析工程文件 *.mxd,得出核污染气

团对各个重要区域的详细影响及各个区域对核污染扩散的预警及应急处置反应时间.这种基于 C4ISRE 的推演技术为环境保护应急部门及核防化部队制定具体的战术方案提供了一种重要的技术支持.

2) 核污染气团从模拟起始时间 2014 年 4 月 3 日 0 时 0 分 0 秒开始由 1 号反应堆位置 (39. 769 N, 121. 47 E) 经过 71. 885 s 到达常规岛废液贮存罐厂房东北面;79. 306 s 扩散至热机修车间和仓库,85. 636 s 经过热机修车间和仓库;91. 596 s 抵达废水处理站和车库;132. 267 s 扩散至厂界海区边界;655. 337 s 扩散至烟羽应急区交界;712 s 进入黄泥洞村空界;1240. 535 s 扩散至烟羽应急区 10 km 交界处;2527. 945 s 扩散至长兴岛镇空界;3 468. 65 s 扩展至烟羽应急区 30 km 交界.

参考文献:

[1] Ma Y F, Hu X M. The research on the environmental assessment automation system; C4ISRE based on C4ISR theory [C] // The 6th International Conference on Information Technology: New Generations. Las Vegas: IEEE Computer Society, 2009: 1485 - 1491.

[2] Ma Y F, Wang Q, Shi X F. Research on system simulation technology for joint prevention and control of environmental assessment based on C4ISRE [C] // Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem Communications in Computer and Information Science. Wuhan: IEEE Computer Society, 2015: 699 - 706.

[3] 马云峰. 基于 C4ISR 理论的环境影响评价系统仿真研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 27 - 63. (Ma Yun-feng. The system simulation research for the environmental impact assessment based on C4ISR theory [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 27 - 63.)

[4] Stein A F. NOAA ' s hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. American Meteorological Society, 2015, 124: 2059 - 2078.

[5] Su L, Yuan Z, Jimmy C H, et al. A comparison of hysplit backward trajectories generated from two GDAS datasets [J]. Science of the Total Environment, 2015 (4): 527 - 537.

[6] Chen B, Ariel F. Modeling and evaluation of urban pollution events of atmospheric heavy metals from a large cusmelter [J]. Science of the Total Environment, 2016, 36 (1): 17 - 25.

[7] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. Trajstat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modeling & Software, 2009, 24 (8): 938 - 939.

(下转第 1490 页)