

黄顺祥, 刘峰, 李慧敏, 等. 2010. 2008年北京奥运会开幕式化学危害预测数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 579-583. Huang Shunxiang, Liu Feng, Li Huimin, et al. 2010. Numerical simulation of the chemical hazard prediction during the 2008 Beijing Olympic Games opening ceremony [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 579-583.

2008年北京奥运会开幕式化学危害预测数值模拟

黄顺祥 刘峰 李慧敏 陈海平

防化指挥工程学院, 北京 102205

摘要 针对2008年北京奥运会安保, 建立了一个复杂的系统, 包括两个气象预报模式MM5和RAMS6.0以及一个复杂地形上有毒云团的扩散模式CDM。开发了MM5和RAMS6.0接口模块, 发展了基于RAMS6.0气象场预报结果的CDM, 实现了对未来36 h内的精细气象场和扩散场进行模拟, 气象场预报的分辨率为500~1000 m, 扩散场的分辨率可达到50~200 m。基于T213数据, 应用MM5进行了水平分辨率为3 km的气象场初步预报, 将该预报结果转化为RAMS6.0识别的数据格式, 应用RAMS6.0对气象场进行分辨率为500~1000 m的精细预报, 得出北京奥运会期间的风场与湍流量的预报结果。基于该气象场, 根据想定, 应用CDM对北京奥运会国家体育场“鸟巢”附近发生化学事件时进行了模拟研究, 得出危害范围、危害等级、危害开始时间、危害持续时间等时空分布, 为奥运会开幕式化学危害应急提供技术支持。

关键词 北京奥运会 大气污染 化学危害 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0579-05 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

Numerical Simulation of the Chemical Hazard Prediction during the 2008 Beijing Olympic Games Opening Ceremony

HUANG Shunxiang, LIU Feng, LI Huimin, and CHEN Haiping

Institute of Chemical Defense, Beijing 102205

Abstract A comprehensive system was developed to meet the demand of the security guarding during the 2008 Beijing Olympic Games. In the system, meteorological models, namely, MM5 and RAMS6.0, and a poisonous Clouds Diffusion Model over complex terrain (CDM) were configured in a one-way off-line nested way. In the system, MM5 runs were performed in a real-time operational way with a horizontal resolution of 3 km, which took the output from a global scale model, that is T213 from the Chinese Meteorological Administration (CMA), as the initial and boundary conditions, and the output from MM5 was used to drive the RAMS6.0 runs to provide a 36-hour prediction with a horizontal resolution of 500 - 1000 m. The wind and turbulent field outputs from RAMS6.0 were sequentially used to drive CDM runs, which can provide the prediction of the concentration field and the dose field of the chemical clouds. During the 2008 Beijing Olympic Games, the system was used to provide the scenario prediction results and the security target was set as the National Stadium (known as the Bird's Nest), and the quantitative analysis of the hazard risk was performed based on the scenario prediction results.

Key words Beijing Olympic Games, atmospheric pollution, chemical hazard, numerical simulation

收稿日期 2010-03-27 收到, 2010-08-09 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究与发展计划 2006AA06A306 和国家自然科学基金资助项目 40975089

作者简介 黄顺祥, 男, 1976年出生, 硕士, 助理研究员, 主要从事大气环境和核化生应急研究。E-mail: me_525@163.com

1 引言

突发化学事件的风险分析、预警和应急响应都需要有效的模拟手段。早期的大气扩散模型较为简单,采用高斯模型和平直风场假设。20世纪90年代,空气质量模式取得了巨大的进步,一些综合模型相继建立,如城市空气质量模型(Urban Airshed Model)(Khalid and Samson, 1996)、综合空气质量模式(Comprehensive Air quality Model with extensions,简称CAMx)(ENVIRON, 2004)、多尺度空气质量模型集合(Community Multiscale Air Quality Modeling System, CMAQ)(Binkowski and Roselle, 2003)等,但这些模型并不适应突发事件大气扩散模拟的应急要求。

突发化学事件中大气扩散的局地行为更受关注,气象条件的变化为突发事件大气扩散模拟增加了难度(Huang et al., 2004a)。气象部门的常规气象预报信息远不能满足事故扩散模拟的需要。应对突发化学事件,需要快速有效的应急响应机制和预警系统(Huang et al., 2005)。1976年前,可以认为是化学事故应急响应和预警技术发展的酝酿阶段。1976~1986年间,各国政府开始关注化学品的管理,颁布了一系列法令来加强对化学品的管理,启动了应急、预警技术的发展计划。1986~2000年间,国际上化学事故频发,尤其是1984年印度的博帕尔甲基异氰酸酯储罐泄漏的严重后果,引起各国广泛重视,促进了化学事故应急技术的进一步发展,但已有的技术总体上因气象条件处理方法简单(Fedra, 1998; Huang et al., 2004b)、气象场预报耗时长(黄顺祥等, 2004; Suzuki et al., 2004; Huang et al., 2006)等仍难以满足突发化学事件的实际需求。北京奥运会期间,安全保障工作格外重要,尤其是奥运会的开闭幕式。为了确保现场人员的人身安全,应对突发化学事件是安全保障的重要工作之一。要同时满足化学危害预测预警准确性和时效性要求,首先需要对目标区域内的气象场进行预报模拟,一旦事故发生,直接调用预报流场,通过扩散模拟,为应急快速提供关键技术依据。为此,开发了MM5(Dudhia et al., 2000)和RAMS6.0(Li et al.,

2007)的接口技术,MM5应用T213资料对北京地区的流场进行初步预报,MM5预报结果驱动RAMS6.0, RAMS6.0根据详细的初始场、边界条件再进行精细预报,开发了基于拉格朗日原理的复杂地形上毒剂云团扩散模式(CDM)和CDM与RAMS6.0耦合技术。在奥运会开幕式时,对国家体育场(“鸟巢”)附近发生突发大气污染事件进行了模拟预测。

2 基本原理

2.1 系统原理

突发大气污染化学事件数值模拟主要分为气象场模拟和扩散模拟,技术框图如图1所示,MM5调用初始场、边界条件,在T213背景场数据的驱动下,使用3层网格嵌套,对北京地区未来36h内的气象场进行初步预报,分辨率设为3 km。RAMS6.0应用所开发的MM5和RAMS6.0接口模块,调用更加精细的初始场、边界条件,在MM5预报的初始气象场驱动下,应用并行计算,对目标区域的气象场进行精细模拟,分辨率为500~1000 m。基于拉格朗日原理,建立了复杂地形上化学危害评估模式或浓度和剂量模式(CDM),CDM直接调用RAMS6.0的预报结果和危害指标体系,输入危险源强的大小和名称后,CDM进行扩散模拟,分辨率为125~1000 m,运算时间通常在2 min之内。数值模式运行的平面直角坐标和大地经纬度坐标的数据转换引擎被研发,CDM的模拟结果通过数据转换引擎,自动在GIS系统上进行展示和发布,包括危害范围、危害等级、危害开始时间、危害持续时间、伤亡概率分布等。

2.2 物理过程参数化方案

风场与湍流场数值预报系统的核心为

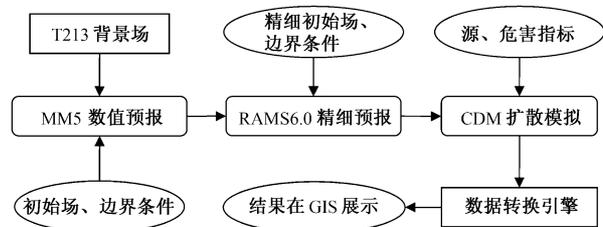


图1 突发大气污染化学事件数值模拟框图

Fig. 1 The chart of the numerical simulation on the atmospheric pollution chemical accidents

RAMS6.0 模式，该模式采用了各种参数化方案对发生在大气中的多种物理过程进行描述，主要包括：长、短波辐射参数化；湿物理过程（根据用户选择，模式可描述不同复杂度的湿物理过程，包括云的形成及其与液态、固态降水物质的相互作用）；多层土壤模式；地表与大气的感热和潜热交换；积云对流参数化方案。本文的风场与湍流场数值预报系统中，考虑到模拟范围主要为城市下垫面、水平格距最精细达到了 500 m 数量级等特点，主要使用了以下参数化方案：Chen-Cotton 短波及长波辐射方案；3 阶湿物理方案（Level3，为 RAMS6.0 所能提供的最复杂的湿物理方案，可考虑水汽相变、成云致雨等物理过程）；11 层土壤模式，可更为精细地计算土壤中的能量输送过程；LEAF3（Land Ecosystem Atmosphere Feedback, Version3）陆面过程模式。这些参数化方案的使用，保证了系统在预报风场与湍流场时，可以较为系统地考虑发生在大气中的各种辐射、水汽相变以及地表—大气间的能量交换等过程，从而对提高风场与湍流场的预报准确性大有帮助。在北京地区，对不同的地表覆盖类型采用了不同的特征参量，这些特征参量在以往的研究中被证明可以较好地模拟出北京地区的地面风场（如表 1 所示）。

表 1 风场与湍流场数值预报系统中的主要陆面参数
Table 1 The main parameters of the wind and turbulent fields in the numerical prediction system

植被类型	比辐射率	最大叶面		反照率	粗糙度
		积指数	覆盖度		
草地	0.96	2.6	0.73	0.11	0.040
农田	0.95	6.0	0.85	0.20	0.060
水体	0.99	0.0	0.00	0.14	0.001
有林草地	0.96	5.0	0.80	0.18	0.510
湿地	0.98	6.0	0.80	0.12	0.030
混合林地	0.96	6.0	0.80	0.15	0.200
城镇	0.90	3.8	0.45	0.15	2.000

3 结果与分析

根据上述的模拟原理及模式，在北京奥运会期间，对北京地区气象场进行了实时连续预报，其中开幕时的流场分布如图 2 所示，主导风向为南风，受西北部山体的影响，在“鸟巢”附近出现西南风。

在北京奥运会开幕时即 2008 年 8 月 8 日 20 时（北京时间，下同），假设有 20 kg 沙林在“鸟巢”附近发生事故，则危害区域主要分布在“鸟巢”的东北方向，危害纵深达 8 km，在“鸟巢”东北角 6 km 附近区域内有大量的毒剂云团滞留，可造成致死危害，具体分布如图 3 所示。

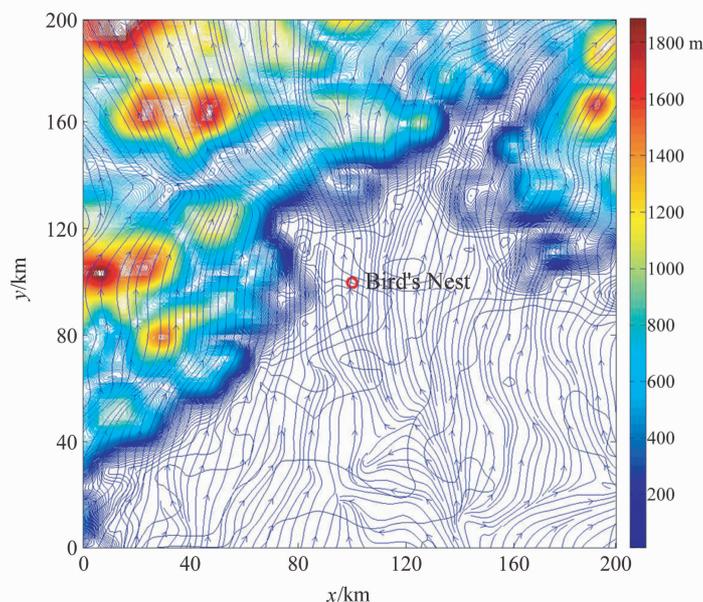


图 2 2008 年北京奥运会开幕时的流场分布

Fig. 2 Distribution of the wind field at the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games

危害开始时间的分布如图 4 所示, 最远危害地段在事故后约 160 min 开始受到危害。

危害持续时间如图 5 所示, 毒云在“鸟巢”附近长时间滞留, 最长危害持续时间达 200 多分钟。



图 3 2008 年奥运会开幕时“鸟巢”附近发生事故时的危害剂量分布模拟

Fig. 3 Simulation of the distribution of the poisonous dose at the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games when a chemical accident occurred around the Bird's Nest



图 4 同图 3, 但为危害开始时间

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the first risk time



图 5 同图 3, 但为危害持续时间

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the risk duration



图 6 同图 3, 但为杀伤概率

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the casualty probabilities

杀伤概率的分布如图 6 所示, 奥运会时“鸟巢”附近伤害的概率比较大, 最大达 60% 以上, 但伤害概率最大的区域位于“鸟巢”东北角 6~7 km 处, 伤害概率达 90% 以上。

根据以上的模拟结果, 若北京奥运会开幕时在“鸟巢”附近发生突发大气污染化学事件, 应急救援和应急监测等力量分配的重点地区为“鸟巢”及其东北方向的相关地段。

4 总结

突发大气污染化学事故的危害预测需要“快速、准确、直观”。事故时对人员和环境能造成实质性危害的扩散过程通常在几十分钟之内, 在对流条件下风速较大时危害时间将只有几分钟至十几分钟, 即使化学物质大量泄露、在逆温条件下危害时间通常也不会超过几小时, 而且主要危害集中在开始阶段, 因此对突发化学事故的危害预测必须要求快, 否则预测结果对应急将失去指导意义。对化学事故处置方案是否正确, 很大程度上取决于对化学危害预测的准确性, 预测结果是对应急力量调配与分配的重要决策依据, 因此对化学事故的危害预测需要准确。然而, 在化学危害预测中, 预测的快速性和准确性通常是相互矛盾的。为了满足快速性要求, 常常基于 Gauss 假设进行简单模拟, 但又难以实现对复杂条件的模拟。为了对复杂条件进行模拟, 就需要进行数值模拟, 而数值模拟耗时很长, 满足不了应急的时效性。为了解决这一矛盾, 本文实现了对目标区域内进行实时的精细气象预报模拟, 通过扩散模

式与气象预报模式的无缝耦合,可以在 5 min 内对目标区域内任意位置的突发化学事故进行精细的危害预测,同时给出定量的危害范围、危害等级、危害开始时间、危害持续时间、伤亡概率等关键应急信息。另外,在化学事故应急决策中,应急信息除了要求快速、准确外,还要求直观简洁。为此,该化学危害预测系统基于 GIS 平台,通过建立数据转换引擎,所有信息自动在 GIS 系统上进行集成和发布。在 2008 年北京奥运会中,该化学危害预测系统进行了业务化运行,根据想定进行了模拟,为开幕式应急资源的配置和应急力量的调配提供了技术支撑。

文章中实现了对单个固定风险源的应急危害预测模拟,对于多个固定风险源和移动风险的危害预测因源强的数量和位置不确定性变得更加复杂,对于已知的保护目标,这种预测是一个反问题,即针对保护目标对源强进行反算,对于该问题可以应用自然控制论思想(Zeng, 1996)和伴随方法(Liu et al., 2005)来解决,这方面 Huang et al. (2008)进行了相关研究,但系统的应用必须与气象场预报、源强实时分布相联,实际应用中还需要跟风险源监测系统相结合。

致谢 感谢曾庆存院士对本项目的多次指导,感谢李磊博士和马晓光硕士的深入探讨。

参考文献 (References)

- Dudhia J, Gill D, Guo Y R, et al. 2000. PSU/NCAR Mesoscale modeling system tutorial class guide: MM5 modeling system version 3 [R].
- ENVIRON. 2004. User's Guide for Comprehensive Air Quality Model with extensions (CAMx) Version 4.00 [R].
- Fedra K. 1998. Integrated risk assessment and management: Overview and state of the art [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 61 (1-3): 5-22.
- Binkowski F S, Roselle S J. 2003. Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D6), 4183, doi: 10.1029/2001JD001409.
- 黄顺祥, 胡非, 李昕, 等. 2004. 反化学恐怖危害评估 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 40 (1): 121-128. Huang Shunxiang, Hu Fei, Li Xin, et al. 2004. Study of the anti-chemical terrorism on numerical simulation [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universtatis Pekinensis (in Chinese)*, 40 (1): 121-128.
- Huang S X, Liu P, Chen H P. 2006. The Potential Risk Assessment of JACWs Based on the Monte Carlo Model, *Progress in Safety Science and Technology VI* [C]. Beijing: Science Press, 1362-1365.
- Huang S X, Hu F, Chen H P, et al. 2004a. Development of Chemical Agents Dispersion Models for Countering Chemical Terrorism [C]. *International Chinese Ocean-Atmosphere Conference*, A7.5, Beijing, China, 1-10.
- Huang S X, Hu F, Liu F. 2004b. Fast Risks Evaluation Method for Chemical Cases. *Progress in Safety Science and Technology IV* [C]. Beijing: Science Press, 2353-2356.
- Huang S X, Liu P, Hu F, et al. 2005. Countering Nuclear, Chemical and Biological Terrors and the Essential Role of Atmospheric Sciences, *Progress in Safety Science and Technology V* [C]. Beijing: Science Press, 1830-1836.
- Huang S X, Liu F, Liu P. 2008. Study on a Chemical Hazard Early Warning Technology Platform, *Progress in Safety Science and Technology VII* [C]. Beijing: Science Press, 394-398.
- Khalid I Al-Wali, Samson P J. 1996. Preliminary sensitivity analysis of urban airshed model simulations to temporal and spatial availability of boundary layer wind measurements [J]. *Atmos. Environ.*, 30 (12): 2027-2042.
- Li L, Hu F, Jiang J H, et al. 2007. An application of RAMS/FLUENT system on the multi-scale numerical simulation of urban surface layer—A preliminary study [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (2): 271-280.
- Liu F, Zhang Y H, Hu F. 2005. Adjoint method for assessment and reduction of chemical risk in open spaces [J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 10 (4): 331-339.
- Suzuki N, Murasawa K, Sakurai T, et al. 2004. Geo-referenced multimedia environmental fate model (G-CIEMS): Model formulation and comparison to the generic model and monitoring approaches [J]. *Environmental Science and Technology*, 38 (21): 5682-5693.
- Zeng Q C. 1996. Natural cybernetics [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1: 16-21.