

NACPADS 及其在核事故后果评价中的应用

王瑞英¹ 冯文东² 王韶伟¹ 林权益¹ 李雯婷¹

1 (环境保护部核与辐射安全中心 北京 100082)

2 (中国辐射防护研究院 太原 030006)

摘要 介绍了环境保护部核与辐射安全中心开发的核事故后果预测与评价决策系统(Nuclear Accident Consequence Prediction and Assessment Decision System, NACPADS)的主要功能和特点, 重点分析了 NACPADS 的精细评价模式、快速评价模式以及根据辐射监测结果估算剂量模式。最后, 将 NACPADS 应用于我国某核电厂事故应急演习中, 评价分析事故情景下的放射性影响。计算结果表明: NACPADS 适用于核事故的早期后果评价。

关键词 核事故后果预测与评价决策系统, 核事故, 后果评价

中图分类号 TL72

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.030603

Nuclear accident consequence prediction and assessment system and its applications

WANG Ruiying¹ FENG Wendong² WANG Shaowei¹ LIN Quanyi¹ LI Wenting¹

1(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

2(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract [Background] The nuclear accident consequence prediction and assessment decision system (NACPADS) is developed by Nuclear and Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China for quick and accurate evaluation of the consequences of nuclear accidents. [Purpose] This study aims to assess and analyze the radioactive effect in accident scene for nuclear power plant accident emergency exercise in China. [Methods] Three modules, i.e., fine evaluation, rapid evaluation, and dose estimation based on radiation monitoring results, are implemented in NACPADS. The detailed evaluation module possesses functionalities of the source input, meteorological, atmospheric diffusion and dose calculation, protection action and its consequence calculation etc., thus can be used to give detailed evaluation results. The rapid evaluation module is possessed of simple atmospheric diffusion and dose calculation for quick and simple evaluation results. According to the radiation monitoring results, the dose module is designed for dose calculation using field radiation monitoring data. [Results] The calculation results showed that NACPADS was suitable for early consequence assessment of nuclear accidents. [Conclusion] NACPADS can quickly provide emergency protection actions such as concealment, evacuation and iodine, and provide necessary support for the emergency decision-making of China's nuclear safety regulators.

Key words NACPADS, Nuclear accident, Consequence evaluation

公益性行业科研专项(No.201309058)资助

第一作者: 王瑞英, 女, 1987 年出生, 2011 年于中国辐射防护研究院获硕士学位, 研究领域为核与辐射事故应急

通信作者: 李雯婷, E-mail: lwt_nsc@126.com

收稿日期: 2017-09-20, 修回日期: 2017-12-04

Supported by Public Welfare Special Research on Industry (No.201309058)

First author: WANG Ruiying, female, born in 1987, graduated from China Radiation Protection Research Institute with a master's degree in 2011, focusing on nuclear and radiation emergency

Corresponding author: LI Wenting, E-mail: lwt_nsc@126.com

Received date: 2017-09-20, revised date: 2017-12-04

20 世纪 80 年代以来,尤其是三里岛核电厂发生堆芯熔化严重事故后,如何降低现役和新建核电站发生严重事故的可能性,以及提高核电站预防和缓解严重事故的能力,是核电发展所面临和亟待解决的问题^[1]。近年来,随着核技术与核能应用的日益增加,核与辐射事故的潜在危险也在悄然增大,人们对于核事故下气载放射性物质对环境和公众的辐射后果的关注度越来越高^[2-3]。

在核事故发生后,气载放射性污染物经大气扩散,在短期内对环境产生大范围的影响^[4]。气载放射性污染物大气扩散过程的模拟非常重要,大气扩散模型为核事故应急提供技术支持^[5-6]。核事故应急作为核安全纵深防御体系的最后一道屏障,在核事故应急时,必须对是否实施和何时实施减少居民辐射后果的防护行动做出决策。这些决策需要依据国家的计划或者建议做出,通常与国际组织制定的原则相一致^[7-8]。在核事故应急响应中,实施防护行动的决策应当能够反映所遇到的实际情况,这就需要核事故后果进行量化评价。

在核事故后果评价系统应用和发展方面,几个国际先进的后果评价和应急决策支持系统——欧共体发展的场外应急决策支持系统(Realtime On-line Decision Support System for off-site Emergency of Nuclear Power Plants, RODOS)、日本发展的环境应急剂量预测信息系统(Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information, SPEEDI/WSPEEDI)、美国实时剂量评价系统(Atmospheric Release Advisory Capability, ARAC/NARAC),都非常关注中小尺度气载放射性后果评价技术的发展。这些系统都是多尺度范围放射性后果评价与决策技术支持软件系统,均具有精确预测本国及其周边国家及地区不同位置核与辐射事故的中小尺度后果评价功能。

我国开发的应急响应期间事故后果评价软件系统(其中某些系统称为“决策支持系统”)是从 1997 年引进了欧洲核应急决策支持系统 RODOS3.0 作为研究开发我国核应急决策支持系统的技术平台以来,经过 5 年的努力,于 2002 年成功开发出了基于 RODOS3.0 系统的核应急决策支持系统 RODOS3.0-C。随后完成的各核事故后果评价系统都是在这个成果的基础上取得的。这些系统所采用的模型较为一致,且为国际上通用的成熟模型,能够快速评估、预报/评价我国核电厂的核事故后果。

本文讨论的核事故后果预测和评价决策系统(Nuclear Accident Consequence Prediction and Assessment Decision System, NACPADS),是环境保

护部核与辐射安全中心用于评价核事故的一套预测和决策支持系统,它可为事故情况下的应急决策提供技术支持。

1 NACPADS 简介

原国家环保总局的 NACPADS 是清华大学核能与新能源技术研究院于 2006 年开发的,该系统满足核事故后果预测与评价决策的不同要求,它配置了精细评价模式、快速评价模式和根据辐射监测结果估算剂量模式,具有良好的综合性的事故后果预测、评价和决策支持性能^[9]。由于开发较早,当时仅针对我国大亚湾核电厂、秦山核电厂和田湾核电厂。环境保护部核与辐射安全中心于 2016 年底对该系统进行了升级,其应用范围扩展至我国目前已装料或即将装料的所有核设施。

1.1 NACPADS 主要功能

对于事故后果预测, NACPADS 具有风场计算的功能,它能够在国家气象中心提供的气象预报数据的基础上,按照事故后果评价的要求,对评价区域的风场进行插值计算,并在此基础上进行辐射剂量的计算;对于事故早期阶段可能采取的应急防护措施(隐蔽、撤离、碘防护),该系统可以对这些防护措施避免或降低事故情况下的辐射剂量的有效性进行分析评价,为决策者的应急决策提供技术支持。

1.2 NACPADS 主要特性

作为一套后果预测与评价决策系统, NACPADS 具有如下特性:

1) 根据是否使用厂址周围区域气象数据以及扩散模型分为精细和快速两种评价模式。精细评价模式使用国家气象中心提供的数值天气预报产品,采用拉格朗日轨迹烟团模型进行浓度和剂量的计算;快速评价模式使用核电厂及周边的实测气象数据,采用高斯烟羽模型进行浓度和剂量的计算。

2) 计算或预测放射性物质在环境中的辐射剂量分布,并对事故早期可能采取的防护行动有效性进行分析,给出决策建议。该系统剂量计算的目的是判断是否需要采取保护行动,并非提供人员实际接受的剂量。

3) 释放时间: NACPADS 能够计算的最大释放时长为 24 h,实际应用中很少达到 24 h。这是由于 NACPADS 是用于防护行动的早期决策,当源项释放时间过长可通过野外测量或其它更好更精确的手段进行决策。

2 NACPADS 主要模式

NACPADS 具有三个功能模式: 精细评价模式、快速评价模式和根据辐射监测结果估算剂量模式。

2.1 精细评价模式

精细评价模式中包含源项输入模块、气象模块——质量守恒约束风场模块(MCF)/三维质量守恒诊断风场模块(CALMET)、大气扩散和剂量计算模块——烟团扩散模型(RIMPUFF)、防护行动及后果计算模块——早期防护措施模型(EMERSIM), 具体评价流程见图 1。

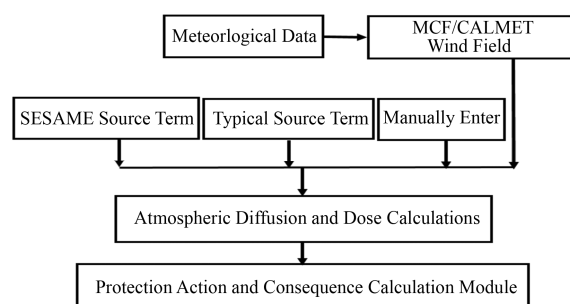


图 1 精细评价模式流程
Fig.1 Fine evaluation module

2.1.1 源项输入模块

事故早期阶段, 通常难以根据放射性释放的情况来确定实际源项。在 NACPADS 中, 源项的输入有三种方法: 一是根据从法国引进的 SESAME 程序计算的释放开始时间、释放总量、释放持续时间和核素组成等; 二是使用核电厂安全分析报告给出的各种典型事故源项, 该源项已预先输入到数据库中; 三是由用户直接输入源项数据。

2.1.2 气象数据

精细评价模式的气象数据采用国家气象中心提供的数值天气预报产品 GRAPES_meso。该数据覆盖经纬度从东经 70°–134.75°、北纬 15°–54.75° 的范围, 数据点经纬间距为 0.15°, 12 h 更新一次, 预报时长为 72 h, 时间间距 1 h。

2.1.3 气象模块

气象模块的任务是利用厂址周围气象预报数据, 形成更精细网格上所需要的气象场, 供后续模块使用。

气象模块包括一个气象数据预处理模块和两个计算模块 MCF/CALMET。

1) 气象数据预处理模块。对气象数据进行预处理, 为 MCF/CALMET 计算做好准备, 同时, 计算厂址周围区域大气稳定度, 它与降雨数据一起提供给大气扩散和剂量计算模块。

2) MCF。在一般风场诊断模式中加上质量守恒基本要求, 在整个局地尺度范围通量散度为最小的约束条件下得到与质量守恒一致的内插风场。具体为用厂址周围区域有限几个点(例如 6×6 个网格点)的气象数据, 结合研究区域的地形特征, 插值计算更细的各网格点(例如 41×41 个网格点)上的风场。对物理约束的考虑较粗略, 因而计算模式简单, 计算速度快。在计算条件有限或对风场计算的时效性要求比较高的情况下, 该方法的优点是显而易见的。

3) CALMET^[10]是 CALPUFF 空气质量扩散模式的一部分, 利用质量守恒连续方程, 在三维网格模拟域中描述小时风场与温度场的气象模块, 其核心部分包括诊断风场以及海陆边界层之上的微气象模块。它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大型中尺度气象模式输出场后, CALMET 模式将自动计算并生成包括逐时的风场、混合层高度、大气稳定性和微气象参数等的三维风场和微气象场资料。CALMET 模块在三维风场模拟过程中详细考虑了地形的动力学影响、倾斜气流和阻塞效应。

2.1.4 大气扩散和剂量计算模块

大气扩散和剂量计算模块 RIMPUFF 的任务是利用 24 h 风场预报数据进行事故释放开始后 24 h 大气扩散预报计算。

RIMPUFF 是利用拉格朗日轨迹烟团模型计算气载物质扩散产生的浓度和剂量的模型。该模型可很好地处理非均匀不稳定气象条件, 它考虑了事故持续过程中气象条件随时间和空间的各种变化。模型的核心就是通过顺序释放的一系列烟团来模拟连续释放。分配到每个烟团中的气载物质的量等于释放率乘以烟团的释放时间间隔。在每个时间步长中, 该模块依据局地气象参数分析计算各个烟团的平流传输、扩散和沉积, 计算由烟团和沉积核素造成的近地面空气中核素的浓度、空气中核素的时间积分浓度、地面污染、烟云的 γ 辐射剂量/剂量率、地面 γ 辐射剂量/剂量率、吸入内照射剂量/剂量率等。

2.1.5 防护行动及后果计算模块

防护行动及后果计算模块 EMERSIM 的主要任务是确定需要采取早期应急行动的区域, 模拟防护行动并计算在采取措施和不采取措施情况下随时间、空间变化的每种照射途径的辐射剂量及其总和。根据大气扩散和剂量计算模块所提供的目前和未来放射性释放和时空分布状况, 估算可供选择的防护行动(隐蔽、撤离、服碘)下可能避免的剂量, 为应急决策过程提供必要的支持信息。

模块中考虑的防护措施为早期防护, 应急措施空间范围一般限于核电厂周围几十公里地区范围, 时间范围一般限于释放开始的前几小时至放射性烟云经过后的几小时内。在给定的事故情景下, 可以根据通用优化干预水平和(或)应急计划区来确定应急行动的范围。

2.2 快速评价模式

快速评价模式只包含简单的大气扩散和剂量计算模块, 流程详见图 2。源项同精细评价模式的源项输入方式。

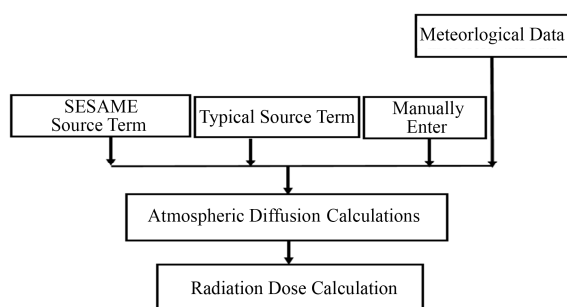


图2 快速评价模式流程
Fig.2 Rapid evaluation module

气象数据使用核电厂的实测气象数据, 包括气象数据的时间(年/月/日/小时/分钟)、风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、风向、稳定度等级、混合层高度、降水类型。

该模式使用两种大气输送和扩散模式。一种是直线高斯烟羽模式(Straight-line Gaussian plume model); 另一种是拉格朗日-轨迹高斯烟团模式(Lagrangian-trajectory Gaussian puff model)。在 5 km 范围内使用直线高斯烟羽模式, 超过 5 km 使用烟团模式。另外, 当释放点处风速为零(静风)时亦使用烟团模式。烟团模式允许随时间改变气象条件, 自动加入气象资料的时间变化。

2.3 根据辐射监测结果估算剂量模式

“根据辐射监测结果估算剂量”模式的任务是完成由野外辐射监测数据计算剂量的功能。该模块计算的剂量包括由吸入、空气浸没及地面照射几种照射途径所致剂量, 流程详见图 3。

首先, 计算每种核素各途径下的照射量, 然后, 乘以适当的剂量因子得到剂量。早期剂量包括地面照射、烟云浸没、50 a 吸入剂量以及总有效剂量, 计算假设所有的放射性核素浓度在受照期间内为常数。长期剂量给出第一个月、第二个月和 50 a 的地面照射剂量和吸入剂量及其总和, 在计算中, 考虑衰变和衰变产物的生成。

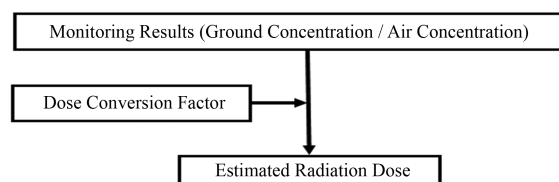


图3 根据辐射监测结果估算剂量模式流程
Fig.3 Evaluation dose module according radiation monitoring

3 NACPADS 在核电厂应急演习中的应用

根据《核动力厂营运单位的应急准备和应急响应》(HAD002/01-2010)^[11]要求: “每个核动力厂的综合演习至少两年举行一次”。我国某核电厂目前 1、2 号核电机组均已商运, 于 2017 年某一时间开展综合应急演习, 对核电厂应急计划与准备的有效性进行全面检验。

3.1 事故情景

演习的主要事故情景为: 某核电厂由于发生地震进入厂房应急状态; 1 号核电机组 1 号蒸汽发生器壳内给水管线破口; 由于部分设备损坏, 二回路系统面临丧失给水的危险; 1 号蒸汽发生器传热管出现破管; 产生放射性气态释放, 进入场区应急状态。由于破口位置在 1GCT128VV 上游, 破口短期内无法封堵。考虑到 1 号反应堆安全屏障已被突破, 放射性气态释放进一步加大, 进入场外应急状态。在破口封堵完毕, 乏池漏点封堵完毕, 现场无水泄漏, 厂区辐射水平已趋于稳定, 开始制定厂区去污方案, 终止应急状态, 实施恢复行动。

表 1 源项数据
Table 1 The source data

核素 Nuclide	释放量 Release quantum / Bq	核素 Nuclide	释放量 Release quantum / Bq
^{86}Rb	1.25×10^{10}	^{131}I	6.56×10^{12}
^{132}I	4.80×10^{12}	^{133}I	1.23×10^{13}
^{134}I	2.45×10^{12}	^{135}I	9.79×10^{12}
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	1.14×10^{12}	^{87}Kr	8.96×10^{11}
^{88}Kr	2.46×10^{12}	^{136}Cs	3.20×10^{11}
^{91}Sr	1.06×10^{10}	^{89}Sr	1.38×10^9
^{133}Xe	1.33×10^{13}	^{135}Xe	4.21×10^{12}
^{141}Ce	1.91×10^7	^{143}Ce	3.08×10^7
^{140}Ba	6.53×10^8	^{140}La	2.51×10^7

根据核电厂核事故报告中的信息, 得出场区应急时的计算条件: 释放开始时间为 2017 年 x 月 x 日早 9:00, 持续释放时间为 2.5 h, 释放高度 20 m,

20 m 高度处风速为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向为 SSW, 源项详见表 1。

3.2 事故评价

3.2.1 精细评价模式

启用 NACPADS, 选取预报的实时气象数据, 分别采用 MCF 和 CALMET 风场模式进行核事故后果评价计算。计算的剂量水平为: 2 d 可防止有效剂量的最大值为 0.0292 mSv , 甲状腺的可防止剂量的最大值为 0.490 mGy 。

根据我国《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)^[12]规定的通用优化干预水平: 2 d 可防止有效剂量大于 10 mSv , 需采取隐蔽的防护行动; 7 d 可防止有效剂量大于 50 mSv , 需要采取撤离的防护行动; 7 d 可防止甲状腺剂量大于 100 mGy , 需要采取服碘的防护行动。由计算结果判断, 不需要对公众采取撤离、隐蔽等紧急防护行动。

3.2.2 快速评价模式

选用核电厂发生事故时刻释放点的实测气象数据, 计算时间为 2 d, 进行核事故后果评价计算。计算的有效剂量的最大值为 0.41 mSv , 甲状腺剂量的最大值为 12 mGy , 均出现在场区边界(下风向约 1 km)处。由该结果判断: 场区边界(下风向约 1 km)处的可防止有效剂量低于我国通用优化干预水平, 无需对公众采取防护行动。

3.2.3 根据辐射监测结果估算剂量

现场开展应急环境监测, 得出: 1) 场区边界以外的现场环境 γ 剂量率的最大值出现在厂址 SW 方位 2 km 处, 为 $129 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$; 2) 地表污染的最大值出现在一号门外 2.4 km 处, 为 $3.5\times 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$; 3) 根据水样品取样放化分析结果, 水中的放射性活度浓度为 $0.21 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

使用根据辐射监测结果估算剂量模块, 按照地面浓度 $3.5\times 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, 计算得到相应的早期剂量——总有效剂量为 $9.35\times 10^{-2} \text{ mSv}$ 。

由此结果判断: 最大环境 γ 剂量率低于操作干预水平; 根据最大地面浓度计算的有效剂量也低于通用干预水平。此外, 水样放化分析水中的放射性活度浓度远低于我国的食物饮用水通用行动水平 ($1 \text{ kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$)。因此, 根据环境监测结果也无需对公众采取防护行动。

综合 NACPADS 的精细评价模式、快速评价模式和根据辐射监测结果估算剂量模式, 在该事故情景下不需要对公众采取防护行动。

4 结语

通过将 NACPADS 应用于我国某核电厂事故情景下的放射性影响评估, 分析结果表明:

1) NACPADS 具有友好的界面和便捷的操作, 可快速给出合理的隐蔽、撤离、服碘等应急防护行动建议, 它是适合于我国核电厂的后果评价软件, 可为我国核安全监管机构对核事故应急决策过程提供必要的支持信息。

2) NACPADS 适用于核事故的早期后果评价, 该阶段可获得的信息少, 而应急防护决策需要在发生事故后的短时间内进行, 以利于及早采取防护行动。建议事故评价人员尽早尽可能多获取相关信息, 以便在短时间内给出可靠的评估结果。

3) 现场监测人员可以根据 NACPADS 的计算结果指导监测布点区域和范围。

参考文献

- 1 姚彦贵, 宁冬, 武志玮, 等. 假想堆芯熔化严重事故下反应堆压力容器完整性的研究进展与建议[J]. 核技术, 2013, **36**(4): 040615. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.040615.
YAO Yangui, NING Dong, WU Zhiwei, *et al.* Research progress and recommendations on reactor pressure vessel integrity under hypothetical core melt down accident[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(4): 040615. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.040615.
- 2 郭月凤, 张慧芳, 杨彪, 等. 急性辐射损伤的生物剂量估算方法[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2012, **30**(3): 135-141.
GUO Yuefeng, ZHANG Huifang, YANG Biao, *et al.* Biodosimetry estimation methods for acute radiation damage[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2012, **30**(3): 135-141.
- 3 乔清党, 李冰, 岳会国, 等. 气载放射性物质扩散的精细化模拟方法研究[J]. 核安全, 2014, **13**(1): 28-33. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2014.01.004.
QIAO Qingdang, LI Bing, YUE Huiguo, *et al.* Refined analogy method research of diffusion of airborne radioactive substance released of nuclear accident[J]. Nuclear Safety, 2014, **13**(1): 28-33. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2014.01.004.
- 4 蔡旭晖, 陈家宜, 康凌. 核事故条件下的大气扩散模式及应用[J]. 辐射防护, 2003, **23**(5): 293-299.
CAI Xuhui, CHEN Jiayi, KANG Ling. An atmospheric diffusion model for conditions of nuclear accident[J]. Radiation Protection, 2003, **23**(5): 293-299.

- 5 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.
- 6 吉志龙, 马元巍, 王德忠. 遗传算法动态修正核素大气扩散模型的适应度函数研究[J]. 核技术, 2014, **37**(4): 040503. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040503.
JI Zhilong, MA Yuanwei, WANG Dezhong. Study on fitness functions of genetic algorithm for dynamically correcting nuclide atmospheric diffusion model[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(4): 040503. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040503.
- 7 HAF101: 核电厂厂址选择安全规定[S]. 1991.
HAF101: Safety provisions for site selection of nuclear power plants[S]. 1991.
- 8 GB6249-2011: 核动力厂环境辐射防护规定[S]. 2011.
GB6249-2011: Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plants[S]. 2011.
- 9 林雪清, 曹建主, 曲静原, 等. 国家环保总局核事故后果评价与预测系统的设计与开发[J]. 辐射防护, 2006, **26**(2): 70–76.
LIN Xueqing, CAO Jianzhu, QU Jingyuan, *et al.* Design and development of consequences assessment and forecast system for nuclear accidents for state environmental protection administration[J]. Radiation Protection, 2006, **26**(2): 70–76.
- 10 朱振铎, 端义宏, 陈德辉. GRAPES-TCM 业务试验结果分析[J]. 气象, 2007, **33**(7): 44–54.
ZHU Zhenduo, DUAN Yihong, CHEN Dehui. GRAPES-TCM business test result analysis[J]. Meteorological Monthly, 2007, **33**(7): 44–54.
- 11 HAD002/01-2010: 核动力厂营运单位的应急准备和应急响应[S]. 2010.
HAD002/01-2010: Emergency preparedness and response of operating units in nuclear power plants[S]. 2010.
- 12 GB18871-2002: 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 2002.
GB18871-2002: Basic standards for ionizing radiation protection and radiation source safety[S]. 2002.