

大规模核素扩散数据可视化方法研究与应用

贾亚宁^{1,2} 郑晓磊¹ 陈春花¹ 何桃¹ 龙鹏程¹

¹ (中国科学院核能安全技术研究所 中子输运理论与辐射安全重点实验室 合肥 230031)

² (中国科学技术大学 合肥 230027)

摘要 在核应急响应期间,利用可视化手段直观展示大规模核素扩散数据的空间分布,有助于应急指挥人员快速有效地进行科学决策与指挥。本文基于科学计算可视化技术,选用改进的八叉树模型对扩散数据建立空间索引,并根据操作干预水平提取数据水平时空切片,完成了大规模核素扩散数据的可视化。以日本福岛核事故为例,对其大规模核素扩散数据进行分层可视化,直观显示了放射性核素在不同高度的空间分布状态,表明本文方法可为核应急快速响应与决策提供技术支持。

关键词 大规模数据处理,核素扩散,可视化,核事故应急

中图分类号 TL732, TP391.9

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.050701

Research and application of a spatiotemporal visualization method for large-scale nuclide diffusion data

JIA Yaning^{1,2} ZHENG Xiaolei¹ CHEN Chunhua¹ HE Tao¹ LONG Pengcheng¹

¹(Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

²(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

ABSTRACT During a nuclear emergency response, detailed spatiotemporal distribution visualization helps to make quick and effective scientific decisions to analyze large-scale nuclide diffusion data. Thus, a method based on scientific visualization is developed in this study. An optimized index management method, based on a traditional Octree structure, is adopted to establish spatial indexes for diffusion data and extract horizontal spatiotemporal slices according to the operation intervention levels. Considering the Fukushima nuclear accident in Japan as an example, large-scale radionuclide diffusion data are visualized in layers, so that the spatial distribution of radionuclides at

基金资助: 国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(2014GB112000)、中国科学院信息化项目(XXH13506-104)、国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家基础科学数据共享服务平台”(DKA2017-12-02-17)、中国科学院青年创新促进会专项项目、产业化基金资助

第一作者: 贾亚宁, 女, 1993年10月出生, 2016年毕业于东北大学获工学学士学位, 目前为中国科学技术大学硕士研究生在读, 核能科学与工程专业, E-mail: yaning.jia@fds.org.cn

通信作者: 何桃, 博士, E-mail: tao.he@fds.org.cn

收稿日期: 初稿 2018-07-12, 修回 2018-09-15

Supported by National Magnetic Confinement Fusion Science Program of China (2014GB112000), Informatization Project of Chinese Academy of Sciences (XXH13506-104), The National R&D Infrastructure and Facility Development Program of China-Fundamental Science Data Sharing Platform (DKA2017-12-02-17), Special Project of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences, and Industrialization Fund

First author: JIA Yaning (female) was born in October 1993, and obtained her bachelor's degree from Northeastern University in 2016. Now she is a master candidate at University of Science and Technology of China, majoring in nuclear science and engineering. E-mail: yaning.jia@fds.org.cn

Corresponding author: Ph.D. HE Tao, E-mail: tao.he@fds.org.cn

Received 12 July 2018; accepted 15 September 2018

different heights can be visualized. The results show that this method can provide technical support and facilitate decision-making during nuclear emergency response incidents.

KEYWORDS Large-scale data processing, Nuclide diffusion, Spatiotemporal visualization, Nuclear accident emergency

CLC TL732, TP391.9

核应急是保障核能事业可持续健康发展的重要环节^[1-2]。核事故后,放射性核素在大气中的扩散迁移受风向、风速、大气稳定度等因素影响^[3],快速完成扩散场可视化,直观显示核素扩散的方向、速度、影响范围及严重程度,对决策者及时确定事故危害范围,规划撤离路径,调配可用物资,生成科学的应急响应方案十分重要。

随着计算机技术的进步^[4-6]和核素扩散后果预估模型研究的深入^[7-9],以及辐射环境监测手段的不断提高^[10-12],可供决策者进行应急响应的核素扩散数据的规模越来越大。如在日本福岛核电站事故应急期间,地面机动辐射巡测的范围约 100 km,一次监测数据点数可达 35 万个^[13]。此外,扩散数据具有时空特性,基于二维地图的整个时空数据场无规律的堆叠会影响决策者对核素时空分布状态的判断,并造成系统资源的浪费。抽取任意高度层数据表征整个空间的扩散场,结果具有不确定性,对应急指挥人员开展科学决策产生不利影响。Gil-Lopez 等^[14]选择 1.3 m 处的数据显示研究对象的空间浓度分布,Rivera 等^[15]选择 1.5 m 处的数据表征整个空间中超细颗粒物的分布。这些研究对高度层的选择依据单一,且没有说明该选择的合理性与完整性。Povinec 等^[16]以点、线条等形式模拟了日本福岛放射性核素在大气和海洋中的扩散。Lagzi 等^[17]以黑白等值线的形式模拟了 ¹³¹I 的扩散分布。但这些研究结果难以被决策者直观地理解运用。为了更科学地指导核应急行动,需要对大规模扩散数据的管理和运算,并保证可视化的结果通俗易懂,为决策者提供依据。

为了满足核应急快速响应与决策的要求,本文采用改进的八叉树模型^[18]对扩散数据建立空间索引,结合时空切片技术提取特征高度层,实现了大规模核素扩散数据的可视化,并应用于 FDS 凤麟核能团队研发的虚拟核电站与核安全云平台 Virtual4DS 中。本文以日本福岛核电站事故应急中部分核素扩散数据为案例,介绍了测试验证情况。

1 大规模核素扩散数据快速可视化

数据源是可视化技术的基础。核素扩散的数据遵照时间序列以文本格式存储,每一时刻的文本数据为模拟区域内所有扩散点的集合,每个扩散点均包含位置信息(X、Y、Z 位置坐标)与属性值(如浓度),X、Y、Z 3 个方向的坐标与属性值均以数组形式分别存储。扩散点的位置数据具有独立的坐标系统,其时间轴与欧几里德空间的三维坐标共同构成可视化模拟的表达空间。结合核素扩散数据的特点,通过建立八叉树空间索引、抽取数据水平切片等方法,最终实现了大规模核素扩散数据的快速可视化。

1.1 八叉树索引建立

通过分析不同空间索引技术的特点,考虑核应急的时效性需求,要求核素扩散可视化的数据处理速度尽可能快。图 1 为空间索引的建立流程。

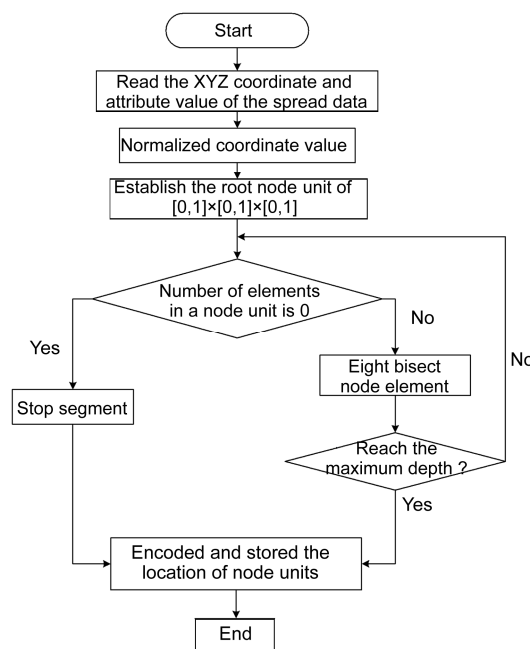


图 1 八叉树建立流程图
Fig.1 Flow chart of octree establishment

本文采用改进的八叉树模型^[18]对核素扩散数据建立空间索引，在通用八叉树的基础上增加了位置编码机制，有效提高了数据访问效率。编码八叉树的每个节点单元都代表一个三维空间，将父节点的空间进行8等分即得到对应的8个子节点。每个节点都分别使用对应空间的X、Y、Z方向分量的最小坐标值进行二进制编码，具体描述为，以该值与 $2^{\text{level}-1}$ （level为八叉树的最大递归深度）进行乘积后向下取整，使用此整数的二进制编码。图2演示了一维情况下八叉树编码和搜索的过程，根节点对应[0, 1]空间，等分为[0, 0.5]和[0.5, 1]两个子空间，左子节点的编码为 $\text{Binary}(0 \times 2^7) = \text{Binary}(0) =$

00000000，右子节点的编码为 $\text{Binary}(0.5 \times 2^7) = \text{Binary}(64) = 01000000$ ，以此类推。在搜索时，也将要搜索的数值进行编码，第*i*位的编码值指示了第*i*-1层树节点的搜索方向，编码值为0则搜索左分支，为1则搜索右分支。仍以图2为例，搜索0.28，它的编码为 $\text{Binary}(0.28 \times 2^7) = \text{Binary}(35) = 00100011$ ，则从根节点依次搜索左、右、左、左、左、右、右分支，即可找到该数据。显然，本文的编码二叉树在搜索时无需通过比较来判断要搜索的子空间，而只需按照编码值进行简单的位操作即可，显著简化了搜索流程，提升了搜索性能。

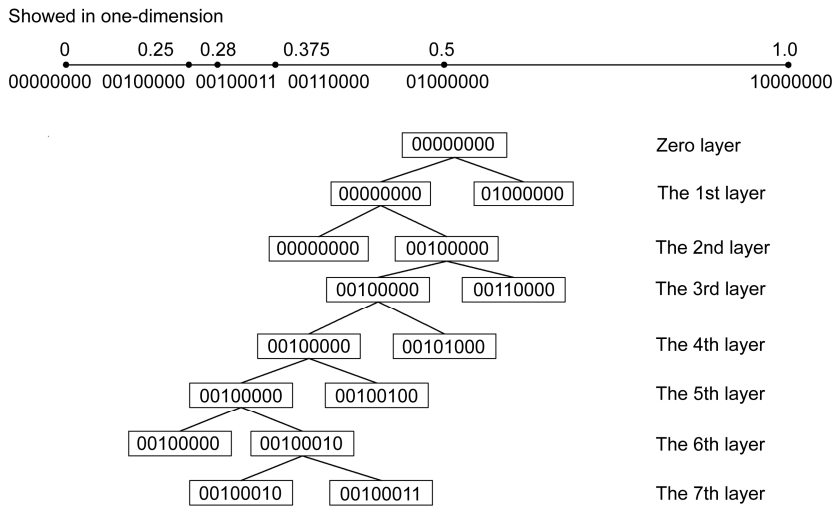


图2 八叉树结构展示图
Fig.2 Diagram of octree structure

1.2 时空切片抽取

为了更好地指导核应急工作，根据国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)推荐的操作干预水平 (Operational intervention level, OIL)^[19]，抽取特征高度层数据进行可视化展示，显示不同高度上核素的分布状况，并以特征高度层叠加的方式表征核素在整个空间的分布状态，实现了大规模扩散数据的时空可视化。由不同事故阶段核素扩散场景及操作干预水平的描述，按表1进行特征高度层的抽取。

基于前文建立的八叉树空间索引，利用节点单元定位算法^[18]提取特征高度层的扩散数据，以直观显示数据体的空间分布。建立的八叉树索引在划分空间时会产生两种不同的节点单元，单元元素为空与单元元素不为空。在切片之前，要对节点单元进

行筛选和操作：对于空节点单元，将其与最邻近的不为空的节点单元合并；对于非空节点单元，直接获取指定单元的所有单元元素。由于八叉树在空间划分时遵循“就近原则”，这里忽略一个节点单元内所有单元元素携带的高度差。定位算法步骤如下：首先，将特征高度层数据Z方向分量的坐标转换成相应的位置编码；然后，利用Z方向的位置编码，从根节点单元开始向下索引，确定所查找的子节点单元的位置，找到对应八叉树层数，获取浓度数据。本文将抽取高度为0、0.5、1.0、1.5、2.0 m等5层浓度数据。经归一化处理之后，Z值位置编码及对应层数如表2所示。对得到的数据切片，首先进行节点单元解码，实现向地理坐标的转换，之后再行浓度等值线跟踪，并在相邻等值线间进行颜色填充，完成核素扩散场景图像绘制。

表 1 数据层抽取依据表
Table 1 Data layer extraction basis table

| 高度层 / m Height layer | 操作干预水平 Operational intervention level | 对应事件 Corresponding events |
|-------------------------|--|---|
| 0 | OIL7 | 核素沉积 Nuclide deposition |
| 0.5 | OIL4 | 手部或面部裸露处剂量率, 常见植物、家禽的生长环境, 人的呼吸带及身高 The dose rate of exposed parts of hands or faces, growth environment of common plants and poultry, respiratory belt and height of human body |
| 1.0 | OIL1/OIL2/OIL3 | 面部裸露处剂量率, 常见植物、家禽的生长环境, 人的呼吸带及身高 The dose rate of exposed part of face, growth environment of common plants and poultry, respiratory belt and height of human body |
| 1.5 | OIL4/OIL8 | 面部裸露处剂量率, 人的呼吸带及身高 The dose rate of exposed part of face, the breathing band and height of the human body |
| 2.0 | - | 动植物生长环境 The growth environment of plants and animals |

表 2 位置编码表
Table 2 Position coding table

| Z / m | 二进制数 Binary | 位置编码 Position coding | 层数 Level |
|-------|----------------|-------------------------|-------------|
| 0 | 0 | 00000000 | 0 |
| 0.05 | 6.4 | 00000110 | 6 |
| 0.10 | 12.8 | 00001100 | 5 |
| 0.15 | 19.2 | 00010011 | 7 |
| 0.20 | 25.6 | 00011001 | 7 |

1.3 方法实现

基于开源 QGIS 平台^[20]对本研究方法进行了程序开发, 完成了集数据读取、建立八叉树索引、抽取时空切片、坐标转换及图像绘制为一体的核素扩散可视化功能模块, 可以结合地图直观地显示核素在空间内扩散的方向、趋势及范围。该模块已集成进 FDS 风麟核能团队自主开发的虚拟核电站与核安全云平台 Virtual4DS 中, 该团队在先进反应堆概念设计^[21-23]、抗辐照材料^[24-28]、中子源^[29-30]以及聚变安全^[31]等方面都开展了深入的研究。可视化具体流程如图 3 所示。

2 验证测试

2.1 场景描述

选用日本原子能研究开发机构 (Japan Atomic Energy Agency, JAEA)^[32]在日本福岛核电站事故后提供的数据为模拟条件, 该数据反映了事故后核素的弥散状态。模拟区域面积 18 526 849 585.674 286 m², 泄漏点坐标为东经 141°01'57", 北纬 37°25'17"。应用核应急信息化协同指挥平台进行模拟计算, 单

个时刻的文件数据体量约 330 M, 所有的数据文件体量合计约 154.69 GB。

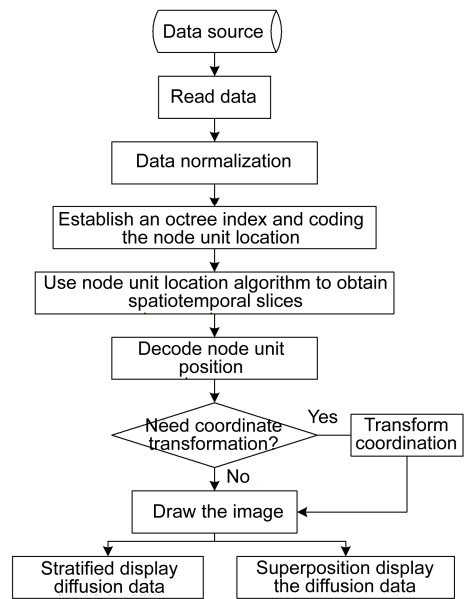


图 3 可视化方法流程图
Fig.3 Flow chart of visualization method

2.2 扩散数据可视化模拟

以自主开发的核应急信息化协同指挥平台实现数据处理与可视化展示, 程序界面如图 4 所示。

可视化模拟的输入为特定模拟条件下所有时间序列的计算数据, 输出为该模拟条件下所有时间序列的扩散图像。扩散图像包括 5 个特定高度层核素扩散模拟图及高度层叠加表征的整个空间的核素扩散模拟图, 其中, 空间叠加策略为 5 个高度层中同

一 X 、 Y 坐标下，核素浓度最大值代表该空间位置的核素浓度。核素扩散到 4 h 时，核素扩散时空分布效果如图 5 所示。由图 5 可以看出，同一时刻不同高度的核素分布状态明显不同。根据切片显示结果，可以直观地看出放射性核素对不同高度受体(植被、水源、食物、公众等)的影响。以特征高度层数据叠加显示的方式，表征整个空间的核素空间分布，充分考虑了每个高度层的受体与核素分布状态，

可有效降低因抽取高度而造成的不确定性，为决策者提供更科学的指导，最大程度地保障公众安全。在本文的示例中，1.0 m 高度层的核素分布场最大，也最接近整个空间的扩散趋势，这在一定程度上反映了操作干预水平 OIL1/OIL2 选择在高度 1.0 m 处进行测量的科学性，也说明了本文基于操作干预水平选取时空切片的方法是合理的。

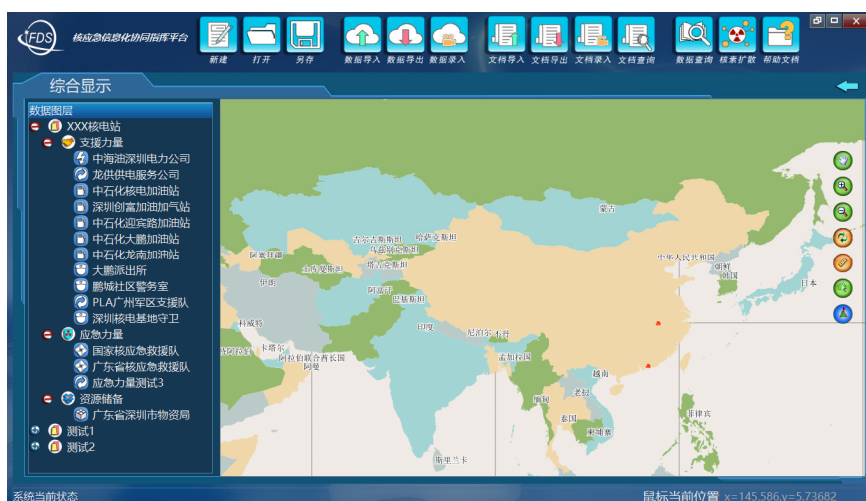


图 4 程序界面图 (地图引用源: 开源 QGIS 平台^[20])
 Fig.4 Diagram of program interface (Map reference source: open source QGIS platform^[20])

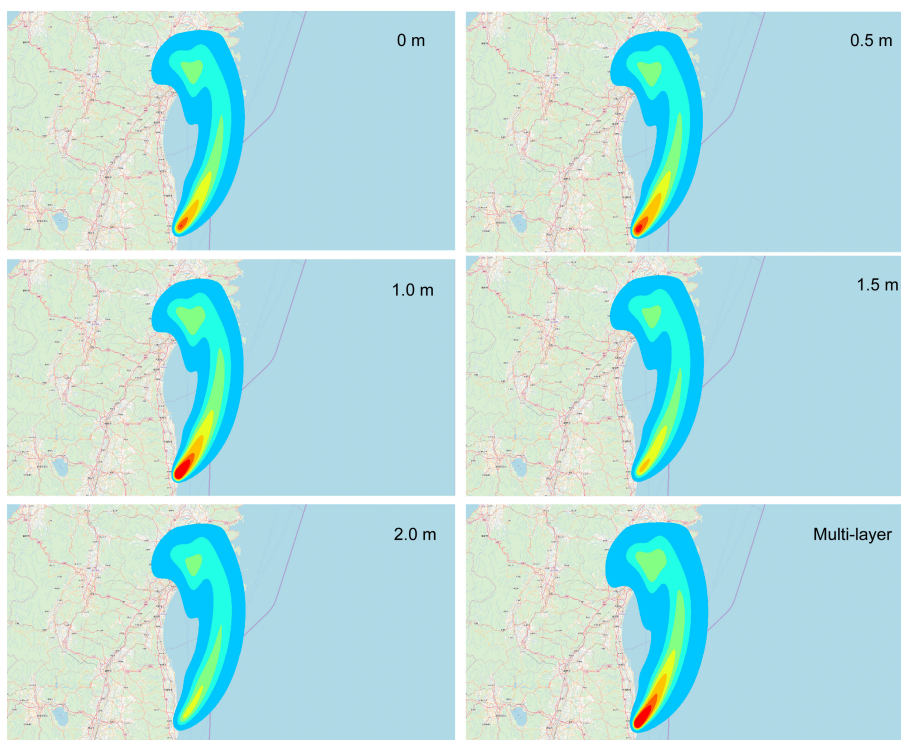


图 5 核素扩散模拟图
 Fig.5 Nuclide diffusion simulation

3 结论

本文研究了适用于大规模核素扩散数据时空可视化的方法,并实现了该功能模块的开发,可为核应急响应工作的开展提供科学指导。本文基于改进的八叉树模型对大规模核素扩散数据建立空间索引,实现了数据快速访问。同时采用时空切片技术,抽取特征高度层水平时空切片,展示了不同高度核素的分布状态,并以特征高度层叠加的方式展示了整个空间的核素分布状态。最后以日本福岛核电站事故为例,验证了本文方法,结果表明应用效果好,可以为核应急快速响应与决策提供技术支持。

核事故发生之后,如何使公众较为直观地理解自身所处环境的污染程度,在保障公众安全的同时给予公众信心是接下来的研究方向。

致谢 本文作者向 FDS 凤麟核能团队的支持和帮助表示衷心感谢。

参考文献

- 1 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的核应急[M]. 上海: 人民出版社, 2016.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's nuclear emergency preparedness[M]. Shanghai: People's Publishing House, 2016.
- 2 吴宜灿, 胡丽琴, 龙鹏程, 等. 虚拟核电站与核安全的综合模拟仿真[C]//中国科学院. 中国科研信息化蓝皮书 2017. 北京: 电子工业出版社, 2017: 162-176.
WU Yican, HU Liqin, LONG Pengcheng, *et al.* Comprehensive simulation of virtual nuclear power plant and nuclear safety[C]//Chinese Academy of Sciences. China's e-science blue book 2017. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 162-176.
- 3 胡二邦, 陈家宜. 核电厂大气扩散及其环境影响评价[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
HU Erbang, CHEN Jiayi. Atmospheric diffusion and environmental impact assessment of nuclear power plant[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999.
- 4 Ernsting S, Kuchen H. Data parallel algorithmic skeletons with accelerator support[J]. *International Journal of Parallel Programming*, 2017, **45**(2): 283-299. <http://dx.doi.org/10.1007/s10766-016-0416-7>.
- 5 Wu Y C. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2009, **84**(7-11): 1987-1992. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.12.041>.
- 6 Wu Y C, Song J, Zheng H, *et al.* CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system superMC[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, **82**: 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.058>.
- 7 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC[J]. *核科学与工程*, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
WU Yican, SONG Jing, HU Liqin, *et al.* Super Monte Carlo simulation program for nuclear and radiation process: superMC[J]. *Nuclear Science Engineering*, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
- 8 Wu Y C. Conceptual design of china fusion power plant FDS-II[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2008, **83**(10-12): 1683-1689. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.06.048>.
- 9 郭瑞萍, 张琼, 陈海英, 等. 核电厂放射性气态流出物大气弥散模型现状与展望[J]. *核安全*, 2012(2): 66-71. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5360.2012.02.015.
GUO Ruiping, ZHANG Qiong, CHEN Haiying, *et al.* Progress and prospects of atmosphere dispersion model of radioactive gaseous effluents from nuclear power plant[J]. *Nuclear Safety*, 2012(2): 66-71. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5360.2012.02.015
- 10 Kim J H, Park K H, Joo K S. Development of low-cost, compact, real-time, and wireless radiation monitoring system in underwater environment[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2018, **50**(5), 801-805.
- 11 Jiang J, Shimazoe K, Nakamura Y, *et al.* A prototype of aerial radiation monitoring system using an unmanned helicopter mounting a GAGG scintillator compton camera[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2016(7): 1-9. <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2015.1089796>.
- 12 Guo S, Wu J, Ma Z, *et al.* Study on the correction method for the dead-time effects of neutron detectors due to pulsed radiation[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2018, **72**(4): 485-491. <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.72.485>.
- 13 王永红. 福岛核事故应急[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
WANG Yonghong. Fukushima nuclear accident emergency[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.

- 14 Gil-Lopez T, Castejon-Navas J, Galvez-Huerta M, *et al.* Predicted percentage of dissatisfied and air age relationship in ventilation systems: application to a laboratory[J]. HVAC&R Research, 2013, **19**(1): 76-86. DOI: 10.1080/10789669.2012.741931.
- 15 Rivera M, Basagaña X, Aguilera I, *et al.* Spatial distribution of ultrafine particles in urban settings: A land use regression model[J]. Atmospheric Environment, 2012, **54**(4): 657-666. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.058>.
- 16 Povinec P P, Gera M, Holý K, *et al.* Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, **81**(2): 383-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.058>.
- 17 Lagzi I, Kármán D, Turányi T, *et al.* Simulation of the dispersion of nuclear contamination using an adaptive eulerian grid model[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, **75**(1): 59-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.11.003>
- 18 宋涛, 欧宗琪, 王瑜, 等. 八叉树编码体数据的快速体绘制算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, **17**(9): 1990-1996. DOI: 10.3321/j.issn:1003-9775.2005.09.016.
SONG Tao, OU Zongying, WANG Yu, *et al.* Fast volume rendering algorithm of octree encoded volume[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2005, **17**(9): 1990-1996. DOI: 10.3321/j.issn:1003-9775.2005.09.016.
- 19 Thorne M C. Actions to protect the public in an emergency due to severe conditions at a light water reactor: emergency preparedness and response report[J]. Journal of Radiological Protection Official Journal of the Society for Radiological Protection, 2013, **33**(3): 709. <http://dx.doi.org/10.1088/0952-4746/33/3/B01>.
- 20 Q D Team. QGIS 2.8 user guide[M]. UK: Samurai Media Limited, 2016.
- 21 Wu Y C. Multifunctional neutronics calculation methodology and program for nuclear design and radiation safety evaluation[J]. Fusion Science and Technology, 2018(1): 1-9. DOI: 10.1080/15361055.2018.1475162.
- 22 Wu Y C, Jiang J, Wang M, *et al.* A fusion-driven subcritical system concept based on viable technologies[J]. Nuclear Fusion, 2011, **51**(10): 103036. <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/51/10/103036>.
- 23 Wu Y C, Bai Y, Song Y, *et al.* Development strategy and conceptual design of china lead-based research reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, **87**: 511-516. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.08.015.
- 24 Wu Y C. Design and R&D progress of China lead-based reactor for ADS research facility[J]. Engineering, 2016, **2**(1): 124-131. <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.023>.
- 25 Huang Q, Baluc N, Dai Y, *et al.* Recent progress of R&D activities on reduced activation ferritic/martensitic steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, **442**(1-3): S2-S8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.12.039>.
- 26 Huang Q, Li C, Li Y, *et al.* Progress in development of China low activation martensitic steel for fusion application[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **367**: 142-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.03.153>.
- 27 Huang Q. Status and improvement of CLAM for nuclear application[J]. Nuclear Fusion, 2017, **57**(8): 086042. <http://dx.doi.org/10.1088/1741-4326/aa763f>.
- 28 Wu Y C. Design status and development strategy of China liquid lithium—lead blankets and related material technology[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **367**: 1410-1415. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.04.031>
- 29 吴宜灿, 刘超, 宋钢, 等. 强流氦氖聚变中子源 HINEG 设计研究[J]. 核科学与工程, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.011.
WU Yican, LIU Chao, SONG Gang, *et al.* Design study of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG[J]. Nuclear Science Engineering, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.011.
- 30 Wu Y C. Development of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG[J]. International Journal of Energy Research, 2018, **42**(2): 68-72. <https://doi.org/10.1002/er.3572>.
- 31 Wu Y C, Chen Z, Hu L, *et al.* Identification of safety gaps for fusion demonstration reactors[J]. 2016, **1**: 16154. <http://dx.doi.org/10.1038/nenergy.2016.154>.
- 32 Japan Atomic Energy Agency. Fukushima Nuclear Accident Archive[EB/OL]. (2011-03-15) [2018-06-25]. <https://f-archive.jaea.go.jp/index.php?locale=eng>.