DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0389
单皖粤,梁玉函,王刚, 等.2024.核泄漏大气扩散与环境风险模拟:以山东半岛为例[J].环境科学学报,44(6):292-299
SHAN Wanyue, LIANG Yuhan, WANG Gang, *et al*.2024.Atmospheric diffusion and environmental risk simulation of nuclear leakage: A case study of Shandong Peninsula, China[J].Acta Scientiae Circumstantiae,44(6):292-299

核泄漏大气扩散与环境风险模拟:以山东半岛为例

单皖粤[1,2],梁玉函[1],王刚[3],伯鑫[1,2,*],徐鑫[1,2,*]

1. 北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029
2. 北京化工大学北化中国工业碳中和研究院,北京 100029
3. 三捷环境工程咨询(杭州)有限公司,杭州 310012

摘要:以山东半岛为研究区域,利用CALPUFF模型定量模拟了2018年1月1日—12月31日虚拟核电站在不同沿海网格内的放射性核素泄漏扩散情况.在此基础上,采用综合考虑人群影响与污染物浓度情况下的网格环境风险值的计算方法,表征核泄漏事故过程中潜在的核素环境风险影响,从而得到研究区域内的最优和最不利的厂址布点.此外,结合最优和最不利的厂址所在区域的风场资料,分析了不同季节的I-131的大气扩散情况.结果表明,位于威海市的44号网格总环境风险值为1.73×10^{10},总环境风险最低,为本研究中核电站的最优布局点.而位于青岛市的35号网格总环境风险值为9.98×10^{11},总环境风险值最高,不适合作为核电站布局点.I-131的大气扩散主要受所在区域主导风向的影响,最优和最不利的情景中I-131的月均浓度最大值均出现在夏季.对于核电厂的选址,应综合考虑风向、地形和人口因素,人口少、处于主导风向下风向的沿海地区更适合作为核电厂厂址.研究结果可为定量评估核电站布局选址的潜在核泄漏环境风险提供方法学参考,并为核电站现有的布局和选址方法提供新思路和技术支持.

关键词:核泄漏事故;放射性核素扩散;CALPUFF模型;厂址布局优化

文章编号:0253-2468(2024)06-0292-08　　**中图分类号**:X820.4,X507　　**文献标识码**:A

Atmospheric diffusion and environmental risk simulation of nuclear leakage: A case study of Shandong Peninsula, China

SHAN Wanyue[1,2], LIANG Yuhan[1], WANG Gang[3], BO Xin[1,2,*], XU Xin[1,2,*]

1. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029
2. BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029
3. Trinity Consultants Inc., Hangzhou 310012

Abstract: Taking the Shandong Peninsula as the research area, this study used the CALPUFF model to quantitatively simulate the radionuclide leakage and diffusion from a virtual nuclear power plant in different coastal grids from January 1 to December 31, 2018. On this basis, a grid health risk value calculation method that considers both population and pollutant concentration was used to characterize the potential environmental health risks of nuclides in the process of nuclear leakage accidents, thereby determining the optimal and most unfavorable plant locations in the study area. Additionally, atmospheric dispersion of I-131 in different seasons was analyzed by combining wind field data of the optimal and least favorable sites. Results showed that grid 44 in Weihai City had the lowest total environmental risk (environmental risk value: 1.73×10^{10}), meaning that it was the optimal location for a nuclear power plant. The total environmental risk value of grid 35 (in Qingdao City) was the highest (environmental risk value: 9.98×10^{11}), meaning that it was a location unsuitable for a nuclear power plant in this study. Atmospheric dispersion of I-131 is mainly affected by the regional prevailing wind direction, and the maximum monthly mean concentration of I-131 under both the optimal and the least favorable scenarios occurred in summer. The siting of nuclear power plants should consider wind direction, terrain, and population factors. Coastal areas with small populations in the downwind direction of the prevailing winds are most suitable for nuclear power plants. The research results represent a methodological reference for quantitative assessment of the potential environmental risks of nuclear power plant layout and site selection, and provide new ideas and technical support for existing layouts and site selection methods of nuclear power plants.

Keywords: nuclear leakage accident; radionuclide diffusion; CALPUFF model; site layout optimization

收稿日期:2023-11-06　　**修回日期**:2023-11-24　　**录用日期**:2023-11-27
基金项目:国家自然科学基金(No.72174125);中央高校基本科研业务费资助项目(No.buctrc202133)
作者简介:单皖粤(2001—),女, E-mail: 2022210141@buct.edu.cn; *责任作者,E-mail:boxin@buct.edu.cn;xuxin04210202@163.com

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1　引言(Introduction)

近年来,中国核电发电量逐年增加,2021 年核电发电量已达 4075.2 亿 kWh,较 2020 年增加了 412.7 亿 kWh,同比增长 10.13%(蒋向利, 2022; 国家统计局, 2022).此外,在"双碳"背景及构建低碳化能源体系总体要求下,预计到 2030 年我国核电装机容量将占总发电量的 10% 以上,到 2060 年将达到 20% 以上(张蕴, 2021).可见,加快我国核电技术发展及建设规模,提高核电占比成为满足国家重大需求的重要实现途径.然而,与其他能源相比,核电具有其独特之处,尤其是在安全性和可靠性方面,这为核电的大规模发展带来了诸多不确定性.日本福岛核事故之后,全球对核电运行的安全性空前关注.因此,在核能产业发展过程中,保障公众安全和保护生态环境显得尤为重要.面对核电站潜在的核泄漏风险,对核电站开展合理的布局选址研究以降低核泄漏所带来的环境风险是十分必要的.

在核泄漏事故模拟评估方面,空气质量模型可用于模拟放射性核素在大气中的扩散过程.其中,CALPUFF 模型为我国《环境影响评价导则大气环境》(HJ 2.2-2018)中的推荐模型,目前已得到了广泛的应用(生态环境部, 2018).例如,崔慧玲(2012)利用 CALPUFF 模型研究不同尺度下的核素扩散性质,验证了该模型在中、远距离和陆海风效应下的可靠性和准确性.宁莎莎(2013)选取 CALPUFF 模型模拟了福岛核事故中核素浓度分布,模拟结果证明了该模型在海岸线区域模拟的合理性和优越性.Dario 等(2018)通过 CALPUFF 模拟切尔诺贝利事故中的 Cs-137 沉积,确认了模型对排放源参数化的强依赖性,验证了该模型在放射性核素长距离扩散模拟中的适用性.上述研究利用 CALPUFF 模型对核事故泄漏的浓度扩散和空间分布情况进行模拟,未考虑核泄漏造成的环境风险.此外,本研究收集了生态环境部公开的 29 本民用核电站环评报告书,发现相关报告书均未考虑海岸线不同网格选址的核泄漏环境风险.

针对上述问题,本研究以山东半岛为研究区域,提取山东省沿海岸线 259 个网格,利用 CALPUFF 模型定量模拟 2018 年 1 月 1 日—12 月 31 日虚拟核电站在不同沿海网格内的放射性核素泄漏扩散及浓度分布情况,并结合当地人口情况计算不同情景下的环境风险,最后得到研究区域内的最优和最不利的厂址布局点.以期为核电站现有的布局和选址方法提供新思路和技术支持.

2　材料与方法(Materials and methods)

2.1　研究区域与对象

研究区域涵盖山东省全域,东西长 721.03 km,南北长 437.28 km,面积约为 1.56×10^5 km^2.其中,沿海研究区域包括山东省的滨州市、东营市、潍坊市、烟台市、威海市、青岛市、日照市共 7 个沿海城市.

2.2　CALPUFF 模型

CALPUFF 模型作为中国生态环境部推荐的用于模拟污染物扩散的法规模式之一,在复杂的地形和气象场条件下,具有较好的准确性和有效性(伯鑫等,2009),从而可以为放射性核素的长距离传输提供更好的模拟效果.本研究主要的研究区域为海岸线网格,而 CALPUFF 模型可以更准确地模拟有海岸效应的非稳态情况(阚慧等,2019;崔建升等,2020).因此,考虑到 CALPUFF 模型在对还原污染泄漏时的气象场方面具有更好的模拟效果,以及在参数设置上具有更多的可选择性,本研究选择 CALPUFF 模型进行 I-131 的扩散模拟研究.

本研究的模型坐标系采用兰伯特投影,设置的网格分辨率为 8 km,南北方向 65 个网格,东西方向 96 个网格,研究时段为 2018 年 1 月 1 日—12 月 31 日.研究区域的气象数据为中尺度数据大气模式 WRF 模拟提供的三维气象场数据.研究区域的地形高程数据来自美国地质勘探局(USGS),精度为 90 m,土地利用类型数据精度为 30 m(王成鑫等, 2022; 伯鑫等, 2023a).本研究参数的选取已在多个研究项目中得到了应用,取得了很好的模拟效果(伯鑫等, 2015; 袁文燕等, 2020;汤玲等, 2023).由于 I-131 是气载源项中受到主要关注的核素之一,根据崔慧玲(2012)的核模拟研究及日本原子能研究开发机构 JAEA 的 SPEED 反演算源项(Terada *et al.*, 2012),本研究选择 1×10^{16} Bq·h^{-1} 为点源虚拟释放率.此外,本研究沿山东海岸线提取了 259 个网格作为虚拟核电站厂址,模拟在不同网格内泄漏的放射性核素的扩散情况.根据每个网格的人口数量和大气放射性核素浓度,计算不同海岸线网格情景下的环境风险值,从而确定最优情景(总环境风险值最低)和最不利情景

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(总环境风险值最高).图1为沿海网格中心点分布情况.

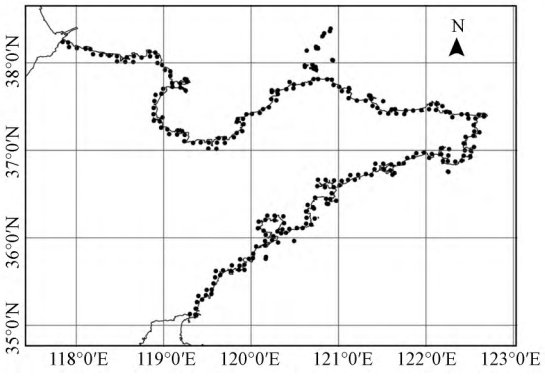


图 1 沿海网格中心点点位分布

Fig.1 Distribution of central points of coastal grid

2.3 人口数据概况

研究区域的人口数据来源于2018年世界人口动态统计分析数据库(LandScan),是目前关于人口数据研究中被普遍使用的、相对权威的人口空间数据(Rose *et al.*, 2019).图2为2018年山东省人口分布情况.

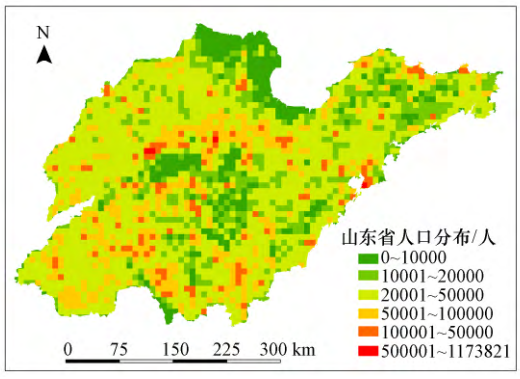


图 2 2018年山东省人口分布

Fig.2 Population distribution of Shandong Province in 2018

2.4 环境风险值计算方法

参考本团队之前对于环境风险的研究(袁文燕等, 2020;伯鑫等, 2023b; Xu *et al.*, 2023),本文基于2018年LandScan山东人口分布信息和CALPUFF模拟的放射性物质I-131浓度数据,将研究地域划分成8 km分辨率的网格i(i=1,2,……,N, N=259),根据每个网格的放射性污染物I-131浓度R_i和人口数量C_i,由式(1)计算不同情景下每个网格的环境风险值P_i.

$$P_i = R_i \times C_i \tag{1}$$

利用公式(2)计算不同情景下所有网格的总环境风险值,最优情景为P取得最小值时,最不利情景为P取得最大值时.

$$P = P_1 + P_2 + \ldots + P_n \tag{2}$$

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 不同情景下I-131的扩散情况

本研究的假设情景为发生核泄漏事故的核电站位于各个沿海网格中,依次对其进行放射性核素扩散模拟研究.基于山东省LandScan人口空间数据和CALPUFF模拟的I-131年均、月均浓度及风场数据,计算不同情景下(259个情景)的环境风险值分布(图3),最终确定核电站的最优布局点.结果显示,环境风险值较低的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

前35个研究区域网格大多位于威海市.本研究选取总环境风险值最低和最高的两个网格,分别是位于威海市的44号网格和位于青岛市的35号网格(图4),作为本研究的最优情景和最不利情景,分别开展I-131年均及月均浓度分布、风场数据和环境风险值分布的分析.

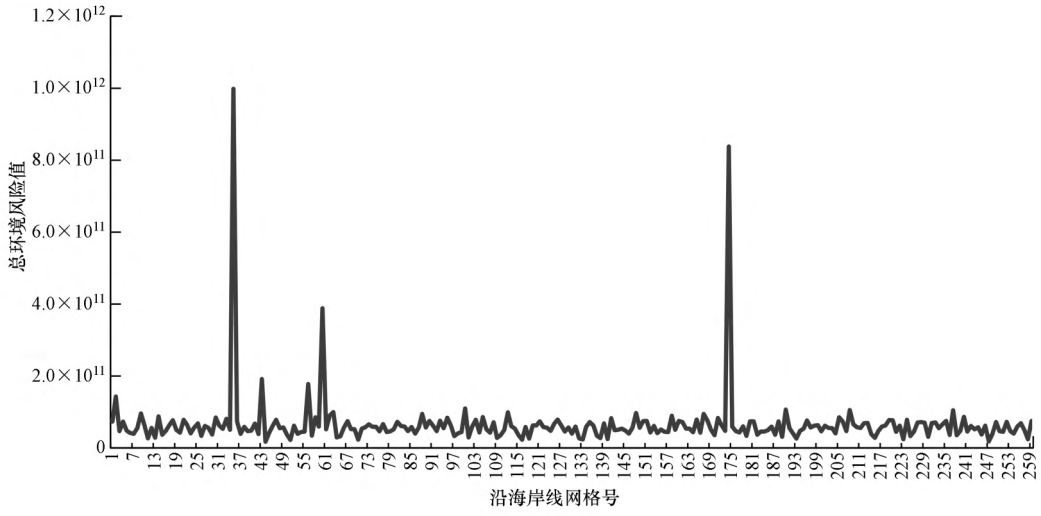


图3　259种情景下山东省的总环境风险值分布

Fig.3　Distribution of total environmental risk of Shandong Province under 259 scenarios

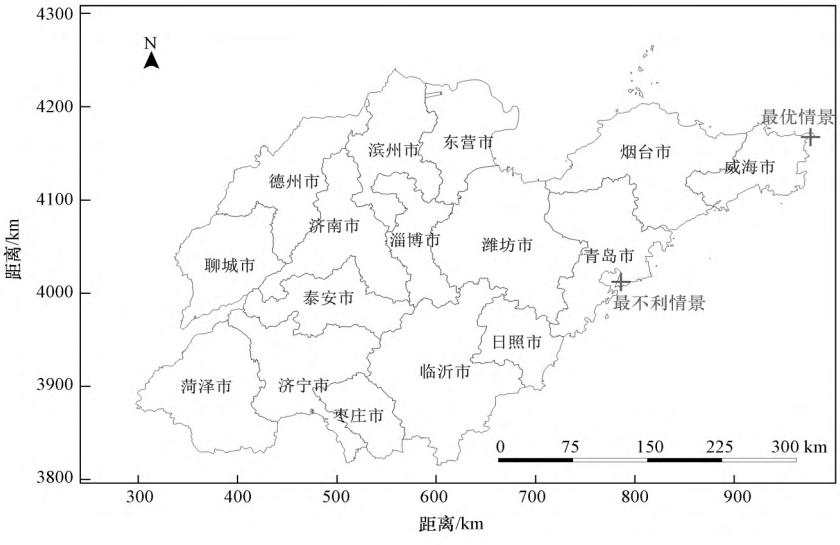


图4　最优情景和最不利情景的点源位置

Fig.4　Point source location for the optimal and the most unfavorable scenarios

3.2　最优情景分析

在最优情景下,即虚拟核电站位于威海市的44号网格时,核泄漏后I-131年均浓度分布如图5所示.由图可知,I-131年均浓度影响范围为5.54~5.55×10^4(假设源强为定值,分析2018年1月1日—12月31日年平均浓度的相对大小,无量纲),年均浓度在计算区域近源处形成峰值,并以厂址为中心向四周扩散.该模拟结果符合威海市的西南风与北风主导风向规律,在最大风频下风侧地区浓度较高.

以季节典型月份1月(冬)、4月(春)、7月(夏)和10月(秋)为代表,分析不同季节I-131的大气扩散情况.44号网格情景不同季节I-131的扩散情况如图6所示.1月该情景下虚拟核电站泄漏的I-131月均浓度在0~7.51×10^{4}范围内波动,I-131主要向南扩散,扩散方向大致符合威海市的主导风向西北风.4月虚拟核电站泄漏的I-131月均浓度在0~8.49×10^{4}范围内波动,扩散方向大致符合威海市的主导风向西南风;而4月上旬

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

山东的东北部地区也出现了较强的北风和东北气流，因此也存在向南扩散的趋势.7月I-131月均浓度在10.48~1.32×10^{5}范围内波动，主要随主导风向朝西北及北部扩散；而7月上旬主要为东风及东北风，故也表现出向西南扩散的趋势.10月I-131月均浓度在0.07~6.32×10^{4}范围内波动，随主导风向朝海上扩散.

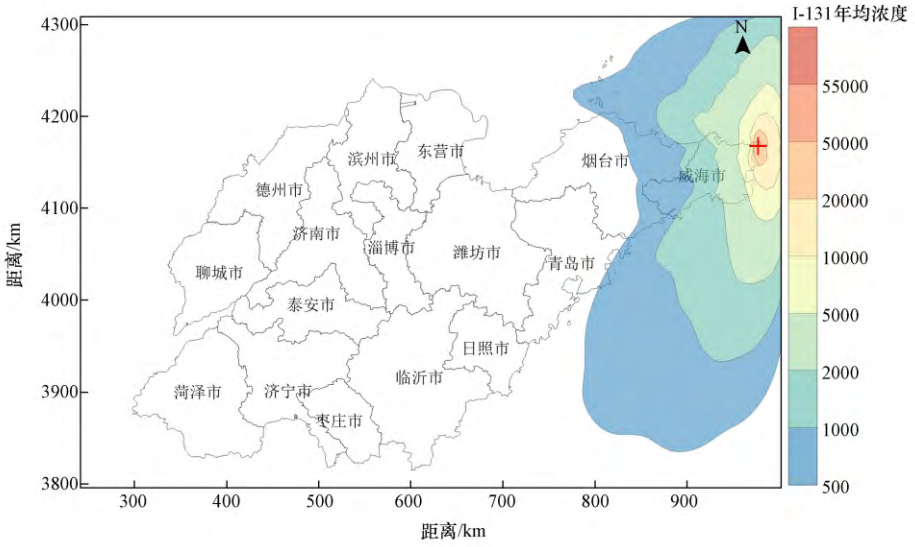


图5 最优情景中I-131年均浓度分布

Fig.5 Average annual concentration distribution of I-131 in the optimal scenario

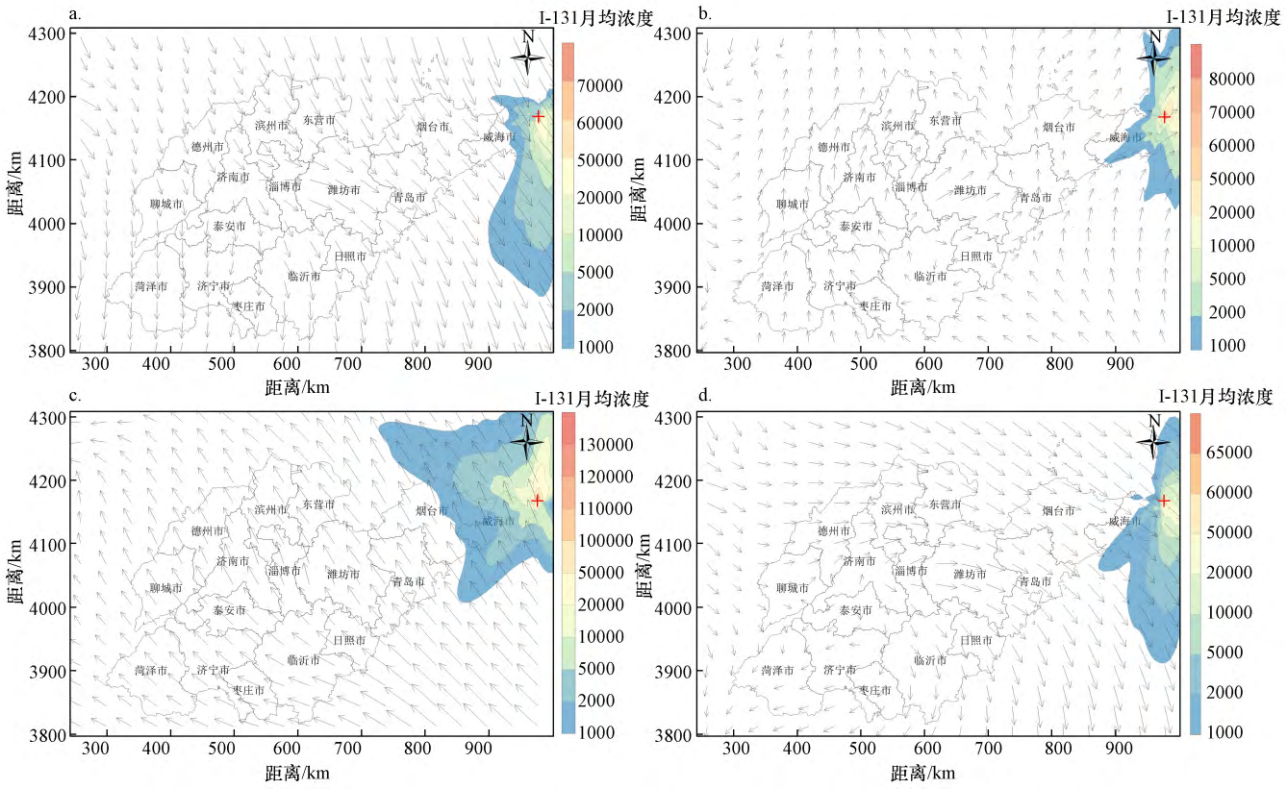


图6 最优情景中不同月份I-131的月均浓度分布（a. 1月；b. 4月；c.7月；d. 10月.箭头指向为月均风场方向，箭头长短代表月均风速大小）

Fig.6 Average monthly concentration distribution of I-131 in different months in the optimal scenario (a. January; b. April; c. July; d. October. The arrow points to the direction of the average monthly wind field, and the length of the arrow indicates the average monthly wind speed)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本情景下的环境风险值分布如图7所示.该情景的总环境风险值为1.73×10^{10},在所有沿海网格中总环境风险值最低.I-131的环境风险最高值分布在排放源附近,青岛市部分沿海地区虽然I-131浓度分布较低,但人口密集,因此,环境风险也相对偏高.整体上东南沿海地区风险值较大,西北沿海及内陆地区风险值较小.

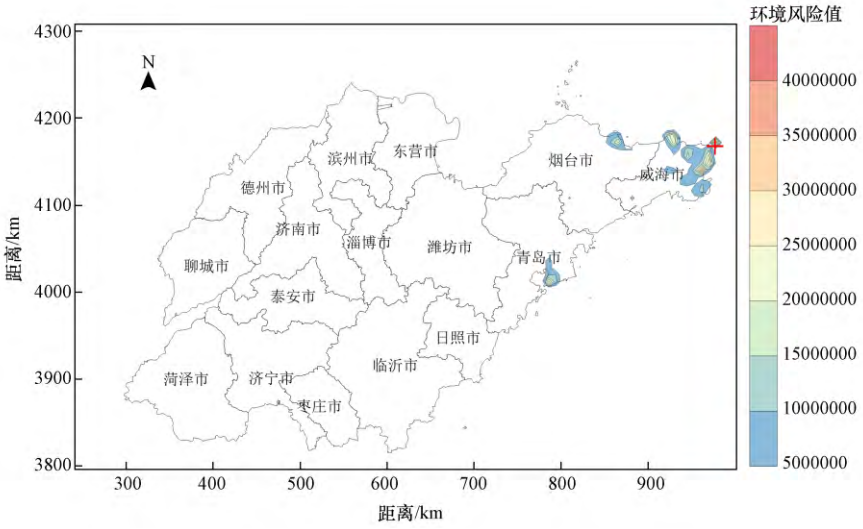


图 7　最优情景的环境风险分布

Fig.7　Environmental risk distribution of the optimal scenario

3.3　最不利情景分析

在最不利情景下,即虚拟核电站位于青岛市的35号网格时,核泄漏后I-131年均浓度分布如图8所示.I-131年均浓度影响范围为$13.80\sim1.40\times10^{6}$.从图中可以看出,核素浓度在近源处形成峰值,并以厂址为中心向四周逐步扩散,扩散范围较大,主要与所在区域的地形因素有关.青岛市地貌多为平原,地形地势较为平坦,故I-131年均浓度分布趋势与地形地势相对一致.

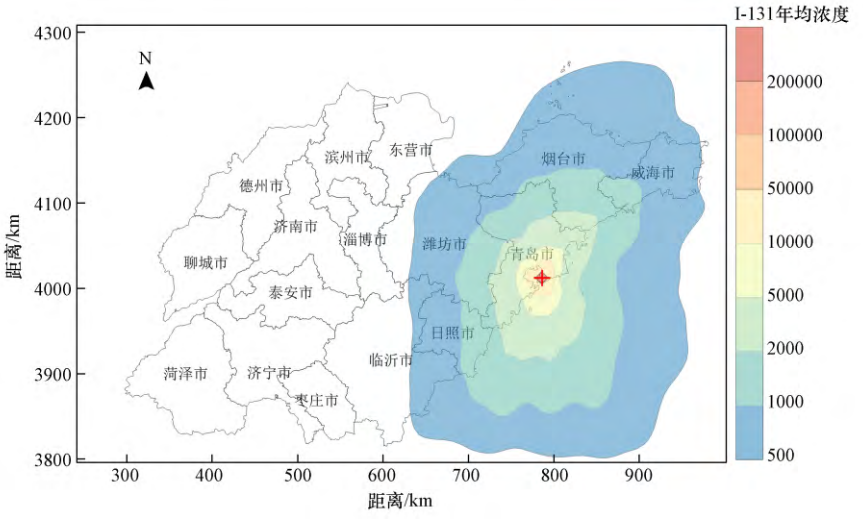


图8　最不利情景中I-131年均浓度分布

Fig.8　Average annual concentration distribution of I-131 in the most unfavorable scenario

以季节典型月份1月(冬)、4月(春)、7月(夏)和10月(秋)为代表,分析不同季节I-131的大气扩散情况.35号网格情景不同季节I-131的扩散情况如图9所示.1月该情景下虚拟核电站泄漏的I-131月均浓度在$0\sim2.10\times10^{5}$范围内波动,I-131主要向东南方向扩散,扩散方向大致符合青岛市的主导风向西北风.4月虚拟核电站泄漏的I-131月均浓度在$4.92\sim4.02\times10^{5}$范围内波动,主要随主导风向向东北扩散,而4月下旬也出现了较强的北风,因此也存在向南扩散的趋势.7月I-131主要随风场向内陆扩散,月均浓度在$0.19\sim3.60\times10^{6}$范围内

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

波动.10月I-131随风向朝青岛南部扩散,月均浓度在0.03~5.90×10^{5}范围内波动.

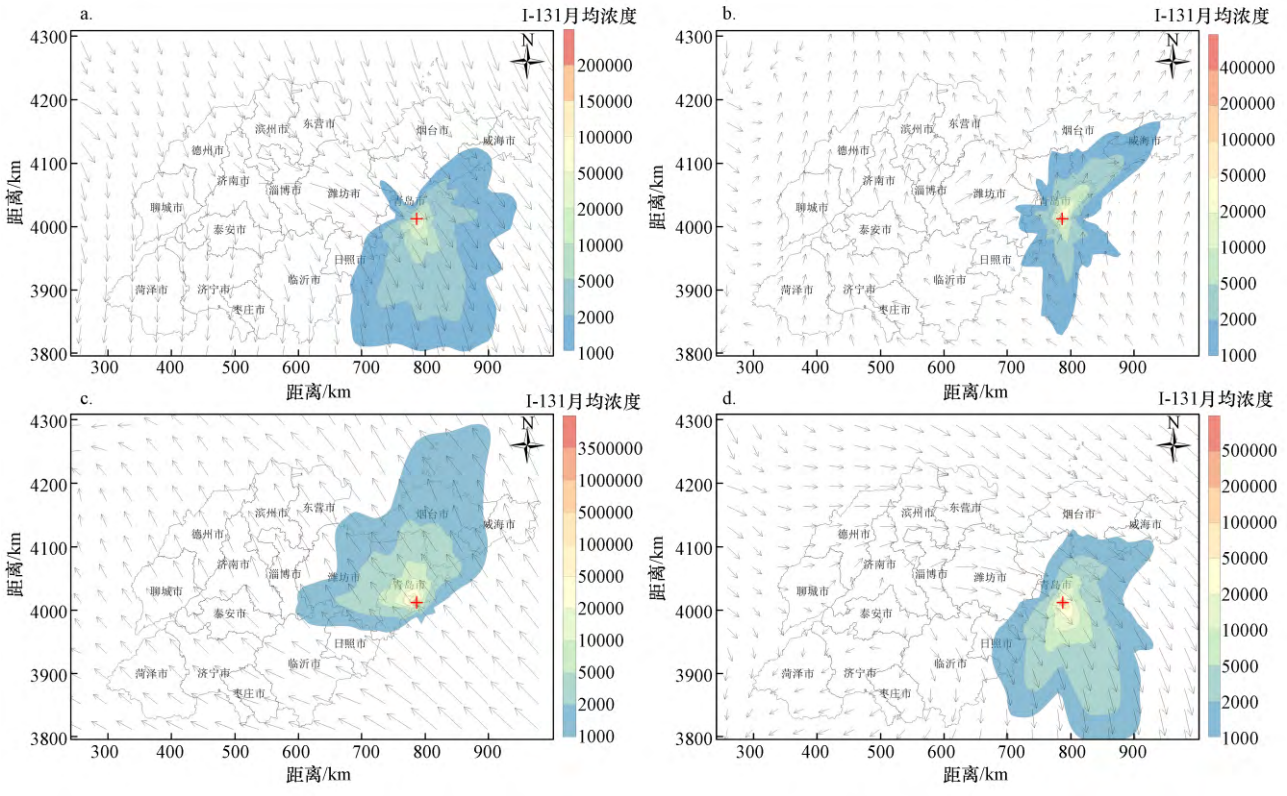


图9 最不利情景中不同月份I-131的月均浓度分布(a. 1月; b. 4月; c.7月; d. 10月. 箭头指向为月均风场方向,箭头长短代表月均风速大小)

Fig.9 Average monthly concentration distribution of I-131 in different months in the most unfavorable scenario (a. January; b. April; c. July; d. October. The arrow points to the direction of the average monthly wind field, and the length of the arrow indicates the average monthly wind speed)

本情景下的环境风险值分布如图10所示.本情景下的总环境风险值为9.98×10^{11},在所有沿海网格中总环境风险值最高.在该情景下山东省大部分区域的I-131年均浓度均较高,且高值区范围内的人群较多,因此山东总体环境风险值也更高.故青岛市的35号网格不适合作为核电站布局点.

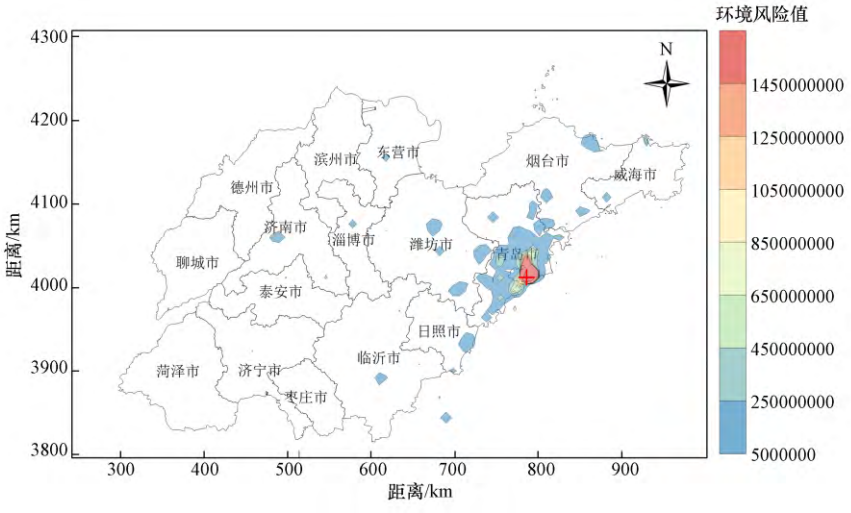


图10 最不利情景下的环境风险分布

Fig.10 Environmental risk distribution in the most unfavorable scenario

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　不确定性分析(Uncertainty analysis)

本研究的不确定性分析如下:①I-131 核素的不确定性,在现实中核素扩散还需考虑扩散过程中核素的物理变化,可能造成结果偏差;②环境风险的受体人群不确定性,人群空间坐标是处于动态变化的,本研究未考虑此因素,可能导致结果的不确定性;③源强的不确定性,本研究源强的信息参考公开报道的研究,存在一定的不确定性;④本研究中的环境风险方法针对核电站选址的大气环境风险,未考虑地质、地震等因素影响.

5　结论(Conclusions)

1)本研究最优布局点为威海市的 44 号网格,其模拟的放射性核素 I-131 年均浓度峰值为 5.55×10^{4},总环境风险值为 1.73×10^{10},在所有沿海网格中总环境风险值最低,为本研究中最优的厂址布局点.本研究中最不利布局点为青岛市的 35 号网格,模拟的放射性核素 I-131 年均浓度峰值为 1.40×10^{6},总环境风险值为 9.98×10^{11},在所有沿海网格中总环境风险值最高,为本研究中最不利的厂址布局点.

2)在最优情景和最不利情景中,不同季节 I-131 的月均浓度分布主要受所处区域主导风向的影响,且 I-131 的月均浓度最大值均出现在夏季.在最优情景中,10 月 I-131 月均浓度在 $0.07\sim6.32\times10^{4}$ 范围内波动,随主导风向朝海上扩散,与其他季节相比,对山东内陆的影响较小;在最不利情景中,7 月 I-131 月均浓度在 $0.19\sim3.60\times10^{6}$ 范围内波动,主要随风场向内陆扩散,与其他季节相比,对山东内陆的影响最大.

3)对于核电厂的选址,应综合考虑风向、地形和人口因素.面对潜在的核泄漏导致的环境风险,人口少、处于主导风向下风向的沿海地区更适合作为核电厂厂址.

责任作者简介:伯鑫,男,博士,教授,博士生导师,研究领域为环境质量模拟,主持和参加科研项目等 50 余项,发表学术论文 100 多篇.徐鑫,博士研究生,研究方向为环境管理.

参考文献(References):

伯鑫,丁峰,徐鹤,等.2009.大气扩散 CALPUFF 模型技术综述[J].环境监测管理与技术,21(3):9-13+47

伯鑫,李楠,谭民强,等.2023a.用于 CALPUFF 系统的土地利用数据处理方法[P].中国,发明专利,CN109558641B. 2023-06-09

伯鑫,王成鑫.2023b.基于数值模拟与人口数据的选址数据处理方法及系统[P]中国, 发明专利,CN115712978A. 2023-02-24

伯鑫,王刚,温柔,等.2015.京津冀地区火电企业的大气污染影响[J].中国环境科学,35(2):364-373

崔慧玲.2012.CALPUFF 模式用于放射性核素不同尺度的迁移扩散研究[D].太原:太原理工大学

崔建升,雷团团,伯鑫,等.2020.海南省大气污染源排放清单及环境影响研究[J].环境污染与防治,42(6):651-659+665

Giaiotti D,Oshurok D,Skrynyk O.2018.The Chernobyl nuclear accident 137 Cs cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system[J].Atmospheric Pollution Research,9(3):502-512

国家统计局.2022.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社

蒋向利.2022.五大路线攻关前沿技术 激发能源创新发展新动能——《“十四五”能源领域科技创新规划》出台[J].中国科技产业,(5):22-23

阚慧,伯鑫,屈加豹,等.2019.2015 年海南省火电行业大气环境影响研究[J].中国环境科学,39(1):428-439

宁莎莎.2013.福岛核事故典型气载放射性核素的弥散及辐射剂量研究[D].上海:上海交通大学

Rose A,Mckee J,Urban M,*et al*.2019.LandScan Global 2018[DS].Oak Ridge National Laboratory:Oak Ridge, Tennessee, USA

生态环境部环境工程评估中心.2018.HJ 2.2-2008 环境影响评价技术导则 大气环境[S].北京:生态环境部

汤铃,郭静,郭朋恒,等.2023.山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单及其环境影响[J].中国环境科学,43(2):735-747

Terada H,Katata G,Chino M,*et al*.2012.Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident[J].Journal of Environmental Radioactivity,112:141-154

王成鑫,楚英豪,阮建辉,等.2022.AERMOD 模型地表参数更新对模拟效果影响[J].中国环境科学,42(5):2070-2077

Xu X,Wang C,Wang P,*et al*.2023.Bioaerosol dispersion and environmental risk simulation: Method and a case study for a biopharmaceutical plant of Gansu Province, China[J].Science of the Total Environment,860:160506

袁文燕,王鹏,伯鑫,等.2020.含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险[J].中国环境科学,40(7):3173-3178

张蕴.2021.双碳目标下我国核电发展趋势分析[J].核科学与工程,41(6):1347-1351

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net