

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.01.005

浮动核电站放射性核素在海洋中迁移机理研究

邹树梁^{1,2}, 刘泓君^{1,2}, 凌鑫^{1,2}, 黄燕^{1,2}

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要:为了研究放射性核素泄露到海洋中的迁移规律, 针对浮动核电站在海上发生严重事故这一情况, 提出了基于瞬时点源约瑟夫模型的改进核素迁移模型, 考虑海洋中放射性核素衰变和浮动核电站移动这两个因素。并以核素¹³⁷Cs为例, 研究核素¹³⁷Cs在发生核事故后在海洋中的迁移扩散机理。研究结果表明浮动核电站发生核事故后, 放射性核素浓度的空间分布呈现椭圆形, 且沿着船舶运动轨迹方向的放射性核素浓度比其垂直方向上的浓度高, 并向四周递减扩散。改进的核素迁移模型可为海洋应急监测工作提供参考, 实现对浮动核电站核事故发生后应急监测的研究。

关键词:浮动核电站; 放射性核素; 迁移机理

中图分类号: TM623.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0062(2020)01-0029-07

Research on the Migration Mechanism of Radionuclide in Floating Nuclear Power Plant in the Ocean

ZOU Shuliang^{1,2}, LIU Hongjun^{1,2}, LING Xin^{1,2}, HUANG Yan^{1,2}

(1. School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the migration law of radionuclide leaking into the ocean after a serious accident at a floating nuclear power plant, an improved nuclide migration model based on the instantaneous point source Joseph model is proposed, considering the radionuclide decay in the ocean and the floating nuclear power plant movement. Taking the ¹³⁷Cs as an example, the mechanism of migration and diffusion of nuclide ¹³⁷Cs in the ocean after a nuclear accident was studied. The results show that the spatial distribution of radionuclide concentration appears elliptical after a nuclear accident at a floating nuclear power plant,

收稿日期: 2019-09-27

作者简介: 邹树梁(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事核安全与核应急方面的研究。E-mail: zousl2013@126.com

and the concentration of radionuclide along the direction of the ship's motion is higher than that in the vertical direction, and decreases downwards. The improved nuclide migration model can provide reference for marine emergency monitoring work to realize the emergency monitoring of floating nuclear power plant nuclear accidents.

key words: floating nuclear power plant; radionuclide; migration

0 引言

海上浮动核电站近几年已经引起世界的极大关注。由于其建造周期短,建造成本低,且可以长时间在海上航行,连续不断的到所缺能源处进行能源供给,如电能、海水淡化、热能等多种能源,因此浮动核电站在海上的安全运行是最值得关注的事情。一旦浮动核电站在海上发生严重核事故,可能因多种原因导致放射性核素泄漏污染海水,并将在海水中不断扩散,从而导致失事海域全方位、大范围的放射性污染。海洋中的天然和人工放射性核素不断参与海洋地球物理和化学过程,并通过海洋生物被富集和放大,又以海产品的形式被人们所摄入,对人体产生内辐照风险。因此,需要掌握放射性核素在海洋中的迁移机理,为应急监测和事故救援提供技术支持^[1]。

事故情况下,放射性核素信息通常难以直接获得,需要事先了解核素的迁移机理,再进行监测。国外最先开展对放射性核素迁移的研究,1961年,Bera通过对溶质迁移进行研究,建立了关于溶质迁移方程的多个解析解,开始了对水体中放射性物质的迁移扩散研究。2004年,Monte等人为预测放射性核素在河流中的迁移扩散而开发一种新模型,并描述了针对特定污染情景进行模型应用的结果。2011年,F. L. Qiao等人针对福岛核泄漏进行海洋和大气相结合的数值模拟与预测^[2]。2012年,I. Kriest通过利用示踪物的方式对福岛事故所产生的¹³⁷Cs进行模拟^[3]。国内学者对放射性核素在海洋中迁移扩散的研究相对较晚,1976年,张正斌等人从微观角度研究海洋中元素的迁移问题,并提出海水中元素向海底转移的物质平衡规律,开始了元素在海洋中的迁移扩散研究。2014年,郭皓等人通过分析放射性核素在海洋各介质中的迁移特点,对¹³⁷Cs和⁹⁰Sr在海水中的扩散、海洋沉积物中的吸附与转化等情况进行了讨论^[4]。2016年,王韶伟等人通过构建水动力环境模型,模拟研究区的潮流运动过程和特征,并以核素¹³¹I为例,分析放射性核素¹³¹I在海

域的时间和空间分布规律^[5]。2018年,刘媛媛等人通过分析核素在地下水、海域等单一介质和多介质中迁移研究的现状,总结得到核素迁移的影响因素有核素自身性质、地质条件、水动力及化学环境等^[6]。2019年,周涛等人通过建立海洋核素放射性浓度的衰变和吸附沉降数学模型,模拟计算得到核电站发生严重事故产生的放射性核素在海洋中的放射性浓度变化趋势^[7]。

虽然国内外关于核素迁移已经有了大量文献,但是尚未发现针对浮动核电站在海上发生核事故,核素迁移机理方面的文献。因此本文针对浮动核电站在海上发生核事故的特殊性,基于瞬时点源约瑟夫模型,考虑浮动核电站在海上的移动特性和放射性核素在海洋中的衰变特性对模型进行改正,并以核素¹³⁷Cs为例,分析放射性核素在海洋中的迁移机理,对掌握海洋污染状况以及事故应急监测有着重要意义。

1 放射性核素在海洋中的迁移模型

1.1 瞬时点源约瑟夫模型

浮动核电站如果在海洋中发生核泄漏事故,大量的放射性核素会在极短的时间内排入海洋中,可以将其看成是一个放射性点源。因此,选取符合放射性核素在海洋中迁移扩散规律的瞬时点源模型。瞬时点源约瑟夫模型公式为^[8]:

$$C(r,t) = \frac{1 \times 10^{-3} Q}{2\pi h p^2 t^2} \exp\left(\frac{-r}{pt}\right)$$

式中, C :释放后 t 时刻距离 r 处海水的污染浓度(mg/L或Bq/L);

p :水平扩散速度(m/s),扩散速度0.005~0.015 m/s;

Q :源强,放射性污染物一次的排放总量(mg或Bq);

h :污染物浓度呈均匀分布的水层厚度(m);

r :距离源项的径向距离(m);

t :释放后的时间(s)。

浮动核电站在海上相当于一艘大型船舶,但其本身并不一直处于移动状态。发生严重事故后,停堆的浮动核电站会顺着洋流漂移,使其形成

一个带有放射性污染的移动源,而且瞬时点源约瑟夫模型并没有考虑核素的衰变特性,所以用瞬时点源约瑟夫模型研究核素在海洋中的迁移规律具有一定局限性。因此需要对该模型进行改进,使改进后的模型可用于研究浮动核电站在海上发生核事故后放射性核素迁移的模拟和计算。

1.2 改进的核素迁移模型

浮动核电站发生严重事故后,泄露的核素瞬时进入海洋中。假设船舶是匀速运动,并把船舶运动轨迹进行离散化,以船舶的起始位置为坐标原点,船舶沿 x 轴运动,依此建立坐标系,船舶 S_i 位置,核素扩散时间为 $t-i\Delta T$,任一位置的放射性核素浓度为 $C_i(x, y, t)$ 。在考虑放射性核素衰变特性以及船舶运动的情况下,对 t 时刻任一位置放射性核素浓度 $C(x, y, t)$ 的估算,则新改进的模型结构如下:

$$C_i(x, y, t) = \frac{1 \times 10^{-3} q}{2\pi h p^2 (t - i\Delta T)^2} \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{(x - iv\Delta T)^2 + y^2}}{p(t - i\Delta T)}\right) \cdot k_j$$

在整个 t 时间内,船舶运动时间为 T ,任一位置的放射性核素浓度为各位置浓度叠加之和,即为:

$$C(x, y, t) = \sum_0^i C_i(x, y, t)$$

式中, q :源强,任意一点的放射性污染物一次的排放总量(mg 或 Bq);

T :船舶运动的时间(s);

ΔT :船舶在相邻两点之间运动时间(s);

v :船舶运动的速度(m/s);

i :船舶运动过程中被分割成 i 个点源的数量;

k_j :衰变影响因子。

考虑浮动核电站在海洋中的特殊性,将瞬时点源约瑟夫模型进行适当改进,建立与浮动核电站相耦合的模型,更加准确的分析浮动核电站事故后的核素扩散迁移规律,为核应急辐射监测策略提供技术支撑。

2 放射性核素在海洋中迁移扩散规律研究

2.1 条件假设与参数设置

本文研究的是浮动核电站发生核事故后泄露出的放射性核素在海洋中的迁移规律,假设条件

如下:

1)浮动核电站在远离陆地的海洋中发生核泄漏事故,在海洋中顺着洋流漂移的速度在 $4 \sim 7$ 节(大致为 $2 \sim 3.6$ m/s,本研究取 3 m/s);

2)研究区主要考虑海洋水平面,海水表层扩散为主要迁移扩散方式,不考虑垂直方向的扩散。模型中海洋水平扩散系数由 p 决定,取值在 $0.005 \sim 0.015$ m/s,本研究 p 取值 0.010 m/s。

3)海洋中的特殊环境不做考虑,研究区内放射性污染扩散水体性质相同,不考虑风等因素对海洋造成的海流运动;忽略海洋动植物对放射性核素的吸附和摄入影响。

以浮动核电站出事地为原点,船舶沿 x 轴运动,海平面为 xoy 平面,海平面垂直方向建立 z 轴,依此建立坐标系。由于浮动核电站发生核事故后向海洋中排放的放射性核素中以 ^{131}I 和 ^{137}Cs 为主,而 ^{137}Cs 能长期对海洋内的放射性活度产生影响,且其半衰期长达 30 a,进入海洋中将对海洋内的水质造成极大影响^[9],因此,本文选取放射性核素为 ^{137}Cs ,放射性核素排放到海洋的总量为 1.57×10^{12} Bq(数据源于某研究机构调研获取)。本文以浮动核电站为研究对象,研究核事故发生后放射性核素在海洋中迁移扩散机理。在发生核事故后,会向海水中释放大量的放射性核素。随着核电站在海面的漂移运动,释放源会在空间移动使研究过程变得复杂,为了便于计算分析,认为匀速移动点源的放射性污染扩散过程等价于其路径上无数个完全相同点源的扩散过程,将点源转化为线源可以不考虑源项移动带来的影响,简化了物理模型。在数值模拟计算过程中,只能选取路径上有限的点源,选取的点数越多越能接近具体情况。

假定核电站在海面匀速漂流 1 h 且污染物释放速率不变,在将移动的点源转化为线源(多个轨迹上的离散点源的集合)的过程中,选取时间间隔 ΔT 为 10 s,这样可以将整段轨迹离散为 $i = 360$ 段。为了对比瞬时点源约瑟夫模型和改进模型的计算结果,分别采用两种方法对污染物的扩散过程进行了模拟计算。采用瞬时点源约瑟夫模型模拟的参数确定如表 1 所示。采用改进的放射性核素迁移模型进行模拟,模型参数的确定如表 2 所示。假定污染物水平扩散海水厚度 h 为 10 m。

表 1 瞬时点源约瑟夫模型参数值列表

Table 1 List of parameter values of the instantaneous point source Joseph model

t/s	Q/Bq	$v/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(m \cdot s^{-1})$	h/m	x/m	y/m
24×3 600	1.57×10^{12}	3	0.01	10	$[-2000; 2000]$	$[-2000; 2000]$

表 2 改进的放射性核素迁移模型参数值列表

Table 2 List of parameter values of the improved radionuclide migration model

$\Delta T/s$	i	q/Bq	$v/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(m \cdot s^{-1})$	h/m	x/m	y/m
10	360	4.36×10^9	3	0.01	10	$[-2000; 12000]$	$[-4000; 4000]$

衰变影响因子的表达式为^[10]

$$k_j = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_j}}$$

式中, T_j :放射性核素的半衰期。

由于本文只考虑 1 d 内的¹³⁷Cs 在海洋中的扩散模拟,因此衰变影响因子 k_j 为 0.999。

2.2 改进模型前后模拟结果分析

根据改进模型的前后模拟对比,放射性核素¹³⁷Cs 在 24 h 后浓度空间变化规律如图 1、图 2 所示。

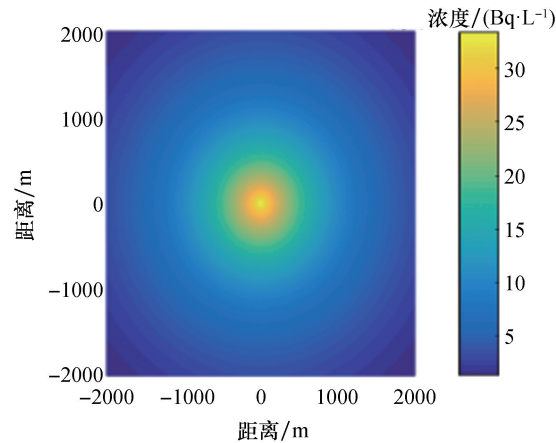


图 1 瞬时点源约瑟夫模型

Fig.1 Instantaneous point source Joseph model

对图 1、图 2 比较分析可得,对于瞬时点源约瑟夫模型,其放射性浓度空间大致呈中心对称分布,对称点为事故发生点,距离源点处放射性浓度最高,达到 33.47 Bq/L,向四周依次衰减。放射性核素在海洋中迁移扩散被海水稀释,距离源点处越远其稀释的浓度变化越小。对于改进的核素迁移扩散模型,放射性核素浓度呈现“椭圆形”,主要由于船舶顺着洋流漂移,放射性核素在迁移扩散过程中不断稀释、衰变,使得放射性核素浓

度逐渐变小。船舶运动附近的核素浓度较高,最高达到 5.48 Bq/L。

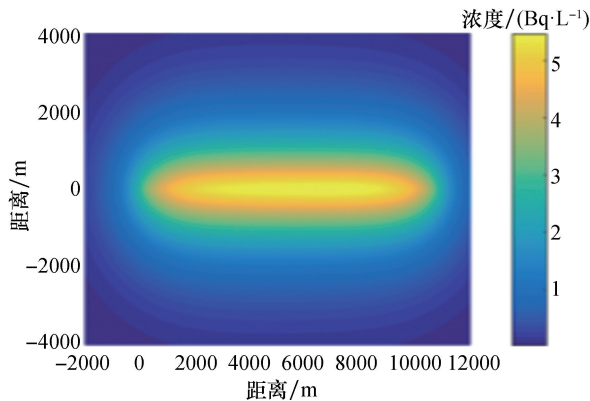


图 2 改进的核素迁移扩散模型

Fig.2 Improved radionuclide migration model

根据改进的放射性核素迁移扩散模型,在核事故发生 24 h 后,放射性核素¹³⁷Cs 在海洋中的浓度变化如图 3、图 4、图 5 所示。

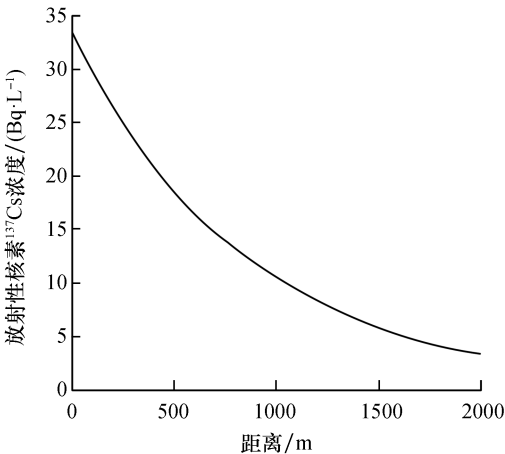


图 3 24 h 后 2 000 m 内¹³⁷Cs 浓度图

Fig.3 ¹³⁷Cs concentration chart within 2 000 m after 24 h

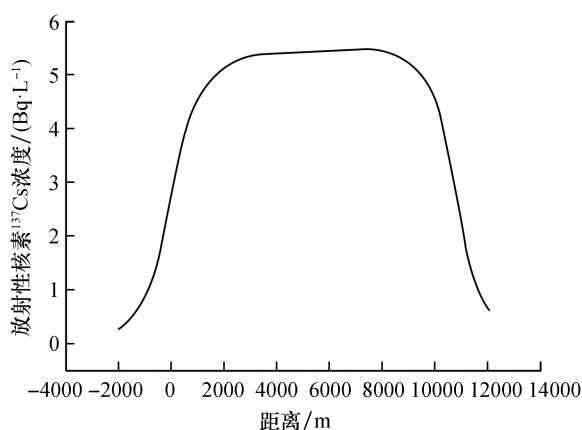
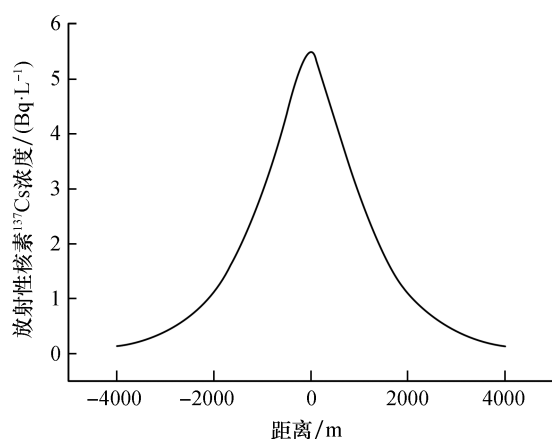
图4 运动轨迹方向上 ^{137}Cs 浓度图Fig. 4 ^{137}Cs concentration chart in the direction of the movement track图5 研究点(6690,0)垂直方向上 ^{137}Cs 浓度图Fig. 5 ^{137}Cs concentration chart in the vertical direction of the research point (6690,0)

图3是基于瞬时点源约瑟夫模型,在核事故发生24 h后,距离源点2 000 m处放射性核素 ^{137}Cs 浓度随距离的变化规律图。图4、图5分别是基于改进的核素迁移模型,在船舶运动1 h,核素扩散24 h后,船舶运动轨迹方向和浓度最大值(6690,0)的垂直方向上核素 ^{137}Cs 浓度随距离的变化规律图。从图3可以看出,距离出事地点越远,24 h后 ^{137}Cs 浓度越小。由图4可知,在船舶运动轨迹方向上的两侧核素浓度变化较快,中间区域核素浓度变化不大,大致呈对称分布。

由图5可知,在浓度最大值(6690,0)的垂直方向上的两侧核素浓度变化呈对称分布,且变化速率要比运动轨迹方向上的大。从图3、图4和图5比较分析可得,改进前的模型模拟后的 ^{137}Cs 浓度变化规律与改进后的模型模拟后的 ^{137}Cs 浓

度变化规律一致,且将本文改正的模型与卢博鑫^[10]的理论研究进行对比分析,改进后的核素迁移模型更贴近于浮动核电站放射性核素在海洋中迁移规律的实际情况。

根据改进的放射性核素迁移扩散模型,在核事故发生1 d内,选取6个研究点了解事故发生后不同研究位点浓度随时间的变化规律如图6、图7所示。

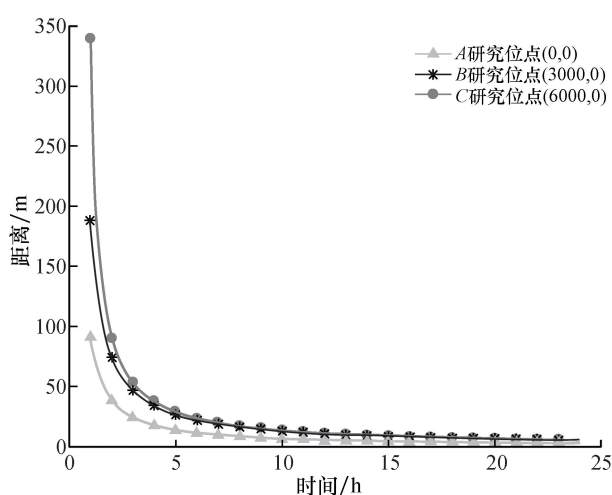
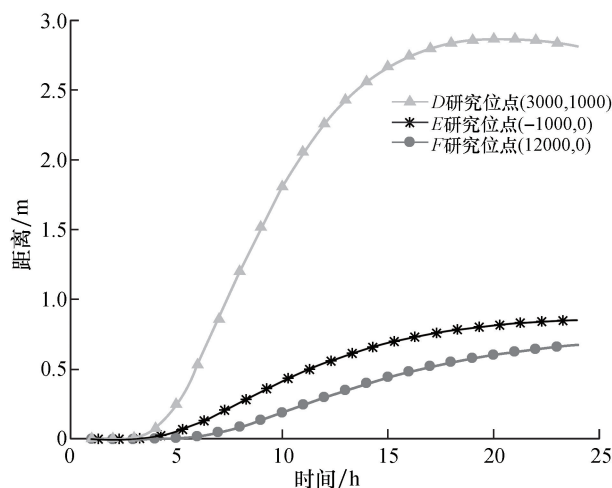
图6 A、B、C三个研究位点处 ^{137}Cs 浓度变化图Fig. 6 ^{137}Cs concentration chart at A, B, and C图7 D、E、F三个研究位点处 ^{137}Cs 浓度变化图Fig. 7 ^{137}Cs concentration chart at D, E, and F

图6给出利用改进模型模拟,A研究位点(0,0)、B研究位点(3000,0)、C研究位点(6000,0)三个研究位点海水中 ^{137}Cs 浓度随时间的变化特征。由图6可知:

1) A、B、C三个研究位点在船舶运动方向上 ^{137}Cs 浓度随时间的增加而逐渐降低。

2)在放射性核素泄露的最初5 h内, ^{137}Cs 浓度迅速下降,5 h以后缓慢下降。

3)由于三个研究位点距离事故发生点不同,因此每个研究位点所到达的放射性核素浓度最大值不尽相同。 A 研究位点在1 h时刻 ^{137}Cs 浓度出现最大值,为91.220 Bq/L,在5 h内迅速下降到13.950 Bq/L,5~20 h内 ^{137}Cs 浓度缓慢下降,即从13.950 Bq/L下降到3.280 Bq/L,20 h以后浓度下降幅度更为缓慢,直到24 h时刻,浓度值为2.724 Bq/L。 B 研究位点距离出事点3 000 m,在1 h时刻 ^{137}Cs 浓度出现最大值,为188.600 Bq/L,在5 h内迅速下降到27.281 Bq/L,5 h以后缓慢下降,直到24 h时刻,浓度值为5.344 Bq/L。 C 研究位点距离出事点6 000 m,在1 h时刻 ^{137}Cs 浓度出现最大值,为339.309 Bq/L,在5 h内迅速下降到28.996 Bq/L,5 h以后缓慢下降,直到24 h时刻,浓度值为5.471 Bq/L。

图7给出利用改进模型模拟, D 研究位点(3000,1000)、 E 研究位点(-1000,0)、 F 研究位点(12000,0)三个研究位点海水中 ^{137}Cs 浓度随时间的变化特征。由图7可知:

1) D 、 E 、 F 三个研究位点的 ^{137}Cs 浓度随时间的增加先升高后降低。

2)在放射性核素泄露的最初5 h内, ^{137}Cs 浓度缓慢上升,5 h以后 ^{137}Cs 浓度迅速上升到最大值后缓慢下降。

3)随着船舶在海洋中顺着洋流向前漂移, D 研究位点处放射性核素 ^{137}Cs 浓度由于受海水的水平扩散以及船舶运动的影响,在2.528 h时刻 ^{137}Cs 浓度开始缓慢升高,5 h内浓度变化不大。5 h以后浓度迅速上升,在20.278 h时刻达到最大值2.867 Bq/L,20.278 h以后,浓度缓慢下降。 E 研究位点与船舶运动的轨迹相反,但是由于改进模型的放射性核素浓度呈现“椭圆形”扩散,因此 E 研究位点也会有放射性核素出现。由图4可知, E 研究位点在2.750 h时刻开始有放射性核素出现,5 h内浓度变化幅度缓慢,5 h后浓度迅速升高,由于 E 研究位点变化缓慢,如果选取时间加长会发现 E 研究位点 ^{137}Cs 浓度随着时间的变化而下降。 F 研究位点虽在船舶运动的轨迹方向上,但是由于该点距离出事点较远,因此会发现该点的 ^{137}Cs 浓度先升高后降低,而且在4.333 h时刻才开始有放射性核素出现,24 h内浓度最高达到0.671 Bq/L,在《海水水质标准》^[11]规定海洋中放射性核素浓度0.7 Bq/L以下。

根据图6和图7可以看出,由于放射性核素浓度呈现“椭圆形”向四周扩散,每个研究位点所到达的放射性核素浓度变化各不相同, A 、 B 、 C 三个研究位点由于在船舶运动的轨迹上,因此三个研究位点的 ^{137}Cs 浓度普遍偏高,且随着船舶向前驶离,使得三个研究位点的放射性核素浓度在5 h内迅速降低,而 D 、 E 两个研究位点均在放射性核素扩散方向上,使得两个研究位点的 ^{137}Cs 浓度先升高后降低, F 研究位点由于离出事地点较远,使得其处的 ^{137}Cs 浓度也存在先升高后降低的现象,且所选取的 D 、 E 、 F 三个研究位点的 ^{137}Cs 浓度普遍比 A 、 B 、 C 三个研究位点的 ^{137}Cs 浓度低。

3 结 论

1)本文基于瞬时点源约瑟夫模型,考虑船舶移动以及放射性核素衰变两大因素对模型进行改正,改正后的模型符合放射性核素在海洋中的变化幅度规律,对掌握海洋污染状况以及事故应急监测有着重要意义。

2)以核素 ^{137}Cs 为例,研究放射性核素在海洋中的迁移机理。基于瞬时点源约瑟夫模型的改进核素迁移模型,由于其考虑浮动核电站的移动特性以及放射性核素的衰变,因此 ^{137}Cs 浓度空间分布呈椭圆形,且随着事故的发生,沿着浮动核电站运动轨迹方向的 ^{137}Cs 浓度偏高,在24 h内的变化幅度较大。

3)根据改进的核素迁移模型,选取六个研究位点对 ^{137}Cs 浓度变化规律进行研究, A 、 B 、 C 三个研究位点由于在船舶运动的轨迹上,因此三个研究位点的 ^{137}Cs 浓度普遍偏高。而 D 、 E 、 F 三个研究位点均在放射性核素扩散方向上,因此三个研究位点的 ^{137}Cs 浓度普遍偏低。

参考文献:

- [1] 钱永柏,党同强,王鑫,等.海上核应急辐射场计算评估方法[J].辐射研究与辐射工艺学报,2019,37(2): 60-66.
- [2] QIAO F L, WANG G S, ZHAO W, et al. Predicting the spread of nuclear radiation from the damaged Fukushima Nuclear Power Plant[J]. Chinese science bulletin, 2011, 56(18): 1890-1896.
- [3] DIETZE H, KRIEST I. ^{137}Cs off Fukushima Dai-ichi, Japan-model based estimates of dilution and fate[J]. Ocean science, 2012, 8(3): 319-332.

(下转第67页)

容按钮触发的电话求助设备,以及可调节亮度的夜灯装置。

但本系统仍然有以下几点可做出优化:

- 1) 程序应在开机时可自动运行;
- 2) 语音唤醒指令应该更加精准;
- 3) 程序还需优化以减少系统延时;
- 4) SIM 模块在通话时声音小,还需做出改进。

参考文献:

- [1] 刘伟,倪桑. 2018 年人工智能研发热点回眸[J]. 科技导报,2019,37(1):157-162.
- [2] 王海坤,潘嘉,刘聪. 语音识别技术的研究进展与展望[J]. 电信科学,2018,34(2):1-11.
- [3] ALAM M R, REAZ M B I, ALI M A M. A review of smart homes-Past, present, and future[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews), 2012, 42(6):1190-1203.
- [4] NODA K. Google home: smart speaker as environmental control unit[J]. Disability and rehabilitation: assistive technology, 2017, 13(7):674-675.
- [5] ALMUSAYLIM Z A, ZAMAN N. A review on smart home present state and challenges; linked to context-awareness internet of things (IoT) [J]. Wireless networks, 2019, 25(6):3193-3204.
- [6] HOSSAIN M S, MUHAMMAD G. Cloud-assisted speech and face recognition framework for health monitoring [J]. Mobile networks and applications, 2015, 20(3):391-399.
- [7] Vamei. 从 Python 开始学编程[M]. 北京:北京电子工业出版社,2017.
- [8] GOODWIN S. Linux+树莓派玩转智能家居[M]. 李明,译. 北京:人民邮电出版社,2014.
- [9] 柯博文. 树莓派(Raspberry Pi)实战指南[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [10] 党宏社,侯金良,张超. 基于 Kinect 的家庭助理机器人系统设计与实现[J]. 电子技术应用,2017,43(3):70-72;76.
- [11] 李建勇,李洋,刘雪梅. 基于 ZigBee 的粮库环境监控系统设计[J]. 电子技术应用,2016,42(1):65-67;71.
- [12] 程风. 基于语音交互技术的智能家居主控设计[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018:1-2.

(责任编辑:周泉)

(上接第34页)

- [4] 郭皓,杜金秋. 海洋核污染与核素迁移[J]. 海洋开发与管理,2014,31(7):83-86.
- [5] 王韶伟,张琨,陈海英,等. 某核电厂近岸海域放射性核素迁移特征探讨[J]. 海洋科学进展,2016,34(2):271-279.
- [6] 刘媛媛,魏强林,高柏,等. 放射性核素在不同介质中的迁移规律研究现状及进展[J]. 有色金属:冶炼部分,2018(6):76-82.
- [7] 周涛,石顺,李子超,等. 海洋中核素的迁移与污染研究[J]. 黑龙江电力,2019,41(1):5-7.
- [8] 宋妙发,强亦忠. 核环境学基础[M]. 北京:原子能出版社,1999:135-138.
- [9] 丁敏霞,刘国卿,苏玲玲,等. 深圳近岸海域海水及沉积物中放射性核素水平[J]. 核化学与放射化学,2017,39(6):442-446.
- [10] 卢博鑫. 严重事故条件下放射性核素在海洋中的迁移扩散模拟研究[D]. 北京:华北电力大学,2016:40-42.
- [11] 国家环境保护局. 海水水质标准:GB 3097—1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.

(责任编辑:扶文静)