

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.014

· 辐射环境/论著 ·

放射性释放源项反演模型的初步研究

张良, 宋卫杰

中国原子能科学研究院, 北京 102413

摘要: **目的** 基于监测数据、高斯烟羽模型和优化算法, 初步研究放射性释放源项反演模型。**方法** 通过比较几种优化算法的适用条件和性能, 并对相同条件下不同算法源项反演计算结果的准确性进行比较验证。**结果** 通过对放射性释放源项反演模型初步研究, 发现基于高斯烟羽的反演模型, 采用最小二乘法优化后进行释放源项反演计算是可行的。该优化模型对于简单地形下的模拟结果精度较高, 为实测值的 0.92 倍; 对于复杂地形条件下的模拟结果受模型本身限制误差相对较大, 为实测值 1.5 倍。**结论** 研究表明高斯烟羽结合最小二乘法的优化源项反演模型在计算性能和精度上可更好地满足核事故后果评价和应急决策需求。

关键词: 放射性释放; 源项反演; 高斯烟羽模型; 最小二乘法

中图分类号: TL73 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)01-0063-06

Preliminary study on inversion model of radioactive release source terms

ZHANG Liang, SONG Weijie

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China

Abstract: **Objective** Based on the monitoring data, Gaussian plume model and optimization algorithm, the inversion model of radioactive release source term was preliminarily studied. **Methods** By comparing the application conditions and performance of several optimization algorithms, the accuracy of source term inversion results of different algorithms under the same conditions was compared and verified. **Results** The preliminary study of radioactive release source term inversion model shows that it is feasible to use the least square method to optimize the inversion model based on Gaussian plume. The accuracy of the optimized model is 0.92 times of the measured value for flat terrain, and 1.5 times of the measured value for complex terrain, whose error is relatively large because of the limitation of the model itself. **Conclusion** The results show that the optimized source term inversion model based on Gaussian plume and least square method can better meet the needs of nuclear accident consequence assessment and emergency decision-making in terms of computational performance and accuracy.

Keywords: Radioactive Release; Source Term Inverse; Gaussian Plume Model; Least Square Method

Corresponding author: SONG Weijie, E-mail: swjnn@163.com

核事故后果评价是事故应急决策的重要支持手段, 源项信息的准确度直接影响到核事故后果评价及应急决策, 其中源项的不确定性是造成评价结果误差的主要原因之一^[1]。为获得较准确的核事故源项, 基于监测数据反演事故释放源项的技术得到广泛发展。源项反演基本原理是将各个测量点坐标、测量数据以及气象数据(如大气稳定度、风向、风速、温度)与大气扩散模型相结合, 从而推导出源项。文中基于环境监测数据和高斯烟羽模型, 分析比较了可用于源项反演的几种优化算法, 并对同条件下不同算法计算结果的准确性进行比较验证, 初步研究了放射性释放源

项反演模型。

1 材料和方法

1.1 扩散模型 高斯烟羽模型结构简单, 所需计算参数少, 计算迅速, 能够快速估算出烟羽的大概分布, 扩散因子计算见式 1)^[2], 反演过程见式 2):

$$C(x, y, z, H) = \frac{A}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left(-\frac{\lambda x}{u}\right) DF(x) \quad (1)$$

$$X * A = Y$$

$$\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p,1} & x_{p,2} & \dots & x_{p,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_p \end{bmatrix} \quad 2)$$

式中, C 为时间积分的空气浓度, $(Bq \cdot s)/m^3$; A 为释放量, Bq ; H 为有效释放高度, m ; λ 为核素衰变系数, s^{-1} ; x, y, z 均为计算点坐标, m ; σ_y, σ_z 分别为横向和纵向扩散参数, m ; u 为有效释放高度 H 处的平均风速, m/s ; $DF(x)$ 为烟羽耗减因子。 $x_{i,j}$ 为 i 点 j 时段的弥散因子, 由扩散公式计算; a_j 为 j 时段的释放量; y_i 为

i 点在 n 时刻(高斯模型 $n=1$)的监测值。

1.2 优化算法 目前优化算法主要使用的有最小二乘法、禁忌搜索算法、遗传算法和蚁群优化算法等^[3-5]。

(1)最小二乘法: 该算法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配, 简便地求得未知数据, 并使所得数据与实际数据之间误差的平方和为最小。具体过程分 3 步: ① 确定线性方程组 $X * A = Y$, X 为 $p \times n$ 矩阵, $p \geq n$, A 为 $[a_1, a_2, \dots, a_n]^T$, Y 为 $[y_1, y_2, \dots, y_n]^T$; ② 分别计算 $X^T * X$, $X^T * Y$; ③ 计算 $A = X^T * Y / X^T * X$ 。流程见图 1。

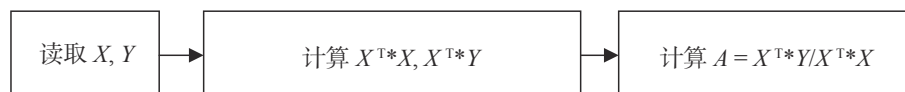


图 1 最小二乘法计算流程图

Figure 1 Flow chart of least square method

(2)禁忌搜索算法: 该算法用禁忌表记录已到达过的局部最优点或过程, 在下次搜索中利用禁忌表信息不再或有选择地搜索这些点或过程, 以此跳出局部最优点。具体过程分 5 步: ① 在解域范围均匀生成 N 个样本; ② 计算每个样本的符合度并排序; ③ 判断最高符合度的样本是否满足误差要求, 若满足输出并退出搜索; ④ 若不满足, 将符合度低的样本及其领域放入禁忌表, 在符合度高的样本附近重新搜索新样本; ⑤ 回到 step2。流程见图 2。

(3)遗传算法: 该算法主要借用生物进化中“适者

生存”规律, 通过对“解”进行编码, 遗传过程中通过杂交变异不断产生新的解, 最终获得最优解。具体分 5 步计算: ① 在解域范围生成初始种群; ② 计算每个样本的适应度并排序; ③ 若最高适应度的样本满足误差要求, 输出并退出循环; ④ 按照适应度从大到小将样本分成 4 类, 第一类样本保持不变, 但参与第二类的杂交; 第二类样本与第一类样本杂交生成新样本; 第三类变异生成新样本; 第四类抛弃, 并在第一类领域附近随机生成新样本; ⑤ 将 step4 生成的样本组成新种群, 回到 step2。计算流程见图 3。

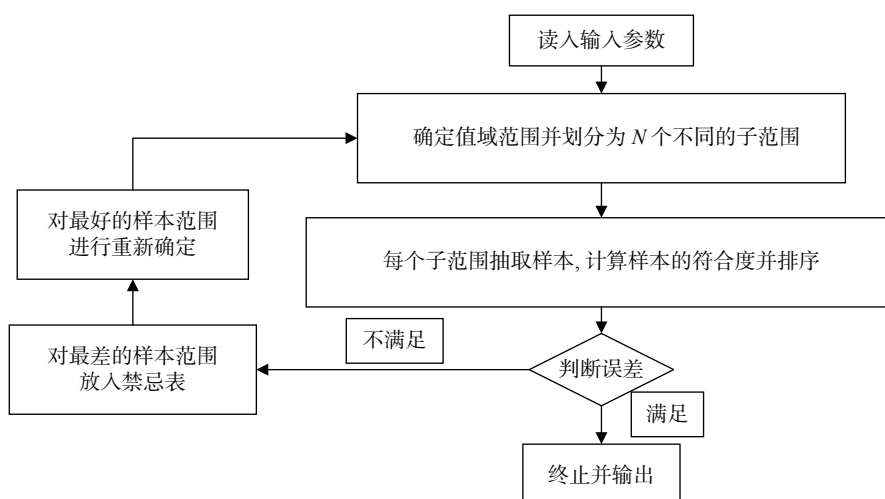


图 2 禁忌搜索算法基本流程图

Figure 2 Basic flow chart of tabu search algorithm

(4)蚁群优化算法: 该算法是种分布式智能模拟算法, 基本思想是模仿蚂蚁依赖信息素进行通信而显示出的社会行为。它是种基于总体优化、随机的通用试探法, 可用于求解各种不同组合优化问题, 具有通

用性和鲁棒性。具体分 5 步计算: ① 在解域范围生成初始蚁群; ② 计算每个样本的信息素并排序; ③ 如果最高信息素的样本满足误差要求, 输出并退出循环; ④ 按照信息素从大到小以一定概率向最高信息素附

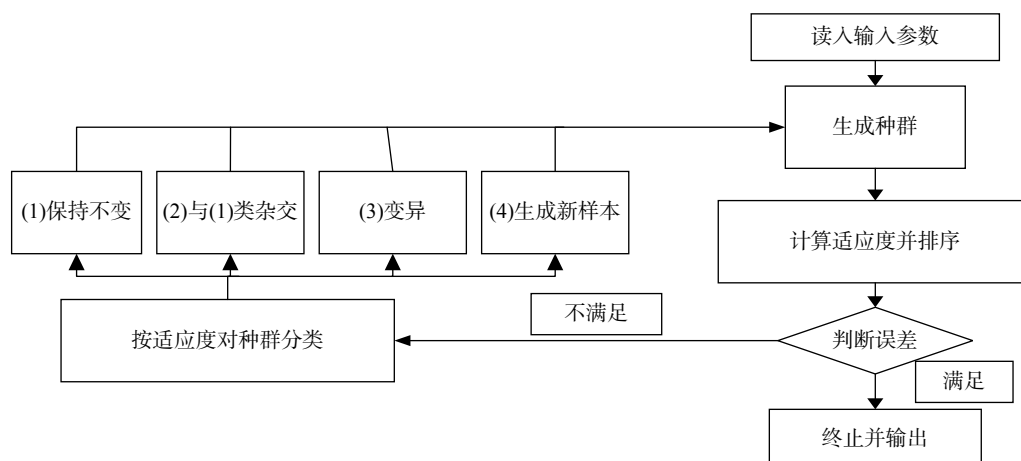


图3 遗传算法基本流程图

Figure 3 Basic flow chart of genetic algorithm

近移动(最高信息素的样本附件生成新样本);⑤将 step4 生成的样本组成新蚁群,回到 step2。计算流程见图 4。

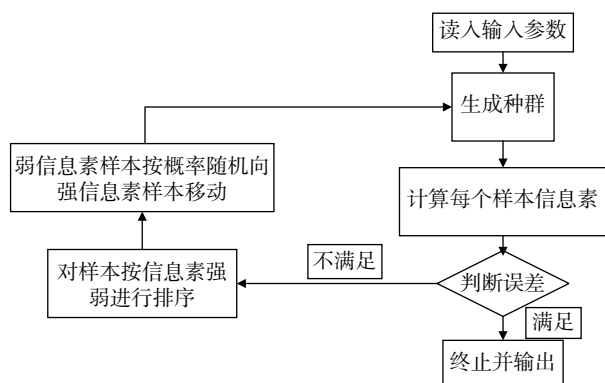


图4 蚁群优化算法基本流程图

Figure 4 Basic flow chart of ant colony optimization algorithm

1.3 反演模型分析 反演模型分析基于监测数据、高斯烟羽模型和不同优化算法相结合的方法,通过优化算法比较和实际案例验证的方法进行反演模型分析,研究使用的条件和参数见下文。

(1)优化算法的比较:采用几种优化算法进行源项反演计算,并比对不同算法的计算结果,选出较适用于源项反演分析的优化方法。目前优化算法主要是解决线性方程的求解(式 3),本文针对前者反演求解式对不同算法进行了测试比较。

$$C = C_0 + \sum XOQ_i \cdot Q_i \quad D = D_0 + \sum DXQ_i \cdot Q_i \quad (3)$$

式中, C 为空气中浓度, Bq/m^3 ; C_0 为本底或其他因素造成的浓度, Bq/m^3 ; XOQ_i 为弥散因子, s/m^3 ; D 为外照射剂量率, nGy/h ; D_0 为本底或其他因素造成的剂量率, nGy/h ; DXQ_i 为剂量计算因子; Q_i 为源项释放率, Bq/s 。

模拟数据基于高斯烟羽模型计算结果并符合随

机误差生成,模拟输入数据见表 1,其中 $C_0 = 63.5$, $Q = 0.035$, 求解范围 $[0, 800]$ 。

表 1 模拟输入参数

Table 1 Analog input parameters

XOQ	130.2	120.3	115.6	107.4	100.1	92.8	85.5	78.2	70.9	63.6
C	68.1	67.7	67.5	67.3	67.0	66.7	66.5	66.2	66.0	65.7

(2)实际案例的验证:选用复杂和简单地形下的实际扩散示踪案例对优化模型计算准确性进行了验证。现场试验地形见图 5、图 6(复杂和简单地形实验释放时长分别为 45 min 和 1 h,每次试验采样点连续采样 3 次(时长 10 min,间隔 5 min),各采样点从采样开始到结束共计 40 min。采样结果为采样点 10 min 的平均结果,总反演时长为释放时长。)源项、气象和监测点数据分别见表 2、表 3、图 7、图 8、图 9、图 10。

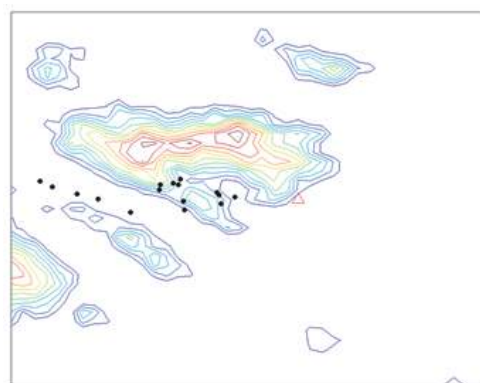


图5 SF_6 现场试验复杂地形及采样点分布
Figure 5 Complex terrain and sampling point distribution of SF_6 field test

2 结果

2.1 不同算法的计算结果 基于第 1 章节中的理论分析和参数,用于比较优化算法的结果见表 4。

表 2 源项数据

Table 2 Source term data

参数	复杂地形	简单地形
释放日期	1997.8.15	2017.7.6
释放时间	14:00~14:45	12:18~13:18
释放量/kg	48.5	21.4
释放随地高度/m	100	75

表 3 复杂地形反演使用的气象数据

Table 3 Meteorological data in complex terrain for inversion

风向	风速/(m/s)	稳定性
67.5	2.88	C



图 6 SF₆ 现场试验简单地形及采样点分布

Figure 6 Flat terrain and sampling point distribution of SF₆ field test

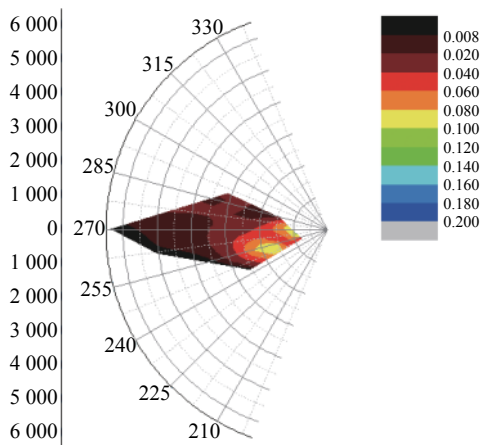


图 7 复杂地形条件的监测数据分布图

Figure 7 Distribution of monitoring data in complex terrain conditions

2.2 实际案例的验证结果 基于第 1 章节中的理论分析和参数,实际案例的验证结果见表 5。

3 讨论

3.1 最优算法选取 从表 5 可看出:①最小二乘法

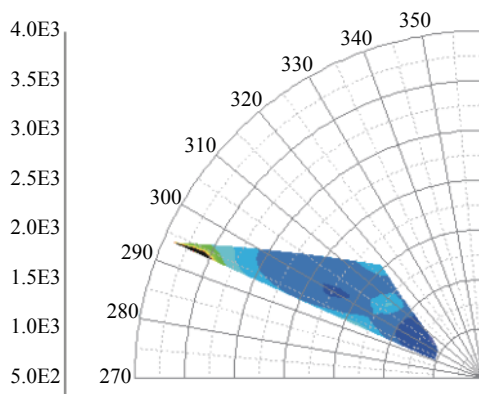


图 8 简单地形条件的环境监测数据分布图
(采样时间 12:30~12:40)

Figure 8 Distribution of environmental monitoring data under flat terrain conditions

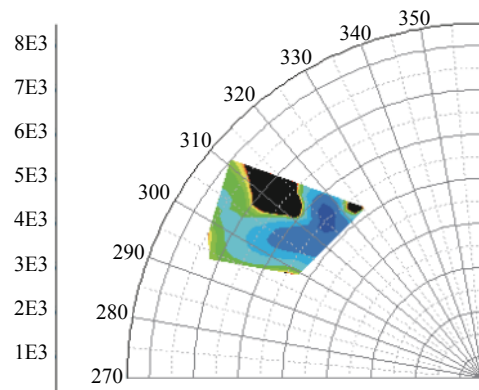


图 9 简单地形条件的环境监测数据分布图
(采样时间 12:40~12:50)

Figure 9 Distribution of environmental monitoring data under flat terrain conditions

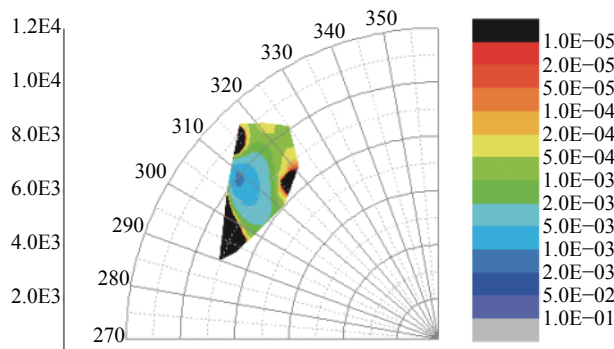


图 10 简单地形条件的环境监测数据分布图
(采样时间 12:50~13:00)

Figure 10 Distribution of environmental monitoring data under flat terrain conditions

效率最高, 仅需一次解析计算即可得到结果; ②禁忌搜索算法、遗传算法、蚁群算法计算迭代次数与给定的解范围和搜索样本数有关, 当给定解范围越精确、搜索样本越多, 需要迭代次数越少; 但给定搜索样本越多, 每步计算量也随之增大, 总计算效率不会提高很多; ③对于多元一次方程形式(线性)的反演模型,

表 4 简单地形反演中的气象数据

Table 4 Meteorological data in simple terrain for inversion

时间 (年月日时分)	高度											
	10 m			30 m			80 m			100 m		
	风向	风速/(m/s)	温度/℃	风向	风速/(m/s)	温度/℃	风向	风速/(m/s)	温度/℃	风向	风速/(m/s)	温度/℃
2017.7.6 12:10	121	5	23	123	6	23	135	9.3	23	138	8.7	23
2017.7.6 12:20	120	4.9	23	118	5.3	23	133	8	23	137	7.9	23
2017.7.6 12:30	112	4.8	23	114	5.5	23	129	8.8	23	130	9.1	23
2017.7.6 12:40	116	4.7	23	117	5.2	23	133	8.4	23	136	7.9	23
2017.7.6 12:50	127	5.3	23	124	5.9	23	132	8.5	23	139	7.9	23
2017.7.6 13:00	134.2	5.36	23	137.4	5.73	23	152.6	6.8	23	156.1	5.55	23
2017.7.6 13:10	138	5.8	23	141	6	23	155	5.9	23	159	5.1	23
2017.7.6 13:20	143	5.7	23	149	6.3	23	169	6.7	23	168	4.4	23

注:释放高度(75 m)处的风向采用80 m高度处风向,风速为插值获得。稳定度采用10 m~100 m温度梯度法计算得到。

表 5 模拟结果

Table 5 Simulation results

算法	最小二乘法	禁忌搜索算法	遗传算法	蚁群优化
C ₀	63.4255	63.4526	63.5161	63.466
Q	0.0354	0.0354	0.0347	0.0353
迭代次数	1	12	51	18

最小二乘法是最有效的方法;对于多元非线性方程形式的反演模型来说,则需要做更多的研究比较。因此对于多元一次方程形式(线性)的反演模型,推荐选用最小二乘法。

3.2 实际案例分析 表 6 计算结果显示:①采用反演模型进行释放源项的反演计算是可行的,其误差精度满足后果评价要求;②采用文中直线高斯烟羽模型的源项反演计算,对于简单地形下的反演结果为实测值的 0.92 倍,精度较高;对于复杂地形条件下的反演结果为实测值 1.5 倍,受模型本身限制,误差相对较大。

表 6 实际释放量与计算结果的比较

Table 6 Comparison of actual release and calculation results

地形	实测释放量/kg	反演释放量/kg	反演/实测
复杂	48.5 kg	72.6 kg	1.5
简单	10.7 kg	9.84 kg	0.92

注:简单地形的反演释放量是基于前半个小时的监测结果计算的,因此实测释放量只取了1/2。

3.3 小结 通过本文的研究,得出以下主要结论:

(1)对于直线高斯烟羽模型,长期事故释放情景

只能采用分段处理方式,进而获取整个释放期间的释放量。因文中采用模型的限制,对于简单地形地区的反演效果较好,对于复杂地形条件,通过对监测点的选择可有效提高反演精度。

(2)从优化算法的对比来看,虽然各类优化算法均可实现释放量的反演分析,最小二乘法效率最高。对于其他算法,变量较少时容易实现计算,当待求解变量数很多时,对于程序的编制,以及计算效率有很高的要求。

(3)因模型的限制,对于复杂地形条件和复杂气象条件时的反演存在较大的困难,因此需要后续研究考虑更精确的扩散模型。

利益冲突声明 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 张良:负责文章中研究内容具体工作的开展;宋卫杰:负责文章编写,辅助文章研究内容的开展

参考文献

- [1] 徐志新,奚树人,曲静原.核事故源项反演技术及其研究现状[J].科技导报,2007,25(5):16-20. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2007.05.004.
Xu ZX, Xi SR, Qu JY. Review on source inversion technology in analyzing nuclear accidents[J]. Sci Technol Rev, 2007, 25(5): 16-20. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2007.05.004.
- [2] 宁莎莎,蒯琳萍.混合遗传算法在核事故源项反演中的应用[J].原子能科学技术,2012,46(21):469-472. DOI: 1000-6931(2012)SO-0469-04.
Ning SS, Kuai LP. Back-calculation of source terms by hybrid

genetic algorithm in nuclear power plant accident[J]. *At Energy Sci Technol*, 2012, 46 (4) : 469-472. DOI: [1000-6931\(2012\)SO-0469-04](#).

- [3] 侯闻宇, 凌永生, 赵丹, 等. GA-BP算法应用于核事故源项反演的研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16 (6) : 24-28. DOI: [CNKI: SUN: AQHJ.0.2016-06-007](#).

Hou WY, Ling YS, Zhao D, et al. GA -BP neural network algorithm and its application to the nuclear accident source term inversion[J]. *J Saf Environ*, 2016, 16 (6) : 24-28. DOI: [CNKI: SUN: AQHJ.0](#).

2016-06-007.

- [4] 余胜威. MATLAB优化算法案例分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2014.

Yu SW. Case analysis and application of MATLAB optimization algorithm[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2014.

- [5] Steven G. Homann. HotSpot-Health Physics Codes Version 2.07 User's Guide[M]. March 1, 2009.

收稿日期:2020-08-04

(上接第 52 页)

- [2] Bromet EJ, Havenaar JM, Guey LT. 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident[J]. *Clin Oncol*, 2011, 23 (4) : 297-305. DOI: [10.1016/j.clon.2011.01.501](#).

- [3] Bromet EJ. Mental health consequences of the Chernobyl disaster[J]. *J Radiol Prot*, 2012, 32 (1) : N71-N75. DOI: [10.1088/0952-4746/32/1/n71](#).

- [4] Terayama T, Shigemura J, Kobayashi Y, et al. Mental health consequences for survivors of the 2011 Fukushima nuclear disaster:a systematic review.Part 2:emotional and behavioral consequences[J]. *CNS Spectrums*, 2020: 1-13. DOI: [10.1017/S1092852920000115](#).

- [5] World Health Organization, War Trauma Foundation and World Vision International. Psychological first aid: Guide for field workers[R]. Geneva: WHO, 2011.

- [6] 叶常青, 徐卸古.核生化突发事件心理效应及其应对[M].北京:科学出版社, 2012: 270-274.

Ye CQ, Xu XG.Medical response for psychological consequences during a NBC emergency[M]. Beijing: Science Press, 2012: 270-274.

- [7] 雷翠萍, 陈惠芳, 付熙明,等. 核电站事故情况下的心理援助[J]. *中国辐射卫生*, 2017, 26 (4) : 458-460. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2017.04.030](#).

Lei CP, Chen HF, Fu XM, et al. Psychological assistance during a nuclear accident[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2017, 26 (4) : 458-460. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2017.04.030](#).

- [8] 国家卫生和计划生育委员会. GBZ/T 262—2014 核和辐射突发事件心理救助导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

National Health and Family Planning Commission fo PRC. GBZ/T 262—2014 Guidelines of psychological assistance after nuclear and radiological emergency[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

收稿日期:2020-08-13

欢迎订阅! 欢迎投稿!

《中国辐射卫生》

网站: www.zgfsws.com

邮箱: redi@chinajournal.net.cn