朱鸿浩，王璐，程勇，等. 急性电离辐射灾害事故损伤剂量与防护措施研究[J]. 灾害学，2019，34(2)：48－51. [ZHU Honghao，WANG Lu，CHENG Yong，et al. Damage Dose and Protection Measures in Accidents of Acute Ionizing Radiation Disasters[J]. Journal of Catastrophology，2019，34(2)：48－51. doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2019.02.010.]

急性电离辐射灾害事故损伤剂量与防护措施研究*

朱鸿浩，王　璐，程　勇，尚　靖，徐　浩

（暨南大学附属第一医院 广州华侨医院核医学科，广东 广州 510000）

摘　要：快速准确地剂量评估是放射事故医学救治的重要环节。针对传统的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法存在计算效率较低、计算误差较高等问题，提出了一种新的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法。根据放射事故剂量的相关物理以及生物估算理论，需要设计一种针对不同外照条件下的放射事故剂量计算程序。利用可供剂量进行估算时使用的参数以及信息，能够快速实现急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算，并且给出了相应的防护措施。实验结果表明，所提方法能够快速、准确的进行急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算，并且及时的给出相应的防护措施。

关键词：急性电离辐射；灾害事故损伤剂量；防护措施研究

中图分类号：TP333；X915.5；X45；X9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000－811X(2019)02－0048－04

doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2019.02.010

在核能应用以及国防科技中等涉及核邻域的工作中，常常会接触到电离辐射，但是由于一些工作人员对于电离辐射的认知有限，将其对人体的危害夸大，导致人们对它心存畏惧，无法正常工作，严重影响的工作进度以及工作效率[1－2]。急性电离辐射事故主要由电离辐射失控引发的异常事件，能够直接、间接对生命、健康的能够造成伤害。针对电离辐射的最大担忧主要来源于其引发的疾病可能会对后代造成影响[3]。随着人们对于电离辐射的了解越来越多，人们已经研究出各种保护人类免受各种辐射源照射的防护方法，但是，人们的担心依旧存在[4]。需要研究一种更为全面的方法进行有效防护。

目前，相关专家给出了一些较好的研究，例如雷鸣等人[5]提出一种基于耦合计算的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法，通过点燃耗程序与耦合计算相结合，分析活化核素剂量率贡献及相应衰减时间，实现急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算。但是该方法没有提出相应的保护措施。陈华等人[6]提出了一种基于 Monte Carlo 算法的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法，该方法分别采用 AAA、CCC 算法相结合，实现对急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算。但是该计算方法的计算结果存在误差。

针对上述方法存在的一系列问题，我们提出了一种新的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法。通过放射事故计量对全身造血干细胞存活率进行计算，估计 1 d 内的照射等效剂量，完成急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算。针对上述结果进行分析，给出具有针对性的防护措施。

1　急性电离辐射灾害事故损伤剂量与防护措施研究

1.1　急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算

灾害事故损伤计量是指事故发生时提供受照者人体剂量学参数，在事故发生的情况下，人体所受到的照射是不均匀的，所以，描述病人全身照射的平均剂量以及中线剂量不适合用在不均匀的事故照射，所以，引用“干细胞活存模型”计算急性电离辐射灾害事故损伤剂量，以下给出具体的计算过程。

如果受照剂量在引起骨髓型放射病的范围内，全身剂量是根据照射后全身造血干细胞存活率决

* 收稿日期：2018－11－15　　修回日期：2019－01－24
基金项目：国家社会科学基金项目(16BGL181)
第一作者简介：朱鸿浩(1986－)，男，四川内江人，核医学物理师，研究方向为核医学科辐射防护等相关研究工作.
E-mail：zixcan1001@163.com
通讯作者：徐浩(1963－)，男，江西临川人，博士，主任医师，教授，研究方向为医学影像与介入放射学(分子核医学).
E-mail：robinson123456789@163.com

定，以下给出几个相关的因素：①全身各个部位红骨髓的相对含量；②上述部位的受照剂量[7]；③干细胞的剂量存活关系。在不均匀的照射条件下，干细胞的存活率的计算式为：

$$S_n = 1/W\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} m(D)S_u(D)\mathrm{d}D。\tag{1}$$

式中：W 代表受照人全身的红骨髓质量，D 代表红骨髓所吸收的剂量，$m(D)$ 代表在受照剂量为 D 时的红骨髓质量，$m(D)\mathrm{d}D$ 代表受照剂量在 D 至 $D+\mathrm{d}D$ 范围内红骨髓的质量，$S_u(D)$ 代表在受照剂量为 D 时干细胞的存活率。$S_u(D)$ 的表达式为：

$$S_u(D) = 1-(1-e^{-D/D_0})^n。\tag{2}$$

式中：D_0、n 都为常数。

根据人体内红骨髓以及剂量分布的相关情况，通过式(1)得到了不均匀照射下的干细胞存活率[8]，将上述条件带入到式(2)中，即 $S_n = S_u$，得到 D。实际剂量估计应用中，需要计算全身平均吸收剂量 D_{sw} 以及红骨髓计权平均剂量 D_{rw}，将其与干细胞存活计权等效剂量 D_{sw} 进行粗略对比，以保证最终估算结果的准确性。全身平均吸收剂量 D_{aw} 为：

$$D_{aw} = \frac{\sum_{i=1}^{17} D_i m_i}{\sum_{i=1}^{17} m_i}。\tag{3}$$

式中：D_{aw} 代表全身的平均吸收剂量，D_i 代表第 i 块小组织内的吸收剂量，m_i 代表第 i 块小组织内的质量。红骨髓平均剂量 D_{rw} 为：

$$D_{rw} = \frac{\sum_{i=1}^{17} D_i W_i}{W_i}。\tag{4}$$

式中：D_{rw} 代表红骨髓的平均剂量，W_i 代表第 i 个小立方体内的红骨髓质量。有、无体模时第 i 层组织的照射量为：

$$X_i^w = TAR_i \times X_i^a;\tag{5}$$

$$X_i^a = T_i \times t。\tag{6}$$

i 层组织的吸收剂量为：

$$D_i = X_i^w \times k。\tag{7}$$

总吸收剂量为：

$$D = \sum_{i=1}^{17} D_i。\tag{8}$$

干细胞活存计权等效剂量为：

$$D_{sw} = -D_0 \mathrm{In}S_n。\tag{9}$$

分次、延时照射比一次等剂量 LET 辐射的急性照射具有较小的辐射效应。把分次、延时照射的累积剂量归一为一次照射等效剂量。以下给出具体的计算方法。

分次照射的一次等效剂量为：

$$NSD = (TDF)^{1/1.538}。\tag{10}$$

式中：TDF 代表时间剂量因子。TDF 的表达式为：

$$TDF = n \cdot d^{1.538}X^{0.169}。\tag{11}$$

式中：n 为分割次数[9]，d 为分次照射剂量，X 为分次进行照射的时间间隔。如果式(11)满足 $n \geqslant 4$ 的条件，则有：

$$TDF_{total} = \sum_{i-1}^{n} TDF_i。\tag{12}$$

式中：TDF_i 为第 i 次照射的时间剂量分次因子。

分别校正不同疗程间的衰减因子，衰减因子 DF 为：

$$DF = \left[\frac{T_1}{T_1+R}\right]^{0.11}。\tag{13}$$

式中：T_1 为第一疗程的治疗时间间隔，R 为两个疗程之间的时间间隔。求解两个疗程结束之后获取的等效剂量，对式(10)进行校正，则有：

$$NSD = (TDF_1)^{1/1.158} \cdot DF + (TDF_2)^{1/1.158}。\tag{14}$$

式中：TDF_1 为第一个疗程的 TDF 值，TDF_2 为第二个疗程的 TDF 值。

根据相关的照射原理剂量估计规定可知，延时照射一般情况下归一为一次照射等效剂量，以下给出在延时照射情况下的等效剂量计算式：

$$ED = \frac{D}{1+\frac{K}{D'^{1/3}}}\tag{15}$$

式中：ED 为一个星期内的照射剂量当量，D 为累积剂量，D' 为剂量率，K 为常数。

在急性电离辐射外射的情况下，通过染色体畸变分析法估计剂量的范围在 0.1 ~ 5 Gy。相对于估算全身受一次性均匀分布的贯穿性的过量照射较为准确，但是针对于不均匀的照射，只能给出相当于一次全身均匀照射的等效剂量，不能利用较小的剂量进行估算[10]。针对低传能线密度的电离辐射，利用双着丝粒畸变作为指标，将其剂量设定为等效硬关系，则有：

$$p = c + \alpha D + \beta D^2。\tag{16}$$

式中：p 为不同染色体发生畸变的概率，D 为照射剂量，c 为常数，α 为剂量直线项系数。针对于 LET 辐射，大部分的剂量效应关系为直线模式，即：

$$p = c + \alpha D。\tag{17}$$

式(16)与式(17)中的 p 相同，即：

$$p = x/n。\tag{18}$$

式中：n 为分析细胞数量，x 为“双 + 环”数。

通过上述的计算模型，通过发生畸变的概率得到生物剂量估计值：

$$D_0 = [a^2 - 4b(c-p)]^{1/2}/2b。\tag{19}$$

针对于 LET 射线，则有：

$$D = (p - c)/\alpha。 \quad (20)$$

针对剂量估计中不确定性的计算方法，急性电离辐射灾害事故损伤剂量为：

$$S_p = x^{1/2}/n。 \quad (21)$$

1.2 急性电离辐射灾害事故防护措施研究

通过分析上述过程，以下给出具体的急性电离辐射灾害防护措施。

(1)时间防护。工作人员累积照射的剂量以受照射时间成正比，工作人员的受照时间越长，其受到的累积剂量也就越大。通常情况下，需要控制受照时间来减少受照人员所受的累积剂量。所以，在一切操作中应该以有效减少受照时间为原则。在工作中，工作人员需要操作熟练，应变能力强，迅速准确地排除故障。如果工作人员必须要在较强的辐射下进行工作，并且时间较长的时候，此时，需要采取轮流制，减少每个工作人员的操作时间。

(2)距离防护。增大人与辐射源之间的距离，能够有效降低工作人员的照射量率。针对点状放射源，辐射剂量率水平和放射源的距离平方成反比的关系。在实际的操作过程中，需要尽可能的采取长柄钳以及自动控制装置等。

(3)屏蔽防护。在日常工作中，单单依靠缩短受照时间来以及增大距离并不能够达到安全操作的目的。在正常情况下，需要在放射源以及人体放入一层隔离物质，能够有效减少弱射线照射。针对不同类型的辐射，其隔离物质的材质也是不同的，尽量选取经济实惠的隔离材料。

(4)内照射防护。以下给出几种较为常见的放射性物质进入人体内的途径：呼吸道进入、皮肤进入以及伤口侵入等。该物质在进入人体以后，会引起全身以及组织的照射。为了有效防止放射性物质进入人的身体内部，在工作中需要加强个人防护，穿专业的服装，戴好口罩、手套等。

(5)空气净化。通过过滤、防尘等方法将空气进行净化，减少空气中放射性粉尘以及气溶胶的浓度。

(6)针对所工作的区域以及周围的环境，需要对其中具有代表性的产品进行常规检测，及时发现操作中出现的问题，对其进行改进。

2 实验结果与分析

为了验证本文研究所得出的方法的综合有效性，需要进行实验，实验环境为：为 MATLAB R2012a。计算机配置为：32 位 Windows7 系统，Pentium 双核2.8GHz，运行内存 2GB。为研究不同剂量计算方法的计算误差效果，进行如下实验。

(1)分别对比不同方法的计算误差(%)

分别将我们的方法与基于耦合计算的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法以及基于 Monte Carlo 算法的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法进行实验对比，对比 3 种不同计算方法的计算误差(%)，对比结果如图 1 所示。图 1 中，A 代表所提方法，B 代表基于耦合计算的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法，C 代表基于 Monte Carlo 算法的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法。从图 1 可知，随着实验次数的不断变化，不同剂量计算方法的变化趋势也在不断发生变化。我们的方法的误差在 3 种方法中为最小，几乎接近 0。基于耦合计算的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法的计算误差次之，基于 Monte Carlo 算法的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法的计算误差在 3 种方法中为最高，期间出现了两次峰值，并且误差值较大。通过实验数据对比可知，本文方法能够有效降低计算误差，提高计算结果的准确性。

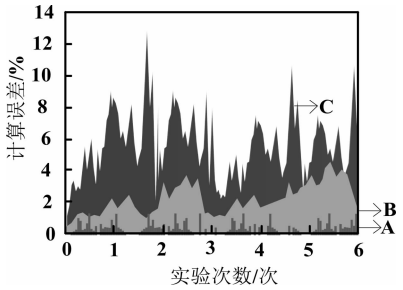


图 1 不同剂量计算方法的计算误差对比结果

(2)分别对比不同方法的计算效率(%)

分别将我们的方法与基于耦合计算的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法以及基于 Monte Carlo 算法的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法进行实验对比，对比 3 种不同计算方法的计算效率(%)，对比结果如表 1 所示。

表 1 不同剂量计算方法的计算效率对比结果

样本数量/个	计算效率/%		
	A 方法	B 方法	C 方法
300	98	87	94
500	94	89	92
700	98	91	87
900	97	92	85
1500	99	95	81
平均计算效率/%	97.2	90.8	87.8

分析表 1 可知，不同剂量计算方法计算效率的变化趋势也在不断发生变化。在样本数量较低时，我们的方法的计算效率到达 98%，而传统方法仅为 87% 与 94%；随着样本数量增加，该的计算效

率波动幅度较小，平均计算效率达到了 97.2%，基于耦合计算的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法的计算效率呈上升取值，但是该方法的平均计算效率与所提方法相差了 6.4%。基于 Monte Carlo 算法的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法的计算效率一直呈下降趋势，该方法的平均计算效率与所提方法相差了 9.4%。通过实验数据对比可知，所提方法的计算效率在 3 种方法中为最高。因此，说明我们的方法比传统方法拥有更高的计算效率，更加适合使用。

3　结束语

针对传统方法存在的一系列问题，我们提出了一种新的急性电离辐射灾害事故损伤剂量计算方法。该研究了一种新的计算程序，通过可供剂量对使用的参数以及信息进行估算，并给出相关的防护措施。实验结果表明，我们的方法能够有效降低计算误差，提高计算结果的准确性，以此同时，提高了所提方法的计算效率。此方法受到资金限制不能大量推广使用，因此今后将研究重点放在节约成本上。

参考文献：

[1] 姚成云，王丽君，孔诚，等. 鼻咽癌 IMRT 脑干损伤的剂量体积研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志，2017，26(2)：128－132.

[2] 许倩，史晓磊，张应超，等. 剂量率在严重事故下乏燃料损伤评价系统中的应用[J]. 原子能科学技术，2017，51(9)：1606－1610.

[3] 李超彦，周媛媛，王福青. 黄精多糖联合低剂量顺铂对小鼠 H22 肝癌移植瘤生长的抑制及其抗氧化损伤作用[J]. 中国老年学杂志，2016，36(5)：1038－1040.

[4] 郎丽，林瀚生，陈青松，等. 周围血 5-羟色胺与手传振动接触水平及末梢血管损伤的相关性[J]. 环境与职业医学，2016，33(6)：542－546.

[5] 雷鸣，周春林，李子彦，等. 高通量堆 NTD 硅系统活化剂量计算[J]. 核电子学与探测技术，2016，36(9)：953－957.

[6] 陈华，徐义果，庄志邈，等. 放疗计划系统中空腔边缘剂量计算准确性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志，2017，26(1)：69－73.

[7] 尹海燕，主有峰，陶珮，等. 姜黄素对脓毒症大鼠肝细胞的剂量保护效应[J]. 中华危重病急救医学，2016，28(3)：252－256.

[8] 魏春敏，王水强，杨进波. 药代动力学在创新药物首次人体试验起始剂量计算中的意义[J]. 中国临床药理学杂志，2016，32(24)：2341－2344.

[9] 魏春敏，王水强，杨进波. 药代动力学在创新药物首次人体试验起始剂量计算中的意义[J]. 中国临床药理学杂志，2016，32(24)：2341－2344.

[10] 马杰良，梁桐睿，陆明明. 地区太阳能辐射资源定量评估仿真[J]. 计算机仿真，2017，34(8)：382－385.

Damage Dose and Protection Measures in Accidents of Acute Ionizing Radiation Disasters

ZHU Honghao, WANG Lu, CHENG Yong, SHANG Jingjie and XI Hao

(*First Affiliated Hospital of Jinan University*, *Department of Nuclear Medicine of Guangzhou Overseas Chinese Hospital*, *Guangzhou* 510000, *China*)

Abstract: Fast and accurate dose assessment is an important part of medical treatment for radiation accidents. Aiming at the problems of traditional acute ionizing radiation disaster accident damage dose calculation method, such as low computational efficiency and high calculation error, a new method for calculating the damage dose of acute ionizing radiation disaster accident is proposed. According to the relevant physical and biological estimation theory of radiation accident dose, it is necessary to design a radiation accident dose calculation program for different external exposure conditions. Using the parameters and information used in the estimation of the available dose, it is possible to quickly calculate the damage dose of acute ionizing radiation disaster accidents and give corresponding protective measures. The experimental results show that the proposed method can quickly and accurately calculate the damage dose of acute ionizing radiation disaster accidents, and give corresponding protective measures in time.

Key words: acute ionizing radiation; damage dose of disaster accidents; research on protective measures