

# 医学参考报

## 放射医学与防护频道

Radiological Medicine and Protection

Number 02

### 执行主编介绍



李君利 教授

清华大学工程物理系教授，博士生导师，现任清华大学工程物理系核技术所副所长，辐射防护与环境保护研究室主任；ICRP 第二分委员会 TG96 通讯委员；IEC/TC45/SC45B/WG15，委员；辐射防护与核应急中国疾控中心重点实验室学术委员会委员；中华医学会放射医学与防护学会委员会委员；卫生部放射卫生标准化技术委员会副主任委员；北京市重大传染性疾病和突发公共卫生事件专家委员会委员等。

主持国家 863 项目一项，主持国家核电重大专项分课题一项，参与国家重大科学仪器设备开发专项一项，主持国家自然科学基金课题四项。曾获得国家科学技术进步一等奖、教育部科学技术进步一等奖，中国专利金奖等多项。发表数十篇 SCI、EI、核心期刊论文。

### 导读

展望未来：医学辐射防护的挑战

3版

X射线照射下细胞内纳米金粒子辐射增敏效应模拟研究

4版

氨磷汀和肽聚糖对10Gy照射小鼠的防护作用

5版

间充质干细胞对放射性肺损伤的保护作用

6版

加拿大在辐射和核应急中儿童管理的建议

7版

## 人体计算模型的发展及应用

在辐射防护领域，人体模型大体可以分为两种类型：物理模型和计算模型。物理模型是由一种或多种人体组织等效材料构成，模仿人体解剖结构和辐射衰减特性的实体模型。物理模型常用于人体剂量测量相关的实验研究。由于物理模型存在制作工艺复杂、包含的人体组织器官数目有限、难以根据个体进行调整等缺点，其应用受到一定限制。人体计算模型是在计算机中建立的虚拟人体模型。基于人体计算模型，利用蒙特卡罗方法可以模拟各种辐射与人的相互作用，得到人体内的能量沉积。在辐射防护中，对于一些物理量或照射条件，只能利用计算模型通过计算机模拟进行剂量计算，而无法利用物理模型通过实验测量获得，如人体器官的当量剂量、有效剂量等。因此，人体计算模型已经成为辐射防护领域不可缺少的一项基础研究工具。

### 1. 人体计算模型的发展

从 20 世纪 50 年代末期使用平板、球体等非常简单的几何体作为模型开始，人体计算模型已经发展了近 60 年。按照发展的时间顺序，人体计算模型大体可以分为四种类型：简单几何、数学模型、体素模型和面元模型，如图 1 所示。

简单几何模型：1959 年，ICRP（国际放射防护委员会）2 号报告提出一种非常简单的“球形”模型——将整个身体以及所有体内器官都用成分均匀的球形表示，利用该模型进行人体内照射剂量研究，提出了内照射容许剂量。

人体数学模型：20 世纪 60 年代中期，美国橡树岭国家实验室在男性解剖数据基础上，融合了女性器官，最先建立了男女同体的成人数学模型 MIRD-5。人体数学模型基于数学公式，用椭球、圆柱等一些二次曲面及其切割或组合表示人体内部器官和外形。此后人体数学模型向着不同人种、年龄、性别等多种方向发展，

建立了一系列模型。

人体体素模型：20 世纪 80 年代，美国 Vanderbilt 大学率先开展了人体体素模型的建模，基于 X 光片建立了一个成年女性模型。人体数学模型由于建模方法的限制，必须对人体组织和器官的外形进行一定简化，所以模型结构与人体真实结构相差较大。断层成像技术的出现以及计算机图形学的发展，使人体内部结构可以被成像并以数字形式存储和显示，解决了人体体素模型发展的关键技术问题。人体体素模型基于活人的 CT、MRI 图像或死者的彩色解剖断层照片建立，每张断层图片上的像素和图片之间的厚度形成的长方体称为体素。人体体素模型由几百万至上亿个有序堆列的小体素组成，根据断层图片信息，指定每个体素所属的器官及其材料、密度等物理属性，从而可以精细的描述人体解剖结构。

2007 年，ICRP 正式决定在德国 Zankl 等人开发的体素模型基础上建立 ICRP 成年参考人体素模型，并将开发不同年龄儿童和孕妇及胎儿的参考体素模型。2009 年，ICRP 110 号报告正式发布了 ICRP 成年

参考人体素模型，取代 ICRP 23 号报告的 MIRD 数学模型进行剂量转换系数的计算。这代表着体素模型在辐射防护领域得到了正式认可。目前，全世界用于电离和非电离辐射研究的人体体素模型数目超过了 70 个。

人体面元模型：2001 年，北卡罗来纳大学 Segars 最早发表了基于 NURBS 的人体面元模型建模方法，建立了 4D 心脏-躯干模型 NCAT，对心脏跳动和呼吸过程中胸腔的运动进行了动态建模。人体体素模型可以精细描述人体解剖结构，但不容易进行变形人体面元模型采用边界表示法建模，这种方法通过描述物体的边界来表示物体，通过记录构成物体边界的顶点、边和面的位置、曲线曲面方程及其相互连接关系，将三维物体描述为由一组曲面所围成的封闭空间，易于调整组织和器官的大小以及改变人体模型的姿态。

在我国，体模技术的研究工作略晚于国际同行。清华大学工程物理系辐射防护与环境保护研究室在人体计算模型的建模方面开展了一系列工作。2004 年，本研究室与航天医学研究所合作，建立了基于 MRI

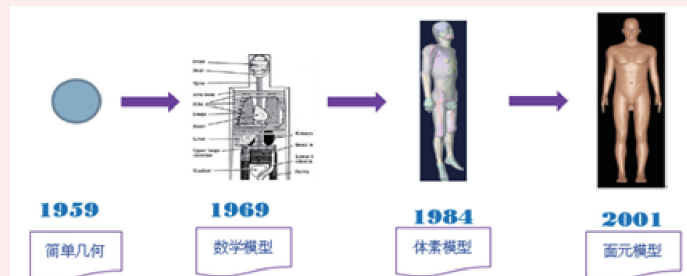
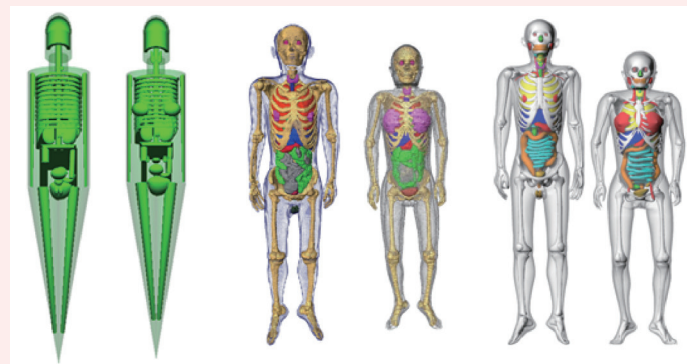


图 1 人体计算模型发展历程



(a) 中国参考人 数学模型 (b) 中国参考 人体素模型 (c) 中国参考 人面元模型

图 2 不同类型的中国参考人模型图

### 作者介绍



李春艳

清华大学安全技术检测研究院，毕业于清华大学工程物理系。主要从事辐射防护、辐射剂量学、辐射生物效应等领域的研究，组织开发了纳剂量蒙特卡罗程序。参与国家重大科学仪器设备开发专项和国家自然科学基金课题等多个项目。发表十多篇 SCI、EI、核心期刊论文。

图像的体素体模 CVP (Chinese Voxel Phantom)，成功应用于我国航天员“神舟”任务的剂量评价。2005 年，与中国辐射防护研究院合作，采用中国虚拟人彩色切片照片数据集，建立了中国成年男性体素体模 CNMAN (ChiNese MAN)。2010 年，本研究室完成了辐射防护用中国成年男性参考人体素体模 CRAM (Chinese Reference Adult Male voxel model) 和成年女性参考人体素体模 CRAF (Chinese Reference Adult Female voxel model) 的建立，模型包含了淋巴结、口腔粘膜等小器官在内的 79 种组织器官及部位，满足 ICRP 103 号报告的技术要求。在此模型基础上，又发展了中国成年男性、女性参考人面元模型以及不同身高、体重的成人人体素体模库。目前，

下转第 2 版

消息

医学参考报社网站已开通，以放射医学与防护频道为主的各频道，现正免费注册网站会员，并可网上阅读报纸以及参加继续医学教育等学术活动。

网址：www.yxckb.com

终校	排版设计	年 月 日	经营监管部	年 月 日
	编辑出版	年 月 日	总编室	年 月 日

**◀ 上接第 1 版**

正在利用儿童的 CT 图片, 建立不同年龄的儿童体素模型。图 2 为本研究室建立的不同类型的中国参考人模型图。

**2. 多尺度中国参考人体素体模**

采用人体体素模型结合蒙特卡罗方法, 可以给出人体内能量沉积的三维精细分布, 计算精度远远超过过去的方法, 因而已成为辐射剂量学领域不争的发展趋势。而目前的辐射防护量值体系中, 当量剂量 H、有效剂量 E 两种“防护量”的定义都基于组织器官的平均剂量。事实上, 辐射粒子在人体内沉积能量的分布显然不是均匀的。宏观方面, 辐射粒子与人体组织发生反应的几率及次级带电粒子的产生情况, 强烈依赖于所作用组织的元素组成情况, 而人体内部组织器官的结构和材料组成是十分复杂的, 所以, 辐射粒子在人体不同组织中沉积的能量是不同的。微观方面, 由于组织器官仍然存在细微的组织结构, 即使宏观上呈均匀分布的能量沉积, 在微观上仍会是非均匀的。特别是对  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子这类弱贯穿能力射线, 由此形成的局部高剂量会非常显著。微观上剂量分布非常不均匀, 据文献报道, 在某些内照射情形下, 吸入氡子体可以导致支气管靶细胞剂量达到发生确定性效应的程度, 而此时呼吸道及肺部的平均剂量却并不大。因此, 精细的个人剂量重建已成为未来辐射剂量学发展中的关键因素。

本研究室提出了构建多尺度剂量学的设想, 通过多尺度精细化的人体体模和精细化的蒙特卡罗方法, 从 mm、 $\mu$ m、nm 三个空间尺度分别构建出能量沉积量和生物损伤量, 并构建出对应于不同空间尺度的剂量学量值体系, 最终实现宏观量与微观量、物理量与生物量的统一。

如图 3 所示, 建立多尺度的人体体模是构建多尺度剂量学的第一步。在这方面, 本研究室

已有了很好的研究基础。我们已经建立了 mm 尺度的中国参考人体素体模 CRAM 和 CRAF, 还要建立建立精细化的  $\mu$ m 级和 nm 级器官组织结构。精细化的目的不是要无限精细地描述人体结构, 而是要以人体辐射健康效应为导向。按照 ICRP 103 号报告的结论, 辐射确认可诱发的癌症有 12 种: 白血病、甲状腺癌、乳腺癌、肺癌、骨肉瘤、消化器官恶性肿瘤、肾及膀胱癌。因此, 需要精细化处理的组织器官应该包括: 骨骼(包括骨内膜、红骨髓)、乳腺、甲状腺、呼吸道、消化道、肾和膀胱。所有辐射致癌的靶细胞都在十几到几十  $\mu$ m, 辐射作用的最关键的靶分子 DNA 尺寸在 2 nm 左右。人体体模精细化的基本思路是分别用 mm、 $\mu$ m、nm 三种不同尺度的体素来描述不同的人体组织器官, 辐射敏感器官要有  $\mu$ m 级和 nm 级的空间结构。

**$\mu$ m 级呼吸道精细模型**

肺癌是发病率和死亡率增长最快, 对生命威胁最大的恶

性肿瘤之一。美国估计每年约有 1 万例肺癌是由室内氡引起的。氡、钍子体主要是  $\alpha$ 、 $\beta$  衰变, 穿透能力弱, 能量基本就地沉积, 剂量分布和氡子体在呼吸道内的分布有很大关系。

中国参考人体素体模的呼吸道模型已经建立了胸腔外区的两个结构(ET1 和 ET2), 但胸区内只有主气管和前两级支气管。流行病学调查数据表明, 肺癌最大比例起源于支气管。所以完善下呼吸道模型非常重要。ICRP 66 号报告采用了 16 级支气管模型, 并给出了每级管道的直径、长度和分叉角度。本研究室根据 ICRP 提供的数据建立了一个 16 级的气管树模型, 如图 4 所示。呼吸道辐射敏感细胞是呼吸道上皮细胞, 位于内表面下几微米至几十微米处。根据靶细胞的位置和几何信息, 本研究室进行蒙特卡罗计算时对呼吸道的靶层进行了虚拟分割。应用和宏观体模相结合的多尺度人体体模, 本研究室计算了人体吸入环境氡后呼

吸道的内照射剂量, 包括吸收分数和三维剂量分布, 为评价分析氡致肺癌的影响提供了更精确的剂量值。

**$\mu$ m 级乳房精细模型**

在 ICRP 2007 号报告中, 乳腺组织的危险度权重因子由 1990 年的推荐值 0.05 提升为 0.12, 因此, 对乳腺剂量的准确评估很重要。乳腺剂量不仅受到平均乳腺含量的影响, 也受到乳房内腺体分布情况的影响。然而目前参考人体素体模 CRAF 受到 CT、MRI 图像或彩色解剖断层图片的分辨率限制, 无法描述乳房内的精细结构。本研究室根据乳房的精细解剖结构, 结合中国女性乳房外形和组织等参数的调查分析结果, 按照乳房内各组织的形态先建立数学模型, 然后采用体素化方法, 转化为体素模型, 如图 5 所示。乳房精细模型包含了皮肤、脂肪、输乳管、小叶、Cooper 韧带等精细结构。使用该模型, 本研究室模拟计算了不同 X 射线管电压、不同压迫厚度、不同腺体百分含量的平均腺体剂量转换系数, 以及剂量三维分布图。同时使用和宏观体模相结合的多尺度人体体模, 计算了光子和中子外照射剂量转换系数, 为更准确评估乳腺受照剂量提供了数据参考。

**$\mu$ m 级骨松质模型**

中国参考人体素体模中, 骨骼分为 19 个部分, 区分了密质骨和骨松质。辐射防护中关心骨松质的两个结构: 骨内膜和红骨髓, 分别是骨癌和白血病的靶器官。骨内膜在骨小梁表面, 红骨髓在骨小梁形成的不规则腔里, 和黄骨髓以一定比例混合在一起, 它们的几何尺度都是微米量级。而目前基于 CT、MRI 图片以及彩色切

层照片建立的体模, 分辨率一般在 mm 量级。因此无法对骨骼内部的复杂结构进行精细描述, 只能用均匀模型来代替。

本研究室基于一男一女两套完整人体骨骼, 分别从全身各处获取了 32 块骨松质样品进行 micro-CT 扫描, 通过图像分割划分了骨小梁和骨髓腔, 建立体素分辨率达  $19 \mu\text{m} \times 19 \mu\text{m} \times 19 \mu\text{m}$  的骨松质微观模型。根据 Bolch 等人对髓腔内黄骨髓的尺寸和分布数据研究显示, 黄骨髓平均直径约为  $57 \mu\text{m}$ 。因此在骨髓腔内随机抽取  $3 \times 3 \times 3$  个体素分割为黄骨髓, 骨髓腔内其余骨体素分割为红骨髓。骨松质微观模型被融入到全身体素体模中进行蒙特卡罗模拟计算。图 6 是男性胸骨的骨松质模型。使用该模型, 本研究室计算了中国成年男性骨内放射源对红骨髓和骨内膜的电子和  $\alpha$  粒子吸收分数。同时使用和宏观体模结合的多尺度人体体模, 研究了  $^{224}\text{Ra}$  静脉注射后骨内红骨髓和骨内膜的剂量, 改进了骨内膜的判定方法, 为更准确评估亲骨性元素对红骨髓和骨内膜的剂量提供了技术参考。

**nm 级 DNA、染色体模型**

细胞核中 DNA 是辐射生物效应的主要靶物质, DNA 的辐射损伤是引起一切辐射生物效应最基本、最重要的原初损伤。所以有必要建立染色质 DNA 的模型, 该模型的精细程度会对蒙特卡罗模拟的准确性产生影响。本研究室已经建立了从 DNA 双螺旋链、核小体、染色质纤维到染色质一系列 DNA 高阶结构的原子模型, 最终生成了一个处于分裂间期的人类淋巴细胞的球型细胞核模型, 如图 7 所示。模型直径为  $11 \mu\text{m}$ , 包含人体细胞的 46 条染色体和 2 个核仁, 总基因量约为 6.2 Gbp。使用该模型, 本研究室计算了不同能量光电子的 DNA 损伤产额; X 射线放疗中纳米金辐射增强因子; 俄歇电子发射体  $^{125}\text{I}$  和放射性核素氟分布于细

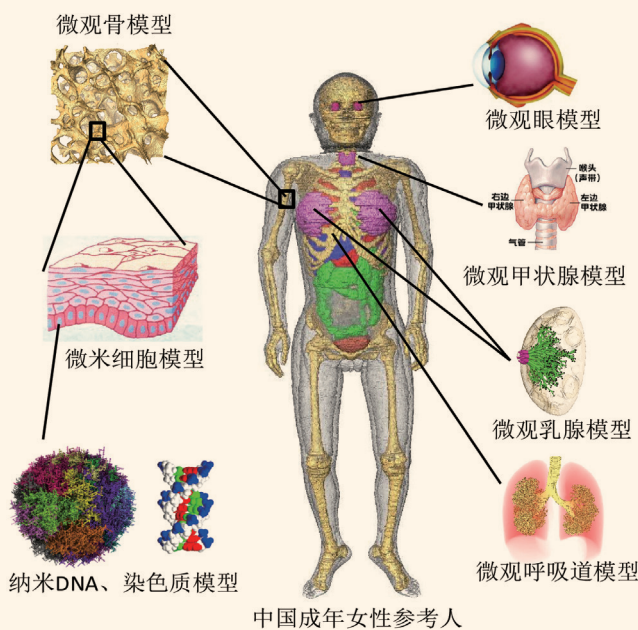


图 3 多尺度人体体模构建示意图

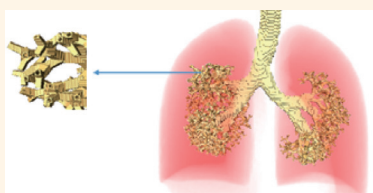


图 4 呼吸道模型示意图

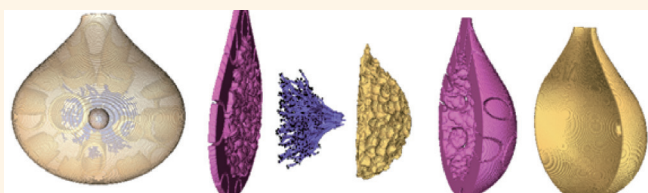


图 5 乳房精细模型外形及内部精细结构图

下转第 8 版 ▶

医学参考报		放射医学与防护频道							
理事长兼总编辑: 巴德年 副理事长: 曹雪涛等 理事会秘书长: 周赞	社长: 魏海明 副社长: 吕春雷 副社长: 周赞	名誉主编: 吴祖泽 潘自强 主编: 马力文 副主编: 姜恩海 罗庆良 邹跃 <b>刘长安</b> 常务编委: 陈英 郭亦超 江其生 金顺子 刘芬菊 吕慧敏 李君利 刘强 李蓉 刘英 陆毅 刘玉龙 吕玉民 冉新洋 尚兵 问清华 万玲 朱国英 张淑兰 编委: 崔凤梅 陈红红 陈肖华 崔勇 高林峰 何玲 鞠永健 刘福东 梁莉 刘丽宏 凌光华 马庆录 任福利 吴锦海 邬家龙 赵丽娅 王墨培 王善强 肖德涛 谢萍 邢志伟 姚波 余长林 杨文峰	杨业鹏 尹在哲 赵超英 张继勉 张玉松 张照辉 专家委员会主任委员: 尉可道 专家委员会副主任委员: 贾廷珍 委员: 白光 龚守良 龚治芬 李开宝 施仲齐 董建 王桂林 王洪复 王继先 王文学 周湘艳 编辑部主任: 张照辉 编辑部副主任: 郭亦超 陆毅 编辑: 王墨培 肖宇 曹宝山 岳瑶 学术发展部主任: 梁莉 学术发展部副主任: 刘丽宏 刘强						
社址: 北京西城区红莲南路30号4层B0403 邮编: 100055 总机: 010-63265066									

终校	排版设计	年 月 日	经营监管部	年 月 日
	编辑出版	年 月 日	总编室	年 月 日

## 展望未来：医学辐射防护的挑战

【据《Radiation Protection Dosimetry》2015年4月报道】题：展望未来：医学辐射防护的挑战（作者 M. M. Rehani 等）

随着 X 射线应用的增多，潜在的长期致癌效应使得医学方面的辐射防护也日益变得重要。2014 年 5 月 30 日至 6 月 2 日在瓦尔纳召开的国际医学辐射防护会议讨论了医学辐射防护领域中的挑战。来自美国哈佛医学院和马萨诸塞州总医院的 M. M. Rehani 等列出了未来 10 年辐射防护在医学领域的挑战。

1. 计算机断层扫描 (CT) 的剂量在接下来几年将可能成为 sub-mSv；正电子发射断层扫描 (PET)，单光子发射计算机断层扫描 (SPECT) 以及部分放射医学检查将由于其高剂量受到重视，即使他们的使用频率不是很高。
2. 多次 CT 扫描受到的放射剂量的辐射效应以及辐射效应是否累积需要得到明确。
3. 目前的剂量单位中，单位 mSv 可同时表示有效剂量和当量剂量，单位 mGy 可同时表示吸收剂量、比释动能和授予能。所以有必要建立一个新的剂量单位体系，单位和其代表的剂量量可以一一对应，就像单位摄氏度对应温度这个量，单位千米对应长度这个量。

4. 加强对成像部门之外的地方（例如手术室）使用成像设备的医生的教育和培训。目前世界上许多国家的这类医生都缺乏辐射防护方面的培训。

5. 建立辐射剂量的生物标记物。
6. 将参考体模的剂量转换为患者个人剂量；目前认为病人所受的剂量可以用参考体模所受的剂量代表，但是需要注意的是参考体模和特定病人之间存在差异，有必要明确病人所受到的剂量，这一剂量应该代表特定的病人。
7. 在操作控制台上弹出警告，该警告可以提醒放射物理师在检查过程开始之前审查扫描设置，并当剂量高到足以引起组织反应时发出警报。
8. 排除使用电离辐射的放射性检查中的不当转诊。
9. 建立可以自动最小化并优化照射剂量的成像设备以达到临床目标。
10. 避免病人产生辐射所致皮肤损伤，避免职业人员产生放射性白内障。
11. 加强病人对放射诊断和治疗的安全和疗效的信心。

（清华大学 朱红玉 报道）

## 放疗二次癌风险评估中使用的多种癌症风险模型的评价

【据《Physics in Medicine & Biology》2014年8月报道】题：放疗二次癌风险评估中使用的多种癌症风险模型的评价（作者 CHUV, A Joosten 等）

近年来，放疗技术发展迅速，尤其是三维调强适形放疗技术 (IMRT) 的发展，有效降低了对肿瘤周围组织器官的剂量，但同时也给更广范围的器官带来了低剂量。因此，很多研究者开始研究 IMRT 带来的二次癌风险，并与过去的二维放疗 (2DRT)；四个射野的二维放疗 (2DRT<sub>4F</sub>)，三维适形放疗 (3DCRT) 作比较。然而不同研究的结果差别很大，该文作者猜想这可能与研究使用的癌症风险模型不同有关。

瑞士洛桑大学及附属医院的 CHUV A Joosten 等设计了实验来验证这一猜想。采用该文作者早先发表的一篇文章中计算的乳腺癌患者，分别在 2DRT, 2DRT<sub>4F</sub>, 3DCRT, IMRT 下的全身剂量分布结果，利用不同的癌症风险模型计算了全身、肺、乳房，以及其他外围器官（胃等）的二次癌风险。癌症风险模型有线性模型，包括 ICRP 模型和 BEIR 模型，以及 8 种非线性模型。结果显示，不同模型得到的二次癌风险差别较大，对于不同技术之间的癌症风险比，有些模型该值小于 1，有些模型则大于 1。因而该文得出结论，不同癌症风险模型得到的放疗技术二次癌风险差别较大，应谨慎对待仅用单个癌症风险模型计算的二次癌风险的结果。

另外结合流行病学调查，该文作者对这些癌症风险模型在不同情形下的计算结果也做了一些评价。对于器官特异性的风险评价，BEIR 模型因为考虑到性别及年龄，因而要优于 ICRP 模型。而对于高剂量的器官，上述线性模型采取外推的方法计算，对风险往往存在高估。原因在于高剂量情形下，细胞更倾向于凋亡，而非修复。这时非线性的风险模型更适用。这一点在该文中评估肺与对侧乳房的癌症风险中有所体现，非线性风险模型与流行病学调查符合性更好。最近，高剂量情形下剂量响应函数的数据也在逐步增多，这对发展非线性风险模型来说是一个好消息。

（清华大学 果申申 报道）

## 蒙特卡罗模拟基准实验吸收剂量的不确定性研究

【据《Physics in Medicine & Biology》2015年9月报道】题：蒙特卡罗模拟基准实验吸收剂量的不确定性研究（作者 F Renner 等）

由于蒙特卡罗程序经常应用在放射治疗剂量问题的研究中，例如 EGSnrc 程序，所以德国国家计量院的 F Renner 等人认为，有必要核实这些通用蒙特卡罗程序的准确性。目前已经公布了一些基准实验，这些基准实验通常用于验证吸收剂量计算值。然而，仍然缺少绝对基准实验，也就是不用进行归一化的实验。因此，德国国家计量院的 F Renner 等学者进行了一个基准实验，用于放射治疗中辐射输运计算剂量的绝对验证。用高能韧致辐射照射内部装有指型电离室的物理体模，测量在敏感体积内的每个入射电子所致的平均吸收剂量。加速器和实验装置的特征经过精确定义，实验结果和 EGSnrc 模拟结果进行了比较。同时也进行了蒙特卡罗模拟的不确定性分析，包括模拟几何、辐射源、蒙特卡罗程序中输运参数和反应截面的不确定性研究。

研究表明，保守估计蒙特卡罗模拟的吸收剂量的总不确定度为 0.78%。不确定度贡献最大的是反应截面，所以本文集中研究了光子截面和电子碰撞阻止本领的不确定度。对于如何正确评估光子截面（特别是康普顿散射截面）和电子在碳中的阻止本领，还很有争议。后者需要碳原子更精确的平均电离能。使用保守估计，截面不确定性已经略大于基准实验的不确定性。所以，蒙特卡罗模拟无法达到经过仔细评估的吸收剂量实验值的准确度。另一方面，正如文中所述，如果使用已有文献中提出的减少截面不确定性的方法，蒙特卡罗模拟计算的吸收剂量的总不确定度小于实验不确定度。无论使用哪种截面，蒙特卡罗模拟的吸收剂量的不确定度都小于 1%，并且和实验值吻合。EGSnrc 程序模拟计算特定放疗装置的剂量通过了绝对实验的验证。可以使用本文的方法验证其它的蒙特卡罗程序。

（清华大学 代明亮 刘欢 报道）

## 乳房精细建模及其在乳腺 X 射线摄影中的应用

本研究室（清华大学工程物理系辐射防护与环境保护室）根据乳房的精细解剖结构，结合中国女性乳房外形和组织等参数的调查分析结果，按照乳房内各组织的形态，建立了精细乳房数学模型，并采用体素化方法，将数学模型转化为体素模型。考虑到在乳腺 X 射线摄影中采用压迫乳房的方法进行成像，在精细乳房体素模型的基础上，通过体素变形建立压迫乳房模型。采用 Geant4 对乳腺 X 射线摄影进行蒙特卡罗模拟，计算了一系列基于乳房精细模型的，可用于乳腺 X 射线

摄影中平均腺体剂量评估的转换系数。

精细乳房数学模型先建立乳房外形。乳房外形采用下部为椭球面、上部为双曲面的拼接方式建模。乳房结构区域划

分为皮肤区、脂肪区和纤维腺体区。在已建好的乳房外形基础上，划分一定厚度作为皮肤层。脂肪区包括皮下脂肪和乳房后侧脂肪。脂肪区包围的乳房中心区域是纤维腺体区。

在脂肪区和纤维腺体区建立 Cooper 韧带、腺体、脂肪和输乳管系统等细致结构。将建立的精细乳房数学模型体素化为体素模型，体素尺寸选为 0.2 mm。精细乳房体素模型的内部

结构如图 1 所示，从左到右分别为乳房后侧脂肪、输乳管和小叶、腺体、皮下脂肪和皮肤的建模三维效果图。

考虑到在乳腺 X 射线摄影中采用压迫乳房的方法进行成像，在精细乳房体素模型的基础上，通过体素变形，建立头尾位 (CC 位) 压迫乳房模型。根据乳房内各组织的声速和密度，推导他们力学参数的关系，从而计算压迫后每个体素的形变量，按比例进行体素变形。CC 位的乳房压迫模型如图 2 所示。

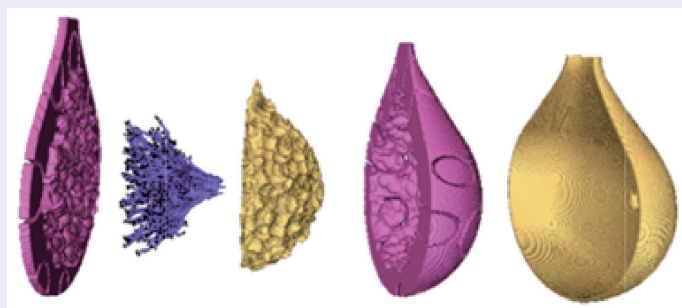


图 1 精细乳房体素模型内部结构图

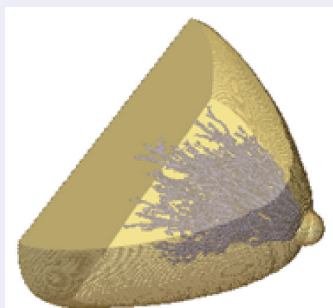


图 2 CC 位的乳房压迫模型

下转第 4 版 ▶



## X 射线照射下细胞内纳米金粒子辐射增敏效应模拟研究

【据《Physics in Medicine & Biology》2015 年 7 月报道】题：X 射线照射下细胞内纳米金粒子辐射增敏效应模拟研究（作者谢文章等）

辐射生物效应是肿瘤放射治疗的基本原理。在放疗当中最为关注的问题是，如何做到在提高肿瘤照射剂量的同时、降低对正常组织的伤害。为了解决这一问题，提出并发展了几种不同的方向方法。其中将纳米金粒子（Gold NanoParticle, GNP）用作放疗中的新型辐射增敏剂，是目前

的一个研究热点。

纳米金粒子可用作 X 射线放疗辐射增敏剂的基本原理在于光子反应截面（尤其是光电效应截面）与原子序数 Z 之间的正相关关系。金是一种高 Z 材料，当能量在几十到几百 keV 之间的 X 射线照射含有 GNP 的组织时，靶向定位到肿瘤细胞的 GNP，会大大增加肿瘤细胞区的照射剂量和辐射损伤，同时避免了对正常细胞的伤害。

该研究中，来自清华大学的谢文章等使用生物物理蒙特

卡罗模拟程序 PARTRAC 对 X 射线照射下 GNP 的细胞辐射增敏效应进行了模拟研究。该研究中的细胞模型由两个同心球体构成，直径 30  $\mu\text{m}$  的球体代表细胞，中心直径 10  $\mu\text{m}$  的球体代表细胞核，细胞核中含有染色质分布结构的原子信息。首先对不同尺寸的单个 GNP（直径 100 nm, 74 nm, 50 nm, 14 nm 和 2 nm）在不同能量 X 射线（200 kVp, 150 kVp, 100 kVp, 80 kVp 和 60 kVp）照射下的辐射增敏效应进行了模拟。随后对细胞中不同分布（细胞

核表面、细胞质中某一球面、细胞表面和细胞质中随机分布）的多个 GNP 的辐射增敏效应做了研究。模拟结果分为两部分，一部分是“物理”增敏效应，指能量沉积、剂量、相互作用一类量；第二部分是“生物”增敏效应，主要指的是 DNA 单链断裂（SSB）和双链断裂（DSB）。为了对辐射增敏效应做定量的评价，同时模拟了无 GNP 情况下细胞中的能量沉积和链断裂值，并将有 GNP 和无 GNP 两种情况下物理量的比值定义为增强因子。

研究表明，GNP 可以引起能量沉积的增强，产生物理增敏效应，但只局限在 GNP 周围有限的范围内，一般不超过 5  $\mu\text{m}$ ，增强因子的峰值可以达到 10 以上；GNP 也能够引起 DNA 链断裂的增加，产生生物增敏效应，增强因子通常在 1.0 ~ 1.5 之间，小于对应能量沉积的增强因子；相比之下，粒径较大的 GNP、60 kVp 的 X 射线能谱及在细胞核表面的 GNP 分布形式这三种条件下的辐射增敏效应更为明显。

（清华大学 谢文章 报道）

## 水与 DNA 比较：放射生物学和放射治疗中质子径迹结构模拟的新见解

【据《Physics in Medicine and Biology》2015 年 9 月报道】题：水与 DNA 比较：放射生物学和放射治疗中质子径迹结构模拟的新见解（作者 C.Champion 等）

随着质子治疗的发展，研究质子与生命物质的相互作用，对于 DNA 损伤分析、质子治疗方案优化非常重要。在细胞水平，一般使用蒙特卡罗方法模拟质子与人体相互作用的过程。考虑到细胞主要成分是水，当前主要使用水作为组织等效材料进行模拟计算，研究质子造成的辐射损伤及相关剂量学问题。但是质子在物质中的径迹及能量沉积类型都与被辐照物质的分子性质有关，因此使用水替代真实人体组织所产生的误差引起人们的关注。

法国波尔多大学的 Champion 等人提出一种自洽的量子力学模型来描述质子在水和 DNA 组分中的电离和电子俘获过程，来研究蒙特卡罗模拟时水替代生命物质的准确性，同时研究质子在真实生物介质中的能量转移。基于该模型，作者计算了质子与水和 DNA 组分发生电离和电子俘获的截面，以及反应的平均能量转移和能量沉积。

截面计算结果显示在同一密度下质子在水中和 DNA 组分中的自由程近似，因而使用生命物质建模与水建模对质子运输的模拟不会产生影响。但由于使用微分截面数据计算所得质子在水和 DNA 组分中的能量转移有很大差异，因此这一结论受空间范围限制。当用水代替实际 DNA 分子后，单次电离过程的能量沉积在整个质子能量区间（10keV-100MeV）内近似相等，但会导致质子转移给次级电子的动能被低估。

关注纳米尺度辐射作用机理的微观剂量学对于 DNA 损伤的研究目前大都使用液态水替代 DNA 计算粒子径迹，再加入 DNA 分子结构进行损伤分析。作者计算了在代表 DNA 片段的圆柱体内充满液态水和 DNA 后质子发生的电离作用数和能量沉积，结果显示在蒙特卡罗模拟时如果使用水作为 DNA 主要组分将会导致能量转移的低估，DNA 单链断裂 DSB 与 SSB 的能量阈值等参数也需要进行修正。此外，对能量转移的低估在低能区（质子能量小于 100keV）更为显著，该能区对应于放疗时质子径迹的末端即感兴趣区，因而这将导致肿瘤位置能量沉积的低估，以及质子径迹长度的高估。以上结论可对质子辐射损伤的预测和放疗方案的制定提供参考。

（清华大学 陈宜正 报道）

### ◀ 上接第 3 版

采用拼接的方法将建立的压迫乳房模型与中国成年女性参考人体素模型（CRAF）相结合，并采用 Geant4 对乳腺 X 射线摄影进行蒙特卡罗模拟。计算了在 25-35kV 管电压下，采用钼/钼、钼/铈、铈/铈、铈/铝、钨/铈等不同靶/滤过组合，针对不同乳房压迫厚度和不同腺体百分含量乳房，用于评估乳腺 X 射线摄影中平均腺体剂量的转换系数。

计算的腺体剂量转换系数比 Dance et al（2009）的计算结果偏小，差异在 0 ~ 30%。这主要是因为与 Dance 采用的简单乳房模型相比，精细乳房体素模型皮下脂肪层厚度更大，纤维腺体内腺体组织在中心区域更加集中，因此沉积在腺体组织的能量变少了，相应的转换系数也就偏小了。这说明皮下脂肪层的厚度和腺体组织的分布对平均腺体剂量的影响是不可忽略的，需要在精细乳房体素模型的基础上，进一步进行研究。除平均腺体剂量评估外，精细乳房体素模型还可用于中国女性乳腺 X 射线摄影防护最优化的研究。

（清华大学 王文静 报道）

## 电子所致 DNA 链断裂的纳剂量蒙特卡罗程序 NASIC 模拟

【据《Radiation Protection Dosimetry》2015 年 4 月报道】题：电子所致 DNA 链断裂的纳剂量蒙特卡罗程序 NASIC 模拟（作者李君利等）

DNA 是遗传信息的主要载体，细胞核中 DNA 的辐射损伤是引起一切辐射生物效应的最基本、最重要的原初损伤。蒙特卡罗模拟方法为研究 DNA 辐射损伤提供了强有力的工具。

清华大学工程物理系辐射防护及环境保护实验室的李君利等学者开发了一套纳剂量蒙特卡罗模拟程序 NASIC（Nanodosimetry Monte Carlo simulation code），可以用于模拟不同能量电子（包括低能电子）照射 DNA 时所导致的辐射损伤，包括单链断裂、双链断裂和碱基损伤。NASIC 程序包含物理模块、前化学模块、化学模块、几何模块和 DNA 损伤模块。物理模块通过模拟电子与生物介质的相互作用过程，给出电子每一步能量沉积的位置和能量信息。电子与生物介质中的水作用会生成大量的电离激发水分子。前化学模块主要模拟电离激发水分子的衰减，得到不同的辐解产物。在化学模块中，这些辐解产物不断扩散，同时辐解产物之间不断进行化学反应。在几何模块中，建立了两种 DNA 模型。一种是一直被广泛用于蒙特卡罗模拟的 DNA 简单圆柱模型；一种是精确到原子的 DNA、染色体模型。后者模拟了人体淋巴细胞间期的细胞核结构，包括 46 条染色体纤维和 2 个核仁。在 DNA 损伤模块中，判断物理模块中发生的能量沉积能否造成 DNA 链断裂的直接损伤以及化学模块中的化学反应能否造成 DNA 链断裂的间接损伤。

文章研究了不同的电子非弹性散射截面以及是否考虑振动激发反应对模型参数、模拟结果的影响。结果显示，不同的电子非弹性散射截面对直接作用造成的双链断裂（DSB）产额的影响可高达 70%，对总单链断裂（SSB）产额的影响小于 40%，对总 DSB 产额的影响非常小。另外，振动激发反应对于 DNA 损伤产额结果的影响非常小。在未来的研究中，更多的粒子类型将会加入 NASIC 物理模块中，同时基于 DNA 非同源末端连接修复原理的 DNA 修复模块目前正在开发中。NASIC 有望在今后实现从粒子径迹到细胞损伤、修复、死亡的完整建模。

（清华大学 姜晨星 李春艳 报道）

## 氨磷汀和肽聚糖对 10Gy 照射小鼠的防护作用

【据《Radiation Research》2015年1月报道】题：辐射保护剂 WR-2721 和肽聚糖通过减轻肠道和骨髓损伤协同提高小鼠存活率（作者 Wei LIU 等）

放射治疗仍是治疗肿瘤最有效的方法之一，但是电离辐射造成的小肠和骨髓损伤仍是一大难题。放射肿瘤学的一个主要目标即为保护正常组织免受放射损伤，提升治疗效果。此外，核事故导致的辐射暴露也可引起放射性损伤。因此，寻找有效的抗放射药物，特别是在预防和治疗骨髓肠道损伤的有效药物显得很有必要。

WR-2721 是第一个进入临床应用的放射保护药物，它能在癌症放疗期间保护患者头部和颈部的唾液腺。但是 WR-2721 在对正常组织的放射防护效果的作用很一般，这限制了它在临床上的使用。

最近有研究表明小鼠接受致死剂量照射前使用 TLR5 受体激动剂 CBLB502 能治疗肠型和骨髓性急性放射综合征，它主要是通过激活 NF- $\kappa$ B 信号通路而实现。虽然在照射后注射 CBLB502 也能提高小鼠的存活率，但只局限于在低剂量照射水平。Ciorba 等发现，照射前注射鼠李糖乳杆菌，可通过激活 TLR2 减轻放射导致的上皮损伤，提高肠道隐窝的存活率，但照射后注射却没有效果。

小肠的稳态依赖于肠道干细胞适当的活性。肠道上皮细胞可连续的自我更新，一旦遭到损伤能快速重建。富含亮氨酸重复序列的蛋白偶联受体 5

(Lgr5) 是有丝分裂活性肠道干细胞 (ISC) 的细胞标志。在放射诱导损伤期间，去除 Lgr5+ 细胞可导致肠道隐窝的消失以及肠绒毛结构的退化。因此，Lgr5+ 细胞对照射损伤后的小肠重建至关重要。

中国苏州大学刘伟等评估了单独或联合使用 WR-2721、TLR2 激动剂肽聚糖 (PGN) 在小鼠接受全身 10Gy 照射后肠道和骨髓损伤中的治疗作用，该研究表明，联合使用 WR-2721 和 PGN 在对小鼠致死剂量放射损伤中有潜在的治疗作用。

小鼠接受 10Gy 全身电离辐射后，对照组、WR-2721 组、PGN 组分别在 4、6、9 天内全部死亡，而联合用药组 50% 的小鼠观察存活时间大于 30d 且该组小鼠的体重保持相对稳定 (图 1)。

在减轻骨髓损伤方面，WR-2721+PGN 组能刺激造血恢复，部分机制是通过保护 CD34+CD45+ 细胞实现的，且效果优于单用 WR-2721 或 PGN。HE 染色示 10Gy 照射

后 WR-2721+PGN 组骨髓内皮细胞可新生成微血管，并且在周围能轻易发现小而圆的造血细胞。集落生成实验也表明，10Gy 照射后 40 天 WR-2721+PGN 组集落生成的数量与未照射组相比，无统计学差异。

在减轻肠道损伤方面，WR-2721 和 PGN 能保护 Lgr5+ 细胞，相对于照射对照组和单

用药物组，WR-2721+PGN 组能维持小肠黏膜的正常厚度，最小的炎症反应，最大程度保护小肠的正常结构。此外，联合用药还能显著改善照射后小鼠的肠道吸收功能。

小鼠经 10Gy 全身照射后 1.25 天，对照组 NF- $\kappa$ B 的 P50 蛋白都位于胞质，相反地，PGN 和 WR-2721 都能使 P65 易位于核内，表明两种药物都

能激活 NF- $\kappa$ B 信号通路 (图 2)。然而通过分析细胞因子后发现，照射后小鼠会产生体液和细胞免疫反应紊乱，WR-2721 和 PGN 并不能完全改善这些紊乱。

小肠黏膜固有层单个核细胞上都有 TLR2 细胞的表达，为了保持共生和粘膜稳态，TLR2 在不同细胞间表现出细胞特异性的保护特征。在小肠上皮，TLR2 直接保护细胞间紧密连接，维持宿主免疫屏障的完整性。在树突状细胞中，TLR2 可促进抗原递呈，此外 TLR2 还可以调节 Treg 细胞以此影响获得性免疫反应。另有研究表明，WR-2721 的活性形式 WR-1065 可直接结合于转录因子 NF- $\kappa$ B 的 p50 亚基，激活 NF- $\kappa$ B 信号通路，增强细胞内锰超氧化物歧化酶 (MnSOD) 基因表达。WR-2721 和 PGN 可能是通过不同方式激活了 NF- $\kappa$ B 信号通路，这部分解释了对照射后小鼠肠道的保护作用，这也可能是联合使用后能显著提高小鼠存活率的原因。

WR-2721 和 PGN 合用后经 10Gy 全身照射的小鼠仍有半数的小鼠在 30 天内死亡，可能原因是造血障碍、肠道损伤的非完全性恢复、免疫应答紊乱。WR-2721 和 PGN 虽然可以通过激活 NF- $\kappa$ B 信号通路减轻照射诱导的损伤，但同时引起的免疫紊乱又能削弱其保护作用。如果再加用免疫调节剂可进一步延长小鼠存活率。

(军事医学科学院  
彭仁军报道)

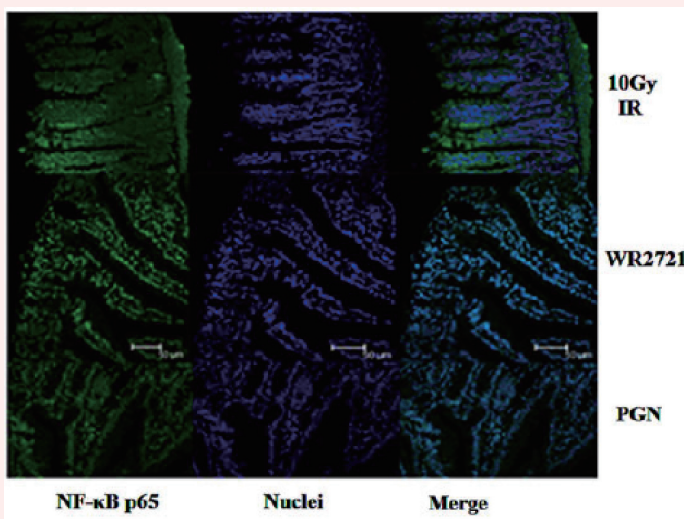


图 2 10Gy 全身照射后 1.25 天，NF- $\kappa$ B p65 亚基位于胞质内。WR-2721 和 PGN 治疗都能活化诸如肠道平滑肌细胞的 NF- $\kappa$ B 并诱导其进入核内

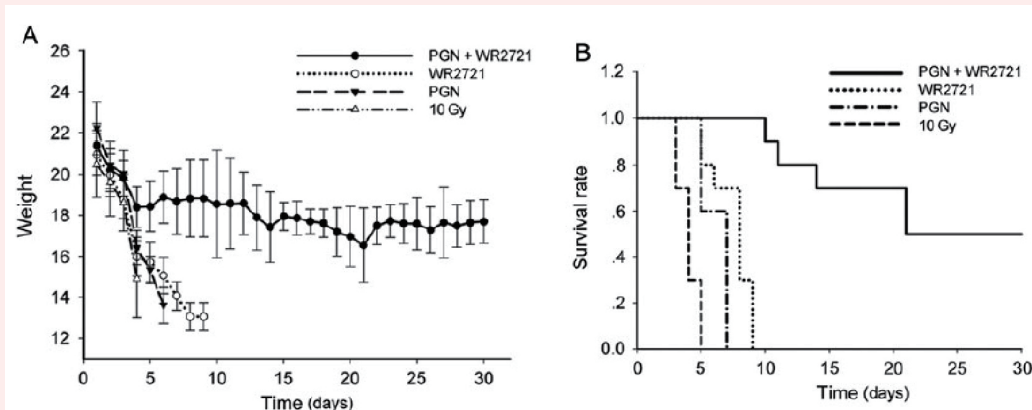


图 1 WR-2721 和 PGN 联合治疗可维持全身 10Gy 照射后小鼠体重 (A) 并提高小鼠存活率 (B)

### 表皮生长因子和骨髓移植对小鼠胃肠辐射损伤的影响

【据《Int J Radiat Biol》2015年6月报道】题：表皮生长因子和骨髓移植对小鼠胃肠辐射损伤的影响 (作者 Pejchal J 等)

捷克国防大学这队卫生学院 Pejchal 等教授观察了表皮生长因子 (EGF) 和骨髓移植 (BMT) 对小鼠胃肠辐射损伤的影响，他们用 13Gy  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线照射 C57Black/6 小鼠，照射剂量率为 0.59 ~ 0.57 Gy/min。实验分为正常对照、照射对照、EGF (照射后 24 h, 2mg/kg, 以后每 48 h 一次)、BMT (照射后 4 h 注射绿色荧光蛋白标记的骨髓细胞  $5 \times 10^6$  / 鼠) 和 EGF + BMT 共 5 组。观察动物活存数、血细胞计数、胃肠道和肝脏参数、绿色荧光蛋白 (GFP) 阳性细胞迁移率等指标。结果显示，BMT + EGF (照射后 1、3、5 d) 组动物活存数明显增加，但对外周血细胞数进行性减少无明显改善作用。骨髓移植、表皮生长因子及其组合可明显减轻照射后第一周胃肠道萎缩并能促进再生，而联合处理组效果最好。照射后 30 天观察到了全身炎症反应的迹象。作者认为，骨髓移植联合 EGF 对大剂量全身照射损伤的治疗是一个有希望的策略。

(军事医学科学院中星报道)

### 芝麻油能够保护 $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 射线照射小鼠造血及胃肠系统损伤

【据《Free Radic Res》2015年7月报道】题：芝麻油能够保护  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线引起的雄性小鼠造血系统及胃肠系统损伤 (作者 Khan S, Kumar A 等)

机体骨髓、肠道以及毛囊等快速增殖组织对照射后 DNA 损伤引起的细胞凋亡最为敏感。所以，在临床放射治疗过程中出现的造血及胃肠道损伤一直都是制约放疗发挥效应的瓶颈。然而，目前并无针对放射治疗所致胃肠道损伤的合适药物。能够保护  $\gamma$  射线所造成的造血及胃肠系统损伤的物质具有发展成为辐射防护剂的潜在价值。因此，基于这一目的，印度核医学与联合科学研究所 Khan 教授课题组对芝麻油改善  $\gamma$  射线引起小鼠造血、胃肠

系统损伤的辐射防护效应及可能的机制进行了详细研究。结果显示，照射前 30 分钟经腹腔给予芝麻油 100 或 50mg/kg 能明显提高 7.5Gy 照射 C57BL/6 雄性小鼠 30 天存活率，其中 100mg/kg 组小鼠存活率能够达到 100%。亚致死剂量 (5Gy) 全身照射后 4 天，小鼠骨髓内造血干/祖细胞急剧减少，导致照射后第四天 B 细胞、T 细胞亚群数量减半，同时，脾脏造血增加。而当给予芝麻油 100 或 50mg/kg 预处理后，照射小鼠以上症状得到明显改善。同时，能够降低辐射引起的骨髓有核细胞减少以及减少骨髓、脾脏细胞的凋亡。提前给予芝麻油后能够抑制照射后脂类过氧

下转第 6 版 ▶

## 间充质干细胞对放射性肺损伤的保护作用

【据《Antioxid Redox Signal》2015年7月报道】题: 间充质干细胞疗法对放疗损伤的肺组织有保护作用, 而且能减少癌细胞肺内扩散(作者 Klein D 等)

放疗是治疗肺部肿瘤行之有效的治疗手段, 然而局部肿瘤复发和肿瘤远处转移仍然会导致肿瘤患者死亡。机体自身的天然高辐射敏感性的组织或器官, 限制了使用放疗的治疗剂量。胸部照射能够造成患者肺部组织炎症和肺纤维化, 其副作用的致死率大约占 15%, 不仅如此, 胸部照射在杀伤肿瘤细胞的同时, 也会刺激残存肿瘤细胞在肺部的扩散。其发病机制有待研究, 也缺乏相应的治疗措施。近期, 德国杜伊斯堡-埃森大学细胞生

物学研究所 Klein 等发表文章表示间充质干细胞移植疗法, 可以促进放疗损伤的肺组织重建, 而且可以降低癌细胞肺转移的风险。

为了研究肿瘤转移和放疗之间的关系, 作者采用 C57 小鼠作为肿瘤移植模型, 通过预先进行 15 Gy 肺部照射, 21 d 后小鼠被尾静脉移植同系小鼠的黑色素瘤细胞, 再过 14 d 后取肺组织切片, 可见照射组小鼠肺部的肿瘤转移数要明显高于非照射组, 与此同时, 皮下注射肿瘤小鼠模型也可见明显的促进肺转移作用。在此模型的基础上, 作者加入了间充质干细胞治疗, 小鼠肺部经 15 Gy 照射后 24 h 或 14 d, 通过尾静脉移植  $0.5 \times 10^6$  带有 EGFP 标签的间充质干细胞, 之后在按照程序移植肿瘤

细胞, 收集小鼠肺组织病理切片, 结果显示间充质干细胞移植可以有效阻止肿瘤细胞的肺植入。

文章指出, 胸部照射后, 癌细胞肺转移高风险的原因在于辐射可导致普通肺血管内皮细胞的损害, 造成支气管上皮细胞的老化, 并且通过细胞衰老相关的分泌模式 (Senescence-associated Secretory Pattern, SASP) 上调促进炎症反应和肿瘤侵袭性的细胞因子, 比如内皮细胞基质金属蛋白 (Endothelial Matrix Metalloproteinase, Mmp2)、其催化剂 Mmp14, 其辅助因子组织基质金属蛋白酶抑制剂 (Tissue Inhibitor of Metalloproteinases 2, Timp2), 以及趋化因子配基 2 [chemokine (C-C motif) ligand 2] 和尿激酶

型纤溶酶原激活物 (Urokinase-type Plasminogen Activator, Plau/uPA)。其中 Ccl2 和 Plau/uPA 可能参与募集大量的 CD11b+CD11c- 骨髓单个核细胞进入肺组织, 而该类细胞聚集后, 虽然能增加放疗的肿瘤杀伤效果, 但是其用能通过旁分泌作用支持肿瘤细胞的存活。而间充质干细胞移植治疗后, 同样可以通过旁分泌途径下调炎症因子, 减少肺泡细胞的凋亡和肺泡的炎症反应。更为关键的是血管内皮来源的间充质干细胞移植, 有助于新的血管形成, 因此可以有效的保护和修复肺组织的血管, 减轻辐射所致的血管损伤, 保证了肺组织营养供应, 抑制肺纤维化和细胞凋亡。同时, 后续试验也证实了通过 Mmp2 抑制剂治疗该小鼠模型, 可以得到

与间充质干细胞治疗相类似的结果, 这表明 MSC 可能通过下调 Mmp2 起到保护血管的作用。

总而言之, 作者认为间充质干细胞能够减轻辐射所致的血管损伤, 缓解支气管上皮细胞老化, 并且有效抑制外周循环肿瘤细胞的远端植入。同时, 下调辐射所致内皮细胞表达的 Mmp2 以及 SASP 炎症因子 Ccl2、Plau/uPA 的表达, 减少肿瘤转移相关髓细胞的侵入也是间充质干细胞的治疗功效。在间充质干细胞治疗技术已经逐渐成熟的今天, 用间充质干细胞治疗来减少放疗后局部或者远处肿瘤的复发或转移, 是一个新的有可行性的保护性治疗方案。

(军事医学科学院  
中星报道)

## 血栓调节蛋白对 9Gy 照射小鼠的防护作用

【据《PLoS One》2015年4月报道】题: 血栓调节蛋白促成  $\gamma$ -生育三烯酚 (GT3) 介导的对受照射小鼠的保护和促进造血恢复 (作者 Pathak R 等)

全身注射重组血栓调节蛋白 (TM) 部分是通过加速造血恢复来发挥辐射防护作用。 $\gamma$ -生育三烯酚 (GT3) 是维生素 E 的一种, 具有抗氧化作用, 其辐射防护作用优势突出。通过比较几种维生素 E 的特点发现, GT3 优效的辐射防护作用不仅在于它能抗氧化, 还可能与它能够抑制羟甲基戊二酰辅酶 A 还原酶 (hydroxymethyl-glutaryl-coenzyme A reductase, HMGCR) 有关, 而 HMGCR 抑制剂的突出作用是上调 TM 表达。美国阿肯色州医科大学药学院 Pathak 教授推测, GT3 的辐射防护作用可能部分依赖于内皮 TM 的存在, 进而对其进行研究。体外实验结果表明, 5 Gy  $\gamma$  射线照射后 4h 内皮细胞 TM 表达水平仅有基础值的 40%; 而 GT3 则可以诱导内皮细胞内 TM 表达 (5  $\mu$ M GT3 作用 4h 后, TM mRNA 水平是基础值的 2 倍)。小鼠存活实验结果显示, GT3 对 TM 野生型小鼠 (TM+/+) 的辐射防护作用较低 TM 功能的小鼠 (TMPro/-) 更显著。照射前 24h 皮下注射 GT3 400mg/kg 可使 9 Gy 全身照射 TM+/+ 小鼠存活 85%, 而 TMPro/- 小鼠仅存活 50%。这表明 GT3 介导的辐射防护作用部分依赖于内皮 TM。此外, 尽管 GT3 诱导 TMPro/- 小鼠血清中 G-CSF 高表达 (P=0.0001), 但受照射 TMPro/- 小鼠的血象恢复并未加快; 相反, TM+/+ 小鼠造血恢复、尤其是白细胞的恢复更加明显 (P=0.003)。提示 TM 在 GT3 介导的辐射防护和促进造血恢复中发挥关键的作用, 而且这种作用不依赖于 G-CSF。这可能为提高现有的核/辐射应急医学处置能力提供新策略。

(军事医学科学院 邢爽 报道)

### ◀ 上接第 5 版

化反应, 抑制肠道细菌向脾脏、肝脏及肾脏等脏器迁移, 促进小肠隐窝再生。此外, 提前给予芝麻油能够减少辐射引起的 p53 和 Bax 凋亡蛋白的表达。在减少凋亡蛋白的同时, 抗凋亡蛋白 Bcl-x 和 PCNA 蛋白表达上调。作者还利用 ABTS 和 DPPH 分析评估其抗氧化剂容量, 发现芝麻油处理后能够缓和脾脏和肠道抗氧化剂总容量。

综上, 目前的研究表明, 照射前单次给予芝麻油能够有效保护  $\gamma$  射线照射对小鼠造血及胃肠系统的辐射损伤。

(军事医学科学院 白帆 报道)

## RTA408 可明显减轻小鼠骨髓型急性放射综合征

【据《Radiation Research》2015年3月报道】题: 三萜类化合物 RTA408 有力减轻小鼠骨髓型急性放射综合征 (作者 Goldman DC 等)

放疗以及核扩散或核材料装置 (如脏弹) 爆炸等意外照射对组织损伤的威胁广泛存在。具有高度增殖活性的造血系统对电离辐射极其敏感。较低剂量照射对造血细胞的损伤即可引起骨髓衰竭, 导致贫血、感染和出血。即使是非致死剂量的照射也可引起造血干细胞 (HSC) 显著损伤, 导致 HSC 数量耗竭、分化增加、自我更新活力受损。因此, 为了应对不可预料的射线照射, 治疗因素必须在照射后应用能够有效减轻射线诱导的损伤。然而, 迄今为止, 尚没有一个小分子药物被批准用于防护或治疗电离辐射所致的造血综合征。

三萜类化合物与目标蛋白上特异的半胱氨酸残基相结合而产生细胞保护和抗炎活性。以往研究表明, 三萜类化合物对致死性照射斑马鱼的胚胎有保护作用。最近报道, 三萜类化合物 CDDO-Me 照射后 24 h 给药可以提高致死性全身照射小鼠的存活率。RTA408 是一个正在开展肿瘤治疗临床研究的三萜类小分子化合物, 近期研究证明, RTA408 对小鼠皮肤和肠粘膜有辐射防护作用。基于此, 美国俄勒冈州健康与科学大学 Goldman 教授等研究了 RTA408 促进辐射损伤造血恢复的潜能, 以及它在照射后 24h 给药减轻辐射损伤的效果。

存活实验结果表明, 照射后 24 h 开始每天一次连续 3 天腹腔注射 RTA408 17.5 mg/kg 可以使 7.0, 7.5 和 8.0 Gy 全身照射小鼠的存活率分别提高到 100%, 60% 和 40% (对照组分别是 20%, 0 和 0)。血象检测结果显示, 7.5 Gy 全身照射后 11 周, RTA408 治疗小鼠的血细胞数恢复至正常水平。7.5 Gy 照射后 14 周, 取骨髓细胞进行造血细胞集落培养和造血干/祖细胞流式检测分析发现, RTA408 治疗小鼠的造血干细胞 (Lin-Sca1+c-kit+, LSK)、造血祖细胞 (Lin-Sca-c-kit+) 和功能高度富集的干细胞 (CD150+LSK) 的数量和比例均与正常小鼠相当, 形成的多系造血细胞集落数与正常对照小鼠也无显著差异。竞争移植实验证明, 7.5Gy 照射后 3.5 个月取 RTA408 治疗小鼠的骨髓细胞移植可以重建致死剂量照射小鼠的造血功能, 而且能改善射线照射引起的造血干细胞向长期髓系细胞的偏移。进一步二次移植实验证明, 7.5Gy 照射后经 RTA408 治疗的小鼠其 HSCs 的自我更新能力与正常对照小鼠无显著差别。这些数据证实, RTA408 照射后给药可以支持骨髓致死剂量照射小鼠的造血细胞再生, 功能恢复, 谱系平衡和长期的 HSCs 潜能。提示, RTA408 有望成为临床治疗辐射损伤的潜在候选药物。

(军事医学科学院 张蕊莹 邢爽 报道)



终校	排版设计	年 月 日	经营监管部	年 月 日
	编辑出版	年 月 日	总编室	年 月 日

## 加拿大在辐射和核应急中儿童管理的建议

【编者按】在辐射和核应急中儿童有更大的被放射性物质污染的机会。他们对辐射健康效应更敏感，并且在应急响应过程中比成年人更容易遭受心理的影响。这篇文章提出了在辐射或核事故中有效管理儿童的总结性的建议。这些建议倾向于更多的考虑现在的辐射或核事故响应协议以及当地的、州/省，或国家级的实现程序。

### 1. 背景资料

2011年3月11日，日本东北2011年3月11日，日本东北部因发生强烈地震引发海啸引发了日本福岛第一核电站的事故，1986年的诺尔切贝利（IAEA 2001）事故和1987年的格鲁吉亚放射事故（IAEA 1988），这3起辐射或核事故引起严重的环境和人员的污染。受影响国家以及世界各地的应急管理部门和公共卫生组织在管理受影响的人群方面获得了经验和教训。（IAEA 1998，WHO 2006，WHO 2013）。

受事故影响的某些人群，如儿童、孕妇和需要特殊照顾的老年人更容易受到辐射或应急处置中的一些影响。儿童被放射性物质污染机会更多并且对其更敏感。切尔诺贝利事故中，6000多孩子由于受到放射性碘同位素<sup>131</sup>I照射而发生了甲状腺癌，通过吸入污染的空气和食入污染的食品和牛奶。此外，他们比成年人更引人关注的心理影响（WHO 2006）。在格鲁吉亚事故中，对10多万人进行了<sup>137</sup>Cs的内外污染监测，其中约200人进行了治疗，许多都是孩子（IAEA 1998）。在福岛事故发生过程中和其后，虽然没有有效管理孩子的详细报告，但是福岛健康管理调查组织计划将在未来的30年对福岛县的所有孩子进行监测。

在加拿大，一个多合作者团队项目中最近提出关于“辐射或核应急中有效管理儿童的建议”。管理者与参与者包括应急管理组织、公共卫生机构、第一响应者/接收者，和学校/儿童看护中心。建议倾向因地制宜。

### 2. 建议

该建议介绍发生了各类不同事故导致的水和环境污染的核应急，目标人群是孩子的可

能在辐射或核应急期间或之后受到放射性和/或其他因素的影响。建议总结了4组干预措施：现场即刻保护措施，监测和去污染，医学管理和长期随访。

#### 2.1 现场即刻保护措施的

确认辐射或核事故紧急威胁后，应该立即采取直接的保护行动来减少儿童的辐射照射以及降低所有涉及者的心理影响，尤其是儿童和他们的家长。这些包括屏蔽，如果涉及到放射性碘则应该KI甲状腺阻断，以及应急通讯。加拿大卫生部出版了核应急期间干预加拿大导则（加拿大卫生部2003），推荐了核应急后的各自对策应用的干预水平。该导则是在针对敏感人群考虑了儿童的受照剂量的干预水平的基础上形成的。美国环境保护机构也出版了辐射事故保护行动指南和规划指导（美国EPA 2013）。然而，在辐射和核应急期间，对策不应延迟。在任何情况下，学校和儿童看护中心应该按照他们正常的计划并等待来自应急管理机构的指示并在实施特别措施时能第一时间响应。如果应急发生在校外时间，父母/监护人应该遵循第一响应者和应急管理机构的指导并且采取建议的立即行动来保护孩子免受放射性物质照射或污染。

在辐射或核事故的第一阶段，屏蔽被认为是一种游戏的措施。多数情况指的是躲避在一个地方而不是设计好的躲避中心。在辐射或核事故应急期间，放射性烟羽可能会通过学校或儿童看护中心。在这种情况下，要求所有的孩子去建筑物里（窗户和门关好，通风关闭）会有助于减少他们受到直接的外照射和吸入的内污染。在学校或儿童看护中心，实施锁定程序直接适用于辐射或核事故期间的屏蔽。如果学校或儿童看护中心没有锁定，儿童应该直接进入建筑物内部，最好是有一定量窗户和门的区域（如体育馆）。在屏蔽前孩子可能受到放射性粒子的污染时，在进入建筑物前需要移除他们的鞋和外衣。在应急期间，父母应该到学校或者儿童看护中心看照孩子。

稳定性碘甲状腺阻断在

放射性碘释放的紧急情况如核电站事故时可以给予庇护，甲状腺是放射性碘通过吸入或食入进入甲状腺。稳定性碘，主要是以碘化钾的形式存在，受照前或受照即刻服用稳定性碘（主要是以碘化钾形式存在）可饱和甲状腺从而阻断放射性碘的吸收。然而，KI有副作用，只有在应急管理机构或医学专家给予指令时才可以摄入。

在紧急情况或自然灾害后疏散是一种常见的公共健康对策。每个学校或儿童看护中心应该有指定的疏散中心，最好有一个备用的疏散中心（以免最初的疏散中心被路过的放射性烟羽污染）。在应急计划中建议学校或儿童看护中心有指定的通道到疏散中心。疏散中心的位置应该与家长/监护人对子女登记的住所相通。紧急情况下，到达的地点用所有的有效的通信渠道（电台、网站、论文发表、社交媒体等）可以沟通。

在开始去疏散中心前家长可能出现，但是应该鼓励他们去疏散中心见到孩子。如果他们不顾劝告并坚持接回自己的孩子，老师应该在放孩子前更新他们的照顾记录。这对于应急中追踪孩子是非常重要的。

在辐射与核事故启动阶段有效的沟通是很重要的。获得可靠的信息后尽早关注学校/儿童看护中心并与家长/监护人沟通放射性给孩子带来的风险并用清晰的非专业性语言实施对策。与大多数市民有多种有效的沟通方式；然而，使用快速传播沟通策略的手段如社交媒体，应该由应急管理计划中发布。应尽快只发布从可靠来源确认的信息，避免混合信息和使用技术术语。一个增量的通信策略可以帮助减轻对儿童及其父母和照顾者心理的影响。

在辐射或核应急之后，父母想知道他们的孩子是否安全。应该有有效的家长与学校/儿童看护中心的沟通方式。对于大孩子，其父母可以与他们通过电话或社交媒体沟通。父母/监护人和老师/看护者对辐射或核应急相关新闻的过度反应将对孩子产生情绪影响。反复暴露于紧急的媒体报道被认为可以导致孩子恐惧和焦虑，

因为他们可能认为事件正在发生。因此，在应急期间要限制孩子媒体接触。

#### 2.2 关于监测和去污的建议

核应急后放射性物质释放并扩散到环境中，人的身上，包括孩子，放射性烟羽的路径可能被污染。他们需要监测，如果有必要对潜在的污染要去污。应急后详细的监测和人员去污可参考美国疾控中心（美国CDC 2014）和加拿大辐射应急医学管理部门（加拿大卫生部，2014）出版的辐射应急中人群的监测。如果应急发生在校外时间，家长/监护人应该遵从应急管理组织的命令并第一时间响应孩子的监测和去污（注意去污可能在家完成，如没有外伤可以淋浴）。否则，学校或儿童看护中心的老师和看护者应该遵守应急管理组织的指令并第一时间响应并引导孩子通过监测和去污过程，这包括4个主要步骤：登记和跟踪，监测潜在的污染，去污（如有必要）和再监测，释放和家人团聚。在辐射或核应急期间，虽然在事故现场不可能发展成急性放射损伤的症状，需要注意孩子可能有身体损伤。正常的医学分诊可用于损伤评估，威胁生命的损伤优先于监测和去污。

登记和跟踪。有必要污染监测和去污时，应该给每个孩子一个物理标识，如独特的数字（或数字或字母组合）标记在皮肤上（使用永久性标记）。这个标识应该与其他信息同时几率，如姓名，学校名称，家庭电话，在他/她登记的形式中。在整个监测和去污过程中追踪孩子很重要，包括在应急事件中转运到哪里，污染监测的结果，去污记录（如有必要）以及再监测的结果。当回到家长/监护人那里时，推荐医学或放射性随访。注意在监测和去污的时候孩子不应该和负责他们的成人分开。

#### 监测潜在的污染

孩子可能需要更多的时间对要求做出响应和理解监测过程。第一响应者或其他应急管理人员可能需要用不同的语言与孩子沟通，尤其是更小的孩子。应该给予清晰、简明和具体的说明。应该允许孩子见到其他被监测的孩子，通常用手持探测器或门户监测器。然

**作者介绍**



**岳瑶**  
岳瑶，就职于北京大学第三医院肿瘤化疗与放射病科，助理研究员。2004年开始从事放射工作人员职业健康监护工作，发表相关论文9篇，翻译了卫计委《核事故医学应急演习方案》一书，多次在放射工作人员辐射防护培训中授课。目前主要从事染色体畸变分析和淋巴细胞微核率实验室检测工作。

而，当监测孩子的时候，应该关闭监测设备的声音信号或使用耳机。这些将有助于减少对孩子的心理影响并且减少对挑出污染孩子的感知。当使用手持的探测器时，应该是从头到脚扫描孩子来寻找存在的放射性污染，重点要看透，肩，双手和脚。当用门户监测系统时，需要孩子（鼓励更小的孩子）一个接一个走过门户。当许多小孩在监测过程中可能害怕时，一个成年人或大孩子的示范将有助于帮助其他孩子学习这个过程。如果小孩太小，他/她可能需要与连同他/她的照顾者一起监测。

#### 去污和再监测

如果监测结果表明孩子受到放射性物质的污染，他/她需要尽早去污。移除外衣可能减少80%以上的外污染。对于非覆盖区的去污（皮肤，头发），干性去污（如用微湿布或毛巾）优于湿性去污（如洗澡）。然而，在干性去污后污染仍持续存在，湿性去污则很有必要。在去污过程中，负责人的成年人（老师或看护者）可能不能直接协助，但是必须对孩子负责直到交给家长。儿童比成年人对低温更敏感，在去污过程中应该保暖。在去污过程中保护隐私很重要，性别特异性区域尤其要保护隐私。如果需要脱衣服，孩子们应该保留内衣。

去污后应该再监测孩子剩

下转第8版 ▶

## ◀ 上接第 7 版

余的外污染或潜在的内污染。如果没有外/内污染,他们准备放出去。如果证实有内污染,应该进一步到指定的医院/医生那里进一步生物测定或必要的医学处理。

释放回归家庭。一旦完成监测和去污,孩子们应该回到他/她父母/监护人那里。父母/监护人的身份应该统一确认。此时,应该收集和检查登记和追踪表。如果表中重要的人口信息丢失,如接触的随访信息,则试图获得这样的信息。

## 3. 医学管理的建议

应急期间,儿童可能受到身体伤害和/或放射性的照射/污染。如上面章节推荐,救命优于治疗放射损伤和去污。这适用于现场和医院的医疗行为。

## 3.1 医学和放射性分类

在辐射/核应急期间受伤的和/或污染的孩子需要医学分类和放射性分类。有威胁生命的症状的人员伤亡和/或额外的创伤需要现场或医院治疗无论污染状态如何都不能延误。如果在应急期间涉及放射性物质的污染,一旦病情稳定则需要去污处理。无论伤亡人员的表面或体内有无放射性污染的存在,挽救生命的行动是要按相同的方式处理。如果有必要,状况稳定的伤员需要监测潜在的放射性污染和去污。如果去污后再监测意味着放射性内污染,需要生物测定评估摄入量和通知其必要的治疗。

不在辐射/核事故附近的孩子不可能经历急性辐射综合征(ARS)。然而,由于缺乏知识,孩子的父母可能有担忧。他们

需要在分流过程中再确认。一些ARS相似的症状,如恶性或呕吐可能由于害怕或其他因素引起。

## 3.2 内污染的评估和处理

加拿大辐射应急医学管理指南最近又加拿大卫生部出版(加拿大卫生部,2014),该提供了关于受内污染影响人员的评估和治疗的详细信息。这个指南适用于对孩子评估和治疗。内污染通过体内生物检测了评估(即全身计数,肺计数)或体外生物样品检测(如尿或血清生物测定,鼻拭子),根据污染的途径(如吸入,食入),放射性物质的物理和化学特征和其他因素/考虑。内污染的治疗依据污染的特征和涉及的放射性物质,如特异器官/组织阻断放射性物质的吸收(如在核应急期间用稳定性碘阻断甲状腺<sup>131</sup>I的吸收),减少消化道放射性物质的吸收(如用普鲁士蓝治疗<sup>137</sup>Cs污染),和移除体内放射性物质(如用DTPA-Zn促排<sup>139</sup>Pu的污染)。

由于孩子对辐射比成年人敏感,所以应该尽早治疗。有医生给予医学处理,应该考虑到潜在的健康副作用。例如,阻吸收剂可引起脱水,电解质不平衡,或孩子吸气。

## 3.3 急性辐射损伤的评估和治疗

加拿大辐射应急医学管理指南(加拿大卫生部2014)提供了急性辐射损伤的医学管理详细信息。综上所述,不在辐射或核应急就近的孩子不可能引起急性辐射综合征(ARS),然而,如果他们在附近的时间比较长,他们可能(如学校操场被恶意放置了强的辐射源)会经历急性辐射综合征。如果怀疑有这样的辐射暴露,一些检查需要尽早完成,包括全身的体格检

查,全血实验,染色体分析,和淋巴细胞计数。一些症状,如恶心和呕吐,出血,皮肤发红,发热,可能提示有潜在的辐射损伤。发展成ARS需要一段时间,从数小时到数周不等,取决于辐射剂量和个人接受的剂量率,全身的剂量分布和个体易感性。

仅仅依靠症状而不是知觉和估算的受照剂量,急性辐射损伤的治疗有病人特异性。所有的体征,症状和最初的医学检查和血液结果准确记录是至关重要的。

一些临床综合征可能单独或联合出现,包括血液、皮肤、胃肠道和神经血管综合征。确定辐射损伤的严重程度后可能出现集体体征和症状,ARS进展的文献,预后的文献有助于治疗的决定,如支持护理,血液替代,生长因子治疗,干细胞移植和手术。

## 4. 长期随访的建议

一旦完成了辐射或核应急阶段处置,应该长期随访受照射影响孩子的健康和幸福。应急期间,食品、饮用水,和环境可能受到涉及的放射性物质的污染。应避免孩子食用污染性食物、饮用水以及污染环境。应遵守加拿大卫生部出版的“加拿大核应急后限值食品和水的放射性污染指南”(加拿大卫生部2000)。如果食品和饮用水的放射性物质的水平低于指南水平,则食品和水可以安全使用。

辐射或核事故附近的区域可能最初被认为是人类生活不安全的,认为有高水平的放射性污染。伴随着放射性物质的物理衰变和风化作用,这些区域可能由于生活而再次受影响。如果家庭决定搬回这些区域,应定期监测孩子的辐射剂量(内照射和外照射)直到不

再需要监测。

## 卫生监督 and 医学随访

2011年福岛事故后,日本政府和福岛县发起了一个长期的健康监测计划,福岛健康管理调查(FMU 2014)来监测福岛县居民为了30年的放射性和非放射性相关的健康效应。这种检测和监测形式对孩子而言是很重要的因为他们对辐射效应和心理影响更敏感。

最大的孩子的长期关注(包括受照时在子宫内)是否最终发展的癌症。孩子受照剂量的准确估算和确认(有内污染的情况)可用于预测放射性肿瘤的概率。儿童一些肿瘤一生的风险考虑要高于成年人(UNSCEAR 2013)。当然,在应急事故后一些其他的放射性相关的健康效应也需要长期随访。

## 4.2 心理的随访

儿童比成年人更容易受到长期的不良心理的影响。这在切尔诺贝利事故后已经观察到(WHO 2006)并在福岛核事故后有预测。疏散的突如其来创伤,社会网的混乱,长时间的被疏散,“辐照的孩子”的社会标签,导致压力,焦虑甚至疾病。需要对心理和社会困难的孩子敏感些的父母,照顾者,老师和社会工作者提供可能的安慰和教育。对孩子提供长期的教育,培训,和随访计划确保孩子心理健康是很重要的。不仅仅是受影响的儿童,其他人员也需要列入计划。

## 5. 讨论

如果建议执行正确,预计上述介绍可能有助于辐射或核应急直接或间接影响的儿童的健康和幸福随访数据相关的结果:a)如果立即采

取防护措施可以减少辐射健康风险,实施早期监测和去污,和提供必要的医学管理;b)如果实现有效的应急通讯,包括放射性风险沟通,如果对儿童和他们的家庭提供长期的随访,可减少心理健康的风险。另一个结果,如果在辐射或核应急事故期间管理好孩子可以实现包括减少儿童父母的心理健康效应和减少社会经济的影响。

建议在辐射或核应急中全部管理计划中纳入孩子的上述管理并有规律地进行练习。在辐射或核应急期间理解很重要,人们期望得到帮助,人们将根据他们的理解和对状况的认识而采取行动,家长想联系和再联系他们的孩子,老师/看护者想在他们的职责范围内保护孩子。

当应急管理组织形成他们的辐射或核事故应急管理计划,这意味着他们涉及学校和儿童看护中心。这个计划包括针对孩子和他们父母的风险沟通策略。当应急管理计划演习时,学校/儿童看护中心,儿童及家长应该参与。在辐射或核应急期间,应该向需要培训的第一响应人和管理孩子的接收人介绍应急管理计划,应急响应期间的资源稀缺和天气条件。

这个提示辐射科学建成教育计划,因此孩子们可以学习和理解受照的风险。这有助于老师和家长理解辐射风险。

在应急或灾难期间管理孩子的一般有效的方法适用于辐射或核应急。在这篇短文中提出的建议提供了另外的辐射特异性的考虑。作者希望应急管理组织,第一响应者/接收者,和学校/儿童看护中心在形成他们的应急计划和/或培训计划时发现这篇文章而将其做有用的参考。

## ◀ 上接第 2 版

胞不同位置的细胞S值,以及它们链接到DNA时的DNA损伤产额,为DNA尺度、染色体尺度及细胞尺度的辐射生物效应研究提供了有意义的的数据。

## 3. 人体计算模型的应用

人体计算模型在辐射防护领域有着广泛的应用。人体计算模型与蒙特卡罗方法的结合,可用于计算辐射防护的基础剂量数据。在人体剂量评价中,需要用到一系列剂量系数,如内照射剂量估算中所用的吸收分数(AF)、比吸收分

数(SAF),外照射剂量评价中所用的光子、中子、质子剂量转换系数,环境照射剂量评价中所用的地面照射、烟羽浸没照射剂量系数等。过去,这些基础剂量数据主要利用人体数学模型计算得到,例如ICRP 74号报告、美国FGR-12报告。近年为了更为准确地评价人员所受剂量,ICRP基于人体体素模型重新计算了上述剂量系数,出版在ICRP116号报告中。本研究室基于中国成年男性、女性参考人体素模型CRAM和CRAF,计算了中子、光子外照射剂量转换系数。

人体计算模型在放射诊断治疗领域也有非常重要的应用,可用于受照人体剂量的模拟计算。人体体素模型因其具有良好的解剖真实性,它被用于CT扫描等放射诊断病人,尤其是儿童所受剂量的评估。同时,在核医学、放射治疗病人“个体化”(patient-specific)剂量评估方面也得到了广泛的应用。例如,人体心脏跳动、呼吸的动态变化对放射治疗剂量的影响研究,以及近年有关放射治疗所致二次癌风险的研究等。此外,体素模型也被用于X射线透视设备工作参数和

受检剂量的优化研究。

另外,在内照射活体监测方面,人体计算模型也有广泛的应用。效率刻度是人体污染活体测量过程中的一项关键技术,同时也是影响活体测量准确性的一个重要因素。近年,结合蒙特卡罗模拟计算方法,实现活体测量效率的虚拟刻度成为体素模型又一个重要的应用方向。相比传统的物理模型刻度方法,体素模型虚拟刻度方法具有解剖形态更为真实,效率刻度更为准确,刻度过程速度快、成本低,可模拟体内放射源的任意分布等优点。加

拿大、法国、日本、美国等研究人员相继在这方面开展了一系列研究工作。本研究室基于中国成年男女参考人CRAM和CRAF,采用蒙特卡罗动态虚拟刻度方法,针对NaI、LaBr3探测器,建立了内污染照射的虚拟效率刻度数据库。

此外,人体计算模型也被用于事故情况下人员受照剂量的评估、核电站检修三维模拟与剂量评估、航天员在太空中的剂量评估等方面。此外,它也被应用于非电离辐射领域,例如电磁辐射剂量学的研究。(清华大学李春艳任丽报道)

终校	排版设计	年 月 日	经营监管部	年 月 日
	编辑出版	年 月 日	总编室	年 月 日