

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

——中国核学会2011年学术年会论文集

第8册

- ▲ 辐射研究与应用分卷
- ▲ 同位素分卷
- ▲ 核农学分卷

中国原子能出版社

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

——中国核学会 2011 年学术年会论文集

第 8 册

辐射研究与应用分卷

同位素分卷

核农学分卷

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国核科学技术进展报告. 第2卷 : 中国核学会 2011 年学术年会论文集. 第8分册, 辐射研究与应用分卷、同位素分卷、核农学分卷 / 中国核学会主编.
—北京: 中国原子能出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-5022-5599-2

I. ①中… II. ①中… III. ①核技术—技术发展—研究报告—中国 IV. ①TL-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 150932 号

内 容 简 介

自首届全国学术年会以来,我国核科学技术取得长足发展。从基础核科学到核技术应用,从核电技术到核电配套产业集群,均呈现蓬勃发展态势。在这种时代背景下,中国核学会第二届全国学术年会于 2011 年 10 月 11 日至 14 日在贵阳召开。大会以“蓬勃发展中的核科学技术”为主题,吸引了来自政府部门、企业界、科研机构、高等院校及学术团体的知名院士、专家、教授及青年核科技工作者,共计 1200 余人(其中院士 31 人)与会。年会共征集论文 1192 篇,内容涵盖基础核科学、核电及其关联产业、核技术应用、核技术经济及核科技信息等学科。会后,经过各个二级学科专家组的评审,近 800 篇论文通过了学术(技术)审查,结集为《中国核科学技术进展报告(第二卷)》,全卷分为 10 册,并按 21 个二级学科设立分卷。

各册包含的分卷如下:第 1 册为“铀矿地质”分卷;第 2 册含“铀矿冶”分卷和“核能动力”分卷(上)两部分;第 3 册为“核能动力”分卷(下);第 4 册收录了“核材料”、“同位素分离”和“核化学与放射化学”3 个分卷;第 5 册内容为“辐射防护”和“核化工”两个分卷;第 6 册共收录了“核物理”、“计算物理”和“粒子加速器”3 个分卷;第 7 册则为“核电子学与核探测技术”、“脉冲功率技术及其应用”和“核聚变与等离子体物理”3 个分卷;第 8 册包含有“辐射研究与应用”、“同位素”和“核农学”3 个分卷;第 9 册收录有“核医学”和“核技术工业应用”两个分卷;第 10 册内容为“核情报(含计算机技术)”分卷和“核技术经济与管理现代化”分卷。

作为公共信息,文集还列出了中国核学会 2011 年学术年会的组织机构,《中国核科学技术进展报告(第二卷)》的总编委会和 21 个(二级学科)分卷编委会的名单。

中国核科学技术进展报告(第二卷)

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 王 丹
技术编辑 丁怀兰
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 890 mm×1240 mm 1/16
印 张 16.75 字 数 496 千字
版 次 2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5599-2 定 价 100.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com
发行电话: 010-68452845

中国核学会 2011 年 学术年会大会组织机构

大会主席 翟 彦
执行主席 李冠兴
副 主 席 (按姓氏笔画排序)
丁中智 孙汉虹 邱爱慈 贺 禹 康克军
彭先觉 雷增光 穆占英

顾问委员会

主 任 王乃彦
委 员 (按姓氏笔画排序)
王大中 毛用泽 方守贤 吕 敏 朱永贽
阮可强 李德平 杨福家 吴德昌 陈能宽
胡思得 钱绍钧

组 委 会

主 任 雷增光
副 主 任 潘传红(常务) 刘长欣 王德林
委 员 (按姓氏笔画排序)
王 敏 王国保 石金水 冉木子 朱升云
刘 毅 苏艳如 李思凡 吴春喜 何作祥
辛 锋 张 闯 张一心 张生栋 杨华庭
罗志福 金 蓓 哈益明 赵京伟 顾 军
徐燕生 崔建春 康力新 程建平 简晓飞
蔚喜军
秘 书 秦昭曼 张宝珠 耿庆云 王义伟 马正锋
李 钢 伍险峰 张小庆 王 宇 黄 伟
苏 萍

学术委员会

主 任 李冠兴
副 主 任 彭先觉 邱爱慈
委 员 (按姓氏笔画排序)
王志东 王贻芳 邓建军 刘国治 李金英
李德连 沈文庆 吴中俭 吴国忠 何多慧
张飞凤 张焕乔 张锦荣 陈念念 陈盛祖
畅 欣 周永茂 赵志祥 赵宪庚 侯惠群
柴之芳 崔建春 樊明武 潘传红 潘自强

主办单位 中国核学会
承办单位 贵阳市人民政府
协办单位 中国核工业集团公司 中国核工业建设集团公司
中国电力投资集团公司 国家核电技术有限公司
中国广东核电集团有限公司 中国工程物理研究院
清华大学 贵州大学

技术支持单位

铀矿地质分会、铀矿冶分会、核能动力分会、核材料分会、同位素分离分会、核化学与放射化学分会、核化工分会、辐射防护分会、核农学分会、计算物理分会、核物理分会、粒子加速器分会、核电子学与核探测技术分会、脉冲功率技术及其应用分会、核聚变与等离子体物理分会、同位素分会、核医学分会、辐射研究与应用分会、核技术工业应用分会、核情报分会、核技术经济与管理现代化分会

北京市核学会、湖南省核学会、江西省核学会、广东省核学会、四川省核学会、浙江省核学会、湖北省核学会、福建省核学会、陕西省核学会、辽宁省核学会、甘肃省核学会、山西省核学会、吉林省核学会、新疆自治区核学会、安徽省核学会、河南省核学会、江苏省核学会、上海市核学会、天津市核学会、贵州省核学会、黑龙江省核学会

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

总编委会

主任 李冠兴

副主任 彭先觉 邱爱慈

委员

(按姓氏笔画排序)

王志东	王贻芳	邓建军	刘国治	李金英
李德连	沈文庆	吴中俭	吴国忠	何多慧
张飞凤	张焕乔	张锦荣	陈念念	陈盛祖
畅欣	周永茂	赵志祥	赵宪庚	侯惠群
柴之芳	崔建春	樊明武	潘传红	潘自强

编委会办公室(中国原子能出版社)

主任 侯惠群

副主任 杨树录

成员

(按姓氏笔画排序)

丁怀兰	卫广刚	王丹	付真	任重远
刘朔	孙凤春	张关铭	赵志军	侯茸方
谭俊				

辐射研究与应用分卷

编委会

主任 吴国忠

委员 (按姓氏笔画排序)

王敏 许云书 李景烨 杨晓明 吴军
张志成 邵春林 郭国祯 翟茂林

同位素分卷

编委会

主任 安继刚

副主任 张锦荣

委员 (按姓氏笔画排序)

王荣福 张现忠 罗志福 罗顺忠 唐志刚
黄伟

核农学分卷

编委会

主任 陈子元

副主任 徐步进 王志东 华跃进

委员 (按姓氏笔画排序)

叶庆富 刘录祥 许方佐 许德春 李云
李潞滨 杨俊诚 吴殿星 陈浩 陈秀兰
金庆生 赵永富 哈益明 涂书新 商照荣
彭选明 葛才林 程薇 路大光 潘家荣

前 言

“创新是一个民族进步的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力”(江泽民《在全国科学技术大会上的讲话》),我国核科技事业的发展史实际上就是一部蓬勃发展的科技创新史。从基础核科学领域的原始创新,到核技术广泛应用于工业、农业、医学等各个领域,从成功研制核武器,到核电技术快速发展,核科学技术的每一项技术进步都闪耀着核科技工作者的创新精神。以“蓬勃发展中的核科学技术”为主题,中国核学会两年一度的全国学术年会于2011年于10月11日至14日在贵阳市隆重举行。本届学术年会由贵阳市人民政府承办。年会共征集论文1192篇,内容涵盖基础核科学、核电及其关联产业、核技术应用、核技术经济及核科技信息等学科。会议期间,来自政府部门、企业界、科研机构、高等院校及学术团体的知名院士、专家、教授及青年核科技工作者,共计1200余人(其中院士31人)参加会议。共同围绕我国核工业发展、核电及其相关产业技术进步、核技术应用研究、基础核科学创新和发展、以及核科技人才培养等问题,交流观点,畅谈体会,切磋学术,探讨对策,以期促进中国核科技事业健康发展。

本届学术年会会期三天,第一天为主会场邀请报告。13名相关领域的专家学者,分别介绍了近年来我国在核安全监管、核电及其关联产业技术进步、以及基础核科学、核技术应用、核武器等相关领域取得的进展、未来的发展趋势与展望。第二天和第三天为“分会场口头报告”和“张贴报告”时段,两天时间里,计有486名科技工作者分别在10个分会场进行“口头报告”交流,有600多篇报告在张贴报告区进行书面交流。大会全景式展示了我国核科技界近两年来最新研究成果,包括AP1000的工程建设实践、AP1400科研进展、CPR1000自主化实践、我国铀矿冶新技术、高放废物深地质处置技术、同步辐射光源进展与展望、中微子实验、同位素及辐照加工技术进展、核技术在医学领域的应用等。此外,核物理、核化学、粒子与加速器物理、核聚变与等离子体物理等基础学科领域的进展,以及核医学、核农学、同位素与辐照加工技术、核技术工业应用等应用学科领域的技术进步,也引起人们的极大兴趣。

由于日本福岛核事故的影响,与核电有关的议题成为本届学术年会关注的焦点,会议回顾和总结了福岛核事故的经验教训及其对世界核能发展的影响,提出了大力发展最先进的核电技术,加强核安全法规(制度)体系及核安全文化建设,加强铀资源保障工作和核燃料后端产业发展、实现核燃料闭式循环,大力推进核电及其关联产业全面协调可持续发展等项对策和建议。使参会代表不仅近距离了解我国核基础科学技术的最近研究成就,还感受到我国“发展核电的决心不能动摇”(张德江副总理语)和核电关联产业蓬

勃发展的态势。

本届学术年会期间,在各个二级学科推荐基础上,通过学术委员会严格评审,共有 66 篇论文分别获得“优秀学术论文”一、二、三等奖和“青年优秀科技论文奖”。会后,经过各个二级学科专家组的评审,近 800 篇论文通过了学术(技术)审查,结集为《中国核科学技术进展报告(第二卷)》。和上届学术年会的论文集一样,《中国核科学技术进展报告(第二卷)》分为 10 册,并按 21 个二级学科设立分卷。

中国核学会作为全国性学术团体,自创立以来,努力贯彻执行党的方针政策,紧密团结广大核科技工作者,搭建高水平学术交流平台,推动各学科间的交流与融合,提升我国核科技创新能力,为经济社会发展服务、为提高全民科学素质服务、为科学技术工作者服务。通过广大核科技工作者的共同努力,经过两次成功办会所积累的经验,中国核学会的全国学术年会已经初步显示出旺盛的生命力,成为我国核科技界规模最大、最具影响力的学术交流平台。《中国核科学技术进展报告(第二卷)》如期结集出版,便是这场盛会之具体成果,可喜可贺!我们期待着中国核学会全国学术年会这朵奇葩,在广大核科技工作者的精心呵护和关怀下,绽放更绚丽的光彩,结出更丰硕的成果!

中国核学会第二届全国学术年会的顺利召开,离不开贵阳市人民政府的大力支持,离不开全国大核科技工作者的理解与支持,离不开中国核学会全体分支机构和 21 个省级(地方)核学会的密切配合,因此,要首先感谢那些为学术年会顺利召开做出贡献的单位和个人;其次,在论文学术(技术)评审和论文集出版发行过程中,学科评审专家组、分卷编委会及总编委会的全体同仁,付出了辛勤的劳动,在此对他们严谨学风和治学态度表达崇高敬意;此外,中国核学会秘书处和出版社的工作人员,在文字的编辑和校核过程中,也做出了具体贡献。在此一并致谢。

《中国核科学技术进展报告(第二卷)》编委会
2012 年 5 月 24 日

目 录

目录

辐射研究与应用

Radiation Research & Application

目录

目录

目录

目录

目录

目 录

研究辐射危害的线性无阈(LNT)模型及目前对模型的评价	闵 锐(1)
10MeV 直线加速器辐照泡凤爪的效果研究	莫 燕,张亚群,杨东情(7)
辐照技术在植物检疫方面的应用	唐卫东,杨 斌,张 玥,等(11)
甲基乙烯基硅泡沫材料在复合条件下的老化效应研究	黄 玮,高小铃,熊 洁,等(17)
乙酰甲胺磷的 ⁶⁰ Co-γ 辐射降解机理研究	高慧宇,刘远霞,包华影(23)
⁶⁰ Co-γ 辐照法去除水中两种卤乙酸的研究	李林娜,刘远霞,包华影,等(28)
⁶⁰ Co-γ 辐射降解水中对氯硝基苯	胡建华,刘远霞,包华影(33)
低剂量辐射生物效应	贾立立,徐 波,马淑梅,等(39)
辐照预处理对变温压差膨化金丝小枣品质的影响	王崇林,王勇强,刘 爽,等(43)
异丙氧基杯 ^[4] 冠-6 的辐射效应研究	敖银勇,彭 静,袁立永,等(46)
丙烯酸甲酯在超高分子量聚乙烯纤维上的 γ 射线辐射接枝研究	邢 哲,王谋华,吴国忠(51)
插层型蒙脱土/聚丙烯复合材料辐射交联行为的研究 ...	王永常,范 宏,董 凯,等(56)
辐照技术在检疫处理方面的应用概况	雷 庆,黄 敏,伍 玲,等(61)
电子束辐射交联聚四氟乙烯的结构研究	唐忠锋,王谋华,吴国忠(65)

研究辐射危害的线性无阈(LNT)模型及目前对模型的评价

闵 锐

(第二军医大学海军医学系放射医学教研室,上海 200433)

摘要:介绍研究辐射危害常用的剂量效应线性无阈(LNT)模型及目前对该模型应用的评价。方法:综合分析文献,客观呈现观点。LNT 模型对大剂量诱导生物学效应描述的准确性优于对低剂量诱导生物学效应的描述;细胞辐射效应的条件修复模型可较好兼顾高、中、低照射剂量范围对细胞存活的描述;建立在以 LNT 剂量反应假设和个体平均器官当量剂量基础上的内照射有效剂量评估模型仍存在许多不确定性,考虑到性别的差异有必要建立性别特异的体素人体模型。结论:各种模型优缺点并存,在新理论新模型未产生之前,遵循现有理论和 LNT 模型评估辐射危害仍是目前最科学的态度和明智的选择。

关键词:辐射危害评价;线性无阈模型;条件可修复模型;内照射;剂量评估

目前,建立在大规模流行病学调查基础上的辐射危害评价剂量效应模型(LNT 模型)仍需要在深入研究离体细胞和整体动物内外照射、不同剂量和剂量率照射辐射生物学效应基础上进行修饰和细化,以期获得能适用于不同照射剂量,不同照射方式,不同照射个体,能更科学合理和准确客观评价辐射危害的辐射剂量效应模型。

1 线性无阈(LNT)模型

旨在保护公众免受低剂量电离辐射危害的辐射防护标准基本上是根据 LNT 模型建立的,因此得出无论辐射剂量多小都不能认为是安全的结论。这种模型的基本假设认为 DNA 是辐射作用的主要靶物质,辐射效应由射线能量在 DNA 上的沉积所引起,在此基础上细胞反应可用来协助了解组织和生物整体的辐射效应。这种模型的流行病学依据是广岛和长崎原爆幸存者的调查研究结果,即受照幸存人群癌症发病率与器官受照剂量之间存在明显的线性关系,器官受照剂量范围在高达三个数量级的情况下这种线性关系仍然成立^[1-3]。其他流行病学调查结果也支持这样的结论。因此,长期以来利用 LNT 模型外推法将危害性直接与辐射剂量相联系已成为预测辐射危险的黄金标准^[4]。

根据 LNT 模型假设,只要接受照射就一定存在风险,且这些风险性是可以积累相加的。因此,基于对整体辐射剂量的限制,辐射防护实践中提出辐射剂量合理达到最低的原则(ALARA)。该原则对个体和群体都适用,因此可通过个体积累的小剂量来估计人群集体接受的总照剂量,并以此来预测实际或潜在照射致癌症死亡的人数。不同国家设计的年辐射防护剂量略有不同,如英国设计为平均每年 0.3 mSv。在放射性处理和排放场合,评估关键人群所用的防护剂量限值可能会更低。

目前认为低剂量辐射对人类最重要的影响主要是诱导癌症。然而根据线性无阈 LNT 模型外推法来预测医疗和职业低剂量照射的危害是否合理和科学,以及这种外推是否就是实际执行过程中最合理的解决办法仍值得讨论和研究。最近一些研究表明,射线与生物物质作用存在非靶效应,这种效应已在培养细胞和动物实验中得到证实。该效应既能通过清除损伤的细胞发挥有益的作用,也可通过诱导非照射细胞的损伤而发挥有害作用^[5]。因此有人对用 LNT 外推法预测危害的合理和科学性提出质疑^[6]。此外,大剂量放射治疗时的线性偏差是否会影响患者继发癌症的风险也是一个备受关注的问题。此外,在特定实验和剂量范围内,对剂量有修饰作用的适应性反应也还不能提供充分的证据证明 LNT 模型是不合适的。审视目前发现的所有放射生物学效应现象,结果和证据并不能立即清楚回答适应性反应,非靶效应等究竟会对辐射风险评估产生什么影响。如在低剂量范围诱导有害效应的非靶效应可能增加风险,而旁观者的保护作用则能降低这种风险。虽然这些影响有可能改变低剂量辐射的剂量效应关系,但也预示这些效应要么高于,要么低于根据 LNT 模型外推得到的结果。

因此,一些学者认为在对这些效应的作用机制更深入了解和对其在生物体内的重要意义更清楚认识之前,否定 LNT 模型作为建立辐射防护标准的重要依据和合理性是不明智的。

2 细胞外照射条件可修复性修复(RCR)模型

细胞修复-错误修复(repair-misrepair,RMR)存活模型分别由 Kappos 和 Pohlit(1972),Tobias(1985)提出,该模型对一些可能导致细胞存活或灭活的修复和错误修复事件进行描述。Curtis(1986)在细胞存活线性二次方规律的基础上,结合修复-错误修复细胞存活模型提出潜在致死损伤(lethal potentially lethal,LPL)模型。根据这种模型细胞存活曲线形成的“肩”是由于存在修复,对组织而言“肩”表示对低剂量的高敏感性。线性二次方(LQ)模型在描述细胞受低剂量照射,尤其是在受高剂量照射时都不很准确^[7-8]。最近提出的所谓条件可修复性修复(repairable-conditionally repairable,RCR)模型能较准确地描述细胞存活曲线肩形成的初始状态,亦能较准确处理低剂量和高剂量照射情况下细胞存活的问题^[9]。这种模型将哺乳细胞损伤修复的两种关键途径,非同源末端连接(NHEJ, Non-homologous end joining)和同源重组(HR, homologous recombination)^[10-11]紧密联系起来。

经典线性二次方模型 $Y(D)=\alpha D+\beta D^2$ (式中第一项 αD 表示单靶一次击中事件; βD^2 表示多靶多次击中事件)存在低剂量条件下不能很好说明低剂量超敏现象,而在高剂量条件下,该模型因存在 βD^2 函数因而对损伤预测过重的缺陷(βD^2 函数中的 β 值在描述低剂量损伤修复时是有用的)。RCR 模型通过确认和考虑两类主要的辐射损伤,较好解决了经典线性二次方模型不能解决的两个问题:即潜在修复损伤主要利用 DNA-PK 过程及其相关基因通过 NHEJ 途径进行修复(图 1,右侧插入椭圆型)。条件修复损伤往往需要快速的 NHEJ 修复,但为保证准确纠正因 NHEJ 修复可能带来的错配修复,在细胞周期后期的 G2 和 M 期也存在 RH 修复过程(见图 1)^[12]。如果应用泊松统计,这种简单的 2 步细胞存活模型,即能在低剂量范围描述细胞的辐射敏感性,2 Gy 剂量左右出现的“肩”,5 Gy 以上出现的指数型尾,如图 1 所示。图 1 是人脑胶质瘤细胞 M059K(DNA-PKcs 正常)和 M059J(DNA-PKcs 缺失)⁶⁰Co- γ 射线和氮离子照射后的细胞生存曲线。此图表明,M059K 细胞被低 LET 的⁶⁰Co- γ 射线照射后潜在修复可修复损伤,但高 LET 的氮离子照射后这种损伤却不能修复。而 M059J 细胞既不能修复⁶⁰Co- γ 照射诱导的亚致死损伤,也不能修复由氮离子辐射诱导的损伤。RCR 模型的细胞存活可由下式描述:

$$S(D)=e^{-aD}+bDe^{-cD}$$

式中的存活细胞包括未受到照射或未受损伤的细胞(e^{-aD}),以及那些受损但在照后约 2 周能正确修复的细胞(bDe^{-cD})(见图 3)。潜在可修复损伤量近似与剂量(bD)成比例,但修复细胞的损伤和错误修复均可降低存活(e^{-cD})。由于两种修复系统都需要,NHEJ 修复过程在低剂量照射时占主导地位,而在高剂量时,存活细胞主要由条件修复细胞组成。对于那些具有 NHEJ 能修复能力的细胞系(M059K)可通过实验来确定其亚致死损伤的修复,其具体做法是,减去任何细胞修复系统以外未受损伤细胞的贡献,如 DNA-PK 基因敲除细胞(M059J)。因此,在大剂量照射情况和局部多发性损伤概率增加的后期阶段,HR 修复过程变得非常重要。该模型可非常准确地处理低和高 LET 事件的相互作用,如由 X 射线和氖(neon)照射得出的结果。

DNA-PK-/-缺陷的胶质瘤细胞(j)细胞存活随辐射剂量的变化(非对数指数细胞存活曲线)。对于低 LET⁶⁰Co- γ 射线作用 DNA-PK +/+阳性细胞 K,由于存在有效 DNA 修复,得到的是一条随照射剂量增加带“肩”的可修复损伤(concave curves,凹曲线)曲线。当两种不同细胞系用氮离子照射时,细胞存活没有差别,而两种细胞系对⁶⁰Co- γ 射线的反应大不相同。这表明,高 LET 氮离子在这些细胞系诱导的损伤不是通过 DNA-PK 途径修复。因此,可通过实验来确定细胞生存曲线图中不同的部分,如剂量轴 0.35 Gy 处的左侧部分。高剂量照射时,表现为条件修复占主导。

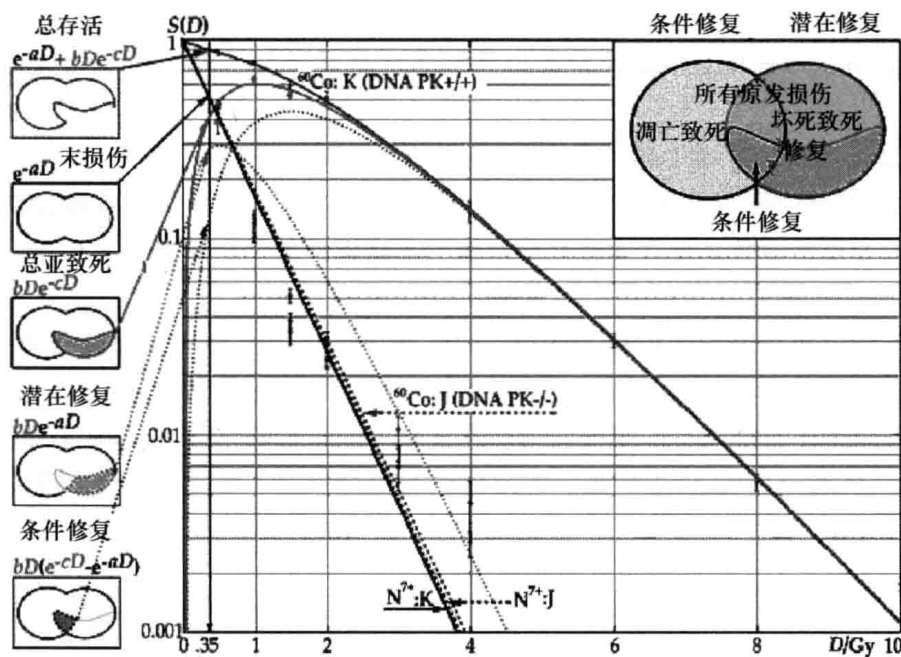


图 1 不同 DNA 修复能力细胞⁶⁰Co-γ 射线和 高 LET N⁷⁺ 离子多击条件下的 DNA 致死性损伤

3 内照射生物动力学和剂量测量模型

随着核医学显像技术的发展,更多放射性核素经进入体内,然而目前能收集的放射性核素内照事件较少,内照射的辐射风险也较难评估。多数辐射风险估算模型基本上是在对外照射人群流行病学研究结果基础上的^[13]。虽有大量关于氡吸入(摄入)的一剂量一效应关系流行病学调查数据^[14],但要调查其他进入人体放射性核素的效应,首先要预测其吸收和确定辐射剂量。为此,辐射防护委员会提供几种计算摄入或吸入不同放射性核素在器官和组织内沉积的宏观分布的生物动力学和剂量模型。一般工人或市民吸入或摄入放射性核素,可通过现有剂量系数 Sv Bq⁻¹ 模型计算实际接受的剂量、剂量当量和有效剂量,此剂量系数也可用于计算医学诊断用放射性药物的剂量范围。除了辐射防护委员会提供的模型还有其他剂量测量模型,如用于呼吸道的 MIRD 模型,即评估气道剂量的几何模型等。

不同人群(如成人、儿童、胎儿)和不同放射性核素内照射的评估需要用不同的生物动力学模型^[13]。如人体呼吸道模型包括胸外(鼻、口咽部、喉部)和胸部(支气管,细支气管,肺泡间质)等部分。这些模型对放射性物质在靶器官内的转移,滞留和排泄,以及辐射类型和受照途径都纳入考虑,之后可通过剂量学模型转换计算出组织的受照剂量。放射性核素在骨中的沉积可能发生在骨源细胞、骨髓、骨髓或骨表面,因此骨小梁和皮质骨的剂量须用专用模型估计。那些经过受照人群资料数据拟合验证和改进的生物动力和剂量测量学模型可用于流行病学研究中对个体受照剂量和辐射风险的计算,也可对癌症的因果关系进行判断。在确定吸收剂量后,还应该计算不同敏感组织的当量剂量,再根据适当的辐射和组织权重因子条件,计算有效剂量。对于那些剂量分布差别很大的器官和组织,有效剂量是外部和内部照射剂量的综合,与剂量的传递时间过程无关^[15]。有效剂量只是以 LNT 剂量反应假设和个体平均值的器官当量剂量为依据,考虑到性别差异还有必要建立性别特异的体素基础人体模型。

4 内照射风险估计的不确定性

与非电离辐射和其他环境因素比,电离辐射风险的定量描述是目前为止做得最好的,如可用全身或组织器官的有效或当量剂量来描述危险度和设置剂量限制。为方便制订内照射辐射防护计划,利用复杂且未经任何修饰的系统对各种辐射风险进行累加,利用这种累加效应大概估计辐射风险。然

而由于辐射类型的多样性和有限的内照射危害事件资料,现在用的风险估计模型仍有很大的不确定性。但随着新风险评估类型以及不同定量模型之间结果差异的不断出现,准确定量评估辐射风险仍有很长的路要走。

考虑到癌症风险估计的不确定性,美国辐射防护委员会 NCRP126 号报告中^[16]将低 LET 外照射诱导致死性癌症的危险因素定为 8,而国际辐射防护委员会 ICRP 估计的癌症发病率危险因素为 5^[17]。更精确的辐射危害评价还应在微观尺度考虑与不确定性相关的辐射相互作用。过去,一直用带电粒子的轨道结构方式来分析电离辐射对 DNA,细胞和组织的作用。像 X 射线和 γ 射线类的低 LET 辐射,虽然平均电离密度比较稀疏,但约四分之一的能量沉积可引起低能次级电子高密度的簇性电离。随着在 DNA 分子大小尺度范围所有辐射的轨道都可以高度结构化,因此可认为 DNA 损伤的方式应该是 DNA 分子中三个或更多成分的简单或复杂的簇性损伤,无论哪种辐射都可能诱导产生高产额复杂的 DSB。从这一点出发,用线性二次方程就能很好拟合实体癌的发生风险,其中 1 mS 当量剂量大约代表一个轨道(每个细胞核),20 mSv 约为 20 个轨道。临床上一次 CT 扫描的轨道约为 1~50 个,意味着相当于接受 1~50 mSv 当量剂量的照射。

由于计算元素及相关假设数量上的原因,内照射危险检查委员会推荐的内照射模型不确定性比外照射模型更大^[18]。对于 ^{137}Cs ,内照射剂量的不确定性系数约为 5,沉积在骨髓中钚的内照射剂量不确定性系数可达数千。根据计算辐射防护委员会已列出一些特定核素的剂量系数表,表中对那些能准确评估辐射风险的剂量系数进行了特殊标注。尽管能量化内照射风险不确定性因素,但精准计算仍不太容易。从评估计算 1950 年出生在 Seascale 儿童直到他们 50 岁这段时间红骨髓所接受各种辐射的当量剂量过程中可看出其不确定性,如以 1984 年,1986 年和 1999 年当时使用的系数进行计算,不同年份变异系数高达 14。另一个不确定性的例子是用辐射防护委员会统一的剂量测量方法直接估计 α 粒子掺入的风险,结果表明该方法评估吸入氡 222 导致肺癌的发生风险因子高于实际风险因子的 3 至 10 倍。

内照射的不确定性还与 γ, α, β 和俄歇电子分别与物质的相互作用过程相关^[19-20]。 γ 射线具有高穿透性,低衰减性,通常在与物质随机相互作用产生电离前能在组织材料中穿行数厘米,射线在物质中的穿行与放射性核素的位置关系不大,因此可用平均器官剂量来描述。而 α 粒子在生物组织中仅能穿行数个细胞,能量沉积非常局限,因此用辐射加权因子表示 α 粒子诱导癌症的风险要 20 倍于 γ 射线,但这种估算实际上是忽略了吸收剂量的非均质性和辐射质量方面的巨大差异。在考虑 β 粒子内照射辐射防护剂量时,其实平均电离密度和电子轨道的变化,以及剂量的非均匀性等因素都未予以考虑。最后,能发射俄歇电子的核素一般都具有超高的 LET 能力,如碘 125 一次衰变可放出 20 个电子,这些核素大多数衰变能量较低,但可在衰变位置周围纳米空间造成强大的电子轨道重叠,以致于在一个 DNA 分子上造成的簇性损伤可能比 α 粒子还要大。

可见,从不同类型的辐射到不同组织的相对剂量和风险评估都有很大的不确定性。辐射防护委员会提出的模型只是为了便于剂量系数的计算,同时也是目前最佳的估计剂量和评估风险的模型。辐射防护委员会提出的剂量系数只能作为参考值,这个参考值只能说明不确定性的存在,但不能代替不确定性。了解各种不确定因素只是有助于理解对内照射防护最优化作出的判断,如果只是出于一般防护目的,没有必要对不确定性进行例行的评估。

5 小结

目前对上述辐射危害生物学研究结果和在此基础上建立的各种评估辐射危害的模型虽然还存在不同的评价和观点,但在如何科学评估辐射危害这个问题上,上述研究也是目前能提供最科学的研究结果和较合理的解释模型。随着研究的不断深入,有望产生更科学更合理的辐射危害评价理论和模型。然而,在新理论新模型未产生之前,继承现有的理论和模型是科学的态度和明智的选择。