

ICRP第148号出版物《参考动物和植物的辐射权重》内容简介及中国学者的贡献

A brief introduction to ICRP publication 148: radiation weighting for reference animals and plants and the contribution of Chinese scholars

Liu Yulong, Wang Bing, Cui Fengmei

引用本文:

刘玉龙, 王冰, 崔凤梅. ICRP第148号出版物《参考动物和植物的辐射权重》内容简介及中国学者的贡献[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2023, 47(10): 652-658. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202308005-00356

Liu Yulong, Wang Bing, Cui Fengmei. A brief introduction to ICRP publication 148: radiation weighting for reference animals and plants and the contribution of Chinese scholars[J]. *International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*, 2023, 47(10): 652-658. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202308005-00356

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202308005-00356>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

开放性放射性核素治疗后患者免住院的建议 (ICRP 94 报告要点解读)

Release of patients therapy with unsealed radionuclides (ICRP publication 94)

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(5): 397-399 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.05.002>

分子生物学水平的生物剂量学指标研究现状

Research status of biological dosimetry index of molecular biological level

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(2): 167-172 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.02.012>

电离辐射诱导的外泌体的生物学效应

Biological effects of radiation-induced exosomes

国际放射医学核医学杂志. 2017, 41(2): 121-125 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2017.02.008>

MiR-148a对肺癌细胞放射敏感性的影响

Effect of miR-148a on the radiosensitivity of lung cancer cells

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(3): 248-256 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.03.010>

辐射损伤相关生物标志物的研究进展

Research progress of biomarkers related to radiation injury

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(2): 118-123 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202009038-00019>

胸部肿瘤适形和调强常规分割放疗脊髓生物效应剂量研究

The study for biological effect dose of spinal cord in thoracic tumors with the model of conformal and intensity modulated technique and conventional fractionation

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(6): 518-523 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.06.008>

·氚的辐射危害与防护管理·

ICRP 第 148 号出版物《参考动物和植物的辐射权重》

内容简介及中国学者的贡献

刘玉龙¹ 王冰² 崔凤梅³

¹苏州大学附属第二医院肿瘤职业病科, 苏州 215004; ²日本国立研究开发法人量子科学技术研究开发机构, 放射线医学研究所, 千叶 263-8555; ³苏州大学苏州医学院放射医学与防护学院, 放射医学与辐射防护国家重点实验室, 苏州 215123

通信作者: 刘玉龙, Email: yulongliu2002@126.com

【摘要】核聚变的推广应用是国家重要的能源战略。伴随着氚向环境中排放量的增加以及氚在众多领域中的广泛应用, 人类受到低剂量氚照射的概率也随之增加。2021年国际放射防护委员会(ICRP)第148号出版物《参考动物和植物的辐射权重》正式发布。在其选用的资料中, 均引用了中国学者的相关文献及氚相对生物效能(RBE)的研究结果。笔者以ICRP第148号出版物为基础, 概述了低能氚 β 粒子对不同生物终点影响的RBE值, 总结了我国学者对氚研究所做出的贡献, 并对氚的进一步研究进行了展望, 旨在推动对氚的纵深研究进展, 为氚的辐射防护做出应有的贡献。

【关键词】氚; 国际放射防护委员会; β 粒子; 相对生物效能; 生物终点

基金项目: 国家社会科学基金(21BGL300)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202308005-00356](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202308005-00356)

A brief introduction to ICRP Publication 148: Radiation Weighting for Reference Animals and Plants and the contribution of Chinese scholars

Liu Yulong¹, Wang Bing², Cui Fengmei³

¹Department of Oncology and Occupational Disease, the Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215004, China; ²Institute for Radiological Science, National Institutes for Quantum Science and Technology, Chiba 263-8555, Japan; ³State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, School of Radiology Medicine and Protection, Suzhou Medical College of Soochow University, Suzhou 215123, China

Corresponding author: Liu Yulong, Email: yulongliu2002@126.com

【Abstract】 The promotion and application of nuclear fusion is an important national energy strategy. Tritium emissions into the environment have increased, and its application in many fields has become extensive. Accordingly, the probability of human exposure to low-dose tritium radiation also increases. In 2021, International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 148: *Radiation Weighting for Reference Animals and Plants* was officially released. Among the selected materials, relevant literature from Chinese scholars and results of research on tritium relative biological efficiency (RBE) are cited. Based on ICRP Publication 148, the author summarizes the RBE values of the effects of low-energy tritium β particles on different biological endpoints, as well as the contributions made by Chinese scholars to tritium research. We further discuss prospects for future research on tritium to promote its in-depth study and suitably contribute to its radiation protection.

【Key words】 Tritium; International Commission on Radiological Protection; Beta particles; Relative biological effectiveness; Biological endpoint

Fund program: National Social Science Foundation of China (21BGL300)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202308005-00356

国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第148号出版物(ICRP Publication 148: *Radiation Weighting for Reference Animals and Plants*)^[1]于2021年正式发布,其授权的中文译本《参考动物和植物的辐射权重》^[2]也于2023年4月由中国原子能出版社出版。该出版物的要点有以下5个部分:(1)综述了相对生物效能(relative biological effectiveness, RBE)的研究数据,如低能氚 β 粒子和 α 粒子的RBE值。(2)物种间的RBE值没有显示明显的差异,与X射线和 γ 射线相比,氚 β 粒子的RBE值分别为1.5~2和2~2.5。通常 α 粒子的RBE值更高,约为10。(3)出于辐射防护目的,根据现有知识,将生物种群吸收剂量的RBE权重因子指定为所有参考动物和植物(reference animals and plants, RAPs)的单一值,以适用于所有与种群相关的生物终点。(4)RBE对RAPs的RBE权重因子吸收剂量率应采用所有低传能线密度(linear energy transfer, LET)的值为1的射线和LET的值为10的 α 粒子计算,以便与导出考虑参考水平(derived consideration reference level, DCRL)进行比较。(5)如果暴露于氚 β 粒子或其他低能量、低LET辐射的剂量在DCRL范围内或接近DCRL,则可能需要进行额外审查并修改RBE权重因子。ICRP第148号出版物收集了1957~2021年64年间世界各国有关氚 β 粒子所致生物效应RBE值的研究成果,其中降低生殖功能率的RBE值等资料均来自中国学者的贡献。该出版物涵盖内容丰富,本文作者在获得ICRP授权后,组织该领域的学者将其翻译成了中文。本文重点介绍低能氚 β 粒子对不同生物终点影响的RBE值。

1 ICRP第148号出版物的主要组成部分及氚相关内容的概括性介绍

ICRP第148号出版物的主要组成部分包括总论、氚 β 粒子的RBE值、 α 粒子的RBE值、总体结论和建议、参考文献、3个附录、词汇表及致谢。ICRP第148号出版物指出,RBE值是产生相同水平效应的辐射和低LET参考射线的剂量比值,其是通过实验确定的。在包括人类和动物细胞系在内的体外实验以及动物体内实验中,研究者对各种生物终点的RBE值进行测量,得出生物效能的大小不仅取决于辐射的剂量、类型和能量,还取决于剂量率,最重要的是取决于被研究的生物终点的结论。将上述结论应用于人类的辐射防护,需要对RBE数据进行汇总与分析。尽管人类辐射防护的重点是避免确定性效应和限制随机性效

应(癌症或遗传)的发生,但对生物种群的辐射防护主要侧重于与生物种群生存能力相关的终点。ICRP第148号出版物综合报道了低能氚 β 粒子对不同生物终点影响的RBE值。与X射线相比,氚 β 粒子的RBE值为1.5~2;与 γ 射线相比,氚 β 粒子的RBE值为2~2.5。鉴于辐射防护目的,建议使用RBE加权吸收剂量,所有受低LET辐射照射生物种群的RBE权重因子为1。然而,如果估算暴露于氚 β 粒子或其他低能量、低LET辐射的剂量在DCRL范围内或接近DCRL,则可能需要采用更高的RBE值进行相应的评估。

氚原子核包含1个质子和2个中子,其通过发射 β 粒子进行衰变,物理半衰期为12.3年, β 粒子在空气中的传播距离约为6.0 mm,无法穿透皮肤的角质层。因此,与氚相关的主要危害是氚进入生物体内(食入、吸入和通过皮肤吸收)并在生物体内释放 β 粒子。在活的生物组织中,氚 β 粒子的传播距离仅约6 μm (典型动物细胞的直径为10~20 μm ,细胞核的直径为6~15 μm ;植物细胞的直径为10~100 μm),由于氚 β 粒子初始能量低且射程短,因此发射的 β 粒子产生的平均电离密度高于高能量 β 粒子或光子产生的电离密度;LET也是前者高于后者。

氚作为氚水在环境中最常见,其具有与水相同的化学性质,一旦进入生物体内,它就会迅速与生物体内的水分达到平衡,并均匀分布在所有软组织中。有机结合氚(organically bound tritium, OBT)是指氚结合到碳水化合物、脂肪或蛋白质等有机分子中的一种形式,包括可交换和不可交换OBT。当氚原子与氧、硫、氮或磷原子发生键合时,氚很容易与水里的氢交换,因此被认为是可交换OBT。OBT中的可交换氚表现出与氚水相似的动力学行为。当氚原子与有机分子中的碳原子键合时,只能通过酶反应释放,被认为是不可交换OBT。OBT中只有不可交换态氚才表现出有关OBT分子的动力学特征及其在生物体内组织中的循环。在有机分子的合成过程中,少部分OBT被非交换性地掺入其中(成为不可交换OBT)。氚也可以作为食物中的OBT被动物摄入。氚在成年人体内的生物半排期(核素在机体中的总量减少到一半时所需的时间):可交换性氚水为10 d,不可交换性OBT为40 d^[3]。ICRP的一系列出版物建立了不同年龄阶段人体的生物动力学和剂量学模型,并用于计算氚水、OBT和氚化气体摄入量系数^[3-7]。当氚掺入DNA中,如氚标记的胸腺嘧啶核苷(³H-thymidine, ³H-TdR),细胞接受的 β 粒子的辐射剂量将取决于其分裂周期的长短,增殖速率较大的细胞结合³H-TdR的概率更大,

但它们也会更迅速地清除³H-TdR; 增殖速率较小的细胞结合³H-TdR的概率会小得多, 但其滞留时间较长。源自OBT的 β 粒子辐射剂量的估算比氘水的剂量的估算具有更多的不确定性^[8-9]。

2 氘 β 粒子RBE相关内容的详细介绍

2008年的ICRP出版物将氘 β 粒子RBE值的生物终点分为早期死亡率、生殖功能率、发病率、染色体损伤或基因突变, 其中只有前3个生物终点被认为与生存能力有关^[10]。

2.1 以早期死亡率为生物终点的RBE值

Yamada等^[11]研究了氘 β 粒子和 γ 射线外照射对小鼠胚胎[BC3F1(C3H/C57BL)]存活率的影响。他们首先对原核期和两细胞期小鼠胚胎进行体外培养, 在培养液中加入氘水, 使其剂量率为0.2~4.1 Gy/d(3 d后累积剂量为0.6~16.3 Gy); 然后, 以⁶⁰Co γ 射线作为参考射线, 剂量率为0.48 Gy/d(3 d后累积剂量为19.2 Gy), 根据LD₅₀值(杀死半数受试群体所需的剂量)计算RBE值, 原核期、早期两细胞期和晚期两细胞期胚胎的RBE值分别为1.0、1.7和1.3。

总之, 所有估算氘 β 粒子RBE值的相关研究都使用氘水作为辐射源, 研究对象为BC3F1小鼠胚胎和CF1成年小鼠, 每项类似的研究都采用高剂量率和高累积剂量的慢性照射, 提高死亡率的RBE值为1.0~1.7。

2.2 以降低生殖功能率为生物终点的RBE值

有研究者使用250 kVp的X射线作为参考射线, 研究了氘 β 粒子对成年小鼠(CBA/H)睾丸质量的影响。小鼠单次腹腔注射氘水(剂量率为0.14~0.43 Gy/d, 累积剂量为1.43~4.34 Gy), 10 d后测定睾丸质量; X射线持续照射10 d(剂量率为0.13~0.33 Gy/d, 累积剂量为1.33~3.36 Gy), 照射结束后测定睾丸质量。结果显示, 小鼠睾丸质量降低的RBE值为1.07~1.40^[12]。

Carr和Nolan^[13]研究了氘水和³H-TdR对成年小鼠(CBA/H)睾丸质量的影响, 并将这些影响与⁶⁰Co γ 射线产生的影响进行了比较。他们采用 γ 射线分割照射15次, 以模拟氘暴露(总剂量为0.578 Gy)。成年小鼠单次腹腔注射氘水或³H-TdR, 平均累积剂量分别为0.145~0.58 Gy和0.03~0.50 Gy。每个实验组小鼠在照射开始后24周测定睾丸质量。根据相应的剂量-反应曲线的斜率计算氘 β 粒子的RBE值(积分分数质量损失作为计算照射后10周睾丸内平均吸收剂量的函数), 并获得氘水的RBE值为1.43±0.19, ³H-TdR的RBE值为2.07±0.25。值得注意的是, 研究中只使用了单一剂量的⁶⁰Co γ 射线, 因此研究得出的RBE值仅适用于该剂量。

Lambert^[14]研究了氘 β 粒子(氘水和³H-TdR)与X射线相比杀死成年小鼠(DBA2)静息初级精母细胞的RBE值。

一组小鼠单次腹腔注射氘水, 剂量率为0.04~0.06 Gy/d(累积剂量为0.05~0.12 Gy); ³H-TdR的剂量率为0.06~0.11 Gy/d(累积剂量为0.084~0.19 Gy)。同时, 另一组小鼠在0.02~0.16 Gy/d的剂量率范围内, 以递减剂量率的X射线慢性照射72 h(累积剂量为0.05~0.50 Gy)。在氘注射(氘水或³H-TdR)或X射线照射后19、72 h, 对小鼠静息初级精母细胞的RBE值进行定量, 氘 β 粒子的RBE值分别为2.3和2.4, 而³H-TdR的RBE值分别为1.3和1.6。

Zhou等^[15]研究了氘 β 粒子和 γ 射线对幼年小鼠(LACA系)初级卵母细胞和精原细胞存活率的影响。研究者采用2种不同的方法处理小鼠: (1)单次腹腔注射氘水(指数递减剂量率); (2)单次腹腔注射氘水后, 在小鼠饮水中氘给药(恒定剂量率)。上述细胞10 d内从氘水 β 粒子中接受的累积剂量为0.2~1.0 Gy。另一组小鼠用⁶⁰Co γ 射线以指数递减剂量率或恒定剂量率连续照射10 d(累积剂量为0.7~2.8 Gy)。在剂量率呈指数下降的情况下, 根据剂量-反应曲线的斜率计算出氘 β 粒子的RBE值, 初级卵母细胞存活率的RBE值为1.4~2.0, 精原细胞存活率的RBE值为2.1~2.8。辐射以恒定剂量率进行时, 初级卵母细胞存活的RBE值为1.65, 精原细胞存活的RBE值为2.3~2.5。

Dobson和Kwan^[16]将⁶⁰Co γ 射线作为参考射线, 计算氘 β 粒子的RBE值, 研究了氘对降低瑞士-Webster小鼠初级卵母细胞存活率的影响。一组小鼠以2.20~19.80 mGy/d的剂量率(累积剂量为0.07~0.65 Gy)暴露于氘水中(暴露33 d, 从受孕至出生后14 d)。另一组小鼠以10.08~31.92 mGy/d的剂量率(累积剂量为0.33~1.05 Gy)的⁶⁰Co γ 射线慢性照射(照射33 d, 从受孕至出生后14 d)。在出生后14 d, 对每个实验组小鼠的雌性后代进行初级卵母细胞数量的量化。氘 β 粒子的RBE值随剂量的减小而增大, 在参考⁶⁰Co γ 射线剂量为0.4、0.2 Gy时, RBE值分别为1.8、2.5。此后, Dobson和Kwan^[17]发表了一份更完整的后续研究报告。他们使用相同的实验动物(非近交的瑞士-Webster小鼠)和方法(从小鼠受孕到出生后14 d, 接触氘水或⁶⁰Co γ 射线33 d), 但剂量率不同。氘水的剂量率为24.96~51.52 mGy/d(累积剂量为0.57~0.83 Gy), ⁶⁰Co γ 射线的剂量率为8.0~38.0 mGy/d(累积剂量为0.26~1.25 Gy)。经估算, 在低辐射剂量条件下, 卵母细胞存活的氘 β 粒子的RBE值为2.5。

Satow等^[18]研究了氘 β 粒子对小鼠卵母细胞存活率影响的RBE值。他们给予14日龄幼鼠(ICR)单次腹腔注射氘水(累积剂量为0.04~0.25 Gy, 连续14 d)或¹³⁷Cs γ 射线以逐渐降低的剂量率慢性照射以模拟氘水暴露(剂量率为0.03~0.09 Gy/d, 连续14 d, 累积剂量为0.06~0.2 Gy)。由单靶模型的生存曲线计算得到氘 β 粒子的RBE值为1.1~3.5。这与文献^[16-17]报道一致, 即RBE值随氘 β 粒子剂量的减少而增

加;但在低剂量(0.04 Gy)时 RBE 值最高,为 3.5^[18]。

Satow 等^[19]研究了氡 β 粒子和¹³⁷Cs γ 射线对成熟大鼠(Donryu)的致畸作用。在实验中,注入组大鼠于妊娠第 8 天或第 9 天单次腹腔注射氡水(剂量率为 0.14~1.06 Gy/d,累积剂量为 1.75~6.80 Gy)。对照组大鼠于妊娠第 9~18 d 接受¹³⁷Cs γ 射线慢性照射(剂量率与氡水相同,累积剂量为 1.75~6.80 Gy)。计算并统计 2 组大鼠胎儿存活的百分比和胎儿畸形的发生频率。氡 β 粒子注入组中产生 50% 和 20% 异常的 RBE 值分别为 1.8 和 2.4。50% 和 20% 存活胎儿产生异常的 RBE 值分别为 2.0 和 2.6。

Zhou 等^[20]研究了氡 β 粒子和 γ 射线对成年雌性小鼠(LACA)卵母细胞显性致死突变频率的影响。一组小鼠单次腹腔注射氡水(累积剂量为 39~912 mGy)。另一组小鼠用⁶⁰Co γ 射线以逐渐降低的剂量率慢性照射 10 d(累积剂量为 0.53~2.70 Gy)。照射后 21 d,雌性小鼠与未照射的雄性小鼠交配,交配后再饲养 18 d,检查雌性小鼠卵巢中的黄体数量、活胎胎数以及早期和晚期胚胎死亡数,以估计诱发显性致死突变频率的剂量,最终由剂量-反应曲线斜率计算得到氡 β 粒子的 RBE 值为 2.5。

此后,Zhou 等^[15]进行了一项更完整的研究,分析了氡 β 粒子和 γ 射线对幼年小鼠的遗传效应(卵母细胞、精母细胞的显性致死突变,精原细胞的显性致死突变)。一组小鼠单次腹腔注射氡水,剂量率呈指数递减,氡 β 粒子 10 d 的累积剂量为 0.2~1.0 Gy。另一组小鼠用⁶⁰Co γ 射线以指数递减或恒定剂量率慢性照射 10 d,累积剂量为 0.7~2.8 Gy。根据剂量-反应曲线斜率计算氡 β 粒子的 RBE 值,卵母细胞显性致死突变的 RBE 值为 2.8~3.4,精原细胞显性致死突变的 RBE 值为 3.5~3.9,精母细胞显性致死突变的 RBE 值为 1.6~3.9。

综上,大多数关于降低生殖功能率的氡 β 粒子 RBE 值研究的对象均为小型哺乳动物,研究人员分析了与降低生殖功能有关的几个生物终点:生殖能力和性能、睾丸质量减轻、生殖细胞(雌性和雄性)存活和显性致死突变。

绝大多数关于降低生殖功能率的氡 β 粒子的 RBE 值研究都使用 γ 射线作为参考射线。在所有研究中,氡和参考射线均以 2~1 700 mGy/d 的剂量率长期照射。降低生殖功能率的氡 β 粒子(氡作为氡水或³H-TdR 进入体内)的 RBE 值为 1.0~3.9。23 个氡 β 粒子的 RBE 值中只有 5 个大于 3.0。

2.3 以发病率为生物终点的 RBE 值

有研究者估算了氡 β 粒子在大鼠和小鼠体内诱发癌症的 RBE 值。Gragtmans 等^[21]研究了氡 β 粒子和 X 射线对诱导雌性大鼠(Sprague Dawley)乳腺肿瘤的影响。他们给大鼠腹腔注射氡水(间隔 2 d 注射 1 次,共注射 4 次),以维持恒定剂量率(累积剂量为 0.49~4.10 Gy)。通过剂量-反应曲线

的初始斜率(最佳拟合线性关系)计算氡 β 粒子的 RBE 值。在接触氡水所有剂量的大鼠中,每 100 只大鼠累积乳腺肿瘤发病率对应的 RBE 值为 1.02±0.13;当排除最高剂量 3.85 Gy 时,RBE 值为 1.17±0.18。

Johnson 等^[22]研究了氡 β 粒子和 X 射线诱导小鼠(CBA/H)髓系白血病的效能。一组小鼠单次腹腔注射氡水(累积剂量为 0.85~3.04 Gy)。另一组小鼠用 150~200 kVp 的 X 射线慢性照射 10 d,剂量率为 0.24~0.72 Gy/d(累积剂量为 1.06~2.64 Gy)。计算氡 β 粒子的 RBE 值时,考虑到每 1 万只处于风险中的小鼠发生髓系白血病的剂量反应的不同拟合度,其 RBE 值为 1.1~1.24,最佳 RBE 值为 1.2±0.3。

Seyama 等^[23]研究了氡 β 粒子和¹³⁷Cs γ 射线对成年雌性小鼠(C57BL/6N 和 BCF1)不同器官肿瘤发生发展的影响。一组小鼠单次腹腔注射氡水(累积剂量为 0.27 Gy 或 2.7 Gy)。另一组小鼠接受¹³⁷Cs γ 射线慢性照射(累积剂量为 0.27 Gy 或 2.7 Gy,剂量率分别为 0.08 Gy/d 和 0.76 Gy/d)。根据 2.7 Gy 照射后 500 d 的肿瘤发病率计算,氡 β 粒子的 RBE 值为 2.5。

总之,在小型哺乳动物系统中,无论是在体内(小鼠和大鼠)还是在体外(转化细胞系,如小鼠淋巴细胞白血病、细胞系 L5178Y 或中国仓鼠 V79B)研究氡水的氡 β 粒子照射产生致病效应的 RBE 值,均选用¹³⁷Cs、⁶⁰Co 或²²⁶Ra γ 射线作为参考射线。在 RBE 值研究中,分析了与发病率相关的几个终点:诱导的乳腺肿瘤、髓系白血病、实验动物组织损伤(如脾脏和胸腺萎缩)、降结肠和肠细胞存活率、⁵⁹Fe 摄取抑制和转化细胞系中的细胞存活率。综上,用氡水处理时,大多数氡 β 粒子产生致病效应的 RBE 值为 1.0~2.5。当选用细胞系研究生物终点时,估算的 RBE 值为 1.7~4.4,具体 RBE 值取决于研究中的温度、照射细胞系的时间和选用的细胞类型。

2.4 以染色体损伤或基因突变为生物终点的 RBE 值

Kozlowski 等^[24]评估了氡 β 粒子和 X 射线诱导小鼠骨髓细胞染色体畸变的情况。一组小鼠从受孕后第 1 天到第 20 天分娩期间给予氡水或氡化水芹,估算孕期累积剂量分别为 0.6 Gy 和 0.3 Gy。分娩后 4 周内,氡水和氡化水芹组小鼠的总氡累积剂量均为 0.1 Gy。另一组小鼠于妊娠第 7 天或第 14 天用 250 kVp 的 X 射线急性照射,总剂量为 0.5 Gy。分别对氡水、氡化水芹组和 X 射线照射组小鼠的母代及其子代的骨髓染色体畸变进行定量分析。他们没有准确计算氡 β 粒子的 RBE 值,其估算 RBE 值为 1.0~2.0。

Zhou 等^[15]以诱导小鼠精母细胞染色体畸变为生物终点研究了氡 β 粒子的 RBE 值。一组小鼠单次腹腔注射氡水,然后在饮用水中加入氡以保持剂量率恒定,β 射线的累积剂量为 0.2~1.0 Gy(剂量率为 0.005~0.05 Gy/d)。另一组小鼠以恒定剂量率的⁶⁰Co γ 射线慢性照射 10 d,累积剂量为 0.43~

2.04 Gy(剂量率为 0.04~0.20 mGy/d), 计算得出 RBE 值为 2.9~3.8。

Tanaka 等^[25]研究了以人外周血淋巴细胞和骨髓细胞染色体畸变为生物终点的氚 β 粒子的 RBE 值。他们在室温下用氚水处理外周血和骨髓样本, 剂量率为 4.8 Gy/d, 累积剂量为 0.13~1.11 Gy; 分别以⁶⁰Co γ 射线(剂量率为 28.8 Gy/d, 累积剂量为 0.25~2.0 Gy)和¹³⁷Cs γ 射线(剂量率为 0.29 Gy/d, 累积剂量为 2.0 Gy)作为参考射线。当以⁶⁰Co γ 射线作为参考射线时, 引发人外周血淋巴细胞染色体畸变和双着丝点畸变的氚 β 粒子的 RBE 值分别为 2.2~2.7 和 2.1~2.3; 当以¹³⁷Cs γ 射线作为参考射线时, 引发染色体畸变的 RBE 值为 2.0。在人类骨髓细胞中, 当以⁶⁰Co γ 射线作为参考射线时, 引发染色体畸变和染色单体畸变的 RBE 值分别为 1.13 和 3.10。

3 中国学者贡献的简要介绍

氚的 RBE 值变化较大, 其与不同组织的辐射敏感性及其对低能氚 β 粒子的敏感性有关, 随选择参考射线的能量、剂量、剂量率以及生物终点的不同而不同。在任何情况下确定 RBE 值时, 所有这些元素都需要尽可能保持恒定, 但是在比较 RBE 值时, 很难确定哪个决定因素更重要。

从 2021 年 ICRP 第 148 号出版物^[1]介绍的研究氚 RBE 值的大量成果可以看出, 氚是放射毒理学研究领域很重要的一个组成部分。随着核能的发展, 氚生物效应的研究与核聚变反应堆的开发这一重大课题有着密切关系, 这是当今它在辐射防护研究中占据重要位置的主要原因。在俄罗斯、美国和日本, 氚的研究开始得比较早。我国氚的研究虽然起步相对较晚, 但也有 40 多年的历史, 在氚通过不同途径进入体内的分布、代谢、转移规律及内剂量估算^[26-28]、氚对发育中的中枢神经系统的影响及机制探讨^[29-38]等诸多方面的研究都有中国学者的贡献。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 刘玉龙负责综述的撰写; 王冰、崔凤梅负责综述的修改

参 考 文 献

- [1] Higley K, Real A, Chambers D. ICRP Publication 148: Radiation Weighting for Reference Animals and Plants[J]. *Ann ICRP*, 2021, 50(2): 9-133. DOI: [10.1177/0146645319896548](https://doi.org/10.1177/0146645319896548).
- [2] 刘玉龙, 王冰, 崔凤梅. 参考动物和植物的辐射权重[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2023.
Liu YL, Wang B, Cui FM. Radiation weighting for reference animals and plants[M]. Beijing: China Atomic Energy Publishing House, 2023.
- [3] Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. A report of a task group of committee 2 of the international commission on radiological protection[J]. *Ann ICRP*, 1993, 23(3/4): 1-167. DOI: [10.1002/anie.201502548](https://doi.org/10.1002/anie.201502548).
- [4] Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. A report of a task group committee of the international commission on radiological protection[J]. *Ann ICRP*, 1989, 20(2): 1-122.
- [5] Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a task group of the international commission on radiological protection[J]. *Ann ICRP*, 1994, 24(1/3): 1-482.
- [6] Task Group of Committee 2. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. A report of a task group of committee 2 of the international commission on radiological protection[J]. *Ann ICRP*, 1995, 25(3/4): 1-405. DOI: [10.1016/S0146-6453\(00\)80008-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6453(00)80008-1).
- [7] Age-dependent dose to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients[J]. *Ann ICRP*, 1996, 26(1): 1-91. DOI: [10.1016/S0146-6453\(00\)89192-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6453(00)89192-7).
- [8] Mann K. Tritium and other radionuclide labeled organic compounds incorporated in genetic material: NCRP report no. 63. National Council on Radiation Protection and Measurements Washington, DC, IAEA, 1979, 116 pp, Austrian Schillings 185[M]. NCRP, 1979.
- [9] Straume T, Carsten AL. Tritium radiobiology and relative biological effectiveness[J]. *Health Phys*, 1993, 65(6): 657-672. DOI: [10.1097/00004032-199312000-00005](https://doi.org/10.1097/00004032-199312000-00005).
- [10] Clarke RH, Holm LE. Development of ICRP's philosophy on the environment. A report of environmental protection: the concept and use of reference animals and plants[J]. *Ann ICRP*, 2008, 38(4/6): 3-242. DOI: [10.1016/j.icrp.2009.04.002](https://doi.org/10.1016/j.icrp.2009.04.002).
- [11] Yamada T, Yukawa O, Asami K, et al. Effect of chronic HTO β or ⁶⁰Co γ radiation on preimplantation mouse development *in vitro*[J]. *Radiat Res*, 1982, 92(2): 359-369. DOI: [10.2307/3576012](https://doi.org/10.2307/3576012).
- [12] Atomic Energy Control Board. Cytogenetic measurements of the relative biological effectiveness of tritium[R]. Ottawa: Atomic Energy Control Board, 1988.
- [13] Carr TE, Nolan J. Testis mass loss in the mouse induced by tritiated thymidine, tritiated water, and ⁶⁰Co gamma irradiation [J]. *Health Phys*, 1979, 36(2): 135-145. DOI: [10.1097/00004032-197902000-00004](https://doi.org/10.1097/00004032-197902000-00004).
- [14] Lambert BE. Cytological damage produced in the mouse testes by tritiated thymidine, tritiated water and x-rays[J]. *Health Phys*, 1969, 17(4): 547-557. DOI: [10.1097/00004032-196910000-00003](https://doi.org/10.1097/00004032-196910000-00003).
- [15] Zhou XY, Dong JC, Zhou SY, et al. Experimental study on

- relative biological effectiveness of tritium and risk estimates of genetic damage[J]. *Chin Med J (Engl)*, 1989, 102(11): 872-878.
- [16] Dobson RL, Kwan TC. The RBE of tritium radiation measured in mouse oocytes: increase at low exposure levels[J]. *Radiat Res*, 1976, 66(3): 615-625. DOI: [10.2307/3574465](https://doi.org/10.2307/3574465).
- [17] Dobson RL, Kwan TC. The tritium RBE at low-level exposure--variation with dose, dose rate, and exposure duration[J]. *Curr Top Radiat Res Q*, 1978, 12(1/4): 44-62.
- [18] Satow Y, Hori H, Lee JY. Teratogenic effect of fission neutron and tritium water on rat embryo[J]. *J UOEH*, 1989, (Suppl 11) : S416-431.
- [19] Satow Y, Hori H, Lee JY, et al. Effect of tritiated water on female germ cells: mouse oocyte killing and RBE[J]. *Int J Radiat Biol*, 1989, 56(3): 293-299. DOI: [10.1080/09553008914551461](https://doi.org/10.1080/09553008914551461).
- [20] Zhou XY, Dong JC, Geng XS, et al. Tritium beta-ray and ⁶⁰Co gamma-ray caused dominant lethal mutation in mice[J]. *Chin Med J (Engl)*, 1986, 99(5): 420-423.
- [21] Gragtmans NJ, Myers DK, Johnson JR, et al. Occurrence of mammary tumors in rats after exposure to tritium beta rays and 200-kVp X rays[J]. *Radiat Res*, 1984, 99(3): 636-650. DOI: [10.2307/3576337](https://doi.org/10.2307/3576337).
- [22] Johnson JR, Myers DK, Jackson JS, et al. Relative biological effectiveness of tritium for induction of myeloid leukemia in CBA/H mice[J]. *Radiat Res*, 1995, 144(1): 82-89. DOI: [10.2307/3579239](https://doi.org/10.2307/3579239).
- [23] Seyama T, Yamamoto O, Kinomura A, et al. Carcinogenic effects of tritiated water (HTO) in mice: in comparison to those of neutrons and gamma-rays[J]. *J Radiat Res*, 1991, 32 (Suppl 2): S132-142. DOI: [10.1269/jrr.32.supplement2_132](https://doi.org/10.1269/jrr.32.supplement2_132).
- [24] Kozłowski R, Bouffler SD, Haines JW, et al. In utero haemopoietic sensitivity to alpha, beta or X-irradiation in CBA/H mice[J]. *Int J Radiat Biol*, 2001, 77(7): 805-815. DOI: [10.1080/09553000110053161](https://doi.org/10.1080/09553000110053161).
- [25] Tanaka K, Sawada S, Kamada N. Relative biological effectiveness and dose rate effect of tritiated water on chromosomes in human lymphocytes and bone marrow cells[J]. *Mutat Res*, 1994, 323(1/2): 53-61. DOI: [10.1016/0165-7992\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0165-7992(94)90045-0).
- [26] 吕慧敏, 周湘艳, 董金婵, 等. 氚水通过不同创伤皮肤的吸收率[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1995, 15(6): 411-413. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1995.06.116](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1995.06.116).
- Lyu HM, Zhou XY, Dong JC, et al. The absorption rate of tritium water through different traumatic skins[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1995, 15(6): 411-413. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1995.06.116](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1995.06.116).
- [27] 吕慧敏, 周湘艳, 李莉, 等. 氚通过母乳向仔鼠的转移规律[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1993, 13(3): 180-182. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.03.114](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.03.114).
- Lyu HM, Zhou XY, Li L, et al. The transfer law of tritium from breast milk to neonatal rats[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1993, 13(3): 180-182. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.03.114](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.03.114).
- [28] 吕慧敏, 周湘艳, 李莉, 等. 单次注入氚水后氚在孕鼠体内的代谢和转移[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1993, 11(2): 95-98.
- Lyu HM, Zhou XY, Li L, et al. Metabolism distribution and transfer of tritium in pregnant mice after exposure to tritium water[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 1993, 11(2): 95-98.
- [29] Wang B, Takeda H, Gao WM, et al. Induction of apoptosis by beta radiation from tritium compounds in mouse embryonic brain cells[J]. *Health Phys*, 1999, 77(1): 16-23. DOI: [10.1097/00004032-199907000-00005](https://doi.org/10.1097/00004032-199907000-00005).
- [30] Wang B, Watanabe K, Yamada T, et al. Effects of beta radiation from organically bound tritium on cultured mouse embryonic mid brain cells[J]. *Health Phys*, 1996, 71(6): 915-921. DOI: [10.1097/00004032-199612000-00008](https://doi.org/10.1097/00004032-199612000-00008).
- [31] 王冰, 周湘艳, 王玉起, 等. 小剂量氚水宫内照射对出生后仔鼠脑组织生长抑素、精氨酸加压素含量的影响[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1993, 13(5): 311-314. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.05.108](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.05.108).
- Wang B, Zhou XY, Wang YQ, et al. Changes in contents of somatostatin in hypophysis and arginine vasopressin in hypothalamus of postnatal developing brain induced by low level prenatal β -irradiation of tritiated water in mice[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1993, 13(5): 311-314. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.05.108](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.05.108).
- [32] 王冰, 周湘艳. 小剂量氚水宫内照射对出生后仔鼠行为、学习及记忆能力的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1993, 11(3): 184-188, 192.
- Wang B, Zhou XY. Effects of low level prenatal beta-irradiation of tritiated water on postnatal behavior, learning and memory ability in mice[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 1993, 11(3): 184-188, 192.
- [33] 王冰, 周湘艳. 低剂量氚水宫内照射对出生后仔鼠生长发育及反射行为的影响[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1993, 13(4): 232-235. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.04.106](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.04.106).
- Wang B, Zhou XY. Effects of low level prenatal β -irradiation from tritiated water on postnatal growth and reflex behavior in mice[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1993, 13(4): 232-235. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.04.106](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1993.04.106).
- [34] 王冰, 周湘艳. 低剂量氚水宫内照射对仔鼠脑神经元发育的影响[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1994, 14(2): 79-82.
- Wang B, Zhou XY. Effect of low-dose β -irradiation of tritiated water on neurons of developing brain in mice[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1994, 14(2): 79-82.
- [35] 高卫民, 周湘艳. 辐射对发育中脑的影响[J]. *辐射防护*, 1997, 17(6): 468-474.
- Gao WM, Zhou XY. Influence of radiation on the developing brain[J]. *Radiat Protect*, 1997, 17(6): 468-474.
- [36] 高卫民, 周湘艳, 何湘平, 等. 出生前氚水照射对仔鼠海马神经元电生理及神经行为的影响[J]. *辐射防护*, 1997, 17(5): 44-53.

Gao WM, Zhou XY, He XP, et al. Effects of prenatal low dose beta radiation from tritiated water on rat hippocampus neurons: electrophysiological and neurobehavioural changes[J]. Radiat Protect, 1997, 17(5): 44-53.

[37] 高卫民, 周湘艳. 出生前氚水照射对仔代大鼠生长发育及神经行为的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1998, 18(6): 381-385. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1998.06.005.

Gao WM, Zhou XY. Effect of prenatal exposure to low dose beta

radiation from tritiated water on postnatal growth and neuro behavior of rats[J]. Chin J Radiol Med Prot, 1998, 18(6): 381-385. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1998.06.005.

[38] Gao WM, Wang B, Zhou XY. Effects of prenatal low-dose beta radiation from tritiated water on learning and memory in rats and their possible mechanisms[J]. Radiat Res, 1999, 152(3): 265-272. DOI: 10.2307/3580326.

(收稿日期: 2023-08-08)

《国际放射医学核医学杂志》第六届编辑委员会成员名单

顾问 柴之芳 程天民 樊飞跃 刘昌孝 潘自强 詹启敏 张永学
 总编辑 樊赛军
 副总编辑 黄钢 李宝生 李方 李思进 李亚明 刘强 孙全富 谭建 王军平 王铁
 赵军

编辑委员 (含总编辑、副总编辑)

蔡露(美国) 陈明 陈文新 陈跃 程震 邓大平 董秀玥 樊赛军 樊卫
 方纬 冯彦林 傅志超 高再荣 顾永清 官键 韩星敏 何玲 贺小红 胡步荣
 黄钢 贾强 姜炜 金顺子 鞠永健 兰晓莉 李宝生 李彪 李方 李剑明
 李洁清 李林 李林法 李思进 李险峰 李小东 李亚明 李幼忱 梁琰 林岩松
 刘鉴峰 刘建军 刘建香 刘强 刘兴党 刘玉龙 龙鼎新 吕玉民 吕中伟 马云川
 缪蔚冰 邵春林 沈捷 沈强(美国) 石峰 石洪成 宋娜玲 宋少莉 孙全富
 谭建 唐亚梅 王冰(日本) 王春祥 王凡 王海潮(美国) 王辉 王军平
 王平 王全师 王铁 王雪梅 王跃涛 王云华 王振光 吴华 吴李君 武志芳
 肖国有 徐白萱 徐浩 徐文贵 徐志勇 阎紫宸(中国台湾) 杨国仁 杨辉
 杨吉刚 杨卫东 杨志 姚稚明 于丽娟 查金顺 章英剑 章真 张宏 张锦明
 张舒羽 张遵城 赵长久 赵晋华 赵军 赵路军 赵新明 郑飞波 周美娟 周平坤
 周宗玖 朱朝晖 朱茂祥 朱小华 左长京 Hiroshi Toyama(日本)

Hongming Zhuang(美国) Li shuren(奥地利)

通讯编委

边艳珠 卜丽红 陈薇 陈志军 程兵 程祝忠 戴东 邓智勇 董华 董孟杰
 段东 冯学民 傅鹏 付鹏 付巍 管樑 何玉林 何之彦 黄建敏 黄琦
 霍力 金刚 康飞 李百龙 李贵平 李素平 李昕 梁婷 林端瑜 林志春
 刘斌 刘雪辉 龙再颖 卢洁 陆克义 罗全勇 马超 孟召伟 穆晓峰 农天雷
 秦永德 史文杰 宋其韬 苏新辉 孙凯 谭丽玲 王攀 王任飞 王伟 王雪鹃
 王玉君 王治国 韦智晓 吴彩兰 吴巍 夏伟 徐荣 徐文清 徐颖 杨爱民
 杨忠毅 姚树展 尹雅芙 于海鹏 余飞 袁耿彪 袁建伟 岳殿超 章斌 张春银
 张金赫 张金山 张凯秀 张一帆 张照辉 赵倩 郑红宾 朱高红 朱国英 朱玉春
 周友俊 邹仲敏 左传涛

(以上按姓氏汉语拼音排序)