

· 综述与编译 ·

²³⁹Pu 授予胎体的剂量估算

苏州医学院 苏崑源综述 朱寿彭审校

摘要:为了评价在怀孕期间,由于职业照射及环境照射所带来的危险,以及为了阐明处在核设施周围的儿童白血病的发生与放射性核素照射之间的相关性,胎体剂量学的研究是十分必要的。本文就文献中有关²³⁹Pu 授予胎体的剂量,以及胎儿自出生后到 70 岁止的剂量估算作一概括性介绍。

²³⁹Pu 是一个极毒的放射性核素,它在衰变时释放出 6 种能量不同的 α 粒子,其中能量为 5.16MeV 的 α 粒子占 73.3%,此外,还释放出能量为 32~769keV 的 γ 射线。²³⁹Pu 的物理半衰期为 2.44 × 10⁴ 年,比活度为 2.28GBq/g。

随着核能动力工业的发展,²³⁹Pu 对环境的污染以及对职业人员带来的危害已引起人们的极大关注。²³⁹Pu 对环境的污染来自核工业设施,如核燃料后处理厂、核燃料加工厂及核反应堆所排放的²³⁹Pu⁽¹⁾,以及核试验反应堆发生事故时释放的²³⁹Pu。为了评价在怀孕期间,由于职业照射及环境照射所带来的危险,以及为了阐明处在核设施周围儿童白血病的发生与放射性核素照射之间的相关性,近些年来,有关²³⁹Pu 授予胎体的剂量估算资料日渐增多。从现有的文献资料来看,都是依动物实验资料为依据的⁽²⁻⁶⁾,其中以啮齿类动物的资料居多,也有少量的狒狒资料。在取得动物实验资料之后,再将其外推到人胎体的剂量估算。

1 与人的胎体剂量估算有关的资料及参数

1.1 孕期及宫内剂量估算的参数

表 1 给出了大鼠、豚鼠和人的孕期,以及供宫内剂量估算使用的主要阶段。

但是,有必要指出,表中给出的数值不宜简单地作种间比较,因为尽管发育过程是类

似的,然而在器官发育的进程中,却存在着明显的差异,尤其是在胎儿成长期内,种间差异表现得尤为显著。

表 1 大鼠、豚鼠及人的孕期

怀孕时期	怀孕后的时间(d)		
	大鼠	豚鼠	人
着床植入	5	6	6
胚胎层分化及胎膜发生	5~10	6~13	7~21
胚胎期	9~15	12~26	15~56
胎儿期	15~22	26~70	56~266
供剂量估算使用的主要阶段			
卵黄囊造血期	9~13	13~35	19~63
胎肝显露	10~11	16	30
肝脏造血开始出现	11	20?	42
成骨(骨化)过程开始出现	16	25	56
骨髓造血开始出现	16~17	25~26?	70~77

1.2 剂量估算时所涉及到的胎体器官和组织
的²³⁹Pu 浓度与母体肝脏²³⁹Pu 浓度的比率

动物实验表明,在胎体发育过程,²³⁹Pu 主要滞留在胚囊/卵圆柱体、卵黄囊、肝脏和骨骼(包括骨髓)中。因此,在估算胎体的剂量时,必须包括上述器官和组织。

研究表明,胚囊/卵圆柱体、卵黄囊、肝脏和骨髓的²³⁹Pu 浓度与母体肝脏的²³⁹Pu 浓度比率分别是 0.05~0.4,1~3,0.0085~0.05 和 0.015~0.025。但是,在估算人胎体的剂量时,使用的上述浓度比值分别是 0.1,2,0.01 和 0.02,并将它们分别使用在人怀孕后的 0~2.5 周、2.5~6 周、6~12 周和 12~38

周。

通过动物实验研究得到的、在宫内各个不同发育阶段、胎体的²³⁹Pu浓度与母体²³⁹Pu浓度的比率以及胎儿在出生时的²³⁹Pu浓度与母体的²³⁹Pu浓度的比率参看文献7,利用后者及其它有关参数,按胎儿在出生时的体重,可以计算出胎儿在出生时体内滞留的²³⁹Pu放射性活度。借助这个活度,可以进一步估算出胎儿从出生起到70岁止的待积当量剂量。

1.3 母体肝脏的剂量估算(见下节)

2 剂量估算

2.1 ²³⁹Pu 授予母体肝脏的剂量

ICRP 于 1991 年指出,假若母体在怀孕当年,均衡地慢性经口摄入总量为 1.8kBq 的²³⁹Pu,授予母体的待积有效剂量为 1mSv。据此,对²³⁹Pu 授予母体肝脏的剂量进行了估算。鉴于²³⁹Pu 自人胃肠道的吸收率为 10⁻³,故经口摄入 1.8kBq 的²³⁹Pu 时,其中只有 1.8Bq 进入血液,入血的²³⁹Pu 有 45%滞留在肝脏中。在几天的慢性照射之后,²³⁹Pu 授予母体肝脏的累积当量剂量(Sv)可按下式⁽⁷⁾求得:
$$H_T = 1.8 \times 0.45 \times n / 365 \times n / 2 \times 86400 \times 1 / 1.4 \times 5.155 \times 20 \times 1.6 \times 10^{-13}$$

式中,1.8×0.45×n/365 ²³⁹Pu 到达肝脏的总放射性活度(Bq),n/2×86400 是平均照射时间(s),1.4 是肝脏的质量(kg),5.155 是²³⁹Pu 释放的 α 粒子的能量(MeV),20 是 α 粒子照射的品质因子,1.6×10⁻¹³是由 MeV 换算为焦耳时的转换系数。

2.2 在宫内时期²³⁹Pu 授予造血组织的剂量

在宫内时期,造血组织包括胚囊/卵圆柱体、卵黄囊、肝脏及骨髓。在估算人胎体造血组织的剂量时,所使用的这些器官和组织的²³⁹Pu 浓度与母体肝脏的²³⁹Pu 浓度的比率,以及这些比率值应用于剂量估算时的时间选择已在前一节中作过介绍。现将²³⁹Pu 授予人胎体造血组织的当量剂量列于表 2 中。

表 2 在怀孕当年母体慢性摄入 1.8kBq²³⁹Pu 授予胎体造血组织的当量剂量

组织	怀孕时期(周)	浓度比率	当量剂量(μSv)
胚囊/卵圆柱体	0~2.5	0.1	0.04
卵黄囊	2.5~6	2	1.40
肝脏	6~12	0.01	0.02
骨髓	12~38	0.02	0.70

* 指胎体组织与母体肝脏的²³⁹Pu 浓度比率(由动物资料推得)

由表 2 可看出,在怀孕当年,母体经口慢性摄入 1.8kBq 的²³⁹Pu 时,在宫内时期,²³⁹Pu 授予胎体造血组织的当量剂量是 2.16μSv,其中卵黄囊占 65%,骨髓占 32%。与胎体相比较,母体在这一年中,红骨髓的剂量是 34μSv。

2.3 宫内时期²³⁹Pu 授予肝脏和骨骼的剂量

表 1 给出的资料表明,人在怀孕后 30 天,胎体肝脏开始显露,因此,在估算胎体肝脏的剂量时,从孕后的第 5 周算起,直到出生时为止。表 1 资料同时表明,人在怀孕后 56 天,胎体的成骨过程开始出现,因此,在估算胎体骨骼的剂量时,从孕后 8 周末算起,直到出生时为止。

在估算人胎体骨骼的剂量时,所使用的骨骼²³⁹Pu 浓度与母体肝脏²³⁹Pu 浓度的比率是 0.02。但是,由于胎体肝脏的²³⁹Pu 浓度与母体肝脏²³⁹Pu 浓度的比率存在着明显的种间差异,为此,根据大鼠、小鼠、豚鼠及狒狒的资料,分别对人胎体肝脏的剂量进行了估算。在估算时,使用的浓度比率及其它资料见表 3。

由表可以看出,估算的结果是,骨骼的当量剂量是 1.1μSv,肝脏的当量剂量也是 1.1μSv,是由 2.7μSv+0.2μSv+0.5μSv 除以 3 得到的。

2.4 ²³⁹Pu 授予子体(从出生时起到 70 岁止)的剂量

在计算出生时存在于子体的²³⁹Pu 放射性活度时,只要已知此时子体的²³⁹Pu 浓度与

表3 在宫内时期²³⁹Pu 授予人胎儿肝脏及骨骼的当量剂量

组织	动物种系	人怀孕时期(周)	浓度比率*	当量剂量(μSv)
肝脏	大鼠/小鼠	5~20	0.025	
		20~38	0.1	2.7
	豚鼠	5~15	0.015	
		15~25	0.002	
		25~38	0.0025	0.2
	狒狒	5~38	0.009	0.5
骨骼	小鼠/豚鼠/狒狒	8~38	0.02	1.1

* 指胎儿组织与母体肝脏²³⁹Pu 浓度比率(由动物资料推得)

母体的²³⁹Pu 浓度比率以及此时子体的体重即可求得。Morgan 指出,母体在怀孕当年,慢性经口摄入 1.8kBq 的²³⁹Pu,胎儿在出生时,其²³⁹Pu 浓度与母体²³⁹Pu 的比率是 0.00133,胎儿在出生时的体重为 3.4kg,故算得胎儿在出生时其体内滞留的²³⁹Pu 放射性活度为 0.0054Bq。

鉴于出生时的胎儿体内²³⁹Pu 分布与成人不同,为此,估算了从 1 岁起到 70 岁时的待积当量剂量。就成年人而言,体内的²³⁹Pu 在肝脏和骨骼的分布各占 45%^[8]。然而动物实验资料显示,²³⁹Pu 在胎儿体内的分布是,肝脏占 20%,骨骼占 70%。据此估算,胎儿在出生时体内滞留的 0.0054Bq²³⁹Pu,从出生时起到 70 岁止这段时期内,授予红骨髓的待积当量剂量是 22μSv。与之相比较,母体红骨髓的剂量是 2.5mSv,肝脏和骨表面的剂量是 14μSv 和 263μSv。若将胎体在宫内时期造血组织受到的 2.16μSv 计算在内,到 70 岁时,子代造血组织受到的总剂量为 24.16μSv。

2.5 在卵黄囊造血期一次急性经口摄入²³⁹Pu 授予卵黄囊的剂量

如前所述,由于母体多次慢性经口摄入²³⁹Pu,在怀孕早期,沉积在卵黄囊中的²³⁹Pu 对造血组织总剂量的贡献大约是 65%。因此,一旦母体一次急性摄入²³⁹Pu 的时间发

生在卵黄囊造血期,造血组织受到的剂量将是最大的。假如母体摄入 1.8kBq ²³⁹Pu 发生在怀孕后的第 21 天时,到 6 周末,²³⁹Pu 授予卵黄囊的剂量为 36μSv。据估算,在出生时存在于胎儿体内的²³⁹Pu 放射性活度到 70 岁时,授予子代的待积当量剂量大约是 0.7μSv。在怀孕当年,²³⁹Pu 授予母体红骨髓的剂量大约是 70μSv,待积当量剂量是 2.5mSv。

3 危险度估算

本文的剂量估算结果可以用来评价危险度。Stather 于 1988 年提出,胎儿期受到照射时,胎儿白血病的致死危险度是 $1.25 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 。ICRP 于 1991 年提出,从出生时起受到照射的子体,其白血病的致死危险度是 $5 \times 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$,而母体的是 $4 \times 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ 。据此,依据在宫内时期²³⁹Pu 授予胎儿造血组织的剂量是 2.16μSv,母体在怀孕当年慢性摄入 1.8kBq ²³⁹Pu 授予红骨髓的剂量是 34μSv,从而估算出相应的危险度是,胎儿为 $2.7 \times 10^{-8} \text{ Sv}^{-1}$,母体为 $1.4 \times 10^{-7} \text{ Sv}^{-1}$ 。至于子体和母体白血病的终生危险度则分别是 $1.4 \times 10^{-7} \text{ Sv}^{-1}$ 和 $7 \times 10^{-6} \text{ Sv}^{-1}$ 。在卵黄囊造血期,由于母体一次急性摄入 1.8kBq²³⁹Pu,授予卵黄囊的剂量所致的胎儿白血病的危险度是 $4.5 \times 10^{-7} \text{ Sv}^{-1}$,而在怀孕当年,由于²³⁹Pu 授予母体红骨髓的剂量所致的胎儿白血病的危险度是 $3 \times 10^{-7} \text{ Sv}^{-1}$ 。但是,就白血病的终生危险度而言,与母体相比较,子体的要小得多,这与慢性摄入时的情况是一致的。由此看来,就上述的各种情况而言,只要对母体实施防护,就能确保对胎儿的防护。

应当指出,前面所提到的危险度系数不能简单地应用到体内滞留的²³⁹Pu α 粒子的照射,因为在估算危险度时,还必须考虑到与靶细胞定位密切相关的 α 照射在组织之间的不均匀性分布,以及在胎儿发育期内组织的放射敏感性的变化。Moson 在 1989 年曾研

究了在孕期的不同阶段将²³⁹Pu引入小鼠体内后对造血的影响。结果显示,在怀孕的早期阶段给予低剂量的²³⁹Pu时,对干细胞具有直接作用;而在较晚时期给予时,²³⁹Pu的作用是降低了骨髓微环境的造血能力。至于在宫内的不同发育阶段,多种潜在的造血细胞对α粒子损伤的敏感性问题也需要加以进一步的研究。

参 考 文 献

1 朱寿彭等. 放射毒理学. 第二版, 北京: 原子能出版社, 1992: 301-302
 2 Stather JW et al. Comparative studies on the transfer of radionuclides to the fetus in the rat-

implications for human dosimetry. In: Gerber GB, Metivier H eds. Age-related factors in radionuclide metabolism and dosimetry, Netherlands: Martinus Nijhoff, 1987: 371-380
 3 Morgan A et al. Int J Radiat Biol, 1991; 59(6): 1395-1413
 4 Sikov MR et al. Health Phys, 1968; 14(3): 205-208
 5 Wiss JF et al. Health Phys, 1978; 35(6): 773-777
 6 Hui TE et al. Health Phys, 1993; 64(suppl 1): S74
 7 Morgan A et al. Health Phys, 1992; 63(5): 552-559
 8 阎效珊. 国外医学·放射医学核医学分册, 1990; 14(3): 114-116

DNA 损伤检测技术的新进展

西安医科大学 李 润综述 王德全 曹恩华* 审校

摘 要: 在 DNA 损伤检测中, 染色体畸变经历着筛选与改进, 用激光扫描共焦显像探测类核的改变及核粒的出现对探讨 DNA 损伤具有重要作用。以 dsb(双链断裂)及突变检测方法为主要内容的 DNA 分子水平损伤的研究方法层出不穷。从单个细胞的全基因放大获得了精子或卵子分型及多点核酸图谱; 凝胶电泳及滤膜洗脱技术不断改进, 使 dsb 及突变检测灵敏度及可靠性不断提高。HPLC(高效液相色谱法)及 GC/MS 技术的应用, 大大提高了单个碱基突变的检测灵敏度。

近年来, DNA 损伤的检测技术不断发展, 原有的技术在沿用中接受筛选与改进, 新的技术不断出现。

1 染色体畸变的沿用与改进

染色体畸变是最经典的观察指标, DNA 损伤后, 染色体可出现各种异常表现, 故是至今仍被沿用的主要观察指标。但是, 对具体的某种畸变形态能否作为损伤指标, 尚在不断筛选之中。例如, 有人以染色体畸变为观察指标, 检测了某些德国居民外周淋巴细胞的染

色体变化。在原苏联切尔诺贝利核事故后, 这些人是德国境内接受辐射剂量最大的居民(>42kBq/m²), 曾接受体内放射性铯的含量测定。在 1989~1990 年间, 他们的染色体畸变不断上升。但上述测定结果不能对双核和环状染色体的暂时下降做出解释^[1]。

早熟染色体凝聚已作为 G₁ 期人淋巴细胞接受电离辐射时染色体损伤的指标, 但随辐射后的时间推移, 这种损伤逐渐修复, 而低温保存可暂时冻结修复过程, 待以后的剂量分析^[2]。

* 中国科学院生物物理研究所