

# 低剂量电离辐射胎内照射的损害效应与防护问题

河北省放射卫生研究所 王瑞林综述 叶常青审校

**摘要:**胚胎受到辐射照射的损害效应与受照射时的妊娠期密切相关。植入前期受照射造成胚胎死亡;器官形成期受照射引起正在发育器官的畸形;胎儿发育期受照射导致智力迟钝。胎脑具有最大的辐射敏感性,孕龄8~15周胎内照射,智商下降系数约为 $30IQ \text{ 分} \cdot Sv^{-1}$ ,严重智力迟钝发生概率约为 $0.4Sv^{-1}$ 。随着对胚胎和胎儿辐射效应认识的不断深入,辐射防护观点和对孕妇的剂量限制也有所变化。

低剂量电离辐射对人体在健康方面的影响,是目前放射生物学、放射医学和放射防护界最关心的问题之一,特别是发育中的胚胎和胎儿处于高度分化的阶段,对电离辐射很敏感,更加引起人们的关注。生物实验和人的实践已证实,中等剂量以上的电离辐射照射可以引起胚胎和胎儿的损害<sup>[1]</sup>。但是,低剂量电离辐射胎内照射的损害效应还是一个尚不清楚的问题,胎内照射的防护观点也有所变化。本文简要地讨论一些目前的观点和动向。

## 1 胎内照射防护观点的变迁

放射防护界对胎内照射所致的胚胎和胎儿辐射效应一直在进行不断的探讨,联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)1977年报告曾对其作过广泛的论述。早期的观点是把整个妊娠期都视为电离辐射危险期。通常将妊娠期划分为三个时期:植入前期,器官形成期和胎儿发育期。自受精卵开始至囊胚植入子宫内之前,称植入前期,约历时1周。囊胚植入到子宫内后,细胞开始分化,陆续形成各器官的原基,约历时7周,称为器官形成期。第8周以后胚胎体内的各器官已奠定基础,初具人体的雏形,称为胎儿发育期。一些早期的观点认为,孕龄6周以前的胚胎辐射敏感性高,孕龄6周以后的辐射敏感性比6周以前低得多<sup>[2]</sup>。这些观点来自较大剂量(1~3Gy)的胎内照射,并以死胎和畸形为效应终点而得到的认识。早期的观点忽视低剂量和

中等剂量(0.01~1.0Gy)对胎脑功能发育的影响。国际放射防护委员会(ICRP)第49号出版物<sup>[3]</sup>建议:对妊娠期的辐射防护工作重点应着重在妊娠8周以后,特别是妊娠8~15周。在此期间,胎儿遭受电离辐射照射产生儿童智力迟钝的危险显著增加。最近发表的ICRP第60号出版物<sup>[4]</sup>强调指出,妊娠后的前3周胚胎对电离辐射并不敏感,低剂量胎内照射不致引起出生后儿童的确定性效应或随机性效应。自第3周直到妊娠末期胎体受照射可诱发损害效应,应采取附加的剂量限制。

上述这些辐射防护观点的重要改变,对各国辐射防护政策、法规和防护标准的制定必然产生一定的影响。

## 2 胎内照射的辐射效应

胚胎和胎儿对电离辐射的敏感性很高。文献中关于实验动物胎内照射对胚胎和胎儿的辐射效应,特别是对中枢神经系统影响的资料很多,但是人的资料比较少。根据一般看法,动物实验得到的结论可以定量地应用于人类,因为没有理由相信人的这方面反应和动物会有实质性差别<sup>[5]</sup>。

胎内照射效应按惯例分为致死效应、畸形和发育障碍三大类,它们都与受照射时的妊娠期密切相关。植入前期受照射的特点是胚胎死亡;器官形成期受照射可能造成正在发育器官的畸形;胎儿发育期受照射可能表现为前脑发育缺陷,导致智力迟钝<sup>[5]</sup>。从受孕

后3周到妊娠终了,辐射照射还可能引起出生后儿童癌症概率的增加<sup>(4)</sup>。

在植入前期受照射引起胚胎死亡已为大量动物实验资料(尤其啮齿类动物)所证实。正如1977年UNSCEAR报告中所讨论的,这种效应在多胎类动物中更容易观察到,并且可表现为单个胚胎的死亡(根据每只受孕动物囊胚植入的平均数随剂量增加而减少的推断)或整窝死亡(通过不育的交配数随剂量增加而增多所证实)。根据小鼠活体实验资料,植入前胚胎丢失系数的净增值可能为 $1\text{Gy}^{-1}$ 。但是,至今尚无能反映人类中存在此类效应的资料,这或许是观察困难之故。植入前胚胎丢失确实像一次错过的月经,以至在临床上不易引起注意。

不同动物的器官形成期诱发各种畸形的资料已相当丰富,UNSCEAR在1977年报告中作过广泛论述,但至今尚未见到辐射诱发人体畸形的明确证据。不过,有一点是很有意义的,即适当地考虑物种之间在发育和解剖学上的差异,如果在差不多的孕龄受到照射,则出现畸形等级和类型是相似的。这一点提示人类在这一方面可能也不例外。UNSCEAR 1986年报告<sup>(5)</sup>又明确指出,在器官形成期受到照射诱发畸形的效应,人类不同于其他哺乳动物是难以令人相信的。并且相应地假定辐射对人的致畸损伤可能发生在妊娠后第2至8周。还假设在动物中观察到的各类畸形的发生率,可作为人类该时期致畸效应的诱发率( $5 \times 10^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$ )。必须强调指出,使用动物实验资料,按线性无阈的假设推测到人,得出的危险估计值似乎偏高,这不仅是因为人类受到低剂量照射后,尚未观察到辐射致畸效应,而且还因为在各个种系中不排除阈剂量的存在<sup>(6)</sup>。

Otake与Schull<sup>(7)</sup>对日本广岛和长崎原爆时胎内受照儿童的临床检查资料重新作了评价,指出智力迟钝很可能是辐射诱发人类胚胎发育异常的一种共同类型。前脑遭受损

伤的最大危险期为孕龄8~15周,此期间受照射严重智力迟钝的危险度,约为16周孕龄以后受照射者的4倍。ICRP进一步分析了智力迟钝与受照射时孕龄和胎儿吸收剂量的关系指出<sup>(8)</sup>,8~15周的损伤危险度和胎儿受照射剂量成线性关系,而16周以后可能存在剂量阈值。孕龄7周以前和26周以后受照射,未发现辐射诱发的严重智力迟钝。并且发现60%的严重智力迟钝者同时伴有小头畸形,全部小头畸形者约有10%有智力迟钝。ICRP最近发表的第60号出版物<sup>(9)</sup>对胎内照射的辐射效应进一步评价指出,智力迟钝可分为两类,一类是智商(IQ)下降,另一类是严重智力迟钝。妊娠8~15周内受照射智商下降系数约为 $30\text{IQ分} \cdot \text{Sv}^{-1}$ ,严重智力迟钝的发生概率大约为 $0.4\text{Sv}^{-1}$ 。妊娠16~25周受照射智商值下降较小,严重智力迟钝发生概率约为 $0.1\text{Sv}^{-1}$ ,并且可能存在剂量阈值约为 $0.1\text{Sv}$ 。Otake等<sup>(8)</sup>分析了日本原爆时胎内受照射的1473名9~19岁儿童小头畸形与严重智力迟钝的关系时指出,严重智力迟钝伴有小头畸形的儿童,IQ值为 $63.8 \pm 8.5$ ,严重智力迟钝不伴有小头畸形的儿童,IQ值为 $68.9 \pm 11.9$ ,二者无显著差异,小头畸形不伴有严重迟钝的儿童,IQ值为 $97.1 \pm 20.3$ ,与以上两个IQ值有显著差异。

应强调指出,IQ值下降和严重智力迟钝都与高剂量、高剂量率相关。直接应用这些资料评价低剂量辐射效应会过高估计危险度<sup>(9)</sup>,最理想的是直接估计低剂量和低剂量率的辐射危险。但是,关于低剂量电离辐射胎内照射对胎儿的影响,缺乏确实可靠的资料作为危险估计的基础。一般说来,大都缺少关于照射的具体情况,或受照时孕龄的资料。1978年,Neumeister报道了19例在胎内受到 $0.015 \sim 0.1\text{Gy}$ 剂量照射儿童的观察结果,没有发现严重智力迟钝的病例,但没有考虑到受照射时的孕龄。1976年,Meyer等调查了1458名女青年,由于她们的母亲在怀孕期间

接受过诊断性 X 射线盆腔检查,而致在胎内受到低剂量照射,未发现严重智力迟钝发生率增加,但不能确定是否存在因严重智力缺陷而过早死亡的影响。

我国胡玉梅,姚家祥<sup>[10]</sup>调查了1 026名胎儿期受 X 射线诊断照射的儿童(胎儿的吸收剂量为11.8~42.7mGy)和1 191名未受照射的对照儿童的智能发育情况,照射组与对照组无显著差异。但收集的病例中,8~15周孕龄受照射者仅有13例(占1.27%),而94.64%的病例是在26周以后受照射,已超过了易受损伤的时期。

胎儿期受照射同样能引起生长发育障碍和其他效应。1968年,丹麦 Nokkentved 报道152名儿童(其母亲在妊娠4个月内腹部受 X 射线诊断照射)和143名对照儿童调查结果,照射组身高明显低于对照组,出生时体重也偏小。美国 Meyer 等<sup>[11]</sup>调查1 109名出生前受 X 射线诊断照射与1 124例未受照射的20~29岁女青年身高和体重,发现照射组身体矮小者显著多于对照组,但与照射组母亲身材较矮相关。我国李兰如等<sup>[12]</sup>观察448例胎儿期受 X 射线诊断照射的儿童身高、体重;胡玉梅,姚家祥<sup>[13]</sup>调查1 026名胎儿期受 X 射线照射的儿童身体发育情况,均未发现与正常值有显著差异。看来,低剂量胎内照射对儿童生长发育的影响尚无定论。

关于胎内照射的致癌效应,牛津大学对英国死于癌症儿童进行的回顾性调查,是一项著名的胎内照射效应研究<sup>[14]</sup>。结果表明,胎内受到剂量非常低的诊断 X 射线照射的儿童中,发生白血病和实体瘤的危险增加。估计白血病的发生率比未受照儿童高50%,而实体瘤诱发率增加量值可能略低些。美国的一项调查<sup>[14]</sup>证实了英国牛津的结果,但英国的调查结果曾受到怀疑<sup>[15]</sup>,其根据是日本原子弹爆炸时在宫内受照射的儿童死于癌症或白血病的人数并没有增加。1974年,Moile 根据放射生物学上的论据解释为,潜在的转化

细胞被杀死(尤其在大剂量时)可能与日本观察到的肿瘤发生率低有关。可见胎内照射诱发儿童癌症发生率增加的资料不一致。UNSCEAR<sup>[6]</sup>认为,尽管支持胎内照射与致癌效应之间存在因果关系的资料尚不能令人信服,但是,从表面上看,胎内照射0.01Gy,出生后10年内表现出来的致癌危险(特别是白血病)约比对照增加50%。假定在整个妊娠期内的危险固定不变,估计胎内照射所致致死性儿童癌症的发生概率为 $2.8 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。最近,Yoshimoto 等<sup>[16]</sup>总结了日本原爆时胎内受照射和小于10岁的幸存者1950~1989年间发生超额癌症的相对危险,指出胎内受照者在晚年癌症发生率有所增加,但与原爆时小于10岁的幸存者癌症发生率无显著差异。

### 3 胎内照射的防护要点

#### 3.1 孕妇职业性照射的控制

未怀孕妇女职业照射的控制与男性相同,但是如果妇女已怀孕或者有可能怀孕,则必须考虑附加控制措施,以保护胚胎或胎儿。ICRP 第26号出版物建议,被诊断为已怀孕的妇女受到职业性照射的条件,应限制在一年照射的有效剂量当量不能超过3/10的剂量当量限值(乙种工作条件)。我国放射卫生防护基本标准也作了同样的限制<sup>[7]</sup>。ICRP 根据1983年华盛顿会议声明提出<sup>[3]</sup>,保护从事放射性工作的孕妇的办法是提供一个保护胎儿的标准,大致类似于为保护公众成员所提供的那样。最近 ICRP 第60号出版物<sup>[4]</sup>规定了孕妇的剂量限制:只要确诊怀孕,则应在剩余的妊娠时间内施加补充的当量剂量限值,即下腹部外照射不超过2mSv,内照射限制放射性核素摄入量在1/20年摄入量限值(ALI)以下。

英国原子能管理委员会(AECB)发表了咨询文件 C-122<sup>[18]</sup>,采纳了 ICRP 1990年建议书规定的剂量限值,并提议纳入国家法规,提交全国放射工作人员代表大会讨论。但大

部分与会代表认为,ICRP规定的新剂量限值太严,可能造成孕妇暂时脱离放射性工作,建议孕妇的剂量限值改为5mSv.美国联邦法规全书(CFR)规定孕妇的剂量限值也是5mSv<sup>[19]</sup>.

### 3.2 孕妇医疗照射的控制

鉴于孕妇施行下腹部的放射学检查时有使胚胎或胎儿受到辐射损伤的危险,在决定是否对育龄妇女进行这类X射线检查时,应当考虑的重要因素之一是她们是否可能或已经怀孕.月经来潮的头10天内不会受孕,显然不存在射线对孕体的危害.由于妊娠的前3周胚胎对射线并不敏感,前3周胚胎受照射不可能造成出生后儿童的确定性效应和随机性效应<sup>[4]</sup>,在这段时间进行X射线检查不需要特别加以限制.因此,ICRP第16号出版物建议对育龄妇女施行腹部X射线检查要限制在月经来潮后的10天内(即10日规则)可能是多余的约束.尽管如此,对育龄妇女的X射线检查要特别慎重.如果月经到期未来,或者已明显停经,则除非有确实根据证明没有怀孕,否则就应当作孕妇看待.为了减少胎儿受到意外照射的机会,建议在放射科和其他使用X射线诊断设备的科室(牙科除外),应张贴如下告示<sup>[20]</sup>:如果您可能或已经怀孕,请您在进行X射线检查前告诉放射科医师或技术员.

孕妇腹部的X线检查常常导致胎儿全身受照射,因而对孕妇的防护是特别重要的.除非有明显的临床适应症,否则应当避免对孕妇施行腹部受照射的诊断检查和治疗<sup>[4]</sup>.

在许多情况下,特别是在估计胎儿成熟情况和胎盘位置时,使用超声波检查要比X射线检查好,因超声波检查可靠又不接收X射线照射.

虽然骨盆测量有时很有价值,但这只应在少数确实需要时才偶而进行,切不可作为产科常规检查.尤其不宜拍摄骨盆轴位片,因为这样会使胎儿受到不合理的大剂量照射.

当需要对孕妇进行其它X射线检查,而这种检查会使胎儿受到有用线束直接照射时,应该特别注意进行正当化判断,尽可能推迟到分娩以后.如果确有必要进行X射线检查,这时更要特别小心,尽可能减少照射时间或减少拍片张数,并采取其他降低照射剂量的技术措施.例如,严格的线束准直、采用高速感光胶片和增感屏、在前后位和侧位检查中采用无滤线栅技术和对胎儿进行局部屏蔽等,使胎儿的受照剂量降到最小程度<sup>[21]</sup>.

### 4 结束语

电离辐射对发育中的胚胎或胎儿可能产生的效应,有两种需要考虑,这就是发育异常和在儿童期或成年期发生癌症.目前依据实验动物和日本原爆幸存者流行病学调查资料而获得的辐射对胚胎或胎儿发育的影响,既有对辐射防护工作的普遍指导意义,又有在理论认识上的局限性.特别是低剂量照射,现有的资料很不一致,而且存在相当大的不确定性.为此,最迫切需要直接收集人类在胎内不同孕龄时受低剂量照射的胚胎或胎儿辐射效应的资料.尽管胎内照射的对象相当有限,但是采用现代方法对胎内受照射的儿童进行体格发育、智力、学业和其他功能测验的分析,或许能揭示不易觉察的辐射效应.

鉴于直接从人体获得的资料有限,利用低剂量胎内照射效应的动物模型,对了解辐射损伤机制,推测人的辐射效应及其发生概率是非常重要的.此外,对受照射孕妇进行医疗性人工流产的干预水平的研究,将有助于减少畸形和严重智力迟钝的发生.研究探索建立合适的医疗照射剂量约束或调查水平,将有利于促进提高医疗照射防护的最优化水平.

### 参 考 文 献

- 1 魏履新. 中华放射医学与防护杂志,1983;3(4): 55-60

- 2 刘洪祥. 放射医学与防护简报, 1987; (108): 2-5 (3): 179-182
- 3 ICRP: Publication 49, Ann ICRP, 1986; 16(4): 1-31
- 4 ICRP: Publication 60, Ann ICRP, 1991; 22(1): 22-149
- 5 Giovanni Silini(张卿西译). 中华放射医学与防护杂志, 1983; 3(1): 7-9
- 6 UNSCEAR: 1986 Report to General Assembly, New York: United Nations, 1986; 263-366
- 7 Otake M, Schull WJ. Br J Radiol, 1984; 57: 409-414
- 8 Otake M, et al. J Radiat Res, 1992; 33(1): 78
- 9 Darby SC. Health Phys, 1986; 51(3): 269-281
- 10 胡玉梅, 姚家祥. 中国辐射卫生, 1992; 1(3): 135-138
- 11 Meyer MB, Tonascia J. Am J Epidemiol 1981; 114(3): 317-326
- 12 李兰如等. 中华放射医学与防护杂志, 1985; 5(3): 179-182
- 13 胡玉梅 姚家祥. 中华放射医学与防护杂志, 1992; 12(1): 2-6
- 14 Stanley Lee(谭绍智译). 中华放射医学与防护杂志, 1987; 7(6): 398-401
- 15 Totter JR, Macpherson HG. Health phys, 1981; 40: 511
- 16 Yoshimoto Y, et al. J Radiat Res, 1992; 33(1): 78
- 17 中华人民共和国国家标准. 放射卫生防护基本标准, GB4792-84, 北京: 技术标准出版社, 1984; 2
- 18 Pomroy C. Health Phys, 1993; 64; S4
- 19 Wiedis D. Health Phys, 1993; 64; S4
- 20 ICRP. Publication 34. Ann ICRP, 1982; 9(2/3): 41-43
- 21 Russell JGB et al. Br J Radiol, 1980; 53: 233-236

## 过热滴探测器的中子响应

苏州医学院 林 洁编译 李士骏 孙福印审校

**摘要:**过热滴探测器(SDD)是一种新型中子探测器,原理与气泡室相似。SDD的中子能量响应曲线与ICRP剂量当量曲线基本一致。经蒙特卡罗中子输运计算得出中子响应函数,表明在自由中子场内SDD-100包裹2.54cm厚的聚乙烯后,其剂量当量响应最佳,且得到了实验证实。

1979年,Apfel研制了一种新的中子探测器——过热滴探测器。这种探测器在工作时不需任何能源,室温下有近似剂量当量响应,及有直读、便携、操作简单、造价低廉等优点,目前应用较广泛。

理想的剂量当量中子剂量计应完全不受入射中子能量的影响。1988年,Lo和Apfel对各型SDD的中子响应函数进行了计算,发现SDD-100对高能中子和热中子的响应较灵敏,对低能中子响应不灵敏,甚至无响应。Chris Wang认为中子慢化效应可能是导致

这种现象的主要原因,并设想在SDD-100外周包裹聚乙烯。其原理是:适量含氢物质可提高慢化效应,增强了SDD-100对低能中子的响应,降低了它对高能中子和热中子的响应,使响应函数更接近剂量当量函数。

### 1 SDD的工作原理

液体蒸发时,其成核过程需要有微小的蒸汽胚(vaporous embryo),当蒸汽胚小于临界值时,就容易崩解。如去除了液体中的异质成核点,并选用适宜的过热温度(即室温时同