

## 深低温保存造血干细胞移植治疗急性放射损伤

第二军医大学三六九研究室 丁振海 麦智广综述

北京北太平路医院 叶根耀审

极重度骨髓型和部分肠型急性放射病,用一般抗辐射药物加综合治疗难以奏效。近年来,国内外普遍重视造血干细胞移植的研究。这对加速造血功能的恢复和免疫系统的重建是一项关键性治疗措施。造血干细胞来源已经从单纯骨髓中采集,发展为从外周血和胚胎肝中获取的三条途径。从新鲜造血干细胞移植发展为冰冻保存造血干细胞移植治疗急性放射损伤。由于同种异体造血干细胞移植易引起严重的移植物抗宿主病(GVHD)。人们对自体干细胞移植寄以很大希望。它不仅可取得满意的造血重建,而且避免了GVHD的发生。目前深低温冷冻保存技术已成为造血干细胞移植的一个重要组成部分。因此,冰冻保存技术、冰冻保护剂、冰冻及融冻的速度等低温生物学领域几个重要问题的研究发展很快,而且已初步形成体系。

### 一、冷冻技术的应用

#### (一)冷冻保存的基本原理

冷冻在生物学上有两种截然不同的作用:①促进细胞坏死的破坏作用;②维持细胞生命,以便长期保存细胞、组织器官乃至整个生物体。冷冻保存的基本作用是使细胞处于不分裂,代谢失活状态。众所周知,细胞代谢与外界温度是密切相关的,温度降低时细胞代谢延缓,一般在 $-79^{\circ}\text{C}$ 时酶的活力即停止,至 $-130^{\circ}\text{C}$ 时生物代谢完全停止。若达到 $-196^{\circ}\text{C}$ 时,几乎所有的细胞代谢活动及生命过程均停止,从而保持在“生机停顿”状态。这时细胞组织的衰老和退化停止。这样既排除了遗传性状的变异,又保存了细胞的潜在活力和生物学本质。对细胞生物学及医学某些领域的研究工作无疑会起到很好的推动作用。

#### (二)冷冻保存技术(方法)

冷冻—贮存—融冻—移植(测试)是密切相关的环节,任一步骤失败都会给这个过程带来致命性伤害(图1)。

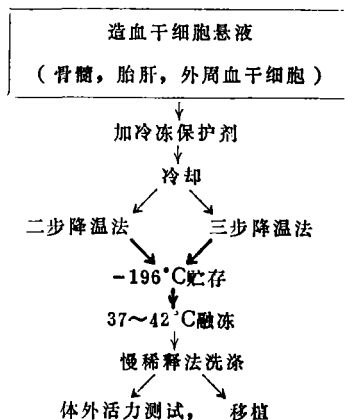


图1 造血干细胞低温保存技术示意图

目前通常采用的冷冻方法有①酒精加干冰降温法;②化学物质(如硝基甲烷, 苯甲烷等)降温法;③利用液氮容器颈部自然梯度温差降温法;④程序降温装置降温法,这是目前使用最多,降温精度最可靠的方法[1~4]。

利用程序降温法,多数使用三步法,即开始以 $1\sim3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 降温,至 $-25^{\circ}\text{C}$ ,改为 $5^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ,降至 $-80^{\circ}\text{C}$ ,转入液氮中( $-196^{\circ}\text{C}$ )贮存。也有人提出开始降温速度应严格控制在 $1\sim3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ,但经过“相变”( $-11\sim-15^{\circ}\text{C}$ )热释放之后即可加快降温速度,余下各阶段对细胞影响不大。

在冷冻过程中尽管采用了最佳的降温速度与方法,但仍有部分细胞会受到损害,这些损伤究其原因不外乎二种看法:一种认为是物理性损伤,细胞受冷后首先是细胞外结冰,细胞内过冷的水份不断外溢而避免了细胞内结冰,

细胞完好。当降温速度过快细胞内水份丢失不充分或融冻时升温速度过慢,细胞内就会形成结晶水,导致细胞死亡。而且降温速度越快细胞内结冰越多。另一种看法则认为主要是化学性损伤,在冷冻过程中形成冰晶使细胞内外的盐浓度增高有差别,渗透压增加,细胞受到渗透性打击(Osmotic Shock)及蛋白质变性,细胞死亡[5、6]。

### (三)融冻

融冻速度对细胞活存的影响比冷冻速度略小。采取快速融冻,防止解冻过程中冰晶再形成而产生有害作用。通常把冻存样本置于37~42℃恒温水浴中,在1~2分钟内快速溶解。有的样本体积较大,势必造成复温时间延长,不利于细胞活存,可用两块铜板夹在样本两侧,使样本变薄,这样既可保证贮存袋内外温度均匀一致,又有利于细胞快速融化。也有人为了缩小贮存体积,把样本先经逆流离心纯化造血干细胞,除去大部分红细胞和其他非增殖性细胞,使贮存细胞体积大大减少,在融冻时可迅速融化[6]。

融冻后一般在室温下逐步用含10%小牛血清的MC Coy's 5 A溶液或其他介质慢稀释5~10倍,要求在10~30分钟稀释完毕。因稀释太快渗透压发生剧烈改变,细胞易受损伤。为了防止融冻后细胞发生凝集,可在细胞悬液中加入DNA酶I 3万单位/ml。最近又有人使用5%DMSO和5%HES混合冰冻保护剂,融冻后细胞不发生凝集[7~10]。

冻存造血干细胞复温后需进行活力测定。染料排斥试验,体内,体外细胞培养,白细胞形态及功能检查,<sup>3</sup>H-TdR掺入等均可反映细胞活力。很多资料说明人骨髓冰冻保存后CFU-GM仍能保持一定活力,其回收率为47~62%。骨髓长期冰冻保存(1~5年)CFU-GM,活力亦无进一步下降。

## 二、冷冻保护剂及其应用

目前常用的冰冻保护剂可分为两大类:①细胞内冰冻保护剂,如甘油、二甲基亚砷

(DMSO)、糖类(蔗糖)等,均属于低分子量的中性溶液,可通过细胞膜进入细胞内。它一方面通过在溶液中强烈结合水分子的水合作用,降低结冰速度和程度,避免和减轻细胞内溶液浓度的升高,减少蛋白质变性,从而减轻化学损伤。同时缩短细胞破坏的临界温度范围,避免在此阶段对细胞的破坏。Babnett等在实验中还观察到甘油和DMSO能可逆地抑制细胞膜上Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATP酶。通过与膜磷脂的作用而提高细胞膜的流动性,使膜对渗透压的变化更具弹性,免于损伤[11]。Miller则认为冰冻保护剂的作用取决于去氢氧根的能力,因为不可逆膜损伤与蛋白质巯基对分子内二硫键的氧化作用有关,氧化过程可清除氢氧根,DMSO,甘油均有此能力[12]。②细胞外冰冻保护剂,如聚乙烯吡咯酮(PVP),聚乙烯氧化物(PE-O),羟乙基淀粉(HES)等。这些属于高分子化合物,其保护作用机制与抑制冰晶生长有关[12,13]。

几种冰冻保护剂各具特点,其中关于甘油和DMSO报道较多,自1949年发现甘油对细胞有冷冻保护作用后,就广泛应用低温保存的研究,中等浓度时无毒性,而且效果较好。主要缺点是穿过各种不同细胞膜速度不一致。DMSO应用于多数细胞均优于甘油,可有效地减少细胞内结冰,而且毒性低,可不洗脱,更为多数研究者所接受[3,13]。也有人把几种保护剂混合使用,而且取得了较好效果;Harvey等(1980)把DMSO、PVP、Hepes、甘油等作多种浓度混合保存大鼠有核细胞,其中活存率最好的是10%DMSO和5%HES混合保护剂。而且能减少融冻后细胞凝块的出现[5,14]。

## 三、冰冻保存造血干细胞移植效果

早在1955年,Barnes和Loutit就利用Polge-Smith-Paekes装置以甘油作冰冻保护剂,低温保存啮齿类动物骨髓细胞83天,证明仍有活力。尔后不少作者在兔、狗、猴等动物也获得了肯定的效果。1957年,kurnick等首次把冰冻保存的骨髓细胞自体输注应用于人,治疗

二例放疗后造血障碍的病人,取得造血功能迅速回升的效果。随着外周血干细胞,胎肝细胞再殖能力的证实,冰冻保存外周血干细胞,粒细胞以及胎肝细胞用于急性放射损伤的治疗已有不少报道。

### (一)冰冻骨髓造血干细胞移植

骨髓在4℃条件下只能保存数天,延长保存时间则造血干细胞活力明显下降,因此,必须采用深低温保存方法才能长期保持造血干细胞的活力。冰冻保存骨髓细胞移植治疗放射损伤在动物试验研究和病人临床应用两个方面均取得了较好的疗效<sup>[15~17]</sup>。

1962在, Cavins等报道13条小猎犬, 3条蒙古狗, 经1200R照射输注-80℃冻存自体骨髓细胞 $1\sim5\times10^9$ /只。冰冻保护剂用10% DMSO活存8/9, 5% DMSO活存2/3, 15% DMSO活存1/3。Bodenbeger等给32条狗分次照射, 总剂量2400R, 输注冰冻保存自体骨髓细胞 $5.5\times10^7$ /kg活存9/9, 造血重建;  $1.5\sim5.2\times10^7$ /kg活存6/15; 输注 $0.7\sim1.3\times10^7$ /kg活存0/8。作者认为抽骨髓时掺入不同量的外周血, 一般每50个有核细胞中有一个粒系祖细胞。输注有核细胞最佳值为 $7\sim8\times10^7$ /kg, 足以使白细胞、血小板较块回升, 再增加输注细胞量也不能加块外周血细胞恢复的速度。Schaefer认为对猴冻存骨髓细胞 $4\times10^7$ /kg即足够了。而Cherkor等则认为猩猩需要 $2\times10^8$ /kg新鲜骨髓细胞<sup>[18]</sup>。Gorin认为血液病人只要 $5\times10^7$ /kg自体骨髓细胞。该作者在另一次试验给46条狗照射1000rads, 结果对照组12天内全部死亡, 骨髓移植组: 有核细胞数 $0.1\sim1.0\times10^8$ /kg新鲜细胞组活存14/18, 冻存二个月组活存14/17, 冻存五个月组活存7/11。认为效果最好的是 $0.5\sim1.0\times10^8$ /kg, 新鲜与冻存二个月的骨髓细胞无明显差别<sup>[19]</sup>。

人骨髓造血干细胞冻存后移植, 几年来发展较快, 对肿瘤性疾病(特别是实体瘤)、白血病冻存自体骨髓细胞移植都取得了明显的效果。也有人对超低温长期(16年)保存人骨髓细胞集落生长能力进行测试, 结果: 骨髓有核

细胞回收率仍有90%及64%。集落生长能力, 保存14~16年与保存5年相近似, 分别为 $37.5\pm5.5\%$ 和 $53.6\pm6.5\%$ 。保存5年正常供体骨髓与保存15年尸体骨髓无明显差别<sup>[20~23]</sup>。

### (二)冰冻保存外周血干细胞

哺乳动物和人外周血中存在具有自我更新, 增殖和分化能力的造血干细胞, 可以通过多种方法分离外周血单个核细胞(MNC)来收集外周血干细胞, 冻存治疗放射损伤引起的造血障碍。

Cavins等(1964)给9条蒙古狗照射1200~2000R输注自体冻存白细胞, 方法是照前多次抽血沉淀分离白细胞, 每条狗累积白细胞总数 $2\sim20\times10^9$ , 加10% DMSO, 冰冻保存1~2周, 照后自体回输, 结果细胞数在 $9\times10^9$ /只以上, 活存3/6, 细胞数少于 $6\times10^9$ /只活存0/3。作者认为输注白细胞数 $9\times10^9$ /只可作为临界值。Nothdurft等给1200R照射的8条狗冻存1~18个月自体单个核细胞 $0.98\times10^9$ /kg内含CFU-C  $0.72\times10^5$ /kg, 加支持疗法, 活存7/8, 回输后外周血CFU-C有6条狗在15~20天即回到正常水平。有2条输注细胞数少的狗CFU-C再生明显推迟, 30天才达到照前水平。活存狗最长的已达898天<sup>[24]</sup>。

Fliedner等给26条小猎犬照射1200R输注同种异体DLA相合, MLC阴性的外周血MNC  $0.5\sim2.8\times10^9$ /kg, 其中不用免疫抑制剂治疗活存1/12, 加氨甲喋呤治疗活存8/14, 而且GVH反应较轻。在另一实验中, 用16条狗作新鲜和冻存自体MNC输注, 细胞数分别为 $6.6\times10^9$ /只和 $7.7\times10^9$ /只, 回输后10天白细胞数分别达到 $539.2\pm188.0$ 和 $366.1\pm69.8$ /mm<sup>3</sup>。骨髓有核细胞分别为 $2470.4\pm236.0$ 和 $2209.0\pm646.8$ 。可以看出新鲜比冰冻回升略高些<sup>[25, 26]</sup>。Ross等用连续血细胞分离器分离MNC, 用Ficoll去掉红细胞, 再进行白蛋白梯度分离, 分为6个组分, 冻存后输注给经1200R照射同种异体狗, 其中输注第Ⅱ组分的2条狗活存2/2, 未发生GVHR, 输注其余组动物无一活存<sup>[27]</sup>。Trensh等(1980)将分离

外周血白细胞再经逆流离心法 (Counterflow Centrifugation) 纯化粒细胞, 加 5 % DMSO, 5 % HES 冰冻保存, 融冻后作趋化试验, 吞噬功能, 杀菌作用及部分酶活力等体外试验。冷冻后粒细胞趋化反应明显降低 ( $P < 0.01$ ) 亮氨酸氨基酶降低, 吞噬颗粒作用及氧消耗也明显降低, 大约只相当冰冻前的 50 %。有些作者用类似方法对狗、狒狒、荷兰猪等冻存粒细胞功能的观察, 其结果也基本相同[8, 28~32]。

Lionetti 等报道用 Beckman JE 6 离心机从人全血或 Buffy coat 中逆流离心纯化粒细胞, 冻存后进行各种测试。作者认为逆流离心法可纯化粒细胞, 基本上无淋巴细胞、红细胞和血小板。而其他分离方法常常混有 10 倍以上的红细胞及其他细胞[33]。Berthier 等从慢性粒细胞性白血病人外周血分离单个核细胞, 冰冻保存。放疗后自体回输  $0.10 \sim 0.96 \times 10^9/\text{kg}$ , 含 CFU-GM  $1.77 \sim 4.69 \times 10^5/\text{kg}$ , 五个病人造血均有再生, 且获得缓解。

### (三) 冰冻保存胎肝造血干细胞

胎肝造血干细胞移植已经成为解决难以寻找 HLA 相合骨髓供者而开辟的另一条受到临床重视的造血干细胞移植途径, 而且对某些血液病治疗已经取得令人瞩目效果。但在临床应用中已经发现供需之间存在着矛盾, 即当病人需要移植时, 难以找到适合胎龄的胎肝供者。用冰冻保存方法, 将会使这种矛盾得以缓和, 也将会促进胎肝细胞治疗进一步发展。

Andreani 等 (1982) 给大鼠照射 1200R, 观察移植冰冻保存胎肝细胞效应, 并与冻存骨髓细胞相比较, 结果骨髓移植组 9 天活存率 35%, 30 天活存 0 %。同窝骨髓移植组 9 天活存 70%, 30 天为 50 %。胎肝移植组 9 天活存 25 %, 30 天 0 %。同窝胎肝移植组 9 天活存 75 %, 30 天为 65 % [34]。

Agostinelli 等 (1984) 对大鼠同种与同窝胎肝细胞移植作了比较, 大鼠照射 1200rad 移植同种新鲜胎肝组活存 25 %, 而冻存同种胎肝移植组在照后 12 天内全部死亡。但同窝大鼠胎肝细胞移植组活存 50 ~ 60 %, 新鲜与冰冻之间没

有差别[35]。

我们小组对昆明种及 LACA 小鼠胎肝细胞冰冻保存 2 周 ~ 105 天, 观察移植效果。800rad 照射 LACA 小鼠移植冻存同种胎肝细胞  $3.5 \times 10^7/\text{只}$ , 30 天活存 11/11, 对照组 4/9。850rad 照射组: 昆明种小鼠移植组活存 8/20, 对照组 0/6, LACA 小鼠移植组活存 10/10, 对照组 0/10 [36]。

大动物胎肝细胞移植成功率较低, 因而采用冰冻保存胎肝细胞移植较少。Prümmer 等用同卵同窝狗怀孕 52 天的胚胎肝细胞冻存给三条全身照射  $3 \times 6\text{Gy}$  狗, 各输注  $1.03 \sim 1.56 \times 10^8/\text{kg}$ , 内含 CFU-C  $0.91 \sim 1.99 \times 10^4/\text{kg}$ , 全部植活。10 天骨髓核型分析均为完全嵌合体。外周血白细胞 19 天达到正常水平, 血小板 26 天恢复正常, 而淋巴细胞回复迟缓, 50 天仅为照前 30 %。其中二条狗分别于 21 和 70 天发生 GV-HD。该作者 (1984) 又用 10 条小猎犬照射  $3 \times 6\text{Gy}$ , 移植 DLA 相同妊娠 52 天同胞狗冰冻保存胎肝细胞  $0.2 \sim 1.6 \times 10^8/\text{kg}$ , 含  $0.9 \sim 19.8 \times 10^4/\text{CFU-C/kg}$ 。移植后一年造血与免疫功能完全重建, 受者骨髓为供体型, 但外周血 2 ~ 3 个月仍残留宿主的淋巴细胞。作者认为增加 CFU-GM 的植入量可加速粒细胞、血小板和淋巴细胞回升速度。因此, 用冰冻保存方法累积狗胎肝细胞, 对受大剂量照射动物输注可加快白细胞和免疫活性细胞的增殖[37~38]。

人冰冻胎肝细胞移植尚未见更多报道, Moritti 等 (1984) 摘要报告了对 100 例人胎肝实验室研究工作, 包括各种冷冻速率、稀释方法、冷冻和贮存方法, 时间等对 CFU-GM 回收率的影响[30]。冰冻胎肝移植可能成为今后临床干细胞移植的一个发展方向, 因为可随时获得适合胎龄的胎肝细胞, 进行冰冻保存, 待临床需要时取之应用, 为临床移植工作提供方便。而且无 GVH 反应发生, 或即使有也较轻。当然冰冻胎肝与新鲜胎肝移植一样仍然存在着个体发育屏障和组织相容性屏障, 这是今后需要研究和解决的重要课题之一。

#### 四、结束语

从上述各种实验表明,用冷冻保存技术可长期贮存造血干细胞(骨髓、外周血、胎肝干细胞)。目前认为贮存最佳条件:10%DMSO,降温速度1~3℃/分,降至-25~30℃,再以5℃/分的速度降到-80℃,最后贮存在-196℃液氮中。融冻时在37~42℃水浴中,2分钟内迅速融化。融冻后细胞悬液采用慢稀释法在30分钟内以HBBS稀释10倍,避免渗透压发生剧烈变化,提高细胞活存率。

各种来源造血干细胞冰冻保存后均有较好的移植效果:自体骨髓冻存二个月,给1000rad照射狗回输 $0.1\sim 1.0\times 10^8/\text{kg}$ ,活存14/17。对大剂量放疗病人冻存自体骨髓细胞至少需要 $1\times 10^8/\text{kg}$ ,如经过纯化骨髓细胞只需 $4\sim 6\times 10^4/\text{kg}$ ,即有较好疗效。

冻存外周血干细胞:狗照射1200R输注自体外周血MNC $0.98\times 10^6/\text{kg}$ ,活存7/8,输注经梯度分离第Ⅰ组分同种MNC $24.0\sim 30.0\times 10^6/\text{kg}$ ,活存2/2。

冻存胎肝造血干细胞:大鼠1200rad照射输注同窝胎肝细胞 $30\times 10^6/\text{只}$ ,活存65%。 $3\times 6\text{Gy}$ 分次照射,输注同窝狗胎肝细胞 $0.2\sim 1.6\times 10^6/\text{kg}$ ,活存10/10。

造血干细胞移植各种动物所需要的细胞量,Ven Bekkum用图解方式表示致死剂量照射后,活存50%所需要的细胞数与体重之间的关系,可供参考。但异体输注时,HLA相合尚须增加4倍,不相合者要增加50倍(图2)(40)。

人胎肝细胞冰冻保存后移植迄今报道甚少,仅见临床前CFU-GM回收率等研究。相信不久将会有更多人应用冰冻保存技术来解决临床造血干细胞移植工作中的供需矛盾。

#### 参考文献

1. Johnson IA et al; Cryobiology 19; 1, 1982.
2. Berthier R et al; Cryobiology 20; 637, 1983.
3. 刘作斌等; 解放军医学杂志 9; 180, 1984.
4. Mc Gann LE et al; Cryobiology 18; 469, 1981.
5. Федотенков ДТ; Криобиология и Криомедицина, 18, 30, 1982.
6. Berthier LE et al; Exp Hematol 10; 578, 1982.
7. Visani G et al; Cryobiology 20; 587, 1983.
8. French JE et al; Cryobiology 17; 252, 1980.
9. Stiff PJ et al; Cryobiology 20; 17, 1983.
10. Fliedner TM et al; Blut 35; 159, 1977.
11. Barnett RE et al; Cryobiology 15; 227, 1978.
12. Miller JS et al; Cryobiology 15; 585, 1978.
13. Bouroncle BA et al; Cryobiology 6; 409, 1970.
14. Harvy L et al; Blood Cells 6; 65, 1980.
15. Schmieser TH; Blut 49; 53, 1984.
16. Kohsaki M et al; Exp Hematol 9; supp 193, 1981.
17. Delforge A et al; Br J Hematol 53; 49, 1983.
18. Bodenberger UH et al; Exp Hematol 8; 384, 1980.
19. Gorin NC et al; Blood 51; 257, 1978.
20. Herve P et al; Bone marrow transplantation in Europe, Excerpta Medica, New York, P 80, 1979.

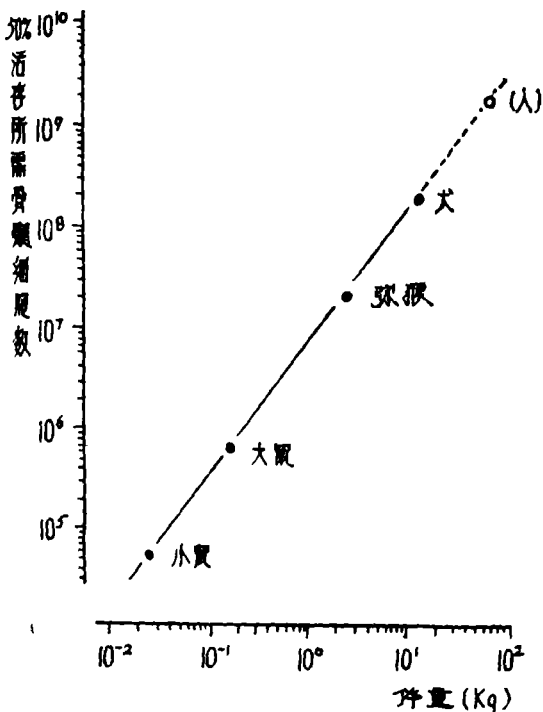


图2 致死剂量照射50%活存所需细胞数与体重关系 (人为外推值)

21. Scheiwe MW et al, Cryobiology 18; 344, 1981.
22. Douay L et al, Exp Hematol 10; 360, 1982.
23. 森山 美昭他, 低温医学 10; 8, 1984.
24. Nothduest W et al, Scand J Hematol 19; 470, 1977.
25. Flidner TM et al, Hematologica 61; 141, 1978.
26. Debelak-Fehir KM et al, Transplantation 20; 63, 1975.
27. Ross WM et al, Experimental Hematology Today Springer-verlag, New York, P 29, 1977.
28. Vander Meulen FW et al, Cryobiology 18; 337, 1981.
29. Voetman AA et al, Blood 63; 234, 1984.
30. Hill RS et al, Cryobiology 18; 533, 1981.
31. Coelreras TJ et al, Cryobiology 17; 243, 1980.
32. Lusciankas FW et al, Cryobiology 20; 1, 1983.
33. Lionetti FJ et al, Transfusion 17; 465, 1977.
34. Andreani M et al, Hematologica 67; 671, 1982.
35. Agostinelli F et al, Abstracts, 2nd International symposium on fetal liver transplantation p10 Pesaro, 1984.
36. 丁振海等: 待发表资料
37. Prümmer O et al, Exp Hematol 11; 79, 1983.
38. Prümmer O et al, Abstracts, 2nd International symposium on fetal liver transplantation P13, Pesaro, 1984.
39. Moretti L et al, Abstracts, 2nd International symposium on fetal liver transplantation P 18, Pesaro, 1984.
40. Ven Bekkum, Semin Hematol 21; 81, 1984.

## $^{137}\text{Cs}$ 与 人 体 健 康

天津市卫生防病中心      吴复寿综述

苏州医学院放射医学系      章仲侯审

$^{137}\text{Cs}$ 是最重要的核裂变产物之一。裂变产额高,不论何种裂变类型,每百次裂变约产生6个原子。经 $\beta$ 衰变而成亚稳态 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ,再衰变放出0.66MeV的 $\gamma$ 线后变为稳定性Ba。 $^{137}\text{Cs}$ 的物理半衰期长达30年,化学性质与钾相似,能直接参与人体代谢,因此早已引起人们的关注。国内外曾对放射性沉降物、水源、土壤、动植物、人类膳食以致人体组织的 $^{137}\text{Cs}$ 含量进行了大量的分析测定,以便作出卫生学评价。现就 $^{137}\text{Cs}$ 的来源、生态学、内照射剂量、促排方法以及对机体的损伤效应作简要介绍。

### 一、环境 $^{137}\text{Cs}$ 的来源及其生态循环

环境 $^{137}\text{Cs}$ 主要来自大气层核试验。1945~1978年间,全世界共进行了905次核试验。有人估计,截至1970年已爆炸的总裂变当量为194

兆吨TNT当量,产生 $^{137}\text{Cs}$ 约为34兆居里,其中大部分 $^{137}\text{Cs}$ 最初进入同温层,然后呈相对均匀地全球性沉降。环境 $^{137}\text{Cs}$ 的其它来源为核燃料循环中的核反应堆运行、核燃料回收,和平利用核爆炸挖掘河道、海港、地下仓库等,以及核潜艇等排放的放射性废物等〔1~8〕。

$^{137}\text{Cs}$ 随全球性分布的放射性沉降物污染各地的空气、水、土壤和植物,最后转移到动物和人体内。 $^{137}\text{Cs}$ 在对流层内的半滞留期约6~12个月。在冬末,由于同温层与对流层的交换达到最大,导致春季两半球地表空气中裂变产物放射性水平最高。在大部分中纬度地区,这种春季高峰与频繁降雨相一致,加上各种机理而使沉降量增加。因此,在多数情况下,正在生长的幼嫩植物中的 $^{137}\text{Cs}$ 主要来自沉积在叶和茎上的污染物,而不是通过根部吸收。在一般耕地情况下,植物从土壤中摄取铯