

CNIC-00332
SMC-0035

CN9100180

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

骨髓移植前应用钴-60 γ 射线进行全身照射的剂量学要点

THE DOSIMETRY OF COBALT 60γ -RAY

TOTAL BODY IRRADIATION

BEFORE BONE MARROW

TRANSPLANTATION

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00332

SMC-0035

骨髓移植前应用钴-60 γ 射线
进行全身照射的剂量学要点

THE DOSIMETRY OF COBALT $^{60}\gamma$ -RAY
TOTAL BODY IRRADIATION
BEFORE BONE MARROW
TRANSPLANTATION

(In Chinese)

董凡 张桂如

(苏州医学院)

中国核情报中心
原子能出版社

北京·1989.11

摘 要

探讨利用普通钴疗机进行全身照射的剂量学要点。通过将源-体中面距延长至346cm,得到98×92cm²的近似正方形照射野,其对角线长134cm。为了模拟辐射在人体内的作用,制成一具非均匀人体模型,经CT扫描证实其组织等效性良好。体模剂量测定表明:(1)对于平均大小的病人,其对应的有效照射野为25×25cm²,并讨论了估价人体有效照射野的方法;

(2)体中面剂量始终大于体表剂量,但随着人体厚度增加,体中面/体表剂量比减小,两者之间呈明显负相关($r=-0.683$, $p<0.001$),并拟合了回归曲线;(3)前后野(AP)或AP+左右侧野(RL)照射的剂量分布均匀性优于RL照射;(4)组织补偿可显著改善剂量分布均匀性,并叙述了组织补偿技术。

关键词 全身照射 辐射剂量学 骨髓移植

THE DOSIMETRY OF COBALT $^{60}\gamma$ -RAY TOTAL BODY IRRADIATION BEFORE BONE MARROW TRANSPLANTATION

Dong Fan Zhang Guiru

(Suzhou Medical College)

ABSTRACT

The dosimetric considerations of using conventional cobalt-60 unit for total body irradiation (TBI) are presented. By extending the source-to-midplane distance (SMD) to 346 cm, a 92×98 cm² rectangular field with diagonal dimension 134 cm was obtained. The results from the phantom measurements showed: (1) The effective field corresponding to an average-size patient is 25×25 cm², and a method for estimating the effective field of human body is given. (2) The midplane doses are consistently higher than those of surfaces, but the dose ratio of midplane to surface decreases as the body thickness increases, and a significant negative correlation is existed between the dose ratio and thickness, thus a linear regression line is fitted. (3) The anterior-posterior (AP) or AP+ bilateral irradiation will yield a more uniform dose distribution in the whole body than the bilateral irradiation. (4) The dose uniformity can apparently be improved by the tissue compensation, for which the technique is described.

引 言

骨髓移植 (BMT) 的广泛开展, 大大延长了白血病患者无病生存期, 明显提高了严重性再障的生存率, 并使某些遗传性血液病获得治愈, 从而为血液病治疗开辟了新途径^[1,2]。全身照射 (TBI) 是 BMT 之前预处理的一个重要组成部分, 其目的在于摧毁病态骨髓, 根除肿瘤细胞和抑制宿主免疫功能, 以确保输入的造血干细胞植活^[3]。但是, 准确的照射剂量、理想的体内剂量分布成为面临的实际课题。由于人体外部形态不规则, 内部各脏器组织密度相差较大, 致使 TBI 吸收剂量的计算和核实都较困难, 体内分布的均匀性较差, 照射剂量不易掌握。若剂量过大将产生严重副反应, 甚至危及生命; 反之剂量过小却达不到预处理目的, 导致移植失败。目前, BMT 已在国内陆续开展, 但有关钴-60 TBI 的剂量学的研究未见报道, 因而阻碍了该技术的广泛应用。本文的目的在于探讨应用普通钴-60 治疗机的有关剂量学要点。

材 料 与 方 法

(一) 非均匀人体模型模型的制作

为模拟 TBI 时人体对射线的吸收, 以便估价体内吸收剂量及其分布情况, 遂制作一具人体模型。该体模以 Mix-D 作为人体软组织等效材料, M_1 为肝、肾、胰和脾脏的等效材料, 肺由发泡乳胶制成, 骨髓取自福尔马林浸泡的尸体。体模身长、外形、内脏大小及位置均参考已发表的国人平均值, 实际制作时作了部分修正。成型后体模长 168cm, 胸围 92cm, 颈围 33cm, 腰围 74cm, 臀围 63cm。为便于安放剂量元件, 将体模自头至骨盆底共分 15 段, 每段厚为 4.5~7.5cm 不等, 每个段面由中心向四周均匀打孔, 孔径为 0.48cm, 孔深为 1~1.5cm, 孔与孔之间距离约 4cm。体模经 CT 扫描证实, 各段图像与正常人体相似, 脏器位置基本正确, 组织等效性良好, 各部位 CT 值和电子密度与相应人体器官组织相差最大不超过 3%。

(二) 照射条件

照射源为普通钴-60 治疗机, 为得到足够大的照射野, 使之能容纳整个人体, 将机头转动, 使射线束水平射向墙壁, 源-体中面距 (SMD) 延长至 346cm。当准直器升至最大时, 在治疗平面 (即体中面所在处) 得到 $98 \times 92 \text{cm}^2$ 的近似正方形照射野, 其对角线长为 134cm。将准直器旋转 45 度, 使对角线与人体的纵轴相一致 (见图 1)。

(三) 剂量测定

全部采用氯化锂 (Mg, Cu, P) 热释光圆形薄片 (直径 4mm, 厚 0.8mm), 剂量片分散性 < 4%。测量仪器型号为 FJ-377。

(四) 射野均匀度

沿照射野对角线测定了射野的均匀度, 在距射线束中心轴 54cm 范围内, 辐射强度变化较小, 超过此范围迅速减弱, 60cm 处辐射强度仅为中心轴的 63%, 67cm 处减至 36%。因此, TBI 时必须考虑这一因素。

(五) 体模内剂量测定

体模直立于治疗架上 (参见图 1), 射线束中心轴对准肺部 (体模第 11 段)。前后野 (AP)

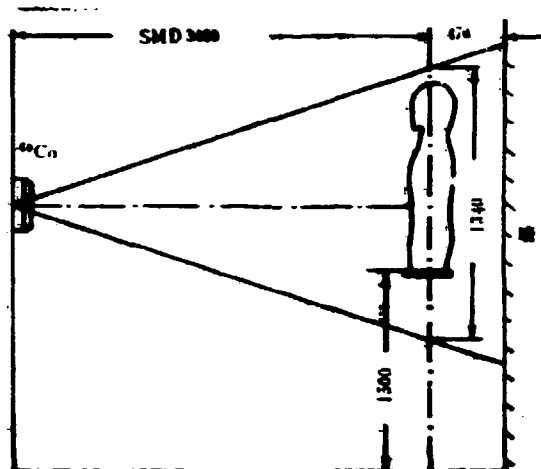


图1 治疗布局示意图

或左右野 (RL) 照射时, 每侧照射时间各占1/2; AP+RL照射时, 每侧各占1/4。测定体模内深度剂量时, 体模接受前野或左侧野照射。剂量片按要求预先布于体表和体模内部不同部位, 每个测定点布6片。放置剂量片时使其面对射线, 以避免方向依赖性。体表剂量片表面未加剂量累积 (Build-UP) 材料。

(六) 组织补偿 (屏蔽) 设计

补偿材料选用铝, 在治疗条件下测定铝的有效线衰减系数 (μ_{eff})^[4]。测定时剂量片分布于体模第11段深度为6.3、10.2和14.5cm处, 铝板放在钴治疗机头部铅块支持架上, 然后在无铝板和不同铝板厚度时测定照射量, 并按公式 $I = I_0 \cdot e^{-\mu_{eff} x}$ 拟合指数曲线, 由此求得 μ_{eff} 。在深度10.2cm处得到 $\mu_{eff} = 0.151 \text{ cm}^{-1}$, 在6.3和14.5cm深处得到的 μ_{eff} 与此相差 $\leq 0.4\%$ 。因此可以认为, 在上述深度范围内, μ_{eff} 基本不变。

组织补偿设计参考了Khan^[5]和Galvin^[6]等的计算原理, 对于头颈部屏蔽, 补偿铝板厚度按下列式计算:

$$e^{-\mu_{eff} x} = \frac{TAR(A, d_T)}{TAR(A, d_H)} C \quad (1)$$

式中TAR代表组织空气比, A为人体的有效照射野面积, d_H 和 d_T 分别代表头或颈和躯干水平脐处的体模中面深度, C为照射野辐射强度变化的修正因子。

对于肺部屏蔽, 只需将(1)式中的 d_H 改为 d_{L_0} 而

$$d_{L_0} = \frac{T - L(1 - \rho_L)}{2} \quad (2)$$

式中T代表射线束方向上的胸部厚度, L为同方向上肺的线度, ρ_L 代表肺的质量密度。

结 果

(一) 体模TAR

沿体模第11段前-后和左-右中心线测定了不同深度的剂量,自由空气剂量在治疗平面作了测定,其余各点按反平方定律推算,由此计算了体模内TAR,结果见表4。与文献[7]发表的TAR相比较,体模内TAR相当于 $25 \times 25 \text{cm}^2$ 照射野的数值。

(二) 不同体位照射时体模内的剂量分布

表1为沿体模各段中心测得的体中面剂量。根据有关文献^[8]的建议,拟定和报告TBI剂量应以腹部脐水平中心为准,因此将该点剂量归为100%,其余各部位剂量均为其相对值。由表可见,AP照射时颈部剂量较高,头部剂量因照射野辐射强度减弱而偏小;RL照射则因头颈部在射线束方向上厚度小及胸部肺组织密度低,使上述部位剂量较高,肩部因厚度大而剂量减小;AP+RL照射的剂量分布介于两者之间。总的说来,AP或AP+RL照射的体中面剂量分布比较一致,最大与最小剂量之差分别为27.7和27.9%,而RL照射则达53.6%。

表1 沿体模各段中心的剂量

分段 编号	对应 部位	相 对 剂 量*		
		前 后 照 射	两 侧 照 射	前 后+两 侧 照 射
2	头	91.7	112.3	100.4
3		92.1	125.1	100.6
4	颈	119.4	111.7	112.7
5	肩	104.0	71.5	84.8
6	胸	104.0	103.9	103.7
7		96.0(肺110.7)	112.8(肺118.9)	106.6(肺111.3)
8	腹	95.2	101.1	104.9
9		106.0	104.5	103.7
10	盆	99.6	98.9	103.7
11		100.0	100.0	100.0
12	腔	99.6	93.9	100.4
13		97.6	97.2	95.1
14		99.6	95.5	97.1
15		94.4	95.0	98.9

*以腹部脐水平(第11段)中线剂量标定为100%。

除纵向剂量分布外,还选择体模节2、7和11段测定横向剂量分布,该3段分别对应于人体头、胸和腹腔。结果表明RL照射时,横向剂量与参考点剂量的差异亦大于AP或AP+RL照射,特别是RL照射时肺部剂量高达118.9%,而AP或AP+RL照射则分别为110.7%和111.3%,上述结果与文献[9]报道相一致。

(三) 组织补偿后的剂量分布

表2给出了组织补偿后AP和RL照射的体中面剂量测定值。根据表1的资料,AP照射时只屏蔽颈和胸部,RL照射则头颈胸部均给予屏蔽。不难看出纵向剂量分布均匀性有明显改善,AP和RL照射的最大和最小剂量之差分别为10.2%和24.5%,颈和肺部剂量已接近参考点剂量。

表2 组织补偿后体模各层中心的剂量

分段 编号	对应 部位	相对剂量*	
		前后照射	两侧照射
2	头	93.0	97.5
3		96.1	102.5
4		98.1	94.5
5	肩	99.6	78.0
6	胸	92.7	101.3
7		92.2(等101.0)	101.3(等106.7)
8		93.0	99.4
9	腹	96.1	96.2
10		101.9	101.2
11		100.0	100.0
12	盆腔	100.5	99.1
13		102.4	98.1
14		96.1	97.5
15		97.1	96.9

*以腹部水平(第11段)中线剂量标定为100%。

(四) 体表剂量与体中面剂量的关系

通过比较体模各段中心与对应体表的剂量,发现体中面剂量始终高于体表剂量,但体中面/体表剂量比并不恒定,而与组织厚度有关,随厚度增加,剂量比减小,两者之间呈明显的直线相关($r=-0.983, p<0.001$),因此拟合了直线方程 $y=1.263-0.008x$ (图2)。按公式计算,当组织厚度为9.8cm和30.4cm时,剂量比分别为1.18和1.02,与实测结果完全一致。

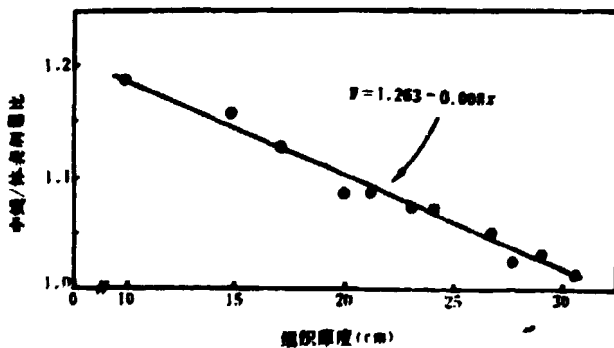


图2 中平面剂量与体表剂量的关系

(五) 骨髓剂量及其分布

测定了组织补偿后AP和RL照射的骨髓剂量,结果列于表3。对于AP照射,不同部位骨髓剂量最大相差10.4%,RL照射为27.7%,骨髓平均剂量按下式计算:

$$D_m = \sum f_i \cdot D_i \quad (3)$$

D_m 为骨髓平均剂量, D_i 为第*i*个骨髓的剂量, f_i 代表第*i*个骨髓的量占全身骨髓的百分数。由于目前尚缺乏国人红骨髓分布的统计资料,因此参照日本成人的平均值^[10]。由此计算AP和RL照射的红骨髓平均剂量分别为98.3%和96.4%,接近腹部体中面剂量。由此可见红骨髓剂量及其分布与人体软组织相近。

表3 骨髓剂量及其分布

骨	测定点	相对剂量*	
		前后照射	两侧照射
颅骨	2	93.1	95.6
下颌骨	1	97.7	97.1
颈椎	1	97.1	102.2
锁骨	2	103.5	78.1
肩胛	2	98.3	86.7
肋骨	2	101.2	79.6
胸椎	1	100.6	86.7
肋骨	6	94.2	97.8
肋骨	1	93.6	93.4
腰椎	2	102.9	102.9
髂骨	6	98.3	98.5
胫骨	2	100.6	105.8
股骨	2	95.4	91.2
平均剂量		98.3	96.4

*以腹部体中面(第11段)中线剂量标定为100%。

讨 论

(一) 照射野

国外TBI一般用直线加速器或专门设计的钴治疗机进行^[11],因此照射野大。国内除少数单位外,多数不具备上述条件。我们通过延长SMD,利用普通钴治疗机得到98×92cm²、对角线长为134cm的近似正方形照射野,如果照射时病人下肢屈曲,该照射野在多数情况下可以包括整个人体,但对身材高的病人仍嫌过小。虽然照射野边缘部分射线强度减弱,但从表1和2的数值可以看出,由于处于该部位的头部厚度小,对剂量分布影响不很大;若合理应用照射体位,有时反而有助于剂量的均匀分布。

(二) 吸收剂量的计算

关键是确定人体所代表的散射体积及对应的有效照射野。文献发表的TAR通常在散射体积大于照射野条件下用均匀水体模测得，水模大小足以对测定点提供充分的散射^[1]。由于人体外形极不规则，各部位厚薄不等，散射亦不同。对于平均大小的病人来说，散射体积究竟多大？美国儿童肿瘤研究组（CCSG）推荐了估计人体散射体积的方法^[2]，其大小相当于人体躯干，长从头顶至骨盆底，宽和厚分别相当于腹部脐水平的左右和前后线度。根据这种方法，结合本体模，可得到 $65 \times 27 \times 20.5 \text{ cm}^3$ 的立方体。按等效照射野法^[14]，对于AP和RL照射，相应的等效正方形照射野分别为 $38 \times 38 \text{ cm}^2$ 和 $31 \times 31 \text{ cm}^2$ ，但这两个照射野的TAR均大于体模的实际数值（表4）。Hochhauser^[12]同样观察到上述情况，他指出人体近似为圆柱体，其横断面内嵌在立方体横断面内，因此散射体积小于立方体，并指出对于足够长的圆柱体，散射对半平面TAR的贡献与其截面积 Q 和周长 U 的比值成正比。对于边长为 S 的正方形照射野，上述关系仍然成立，因此

$$\frac{S^2}{4S} = \frac{Q}{U} \quad (4)$$

若椭圆的长轴为 d_1 ，短轴为 d_2 ，则 $Q = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot d_2}{4}$ ，代入(4)式得 $S = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot d_2}{U}$ (5)

将体模第7、11和13段的左右、前后线度及周长平均，得 $d_1 = 30.5 \text{ cm}$ ， $d_2 = 22 \text{ cm}$ ， $U = 34 \text{ cm}$ ，代入(5)式求得 $S = 25 \text{ cm}$ ，即照射野大小为 $25 \times 25 \text{ cm}^2$ ，其TAR与体模的实际数值十分接近（见表4），误差一般在2%以内。仅在25.5cm深处，体模内TAR减少5%，这可能与该深度靠近射线束出射面，反散射减少有关。

表4 体模内的TAR与3个正方形照射野TAR的比较

深度 (cm)	体 模	$25 \times 25 \text{ cm}^2$	$31 \times 31 \text{ cm}^2$	$38 \times 38 \text{ cm}^2$
0.7	1.079	1.073	1.081	1.086
1.3	1.078	1.066	1.074	1.080
2.2	1.048	1.047	1.058	1.063
3.8	0.934	0.900	0.955	1.006
6.3	0.912	0.935	0.952	0.966
9	0.866	0.840	0.872	0.888
10.2	0.802	0.809	0.833	0.853
13.2	0.707	0.714	0.741	0.765
14.5	0.684	0.678	0.705	0.731
17.2	0.615	0.603	0.632	0.658
18.5	0.582	0.570	0.599	0.626
21.2	0.500	0.508	0.533	0.574
25.5	0.395	0.415	0.446	0.472

• 内插法求得

(三) 吸收剂量的核实

上面用TAR计算吸收剂量时是假定整个人体的密度相同,但实际上各脏器组织的密度有很大差异,骨髓密度显著高于软组织,而软组织密度较低,导致计算的吸收剂量与实际剂量仍有一定误差,因此照射时必须进行监测并及时修正。此外,补偿设计是否合理也只有通过实际测定才能知道。临床照射时除口腔和直肠内可放置剂量片外,一般只能由体表剂量来推断体内吸收剂量,为此,必须知道两者之间的关系^[1]。我们的测定表明,在人体厚度范围内,体表剂量始终低于体中面剂量,这是因为当体表剂量片位于入射和出射面时,分别缺乏来自前方和后方的散射。该结果与文献报道一致,但我们通过进一步观察还发现,随着组织厚度增加,体中面/体表剂量比逐渐减小,且两者之间呈明显直线相关,因此我们拟合了直线方程。临床监测时可根据病人不同部位的厚度,利用该直线方程,由体表剂量较准确地推断出病人体中面的实际剂量。

(四) 病人体位的选择

由于AP照射时人体在射线束方向上的厚度变化较RL照射小,因此体内吸收剂量分布比较一致。若仅考虑剂量均匀分布,则AP照射显然较理想;但另一方面,TBI治疗时间较长,因此病人体位尽可能舒适。AP照射时病人侧卧,RL照射则可仰卧,显然后者体位舒适。AP+RL照射的剂量分布虽然也较均匀,但剂量计算,组织补偿设计较复杂。实际照射时必须综合考虑,权衡利弊。我们认为,若病人能耐受较长时间侧卧,则可选择AP照射。

(五) 组织补偿

关于TBI的吸收剂量应达到多大程度的均匀分布,目前尚无统一意见。若BMT用于治疗白血病,为使体内白血病细胞得到均匀杀灭,剂量分布应尽可能一致。此外大量临床资料表明,肺部剂量过大是BMT后间质性肺炎发病率增高的原因之一^[2]。一般认为剂量分布均匀度应达 $\pm 10\%$ ^[3]。

虽然合理选择照射体位有助于剂量均匀分布,但头、颈和肺部剂量仍较高,因此这些部位应予屏蔽。我们在治疗条件下测定铅的 μ_{en} ,并以腹部脐水平中心作为参考点,根据头颈部体中面深度及胸部肺组织密度的差异,计算了补偿铅板厚度。组织补偿后体内剂量分布均匀性明显改善。对于AP照射,若以腹部脐水平中心作为参考点,则剂量分布均匀性优于8%。我们未测定四肢的吸收剂量,但四肢厚度小,估计吸收剂量亦较大。由于四肢无重要器官,屏蔽与否意义不很大^[4]。

(六) 骨髓剂量及其分布

骨髓是TBI的靶器官之一,应确保照射时受到足够剂量,因此临床上主要关心的是剂量下限。我们测定了组织补偿后的红骨髓剂量,其平均剂量接近腹部体中面剂量,且各部位骨髓所受剂量的差异与软组织相近,因此可用参考点剂量来大致反映红骨髓剂量。虽然屏蔽部位的部分骨髓剂量较小,但仍大于软组织最低剂量,由此可见组织补偿后红骨髓仍受到足够的剂量。

参 考 文 献

- [1] Stroh R and Santos GW. Clin. Haematol. 1983; 1: 721.
- [2] O'Reilly RJ, et al. Semin. Hematol. 1984; 21: 188.
- [3] Vriesendorp HM and Bekkum DW van. Role of total body irradiation in conditioning for bone

marrow transplantation, in Thierfelder S, Rodt HV, Kolb HJ (eds) ;Immunobiology of bone marrow transplantation, Heidelberg New York, Springer Verlag 1980;348.

- [4] Leung PMW, et al., Bri.J. Radiol. 1974; 47:805.
- [5] Khan FM, et al. Int. J. Radia. Onco Biol. Phys. 1980; 6:745.
- [6] Galvin JM, et al. Ibid. 767.
- [7] Gupta K and Cunningham JR. Bri. J. Radiol. 1966; 39:7.
- [8] Galvin JM. Int. J. Radia. Onco. Biol. Phys. 1983; 9:1919.
- [9] Lam WC, et al. Int. J. Radia. Onco. Biol. Phys. 1980; 6:245.
- [10] Hashizume T, et al., J. Radiat. Res. 1977; 18:67.
- [11] Kim TH, et al., Int. J. Radia. Onco. Biol. Phys. 1980; 6:779.
- [12] P. Omäki LK. Bri. J. Radiol, 1968; 41:381.
- [13] Hochhauser E and Balk OA. Bri. J. Radiol. 1978; 51:480.
- [14] Glasgow Cp. Medical Phys. 1982; 9:311.
- [15] Keane JL, et al., Int. J. Radia. Onco. Biol. Phys. 1981; 7:1365.

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



书号: 15175-00332

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre