

# 宇宙射线的变化规律及机组人员受照剂量

北京放射医学研究所(北京, 100850) 于水综述 王功鹏 张景源\* 审校

摘要:对高空辐照环境及变化规律、太阳黑子活动对剂量率的影响、中子剂量贡献、机组人员受照剂量等内容进行了综述

关键词:宇宙射线 受照剂量

## 1 高空辐照环境及变化规律

宇宙射线来自银河系和太阳系,包含低、高 LET两种粒子,具有极高能量,它们穿过地球磁场后,和空气中的氧、氮等核发生电离作用,形成一系列次级粒子,包括 $\alpha$ 粒子、质子、 $\pi$ 、 $\mu$ 电子、正电子和中子,还有 $\gamma$ 射线。银河系的宇宙射线包括 98%重子(87%质子,12%氦离子和1%重粒子)和2%的电子,能量至少可达 $10^{15}$  MeV。银河次级射线最高能量可达 $10^{14}$  MeV,峰值 300MeV;太阳次级射线,最高能量约为 300MeV,但一般在 1~40MeV<sup>[1]</sup>。

宇宙射线穿越地球磁场过程中,部分能量较低的粒子,由于地球磁场的作用而偏离,这种“屏蔽”作用在赤道处最强,因为入射角度和磁力线几乎垂直,在极点处最弱,因为入射方向和磁力线几乎平行,故初级射线和次级射线剂量率都和纬度有关,纬度越高,剂量率越大。

空气中初级射线和次级射线粒子密度变化规律的研究发现,在 150~50km 高度内,粒子总密度几乎恒定,从 50km 向下,密度开始增加,于 20km 达到最大值,随后由于能量损失和核反应而降低。随着大气深度增加,带电粒子中的质子相对量减少,电子相对量增加。在民航飞行的高度(10~12km),带电粒子主要成份是电子和质子。

实验发现,地磁纬度 $\lambda$ 在 35~55之间,

剂量率正比于  $1 - \cos^4 \lambda$ <sup>[2]</sup>,即纬度增加,粒子密度增大,当纬度高于 55°后,趋于不变,这是由于星际间磁场屏蔽效应导致的。低 LET(传能线密度)辐射和中子一样,其剂量率沿赤道有对称性。电离辐射剂量率和中子注量近似于指数规律随高度增加而升高,联合国原子辐射效应科学委员会 1988年报告给出了根据电离辐射计算组织剂量以及中子剂量当量随高度的变化公式<sup>[3]</sup>。

## 2 太阳黑子活动

太阳宇宙射线主要是由太阳黑子爆炸产生的,它释放的粒子(多数是质子,也有一些氦核和重粒子)能量为 $10^{22} \sim 10^{25}$  J,最大通量达 $10^{16}$ 粒子/cm<sup>2</sup>,这种现象有时每年可多达 10次。

太阳黑子的活动会引起地球磁场压缩,减弱了屏蔽作用,从而使能量较低的粒子也可进入大气。在高空,太阳黑子的活动周期对带电粒子电离辐射有较大的影响,在 30km 高度,剂量率随太阳活动周期呈明显的波浪型变化,10.6km(飞机飞行高度)以下,影响变得很小,这是由于太阳宇宙射线的能量相对较低,很难通过地球磁场的屏蔽。但是,这些粒子移出太阳系,形成磁场,将阻挡宇宙射线中的低能粒子,所以,太阳黑子活动频繁时,宇宙射线通量减少。例如在 12km 的飞行高度,太阳黑子活动从最低期到最高期,可导致宇宙射线约 20% 的变化。

\* 中国医学科学院、中国协和医科大学放射医学研究所

太阳黑子活动大约以 11 年为一个周期, 1972 年 8 月是观察到的最强一次 1956 年 2 月的黑子活动, 所产生的宇宙射线高能量成份较多, 有很多的粒子进入大气, 有幸的是, 这次事件的强度约为 1972 年的 1/10 根据现有的知识, 即使遇到 1956 年那样的太阳耀斑, 机组人员受太阳系和银河系宇宙射线混合照射也不会超过 ICRP 第 60 号出版物中的新职业照射限值 (5 年中平均不超过  $20\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ , 任何一年不超过  $50\text{mSv}$ ).

太阳黑子的活动可使剂量水平由  $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  升到  $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$  水平, 见表 1 所示. 在这些特定时期, 需要采取干预手段, 如限制飞行次数, 飞行的高度, 纬度等. Bartlett<sup>[8]</sup> 提出了一套理想的监测报警系统, 但未考虑其成本及对工作人员和公众的心理影响

表 1 太阳黑子活动对剂量率的影响

高度 (km)	通常的剂量率 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ )	黑子活动期的剂量率 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ )
10	5 <sup>[4]</sup>	1 000 (1965 年) <sup>[3]</sup>
20	15	3 000 (1965 年) <sup>[3]</sup>
18	12. 2	76 (1989 年) <sup>[6]</sup>
19. 8	20	110 (1989 年, 北极) <sup>[7]</sup>

### 3 中子剂量

中子没有电荷, 不受地球磁场影响, 但它是带电粒子的产物, 加之大气对其吸收厚度随地磁纬度增加而下降, 故较电离辐射有更强的纬度效应, 即在南极和北极上空, 中子的剂量贡献较赤道处高. Hewitt 等人<sup>[9]</sup> 在海拔 10. 1km 的高度研究发现, 在地球的两极, 中子剂量率较赤道增加约 5 倍, 而电离辐射仅增加 1 倍. 此外, 中子的注量与太阳的活动周期也有关, 在太阳活动最低期, 更多的初始粒子进入大气, 中子的产额较太阳黑子活动最高期增加许多.

Foelsche<sup>[5]</sup>、Bartlett<sup>[8]</sup>、Hewitt<sup>[9]</sup> 等研究发现, 中子对受照剂量的贡献随高度增加而

增多, 约为 20% ~ 80%, 在民航飞行高度, 中子贡献介于 5% ~ 8%. Schakch 等<sup>[10]</sup> 的研究结果显示, 在 50~ 80°N, 9. 5~ 12km 范围内, 中子剂量约占总剂量的 2/3 表 2 列出了部分文献报道的中子剂量贡献

表 2 中子剂量贡献和电离辐射的关系

高度 (km)	纬度 (°N)	中子贡献 / 电离辐射	备注
9~ 12	38~ 56, 60~ 82	1. 45± 0. 10	根据 ICRP21
13~ 18	40~ 45	1. 12± 0. 04	计算中子剂量, QF= 9 <sup>[11]</sup>
	46~ 58	1. 55± 0. 09	
	65~ 72	1. 43± 0. 02	
9. 5	55~ 60	3. 3	根据 ICRP60
10	60~ 70	3. 4	计算中子剂量, QF= 20 <sup>[10]</sup>
10. 7	70~ 80	3. 8	
11. 3	80~ 70	4. 3	

ICRP 第 21 号出版物指出, 中子对总剂量当量率贡献为 20% ~ 75%; ICRP 在 1990 年出版物中指出, 在高空, 高能中子是剂量主要贡献, 约占 2/3

### 4 机组人员受照剂量

估算机组人员受照剂量, 必须假定典型的飞行图, 知道不同高度的飞行时间、剂量随高度和纬度的变化规律, 考虑中子的品质因子以及数据的不确定因素, 还有不可预测的太阳耀斑. Friedberg 等<sup>[12]</sup> 研究发现, 飞行时间 500~ 1 000h, 飞行高度 5~ 12km, 机组人员或频繁飞行的人年受照剂量可能在 1~ 10mSv 之间, 平均值接近 5mSv. Davies<sup>[13]</sup> 对目前英国 20 年超音速飞机收集的数据进行分析处理, 得出平均年受照剂量介于 3~ 6mSv, 长距离飞行机组为 6~ 10mSv. 综合文献研究结果, 机组人员受照有效剂量当量率介于  $5\sim 20\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ , 年受照剂量为  $3\sim 12\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ , 这与飞行时间、纬度和高度有关.

### 5 需要开展的工作

进一步开展基础理论的研究, 如不同辐

射成分的相对含量及品质因数,中子能谱和其变化规律,高 LET与低 LET电离辐射的放射生物学机理的差异等。热释光探测器的阻止能力与电子(1~100MeV)和质子(10~500MeV)的能量有关系,这种对 LET的依赖作用将导致低估组织吸收剂量。

进一步开展方法学的实验研究,减少总的不确定度。中子测量仪器常用<sup>252</sup>C刻度,不适合高能中子(>10MeV)的测定,导致测量结果比计算结果低很多。Spurny等<sup>[14]</sup>比较用加速器刻度与用<sup>252</sup>C刻度的结果,发现刻度因子降低了3倍,也就是说,以往中子的测量结果偏低。高能中子的测量方法少,通常是依据蒙特卡罗方法计算得出,所以中子能量分布、注量、剂量率变化有较大不确定性(约20%)。

由于测量仪器的技术限制和测量混合辐射场剂量率的困难,使得现有测量结果相差2~3倍。现有的剂量数据不足以得出可靠的当量剂量率和高度、纬度、太阳活动周期的关系,需要获得更多、更准确的数据,建立可靠的计算模型,估算器官剂量当量。另外现有数据测量的最高高度是12km,多数介于9.5~10.7km,而将来的飞机,像A340的飞行高度是12.5~13km,所以有必要进行该高度

的调查。

## 参 考 文 献

- 1 Reitz G. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 5-20
- 2 Thomas RH. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 51-57
- 3 UN SCEAR. Sources, Effects and risks of ionizing radiation. 1988 49-134
- 4 NRPB. Radiation doses—maps and magnitudes. (Harwell NRPB) 1991: 18
- 5 Foelsche T. National aeronautics and space administration. Washington, DC, USA, NASA TM X-71990, 1968 5
- 6 Nguyen VD et al. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 41-46
- 7 Barish RJ. Health Phys. 1990; 59(2): 199-204
- 8 Bartlett DT. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 93-100
- 9 Hewitt JE et al. Natural Radiat Environment III, 1980(2): 855-881
- 10 Schalh D et al. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 85-91
- 11 Akatov Yu A. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 59-63.
- 12 Friedberg W et al. Aviat Space Environ Med, 1989; 60 1104-1108
- 13 Davies DM. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 121-124
- 14 Spurny F et al. Radiat Protect Dosim, 1993; 48(1): 73-77.

(收稿日期: 1996-09-23)

## 生物还原剂 SR-4233的研究概况

中国辐射防护研究院(太原, 030006) 敖桂珍综述 胡 璧\* 审核

**摘 要:** 生物还原剂 SR-4233选择性对乏氧细胞产生毒性,与照射合用时可显著提高其毒性。本文就 SR-4233对离体乏氧细胞和整体肿瘤组织的细胞毒性作用、与氧浓度的关系、作用机制和临床应用前景等方面进行综述。

**关键词:** 生物还原剂 SR-4233

SR-4233作为生物还原剂,目前已进入 I 期临床试验,事实上也是第一个纯粹作为

\* 中国医学科学院、中国协和医科大学放射医学研究所