

文章编号: 1000-6486(2009)05-0417-03

【综述】

航空机组人员宇宙射线职业照射研究概况

Research review on occupational exposure to cosmic rays among civil aircrew

雷淑洁, 孙全富, 毛玲, 钱叶侃, 武云云, 尚兵

LEI Shu-jie, SUN Quan-fu, MAO Ling, QIAN Ye-kan, WU Yun-yun, SHANG Bing

关键词: 航空机组人员; 宇宙射线; 职业照射

中图分类号: X591

文献标识码: A

宇宙射线是航空和航天活动中职业照射的辐射来源,起源于外太空,主要由质子和 α 粒子组成,它们与地球高空大气作用产生次级辐射,产物中比较重要的是 μ 介子、正负电子、光子(γ 线)和中子。

1 宇宙射线剂量与海拔高度和地磁纬度的关系

航空机组人员受照射剂量主要取决于飞行高度、飞行时间、航线区域(地磁纬度)、太阳活动和太阳耀斑等因素。

航空机组人员所接受的宇宙射线照射由电离成分和中子组成,这两部分的比例随海拔高度而变化。一般而言,6 km以上中子占60%~80%^[1]。据SCHALCH等^[2]在50~80°N,海拔915~1 215 km高度上调查发现,中子剂量贡献约为直接电离辐射的3~5倍。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)多年来一直采用BOUVILLE和LOWDER给出的估算不同海拔高度宇宙射线电离成分剂量率的公式^{[3]29-30}。关于中子剂量率随海拔高度的变化,近年来多采用对中子特别是高能中子响应较好的Bonner球谱仪(一种球形组织等效正比计数器)测量结果的模型进行估计,海拔高度需要用大气厚度进行修正。地磁纬度对中子注量的影响,采用Florek公式估计。国内也开展了相关的测量工作。秦宝霞等^[4]和葛盛秋^[5]的测量显示宇宙辐射电离成分的剂量率随飞行高度增加呈指数增加,随地磁纬度增高呈线性增加。于水等^[6]根据1992—1993年对国内34条航线宇宙射线剂量率424个实测数据,拟合了宇宙射线剂量率与海拔高度间的函数关系,认为在所调查的范围内,宇宙射线随地理经度的变化不明显,但不同高度的宇宙射线随地磁纬度的增加宇宙射线呈线性增加。

2 国内测量结果

于水等^[6]1997年对国内34条航线的统计表明,平均起飞时间为(19.2±5.2) min,平均降落时间为(22.4±4.4) min,近似认为起降时间均为20 min,航班巡航高度多数为10 000 m。根据测量结果,作者拟合了海拔高度与宇宙射线剂量率之间的

方程,求得当海拔高度为0和10 000 m时,平均剂量率分别为6.49和160.7($\times 10^{-8}$ Gy/h)。该作者假定,国内每周有约3 200个班次,飞行时间约6 600 h,平均飞行时间为2.06 h,近似认为120 min起降时间约占飞行时间的1/3,剂量贡献仅占整个航行过程中所受剂量的约13%。假设机组人员每年工作1 000 h,按照上述模式,10 000 m平飞时间为670 h,起降时间为330 h,工作时间内宇宙射线电离成分对机组人员年平均剂量为1.4 mSv。作者引用了北欧国家的估算结果,认为中子剂量贡献约为直接电离辐射的3~5倍。据此,估算我国机组人员飞行时间内的年受照射剂量约为4.5~7.0 mSv。作者对飞行时间的假定和对中子剂量的处理可能高估了年剂量。

秦宝霞等^[4]1996年采用BF₃中子剂量计,对国际航线中子剂量进行测定,据此估计北京—纽约航线中子剂量为2.94 mSv/1 000 h,占总剂量的37.5%。北京—斯德哥尔摩航线为3.50 mSv/1 000 h,中子成分的贡献为42.3%。

陈英民等^[7]1997年采用热释光个人剂量计(TLD)和CR-39中子剂量计的个人剂量监测方法对山东航空公司机组人员和飞机内的剂量进行了3个月的累积测量。在这3个月中机组人员平均飞行326 h,因此估计年飞行约为1 300 h。考虑到CR-39对中子的能量响应问题,作者将CR-39实际测量的中子剂量乘以3得到估计的中子剂量。报告飞行高度在8 000~10 000 m和4 000 m机组人员年剂量水平分别为2.40 mSv和1.12 mSv。

王其亮等^[8]1995年采用RS-111型高压电离室和FD-3013型闪烁辐射仪对国内30条航线的宇宙射线电离成分进行测量,宇宙辐射中子成分的贡献则用UNSCEAR 1988年报告书的方法估算。测量的宇宙射线剂量率为(12.0~917.0) $\times 10^{-8}$ Sv/h,30条航线飞行的时间在0.80~3.75 h之间。按每年飞行1 000 h计算,机组人员在飞行中所受年有效剂量范围为0.12~9.17 mSv。

3 依据模型软件进行估算

从理论上讲,可以采用几种方法估算航空机组人员接受宇宙射线产生的照射剂量:①在机舱内利用球形组织等效正比计数器等参考基准仪器直接测量;②采用对光子响应较好的TLD和对中子响应较好的CR-39等进行被动累积(个人)测量;③根据粒子注量计算程序或实际环境剂量测量数据编制计算机程

作者单位: 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所,北京100088

作者简介: 雷淑洁(1964—),女,大学专科,副主任技师,主要从事放射卫生工作

中国知网 <https://www.cnki.net>

通讯作者: 孙全富, E-mail: qfusun@ninp.cn

序估算航空机组人员的受照剂量。考虑到宇宙射线的构成非常复杂,能谱特别是具有重要剂量学意义的中子的能谱极宽,包括电离室在内的一般的测量仪器和被动累积测量方法都存在一些问题。一般认为,航空机组人员的法定剂量估计应采用符合有关国际组织标准并获得本国航空管理部门许可的软件进行^[9-10]。

实际工作中,最常用的计算机模拟程序是美国航空署的 CARI-6和德国环境健康研究中心等研发的 EPCARD^[11],以及加拿大的 PC Air和奥地利的 Free等软件。这些软件在其数据库内已存储了航空飞行高度范围的三维等剂量率曲线,只要将飞行的起始机场、爬升和降落时间、巡航时间及巡航高度、飞行轨迹和日期等数据输入,就会自动计算出每次飞行的剂量。不同软件的计算结果应该是非常接近的,但各种软件对太阳活动周期 (Solar cycle)、太阳耀斑 (Solar flares)和地磁圈 (Magnetosphere of the earth)等数据的更新有所不同。

国内目前尚没有这方面的法定软件,因为涉及到航空公司的许多商业机密信息,那些完全采用上传航线等数据返回剂量估算结果的软件,可能不适合国内航空管理部门采用。

冯英进等^[12]2004年根据 1997—1999年新疆航空公司各类飞行人员飞行时间,利用美国联邦航空署开发的 CARI-6软件计算了各条航线年均宇宙辐射有效剂量。234名飞行人员3年中个人年均受照有效剂量为 2.19 (0.89~4.42)mSv。因为各工种间的飞行时间不一样,不同工种间的受照剂量差异有显著性,其中安全员 3.28 mSv,空乘 2.84 mSv,机械师 2.04 mSv,领航员 1.77 mSv,飞行员 1.72 mSv。

刘建忠等^[11]2006年计算了国内和国际数条典型航线的剂量。据此,我们可以推算国内主要大城市航线飞行 1 000 h接受剂量约 2 mSv,主要国际航线飞行 1 000 h接受剂量约 6 mSv,见表 1。

表 1 不同航线机舱内宇宙辐射有效剂量 (软件计算结果)

| 航 线 (单程) | 飞行时间 (m in) | 有效剂量 (mSv) | |
|-----------|----------------|----------------------|------------|
| | | 单程飞行 | 飞行 1 000 h |
| 国内航线 | | | |
| 北京—广州 | 180 | 6.8×10^{-3} | 2.3 |
| 北京—上海 | 115 | 4.1×10^{-3} | 2.2 |
| 广州—上海 | 120 | 3.8×10^{-3} | 1.9 |
| 上海—广州 | 120 | 3.7×10^{-3} | 1.8 |
| 上海—成都 | 140 | 4.8×10^{-3} | 2.1 |
| 上海—昆明 | 185 | 6.5×10^{-3} | 2.1 |
| 国际航线 | | | |
| 北京—旧金山 | 460 | 4.3×10^{-2} | 5.6 |
| 北京—东京 | 205 | 8.9×10^{-3} | 2.6 |
| 北京—哥本哈根 | 535 | 4.0×10^{-2} | 6.0 |
| 北京—布鲁塞尔 | 665 | 6.8×10^{-2} | 6.2 |
| 北京—巴黎 | 650 | 6.6×10^{-2} | 6.2 |
| 上海—温哥华 | 650 | 6.6×10^{-2} | 6.2 |
| 上海—布鲁塞尔 | 845 | 8.2×10^{-2} | 5.8 |
| 广州—墨尔本 | 550 | 2.7×10^{-2} | 3.0 |
| 广州—阿姆斯特丹 | 560 | 2.8×10^{-2} | 3.3 |

由此可见,无论是实际测量结果还是依据国外软件估算结果,我国航空机组人员所接受的年剂量都大于 1 mSv的公众照射限值,可能与其他职业的放射工作人员年剂量相当。如果不实行适当的航线轮换,国际航线机组人员剂量甚至更高。

4 集体剂量估计

因为缺乏航空公司提供的各条航线的具体飞行数据,只能按照平均剂量和机组人员总数估计我国民用航空机组人员的集体剂量。

首先估计航空机组人员的数量。根据 2006年民航总局公报,截止到 2006年 1月,我国民航共有职工 35万人,其中飞行员 12 840人,女飞行员约 300人 (含空军)。每天飞行 4 023班,其中国内航班 3 602班,国际航班 421班。全行业有运输飞机 982架,其中客机 937架,货机 45架。通用航空飞机 383架,教学校验飞机 140架。没有见到公开的空乘人员的数量,一般规定飞行员与空乘人员标准比例是 1.0:1.5。中国国际航空公司和海南航空公司飞行人员和乘务人员的实际人数分别为 2 875:6 166人和 1 050:1 530人,据此推算比例为 1.0:1.8。UNSCEAR 1993年报告给出的美国 1980年代的比值 1.48。我们取 1.0:1.5,也即我国目前有 1.28万飞行员和约 1.92万空乘人员,共计 3.2万民航机组人员。

我们把 3.2万名航空机组人员按照国内和国际航班数量之比 (2006年国内国际航班之比为 3 602/421)分配,即国内机组人员占 89.5%,国际机组人员占 10.5%。假设机组人员每年平均飞行时间为 1 000 h,据此估计我国民航客机航空机组人员 1986—1990年和 1991—2006年的年集体剂量,分别为 60.5和 77.7人·Sv,见表 2。约占世界机组人员年集体有效剂量 800人·Sv的 1/10^{[3]530-531},见表 3。

表 2 我国机组人员天然辐射职业照射水平

| 时间 (年份) | 年均机组人员数量 (千人) | 年均有效剂量 (mSv) | 平均集体有效剂量 (人·Sv) |
|-----------|---------------|------------------|-----------------|
| 1986—1990 | 25.0 | 2 (国内) 6 (国际) | 60.5 |
| 1991—2006 | 38.4 | 2 (国内) 6 (国际) | 77.7 |

表 3 各国机组人员天然辐射职业照射水平

| 地 区 | 年份 | 机组人员 | | | 平均有效剂量 (mSv) | 集体剂量 (人·Sv) |
|------|-----------|---------|--------|--------|--------------|-------------|
| | | 总人数 | 飞行员 | 乘务员 | | |
| 美国 | 1985 | 114 000 | 46 000 | 68 000 | 3.51 | 400.0 |
| 英国 | 1991 | 24 000 | | | 2.09 | 50.0 |
| 芬兰 | 1990—1994 | 1 930 | | | 1.96 | 3.8 |
| 保加利亚 | 1990—1994 | 1 400 | | | 2.00 | 2.8 |
| 世界 | 2000 | 250 000 | | | 3.00 | 800.0 |
| 中国 | 2006 | 32 100 | 12 840 | 19 260 | 2.42 | 77.7 |

需要说明的是,以上估计不是采用国际上的通用办法,即利用航空公司提供的全部航班飞行数据,利用软件进行剂量估算,而是利用国内和国际典型航线数据,利用软件估算飞行典型航班机组人员的年剂量 (假定年均飞行 1 000 h),再与推算

得出的机组人员总数相乘所得。显然,这样的估计误差较大,因为忽略了国内存在的大量短程和低飞航线,另外,我国目前实际的客机数量仅为 1 000架,每天约有 4 100个航班,按照 1架客机飞行时约有 2名飞行员和不超过 20名空乘服务人员,处于飞行状态的民用航空机组成员数量不到 2.2万人。其他人员的实际职业照射剂量可能为 0 mSv。

5 航空机组人员生物剂量计结果

刘倩等^[13] 1999年观察了 49名年龄为 22~46岁健康男性飞行员周围血淋巴细胞微核率,发现飞行员组微核率(MNF%)为 (5.86 ± 2.24) ,高于健康献血员 (3.85 ± 1.66) ,两者比较差异有显著性($P < 0.01$)。连续飞行组(连续飞行 100 h以上)微核率显著高于间断飞行组(年飞行 25 h以下),2组间差异有显著性($P < 0.01$)。间断飞行组微核率与健康献血员比较差异无显著性($P > 0.05$)。微核率受许多因素包括吸烟等影响,开展周围血淋巴细胞染色体畸变分析更有意义。

6 航空机组人员职业健康管理

考虑到现代商业民航客机飞行高度高,也考虑到中子照射的贡献,特别是中子品质因子不断增大,国际放射防护委员会(ICRP)1990年第 60号建议书、国际原子能机构(IAEA)1997年“国际电离辐射防护和辐射源安全的基本安全标准(IAEA安全丛书 No. 115)”均建议将机组人员接受的照射视为职业照射。1990年美国航空管理局将驾驶喷气式客机机组人员列为职业照射人员范畴,并采用了放射工作人员的剂量限值。欧委会原子能指令(EC Directive 96/29 EURATOM)1996年要求对航空机组人员按照放射工作人员进行管理,开展剂量监测与估算。欧盟成员国在 2000年以后逐步对本国辐射防护规定进行修订,要求告知航空机组人员宇宙射线的危害,采取机组成员工作时间和航班计划等措施降低宇宙射线剂量,并由各航空公司或指定机构按照法定的软件,估计并报告航空机组人员的年剂量。

我国 GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》已经把航空机组人员的宇宙射线照射视为职业照射^[14]。同时颁布了针对空勤人员的国家职业卫生标准 GBZ 140—2002《空勤人员宇宙辐射控制标准》,明确航空空勤人员飞行期间所受宇宙射线照射为职业照射,规定用经过验证、得到国家有关部门审核的软件计算评估飞行人员在所有飞行安排中接受的直接和间接宇宙辐射电离辐射成分的照射,并给出了与表 1一致的软件估计的年剂量估算结果作为重要参照^[15]。但在法规方面,无论是国务院 449号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》还是卫生部 55号令《放射工作人员职业健康管理规定》,均未明确将航空机组人员纳入放射工作人员健康管理范畴。

宇宙辐射是天然辐射源外照射,既无法取消,也不可能通过对飞机舱采取措施做到有效屏蔽。对航空机组人员主要的防护措施,包括在机组人员任务安排和航班计划中限制飞行时间、轮换飞行高低纬度航线等措施。对怀孕的女机组人员,个人剂量限值为 1 mSv。要注意选择低海拔航线飞行,控制累积飞行时间^[16]。欧盟国家的监测数据表明,年轻的女性空乘人

员和富有飞行经验的中年飞行员接受的剂量大于其他人员,这可能与年轻女性家庭负担轻,更适合远程飞行特别是国际航班的飞行以及补贴较高和需要飞行员具有更多飞行经验有关。

在未来航空机组人员放射性职业健康管理中,有关部门应在相关法规中明确将航空机组人员纳入放射工作人员行列中,统一进行职业健康管理。开展宇宙射线危害告知,明确我国航空机组人员剂量估算的法定软件,各航空公司或指定机构利用其飞行日志记录的飞行时间和航线,对航空机组人员受照剂量进行准确估计,并上报国家放射工作人员个人剂量监测登记报告系统。

参考文献:

- [1] 温静,葛盛秋,叶坚.宇宙辐射对民航机组人员的危害及其防护[J].中华航空医学杂志,1994,12(5):239—241.
- [2] SCHALCH D, SCHARMANN A. In-flight measurements at high latitudes: fast neutron dose to aircrew [J]. Radiat Prot Dosim, 1993, 48(1): 85—91.
- [3] 联合国原子辐射效应科学委员会. UNSCEAR 2000年报告中文版:卷 1(辐射源) [M]. 太原:山西科技出版社,2005:29—30, 530—531.
- [4] 秦宝霞,姚永祥,王其亮,等.宇宙辐射电离成分剂量率与高度和纬度的关系[J].中华航空医学杂志,1996,7(1):31—34.
- [5] 葛盛秋.民航飞机座舱中宇宙辐射中子剂量与飞行高度和地磁纬度关系探讨[J].中华航空航天医学杂志,1998,9(3):157—161.
- [6] 于水,王功鹏,关守化.低大气层宇宙射线剂量水平及机组人员受照剂量的研究[J].辐射防护,1997,17(2):103—108.
- [7] 陈英民,李福生,林俊明,等.航空机组人员个人受照剂量水平及评价[J].中国辐射卫生,1999,8(4):206—207.
- [8] 王其亮,崔圣裕,樊小敏,等.航空机组人员的职业照射及危险估计[J].中国辐射卫生,1995,4(1):9—11.
- [9] MCAULAY I. Regulatory control of air crew exposure to cosmic radiation: the European approach [J]. Health Physics, 2000, 79(5): 5962—5991.
- [10] FRIEDBERG W, COPELAND K, DUKE F, et al. Guidelines and technical information provided by the U. S. Federal Aviation Administration to promote radiation safety for air carrier crewmembers [J]. Radiat Prot Dosim, 1999, 86(4): 323—327.
- [11] 刘建忠,靳根.空勤人员辐射剂量的估算与测定[J].辐射防护通讯,2006,26(5):23—27.
- [12] 冯英进,陈蔚如,仲晶.飞行人员宇宙辐射有效剂量的估算和分析[J].环境与职业医学,2004,4(1):271—274.
- [13] 刘倩,秦莲,安一明,等.飞行员外周血淋巴细胞微核的观察[J].解放军预防医学杂志,1999,17(1):70.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 [S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [15] 中华人民共和国卫生部. GBZ 140—2002 空勤人员宇宙辐射控制标准 [S]. 北京:法律出版社,2002.
- [16] LM M K. Cosmic rays are air crew at risk? [J]. Occup Environ Med, 2002, 59(7): 428—432.

(收稿日期:2009-03-12 修回日期:2009-06-22)