

空勤人员宇宙辐射职业危害的研究进展

孙艺哲, 罗永斌, 涂娜

武汉市职业病防治院临床检验科, 湖北 武汉 430014



DOI 10.11836/JEOM21398

摘要:

根据中国民航局 2020 年发布的数据显示,我国目前共有超过 6 万名的飞行员和超过 10 万名乘务员在各航空公司持证上岗。这些空勤人员的健康是维护和延续民用航空顺利发展的基础。空勤人员在高空会受到宇宙辐射的照射,然而由于宇宙辐射种类复杂、多变、难以准确测量,因此其对空勤人员的健康是否有影响并没有定论。本文介绍了宇宙辐射对空勤人员的影响,回顾了国内外对于宇宙辐射剂量的估算并总结了剂量测量方法种类和局限性,并指出了现有的空勤人员职业健康管理的不足,对加强空勤人员的辐射危害的健康管理提出新的意见。

关键词: 空勤人员; 宇宙辐射; 辐射危害; 宇宙辐射剂量; 剂量估算方法

Research progress on occupational hazards of cosmic radiation for aircrew SUN Yizhe, LUO Yongbin, TU Na (Clinical Laboratory, Wuhan Prevention and Treatment Center for Occupational Diseases, Wuhan, Hubei 430014, China)

Abstract:

According to the data released by the Civil Aviation Administration of China in 2020, there are more than 60000 pilots and more than 100000 flight attendants in China working with certificates in various airlines. The health of these aircrew is the basis for maintaining and continuing the smooth development of civil aviation. Aircrew are exposed to cosmic radiation at high altitudes. However, because the types of cosmic radiation are complex, changeable, and difficult to measure accurately, there is no definite conclusion as to whether it has any effect on the health of aircrew. This paper introduced the impacts of cosmic radiation on aircrew, reviewed the estimation of cosmic radiation dose at home and abroad, and summarized the cosmic radiation dose measurement methods and their limitations. It also pointed out the shortcomings of existing occupational health management of aircrew and put forward new suggestions on strengthening the health management of radiation hazards for aircrew.

Keywords: aircrew; cosmic radiation; radiation hazard; cosmic radiation dose; method of dose estimation

作者简介

孙艺哲(1985—),女,硕士,主管技师;
E-mail: 40094711@qq.com

通信作者

罗永斌, E-mail: 547936086@qq.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-08-29

录用日期 2021-12-09

文章编号 2095-9982(2022)03-0337-06

中图分类号 R12

文献标志码 A

►引用

孙艺哲, 罗永斌, 涂娜. 空勤人员宇宙辐射职业危害的研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(3): 337-342.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21398

Correspondence to

LUO Yongbin, E-mail: 547936086@qq.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-08-29

Accepted 2021-12-09

► To cite

SUN Yizhe, LUO Yongbin, TU Na. Research progress on occupational hazards of cosmic radiation for aircrew[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(3): 337-342.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21398

宇宙辐射是一种来自太空的电离辐射,它含有各种高能粒子,具有很宽的能量范围。由于宇宙辐射的组成非常复杂,高能粒子与大气成分相互作用,产生次级粒子,这些次级粒子主要由中子、光子、质子、带电和不带电的介子组成^[1]。它的剂量在世界各地都不同,主要取决于地磁场纬度、海拔高度和太阳周期。宇宙辐射剂量随着海拔高度增加而增加,极地地区宇宙辐射量高于非极地地区^[2],而太阳周期的波动偶尔会导致宇宙辐射剂量激增。在高空工作的空勤人员长期接受到高水平的宇宙辐射。高空中的宇宙辐射 40%~80%为中子,中子是一种高传能线密度的辐射,而一般医院、工厂的放射工作人员接触的大多是属于低传能线密度的辐射,有研究发现高传能线密度的辐射射线比低传能线密度的辐射射线具有更高电离能力,可致细胞染色体损伤更重,具有较高的致癌效应,对身体的伤害更大^[3-4]。1990 年,国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)就已经建议将机组人员归类为职业暴露人员。

1 宇宙辐射对空勤人员的影响

空勤人员接受的辐射剂量一直以来都被认为是没有超过国家剂量限值 $20 \text{ mSv} \cdot \text{年}^{-1}$, 因此其放射危害并没有得到足够的重视, 然而长期低剂量的电离辐射依然会对空勤人员造成伤害。

1.1 甲状腺疾病

甲状腺作为人体最大的内分泌腺, 是电离辐射的重要靶器官, 极易受到电离辐射的影响, 可导致甲状腺功能或形态的改变, 在切尔诺贝利核事故和福岛核反应堆事故后, 对当地居民长期健康调查中发现, 居民的甲状腺结节和甲状腺癌发病率显著增加^[5-6], 国外研究发现暴露于电离辐射的医护人员与未接触辐射的医护人员相比出现了促甲状腺激素平均水平显著较高, 游离三碘甲状腺原氨酸和游离甲状腺素平均水平较低的现象^[7], 还有研究人员对医院从事放射工作的 326 名医务人员进行了 12 年的随访, 观察到这些医务人员的三碘甲状腺原氨酸和甲状腺素在研究期间下降, 因此电离辐射可能导致医护人员的血清三碘甲状腺原氨酸和甲状腺素水平下降^[8]。关于低剂量电离辐射可能会导致甲状腺疾病风险增加的研究也有很多^[7, 9-10]。

对空勤人员的体检研究显示, 空勤人员甲状腺结节检出率明显高于普通健康体检人员, 还发现飞行员甲状腺结节检出率明显高于其他机组人员。飞行员在飞机的前方工作, 宇宙辐射的暴露机会更大, 宇宙辐射的年平均有效剂量显著高于其他机组人员^[11], 印证了宇宙辐射暴露与甲状腺结节可能存在一定的相关性。

1.2 生殖问题

研究发现女性空勤人员存在较高的自然流产率以及一定数量反复流产的现象^[12]。国内外有研究发现接受电离辐射时间过长是胚胎停育的危险因素之一^[13]。英国对 1 万名以上的空勤人员进行调查, 同时以地勤人员作为对照, 发现男性空勤人员配偶的死胎率较高, 女性空勤人员胎儿先天性畸形比例较高^[14]。此外还有试验通过用电离辐射照射怀孕小鼠, 与空白对照组比较, 发现照射后的孕鼠, 其死胎率、流产数量增加, 且随着辐射剂量的增加, 出现死胎、畸胎、流产的孕鼠数呈上升趋势^[15]。因此可以推断女性空勤人员自然流产率较高可能与其在工作中长时间暴露于宇宙辐射有关。

1.3 癌症

电离辐射对人体的损伤是一个复杂过程, 辐射在人体组织中释放能量, 导致细胞死亡或发生异常。有

些异常细胞发生恶性增殖导致癌症的发生, 虽然被辐射照射后不一定得癌症, 但是受到辐射的人群比未受到辐射的人群得癌症概率会大很多^[16]。对广岛和长崎原子弹爆炸中日本幸存者的队列研究(寿命研究)发现, 辐射暴露会增加终生罹患癌症的风险, 幸存者与辐射相关的癌症风险明显增加^[17]。

国外研究发现女性空勤人员与普通人群相比, 乳腺癌发病率更高^[18-19]。多项对空勤人员进行的癌症发病率研究发现, 与普通大众相比, 乳腺癌、皮肤黑色素瘤的发病率显著增加^[20-23], 但是这种现象是否由于宇宙辐射导致, 还是由于昼夜节律失调导致激素异常或者紫外线照射导致尚需要进一步研究。此外有研究通过对加拿大空勤人员的多年随访调查, 发现其髓系白血病的发病率显著增加^[24], 但是由于相关报道并不多, 所以需要进一步研究。

1.4 眼晶状体病变

晶状体是人体对辐射最敏感的组织之一, ICRP 认为电离辐射会导致辐射性白内障的发生, 高剂量辐射可导致晶状体损伤, 长期间歇性低剂量辐射也有累积效应^[25-26]。有研究指出宇宙辐射可能会诱发白内障^[27]。美国国家航空航天局通过对 206 名飞行员、宇航员、普通男性进行比较研究, 发现宇宙辐射可能是一个独立且更容易导致白内障的风险因素。研究中飞行员发病时间早于宇航员, 飞行员白内障的发病时间大概是 40~45 岁, 而宇航员的发病时间一般是 60~70 岁, 但宇航员中白内障的发生率比军事飞行员的白内障发生率显著偏高^[28]。但是由于引起白内障的因素很多, 因此还需要更进一步的研究。

1.5 骨代谢问题

空勤人员经常会出现颈椎、腰椎和腿部的疼痛, 以往有文献报道空勤人员腰腿痛发病率高达 40% 以上^[29]。有研究发现治疗性辐射会导致骨损伤, 并可能增加骨折风险。有研究表明, 电离辐射通过降低碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, ALP)活性和编码 ALP 和抑制 I 型胶原的信使核糖核酸(messenger RNA, mRNA)的表达, 从而干扰骨的形成^[30]。还有研究将小鼠置于模拟宇宙辐射环境下, 发现出现骨形成减少和骨吸收增多, 最终导致骨质量减少的现象^[31], 因此我们推断电离辐射可能导致骨代谢的异常。

还有研究发现某航空公司工作时长最多的飞行人员群体, 其骨代谢指标明显低于其他工作时长较低的对照人员。因此可以推断飞行时间越多, 所受宇宙辐射剂量越大, 骨代谢水平下降越明显。同时还通过

体外培养和照射成骨细胞,发现辐射可能通过影响成骨细胞相关基因的表达从而影响成骨细胞的增殖、分化和功能^[32]。但是导致腰腿疼痛的原因复杂,也可能是工作疲劳和体态不正确导致,因此还不能简单与宇宙辐射联系到一起,还需要进一步的研究。

2 空勤人员所受宇宙辐射的剂量估算

国际癌症研究机构表示电离辐射会损害人类健康。然而电离辐射研究针对的人群大多是在医院或者其他工作岗位从事放射工作的人员,社会上对宇宙辐射的关注不够,宇宙辐射对空勤人员影响的研究也较少。目前,我国 GBZ 140—2002《空勤人员宇宙辐射控制标准》规定空勤人员受到的宇宙辐射属于职业照射,规定要求当空勤人员的年平均有效剂量超过 1 mSv 时,需要采取控制措施,并要求空勤人员职业照射年平均有效剂量不得超过 20 mSv。

国内外对空勤人员受到的宇宙辐射剂量也进行了一些研究,辐射剂量一般是使用计算机模拟程序进行计算。它可以计算出每条航线单次飞行个人受照剂量,再结合个人的一年的航线路程可以算出个人的年受照剂量。我国民航局也开发了自己的宇宙辐射剂量计算系统,用于计算我国空勤人员在工作中受到的宇宙辐射有效剂量。有研究发现长途空勤人员的年平均有效剂量大约为 2~3 mSv,短途空勤人员年平均有效剂量大约为 1~2 mSv^[33]。法国航空几十年来一直在对宇宙辐射进行测量,辐射剂量率记录显示在超音速飞机上为 12~15 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$,在长距离亚音速喷气式飞机上为 4~6 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$,在短途亚音速喷气飞机上为 1~3 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。大多数空勤人员每年的飞行时间约为 750 h,因此空勤人员年平均有效剂量大约为 3~4 mSv^[34]。2004 年和 2005 年,爱尔兰空勤人员受到的年平均有效剂量分别为 1.8~2.0 mSv,高于该国任何其他职业的放射工作人员^[35]。另一项对宇宙辐射剂量的测量结果发现 1997—1999 年,新疆航空公司所有航班空勤人员的年平均有效剂量为 2.193~4.419 mSv^[36]。此外,通过仪器测量典型极地航线(北京—纽约)机组人员的个人辐射剂量,结果发现极地航线飞行员组年平均有效剂量为 3.27~3.59 mSv,空中乘务员组为 2.66~3.22 mSv^[37]。因此,无论是仪器的实际测量还是计算机程序估算,空勤人员接收的宇宙辐射年平均有效剂量大多数超过了 1 mSv。

与此同时,研究发现国内外的放射工作人员的年平均有效剂量大都小于 1 mSv。在工业方面,研究发现孟加拉国约 75%工业放射工作人员在 2010—2014 年

中接受的剂量低于 1 mSv^[38]。我国在 2009—2018 年期间共监测了 504 538 名工人的放射工作人员,发现 95.4% 以上的放射工作人员的年平均有效剂量低于 1 mSv。远低于国家规定的职业剂量限值 20 mSv $\cdot\text{a}^{-1}$ 。并且其年平均有效剂量有显著下降趋势^[39]。

在医疗方面,我国医疗职业暴露的数据表明,在诊断放射学、核医学和放射治疗中,这些类别的医务人员的平均年有效剂量分别在 1.5~2.2 mSv、1.2~1.6 mSv 和 1.0~1.5 mSv 范围内^[40]。有研究调查阿联酋 9 家医院放射科和心脏科医务人员的职业辐射暴露情况,获得的数据表明,医务人员的平均年有效剂量为 0.38~0.62 mSv,均低于国家立法和国际标准规定的限值^[41]。由此可见,放射工作人员的年平均有效剂量大多数小于空勤人员,因此我们可以推断空勤人员可能比一般放射工作人员在工作场所受到更大的辐射剂量。

3 测量宇宙辐射剂量方法的介绍

目前宇宙辐射剂量的测量方法包括仪器测量和计算机模拟程序估算,通用的方法是通过计算机模拟程序估算出空勤人员可能受到的宇宙辐射剂量。其中运用最广泛的是美国航空管理局的 CARI-6 计算机模拟程序和欧洲国家开发的 EPCARD 计算机模拟程序,程序运用粒子流的理论模型和在大气层中与其他原子的反应为基础^[42],通过输入飞行起始地机场的地理位置(纬度、经度)、飞行时间、飞行高度、起降时间和海拔高度等地理信息,可以估算出航行过程中的宇宙辐射剂量^[33]。有研究选定的 23 个航班中涵盖了世界上所有主要的客运航线,包含广泛的纬度(从北到南)。其中还包括 7 次飞行持续时间超过 13 h 的超远程飞行。用多种计算机模拟程序对其进行辐射剂量的估算比较,结果显示总体一致性较好,差异性小于 20%^[43]。

仪器测量宇宙辐射剂量的方法包括:组织等效正比计数器、热释光探测器和固体径迹探测器或半导体探测器。组织等效正比计数器适用于测量中子、 γ 混合辐射场的剂量,不仅可以区分辐射粒子的类型,还可以区分它们的能量和能量传递线密度、辐射剂量、剂量当量;热释光探测器用于测量除中子成份之外的辐射剂量,固体径迹蚀刻探测器是一种测量中子和 α 粒子的固体探测器;半导体探测器是以半导体材料为探测介质的辐射探测器,适于探测穿透力较小的带电粒子^[44-45],但是这些测量仪器都有一定的测量范围,超出范围则无法检测,因此存在一定的局限性。

为了解仪器测量与计算机模拟程序测量结果的一致性,2002年在巴黎—东京往返航班上进行了一次比较试验,将测量仪器安装于波音747驾驶舱内,在长达29.5 h的飞行后,对比发现,通过仪器测量和计算机模拟程序得到宇宙辐射剂量值的一致性令人满意^[46]。

需要注意的是,当宇宙辐射场相当恒定时,可以使用计算机模拟程序估算辐射剂量,但有当太阳粒子事件发生时,则不能信任计算机模拟程序估算的结果。美国国立职业安全与卫生研究所估计,空勤人员在平均28年的职业生涯中会碰到大约6次太阳粒子事件,太阳粒子事件会发射出大量的高能粒子,形成极高的宇宙辐射,据估算在一次强太阳粒子事件发生期间飞机上的空勤人员接受到的辐射剂量可能相当于他们一年所受的辐射剂量,但是这种事件是不能被有效预测的^[47]。有欧洲的专家也认为太阳活动会影响宇宙辐射剂量的变化,因此使用计算机软件估算宇宙辐射的方式得到的检测值很可能是低于实际值的^[48]。

所以现有的估算宇宙辐射剂量的方法有一定的局限性,并不能完全测量出空勤人员实际受到的辐射剂量。因此,空勤人员实际受到的辐射剂量可能远高于估算或测量的剂量,存在比一般放射工作人员更多更复杂的放射危害。

4 对空勤人员宇宙辐射控制措施的建议

尽管目前我国对空勤人员受到宇宙辐射有控制措施,但目前所用计算机模拟程序以及仪器测量的方法都有一定的局限性,并且有研究发现人群中存在对辐射敏感的个体^[49],每个人对宇宙辐射的敏感性不同,并不能仅仅通过估算宇宙辐射剂量来判定对人体的损伤程度,因此有必要在空勤人员的职业健康体检中加入针对宇宙辐射的检查项目。

辐射损伤最常用的细胞遗传学指标检测是淋巴细胞微核检测和染色体畸变检测这两项检测。它们也是放射工作人员职业健康体检中的必检项目,当这两项检测结果发现异常时会要求放射工作人员暂时脱离工作环境,等恢复正常后再返回岗位。

外周血淋巴细胞染色体畸变是人体受到辐射损伤估算的“金标准”,它已被用于测量核事故、广岛和长崎原子弹爆炸幸存者以及太空飞行中暴露的宇航员的辐射暴露情况^[50-52]。染色体畸变率的高低直接反映染色体损伤程度。在评估宇宙辐射危害时,染色体畸变是唯一可以同时提供宇宙辐射剂量和风险信息

的生物标志物,并且在过去10年中已在宇航员中广泛测量^[53]。在通过对和平号空间站机组人员的细胞遗传学分析表明,在飞行后可以检测到染色体畸变率的显著增加,这种增加很可能是由于宇宙辐射暴露所致^[54]。国外也有相关研究发现空勤人员比机场地勤人员的染色体畸变率明显增加^[55]。

此外,淋巴细胞微核率也是评估放射工作人员辐射损伤程度的重要生物学指标,微核率能灵敏地反映近期飞行负荷,可作为近期辐射损伤的监测指标。有研究通过胞质分裂阻滞微核检测法检测双核淋巴细胞微核,在去除年龄、性别等影响因素后,对比某航空公司空勤人员与同地区地面工作人员的双核淋巴细胞微核率、微核细胞率,发现空勤人员比地面工作人员的双核淋巴细胞微核率、微核细胞率明显升高,差异有统计学意义($P < 0.01$),研究发现双核淋巴细胞微核率主要和年飞行小时成正相关,可较灵敏地反映近期内飞行时间的变化。值得注意的是由于工龄短但近期工时较长的空勤人员微核率高于工龄长但近期工时较短的空勤人员。说明空勤人员的微核率可能主要受近期飞行时间的影响,不能反映宇宙辐射造成的累积损伤^[56]。还有研究通过检测23名空勤人员的染色体畸变和微核,并以地面人员作为匹配的对照组。结果发现,空勤人员外周血淋巴细胞微核率和染色体畸变率都有所增加^[57]。因此淋巴细胞微核检测和染色体畸变检测这两项检测可以较好的反映空勤人员受到辐射损伤的情况。

5 空勤人员宇宙辐射健康管理

通过研究我们发现,宇宙辐射确实会对空勤人员的身体造成伤害。然而宇宙辐射属于天然辐射源外照射,无法消除,也没有办法进行防护。目前对空勤人员的防护措施,主要是通过软件估算剂量或监测工作时间,我国GBZ 140—2002《空勤人员宇宙辐射控制标准》规定空勤人员在1个日历年内,飞行时间不得超过1 000 h,通过限制飞行时间、轮换飞行高低纬度航线等措施来控制空勤人员受到宇宙辐射的剂量。女性空勤人员从发现怀孕之日起,应该立即告诉上级,严格控制飞行时间和线路,注意选择低空航线,以使其腹部(下躯干)接受的年平均有效剂量不超过1 mSv。但仅仅这些措施方法还存在不足。本研究建议加强对宇宙辐射危害的认识,确保空勤人员清楚相关知识,并对空勤人员的职业健康体检中加入淋巴细胞微核检测和染色体畸变检测,当检测结果超出正常范围

时,建议空勤人员脱离工作岗位,恢复正常后再重返岗位。除了常规的体检项目以外,还需要加强对甲状腺、生殖系统、晶状体、骨密度等健康问题的管理。空勤人员包括驾驶员、领航员、飞行机械员、飞行通讯员、乘务员。驾驶员的体检项目一般比较全面,而其他空勤人员的体检项目则比较基础,因此建议对其他空勤人员体检项目进行升级,加强对宇宙辐射危害的重视和防护。

6 结论

空勤人员在工作中暴露在宇宙辐射下已经成为一个不可忽视的问题,它对人体的损害也逐渐被专家和学者认识,然而由于宇宙辐射的成分复杂,空勤人员的工作环境、性质特殊,因此无法明确空勤人员的健康问题是否是宇宙辐射导致。然而,通过调查研究已经发现空勤人员比一般放射工作人员受到更多更复杂的电离辐射,因此无法忽视宇宙辐射可能带来的危害。由于目前的科学技术无法对宇宙辐射进行防护,因此更要做好空勤人员的健康监护工作,为所有空勤人员设置职业健康监护和个人剂量监测管理,将针对性的放射体检项目加入到其职业健康体检项目中。这些措施不仅对于保障空勤人员这个群体的健康具有重大意义,也是维护民航事业顺利发展的重要保障。

参考文献

- [1] POJE M, VUKOVIĆ B, RADOLIĆ V, et al. Neutron radiation measurements on several international flights[J]. *Health Phys*, 2015, 108(3): 344-350.
- [2] BOICE JD JR, BLETTER M, AUVINEN A. Epidemiologic studies of pilots and aircrew[J]. *Health Phys*, 2000, 79(5): 576-584.
- [3] ROOBOL SJ, VAN DEN BENT I, VAN CAPPELLEN WA, et al. Comparison of high- and low-LET radiation-induced DNA double-strand break processing in living cells[J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(18): 6602.
- [4] HALL EJ, HEI TK. Genomic instability and bystander effects induced by high-LET radiation[J]. *Oncogene*, 2003, 22(45): 7034-7042.
- [5] CAHOON EK, NADYROV EA, POLYANSKAYA ON, et al. Risk of thyroid nodules in residents of Belarus exposed to Chernobyl fallout as children and adolescents[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2017, 102(7): 2207-2217.
- [6] FURUKAWA K, PRESTON D, FUNAMOTO S, et al. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure[J]. *Int J Cancer*, 2013, 132(5): 1222-1226.
- [7] CIOFFI DL, FONTANA L, LESO V, et al. Low dose ionizing radiation exposure and risk of thyroid functional alterations in healthcare workers[J]. *Eur J Radiol*, 2020, 132: 109279.
- [8] WONG Y S, CHENG Y Y, CHENG T J, et al. The relationship between occupational exposure to low-dose ionizing radiation and changes in thyroid hormones in hospital workers[J]. *Epidemiology*, 2019, 30(Suppl 1): S32-S38.
- [9] 涂雷,王守林,董秋,等.低剂量电离辐射对医疗职业人群甲状腺机能影响研究[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2018, 36(2): 91-94.
- TU L, WANG SL, DONG Q, et al. Effect of low-dose ionizing radiation exposure on thyroid function in a medical occupational population[J]. *Chin J Ind Hyg Occup Dis*, 2018, 36(2): 91-94.
- [10] YAHYAPOUR R, AMINI P, REZAPOUR S, et al. Radiation-induced inflammation and autoimmune diseases[J]. *Mil Med Res*, 2018, 5(1): 9.
- [11] 杨茜雯,蔡旻,李玉华,等.军事飞行人员甲状腺结节超声检出情况及TI-RADS分类结果与普通健康体检人员的比较研究[J]. *东南国防医药*, 2020, 22(6): 564-568.
- YANG QW, CAI M, LI YH, et al. A comparative study of ultrasonic detection of thyroid nodules and TI-RADS classification results between military pilots and the general population[J]. *Mil Med J Southeast China*, 2020, 22(6): 564-568.
- [12] 嵇明月,王娜,余永平.某航空公司空中乘务员流产情况分析与预防措施探讨[J]. *疾病预防控制通报*, 2017, 32(5): 59-61.
- JI MY, WANG N, YU YP. Investigation on abortion situation in air stewardess and discussion on preventive measures[J]. *Bull Dis Control Prev*, 2017, 32(5): 59-61.
- [13] MAGANN EF, CHAUHAN SP, DAHLKE JD, et al. Air travel and pregnancy outcomes: a review of pregnancy regulations and outcomes for passengers, flight attendants, and aviators[J]. *Obstet Gynecol Surv*, 2010, 65(6): 396-402.
- [14] DOS SANTOS SILVA I, PIZZI C, EVANS A, et al. Reproductive history and adverse pregnancy outcomes in commercial flight crew and air traffic control officers in the United kingdom[J]. *J Occup Environ Med*, 2009, 51(11): 1298-1305.
- [15] 陈凤.电离辐射诱发孕鼠体内旁效应的初步研究[D].苏州:苏州大学, 2011.
- CHEN F. Preliminary study on bystander effect in pregnant mice induced by ionizing radiation *in vivo*[D]. Suzhou: Soochow University, 2011.
- [16] ALBI E, CATALDI S, LAZZARINI A, et al. Radiation and thyroid cancer[J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18(5): 911.
- [17] KAMIYA K, OZASA K, AKIBA S, et al. Long-term effects of radiation exposure on health[J]. *Lancet*, 2015, 386(9992): 469-478.
- [18] LIU T, ZHANG C, LIU C. The incidence of breast cancer among female flight attendants: an updated meta-analysis[J]. *J Travel Med*, 2016, 23(6): taw055.
- [19] GASSMANN AS, GONZALEZ M, MATHELIN C. Have female flight attendants an over-risk of breast cancer?[J]. *Gynecol Obstet Fertil*, 2015, 43(1): 41-48.
- [20] PUKKALA E, HELMINEN M, HALDORSEN T, et al. Cancer incidence among Nordic airline cabin crew[J]. *Int J Cancer*, 2012, 131(12): 2886-2897.
- [21] RAFNSSON V, TULINIUS H, JÓNASSON JG, et al. Risk of breast cancer in female flight attendants: a population-based study (Iceland)[J]. *Cancer Causes Control*, 2001, 12(2): 95-101.
- [22] MCNEELY E, MORDUKHOVICH I, STAFFA S, et al. Cancer prevalence among flight attendants compared to the general population[J]. *Environ Health*, 2018, 17(1): 49.
- [23] SANLORENZO M, WEHNER MR, LINOS E, et al. The risk of melanoma in airline pilots and cabin crew: a meta-analysis[J]. *JAMA Dermatol*, 2015, 151(1): 51-58.
- [24] BAND PR, LE ND, FANG R, et al. Cohort study of Air Canada pilots: mortality, cancer incidence, and leukemia risk[J]. *Am J Epidemiol*, 1996, 143(2): 137-143.
- [25] HAMADA N, AZIZOVA TV, LITTLE MP. An update on effects of ionizing radiation exposure on the eye[J]. *Br J Radiol*, 2020, 93(1115): 20190829.
- [26] THOME C, CHAMBERS DB, HOOKER AM, et al. Deterministic effects to the lens of the eye following ionizing radiation exposure: is there evidence to support a reduction in threshold dose?[J]. *Health Phys*, 2018, 114(3):

- 328-343.
- [27] RAFNSSON V, OLAFSDOTTIR E, HRAFNKELSSON J, et al. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case-control study[J]. *Arch Ophthalmol*, 2005, 123(8): 1102-1105.
- [28] JONES J A, MCCARTEN M, MANUEL K, et al. Cataract formation mechanisms and risk in aviation and space crews[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2007, 78(Suppl 4): A56-A66.
- [29] POSCH M, SCHRANZ A, LENER M, et al. Prevalence and potential risk factors of flight-related neck, shoulder and low back pain among helicopter pilots and crewmembers: a questionnaire-based study[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1): 44.
- [30] SAKURAI T, SAWADA Y, YOSHIMOTO M, et al. Radiation-induced reduction of osteoblast differentiation in C2 C12 cells[J]. *J Radiat Res*, 2007, 48(6): 515-521.
- [31] MACIAS BR, LIMA F, SWIFT JM, et al. Simulating the lunar environment: partial weightbearing and high-LET radiation-induce bone loss and increase sclerostin-positive osteocytes[J]. *Radiat Res*, 2016, 186(3): 254-263.
- [32] 沈海明. 航空辐射环境对民航飞行人员骨代谢的影响及¹³⁷Cs γ射线对体外培养成骨细胞作用的研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2008.
- SHEN H M. The influence of cosmic radiation on bone metabolism in civil aviation flight personnel and the effects of ¹³⁷Cs γ-irradiation on osteoblasts *in vitro* [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2008.
- [33] BAGSHAW M. Cosmic radiation in commercial aviation[J]. *Travel Med Infect Dis*, 2008, 6(3): 125-127.
- [34] DESMARIS G. Cosmic radiation in aviation: radiological protection of Air France aircraft crew[J]. *Ann ICRP*, 2016, 45(Suppl 1): 64-74.
- [35] COLGAN PA, SYNNOTT H, FENTON D. Individual and collective doses from cosmic radiation in Ireland[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2007, 123(4): 426-434.
- [36] FENG Y J, CHEN W R, SUN T P, et al. Estimated cosmic radiation doses for flight personnel[J]. *Space Med Med Eng (Beijing)*, 2002, 15(4): 265-269.
- [37] 刘蕴, 姚永祥, 周炼. 极地航线空勤人员所受光子、中子累积剂量测量[J]. *空军总医院学报*, 2009, 25(3): 115-116.
- LIU Y, YAO YX, ZHOU L. Measurement of cosmic radiation dose contributed by photon and neutron for aircrew occupants in polar route flight[J]. *Med J Air Force*, 2009, 25(3): 115-116.
- [38] RAHMAN MS, BEGUM A, HOQUE A, et al. Assessment of whole-body occupational radiation exposure in industrial radiography practices in Bangladesh during 2010-2014[J]. *Braz J Radiat Sci*, 2016, 4(2): 1-17.
- [39] FAN S, DENG J, QIAO B, et al. Trends of annual whole-body occupational radiation exposure for industrial practices in China (2009-2018)[J]. *Health Phys*, 2021, 120(4): 427-432.
- [40] WU W, ZHANG W, CHENG R, et al. Occupational exposures of Chinese medical radiation workers in 1986-2000[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2005, 117(4): 440-443.
- [41] ELSHAMI W, ABUZAIID M, PEKKARINEN A, et al. Estimation of occupational radiation exposure for medical workers in radiology and cardiology in the united arab emirates: nine hospitals experience[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2020, 189(4): 466-474.
- [42] HAMMER GP, ZEEB H, TVETEN U, et al. Comparing different methods of estimating cosmic radiation exposure of airline personnel[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2000, 39(4): 227-231.
- [43] BOTTOLIER-DEPOIS J F, BECK P, BENNETT B, et al. Comparison of codes assessing galactic cosmic radiation exposure of aircraft crew[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2009, 136(4): 317-323.
- [44] KUBANCAK J, MOLOKANOV AG. Measurements of let spectra of the Jinr phasotron radiotherapy proton beam[J]. *Probl At Sci Technol*, 2013, 88(6): 90-92.
- [45] SIHVER L, PLOC O, PUCHALSKA M, et al. Radiation environment at aviation altitudes and in space[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2015, 164(4): 477-483.
- [46] BOTTOLIER-DEPOIS J F, TROMPIER F, CLAIRAND I, et al. Exposure of aircraft crew to cosmic radiation: on-board intercomparison of various dosimeters[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2004, 110(1/2/3/4): 411-415.
- [47] SATO T. Recent progress in space weather research for cosmic radiation dosimetry[J]. *Ann ICRP*, 2020, 49(Suppl 1): 185-192.
- [48] SOVILJ MP, VUKOVIĆ B, RADOLIĆ V, et al. Potential benefit of retrospective use of neutron monitors in improving ionising radiation exposure assessment on international flights: issues raised by neutron passive dosimeter measurements and EPCARD simulations during sudden changes in solar activity[J]. *Arh Hig Rada Toksikol*, 2020, 71(2): 152-157.
- [49] EL-NACHEF L, AL-CHOBOQ J, RESTIER-VERLET J, et al. Human radiosensitivity and radiosusceptibility: what are the differences?[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(13): 7158.
- [50] CAO J, ZHANG J, WANG Y, et al. Cytogenetic abnormalities in lymphocytes from victims exposed to cobalt-60 radiation[J]. *Int J Mol Sci*, 2013, 14(9): 17525-17535.
- [51] KODAMA Y, PAWEL D, NAKAMURA N, et al. Stable chromosome aberrations in atomic bomb survivors: results from 25 years of investigation[J]. *Radiat Res*, 2001, 156(4): 337-346.
- [52] GEORGE K, DURANTE M, WILLINGHAM V, et al. Biological effectiveness of accelerated particles for the induction of chromosome damage measured in metaphase and interphase human lymphocytes[J]. *Radiat Res*, 2003, 160(4): 425-435.
- [53] DURANTE M. Biomarkers of space radiation risk[J]. *Radiat Res*, 2005, 164(4): 467-473.
- [54] DURANTE M, BONASSI S, GEORGE K, et al. Risk estimation based on chromosomal aberrations induced by radiation[J]. *Radiat Res*, 2001, 156(5): 662-667.
- [55] CAVALLO D, MARINACCIO A, PERNICONI B, et al. Chromosomal aberrations in long-haul air crew members[J]. *Mutat Res*, 2002, 513(1/2): 11-15.
- [56] 彭新涛, 陈蔚茹. 高空环境对民航飞行人员细胞遗传学指标的影响[J]. *中国城乡企业卫生*, 2009(4): 84-87.
- PENG XT, CHEN WR. Effects of cosmic radiation on Genetics markers of civil aviation pilots and crew members[J]. *Chin J Urban Rural Enterprise Hyg*, 2009(4): 84-87.
- [57] ZWINGMANN IH, WELLE IJ, VAN HERWIJNEN M, et al. Oxidative DNA damage and cytogenetic effects in flight engineers exposed to cosmic radiation[J]. *Environ Mol Mutagen*, 1998, 32(2): 121-129.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 王晓宇)