



DIAMON便携式中子谱仪的 刻度与应用

中国疾病预防控制中心辐射安全所
邓 君
二〇二五年七月



目录

- 一、研究背景
- 二、研究目的及意义
- 三、DIAMON便携式中子谱仪刻度及性能测试
- 四、DIAMON便携式中子谱仪应用



(一) 开展放射卫生工作，为国家制定职业照射、医疗照射、公众照射的安全与防护等放射卫生相关法律法规、政策、规划和监督管理提供技术支撑和政策建议。

(二) 组织制定放射卫生相关技术方案、指南和标准。承担国家卫生标准委员会放射卫生标准专业委员会、国家放射性职业病诊断与鉴定指导委员会等专业委员会秘书处的管理工作。开展放射卫生健康教育和健康促进工作。

(三) 开展放射性职业危害因素、职业性放射性疾病、医用辐射防护、食品和饮用水放射性等监测、评价与风险评估、专项调查等工作；承担放射卫生信息系统建设和管理。

(四) 开展核和辐射突发事件卫生应急准备与响应，参与突发事件现场调查处置与风险评估工作，为国家应急指挥与决策提供技术支持，指导地方卫生应急处置和能力建设。

(五) 开展放射卫生防护、放射性职业病防治、核和辐射卫生应急等领域关键科学研究和技术开发，推动科研成果转化。

(六) 开展放射卫生、放射医学专业领域的研究生教育和业务培训。

(七) 指导地方实施国家放射卫生工作规划和项目，开展对地方放射卫生技术机构的业务指导、放射卫生检测质量控制比对与能力考核，参与专业技术考核评价等相关工作。

(八) 开展放射卫生领域的国际合作与交流。

(九) 承办国家卫生健康委、国家疾病预防控制局和中国疾病预防控制中心交办的其他事项。

联系电话：010-62389985

电子邮箱：nirp@nirp.chinacdc.cn

地址：北京市西城区德外新康街2号



01

研究背景

1.1 航空飞行辐射来源

宇宙射线是航空飞行中职业照射的辐射来源，约90%是质子，9%是氦核，其他还包括原子核、电子、正电子、反质子和光子等。宇宙射线到达大气层时会与大气中的物质相互作用，产生中子、质子、光子、 μ 介子和电子等，称为次级宇宙射线。

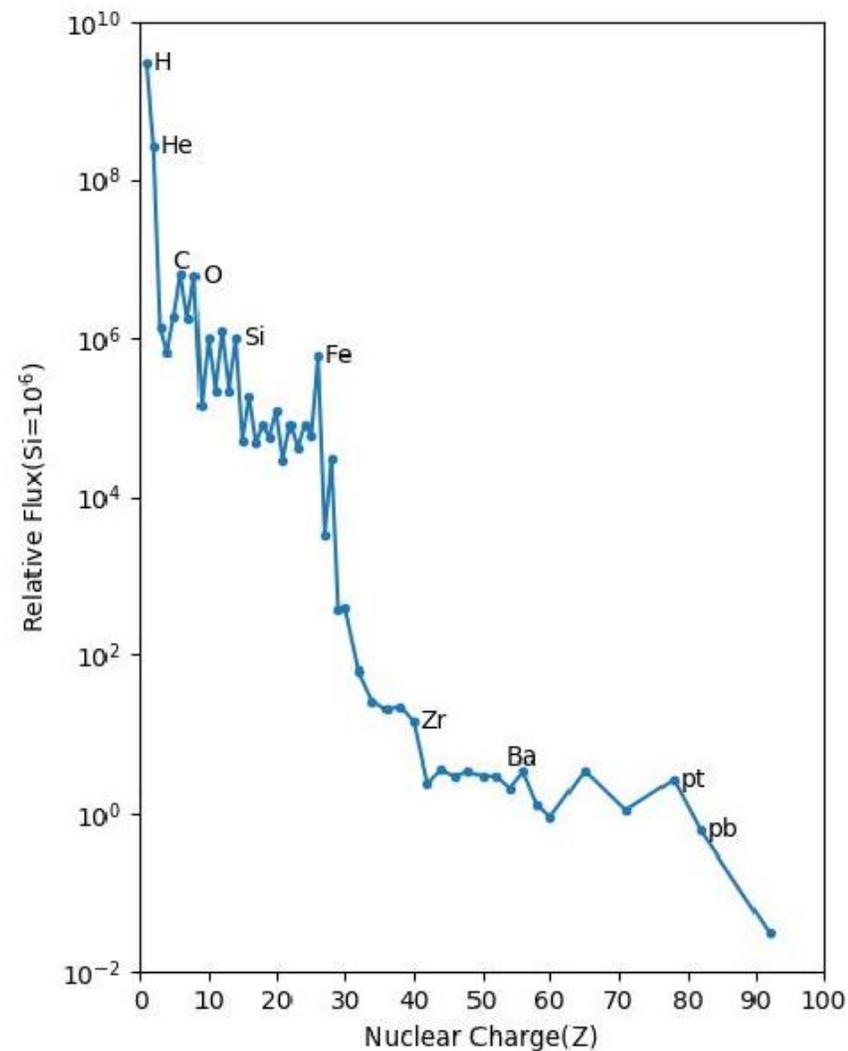


图1 银河宇宙射线丰度

1.1 航空飞行辐射来源

这些次级粒子在大气中传播时，其能量和剂量率随着海拔高度的降低而逐渐衰减，但在航空飞行高度仍保持较高的剂量水平。

尤其是中子，因其电荷为零，穿透能力强，在航空高度的宇宙辐射场中占据重要组成，对航空飞行的辐射剂量贡献最大，占比约为50%左右。

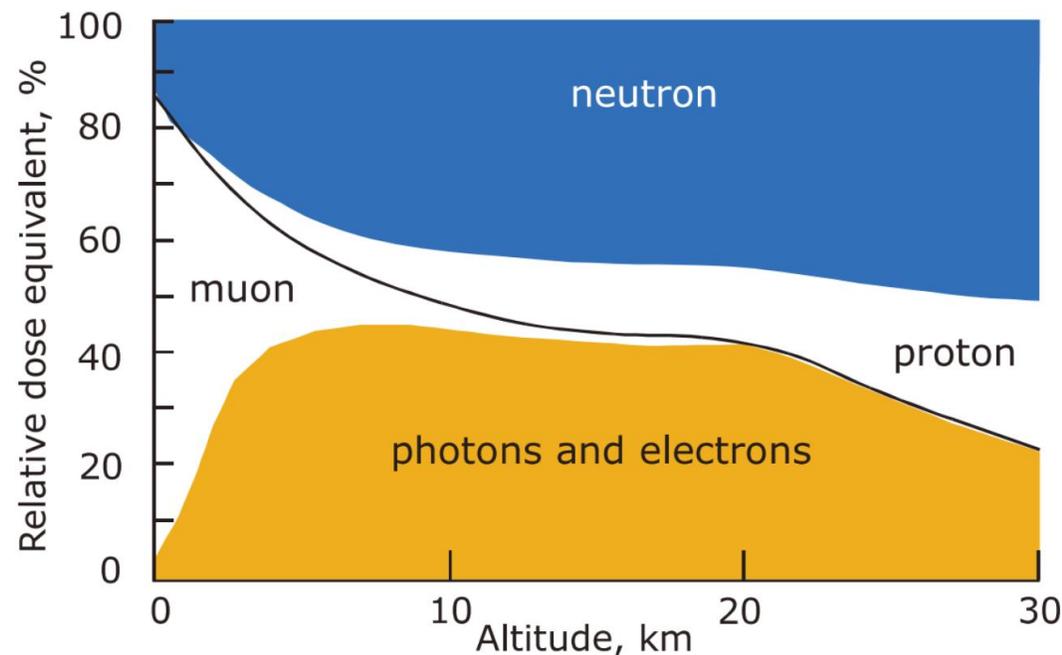


图2 宇宙辐射粒子对周围剂量当量的贡献随海拔高度的变化规律^[1]

[1] Bartlett DT. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew[J]. Radiat Prot Dosim, 2004, 109(4):349-355.

1.2 航空飞行辐射剂量影响因素

民航客机的巡航高度约为8~1.2 km，在此高度次级宇宙射线是航空飞行过程中受到照射的主要来源。航空飞行中的辐射剂量主要受到4个方面的影响，分别是**海拔高度、飞行时间、太阳活动和地球磁场**。

太阳活动高年：增强的太阳风磁场会削弱银河宇宙辐射的强度。

太阳活动低年：银河宇宙辐射强度达到峰值，成为航空辐射的主要来源。

太阳粒子事件：太阳耀斑爆发、日冕大爆发等

最近一次强地磁暴（G5级）是2024年5月，一个复杂的太阳黑子群频繁爆发，释放了多次X级耀斑和CME，为避免辐射剂量激增，北欧至北美航班临时南移至北纬50°以下。

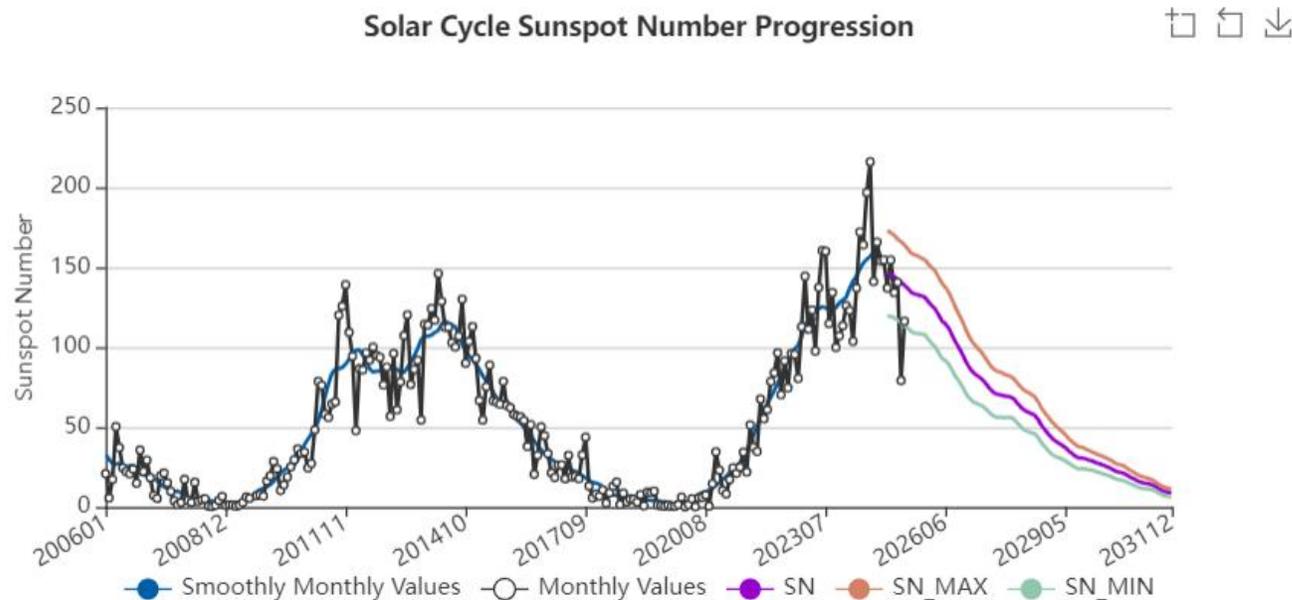


图3 太阳活动周期^[2]

[2] 中国科学院国家空间科学中心,空间环境预报中心[DB/OL].1999 [2025-07-15].<http://www.sepc.ac.cn>.

1.2 航空飞行辐射剂量影响因素

民航客机的巡航高度约为8~1.2 km，在此高度次级宇宙射线是航空飞行过程中受到照射的主要来源。航空飞行中的辐射剂量主要受到4个方面的影响，分别是**巡航高度、飞行时间、太阳活动和地球磁场**。

地球磁场对高能带电粒子具有显著的调制作用，表现出明显的**纬度效应**。地球磁场在低纬度地区较强，对带电粒子的屏蔽作用更明显，导致低纬度航线的宇宙辐射水平较低。而在高纬度和极地地区，地球磁场较弱，更多的高能粒子能够进入大气层，使得这些地理位置的辐射剂量水平显著升高。

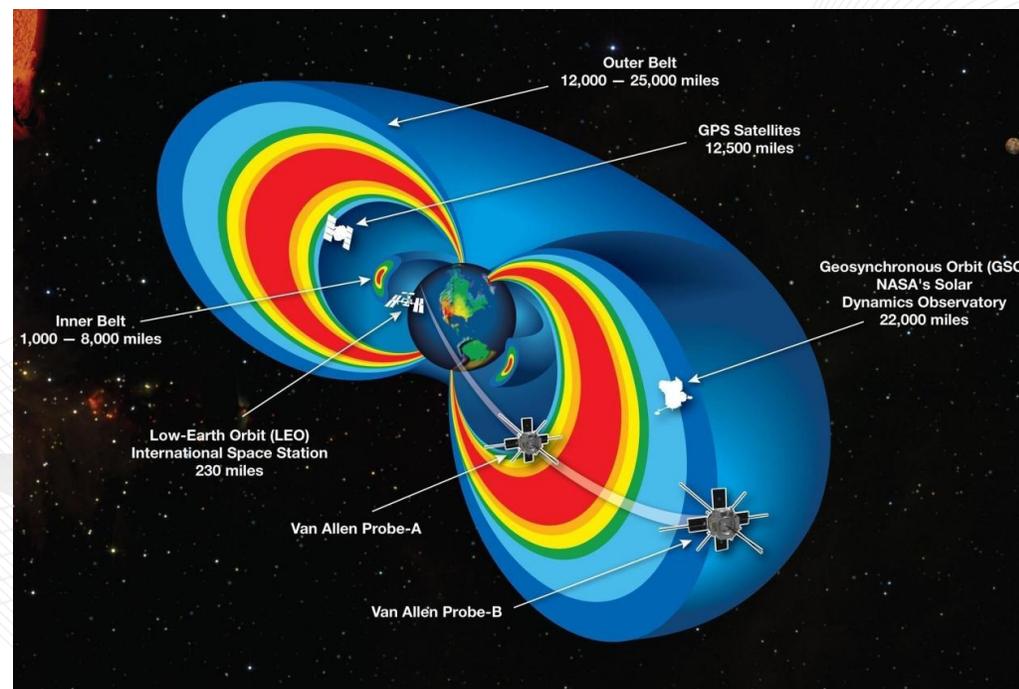


图4 地球辐射带



1.3 航空机组人员数量及总飞行时间

根据中国民用航空局截至目前公布的数据，近年我国民航飞行员、乘务员数量和总飞行时间见下图。

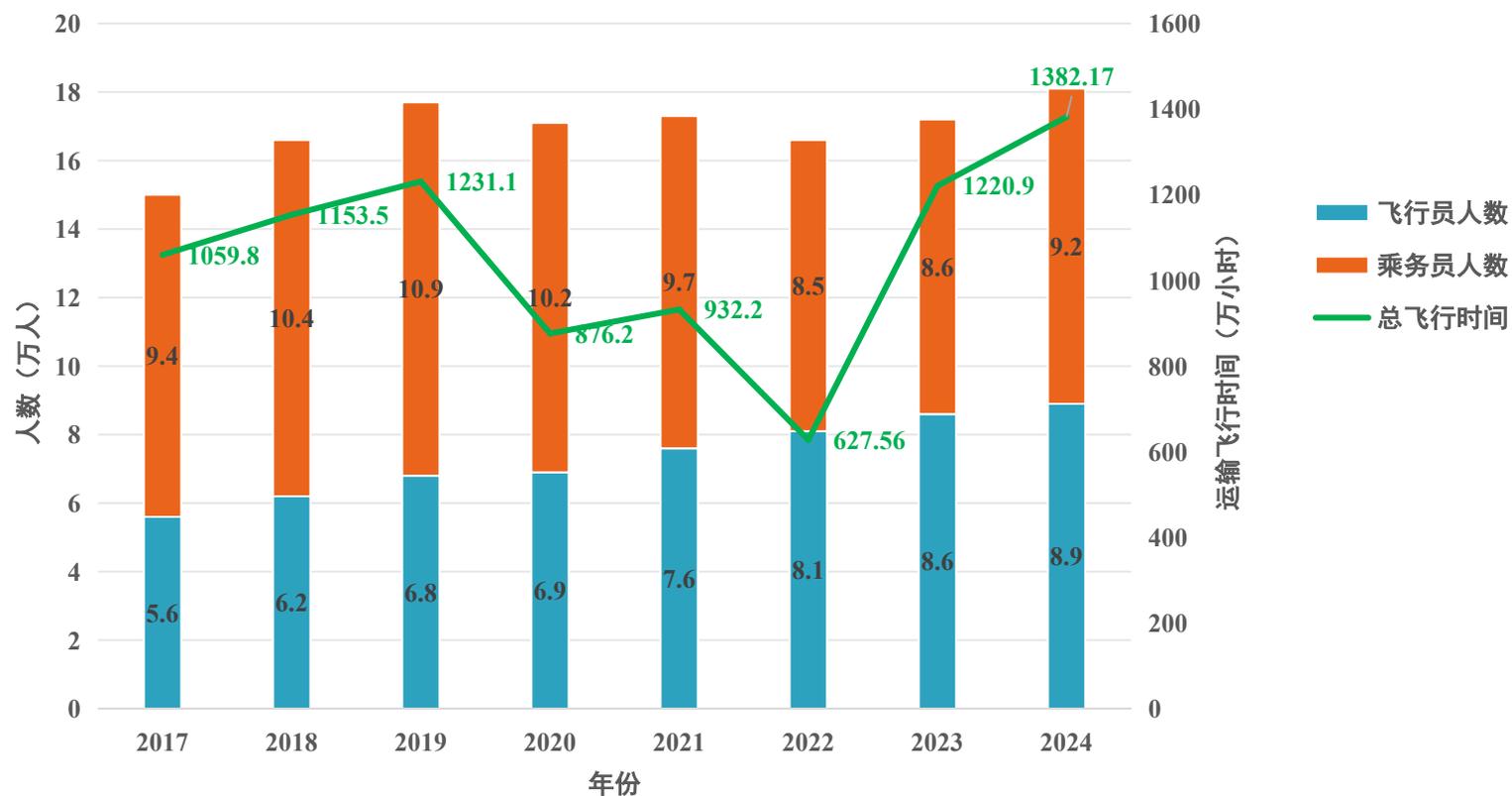


图5 机组人员数量和总飞行时间历年变化图



1.4 相关航空机组人员年均有效剂量已超公众年照射剂量限值（1mSv）和传统职业照射人群

- 根据UNSCEAR 2020/2021年报告，2010-2014年，航空机组人员**全球人均年有效剂量为2.7 mSv**；
- 美国航空机组人员人均年有效剂量为3.07 mSv，欧洲国家航空机组人员人均年有效剂量范围为1.09~4.00 mSv；
- 2014年，德国在册航空机组人员的平均年有效剂量在2~6mSv之间，**终生职业累积剂量可能超过100mSv**；
- 从北京-纽约极地航线机组人员的人均年有效剂量为 (5.79 ± 0.92) mSv，一般非极地航线为 (2.14 ± 0.64) mSv。

表1 2018年我国航空机组人员与传统职业照射人群剂量水平比较

职业类别	人数（万人）	年均有效剂量（mSv）
医学应用	30.8	0.3
工业应用	6.7	0.2
其他应用	0.3	0.2
航空机组人员	16.6	1.9

表3 不同年份机组人员年有效剂量（ μ Sv）

Table 3 Annual effective doses to aircrews in different years (μ Sv)

年份	飞行员			乘务员		
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
2014	1.03	1.90	0.47	1.26	2.33	0.57
2015	1.02	1.89	0.40	1.25	2.32	0.57
2016	1.03	1.90	0.47	1.26	2.33	0.50
2017	1.03	1.91	0.47	1.26	2.34	0.57
2018	1.04	1.92	0.47	1.27	2.35	0.58
2019	1.04	1.92	0.47	1.27	2.35	0.58
2020	1.04	1.92	0.47	1.27	2.30	0.58
2021	1.04	1.92	0.47	1.27	2.35	0.58

张雨，范胜男，邓君，等.航空机组人员职业受照剂量估算程序的分析与应用[J].中华放射医学与防护杂志，2024，44（6）.

1.5 航空机组人员职业健康风险

- UNSCEAR指出，航空机组人员是电离辐射暴露水平**较高**的职业人群之一，应高度关注其宇宙辐射暴露风险；

- 航空机组人员癌症风险**显著升高**

- Meta分析（2019，n>10万）

- ✓ 黑色素瘤 标准化发病比（pSIR）： 飞行员 2.03、空乘 2.12

- ✓ 角质细胞癌 pSIR: 飞行员 1.86、空乘1.97

- 非癌症健康效应

- 神经系统：认知功能↓、记忆力↓、潜在脑肿瘤风险↑

- 心血管：长期高剂量辐射与心血管疾病存在因果关联

- 生殖健康：流产率↑、胎儿发育异常↑

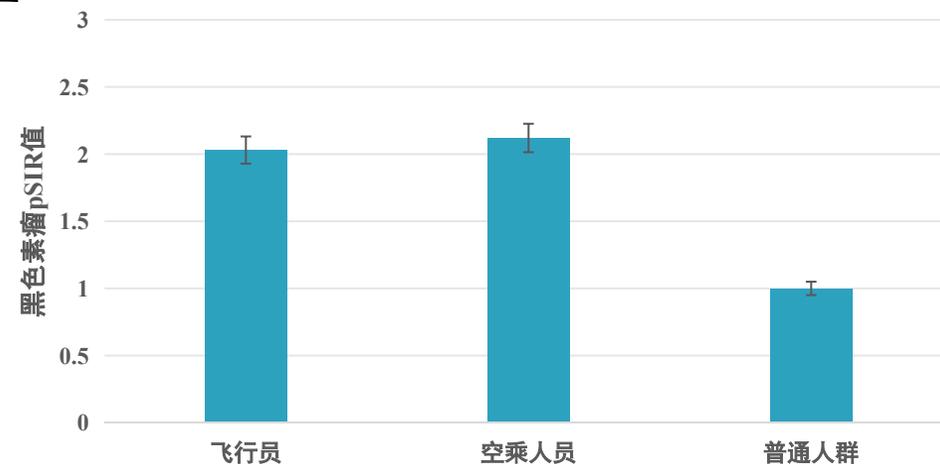


图6 航空人员黑色素瘤标准化发病比

表3 长期高空宇宙射线暴露的潜在健康效应

健康维度	相对风险（RR）
黑色素瘤	2.1
其他皮肤癌（角质细胞癌）	1.9
神经系统损伤（认知/记忆下降、潜在脑肿瘤）	1.5
心血管疾病	1.3
胎儿发育异常 / 流产	1.4



1.5 航空机组人员职业健康风险



首页 要闻 北京 财经 科技 电视剧 更多

南方都市报



常经北极飞往美洲欧洲，韩国空乘患癌去世被认定宇宙辐射工伤



4



南方都市报

2023-11-08 18:21 发布于广东 南方都市报官方账号

+ 关注



1



5

据韩国《中央日报》7日报道，一名大韩航空的乘务员因胃癌去世后，韩国有关部门首次认定为宇宙辐射工伤，韩国劳动福祉公团透露，这名乘务员从1995年到2021年平均每年飞行1022小时，其中约一半航线都是经由北极飞往美洲和欧洲的远程航班。航班经过北极时，机上人员受到的宇宙辐射将提高5倍以上。

1.6 国内外现状

- **国际放射防护委员会 (ICRP)** 1991年首次建议将喷气客机机组人员列为辐射职业受照人员；2020年发布132报告《航空机组人员宇宙辐射的放射防护》。
- **欧盟委员会** 1996年在关于保护工作人员和公众的健康，防止电离辐射引起的危害的安全标准中正式将飞行人员列为辐射职业受照人员；要求所有成员国于2000年5月前将航空机组人员宇宙射线暴露评估和职业管理纳入国家立法；
- 大部分西方发达国家，按照职业照射管理。德国建立剂量登记系统，涵盖航空。



Mean effective annual dose of all measurably exposed persons

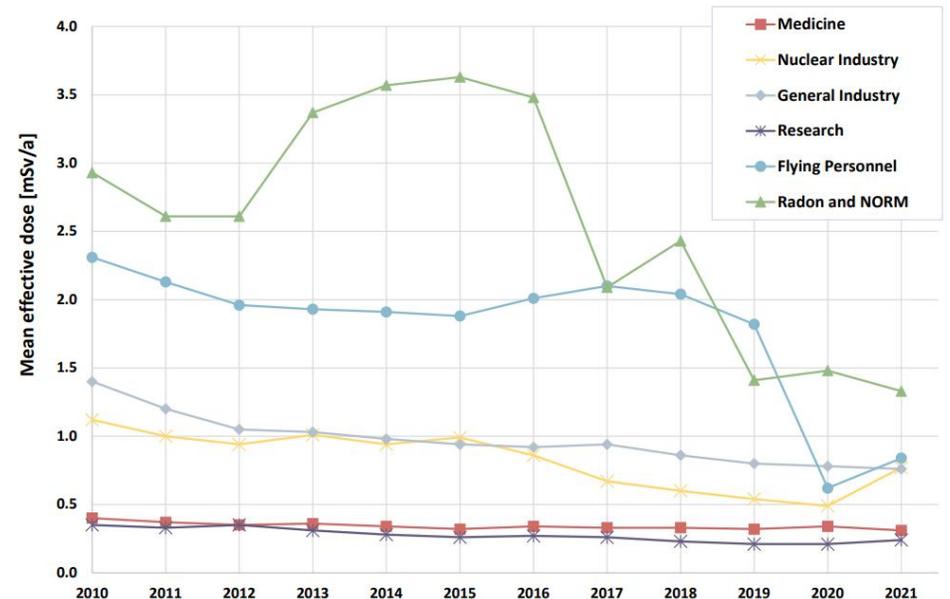
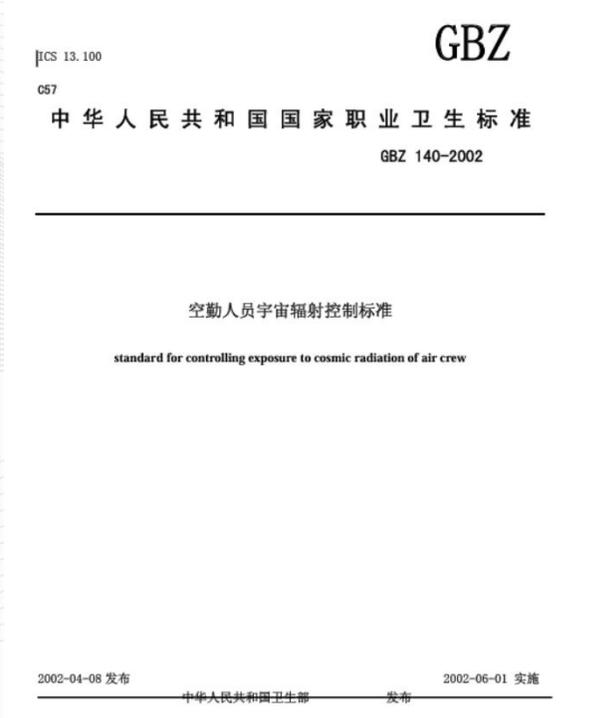
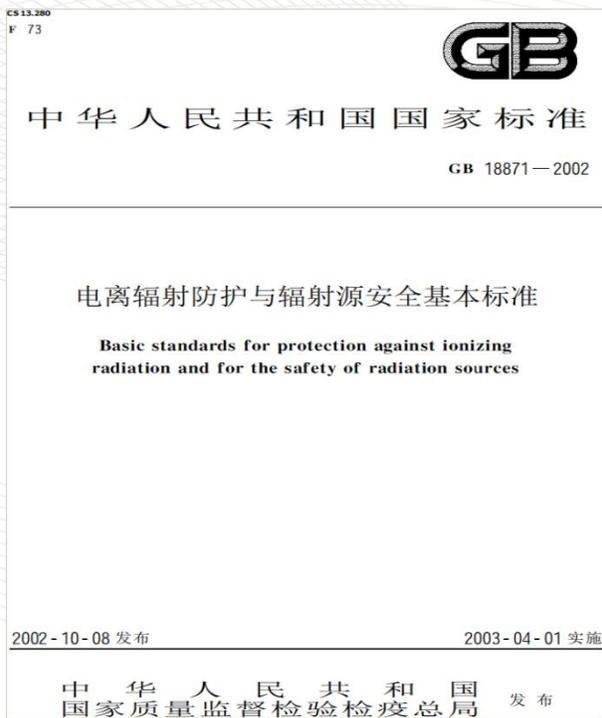


图7 德国所有可测量受照人员的平均年有效剂量

1.6 国内外现状

- 2002年**中国国家标准**《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871—2002）和原卫生部颁布的《空勤人员宇宙辐射控制标准》（GBZ 140—2002）提出将喷气飞机机组人员列为辐射受照职业人群，要求对飞行人员受到的宇宙辐射剂量进行监测和估算。



然而，尽管已有上述标准作为技术支撑，目前我国**尚未将航空机组人员受到的宇宙辐射照射正式纳入《职业病危害因素分类与目录》**，这在一定程度上限制了对该职业群体的系统性职业健康管理。



02

研究目的及意义

2.1 研究目的



1 基于实验测量和蒙卡模拟，建立宇宙辐射剂量估算模型；

2 解决宇宙辐射剂量难以准确定量分析与测量的关键技术问题，实现我国航空机组人员宇宙辐射剂量的快速估算；

3 建立我国疆域三维宇宙辐射水平数据库，为我国剂量学研究提供可靠、规范的宇宙辐射剂量水平数据。



2.2 研究意义

01

为我国航空机组人员宇宙射线辐射剂量水平监测提供一种**快捷、准确、可靠的估算方法**，填补国内空白；

02

本研究紧贴我国职业健康管理现状，对切实可靠**掌握**我国航空机组人员宇宙辐射剂量水平与趋势，**推动**其剂量监测与健康风险评估工作有重要意义。

03

为国家制定航空机组人员职业健康相关**法规、政策和标准**等提供坚实有力的数据支撑和科学依据。



03

DIAMON便携式中子谱仪刻度 及性能测试

3.1 DIAMON中子谱仪简介(IAEA项目资助)

DIAMON 是意大利RATLAB公司生产的便携式中子探测系统，能够实时的测量中子能谱、重建中子场角分布、准确的推导辐射场及操作实用量（例如，注量、 $H^*(10)$ 、场份额等）。

表5 DIAMON中子谱仪技术参数

技术参数	
$H^*(10)$ 测量范围	10nSv/h~100mSv/h
中子能量范围	热中子~几百MeV或更高
γ 灵敏度	$<1 \times 10^{-4}$ cts/nSv (^{137}Cs)，或 $<1\mu\text{Sv/h}$ (^{137}Cs , 10mSv/h)
$H^*(10)$ 校准因子	3.5 $\mu\text{Sv/h/cps}$ (Am-Be源)
$H^*(10)$ 响应	1.03cts/nSv (Am-Be源)
通讯	以太网，或专用Wifi
总重量	8.5kg (高能版)



图8 DIAMON中子谱仪实物图

3.2 中国散裂中子源（CSNS）进行刻度及性能测试

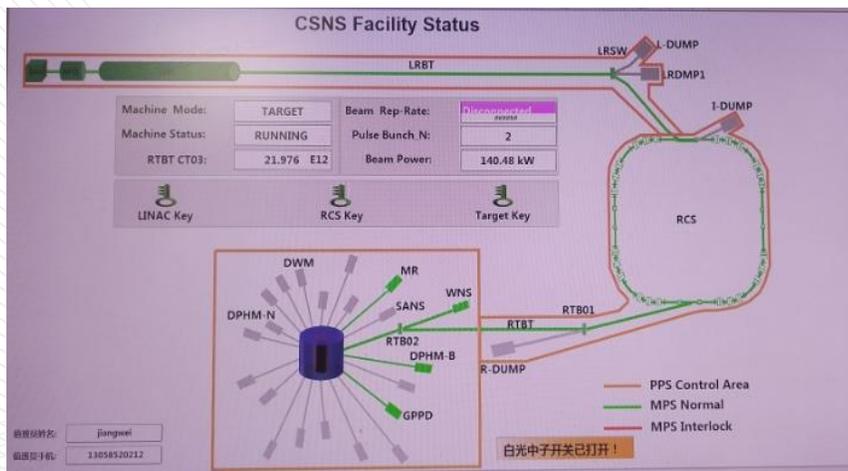


图9 散裂中子源



图10 控制大厅

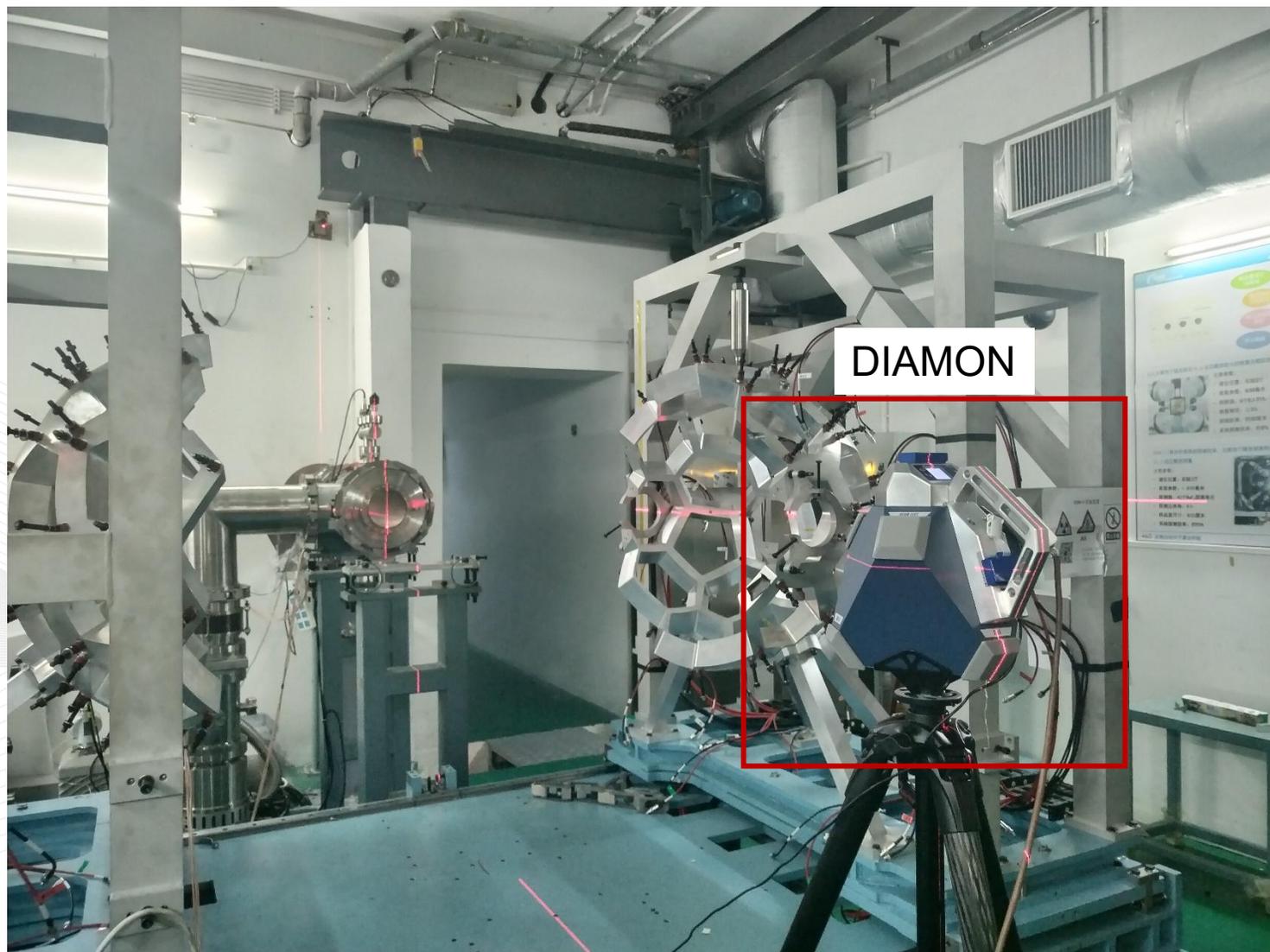


图11 CSNS反角白光中子源实验室



3.2.1 能谱刻度

表6 CSNS反角白光中子源束流参数

CSNS反角白光中子源束流参数	
质子束流打靶功率	140.48kW
质子束流重复频率	25Hz
靶材料	钨

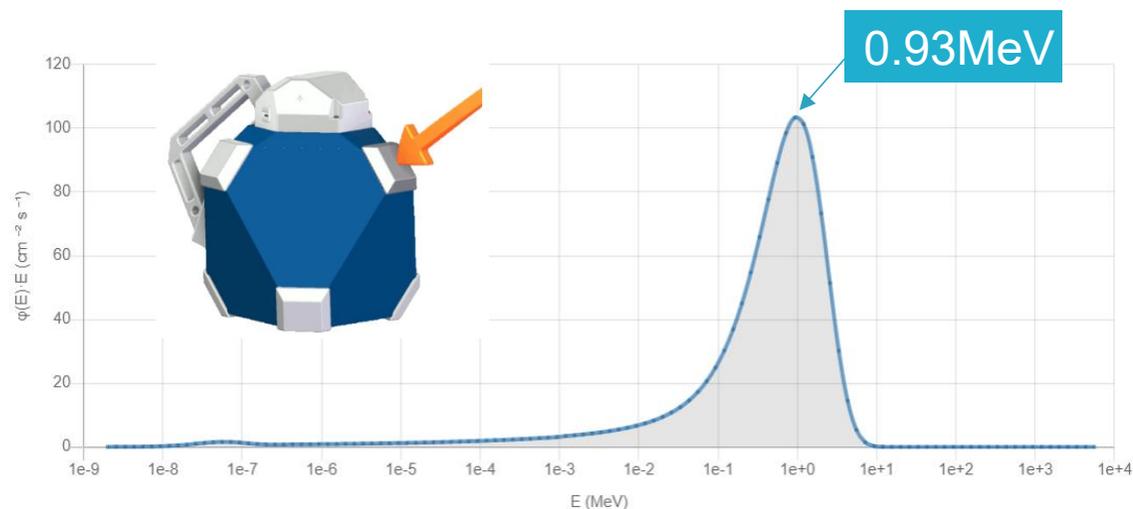


图12 DIAMON中子谱仪能谱

能谱校正因子 $N=0.75$

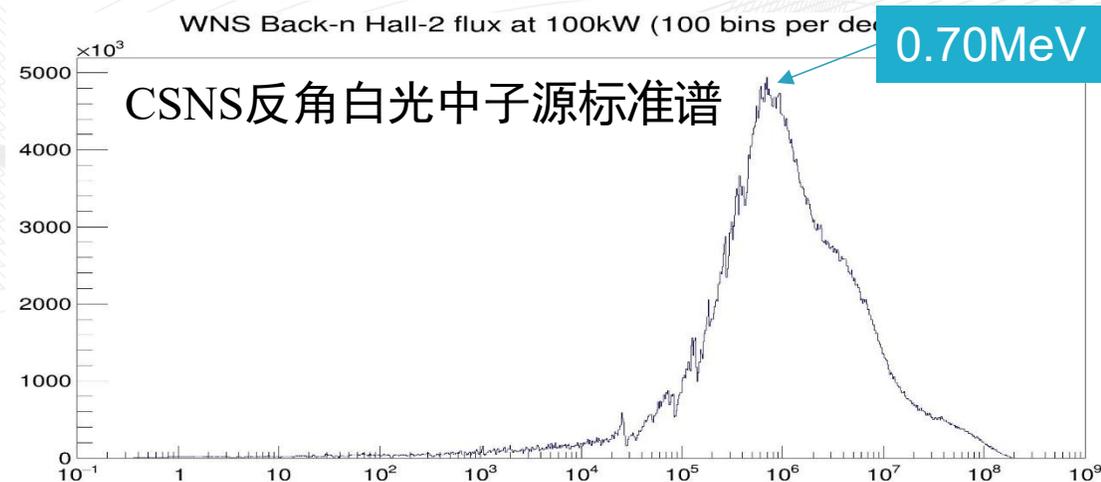
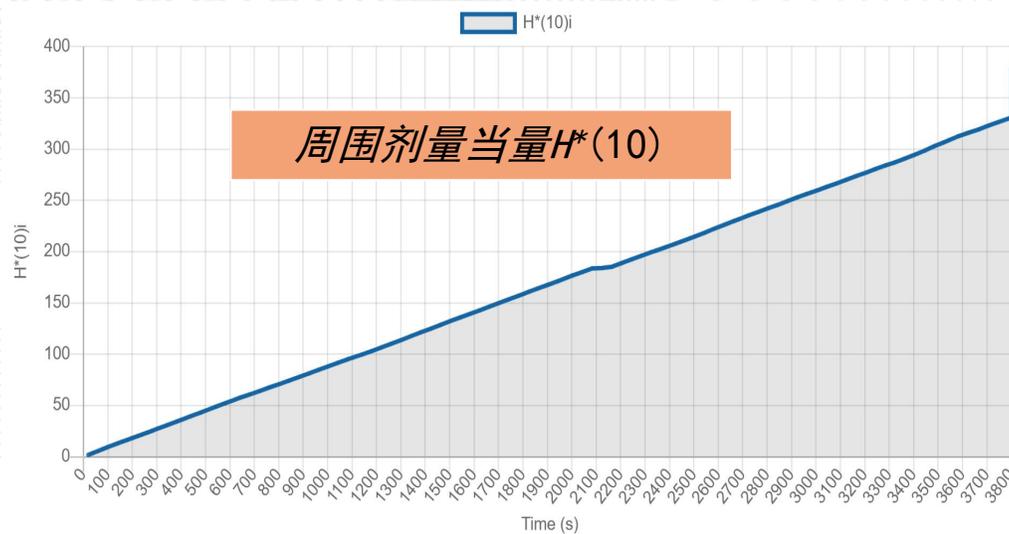
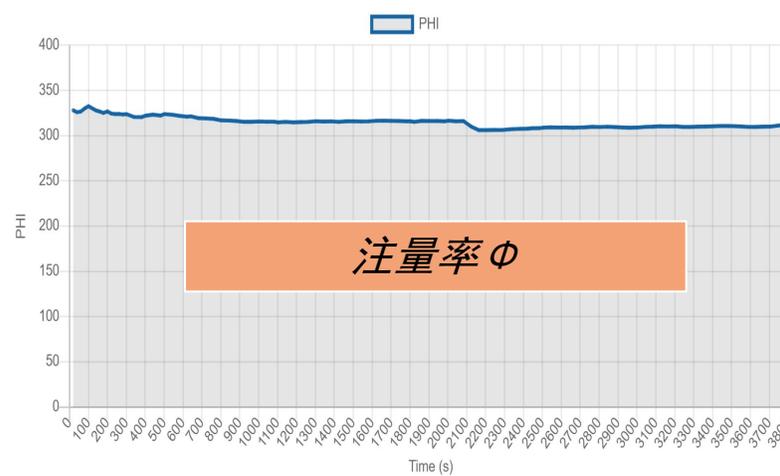
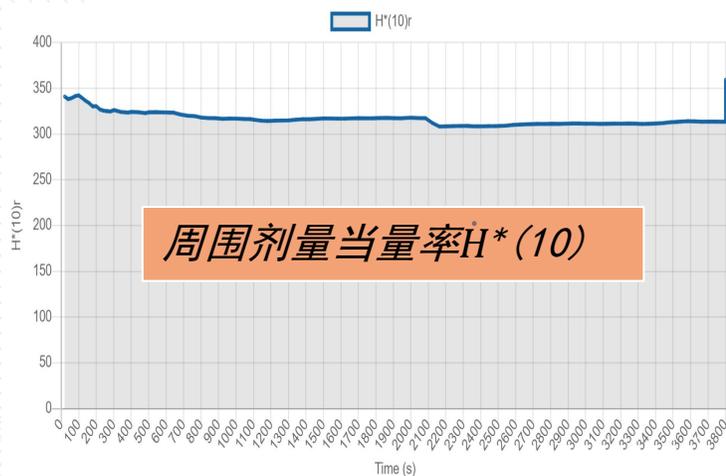


图13 CSNS反角白光中子源标准能谱



3.2.2 剂量测量结果



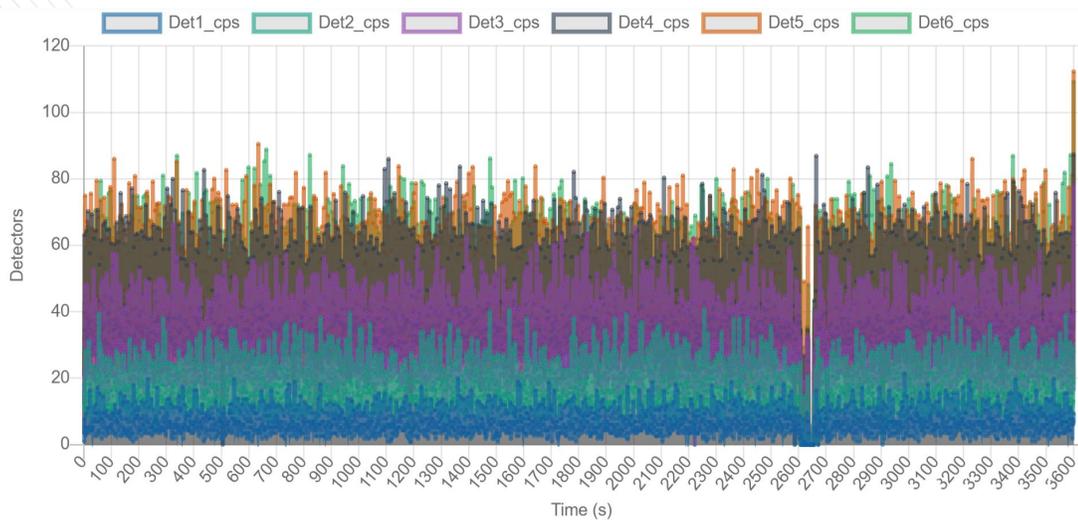
$$\dot{H}^*(10) = h^*(10) \times \phi$$

$$H^*(10) = \int_0^{t_0} \dot{H}^*(10) dt$$

式中， $\dot{H}^*(10)$ 为周围剂量当量率， ϕ 为注量率， $h^*(10)$ 为中子注量到周围剂量当量转换系数， $H^*(10)$ 为周围剂量当量。

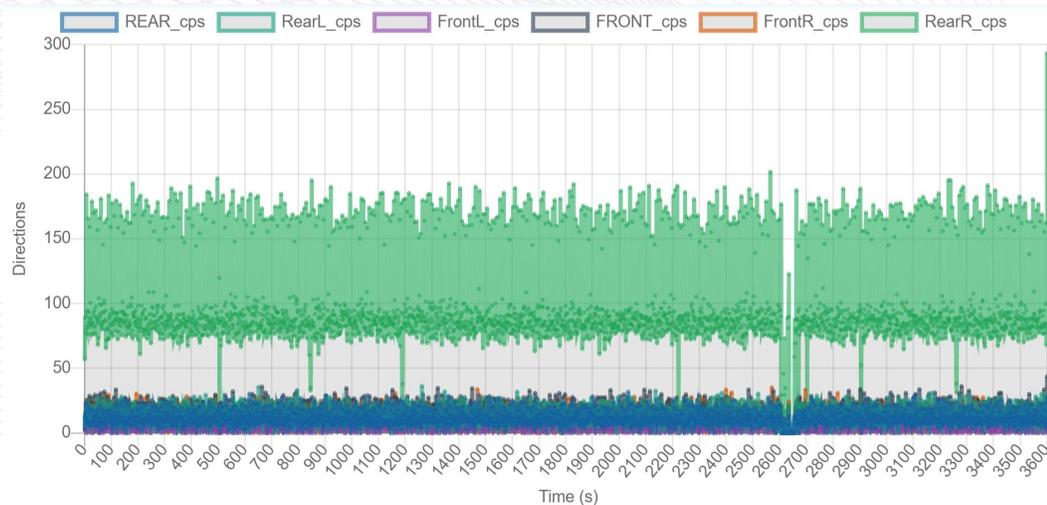


3.2.2 剂量测量结果



DEPTH	Counts	Cps
1	23552	6.541
2	56490	15.689
3	95559	26.539
4	131966	36.65
5	140505	39.022
6	136632	37.946

中子能量分析



CAP	Counts	Cps
REAR	40178	11.158
REAR Left	45230	12.562
FRONT Left	20984	5.828
FRONT	48159	13.375
FRONT Right	42073	11.685
REAR Right	351446	97.606

角响应



3.2.2 剂量测量结果

表7 DIAMON测量结果

测量结果	
$\Phi(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	308.6($\pm 3.6\%$)
$\dot{H}^*(10)(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$	311.8($\pm 5.7\%$)
$H^*(10)(\mu\text{Sv})$	603.6($\pm 5.7\%$)
$h^*(10)(\text{pSv}\cdot\text{cm}^2)$	280.7($\pm 4.4\%$)
Thermal(<0.5eV)	1.30%
Epithermal(0.5eV~100keV)	18.06%
Fast(>100keV)	80.64%

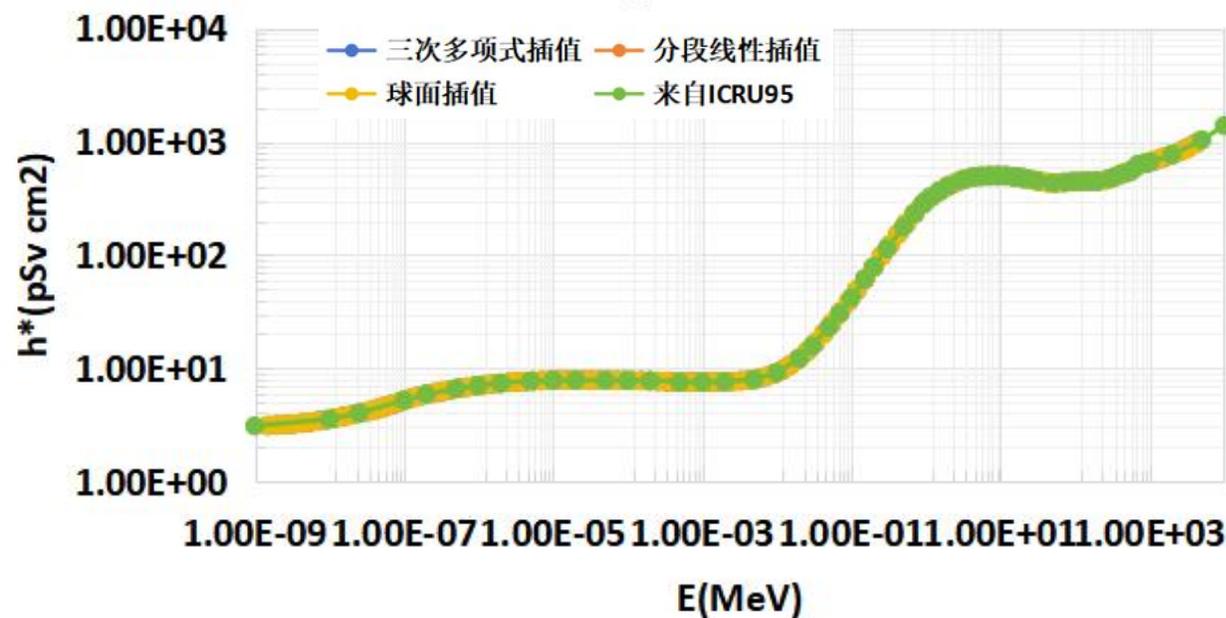


图14 中子注量到周围剂量当量转换系数插值结果



3.2.3 不同中子注量率下的响应

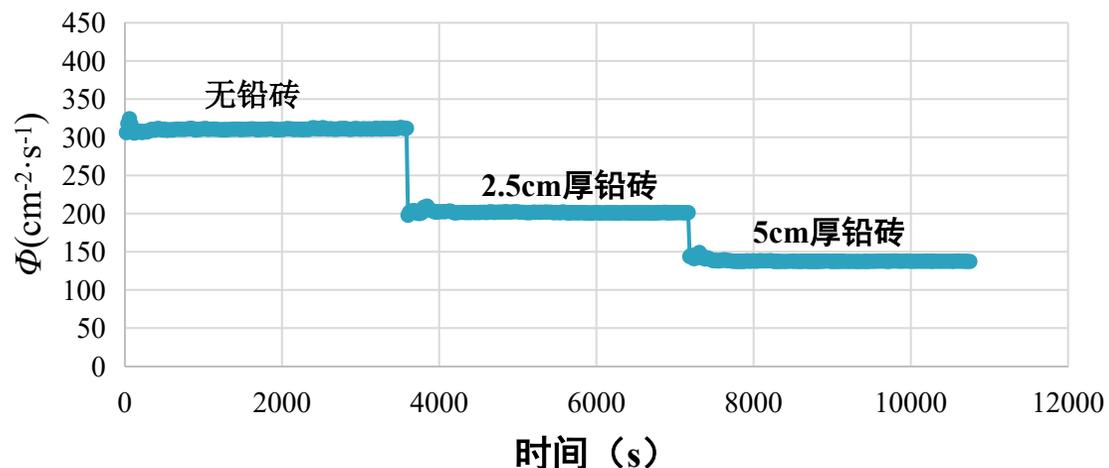


图15 不同厚度铅砖下的粒子注量率

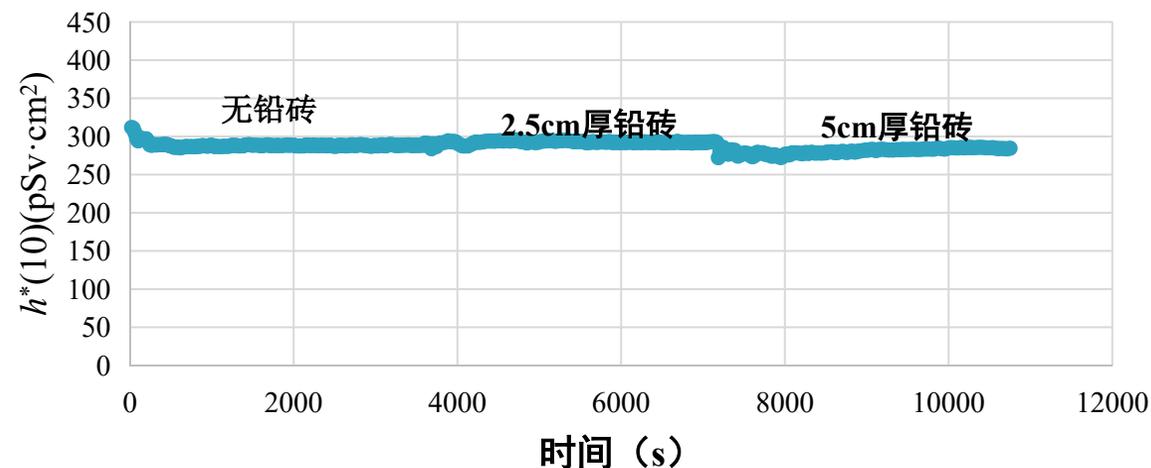


图16 不同厚度铅砖下的转换系数

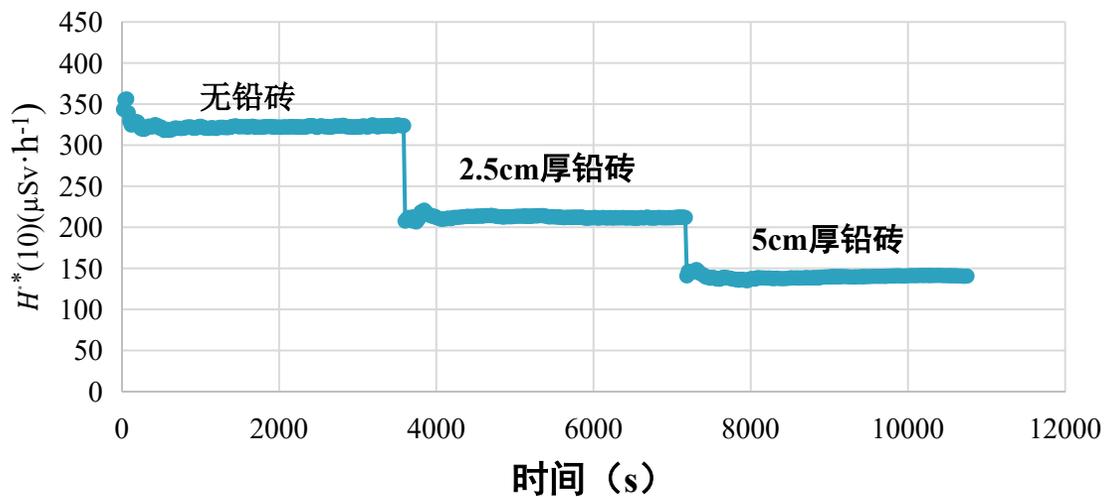


图17 不同厚度铅砖下的周围剂量当量率

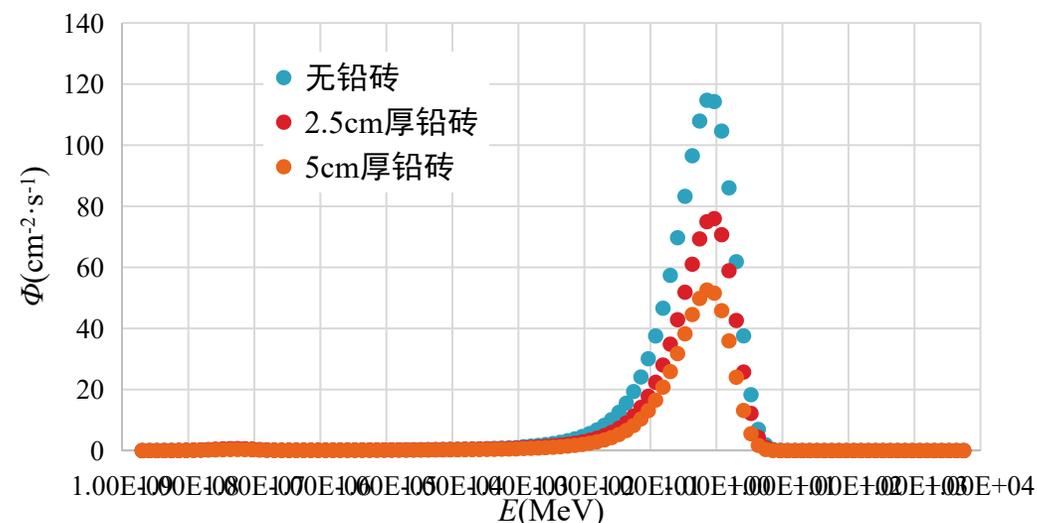


图18 不同铅砖下的能谱

3.2.4角响应性能测试

表8 DIAMON角响应测量结果

	rear	rear-left	rear-right	front	front-left	front-right	相对偏差
$\Phi(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	314.4	312.8	320.7	311.5	311.8	314.3	1.08%
$\dot{H}^*(10)(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$	336.2	311.2	327.6	313.6	323.8	329.8	2.99%
$H^*(10)(\mu\text{Sv})$	333.0)	309.8	326.1	331.0	322.3	328.2	2.57%
$h^*(10)(\text{pSv}\cdot\text{cm}^2)$	297.1	276.3	283.7	279.6	289.9	291.5	2.74%



03

DIAMON便携式中子谱仪应用

4 DIAMON便携式中子谱仪应用

右图1源自航旅纵横app，可查询航班飞行实况数据，包括飞行日期、飞行路径、巡航时间和飞行高度等航线信息。



图19 深圳——北京飞行实况



图20 机上实测

4 DIAMON便携式中子谱仪应用

将DIAMON中子谱仪携带上飞机，置于座位下方，等飞机爬升至巡航高度并平稳飞行后开机，测量时间设置为60 min，由于测量时间需要60 min的平稳飞行，故选择国内较长航线深圳-北京，巡航高度约为11000 m，测量能谱见图11。DIAMON中子谱仪测量的中子能谱峰位置在1.18 MeV和91.20 MeV处，与既往其他学者测量结果一致。

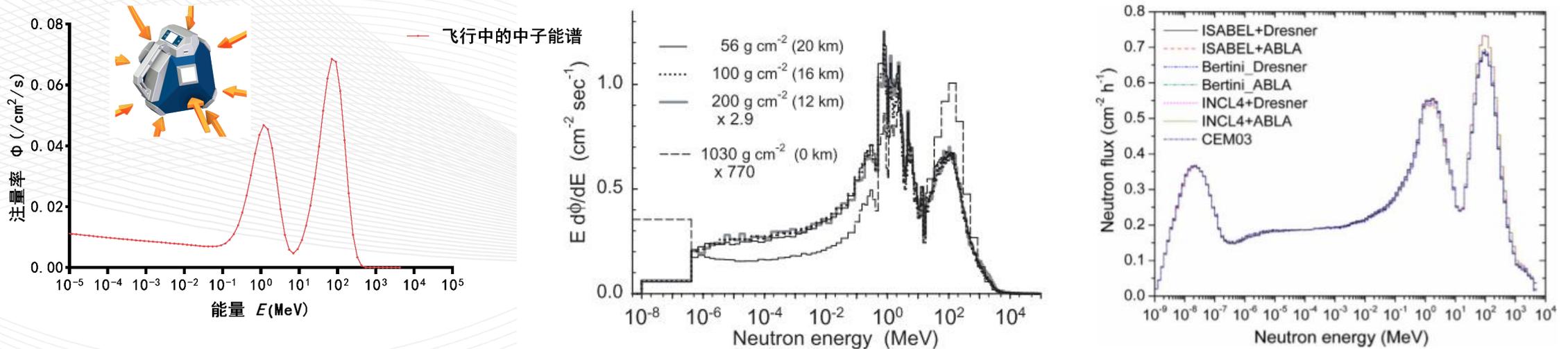


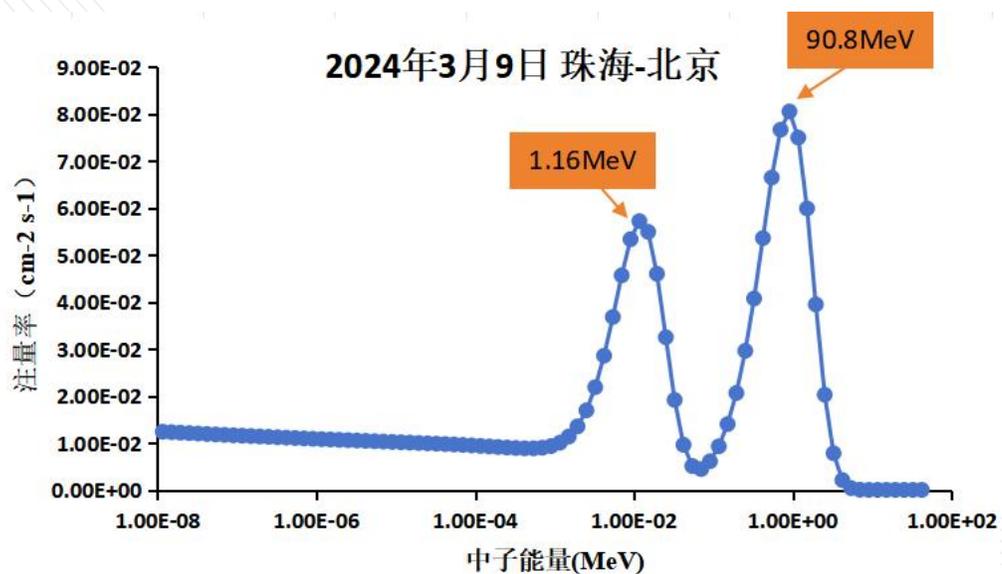
图21 深圳-北京航线中子能谱测量结果与相关文献报告结果对比^[2-3]

[2] Goldhagen P, Clem J M, Wilson J W .The energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons measured on an airplane over a wide range of altitude and latitude[J].Radiation Protection Dosimetry, 2004, 110(1/4):387-392.

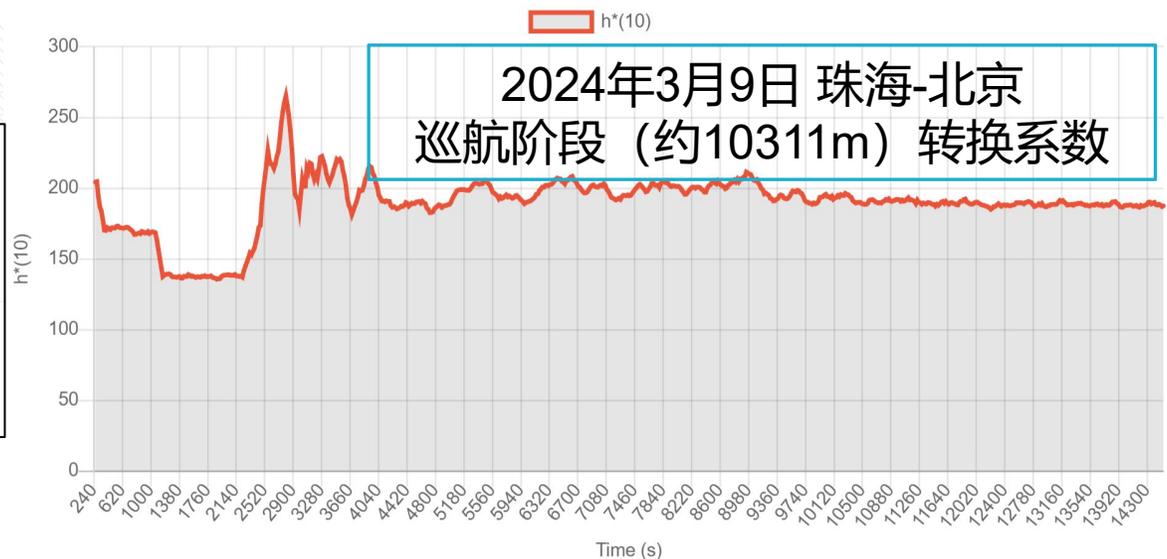
[3] Hu Z M, Ge L J, Sun J Q ,et al.Measurements of cosmic ray induced background neutrons near the ground using a Bonner sphere spectrometer[J].Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 940(OCT.1):78-82.



4 DIAMON便携式中子谱仪应用



FIELD QUANTITIES		巡航阶段场份额情况		
ϕ	Therm	Epith	Fast	
cm ⁻² s ⁻¹	%	%	%	
0.534 (± 5.0%)	23.50	24.70	51.80	





**谢谢！
请批评指正。**

Tel: 18500153735

Email: dengjun@nirp.chinacdc.cn