

空间辐射剂量测量简介

刘建忠, 王 勇, 姚小丽, 刘惠英, 胡 波

中图分类号: R144 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2010)04-0458-04

【摘要】目的 介绍空间辐射的特点和测量方法, 更好地保障航天员的健康。方法 依据空间辐射的特点、剂量学原理, 常用的测量方法。结果 评述了空间辐射测量的现状、存在的主要问题以及研究方向。结论 由于空间辐射的复杂性, 导致其测量和剂量学研究还很不充分, 还有很多领域的高峰需要攻克。

【关键词】空间辐射; 剂量学; 被动式探测器; 主动式探测器

探索、开发和利用外层空间资源, 是人类社会生存和发展的一个必然的历程, 发展载人航天技术对人类的未来和国家的未来都是至关重要的。载人航天在人类的历史上虽然刚刚经历了短短 40 年的发展历程, 但却取得了如登月、多次进入太空、太空持续飞行 438 天等巨大的成就。我国的航天技术与载人航天也在新世纪之初取得了辉煌的进步, 先后实现了六位航天员遨游太空的壮举。相应地登月飞行、火星探险也列入了我国的航天发展规划。

载人航天脱离了地球稠密大气层这一天然屏障的保护, 不可避免地要暴露于外层空间的强辐射环境下, 这是航天期间尤其是长期飞行必然遇到的主要有害环境因素之一。这一辐射环境包括空间天然存在的和在航天器载荷中产生的电离辐射和非电离辐射。空间天然电离辐射源主要是银河宇宙辐射、地磁捕获辐射和随机发生的太阳粒子事件。随着人类探索的脚步不断延伸和在太空中滞留时间的延长, 空间辐射对载人航天的影响也愈发重要和不可忽视, 甚至会成为主要的制约因素之一。

由于空间辐射的特殊性, 其探测技术和剂量学, 都是相应学科中最具挑战性的领域, 本文主要介绍空间辐射及其测量技术以及对载人航天的影响。

1 空间辐射简介

太空中的辐射环境包括电磁辐射和电离辐射^[1,2]。一般来说, 电磁辐射, 包括无线电波、微波、红外、可见光、紫外线等, 贯穿物体的能力差, 与其他物质发生相互作用的能力也较小, 对生物体的伤害较小; 电离辐射, 包括带电粒子、中子、 γ 射线、 x 射线等, 贯穿物体的本领强, 可以直接或间接地使物质电离或激发, 使物体材料和生物细胞受到损伤。对载人航天活动而言, 电离辐射在通过飞船时, 还可能和飞船结构材料发生相互作用产生次级粒子。电离辐射和次级粒子因其可能造成生物机体的严重损伤而在载人航天活动中倍受重视, 也是具有实际防护意义的辐射。

1.1 银河宇宙射线 (GCRs, Galactic Cosmic rays) GCRs 主要包含来自太阳系以外的带电粒子、 γ 射线和 x 射线。粒子的能量范围非常宽, 从 10^3 到 10^{20} eV 且为连续能谱, 它的分布可以认为是均匀的, 其峰值大约在 1GeV 。GCRs 包含 83% 的质子, 13% 的氦离子 (α 粒子), 3% 的电子和介子以及 1% 的重离子 (从锂到铀的各种重离子)。

GCR 粒子进入太阳系后, 与太阳粒子相互作用而部分减弱, 当太阳活动最强时, 太阳粒子最强, GCR 粒子最弱; 反之太阳活动最弱时由于行星际磁场对低能粒子的屏蔽减小, 使 GCR 粒子通量密度最强。而当 GCR 抵达地球附近时, 由于 GCR 是带电粒子, 必然要受到地球磁场的影响。因此, 在 LEO 轨道, GCR 随纬度的增高而增强, 赤道附近最弱两极最强。

GCR 中的低能粒子不能穿透飞船的结构材料, 而高能部分 (尤其是重粒子) 具有高 LET 和强穿透性, 能产生严重的生物损伤。国外的宇航员报告了多起当他们闭上眼睛时感受到辐射粒子穿过大脑和眼睛时产生的短暂闪光。

GCR 的通量不大, 当飞船运行于低地球轨道且在轨时间不长时, 不会对宇航员形成明显的危害。但对于星际探险或飞行时间长 (如火星探险、在月球上建立基地等) 就成为必须考虑的主要危险因素之一。

1.2 太阳粒子事件 (SPEs, Solar Particle Events) 空间辐射的另一个来源是太阳粒子, 尤其是当太阳耀斑和日冕大喷发期间太阳发出的高能粒子, 能量范围从 10^3 eV 至 10^8 eV。SPEs 的主要成分是质子、电子和直到铁的重离子。SPE 粒子的成分、能量、注量以及发生频率总是在发生不断的变化。

太阳耀斑和日冕大喷发可产生波及地球和太阳系其它部分的强烈辐射^[3], 这种辐射会干扰甚至中断地面通信, 它们还会造成卫星工作失常甚至报废, 也会对载人航天产生极大影响。例如在 1972 年 8 月的一次日冕大喷发, 观测到的辐射能在 0.5g/cm^2 的屏蔽下产生 1Sv 的皮肤吸收剂量, 无屏蔽情况下则导致高达 26Sv 的皮肤吸收剂量。因此载人航天活动一般都会避开太阳活动剧烈的时期。

太阳活动剧烈期和正常期的对比如图 1 和图 2

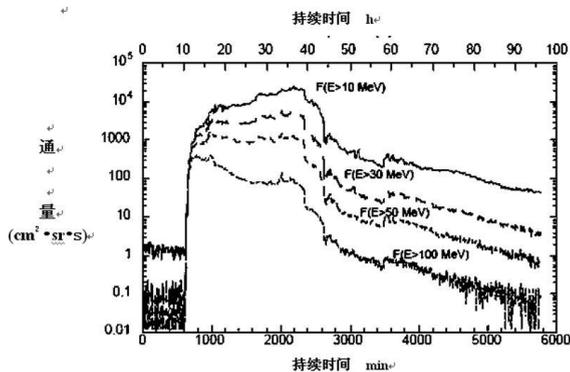


图 1 2000 年 7 月 14 日至 17 日太阳耀斑期间 GEOS-8 卫星测量的质子通量

作者单位: 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006
作者简介: 刘建忠 (1969-) 男, 副研究员, 从事辐射监测和剂量学研究
工作。

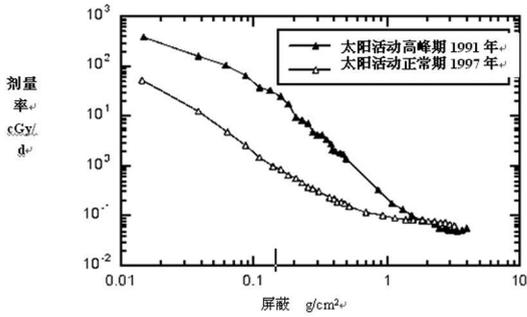


图 2 太阳活动剧烈期和正常期的剂量率对比

1.3 捕获辐射 (Trapped Radiation) 带电粒子被地球磁场捕获形成地球辐射带 (ERBs the Earth's Radiation Belts)。由于磁力线汇聚于地球两极附近, 带电粒子依电性不同而分别漂移, 形成两个辐射带, 捕获电子最高能量可达 7MeV而质子可达 600MeV。ERB随地球纬度增高而增强, 赤道最弱, 两极最强; ERB随飞行高度的增加而减弱。对于在 LEO轨道上的航天器, 辐射剂量主要由质子贡献, 对于星际飞行 ERBs可忽略不计。捕获质子与太阳活动的关系如图 3。

地球磁场与自转轴有一定偏移, 磁场发生扭曲和变形, 在巴西海岸外上空形成一个辐射异常区, 称为南大西洋辐射异常区 (SAA the South Atlantic Anomaly), 这个辐射带延伸至 200km高度 (其他区域为 2000 km和 6000km), 其辐射强度大大高于同纬度的其它地区。对于国际空间站 (ISS), 尽管 ISS穿越 SAA只用不到 15min时间 (不到总在轨时间的 10%), 其在太阳活动极小年的总辐射剂量 SAA贡献 50%, GCRs贡献 50% [4]。表 1给出的是编号为 STS-84飞行期间 (多次穿越 SAA区), GCRs和 SAA区捕获辐射的平均吸收剂量率、平均剂量当量率和它们的品质因子 [5]。

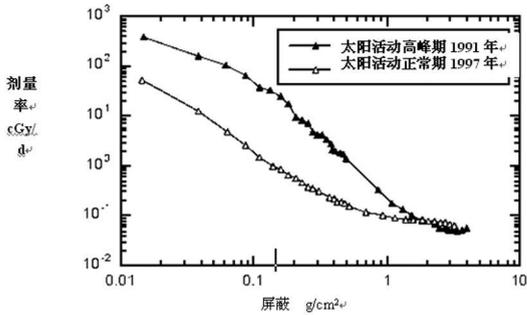


图 3 国际空间站轨道上捕获质子与太阳活动的关系

表 1 STS-84飞行期间 GCRs和 SAA捕获辐射的平均吸收剂量率、平均剂量当量率和它们的品质因子

辐射源	时间 (min)	平均吸收剂量率	平均剂量当量率	品质因子
GCRs	9 323 min	0.158 μGy/min	0.39 μSv/min	2.48
SAA辐射	765 min	3.67 μGy/min	4.37 μSv/min	1.19
合计	10 088 min (7.01 d)	0.424 μGy/min (0.611 mGy/d)	0.693 μSv/min (0.998 mSv/d)	1.64

1.4 次级粒子 由于上述粒子的能量非常高, 它们贯穿飞船时与组成飞船的结构材料的原子核发生相互作用而产生次级粒子, 它们之间的反应主要是: 靶核碎裂和弹核碎裂。次级粒子在运动过程中可能再次与其它核发生核反应。这些核反应会伴随产生中子、γ射线等辐射。

次级中子的能量范围从 10⁵ ~ 10⁹ eV。在小于 500 km的低地球轨道 (LEO Low Earth Orbit), 除次级中子外还有地球大气

层的反照中子, 对于 ISS中子 (包括次级中子和反照中子) 对宇航员总的剂量当量的贡献约为 30% ~ 60% [6,7]。这些中子的品质因子是轻带电粒子的 4~5倍 [8]。

中子的测量和对剂量当量的贡献是空间辐射测量和剂量学的难题之一, 第一是因为空间辐射是混合辐射场, 大多数常规测量方法不能有效区分中子和带电粒子; 其次是现有技术对高能中子的测量还存在很多问题。

2 空间辐射剂量学及测量方法

载人航天 30多年来, 除少量几次登月飞行外, 均为距地面 600 km以下的近地轨道飞行。从目前收集到的美俄 (包括前苏联) 航天器舱内的剂量测量数据 [9]可以看出, 在 300 km左右的轨道, 舱内平均日剂量为 0.1 ~ 0.3 mGy/d。400 km以上则为 0.57 ~ 0.86 mGy/d。而在阿波罗登月飞行时, 因穿越地磁捕获辐射带, 达到迄今为止最大的日剂量 1.27 mGy/d。飞行天数越多, 累积剂量越大, 如美国“天空实验室”4号 90 d飞行的累积剂量达 77.4 mGy。表 2是几次典型的处于不同时期、不同辐射环境下载人航天飞行的剂量对比。

表 2 几次不同任务、不同时间、不同辐射环境的航天飞行的剂量对比

飞行任务	轨道	持续时间 (天)	平均剂量 (Gy/d)	剂量率 (Gy/h)	总剂量 (Gy)
礼炮号-6	LEO	140	2.4E-4	1.0E-5	3.5E-2
和平号舱内	LEO	130	4.5E-4	1.8E-5	6.0E-2
天空实验室-4	LEO	90	8.6E-4	3.6E-5	7.7E-2
阿波罗-14	月球	90	1.3E-3	5.4E-5	—
航天飞机	LEO 变轨	—	4.8E-3	2.0E-4	—
和平号舱外 (1991年太阳活动极大年)					
2.0 g/cm² 屏蔽	LEO	130	1.0E-1	4.2E-3	1.3E+1
0.2 g/cm² 屏蔽	LEO	130	1.0E+1	4.2E-1	1.3E+3
中子剂量	ISS空间站	LEO	—	2E-4	8E-6

从以上数据可以看出, 宇航员作短期的近地轨道飞行时, 不会因辐射影响健康。

在低地球轨道, 宇航员所受剂量与飞船所处轨道的倾角、飞行高度和太阳活动的周期等因素密切相关。宇航员长时间飞行 (比较典型的国际空间站宇航员, 持续时间 90~180 d) 会受到远超过职业照射人员剂量限值的辐射。尽管近年来新材料的不断应用给宇航员提供了比以往更为有效的辐射防护, 但对于更为遥远的星际探险 (地球大气层能提供 1030 g/cm² 的屏蔽, 而火星大气层只有 16 g/cm²) [10], 必需尽快发展更为全面和有效的辐射防护技术和手段, 保障宇航员的安全。目前空间辐射防护方面的研究主要集中在以下几个方面: a) 物理防护: 如新的屏蔽材料的开发和应用; b) 主动防护: 如强磁场; c) 辐射防护药物; d) 局部防护。这些技术发展和应用都是建立在对空间辐射剂量学的更进一步发展的基础上的。

空间辐射剂量学的主要任务是建立空间辐射剂量的测量方法并实施测量, 确定舱内及乘员的辐射水平以及评价和预估航天活动的辐射危险性。由于使用环境特殊, 用于航天器内辐射测量的仪器或器件应满足以下条件:

- (1) 体积小, 重量轻, 以节省发射重量;
- (2) 耗能小, 安全可靠, 以延长空间使用时间;
- (3) 测量值稳定: 不会因发射和返回时强烈的振动、超重及

冲击及飞行期间的失重、真空及温度湿度变化而发生故 障, 保证数据的可靠性和准确性;

(4) 要求探测器的动态范围(包括粒子的能量、注量等)很大, 粒子注量一般很低, 通常每分钟记不到一个粒子, 而有时又会大几个量级。为了辨别不同的粒子和它们具有的品质因子, 还要有好的电荷、能量和 LET分辨。

下面介绍下一些常用的空间辐射和剂量测量方法。

2.1 被动式(无源)探测器 无源探测器的共同优点是体积小、重量轻、不消耗电能。目前常用的无源探测器主要有: 热释光探测器(TLD)和 CR-39固体径迹探测器。

TLD最常用的是⁶LiF和⁷LiF TLD飞行期间储存的剂量信息稳定, 探测器材料有较好的组织等效性, 航天器返回后, 经过读出及刻度, 可获得准确的剂量数据等, 成为测量累积剂量首选的探测器之一。TLD的主要缺点一是不能提供剂量当量数据(即不能提供 LET信息); 另外当 $LET \geq 20 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 时其效率严重下降, 会低估总的剂量^[11]。

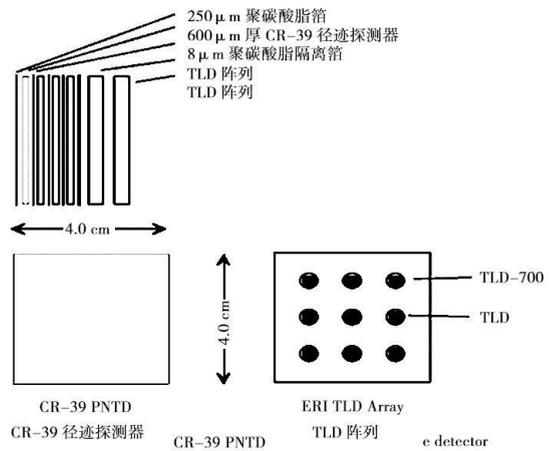


图 4 典型的 TLD和 CR-39组合系统

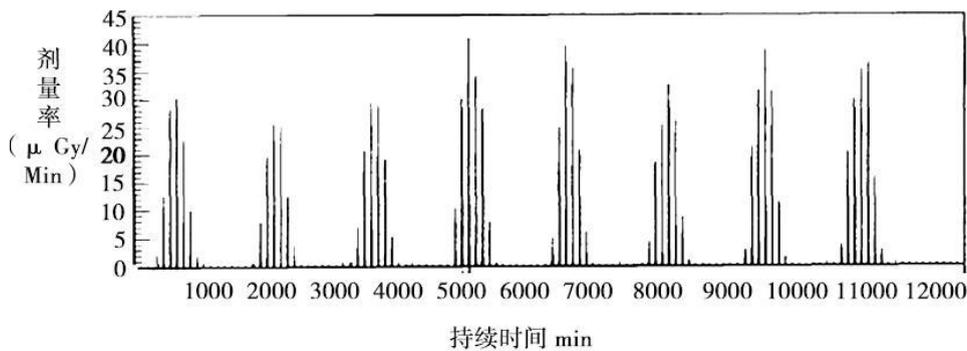


图 5 STS-57飞行期间剂量率与时间的关系

CR-39径迹探测器最大的优点是可正确记录高 LET粒子 (~1000 keV/μm)。

现在一般航天器和宇航服内都内装 TLD阵列和 CR-39的组合系统, 可测量 $LET \geq 5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 的 LET谱、剂量、剂量当量。如图 4

2.2 主动式(有源)探测器 载人航天发展的初期, 航天员在轨期间所受的辐照数据主要是用 TLD测量的剂量和平均剂量率, 没有记录粒子注量和 LET谱。近年来, 随着微电子学、数据处理和存储、大容量电池等技术的发展和成熟, 有源探测器在空间辐射研究中的作用越来越重要。

空间辐射领域用的有源探测器主要包括正比计数器和由多个探测器组合而成带触发和符合, 对方向敏感的带电粒子望远镜。目前比较常用的有:

2.2.1 美国约翰逊航天中心(JSC)研制的组织等效正比计数器 TEPC^[12] TEPC(JSC)组织等效正比计数器的探测器是长 5.08 cm 直径 5.08 cm 的圆柱体, 组织等效塑料厚 1.9 mm 内充低压丙烷气体; TEPC的数据处理由 256道 ADC完成。

TEPC可以测量混合辐射场中的辐射剂量、剂量当量和 LET谱。TEPC模拟 μm 直径的生物细胞, 其探测灵敏度为 $0.2 \text{ keV}/\mu\text{m} \sim 1.250 \text{ keV}/\mu\text{m}$; 每 2 s 或 20 s(根据剂量率自动调整)计算一次吸收剂量, 利用响应函数得到 LET谱。图 5 是 STS-57(轨道倾角 28.5°, 海拔高度 462 km)飞行期间 TEPC测量的剂量率与时间的关系图。高的峰是飞船通过 SAA区, 小的峰是通过两极。可以看出, SAA区的剂量率比非 SAA区高 1~2个量级^[13]。

2.2.2 带电粒子望远镜 德国 Kiel大学研制的 DOSIEL(dosimeter-telescope), 由两个相距 15 mm 厚度为 315 μm 的注入平面硅探测器组成。其 LET灵敏范围是 $0.1 \sim 120 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ^[14]。

日本的 PRMD-3 则由 3个位置灵敏硅探测器(PSD)组

成, 每个 PSD厚 500 μm 之间相距 5 mm; 灵敏范围 $0.2 \sim 400 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 。上下的 PSD用作触发, 中间的测量能量沉积。PRMD-3可以提供入射角度的信息。

JSC研制的带电粒子定向谱仪(CPDS)是迄今为止最复杂的辐射测量仪^[15], 如图 6 CPDS目前已用于国际空间站(ISS)上。PSD₁、PSD₂、PSD₃是 3个厚 300 μm 的位置灵敏探测器; A₁、A₂、A₃是 3个厚 1 mm 的锂漂移半导体探测器; B₁至 B₆是 6个 5 mm 厚的锂漂移半导体探测器; 最后是一个 Cerenkov闪烁体和光电倍增管。A₁和 A₂给出符合信号, B₁至 B₆测量粒子的能量沉积。数据分析与处理由 4096道多道完成。

2.3 存在的问题 空间辐射剂量学是辐射防护领域里较年轻的学科之一, 还存在不少问题和发展不很完备的领域, 如: 空间辐射的生物学效应; 中子剂量学; 高能粒子的测量; 混合辐射场的辐射测量; 测量仪器的小型化、轻量化; 新型屏蔽材料的研发等。

4 结语

在低地球轨道, 空间辐射的日平均剂量一般低于 $500 \mu\text{Gy}$ 在太阳活动极小年, 辐射主要是 SAA区的捕获辐射和银河宇宙射线(GCRs); 而在太阳剧烈活动时能产生比平时高几个数量级短期强辐射。空间电离辐射不仅有在地球表面常见的低 LET辐射, 还有相当多的高 LET辐射(重离子、靶碎片和高能中子)。空间辐射的生物学效应、中子剂量学、高能粒子的测量等领域仍然存在很多问题, 特别是混合辐射场条件下的中子剂量学。

随着人类探索宇宙的脚步不断向前迈进, 空间辐射剂量学的地位愈发突出, 由于在太空进行科学研究的困难程度以及空间辐射本身的特殊性, 空间辐射测量和剂量学研究还很不成熟, 空间辐射剂量学还有很多高峰等待着我们去攀登。

某滚装货运货车安检系统电离辐射水平调查

王 忠, 赵庆会, 毛春雷

中图分类号: X591 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2010)04-0461-02

【摘要】 目的 对某滚装货运货车案件系统周围环境警醒进行放射性水平监测, 以保障工作人员和公众的安全。方法 按照规定的方法进行布点测量。结果 该安检系统工作人员的年吸收剂量约为 1.8 mSv 公众年吸收剂量约为 0.06 mSv 低于本报告对工作人员的年剂量管理约束值。结论 正确使用该安检系统对工作人员和公众是安全的

【关键词】 安检系统; 电离辐射; 水平

某公司在烟台港客运码头安装滚装货运货车安检系统。根据《中华人民共和国放射性污染防治法》等法律法规的要求, 建设单位委托我站编制“烟台客运总公司滚装货运货车安检系统应用密封源项目环保设施竣工验收监测报告”, 结果如下。

1 概述

1.1 目的 为预防、控制、防止放射性危害, 保护环境和放射工作人员、公众的安全, 验证安检系统各项辐射防护安全设施、措施是否达到相关法规与技术标准的要求, 同时为环境行政主管部门对建设项目的验收提供技术依据。

1.2 内容 核实与验证安检系统放射防护和安全设施是否与设计及相符; 评估放射人员与公众的受照剂量, 和实际评价建设单位放射源安全管理、辐射环境监测计划、辐射事故应急预案等规章制度的执行情况。

1.3 依据 根据国家法律法规和技术标准以及现场监测所获得的数据进行评价。

1.4 目标 以 2.0 mSv 作为职业工作人员的年管理剂量约束值; 以 0.10 mSv 作为公众成员的年管理剂量约束值。

2 建设项目概况与工程分析

2.1 建设项目基本情况 建设项目位于烟台港客运码头。检测通道长 42 m 宽 12 m 墙厚为 25 cm 厚的混凝土, 墙高 3 m 在检测通道两端各开 1 个大门供被检车辆进出。安检系统采用 1 枚 ^{60}Co 放射源, 活度为 10.70 TBq (289.1 Ci)。

作者单位: 山东省辐射环境管理站, 山东 济南 250117
作者简介: 王忠 (1968~), 男, 工程师, 从事辐射环境管理工作。

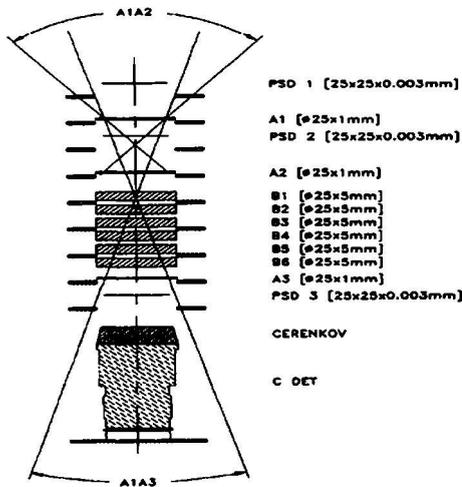


图 6 CPDS示意图

参考文献:

- [1] Benton ER, Benton EV. Space radiation dosimetry in low earth orbit and beyond [J]. Nucl Instr and Meth B 2001; 184: 255
- [2] 祁章年. 载人航天的辐射防护与监测. 北京: 国防工业出版社 [M]. 2003 11-35 196-213
- [3] Francis A, Cucinotta MA, R Shavers. Radiation Protection Studies of International Space Station Extravehicular Activity Space Suits [J]. NASA/TP 2003-212051
- [4] Badhwar GD. The Radiation Environment in Low Earth Orbit [J]. Radiat Res 1997; 148(5): S3
- [5] Sakaguchi T, Doke T, Hasebe N, et al. LET Distribution Measurements with a New Real-time Radiation Monitoring

- Device III on Board the Space Shuttle STS 84 [J]. Nucl Instr and Meth A 1999; 437: 75
- [6] Reedy R, In Balasubramaniam K, S Keil S, L Smart R, N et al. Proceedings of the National Solar Observatory/Sacramento Peak 16th International Workshop on Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances [J]. Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol 95 1996
- [7] Badhwar GD, Keith JE, Cleghorn TE. Neutron Measurements on Board the Space Shuttle [J]. Radiat Meas 2001; (33): 235
- [8] Coradiqi A. The International Package for Scientific Experiments (IPSE) for Mars Surveyor Program [J]. Advances in Space Research 2001; 28(8): 1209-1218
- [9] Benton ER, Frank AL, Benton EV. TLD Efficiency of LF for Doses Deposited by High LET Particles [J]. Radiat Meas, 2000; 32(3): 211
- [10] Badhwar GD, Konradi A, A well W, et al. Measurements of the Linear Energy Transfer Spectra on the Mir Object Station and Comparison with Radiation Transport Model [J]. Radiat Meas, 1996; 26(2): 147
- [11] Badhwar GD, A well W. A Study of the Radiation Environment on Board the Space Shuttle Flight STS-57 [J]. Radiation Measurements 1995; 24(3): 283-289
- [12] Beaujean R, Kopp J, Reitz G, et al. Active Dosimetry on Recent Space Flights [J]. Radiat Prot Dosit 1999; 85(1-4): 223
- [13] Badhwar GD, Patel JU, Cucinotta F A, et al. Measurements of the Secondary Particle Energy Spectra in the Space Shuttle [J]. Radiat Meas 1995; 24(2): 129

(收稿日期: 2010-06-11)