

我国宇宙线空间物理学的进展

黄永年

(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080)

摘要 本文介绍了宇宙线空间物理学在我国形成和主要研究内容,包括:(1)空间探测,有火箭探测、卫星探测;地面宇宙线台站观测;宇宙线的水下测量;(2)宇宙线空间物理学研究,有宇宙线的日地传输;宇宙线强度变化与 CME 事件;宇宙线的源物质与加速过程;宇宙线的地球物理效应.最后提到宇宙线与人体健康,特别是流行性感冒、大的太阳质子事件与地震现象、太阳宇宙线事件与天气和气候等的统计研究.

关键词 宇宙线空间物理,空间探测,宇宙线台站,日地传输,宇宙线源物质,地球物理效应

中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2007)04-1046-06

Advance in cosmic ray space physics in China

HUANG Yong-nian

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In this paper, the formation and main research fields and subjects of cosmic ray space physics in China are presented. They are: (1) space detections including rocket detection, satellite detection, cosmic-ray station detection, and under water detection; (2) cosmic ray space physics research including the solar-terrestrial transport of cosmic rays, cosmic-ray intensity variations and CME events, the source material and acceleration processes of cosmic rays, geophysical effect of cosmic rays. Finally, the statistical researches are mentioned among cosmic rays and human body health, especially influenza, and among large solar proton events and earthquakes, weather, climate, etc.

Keywords cosmic ray space physics, space detection, cosmic-ray station, solar-terrestrial transport of cosmic rays source material of cosmic rays, geophysical effects

0 引 言

宇宙线物理学可分为宇宙线空间物理学和宇宙线天体物理学.简单地说,前者着重研究来自太阳活动、其他天体爆发产生的高能粒子及其空间传输中产生的次级粒子在空间传输过程和效应;后者着重研究空间高能粒子的起源和与物质的相互作用.宇宙线空间物理学是一门令人关注的科学领域,它覆盖的面之广和层次之深,在其它学科中是少见的.

1957 年第一颗人造卫星发射成功,随之各种航天器的迅速发展,以及随着各种高新技术的发展和运用,为这门学科的发展提供了前所未有的强大手段和研究方法,迅速发展成一门国际学术界认可的 20 世纪和 21 世纪的优先发展学科.这门学科与其它学科有着紧密的联系,包括:太阳物理、空间物理、

天体物理、地球物理、核物理和放射化学等,与这些学科的密切交叉,成为人类认识自然、开发和利用自然以及人类自身发展的前沿科学.

宇宙线空间物理学是一门应用性很强的学科.宇宙空间各个层次发生的物理过程,大多与空间高能粒子有直接或简单联系.日地空间,包括太阳大气、行星际空间、行星空间和地球磁层、电离层及中高层大气中发生的一些重要物理过程,特别是太阳高能粒子事件对人类的生存环境、航天活动带来重要影响.宇宙线空间物理学的发展为自然灾害的预报、航天活动的安全、人类的健康和生存环境的维护提供科学依据.

我国的宇宙线空间物理学是在一些远见卓识的老一辈科学家的倡导和关怀下建立和发展起来的.几十年来,随着其它学科的发展和部门的需求,

收稿日期 2007-03-20; **修回日期** 2007-05-10.

作者简介 黄永年,男,1937 年生,江苏江阴人,1963 年毕业于中国科学技术大学近代物理系,主要从事空间高能粒子的起源、加速、传输和地球物理效应研究.

一些单位先后开展了与宇宙线空间物理学有关的探测与研究. 本文介绍了目前为止的主要研究工作. 随着我国航天活动的扩大和业务需求的增加, 可以预期宇宙线空间物理将有更深入的发展.

1 学科的建立

1958年10月, 为适应国家战略需要, 开展卫星和火箭探测的研究事业. 1958年国际地球物理年期间, 在地球物理所所长赵九章和原子能所所长钱三强倡导下, 原子能所8位科研人员和北京及云南落雪二个宇宙线强度观测台转交给地球物理所, 成立了宇宙线组, 周志文任组长, 室主任朱岗昆直接领导. 1961~1963年先后有程耿、李立民、黄永年、易章国和韦瑞干参加宇宙线研究, 成立了高空宇宙线组, 朱岗昆任组长, 原宇宙线组称为地面宇宙线组. 黄永年和李立民开始了星载闪烁谱仪的研制, 张宝襄、韦瑞干和易章国进行了盖革计数管 T7 火箭探测仪器的研制.

高空组成立后, 得到了赵九章、钱三强和张文裕等的关怀和指导, 张文裕还亲自来高空组指导工作.

1968年, 因学科研究和我国航天发展的需求, 由黄永年负责, 与赵天麟开展了星载半导体探测仪器的研制. 1970年, 陈福祥、柳运浩和陈康雯参加了该仪器的研制, 于1972年实现了样机试验, 并承担了“实践2号”和“东方红2号”的星载半导体探测仪器的研制项目. 至此, 宇宙线空间物理及其空间探测和研究在我国基本确定.

2 空间宇宙线的探测研究

2.1 宇宙线空间探测

2.1.1 火箭高空探测

1958年到1963年, 由张宝襄开展了计数管(单管)高能粒子探测器的工作, 主要在小火箭上测量宇宙线强度随大气高度的变化. 该探测器为“实践一号”粒子探测器的研制打下了基础.

1969年8月, 在“东五”火箭上用单管探测两种火箭不同高度的宇宙线强度随高度的变化.

2.1.2 实践一号卫星粒子探测器的研制

1970年5月, 开始研制我国第一颗科学卫星“实践一号”粒子探测器——计数管探测器. 1971年3月3日, “实践一号”由“长征一号”运载火箭发射成功, 探测到了近地点266 km, 远地点1826 km, 倾角 69.9° 空间的宇宙线和内辐射带粒子, 质子能量

大于16.4兆电子伏和电子能量大于0.88兆电子伏的总通量, 第一次取得了我国上空的带电粒子环境资料. 由于卫星只有实时遥测系统, 且无国外接受站, 只取得我国上空的探测资料.

2.1.3 实践二号卫星高能粒子探测器

为开展我国宇宙线空间物理和航天领域粒子辐射防护和环境预报, 早在1968年由黄永年、赵天麟经文献调研, 确定了星载半导体探测器方案, 并计算了测量能阈. 1970又有陈福祥、柳运浩和陈康文等人参加了本项目的研制工作.

70年代初, 另有一个半导体探测器组于1971年3月成立, 由胡友秋负责, 其早期成员有王作桂、余光华等7人. 1973年与上面半导体组合併.

1981年9月20日, “实践二号”发射成功, 该卫星上带有三个高能粒子探测器: 半导体质子方向探测器, 测量能量 ≥ 10 MeV 和 30 MeV 的质子; 电子方向探测器测量能量 ≥ 0.25 MeV, ≥ 0.5 MeV 和 ≥ 0.8 MeV 三个能挡的电子; 半导体质子半全向探测器测量能量 ≥ 60 MeV 的质子.

2.1.4 东方红二号高能粒子探测器

“东方红二号”A星(331), 1984年4月8日发射, “东方红二号”B星1986年2月1日发射, 在这二个通讯卫星上载有相同的二个半导体探测仪器: 半导体质子方向探测器, 测量能量 ≥ 10 MeV 和 ≥ 30 MeV 的质子; 半导体电子方向探测器, 测量能 ≥ 0.5 MeV 和 ≥ 1.0 MeV 的电子.

2.1.5 资源卫星上高能粒子探测

1976年起, 经反复论证和各级领导的重视, 1980年经中央批准由中国科学院负责研制, 资源卫星的研制工作正式列入国家任务. 资源卫星轨道近似于“风云一号”的轨道, 该卫星上载有星内高能粒子探测器(北京大学研制), 测量星内能量5~30 MeV 和 30~60 MeV 的质子通量; 测量能0.5~2 MeV 和 2~4 MeV 的星内电子通量, 为星内仪器的辐射防护和故障分析提供依据. 第一颗资源卫星与巴西共同研制, 于1999年10月发射, 到目前已发射二颗.

2.2 宇宙线地面观测^[1]

2.2.1 北京白家疃宇宙线台

该台是1957年作为我国参加国际地球物理年的观测研究项目而建立的, 最初建立时, 属中国科学院原子能所. 由张文裕倡导, 在肖健直接组织领导下创建的. 当时有小中子堆、 μ 介子望远镜和游离室三种国际地球物理年的标准仪器. 1960年初, 划归中

中国科学院地球物理研究所. 1984年,大中子堆在小牛坊建成并正式工作,小中子堆和 μ 介子望远镜于1985年初停止工作,只留下游离室进行观测工作,直止现在并继续进行.

2.2.2 北京小牛坊宇宙线台

1973年,为加强白家疃站工作,经五院批准,最后由国务院几位副总理过问,并在韩光亲自主持下,决定另选一个地方,建立一个现代化的宇宙线台,进口大型中子管的成套仪器,建立起了小牛坊台站.在当时七机部领导的支持下,在章公亮等的领导下,于1981年引进大型中子堆的成套设备,在1983年底建成,并于1984年初正式运行.至今一直为太阳耀斑和质子事件预报提供资料.

2.2.3 云南落雪宇宙线台

与北京白家疃台站一样,落雪台也是作为我国参加国际地球物理年的观测研究项目,1957年建立,1958年开始工作.观测仪器有小中子堆、 μ 介子望远镜.该台站位于北纬 27° ,东径 102° ,海拔高度3180 m.1964年初搬到距原址5 km的220高地,海拔高度为3200 m,1967年初在文革中停止工作.

2.2.4 广州观象台

该台的前身为武汉中南物理所广州宇宙线观象台.1963年,中南物理所为迎接1964国际太阳宁静年(IQSY),在宇宙线专家韦宝镠的建议下建立了广州宇宙线观测站.当时台站设备仅有G-M计数管 μ 介子望远镜和小中子堆.实验室最初建立在简易平房内,后经向中国科学院申请,在赵九章批准下,中国科学院拨了专款建了约250 m²的实验室和相关的办公用房,地点在中国科学院广州分院大院内(于1995年拆迁).1964年, μ 介子望远镜正常运行,每月资料用报表形式向中南物理所宇宙线研究室汇报.中子堆于1966年初运行.不久文革开始,仪器运行不正常,在1968年停止工作,1970年,中南物理所领导成员赵欣调到广州701所工作,任副所长,在他主持下,观测站的人员、设备、实验室并入广州701所(广州电子所).

1978年,经七机部和中国科学院批准,将701所管辖的广州宇宙线台划归七机部505所管理.1978年8月双方达成交接协议,广州宇宙线台站在原址恢复.台站恢复后,最初的工作是将原台站 μ 介子望远镜和小中子堆的记录系统小型化.1987年建大型闪烁晶体 μ 介子望远镜,将灵敏度较低的G-M管 μ 介子望远镜和小中子堆先后停止运行.大型闪烁晶体 μ 介子望远镜一直运行至今.记录资料每

月向北京汇报.

2.2.5 西藏羊八井观测站

该台站是中科院高能物理研究所与日本合作,于1988筹建,1990正式成立.测量银河宇宙线通过地球大气层在大气簇射中产生的次级粒子,反演到大气层以外的初级宇宙线的能量和方向,取得了一些重要结果.

2004年,唐云秋和卢红等人对羊八井宇宙线强度作了气压修正,表明气压不仅与气压有关,还与太阳活动强弱和数据采样的时间间隔有关.最后得到了单路和八道多重计数的气压修正系数^[2].

2.3 宇宙线的水下测量

1967年3月至1969年5月,根据当时六机部七院十所的研究任务的需求,我们测量和研究了宇宙线强度随海水深度的变化,以及舰船通过时对船下水宇宙线强度产生的变化大小,探索宇宙线变化作为水雷引信的可能性.按要求完成了水下宇宙线 μ 介子望远镜探测器一套,完成了宇宙线强度随海水深度变化的探测结果.进行了水下宇宙线强度变化作为水雷引信可能性的理论分析研究.该项研究由叶宗海负责,参加者有朱邦耀,赵天麟等8人.

3 宇宙线空间物理学的研究

3.1 宇宙线的日地空间传输研究

宇宙线空间物理学研究基本上在1965年后开始,在这个时期,主要集中在太阳宇宙线的行星际传播.1978年,章公亮提出了“用量纲分析法求解太阳宇宙线扩散对流方程”,得到了推广扩散方程的解和均匀无限介质中扩散对流方程的解^[3].1979年,章公亮提出了“太阳宇宙线传播方程的量纲分析解”,给出了耀斑瞬时点源条件下太阳宇宙线上升至极大的时间,及强度峰值随耀斑磁经度的分布^[4].

1979年,黄永年创建了扇形坐标系,研究了宇宙线在行星际螺旋场中的传播问题,克服了流行的传播理论存在的困难,合理得到了太阳宇宙线行星际传播的无穷介质解和行星际传播中粒子强度相对于空间和时间变化的各种不对称性^[5].1983年提出了高能太阳宇宙线的三维扩散模型^[6].1984年由木星电子的扇形坐标系理论,克服了流行的直角坐标系模型的困难,合理得到了木星电子27天周期调制和13.1年的会合周期调制^[7].1998年到2000年黄永年提出了三维空间均匀各向异性扩散的传播,求得了解析的太阳宇宙线行星际传播的格林函数^[8],并提出了太阳宇宙线的日冕横向传输模型,从而建

立了一个新的日地传输模型^[9,10],解释了同一太阳耀斑高能粒子事件在黄道面内不同径向距离和不同经度的粒子强度的时间变化,为太阳质子事件的强度、空间和时间的预报建立了定量理论。

2002年,秦刚等人研究了非线性效应在扩散过程中的作用^[11,12],在此基础上,和他人合作提出了一个关于横向扩散的非线性引导中心理论^[13],2007年,秦刚提出了一个非线性纵向扩散理论,该理论与前理论结合构成一个扩展的引导中心理论,与数值模拟符合得很好^[14]。

1982年到1983年,黄永年为了解释“天文三号”(HEAO-3 C-2)宇宙线领域的重要新发现:锰元素能谱比其它亚铁元素的能谱平坦得多的特征,与国外同行合作提出了用放射性同位素锰-54确定宇宙线年龄的设想^[15]。之后,黄永年独立进行定量研究,提出了包含高能裂变和放射性衰变等宇宙线的星际传输方程,导出了锰-54的相对含量与能量的关系,发现了银河宇宙线的锰-54,由此对锰元素的平坦能谱作出了全面定量的解释:由相对论关系,放射性同位素锰-54的能量越高其衰变寿命越长,在低能端,放射性锰-54衰变快了,从而合理地解释了过去为什么在银河宇宙线中没有发现锰-54,同时解释了“天文三号”观测到的锰元素平坦能谱特征。并给出了宇宙线年龄,从而破解了宇宙线领域长期悬而未决的锰-54之谜^[16,17]。

轻元素的起源是继 W. A. Fowler 等人提出“重元素产生于恒星演化过程而轻元素不能在其演化过程中产生”而获得 1983 年诺贝尔物理学奖后,遗留下来的重大意义的难题。1986年,黄永年继宇宙线锰-54的研究及成果,研究了星体爆发过程后,提出了相应的星际传播方程,导出了星体源的锂-7对碳的相对丰度和观测值符合。由此,提出了轻元素可产生于超新星和红巨星等爆发和宇宙大爆炸过程中,其中超新星爆发和宇宙大爆炸产生轻元素的预言已被超新星 1987A 和美国 2000 年的观测结果得到验证^[18]。

1983年,黄永年和程栋元及章公亮合作,提出了银河宇宙线在星际介质中的传播——路径长度、居留时间和寿命,还提出了银河宇宙线在银河系中的逃逸和生存^[19]。

程栋元和吴寄萍,利用 1967~1972 年太阳质子事件资料、相应的太阳耀斑和射电资料进行了统计分析,用二次曲线进行拟合,求得了时间与耀斑日冕经度和耀斑相对于过地球的行星际磁力或经度的相

关统计关系,并利用对数拟合关系,求得了质子事件强度与射电参量的相关统计结果^[20]。

1998年,黄永年和王志丹,利用 1966~1998 年间的太阳耀斑以及相应的质子事件资料,分析研究了质子事件到达地球空间的时间和极大时间与耀斑经度位置的统计关系。结果表明当耀斑位置位于经过地球的行星际大尺度磁场力线足点位置附近时,上述两种时间过程最短。这个结果支持了太阳宇宙线经日冕传输并向行星际空间传输的二阶日冕传输模型^[21]。

太阳宇宙线的日地传输包括日冕传输和行星际传输二个过程。之前国际宇宙线界采用了点源条件下的简单扩散方程解,没有严格的二步日冕传输解。2001年,黄永年和王世金考虑了产生太阳宇宙线的黑子群和太阳耀斑过程,提出了观测上的日冕传输快传播过程是与磁多极性黑子的湮没有关,而慢传播过程取决于日冕中的磁不规则性,以及传输的演化是与太阳耀斑过程有关。在此基础上,提出了二过程日冕传输的数字物理方程以及初始和边界条件,预言结果跟主要观测特征相符合^[22]。

3.2 宇宙线强度变化与 CME 事件

2003年到2004年,乐贵明等人利用地球南北极尖区位置的 McMurdo 和 Thule 台站以及广州宇宙线台站资料,利用宇宙线强度的南北不对称性来判断 CME(日冕物质抛射)到达地球磁层顶的方向。当运动方向偏向地球一侧的 CME 引起的磁暴比垂直磁层顶的 CME 引起的磁暴要弱^[23,24]。2005年,乐贵明和韩延本根据 CME 到达地磁层时引起宇宙线强度的突然下降,通过小波分析方法确定了宇宙线强度的突变时刻,并判断到达磁层顶的时刻,从而可得 CME 在磁层顶的结构^[25]。

2007年,乐贵明等人研究了地磁层内太阳高能粒子强度,表明它不仅与行星际的太阳高能粒子强度有关,而且还与行星际激波的速度有关^[26]。

3.3 宇宙线源物质与加速过程

黄永年推导了用以计算宇宙线的长寿命同位素锰-54的半寿命和相对于稳定锰同位素的含量的方程,采用漏盒模型和指数型路径分布,作了详细计算,解释了 HEAO-3 测得的宇宙线锰相对铁的相对含量的资料,得出锰-54产生于初级宇宙线在星际传播过程中和星际介质的高能核碰撞的产物^[16,17],也得出了同位素⁷Li(锂-7)等轻元素不完全是初级宇宙线和星际介质相互作用的裂变产物,也有宇宙线的源物质^[18]。

太阳宇宙线的源物质是起源中的重要问题,黄永年利用太阳高能粒子重离子平均丰度过量的资料,计算得到太阳高能粒子源物质的温度.由此,提出了太阳宇宙线源物质的新模式—色球层模式,得出太阳宇宙线的源和加速区通常不位于同一个区域,进而提出源物质是通过太阳黑子的冻结型无力场从高能球层输送到活动区的机制,从而形成耀斑前加速区内重离子丰度大于耀斑后宇宙线中重元素丰度的过量^[27].

太阳高能粒子的电荷态是怎么形成的,这是起源中另一个重要问题,陈贵福和黄永年讨论了太阳宇宙线成分的高电离态的产生,提出了计算平均有效电荷的公式,其结果与观测资料很好地符合^[28].

在脉冲耀斑中太阳高能电子的动量谱是斜率不同的双幂律谱,而在缓变耀斑中是单幂律动量谱.这两种绝然不同的能谱包含着太阳耀斑中粒子的加速和其它重要物理过程,是宇宙线领域中重要前沿课题之一.黄永年和汪学毅探讨了高能电子通过日冕捕获区的库仑损失、韧致辐射和同步辐射等物理过程,首次研究了日冕等离子体尾场对太阳宇宙线电子的加速及其能谱的形成.所得结果和观测谱很好地符合,从而较合理地阐明了脉冲耀斑和缓变耀斑中太阳高能电子谱的结构^[29,30].

1990年,黄永年等人提出了一个描述太阳脉冲耀斑中耀斑区的上升过程和磁重联过程的物理图象;给出了脉冲太阳耀斑的加速中,硬X射线和微波辐射之间的时空关系,解释了一些难于解释的观测特性.由此,提出在磁通量管中,快耀斑电子从耀斑区运动到硬X射线的足点产生的等离子体尾场加速,可以产生硬X射线尖峰的新解释^[31].

太阳电子事件分高铁(Fe)和贫铁两类事件,我们对ISEE-3的51个太阳电子事件资料,进行系统分析,通过Saha平衡模型计算了两类事件的平衡温度,提出这两类事件的粒子源:高Fe事件的粒子源位于高能球层;贫Fe事件粒子源位于色球层和日冕间的过渡区^[32].

2006年,乐贵明等人^[23]基于地面中子堆、WIND卫星以及X射线和射电资料,研究了2005年1月20日太阳高能粒子事件.结果表明,在这个事件中,太阳高能粒子的加速主要是太阳耀斑过程,行星际激波对能量低于130 MeV的太阳高能质子起作用,而对相对论质子只在耀斑中得到加速.

李川和唐玉华等人^[34]研究了二个太阳大耀斑和太阳高能粒子的时间演化过程,发现耀斑中磁重

联感应电场与硬X射线、 γ 射线时间演化过程有很好的相关性.由此,他们认为太阳高能粒子事件存在两种成分:脉冲成分和渐近成分;前者的主要贡献在于由磁重联的感应电场得到加速的相对论高能粒子,后者主要来自CME(日冕物质抛射)的启动激波得到加速的高能粒子.

3.4 宇宙线的地球物理效应

1992年,叶宗海和孙小青利用11个地面超中子堆资料,分析了6个不同地磁暴期间由于赤道环电流增加引起的暴时增加,表明暴时增加与地磁暴变化、地磁截止刚度和地方时等相关^[35].

叶宗海和薛顺生统计分析了1960至1982年间1级以上的太阳质子事件与四个不同地理纬度大气臭氧含量的相互关系.结果表明,只有3、4级的大事件才对臭氧含量产生扰动且有明显的纬度效应;在极区,1级以上质子事件对臭氧含量有影响,且随质子事件级别的增高其臭氧含量的扰动也加大.通常,太阳质子事件的当天,臭氧含量开始下降,扰动持续数天;冬天太阳质子事件对臭氧的扰动大于夏天的扰动^[36].叶宗海等人统计分析了宇宙线强度变化和磁暴的关系,对急始磁暴按K指数和持续时间分为5类,宇宙线Forbush下降幅度随磁暴的增强而加大,下降速度随磁暴的增强而加快,扰动的持续时间随磁暴的减弱而增加^[37].

薛顺生等人^[38]统计分析了1971~1975年间宇宙线北南各向异性及相关的太阳风和行星际磁场在卡林顿自转周中的变化,即共转变化.结果表明宇宙线北南各向异性与行星际磁场分量 B_x 和 B_y 有很好的相关,利用地面观测的宇宙线各向异性有可能推求行星际磁场的极性.

1991年,宗秋刚和叶宗海计算了不同级别,不同能谱的太阳宇宙线事件在极区产生的电离有明显差别,电子产率的分布出现双峰;前峰由太阳质子产生,位于60 km;后峰主要是 $Z \geq 2$ 的重粒子产生,位于85 km里左右^[34].

4 结 语

本文介绍了上世纪50年代以来,我国在宇宙线空间物理学领域所取得的主要探测和理论研究的成果.由于该学科的广泛交叉性和对了解交叉领域研究的局限性以及文章篇幅的限制,有些相关研究成果及高能天体物理、地震、太阳物理、天文、空间物理、气象物理等系统的一些专家、学者,在太阳活动和太阳高能质子事件与灾害性天气、地震、中长期气

候影响、人类疾病特别是流行性感胃等方面取得的研究成果,本文没有介绍。

参 考 文 献 (References):

- [1] 中国科学院空间科学与应用研究中心史,2003,1:152~154.
- [2] 唐云秋,卢红. 空间科学学报 2004,24(3):219~225.
- [3] 章公亮. 太阳宇宙线的传播效应[J]. 高能物理与核物理,1978,2(5):385~393.
- [4] 章公亮. 太阳宇宙线的传播方程的量纲分析解[J]. 中国科学,1979,(8):818~826.
- [5] 黄永年. 关于太阳宇宙线传播问题的研究[J]. 地球物理学报,1979,22(2):97~108.
- [6] Huang Y N. The Three-Dimensional Diffusion of High-Energy Solar Cosmic Rays[J]. 18th International Cosmic Ray Conference,1983,4, sp5 1-7: 135~138.
- [7] 黄永年. 木星电子在行星际空间的传播[J]. 空间科学学报,1984,4(4):269~276.
- [8] Huang Y N, Wang Z D, Wang Y L. Propagation modol of hish-energy solar Cosmic rays in interplanetary space and Green function[J]. SCIENCE IN CHINA (Series A), 1998, 41(11): 1197~1205.
- [9] Huang Y N, Wang S J. A new modoe for solar-terrestrial Propagation of solar Cosmic rays[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5):615~620.
- [10] 黄永年,王志丹,汪学毅. 太阳宇宙线的行星际扰动[J]. 地球物理学报,1998,41(11):1197~1205.
- [11] Qin G, Matthaeus W H, Bieber J W. Subdiffusive transport of changed particles perpendicular to the large scale magnetic field[J]. Geophys. Res. Lett., 2002,29(4),7~1.
- [12] Qin G, Matthaeus W H, Bieber J W. Perpendicular transport of charged particles in composite model turbulence: recovery of diffusion[J]. Astrophys. J., 2002,578,117.
- [13] Matthaeus W H, Qin Q, Bieber J W, Zank G P. Nonlinear collisionless perpendicular diffusion of charged particles[J]. Astrophys. J., 2003,590,53.
- [14] Qin Q. Nonlinear parallel diffasion of charged particles: extension to the nonlinear quiding centecr theory[J]. Astrophys. J. 2007, 656(1): 217~221.
- [15] Lund N, Rasmussen I L, Rotenberg M, Huang Y, Goret P, Juliusson E. The age of cosmic rays in the galaxy as determined from the decay of the manganese 54 isotope[J]. 17th International Cosmic Ray Conference, 1981, 2: 26~29.
- [16] 黄永年. 确定宇宙线年龄的方法[J]. 空间科学学报,1982,2(3):224~230.
- [17] 黄永年. HEAO-3 C-2 宇宙线实验资料确定的锰-54 和相对论宇宙线的寿命[J]. 中国科学(A 辑),1983,5:479~484.
- [18] Huang Y N. Origin of isotope Lithium-7 in galactic cosmic rays, 21st Inter[J]. Cosmic Ray Conf., 1990,3 (OG5. 2-9): 47~50.
- [19] 黄永年,程栋元,章公亮. 宇宙线在星际介质中的传播——路径长度,居留时间和寿命[J]. 空间科学学报,1983,3(2):157~161.
- [20] 程栋元,吴寄萍. 质子事件上升时间及峰值强度的统计研究[J]. 空间科学学报,1981,1(11):52~56.
- [21] 黄永年,王志丹. 影响地球环境的太阳质子事件的时间过程[J]. 空间科学学报,1998,18(1):81~85.
- [22] Huang Y N, Wang S J. Two-step coronal transport of solar flare particles from magnetic multipolarity sources in a flare region[J]. CHIN. Physics letter, 2001, 18(2):304~306.
- [23] 乐贵明,叶宗海,等. 银河宇宙线对 1991 年 3 月日日冕物质抛射的监测[J]. 地球物理学报,2003,46(2):152~155.
- [24] 乐贵明,叶宗海. 用银河宇宙线判定几个引起特大磁暴 CME 的运动方向[J]. 空间科学学报,2004,24(1):15~21.
- [25] 乐贵明,韩延本. 用银河宇宙线数据分析 1991 年 3 月 24 日 CME 的结构[J]. 物理学报,2005,54(1):467~470.
- [26] Le G M, Han Y B, Zhang Y J. A Comparative analysis on two solar proton events[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 47~52.
- [27] 黄永年. 太阳宇宙线源物质的高色球层模式和重离子丰度过程机制的探讨[J]. 空间科学学报,1987,7(3):198~202.
- [28] 陈贵福,黄永年. 太阳宇宙线的有效电磁及计算[J]. 空间科学学报,1989,9(1):45~51.
- [29] 汪学毅,黄永年. 日冕背景下的等离子体尾场效应[J]. 空间科学学报,1994,14(4):260~268.
- [30] Huang Y H, Wang X Y. The Plasma wave Field Excited by solar Energetic Flare Electrons Through the Corona, 24th Inter[J]. Cosmic Ra Confer., 1995,4:1~4.
- [31] Huang Y N, Chen G F, Zhen H S. Electron Acceleration Processes In Flare Impulsive Phase, 21st Inter[J]. Cosmic Ray Conf., 1990, 5 (SH1. 2~3):40~43.
- [32] 汪学毅,黄永年. 太阳电子事件粒子源区的位置[J]. 空间科学学报,1996,16(2):85~91.
- [33] Le G M, Tang Y H, Han Y B. Solar Energetic Particle Event of 2005 January 20:Release Times and Possible Sources [J]. Chin. J. Astron, Astrophys,2006,6(6):751~758.
- [34] Li C, Tang Y H, Dai Y, Fang C, Astronomy and Astrophysics[J]. 2007,461:1115~1119.
- [35] 叶宗海,孙小青. 宇宙线暴时增加及其特征[J]. 空间科学学报,1992,12(4):270~278.
- [36] 叶宗海,薛顺生. 太阳质子事件与大气臭氧扰动[J]. 空间科学学报,1987,7(1):65~72.
- [37] 叶宗海,卢钦棠,宗秋刚. 宇宙线强度变化与磁扰 K 类型[J]. 空间科学学报,1987,7(4):306~313.
- [38] 薛顺生,章公亮,肖少瑜. 宇宙线北南各向异性的共转变化[J]. 空间科学学报,1989,9(2):155~160.
- [39] 宗秋刚,叶宗海. 太阳宇宙线在电离层 D 层中的电离[J]. 空间科学学报,1991,11(3):201~207.