

太阳质子事件预报研究进展

张 勤

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

摘 要

就太阳质子事件预报研究的重要意义,产生太阳质子事件的太阳活动区的一般特征,质子耀斑的辐射特征,质子事件几个重要参数预报方法简述了目前的研究进展。还给出了当前为满足用户需要改进预报应着重研究的方面。

关键词 太阳: 活动 — 太阳: 质子事件 — 预报

分类号: P182.9

1 太阳质子事件预报的意义

Forbush^[1] 于 1942 年 3 月 7 日首次在地面上检测到太阳粒子事件之后, 经过 50 多年的研究和探索, 人们逐步认识到太阳质子事件主要是太阳耀斑产生的。太阳耀斑及其它形式的太阳活动和爆发过程(如日冕物质抛射等)能够加速荷电粒子到高能, 这些高能粒子在行星际空间传播, 会影响日地空间环境。行星际空间扰动产生的激波又可加速正在传播中的荷电粒子。太阳质子事件是引起日地系统扰动的极重要的源, 它能造成近地空间的灾害性扰动, 因而受到广泛的关注。

传播到地球的太阳质子首先影响地球极区电离层, 引起极盖吸收。这时甚低频信号的振幅和位相会由于极区电离层电子密度的增加而改变, 从而影响通讯和导航。粒子能量越高, 扰动便越强, 有时点对点高频极区通讯甚至会完全中断, 导致极盖致盲。

高能质子还威胁着地球磁层和上大气层外的宇航员和宇航飞行器的安全。它能使卫星上的电子元器件失效, 这种辐照效应有时是暂时的, 使卫星运行异常; 有时是永久性的, 可使整个卫星完全丢失, 一次灾害性事件即可造成数亿美元的巨大损失。过去 10yr 中 TDRS-1 飞船的姿态控制系统曾有多次异常, 特别是 1989 年和 1991 年大质子事件期间异常次数大大增加^[2], 可能就与高能质子事件有关。它还能使卫星上的太阳能电池性能退化。日本电视卫星 BS-3a 在 1994 年 2 月的质子事件期间, 出现了信号中断; 1991 年 3 月的质子事件期间, 丧失了电力输出。GOES-6 和 GOES-7 卫星的电流输出在 1991 年 3 月质子事件期间也降低

了约 0.2~0.3A, 相当于卫星在地球同步轨道上被辐照了 3yr 时间^[2]。据估计^[3], 1989 年 3、8 和 10 月 3 次大的质子事件对地球防护层外的人员在 2g/cm² 屏蔽层后的造血机体吸收辐射剂量为 1.39Sv, 而宇航员每年剂量上限推荐值仅为 0.50Sv。此外, 它还对高纬飞行人员的健康造成损害, 1989 年 9 月底的质子事件期间, 对飞机飞行人员的辐照就相当于一次 X 射线胸透的剂量。大气臭氧在 1972 年 8 月和 1989 年 10 月的强质子事件后有所减少^[4,5]。

研究表明, 高能电子流量的增强也与质子事件有关。而高能电子增强可在卫星绝缘材料中沉积过量电子, 引起脉冲放电, 导致关闭飞船或者使推进器点火, 或引起其它类似的扰动过程^[6]。这种“深电介质充电”导致 1994 年 1 月加拿大的 Anik 卫星和 1994 年 2 月 22 日日本的 BS-3a 卫星异常。

随着空间技术的飞速发展, 质子事件造成的损失会更加严重和广泛, 因此, 各方面都十分关注太阳质子事件的预报。如能准确预报可能造成的危害, 人们便可采取必要的防护措施, 对电子元器件进行抗辐射加固, 确保卫星和载人航天器的安全飞行; 还可为采取预防和应变措施赢得宝贵时间, 尽可能降低经济损失; 同时也为航天器的故障分析和采取防护措施及宇航员的安全防护提供科学依据。

2 质子耀斑的观测特征

大量观测研究表明, 质子耀斑及产生质子耀斑的活动区都具有一定特征, 这些特征是质子事件预报的重要预报因子。

2.1 质子耀斑的日面分布特征

周树荣^[7]根据 1954 年 6 月~1992 年 12 月近四个太阳活动周的观测资料, 得到质子耀斑的日面分布呈现出显著的群聚特征, 在经度和纬度上都呈现出成群集中趋势, 质子耀斑强度越大, 集中趋势越加明显。他引入了“质子活动复合体”概念, 认为在一相当长的时期内, 老质子耀斑活动区的基底有一经度漂移的相继不断出现的活动区, 不断地爆发质子耀斑, 新老活动区便可认为是同一个质子活动复合体。在太阳较差自转的作用下, 按黑子带自转会合速度公式^[8], 计算基源随时间的经度漂移量, 与其后发生的质子耀斑在时间和位置上作比较, 表明^[9]质子耀斑活动区的再现与计算结果基本相符, 定期复合的长周期为 8~11.6yr, 短周期为 1~2.6yr。显然, 关注这些经纬度带活动区的出现, 将有助于质子耀斑的预报。

周爱华等人^[10]的统计表明, 质子耀斑在西经 30°~66° 间隔内特别多, 愈近日面东边缘, 质子耀斑数愈少; 高能质子极大时间相对软 X 射线发射的极大时间的时延也呈向东单调递增趋势, 亦即质子流传播速度有西快东慢的特点。

王家龙^[11]统计了 1976~1991 年 ≥ 1 级质子事件耀斑, 发现太阳质子耀斑相对于太阳光球大尺度平均视向磁场的中性线的分布是不对称的, 73% 的质子耀斑位于中性线的日面中心点的一侧, 且质子耀斑数目的平滑峰值对应于日面中心点和耀斑位置点对日球中心张角为 25° 至 45° 的地方。说明耀斑发射的质子流的传播可能受到太阳光球大尺度磁场的影响或调制。事实上, Reinhard 等人^[12]也证明, 太阳质子耀斑的质子在传播中会受到太阳大尺度磁场结构的影响。Pereyaslova 等人^[21]也认为质子耀斑预报参数应考虑光球磁场结构及耀斑和日地磁联线的足点位置以及日冕粒子分布模型, 便可提前数小时预报太阳质子事件的谱特征和质子流量的时间轮廓, 且还具有较满意的精度。

2.2 质子耀斑活动区的形态特征

周树荣等人^[15]分析了22周9个强质子耀斑活动区的形态。结果表明,单个团状结构活动区,即在同一黑子半影中紧锁着多个异极性本影核的 δ 磁结构,一旦它们紧锁在一起,就绝不会分离^[16]。这种黑子群的日面跨度大于 10° ,面积大于1000黑子面积单位。另外,这些黑子群都有旋转运动,在质子耀斑爆发前1~2d内,旋转角速度最大,或旋转方向发生逆转时会产生质子耀斑。大角速度转动可以导致黑子间不断挤压和碰撞,产生磁力线的扭曲和较大的剪切,贮存建立质子耀斑的能量。耀斑爆发后,旋转明显减速。

Ivanov^[17]曾计算过1966~1979年间所有大于100黑子面积单位的黑子群的简洁指数 C (黑子群最大黑子面积与该群总面积之比)和黑子群双极轴与赤道的交角即磁倾角 ϕ 。发现所有质子耀斑活动区都有 $|\phi| \geq 15^\circ$,其 C 值随 ϕ 的增加而增加。80%以上的质子耀斑活动区满足 $|\phi| \geq 45^\circ, C \geq 0.6$ 。

利用以上形态特征可提前1~2d预报质子耀斑。

2.3 伴随质子耀斑的软 X 射线爆发

王家龙^[18]统计了1976~1991年间120个质子耀斑,发现相应的软 X 射线爆发多为 X 级,占60%,M级约占40%。峰值流量大于1000PFU(质子 \cdot cm $^{-2}$ \cdot s $^{-1}$ \cdot sr $^{-1}$)的强质子耀斑全都是 X 级的。说明色球亮耀斑和强软 X 射线爆发与粒子加速密切相关。

周树荣等人^[19]统计了1979年4月~1991年10月间的二级质子事件,得到其与相应软 X 射线爆发峰值强度 S_X 的相关系数为0.72,质子事件峰值流量 P 与软 X 射线爆发的能通量 $E_X = 0.5T_X S_X$ (T_X 为软 X 射线爆发的持续时间)的相关系数为0.79,相关都很显著。 P 与相应软 X 射线爆发的强度呈正指数关系,这样质子事件的峰值流量 P 可由相应的软 X 射线爆发的峰值强度 S_X 和能通量 E_X 估计。

Kuck等人^[20]发现,质子事件峰值流量与1~8Å的积分流量相关最好。1~8Å和0.5~4Å积分能量的幂律和可进一步改善这种相关。Pereyaslova等人^[21]分析了质子事件峰值流量和相应1~8Å X 射线爆发最大强度间的关系,由1965年到1977年观测到的质子事件,并考虑到由不同卫星观测而推出的经度衰减函数,磁反转线和耀斑发生处的经度差,给出了质子事件峰值流量的时间 T_m 与相应1~8Å软 X 射线爆发最大强度的回归关系。并对1978~1982年间的质子事件进行质子事件时间特性(开始时间、极大时间)和谱特性(谱指数)作预报检验。结果表明,质子事件的积分流量误差不超过15%,看来预报还是令人满意的。

研究还表明,U形射电爆发的概率与 X 射线积分流量的相关极高,因此早先提出的 U 形射电爆发是质子事件预报相当好的指标的看法得到了进一步证实。Gentile等人^[22]调查了利用强软 X 射线暴衰减 e 倍的时间来估计相应质子事件的可能性,指出脉冲式的 X 级软 X 射线爆发一般与质子事件无关。

2.4 伴随质子耀斑的硬 X 射线爆发

质子耀斑的硬 X 射线是耀斑高能电子与太阳大气相互作用的韧致辐射产生的,能更直接反映高能粒子加速方面的信息。统计表明^[18],质子耀斑硬 X 射线爆发在耀斑脉冲相的计数率的变化率的对数与爆发的最高的光子能量呈线性关系,而非质子耀斑的硬 X 射线爆发无此关系。

林华安等人^[23]发现质子耀斑的硬 X 射线辐射的峰值流量和积分流量较大,持续时间和上升时间较长,光子能量较高,能谱较硬,谱指数小于4,高能时延一般都大于10s。显然,

这些特征可作为质子事件的警报判据。据此,王世金等人^[24]分析了1980年2月~1986年2月SMM卫星的硬X射线资料,发现质子耀斑的硬X射线参数(即峰值流量、积分流量、上升时间、持续时间和出现计数的最高能道数)间有较好的对数线性关系,而质子耀斑与非质子耀斑的硬X射线参数分布明显不同。他们采用模糊聚类方法,对这一期间的所有硬X射线爆发试预报。结果表明,报准率为88.5%,虚报率($1 - \text{预报正确数} / \text{预报事件发生数}$)为53.1%,漏报率为11.5%。这提供了一种基于硬X射线辐射特征的质子事件警报方法。

周爱华^[25]发现硬X射线爆发的寿命 $T_d(\text{s})$ 、峰值计数率 $F_X(\text{c/s})$ 和爆发期间发射的总光子数 c 的对数值与质子积分流量 F_p (归一到相应耀斑位置)的对数值之间均具有特别显著的线性关系。可将这种关系用于质子积分流量的警报中。

2.5 伴随质子耀斑的微波爆发

Mel'nikov等人^[26]调查了微波爆发与对应的质子事件间的关系,认为微波爆发的有效持续时间 T_μ 和与射电源磁场密切相关的谱极大频率 f_m 在预报质子事件流量的大小和谱参数中具有重要意义,米波分量的强度在用射电辐射估计质子流量时极其重要,因为米波辐射的存在表明了粒子逃逸进日冕和行星际空间的有利条件,而质子和电子逃逸进行星际空间的逃逸条件是相同的,与被加速的粒子类型无关,从而可用射电爆发特征预报质子峰值流量。

周树荣等人^[19]在分析中也得到质子事件峰值流量的对数 $\log P$ 与相应射电微波爆发的峰值流量的对数 $\log S_f$ 呈正线性关系。对15.4 GHz和8.8 GHz辐射的相关系数分别为0.80和0.78。还得到质子事件与米波IV型爆发对应得最好,其次是II型爆发。大于或等于2级的质子事件,几乎都有IV型爆发与之对应。此外,质子事件的发生与中等持续时间(10~40min)较强的脉冲型射电爆发有关,与长寿命(>60min)缓变型爆发和高强度的复杂型射电爆发有关,持续时间越长,相应质子事件的峰值流量越高,即质子事件峰值流量与相应射电爆发的强度呈正的指数关系。

3 质子事件几个重要参数的预报

检测到的质子事件相对较少,因此在实践上目前有效的预报都是提前1~3d的短期预报及警报,而且主要决定于产生质子事件的质子耀斑的预报。

3.1 质子事件峰值流量

在应用中,需要预报单个质子事件的峰值流量,用以估计事件的效应^[27],航天器设计也需要单个质子事件峰值流量的数据。尽管有许多统计分析,然而目前还没有可接受的模型来预报质子事件的峰值流量。

Smart等人^[28]给出了峰值流量的分布,他们分析了至少三个太阳周中的大于或等于10MeV太阳质子事件。发现这些质子事件分布由两个不同的群体组成,一是最经常发生的低流量群体,另一是峰值流量大于1000PFU的群体。大流量群体流量分布明显下降,其斜率增大表明,加速度过程有一定范围,因此大流量事件是很少的。用此分布可以估计给定年可能发生的特定峰值流量的质子事件数,显然,它随太阳周而变化。

3.2 太阳质子事件的延迟时间

如果质子事件开始时间能精确预测,便可对系统某些潜在危险进行战略缓解。

除上述的日面西半球耀斑产生的质子事件有较短的延迟时间,东半球的事件延迟时间较

长外, 研究还表明^[29], 耀斑发生位置和连到地球的磁力线的足点间如有一中等大小的冕洞, 所对应的质子事件就有较长的延迟时间。中等大小冕洞的存在可使日面东边缘附近耀斑相应质子事件延迟大约 10~15h, 并使其峰值流量减小。看来, 冕洞影响着质子的传播和加速, 延迟时间的预报应考虑冕洞的分布。

黄永年等人^[30]研究了质子事件的时间过程。认为耀斑高能粒子先在日冕内扩散、逃逸和漂移, 然后沿行星际大尺度磁场传播, 而高能粒子到达地球的时间同耀斑发生经度间的关系主要受日冕传播过程影响。他们用最小二乘法拟合分析了 1966 年以来质子事件的到达时间、极大时间与耀斑经度之间的统计关系, 完全证实了耀斑高能粒子的“二阶段传播模型”。研究还表明, 当与质子事件相应的耀斑位置与经过地球的大尺度磁场磁力线足点位置越接近, 则从耀斑爆发到影响地球空间环境所需的时间以及质子强度上升时间越短; 能量越高, 其传播时间和到达极大时间越短。他们^[31]还从理论上研究了质子在日冕中横向传播的特性, 提出了具有扩散和逃逸过程的日冕分布粒子源模型, 用以求其行星际传播有源方程的解, 利用位于不同经度、不同径向距离的三颗卫星对 1978 年 9 月 23 日质子事件的观测结果作了检验。结果表明, 质子事件的强度随时间变化的理论结果与观测一致。质子流量随经度的分布表明, 在地球轨道, 质子事件扰动的主要区域在离耀斑位置的角距离 100° 之内。质子事件的行星际传播基本上是沿行星际大尺度螺旋场进行, 近地空间的观测特征主要由日冕过程决定。

3.3 质子事件的积分流量

设计航天飞行器需要估计 1yr 或数 yr 质子事件总的积分流量。积分流量是流量增加期间的累积质子流量, 可以用积分流量来估计积分剂量所造成的危险^[32]、宇航员所受到的辐照剂量, 从而评估空间辐射环境。30 多年的观测表明, 衡量空间粒子环境剧烈程度的参量是太阳周的位相, 而不是黑子数。太阳周可分为活动期和宁静期, 活动期由太阳周极大前 2yr 持续到极大后 4yr, 因而仅需考虑这 7yr 间的水平。

Feynman 等人^[32]用 1963~1991 年 4 月的观测资料研制了质子积分流量预报模型 JPL-1991。该模型首先规定每天积分流量的阈值作为质子“事件”, 然后从超过阈值的第一天开始直到低于阈值的那天将每天积分流量累加起来, 按事件积分流量排列。对每个事件, 标绘出积分流量大小与数据组中小于该积分流量的事件的百分比, 显然, 总积分流量由较大事件来决定。因此, 重要的是要准确预报大事件。在实际应用中, 可对大于或等于 10MeV 事件的各种不同时间长度标绘出超过给定积分流量的概率, 由标绘图便可查得相应的概率和积分流量的预报值。该模型虽稳定, 但不能预报其它重要参量如质子事件峰值流量等。

3.4 质子事件有无的预报

质子事件有无的预报是最基本的预报。90 年代初, 有人认为^[3], 要有效地执行空间飞行任务, 对大于或等于 10MeV 大于 $107 \text{ 质子} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 积分流量的质子事件有无的预报要求达到 90% 的准确率。

空间环境预报中心^[3]提出了一种当已观测到特定耀斑后进行预报的方法。通常, 质子流量上升到峰值需要几十 min 到 20h 以上, 然后再下降到本底水平。利用质子事件延迟和上述时间, 执行任务的宇航员可以采取种种防护措施(进入屏蔽或防护车辆中, 使用化学防护等)^[33], 以降低辐射的伤害。显然, 研制这种警报系统是必要的, 对 1989 年的质子事件作警报检验, 成功率为 80%。

该模型包括两部分。它使用耀斑或其它高能事件产生的 X 射线辐射通量与地球附近荷电

粒子流量间相互关系的变化, 用 II 或 IV 型射电爆发代替通过日冕的物质抛射, 得到高能粒子数的估计。然后由高能粒子通过日冕和行星际到达地球的传播信息, 得到地球附近预计的粒子流量最大值随耀斑位置和行星际传播条件的变化。某些参数取自 20~21 周实测资料。

在实施中, 使用了 GOES 卫星的软 X 射线峰值流量和积分流量、耀斑位置、II 或 IV 型射电暴、米波和分米波的爆发强度以及地磁 A 指数等资料。模型给出大于或等于 10 MeV 质子事件的概率、预警报峰值流量、质子事件开始时间以及达到峰值流量的上升时间。实践表明, 该模型未考虑行星际激波的影响, 因此对峰值流量、延迟时间的预警报都不太理想。如将太阳风的直接观测代替目前推导太阳风的方法, 加上日冕的 X 射线像巡视, 更全面地了解日冕物质抛射、日冕结构以及激波的传播和影响, 它的预警能力或许能改善。

张勤等人^[34]根据异常磁结构黑子群的快速变化特征, 选取活动区磁场型别、反极群、黑子群面积在一天中的变化率、磁倾角以及黑子群类型作预报因子, 用模糊聚类方法探讨质子耀斑提前 1~3d 的预报。对 1984 年上半年和 1985 年 1~5 月两个时段作逐日检验, 结果表明, 预报准确率分别为 86% 和 100%。这种方法预报质子事件的级别下限也是有效的。但此方法仅由活动区的光学观测特征来预报, 必然会发生虚报, 同时也不能预报发生在日面东边缘附近的质子耀斑。

4 结 语

自 1955 年以来, 人们在地球上已观测到了 316 个太阳质子事件, 包括 1972 年 8 月 4 日的质子事件, 峰值流量高达 86×10^3 PFU 是数十年观测到的最大质子事件。这些观测资料是质子事件预报研究的重要基础。随着航天事业的高速发展, 高科技的进步, 日地空间环境的扰动及灾害性空间天气的预报显得越来越重要。利用现在积累的观测经验, 根据多方面的观测资料, 质子事件是可以预报的, 有的预报检验表明^[24,34,37], 其事件有无的预报报准率可达 85% 以上, 但要想进一步提高, 满足用户需要, 还需进一步努力, 改进预报。

为改进预报, 基本的物理研究显得更加重要, 质子事件与行星际激波到达地球的关系, 耀斑位置与质子事件峰值流量、积分流量的关系, 以及日冕物质抛射在质子事件中起的作用虽有一些统计结果, 但对物理机制的认识还远远不够, 虽对质子在近太阳空间和行星际空间的传播过程有所重视, 但对物理过程的了解也实在太肤浅了。致使太阳质子耀斑短期预报自 70 年代后期到现在, 似乎没有取得重大进展^[35]。

此外, 还需要研究为什么有的太阳周会产生更多的质子事件, 最可能产生质子耀斑的太阳活动区的特征及短于 1d 的更高时间分辨率的演化也有必要深入研究, 文献^[35]中提出的太阳活动区新分类研究可能是一种有助于实际预报工作改进的好建议, 进一步研究可能导致航天飞行器故障的各种原因, 并提供产生这些原因的准确预报是我们努力的方向^[36]。

在预报方法上, 由于质子事件是相对稀少的事件, 且还具有高度群聚性, 在我们还不太清楚太阳质子事件形成的机理, 更不清楚质子流在日冕和行星际空间传播的物理过程的今天, 采用聚类分析、模糊聚类^[23,34]、人工神经网络^[37]乃至混沌神经网络方法进行识别预报无疑是适宜的。筛选更好的预报因子, 并注重预报方法的实践检验是目前值得注意的另一方面。总之, 它依赖于太阳物理、空间物理和地球物理等多学科共同努力。

参 考 文 献

- 1 Forbush S E. *Phys. Rev.*, 1946, 70: 771
- 2 Shea M A, Smart D F. In: Heckman G *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-V, Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, Hitachinaka: CRL, 1997. 441*
- 3 Heckman G R, Kunches J M, Allen J H. *Adv. Space Res.*, 1992, 12(2): 313
- 4 Crutzen P J, Isaksen I S A, Reid G C. *Science*, 1975, 189: 457
- 5 Reid G C, Solomon S, Garcia R R. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, 18: 1019
- 6 Violet M D, Frederickson A R. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, 40: 1512
- 7 周树荣. *天文学报*, 1994, 35: 333
- 8 Allen C W 编. *物理量和天体物理量*. 杨建译. 上海: 上海人民出版社, 1976, 223
- 9 周树荣, 吴铭蟾, 倪祥斌. *空间科学学报*, 1996, 16: 293
- 10 周爱华, 王荣川. *紫金山天文台台刊*, 1993, 12: 221
- 11 王家龙. *空间科学学报*, 1993, 13: 313
- 12 Reinhard R W, Wibberenz G. *Solar Phys.*, 1974, 36: 473
- 13 周树荣, 张洪起. *紫金山天文台台刊*, 1993, 12: 1
- 14 Zhou Shurong, Zheng Xingwu. *Solar Phys.*, 1998, 181: 327
- 15 周树荣. *天体物理学报*, 1996, 16: 314
- 16 Zirin H, Liggett M A. *Solar Phys.*, 1987, 113: 267
- 17 Ivanov E V. In: Simon P A *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-II, Proceedings of a Workshop at Meudon, France, Boulder: NOAA ERL, 1986. 376*
- 18 王家龙. *武汉大学学报*, 1993 增刊, *空间物理专刊*, 116
- 19 周树荣, 许富英, 李春生. *紫金山天文台台刊*, 1993, 12: 16
- 20 Kuck G A, Huston S L. In: Hruska J *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-IV, Proceedings of a workshop at Ottawa, Canada, Boulder: NOAA ERL, 1992. 192*
- 21 Pereyaslova N K, Mikirova N A, Nazarova M N. In: Simon P A *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-II, Proceedings of a Workshop at Meudon, France, Boulder: NOAA ERL, 1986. 220*
- 22 Gentile L C, Campbell J M, Cliver E W, Cane H V, In: Hruska J *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-IV, Proceedings of a workshop at Ottawa, Canada, Boulder: NOAA ERL, 1992. 153*
- 23 林华安, 王世金. *空间科学学报*, 1993, 13: 122
- 24 王世金, 林华安. *空间科学学报*, 1993, 13: 215
- 25 周爱华. *天体物理学报*, 1994, 14: 251
- 26 Mel'nikov V F, Podstrigach T S, Dajbog E I *et al.* In: Thompson R J *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-III, Proceedings of a Workshop at Leura, Australia, Boulder: NOAA ERL, 1989, Vol.VI: 533*
- 27 Feynman J. In: Heckman G *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-V, Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, Hitachinaka: CRL, 1997. 457*
- 28 Smart D F, Shea M A. In: Heckman G *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-V, Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, Hitachinaka: CRL, 1997. 449*
- 29 Kunches J M, Zwickl R D. In: Heckman G *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-V, Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, Hitachinaka: CRL, 1997. 453*
- 30 黄永年, 王志丹. *空间科学学报*, 1998, 18: 81
- 31 黄永年, 王志丹, 汪学毅. *地球物理学报*, 1998, 41: 149
- 32 Feynman J, Spitale G, Wang J *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 13281
- 33 Maisin J R. *Adv. Space Res.*, 1989, 9(10): 205
- 34 张勤, 洪琴芳. *天文学报*, 1986, 27: 164
- 35 王家龙. *天体物理学报*, 1999, 19: 412
- 36 Thompson R. In: Heckman G *et al.* eds. *Solar-Terrestrial Predictions-V, Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, Hitachinaka: CRL, 1997. 3*
- 37 王家龙, 张训斌, 黄泽荣. *天体物理学报*, 1999, 19: 318

Research Progress of Predicting Solar Proton Events

Zhang Qin

(Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

The important significance of predicting solar proton events, the general characteristics of the active regions producing solar proton events, the radiation characteristics of proton flares, the predicting techniques of several important parameters of proton events and their research progress at present are briefly reviewed in this paper. The key points of the improvement of the prediction to meet up-to-date needs of the user are presented.

Key words Sun: activity—Sun: proton event—prediction