

穆 军,王劲松,赵海娟等.典型的太阳质子事件峰值流量的一种预报方法.地球物理学报,2010,53(9):2032~2036,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.003

Mu J, Wang J S, Zhao H J, et al. A method for predicting the maximum flux of solar proton event. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(9):2032~2036, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.003

# 典型的太阳质子事件峰值流量的一种预报方法

穆 军<sup>1,2,3</sup>,王劲松<sup>3\*</sup>,赵海娟<sup>3</sup>,敦金平<sup>3</sup>

1 中国科学院国家天文台云南天文台,昆明 650011

2 中国科学院研究生院,北京 100049

3 国家空间天气监测预警中心,北京 100081

**摘 要** 分析了 1988~2006 年中 62 个典型的太阳质子事件,发现其归一化后峰值流量变化具有很好的统计规律,根据该规律提出了一种对太阳质子事件峰值流量进行预报的方法.试验预报结果表明,太阳质子事件峰值流量的预报值和实测值都在同一个量级以内,平均相对误差为 32%,预报误差在可接受范围内.本文方法对于日常预报业务而言是实用和可行的.

**关键词** 太阳,太阳活动,太阳质子事件,空间天气,预报

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.003

中图分类号 P353

收稿日期 2010-04-30,2010-07-12 收修定稿

## A method for predicting the maximum flux of solar proton event

MU Jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Jing-Song<sup>3\*</sup>, ZHAO Hai-Juan<sup>3</sup>, DUN Jin-Ping<sup>3</sup>

1 National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China

2 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 National Center for Space Weather, Beijing 100081, China

**Abstract** Sixty-two typical solar proton events during 1988~2006 are analyzed. It is found that the top flux figure change has good statistic regularity after the data is normalized. A method for predicting the top flux of solar proton event is put forward. All the events are predicted for the top flux. The result of the examination indicates that the predicted values and observed values are on the same order of magnitude, and the relative standard deviation is  $\pm 32\%$ . The error level is acceptable and the method is reliable for daily monitoring of space weather.

**Keywords** Sun, Solar activity, Solar proton event, Space weather, Prediction

## 1 引 言

太阳质子事件(SPE)是一种强烈的太阳爆发活动,它所产生的高能粒子在行星际空间传播,会影响日地空间环境.太阳质子事件是引起日地系统扰动的极重要的源,能造成近地空间的灾害性扰动,对空

间环境和航天业务产生很大的影响,因而受到广泛的关注<sup>[1,2]</sup>.目前国际上公认的太阳质子事件确认标准是:能量  $E > 10$  MeV 的质子在连续 15 min 以上的时间内通量超过 10 个/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ )<sup>[3,4]</sup>.随着空间技术的快速发展,太阳质子事件造成的损失会更加严重和广泛,因此,对质子事件进行深入的研究,掌握它的规律并对它进行预报,具有很重要的意义.

**基金项目** 空间灾害天气的太阳驱动源研究(40636031/D0401)和国家自然科学基金项目(40674077,40436015,40804029)资助.

**作者简介** 穆 军,男,1979 年生,中国科学院国家天文台云南天文台博士研究生,主要从事太阳活动及其预报方法的研究工作.

E-mail: daojunmu@sohu.com

\* 通讯作者 王劲松, E-mail: wangjs@ema.gov.cn

从 1955 年到现在,人类在地球上已经观测到了 375 个太阳质子事件. 太阳质子事件通常可分为两类:脉冲型事件和缓变型事件,这两类质子事件的粒子成分、持续时间和相对应的射电爆发类型都有区别<sup>[5,6]</sup>. 脉冲型质子事件的加速源为太阳耀斑,而大的缓变型的太阳质子事件与太阳耀斑无关,日冕物质抛射(CME)驱动的激波是粒子唯一的加速源<sup>[7~10]</sup>.

人们已经做了大量的相关工作,预报也取得了一些成果<sup>[11]</sup>. 由于对质子事件发生后在行星际空间传播的过程和相互作用机制不太了解,只能进行经验性的统计预报研究. 还有人从相关性方面进行研究,找出质子事件最相关的前兆来进行预报<sup>[12]</sup>. 特别是伴随耀斑发生的质子事件,通过对质子耀斑的监测,能够对质子事件的通量水平提前做出很好的预报<sup>[13]</sup>.

现阶段的质子事件预报模式主要依靠对过去质子事件的观测,在经验统计的基础上,根据一定时期内太阳质子通量水平,以及对相关参量如峰值流量、延迟时间等的分析来预报质子事件<sup>[4,14]</sup>. 例如 King 模型<sup>[4,14]</sup>,即质子通量水平的模型,它假设太阳黑子数和年均质子总通量水平线性正相关. 该模型在很

长一段时间被视作空间任务期间的总太阳质子通量水平的标准模型. 1990 年 Feynman 及其同事建立了 JPL 模型<sup>[4,15]</sup>,它假设质子事件的积分流量服从对数正态分布,根据所用的数据特征得出平均对数流量和标准偏差,在统计分析的基础上,对持续时间超过一年的空间任务,预报不同能量范围质子积分流量水平,取得了很好的效果.

随着我国空间探测和载人航天等工程的发展和需要,我国学者日益重视太阳质子事件的预报工作,并提出一些比较好的预报方法,如胡雄<sup>[4,16]</sup>等人采用全连接型神经网络结构,对百天发生的质子事件进行预报,准确率达到 92%. 张勤等人<sup>[4,17]</sup>用模糊聚类方法研究对质子耀斑提前 1~3 天的短期预报,对 1984 年上半年和 1985 年 1~5 月两个时段的检验表明,预报准确率分别为 86% 和 100%. 这些方法主要预报太阳质子事件的有无,而对质子流量的演变没有考虑.

典型的单个缓变型太阳质子事件随时间变化的轮廓如图 1a 所示. 从图上可以看出,典型的缓变太阳质子事件具有如下特征:从质子被加速到质子通量增强有一个传播延迟时间,通常为 20~90 min.

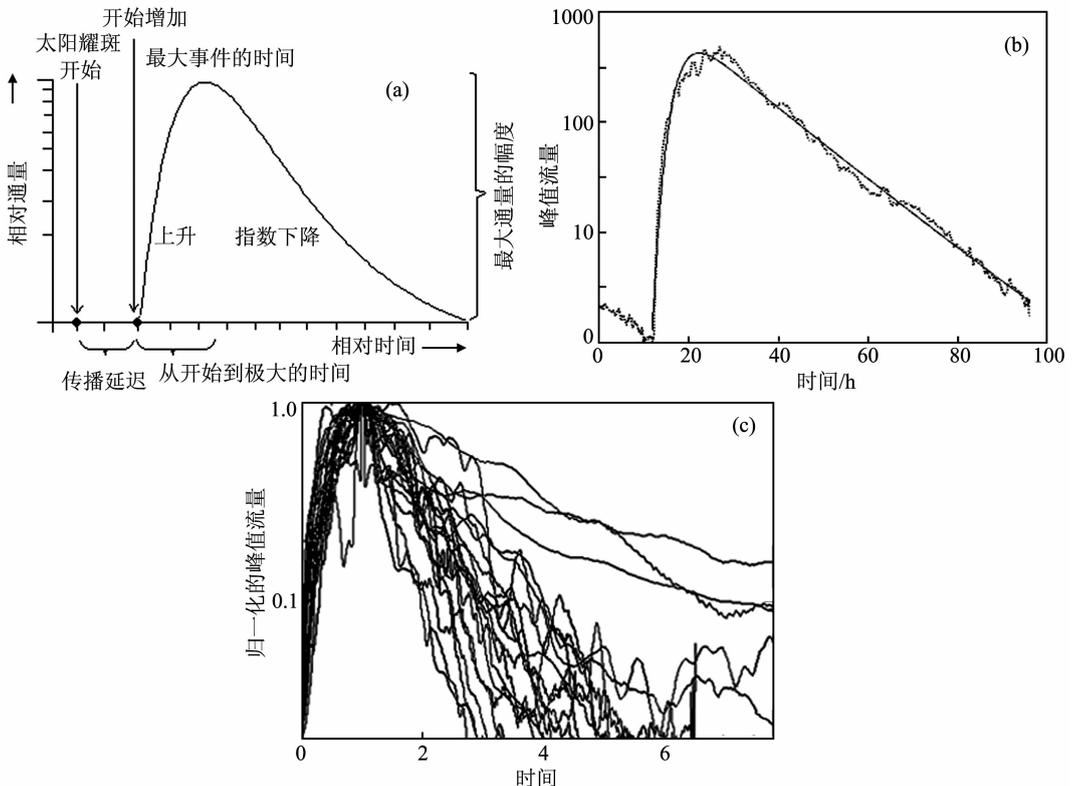


图 1 (a)典型的单个太阳质子事件随时间变化的轮廓图;(b)用公式(1)对1997年11月6日事件进行拟合的结果;(c)全部样本峰值流量和峰值时间归一化后的轮廓

Fig. 1 (a) A typical single solar proton events over time-varying contour map; (b) The fitting results with the formula (1) for November 6, 1997 event; (c) The normalized contours for maximum flux of all the samples peak flow and peak time

最初的通量是各向异性的, 偏于向前的方向, 但逐渐地变为各向同性. 质子通量强度快速上升到一个峰值(上升相), 然后缓慢地衰减到背景水平(下降相), 一般是以指数规律衰减的. 通常在 10~14 h 后, 可下降到峰值流量的 1/e 的水平<sup>[4]</sup>. 本文即基于对这种典型特征的统计验证, 提出了一种预报质子事件流量的思路.

## 2 方法介绍

本文将介绍一种针对上述典型的单个太阳质子事件的预报方法. 我们分析了 1988~2006 年间 GOES 卫星所观测到的全部 SPE 共 165 个, 其中如图 1a 所示的典型的可分辨上升相的缓变型质子事件 37 个. 数据来自于 <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>, 时间分辨率为 5 min.

对质子事件的变化规律, 流量的对数可用公式(1)来描述:

$$F(t) = A[1 - e^{-(t-\tau_m)/\tau_a}]e^{-(t-\tau_m)/\tau_d}, \quad (1)$$

其中系数  $A$  即为质子事件的峰值的对数,  $\tau_m$  是峰值对应的时间, 系数  $\tau_a$  是上升相的上升时间,  $\tau_d$  是下降相的下降时间. 先分析一个具体事件: 图 1b 是对 1997 年 11 月 6 日事件进行拟合得到的结果, 图中虚线为实测值, 实线为拟合值. 可见式(1)是一个很好的描述.

把所有事件的峰值流量和峰值时间进行归一化, 即令每个事件的峰值流量为 1, 峰值发生时间为 1, 发现它们的轮廓极其相似, 都具有相似的演化规律, 先快速上升, 达到峰值后指数下降, 见图 1c. 这进一步验证了文献<sup>[4]</sup>的结论.

从图 1c 可以看出, 通量下降阶段变化比较复杂. 本文仅研究通量上升阶段, 并由此预报峰值  $A$  的对数及其对应的时间  $\tau_m$ .

从图 1c 还可以看出, 对于质子事件峰值的预测, 可以用公式(2)对上升相进行拟合, 如拟合的各参数有明显的规律性, 则可根据得到的系数进行质子流量峰值预报. 其中系数  $A$  即为我们要进行预报的质子事件的峰值, 而系数  $\tau_a$  则是上升相上升时间. 当完全不考虑下降相而仅考虑上升相时, 公式(1)可简化为

$$F(t) = A'(1 - e^{-t/\tau_a}). \quad (2)$$

根据公式(2), 可以利用质子流量突然增加后的观测数据来预测  $A'$ . 为了减小个别数据对预报结果的影响, 首先对数据进行 15 min 滑动平均, 显然使

用的数据点的多少将强烈地影响结果.

以 2005 年 6 月 16 日事件为例, 分别使用质子通量增加后 1~100 个点的观测值对峰值进行预报. 采用连续增加的数据点来拟合通量的变化, 可以看出: 随着所采用数据的增加, 预报值  $A'$  由远远高于实测值, 到越来越接近实测值; 当所采用的数据点继续增多时, 又发生预报值比实测值偏低, 并趋近于一个恒定值, 详见图 2. 图中横轴为所采用的数据点数, 纵轴为质子流量实测值的常用对数值. 其他事例也给出类似的结果.

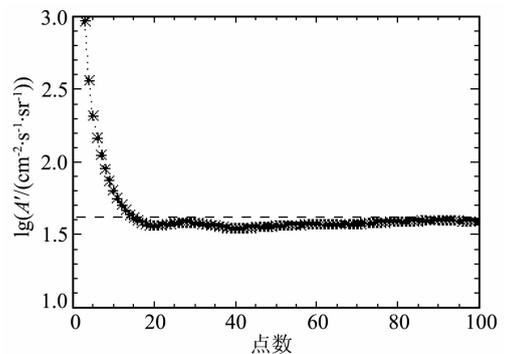


图 2 2005 年 6 月 16 日事件的峰值流量拟合所用数据点的关系曲线

Fig. 2 The relationship curves between the peak flow and the used fitting data for June 16, 2005 event

由图 2 可以看出, 当观测到质子流量增强开始后, 对 30 个以上数据点(150 min, 2.5 h)的拟合, 系数  $A'$  几乎不再变化, 趋于一个恒定值. 实际上, 对于本例, 从观测到流量开始增强到达到峰值的时间为 10 h, 预报提前量在 7 h 以上. 对于本文中的 62 个事件, 采用的是 1.5~3 h 的观测值进行的预报, 时间提前量在 2 h 以上.

对选定的 62 个事件的峰值进行预报分析表明, 虽然该  $A'$  并不是实际流量峰值  $A$ , 但所有样本分析表明该  $A'$  与  $A$  之间存在非常明显的规律, 详见图 3a.

相关分析结果表明, 二者之间存在显著的线性相关, 相关系数  $R=0.98$ , 标准偏差  $\sigma=0.18$ . 二者之间的相关关系为

$$A_p = 1.02A' + 0.11. \quad (3)$$

因此在得到拟合的  $A'$  (最初的预报值) 之后, 可以根据公式(3)对预报值进行修正, 得到修正后的预报值  $A_p$ , 图 3b 所示为  $A_p$  与观测值  $A$  之间的关系, 可以看出, 预报值  $A_p$  与观测值  $A$  之间的相关性显著提高, 二者之间的关系为

$$A = 1.000A_p + 0.003 \approx A_p. \quad (4)$$

对结果进行分析, 可见预报值和实测值都在同一个

量级以内.

由于  $A_p$  和  $A$  都是取常用对数后的峰值流量, 在作误差分析时, 为了与实际情况相符, 必须把  $A_p$  和  $A$  换算回去. 这样处理后的绝对误差分布见图 4a. 相对误差分布在  $-70\% \sim 90\%$  之间的范围内,

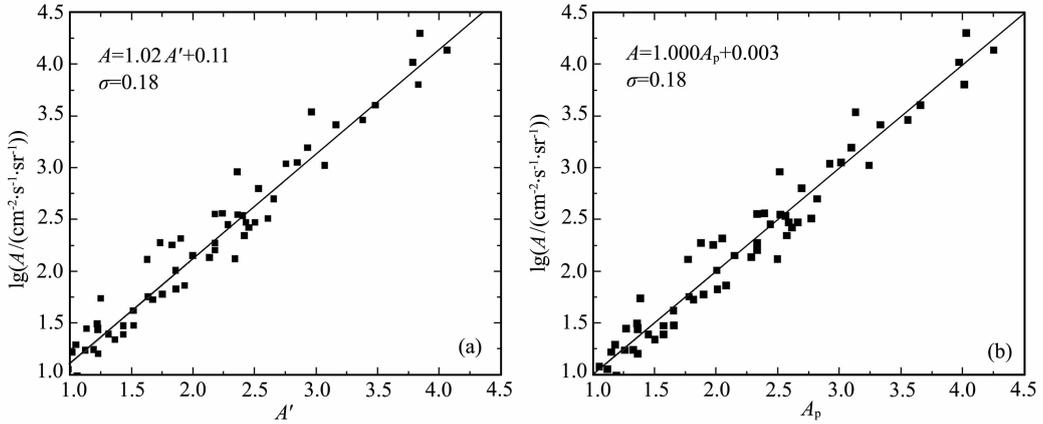


图 3 (a)  $A$  与  $A'$  之间的关系; (b)  $A$  与  $A_p$  之间的关系

Fig. 3 (a) Relation between  $A$  and  $A'$ ; (b) Relation between  $A$  and  $A_p$

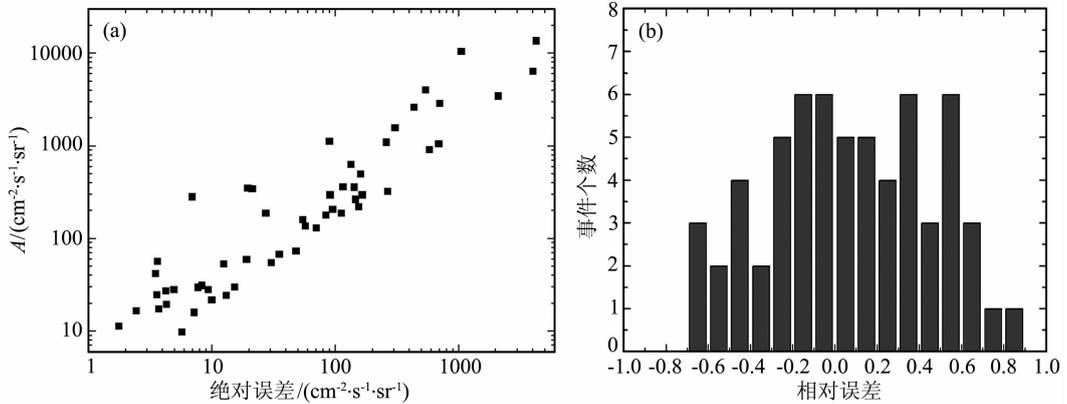


图 4 (a)  $A$  与  $A_p$  之间的绝对误差; (b)  $A$  与  $A_p$  之间的相对误差

Fig. 4 (a) Analysis of absolute error between  $A$  and  $A_p$ ; (b) Analysis of relativity error between  $A$  and  $A_p$

### 3 结论和讨论

我们对典型的单个太阳质子事件进行分析, 基于其形态提出一种新的预报方法. 结果表明:

(1) 对典型的单个太阳质子事件来说, 上升相和下降相都遵从指数变化规律. 我们采用连续增加的数据点来拟合通量的变化, 对峰值进行预报, 即需要一定的观测时间才能从更多的数据中提取出一次事件的信息, 从而对峰值做出预报, 所以本方法对缓变型质子事件的预报效果较好, 而对于脉冲型的质子事件, 由于它在很短的时间内就已经达到峰值, 所以不适合用该方法对其进行预报.

平均相对误差为  $32\%$ . 且  $74\%$  的样本相对误差在  $50\%$  以内, 详见图 4b. 由于通常业务中关心的是质子流量的量级, 我们的预报值和实测值都在同一个量级以内, 因此预报结果在预警业务可接受范围内, 可用于空间天气预警业务之中.

(2) 采用连续增加的数据点来拟合通量的变化, 开始数据量较少时, 预报值  $A'$  远远高于实测值, 预报误差较大; 随着所采用数据的增加, 事件的信息量增加, 预报值越来越接近实测值. 当所采用的数据点继续增多时, 由于下降相的信息已经显现, 而我们的方法中只考虑了上升相的作用, 所以必然又发生预报值比实测值偏低的情况. 未来可以考虑公式 (1), 同时加入上升相和下降相的因子对数据进行拟合预报, 从而提高预报精度.

(3) 本方法的预报值和实测值都在同一个量级以内, 平均相对误差为  $32\%$ , 预报误差在可接受范围内, 时间提前量在  $2\text{ h}$  以上, 这种预报能够基本满足目前空间天气监测预警业务的需要.

## 参考文献(References)

- [1] 刘振兴. 中国空间风暴探测计划和国际与日共存计划. 地球物理学报, 2005, **48**(3): 724~730  
Liu Z X. Space Wind and Storms Exploration Program and International Living with a Star Initiative. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 724~730
- [2] 邹 鸿, 肖 佐, 郝永强等. “资源一号”卫星星内粒子探测器对扰动事件的观测. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 636~641  
Zou H, Xiao Z, Hao Y Q, et al. Observation of the disturbed events by the particle detector inside "ZY-1" satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(3): 636~641
- [3] Shea M A, Smart D F. Solar proton event patterns. *Adv Space Res*, 2002, **29**(3): 325~330
- [4] 何玉林, 王华宁. 太阳质子事件研究进展. 科学技术与工程, 2006, **6**(24): 3900~3908  
He Y L, Wang H N. Research progress of solar proton events. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 2006, **6**(24): 3900~3908
- [5] Cliver, Gentile L, McNamara L. Peak-flux-density of large solar radio burst and proton emission from flares. Solar-Terrestrial Predictions Proceeding of a Workshop, Meudon, France, 1984. 212
- [6] Cliver E. X-class soft burst and major proton event during solar cycle 21. Solar-Terrestrial Proceeding of a Workshop, leura, Australia, 1989. **1**: 359
- [7] 乐贵明, 唐玉华, 韩延本. 太阳高能粒子的日冕逃逸时间与日冕加速源. 科学通报, 2007, **52**(21): 2461~2467  
Le G M, Tang Y H, Han Y B. Corona escape time and corona accelerated source for solar energetic particles. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2007, **52**(21): 2461~2467
- [8] 乐贵明. 2000年7月14日与2003年10月28日太阳质子事件的观测比较分析. 科学通报, 2006, **51**(15): 1746~1750  
Le G M. Solar proton events observed comparative analysis of July 14, 2000 and October 28, 2003. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2006, **51**(15): 1746~1750
- [9] Reames D V. Particles acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci Rev*, 1999, **90**: 413~491
- [10] Reames D V. Magnetic topology of impulsive and gradual solar energetic particle events. *Astrophys J*, 2002, **571**: L63~L66
- [11] 龚建村, 薛炳森, 刘四清等. 神经网络方法在太阳质子事件短期预报中的应用. 空间科学学报, 2003, **23**(6): 443~451  
Gong J C, Xue B S, Liu S Q, et al. Neural network method in the short-term prediction of solar proton events application. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2003, **23**(6): 443~451
- [12] 张桂清. 太阳质子活动区. 中国科学(A), 2000, **30**(增刊): 103~106  
Zhang G Q. Solar proton activity area. *Science in China (Series A)* (in Chinese), 2000, **30**(Suppl.): 103~106
- [13] 马宇倩, 王焕玉, 张承模等. 2001年4月2日太阳耀斑及其太阳质子事件的观测结果研究. 地球物理学报, 2004, **47**(5): 737~742  
Ma Y Q, Wang H Y, Zhang C M, et al. A conjunctive of solar flare 20010402 and related solar proton events. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47**(5): 737~742
- [14] Stassinopoulos E G, King J H. Empirical solar proton model for orbiting spacecraft applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, AES-10: 442~450
- [15] Feynman J, Armstrong T P, Dao-Gibner L, et al. A new interplanetary proton fluence model. *J Spacecraft Rockets*, 1990, **27**: 403
- [16] 胡 雄, 黄泽荣, 张训械等. 太阳质子事件警报. 空间科学学报, 1998, **18**(4): 323~328  
Hu X, Huang Z R, Zhang X X, et al. Solar proton events alerts. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 1998, **18**(4): 323~328
- [17] 张 勤, 洪琴芳. 用模糊聚类方法探讨太阳质子耀斑的短期预报. 天文学报, 1986, **27**(2): 164~169  
Zhang Q, Hong Q F. Using the fuzzy clustering method for the short-term prediction of the proton flares. *Acta Astronomy Science* (in Chinese), 1986, **27**(2): 164~169

(本文编辑 何 燕)