

基于太阳 10.7 cm 射电流量的全日面 耀斑预报方法*

雷 蕾 崔延美 钟秋珍 师立勤

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 太阳耀斑是一种重要的太阳爆发活动现象, 表现为近乎全波段的电磁辐射增强。统计表明, 太阳活动水平越高, 太阳爆发越频繁, 耀斑爆发的概率越大。利用 1975–2007 年 10.7 cm 流量与耀斑爆发的统计关系, 建立了一种可行的全日面爆发耀斑概率的预报方法, 能够实现 C, M, X 三种级别的耀斑在全日面爆发的概率预报。通过 2008–2016 年的观测数据, 对模型进行了预报性能的评估, 得到模型对 C, M, X 级耀斑发生概率的预报误差均较小, Brier 评分误差分别为 0.113, 0.087, 0.012; 模型的预报性能均比平均模型有提高, 对 C, M, X 级耀斑发生概率预报的 Brier 技巧评分分别为 0.250, 0.106, 0.012。在 2008–2016 年未来 1 天耀斑预报的模型实测中, 模型的预报效果与中国科学院空间环境预报中心的预报效果相当, 这说明该模型在实际的空间环境预报中切实可行。

关键词 10.7 cm 流量, 全日面耀斑预报, 概率预报

中图分类号 P353

Solar Full-disk Flare Forecasting Model Based on 10.7 cm Solar Radio Flux

LEI Lei CUI Yanmei ZHONG Qiuzhen SHI Liqin

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Solar flare is an important solar active phenomenon, which is manifested as electromagnetic radiant enhancement in almost all wave bands. The statistics indicate that the solar flare is positively associated with the solar active levels. In this paper, a method for predicting the probability of solar flare

* 国家自然科学基金项目 (420722424), 中国科学院重点研究项目 (ZDRE-KT-2021-3) 和中国科学院国家空间科学中心攀登计划共同资助

2022-02-17 收到原稿, 2022-04-13 收到修定稿

E-mail: ymcui@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

is established based on the statistical relationship between 10.7 cm flux and solar flare during 1975 to 2007. The forecasting model can be used to predict the probability of C, M and X class flares. During 2008 to 2016, the predicted errors of the model for C, M and X class flares are 0.113, 0.087 and 0.012, respectively, and the predicted skill scores are 0.250, 0.106 and 0.012, respectively. It means that our method has less predicted errors and more skill scores than the average model for predicting C, M and X class flares. During the period from 2008 to 2016, the predicted results of the model are similar to that of Space Environment Prediction Center in National Space Science Center. It indicates that the model is feasible in the actual space environment prediction.

Key words 10.7 cm solar radio flux, Solar full-disk flare forecasting, Probabilistic forecast

0 引言

太阳耀斑是一种重要的太阳爆发活动现象,其增强的电磁辐射能够引发地球向阳面电离层的突然骚扰,进而对高频无线电通信、卫星通信产生干扰^[1]。大耀斑通常还会伴随日冕物质抛射和太阳质子事件,且耀斑规模越大,与之相伴随的其他太阳爆发活动的规模也往往越大^[2],进而引发地磁暴、高能电子暴、电离层暴等一系列不同形式的地球空间环境扰动事件^[3]。由此,耀斑成为空间环境是否安全的重要标识,耀斑预报也因此成为空间环境预报的一项重要内容。

在实际的空间环境业务预报中,耀斑预报主要以经验预报为主,模型预报为辅。究其原因,一方面是因为大多数耀斑预报模型主要基于活动区磁特征参量开展,而活动区的磁场观测由于受到日面投影效应的影响,只能对日面中心区域的活动区进行是否爆发耀斑的预测,不能涵盖整个日面^[4]。另一方面,所建立的耀斑预报模型的输出结果与实际的耀斑业务预报需求不匹配。在实际的耀斑业务预报中,预报结果通常为 M 和 X 级耀斑分别可能发生的概率,模型预报则通常是不同等级耀斑的“有、无”预测^[5,6]。由此可见,面向空间环境业务预报需求的全日面耀斑预报模型仍亟待开发。

太阳 10.7 cm 射电流量是太阳发出的频率 2.8 GHz 上的电磁辐射成分,是日面上所有源区的总射电辐射流量值 ($F_{10.7}$)^[7,8]。 $F_{10.7}$ 的源由三部分组成:平静太阳的背景辐射、缓变成分、来自耀斑或其他瞬时事件的短时辐射。平静太阳的背景辐射是一个常

量;缓变成分来自活动区域,随活动区结构的演变会出现小时到数月的时间变化,随太阳活动周期的推移则会出现年变化。不受地面天气影响,这个波段的射电波能够穿透地球大气,在地面上很容易观测到。自 1947 年开始,该流量就实现了每日的常规业务监测。 $F_{10.7}$ 反映了太阳活动的整体水平。在基于物理的电离层或大气建模中,通常也多用 $F_{10.7}$ 作为描述太阳活动和驱动模型的输入指数。由于应用的普遍性,长、中、短期的 $F_{10.7}$ 预报在空间环境业务预报中均已经实现。

本文利用 $F_{10.7}$ 与耀斑的长期历史观测数据,统计 $F_{10.7}$ 与不同级别耀斑发生的相关关系。在此基础上,构建依赖于 $F_{10.7}$ 的 C, M, X 级耀斑发生的函数关系,从而建立一种实用的、能够实现全日面爆发 C, M, X 级耀斑的概率预报方法,切实满足空间环境预报中对耀斑预报的实际需求。

1 数据来源

$F_{10.7}$ 以太阳辐射通量密度 (sfu) 为单位, $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。本研究中采用的 $F_{10.7}$ 数据来自加拿大 DRAO (Dominion Radio Astrophysical Observatory) 天文台的观测,由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的网站提供^{*}。该网站提供的 $F_{10.7}$ 的调整日值是在观测值基础上去掉了日地距离变化带来的影响,反映了太阳辐射在该波段上的自身变化。

耀斑数据来自 GOES 卫星观测。基于该观测,NOAA 已经建立了全面的耀斑发生目录^{**},不仅包括

^{*}https://ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/noontime-flux/penticton/penticton_observed/listings/

^{**}<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>

耀斑的开始、峰值和结束时间,还有耀斑的级别和总通量等参量。这两种数据选用的时间范围为 1975—2016 年,该时间段包含了第 21~24 太阳活动周的数据。根据耀斑发生目录,统计了该时间范围内 C, M, X 级耀斑的每日发生次数。图 1 给出了这 4 个太阳活动周中, $F_{10.7}$ 的调整日值和 C, M, X 级耀斑的每日爆发次数。

在接下来的建模中,力图能够真正满足太阳耀斑概率预报的业务需求。从这个角度讲,建模数据与验证数据最好不要在时间上重合,以便于对模型的预报性能进行实测检验。本工作中,1975—2007 年的数据将用于建立全日面爆发 C, M, X 级耀斑概率预报模型的训练数据;2008—2016 年的相应数据则作为模型的验证数据,用于评估模型的预报性能。此外,为了验证模型在实际预报中的效果,还利用了中国科学院空间环境预报中心发布的 $F_{10.7}$ 短期预报值作为模型

实测输入*,以预报中心对耀斑的短期预报作为参考预报与模型性能进行比较,数据选用的时间范围为 2008—2016 年。

2 模型建立与评估

2.1 模型建立

从图 1 可以看出, $F_{10.7}$ 的逐日变化和 C, M, X 级耀斑的爆发次数均反映出大约 11 年的太阳活动周期变化。即太阳活动高年时 $F_{10.7}$ 的日值较高, C, M, X 级耀斑的爆发也较多,级别小的耀斑尤其明显;在太阳活动低年, $F_{10.7}$ 的日值较低且变化小,耀斑发生频次也很少,尤其是级别大的耀斑发生概率更小。因此本节利用 1975—2007 年的建模数据集,通过统计不同 $F_{10.7}$ 区间上与 C, M, X 三种级别耀斑发生的相关关系,构建一种以 $F_{10.7}$ 为变量的全日面爆发 C, M,

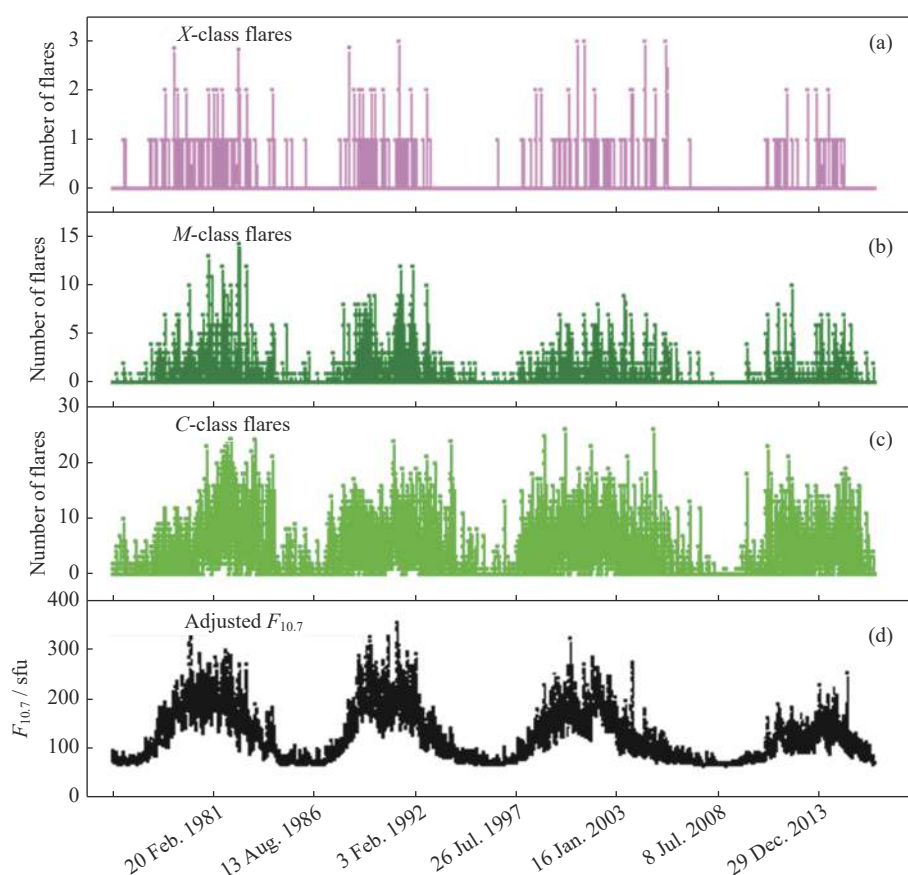


图 1 $F_{10.7}$ 的逐日变化和 C, M, X 级耀斑的每日爆发次数

Fig. 1 Daily $F_{10.7}$ and daily numbers of C, M, and X-class flares

*<http://www.sepc.ac.cn/archive2.php>

X 级耀斑的概率预报方法。具体过程如下。

步骤 1 建立 $F_{10.7}$ 与 C, M, X 级耀斑每日发生情况的样本集。以每天的数据作为一个样本。耀斑的发生情况用 0 和 1 进行标记: 该天若发生 C 级耀斑, 记为 1; 若没有发生 C 级耀斑, 则记为 0; 对于 M 和 X 级耀斑, 也是这样记录。1975—2007 年的整个时间段上共有 11810 天, 即样本总计为 11810 个。其中, 有 C 级耀斑发生的样本为 8927 个, 有 M 级耀斑发生的样本为 3161 个, 有 X 级耀斑发生的样本为 432 个。由此, 整个时间段内 C, M, X 级耀斑的发生概率分别为 49.3%, 17.5% 和 2.4%。可以明显看到, 随着耀斑级别的增大, 耀斑的发生概率明显降低。

步骤 2 对所有的样本进行等频分箱处理。根据 $F_{10.7}$ 数值从大到小排列, 将样本集分成几等份, 每等份为一个数据箱, 每箱里面的样本数是一样的。分箱的关键是要保证每个数据箱内具有充分的样本。即, 每箱中的样本不能太少, 否则随机性太大, 结果不具有统计意义; 每箱中的样本也不能太多, 否则分箱过少, 导致样本间的区分度过低, 不易得到耀斑产率随 $F_{10.7}$ 的变化关系。遵从这一原则, 对每箱中样本量的多少进行了多次实验, 最终确定每箱的样本数为 500, 最后不足 500 个样本的数据箱合并到前一箱中。最终, 样本数分成 23 箱, 除了第 23 箱中的样本数量为 810 个, 其他箱中的样本数量均为 500。

步骤 3 计算每个数据箱中 C, M, X 级耀斑的发生概率。每个数据箱中, 若有 n_C 天发生了 C 耀斑发生, n_M 天发生了 M 耀斑发生, n_X 天发生了 X 耀斑发生, 则 C, M, X 级耀斑的发生概率分别为

$$\frac{n_C}{N} \times 100\%, \quad (1)$$

$$\frac{n_M}{N} \times 100\%, \quad (2)$$

$$\frac{n_X}{N} \times 100\%. \quad (3)$$

其中, N 在第 23 箱中的取值为 810, 其他箱中的取值均为 500。进行散点绘图, 结果如图 2 所示。从图 2 可以看到, $F_{10.7}$ 与 C, M, X 级耀斑的发生均呈正相关关系。对于 C 级耀斑, 当 $F_{10.7}$ 在 95 sfu 左右时, 发生概率达到了 50%; 当 $F_{10.7}$ 在 135 sfu 左右时, 发生概率超过了 90%。对于 M 级耀斑, 其发生概率与 $F_{10.7}$ 近似线性相关。当 $F_{10.7}$ 在 190 sfu 左右时, M 级耀斑的发生概率达到了 50%, 随着 $F_{10.7}$ 的增长, M 级耀斑的发生概率最大为 80.4%。对于 X 级耀斑, 由于耀斑自身发生频次较低, 当 $F_{10.7}$ 超过 200 sfu 左右时, 发生概率也仅达到 10%; 随着 $F_{10.7}$ 的增长, X 级耀斑的发生概率最大为 18.6%。

步骤 4 构建依赖于 $F_{10.7}$ 的 C, M, X 级耀斑发生的函数关系。通过尝试多种函数形式, Boltzmann 函数能够对这三种级别耀斑的发生概率进行较好的拟合。Boltzmann 函数形式为

$$Y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp[(Z - Z_0)/W]}. \quad (4)$$

式中, Y 为耀斑发生概率; A_1, A_2, W 分别为函数系数; Z 为自变量, 这里为 $F_{10.7}$ 。 $F_{10.7}$ 与 C, M, X 级耀斑发生概率之间的函数拟合系数见表 1, 拟合结果如图 2 所示。在实际业务预报中, 耀斑发生的最小可能性为 0, 最大为 1。因此, 对应 C, M, X 级耀斑发生概

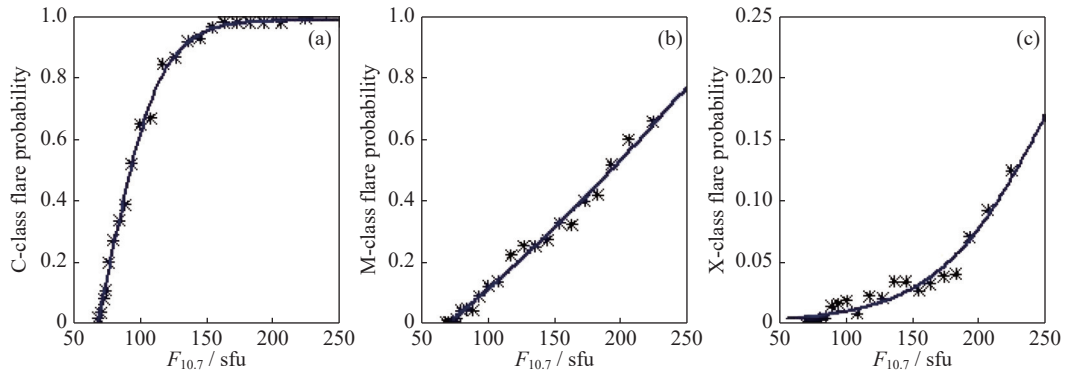


图 2 $F_{10.7}$ 与太阳耀斑爆发频次的统计关系 (数据散点为统计结果, 曲线为 Boltzmann 函数对数据散点的拟合)

Fig. 2 Statistical relationship between $F_{10.7}$ and production frequencies of C, M, and X-class flares (Scatter points are the statistical results, and the curve is the fitting of Boltzmann function to these points)

率的 Boltzmann 函数, 当 Y 值小于 0 时, 一律取值为 0; 当 Y 值大于 1 时, 一律取值为 1。

通过以上步骤, 可以得到 $F_{10.7}$ 与 C, M, X 级耀斑发生概率之间的函数关系, 建立了基于 $F_{10.7}$ 的全日面耀斑预报模型, 实现了对全日面发生 C, M, X 级耀斑发生概率的预报。

2.2 模型评估

2008—2016 年的模型评估样本共有 3288 个。其中, 有 1619 个样本发生 C 级耀斑, 有 398 个样本发生 M 级耀斑, 有 41 个样本发生 X 级耀斑。以当日 $F_{10.7}$ 作为 Boltzman 函数的输入, 分别得到对应当日 C, M, X 级耀斑的概率预报输出。图 3 给出了 2014 年 10 月模型预测与实测结果的比较, 红色散点

表 1 $F_{10.7}$ 分别与 C, M, X 级耀斑频率进行 Boltzmann 函数拟合的拟合系数

Table 1 Boltzmann function coefficients for fitting $F_{10.7}$ to the production frequencies of C, M, and X-class flare, respectively

	C	M	X
A_1	-0.62756	-1.17626	-6.77724×10^{-5}
A_2	0.98561	4.71786	0.35925
Z_0	77.30752	435.65705	254.95498
W	19.23882	262.55073	42.62485

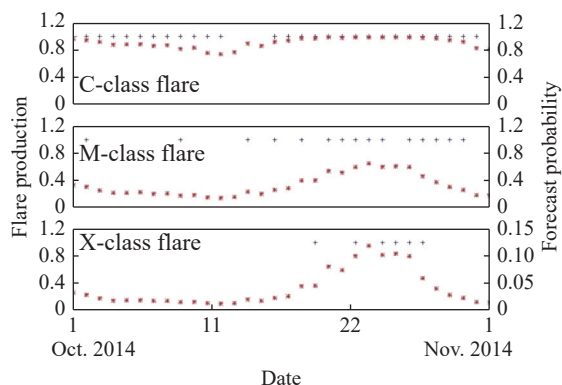


图 3 2014 年 10 月全日面耀斑预报模型的预报结果与实测结果的比较 (红色散点为预报值, 蓝色散点为耀斑实际发生情况)

Fig. 3 Comparison of the output of the solar full-disk flare prediction model with the observation results in October 2014 (The red scatter points are the predicted values, and the blue scatter points are the actual occurrence of the flares)

为预报值, 蓝色散点为耀斑实际发生情况, 纵坐标为耀斑发生概率, 0 为耀斑未发生, 1 为耀斑发生。

根据模型得到的耀斑概率输出, 对模型的预报误差、预报技能、预报可靠性三方面进行了性能评估。其中, 模型预报误差采用的指标为 Brier 误差评分 (B_s), 有

$$B_s = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (F_i - O_i)^2. \quad (5)$$

式中, K 为样本数目, F_i 为预报概率值, O_i 为观测值。该评分实际是预报值与观测值的平均误差, 取值范围为 $[0, 1]$, 数值越小说明模型的预报误差越小。0 对应理想预报结果, 即预报与输出完全一致。Brier 误差评分受事件的发生概率影响; 事件发生概率越小, 越容易得到较小的误差。即对于越小概率的事件, 越容易得到低的 Brier 误差评分。在该模型中, F_i 分别对应每日 C, M, X 级耀斑的概率预报输出, O_i 对应每日 C, M, X 级耀斑的实际发生情况, 其值为 1 或者 0。该模型对 C, M, X 级耀斑的预报误差分别为 0.113, 0.087 和 0.012, 误差均较小。而且, 随着耀斑级别的增大, 模型的预报误差逐渐缩小, 模型对 X 级耀斑的预报误差最小。

模型预报技能采用 Brier 技巧评分 (B_{ss}) 进行评估, 有

$$B_{ss} = 1 - \frac{B_s^{\text{for}}}{B_s^{\text{ref}}}. \quad (6)$$

式中, B_s^{for} 为所要评估模型的 Brier 误差评分, B_s^{ref} 为参考模型的 Brier 误差评分。该评分的取值范围为 $(-\infty, 1]$, 0 表示模型相对参考模型没有技能, 1 表示理性模型。这里取平均模型 (或气候模型) 作为参考模型, 即在 Brier 技巧评分中考虑事件自身的发生概率, 因此该评分不会受到事件发生概率的影响。计算得到, 模型对 C, M, X 级耀斑的预报技能评分 B_{ss} 分别为 0.250, 0.106, 0.012, 均大于 0, 说明本文模型具有一定的预报技能。随着耀斑级别的增大, 模型预报技能逐渐变差。这是因为级别越大的耀斑发生概率越低, 发生的偶然性越强, 预报难度也越大。

模型预报的可靠性采用条件观测均值和条件预测值的定性关系来表示, 即先根据预报输出结果将预报概率分成几个区间, 统计对比每个预报区间上的观测频率和预报概率的关系。图 4 给出了对模型预报可靠性的评估结果, 图 4 横轴为预报结果, 预报区间的大小为 0.1, 从 0~1 共分成 10 个区间。图 4(a) 从

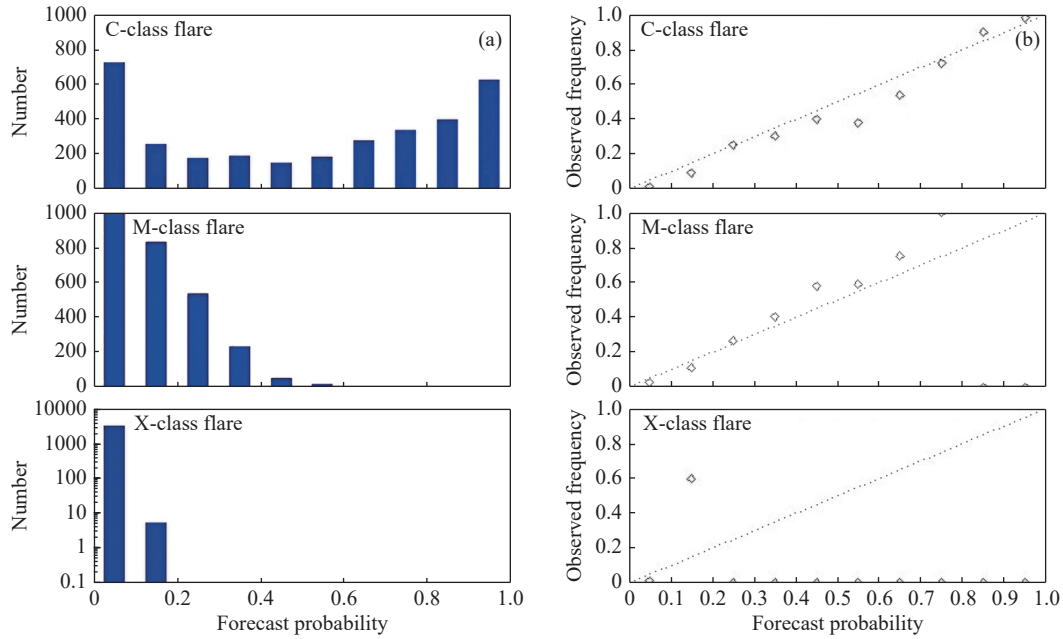


图 4 模型预报可靠性评估结果

Fig. 4 Evaluation results of the model reliability

上到下分别为落在每个区间上的 C, M, X 级耀斑的样本数量; 图 4(b) 为对应的每个区间上的 C, M, X 级耀斑的观测频率。图 4(a) 中模型对 C 级耀斑的 10 个预报区间中都有相应的观测样本, 说明模型预报的分辨率较高; 对 X 级耀斑的 10 个预报区间中, 只在 (0, 0.1] 和 (0.1, 0.2] 两个区间中有相应的观测样本, 说明模型对 X 级耀斑预报的分辨率较低, 这也是由于 X 级耀斑发生频次太少的原因; 模型对 M 级耀斑的预报分辨率介于对 C 级和 X 级耀斑预报分辨率之间。图 4(b) 中数据点落在虚线对角线上, 表示预报概率和观测频率一致, 预报可靠; 数据点在虚线以上, 表示预报结果偏低; 数据点在虚线以下, 则表示预报结果偏高。整体来看, 模型对 C 级耀斑的预报与观测较为一致, 可靠性较高; 模型对 M 级耀斑的预报概率在 0.3 以上时, 数据点开始向上偏离虚线, 预报偏低; 模型对 X 级耀斑的预报更是明显偏低, 即预报较保守。

综上分析, 本文建立的基于 $F_{10.7}$ 的全日面耀斑预报模型能够对 C, M, X 级耀斑进行较为可靠的预报。模型对 C, M, X 级耀斑预报的评分误差 B_s 均小于 0.12, 预报性能 B_{ss} 均比平均模型有提高。

3 模型实测

在实际的空间环境预报中, $F_{10.7}$ 的实测值通常是

未知的。因此, 需要利用 $F_{10.7}$ 的预报值作为模型输入。利用本文建立的模型, 能够根据 $F_{10.7}$ 未来 3 天的短期预报、27 天的中期预报或太阳活动周的长期预报来实现太阳耀斑的短期、中期和长期预报。

以耀斑未来 1 天的短期预报为例进行模型的实际操作。利用中国科学院空间环境预报中心(以下简称预报中心)对 $F_{10.7}$ 的短期预报值作为本模型的输入, 并将模型的耀斑预报结果和预报中心的常规耀斑预报结果进行比较。模型选用与预报中心同样的耀斑等级进行预报, 即只对未 M 级和 X 级耀斑的发生概率进行预报。

对 2008—2016 年的模型耀斑预报和预报中心的耀斑预报进行了预报误差 B_s 和预报技能 B_{ss} 的评估。模型对 M 级和 X 级耀斑的预报误差分别为 0.0895 和 0.0119, 预报中心对 M 级和 X 级耀斑的预报误差分别为 0.0860 和 0.120; 模型对 M 级和 X 级耀斑的预报技能评分分别为 0.1590 和 0.0358, 预报中心对 M 级和 X 级耀斑的预报技能评分分别为 0.1914 和 0.0290。综合指标来看, 模型预报与预报中心的预报相差不大。这一方面说明了模型预报性能较为可靠, 另一方面也反映出预报中心在进行 $F_{10.7}$ 和耀斑短期预报时对太阳活动性判断的一致性。耀斑的短时辐射也是 $F_{10.7}$ 的来源之一, 预报中

心在进行 $F_{10.7}$ 预报时已经将耀斑可能带来的辐射考虑在内。模型基于预报中心 $F_{10.7}$ 进行的耀斑预报与预报中心耀斑预报的评估对比见表 2。

4 讨论与结论

针对当前空间环境业务预报中全日面耀斑预报模式亟待发展的需求,发展了一种依赖于 $F_{10.7}$ 的全日面耀斑爆发的概率预报模型。利用 1975—2007 年的 $F_{10.7}$ 和耀斑观测数据,统计了 C, M, X 三种级别耀斑发生频次与 $F_{10.7}$ 的关系。在此基础上,通过 Boltzmann 函数拟合建立了以 $F_{10.7}$ 为变量的耀斑发生概率预报模型,实现了 C, M, X 三种级别的耀斑在全日面爆发的概率预报。利用 2008—2016 年的数据进行模型性能评估,模型对 C, M, X 级耀斑的预报误差 B_s 分别为 0.113, 0.087 和 0.012, 预报技能评分 B_{ss} 分别为 0.250, 0.106 和 0.012。总体来看,模型对 C, M, X 级耀斑的预报误差均较小,且均比平均模型有技能。只不过,由于级别越高的耀斑发生频次越低,越容易产生低的预报误差;由于级别越高的耀斑发生偶然性更强,预报难度更大,预报技能评分会更小。此外,在模型可靠性的定性评估中,模型对 C 级耀斑的预报与观测较为一致,可靠性较高;模型对 X 级耀斑的预报明显偏低,可靠性差;模型对 M 级耀斑的预报可靠性介于这两者之间。

此外,还以耀斑未来 1 天的短期预报为例进行了模型的实际操作与检验。通过利用 2008—2016 年的中科院空间环境预报中心对 $F_{10.7}$ 的短期预报作为模型输入,对 M 级和 X 级两个级别的耀斑在全日面的爆发进行了概率预报,并将预报结果与该时段预报中心对 M 级和 X 级两个级别的耀斑预报进行了对比。对比发现,模型预报与预报中心的预报相差不大,这说明该模型的预报结果较可靠,能够应用于实际的空间环境预报中。由此,还可以利用 $F_{10.7}$ 未来 3 天的短期预报、27 天的中期预报或太阳活动周的长期预报来实现太阳耀斑预报的短期、中期和长期的预报。

值得注意的是, $F_{10.7}$ 刻画的是太阳活动整体水平。相对耀斑的发生来说,其是一种缓变量。因此单

表 2 模型基于预报中心 $F_{10.7}$ 进行的耀斑预报与预报中心耀斑预报的评估对比

Table 2 Comparison of results between the model flare forecasts based on SPEC-predicted $F_{10.7}$ values as inputs and the flare forecasts provided by the SEPC

	耀斑级别	B_s	B_{ss}
模型预报	M	0.0895	0.1590
	X	0.0119	0.0358
预报中心的预报	M	0.0860	0.1914
	X	0.0120	0.0290

纯以 $F_{10.7}$ 为变量的耀斑概率预报模型,提供的是一种耀斑发生趋势预测,对于耀斑发生或不发生的具体时刻很难进行区分。在下一步工作中,将 $F_{10.7}$ 与日面上的其他活动参量相结合,如活动区演变特征、爆发先兆等,能够建立起更加准确的耀斑预报模型。

参考文献

- [1] SHARP L E, HARRIS D E. Enhanced interplanetary scintillations associated with solar flares[J]. *Nature*, 1967, **213**(5074): 377-378
- [2] YASHIRO S, AKIYAMA S, GOPALSWAMY N, *et al.* Different power-law indices in the frequency distributions of flares with and without coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, **650**(2): L143-L146
- [3] NITTA N V, MULLIGAN T, KILPUA E K J, *et al.* Understanding the origins of problem geomagnetic storms associated with “stealth” coronal mass ejections[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(8): 82
- [4] HUANG X, WANG H N, XU L, *et al.* Deep learning based solar flare forecasting model. I. results for line-of-sight magnetograms[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **856**(1): 7
- [5] LEKA K D, PARK S H, KUSANO K, *et al.* A comparison of flare forecasting methods. II. benchmarks, metrics, and performance results for operational solar flare forecasting systems[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, **243**(2): 36
- [6] PARK E, MOON Y J, SHIN S, *et al.* Application of the deep convolutional neural network to the forecast of solar flare occurrence using full-disk solar magnetograms[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **869**(2): 91
- [7] TAPPING K F, DETRACEY B. The origin of the 10.7 cm flux[J]. *Solar Physics*, 1990, **127**(2): 321-332
- [8] TAPPING K F. The 10.7 cm solar radio flux ($F_{10.7}$)[J]. *Space Weather*, 2013, **11**(7): 394-406