

$F_{10.7}$ 指数与 A_p 指数短期预报检验*

陈安芹 李 沐 郭建广
刘丹丹 唐 伟 赵海娟

(中国气象局空间天气重点开放实验室/国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 北京 100081)

(许健民气象卫星创新中心 北京 100081)

摘 要 国家空间天气监测预警中心(NCSW)从2004年7月1日开始对用户提供服务,其中包括未来24 h, 48 h和72 h的 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数预报. 本文对2005–2022年NCSW的 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报结果进行了检验. 通过检验发现, NCSW预报的未来24 h, 48 h和72 h的 $F_{10.7}$ 指数平均比实测值偏小; 未来24 h的 A_p 指数平均比实测值偏大, 未来48 h和72 h的 A_p 指数平均比实测值偏小. 太阳活动水平越高, $F_{10.7}$ 指数的预报误差越大; 但是 A_p 指数预报误差最大值反而出现在太阳活动下降段. 此外, 通过与跟报模型、14天回归模型、14天回归修正模型、27天回归模型和27天回归修正模型等简单的统计预报模型对比发现, NCSW的预报性能整体优于简单的统计预报模型. 对于 $F_{10.7}$ 指数, NCSW的预报性能略好于跟报模型, 明显好于4个回归模型, 但是当太阳活动水平较高时, 跟报模型未来72 h的 $F_{10.7}$ 指数预报性能优于NCSW; 对于 A_p 指数, 多数情况下, NCSW的预报性能明显优于统计预报模型, 但是地磁扰动剧烈时, 27天回归模型预报的 A_p 指数反而比NCSW的预报更准确.

关键词 空间天气, 预报检验, $F_{10.7}$ 指数, A_p 指数

中图分类号 P353

Verification of Short-term Forecast for $F_{10.7}$ Index and A_p Index

CHEN Anqin LI Mu GUO Jianguang
LIU Dandan TANG Wei ZHAO Haijuan

(Key Laboratory of Space Weather, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather),
China Meteorological Administration, Beijing 100081)

(Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081)

Abstract The National Center for Space Weather (NCSW) has been providing space weather forecasts for the next 24 h, 48 h and 72 h since 1 July 2004. In this paper, the average error, the average absolute error, the skill score, the median error and the interquartile range of error are used to verify the

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15350203)和国家自然科学基金项目(42004144)共同资助

2023-10-27 收到原稿, 2023-12-12 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

$F_{10.7}$ index and A_p index forecasted by NCSW from 2005 to 2022. It was found that the $F_{10.7}$ index forecasted by NCSW for the next 24 h, 48 h, and 72 h are usually smaller than the observed $F_{10.7}$ index; the A_p index for the next 24 h is usually higher than the observed A_p index, while A_p index forecasted for the next 48 h and 72 h are usually lower than the observed A_p index. The higher the level of solar activity, the greater the forecast error of the $F_{10.7}$ index is. However, the maximum forecast error of the A_p index occurs in the declining period of solar activity. In addition, we compared the forecasts of NCSW with the simple statistical models such as the persistence model, 14 days recurrence model, 14 days corrected recurrence model, 27 days recurrence model, and 27 days corrected recurrence model, and found that the forecast performance of NCSW is usually better than that of five simple statistical models. For the $F_{10.7}$ index, the forecast performance of NCSW is slightly better than that of the persistence model, and significantly better than that of the four recurrence models. However, when the solar activity level is high, the persistence model's performance of the $F_{10.7}$ index for the next 72 h is better than that of NCSW. For the A_p index, in most cases, the performance of NCSW is significantly better than that of statistical models. However, when geomagnetic disturbances are severe, the A_p index forecasted by the 27 days recurrence model is more accurate than that forecasted by NCSW.

Key words Space weather, Forecast verification, $F_{10.7}$ index, A_p index

0 引言

随着科学技术的发展和进步,有关空间天气监测、预报和应用服务研究不断深入.作为中国首个空间天气业务中心,国家空间天气监测预警中心(NCSW)于2002年6月1日成立,承担中国空间天气监测预警、预报发布和应用服务,并于2004年7月1日正式开展空间天气业务.在空间天气日报中,NCSW可以提供未来1~3 d的空间天气状况预报,包括太阳 $F_{10.7}$ 指数、地磁 A_p 指数、耀斑爆发概率、地磁暴概率以及太阳质子事件概率预报.空间天气日报会在当日01:30 UTC之前对外发布^{*}.

太阳极紫外辐射是中高层大气温度和密度变化的重要能量来源.但是太阳极紫外辐射无法在地面进行观测,且太阳极紫外辐射的卫星观测历史相对较短.一些研究表明,太阳极紫外辐射强度与 $F_{10.7}$ 指数具有很好的正相关^[1,2].200 km以上的高层大气温度同样与 $F_{10.7}$ 指数线性相关^[3,4].因此,可用 $F_{10.7}$ 指数的变化来反映其顶层温度和大气密度的变化.由于 $F_{10.7}$ 指数可在地面进行连续观测,且观测历史较长,因此长期以来都用 $F_{10.7}$ 指数来表征太阳极紫外辐射强度,并作为中高层大气密度分布和电离层电子密度分布等模型的输入条件,用来预报中高层大气的温

度、密度和电离层电子密度^[5-7].

地球磁场本身是相对稳定的,但太阳活动会对地球磁场产生扰动,剧烈的地磁扰动又会对电离层和中高层大气产生影响,形成恶劣的空间环境.热层大气密度从太阳活动高年到低年约有两个数量级的变化,地磁暴可对热层大气造成短时间尺度的剧烈扰动^[8-15].为了便于记录并应用地磁扰动,形成了实用的地磁 A_p 指数来表征全球的全日地磁扰动强度^[6,16].

对预报数据进行检验是空间天气预报业务的重要环节,也是空间天气预报业务可持续发展的基础.预报检验在气象领域中已经使用数十年,一些空间天气预报机构也陆续对自己的预报结果开展检验^[17-21].本文采用成熟的气象业务规范^[22],并参考国际上通用的空间天气预报检验方法^[19],对2005—2022年间NCSW未来3 d的 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报结果进行检验,并与统计预报模型的预报结果进行对比.通过系统科学的检验,将有利于对 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报质量进行定量、科学、规范的分析,评价业务中的新技术对预报质量的改善,以便提高预报准确率.此外,采用标准化的检验方法,将有利于与国内外同行进行预报经验交流,进而提高空间天气整体预报水平.

^{*} http://www.nsmc.org.cn/NSMC/spaceweather/cn/sws/forecast_search.html

1 预报参数与检验方法

1.1 预报参数

$F_{10.7}$ 指数是每日 12:00 LT 在频率为 2800 MHz 处测量并改正到距离太阳 1 个天文单位处的太阳射电流量密度, 单位为 sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$). 国际上以加拿大布列颠哥伦比亚省彭蒂克顿射电天文台的测量为准. $F_{10.7}$ 实测数据可以从加拿大布列颠哥伦比亚省彭蒂克顿射电天文台* 或者美国空间天气预报中心 (SWPC) 获取.

A_p 指数可以反映当日全球地磁扰动的整体情况, 单位为 nT. 业务上以 SWPC 发布的 A_p 指数观测值为准**.

1.2 检验方法

采用平均误差、平均绝对误差、技术评分、误差中值和四分位数极差对 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报值进行检验.

平均误差是预报值与观测值偏差的平均值, 反映了预报值的平均偏离程度, 计算公式如下:

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i). \quad (1)$$

其中, F_i 和 O_i 分别代表预报值和观测值, N 为使用的样本数. 平均绝对误差是预报值与观测值偏差的绝对值的平均, 由于误差被绝对值化, 不会出现正负相抵消的情况, 因此能更好地反映预报值偏离的实际情况, 其计算式如下:

$$E_{ma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|F_i - O_i|). \quad (2)$$

均方根误差反映预报值偏离观测值的离散程度, 其计算式如下:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}. \quad (3)$$

技术评分是根据均方根误差定义的^[19], 其计算式如下:

$$S_{skill} = 1 - \frac{E_{ms}}{E_{ms,ref}}. \quad (4)$$

其中, $E_{ms} = E_{rms}^2$, $E_{ms,ref}$ 为参考模型的均方误差. 本文使用的参考模型为跟报模型, 技术评分的取值范围为 $(-\infty, 1]$. 预报值的均方误差越接近参考模型的均方误差, 技术评分越接近 0, 说明预报模型与参考模型性能越一致; 预报值的均方误差远小于参考模型的均方误差, 技术评分为 1; 预报值的均方误差远大于参考模型的均方误差, 技术评分为负无穷. 当预报值的均方误差越接近 0, 技术评分越接近 1, 说明预报越准确.

极差是预报值的最大误差与最小误差之间的差值. 将最小 25% 的误差和最大 25% 的误差去掉后, 得到的极差就是四分位数极差. 四分位数极差反映了中间 50% 数据的离散程度, 四分位数极差越小, 说明中间数据越集中, 反之则越分散^[23].

2 预报检验结果与分析

图 1 以 2014 年的数据为例, 给出了 $F_{10.7}$ 指数的

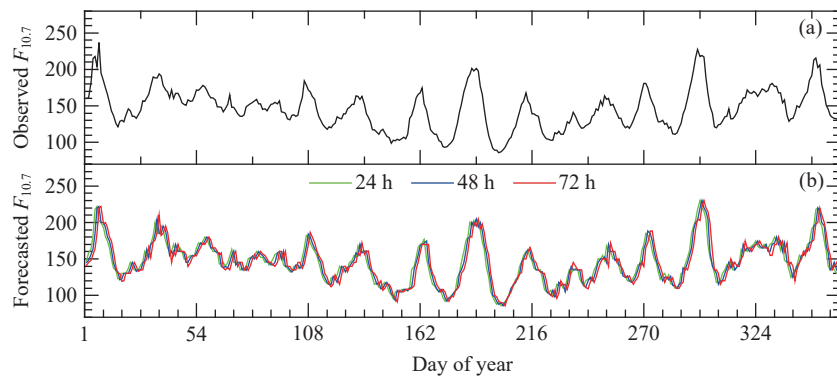


图 1 2014 年 $F_{10.7}$ 指数的观测值和 NCSW 预报的未来 24 h, 48 h 和 72 h 的 $F_{10.7}$ 指数分布

Fig. 1 Distribution of the observed $F_{10.7}$ index and the $F_{10.7}$ index forecasted by NCSW for the next 24 h, 48 h and 72 h during 2014

* ftp://ftp.seismo.nrcan.gc.ca/spaceweather/solar_flux/daily_flux_values/fluxtable.txt

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

观测值, 以及 NCSW 的 24 h, 48 h 和 72 h 预报值分布. 从图 1(a) 可以看出, 受太阳 27 d 自转周期的影响, $F_{10.7}$ 的观测值存在明显的 27 d 周期, 尤其在第 136~216 d 之间比较明显. 从图 1(b) 可以看出, 预报峰值的出现时间往往会落后于观测值的峰值时间, 例如第 187 d 观测值出现一个峰值, 但 24 h, 48 h 和 72 h 的预报最大值却分别出现在第 188 d, 189 d 和 190 d. 这说明在预报过程中隐含使用了跟报规则.

2.1 预报模型

为了评估检验 NCSW 的 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报结果, 利用简单的统计预报模型对同一个参数进行预报, 并将 NCSW 的预报性能与统计预报模型的预报性能进行对比, 以便找到隐含的可用于提高人工预报性能的方法. 本文使用的统计预报模型包括跟报模型、27 天回归模型、27 天回归修正模型、14 天回归模型和 14 天回归修正模型.

跟报模型是假设今天的太阳活动或者地磁活动跟昨天处于同一水平, 因此未来 3 d 的 $F_{10.7}$ 指数和地磁 A_p 指数的预报值与昨天的观测值一致.

27 天回归模型是基于太阳是空间天气的源头, 考虑到太阳的自转周期平均为 27 d, 假设今天的太阳活动或者地磁活动与 27 d 前处于同一水平, 因此今天的 $F_{10.7}$ 指数和地磁 A_p 指数的预报值与其对应的 27 d 前的观测值相同.

27 天回归修正模型介于跟报模型和 27 天回归模型之间, 是在 27 天回归模型基础上, 将前一天的观测值与其对应的 27 d 前的观测值的增量应用于 27 天回归模型中. 以 $F_{10.7}$ 为例, 第 n 天的 $F_{10.7}$ 预报值为

$$F_{10.7,n} = F_{10.7,n-27} + F_{10.7,n-1} - F_{10.7,n-28}. \quad (5)$$

其中, $F_{10.7,n-28}$, $F_{10.7,n-27}$ 和 $F_{10.7,n-1}$ 分别为第 $(n-28)$ 天, $(n-27)$ 天和 $(n-1)$ 天的观测值.

此外, 由于太阳上的活动区并非均匀分布, 而是存在两个相差约 14 d 的活动经度带^[24-30], 因此本文对 14 天回归模型和 14 天回归修正模型的预报性能同样进行了检验^[19]. 14 天回归模型和 14 天回归修正模型的原理分别跟 27 天回归模型和 27 天回归修正模型的原理类似.

2.2 $F_{10.7}$ 指数检验

图 2 给出了不同预报方法预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均误差、平均绝对误差和技术评分分布情况. 从图 2(a) 可以看出, NCSW、14 天回归模型、27 天回归

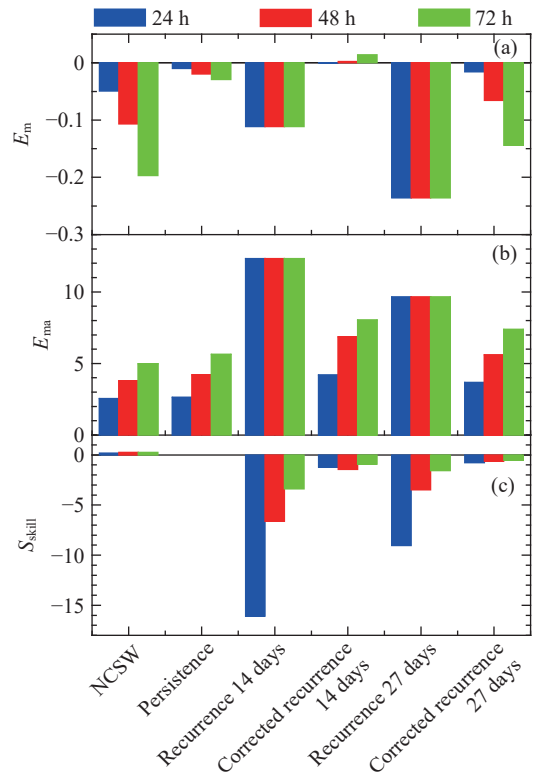
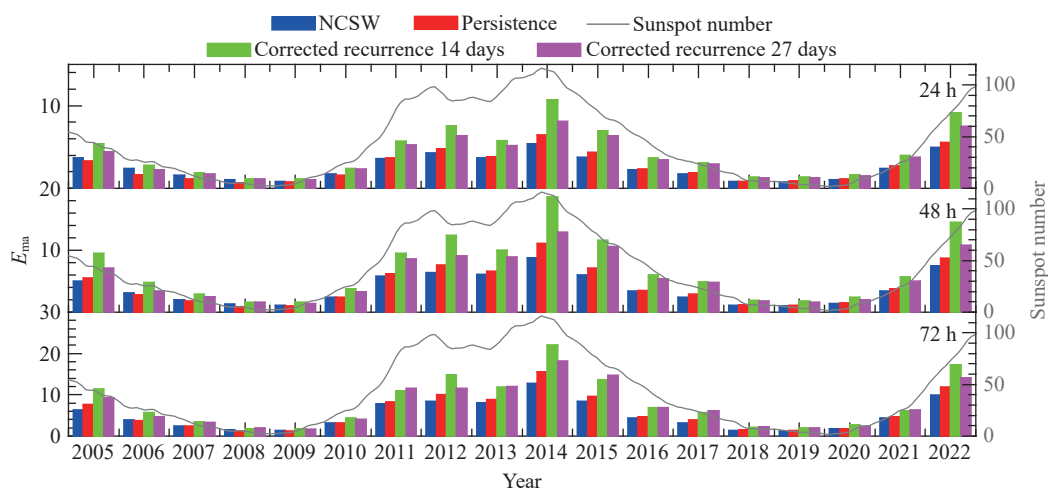
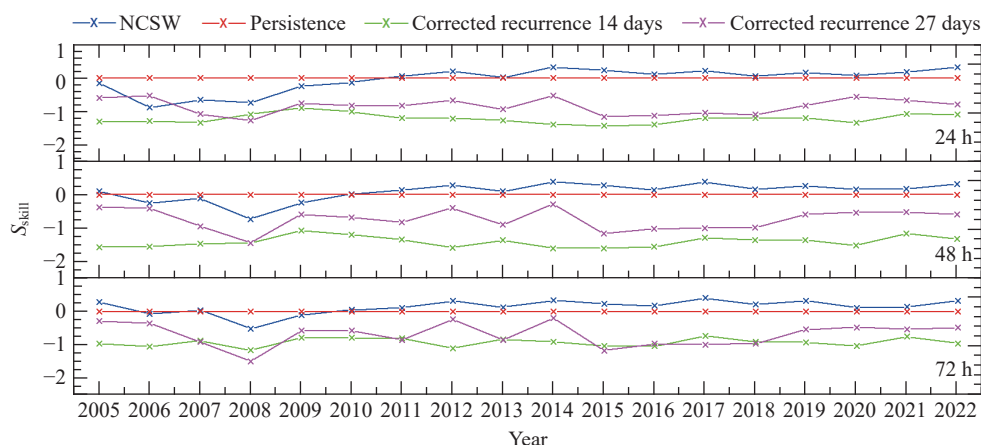


图 2 NCSW 和不同统计预报模型预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均误差、平均绝对误差和技术评分

Fig. 2 Mean errors, absolute errors and skill scores of $F_{10.7}$ index forecasted by NCSW and different statistical models

模型以及 27 天回归修正模型预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均误差明显小于 0, 说明 $F_{10.7}$ 指数平均被低估比被高估的可能性更大; 而跟报模型和 14 天回归修正模型预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均误差都接近 0. 从图 2(b) 可以看出, NCSW 预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均绝对误差最小, 即其预报性能最好. 跟报模型的 $F_{10.7}$ 指数预报性能比 NCSW 略差, 27 天回归修正模型的 $F_{10.7}$ 指数预报性能位于中间, 14 天回归模型和 27 天回归模型的 $F_{10.7}$ 指数预报性能最差. 如图 2(c) 所示, NCSW 的技术评分同样略高于跟报模型的技术评分.

为了评估 NCSW 与不同统计预报模型的预报性能是否受太阳活动水平的影响, 分别计算了 NCSW 和 3 个平均绝对误差较小的统计预报模型预报的 $F_{10.7}$ 指数每年的平均绝对误差 (见图 3) 和技术评分 (见图 4). 图 3 给出了不同预报方法预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均绝对误差分布情况. 整体来看, NCSW 和跟报模型的 $F_{10.7}$ 指数的预报性能高于 14 天回归修正

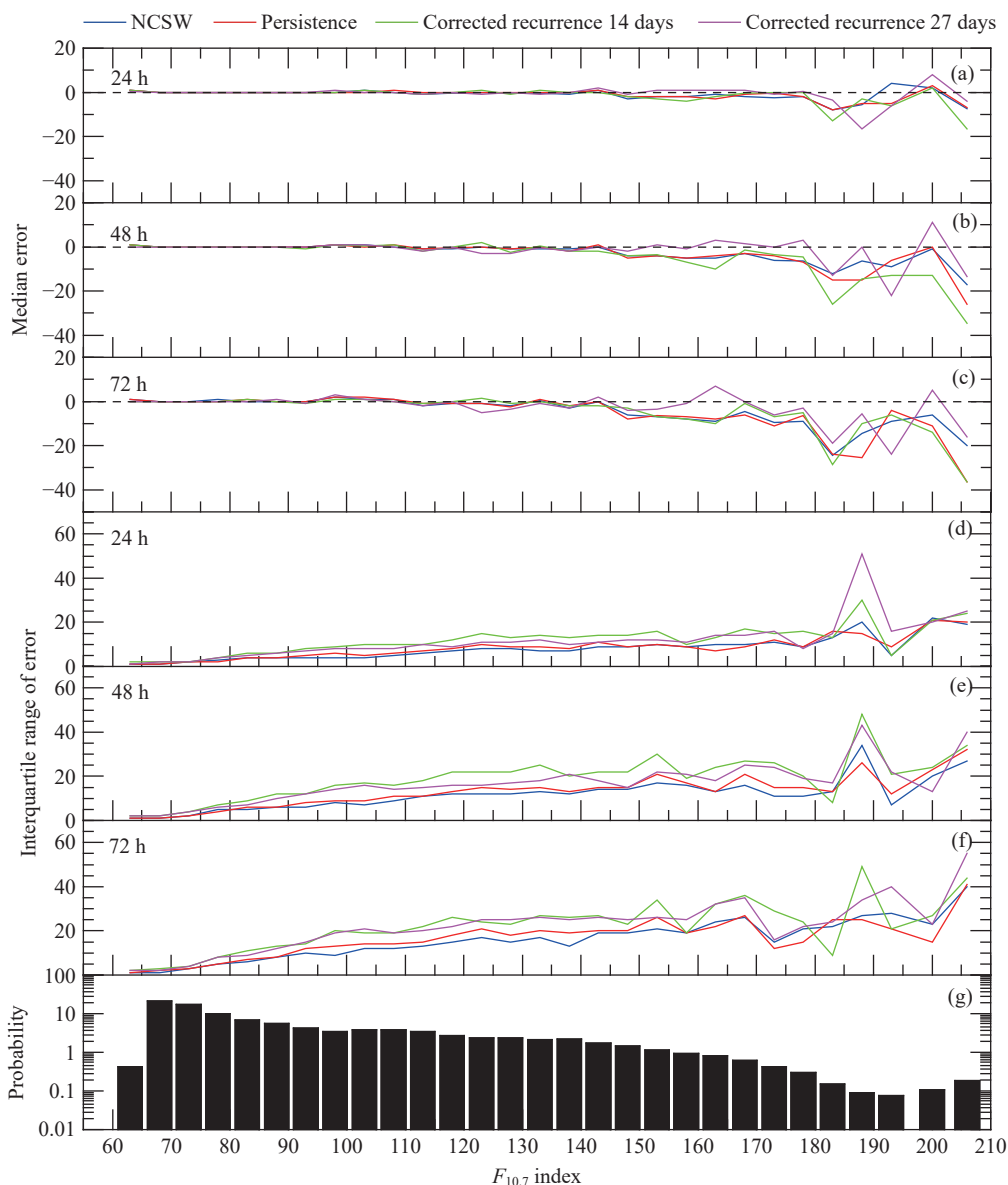
图 3 2005—2022 年 $F_{10.7}$ 指数预报值的平均绝对误差分布Fig. 3 Distribution of the mean absolute errors for the forecast of $F_{10.7}$ index from 2005 to 2022图 4 2005—2022 年 $F_{10.7}$ 指数预报值的技术评分分布Fig. 4 Distribution of the skill scores of forecasted $F_{10.7}$ index from 2005 to 2022

模型和 27 天回归修正模型. 2010 年之前, 跟报模型的 $F_{10.7}$ 指数的预报性能高于 NCSW 和其他两种统计预报模型, 其预报值的平均绝对误差整体小于 NCSW 和其他统计预报模型的平均绝对误差. 2010 年, 跟报模型预报的未来 24 h 的 $F_{10.7}$ 指数的平均绝对误差小于 NCSW 和其他统计预报模型, 但未来 48 h 和 72 h 的平均绝对误差高于 NCSW. 从 2011 年开始, NCSW 的预报性能有所提高, 24 h, 48 h 和 72 h 的 $F_{10.7}$ 指数预报值的平均绝对误差均小于其他统计预报模型. 从 $F_{10.7}$ 指数的预报技术评分也可以得到相似的结论 (见图 4).

太阳黑子数表征了太阳活动水平的高低, 太阳黑子数越高表明太阳活动越剧烈. 从图 3 还可以看出,

在太阳活动低年, NCSW 和其他 3 个统计预报模型预报的 $F_{10.7}$ 指数的平均绝对误差都比较小, 而随着太阳活动的增强, 平均绝对误差会不断增大. 这说明, 对于 $F_{10.7}$ 指数的预报, 在太阳活动低年时相对更容易, 而在太阳活动高年则难度较大.

为了研究不同大小的 $F_{10.7}$ 指数观测值对应的预报误差变化情况, 将 $F_{10.7}$ 指数观测值从 61 sfu 开始每增加 5 sfu 以内的天数划分为一组进行统计, 例如 $F_{10.7}$ 指数观测值为 61~65 sfu 的天数为 1 组, 66~70 sfu 的天数为 1 组. 由于不小于 196 sfu 的天数比较少, 因此将 $F_{10.7}$ 指数观测值为 196~205 的天数划分为 1 组, 所有不小于 206 sfu 的天数划为 1 组. 图 5(a)~(c) 给出了不同 $F_{10.7}$ 指数观测值对应不同

图5 2005—2022年不同 $F_{10.7}$ 指数观测值对应的预报误差分布Fig. 5 Errors conditional on the observed $F_{10.7}$ index from 2005 to 2022

预报方法的预报误差中位数变化, 图5(d)~(f)给出了四分位极差分布情况. 图5(g)给出了不同大小的 $F_{10.7}$ 指数观测值的天数占总天数的概率.

如果预报误差中位数为1 sfu, 说明有一半天数的预报误差大于1 sfu, 另半天数的预报误差小于1 sfu. 分析图5(a)~(c)可以看出, 在24 h预报中, 当 $F_{10.7}$ 指数观测值小于180 sfu时(约占总天数的99.1%), 4种预报方法的预报误差中位数相当, 均在 ± 3 sfu以内; 当观测值不小于181 sfu时, NCSW和跟报模型的预报性能更好一些, 均在 ± 8 sfu以

内, 14天回归修正模型和27天回归模型表现稍差. 48 h和72 h预报误差的中位数偏离0 sfu略大一些. 当 $F_{10.7}$ 指数观测值不大于145 sfu(约占总天数的93.7%)时, 4种预报方法的误差中位数相当, 均接近0. 当 $F_{10.7}$ 指数观测值介于146~180 sfu之间时, 27天回归修正模型表现更好. 多数情况下NCSW的 $F_{10.7}$ 指数预报误差中位数不大于0, 再次说明多数时候, NCSW的 $F_{10.7}$ 指数预报值偏小.

图5(d)~(f)给出了 $F_{10.7}$ 指数预报误差的四分位极差的变化情况. 以24 h预报为例, $F_{10.7}$ 指数观测

值为 96~100 sfu 时对应的 NCSW 四分位数极差为 4 sfu, 那么意味着在这个范围内有一半的天数预报误差在 ± 2 sfu 范围内. 在 24 h 预报中, 除 $F_{10.7}$ 观测值介于 196~205 sfu 之间时, NCSW 和跟报模型的预报误差的四分位数极差略大于 20 sfu 外, 其余时间均不大于 20 sfu. 在 48 h 和 72 h 预报中, 当 $F_{10.7}$ 指数观测值分别不大于 185 sfu (约占总天数的 99.5%) 和 150 sfu (约占总天数的 95.2%) 时, NCSW 的预报误差的四分位数极差小于 20 sfu, 跟报模型表现略差. 但在 72 h 预报中, 当 $F_{10.7}$ 指数不小于 170 sfu 时, 跟报模型表现最好.

2.3 A_p 指数检验

图 6 给出了 NCSW 和不同统计预报模型预报的 A_p 指数的平均误差、平均绝对误差和技术评分对比. 从图 6(a) 可以看出, NCSW 的 24 h 预报的平均误差大于 0, 48 h 和 72 h 预报的平均误差小于 0, 即 NCSW 预报未来 24 h 的 A_p 指数平均比观测值大, 预报

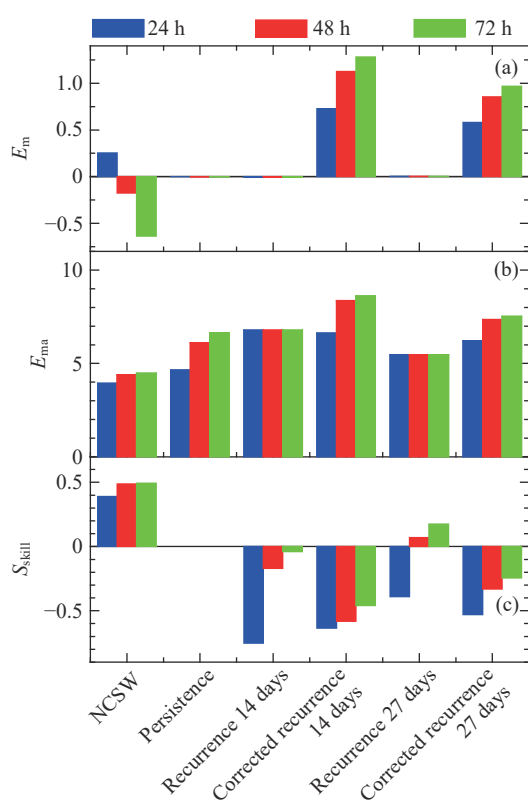


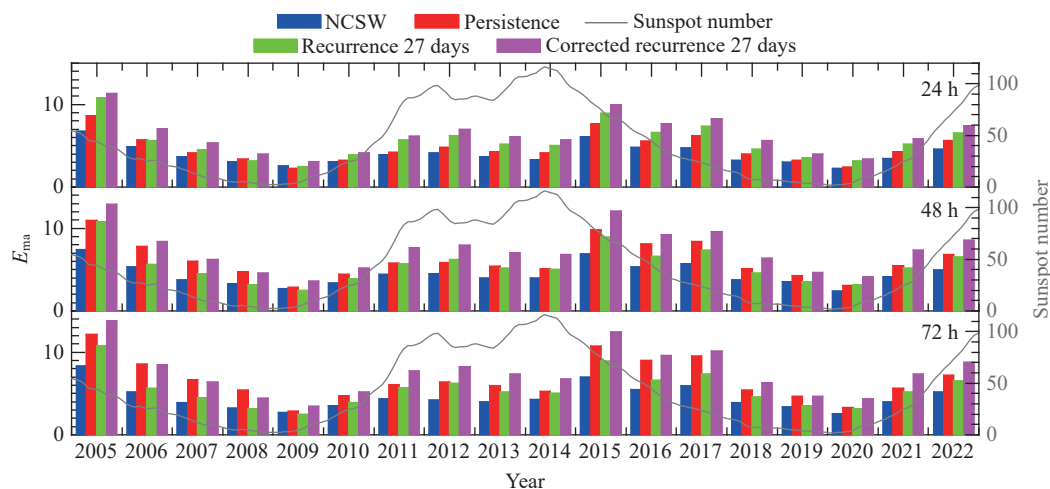
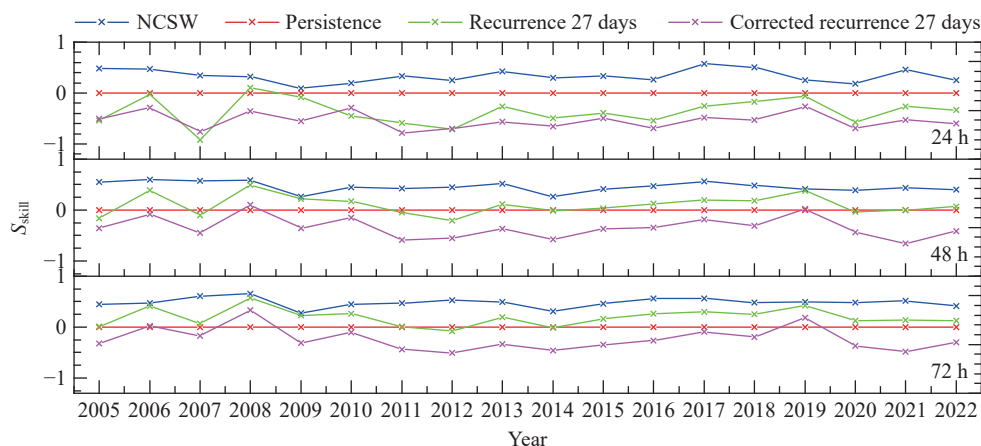
图 6 NCSW 和不同统计预报模型预报的 A_p 指数的平均误差、平均绝对误差和技术评分

Fig. 6 Mean errors, mean absolute errors and skill scores of A_p index forecasted by NCSW and different statistical models

的 48 h 和 72 h 的 A_p 指数平均比观测值小. 14 天回归修正模型和 27 天回归修正模型预报的 24 h, 48 h 和 72 h 的 A_p 指数平均比观测值大, 而跟报模型、14 天回归模型和 27 天回归模型预报的 A_p 指数的平均误差接近 0. 从图 6(b) 可以看出, NCSW 预报的未来 24 h, 48 h 和 72 h 的 A_p 指数的平均绝对误差在所有预报方法中均最小, 即其预报性能最好. 在 5 个统计预报模型中, 跟报模型预报的 24 h 的平均绝对误差最小, 27 天回归模型预报的 48 h 和 72 h 的平均误差最小, 14 天回归修正模型表现最差. 从图 6(c) 也可以看出, 只有 NCSW 的 24 h, 48 h 和 72 h 的技术评分, 以及 27 天回归模型的 48 h 和 72 h 的技术评分大于 0, 即其预报性能优于跟报模型的预报性能.

为了评估 NCSW 和不同统计预报模型预报 A_p 指数的性能是否受太阳活动水平影响, 分别计算 NCSW 和 3 个平均绝对误差较小的统计预报模型预报的 A_p 指数每年的平均绝对误差 (见图 7) 和技术评分 (见图 8). 从图 7 可以看出, 除 2009 年外, NCSW 预报的未来 24 h, 48 h 和 72 h 的 A_p 指数的平均绝对误差均小于其他 3 个统计预报模型, 即其预报性能最好. 在 24 h 预报中, 跟报模型预报的 A_p 指数的平均绝对误差小于两个回归模型的平均绝对误差, 但在 48 h 和 72 h 预报中, 27 天回归模型预报的 A_p 指数的平均绝对误差要小于其他 2 个统计预报模型的平均绝对误差. 在 4 个预报方法中, 27 天回归修正模型的平均绝对误差最大. 此外, 从图 7 还可以发现, 在太阳活动下降阶段, A_p 指数预报值的平均绝对误差相对比较大. 从 A_p 指数的预报技术评分 (见图 8) 同样可以发现, NCSW 的预报性能明显好于其他 3 种统计预报模型.

与 $F_{10.7}$ 指数类似, 同样研究不同大小的 A_p 指数观测值对应的预报误差变化情况, 如图 9 所示. 将 A_p 指数从 0 nT 开始观测值每增加 5 nT 以内的天数划分为一组进行统计, 例如 A_p 指数观测值为 0~4 nT 的天数为 1 组, 5~9 nT 的天数为 1 组. 由于不小于 70 nT 的天数比较少, 因此将所有不小于 70 nT 的天数划为一组. 从图 9(a)~(c) 可以看出, NCSW、跟报模型、27 天回归模型和 27 天回归修正模型的预报误差中位数相当, 且多数情况下误差中位数小于 0, 即预报值多数情况下都会被低估. 实测值越大, 被低估的也越大. 当实测值不小于 25 nT 时, 预报值误差中位数低于 -10 nT. 从图 9(d)~(f) 可以看出, 当

图7 2005—2022年 A_p 指数预报值的平均绝对误差分布Fig. 7 Distribution of the mean absolute errors for the forecast of A_p index from 2005 to 2022图8 2005—2022年 A_p 指数预报值的技术评分分布Fig. 8 Distribution of the skill scores of forecasted A_p index from 2005 to 2022

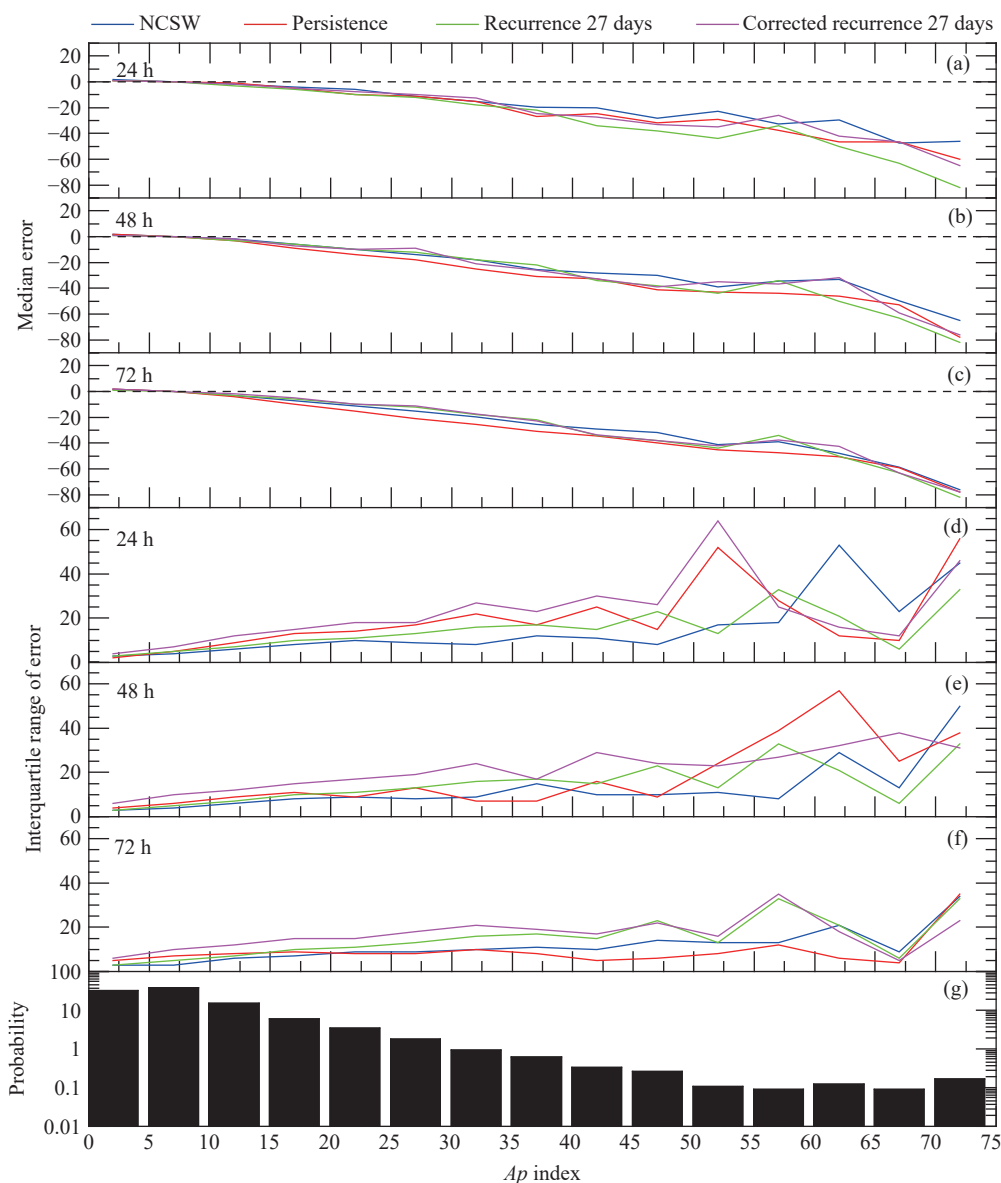
A_p 指数观测值小于 60 nT 时, NCSW 的预报性能整体表现更好, 其 A_p 指数预报值误差的四分位数极差均小于 20 nT. 但是当 A_p 指数观测值超过 60 nT 时, 统计预报模型表现要更好一些. 在 24 h 和 72 h 预报中, 3 种统计预报模型的四分位数极差相当, 在 48 h 预报中, 27 天回归模型的预报表现更好.

3 讨论与结论

利用平均误差、平均绝对误差、技术评分、误差中值和四分位数极差对 2005—2022 年 NCSW 的 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数预报结果进行检验, 并与跟报模型、14 天回归模型、14 天回归修正模型、27 天回归模

型和 27 天回归修正模型进行了对比.

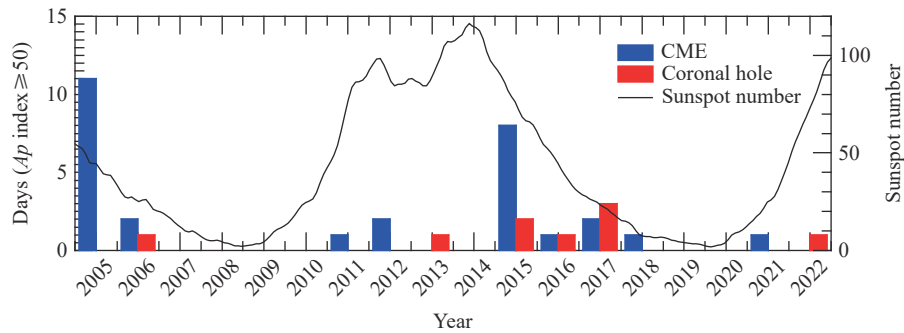
通过检验发现, NCSW 预报的未来 24 h, 48 h 和 72 h 的 $F_{10.7}$ 指数的平均误差均小于 0, 且多数情况下, 其误差中位数不大于 0, 即 NCSW 预报的 $F_{10.7}$ 指数通常比实测值偏小. NCSW 预报的未来 24 h 的 A_p 指数平均比实测值偏大, 48 h 和 72 h 的 A_p 指数平均比实测值偏小. 通过与简单的统计模型的预报结果对比发现, NCSW 的整体预报性能优于 5 个统计模型的预报性能. 在 5 个统计模型中, 跟报模型预报 $F_{10.7}$ 指数的性能最好, 而 27 天回归模型预报 A_p 指数的性能最好. 这是由于与 $F_{10.7}$ 指数相比, A_p 指数变化相对比较快, 跟报模型只有在地磁比较平静时有优势, 27 天回归模型对预报冕洞高速流引起

图 9 2005—2022 年不同 A_p 指数观测值对应的预报误差分布Fig. 9 Errors conditional on the observed A_p index from 2005 to 2022

的地磁扰动则有明显优势.

此外还发现, 太阳活动水平越低, $F_{10.7}$ 指数的预报误差会越小, 反之越大. 这很容易理解, 因为 $F_{10.7}$ 指数主要受可见日面上的活动区影响, 太阳活动低年, 可见日面上的活动区很少, 甚至没有, $F_{10.7}$ 指数的变化非常小, 比较容易预报; 而在太阳活动高年, 可见日面上的活动区比较多且演化比较快, $F_{10.7}$ 指数除本身比较大外, 其变化也比较大, 因此相对太阳活动低年, 其预报相对会更困难. 通常认为, 在太阳活动高年, 日冕物质抛射 (CME) 爆发的频率更高, 引起地磁扰动更加频繁, 从而导致 A_p 指数预报困难, 误差

会更大一些. 然而, 实际上 NCSW 的 A_p 指数的预报误差的最大值并非出现在太阳活动高年, 而是出现在太阳活动下降段. 为此, 对 2005—2022 年 A_p 指数 ≥ 50 的大地磁扰动天数进行了统计. 这 11 年共有 38 d 的 A_p 指数 ≥ 50 , 其中 2005 年和 2015 年分别有 11 d 和 10 d, 正好对应图 7 中 A_p 指数预报值的平均绝对误差最大的 2 年. 通过对这些地磁暴产生的原因进行分析发现, 这些大地磁扰动多数是由 CME 引起. 在这 38 d 中, 其中有 29 d 的地磁扰动的源头是 CME, 9 d 的地磁扰动的源头是冕洞, 且多数由 CME 引起的大地磁扰动发生在 2005 年和 2015 年, 具体分

图 10 2005—2022 年 A_p 指数 ≥ 50 的地磁扰动天数分布Fig. 10 Distribution of days of geomagnetic disturbance with A_p index ≥ 50 from 2005 to 2022

布如图 10 所示. 这也是在太阳活动下降段 A_p 指数的平均绝对误差比较大的原因.

鉴于 NCSW 的 $F_{10.7}$ 指数预报值通常比实测值偏小, 在今后的预报中, $F_{10.7}$ 指数可适当报高一些, 尤其是太阳活动高年, 在未来 72 h 预报中, 可更多参考跟报模型的预报结果. 对于冕洞引起的地磁扰动, NCSW 可更多参考 27 天回归模型的预报结果, 以提高预报的准确率.

$F_{10.7}$ 指数大小会受可见日面上活动区的影响, 当有新活动区从太阳东边缘转入可见日面时, $F_{10.7}$ 指数会增加; 反之, 当有活动区从太阳西边缘转出可见日面时, $F_{10.7}$ 指数会减小. 此外, 随着可见日面活动区的生成、发展或衰减, $F_{10.7}$ 指数也会发生变化. 在日地关系观测台 (STEREO 卫星)^[31] 发射之前, 尚无法对太阳背面进行观测, 因此也就无法预知是否有新活动区即将转入可见日面. 2006 年 STEREO 卫星发射后, 其搭载的极紫外成像仪可以对太阳背面进行紫外成像观测, 从而使得人工预报可以判断是否有新活动区即将转入可见日面. 但是统计预报模型仍无法判断是否有活动区转入或者转出可见日面. 2010 年太阳动力学天文台 (SDO 卫星)^[32] 发射, 其搭载的日震与磁场成像仪首次实现 24 h 不间断地观测太阳矢量磁场^[33], 从而使预报员可以判断活动区的演化情况, 为提升 $F_{10.7}$ 指数预报的准确率提供了重要的数据基础. 这也就是 NCSW 的人工预报性能优于统计预报模型的原因. 在 2011 年之前, 由于太阳活动正处于低谷, 可见日面上的活动区比较少, $F_{10.7}$ 指数的变化相对比较小, 加上空间天气预报业务刚起步, 预报员经验相对不足, 因此 NCSW 人工预报的准确率反而没有跟

报模型的预报准确率高.

对于 A_p 指数而言, 除考虑冕洞高速流对地球磁场的影响外, 还需要考虑 CME 对地球磁场的影响. 冕洞的寿命往往超过几个太阳自转周, 同一个冕洞对地球磁场的影响大约有 27 d 周期; 而 CME 的爆发具有偶然性, 目前还很难预测, 且 CME 到达地球后, 对地磁场的影响要远大于冕洞高速流的影响. 虽然从 CME 爆发到其到达地球附近还有 3 d 左右时间, 但是从太阳到地球的距离非常遥远, 中间的空间环境也比较复杂, 而目前却没有太多的手段对其进行监测. 在后续人工预报中, 对于冕洞的影响, 除考虑参考 27 天回归模型的预报结果外, 还可以考虑加入其他观测资料, 例如冕洞面积、亮度、经度跨度^[34,35] 以及冕洞源区磁场特征等; 对于 CME 的影响, 可以参考数值预报模式*的预报结果.

随着计算机技术和计算理论的发展以及数字数据的激增, 近些年机器学习变得非常流行. 目前, 机器学习方法用于 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报工作还比较少, Gao 等^[36] 基于长短时记忆神经网络, 利用 $F_{10.7}$ 和太阳黑子数的历史数据, 发展了一种预报未来 7 d 的 $F_{10.7}$ 指数的预报方法, 其预报性能优于 SWPC 的预报性能. 在太阳耀斑预报方面, 大量研究开始尝试利用机器学习方法来进行预报, 并取得了很好的成效^[37-43]. 这些预报方法同样可以通过改进, 将太阳光球观测数据^[44]、太阳极紫外图像数据^[45] 以及太阳磁场数据^[46] 等作为输入数据用于 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数的预报. 随着 $F_{10.7}$ 指数和 A_p 指数预报方法的改进, 可以沿用本文的评估检验方法来评估检验新的预报方法的预报性能.

* <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard>

参考文献

- [1] ROEMER M, FRAMKE W, SCHUCHARDT K G H. Solar EUV and decimetric indices and thermospheric models[J]. *Advances in Space Research*, 1983, **3**(1): 75-82
- [2] HEDIN A E. Correlations between thermospheric density and temperature, solar EUV flux, and 10.7-cm flux variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1984, **89**(A11): 9828-9834
- [3] LIU Fang, CAI Lifeng, SUN Xianwei, *et al.* Fusion application of prediction data for space environmental parameters in orbit control strategy[J]. *Radio Engineering*, 2019, **49**(4): 314-318 (刘芳, 蔡立锋, 孙先伟, 等. 空间环境参数预报数据在轨控策略中的融合应用 [J]. *无线电工程*, 2019, **49**(4): 314-318)
- [4] PISACANE V L. The Space Environment and its Effects on Space Systems[M]. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008 (张育林, 陈小前, 闫野, 译. 空间环境及其对航天器的影响 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011)
- [5] LIN Yuanzhang. Introduction of Solar Physics[M]. *Beijing: China Science Press*, 2000 (林元章. 太阳物理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000)
- [6] WANG Jingsong, LÜ Jianyong. Space Weather[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009 (王劲松, 吕建永. 空间天气 [M]. 北京: 气象出版社, 2009)
- [7] ZHANG Xiaoxin, DU Dan, GUO Jianguang. Quantitative Forecasting Model of Space Weather[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016 (张效信, 杜丹, 郭建广. 空间天气定量预报模式 [M]. 北京: 气象出版社, 2016)
- [8] LEI Jiuhou, LI Ruoxi, REN Dexin, *et al.* Recent progress on the retrieval and modeling of thermosphere mass density[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, **54**(4): 434-454 (雷久侯, 李若曦, 任德馨, 等. 热层大气密度反演与建模研究进展 [J]. *地球与行星物理论评*, 2023, **54**(4): 434-454)
- [9] BRUINSMA S, FORBES J M, NEREM R S, *et al.* Thermosphere density response to the 20–21 November 2003 solar and geomagnetic storm from CHAMP and GRACE accelerometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A6): A06303
- [10] LEI J H, THAYER J P, LU G, *et al.* Rapid recovery of thermosphere density during the October 2003 geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A3): A03306
- [11] LEI J H, BURNS A G, THAYER J P, *et al.* Overcooling in the upper thermosphere during the recovery phase of the 2003 October storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A3): A03314
- [12] LIU R, LÜHR H, DOORNBOS E, *et al.* Thermospheric mass density variations during geomagnetic storms and a prediction model based on the merging electric field[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(9): 1633-1645
- [13] LIU R, MA S Y, LÜHR H. Predicting storm-time thermospheric mass density variations at CHAMP and GRACE altitudes[J]. *Annales Geophysicae*, 2011, **29**(3): 443-453
- [14] LÜHR H, ROTHER M, KÖHLER W, *et al.* Thermospheric up-welling in the cusp region: evidence from CHAMP observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(6): L06805
- [15] SUTTON E K, FORBES J M, NEREM R S. Global thermospheric neutral density and wind response to the severe 2003 geomagnetic storms from CHAMP accelerometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A9): A09S40
- [16] LIU Zhenxing. Space Physics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005 (刘振兴. 太空物理学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005)
- [17] ZHANG Guiqing, WANG Jialong. Verification on new scheme of predicting x-ray flares in BAO and comparison with predicting effectiveness of old scheme and WWA[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, **9**: 42-47 (张桂清, 王家龙. 北京天文台太阳活动预报新方案的检验和与旧方案及 WWA 预报效果的比对 [J]. *地球物理学报*, 1994, **9**: 42-47)
- [18] CROWN M D. Validation of the NOAA space weather prediction center's solar flare forecasting look-up table and forecaster-issued probabilities[J]. *Space Weather*, 2012, **10**(6): S06006
- [19] DEVOS A, VERBEECK C, ROBBRECHT E. Verification of space weather forecasting at the regional warning center in Belgium[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, **4**: A29
- [20] SHARPE M A, MURRAY S A. Verification of space weather forecasts issued by the met office space weather operations centre[J]. *Space Weather*, 2017, **15**(10): 1383-1395
- [21] ZHONG Q Z, WANG J J, MENG X J, *et al.* Prediction model for solar energetic proton events: analysis and verification[J]. *Space Weather*, 2017, **17**(5): 709-726
- [22] China Meteorological Administration. QX/T 295-2015 Verification methods for short-term space weather forecast[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2015 (中国气象局. QX/T 295-2015 空间天气短期预报检验方法 [S]. 北京: 中国气象出版社, 2015)
- [23] GUDMUND R I, MARY G. Statistics (The conceptual approach). New York: USA Springer, 1997 (吴喜之, 程博, 柳林旭, 等译. 统计学 (基本概念和方法). 北京: 高等教育出版社, 2000)
- [24] BERDYUGINA S V, USOSKIN I G. Active longitudes in sunspot activity: century scale persistence[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003, **405**(3): 1121-1128
- [25] USOSKIN I G, BERDYUGINA S V, POUTANEN J. Preferred sunspot longitudes: non-axisymmetry and differential rotation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, **441**(1): 347-352
- [26] ZHANG L Y, CUI Y M, HE H, *et al.* Longitudinal distri-

- bution of major solar flares during 1975-2005[J]. *Advances in Space Research*, 2007, **40**(7): 970-975
- [27] ZHANG L Y, WANG H N, DU Z L, *et al.* Long-term behavior of active longitudes for solar X-ray flares[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, **471**(2): 711-716
- [28] ZHANG L Y, WANG H N, DU Z L. Prediction of solar active longitudes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2008, **484**(2): 523-527
- [29] ZHANG L, MURSULA K, USOSKIN I, *et al.* Global analysis of active longitudes of solar X-ray flares[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, **73**(2/3): 258-263
- [30] CHEN A Q, WANG J X, LI J W, *et al.* Statistical properties of superactive regions during solar cycles 19-23[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, **534**: A47
- [31] BIESECKER D A, WEBB D F, ST CYR O C. STEREO space weather and the space weather beacon[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **136**(1/2/3/4): 45-65
- [32] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The solar dynamics observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1/2): 3-15
- [33] SCHOU J, SCHERRER P H, BUSH R I, *et al.* Design and ground calibration of the *Helioseismic and Magnetic imager* (HMI) instrument on the *Solar dynamics observatory* (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1/2): 229-259
- [34] LUO Bingxian, LIU Siqing, ZHONG Qiuzhen, *et al.* Primary study about the relationships between coronal holes' parameters and the correlative geomagnetic disturbances[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2007, **27**(2): 117-124 (罗冰显, 刘四清, 钟秋珍, 等. 冕洞特征参数与重现型地磁暴关系的统计研究 [J]. *空间科学学报*, 2007, **27**(2): 117-124)
- [35] BU Xuan, LUO Bingxian, LIU Siqing, *et al.* Statistical study between characteristic parameters of coronal holes and intensity/time of geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 9-19 (卜萱, 罗冰显, 刘四清, 等. 冕洞特征参数与地磁暴强度及发生时间统计 [J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(1): 9-19)
- [36] GAO Yang, LÜ Jianyong, WANG Ming, *et al.* Short-term prediction of solar $F_{10.7}$ radiation flux based on deep learning[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2022, **63**(1): 104-114 (高扬, 吕建永, 王明, 等. 基于深度学习的太阳 $F_{10.7}$ 辐射通量的短期预报研究 [J]. *天文学报*, 2022, **63**(1): 104-114)
- [37] 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
- [38] ZHENG Y F, LI X B, WANG X S. Solar flare prediction with the hybrid deep convolutional neural network[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **885**(1): 73
- [39] LI X B, ZHENG Y F, WANG X S, *et al.* Predicting solar flares using a novel deep convolutional neural network[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **891**(1): 10
- [40] BHATTACHARJEE S, ALSHEHHI R, DHURI D B, *et al.* Supervised convolutional neural networks for classification of flaring and nonflaring active regions using line-of-sight magnetograms[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **898**(2): 98
- [41] CHEN A Q, YE Q, WANG J X. Flare index prediction with machine learning algorithms[J]. *Solar Physics*, 2021, **296**(10): 150
- [42] LIU S X, XU L, ZHAO Z R, *et al.* Deep learning based solar flare forecasting model. II. Influence of image resolution[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **941**(1): 20
- [43] LI M, CUI Y M, LUO B X, *et al.* Deep neural networks of solar flare forecasting for complex active regions[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1177550
- [44] WEN Jing, ZHONG Qiuzhen, LIU Siqing. Model research of 10.7 cm solar radio flux 27-day forecast (II)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010, **30**(3): 198-204 (温靖, 钟秋珍, 刘四清. 太阳 10.7 cm 射电流量中期预报模型研究 (II)[J]. *空间科学学报*, 2010, **30**(3): 198-204)
- [45] LEI L, ZHONG Q, WANG J, *et al.* The mid-term forecast method of $F_{10.7}$ based on extreme ultraviolet images[J]. *Advances in Astronomy*, 2019, **2019**: 5604092
- [46] HENNEY C J, TOUSSAIN W A, WHITE S M, *et al.* Forecasting $F_{10.7}$ with solar magnetic flux transport modeling[J]. *Space Weather*, 2012, **10**(2): S02011

作者简介



陈安芹 女, 1980 年 1 月出生于山东省昌乐县, 现为国家卫星气象中心 (国家空间天气监测预警中心) 高级工程师、首席预报员, 主要研究方向为太阳活动区特征、空间天气预报等。

E-mail: chenanqin@cma.gov.cn



赵海娟 (通信作者) 女, 1977 年 4 月出生于河北省滦南县, 现为国家卫星气象中心 (国家空间天气监测预警中心) 高级工程师, 主要从事太阳活动预报研究及空间天气预报工作。

E-mail: zhaohj@cma.gov.cn