

太阳 $E_{10.7}$ 指数的反演及预报方法

雷 蕾^{1,2} 钟秋珍^{1,2} 王晶晶¹
师立勤^{1,2} 苗 娟¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 针对高层大气密度预报和轨道预报业务中对新型太阳紫外辐射指数 $E_{10.7}$ 的需求, 基于 TIMED-SEE 观测仪器提供的 0.1~105 nm 太阳辐射强度数据, 开展了 $E_{10.7}$ 指数反演和中期预报研究。 $E_{10.7}$ 指数是太阳光谱中波长为 0.1~105 nm 的辐射流量, 单位与 $F_{10.7}$ 指数相同 (sfu , $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)。 TIMED-SEE 观测仪器提供的 0.1~105 nm 太阳辐射强度实测值具有高时间分辨率、延迟时间短和易获得的优势, 利用最小二乘法拟合可反演出准实时的 $E_{10.7}$ 指数, 均方根误差为 5.445 sfu 。利用高阶自回归模型对 $E_{10.7}$ 的中期预报效果尚佳, 未来 27 天的预报值平均相对误差为 7.83%。利用同样方法还开展了 $E_{10.7}$ 指数 81 天中心滑动平均值未来 27 天预报试验, 未来 27 天的预报值平均相对误差仅为 3.63%。

关键词 $E_{10.7}$ 指数, 自回归模型, 中期预报

中图分类号 P353

Autoregressive Prediction Method of $E_{10.7}$ Index

LEI Lei^{1,2} ZHONG Qiuzhen^{1,2} WANG Jingjing¹
SHI Liqin^{1,2} MIAO Juan¹

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In response to the demand for the new solar ultraviolet radiation index $E_{10.7}$ in the operation of upper atmospheric density prediction and orbit prediction, this paper carries out the research on $E_{10.7}$ index inversion and medium-term prediction based on the integrated solar irradiance from 0.1 to 105 nm provided by TIMED-SEE instrument. The $E_{10.7}$ index is the radiation flux in the solar spectrum at wavelengths from 0.1 to 105 nm in the same unit as the $F_{10.7}$ index (sfu , $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$). The integrated solar irradiance from 0.1 to 105 nm provided by the TIMED-SEE instrument has the advantages of high time resolution, short delay time, and easy availability. The quasi-real-time $E_{10.7}$ can be retrieved by least square fitting, and the root mean square error is 5.445 sfu . The average relative error

2021-10-25 收到原稿, 2022-04-19 收到修定稿

E-mail: lilith0512@163.com. 通信作者 钟秋珍, E-mail: zhongqz@nssc.ac.cn

of the next 27 days prediction is 7.83% using the autoregressive model. Using the same method, the 27 days prediction test of the 81-day central moving average of $E_{10.7}$ is also carried out. The average relative error of the next 27-day predictions of the 81-day central moving average of $E_{10.7}$ is 3.63%.

Key words $E_{10.7}$ index, Autoregressive model, Mid-term forecast

0 引言

太阳极紫外辐射 EUV(Extreme Ultraviolet)是指波长在 10~120 nm 范围的太阳辐射,是中高层大气基本的物理加热能量来源,其扰动变化对地球中高层大气、电离层和空间天气具有重要影响^[1,2]。在极紫外漏洞^[3]时期,由于测量技术的限制,地面观测的太阳黑子数和 10.7 cm 太阳射电流量($F_{10.7}$)一直被广泛用于表征地球大气接受的太阳极紫外辐射强度。但实际上太阳黑子数和 $F_{10.7}$ 对地球大气没有任何直接影响^[4,5]。Tobiska^[6]通过统计 1982 年 4 月 1 日至 1983 年 8 月 9 日的太阳中层大气探测卫星的日海拔衰减数据,发现 $F_{10.7}$ 的数值比大气真实接收的极紫外能量高 60% 或低 50%。为有效提升中高层大气模型的精度,提出了一种新的太阳辐射指数 $E_{10.7}$ 。

$E_{10.7}$ 指数是地球大气顶部太阳光谱中波长为 1~105 nm 的辐射流量 $E(t)$ 的积分,并以与 $F_{10.7}$ 指数一致的单位 sfu($1 \text{ sfu}=10^{-22} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$)给出。表达式为

$$E(t) = \sum_{\lambda=1 \text{ nm}}^{105 \text{ nm}} E(\lambda, t). \quad (1)$$

其单位为 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。利用多项式拟合技术,可以将 $E(t)$ 转化为与 $F_{10.7}$ 同样的单位, $E_{10.7}$ (单位sfu)的表达式如下^[6]:

$$E_{10.7} = a_0 + a_1 E(t) + a_2 E(t)^2 + a_3 E(t)^3. \quad (2)$$

对大气有效加热效应的太阳辐射主要集中在 1~105 nm 的波段,因此 $E_{10.7}$ 是更有效表征太阳活动对中高层大气扰动的代理指数。在针对不同太阳辐射指数对大气模型精度的对比分析中, $E_{10.7}$ 的应用可有效提升大气模型的精度^[7]。在中国的轨道预报业务中,后续也将应用 $E_{10.7}$ 。

2000 年美国空间环境技术中心 SpaceWX 发布的 Solar2000(S2 K)大气辐射模型^[8,9]中提供了 $E_{10.7}$

指数,可在参考大气模型、电离层模型以及其他模型中来表征太阳活动的强度。美国空军高精度大气拖曳模型(HASDM)的外层温度的表达式中,就采用 $E_{10.7}$ 替代 $F_{10.7}$ 来表征外层温度的变化^[7]。在针对不同太阳辐射指数对大气模型精度的对比分析中, $E_{10.7}$ 的应用可有效提升大气模型精度^[10]。已有研究利用 30.4 nm 和 121.6 nm 的莱曼 α 射线两个能道的太阳辐射观测值尝试建立了 $E_{10.7}$ 计算方法^[11]。

在中国的轨道预报业务中,后续也将应用 $E_{10.7}$ 指数。由于目前中国缺少有效的太阳极紫外观测,无法实时计算得到 $E_{10.7}$,进而提供业务化应用,因此本文利用 TIMED-SEE 提供的 0.1~105 nm 的太阳辐射强度数据,反演出实时 $E_{10.7}$ 观测数据,进而开展 $E_{10.7}$ 的现报和预报研究。

1 $E_{10.7}$ 数据与处理

2002 年在轨运行的 TIMED 卫星搭载的太阳极紫外线实验仪(SEE)是首次可以直接测量 0.1~194 nm 的太阳极紫外辐射强度的星载仪器,时间跨度为 2002 年 1 月 22 日至今^[12]。SEE 由分光计和一套光度计组成,用以测量沉积在大气层的中间层、低热层以及电离层区域的太阳软 X 射线、极紫外线和远紫外线辐射。SEE 上的软 X 光度计系统由 9 个涂有薄膜透射滤光片的硅光电二极管构成,能提供分辨率约 5 nm 的 1~35 nm 内的软 X 光辐照度的测量数据。在 25~195 nm 内的光辐照度数据则是由 SEE 上的极紫外光栅光谱仪测量,分辨率为 0.4 nm^[13]。

TIMED 卫星 SEE 仪器提供 0~105 nm 的太阳辐射积分值,为了区分 Tobiska 定义的 $E_{10.7}$,以下称为 E_{TS} 。 E_{TS} 由戈达德飞行中心的协调数据分析网站(CDA Web)提供*,时间分辨率约为 97 min,单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,为准实时数据,数据延迟时间为 4 天。为了获取实时 $E_{10.7}$ 数据,本文利用历史数据建立 E_{TS} 和

*<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html>

$E_{10.7}$ 之间的经验关系式, 并据此反演得到近实时的 $E_{10.7}$, 以通过预报得到未来 $E_{10.7}$ 预报值, 满足大气密度模型和轨道预报的需求。

使用的 $E_{10.7}$ 数据是美国海洋气象局(NOAA)发布的观测值*, 时间分辨率为 1 天, 单位为 sfu。历史数据的时间跨度为 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日。图 1 给出了 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日的 E_{TS} 和 $E_{10.7}$ 的对比, 可以看出二者的波动趋势相似, 并且 E_{TS} 数据在时间分辨率上占绝对优势。

从图 1 还可以看出, 2002 年中段的 E_{TS} 部分数据明显偏低, 且在 E_{TS} 数据的某些波峰上方有少许偏高的点(红色点)。前者是由 SEE 的某些滤光器异常等导致, 后者是由观测仪器在 X 级太阳耀斑发生期间响应延迟产生^[13]。表 1 列出了 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日发生的 X 级耀斑。本文在后续计算中根据表 1 中 X 级太阳耀斑发生的峰值时刻剔除这些无效数据。

为了分析 $E_{10.7}$ 和 E_{TS} 之间的关系, 将分辨率 97 min 的 E_{TS} 数据进行线性平均得到日均值, 缺失的 E_{TS} 和 $E_{10.7}$ 数据用相邻两个数据的均值插入补足。通过统计计算可知, $E_{10.7}$ 和 E_{TS} 日均值的线性相关系数为 0.986。为了确定 $E_{10.7}$ 和 E_{TS} 的关系, 采用最小二乘法对 $E_{10.7}$ 和 E_{TS} 的日均值进行线性拟合, 可以得到 $E_{10.7}$ 与 E_{TS} 的对应关系为

$$E_{10.7} = -2.49 + 29792.23E_{TS}. \quad (3)$$

拟合方程的均方根误差为 5.724, 结果如图 2 所示。

由于 TIMED 任务期间存在观测仪器退化等原

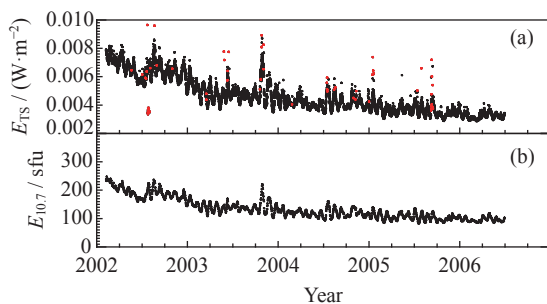


图 1 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日的 E_{TS} 和 $E_{10.7}$ (红色点为异常数据)

Fig. 1 E_{TS} and $E_{10.7}$ from 7 February 2002 to 30 June 2006 (The red points are abnormal)

*<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>

因, 长时间连续观测的 E_{TS} 数据会受到影响。为了减小这些干扰, 采用滑动拟合构建 $E_{10.7}$ 和 E_{TS} 日均值的线性关系, 即

$$E_{10.7} = a_0 + a_1 E_{TS}. \quad (4)$$

其中, a_0 和 a_1 分别为线性拟合关系式的常数项和一次项系数。滑动窗口宽度为 2 个太阳活动自转周, 即 54 天。

图 3 给出了利用式(3)计算所得的 $E_{10.7}$ 数据(红色实线)与滑动拟合得到的 $E_{10.7}$ 数据(蓝色实线, 以下称为 $T_{10.7}$)的对比。后者的均方根误差为 5.445, 低于前者。滑动拟合方法可以排除长时间观测仪器退化对数据的影响, 且计算所需数据明显更少, 拟合的误差也更低, 因此在实际应用中具有明显的优势。这里建模所用数据就是由滑动拟合得到的 $T_{10.7}$ 。

通过以上方法, 得到了与 $E_{10.7}$ 单位同为 sfu 的 $T_{10.7}$ 历史值, 数值保留一位小数。这使得后续在各模型中能够更方便地直接应用 $T_{10.7}$ 数据^[6,9]。

2 $E_{10.7}$ 中期预报模型构建

对于 $E_{10.7}$ 数据这类时间序列, 通常能够通过统计方法计算出其相关关系, 并利用这个关系来预测未来的数据。常用的预报模型主要包括自回归(Autoregressive, AR)模型、滑动平均(Moving Average, MA)模型以及自回归-滑动平均(Autoregressive Moving Average, ARMA)模型。ARMA 模型的适用性更广, 但是其建模计算非常复杂; AR 模型建模相对简单, 并且一个高阶的 AR 模型可以近似于一个 ARMA 模型。因此, 本文选择利用高阶自回归模型对 $E_{10.7}$ 做中期预报。

AR 模型是利用同一变数, 例如 X 的往期即 X_{t-p} 至 X_{t-1} 来预测本期 X_t 的表现, 并假设其为一线性关系, 表达式为

$$X_t = \alpha_0 + \alpha_1 X_{t-p} + \alpha_2 X_{t-p+1} + \cdots + \alpha_p X_{t-1} + \varepsilon_t. \quad (5)$$

其中, p 为 AR 模型的阶数; ε_t 为白噪声序列, 视为预报误差。模型的参数估计采用伯格(Burg)算法^[14,15]。

为了确定自回归预报模型的参数和阶数, 利用 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日的 $T_{10.7}$ 数据进行自相关和偏自相关分析。图 4 给出了分析结果, 可

表 1 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日 X 级耀斑
Table 1 X class solar flares from 7 February 2002 to 30 June 2006

年-月-日	峰值时刻(UT)	耀斑等级	年-月-日	峰值时刻(UT)	耀斑等级
2002-04-21	01:51	X1.5	2003-11-04	19:50	X28.0
2002-05-20	15:27	X2.1	2004-02-26	02:03	X1.1
2002-07-03	02:13	X1.5	2004-07-15	01:41	X1.8
2002-07-15	20:08	X3.0	2004-07-15	18:24	X1.6
2002-07-18	07:44	X1.8	2004-07-16	02:06	X1.3
2002-07-20	21:30	X3.3	2004-07-16	10:41	X1.1
2002-07-23	00:35	X4.8	2004-07-16	13:55	X3.6
2002-08-03	19:07	X1.0	2004-07-17	07:57	X1.0
2002-08-21	05:34	X1.0	2004-08-13	18:12	X1.0
2002-08-24	01:12	X3.1	2004-08-18	17:40	X1.8
2002-08-30	13:29	X1.5	2004-10-30	11:46	X1.2
2002-10-31	16:52	X1.2	2004-11-07	16:06	X2.0
2003-03-17	19:05	X1.5	2004-11-10	02:13	X2.5
2003-03-18	12:08	X1.5	2005-01-01	00:31	X1.7
2003-05-27	23:07	X1.3	2005-01-15	00:43	X1.2
2003-05-28	00:27	X3.6	2005-01-15	23:02	X2.6
2003-05-29	01:05	X1.2	2005-01-17	09:52	X3.8
2003-06-09	21:39	X1.7	2005-01-19	08:22	X1.3
2003-06-11	00:02	X1.3	2005-01-20	07:01	X7.1
2003-06-11	20:14	X1.6	2005-07-14	1055	X1.2
2003-06-15	23:56	X1.3	2005-07-30	0635	X1.3
2003-10-19	16:50	X1.1	2005-09-07	17:40	X17.0
2003-10-23	08:35	X5.4	2005-09-08	21:06	X5.4
2003-10-23	20:04	X1.1	2005-09-09	03:00	X1.1
2003-10-26	06:54	X1.2	2005-09-09	09:59	X3.6
2003-10-26	18:19	X1.2	2005-09-09	20:04	X6.2
2003-10-28	11:10	X17.2	2005-09-10	16:43	X1.1
2003-10-29	20:49	X10.0	2005-09-10	22:11	X2.1
2003-11-02	17:25	X8.3	2005-09-13	19:27	X1.5
2003-11-03	01:30	X2.7	2005-09-13	23:22	X1.7
2003-11-03	09:55	X3.9	2005-09-15	08:38	X1.1

注 数据由美国国家海洋和大气管理局国家地球物理数据中心提供。

以看出 $T_{10.7}$ 的自相关系数随天数的增加逐渐减小,并在天数为 600 的时候最趋于 0;而 $T_{10.7}$ 的偏自相关系数在 52 天时最趋于 0,且其后天数的偏自相关系数均在正负 0.05 以内。根据自相关系数的分析, $T_{10.7}$ 数据的自相关性随着相隔天数的增加下降,600 天时相关系数接近 0,即没有相关性。因此,采用连续

600 天的观测数据建立自回归模型的样本数据,即用连续 600 天的观测数据拟合式(5)中的模型参数。根据偏自相关系数的分析,与当前数据存在独立相关性的数据主要在相隔 52 天以内的数据,并且 52 天接近两个太阳自转周的时间。因此,预报 $E_{10.7}$ 自回归模型的阶数选用 52 阶。

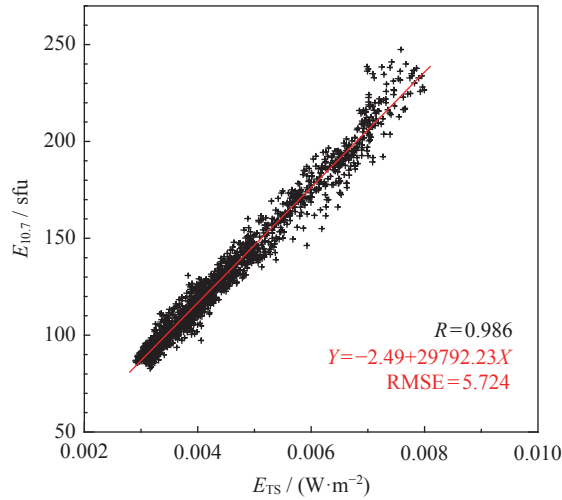


图2 2002年2月7日至2006年6月30日NOAA发布的 $E_{10.7}$ 与 E_{TS} 日均值关系。 R 为二者的线性相关系数, RMSE为线性拟合均方根误差, 红色实线为线性拟合结果

Fig. 2 Relationship between $E_{10.7}$ and E_{TS} daily average values from 7 February 2002 to 30 June 2006. R is the linear correlation coefficient, RMSE is the root mean square error of linear fitting, and the red solid line is the result of linear fitting

实际应用中, 通常用 $E_{10.7}$ 的81天中心平均值来表示近3个太阳自转周极紫外辐射的平均状态。本文将过去40天、未来40天和当日 $E_{10.7}$ 的日均值定义为 $E_{10.7}$ 的81天中心平均值(E_{81C}), 表达式为

$$E_{81C} = \frac{1}{81} \sum_{t=-40}^{40} E_{10.7t}. \quad (6)$$

其中, t 为距离预报当天的天数。

由于 $T_{10.7}$ 观测数据有4天的延迟时间, 若采取此数据做预报, 在 $t = -3$ 时, 就要开始对 $T_{10.7}$ 进行预报。对于计算未来第27天的 E_{81C} , 需要至未来第67天的 $E_{10.7}$ 。因此, 需要预报共71天($t \in [-3, 67]$)的 $T_{10.7}$ 。其中前4天的值为延迟时间内的预报值, 5至31天的值为未来27天的预测值, 71天的预报值和实测值用于滑动计算未来27天的 E_{81C} 预报值。的预报模型构建流程如下。

第1步 利用最小二乘法将过去600天的 $E_{10.7}$ 和 E_{TS} 历史观测数据进行滑动线性拟合, 滑动窗口宽度为54, 得到共600天的 $T_{10.7}$ 数据。

第2步 将第1步所得共600天的 $T_{10.7}$ 数据作为训练数据, 带入式(5)的52阶自回归模型, 拟合得

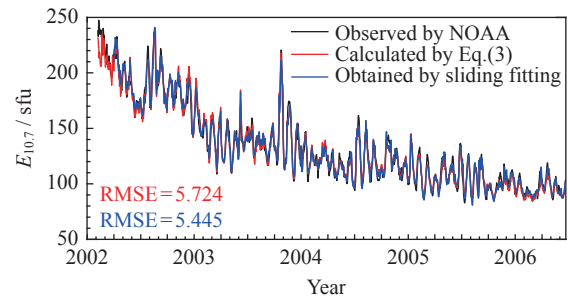


图3 2002年2月7日至2006年6月30日NOAA发布的 $E_{10.7}$ 日均值、利用式(3)计算的 $E_{10.7}$ 数据及滑动拟合得到的 $E_{10.7}$ 数据

Fig. 3 $E_{10.7}$ of NOAA calculated by Eq.(3), and obtained by sliding window linear fitness from 7 February 2002 to 30 June 2006

到自回归模型的参数。

第3步 把前52天的 $T_{10.7}$ 数据输入自回归模型, 计算得到当天的 $E_{10.7}$ 预报值; 以前51天 $T_{10.7}$ 数据和当天 $E_{10.7}$ 预报值作为输入, 计算得到未来1天 $E_{10.7}$ 的预报值。以此类推, 计算71天的 $E_{10.7}$ 预报值。由于 $T_{10.7}$ 观测数据有4天的延迟时间, 实际应用中, 第5至31天的值为未来27天的 $E_{10.7}$ 预报值。

第4步 利用第3步所得的71天 $E_{10.7}$ 预报值和 $E_{10.7}$ 历史实测值, 通过式(6)计算未来27天的 E_{81C} 预报值。

3 $E_{10.7}$ 预报模型评估

为了评估预报模型的效果, 这里以2005年1月1日至2006年6月30日期间的数据为测试集, 对 $E_{10.7}$ 指数进行预报测试。

评估预报结果主要采用逐日相对误差、相对误差、平均逐日相对误差和平均相对误差。其中, 逐日相对误差(E_{mr}^t)为单次预报的未来第 t 天的相对误差, 相对误差(E_{mr})为单次预报未来27天的相对误差的平均值, 平均逐日相对误差($E_{mr,av}^t$)为测试集的 E_{mr}^t 的平均值, 平均相对误差($E_{mr,av}$)为全部测试集的 E_{mr} 的平均值。这4个量的表达式为

$$E_{mr}^t = \frac{|o_{t,i} - f_{t,i}|}{o_{t,i}} \times 100\%, \quad t = 0, 1, 2, \dots, 27; \quad (7)$$

$$E_{mr} = \frac{1}{27} \sum_{t=1}^{27} \frac{|o_{t,i} - f_{t,i}|}{o_{t,i}} \times 100\%, \quad t = 1, 2, 3, \dots, 27; \quad (8)$$

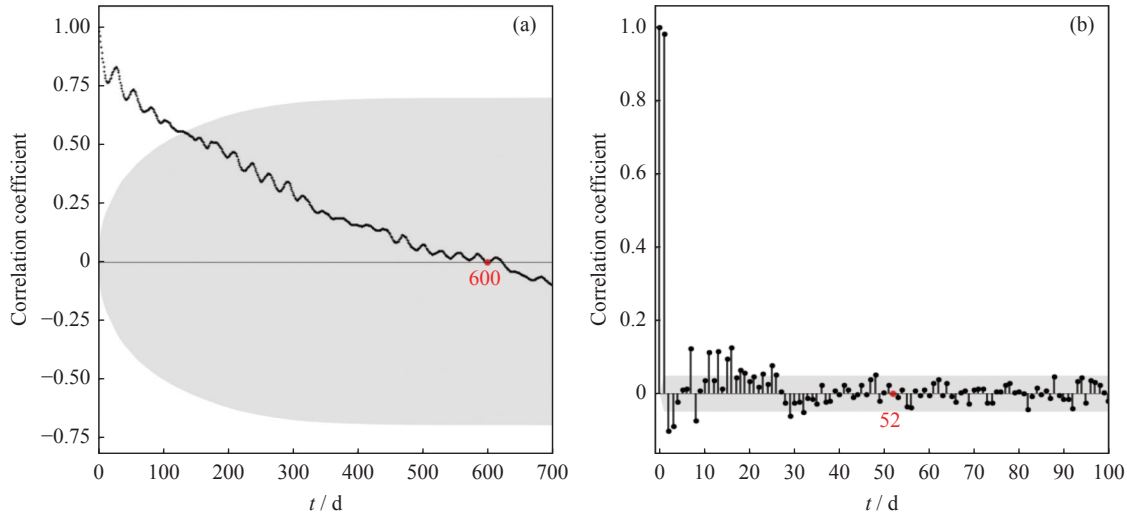


图 4 2002 年 2 月 7 日至 2006 年 6 月 30 日的 $T_{10.7}$ 的自相关 (a) 和偏自相关 (b) 结果
(红色点为相关系数为 0 的点)

Fig. 4 Autocorrelation function (a) and the partial autocorrelation function (b) of $T_{10.7}$ from 7 February 2002 to 30 June 2006 (Red dot is the point with the correlation coefficient of 0)

$$E_{\text{mr,av}}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|o_{t,i} - f_{t,i}|}{o_{t,i}} \times 100\%,$$

$$t = 0, 1, 2, \dots, 27; \quad (9)$$

$$E_{\text{mr,av}} = \frac{1}{27N} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{27} \frac{|o_{t,i} - f_{t,i}|}{o_{t,i}} \times 100\%,$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, 27. \quad (10)$$

其中, N 为测试集样本数, t 为预测未来的天数, i 为测试集中的单个样本, $o_{t,i}$ 为 $E_{10.7}$ 的实测日值, $f_{t,i}$ 为 $E_{10.7}$ 的预报日值。

利用 $E_{10.7}$ 自回归预报模型预报 2005 年 5 月 20 日未来 67 天的 $E_{10.7}$ 和未来 27 天的 E_{81C} , 如图 5 所示。 $T_{10.7}$ 观测数据有 4 天的延迟时间, 因此利用式 (5) 的 52 阶自回归模型, 共预报 71 天(横坐标 -3 至 67)的 $T_{10.7}$, 其中前 4 天(横坐标 -3 至 0)的值为延迟时间内的预报值, 5 至 31 天(横坐标 1 至 27)的值为未来 27 天的预测值。从图 5 可以看出, 模型对 5 月 20 日之后两个太阳自转周内的 $E_{10.7}$ 的周期变化有较好的预报效果, 且未来 27 天的 E_{81C} 预报值与实测值也有较好吻合。模型 27 天 $E_{10.7}$ 预报值的平均逐日相对误差为 3.05%, 模型 27 天的 E_{81C} 预报值平均逐日相对误差为 0.62%。

利用 $E_{10.7}$ 自回归预报模型预报 2005 年 5 月 1 日未来 67 天的 $E_{10.7}$ 和未来 27 天的 E_{81C} , 如图 6

所示。与图 5 相比, 本次预报 $E_{10.7}$ 和 E_{81C} 的平均逐日相对误差分别增大了 10.4% 和 7.39%。从图 6 可以看出, 52 阶自回归预报模型可以很好地确定太阳活动指数的 27 天周期, 但是预报值与实测值存在一定差距, 预报值的周期波动幅度随预报时间增长而减小。因此, 当未来 27 天的 $E_{10.7}$ 比前一个周期有增幅时, 52 阶自回归预报模型的预报误差较大。

为衡量自回归模型的整体预报效果, 对 2005 年 1 月 1 日至 2006 年 6 月 30 日期间的预报结果进行整体评估。图 7 为此期间未来 27 天 $E_{10.7}$ (黑色菱形) 和 E_{81C} (红色三角) 预报结果的平均逐日相对误差。由于 $T_{10.7}$ 的实测数据存在 4 天延时, 图中 0 天是提前 4 天的预报结果, -3 天是提前 1 天的预报结果。从图 7 可看出, 模型 $E_{10.7}$ 预报值的误差在前 7 天内(即提前 10 天的预报)较快增长, 平均相对误差由 3.5% (-3 天) 增长到 8% (第 7 天), 7 天至 24 天的平均相对误差基本维持在 8% 附近, 24 天后又出现增长。 E_{81C} 预报值的平均相对误差随预报天数的增加而缓慢增大, 从 2.5% (-3 天) 增加到 4.5% (第 27 天)。

表 2 给出了预报结果的误差统计。在整个测试时间段, $E_{10.7}$ 预报值 27 天平均逐日相对误差最小值为 2.4%, 最大值为 15.08%, 平均值为 7.83%; E_{81C} 预报值 27 天平均逐日相对误差最小值为 0.29%, 最大值为 10.10%, 平均值为 3.63%。对于未来大气模型的

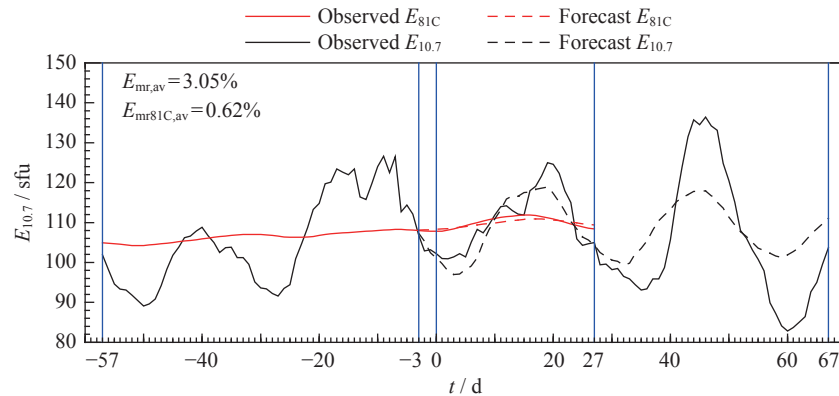


图 5 2005 年 5 月 20 日预报与观测的 $E_{10.7}$ 和 E_{81C} 。 t 为距 2005 年 5 月 20 日的天数，负值为距 2005 年 5 月 20 日的历史天数

Fig. 5 $E_{10.7}$ and E_{81C} that are predicted and observed on 20 May 2005. Positive values in abscissa are the numbers of days after 20 May 2005, the negative values in abscissa are the numbers of days before 20 May 2005

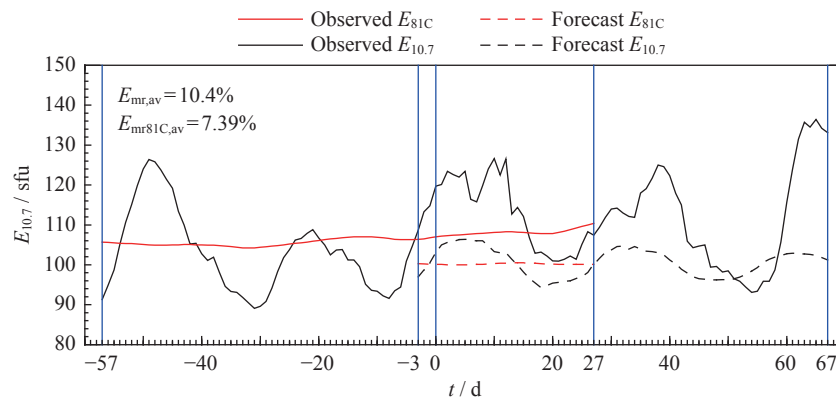


图 6 2005 年 5 月 1 日预报与观测的 $E_{10.7}$ 和 E_{81C} 。 t 为距离 2005 年 5 月 1 日的天数，负值为距 2005 年 5 月 1 日的历史天数

Fig. 6 $E_{10.7}$ and E_{81C} that are predicted and observed on 1 May 2005. Positive values in abscissa are the numbers of days after 1 May 2005, the negative values in abscissa are the numbers of days before 20 May 2005

应用来说, E_{81C} 预报值平均 3.63% 的误差可以较好地满足应用需求。

4 讨论与结论

针对高层大气密度预报和轨道预报业务中对新型太阳紫外辐射指数 $E_{10.7}$ 的需求, 利用 TIMED/SEE 观测到的高时间分辨率的太阳辐射强度数据, 基于最小二乘法建立了反演 $E_{10.7}$ 指数的方法。在分析反演数据自相关和偏自相关的基础上, 构建了一个 52 阶的自回归预报模型, 可以实现 $E_{10.7}$ 的中期预报。初步结论如下。

TIMED/SEE 观测仪提供的 E_{TS} 实测值具有高时间分辨率、延迟时间短和易获得的优势, 利用最小二乘法拟合可反演出准实时的 $E_{10.7}$, 均方根误差为 5.445 sfu, 能够基本满足实际应用。利用该方法可以为中国相关用户提供准实时的 $E_{10.7}$ 指数。

利用 52 阶自回归模型对 $E_{10.7}$ 的中期预报效果尚好, 预报误差随预报时间的增加而增大, 未来 27 天的预报值平均相对误差为 7.83%。利用同样方法也开展了对 $E_{10.7}$ 的 81 天滑动平均值 E_{81C} 的未来 27 天预报试验。试验结果表明, 与 $E_{10.7}$ 类似, 预报平均相对误差随预报天数的增加而增大, 但误差较低, 未来 27 天的预报值平均相对误差仅为 3.63%。

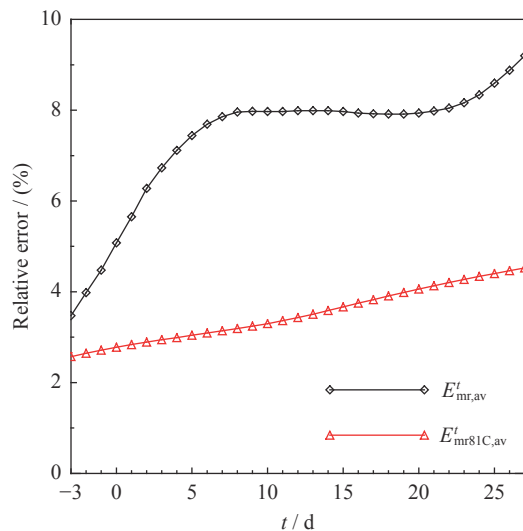


图 7 模型预测未来 27 天 $E_{10.7}$ 和 E_{81C} 的平均逐日相对误差

Fig. 7 Average daily relative error of $E_{10.7}$ and E_{81C} that are predicted in the next 27 days

表 2 测试集的 $E_{10.7}$ 和 E_{81C} 预报误差
Table 2 Predicted error of $E_{10.7}$ and E_{81C} of all test sets

预报相对误差	平均值/(%)	最大值/(%)	最小值/(%)
$E_{10.7}$	7.83	15.08	2.40
E_{81C}	3.63	10.10	0.29

随着航天事业发展,中国卫星轨道预报业务对轨道大气密度的精确度要求也越来越高,将需要逐步在大气模型中采用 $E_{10.7}$ 指数替代 $F_{10.7}$ 指数,提高大气密度计算的准确性。本文建立的 $E_{10.7}$ 反演方法和自回归预报模型可用于未来 $E_{10.7}$ 的现报和预报。

致谢 E_{TS} 实测值由 TIMED/SEE 观测仪提供。

参考文献

[1] WOODS T N. Recent advances in observations and modeling of the solar ultraviolet and X-ray spectral irradiance[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **42**(5): 895-902

[2] EVANS J V. The Sun's influence on the Earth's atmosphere and interplanetary space[J]. *Science*, 1982, **216** (4545): 467-474

[3] DONNELLY R. Gaps between Solar UV and EUV ra-

diometry and atmospheric sciences[C]//Solar Radiative Output Variation, Cambridge Research and Instrumentation. Boulder, 1988: 139-145

[4] KOCKARTS G. Effects of solar variations on the upper atmosphere[M]//DOMINGO V. Physics of Solar Variations. Dordrecht: Springer, 1981: 295-320

[5] ROBLE R G, RIDLEY E C, DICKINSON R E. On the global mean structure of the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**(A8): 8745-8758

[6] TOBISKA W K. Validating the Solar EUV Proxy, $E_{10.7}$ [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A12): 29969-29978

[7] STORZ M F, BOWMAN B R, BRANSON M J I, et al. High accuracy satellite drag model (HASDM)[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **36**(12): 2497-2505

[8] TOBISKA W K, BARTH C A. A solar EUV flux model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1990, **95**(A6): 8243-8251

[9] TOBISKA W K, WOODS T, EPARVIER F, et al. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(14): 1233-1250

[10] WANG HongBo, ZHAO ChangYin. Effects of various solar indices on accuracy of Earth's thermospheric neutral density models[J]. *Science in China Series G-Physics Mechanics & Astronomy*, 2009, **52**(7): 1120-1128 (汪宏波, 赵长印. 不同太阳辐射指数对大气模型精度的影响分析[J]. 中国科学 G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, **52**(7): 1120-1128)

[11] FAN Lei, WEI Fei, FU Yang, et al. Use double channel solar irradiance flux to compute the $E_{10.7}$ index[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(4): 403-409 (范磊, 韦飞, 符养, 等. 双通道辐射量计算太阳极紫外辐射 $E_{10.7}$ 指数方法初探[J]. 空间科学学报, 2013, **33**(4): 403-409)

[12] WOODS T N, BAILEY S, EPARVIER F G, et al. TIMED solar EUV experiment[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 2000, **25**(5/6): 393-396

[13] WOODS T N, EPARVIER F G, BAILEY S M, et al. Solar EUV Experiment (SEE): Mission overview and first results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A1): A01312

[14] LIU Siqing, ZHONG Qinzhen, WEN Jing, et al. Model research of 10.7 cm solar radio flux 27-day forecast (I)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010, **30**(3): 1-8 (刘四清, 钟秋珍, 温靖, 等. 太阳10.7 cm射电流量中期预报模型研究 (I)[J]. 空间科学学报, 2010, **30**(3): 1-8)

[15] DING Yuguo, JIANG Zhihong. Time Series Signal Processing of Meteorological Data[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998 (丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理[M]. 北京: 气象出版社, 1998)