0254-6124/2019/39(5)-629–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Yanan, WU Xiaocheng, HU Xiong. Thermospheric density prediction based on electron density assimilation (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(5): 629-637. DOI:10.11728/cjss2019.05.629

基于电子密度同化的热层大气密度预报方法*

张亚楠[1,2] 吴小成[1] 胡 雄[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 采用热层电离层耦合模式 TIEGCM 和集合卡尔曼滤波同化方法, 利用同化 COSMIC 电离层掩星电子密度数据优化热层电离层参量, 并将模式预报的大气密度与 CHAMP 卫星大气密度数据进行对比, 分别开展模拟和实测数据的同化预报实验. 在模拟数据同化实验中, 状态向量包含温度、风场和离子成分的实验结果表明, 仅优化温度即可达到最优的热层大气密度预报效果. 在实测数据同化实验中, 将温度作为状态向量参数, 优化结果表明, 循环同化过程中模式预报的大气密度相对偏差的均方根误差在 48 h 内从 38% 减小到 27%, 同化稳定时间至少需要 30 h. 预报过程中大气密度预报效果的改善持续时间为 34 h. 这表明电子密度同化能够改善热层大气密度的预报精度, 设计的实验方案合理可行, 可获得较长的预报时效.

关键词 大气密度, 电子密度, 热层, 数据同化, 集合卡尔曼滤波

中图分类号 P 351

Thermospheric Density Prediction Based on Electron Density Assimilation

ZHANG Yanan[1,2] WU Xiaocheng[1] HU Xiong[1]

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

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

Abstract Using the thermosphere ionosphere coupling model TIEGCM and the thermospheric and ionospheric observations, the assimilation and forecast experiments with simulated and measured data are carried out based on the ensemble Kalman filter method respectively. The results of the simulated assimilation experiments with different thermospheric ionospheric parameters show that the temperature is the key parameter to improve the thermospheric density. In the assimilation experiments, the temperature is taken as the parameter of state vector. The optimization results show that the root mean square error of relative deviation of atmospheric density predicted by the model is reduced from 38% to 27% in 48 hours, and the stabilization time of assimilation is at least 30 hours. However, it may need at least 30 hours to achieve the best assimilation results when only the temperature is estimated, and the e-folding time of neutral density is 34 hours. The accuracy

* 国家重点研发计划项目 (2016YFB0501503) 和国家自然科学基金项目 (41204137) 共同资助

2018-10-26 收到原稿, 2019-04-05 收到修定稿

E-mail: zhangyanan@nssc.ac.cn

of the neutral density prediction in the TIEGCM has been significantly improved, which indicates that it is feasible to improve the prediction accuracy of the neutral density of the thermosphere using ionospheric observations

Key words Neutral density, Electron density, Thermosphere, Data assimilation, Ensemble Kalman filter

0 引言

热层大气对低地球轨道卫星的拖曳作用显著 [1]. 热层大气密度的预报误差是低轨卫星轨道预测的重要误差来源. 热层大气密度预报方法研究对低轨卫星轨控等航天活动具有重要意义. 目前, 基于探测数据已建立了 Jacchia, DTM, MSIS 等系列大气经验模型 [2−5]. 利用这些经验模型开展热层大气密度预报的精度一般不低于 15%[6], 难以满足现代高精度轨道预报的需求. 为了进一步提高大气密度预报精度, 国内外一些学者利用实测数据对已有经验模型, 例如 MSISE 的预报结果进行修订 [7−10], 取得了很好的效果.

热层大气理论模式 [11−14] 常用于热层大气物理现象和规律的模拟研究. 目前直接用于大气密度预报的精度比经验模式差. 但是, 理论模式包含了热层大气的物理和化学变化规律, 在观测数据驱动下, 可能给出好的预报精度, 具有潜在的发展前景, 因此受到了越来越多的关注. Morozov 等 [15] 利用理论模式 GITM 和集合卡尔曼滤波方法, 同化了 CHAMP 大气密度实测数据, 采用不同轨道轨迹上的 GRACE 大气密度进行比较发现, 同化数据观测点附近大气密度的同化结果与观测值的偏差大幅度减小, 但距观测点较远的区域仍存在很大偏差 (52%). Matsuo 等 [16] 基于理论模式 TIEGCM, 通过同化 CHAMP 大气密度模拟观测数据, 也得到了类似的结果, 且大气密度预报未获得改善. 在上述研究中, 用于同化的热层大气密度观测数据稀少且时空覆盖性差, 这导致大气密度同化预报结果只在局部获得了改善.

虽然热层大气密度观测数据稀缺, 但电离层的观测数据丰富. 电离层与热层通过各种物理化学过程紧密耦合在一起 [17,18]. 基于电离层观测数据获取热层参数逐渐成为近年来的研究趋势, 已有很多研究通过同化电离层观测数据来获取热层大气参数 [19−22]. Hsu, Chartier 和 Chen 等 [23−25] 开展了同化电子密度或 TEC 优化热层参数, 以改善电离层预报精度的研究, 研究结果均表明, 利用电离层观测资料获取热层参数可行且有效.

Matsuo 等 [16] 进一步开展了基于同化电离层电子密度观测数据, 获取热层大气参数以改善热层大气密度预报的研究. 该研究利用理论模式 TIEGCM 和集合卡尔曼滤波同化方法, 通过模拟电离层掩星观测数据同化实验同时优化多种热层参数, 包括温度、风场和组成成分, 结果表明大气密度分析场获得了改善. 但在 Matsuo 等的实验方案中, 生成集合样本时, 设置集合样本的输入参数均值与模拟真值的输入参数值相同, 假设预报模式为完美模式, 结果表明全球热层大气密度的预报并未得到改善, Matsuo 等没有利用实测数据进一步分析验证.

为了进一步发展基于理论模式的热层大气密度预报方法, 这里采用理论模式 TIEGCM* 和集合卡尔曼滤波同化方法, 开展模拟电离层掩星观测数据同化研究, 分析选择优化的热层参数, 形成热层大气密度预报方法, 然后将该预报方法应用于实测电离层掩星观测数据同化预报试验, 验证其预报效果.

1 实验设计

1.1 同化预报系统

通过同化模拟的电子密度数据估计热层的温度、中性组成和外强迫参数, 输入耦合模式进行预报, 并对利用该方法获取热层大气密度的效果进行验证和评估. Zhang 等 [26,22] 基于集合卡尔曼滤波算法和电离层热层电动力学耦合模式建立了电离层热层同化预报系统, 发现利用电子密度优化相关热层大气参量可改善电子密度的预报效果. 本文基于该系统开展连续的同化预报实验, 进一步研究大气密度的预报效果. 实验流程如图 1 所示.

* http://www.hao.ucar.edu/modeling/tgcm/tie.php

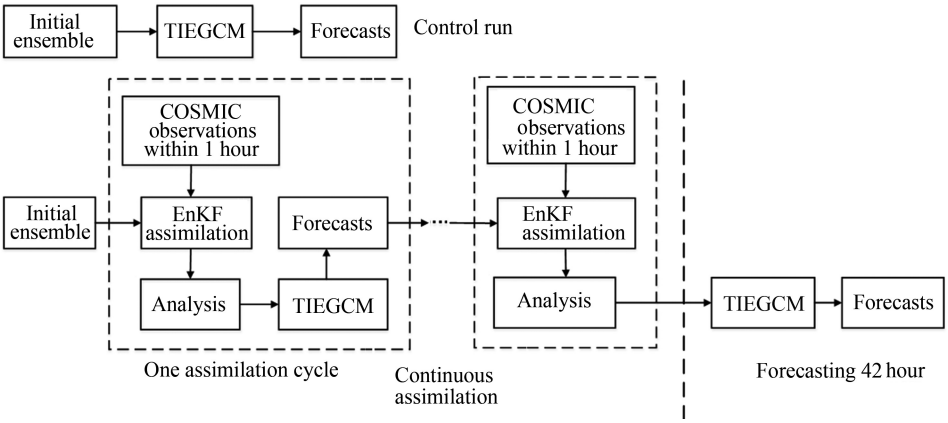

图 1 实验方案与流程

Fig. 1 Experimental scheme and process

图 1 中包含控制运行过程、循环同化过程和预报过程. 控制运行过程实验时间为 72 h, 没有数据参与同化; 循环同化过程为 30 h, 同化周期为 1 h; 预报过程为 42 h, 不进行数据同化.

这里采用的大气模式为 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 开发的热层电离层电动力学耦合模式 TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model)[11,27], 其为一种三维、时变的地球热层电离层耦合理论模式, 使用有限差分技术, 自洽求解三维中性成分和离子的动量方程、能量方程和连续性方程. TIEGCM 的输出文件中包含主要大气成分的质量混合比, 中性大气的温度、风场, 离子成分和电子数密度等参数. 这里使用的 TEIGCM 是 NCAR 高山天文台 (High Altitude Observatory) 官方网站发布的 1.95 版本. 对 TIEGCM 与 CHAMP 数据的更多比较结果参见文献 [28].

使用的同化方式为集合卡尔曼滤波 (Ensemble Kalman Filter, EnKF). 该同化方法是 Evensen 等 [29,30] 基于蒙特卡洛随机抽样提出的卡尔曼滤波方法. EnKF 采用非线性集合预报的有限样本估算误差协方差, 既不需要切线性算子或伴随方程, 也不需要随时间向后积分. 其基本滤波公式如下 [22]:

$$\boldsymbol{x}_{\rm a} = \boldsymbol{x}_{\rm b} + K(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_{\rm b}), \tag{1}$$

$$K = \boldsymbol{P}_{\rm b}\boldsymbol{H}^{\rm T}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{\rm b}\boldsymbol{H}^{\rm T} + \boldsymbol{R})^{-1}. \tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{x}_{\rm b}$, $\boldsymbol{Y}$, $\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{H}$ 分别表示状态量、观测量、背景误差协方差矩阵、观测误差协方差矩阵和观测算子. $\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}^{\rm T}$ 和 $\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}^{\rm T}$ 分别为 [22]

$$\boldsymbol{P}_{\rm b}\boldsymbol{H}^{\rm T} = \frac{1}{N-1}(\boldsymbol{x}_{\rm b} - \overline{\boldsymbol{x}}_{\rm b})(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_{\rm by} - \boldsymbol{H}\overline{\boldsymbol{x}}_{\rm by})^{\rm T}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}^{\rm T} = \frac{1}{N-1}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_{\rm by} - \boldsymbol{H}\overline{\boldsymbol{x}}_{\rm by})\cdot (\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_{\rm by} - \boldsymbol{H}\overline{\boldsymbol{x}}_{\rm by})^{\rm T}. \tag{4}$$

其中, $\boldsymbol{x}_{\rm b}$ 和 $\boldsymbol{x}_{\rm by}$ 分别为待优化状态参数和预报背景场电子密度.

这里使用的观测数据包括电子密度和大气密度. 电子密度采用 COSMIC 的实测电子密度廓线数据 *, 同化窗口和同化周期均为 1 h, 实验时间为 2008 年第 103 天, 该日共有 2300 条廓线, 每小时平均 90 余条.

大气密度数据采用 CHAMP 卫星 ** 搭载的加速计反演得到的轨道大气密度 [31,32]. TIEGCM 模拟的大气密度误差随太阳活动水平的下降而上升, 在 2006−2008 年的太阳活动低年, 模式的模拟结果远大于实测值. 因此这里选择 2008 年 (太阳活动低年) 进行实验, 可获得时间覆盖的电子密度和大气密度数据. 通过同化 COSMIC 电子密度数据优化影响热层高层大气密度的主要背景参量, 比较不同热层参数对热层密度预报效果的影响, 并进一步利用实测数据对最优组合加以验证.

1.2 实验方案

引起热层密度变化的因素较多, 如高纬电势场、来自太阳的高能粒子流以及来自低层大气向上传播

*http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/tar/rest.html

**http://sisko.colorado.edu/sutton/data.html

的波动等. 但高层大气的主要能量来源是太阳极紫外 (EUV) 或远紫外 (FUV) 辐射 [33], 因此热层是一个强受迫系统, 对外部驱动因素异常敏感. CHAMP 卫星 2001 年到 2008 年的观测结果显示, 超过 90% 的热层中性大气密度的变化与太阳极紫外辐射的变化有关 [34].

考虑模式主要的误差来源, 选取 TIEGCM 模式参数中的 $F_{10.7}$ 指数作为扰动参数生成初始背景集合. 集合成员通过构造服从正态分布的 $F_{10.7}$ 指数模拟获得, 高斯分布均值设为 70, 标准偏差为 20%, 样本数为 30. 模拟真值的 $F_{10.7}$ 输入设为 100.

为使每个集合成员在同化开始时能够达到稳定状态, 模式初始运行时间设为 14 天, 期间每个集合成员的输入强迫参数保持不变, 其他参数保持默认设置. 一组初始集合用于进行同化试验 (见图 1 Continious assimilation), 另一组相同的初始集合不参与同化 (见图 1 Control run), 其模拟结果称为控制运行场, 用于计算状态向量参数的优化比例. 模拟电子密度廓线从真值的模拟结果计算得到, 高度范围为 160~450 km, 并等间距插值到 10 km 间距的网格上. 观测误差的标准偏差在所有高度上均设为电子密度绝对值的 20%.

温度与大气密度的计算结果直接相关, 风场引起的输运过程对大气密度分布也有一定影响. 因此, 实验状态向量考虑了热层大气温度和风场. 离子成分由氧原子电离产生, 通过分解复合等光化学过程生成原子或分子, 电离层峰值高度以上也主要以原子离子为主. 因此, 氧原子离子也作为实验状态参量.

表 1 为包含不同参数实验组合. 以 dens, OP, TN, UV 分别表示中性大气成分密度、温度、氧离子密度、风场等状态向量. 不同组合中除中性成分外, 还包含温度、风场和离子成分, 以及这些参数的全状态组合, 从而比较分析这些参量各自的效果. 这 6 组实验分别进行 24 h, 每次同化结束后, 状态参数的分析场作为下一次预报的初始场输入到 TIEGCM 驱动模式预报. 集合均值作为统计值用于计算其与模拟真值或实际观测值的偏差.

在没有离子成分和中性成分直接观测数据的情况下, 无法对非直接观测变量的估计效果进行评估. TIEGCM1.95 及较早的模式版本输出结果不包含大气密度, 但利用大气状态方程, 可以通过主要的中性大气成分比例、压强和温度计算得到大气密度, 其计算公式如下:

表 1 包含不同待优化参数的实验组合

Table 1 Experiments with different parameters included in state vector

实验	状态向量 $\boldsymbol{x}$
1	中性成分密度
2	中性成分密度, 氧原子离子密度
3	中性成分密度, 水平风场
4	中性成分密度, 温度
5	中性成分密度, 水平风场, 温度
6	中性成分密度, 氧原子离子密度, 水平风场, 温度

$$\rho = \frac{P}{RT\left(\frac{\gamma_{\mathrm{O}}}{16} + \frac{\gamma_{\mathrm{O_2}}}{32} + \frac{1-\gamma_{\mathrm{O}}-\gamma_{\mathrm{O_2}}}{28}\right)}. \tag{5}$$

其中, P 为大气压强, R 为大气常数, γ_{O} 和 $\gamma_{\mathrm{O_2}}$ 分别为氧原子和氧分子的质量混合比, 氮分子由前两者计算得到.

1.3 预报效果统计方法

这里采取均方根误差来评估大气密度预报误差的变化情况, E 用来计算集合均值 $f(f^{\mathrm{b}}, f^{\mathrm{c}})$ 和模拟真值之间的均方根误差, 即

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} e_{\mathrm{r}}}{n-1}}. \tag{6}$$

其中 n 为统计观测点的个数. 考虑到热层大气密度极其稀薄, 且不同地方时的观测值也存在相当大的差异. 因此, 这里的 e_{r} 采用相对偏差来计算, 以消除数值本身的较大差异对统计结果的影响, 即

$$e_{\mathrm{r}} = \frac{f - f^{\mathrm{t}}}{f^{\mathrm{t}}} \times 100\%. \tag{7}$$

为了更加直观展示预报场的偏差变化, 以百分比形式计算如下:

$$E_{\mathrm{r}} = \frac{E}{E_{\mathrm{c}}}. \tag{8}$$

其中 E_{c} 为控制运行场相对真值的偏差.

2 实验结果

2.1 模拟数据同化实验

大气密度在不同高度上存在量级上的差异, 中性成分比例也随高度变化. 因此, 不同高度上大气密度

的预报改善效果可能不同. 首先对中性成分在 1 h 预报周期内的变化情况进行高度比较. 实验计算发现 200 km 以下的插值误差较大, 因此分析时不予考虑. 图 2 为第 12 个预报周期内氧原子、氧分子和大气密度偏差的高度分布. 黑色实线为 12 h 的分析场偏差, 蓝色实线为 13 h 的预报场偏差. 由图 2 可以看出, 中性成分的 E_{r} 在较低高度和较高高度上改善效果的变化存在明显差异, 氧分子在 200 km 和 300 km 的偏差相差 50% 以上. 200~600 km 上一个小时内氧原子的 E_{r} 从 40% 增加至 90%, 但是氧分子的 E_{r} 在 300 km 增加至将近 100%. 因此, 氧分子的改善效果只能维持在 300 km 以下. 基于此, 这里对中性成分的统计高度设置为 250 km 和 500 km.

由于中性大气主要由氧原子、氧分子和氮分子组成, 热层分子扩散作用增强, 在不同高度上各成分的比例不同. 在低高度上主要是分子气体, 较高高度上主要是原子气体. 因此, 理论上 500 km 高度上大气密度的改善效果可仅通过优化氧原子得到, 250 km 高度上大气密度的改善效果可由氧原子和氧分子共同优化得到.

图 3 和图 4 中用 6 种不同颜色分别表示各组实验结果. 在 250 km 高度上, 前三组实验的状态向量不包含温度, 24 h 大气密度预报结果相对真值的偏差约减小 20%. 其他三组状态向量不包含温度的实验结果显示, 该偏差能减小约 70%. 250 km 高度上大气密度初始时刻 (1~2 h) 的预报偏差大于控制运行场, 1 h 处的预报偏差增长了约 10%. 这表明中性成分的同化与其他变量间产生了一定程度上的动力不协调,

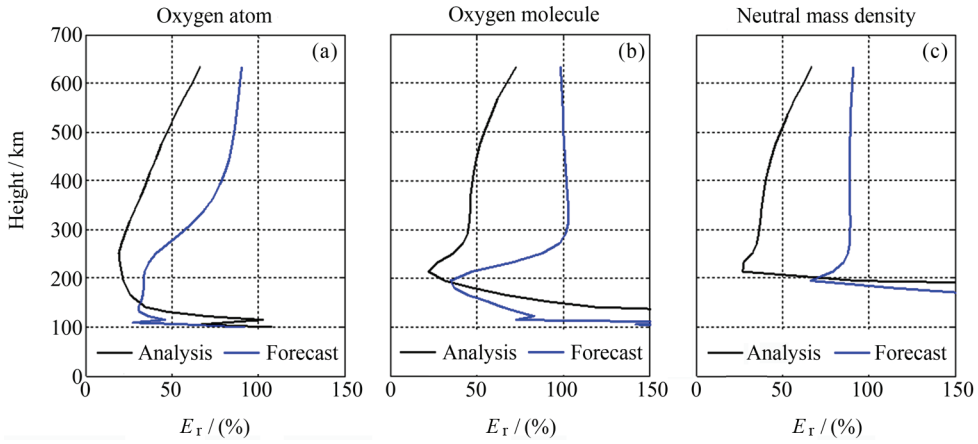

图 2 第 12 h 分析场 (黑色实线) 和第 13 h 预报场 (蓝色实线) 中氧原子、氧分子和氮分子的相对均方根误差随高度的变化

Fig. 2 Relative root mean square error of oxygen atom, oxygen molecule and neutral mass density versus height. Posterior (black) represent the results at 12 h and prior (blue) represent the results at 13 h

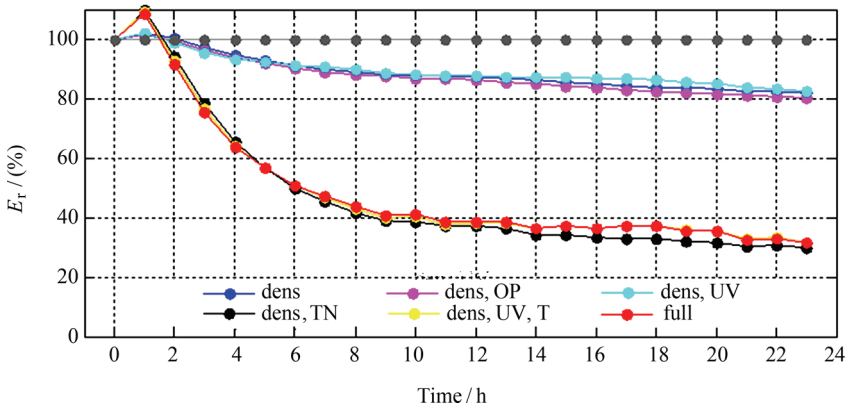

图 3 不同实验组合下 250 km 高度上的大气密度预报结果

Fig. 3 Predictions of atmospheric density at 250 km altitude under different experimental combinations

导致大气密度的预报偏差在 2 h 内增大. 500 km 高度上的实验结果与 250 km 除前两小时外基本相同. 热层大气密度在不同高度上的预报改善效果主要来自于温度, 这里将通过优化温度对实测数据做进一步验证.

2.2 实测数据同化实验

从前面的模拟数据同化研究结果可以看出, 基于热层电离层在物理、化学和电动力学上的耦合作用, 利用同化模拟的电离层掩星电子密度数据, 通过集合卡尔曼滤波同化方法, 理论上可以从电子密度观测中获取热层状态, 但实际效果严重依赖于模式对热层和电离层耦合关系的准确描述 [21]. 这里采用实测 COSMIC 电子密度数据进行同化实验, 并与实际观测的 CHAMP 卫星大气密度进行比较. 模拟实验结果显示, 温度是改善热层大气密度预报效果最显著的参数. 因此, 本节实验状态向量只包含温度, 循环同化过程的实验时间为 48 h.

这里选取的实验时间为地磁平静期, 没有明显的太阳活动和太阳耀斑发生, 模式模拟的大气密度在该时间段内较稳定. 图 5 给出了 48 h 大气密度预报场的 E_r 在同化实验期间的变化情况. 由图 5 可以看出, 实验期间大气密度预报偏差整体呈减小趋势, 从约 30 h 开始 E_r 趋于稳定. 在实验初始 6 h 内, 大气密度偏差增大.

图 6 给出了实验期间控制运行场和预报场与 CHAMP 卫星大气密度相对偏差的均方根误差. 由图 6 可以看出, 没有同化参与的控制运行场偏差整体偏大, 有同化参与的预报场偏差在 12 h 之后开始

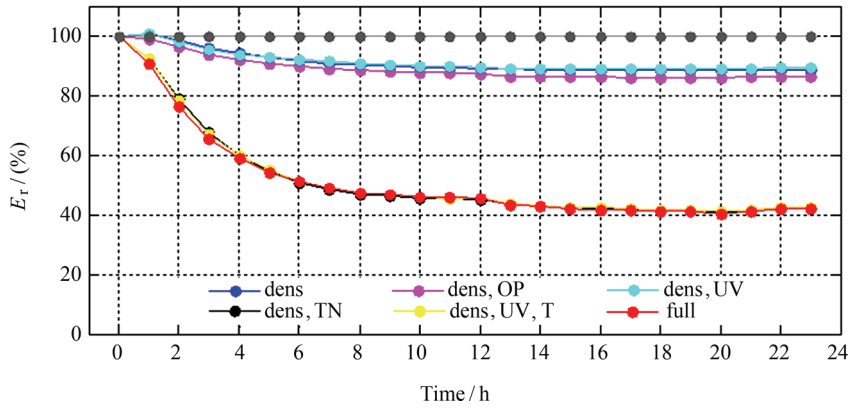

图 4 不同实验组合下 500 km 高度上大气密度的预报结果

Fig. 4 Predictions of atmospheric density at 500 km altitude under different experimental combinations

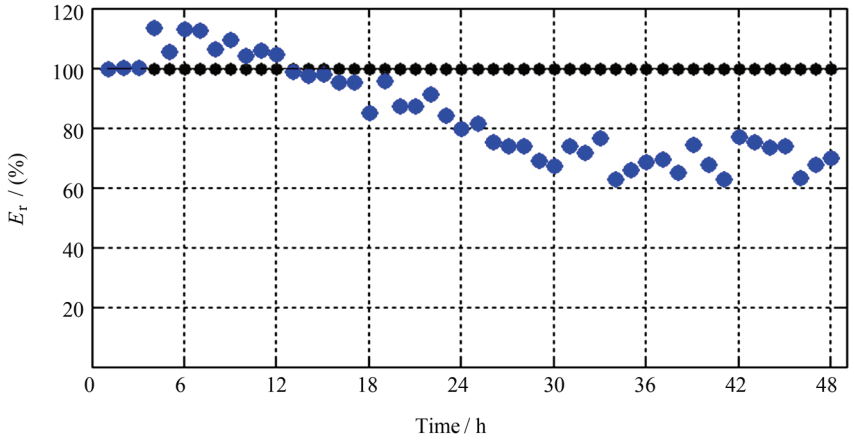

图 5 实测电子密度的同化预报实验结果 (蓝点为预报场大气密度的相对均方根偏差)

Fig. 5 Experimental results of assimilation prediction of the measured electron density (The blue points are the relative mean square deviation of the atmospheric density of the prediction field)

小于控制运行场. 30~48 h 控制运行场和预报场的均方根误差均值分别为 38% 和 27%, 预报场偏差减小了 29%.

模拟和实测数据同化实验结果均表明：由于同化产生模式参数间的动力不协调, 初始几小时内温度优化使大气密度预报场偏差不降反增; 改善实测数据同化的预报效果需要经过至少 12 h. 从图 5 可以看出, 在循环同化过程中, 预报场偏差达到稳定需要至少约 30 h. 为进一步分析没有同化参与时的大气密度预报效果变化趋势, 从第 30 h 开始不作同化并预报至 72 h.

图 7 给出了没有同化参与时大气密度的连续预报偏差. 30~72 h 为没有同化参与的预报场偏差. 不再同化观测数据之后, 热层大气密度偏差缓慢增大, 预报结束时其偏差增加到控制运行场的 95% 左右. 由图 7 可以看出, 温度的优化对热层大气密度的预报改善效果至少可维持 42 h. e 折时间定义为预报改善效果减小到初始预报时刻的 $1/e$ 所需的时间 (e 为自然常数, 约为 2.7)[35]. 经计算得到第 64 h 预报改善效果减小到第 30 h 的 $1/e$, 因此 e 折时间为 34 h.

Matsuo 等 [16] 采用 TEIGCM 大气模式和集合卡尔曼滤波方法, 利用同化模拟的电离层掩星电子密度数据, 同时优化了温度、风场和组成成分. 但实验结果并未发现大气密度预报精度有所改善. 本文结果

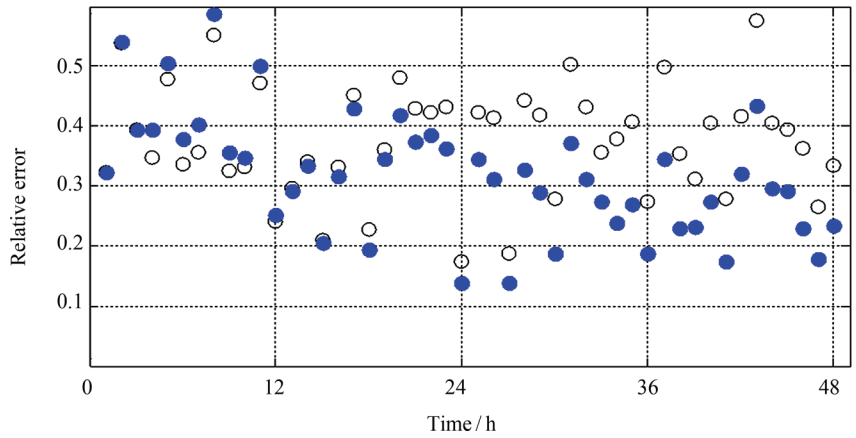

图 6 有同化预报场和无同化控制运行场的大气密度与 CHAMP 卫星观测结果的相对偏差

Fig. 6 Relative deviation between the atmospheric density of the forecast field with assimilation and the control run field without assimilation and the CHAMP satellite observation, respectively

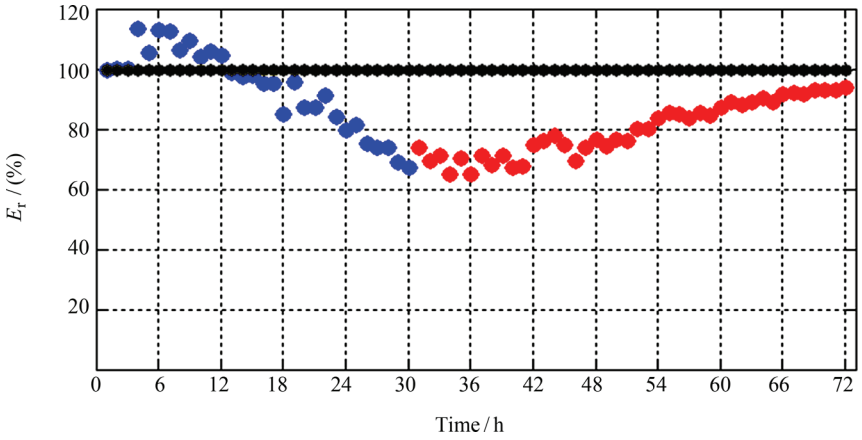

图 7 同化预报实验得到的实测电子密度相对均方根误差 (蓝点为连续同化期间, 红点为无同化期间)

Fig. 7 Relative root mean square error of the measurements of the electron density obtained by assimilation prediction experiments (Blue point is obtained during continuous assimilation. The red dot is obtained without assimilation)

与之不同的原因可能是 Matsuo 等的实验方案中设模拟真值输入的 $F_{10.7}$ 指数与背景场集合均值相同, 而本文模拟数据同化实验将其分别设为 70 和 100, 考虑了实际大气模式可能存在的主要误差源. 本实验方案的研究结果对存在实际偏差的大气模式同化预报研究更具有参考意义.

热层大气具有较强的受外强迫参数驱动的性质, 而 TIEGCM 模式对外驱动力的表征可能存在系统性误差. 例如太阳辐射模型, 这里输入了真实的 $F_{10.7}$ 指数观测值, 但大气密度整体偏高. 30 h 之后的预报阶段随着温度的优化效果逐渐消失, 大气密度趋于没有同化的控制运行场的状态. 未来将进一步研究能否利用电子密度观测估计模式外驱动参数, 进而校正模式的系统性偏差并改善大气密度预报效果.

3 结语

采用热层电离层耦合模式 TIEGCM 和集合卡尔曼滤波方法, 利用同化 COSMIC 电离层掩星电子密度数据优化热层电离层参数, 将优化后的参数输入到 TIEGCM 驱动模式预报, 并将模式预报的大气密度与 CHAMP 卫星观测的大气密度数据进行对比, 分别开展模拟数据和实测数据的同化预报实验.

在模拟数据同化实验中, 分析了状态向量分别包含温度、风场和离子成分的情况下, 这些参数的优化对热层大气密度预报的改善效果. 结果表明: 温度是改善热层大气密度预报的关键参数; 状态向量只包含温度时, 热层大气密度可在 12 h 循环同化过程内达到最优预报效果. 在实测数据同化预报实验中, 根据模拟数据同化实验结果, 选择改善热层大气密度预报的最优参数温度作为状态向量参数进行优化, 并开展同化预报实验. 结果表明：在循化同化过程中, 大气密度预报场的相对偏差均方根误差从 38% 减小到 27%, 所需时间至少为 30 h; 在预报过程中, 大气密度的预报改善效果可至少维持 42 h, e 折时间为 34 h.

通过本文建立的同化模型及采取的同化方案, 利用同化电离层掩星电子密度观测数据, 能够改善热层大气密度的预报精度并获得较长的预报时效.

本文实验结果与 CHAMP 大气密度观测仍存在较大偏差. 这可能是由于在本文实验过程中, 未考虑来自 TIEGCM 模式底部的潮汐作用及上部太阳辐射的时间变化, 而热层大气密度受这些因素影响显著, 对这些参数进行优化可能有助于提高模式预报精度. 另外, 本文实验是在太阳平静期即没有强烈地磁扰动的情况下进行的, 实验结果是否适用于磁暴期等太阳剧烈活动情况还有待进一步研究.

致谢 TIEGCM 模式由 NCAR 提供. COSMIC 电离层掩星电子密度数据由 COSMIC Data Analysis and Archive Center 提供. CHAMP 卫星大气密度数据由科罗拉多大学提供.

参考文献

[1] MARCOS F, LAI S, HUANG C, *et al*. Towards next level satellite drag modeling [C]//AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Reston: AIAA, 2010

[2] JACCHIA L G. New static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles [J]. *Sao Spec. Rep.*, 1971, **313**: 3138-3144

[3] HEDIN A E, SALAH J E, EVANS J V, *et al*. A global thermospheric model based on mass-spectrometer and incoherent-scatter data MSIS, 1. N2 density and temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**: 2139-2147

[4] BARLIER F, BERGER C, FALIN J L, *et al*. Thermospheric model based on satellite drag data [J]. *Ann. De Geophys.*, 1978, **34**: 9-24

[5] BRUINSMA S, THUILLIER G, BARLIER F. The DTM-2000 empirical thermosphere model with new data assimilation and constraints at lower boundary: accuracy and properties [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2003, **65**: 1053-1070

[6] MARCOS F. New satellite drag modeling capabilities [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevoda: AIAA, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-470

[7] MARCOS F A, KENDRA M J, GRIFFIN J M, *et al*. Precision low Earth orbit determination using atmospheric density calibration [J]. *J. Astronaut. Sci.*, 1998, **46**: 395-409

[8] MIAO Juan, LIU Siqing, LI Zhitao, *et al*. Atmospheric density calibration using the real-time satellite observation [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4): 459-466 (苗娟, 刘四清, 李志涛, 等. 基于实时观测数据的大气密度模式修正 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4): 459-466)

[9] CHEN Xuxing, HU Xiong, XIAO Cunying, *et al*. Correction method of the low earth orbital neutral density prediction based on the satellites data and NRLMSISE-00 model [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(10): 3246-3254 (陈旭杏, 胡雄, 肖存英, 等. 基于卫星数据和 NRLMSISE-00 模型的低轨道大气密度预报修正方法 [J]. 地球物理学报, 2013, **56**(10): 3246-3254)

[10] LI Xie, TANG Geshi, LI Zheng, *et al*. A method for calibrating empirical density model based on temperature pa-

rameters [J]. *Mann. Spaceflight.*, 2015, **21**(1): 48-52 (李勰, 唐歌实, 李正, 等. 基于温度参数的经验密度模式修正方法 [J]. 载人航天, 2015, **21**(1): 48-52)

[11] RICHMOND A D, RIDLEY E C, ROBLE R G. A thermosphere/ionosphere general-circulation model with coupled electrodynamics [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**: 601-604

[12] RIDLEY A J, DENG Y, TOTH G. The global ionosphere-thermosphere model [J]. *J Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2006, **68**: 839-864

[13] FULLER-ROWELL T, WU F, AKMAEV R, *et al.* A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2010, **115**. DOI: 10.1029/2010JA015524

[14] LIU H L, FOSTER B T, HAGAN M E, *et al.* Thermosphere extension of the whole atmosphere community climate model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**. DOI: 10.1029/2010JA015586

[15] MOROZOV A V, RIDLEY A J, BERNSTEIN D S, *et al.* Data assimilation and driver estimation for the Global Ionosphere-Thermosphere Model using the ensemble adjustment Kalman filter [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2013, **104**: 126-136

[16] MATSUO T, LEE I T, ANDERSON J L. Thermospheric mass density specification using an ensemble Kalman filter [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**: 1339-1350

[17] EMMERT J T, HERNANDEZ G, JARVIS M J, *et al.* Climatologies of nighttime upper thermospheric winds measured by ground-based Fabry-Perot interferometers during geomagnetically quiet conditions: 2. High-latitude circulation and interplanetary magnetic field dependence [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**. DOI: 10.1029/2006JA011948

[18] MAKELA J J, FISHER D J, MERIWETHER J W, *et al.* Near-continual ground-based nighttime observations of thermospheric neutral winds and temperatures over equatorial Brazil from 2009 to 2012 [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2013, **103**: 94-102

[19] DATTA-BARUA S, BUST G S, CROWLEY G, *et al.* Neutral wind estimation from 4-D ionospheric electron density images [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**. DOI: 10.1029/2008JA014004

[20] SCHERLIESS L, THOMPSON D C, SCHUNK R W. Ionospheric dynamics and drivers obtained from a physics-based data assimilation model [J]. *Radio Sci.*, 2009, **44**(1). DOI: 10.1029/2008rs004068

[21] MATSUO T, ARAUJO-PRADERE E A. Role of thermosphere-ionosphere coupling in a global ionospheric specification [J]. *Radio Sci.*, 2011, **46**. DOI: 10.1029/2010RS004576

[22] ZHANG Y N, WU X C, HU X. Effects of estimating the ionospheric and thermospheric parameters on electron density forecasts [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2018, **61**(12): 1875-1887

[23] HSU C T, MATSUO T, WANG W B, *et al.* Effects of inferring unobserved thermospheric and ionospheric state variables by using an Ensemble Kalman Filter on global ionospheric specification and forecasting [J]. *J. Geophys. Res.*, 2014, **119**: 9256-9267

[24] CHARTIER A T, MATSUO T, ANDERSON J L, *et al.* Ionospheric data assimilation and forecasting during storms [J]. *J. Geophys. Res.*, 2016, **121**: 764-778

[25] CHEN C H, LIN C H, MATSUO T, *et al.* Ionospheric data assimilation with thermosphere-ionosphere-electrodynamics general circulation model and GPS-TEC during geomagnetic storm conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 2016, **121**: 5708-5722

[26] ZHANG Yanan, Wu Xiaocheng, HU Xiong. TIEGCM ensemble Kalman filter assimilation model design and premilinary results [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(2): 168-176 (张亚楠, 吴小成, 胡雄. TIEGCM 集合卡尔曼滤波同化模型设计及初步试验 [J]. 空间科学学报, 2017, **37**(2): 168-176)

[27] ROBLE R G, RIDLEY E C, RICHMOND A D, *et al.* A coupled thermosphere/ionosphere general circulation model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**(12): 1325-1328

[28] QIAN L , SOLOMON S C . Thermospheric density: an overview of temporal and spatial variations [J]. *Space Sci. Rev.*, 2012, **168**(1-4): 147-173

[29] EVENSEN G. The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation [J]. *Ocean Dyn.*, 2003, **53**: 343-367

[30] EVENSEN G. Data Assimilation: the Ensemble Kalman Filter [M]. New York: Springer, 2006

[31] REIGBER CH, L ü HR H, SCHWINTZER P. Champ mission status [J]. *Adv. Space Res.*, 2002, **30**(2): 129-134

[32] SUTTON E K, NEREM R S, FORBES J M. Density and winds in the thermosphere deduced from accelerometer data [J]. *J. Spacecraft Rockets*, 2007, **44**(6): 1210-1219

[33] ROBLE R G. Energetics of the mesosphere and thermosphere. The upper mesosphere and lower thermosphere: a review of experiment and theory [J]. *Geophys. Monograph Ser.*, 1995, **87**: 1-21

[34] MATSUO T, FORBES J M. Principal modes of thermospheric density variability: empirical orthogonal function analysis of CHAMP 2001-2008 data [J]. *J Geophys. Res.*, 2010, **115**. DOI: 10.1029/2009JA015109

[35] JEE G, BURNS A G, WANG W, *et al.* Duration of an ionospheric data assimilation initialization of a coupled thermosphere-ionosphere model [J]. *Space Weather*, 2007, **5**(1). DOI: 10.1029/2006sw000250