中低纬电离层理论模式的构建和一个观测系统数据同化试验

乐新安[①②③] 万卫星[①*] 刘立波[①] 乐会军[①] 陈一定[①] 余 涛[①④]

(① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ② 中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071; ③ 中国科学院研究生院, 北京 100049; ④ 中国气象局国家空间天气监测预警中心, 北京 100081. * 联系人, E-mail: wanw@mail.iggcas.ac.cn)

摘要 在前人工作的基础上, 完善了一个中低纬电离层理论模式(TIME-IGGCAS: Theoretical Ionospheric Model of the Earth in Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences). TIME-IGGCAS 模式自洽的求解等离子体连续性方程、动量方程、能量方程, 对地磁场采用偏心偶极近似. 同时结合欧拉网格和拉格朗日网格, 并考虑了等离子体的电场漂移作用. 计算结果表明模式稳定可靠, 能再现大部分电离层大尺度特征. 基于本模式, 进行了一个观测系统数据同化试验. 结果表明, 采用非线性最小二乘拟合的方法, 把观测到的电离层临界频率和峰值高度同化到理论模式中, 能够准确的估算电场漂移作用, 为进一步开发同化模式, 进行电离层现报和预报奠定了基础.

关键词 电离层 理论模式 数据同化 非线性最小二乘拟合

电离层理论模式是指从描述等离子体的输运方程(连续性方程、动量方程和能量方程)出发, 借助一定的数值方法和计算手段, 通过模拟电离层中的各种物理与化学过程, 得到电离层中等离子体的浓度、速度、温度的时空分布特性. 与经验和半经验模式相比, 理论模式受数据源的限制要弱, 而且它能够对特定的物理问题进行模拟. 当准确地给定初始条件和外驱动参数, 它还能够对电离层状态进行准确的预报. 因此, 在过去的几十年里, 全世界很多研究小组都比较重视发展电离层理论模式. 目前, 世界上已经有不少理论模式被人们广泛使用, 诸如: 美国大气研究中心的TIGCM 模式、美国Alabama大学的FLIP模式、英国Sheffield 大学的 SUPIM 模式、Millward等人开发的CTIP热层-电离层-等离子体层耦合模式、Phillips实验室的GTIM模式、美国海军实验室的Sami2 模式、俄罗斯Pavlov等人开发的IZMIRAN模式等 [1~7]. 与此同时, 国内的学者也开展了很多与理论模式相关的工作. 涂剑南和Liu等人 [8~10]用算子分裂算法发展了一个低纬电离层模式并用它来研究电离层对日食的响应以及赤道异常区的演化. Zhang等人[11]则建立了一个中纬理论模式并研究了电离层峰下结构的形成. 高铭、王劲松等人 [12,13]耦合求解中性大气方程建立了一个耦合模式, 利用该模式他们比较了不同边界条件下的模拟结果同时研究了中低纬电离层谷区的形成. 还有其他一些工作如Zhang等人 [14]建立的一维理论模式、Zhang等人 [15]用一维模式对极区进行了相关的模拟、朱明华等人 [16]则用一种不同的数值方法-谱方法开发了一个中纬理论模式. 最近, Lei[17]等人开发了一个中纬理论模式, 并用来模拟了电离层低过渡高度.

近年来, 结合理论模式和观测数据进行电离层数据同化的研究成为一个新的热点. 如喷气动力试验室-南加州大学全球同化电离层模式和犹他州立大学全球电离层观测同化模式都基于理论模式, 利用卡尔曼滤波、三维、四维变分技术同化包括GPS-TEC、卫星观测、雷达观测等多种数据源, 来提供尽可能准确的电离层现报和预报 [18,19]. 除了进行现报和预报, 也有很多学者通过把观测同化到理论模式当中, 来研究一些物理问题, 如Zhang等人 [20,21]曾经结合一个中纬理论模式和非相干散射雷达观测, 来探讨中纬地区电离层的外驱动力包括紫外辐射、中性组成、中性风、中性温度等的地方时变化, 同时还讨论了这些外驱动力之间的相关性以及模糊度问题. Lei等人 [22]则进一步把这种方法应用到推算磁暴期间电离层外驱动力的

2007-05-08 收稿, 2007-06-15 接受

中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号: KZCX3-SW-144)、国家自然科学基金(批准号: 40636032, 40504023)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB806306)资助

变化, 进而揭示电离层暴的机制问题.

本文在刘立波、Lei等人[8~10,17,22,23]工作的基础上, 完善了一个中低纬电离层理论模式(TIME-IGGCAS: Theoretical Ionospheric Model of the Earth in Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences). 同时利用该模式, 进行了一个简单的数据同化试验-观测系统模拟试验. 本模式部分化学反应系数、离子电子加热率系数等采用了Lei等人[17,22,23]的模式的取法, 因为求解的区域不同, 所以网格划分、数值方法和求解的过程与Lei等人[17,22,23]的一维中纬模式都有本质的区别; 与刘立波等人[8~10]的模式相比, 本模式对地磁场采用偏心偶极近似; 网格的划分更灵活, 磁力线的数目和每根磁力线上的点可以任意给定; TIME-IGGCAS求解能量方程获得电子离子温度而不是用经验模式获得; 在数值方法上本模式结合欧拉网格和拉格朗日网格考虑电场漂移作用, 而刘立波等人的模式是用分裂算子的做法. 本文重点介绍TIME-IGGCAS模式改进的地方, 一些相同的部分则略写.

1 模式介绍

1.1 坐标系和网格划分

在电离层高度, 等离子体的运动可以近似的分解为沿着磁场方向和垂直于磁场方向, 因此一般电离层模式都是建立在地磁场的框架下而不是传统的地理坐标系统. TIME-IGGCAS 用偏心偶极场来近似表示地磁场. 坐标系统采用(p, q)坐标系, 定义如下:

$$p=\frac{r_m}{r_0\cos^2\theta_m}, \tag{1}$$

$$q=\frac{{r_0}^2\sin\theta_m}{{r_m}^2}, \tag{2}$$

r_m是该点到地磁中心的距离, r_0 是地球半径, θ_m是地磁纬度. 该坐标系的优点是: 对一根磁力线而言, p是相等的, 对应于该磁力线磁赤道上空的点到地球中心的距离和地球半径的比值; 对于磁旋频率远大于碰撞频率的高度上, 可以近似认为等离子体垂直于磁力线的运动是等q值的. 关于偏心偶极坐标系和地理坐标系之间的转换可以参考Millward[4]的文章, 这里不再详述.

磁力线上点的划分参考Millward[4]的划分方法, 从而保证在较低的高度有比较密集的点, 而在较高高度点的距离可以比较大. 图 1 给出了在地磁纬度–45°~45°之间划分 30 根磁力线时对应的网格点的分布情况, 可以看出这种划分方法基本保证了在电离层F层有较好的代表性.

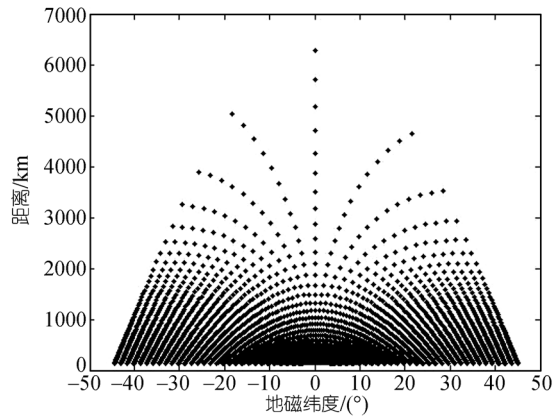


图 1 TIME-IGGCAS 模式网格划分示意图
在地磁纬度–45°~45°之间划分 30 根磁力线时网格点的分布

1.2 基本方程

TIME-IGGCAS 的基本出发方程是离子的连续性方程、离子和电子的动量方程、能量方程:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t}=P_i-L_i-\nabla\cdot(N_iV_i), \tag{3}$$

$$0=-\nabla p_i+N_im_i\vec{g}+N_ie(\vec{E}+\vec{V}_i\times\vec{B}) -N_im_i\sum\nu_{in}(\vec{V}_i-\vec{V}_n)-N_im_i\sum\nu_{ij}(\vec{V}_i-\vec{V}_j), \tag{4}$$

$$\frac{3}{2}NK\frac{DT}{Dt}+p\nabla\cdot V-\nabla\cdot(\kappa\nabla T)=P_T-L, \tag{5}$$

其中P_i和L_i分别是第i种离子的产生率和损失率, V_i是第i种离子的运动速度, ν_{ij}和ν_{in}分别是i和j离子以及i离子和n中性成分之间的碰撞频率, P_T和L是电子或者氧离子的热产生和热损失率. 本文求解了 6 种离子成分, 其中包括三种主要离子(O^+, H^+, He^+)和三种次要离子(NO^+, O_2^+, N_2^+), 对次要离子忽略连续性方程中的输运项, 直接由光化学平衡得到离子浓度, 电子的浓度由电中性原理获得, 即等于其他所有离子的浓度总和. 离子的产生率包括光化学产生率和化学反应产生率, 其中光化学产生率考虑了白天光电子的二次电离效应和夜间的一些电离源. 离子损失率包括了化学反应损失率和离子复合损失率. 化学反应考虑了涉及我们所计算的 6 种离子的化学反应 20 个. 相关的详细介绍包括化学反应式、化学反应系数、碰撞频率等可以参考涂剑南等人[8]和Lei等人[17]的相关文章.

本模式忽略离子之间的温度差别，即所有的离子的温度都等于氧离子温度．考虑的电子热源包括光电加热、与中性粒子的弹性碰撞、N_2 和O_2 的振动和转动激发、原子氧精细结构激发、原子氧从 ^{3}P态到 ^{1}D态跃迁时的激发、以及电子-离子之间的碰撞；考虑的O^+热源有离子-电子碰撞、离子-离子碰撞以及离子和中性成分之间的弹性和非弹性碰撞．对电子的下边界条件是热平衡假设、而O^+则假设等于中性成分的温度．电子和O^+的能量方程采用求解连续性方程时一样的有限差分方法 [23]．上述的各种加热率的详细说明可以参考雷久侯 [23]的博士论文，其中关于电子的光电加热率我们采用了Millward[4]的做法．

1.3 数值方法

TIME-IGGCAS对连续性方程的求解分成两步：首先沿磁力线求解方程，考虑等离子体沿磁力线的运动，包括一系列的对流和扩散过程，方程的推导参考Millward[4]的文章，最后对偏微分方程进行差分处理，形成三对角方程，用追赶法求解即可求解得到离子浓度，边界条件是光化学平衡．然后考虑离子垂直于磁力线的运动，即E×B漂移，本文中漂移速度既可以人为给定也可以利用Fejer经验模式求得 [24]．离子在电场漂移的作用下垂直于磁力线运动，利用离子通量和磁通量守恒即可求解得到离子在新的位置的浓度值，详细处理过程可以参考Huba等人 [6]的文章．

电场漂移一般是白天向上晚上向下，对一根磁力线而言，在一天的时间里能够向上或者向下漂移几百公里的距离．如果单纯的在拉格朗日网格下求解，就要在磁力线上飘的过程中在下面增加磁力线的数目来获得比较完整的低电离层高度的模拟参量．在本文中，为了获得比较固定的网格输出，我们采用Pavlov等人 [7]的方法，同时结合拉格朗日和欧拉网格求解，既当求解得到离子在漂移后位置的浓度后，又插值到原来的固定的网格．然后求解这个固定网格上的离子速度和等离子体温度．程序的流程图见图2．

1.4 模式的一些计算结果

在本文的实验中，我们在每一根磁力线上取 201 个点，一个子午面内取 60 根磁力线，计算的地磁纬度范围是–47°~47°，模式计算的起始时间是从地方时 12 点开始．因为初始条件的不确定性，开始的一段时间里模式并没有达到平衡，所以我们这里每一次都计算 72 h，把最后的 24 h的结果作为可靠结果．当计算全球的浓度时，我们忽略了磁力线的经度漂移效应．我们取太阳活动$F107$=200，地磁活动Ap=5．电场漂移我们采用Fejer经验模式 [23]．

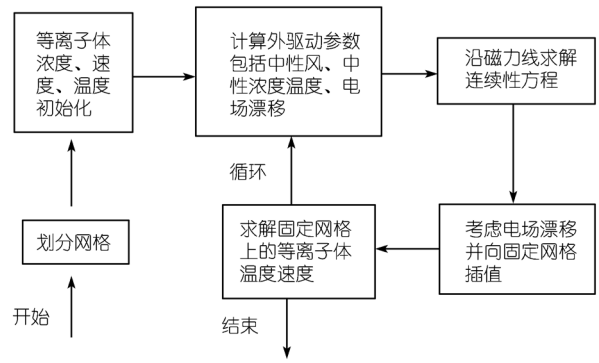


图 2 TIME-IGGCAS 模式程序流程示意图

图 3 给出的是 120°E子午面上电子浓度的剖面随地磁纬度、季节、地方时的变化特征．4 个选择的地方时分别对应午夜、日出、中午、日落．图 3 基本反映了电离层的大部分变化特征．从地方时来看，双峰现象在日出时候并不明显，在日落的时候由于电场的反向增强，双峰有明显的抬升，而夜晚由于电场的向下漂移，双峰明显的下降．从季节变化来看，赤道异常区峰值电子浓度的最大值基本上都是出现在春秋分点，这就是所谓的电离层半年异常 [25,26]．比较中纬地区电子浓度可以看出，白天冬季半球的要大于夏季半球的，而到晚上又变成夏季半球大于冬季半球，符合冬季异常现象 [25,26]．对比 12 月份和 6 月份的值可以看出，在整个子午面内，除了南半球的白天，12月份的值要大于6月份的值，这是所谓的年度异常 [25,26]．

图 4，5 分别是计算的全球临界频率、峰高和电子浓度的切片图．这里计算了 180°W 到 170°E 之间共 36 个子午面．从图 4 中可以看出，TIME-IGGCAS 模式计算的全球范围内的临界频率和峰高的纬度变化和经度变化都比较符合实际情况，电场反向增强导致的临频的增强和峰高的抬升都比较明显．图 5 中电子浓度随纬度、经度、和高度的变化都与实际情况符合的较好．关于 TIME-IGGCAS 模式的进一步验证，包括与经验模式(IRI，NeQuick)和观测数据(GPS-TEC，测高仪观测、卫星观测)的比较，我们已经有专门的文章论述，这里就不再给出结果．

2 基于构建的模式进行的数据同化实验

在实际应用中，理论模式值常常与观测结果有

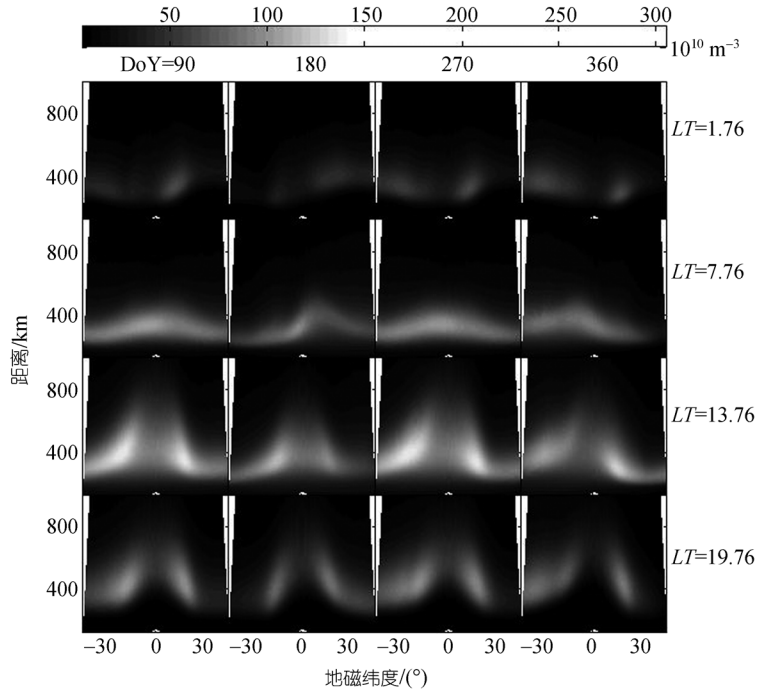


图 3 用 TIME-IGGCAS 模式计算的在 120°E 经度链上太阳活动高年电子浓度的剖面随纬度、地方时、季节的变化特征

选择的天数分别对应 2000 年第 90, 180, 270, 360 天. 4 个选择的地方时分别对应午夜、日出、中午、日落

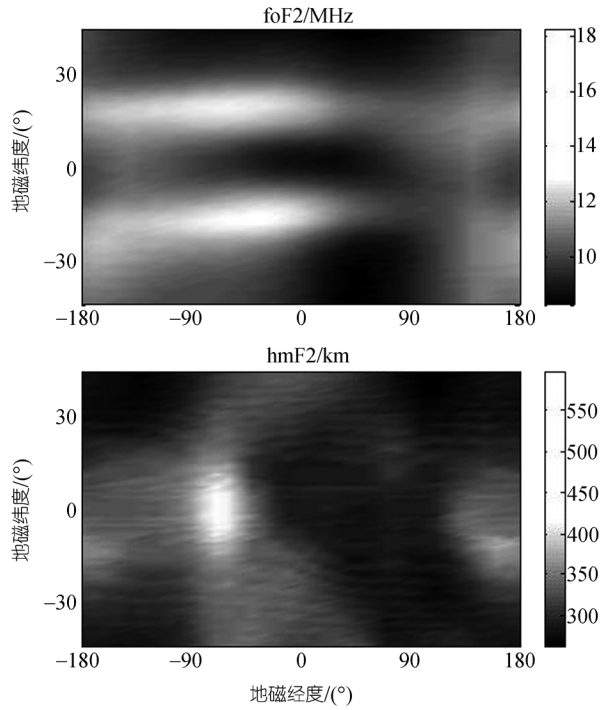


图 4 用 TIME-IGGCAS 模式计算的全球电离层临界频率和峰值高度随地磁经纬度在某一世界时的分布图

纬度范围是地磁–45°~45°. 太阳活动 $F107 = 200$, 地磁活动 $Ap = 5$, 时间是 2000 年的秋分

一定的差别, 最主要的原因就是因为我们不能获得准确的外驱动参量, 这些参量包括低纬和高纬地区的电场、中性风, 以及中性成分和温度. 在数据同化模式中, 为了提高模式的预报能力, 需要利用观测结合模式同时获得这些外参量. 喷气动力试验室-南加州大学全球同化电离层模式利用非线性最小二乘拟合的方法来推算低纬电场和中性风来使变分同化的结果和观测的偏差达到最小, 进而提高同化模式的预报精度 [27]. Lei等人 [28]则利用非线性最小二乘拟合的办法来推算磁暴期间影响中纬电离层的一些关键参量如中性风、中性成分、太阳辐射等来使模式值和观测值的偏差最小, 这些推算的参数又可以在一定程度上揭示暴的机制. 本文就尝试利用我们开发的TIME-IGGCAS模式, 进行了一个观测系统模拟试验. 我们选择的观测系统是中国科学院地质与地球物理研究所沿地理 120°E附近, 纬度间隔大概 10°左右的 4 个观测台站和南半球在相同经度扇区的 4 个台站, 这几个站依次是漠河(53.4°N, 122.3°E)、北京(40.3°N, 116.2°E)、武汉(30.5°N, 114.3°E)、三亚(18.3°N, 109.6°E)、Vanimo(2.7°S, 141.3°E)、Darwin (12.5°S, 130.9°E)、Townsville (19.3°S, 146.7°E)、Brisbane

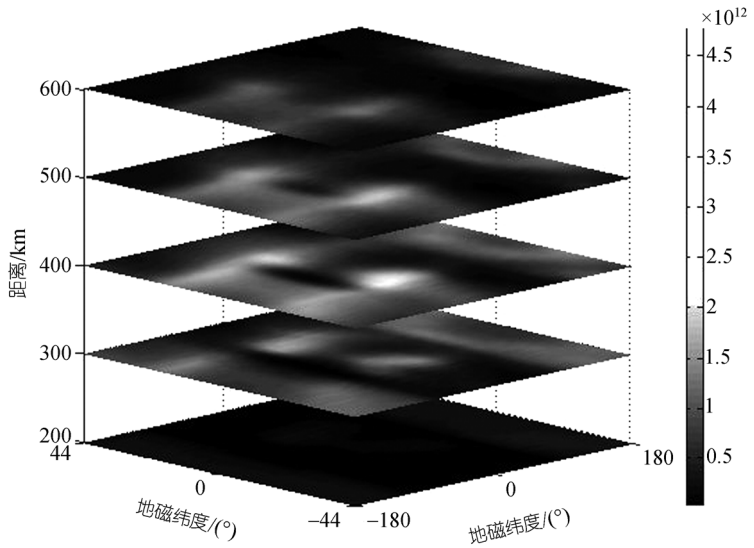


图 5 用 TIME-IGGCAS 模式计算的全球电离层电子浓度在某一世界时的切片图

太阳活动 $F107 = 200$, 地磁活动 $Ap = 5$, 时间是 2000 年的秋分. 纬度范围是地磁−45°~45°, 高度范围是 200~600 km

(27.5°S, 152.9°E). 计算的时间是秋分, 太阳活动和地磁活动同上.

在电离层低纬和赤道地区, 最重要的控制参量就是电场垂直漂移速度. 一般情况下可以认为垂直漂移是白天向上、夜晚向下, 速度的幅度是几米每秒到几十米每秒. 在本文的数据同化试验中, 我们采用两种形式的电场漂移, 一种是 Fejer 经验模式, 我们把它计算的电场漂移当作观测值; 另一种是幅度为 20 m/s, 随地方时正弦变化的电场漂移.

首先我们采用观测电场漂移, 运行模式并计算对应 8 个台站的临界频率和峰值高度, 把得到的结果当做观测值. 然后我们采用正弦电场运行模式, 同时我们把前面得到的北半球的 4 个台站的临界频率和峰值高度同化到理论模式当中去, 用非线性最小二乘拟合的方法估算电场漂移, 从而使计算结果与同化进去的数据的偏差最小.

图 6 给出了观测电场漂移、正弦电场漂移和同化以后估算的电场漂移的地方时变化. 由图 6 可见, 观测电场漂移(Fejer 经验模式)在日落的时候有明显的反向增强. 同化以后估算的电场漂移在白天和观测电场吻合得很好, 在晚上有一些轻微的扰动, 但是基本的变化形态还是反映出来了. 如观测值的日落反向增强可以被同化模式很好的捕捉到. 图 7 和 8 分别是我们选择的观测系统的 8 个台站的临界频率和峰值高度的地方时变化. 点线、点划线、实线分别对应观测、没有同化和同化以后的结果. 从图 7 和 8 上可

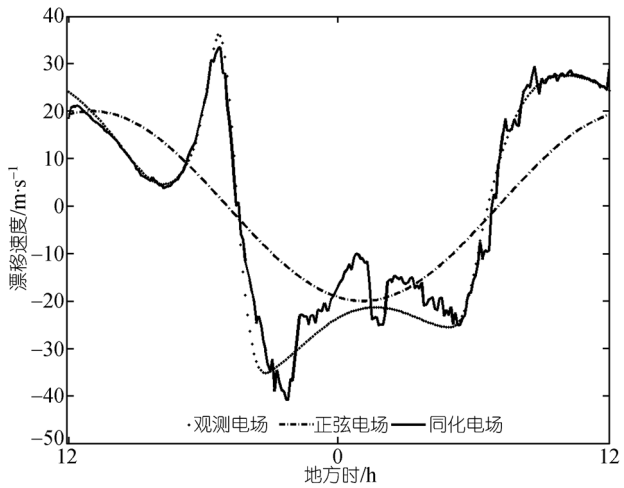


图 6 本文涉及到的三种电场漂移速度的地方时变化

依次是 Fejer 经验模式计算的电场漂移速度(点)、幅度为 20 m/s, 随地方时正弦变化的电场漂移速度(点划线)和把测高仪观测同化到 TIME-IGGCAS 模式以后估算的电场漂移(线)

以看到, 对纬度偏高的台站, 如: 漠河、北京, 用两种不同电场漂移计算的临界频率和峰值高度并没有多大差别, 这说明中纬台站受电场漂移的影响比较小. 比较观测数据和同化以后的数据可以看到, 对北半球 4 个台站而言, 最后同化的结果与观测数据基本是一致的. 对南半球 4 个台站而言, 最后同化的结果与观测数据有微小的差别, 这些差别主要是在晚上, 但基本的变化形态还是符合的很好. 这说明我们仅仅利用北半球的 4 个台站的观测值进行数据同化, 利用推

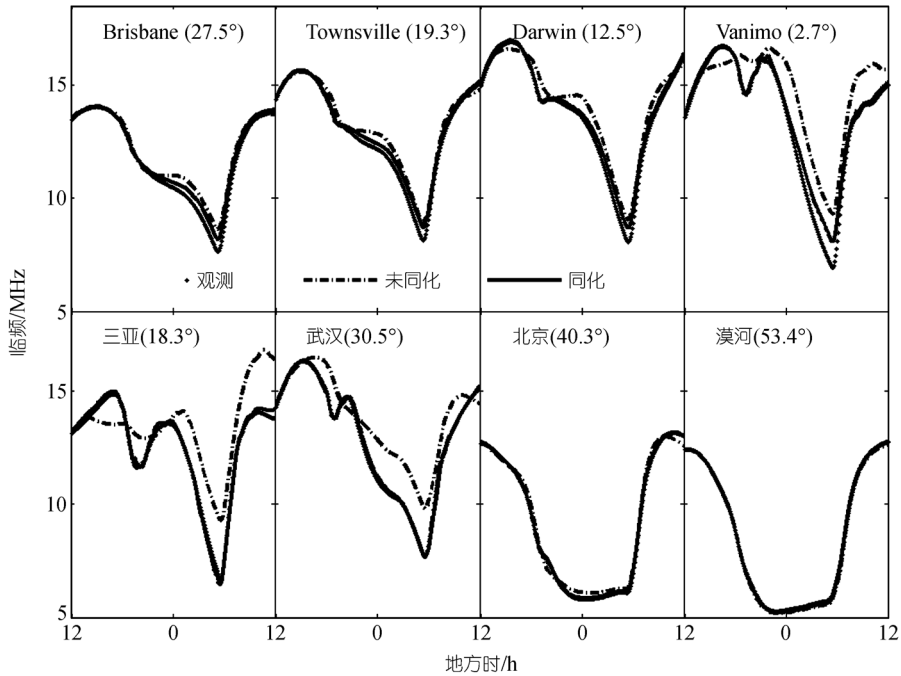


图 7　我们选择的 8 个台站的临界频率的地方时变化

点线、点划线、实线分别对应观测结果、TIME-IGGCAS 模式计算结果和把观测同化到 TIME-IGGCAS 模式以后用非线性最小二乘估算的结果

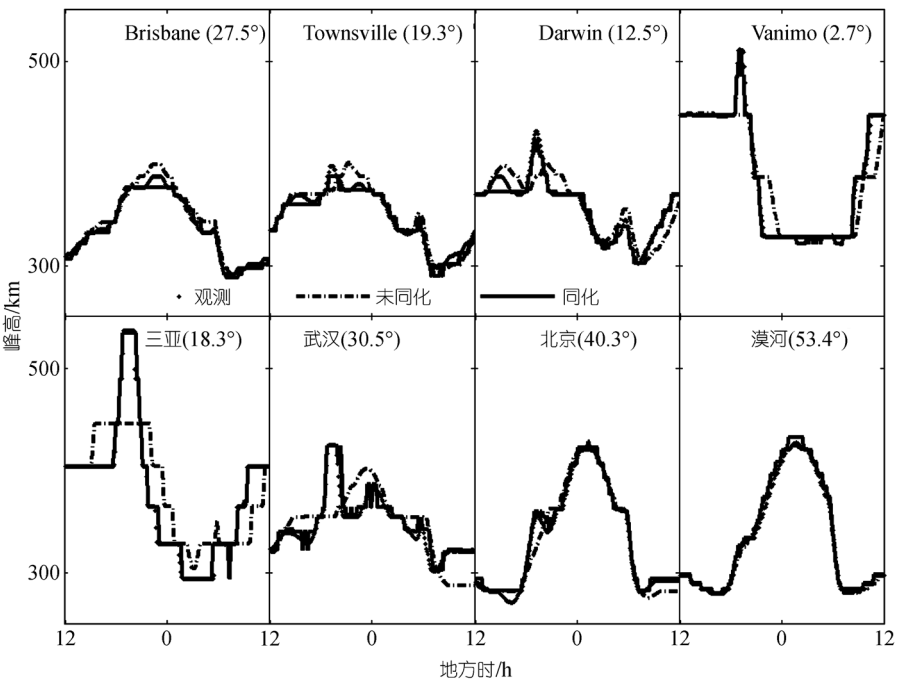


图 8　我们选择的 8 个台站的峰值高度的地方时变化

说明同图 7

算出来的电场漂移计算的结果，在没有被同化的台站照常可以符合的很好. 一方面说明了模式的可靠性，另一方面说明我们采用非线性最小二乘拟合进行数据同化、估算外参量是可行和有效的.

3 结论

本文在刘立波、雷久侯等人[8~10,17,22,23]工作的基础上构建了一个中低纬电离层理论模式: TIME-IGGCAS. TIME- IGGCAS模式采用偏心偶极坐标系, 自洽的求解连续性方程、动量方程、能量方程. 模式考虑了电场漂移的作用. 我们同时利用这个模式进行了一个观测系统数据同化试验, 结论如下:

模式计算结果能重现大部分电离层正常和异常现象, 如: 赤道双峰的形成和由于电场的日落反向增强导致的双峰的抬升和电子浓度的日落增强; 电子浓度和峰值高度的地方时变化; 电离层年度异常、半年异常和冬季异常. 计算的全球临界频率、峰值高度和电子浓度的切片图都比较符合实际情况, 说明模式是稳定和可靠的.

观测系统数据同化表明, 把观测(这里是用模式生成的)同化到模式当中, 用非线性最小二乘拟合的办法可以很准确的估算模式的外驱动参数. 本文中我们估算的电场漂移速度除在晚上有一些微小的差别外, 在白天符合的很好. 南半球 4 个台站的临界频率和峰值高度在 3 种情况下的对比表明(观测、没有同化、同化): 虽然这些台站的数据没有被同化到模式当中去, 仅仅利用北半球 4 个台站的观测数据推测的电场漂移速度完全可以使他们的结果与观测符合的很好, 说明了我们同化方法的有效性.

参 考 文 献

1 Roble R G, Ridley E C, Richmond A D, et al. A coupled thermosphere and ionosphere general circulation model. Geophys Res Lett, 1988, 15: 1325—1328

2 Richards P G, Torr D G. Seasonal, diurnal, and solar cyclical variations of the limiting H^+ flux in the Earth's topside ionosphere. J Geophys Res, 1985, 90: 5291—5268

3 Bailey G J, Balan N, Su Y Z. The Sheffield University plasmasphere ionosphere model-a review. J Atmos Solar-Terr Phys, 1997, 59: 1541—1552[DOI]

4 Millward G H. A global model of the earth's thermosphere, ionosphere and plasmasphere: Theoretical studies of the response to enhanced high-latitude convection. Dissertation for the Doctoral Degree. UK: University of Sheffield, 1993. 1—195

5 Anderson D N. A theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly, Ⅰ. Theory. Planet Space Sci, 1973, 21: 409—419

6 Huba J D, Joyce G, Fedder J A. Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low latitude ionospheric model. J Geophys Res, 2000, 105(A10): 23035—23053[DOI]

7 Pavlov A V. New method in computer simulations of electron and ion densities and temperatures in the plasmasphere and low-latitude ionosphere. Ann Geophys, 2003, 21: 1601—1628

8 涂剑南, 刘立波, 保宗悌. 一个低纬电离层理论模式. 空间科学学报, 1997, 17: 212—219

9 Liu L B, Wan W X, Tu J N, et al. Modeling of the ionospheric response to the solar eclipse of 24 October 1995. Terr Atmos Ocean Sci, 2000, 11(2): 543—554

10 Liu L B, Wan W X. The Evolution of Equatorial Trough of Ionospheric F-region Ionization. Terr Atmos Ocean Sci, 2001, 12(3): 559—565

11 Zhang S R, Huang X Y. An ionospheric numerical model and some results for the electron density structure below the F2 peak. Adv Space Res, 1995, 16(5): 119—120[DOI]

12 高铭, 肖佐. 一种电离层物理模型及其在 F1 谷区形成讨论中的应用. 空间科学学报, 1992, 12(4): 287—297

13 王劲松, 肖佐. 子午面内时变电离层模型及其边界条件. 地球物理学报, 1999, 42(1): 18—29

14 Zhang M L, Radicella S M, Shang S P. A physical numerical ionospheric model and its simulation results. Commun Theor Phys, 2004, 41: 795—800

15 Zhang B C, Kamide Y, Liu R Y. Response of electron temperature to field-aligned current carried by thermal electrons: A model. J Geophys Res, 2003, 108(A5): 1169—1179[DOI]

16 朱明华, Taieb C, 曹冲. 中纬电离层理论模式研究. 空间科学学报, 1998, 18: 23—30

17 Lei J H, Liu L, Wan W, et al. Model results for the ionospheric lower transition height over mid-latitude. Ann Geophys, 2004, 22: 2037—2045

18 Wang C, Hajj G, Pi X, et al. Development of the Global Assimilative Ionospheric Model. Radio Sci, 2004, 39: RS1S06, doi: 10.1029/2002RS002854[DOI]

19 Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM). Radio Sci, 2004, 39: RS1S02, doi:10.1029/2002RS002794[DOI]

20 Zhang S R, Oliver W L, Fukao S, et al. Extraction of solar and thermospheric information from the ionospheric electron density profile. J Geophys Res, 2001, 106: 12821—12836[DOI]

21 Zhang S R, Oliver W L, Holt J M, et al. Solar EUV flux, exospheric temperature and thermospheric wind inferred from incoherent scatter measurements of electron density profile at Millstone and Shigaraki. Geophys Res Lett, 2002, 29(9): 1207—1210

22 Lei J H, Liu L, Wan W, et al. Modeling investigation of ionospheric storm effects over Millstone Hill during August 4-5, 1992. Earth Planet Space, 2004, 56(9): 903—908

23 雷久侯. 中纬电离层的统计分析与模式化研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2005. 48—68

24 Scherliess L, Fejer B G. Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model. J Geophys Res, 1999, 104(A4): 6829—6842[DOI]

25 Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionosphere F2-layer. J Atmos Terr Phys, 1998, 60: 1385—1402[DOI]

26 赵必强. 中低纬电离层年度异常与暴时特性研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2006. 37—67

27 Pi X, Wang C, Hajj G A, et al. Estimation of E×B drift using a global assimilative ionospheric model: An observation system simulation experiment. J Geophys Res, 2003, 108(A2): 1075—1088[DOI]

28 Lei J, Liu L, Wan W, et al. Modeling the behavior of ionosphere above Millstone Hill during the September 21—27, 1998 storm. J Atmos Solar-Terr Phys, 2004, 66: 1093—1102[DOI]