0254-6124/2023/43(2)-0251-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Yuhan, REN Zhipeng, YU Tingting, LIU Yunbo, WEI Yong. Morphological Study on Magnetically Quiet-day Ionospheric Potential Distribution (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 251–259. DOI:10.11728/cjss2023.02.220328032

磁静日电离层电势分布的形态学研究*

王瑜晗[1,3] 任志鹏[1,2,3] 于婷婷[1,2,3]
刘耘博[1,3] 魏 勇[1,2,3]

1(中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理院重点实验室 北京 100029)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京 100029)

3(中国科学院大学地球与行星学院 北京 100049)

摘 要 利用理论模式 GCITEM，在国际地磁参考场（IGRF）下，模拟了地磁平静条件下的电离层发电机主导的中低纬电离层电势分布，研究了太阳活动、季节、世界时和低层大气潮汐对电离层电势的调节作用。结果表明，各种条件下中低纬电势全局分布基本一致，都具有两个正电势峰值（源）和一个负电荷峰值（汇）；电势分布存在明显的季节和世界时差异；中低纬电离层电势峰值差随着太阳活动的增强明显增加，并在一定太阳活动高值后趋于饱和；周日迁移潮主要影响赤道地区，导致电势峰值差增加，而半周日迁移潮主要影响中纬度地区，导致电势峰值差减小。

关键词 电离层电动力学，电离层电势变化性，数值模拟，电离层发电机，大气潮汐

中图分类号 P352

Morphological Study on Magnetically Quiet-day Ionospheric Potential Distribution

WANG Yuhan[1,3] REN Zhipeng[1,2,3] YU Tingting[1,2,3]
LIU Yunbo[1,3] WEI Yong[1,2,3]

1(*Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

2(*Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

3(*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

* 中国科学院战略性先导科技专项（B 类）（XDB4100000），国家自然科学基金项目（41874179, 41674158, 41427901），中国科学院战略性先导科技专项（A 类）（XDA17010201, XDA17010404），中国科学院重点部署项目（ZDRY-KT-2021-3），民用航天技术预先研究项目（D020105），重大科研基础设施开放研究项目和中国博士后科学基金会（2021M703192）共同资助

2022-03-25 收到原稿，2022-11-09 收到修定稿

E-mail：zpren@mail.iggcas.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/)

Abstract Under the International Geomagnetic Reference Field (IGRF), Global Coupled Ionosphere-Thermosphere-Electrodynamics Model (GCITEM) simulations are used to investigated magnetically quiet-day ionospheric potential distribution at middle-low latitudes, which is dominated by ionospheric dynamo. We present the dependence of ionospheric potential on solar activity, season, UT, and lower atmospheric tides. The results are as follows: the global distribution of ionospheric potential is similar under different conditions. There are two positive potential peaks (source) and one negative charge peak (sink) in one hemisphere. Potential distributions have obvious seasonal and UT variations. The differences of potential peak between source and sink have an increase with the increase of solar activity, however, the differences tend to saturate after a high solar activity level. The diurnal migration tides mainly affect the ionospheric potential at equatorial regions, resulting in the increase of potential peak differences. In comparison, the semi-diurnal migration tides mainly affect the ionospheric potential at middle latitudes, resulting in the decrease of potential peak differences.

Key words Ionospheric electrodynamics, Ionospheric potential variability, Numerical simulation, Ionospheric dynamo, Tides

0 引言

电离层电动力学过程是电离层/热层系统的结构和变化及耦合的关键过程，同时也对电离层/热层系统与磁层和中低层大气之间耦合和相互作用有着重要的影响。电离层电场和许多重要的电离层现象有着密切关系，例如中低纬地区的赤道电集流[1]、电离层赤道异常[2]、高纬地区的极光电集流[3]和极区电离层的偶发 E 层[4]等现象。研究电离层电动力学的形态学特征以及产生演化的过程，对深入了解电离层/热层耦合系统具有重要意义。在电离层电动力学的理论研究中，电离层发电机理论受到广泛认可[5]：中性风拖曳等离子体切割磁力线产生感生电场，并由于电离层电导率的时空不均匀分布出现电荷积累，从而形成极化电场。在电离层的准稳态条件下，等离子体漂移、电流和极化电场之间存在一定因果关系，电流表示为需要平衡等离子体与中性气体之间碰撞的沿着磁场分布的磁应力。在中低纬地区电离层 F 层高度，根据关系式 $E=-V\times B$，可以将等离子体漂移的观测等效成电离层电场，等离子体漂移与中性风之间也存在一定联系，可以用于反演热层中性风场[6]。在高纬地区，极化电场的形成不完全由发电机效应产生，磁层投射下来的电场会对电场分布产生相当大的影响，同时粒子沉降会改变极区电离层的电导率分布，导致极区电离层电动力学过程非常复杂。

迄今为止，人们主要依赖地基观测（地磁仪、测高仪和非相干散射雷达等）和天基观测（卫星和火箭）对电离层电流和电场进行探测。早期探测方式主要是通过地面磁力仪观测分析得到的地面磁场扰动分量，反演电离层的平静太阳日（Sq）电流，得到的实际上是一定高度范围内的电离层电流平均结果[7]。20 世纪 60 年代，通过一系列火箭探测，得到了赤道电集流的基本垂直结构[8]。20 世纪 70 年代以后，利用卫星和非相干散射雷达对电离层电场进行了广泛研究，基于美国 Jicamarca 非相干散射雷达和 AE-E 卫星的等离子体漂移观测数据，Fejer 等[9–12]给出了电离层 F 区电场的基本形态结构。利用四台非相干散射雷达（Millstone Hill, Arecibo, St. Santin 和 Jicamarca）的观测数据，Richmond 等[13]建立了一个太阳活动低年地磁平静下中低纬电离层电势电场的经验模型。基于非相干散射雷达和卫星观测的等离子体漂移数据，人们建立起了一系列地磁平静和扰动条件下的赤道区等离子体漂移经验模型[12,14–17]。对电离层电场和电流的探测手段十分有限，因此数值模拟在研究电离层电动力学过程中依然占有重要地位。

20 世纪 50 年代以来，在电离层电动力学的数值模拟方面做了大量的工作[7,18]，例如解释了 Sq 电流系的成因[7]，以及赤道电集流垂直结构[19,20]等。早期这类工作限于计算条件和对于电离层电动力学过程的了解不够深入，大部分是二维空间模拟，且存在电场、

电流和风场之间不自洽的问题[19]。二维模式的建立基于发电机 E 层发电机理论, 忽略了 F 层发电机的贡献, 因此夜间电场的模拟会存在问题[21]。随着发电机理论研究的逐渐深入和计算性能的大幅提高, 对全球电离层电场的三维模拟可以克服以上问题。大多数三维电离层电场模拟都建立在等电势假设上, 即平行磁力线方向的电导率远大于垂直方向的电导率, 即沿磁力线方向电势相等, 并根据发电机理论, 采用数值方法求解电离层电场和电流。基于以上方法, 研究建立了一系列三维电离层电场理论模式, 对赤道电集流(EEJ)、Sq 电流和日落反转增强(PRE)等现象的形态结构进行了研究[22–27]。Crain 等[28,29] 进行了电离层理论模式和电场模式的耦合计算, 比较了不同背景风场输入对电离层电场的影响。在中国, Xu, Yu 和 Shen 等[30–33] 开展了一系列电离层电场和电流的模拟研究。基于电离层发电机理论, Ren 等[34] 在改良的 APEX 坐标系下, 推导出非偶极地磁场下电离层电势满足的微分方程, 改进原有电离层电场模式, 发展出了能够独立运行的 TIDM-IGGCAS-II 模式。

本文在真实地磁场下模拟了地磁平静条件下的电离层发电机主导的中低纬电离层电势分布, 并通过电离层电势正负峰值的位置以及峰值差, 对电离层电势全球分布的主要特征进行分析。正负电势峰值分别是正电荷和负电荷的累积中心, 对应着极化电场的源和汇[32], 极化电场则从正电荷的累积中心流向负电荷的累积中心。电荷累积中心现象的形成原因一般认为是由于发电机区风场和电导率的不均匀性, 导致了发电机电流的不均匀性, 最终形成了电荷堆积现象[35]。通过运行理论模式 GCITEM, 利用其电场模块 TIDM-IGGCAS-II, 计算得到了地磁平静条件下的全球电势分布。其中, GCITEM 模式为电离层/热层系统耦合模式, 模式具有三维结构, 能够自适应求解大部分电离层/热层系统参数, 具备完善的热平衡和化学循环过程, 且有较好的独立性。模拟结果能够充分展示出电势分布的基本形态学特征。重点研究了太阳活动、季节、世界时和低层大气潮汐(包括周日迁移潮和半周日迁移潮)等多种因素调控下电势分布的变化规律。

1 模式

采用的电离层模式为 GCITEM(Global Coupled Ionosphere-Thermosphere-Electrodynamics Model, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences), 其是一个自洽的时变三维电离层/热层系统耦合模式。模式建立在高度网格的地理坐标系下, 经度–纬度网格为 7.5°×5°, 高度范围为 90～600 km, 分为 28 层, 能够模拟电离层/热层区域内基本的物理、化学过程。模式的下边界由经验模型给定, 通过自洽求解电离层/热层的动量方程、能量方程、质量方程、流体静力学方程和状态方程, 能够自适应计算电离层/热层区域的主要中性成分 (O, O_2, N_2), 以及次要中性成分 (N(^{4}S), N(^{2}D), NO, Ar, He), 离子 (O^+, N_2^+, O_2^+, NO^+, N^+) 和电子数密度, 电子、离子和中性温度(T_e, T_i 和 T_n)及中性风场的时变三维结构。模式具体计算方法参考 Ren 等[36]。该模式通过调用电离层发电机模块 TIDM-IGGCAS-II, 直接提供温度、等离子体密度和中性风场等信息, 能够实现中低纬电离层电势、电场的自洽计算。

TIDM-IGGCAS-II(Theoretical Ionospheric Dynamo Model in Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Version II), 可作为 GCITEM 电场模块运行, 也能够作为独立的电离层电场模式运行。模式独立运行时主要的输入参量为电离层中性风场 (由经验模型或观测数据提供) 和电导率模型(由各种经验模型提供的热层/电离层参量计算提供), 而作为 GCITEM 电场模块时以上参量直接由 GCITEM 模式的其他模块提供。TIDM-IGGCAS-II 模式建立在改良的 APEX 坐标下, 基于电离层发电机原理推导出用于描述非偶极子场条件下电离层电势的微分方程。背景地磁场既可以采用理想偶极场, 也可采用更为真实的国际参考地磁场(IGRF)。地磁 APEX 坐标由 Vanzandt 等[37] 开发, 是一种电离层研究领域内非常重要的地磁坐标系, 通过磁力线追踪的方法在给定地磁场内找到某一磁力线的顶点, 从而标定磁力线, 可以很好地反映出真实地磁场的构型。模式基础方程为

$$\frac{\partial}{\partial\phi}\left(S_{\phi\phi}\frac{\partial\Phi}{\partial\phi}+(S_{\phi\lambda}+S_H)\frac{\partial\Phi}{\partial\lambda}\right)+\frac{\partial}{\partial\lambda}\left((S_{\lambda\phi}-S_H)\frac{\partial\Phi}{\partial\phi}+S_{\lambda\lambda}\frac{\partial\Phi}{\partial\lambda}\right)=\frac{\partial Q_\phi}{\partial\phi}+\frac{\partial Q_\lambda}{\partial\lambda}.$$

其中, Φ为电离层电势, S 为电导率沿磁通量管的体积分结果, Q 为电流沿磁通量管的体积分结果[34]。该模

式能很好地展现出中低纬电离层电势、电场的基本结构和形态。

模拟背景设置在地磁平静条件下，地磁活动指数设置为 $Ap = 4.0$。在低中高三种太阳活动条件下运行，低太阳活动设置 $F_{10.7} = 70.0$, $F_{10.7\,\mathrm{A}} = 70.0$，中太阳活动下 $F_{10.7} = 140.0$, $F_{10.7\,\mathrm{A}} = 140.0$，高太阳活动下 $F_{10.7} = 210.0$, $F_{10.7\,\mathrm{A}} = 210.0$。极盖电势降设置为 20 kV，极光粒子沉降的半球积分功率设置为 10 GW。输出时间点分别取春分日（3 月 20 日）、夏至日（6 月 21 日）、秋分日（9 月 23 日）和冬至日（12 月 21 日）。模式运行时间步长为 150 s，为保证模式结果的收敛，运行时间设置为 15 天。模式下边界采用 SABER 数据作为输入，提取了 DW1 和 SW2 两种潮汐波模，并将两种潮汐波模叠加作为第三种情况的底边界输入，用以模拟低层大气向上传输对电势分布造成的影响。以下给出模式模拟的部分电势计算结果。

2 模式计算结果

图 1 分别展示地理坐标系和地磁坐标系下的全球电势分布的等值线图，黑色虚线为地磁 0°子午面。模拟设置在中等太阳活动下春分日 00:00 UT 处，等值线间隔为 500 V。从图中可以看出，地磁场位形对电离层发电机具有明显的调制作用[38,39]，进而会影响电荷累积中心的位置与形态学特征，改变电离层电势的全球分布。考虑到地磁场的经度变化性，为便于模拟结果的呈现，后文选择地磁坐标系来呈现模拟结果，并选取赤道地区的电势平均值作为模式电势数据的参照零点。在地磁坐标系下，由于磁力线高电导率的耦合作用，南北半球的电势具有对称性。地磁坐标系下呈现的模拟电势分布与 Richmond[13] 以及 Crain 等[29,30] 的模拟结果相近。

图 2 分别给出了不同太阳活动条件下全球电势分布的等值线。参考平面在 300 km 高度处，磁纬在±60°之间，覆盖中低纬地区。对比模式结果可以发现，中太阳活动和高太阳活动之间的差别要小于和低太阳活动之间的差别，具体体现在正负电荷峰值和电势峰值差上，尽管三种太阳活动 $F_{10.7}$ 指数均相差 70。这与前人的结论吻合，即太阳活动对电势分布的影响在达到一定太阳活动后电离层电荷处于趋于饱

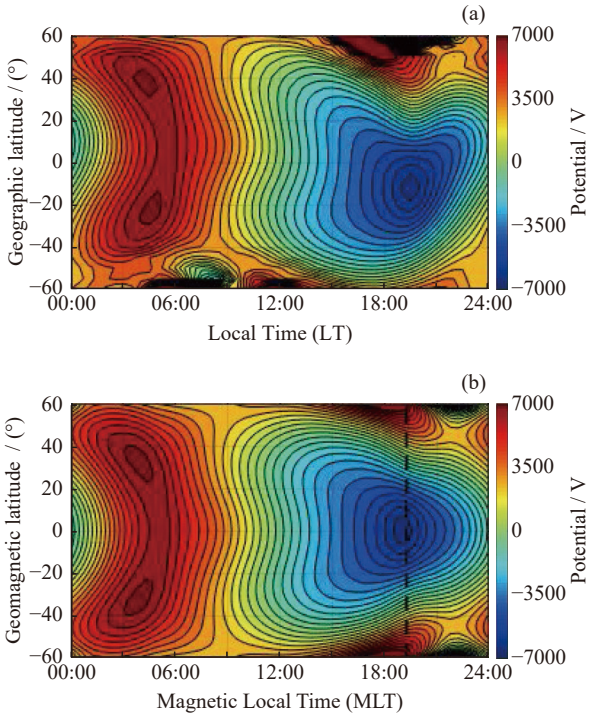

图 1 地理坐标系（a）和地磁坐标系（b）下中等太阳活动下春分日 00:00 UT 的全球电势分布（黑色虚线为地磁 0°子午面）

Fig. 1 Global potential distribution under medium solar activity in geographic coordinate system (a) and geomagnetic coordinate system (b) at the spring equinox at 00:00 UT (The black dotted line is the geomagnetic 0° meridian plane)

和的状态，直接影响电离层电导率[14]。

图 3 给出了中等太阳活动下冬至日、春分日、夏至日以及秋分日的 4 个世界时（05:00 UT, 11:00 UT, 17:00 UT, 23:00 UT）的全球电势分布等值线，其中 05:00 UT 时的磁地方时 00:00 接近于地磁 0°子午面。模式结果显示，中等太阳活动下北半球极化电场主要存在两个源和一个汇。在赤道地区磁地方时 19:00－20:00 MLT 出现汇，强度在–8 kV 左右，在昏侧磁纬±60°或稍高纬度出现一个源，在磁地方时 04:00－05:00 MLT 会出现另一个源，源的位置存在明显的季节变化，源的强度均在 6 kV 左右。电势分布有着明显的季节特征。春秋分日晨侧源出现在赤道到磁纬 ±45°之间，夏至日源出现的纬度最高，在磁纬 ±50°附近，同时冬夏的源的形成时间要早于春秋。春秋分日电势峰值差在 15 kV 左右，而冬夏至日则只有 12 kV 左右，要小于春秋分。世界时对电离层

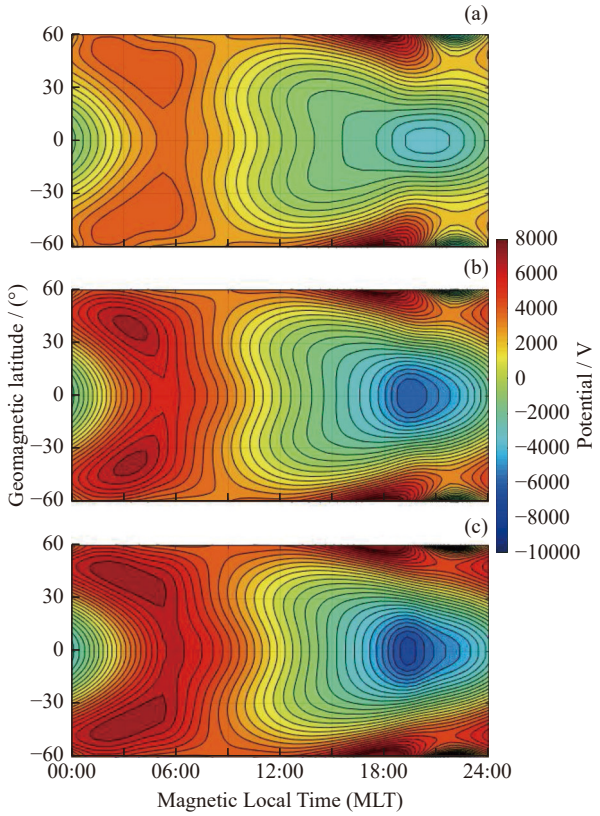

图 2 低太阳活动（a）、中等太阳活动（b）和高太阳活动（c）下秋分日 00:00 UT 的全球电势分布

Fig. 2 Global potential distribution under low solar activity (a), medium solar activity geomagnetic (b), and high solar activity geomagnetic (c) at the spring equinox at 00:00 UT

极化电场源和汇的位置也会产生一定影响，由于采用的是更接近于真实地磁场的 APEX 坐标，不同的世界时实际上反映了地磁场的经度变化引起的地磁场位形改变的影响。模式结果表明，世界时的调制作用对电势的整体分布特征产生的影响相对较小。

图 4 给出了低太阳活动下冬至日、春分日、夏至日以及秋分日的 4 个世界时（05:00 UT, 11:00 UT, 17:00 UT, 23:00 UT）的全球电势分布的等值线图。模式结果显示，低太阳活动下电势分布整体形态与中太阳活动下相似，但仍有许多差异。具体体现在相较于中太阳活动，正负电势相对强度都减弱，极化电场的源与汇之间电势峰值差明显减小，春秋分日电势峰值差在 10 kV 左右，冬夏至日电势峰值差在 7 kV 左右。此外，可以发现春分日的源会向低磁纬地区移动，冬夏至日的汇出现的时间提前到 13:00－14:00 MLT，部分世界时汇区会朝中纬地区移动，同时有的世界时汇区会分离，在 21:00 MLT 附近形成一个新的汇区。图 5 给出的是高太阳活动下冬至日、春分日、夏至日以及秋分日的 4 个世界时（05:00 UT, 11:00 UT, 17:00 UT, 23:00 UT）的全球电势分布的等值线图。模式结果与图 1 非常相似，相较于中太阳活动，高太阳活动下的正负电势峰值都有所增加。其中，春秋分日电势峰值差在 16 kV 左右，冬夏至日的电势峰值差在 13 kV 左右。

图 6 给出了中等太阳活动下春分日 06:00 UT 时刻的模式输出结果，底层边界输入分别使用了 DW1 与 SW2 以及 DW1 与 SW2 共同作用的潮汐波模。对比模式结果可以发现，不同潮汐驱动下电势分布的整体特征仍然相同，具备两个源和一个汇的基本特点。DW1 潮汐作为模式输入时，相较于两种潮汐共同作用，晨侧的源会向稍高的纬度移动，SW2 潮汐作为输入，源则会向赤道地区收缩。对比不同潮汐波模驱动的结果可以发现，DW1 潮汐输出的正负电势峰值差最大，而 SW2 潮汐输出的最小，两种潮汐共同作用结果则介于二者之间，同时受到 DW1 和 SW2 两种潮汐的调制。

3 结论

本文重点讨论了地磁平静条件下不同世界时、季节、太阳活动等因素作为背景以及 SABER 卫星数据提取的不同潮汐成分作为底层输入，通过 GCITEM 模式输出的电离层电势全球分布变化特征结果。电离层的电势形态学特征在不同因素的影响下会有所变化，具体结论如下。

（1）电势分布与以往研究计算结果相近，表明模式计算结果具有可信性。整体分布结构大体相同，均具有“两源一汇”的特点。大多数情况下，一个源区出现在 04:00－05:00 MLT 期间，另一个源区出现在磁纬±60°附近，可能与高纬地区输入相关，汇区出现在 19:00－20:00 MLT 期间赤道地区。

（2）磁场位形的改变，引起全球的电势分布的世界时变化。

（3）电势分布存在明显的季节差异。春秋分日的电势峰值差大于冬夏至日。春分日正电荷累积中心出现的纬度较秋分日稍低，夏至日的正电荷累积中心

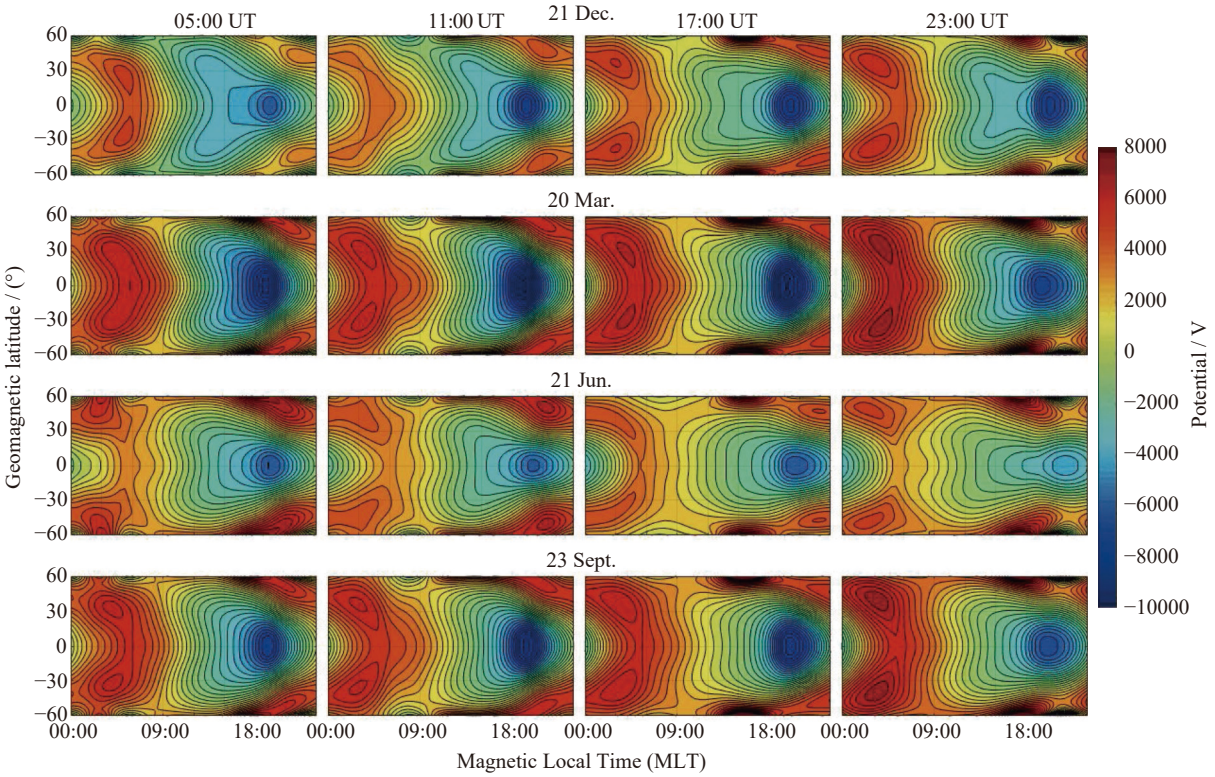

图 3 中等太阳活动条件下不同季节 4 个世界时的全球电势分布

Fig. 3 Seasonal and Universal Time (UT) dependence of global potential distribution under medium solar activity

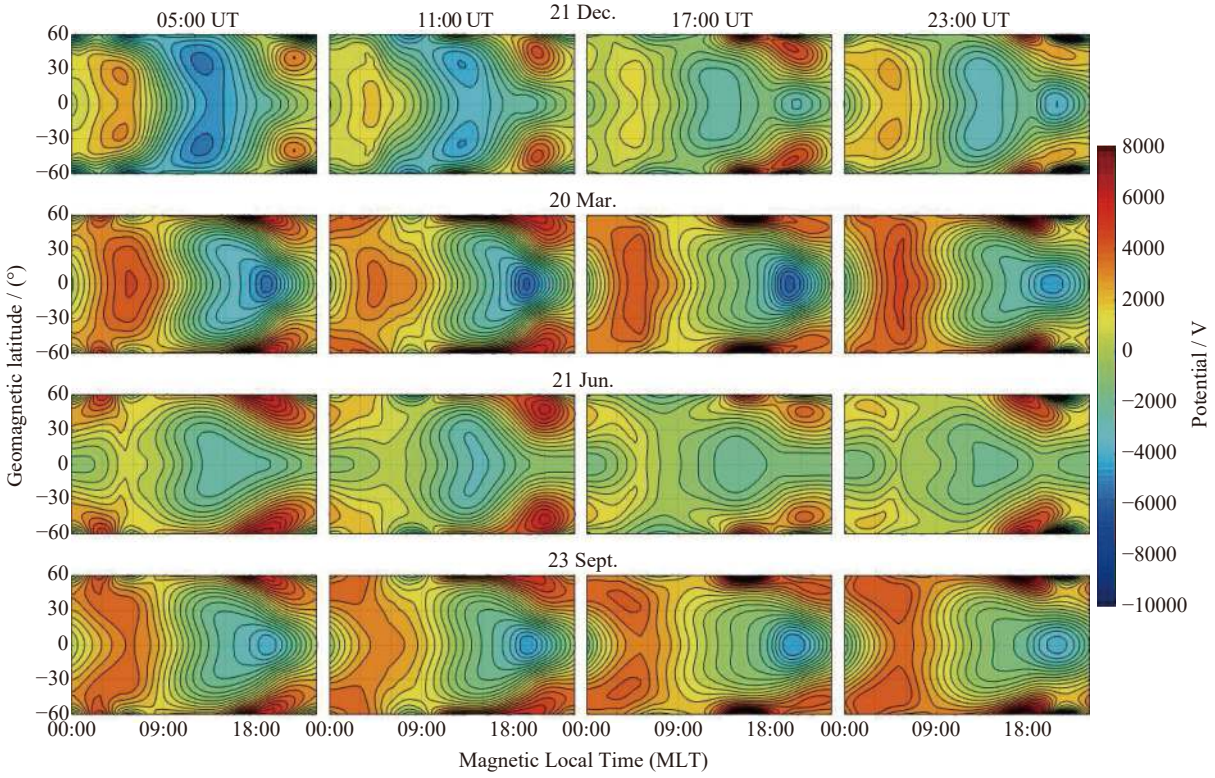

图 4 低太阳活动下不同季节的 4 个世界时的全球电势分布

Fig. 4 Seasonal and Universal Time (UT) dependence of global potential distribution under low solar activity

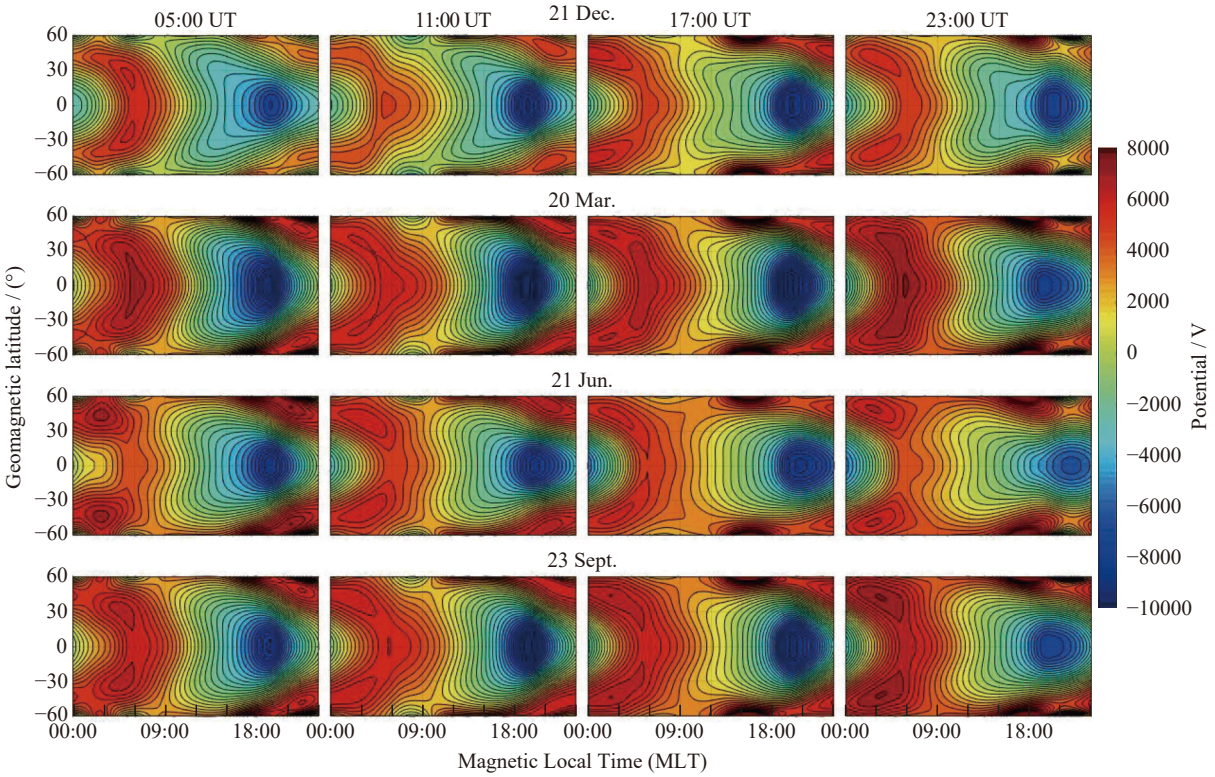

图 5 高太阳活动不同季节 4 个世界时的全球电势分布

Fig. 5 Seasonal and Universal Time (UT) dependence of global potential distribution under high solar activity

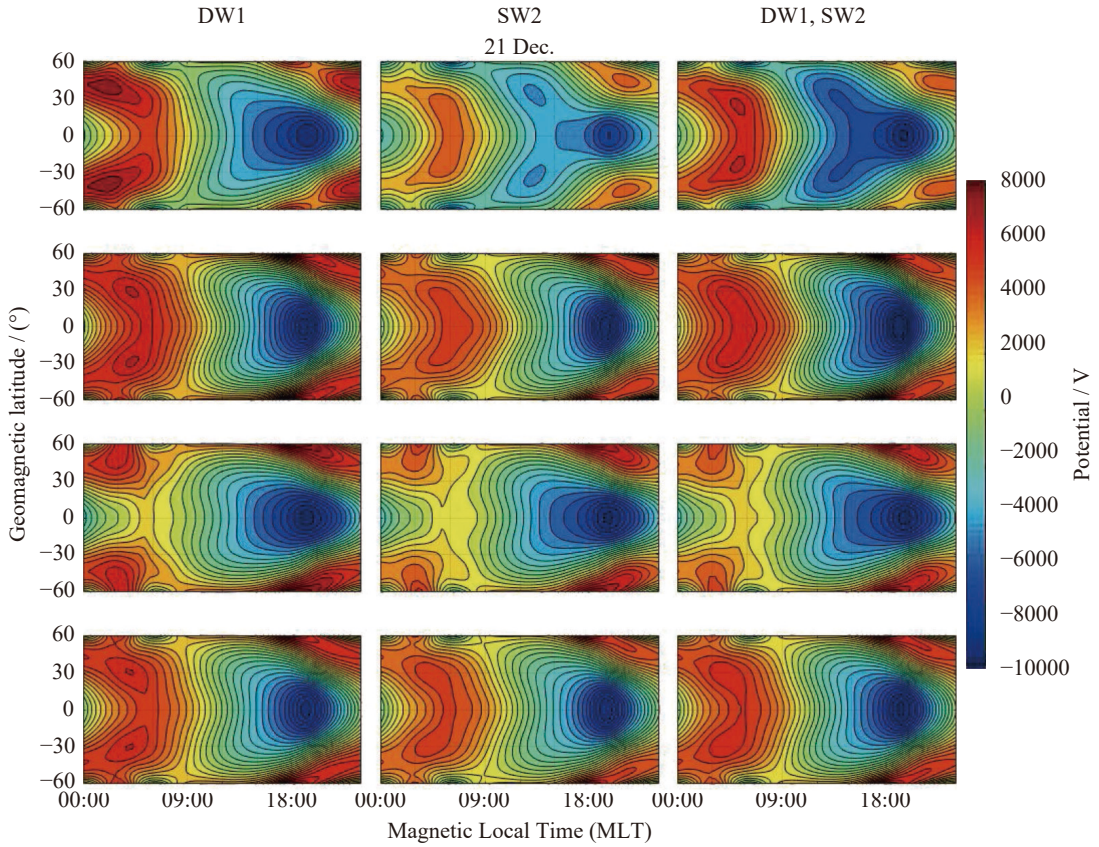

图 6 中等太阳活动下 06:00 UT 理论模式输出的电势结果

Fig. 6 Potential output of theoretical model under medium solar activity at 06:00 UT

会朝较高纬度地区移动,同时部分世界时会发生负电荷累积中心分离的现象。冬夏的源的形成时间要早于春秋。

(4)随着太阳活动的增强,电势峰值差明显增加。同时值得注意的是,峰值差随太阳活动的变化并非完全线性相关,达到一定太阳活动后电离层电荷处于趋于饱和的状态。

(5)不同潮汐作为输入时,电势的整体分布特征不变。其中,DW1 潮汐作为模式输入时主要影响低纬赤道地区,同时导致正负电势峰值差增加;SW2 潮汐主要影响中纬地区,导致正负电势峰值差减小。

本文对模式输出结果所进行的分析可以为电离层中低纬电动力学过程的研究提供一种新的参考。

参考文献

[1] CHAPMAN S. The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution above Huancayo, Peru, and elsewhere[J]. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A*, 1951, **4**(1): 368-390

[2] STENING R J. Modelling the low latitude *F* region[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1992, **54**(11/12): 1387-1412

[3] KAMIDE Y, BAUMJOHANN W. Magnetosphere-Ionosphere Coupling[M]. New York: Springer, 1993

[4] WAN W X, PARKINSON M L, DYSON P L, *et al*. A statistical study of the interplanetary magnetic field control of sporadic *E*-layer occurrence in the southern polar cap ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, **61**(18): 1357-1366

[5] HEELIS R A, MAUTE A. Challenges to understanding the earth's ionosphere and thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(7): e2019JA027497

[6] IMMEL T J, HARDING B J, HEELIS R A, *et al*. Regulation of ionospheric plasma velocities by thermospheric winds[J]. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(12): 893-898

[7] RICHMOND A D, MATSUSHITA S, TARPLEY J D. On the production mechanism of electric currents and fields in the ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(4): 547-555

[8] DAVIS T N, BURROWS K, STOLARIK J D. A latitude survey of the equatorial electrojet with rocket-borne magnetometers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, **72**(7): 1845-1861

[9] FEJER B G. The equatorial ionospheric electric fields. A review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1981, **43**(5/6): 377-386

[10] FEJER B G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1991, **53**(8): 677-693

[11] FEJER B G, DE PAULA E R, HEELIS R A, *et al*. Global equatorial ionospheric vertical plasma drifts measured by the AE-E satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A4): 5769

[12] FEJER B G, SCHERLIESS L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A11): 24047-24056

[13] RICHMOND A D, BLANC M, EMERY B A, *et al*. An empirical model of quiet-day ionospheric electric fields at middle and low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A9): 4658-4664

[14] SCHERLIESS L, FEJER B G. Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A11): 24037-34046

[15] SCHERLIESS L, FEJER B G. Radar and satellite global equatorial *F* region vertical drift model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A4): 6829-6842

[16] FEJER B G, SOUZA J R, SANTOS A S, *et al*. Climatology of *F* region zonal plasma drifts over Jicamarca[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A12): A12310

[17] FEJER B G, JENSEN J W, SU S Y. Quiet time equatorial *F* region vertical plasma drift model derived from ROCSAT-1 observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A5): A05304

[18] CHEN Junjie. A Simulation Study on the Variations of Ionospheric Electric Fields at Low and Middle Latitudes[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021 (陈俊杰. 中低纬电离层电场时空变化特征的模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021)

[19] UNTIEDT J. A model of the equatorial electrojet involving meridional currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, **72**(23): 5799-5810

[20] SUGIURA M, POROS D J. An improved model equatorial electrojet with a meridional current system[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, **74**(16): 4025-4034

[21] YU Tao, MAO Tian, WANG Yungang, *et al*. Two-dimension theoretical modeling of ionospheric dynamo and its preliminary application[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(5): 1357-1365 (余涛, 毛田, 王云冈, 等. 二维电离层发电机理论模式及其初步应用[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(5): 1357-1365)

[22] RICHMOND A D. Equatorial electrojet—I. Development of a model including winds and instabilities[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1973, **35**(6): 1083-1103

[23] TAKEDA M, MAEDA H. Three-dimensional structure of ionospheric currents 1. Currents caused by diurnal tidal winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A12): 6895-6899

[24] MAUTE A. Thermosphere-ionosphere-electrodynamics ge-

neral circulation model for the ionospheric connection explorer: TIEGCM-ICON[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1/2): 523-551

[25] CHEN J J, LEI J H. A simulation study on the latitudinal variations of ionospheric zonal electric fields under geomagnetically quiet conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(2): 1444-1453

[26] CHEN J J, WANG W B, LEI J H, *et al*. The physical mechanisms for the sunrise enhancement of equatorial ionospheric upward vertical drifts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): e2020JA028161

[27] ZHOU X, LIU H L, LU X, *et al*. Quiet-time day-to-day variability of equatorial vertical E × B drift from atmosphere perturbations at dawn[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(4): e2020JA027824

[28] CRAIN D J, HEELIS R A, BAILEY G J, *et al*. Low-latitude plasma drifts from a simulation of the global atmospheric dynamo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A4): 6039-6046

[29] CRAIN D J, HEELIS R A, BAILEY G J. Effects of electrical coupling on equatorial ionospheric plasma motions: when is the *F* region a dominant driver in the low-latitude dynamo?[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A4): 6033-6037

[30] XU Wenyao, XIA Qing, LI Weidong. A numerical solution of the dynamo equation for the global ionosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1994, **14**(3): 205-209 (徐文耀, 夏庆, 李卫东. 全球电离层发电机方程的一种数值解法[J]. 空间科学学报, 1994, **14**(3): 205-209)

[31] YU Tao. Numerical Study of the Ionospheric Electric Field at Mid- and Low Latitudes and It's Influence on the Ionospheric Annual and Semi-annual Variations[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2003 (余涛. 中低纬电离层电场的模拟研究及电场对电离层年度变化的影响[D]. 武汉: 中国科学院武汉数学与物理研究所, 2003)

[32] YU Tao, WAN Weixing, LIU Libo, *et al*. Numerical study for the semi-annual variation of electric fields at the mid- and low-latitudes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(3): 182-193 (余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 电离层电场半年变化的模拟研究[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(3): 182-193)

[33] SHEN Changshou, ZI Minyun, WANG Jinsong, *et al*. On the asymmetry of the storm-time current system in the ionosphere between southern and northern hemispheres[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(6): 1573-1581 (沈长寿, 资民筠, 王劲松, 等. 关于暴时电离层电流分布的南北半球不对称性[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(6): 1573-1581)

[34] REN Zhipeng, WAN Weixing, WEI Yong, *et al*. A theoretical model for mid- and low-latitude ionospheric electric fields in realistic geomagnetic fields[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(24): 3883-3890 (任志鹏, 万卫星, 魏勇, 等. 基于真实地磁场的中低纬电离层电场理论模式[J]. 科学通报, 2008, **53**(24): 3883-3890)

[35] ZHUANG Hongchun. Space Electricity[M]. Beijing: Science Press, 1995: 192 (庄洪春. 空间电学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 192)

[36] REN Z P, WAN W X, LIU L B. GCITEM-IGGCAS: a new global coupled ionosphere–thermosphere-electrodynamics model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, **71**(17/18): 2064-2076

[37] VANZANDT T E, CLARK W L, WARNOCK J M. Magnetic apex coordinates: a magnetic coordinate system for the ionospheric F_2 layer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(13): 2406-2411

[38] BATISTA I S, DE MEDEIROS R T, ABDU M A, *et al*. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A5): 10887-10892

[39] HARTMAN W A, HEELIS R A. Longitudinal variations in the equatorial vertical drift in the topside ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A3): A03305