0254-6124/2015/35(5)-556–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yao Xin, Zhao Biqiang, Liu Libo, Wan Weixing. Comparison of ionospheric total electron content over North America and East Asia with EOF analysis (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(5): 556-565, doi:10.11728/cjss2015.05.556

北美与东亚中纬地区电离层 TEC 变化的 EOF 建模和分析*

姚 新[1,2,3] 赵必强[1,2] 刘立波[1,2] 万卫星[1,2]

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 北京 100049)

摘 要 考察了北美 (30°N−50°N, 140°W−50°W) 与东亚 (42.5°N−57.5°N, 65°E−140°E) 中纬地区电离层总电子含量 (TEC) 的变化. TEC 数据来自美国喷气动力实验室 (JPL) 约 15 年的全球电离层图 (Global Ionospheric Map, GIM) 数据. 利用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Functions, EOF) 得到上述两地区前三阶本征模及相关时间系数, 分别约占 TEC 总变化的 99.57% 和 99.79%. 结果表明, 两地区前三阶 EOF 分量所表现出的 TEC 变化基本一致. 第一阶 EOF 分量表现为受太阳活动调制的半年变化; 第二阶 EOF 分量表现为关于零磁偏线的经向电子浓度东西不对称结构, 计算表明该结构与受地磁偏角控制的热层纬向水平风引起的等离子体向上漂移密切相关; 第三阶 EOF 分量表现为磁倾控制的热层子午向风引起的等离子体向上漂移影响.

关键词 电离层 TEC, 经验正交函数 (EOF), 半年/年变化, TEC 东西不对称

中图分类号 P 352

Comparison of Ionospheric Total Electron Content over North America and East Asia with EOF Analysis

YAO Xin[1,2,3] ZHAO Biqiang[1,2] LIU Libo[1,2] WAN Weixing[1,2]

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

Abstract In the present work, variations of ionospheric Total Electron Content (TEC) are investigated and compared with applying Empirical Orthogonal Functions (EOF) on the dataset from the Global Ionospheric Maps (GIMs) which are produced by Jet Propulsion Laboratory (JPL) over two concerned areas: the North America (30°N−50°N, 140°W−50°W) and East Asia (42.5°N−57.5°N,

* 国家自然科学基金项目 (41174138, 41131066) 和国家重点基础研究项目 (2011CB811405) 共同资助

2015-04-02 收到原稿, 2015-05-17 收到修定稿

E-mail: zbqjz@mail.iggcas.ac.cn

65°E−140°E). The first three EOF components attribute about 99.57% and 99.79% to the total variations separately, and spatial-temporal features manifested by each EOF components are similar for the two areas: the first order EOF component for both areas represents semiannual variation which is strongly modulated by the solar activity; the second order component exhibits pronounced east-west longitude difference to the zero valued geomagnetic declination line, and these east-west longitude differences are coincidently consistent with plasma drift velocity caused by thermospheric zonal wind; the third order component demonstrates latitudinal variations possibly influenced by plasma drift velocity caused by thermospheric meridional wind. Results of the this paper are useful for understanding the physics mechanism of the ionospheric variations.

Key words Ionospheric TEC, EOF (Empirical Orthogonal Functions), Semiannual/annual variation, TEC east-west longitude difference

0 引言

电离层主要受到太阳活动、地磁场、中性大气成分及热层中性风场条件下光化学过程和动力学输运过程的影响, 多种电离层参量表现出丰富的时空异常变化. 所谓异常通常是指与 Chapman 理论有差异的电离层变化. 通过对电离层的长期观测, 研究发现电离层存在冬季异常、年异常和半年异常等全球尺度异常变化 [1]. 这些异常产生的机制与背景大气中性成分的季节变化, 日地距离产生的辐射差异, 低层大气各种波动和潮汐过程的周期变化等机制相关 [2−4]. 除此之外, 电离层还存在局部异常变化, 例如威德尔海异常 (Weddell Sea Anomaly, WSA), 也称为中纬夏季夜间异常 (Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly, MSNA), 即电离层电子浓度的周日最大值出现在傍晚甚至子夜或夏季电子浓度夜间增强现象 [5−7]. 这些局部电离层异常结构在最近几年受到大量关注. 传统观点认为, 威德尔海地处地磁中纬, 水平中性风驱动等离子体沿磁力线运动速度的垂直分量较大, 该区域又位于地理高纬, 夏季 F 层仍有部分产生率, 夜间盛行赤道风将 F_2 层峰值带到复合率较低的更高的高度. 因此, 峰值浓度将有可能升高. Burns 等 [8] 详细讨论 WSA 的相关机制, 提出黄昏时刻盛行的东向风并不能有效地向上运输等离子体, 来自等离子体层的质子通过电荷交换和双极扩散可能是引起上述增强最可能的物理过程. 威德尔海等局部电离层异常变化反映出电离层存在显著的局地经度差异, Zhang 等 [9] 研究发现北美大陆 TEC 存在显著东西经度差异日变化, 这种变化体现为沿零磁偏线东西两侧电子浓度差异以及明显的日变化和季节变化. Zhao 等 [10] 利用中国境内三对电离层探测仪的电子浓度 N_e 数据, 通过研究 F_2 层电子浓度峰值 N_mF_2, 证实了远东地区同样存在这种电子浓度东西不对称现象. Xu 等 [11] 也在南北美及大洋洲地区观测到类似现象. Zhang 等 [12] 进一步利用经验正交函数 (EOF) 分析了美国麻省理工学院 GPS 自动处理系统生成的北美地区约 12 年的 TEC 数据, 结果发现第二阶 EOF 分量空间变化即反映了这种相对于零磁偏线的电子浓度东西不对称现象, 同时发现第二阶 EOF 分量空间变化与热层纬向风引起的等离子体向上漂移高度相关, 表明这种电子浓度东西不对称现象可能是由地磁磁偏及热层中性风共同作用引起的.

EOF 方法能够很好地提取数据固有特性, 得到数据的各阶时空变化. EOF 分析方法最初被引入气候学领域用于提取气象数据空间变化的主模 [13], 近年来广泛用于电离层建模和电离层时空变化研究. 例如 EOF 方法被用于建立参数电离层模型 (Parameterized Ionospheric Model, PIM)[14]; 通过对 GPS 和地球地轨卫星数据进行参数化处理, 即在垂直方向使用 EOF 方法, 在水平方向使用球谐函数, 建立了 4 维电离层模型 [15]; 采用 EOF 方法, 通过分析 1980 年 4 月至 1990 年 12 月利用 ETS-II 卫星信标 136MHz 信号的 Faraday 旋转效应得到的 TEC 月中值数据, 建立了 TEC 月中值经验模型 [16]; 利用国际全球卫星导航系统和中国地壳运动观测网络 1996−2004 年中国地区 TEC 数据建立了 TEC 气候学模型 [17]; 利用 1957−1991 年武汉电离层观测站电离层传播因子 $M_{(3000)}F_2$ 数据建立了 $M_{(3000)}F_2$ 单站经验模

型 [18]; 利用 EOF 对 JPL GIMs 数据建模得到一个全球 TEC 模型, 发现 EOF 能够很好地实现 TEC 空间与时间变化的分离, 同时结果表明第一、二阶 EOF 分量主要体现了电离层气候学特性 [19].

东亚中纬地区 (42.5°N−57.5°N, 65°E−140°E) 与北美 (30°N−50°N, 140°W−50°W) 中纬地区具有类似的地磁场结构构型, 即两地区均处于北半球地磁磁纬 35°−55° 范围内, 同时地磁零磁偏线均穿过两地区, 但北美地区地磁磁偏角度差大于东亚地区 (地磁磁偏范围北美 −10°−10°, 东亚 −5°−5°). 因此, 通过研究地磁磁偏和热层中性风, 太阳活动对北美和东亚中纬地区电离层变化影响的差异, 对于了解电离层时空变化的经度差异机制具有指导意义.

本文利用经验正交函数 (EOF) 方法分析了约 15 年的 JPL GIMs 数据, 探讨了利用 EOF 分解所得到的各阶 EOF 分量变化及物理机制, 分析了所使用的数据处理方法, 对得到的前三阶 EOF 分量所反映的变化和物理机制进行研究, 进而得出了有参考意义的结果.

1 数据与方法

1.1 全球电离层图与 TEC 数据

国际 GPS 服务电离层工作组自 1998 年定期发布电离层垂直电子浓度图, 其数据产品全球电离层图由 5 个 IGS 关联分析中心 (IGS Ionosphere Associate Analysis Centers, IAACs) 制作 [20−21]. 本文使用的 TEC 来自美国喷气动力实验室的 GIM 数据, 该 GIM 数据为对 IGS 全球 GPS 网络约 100 个 (2004 年 5 月 4 日之后该数目加倍) GPS 接收机 TEC 观测数据进行插值所得, 所选择的地基GPS接收机尽可能覆盖大陆及海岛, 以实现 GIM 更加均匀的空间覆盖 [22]. JPL GIM 将 450 km 高度 F_2 层每日 TEC 数据按照每 2 h 时间间隔以 2.5°×5° 分辨率的经纬度网格进行装载, 特别是 2002 年 11 月 11 日之前每天生成 12 张图而之后均为每天 13 张图. 本文使用 1998 年 8 月至 2013 年 4 月约 15 年的北美 (30°N−50°N, 140°W−50°W) 以及东亚 (42.5°N−57.5°N, 65°E−140°E) 中纬地区的 JPL TEC 数据, 同时根据变换公式 $t_{\rm LT} = t_{\rm UT} + \phi_{\rm LON}/15$, 将按世界时 (UT) 分布的原 TEC 数据转换成按地方时 (LT) 等时间隔分布的易于 EOF 处理的 2 维 TEC 数据.

1.2 经验正交函数分析

经验正交函数 (EOF) 方法是一种多元统计方法, 通过应用线性变化去除冗余信息并实现原数据的简化 [23−24]. 通过对上述处理所得按 LT 分布的 TEC 数据 $\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)$ 进行 EOF 分解处理, 这里 t 表示地方时, ϕ 表示地理纬度, λ 表示地理经度. 其空间变化可以在数学上表示为一组正交 EOF 本征模 (或基函数) $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$, 时间变化能够表示成对应的一组主分量 (或时间系数) $\boldsymbol{A}_i(t)$. 利用本征模 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ 和相应时间系数 $\boldsymbol{A}_i(t)$, $\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)$ 可以表示为

$$\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda) = \langle\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)\rangle_{\rm t} + \Sigma_i\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)\boldsymbol{A}_i(t). \quad (1)$$

式中, $\langle\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)\rangle_{\rm t}$ 为总时间段 (1998 年 8 月至 2013 年 4 月) 内 $\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)$ 的时间平均值, 数学上表示矩阵 $\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)$ 的行平均矢量, 物理上表示一个空间分布; i 为阶数, $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ 即为第 i 阶 EOF 本征模. EOF 方法通过计算 $\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)$ 协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的本征方程 $\boldsymbol{C}\boldsymbol{\nu}_i = \mu_i\boldsymbol{\nu}_i$ 得到相应本征值 $\{\mu_i\}$, 即贡献度, 并根据贡献度 $\{\mu_i\}$ 值大小对本征矢进行排序, 最终得到一组最似然基函数 $\{\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)\}$, 将 $\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)$ 对 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ 投影可得 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ 相应的时间系数 $\boldsymbol{A}_i(t)$. 本文中北美和东亚中纬地区 TEC 前三阶 EOF 分量分别约占各自 TEC 总变化的 99.57% 和 99.79%.

图 1 给出了北美和东亚中纬地区 TEC 时间平均值 $\langle\boldsymbol{\delta}_{\rm TEC}(t,\phi,\lambda)\rangle_{\rm t}$ 以及前三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ ($i = 1,2,3$). 图 2 为年积日与地方时坐标平面上两个地区相应的前三阶时间系数 $\boldsymbol{A}_i(t)$ ($i = 1,2,3$), 每张图上叠加了太阳活动因子 P 曲线. $P = (F_{10.7} + F_{10.7}A)/2$ 能够很好地表示太阳活动性, 这里 $F_{10.7}$ 为 10.7 cm 太阳辐射通量, $F_{10.7}A$ 为 $F_{10.7}$ 的 81 天滑动平均值 [25−26]. Liu 等 [25] 研究表明, P 与太阳EUV, H Lyman α, He I 1083 以及 Mg II 线性相关, 并指出 P 比 $F_{10.7}$ 更适于表示太阳活动. 通过计算前三阶时间系数 $\boldsymbol{A}_i(t)$ ($i = 1,2,3$) 与 P 的线性相关系数, 结果表明北美和东亚中纬地区 TEC 第一阶 EOF 分量主要受太阳活动调制. 这是因为第一阶 EOF 主成分 $\boldsymbol{A}_1(t)$ 与 P 高度相关 (线性相关系数, 北美约为 0.93, 东亚约为 0.90); 第二阶 $\boldsymbol{A}_2(t)$ 与 P 弱相关 (线性相关系数, 北美与东亚同约为 0.76); 而第三阶 $\boldsymbol{A}_3(t)$ 与 P 几乎不相关 (线性相关系数, 北美约为 0.37, 东亚约为 −0.46).

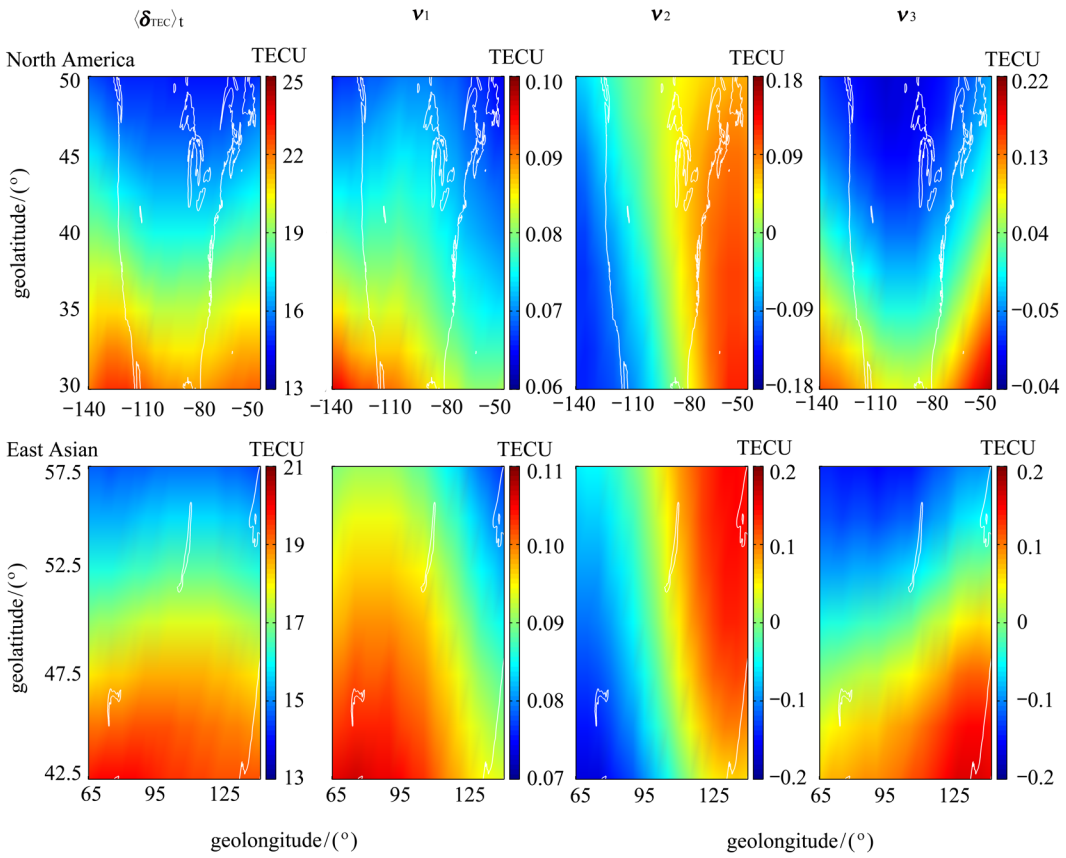


图 1　北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化时间平均 $\langle\boldsymbol{\delta}_{\mathrm{TEC}}(t,\phi,\lambda)\rangle_{\mathrm{t}}$ 和前三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ $(i=1,2,3)$

Fig. 1　Time average TEC map $\langle\boldsymbol{\delta}_{\mathrm{TEC}}(t,\phi,\lambda)\rangle_{\mathrm{t}}$ and the first three EOF modes $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ $(i=1,2,3)$ derived from TEC variations for North America and East Asia respectively

2　结果与讨论

电离层参量表现出不同尺度时空变化 [27−28], 引起电离层变化的各种可能机制包括太阳活动性, 地磁条件, 中性大气动力学和电动力学等过程 [2]. 下面对北美与东亚中纬地区前三阶 EOF 时空变化及物理机制进行讨论.

2.1　第一阶 EOF 分量与半年变化

第一阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_1(\phi,\lambda)$ 包含了最主要的变化, 分别约占北美与东亚中纬地区 TEC 总变化的 97.23% 和 98.71% (见图 3). 其相应时间变化 $\langle\boldsymbol{A}_1(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 表现为半年变化, 这里 $\langle\boldsymbol{A}_1(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 是 $\boldsymbol{A}_1(t)$ 的年平均值 ($\boldsymbol{A}_2,\boldsymbol{A}_3$ 进行相同处理), 两地区最大值均出现在 3 月和 10 月, 同时两地区时空变化还体现为最大值出现在 12:00 LT−1500 LT 的日变化.

北美与东亚中纬地区 TEC 第一阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_1(\phi,\lambda)$ 体现了不同纬向变化, 在 45°N−55°N 的中高纬度带, 东亚地区的幅度强于北美地区 (北美约为 0.07 TECU, 东亚约为 0.1 TECU). 这种变化是 TEC 半年变化 $\boldsymbol{A}_1(t)$ 强度空间分布的结果. 事实上, 半年变化与地理经度变化有关 [1], 在所谓的近极区 (靠近地磁极的地区), 例如北美/西欧等北大西洋地区, 远极区 (距离地磁极较远的地区), 例如亚洲与南大西洋地区, 由于受热层环流, 地磁场及太阳活动影响, 半年变化有较大不同. 在远极地区, 沉降流出现的地理纬度很高, 该地区的太阳天顶角接近 90°, 因此对应的 $[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$ 产生率非常小, 且对太阳天顶角非常敏感, 即使沉降流产生较大的 $[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$, 仍然不能产生较多的电子. 因此, 在远极地区, $N_{\mathrm{m}}F_2$ 在冬季很小 ($[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$ 产生率很小), 春分较大 (天顶角增加导致产生率增加), 夏季又很小 ($[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$ 减小), 这样就出现半年变化的形态. 在近极地区, $N_{\mathrm{m}}F_2$ 在冬季很大 ($[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$ 很大), 春分较小 ($[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$ 减小), 夏季更小 ($[\mathrm{O}/\mathrm{N}_2]$ 进一步减小), 呈现年变化 [1−2,29−31].

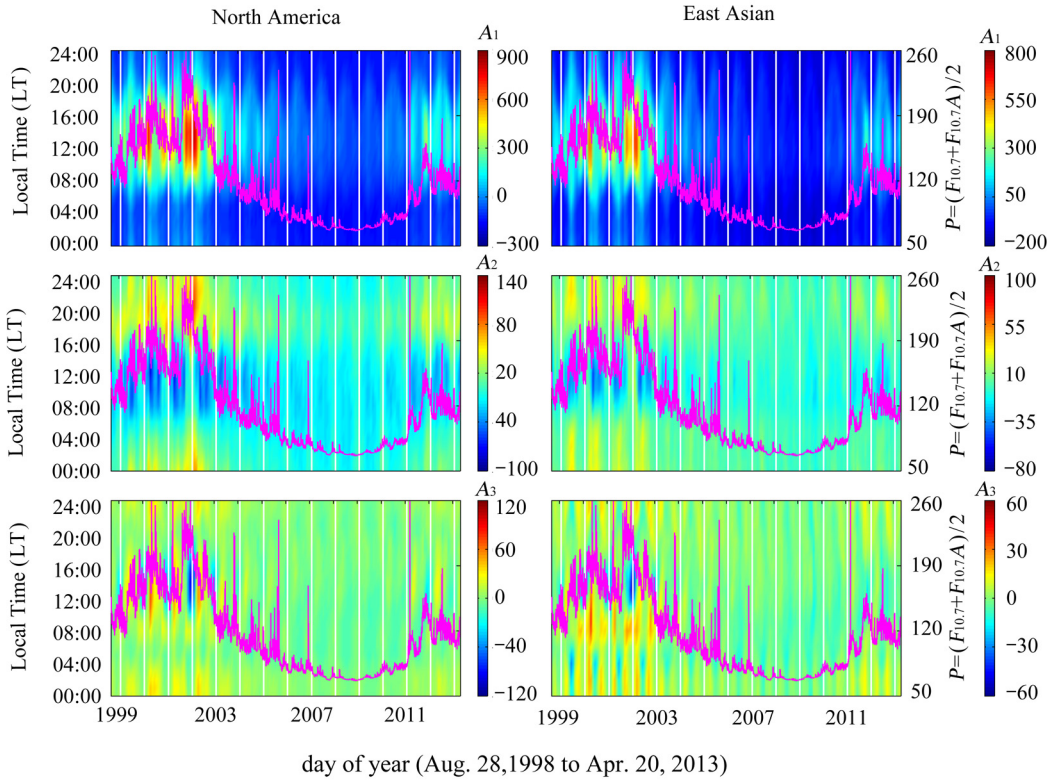


图 2 北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化三阶时间系数 $\boldsymbol{A}_i(t)$ $(i=1,2,3)$. 叠加的紫色曲线为 $P=(F_{10.7}+F_{10.7}A)/2$

Fig. 2 First three order principal components $\boldsymbol{A}_i(t)$ $(i=1,2,3)$ which are exhibited with Local Time and DOY plane for North American and East Asia, and the solar activity factor $P=(F_{10.7}+F_{10.7}A)/2$ (purple line) are superposed on both panels

此外, 上述两地区第一阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_1(\phi,\lambda)$ 空间变化体现出纬度变化, 特别是在赤道电离层异常区较强. 在太阳活动低年, 地磁宁静情况下, Yu 等 [32] 利用电离层理论模式考查了中低纬和赤道地区电离层 $N_{\rm m}F_2$ 受电场半年变化的影响, 模式结果证明了低纬电场半年变化在午后至凌晨时段对赤道异常驼峰区 $N_{\rm m}F_2$ 的半年变化有一定的加强. Ma 等 [33] 发现中低纬地区半年变化与电离层喷泉效应有关, 即电离层 E 层存在一种受类似于热层周日潮汐驱动的具有半年变化的赤道急流, 通过这种喷泉效应进而引起赤道电离层异常的半年变化. 可以看到, 受这种喷泉效应影响, 北美和东亚中低纬度地区存在很强的半年变化幅度.

2.2 第二阶 EOF 分量与电子浓度东西不对称变化

第二阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 包含次主要变化, 分别约占北美与东亚中纬地区 TEC 总变化的 1.71% 和 0.74% (见图 4). 该阶本征模反映了 TEC 的东西不对称现象, 其相应时间变化 $\langle \boldsymbol{A}_2(t)\rangle_{\rm t}$ 反映了东西不对称性随地方时的周日变化和季节的依赖性. 北美地区 3 月至 8 月期间, 电离层变化 $\boldsymbol{\nu}_2\cdot\boldsymbol{A}_2$ 表现为白天 08:00 LT−16:00 LT 西部 TEC 大于东部平均约 6~8 TECU. 白天东西不对称最大出现在 4 月, 次极大值在 8 月附近; 夜间 18:00 LT−03:00 LT 电离层变化表现为东部 TEC 大于西部平均约 6 TECU. 夜间东西不对称几乎全年存在, 但最大出现在冬季 11−2 月. 东亚地区 4−9 月期间, 电离层变化表现为白天 08:00 LT−16:00 LT 西部 TEC 大于东部平均约 5~6 TECU. 白天东西不对称最大值出现在 5 月, 次极大值在 9 月附近; 夜间 18:00 LT−03:00 LT 电离层变化表现为东部 TEC 大于西部平均约 4 TECU. 夜间东西不对称最大出现在 6−7 月.

在北美东部和东亚东部地区, 夏季也观测到存在与威德尔海异常相似的日变化特征 [34], 本文结果表明上述两地区 $\langle \boldsymbol{A}_2(t)\rangle_{\rm t}$ 均体现出最大值分别出现在

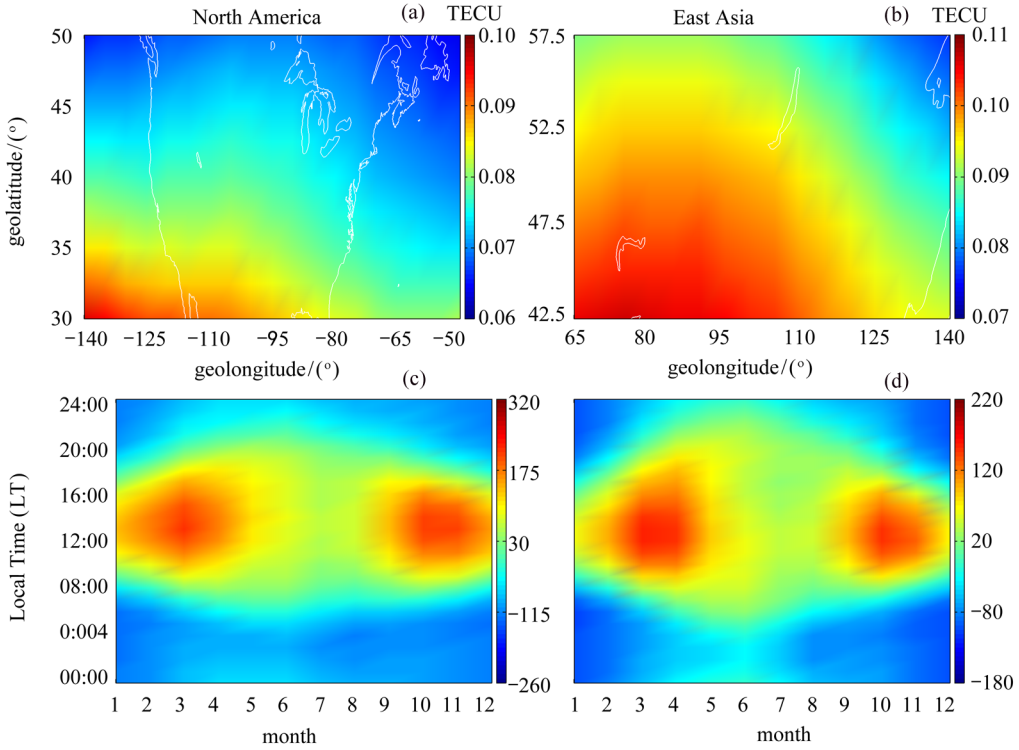


图 3　北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化第一阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_1(\phi,\lambda)$ (a) (b) 与时间系数 $\boldsymbol{A}_1(t)$ 的年平均值 $\langle \boldsymbol{A}_1(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ (c)(d)

Fig. 3　Panel (a) and (b) show the first EOF mode $\boldsymbol{\nu}_1(\phi,\lambda)$ on LON vs LAT plane for North American and East Asia respectively. Panel (c) and (d) exhibit yearly average of principal component $\langle \boldsymbol{A}_1(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ with Local Time and month

4−9 月和 5−9 月的 TEC 夜间增强现象, 这说明北美和东亚地区夏季夜间的东西不对称现象与威德尔海异常或中纬夏季夜间增强密切相关 [5,35−36], 此外北美地区 $\langle \boldsymbol{A}_2(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 在冬季仍表现出明显的 TEC 夜间增强现象.

需要指出的是, $\langle \boldsymbol{A}_2(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 仅表示 TEC 变化第二阶 EOF 分量的时间分布, 并不能直接用来表示两地区的 TEC 变化. 事实上, 对于上述两地区 TEC 变化应结合 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 和 $\boldsymbol{A}_2(t)$ 对 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)\cdot\boldsymbol{A}_2(t)$ 进行讨论, 例如在北半球冬季夜间时, 北美地区 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)\cdot\boldsymbol{A}_2(t)$ 表现出关于零磁偏线东侧为正, 西侧为负的明显的 TEC 东西不对称现象. 这说明两地区 TEC 东西不对称现象与威德尔海异常或中纬夏季夜间增强具有类似的时间变化特征.

根据以上论述, 同时考虑到热层风场和地磁场对 TEC 不对称现象和威德尔海异常的作用机制, 北美地区在冬季仍表现出明显的 TEC 夜间增强现象可以用威德尔海异常现象的磁共轭机制解释. 由于北美地区接近南太平洋出发的磁力线在北半球的磁共轭点, 受 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移作用, 离子沿磁力线运动形成双极扩散, 因此在南半球夏季时, 受这种双极扩散作用影响, 南半球 TEC 夏季夜间增高威德尔海异常将沿磁力线扩散至北半球磁共轭点, 因此北半球冬季时北美地区 TEC 夜间增高现象依然十分明显 [37].

北美与东亚中纬地区 TEC 变化第二阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 均表现出沿零磁偏线的东西不对称现象, 空间变化 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 在零磁偏线西侧为负, 东侧为正 (见图 4). 但是东亚中低纬地区 (地理纬度约 42.5°N) 附近零磁偏线穿过 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 负值区域, 同时 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 与热层纬向风引起的等离子体向上漂移 v_{dz} 符合得并不好, 这是因为东亚地区赤道电离层异常区域延伸到更高的纬度区域, 使得该区域受到电离层喷泉效应的显著影响, 导致东亚中低纬地区 TEC 东西不对称现象不能通过 EOF 方法完全提取出来.

中纬地区电离层F层夜间热层风典型值为

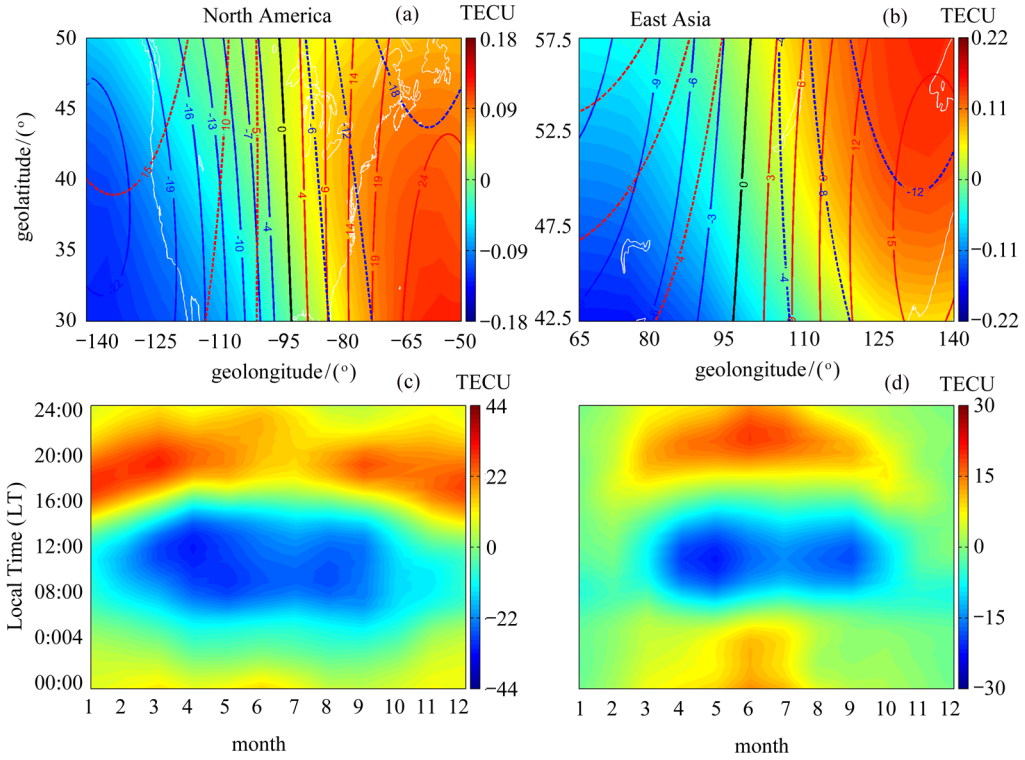


图 4 北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化第二阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$. (a) (b) 叠加了地磁磁偏等值线以及热层纬向风引起的等离子体向上漂移速度 $v_{\mathrm{dz}}=-\frac{1}{2}w_{\mathrm{z}}\sin 2I\sin D$ 等值线 (红色代表正值, 蓝色代表负值); 黑线既是 $v_{\mathrm{dz}}=0$ 线也是地磁零磁偏线; 纬向风速取常值 $w_{\mathrm{z}}=200\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. (c) (d) 为第二阶 EOF 时间系数 $\boldsymbol{A}_2(t)$ 的年平均值 $\langle\boldsymbol{A}_2(t)\rangle_{\mathrm{t}}$

Fig. 4 Panel (a) and (b) show the second EOF mode $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ with longitude and latitude for North America (a) and East Asia (b) respectively, and both are superposed with the contour of vertical plasma drift velocity $v_{\mathrm{dz}}=-\frac{1}{2}w_{\mathrm{z}}\sin 2I\sin D$ induced by zonal thermospheric wind (red curves denote positive value and blue curves denote negative value). Zonal wind w_{z} is set to be a constant of $200\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. The black curve is the $v_{\mathrm{dz}}=0$ line, and also is the zero value geomagnetic declination line. Panel (c) and (d) exhibit yearly average of principal component $\boldsymbol{A}_2(t)$ with the Local Time and month

表 1 北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化第二, 三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_i$ $(\phi,\boldsymbol{\lambda})$ $(i=2,3)$ 与地磁磁偏 DEC, 地磁磁倾 DIP, 热层纬向风/子午向风速引起的等离子体向上漂移的 2 维相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the 2nd, 3rd eigen mode and declination, inclination, zonal and meridian wind induced vertical drift velocity separately. "/" means that the value is not mentioned in the paper

		DEC	DIP	v_{dz}	v_{dm}
North America	$\boldsymbol{\nu}_2$	0.9635	/	0.9440	/
	$\boldsymbol{\nu}_3$	/	0.6105	/	0.6898
East Asia	$\boldsymbol{\nu}_2$	0.9368	/	0.9595	/
	$\boldsymbol{\nu}_3$	/	0.7714	/	0.8011

注 "/" 表示本文未涉及对应两参量之间的相关系数, 故未计算对应值.

$200\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, 考虑到较短时间内风速变化不大, 讨论热层水平风引起的等离子体向上漂移时一般可以取热层风速为该典型值 [12]. 本文采用风速为 $200\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 的东向热层纬向风, 计算等离子体向上漂移速度 $v_{\mathrm{dz}} = -1/2 w_{\mathrm{z}} \sin 2I \sin D$, 这里 $w_{\mathrm{z}} = 200\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 为水平热层风纬向风速, I 为地磁倾角, D 为地磁偏角. 从结果可以看到, 空间变化 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 与热层纬向风引起的等离子体向上漂移速度 v_{dz} 基本一致. 下面处理子午风引起的等离子体向上漂移时亦采用该典型值计算热层子午向风引起的等离子体向上漂移.

为了定量分析第二阶和第三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ $(i=2,3)$ 与热层纬向/子午向水平风引起的等离子体向上漂移的相似性, 这里引入数字图像处理技术中广泛应用的 2 维线性相关系数估计两者之间的相关性 [38−39]. 定义大小均为 $M\times N$ 的 2 维矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的相关系数为

$$\rho = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(\boldsymbol{A}_{mn}-\bar{\boldsymbol{A}})(\boldsymbol{B}_{mn}-\bar{\boldsymbol{B}})\cdot \Big[\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(\boldsymbol{A}_{mn}-\bar{\boldsymbol{A}})^2\Big]^{-\frac{1}{2}}\cdot \Big[\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(\boldsymbol{B}_{mn}-\bar{\boldsymbol{B}})^2\Big]^{-\frac{1}{2}}. \tag{2}$$

式中, $\bar{\boldsymbol{A}}$ 和 $\bar{\boldsymbol{B}}$ 分别为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的均值, 定义为

$$\bar{\boldsymbol{A}} = \frac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\boldsymbol{A}_{mn}, \tag{3}$$

$$\bar{\boldsymbol{B}} = \frac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\boldsymbol{B}_{mn}. \tag{4}$$

北美与东亚中纬地区 TEC 变化第二阶和第三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_i(\phi,\lambda)$ $(i=2,3)$ 与热层纬向/子午向水平风引起的等离子体向上漂移的 2 维相关系数计算结果见表 1.

可以看到, 两地区 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 与 v_{dz} 均具有较高的相关性, 表明 $\boldsymbol{\nu}_2(\phi,\lambda)$ 主要受热层纬向风引起的等离子体向上漂移作用的影响.

2.3 第三阶 EOF 分量

第三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_3(\phi,\lambda)$ 包含的变化分别占北美与东亚中纬地区 TEC 总变化的 0.58% 和 0.4%, 空间变化呈现明显的纬度不对称性并且东亚地区延伸到较高纬度 (见图 5). 由于 EOF 处理方法仅是一个数学过程, 无法将原始数据的时空变化彻底分解为一系列正交基函数, 同时在经验正交函数 EOF 分解过程中高阶 EOF 分量仍保留大部分冗余信息, 因此 $\langle \boldsymbol{A}_3(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 体现的时空变化及物理机制不能得到很好的解释, 例如日间 $\langle \boldsymbol{A}_3(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 体现的 3−4 月正值和 11−1 月负值.

可以看到, 东亚地区第三阶时间变化 $\langle \boldsymbol{A}_3(t)\rangle_{\mathrm{t}}$ 表现出夜间 20:00 LT−04:00 LT 在 2−5 月和 8−10 月期间存在最大值的半年变化, 与 Zhao 等 [10] 揭示的夜间电离层东西 $N_{\mathrm{m}}F_2$ 差异的季节分布极为相似, 即东亚地区电离层夜间电子浓度在 2−5 月和 8−10 月东部高于西部. 结合东亚的 $\boldsymbol{\nu}_3(\phi,\lambda)$ 空间分布, 本文认为该结构的产生与受磁倾角调制的夜间经向风相关. 通过夜间热层子午风引起的等离子体向上漂移速度 $v_{\mathrm{dm}} = -\dfrac{1}{2} w_{\mathrm{m}} \sin 2I \cos D$ 与 $\boldsymbol{\nu}_3(\phi,\lambda)$ 的相关分析 (两者之间的 2 维相关系数见表 1), 可以反映出东亚 $\boldsymbol{\nu}_3(\phi,\lambda)$ 夜间季节变化受热层子午向水平风与地磁控制季节变化的影响. 美洲地区同样也存在适度的相关系数, 说明子午风和地磁倾角在控制电离层时空变化中同样十分重要.

3 结论

利用经验正交函数 (EOF) 方法分析了北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化, 并对各阶 EOF 分量所反映的变化及物理机制进行比较分析, 两地区各阶 TEC 变化比较一致, 第一阶 EOF 分量主要反映了半年变化, 并且与太阳活动高度相关; 第二阶 EOF 分量空间变化反映了相对于零磁偏线的 TEC 东西不对称现象, 与热层纬向风引起的等离子体向上漂移一致, 主要受地磁磁偏和热层纬向风控制; 第三阶 EOF 分量空间变化部分反映了一种纬度变化, 主要受地磁磁倾和热层子午向风控制.

两地区 TEC 变化存在明显的差异, 首先东亚地区半年变化占总 TEC 变化的比例 (97.28%) 高于北美地区 (98.71%), 其次受地磁磁场和热层中性风影响的 TEC 东西差异现象所表现的年变化占 TEC 总变化的比例北美地区 (1.70%) 远高出东亚地区 (0.74%).

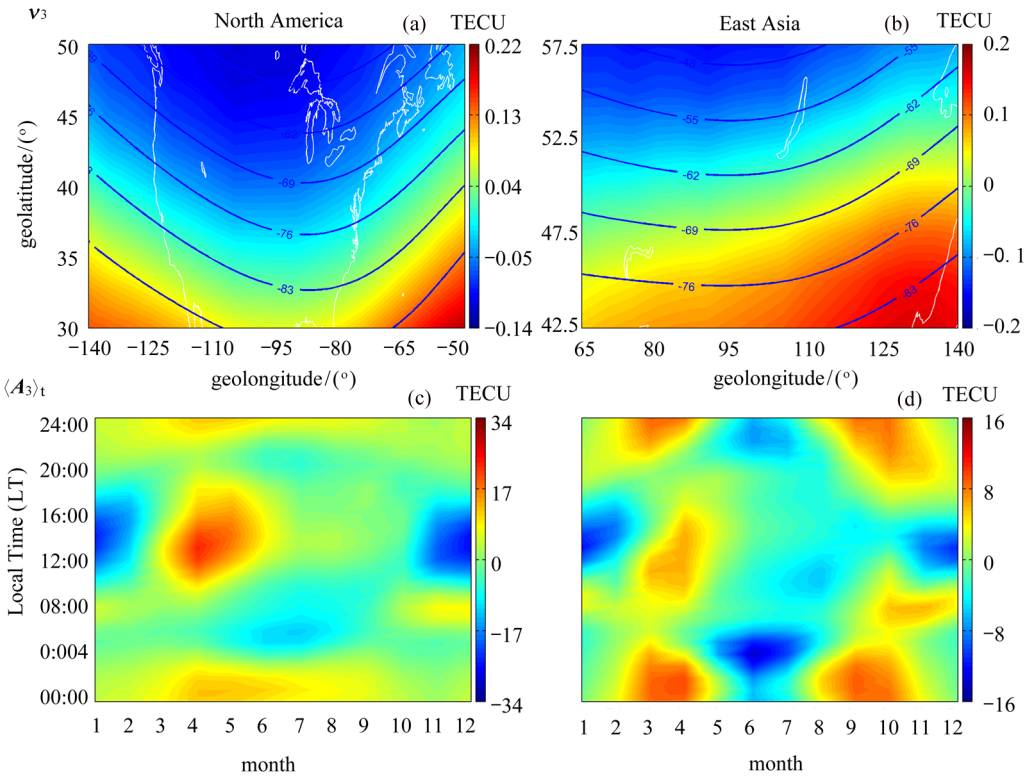


图 5 北美和东亚中纬地区电离层 TEC 变化第三阶 EOF 本征模 $\boldsymbol{\nu}_3(\phi,\lambda)$. 蓝色曲线为叠加的热层子午向风引起的等离子体向上漂移速度 $v_{\rm dm}=-\frac{1}{2}w_{\rm m}\sin 2I\cos D$ 等高线; 子午向风 $w_{\rm m}$ 取常值, 即 $w_{\rm m}=200\,{\rm m\cdot s^{-1}}$; 第三阶 EOF 时间系数 $\boldsymbol{A}_3(t)$ 为年平均值 $\langle\boldsymbol{A}_3(t)\rangle_{\rm t}$

Fig. 5 Panel (a) and (b) show the third EOF mode $\boldsymbol{\nu}_3(\phi,\lambda)$ for North America (a) and East Asia (b) respectively, both are superposed with the contour of plasma drift velocity $v_{\rm dm}=-\frac{1}{2}w_{\rm m}\sin 2I\cos D$ (blue curves) caused by meridional thermospheric winds. Here let meridional wind $w_{\rm m}$ be $200\,{\rm m\cdot s^{-1}}$. Panel (c) and (d) exhibit yearly average of principal component $\langle\boldsymbol{A}_3(t)\rangle_{\rm t}$ with plane Local Time and month

第三阶中的部分时空变化说明, 子午风和地磁倾角对电离层时空变化具有相当重要的作用, 由于EOF分析方法具有一定的局限性, 因此利用物理模式讨论各种机制的影响将使研究更加深入, 例如离子成分、热层子午向/经向风的气候学变化以及地磁场对地区电离层空间变化的影响.

参考文献

[1] Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1998, **60**(14):1385-1402

[2] Rishbeth H, Müller-Wodarg I C F, Zou L, *et al.* Annual and semiannual variations in the ionospheric F_2-layer: II. Physical discussion [J]. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**(8):945-956

[3] Immel T J, Sagawa E, England S L, *et al.* Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**(15):198-210

[4] Hagan M E, Maute A, Roble R G, *et al.* Connections between deep tropical clouds and the Earth's ionosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(20):120-122

[5] Horvath I, Essex E A. Vertical E drift velocity variations and associated low-latitude ionospheric irregularities investigated with the TOPEX and GPS satellite data [J]. *Ann. Geophys.*, 2003, **21**:1017-1030

[6] Thampi S V, Lin C, Liu H, *et al.* First tomographic observations of the midlatitude summer nighttime anomaly over Japan [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A10):270-313

[7] Lin C H, Liu J Y, Cheng C Z, *et al.* Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea anomaly [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A2)

[8] Burns A G, Zeng Z, Wang W, *et al.* Behavior of the F_2 peak ionosphere over the South Pacific at dusk during quiet summer conditions from COSMIC data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(A12):2036-2044

[9] Zhang S R, Foster J C, Coster A J, *et al*. East-West Coast differences in total electron content over the continental US [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, **38**(19):103-140

[10] Zhao B, Wang M, Wang Y, *et al*. East-west differences in F-region electron density at midlatitude: Evidence from the Far East region [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**(1):542-553

[11] Xu J S, Li X J, Liu Y W, *et al*. TEC differences for the mid-latitude ionosphere in both sides of the longitudes with zero declination [J]. *Adv. Space Res.*, 2014, **54**(5):883-895

[12] Zhang S R, Chen Z, CosterA J, *et al*. Ionospheric symmetry caused by geomagnetic declination over North America [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, **40**(20):5350-5354

[13] Storch H, Zwiers F W. Statistical Analysis in Climate Research [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

[14] Daniell R E, Brown L D, Anderson D N, *et al*. Parameterized ionospheric model: A global ionospheric parameterization based on first principle models [J]. *Radio Sci.*, 1995, **30**(5):1499-1510

[15] Howe B M, Runciman K, Secan J A. Tomography of the ionosphere: Four-dimensional simulations [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(1):109-128

[16] Mao T, Wan W X, Liu L B. An EOF based empirical model of TEC over Wuhan [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2005, **48**(4):827-834

[17] Mao T, Wan W, Yue X, *et al*. An empirical orthogonal function model of total electron content over China [J]. *Radio Sci.*, 2008, **43**(2):2217-2235

[18] Liu C, Zhang M L, Wan W, *et al*. Modeling M(3000)F2 based on empirical orthogonal function analysis method [J]. *Radio Sci.*, 2008, **43**(1):411-411.

[19] Wan W X, Ding F, Ren Z P, *et al*. Modeling the global ionospheric total electron content with empirical orthogonal function analysis [J]. *Sci. China: Tech. Sci.*, 2012, **55**(5):1161-1168

[20] Hernández-Pajares M. Performance of IGS ionosphere TEC maps [R]. Barcelona: Research Group of Astronomy and Geomatics, Technical University of Catalonia, 2003:16

[21] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, *et al*. A global mapping technique for GPS: Derived ionospheric total electron content measurements [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(3):565-582

[22] Iijima B A, Harris I L, Ho C M, *et al*. Automated daily process for global ionospheric total electron content maps and satellite ocean altimeter ionospheric calibration based on Global Positioning System data [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1999, **61**(16):1205-1218

[23] Navarra A, Simoncini V. A Guide to Empirical Orthogonal Functions for Climate Data Analysis[M]. Springer Netherlands, 2010

[24] Tabachnick B G, Fidell L S. Using Multivariate Statistics [M]. Boston Massachusetts Allyn and Bacon, 2001

[25] Liu L, Wan W, Ning B, *et al*. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A8):437-440

[26] Richards P G, Fennelly J A, Torr D G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A5):8981-8992

[27] Forbes J M, Palo S E, Zhang X. Variability of the ionosphere [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2000, **62**(8):685-693

[28] Rishbeth H, Mendillo M. Patterns of F_2-layer variability [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2001, **63**(15):1661-1680

[29] Millward G H, Rishbeth H, Fuller-Rowell T J, *et al*. Ionospheric F_2 layer seasonal and semiannual variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A3):5149-5156

[30] Zhao B, Wan W, Liu L, *et al*. Features of annual and semiannual variations derived from the global ionospheric maps of total electron content [J]. *Ann. Geophys.*, 2008, **25**(12):2513-2527

[31] Zou L, Rishbeth H, Müller-Wodarg I C F, *et al*. Annual and semiannual variations in the ionospheric F_2-layer. I. Modelling [J]. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**(8):927-944

[32] Yu T, Wan W, Liu L, *et al*. A simulation study on the semiannual variation of the ionospheric F_2 layer zonal electric fields at the magnetic equator [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, doi:10.1029/2005JA011390

[33] Ma R, Xu J, Liao H. The features and a possible mechanism of semiannual variation in the peak electron density of the low latitude F_2 layer [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2003, **65**(1):47-57

[34] Lin C H, Liu C H, Liu J Y, *et al*. Midlatitude summer nighttime anomaly of the ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, doi:10.1029/2009JA014084

[35] Penndorf R. The average ionospheric conditions over the Antarctic [M]//Geomagnetism and Astronomy: Studies in the Ionosphere, Geomagnetism and Atmospheric Radio Noise, Antarct. Res. Ser., Washington DC: AGU, 1965:1-45

[36] He M, Liu L, Wan W, *et al*. A study of the Weddell Sea Anomaly observed by FORMOSAT-3/COSMIC [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A12)

[37] Burns A G, Solomon S C, Wang W, *et al*. The summer evening anomaly and conjugate effects [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(A1)

[38] Burger W, Burge M J. Digital image processing: An algorithmic introduction using Java [M]. Springer Science & Business Media, 2009

[39] Hoggar S G. Mathematics of Digital Images: Creation, Compression, Restoration, Recognition [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006