

HUANG Linfeng, WANG Jinsong, SONG Shanhai, YANG Shijin, LIAO Yao. EIA Latitude Offset Phenomenon in Winter and Its Impact Mechanism around 120°E Longitude during 1998–2020 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(6): 1451–1459. CSTR:32142.14.cjss.2024-0136. DOI:10.11728/cjss.2025.06.2024-0136

1998—2020 年 120°E 上空电离层赤道异常 冬季纬度偏移现象及其影响机制*

黄林峰^{1,3} 王劲松² 宋善海^{1,3}
杨士进^{1,3} 廖瑶^{1,3}

1(贵州省生态与农业气象中心 贵阳 550002)

2(国家卫星气象中心 北京 100081)

3(高分辨率对地观测系统贵州数据与应用中心 贵阳 550002)

摘要 基于俄罗斯科学院 IZMIRAN 研究所提供的 1998—2020 年的电离层 TEC, f_0F_2 , h_mF_2 等数据, 统计分析在地磁活动平静期间 120°E 上空电离层赤道异常 (EIA) 半球不对称性与冬季纬度位置偏移现象, 并探讨其可能影响机制。研究表明, 冬至期间 EIA 双峰结构不对称性与太阳活动变化的相关性相对显著, 在太阳活动低时主要为南驼峰更为明显, 在太阳活动高时以北驼峰显著为主; EIA 双峰结构纬度位置在冬季期间呈现出向南半球偏移的现象, 特别是在太阳活动很低时, 且南驼峰纬度位置偏移量更明显。在 120°E 冬至期间, 跨赤道中性风是影响 EIA 双峰强度半球不对称性的主要因素, 排除地磁活动和磁偏角等的影响, 冬季 EIA 双峰结构纬度偏移可能与太阳直射点等离子体浓度背景场的地理控制作用有关。

关键词 赤道异常, 半球不对称性, 纬度偏移

中图分类号 P352

EIA Latitude Offset Phenomenon in Winter and Its Impact Mechanism around 120°E Longitude during 1998—2020

HUANG Linfeng^{1,3} WANG Jinsong² SONG Shanhai^{1,3}
YANG Shijin^{1,3} LIAO Yao^{1,3}

1(Guizhou Ecological and Agricultural Meteorology Center, Guiyang 550002)

2(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

3(Guizhou Data and Application Center of High-Resolution Earth Observation System, Guiyang 550002)

* 国家自然科学基金项目资助 (42274217)

2024-10-24 收到原稿, 2024-12-30 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Based on the Total Electron Content (TEC), F_2 layer critical frequency (f_0F_2), and peak height (h_mF_2) data provided by the institute of IZMIRAN of the Russian Academy of Sciences from 1998 to 2020, this study analyzes the morphological features of the hemispheric asymmetry and latitude offset phenomenon of the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) over 120°E during geomagnetically quiet periods, especially during low solar activity, and explores the possible influencing mechanisms. The results showed that the hemispherical asymmetry features of EIA structure that vary with solar activity are significantly different during the summer and winter solstice. The asymmetry exhibits a significant correlation with the solar activity during winter solstice. However, there is a weak negative correlation during the summer solstice. The latitude position of EIA structure moves southward in winter months and the latitude deviation of southern anomaly crest is more significant, especially during the low solar activity. During the winter solstice over 120°E , trans-equatorial neutral winds are the main factor affecting the hemispheric asymmetry of EIA peak intensities. Excluding the influences of geomagnetic activity and magnetic declination, the primary factor for the latitude shifts of the EIA double-peak structure in winter may be related to the geographic control effect of the plasma density background field around the subsolar point. At where, photo-ionization can produce more electrons, and the effect may plays an important role in Southward offset phenomenon of EIA structure in winter around 120°E longitude. Meanwhile, the impact of the geographic control influence still requires further research and validation through theoretical models and simulation studies. These findings provide new insights into the complex behaviors of the EIA under varying solar conditions, highlighting the significant role of subsolar point positioning in modulating ionospheric EIA structures.

Key words Equatorial ionization anomaly, Hemispheric asymmetry, Latitude offset

0 引言

通常电离层状态在一定时间与空间尺度范围内沿着经度与纬度方向在不断变化^[1,2],从而形成了多种多样的电离层形态特征.在磁赤道附近上空赤道电离层异常(EIA)是电离层最显著的特征现象之一,即白天时电离层 F_2 层的峰值电子密度(N_mF_2)在磁赤道两侧呈现出很明显的双峰结构特征^[3].由于 F_2 层是电离层各层中电子密度含量最大的一层,因而赤道与低纬地区电离层的电子浓度总含量(TEC)通常呈现出与 F_2 层相似的EIA双峰结构特征,同时TEC也是被广泛用来研究与分析电离层状态的参量.

自EIA被发现以来,对其研究不断深入^[4-8],包括EIA的日、季节、年等不同时间尺度的变化特征以及相关理论与模拟研究.在中国及东南亚地区,1971年Golton和Walker利用地球同步卫星信号反演的电离层TEC数据分析了EIA的结构特征.之后有关该地区电离层EIA特征的研究不断深入^[9-13].研究结果表明,赤道异常区电离层TEC/ N_mF_2 纬向分布通常均呈现出EIA双峰结构以及半球不对称性等

特征,有时也可能表现为只有一个单峰的现象^[14,15].在地磁活动期间,电离层电场和中性风的显著变化也可能导致EIA形态和强度发生复杂变化^[16].

电离层EIA一直是电离层研究中的一个热点,对于中国及东南亚区域磁赤道附近电离层EIA长时间序列变化中呈现出的局域性特征,特别是在太阳活动低(很低)的时候表现出差异特征,仍有待更深入的分析和研究.本文基于1998—2020年俄罗斯科学院IZMIRAN研究所提供的电离层TEC, f_0F_2 和 h_mF_2 数据,对 120°E 上空电离层赤道异常区EIA在地磁活动平静期间表现出的南北不对称性与双峰结构纬度位置偏移现象进行了统计分析,以及可能对其产生影响的相关过程与物理机制进行了探讨分析.研究结果有助于进一步了解电离层EIA表现出的区域特征以及对其产生影响的相关物理过程.

1 数据与方法

采用的1998—2020年电离层TEC, f_0F_2 , h_mF_2 数据来源于俄罗斯科学院IZMIRAN研究所*.其中

* <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/grif/Maps/>

TEC 数据源于美国喷气推进实验室 (JPL)^[17]. 由于全球电离层测高仪实际站点相对有限, 为了填补电离层雷达探测的不足, 借助 GPS-TEC 同化技术, 通过扩展至等离子体层的国际参考电离层模型 (IRI-Plas) 重建磁共轭半球的 F_2 层临界频率, 即可估算全球 f_0F_2 和 h_mF_2 数据. Gulyaeva 等^[18] 利用东亚地区 8 个电离层测高仪站的 f_0F_2 观测与 GPS-TEC 同化模式下 IRI-Plas 估算结果进行了验证, 并获得一致的结果. 图 1 给出了 120°E 研究区域周边 IGS (International GNSS Service) 站点与电离层测高仪站点分布图, 并给出了赤道与地磁赤道的位置. 其中 IGS 站点表明 JPL TEC 数据的实际观测站数量, 电离层测高仪实际站点与共轭点说明了 IRI-Plas 模型生成的 f_0F_2 和 h_mF_2 数据融合的站点数量. IZMIRAN 电离层网格化地图数据时间分辨率为 1 h, 经纬度分辨率为 $5^\circ \times 2.5^\circ$. 同时, 文中将 F_2 层 f_0F_2 数据转换为峰值电子浓度 N_mF_2 , 即

$$N_m = 1.24 \times 10^{10} f_0^2. \quad (1)$$

其中, N_m 表示 N_mF_2 (单位 m^{-3}), f_0 表示 f_0F_2 (单位 MHz).

在 120°E, 地磁赤道位置大约在地理纬度 10°N (基于国际地磁参考场 IGRF 模型). 没有特别说明时, 本文纬度均指地磁纬度. 为研究电离层 EIA 双峰结构的纬度偏移变化特征, 先剔除地磁指数 $Kp > 3^+$ 的

磁扰期间的数据 (排除地磁扰动的影响), 然后判断并提取 EIA 双峰结构参数. 即在地磁纬度 25°N—25°S (地理纬度 35°N—15°S) 内, 如果在 120°E 上空的 TEC 或 N_mF_2 值在纬向的分布在南北半球分别存在一个极大值, 在磁赤道附近存在一个极小值, 则认为 EIA 双峰结构存在, 反之不存在. EIA 双峰峰值出现 (即发展到最盛) 的大致时间主要在 14:00—16:00 LT^[11], 本文分析中统一选取 15:00 LT 的 EIA 双峰结构进行参数提取与分析. 同时, 根据北半球季节变化特征, 5—8 月代表夏季, 3—4 月代表春季, 9—10 月代表秋季, 11—2 月代表冬季.

Liu 等^[19] 通过东亚/澳大利亚地区电离层测高仪站与日均值太阳极紫外辐射 (EUV) 数据研究电离层峰值电子密度 (N_mF_2) 对太阳活动的依赖性表明, 线性指标 P 指数比太阳活动指数 $F_{10.7}$ 更适合用来反映太阳 EUV. 线性指标 P 指数定义为

$$P = (F_{10.7} + F_{10.7A})/2. \quad (2)$$

其中, $F_{10.7A}$ 表示为以当天为中心, 选取前后各 40 天共计 81 天 $F_{10.7}$ 的均值. 因此, 本文用 P 指数来代表太阳活动的强弱, 参考 $F_{10.7}$ 划分标准, 当 $P < 100$ 时, 表示太阳活动低 (当 $P < 80$ 时, 则代表太阳活动很低); 当 $100 \leq P < 150$ 时, 表示太阳活动中等; 当 $P \geq 150$ 时, 表示太阳活动高. 图 2 给出了 1998—2020 年太阳活动 $F_{10.7}$ 和 P 指数逐日变化

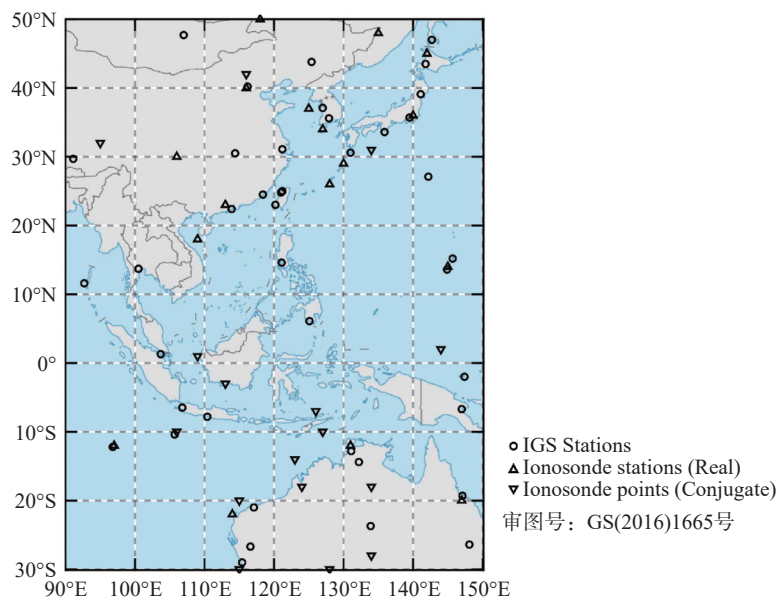
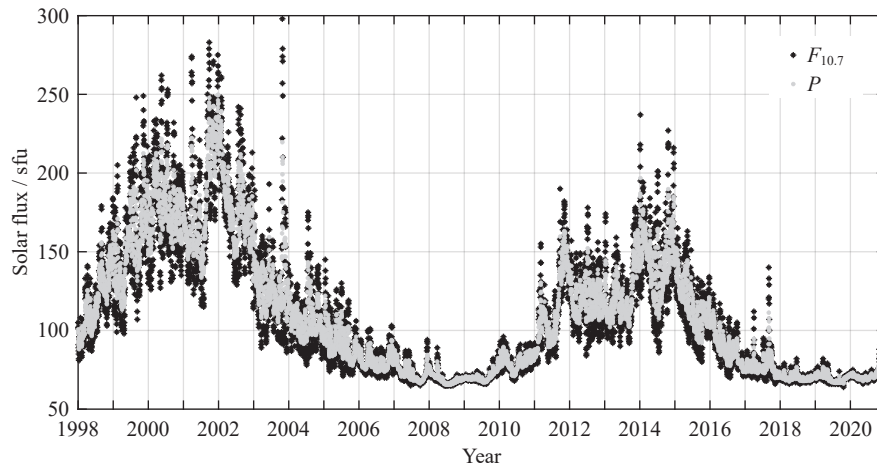


图 1 研究区域周边 IGS 站点与电离层探测仪站点分布

Fig. 1 Distribution of International GNSS Service (IGS) and ionosonde network around the research area

图2 1998—2020年太阳活动 $F_{10.7}$ 和 P 指数Fig. 2 Values of $F_{10.7}$ and P during the period from 1998 to 2020

对比.

为了分析电离层 EIA 双峰结构的半球不对称性, 这里用不对称性指数 (δ_{AI}) 表示 EIA 双峰强度的相对差异特征^[14], 即

$$\delta_{AI} = \text{sgn}(I_{nc} - I_{sc}) \{ 1 - [\min(I_{nc}, I_{sc}) - I_{et}] / [\max(I_{nc}, I_{sc}) - I_{et}] \}. \quad (3)$$

其中, sgn 表示符号函数, 以北驼峰值大时为正; I 为 TEC 或 $N_m F_2$ 强度值, 下角 nc, et, sc 分别表示北驼峰、赤道槽与南驼峰.

2 结果

2.1 夏冬至期间赤道异常双峰强度不对称性

由于电离层 EIA 双峰结构参数随地方时与太阳活动等变化, 且双峰强度不对称性主要表现在冬季与夏季期间. 为了更好地分析 EIA 双峰强度不对称性变化特征, 图 3 分别给出了 1998—2020 年夏冬至期间 EIA 双峰强度 (TEC 和 $N_m F_2$) 不对称性指数随太阳活动指数变化的散点分布与线性拟合图. 图中, 夏冬至时段分别选取夏至/冬至前后各 15 天 (共计 31 天). 在夏至期间, 电离层 EIA 双峰强度 (TEC 与 $N_m F_2$) 不对称性指数随太阳活动指数的变化均呈现弱相关 (相关系数分别为 -0.36 和 -0.47), 在太阳活动低时 TEC 与 $N_m F_2$ 双峰不对称性以北驼峰强为主, 随着太阳活动指数的升高不对称性指数呈明显减小趋势, 且在太阳活动高时变为以南驼峰强为主; 而在冬至期间, TEC 与 $N_m F_2$ 双峰强度不对称性指数随太

阳活动指数的变化均呈现为显著相关 (相关系数分别为 0.75 和 0.83), 不对称性指数随太阳活动指数的变化趋势与夏至期间明显相反, 且电离层 $N_m F_2$ 与太阳活动的相关性比 TEC 的相关性要好.

2.2 太阳活动低时赤道异常随地方时变化

综上所述可以看出在太阳活动低时, EIA 双峰结构不对称性特征 (相对太阳活动高时) 表现出明显的差异. 为了进一步分析在太阳活动低时 120°E 上空 EIA 双峰结构的纬向分布特征, 图 4 给出了 1998—2020 年太阳活动低时 ($P < 100$) 电离层 $N_m F_2$ 月均值随纬度和时间分布. 在太阳活动低时, 约 10:00 LT 双峰结构逐渐形成, 14:00—16:00 LT 发展到最盛, 一直维持到 18:00 LT 左右; 双峰峰值纬度主要出现在磁赤道南北两侧 10°—15°, 春季和秋季期间双峰结构相对明显, 夏季期间北驼峰结构相对明显, 冬季南驼峰结构相对明显; 相对于其他季节, 冬季期间 (11—2 月) 双峰结构纬度位置表现出明显的向南半球偏移, 本文称之为冬季纬度偏移现象.

2.3 夏冬季期间赤道异常双峰纬度偏移

夏冬季期间电离层 EIA 双峰强度存在明显的不对称性特征, 并在冬季时双峰结构纬度位置也可能出现偏移现象. 图 5 分别给出了 1998—2020 年在太阳活动强与弱 ($P \geq 150$ 与 $P < 100$) 时条件下 TEC 和 $N_m F_2$ 双峰结构的纬度位置的散点分布及相应的月均值曲线. 同时, 表 1 分别给出了在太阳活动高时和低时电离层 EIA 双峰结构北驼峰位置 (L_{nc})、赤道槽位置 (L_{et})、南驼峰位置 (L_{sc}) 均值冬季相对于夏季的

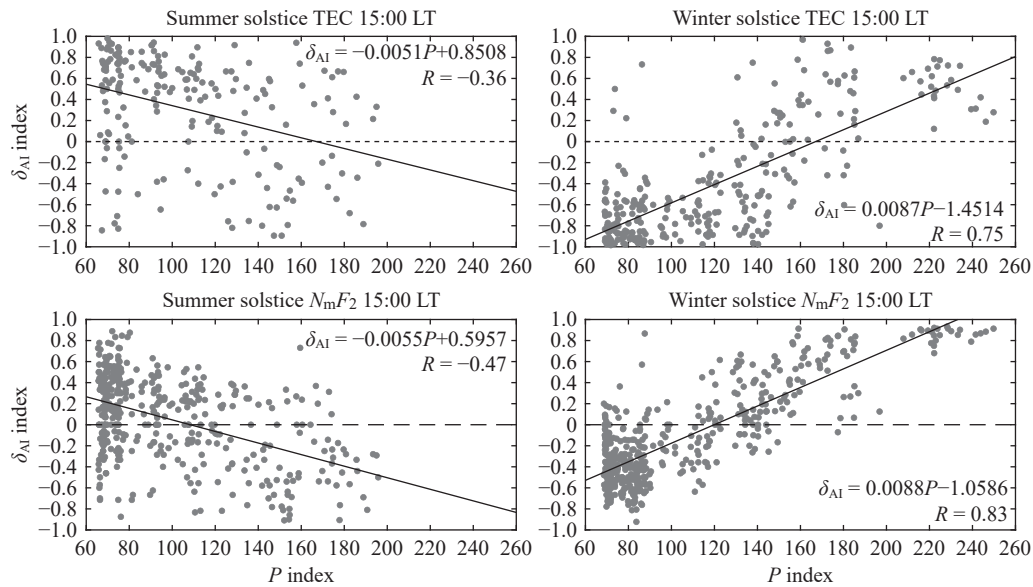


图 3 1998—2020 年夏至期间双峰强度不对称性指数与太阳活动指数变化关系

Fig. 3 Solar activity (P) dependence of asymmetry index (δ_{AI}) of TEC and N_mF_2 during summer and winter solstice from 1998 to 2020

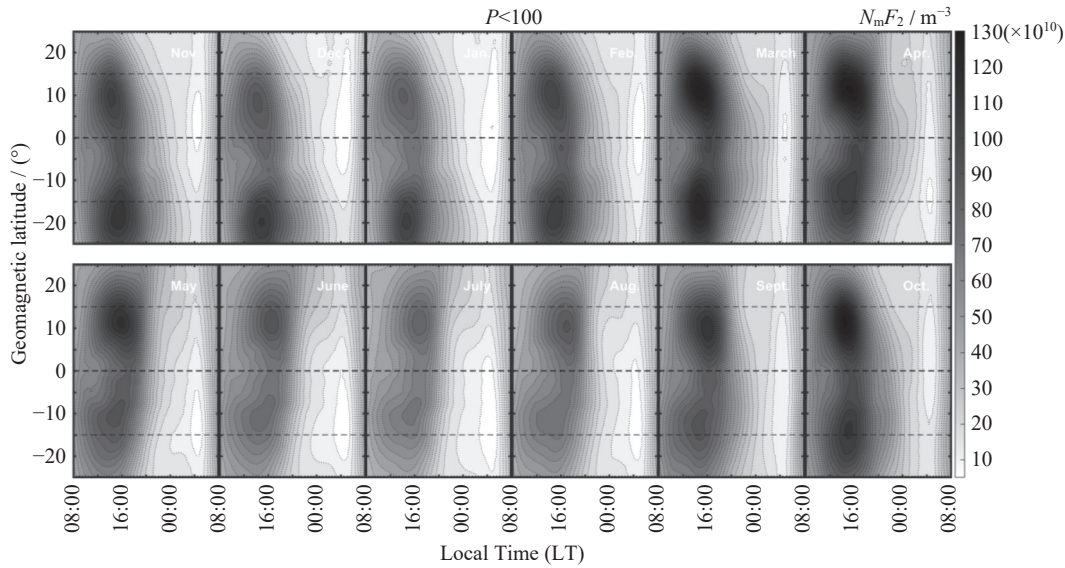


图 4 1998—2020 年太阳活动低时电离层 N_mF_2 月均值随纬度和时间分布

Fig. 4 Monthly contour plots of mean N_mF_2 under the low ($P < 100$) solar activity days from 1998 to 2020

偏移量. 进一步对比太阳活动高时与低时冬季期间 TEC 与 N_mF_2 双峰结构 (见图 5), 可以看出: 对于冬季期间 TEC 双峰结构, 太阳活动低时 L_{nc} , L_{et} , L_{sc} 均值相对于太阳活动高时向南半球的纬度偏移量分别为 3.8° , 1.2° , 3.7° ; 对于冬季期间 N_mF_2 双峰结构, 太阳活动低时 L_{nc} , L_{et} , L_{sc} 均值相对于高时向南半球的纬度偏移量分别为 4.1° , 0.7° , 2.4° .

3 讨论

电离层 EIA 双峰结构主要受到磁赤道低纬地区电离层中的电动力学过程的影响, 喷泉效应和跨赤道中性风是影响电离层 EIA 形成的两个重要物理过程^[20,21]. 影响 EIA 双峰形成与峰值位置移动的主要因素是电场, 即赤道等离子体喷泉效应^[22]. 随着太阳活动

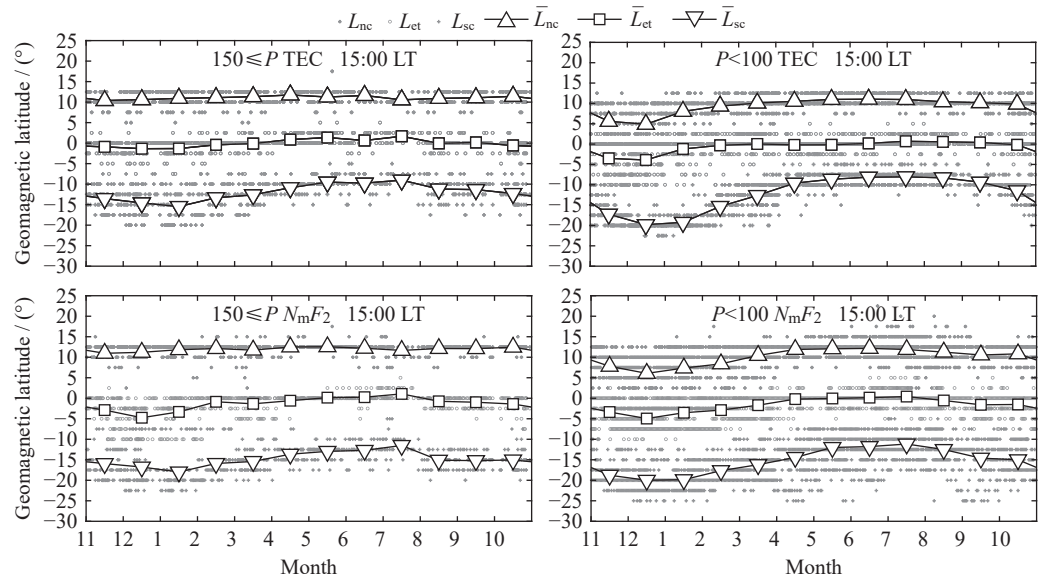


图 5 1998—2020 年太阳活动高时和低时电离层 TEC 与 N_mF_2 双峰结构纬度位置逐月变化
Fig. 5 Monthly variation of the TEC and N_mF_2 under the high low ($P \geq 150$) and low ($P < 100$) solar activity days from 1998 to 2020

表 1 太阳活动高时和低时电离层双峰结构纬度冬季相对于夏季的偏移量对比
Table 1 Comparison of latitude offset of EIA structure in winter relative to summer

太阳活动	双峰结构参数	L_{nc} 偏移量/(°)	L_{et} 偏移量/(°)	L_{sc} 偏移量/(°)
$P \geq 150$	TEC	0.3	1.9	4.3
	N_mF_2	0.6	3.1	3.6
$P < 100$	TEC	3.9	2.5	9.6
	N_mF_2	4.4	3.7	7.2

的增强,白天时在磁赤道上空的电离层 E 层发电机效应变强,导致背景电场 E 增大;在恒定地磁场 B 的作用下, $E \times B$ 漂移产生的垂直方向等离子体运动增强,即喷泉效应增强,进而抬升 F_2 层的等离子体;同时随着太阳活动减弱时,喷泉效应作用也随之减弱.而产生 EIA 双峰强度不对称主要是受热层跨赤道中性风作用的影响^[23],在夏冬季时电离层 F_2 层的等离子体沿着夏半球吹向冬半球的热层跨赤道中性风场运动,使得 EIA 双峰强度出现了半球不对称性. Yang 等^[16]研究分析地磁暴对赤道和低纬度电离层的影响 (尤其是对 EIA 双峰结构的变化),结果表明地磁活动 (尤其是强烈地磁暴) 通过改变穿透电场和扰动风场,对 EIA 的双峰强度、位置和不对称性等产生显著影响. 为了避免地磁活动对本文结论的影响,剔除了地磁扰动 ($Kp > 3^+$) 期间的数据.

根据上文分析,在 $120^\circ E$ 的磁赤道上空,白天电离层 EIA 双峰强度 (TEC 与 N_mF_2) 在夏至期间均表现出明显的不对称性特征,但同时也表现出明显的夏至与冬至的季节性差异特征:夏至与冬至期间,南北双峰强度不对称性 (TEC 与 N_mF_2) 对太阳活动变化总体呈相反的趋势,且冬至期间双峰强度不对称性与太阳活动相关性更显著 (见图 3);冬至期间, EIA 双峰结构 (TEC 与 N_mF_2) 呈现纬度向南半球偏移的现象,尤其在太阳活动低时 ($P < 100$) 纬度偏移现象更加明显 (见图 5).

相同太阳活动条件下,夏至期间喷泉效应强度也可能不同. 图 6 分别给出了夏至期间 F_2 层 EIA 赤道槽电子浓度峰值高度 h_mF_2 随太阳活动的散点分布,以及对应的线性变化拟合曲线. 可以看出,在相同的太阳活动条件下冬至期间 h_mF_2 趋势上均要高

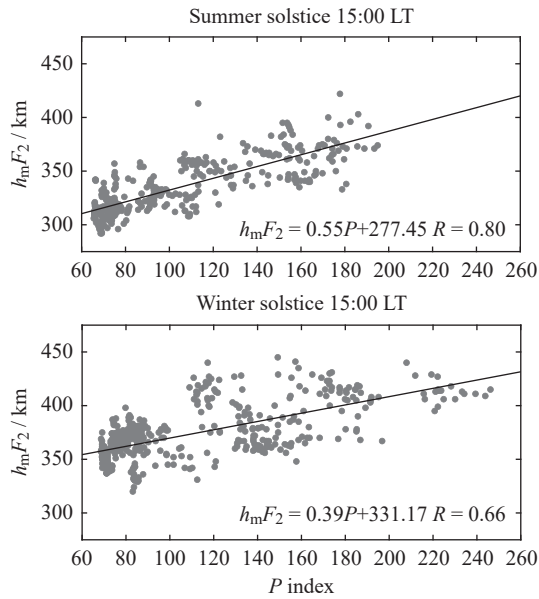


图 6 1998—2020 年夏至期间 F_2 层双峰结构磁赤道电子浓度峰值高度 $h_m F_2$ 与太阳活动对应关系

Fig. 6 Solar activity (P) dependence of F_2 layer peak height ($h_m F_2$) of the magnetic equator during solstice period from 1998 to 2020

于夏至期间,说明在相同太阳活动情况下喷泉效应强度在冬至期间相对较强. 在太阳活动低时,赤道等离子体喷泉效应显著减弱,使得热层跨赤道中性风对 EIA 形态的调制作用相对更为突出,这可能导致 EIA 双峰结构在冬季期间更容易呈现出显著的不对称性特征. 基于以上两点,赤道等离子体喷泉和热层跨赤道中性风的相互作用会在一定程度上加剧夏冬至期间 EIA 双峰强度的不对称性差异. 然而研究中冬至期间 EIA 双峰结构纬度位置呈现出明显的向南半球偏移现象,很可能与其他作用/过程有关,且该作用/过程在冬至与夏至期间存在明显的差异.

电离层中的电子密度主要受太阳 EUV 的调制,只考虑由 EUV 电离产生的等离子体背景场形态分布特征,即以太阳直射点为中心,等离子体浓度沿两侧逐渐衰减的分布特征. 在春分和秋分时太阳直射点在地理赤道位置 (0°),夏冬至时分别在北南回归线 (23.43°N/S). 在 120°E 地区,磁赤道位置约在地理纬度 10°N (由于磁偏角很小,由此产生的双峰不对称性差异不考虑),太阳直射点在冬季时相对于夏季要离磁赤道位置明显更远 (两至期间纬度位置差异最大可达约 20°),使得 EUV 产生的电离层等离子体背景场

纬度分布在夏冬至期间存在明显地理位置差异. 因此,电离层等离子体背景场分布对 EIA 双峰结构的形成可能存在明显的冬夏至季节差异,电离层等离子体背景场可能对 EIA 双峰结构呈现出地理影响作用 (即离子体背景场的地理控制影响),特别是在太阳活动低时离子体背景场的地理控制作用可能更加显著.

在研究 EIA 双峰结构形成的过程中,相关研究一般主要考虑喷泉效应与跨赤道中性风这两者的相互作用. Huang 等^[11]统计了 110°E 附近 2000—2011 年电离层 TEC 双峰结构不对称性特征,发现在太阳活动低时冬季期间,赤道异常 TEC 北峰在向赤道移动及南峰向极地 (南极) 方向移动的特征,并提出可能与太阳直射点有关,但没有进行更深入研究分析. 在太阳活动低/很低时,喷泉效应减弱,电离层可能出现单峰现象,Mei 等^[13]对电离层赤道异常区下午 (14:00 LT 之后) 单峰的纬度位置统计,发现单峰纬度位置在冬至期间偏南半球. 本文中进一步考虑太阳直射点离子体背景场的地理控制影响作用,图 7 给出了太阳活动低时冬至期间电离层 EIA 双峰结构形成的示意图. 太阳活动低时,白天电离层在喷泉效应与中性风场的共同作用下,并进一步考虑受到太阳直射点等离子体浓度背景的地理控制影响,即在电离层中等离子体背景场分布在太阳直射点 (南回归线) 附近最大,因此在太阳活动低时冬至期间电离层 EIA 双峰强度 ($\text{TEC}/N_m F_2$) 表现出明显的南驼峰强于北驼峰的特征,并表现出明显的双峰纬度位置向南半球偏移现象. 而在太阳活动高时冬至期间,尽管喷泉效应显著增强,但太阳直射点等离子体浓度背景的地理控制作用也可能呈现一定的调控作用,即 EIA 双峰结构纬度位置也会呈现出一定的向南半球偏移量. 这与图 3 和图 5 中太阳活动低时 EIA 双峰结构不对称性与纬度分布结果基本相符.

赤道异常区 TEC 通常表现为 EIA 双峰结构,但电离层 EIA 结构也会出现不连续性特征^[24],以及表现为单峰、三峰甚至多峰的现象,即使在地磁平静期也常出现与经典的双峰 EIA 结构不同的特征^[25],尤其在极低太阳辐射条件下,电离层动力学过程会出现偏离常态的情况^[26,27]. 在太阳活动很低时 (见图 7),随着喷泉效应进一步减弱,同时受到离子体背景场的地理控制影响作用,电离层 $\text{TEC}/N_m F_2$ 均有可能呈现单峰结构的现象,这也与相关研究结果提出的观点相

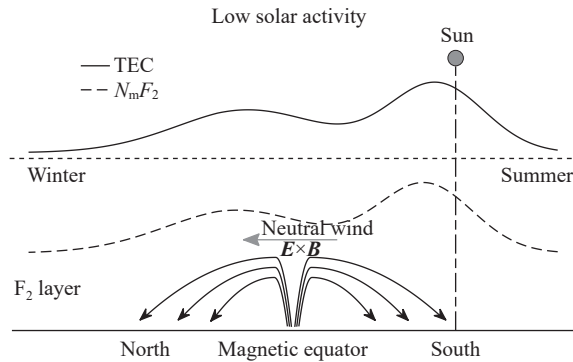


图7 太阳活动低时冬至期间 EIA 形成双峰结构
Fig. 7 Schematic diagram of the EIA structure under the low ($P < 100$) solar activity days during winter solstice

符. 同时, 有研究表明 EIA 双峰结构的纬度位置变化, 也可能受到行星尺度波、月球潮汐的影响^[28,29]. 这些都意味着电离层结构的复杂性, 因此在 EIA 双峰强度与纬向分布等可能表现出不一样的区域性特征, 其变化特征需要充分考虑电离层热结构、动力学过程等各种因素, 因此等离子体浓度背景场的地理控制影响作用还有待更进一步研究与确定.

4 结论

利用俄罗斯科学院 IZMIRAN 研究所提供的 1998—2020 年约两个太阳活动周期的 120°E 上空电离层 TEC, $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 数据, 重点分析了在地磁活动平静期间 (尤其是在太阳活动低时) EIA 双峰结构的不对称性、冬季纬度偏移特征及其可能影响机制, 具体结果可总结如下.

(1) 在太阳活动低时电离层 EIA 双峰结构存在明显的季节变化特征. 春季和秋季期间双峰结构相对明显, 夏季期间北驼峰强度相对明显, 冬季反之; 同时冬季期间 (11—2 月) 双峰结构纬度位置呈现出明显的向南半球偏移的现象.

(2) 夏至与冬至期间 EIA 双峰强度不对称性随太阳活动变化差异明显. 夏至期间, 电离层 TEC 与 $N_m F_2$ 双峰强度不对称性指数与太阳活动变化相关性不明显均不显著; 而冬至期间, 电离层 TEC 与 $N_m F_2$ 双峰强度不对称性指数与太阳活动变化呈显著相关, 且在太阳活动低时 TEC 与 $N_m F_2$ 不对称性主要表现为南驼峰强, 且随着太阳活动升高不对称性指

数逐渐增大, 形成与太阳活动低时截然相反的特征.

(3) EIA 双峰结构表现出冬季纬度偏移现象, 且随着太阳活动的减弱偏移量更加明显. 在太阳活动低时冬季期间, TEC 双峰结构 L_{nc} , L_{et} , L_{sc} 均值相对于夏季向南半球纬度偏移量分别为 3.9°, 2.5°, 9.6°, $N_m F_2$ 双峰结构 L_{nc} , L_{et} , L_{sc} 均值相对于夏季向南半球纬度偏移量分别为 4.4°, 3.7°, 7.2°.

(4) 排除地磁活动与磁偏角等的影响, EIA 双峰结构冬季纬度位置偏移可能受到太阳直射点等离子体浓度背景的地理控制作用. 在 120°E 上空冬季时, 电离层 EIA 在喷泉效应和中性风场作用下, 同时受到以太阳直射点 (南回归线) 为中心的等离子体背景场叠加的影响, 尤其是随着太阳活动减弱到很低时, 这种影响作用可能更加显著, 从而造成 TEC/ $N_m F_2$ 双峰结构呈现出明显的向南半球偏移与不对称性特征, 且南驼峰纬度位置向南半球偏移明显. 但这种地理控制影响作用还需结合理论模式与模拟仿真等开展进一步研究验证.

参考文献

- [1] FORBES J M, PALO S E, ZHANG X L. Variability of the ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(8): 685-693
- [2] FEJER B G. Low latitude ionospheric electrodynamics[J]. *Space Science Reviews*, 2011, **158**(1): 145-166
- [3] APPLETON E V. Two anomalies in the ionosphere[J]. *Nature*, 1946, **157**(3995): 691
- [4] MOFFETT R J, HANSON W B. Effect of ionization transport on the equatorial F-region[J]. *Nature*, 1965, **206**(4985): 705-706
- [5] BALAN N, IYER K N. Equatorial anomaly in ionospheric electron content and its relation to dynamo currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983, **88**(A12): 10259-10262
- [6] Lin C H, Liu J Y, Fang T W, et al. Motions of the equatorial ionization anomaly crests imaged by FORMOSAT-3/COSMIC[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(19): L19101
- [7] LI Bo, CUI Ruifei, WENG Libin. Seasonal variations of global ionospheric $N_m F_2$ and $h_m F_2$ [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(1): 60-70 (李波, 崔瑞飞, 翁利斌. 全球电离层峰值参数的季节变化 [J]. *空间科学学报*, 2024, **44**(1): 60-70)
- [8] LOMOTÉY S O, DE SOUZA J R, WRASSE C M, et al. Variability of the equatorial ionization anomaly over the South American sector: effects of electric field and effective meridional wind[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2024, **260**: 106240.

- [9] YU Tao, WAN Weixing, LIU Libo, *et al.* Using IGS data to analysis the global TEC annual and semiannual variation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(4): 943-949 (余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特性 [J]. *地球物理学报*, 2006, **49**(4): 943-949)
- [10] LIU L B, WAN W X, CHEN Y D, *et al.* Solar activity effects of the ionosphere: a brief review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(12): 1202-1211
- [11] HUANG L F, HUANG J, WANG J S, *et al.* Analysis of the north-south asymmetry of the equatorial ionization anomaly around 110°E longitude[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, **102**: 354-361
- [12] LI Yongtao, LI Jianwen, DAI Taogao, *et al.* Influence of solar activity on ionospheric TEC change[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(6): 847-854 (李涌涛, 李建文, 代桃高, 等. 太阳活动对电离层 TEC 变化影响分析 [J]. *空间科学学报*, 2018, **38**(6): 847-854)
- [13] MEI Xuefei, LUO Weihua, CAI Hongtao, *et al.* Characteristic of the equatorial ionization anomaly strength and hemispheric asymmetry based on IGS network during 2001—2008[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(9): 3235-3246 (梅雪飞, 罗伟华, 蔡红涛, 等. 基于 IGS 台网观测的 2001—2008 年赤道电离层异常的强度和半球不对称特征 [J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(9): 3235-3246)
- [14] HUANG L F, WANG J S, JIANG Y, *et al.* A preliminary study of the single crest phenomenon in Total Electron Content (TEC) in the equatorial anomaly region around 120°E longitude between 1999 and 2012[J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(11): 2200-2207
- [15] TIAN Yaoyu, HAO Yongqiang, ZHANG Donghe, *et al.* Single crest phenomenon in the equatorial ionospheric anomaly region and its longitudinal distribution caused by nonmigrating tides[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(11): 4067-4081 (田耀宇, 郝永强, 张东和, 等. 非迁移潮作用下的电离层赤道异常区单峰现象及其经度分布 [J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(11): 4067-4081)
- [16] YANG Y, XIONG C, ZHANG S, *et al.* The double peak superposition on the equatorial ionization anomaly crests during the 23 April 2023 storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL108850. DOI: 10.1029 / 2024GL108850
- [17] 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 Science*, 1998, **33**(3): 565-582
- [18] GULYAEVA T L, ARIKAN F, STANISLAWSKA I. Inter-hemispheric imaging of the ionosphere with the upgraded IRI-Plas model during the space weather storms[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, **63**(8): 929-939
- [19] LIU L B, WAN W X, NING B Q, *et al.* Solar activity variations of the ionospheric peak electron density[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A8): A08304
- [20] BALAN N, BAILEY G J. Equatorial plasma fountain and its effects: possibility of an additional layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A11): 21421-21432
- [21] RISHBETH H. The equatorial F-layer: progress and puzzles[J]. *Annales Geophysicae*, 2000, **18**(7): 730-739
- [22] YEH K C, FRANKE S J, ANDREEVA E S, *et al.* An investigation of motions of the equatorial anomaly crest[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(24): 4517-4520
- [23] XIONG C, LÜHR H, MA S Y. The magnitude and inter-hemispheric asymmetry of equatorial ionization anomaly-based on CHAMP and GRACE observations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, **105-106**: 160-169
- [24] CAI X G, WANG W B, EASTES R W, *et al.* Equatorial ionization anomaly discontinuity observed by GOLD, COSMIC-2, and ground-based GPS receivers' network[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(10): e2023GL102994
- [25] MENG X, VERKHOGLYADOVA O P, CHAPMAN S C, *et al.* Statistical characteristics of total electron content intensifications on global ionospheric maps[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(1): e2023SW003695
- [26] SMITHTRO C G, SOJKA J J. Behavior of the ionosphere and thermosphere subject to extreme solar cycle conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A8): A08306
- [27] DANG T, LUAN X L, LEI J H, *et al.* A numerical study of the interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstice at solar minimum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 9099-9110
- [28] MO X H, ZHANG D H, GONCHARENKO L, *et al.* Meridional movement of northern and southern equatorial ionization anomaly crests in the East-Asian sector during 2002–2003 SSW[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, **60**(4): 776-785
- [29] ZHOU Weiqi, YU You, WAN Weixing, *et al.* Tidal variations of the ionospheric f_0F_2 in mid-latitude ionosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, **61**(1): 30-42 (周惟琦, 余优, 万卫星, 等. 中纬度电离层 f_0F_2 潮汐的变化特性 [J]. *地球物理学报*, 2018, **61**(1): 30-42)

作者简介



黄林峰 (通信作者) 男, 1986 年 3 月出生于江西省抚州市, 现为贵州省生态与农业气象中心高级工程师, 主要研究方向为电离层与中高层大气等。
E-mail: lxq850808@126.com