

西北走廊地区电离层吸收特性研究

辛浩¹ 赵海生^{2,3} 王俊江² 葛淑灿²

1(平顶山工业职业技术学院现代教育技术中心 平顶山 467001)

2(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

3(海南大学电子科学与技术学院 海口 570228)

摘要 电离层 $f_{\min}$ 是频高图上观测到的回波最低频率, 是电离层垂直探测仪性能的一个重要指标, 也是电离层 D 区吸收效应研究的重要指标. 本文利用中国电离层垂测站网位于西北走廊地区的西安、乌鲁木齐、兰州三个台站电离层 $f_{\min}$ 数据, 研究了西北走廊地区电离层吸收的强度特性、空间分布特性、日变化、季节变化及长期变化特性. 开展电离层吸收变化特性研究, 对研究短波通信最低频率选择、天波超视距雷达探测性能评估、甚低频 (VLF) 远程通信效能预测具有重要应用价值. 同时电离层吸收与 D 层电子密度关系紧密, 是 D 层电子密度强弱的重要指标, 开展电离层吸收特性研究, 对于研究 D 区电离层变化特性, 建立 D 区电子密度分布模型具有重要科学意义.

关键词 西北走廊, 电离层 $f_{\min}$, 日变化, 季节变化, 长期变化, 空间分布

中图分类号 P352

Study on Ionospheric Absorption Variation Characteristics in the Northwest Corrido

XIN Hao¹ ZHAO Haisheng^{2,3} WANG Junjiang² GE Shucan²

1(Modern Education Technology Center, Pingdingshan Polytechnic College, Pingdingshan 467001)

2(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

3(School of Electronic Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228)

Abstract Ionospheric $f_{\min}$ is the lowest echo frequency observed on the frequency height map, which is an important index of the performance of the ionosonde and also an important index for the study of the absorption effect in the ionospheric D region. In this paper, the ionospheric absorption intensity, spatial distribution, diurnal variation, seasonal variation and long-term variation are studied by using ionospheric $f_{\min}$ data from Xi'an, Urumqi and Lanzhou stations of China ionospheric vertical survey network in the Northwest Corridor region. The study of ionospheric absorption variation is of great application value to the selection of the lowest frequency of shortwave communication, the evaluation of detection performance of sky-wave over-the-horizon radar and the prediction of VLF telecommunication efficiency.

2024-06-09 收到原稿, 2024-09-15 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/>)

At the same time, ionospheric absorption is closely related to the electron density of the D layer, which is an important indicator of the intensity of the electron density of the D layer. To study the ionospheric absorption characteristics is of great scientific significance for the study of the ionospheric variation characteristics and the establishment of the electron density distribution model in the D region. The absorption effect of ionospheric region D in the Northwest Corridor mainly occurs in the daytime, with the highest absorption intensity at noon and the weakest in the early morning at night. Meanwhile, the absorption effect of ionospheric region D in the Northwest Corridor has significant seasonal variation characteristics, the strongest in summer and the weakest in other seasons. The ionospheric $f_{\min}$ value of Urumchi at higher latitude is obviously higher than that of Xi'an and Lanzhou at middle latitude, and the absorption effect center has obvious diurnal drift characteristics. The absorption of ionospheric region D in the Northwest Corridor is positively correlated with the intensity of solar activity. In particular, the absorption intensity of ionospheric region D in high solar activity years is significantly higher than that in low solar activity years.

Key words Northwest corridor, Ionospheric $f_{\min}$, Daily variation, Seasonal change, Long-term trend, Spatial distribution

0 引言

D 区是电离层高度最低的区域, 距离地面高度约 60~80 km, 由于 D 区探测手段有限, D 区是电离层中了解最少的区域, 其结构和变化特性有待进一步深入研究. 目前对 D 区的探测主要来源于无线电手段, 包括: 基于电动力学的波相干探测, 该方法曾得到了很多有价值的成果, 但是在实验技术和数据相干处理上复杂度极高^[1-4]; 火箭探测, 该手段具有探测分辨率和精度高等优点, 但是成本很高, 无法开展长时间连续探测^[5-7]; 非相干散射雷达探测, 该手段仅能获取 80 km 高度以上的 D 层信息, 且成本很高^[8,9]; 甚低频 (VLF) 接收实验, 该方法可较准确地反演 D 区最低有效反射高度, 但是获取 D 层电子密度分布困难^[10-18]; 中频 (MF) 雷达具有设备简单、运行方便和无人值守的优点, 已发展成为电离层 D 区探测的主要手段之一^[19-24].

低电离层 NO 和亚稳态氧分子 O₂ 由于太阳紫外辐射发生的光电离产生了日间 D 区的平静区, 在太阳活动高年, 硬 X 射线辐射是 D 区的主要电离源, 在磁暴期间和紧接磁暴之后, 来自磁气圈中能量电子以大于 40 keV 能量的急速沉降也是 D 区的重要电离源之一, 除此之外, 宇宙射线是 D 区底部的主要电离源^[25-28].

电离层 D 区对穿越其中的无线电波的吸收效应一直是电波传播研究中的一个重要方向^[29,30], 白天

D 区由于电离而导致的高频无线电波的吸收在中低纬显示了规律的周日变化和季节变化. 电离层 D 区电子密度不大, 中性大气密度高, 通过电子与中性粒子的碰撞, 将入射电磁波能量转换为热能, 造成电波能量衰减. 特别是在太阳耀斑爆发等剧烈太阳活动期间, D 层电子密度快速升高, 造成电波吸收衰减大幅增加, 严重时致使电离层短波通信中断. 同时, 电离层 D 区是 VLF 远程通信系统的重要发射区域, D 区吸收变化对 VLF 通信系统性能具有重要影响^[31].

电离层 $f_{\min}$ 是频高图上观测到的回波最低频率, 是电离层垂直探测仪性能的一个重要指标, 也是电离层 D 区吸收效应研究的重要指标. 本文利用中国电离层垂测站网位于西北走廊地区的西安、兰州、乌鲁木齐三个台站电离层 $f_{\min}$ 数据, 深入研究了西北走廊地区电离层吸收的强度特性、空间分布特性、日变化、季节变化及长期变化特性. 开展电离层吸收变化特性研究, 对研究短波通信最低频率选择、天波超视距雷达探测性能、VLF 远程通信效能预测具有重要应用价值. 同时电离层吸收与 D 层电子密度关系紧密, 是研究 D 层电子密度强弱的重要指标, 开展电离层吸收研究, 对于研究 D 区电离层电子密度变化特性具有参考价值.

1 数据来源

电离层地基无线电垂直探测是最基本的电离层

有效探测手段之一, 经过多年发展, 中国逐渐形成了覆盖全国、布局合理的电离层垂直探测站网, 基本满足电离层探测及电波传播研究的需要. 西北走廊地区是亚欧大陆桥的重要通道, 战略地位十分重要, 开展西北走廊地区电离层吸收衰减特性研究, 对于保证亚欧大陆桥高可靠短波通信具有重要意义. 本文采用的电离层 $f_{\min}$ 数据来自中国电离层垂直探测站网的西安、兰州、乌鲁木齐三个台站, 如图 1 所示.

各站点的名称、经纬度以及数据年限列于表 1.

2 吸收强度特性

电离层 $f_{\min}$ 月均值是衡量某一地区电离层 D 区电波吸收效应的重要指标, 月均值能够体现出这一地区电波吸收强度的平均水平, 具有较高的可信度. 图 2 给出了西北走廊地区 3 个台站电离层 $f_{\min}$ 月均值随地方时和月份的变化情况.

从图 2 可以看出, 西北走廊地区电离层 D 区吸收

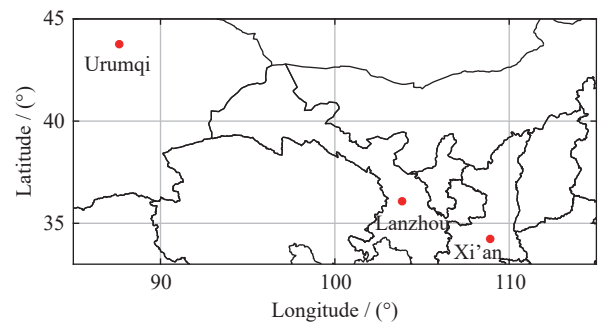


图 1 西北走廊地区电离层垂测站点分布

Fig. 1 Ionosonde stations in the northwest corridor

效应主要发生在白天, 正午吸收强度最大, 夜间凌晨吸收强度最弱, 同时, 西北走廊地区电离层 D 区吸收效应具有显著的季节变化特性, 夏季最强, 分季次之, 冬季最低. 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 月均值范围为 1.2~3 MHz, 较高纬度的乌鲁木齐电离层 $f_{\min}$ 取值明显大于中纬度的西安和兰州.

3 吸收空间分布特性

电离层 $f_{\min}$ 的空间分布对研究该地区 D 区吸收特性至关重要, 这里根据乌鲁木齐、西安、兰州三台站电离层 $f_{\min}$ 的年平均值, 采用克里金插值方法, 给出了西北走廊地区电离层 D 区电波吸收效应的全年平均值分布 (见图 3).

从图 3 可以看出, 西北走廊地区电离层 D 区吸收强度具有沿纬度成带状分布趋势, 随纬度升高 D 区吸收强度逐渐增加. 电离层 D 区吸收强度呈现的这一纬度变化特性, 可能与电离层的稳定状态有关, 30°N 一线的中纬度地区电离层较为稳定, 吸收衰减相对较小, 随纬度升高, 电离层不稳定性逐渐增强, 吸收衰减逐渐增加.

表 1 电离层 $f_{\min}$ 观测站与数据年限
Table 1 Ionospheric observation stations and data duration of $f_{\min}$

序号	站名	经度/(°)N	纬度/(°)E	数据年限
1	西安	34.23	108.92	2013—2022年
2	乌鲁木齐	43.75	87.63	2013—2022年
3	兰州	36.06	103.87	2013—2021年

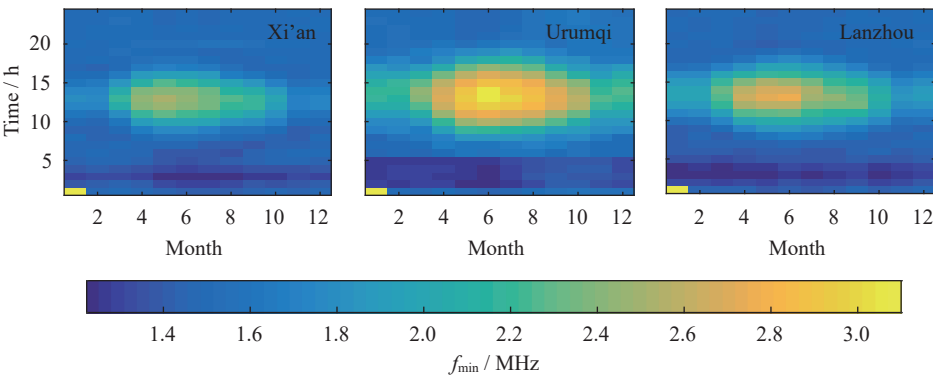
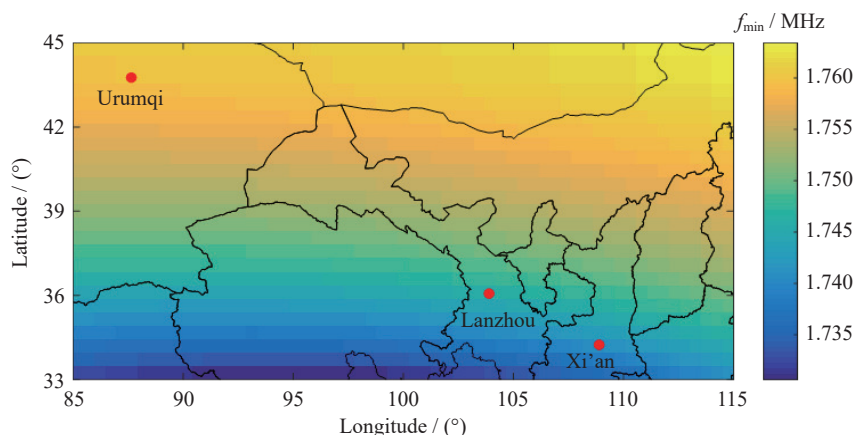


图 2 西北走廊地区 $f_{\min}$ 月均值分布

Fig. 2 Distribution of $f_{\min}$ average values in northwest corridor

图3 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 全年平均值分布Fig. 3 Distribution of $f_{\min}$ annual average in the northwest corridor

4 吸收时间分布特性

4.1 日变化特性

为进一步研究西北走廊地区电离层 D 区吸收强度的日变化规律, 研究给出了西北走廊地区三台站电离层 $f_{\min}$ 平均月均值随时间的变化曲线 (见图 4).

从图 4 可以看出, 西北走廊地区电离层 D 区吸收最大值一般出现在 13:00 LT, D 区吸收最小值一般出现在凌晨 03:00 LT 左右, D 区吸收强度白天远大于夜晚.

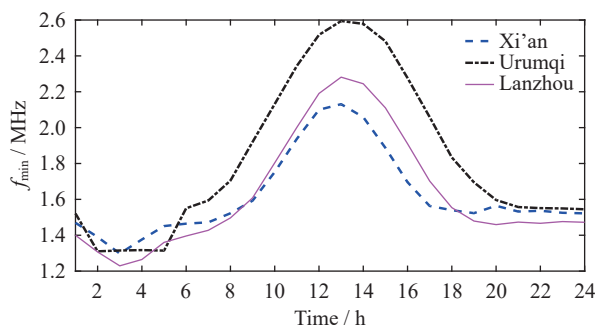
为进一步研究西北走廊地区电离层 D 区吸收强度的昼夜变化特性, 图 5 分别给出了电离层 $f_{\min}$ 平均月均值在白天和夜间的空间分布特性 (其中白天时段为 09:00 LT—17:00 LT; 夜晚时段为 22:00 LT—06:00 LT).

从图 5 可以看出, 白天西北走廊地区电离层 D 区吸收中心位于乌鲁木齐, 夜晚吸收中心分离为乌鲁木齐和西安两个区域. 需要指出的是, 在三个台站中, 西安地区白天电离层 D 区吸收效应最弱, 而夜晚反而变为吸收强度较大区域, 由此表明, 西北走廊地区电离层 D 区吸收效应中心具有明显的昼夜漂移特性.

4.2 季节变化特性

为进一步研究西北走廊地区电离层 D 区吸收效应季节变化特性, 图 6 分别给出了西安、乌鲁木齐、兰州三台站电离层 $f_{\min}$ 平均月均值随季节的变化曲线.

从图 6 可以看出, 西北走廊地区电离层 D 区吸收最大值一般出现在 4—6 月, 最小值出现在 11—2 月, 夏季最强, 分季次之, 冬季最低, 最强月份电离层

图4 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 均值日变化曲线Fig. 4 Daily variation curve of ionospheric $f_{\min}$ in the northwest corridor

$f_{\min}$ 取值高于最低月份 30%~50%.

为进一步研究西北走廊地区电离层 D 区吸收强度的季节变化特性, 图 7 分别给出了电离层 $f_{\min}$ 平均月均值在夏季和冬季的空间分布特性 (其中, 5—8 月为夏季; 11—2 月为冬季).

从图 7 可以看出, 西北走廊地区夏季电离层 D 区吸收强度具有明显的随纬度分布特性, D 区吸收中心位于乌鲁木齐地区, 冬季电离层 D 区吸收强度明显下降, 吸收中心分布特性与夏季基本相同, 夏季电离层 $f_{\min}$ 大于冬季电离层 $f_{\min}$ 约 20%.

4.3 太阳周期变化特性

电离层 D 区电子密度主要受太阳辐射控制, 因此 D 区电波吸收强度也必将受到太阳活动的显著影响^[32-37].

为了深入研究西北走廊地区电离层 D 区吸收强度的太阳周期变化特性, 图 8 和图 9 利用 2013—

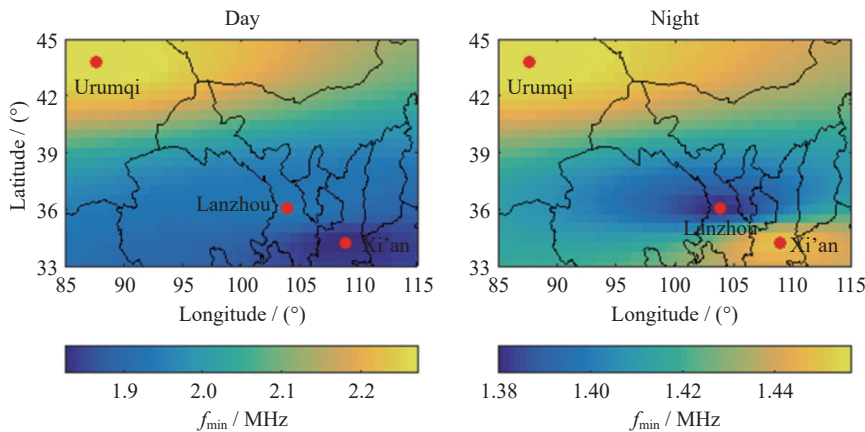


图 5 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 均值的昼夜变化

Fig. 5 Diurnal variation of ionospheric $f_{\min}$ in the northwest corridor

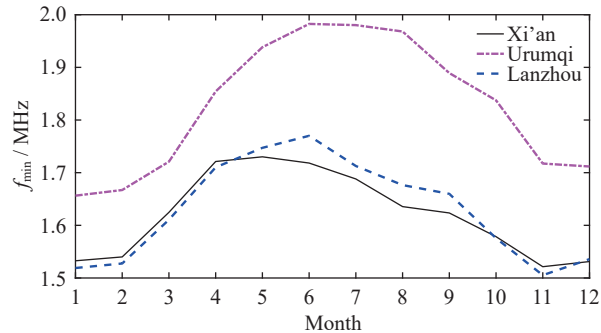


图 6 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 均值的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of ionospheric $f_{\min}$ in the northwest corridor

2022 年一个太阳周期内西安、乌鲁木齐、兰州三个台站电离层 $f_{\min}$ 探测数据, 分析了西北走廊地区电离层 D 区吸收强度与太阳活动的相关性.

从图 8 和图 9 可以看出, 太阳活动低年的 2017—2020 年, 电离层 D 区吸收强度显著低于太阳活动高年的 2013—2015 年, 西北走廊地区电离层 D 区吸收与太阳活动强度呈现明显正相关关系, 特别是太阳活动高年的白天 D 区吸收强度明显高于太阳活动低年, 而夜间 D 区吸收强度与太阳活动关系不明显. 西北走廊地区电离层 D 区吸收呈现出的与太阳活动强相关变化特性, 可能是因为太阳活动高年, 高能射线辐射增强引起 D 区电子密度增加, 从而致使 D 区吸收明显增强.

值得注意的是, 乌鲁木齐站某些年份并没有明显的太阳周期变化特征, 太阳活动水平似乎对其影响不大. 此外, 乌鲁木齐站 2013 年、2015 年、2016 年冬季 $f_{\min}$ 都出现了异常增加现象, 这一现象的产生可能与电离层冬季异常吸收有关.

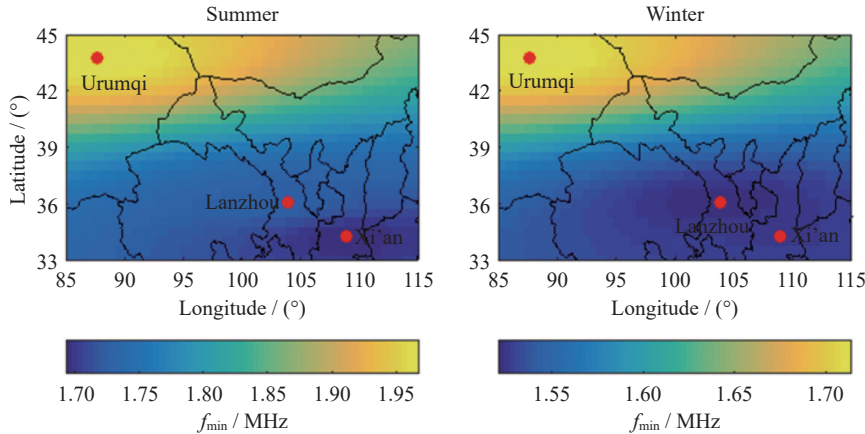


图 7 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 均值夏冬对比

Fig. 7 Comparison of ionospheric $f_{\min}$ values in summer and winter in the northwest corridor

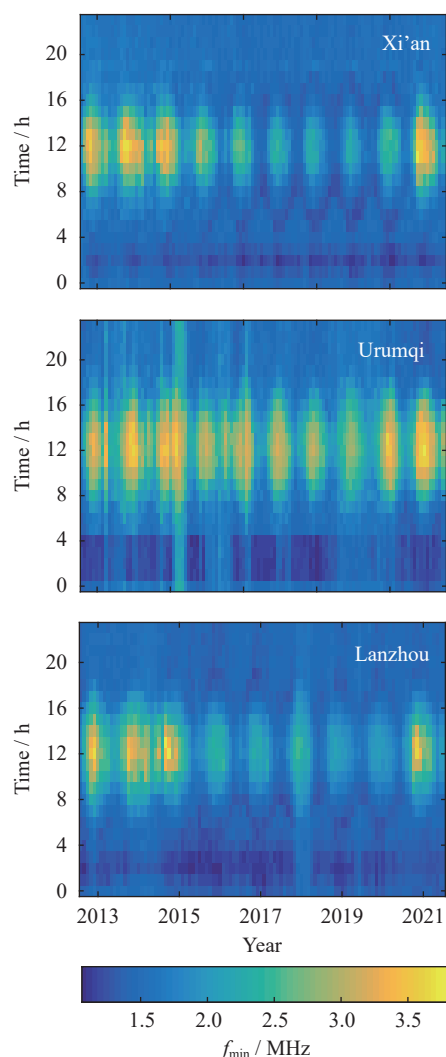


图 8 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 太阳周期变化特性
Fig. 8 Variation characteristics of ionospheric $f_{\min}$ solar cycle in the northwest corridor

5 结论

本文利用中国电离层垂测站网位于西北走廊地区的西安、兰州、乌鲁木齐三个台站电离层 $f_{\min}$ 数据, 深入研究了西北走廊地区电离层吸收的强度特性、空间分布特性、日变化、季节变化及长期变化特性. 开展电离层吸收变化特性研究, 对研究短波通信最低频率选择、天波超视距雷达探测性能、VLF 远程通信效能预测具有重要应用价值. 同时电离层吸收与 D 层电子密度关系紧密, 是研究 D 层电子密度强弱的重要指标, 开展电离层吸收研究, 对于研究 D 区电离层电子密度变化特性具有参考价值. 研究结论如下.

(1) 西北走廊地区电离层 D 区吸收效应主要发生在白天, 正午吸收强度最大, 夜间凌晨吸收强度最弱, 同时, 西北走廊地区电离层 D 区吸收效应具有显著的季节变化特性, 夏季最强, 分季次之, 冬季最低. 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 月均值为 1.2~3 MHz, 较高纬度的乌鲁木齐电离层 $f_{\min}$ 取值明显大于中纬度的西安和兰州.

(2) 西北走廊地区电离层 D 区吸收强度具有沿纬度呈带状分布趋势, 随着纬度升高 D 区吸收强度逐渐增加.

(3) 西北走廊地区电离层 D 区吸收最大值一般出现在 13:00 LT, D 区吸收最小值一般出现在凌晨 03:00 LT 左右, D 区吸收强度白天远大于夜晚. 白天西北走廊地区电离层 D 区吸收中心位于乌鲁木齐, 夜晚吸收中心分离为乌鲁木齐和西安两个区域, 西北走廊地区电离层 D 区吸收效应中心具有明显的昼夜漂移特性.

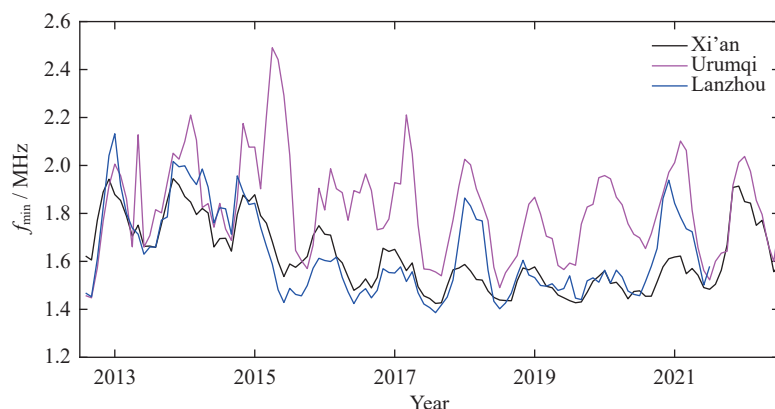


图 9 西北走廊地区电离层 $f_{\min}$ 长期变化特性
Fig. 9 Long-term variation characteristics of ionospheric $f_{\min}$ in the northwest corridor

(4) 西北走廊地区电离层 D 区吸收最大值一般出现在 4—6 月, 最小值出现在 11 月至 2 月, 最强月份电离层 $f_{\min}$ 取值高于最低月份 30%~50%。西北走廊地区夏季电离层 D 区吸收强度具有明显的随纬度分布特性, D 区吸收中心位于乌鲁木齐地区, 冬季电离层 D 区吸收中心分布特性与夏季基本相同, 但吸收强度明显下降, 夏季电离层 $f_{\min}$ 大于冬季约 20%。

(5) 西北走廊地区电离层 D 区吸收与太阳活动强度呈现明显正相关关系, 特别是太阳活动高年的白天 D 区吸收强度明显高于太阳活动低年, 而夜间 D 区吸收强度与太阳活动关系不明显。

参考文献

- [1] BELROSE J S. Radio wave probing of the ionosphere by the partial reflection of radio waves (from heights below 100km)[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1970, **32**(4): 567-596
- [2] BELROSE J S, BURKE M J. Study of the lower ionosphere using partial reflection: 1. Experimental technique and method of analysis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, **69**(13): 2799-2818
- [3] BELROSE J S, BURKE M J, COYNE T N R, *et al.* D-region measurements with the differential-absorption, differential-phase partial-reflection experiments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(25): 4829-4838
- [4] CHAKRABARTY D K, CHAKRABARTY P, WITT G. A theoretical attempt to explain some observed features of the D region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A12): 5763-5767
- [5] ISHISAKA K, OKADA T, HAWKINS J, *et al.* Investigation of electron density profile in the lower ionosphere by SRP-4 rocket experiment[J]. *Earth, Planets and Space*, 2005, **57**(9): 879-884
- [6] MEIRA L G JR. Rocket measurements of upper atmospheric nitric oxide and their consequences to the lower ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, **76**(1): 202-212
- [7] THOMSON N R, CLILVERD M A, RODGER C J. Ionospheric D region: VLF-measured electron densities compared with rocket-based FIRM-2018 model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(11): e2022JA030977
- [8] MATHEWS J D. Incoherent scatter radar probing of the 60-100-km atmosphere and ionosphere[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, **GE-24**(5): 765-776
- [9] MENDILLO M, EVANS J V. Incoherent scatter observations of the ionospheric response to a large solar flare[J]. *Radio Science*, 1974, **9**(2): 197-203
- [10] ŽIGMAN V, GRUBOR D, ŠULIĆ D. D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(7): 775-792
- [11] MCRAE W M, THOMSON N R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(1): 77-87
- [12] THOMSON N R, CLILVERD M A. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF amplitude observations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(16): 1729-1737
- [13] PALIT S, BASAK T, MONDAL S K, *et al.* Modeling of Very Low Frequency (VLF) radio wave signal profile due to solar flares using the GEANT4 Monte Carlo simulation coupled with ionospheric chemistry[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(18): 9159-9168
- [14] SINGH A K, SINGH A K, SINGH R, *et al.* Solar flare induced D-region ionospheric perturbations evaluated from VLF measurements[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2014, **350**(1): 1-9
- [15] TAN L M, THU N N, HA T Q, *et al.* Study of solar flare induced D-region ionosphere changes using VLF amplitude observations at a low-latitude site[J]. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 2014, **43**(3): 197-204
- [16] XIONG S P, LI J Y, WEI G C, *et al.* The northern and southern hemispheric asymmetries of mesospheric ozone at high latitudes during the January 2012 solar proton events[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(5): e2023SW003435
- [17] THOMSON N R. Daytime tropical D region parameters from short path VLF phase and amplitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A9): A09313
- [18] THOMSON N R, RODGER C J, CLILVERD M A. Daytime D region parameters from long-path VLF phase and amplitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A11): A11305
- [19] HOLDSWORTH D A, VUTHALURU R, REID I M, *et al.* Differential absorption measurements of mesospheric and lower thermospheric electron densities using the Buckland Park MF radar[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(18): 2029-2042
- [20] LI N, CHEN J S, DING Z H, *et al.* Mean winds observed by the Kunming MF radar in 2008-2010[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, **122**: 58-65
- [21] TANG Z M, LI N, WANG J Y, *et al.* Variation of electron density in the D-region using Kunming MF radar under low solar activity[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(12): 1764
- [22] LI N, LEI J, LUAN X, *et al.* Responses of the D region ionosphere to solar flares revealed by MF radar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, **182**: 211-216
- [23] ZHANG Donghe, XIAO Zuo, WU Jian, *et al.* The study of

- the electron density in ionospheric d region using mf radar during flares period[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, **23**(5): 334-342 (张东和, 萧佐, 吴健, 等. 利用 MF 雷达对耀斑期间电离层 D 区电子密度的观测研究 [J]. *空间科学学报*, 2003, **23**(5): 334-342)
- [24] ZHU M Y, XU T, SUN S J, *et al*. Physical model of D-region ionosphere and preliminary comparison with IRI and data of MF radar at Kunming[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(2): 235
- [25] FEJER J A, VICE R W. An investigation of the ionospheric D-region[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1959, **16**(3/4): 291-306
- [26] ANANTHAKRISHNAN S, ABDU M A, PIAZZA L R. D-region recombination coefficients and the short wavelength X-ray flux during a solar flare[J]. *Planetary and Space Science*, 1973, **21**(3): 367-375
- [27] BARRINGTON R E, THRANE E. The determination of D-region electron densities from observations of cross modulations[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1962, **24**(1): 31-42
- [28] RAULIN J P, TROTTET G, KRETZSCHMAR M, *et al*. Response of the low ionosphere to X-ray and Lyman- α solar flare emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(1): 570-575
- [29] VAMPOLA A L, GORNEY D J. Electron energy deposition in the middle atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983, **88**(A8): 6267-6274
- [30] NAGANO I, OKADA T. Electron density profiles in the ionospheric D-region estimated from MF radio wave absorption[J]. *Advances in Space Research*, 2000, **25**(1): 33-42
- [31] FERGUSON J A. Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0: User's Guide and Source Files[R]. San Diego: Space and Naval Warfare Systems Center, 1998
- [32] KUMAR A, KUMAR S. Solar flare effects on D-region ionosphere using VLF measurements during low- and high-solar activity phases of solar cycle 24[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 29
- [33] MAURYA A K, SINGH R, KUMAR S, *et al*. Waves-like signatures in the D-region ionosphere generated by solar flares[C]//Proceedings of 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing: IEEE, 2014. DOI: [10.1109/URSIGASS.2014.6929796](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929796)
- [34] GRUBOR D, ŠULIĆ D, ŽIGMAN V. Influence of solar X-ray flares on the earth-ionosphere waveguide[J]. *Serbian Astronomical Journal*, 2005(171): 29-35
- [35] OSEPIAN A, KIRKWOOD S, DALIN P, *et al*. D-region electron density and effective recombination coefficients during twilight - experimental data and modelling during solar proton events[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(10): 3713-3724
- [36] SELVAKUMARAN R, MAURYA A K, GOKANI S A, *et al*. Solar flares induced D-region ionospheric and geomagnetic perturbations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, **123**: 102-112
- [37] KUMAR A, KUMAR S. Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum[J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, **66**(1): 76

作者简介



辛浩男, 1981年1月出生于河南省平顶山市, 现为平顶山工业职业技术学院讲师, 主要研究方向为无线电通信、网络安全技术、电离层电波传播等。
E-mail: aurorx@qq.com



赵海生(通信作者)男, 1981年6月出生于河南省平顶山市, 现为海南大学电子科学与技术学院研究员, 海南省领军人才, 博士生导师, 主要研究方向为电离层环境探测、电离层电波传播等。
E-mail: zhaohaisheng213@163.com