

曲靖地区电离层多参数变化特征*

代连东 丁宗华 杨 嵩 苗建苏
许正文 吴 健

(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)

(昆明电磁波环境国家野外科学观测研究站 曲靖 655500)

摘 要 利用电波环境观测网曲靖站电离层垂直探测仪数据(2008—2018), 分析了该站电离层多参数(包括 $f_{\min}$, f_0E_s , $h'E_s$, f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$, MUF(3000) F_2 等)随太阳活动、季节、地方时的变化特征。结果表明, $f_{\min}$, f_0E_s , $h'E_s$ 随太阳活动变化不明显, f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$, MUF(3000) F_2 与太阳活动变化具有相关性, f_0F_2 经常发生日落增强现象, 同时各自具有独立性; 与拉萨、乌鲁木齐地区 f_0F_2 , $h'F$, f_0E_s 变化特征对比, 发现地方时与月份变化趋势相同, 但是极值出现的位置有所不同, 这可能与各地区的地理纬度和地形等因素有关; $h'F$ 夜间大于白天, 在日出日落时段有突然上升现象, 冬季的 $h'F$ 一般都小于其他季节; MUF(3000) F_2 与 f_0F_2 的变化特征相似, 白天值高于夜晚值, 春秋分季高于夏冬季, 太阳活动高年日落后 MUF(3000) F_2 一直维持较高值并持续到 03:00—04:00 LT。

关键词 曲靖, 电离层, 垂直探测仪, 参数特征

中图分类号 P352

Characteristics of Ionospheric Multiparameter Changes in Qujing Area

DAI Liandong DING Zonghua YANG Song MIAO Jiansu
XU Zhengwen WU Jian

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

(Kunming Electro-magnetic Environment National Observation and Research Station, Qujing 655500)

Abstract The Qujing ionospheric vertical sounders 11 years data in network of radio environment observatories are processed. The correlations between ionosphere parameters and solar activity month local time are analyzed including $f_{\min}$, f_0E_s , $h'E_s$, f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$, MUF(3000) F_2 . Several interesting results are achieved. Firstly, the relationships between $f_{\min}$, f_0E_s , $h'E_s$ and solar activity are not obvious,

* 电波环境特性及模化技术重点实验室基金项目(6142403210103)和基础加强计划重大项目共同资助

2021-11-12 收到原稿, 2022-06-10 收到修定稿

E-mail: cetc22s_dai@sina.com

but f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$, $\text{MUF}(3000)F_2$ have good correlation with solar activity. Secondly, the value of f_0F_2 parameter often enlarged on sunset, and both are independent. The f_0F_2 , $h'F$, $\text{MUF}(3000)F_2$ parameters variation trend of Lhasa and Urumqi are compared, it is found that the variation trend of local time and month are similar, but extreme values appeared in different positions. This phenomenon may have a relationship with topography and latitude and longitude. Thirdly, the daytime value of $h'F$ is smaller than night, and rise abruptly at sunrise and sunset, and the winter $h'F$ value is smaller than other seasons. Fourthly, the change trend of $\text{MUF}(3000)F_2$ is similar with f_0F_2 , the daytime value is higher than night, the equinox value is higher than summer and winter, and the $\text{MUF}(3000)F_2$ value in high solar activity year is high till 03:00–04:00 LT on the morning.

Key words Qujing, Ionosphere, Vertical sounders, Arameter features

0 引言

电离层是距地球表面 60 km 至上千 km 的部分电离的高空大气, 电离层中存在大量的自由电子, 对电离层电波传播以及有关的无线电信息系统具有重要影响。研究电离层各参数的变化特征, 对于提升电离层环境认知、建模与预报水平具有重要意义。

中国在电离层参数的变化特征分析方面开展了大量工作。例如, Xiong 等^[1] 分析了武汉地区电离层总电子含量(TEC)、 N_mF_2 与板厚的季节变化特征; Zuo 等^[2] 分析了武汉地区偶发 E 层(Es 层)与太阳活动的相关性; Zhao 等^[3] 利用中国与日本共 20 站的数据分析了东亚地区的 Es 层临界频率(f_0E_s)的统计特征; Zhao 等^[4] 分析了乌鲁木齐(43.75°N, 87.64°E)地区电离层 F₂ 层临界频率(f_0F_2)、F 层虚高($h'F$)与 Es 层临界频率(f_0E_s)的长期变化特征; Gao 等^[5] 分析了拉萨地区(29.63°N, 91.28°E)电离层 f_0F_2 , $h'F$ 与 f_0E_s 的长期变化特征; Wang 等^[6] 分析了中国兰州、曲靖与海口地区电离层 F 层峰值高度(h_mF_2)与厚度的变化特征, 这些工作增强了对中国电离层变化特征的认识, 但是都局限于少部分参数。

曲靖地区位于中国中低纬过渡区, 同时毗邻青藏高原, 电离层具有复杂的变化特征。本文利用曲靖站(25.50°N, 103.80°E)一个太阳活动周(2008–2018 年)的电离层垂直探测数据(月中值), 分析了该地区电离层垂直探测最低频率($f_{\min}$)、Es 层临界频率(f_0E_s)、Es 层虚高($h'E_s$)、E 层临界频率(f_0E)、F₁ 层临界频率(f_0F_1)、F₂ 层临界频率(f_0F_2)、F 层虚高($h'F$)和 F₂ 层 3000 km 传播的最大可用频率 $\text{MUF}(3000)F_2$ 日变化、季节变化和太阳活动变化等, 得出了一些有

意义的结论。

1 曲靖地区电离层多参数统计特征

图 1 为曲靖地区 2008–2018 年太阳 10.7 cm 射电流流量指($F_{10.7}$)的月中值, 横坐标为 2008–2018 年的各月份, 纵坐标为 $F_{10.7}$ 。从图 1 可见, 2008–2009 年、2018 年太阳活动处于低水平, $F_{10.7}$ 数值范围为 66~73 sfu(太阳流量单位 1 sfu=10⁻²² W·m⁻²·Hz⁻¹)。在 2012–2015 年处于高活动水平, $F_{10.7}$ 数值范围为 101~167 sfu, 其他年份处于中等活动水平, 具有较显著的 11 年周期变化。

1.1 参数 $f_{\min}$

图 2 为曲靖地区 2008–2018 年 $f_{\min}$ 的月中值, 横坐标为 2008–2018 年的各月份, 纵坐标为地方时。从图 2 可知, $f_{\min}$ 数值范围为 1~4 MHz。经计

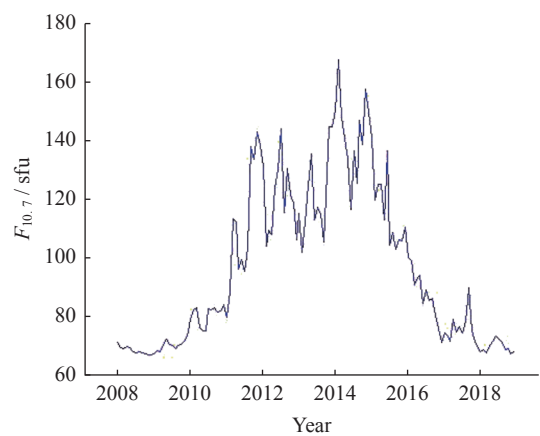


图 1 2008–2018 年太阳活动指数 $F_{10.7}$ 月中值

Fig. 1 Monthly median of solar activity index $F_{10.7}$ from 2008 to 2018

算, $f_{\min}$ 与 $F_{10.7}$ 相关系数约为 -0.04 , 表明 $f_{\min}$ 不随太阳活动周期变化。 $f_{\min}$ 在 05:00—20:00 LT 之间具有有效观测值, 在正午附近具有最大值, 这是由于 05:00 LT 以前与 20:00 LT 之后的低电离层电子密度太低, 以至于 $f_{\min}$ 无有效数据, 这反映出电离层 D 区的太阳电磁辐射控制效应。此外, $f_{\min}$ 随季节变化显著, 春秋分季较大, 冬季最小, 5 月份具有最大值, 在 6 月份出现极小值。

1.2 参数 f_0E_s

图 3 为曲靖地区 2008—2018 年 f_0E_s 月中值。从图 3 可知, f_0E_s 数值范围为 $1.2 \sim 9.5$ MHz。经计算, f_0E_s 与 $F_{10.7}$ 相关系数约为 -0.05 , 表明 f_0E_s 不随太阳活动周期变化。 f_0E_s 全天都有有效观测数据, 最大值

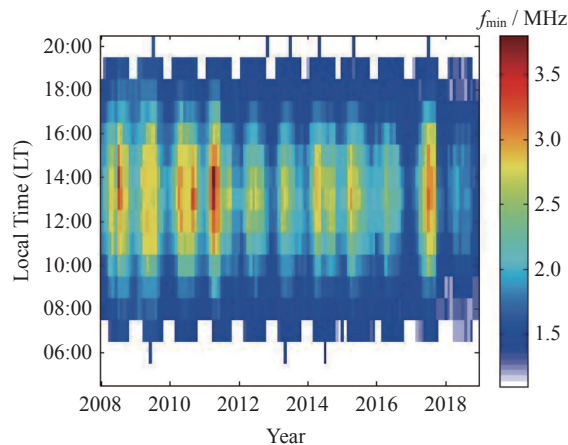


图 2 曲靖地区 2008—2018 年 $f_{\min}$ 月中值
Fig. 2 Monthly median of Qijiang $f_{\min}$ from 2008 to 2018

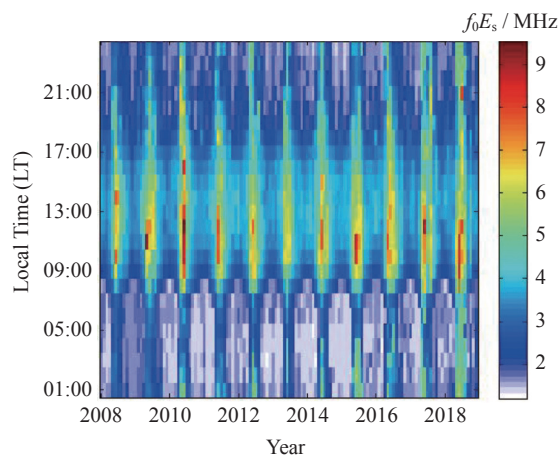


图 3 曲靖地区 2008—2018 年 f_0E_s 月中值
Fig. 3 Monthly median of Qijiang f_0E_s in 2008—2018

出现在 13:00 LT, 最小值出现在 03:00 LT, 呈单峰结构, 白天大于夜间。 f_0E_s 随季节变化显著, 冬季最小, 6 月最大, 春秋分季次之。

1.3 参数 $h'E_s$

图 4 为曲靖地区 2008—2018 年 $h'E_s$ 的月中值。从图 4 可知, $h'E_s$ 数值范围为 $95 \sim 155$ km, 经计算 $h'E_s$ 与 $F_{10.7}$ 相关系数约为 -0.26 , 表明 $h'E_s$ 不随太阳活动周期变化。 $h'E_s$ 全天都有有效观测数据, 白天大于夜晚, 在 09:00 LT 取得极大值, 在 17:00 LT 取得最大值。从季节变化来看, $h'E_s$ 在春分季 (3 至 4 月) 的数值大, 在夏季最小, 冬季和春分季次之。

1.4 参数 f_0E

图 5 为曲靖地区 2008—2018 年 f_0E 的月中值。

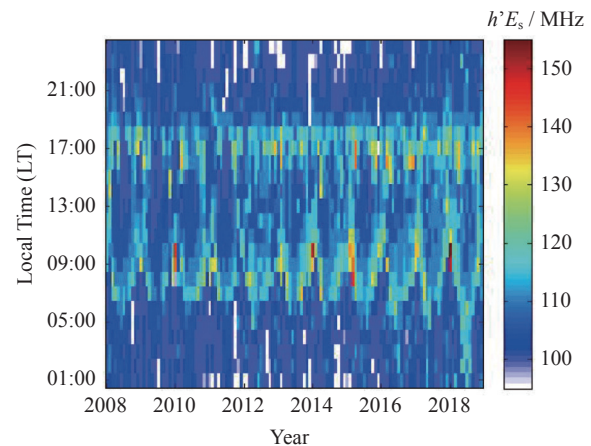


图 4 曲靖地区 2008—2018 年 $h'E_s$ 月中值
Fig. 4 Monthly median of Qijiang $h'E_s$ from 2008 to 2018

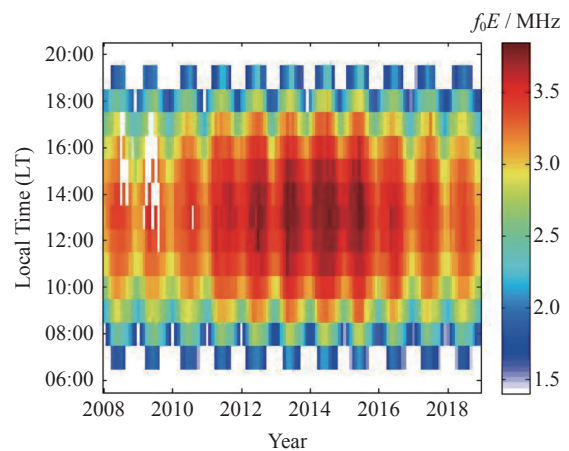


图 5 曲靖地区 2008—2018 年 f_0E 月中值
Fig. 5 Monthly median of Qijiang f_0E from 2008 to 2018

从图 5 可知, f_0E 数值范围为 1.4~3.9 MHz。经计算, f_0E 与 $F_{10.7}$ 相关系数约为 0.75, 表明 f_0E 与太阳活动周期变化相关性较高, 太阳活动高年大, 太阳活动低年小。在 07:00—19:00 LT, f_0E 具有有效观测值; 在 07:00 LT 以前与 19:00 LT 之后, 由于电离层 E 区电子密度低 f_0E 无有效数据, 最大值出现在 13:00 LT, 最小值出现在 07:00 LT, 呈单峰结构, 白天大于夜晚。 f_0E 随季节变化显著, 呈单峰结构, 夏季最大(最大值出现在 5 至 7 月份), 冬季最小, 春秋分季次之。

1.5 参数 f_0F_1

图 6 为 2008—2018 年 f_0F_1 的月中值。从图 6 可知, 曲靖 f_0F_1 数值范围为 2.9~5.8 MHz。经计算, f_0F_1 与 $F_{10.7}$ 相关系数约为 0.88, 表明 f_0F_1 与太阳活动周期变化相关性较高, 太阳活动高年大, 太阳活动低年小。太阳活动高年(2012—2015 年) f_0F_1 在 09:00—18:00 LT 具有有效观测值, 其他年份在 08:00—19:00 LT 之间 f_0F_1 具有有效观测值, 太阳活动高年有效观测时间更短; 在 08:00 LT 以前与 19:00 LT 之后, 由于 F_1 区电子密度低, f_0F_1 无有效数据, 最大值出现在 13:00 LT, 最小值出现在 19:00 LT, 呈单峰结构, 整体上白天大于夜晚。 f_0F_1 随季节变化较显著, 冬季最小, 春秋分季最大, 夏季次之, 在 9 月出现最大值, 4 月次之。需要注意的是, 9 月明显大于 8 月与 10 月, 而 4 月略大于 5 月与 6 月。

1.6 参数 f_0F_2

图 7 为曲靖地区 2008—2018 年 f_0F_2 的月中值。从图 7 可知, 曲靖 f_0F_2 数值范围为 1.8~19.3 MHz。

经计算, f_0F_2 与 $F_{10.7}$ 相关系数约为 0.87, 表明 f_0F_2 与太阳活动周期变化相关性较高, 太阳活动高年大, 太阳活动低年小。 f_0F_2 日变化显著, 最大值出现在 14:00—19:00 LT, 显示了日落电子密度增强现象, 最小值出现在 06:00 LT, 白天数值远大于夜晚。 f_0F_2 随季节变化显著, 春秋分季较大, 冬季最小, 夏季次之。

1.7 参数 $h'F$

图 8 为曲靖地区 2008—2018 年 $h'F$ 的月中值。从图 8 可知, 曲靖 $h'F$ 数值范围为 175~285 km。经计算, $h'F$ 与 $F_{10.7}$ 相关系数约 0.50, 表明 $h'F$ 与太阳活动周期变化具有一定的相关性, 太阳活动高年大, 太阳活动低年小。 $h'F$ 在全天时段内变化, 整体呈现

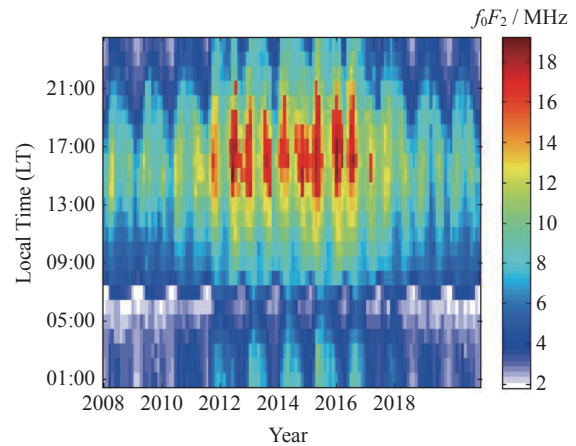


图 7 曲靖地区 2008—2018 年 f_0F_2 月中值

Fig. 7 Monthly median of Qijiang f_0F_2 from 2008 to 2018

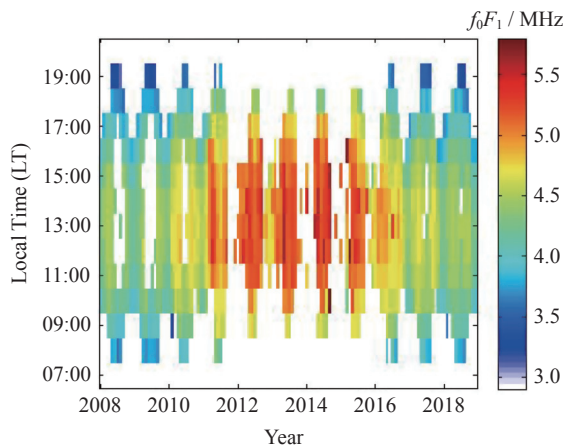


图 6 曲靖地区 2008—2018 年 f_0F_1 月中值

Fig. 6 Monthly median of Qijiang f_0F_1 from 2008 to 2018

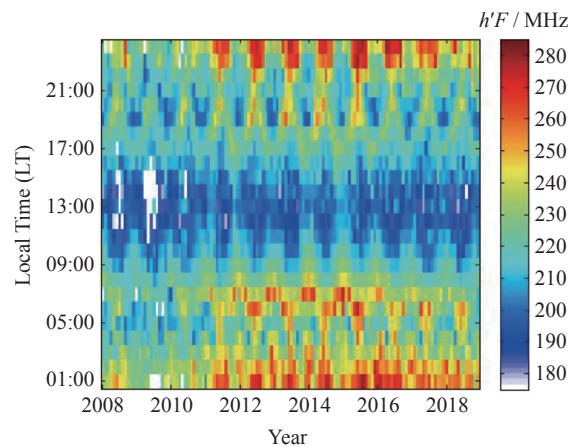


图 8 曲靖地区 2008—2018 年 $h'F$ 月中值

Fig. 8 Monthly median of Qijiang $h'F$ from 2008 to 2018

夜间高、白天低的趋势,最大值出现在 01:00 LT,最小值出现在 12:00 LT,在日出 06:00 LT 附近有一个突然上升现象,在日落 20:00 LT 附近有一个突然下降现象。 $h'F$ 随季节变化显著,最大值出现在 5 月份,最小值出现在 2 月份,整体呈现出夏季最高、春秋分季次之、冬季最低的趋势。

1.8 参数 MUF(3000) F_2

图 9 为曲靖地区 2008—2018 年 MUF(3000) F_2 的月中值。从图 9 可知,曲靖 MUF(3000) F_2 数值范围为 5~57 MHz。经计算,MUF(3000) F_2 与 $F_{10.7}$ 相关系数为 0.8574,表明 MUF(3000) F_2 与太阳活动周期变化相关性较高,太阳活动高年大,太阳活动低年小。MUF(3000) F_2 在全天时段内变化,最大值出现在 16:00 LT,最小值出现在 06:00 LT,白天数值远大于夜晚,数值范围在 7~36 MHz 之间。MUF(3000) F_2 随季节变化显著,春秋分季较大,冬季最小,夏季次之。

2 结果对比与机理分析

从上文可知, $f_{\min}$, f_0E_s , $h'E_s$ 与太阳活动变化趋势相关性不一致, f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$,MUF(3000) F_2 与太阳活动变化具有一致性。 $f_{\min}$ 为电离层垂直探测最小频率(也称起始观测频率),与电离层 D 区电子密度、垂直探测仪技术性能(例如灵敏度)、短波背景电磁环境等有关。因此, $f_{\min}$ 可一定程度上反映 D 区电子密度的强弱,由于电离层 D 区电子密度主要受太阳 X 射线辐射影响,而 $F_{10.7}$ 指数为太阳 10.7 cm 电

磁辐射流量,因此 $f_{\min}$ 未显示与太阳 10.7 cm 变化的相关性。 f_0E_s 一般认为由风剪切形成^[7],并受金属离子密度、潮汐、行星波和重力波等因素影响^[8,9]。因此, f_0E_s 不随太阳活动周期性变化。电离层 E 层与 F 层主要受太阳活动影响,包括太阳电磁辐射引起的光化学过程与光致电离等,因此 f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$,MUF(3000) F_2 与太阳活动周期变化特征一致。

与乌鲁木齐地区^[4]对比分析发现,曲靖地区 f_0F_2 日中值变化趋势与乌鲁木齐地区相似,不同之处在于曲靖地区最大值出现在 14:00—19:00 LT,最小值出现在 06:00 LT,而乌鲁木齐地区最大值出现在 12:00 LT,最小值出现在日出前 04:00 LT, f_0F_2 随月份变化与乌鲁木齐地区相似均呈现双峰结构,不过曲靖地区主峰在 3 月份,乌鲁木齐地区主峰在 4 月份。曲靖地区 $h'F$ 日中值变化趋势与乌鲁木齐地区相似,但曲靖地区 $h'F$ 在 06:00 LT 有一个突然上升,在 20:00 LT 有一个突然下降, $h'F$ 随月份变化趋势与乌鲁木齐地区相似,但曲靖地区 $h'F$ 在 2 月份取得最小值,5 月份取得最大值,乌鲁木齐地区 $h'F$ 在 3 月份取得最小值,6 月份取得最大值。曲靖地区 f_0E_s 日中值变化与乌鲁木齐相似均呈单峰结构,不同之处在于曲靖地区最小值出现在 03:00 LT 最大值出现在 13:00 LT,乌鲁木齐地区最小值出现在 04:00 LT,最大值出现在 11:00 LT。 f_0E_s 随月份变化趋势与乌鲁木齐地区相似,但曲靖地区在 7 月份和 11 月份都有一个突然上升现象。电离层参数 f_0F_2 , $h'F$, f_0E_s 在曲靖地区与乌鲁木齐地区随地方时和月份变化趋势相同,只是极值出现的地方时和月份有所不同,这可能与乌鲁木齐位于中纬,曲靖地区位于中低纬云贵高原同时受青藏高原地形影响等因素有关,该方面研究需要更多的数据以及机理分析。

与拉萨地区^[5]研究结果的对比分析可以看出,曲靖地区 f_0F_2 日中值变化趋势与拉萨地区相似,不同之处在于曲靖地区最大值出现在 14:00—19:00 LT,最小值出现在 06:00 LT,而拉萨地区最大值出现在 14:00 LT,最小值出现在日出前 05:00 LT。 f_0F_2 随月份变化与拉萨地区相似,均呈现双峰结构,不过曲靖地区主峰在 3 月份次峰在 9 月份,拉萨地区主峰在 4 月份次峰在 10 月份。曲靖地区 $h'F$ 日中值变化趋势与拉萨地区相似,不同之处在于曲靖地区在 06:00 LT 有一个突然上升,而拉萨地区在 04:00 LT

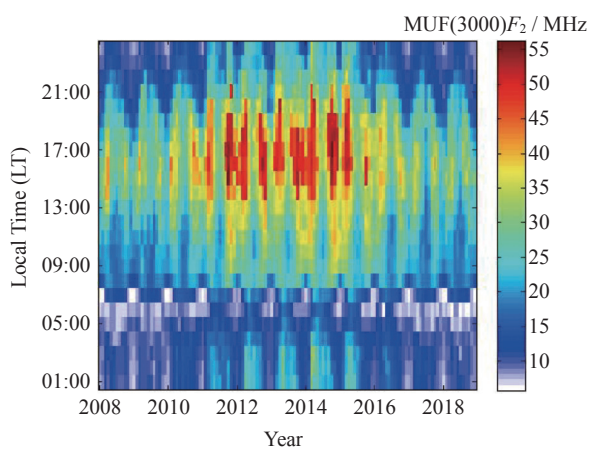


图 9 曲靖地区 2008—2018 年 MUF(3000) F_2 月中值
Fig. 9 Monthly median of Qijiang MUF(3000) F_2
from 2008 to 2018

有一个突然上升, $h'F$ 随月份变化趋势与拉萨地区相似, 但曲靖地区 $h'F$ 在 2 月份取得最小值, 5 月份取得最大值, 拉萨地区 $h'F$ 在 11 月份取得最小值, 6 月份取得最大值。曲靖地区 f_0E_s 日中值变化与拉萨相似, 均呈单峰结构, 与曲靖地区最小值出现在 03:00 LT 而最大值出现在 13:00 LT 不同, 拉萨地区最小值出现在 04:00 LT, 最大值出现在 11:00 LT。 f_0E_s 随月份变化趋势与拉萨地区相似, 但曲靖地区在 7 月份和 11 月份都有一个突然上升现象。同时, 曲靖地区 f_0E_s 在 1 月份取得最小值, 拉萨地区 f_0E_s 在 12 月份取得最小值。电离层参数 f_0F_2 , $h'F$, f_0E_s 在曲靖地区与拉萨地区随地方时和月份变化趋势相同, 只是极值出现的地方时和月份有所不同, 这可能与两地的经纬度和地形等因素有关, 该方面的研究需要更多的数据以及机理分析。

曲靖地区 $h'F$ 夜间大于白天, 并且在日出日落时段 $h'F$ 有突然上升现象, 冬季的 $h'F$ 一般都小于其他季节, 以上结论与 Wang 等^[6] 的研究结果一致。 $h'F$ 夜间大于白天是因为 $h'F$ 反映了电离层从分子离子(NO^+ , O_2^+)层到原子氧离子(O^+)稠密层的过渡, 在夜间随着太阳电离辐射作用降低, 分子离子层逐渐减弱甚至消失, 过渡区域抬高。因此, $h'F$ 上升。日出日落时段 $h'F$ 先上升后下降现象可能是因为此时电离层 F 层底部面临的太阳电磁辐射剧烈变化, 从而引起电子产生率和分子离子-原子离子过渡高度的变化所致。

曲靖地区 f_0F_2 与 $\text{MUF}(3000)F_2$ 中值变化特征相似, $\text{MUF}(3000)F_2$ 白天值高于夜晚值, $\text{MUF}(3000)F_2$ 春秋分季高于夏冬季, 太阳活动高年日落后 $\text{MUF}(3000)F_2$ 一直维持较高值并持续到 03:00—04:00 LT, 以上结论与 Chen^[10] 的研究结果一致。 $\text{MUF}(3000)F_2$ 由 F_2 层临界频率 f_0F_2 与传播因子 $\text{MUF}(3000)F_2$ 相乘得到, f_0F_2 与 $\text{MUF}(3000)F_2$ 中值变化特征相似, 说明 $\text{MUF}(3000)F_2$ 主要由 f_0F_2 确定。 $\text{MUF}(3000)F_2$ 白天值高于夜晚值是由于地球相对于太阳自转进而会对电离层产生显著影响, 电离成分在白天增加而在夜间减少。 $\text{MUF}(3000)F_2$ 春秋分季高于夏冬季, 可能是因为白天等离子体漂移在春秋分季高于夏冬季, 强的漂移使更多的电子被输运到台站上空所致。

Ding 等^[11,12] 和 Liu 等^[13] 利用曲靖地区非相干散射雷达数据分析发现曲靖地区电离层电子密度存在

日落增强现象, 认为与日落时电离层西向电场反转增强等有关。图 7 表明, 曲靖地区经常性出现日落电子密度增强现象, 这与此结论基本一致。电离层日落增强现象主要与地磁场、中性风、等离子体扩散以及青藏高原大气环流和底层大气动力学等因素相关, 对于该现象的具体成因需要开展进一步机理分析。

3 结语

利用电波环境观测网曲靖地区垂测仪数据, 统计分析了 2008—2018 年的电离层参数变化特征, 得出各个参数随年份、月份、地方时的变化规律, 并对结果进行了分析讨论, 主要结果如下。

(1) $f_{\min}$ 主要受太阳 X 射线影响, 所以与太阳 10.7 cm 电磁辐射流量变化不一致; f_0E_s 主要受风剪切、金属离子密度、潮汐、行星波和重力波等因素影响, 所以不随太阳活动周期性变化。

(2) 从季节分布看, $f_{\min}$, f_0E_s , f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'F$, $\text{MUF}(3000)F_2$ 均在冬季最小; $f_{\min}$, f_0E_s , f_0E , $h'F$ 在夏季最大, 春秋分季次之; f_0F_1 , f_0F_2 , $\text{MUF}(3000)F_2$ 在春秋分季最大, 夏季次之。其中, f_0F_1 秋分季高于春分季, 而 f_0F_2 和 $\text{MUF}(3000)F_2$ 春分季高于秋分季, f_0F_2 经常出现日落增强现象。

(3) f_0F_2 , $h'F$, f_0E_s 参数在曲靖地区与乌鲁木齐^[4]、拉萨地区^[5] 变化趋势大致相同, 但在个别极值出现的位置与时间点有所不同, 这可能与两个地区的地理位置不同有关。

(4) $h'F$ 夜间大于白天, 在日出有突然上升现象, 日落有突然下降现象, 冬季的 $h'F$ 一般都小于其他季节, 与 Wang 等^[6] 结论一致, 但本文补充了在夏季最高的结论。

(5) $\text{MUF}(3000)F_2$ 与 f_0F_2 的变化特征相似, 白天值高于夜晚值, 春秋分季高于夏冬季, 太阳活动高年日落后 $\text{MUF}(3000)F_2$ 一致维持较高值并持续到 03:00—04:00 LT, 这与文献^[10] 结论一致, 本文对其中的机理特征进行了分析。

下一步将结合电离层模型深入分析曲靖地区电离层变化特征的物理机理, 以提升对中国中低纬过渡区电离层变化特征的认知水平。

致谢 本文所用电离层数据来自中国电波传播研究所信息中心。

参考文献

- [1] XIONG Bo, WAN Weixing, LIU Libo, *et al.* Seasonal variation of the ionospheric total electron content, maximum electron density and slab thickness over Wuhan[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2007, **27**(2): 125-131 (熊波, 万卫星, 刘立波, 等. 武汉地区电离层TEC和 $N_m F_2$ 及板厚的季节变化[J]. *空间科学学报*, 2007, **27**(2): 125-131)
- [2] ZUO Xiaomin, WAN Weixing. The correlation between sporadic E-layers and solar activity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, **45**(6): 759-765 (左小敏, 万卫星. 电离层突发E层与太阳活动的相关性[J]. *地球物理学报*, 2002, **45**(6): 759-765)
- [3] ZHAO Haisheng, XU Zhengwen, WU Zhensen, *et al.* Sporadic E morphology of East Asia[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(1): 38-45 (赵海生, 许正文, 吴振森, 等. 东亚地区Es特性研究[J]. *空间科学学报*, 2014, **34**(1): 38-45)
- [4] ZHAO Haisheng, WU Zhensen, XU Zhengwen, *et al.* Long-term ionospheric characteristics over Urumqi[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(4): 398-405 (赵海生, 吴振森, 许正文, 等. 乌鲁木齐地区电离层环境长期变化特性研究[J]. *空间科学学报*, 2014, **34**(4): 398-405)
- [5] GAO Jingfan, ZHAO Haisheng, XU Zhaohui, *et al.* Long-term ionospheric characteristics over Lhasa[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, **33**(6): 701-707 (高敬帆, 赵海生, 徐朝辉, 等. 拉萨地区电离层长期变化特性研究[J]. *电波科学学报*, 2018, **33**(6): 701-707)
- [6] WANG Ning, GUO Lixin, ZHAO Zhenwei, *et al.* Analyzing peak height and thickness variation characteristics of ionospheric F-layer at middle and low latitudes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(4): 1268-1275 (王宁, 郭立新, 赵振维, 等. 中低纬电离层F层峰高和厚度的变化特征分析[J]. *地球物理学报*, 2017, **60**(4): 1268-1275)
- [7] AXFORD W I, CUNNOLD D M. The wind-shear theory of temperate zone sporadic E [J]. *Radio Science*, 1966, **1**(2): 191-197
- [8] DING Zonghua, WU Jian, SUN Shuji, *et al.* The variation of ionosphere on some days before the Wenchuan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, **53**(1): 30-38 (丁宗华, 吴健, 孙树计, 等. 汶川大地震前电离层参量的变化特征与分析[J]. *地球物理学报*, 2010, **53**(1): 30-38)
- [9] WHITEHEAD J D. Production and prediction of sporadic E[J]. *Reviews of Geophysics*, 1970, **8**(1): 65-144
- [10] Chen Chun. Study on short-term and storm-time forecasting the critical frequency of the ionospheric F₂ layer[D]. Xidian University, 2010 (陈春. 电离层F₂层临界频率的短期和暴时预报研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010)
- [11] DING Zonghua, YU Lang, DAI Liandong, *et al.* The preliminary measurement and analysis of the power profiles by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3564-3569 (丁宗华, 鱼浪, 代连东, 等. 曲靖非相干散射雷达功率剖面的初步观测与分析[J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(11): 3564-3569)
- [12] DING Z H, WU J, XU Z W, *et al.* The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 87
- [13] LIU L B, DING Z H, LE H J, *et al.* New features of the enhancements in electron density at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2020, **125**(2): e2019JA027539