0254-6124/2022/42(3)-0376-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHU Pinjie, TENG Chenkemin, GU Shengyang, DOU Xiankang, LI Guozhu, XIE Haiyong. Seasonal Variation of the Sporadic E Layer over Wuhan and Its Dependence with Mesospheric Wind (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 376–382. DOI:10.11728/cjss2022.03.210406043

武汉突发 E 层的季节变化及其与中层风的关系*

朱品洁[1] 滕陈轲敏[1] 谷升阳[1]
窦贤康[1] 李国主[2] 解海永[2]

1(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘 要 通过对 2018 年武汉站（114.61°E，30.53°N）数字测高仪记录的数据统计分析，研究武汉地区突发 E 层的特征。研究发现：2018 年武汉地区电离层突发 E 层的临界频率在夏季最高，在冬季有一个次增强现象，在春秋季较低；在正午前最大，在日落后出现小幅度提升，在日出前最低。利用指定动态全球大气气候扩展模型 SD-WACCM-X 模拟出 2018 年武汉上空 90～140 km 高度的平均风场，探讨突发 E 层与背景风之间的关系，揭示突发 E 层的形成机制。结果表明，半日潮汐分量可能诱导突发 E 层临界频率的半日变化，周日潮汐分量诱导突发 E 层临界频率的周日变化；突发 E 层的强度可能与纬向风场 120 km 高度处的风剪切有关。

关键词 突发 E 层，大气风场，季节变化，风剪切，周日潮汐，半日潮汐

中图分类号 P353

Seasonal Variation of the Sporadic E Layer over Wuhan and Its Dependence with Mesospheric Wind

ZHU Pinjie[1] TENG Chenkemin[1] GU Shengyang[1]
DOU Xiankang[1] LI Guozhu[2] XIE Haiyong[2]

1(*School of Electronic Information*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072)

2(*Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029)

Abstract Based on the statistical analysis of the dataset recorded by ionosonde at Wuhan station (114.61°E, 30.53°N) in 2018, characteristics of sporadic E layer over Wuhan area are studied. It is found that the critical frequency of sporadic E layer was the highest in summer, a secondary enhancement in winter, and it was very low in spring and autumn; and it was highest around noon, a secondary

* 国家自然科学基金项目资助（41874181，41831071）

2021-04-04 收到原稿，2022-02-12 收到修定稿

E-mail：zhupinjie11@163.com. 通信作者 谷升阳，E-mail：gushengyang@whu.edu.cn

enhancement at sunset and the lowest before sunrise. Using the specified dynamics Whole Atmosphere Community Climate Model-extended (SD-WACCM-X) to simulate the average wind field over Wuhan at a height of 90～140 km in 2018, to reveal the formation mechanism of sporadic E layer. The results show that the semi-diurnal tidal component may induce a semi-diurnal change in the critical frequency of the sporadic E layer, and the diurnal tidal component induces a diurnal change in the critical frequency of the sporadic E layer. It is also found that the intensity of the sporadic E layer may be related to the wind shear at a height of 120 km in the zonal wind field.

Key words Sporadic E layer, Mesospheric wind, Seasonal variation, Wind shear, Diurnal tide, Semi-diurnal tide

0 引言

电离层突发 E(Es)层是指出现在电离层 E 层上由金属离子构成的局部电离增强结构, 垂直厚度约为 0.5～5 km, 水平覆盖范围可达几十至几百千米。突发 E 层是电离层 E 层最显著的异常。

Es 层的分布具有昼夜变化、季节变化和太阳黑子周期变化的特征, 并随地理经纬度而异。在低纬及赤道地区, Es 层出现于白天, 季节差异不大; 在中纬地区, Es 层白天出现率高于夜晚, 夏季频发; 在高纬地区及极区, Es 层大多在夜晚出现, 且不受季节的影响。Smith[1] 发现中低纬度远东区域的 Es 层出现夏季异常现象, 相比于同纬度的其他区域, 该异常现象出现频率更高。Hocke 等[2] 提出, 在夏季半球的中低纬度地区观测到强 Es 主要发生在 90～110 km 的高度范围内。

对于中纬突发 E 层的形成机制, Dungey[3] 提出了风剪切理论, Whitehead[4] 和 Axford[5] 进一步发展和完善了该理论: 在电离层 E 层区域高度的中性风场由高层大气的水平气压梯度力形成, 由于存在地磁场, 这些被风驱动的带电粒子受到洛仑兹力的影响, 导致其在垂直方向上漂移, 上层的离子漂移到较低高度, 下层的离子漂移到较高高度, Es 层则由这些漂移运动的金属离子压缩形成。

通过大量的实验论证, 风剪切理论受到广泛认可。Jacobi 等[6] 将科尔姆风剪切相位与 Es 发生率相位进行比较, 发现风场的半日、1/3 和 1/4 潮汐分量风剪切相位分别与 Es 发生率的半日、1/3 和 1/4 周期分量相位之间具有良好的对应关系, 而风场的周日潮汐分量与 Es 发生率的 24 h 周期分量不对应。Liu 等[7] 研究了 Es 发生的统计特征及其与风切变的关系, 认为 Es 有明显的时间和空间变化特性, 在当地时间白天和日落后达到最大值; 在北半球(南半球)的冬季, 特别是在中纬度地区, 风剪切在 Es 的形成中起着重要作用。Wu[8] 数值模拟了 Es 时空分布, 发现风剪切在 Es 形成过程中起关键作用, 且 Es 出现的高度与风剪切的位置一致。

从 Es 形成的光化学角度看, 分子离子(O_2^+和 NO^+)和金属离子(Fe^+和 Mg^+)是讨论 Es 层时必须考虑的两个主要元素。Niu 等[9] 利用全天空流星雷达和数字测高仪联合观测数据研究发现, 流星雨期间大量流星雨电离产生 Es 层, 流星雨后沉积的金属离子在风剪切作用下形成 Es 层。Zhou 等[10] 认为中纬度电离层突发 E 层的发生随着地磁活动水平的增加而增加。Qiu 等[11] 发现大气北向电场在一定程度上对 Es 事件的发生有抑制作用, 并对 Es 层事件的发生高度有明显影响。此外, Liu 等[12] 发现在中低纬度夜间电离层中, E 区和 F 区之间存在电动力耦合, 并提出了突发 E(Es)层的观测证据。总之, 地磁活动、天气、流星雨、太阴潮汐、地震等都有可能对 Es 层产生影响, 其影响机制仍需进一步研究和分析。

Es 层电波传播是指基于 Es 层的超短波反射和散射传播。由于 Es 层是电离层 E 层上电离增强的结构, 其电子密度很高, 会影响无线电波的传播。高频信号在传播过程中由于不能穿透 Es 层而被反射或散射, 不能到达电离层 F 层, 因此阻碍了信号在电离层 F 层上传播。而 Es 层对超短波进行反射和散射, 增大了传输距离, 实现了信号远距离传输[13]。Zhang 等[14] 基于电离层 Es 层的电子密度时空分布特点, 建立高阶 Es 反射模型。Chen 等[15] 通过对中国夏季

Es 层对短波通信的影响进行分析，构建了 Es 传播模型。Wang 等[16] 提出了一种基于决策树算法的自动识别 Es 层回波的方法，以提高 Es 层识别效率。

中国很多山区、河流、沙漠、戈壁滩等地区的通信受环境限制，在信息发达的时代，远程通信的需求更加迫切。而中国大部分地区处于北半球中纬度，Es 层发生率高，且 Es 层强度也高，这意味着 Es 层出现频繁且 Es 层较厚，信号不易穿透，更利于超短波的传播。因此，基于 Es 层电波传播的远程超短波通信将解决这一难题。但是 Es 层具有突发性且其形成机制尚未明确，不能提供稳定的通信条件，因此对 Es 层的变化特性、形成机制及其与中层风的关系的探讨对超短波通信具有深远的意义。

本文统计了 2018 年武汉地区电离层 Es 层的临界频率和虚高并研究其季节特征，利用指定动态大气通用气象扩展模型 SD-WACCM-X 模拟出 90～140 km 高度的平均风场，分析 Es 与背景风的关系。

1 数据与分析方法

1.1 Es 层数据处理

电离层数字测高仪是观测电离层的常规仪器。Es 层参数主要有临界频率 f_0E_s、虚高 $h'E_s$ 等。临界频率 f_0E_s 为 Es 层能够反射 O 波的最大频率，与最大电子密度相对应，该参数可以代表 Es 的强度。武汉站测高仪每 15 min 进行观测，本文选取 2018 年 f_0E_s 整点数据统计分析，其中每月 f_0E_s 的取值是该月内各地方时的中位数，即每月的 f_0E_s 是包含 24 个数据的集合，一共 12 个月。对 Es 层的虚高 $h'E_s$ 和常规 E 层的临界频率 f_0E 也进行同样处理。

1.2 风场数据来源及处理

由中性风场驱动的离子垂直运动速度可以表示为

$$w = \frac{rU\cos I + V\sin I\cos I}{1+r^2}. \tag{1}$$

其中，U 和 V 分别为中性风场纬向和经向分量，I 为磁倾角，r 为离子–中性成分碰撞频率与离子回旋频率之比。120 km 以下，r 远大于 1，所以该区域内 w 由式(1)中纬向风场决定，西向(东向)风场导致离子向下(向上)漂移；120 km 以上，离子回旋频率不变，而由于中性成分随高度呈指数衰减，碰撞频率迅速下降，导致 r 远小于 1，该区域内 w 由经向风场决定，北向(南向)风场导致离子向下(向上)漂移[17]。

Es 层一般出现在 90～130 km 高度，而流星雷达风场探测的高度在 80～100 km，其无法探测到更高高度的风场。到目前为止，没有对 100～140 km 风场进行连续探测的观测设备。而基于全大气层耦合模式的数据同化，能够提供中高层大气最接近真实状态的风场信息，有效弥补观测数据的不足。本文利用 SD-WACCM-X 模型对 90～140 km 高度的风场进行数值模拟，搭建 WACCM-X 运行环境，对中高层大气真实状态进行模拟，提供 90～140 km 高度的风场信息，探讨武汉中性风场与 Es 形成机制的关系。

WACCM-X 是美国国家大气研究中心 NCAR 建立的一种综合性大气数值模式。WACCM-X 是整个大气层的模型，其延伸到热层约 500～700 km 的高度，并包括电离层。WACCM-X 模式包含对流层、平流层、中间层、热层等，不仅包含大气中性成分，也包含大气电离成分。该模型使用 NCAR 的通用地球系统模型 CESM (The Community Earth System Model)作为通用数值，将高层大气模型 HAO，中层大气模型 ACOM 以及对流层模型 CGD 结合在一起。WACCM-X 可用于模拟特定事件，方法是使用气象数据分析观测值来约束模型，在下边界使用指定的海面温度，并重建历史时期的光谱辐照度。Sassi 等[18] 将该模型配置称为指定的动态 WACCM-X(SD-WACCM-X)。

SD-WACCM-X 全球风场模型在 80 km 以下采用了 MERRA2 再分析数据进行约束，模型结果更加准确，可信度更高。纯粹的理论模型不能够很好地对中高层大气的实际状况进行模拟，而基于卫星观测数据同化，不仅保留了数值模式的多参数特性，而且使数值模拟结果更加贴近于真实大气状态。基于这些数据同化结果，进而计算出 E 层高度的背景风场及其梯度，并提取 E 层高度处风场的潮汐波动信息，深刻揭示 Es 的形成机制。Sassi 等[18] 对 2009 年冬季的平流层突然变暖(SSW)期间基于 SD-WACCM-X 提供的潮汐进行了详细讨论，发现对于迁移的周日潮(DW1)，在 100 km 附近显示出幅度的减小，这种行为与热带纬向平均涡度的变化有关。

SD-WACCM-X 模型水平分辨率为 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$(经度×纬度)。SD-WACCM-X 按气压分层，从海平

面到高度最大平面共分为 145 层。本文所研究的武汉 2018 年 90～140 km 区域约分为 23 层，高度分辨率约 1.5～4 km。SD-WACCM-X 模拟计算结果的时间分辨率为 1 h，每日 24 组数据，包含白天和晚上。

最小二乘法是提取中性大气风场中潮汐波动的有效方法，采用 4 天窗口向前滑动 1 天的谐波拟合方法，得到周日潮汐、半日潮汐的振幅。用于谐波分析的拟合函数为

$$y = A\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}\right)\right] + B\sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T}\right)\right] + C. \quad (2)$$

其中，t 为当地时间，y 为风场数据，T 为所研究的波动周期。本文 T 取 24 h 和 12 h。参数 A 和 B 用于计算潮汐波的波动幅度和相位，而 C 代表拟合窗口内背景风场的状态。通过最小二乘法拟合，确定系数 A，B 和 C，其中潮汐波的波动幅度和相位计算公式为

$$R = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(-\frac{B}{A}\right). \quad (4)$$

通过改变观测高度，计算在不同高度的潮汐幅度值，探讨潮汐高度与 Es 事件的相关性。通过改变周期 T 的值，对不同分量的潮汐波进行计算，来分析不同潮汐波分量对 Es 的贡献。

2 分析结果

2018 年武汉 Es 层临界频率(f_0E_s)的分布如图 1 所示。其中，每月 f_0E_s 的取值是该月内各地方时的中位数，即每月的 f_0E_s 是包含 24 个数据的集合。图 1(a) 为 f_0E_s 随季节和地方时的变化，可以明显看出：f_0E_s 的最大值出现在夏季中午，最高达 7 MHz；其他季节除中午外，f_0E_s 值也较低。图 1(b) 显示了武汉地区 12:00 LT 时 f_0E_s 的季节变化，可以看出：夏季 Es 强度明显高于其他季节，其中在 6 月达到最大；春秋季 f_0E_s 较低，在冬季有一个次要增强现象。图 1(c) 显示了武汉 6 月 f_0E_s 的日变化，可以看出：f_0E_s 有明显的昼夜不对称性，f_0E_s 在中午达到最大值，在日出前时段最小，在日落后出现次要增强现象。

Es 层主要出现于 90～130 km 高度上，武汉 2018 年 Es 层虚高的季节变化和日变化如图 2 所示。从图 2 中 $h'E_s$ 随月份和地方时的变化上看，$h'E_s$ 均呈现双峰结构。从图 2 (a) 12:00 LT 时 $h'E_s$ 的季节变

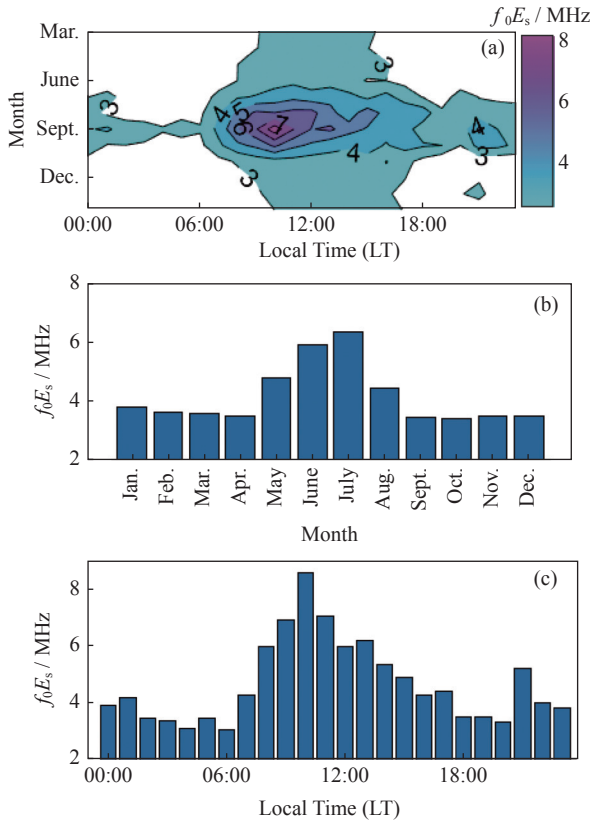


图 1 (a) 2018 年 Es 层临界频率 f_0E_s 随月份和地方时的变化，(b) 12:00 LT 时 f_0E_s 随月份的变化，(c) 6 月 f_0E_s 随地方时的变化

Fig. 1 (a) Variations of f_0E_s with month and LT, (b) variation of f_0E_s with month at 12:00 LT, (c) variation of f_0E_s with LT in June

化上看，武汉站点 Es 虚高呈现双峰结构，极大值出现在春季和冬季，秋季 Es 层出现高度明显低于其他季节。从图 2 (b) 6 月日变化上看，武汉站点 Es 虚高呈现双峰结构，极大值出现在日出时段，日落时段高度有小幅度的提升，白天以及午夜 Es 层出现在较低高度。大部分 Es 层出现在 120 km 以下。

3 讨论

3.1 Es 层与 E 层状态的相关性

2018 年武汉地区电离层 E 层临界频率(f_0E)的季节变化和日变化如图 3 所示。由图 3(a) 可以看出，武汉地区电离层 E 层临界频率的日变化和季节变化相比于 Es 层比较规律。由图 3(b) 可以看出，E 层临界频率的季节变化，夏季最高，春秋季次之，冬季最低。从图 3(c) 可以看出，E 层主要是日间现象，在 06:00—

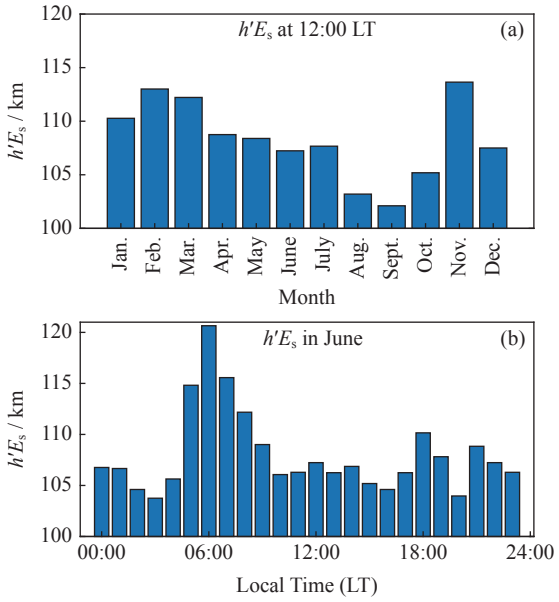


图 2 2018 年 Es 层虚高 $h'E_s$ 随月份和地方时的变化

Fig. 2 Variations of $h'E_s$ with month and LT in 2018

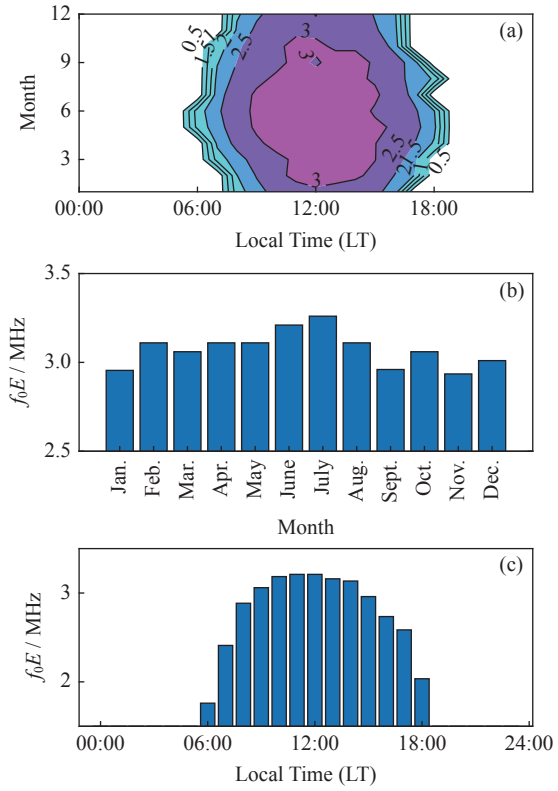


图 3 (a) 2018 年 E 层临界频率 f_0E 随月份和地方时的变化，(b) 12:00 LT 时 f_0E 随月份的变化，(c) 6 月 f_0E 随地方时的变化

Fig. 3 (a) Variations of f_0E with month and local time in 2018, (b) variation of f_0E with month at 12:00 LT, (c) variation of f_0E with local time in June

19:00 LT 时间段内出现，其临界频率在中午 12:00 LT 前后最高，在早晨和傍晚较低。上述结果与 Wang 等[19] 对海南地区 2002－2007 年的电离层 E 层临界频率的观测分析基本一致。

与电离层 E 层的临界频率相比，Es 层临界频率的日变化和季节变化更复杂，且临界频率的值更高。对比图 1 中武汉地区电离层 Es 层和图 3 中 E 层临界频率的季节变化和日变化特征。在季节变化上，Es 层和 E 层临界频率分布结构在夏季时最相似，二者的不同之处在于：f_0E 在冬季最低，而 f_0E_s 在春秋季最低，这可能是由于 f_0E_s 在冬季有一个小幅度增长的现象；相对于 f_0E，夏季的 f_0E_s 明显高出其他季节，最高频率为最低频率的 2 倍，而 f_0E 约为 1.1 倍。在日变化上 Es 层和 E 层临界频率分布相似之处是：白天的变化趋势都是先增大，在 12:00 LT 前后有最大值，然后再减小，在日出和日落时都较低；f_0E_s 的变化趋势更为陡峭。Es 层与 E 层最大的不同在于，E 层主要是日间现象，在 06:00－18:00 LT 时间段内出现，而 Es 层在夜晚也会出现，且在夜间 21:00 LT 时，f_0E_s 出现小幅度回升。此外，f_0E_s 值明显高于 f_0E，Es 层是 E 层中局部电离增强结构。

3.2 Es 层与潮汐波的相关性

Es 出现在 90～130 km 高度处，潮汐的影响不容忽视。通过分析风场中潮汐分量的季节变化，可以探究突发 E 层季节变化与周日潮汐和半日潮汐的关系。

利用 SD-WACCM-X 模型模拟出武汉 2018 年 90～140 km 高度处的风场，其时间分辨率为 1 h，每日 24 组数据。利用最小二乘法提取出纬向风场中的周日潮汐分量和半日潮汐分量的幅度，并进行月平均处理，如图 4 所示。由图 4 可以明显看出，纬向风场中的半日潮汐幅度远大于周日潮汐幅度，占主导地位。如图 4(a) 所示，纬向风场中的周日潮汐分量在冬季月份 110 km 高度处达到极大值，约 35 $m\cdot s^{-1}$。如图 4(b) 所示，纬向风场中的半日潮汐分量在夏季出现最大值，达 60 $m\cdot s^{-1}$。

Zuo 等[20] 统计得到 Fort Monmouth (40.4°N, 285.9°E) f_0E_s 数据频谱分布，其 24 h 和 12 h 周期十分明显，分析后认为 Es 层与大气潮汐风场相关。根据大量观测台站数据可知：低纬度地区 Es 出现率的周日变化是单峰结构，风场周日潮汐分量占主导；中

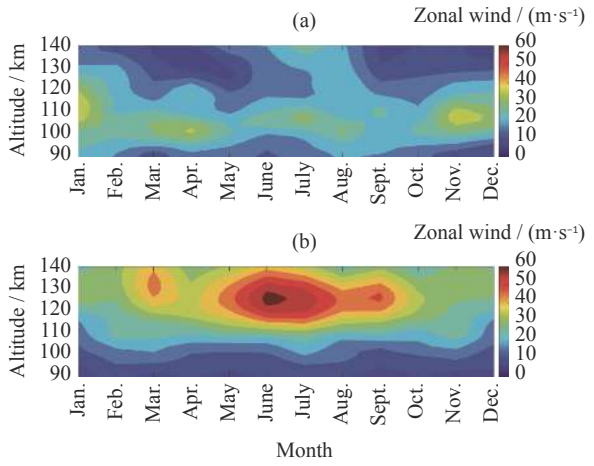


图 4 2018 年纬向风场周日潮汐分量 (a) 和半日潮汐分量 (b) 随月份的变化

Fig. 4 Variation of zonal wind diurnal (a) and semidiurnal (b) tides with month in 2018

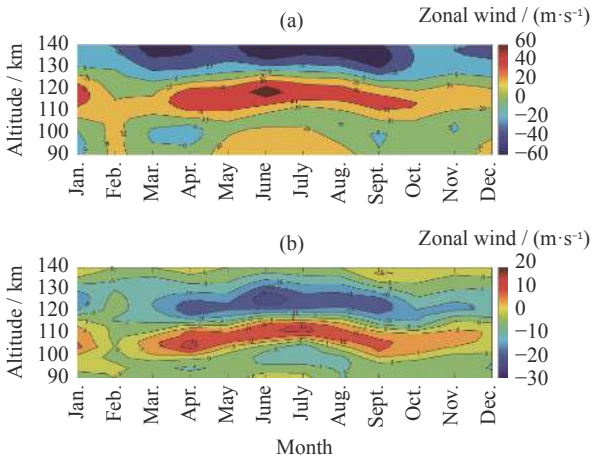


图 5 2018 年 12:00 LT 时 (a) 纬向风场和 (b) 垂直风剪切随月份的变化

Fig. 5 Variation of zonal wind (a) and the vertical shear (b) with month at 12:00 LT in 2018

纬度地区 Es 出现率的周日变化呈双峰结构, 半日潮汐分量占主导。这些结论证实了潮汐风场对 Es 的诱导作用。从图 4 可以看出, 纬向风场中半日潮汐占主导地位, 图 1 中 f_0E_s 日变化的双峰结构也证实了这一观点。Es 的强度出现双峰结构很大可能是半日潮汐分量引起的。从季节变化的角度来看: 图 1(a) 中 f_0E_s 的日变化在夏季表现为明显的双峰结构, 而冬季则表现为单峰结构; 而图 4 中夏季以半日潮汐分量占主导, 冬季以周日潮汐分量为主。这些结论进一步佐证了半日潮汐分量诱导 f_0E_s 的半日变化, 周日潮汐分量诱导 f_0E_s 的周日变化。

3.3 Es 层与背景风场的相关性

根据风剪切理论, 由式 (1) 可知 120 km 高度以下 Es 的形成由纬向风决定。因此本文着重分析纬向风场。从 SD-WACCM-X 模型模拟的 2018 年 90～140 km 高度处的纬向风场数据中选取 12:00 LT 时的数据进行月平均, 并计算对应风场的高度梯度。图 5(a) 为纬向风场随季节的变化, 其中东向风为正, 西向风为负。图 5(b) 为 12:00 LT 时纬向风场的高度梯度随季节的变化。由图 5(a) 可以看出, 在 120 km 下方出现较强的东向风, 130 km 上方出现较强的西向风, 这一现象满足风剪切理论, 即西向(东向)风场导致离子向下(向上)漂移。由图 5(b) 可看出, 在约 120 km 高度夏季东向风强度最强, 相应地在 120 km 形成的风剪切最强, 在冬季也出现了较强的风剪切。结合图 1 中约 120 km 高度处形成的风剪切与 Es 强度在季节变化上有相同的特征, 可知 Es 层的强度与纬向风场 120 km 高度的风剪切有一定的相关性。

4 结论

2018 年武汉地区电离层突发 E 层的临界频率具有季节单峰特征, 夏季最大; 日变化上呈双峰结构, 中午最大, 日落后有一个次要增长。Es 层大多出现在 100～110 km 高度处。

在季节变化上, 电离层 E 层的临界频率在冬季最低, 而电离层突发 E 层的临界频率在春秋季最低, 这可能是由于电离层突发 E 层的临界频率在冬季有一个小幅度增长的现象。在日变化上, 电离层 Es 层与 E 层临界频率白天的变化趋势相同, 不同之处在于 E 层主要是日间现象, 而 Es 层在夜晚也会出现, 且其在夜间出现小幅度回升。

电离层突发 E 层临界频率的日变化在夏季表现为明显的双峰结构, 而冬季则表现为单峰结构; 纬向风场在夏季以半日潮汐分量为主, 冬季以周日潮汐分量为主。这些发现进一步佐证了风场半日潮汐分量诱导 f_0E_s 的半日变化, 周日潮汐分量诱导 f_0E_s 的周日变化。

在约 120 km 高度处形成的风剪切在夏季最强, 在冬季也出现了较强的风剪切, 在春秋季较弱, 与 Es 强度随季节变化的特征相同, Es 层的强度与纬向风场 120 km 高度处的风剪切有一定的相关性。

致谢 Es 数据是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观测得到，由国家地球系统科学数据中心–地球物理分中心提供。本论文的数值计算得到了武汉大学超级计算中心的计算支持和帮助。

参考文献

[1] SMITH E K. Worldwide Occurrence of Sporadic E[M]. United States: National Bureau of Standards, 1957

[2] HOCKING W K, FULLER B, VANDEPEER B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(2/3): 155-169

[3] DUNGEY J W. Cosmic Electrodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1958: 167-168

[4] WHITEHEAD J D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-*E*[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1989, **51**(5): 401-424

[5] AXFORD W I. The formation and vertical movement of dense ionized layers in the ionosphere due to neutral wind shears[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, **68**(3): 769-779

[6] JACOBI C, ARRAS C. Tidal wind shear observed by meteor radar and comparison with sporadic E occurrence rates based on GPS radio occultation observations[J]. *Advances in Radio Science*, 2019, **17**: 213-224

[7] LIU Y, ZHOU C, TANG Q, *et al*. The seasonal distribution of sporadic E layers observed from radio occultation measurements and its relation with wind shear measured by TIMED/TIDI[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **62**(2): 426-439

[8] WU Jinnan. Simulation and Observation of the Low and Middle Latitude Ionospheric E Region Irregularity[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019

[9] NIU Xiaojuan, XIONG Jiangang, WAN Weixing, *et al*. Relationship between the meteor showers and the occurrence of sporadic E over Wuhan[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(2): 105-111 (牛晓娟, 熊建刚, 万卫星, 等. 武汉上空偶发E层与流星雨的联系[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(2): 105-111)

[10] ZHOU C, TANG Q, SONG X X, *et al*. A statistical analysis of sporadic E layer occurrence in the midlatitude China region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(3): 3617-3631

[11] QIU Shican, WANG Xingjin. Correlation between atmospheric electric fields overturning and mesospheric sporadic thin layers[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, **43**(2): 356-365 (邱世灿, 王兴金. 大气电场倒转与突发钠层及突发E层的相关性[J]. 地球科学与环境学报, 2021, **43**(2): 356-365)

[12] LIU Y, ZHOU C, TANG Q, *et al*. Evidence of mid- and low-latitude nighttime ionospheric E–F coupling: coordinated observations of sporadic E layers, F -region field-aligned irregularities, and medium-scale traveling ionospheric disturbances[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(10): 7547-7557

[13] WANG Xiaobin, MA Zhengzheng, ZHANG Yabin. Statistical analysis on characteristics of Es in Qingdao region[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, **29**(5): 969-972,993 (王晓宾, 马征征, 张雅彬. 青岛地区电离层Es特征统计分析[J]. 电波科学学报, 2014, **29**(5): 969-972,993)

[14] ZHANG Yabin, WU Jian, XU Zhengwen, *et al*. Radio propagation model of ionospheric sporadic E[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(1): 55-61 (张雅彬, 吴健, 许正文, 等. 电离层Es电波传播模型研究[J]. 空间科学学报, 2019, **39**(1): 55-61)

[15] CHEN Chun, YANG Ge, LIN Huijiao. Method for calculating Es field strength of HF bands in summer[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, **36**(2): 285-295 (陈春, 杨戈, 林惠娇. 夏季短波Es场强计算方法研究[J]. 电波科学学报, 2021, **36**(2): 285-295)

[16] WANG Sheng, ZHOU Chen, JIANG Chunhua, *et al*. Automatical scaling of Es layer echoes on ionograms[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(4): 432-441 (王胜, 周晨, 姜春华, 等. 频高图Es层回波的自动识别[J]. 空间科学学报, 2019, **39**(4): 432-441)

[17] WANG Guojun, SHI Jiankui, WANG Xiao. Tidelike periodicities of ionospheric sporadic E observed at low latitude Hainan station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(5): 501-508 (王国军, 史建魁, 王霄. 低纬(海南)地区电离层偶发E层的潮汐类周期研究[J]. 空间科学学报, 2013, **33**(5): 501-508)

[18] SASSI F, LIU H L, MA J, *et al*. The lower thermosphere during the northern hemisphere winter of 2009: A modeling study using high-altitude data assimilation products in WACCM-X[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16): 8954-8968

[19] WANG Shengguo, SHI Jiankui, WANG Guojun, *et al*. Variation of E layer over Hainan station[C]//National Security Geophysics Series (XIV) -- Resources, Environment and Geophysics. 2018

[20] ZUO Xiaomin, WAN Weixing, TAN Hui. Observational evidences and simulation of tide wind induced mid-latitude sporadic E-layers[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, **26**(5): 346-351 (左小敏, 万卫星, 谭辉. 大气潮汐风场诱导中纬突发E层的观测证据及理论模拟分析[J]. 空间科学学报, 2006, **26**(5): 346-351)

(责任编辑：孙伟英)