

HE Shimin, ZHANG Tiemin, CHAI Weiwei, ZHANG Yimin, YANG Dali, PENG Hongyan, WANG Jihong. Seasonal Variation Characteristics of Sodium Layer in Low Latitude by Lidar (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(1): 102–112. CSTR:32142.14.cjss.2024-0035. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024-0035

# 激光雷达观测研究低纬度地区 钠层季节变化特征\*

何诗敏<sup>1</sup> 张铁民<sup>1</sup> 柴薇薇<sup>1</sup> 张一民<sup>1</sup>  
羊大立<sup>1</sup> 彭鸿雁<sup>1</sup> 王继红<sup>2</sup>

1(海南师范大学物理与电子工程学院 海口 571158)

2(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

**摘要** 使用钠荧光激光雷达观测 2018—2019 年低纬度地区海口 (20.0°N, 110.3°E) 上空钠层变化规律, 统计分析了钠层密度分布与其季节变化特征以及特殊事件的季节变化特征, 发现海口钠层变化与季节之间有较大关联。钠层平均密度呈现基本对称的高斯分布特点, 柱密度和峰值秋冬季大, 峰值位置夏高秋低, 质心高度变化稳定, 半高全宽与均方根宽度秋季小冬季大。突发钠层事件 (Sporadic Sodium Layer, SSL) 随季节变化明显, 持续时间夏长春短, 峰值秋季大、春季小, 秋冬季峰值位置较高, 夏季突发强度最大, 除秋季外其他季节突发峰值多在后半夜。结合海南儋州 (19.5°N, 109.1°E) 测高仪数据, 结果显示海口地区发生在 97 km 以上的 SSL 与突发 E 层 (Es) 有较大相关性。低纬度地区冬季发生 SSL 的概率较高, 双钠层 (Double Sodium Layer, DSL) 多出现在春、夏季。

**关键词** 激光雷达, 钠层季节变化特点, 突发钠层, 电离层偶发, 双钠层

**中图分类号** P352

## Seasonal Variation Characteristics of Sodium Layer in Low Latitude by Lidar

HE Shimin<sup>1</sup> ZHANG Tiemin<sup>1</sup> CHAI Weiwei<sup>1</sup> ZHANG Yimin<sup>1</sup>  
YANG Dali<sup>1</sup> PENG Hongyan<sup>1</sup> WANG Jihong<sup>2</sup>

1(College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158)

2(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** Sodium lidar observations of sodium layer from 2018 to 2019 at a low-latitude location (Haikou, China, 20°N, 110.3°E) are reported in this paper. The purpose is to reveal characteristics of seasonal variations of the sodium layer, including density distribution characteristics, seasonal variation

\* 海南省自然科学基金项目资助 (121MS0770, 121RC535)

2024-03-10 收到原稿, 2024-05-09 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/>)

characteristics and special events of sodium layer. According to statistical analysis, there is a great correlation between the variation of sodium layer and seasons. Average density of sodium layer presents a basically symmetrical Gaussian distribution, with good morphological symmetry in autumn. Column density and peak value are small in spring and summer and vice versa in autumn and winter. Peak position is high in summer and low in autumn. There is no clear seasonal variation about the centroid height of the sodium layer. Full Width at Half Maximum (FWHM) and Root Mean Square (RMS) width of sodium layer are both small in autumn and large in winter. Sporadic Sodium Layers (SSLs) change obviously with seasons and the growth, decline and duration time are short in summer and long in spring. Peak value has the minimum in spring and maximum in autumn, respectively. Peak position tends to be higher during autumn and winter but lower during spring and summer. The intensity is the largest in summer. Except autumn, peak value of other seasons is mostly in the latter half of the night. With respect to the correlation with sporadic E, combining with the ionosphere data obtained by the nearest ionosonde at Danzhou, China (19.5°N, 109.1°E), there is a considerable correlation between sporadic E layers (Es) and SSLs above 97 km at low latitude, which is embodied in the time, height and intensity. By statistical analysis of special events, it is found that the probability of SSLs in winter is high and the Double Sodium Layer (DSL) mostly appears in spring and summer at Haikou.

**Key words** Lidar, Seasonal variations of sodium layer, Sporadic sodium layer, Sporadic E layer, Double sodium layer

## 0 引言

中高层大气存在的碱金属层处于 80~110 km 的高度, 与其他粒子具有复杂的物理、化学及动力学的相互作用. 利用金属层中浓度较高、散射截面大且最易被探测到的钠原子作为示踪物质, 钠荧光激光雷达成为一种研究钠层特性、监测大气活动和动力学过程的有效手段<sup>[1]</sup>. Bowman 等<sup>[2]</sup>首先使用激光雷达观测到钠层后, 对钠层研究不断深入; 近年为定性讨论钠层变化特点背后的机制提供更加全面的理论基础, 通过结合钠层和其他不同金属层 (例如钾层) 的观测对变化成因机制进行分析成为热点<sup>[3-5]</sup>. 突发钠层 (Sporadic Sodium Layer, SSL) 是指钠层在短时间内注入大量钠原子的显著现象, 1978 年 Clemesha 等<sup>[6]</sup>首次观测到这一现象并提出可能的形成机制. 然而, SSL 的形成机制在不同纬度、不同高度是不完全相同的. 各种解释的模型理论不断出现, 近几年对 SSL 的形成机制讨论不断深入<sup>[7,8]</sup>. Gong 等<sup>[9]</sup>首先对双钠层结构 (Double Sodium Layer, DSL) 进行研究, 认为双钠层结构是与正常钠层分开的第二个钠层, 一般出现在 110 km 以上, 但双钠层研究较少, 有待进一步丰富. SSL 和 DSL 涉及许多大气参数的变化, 对了解中高层大气各参数耦合过程具有重要意义.

本文利用子午工程海南 Na 激光雷达对低纬度地区海口 (20.0°N, 110.3°E) 钠层 2018—2019 年的观测数据, 通过算术平均和加权平均的办法拟合得到海口地区上空钠层形态、峰值、峰值高度、半高全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM)、柱密度、质心高度、均方根宽度等参量的变化特点, 同时对 SSL 和 DSL 进行统计分析得到钠层特殊事件的季节变化特征, 讨论 SSL 与电离层偶发 E 层 (Sporadic E, Es) 的相关性, 得出低纬度地区海口较为全面的季节变化特征, 丰富了低纬度地区的钠层变化研究.

## 1 观测与讨论

### 1.1 观测设备与数据

#### 1.1.1 观测设备

子午工程海南钠激光雷达 (20.0°N, 110.3°E) 是中国唯一的低纬度激光雷达观测站, 由激光发射单元、接收单元和数据采集与控制单元三部分组成. 其中, 激光发射单元由 Nd:YAG 激光器和泵浦染料激光器组成. Nd:YAG 激光器经过晶体倍频形成 532 nm 的发射激光, 染料激光器产生 589 nm 的激光, 经钠荧光室后形成探测光束. 激光器频率为 30 Hz, 能量为 42 mJ, 发散角为 1 mrad; 接收单元利

用视场角为 2 mrad, 主镜直径为 1000 mm 的望远镜接收钠层后向散射荧光光子, 通过带宽为 1 nm 的滤光片后, 经光电倍增管、前置放大器、光子计数器和计算机等数据采集与控制单元的处理部件, 对光电转换后的电信号进行放大、采集、累加平均和存储, 得到空间分辨率为 96 m 的激光雷达回波剖面数据. 子午工程一期的海南钠荧光激光雷达的重复频率为 50 Hz, 原始文件由 1000 个激光脉冲产生, 每一个数据文件的时间分辨率为 20 s. 表 1 列出海南钠荧光激光雷达的相关参数.

1.1.2 观测数据

选取 2018 年 1 月至 2019 年 12 月期间的钠原子原始光子回波数据进行数据反演, 钠层密度根据钠荧

光散射激光雷达方程得出. 为了提高结果的可靠性, 对原始回波信号进行筛选, 筛选条件是 70~120 km 的最大信号与 120 km 处信号 (即背景噪声) 的比值为 10, 即信噪比超过 10:1 为有效观测数据. 反演时对有效回波光子信号扣除背景噪声和平滑处理, 背景噪声选用 120~130 km 的平均值. 数据反演所获得的单条钠密度廓线的等效空间分辨率为 96 m, 等效时间分辨率为 2 min. 观测数据共计 231 个夜晚, 时长共计约 1681 h 的钠层观测数据作为研究钠层夜间变化和季节变化特征的基础, 详细分布如图 1 所示. 由于受天气影响, 某些月份数据欠缺, 尤其是 2019 年 3 月没有观测数据, 一定程度上将影响本文结果.

1.2 钠层季节变化特征

1.2.1 钠层密度随季节分布特征

分析了 2018—2019 年钠层观测数据, 利用形态变化、峰值变化、峰值位置变化、FWHM 变化说明平均钠层密度分布特征. 平均值按算术平均的办法进行计算, 计算过程中不剔除 SSL 事件. 图 2 给出 2018—2019 年内海口上空平均钠层绝对密度 (Average Absolute Density of Sodium Layer, ADSL) 的分布情况. 从图 2 可以看出: 海口地区 ADSL 分布呈现一种基本对称的高斯分布形态, 且上沿相较于下沿略微陡. 峰值高度为 92.8 km, 峰值为  $2457.5\text{ cm}^{-3}$ , FWHM 约为 10.75 km, 分布范围在 80~105 km. 与 Clemesha 等<sup>[10]</sup> 在低纬度地区 São José dos Campos (23°S, 46°N) 所报道的钠层平均形态基本相同, 与其

| 表 1 海口地区钠荧光激光雷达参数                                           |          |           |
|-------------------------------------------------------------|----------|-----------|
| Table 1 Main parameters of Na fluorescence lidars at Haikou |          |           |
| 组成部分                                                        |          | 参数        |
| 激光发射单元                                                      | 双波长/nm   | 532 / 589 |
|                                                             | 脉冲能量/mJ  | 42        |
|                                                             | 频率/Hz    | 50        |
|                                                             | 发散角/mrad | 1         |
| 接收单元                                                        | 望远镜直径/mm | 1000      |
|                                                             | 视场角/mrad | 2         |
|                                                             | 滤光片带宽/nm | 1         |
| 数据采集与控制单元                                                   | 空间分辨率/m  | 96        |
|                                                             | 时间分辨率/s  | 20        |

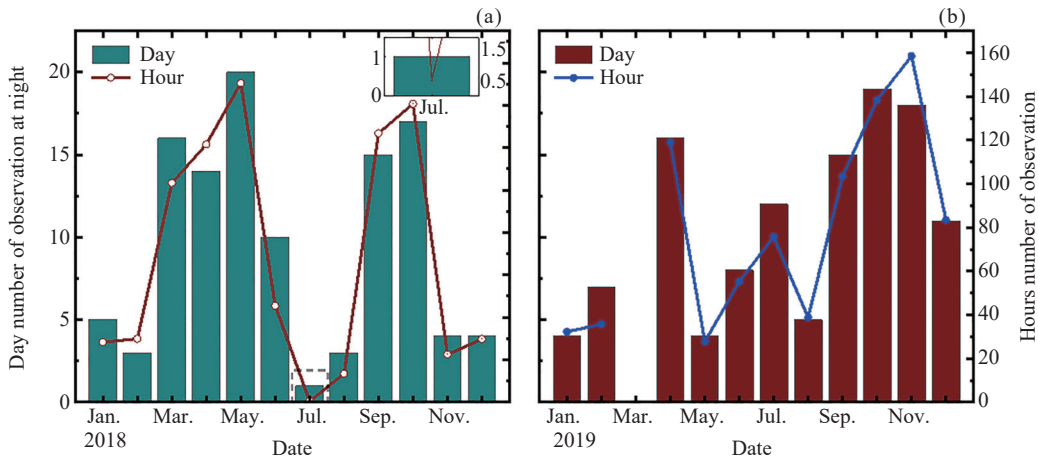


图 1 海口夜间激光雷达观测天数及其小时数的统计  
Fig. 1 Histograms of lidar observing nights and hours at Haikou

报道的峰值高度 92.5 km 基本接近. 测出的 ADSL 分布基本特点与中纬度地区武汉报道的结果也类似.

图 3 给出了钠层随月份变化的情况, 按 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12—2 月为冬季进行归类. 钠层密度最大值出现在秋季的 10 月, 并且相对于其他季节来说, 属于秋季 (9—11 月) 整体密度都较大, 而夏季 (6—8 月) 钠密度则较低.

图 4 给出了海口上空钠层分布及钠层密度峰值、峰值位置、FWHM 的季节拟合变化. 图 4(a) 分别给出了不同季节的平均钠层密度与 ADSL 的对比, 各个季节形态变化综合体现峰值、峰值高度和 FWHM 的变化: 夏、冬季呈现上沿比下沿明显陡峭的不对称高斯形态, 相对其他季节来说, 秋季的对称性较好.

从图 4(b) 发现海口上空的钠层密度分布有强烈的季节变化特点, 平均峰值呈现春夏季小, 而秋冬季大的特征; 秋季平均钠层密度峰值有最大值, 夏季最小. 四季的平均钠层密度峰值依次为 1964.4, 1564.4, 3128.3, 2475.6  $\text{cm}^{-3}$ , 不难发现, 秋冬季分别是夏季的 2 倍、1.58 倍; 与中纬度地区武汉冬夏季比值为 2 的结论相比, 海口的比值较低. 上述峰值变化特点通常认为是与钠层消失机制的主要中性化学反应  $\text{Na} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{NaO}_2 + \text{M}$  相关<sup>[11]</sup>, 该反应使得钠原子消失速率与温度负相关. 在中层顶区夏季温度较低, 因此钠原子消失的速度较大, 使得夏季平均密度峰值小, 冬季大. 而 Fan 等<sup>[12]</sup> 得出北半球的钠层密度最大值出现在 10—11 月, 也就是说秋季正常钠层平均密度较大, 另外在后面 SSL 的分析中, 发现海口

地区秋季 SSL 有突发峰值大的特点, 这两个特点也许能对秋季平均钠层密度峰值大的特点进行解释.

由图 4(a) 可见, 夏冬季平均峰值高度明显向上偏移; 由图 4(b) 可知, 平均峰值位置在 92~95 km 变化, 春秋两季的平均峰值位置接近且较低, 秋季具有最小值, 夏冬两季的平均峰值位置接近且较高, 与 Simonich 等<sup>[13]</sup> 研究的峰值位置随季节变化不明显的结论有所不同, 其背后的形成机制通常认为与低层热层的垂直风有关<sup>[10]</sup>. 平均 FWHM 呈现春秋小、夏冬大的变化特征, 秋季有最小值.

### 1.2.2 海口上空钠层的变化特征

在研究钠层的长期变化中, 由于质心高度和 RMS 宽度参数对较短波长的重力波和噪声的影响相对不敏感, 即使在相对嘈杂的激光雷达数据中, 这些参数也可以以较好的精度计算出来. 为了更精确表征钠层的总体特征, 常用柱密度、质心高度、RMS 宽度这三个参数分析钠层的变化特点. 图 4 散点给出了钠层的柱密度、质心高度、RMS 宽度的全年分布, 红色的实线是按钠层的柱密度、质心高度、RMS 宽度的月平均值进行季节变化分析的, 虚线用来划分了四季范围, 统计数据不扣除 SSL 事件. 各参数的平均值一律按加权平均的办法进行计算 (加权平均的规则: 每日的数值进行算术平均后, 得到的日平均值按每日小时数进行加权平均, 从而得到月平均值和季节平均值).

由图 5 可知, 2018 年和 2019 年的钠层柱密度极大值分别为  $8.3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  和  $6.17 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , 出现在 12 月 4 日和 10 月 27 日; 极小值分别为  $0.32 \times$

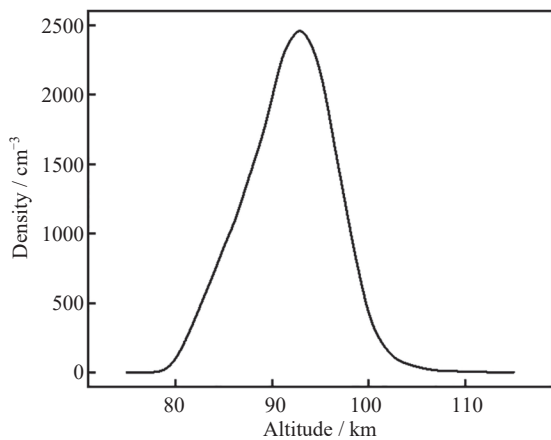


图 2 海口上空钠层两年平均密度廓线  
Fig. 2 Average density profiles of sodium layer over Haikou

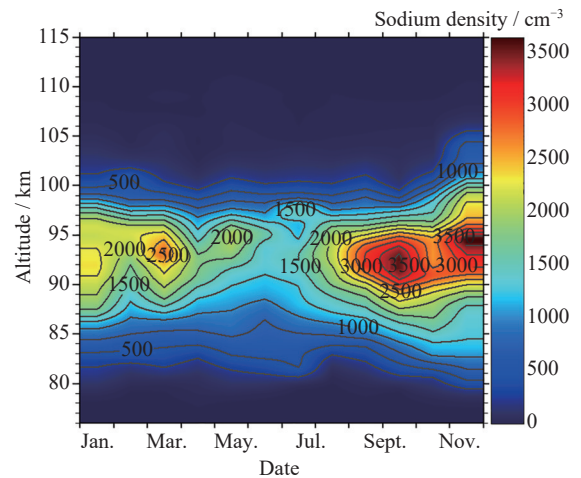


图 3 钠层月平均分布  
Fig. 3 Sodium layer monthly variation

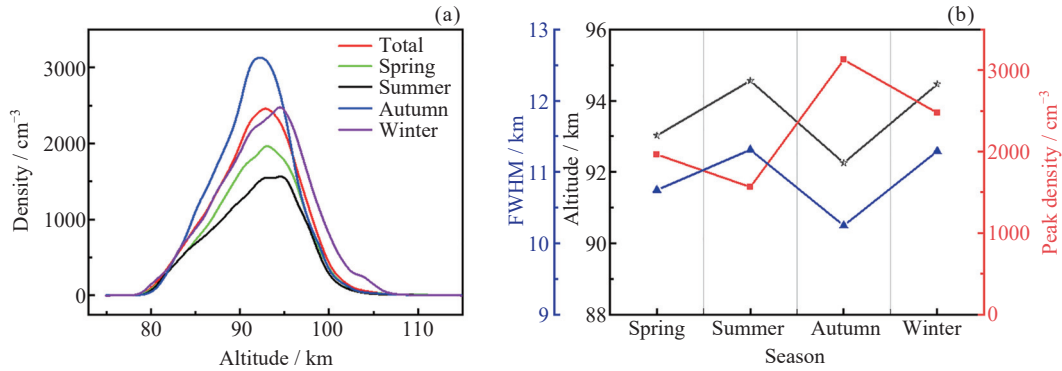


图 4 海口上空各季节的钠层平均钠密度分布与两年平均钠层密度分布的对比 (a) 及钠层密度峰值、峰值位置、FWHM 随季节变化 (b)

Fig. 4 Comparison between the seasonal average sodium density and ADSL distribution (a) and the seasonal fits to the data of sodium layer over Haikou (b)

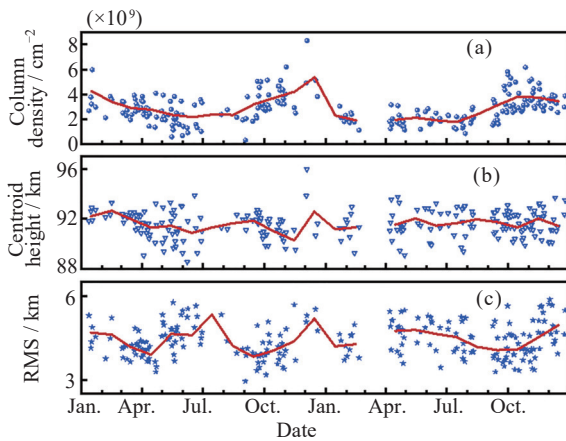


图 5 2018—2019 年海口上空钠层各参数的统计结果 (散点表示日平均值, 实线为参数月平均值的拟合曲线)

Fig. 5 Statistics of sodium layer from 2018 to 2019 over Haikou (Scatter represents the daily average, lines represent the mean parameter values in every month)

$10^9 \text{ cm}^{-2}$  和  $0.86 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , 出现在 9 月 3 日和 7 月 29 日. 同时根据图 5 钠层的月平均柱密度拟合曲线以及图 6 季节拟合曲线, 可以看出夏季到冬季海口上空钠层柱密度逐渐增大, 呈现冬季数值大、夏季数值小的季节周期性变化特点, 此特点与钠层峰值密度的变化特点相似, 也与其他低纬度激光雷达所观测的基本一致<sup>[3,13]</sup>.

2018 年和 2019 年的钠层质心高度极大值分别为 95.97 km 和 93.77 km, 出现在 12 月 4 日和 4 月 19 日, 两年内的极小值比较分散. 根据图 5 钠层的月

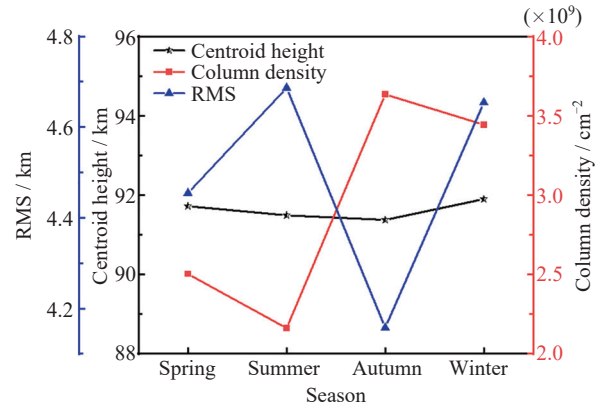


图 6 2018—2019 年海口上空钠层各参数的季节变化曲线

Fig. 6 Seasonal fits to the data of sodium layer from 2018 to 2019

平均柱密度拟合曲线以及图 6 的季节拟合曲线, 发现海口上空钠层的月平均质心高度在 90.2~92.7 km 变化, 季节平均质心高度在  $91.5 \pm 0.5 \text{ km}$  浮动, 变化相对稳定, 随季节变化较小. 与 Vishnu 等<sup>[14]</sup>报道的 Gadanki ( $13.5^\circ \text{N}$ ,  $79.2^\circ \text{E}$ ) 上空钠层平均质心高度的 92~93.7 km 的变化范围相比, 整体均值偏低.

2018 年和 2019 年的钠层 RMS 宽度极大值分别为 5.76 km 和 5.87 km, 出现在 5 月 18 日和 12 月 2 日, 极小值为 2.95 km 和 3.29 km, 出现在 9 月 3 日和 9 月 12 日. 根据钠层的月平均 RMS 宽度曲线显示, 从夏季到冬季, 先减小后变大, 秋季有最小值, 与钠层 FWHM 的变化规律相似.

结果显示三个参数的变化趋势与研究去除

SSL 的背景钠层<sup>[15]</sup> 所得到基本一致, 但柱密度的数值总体偏大. 对照 Simonich 和 Clemesha<sup>[16]</sup> 改进的分析结论, 他们发现当 SSL 的强度 (即峰值密度与背景密度平均值的比值) 小于 4 时不会影响长期钠密度平均值, 但当 SSL 强度大于 4 时, 会影响钠层柱密度的数值大小, 这说明本报道的观测数据中存在一定数量的强事件, 从而影响了柱密度, 也反映出了低纬度地区 SSL 的强度和频率都是相对较大的.

2 特殊事件的季节性变化特征

2.1 SSL 的季节性变化特征

2018 年 1 月至 2019 年 12 月期间海口上空钠层夜间观测天数共计 231 天. SSL 通常是指狭窄钠层密度在短时间 (通常在 5 min 左右) 迅速增至同一高度整夜平均背景钠层密度 2 倍以上的现象. SSL 事件的判断标准为: ① 同一高度下, SSL 的峰值密度增至观

测整夜平均背景钠层密度的 2 倍; ② FWHM 在 5 km 以内. 按照这一标准, 表 2 列出了相关天数统计, 有 45 天存在 SSL, 共计 73 件 SSL, 观测过程完整的 SSL 有 50 件, 可以看出相比其他季节, 低纬度地区夏季和冬季发生 SSL 的概率较高.

图 7 给出的是 2019 年 10 月 3 日海口激光雷达观测到的典型 SSL 事件. 图 7(a) 红线给出了夜间 SSL 峰值时刻的钠层密度廓线, 可以看到此 SSL 峰值高度为 99.65 km, 钠密度峰值强度达到  $10823\text{ cm}^{-3}$ , 钠层峰值宽度取半峰全宽 1.34 km. 图 7(b) 可以看出 SSL 在 21:20 LT—01:30 LT 的密度变化. 从 22:44 LT 开始, 99.65 km 附近钠层密度开始增强, 在 23:04 LT 达到峰值, 然后经过短暂的密度下降, 随后于 98.88 km 处再次突发, 在 00:07 LT 时钠层密度增强至  $13323\text{ cm}^{-3}$ , 此时 SSL 达到整夜最强.

图 8(a)~(d) 给出对 2018—2019 年完整 SSL 事件的相关统计. 图 8(a) 给出 SSL 增长时间、衰退时间

表 2 钠层突发事件的观测统计  
Table 2 Statistical chart of SSL observation in different seasons

| 季节 | 总钠层<br>观测天数 | SSL观测天数 | SSL产生概率/(%) | SSL件数 | SSL观测<br>过程完整件数 |
|----|-------------|---------|-------------|-------|-----------------|
| 春  | 70          | 9       | 12.86       | 16    | 14              |
| 夏  | 39          | 9       | 23.08       | 14    | 10              |
| 秋  | 88          | 18      | 20.45       | 33    | 22              |
| 冬  | 34          | 9       | 26.47       | 10    | 4               |
| 总计 | 231         | 45      | 19.91       | 73    | 50              |

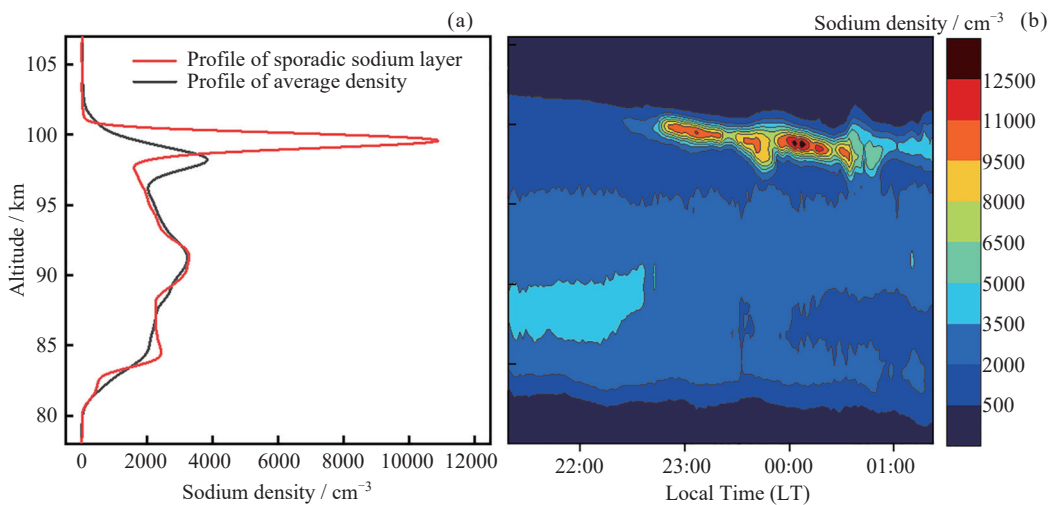


图 7 2019 年 10 月 3 日海口上空典型的强烈 SSL  
Fig. 7 An SSL event observed on 3 Oct. 2019 over Haikou

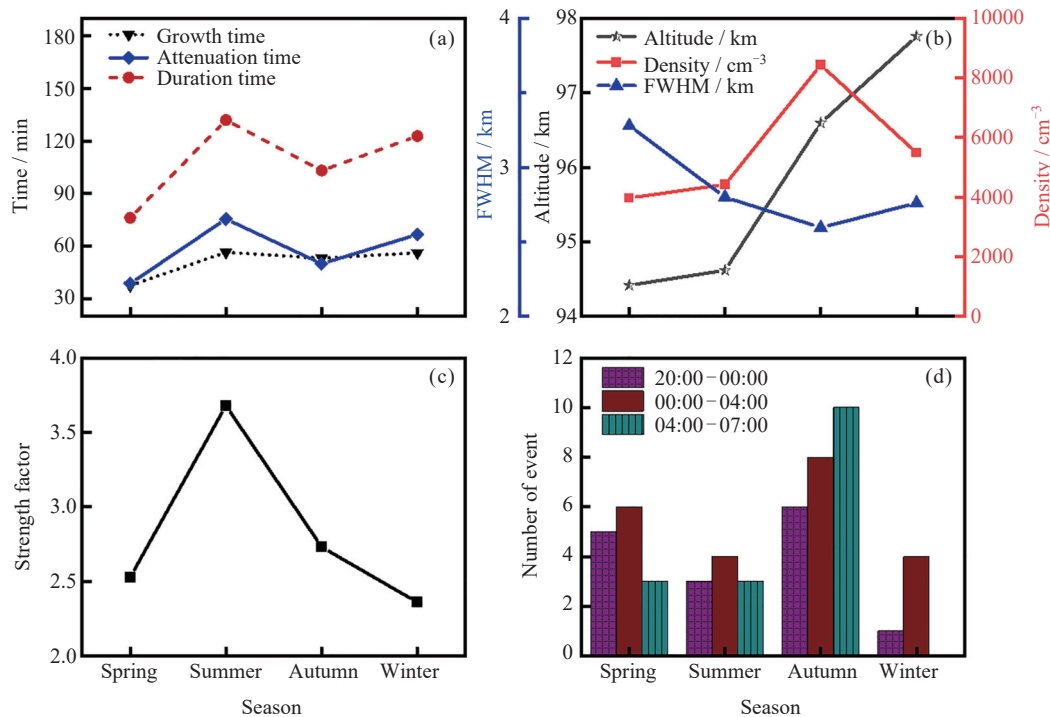


图 8 SSL 各参数随季节变化

Fig. 8 Seasonal variation curve of SSL

和持续时间随季节的变化, SSL 开始时刻指的是原钠层某一高度出现窄尖峰时, 增长时间为 SSL 开始时刻到其最大峰值时刻所经历的时间, 衰减时间为从 SSL 最大峰值时刻到消失经历的时间, 可以看出三者的季节性特征是基本一致的. 夏季较长, 春季短, 即春季易发生短暂的 SSL, 快速增至峰值后又快速衰减. SSL 的峰值、峰值位置和 FWHM 随季节的变化如图 8(b) 所示, 峰值在秋季有最大值, 春季有最小值; 秋冬季突发峰值位置高, 春夏季低; FWHM 在秋季有最小值, 说明秋季产生突发的高度范围小; 为了评估这些事件的归一化强度, 对强度因子进行计算, 即 SSL 峰值密度与突发前同一高度处钠层密度的比值, SSL 强度的季节性变化由图 8(c) 给出, 明显看到夏季具有最大值, 说明夏季易发生强烈的 SSL 事件. 值得注意的是, 秋季的强度因子低但峰值密度最大, 说明秋季钠层背景钠密度较高, 与前面讨论平均钠层峰值密度特点讨论所得的结论一致. 将激光雷达观测的时间段进行定义划分, 20:00 LT–00:00 LT 为前半夜, 00:00 LT–04:00 LT 为后半夜, 04:00 LT–07:00 LT 为凌晨. 突发峰值所在时间段的情况由图 8(d) 可见, 除秋季的 SSL 峰值多发生在凌晨时段外, 其他季节

SSL 峰值多在后半夜发生, 与 Andrioli 等<sup>[17]</sup> 在低纬度地区 São José dos Campos (23°S, 46°N) 观测到 SSL 峰值多出现在 21:00 LT 和 01:00 LT 的结论部分一致.

综上所述, 可以总结出海口上空在春季多发生短暂的、强度和峰值均较低且突发范围较宽的 SSL; 在夏季发生的 SSL 多为持续时间较长的、突发强度大的强烈 SSL; 秋季的 SSL 一般多在凌晨产生, 具有突发高度范围小且峰值较大的特点; 冬季 SSL 的突发峰值位置高, 且峰值易发生在后半夜时段.

## 2.2 SSL 与 Es 的季节性变化特征

SSL 与 Es 形成机制的讨论存在某些关联, 低纬度的 SSL 被认为与 Es 理论和升温理论都有着密切的关系<sup>[18–20]</sup>. 为了研究 SSL 与 Es 之间的相关性, 针对 SSL 出现的夜晚, 对比位于海口激光雷达西南方向约 160 km 的海南儋州 (19.5°N, 109.1°E) 测高仪数据, 两者同时观测且观测过程较为完整有效的数据共有 28 个 (见表 3).

由表 3 可以看出, 28 个观测结果都是 Es 先到达最小高度, SSL 随之达到最大峰值. 时间差在冬季有最小差值 9 min, 在夏季有最大差值 456 min; Es 的

临界频率  $f_oE_s$  最大值在秋季, 为 15.43 MHz, 最小值在夏季, 为 3.45 MHz. 图 9 给出不同高度下, SSL 和 E 层突发的时间差及其突发位置的高度差. 可以认为当 Es 与 SSL 发生在 120 min 内 (即 2 h), 高度差在 10 km 范围内则说明 SSL 和 E 层突发具有较强的相关性. SSL 与 Es 在不同高度下的平均时间差和平均高度差由图 9 给出, 不难发现, 海口地区 97 km 及以上产生的 SSL 与 Es 的联系更为密切. 由表 3 可以看

出与 SSL 紧密相关的 Es 在 9 月 (非夏季) 出现最大值, 与 Tang 等<sup>[21,22]</sup> 研究表明 Es 在夏季有最大强度的结论不同.

Xia 等<sup>[23]</sup> 的研究提出, 中纬度地区北京 (40.5° N, 116 °E) SSL 发生与 Es 发生随季节变化特点是一致的. 为了进一步探究低纬度地区 SSL(97 km 以上) 与 Es 随季节变化的相关程度, 针对 97 km 以上的 10 个观测结果进行分析. 表 4 给出不同季节下, 97 km 以

表 3 2018—2019 年海口观测 SSL 和海南儋州观测 Es 的主要参数  
Table 3 Main parameters of SSL at Haikou (20.0°N, 110.3°E) and Es events observed at Danzhou (19.5°N, 109.1°E) in 2018—2019

| 序号 | 日期            | SSL      |         |      | Es      |               | 时间差/min |
|----|---------------|----------|---------|------|---------|---------------|---------|
|    |               | 峰值时刻(LT) | 峰值高度/km | 强度因子 | 最低高度/km | $F_oE_s$ /MHz |         |
| 1  | 12 Jan. 2018  | 22:52    | 96.67   | 3.6  | 110     | 4.28          | -37     |
| 2  | 21 Mar. 2018  | 21:53    | 92.83   | 2    | 106.3   | 3.55          | -23     |
| 3  | 1 May. 2018   | 03:00    | 99.17   | 2.2  | 110     | 4.85          | -60     |
| 4  | 06 May. 2018  | 04:41    | 97.63   | 3.4  | 115.8   | 5.35          | -26     |
| 5  | 31 May. 2018  | 21:28    | 94.56   | 4.3  | 108.8   | 4.83          | -28     |
| 6  | 3 Dec. 2018   | 01:24    | 104.4   | 2    | 102.5   | 4.28          | -9      |
| 7  | 27 Apr. 2019  | 22:01    | 92.64   | 3.5  | 110     | 4.83          | -121    |
| 8  | 27 Apr. 2019  | 22:15    | 93.22   | 2    | 110     | 5.38          | -105    |
| 9  | 27 Apr. 2019  | 00:02    | 90.91   | 2.3  | 112.5   | 4.97          | -152    |
| 10 | 27 Apr. 2019  | 00:31    | 90.62   | 2.3  | 107.5   | 5.45          | -106    |
| 11 | 27 Apr. 2019  | 01:19    | 90.53   | 2    | 107.5   | 4.67          | -124    |
| 12 | 19 May. 2019  | 23:54    | 97.25   | 2    | 105     | 5.78          | -34     |
| 13 | 19 May. 2019  | 00:58    | 97.06   | 2.2  | 102.5   | 7.2           | -63     |
| 14 | 23 May. 2019  | 04:51    | 93.02   | 2.3  | 100     | 5.2           | -456    |
| 15 | 9 Jun. 2019   | 01:47    | 93.98   | 2.7  | 95      | 3.45          | -287    |
| 16 | 27 Jul. 2019  | 03:12    | 92.83   | 2    | 102.5   | 3.8           | -102    |
| 17 | 28 Jul. 2019  | 20:56    | 96      | 13   | 105     | 7.15          | -206    |
| 18 | 28 Jul. 2019  | 21:20    | 96      | 2.3  | 102.5   | 6             | -170    |
| 19 | 7 Aug. 2019   | 04:17    | 95.62   | 3    | 102.5   | 5.75          | -167    |
| 20 | 30 Sept. 2019 | 19:34    | 102     | 2.4  | 103.3   | 15.43         | -44     |
| 21 | 30 Sept. 2019 | 20:54    | 101.4   | 2.1  | 101.3   | 14.1          | -99     |
| 22 | 30 Sept. 2019 | 21:52    | 101.1   | 2.1  | 102.5   | 8.6           | -137    |
| 23 | 3 Oct. 2019   | 23:04    | 99.65   | 3    | 100     | 5.67          | -88     |
| 24 | 3 Oct. 2019   | 00:07    | 98.88   | 2.8  | 100     | 6.83          | -77     |
| 25 | 4 Oct. 2020   | 05:30    | 91.49   | 2.8  | 102.5   | 4.53          | -140    |
| 26 | 5 Oct. 2019   | 00:44    | 96.38   | 2    | 107.5   | 4.83          | -79     |
| 27 | 17 Nov. 2019  | 00:09    | 96.58   | 3.2  | 102.5   | 6.6           | -114    |
| 28 | 12 Dec. 2019  | 02:20    | 95.81   | 2    | 105     | 3.77          | -125    |

注 时间差为 SSL 达到最大峰值密度与 Es 突发最小高度的时间差, “-” 表示 Es 突发达到最小高度早于 SSL 达到最大峰值密度.

上的 SSL 和 Es 的参数平均值对比. 由表 4 对比发现 SSL 和 Es 在强度变化上具有较好的一致性; 秋、冬季在高度变化上展现良好的相关性, 春季相关性较差, 与 Jiao 等<sup>[24]</sup>报道的良好高度相关性部分一致; 春冬季有良好时间相关性. 夏季 SSL 多在 97 km 以下发生, 因此缺少两者在夏季的参数平均值分析. 综上所述清晰看出, 海口地区 SSL (97 km 以上) 与 Es 在季节依赖性上有较大的相关性, 但仍需更多的观测数据进行验证.

2.3 DSL 的季节性变化特征

图 10 给出的是 2018 年 5 月 24 日海口激光雷达观测到的典型 DSL 事件. 图 10(a) 给出了夜间 DSL 峰值时刻的钠层密度廓线, 可以看到此 DSL 第一钠层峰值高度为 92.16 km, 钠密度峰值强度达到  $2559.53\text{ cm}^{-3}$ ; 第二钠层峰值高度为 105.5 km, 钠密度峰值强度达到  $1273\text{ cm}^{-3}$ , 峰值宽度取半峰全宽 5.6 km. 第二钠层与正常钠层峰值密度比 (Ratio of

Peak Density, RPD) 为 48.22%, 第二钠层的柱密度与正常钠层柱密度之比 (Ratio of Column Density, RCD) 为 29.51%. 图 10(b) 给出了 DSL 在 23:30 LT–05:40 LT 的密度变化情况, 105~110 km 的钠层密度在 03:53 LT 明显开始增强, 在 05:39 LT 第二钠层达到观测过程的最大值, 峰值高度降低至 105.5 km 处.

表 5 给出了 2018–2019 年海口上空发生的 DSL 事件, 发生双钠层结构时, 第二钠层一般出现在 104~110 km 高度处, 相较于中纬度地区来说, 低纬度地区第二钠层出现的峰值高度较低<sup>[25]</sup>. 在低纬度地区 DSL 多出现在春、夏季, 但由于其出现的频率较低, 事件较少, 其季节性特点还需长期及大量数据进行研究.

3 结论

通过利用海口钠荧光激光雷达 2018–2019 年钠层观测数据, 统计分析了低纬度地区海口的钠层密度分布特点、钠层季节变化特点、SSL 及 DSL 结构的季节变化特点. 海口钠层平均密度分布总体呈基本对称的高斯分布特点, 有强烈的季节变化特征, 夏冬季呈上沿比下沿明显陡峭的不对称高斯形态, 相对其他季节, 秋季具有较好的对称性; 峰值和密度均表现为春夏季小, 秋冬季大; 夏冬两季平均峰值位置明显向上的偏移; FWHM 与 RMS 宽度有夏季大、秋季小的特点; 质心高度变化相对稳定, 与季节的相关性较弱.

在特殊事件的统计中, 发现 SSL 在冬季发生的概率较大; SSL 随季节变化明显, 其季节变化特征表现为, 突发所用的增长、衰退和持续时间夏季长、春季短; 峰值秋季大、春季小; 秋冬的突发峰值位置较高, 春夏季反之; 秋季的突发高度范围小; 突发强度在夏季有最大值; 除秋季外, 其他季节 SSL 峰值多发生在后半夜; 同时通过对比海南儋州测高仪观测数据, 发

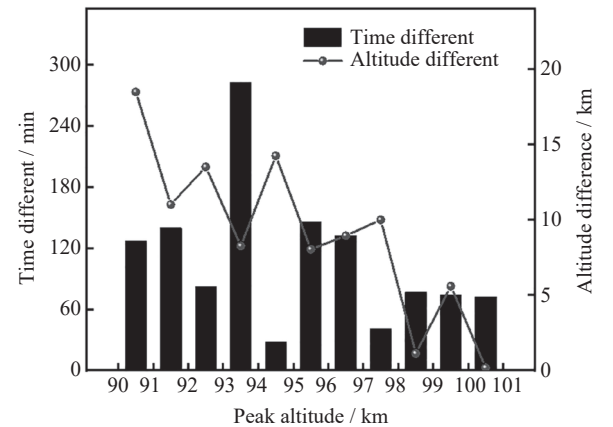


图 9 海口地区不同 SSL 峰值高度下 SSL 与 Es 的参数对比

Fig. 9 Comparison between SSL and Es with different peak altitude in Haikou

表 4 SSL 与 Es 随季节变化的对比  
Table 4 Comparison between SSL and Es with seasonal variation

| 季节 | SSL     |      | Es      |                     | 高度差/km | 时间差/min |
|----|---------|------|---------|---------------------|--------|---------|
|    | 峰值高度/km | 强度因子 | 最低高度/km | $F_0E_s/\text{MHz}$ |        |         |
| 春  | 97.78   | 2.45 | 108.32  | 5.8                 | 10.54  | -52.33  |
| 夏  | —       | —    | —       | —                   | —      | —       |
| 秋  | 100.61  | 2.48 | 101.42  | 10.13               | 0.81   | -82.5   |
| 冬  | 104.4   | 2    | 102.5   | 4.28                | 1.9    | -9      |

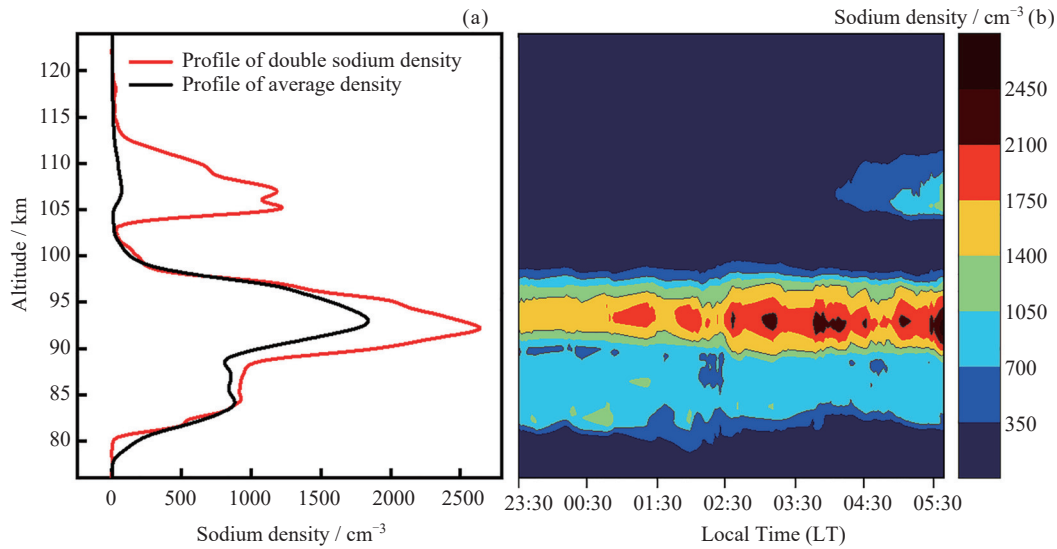


图 10 2018 年 5 月 24 日海口上空的 DSL 事件

Fig. 10 A DSL event observed on 24 May 2018 over Haikou

表 5 2018—2019 年海口 DSL 事件主要参数

Table 5 Characteristics of double sodium layer over Haikou from 2018 to 2019

| 日期          | 开始时间(LT) | 峰值高度/km | 峰值密度/cm <sup>-3</sup> | FWHM/km | 持续时间/min | RCD/(%) | RPD/(%) |
|-------------|----------|---------|-----------------------|---------|----------|---------|---------|
| 9 Mar. 2018 | 21:46    | 104.5   | 881                   | 1.6     | 523      | 8.42    | 18.27   |
| 24 May 2018 | 03:53    | 105.5   | 1273                  | 5.6     | 137      | 29.51   | 48.22   |
| 6 Jun. 2019 | 23:26    | 108.7   | 196                   | 3.6     | 222      | 4.88    | 9.10    |

现通常 Es 到达最低高度早于 SSL 最大峰值发生, 且 97 km 以上的 SSL 与 Es 具有较大的相关性, 两者在时间、高度、强度上的季节依赖性有一定的相关性, 但需要更多观测数据支撑. 另外, 低纬度地区 DSL 多出现在春、夏季, 但其季节性特点仍需长期及大量数据进行研究.

**致谢** 海南激光雷达观测站全体工作人员和子午工程数据中心对本研究给予了大力支持.

参考文献

[1] SHE C Y, YU J R, LATIFI H, *et al.* High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(12): 2095-2106

[2] BOWMAN M R, GIBSON A J, SANDFORD M C W. Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar[J]. *Nature*, 1969, **221**(5179): 456-457

[3] YUE X C, ZHOU Q H, YI F, *et al.* Simultaneous and common-volume lidar observations of K/Na layers and temper-

ature at Arecibo Observatory (18°N, 67°W)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(13): 8038-8054

[4] WU F J, CHU X Z, DU L F, *et al.* First simultaneous lidar observations of thermosphere-ionosphere sporadic Ni and Na (TISNi and TISNa) layers (~105-120 km) over Beijing (40.42°N, 116.02°E)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(16): e2022GL100397

[5] ANDRIOLI V F, XU J Y, BATISTA P P, *et al.* C-structures in mesospheric Na and K layers and their relations with dynamical and convective instabilities[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(11): 1867

[6] CLEMESHA B R, KIRCHHOFF V W J H, SIMONICH D M, *et al.* Evidence of an extra-terrestrial source for the mesospheric sodium layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 1978, **5**(10): 873-876

[7] FONTES P A, MUELLA M T A H, RESENDE L C A, *et al.* Evidence of anti-correlation between sporadic (*E*<sub>s</sub>) layers occurrence and solar activity observed at low latitudes over the Brazilian sector[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(7): 3563-3577

[8] FONTES P A, DE ASSIS HONORATO MUELLA M T, RESENDE L C A, *et al.* Effects of the terdiurnal tide on

- the Sporadic E ( $E_s$ ) layer development at low latitudes over the Brazilian sector[J]. *Annales Geophysicae*, 2023, **41**(1): 209-224
- [9] GONG S S, YANG G T, WANG J M, *et al.* A double sodium layer event observed over Wuhan, China by lidar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(5): 1209
- [10] CLEMESHA B R, SIMONICH D M, TAKAHASHI H, *et al.* The annual variation of the height of the atmospheric sodium layer at 23°S: Possible evidence for convective transport[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, **97**(D5): 5981-5985
- [11] KWON K H, GARDNER C S, SENFT D C, *et al.* Day-time lidar measurements of tidal winds in the mesospheric sodium layer at Urbana, Illinois[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1987, **92**(A8): 8781-8786
- [12] FAN Z Y, PLANE J M C, GUMBEL J, *et al.* Satellite measurements of the global mesospheric sodium layer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(15): 4107-4115
- [13] SIMONICH D M, CLEMESHA B R, KIRCHHOFF V W J H. The mesospheric sodium layer at 23°S: nocturnal and seasonal variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **84**(A4): 1543-1550
- [14] VISHNU PRASANTH P, SIVAKUMAR V, SRIDHARAN S, *et al.* Lidar observations of sodium layer over low latitude, Gadanki (13.5°N, 79.2°E): Seasonal and nocturnal variations[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(10): 3811-3823
- [15] GONG S H, YANG G T, XU J Y, *et al.* Nighttime and seasonal variations of the sodium layer measured by lidar at different latitudes in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(4): 361-372
- [16] SIMONICH D, CLEMESHA B. Sporadic sodium layers and the average vertical distribution of atmospheric sodium: Comparison of different  $\text{Na}_s$  layer strengths[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **42**(1): 229-233
- [17] ANDRIOLI V F, XU J, BATISTA P P, *et al.* Simultaneous observation of sporadic potassium and sodium layers over São José dos Campos, Brazil (23.1°S, 45.9°W)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(5): e2020JA028890
- [18] FONTES P A, MUELLA M T A H, RESENDE L C A, *et al.* Effects of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings on the Sporadic-E layers in the Brazilian sector[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2024, **256**: 106199
- [19] QIU S C, TANG Y H, JIA M J, *et al.* A review of latitudinal characteristics of sporadic sodium layers, including new results from the Chinese Meridian Project[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, **162**: 83-106
- [20] QIU S C, WANG N, SOON W, *et al.* The sporadic sodium layer: a possible tracer for the conjunction between the upper and lower atmospheres[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(15): 11927-11940
- [21] TANG Q, ZHOU C, LIU H X, *et al.* Global structure and seasonal variations of the tidal amplitude in sporadic-E layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(10): e2022JA030711
- [22] TANG Q, ZHAO J Q, YU Z B, *et al.* Occurrence and variations of middle and low latitude sporadic E layer investigated with longitudinal and latitudinal chains of ionosondes[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(12): e2021SW002942
- [23] XIA Y, NOZAWA S, JIAO J, *et al.* Statistical study on sporadic sodium layers (SSLs) based on diurnal sodium lidar observations at Beijing, China (40.5°N, 116°E)[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, **212**: 105512
- [24] JIAO J, YANG G T, ZOU X, *et al.* Joint observations of sporadic sodium and sporadic E layers at middle and low latitudes in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(29/30): 3868-3876
- [25] YANG D L, ZHANG T M, WANG J H, *et al.* Characteristics of double sodium layer over Haikou, China (20.0°N, 110.1°E)[J]. *Solar-Terrestrial Physics*, 2019, **5**(2): 28-32

## 作者简介



**何诗敏** 女, 1998年3月出生于广东省茂名市, 现为海南师范大学物理与电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为激光雷达。

E-mail: 18312554903@163.com



**张铁民 (通信作者)** 男, 1968年7月出生于吉林省吉林市, 现为海南师范大学物理与电子工程学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为激光雷达、光电子材料与器件等。

E-mail: 060049@hainu.edu.cn