

ZHANG Tiemin, WANG Jihong, WANG Linmao, CHEN Xueming, WU Jianqing, ZOU Xu, PENG Hongyan. Observations of sodium layer over Beijing and Haikou in July 2012 (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(4): 424-431. DOI:10.11728/cjss2017.04.424

2012年7月海口与北京大气钠层观测^{*}

张铁民¹ 王继红² 王林茂¹ 陈学明¹
吴建清¹ 邹旭¹ 彭鸿雁¹

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 2012年7月海南激光雷达站(20°N, 110°E)和北京激光雷达站(40°N, 116°E)同时进行观测,对比低纬和中纬度中高层大气钠层分布及密度变化特性。两地使用相同的Nd:YAG激光器和泵浦染料激光器产生589 nm激光,设定相同的激光参数,使用相同的直径1000 mm的望远镜接收钠层的光子回波。两地均观测到突发钠层和双钠层事件。其中:海口观测到突发钠层事件9个,双钠层事件1个;北京观测到突发钠层事件1个,双钠层事件4个。分析海口和北京同一天夜间观测的大气钠层特性,对比两地同时观测到的钠层高度与密度的不同变化,发现当天夜间低纬度地区海口市上空钠层出现双钠层结构,持续时间123 min,但是北京上空钠层没有发现该结构。

关键词 激光雷达,中高层大气,钠层密度,大气光学

中图分类号 P 352

Observations of Sodium Layer over Beijing and Haikou in July 2012

ZHANG Tiemin¹ WANG Jihong² WANG Linmao¹ CHEN Xueming¹
WU Jianqing¹ ZOU Xu¹ PENG Hongyan¹

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 The observations were conducted by lidar over Haikou (20°N, 110°E) and Beijing (40°N, 116°E) in July 2012. The basic characteristics of the sodium layer density at a low-latitude and mid-latitude location are analyzed by the observations. The double sodium layer events and sporadic layer were observed over Beijing and Haikou. A Nd:YAG laser and a pumped dye laser are used to generate the probing beam. The wavelength of the dye laser is set to be 589 nm by a sodium fluorescence cell. The energy and divergence of the beam are set about 45 mJ and 1 mrad, respectively. The backscattered fluorescence photons from the sodium layer are collected by a telescope with a primary

* 国家自然科学基金项目(41364005, 41564006)和海南省自然科学基金项目(20164163)共同资助

2016-05-03 收到原稿, 2017-03-28 收到修定稿

E-mail: zhangtiemin@sohu.com, jhwang@nssc.ac.cn

mirror which diameter is equal to 1000 mm. There are 9 events of Sporadic Sodium Layer (SSL) and 1 event of Double Sodium Layer (DSL) occurred in Haikou, and 1 event of SSL and 4 events of DSL occurred in Beijing. The variety and distribution of the sodium density over Beijing and Haikou during the night of July 1, 2012 are compared. A DSL structure was observed and it had lasted 120 min during the night of July 1, 2012 over Haikou, but no DSL structure occurred over Beijing.

Key words Lidar, Mesosphere and lower-thermosphere, Sodium layer density, Atmospheric optics

0 引言

钠层位于高度范围 80~110 km 的大气层内, 与其他原子、分子、离子具有各种复杂的物理、化学和动力学的相互作用。Sliper^[1] 于 1929 年在大气中发现钠层, Bowman 等^[2] 首先使用激光雷达观测到大气中的钠层, Kwon 等^[3] 第一次在白天对大气钠层进行了观测。使用激光雷达对钠层的探测结果进行分析已取得很多成果^[4-6]。近年来, 通过激光雷达观测, 获得了北京、武汉、合肥、海口上空中高层大气参数的科学数据, 经研究分析取得了一系列研究成果^[7-10]。这些研究成果对空间天气及大气中碱金属的特性研究具有十分重要的意义。

由于北京和海口激光雷达站同时建站, 其激光雷达设备型号和参数设置相同。北京处于中纬度, 而海口处于低纬度, 对比两地观测数据具有非常重要的意义。本文利用钠荧光激光雷达联合观测 2012 年 7 月海口和北京上空大气, 分析同一时间段海口与北京大气钠层的变化特性。

1 设备

海南激光雷达站(海口)和北京激光雷达站同时建站, 采用相同设备。Nd:YAG 激光器泵浦染料激光器产生探测光束; ND6000 型染料激光器使用 Na 荧光室, 产生 589 nm 的激光。此外, 二者设置的参数相同: 能量 45 mJ, 发散角 1 mrad, 重复频率 30 Hz。Na 层后向散射荧光光子经主镜直径为 1000 mm 的望远镜接收。发射出的激光光束距离接收望远镜中心 6 m, 望远镜视场通常设置为 2 mrad, 通过带宽为 1 nm 的带通光学滤光片、致冷的光电倍增管、前置放大器和时间分辨的光子计数器对信号进行探测, 最后通过计算机处理收集的数据。每个激光雷达文件由 5000 个激光脉冲累积, 高度分辨率为 100 m,

激光器脉冲频率为 30 Hz, 记录每个数据文件的时间为 2.78 min。Na 层的廓线由激光雷达文件经标准转化程序得到。在中高层大气中, 对于 588.997 nm 的激光, 80~110 km 范围内主要是钠荧光散射。这里钠层密度根据钠荧光散射的激光雷达方程计算得出。

2 观测与讨论

2.1 海口观测数据

突发钠层事件最早由 Clemesha 等^[11] 提出, 其研究认为发生时间短、峰值密度大、半峰全宽窄钠层为突发钠层。Gong 等^[12] 首先对双钠层事件进行了分析, 认为双钠层事件发生在 110 km 以上, 是与正常钠层分开的第二个钠层。2012 年 7 月处于低纬度地区的海南激光雷达站共开机观测 13 天, 总计 6433 min。此次开机观测到突发钠层事件 9 个, 累计钠层突发时间为 1240 min; 观测到双钠层事件 1 个, 双钠层持续时间 123 min。观测到的 7 月份海口上空大气突发钠层事件主要参数列于表 1, 该突发钠层平均峰值高度 94.3 km, 平均持续时间约 126.6 min, 平均半峰宽约 2.3 km。图 1 给出了 2012 年 7 月 21 日 04:12 LT 时在海口观测到的钠层突发密度廓线, 其峰值密度达到 8987 cm^{-3} , 峰值高度为 93.0 km。表 2 列出了海口观测到的双钠层事件参数, 该事件发生在 7 月 1 日 21:53 LT—23:50 LT, 持续时间约 123 min, 第二钠层峰值出现在 109.3 km, 密度为 616 cm^{-3} 。图 2 给出了 2012 年 7 月 1 日 22:07 LT 海口上空大气中双钠层密度廓线。由图 2 可以非常明显地看到第二个钠层, 其与正常钠层峰值密度比为 31.4%。

2.2 北京观测数据

2012 年 7 月, 处于中纬度地区的北京激光雷达站共开机观测 4 天, 总计 1712 min。观测到突发钠层事件 1 个, 持续时间为 17 min; 观测到双钠层事件 4 个, 持续时间为 321 min。7 月份北京突发钠层事件主要

参数列于表 3, 该突发钠层事件峰值高度为 101.3 km, 持续时间为 17 min. 图 3 给出了 2012 年 7 月 14 日 23:37 LT 在北京观测到的钠层突发密度廓线, 其峰值密度达 1179 cm^{-3} , 峰值高度达 101.3 km. 表 4 列出了北京观测到的双钠层事件主要参数. 激光雷达开机工作的四个夜晚均观测到双钠层事件, 其中三

次出现在夜间, 一次出现在凌晨. 这四个双钠层事件中, 第二个钠层峰值高度出现在 105~117 km, 峰值密度介于 $77 \sim 197 \text{ cm}^{-3}$ 之间, 持续时间为 26~136 min. 图 4 给出了 2012 年 7 月 16 日 21:14 LT 北京上空大气中的双钠层密度廓线. 由图 4 可见, 第二个钠层密度较小, 其特征比海口发生的双钠层事件弱.

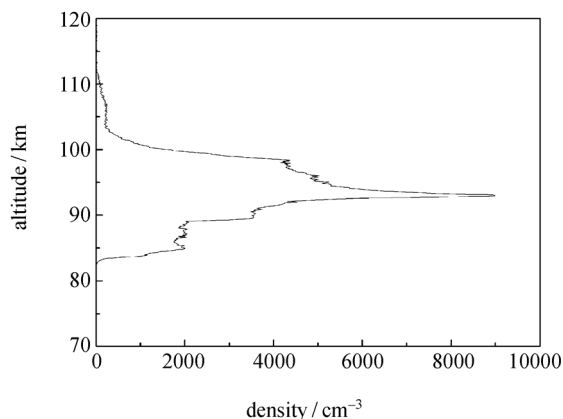


图 1 2012 年 7 月 21 日 04:12 LT 观测到的海口上空大气钠层突发密度廓线

Fig. 1 Density profile of sodium layer over Haikou observed at 04:12 LT on 21 July 2012

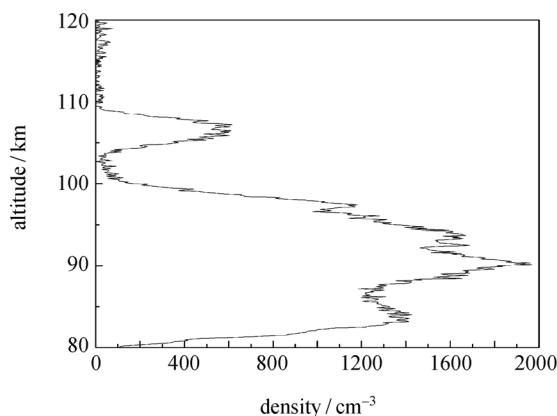


图 2 2012 年 7 月 1 日 22:07 LT 海口上空大气双钠层密度廓线

Fig. 2 Sodium density profile of double sodium layer over Haikou observed at 22:07 LT on 1 July, 2012

表 1 2012 年 7 月海口突发钠层事件主要参数

Table 1 Characteristics of sporadic sodium layer over Haikou in July 2012

日	峰值时间 (LT)	持续时间/min	峰值密度/ cm^{-3}	峰值高度/km	半峰宽/km	强度因子
03	02:15	188	6698	93.6	3.8.	4.5
10	02:36	189	2852	92.7	1.4	2.5
11	04:40	97	4453	92.8	2.3	3.5
11	21:36	> 273	5612	94.8	1.6	3.5
12	21:59	> 142	3193	96.9	2.0	3.0
13	21:30	> 161	1842	91.9	1.6	2.5
21	04:12	62	8987	93.0	4.6	2.0
30	02:22	67	4274	96.6	2.6	2.0
31	02:15	61	6696	96.5	1.4	4.5

表 2 2012 年 7 月 1 日海口双钠层事件主要参数

Table 2 Characteristics of double sodium layer over Haikou on 1 July 2012

时间 (LT)	峰值高度/km	峰值密度/ cm^{-3}	半峰宽/km	持续时间/min	第二钠层与正常钠层峰值密度比
21:59	109.3	616	2.7	123	31.4%

2.3 海口与北京观测结果对比

由于激光雷达观测受天气影响, 统计海南激光雷达站和北京激光雷达站观测数据, 2012 年 7 月份只有 7 月 1 日同时段开机观测. 海口观测时间为从 2012 年 7 月 1 日 20:27LT 开始至次日 02:37LT, 记录了 126 个数据. 北京观测时间为从 2012 年 7 月 1 日 20:46LT 开始至次日 03:57LT, 记录了 153 个数据.

图 5 给出了 7 月 2 日 01:25LT 海口和北京激光雷达获得的中高层大气光子回波数据. 从图 5 可知,

两地上空 30~70 km 均为瑞利散射, 在对数坐标下瑞利散射均为直线型. 两地上空 80~110 km 为钠原子共振光子回波数据, 光子回波均在 80 km 处迅速达到较强数值. 从图 5 可以看出两地钠原子光子回波相似, 钠层宽度相当. 海口上空在 90.0 km 和 96.4 km 两处出现突发钠层, 而北京上空钠层从 80 km 起始, 在 83 km 处达到密度峰值, 然后钠层密度逐渐减小, 约在 110 km 消失.

2.3.1 海口与北京夜间钠层密度平均值对比

图 6 给出了海口 126 个数据和北京 153 个数据

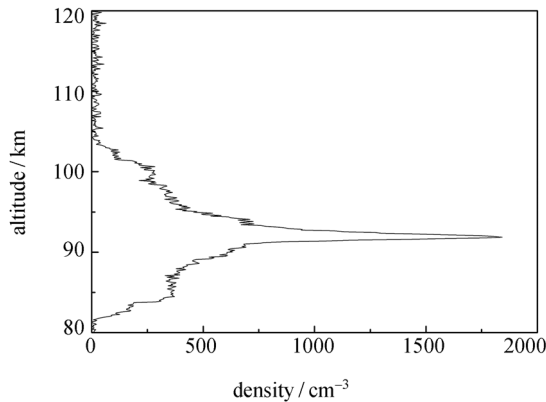


图 3 2012 年 7 月 14 日 23:37LT 观测到的北京上空大气突发钠层密度廓线

Fig. 3 Density profile of sporadic sodium layer over Beijing observed at 23:37 LT on 14 July 2012

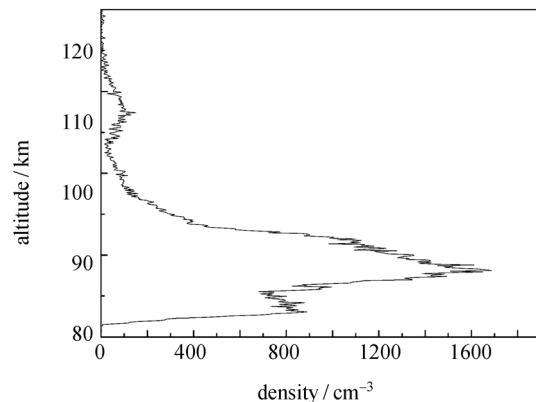


图 4 2012 年 7 月 16 日 21:14LT 观测到的北京上空大气双钠层事件

Fig. 4 Density profile of double sodium layer over Beijing observed at 21:14 LT on 16 July 2012

表 3 2012 年 7 月北京突发钠层事件主要参数

Table 3 Characteristics of sporadic sodium layer over Beijing on 14 July 2012

峰值时间 (LT)	持续时间/min	峰值密度/cm ⁻³	峰值高度/km	半峰宽/km	强度因子
23:37	17	1179	101.3	1.1	4.0

表 4 2012 年 7 月北京双钠层事件主要参数

Table 4 Characteristics of double sodium layer over Beijing in July 2012

日	时间 (LT)	峰值高度/km	峰值密度/cm ⁻³	半峰宽/km	持续时间/min	第二钠层与正常钠层峰值密度比
01	21:46	117.3	77	0.5	105	6.5%
14	20:50	105.3	197	1.4	> 26	10.3%
15	03:35	111.5	112	1.1	54	4.3%
16	21:14	107.4	150	1.3	136	8.9%

钠层密度平均值廓线. 从图 6 可以看出, 海口上空钠层廓线出现三个峰, 其高度从低空到高空分别为 84.0 km, 90.3 km, 96.8 km, 对应的钠层密度值依次为 1381 cm^{-3} , 2196 cm^{-3} , 2487 cm^{-3} . 同时, 北京上空钠层廓线出现两个峰, 其高度从低空到高空分别为 83.7 km 和 94.4 km, 对应的钠层密度依次为 1625 cm^{-3} 和 787 cm^{-3} . 海口大气钠层平均密度峰值为北京大气钠层平均密度峰值的 1.5 倍, 而且海

口平均钠层密度峰值高度位于 96.8 km, 高于北京的平均钠层密度峰值高度 13.4 km.

2.3.2 海口与北京夜间钠层密度和峰值高度变化对比

图 7 给出了 2012 年 7 月 1 日 20:27 LT 至次日凌晨 02:37 LT 海口上空大气钠层的密度变化, 由于数据多, 分为了上下两个图表示. 由图 7 可以看出,

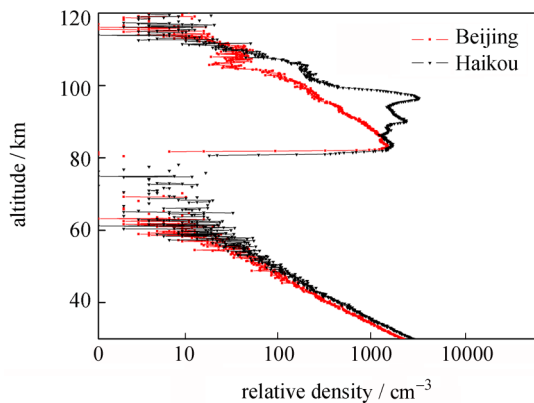


图 5 2012 年 7 月 2 日 01:25 LT 海口和北京中高层大气激光雷达钠荧光光子回波

Fig. 5 Typical echo signal of sodium fluorescence lidar over Beijing and Haikou at 01:25 LT on 2 July 2012

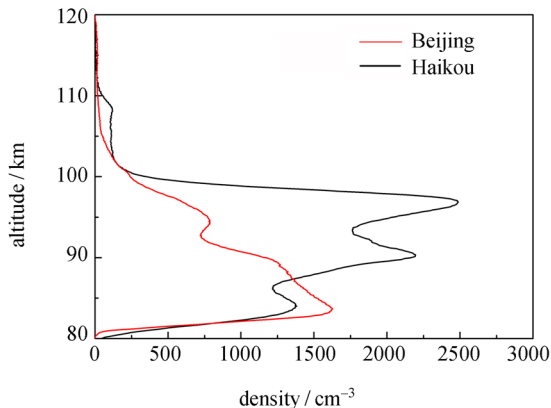


图 6 2012 年 7 月 1 日夜间到次日凌晨海口和北京上空大气钠层密度平均值

Fig. 6 Average value of sodium density over Beijing and Haikou from the nighttime of 1 July 2012 to the next day early morning

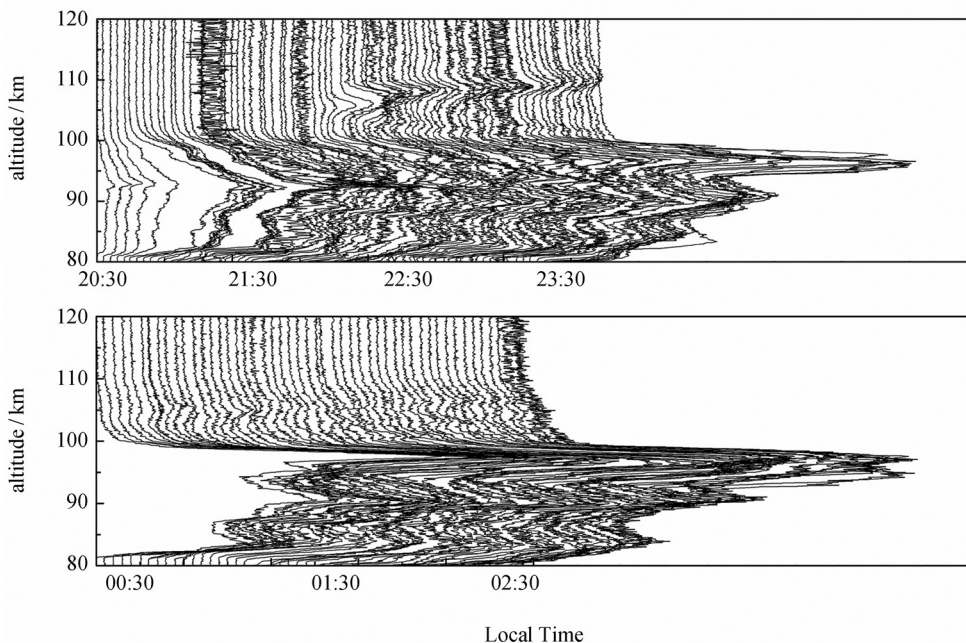


图 7 2012 年 7 月 1 日 20:27 LT 到次日凌晨 02:37 LT 的海口上空大气钠层密度廓线

Fig. 7 Sodium density profile over Haikou from 20:27 LT on 1 July 2012 to 02:37 LT on 2 July 2012

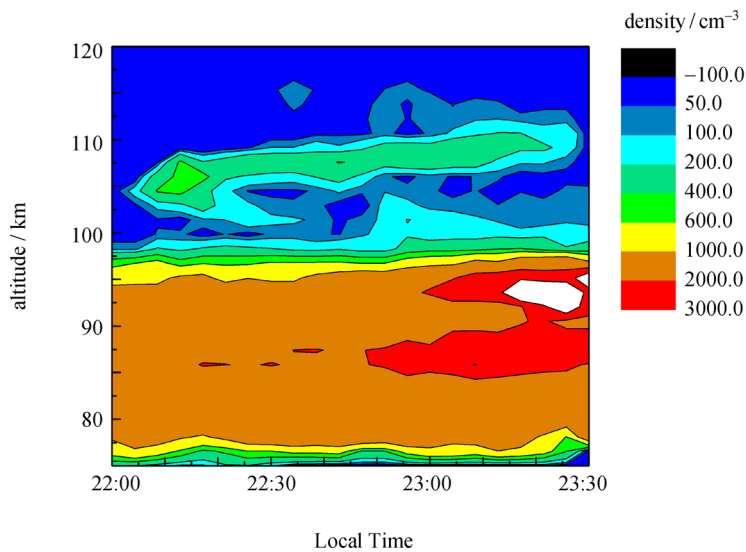


图 8 2012 年 7 月 1 日 20:27 LT 至次日 02:37 LT 的海口上空双钠层事件

Fig. 8 Sodium density map over Haikou from 20:27 LT on 1 July 2012 to 02:37 LT on 2 July 2012

该密度变化过程由 126 个钠层密度廓线构成, 密度峰值在观测的时间内随着时间推移由低空向高空移动. 从 21:53 LT 到 23:50 LT, 110 km 附近高空大气出现了双钠层结构, 此时钠层分布在 80~115 km 高度范围内.

图 8 给出的是发生双钠层结构时大气中的钠层密度分布情况. 从图 8 可以清晰看到, 第二钠层出现在 100~110 km 高度, 第二钠层密度明显小于第一钠层且随着时间减小直至消失. 第二钠层密度最大值为 616 cm^{-3} , 是第一钠层密度最大值的 $1/3$, 出现在 22:07 LT. 此次观测到的双钠层结构持续时间为 117 min.

图 9 给出了海口上空大气中钠层密度和峰值高度随时间的变化. 从图 9 可以看出, 20:27 LT 至 23:34 LT 钠层密度在 2000 cm^{-3} 附近波动; 23:34 LT 至次日 02:37 LT, 钠层密度达到 3000 cm^{-3} 以上; 钠层密度最高值为 4978 cm^{-3} , 出现在 01:30 LT. 钠层峰值高度变化分为三个阶段. 第一阶段: 20:27 LT 至 21:51 LT, 峰值位于 92~93 km. 第二阶段: 21:51 LT 至 23:34 LT, 峰值位于 89~90 km. 第三阶段: 23:34 LT 至次日 02:37 LT, 峰值位于 96~97 km.

图 10 为 2012 年 7 月 1 日 20:46 LT 至次日凌晨 03:57 LT 北京上空大气中的钠层密度, 共由 153 个钠层密度廓线构成. 图 11 为北京上空大气中钠层密度和峰值位置随时间的变化. 从图 11 可知, 北京上

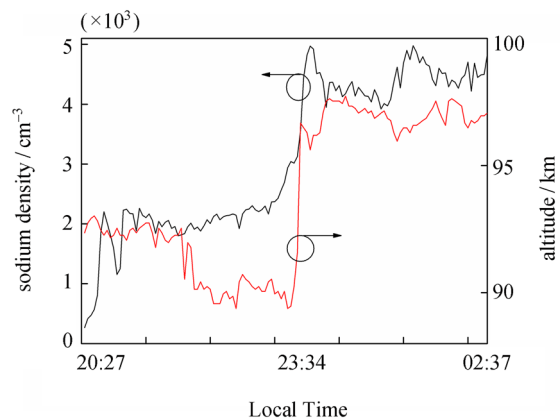


图 9 2012 年 7 月 1 日 20:27 至次日 02:37 LT 海口上空大气钠层密度和峰值高度随时间的变化. 黑色曲线为密度变化, 红色曲线为高度变化, 箭头指向为对应的坐标

Fig. 9 Relation between the sodium density peak and time over Haikou from 20:27 LT on 1 July 2012 to 02:57 LT on 2 July 2012. The black curve represents density variation, and the red curve represents height variation. The arrow points to the corresponding coordinate

空大气钠层密度峰值高度在观测时间内变化不大, 仅在次日 00:19 LT—00:36 LT 钠层密度峰值升高到 88.4 km, 其他时间钠层密度峰值均在 82~86 km 内变化. 此外, 北京上空大气中没有观测到双钠层结构. 在观测时间内, 北京上空大气中钠层最高密度值

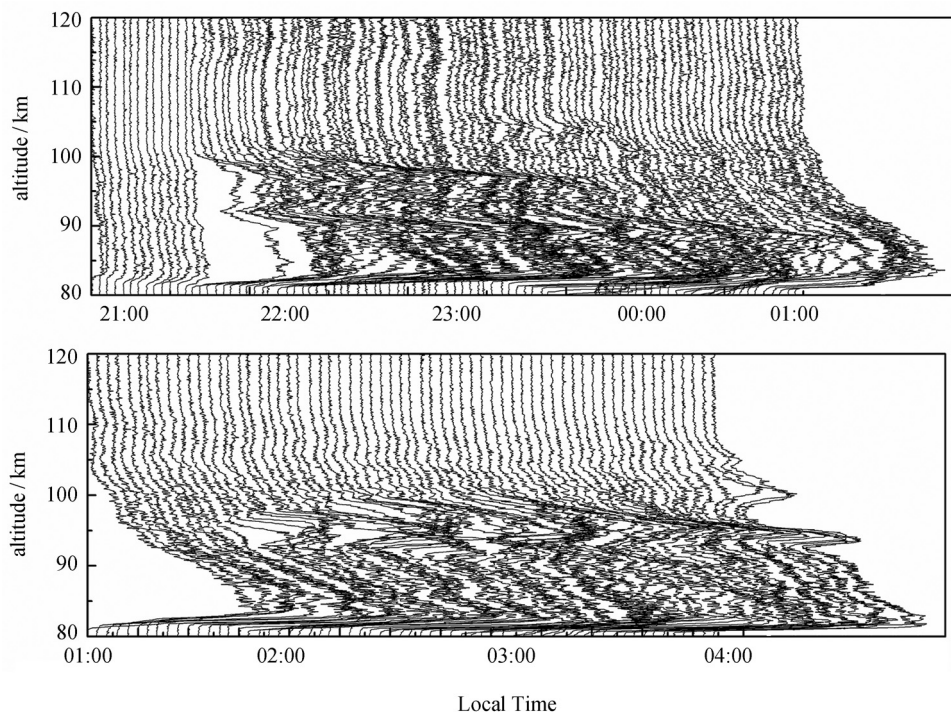


图 10 2012 年 7 月 1 日 20:46 LT 至次日 03:57 LT 北京上空中高层大气的钠层密度

Fig. 10 Sodium density profile over Beijing from 0:46 LT on 1 July 2012 to 02:37 LT on 2 July 2012

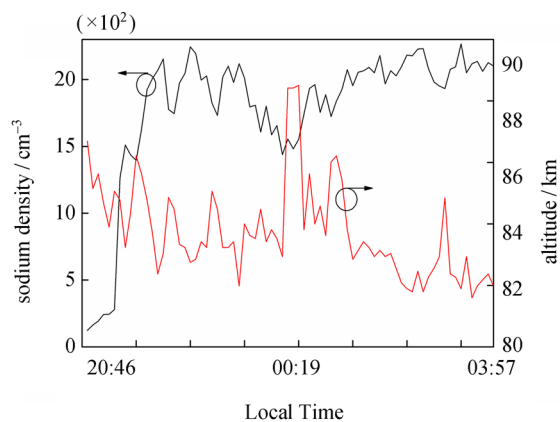


图 11 2012 年 7 月 1 日 20:46 LT 至次日 03:57 LT 北京上空大气中钠层密度和峰值位置随时间的变化

Fig. 11 Relation between the sodium density peak and time over Beijing from 20:46 LT on 1 July 2012 to 03:57 LT on 2 July 2012

为 2375 cm^{-3} , 出现在 23:25 LT.

对比与海口同处于低纬度地区的大气钠层观测结果, 1987 年 1 月 21 日在美国冒纳凯亚 (19.8°S , 155.5°W)^[13], 在大气 96 km 高度观测到突发钠层峰值密度为 28000 cm^{-3} , 全峰宽 2 km, 持续时

间 40 min. 1999 年 7 月 14 日在巴西圣若泽杜斯坎普斯 (20.5°S , 46°W)^[14] 观测到一个双峰突发钠层, 持续时间 157 min, 此外还在 96 km 和 84 km 高度观测到两个小的突发峰. 1980 年 12 月至 1986 年 5 月在与北京同处于中纬度地区的美国厄巴纳 (40°N , 88°W)^[15] 观测发现, 12 月和 1 月的钠层丰度比 6 月的高 4.5 倍. 11 月和 12 月的钠层中心高度比年度平均值低 1.5 km. 2003 年 9 月在美国柯林斯堡 (41°N , 105°W)^[16] 使用激光雷达和仿真模型研究钠层演化发现, 大尺度波和小尺度波与钠层演化相关.

3 结论

利用钠荧光激光雷达对 2012 年 7 月海口和北京上空中高层大气进行观测, 研究了低纬度和中纬度地区中高层大气中钠层密度变化特征. 研究发现, 海口与北京大气中钠层具有不同的变化特征, 均出现突发钠层事件和双钠层事件. 海口突发钠层事件发生频度高于北京, 北京双钠层事件发生频度高于海口. 海南激光雷达站与北京激光雷达站的设备相同, 且激光雷达各项参数及观测时间相同. 观测结果不同表明,

同一时间段不同纬度大气中钠层变化是不同的. 通过数据分析可知, 大气中钠层密度是动态变化的, 钠层密度峰值位置也随时间动态变化. 2012年7月1日夜至次日凌晨的观测结果表明: 海口大气中钠层厚度和峰值密度明显高于北京; 海口大气中钠层密度峰值位于较高的大气层; 在海口大气中观测到双钠层结构, 而北京大气中没有观测到. 本文仅仅对比了1个月的激光雷达观测数据, 为深入分析低、中纬度两地钠层特性, 还需对海口和北京激光雷达观测的长期和大量数据进行研究.

致谢 海南和北京激光雷达观测站的全体工作人员在观测和数据分析方面给予了支持.

参考文献

- [1] SLIPHER V M. Emissions in the spectrum of the light of the night sky [J]. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1929, **41**: 262-264
- [2] BOWMAN M R, GIBSON A J, SANDFORD M C W. Observation of mesospheric Na atoms by tuner laser radar [J]. *Nature*, 1969, **221**: 456-458
- [3] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A8): 8781-8786
- [4] GARDNER C S. Sodium resonance fluorescence lidar applications in atmospheric science and astronomy [J]. *Proc. IEEE*, 1989, **77**(3): 408-418
- [5] SHE C Y, YU J R, LATIFI H, *et al.* High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesosphere sodium temperature measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(12): 2095-2106
- [6] NAGASAWA C, ABO M. Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(3): 263-266
- [7] WANG Jihong, YANG Yong, CHEN Xuewu, *et al.* Double sodium layers observation over Beijing, China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, **39**(15): L15801
- [8] GONG S S, YANG G T, WANG J M, *et al.* Occurrence and characteristics of sporadic sodium layer observed by lidar at a mid-latitude location [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**(18): 1957-1966
- [9] WU Yonghua, HU Huanling, HU Shunxing, *et al.* Rayleigh-Raman scattering lidar for atmospheric temperature profiles measurements [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 851-856 (吴永华, 胡欢陵, 胡顺星, 等. 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 851-856)
- [10] ZHANG Tiemin, WANG Jihong, LIU Hanjun. Observation of sporadic sodium layer over Haikou, China in 2010 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(5): 566-573 (张铁民, 王继红, 刘汉军. 2010年海口上空突发钠层观测 [J]. *空间科学学报*, 2015, **35**(5): 566-573)
- [11] 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]. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5**(10): 873-876
- [12] GONG S S, YANG G T, WANG J M, *et al.* A double sodium layer event observed over Wuhan, China by lidar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(5): 1209
- [13] KWON K H, SENFT D C, GARDNER C S. Lidar observations of sporadic sodium layers at Mauna Kea observatory, Hawaii [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(20): 14199-14208
- [14] BATISTA P P, CLEMESHA B R, SIMONICH D M, *et al.* Simultaneous lidar observation of a sporadic sodium layer, a "wall" event in the OH and OI5577 airglow images and the meteor winds [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**(12-14): 1327-1335
- [15] GARDNER C S, VOELZ D G, SECHRIST C F Jr, *et al.* Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois: 1. Seasonal and nocturnal variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(A12): 13659-13673
- [16] XU Jiyao, SMITH A K, COLLINS R C, *et al.* Signature of an overturning gravity wave in the mesospheric sodium layer: comparison of a nonlinear photochemical-dynamical model and lidar observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(D17): D17301