

## 大气重力波引起的偶发钠层研究

程永强<sup>1,2</sup>, 胡 雄<sup>1</sup>, 闫召爱<sup>1</sup>, 郭商勇<sup>1</sup>, 王 博<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 利用了中国科学院临近空间环境野外综合探测站(廊坊, 39°N, 116°E)的钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的探测数据对廊坊上空大气重力波引起的偶发钠层(SSL)进行了研究。首先从大气重力波方程出发, 计算分析了大气水平风剪切和垂直风场之间的相位关系; 其次利用了钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的实测数据对大气重力波引起的偶发钠层进行了分析研究; 经研究分析可知, 由于大气重力波引起强的水平风切变和垂直风场风向反转的共同作用, 其堆积效应使得钠原子密度增强, 形成了偶发钠层。

**关键词:** 钠荧光多普勒激光雷达; 流星雷达; 大气重力波; 偶发钠层

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1030004

## Study of sporadic sodium layers guided by gravity waves

Cheng Yongqiang<sup>1,2</sup>, Hu Xiong<sup>1</sup>, Yan Zhaoai<sup>1</sup>, Guo Shangyong<sup>1</sup>, Wang Bo<sup>2</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The sporadic sodium layers (SSL) caused by atmospheric gravity waves over Langfang (39°N, 116°E) is studied by using the sodium fluorescence Doppler lidar and the meteor radar detection data of the near space environment comprehensive exploration station, Chinese Academy of Sciences. Firstly, the phase relationship between the atmospheric horizontal wind and vertical wind field was calculated and analyzed by the atmospheric gravity wave equation. Secondly, the SSL caused by atmospheric gravity waves was analyzed by the experimental data of the sodium fluorescence lidar and the meteor radar. The results show that the accumulation and joint action of the strong horizontal wind shear and vertical wind field direction caused by the atmospheric gravity wave increases the density of sodium atoms and form the SSL.

**Key words:** sodium fluorescence Doppler lidar; meteor radar; gravity waves; SSL

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(41104100); 中国科学院科研装备研制项目(YZ201130)

作者简介: 程永强(1981-), 男, 博士生, 主要从事临近空间环境探测和激光雷达技术研究。Email: chengyq@nssc.ac.cn

导师简介: 胡雄(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事临近空间环境的研究工作。Email: xhu@nssc.ac.cn

## 0 引言

在距离地面大约 80~105 km 高度范围内存在着钠原子层,其处于中间层顶大气和低电离层的交汇区,其间充满着极其复杂的光化学过程和动力过程,因其难以探测,有许多现象一直是研究的热点和难点。地基激光雷达对钠层的探测可以追溯到上世纪六十年代,并且积累了大量关于钠层形态特征的观测结果<sup>[1]</sup>。从钠层观测的结果中可以发现,偶发钠层(Sporadic Sodium Layer, SSL)是钠层最显著的现象之一。偶发钠层是指在极狭窄的高度范围内钠层密度在短时间迅速增加至同一高度整夜平均背景钠密度 2 倍以上的一种偶发现象<sup>[2]</sup>。Clemesha 等人 1978 年首次观测到偶发钠层,随后偶发钠层在各地均有报道<sup>[3]</sup>。由于偶发钠层是钠层短时间尺度上最显著的现象,自 1978 年第一次观测到目前一直吸引着众多学者的研究目光。偶发钠层的形成被认为与其他一些大气成分(例如 Na<sup>+</sup>、NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)的重新分布、大气重力波的传播与破碎电离层活动、风剪切、温度以及极光活动等大气参数的变化有关<sup>[4-7]</sup>。因此,将偶发钠层可以作为这些大气参数的示踪物,对于了解中层顶各项大气参数的耦合过程具有重要意义。

关于偶发钠层的形成机制可以归纳为两个:一是外部注入;二是大气动力学因素。Kirkwood 和 Collis 提出偶发钠层的形成,大气动力学因素是其主要原因之一,例如大气重力波的作用。他假设了一个正弦变化的垂直风场,并对偶发钠层的形成过程做了数值模拟,结果表明 SSL 的形成高度,峰宽和持续时间都与实测数据比较吻合<sup>[8]</sup>。Gong 和 Liu 等通过对中国武汉地区钠荧光激光雷达观测到的几次偶发钠层现象的深入分析,认为大气动力学因素可能是武汉地区 SSL 生成的主要原因<sup>[9-10]</sup>。Tan 等在改进 Kirkwood 风场模式的基础上,对重力波垂直风场形成偶发钠层的过程进行了模拟研究<sup>[11]</sup>。Qiu 等研究了中高层大气偶发钠层区域特征及机制研究,给出了偶发 E 层(Es)理论和温度控制理论在突发钠层的形成过程中所起到的相关作用,并认为中纬度附近突发钠层的发生概率非常低,其主要受到温度升高和风剪切以及大气重力波的影响<sup>[12]</sup>。文中首先从大

气重力波波动方程出发,计算分析了大气水平风剪切和垂直风场之间的相位关系,并给出了二者之间的相位关系图;其次利用钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的实测数据对大气重力波引起的偶发钠层进行了分析研究;最后给出了结论。

## 1 大气重力波方程

根据 David G 和 James R 在中层大气动力学中对大气惯性重力波描述的公式(1)如下:

$$(u', v', w', \phi') = e^{j(2\pi H)} \text{Re}[(\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}, \hat{\phi}) \exp i(kx + ly + mz - \omega t)] \quad (1)$$

式中:  $u', v', w'$  为大气重力波的纬向( $x$ 轴)、径向( $y$ 轴)、垂直方向( $z$ 轴)的分量;  $\phi'$  为位势;  $k, l, m$  分别为纬向、径向、垂直方向的波束;  $f$  为科氏参量;  $\omega$  为波动频率;  $N$  为浮力频率;  $H$  为大气标高<sup>[13]</sup>。由公式(1)可得:

$$\hat{u} = (\omega^2 - f^2)^{-1} (\omega k + i l f) \hat{\phi} \quad (2)$$

$$\hat{v} = (\omega^2 - f^2)^{-1} (\omega l - i k f) \hat{\phi} \quad (3)$$

$$\hat{w} = -\frac{\omega}{N^2} (m - \frac{i}{2H}) \hat{\phi} \quad (4)$$

$$\omega^2 - f^2 = \frac{N^2(k^2 + l^2)}{m^2 + 1/4H^2} \quad (5)$$

由公式(2)~(5)可得纬向风剪切和经向风剪切与垂直风场之间的相位关系如下:

$$\frac{\partial u'}{\partial z} = \frac{-i(\omega k + i l f) N^2}{\omega(\omega^2 - f^2)} \hat{w} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial z} = \frac{-i(\omega l - i k f) N^2}{\omega(\omega^2 - f^2)} \hat{w} \quad (7)$$

将公式(6)~(7)中的  $k, l, N, f, \omega$  取典型值,可得水平风剪切和垂直风场之间随高度变化的相位关系如图 1 所示。图中  $w$  为垂直风场,  $\partial v'/\partial z$ 、 $\partial u'/\partial z$  分别

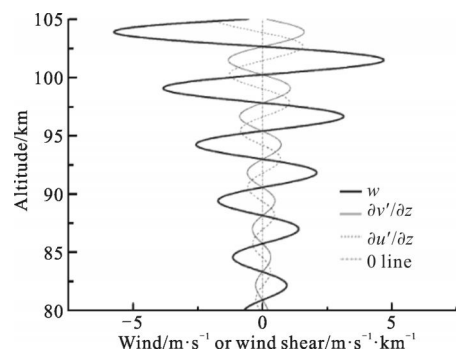


图 1 水平风剪切和垂直风场之间的相位关系图

Fig. 1 Phase diagram of horizontal wind shear and vertical wind

为大气重力波的径向和纬向风剪切, 0 line 为 0 线。由图 1 可知, 大气重力波的径向和纬向风剪切与垂直风场的相位差分别为  $\pi$  和  $-\pi/2$ 。

## 2 探测结果与分析

### 2.1 探测设备

#### 2.1.1 钠荧光多普勒激光雷达

中国科学院国家空间科学中心自主研制了国内第一台钠荧光多普勒激光雷达系统, 该设备利用窄线宽高功率的 589 nm 激光激发中间层顶区域的钠原子发射共振荧光, 通过分析荧光的多普勒谱线展宽与频移获得该区域的大气温度、风场以及钠原子数密度等。该激光雷达系统主要包括发射系统、接收系统、数据采集与控制系统以及数据处理与分析系统等, 分别如图 2 中 1、2、3、4 所示, 钠荧光多普勒激光雷达系统技术参数见表 1<sup>[14-16]</sup>。

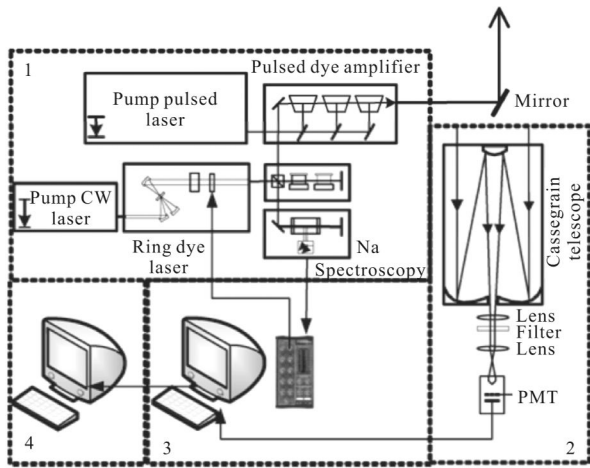


图 2 钠荧光多普勒激光雷达系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the sodium fluorescence Doppler lidar system

表 1 钠荧光多普勒激光雷系统参数

Tab.1 Parameter of the sodium fluorescence Doppler lidar system

Parameters	Value
Laser wavelength	589.158 nm
Shifted frequency	$\pm 630$ MHz
Laser power	$\sim 1$ W
Repetition rate	30 Hz
Pulse length	$\sim 7$ ns
Beam divergence	$\sim 1$ mrad
Telescope aperture	1 000 mm

#### 2.1.2 流星雷达

位于廊坊站的流星雷达通过发射 VHF 波段的

无线电波, 接收低电离层高度(100 km 左右)由流星与大气摩擦烧蚀产生流星尾迹的反射回波, 可获得在 70~110 km 高度范围内大气风场等各种环境参数。流星雷达系统参数见表 2。

表 2 流星雷达系统参数

Tab.2 Parameter of the meteor radar

Parameters	Value
Pulse power	20 kW
Frequency	$\sim 35$ MHz
Detection parameters	Horizontal wind
Detection range	70~110 km
Range resolution	2 km
Time resolution	1 h

### 2.2 结果与分析

文中选取了钠荧光多普勒激光雷达观测到廊坊上空 3 个典型的偶发钠层事件(时间分辨率为 10 min, 高度分辨率为 77 m), 并利用廊坊站的钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的联合观测数据对廊坊上空大气重力波引起的偶发钠层进行了分析研究。

图 3(a1)显示了 2011 年 3 月 28 日夜間廊坊钠荧光多普勒激光雷达观测到了一次偶发钠层事件。偶发从 17:39 UT 持续到 18:29 UT, 约 50 min, 突发强度约为 2.5 倍。这次偶发钠层达到峰值的时间为 18:05 UT, 峰值高度为 94.97 km, 半高全宽(FMHW)为 1.55 km, 密度最大值为  $10\ 095.6\ \text{cm}^{-3}$ ; 图 3(a2)为 2011 年 3 月 28 日夜間廊坊钠荧光多普勒激光雷达观测到钠层柱密度的变化, 可以看出在偶发钠层发生时段钠层柱密度均有所增强。图 4 为 2011 年 3 月 28 日晚 18:00 的廊坊站钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的实测数据, 其中图 4(a)、(b)分别为流星雷达探测到的经向和纬向水平风剪切, 图 4(c)、(d)分别为钠荧光多普勒激光雷达探测到的垂直风场(图中横短线为误差棒)和钠原子密度廓线(图中虚廓线为 Na 原子背景密度, 剔除了突发时段的 Na 原子密度)。由图 4(a)、(b)可以看出有较强的重力波传播, 其最大振幅约为 16 m/s, 垂直波长约为 12 km。

图 3(b1)显示了 2014 年 3 月 19 日夜間廊坊钠荧光多普勒激光雷达观测到了一次偶发钠层事件, 偶发从 16:20 UT 持续到 17:20 UT, 约 60 min, 偶发强度约为 2 倍。这次偶发钠层达到峰值的时间为 16:40 UT, 峰值高度为 94.195 km, 半高全宽(FMHW)为

2.77 km, 密度最大值为  $3342.6\text{ cm}^{-3}$ 。图 3(d) 为 2014 年 3 月 19 日夜间廊坊钠荧光多普勒激光雷达观测到钠层柱密度的变化, 可以看出在偶发钠层发生时段钠层柱密度均有所增强。图 5 为 2014 年 3 月 19 日晚 16:30UT 的廊坊站钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的实测数据, 其中图 5(a)、(b) 分别为流星雷达探测到的经向和纬向水平风剪切, 图 5(c)、(d) 分别为钠荧光多普勒激光雷达探测到的垂直风场 (图中横短线为误差棒) 和钠原子密度廓线 (图中虚廓线为 Na 原子背景密度, 剔除了突发时段的 Na 原子密度)。由图 5(a)、(b) 可以看出有较强的重力波传播, 其最大振幅约 12 m/s, 垂直波长约 10 km。

图 3(c1) 显示了 2014 年 4 月 4 日夜间廊坊钠荧光多普勒激光雷达观测到了一次偶发钠层事件, 偶发从 16:10 UT 持续到 16:50 UT, 约 40 min, 偶发强度约为 2 倍。这次偶发钠层达到峰值的时间为 16:35 UT, 峰值高度为 92.89 km, 半高全宽 (FMHW) 为 2.32 km, 密度最大值为  $2660\text{ cm}^{-3}$ 。图 3(c2) 为 2014 年 4 月 4 日夜间廊坊钠荧光多普勒激光雷达观测到钠层柱密度的变化, 可以看出在偶发钠层发生时段钠层柱密度均有所增强。图 6 为 2014 年 4 月 4 日晚 16:30 的廊坊站钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的实测数据, 其中图 6(a)、(b) 分别为流星雷达探测到的经向和纬向水平风剪切, 图 6(c)、(d) 分别为钠荧光多普勒激光雷达探测到的垂直风场 (图中横短线为误差棒) 和钠原子密度廓线 (图中虚廓线为 Na 原子背景密度, 剔除了突发时段的 Na 原子密度)。由图 6(a)、(b) 可以看出有较强的重力波传播, 其最大振幅约为 20 m/s, 垂直波长约为 14 km。

从图 4(a) 和 (b)、5(a) 和 (b)、6(a) 和 (b) 中能明确

看出水平风剪切之间存在约  $\pi/2$  的相位差, 同时在偶发钠层的峰值高度上径向和纬向风剪切与垂直风场之间存在分别为约  $\pi$  和约  $-\pi/2$  的相位差, 依据第 1 小节的理论分析可以推知, 文中的风剪切由大气重力波引起; 同时对比图 4~6 中水平风剪切与 Na 密度廓线可知, 偶发钠层的峰值高度与纬向风剪切峰

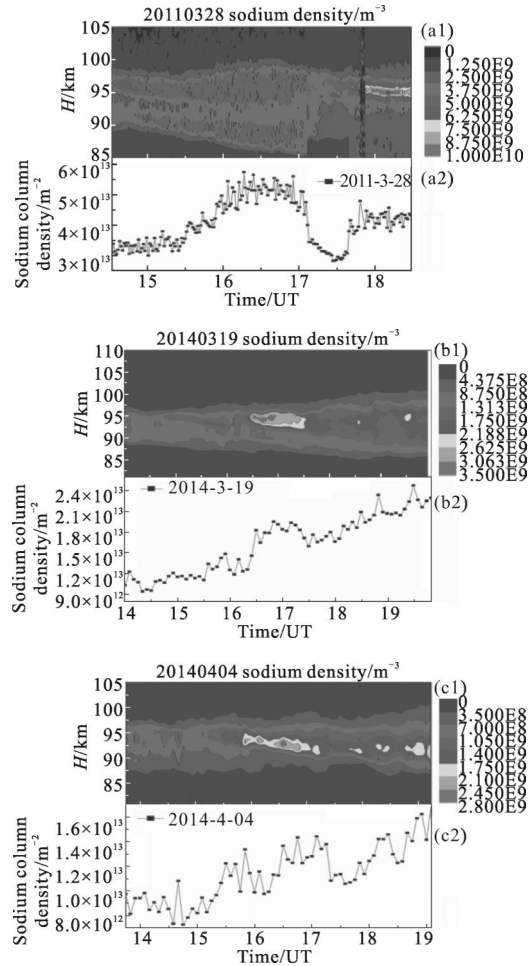


图 3 3 个典型的偶发钠层事件

Fig.3 Three typical sporadic sodium layers events

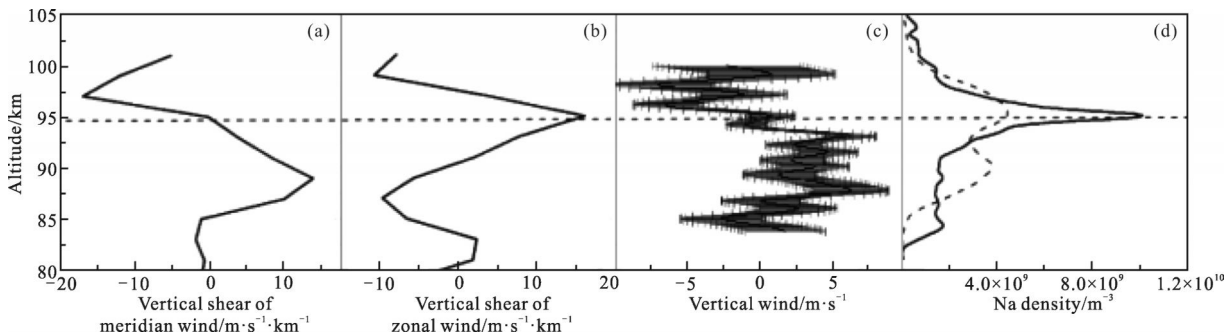


图 4 2011 年 3 月 28 日 18:05 的廊坊站观测结果

Fig.4 Observation results of the Langfang at 18:05UT on Mar 28(th) 2011

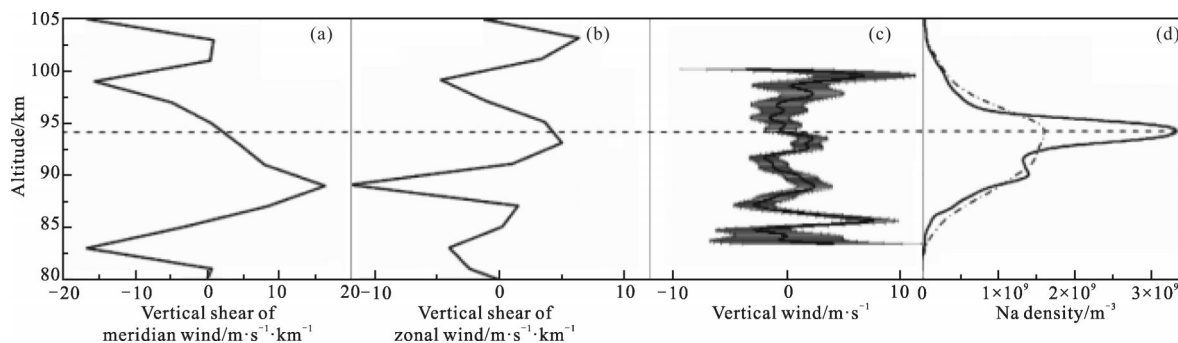


图 5 2014 年 3 月 19 日 16:40 廊坊站观测结果

Fig.5 Observation results of the Langfang at 16:40UT on Mar 19(th) 2014

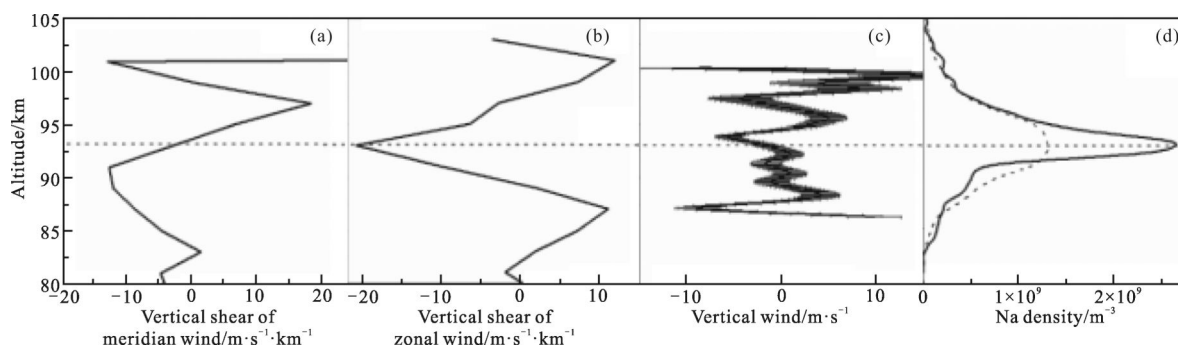


图 6 2014 年 4 月 04 日 16:35 廊坊站观测结果

Fig.6 Observation results of the Langfang at 16:35UT on Apr 04(th)2014

值高度处吻合的较好,即偶发钠层与风剪切表现出强相关;另外由图 4~6 可以看出,在此高度附近垂直风场风向反转,偶发钠层的峰值高度附近上方垂直风向为向下,而峰值高度附近下方的垂直风向为向上,这种垂直风场的上下同时压缩和堆积效应可使得钠原子密度增强。因此,由大气重力波引起强的风切变和垂直风场的风向反转共同作用,其堆积效应使得钠原子密度增强,形成了偶发钠层。综上所述,大气重力波是引起廊坊上空偶发钠层的主要因素之一。另外因将钠荧光多普勒激光雷达的温度数据分析后,发现温度的加热效应和这三个观测事例并无较强的相关性,故在此不再做分析研究。

### 3 结论

文中利用了中国科学院临近空间环境野外综合探测站(廊坊,39°N,116°E)的钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的探测数据对廊坊上空大气重力波引起的偶发钠层(SSL)进行了研究。首先利用大气重力波方程计算分析了大气水平风剪切和垂直风场之间

的相位关系,并给出了二者之间的相位关系图;其次利用了钠荧光多普勒激光雷达和流星雷达的实测数据对大气重力波引起的偶发钠层进行了分析研究。经以上分析可知大气重力波引起偶发钠层的形成过程为:在中层顶区域存在各种波动过程,如大气重力波、潮汐波和行星波等,这些波动在某一高度叠加在一起相互作用形成了强的风切变和垂直风场风向反转,其堆积效应使得钠原子密度增强,形成了 SSL。因此可得,大气重力波是引起廊坊上空的偶发钠层的主要因素之一。

由于 SSL 形成机理的研究牵涉到风场、电离层、温度、气辉等许多参数,在今后的工作中随着廊坊站激光雷达和其他探测设备数据的积累,对廊坊上空偶发钠层形成机理分析将会更加深入。

### 4 致谢

感谢美国科罗拉多州立大学 Shechiao Yao 教授,美国科罗拉多大学 Chuxin Zhao 教授等在笔者建立钠荧光多普勒激光雷达系统过程中给予的帮助。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Von Zahn V, Hansen T L. Sudden neutral sodium layers: a strong link to sporadic E layers [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1988, 50(2): 93–104.
- [3] Clemesha B R, Batista P P, Simonich D M. Concerning the origin of enhanced sodium layers [J]. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15(11): 1267–1270.
- [4] Von Zahn V, Von Der Gathen P, Hansen G. Forced release of sodium from upper atmospheric dust particle [J]. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14(1): 76–79.
- [5] Williams B P, Croskey C L, She C Y. Sporadic sodium and E layers observed during the summer 2002MaCWAVE/MIDAS rocket campaign[J]. *Ann Geophys*, 2006, 24: 1257–1266.
- [6] Sridharan S, VishnuPrasanth P, BhavaniKumar Y. Observations of peculiar sporadic sodium structures and their relation with wind variations [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, 71: 575–582.
- [7] Dou X K, Xue X H, Li T. Possible relations between meteors, enhanced electron density layers, and sporadic sodium layers[J]. *J Geophys Res*, 2010(115): A06311.
- [8] Kirkwood S, Collis P N. Gravity wave generation of simultaneous auroral sporadic-E layers and sudden neutral sodium layers[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1989, 51(4): 259–269.
- [9] Gong S S. First time observation of sodium layer over Wuhan China by sodium fluorescence lidar [J]. *Chinese Sci*, 1997, (40): 11–15. (in Chinese)
- [10] Liu J B. Study of Formation Mechanism of Sudden Sodium Layers over Wuhan[M]. Wuhan: Wuhan University, 2003.(in Chinese)
- [11] TAN H, WAN W X. Simulation and research of sudden sodium layer guided by gravity waves [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000, 22(4): 339–345. (in Chinese)
- [12] QIU S C. Regional characteristics and possible mechanisms of the sporadic sodium layers [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [13] David G A, James R H, Conway B L, et al. Middle Atmosphere Dynamics[M]. Orlando: Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 1987: 197–200.
- [14] Cheng Yongqian, Hu Xiong, Xu Li, et al. Advances of Na Lidar in near space detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(9): 28–31. (in Chinese)
- [15] Xu Li, Hu Xiong, Yan Zhaoai, et al. Retrieval method of atmospheric parameters for a sodium Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 140–143. (in Chinese)
- [16] Hu Xiong, Yan Zaoai, Guo Shangyong, et al. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56: 417–423.(in Chinese)