0254-6124/2021/41(2)-279–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HU Yunjie, YI Fan. Structures and interannual variations of the nocturnal mesospheric Na and Fe layers at 30°N (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(2): 279-285. DOI:10.11728/cjss2021.02.279

北纬 30° 中层顶区域钠与铁原子层的结构和年际变化 *

胡云杰　易　帆

(武汉大学电子信息学院　武汉 430072)

摘　要　基于武汉大学 Na 和 Fe 激光雷达在 2004 年 1 月至 2011 年 12 月期间的观测数据, 得到武汉上空中层顶区域 Na 和 Fe 原子层的平均特性、夜间变化和季节变化特征. Na 层平均质心高度为 91.36 km, 平均 RMS (均方根) 宽度为 4.64 km. Fe 层平均质心高度为 88.99 km, 平均 RMS 宽度为 4.57 km. 在充分考虑金属层夜间变化和季节变化对数据样本影响的基础上, 获取了 Na 层和 Fe 层结构在此期间的年际变化特征. 对 Na 层和 Fe 层质心高度及 RMS 宽度的年际变化进行线性拟合, 发现 Na 层和 Fe 层在此期间均相对稳定, Na 层质心高度在近 8 年间仅有约 58 m 的下降, 变化率为 $-7.91\,\mathrm{m{\cdot}a^{-1}}$, Na 层 RMS 宽度减小约 151 m, 变化率为 $-20.60\,\mathrm{m{\cdot}a^{-1}}$. 同期, Fe 层的质心高度下降了约 230 m, 变化率为 $-31.36\,\mathrm{m{\cdot}a^{-1}}$, Fe 层 RMS 宽度则有所增大, 变化率为 $21.01\,\mathrm{m{\cdot}a^{-1}}$.

关键词　金属层, 激光雷达, 质心高度, RMS 宽度, 年际变化

中图分类号　P 356

Structures and Interannual Variations of the Nocturnal Mesospheric Na and Fe Layers at 30°N

HU Yunjie　YI Fan

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

Abstract　By analyzing the observational data of the Wuhan University Na and Fe lidars from January 2004 to December 2011, the average characteristics, nighttime and seasonal variations of the mesospheric Na and Fe layers at 30°N are obtained. The average centroid height of the Na layer is 91.36 km, while the average RMS (root-mean-square) width is 4.64 km. The corresponding results for the Fe layer are respectively 88.99 and 4.57 km. Considering the influence of the nighttime and seasonal changes of the Na and Fe layers, we extract the interannual changes of the Na and Fe layers. It is found that both the Na and Fe layers are relatively stable during this period. The centroid height of the Na layer decreases by about 58 m in the nearly eight years with an annual change

* 国家自然科学基金项目资助 (41521063)

2020-03-31 收到原稿, 2021-01-18 收到修定稿

E-mail: 15071262749@163.com

rate of −7.91 m, and the RMS width of Na layer decreases by about 151 m with an change rate of $-20.60\,\mathrm{m\cdot a^{-1}}$. Meanwhile the centroid height of the Fe layer has a decrease of about 230 m with an annual change rate of $-31.36\,\mathrm{m\cdot a^{-1}}$, and the RMS width of the Fe layer show an increases with an annual change rate of $21.01\,\mathrm{m\cdot a^{-1}}$. In addition, the factors that affect the interannual variation of the metal layer were analyzed, and the similarities and differences between the Na layer and the Fe layer were drawn. Based on our research, it is estimated that the atmospheric temperature in the MLT region over Wuhan has a cooling trend closed to pre decade 0.85 K.

Key words Metallic layer, Lidar, Centroid height, RMS width, Interannual variations

0 引言

金属原子 (Na, Fe, K, Ca 等) 广泛分布于地球大气中层顶区域 (80~110 km), 这些金属原子主要来源于流星消融 [1−4]. 流星消融释放出自由的金属原子, 在复杂的气相化学反应、动力学过程和烟尘吸附作用下, 实现收支平衡, 形成一个峰值在约 90 km 的稳定金属层. 对金属层自身结构及其变化特性的研究有助于加深对中层顶区域的背景特性、各种化学过程和动力学过程的理解. 在这些金属原子中, 由于 Na 与 Fe 原子均具有适合的共振荧光波长, 且 Na 层和 Fe 层具有较高的粒子密度, 所以 Na 层和 Fe 层比较容易被共振荧光激光雷达探测到, 利用 Na 和 Fe 激光雷达技术探测金属层已经成为研究中层顶区域的重要途径.

自 1969 年首次利用 Na 共振荧光激光雷达探测中高层大气以来 [5], 全球许多地区先后建立起了金属层激光雷达观测站. 各个站点对当地金属层的夜间变化、季节变化及金属偶发层做了细致研究 [6,7], 而对金属层年际变化研究则鲜有报导, 这是因为研究年际变化需要积累大量的连续观测数据. Clemesha 等 [8−12] 曾基于巴西圣保罗的 Na 激光雷达数据进行了一系列研究, 深入分析了当地上空 Na 金属层的年际变化, 发现当地 Na 层质心高度仅呈现沉降速度为 $9.3\pm5.3\,\mathrm{m\cdot a^{-1}}$ 的小幅下降 [10], Na 层平均形态几乎没有变化, 此外 Clemesha 通过模式计算得出当地 Na 层质心高度与 Na 层所在区域背景温度的量化关系 [12], 认为 Na 层所在区域的背景温度在近 30 年内变化幅度较小, 约每 10 年下降 1 K.

武汉大学 Na 和 Fe 激光雷达自建成以来, 已经积累了时间跨度达 19 年的 Na 激光雷达数据以及时间跨度约 10 年的 Fe 激光雷达数据, 为研究武汉上空金属层提供了足量的观测数据. 在 2004 年 1 月至 2011 年 12 月近 8 年中, Na 和 Fe 激光雷达均积累了大量的连续观测数据, 使本文研究武汉上空 Na 层和 Fe 层在同时期的年际变化有了足够的数据支撑.

1 Na 与 Fe 荧光激光雷达系统及数据反演

武汉大学 Na 与 Fe 激光雷达分别于 2001 年 3 月和 2003 年 12 月建成并安装于武汉大学大气遥感观测站, 其工作原理及详细参数可参考文献 [13, 14], 在这里仅做简要介绍. Na 荧光激光雷达发射部分由 Nd:YAG 激光器和染料激光器组成, 工作波长为 589 nm, 单脉冲输出能量为 60 mJ, 重复频率为 20 Hz, 出射激光平均线宽为 1.5 GHz, 激光束发散角为 0.5 mrad, 激光束发射后, 激发高空 Na 原子, 使其辐射出共振荧光, 并产生后向散射光子回波, 后向散射光子经望远镜、滤波片、光电倍增管进入信号处理系统, 接收望远镜口径为 0.52 m, 接收视场角设置为 1.0 mrad. Fe 荧光激光雷达利用混频技术得到 372 nm 附近的紫外激光, 单脉冲输出能量为 40 mJ, 重复频率为 20 Hz, 出射激光平均线宽为 1.8 GHz, 激光束发散角为 0.5 mrad, 接收望远镜为直径 1 m 有效孔径的卡塞格林望远镜, 视场角设置为 1.0 mrad.

在激光雷达的观测过程中, 设定通道位宽 bin 为 640 ns, 对应高度分辨率为 96 m; 设定常规观测的累积次数为 4800 次, 对应时间分辨率为 5 min (当雷达采集的时间分辨率为 4 s 时 [15], 所使用的 5 min 光子计数剖面是对应时间段内 4 s 光子计数剖面的累积). 用标准反演方法 [16] 可以从光子计数剖面反演得到 Na 层与 Fe 层的数密度剖面, 在 z 高度处的金

属原子数密度为

$$n(z)=\frac{z^2\sigma_{\rm R}n(z_{\rm R})}{z_{\rm R}^2\sigma_{\rm S}}\frac{[N(z)-N_{\rm B}]}{[N_{\rm R}(z_{\rm R})-N_{\rm B}]}. \tag{1}$$

其中, $N(z)$ 为 z 高度处在 Δz (高度分辨率) 范围 Δt (时间分辨率) 时间内积累的回波光子数; $N_{\rm B}$ 为背景噪声, $N_{\rm R}(z_{\rm R})$ 为参考高度 $z_{\rm R}$ 附近 5 km 范围内的平均回波光子计数; $\sigma_{\rm R}$ 为大气分子瑞利微分散射截面; $\sigma_{\rm S}$ 为金属原子有效散射截面, 是激光线型与金属原子超精细结构的卷积, 为方便计算, 通常取定值; 参考高度 $z_{\rm R}$ 取为 30 km, 对应的大气密度 $n(z_{\rm R})$ 为 $3.828\times10^{23}{\rm m}^{-3}$, 由于参考高度的实际大气密度是在小范围内浮动的, 所以通过式 (1) 计算得到的密度剖面存在微小的标定误差, 由气球数据得到武汉地区参考点大气密度的标定误差约为 8.2%[7]. 柱密度 ρ、质心高度 $C_{\rm S}$、均方根宽度 $W_{\rm rms}$ 是金属层研究的三个重要参数, 计算公式分别为

$$\rho=m_0, \tag{2}$$

$$C_{\rm S}=m_1/m_0, \tag{3}$$

$$W_{\rm rms}=\left[\frac{m_2}{m_0}-\left(\frac{m_1}{m_0}\right)^2\right]^{1/2}. \tag{4}$$

其中, m_i 的计算公式为

$$m_i=\int_{z_0-\Delta z_0}^{z_0+\Delta z_0}z^i n(z){\rm d}z. \tag{5}$$

z_0 选为 90 km, $\Delta z_0=15$ km, $n(z)$ 为式 (1) 所求高度 z 处的金属数密度. 由于密度剖面存在标定误差, 故应避免使用柱密度这一参数研究金属层微弱的年际变化. 金属层另外两个主要参数质心高度 $C_{\rm S}$ 和半高宽 $W_{\rm rms}$ 的计算过程将抵消 $n(z)$ 项, 因此不受参考点数值标定的影响, 更适合用来研究可能相对微弱的年际变化, 所以本文通过这两个参数研究金属层的年际变化.

武汉大学激光雷达经常会观测到偶发 Na 层与 Fe 层 [13,17], 偶发层在较窄的高度范围内呈现密度陡然增大, 达到背景层密度的 2 倍以上, 会在很大程度上影响金属层主层质心高度和 RMS 宽度的测定. 为了得到主层的平均特性及变化规律, 将出现 Na 与 Fe 偶发层的剖面从所观测到的数据中剔除, 再将整晚有效观测时长小于 3 h 的数据排除, 以保证所选数据能代表当晚金属层的平均特性, 而不是当晚某个时段的特征. 处理之后, 共得到 181 晚 16 275 个有效 Na 密度剖面数据, 因设定雷达的时间分辨率为 5 min, 即每个剖面数据对应 5 min 的观测时长, 故平均每晚有效观测时长为 7.49 h; Fe 激光雷达有效观测 199 晚, 平均每晚有效观测时长为 6.96 h.

2 观测结果及讨论

Na 与 Fe 激光雷达均在晴朗的夜晚进行观测, 雷达观测起止时间没有规律, 每晚的有效观测时间段不定, 数据的季节分布也不均匀, 通常每年秋冬季观测数据较多. 因为雷达数据在夜间与季节的分布不均匀, 因此在提取金属层的年际变化前, 要获取金属层的平均夜间变化和季节变化, 并评估金属层的夜间变化与季节变化对从雷达数据中提取金属层年际变化的影响. 因为在提取背景 Na 层与 Fe 层的年际变化过程中, 对 Na 数据与 Fe 数据使用了相似的处理方法, 所以这部分主要介绍对 Na 数据处理的方法及过程, 对 Fe 数据仅给出了处理后的最终结果.

2.1 Na 层平均夜间变化

图 1 给出的是将不同夜晚相同时间的所有有效 Na 密度剖面进行平均后得到的 Na 原子数密度随夜间时间的变化情况. 可以看到 Na 层的夜间变化比较平稳, Na 原子数密度的峰值在后半夜有所增加, RMS 宽度整体在前半夜减小, 后半夜增大. 为了更细致地描述 Na 层夜间变化, 图 2 给出 Na 层质心高度和 RMS 宽度随夜间时间的变化情况. 可见质心高度整夜在 91.4 km 附近小幅振荡, 在 20:15 LT 达到最小值 91.19 km, 在 05:00 LT 达到最大值 91.55 km, 整夜涨幅为 0.36 km. 而 RMS 宽度整夜起伏较大, RMS 宽度在前半夜呈整体下降趋势, 从 20:15 LT 的 4.89 km

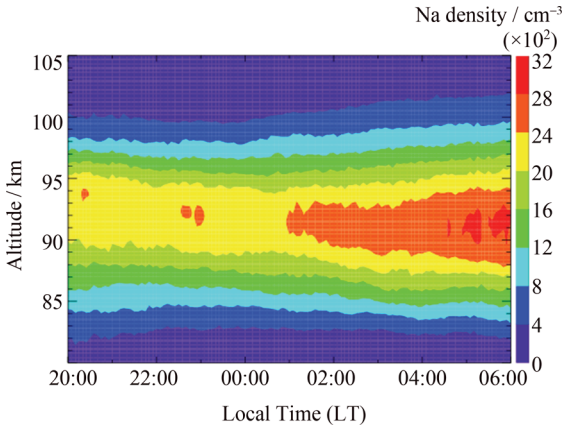


图 1 武汉上空 Na 层原子数密度平均夜间变化

Fig. 1 Averaged nocturnal variations of Na layer over Wuhan

下降到 23:25 LT 的 4.39 km, RMS 宽度在后半夜除在日出阶段 (05:00 LT) 有一个明显的凹陷外, 整体呈上升趋势, 在 06:00 LT 达到最大值 4.96 km. RMS 宽度整夜涨幅为 0.57 km, 但是整体呈现以 00:00 LT 时刻对称的前半夜下降, 后半夜上升的变化趋势.

Na 层在单个夜晚的形态变化受微流星注入、化学反应和动力传输等过程的影响, 其中动力传输占主导作用, 导致 Na 层在单个夜晚的变化幅度可能较大, 且各个夜晚 (包括相邻夜晚) 的形态也会有较大差异, 但在将所有 Na 剖面按照对应的时间进行平均后, 大气波动因素对 Na 层夜间变化的影响理论上将被削弱, 这在图 2(a) 中 Na 层质心高度整夜较小的涨幅上有所体现.

整夜 Na 层质心高度变化较小, 虽然 RMS 宽度整夜的相对变化较大, 但是关于 00:00 LT 有一定的对称性, 而雷达数据在夜间时间上的分布较均匀, 在 00:00 LT 时刻附近相对稍多、入夜和日出阶段数据相对较少, 同样关于 00:00 LT 对称, 因此不需要选取特定时间段的数据减小 Na 层夜间变化对提取年际变化的影响. 另外, 因为保证每晚至少有效观测 3 h, 平均观测时长为 7.49 h, 故可以用每晚有效数据的平均质心高度和平均 RMS 宽度表征当晚 Na 层的平均形态, 以此进行 Na 层季节变化与年际变化的研究.

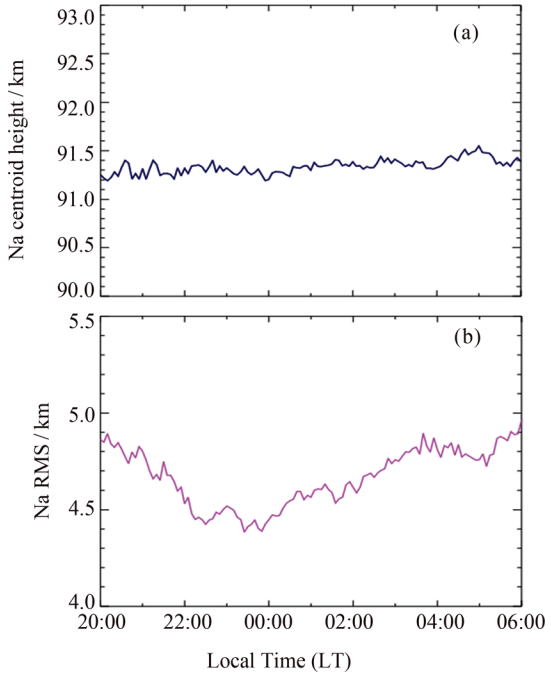


图 2 武汉上空 Na 层质心高度 (a) 和半高宽 (b) 的平均夜间变化

Fig. 2 Averaged nocturnal variations of centroid height (a) and RMS Width (b) of Na layer over Wuhan

2.2 Na 层的季节变化

为了描述 Na 层的季节变化, 计算得到 Na 层每个月所有有效剖面数据的平均质心高度、平均 RMS 宽度, 结果如图 3 所示. 图 3(a) 显示, Na 层的质心高度在 2 月和 8 月具有极大值, 分别为 92.07 km 及 92.12 km, 在 5 月和 10 月具有极小值, 分别为 90.91 km 及 91.15 km. 最大值与最小值相差 1.21 km, 且具有较明显的半年变化特征. 图 3(b) 显示 RMS 宽度也具有明显的半年变化特征, 其值在 1, 5, 6 和 12 月时值较大, 在 3 月和 10 月时值较小. 最大值为 6 月的 5.09 km, 最小值为 3 月的 4.12 km, 最大值与最小值相差 1.03 km. 可以看到, Na 层质心高度和 RMS 宽度的季节变化与其平均夜间变化相比, 均有更大的振幅, 且具有明显的半年变化特征.

Na 层的季节变化也可以通过 Na 层参数的季节散点图来表征, 计算得到每晚的平均质心高度和 RMS 宽度, 可以得到其随季节变化的散点图, 结果如图 4 所示. 不同夜晚的质心高度和 RMS 宽度差异较大, 1—10 月 Na 层的质心高度整体呈类 M 型分

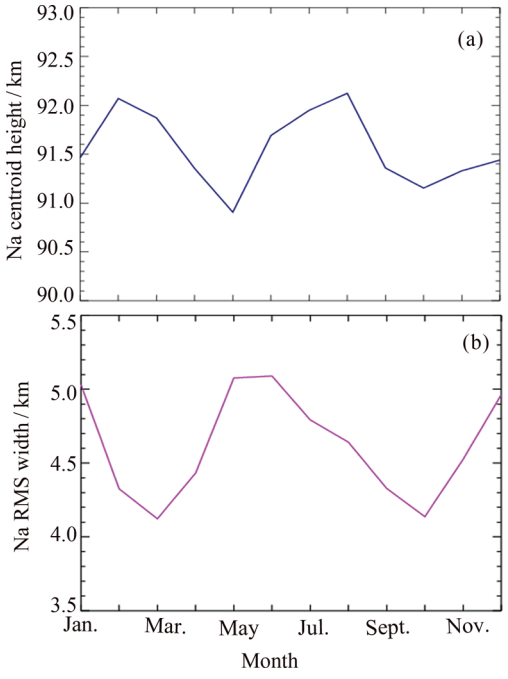


图 3 武汉上空 Na 层质心高度与半高宽的月变化

Fig. 3 Monthly averaged variations of centroid height (a) and RMS width (b) of Na layer over Wuhan

布, RMS 宽度则在整年呈类 W 型分布, 这与图 3 结果一致. 同时可以清晰看到观测数据量的季节分布, 在 6 月和 7 月观测数据较少, 秋冬季较多.

Na 金属层的季节变化主要受背景大气温度等因素季节变化的影响, 在夏季武汉上空中层顶区域背景大气温度较低, 有利于 Na 转化成 Na^+, 因此夏季 Na 层平均柱密度小于冬季. 因为 Na 层季节变化幅度较大, 具有明显的准半年变化特征, 且有效数据的季节分布不均匀, 秋冬季数据较多, 所以在提取金属层的年际变化时, 不可忽略季节变化的影响, 必须设法削弱数据样本季节差异带来的影响.

2.3 Na 层的年际变化

由 Na 层季节变化的分析可知, 武汉地区的季节变化具有明显的半年变化特征, 质心高度和 RMS 宽度的变化幅度均大于 1 km, 且因为武汉地区天气的影响, Na 激光雷达数据量的季节分布也不均匀, 在秋冬季积累的数据较多, 这种数据样本的季节不均匀性会对 Na 层年际变化的提取产生影响.

为了削弱这种影响, 尽可能准确的提取金属 Na 层的跨年变化, 需选取每年特定月份的数据. 由于在秋冬季 (9 月至 1 月) 里观测相对频繁, 且质心高度和 RMS 宽度在这几个月的季节变化幅度相对较小, 月平均质心高度最大值与最小值相差仅 0.21 km, 因此选取每年秋冬季观测数据进行年际变化研究. 这种做法的优点是既较大程度地剔除了季节变化这一影响因素, 又使用了足量的样本数据, 减小误差. 为了提取 Na 层形态的年际变化, 用每年秋冬季的数据进行计算, 得到每晚的平均质心高度和 RMS 宽度, 进而得到其随观测时间的散点图, 对这些散点进行随时间变化的线性拟合, 结果如图 5 所示.

图 5(a) 显示, 每年秋冬季有效观测天数不同, 但至少有 8 个夜晚的数据, 可以保证所选数据能够代表当年秋冬季的平均水平. 线性拟合结果表明, Na 主层质心高度在 8 年间的变化幅度很小, 仅从 2004 年的 91.376 km 下降到 2011 年的 91.318 km, 平均每年下降约 7.91 m, 这样的变化幅度与 Na 层质心高度的夜间变化、相邻夜晚变化、季节变化幅度相比, 可以忽略不计, 且与 Clemesha 等 [10] 在不同时空的研究得到的结果近乎一致. 图 5(b) 则表明, Na 主层 RMS 宽度在 8 年间略有减小, 线性拟合结果为从 2004 年的 4.680 km 减小到 2011 年的 4.529 km, 平均每年约减小 20.60 m. 因为质心高度和 RMS 宽度的测量都

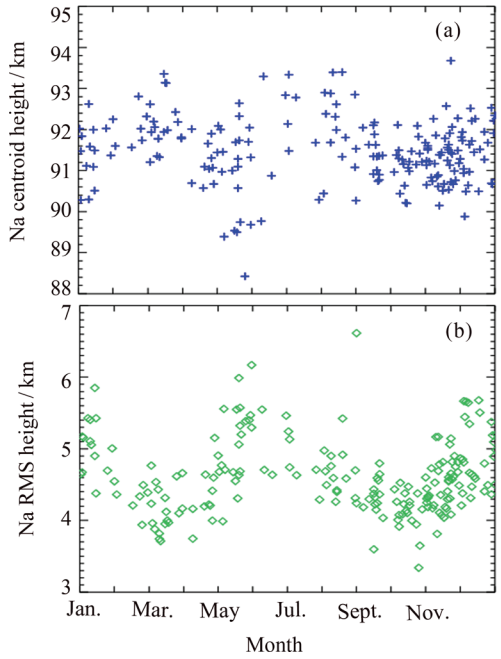


图 4 武汉上空 Na 层质心高度 (a) 与半高宽 (b) 的季节变化

Fig. 4 Nightly averaged Na centroid height (a) and RMS width (b), versus month over Wuhan

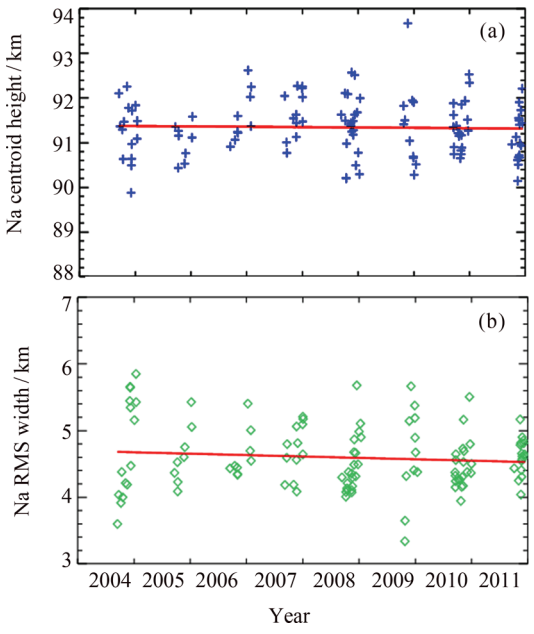


图 5 秋冬季武汉上空 Na 层质心高度 (a) 和半高宽 (b) 散点图及年际变化

Fig. 5 Nightly averaged Na centroid height (a) and RMS width (b) in autumn and winter, versus year over Wuhan

是基于对光子回波飞行时间的精确测量, 且年际变化的提取是在充分考虑夜间变化与季节变化对样本数据的影响后完成的, 因此本文结果具有很高的可靠性, 即 Na 层在这期间整体保持平稳, 平均每年质心高度下降 7.91 m, RMS 宽度减小 20.60 m.

金属层化学模型理论认为, 流星物质的注入、垂直扩散、化学反应和烟尘粒子吸附维持了金属层的动态收支平衡, 因此金属层任何时间尺度上的变化都是多重因素影响后的结果. 例如, 金属层夜间变化受流星注入量、背景温度、大气波动、化学反应等多种因素的夜间变化影响, 同理金属层的长期变化也是多重因素长期变化影响下的结果. 因为金属层的源来自于流星消融, 所以背景大气温度的长期变化会影响到大气等压线的升降, 从而导致金属层的整体上升或下移. 随着人类经济活动的进行, 中高层大气中 CO_2, O_3, H_2O 等的浓度变化, 也会通过气相化学作用模型影响金属层的形态变化, 例如 CO_2 的增加会加剧 NaOH 转化成稳定化合物 Na_2CO_3, 被烟尘粒子吸附, 这个过程主要出现在 Na 层底部, 会加速底层 Na 原子的汇过程, 因此 CO_2 的增加会提升 Na 层质心高度, 减小 RMS 宽度. 另外, 太阳活动的周期变化也会通过影响中层顶大气背景温度及改变气相化学作用模型中部分成分的含量两种方式影响金属层的年际变化.

总之, 金属层的长期变化是受背景大气诸多因素的长期变化共同影响的最终结果. Clemesha 等 [12] 对 Na 层质心高度进行了系统的模式研究, 对主要影响因素年际变化与金属 Na 层质心高度年际变化之间的响应关系进行了量化, 再结合除背景大气温度外影响因素 (例如 CO_2 等) 变量的测量值, 以及利用激光雷达测量得到的金属层质心高度的实际年变化率, 反推得到当地上空中层顶区域背景大气温度的年际变化. 最终通过计算发现, 当地上空中层顶区域背景大气温度具有每 10 年下降 1 K 的长期变化趋势.

Clemesha 的研究与本文的研究基于不同时空背景的金属 Na 层, 但是得到的结果却非常接近, 即 Na 层质心高度均有平均每年下降 10 m 左右的年际变化, 说明 Na 层质心高度的年际变化具有连续性和普适性. Clemesha 的模式研究具有一定的借鉴意义, 参考其得到的 Na 层质心高度年际变化对背景温度年际变化的响应关系, 估测在 2004 年到 2011 年底期间, 武汉 Na 金属层背景大气温度变化速率约为每 10 年下降 0.85 K.

2.4 Fe 层的年际变化

通过分析同时期 (2004−2011 年) 武汉地区 200 晚有效的 Fe 激光雷达数据, 得到在此期间金属 Fe 层的平均夜间变化和季节变化, 发现 Fe 层质心高度及 RMS 宽度的夜间变化幅度比 Na 层稍大, 但仍呈现出关于 00:00 LT 对称的特点, 因此 Fe 层的夜间变化同样不影响 Fe 层年际变化的提取. Fe 层的季节变化与 Na 层一样以半年振荡为主, 振幅稍大. 运用相似的处理方法提取 Fe 层的年际变化, 即选取 9 月至 1 月的 Fe 数据与时间进行线性拟合, 图 6 给出了秋冬季 Fe 层质心高度和 RMS 宽度随观测时间变化的散点图, 线性拟合显示: Fe 层质心高度与 Na 层质心高度呈现相同的下降趋势, 每年下降约 31.36 m, 下降幅度比 Na 层大; RMS 宽度则有所增大, 每年增大约 21.01 m, 与 Na 层 RMS 宽度的变化趋势相异.

这是首次获取同时期下同区域金属 Na 层与 Fe 层的年际变化, Na 层与 Fe 层质心高度年际变化趋势具有一致性, 即均有所下降, 说明背景温度是影响金属层质心高度的主导因素, 武汉上空中层顶区域温度下降; 同时, Na 层与 Fe 层的年际变化也有不同之处, 例如 Fe 层质心高度下降幅度大于 Na 层, Fe 层 RMS 宽度增大, Na 层减小, 这些差异可能与 Na 和 Fe 原

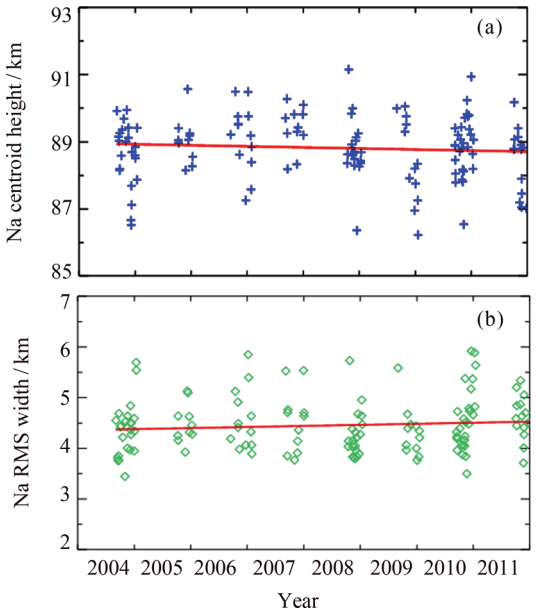


图 6 秋冬季武汉上空 Fe 层质心高度 (a) 和半高宽 (b) 散点图及年际变化

Fig. 6 Nightly averaged Fe centroid height (a) and RMS width (b) in autumn and winter, versus year over Wuhan

子具有不同沸点, Na 层和 Fe 层具有不同的化学反应模式及化学反应速率等因素有关, 这些因素的差异导致不同金属层对同种影响因素的年际变化具有相异响应, 即 Na 原子与 Fe 原子本身的物理及化学性质的差异性导致了两金属层年际变化的差异.

3 结论

对武汉大学 2004−2011 年 Na 和 Fe 激光雷达观测数据进行分析, 得到了 30°N 中层顶 Na 和 Fe 原子层的结构和年际变化. Na 层的平均质心高度为 91.36 km, 平均 RMS 宽度 (均方根宽度) 为 4.64 km; Fe 层的平均质心高度为 88.99 km, 平均 RMS 宽度为 4.57 km. 在考虑金属层夜间变化和季节变化对样本数据的影响后, 提取了金属层的年际变化. 研究结果表明, 相比相对平稳的夜间变化和准半年震荡的季节变化, Na 层和 Fe 层年际变化的幅度较小. Na 层的质心高度在 8 年时段内稍有下降, 平均每年下降 7.91 m; RMS 宽度呈现减小趋势, 平均每年减小 20.60 m. Fe 层的质心高度也有所下降, 平均每年下降 31.36 m, 下降幅度比 Na 主层稍大; 而 Fe 层的 RMS 宽度则在这 8 年间有个增大的趋势, 平均每年增大 21.01 m.

Na 层与 Fe 层的质心高度在同时期内均有所下降, 其中 Na 层质心高度平均每年下降 7.91 m, 与 Clemesha 基于不同时空下得到的结果 −9.3 m 很接近, 参考 Clemesha 的模式研究, 说明在这段时期武汉上空中层顶区域的背景温度具有微弱的下降趋势, 幅度约为每 10 年下降 0.85 K. 影响金属层年际变化的因素是多重且复杂的, 大气成分含量的长期变化及太阳活动的周期变化等均能对其产生实质性影响, 因不同金属原子物理特性及化学特性的差异, 不同金属层对这些变化因子的响应不尽相同, 这在 Na 和 Fe 金属层质心高度的下降幅度及 RMS 宽度的年际变化趋势上有所体现.

参考文献

[1] CLEMESHA B R, KIRCHHOFF V, SIMONICH D, *et al.* Evidence of an extra-terrestrial source for the mesospheric sodium layer [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5**: 873-876

[2] PLANE J, COX R, ROLLASON R. Metallic layers in the mesopause and lower thermosphere region [J]. *Adv. Space Res.*, 1999, **24**(11): 1559-1570

[3] ZENG L, YI F. Lidar observations of Fe and Na meteor trails with high temporal Resolution [J]. *J. Atmos. Sol.*: *Terr. Phys.*, 2011, **73**: 2367-2372

[4] YI F, ZHANG S, YU C, *et al.* Simultaneous and common-volume Fe and Na Lidar observations [J]. *J. Atmos. Sol.*: *Terr. Phys.*, 2013, **102**: 172-184

[5] BOWMAN M R, GIBSON A J, STANFORD M C. Atmosphere sodium measured by a tuned laser radar [J]. *Nature*, 1969, **221**: 456-457

[6] SIMONICH D, CLEMESHA B R, KIRCHHOFF V. The mesospheric Sodium layer at 23°S: nocturnal and seasonal variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 1543-1550

[7] YI F, YU C, ZHANG S, YUE X, *et al.* Seasonal variations of the nocturnal Na and Fe layers at 30°N [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: D01301

[8] CLEMESHA B R, SIMONICH B R, BATISTA P P. A long-term trend of the atmospheric Sodium layer: possible evidence for global change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**: 457-460

[9] CLEMESHA B R, BATISTA P P, SIMONICH D M. Long-term and solar cycle changes in the atmospheric sodium layer [J]. *J Atmos. Terr. Phys.*, 1997, **59**: 1673-1678

[10] CLEMESHA B R, BATISTA P P, SIMONICH D M. Long-term variations in the centroid height of the atmospheric sodium layer [J]. *Adv. Space Res.*, 2003, **32**: 1707-1711

[11] CLEMESHA B R, TAKAHASHI H, SIMONICH D M. Experiment evidence for solar cycle and long-term changes in the low-latitude MLT region [J]. *J. Atmos. Sol.*: *Terr. Phys.*, 2004, **67**: 191-196

[12] CLEMESHA B R, SIMONICH D M, BATISTA P P. Negligible long-term temperature trend in the upper atmosphere at 23°S [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2004, **109**: D05302. DOI: 10.1029/2003JD004243

[13] YI F, ZHANG S, ZENG H, *et al.* Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N,114.4°E) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(9): 1345

[14] YI F, ZHANG S, YU C, *et al.* Simultaneous observations of sporadic Fe and Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E) [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2007, **112**: 04303. DOI: 10.1029/2006JD007413

[15] LIU Y J, YI F. Behavior of sporadic Na layers on small scale [J]. *J. Atmos. Sol.*: *Terr. Phys.*, 2009, **32**(10): 1321-1332

[16] GARDNER C S. Na resonance fluorescence lidar applications in atmospheric science and astronomy [J]. *Proceed. IEEE*, 1989, **77**(3): 408-418

[17] MA Z, YI F. High-altitude sporadicmetal atom layers observed with Na and Fe lidars at 30°N [J]. *J Atmos. Terr. Phys.*, 2010, **72**: 482-491