0254-6124/2020/40(2)-215–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LU Zhenghua, YANG Guotao, WANG Jihong, JIAO Jing, XUN Yuchang. Daytime sodium lidar observations and studies of the tidal characteristics in winter over Beijing (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(2): 215-222. DOI:10.11728/cjss2020.02.215

北京上空冬季潮汐波活动特征全天时激光雷达探测研究 *

鲁正华[1,2] 杨国韬[1] 王继红[1] 焦 菁[1] 荀宇畅[1,2]

1(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)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 利用北京延庆子午工程激光雷达对北京上空钠层进行长期连续观测, 分析研究钠层及其相关参数的周日变化. 提取钠层各个高度上的相位信息, 与同时段经向风潮汐信息进行比较发现: 在各个高度上, 二者周日相位数值基本一致. 半日相位对比结果表明, 虽然存在差异, 但整体仍保持较好的一致性. 此外, 从 2014 年至 2016 年每年 10 月到第二年 1 月共 4 个月的钠层连续观测数据中提取钠层周日和半日的振幅和相位, 探究北京上空冬季的潮汐特征. 结果显示: 周日潮的相位自上向下传播, 且无明显的季节变化特征, 其垂直波长在 40∼50 km 的范围; 周日潮较强, 半日潮较弱.

关键词 激光雷达, 连续观测, 潮汐波

中图分类号 P 351

Daytime Sodium Lidar Observations and Studies of the Tidal Characteristics in Winter over Beijing

LU Zhenghua[1,2] YANG Guotao[1] WANG Jihong[1]

JIAO Jing[1] XUN Yuchang[1,2]

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

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Based on continuous observation of the sodium layer from lidar located in Yanqing, Beijing, the diurnal variation of the sodium layer and its relevant parameters can be analyzed. Comparing the phase information of sodium density from every altitude with the information from meridian wind at the same time, it can be found that the two diurnal phases are consistent with each other. Although the two semi-diurnal phases exist a little bit difference, as a whole, they two agree very well. Extracting the phase and amplitude from continuous sodium observation data

* 国家自然科学基金项目 (41474130, 41627804, 41604130), 北京市科技计划项目 (Z181100002918001), 中国科学院国家空间科学中心重点培育项目和国家重点实验室专项项目共同资助

2019-03-25 收到原稿, 2019-12-06 收到修定稿

E-mail: gtyang@spaceweather.ac.cn

from October to January from 2014 to 2016, tidal characters in fall over Beijing can be studied. The results show diurnal tide phases have unobvious seasonal variation and propagate upward with vertical wavelengths between 30 and 50 km. Besides, the diurnal tide is stronger than the semidiurnal tide.

Key words Lidar, Continuous observation, Tide wave

0 引言

钠层分布在 80~105 km 的高度范围, 一般认为其形成是流星消融的结果 [1,2]. 重力波和潮汐波对大气成分的垂直分布具有重要影响, 钠层是良好的波动示踪剂 [3−6]. 激光雷达观测钠层是一种十分有效的观测手段, 其观测数据有助于进一步理解中间层范围内的化学和动力学过程.

白天太阳光会造成很强的噪声, 20 世纪 70 年代以前钠共振荧光激光雷达只能在夜间进行观测. Gibson 等 [7] 和 Granier 等 [8] 利用标具或者原子滤光技术对激光雷达进行改进, 使得全天时钠层观测得以实现. Clemesha 等 [9] 和 Batista 等 [3] 等分别对钠层进行了长时间连续观测, 发现钠层周期变化是因为潮汐的影响. She 等 [10] 和 Yuan 等 [11] 等也观测到了钠层的潮汐变化, 并且发现周日振幅远小于半日振幅. Jiang 等 [12]、Xiong 等 [13] 及 Batista 等 [14] 等也利用流星雷达的风场数据进行了潮汐活动的研究. 全天时钠层激光雷达的出现使得通过钠层密度研究潮汐活动成为可能.

北京延庆台站 2014 至 2016 年对钠层进行了长时间连续观测, 本文利用连续观测得到的数据, 从钠密度的角度研究北京上空潮汐活动.

1 对北京上空钠层的观测

在原有的双波长激光雷达钠荧光接收通道上增加一个原子滤光器, 可以实现钠激光雷达的白天观测 [15]. 原子滤光器由原子共振泡和置于其两端的偏振片构成. 当光源通过原子滤光器时, 背景光被偏振片阻挡. 但是钠荧光可以与泡中原子发生共振, 并产生偏振面的法拉第旋转, 在合适的磁场和温度条件下使偏振面正好旋转 90° 的奇数倍, 进而使共振荧光通过第二个偏振片. 白天激光雷达的详细技术详见文献 [15].

通过添加原子滤光器, 实现了对北京上空钠层长时间连续观测. 激光雷达原始数据的时间分辨率为 0.56 min, 高度分辨率为 96 m. 对每 6.7 min 的数据进行累加, 通过降低时间分辨率, 产生较高信噪比的数据. 此外, 本文主要关注潮汐波活动对钠层的影响, 因此舍去了明显不是由潮汐波引起的钠密度扰动数据, 例如钠突发的数据.

受天气影响, 北京夏季钠层长时间连续观测的有效数据较少, 数据主要集中在 10−12 月以及 1 月这 4 个月. 本文利用 2014 至 2016 年冬季的数据进行北京冬季潮汐活动研究, 认为连续观测时长超过 48 h 为有效长时间观测数据. 其中 10 月包含 6 个长时间观测数据, 11 月包含 6 个长时间观测数据, 12 月包含 5 个长时间观测数据, 1 月包含 7 个长时间观测数据. 数据的详细信息列于表 1.

2 数据观测及分析结果

2.1 钠层的观测结果

图 1 给出了 2014 年 12 月 7−9 日钠密度随时间的变化情况. 从图 1 可以看到: 20:00 LT 时钠层的峰

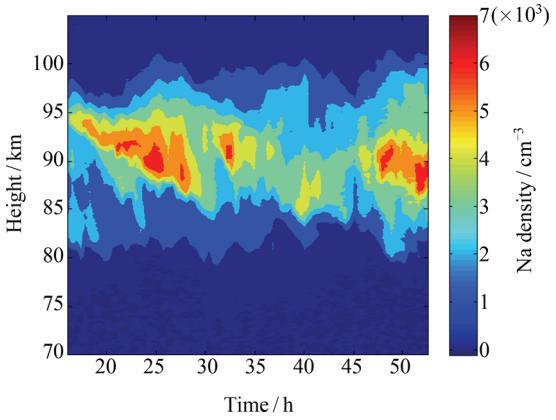


图 1 2014 年 12 月 7−9 日北京上空钠密度随时间的变化

Fig. 1 Diurnal variation of Na over Beijing from 7 to 9 in December 2014

值高度为 94 km, 随着时间变化, 峰值高度稳定下降; 次日 22:00 LT 时刻 85 km 处峰值消失. 整个钠层峰值高度稳定下降过程持续了约 24 h. 次日 22:00 LT 时刻 94 km 处峰值形成并继续开始下降. 20:00 LT 时刻 94 km 处和 22:00 LT 时刻 94 km 处的峰值并不完全由潮汐扰动造成. 仅考虑波动扰动的线性影响因素, 即使波的振幅很大, 潮汐扰动对 94 km 高度范围内的钠密度影响依然很小 [16]. 因此, 这两处峰值的出现并不完全由潮汐扰动造成, 其可能是新的钠源注入或者钠层突发的结果.

在以往钠层周期变化的研究分析中, 钠层的柱密度 (Column abundance)、质心高度 (CH) 以及半高全宽 (RMS) 是重要的衡量指标 [9,17,18]. 图 2 给出了这些参数的周日变化和对这些参数的拟合结果. 由图 2 可以看出: 钠层柱密度平均值为 $5.4\times10^9\,\mathrm{cm}^{-2}$, 柱密度在 02:00 LT 达到最大值, 在 20:00 LT 达到最小值, 周日变化振幅大于半日变化振幅; 质心高度的平均值为 90.6 km, 在 01:00 LT 达到最大值, 在 18:00 LT 达到最小值, 受周日和半日变化共同影响; 半高宽度 (RMS) 的平均值为 4.9 km, 其最小值在 21:00 LT 时刻出现. 上述结果表明这三个参数呈现明显的日变化规律.

表 1 2014 至 2016 年北京钠层连续长时间观测数据

Table 1 Continuous Na layer observations over Beijing from 2014 to 2016

月份	数据量/个	观测时长/h
10	6	276
11	6	318
12	5	267
1	7	363

为进一步探究钠层日变化的来源, 对钠密度在高度上进行两公里的合并, 结果如图 3 所示. 从图 3 可以明显看出其相位呈现向下传播的趋势, 24 h 周期扰动在钠层中占主导地位.

为了获得各个高度上钠层周日和半日的振幅和相位, 利用函数拟合图 3 各个高度上的曲线, 函数表达式为

$$Y(t)=A_0+A_1\cos\left[\frac{2\pi}{24}(t-\Phi_1)\right]+A_2\cos\left[\frac{2\pi}{12}(t-\Phi_2)\right]. \tag{1}$$

式中: A_0, A_1, A_2 分别为平均、日周期和半日周期振幅; Φ_1 和 Φ_2 为日周期和半日周期相位.

流星雷达观测的北京风场数据的高度范围为 70~110 km, 高度分辨率为 2 km, 时间分辨率为 1 h. 选取 2014 年 12 月 7—9 日 80~105 km 高度范围的风场数据. 采用谐波拟合的方式提取北京风

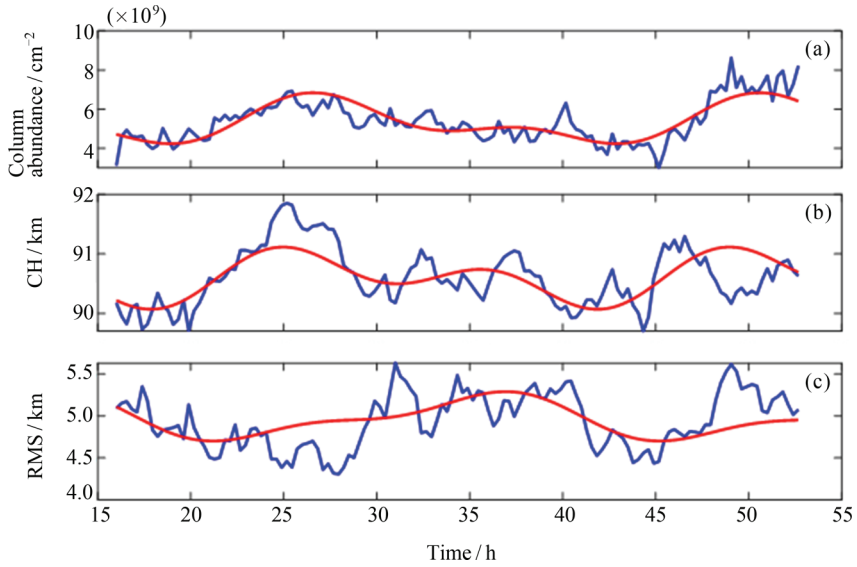


图 2 2014 年 12 月 7—9 日钠层柱密度 (a)、质心高度 (b)、半高宽 (c) 随时间的变化 (蓝色曲线) 及拟合曲线 (红色曲线)

Fig. 2 Diurnal variation (blue curve) and fitted curve (red curve) of Na column abundance (a), centroid height (b) and RMS layer width (c) of sodium layer observed at Beijing from 7 to 9 in December 2014

场的周日变化和半日变化信息, 拟合公式为 [12]

$$y(t)=\bar{y}(t)+A_1\cos\left(\frac{2\pi}{24}-\Phi_1\right)+A_2\cos\left(\frac{2\pi}{12}-\Phi_2\right)+R(t). \quad (2)$$

其中, $y(t)$ 为风场数据, $\bar{y}(t)$ 为背景风. 利用式 (2) 可以获取 80~105 km 高度范围内每隔 2 km 位置上的周日潮汐和半日潮汐信息.

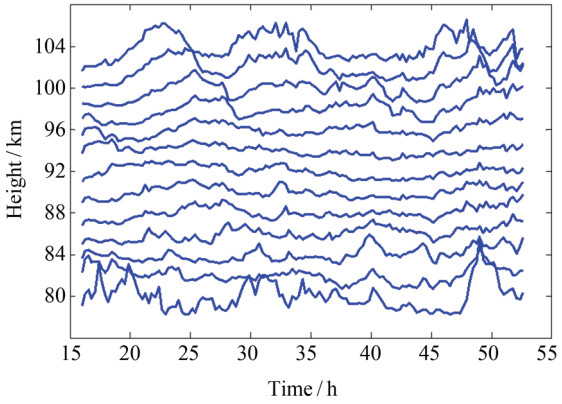


图 3 钠密度变化

Fig. 3 Na density variation with time at different altitudes

大气潮汐波动对大气成分垂直波动有显著影响. 对全天时钠密度数据与同时段流星雷达风场数据进行比较, 分析观测到的密度数据中的周期扰动和由风场数据提取的潮汐信息之间的联系, 找出影响钠层周日变化的主要因素. 对由密度和风场中提取的各个高度相位信息进行比较, 结果如图 4 所示.

由图 4 可知, 周日相位数据在 85 km 以上吻合较好, 85 km 以下略有不同, 这可能是因为钠层底端受到了化学变化的影响. 但二者的周日相位随高度的走势基本一致; 半日相位数据在 95 km 以上较为相似, 90 km 以下存在差异. 由钠密度推导出来相位数值和风场提取的参数在各个高度上都比较吻合, 这说明钠层的周期变化与潮汐扰动紧密相关, 因此可以通过钠密度数据提取潮汐的变化特征.

2.2 钠密度月平均观测结果

对 2014 至 2016 年每年 10 月至次年 1 月的连续长时间钠密度数据进行相位提取, 并选取 82, 86, 90, 94 km 这 4 个高度来反映潮汐相位在 80~105 km 范围内的变化, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 在所选择的 4 个高度上, 周日和半日潮汐在各个高度上达到最大值的时间关系是: 94 km 的时间最早, 随后依次

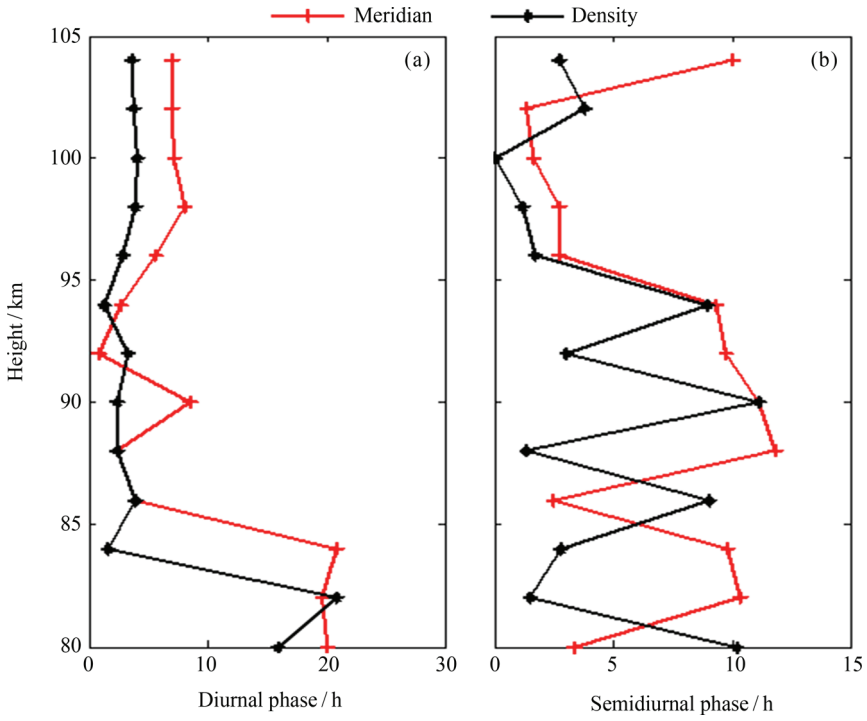


图 4 2014 年 12 月 7—9 日钠密度和风场提取相位的对比

Fig. 4 Phase profiles for diurnal and semidiurnal oscillations extracted from Na density and wind data at Beijing from 7 to 9 in December 2014

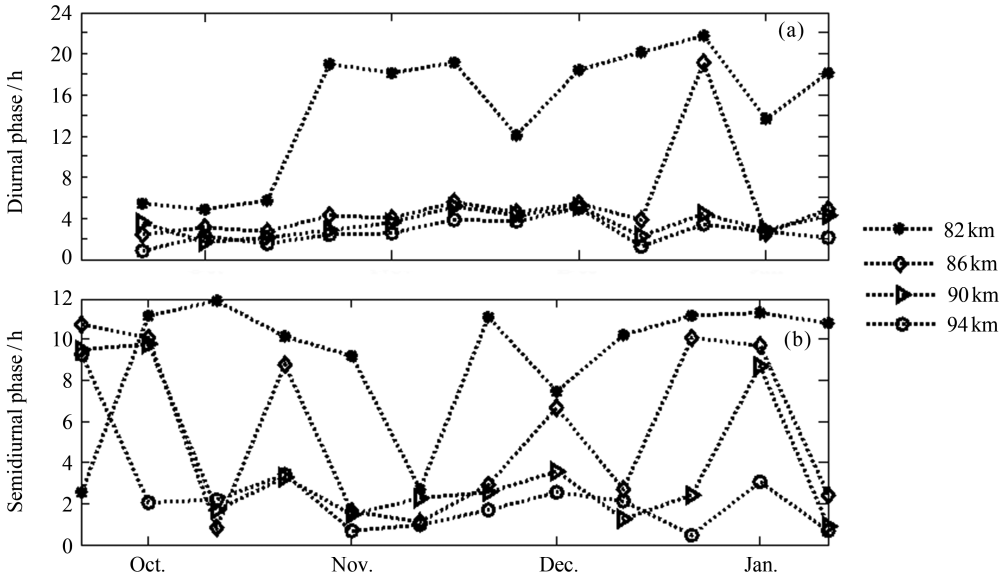


图 5 2014 至 2016 年每年 10 月至次年 1 月的周日相位和半日相位在各个高度上的变化

Fig. 5 Variations of Na density diurnal phase and semidiurnal phase at different altitudes from October to January in 2014—2016

为 90, 86, 82 km. 这表明周日潮相位在垂直方向的传播是从上往下的. 在 82 km 的高度上, 周日相位在冬季 4 个月均有较大波动, 而在其他高度上的相位波动较小.

为了进一步通过钠密度数据探究冬季潮汐波动的特征, 将 2014 至 2016 年间 10 月至次年 1 月的钠密度数据分别进行月平均处理: 将这三年同一月份的长时间钠密度观测数据进行小时平均后, 得到该月的月平均结果; 对每个月的月平均数据进行各个高度上钠密度周日和半日的振幅及相位提取.

图 6 给出了 10 月至次年 1 月期间每个月的月平均钠密度周日相位提取结果. 由图 6 可以看出: 在冬季 4 个月份, 周日相位均呈现明显的向下传播趋势; 在 80~82 km 范围内, 4 个月周日相位数值波动比较大, 其他高度相位均无太大的变化. 这与图 5 展示的结果一致. 对提取的周日相位进行拟合, 通过拟合曲线估算出这 4 个月周日潮汐的垂直传播速度分别为 1.7, 2.2, 1.8, 2.1 $km\cdot h^{-1}$, 垂直波长分别为 41, 53, 43, 50 km. 图 7 给出了 2014 至 2016 年 10 月至次年 1 月这 4 个月钠密度提取的半日相位结果. 图 7 中除 11 月半日相位随高度呈现波动的变化外, 其他 3 个月的半日相位也呈现出向下传播的趋势.

重力波中的大气密度扰动可以从钠密度推算得出 [6,17]. 但对于潮汐扰动, 其周期在十小时以上, 本底钠层必然受到化学变化的干扰, 这给大气密度提取结果带来一定程度的影响. 因此, 钠密度扰动中提取的周日和半日振幅结果并不能直接视为大气密度扰动的振幅结果. 但是因为二者之间的正相关性, 可以通过钠密度的振幅结果定性分析潮汐振幅. 为了进一步探究周日和半日潮汐的特征, 图 8 给出了 2014 至 2016 年月平均钠密度振幅提取的结果. 图 8 中红色曲线代表周日振幅与平均振幅的百分比, 黑色曲线代表半日振幅与平均振幅的百分比. 由图 8 可以看出, 1 月的周日振幅与半日振幅强度接近, 其他 3 个月的周日振幅均大于半日振幅. 其中 10 月的周日振幅峰值是半日振幅峰值的 3 倍左右. 此外, 从 10 月到 1 月周日振幅和半日振幅的差距不断缩小. 10 月的周日振幅是半日振幅的 3 倍左右, 到 1 月时二者大小已经无太大差别.

3 讨论

从图 1 给出的 2014 年 12 月 7 日至 9 日的钠密度演化中发现了明显的峰值下行运动. 从图 2 也可以看出钠层相关参数包括柱密度、质心高度以及半高宽度也呈现出较为显著的周期变化. 将 80~105 km

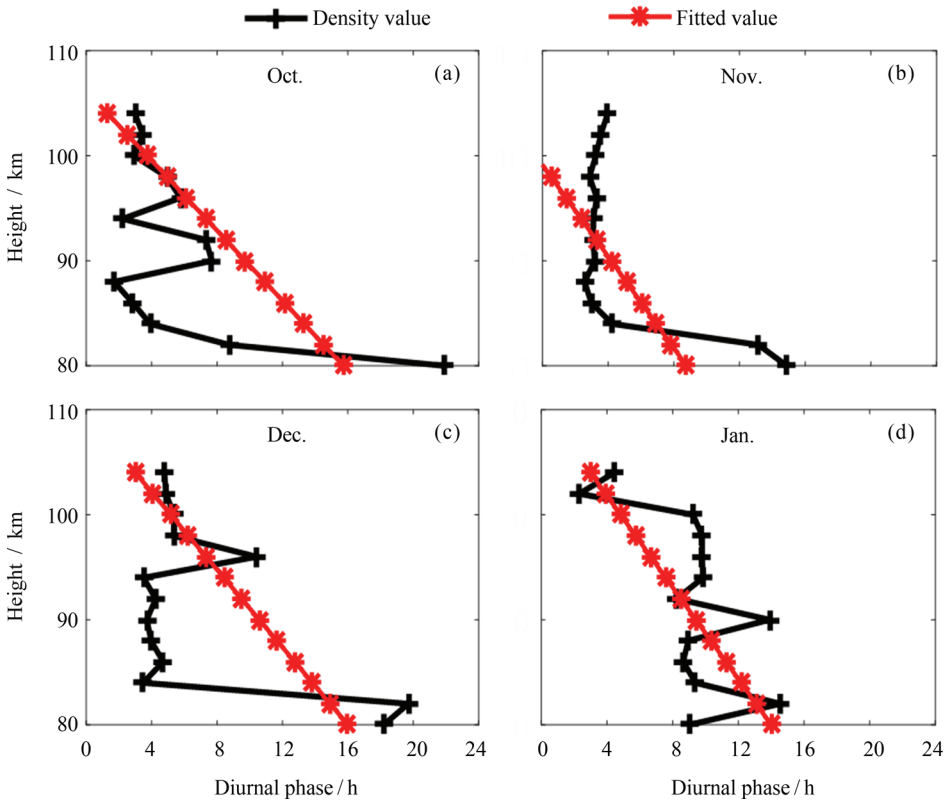


图 6 2014 至 2016 年每年 10 月至次年 1 月钠密度提取的月平均周日相位及拟合结果

Fig. 6 Monthly mean diurnal phase of Na density and its fitted result from October to January in 2014—2016

高度范围内的钠密度进行两公里合并, 并在各个高度上进行拟合, 获取相位信息, 然后与同时间段经向风数据提取的相位信息进行比较, 发现二者的相位随高度变化趋势十分相似. 这说明钠密度扰动受到潮汐波动显著影响. 上述分析与 Clemesha 等 [9] 及 Batista 等 [19] 得到的钠层周日和半日振荡是由潮汐传播导致的结论吻合. 此外, Lu 等 [20] 对武汉的观测研究也认为钠层的周日变化与潮汐密切相关 [20].

在此基础上, 利用 2014 至 2016 年 10 月至 1 月的钠密度长时间连续观测数据进行冬季潮汐波的研究. 图 5 中相位在各个高度上的连续观测结果说明, 潮汐相位自上向下传递, 这与 Jiang 等 [12] 和 Xiong 等 [13] 利用流星雷达观测的结果一致. 除了 82 km 处的周日相位在 4 个月内的波动较大, 其他 3 个高度的周日相位值在 4 个月内的变化很小, 潮汐的周日相位未呈现明显的季节特征.

利用 10 月至 1 月的钠密度月平均数据进行钠密度振幅和相位的提取. 由于钠密度扰动与潮汐扰动紧密相关, 因此可以利用钠密度的月平均相位结果来探究冬季潮汐相位的变化. 10 月至 1 月, 潮汐相位在垂直方向自上向下传递. 从周日相位的拟合廓线中可以确定, 这四个月周日潮汐的垂直波长分别为 41, 53, 43, 50 km. 从钠密度扰动中提取的周日和半日振幅的结果定性分析潮汐振幅在冬季的变化情况可以发现, 除了 1 月, 其他三个月钠密度提取的周日振幅均大于半日振幅. 这说明冬季周日潮汐的强度大于半日潮汐的强度.

Jiang 等 [12] 及 Xiong 等 [13] 利用流星雷达分别在海南和武汉进行潮汐波特征的研究. 本文从长时间连续观测的钠密度出发, 探究北京冬季潮汐的特征, 为潮汐研究提供了一个新的角度.

4 结语

对北京上空钠层进行长时间连续观测发现, 钠层的周日变化受到潮汐的显著影响. 从 2014 至 2016 年每年 10 月至次年 1 月的长时间连续观测的钠密度数据中提取周日和半日的振幅和相位, 研究潮汐在北京

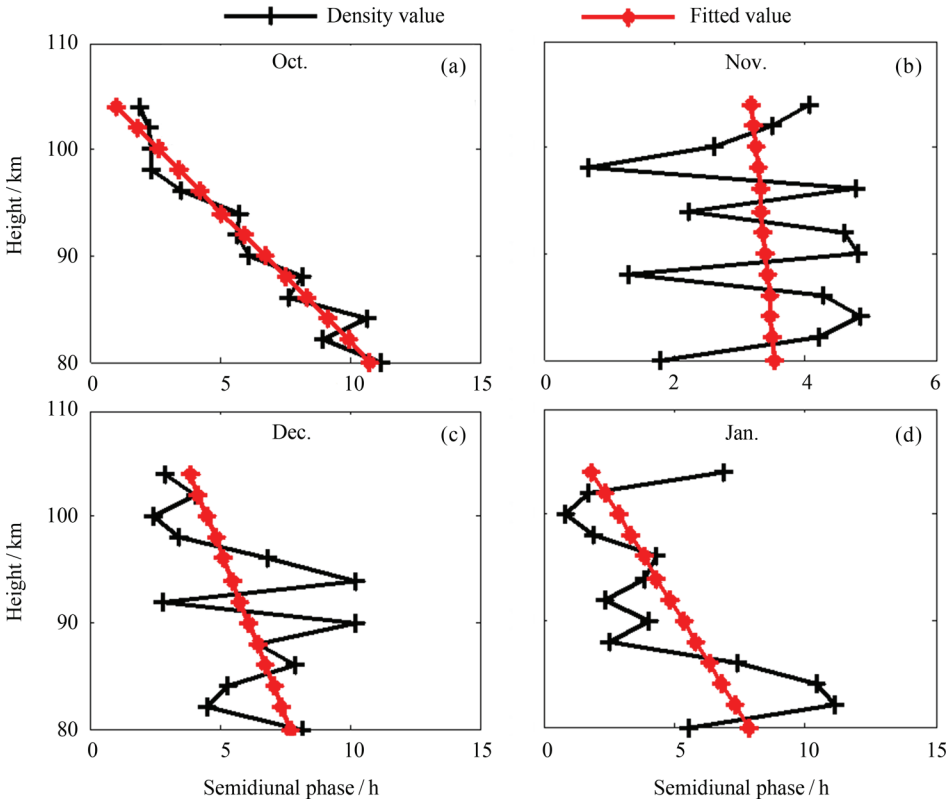


图 7　2014 至 2016 年每年 10 月至次年 1 月钠密度提取的月平均半日相位及拟合结果

Fig. 7　Monthly mean semidiurnal phase of Na density and its fitting result from October to January in 2014—2016

冬季的变化特征. 结果表明, 周日潮相位自上向下传播, 垂直波长在 40~50 km 范围内, 无明显季节变化特征. 北京上空冬季主要受周日潮影响, 半日潮影响较弱.

致谢　本文数据来自国家科技基础设施项目子午工程科学数据中心.

参考文献

[1] PLANE J M C, GARDNER C S, YU J, *et al*. Mesospheric Na layer at: modeling and observations [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atoms.*, 1999, **104**(D3): 3773-3788

[2] KANE T J, GARDNER C S. Lidar observations of the meteoric deposition of mesospheric metals [J]. *Science*, 1993, **259**: 1297-1300

[3] BATISTA P, CLEMESHA B, SIMONICH D, *et al*. Tidal oscillations in the atmospheric sodium layer [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atoms.*, 1985, **90**: 3881-3888

[4] GARDNER C S, VOELZ D G. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana Illinois, 2, Gravity waves [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1987, **92**: 4673-4693

[5] GARDNER C S. Sodium resonance fluorescence lidar applications in atmospheric science and astronom [J]. *Proc. IEEE*, 1989, **77**: 408-418

[6] YANG G, CLEMESHA B, BATISTA P, *et al*. Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at 23°S [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atoms.*, 2006, **111**(D21). DOI: org/10.1029/2005JD006900

[7] GIBSON A J, SANDFORD M C W. Day-time laser radar measurement of the atmospheric sodium layer [J]. *Nature*, 1972, **239**: 509-511

[8] GRANIER C, MEGIE G. Daytime lidar measurement of the mesospheric sodium layer [J]. *Planet. Space Sci.*, 1982, **30**: 169-177

[9] CLEMESHA B, SIMONICH D, BATISTA P, *et al*. The diurnal variation of atmospheric sodium layer [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 1982, **87**: 181-186

[10] SHE C Y. Tidal perturbations and variability in the mesopause region over Fort Collins, CO (41°N,105°W) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L24111

[11] YUAN T, SHE C Y, KAWAHARA T D, *et al*. Seasonal variations of mid-latitude mesospheric Na lidar and their tidal period perturbations based on full diurnal cycle Na lidar observations of 2002—2008 [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atoms.*, 2012, **117**: D11304

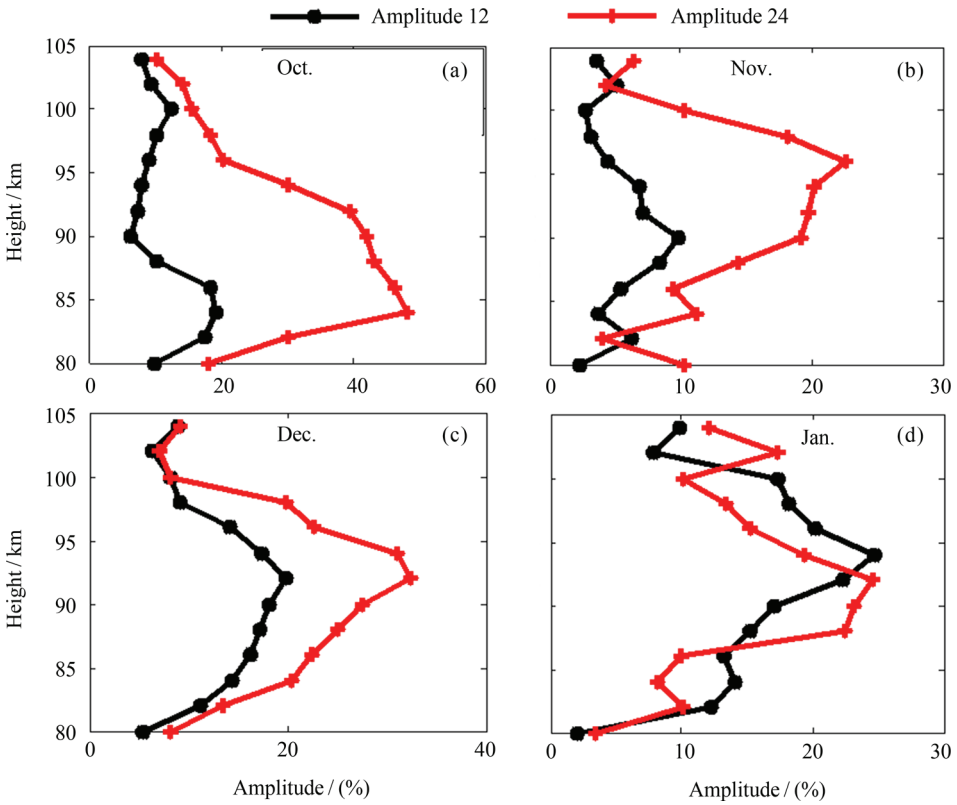


图 8 2014 至 2016 年每年 10 月至 1 月钠密度提取的周日振幅和半日振幅

Fig. 8 Monthly mean Na density diurnal amplitude and semidiurnal amplitude from October to January in 2014—2016

[12] JIANG Guoying, XU Jiyao, *et al.* The first observation of the atmospheric tides in the mesosphere and lower thermosphere over Hainan [J]. *Chin. Sci Bull.*, 2010, **55**(10): 923-930 (姜国英, 徐寄遥. 我国海南上空中高层大气潮汐风场的首次观测分析 [J]. 中国科学, 2010, **55**(10): 923-930)

[13] XIONG J G, WAN W, NING B, *et al.* First results of the tidal structure in the MIT revealed by Wuhan meteor radar [J]. *J. Atmos. Sol.: Terr. Phys.*, 2004, **66**: 675-682

[14] BATISTA P P, CLEMESHA B R, TOKUMOTO A S, *et al.* Structure of the mean winds and tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7°S, 45°W) and its comparison with models [J]. *J. Atmos. Sol.: Tberr. Phys.*, 2004, **66**(6-9): 623-636

[15] CHENG X, GONG S, Li F, *et al.* 24h continuous observation of sodium layer over Wuhan by lidar [J]. *Sci. China Ser. G: Phys. Mech. Astron.*, 2007, **50**: 287-293

[16] GARDNER C S, SHELTON J D. Density response of neutral atmospheric to gravity wave perturbations [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1985, **90**: 1745-1754

[17] SONG Juan, CHENG Xuewu, YANG Guotao, *et al.* The investigation of gravity wave activities on mesopause over Wuhan by sodium lidar [J]. *China. J. Space Sci.*, 2005, **25**(6): 522-528 (宋娟, 程学武, 杨国韬, 等. 武汉上空中层顶大气重力波活动的钠层荧光激光雷达观测研究 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(6): 522-528)

[18] KWON K, GARDNER C, SENFT D, *et al.* Daytime lidar measurements of tidal winds in the mesospheric sodium layer at Urbana, Illinois [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1987, **92**: 8781-8786

[19] CLEMESHA B R, BATISTA P P, SIMONICH D M. Tide induced oscillations in the atmospheric sodium layer [J]. *J. Atmos. Sol.: Terr. Phys.*, 2002, **64**: 1321-1325

[20] LU Honghui, YANG Guotao, WANG Jihong, *et al.* Investigation of tidal wave activities over Wuhan by daytime sodium lidar [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2013, **30**(1): 17-24 (卢洪辉, 杨国韬, 王继红, 等. 武汉上空潮汐波活动的全天时钠激光雷达研究 [J]. 量子电子学报, 2013, **30**(1): 17-24)