0254-6124/2011/31(6)-778–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Xiaobin, Sun Shuji, Chen Chun, Chen Jinsong, Xu Zhengwen. Lidar observations of middle atmospheric density and temperature over Qingdao. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(6): 778-783

青岛上空中层大气密度和温度的激光雷达探测*

王晓宾 孙树计 陈 春 陈金松 许正文

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

摘 要 介绍了中国电波传播研究所瑞利散射激光雷达系统的结构和性能, 阐述了激光雷达探测中层大气密度和温度的工作原理, 给出了青岛地区中层大气密度和温度的初步探测结果. 通过与卫星、探空气球和大气模式数据的结果对比, 验证了激光雷达探测大气温度的可靠性. 基于 2008–2009 两年的观测, 获得了青岛地区上空中层大气温度的季节变化和平均分布. 激光雷达观测结果表明, 青岛地区平流层温度比 CIRA86 模式结果高, 且二者偏差呈夏秋季小、冬春季大的特点, 中间层温度则正好相反.

关键词 激光雷达, 瑞利散射, 中层大气, 大气密度和温度

中图法分类号 P 412

Lidar Observations of Middle Atmospheric Density and Temperature Over Qingdao

WANG Xiaobin SUN Shuji CHEN Chun CHEN Jinsong XU Zhengwen

(*National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

Abstract The structure and performance of CRIRP (China Research Institute of Radiowave Propagation) Rayleigh backscattering lidar are introduced, the principles to derive middle atmospheric density and temperature are described, and the primary results observed over Qingdao are reported. The lidar observed temperatures are validated through comparison with a variety of observational and model data provided by satellite, radiosonde and CIRA86 respectively. The mean and seasonal variation of middle atmospheric temperature profiles is given, based on the observational data during 2008–2009. The lidar results show that stratospheric temperature over Qingdao is higher than the CIRA86 model, and that the difference is small in summer and autumn, and large in winter and spring, while the mesospheric temperature trend is opposite.

Key words Lidar, Rayleigh scattering, Middle atmosphere, Atmosphere density and temperature

1 引言

中层大气一般是指距地面约 10~100 km 高度范围内的大气, 其间存在复杂的光化学和动力学过程, 既受太阳辐射的影响, 又与对流层大气有很强的耦合作用, 与人类的生存环境和航空航天活动密切相关,

* 电波环境特性及模化技术重点实验室基金项目资助 (9140C0803020804)

2010-05-06 收到原稿, 2011-04-21 收到修定稿

E-mail: wxbtianji@126.com

因此, 中层大气的观测和研究具有重要意义. 目前已经发展了多种探测手段, 如气球探空仪、探空火箭、卫星、GPS 掩星、无线电雷达 (MST, MF, 流星雷达) 等. 但是, 30~70 km 高度范围内的中层大气观测比较困难, 对气球探空而言太高, 对卫星而言又太低, 同时又是无线电雷达的盲区. 虽然火箭探空是一种比较好的方法, 但其价格昂贵, 不适合连续观测. 激光雷达具有较高的时间和空间分辨率, 经过多年发展, 已逐渐成为中层大气探测的重要手段, 适合诸如重力波、行星波等大气动力学过程的观测 [1−2]. 目前, 很多国家都已建立激光雷达观测系统 [3−5]. 中国的中层大气激光雷达主要集中在武汉和合肥地区 [6−8]. 另外, 中国目前采用的中高层大气模式多为国外的模式, 因此, 增加中层大气观测系统, 形成中国范围的大型观测网络, 对于建立适合中国的大气模式具有重要意义.

CRIRP 激光雷达于 2007 年在青岛 (36.24°N, 120.41°E) 研制并安装成功, 集米散射、瑞利散射和钠共振散射三种功能于一体, 可以探测近地面至 110 km 高度范围内的大气参量, 包括气溶胶消光系数、大气分子密度和温度以及钠层原子密度, 增强了中国中高层大气的区域观测能力. 本文主要介绍该激光雷达系统的瑞利散射功能, 并对青岛地区中层大气密度和温度垂直分布的初步探测结果进行分析.

2 激光雷达系统

CRIRP 激光雷达主要由激光发射、回波信号接收、数据采集及控制三部分组成, 系统原理结构如图 1 所示. Nd:YAG 激光器水平输出倍频 532 nm 波长的激光束, 扩束后的发散角约 0.3 mrad, 单个脉冲能量约 200 mJ, 重复频率为 20 Hz, 经 45° 反射镜后垂直入射到大气中, 激光与大气中的分子和气溶胶相互作用而发生瑞利散射和米散射, 30 km 以上气溶胶含量极微, 可认为激光雷达接收的只有大气分子的瑞利散射回波信号. 接收望远镜为直径 1 m 的卡塞格仑型, 焦距为 9 m, 用于收集大气的后向散射光信号, 小孔光阑的作用是限制接收望远镜系统的接收视场, 接收视场角约为 2 mrad. 后向散射光经目镜准直后由光电倍增管转化为电信号. 为减小照射到阴极的光强, 光电倍增管前放置了衰减片, 衰减片的透过率有 100%, 50%, 10%, 1% 和 0.1% 可供选择. 选用线性好、增益高的 EMI9817B 型光电倍增管, 采用光子计数方式记录中层大气的弱回波信号. PMT 配备了相应的制冷器, 用以降低热噪声和暗电流. 为抑制天空背景噪声, PMT 前放置了窄带干涉滤光片, 带宽为 1 nm. Nd:YAG 激光器调 Q 输出信号输入时序控制器, 触发采集软件同步开始采集. 光子计数采集软件可以设置采样的分层厚度、激光脉冲数和甄别电平, 并实时显示回波信号随高度的分布曲线. 表 1 给出了该激光雷达系统的技术参数.

3 探测原理

30 km 高度以上, 大气气溶胶的含量极微, 基本可以忽略, 大气后向散射光主要是大气分子的瑞利散

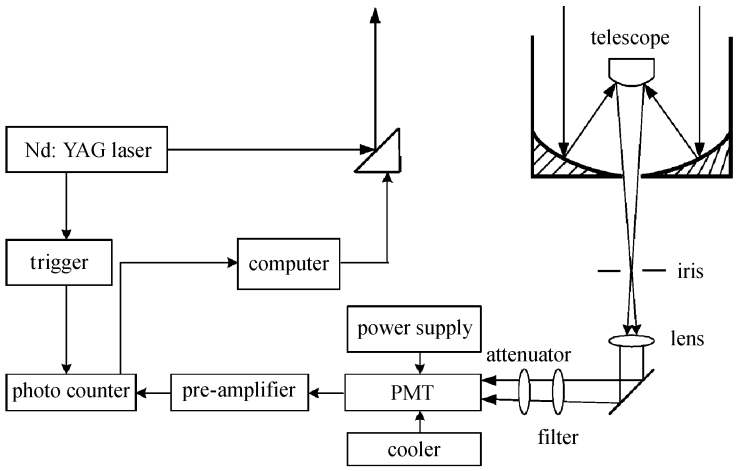


图 1 CRIRP 激光雷达结构

Fig. 1 Schematic diagram of CRIRP lidar

表 1 CRIRP 激光雷达系统参数

Table 1 Specification of CRIRP lidar

发射系统	参数	接收系统	参数	数据采集系统	参数
波长	532 nm	望远镜直径	1 m	最大计数率	150 MHz
脉宽	7 ns	焦距	9 m	距离分辨率	150 m
脉冲能量	200 mJ	视场角	2 mrad	时间分辨率	8.3 min
重复频率	20 Hz	滤光片带宽	1 nm	计数通道数	1000
发散角	0.3 mrad				

射信号. 激光雷达接收到的高度 z 处的瑞利散射光子数 $P(z)$ 满足雷达方程, 即

$$P(z)=C\frac{\sigma\rho(z)}{z^2}Q^2(0,z). \tag{1}$$

其中, C 为激光雷达系统常数, σ 为大气分子的瑞利散射截面, $\rho(z)$ 为 z 高度处的大气分子密度, $Q^2(0,z)$ 为激光雷达至高度 z 处的大气双程透过率.

激光雷达系统常数 C 很难准确确定, 为此假设某一高度 z_0 上的大气分子密度 $\rho(z_0)$ 已知, 大气分子密度 $\rho(z)$ 可由如下瑞利散射激光雷达的回波信号求得:

$$\rho(z)=\frac{P(z)z^2}{P(z_0)z_0^2}\rho(z_0)Q^2(z,z_0). \tag{2}$$

式中, z_0 一般选在 40 km 附近, 是综合考虑激光雷达系统信噪比、光子计数系统的信号饱和效应、气溶胶的影响以及模式密度值的可信度等因素而选择的, $\rho(z_0)$ 可以利用大气模式或探空资料得到. $Q^2(z,z_0)$ 为 z 至 z_0 高度的大气双程透过率, 可以近似取 1, 由此带来的误差约 1%~2%. 大气静力学方程为

$$\mathrm{d}p=-\rho g\mathrm{d}z. \tag{3}$$

给定上边界 z_c, 由上至下积分可得

$$p(z)=p(z_\mathrm{c})+\int_z^{z_\mathrm{c}}\rho(z')g(z')\mathrm{d}z'. \tag{4}$$

假设大气满足理想气体状态方程

$$p=\frac{R}{M}\rho T, \tag{5}$$

将式 (5) 代入式 (4), 得到大气温度 $T(z)$ 的表达式为

$$T(z)=\frac{T(z_\mathrm{c})\rho(z_\mathrm{c})+\dfrac{M}{R}\displaystyle\int_z^{z_\mathrm{c}}g(z')\rho(z')\mathrm{d}z'}{\rho(z)}. \tag{6}$$

其中, $T(z)$ 和 $T(z_\mathrm{c})$ 分别为 z 和 z_c 高度上的大气温度, $T(z_\mathrm{c})$ 可从大气温度模式得到; M 为大气分子的摩尔质量; R 为气体普适常数; $g(z')$ 为重力加速度.

由式 (6) 可以看出, 温度的反演精度与回波信号、大气双程透过率、相对密度和参考温度的不确定性有关, 而与绝对密度无关. 上边界 z_c 处参考温度对反演结果的影响会随着高度的降低而减小.

激光雷达的探测误差除了与反演方法有关外, 还存在系统误差和统计误差. 其中, 系统误差可以通过合理设计雷达系统并采用合适的修正措施来降低, 统计误差可通过增大发射功率和望远镜直径等改进系统配置的措施或降低探测的距离分辨率及时间分辨率来改善.

4 结果及讨论

CRIRP 瑞利散射激光雷达的典型回波信号如图 2 所示, 通过积累 10000 个激光脉冲获得, 时间约 8.3 min, 空间分辨率为 150 m, 采样的最大高度为 150 km, 光电倍增管的门控开门高度为 24 km, 70 km 以上基本为天空背景噪声, 在数据处理时先行剔除. 激光雷达的工作波长为 532 nm, 属可见光, 受天气和背景噪声的限制, 一般在晴朗无云的夜晚进行观测. CRIRP 激光雷达发射功率一般为 4 W, 望远镜直径为 1 m, 因此该激光雷达的质量因子 PA 为 3.14, 探测的最大高度约 70 km, 如果使用更大的发射功率和望远镜, 还可以提高探测的高度. 图 3 为利用此回波信号反演得到的大气分子密度. 由于密度随高度增高呈指数减小, 30~70 km 有 3 个数量级的变化, 因此将其表示为观测值与模式值的比. 大气模式采用的是与 CIRA86 相同纬度的月平均值. 可以看出, 密度比值在 1.0 附近波动, 65 km 以下大气密度实测值与模式值非常接近, 65 km 以上偏离较大是因为雷达回波的信噪比已经很小. 从图 3 中还可以看到一个类似正弦的振荡, 其振幅和波长都随高度的升高而增大. 激光雷达的这种高的空间和时间分辨率特性非常适

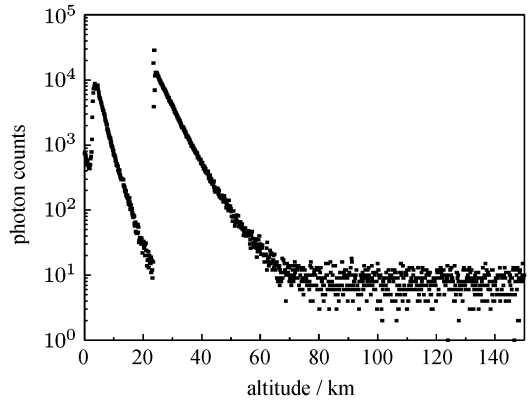


图 2 激光雷达瑞利散射回波信号

Fig. 2 Lidar Rayleigh backscattering signal

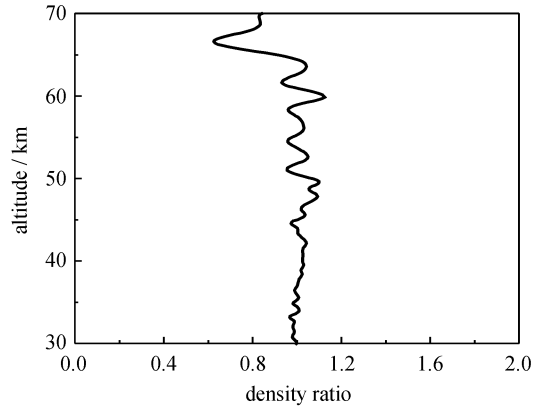


图 3 大气密度观测值与模式值之比

Fig. 3 Density ratio to the CIRA86 model

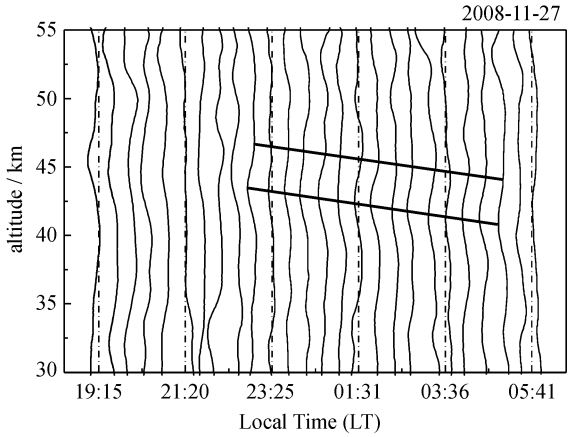


图 4 大气密度扰动序列

Fig. 4 Sequence of density disturbance

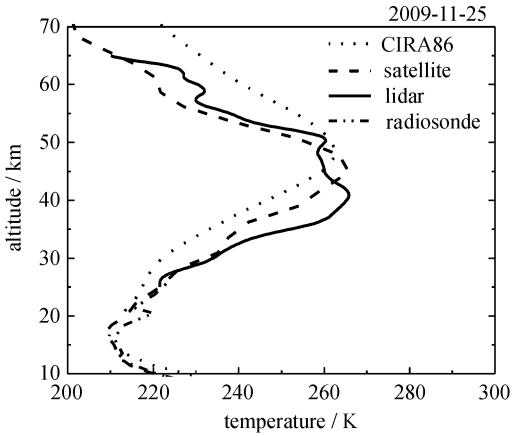


图 5 中层大气温度对比

Fig. 5 Comparison of temperature profiles

合中高层大气重力波的观测和研究.

为更好地反映大气的波动情况, 大气密度可用其扰动量来表示. 将当晚观测的大气密度进行平均, 并用指数函数进行拟合, 得到大气密度的背景值, 扰动量即为某一时刻大气密度与背景值的相对变化量. 图 4 为 2008 年 11 月 27 日晚的密度扰动序列, 每条廓线间的时间间隔为 25 min, 从左至右按时间排列, 图 4 中 40~50 km 之间的两条斜线标示出了密度扰动相位的向下传播趋势, 预示着重力波的向上传播. 如果对这些扰动信息进行滤波和谱分析, 则可得到大气波动的垂直波长、振幅和相速度等参数.

图 5 是 2009 年 11 月 25 日晚激光雷达观测的温度, 同时给出 CIRA86 模式与卫星和无线电探空仪的结果作为参考和比对. 激光雷达的观测时间为 19:30 LT–23:30 LT, 大气温度是通过对多个瑞利散射回波信号累加平均后反演得到的, CIRA86 模式给出的是北半球同一纬度的月平均温度. 通常习惯于将激光雷达观测结果与大气模式结果进行比较, 验证激光雷达的探测性能, 但是当晚激光雷达观测结果与模式结果之间存在较大的差异, 为此, 使用卫星和气球探空观测的温度作为比对资料. 卫星数据使用 AURA 卫星上微波临边探测器 (MLS) 探测的温度, AURA 卫星每天两次对地球南北纬 80° 之内的区域进行扫描观测. 由于卫星与激光雷达探测在时间和空间上的不一致, 将有效数据限制在激光雷达站点周围经度和纬度 5° 以内, 时间 12 h 以内, 选取距离最近的一次观测进行对比. 据此选取的 2009 年 11 月 25 日卫星数据的观测地点为 (34.10°N, 115.60°E), 时间为 13:42 LT, 距离激光雷达 498 km, 时间间隔 8 h. 探空气球于当日 20:00 LT 在青岛气象站 (36.06°N, 120.33°E) 释放, 上升过程中的水平位置由当时气流

状况决定. 整体而言, 激光雷达与卫星的观测结果基本一致, 在 25 km 高度处与气球探空的观测结果衔接得也很好. 这表明激光雷达观测的温度是准确可靠的, 能够反映青岛上空中高层大气的实际状况. 激光雷达与卫星数据比较, 30~65 km 整体偏大, 但在平流层顶上下却偏小. 激光雷达的高空间分辨率特性很好地表现出了 60 km 处的局部温度增高而出现的逆温层, 中间层的逆温层在其他激光雷达的观测结果中也经常出现 [9]. 激光雷达的垂直分辨率比卫星的分辨率要高 20 倍左右, 利用温度扰动信息同样可以提取重力波参数. 激光雷达观测的平流层温度与卫星的观测结果存在较大的差别, 39 km 处温度差值约 10 K. 这种差别可能与观测原理、时间和地点等因素有关. 为了与探空气球的结果进行比对, 在不考虑气溶胶影响的情况下, 将温度反演的高度下限扩展到了 25 km, 此处激光雷达、卫星及气球探空三者观测的温度一致, 均比模式值大. 探空气球在平流层 20 km 处观测到一逆温层.

图 6 给出了青岛地区中层大气温度的季节变化. 使用的是激光雷达 2008–2009 两年共 33 个夜间的观测数据, 按春 (3, 4, 5 月)、夏 (6, 7, 8 月)、秋 (9, 10, 11 月)、冬 (12, 1, 2 月) 四季划分进行统计平均. 受天气条件影响, 在数据分布上, 冬季和春季数据较多, 夏季数据较少. 由于每天观测的结束时间不同, 考虑到一致性, 只采用了 00:00 LT 之前的数据, 后半夜的数据没有使用. 这种选取数据的原则有可能对温度的统计特性造成影响, 使其与全天平均的大气温度之间产生偏差. 受大气衰减的影响, 当天气状况不是很好时, 激光雷达瑞利散射回波信号的最大有效高度会有所降低, 因此在统计分析时, 只选取了最大探测高度大于 60 km 的观测数据, 并且在数据处理过程中, 将截取高度设置为 60 km. 在数据处理时, 先将约 1 h 的观测信号累加反演得到一条温度廓线, 然后平均当晚所有温度廓线得到夜平均温度, 进而计算月平均温度和季节平均温度. 作为参考, 图 6 同时给出了 CIRA86 大气模式的季节平均温度. 结果显示, 夏季平流层激光雷达观测的温度与大气模式符合较好, 其他季节则出现不同的偏差. 整体而言, 夏季和秋季偏差较小, 冬季和春季偏差较大. 中间层温度的比较结果则与平流层正好相反, 冬季和春季偏差小, 夏季和秋季偏差大. 平流层顶以下温度偏差的季节性变化与武汉地区的观测结果是一致的, 所不同的是, 与模式结果相比较, 青岛地区激光雷达观测的大气温度在平流层高, 中间层低, 而武汉地区则是平流层低, 中间层高 [10]. 激光雷达观测的平流层顶高度, 在春夏季与模式值基本相同, 秋冬季比模式值要低; 而平流层顶的温度在春夏季与模式值一致, 秋季比模式值小, 冬季比模式值大.

图 7 为青岛地区激光雷达观测的中层大气平均温度, 其是由季节温度算术平均得到的, 仍然以卫星

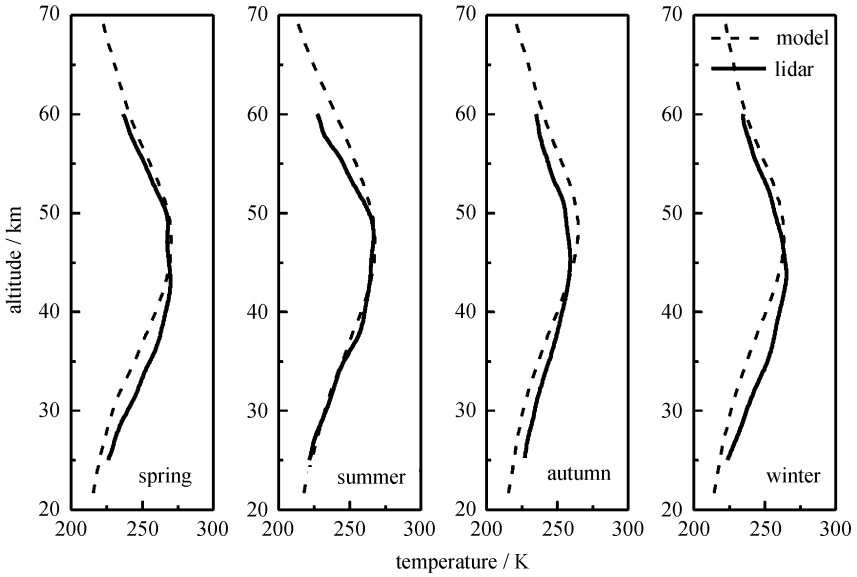


图 6 青岛地区中层大气温度季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of temperature over Qingdao

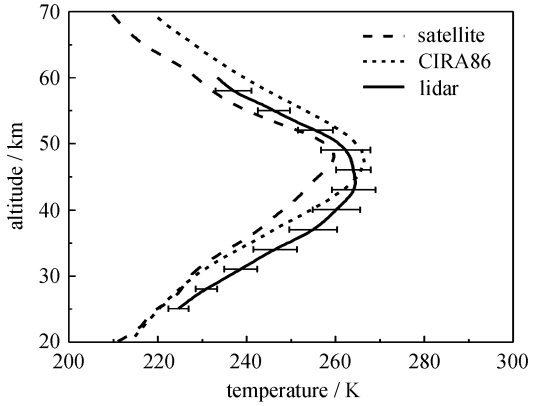


图 7 青岛地区中层大气平均温度

Fig. 7 Average temperature over Qingdao

和大气模式 CIRA86 提供的年平均温度作为比较和参考, 卫星观测选取与激光雷达观测时间相近的数据, 通过平均计算得到. 整体而言, 激光雷达观测的平流层温度较模式值大, 中间层温度较模式值小. 卫星观测的温度在 30~70 km 范围内较模式值小, 也较激光雷达的观测值小. 激光雷达观测的中间层温度处于卫星观测与模式值之间. 激光雷达与模式之间的结果偏差在 37 km 和 57 km 分别达到最大, 偏差约 8 K. 平流层顶高度和温度的比较结果, 激光雷达观测的平流层顶高度为 45.6 km, 比模式值低 2 km, 比卫星观测数据低 2.6 km; 温度为 263.7 K, 比模式值小 2.8 K, 比卫星观测数据大 4.1 K. 图 7 同时给出了中层大气平均温度的统计误差, 显示平流层顶区域温度的四季变化较大.

青岛地区中层大气温度廓线既验证了激光雷达观测大气温度的可靠性, 其观测结果能够反映中层大气温度随高度的分布和变化, 又说明不同观测设备之间存在系统偏差. 激光雷达是在同一地点垂直向上连续观测, 卫星是在全球扫描过程中对某一区域的瞬时临边扫描, 而大气模式则是全球同一纬度的平均结果, 这些是对比结果出现差异的主要原因之一. CRIRP 激光雷达运行时间短, 观测数据量有限, 在以后的数据积累中可不断修正统计结果, 使之更加真实地反映中层大气的变化特征.

5 结论

CRIRP 激光雷达是在青岛地区运行的首台中高层大气激光雷达. 利用大气模式、卫星和探空气球数据, 验证了其观测中层大气密度和温度的可靠性. 通过 2008–2009 两年的观测, 初步给出了青岛地区中层大气温度的季节变化及平均温度, 并对青岛地区中层大气的分布变化特征进行了分析. 进一步的研究, 将利用 CRIRP 激光雷达对青岛地区中高层大气的长期变化进行监测, 进而与其他地区的激光雷达开展联合观测, 为建立中国的中高层大气模式提供实测数据, 同时, 将利用激光雷达的高分辨率特性, 深入开展重力波等大气动力学过程的研究.

致谢 卫星数据由美国 NASA 提供, 气球探空数据由 Wyoming 大学提供.

参考文献

[1] Lü Hongfang, Yi Fan. Gravity wave characteristics observed by lidar and radiosonde in Wuhan [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(6):1582-1587

[2] Sivakumar V, Rao P B, Bencherif H. Lidar observations of middle atmospheric gravity wave activity over a low-latitude site (Gadanki, 13.5°N, 79.2°E) [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:823-834

[3] Argall P S, Sica R J. A comparison of Rayleigh and sodium lidar temperature climatologies [J]. *Ann. Geophys.*, 2007, **25**:27-35

[4] Chandra H, Sharma Som, Acharya Y B, *et.al.* A Rayleigh lidar study of the atmospheric temperature structure over Mt. Abu, India [J]. *J. Ind. Geophys. Union*, 2005, **9**(4):279-298

[5] Schoch A, Baumgarten G, Fiedler J. Polar middle atmosphere temperature climatology from Rayleigh lidar measurements at ALOMAR (69°N) [J]. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**:1681-1698

[6] Zheng Wengang, Li Hongjun, Yang Guotao, *et al.* Lidar detection of the atmospheric density and temperature over Wuhan [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 1999, **23**(4):27-35

[7] Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing, *et al.* Atmospheric density and temperature measurement with lidar in the middle and upper stratosphere [J]. *Chin. J. Quantum Ele.*, 2000, **17**(5):426-431

[8] Chen Hao, Yi Fan. Rayleigh lidar and radiosonde observations of density and temperature in middle atmosphere over Wuhan [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(4):262-268

[9] Meriwether J W, Gardner C S. A review of the mesosphere inversion layer phenomenon [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:12 405-12 416

[10] Chang Qihai, Yang Guotao, Song Juan, *et al.* Lidar observations of the middle atmospheric temperature characteristics over Wuhan [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2005, **29**(2):314-320