

我国光学干涉仪对中高层大气风场的首次观测

袁轲^{①②}, 徐寄遥^①, 马瑞平^①, 吴谦^③, 姜国英^①, 高红^①, 刘晓^①, 陈孙征^①

① 中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307, USA

E-mail: wyuan@spaceweather.ac.cn

2010-07-27 收稿, 2010-09-06 接受

国家自然科学基金(40890165, 40921063, 40911120063)、国家大科学工程“子午工程”和国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 子午工程光学干涉仪安装在河北省境内的国家天文台兴隆园区(40.2°N, 117.4°E), 于2010年4月开始观测运行, 探测峰值高度在87, 98和250 km的OH 892.0, OI 557.7和OI 630.0 nm的气辉辐射. 设备从4月5日到5月12日共38 d的观测运行表明, 光学干涉仪成功地进行了中高层大气风场的地基观测, 获得了大气风场的观测数据. 分析结果表明: 风场数据具有非常明显的逐日变化, 观测期间内, 在87, 98, 250 km高度区域内的经向风和纬向风的平均值分别处在-16.5~8.7和-5.4~7.6 m/s, -24.4~15.9和2.3~23.0 m/s, -43.6~1.5和-22.6~49.3 m/s之间. 与HWM93模式结果比较, 87和98 km峰值高度的气辉反演风场的平均分布与模式之间存在较好的一致性, 半日潮变化相当明显; 250 km高度的热层大气风场的探测结果与经验模式有较大的差异. 观测结果表明, 子午工程光学干涉仪是一个适合观测中纬地区中层顶和热层风场的地基探测设备.

关键词

Fabry-Perot 干涉仪
中层顶
热层
气辉
风场

法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)利用Fabry-Perot标准具得到多光束干涉条纹, 在CCD上记录干涉条纹图像, 得到光谱精细结构的图像数据, 包括谱线的Doppler频移和谱线展宽等. 在国外, 利用FPI进行中高层大气的地基观测和卫星观测已经开展了很多年^[1-5]. FPI可以探测中高层大气气辉, 如87 km的OH 892.0 nm, 98 km的OI 557.7 nm和250 km的OI 630.0 nm的气辉, 利用气辉辐射的Doppler频移, 反演得到气辉高度区域的大气风场. 中高层大气风场的探测数据可以作为中高层大气模式建立的重要数据基础, 并为中高层大气动力学过程、动力学与光化学耦合过程、以及中高层大气与电离层之间的相互耦合过程的研究提供重要的探测资料.

近年来, 我国陆续发展了一些新型的地基探测

设备进行中高层大气的观测研究, 主要包括数字测高仪^[6]、流星雷达^[7-11]、大气重力波成像仪器^[12]等, 或者利用国外的一些FPI观测数据进行数据分析^[13]. 中国科学院空间科学与应用研究中心牵头建设的子午工程, 在河北省境内的国家天文台兴隆园区(40.2°N, 117.4°E)建设了1套FPI, 该仪器采用基于目前在加拿大Resolute观测站运行的FPI设计方案^[3], 由美国国家大气研究中心研制完成. 2010年4月初, 新安装的FPI开始试运行, 并得到正常的观测数据.

本文介绍子午工程FPI以及观测结果, 并与水平风的经验模式HWM93进行比较. 通过分析对比, 检查观测数据是否合理, 在与模式结果的比较中发现, 子午工程FPI是一个适合中纬地区中高层大气风场观测的探测设备.

英文版见: Yuan W, Xu J Y, Ma R P, et al. First observation of mesospheric and thermospheric winds by a Fabry-Perot interferometer in China. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-010-4192-2

1 子午工程 FPI 和数据处理方法介绍

1.1 子午工程 FPI

子午工程 FPI 由天空扫描系统、激光定标系统、滤波片控制系统、F-P 标准具系统、自动聚焦系统和数据采集与存储系统组成, 设备运行时各个系统之间的配合由控制计算机通过程序实现, 系统框图如图 1 所示。

天空扫描系统选定 5 个方向进行观测, 分别是天顶角为 0°的天顶方向和天顶角为 45°的东、南、西、北方向。两个平面镜分别绕水平轴和竖直轴旋转配合, 由电机驱动、皮带传动, 把上述 5 个方向的气辉辐射信号导入 FPI 的光路中。

滤波片控制系统采用 5 通道滤波片轮, 其中 3 个通道放置了滤波片, 中心波长分别对应于气辉峰值高度在 87 km 的 OH Meinel 892.0 nm, 98 km 的 OI 557.7 nm 和 250 km 的 OI 630.0 nm; 第 4 个通道设置光阑, 获得 CCD 的本底数据; 第 5 个通道获取稳频激光器的定标信号。滤波片控制系统还包括 1 套匹配的光路准直系统, 使更多的能量通过滤波片, 进入 F-P 标准具。

F-P 标准具系统的有效通光孔径为 100 mm。标准具室内的压强由气压控制系统精确控制, 标准具室内的温度由温度控制系统精确控制, 始终保证标准具气压和温度的稳定。

自动聚焦系统将调整成像光路中的透镜位置, 保证 CCD 的靶面准确处在系统的像平面上。设备调试时记录好透镜位置, 并输入到控制软件中, 日常观测时系统会根据使用的滤波片不同适时将成像透镜停留在指定的位置, 始终保证 CCD 成像清晰。

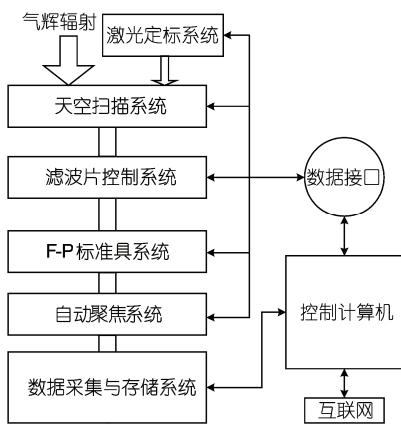


图 1 子午工程 FPI 系统框图

数据采集与存储系统使用背照式 CCD, 像素为 1024×1024, 工作温度为-50℃。

子午工程 FPI 的日常观测在 3 个气辉波段上循环进行, 每一个波段的观测都先后指向 5 个方向, 在每一个观测方向上, 相同波段的曝光时间不变, 不同波段的曝光时间为 3~5 min。通常, 完成一次 3 通道的循环观测时间, 包括曝光、扫描、聚焦、数据采集和等待的时间, 大约为 1 h。

有关 FPI 的更多的描述可以参考文献[3]。

1.2 观测数据和数据处理方法

子午工程 FPI 从 2010 年 4 月初开始试运行, 并获取观测数据。图 2 是从 2010 年 5 月 7 日的 4 个波长观测数据中选取的数据图像, 分别是稳频激光 632.8, 557.7, 630.0 和 892.0 nm 的干涉条纹, 其中, 632.8 nm 为定标波长。

处理干涉条纹图像数据能够得到气辉高度区间的大气风场数据。CCD 记录的干涉条纹的强度分布随着不同波长的输入光产生变化, 分析同级干涉条纹半径的变化, 与系统定标的的数据比较, 反演得到风场数据。在数据处理过程中, 利用了如下的假设: 在同一个观测循环中, 假设同一水平高度上大气的经向风场和纬向风场没有空间梯度, 也不考虑时变。详细的数据处理方法可以参考文献[3]。

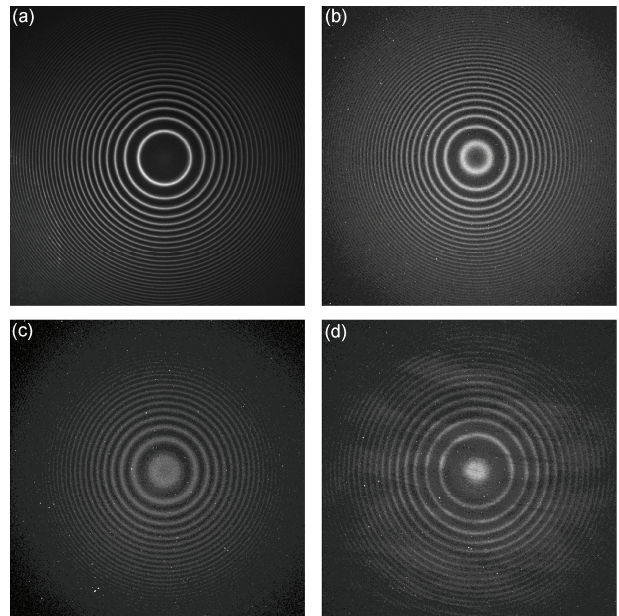


图 2 FPI 在 2010 年 5 月 7 日记录的不同波长的干涉条纹 (a) 632.8 nm (定标); (b) 557.7 nm; (c) 630.0 nm; (d) 892.0 nm

本文对个例观测数据和平均观测数据分别进行分析. 个例观测分析选取2010年5月6~8日连续3 d的观测数据; 平均观测分析选取2010年4月5日到5月12日共38 d的观测数据, 并将风场数据与在相同时间、地点、高度上HWM93模式结果比较.

2 风场观测结果

2.1 个例观测分析

选取2010年5月6~8日3 d的观测数据进行数据分析. 处理后得到3个不同高度的风场数据, 分别用经向风和纬向风表示, 如图3所示, 垂直线段表示数据的探测误差. 可以看出, 这些风场具有明显的逐日变化, 在南北风场中表现得更为明显. 尤其是热层大气的风场具有很强的逐日变化, 例如: 利用630 nm探测的热层大气经向风场从第127天到第128天, 风场变化达到大约100 m/s.

2.2 平均观测分析

对4月5日~5月12日共38 d的风场观测数据进行时序叠加统计分析, 得到3个高度上的时间系列的

经向风和纬向风平均数据. 在时序叠加统计分析中, 选取每一个地方时整点作为观测时间点, 对3个高度的风场进行统计, 得到全部38 d的观测数据的平均值和标准差. FPI的观测时间基本上在每天的20点到次日5点之间, 所以1 d的观测有9~10组观测数据. 每个时间点上的有效样本数如图4所示, 最大样本数为38. 数据筛选时考虑了原始图像的记录情况、反演后风场数据的阈值等. 由于晨昏时间观测受外界干扰较大, 所以有效观测的次数明显减少.

图5给出2010年4月5日~5月12日期间观测的平均风场数据与同期的HWM93数据结果的比较. 垂直线段表示数据的标准差. 从图上可以看到, 在87 km高度区域内的经向风和纬向风的平均值分别处在-16.5~8.7和-5.4~7.6 m/s之间; 在98 km高度区域内的经向风和纬向风在-24.4~15.9和2.3~23.0 m/s之间. 从标准差可以发现, 标准差的大小和观测得到的风场变化幅度相当, 甚至有些超过风场变化幅度, 很明显, 观测数据系列表现出较大的离散性. 产生离散的原因很多, 主要是由大气行星波、重力波和潮汐波产生的风场变化, 另外探测仪器的探测误差也会对探测结果产生影响. 从观测的平均风场与HWM93

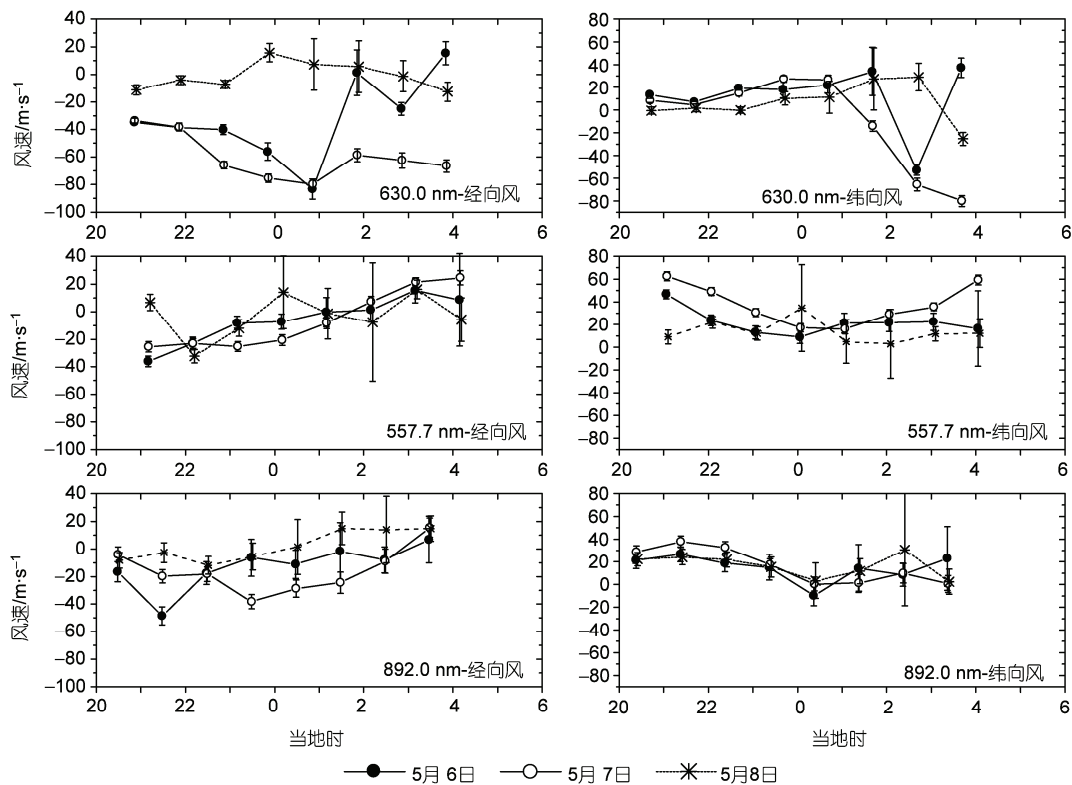


图3 FPI在2010年5月6~8日观测的风场结果

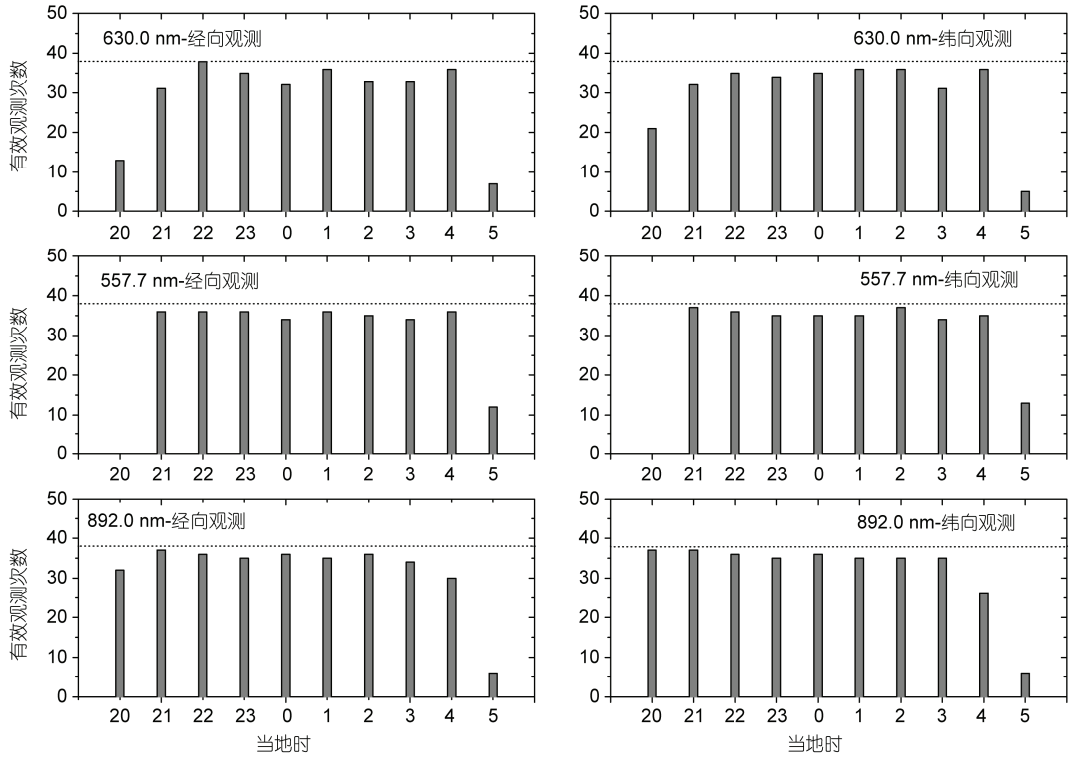


图4 2010年4月5日~5月12日期间观测的平均风场数据的有效样本数
虚线为最大样本数

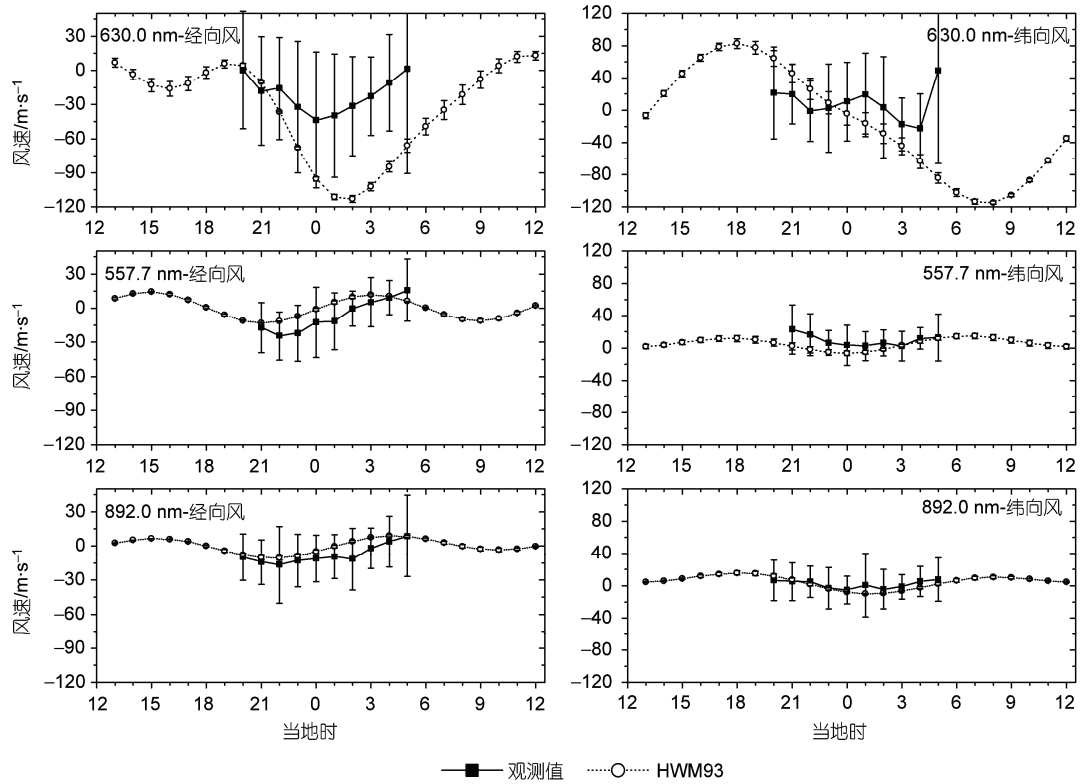


图5 2010年4月5日~5月12日期间观测的平均风场数据与同时段HWM93的比较

计算的同期的结果比较可以看到,两者存在较好的一致性,特别是87和98 km高度的风场半日潮与HWM93预报的半日潮相当一致.与同类型的FPI在加拿大的Resolute观测站的观测结果进行比较^[3],子午工程FPI在40°N观测点的运行也表现出相似的结果,即892.0和557.7 nm气辉所在的高度区间的风场具有明显的半日潮汐波.中高层大气半日潮在中纬地区的振幅较大,是该地区的主要动力学特征.通过对它的研究特别是对逐日变化的研究将进一步揭示中高层动力学过程.图5还显示,在87和98 km高度上的半日潮的相位基本一致.理论和观测表明,半日潮具有较长的垂直波长(40 km或更长),因此,它不只受对流层太阳加热激发,它也受平流层臭氧加热激发.FPI数据显示从87到98 km半日潮有较小的垂直相位变化,这和半日潮较长的垂直波长的理论结果是一致的.目前对半日潮认识还很不充分,半日潮的理论模式结果和观测结果还有较大的差距.经验模式由于是由观测数据产生,和子午工程FPI观测的平均结果吻合得很好.

从图5我们还可以看出,250 km高度的经向风和纬向风的平均值在-43.6~1.5和-22.6~49.3 m/s之间,与中层顶的数据相比,表现出更大的离散性.其原因可能是:(1)HWM93模式计算与FPI观测处在不同的太阳活动期;(2)630.0 nm气辉的辐射强度较弱,曝光时间为5 min,观测过程被外界因素的影响增加;(3)在250 km高度上,南北或东西方向上对应的被观测区域相距500 km,这两个被观测区域的实际风场是否相同,与数据反演时假设的风场相同,两者之间可能存在一定的偏差.同时,630.0 nm气辉辐射探测的热层大气风场与经验模式的结果有较大偏差.HWM93模式显示在夜间出现了很强的经向风分布,可能是由于模式包含了太阳活动较强期间的数据.FPI受到每天只能夜间观测的限制,还不能从观测数据看到模式结果显示的本地日潮的分布.总之,热层大气风场的实际观测结果与经验模式结果之间存在相当大的不一致.正因为对中高层大气风场的立体分布的认识和250 km高度风场的地基观测资料的不足,

作为目前对630 nm气辉辐射高度地基探测的唯一手段,利用FPI观测630 nm气辉辐射获得的热层大气风场的探测数据将成为对该高度的大气风场经验模式改进的重要的数据基础.

统计设备的观测误差数据,并与观测期间的观测数据表现的潮汐波幅度进行比较.在87,98,250 km高度区域内的经向风和纬向风的误差平均值分别为6.5和6.4 m/s,3.6和3.5 m/s,6.8和6.7 m/s,观测得到的潮汐波幅度分别对应为12.6和6.5 m/s,20.1和10.4 m/s,22.5和36.0 m/s.比较结果可见,观测数据能够较好地反映风场的分布,也说明设备能够获取较好的观测数据.

3 结论

利用子午工程FPI对3个特征高度区域的气辉辐射进行夜间观测,分析得到了大气风场.观测数据系列表现出较大的逐日变化.选取2010年4月5日到5月12日共38 d的观测数据,得到观测的平均数据,在87,98和250 km高度区域内的经向风和纬向风的平均值分别处在-16.5~8.7和-5.4~7.6 m/s,-24.4~15.9和2.3~23.0 m/s,-43.6~1.5和-22.6~49.3 m/s之间.与HWM93经验模式计算的风场比较,在87和98 km高度上,观测数据与模式之间存在一致性,特别是风场的半日潮与HWM93预报的半日潮非常清晰一致.但250 km的热层大气风场与经验模式有较大的差异.而FPI的热层大气风场探测是目前对该高度区间风场进行地基探测的唯一手段,这一探测得到的热层大气风场数据将是改进相应的经验模式的重要数据基础.

下一步,随着较长时间地基观测数据的积累,我们将进行地基和卫星探测数据的比较和分析,重点研究中高层大气的潮汐波以及对太阳活动的响应.

另外,通过分析3个特征高度区域的气辉辐射的干涉条纹的谱线展宽,能够得到相应高度区间的大气的温度观测数据.目前,正在进一步调试子午工程FPI的3个特征高度区域的气辉辐射反演温度数据的分析软件,以获取可靠的温度数据.

致谢 感谢中国科学院空间科学与应用研究中心牵头建设的“子午工程”提供了设备的建设经费.美国国家大气研究中心由美国国家科学基金会资助.

参考文献

- 1 Hays P B, Killeen T L, Kennedy B C. The Fabry-Perot interferometer on dynamics explorer. *Space Sci Instrumentation*, 1981, 5: 395—416
- 2 Sipler D P, Biondi M A. Simulation of hot oxygen effects on ground-based Fabry-Perot determinations of thermospheric temperatures. *J Geophys Res*, 2003, 108, doi: 10.1029/2003JA009911
- 3 Wu Q, Gablehouse R D, Solomon S C, et al. A new Fabry-Perot interferometer for upper atmospheric research. *Proc SPIE*, 2004, 5660: 218—227
- 4 Ishii M, Conde M, Smith R W, et al. Vertical wind observations with two Fabry-Perot interferometers at Poker Flat, Alaska. *J Geophys Res*, 2001, 106: 10537—10551
- 5 Niciejewski R J, Killeen T L, Turnbull M. Ground-based Fabry-Perot interferometry of the terrestrial nightglow with a bare charge-coupled device: Remote field site deployment. *Opt Eng*, 1994, 33: 457—465
- 6 Liu L, Luan X, Wan W, et al. A new approach to the derivation of dynamic information from ionosonde measurements. *Ann Geophys*, 2003, 21: 2185—2191
- 7 姜国英, 徐寄遥, 史建魁, 等. 我国海南上空中层顶附近大气环流的流星雷达观测. *科学通报*, 2010, 55: 923—930
- 8 熊建刚, 万卫星, 宁百齐, 等. 武汉上空中层顶附近大气环流的流星雷达观测. *科学通报*, 2003, 48: 1102—1106
- 9 Xiong J, Wan W, Ning B, et al. Gravity waves in the mesosphere observed with Wuhan meteor radar: A preliminary result. *Adv Space Res*, 2003, 32: 831—836
- 10 Zhao G, Liu L, Wan W, et al. Seasonal behavior of meteor radar winds over Wuhan. *Earth Planets Space*, 2005, 57: 61—70
- 11 Zhao G, Liu L, Ning B, et al. The tidal tide in the mesosphere and lower thermosphere over Wuhan. *Earth Planets Space*, 2005, 57: 393—398
- 12 涂翠, 胡雄, 闫召爱, 等. 中国首次中层顶大气重力波成像观测实验. *科学通报*, 2009, 54: 3784—3789
- 13 赵正启, 周小珊, 艾勇. 扫描式法布里-珀罗干涉仪测量高空大气风速. *应用光学*, 2006, 27: 558—562