

红外望远镜站址大气传输和环境背景特性的测量分析研究

戴聪明^{1*}, 张志勇², 马力^{1,3}, 冯志伟², 魏合理^{1,3}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分和光学重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院国家天文台 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100049;
3. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 大口径的地基红外望远镜必须安装在具有良好大气条件的观测台站才能充分发挥其性能, 天空背景辐射和大气传输特性是地基红外望远镜站址选择所需考虑的重要内容。采用消光-小角度散射法在西藏羊八井实测了太阳直接红外辐射和大气背景红外辐射, 并根据备选站点的大气参数, 采用 CART 软件计算了当地 8~14 μm 波段整层垂直大气的光谱透过率、太阳直接光谱辐射和地面大气垂直向下的背景光谱辐射, 以及相关量的波段积分值, 这些结果有助于地基红外太阳望远镜的站址选择。

关键词: 红外天文望远镜; CART; 太阳直接辐射; 大气透过率

中图分类号: P412 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1204005

Measuring and analysis of atmospheric transfer and environment background character on infrared telescope site

Dai Congming^{1*}, Zhang Zhiyong², Ma Li^{1,3}, Feng Zhiwei², Wei Heli^{1,3}

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Environmental Sciences and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: Selecting a fine atmospheric site is very important for ground-based infrared astronomy. The sky background radiance and atmospheric transmittance are important factors for selecting site. Combined observations of solar spectral extinction and forward angular scattering were presented with ground-based FTIR on Yangbajing, Tibet. The direct solar irradiance and atmospheric background radiance were showed on 8–14 μm band. According to the atmospheric parameters, the direct solar radiance, atmospheric spectral transmittance and background radiance of selecting sites were compared by CART on long-wave infrared band. These will be useful to select a site for ground-based infrared solar telescope.

Key words: infrared astronomical telescope; CART; direct solar radiance; atmospheric transmittance

收稿日期: 2016-04-10; 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 空间目标测量重点实验室开放基金

作者简介: 戴聪明^{*}(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为红外辐射大气传输特性研究。Email: cmdai@aiofm.ac.cn

0 引言

近年来,红外天文观测在研究太阳物理、揭示冷暗物质、探索隐藏的宇宙、丰富原有可见光观测天体目标的光谱特征信息等方面呈现出巨大发展潜力。大口径的地基红外望远镜必须安装在具有良好大气条件的台站才能充分发挥其观测性能,因此选择气象条件最优的站点至关重要^[1-2]。地基光学天文望远镜的选址需要测量和评估的大气参数较多,如气候情况、大气视宁度、大气水汽含量和常规气象参数等^[2-3]。红外天文望远镜对站址处的天空背景亮度和整层大气消光特性具有严格的要求,通常选择在寒冷、干燥的高海拔地区,如南极高海拔区域,其天空背景低辐射和大气高透射特性有利于获取高质量的天文图像^[4-5]。红外太阳望远镜的站址选择具有一定特殊性,太阳直接红外辐射和周围大气背景红外辐射是台址确定后的重要观测内容,也是比较这类天文台址品质优劣的重要指标。

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 技术是 20 世纪 80 年代兴起的新谱学方法,目前广泛应用于大气环境探测、空间红外天文观测等领域^[5]。Walden 等采用 FTIR 首次测量了南极 Dome C 站点的红外天空背景亮度^[6]。笔者曾采用 FTIR 光谱仪在内地测量了天空背景红外辐射,与理论计算值吻合较好^[7]。为此,在西藏羊八井采用 FTIR 测量太阳光环辐射,从中提取太阳直接红外光谱辐射和太阳边缘的大气背景红外光谱辐射,为地基红外太阳望远镜的站址选择提供基础科学数据。

国内西部天文选址结果表明:观测站点海拔越高,大气水汽含量越少,整层大气吸收越弱,因此青藏高原是最适合进行红外天文观测的区域^[8]。在该地区选择最适合观测太阳红外辐射的站点,对各站址的大气环境背景特性要求非常苛刻。由于不同站址的大气环境差异较小,且在不同站点难以做到太阳辐射同步测量。因此,选择了几个代表站点,根据实测近地面大气参数,结合各站点临近的高空气象数据,采用大气辐射传输模式计算了备选站点在当地正午 8~14 μm 波段大气顶到地面整层垂直大气的光谱透过率、太阳入射的光谱辐射和地面大

气垂直向下的光谱背景辐射,以及相关量在 8~14 μm 波段的积分量。用来分析各站点的红外太阳辐射、大气透过率和大气背景辐射。

1 太阳光环辐射测量方法

图 1 是太阳光环辐射地基测量装置的示意图。测量太阳光环辐射时,在视场镜前端外加可变孔径光阑,以保证 FTIR 测量的信号不饱和且具有足够的信噪比。入射的太阳光经平面镜反射后,平行入射到小视场镜并聚焦。随着太阳的运动,FTIR 可监测太阳逐渐进入直至完全移出光谱仪视场的整个过程。

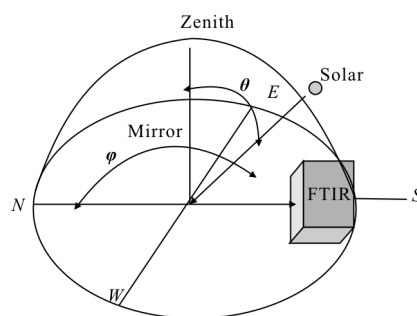


图 1 太阳光环辐射测量装置示意图

Fig.1 Schematic diagram for solar aureole radiance measurements

采用标准面源黑体对 FTIR 测量装置进行辐射定标。将黑体分别置于温度 T_1 和 T_2 , 待其稳定后, FTIR 测得其光谱辐射信号 V_{T_1} 和 V_{T_2} , 由黑体温度可计算其辐射强度 L_{T_1} 和 L_{T_2} , 根据以下公式

$$V_{T_1}(\nu) = V_0(\nu) + G(\nu) \cdot L_{T_1} \quad (1)$$

$$V_{T_2}(\nu) = V_0(\nu) + G(\nu) \cdot L_{T_2} \quad (2)$$

可得到信号偏移量 $V_0(\nu)$ 和信号增益 $G(\nu)$, ν 为波数。标准黑体的辐射量为:

$$L_T(\epsilon, \nu) = \frac{\epsilon c_1^3 \nu^3}{\exp(c_2 \nu / T) - 1} \quad (3)$$

式中: T 为黑体温度; c_1 为第一辐射常数 1.191048E-12; c_2 为第二辐射常数 1.438 775; ϵ 为参考黑体的发射率, 面源黑体的辐射率 ϵ 为 0.95。根据公式(1)~(3), 由线性回归方法, 可得探测器的定标系数曲线 $V_0(\nu)$ 和 $G(\nu)$ 。

$$G(\nu) = \frac{V_{T_2} - V_{T_1}}{L_{T_2} - L_{T_1}} \quad (4)$$

$$V_0(\nu) = \frac{V_{T_1}(\nu)L_{T_2}(\nu) - V_{T_2}(\nu)L_{T_1}(\nu)}{L_{T_2}(\nu) - L_{T_1}(\nu)} \quad (5)$$

2 测量结果分析

2.1 太阳直接辐射

图 2 是 2014 年 12 月 30 日在 13 时 35 分 4 秒西藏羊八井测量的太阳辐射电压值随时间的变化,它是 714~1250 cm^{-1} 波段的积分值。图中显示太阳逐渐进入光谱仪视场直至完全移出光谱仪视场的整个过程。第 167 组测量数据的积分辐射最大,表明太阳完全处于探测器视场中,第一组和最后一组测量信号是太阳未进入光谱仪视场的太阳周围大气和光阑的辐射之和,即环境背景辐射。

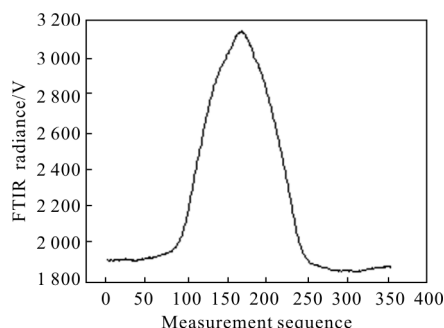


图 2 8~14 μm 的积分辐射随测量序列的变化

Fig.2 8~14 μm integrated radiance variance with measurement sequence

图 3 (a)是 FTIR 测量的太阳直接辐射电压信号,其值较低的谱区主要由臭氧及水汽的吸收造成。根据面源黑体温度在 100 $^{\circ}\text{C}$ 和 200 $^{\circ}\text{C}$ 下的辐射值,对 FTIR 光谱仪绝对辐射定标,并经过测量装置的探测视场(14 mrad)订正,得到近地面的太阳直接红外辐射谱,如图 3(b) 所示。实测的太阳直接辐射谱包含了臭氧 9.6 μm 吸收带及若干水汽谱线的吸收。由于太阳表面温度接近于 5800 K,要想准确测量太阳

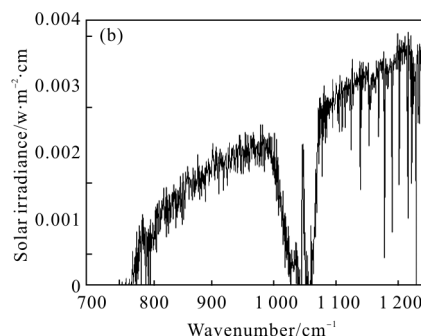
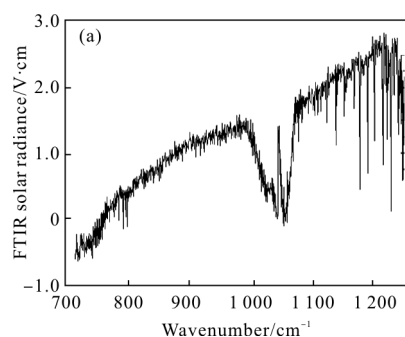


图 3 FTIR 测量的太阳直接红外辐射(定标前(a)和定标后(b))

Fig.3 Direct solar radiance measured by FTIR ((before(a) and after(b) calibration)

透射大气的直接辐射,应采用高温黑体对 FTIR 光谱仪进行辐射定标^[9]。因此,文中的黑体辐射定标将引入一定的测量误差。

2.2 大气背景辐射

2014 年 12 月 30 日 11 时 16 分 38 秒,在西藏羊八井采用 FTIR 测量了太阳边缘的大气背景辐射。图 4 是测量的 8~14 μm 波段积分辐射电压值随采集帧数的变化。图中显示,随着测量时间的增加,积分辐射逐渐减弱,太阳逐渐偏离 FTIR 测量装置的探测视场,视场内大气散射的太阳辐射越来越弱,大气热辐射在观测总辐射中的比重逐渐增加。

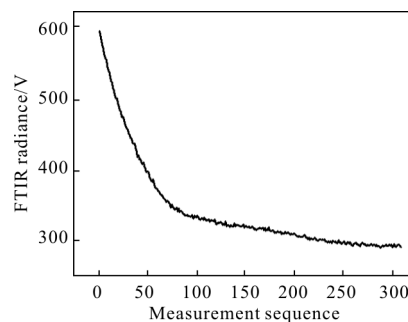


图 4 8~14 μm 的积分辐射随测量序列的变化

Fig.4 8~14 μm integrated radiance variance with measurement sequence

图 5(a)是 FTIR 测量的大气背景辐射原始光谱图,图中包含了臭氧 9.6 μm 强发射带。经黑体辐射定标(温度为 40 $^{\circ}\text{C}$ 和 60 $^{\circ}\text{C}$)后,得到太阳边缘的大气背景光谱辐射,见图 5(b)。图中显示在 760 cm^{-1} 的长波区域,大气背景辐射很强,主要由二氧化碳 15 μm 光谱带的辐射构成。在 900 cm^{-1} 的短波区域,大气背景辐射越来越强,这是因为 FTIR 观测的空域处于太阳的边缘(3 $^{\circ}$ 范围

内), 大气对太阳光的前向散射在长波红外谱区仍较强, 叠加在大气热辐射上并被 FTIR 所接收。

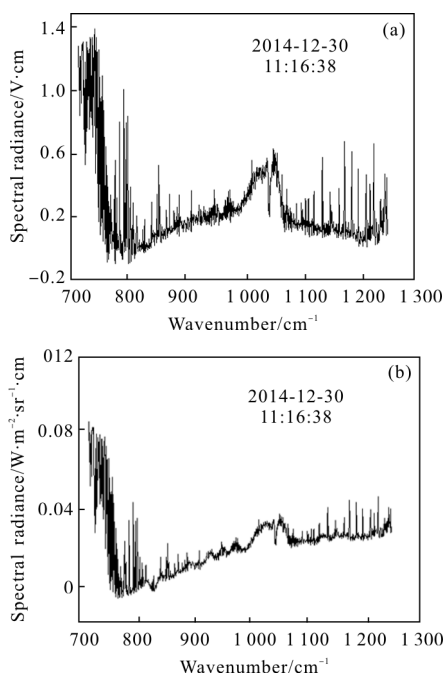


图 5 FTIR 测量的大气背景光谱辐射(定标前(a)和定标后(b))

Fig.5 Atmospheric thermal radiance measured by FTIR (before calibration (a) and after calibration (b))

3 备选站点大气背景辐射特性的比较

在 2014-12-12、2014-12-18、2014-12-30 和 2015-01-13 分别测量了西藏阿里、青海德令哈、西藏羊八井和四川稻城的近地面大气参数, 各站点的地理纬度和近地面大气参数信息见表 1。结合各站点临近的气象探空数据(那曲代表阿里, 都兰代表德令哈, 拉萨代表羊八井, 西昌代表稻城), 构建各站点的大气参数高度廓线。图 6 是各站点的正午时刻大气温度、水汽密度和气压的高度分

布廓线。可以看出, 稻城水汽含量显著高于其他站点, 德令哈的水汽含量最小。水汽吸收遍及红外波段, 是影响大气传输和天空背景辐射的一个重要参数。

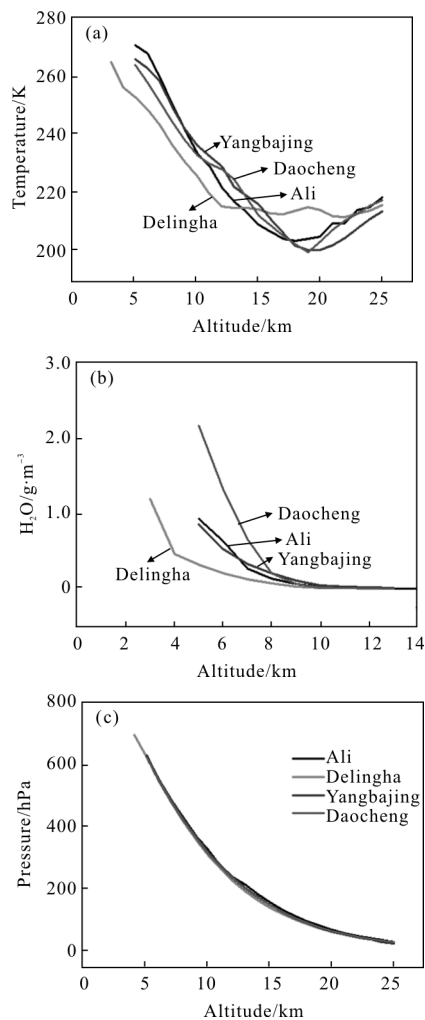


图 6 大气温度、水汽密度和气压的高度分布

Fig.6 Atmospheric temperature, water density and pressure variance with altitude

采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研发的

表 1 各个站点的位置信息和近地面大气参数

Tab.1 Positions and atmospheric parameters of sites

Location	Longitude/(°)	Latitude/(°)	Sea height/km	Solar zenith angle/(°)	Temperature/K	H ₂ O/g·m ⁻³	Pressure/hPa
Ali	80.0	32.3	5.1	66.5	268.0	0.930	586.0
Delingha	97.2	37.2	3.0	64.0	261.0	1.205	696.0
Yangbajing	90.4	30.2	4.7	67.7	266.0	0.860	624.0
Daocheng	100.1	28.0	4.7	54.6	264.0	2.179	623.0

通用大气辐射传输软件 $CART^{[10]}$, 计算不同站点正午时刻在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的大气光谱透过率、太阳直接光谱辐射和大气背景光谱辐射。图 7 是阿里、德令哈、羊八井和稻城的大气光谱透过率和太阳直接光谱辐射。图 7(a) 显示, 德令哈站的大气透过率高于稻城, 阿里和羊八井的大气透过率相差不大。同时, 稻城的太阳直接辐射低于德令哈, 阿里和羊八井的太阳直接辐射相差不大。

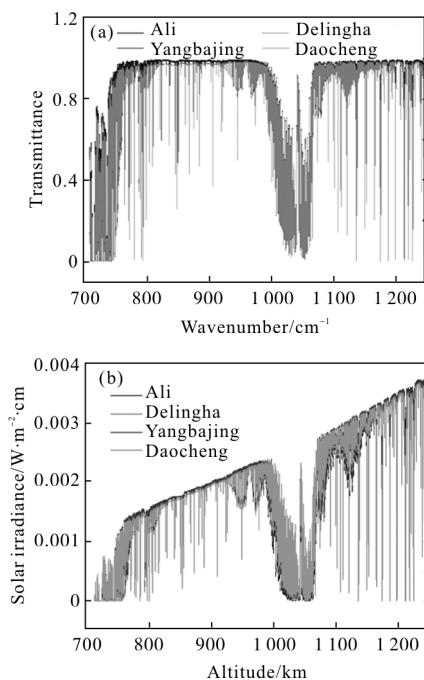


图 7 大气光谱透过率和太阳直射光谱辐射

Fig.7 Atmospheric spectral transmittance and direct solar spectral radiance

图 8 是 4 个站点大气背景光谱辐射的比较, 稻城的大气背景辐射略强于阿里、羊八井和德令哈。

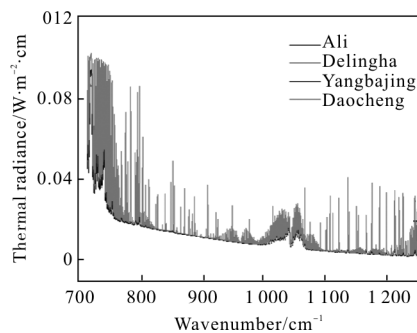


图 8 大气背景光谱辐射

Fig.8 Atmospheric background spectral radiance

景辐射在红外天文上有重要的应用, 为此, 文中以该波长为例, 详细分析备选站址的大气传输特性。图 9 显示了特征波长处的大气透过率、太阳直射辐射和大气背景辐射。可以看出, 该波长位于大气窗口内, 不受水汽谱线吸收的影响, 但仍受水汽连续吸收的影响, 当大气中的水汽含量越大, 对太阳辐射的衰减越强, 如稻城的大气透过率、太阳直接辐射明显低于其他站点, 大气背景则强于其他站点。

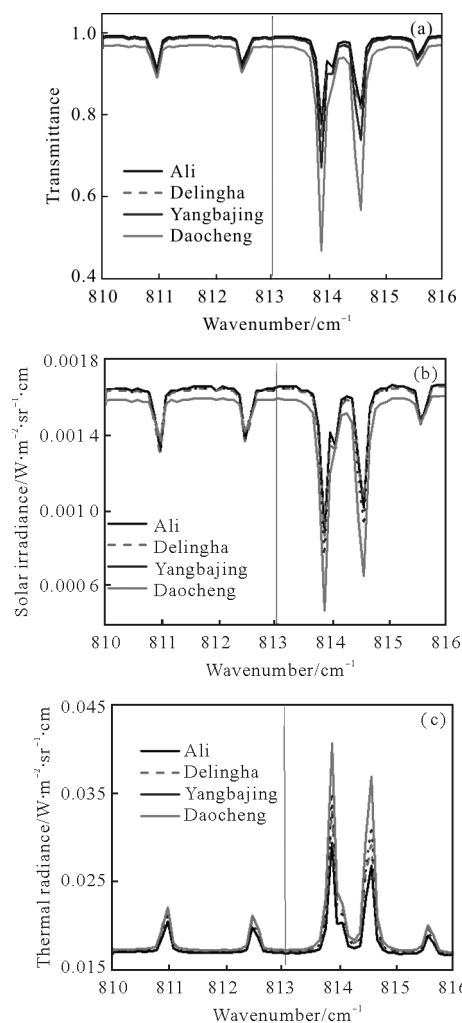


图 9 特征波长($813\ \text{cm}^{-1}$)附近的大气透过率、太阳直射辐射和大气背景辐射

Fig.9 Atmospheric transmittance, direct solar radiance and atmospheric background radiance on special wavelength ($813\ \text{cm}^{-1}$)

表 2 是备选站点的大气透过率、太阳直射辐射和大气背景辐射在 $813.0\ \text{cm}^{-1}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的平均(或积分)值。从中可知, 稻城的大气透过率和太阳直射辐射明显低于其他站点, 大气背景辐射则强于其他站点, 这与稻城水汽含量大、大气温度高密切

波长 $813\ \text{cm}^{-1}$ 附近的太阳直接辐射和大气背

相关;阿里的大气透过率、太阳直接辐射大于羊八井和德令哈,背景辐射则低于后者。这说明阿里最适合观测太阳红外辐射。羊八井和德令哈的大气透过率、太阳直射辐射及大气背景辐射相差不大,就

8~14 μm 的统计值而言,羊八井的平均透过率大于德令哈,太阳直接辐射强于后者,但大气背景辐射比德令哈低,这说明羊八井比德令哈更适合观测太阳红外辐射。

表 2 青藏高原备选站点的大气透过率、太阳直射辐射和大气背景辐射的比较

Tab.2 Comparisons of atmospheric transmittance, direct solar radiance and atmospheric background radiance on Tibet region

Location	813.0 cm ⁻¹			8-14 μm		
	Transmittance	Solar irradiance / (W·m ⁻² ·cm)	Thermal radiance / (W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·cm)	Average transmittance	Integrated solar irradiance/(W·m ⁻²)	Integrated thermal radiance / (W·m ⁻² ·sr ⁻¹)
Ali	0.992	1.66E-3	1.69E-2	0.845	1.06	8.00
Delingha	0.989	1.65E-3	1.71E-2	0.832	1.05	8.46
Yangbajing	0.989	1.65E-3	1.71E-2	0.835	1.07	8.30
Daocheng	0.968	1.60E-3	1.73E-2	0.816	1.04	8.76

4 结 论

太阳直接辐射和整层大气透过率是红外太阳望远镜站址选择所需考虑的重要问题。文中采用 FTIR 光谱仪,基于消光-小角度散射法在西藏羊八井测量了太阳光环辐射,初步获取了 8~14 μm 波段的太阳直接红外辐射和大气背景红外辐射,其精度主要取决于高低温黑体对 FTIR 的辐射定标精度。为了在青藏高原选择最适合进行太阳红外辐射观测的站点,文中结合实测大气参数,采用 CART 软件比较了备选站点的太阳直接红外光谱辐射、大气背景红外光谱辐射和大气光谱透过率,结果显示:阿里站点的太阳直接辐射最强、大气透过率最高,单从这个角度讲,阿里最适合进行太阳红外测量,羊八井次之。当然,实际大气的传输特性与当时的大气状况有关,要精确得到这些备选站址的大气透过率、太阳辐射和大气背景辐射,需要在不同季节、天气条件下开展地基红外观测系统的长期测量,得到大量数据的统计结果,才能得到客观定量的比较结果。

参考文献:

[1] Hou Jinliang, Site testing parameters and their measurements [J]. *Progress in Astronomy*, 1994, 12(2): 126-132. (in Chinese)
候金良. 天文选址的主要参数及测量方法[J]. 天文学进展, 1994, 12(2): 126-132.

[2] Qian Xuan, Wang Panxing, Yao Yongqiang, et al. Time variation of astro-climate conditions in China [J]. *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2011, 41(7): 896-910. (in Chinese)
钱璇,王盘兴,姚永强,等.中国天文气象特征的时变特征[J]. 中国科学物理学:力学 天文学, 2011, 41(7): 896-910.

[3] Wu Xiaoqing. Site testing for ground-based optical telescope [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2013, 36(5): 414-418. (in Chinese)
吴晓庆.地基天文光学望远镜选址[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2013, 36(5): 414-418.

[3] Liu Guangqian, Yang Lei, Deng Linhua, et al. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-guiding system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0101002-1-5. (in Chinese)
柳光乾,杨磊,邓林华,等.大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101002-1-5.

[4] Kenyon S L, Storey J W V. A review of optical sky brightness and extinction at Dome C. Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2006, 118(841): 489-502.

[5] Walden V P, Town M S, Halter B, et al. First measurements of the Infrared Sky Brightness at Dome C, Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2005, 117: 300-308.

[6] Evans W F J, Puckrin E. Combined measurements of thermal emission and solar absorption of atmospheric carbon monoxide[J]. *Atmospheric Environment*, 1993, 33: 2081-2088.

[7] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, et al. Ground-

- based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 284–290. (in Chinese)
- 魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 284–290.
- [8] Yao Yongqiang. The astronomical site survey in west China [J]. *Journal of Korean Astronomical Society*, 2005, 39: 113–116.
- [9] Gardiner T D, Coleman M, Browning H, et al. Absolute high spectral resolution measurements of surface solar radiation for detection of water vapor continuum absorption [J]. *Phil Trans R Soc A*, 2012, 370: 2590–2610.
- [10] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2 (6): 446–450. (in Chinese)
- 魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 通用大气辐射传输软件(CART)介绍[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 446–450.