

# 太阳直射光谱和天空光谱的测量与分析\*

曹婷婷 罗时荣† 赵晓艳 梁慧敏 王宏波 杨经国

(四川大学物理系 成都 610064)

(2006 年 12 月 28 日收到 2007 年 2 月 17 日收到修改稿)

在海拔 9600 m 高空测量并获得了大气上界直射太阳光谱和天空光谱, 测量了成都、丽江和玉龙雪山地表直射太阳光谱和天空光谱. 结果表明(西昌段)大气上界直射太阳光谱能量最大峰值对应的波长位于 482.1 nm, 天空光谱能量分布相对于直射太阳光谱能量分布明显紫移, 0.41—0.42  $\mu\text{m}$  波段成为天空光谱能量第一主峰区. 地表晴天天空光谱中的能量分布与直射太阳光谱的能量分布区别很大, 而有云时天空光谱中的能量分布和直射太阳光谱能量分布的差别比较小. 玉龙雪山山峰积雪雪面在可见光波段对不同波长有不同的反照率.

关键词: 太阳直射光谱, 天空光谱, 大气上界

PACC: 9260W, 9665H, 9410G

## 1. 引 言

随着大气污染检测方法研究的进展, 通过测量太阳辐射穿过大气层的光谱吸收来分析大气污染状况的研究成为大气科学研究的热点<sup>[1-4]</sup>. 为了获得太阳辐射的吸收, 首先需要获得大气上界太阳光谱作为参考光谱, 以本地采集的太阳光谱为样本光谱, 应用差分吸收方法反演获得大气污染气体(如  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  等)的垂直柱体密度. 长期以来, 人们主要采用 Kurucz<sup>[5]</sup> 等在美国 Kitt Peak 国家天文台 2000 m 高度处测量的太阳光谱作为参考光谱, 也使用美国 NASA 采用的日地平均距离处大气上界直射太阳光谱<sup>[6]</sup>, 但其分辨率为 5 nm. 为了获得更为理想的大气上界太阳光谱, Solomon 等从地表太阳光谱的观测推算获得大气上界太阳光谱(谓之长法)<sup>[7]</sup>, 但此方法需要很长的观测时间, 并要求在观测期内光学厚度不变. 周斌等<sup>[2]</sup> 曾以海拔 1860 m 黄山光明顶上采集的太阳光谱为参考光谱, 以此反演合肥西郊地区上空  $\text{NO}_2$  含量. 本课题组也曾使用西岭雪山顶(海拔 3400 m)太阳光谱反演成都地区大气中  $\text{NO}_2$  含量<sup>[3]</sup>.

与人类生活密切相关的大气层是大气对流层(海拔高度 10 km 以下), 云、雾、雨和雷电发生在这里, 由人类活动带来的大气污染也主要发生在对流

层. 因此, 对流层上界太阳直射光谱是更为理想的分析大气污染参考光谱.

本课题组最近在海拔 9600 m 高空(成都至昆明航线西昌段)和海拔 10000 m 高空(成都至西安航线秦岭段)的云层上方, 使用多道光纤光谱仪测量均获得了大气上界太阳直射光谱和天空光谱, 同时测量了成都、丽江以及玉龙雪山地区地表直射太阳光谱和天空光谱, 并对所测光谱进行了对比分析.

## 2. 光谱测量

光谱采集仪器为 71GF10 多道光谱仪(北京赛凡公司出品), 光谱采集范围 340.5—818.6 nm, 光谱分辨率 0.23 nm, 曝光时间 4.91 ms, 采样平均数 1000. CCD 探测器为 Sony ILX554B. 光谱仪通过 USB2.0 接口与计算机连接, 实现光谱的实时采集, 所讨论光谱均经过多道光谱 CCD 响应曲线校正<sup>[8]</sup>.

### 2.1. 大气上界直射太阳光谱和天空光谱的测量

分别测量了 2006 年 10 月 22 日 09:00 成都至昆明航线(西昌 30°N, 104°E)海拔 9600 m 高空和成都至西安航线(秦岭段)海拔 10000 m 高空的大气上界直射太阳光谱. 选取成昆航线测量的原始多道光谱图, 如图 1(a), 图 1(b)为多道光纤光谱仪 CCD 探测

\* 国家自然科学基金(批准号: 60078020, 60478044)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: shirongluo@sohu.com

器光谱响应曲线,图 1(a)光谱经过 CCD 光谱响应校正后,得到如图 1(c)所示直射太阳光谱.测量的大气上界天空光谱经多道光谱检测 CCD 响应强度校正后,如图 2 所示,所对应的太阳天顶角为  $45^\circ$ .

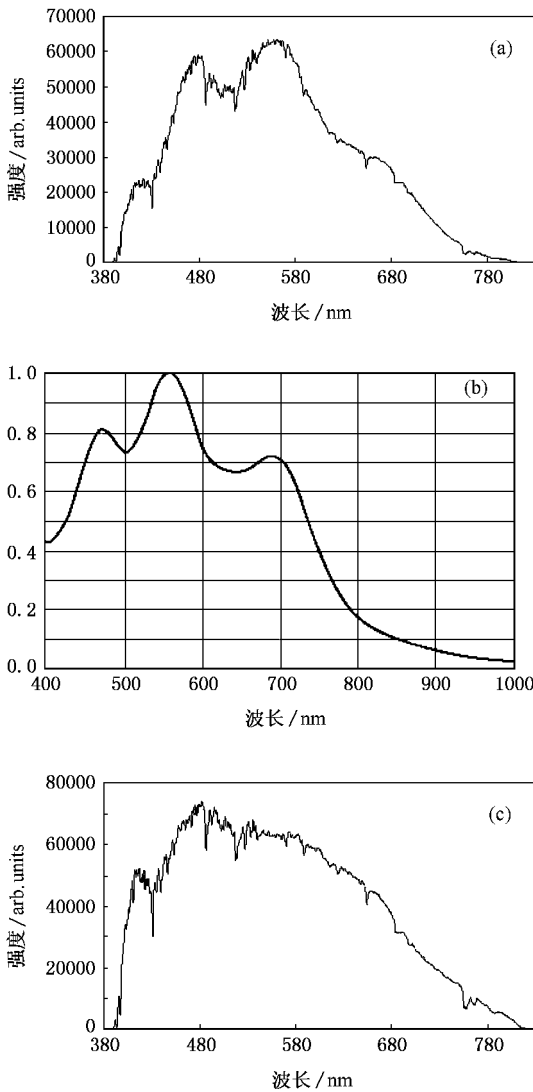


图 1 大气上界(海拔 9600 m)太阳直射光谱 (a)强度校正前;(b)CCD 响应曲线 (c)强度校正后光谱图

### 2.2. 地表太阳直射光谱和天空光谱的测量

采集 2006 年 10 月 22 日丽江(  $25.59^\circ\text{N}$ ,  $99.23^\circ\text{E}$  )以及 2006 年 9 月 5 日成都(  $30.63^\circ\text{N}$ ,  $104.09^\circ\text{E}$  )地区的太阳直射光谱分别如图 3 曲线 3、4 和大气上界直射太阳光谱(曲线 2)相比,成都地表直射太阳光谱辐照度(由光谱强度在  $340.5\text{--}818.6\text{ nm}$  对面积积分获得)比大气上界小 18%,丽江地表直射太阳光谱辐照强度比大气上界小 8.5%,成都地表直射太阳光谱辐照度比丽江测量的平均小 9%—

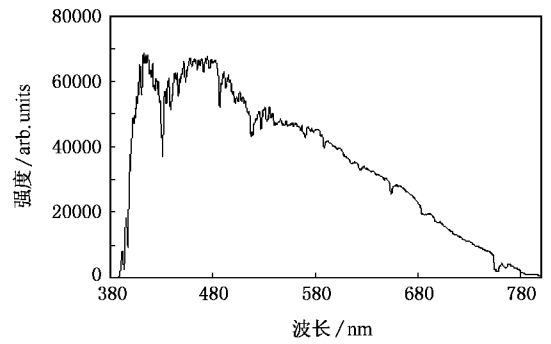


图 2 强度校正后的大气上界天空光谱(太阳天顶角为  $45^\circ$ )

11%.图 3 曲线 1 为玉龙雪山(  $27.10^\circ\text{N}$ ,  $100.09^\circ\text{E}$  ) 4650 m 海拔处采集的直射太阳光谱曲线,可以看出,玉龙雪山山峰的积雪雪面在可见光波段有明显的反照率(由于表面反射导致天空光中某些波段光谱的增强),主要集中在近紫外段和近红外段.

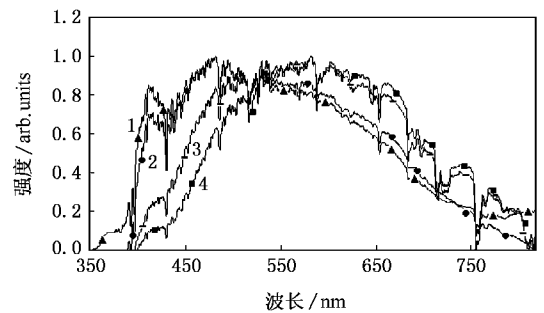


图 3 地表直射太阳光谱和大气上界直射太阳光谱

采集 2006 年 10 月 25 日晴天中午 12 时和 2006 年 10 月 28 日阴天中午 11 时丽江地表天空光谱如图 4(曲线 1 为晴天,曲线 2 为阴天)所示,强度均经过归一化,对应太阳天顶角均为  $45^\circ$ .由图可见,晴天丽江地表天空光谱能量主要集中在  $0.40\text{--}0.48\ \mu\text{m}$ ,阴天天空光谱能量主要集中在  $0.43\text{--}0.65\ \mu\text{m}$ .

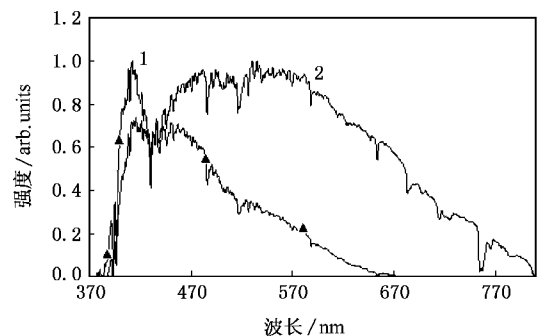


图 4 不同天气情况下地表天空光谱

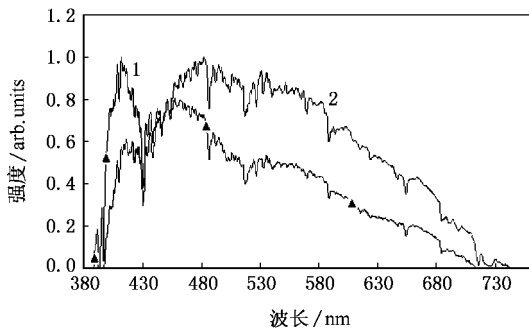


图5 丽江、成都两地天顶光光谱(晴天)

晴天天气情况下,丽江和成都两地正午时刻天顶光(天顶角为 $0^\circ$ )光谱分别如图5曲线1、2所示。由图可见,丽江天顶光光谱的最大峰值位于 $412\text{ nm}$ 处,而成都地区天顶光光谱的最大峰值位于 $482.3\text{ nm}$ 。丽江地表天顶光光谱能量主要集中在 $0.40\text{—}0.48\ \mu\text{m}$ ,成都天顶光光谱能量主要集中在 $0.43\text{—}0.60\ \mu\text{m}$ 。

### 3. 光谱数据分析

#### 3.1. 大气上界直射太阳光谱和天空光谱的分析

我们所得到的西昌直射太阳光谱能量最大峰值位于 $482.1\text{ nm}$ ,落在林科<sup>[9]</sup>指出的太阳直射光谱最大值应出现的光谱区域内( $0.46\text{—}0.48\ \mu\text{m}$ ),也与NASA采用的太阳光谱峰值对应波长( $480\text{ nm}$ )接近,并且两者的光谱能量分布基本一致。

太阳天顶角为 $45^\circ$ 时大气上界的天空光光谱能量分布有变化,大气上界天空光光谱能量分布和直射太阳光光谱能量分布相比明显紫移, $0.41\text{—}0.42\ \mu\text{m}$ 波段成为最大光谱能量集中区;直射太阳光光谱能量最大区位于 $0.46\text{—}0.48\ \mu\text{m}$ 波段,成为大气上界天空光光谱能量分布的第二主峰区。

#### 3.2. 地表直射太阳光谱分析

丽江和成都地区的太阳直射光谱在各波段的吸收峰(夫琅和费暗线)所对应的位置一致。在 $390\text{—}580\text{ nm}$ 波段,成都地区的光谱线明显向下凹陷,表明成都地区低层大气存在较大气体吸收。在 $630\text{—}780\text{ nm}$ 波段成都地区的太阳直射光谱向上凸起,起

因于大气中的气溶胶颗粒对太阳光的Mie散射,引起前向散射光在总散射光中的比值增大,造成在 $630\text{—}780\text{ nm}$ 波段太阳直射光谱线的凸起。

玉龙雪山采集的太阳直射光谱在近紫外段和近红外段明显比大气上界直射太阳光谱强度大,而在其他波段基本相同,这是因为积雪雪面对不同波长的反照率不同。结果表明,玉龙雪山的积雪雪面在近紫外和近红外段的反照率较高。

#### 3.3. 地表天空光谱分析

在晴朗的天气情况下,丽江的天空光光谱峰位蓝移,光谱谱线最大峰峰值位于 $412\text{ nm}$ ,而在阴天有云的天气状况时,天空光光谱最大峰值对应的波长位于 $535.3\text{ nm}$ 。不同天气状况下,地表天空光光谱能量分布的差异起因于不同的散射机理。晴天时,空中尺度很小的粒子产生的Rayleigh散射导致光谱强度在紫外 $0.40\text{—}0.42\ \mu\text{m}$ 增强。而阴天有云时,云层中大量的水汽和凝结核对应太阳光的Mie散射使天空光光谱能量分布和直射太阳光光谱能量分布差别较小。

丽江地表天顶光能量分布最大值出现在 $0.40\text{—}0.42\ \mu\text{m}$ ,成都的分布最大值出现在 $0.46\text{—}0.58\ \mu\text{m}$ ,并且成都地表天顶光能量分布曲线和地表直射太阳光光谱能量分布相似。由于成都市平均海拔( $500\text{ m}$ )远低于云南省丽江的平均海拔( $2400\text{ m}$ ),并且大气气溶胶粒子浓度远高于丽江,气溶胶和水汽等对太阳光的Mie散射导致成都天空光光谱和丽江天空光光谱能量分布差异较大。

### 4. 结 论

本文给出了位于西昌段 $9600\text{ m}$ 高空和秦岭上空 $10000\text{ m}$ 高空的大气上界直射太阳光谱,该光谱辐射能量分布和美国NASA采用的大气上界太阳光谱一致。在对流层顶,污染气体吸收浓度可近似视为零,因而此次采集的直射太阳光谱可以作为很好的参考光谱。利用本次采集的大气上界直射太阳光谱和地表直射太阳光谱反演可以得到地表大气中 $\text{NO}_2$ 气体的垂直体密度。对大气上界天空光光谱能量分布和直射太阳光光谱能量分布比较发现:天空光谱明显比直射太阳光光谱紫移, $0.41\text{—}0.42\ \mu\text{m}$ 波段成为光谱能量第一主峰区。



- [ 1 ] Wu X J , Wen X S 2001 *The Favorable Reply From Universe : Astrophysics* ( Shanghai : Shanghai Press ) ( in Chinese ) [ 吴鑫基、温学诗 2001 宇宙佳音 : 天体物理学 ( 上海 : 上海出版社 ) ]
- [ 2 ] Zhou B 2004 *Acta . Phys . Sin .* **49** 2057 ( in Chinese ) [ 周 斌 2004 物理学报 **49** 2057 ]
- [ 3 ] Zuo H Y 2006 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **26** 1356 ( in Chinese ) [ 左浩毅 2006 光谱与光谱分析 **26** 1356 ]
- [ 4 ] Hao N , Zhou B , Chen L M 2006 *Acta . Phys . Sin .* **55** 1529 ( in Chinese ) [ 郝 楠、周 斌、陈立民 2006 物理学报 **55** 1529 ]
- [ 5 ] Kurucz R L , Furenlid I , Brault J. Solar flux atlas from 296 to 1300 nm. Harvard University ,1984 ( Http ://cfaku5.harvard.edu/sun.html )
- [ 6 ] Zhou X J 1991 *Advanced Aerophysics* ( Beijing : Meteorological Press ) ( in Chinese ) [ 周秀骥 1991 高等大气物理学 ( 北京 : 气象出版社 ) ]
- [ 7 ] Solomon S , Schmeltekopf A L , Sanders R W 1987 *Geophy . Res .* **92** 8311
- [ 8 ] Chen W X 2004 *Analytical Instrument* **4** 34 ( in Chinese ) [ 陈文芎 2004 分析仪器 **4** 34 ]
- [ 9 ] Editor : Kantrajeff Translator : Li H J 1962 *Solar Radiotechnology* ( Beijing Science Press ) [ 康德拉捷夫著 , 李怀瑾译 1962 太阳辐射能 ( 北京 : 科学出版社 ) ]

## Measurement and analysis of direct sunlight and skylight spectra<sup>\*</sup>

Cao Ting-Ting Luo Shi-Rong<sup>†</sup> Zhao Xiao-Yan Liang Hui-Min Wang Hong-Bo Yang Jing-Guo  
( Department of Physics , Sichuan University , Chengdu 610064 , China )

( Received 28 December 2006 ; revised manuscript received 17 February 2007 )

### Abstract

The extraterrestrial spectrum in the visible wavelength range of 340.5—818.6 nm at the height of 9.6 km has been detected , furthermore , the upper sunlight and skylight spectra have been collected in different regions of Chengdu and Lijiang . The date and diagram indicated that 482.1 nm is the highest point in extraterrestrial direct solar spectra , and that of the extraterrestrial skylight spectra is shifted to 412 nm . The skylight spectra registered on sunny and cloudy days are notably different . It was also found that the firm on top the Yulong Mountain has different albedos in different wavebands visible range .

**Keywords :** direct sunlight , skylight , extraterrestrial spectrum

**PACC :** 9260W , 9665H , 9410G

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60078020 , 60478044 ) .

<sup>†</sup> E-mail : shirongluo@sohu.com