

# 利用太阳直射光谱遥感大气柱水汽总量的研究\*

李 放 吕达仁 刘锦丽

(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

**摘 要** 太阳光谱仪测得的直接辐射光谱含有大气水汽含量的信息。本文提出一种用太阳直射光谱反演大气柱水汽总量的方法。采用分子吸收的随机模式,而不是通常的 Bouguer 定理,处理水汽吸收,故更为合理。选取水汽的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\rho\sigma\tau$  吸收带逐次扣除,联合订正,给出水汽含量。并与探空资料结果做了对比,有较好的一致性。

**关键词** 大气,水汽总量,遥感,探空

## 1 引 言

大气中的水汽量是大气遥感的一个重要内容。水汽的主要来源是水面,特别是海洋表面的蒸发。水汽在太阳辐射的近红外部分有一系列吸收带,其中心波长分别在  $0.72\ \mu\text{m}$  ( $\alpha$  带),  $0.82\ \mu\text{m}$  ( $\beta$  带) 和  $0.937\ \mu\text{m}$  ( $\rho\sigma\tau$  带) 等。Fowle 在 1915 年确定了水汽各个吸收带的光谱透过率<sup>[1]</sup>, 他的研究结果在其后的几十年间被广泛引用。由于受实验技术限制,其结果未曾考虑水汽透过率随压力和温度的变化。Howard 等人对此做了改进<sup>[2]</sup>。Leckner 做了进一步的研究<sup>[3]</sup>, 给出了已知大气柱中水汽含量的太阳直接辐射光谱透过率表达式。本文就是基于这种理论,对其反问题——水汽遥感做研究。孔琴心等人曾用单色计在地面测量太阳  $0.873\ \mu\text{m}$  和  $0.942\ \mu\text{m}$  辐射强度比值,确定大气水汽总含量<sup>[4]</sup>。然而,此方法受无线电探空精度的影响(依赖于探空定标),不宜做相互比较。本文利用 PIS 太阳光谱仪进行大气水汽透过率观测,光谱分辨率高,可独立于探空资料,依据水汽分子吸收带的波谱参数,给出遥测瞬间大气柱中水汽含量。与探空资料作比较有较好的一致性。文中还简要讨论了误差因素。

## 2 遥感原理

Leckner 曾利用实验室测定的分子光谱吸收率总结得到了计算大气光谱透过率的严格表示式<sup>[3]</sup>。对于水汽吸收,若波长为  $\lambda$  的透过率用  $\tau_{w_{\alpha\lambda}}$  表示,则有

$$\tau_{w_{\alpha\lambda}} = \exp \left[ -0.2385 k_{w_{\alpha\lambda}} w m_r / (1 + 20.07 k_{w_{\alpha\lambda}} w m_r)^{0.45} \right] \quad (1)$$

其中  $k_{w_{\alpha\lambda}}$  为水汽吸收系数(单位为  $\text{cm}^{-1}$ );  $w$  是水汽总量 ( $\text{cm}$ );  $m_r$  是标准压力下大气质

\*国家自然科学基金资助。

收稿日期: 1995年11月8日; 收到修改稿日期: 1996年5月28日

量(无量纲)。该式已考虑了标准大气下,气压和温度在垂直方向变化的影响。它是基于分子吸收“随机模式”导出的。研究表明,该式优于 Bouguer 定理的结果。水汽光谱吸收系数  $k_{wai}$  采取 Iqbal 的表列值<sup>[5]</sup>,大气质量  $m_a$  可用 Kasten 公式求得<sup>[6]</sup>。

这里  $\theta_2$  为太阳天顶角,对于地基观测,该式在  $\theta_2$  小于  $86^\circ$  时,误差小于 0.1%,最大误差出现在  $\theta_2 = 89.5^\circ$  处,为 1.25%。

$$m_a = [\cos\theta_2 + 0.15(93.885 - \theta_2)^{-1.253}]^{-1} \quad (2)$$

图 1 显示了地面实测的大气总光学厚度  $T_0$  和气溶胶光学厚度  $T_a$  的波谱曲线。光学厚度即为垂直透过率倒数取自然对数<sup>[7]</sup>。在图 1 中标出了水汽的  $\alpha, \beta$  和  $\rho\sigma\tau$  吸收带产生的光学厚度峰。在 760—770 nm 之间为  $O_2$  吸收的光学厚度峰。对于水汽总量,我们提出一种逐次迭代扣除方法,即初始量从  $w=0.01 \text{ cm}$  算起,逐次递增,直至水汽的  $\alpha, \beta$  和  $\rho\sigma\tau$  带消去为止。各带得到的水汽量加权平均,给出整层大气柱水汽总量。

图 1 显示了地面实测的大气总光学厚度  $T_0$  和气溶胶光学厚度  $T_a$  的波谱曲线。光学厚度即为垂直透过率倒数取自然对数<sup>[7]</sup>。在图 1 中标出了水汽的  $\alpha, \beta$  和  $\rho\sigma\tau$  吸收带产生的光学厚度峰。在 760—770 nm 之间为  $O_2$  吸收的光学厚度峰。对于水汽总量,我们提出一种逐次迭代扣除方法,即初始量从  $w=0.01 \text{ cm}$  算起,逐次递增,直至水汽的  $\alpha, \beta$  和  $\rho\sigma\tau$  带消去为止。各带得到的水汽量加权平均,给出整层大气柱水汽总量。

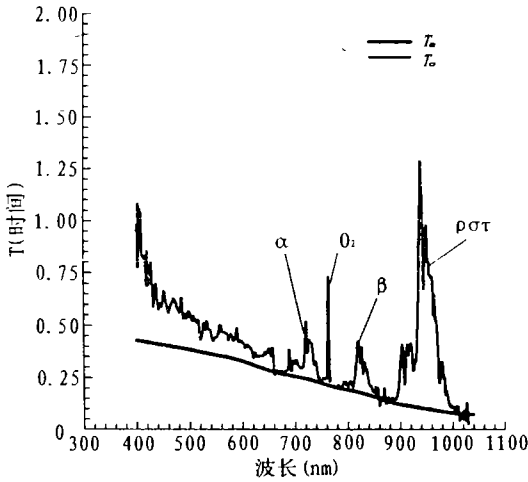


图 1 实测大气总光学厚度  $T_0$  和气溶胶光学厚度  $T_a$  光谱曲线, 及水汽的  $\alpha, \beta$  和  $\rho\sigma\tau$  吸收带产生的峰

注: 新乡 1993 年 9 月 15 日 13: 53, PIS 光谱仪观测资料  
Fig.1 Total spectral optical depth  $T_0$  and aerosol optical depth  $T_a$ . The peaks due to absorbing bands of water vapour  $\alpha, \beta, \rho\sigma\tau$  are indicated respectively.

### 3 观测结果与讨论

(1) 实验设备。所用 PIS 光谱仪是一台 512 元硅探测阵列光谱仪器, 波长范围 0.40—1.04  $\mu\text{m}$ , 光谱分辨率为 1.25 nm, 光谱响应时间 10 ms, 视场角  $2.5^\circ$ , 仪器重复性误差小于 2%。

(2) 观测时期和地点 (表 1)

表 1 太阳直接辐射光谱测量的地点和时期

Table 1 The positions and dates of observations for spectral direct solar radiation

测点名称	东 经	北 纬	海 拔 (m)	观测时期
北京	116° 24'	40° 00'	55	1995 年 1—3 月
新乡	117° 00'	35° 17'	74	1993 年 9 月

(3) 数据采集方法。选择晴天或少云天气, 在视场角  $5^\circ$  立体角内无云为原则。观测结果与实时探空资料的对比 (图 2)。由探宝资料获得水汽总量  $w'$  用下式求取

$$w' = \int_{-z}^z \frac{6110R_H(z)10^{\frac{7.5t(z)}{237.3+t(z)}}}{4.615T(z)} dz \quad (3)$$

其中  $z$  为几何高度;  $R_H(z)$  为相对湿度;  $t(z)$  为气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T(z)$  是绝对温标。由于新乡地区探空资料的实时匹配颇为困难, 可作比较的点数较少。图 2 中横轴表示遥感的水汽总量, 纵轴表示探空得到的水汽总量, 斜线为理想情况下两者相等时的轨迹。实际观测有一定的分布, 但总趋势呈线性变化。遥感和探空水汽总量相关系数为 0.82, 有较好的一致性。分析遥感和探空之间的偏差主要原因, 我们认为:

- (1) 探空资料本身的误差在 10% 左右<sup>[4]</sup>;
- (2) PIS 光谱仪测量误差虽然低于探空, 但 PIS 光谱仪给出的是瞬时水汽值, 而探空得到的是一个时段内的水汽值。两者不易做到真正意义上的实时匹配, 只能是平均意义上的“同时”。这是观测点有一定分布的主要原因。考虑到以上分析, 图 2 显示的结果可以表明本文提出的太阳直射光谱遥感大气柱水汽总量的方法是可行的。经分析可知, 本方法的精度主要受水汽吸收系数的气压和温度变化偏差的制约, 这方面还需做进一步的研究。

### 4 结 论

本文利用 PIS 太阳光谱仪测定的近红外区直接辐射谱资料, 以及水汽分子吸收的随机模式得到的光谱吸收系数进行了遥感大气水汽总量的研究, 遥感结果与探空资料做了对比, 两者有较好的一致性。这种方法可应用于定量化遥感的大气订正中, 进行水汽含量影响的自行扣除。在缺少探空资料的地区, 尤为适用。

### 参 考 文 献

[1] Fowle, F. E.. The transparency of aqueous vapor. *J. Astrophys.*, 1915, **42**. 394—411.  
 [2] Howard, J. N., D. E. Burch, D. Williams. Infrared transmission of synthetic atmospheres. III. Absorption by water vapor. *J. Opt. Soc. Am.*, 1956, **46**(4). 242—245.  
 [3] Leckner, R.. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model. *Sol. Energy*, 1978, **20**(2). 143—150.

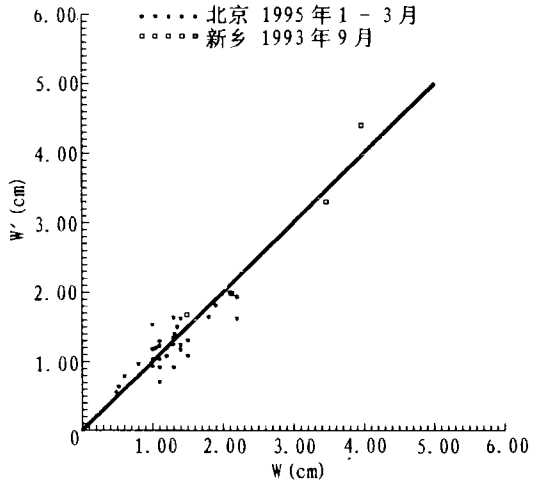


图 2 遥感的大气柱水汽总量  $w$  与探空结果  $w'$  的比较

Fig.2 Comparison of water vapour content in the atmospheric column  $w$  by the remote sensing with that  $w'$  by radiosonde

- [4] 孔琴心, 任丽新. 大气柱内水汽含量的遥测. 大气科学文集. 气象出版社, 1983, 29—32.
- [5] Iqbal M. An introduction to solar radiation. Academic Press. 1983, 107—168.
- [6] Kasten. A new table and approximate formula for relative optical air mass. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser.* 1966, **B14**, 206—223.
- [7] 李 放, 刘锦丽, 吕达仁. 北方局地区夏末气溶胶光学特性综合观测分析. 大气科学, 1995, **19**(2), 235—242.

### 作 者 简 介

李 放, 男, 1958年4月生, 1982年毕业于南京理工大学, 1991年在北京理工大学获博士学位。主要从事利用遥感方法, 研究大气气溶胶物化特性和光学特征, 以及气溶胶的辐射传输效应和它对气候的影响。目前正从事大气气溶胶模式研究和城市碳黑气溶胶辐射效应研究。已发表论文 32 篇。

## A Study of the Remote Sensing in Columnar Water Vapour Content from Spectral Direct Solar Radiation

Li Fang      Lü Daren      Liu Jinli

(*Institute of Atmospheric Physics, LAGEO, Chinese Academy of Sciences*)

**Abstract** There is the information content of atmospheric water vapour in direct solar radiation measured with a solar spectrometer. A deduction approach is presented for retrieving the columnar water vapour content. On the basis of the random model rather than the Bouguer Law, the retrieval for water vapour absorption is more reasonable. Three water vapour absorbing bands,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho\sigma\tau$ , are selected in the joint deduction of water vapour content. It is shown that the columnar water vapour content from the remote sensing data is quite consistent with that from radiosonde data.

**Key words** Atmosphere, Columnar water vapour content, Remote sensing, Radiosonde