

近红外大气水蒸气柱密度计

周 旭 钱忠钰

(中国科学院 北京天文台)

摘要——本文所述便携式近红外大气水蒸气柱密度计, 可以用太阳或月亮作辐射源, 通过对吸收线剩余强度的测量来确定从地面到大气外辐射路径上水蒸气的积分柱密度。仪器携带和使用方便, 工作可靠, 是红外天文选址和大气水蒸气含量监测的有用工具。

一、概 述

地面的红外天文观测受到地球大气吸收的严重限制, 只能在某些特定的“大气窗口”进行, 即使在那些窗口, 观测也受到大气吸收很大的影响, 其中水蒸气对红外辐射吸收的影响是最重要的因素。

大气中水蒸气含量受地理位置、地貌、海拔高度和季节变化等因素的影响, 差异很大。在选择红外天文观测台址时, 大气水蒸气柱密度(从地面直到大气外每单位面积垂直路径上水蒸气含量的积分值)是一个关键的指标, 其单位为 kg/m^2 。由于气象部门常常难以提供候选点时间上较密的数据, 尤其是经常缺少天文观测中最重要的晚上的数据, 所以一个轻便的近红外大气水蒸气柱密度计对红外选址工作是很有价值的。在常规红外观测中, 用它来监测大气中水蒸气含量的时间变化对数据处理也是有意义的。

二、工作原理与构造

测量太阳光谱在水蒸气吸收带处的剩余强度, 把它和附近无吸收处连续背景的背景强度相比较, 根据谱线的形成理论, 就可推算出辐射所通过的路径上水蒸气含量的积分值。波长的选择可以使用窄带干涉滤光片来实现。

通常挑选太阳光谱中近红外区水蒸气吸收的 $\sigma_{\nu\tau}$ 带来测量大气水蒸气柱密度, 它是水分子振动能级从基态 000 跃迁到量子态 201 和 003 时吸收辐射所产生的, 中心波长分别在 940 nm 和 914 nm 附近, 如图 1 所示。我们使用的也是这二条吸收线, 不吸收的连续背景取在 870 nm 和 755.5 nm 处, 所用的干涉滤光片主要参数列于表 1。

仪器的光学原理如图 2 所示。物镜口径为 40 mm; 焦距为 135 mm; 有效光栏直径为

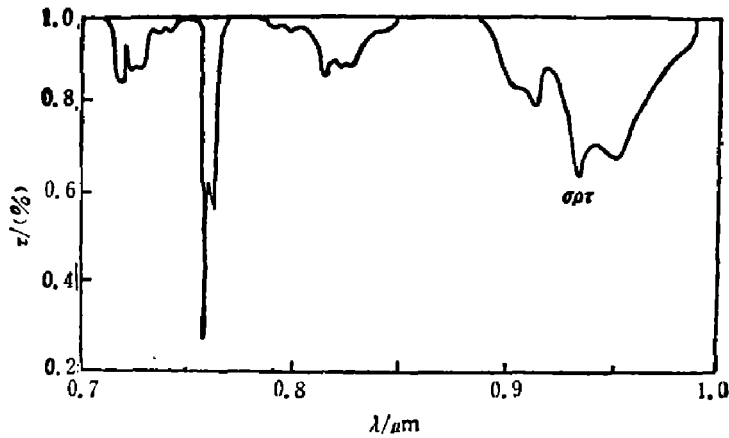


图1 近红外区的大气透射特性(对应水蒸气柱密度为 10kg/m^2)

Fig. 1 The near infrared atmospheric transmission with an H_2O -column density of 10kg/m^2

表1 窄带干涉滤光片光谱特性

Table 1 The Spectral characteristics of narrow band interference filters

| 滤光片编号 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|-----|-------|-------|-------|
| 中心波长(nm) | 941 | 916.5 | 872.8 | 755.5 |
| 半高全宽(nm) | 14 | 14 | 10.5 | 8 |
| 最大透过率(%) | 78 | 63 | 72 | 54 |

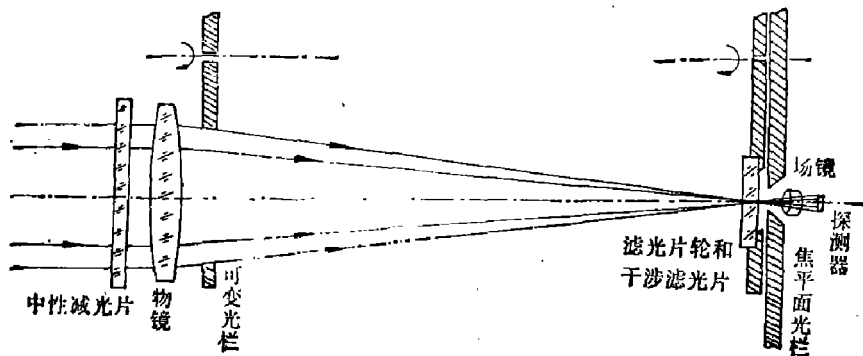


图2 仪器光学原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the optic layout of the instrument

30 mm。其物镜口径较大,这是考虑到晚上用月亮测量的需要。白天使用时要缩小有效光栏,并在物镜前加0.001的铂中性减光片。探测器是直径约为1 mm的光敏两极管,负载回路中串了 $5\text{M}\Omega$ 的电阻,用高灵敏度的数字电压表测量负载电阻上的电压就是所接收的光辐射强度。

为了获得均匀的视场特性,采用了场光学系统。为减少散射光影响,视场角取得较小,但仪器无跟踪系统,视场角也不能太小;从测量一次所需时间考虑,选 1.5° 左右较合适。实际焦平面光栏直径为3.9 mm,计算其相应视场角直径为 1.66° ,实测结果和预期符合很好。

仪器的指向由一个小透镜和刻有十字标记的屏来实现;天顶距则由带重锤的小针来指示。

三、数据处理和定标

考虑到吸收线的加宽机制主要是辐射阻尼和压力致宽,吸收系数可以表示为

$$i(\nu) = \frac{i_0}{\pi} \cdot \frac{a}{(\nu - \nu_0)^2 + a^2};$$

式中, ν 为辐射频率; ν_0 为吸收线中心频率; i_0 为最大吸收强度; a 是与谱线半宽有关的常数。由上式可以得到剩余强度 Q 与水蒸气柱密度的关系: 在吸收系数较小, 或水蒸气含量较少时为线性关系, 可表示为 $Q=1-K_1W$; 在吸收系数较大, 或水蒸气含量高时则为平方根关系, 可表示为 $Q=1-K_2\sqrt{W}$; 式中 W 为水蒸气柱密度, K_1 、 K_2 均为常数。 Q 的值可由下述方法算出来: 先由二条不吸收的谱线强度推算出吸收线线心处在大气外的不吸收强度, 再从实际测得的线心处强度计算出剩余强度。实际上以吸收线线心处($\lambda=941\text{ nm}$)测得的强度和在不吸收处($\lambda=872.8\text{ nm}$)测量的强度之比 R 直接代替 Q , 其结果也很满意。 Q 和 R 的表达式分别如下:

$$Q_j = \frac{H_j}{H_3} \exp \left[-\frac{\ln(\lambda_j/\lambda_3)}{\ln(\lambda_4/\lambda_3)} \right] \ln \left(\frac{H_4}{H_3} \right);$$

$$R_j = \frac{H_j}{H_3}, \quad j=1, 2;$$

式中, $H_i = C_i U_i$, $i=1, 2, 3, 4$ 。

U_i 为不同滤光片位置时仪器的测量值; C_i 为修正系数, 其值与滤光片的特性, 如中心波长, 有效带宽和透过率有关, 可以由实验测定, 也可以根据基本数据来计算。在我们的具体条件下, 选取 $C_3=1$ (即 $\lambda=872.8\text{ nm}$ 的滤光片), 则相应的 C_1 ($\lambda=941\text{ nm}$)、 C_2 ($\lambda=916.5\text{ nm}$) 和 C_4 ($\lambda=755.5\text{ nm}$) 的值分别为 1.459、1.282 和 1.980。吸收线虽然选了两条, 由于 $\lambda=916\text{ nm}$ 处吸收较弱, 测量误差相对较大, 正式数据只选用 $\lambda=941\text{ nm}$ 处所测得的结果。

定标就是要确定公式中 K_1 和 K_2 的值。我们利用了北京观象台的高空气球探测资料, 它包括 15000 米以下不同等压面的高度、温度和相对湿度等数据。由此可以计算出垂直于地面的大气中水蒸气柱密度为^[3]

$$W[\text{kg/m}^2] = \sum_i 6.61 \times 10^{-3} (h_{i+1} - h_i) \times \left[\frac{r_i}{273.15 + t_i} \exp \left(\frac{17.5t_i}{241.5 + t_i} \right) + \frac{r_{i+1}}{273.15 + t_{i+1}} \exp \left(\frac{17.5t_{i+1}}{241.5 + t_{i+1}} \right) \right];$$

式中 h_{i+1} 和 h_i 为相邻两等压面的高度, 单位为 m ; r_i 和 t_i 分别为某等压面处的相对湿度和温度值; 整个方括号中的值正比于相邻两等压面间水蒸气平均密度。

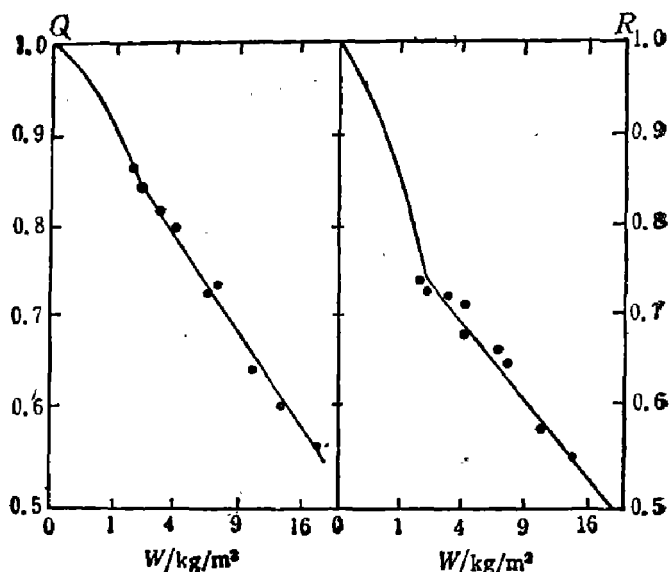


图3 Q 和 R 的定标曲线($\lambda=941\text{ nm}$)

Fig. 3 The calibration curves of Q and R ($\lambda=941\text{ nm}$)

定标曲线如图 3 所示,由定标点所求得的水蒸气柱密度的表达式为($\lambda=941\text{ nm}$),

$$\begin{cases} W = (18.595 - 7.958Q)^2, & Q \leq 0.829; \\ W = 9.467(1-Q), & Q > 0.829. \end{cases}$$

$$\begin{cases} W = (8.539 - 8.683R)^2, & R \leq 0.753; \\ W = 8.381(1-R), & R > 0.753. \end{cases}$$

四、结果和讨论

仪器曾在北京、河北兴隆和乌鲁木齐等地作过测量,使用方便,性能稳定。

图 4 是在北京天文台兴隆观测站比较干燥的季节所测得的一天中水蒸气变化情况。白天是用太阳作辐射源,晚上以满月作辐射源,图中还标出了北京高空气球探测结果并考虑了高度修正之后所得的水蒸气含量,两者基本上是一致的。从定标情况和大量测量结果分析,仪器的测量精度在 $0.5 \sim 1\text{ kg/m}^2$ 之间。

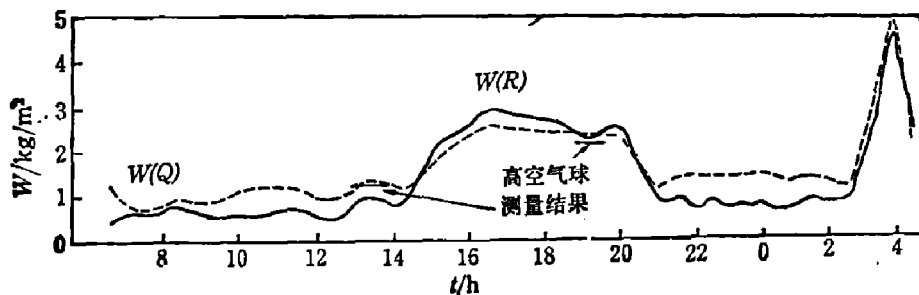


图 4 北京天文台兴隆观测站干燥季节水蒸气含量的典型测量结果

Fig. 4 Typical results of the water vapor content in the dry season at Xinglong station of Beijing Observatory

此仪器是以北京观象台的高空气球探测结果为依据来定标的。所以测量结果显然具有和探空值相同的系统误差。为了进一步提高定标精度,有必要增加另一种定标手段。

致谢——北京观象台为仪器的定标提供了大量的高空气球探测数据,作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Biischer E. and Lemke D., *Infrared Phys*, **20** (1980), 321~325.
- [2] Landau R., *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **94** (1982), 600~604.
- [3] 杨大升等, *动力气象学*(第二版), 气象出版社, (1983), 16.

A NEAR INFRARED HYGROMETER

ZHOU XU, QIAN ZHONGYU

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

ABSTRACT

A near infrared hygrometer is described in this paper, which measures the column density of water vapour in the earth atmosphere. It can be used with either the Sun or the Moon as a radiation source. Then the integral column density can be obtained by means of measuring the residual intensity in a water vapour absorption band of solar spectrum on earth surface. The instrument is easy to use and handle, and useful in infrared astronomical site-selection. And it can also be used for monitoring of variation of the atmosphere water vapour.