

# 用长程吸收法测量大气中的水汽含量\*

孔琴心 王庚辰

(中国科学院大气物理所)

长程吸收法是目前确定大气微量气体成份平均浓度的一种高灵敏度方法, 本文首先报导在实验室内, 利用 CO 激光作光源, 在自行设计的吸收池内进行原理性模拟测量, 然后介绍室外测量装置和相应的测量结果。

## 1. 测量原理和方法

长程吸收法测量水汽含量的基本方程仍是建立在朗伯定律的基础之上, 即

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-K_{\lambda} \cdot L} \quad (1)$$

$I_{0\lambda}$  和  $I_{\lambda}$  分别为入射光强和透射光强,  $K_{\lambda}$  为消光系数,  $L$  是光程长度。

通常,

$$K_{\lambda} = \sum_i K_{a_i} + \sum_j K_{s_j} \quad (2)$$

$K_a$  是吸收引起的消光,  $K_s$  是散射引起的消光。  $i, j$  分别表示有贡献的气体 and 粒子种类。

合併(1)、(2)得

$$\begin{aligned} T_{\lambda} &= \frac{I_{\lambda}}{I_{0\lambda}} \\ &= e^{-(\sum_i K_{a_i} + \sum_j K_{s_j})L} \end{aligned} \quad (3)$$

我们若能找到一对波长极靠近的谱线, 而其中一条谱线波长位于水汽强吸收区, 另一条谱线波长位于水汽弱吸收区, 并且在这一对谱线波长范围内仅有水汽一种吸收物质, 因为在红外, 气溶胶粒子的 Mie 散射可以看成是波长的缓慢变化函数, 瑞利散射可忽略不计, 于是从(3)式可以导出:

$$\begin{aligned} \ln[T(\lambda_1)/T(\lambda_2)] &= L \cdot \Delta K_{H_2O} \\ &= W \cdot \Delta \alpha_{H_2O} \end{aligned} \quad (4)$$

$W$  表示路径上水汽含量[克/厘米<sup>2</sup>, 或降水厘米],  $\Delta \alpha_{H_2O}$  表示水汽在  $\lambda_2$  与  $\lambda_1$  处吸收系数之差[克/厘米<sup>2</sup>]<sup>-1</sup>。

$$W = \ln \frac{T(\lambda_1)}{T(\lambda_2)} / \Delta \alpha_{H_2O} \quad (5)$$

可见, 根据已知的  $\Delta \alpha_{H_2O}$  以及测量相应的  $T(\lambda_1)/T(\lambda_2)$  值, 按式(5)不难得到需要的

\* 本文于 1982 年 9 月 10 日收到, 1983 年 2 月 2 日收到修改稿。



比较方便的获得选定的波长, 强线功率约为一瓦左右。装置中 6328 Å He-Ne 激光用以进行导光, 测量前先将 He-Ne 激光与 CO 激光调整同轴。为了减小激光光束的发散角, 采用球面镜  $M_2$  和  $M_3$  组成发射望远镜系统(亦是接收望远镜系统), 经扩束后, 激光束发散度可改善 10 倍左右, 发射光束经  $KRS_5$  晶体片  $T_1$  后分成两束, 一束由发射望远镜发出, 另一束到达探测器  $D_1$  作为监测之用。合作目标是一个直角反射器  $R$ , 这种装置能将它们所截取的辐射功率中绝大部分原向反射回去, 显然, 入射角离轴越小, 有效孔径越大, 反回能量也越大。实验中使用的角反射器的有效孔径约为  $\phi 100$  mm。经过角反射器反回的光束按原光路回到望远镜系统, 然后经 NaCl 晶体分束片  $T_2$  反射到探测器  $D_2$ , 再经放大, 和相应的监测信号同时送入到 x-y 记录器进行记录。

## 2) 测量结果

室外测量分别在 220 米(往返)和 420.7 米(往返)两种路径上进行, 光束距下垫面(水泥地)约 3 米高, 在短路径上选用吸收较强的 1847.131 和 1876.630  $\text{cm}^{-1}$  激光线作为信号通道, 长路径上则选用吸收较弱的 1834.593, 1838.708 和 1872.344  $\text{cm}^{-1}$  激光线作为信号通道, 在两种情况下, 参考线均选用 1851.372, 1855.632 和 1880.901  $\text{cm}^{-1}$  三条线, 这样共得到 15 对波长, 信号波长和参考波长光束均来自同一个 CO 激光源, 依靠调整光栅位置顺序进行测量, 考虑对光方便, 测量在晚间进行, 温度  $t$  由普通水银温度计测量, 路径上的相对湿度  $H$  由阿斯曼通风湿度计获得, 测量结果分别在表 2 和 3 中给出, 资料处理中相应激光线的水汽吸收系数由[1]中资料换算获得。

表 2 室外水汽含量测量结果及误差  
( $H=31\%$ ,  $t=18^\circ\text{C}$ ,  $L=220$ 米, 折合水汽浓度  $W_{\text{实}}=0.105$ 克/厘米<sup>2</sup>)

参 考 波 长(厘米 <sup>-1</sup> )	1847.131		1876.630	
	$W_{\text{测}}$ (克/厘米 <sup>2</sup> )	$\Delta W/W_{\text{实}}(\%)$	$W_{\text{测}}$ (克/厘米 <sup>2</sup> )	$\Delta W/W_{\text{实}}(\%)$
1851.372	0.095	9.5	0.096	8.6
1855.632	0.098	6.7	0.100	4.8
1880.901	0.100	4.8	0.103	1.9

从表 2 和 3 给出的数据可以看出, 水汽浓度测量的相对误差一般在 10% 以内, 个别情况达到 20% 左右, 室内模拟比室外测量误差略小, 室外测量中, 相对误差 20% 的情况都出现在长路径, 据我们分析, 这可能是由于望远镜系统固定得不牢固和大气湍流引起光斑漂移引起的。我们用肉眼监视 6328 Å 激光漂移, 若肉眼能看出明显漂移亦重新对光测量。

## 4. 讨 论

### 1) 测量水汽浓度的误差

在长程双波长水汽浓度测量中, 主要误差来源于两个方面: a) 方程(4)推导过程中引入的误差; b) 测量透过率和吸收系数带入的误差。在方程(4)推导中, 我们引入了两个假

表 3 室外水汽含量测量结果及误差

(H=29.5—36%, t=21.4°—20°C, L=420.7米, 折合水汽浓度=W实[克/厘米<sup>2</sup>], W测=长程法测量结果)

参考波长 (厘米 <sup>-1</sup> )	信号波长 (厘米 <sup>-1</sup> )	W实=0.233		W实=0.243		W实=0.260		W实=0.262	
		W测 (克/厘米 <sup>2</sup> )	ΔW/W实 (%)	W测 (克/厘米 <sup>2</sup> )	ΔW/W实 (%)	W测 (克/厘米 <sup>2</sup> )	ΔW/W实 (%)	W测 (克/厘米 <sup>2</sup> )	ΔW/W实 (%)
1851.372	1834.593	0.226	3.0	0.197	18.9	0.237	8.8	0.218	16.7
	1838.708	0.242	3.9	0.217	10.7	0.240	7.7	0.251	4.1
	1872.344	0.230	1.3	0.218	10.3	0.228	12.3	0.242	7.6
1855.632	1834.593	0.209	10.3	0.215	11.5	0.251	3.5	0.237	9.5
	1838.708	0.221	5.2	0.239	1.6	0.259	0.4	0.275	5.0
	1872.344	0.183	21.5	0.267	9.9	0.269	3.5	0.267	2.0
1880.901	1834.593	0.239	2.6	0.231	4.9	0.246	5.4	0.262	0
	1838.708	0.257	10.3	0.257	5.8	0.251	3.5	0.285	8.8
	1872.344	0.261	12.0	0.300	23.5	0.253	2.7	0.290	10.7

设,即假定在选择的波长中仅有水汽一种吸收物质;气溶胶散射是波长的平滑函数,与分子散射一起在方程中被消去。根据文献[2],我们对本实验条件范围内消去的这两项进行了粗略估计,忽略大气中 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub> 气体在 6.3 μ 波段的衰减引起的透过率误差仅为 0.4%;分子散射衰减在 6.3 μ 波段比水汽衰减小 5—6 个数量级,完全可以忽略不计;气溶胶衰减在 6.3 μ 波段也仅有水汽衰减的 2% 左右,由于采用双波长测量,气溶胶所引起的误差约为 0.2%。由此看来,推导方程引入假设造成的误差 < 1%。下面估计透过率和吸收系数带来的误差,对方程(4)进行微分,可以得到:

$$\left| \frac{\Delta W}{W} \right| = \left| \frac{\Delta T(\lambda_1)}{T(\lambda_1)[\ln\{T(\lambda_1)/T(\lambda_2)\}} \right| + \left| \frac{\Delta T(\lambda_2)}{T(\lambda_2)[\ln\{T(\lambda_1)/T(\lambda_2)\}} \right| + \left| \frac{\Delta \alpha(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_2) - \alpha(\lambda_1)} \right| + \left| \frac{\Delta \alpha(\lambda_2)}{\alpha(\lambda_2) - \alpha(\lambda_1)} \right| \quad (6)$$

由(6)式可以看出,双波长测量中,两个波长的吸收相差越大,引起的误差越小,就本实验采用的波长而论,透过率测量相对误差引起浓度相对误差 4%。因为测量中信号波长吸收系数比参考波长吸收系数大 3.2—12 倍,根据文献[1]推算的吸收系数的相对误差约为 5%,代入方程(6),等式右边第三项最大误差约为 5.5%,第四项误差 ≤ 2%。综合(a)、(b)两项,水汽浓度的相对误差约为 12.5%。

## 2) 用目前的实验装置估计可测水汽的范围

CO 选支激光器具有丰富的发射谱线,并且水汽对各谱线的吸收程度很不相同,对于 XZJ-1 型 CO 激光器各谱线来讲,水汽吸收系数的变化范围约为 2—500[克/厘米<sup>2</sup>]<sup>-1</sup>,因此用它开展广泛的水汽测量工作,小到可以研究近距离的湿度脉动,大到可以监测数公里干燥环境的背景。

## 3) 本测量中信号波长和参考波长来自同一个激光器,双波长测量依靠改变光栅位置

(下转124页)

(3) 碰撞角,由照片直接用量角器求得。

## 2. 实 验 结 果

在实验中观测到水滴碰撞后可以出现三种情况:合并、反跳和破碎。

图 2 是碰撞后合并的一例。大、小水滴的直径分别是 2 和 1 毫米,碰撞速度为 5 厘米/秒,碰撞角为  $6^\circ$ ,摄影速率为 757 幅/秒。从照片可以看到:

- (1) 两个水滴不是一碰就并;
- (2) 在合并开始时,一种环状结构把大、小两个水滴联结在一起;
- (3) 在未合并成一个水滴之前,大、小水滴分别地继续向下和向上运动;
- (4) 合并后的水滴处于振荡状态中。其能量系来源于碰撞水滴的相对动能。一般经过 50—70 毫秒后由于粘滞作用振荡才停止。

实验中观察到碰撞后反跳的现象。当碰撞速度比较小而碰撞角又比较大时,碰撞后反跳的概率大于并合。反跳的原因是:碰撞的相对动能太小,不足以排除两个水滴之间的空气薄层。

随着碰撞速度的增大,碰撞后水滴破碎的可能性也相应地增大。碰撞破碎作用对于暖云降水机制和雨滴谱理论都具有重要意义。

管壁的存在使碰撞水滴周围的流场结构发生变化,管径越小,这种影响越大。下一步的工作是设计一种悬浮管,其管径可扩大到 2 厘米,减小管壁的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Magono C. & Nakamura T, On the Behavior of Water Droplets during collision with a large water drop, *J. Met. Soc. Japan*, **37**, No. 4, 124—127, 1959.
- [2] Whelpdale, D. M. & List, R, The coalescence process in raindrop growth, *J. Geophys. Res*, **76**, No. 12, 2836—2854, 1971.
- [3] Levin, Z & Machnes, B, Experimental evaluation of the coalescence efficiencies of colliding waterdrops, *Pure and Appl. Geophys*, **115**, No. 4, 845—867, 1977.
- [4] Gunn, R, Collision characteristics of freely falling water drops, *Science*, **150**, No. 3697, 695—701, 1965.
- [5] Brazier-Smith, P. R. et al, The Interaction of falling water drops: Coalescence, *Proc. Roy. Soc London A* **326**, No 1566, 393—408, 1972.
- [6] McTaggart-Cowan, J. D. & R. List, An acceleration system for water drops. *J. Atmos. Sci*, **32**, No. 7, 1395—1400, 1975.

(上接121页)

顺序实现,这样,大气中的一些时间起伏因子会对测量结果有一定影响。为此,本测量给出的是多次测量的平均结果。如果使用两只 CO 激光器可部分消除这种影响并可提高工作效率。

## 参 考 文 献

- [1] 孔琴心, 张文, 王庚辰, 选支 CO 激光 86 条发射谱线大气透过率的研究, 大气科学, 第七卷, 第 1 期, 1983.
- [2] McClatchey, R. A, et al, Optical Properties of the atmosphere, AD-753075, 1972.