

# 917~ 945 nm 水汽吸收线强度 和空气加宽系数测量

陈红兵 高军毅 丁 强 张寅超 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘 要** 利用连续波窄带可调谐钛宝石激光器和长光程吸收池测量了917~ 945 nm 60 余条水汽吸收线的强度和空气加宽系数。线强度测量精度优于4%，加宽系数测量精度优于6%。线强度结果和 Chevillard 等的测量结果比较，比值为 $0.986 \pm 0.0685$ ，符合得较好。空气加宽系数和 Hitran-92数据库比较，比值为 $0.906 \pm 0.164$ ，存在较大的偏差。

**关键词** 水汽， 线强度， 空气加宽系数。

## 1 引 言

近红外大气水汽的吸收线参数测量，近年来越来越受到人们的重视。这一方面是激光雷达遥感水汽<sup>[1,2]</sup>的需要，另一方面可积累详细、准确大气水汽吸收资料，为其它大气光学工程服务。1989年，Grossmann 等<sup>[3,4]</sup>用环行腔染料激光器和长光程怀特池测量了720 nm 区域的水汽线参数。然而，对近红外另一个重要的区域，水汽  $\rho\sigma\tau$ 带(940 nm)带，到目前为此，还未见用窄线宽激光光谱仪测量水汽的线参数的报道。

940 nm 区域水汽的线参数，较早的报道是 Swensson 等的太阳光谱线表<sup>[5]</sup>，较为完备的则为高分辨大气分子吸收数据库(即 Hitran 数据库)<sup>[6]</sup>。Giver 等<sup>[7]</sup>用分辨率为 $0.046 \text{ cm}^{-1}$ 的光栅光谱仪、Chevillard 和 Mandin 等<sup>[8,9]</sup>用分辨率为 $0.02 \text{ cm}^{-1}$ 的傅里叶光谱仪、Chu 等<sup>[10]</sup>利用可调谐染料激光器通过拉曼池产生的第一斯托克斯辐射( $0.015 \text{ cm}^{-1}$ 的线宽)，曾对940 nm 带的吸收线参数进行了测量。应该指出的是，他们的测量用的光源带宽较宽，数据处理必须修正光源线宽对测量结果的影响，相互之间的结果偏差较大。另外，对加宽系数的测量仅限于强吸收线，覆盖的波长范围也有限。所以，利用高分辨率的激光光谱仪进一步测量非常必要。

本文利用 CR899钛宝石激光器，在公里级长光程吸收池充洁净空气，测量了917~ 942 nm 60 余条水汽线强度和空气加宽系数。

## 2 实验装置和测量步骤

实验装置如图1所示，其中包括899-29 钛宝石激光器、可调温长光程吸收池、自行研制的

波长计<sup>[12]</sup>、数据采集和扫描控制的接口电路。899 激光器运转在910~ 950 nm 波段, 激光线半高全宽优于500 KHz, 单频输出功率大于500 mW。激光波长计测量波段为400~ 1100 nm, 重复测量精度优于 $\pm 50$  MHz。自动扫描控制能让激光器以500 KHz 的线宽作连续扫描, 在扫描过程中同时记录光谱数据, 并带有线性的波长标度(非线性误差在 $\pm 50$  MHz 以下)。多次反射吸收池其光程在46~ 1097 m 可调, 光程不确定性为0.15%。池体温度稳定性好于 $\pm 0.5^\circ$  C, 池体内部可维持 $1.3 \times 10^{-5}$  Pa 以上的高真空。He-Ne 激光和899激光在波长计前同轴, He-Ne 激光作引导光。在波长计内有探测器作功率归一, 用以消除激光功率起伏对测量结果的影响。在吸收池出口处一探测器探测吸收后光信号。功率归一和测量用的探测器都选用中国科学院上海技术物理研究所生产的 SPS-02型硅探测器。两个探测器之间激光直接暴露在空气中的光程小于0.5 m。对于小于20 mW 的光信号, 探测器和前置放大器其线性度好于0.5%。光信号接收后, 和功率信号相除, 再由8位 A/D 转换为数字信号, 送到计算机处理。比值放大器采用美国模拟器件公司生产的 AD535芯片, 其精度优于0.5%。

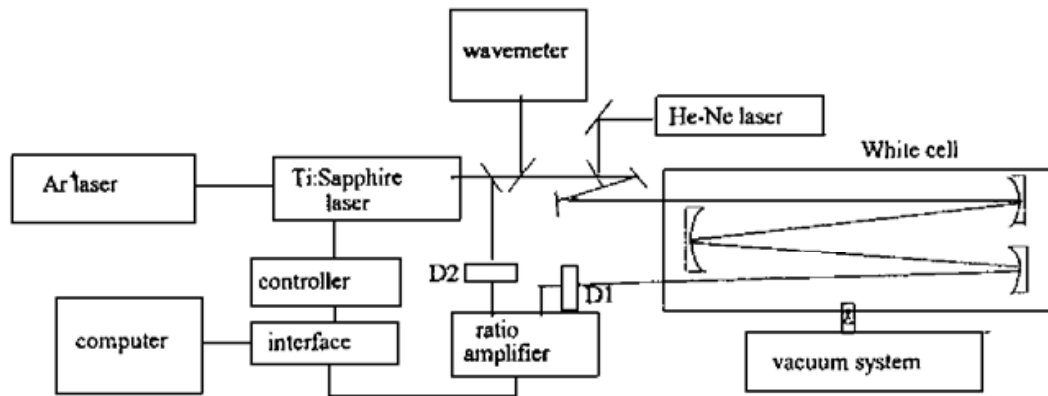


Fig. 1 Schematic of H<sub>2</sub>O absorption spectroscopy experiment

实验时, 先将怀特池内部抽成 $1.3 \times 10^{-4}$  Pa 的真空, 排除池子内部的其它杂质气体, 然后缓缓充入实验室空气。充气过程中, 用滤纸滤掉空气中的气溶胶粒子, 保证池子内空气洁净。充到指定气压后, 稳定两小时, 再开始实验。怀特池内的气压由水银规和油规测量。水银规测量范围为0~  $10^5$  Pa, 测量精度优于133 Pa, 油规测量范围为0~  $4 \times 10^3$  Pa, 测量精度为10 Pa。空气的相对湿度由干湿球温度计测量温度, 对照湿度表查得, 其误差为1%。实验时怀特池内充气 $2 \times 10^4$  Pa, 光程调到611 m, 空气的相对湿度为50%, 温度稳定在300 K。这样, 能直接测量强度在 $3 \times 10^{-24} \sim 3 \times 10^{-23} \text{ cm}^{-1} / (\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2})$  之间的吸收线线强度和加宽系数。为了对比测量结果, 分别在 $4.2 \times 10^3$  Pa 和 $8.8 \times 10^3$  Pa 重复测量了一些线的强度和加宽系数。实验数据由 PC (80286) 机记录, 同时记录波长计标准具干涉花纹和吸收曲线。

### 3 数据处理

从高分辨吸收光谱中得到线参数, 一般利用已有的理论线型模式如 Voigt 线型、硬碰撞线型或软碰撞线型, 对光谱曲线进行非线性最小二乘拟合。Ritter<sup>[14]</sup>和 Grossmann<sup>[3]</sup>在氧和水汽吸收谱线的实验数据处理中, 对几种线型进行详细的比较和研究。结果表明, 在目前的测量误差范围内, 对线强度和加宽系数和处理, Voigt 线型一般能满足要求。

对于孤立谱线的测量, Voigt 线型函数为:

$$\mathcal{Q}_{\nu, \nu_j, \gamma_{Lj}, \gamma_D} = (1/\gamma_D) \sqrt{(\ln 2/\pi) \text{Re} [W(z_i)]}, \quad (1)$$

式中  $z_i = x_i + iy_i$ ,  $x_i = \sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_j) / \mathcal{Y}_D$ ,  $y_i = \sqrt{\ln 2} \mathcal{Y}_{Lj} / \mathcal{Y}_D$ ,  $w(z_i) = \exp(-z_i^2) \operatorname{erf}(-iz_i)$ ,  $\Phi$  为线型函数,  $\nu$  为第  $i$  个数据点的光频率,  $\nu_j$ ,  $\mathcal{Y}_{Lj}$  为第  $j$  条谱线的线中心频率, 碰撞加宽半宽度,  $\operatorname{erf}(-iz_i)$  是复误差函数。  $\mathcal{Y}_D = \sqrt{\ln 2} \nu_j (2kT / M_{H_2O})^{1/2} / c$  为多普勒加宽半宽度,  $M_{H_2O}$  为水分子质量,  $c$  为光速。

考虑吸收光谱的连续背景的修正和线型模型, 透过率公式 Beer-Lambert 定律可表示为:

$$I(\nu) / I_0 = \exp[-Lk(\nu) - C - C_1(\nu - \nu_0)], \quad k(\nu) = \sum_j S_j P \Phi(\nu, \nu_j, \mathcal{Y}_{Lj}, \mathcal{Y}_D) \quad (2)$$

式中,  $\nu_0$  为进行非线性拟合的第一个数据点的频率,  $-C - C_1(\nu - \nu_0)$  为连续背景的修正,  $S_j$  为  $j$  吸收线的强度,  $P$  为水汽分压。利用(2)式以及 Voigt 线型模式, 用非线性最小二乘法拟合, 可以反演得到所测吸收谱中的线参数。拟合反演中, 参数的初值作如下选取。

$\mathcal{Y}_{Lj}$ : 对孤立线, 将直接测量得到 Voigt 半宽度  $\mathcal{Y}_V$ , 利用 Olivero 和 Longbothum<sup>[15]</sup> 得到的表达式计算  $\mathcal{Y}_L = \mathcal{Y}_V [7.7254 - 6.7254 \sqrt{1 + 0.3195(\mathcal{Y}_D / \mathcal{Y}_V)^2}]$  作为洛仑兹半宽度的拟合初值;  $S_j$ : 线中心  $\pm 0.15 \text{ cm}^{-1}$  内的透过率积分值;  $\nu_j$ : 吸收线峰频率; 其它参数初值设为零。

由实验记录记录的温度和相对湿度, 利用饱和水汽压的计算公式<sup>[13]</sup>和理想气体状态方程可求得水汽分压  $P$  和水汽的分子数密度, 从而最终导出吸收线线强度、加宽系数和吸收截面积。为方便和已有的测量和计算结果进行比较, 可以将它们归一为标准状态下的值<sup>[10]</sup>。注意到本文中吸收线温度指数取0.68, 和92-Hitran 数据库一致。

为检验拟合程序的正确性, 先假设某一谱线的线强度、线宽和中心频率, 依 Voigt 线型计算出吸收光谱数据, 然后利用随机函数对其统计处理(用 Fortran 语言的 RAN 函数, 幅度为5%)。处理后的数据再用上述方法进行拟合, 得出的线参数值和给定值差别在0.5%以下, 证明数据拟合程序是可靠的。

## 4 误差分析

表1列出了线  $201_{(633) \sim (514)} (10837.1251 \text{ cm}^{-1})$  连续多次测量结果。其中线强度乘  $10^{-24}$  因子。吸收线参数测量, 误差源包括随机误差及系统误差两部分。随机误差用重复测量结果的方差来估计。系统误差来源主要包括激光器扫描的非线性, 数据采集精度及探测器对光信号响应的非线性, 水分子数密度的测量精度, 参数拟合所采用的模型带来的误差, 基线位置的影响等等。899 激光器线宽为 500 KHz, 数据采集过程中, 设置 10 GHz 扫描采集 800 个数据点, 每个频率点间隔为 12.5 MHz, 对线宽及线强度测量影响在 0.3% 以下。899 激光器 30GHz 扫描, 经线性化修正后, 误差小于 50 MHz, 扫描的非线性为 0.17%。分子数

Table 1. The measured results of H<sub>2</sub>O line 201<sub>(633) ~ (514)</sub>

| $\mathcal{Y}_L (\text{cm}^{-1} / 10^5 \text{ Pa})$ | $S (\text{cm}^{-1} / \text{molecule} / \text{cm}^2)$ |
|--|--|
| 0.0821   | 11.579   |
| 0.0818   | 11.340   |
| 0.0816   | 11.483   |
| 0.0807   | 11.342   |
| 0.0823   | 11.404   |
| 0.0832   | 11.449   |
| 0.0849   | 11.465   |
| 0.0825 (mean)                                      | 11.51  |
| 2.82% (r. m. s)                                    | 1.79%  |

密度(测量精度1.1%)、吸收池光程(误差约0.15%)、以及 A/D 和比值计精度(0.5%)对吸收截面的影响可直接由 Berr-Lambert 定律导出, 如果考虑30%的吸收, 这几项对吸收截面的测量精度影响小于2%, 对线宽测量精度影响小于4%。在拟合程序中, 基线作为拟合参数, 在

低压测量的几条线,和 $3 \times 10^4$  Pa 结果比较,线强度差在2%之内,这证明数据拟合时基线选择是正确的。综合各种误差源,半宽度测量精度优于6%,线强度测量精度优于4%。应该指出,由于在此区域大气中其它成分几乎没有吸收,所以不考虑其它气体对吸收线参数的影响。

## 5 实验结果

在 $2 \times 10^4$  Pa 气压下测量了940 nm 带60余条水汽线线强度和半宽度。其线强分布在 $3 \times 10^{-24}$ 至 $3 \times 10^{-23}$   $\text{cm}^{-1}/(\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2})$ 之间。其结果列出表2中。所给出的线强度测量方差在4%以内,半宽度测量方差在6%以内,方差大于此值的未列出。线强度测量平均方差为2%,线宽度测量平均方差为3%。

所测量水汽线包括(300)带16条、(201)带21条、(102)带12条和(003)带10条,其 $J''$ 值分布值分布在0~10之间。图2所示为(201)、(300)和(102)带半宽度和下能态 $J''$ 值之间的关系图。从图中可以看出,随 $J''$ 增加,半宽度减小,另外同一带同一 $J''$ 值,随着 $Ka''$ 、 $Kc''$ 的变化,半宽度也在较宽的范围内分布。虽然由于测量的线数较少,图2中的结果不能完全

Table 2. Measured strengths and air-broadened coefficients for 60 water vapor absorption lines between 917~ 942 nm at 300K

| wavenumber<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | VIB | $J'Ka'Kc'$ | $J''Ka''Kc''$ | $E''$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | strength<br>( $10^{-24}\text{cm}^{-1}/\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) | Gama<br>( $\text{cm}^{-1}/10^5\text{Pa}$ ) |
|------------------------------------|-----|------------|---------------|-------------------------------|--|--|
| 10611.9686                         | 201 | 404        | 321           | 212.156                       | 6.099  | 0.884                                      |
| 10619.5268                         | 300 | 211        | 202           | 70.090                        | 9.505  | 0.924                                      |
| 10621.0709                         | 201 | 615        | 532           | 508.812                       | 4.820  | 0.1125                                     |
| 10622.0062                         | 201 | 826        | 909           | 920.163                       | 2.946  | 0.1168                                     |
| 10622.0062                         | 300 | 633        | 624           | 802.733                       | 2.946  | 0.1168                                     |
| 10622.5805                         | 300 | 422        | 413           | 275.497                       | 8.279  | 0.0810                                     |
| 10622.5805                         | 300 | 542        | 615           | 542.905                       | 8.279  | 0.0810                                     |
| 10627.5664                         | 300 | 312        | 305           | 136.761                       | 23.877   | 0.0834                                     |
| 10633.5549                         | 300 | 111        | 000           | 0.000                         | 31.936   | 0.0811                                     |
| 10635.2805                         | 201 | 312        | 313           | 142.278                       | 23.316   | 0.0854                                     |
| 10644.7121                         | 300 | 221        | 212           | 79.495                        | 21.762   | 0.0823                                     |
| 10655.6114                         | 300 | 432        | 423           | 300.362                       | 20.424   | 0.0722                                     |
| 10658.5961                         | 300 | 634        | 625           | 522.911                       | 11.301   | 0.0736                                     |
| 10662.9593                         | 300 | 735        | 726           | 709.608                       | 1.980  |  |
| 10633.4655                         | 300 | 313        | 202           | 70.090                        | 20.319   | 0.0898                                     |
| 10664.5703                         | 300 | 440        | 431           | 383.842                       | 2.929  | 0.0822                                     |
| 10669.4388                         | 201 | 514        | 515           | 326.625                       | 11.175   | 0.0827                                     |
| 10669.5222                         | 300 | 836        | 827           | 885.600                       | 3.800  | 0.0616                                     |
| 10672.4839                         | 201 | 423        | 404           | 222.502                       | 6.610  | 0.0764                                     |
| 10679.4357                         | 201 | 524        | 505           | 325.347                       | 15.845   | 0.0737                                     |
| 10680.1729                         | 102 | 707        | 818           | 744.163                       | 3.679  | 0.0520                                     |
| 10686.3151                         | 300 | 515        | 404           | 222.052                       | 9.259  | 0.0644                                     |
| 10691.6787                         | 201 | 652        | 551           | 742.073                       | 5.859  | 0.0784                                     |
| 10691.7665                         | 201 | 651        | 550           | 742.076                       | 15.82  | 0.0542                                     |

| wavenumber<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | VIB | $J'Ka'Kc'$ | $J''Ka''Kc''$ | $E''$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | strength<br>( $10^{-24}\text{cm}^{-1}/\text{molec}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) | Gama<br>( $\text{cm}^{-1}/10^5\text{Pa}$ ) |
|------------------------------------|-----|------------|---------------|-------------------------------|--|--|
| 10694.1164                         | 201 | 761        | 660           | 1045.058                      | 4.097  | 0.0585                                     |
| 10694.1164                         | 201 | 762        | 661           | 1045.057                      | 4.097  | 0.0585                                     |
| 10708.7451                         | 201 | 753        | 652           | 888.598                       | 13.218   | 0.0513                                     |
| 10709.0754                         | 201 | 752        | 651           | 888.632                       | 4.470  | 0.0700                                     |
| 10714.6369                         | 201 | 220        | 101           | 23.794                        | 10.491   | 0.0889                                     |
| 10727.5661                         | 201 | 743        | 642           | 757.780                       | 9.594  | 0.0609                                     |
| 10736.2075                         | 121 | 826        | 707           | 586.243                       | 18.214   | 0.0634                                     |
| 10751.3262                         | 102 | 423        | 514           | 339.457                       | 3.867  | 0.0722                                     |
| 10751.7844                         | 201 | 946        | 845           | 1122.709                      | 8.025  | 0.0576                                     |
| 10752.0932                         | 201 | 918        | 817           | 882.891                       | 10.463   | 0.0591                                     |
| 10755.9066                         | 201 | 1029       | 928           | 1080.385                      | 4.235  | 0.0429                                     |
| 10756.1765                         | 102 | 414        | 505           | 325.347                       | 11.762   | 0.0733                                     |
| 10757.6886                         | 201 | 1019       | 918           | 1079.08                       | 15.800   | 0.0423                                     |
| 10762.5708                         | 201 | 11210      | 1029          | 1293.634                      | 5.514  | 0.0310                                     |
| 10764.9970                         | 300 | 634        | 523           | 416.510                       | 5.728  | 0.0750                                     |
| 10765.4334                         | 022 | 836        | 725           | 782.409                       | 17.377   | 0.0730                                     |
| 10772.7124                         | 300 | 836        | 725           | 782.409                       | 10.068   | 0.0590                                     |
| 10773.2333                         | 102 | 110        | 221           | 134.902                       | 7.705  | 0.1012                                     |
| 10801.8252                         | 003 | 542        | 743           | 931.237                       | 2.004  | 0.0829                                     |
| 10806.5624                         | 102 | 212        | 303           | 136.761                       | 10.925   | 0.0859                                     |
| 10808.4227                         | 102 | 212        | 221           | 134.902                       | 2.817  | 0.0993                                     |
| 10812.1798                         | 102 | 101        | 212           | 79.495                        | 12.597   | 0.0925                                     |
| 10813.8497                         | 201 | 532        | 413           | 275.479                       | 5.481  | 0.1039                                     |
| 10816.1385                         | 003 | 633        | 734           | 842.356                       | 4.040  | 0.0756                                     |
| 10821.7826                         | 102 | 312        | 321           | 212.156                       | 6.605  | 0.0867                                     |
| 10828.0450                         | 003 | 627        | 725           | 782.409                       | 5.463  | 0.0703                                     |
| 10830.6775                         | 003 | 542        | 643           | 756.724                       | 2.854  | 0.0536                                     |
| 10837.1251                         | 201 | 633        | 514           | 399.457                       | 13.049   | 0.0992                                     |
| 10849.3044                         | 102 | 101        | 110           | 42.371                        | 9.934  | 0.0942                                     |
| 10851.4693                         | 003 | 533        | 634           | 648.978                       | 6.614  | 0.0656                                     |
| 10856.4389                         | 003 | 523        | 624           | 602.773                       | 3.622  | 0.0755                                     |
| 10857.2749                         | 003 | 440        | 541           | 610.34                        | 3.062  | 0.0577                                     |
| 10858.5215                         | 201 | 533        | 414           | 224.838                       | 3.276  | 0.0896                                     |
| 10871.3140                         | 003 | 605        | 707           | 586.243                       | 12.788   | 0.0566                                     |
| 10871.8885                         | 003 | 514        | 615           | 542.905                       | 4.702  | 0.0764                                     |
| 10884.3400                         | 102 | 110        | 101           | 23.794                        | 12.952   | 0.0931                                     |
| 10885.0489                         | 003 | 422        | 523           | 446.51                        | 18.468   | 0.0779                                     |
| 10893.8398                         | 102 | 523        | 514           | 399.457                       | 6.567  | 0.0860                                     |
| 10893.9810                         | 102 | 321        | 312           | 173.365                       | 13.557   | 0.0992                                     |

Note, for each line, we give:

- \* the upper state vibrational assignment; the lower state is always is (000)
- \* the rotational assignment of the upper and lower levels of the transition
- \* columns 1~ 5 were taken from Chevillard *et al.* (ref. 8)

反映加宽系数和  $J''$  的变化规律, 但已经表明了变化趋势。当  $J''$  从3变化到5, 三个带的平均半宽度从0.09944变化到0.0804, 变化14.5%。同样的结果被 Chu 等<sup>[10]</sup> (15%) 和 Giver 等<sup>[7]</sup> (13%) 观察到。

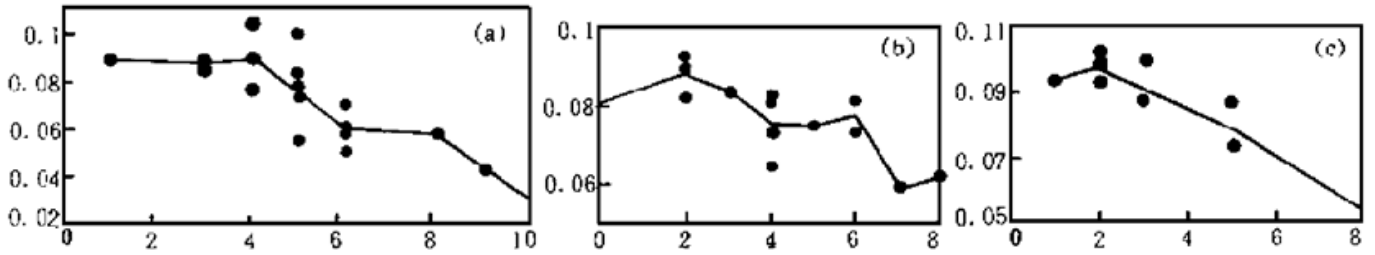


Fig. 2 Air-broadening coefficient as a function of the rotational quantum number  $J''$  for lines associated with the vibrational state (a)  $\nu_1 \nu_2 \nu_3 = 201$  and (b)  $\nu_1 \nu_2 \nu_3 = 300$  and (c)  $\nu_1 \nu_2 \nu_3 = 102$ . Average values for each rotational number  $J''$  are joined by straight lines for visibility

图3为水汽线强度测量结果和 Chevillard 等的测量比较。从图中可以看出, 两者在误差范围内一致。60条线强度的平均比值为  $0.986 \pm 0.0685$ 。线强度值符合得较好的原因之一是光源线宽对强度测量结果影响较小。图4为作者测量的水汽的空气加宽系数和 Mandin 等测量结果及 Hitran 数据库中数值比较。本实验测量结果和92-Hitran 数据库中的空气加宽系数比较, 平均值的比值为  $0.906 \pm 0.164$ 。92-Hitran 数据库<sup>[6]</sup>中引用的加宽系数值为 Cameche 等<sup>[11]</sup>的水汽氮加宽的纯转动线的理论计算结果( $\times 0.9$ ), 本文的实验结果证明, 它们在中高  $J''$  (6~10) 值时偏大。Mandin 等在此范围内24条线加宽系数(氮加宽 $\times 0.9$ )和 Hitran 数据库的比值为  $0.946 \pm 0.150$ , 这说明了 Mandin 等的测量结果反应了同样的趋势。

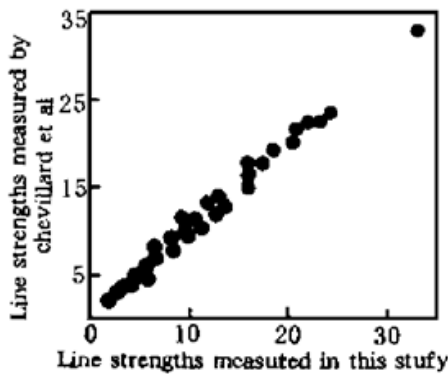


Fig. 3 Comparison of the current line strength measurements of 60 spectral lines with the results from Chevillard *et al.* ( $S \sim 10^{-24} \text{ cm}^{-1} / \text{molec} / \text{cm}^2$ )

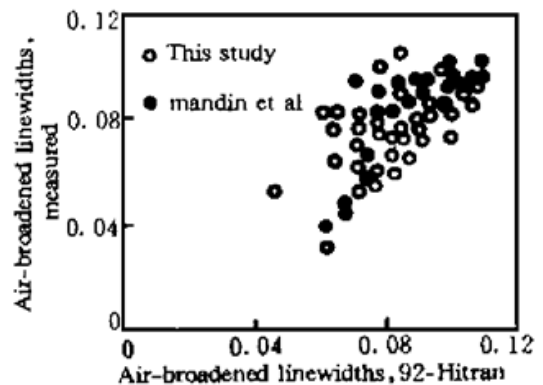


Fig. 4 Measured air-broadened linewidths in this study and by Mandin *et al.* are plotted as functions of the calculation data from 92-Hitran ( $\gamma \sim \text{cm}^{-1} / 10^5 \text{ Pa}$ )

**结 论** 用899激光器和长光程怀特池记录了大气水汽分子917~ 945 nm 区域的高分辨率吸收谱线, 导出了60余条线的线强度和空气加宽系数, 线强度测量精度好于4%, 半宽度测量精度好于6%, 为这个波段激光雷达遥感水汽和其它大气光学工程提供了可靠的高分辨光谱参数。线强度测量结果和 Chevillard 等的结果比较, 比值为  $0.986 \pm 0.0685$ , 符合得较好。空气加宽系数和92-Hitran 数据比较, 比值为  $0.906 \pm 0.164$ , 存在较大的偏差, 这说明一步积累高分辨光谱实验数据和发展更完善的理论模型计算分子的加宽系数是必要的。



## 参 考 文 献

- [1] E. V. Browell, T. J. Mellrath, Water vapor differential absorption lidar development and evaluation. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(20) ·3474~ 3483
- [2] T. D. Wilkerson, G. K. Schwemmer, Lidar techniques for humidity and temperature measurement. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(2) ·1022~ 1024
- [3] B. E. Grossmann, E. V. Browell, Water-vapor line broadening and shifting by air, nitrogen, oxygen, and argon in 720 nm wavelength region. *J. Mol. Spectrosc.*, 1989, **138**(2) ·562~ 595
- [4] B. E. Grossmann, E. V. Browell, Spectroscopy of water vapor in 720 nm wavelength region: line strengths, self-induced pressure broadenings and shift, and temperature dependence of linewidths and shifts. *J. Mol. Spectrosc.*, 1989, **136**(2) ·264~ 294
- [5] W. Swensson, W. S. Bebedict L. Delbouille *et al.*, *The Solar Spectrum from  $\lambda$  7498 ~  $\lambda$  12016*, Special Vol. 5 of Memoires de la Societe Royale de Science de Liege (Socoete Royale de Science de Liege, Liege, Belgium, 1970)
- [6] L. S. Rothman, R. R. Gamache R. H. Tipping *et al.*, The Hitran molecular database; editions of 1991~ 1992. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer.*, 1992, **48**(5) ·469~ 507
- [7] L. P. Giver, B. Gentry, G. Schwemmer *et al.*, Water absorption lines, 931~ 961 nm: selected intensities, N<sub>2</sub>-collision-broadening coefficients, self-broadening coefficients, and pressure shofts in air. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer.*, 1982, **27**(4) ·423~ 436
- [8] J. P. Chevillard, J. Y. Mandin, J. M. Flaud *et al.*, H<sub>2</sub><sup>16</sup>O: line positions and intensities between 9500 and 11500 cm<sup>-1</sup>. The interacting vibrational states (041), (220), (121), (022), (300), (201), (102), and (003). *Caned. J. Phys.*, 1989, **67**(11) ·1065~ 1084
- [9] J. Y. Mandin, J. P. Chevillard, C. Camy-Peyret *et al.*, N<sub>2</sub> broadening coefficients of H<sub>2</sub><sup>16</sup>O lines between 9500 and 11500 cm<sup>-1</sup>. *J. Mol. Spectrosc.*, 1989, **138**(1) ·272~ 281
- [10] Zhiping Chu, T. D. Wilkerson, U. N. Singh, Water-vapor absorption line measurements in the 940 nm band by using a Raman-shifted dye laser. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(6) ·992~ 998
- [11] R. R. Gamache, R. W. Davies, Theoretical calculation N<sub>2</sub>-broadened halfwidths of water vapor: the pure rotation and  $\nu_2$  bands. *J. Mol. Spectrosc.*, 1988, **128**(2) ·360~ 369
- [12] 陈红兵, 高军毅, 丁强等, 扫描激光波长计. 量子电子学, 1995, **12**(1) ·59~ 65
- [13] 王永生主编, 大气物理学, 第一版, 北京: 气象出版社, 1987 ·18
- [14] K. J. Ritter, T. D. Wilkerson, High-resolution spectroscopy of the oxygen A band. *J. Mol. Spectrosc.*, 1987, **121**(1) ·1~ 19
- [15] J. Olivero, R. L. Longbothum, Empirical fits to the voiget linewidth: a brief review. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer.*, 1977, **17**(2) ·233~ 236

## High-Resolution Absorption Spectroscopy of Water Vapor at 917~ 945nm: Measurements of Line Strengths and Air-Broadening Coefficients

Chen Hongbing    Gao Junyi    Ding Qiang  
Zhang Yinchao    Gong Zhiban

*nhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)*

(Received 11 August 1995; revised 13 November 1995)

**Abstract** Water vapor high-resolution spectroscopy were recorded with a cw narrow linewidth Ti:Sapphire laser and a long pass absorption cell in 917~ 945 nm wavelength range. Measurements were made of line strengths with 4% uncertainty and air-broadening coefficients with 6% uncertainty of 60 water absorption lines. Compared with Chevillard's line strengths data, the agreement is good with average ratios of  $0.0986 \pm 0.0685$ . However, the difference of air-broadening coefficients is obvious between Hitran-92 database and ours, with average ratios of  $0.906 \pm 0.164$ .

**Key words** water vapor, line strengths, air-broadening coefficients.