

1. 1 μm 波段水分子的 CO₂ 加宽系数研究*

杨韬¹⁾²⁾³⁾ 钱仙妹¹⁾³⁾ 马宏亮¹⁾⁴⁾ 刘强^{1)3)†} 朱文越¹⁾³⁾ 郑健捷¹⁾²⁾³⁾

陈杰¹⁾²⁾³⁾ 徐秋怡¹⁾²⁾³⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

3) (先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

4) (安庆师范大学电子工程与智能制造学院, 安庆 246133)

摘要

水分子吸收光谱参数是遥感探测、行星观测应用领域所需的关键基础科学数据。基于窄线宽外腔半导体激光器和长程吸收池, 测量了室温下 9332-9722cm⁻¹ 波段内, CO₂ 加宽的 18 条水分子的吸收谱线。分别使用 Voigt 线型和 quadratic speed-dependent Voigt 线型对吸收光谱数据进行拟合并获得了这些谱线的 CO₂ 加宽系数, quadratic speed-dependent Voigt 线型表现出更好的拟合效果。与 HITRAN2020 数据库该波段空气加宽系数进行了对比, 两种线型反演获得的水分子 CO₂ 加宽系数与空气加宽系数之比的均值分别为 1.327 和 1.454, 验证了利用水分子的空气加宽系数估算 CO₂ 加宽系数的方法存在可靠性。本研究可为近红外波段的火星、金星等大气结构探测技术及相关研究提供可供参考的实测光谱参数数据。

关键词: 水分子, 近红外光谱, CO₂ 加宽系数, 线型

PACS: 33.20.Ea, 33.70.Jg, 33.70.-w

基金: 国家自然科学基金 (批准号: 41805014)、中国科学院国防科技重点实验室基金(批准号: CXJJ-21S028)、中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)(批准号: XDA17010104)、科工局国防基础科研计划 (批准号: JCKY2019130D021)、安徽省高校优秀青年人才支持计划 (重点项目)(批准号: gxyqZD2020032)和中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金 (批准号: JJ-19-01) 资助的课题。

1 引言

水分子是地球、金星等行星大气的重要成分^[1]，其吸收波段广泛，从微波到可见光波段存在大量的吸收谱线^[2]。准确的水分子吸收谱线的线强、自加宽系数及空气加宽系数等有利于解决气候模型建立、大气遥感探测等方向中遇到的相关问题^[3-7]。在地外行星观测中，微量的水分子在行星的光化学效应中扮演着重要角色^[8]，其他分子如 N_2 对水分子加宽的研究有助于反演出更精密的地球大气光谱参数^[9]， CO_2 对水分子加宽的研究可以为富含 CO_2 的行星如火星、金星等行星大气结构的研究提供数据基础，有利于行星大气的进一步探索^[10]。

国内外多个研究小组对水分子的 CO_2 加宽系数开展了研究，Sagawa^[8]等人使用太赫兹时域光谱仪首次观测到了水分子在 $18-102\text{ cm}^{-1}(550-3050\text{ GHz})$ 波段的 32 条转动跃迁谱线，获得了水分子在该波段的 CO_2 加宽系数，并应用于金星大气水分子的光谱反演分析。Brown 等人^[11]使用 CRB (Complex Robert-Bonamy) 理论研究了 $200-900\text{ cm}^{-1}$ 波段 CO_2 加宽下的 937 条水分子跃迁谱线的线位移、谱线宽度及温度依赖性，为金星和火星的大气遥感探测提供了基础科学依据。Devi^[12,13]等人利用 MCRB (Modified Complex Robert-Bonamy) 理论计算了 $1100-4100\text{ cm}^{-1}$ 波段 HDO 部分跃迁谱线的 CO_2 加宽系数，通过实验获取了 $2650-2845\text{ cm}^{-1}$ 波段部分 HDO 分子跃迁谱线的 CO_2 加宽系数及其温度依赖性，该数据可用于反演火星和金星大气中的 HDO 柱丰度及 D/H 同位素丰富比。Borkov^[14]等人利用傅里叶变换光谱仪测量了 $10100-10800\text{ cm}^{-1}$ 波段水分子的 CO_2 加宽吸收光谱，并利用多光谱拟合程序反演了水分子谱线的 CO_2 加宽系数。Lu Yan^[15]等人利用腔衰荡吸收光谱法获得了 790 nm 附近 6 条水分子吸收光谱的 CO_2 加宽系数及线位移。L. Régalia 等人^[16]利用傅里叶变换光谱仪测量了 $2.7\text{ }\mu\text{m}$

和 6 μm 窗口区附近水分子的 CO_2 加宽系数。位于 H_2O 和 CO_2 强吸收带之间的 1.1 μm 波段是行星观测的重要窗口区，可以让金星、火星深层大气的热辐射传输至太空中，该窗口区的光谱分析有利于获取金星、火星近地表大气的组成和物理性质^[17]。目前，1.1 μm 附近的 CO_2 气体分子对水分子吸收光谱的加宽研究仍然十分少见。

本文基于窄线宽外腔半导体激光器和长程吸收池，建立了一套 1.1 μm 波段高分辨率水分子吸收光谱实验装置，测量了室温下 9332-9722 cm^{-1} 波段之间的 18 条水分子吸收光谱。分别利用 Voigt 和 quadratic speed-dependent Voigt (qSDV) 两种线型对高分辨率吸收光谱进行拟合，获得了水分子的 CO_2 加宽系数，并将其与 HITRAN2020 数据库的空气加宽数据进行对比分析。

2 实验原理

频率为 ν 的激光光束通过吸收气体后，传输遵循 Beer-Lambert 定律：

$$\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp[-\alpha(\nu)L] \quad (1)$$

式中， $I(\nu)$ 为待测气体的出射光强， $I_0(\nu)$ 为通过待测气体的入射光强， L 为吸收光程长度， $\alpha(\nu)$ 为光谱吸收系数。

压力较低时，Doppler 加宽占主导地位，谱线线型可用 Gaussian 线型表示；对于较高的压力，碰撞加宽占主导，谱线线型可用 Lorentzian 线型表示。当压力在二者之间时，谱线线型可用 Gaussian 线型和 Lorentzian 线型的卷积表示，即 Voigt 线型，可以描述为：

$$\phi_{VP}(x, y) = A \frac{y}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{(\tilde{\nu} - t)^2 + y^2} dt = A \text{Re}[W(z)] \quad (2)$$

式中 $W(z) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t^2}}{z - t} dt = e^{-z^2} \cdot \text{erfc}(-iz)$ ，系数 $A = \sqrt{\ln 2 / \pi} / \gamma_D$ ， $z = x + iy$ ，

$x = \sqrt{\ln 2} \cdot (\nu - \nu_0) / \gamma_D$, $y = \sqrt{\ln 2} \cdot \gamma_L / \gamma_D$, γ_D 和 γ_L 分别为多普勒半宽和洛伦兹半宽, 满足:

$$\gamma_D = 3.58117 \times 10^{-7} \cdot \sqrt{T/M} \cdot \nu_0 \quad (3)$$

式中, M 为吸收气体的摩尔质量, T 为测量时的温度。洛伦兹半宽 γ_L 可分为吸收气体分子的自加宽和其他分子的碰撞加宽, 可表示为:

$$\gamma_L = \gamma_{\text{self}} \cdot \frac{P_{\text{self}}}{P_{\text{atm}}} + \gamma_{\text{out}} \cdot \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{atm}}} \quad (4)$$

式中, γ_{self} 表示吸收气体分子的自加宽系数, γ_{out} 为外加宽系数, P_{self} 为吸收气体分压, P_{out} 其他气体分子分压, P_{atm} 为标准大气压。

水分子运动速度对弛豫几率的影响所造成的速度依赖效应, 是 Voigt 线型拟合的重要误差源, 精确的速度依赖线型如 quadratic Speed-dependent Voigt (qSDV) 线型可以更准确的描述分子吸收光谱线轮廓, 较 Voigt 线型有更好的拟合能力。qSDV 线型可用两个复概率函数之差来表述:

$$\phi_{\text{SDV}} = \text{Re}[W(iz_-) - W(iz_+)] \quad (5)$$

$$z_{\pm} = \left(\frac{-i(\nu_0 - \nu) + C_0 - \frac{3C_2}{2}}{C_2} + \frac{\gamma_D^2}{4\sqrt{\ln 2} C_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \pm \left(\frac{\gamma_D^2}{4\sqrt{\ln 2} C_2^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中 $C_0 = \gamma_L + i\delta_0$, $C_2 = \gamma_2 + i\delta_2$ 。 γ_L 和 δ_0 分别代表碰撞加宽和压力位移, γ_2 和 δ_2 表征了对分子速度的依赖, γ_L 、 δ_0 、 γ_2 和 δ_2 均是碰撞压力呈线性相关的无量纲参数。

3 实验装置

本文实验装置如图 1 所示, 该实验装置的详细介绍见参考文献[3]。装置使用的激光光源为 Toptica 公司生产的窄线宽外腔半导体激光器, 吸收池为自研的 Herriott 型双光程气体吸收池。激光光束 1 入射至波长计产生绝对波长信号, 光束 2 入射至 F-P (Fabry Perot) 标准具 (自由光谱范围 $FSR = 749.36 \text{ MHz}$) 以进行相对波长标定; 为实现吸收信号与背景信号的同步探测, 利用分束棱镜 BS2 分出光束 3 和光束 4, 光束 3 入射进入吸收池, 经长程传输后入射平衡探测器, 测量分子吸收光谱信号, 光束 4 直接入射至平衡探测器测量背景信号; 为消除吸收池外部光程吸收带来的测量误差, 光束 4 的光程与激光器光束出口至长程吸收池入口之间的光程相同, 约为 75 cm。光电探测器的信号由采集卡 (USB6356, NI) 采集并传输到计算机做后续实验数据处理。数据采集过程由自编的 LabView 程序实现。吸收池内压力由两个薄膜压力计 (Leybold CTR100N, 量程为 0-13332.2 Pa, 精度为 0.01 %; MKS 626C: 量程为 0-66661.2 Pa, 精度为 0.25 %) 监测。实验中所用的水分子均由蒸馏水气化产生, 实验前将蒸馏水所存放的样品容器充分烘干, 通过蒸馏水结冰的方式将混入的杂质气体析出。使用真空泵将吸收池抽至真空状态 ($<2 \text{ Pa}$) 后, 打开蒸馏水样品容器阀门, 让水汽分子冲刷整个气路系统约 20min。随后调节阀门使得系统内压力达到水分子压力的设定值附近, 关闭所有阀门后静置 60min 后充入干燥的 CO_2 气体, 待系统压力稳定后开始实验测量。室温下, 分别测量 4020 Pa, 6629 Pa, 9412 Pa, 13323 Pa, 19687 Pa 五组压力下的吸收光谱。

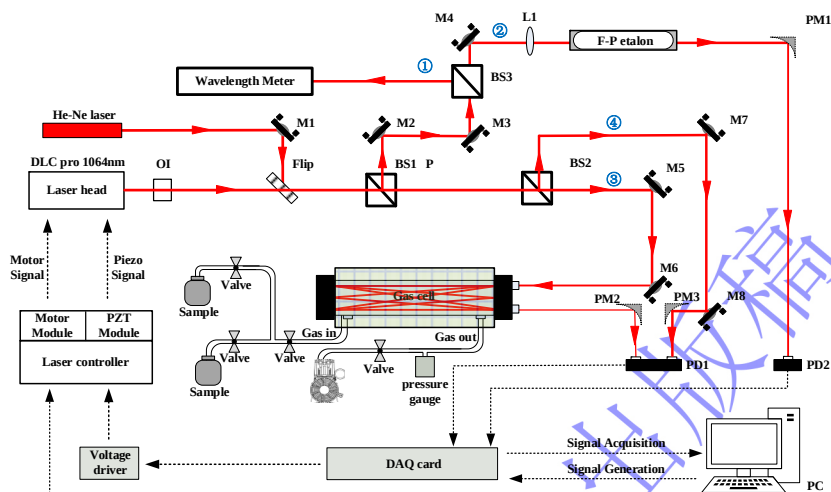


图 1 水分子吸收光谱实验装置

Fig. 1. The experimental setup of water vapor absorption spectrum

图 2 给出了引入光束 4 前后，跃迁位置 9721.806 cm^{-1} 处得到的吸收光谱信号及 F-P 标准具信号，图 (b) 吸收光谱信号基线更加稳定，信噪比较图 (a) 提升 7.75 倍。在功率背景噪声被降低后，光束传输过程中仍会存在光学器件等带来的较微弱的噪声影响光束信号质量，通过对基线进行高阶多项式拟合可以进一步提升光束信号质量。

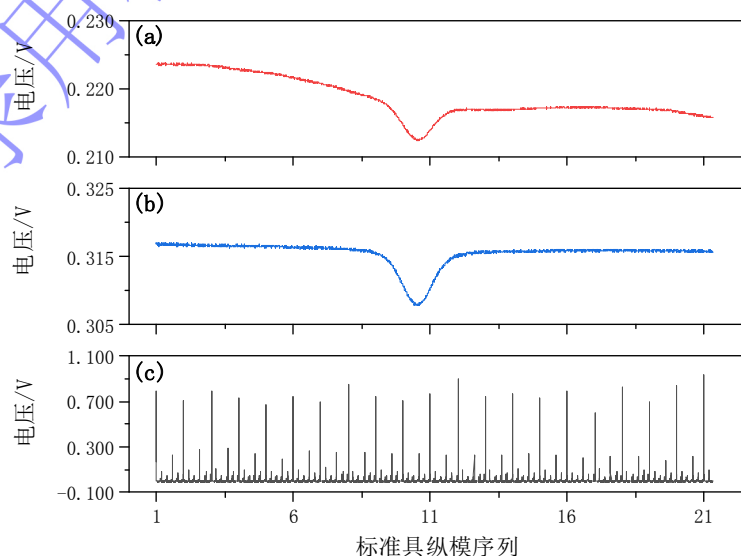


图 2 吸收信号对比 (a) 光束 4 引入前获得的水分子吸收信号；

(b) 光束 4 引入后获得的水分子吸收信号； (c) F-P 标准具纵模信号。

Fig. 2. Comparison of acquired signals : (a) Water vapor absorption signals before beam 4

introduced; (b) Water vapor absorption signals after beam 4 introduced;

(c) the longitudinal mode signals of F-P etalon.

4 结果和讨论

实验中压力计所获得压力数据为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系统总压力，由于水分子具有吸附性，水分子分压与初始值存在差异。对某一确定谱线，水分子在参考温度 $T_0=296\text{ K}$ 下的光谱线强值为固定值，不与压力相关，根据 HITRAN2020 数据库提供的水分子光谱线强值，可反演出该条件下水分子的分压值，进一步得出 CO_2 气体的分压值。基于多光谱拟合程序^[18]，分别采用 Voigt 线型和 qSDV 线型对测量所得数据进行拟合，图 3 为 9412.790 cm^{-1} 波段处不同压力下的拟合光谱及两种线型拟合的残差，由于 Voigt 线型中没有考虑速度变化 (VC) 碰撞和碰撞的速度相关 (SD) 效应，容易在高精度光谱中的产生“W”型残差结构，相比于 Voigt 线型，可以有效的抑制“W”型残差的 qSDV 线型具有更好的拟合能力。图 4 给出了两种不同线型拟合后，所得到的碰撞展宽随压力变化的值。表 1 列出了实验所得的水分子的 CO_2 加宽系数， ν_0 和 $\gamma_{\text{HITRAN}}^{\text{AIR}}$ 分别表示水分子的跃迁频率和空气加宽系数，由 HITRAN2020^[19]数据库提供， $\gamma_{\text{VP}}^{\text{CO}_2}$ 、 $\gamma_{\text{qSDVP}}^{\text{CO}_2}$ 分别表示 Voigt 线型和 qSDV 线型拟合得出的 CO_2 对水分子谱线加宽系数。

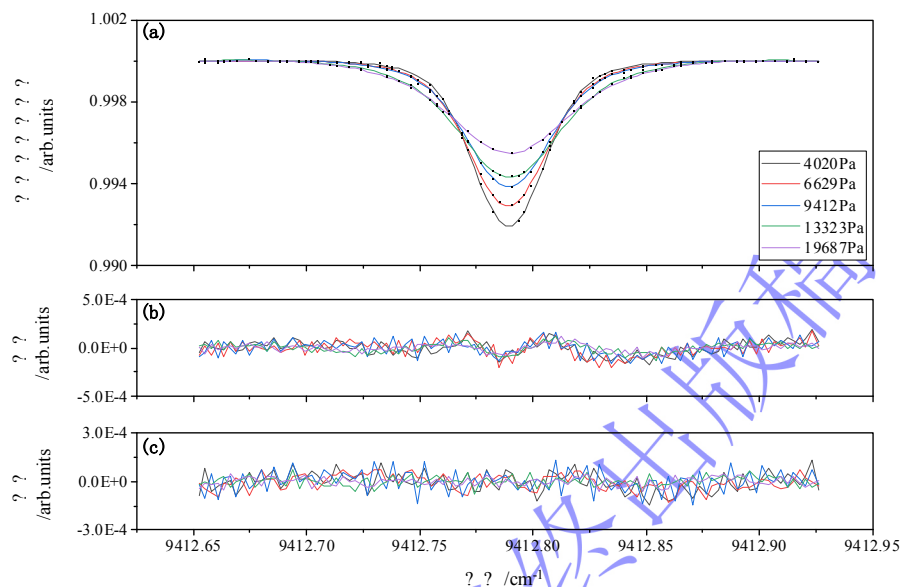


图 3. (a) 9412.790 cm^{-1} 处，不同压力下的测量点及拟合结果； (b) 使用 voigt 线型拟合吸收光谱得到的残差； (c) 使用 qSDV 线型拟合吸收光谱得到的残差

Fig. 3. (a) Measurement points and fitting results at 9412.790 cm^{-1} under different pressures; (b) Residuals obtained by fitting absorption spectra using voigt profile; (c) Residuals obtained by fitting the absorption spectrum using the qSDV profile.

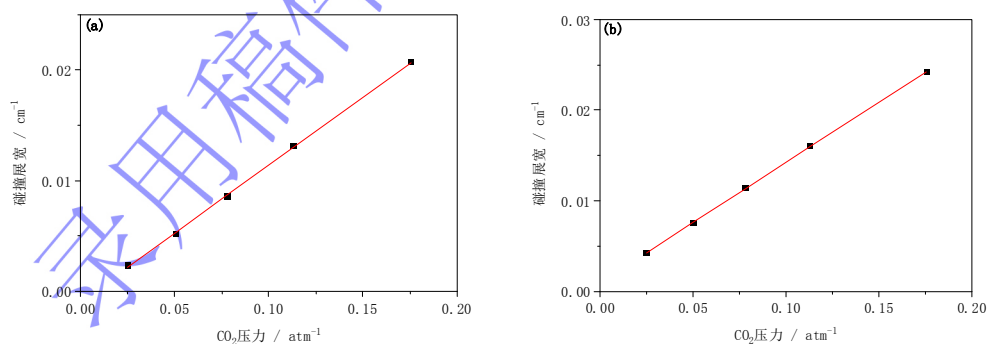


图 4 (a) voigt 线型拟合后，不同气压下的碰撞展宽值
(b) qSDV 线型拟合后，不同气压下的碰撞展宽值

Fig. 4 (a) Collision line width under different pressures obtained by voigt profile
(b) Collision broadening values under different pressures after qSDV profile

表 1 CO₂ 压力加宽的水分子谱线加宽参数（括号内数字为拟合误差）

Table. 1. Line parameters of water vapor broadened by the pressure of carbon dioxide

线位置(cm^{-1}) ν_0	CO ₂ 加宽系数($cm^{-1} \cdot atm^{-1}$)			空气加宽系数(cm^{-1}/atm)	比值		
	VP	qSDVP		γ_{HITRAN}^{AIR}	$\gamma_1^{CO_2}/\gamma_{HITRAN}^{AIR}$	$\gamma_0^{CO_2}/\gamma_{HITRAN}^{AIR}$	$\gamma_0^{CO_2}/\gamma_{VP}^{CO_2}$
	$\gamma_1^{CO_2}$	$\gamma_0^{CO_2}$	$\gamma_2^{CO_2}$		(%)	(%)	(%)
9332.623	0.079 (0.42)	0.093 (1.86)	0.020 (6.8)	0.0483	1.632	1.917	1.175
9335.691	0.107 (0.58)	0.111 (2.76)	0.013 (18.7)	0.0772	1.391	1.441	1.036
9339.709	0.083 (0.74)	0.100 (4.95)	0.007 (20.0)	0.0732	1.135	1.361	1.199
9344.263	0.084 (0.69)	0.097 (2.51)	0.016 (7.07)	0.0573	1.468	1.685	1.148
9346.912	0.095 (0.66)	0.102 (1.61)	0.026 (6.92)	0.0762	1.247	1.341	1.076
9351.149	0.072 (0.18)	0.079 (1.37)	0.005 (9.63)	0.0623	1.153	1.274	1.105
9351.509	0.082 (1.14)	0.092 (4.00)	0.004 (12.05)	0.0804	1.014	1.150	1.134
9366.591	0.084 (0.18)	0.085 (1.27)	0.018 (17.27)	0.0602	1.394	1.418	1.017
9366.781	0.082 (0.40)	0.089 (2.40)	0.089 (2.40)	0.0565	1.451	1.568	1.081
9388.751	0.085 (0.96)	0.094 (2.58)	0.015 (9.77)	0.0637	1.328	1.472	1.108
9388.968	0.096 (0.56)	0.102 (3.35)	0.069 (18.15)	0.0791	1.212	1.294	1.067
9409.130	0.086 (0.41)	0.089 (1.92)	0.010 (12.02)	0.0713	1.205	1.245	1.034
9412.790	0.122 (1.30)	0.133 (3.37)	0.019 (6.05)	0.0817	1.489	1.625	1.092
9676.881	0.068 (0.32)	0.073 (1.60)	0.016 (11.04)	0.0473	1.446	1.552	1.073
9694.811	0.083 (0.28)	0.098 (2.41)	0.031 (9.83)	0.0628	1.323	1.560	1.180
9713.959	0.094 (0.69)	0.099 (2.72)	0.024 (11.35)	0.0726	1.294	1.370	1.059
9720.277	0.114 (0.51)	0.118 (3.86)	0.027 (7.39)	0.0831	1.367	1.421	1.040
9721.806	0.094 (0.20)	0.104 (1.15)	0.024 (8.58)	0.0704	1.338	1.477	1.104

实验共获得了 18 条水分子谱线的 CO_2 压力加宽系数 ($\nu_2 + 2\nu_3$: 9 条; $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$: 4 条; $4\nu_2 + \nu_3$: 5 条)。图 5 显示了不同线型拟合得出的水分子的 CO_2 压力加宽系数以及其与水分子空气加宽系数的比较结果。可以看出, 在实验研究的 18 条谱线中, 水分子的 CO_2 压力加宽系数高于空气加宽系数, qSDV 线型拟合结果普遍高于 Voigt 线型得到的结果, 二者比值的均值为 1.096。HITRAN 数据库中对水分子的 CO_2 压力加宽系数收录较少, 实际应用中, 大多通过缩放其他气体如空气的加宽系数来估算。根据 Howard^[20]等人文中的计算公式, 通常水分子的 CO_2 压力加宽系数比空气加宽系数大几十个百分点, Pollack^[21]等人通过将 HITRAN 数据库中水分子的空气加宽系数乘以 1.3 来估算近红外区域水分子的 CO_2 加宽系数, 而在实验研究的 18 条水分子吸收谱线中, Voigt 线型拟合得出的水分子 CO_2 压力加宽系数结果均高于空气加宽系数, 其比值均值为 1.327, qSDV 线型的拟合结果的比值均值为 1.454, 验证了此类估算方法存在一定的可靠性。

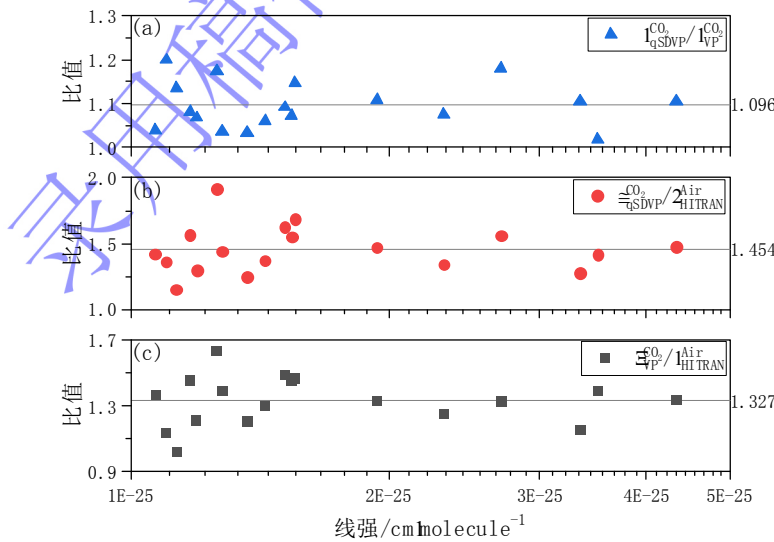


图 5. (a) 使用 Voigt 线型得到的水分子的 CO_2 加宽系数与 HITRAN2020 数据库中水分子的空气加宽系数之比; (b) 使用 qSDV 线型得到的水分子的 CO_2 加宽系数与 HITRAN2020 数据库中水分子的空气加宽系数之比; (c) 使用 Voigt 线型得到的水分子的 CO_2 加宽系数与使用 qSDV 线型得到的水分子的 CO_2 加宽系数之比。

Fig 5. (a) The ratios of CO_2 -broadened coefficients of water vapor obtained by using the Voigt

profile to the air broadening coefficients of water vapor in the HITRAN2020 database; (b) The ratios of CO₂-broadened coefficients of water vapor obtained by using the qSDV profile to the air broadening coefficients of water vapor in the HITRAN2020 database; (c) The ratios of CO₂-broadened coefficients of water vapor obtained by using the Voigt profile to the coefficients obtained by using the qSDV profile.

5 结 论

本文基于窄线宽外腔半导体激光器和长程吸收池，搭建了一套高分辨率、高灵敏度的水分子吸收光谱测量装置，测量了室温下 9332-9722cm⁻¹ 波段内，4020-19687 Pa 压力范围内 CO₂ 加宽的 18 条水分子吸收谱线。分别采用 Voigt 线型和 qSDV 线型对所获得的吸收光谱线进行拟合，获得了这些谱线的 CO₂ 加宽系数。实验结果表明，对于同一条谱线，qSDV 线型可有效的抑制 “W”型残差，较 Voigt 线型具有更好的拟合能力；qSDV 线型拟合所得到的水分子的 CO₂ 加宽系数普遍高于 Voigt 线型得到的结果，二者之比的均值为 1.096。将实验获得的水分子 CO₂ 加宽系数与 HITRAN2020 数据库提供的相应波段空气加宽系数进行对比，对于所测量的 18 条谱线，Voigt 线型与 qSDV 线型拟合得到的水分子 CO₂ 加宽系数均高于空气加宽系数，比值均值分别为 1.327、1.454，验证了通过水分子的空气加宽系数估算 CO₂ 加宽系数的方法存在一定的可靠性。太阳辐射能量主要集中在可见至近红外波段，本工作获取的 1.1 微米波段水分子 CO₂ 加宽系数光谱参数可为行星观测及其大气结构的研究提供重要的参考。

参考文献

- [1] Regalia L, Oudot C, Mikhailenko S, Wang L, Thomas X, Jenouvrier A, Heyden P V 2014 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **136** 119
- [2] Antony B K, Neshyba S, Gamache R R. 2007 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **1** 148
- [3] Zheng J J, Zhu W Y, Liu Q, Ma H L, Liu K, Qian X M, Chen J, Yang T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 163301(in Chinese) [郑健捷, 朱文越, 刘强, 马宏亮, 刘锬, 钱仙妹, 陈杰, 杨韬 2021 物理学报 **70** 163301]
- [4] Ma H L, Zha S L, Zha C L, Zhang Q L, Cai X Y, Cao Z S, Zhan S B, Pan P 2019 *Chin. J. Quantum Elect.* **36** 663 (in Chinese) [马宏亮, 查申龙, 查长礼, 张启磊, 蔡雪原, 曹振松, 占生宝, 潘盼 2019 量子电子学报 **36** 663]
- [5] Jacquemart D, Gamache R, Rothman L S 2004 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **96** 205
- [6] Sironneau V T, Hodges J T 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **152** 1
- [7] Brown L R, Toth R A, Dulick M 2002 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **212** 57
- [8] Sagawa H, Mendrok J, Seta T, Hoshina H, Baron P, Suzuki K, Hosako I, Otani C, Hartogh P, Kasai Y 2009 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **18** 2027
- [9] Gao X M, Huang W, Deng L H, Shao J, Fan H, Cao Z S, Yuan Y Q, Zhang W J, Gong Z B 2006 *Acta Optica Sinica* **26** 5 (in Chinese) [高晓明, 黄伟, 邓伦华, 邵杰, 樊宏, 曹振松, 袁恽谦, 张为俊, 龚知本 2006 光学学报 **26** 5]
- [10] Chamberlain S, Bailey J, Crisp D, Meadows V 2013 *Icarus* **1** 364
- [11] Brown L R, Humphrey C M, Gamache R R 2007 *J. Mol. Spectrosc.* **246** 1
- [12] Devi V M, Benner D C, Sung K, Crawford T J, Gamache R R, Renaud C L,

- Smith M A H, Mantz A W, Villanueva G L 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **187** 472
- [13] Devi V M, Benner D C, Sung K, Crawford T J, Gamache R R, Renaud C L, Smith M A H, Mantz A W, Villanueva G L 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **203** 158
- [14] Borkov Y, Petrova T M, Solodov A M, Solodov A A 2018 *J. Mol. Spectrosc.* **344** 39
- [15] Lu Y, Li X F, Liu A W, Hu S M 2014 *Chinese Journal of Chemical Physics* **27** 1
- [16] Régalia L, Cousin E, Gamache R R, Vispoel B, Robert S, Thomas X 2019 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **231** 126
- [17] Bézard B, Fedorova A, Bertaux J-L, Rodin A, Korablev O 2011 *Icarus* **1** 173
- [18] Zheng J, Ma H, Liu Q, Qian X, Zhu W, Cao Z, Chen J, Yang T, Xu Q 2022 *Microw. Opt. Technol. Lett.*
- [19] Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. 2022 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **277** 107949
- [20] Howard J N, Burch D E, Williams D 1956 *J. Opt. Soc. Am.* **46** 242
- [21] Pollack J B, Dalton J, Grinspoon D, et al. 1993 *Icarus* **103** 1

Study of CO₂-broadened coefficients of water vapor in 1.1μm band^{*}

Yang Tao¹⁾²⁾³⁾ Qian Xian-Mei¹⁾³⁾ Ma Hong-Liang¹⁾⁴⁾ Liu Qiang^{1)3)†} Zhu Wen-Yue¹⁾³⁾

Zheng Jian-Jie¹⁾²⁾³⁾ Chen Jie¹⁾²⁾³⁾ Xu Qiu-Yi¹⁾²⁾³⁾

1) (Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei

Institutes of Physical Science, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2) (Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China,

Hefei 230026, China)

3) (Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

4) (School of Electrical Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University,

Anqing 246133, China)

Abstract

The absorption spectral parameters of water vapor molecules are the key basic scientific data for the remote sensing detection and the planetary observation applications. Based on a narrow line-width external cavity diode laser and a long-path absorption cell, 18 absorption spectral lines of CO₂-broadened water vapor molecules in the 9332-9722cm⁻¹ region at room temperature were measured. To obtain the CO₂-broadened water vapor molecules coefficients, the Voigt profile and the quadratic speed-dependent Voigt profile were used to fit the absorption spectrum data. The quadratic speed-dependent Voigt profile showed better fitting ability. Compared with the air-broadened coefficients of the corresponding region from the HITRAN2020 database, the mean ratios of the

CO₂-broadened coefficients of water vapor molecules and the air-broadened coefficients obtained by the two models of the line shape are 1.327 and 1.454, respectively, which verifies that the method of estimating the CO₂-broadened coefficient by the air-broadened coefficient of water vapor molecules has certain reliability. This study can provide referenced data of measured spectral parameters for the detection technology and related research of atmospheric structures of Mars and Venus in the near-infrared region.

Keywords: water vapor, near infrared spectrum, CO₂-broadened coefficients, profile

PACS: 33.20.Ea, 33.70.Jg, 33.70.-w

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41805014), Foundation of Key Laboratory of Science and Technology Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. CXJJ-21S028), the Strategic Priority Research Program (A) of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA17010104), Technology and Industry for National Defence of China (Grant/Award Number: JCKY2019130D021), the Key Program of the Youth Talent Support Plan in Universities of Anhui Province, China (Grant No. gxyqZD2020032), and the Open Research Fund of Key Laboratory of Atmospheric Optics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. JJ-19-01).