

文章编号 1004-924X(2026)15-2289-13

低压水汽及氢氧同位素波长调制检测

王立一^{1,2}, 李 想¹, 曹乃亮^{1*}, 邓 昊¹, 胡海飞³, 糜小涛³, 阚瑞峰¹

(1. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对低压、动态条件下微量水汽及其氢氧同位素检测中存在的弱吸收信号提取困难和谱线交叠问题,提出一种基于波长调制吸收光谱技术(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)的检测方法。利用中心波长 1.863 μm 的分布反馈式半导体激光器(Distributed Feedback Laser, DFB)作为激光光源,构建了有效光程为 12 m、吸收池容积为 80 cm^3 的小型化检测装置,由单次扫描输出实现对 H_2^{16}O 、 H_2^{17}O 、 H_2^{18}O 和 HDO 的同时探测。通过不同标准水样开展标定实验,建立弱同位素通道与参考通道拟合积分面积比和标准真值之间的对应关系,实现水汽氢氧同位素比率及其 δ 值的测量。实验结果表明,各同位素拟合积分面积与水汽压力之间均呈线性相关,相关系数 R^2 均大于 0.99;在 340 Pa 稳态条件下, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 通道的最优积分时间分别为 18、23 和 20 s,对应最小 Allan 偏差分别为 2.015‰、3.636‰ 和 1.317‰;模拟月壤实验验证了该方法能够跟踪吸附分馏过程中的同位素动态变化,当前实验条件下的 10%~90% 压力响应时间为 71 s;与 2.731 μm 、25 m 有效光程直接吸收方法对比,所得 δD 结果表现出一致的变化趋势。本文方法能够实现低压条件下水汽及其氢氧同位素的稳态定量测量和动态过程测量,可为低压、动态过程中的水汽及氢氧同位素小型化原位检测提供技术支撑。

关键词: 低压水汽; 氢氧同位素; 波长调制光谱法; 同位素反演

中图分类号: TN248 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20263415.2289

CSTR: 32169.14.OPE.20263415.2289

Wavelength-modulation detection for water vapor and hydrogen-oxygen isotopes under low-pressure conditions

WANG Liyi^{1,2}, LI Xiang¹, CAO Nailiang^{1*}, DENG Hao¹, HU Haifei³, MI Xiaotao³, KAN Ruifeng¹

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: nlcao@aiofm.ac.cn

Abstract: Weak absorption and spectral overlap limit trace isotope detection under low-pressure dynamic conditions. To address this issue, a wavelength modulation spectroscopy (WMS) method is proposed for hydrogen and oxygen isotope measurements in water vapor. A distributed feedback (DFB) laser centered

收稿日期: 2026-04-15; 修订日期: 2026-05-06.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2024YFE0201000); 国家自然科学基金资助项目(No. 62205346)

at 1.863 μm was employed, and a miniaturized detection system with a 12 m optical path and an 80 cm^3 absorption cell was developed. By means of a single scan, simultaneous detection of H_2^{16}O , H_2^{17}O , H_2^{18}O , and HDO was achieved. Calibration experiments were performed using different standard water samples, and relationships were established between the fitted integrated area ratios and isotope reference values. Hydrogen and oxygen isotope ratios, together with the corresponding δ values, were then obtained. The fitted integrated areas exhibited linear relationships with water vapor pressure, with correlation coefficients exceeding 0.99. Under a steady pressure of 340 Pa, the optimal integration times were determined to be 18 s, 23 s, and 20 s for δD , $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$, respectively. The minimum Allan deviations were 2.015‰, 3.636‰, and 1.317‰. Simulated lunar-soil experiments further verified dynamic isotope monitoring, and isotope variations during adsorption fractionation were successfully captured. The 10%-90% pressure response time was 71 s. A comparison experiment was also conducted using a direct absorption system at 2.731 μm as a reference, with an optical path length of 25 m. Consistent δD variation trends were observed in both systems. The proposed method enables steady-state and dynamic measurements of hydrogen and oxygen isotopes in water vapor under low-pressure conditions, thereby providing technical support for miniaturized in situ isotope detection in dynamic environments.

Key words: low-pressure water vapor; hydrogen and oxygen isotopes; wavelength modulation spectroscopy; isotope retrieval

1 引言

月球水及其同位素组成是揭示月球起源与演化过程的重要依据^[1-3]。月球极区永久阴影区形成冷阱环境,太阳风注入、微陨石和彗星撞击等过程均可能为月表提供水来源^[4-6]。月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)、月船一号(Chandrayaan-1)等探测结果表明,月球极区存在氢异常及水冰,月球水可能并非静态赋存^[7-9]。然而,月壤吸附水含量通常<0.1%,且释放过程具有样品量小等特点,传统质谱和拉曼等方法难以同时兼顾微量检测及同位素分析需求。因此,发展适用于月壤吸附水释放场景的高灵敏原位检测技术具有重要意义。

激光吸收光谱因具有选择性强、响应快和适于在线测量等特点,已成为痕量气体及稳定同位素分析的重要技术,并在小型化气体检测及复杂工况在线监测方面得到进一步发展^[10-11]。在水汽及其氢氧同位素测量领域,现有相关系统多面向实验室分析和地面连续观测场景,基于腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)、离轴积分腔输出光谱(Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy, OA-ICOS)和可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorp-

tion Spectroscopy, TDLAS)等方法的仪器已较为成熟^[12-15]。面向行星环境原位探测,NASA好奇号任务搭载的火星样本分析(Sample Analysis at Mars, SAM)仪器可用于火星大气及固体样品热释放挥发分析。其中,SAM采用2.78 μm 激光器和容积为405 cm^3 、有效光程为8.93 m的Herriott多通池,结合直接吸收和二次谐波检测方法开展水汽及其同位素测量, H_2O 的检测限可达0.1 $\mu\text{mol/mol}$,水汽同位素测量精度分别为 δD 2‰, $\delta^{18}\text{O}$ 3‰, $\delta^{17}\text{O}$ 5‰^[16]。嫦娥七号月壤水分子分析仪(Lunar Water Analyzer, LUWA)面向月球极区水冰同位素分析,采用2.73 μm 激光器和容积为386 cm^3 、有效光程为9 m的多通池,在模拟月面真空测试条件下使用直接吸收方法开展水汽同位素测量, δD , $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 对应30 s积分时间同位素测量精度分别为1.3‰, 0.77‰和0.75‰^[17]。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)研制的小型CRDS采用1.392 μm DFB激光器和1.4 km等效光程,面向氮气中的痕量水汽测量,检出限达3.1 nmol/mol ^[18]。上述研究表明,激光吸收光谱技术已能够实现高精度水汽及同位素测量。

但现有检测系统主要面向实验室分析、地面连续观测或样品供给相对充足条件下的稳态测量

场景,其设计重点主要在于提高绝对检测精度。对于月壤吸附水释放所代表的低压、动态原位检测需求,现有方案仍存在结构和方法适配不足的问题。一方面,吸收池容积普遍大于 100 cm^3 ,长光程与小体积难以兼顾,系统动态响应能力和有限气量利用效率均受到约束;另一方面,在近红外弱吸收和短光程条件下,弱同位素信号易受主同位素强线旁翼、基线漂移及干涉项影响,难以直接沿用已有直接吸收高精度方案。低压微量水汽及其氢氧同位素检测的关键难点在于系统既要具有足够长的有效吸收光程,以保证弱吸收条件下的信号强度,又要尽可能减小腔体容积,以满足有限气量和快速瞬态响应的测量需求。

针对上述问题,本文面向低压、动态条件下的水汽及氢氧同位素检测需求,从检测装置构建和信号处理方法两方面开展研究。选取了 $5\ 366\text{ cm}^{-1}$ 附近水汽同位素吸收窗口,构建了采用 $1.863\text{ }\mu\text{m}$ DFB 激光器、吸收池容积为 80 cm^3 、有效光程为 12 m 的小型化检测装置;同时引入波长调制光谱方法,以增强弱吸收信号提取能力并降低检测限。在此基础上,建立了基于归一化、多谱线联合拟合和面积比值反演的数据处理方法,并通过标准水样标定、模拟月壤参与下的吸附实验以及 $2.731\text{ }\mu\text{m}$ 直接吸收方法的对比实验,验证了该技术在低压水汽同位素稳态定量测量和动态过程测量中的适用性。

2 检测原理与方法

为实现低压条件下水汽及其氢氧同位素的稳定检测,本文采用 TDLAS 结合 WMS 与归一化处理提高弱吸收信号提取能力;通过交叠谱峰处理算法抑制强弱谱线交叠影响,并利用基于积分面积比的反演方法实现 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 值的测量。

$$S_2(\bar{\nu}) = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left[H_2 + \frac{i_1}{2}(H_1 + H_3)\cos\phi_1 + \frac{i_2}{2}(H_0 + H_4)\cos\phi_2 \right] + N_{2f}, \quad (6)$$

其中: G 为系统增益, N_{2f} 为噪声及残余背景项。由公式(6)可知,二次谐波信号不仅与目标吸收有关,也会受到入射光强变化和背景漂移的影响。

为减弱入射光强变化和系统增益波动对二

2.1 TDLAS 与 WMS 测量原理

TDLAS 利用半导体激光器线宽窄、波长可调谐特点,通过扫描目标气体分子在选定波段内的吸收谱线实现组分识别与浓度反演。入射光经吸收后的透射光强满足 Beer-Lambert 定律:

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)L], \quad (1)$$

其中: L 为吸收光程, $\alpha(\nu)$ 为频率 ν 处的吸收系数。对于单条吸收线:

$$\alpha(\nu) = PXS(T)\phi(\nu, T, P), \quad (2)$$

其中: P 为总压强, X 为待测组分摩尔分数, $S(T)$ 为该吸收线在温度 T 下的线强, $\phi(\nu, T, P)$ 为归一化线型函数。由公式(1)和公式(2)可知,在温度、压强、光程及谱线参数确定时,吸收信号与待测组分含量之间具有确定对应关系^[19-20]。

对于低压水汽测量,直接吸收信号弱,易受激光功率波动、探测器噪声、光路扰动及慢变背景漂移影响。为提高弱吸收条件下的信噪比,本文在低频扫描信号基础上叠加高频正弦调制信号,采用 WMS 提取二次谐波幅值和峰形信息^[19,21-22]。激光瞬时频率可表示为:

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a\cos(\omega t), \quad (3)$$

其中: $\bar{\nu}(t)$ 为低频扫描中心频率, a 为调制幅值, ω 为调制角频率。考虑电流调制同时引入光强调制,激光输出光强可写为:

$$I_0(t) = \bar{I}_0 \left[1 + i_1\cos(\omega t + \phi_1) + i_2\cos(2\omega t + \phi_2) \right], \quad (4)$$

其中: $\bar{I}_0$ 为平均光强, i_1 和 i_2 分别为一次和二次光强调制系数, ϕ_1 和 ϕ_2 为相位差。由公式(1)可知系统瞬时透过率可写为 $\tau[\nu(t)] = \exp\{-\alpha[\nu(t)]L\}$,则其第 k 阶傅里叶系数可表示为:

$$H_k(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a\cos\theta) \cos(k\theta) d\theta. \quad (5)$$

在考虑同步光强调制后,锁相解调得到的二次谐波信号可写为:

$$S_2(\bar{\nu}) = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left[H_2 + \frac{i_1}{2}(H_1 + H_3)\cos\phi_1 + \frac{i_2}{2}(H_0 + H_4)\cos\phi_2 \right] + N_{2f}, \quad (6)$$

次谐波幅值的影响,传统 WMS 方法常以一次谐波为参考进行 $2f/1f$ 归一化。但在本文长光程、低压水汽同位素检测工况下,主同位素吸收增强后会使吸收峰附近的一次谐波幅值显著降低;当吸光度峰值增大至约 0.05 时,一次谐波在吸收峰

中心位置接近零,导致 $2f/1f$ 归一化线型畸变。为避免该问题,采用 Shao 等^[21]提出的固定归一化光强自标定方法,利用无吸收区域的直流光强拟合平滑基线,并以此对 $2f$ 信号进行归一化处理。该方法不直接依赖吸收峰附近的一次谐波幅值,适用于长光程、弱同位素谱线交叠和动态压力变化并存的测量场景,并有利于提高后续多谱线联合拟合的稳定性。

实际扫描过程中,入射直流光强可视为随波数缓慢变化的基线项 $B(\nu)$,透射直流分量满足公式(1)所对应的形式,即 $I_{dc}(\nu) = B(\nu) \exp[-\alpha(\nu)L]$ 。在无吸收区域内 $\alpha(\nu) \approx 0$,故有 $I_{dc}(\nu) \approx B(\nu)$ 。在单次扫描覆盖的窄波数区间内, $B(\nu)$ 通常视为平滑慢变函数,可采用低阶多项式拟合表示为:

$$I_{0f}^{\text{fit}}(\nu) = \sum_{m=0}^M b_m \nu^m. \quad (7)$$

据此,归一化二次谐波信号定义为:

$$R_{2f/0f}(\nu) = \frac{S_{2f}(\nu)}{I_{0f}^{\text{fit}}(\nu)}. \quad (8)$$

需要说明的是,本文中的 $0f$ 始终定义为由无吸收区域拟合得到的平滑基线信号,而非实际透射信号的直流分量。

2.2 交叠谱峰拟合算法

目标波段内 H_2^{16}O 、 H_2^{17}O 、 H_2^{18}O 及 HDO 多条谱线分布密集,主同位素强线远翼与弱同位素目标吸收峰之间存在明显交叠。在低压条件下,经 WMS 解调后得到的归一化二次谐波信号虽然能够提高弱吸收谱线的可分辨性,但弱同位素通道仍易受到邻近强谱线旁翼及残余干涉项的影响。其中,残余干涉项主要来源于多通池腔镜、光学窗口和准直器端面的弱干涉条纹,以及归一化处理后未完全消除的局部周期性干涉条纹。为提高低压条件下弱同位素谱线参数提取的稳定性,采用基于 HITRAN 参数和实验条件约束的交叠谱峰联合拟合方法,对归一化后的 $2f/0f$ 光谱进行分离处理^[21-23]。在低压、窄扫描范围及统一归一化条件下,目标波段内总归一化二次谐波响应可近似表示为多条参考 $2f/0f$ 峰形与局部背景项的组合,该近似主要用于交叠谱峰分离与参数提取。

首先,根据 HITRAN 数据库读取各候选谱线的线中心、线强、空气展宽系数、自展宽系数及

下能级能量等参数,并结合实测温度和压强计算各谱线的初始参数。其中,谱线线强由参考温度下的 HITRAN 线强经温度修正得到,高斯展宽根据分子质量和温度确定,洛伦兹展宽由碰撞展宽模型结合实测压强计算得到。上述参数用于构造各候选谱线的初始 $2f/0f$ 峰形,并为局部窗口参数优化提供初值。

考虑到目标波段内多条水汽同位素谱线存在不同程度的交叠,首先根据谱线中心位置、相邻谱线交叠程度及局部背景变化情况,将归一化二次谐波光谱划分为 4 个局部窗口,主要用于对谱线中心、展宽修正、面积乘数及局部背景项等参数进行初步优化和约束:对于相对独立的弱同位素峰,重点约束其峰形和局部背景项;对于明显交叠区域,则将相邻谱线纳入同一窗口进行联合约束,以降低谱线交叠对弱同位素提取的影响。

设第 w 个窗口内的实验归一化二次谐波信号为 $S_{\text{fit}}^{(w)}(\nu)$,则其拟合模型可写为:

$$S_{\text{fit}}^{(w)}(\nu) = \sum_{j \in \Omega_w} a_j \phi_j[\nu; \nu_j^{(0)} + \Delta\nu_j, \Gamma_{G,j}^{(0)}, \eta_j \Gamma_{L,j}^{(0)}] + \sum_{m=0}^2 c_m \nu^m + d_1 \psi_{\sin}(\nu) + d_2 \psi_{\cos}(\nu), \quad (9)$$

其中: Ω_w 表示第 w 个窗口所包含的谱线集合; ϕ_j 为第 j 条谱线在当前调制参数下对应的理论归一化 $2f/0f$ 峰形, $\nu_j^{(0)}$ 为由 HITRAN 参数和波数漂移共同确定的初始线中心, $\Gamma_{G,j}^{(0)}$ 和 $\Gamma_{L,j}^{(0)}$ 分别为高斯展宽和洛伦兹展宽初值, a_j 为第 j 条谱线的面积乘数, $\Delta\nu_j$ 为线中心修正量, η_j 为洛伦兹展宽乘数, c_m 为局部二次多项式基线系数, d_1 和 d_2 为残余干涉项系数, $\psi_{\sin}(\nu)$ 和 $\psi_{\cos}(\nu)$ 分别为局部干涉波纹对应的正弦/余弦项系数,用于反映归一化光谱中残留的弱周期性背景起伏。

在局部窗口参数优化的基础上,将各窗口获得的参数作为初值或约束条件,对目标波段内归一化二次谐波光谱进行全局联合拟合。拟合过程中,通过最小二乘准则最小化实验曲线与模型曲线之间的残差平方和,即:

$$\min [S_{\text{exp}}^{(w)}(\nu_i) - S_{\text{fit}}^{(w)}(\nu_i)]^2, \quad (10)$$

其中: n_w 为第 w 个窗口内的采样点数,求解后可得到各目标谱线的拟合参数及对应的单谱线拟合分量。对于第 j 条目标谱线,其最终拟合积分面积记为 Q_j 。

分别提取 H_2^{16}O , H_2^{17}O , H_2^{18}O 及 HDO 通道对应的拟合积分面积,用于后续面积比反演。该参数反映了目标谱线在当前压力、温度和光程条件下对归一化二次谐波信号的整体贡献。

2.3 基于积分面积比的同位素反演原理

对于同一样品中的不同水同位素分子,在吸收光程、温度和压强一致的条件下,其吸收响应之比可用于反演相应的同位素丰度比^[24-26]。经 2.2 节所述联合拟合后,可分别获得弱同位素通道和参考通道的单线拟合积分面积。设弱同位素通道为 X ,参考通道为 H_2^{16}O ,则二者积分面积之比可表示为:

$$\frac{Q_X}{Q_{16}} = K_X \frac{N_X}{N_{16}} \frac{S_X(T)}{S_{16}(T)}, X \in \{18, 17, D\}, (11)$$

其中: Q_X 和 Q_{16} 分别为弱同位素通道和 H_2^{16}O 通道的单线拟合积分面积, N_X 和 N_{16} 分别为对应分子的数浓度, $S_X(T)$ 和 $S_{16}(T)$ 为对应谱线在温度 T 下的线强, K_X 为综合比例系数,用于反映不同通道在调制响应、探测增益、拟合尺度及系统偏差上的综合差异。

由公式(11)可知,弱同位素通道与 H_2^{16}O 通道的拟合积分面积比与相应同位素丰度比具有对应关系。本文中, K_X 难以完全通过理论模型准确给出,因此本文不直接由公式(11)计算绝对同位素丰度比,而是将拟合积分面积比 Q_X/Q_{16} 作为后续标定与反演所使用的积分面积比参数,并通过标准水样建立其与 δ 标准值之间的线性映射关系。该处理可将谱线参数误差、通道响应差异和残余系统偏差并入经验标定系数中,从而提高低压弱吸收和谱线交叠条件下同位素反演的稳定性。

在稳定同位素分析中, δ 值通常用于表示样品同位素比值相对于维也纳标准平均海水(Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW)的相对偏差,其定义为:

$$\delta_X = \left(\frac{R_X}{R_{X, \text{VSMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}, (12)$$

其中: R_X 为样品中目标同位素与参考同位素的丰度比, $R_{X, \text{VSMOW}}$ 为 VSMOW 标准中对应的参考比值。对于本文 3 个通道, R_{18} , R_{17} 和 R_D 分别对应 $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$, $\text{H}_2^{17}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ 和 $\text{HDO}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ 的分子丰度比。

因此,本文通过多谱线联合拟合提取各通道

拟合积分面积,构造弱同位素与 H_2^{16}O 通道的面积比,并结合标准水样标定关系实现 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的测量。

3 实验与结果分析

结合不同候选窗口的谱线分布、动态范围确定目标工作波段,并搭建小型化 TDLAS/WMS 检测装置并优化调制深度,最后开展水汽量响应标定及模拟月壤参与下的验证实验,以评估本文方法在低压、动态条件下水汽及氢氧同位素检测中的适用性。

3.1 水汽吸收线的选择

水汽吸收近红外区域常见吸收带主要位于 1.13, 1.38 和 1.87 μm 附近;中红外区域主要集中在 2.7 μm 和 6.3 μm 附近。与近红外倍频和组合吸收带相比,中红外基频吸收带的谱线强度通常高约 1~2 个数量级,具体差异与所选谱线有关^[26]。然而,中红外系统通常存在激光器与探测器集成度低、系统热控要求高等问题,部分中红外光源采用空间光输出,不利于在折叠腔内实现紧凑光路布置^[27-28]。因此,本文优先考虑器件成熟、光路集成便利且适合小型化实现的近红外波段。

在近红外候选窗口中,1.13、1.38 μm 附近代表性窗口受邻近强吸收峰远翼影响,导致峰间区域存在非零吸收背景,增加了基线扣除和弱同位素谱线分离难度。综合考虑谱线强度、弱同位素可分离性与单个 DFB 激光器扫描覆盖范围和局部背景拟合条件,选择 1.863 μm 附近窗口作为工作波段。如图 1 所示,1.863 μm 附近窗口可在单一扫描范围内同步覆盖 H_2^{16}O , H_2^{17}O , H_2^{18}O 和 HDO 的可用吸收谱线,且峰间背景相对平整,便于结合波长调制检测和多谱线联合拟合方法进行弱同位素信号提取。所选谱线参数见表 1。

3.2 实验装置与实验流程

装置结构如图 2 所示,主要由光谱检测模块、电子学驱动与采集模块、加热汽化装置、恒温真空罐、抽真空系统及温度和压力监测单元组成。光谱检测模块采用 1.863 μm DFB 激光器作为光源。实验中,低频扫描信号和高频正弦调制信号由函数信号发生器产生,并经 LDC501 激光二极管控制器叠加到激光器驱动电流上。激光经准直后进入恒温真空罐内的 Herriott 型多通吸收池,透

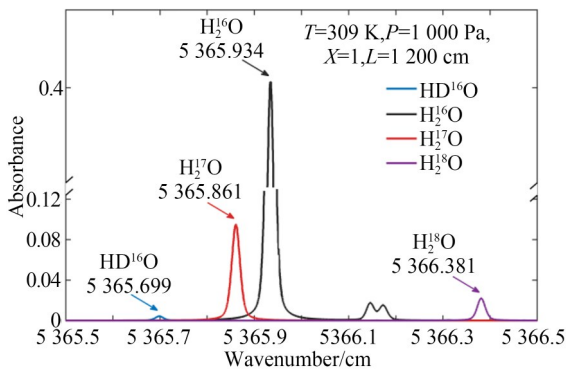


图 1 5 366 cm⁻¹窗口下 H₂¹⁶O、H₂¹⁷O、H₂¹⁸O 和 HDO 吸收谱仿真

Fig.1 Simulated absorption spectra of H₂¹⁶O, H₂¹⁷O, H₂¹⁸O and HDO in the 5 366 cm⁻¹ spectral window

表 1 1.863 μm 附近水汽同位素目标谱线参数

Tab.1 Water-isotopologue target spectral line parameters near 1.863 μm

$\lambda/\mu\text{m}$	isotopologue	ν/cm^{-1}	$S/(\text{cm} \cdot \text{molecule}^{-1})$	E''/cm^{-1}
1.863	HDO	5 365.698 6	4.358×10^{-25}	29.808 6
	H ₂ ¹⁷ O	5 365.860 6	9.610×10^{-24}	23.773 5
	H ₂ ¹⁶ O	5 365.934 3	3.391×10^{-23}	508.812 1
	H ₂ ¹⁸ O	5 366.381 2	1.930×10^{-24}	550.450 8

射光经光电探测和跨阻放大后,由采集卡完成数据采集,并传输至上位机进行存储与处理。

实验中,激光器工作温度稳定在 28.1℃,电流调谐系数为 0.035 nm/mA,扫描电流为 90~102.5 mA,对应 0.437 5 nm 的波长扫描宽度。结合目标谱线位置标定后,实际扫描波数为 5 366.60~5 365.34 cm⁻¹,可覆盖表 1 所列目标吸收峰及其两侧基线区域。

为兼顾小体积气室和长光程吸收需求,本文采用小型化 Herriott 型多通池作为长光程吸收单元。多通池光路采用基于几何光学的光线追迹方法设计,以反射镜曲率半径、镜间距、入射位置和入射角为主要参数,对反射镜表面光斑分布、反射次数和总光程进行优化。设计过程中要求各反射光斑均位于腔镜有效反射区域内,并避免相邻光斑交叠。多通池主要技术参数见表 2。

实验前对检测气路进行抽真空和密封检查,以保证系统处于不漏气状态。标准水样定量注入并汽化后,水汽进入检测气路和吸收池,系统

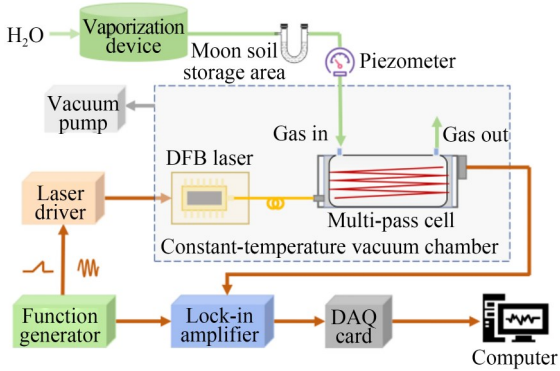


图 2 低压水汽及氢氧同位素 TDLAS/WMS 检测实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of TDLAS/WMS experimental setup for low-pressure water vapor and hydrogen-oxygen isotope detection

表 2 多通池主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of multipass cell

Parameter	Value
Mirror type	concave mirror
Mirror diameter	25.4 mm
Radius of curvature	200 mm
Mirror reflectivity	> 98%
Base length	57.2 mm
Clear aperture	1 mm
Spot pattern	Seven-ring non-overlapping spot pattern
Number of passes	210
Effective absorption path length	12 m

内压力逐渐建立并趋于平衡。实验过程中采用量程为 1 333.22 Pa、测量精度为 0.2% 的真空计实时监测系统压力,并将实测压力用于水汽压力标定和谱线拟合分析。原始数据经本底扣除后,依次进行数字锁相解调、基线拟合和归一化处理,得到归一化二次谐波信号,并进一步用于水汽分压和同位素 δ 值的定量求解。实验选取 4 种标准水样,如表 3 所示,水汽压力覆盖 100~1 100 Pa,用于建立系统输出与水汽压力之间的响应关系,并在固定压力条件下开展不同标准水样的同位素标定。

在保持扫描范围和扫描频率不变的条件下,对不同调制幅值下的归一化二次谐波信号进行了比较,并综合考察了各谱线通道的谐波响应强

表 3 4 种标准水样的 δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ 值
Tab. 3 δD , $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$ of four standard waters

standard water samples	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^{17}\text{O}/\text{‰}$
1	-433.3 ± 0.9	-55.73 ± 0.08	-29.43 ± 0.08
2	-144.0 ± 0.8	-19.13 ± 0.07	-10.02 ± 0.08
3	-1.7 ± 0.4	-0.15 ± 0.07	-0.08 ± 0.06
4	$+642.4\pm1.5$	78.99 ± 0.25	41.71 ± 0.13

度、相邻谱线分离程度以及拟合残差变化。结果表明,当调制正弦信号单边幅值取 0.015 V 时,归一化二次谐波信号在保证弱同位素通道响应幅值的同时,可减小过调制引起的线型展宽及相邻谱线串扰,因此最终确定工作参数为:扫描锯齿波为 3.6~4.1 V,扫描频率为 500 Hz,调制正弦信号单边幅值为 0.015 V,调制频率为 90 kHz。在该参数条件下,系统能够获得稳定的弱信号响应,并满足后续谱峰拟合需求。

对采集得到的原始透射信号进行数字锁相解调,采用二次谐波正交解调、低通滤波和相位旋转投影方法得到二次谐波信号 $S_{2f}(\nu)$;随后在无吸收区域内对原始透射信号进行三阶多项式拟合,得到基线 $S_{0f}(\nu)$;进一步计算归一化二次谐波信号 $R_{2f/0f}(\nu)$,并以此作为后续联合拟合输入。在此基础上,根据 HITRAN 参数和实测温压条件计算各候选谱线的参考峰形,并对同位素交叠吸收峰进行联合拟合。

为验证交叠谱峰联合拟合方法对归一化二次谐波信号拟合效果,图 3 给出了 4 号标准水样在 1 100 Pa, 36 °C 条件下单组代表性单次扫描数据的拟合结果及残差。由图 3 可见,拟合曲线能够复现实验曲线的主峰位置、弱峰响应和整体线形。本文对其他压力条件和不同标准水样的数据均采用相同方法进行处理,仍可获得一致的拟合结果,相对残差均控制在 ± 0.05 范围内。上述结果说明,该模型可用于当前工作波段和实验参数下的交叠谱峰分离,并为后续同位素通道积分面积提取与标定分析提供基础。

3.3 标定结果分析

为验证系统在低压条件下对水汽量及氢氧同位素信息的定量测量能力,围绕水汽量响应标定和同位素比值标定两方面开展研究。首先,在腔体温度控制为 36 °C 的条件下,通过改变同种标准水样形成的水汽压力,建立各同位素通道归一

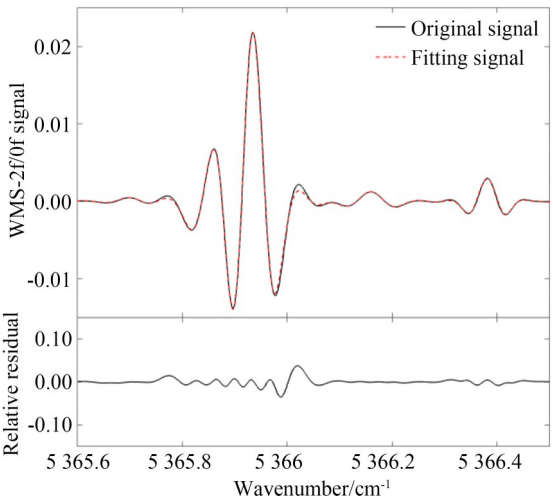


图 3 4 号标准水样在 1 100 Pa, 36 °C 条件下单组归一化二次谐波信号的代表性拟合结果及残差
Fig. 3 Representative fitting results and residuals of normalized 2f signals for standard water No. 4 at 1 100 Pa and 36 °C

化二次谐波信号幅值与水汽压力之间的响应关系,以评估系统对水汽量变化的线性响应能力。在此基础上,进一步更换不同标准水样,构建弱同位素与主同位素拟合积分面积比与标准真值之间的标定关系,实现 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的定量求解。

图 4 给出了 4 号标准水样在 36 °C 条件下的各同位素通道归一化二次谐波信号幅值随水汽压力变化的响应结果。可以看出,随着水汽压力升高,各通道信号幅值整体增大,而谱线峰位和整体峰形未出现明显变化。其他标准水样条件下也呈现相同变化趋势,表明系统响应具有一致性。

在此基础上,对各同位素通道的拟合积分面积与气压关系进行线性拟合,其中 4 号标准水样条件下的结果见图 5 和表 4。由于该组实验采用

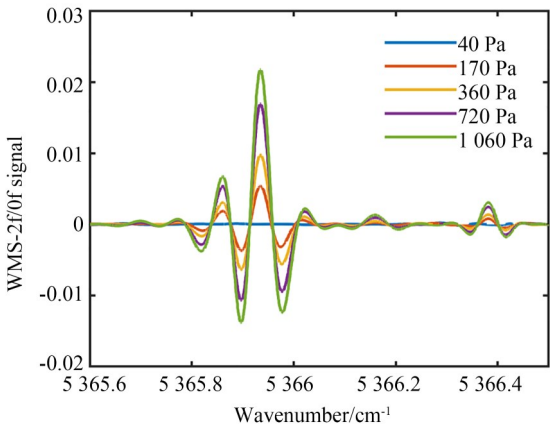


图4 36℃条件下4号标准水样各同位素通道归一化二次谐波信号幅值随水汽压力变化的响应

Fig. 4 Responses of normalized second-harmonic signal amplitudes of different isotopic channels to water vapor pressure for standard water sample No. 4 at 36 °C

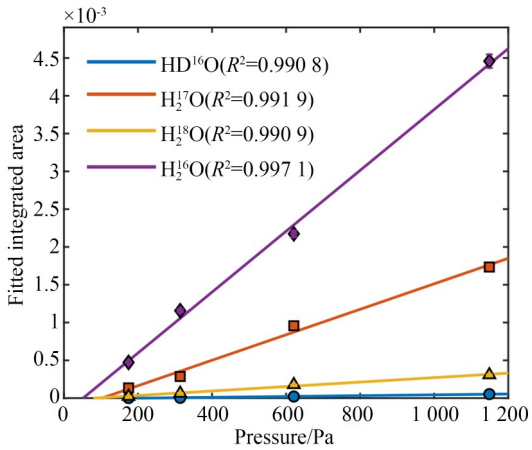


图5 36℃条件下4号标准水样各同位素通道拟合积分面积与水汽压力的线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting results between fitted integrated areas and water vapor pressure for different isotopic channels of standard water sample No. 4 at 36 °C

表4 4号标准水样条件下水汽量响应线性结果汇总
Tab.4 Summary of the linear results of water vapor quantity response under the condition of standard water sample No. 4

Isotopologue	Linear equation	R^2
$H_2^{16}O$	$y=4.027\times10^{-6}x-2.083\times10^{-4}$	0.997 1
$H_2^{17}O$	$y=1.685\times10^{-6}x-1.732\times10^{-4}$	0.991 9
$H_2^{18}O$	$y=2.950\times10^{-7}x-2.394\times10^{-5}$	0.990 9
HDO	$y=5.494\times10^{-8}x-1.135\times10^{-5}$	0.990 8

同一标准水样,样品同位素组成保持不变,因此图5中的线性关系主要反映各通道对水汽含量变化的响应特性。4个通道的相关系数 R^2 均大于0.99,表明各同位素通道的拟合积分面积在100~1 100 Pa内对水汽压力变化呈稳定线性响应,同时也表明未有明显的压力相关非线性偏离。拟合直线的非零截距主要来源于残余基线、解调零点偏置、谱线交叠串扰及背景残余水汽等因素。由于后续定量分析采用经验标定关系,该截距已包含在线性映射系数中,因此在标定范围内不会单独作为额外独立误差项影响反演结果;但在低压端直接外推时,非零截距会增大弱同位素通道面积比的不确定性。基于此,后续同位素标定选取固定压力条件进行,以减小总量变化对面积比反演的影响。

在完成水汽量标定后,进一步选取不同标准水样,在1 060 Pa条件下开展同位素标定实验,使各通道之间的差异主要反映样品同位素组成变化。依据公式(9)和公式(10)完成各目标谱线参数拟合,并进一步求得其拟合积分面积。图6给出了不同标准水样在1 060 Pa条件下弱同位素通道与 $H_2^{16}O$ 通道拟合积分面积比和标准真值之间的线性拟合结果。可以看出, $HDO/H_2^{16}O$, $H_2^{17}O/H_2^{16}O$ 和 $H_2^{18}O/H_2^{16}O$ 拟合积分面积比均随标准真值增大而呈单调增加趋势,说明在恒定水汽分压条件下,拟合积分面积比能够反映不同标准水样之间的同位素组成差异。

其中,3个通道中最左侧 δ 值标准水样点均表现出向拟合直线下方偏离的现象,该偏离与弱同位素信号幅值受背景项影响更明显有关:当拟合积分面积较小时,残余基线、邻近 $H_2^{16}O$ 强线旁翼、局部干涉项以及背景残余水汽等因素在面积比中的相对贡献增大,从而使该区间出现偏离拟合直线的现象。进一步比较各通道可见,其中 $H_2^{18}O/H_2^{16}O$ 通道相关性最高, $H_2^{17}O/H_2^{16}O$ 通道次之, $HDO/H_2^{16}O$ 通道的离散程度高于氧同位素通道,其相关系数 R^2 为0.963 9。这主要与本文1.863 μm 波段下HDO目标谱线弱,且更易受到邻近谱线交叠和气路残余效应影响有关。总体来看,3个比值通道在现有标准水样范围内保持近似线性响应,可用于建立 δ 值的线性经验标定关系。

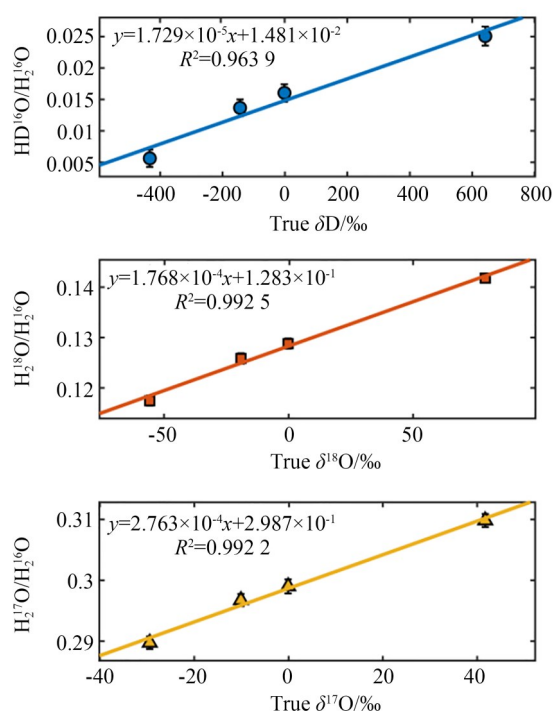


图6 1 060 Pa 条件下不同标准水样弱同位素通道与 H_2^{16}O 通道拟合积分面积比与标准 δ 值的线性关系
Fig. 6 Linear relationships between fitted integrated area ratios of weak isotopologue channels to the H_2^{16}O channel and reference δ values for different standard water samples at 1 060 Pa

为评价系统稳态测量的短时稳定性,对不同水样低压条件下同位素时间序列进行了Allan方差分析。图7给出了4号标准水样在340 Pa低压条件下各同位素通道的Allan偏差结果。可以看出,3个同位素通道的Allan偏差均随积分时间增加呈现先下降后上升的变化规律。前段曲线接近白噪声参考斜率 $\tau^{-1/2}$,说明系统短时噪声主要由白噪声主导,积分平均能够有效降低随机波动;当积分时间进一步增大后,曲线逐渐偏离 $\tau^{-1/2}$ 参考线并在最优积分时间附近达到最小值,随后再次升高,表明长期平均已受到相关噪声和低频漂移限制。 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 通道的最优积分时间分别为18,23和20 s,对应最小Allan偏差分别为2.015‰,3.636‰和1.317‰,其他标准水样条件下的Allan偏差结果与4号标准水样变化趋势一致,表明系统在20 s左右可实现最佳稳态测量精度。

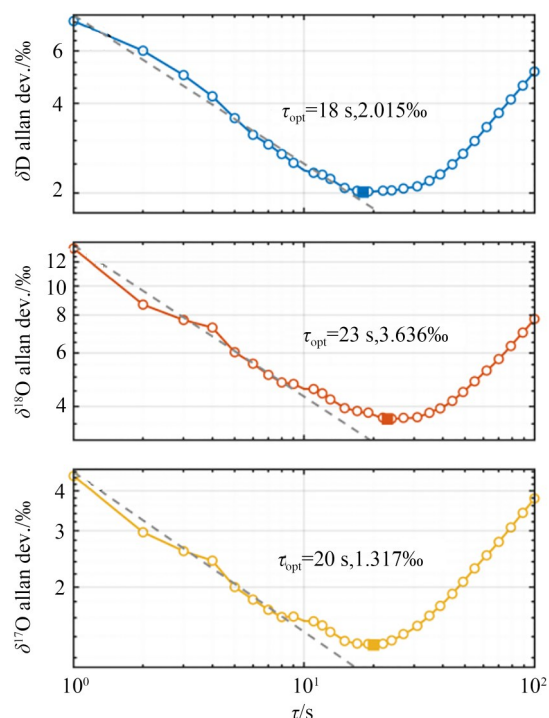


图7 340 Pa条件下4号标准水样 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 通道的Allan偏差结果

Fig. 7 Allan deviation results of δD , $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$ channels for standard water sample No. 4 at 340 Pa

3.4 模拟月壤吸附分馏验证实验

在完成无月壤条件下的系统标定后,进一步采用与3.2节相同的实验装置开展模拟月壤吸附分馏实验。实验前,先将模拟月壤装填于图2所示U型样品区内,并完成气路连接和密封检查,随后对系统进行抽真空处理,以减小残余水汽对后续测量的影响。为降低注样过程中水汽在管壁上的冷凝及记忆效应,气路和汽化单元保持与前述实验一致的加热条件,同时吸收池及真空腔体维持恒温工作状态,以保证目标波段吸收线测量条件稳定。完成背景抽空后,向汽化单元中定量注入标准水样,经加热汽化形成待测水汽。汽化后的水汽在压差驱动下进入样品区,与模拟月壤颗粒表面发生接触、吸附与分馏过程,同时部分水汽继续进入吸收池,形成可供光谱检测的气相样品。原始数据经本底扣除、数字锁相解调、基线拟合和归一化处理后,结合多谱线联合拟合及标定关系,得到 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的动态变化结果。图8给出了4号标准水样在340 Pa模拟月壤参与条件下的10 s滑动平均结果及其波动范围,

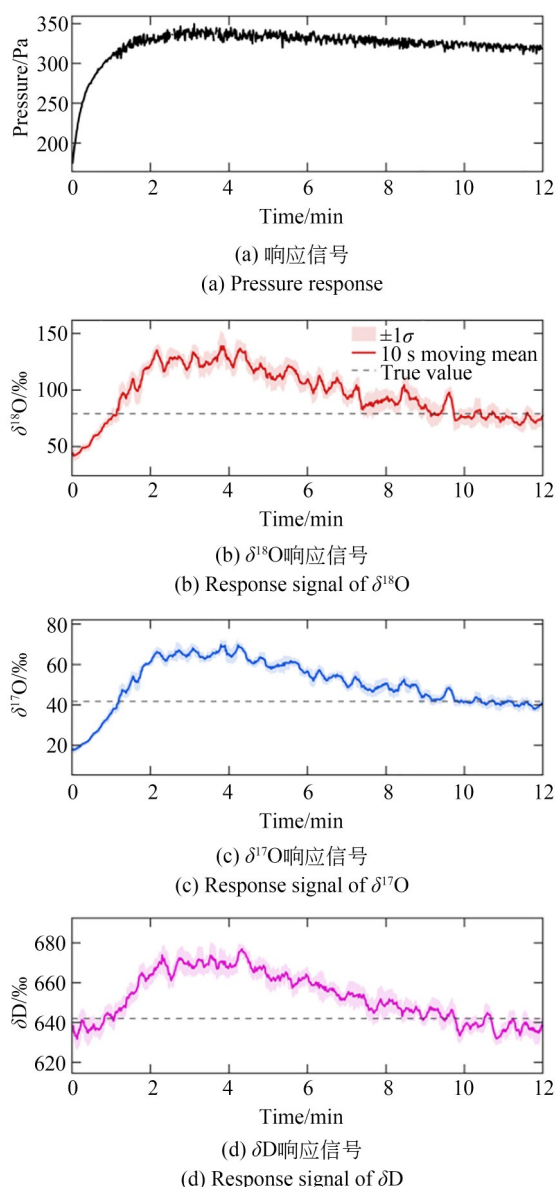


图8 340 Pa模拟月壤吸附分馏条件下4号标准水样的压力及同位素动态响应

Fig. 8 Dynamic responses of pressure and isotopes for standard water sample No. 4 during simulated lunar-soil adsorption fractionation at 340 Pa

用于分析同位素响应过程中的瞬态偏移、波动幅度和后期趋稳过程。

由图8(a)可见,注样后系统总压在前2 min内迅速升高,随后进入缓慢回落阶段,说明水汽在这段时间内完成了由汽化、输运到样品区及吸收池的充填过程。为进一步定量测量该水汽压力建立的响应速度,本文以压力上升段的初始压力和峰值压力为参考,分别确定10%和90%响

应点,并将二者对应时间差定义为10%~90%压力响应时间。由图8(a)计算得到,当前实验条件下的10%~90%压力响应时间为71 s。该结果说明,本文方法能够在分钟量级内捕捉低压水汽释放过程中的压力变化,为“低压、动态检测”表述提供了定量支撑。

与压力响应不同,图8(b)~8(d)所示 δD , $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{17}O$ 均呈现“快速上升—超调—缓慢回落”的变化过程,说明同位素信号受到水汽总量建立、模拟月壤表面吸附分馏及气固交换过程的共同影响。约10 min后,各同位素通道变化速率明显降低,12 min附近基本进入相对稳定状态。实验末尾2 min内, δD , $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{17}O$ 通道均已逐步回归至标准值附近,相对稳态区间均值分别为637.47‰,76.11‰和39.81‰,对应标准差分别为5.60‰,8.49‰和2.79‰,相对于真值的偏差分别为-4.93‰,-2.88‰和-1.90‰。上述结果说明,本文方法能够获得动态过程后期的相对稳定测量结果,并跟踪模拟月壤吸附分馏过程中的同位素动态变化。

在此基础上,为进一步验证本文方法在模拟月壤参与条件下对 δD 的动态测量能力,并评估其小型化工程适用性,开展了与2.731 μm 直接吸收参考系统的同步对比实验。对比实验中,将两套吸收池装置并联接入同一气路系统,对同一标准水样在同一次注样过程中形成的气相样品进行同步测量。两套系统的水汽检测能力及多通池主要工程参数对比如表5所示,其中水汽分压检测下限由实测噪声按 3σ 判据换算得到,用于反映低压水汽检测能力;多通池封装尺寸、重量、有效吸收光程和容积等参数则用于比较两套系统在小体积长光程实现方面的差异。

图9给出了4号标准水样在1 100 Pa条件下两种方法测得的 δD 结果对比。结果表明,两个系统测得的 δD 结果呈现相近的动态变化趋势,短时波动幅度未见明显差异。尽管2.73 μm 直接吸收系统的HDO通道原始吸收裕量约为本文系统的57倍,但本文1.863 μm 波长调制方法仍能够在12 m有效光程条件下跟踪 δD 的动态变化。该结果说明,本文方法具备低压微量水汽同位素动态测量的适用性,并为模拟月壤吸附分馏场景下的小型化检测提供了实验支撑。

表 5 两种检测系统水汽检测能力及多通池主要工程参数对比

Tab. 5 Comparison of water vapor detection capability and key multi-pass cell parameters between two detection systems

Parameter	1. 863 μm WMS system	2. 731 μm DAS system
Dimensions	182 $\times$ 53 $\times$ 53 mm	275 $\times$ 129 $\times$ 103 mm
Weight	2. 98 kg	5. 81 kg
Optical path length	12 m	25 m
Volume	80 cm^3	210 cm^3
Optical path length-to-volume ratio	0. 150 m/ cm^3	0. 119 m/ cm^3
Detection limit (partial pressure)	1. 92 Pa	1. 05 Pa

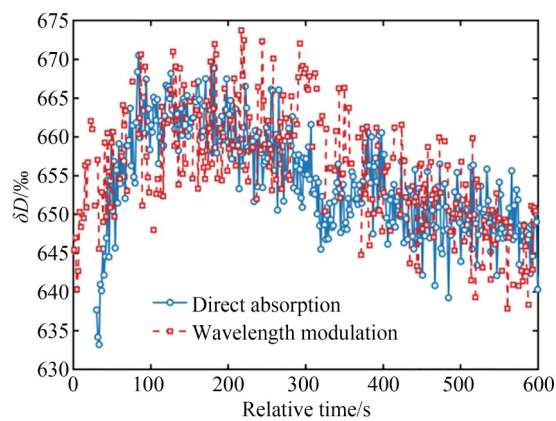


图 9 1. 863 μm , 12 m 有效光程 WMS 方法与 2. 731 μm , 25 m 有效光程 DAS 方法测得的 δD 结果对比

Fig. 9 Comparison of δD results measured by 1. 863 μm WMS with a 12 m path and 2. 731 μm DAS with a 25 m path

4 结 论

针对低压、动态过程中的水汽及其氢氧同位素弱吸收检测需求,本文提出了一种基于波长调制吸收光谱的检测方法。通过优选 5 366 cm^{-1} 目标波段,搭建了采用 1. 863 μm DFB 激光器、12 m 有效光程和 80 cm^3 吸收池的小型化 TDLAS/WMS 检测装置,并建立了基于 2f/0f 归一化、多谱线联合拟合和积分面积比值反演的方法,实现了低压条件下 H_2^{16}O 、 H_2^{17}O 、 H_2^{18}O 和 HDO 的同步检测。

标定与稳定性分析表明,各同位素通道与水汽压力变化的相关系数 R^2 均大于 0. 99, HDO/ H_2^{16}O 、 $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ 和 $\text{H}_2^{17}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ 通道均与标准

真值呈线性关系。Allan 方差分析表明,在 340 Pa 稳态条件下, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 通道的最优积分时间分别为 18、23 和 20 s, 对应最小 Allan 偏差分别为 2. 015‰、3. 636‰ 和 1. 317‰, 表明本文方法能够在低压条件下实现水汽同位素的定量测量,并满足短时稳定测量需求。

模拟月壤实验表明,本文方法能够区分不同标准水样的稳态同位素差异,并连续跟踪吸附分馏过程中的同位素变化。由压力响应曲线线计算得到,当前实验条件下的 10%~90% 压力响应时间为 71 s,为低压、动态检测提供了定量支撑。与 2. 731 μm 、25 m 有效光程直接吸收方法对比,本文检测装置在更短有效光程和更小吸收池容积条件下获得了相近的 δD 变化趋势。综上所述,本文在 12 m 有效光程和 80 cm^3 吸收池容积条件下,实现了低压水汽及其氢氧同位素的同步检测、定量标定和动态变化跟踪,验证了该技术在模拟月壤吸附分馏场景中的适用性。

作者贡献声明:

王立一:测量方法提出,测量实验设计与实施,数据整理与分析,论文构思与撰写;

李想:实验与论文指导,论文审核与编辑写作;

曹乃亮:论文审核与编辑写作,研究指导;

邓昊:测量实验数据分析;

胡海飞、糜小涛:论文指导、论文审核与编辑写作;

阚瑞峰:实验样品与仪器资源提供,研究指导。

参考文献:

- [1] HUI H J, HAN Z Y, SHUAI K. Origin of water in the moon[J]. *National Science Review*, 2024, 11(6): nwae151.
- [2] WANG C, ZHANG G Q, WANG Y H, *et al.* A review of lunar environment and in-situ resource utilization for achieving long-term lunar habitation[J]. *Galaxies*, 2025, 13(5): 103.
- [3] CHEN X S, LI S D, LI J, *et al.* A comprehensive geological engineering site selection for lunar research station and base on a global scale[J]. *Engineering Geology*, 2025, 355: 108225.
- [4] REISS P. Exploring the lunar water cycle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(52): e2321065121.
- [5] GADDIS L R, JOY K H, BUSSEY B J, *et al.* Recent exploration of the moon: science from lunar missions since 2006 [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2023, 89(1): 1-51.
- [6] LIU B, ZENG X G, XU R, *et al.* Lunar surface and subsurface water revealed by Chang'e-6[J]. *Nature Astronomy*, 2025, 9(12): 1776-1784.
- [7] CHAKRABORTY T, SYED T H, HEGGY E, *et al.* On the reachability and genesis of water ice on the Moon[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 211: 392-405.
- [8] ZHU F L, ZHANG W W, WANG L X, *et al.* Modeling and analysis for volatile characteristics of lunar water ice[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 220: 162-172.
- [9] LIN H L, CHANG R, XU R, *et al.* Distribution of lunar surface water dependent on latitude and regolith maturity [J]. *Nature Geoscience*, 2025, 18(11): 1097-1102.
- [10] 刘婧怡, 潘越, 姚路, 等. 小型化中红外直接吸收 CO₂ 光谱仪[J]. *光学 精密工程*, 2024, 32(9): 1330-1337.
LIU J Y, PAN Y, YAO L, *et al.* Mid-infrared laser absorption spectroscopy CO₂ spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(9): 1330-1337. (in Chinese)
- [11] 段政, 孟星星, 李凯亮, 等. 煤热解中痕量乙烯在线激光吸收光谱检测[J]. *光学 精密工程*, 2024, 32(5): 670-677.
DUAN ZH, MENG X X, LI K L, *et al.* Online laser absorption spectroscopy detection of trace ethylene in coal pyrolysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(5): 670-677. (in Chinese)
- [12] MA Y F, LIU Y H, HE Y, *et al.* Design of multi-pass cell with dense spot patterns and its performance in a light-induced thermoelastic spectroscopy-based methane sensor [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(1): 5.
- [13] 张志荣, 夏滑, 孙鹏帅, 等. 基于高灵敏激光吸收光谱技术的稳定气态同位素测量及其应用[J]. *光子学报*, 2023, 52(3): 119-135.
ZHANG ZH R, XIA H, SUN P SH, *et al.* Stable gaseous isotope measurement method based on highly sensitive laser absorption spectroscopy and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(3): 119-135. (in Chinese)
- [14] WANG J, WANG M Z, QIAN F, *et al.* Advances in enhancing the sensitivity of TDLAS for water vapor concentration detection-A review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2026, 153: 106309.
- [15] JIN W L, CAO N L, MA Y F. A highly sensitive TDLAS-based water vapor isotopes sensor using a quantum cascade laser [J]. *Sensors*, 2025, 25(3): 840.
- [16] MAHAFFY P R, WEBSTER C R, CABANE M, *et al.* The sample analysis at Mars investigation and instrument suite [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1): 401-478.
- [17] LI X, CAO N L, *et al.* Miniaturized tunable laser spectrometer for the simultaneous detection of water ice and hydrogen-oxygen isotopes for the Chang'E-7 lunar soil water molecule analyzer[J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(6): 4679-4686.
- [18] ABE H, HASHIGUCHI K, LISAK D, *et al.* A miniaturized trace-moisture sensor based on cavity ring-down spectroscopy[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 320: 112559.
- [19] REID J, LABRIE D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: Comparison of experiment and theory[J]. *Applied Physics B*, 1981, 26(3): 203-210.
- [20] ROTHMAN L S, GORDON I E, BARBER R J, *et al.* HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(15): 2139-2150.
- [21] KLUCZYNSKI P, AXNER O. Theoretical de-

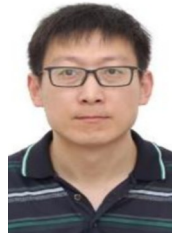
- scription based on Fourier analysis of wavelength-modulation spectrometry in terms of analytical and background signals[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(27): 5803.
- [22] RIEKER G B, JEFFRIES J B, HANSON R K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5546.
- [23] SHAO J, GUO J, WANG L M, *et al.* Self-calibration methodology by normalized intensity for wavelength modulation spectroscopy measurement [J]. *Optics Communications*, 2015, 336: 67-72.
- [24] LEE X, SARGENT S, SMITH R, *et al.* In situ measurement of the water vapor $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratio for atmospheric and ecological applications[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(5): 555-565.
- [25] WEN X F, SUN X M, ZHANG S C, *et al.* Continuous measurement of water vapor D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratios in the atmosphere[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4): 489-500.
- [26] WU T, CHEN W D, FERTEIN E, *et al.* Measurement of the D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, and $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratios in water by laser absorption spectroscopy at $2.73\text{ }\mu\text{m}$ [J]. *Sensors*, 2014, 14(5): 9027-9045.
- [27] YAMANOUCHI T, TANAKA M. Absorption properties of the near-infrared water vapor bands [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1985, 34(6): 463-472.
- [28] WEI P S, CHIU H H, HSIEH Y C, *et al.* Absorption coefficient of water vapor across atmospheric troposphere layer[J]. *Heliyon*, 2019, 5(1): e01145.

作者简介:



王立一(1999—),男,山东德州人,硕士研究生,2020年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事激光吸收光谱检测技术(TDLAS)及其在月球水冰探测的研究。E-mail: wly250@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



曹乃亮(1984—),男,山东泰安人,副研究员,2003年于山东大学获得学士学位,2007年于浙江大学获得硕士学位,2018年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间机构学、深空先进光学有效载荷技术研究。E-mail: nlcao@aiofm.ac.cn