0254-6124/2026/46(5)-1251-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Min, ZHU Yajun, LIU Weijun, YUAN Wei, XU Jiyao. Retrieval and Analysis of OH(3-1) Rotational Temperature at Xinglong Station (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1251–1260. CSTR:32142.14.cjss.2026–0043. DOI:10.11728/cjss2026.05.2026–0043

兴隆台站 OH(3-1) 转动温度的反演与分析*

李 敏[1,2] 朱亚军[1,2] 刘伟军[1]
袁 韦[1] 徐寄遥[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 中间层顶是地球大气响应太阳活动和低层大气波动变化的关键区域, 中间层顶温度是理解中高层大气动力过程和气候变化的重要参数, OH 气辉的转动温度常被用于监测中间层顶区域的长期变化. 为研究该区域温度的长期变化, 使用中国兴隆台站 (40°24′N, 117°35′E) 地基红外光谱仪 (Ground-Based Infrared Spectrometer, GBIS) 在 2017−2024 年的 OH(3-1) 气辉光谱数据, 通过多光谱全局优化拟合算法反演得到 OH 气辉的转动温度. 研究发现, OH(3-1) 转动温度在 2017−2024 年年平均转动温度平均值为 199.3 K, 且呈现出显著的季节性变化特征, 表现为冬季温度高、夏季温度低, 年周期振幅约为 11.6 K, 为主导季节振荡成分; 其年际变化与太阳活动变化具有良好的对应关系, 夏季和冬季平均温度均呈上升趋势, 其中冬季增温速率明显高于夏季. 研究表明, 兴隆地区中间层顶温度变化受到太阳活动和大气动力过程的共同调制, OH(3-1) 转动温度可作为监测中间层顶长期温度变化的重要指标.

关键词 OH(3-1) 转动温度, GBIS, 多光谱全局优化拟合算法, 反演

中图分类号 P351

Retrieval and Analysis of OH(3-1) Rotational Temperature at Xinglong Station

LI Min[1,2] ZHU Yajun[1,2] LIU Weijun[1]
YUAN Wei[1] XU Jiyao[1,2]

1(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Mesopause is a key region that responds to solar activity and wave perturbations originating from the lower atmosphere. Temperature in this region is an essential parameter for understanding the dynamical processes and climate change in the middle and upper atmosphere. Rotational tempera-

* 国家自然科学基金项目 (42174212) 和中国子午工程、太阳活动与空间天气全国重点实验室专项研究基金项目共同资助
2026-02-24 收到原稿, 2026-06-13 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ture of OH airglow is widely used to monitor long-term temperature variations near the mesopause. To investigate the long-term temperature variability in this region, OH(3-1) airglow spectra obtained by a Ground-Based Infrared Spectrometer (GBIS) at Xinglong Station (40°24′N, 117°35′E), China, from 2017 to 2024 were analyzed. The OH rotational temperature was retrieved using a multispectral global optimization fitting algorithm. The reliability of the retrieved temperatures was verified through comparisons with independent measurements from the TIMED satellite and the co-located SpectroMeter of Atmospheric RadiaTion (SMART), showing overall good agreement. The results indicate that the average of annual OH(3-1) rotational temperature during 2017–2024 was 199.3 K and exhibited pronounced seasonal variability, characterized by higher temperatures in winter and lower temperatures in summer. Lomb-Scargle spectral analysis identified the annual oscillation as the dominant periodic component, with an average amplitude of approximately 11.6 K. Furthermore, the interannual variation of the annual mean temperature showed good agreement with changes in solar activity, while both summer and winter mean temperatures exhibited increasing trends throughout the study period, with winter temperatures increasing more rapidly than summer temperatures. These findings suggest that the temperature variability in the mesopause region above Xinglong is jointly influenced by solar activity and atmospheric dynamical processes. The long-term OH(3-1) rotational temperature observations presented in this study demonstrate the capability of GBIS measurements for monitoring long-term temperature variations in the mesopause region and provide valuable observational evidence for understanding the response of the middle and upper atmosphere to external forcing and dynamical processes.

Key words Rotational temperature of OH(3-1), GBIS, Multispectral global optimization fitting algorithm, Retrieval

0 引言

中间层与低热层 (Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT) 区域是地球大气能量和物质耦合的关键区域, 其温度变化反映了来自太阳活动和低层大气波动的共同作用, 是表征该区域热力与动力过程以及长期气候变化的关键物理量. 研究该区域温度的长期演化, 对于理解大气动力过程和气候效应具有重要意义. OH 气辉是中高层大气中最重要的气辉辐射之一, 其发射峰值高度位于 87 km 左右, 厚度约 8 km[1], 是研究 MLT 区域长期温度变化特征和规律的重要示踪物.

在局地热力学平衡假设下, OH 气辉的转动温度与热力学温度一致, 通过夜间测量 OH(3-1) 带气辉来反演转动温度, 已被广泛用于中间层顶区域温度的长期监测[2–6]. 近年来, 多个地面观测台站已积累了长期的 OH 气辉观测数据, 为揭示 MLT 区域温度的长期趋势、太阳活动响应及重力波活动等特征提供了重要的数据支持. 例如 Bittner 等[2] 基于德国 Wuppertal 站 2000 多个夜间观测数据研究了中层顶温度的短期和长期变化特征, 并指出长周期和短周期振荡对太阳活动的响应方向相反. Bittner 等[3] 分析了 18 年 OH(3-1) 气辉转动温度的长期变化, 指出季节分量的振幅和相位在测量期间相对稳定, 而年平均温度与波动活动则呈现显著的长期甚至年代际变化. Offermann 等[4] 对德国多站 1988－2008 年的中层大气温度与风场资料进行分析, 揭示了其长期趋势及太阳周期响应特征. French 等[5] 基于南极 Davis 站冬季 24 年的 OH 气辉观测数据, 分析了中间层顶区域的长期温度趋势、太阳活动响应和温度残差变率.

进一步的研究显示, MLT 区域温度的长期变化并非简单的线性趋势主导, 而是由多时间尺度过程共同作用的结果. Kalicinsky 等[6] 基于 Wuppertal 站 1988－2015 年的 OH(3-1) 转动温度观测数据, 通过对比线性趋势与长周期振荡模型, 发现该站点的转动温度长期变化源于约 25 年的长周期振荡与 11 年太阳周期的共同作用. 随后, Kalicinsky 等[7] 基于该站点 1988－2022 年的 OH(3-1) 转动温度观测数据, 将这一振荡的周期精确为 22.2 年, 并确认其与 11 年太阳周期共同控制了温度的长期演变, 从而解释了基于不同观测时段会得出不同线性趋势的原因.

除了长期趋势外, 波动活动同样在 MLT 温度变

化中发挥关键作用. Bittner 等[8] 通过多站 OH 观测数据证实, 行星波、潮汐波及重力波等动力过程对 MLT 温度场具有显著影响. Kalicinsky 等[9] 基于 Wuppertal 站 30 多年 OH(3-1) 气辉转动温度的观测数据, 分析了中层顶区域中周期大于 2 天的周期性温度波动, 特别是与行星波相关的波动. Singh 等[10] 通过观测 OH(3-1) 气辉的强度和转动温度, 研究了 MLT 区域的大气波动, 特别是重力波 (GWs) 和潮汐. 上述研究表明, MLT 温度的短期至年代际变化均与大气波动过程密切相关, 波动过程通过能量与动量的垂直耦合调制大气的热结构.

中国基于 OH 气辉的观测起步较晚. 2011 年 Zhu 等[11] 在兴隆台站建立了大气气辉光谱探测仪 (SpectroMeter of Atmospheric RadiaTion, SMART), 实现了 OH 气辉的野外长期观测, 并反演了其转动温度, 为后续研究奠定了基础. 自 2016 年 4 月起, 兴隆台站利用地基红外光谱仪 (Ground-Based Infrared Spectrometer, GBIS) 持续观测 OH(3-1) 气辉, 至今已积累 8 年的完整数据. 本文使用多光谱全局最优拟合算法反演了兴隆台站 2017−2024 年的 OH(3-1) 转动温度, 通过最小二乘拟合算法提取了年、半年和 1/3 年周期的振幅和相位参数, 分析了年平均温度与太阳射电通量 $F_{10.7}$ 指数之间的相关性, 以及各周期分量的年际变化趋势, 并比较了不同季节的温度 (冬季和夏季) 年际变化趋势, 探讨了太阳活动与动力学过程对中国中纬度地区中间层顶区域温度的共同作用和影响. 研究结果将为理解 MLT 区域温度的长期变化规律及动力学响应提供新的观测依据.

1　转动温度反演

1.1　气辉数据

OH 气辉发射层位于中间层顶区域, 臭氧与原子氢的反应被认为是激发态 OH 分子产生的主要原因[12], 有

$$O_3 + H \rightarrow O_2 + OH^*(+3.32\ \text{eV}). \tag{1}$$

激发态的 OH 分子通过自发跃迁产生不同波段的气辉辐射, 通过光谱仪等设备可实现不同波段气辉辐射的探测. OH 气辉的观测地点位于河北的兴隆台站 (40°24′N, 117°35′E), 自 2016 年 4 月开始使用 GBIS 观测兴隆上空的 OH (3-1) 气辉. GBIS 是一个配备 512 pixel 铟镓砷 (InGaAs) 光电二极管阵列 (PDA) 的多色仪, 其单次曝光可覆盖 1.50～1.60 μm 的光谱范围, 曝光时间为 15 s[13]. 本研究利用 1.515～1.545 μm 波长内的 OH(3-1) P 支发射谱线反演 OH 气辉转动温度[10]. 图 1 所示为 2024 年 12 月 9 日夜间 GBIS 观测得到的一个 OH(3-1) 气辉光谱, 图中黑色曲线代表实际观测得到的光谱, 红色虚线为通过

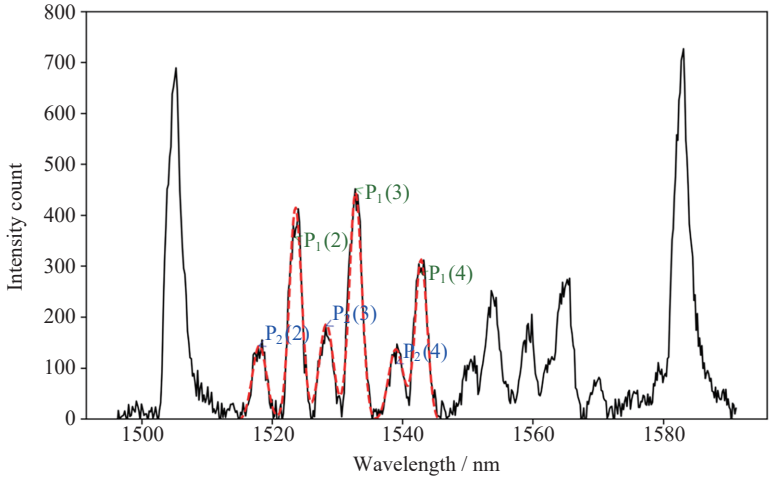


图 1　2024 年 12 月 9 日兴隆台站地基红外光谱仪 (GBIS) 观测的 OH 夜气辉光谱. 黑色曲线表示实际观测得到的光谱, 红色虚线表示通过多光谱全局优化拟合算法得到的结果

Fig. 1　OH nightglow spectrum observed by Ground-Based Infrared Spectrometer (GBIS) at Xinglong Station on 9 December 2024. The black curve represents the actual observed spectrum, and the red dashed line shows the fitting result by using the multispectral global optimization fitting algorithm

多光谱全局优化拟合算法得到的 P_1 支与 P_2 支发射谱线.

1.2 数据处理

在中间层顶高度区域, 由于大气分子间的碰撞频率远大于 OH 激发态的辐射跃迁概率, OH 分子的转动能级分布通过频繁碰撞达到热平衡状态, 即满足局地热力学平衡假设. 则处于激发态的 OH 分子转动量子态的分布符合 Boltzmann 分布, 可以通过转动温度确定局部的动力学温度. 本文利用兴隆台站观测的 OH(3-1) 波段气辉光谱数据, 采用多光谱全局优化拟合算法反演中间层顶区域的 OH(3-1) 转动温度. 该方法的本质是通过非线性最小二乘拟合, 寻找一个参数化的理论光谱模型, 使其与观测光谱达到最佳匹配, 从而从模拟参数中得到温度值. 整个数据处理步骤流程如下.

步骤 1 数据读取与预处理. 获取每个光谱及其对应的时间戳. 由于仪器对不同波长的光强响应存在差异, 在扣除暗电流背景后[13,14], 需要对光谱进行响应率校正.

步骤 2 数据筛选. 设定合理的信号强度阈值, 剔除受到月光、杂散光等干扰或信噪比过低的光谱数据, 确保反演结果的可靠性.

步骤 3 理论光谱模型构建. 在局地热力学平衡假设下, 建立 OH(3-1) 气辉的理论光谱模型. 根据配分函数公式计算 OH 气辉的两种电子态的旋转配分函数, 即

$$Q_{\mathrm{rot}}^{\mathrm{elec}}=\sum_{j}2(2j+1)\exp\left(-\frac{hcE_j}{k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{rot}}}\right). \tag{2}$$

式中, j 为转动角动量量子数, E_j 为激发态转动能级能量, k_{B} 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克 (Planck) 常数, c 为光速, T_{rot} 为转动温度. OH 的发射谱线强度遵循 Boltzmann 分布, 可表示为[15]

$$I_{v',j'-v'',j''}=N_{v'}A_{v',j'-v'',j''}\frac{2\,(2j'+1)}{Q_{v'}\,(T_{\mathrm{rot}})}\exp\left(-\frac{hcE_{j'}}{k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{rot}}}\right). \tag{3}$$

其中, $I_{v',j'-v'',j''}$ 为发射为谱线强度, 下角标 $v^{'}$, $j^{'}$ 和 $v^{''}$, $j^{''}$ 分别表示初始和末态的振动、转动角动量量子数, $N_{v'}$ 为处于振动能级 v' 的分子数, $A_{v',j'-v'',j''}$ 为初末能级自发跃迁的 Einstein 系数, 模型中使用的能级能量和 Einstein 系数均取自 2020 年的 HITRAN 数据库. 模型综合考虑了 P_1 和 P_2 分支的 6 条主要谱线, 由于 GBIS 的仪器函数可近似表示为高斯函数, 观测到的谱线是真实分子谱线与仪器响应的卷积, 其展宽主要由仪器决定, 所以对每条谱线用高斯函数拟合, 其相对强度由 Boltzmann 分布决定, 并与转动温度密切相关.

步骤 4 非线性最小二乘拟合. 采用最小二乘拟合法对观测光谱进行全局最优拟合, 通过迭代优化使理论光谱与观测光谱之间的残差最小化. 拟合参数包括 OH 转动温度、6 条谱线的中心位置、谱线宽度等.

步骤 5 误差估算. 从收敛后的最优拟合参数中直接提取转动温度值, 并根据协方差矩阵计算温度估计的标准误差, 作为反演结果的误差度量.

通过以上处理步骤能够得到 OH(3-1) 气辉的转动温度, 其中步骤 4 的拟合结果如图 1 中红色虚线所示. 因为 GBIS 只能在夜间观测, 且容易受到多云等天气影响, 这导致了数据大量缺失, 简单的算术平均并不可取, 需要采用最小二乘拟合方法来确定年平均温度 T_0, 拟合中包含主要的季节性变化分量, 即年周期、半年周期和 1/3 年周期. Bittner 等[2] 研究表明, 这三个分量是描述 OH(3-1) 气辉转动温度季节性变化的主要成分. 此前已有多项研究采用该方法, 并证明了其有效性[2–4,6,16]. 完整的拟合公式如下:

$$T(t)=T_0+\sum_{i=1}^{3}A_i\cdot\sin\left[\frac{2\pi i}{365.25}\,(t+\phi_i)\right]. \tag{4}$$

式中, T_0 为年平均温度, t 为时间, A_i 和 ϕ_i 分别表示年周期、半年周期和 1/3 年周期的振幅和相位.

2 结果

基于兴隆台站 GBIS 仪器在 2017—2024 年获取的观测数据, 经过 1.2 节所述反演与筛选过程后, 得到如图 2 所示 OH(3-1) 转动温度时间序列. 图中每一个黑色散点表示当日夜间的平均转动温度值.

从图 2 可以看出, OH 气辉转动温度表现出明显的季节性变化特征, 呈现出冬季温度较高、夏季温度较低的规律. 由于仪器故障, 2023 年 12 月的观测数据全部缺失.

为了评估反演结果的可靠性, 使用 TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics, and Dynamics) 卫星搭载的多通道红外辐射计 SABER (Sounding of the Atmosphere using Broad-

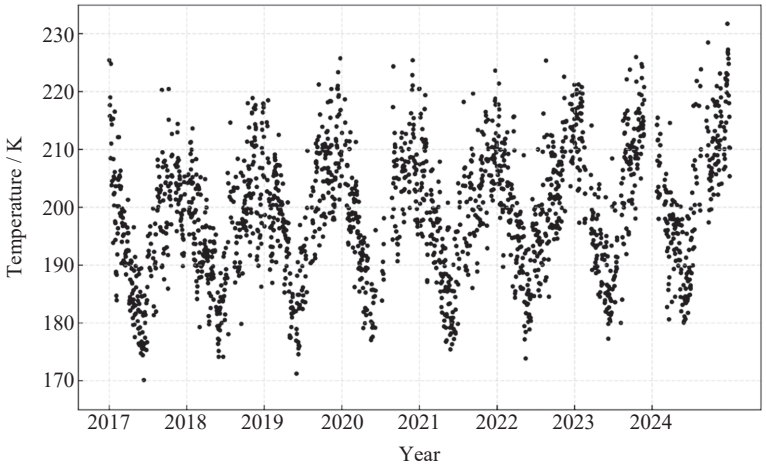


图 2　兴隆台站 2017－2024 年 OH(3-1) 转动温度时间序列. 黑色散点代表每日的夜间平均温度

Fig. 2　Time series of OH(3-1) rotational temperatures observed at Xinglong Station from 2017 to 2024. The black scatter points represent the night-mean temperature

band Emission Radiometry) 观测数据与同台站大气辐射光谱仪 SMART 观测得到的 OH(6-2) 转动温度进行对比分析. 其中由于卫星临边观测与地基 OH 气辉观测在垂直分辨率和物理意义上存在差异, 需要对 SABER 温度廓线进行加权平均处理, 以获得与地基观测对应的 OH 加权平均温度. 图 3 所示为 GBIS 与 TIMED 卫星及同台站 SMART 数据的对比结果.

结果表明, GBIS 反演温度与 TIMED 卫星及同台站 SMART 仪器反演结果总体一致, 其均方根误差 (RMSE) 为 8～12 K. 其中卫星等效温度与地基观测温度的温差基本在 10 K 左右, 这与已有地基和卫星观测之间的对比结果基本一致[17–19], 说明不同观测手段之间的差异处于合理范围内, 从而验证了本文反演方法的可靠性, 所得到的温度数据可用于后续的长期变化特征分析. 需要说明的是, 更为系统的多源数据匹配方法及误差来源分析将在后续研究中进一步开展.

图 4 给出兴隆台站 2017－2024 年间基于全天空气辉成像仪观测数据筛选后得到的月平均有效观测天数分布. 为了保证研究结果的科学性和可靠性, 这里只保留夜间观测时长不低于 4 h 的数据[17].

统计结果表明, 各月份的有效观测天数存在显著的季节性变化特征. 蓝色曲线代表所有夜晚的总观测数, 橙色曲线对应观测时长≥ 4 h 的有效观测夜晚数量. 整体而言, 两条曲线均呈现出冬季数据多、夏季数据少的分布形态, 其中冬季月份 (12 月至次年 2 月) 的有效观测天数普遍较高, 部分月份可达 24 天以上; 而在夏季 (6－8 月), 受多云、降水等天气影响, 数据缺失较为严重, 有效观测天数显著低于其他季节. 该观测天数的季节分布特征与 Kiran 和 Singh[17] 的夜间观测规律一致.

因为数据缺失导致温度的时间序列不均匀分布, 所以使用 Lomb-Scargle 谱分析 (LSP) 方法分析数据的周期性, 该方法即使在数据不均匀分布的情况下也能确定时间序列中的显著振荡周期[10,17,20], 分析结果如图 5 所示.

图 5 中的功率谱密度分析结果显示, 年变化为主要周期振荡成分. 为进一步分析数据的长期趋势和变化特征, 利用 1.2 节中的式 (4) 进行最小二乘拟合, 图 6 所示为 2017 年的拟合结果.

图 6 给出 2017 年包含年、半年和 1/3 年周期成分的拟合结果, 以及温度残差序列, 其中包含了丰富的波动信息[21]. 对 2017－2024 年各个年份的数据分别拟合之后, 得到年平均温度 T_0 的变化如图 7 所示, 2017－2024 年 OH(3-1) 年平均转动温度的平均值为 199.3 K.

太阳射电通量 $F_{10.7}$ 是衡量太阳活动的指标, 图 7 对比了兴隆台站年均 OH(3-1) 转动温度 T_0 与年平均太阳射电通量 $F_{10.7}$ 指数的变化趋势*除 2019 年和

* https://spaceweather.gc.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-en.php.

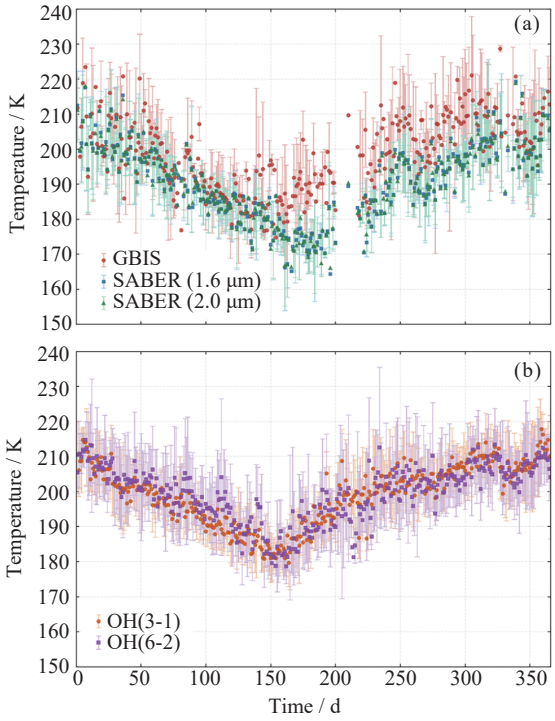


图 3 GBIS 与 TIMED 卫星及同台站 SMART 测得的 8 年平均温度时间序列. (a) OH(3-1) 转动温度与 SABER 加权平均温度时间序列, 其中红色为 GBIS 观测温度, 蓝色为 SABER(1.6 μm) 加权平均温度, 绿色为 SABER(2.0 μm) 加权平均温度, 误差棒表示标准差; (b) OH(3-1) 转动温度与 OH(6-2) 转动温度时间序列, 其中橙色为 OH(3-1) 转动温度, 紫色为 OH(6-2) 转动温度, 误差棒表示标准差

Fig. 3 Time series of 8-year mean temperatures measured from GBIS, the TIMED satellite, and the co-located SMART spectrometer. (a) The OH (3-1) rotational temperature and SABER weighted mean temperatures: red indicates GBIS observed temperature, blue indicates SABER (1.6 μm) weighted mean temperature, and green indicates SABER (2.0 μm) weighted mean temperature. Error bars represent standard deviations. (b) the OH(3-1) rotational temperature and OH(6-2) rotational temperature: orange indicates OH(3-1) rotational temperature, purple indicates OH(6-2) rotational temperature. Error bars also represent standard deviations

2020 年之外, 转动温度与太阳射电通量存在很好的变化一致性, 受太阳活动的影响显著[6,7]. 通过分析 2019 年和 2020 年月平均数据可以发现, 2019 年 9 月和 2020 年 8 月中间层顶温度偏高 6～8 K, 是导致

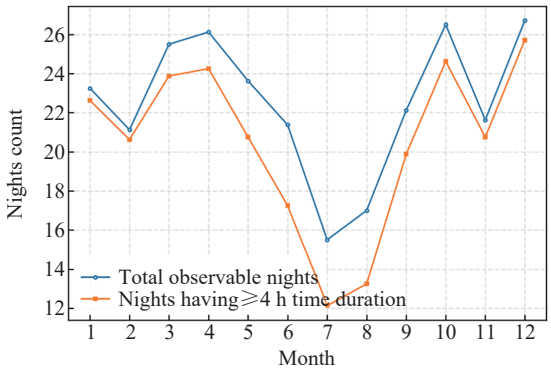


图 4 兴隆台站 OH(3-1) 气辉转动温度有效观测天数月平均分布. 蓝色曲线代表所有夜晚的总观测数, 橙色曲线对应观测时长 ≥4 h 的有效观测夜晚数量

Fig. 4 Monthly distribution of the average number of valid observational nights for OH(3-1) rotational temperature measurements at Xinglong Station. The blue curve represents the total number of nights observed, and the orange curve corresponds to the number of valid nights with an observation time ≥4 h

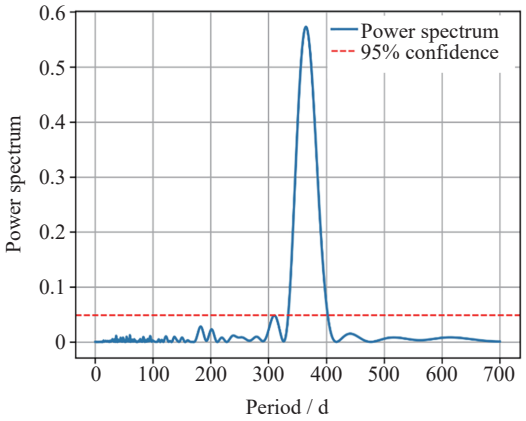


图 5 OH(3-1) 转动温度的 LSP 周期分析结果. 蓝色曲线表示信号的功率谱, 红色虚线为 95% 置信水平

Fig. 5 Lomb-Scargle Periodogram (LSP) results for the OH(3-1) rotational temperature time series. The blue curve represents the power spectrum of the signal, and the red dashed line indicates the 95% confidence level

2019 年和 2020 年年平均温度异常偏高的主要原因.

图 8 给出了根据式 (4) 得到的 2017－2024 年周期分量的相位和振幅的变化趋势. 其中, 图 8(a) 为 2017－2024 年振幅的年均变化趋势, 其中年周期振幅约为 11.6 K, 半年周期振幅约为 2.5 K, 1/3 年周期振幅约为 2.3 K, 年周期的振幅明显高于其他周期分量,

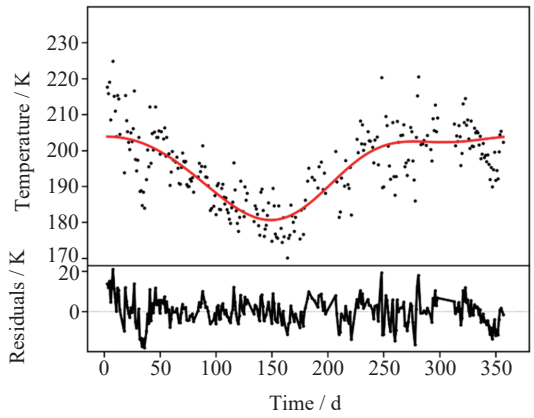


图 6　2017 年 OH(3-1) 转动温度的拟合结果. 黑色圆点代表每一天的日均温度值, 红色曲线为对应的拟合结果. 黑色折线为温度残差, 即实际温度与拟合值的差值

Fig. 6　Fitting result of the OH(3-1) rotational temperature in 2017. The black dots represent the daily mean temperature for each day, and the red curve shows the corresponding fitting result. The black polyline is the temperature residual, *i.e.*, the difference between the measurement and the fitted value

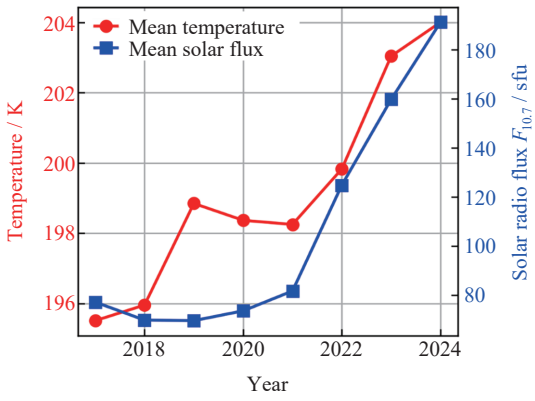


图 7　2017−2024 年兴隆台站 OH(3-1) 年平均转动温度和年均 $F_{10.7}$ 指数. 图中红色实心圆点代表 OH 气辉的年均转动温度, 蓝色实心方点代表 $F_{10.7}$ 指数年均值

Fig. 7　Annual mean OH(3-1) rotational temperature and annual mean solar radio flux index $F_{10.7}$ at Xinglong Station from 2017 to 2024. The solid red circles in the figure represent the annual mean rotational temperature of the OH airglow, and the solid blue squares represent the annual mean $F_{10.7}$ index

表明年周期为中间层顶区域温度变化的主导季节分量. 相位变化如图 8(b) 所示, 相位参数反映了周期振荡在时间轴上的平移量, 因此可用于指示温度峰值出

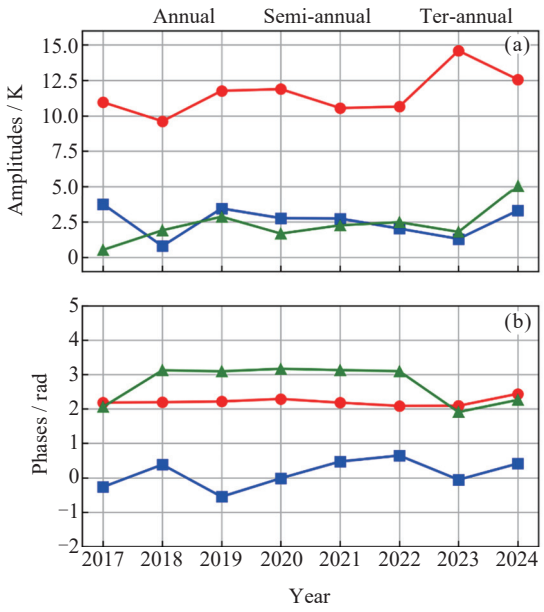


图 8　2017−2024 年 OH(3-1) 转动温度各周期分量振幅和相位变化. (a) 2017−2024 年 OH(3-1) 转动温度年周期、半年周期和 1/3 年周期分量年均振幅变化, (b) 对应各周期分量的年均相位变化. 红色表示年周期成分, 蓝色表示半年周期成分, 绿色表示 1/3 年周期成分

Fig. 8　Variation of amplitude and phase of OH(3-1) rotational temperature in each period from 2017 to 2024. (a) Annual variations of the mean amplitudes of the annual, semi-annual, and ter-annual components of the OH(3-1) rotational temperature from 2017 to 2024. (b) Corresponding annual mean phase variations of each periodic component. Red dot line represents the annual component, blue square line represents the semi-annual component, and green triangle line represents the ter-annual component

现的季节位置. 年周期相位约为 2.2 rad, 对应温度峰值出现在 11 月下旬左右; 半年周期约为 0.12 rad, 对应峰值出现在 2 月中旬左右; 1/3 年周期相位约为 2.7 rad, 对应峰值主要出现在秋末至初冬时段. 从图中可以看出, 2017−2024 年各周期分量的相位均未表现出明显的系统性变化, 说明该区域中间层顶温度的季节结构在该时段内保持相对稳定.

此外, 为探究 OH(3-1) 气辉转动温度的季节变化特征, 分别计算了每年的夏季 (6−8 月) 和冬季 (12 月至次年 2 月) 的平均温度. 图 9 给出了 2017−2024 年季节平均温度的变化趋势.

由于 2023 年 12 月数据全部缺失, 所以 2023 年

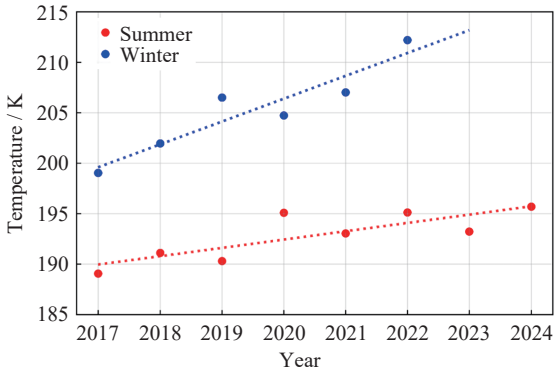


图 9 2017−2024 年季节平均温度变化. 红色散点代表夏季年平均温度, 蓝色散点代表冬季年平均温度, 虚线为线性拟合结果

Fig. 9 Interannual variation of the seasonal mean OH (3-1) rotational temperatures from 2017 to 2024. The red scatter points represent the annual mean temperature in summer, the blue scatter points represent the annual mean temperature in winter, and the dashed line is the linear fitting result

和 2024 年的冬季不纳入计算中. 分析结果显示, 夏季和冬季的年均温度均呈现上升趋势, 与图 5 中的年际变化分析结果一致. 夏季温度的增长率为 0.82 $K\cdot a^{-1}$, 冬季温度的增长率为 2.26 $K\cdot a^{-1}$, 冬季的增温幅度约为夏季的 2.76 倍.

3 讨论与结论

基于兴隆台站 2017−2024 年夜间 OH(3-1) 气辉的长期观测数据, 使用多光谱全局优化拟合算法反演得到其转动温度序列. 结果表明, OH(3-1) 转动温度序列呈现出夏季温度低、冬季温度高的显著季节变化特征, 这种季节变化与中间层顶区域以重力波驱动为主的大尺度环流等动力学过程密切相关[22]. 在夏季, 剩余环流导致该高度的大气以整体上升运动为主, 绝热膨胀过程引起大气冷却, 使温度降低; 而在冬季, 下沉运动占主导, 绝热压缩加热作用增强, 从而导致温度升高[23]. 此外, 年平均温度变化趋势与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 存在明显的相关性, 2017−2024 年, 太阳活动水平总体呈现上升趋势, 太阳辐射不断增强提高了中高层大气对辐射能量的吸收效率, 从而对中间层顶区域产生增温作用. 中间层顶的温度变化不仅受太阳活动调控, 还受到温室气体 (例如 CO_2) 增加所引起的辐射冷却效应的共同影响[4,24,25]. 兴隆台站 OH 气辉转动温度的变化趋势可能是太阳辐射增强、温室气体辐射冷却以及中间层顶动力过程 (例如重力波驱动的剩余环流) 共同作用的结果. 其中, 太阳活动在短时间尺度内对温度变化具有主导调制作用, 而温室气体的影响更可能体现在更长时间尺度的缓慢变化趋势中. 未来仍需结合更长时间序列观测数据及数值模式模拟, 对不同驱动因素的相对贡献进行定量评估.

与 Bittner 等[3]、Offermann 等[4,26] 及 Schmidt 等[27] 的结果相比, 本研究得到的年振幅较低, 这可能是观测点间的纬度差异所导致, 因为年循环的变化幅度在靠近赤道的地区总是弱于靠近极地的地区. 此外, Bittner 等[3]、Offermann 等[26] 指出年振幅可能存在长期微弱减小的趋势. 2017−2024 年, OH(3-1) 转动温度的年振幅、半年振幅及 1/3 年振幅均表现出稳定特征, 且半年振幅和 1/3 年振幅明显小于年振幅, 这与已有的研究结果一致. 需要指出的是, 本文在提取周期分量振幅与相位参数时, 主要关注季节尺度上的年周期、半年周期及 1/3 年周期变化, 未进一步对潮汐成分进行分离. 由于中间层顶区域温度同时受到日潮、半日潮及非迁移潮等动力过程的影响, 部分潮汐信号可能混入周期拟合结果中, 从而对振幅和相位参数产生一定影响, 特别是在不同年份观测时间分布存在差异的情况下, 可能导致相位出现轻微偏移. 因此, 本文得到的周期参数更反映观测条件下的综合季节变化特征. 后续研究可结合更高时间分辨率观测资料以及卫星数据, 对潮汐分量进行进一步分离分析, 以提高周期参数反演的准确性. 本研究观测到的冬季增温速率高于夏季, 这说明不同季节中动力过程对温度变化趋势的作用存在差异, 冬季中纬度区域受重力波驱动的下沉环流主导, 由下沉过程引发的绝热压缩加热与逐年增大的太阳辐射共同作用, 增强了冬季的增温幅度; 而夏季上升运动产生的绝热膨胀冷却则在很大程度上减弱了太阳辐射增温的影响. 因此, 兴隆站的 OH 气辉转动温度的变化趋势可能是太阳辐射、动力学过程与重力波等共同作用的结果, 具体的原因还需结合平流层和中间层环流特征、化学成分变化 (例如 CO_2 与 O_3), 以及太阳活动等外部强迫因素, 利用长期观测和数值模拟加以综合分析和验证.

研究结果表明, 利用 GBIS 的长期连续观测结合多光谱全局最优拟合算法可反演得到的 OH(3-1) 转

动温度, 能够用于中间层顶区域温度的长期监测, 并为大气动力学过程和气候变化研究提供基础数据. 未来, 随着观测数据的持续积累, 不仅可以在更长期时间尺度上揭示温度的周期变化规律, 而且 GBIS 的高时间分辨率能够捕捉中高层大气中的短期波动 (例如重力波和潮汐波), 这将是后续研究的重点方向, 同时也为进一步探讨 MLT 区域的多时间尺度温度变化规律及其动力学机制奠定了坚实基础.

医学伦理　研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] BAKER D J, STAIR-JR A T. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow[J]. *Physica Scripta*, 1988, **37**(4): 611

[2] BITTNER M, OFFERMANN D, GRAEF H H. Mesopause temperature variability above a midlatitude station in Europe[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D2): 2045-2058

[3] BITTNER M, OFFERMANN D, GRAEF H H, *et al*. An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(8/9/10/11): 1147-1166

[4] OFFERMANN D, HOFFMANN P, KNIELING P, *et al*. Long-term trends and solar cycle variations of mesospheric temperature and dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D18): D18127

[5] FRENCH W J R, MULLIGAN F J, KLEKOCIUK A R. Analysis of 24 years of mesopause region OH rotational temperature observations at Davis, Antarctica-Part 1: long-term trends[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(11): 6379-6394

[6] KALICINSKY C, KNIELING P, KOPPMANN R, *et al*. Long-term dynamics of OH* temperatures over central Europe: trends and solar correlations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(23): 15033-15047

[7] KALICINSKY C, KIRCHHOFF S, KNIELING P, *et al*. Long-term variations in the mesopause region derived from OH*(3, 1) rotational temperature observations at Wuppertal, Germany, from 1988-2022[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(7): 3398-3407

[8] BITTNER M, OFFERMANN D, BUGAEVA I V, *et al*. Long period/large scale oscillations of temperature during the DYANA campaign[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1994, **56**(13/14): 1675-1700

[9] KALICINSKY C, REISCH R, KNIELING P. Ground-based observations of periodic temperature fluctuations in the mesopause region with periods longer than 2 d[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2026, **26**(4): 2531-2544.

[10] SINGH R P, PALLAMRAJU D, SURYAWANSHI P, *et al*. Studies of atmospheric waves by ground-based observations of OH(3-1) emission and rotational temperature using PRL Airglow InfraRed Spectrograph (PAIRS)[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2023, **244**: 106039

[11] ZHU Y J, XU J Y, YUAN W, *et al*. First experiment of spectrometric observation of hydroxyl emission and rotational temperature in the mesopause in China[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, **55**(5): 1312-1318

[12] XU J Y, GAO H, SMITH A K, *et al*. Using TIMED/SABER nightglow observations to investigate hydroxyl emission mechanisms in the mesopause region[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D2): D02301

[13] SCHMIDT C, HÖPPNER K, BITTNER M. A ground-based spectrometer equipped with an InGaAs array for routine observations of OH(3-1) rotational temperatures in the mesopause region[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, **102**: 125-139

[14] SAU S, TERRA P, BRUM C G M, *et al*. Retrieval of rotational temperatures from the Arecibo observatory Ebert-Fastie spectrometer and their inter-comparison with Co-located K-Lidar and SABER measurements[J]. *Earth and Space Science*, 2024, **11**(2): e2023EA003323

[15] MIES F H. Calculated vibrational transition probabilities of OH($X^2\Pi$)[J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1974, **53**(2): 150-188

[16] PERMINOV V I, SEMENOV A I, MEDVEDEVA I V, *et al*. Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over mid-latitudinal sites, Zvenigorod and Tory, Russia[J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(12): 2511-2517

[17] KIRAN, SINGH R P. Vertical wave characteristics in the MLT region and its seasonal variations using OH(3-1) brightness and rotational temperature from Ahmedabad (23°N, 72.6°E)[J]. *Advances in Space Research*, 2025, **75**(7): 5484-5498

[18] OBERHEIDE J, OFFERMANN D, RUSSELL-III J M, *et al*. Intercomparison of kinetic temperature from 15 μm CO_2 limb emissions and OH*(3,1) rotational temperature in nearly coincident air masses: SABER, GRIPS[J]. *Geophysical research letters*, 2006, **33**(14): L14811

[19] LIU W J, XU J Y, SMITH A K, *et al*. Comparison of rotational temperature derived from ground-based OH airglow observations with TIMED/SABER to evaluate the Einstein coefficients[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(11): 10069-10082

[20] KALICINSKY C, REISCH R, KNIELING P, *et al*. Determination of time-varying periodicities in unequally

spaced time series of OH* temperatures using a moving Lomb-Scargle periodogram and a fast calculation of the false alarm probabilities[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**(2): 467-477

[21] OFFERMANN D, JARISCH M, DONNER M, *et al*. OH temperature re-analysis forced by recent variance increases[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 2006, **68**(17): 1924-1933

[22] HOLTON J R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, **40**(10): 2497-2507

[23] GARCIA R R, SOLOMON S. The effect of breaking gravity waves on the dynamics and chemical composition of the mesosphere and lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1985, **90**(D2): 3850-3868

[24] ROBLE R G, DICKINSON R E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?[J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, **16**(12): 1441-1444

[25] SOLOMON S C, LIU H L, MARSH D R, *et al*. Whole atmosphere climate change: dependence on solar activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3799-3809

[26] OFFERMANN D, DONNER M, KNIELING P, *et al*. Middle atmosphere temperature changes and the duration of summer[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(6/7/8/9): 437-450

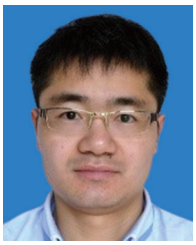
[27] SCHMIDT C, KÜCHELBACHER L, WÜST S, *et al*. OH airglow observations with two identical spectrometers: benefits of increased data homogeneity in the identification of variations induced by the 11-year solar cycle, the QBO, and other factors[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2023, **16**(19): 4331-4356

作者简介



李 敏 女, 2000 年 8 月出生于云南省大理市, 现为中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为中高层大气物理.

E-mail: limin233@mails.ucas.ac.cn



朱亚军（通信作者） 男, 1985 年 8 月出生, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为中高层大气动力学、光化学以及辐射等物理过程和机制、中高层大气地基和卫星探测数的分析和反演算法, 以及被动光学遥感探测仪器的研发等.

E-mail: y.zhu@swl.ac.cn