

中高层 O₂ A 带夜气辉时空分布特征王维佳^{1,2,3}, 罗海燕^{1,2,3}, 李志伟^{1,3}, 熊伟^{1,2,3*}, 麻金继^{3,4**}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, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;⁴安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003

摘要 气辉是中高层大气的重要光化学现象, 其中 O₂ A 带(762 nm)气辉是进行中高层温度探测的最佳观测目标之一。基于 Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System(OSIRIS)在 2008 年间探测的 O₂ A 带夜气辉辐亮度数据, 研究了该气辉全球性时空分布特征。对于夜气辉辐亮度在不同纬度带内的海拔-季度分布, 研究结果表明, O₂ A 带夜气辉辐亮度的高值存在于海拔 95 km 附近, 同时南北半球 A 带夜气辉辐亮度随季节的变化特征刚好相反, 北半球辐亮度高值出现在第二、三季度, 而南半球辐亮度高值出现在第一、四季度。另外, 对于夜气辉辐亮度在不同季度的纬度-经度分布, 发现 O₂ A 带夜气辉在经向分布较均匀, 而纬向分布波动较大。辐亮度高值所在的纬度区间在不同季度具有差异性。研究结果与相关文献相似, 证明了本结果的正确性。同时, 从气辉季度变化规律和影响因素的角度分析, 推断夜气辉的分布具有周年往复的趋势。O₂ A 带夜气辉的时空分布特征对后续仪器设计的研究有重要意义。

关键词 大气光学; O₂ A 带夜气辉; 中高层; 空间分布; 时间分布

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1201001

Spatial and Temporal Distribution of O₂ A-Band Night
Airglow in Mesosphere and Lower ThermosphereWang Weijia^{1,2,3}, Luo Haiyan^{1,2,3}, Li Zhiwei^{1,3}, Xiong Wei^{1,2,3*}, Ma Jinji^{3,4**}¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China;⁴School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China

Abstract Airglow is an important photochemical phenomenon in the mesosphere and lower thermosphere region (MLT region), and O₂ A-band (762 nm) airglow is one of the best observation targets for temperature detection in the MLT region. The radiance data of O₂ A-band night airglow observed by the Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System (OSIRIS) in 2008 were used to study the global spatial and temporal distribution of the night airglow. For the altitude-quarter distribution of night airglow radiance in different latitudes, the results indicated that the highest radiance of O₂ A-band night airglow existed near the altitude of 95 km. In contrast, the seasonal variations of O₂ A-band night airglow in the Northern Hemisphere and the Southern Hemisphere were opposite. To be specific, the highest radiance appeared in the second and third quarters in the Northern Hemisphere but in the

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2020-12-21; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(61975212, 41975033)

* E-mail: frank@aiofm.ac.cn; ** E-mail: jinjima@ahnu.edu.cn

first and fourth quarters in the Southern Hemisphere. The latitude-longitude distribution of night airglow radiance in different quarters shows that the longitudinal distribution of O₂ A-band night airglow is relatively uniform, while the latitudinal distribution fluctuates widely. The latitude region of the highest radiance varies in different quarters. The above results are consistent with those in the relevant literature, which prove the correctness of our results. Furthermore, the analysis of the seasonal variation law of airglow and its influencing factors reveals that the distribution of night airglow has an annual reciprocating trend. The spatial and temporal distributions of O₂ A-band night airglow are of great significance for further research on instrument design.

Key words atmospheric optics; O₂ A-band night airglow; mesosphere and lower thermosphere region; spatial distribution; temporal distribution

OCIS codes 010.1280; 010.1290; 010.1300

1 引言

气辉是中高层大气中重要的光化学现象之一,受大气层内部光化学反应和外部太阳辐射的共同影响,气辉辐射强度受到大气温度和相关大气组分密度控制。同时,它的时间和空间分布受到诸如大气重力波、潮汐波和行星波等多种大气动力学过程调制^[1]。因此,气辉成为大气光化学过程和大气动力学过程的重要示踪剂,对气辉分布特征的研究对于中高层大气的研究非常重要。对气辉的观测方式有采用地面观测装置和随火箭飞行的装置,但对于全球性区域观测来说,装置的空间分辨率和时间分辨率都不够,因此全球性信息观测只有通过星载仪器才能实现^[2]。星载仪器对大气的观测方式有三种:掩星观测、天底观测、临边观测。其中,临边观测兼备了前两种观测方式的优点,既能覆盖全球的辐射信息,又能获取较高的垂直分辨率^[3]。

气辉的形成原理主要是大气成分之间的光化学作用,或直接吸收太阳辐射产生。O₂ A 带气辉是可见及近红外气辉光谱区域内最明亮的气辉样本,并且它存在于宽泛的海拔区间内^[4]。O₂ A 带白天气辉存在于 40~200 km,夜气辉存在于 80~100 km 的薄层^[5-6]。虽然 A 带气辉辐射较强,但由于 70 km 海拔以下存在强烈的自吸收,因此 O₂ A 带气辉的辐亮度无法从地表观测。早期的关于 A 带的火箭测量始于 1968 年,Wallace 等^[7]采用由火箭负载的光度计和光谱仪,在海拔 35~128 km 内首次观测到 O₂ A 带白天气辉,除此之外,他们还观测到了波长为 864 nm 的 O₂ (0-1)带,海拔范围为 59~95 km。但是,直到 1985 年,Skinner 等^[8]使用法布里-珀罗干涉仪在 Dynamics Explorer 2 任务中继续对 A 带进行研究,并做出相关报告。同时,他们想要拓宽 A 带的观测海拔至 250 km,然而部分测量结果被散射光影响,最终无法获取该海拔下的 A 带亮度。随后 1986 年,Torr 等^[9]同样对 A 带气

辉进行了研究。在那之后,A 带气辉开始被用来反演大气中层温度和重要大气成分的密度。1991 年,Heller 等^[10]利用火箭负载的光谱仪测量 A 带气辉,并从中推导了大气中层温度。1992 年,Lopez-González 等^[11]给出了一种利用 A 带夜气辉反演臭氧浓度的方法。对中高层大气中 O₂ A 带气辉进行观测,主要是获取气辉谱线精细光谱结构,从中反演出有效信息,因此要求观测系统具有较高的光谱分辨率。随着干涉仪技术的蓬勃发展,利用法布里-珀罗干涉仪、迈克耳孙干涉仪、光栅光谱仪对 O₂ A 带气辉进行了一系列的观测,并获取了较高质量的大气参数^[12]。如 1995 年发射的 URAS 上的 HRDI,其核心部件是法布里-珀罗干涉仪,获得了可观的 O₂ A 带光谱信息,此光谱信息可用于中高层大气风场、温度场和压力场的探测。关于 O₂ A 带气辉的观测由来已久,并且在高度分布特征上,前人已经做了一定的研究,但是关于该气辉辐射的全球性时空分布特征和三维空间分布特征的研究远远不足,尤其需要对 O₂ A 带气辉辐射的高度分布特征、纬度分布特征及季节变化特征等进行深入研究。

2001 年搭载于 ODIN 卫星上的载荷 Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System (OSIRIS)对中心波长 762 nm 的 O₂ A 带气辉辐亮度进行了临边观测,其核心部件是光栅光谱仪,所获取的 O₂ A 带气辉光谱兼具较高空间分辨率与时间分辨率,为分析 A 带夜气辉的时间空间分布提供了宝贵的数据资源^[13]。本文利用 OSIRIS 在 2008 年间探测的 O₂ A 带夜气辉辐亮度观测数据对气辉的高度变化和季节变化等特征进行了统计分析,并对形成 A 带夜气辉的大气成分数据进行分析,以期进一步明确 O₂ A 带夜气辉的变化趋势和其影响因素。此外,对于后续气辉观测正演模型的建立,乃至气辉观测仪器的设计来说,O₂ A 带夜气辉的高度分布特征、纬度分布特征及季节变化特征能为后续研究提供量化的理论支撑。

2 数据来源与分析方法

研究中所用到的 O_2 A 带气辉数据来源于 OSIRIS 测得的中心波长为 762 nm 的 O_2 A 带夜气辉的辐亮度数据,所用的是 2008 年间的测量结果。ODIN 是 2001 年加拿大发射的太阳同步卫星,卫星轨道高度约为 610 km,搭载了 Sub-Millimeter Radiometer (SMR) 和 OSIRIS 两台仪器^[14]。OSIRIS 的技术核心是光栅光谱仪,由 3 个红外成像仪(红外波段)和 1 个光学光谱仪(紫外到可见波段)组成,其中光学光谱仪观测的波段为 280~800 nm。OSIRIS 的观测方式为临边散射模式,该种观测模式记录大气散射的太阳辐射,能够提供一个更好的地面覆盖和更高垂直分辨率的大气廓线测量。通过 ODIN/OSIRIS 获得的数据具有空间和时间尺度上不规则性。OSIRIS 扫描的数据模式为每天有 14~15 轨,每一轨上进行大约 50 次扫描,每次扫描大约有 50 组数据。OSIRIS 的大多数扫描分为两类:只能到达大约 70 km 高度的平流层模式、可以到达大约 105 km 的中层模式。对于 O_2 A 带气辉来说,平流层模式下的数据属于无效数据,因此必须剔除 OSIRIS 执行平流层模式的扫描数据,尤其值得注意的是,需按单次扫描整组进行数据剔除。剔除无效数据后,可以依据空间尺度和时间尺度重新对数据进行规划。

为了便于进行时空特征分析,在空间尺度上,采用 N32 递减的高斯网格对全球区域进行划分^[15];在时间尺度上,对经纬度同属于高斯网格中同一格的数据按月、季度进行平均,得到网格内的月、季度平均数据;然后建立高斯网格、时间、高度、观测值的多维数据库。

先前的关于 O_2 A 带气辉的海拔分布研究表明,夜气辉主要分布在 80~100 km,为了分析不同区域 O_2 A 带夜气辉的时空分布特征,分别选择北半球高纬度地区、北半球中纬度地区、赤道地区、南半球中纬度地区、南半球高纬度地区作为代表性区域进行分析;同时,为了分析不同季度 O_2 A 带夜气辉的时空分布特征,将全年划分为 4 个季度,对网格内某一海拔上同季度的数据进行统计平均,进而得到 O_2 A 带夜气辉不同季度的全球辐亮度分布特征。

3 时空分布特征统计结果及分析

为了更深入地研究 O_2 A 带夜气辉分布特征,首先从辐射机制的角度进行分析: O_2 A 带气辉的波

段是 759~768 nm,中心波长为 762 nm,产生于氧气第二电子激发态 $O_2(b^1\Sigma)$ 跃迁到基态 $O_2(X^3\Sigma)$ 过程中释放出的特定波长的光^[16]。

如今被广泛接受的形成机制可分为三大类,发生原理如图 1 所示,其中 $O_2(X^3\Sigma)$ 是 O_2 分子基态, $O_2(a^1\Delta)$ 是 O_2 分子第一电子激发态, $O_2(b^1\Sigma)$ 是 O_2 分子第二电子激发态, $O(^1D)$ 与 $O(^3P)$ 是原子氧的激发态, J_{SRC} 、 J_H 、 $J_{Ly-\alpha}$ 、 g 均为光化学反应系数, ϕk_1 、 k_i 为碰撞猝灭率, ν 表征 O_2 分子的振动能级。

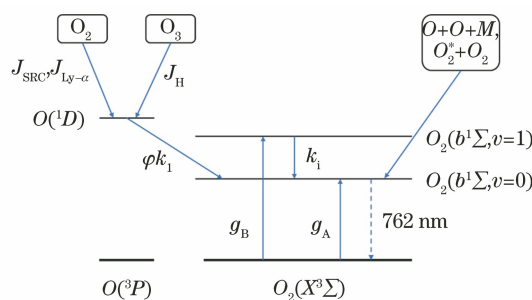
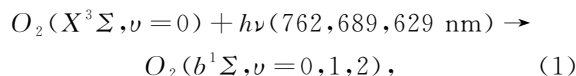


图 1 O_2 A 带气辉生成机制原理图

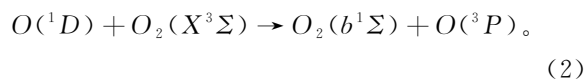
Fig. 1 Formation mechanism schematics of O_2 A-band airglow

第一, $O_2(b^1\Sigma)$ 的第一种生成机制是大气中光子的吸收,反应为

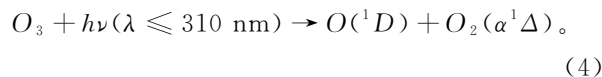
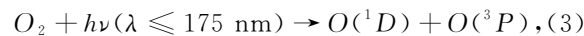


即大气中基态的 O_2 分子吸收 A 带、B 带、 γ 带的光子,其中 γ 带的吸收相对于 A、B 带来说可忽略不计。

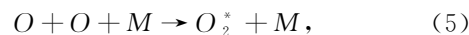
第二, $O_2(b^1\Sigma)$ 的第二种生成机制是将基态 O_2 分子与 $O(^1D)$ 碰撞,激发生成产物,反应为



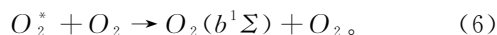
在中高层,(2)式中 $O(^1D)$ 的来源主要有两个途径, O_2 在 Schumann-Runge 连续体中的光分解, O_3 在 Hartley 带中的光分解,分别表示为



第三, $O_2(b^1\Sigma)$ 的第三种生成机制是 Barth 两步生成机制^[17-18]:



式中: M 是 O_2 或 N_2 分子; O_2^* 是激发态的 O_2 分子,具体成分和含量分布未知。随即 O_2^* 态猝灭形成 $O_2(b^1\Sigma)$:



结合 O₂ A 带气辉的形成机制,由于夜间没有太阳辐射的影响,O₂ A 带夜气辉的形成机制仅有

Barth 两步生成机制,由 Barth 机制贡献的气辉体辐射率可表示为

$$\eta = \frac{A_1 k_1 [O]^2 [M] [O_2]}{(A_2 + k_2 [O_2] + k_3 [N_2] + k_4 [O])(C_{O_2} [O_2] + C_O [O])}, \quad (7)$$

式中:A₁,A₂ 均为常数;k₁,k₂,k₃,k₄ 为仅与中高层温度 T 呈负相关的反应系数变量。忽略 O₂ A 带白天气辉在日落后的余辉对早夜气辉辐射的贡献,夜气辉的辐亮度应受原子氧数密度[O]、氧气分子数密度[O₂]、氮气分子数密度[N₂]、中高层温度 T 等参数的影响。因此,在对 O₂ A 带夜气辉的时空分布特征的研究中,在同时空条件下,对相关大气成分即原子氧、氧气、氮气数密度的时空分布特征进行分析,通过对比 A 带夜气辉和大气参量的变化特征,

可以探求 O₂ A 带夜气辉辐亮度的全球性时空变化规律。

3.1 不同纬度区域夜气辉时间与高度变化特征及原因分析

为了分析不同区域 O₂ A 带夜气辉的时空分布特征,在相同的时间条件下,分别分析南北半球不同区域在海拔为 80~100 km 的 O₂ A 带夜气辉辐亮度的季度变化趋势,按 N32 高斯网格所选取的地区如表 1 所示。

表 1 选取的南北半球区域及其纬度范围

Table 1 Selected Northern Hemisphere and Southern Hemisphere region and latitude range

Region	Latitude range
High-latitude region in the Northern Hemisphere	76.73689°N-79.52560°N
Mid-latitude region in the Northern Hemisphere	40.46364°N-43.25419°N
Equator region	1.39530°S-1.39530°N
Mid-latitude region in the Southern Hemisphere	32.09194°S-34.88252°S
High-latitude region in the Southern Hemisphere	76.73689°S-79.52560°S

为分析气辉变化趋势,同时对不同区域、同海拔、同时间条件下的 O₂ A 带夜气辉相关大气参数的变化趋势进行分析。由前文可知,相关大气参数包括原子氧数密度、氧气分子数密度、氮气分子数密度、中高层温度 T,以上数据均来自于大气模型 Neutral Atmosphere Empirical Model-00(NRLMSISE-00)^[19]。

首先,针对北半球高纬度地区,海拔为 80~100 km 的 O₂ A 带夜气辉辐亮度的季度变化趋势如图 2 所示。可以看出:在北半球高纬度地区,O₂

A 带夜气辉的高值在海拔 95 km 附近;此外,O₂ A 带夜气辉辐亮度高值在一年间出现在 4 月到 8 月,其他月份辐亮度较弱。

为了探究其原因,对应分析北半球高纬度地区海拔为 80~100 km 的原子氧、O₂ 分子、N₂ 分子数密度、温度的海拔分布特征和季度变化趋势,如图 3、4 所示。结果表明:北半球高纬度地区 80~100 km 内原子氧数密度的峰值也在 95 km 附近,如图 3 所示,与夜气辉辐亮度在海拔方向上的变化

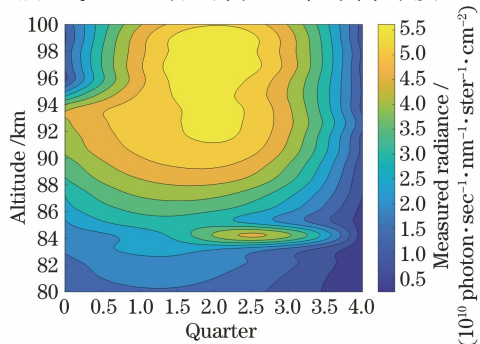


图 2 北半球高纬度地区 O₂ A 带夜气辉季节性分布
Fig. 2 Seasonal distribution of O₂ A-band night airglow at high latitudes in the Northern Hemisphere

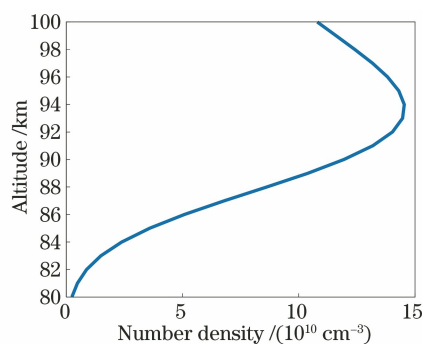


图 3 北半球高纬地区原子氧数密度垂直廓线
Fig. 3 Vertical profile of atomic oxygen number density at high latitudes in the Northern Hemisphere

趋势一致;此外,一年间北半球高纬度地区原子氧数密度年度峰值及温度年度峰值也分布在 4 月到 8 月之间,如图 4 所示;由于氧气与氮气是大气恒定成分,图 4(b)与图 4(c)中 N_2 与 O_2 数密度的变化趋

势高度统一,不同纬度带内的一年间 N_2 与 O_2 数密度趋势并无变化。综合分析得知,北半球高纬度地区 O_2 A 带夜气辉辐亮度与原子氧数密度及大气背景温度呈正相关。

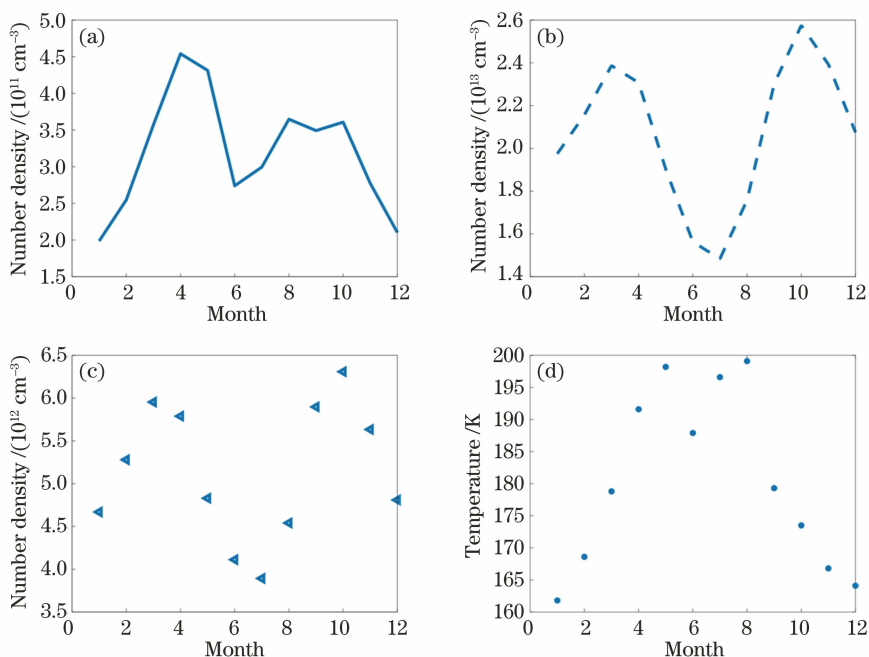


图 4 北半球高纬地区原子氧、 N_2 分子、 O_2 分子数密度廓线及温度季节性分布。

(a)原子氧;(b) N_2 分子;(c) O_2 分子;(d)温度

Fig. 4 Number density distribution of atomic oxygen, N_2 molecule, O_2 molecule, and seasonal temperature at high latitude in the Northern Hemisphere. (a) Atomic oxygen; (b) N_2 molecule; (c) O_2 molecule; (d) temperature

从图 5 可以看出,在北半球中纬度地区,夜气辉的分布规律与同半球高纬度地区相似,辐亮度高值所在区域几乎与高纬地区相同。其中,与高纬度地区不同的是,辐亮度高值存在的时间范围更加广泛,出现在 3 月底到 9 月底,峰值出现在 95 km 附近。使用同北半球高纬度地区分析方法,这一现象同样与大气参量的变化趋势相吻合。

高值出现在 90~95 km。同时,从夜气辉的季节变化可以看出,相比于北半球地区,赤道地区的 O_2 A 带夜气辉全年辐亮度较平均,高值出现的月份区间更加广泛,与原子氧数密度的变化趋势及大气背景温度变化趋势呈正相关,综合二者的调制,赤道地区的 O_2 A 带夜气辉辐亮度在各月份较均匀分布。

如图 6 所示,赤道地区 O_2 A 带夜气辉辐亮度

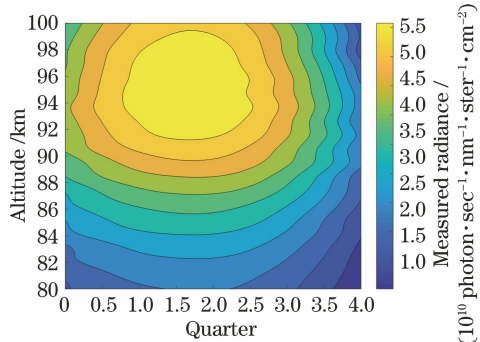


图 5 北半球中纬度地区 O_2 A 带夜气辉季节性分布

Fig. 5 Seasonal distribution of O_2 A-band night airglow at mid-latitudes in the Northern Hemisphere

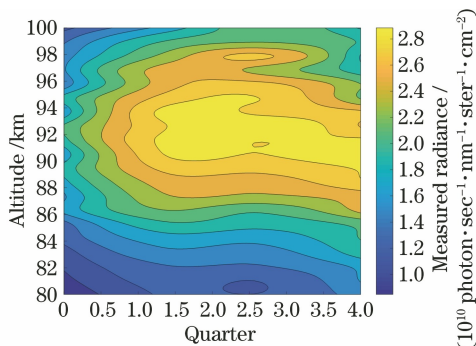


图 6 赤道地区 O_2 A 带夜气辉分布季节性分布

Fig. 6 Seasonal distribution of O_2 A-band night airglow at equator

从图 7 可以看出:南半球中纬度地区 O_2 A 带夜气辉的海拔峰值仍在 95 km 附近,与原子氧的海

拔峰值一致;然而,南半球中纬度地区夜气辉季节性变化趋势与北半球变化趋势完全相反, O₂ A 带的辐亮度高值出现在 10 月到 3 月之间,而 4 月到 9 月辐亮度较弱。

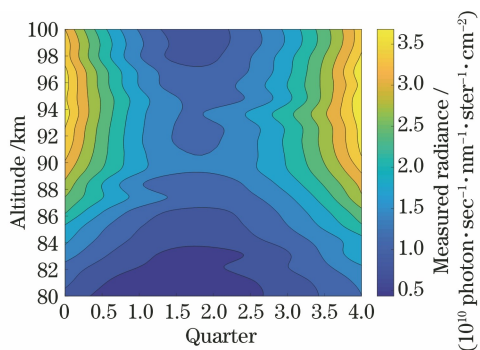


图 7 南半球中纬度地区 O₂ A 带夜气辉季节性分布
Fig. 7 Seasonal distribution of O₂ A-band night airglow at mid-latitudes in the Southern Hemisphere

如图 8 所示,相较于其他地区,南半球高纬度地区的气辉辐亮度整体较弱。而辐亮度的月变化趋势与南半球中纬度地区相似,高值出现的月范围更狭窄,全年谷值出现在年中,且月份范围更加广泛。

3.2 不同季度夜气辉辐亮度的全球空间分布特征及原因分析

为了分析不同季度 O₂ A 带夜气辉的时空分布特征,在相同的地区条件下,具体分析目标气辉所在的海拔范围内辐亮度在不同季节的全球分布特征。

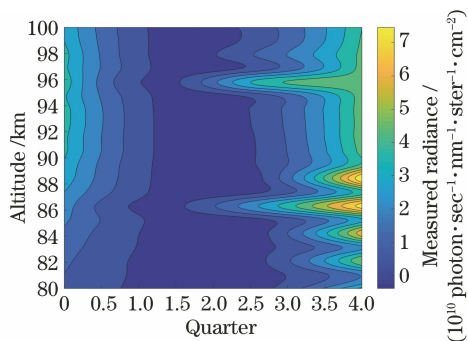


图 8 南半球高纬度地区 O₂ A 带夜气辉季节性分布
Fig. 8 Seasonal distribution of O₂ A-band night airglow at high latitudes in the Southern Hemisphere

根据 3.1 节 O₂ A 带夜气辉辐亮度的时间分布特征分析,可以得知 A 带夜气辉辐亮度峰值大约在 95 km 附近,因此对 95 km 高度附近不同季度 O₂ A 带气辉辐亮度的全球分布进行分析。同时,为了进一步分析不同季度的分布特征,分析 A 带夜气辉相关大气成分分布特征,即原子氧、氧气、氮气在不同季度的数密度分布廓线。从 3.1 节可以得知,相同观测条件下的氧气数密度廓线与氮气数密度廓线具有相同的趋势,在本小节分析过程中也获取了相同的结论,因此将氧气和氮气设置为混合气体进行数密度分析。

图 9 是第一季度各月份 O₂ A 带夜气辉辐亮度的全球分布图,可以发现,第一季度 O₂ A 带夜气辉在经向分布较均匀,而纬向分布波动较大,纬向分布

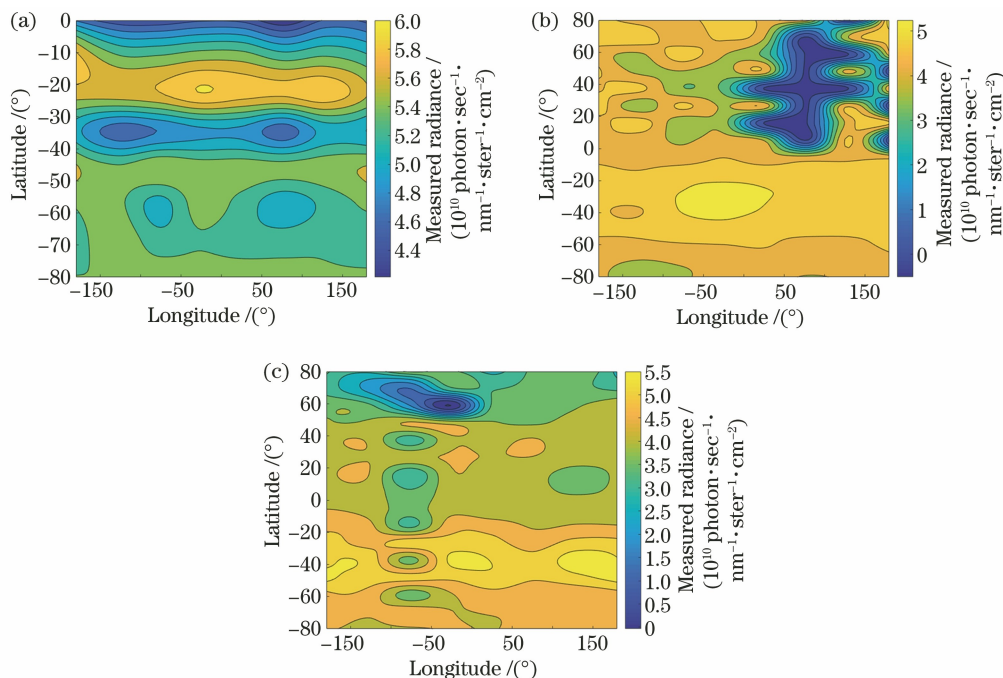


图 9 第一季度 O₂ A 带夜气辉全球辐亮度分布。(a)一月;(b)二月;(c)三月

Fig. 9 Global radiance distribution of O₂ A-band night airglow in the first quarter. (a) January; (b) February; (c) March

的辐亮度高值出现在南半球低纬度全球范围内,所在纬度为 20°S 。基于该气辉的形成机制,可通过第

一季度原子氧、氧气、氮气数密度的纬向分布特征来分析气辉辐亮度非均匀分布,结果如图 10 所示。

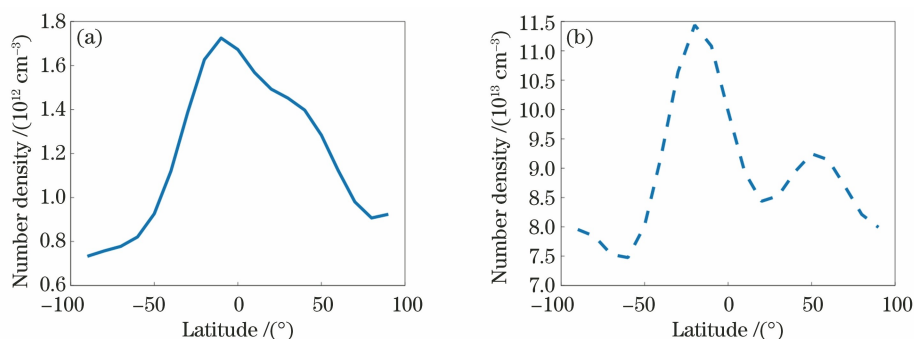


图 10 第一季度原子氧、混合气体分子数密度纬向分布图。(a)原子氧;(b)混合气体

Fig. 10 Number density distribution of atomic oxygen and mixed gas in the latitude dimension in the first quarter.

(a) Atomic oxygen; (b) mixed gas

从图 10 可以看出:第一季度在南半球的原子氧数密度和混合气体分子数密度高于北半球,且峰值出现在南半球低纬度地区,大约在 10°S 至 20°S 之间。此外,从背景大气温度的角度来看,同一纬度带内,经度变化对温度的影响非常小,而由于太阳辐射的影响,不同纬度下温度差异非常大,导致 O_2 A 带夜气辉在经向分布相对较均匀,纬向分布波动较大。此外,由于太阳直射位置的差异,第二季度与第三季度(3月21日到9月23日)太阳直射北半球,北半球大气温度高于南半球,而第一季度与第四季度南北半球的情况完全相反。由于背景大气温度与夜气辉辐亮度呈正相关,因此第一季度南半球的 O_2 A

带气辉辐亮度明显强于北半球,南北半球呈非对称分布。

依次分析 O_2 A 带夜气辉第二、三、四季度各月份的辐亮度全球分布特征,结果如图 11~13 所示。

第二季度 O_2 A 带夜气辉在经向纬向分布特性与第一季度一致,即经向较均匀;从纬向分布来看, O_2 A 带夜气辉辐亮度在第二季度北半球出现两个高值区域,分别是北半球低纬地区与北半球高纬地区,所在纬度为 20°S 及 $70^{\circ}\text{S} \sim 80^{\circ}\text{S}$ 。出现该现象的原因是,第二季度氧气与氮气混合气体分子数密度在北半球明显强于南半球,且北半球存在两个峰值,分别在 $20^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{S}$ 和 $70^{\circ}\text{S} \sim 80^{\circ}\text{S}$ 。

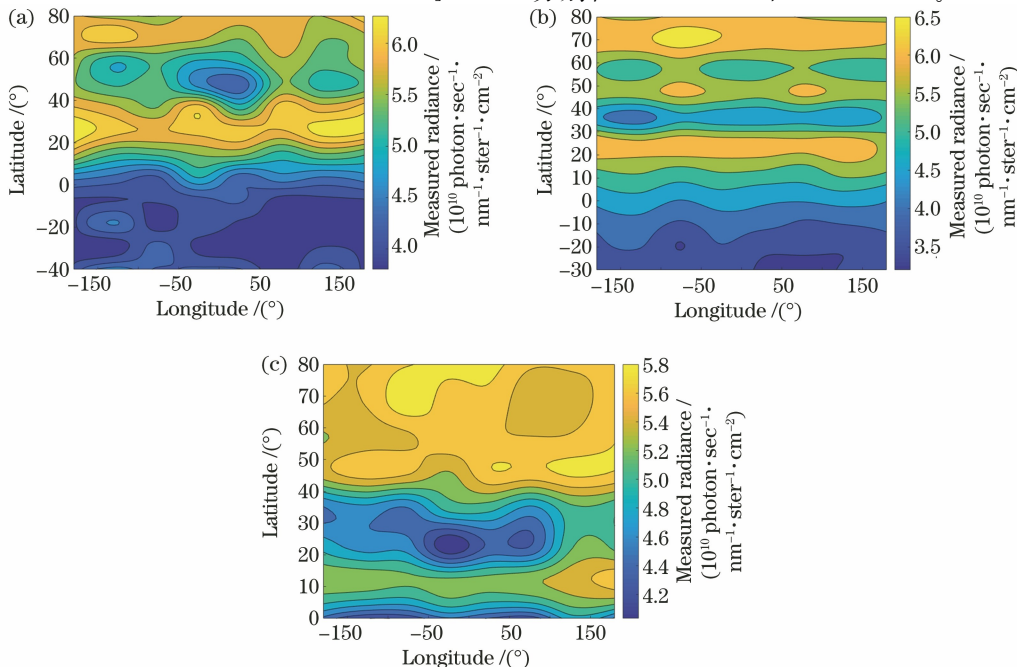


图 11 第二季度 O_2 A 带夜气辉全球辐亮度分布。(a)四月;(b)五月;(c)六月

Fig. 11 Global radiance distribution of O_2 A-band night airglow in the second quarter. (a) April; (b) May; (c) June

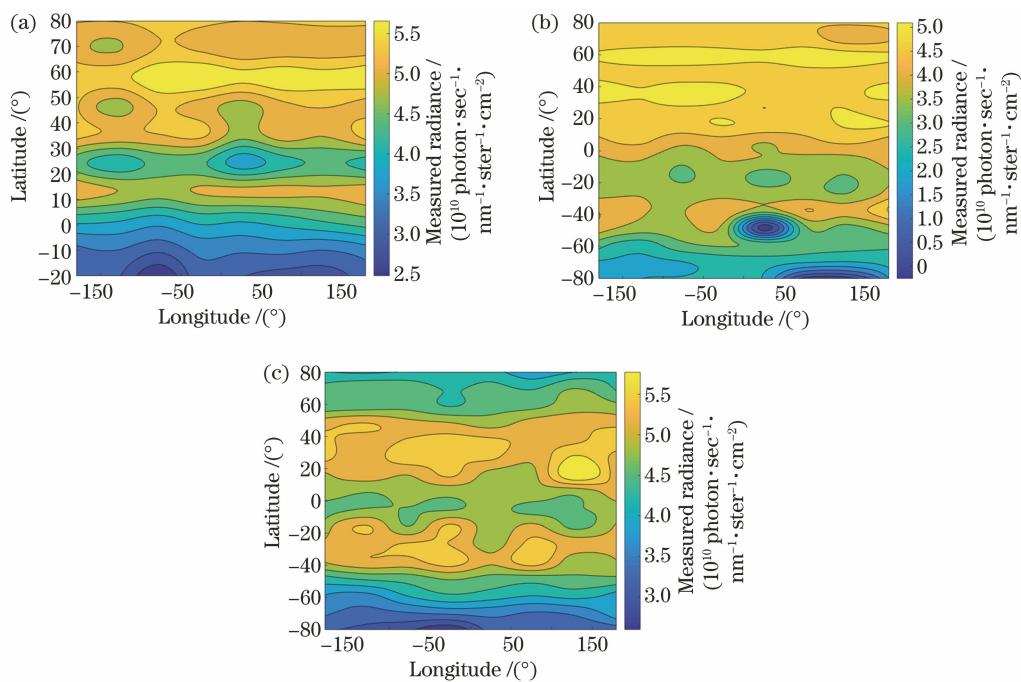


图 12 第三季度 O₂ A 带夜气辉全球辐亮度分布。(a)七月;(b)八月;(c)九月

Fig. 12 Global radiance distribution of O₂ A-band night airglow in the third quarter. (a) July; (b) August; (c) September

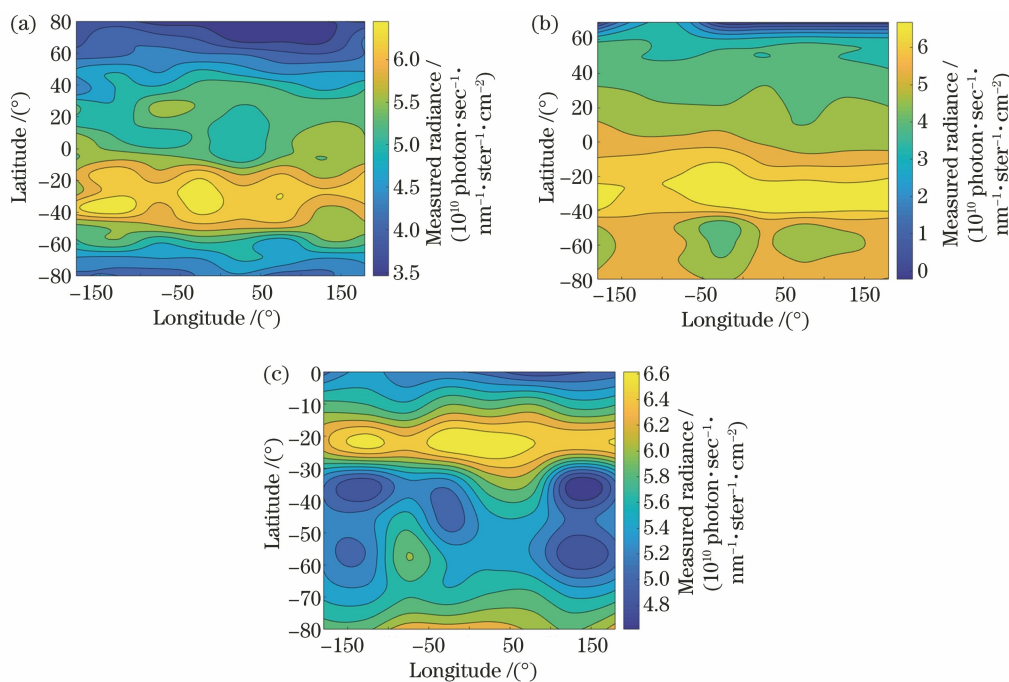


图 13 第四季度 O₂ A 带夜气辉全球辐亮度分布。(a)十月;(b)十一月;(c)十二月

Fig. 13 Global radiance distribution of O₂ A-band night airglow in the fourth quarter.

(a) October; (b) November; (c) December

第三季度的 7 月份和 8 月份, O₂ A 带夜气辉在北半球辐亮度分布显著强于南半球, 且在北半球的纬度范围非常宽泛, 几乎覆盖整个半球; 从 9 月开始, 北半球 O₂ A 带分布逐渐收拢到中纬度地区, 同时南半球中低纬区域 O₂ A 带气辉辐亮度逐渐增

强。在原子氧和混合气体的共同作用下, 第三季度 O₂ A 带夜气辉在北半球辐亮度分布显著强于南半球。

第四季度 O₂ A 带气辉的分布与第一季度十分类似, 即纬向分布的辐亮度高值出现在南半球低纬

度全球范围内, 高值所在纬度区域为 $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$ 。

综合四个季度的分布情况看来: 第一季度与第四季度南半球的 O_2 A 带气辉辐亮度明显强于北半球, 而第二季度与第三季度北半球的 O_2 A 带气辉辐亮度明显强于南半球, 均呈非对称分布; 第四季度 O_2 A 带夜气辉的全球分布规律与第一季度分布规律非常接近; A 带夜气辉的分布特征受到温度、大气成分等大气状态参量调制, 这些大气参量在一年间随四季变化的趋势相对稳定, 因此推断夜气辉的全球分布同样具有周年往复的趋势。

4 结 论

利用 ODIN/OSIRIS 卫星在 2008 年间测量得到的 O_2 A 带夜气辉辐亮度数据, 分析了中高层区域 O_2 A 带夜气辉辐亮度在不同纬度带内的时间变化特征、全球范围内季度分布特征, 发现气辉的高度分布特征, 包括峰值大小、峰高、辐射层的厚度, 均随纬度变化而变化。从 O_2 A 带气辉辐亮度的纬度-季度分布可以看出: O_2 A 带夜气辉辐射层主要位于 $80\sim 100$ km, 一年间的辐亮度峰值都集中在 95 km 附近, 与相关文献一致^[20]。 O_2 A 带气辉全球性分布明显具有季节性特征, 第一季度与第四季度有相似的分布特征, 其间气辉辐亮度高值在南半球; 第二季度与第三季度有相似的分布特征, A 带气辉辐亮度高值在北半球。从辐亮度的纬度-经度分布可以看出: O_2 A 带夜气辉的经向分布相对较均匀, 纬向分布波动较大。南北半球的分布规律与纬度-季度中的分析相吻合, 这些结论跟相关文献所报告的结论类似^[21-22]。同时, 气辉的周期变化趋势和相关大气状态参量的变化趋势暗示 A 带夜气辉的分布具有年周期变化趋势。

中高层大气与人类生产生活息息相关, 经过多年关于大气物理学、化学、动力学以及能量学的研究, 地球大气的气候模型正在日益完善。气辉的分布特征蕴含着大气成分、温度场等重要的气候模型信息, 深入了解气辉的全球性时空分布及其影响因素有利于后续完善气候模型, 对分析大气成分、气象变化、各层能量与能量的输送都有重大意义^[23], 同时为后续气辉观测正演模型的建立、探测仪器的设计奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Gao H, Xu J Y, Chen G M, et al. Global distributions of OH and O_2 (1.27 μm) nightglow emissions observed by TIMED satellite[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2011, 41(3): 374-384.
- 高红, 徐寄遥, 陈光明, 等. TIMED 卫星测量得到的 OH 和 O_2 (1.27 μm) 夜气辉全球分布特征[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(3): 374-384.
- [2] Yang T P, Si F Q, Ping W, et al. Research on cloud fraction inversion algorithm of environmental trace gas monitoring instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0901001.
- 杨太平, 司福祺, Ping W, 等. 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0901001.
- [3] López-Puertas M, Rodrigo R, López-Moreno J J, et al. A non-LTE radiative transfer model for infrared bands in the middle atmosphere. II. CO_2 (2.7 and 4.3 μm) and water vapour (6.3 μm) bands and N_2 (1) and O_2 (1) vibrational levels[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1986, 48(8): 749-764.
- [4] Christensen A B, Yee J H, Bishop R L, et al. Observations of molecular oxygen atmospheric band emission in the thermosphere using the near infrared spectrometer on the ISS/RAIDS experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A4): A016838.
- [5] Marsh D R, Skinner W R, Yudin V A, et al. Tidal influences on O_2 atmospheric band dayglow: HRDI observations vs. model simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(10): 1369-1372.
- [6] McDade I C, Llewellyn E J. The excitation of O(1S) and O_2 bands in the nightglow: a brief review and preview[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1986, 64(12): 1626-1630.
- [7] Wallace L, Hunten D M. Dayglow of the oxygen a band [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1968, 73(15): 4813-4834.
- [8] Skinner W R, Hays P B. Brightness of the O_2 atmospheric bands in the daytime thermosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 1985, 33(1): 17-22.
- [9] Torr M R, Welsh B Y, Torr D G. The O_2 atmospheric dayglow in the thermosphere [J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 1986, 91(A4): 4561-4566.
- [10] Heller J W, Christensen A B, Yee J H, et al. Mesospheric temperature inferred from daytime observation of the O_2 atmospheric (0, 0) band system [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1991, 96(A11): 499-505.
- [11] López-González M J, López-Moreno J J, Rodrigo R, et al. Altitude profiles of the atmospheric system of O_2 and of the green line emission[J]. *Planetary and*

- Space Science, 1992, 40(6): 783-795.
- [12] He W W, Wu K J, Feng Y T, et al. Forward simulation of limb-viewing Michelson wind imaging interferometer based on O₃ radiation source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0512005.
何微微, 武魁军, 冯玉涛, 等. O₃ 辐射源 Michelson 测风成像干涉仪临边观测正演仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0512005.
- [13] Bogner K, Zhao X, Strong K, et al. Updated validation of ACE and OSIRIS ozone and NO₂ measurements in the Arctic using ground-based instruments at Eureka, Canada [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 238: 106571.
- [14] Fang X J. Tomographic retrieval algorithm of OH radical in the mesospheric atmosphere[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
方雪静. 中高层大气 OH 自由基层析反演方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [15] Zhang H H, Li C, Gao Y B, et al. Research for high-level OH radicals spatio-temporal distribution characteristics and its formation mechanism [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2017, 12(4): 292-304.
张洪海, 李超, 高一博, 等. 中高层 OH 自由基时空分布特征及其机理研究[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(4): 292-304.
- [16] Chamberlain J W. The formation of atmospheric O₂ emission in the airglow [J]. The Astrophysical Journal Letters, 1954, 119: 328-333.
- [17] Barth C A. Upper atmosphere three-body reactions study leading to light emission with laboratory results applied to night airglow [J]. NASA Technical Report, 1964.
- [18] Barth C A, Hildebrandt A F. The 5577 Å airglow emission mechanism [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1961, 66(3): 985-986.
- [19] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2002, 107(A12): SIA15.
- [20] Song R, Kaufmann M, Ungermann J, et al. Tomographic reconstruction of atmospheric gravity wave parameters from airglow observations [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(12): 4601-4612.
- [21] Hays P B. A global view of the molecular oxygen night airglow [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D20): 4646.
- [22] Ratnam M V, Shen C M, Chen W N, et al. Study on oxygen atmospheric band dayglow: global and seasonal variations deduced from high-resolution Doppler imager observations [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2004, 66(3/4): 209-218.
- [23] Gao F, Huang B, Shi D C, et al. Design and simulation of pure rotational Raman lidar system for daytime detection of atmospheric temperature [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0301004.
高飞, 黄波, 石冬晨, 等. 全天时大气温度探测的纯转动拉曼激光雷达系统设计与仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0301004.