TIMED 卫星测量得到的 OH 和 O₂(1.27 μm)夜气辉全球分布特征

高红^{①*}, 徐寄遥^①, 陈光明^{①②}, 袁韡^①, BELETSKY A B^③

① 中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

② 北京应用气象研究所, 北京 100029;

③ 俄罗斯科学院西伯利亚分院日地物理研究所, 伊尔库茨克, 俄罗斯

* E-mail: hgao@spaceweather.ac.cn

收稿日期: 2010-04-08; 接受日期: 2010-10-06

国家自然科学基金(批准号: 40874080, 40890165, 41004062, 40911120063)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2006CB806306)、国家重点实验室专项基金和中国博士后科学基金(批准号: 20100481450)资助项目

摘要 为了研究 OH 和 O₂ 夜间气辉辐射随时间变化的全球分布特征, 我们利用 TIMED 卫星在 2002~2009 年间的 OH 和 O₂ 气辉辐射率数据对两种夜气辉的高度变化、地方时变化和季节变化等特征进行了统计分析. 结果表明, OH 夜气辉比白天气辉强, O₂ 夜气辉比白天气辉弱. 赤道附近的 OH 夜气辉辐射强度在午夜附近达到最强, 中高纬度地区的 OH 夜气辉辐射强度在日落之后和日出之前较强. 在分点时, 赤道附近的 O₂ 夜气辉辐射强度随着地方时减弱, 在至点时它的地方时-纬度分布有一个低值区. 对于夜气辉辐射率的高度-纬度分布, OH 的分布在分点时有一个峰, 位于赤道上空 85 km 附近, 并且 3 月分点的峰比 9 月分点的强; O₂ 的分布在分点时有三个峰, 分别位于秋分半球 30°附近、赤道附近和春分半球 30°附近, 位于赤道附近的峰高最低; 两种夜气辉在至点的分布均有三个峰. 两种夜气辉的辐射强度在赤道附近有明显的年变化特征和半年变化特征, 半年变化的峰值和谷值分别出现在分点和至点, 并且 3 月分点的峰值比 9 月分点的大, 两种气辉的分布均存在南北半球不对称特征.

关键词

OH 夜气辉

O₂ 夜气辉

全球分布

气辉是中高层大气光化学过程的产物, 其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^[1]、潮汐波和行星波等多种大气动力学过程调制. 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有助于推进人们对大气光化学和动力学过程的深入理解. 因此, 气辉分布特征的研究对于中高层大气的研究非常重要.

OH 夜气辉辐射很强, 人们很早就开展了对 OH 夜气辉辐射的观测和研究工作. 前人对 OH 夜气辉辐射的分布特征, 包括高度分布特征、纬度分布特征、周日变化特征, 以及季节变化特征等, 已经做了大量的研究工作. Takahashi 等人^[2]分析了在 Brazilian sector (23°S)地区观测到的 OH(8, 3)带夜气辉的辐射强度和转动温度, 发现它们均有明显的地方时变化特征, 并且地方时变化特征随季节改变. AE 卫星在

低纬度地区测量得到的 OH(8, 3)带夜气辉辐射有强烈的半年变化特征, 并且最大值出现在分点附近^[3]. Takahashi 等人^[4]和 Mulligan 等人^[5]分别分析了 Fortaleza (2.9°S, 38.4°W)地区和 Maynooth (53.2°N, 6.4°W)地区观测到的 OH 夜气辉辐射强度, 结果表明它们均有明显的半年变化特征, 最大值出现在分点, 最小值出现在至点. São João do Cariri (7.4°S, 36.5°W)台站的观测数据也表明 OH(6, 2)带气辉辐射强度具有很强的半年变化特征, 最大值和最小值分别出现在分点和至点, 并且3月分点的最大值比9月分点的大, 大气潮汐对半年变化特征有重要影响^[6]. López-González 等人^[7]分析了(37.06°N, 3.38°W)地区的 OH(6, 2)带气辉辐射强度, 发现其年变化幅度和半年变化幅度大体相当. Melo 等人^[8]利用 UARS (The Upper Atmosphere Research Satellite)卫星数据以及分别位于 Cachoeira Paulista (23°S, 45°W)地区和 Fortaleza (4°S, 38°W)地区的两个地基观测台站的观测数据, 分析了 23°S 和赤道区域的 OH 夜气辉夜间变化特征. 其结果表明, OH 气辉主要在 90 km 以下有明显的夜间变化特征, 辐射强度与辐射率峰高成负相关关系. Melo 等人^[9]分析了 UARS 卫星测量得到的 OH 夜气辉辐射的高度分布剖面, 发现大多数剖面为单峰结构, 峰高出现在 85~90 km 之间, 5%~25%的剖面具有复杂的多峰结构. 此外, UARS 卫星的观测结果还表明, OH 气辉辐射在低纬度地区有明显的半年变化特征, 在高纬度地区年变化更为明显, 并且年变化的最小值出现在3月分点之后^[10]; OH 气辉辐射的峰高受潮汐位相的影响很大^[11]; OH 气辉辐射在低纬度地区的半年变化受平流层准两年变化的调制^[12]. UARS 卫星探测到的 OH 气辉辐射数据, 加深了人们对 OH 气辉辐射率分布特征的认识. 但是对 OH 气辉辐射时间变化特征的全球分布做进一步的研究仍然是必要的.

波长为 $1.27 \mu\text{m}$ 的 $\text{O}_2(a^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-)$ (0-0)带 (本文中简称 O_2)夜气辉辐射较弱, 且易被低高度的 O_2 大气吸收, 在地面上不易观测到. 在过去, 主要利用火箭试验对其进行探测. Evans 等人^[13]和 Bishop 等人^[14]首次利用火箭实验探测 O_2 夜气辉辐射率的高度剖面, 其中前者观测到 O_2 夜气辉辐射率的高度剖面具有双峰结构, 两个峰分别位于 87 和 96 km 附近, 后者观测到辐射层为很厚的单峰结构, 峰高位于 90 km 附近. 此后, 还有一些零星的火箭实验^[15-17]对 O_2 夜

气辉辐射率的高度剖面进行过测量. 虽然火箭探测结果让我们对 O_2 夜气辉辐射率高度分布特征有了一定的认识. 但是, 火箭实验具有单次、单点测量的属性, 其探测结果不能用于气辉辐射率随时间变化特征的系统分析, 更不能刻画出气辉辐射的全球分布特征. 这阻碍了人们对 O_2 夜气辉的时间分布特征和水平分布特征的认识. 气辉辐射率的全球三维分布结构的研究离不开卫星探测. 于 1981 年发射的 SME (Solar Mesosphere Explorer)卫星对波长为 $1.27 \mu\text{m}$ 的 O_2 气辉辐射率进行了临边探测, 但是由于该卫星为太阳同步卫星, 其探测结果无法用于研究 O_2 夜气辉辐射的全球地方时分布特征. 迄今为止, 我们对波长为 $1.27 \mu\text{m}$ 的 O_2 夜气辉辐射率的时间分布特征和三维空间分布特征仍然缺乏系统的认识.

TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics)卫星对中心波长为 2.0 和 $1.6 \mu\text{m}$ 的 OH 气辉辐射率, 以及中心波长为 $1.27 \mu\text{m}$ 的 O_2 气辉辐射率进行观测, 该卫星的纬度覆盖范围比 UARS 卫星好. TIMED 卫星的观测结果为进一步认识 OH 夜气辉辐射的分布特征, 系统分析波长为 $1.27 \mu\text{m}$ 的 O_2 夜气辉辐射的时间和空间分布特征提供了宝贵的数据资源. 本文利用 TIMED 卫星观测数据, 分析 OH 夜气辉辐射和波长为 $1.27 \mu\text{m}$ 的 O_2 夜气辉辐射的地方时-纬度分布、高度-纬度分布和季节变化特征, 探讨两种夜气辉辐射分布的南北半球对称性.

1 观测数据和数据分析过程

TIMED 卫星于 2001 年 12 月发射, 卫星的轨道高度约为 625 km, 轨道倾角为 74.1° , 卫星每天绕地球运行约 15 圈. TIMED 卫星轨道进动较为缓慢, 它的测量大约需要 60 d 才能完成全球 24 h 地方时的覆盖^[18, 19]. 搭载在 TIMED 卫星上的探测器共有 4 个, 分别是 GUVI, SABER, SEE 和 TIDI. 其中, SABER 是 10 通道红外辐射计, 用于测量 MLT 区域的大气辐射、能量收支、大气结构、化学组分分布和大气动力学特征. SABER 测量的纬度覆盖范围从冬季半球 53° 到夏季半球 83° . 每 58 s 左右, SABER 可获取自地表到 180 km 高度范围内多个大气参数的高度剖面, 这些参数包括大气温度、OH 气辉辐射率、 O_2 气辉辐射率、原子氧密度和臭氧密度等.

SABER 上中心波长分别为 1.6 和 $2.0 \mu\text{m}$ 的两个

通道测量了 OH 气辉辐射, 其中第一个波段主要包括 OH(5, 3)带、OH(4, 2)带和 OH(3, 1)带的辐射, 第二个波段主要包括 OH(9, 7)带、OH(8, 6)带和部分 OH(7, 5)带的辐射. 我们的分析结果表明, 除了第二个波段的 OH 夜气辉辐射层的峰高比第一个波段的略高之外, 二者的时间和空间分布规律相似. 因此, 本文中我们仅给出中心波长为 2.0 μm 波段的 OH 气辉辐射(本文中简称为 OH 气辉辐射)的分布特征. 研究中所用到的 O₂ 气辉数据为 SABER 上中心波长为 1.27 μm 的通道测量得到气辉辐射率(以下简称 O₂ 气辉). 我们所用的是 SABER 在 2002~2009 年共 8 年间的测量结果. 为了避免由高纬度地区数据间断性缺测引起的分析不便, 我们着重分析 50°S~50°N 纬度范围内的气辉辐射特征.

在做具体分析之前, 我们构造 10° latitude × 1 h × 1 km 的网格, 将分布在该网格内的气辉辐射率做纬向平均, 把平均得到的结果视为网格中心点处的辐射率. 在纬度方向上, 将该网格的中心点在 55°S~55°N 之间做步长为 5°的滑动, 这样便得到从 50°S 到 50°N 共 21 个纬度上气辉辐射率的高度分布剖面. 正如前面提到的, TIMED 卫星需要运行 60 d 它的测量才能覆盖全球 24 h 地方时, 为此, 我们做时间长度为 61 d, 滑动步长为 1 d 的滑动窗, 分布在每个滑动窗内的数据组合便能覆盖 24 h 地方时. 我们把每个滑动窗内的数据视为窗中心当天的数据, 这样, 每天的数据便满足了 24 h 地方时的覆盖. 我们利用由此得到的数据做下面的分析.

2 研究结果

2.1 OH 和 O₂ 气辉强度的夜间分布特征

由于 OH 和 O₂ 夜气辉主要分布在 75~100 km 之间(如图 3 和 4 所示), 地基实验中观测到的辐射强度主要来源于这个高度区域内的气辉辐射, 为了便于与地基实验结果进行比较, 我们将该高度范围内的气辉辐射率取高度积分, 得到辐射强度. 图 1 和 2 分别给出的是 OH 和 O₂ 气辉辐射强度在 3 月分点(第 80 天)、6 月至点(第 170 天)、9 月分点(第 260 天)和 12 月至点(第 350 天)的 8 年平均值随地方时和纬度的分布, 每张图中的两条白色曲线分别表示 100 km 高度的日出和日落时间(太阳光开始和最后照射到 100 km 高度处大气的时间).

从图 1 可以看出, OH 气辉在日落后迅速增强, OH 夜气辉比白天气辉强, 这与 Marsh 等人^[20]得到的结果一致. 在夏季半球 50°处 OH 夜气辉出现的时间最短, 主要分布在 -2.5~2.5 LT 之间. 就整体分布特征而言, 气辉辐射强度的最大值出现在分点时赤道附近, 并且春分的强度比秋分的强, 这与潮汐波对大气温度等参数的调制特征相一致, 而气辉辐射受到大气温度的影响, 因此 OH 气辉辐射强度的地方时-纬度分布特征也与潮汐波的调制有关. 此外, OH 夜气辉辐射强度随地方时变化, 并且变化特征与季节和纬度有关, 这与 Takahashi 等人^[2]的分析结果相同. 在赤道上空, OH 气辉辐射强度在日落后随地方时逐渐增强, 3 月分点和 6 月至点的强度在午夜附近达到最强, 9 月分点和 12 月至点的强度在 -2.0 LT 附近达到最强, 之后逐渐减弱. 在 30°以上的中高纬度上, OH 气辉辐射强度在日落后和日出前较强, 在午夜附近较弱. Marsh 等人^[20]利用三维光化学-动力学模式模拟了 SABER 测量得到的中心波长为 2.0 μm 的 OH 气辉辐射率. 结果表明, 周日潮汐对低纬度地区的 OH 气辉辐射的强度和时间变化有重要影响. Ward 等人^[21], Zhang 和 Shepherd^[22]的研究工作也表明 OH 夜气辉辐射的地方时变化与潮汐的影响有关.

O₂ 白天气辉远比 O₂ 夜气辉强, 鉴于本文主要研究的是 O₂ 夜气辉辐射的变化, 为了尽可能清晰地显示出 O₂ 夜气辉的变化, 图 2 中的色标是不等间隔的, 强度在 0~400 kR 之间的色标间隔为 20 kR, 强度在 400~1600 kR 之间的色标间隔为 100 kR. 从图 2 中可以看出, 日出后 O₂ 气辉迅速增强, 但是 O₂ 气辉并没有在日落之后急剧减弱, 这主要因为 O₂ 白天气辉极强, 并且 O₂(a¹D_g) 分子的寿命很长, 白天产生的 O₂(a¹D_g) 分子需要很长时间才被猝灭, 因此 O₂ 白天气辉在日落后的余辉对早夜(early evening)的 O₂ 夜气辉辐射有很大的贡献. 为了避免白天气辉余辉对分析结果的影响, 我们在假设日落时的 O₂(a¹D_g) 分子在日落后通过自发辐射和与大气组分相互作用而衰减的前提下, 利用 SABER 测量得到的大气温度, [O], [O₃]和 O₂ 气辉辐射率, NTLMSISE-00 模式计算的[H], [N₂]和 [O₂]数据, 依据式子 $n_i = n_0 \exp\{-(t-t_0)/\tau\}$ ($V_i = A \cdot n_i = V_0 \exp\{-(t-t_0)/\tau\}$). 估算了日落时的白天气辉的余辉对夜间测量得到的 O₂ 气辉的贡献. 式

图 1 OH 夜气辉辐射强度在不同季节的地方时-纬度分布(单位: kR)

图 2 O₂ 夜气辉辐射强度在不同季节的地方时-纬度分布(单位: kR)

图 3 OH 夜气辉辐射率在不同季节的高度-纬度分布(单位: $10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

图 4 O₂ 夜气辉辐射率在不同季节的高度-纬度分布(单位: $10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

中, t_0 表示日落时间, $O_2(a^1\Delta_g)$ 分子的寿命

$$\tau = \left(A_{O_2(a^1\Delta_g)} + \sum_{i=4}^8 k_i [X_i] \right)^{-1},$$

$X = \{[O], [H], [O_3], [N_2], [O_2]\}$, 反应系数 k_i 与温度有关, n_0 和 V_0 分别表示日落时 $O_2(a^1\Delta_g)$ 分子的数密度和 O_2 气辉辐射率, n_t 和 V_t 分别表示 n_0 和 V_0 在日落后 t 时刻的剩余量. 尽管 O_2 夜气辉辐射主要位于 95 km 之下(见图 4), 并且 100 km 高度上的日出和日落时间分别比 95 km 以下的要早和晚, 但是为了充分计及白天气辉的余辉对夜气辉测量的影响, 我们在估算时将日落时间取为 100 km 高度大气的日落时间. 在估算 3 月分点时余辉对赤道处 O_2 气辉的贡献时, 日落时间取 -5.33 LT. 在估算 6 月至点时余辉对 50°N 处 O_2 气辉的影响时, 日落时间取 -2.39 LT. 估算结果表明, 在 3 月分点赤道上空, 余辉对 -2.5 LT 时刻的 O_2 气辉的贡献约为 15%, 对 -1.5 LT 之后到日出之前测量得到的 O_2 气辉的贡献可以忽略, 该时段测量得到的 O_2 气辉主要是光化学平衡条件下产生的夜气辉; 在 6 月至点 50°N 上空, 余辉对 1.5 和 2.5 LT 两个时刻的 O_2 气辉辐射率的贡献小于 5%, 对 2.5 LT 时刻的 O_2 气辉辐射率的贡献在峰高附近小于 10%, 余辉对 0.5~2.5 LT 时段内的平均辐射率的贡献小于 5%. 至点时, 夏季半球上纬度越高的地方夜间越短, 因此余辉对 50° 上的气辉辐射的影响比其它纬度的大, 因而在 50° 以下的纬度上, 余辉对 0.5~2.5 LT 之间测量得到的气辉的贡献可以忽略不计. 尽管分点时夜气辉发生的时间很长, 为了统一分析, 在分析 O_2 夜气辉的高度-纬度分布和季节分布时, 所用的是 0.5~2.5 LT 之间的 O_2 气辉辐射率数据, 余辉对该时段内 O_2 夜气辉的高度-纬度分布和季节分布特征的影响可以忽略不计.

从图 2 可以看出, 在分点时, 赤道上空的 O_2 夜气辉随着地方时逐渐减弱, 在上半夜, 赤道处的 O_2 夜气辉明显高于其它纬度的. 至点时, O_2 夜气辉强度的地方时-纬度分布有一个明显的低值区. 在日出前, 赤道处的强度一般小于中纬度的, 尤其在至点时更为明显. 此外, 对比图 1 和图 2 可以发现, OH 气辉辐射强度的地方时-纬度分布与 O_2 的大体相同. 比如, 至点时的低值出现的时间均从冬季半球 40° 处的 -2.0 LT 左右随纬度的降低而推迟, 在赤道附近出现在日出之前. 两种气辉的分布特征类似的原因是由于两种气

辉的辐射强度均受到原子氧密度 [O] 等参数的影响, 它们的分布会表现出一定的协变性. 这在 2.2 部分还会做进一步的讨论.

2.2 OH 和 O_2 夜气辉辐射率的高度分布特征

我们将 8 年间每天 -2.5~2.5 LT 之间的 OH 气辉辐射率取平均, 每天 0.5~2.5 LT 之间的 O_2 气辉辐射率取平均, 由此得到 OH 和 O_2 气辉辐射率夜间平均值在 3 月分点(第 80 天)、6 月至点(第 170 天)、9 月分点(第 260 天)和 12 月至点(第 350 天)的高度-纬度分布, 分别如图 3 和图 4 所示.

可以看出, OH 夜气辉辐射在 80~100 km 之间比较强, O_2 夜气辉辐射在 75~100 km 之间比较强. 两种夜气辉的高度分布特征, 包括峰值大小、峰高和辐射层的厚度, 均随纬度变化. 对于 OH 夜气辉, 分点的分布有一个峰, 位于赤道上空 85 km 附近; 至点的分布有三个峰, 分别位于 40°N/S 和赤道附近, 峰高从夏季半球的 89 km 附近向冬季半球略有降低. 对于 O_2 夜气辉, 分点时其分布大体呈现出三个峰, 分别位于 30°S/N 上空 90 km 附近和赤道上空 85 km 附近, 此外, 秋分半球 50° 上空 90 km 附近的辐射率也很强; 至点时其分布也大体呈现出 3 个峰, 分别位于冬季半球 40° 上空 88 km 附近、赤道附近和夏季半球 50° 上空 90 km 附近. 此外, 分点时, 两种夜气辉在赤道上空的辐射层比在其他纬度的厚, 峰高最低.

分点时, 两种气辉辐射率的峰值均在赤道上空最强, 并且赤道上空的峰高最低, 赤道上空春分的峰值比秋分强, 这可能与大气潮汐的影响有关. 大量地基雷达探测结果(如 Fritts 和 Isler^[23]的结果)和卫星探测结果(如 Xu 等人^[24]的结果)均表明, 在赤道上空的中层顶区域, 分点附近的周日潮汐比至点时的强; 春分时的周日潮汐比秋分的强. Marsh 等人^[20]分析了 SABER 在 2002 年 3 月 26 日~5 月 19 日期间 2.42 LT 时刻测量得到的 OH 夜气辉平均辐射率的高度-纬度分布(见参考文献中的图 2), 其分布与我们的非常相似, 他们指出观测到的低纬度地区的 OH 气辉辐射的强度和时间变化受潮汐的影响很强. 此外, 在我们的研究中还分析了 3 月分点时 OH 夜气辉辐射率的高度-纬度分布在 -2.5~4.5 LT 之间随地方时的变化, 结果表明, -2.5 LT 时的 OH 夜气辉辐射率在赤道上空较低高度(85 km 左右)上有一个很强的峰, 该峰随地方时逐渐减弱, 到 2.5 LT 时几乎消失. 这与 UARS 卫星测

量得到的以及 Ward^[21]模拟得到的 OH 夜气辉辐射率的高度-纬度分布随地方时变化的规律相同. Ward 指出, 这种特征是由于气辉辐射对潮汐的响应随着潮汐振幅的增大而增强, 赤道处的 OH 气辉辐射受潮汐的影响比较明显引起的, 潮汐通过调制背景大气密度、大气温度和原子氧 O 的混合比来调制 OH 气辉辐射率, OH 辐射率峰高的变化与潮汐波引起的原子氧 O 的垂直输运有关, 赤道上空的原子氧 O 向下输运可导致 OH 夜气辉峰高降低, 峰值增大. 依据 Ward 的结果, 气辉辐射对潮汐的响应还与潮汐的相位和波长有关.

我们还分析了 3 月分点时 O₂ 夜气辉辐射率的高度-纬度分布在 -2.5~4.5 LT 之间随地方时的变化, 结果表明, 它的变化规律与 OH 夜气辉的基本相同. 这可以从两种气辉辐射的光化学模式得到解释. O₂ 夜气辉辐射有三个可能的源反应, 即 $O + O + M \rightarrow O_2(^1\Delta_g) + M$, $OH(v) + O_2 \rightarrow OH + O_2(^1\Delta_g)$, 和 $OH(v) + O \rightarrow O_2(^1\Delta_g) + H$, 其中后两个反应与 OH(v) 有关. 因此, O₂ 夜气辉的分布与 OH 夜气辉辐射率的分布有关. 此外, 第一个反应说明 O₂ 夜气辉近似正比于 [O]². 中心波长为 2.0 μm 的 OH 夜气辉辐射主要来源于反应: $H + O_3 \rightarrow OH(v = 6, 9)$, 在光化学平衡条件下, $[O_3] = k_{O+O_2+M} [O][O_2] / (k_{H+O_3} [H])$, 其中反应系数 k_{H+O_3} 和 k_{O+O_2+M} 是温度的函数, 因此 OH 夜气辉近似正比于 [O]. 而中层顶附近 O 的寿命很长, 易受潮汐等动力学过程的调制. 所以, O₂ 夜气辉辐射率的高度-纬度分布, 尤其是在分点时的分布, 也与潮汐的影响有关.

2.3 OH 和 O₂ 夜气辉强度的季节变化特征

我们将每天 -2.5~2.5 LT 之间的 OH 气辉辐射剖面取平均, 之后再对 75~100 km 高度范围内辐射率取高度积分得到 OH 气辉夜间平均辐射强度. 同样, 利用每天 0.5~2.5 LT 之间, 75~100 km 高度范围内的 O₂ 气辉辐射率, 得到每天的 O₂ 气辉夜间平均辐射强度. 图 5 和 6 分别给出的是 OH 和 O₂ 气辉夜间平均辐射强度的季节变化特征.

从图 5 可以看出, 除两至点前后外, 赤道附近的 OH 夜间气辉辐射强度明显大于其它纬度的, 赤道附近的 OH 夜间平均气辉辐射强度的时间分布有明显的半年变化和年变化特征, 并且半年变化的峰值出现在分点附近, 可达 200 kR, 谷值出现在至点附近,

可低至 130 kR, 并且 3 月分点的峰值比 9 月分点的大, 这说明年变化的峰值出现在 3 月分点附近, 这与 Mulligan 等人^[5]和 Buriti 等人^[6]对低纬地区 OH 气辉的年内变化特征进行分析后得到的结论相一致. 在 40°附近的中纬度地区, OH 夜间平均气辉辐射强度也存在年变化和半年变化特征, 并且半年变化的峰值出现在至点前后, 可高达 150 kR, 谷值出现在分点附近, 可低至 100 kR. 在其余纬度上, OH 夜气辉辐射强度的时间分布也具有明显的季节变化特征. 关于 OH 夜气辉辐射季节变化的幅度和相位随纬度的分布, Gao 等人^[25]已经做了详细的分析, 这里不再赘述.

此外, OH 夜气辉辐射强度分布有明显的南北半球不对称特征, 例如在中高纬度地区, 南半球的年平均辐射强度比北半球的弱, 在 50°处, 南半球年变化的低值区比北半球的宽. 为了更好地说明南北半球不对称性, 我们将 OH 夜气辉辐射强度在 12 月至点(第 350 天)和 6 月至点(第 170 天)的纬度分布重叠在一起, 如图 7(a)所示. 显然, 在相同的季节里, 南北半球相同纬度处的 OH 气辉辐射强度并不相同, 尤其在冬至时, 50°N 附近的辐射强度比 50°S 附近的强得多. 图 7(a)中, 在赤道上空, 12 月至点的 OH 夜气辉辐射强度比 6 月至点的强. 我们借用 Zeng 等人^[26]在分析电离层年不对称特征时所用的方法研究夜气辉辐射强度的不对称特征, 计算不对称指数 $r = ((I_N + I_S)_{350th} - (I_N + I_S)_{170th}) / ((I_N + I_S)_{350th} + (I_N + I_S)_{170th})$, 其中 I_N 和 I_S 分别表示北半球和南半球气辉辐射强度, 350th 和 170th 分别表示 12 月至点和 6 月至点. 如果 $r > 0$, 则说明 12 月至点的气辉辐射强度比 6 月至点的强, 反之亦然, 如果 $r = 0$ 则表明两个至点时的气辉辐射强度相同, 气辉辐射强度的年变化南北半球对称. 结果表明, 对于 OH 夜气辉, 在所有纬度上均有 $r > 0$, 并且从 30°和 35°处的 0.002 分别向低纬方向和高纬方向逐渐增大, 在 5°处为 0.03, 在 50°处为 0.04. 正如 Gao 等人^[25]提到的 OH 夜气辉辐射强度分布的南北半球不对称特征是在大气温度、[O]和[O₃]分布的南北半球不对称的共同影响下产生的. Xu 等人^[19]研究了 TIMED 卫星测量得到的中层顶结构分布特征, 发现中层顶的高度和温度分布也存在明显的南北半球不对称特征. Shepherd 等人^[27]发现 UARS/ WINDII 卫星也观测到大气温度具有南北半球不对称性, 并且南半球的温度比较低.

图 5 OH 夜气辉辐射强度的季节变化特征(单位: kR)

图 6 O₂ 夜气辉辐射强度的季节变化特征(单位: kR)

由图 6 可以看出,在不同的纬度, O₂ 夜气辉辐射强度有着不同的季节变化特征. 在赤道附近, O₂ 夜气辉辐射强度有明显的年变化特征和半年变化特征, 半年变化的两个峰分别出现在两个分点附近, 并且 3 月分点的峰值比 9 月分点的大, 这与 OH 夜气辉的特征比较相似. 中纬度地区的 O₂ 夜气辉强度也有明显的季节变化特征. 在 20°S 附近年变化谷值出现在年中, 20°N 附近的大约出现在年初(或年末); 在 40°S 及其以上纬度, O₂ 夜气辉强度年变化的谷值出现在 9 月分点附近, 在 40°N 及其以上纬度, 年变化的谷值出现在 3 月分点附近. 在两个半球相同纬度上年变化谷值出现的时间大约相差 180 d, 这主要由太阳直射点的变化引起的. 此外, 对比图 5 和 6 可以看出, 相同纬度上, O₂ 夜气辉和 OH 夜气辉的年变化特征大体相同. 图 6 中 O₂ 夜气辉辐射强度随时间的分布有突变(不光滑), 这是由计算辐射强度时涉及到的地方时比较短(0.5~2.5 LT), 原始数据在该时段内的采样空缺比较大导致的.

O₂ 夜气辉辐射强度的时间分布也存在南北半球不对称现象, 例如在 50°处, 南半球年变化的谷比北半球的宽. 图 7(b)给出的是 O₂ 夜气辉辐射强度在 12 月至点和 6 月至点的纬度分布. 该图表明, O₂ 夜气辉辐射强度分布的南北半球不对称程度随纬度变化, 并且冬至 50°附近和夏至 10°附近的南北半球不对称最明显. 不对称指数由 5°处的-0.007 随纬度升高逐渐增大, 在 50°处达到 0.05, 并且在 30°开始由“负”转“正”, 这说明在低纬度地区 6 月至点的 O₂ 夜气辉辐射强度比 12 月至点的强, 在中高纬度地区 12 月至点

的强度比 6 月至点的强. 与 OH 夜气辉辐射强度的南北半球不对称同理, O₂ 夜气辉辐射强度的南北半球不对称特征也与大气温度、[O]和[O₃]分布的南北半球不对称有关.

3 结论

我们利用 TIMED/SABER 卫星在 2002~2009 共 8 年间测量得到的 OH 和 O₂ 气辉辐射率数据, 分析了 OH 和 O₂ 两种夜气辉辐射强度的地方时-纬度分布特征、辐射率的高度-纬度分布特征和辐射强度的季节变化特征. 结果表明, OH 夜气辉比白天气辉更强, OH 夜气辉的地方时分布特征随纬度的变化而变化, 在赤道附近, OH 夜气辉辐射强度在午夜附近达到最强, 在中高纬度地区, OH 夜气辉辐射强度在日落之后和日出之前较强. OH 夜气辉辐射层主要位于 80~100 km 之间, 分点时赤道附近的辐射率峰值最大, 峰高最低, 位于 85 km 附近, 至点时的辐射率峰高从夏季半球 50°附近的 90 km 左右向冬季半球略有降低. OH 夜气辉辐射强度有明显的季节变化特征, 在赤道附近, 半年变化的峰值出现在分点附近, 谷值出现在至点附近, 年变化的峰值出现在 3 月分点附近. OH 夜气辉辐射的分布有明显的南北半球不对称特征, 尤其在冬至时, 50°N 附近的辐射强度比 50°S 附近的强得多.

O₂ 白天气辉远比夜气辉强, 白天气辉的余辉对早夜测量得到的夜气辉辐射率有很大贡献. O₂ 夜气辉辐射强度的地方时-纬度分布在分点时赤道附近有一

图 7 (a) OH 夜气辉辐射强度和 (b) O₂ 夜气辉辐射强度在 6 月至点和 12 月至点的纬度分布. 其中 6 月至点的分布被转向, 因此, 对于 12 月至点的分布, 横坐标从左到右表示从 50°S 到 50°N, 对于 6 月至点的分布, 横坐标从左到右表示从 50°N 到 50°S

个峰, 在至点有一个谷. O_2 夜气辉辐射层主要位于 75~100 km 之间, 辐射率的高度-纬度分布有三个峰, 它们在分点时分别位于春分半球 30° 附近、赤道上空和秋分半球 30° 附近, 其中位于赤道上空的峰最强, 峰高最低, 约为 85 km; 它们在至点时分别位于夏季半球 50° 附近、赤道附近和冬季半球 40° 附近. O_2 夜气辉辐射强度在所有纬度上均有季节变化特征, 在赤道附近有明显的半年变化特征和年变化特征, 半

年变化的峰值和谷值分别出现在分点和至点附近, 其中 3 月分点的峰值比 9 月分点的大. $20^\circ S$ 附近的年变化谷值位于年中, $20^\circ N$ 附近的位于年初(或年末). O_2 夜气辉的分布也有明显的南北半球不对称特征, 并且冬至 50° 附近和夏至 10° 附近的南北半球不对称最明显, 在低纬度地区 6 月至点的强度比 12 月至点的强, 在中高纬度地区 12 月至点的强度比 6 月至点的强.

参考文献

- 1 徐寄遥. 钠层对重力波响应的模拟研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34: 577-583
- 2 Xu J Y. Simulation of response of sodium layer to the propagation of gravity wave. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2004, 47: 335-342
- 3 Takahashi H, Sahai Y, Clemesha B R, et al. Diurnal and seasonal variations of the OH(8,3) airglow band and its correlation with OI5577Å. *Planet Space Sci*, 1977, 25: 541-547
- 4 Abreu V J, Yee J H. Diurnal and seasonal variation of the nighttime OH(8-3) emission at low latitudes. *J Geophys Res*, 1989, 94(A9): 11949-11957
- 5 Takahashi H, Sahai Y, Batista P P. Tidal and solar cycle effects on the OI 5577Å, NaD and OH(8,3) airglow emissions observed at $23^\circ S$. *Planet Space Sci*, 1995, 32: 897-902
- 6 Mulligan F J, Horgan D F, Galligan J G, et al. Mesopause temperatures and integrated band brightnesses calculated from airglow OH emissions recorded at Maynooth ($53.2^\circ N$, $6.4^\circ W$) during 1993. *J Atmos Terr Phys*, 1995, 57: 1623-1637
- 7 Buriti R A, Takahashi H, Gobbi D, et al. Semiannual oscillation of the mesospheric airglow at $7.4^\circ S$ during the PSMOS observation period of 1998-2001. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2004, 66: 567-572
- 8 López-González M J, Rodríguez E R, Wiens H, et al. Seasonal variations of O_2 atmospheric and OH(6-2) airglow and temperature at mid-latitudes from SATI observations. *Ann Geophys*, 2004, 22: 819-828
- 9 Melo S M L, Lowe R P, Takahashi H. The nocturnal behavior of the hydroxyl airglow at the equatorial and low latitudes as observed by WINDII: Comparison with ground-based measurements. *J Geophys Res*, 1999, 104: 24657-24665
- 10 Melo S M L, Lowe R P, Russell J P. Double-peaked hydroxyl airglow profiles observed from WINDII/UARS. *J Geophys Res*, 2000, 105: 12397-12403
- 11 Zaragoza G, Taylor F W, López-Puertas M. Latitudinal and longitudinal behavior of the mesospheric OH nightglow layer as observed by the Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder on UARS. *J Geophys Res*, 2001, 106: 8027-8033
- 12 Zhang S P, Roble R G, Shepherd G G. Tidal influence on the oxygen and hydroxyl nightglows: WINDII observations and TIME-GCM simulations. *J Geophys Res*, 2001, 106: 21381-21394
- 13 Shepherd M G, Liu G P, Shepherd G G. Mesospheric semiannual oscillation in temperature and nightglow emission. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2006, 68: 379-389
- 14 Evans W F J, Llewellyn E J, Vallance Jones A. Altitude distribution of the $O_2(^1\Delta)$ nightglow emission. *J Geophys Res*, 1972, 77: 4899-4901
- 15 Bishop R H, Baker K D, Han R Y. Altitude profile of $O_2(^1\Delta_g)$ at night. *J Atmos Terr Phys*, 1972, 84: 1477-1482
- 16 Thomas R J, Barth C A, Rusch D W, et al. Solar Mesosphere Explorer Near-Infrared Spectrometer: Measurements of $1.27\text{-}\mu m$ radiances and the inference of mesospheric ozone. *J Geophys Res*, 1984, 89: 9569-9580
- 17 Lopez-Moreno J J, Rodrigo R, Moreno F, et al. Rocket measurements of O_2 infrared atmospheric system in the nightglow. *Planet Space Sci*, 1988, 36: 459-467
- 18 McDADE I C, Llewellyn E J, Greer R G H. ETON 6: A rocket measurement of the O_2 infrared atmospheric (0-0) band in the nightglow. *Planet Space Sci*, 1987, 35: 1541-1552
- 19 徐寄遥, 纪巧, 袁伟, 等. TIMED 卫星探测的全球大气温度分布及其与经验模式的比较. 空间科学学报, 2006, 26: 177-182
- 20 Xu J, Smith A K, Yuan W, et al. Global structure and long-term variations of zonal mean temperature observed by TIMED/SABER. *J Geophys Res*, 2007, 112: D24106, doi: 10.1029/2007JD008546

- 21 Marsh D R, Smith A K, Mlynczak M G, et al. SABER observations of the OH Meinel airglow variability near the mesopause. *J Geophys Res*, 2006, 111: A10S05, doi: 10.1029/2005JA011451
- 22 Ward W E. A simple model of diurnal variations in the mesospheric oxygen nightglow. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3565–3568
- 23 Zhang S P, Shepherd Gordon G. The influence of the diurnal tide on the O(1S) and OH emission rates observed by WINDII on UARS. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 529–532
- 24 Fritts D C, Isler J R. Mean motion and tidal and two-day structure and variability in the mesosphere and lower thermosphere over Hawaii. *J Atmos Sci*, 1994, 51: 2145–2164
- 25 Xu, J Y, Smith A K, Liu H L, et al. Seasonal and QBO variations in the migrating diurnal tide observed by TIMED. *J Geophys Res*, 2009, 114: D13107, doi: 10.1029/2008JD011298
- 26 Gao H, Xu J Y, Wu Q. Seasonal and QBO variations in the OH nightglow emission observed by TIMED/SABER. *J Geophys Res*, 2010, 115: A06313, doi: 10.1029/2009JA014641
- 27 Zeng Z, Burns A, Wang W, et al. Ionospheric annual asymmetry observed by the COSMIC radio occultation measurements and simulated by the TIEGCM. *J Geophys Res*, 2008, 113: A07305, doi: 10.1029/2007JA012897