

基于MLS卫星临边探测数据研究大气OH时空分布

周丽花¹,张兴赢²,张晶¹

1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875
2. 中国气象局国家卫星气象中心,北京 100081

摘要 OH自由基是大气中重要的氧化剂,对大气中其他气体成分和气溶胶的形成和转化起着重要作用。本文利用MLS(microwave limb sounder)卫星观测资料,对大气平流层上层和中间层OH自由基的时空分布和变化以及中国上空OH自由基的垂直分布进行分析。结果显示,大气平流层上层和中间层OH自由基含量存在明显的季节变化和昼夜变化,在空间上的分布也随着太阳直射点的不同而呈现一定的周期性。比较了中国上空与同纬度纬向平均值,发现白天和夜间的观测值只有个别位置有较明显偏差,中国地区上空的OH含量比在整体上与同纬度比起来无明显异常,中国局地上空廓线的比较更加详细地反映了OH自由基的昼夜垂直结构。总之,中层大气OH自由基含量存在显著的昼夜变化、季节变化,同时也受太阳活动的影响,年际变化则不明显。

关键词 太赫兹临边探测;大气中层;OH自由基;时空分布

中图分类号 P407

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.007

Temporal and spatial distributions of atmospheric hydroxyl radicals based on the observation with the aura microwave limb sounder

ZHOU Lihua¹, ZHANG Xingying², ZHANG Jing¹

1. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
2. National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract OH radicals are important oxidants in the atmosphere, and play important roles in the formation and the conversion of other gases and aerosols in the atmosphere. This paper reviews the research progresses of OH radicals at home and abroad. The temporal and spatial distributions and the changes of the upper stratospheric and mesospheric OH radicals are analyzed based on the MLS (microwave limb sounder) satellite data, especially, the vertical distributions of OH radicals over China. It is shown that there are obvious seasonal and diurnal changes of the OH radical volume mixing ratio in the upper stratosphere and the mesosphere. Compared the OH radical volume mixing ratio over China with the zonal mean values of the same latitudes, it is found that the most of the observed volume mixture ratios of the day and the night are similar at the same latitudes, and there is no obvious difference between them. The profiles over some areas of China reflect the detailed vertical distributions of the day and the night. In a word, the diurnal and seasonal variations of the OH radical concentration in the middle atmosphere can obviously seen. The OH radical volume mixture ratio is also affected by the solar activity, and the annual variation is not significant.

Keywords THz limb detecting; middle atmosphere; OH radicals; temporal and spatial distribution

收稿日期:2015-06-18;修回日期:2015-07-11

基金项目:民用航天技术预先研究项目(E030103);中国气象局公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106045)

作者简介:周丽花,硕士研究生,研究方向为卫星大气成分遥感,电子信箱:lihua.zlh@mail.bnu.edu.cn;张兴赢(通信作者),研究员,研究方向为卫星大气成分遥感及其应用,电子信箱:zxy@cma.gov.cn

引用格式:周丽花,张兴赢,张晶.基于MLS卫星临边探测数据研究大气OH时空分布[J].科技导报,2015,33(17):69-77.

OH 自由基是环境大气中最重要的氧化剂,控制了绝大多数大气痕量成分的氧化去除^[1],因此OH 自由基研究对大气化学反应及其大气成分含量的测量具有重要意义^[2]。在城市大气化学过程中,OH 自由基起着重要作用,尤其是在光化学烟雾的产生、城市大气二次气溶胶的生成等过程中至关重要^[3,4]。1974年,对流层光化学反应机制基本被确立,OH 自由基最终被确认为对流层大气氧化性最主要的指标^[5,6]。OH 自由基可以与大气中其他有机物反应产生其他自由基^[7],形成较大颗粒气溶胶,从而启动了大气中的整个氧化链。由于大气中的微量成分种类繁多,这些成分之间相互影响,且关系复杂^[8],其中OH 自由基在其转化过程中起到关键性作用^[9]。

OH 自由基主要是由于太阳紫外辐射作用而生成的^[10]。大气O₃含量^[11]、对流层HO₂波动、闪电^[12]、NO_x和CO等其他温室气体的排放以及气候变化对OH 自由基的含量变化起到非常重要的作用^[13,14]。研究发现,土壤亚硝酸也可以产生OH 并排放到空气中,所以人类农业活动和土地利用的变化可以改变大气的氧化能力^[15]。

大气中OH 自由基的观测采用最多的方法是通过遥感仪器对其体积混合比或含量进行探测。Anderson等^[16]通过火箭携带光谱仪采用辐射荧光衰减方法,对大气平流层上层和中间层的OH 自由基做了最早的研究。William等^[17]通过使用热气球携带LIDAR对平流层中的OH 自由基进行了探测。还有研究人员^[18-20]通过热气球、飞机携带激光仪器或者地基观测光学仪器对对流层和平流层的OH 自由基和其他成分进行探测。卫星观测不同于局地观测,可对全球的OH 自由基分布进行连续观测,目前具有的可以观测OH 自由基含量的卫星载荷主要有中层大气高分辨率光谱仪研究(the middle atmosphere high resolution spectrograph investigation, MAHRSI)^[21]、太赫兹临边探测技术(microwave limb sounder, MLS)和空间外差光谱技术(the spatial heterodyne imager for mesospheric radicals, SHIMMER)^[22-24]。还有研究者对OH 的研究采用模式模拟的方法^[25],此方法也同时对卫星反演的OH 含量进行对比验证^[26]。地基观测太阳光吸收光谱法在研究大气OH 自由基的日变化、季节变化和年变化方面是一种精度较高的方法。

目前,拥有OH 自由基在线快速连续探测技术的研究单位,主要分布在德国、英国、日本和美国。中国只有少数关于地面观测OH 自由基的相关研究,如任信荣等^[27,28]利用2种基于高效液相色谱技术测定了北京城市大气中OH 自由基。中国科学院安徽光学精密机械研究所刘宇等^[29,30]介绍了超高分辨差分吸收光谱测量火焰中OH 自由基的试验方法与结果分析,获得了OH 自由基在308 nm 波段附近的6条特征吸收峰。利用此方法对蜡烛、酒精灯、酒精喷灯火焰中的OH 自由基进行了检测,并反演了它们的含量。

目前,中国关于卫星监测研究OH 自由基的研究尚未见报道。美国用于探测OH 自由基的载荷已采用了MLS 和SHIMMER。地球中高层大气成份的空间分布及其变化包含着丰富的地球科学和地域环境信息,其物理、化学和辐射等

过程与日地关系、全球变化和环境变化(包括空间环境和地面生态环境)有着重要的关系,因此,中国开展关于大气OH 的相关研究很有必要。本文针对高层大气中的重要氧化剂OH 自由基进行时空分析。

1 MLS 简介及数据资料

1.1 太赫兹临边探测技术简介

2004年7月15日,美国地球观测系统EOS (earth observing system)系列的第3颗卫星Aura 发射成功,该卫星搭载MLS,由美国喷气推进实验室JPL(jet propulsion laboratory)实验室负责载荷设备开发与应用,英国Edinburgh 大学负责数据处理算法研究、数据确认以及相关科学研究。MLS 的主传感器在辐射计部分做了很大改进,由原来的3个辐射计更改为7个,其中2.5 THz(V/H)辐射计用于测量OH。

电磁波频段中,0.1~10 THz 属于太赫兹波段,大气微量气体分子在该波段的热辐射具有较明显的辐射谱线,辐射谱线的中心频率对应不同的气体化学成分,谱线幅值与对应气体的体积混合比(volume mixture ratios, vmr)之间存在固定的函数关系。随着高稳定度太赫兹源技术与高分辨率太赫兹接收技术的发展,目前已经可实现对大气成分太赫兹热辐射谱的高灵敏度测量^[31]。

将太赫兹探测信号进行谱通道细分处理,获得不同化学成分的辐射谱线数据,打包回传至地面数据处理系统,然后基于实际条件下的辐射传输方程对探测数据进行积分,就得相应的Jacobian 矩阵,最后利用Gauss-Newton 迭代法求出参数解,进而反演出大气中这些微量分子的含量或相对丰度,以及大气温度 T 、位势高度等信息,并处理出不同时间尺度的大气成分全球分布图或纬向平均分布图^[32]。

与光学测量技术相比,太赫兹谱测量不受大气层中气溶胶、卷云以及CO₂变化等因素的影响,大气温度对其影响也较小,且可全天时工作,与紫外、可见光、红外等检测技术互为补充。与正下视微波测量技术相比,临边探测方式没有地面辐射信息的干扰,因此有利于对稀薄大气成分的探测,并且在轨运行时,被测大气在较长的时间内仍在视场内,测量的积分时间较长,因此具有较高的探测灵敏度,可测量10⁻⁹~10⁻¹⁰丰度的大气成分(ppbv~pptv 量级)。另外,临边探测的垂直分辨率更高,在大气层剖面内的分辨率优于3 km。因此,可以测量反演得到OH 和HO₂相对丰度。由于含量很低,要看到明显的含量值需要看卫星上升段测量的结果。太赫兹谱临边探测可测量到太阳耀斑导致的中间层OH 和HO_x含量的升高,以及O₃含量产生的相应变化。

1.2 数据资料

对流层上层和中间层OH 自由基强烈地被太阳活动影响,在太阳活动的11年周期中,在2009年保持低值。为了节省太赫兹观测仪器剩下的使用寿命,以便在太阳活动活跃年份进行观测,2009年11月—2011年8月暂停观测,因此在2010年全年没有数据。随着太阳活动变得活跃,太赫兹仪器

被重新启动进行每年8—9月份30 d的连续观测。选择在每年的这个时间段进行观测,是因为太赫兹仪器在太空中开始观测的时间是2004年8月,可以得到更长的时间序列研究年变化趋势。另一个方面,用于MLS OH观测验证的地基观测仪器位于34.4°N,且在夏天有最好的观测信号,而在冬天的观测信号最弱。综合上面2个原因,对每年的8月进行连续观测有利于得到更长的时间序列和对观测进行验证。自2014年以来,随着仪器的老化,信号噪音比以前更明显,而且在中低纬度的空间覆盖方面比较差。

本文所用的数据版本是V4.2x,与V2.2、V3.3x、V3.4x相比在质量上有明显的提高。和以前的版本相比,在一些季节和纬度上,中间层OH数据噪音降低。另外一个提高是在10~15 hPa高度上有更小的偏差。因此日夜偏差订正只需在21和32 hPa等压面上进行。同时发现夜间中间层大气OH垂直廓线有更多的波动值。

OH含量有剧烈的昼夜变化,垂直分辨率在白天和夜间有些许的不同。夜间的分辨率可以研究82 km高度上OH层,高于0.01 hPa高度垂直分辨率达到2.5 km,水平分辨率沿轨道是2.5×165 km。

廓线可以用体积混合比和密度单位表示,所有的MLS数据采用体积混合比表示。对数据的使用要符合数据说明里的条件,根据卫星数据说明,在32~0.0032 hPa高度范围内的数据可用于科学研究,超过这个范围,则不推荐使用。

2 对流层上层和中间层OH自由基的时空分布

2.1 太阳活动对OH自由基分布的影响

科罗拉多大学Greg等^[33]指出:在11年的太阳活动周期中,太阳亮度有所变化,总辐射量增加0.1%,然而其微小变化仍然具有重要影响。

太阳的极度紫外线辐射是一个特别重要的影响因素,这种辐射往往在太阳活动峰年前后的年份达到高峰期。在波长相对较短的极度紫外线辐射期间,太阳辐射量的增加远大于0.1%,猛增10倍或更大,这会严重地影响到上层大气的化学成分和热结构,相关研究表明,在太阳质子事件期间,中层OH含量具有明显的波动^[34],大气OH自由基可以作为太阳活动的指标^[35]。

从1755年记录太阳活动周期以来,目前所处为第24个太阳周期,于2008年开始。2006年12月,是太阳活动活跃的时期,2009年是太阳活动保持低值的年份,所以选2006年12月和2009年12月对各层求平均得出全球OH自由基含量的分布来进行对比。画图时把沿轨道的数据进行了插值,黄色和红色(大值)的连续条带为白天观测值,蓝色条带为夜间观测值,沿着轨迹线具有观测连续性,而越在低纬度地区,空间分辨率越低,图中的白色区域部分是剔除了不可用值的地区。从图1可看出,无论是在2006年还是2009年,OH自由基含量的全球空间分布都是南半球高于北半球,这是因为在冬季观测的缘故。对比2006年和2009年同期的全球分布,发现2006年的垂直平均值在全球的分布明显高于2009年,这是因为太阳活动的影响。

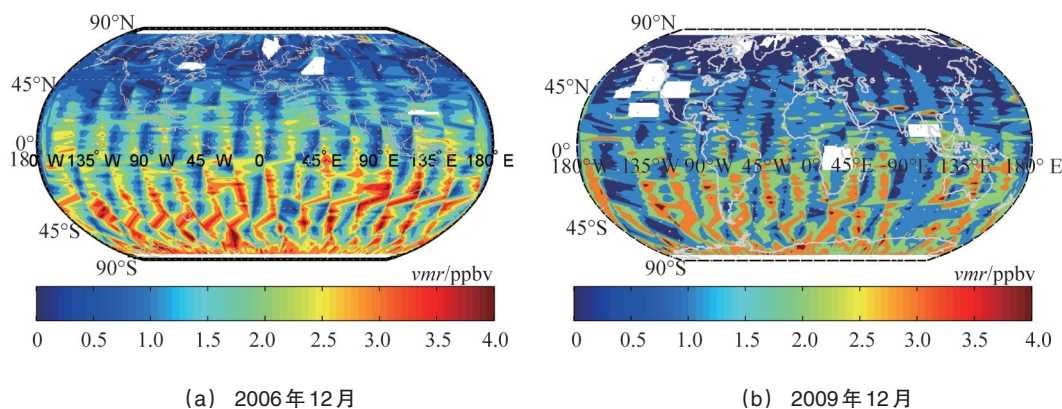


图1 2006年(太阳活动活跃时段)和2009年(太阳活动不活跃时段)32~0.0032 hPa高度范围OH自由基平均全球分布

Fig. 1 OH radical volume mixture ratio (vertical average from 32 to 0.0032 hPa) global distribution in 2006 December (solar energetic particle events) and in 2009 December (no solar energetic particle events)

2.2 大气OH自由基季节性空间分布

分析数据发现,OH自由基观测含量在探测器刚被发射升空的一段时间数据比较稳定,且质量较高,再者,在2005年有较长的持续观测时间。为了分析中层OH自由基含量在全球的分布随季节的变化,选用一年中对四季有代表性的日期春分、夏至、秋分和冬至的观测数据进行对比分析,之所以选在这些时间段,是因为太阳正好在这些日期直射赤道、北回

归线、赤道和南回归线。对典型日期的分布进行分析,可分析OH自由基在全球的季节性分布特征。数据是对32~0.0032 hPa高度范围的平均,且按照数据说明要求剔除了不可用值,并进行了格点插值。

从图2中发现,OH自由基在全球的分布随着季节的变化呈现一定的周期性,随着太阳最大辐射值的南北移动,其含量大值区也随之移动。在春分日和秋分日,太阳直射赤道,

赤道地区为接收太阳辐射能量最多的地区^[36,37],也是OH含量大值区的分布地带(图2(a)和(c)),在赤道地区有极大值,随着纬度的升高,含量逐渐降低,在两极是含量极小值区。在夏至,太阳直射北回归线,是北半球在一年中接收太阳辐射最多的时间段,且北极出现极昼现象,南极出现极夜现象,由

图2(b)可看出,在整个北半球,OH自由基含量都有比较高的值,此时正好是南半球的冬季,OH含量值明显低于北半球。而在冬至图中(图2(d)),正好是与夏至图相反的分布,在冬至太阳直射南回归线,此时南半球接收的太阳辐射在一年中处于高值,相应地,极大值区主要分布在南半球。

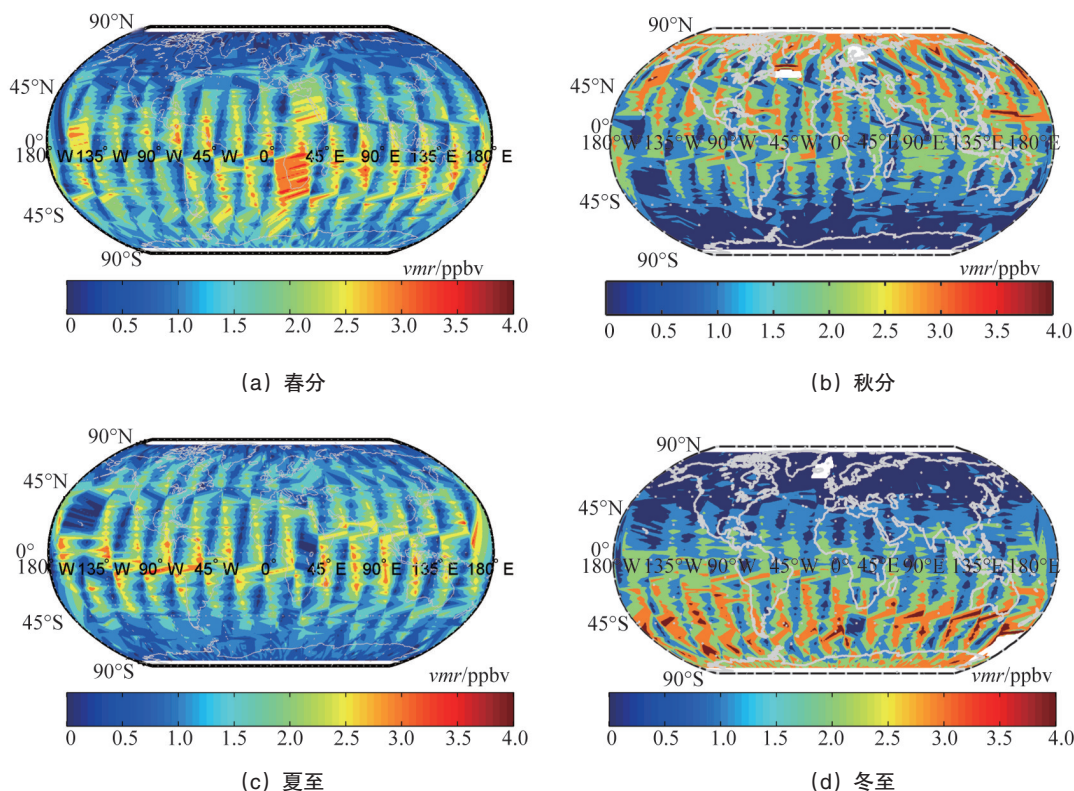


图2 平流层和中间层大气OH自由基垂直平均含量在全球的分布

Fig. 2 Global distribution of the vertical OH radical average volume mixture ratio in the stratosphere and the mesosphere

分析表明,太阳直射点的南北季节性移动与大气OH自由基含量大值区的分布有很高的相关性,说明OH是光化学反应中最活跃的物质之一,太阳辐射越强,OH含量越高。

2.3 垂直剖面分析昼夜垂直结构

全球OH自由基含量的变化随季节变化存在一定周期

性,为分析白天和夜间大气OH垂直结构分布,同时考虑OH在大气中的含量存在明显昼夜变化,特选择2005年秋分日白天和晚上的观测值求纬向平均得到纬度-高度剖面图(图3)。

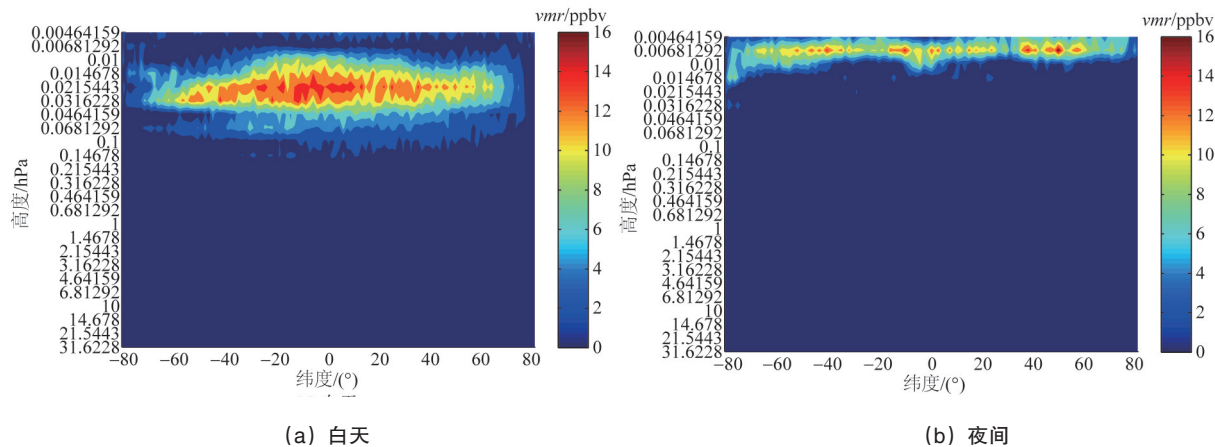


图3 秋分日白天和夜间OH自由基含量剖面图

Fig. 3 Relative abundance of OH profiles in the autumnal equinox day and night

从图3可看出,白天和夜间的垂直分布有明显的不同。白天在垂直方向上大值区分布高度在0.046~0.01 hPa,在0.025 hPa高度上的峰值更加明显,且随着纬度升高,即向两极方向,峰值大值区的范围减小,在低纬度和赤道附近,OH含量最大,向两极呈现减少的趋势。夜间大值区的范围位于0.01~0.0045 hPa,夜间大值区在高度剖面上的分布特征为:赤道和低纬度大值区在垂直高度范围相对较宽,中纬度变窄,在高纬又变宽。夜间分布与白天相比,夜间的峰值区比白天在垂直高度上要高,但峰值区的范围没有白天在垂直高度上宽,且含量低于白天,随纬度的变化趋势也不同。

2.4 中国区域OH自由基纬向平均和年际变化

图4所用数据为2005年秋分日观测数据。分别对白天数据和夜间数据进行对比。从白天观测看,中国上空大值区的分布与同纬度平均值的分布在高度上具有较好一致性,仅个别值与平均值有较大偏差,在20°N~40°N范围,在0.03 hPa高度上比同纬度平均值偏低,在0.01 hPa高度上比同纬度平均值偏高;在40°N~55°N范围内正好相反。从夜间图中看出,大值区高度和含量的大小都与平均值有较好一致性,在大值区,25°N~38°N中国区域含量值比同纬向平均值偏小,在38°N~45°N比平均值偏大,在45°N~50°N又比平均值偏小。

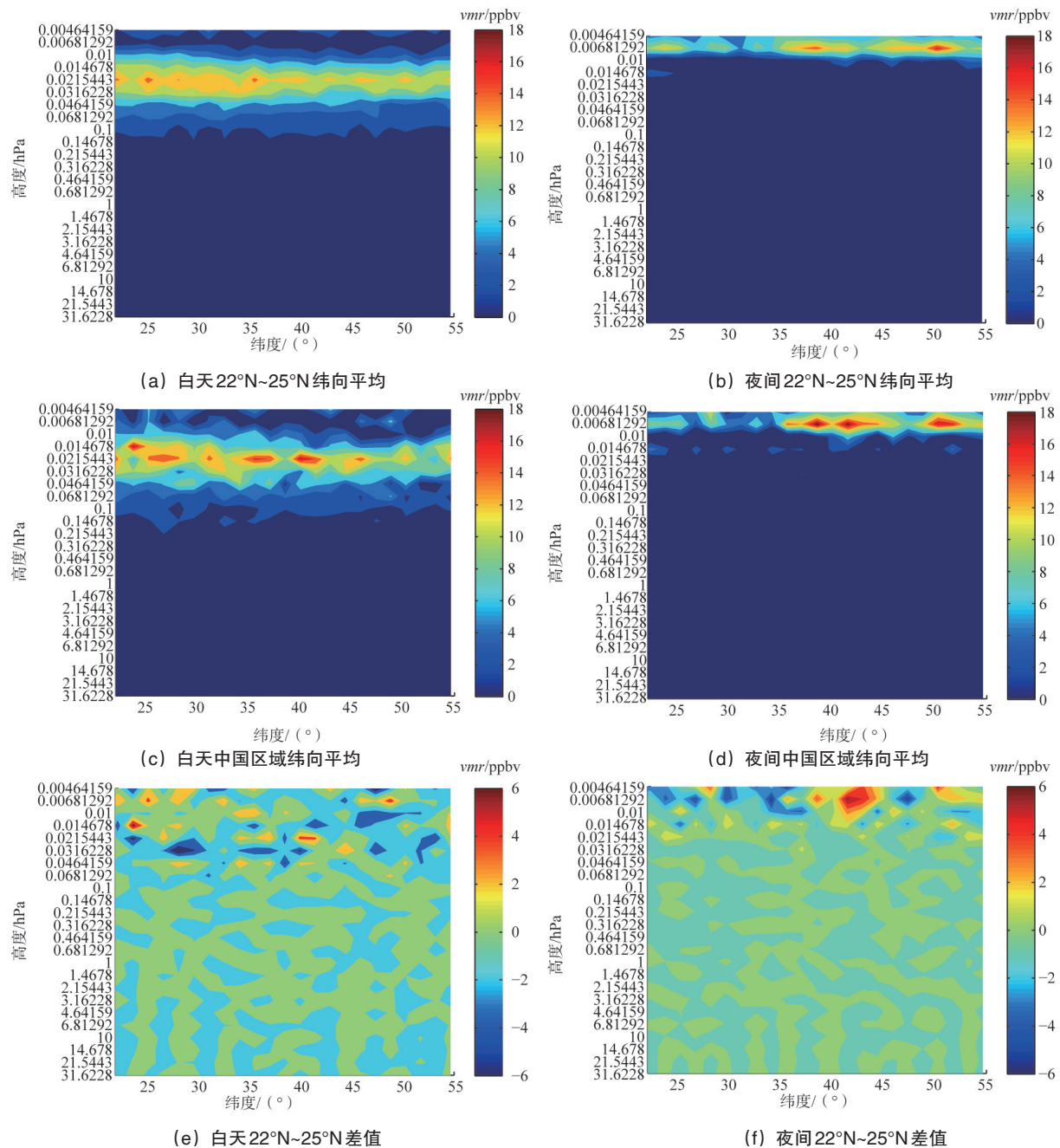


图4 OH自由基纬向平均含量、中国区域纬向平均含量和两者差值(中国区域平均值-纬向平均值)

Fig. 4 Average volume mixture ratio along latitude, average concentration along latitude over China and the anomalies (the latter-the former)

为了比较OH自由基在每一年典型的分布特征,又考虑到现有数据和数据质量,特选取2004年(图5(a))、2005年(图5(b))、2006年(图5(c))、2007年(图5(d))、2008年(图5(e))和2009年(图5(f))秋分日34°N~35°N在中国上空白天和夜间OH廓线数据,如图5所示。在2010年MLS仪器暂停1年,所以在这一年中没有数据。在2011—2014年,MLS开启继续观测,但在这期间,有的年份在秋分日没有数据,所以选取每年的9月14日在相同区域白天和夜间观测的数据进行对比,如图6所示。

从图5和图6可看出,从逐年比较看,白天和夜间峰值

区依然在不同高度上,夜间峰值高度高于白天,但夜间含量最大值没有白天含量最大值高,再次表明OH的含量与太阳辐射有着密切关系,太阳短波辐射有助于OH自由基的生成与存在^[38]。观察每一年廓线峰值区的极大值,发现其含量随时间(年)的变化并没有剧烈的变化。在2004—2014年(2010年除外),白天的OH含量极大值在15~25 ppbv,夜间的OH含量极大值在5~15 ppbv。但是,观察2013年和2014年白天和夜间在垂直方向的极大值,与图3全球平均纬向-高度分布有较大偏差,在2014年,随着高度的变化,出现了数个波动峰值,这与观测仪器噪音增大有很大的关系。

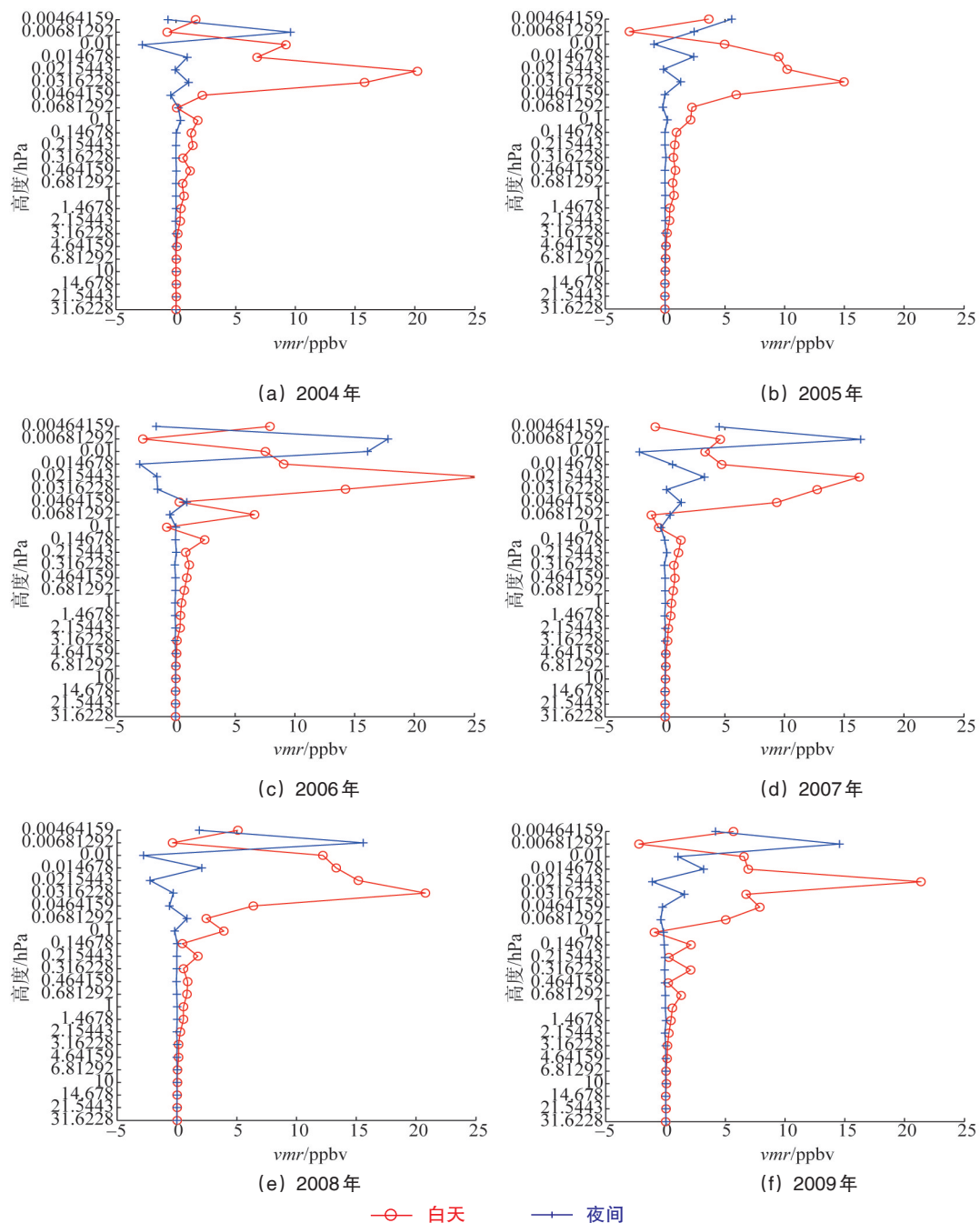


图5 秋分日白天和夜间OH体积混合比 vmr廓线

Fig. 5 OH profiles of day and night in the autumnal equinox

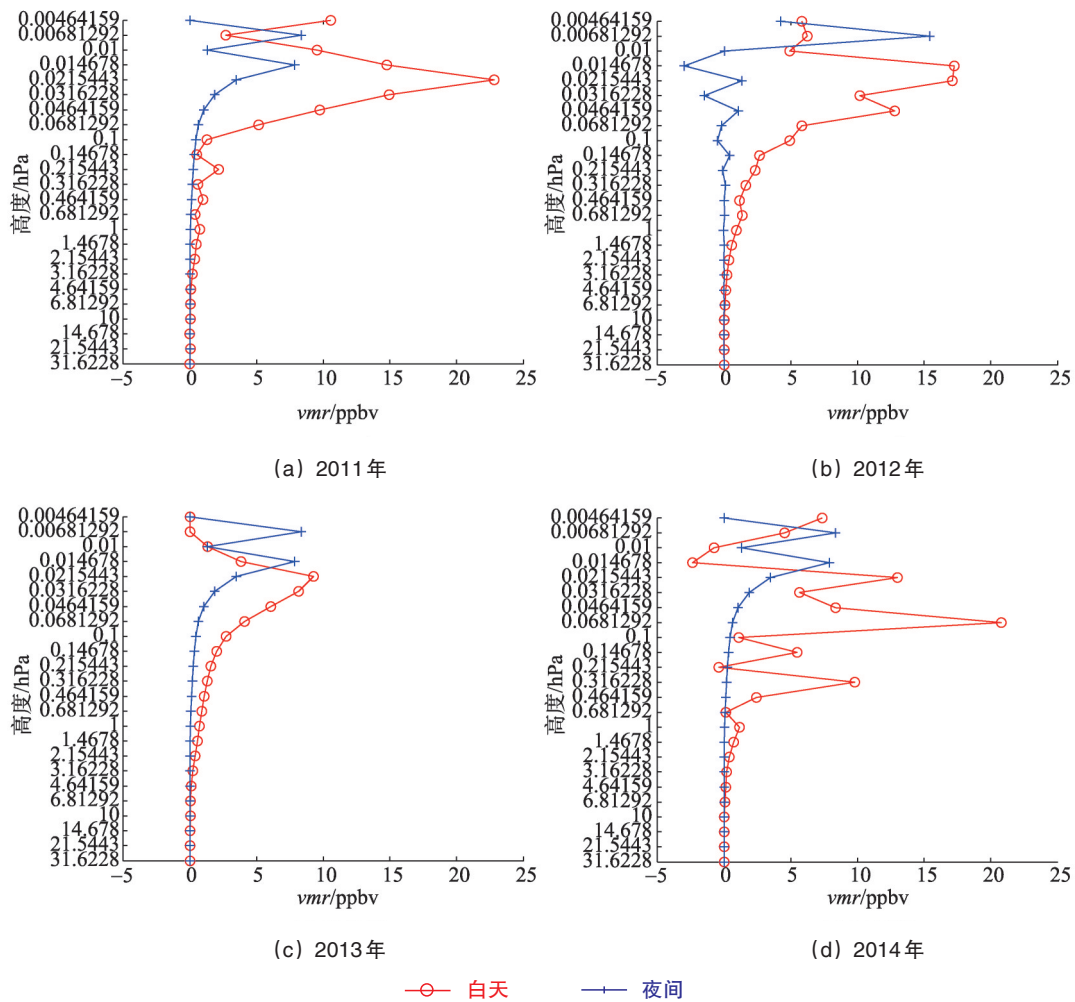


图6 9月14日白天和夜间OH vmr廓线

Fig. 6 OH profiles of day and night in September 14th

3 讨论

分析发现,OH自由基是大气中很活跃的痕量成分,要得到大气OH自由基随时间的变化,做平均统计可能会失去意义,因为会平滑掉周期较小的变化,所以以上的分析不是在连续时间上的时间序列分析,而是选取典型时间的数据进行了对比。要得到可靠的时间序列分析,就需要时间分辨率较高的数据,所以对数据的时间分辨率有较高的要求,地基观测数据在这方面更加有优势。但是MLS卫星数据可对大范围空间进行观测,虽然空间分辨率也较低,但从全球OH自由基随季节的全球分布图中也能发现OH自由基随季节的变化规律。太阳活动活跃时段大气OH自由基含量高于不活跃年份,说明太阳质子事件对大气OH具有重要的影响。由于地球公转,太阳直射点南北周期变化,从而大气层接收到的太阳辐射度随季节变化,对应OH自由基随季节的变化说明太阳辐射强度与大气OH的含量关系密切。对纬向剖面的分析,可以看出OH在大气中的垂直结构,发现其主要分布在中层。粗略对比了中国区域与同纬度的纬向剖面分布,如果数

据分辨率较高,可能会分析出更有价值的结果。由于缺乏全年持续的观测数据,且空间分辨率也低,所以在空间和时间上小尺度的变化异常在本文中未涉及。所用数据从2014年开始,质量下降,参考意义受到影响。

4 结论

对大气平流层和中间层OH自由基含量在全球空间分布、季节变化和昼夜变化、中国区域分布进行了分析。

1) 对太阳活动活跃时间段和太阳活动不活跃时间段在垂直方向上求OH平均含量得出全球分布,发现其含量分布和大小在整体上有明显的差别,太阳活动活跃年份OH含量高于不活跃年份。

2) 大气OH含量具有明显的季节变化:夏季北半球含量总体高于南半球;冬季南半球含量总体高于北半球,春季和夏季大值区在赤道和低纬地区。

3) OH的分布具有剧烈的昼夜变化,白天的含量总体高于夜间的含量,但白天大值区垂直高度低于夜间的大值区高

度,说明日照对大气OH的含量及其垂直结构产生显著影响。

4) 在典型日期比较了中国上空的廓线平均值与同纬度所有观测数据平均值,并求出距平值,发现不管是白天还是夜间,观测值只有个别值与同纬度比起来有较明显偏差,说明中国地区上空的OH大值区在整体上与同纬度比起来无明显异常。但是,在白天,北方和南方的偏差在垂直结构上有区别,并不在一条水平线上。在夜间,北方有明显的偏大值,南方有些许偏小值。OH含量的年际变化较小,比较稳定,远不及昼夜变化剧烈。

参考文献(References)

- [1] Wang H T, Zhu D S, Wang W, et al. The impact of HS radicals on the measured rate constant of H₂S with OH radicals[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 55(26): 2951–2955.
- [2] Liao C H, Kang S F, Wu F A. Hydroxyl radical scavenging role of chloride and bicarbonate ions in the H₂O₂/UV process[J]. *Chemosphere*, 2001, 44(5): 1193–1200.
- [3] Xiang Q, Yu J, Wong P K. Quantitative characterization of hydroxyl radicals produced by various photocatalysts[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 357(1): 163–167.
- [4] Zhao D F, Kaminski M, Schlag P, et al. Secondary organic aerosol formation from hydroxyl radical oxidation and ozonolysis of monoterpenes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(2): 991–1012.
- [5] 林云萍, 赵春生. 对流层大气氧化性研究进展[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(5): 488–496.
Lin Yunping, Zhao Chunsheng. The oxidation in the troposphere: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(5): 488–496.
- [6] Stuhl B K, Hummon M T, Yeo M, et al. Evaporative cooling of the dipolar hydroxyl radical[J]. *Nature*, 2012, 492(7429): 396–400.
- [7] Wang C, Chen Z. Effect of CH₃OOH on the atmospheric concentration of OH radicals[J]. *Progress in Nature Science*, 2006, 16(11): 1141–1149.
- [8] Amedro D, Parker A E, Schoemaeker C, et al. Direct observation of OH radicals after 565nm multi-photon excitation of NO₂ in the presence of H₂O[J]. *Chemical Physics Letters*, 2011, 513(1–3): 12–16.
- [9] Prinn R G, Huang J, Weiss R F, et al. Evidence for substantial variations of atmospheric hydroxyl radicals in the past two decades[J]. *Science*, 2001, 292(5523): 1882–1888.
- [10] Rohrer F, Berresheim H. Strong correlation between levels of tropospheric hydroxyl radicals and solar ultraviolet radiation[J]. *Nature*, 2006, 442(7099): 184–187.
- [11] Slade J H, Thalman R, Wang J, et al. Chemical aging of single and multicomponent biomass burning aerosol surrogate-particles by OH: Implications for cloud condensation nucleus activity[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2015, 15(5): 6771–6819.
- [12] Murray L T, Logan J A, Jacob D J. Interannual variability in tropical tropospheric ozone and OH: The role of lightning[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(19): 11468–11480.
- [13] Reimann S, Manning A J, Simmonds P G, et al. Low European methyl chloroform emissions inferred from long-term atmospheric measurements[J]. *Nature*, 2005, 433(7025): 506–508.
- [14] Lee J, Lane D A. Formation of oxidized products from the reaction of gaseous phenanthrene with the OH radical in a reaction chamber[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(20): 2469–2477.
- [15] Su H, Cheng Y F, Oswald R, et al. Soil nitrite as a source of atmospheric HONO and OH radicals[J]. *Science*, 2011, 333(6049): 1616–1618.
- [16] Andersson M E, Verronen P T, Wang S, et al. Precipitating radiation belt electrons and enhancements of mesospheric hydroxyl during 2004–2009[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D9): 9304–9306.
- [17] William S. Heaps T J M. Balloon borne LIDAR measurements of stratospheric hydroxyl radical[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 1983, 88(C9): 5281–5289.
- [18] Cheung R, Li K F, Wang S, et al. Atmospheric hydroxyl radical (OH) abundances from ground-based ultraviolet solar spectra: An improved retrieval method[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(33): 6277–6284.
- [19] Osterman G B, Salawitch R J, Sen B, et al. Balloon-borne measurements of stratospheric radicals and their precursors: Implications for the production and loss of ozone[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(9): 1107–1110.
- [20] Cageao R P, Blavier J F, McGuire J P, et al. High-resolution Fourier-transform ultraviolet-visible spectrometer for the measurement of atmospheric trace species: Application to OH[J]. *Optical Society of America*, 2001, 40(12): 2024–2030.
- [21] Conway R R, Summers M E, Stevens M H. Satellite observations of upper stratospheric and mesospheric OH: The HO_x dilemma[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(17): 2613–2616.
- [22] Ricaud P, De La Noë J, Connor B J, et al. Diurnal variability of mesospheric ozone as measured by the UARS microwave limb sounder instrument: Theoretical and ground-based validations[J]. *Journal of Geophysical Research* 1996, 101(D6): 10077–10089.
- [23] Millán L, Wang S, Livesey N, et al. Stratospheric and mesospheric HO₂ observations from the Aura Microwave Limb Sounder[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(5): 2889–2902.
- [24] Stevens M H, Englert C R, Hervig M, et al. The diurnal variation of polar mesospheric cloud frequency near 55°N observed by SHIMMER [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, 71(3–4): 401–407.
- [25] Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D19): 23073–23095.
- [26] Siskind D E, Stevens M H, Englert C R, et al. Comparison of a photochemical model with observations of mesospheric hydroxyl and ozone [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(1): 195–207.
- [27] 任信荣, 王会祥, 邵可声, 等. 北京市大气OH自由基测量结果及其特征[J]. *环境科学*, 2002, 23(4): 24–27.
Ren Xinrong, Wang Huixiang, Shao Kesheng, et al. Determination and characteristics of OH radical in urban atmosphere in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(4): 24–27.
- [28] 任信荣, 邵可声, 缪国芳, 等. 大气OH自由基浓度的测定[J]. *中国环境科学*, 2001, 21(2): 20–23.
Ren Xinrong, Shao Kesheng, Miao Guofang, et al. Determination of hydroxyl radical concentration in atmosphere[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(2): 20–23.
- [29] 刘宇, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 超高分辨差分吸收光谱技术测量火焰中OH自由基[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(10): 2659–2663.
Liu Yu, Liu Wenqing, Kan Ruifeng, et al. Measurement of OH radi-

- icals in flame with high resolution differential optical absorption spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(10): 2659-2663.
- [30] Dusanter S, Vimal D, Stevens P S. Technical note: Measuring tropospheric OH and HO₂ by laser-induced fluorescence at low pressure. A comparison of calibration techniques[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(2): 321-340.
- [31] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007(7): 3-14.
Zhang Xingying, Zhang Peng, Fang Zongyi, et al. The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring[J]. Meteorological Monthly, 2007(7): 3-14.
- [32] Mahajan A S, Whalley L K, Kozlova E, et al. DOAS observations of formaldehyde and its impact on the HO_x balance in the tropical Atlantic marine boundary layer[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2010, 66(3): 167-178.
- [33] Greg K, George L, Gary R. The total irradiance monitor (TIM): Science results[J]. Solar Physics, 2005, 2005(230): 129-139.
- [34] Jackman C H, Randall C E, Harvey V L, et al. Middle atmospheric changes caused by the January and March 2012 solar proton events[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(2): 1025-1038.
- [35] Damiani A, Storini M, Rafanelli C, et al. The hydroxyl radical as an indicator of SEP fluxes in the high-latitude terrestrial atmosphere[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(9): 1225-1235.
- [36] 寿绍文, 唐东昇, 朱乾根, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 152-153.
Shou Shaowen, Tang Dongsheng, Zhu Qiangen, et al. The principles and methods of weather science[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 152-153.
- [37] 杨军. 气象卫星及其应用(上)[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 21-22.
Yang Jun. Meteorological satellites and their applications (I)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 21-22.
- [38] Minschwaner K, Manney G L, Wang S H, et al. Hydroxyl in the stratosphere and mesosphere-Part 1: Diurnal variability[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(3): 955-962.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·



中国科学技术协会

中国科协第104期“新观点新学说学术沙龙”召开

2015年8月22—23日,主题为“南极海洋生物量的物质收支-系统演化假说”的中国科协第104期“新观点新学说学术沙龙”在南京举行。南京大学高抒教授、中国极地研究中心研究员孙波、同济大学教授杨守业担任领衔科学家,来自国家海洋局、中国科学院、高等高校的20余位专家与会,围绕南极海区的高生产力区以及物质、能量循环特征与生态系统稳定性、南极海区的物质收支格局与营养物质浓度水平和生态系统演化的关系、南极生态环境变化的沉积记录3个中心议题进行了充分交流。

与会专家经过讨论提出:

1) 南极海域的高生物生产受绕极流及其内圈下沉流的强烈影响,南大洋底层水涌升不仅加强了垂向混合作用,而且为表层生物提供丰富的营养物质,而近岸水域的下沉流将表层的高生物生产物质返回到深层海水中,从而产生累积效应,因而下沉流物质组成成为验证这个假说的关键。

2) 近岸水域生物生产与冰川冰和海冰的动态紧密相关,其机理不仅涉及冰山的物质供给效应,而且对低温下的生物适应或生物生存策略也有显著影响,两者的相对重要性尚待评价。由于南极海域的生态系统过程极其复杂,尚需通过建立生态系统动力模型厘清物质和能量循环的空间分布与时间演化以及不同时空尺度上的主控因素,探索系统演化的过程与机理。

3) 对于生态环境变化的沉积记录,应在对比现代生产力和古生产力的测算方法的基础上,综合采用多指标(例如常量元素同位素、非传统痕量元素同位素、有机地球化学指标、DNA等)进行沉积记录解译和古环境、古生物生产反演,利用沉积记录反演主控的过程和机理。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/16622293.html>。