

卫星遥感中国对流层中高层大气甲烷的时空分布特征

张兴赢^{①②}, 白文广^①, 张鹏^①, 王维和^①

① 中国气象局国家卫星气象中心, 遥感卫星辐射测量和定标重点实验室, 北京 100081;

② 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

E-mail: zxy@cma.gov.cn

2011-02-17 收稿, 2011-07-04 接受

国家自然科学基金(40905056)、科技部公益气象行业专项(GYHY201106045)和大气边界层物理和大气化学国家重点实验室基金(LAPC-KF-2008-11)资助项目

摘要 利用美国 Aqua 卫星的 AIRS 遥感资料, 分析了 2003~2008 年中国地区对流层中高层大气甲烷的时空分布特征. 研究发现, AIRS 观测结果与近地面观测资料变化趋势一致, 与地基遥感的误差在 1.5% 以内. 受近地层自然排放与人为活动的共同影响, 中国对流层甲烷在垂直分布上呈现典型的变化趋势: 随着高度的增加甲烷浓度下降. 甲烷在我国东部和北部地区具有明显的双峰季节变化特征, 最高值存在夏季, 次高值出现在冬季, 与近地面观测结果一致, 而南部地区冬季没有显著增加的人为来源, 西部地区人为活动稀少, 因此在南部和西部地区的甲烷高值只出现在自然源排放强烈的夏季. 中国地区的对流层中高层的甲烷与北半球的几个主要地区变化趋势一致, 均在 2007 年之前保持相对稳定, 在 2007 年后有一个明显的增长, 但是中国的增长速度较其他地区更为显著, 其中 2006~2008 年期间的增长速率与我国近地面观测结果相近.

关键词

卫星遥感
对流层中高层
甲烷
时空分布特征

作为仅次于二氧化碳(CO_2)的第二大温室气体, 甲烷(CH_4)自工业革命以来在大气中的含量迅速增加, 目前已是工业化前的两倍多, 20 世纪 80 年代中期, CH_4 含量以高达每年 1% 左右的速度增长^[1,2], 但近年来又发现 CH_4 的增长速度趋缓, 1992 年甚至出现了 CH_4 增长率下降的异常现象^[3]. CH_4 的浓度变化对大气的化学过程和气候变化都具有重要的作用, 作为一种重要的温室效应气体, CH_4 对温室效应增强作用约占 20%^[4], 仅次于 CO_2 . 虽然 CH_4 在空气中的含量远远低于二氧化碳, 但是单位浓度 CH_4 的温室效应却比 CO_2 大 25 倍, 大气 CH_4 持续增长会对地球的辐射平衡产生效应, 直接影响气候变化^[5]. CH_4 还是大气中最重要的化学活性含碳化合物, 其对流层化学改变 OH 和 CO 浓度, 在大气 O_3 和 H_2O_2 的化学中起着重要作用^[6,7]. 尽管大气 CH_4 如此重要, 对它的研究却并不充分, 断续、分散的观测可追溯到 20 世纪

60 年代, 系统研究则始于 20 世纪 80 年代^[7,8]. 1983 年起, 世界气象组织(WMO)相继在全球不同经纬度地区建立大气本底监测站网, 连续监测近地面层大气 CH_4 浓度变化, 但由于观测台站有限, 全球许多地方存在观测空白, 同时依靠飞机对高空的甲烷分布信息进行监测时空覆盖低, 因此至今人们对甲烷的全球分布及其变化规律还难以系统掌握^[8~11].

卫星遥感的方法, 可以提供稳定、长时间序列、广空间区域、地面或高空三维的大气监测信息, 可以有效弥补近地面观测的不足^[12]. 因此近年来国际上许多研究人员基于甲烷在红外 7.66, 3.3 和 2.3 μm 的光谱吸收特性利用卫星遥感技术来获取长时间序列、广空间区域、高空三维的甲烷遥感监测信息^[13~23]. 2002 年 5 月发身升空的美国 Aqua 卫星, 搭载了 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)仪器, 该仪器通过对红外光谱的探测, 实现了对流层中高层 CH_4 信息的提

取^[13,14]. 本文利用地面观测资料对 AIRS 对流层 CH₄ 产品进行了验证, 并且利用近 6 年(2003~2008 年)的 AIRS 监测产品研究中国地区对流层中高层甲烷的时空分布特征.

1 数据资料

1.1 AIRS 甲烷遥感产品

AIRS 是搭载于 Aqua 卫星的红外探测器, 光谱覆盖短波 3.74~4.61 μm 、中波 6.20~8.22 μm 、长波 8.80~15.4 μm 3 段, 共有 2378 个通道, 光谱分辨率平均为 1200($\lambda/\Delta\lambda$), 观测误差在 0.2 k 量级. AIRS 采用天底观测模式, 其星下点空间分辨率为 13.5 km, 扫描宽度 1650 km, 扫描角度为 $\pm 49.5^\circ$, 瞬时视场 1.1° . 每天扫描全球 2 次. 本文涉及的卫星数据来自美国宇航局(NASA)AIRS 官方反演的对流层 CH₄ 体积混合比产品(<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>), 该产品给出了甲烷在 407.25 hPa(约 5 km), 306.75 hPa(约 7 km)和 206.25 hPa(约 11 km)的体积混合比. 该产品采用了 SVD (singular value decomposition)反演方法^[13~18], 利用 AIRS 具有较高的光谱分辨率和信噪比的 7.66 μm 观测谱段, 来实现对大气中 CH₄ 的精确探测. 已有研究人员利用飞机观测开展对该探测产品的真实性检验, 结果显示 AIRS 可以探测得到高精度的甲烷产品^[13~17], 并且可用于分析研究大气中的甲烷分布和传输规律^[16,17].

1.2 地面甲烷观测资料

本文使用的甲烷近地面观测资料是位于我国青海瓦里关的全球大气本底观测站($36^\circ 17' \text{N}$, $100^\circ 54' \text{E}$, 海拔 3816 m)的观测结果, 该站位于青藏高原东北边缘, 1994 年 9 月正式投入运行, 是 WMO-GAW(全球大气监测网)位于各典型气候和生态代表区域的 22 个全球基准站之一, 按照 GAW 全球基准站选址要求和建议的观测要素^[24,25], 开展了包括温室气体、臭氧层、太阳辐射、降水化学、气溶胶、反应性气体、气象要素等的长期观测^[26], 有关数据的观测和质量控制方法参见文献[27,28].

地基遥感观测数据来自于国家卫星气象中心的地基高光谱遥感观测实验室, 该观测实验室位于国家卫星气象中心 12 层楼顶, 利用德国 BRUKER 公司生产的地基傅立叶(FTIR)红外高光谱仪(IFS 120M), 按照全球大气成分变化观测网(NDACC, Network for

the Detection of Atmospheric Composition Change)观测规范^[29,30], 自主开展地基遥感观测温室气体廓线和柱总量^[31].

2 结果讨论与分析

2.1 AIRS 甲烷数据的地基验证

本文利用中国地区全球大气本底站(瓦里关站)2003 年以来大气 CH₄ 观测数据开展对卫星产品的定性比对验证. 该数据由中国气象科学研究院与美国国家海洋大气管理局气候监测与诊断实验室(NOAA-CMDL)合作, 利用空气样品瓶(Flask)采样测量的大气 CH₄ 分析数据(距地 5 m 采样高度, 每周一对空气样品, 运送至 CMDL 进行空气样品成分分析), 图 1 展示了瓦里关近地面观测数据与 AIRS 在对流层 3 层观测资料比较结果, 可以明显地看出: 近地面观测结果和 AIRS 观测资料具有一致的季节变化特征, 同时可以看出从近地层到对流层顶, 甲烷的浓度随着高度下降.

为了进一步定量检验 AIRS 遥感产品的真实性, 利用地基傅立叶红外高光谱于 2009 年 1~6 月期间在北京的国家卫星气象中心楼顶开展甲烷观测, 利用观测数据与同一时期 AIRS 的 3 层产品进行比对(图 2), 其中线条是观测时期内地基遥感观测甲烷平均廓线结果, 3 个点的数据分别代表 AIRS 在同一时期内不同高度的平均结果. 结果显示 AIRS 的对流层观测资料与地基遥感的误差在 0.2%~1.1%以内, 这一精度与此前国外的飞机航测验证结果(0.5%~1.6%)相当^[13], 证明了 AIRS 的观测资料具备了相当的精度, 可用于开展应用分析研究.

2.2 中国甲烷空间分布特征

图 3 展示了中国地区 2003~2008 年对流层不同高度甲烷的平均分布结果, 在对流层中部地区(407.25 hPa), 由于近地面甲烷排放的影响, 甲烷浓度显著高于对流层中上部(306.25 hPa)和对流层层顶(206.75 hPa). 其中高值主要分布在我国的东部、东北部, 南部以及西北部城市群地区, 可能和上述地区稻田和天然沼泽的排放有关. 东南部近海区域相对于远海地区含量相对要高, 主要是近陆海洋与大陆上空的频繁空气交换有关. 在中国西部的青藏高原是典型低值中心, 一方面与该地区海拔较高有关, 另一方面这些地区人

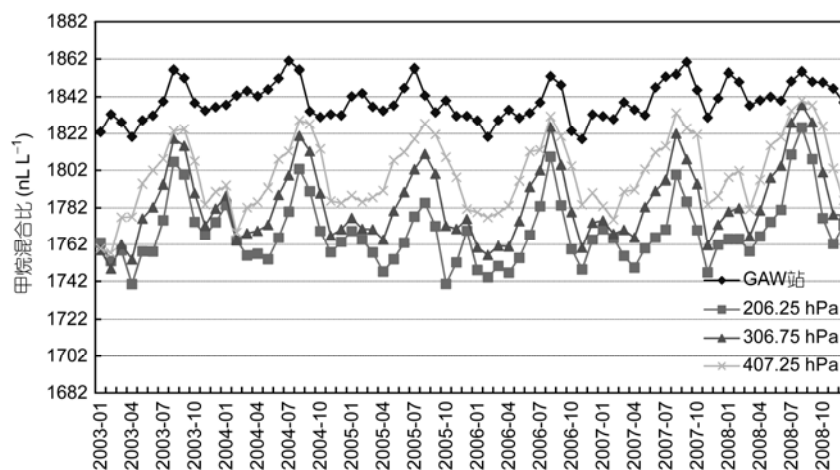


图 1 瓦里关站甲烷观测结果与 AIRS 产品比较

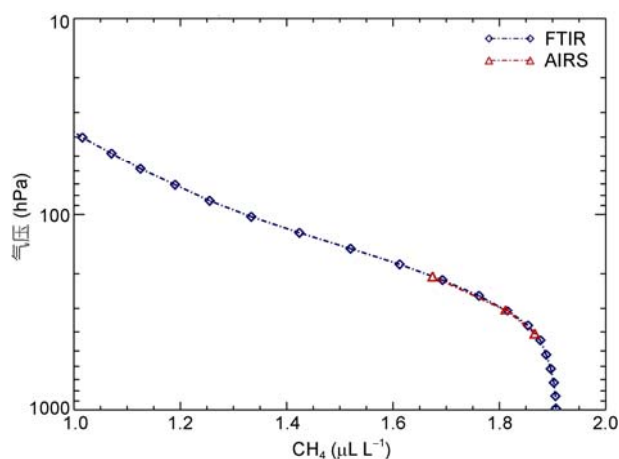


图 2 地基 FTIR 甲烷观测结果与 AIRS 产品比较

迹罕至、动植物稀少、甲烷源排放少有很大关系。而在对流层中上部 and 层顶甲烷的高值主要分布在中国内陆地区, 青藏高原、内蒙古、沈阳地区表现为比较明显的高值区, 而在东南部受海洋环境影响, 甲烷浓

度相对较低。

图 4 定量展示了甲烷在我国 5 个典型区域(东北: $42^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$; 西北: $40^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 92^{\circ}\text{E}$; 东部: $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$; 西部: $30^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $88^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 和南部: $22^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $104^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$)的空间分布特征。在对流层顶我国的南部地区甲烷含量相对较低, 而在对流层上部各个地区混合的相对均匀, 在对流层中部受地面排放源的显著影响, 甲烷浓度明显高于对流层上部和层顶, 且甲烷的低值区域存在于人烟和工农业都相对欠发达的西部地区。

2.3 中国甲烷季节变化特征

图 5 展示了中国不同地区对流层不同高度甲烷多年(2003~2008 年)平均季节变化特征, 我国的西北地区、东北地区以及东部地区存在显著的双峰季节变化特征, 第一个峰值出现在夏季(6~8 月), 第二个峰值出现在冬季(12~2 月), 而且冬季的峰值要高于

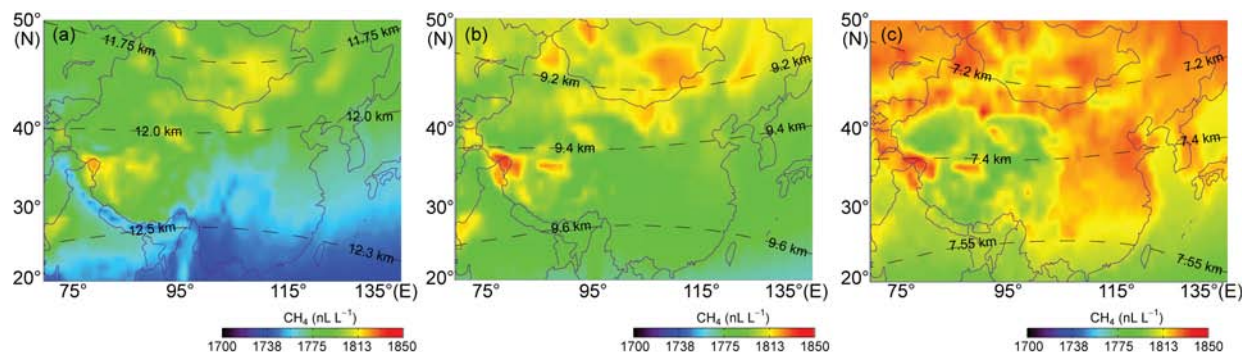


图 3 2003~2008 年中国地区对流层甲烷平均分布

(a) 206.75 hPa; (b) 306.25 hPa; (c) 406.75 hPa

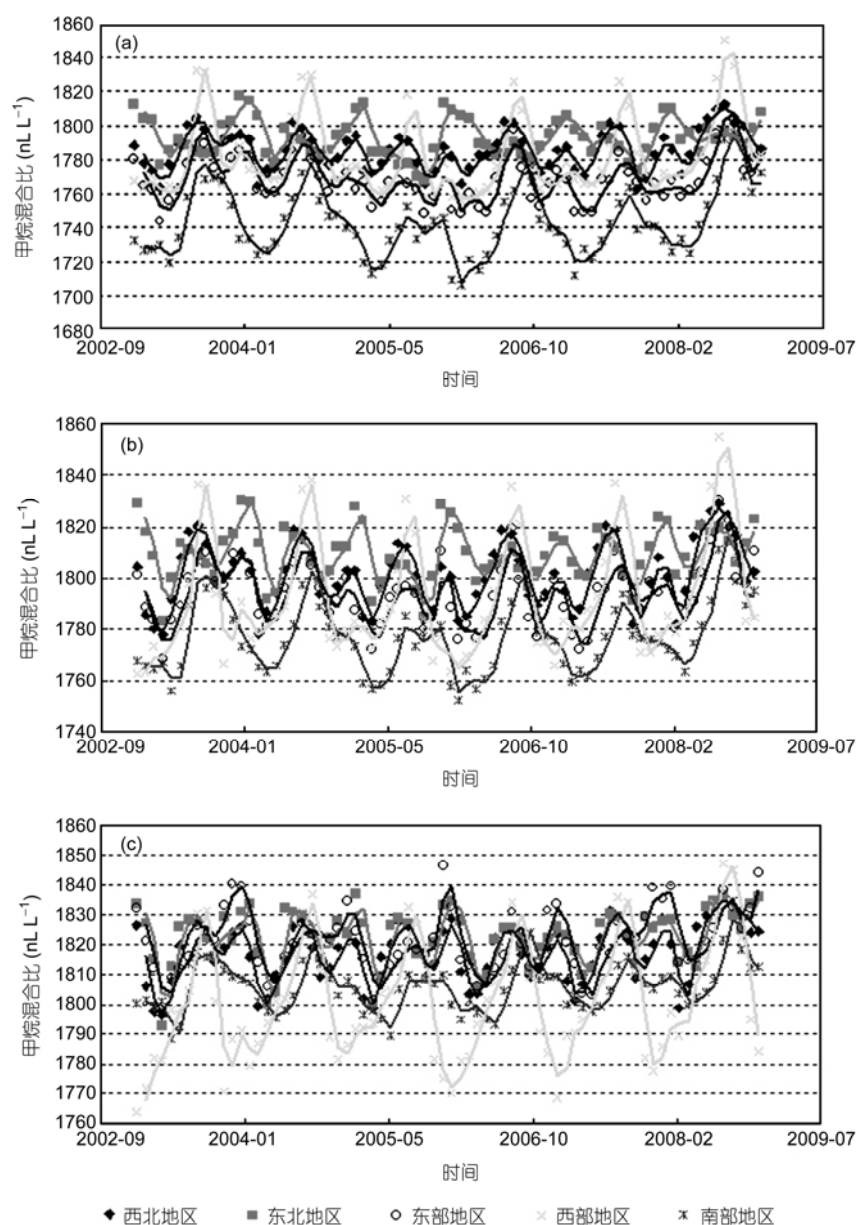


图 4 2003~2008 年中国地区甲烷观测结果
(a) 206.25 hPa; (b) 306.75 hPa; (c) 407.25 hPa

夏季的峰值, 这与我国瓦里关地区的近地面观测结论一致^[32]. 而在我国的南部地区则没有显著的双峰分布模式, 在西部地区更是呈现出典型的单峰分布模式.

造成我国东部、东北以及西北地区甲烷的双峰分布模式的主要原因在于上述地区受生物源和非生物源排放的交替影响. 第一峰值出现在冬季, 是由于冬季北方取暖, 大量化石燃料燃开采、运输以及燃烧排放的废气中含有较高的 CH_4 , 同时冬季的天气条件有

利于污染物的积累所致; 第二峰值出现在夏季, 这是全年 CH_4 生物源排放最旺盛时期. 稻田、河流、湖泊无疑是产生 CH_4 的重要生物源, 研究表明 CH_4 排放与温度之间存在显著的相关性, 当 $<15^\circ\text{C}$ 时很少产生 CH_4 , 而 35°C 时的 CH_4 产量可高出 25°C 时许多倍^[33~39]. 同时甲烷另一个重要生物源是垃圾分解, 由于城市扩大, 人口剧增, 城市地区每年要产生大量的生活垃圾, 这些垃圾目前主要是进行填埋处理, 在水、温度和厌氧菌的作用下, 垃圾就会分解产生 CH_4 .

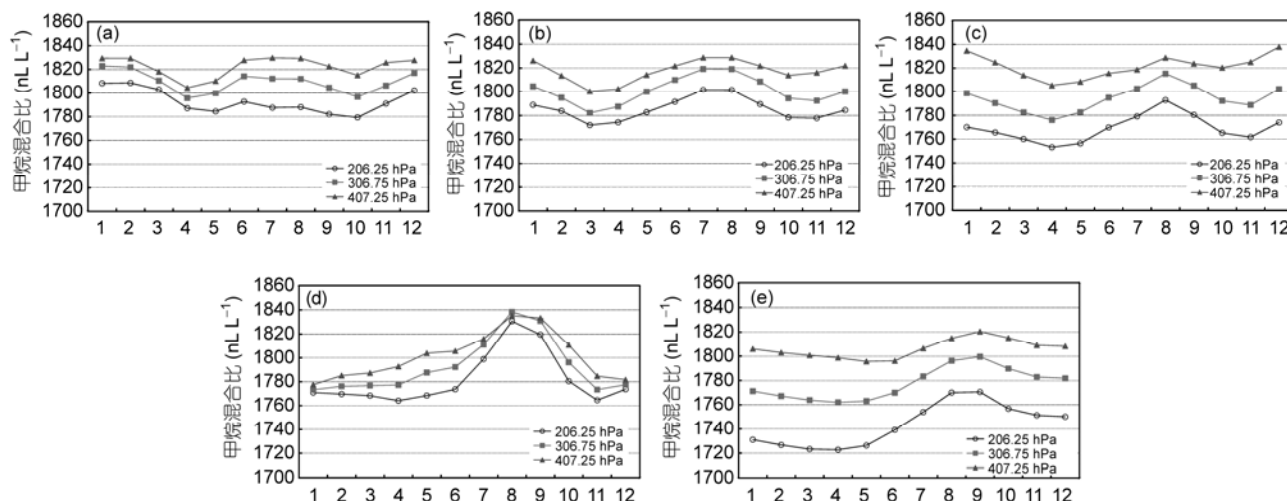


图 5 中国不同地区对流层不同高度甲烷的多年平均季节变化特征

(a) 西北地区; (b) 东北地区; (c) 东部地区; (d) 西部地区; (e) 南部地区

而在我国的南部地区, 受气候条件影响, 以及冬季不取暖, 没有其他比常日更加显著的人为甲烷排放来源, 因此在南部地区的冬季没有明显的峰值. 我国的西部地区地广人稀, 甲烷排放主要以生物源为主, 因此在高温高湿的夏季, 一方面为 CH_4 产生提供了必要的厌氧环境和湿度, 另一方面土壤中的有机质大量分解产生 CH_4 并排放入大气, 致使 CH_4 在大气中的含量迅速升高, 而在西部寒冷的冬季生物源贡献大大下降, 同时西部地区人为和工业排放源很小, 因此冬季成为全年的低值季节, 值得注意的是卫星监测到的对流层高空的甲烷分布不仅仅与地面的排放源关系密切, 同时大气运动的输送也有重要的影响.

2.4 中国甲烷长期变化趋势

图 6 展示了包括中国在内的全球几个主要国家地区近 6 年的对流层甲烷的增长情况, 可以看出, 位于北半球的各个地区在对流层中高层的甲烷几乎都在 2007 年后有一个明显的增长, 而在 2007 年之前均保持相对稳定, 而位于南半球的澳大利亚在 2007 年以前有略微下降的趋势, 其后开始增长, 这个结论与国外学者的研究结果一致^[15]. 近 6 年中国地区对流层大气的甲烷含量的平均值与处于北半球的其他几个地区相当. 表 1 展示了上述地区 2008 年甲烷浓度值减去 2003~2007 年的平均值结果, 可以明显地看出中国在 2007 年后的增长速度要比其他几个地区都要高, 其次是美国和加拿大也显示出较大的增长速度, 而位于南半球的澳大利亚地区由于 2007 年前一直保

持下降的趋势, 虽然 2007 年后也呈现增长的趋势, 但是 2008 年的甲烷浓度在对流层高层依然没达到前几年的平均值, 但是在对流层中部(406.25 hPa), 2008 年的浓度值也超过了之前几年的均值, 这与大量的近地面观测及研究结论相近^[40~43]. 表 2 展示了中国地区对流层各层在 2006~2008 年的增长速率, 卫星观测结果显示对流层不同高度的增长速率在 2006~2008 年保持 $5\sim 8 \text{ nL L}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 与我国瓦里关地区 2006~2008 年近地面的观测资料结果(年均增长值 $6.8 \text{ nL L}^{-1} \text{ a}^{-1}$)相近, 不同之处在于近地面观测结果显示从 2006 年后就开始有显著增长, 但是卫星观测是 2007 年后才有显著增长. 需要说明的是, 要更加客观地揭示对流层甲烷长期变化规律, 需要更长时间的卫星观测数据, 目前只有 6 年的数据, 因此上述结论仅能代表近 6 年的初步结论, 其不确定性是客观存在的.

3 结论

本文利用美国的 Aqua 卫星的 AIRS 遥感资料, 分析研究了 2003~2008 年中国地区对流层中高层大气甲烷的时空三维分布特征, 得出以下几点初步结论:

(1) 利用中国瓦里关大气本底站近地面观测资料与地基遥感观测结果与 AIRS 的对流层观测资料比较发现, AIRS 观测结果与近地面观测资料变化趋势一致, 与地基遥感的误差在 1.5% 以内, 证明了 AIRS 的观测资料具备了相当的精度, 可用于开展应用分析研究.

(2) 受近地层的自然排放与人为活动的共同影

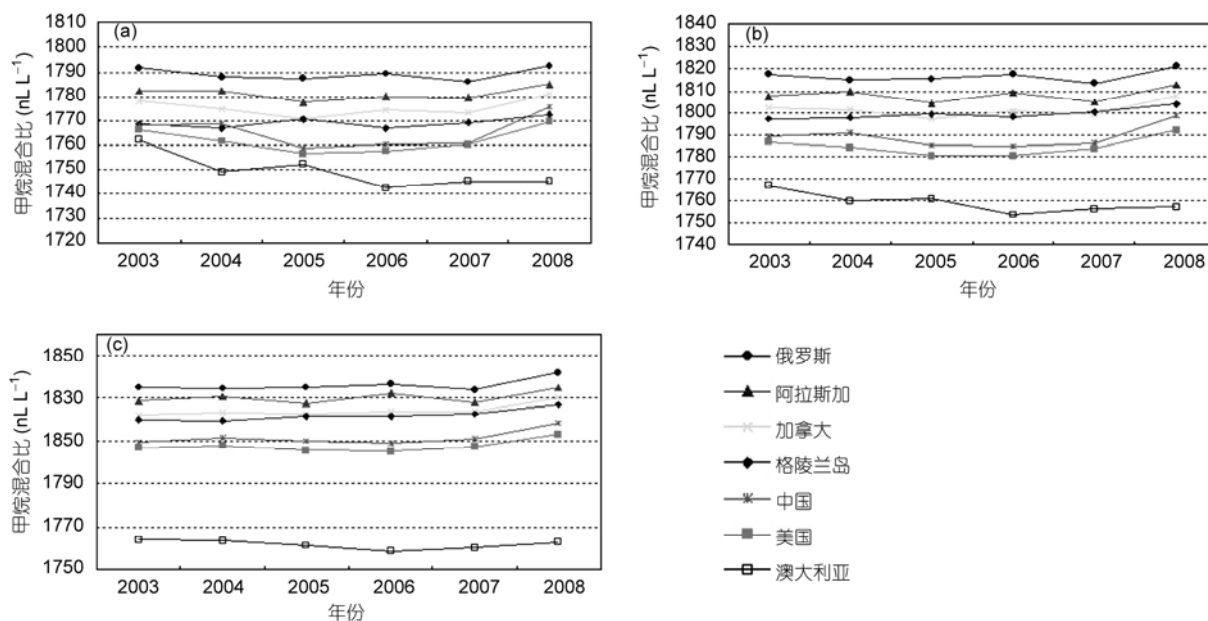


图 6 全球几个主要国家地区近 6 年的对流层甲烷的增长情况
(a) 206.25 hPa; (b) 306.75 hPa; (c) 407.25 hPa

表 1 全球主要地区 2008 年的对流层甲烷浓度减去 2003~2007 年的平均值

地区	地理经纬度区域		206.25 hPa (nL L ⁻¹)	306.75 hPa (nL L ⁻¹)	406.25 hPa (nL L ⁻¹)
	纬度	经度			
中国	22°~42°N	90°~120°E	12.4	11.3	8.5
美国	33°~48°N	124°~75°W	9.1	8.7	6.7
加拿大	50°~65°N	130°~90°W	6.6	7.4	7.0
阿拉斯加	60°~70°N	163°~142°W	4.9	5.5	5.6
俄罗斯	55°~70°N	45°~135°E	4.0	5.4	7.0
格陵兰	65°~80°N	50°~20°W	3.8	5.5	5.7
澳大利亚	30°~20°S	120°~150°E	-4.9	-2.1	1.2

表 2 中国地区对流层甲烷 2006~2008 年的增长速率

高度	2006 年	2007 年	2008 年	增长率(nL L ⁻¹ a ⁻¹)
206.25 hPa	1760.14	1760.81	1775.77	4.9
306.75 hPa	1785.04	1786.55	1798.77	6.9
407.25 hPa	1808.60	1810.77	1818.37	7.8
瓦里关站	1832.67	1841.57	1846.22	6.8

响,中国地区对流层甲烷在垂直分布上呈现典型的变化趋势:随着高度的增加甲烷浓度下降.

(3) 甲烷在我国东部和北部地区具有明显的双峰季节变化特征,最高值存在夏季,次高值出现在冬季,这与我国瓦里关本地站观测结果一致,而在西部和南部地区只在夏季存在一个峰值.

(4) 中国地区的对流层中高层甲烷与北半球的几个主要地区在 2007 年之前均保持相对稳定,在 2007 年后有一个明显的增长,且中国的增长速度较其他几个地区更为显著,其中 2006~2008 年期间的增长速率与近地面瓦里关观测结果相近.

致谢 感谢美国 NASA 提供的卫星观测数据.

参考文献

- 1 Gunter W D, Wong S, Cheel D B, et al. Slowing down of the global accumulation of atmospheric methane during 1980s. *Nature*, 1992, 358: 313–316
- 2 Khalil M A K, Rasmussen R A. Atmospheric methane trends over the last 10000 years. *Atmos Environ*, 1984, 21: 2445–2452
- 3 Dlugokenky E J, Steele L P, Lang P M, et al. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *J Geophys Res*, 1994, 99: 17021–17043
- 4 Etheridge D M, Pearman G I, Fraser P J. Changes in tropospheric methane between 1841 and 1978 from a high accumulation-rate Antarctic ice core. *Tellus*, 1992, 44B: 282–294
- 5 Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 500–590
- 6 Grutzen P J. On the role of CH₄ in atmospheric chemistry: Sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources. *Ambio*, 1995, 24: 52–55
- 7 唐孝炎, 李金龙. 大气环境化学. 北京: 高等教育出版社, 1990. 48–51, 305–306
- 8 周凌晞. 中国大陆地区主要温室气体本底特征研究. 北京: 北京大学环境科学中心, 2001
- 9 周凌晞, 汤洁, 温玉璞, 等. 瓦里关山大气甲烷本底浓度变化特征分析. *应用气象学报*, 1998, 9: 385–391
- 10 WMO. Strategy for the Implementation of the Global Atmosphere Watch Programme(2001–2007), a contribution to the implementation of the WMO longterm plan. GAW Report, 2001, 142: 1–21
- 11 周凌晞, 汤洁, 张晓春, 等. 气相色谱法观测本底大气中的 CH₄ 和 CO₂. *环境科学学报*, 1998, 18: 356–361
- 12 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. *气象*, 2007, 33: 1–14
- 13 Xiong X, Barnet C, Maddy E, et al. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *J Geophys Res*, 2008, 113: G00A01, doi: 10.1029/2007JG000500
- 14 Xiong X, Barnet C, Wei J, et al. Information-based mid-upper tropospheric methane derived from Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and its validation. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2009, 9: 16331–16360
- 15 Xiong X, Barnet C, Maddy E, et al. Seven years' observation of mid-upper Tropospheric methane from atmospheric infrared sounder. *Remote Sens*, 2010, 2: 2509–2530
- 16 Xiong X, Hou W, Wei J, et al. Methane plume over south Asia during the monsoon season: Satellite observation and model simulation. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 783–794
- 17 Xiong X, Barnet C, Zhuang Q, et al. Mid-upper Tropospheric methane in the high northern Hemisphere: Space-borne observations by AIRS, aircraft measurements and model simulations. *J Geophys Res*, 2010, 115: D19309, doi:10.1029/2009JD013796
- 18 Susskind J, Barnet C, Blaisdell J, et al. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *Geosci Remote*, 2003, 41: 390–409
- 19 De Mazière M, Vigouroux C, Bernath P F, et al. Validation of ACE-FTS v2.2 methane profiles from the upper troposphere to the lower mesosphere. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 2421–2435
- 20 Frankenberg C, Meirink J F, van Weele M, et al. Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, 2005, 308: 1010–1014
- 21 Payan S, Camy-Peyret C, Oelhaf H, et al. Validation of version-4.61 methane and nitrous oxide observed by MIPAS. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 413–442
- 22 Payne V H, Clough S A, Shephard M W, et al. Informationcentered representation of retrievals with limited degrees of freedom for signal: Application to methane from the Tropospheric Emission Spectrometer. *J Geophys Res*, 2009, 114: D10307
- 23 Crevoisier C, Nobileau D, Fiore A M, et al. A new insight on tropospheric methane in the Tropics-first year from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2009, 9: 6855–6887
- 24 WMO. International operations handbook for Measurement of Background Atmospheric Pollution. WMO TD491, 1978
- 25 WMO. The Global Atmosphere Watch Guide. WMO TD553, 1993
- 26 周秀骥. 中国大气本底基准观象台进展总结报告(1994–2004). 北京: 气象出版社, 2005. 98
- 27 WMO. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Using Global Observations Through 2006. WMO GGB, 2007
- 28 张东启, 张晓春, 乜虹, 等. 瓦里关大气本底观象台 CO₂, CH₄ 观测过程的质量控制. *应用气象学报*, 2004, 12: 95–100
- 29 Dils B, De Mazière M, Müller J F, et al. Comparisons between SCIAMACHY and ground-based FTIR data for total columns of CO, CH₄, CO₂ and N₂O. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2005, 5: 2677–2717
- 30 Hase F, Hannigan J W, Coffey MT, et al. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2004, 87: 25–52

- 31 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 傅立叶红外高光谱遥感观测大气成分平台建设及其反演技术初步研究. 气象, 2009, 35: 9–17
- 32 Henckel T, Roslev P, Conrad R. Effects of O₂ and CH₄ on presence and activity of the indigenous methanotrophic community in rice field soil. Environ Microbiol, 2000, 2: 666–679
- 33 Yagi K, Minami K. Effect of organic matter applications on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil Sci Plant Nutr, 1990, 36: 599–610
- 34 Thomas K L, Benstead J, Davies K L, et al. Role of wetland plants in the diurnal control of CH₄ and CO₂ fluxes in peat. Soil Biol Biochem, 1996, 28: 17–23
- 35 Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W, et al. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. Plant Soil, 1986, 92: 223–233
- 36 Khalil M A K, Rasmussen R A, Mingxing W, et al. Methane emission from rice field in China. Environ Sci Technol, 1991, 25: 979–981
- 37 Saarnio S, Alm J, Martikainen P J, et al. Effects of raised CO₂ on potential CH₄ production and oxidation in, and CH₄ emission from a boreal mire. J Ecol, 1998, 86: 261–268
- 38 Saarnio S, Silvola J. Effect of increased CO₂ and N on CH₄ efflux from a boreal mire: A growth chamber experiment. Oecologia, 1999, 119: 349–356
- 39 Saarnio S, Saarinen T, Vasander H, et al. A moderate increase in the annual CH₄ efflux by raised CO₂ or NH₄NO₃ supply in boreal oligotrophic mire. Glob Change Biol, 2000, 6: 137–144
- 40 NOAA. Globalview2 CH₄, Cooperative Atmospheric Data Integration Project2 Methane. NOAA CMDL Data Product and Report, Boulder, Colorado, USA, 2005
- 41 Rigby M, Prinn R G, Fraser P J, et al. Renewed growth of atmospheric methane. Geophys Res Lett, 2008, 35: doi: 10.1029/2008GL036037
- 42 Dlugokencky E J, Bruhwiler L, White J W C, et al. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. Geophys Res Lett, 2009, 36, doi: 10.1029/2009GL039780
- 43 NOAA. GLOBALVIEW-CH₄: Cooperative Atmospheric Data Integration Project—Methane. NOAA ESRL: Boulder, CO, USA, 2009