

冯冬霞, 高晓清, 周亚, 等. 2017. 青藏高原大气甲烷浓度时空分布变化特征 [J]. 气候与环境研究, 22 (3): 346–354. Feng Dongxia, Gao Xiaoqing, Zhou Ya, et al. 2017. Characteristics of spatial-temporal variation of atmospheric methane over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (3): 346–354, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16199.

青藏高原大气甲烷浓度时空分布变化特征

冯冬霞^{1,2,3} 高晓清¹ 周亚^{1,2} 杨丽薇¹ 惠小英¹

¹ 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 中国气象局综合观测司, 北京 100081

摘要 利用瓦里关大气本底站甲烷观测数据对美国 Aqua 卫星的 AIRS 观测结果进行对比分析, 并分析研究了 2003~2012 年青藏高原对流层大气甲烷的时空分布特征, 结果表明: 1) AIRS 观测结果与近地面观测资料变化趋势一致, 存在显著的正相关关系, 突变时间比较一致, 可以用于青藏高原区域的甲烷浓度特征分析。2) 青藏高原对流层甲烷浓度在空间分布上存在显著的西北—东南走向的低值带及其南北侧存在 4 个固定的高值中心, 分别位于阿里、那曲、山南和玉树。3) 青藏高原甲烷浓度呈现显著随高度而降低的趋势, 年平均甲烷浓度分别为 1.810 ppm (1 ppm=10⁻⁶)、1.797 ppm 和 1.781 ppm。在对流层中层和中上层, 甲烷浓度基本呈现低值带最低、南北侧均高的山谷型分布特征。在对流层层顶, 以低值带为分界线, 呈现明显的南高北低特征。4) 青藏高原甲烷浓度随时间呈缓慢上升趋势, 平均速度为 0.0018 ppm/a, 夏季上升最快, 秋季上升最慢。5) 青藏高原甲烷存在明显的单峰型季节变化特征, 夏秋季高, 冬春季低, 与东部地区冬、夏双峰型特征不同, 随着高度上升季节变化更为明显。

关键词 大气甲烷 时空分布特征 卫星遥感 青藏高原 瓦里关

文章编号 1006-9585 (2017) 03-0346-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16199

Characteristics of Spatial-Temporal Variation of Atmospheric Methane over the Tibetan Plateau

FENG Dongxia^{1,2,3}, GAO Xiaoqing¹, ZHOU Ya^{1,2}, YANG Liwei¹, and HUI Xiaoying¹

¹ Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Department of Integrated Observations, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract This paper presents a comparative analysis of retrievals of atmospheric methane (CH₄) by the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the EOS/Aqua platform and CH₄ observations from 2003 to 2012 at Waliguan atmospheric benchmark station. Characteristics of spatiotemporal distribution of tropospheric methane over the Tibetan Plateau (TP) are revealed based on AIRS retrievals. The results are as follows: 1) The AIRS retrievals and the surface observation data at Waliguan show a consistent increasing trend. The time series of AIRS retrievals and surface observations are positively correlated and the correlation is statistically significant. The time of abrupt changes are consistent between the two data series. Therefore it is possible to analyze the characteristics of spatiotemporal distribution of CH₄ in the tropospheric over

收稿日期 2016-11-11; 网络预出版日期 2017-01-23

作者简介 冯冬霞, 女, 1981 年出生, 博士研究生、高级工程师, 主要从事青藏高原甲烷变化对气候变化的影响研究。E-mail: fengdx@cma.gov.cn

通讯作者 高晓清, E-mail: xqgao@lzb.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (91437108)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 91437108)

the TP using the AIRS retrievals. 2) A northwest-southeast oriented low concentration zone (LCZ) of CH₄ above the central area of TP and four permanent high concentration centers of CH₄ to the south and north of LCZ (Ngari, Nagqu, Lhoka, and Yushu) are found based on spatial analysis. 3) With the increase in altitude, an obvious decreasing trend of CH₄ concentration is found over the TB. In the middle and upper troposphere, the CH₄ concentration is lower in the LCZ but higher on both sides of it. In the top troposphere, CH₄ is higher to the south and lower to the north of LCZ. 4) CH₄ concentration shows a slowly rising trend with a rate of 0.0018 ppm/a over the TB with the fastest rise in the summer and the slowest in autumn. 5) CH₄ over the TB shows a clear seasonal and unimodal variation characteristic. It is higher in the summer and autumn than in winter, which is quite different to the summer-winter bimodal variation characteristic of CH₄ in East China. Seasonal variation of CH₄ over the TP increases as elevation increases.

Keywords Methane in the atmosphere, Characteristic of spatiotemporal distribution, AIRS retrievals, the Tibetan Plateau (TP), Waliguan

1 引言

甲烷(CH₄)是大气中主要温室气体之一,单位重量CH₄的辐射强迫效应是CO₂的20倍以上,对地球温室效应的贡献为4%~9%,其辐射强迫仅次于CO₂,为 $0.48 \pm 0.05 \text{ W m}^{-2}$ (IPCC, 2007, 2013)。同时,CH₄还是大气中最重要的化学活性含碳化合物,其对流层化学过程可以改变OH⁻和CO浓度,在大气O₃和H₂O₂化学中起着重要作用,由其生成平流层水汽产生的辐射强迫为 0.07 W m^{-2} (唐孝炎和李金龙, 1990; Crutzen, 1995)。自工业革命以来甲烷在大气中的含量迅速增加,已从工业化前720 ppb(1 ppb=10⁻⁹)增加到2012年1819 ppb,增加了大约1.5倍,大气CH₄浓度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(WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2013)。

青藏高原(26°00'N~39°47'N, 73°19'E~104°47'E)平均海拔在4500 m以上,是全球面积次大、海拔最高、地形最复杂的高原(张镱锂等, 2002)。研究表明,高原及其周边地区是中国东部夏季洪涝对流云系统的重要外源强迫和重要源地之一,在夏季风环流的形成、暴发和维持过程中起着重要的推动作用,它的异常变化不仅影响本地环流,还影响亚洲乃至北半球的大气环流,对区域气候、东亚大气环流、气候变化及灾害性天气的形成和发展都有重要影响(冯松等, 1998; 樊红芳, 2008)。青藏高原多年冻土面积为1681.4 km²,占整个区域总面积的66.7%(张秀敏等, 2012)。研究发现,每年从北半球冻原陆地生态系统释放进入大气的甲烷约为 $17 \times 10^6 \sim 42 \times 10^6 \text{ t}$,占全球自然界年释放甲烷总量的22%~25%(Mastepanov et al., 2008),对CH₄平衡以及温室效应具有显著作用。

鉴于青藏高原独特的气候效应和冻土条件,研究青藏高原CH₄浓度的时空分布变化特征十分有必要。

世界气象组织(WMO)从1989年起在空气污染本底监测网和全球臭氧观测系统的基础上组建了全球大气监测网(GAW),目前已经拥有31个全球大气本底站点和400个区域站点以及100多个合作站点,主要开展温室气体、气溶胶、反应性气体、臭氧、紫外辐射、化学沉降等观测,但是甲烷观测站点仅共有100多个,全球许多地方仍是观测空白区,导致至今人们对甲烷的时空分布及其变化规律不能全面分析(WMO, 2009a, 2009b)。而遥感的监测方式不但可以获得CH₄空间分布信息,还可以得到这些气体成分浓度长时间序列的变化信息,特别是卫星遥感的方式,可以提供稳定、长时间序列、全球尺度、时空一致性较好的大气CH₄信息,可以有效弥补地面观测的不足(张兴赢等, 2007; 白文广, 2010)。2002年5月发射升空的搭载于美国Aqua卫星上的AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)仪器,通过对红外光谱的探测,实现了对流层中高层CH₄信息的提取(Xiong et al., 2008, 2009a)。

本文利用2003~2012年的AIRS观测结果,与瓦里关大气本底站甲烷浓度观测数据进行了对比分析,并研究分析了青藏高原地区对流层中高层甲烷的时空分布变化特征,以期为进一步研究甲烷在青藏高原地区气候变化中的作用提供依据。

2 数据资料

2.1 AIRS 甲烷遥感产品

本文所用卫星数据来自美国宇航局(NASA)AIRS官方团队反演的对流层CH₄体积混合比第五版L3每月标准产品(<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>[2013-03-01]),该产品利用AIRS具有较高光谱分

分辨率和信噪比的 $7.66\ \mu\text{m}$ 观测谱段, 采用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)反演方法(Xiong et al., 2008, 2009a, 2009b, 2010a, 2010b), 给出了甲烷在对流层中层(407.25 hPa, 约 5 km)、对流层中上层(306.75 hPa, 约 7 km)和对流层层顶(206.25 hPa, 约 11 km)的体积混合比, 其空间分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 网格。已有研究人员利用飞机观测开展了对该探测产品的真实性检验, 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(张兴赢等, 2011), 与国外的飞机航测的误差在 0.5%~1.6% (Susskind et al., 2003), 可用于分析研究大气中的甲烷分布和传输规律。但是, 由于青藏高原特殊的地理环境, 卫星资料在高原上的适用性还缺乏深入验证。

2.2 地面甲烷观测资料

本文使用的 CH_4 浓度近地面观测资料是由我国青海瓦里关全球大气本底观测站 (Atmospheric Background Station) ($36^\circ 17' \text{N}$, $100^\circ 54' \text{E}$, 海拔 3816 m) 每周一次空气样品 Flask 瓶采样、美国国家海洋与大气管理局地球系统研究实验室 (NOAA/ESRL) 合作分析的温室气体成分浓度数据 (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/wdcgg.html> [2015-08-01])。瓦里关站位于青藏高原东北边缘, 1994 年 9 月正式投入运行, 是全球大气监测网 (WMO-GAW) 位于各典型气候和生态代表区域的 31 个全球基准站之一, 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(周秀骥, 2005), 有关数据的观测和质量控制方法参见文献(张东启等, 2004; 刘立新等, 2009)。

3 结果讨论与分析

3.1 AIRS 甲烷浓度观测结果与地面观测数据的对比分析

图 1 为 2003~2012 年瓦里关大气甲烷浓度观测数据与 AIRS 甲烷观测结果的月变化和年变化。对图 1a 进行相关分析, 瓦里关观测数据与 AIRS 观测结果逐月变化的相关系数分别为 0.494 (206.25 hPa)、0.542 (306.75 hPa) 和 0.552 (407.25 hPa), 均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。对数据进行算术平均得出年变化数据并进行相关分析(图 1b), 瓦里关观测数据与 AIRS 观测结果年变化的相关系数分别为

0.838 (206.25 hPa)、0.876 (306.75 hPa) 和 0.837 (407.25 hPa), 均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。利用曼-肯德尔法 (Mann-Kendall) 对月数据进行突变检验(图 2), 地表至对流层层顶的甲烷浓度均在 2010 年左右出现突变, 2011 年后开始显著上升。总体上, AIRS 观测结果与观测数据存在显著的正相关关系, 突变点一致, 可以用于青藏高原甲烷浓度分布特征分析。

从瓦里关甲烷浓度年变化(图 1b)可以看出, 瓦里关年平均甲烷浓度从地面到对流层层顶逐渐下降, 分别为 1.848 ppm、1.798 ppm、1.789 ppm 和 1.781 ppm。瓦里关地面至对流层层顶甲烷浓度在 2002~2006 年基本稳定, 2007~2012 年期间总体缓慢增长, 2012 年最高, 分别达到 1.877 ppm、1.819 ppm、1.807 ppm 和 1.795 ppm, 这与全球甲烷浓度变化特征基本一致(WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2013)。对甲烷浓度年变化进行线性倾向估计(表 1), 瓦里关各层甲烷浓度均缓慢上升, 2003~2012 年从地面到对流层层顶的甲烷浓度上升幅度分别为 0.041 ppm、0.025 ppm、0.023 ppm 和 0.018 ppm。

表 1 2003~2012 年瓦里关甲烷浓度线性倾向估计回归系数和相关系数

Table 1 Regression coefficients and correlation coefficients of the linear tendency estimation of CH_4 concentration during 2003~2012 at Waliguan

高度	回归系数	相关系数
地面	0.0041	0.78*
407.25 hPa	0.0025	0.83*
306.75 hPa	0.0023	0.80*
206.25 hPa	0.0018	0.78*

*表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

3.2 青藏高原甲烷空间分布特征

从上述分析可以看到, 瓦里关地区大气甲烷浓度观测数据与反演结果具有显著相关性, 且突变时间比较一致, 因此我们利用 AIRS 甲烷浓度反演资料, 分析青藏高原地区 2003~2012 年对流层 3 层甲烷浓度的年平均和季节平均分布(图 3)。结果表明, 甲烷浓度在青藏高原年和季节分布中均有较为明显的西北—东南走向的低值带, 该低值带与青藏高原西北—东南走向的昆仑山脉—唐古拉山脉—横断山脉走向一致, 低值带南侧存在 3 个固定的高值中心, 分别位于阿里地区西部边境、那曲地区以及山南市, 北侧在对流层中层、对流层中上层存在一个固定的高值中心, 位于青海玉树州, 对流层层

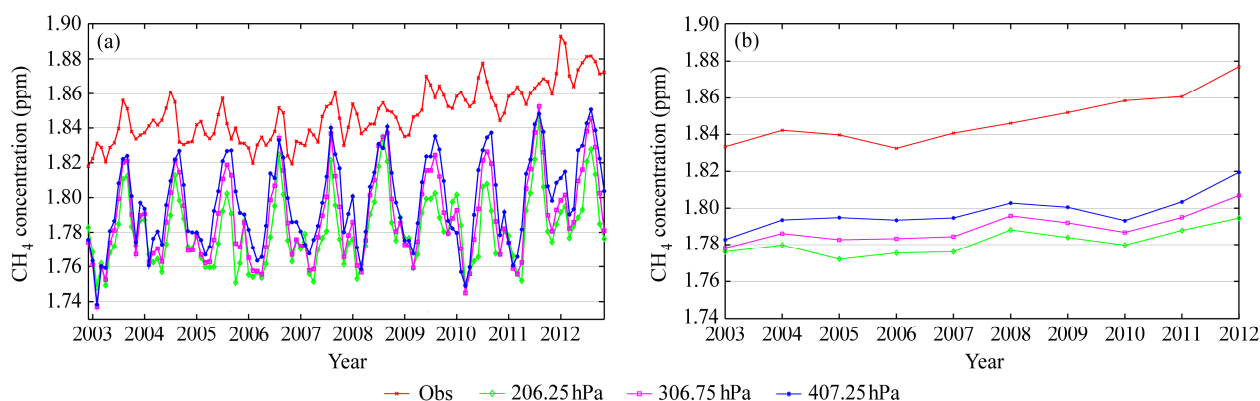


图1 2003~2012年瓦里关大气甲烷浓度观测数据与不同高度(406.25 hPa、306.75 hPa、206.25 hPa) AIRS 甲烷浓度反演结果的比较:(a)月平均值;(b)年平均值

Fig. 1 Comparisons between the CH_4 concentrations at Waliguan and the AIRS retrievals of CH_4 concentration at different heights (406.25 hPa, 306.75 hPa, and 206.25 hPa) during 2003–2012: (a) Monthly mean data; (b) annual mean data

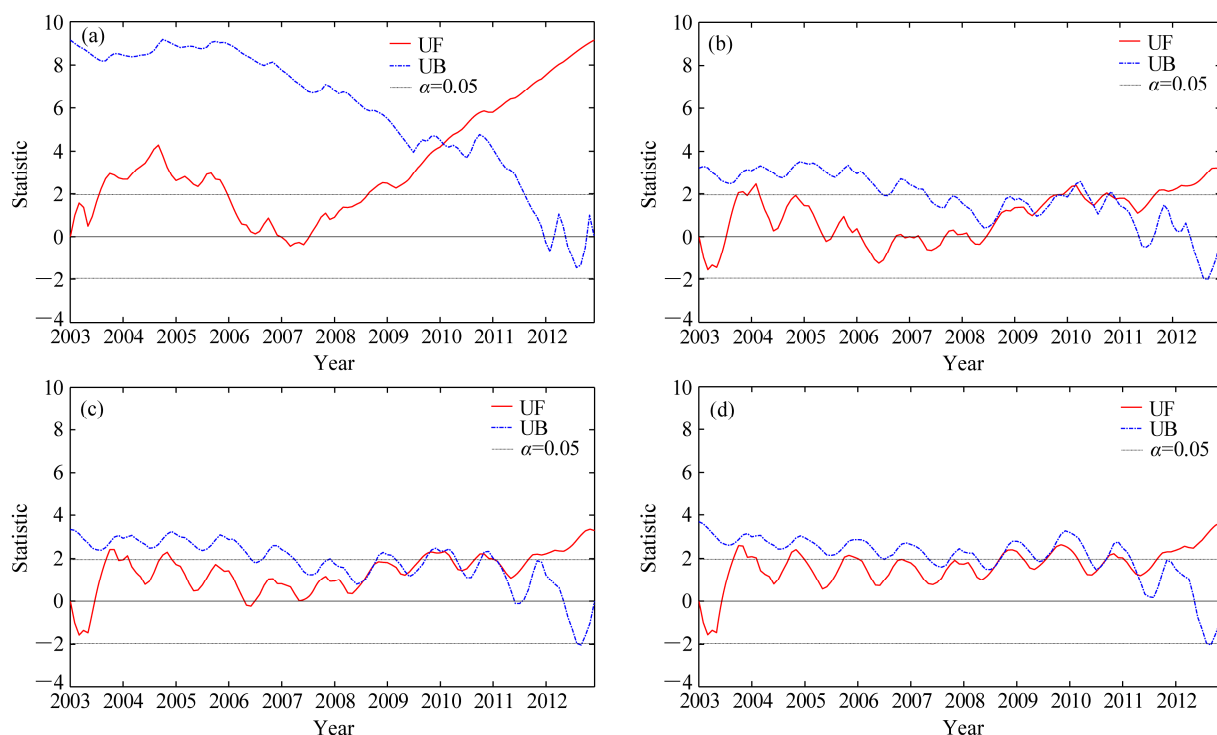


图2 瓦里关 (a) 地表(观测)、(b) 406.25 hPa、(c) 306.75 hPa、(d) 206.25 hPa 甲烷浓度曼-肯德尔统计量曲线

Fig. 2 Mann-Kendall statistics of CH_4 concentration at Waliguan at (a) surface (obs), (b) 406.25 hPa, (c) 306.75 hPa, and (d) 206.25 hPa

顶没有固定高值中心。各高值中心年平均最大甲烷浓度各不相同(表2),年平均最大甲烷浓度从高到低依次是阿里、那曲、山南、玉树。各季节最大甲烷浓度也不相同,最大甲烷浓度最高值除夏季在那曲外其余季节均在阿里,这可能是由于该地区位于印度板块和亚欧板块前沿叠瓦式造山带和地缝合线上,地球气体排放可能是造成该位置甲烷浓度长期高值的主要原因(IPCC, 2013),最低值除冬季

在山南外其他季节均在玉树。从空间分布上来看,高值中心除山南外均位于平均海拔4200~4500 m以上的多年冻土区,分布在高原中部高海拔地区南北两侧。

从图3可以看出,青藏高原甲烷浓度从对流层中层至对流层层顶呈现显著降低趋势,各层年平均甲烷浓度(图3a)分别为1.810 ppm、1.797 ppm和1.781 ppm,与我国其他地区趋势一致,对流层中层

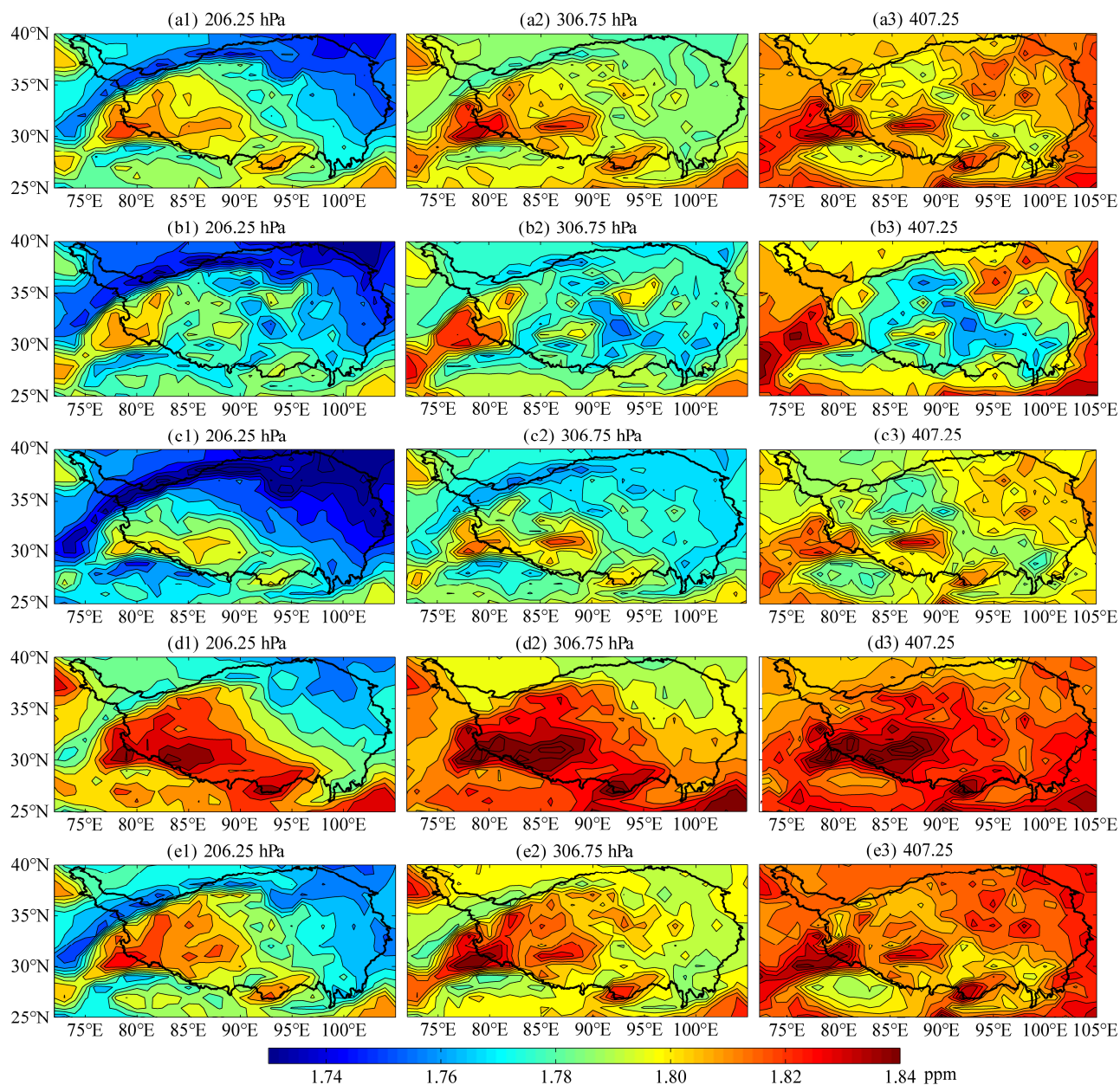


图3 青藏高原对流层甲烷 (a1-a3) 年、(b1-b3) 冬季、(c1-c3) 春季、(d1-d3) 夏季、(e1-e3) 秋季平均浓度分布

Fig. 3 Distributions of mean CH_4 concentration at different heights in the troposphere over the Tibetan Plateau: (a1-a3) Annual average; (b1-b3) winter; (c1-c3) spring; (d1-d3) summer; (e1-e3) autumn

相对全国是低值区域, 对流层中上层和对流层层顶相对全国是高值区域 (张兴赢等, 2011)。在对流层中层和中上层, 甲烷浓度基本呈现低值带最低、南北侧均高的山谷形分布特征, 其中夏季该特征表现不明显。在对流层层顶, 以低值带为分界线, 呈现明显的南高北低特征, 其中北侧仅在秋冬季存在较弱的高值中心。总体上, 南侧甲烷浓度高于北侧, 随着高度上升甲烷浓度南北侧差异越大。

3.3 青藏高原甲烷时间演变特征

从图 4a-c 中可以看出, 青藏高原甲烷浓度在 2003~2012 年间基本随时间呈缓慢上升趋势, 且存在明显的分段特征, 其中 2005~2006 年最低, 分别为 1.804 ppm、1.789 ppm、1.770 ppm, 2008 年出现一次小高峰, 分别为 1.814 ppm、1.802 ppm、1.786 ppm, 2010 年后快速上升至 2012 年最高, 分别为 1.822 ppm、1.811 ppm、1.796 ppm。与 2002~2008

表 2 2003~2012 年阿里、那曲、山南、玉树不同高度的年、季节最大甲烷浓度

Table 2 Maximum CH₄ concentrations at different heights at Ngari, Nagqu, Lhoka, and Yushu during 2003–2012

地区	高度/hPa	最大甲烷浓度 (ppm)				
		年	冬季	春季	夏季	秋季
阿里	407.25	1.83	1.815	1.815	1.847	1.837
	306.75	1.832	1.82	1.813	1.854	1.839
	206.25	1.819	1.809	1.803	1.847	1.826
那曲	407.25	1.821	1.806	1.826	1.852	1.832
	306.75	1.82	1.798	1.819	1.854	1.827
	206.25	1.811	1.793	1.803	1.838	1.818
山南	407.25	1.821	1.797	1.815	1.847	1.832
	306.75	1.814	1.79	1.806	1.847	1.827
	206.25	1.811	1.793	1.803	1.838	1.818
玉树	407.25	1.816	1.824	1.809	1.83	1.827
	306.75	1.803	1.805	1.787	1.833	1.815
	206.25					

年变化趋势相比 (张兴赢等, 2011), 青藏高原甲烷浓度在 2009~2010 年小幅回落, 2010 年后快速上升, 且高于 2008 年的小高峰值。利用线性趋向估计 (表 3), 对流层各层甲烷浓度年增长速率基本相同, 约为 0.0018~0.0019 ppm/a, 2003~2012 年间增长幅度分别为 0.018 ppm、0.019 ppm、0.018 ppm。

表 3 2003~2012 年青藏高原甲烷浓度线性倾向估计回归系数和相关系数

Table 3 Regression coefficients and correlation coefficients of the linear tendency estimation of CH₄ variation during 2003–2012 over the Tibetan Plateau

	不同高度的回归系数			不同高度的相关系数		
	407.25 hPa	306.75 hPa	206.25 hPa	407.25 hPa	306.75 hPa	206.25 hPa
年	0.0018	0.0019	0.0018	0.8814*	0.7807*	0.6673*
冬季	0.0015	0.0017	0.0016	0.7111*	0.6605*	0.5496
春季	0.0019	0.002	0.0018	0.8569*	0.7179*	0.608
夏季	0.0022	0.0026	0.0026	0.9022*	0.7760*	0.6514*
秋季	0.0015	0.0013	0.0011	0.8768*	0.6126	0.3731

*表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

从图 4b 可以看出, 青藏高原甲烷浓度具有显著季节变化, 夏季 (6~8 月) 最高, 春季 (3~5 月) 最低, 呈现典型单峰分布, 这与东部、北部地区的冬、夏双峰型季节变化特征不同 (张兴赢等, 2011), 这可能是因为夏秋季是青藏高原全年 CH₄ 生物源排放和冻土释放甲烷最旺盛时期, 冬春季生物源排放和冻土释放基本消失造成的 (Holzapfel-Pschorn et al., 1986; Yagi and Minami, 1990; Khalil et al., 1991; Thomas et al., 1996; Saarnio and Silvola, 1999; Saarnio et al., 1998, 2000; Henckel et al.,

2000)。随着高度上升季节变化更为明显, 从对流层中层至层顶季节变化幅度分别约为 0.038 ppm、0.055 ppm、0.060 ppm, 与其他文献分析结果一致 (熊效振等, 2011)。如图 4d-g, 在夏秋季节年变化中, 最低值出现在 2005 年, 次高峰出现在 2008 年, 而冬春季最低值出现在 2006 年, 次高峰出现在 2009 年, 变化趋势滞后于夏秋季节。

对季节变化进行线性趋向估计 (表 3), 2003~2012 年青藏高原甲烷浓度夏季年增长最快, 平均为 0.0025 ppm/a, 各层增长幅度分别为 0.022 ppm、0.026 ppm、0.026 ppm; 春季、冬季次之, 分别平均为 0.0019 ppm/a 和 0.0016 ppm/a, 各层增长幅度分别为 0.019 ppm、0.020 ppm、0.018 ppm 和 0.015 ppm、0.017 ppm、0.016 ppm; 秋季年增长最慢, 平均为 0.0013 ppm/a, 各层增长幅度分别为 0.015 ppm、0.013 ppm、0.011 ppm。各季节在不同高度增长速率不同, 冬春季对流层中上层增长最快, 对流层中层和层顶增长速率基本一致, 夏季对流层中上层和层顶增长最快, 对流层中层增长最慢, 秋季随高度上升增长速率快速下降。

4 结论

本文利用中国瓦里关全球大气本底站甲烷浓度观测值对美国 Aqua 卫星的 AIRS 反演资料进行对比分析, 并分析研究了 2003~2012 年青藏高原对流层大气甲烷的时空分布特征, 得出以下几点初步结论:

(1) 瓦里关年平均甲烷浓度从地面到对流层顶逐渐下降, 分别为 1.848 ppm、1.798 ppm、1.789 ppm 和 1.781 ppm。各层甲烷浓度均缓慢上升, 从地面到对流层层顶的甲烷浓度上升速率分别为 0.0041 ppm/a、0.0025 ppm/a、0.0023 ppm/a 和 0.0018 ppm/a。AIRS 观测结果与近地面观测资料变化趋势一致, 存在显著的正相关关系, 且突变年份均为 2010 年左右, 2011 年后均显著上升。

(2) 青藏高原对流层甲烷浓度在空间分布上存在显著的西北—东南走向的低值带, 与青藏高原西北—东南走向的昆仑山脉—唐古拉山脉—横断山脉走向一致, 其南北侧存在 4 个固定的高值中心, 年平均最大值从高到低依次为分别位于阿里、那曲、山南和玉树, 各季节均不相同。在空间分布上, 高值中心除山南外均位于平均海拔 4200~4500 m

以上的多年冻土区,分布在高原中部高海拔地区两侧。

(3) 青藏高原甲烷浓度从对流层中层至对流层层顶呈现显著降低趋势,年平均甲烷浓度分别为 1.810 ppm、1.797 ppm 和 1.781 ppm。在对流层中层

和中上层,甲烷浓度基本呈现低值带最低、南北侧均高的山谷形分布特征。在对流层层顶,以低值带为分界线,呈现明显的南高北低特征。总体上,南侧甲烷浓度高于北侧,随着高度上升甲烷浓度南北侧差异越大。

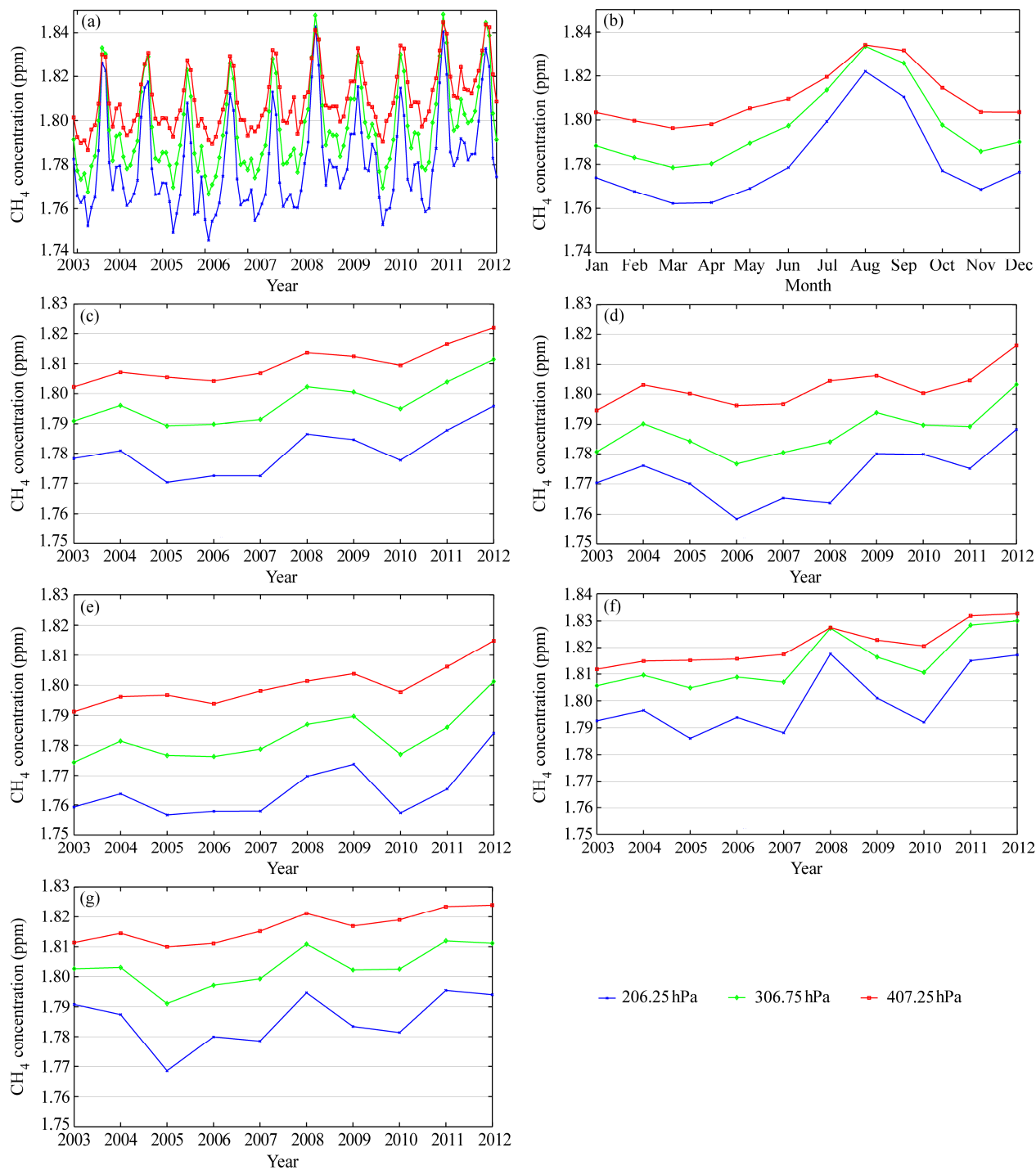


图4 2003~2012年青藏高原区域对流层(a)月、(b)平均月、(c)年、(d)冬季、(e)春季、(f)夏季、(g)秋季甲烷浓度变化

Fig. 4 Temporal variations of (a) monthly, (b) monthly average, (c) annual, (d) winter, (e) spring, (f) summer, and (g) autumn CH_4 concentration at different heights over the Tibetan Plateau during 2003–2012

(4) 青藏高原甲烷浓度随时间呈缓慢上升趋势, 且随着高度上升年平均增长速率基本不变, 平均为 0.0018 ppm/a, 但夏季增长速率最快、达到 0.0025 ppm/a, 春、冬季次之, 秋季增长速率最低。夏秋季节年变化最低值出现在 2005 年、次高峰出现在 2008 年, 而冬春季节最低值出现在 2006 年、次高峰出现在 2009 年, 变化趋势滞后于夏秋季节。

(5) 青藏高原甲烷存在明显的单峰型季节变化特征, 夏、秋季高, 冬、春季低, 与东部地区冬、夏双峰型特征不同, 且随着高度上升季节变化更为明显。这可能是因为夏秋季是青藏高原全年 CH₄ 生物源排放和冻土释放甲烷最旺盛时期, 冬春季生物源排放和冻土释放基本消失造成的。

致谢 感谢青海瓦里关本底站业务人员在野外现场的辛勤工作, 感谢 NOAA/ESRL 提供经过质量控制的瓦里关 Flask 瓶采样比对分析数据, 感谢 NASA 提供的 AIRS 官方反演的对流层 CH₄ 体积混合比产品。

参考文献 (References)

- 白文广. 2010. 温室气体 CH₄ 卫星遥感监测初步研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 69–81. Bai Wenguang. 2010. Preliminary study of satellite remote sensing of greenhouse gases methane [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 69–81.
- Crutzen P J. 1995. On the role of CH₄ in atmospheric chemistry: Sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources [J]. *Ambio*, 24 (1): 52–55.
- 樊红芳. 2008. 青藏高原现代气候特征及大地形气候效应 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 68–103. Fan Hongfang. 2008. The current climate characteristics and topographic climate effect on Tibetan Plateau [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.
- 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 1998. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据 [J]. *科学通报*, 43 (6): 633–636. Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. 1998. The new evidence of Qinghai-Tibet plateau is the area of starting the of climate change in China [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 43 (6): 633–636.
- Henckel T, Roslev P, Conrad R. 2000. Effects of O₂ and CH₄ on presence and activity of the indigenous methanotrophic community in rice field soil [J]. *Environmental Microbiology*, 2 (6): 666–679, doi: 10.1046/j.1462-2920.2000.00149.x.
- Holzappel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. 1986. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil [J]. *Plant and Soil*, 92 (2): 223–233, doi: 10.1007/BF02372636.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis [M]// Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 500–590.
- IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis[M]// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 20–309.
- Khalil M A K, Rasmussen R A, Wang M X, et al. 1991. Methane emissions from rice fields in China [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 25 (5): 979–981, doi: 10.1021/es00017a023.
- 刘立新, 周凌晔, 温民, 等. 2009. 中国 4 个国家级野外站大气 CH₄ 本底浓度变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 5 (5): 285–290. Liu Lixin, Zhou Lingxi, Wen Min, et al. 2009. Characteristics of atmospheric CH₄ concentration variations at four national baseline observatories in China [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 5 (5): 285–290.
- Mastepanov M, Sigsgaard C, Dlugokencky E J, et al. 2008. Large tundra methane burst during onset of freezing [J]. *Nature*, 456 (7222): 628–630, doi: 10.1038/nature07464.
- Saarnio S, Silvola J. 1999. Effects of increased CO₂ and N on CH₄ efflux from a boreal mire: A growth chamber experiment [J]. *Oecologia*, 119 (3): 349–356, doi: 10.1007/s004420050795.
- Saarnio S, Alm J, Martikainen P J, et al. 1998. Effects of raised CO₂ on potential CH₄ production and oxidation in, and CH₄ emission from, a boreal mire [J]. *Journal of Ecology*, 86 (2): 261–268, doi: 10.1046/j.1365-2745.1998.00248.x.
- Saarnio S, Saarinen T I M O, Vasander H, et al. 2000. A moderate increase in the annual CH₄ efflux by raised CO₂ or NH₄NO₃ supply in a boreal oligotrophic mire [J]. *Global Change Biology*, 6 (2): 137–144, doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.00294.x.
- Susskind J, Barnet C D, Blaisdell J M. 2003. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41 (2): 390–409, doi: 10.1109/TGRS.2002.808236.
- 唐孝炎, 李金龙. 1990. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 48–51, 305–306. Tang Xiaoyan, Li Jinlong. 1990. *Atmosphere Environmental Chemistry* [M] (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 48–51, 305–306.
- Thomas K L, Benstead J, Davies K L, et al. 1996. Role of wetland plants in the diurnal control of CH₄ and CO₂ fluxes in peat [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (1): 17–23, doi: 10.1016/0038-0717(95)00103-4.
- WMO. 2009a. Guidelines for the Measurement of Methane and Nitrous Oxide and their Quality Assurance [R]. GAW Report No. 185, 16–21.
- WMO. 2009b. Revision of the World Data Centre for Greenhouse Gases Data Submission and Dissemination Guide [R]. GAW Report No. 188, 1–39.
- WMO Greenhouse Gas Bulletin. 2013. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Using Global Observations up to December 2012 [EB/OL]. No. 9.
- Xiong X Z, Barnet C, Maddy E, et al. 2008. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: G00A01, doi: 10.1029/2007JG000500.
- Xiong X, Barnet C, Wei J, et al. 2009a. Information-based mid-upper tropospheric methane derived from Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and its validation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9

- (4): 16331–16360, doi: 10.5194/acpd-9-16331-2009.
- Xiong X, Houweling S, Wei J, et al. 2009b. Methane plume over south Asia during the monsoon season: Satellite observation and model simulation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9 (3): 783–794, doi: 10.5194/acp-9-783-2009.
- Xiong X Z, Barnet C, Maddy E, et al. 2010a. Seven years' observation of mid-upper Tropospheric methane from atmospheric infrared sounder [J]. *Remote Sensing*, 2 (11): 2509–2530.
- Xiong X Z, Barnet C D, Zhuang Q L, et al. 2010b. Mid-upper tropospheric methane in the high northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D19309, doi: 10.1029/2009JD013796.
- 熊效振, 张莹, 陈良富, 等. 2011. 季风影响下的青藏高原上空甲烷、水汽及云的变化 [J]. *成都信息工程学院学报*, 26 (5): 480–485. Xiong Xiaozhen, Zhang Ying, Chen Liangfu, et al. 2011. Variation of methane, water vapor and clouds over Tibetan Plateau under the impact of Asian Summer Monsoon [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 26 (5): 480–485, doi: 10.3969/j.issn.1671-1742.2011.05.003.
- Yagi K, Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 36 (4): 599–610, doi: 10.1080/00380768.1990.10416797.
- 张东启, 张晓春, 乜虹, 等. 2004. 瓦里关大气本底观象台 CO₂、CH₄ 观测过程的质量控制 [J]. *应用气象学报*, 15 (增刊): 95–100. Zhang Dongqi, Zhang Xiaochun, Nie Hong, et al. 2004. Quality control of CO₂ and CH₄ measurement data on China global atmosphere watch baseline observatory [J]. *Journal Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (S1): 95–100.
- 张秀敏, 盛煜, 赵林, 等. 2012. 基于分区和多元数据的青藏高原温泉区域多年冻土分布研究 [J]. *地理科学*, 32 (12): 1513–1520. Zhang Xiumin, Sheng Yu, Zhao Lin, et al. 2012. Permafrost distribution using sub-region classification and multivariate data in the Wenquan Area over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 32 (12): 1513–1520, doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.012.1513.
- 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 2007. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展 [J]. *气象*, 33 (7): 3–14. Zhang Xingying, Zhang Peng, Fang Zongyi, et al. 2007. The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (7): 3–14.
- 张兴赢, 白文广, 张鹏, 等. 2011. 卫星遥感中国对流层中高层大气甲烷的时空分布特征 [J]. *科学通报*, 56 (33): 2804–2811. Zhang Xingying, Bai Wenguang, Zhang Peng, et al. 2011. Spatiotemporal variations in mid-upper tropospheric methane over China from satellite observations [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 56 (33): 3321–3327.
- 张镡锂, 李炳元, 郑度. 2002. 论青藏高原范围与面积 [J]. *地理研究*, 21 (1): 1–8. Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. 2002. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 21 (1): 1–8, doi: 10.11821/yj2002010001.
- 周秀骥. 2005. 中国大气本底基准观象台进展总结报告 (1994–2004) [M]. 北京: 气象出版社, 98pp. Zhou Xiuji. 2005. Summery Report to the Progress of China Ground Observation (1994–2004) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Administration, 98pp.