

永兴岛大气 CH₄ 浓度变化特征及影响因子研究

姜亦飞^{1,2},王先桥^{1,2},王海燕²,许宇山³,吕洪刚^{1,2*} (1.国家海洋环境预报中心,自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室,北京 100081; 2.国家海洋环境预报中心,北京 100081; 3.国家海洋局三沙海洋环境监测中心站,海南 海口 570311)

摘要: 依托国家海洋局三沙海洋环境监测中心站,基于激光大气温室气体分析仪(GLA331-GGA),搭建了一套全自动、连续、高精度观测大气 CH₄ 的观测系统.通过气团后向轨迹输送特征,结合数值统计方法(局部近似回归法),对西沙永兴岛区域 2013 年 12 月~2017 年 11 月期间的观测数据进行了数据筛选和分析.结果显示:西沙海域大气 CH₄ 季节变化与北半球大气本底变化状况类似,冬季高、夏季低,年平均增长率约为 11.9×10^{-9} ,年平均季节振幅为 81.1×10^{-9} ;其日变化呈现中午低、凌晨高的单周期正弦变化特征;该区域风场数据和气团后向轨迹分析表明:季风是影响该区域 CH₄ 浓度变化的最主要因素.

关键词: 大气 CH₄; 区域本底; 永兴岛

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)11-5054-06

Concentration variation and impact factors of CH₄ in Yongxing Island. JIANG Yi-fei^{1,2}, WANG Xian-qiao^{1,2}, WANG Hai-yan², XU Yu-shan³, LÜ Hong-gang^{1,2*} (1.Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 2.National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 3.Sansha Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Haikou 570311, China). *China Environmental Science*, 2021,41(11): 5054~5059

Abstract: Based on the laser greenhouse gas analyser (GLA331-GGA), an automatic continuous high-accuracy observation system was set up for real-time measurement of atmospheric CH₄ supported by the Sansha Marine Environmental Monitoring Center of State Oceanic Administration. According to the characteristics revealed by backward trajectory of air masses, combining with numerical statistical methods (e.g. robust local regression), the real-time observation data of atmospheric methane in Yongxing Island during the period from December 2013 to October 2017 were screened and analyzed. The results indicate that the concentration of atmospheric CH₄ in Yongxing Island presented an apparent seasonal variation: high in winter and low in summer, which is similar to that of the atmospheric background in the Northern Hemisphere. The annual growth rate of CH₄ was about 11.9×10^{-9} on average, and the annual average seasonal amplitude was 81.1ppb. The diurnal variation of CH₄ concentration showed a single-period sinusoidal variation: low at noon and high in the wee hours. The analysis of wind field data and backward trajectory of air masses demonstrated that the monsoon is the key factor impacting on the variations of CH₄ concentration in the area.

Key words: atmospheric methane; regional background; Yongxing Island

甲烷(CH₄)是大气中最主要的温室气体之一,其辐射强迫仅次于 CO₂,单位浓度 CH₄ 的辐射强迫效应是 CO₂ 的 20 倍以上^[1-4].同时,作为大气中重要的化学活性含碳化合物,CH₄ 可与大气 O₃ 和 H₂O,发生光化学反应,从而改变大气组分比例^[5].据世界气象组织 2019 年温室气体公报报道:排入大气中的 CH₄,约 40%是通过自然源(例如湿地和白蚁),其余约 60%来自人为源(例如养牛、水稻种植、化石燃料利用、垃圾填埋和生物质燃烧)^[6].最新观测数据表明,2020 年全球大气 CH₄ 本底浓度(本文所指的浓度是指体积混合比或摩尔分数)年平均值已达 1879.1×10^{-9} ,而工业革命前的大气 CH₄ 为 720×10^{-9} ,增加了 1.5 倍左右,CH₄ 年平均增幅从 20 世纪 80 年代初的每年约 13×10^{-9} 减少到 1999~2006 年的接近于零,自 2007 年

以来,大气 CH₄ 再次上升,年平均增幅约为 7×10^{-9} ,大气 CH₄ 浓度的持续增长将导致温室效应继续加强,进而直接影响全球气候变化^[6-8].由于 CH₄ 在大气中的停留时间相对较短,一般为 8~12a,其浓度变化主要受短期排放和大气输送影响,也受长期积累的影响.因此,深入了解不同区域大气 CH₄ 浓度变化特征及影响机制,对科学制定温室气体减排政策、积极应对气候变化具有十分重要的意义^[9].

海洋作为大气 CH₄ 的一个自然源,大部分海洋水体中的 CH₄ 均处于不同程度的过饱和状态,其释放 CH₄ 的量约占全球释放总量的 2%~4%^[10].其中占

收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1403306)

* 责任作者,高级工程师,lvhonggang@126.com

海洋面积约 15.2% 的陆架海的 CH₄ 释放量占全球海洋 CH₄ 释放总量的 68%^[11], CH₄ 同时也是海洋中碳循环的重要产物, 因此国内外的学者对其在大洋、海湾以及近岸海域中的产生、时空分布、季节变化和海-气交换通量等进行了广泛研究^[12-14], 但对于海洋大气中 CH₄ 的时空变化分布和影响因子等研究相对较少, 在估算全球海洋释放 CH₄ 量时还存在很大的不确定性^[15].

本文以海岛基实测大气温室气体数据为研究对象, 首次报道了南海大气 CH₄ 的区域本底浓度变化特征, 分析了不同季节 CH₄ 浓度变化的主控影响因素. 永兴岛作为西沙群岛陆地面积最大的岛屿, 在南海具有重要的战略地位, 生态系统多样且复杂, 受季风影响显著. 永兴岛长期、连续、高精度大气 CH₄ 数据能为获取 CH₄ 空间分布信息、弥补近地面观测不足、校正模式参数化方案、研究南海上空 CH₄ 在区域气候变化中的作用提供数据支撑, 亦能为中国应对气候变化、参与国际气候变化谈判提供数据支持和保障.

1 材料与方法

1.1 研究区域

三沙市永兴岛位于南海西沙群岛中部, 距离海南三亚市仅 340km 左右, 是西沙群岛陆地面积最大的岛屿, 地势平坦, 面积约 2.6km²; 永兴岛地处北回归线以南, 属于热带季风气候, 兼具海洋性气候特点, 冬季以东北季风为主导风向, 夏季以西南季风为主导风向, 雨季为每年 5~6 月, 年降水量达 1509.8mm.

1.2 观测仪器与方法

温室气体观测系统的进气口布设于三沙海洋环境监测中心站的楼顶(16.83°N, 112.33°E, 海拔约 18m), 系统使用的高频激光温室气体分析仪型号为 GLA331-GGA, 该型号仪器内部自控温, 受外部环境影响小, 激光飘移小, 测量更稳定, 采用离轴积分腔输出光谱技术(OA-ICOS), 可以同时测量大气中的 CO₂、CH₄ 和 H₂O(水汽)浓度, 采样频率为 1HZ. 该仪器的原理是利用特定波长的激光在光腔内多次反射, 反射镜和目标气体均造成入射光能量的衰减, 根据空光腔和充满样品气时激光衰减到 0 的时间不同, 即可定量样品中目标气体的浓度. Mahesh 等^[16] O'Shea 等^[17] 对该技术的原理和实际应用进行过比

较详细的描述.

观测系统使用的标准气体是中国气象科学研究院提供的可溯源至世界气象组织国际标准的标气, 其广泛应用于瓦里关、龙凤山、临安等全球大气本底站和区域大气本底站^[18-20], 本站所用的标气信息如表 1 所示; 本系统 CH₄ 的测量精度为 1×10⁻⁹, CO₂ 测量精度为 100×10⁻⁹, 系统每天校准 1 次. 此外, 现场值班人员会定期对系统的硬件和软件进行定时检查. 文中所用的气象资料为三沙海洋环境监测中心站业务观测数据; 瓦里关、Mauna Loa、Tiksi 站的数据来源于 WDCGG(<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>); MeteoInfo 软件所用的气象数据来源于美国国家环境预报中心的全球气象资料同化系统(GDAS)(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives>).

表 1 标气的浓度和标准偏差

Table 1 Concentration values and standard deviations of the calibration gases

标气	气体	单位	浓度	标准偏差
1	CO ₂	×10 ⁻⁶	367.01	0.01
	CH ₄	×10 ⁻⁹	1771.2	0.03
2	CO ₂	×10 ⁻⁶	427.00	0.03
	CH ₄	×10 ⁻⁹	1977.2	0.03
3	CO ₂	×10 ⁻⁶	495.73	0.02
	CH ₄	×10 ⁻⁹	2459.7	0.2

注: 1、2、3 分别代表观测系统使用的低、中、高浓度标气.

1.3 区域本底浓度数据筛分

观测区域大气 CH₄ 浓度会受到局地条件和人为活动影响, 短时间内造成浓度的迅速抬升, 因此对观测数据进行筛分能获取真实反映该区域大气 CH₄ 本底特征的数据, 是开展南海大气 CH₄ 分析研究的基础.

常见的大气成分筛分方法主要有黑炭(BC)示踪法、气象要素法、局部近似回归法(REBS)等, Fang 等^[21] 在相关文献中做过非常详细的报道和对比研究. 针对海洋大气 CH₄ 来源特征, 本研究采用局部近似回归法, 基于 R 数值统计软件中的 IDP-Misc 程序包对西沙大气 CH₄ 浓度进行筛分. 该方法由中国气象科学研究院开发, 经比对证实可用于长期观测数据本底浓度筛分^[22]. 局部近似回归法是一种统计学方法, 利用与均值差异大于 3σ 作为标准, 在一段较短时间内对观测值进行估计, 并且考虑温室气体浓度

长期或短期的微小变化,局部近似回归拟合^[23].本底值为假设大气均匀混合状态的值,是大气环境中可能的最低值,因此任何源或汇的因素只会增大或降低本底值,不会有不规则变动的情况发生.

2 结果与讨论

2.1 数据筛分结果

基于局部近似回归法(REBS),对 2013 年 12 月~2017 年 11 月观测期间永兴岛大气 CH₄ 浓度进行了区域本底筛分,结果如图 1 示.

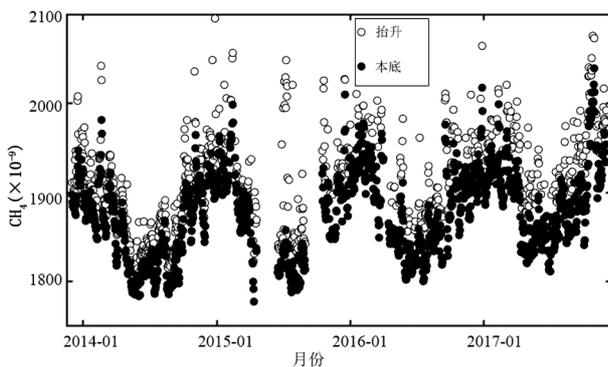


图 1 西沙大气 CH₄ 浓度本底值筛分(2013 年 12 月~2017 年 11 月)

Fig.1 Time series of CH₄ concentration at Xisha

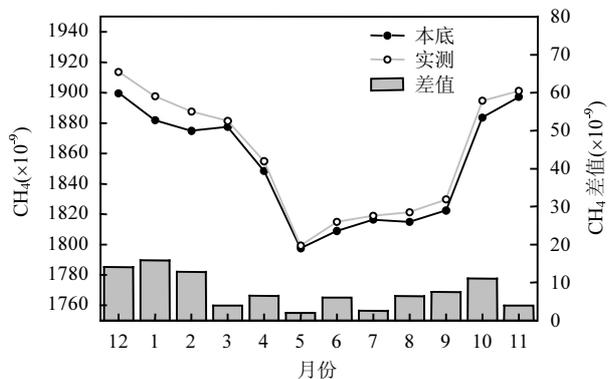


图 2 CH₄ 实际浓度和本底浓度月平均对比(2013 年 12 月~2014 年 11 月)

Fig.2 Monthly mean CH₄ data for monitoring and background concentration

由图 1 可见,CH₄ 本底浓度值夏季最低.非本底浓度值受到区域或局地排放源的影响,使 CH₄ 浓度有较大的抬升.本底浓度呈相对较平稳的基线,波动小,非本底浓度数据波动较大.经分析,约 80%的数据被筛分为本底浓度值;20%数据为源抬升浓度值.连续 4 年数据显示: CH₄ 实际浓度与本底浓度的差值

最大值出现在冬季,而处于季风交替月份的 5 月份差值最小.由图 2 可见,CH₄ 年均实际浓度和本底浓度的月均差值最大值为 1 月份的 15.8×10^{-9} ,最小值出现在 5 月份,为 2.0×10^{-9} ,全年的差值平均值为 7.7×10^{-9} .

2.2 西沙大气 CH₄ 区域本底浓度变化特征

2.2.1 日变化特征 如图 3 所示,2013 年 12 月~2017 年 11 月 4 个季节西沙大气 CH₄ 区域本底浓度日变化(小时平均)特征总体呈现“白天低、夜晚高”的单峰型特征(图 3a).由图 3b 可见,2013 年 12 月~2017 年 11 月 CH₄ 全年均值最低值出现在 13:00~14:00,而 23:00~00:00 左右值最高.其原因可能是:白天西沙海域光照强度较大,大气中 OH 自由基浓度较高,CH₄ 的分解速度在中午达到最高,且白天大气对流传输条件一般较好,因此 CH₄ 浓度出现最低值;而随着夜晚的来临,光照减弱并逐渐停止,CH₄ 的分解也逐渐停止,加上夜间大气边界层高度较低且相对稳定,有利于 CH₄ 在近地面积累,因此,夜间 CH₄ 浓度最高.该现象与陆地区域大气 CH₄ 日变化特征是非常相似的^[24].

尽管不同季节的浓度日变化特征总体相似,但在平均浓度、变化规律等方面亦存在差异.周凌晔等^[25]和 Dlugokencky 等^[26]统计分析了全球大气 CH₄ 分布的研究中指出,全球大气 CH₄ 的时空变化比较明显,随纬度而明显变化,受区域气候特征和局部源影响也较显著.西沙的大气气团来源季节差异显著,冬季主要受大陆气团影响,夏季主要受西南季风影响,不同季节温度差异引起的地表逆温环境不同,也会影响大气 CH₄ 浓度的变化.综上所述,不同季节出现日变化幅度差异及变化时间的差异可以归因于气团来源和气象因素的影响.

2.2.2 月变化特征 美国 Mauna Loa 全球大气本底站(19.54° N, 155.58° W,海拔 3397m)是全球最早建立的大气基准观测站,从 20 世纪 50 年代开始对大气温室气体开展不间断连续观测;而瓦里关全球大气本底站(36.28° N, 100.90° E,海拔 3810m)是北半球内陆腹部唯一的大气本底观测站,是世界气象组织全球大气观测系统的 29 个大气本底基准观测站之一;Tikis 站(71.59° N, 128.92° E,海拔 8m)位于俄罗斯,是全球为数不多的监测北半球高纬度地区温室气体浓度的观测站.

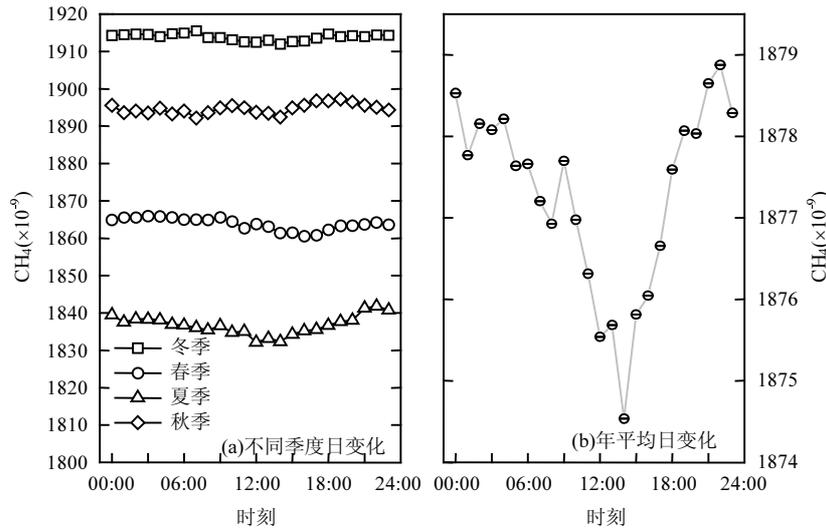


图3 不同季度和全年平均大气 CH₄ 区域本底浓度日变化(2013 年 12 月~2017 年 11 月)
Fig.3 Mean diurnal variations of CH₄ concentration in different seasons and annual average

由图 4 可见,西沙站、Mauna Loa 站、瓦里关站、Tiksi 站在 2013 年 12 月~2017 年 11 月大气 CH₄ 月平均浓度变化呈明显的纬度分布,大致随纬度的增高而增大,到北半球寒带地区达到最大值,与 WDCGG 公布数据和 Dlugokencky 等发表的研究成果是一致的^[26].俄罗斯有大片森林和湿地,天然气和矿物燃料的开采和利用都比较大,这些都是 CH₄ 的主要来源之一^[25-26];观测期间,西沙站的大气 CH₄ 月平均浓度为 $1797.3 \times 10^{-9} \sim 1943.5 \times 10^{-9}$,月浓度变化特征与其他几个站一致,均呈现明显的单峰型季节变化特征,冬季高、夏季低,振幅明显高于 Mauna Loa 站和瓦里关站.主要由于 Mauna Loa 站地处太平洋,远离大陆,人为干扰非常小,气象条件和气候条件相对稳定,取样点海拔较高,气团混合均匀;瓦里关站位于青藏高原,是欧亚大陆唯一的内陆全球大气基准观测站,人为干扰也较小,海拔达 3810m,气象条件和气候条件亦相对稳定,气团混合均匀;而西沙站位于南海北部海域,属于热带海洋性季风气候,常年受季风影响,受到北部中国大陆高浓度气团和印度洋上空低浓度气团的交替影响,因此西沙站振幅明显高于 Mauna Loa 站和瓦里关站.西沙站大气 CH₄ 浓度季平均振幅约为 81.1×10^{-9} ,远高于 Mauna Loa 站和瓦里关站,所在区域生态环境特征、气象条件和气团输送的差异是西沙站季节振幅偏大的主要原因.

通过计算,2013 年 12 月~2017 年 11 月期间,Mauna Loa、瓦里关和 Tiksi 站大气 CH₄ 浓度缓慢升高,月平均浓度曲线斜率分别为 0.65、0.67 和

0.55,而基于现有观测数据的西沙站大气 CH₄ 浓度的增长率高于这三个站,月平均浓度曲线斜率约为 0.99,后面的章节将基于气团后向轨迹等对这一现象作初步探讨.

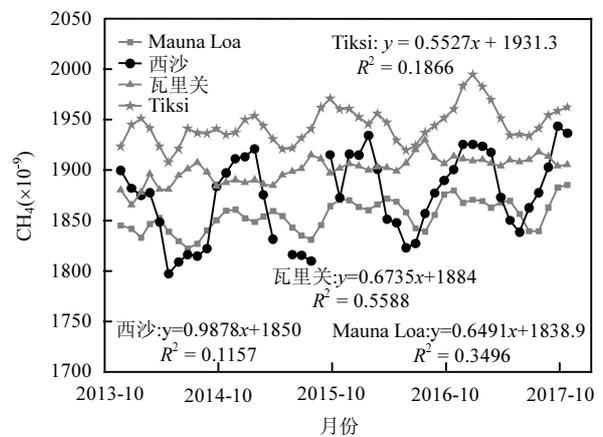


图4 西沙站与 Mauna Loa、瓦里关、Tiksi 站多年大气 CH₄ 月平均浓度变化(2013 年 12 月~2017 年 11 月)
Fig.4 Mean monthly variations of CH₄ concentration at Xisha, Mauna Loa, Waliguan and Tiksi

2.3 影响因子分析和讨论

文献报道的 30 年气候态数据显示^[27]:西沙地区从当年 9 月 5 候至次年 3 月 3 候低层盛行东北风、最大平均风速出现在 11 月和 12 月,约 6.5m/s.3 月 4 候 9 月 3 候盛行东南风和西南风,最大候平均风速为 5m/s,该气候态数据与三沙海洋环境监测中心站的业务观测数据是非常一致的.

如图 5 所示,冬季西沙的主导风向为 NNE-NE-

ENE-E,而夏季西沙的主导风向为 S-SSW-SW-WSW.对照浓度数据发现:冬季 CH₄ 在 NE-NE-ENE-E 扇区的浓度值显著高于其他扇区,而夏季在 N 和 S-SSW 扇区的浓度值显著低于其他扇区.此外,夏季 CH₄ 浓度显著偏大的扇区位于 SW-WSW-W-WNW-NW 扇区,这是与其他 3 个季节最显著的差别,说明在夏季,西沙区域 CH₄ 受该扇区过来的气团影响更大.

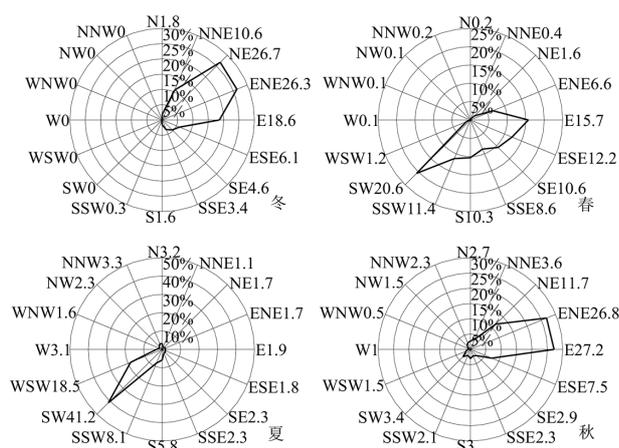


图5 西沙不同季节风向-频率玫瑰

Fig.5 Wind direction-frequency Rose Diagram of different seasons in Xisha

气象数据直观的给出了气团来源的扇区,为了进一步研究不同季节气团的来源分布,我们基于 MeteoInfo 软件,结合“NCEP/NCAR”气象资料,利用插件“TrajStat”对观测期间每天 06:00 做 120h 后向轨迹并进行聚类分析,连续 4 年的结果显示(图 6):研究区域每年各季度后向轨迹分布非常相似,冬季超过 70%的气团来源于我国东南沿海地区,而卫星遥感数据显示冬季该区域是我国大气 CH₄ 浓度含量较高的区域^[28-30],因此冬季是西沙大气 CH₄ 最高的季节;夏季(6 月~8 月)受西南季风影响,约 85%的气团来源于大气 CH₄ 浓度较低的印度洋方向,平均浓度最低;春季(3 月~5 月)和秋季(9 月~11 月)处于东北季风和西南季风交替季节,气团轨迹亦呈现交替变化,大气 CH₄ 浓度低于冬季,高于夏季.

区域大气 CH₄ 的浓度主要受自然源和人为源排放影响,由于大气 CH₄ 的时空变化率太大,对 CH₄ 源区分布及变化的认识也很不够,目前的各种实验及模式研究都还不能很好地解释这种增长的不规则

变化^[25].项目组后续将基于涡动相关法、箱式通量法、卫星遥感反演、数值模拟等方法对永兴岛及周边区域开展 CH₄ 通量观测,结合更长时间序列的大气 CH₄ 观测浓度变化规律,对比周边国家和区域 CH₄ 排放数据,开展进一步研究.

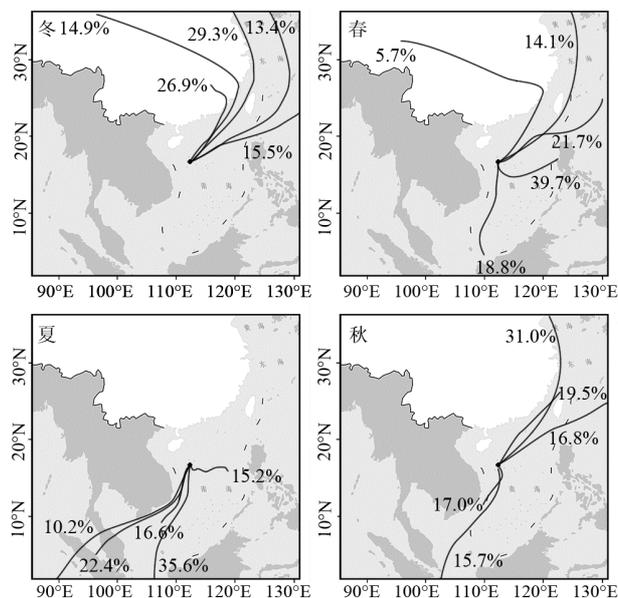


图6 不同季度 72h 后向轨迹簇聚类分析

Fig.6 Air mass arriving at Xisha station by backward trajectories of 72 hours in different seasons

3 结论

3.1 西沙海域大气 CH₄ 浓度呈现明显的单峰型季节变化特征,冬季高、夏季低;受显著的热带海洋季风气候和区域地理环境的影响,浓度季节变化幅度显著高于 Mauna Loa、瓦里关等全球本底站,季节平均振幅约为 81.1×10^{-9} ;不同季节 CH₄ 浓度日变化(小时平均)特征总体一致,基本呈现“白天低、夜晚高”的单峰型特征.

3.2 西沙永兴岛海域季风特征明显,冬季 CH₄ 在 NE-NE-ENE-E 扇区的浓度值显著高于其他扇区,而夏季在 N 和 S-SSW 扇区的浓度值显著低于其他扇区.冬季来自中国东南沿海的高浓度气团和夏季来自印度洋方向的低浓度气团是季节尺度影响永兴岛海域大气 CH₄ 浓度的最主要因素.

3.3 2013 年 12 月~2017 年 11 月,西沙永兴岛海域大气 CH₄ 浓度平均增长速率略高于全球平均水平,基于实测数据计算的年平均增长率约为 11.9×10^{-9} .

参考文献:

- [1] Rasmussen R A, Khalil M A K. Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres: concentrations, trends, and interhemispheric gradient [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984,89 (D7):11599–11605.
- [2] Crutzen P J. On the role of CH₄ in atmospheric chemistry: sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources [J]. *Ambio*, 1995,24(1):52–55.
- [3] Berman E S F, Fladelland M, Liem J, et al. Greenhouse gas analyzer for measurements of carbon dioxide, methane, and water vapor aboard an unmanned aerial vehicle [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012,169:128–135.
- [4] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Cambridge University Press, 2013:20–309.
- [5] Crutzen P J. Methane's sinks and sources [J]. *Nature*, 1991,350 (6317):380–381.
- [6] WMO/GAW. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2018 [M]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2019.
- [7] Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, et al. Global carbon budget 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2019,11(4):1783–1838.
- [8] Nisbet E G, Dlugokencky E J, Bousquet P. Methane on the Rise—Again [J]. *Science*, 2014,343:493–495.
- [9] 刘立新,周凌晞,温民,等.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*, 2009,5(5):285–290.
- [10] IPCC. Climate Change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Cambridge University Press, 2001:1–881.
- [11] Bange H W, Bartell U H, Rapsomanikis S, et al. Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994,8(4):465–480.
- [12] Reeburth W S. Oceanic Methane Biogeochemistry [J]. *Chemical Reviews*, 2007,107(2):486–513.
- [13] Amuorou X D, Roberts G, Rapsomanikis S, et al. Biogenic gas (CH₄, N₂O, DMS) emission to the atmosphere from nearshore and shelf waters of the north-western Black Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002,54(3):575–587.
- [14] Holmes M E, Sansone F J, Kang Y B, et al. Methane production, consumption, and air-sea exchange in the open ocean: an evaluation based on carbon isotopic ratios [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000,14(1):1–10.
- [15] Dlugokencky E J, Nisbet E G, FISHER R, et al. Global atmospheric methane: budget, changes and dangers [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011,369(1943):2058–2072.
- [16] Mahesh P, Sreenivas G, Rao P V N, et al. High-precision surface-level CO₂ and CH₄ using off-axis integrated cavity output spectroscopy (OA-ICOS) over Shadnagar, India [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015,36(22):5754–5765.
- [17] O'Shea S J, Allen G, Gallagher M W, et al. Airborne observations of trace gases over boreal Canada during BORTAS: campaign climatology, air mass analysis and enhancement ratios [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013,13(24):12451–12467.
- [18] Fang S X, Zhou L X, Masarie K A, et al. Study of atmospheric CH₄ mole fractions at three WMO/GAW stations in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(10):4874–4886.
- [19] 方双喜,周凌晞,许林,等.我国 4 个 WMO/GAW 本底站大气 CH₄ 浓度及变化特征 [J]. *环境科学*, 2012,33(9):2917–2923.
- [20] 夏琳君,刘立新.北京上甸子站大气 CH₄ 数据筛选及变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(11):4044–4051.
- [21] Xia L J, Liu L X. Data selection and variation characteristics of atmospheric CH₄ observed at Shangdianzi station in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(11):4044–4051.
- [22] Ruckstuhl A F, Henne S, Reimann S, et al. Robust extraction of baseline signal of atmospheric trace species using local regression [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012,5(11):2613–2624.
- [23] Rabouille C, Mackenzie F T, Ver L M. Influence of the human perturbation on carbon, nitrogen, and oxygen biogeochemical cycles in the global coastal ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(21):3615–3641.
- [24] 浦静姣,徐宏辉,顾骏强,等.气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析 [J]. *环境科学*, 2013,34(3):835–841.
- [25] Pu J J, Xu H H, Gu J Q, et al. Impacts of meteorological factors on atmospheric methane mole fractions in the background area of Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2013,34(3):835–841.
- [26] 周凌晞,李金龙,汤洁,等.瓦里关山大气 CH₄ 本底变化 [J]. *环境科学学报*, 2004,24(1):91–95.
- [27] Zhou L X, Li J L, Tang J, et al. Variations of background atmospheric methane at Mt. Waliguan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004,24(1):91–95.
- [28] Dlugokencky E J, Steele L P, Lang P M, et al. The growth rate and distribution of atmospheric methane [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994,99(D8):17021–17043.
- [29] 吴尚森,梁建茵.南海西沙地区季风季节变化的气候特征 [J]. *大气科学*, 1998,22(5):771–778.
- [30] Wu S S, Liang J Y. Seasonal evolution of climate characteristics of summer monsoon over Xisha Area [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998,22(5):771–778.
- [31] 张兰兰,张金业.基于 GOSAT 卫星数据的中国 CH₄ 浓度时空分布 [J]. *湖北工业大学学报*, 2018,33(4):37–39.
- [32] Zhang L L, Zhang J Y. Spatial and temporal distribution of CH₄ concentration based on GOSAT satellite [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2018,33(4):37–39.
- [33] Zhang Y Z, Jacob D J, Lu X, et al. Attribution of the accelerating increase in atmospheric methane during 2010–2018 by inverse analysis of GOSAT observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021,21(5):3643–3666.
- [34] 张兴赢,白文广,张鹏,等.卫星遥感中国对流层高层大气甲烷的时空分布特征 [J]. *科学通报*, 2011,56(33):2804–2811.
- [35] Zhang X Y, Bai W G, Zhang P, et al. Spatial and temporal variations in mid-upper tropospheric methane over China from satellite observation [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011,56:3321–3327.

作者简介: 姜亦飞(1986–),男,江苏南通人,助理研究员,硕士,主要从事全球碳循环及海气相互作用研究.发表论文 5 篇.