

中国大气本底观测： 减污降碳背景下主要大气成分变化趋势

张勇 颜鹏 靳军莉 周青 梁苗 荆俊山 孙万启 娄梦筠 吕珊珊
(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 大气成分变化对天气气候、环境生态, 以及人体健康、社会生活等都有重要影响。只有通过长期观测, 了解这些大气成分的浓度水平、变化趋势、相关源汇过程, 才能准确地评估人类活动对当前地球气候、环境和生态系统造成的影响, 保护人类发展和生存条件。本文概括介绍了世界气象组织全球大气监测计划(WMO/GAW)和我国开展大气本底观测的发展历程, 介绍了中国气象局大气本底站建设与观测业务体系和运行情况, 以及中国气象局大气本底观测在科学研究、政府决策、社会公众服务等各个领域发挥的重要作用。进一步结合大气本底站观测的温室气体、颗粒物和 O_3 的变化趋势和特点分析, 阐述了大气本底观测对我国应对气候变化、大气污染治理和推进碳达峰、碳中和的重要意义。并对今后我国推动大气本底站建设, 完善大气本底观测网络布局和运行保障体系, 提升大气本底观测能力, 拓展大气本底观测应用服务等提出建议。文章同时介绍了最新得到(截止到2020年)的大气本底站温室气体观测数据结果, 显示青海瓦里关全球大气本底站长期大气 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 年平均浓度与北半球中纬度地区平均浓度相当, 而6个区域大气本底站的 CO_2 、 CH_4 浓度水平平均高于瓦里关站, 反映了人类活动对区域大气本底浓度水平的重要贡献。

关键词: 大气本底观测, 温室气体, 碳达峰, 碳中和, 变化趋势

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.01.003

Atmospheric Background Observations in China: Trends of Major Atmospheric Components in the Background of Pollution and Carbon Reduction

Zhang Yong, Yan Peng, Jin Junli, Zhou Qing,
Liang Miao, Jing Junshan, Sun Wanqi, Lou Mengyun, Lyu Shanshan
(China Meteorological Administration Meteorological Observation Centre, Beijing 100081)

Abstract: The variation of atmospheric composition exerts an important impact on weather, climate, environmental ecology, human health and social life. Only through long-term observation and understanding of the concentration, variation trends and related source and sink processes of these atmospheric components we can accurately assess the impact of human activities on the current earth's climate, environment and ecosystem, and protect human development and living conditions. In this paper, the development of atmospheric background observation in China and Global Atmospheric Watch of World Meteorological Organization (WMO/GAW), establishment and operation system of atmospheric background station network in China Meteorological Administration (CMA), as well as the important role that atmospheric background observation plays in scientific research, government policy making, social public services and other fields are introduced. In addition, based on the analysis on the variation trends and characteristics of greenhouse gases, particulate matter (PM) and O_3 observed by atmospheric background station, the significance of atmospheric background observation in climate change, air pollution control, carbon emission peak and carbon neutrality in China is elaborated. At last, suggestions are put forward in promoting the construction, layout and operational system of atmospheric background stations, enhancing the capacity and expanding the application services of atmospheric background observation. The latest observation of greenhouse gases from atmospheric background station in China by 2020 show that the annual average concentrations of CO_2 , CH_4 and N_2O at the Global Atmospheric Background Station in Waliguan, Qinghai, are comparable to the average concentrations in the middle latitudes of the Northern Hemisphere, while the concentrations of CO_2

and CH_4 at the six regional atmospheric background stations are all higher than those at Waliguan Station, which reflects the important contribution of human activities to atmospheric composition at regional atmospheric background.

Keywords: atmospheric background observation, greenhouse gases, carbon emission peak, carbon neutrality, variation trend

收稿日期: 2021年12月10日; 修回日期: 2022年1月17日
第一作者: 张勇(1976—), Email: yzhang@cma.gov.cn
通信作者: 颜鹏(1964—), Email: yanpeng@cma.gov.cn
资助信息: 科技部重点研发计划课题(2017YFC1501702);
国家自然科学基金重点项目(91644223)

0 引言

大气成分变化对天气气候、环境生态和水资源,以及人体健康、社会生活等方面都有重要影响。持续增加的温室气体,尤其是CO₂等引起的全球暖化、人为排放的CFCs对南极臭氧洞破坏,以及化石燃料燃烧引起的酸雨和空气污染问题,成为影响当今世界发展的焦点问题。大气成分在大气中的寿命可以长达几十、几百年以上,如大气二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等长寿命温室气体,也可以只有几天或更短,如较短寿命的气溶胶、反应性气体等。只有通过长期观测,了解这些大气成分的浓度水平、相关源汇过程,才能准确地评估人类活动对当前地球气候、环境和生态系统造成的影响,更好地预测未来的可能影响,趋利避害,保护全人类的发展和生存条件。大气本底观测就是通过全球长期、可靠的系统观测,获取有关大气组分及其变化信息,以增强对环境、生态和气候影响的评估和预测水平,减缓或遏制不良的气候环境变化趋势。

国际上对全球大气成分的监测最早可以追溯到20世纪20年代,在全球多个地点开展臭氧总量的长期观测。1957年,世界气象组织(WMO)协调建立了第一个全球性的业务化大气成分观测网络—全球O₃观测系统(Global Ozone Observing System, GO3OS)。到20世纪60年代,WMO又建立了本底大气空气污染监测网(BAPMoN),开展降水化学、气溶胶和CO₂的观测。直到1989年,世界气象组织将GO3OS和BAPMoN合并成立了当前的全球大气监测计划(GAW)。GAW所关注的焦点领域主要包括:气溶胶、温室气体、反应性气体、臭氧、紫外辐射、降水化学(或大气沉降)。同时还为空气质量预报模式检验提供近实时的相关数据。

1 我国大气本底观测发展

我国是较早开展大气本底观测的国家之一。早在1981年,中国气象局(前身为中央气象局)就在北京密云上甸子建设了第一个区域大气本底污染监测站,此后于1983年在浙江临安建设了临安区域大气本底污染监测站,1991年在黑龙江五常县建设了龙凤山区域大气本底污染监测站。1994年,由中国气象科学研究所和青海省气象局在世界气象组织、全球环境基金(GEF)等国际组织以及加拿大、美国等国际同行的对口援助下,完成了中国大气本底基准观象台—青海瓦里关中国大气本底基准观象台的建设工作。该大气本底基准观象台是WMO/GAW的全球基准站之一,也是欧亚大陆腹地唯一的大陆型全球基准站^[1]。2004—

2009年,中国气象局开始了对云南香格里拉、新疆阿克达拉,以及湖北金沙区域大气本底站的选址、论证和初步建设。2011年4月,中国气象局根据业务观测需要,把大气成分观测业务从中国气象科学研究院调整到中国气象局气象探测中心(《关于印发大气成分观测业务调整实施方案的通知》中气函〔2011〕80号)。到2012年,中国气象局正式下文,明确了香格里拉、阿克达拉、金沙三个站的定位、机构、编制等,形成目前中国气象局1+3+3的大气本底观测站网、大气成分中心实验室样品分析和以中国气象局气象探测中心大气成分观测与服务中心为业务指导、支撑、保障主体的国家级大气本底观测业务体系。根据中国气象局2018年印发的《大气本底建设指导意见》(气发〔2018〕84号),中国气象局还将在现有7个国家大气本底站基础上,新建设9个国家大气本底站,以及典型区域满足特殊功能需求的大气本底站。构建由16个国家大气本底站组成的全国大气本底观测骨干站网和若干特殊功能区大气本底站为补充的我国大气本底观测站网观测业务。

2 我国大气本底观测业务现状

2.1 我国大气本底与大气成分观测站网

当前我国大气本底观测站网主要包括1个全球大气本底站,青海瓦里关中国大气本底基准观象台,简称瓦里关站,3个WMO/GAW区域大气本底站,分别是北京上甸子、浙江临安、黑龙江龙凤山,分别简称上甸子站、临安站和龙凤山站,以及2012年以来新建的3个国家区域大气本底站,湖北金沙区域大气本底站、云南香格里拉区域大气本底站、新疆阿克达拉区域大气本底站,分别简称金沙站、香格里拉站和阿克达拉站,各站点分布如图1。观测项目包括温室气体、气溶胶、反应性气体、臭氧总量及廓线、大气酸沉降和本底辐射共6大类23种观测项目,覆盖了WMO推荐观测项目的70%以上。到2021年底,中国气象局又在前期站网建设基础上,加强高精度温室气体观测站点建设,初步形成了中国气象局温室气体观测网。

除大气本底观测,中国气象局还针对国家和地方的需求,以及气象观测业务发展,分批建设了酸雨观测站网、沙尘暴观测站网、大气成分站网和环境气象观测站网,以满足不同层面对大气成分观测的需求。目前,中国气象局已经建成了376个酸雨观测站、29个沙尘暴观测站、28个大气成分站、354个环境气象观测站(含省会及副省级城市站)。涉及观测设备类型有46种型号。

观测站网配套运行国家级大气成分实验室,设有

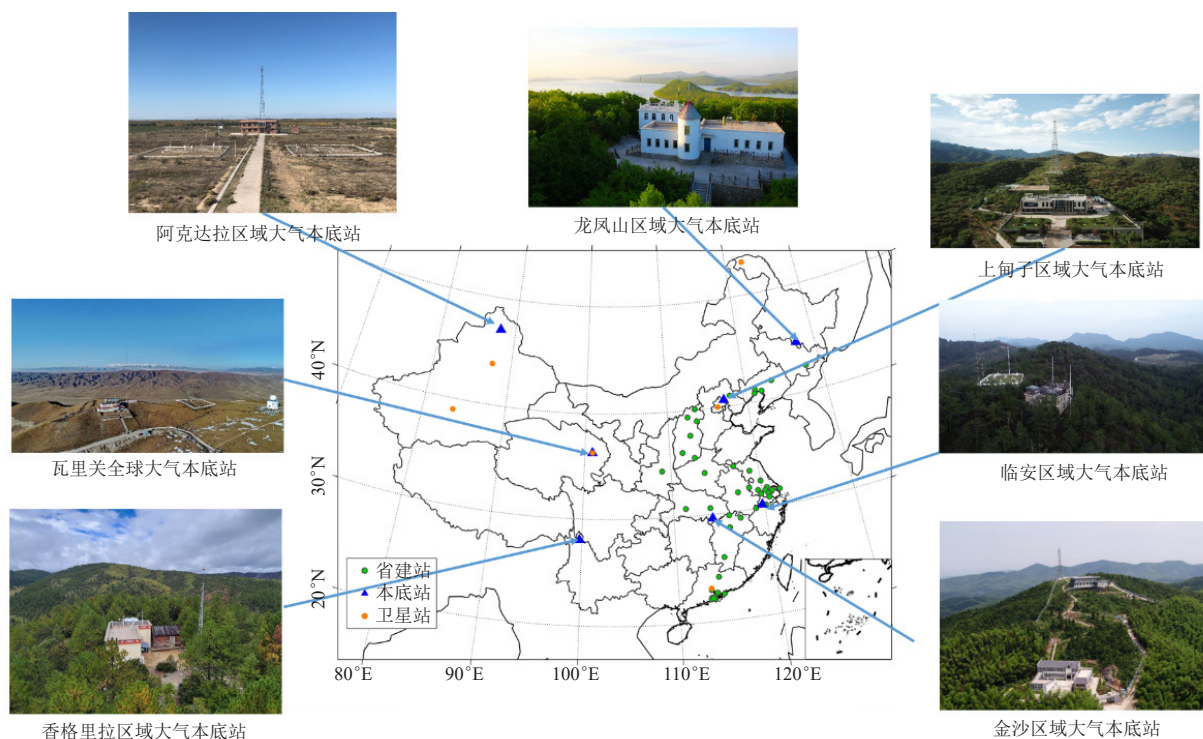


图1 中国气象局大气本底站网及现有温室气体观测站网分布 (照片由各大气本底站提供)

Fig. 1 Map of atmospheric background monitoring network and current greenhouse gases observation stations of CMA

碳循环温室气体、含卤温室气体、稳定同位素、气溶胶、降水化学、反应性气体和标准传递共7个实验室，负责我局大气成分人工采样样品配制分析和标准溯源及传递业务等技术支撑。

2.2 大气本底与大气成分观测业务体系

中国气象局大气本底与大气成分观测业务体系从架构上实行国家、省级(区、市)、台站三级业务布局。

根据当前业务职责划分，中国气象局气象探测中心牵头全国业务布局规划、标准规范体系构建、国家标准溯源、量值传递及设备计量、技术支撑和业务指导、国家级业务运行监控、质量评估和观测产品加工制作，以及国家级大气成分样品分析实验室运行和本底站温室气体观测装备保障。

省级业务部门负责本省(区、市)内其他大气成分观测业务指导、技术支撑、运行监控、质量评估和观测产品加工制作、计量体系构建等。

台站负责按照相关规范制度开展大气成分日常观测业务、设备运行维护、常见故障维修及耗材购置等相关工作。

大气成分观测分析业务的质量保证体系由标准规范建设和质量管理实施两部分构成。

中国气象局分别于2012和2015年印发了《大气

成分观测业务规范(试行)》和《大气成分观测业务运行管理暂行规定》，另发布国家标准12项、行业标准41项，在编国标2项、国标外文版1项、行业标准13项(其中修订4项)，新立项2021年行业标准2项；印发各类技术手册27份，初步建立了较为完整的观测和实验室分析质量保障链条和观测分析规章制度体系。

大气成分业务质量管理实施在中国气象局质量管理体系架构下运行。温室气体、地面臭氧、降水化学等观测项目直接溯源WMO及国际最高质量标准、参与国际质量督察和巡回比对。如CO₂、CH₄、CO、N₂O、SF₆可溯源至WMO制定的中心标校实验室(CCL)国际标准，HFCs、PFCs、NF₃溯源至国际权威温室气体监测网络“先进的全球大气实验网”(AGAGE)国际标准。并参与WMO框架下的系列比对和考核，观测水平和数据质量获得WMO的认可。

3 大气本底观测在国家应对气候变化、减污降碳中的作用和应用

中国气象局大气本底观测对我国应对气候变化、大气污染治理和推进碳达峰、碳中和有重要意义。多年来，中国气象局大气本底观测资料在政府决策、科学研究、社会公众服务等各个领域发挥了重要的作用。

3.1 大气本底观测温室气体应用于国家决策服务和全球数据产品

自2012年起,中国气象局基于瓦里关等大气本底站温室气体观测结果编制《中国温室气体公报》、《WMO温室气体公报解读材料》等决策服务产品,产品已连续发布9期,是我国观测时间序列最长、最权威的国家级温室气体监测和应对气候变化决策服务产品,多次获得国家领导人批示。

瓦里关站的观测资料已共享至温室气体世界数据中心(World Data Center for Greenhouse Gases, WDCGG),用于计算全球温室气体本底浓度的纬度分布及长期变化^[2]。同时用于制作GLOBALVIEW, Obspack等全球温室气体观测数据产品。瓦里关的高精度观测资料对于了解我国温室气体本底浓度变化规律有重要意义^[3-4]。而6个区域本底站的观测结果也对我国不同经济带和生态类型的温室气体本底浓度水平提供珍贵资料,如北京上甸子、浙江临安、黑龙江龙凤山、云南香格里拉、湖北金沙和新疆阿克达拉区域大气本底观测站分别代表京津冀、长三角、东北林带和松嫩平原、川滇及高原边缘带、洞庭鄱阳两湖平原和天山地区的大气本底特征^[5-7]。

图2为瓦里关站接近30年大气二氧化碳(CO₂)浓度变化曲线,显示其浓度特征与同纬度地区的美国夏威夷冒纳罗亚(Mauna Loa)全球大气本底站基本一致,很好地代表了北半球中纬度地区大气二氧化碳的平均状况。该结果被我国代表团在多次国际会议引用。有关消耗臭氧层物质(ODS)观测还在我国参与“蒙特利尔议定书”受控物质监测和履约评估等方面都发挥了重要作用。

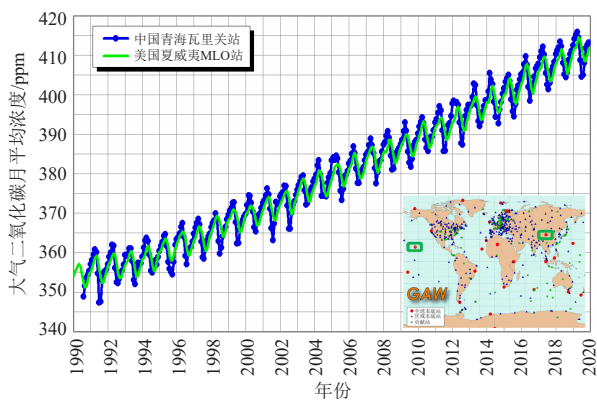


图2 1990—2020年中国青海瓦里关和美国Mauna Loa全球大气本底站大气二氧化碳月均浓度变化^①

Fig. 2 Curves of monthly mean CO₂ baseline concentrations at Mt. Waliguan in Qinghai and Mauna Loa Station of USA from 1990 to 2020

① 中国气象局. 中国温室气体公报, 2020.

3.2 温室气体CO₂“自上而下”源汇反演服务于碳达峰碳中和国家战略

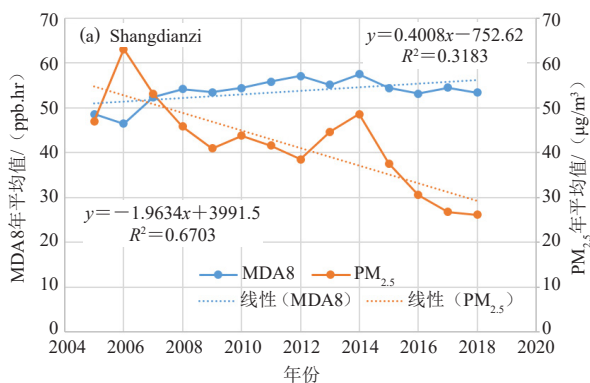
在2021年十三届全国人大四次会议和全国政协十三届四次会议上,“碳达峰”和“碳中和”被首次写入政府工作报告。中国在联合国大会上对实现碳中和时间也做了公开的承诺。2020年12月中央经济工作会议将“做好碳达峰、碳中和工作”列为2021年重点任务。中国提出,二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,力争2060年前实现碳中和。实现碳达峰、碳中和目标的关键问题是对区域大气CO₂排放进行计算和控制。围绕全国和分省CO₂源汇估算的需求,基于大气本底观测获取的长期高精度观测数据对CO₂等温室气体“自上而下”排放源模式反演得到了广泛的应用。这种“自上而下”反演估算区域源汇及变化状况的方法是2019年通过的《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》首次完整提出的,并成为国家温室气体清单检验和校正的重要手段。有研究基于包括瓦里关大气本底观测数据(1996—2012年)在内,用“自上而下”反演方法得到的亚洲区域碳收支揭示,亚洲陆地生态系统(主位于东亚区域),是净的“碳汇”^[8];中国气象局和中国科学院大气物理所研究团队基于中国气象局大气本底站二氧化碳观测数据(2009—2016年),对我国大气CO₂源汇进行了反演分析,得出的结果是“我国陆地生态系统(森林、草地等)每年吸收碳约占我国大陆地区年化石燃料燃烧排放的42%;我国西南地区(云南、贵州、广西等地)陆地生态系统的固碳能力被严重低估,其年碳汇约占全国总陆地生态系统总吸收量的40%。主要因近年来我国大规模退耕还林造成CO₂吸收量增加;以及目前对我国东北地区的陆地生态系统夏季CO₂固碳能力也存在低估现象”^[9]。虽然以上结果还存在较大的不确定性,但这些工作充分显示了温室气体大气本底浓度观测对于掌握碳循环、科学决策方面的支撑作用。随着我国不断加强包括大气本底观测站网和有关温室气体高精度观测能力建设布局,大气本底站网和相关温室气体观测对基于观测数据同化模式反演温室气体源汇及其变化情况的能力将进一步提升,不确定性将会大大降低,对我国CO₂等温室气体源汇估算将会进一步改善,并在我国碳达峰和碳中和中发挥越来越重要的作用。

3.3 大气本底观测服务于国家大气污染评估和治理

大气本底观测在大气污染治理发挥重要作用。由于大气本底观测站点具有更好的区域代表性,其观测

数据通常反映了某个区域大气污染物的背景水平。因此大气本底观测数据对人们更准确评估大气污染治理在更大区域范围的大气质量改善效果、污染物跨区域输送以及作为参考对比评价区域污染治理潜力等具有重要意义。近些年来随着我国大气污染治理力度的加大,伴随城市区域大气污染治理和空气质量的不断改善,在区域性空间尺度上,大气污染物,如地面臭氧、气溶胶PM₁₀、PM_{2.5}等也表现出一些复杂的变化趋势和特点。

图3为上甸子、临安地面气溶胶质量浓度和地面O₃最大8小时日均值(MDA8)逐年长期变化趋势。上甸子站作为华北平原代表性的区域大气本底站,地面PM_{2.5}浓度总体上呈下降趋势,但在2006年和2014年分别呈现峰值,其中2006年年平均PM_{2.5}质量浓度为整个有观测数据期间的最高值,2014年以后,上甸子



站地面PM_{2.5}持续下降,并在2018年达到最低值;临安站作为长三角地区代表性大气本底站,其PM₁₀长期变化与上甸子相似,总体上呈明显的下降趋势,并在2013—2014年出现少量的反弹。从2014年以后,其质量浓度持续降低,到2018年浓度达到最低。这种变化趋势与2013年我国开始落实和加大颗粒物污染治理一致,反映了我国大气污染治理不仅在城市区域,而且在更大的区域范围都取得了显著成效。与PM_{2.5}变化不同,上甸子和临安地面O₃(MDA8)年均值变化却更为复杂,且变化趋势也呈现不同的特点,上甸子站地面O₃(MDA8)呈现增长趋势,而临安站十余年地面O₃(MDA8)水平尽管总体上有下降趋势,但呈现出明显的阶段性变化特点。对照MDA8颗粒物的变化关系,可以看出上甸子、临安站在2014—2016年期间MDA8与颗粒物(PM_{2.5}或PM₁₀)下降趋势相对一致,

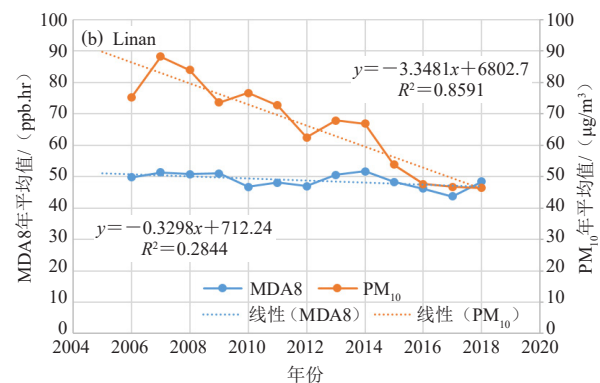


图3 上甸子(a)、临安(b)气溶胶质量浓度(PM)和地面日最大8小时均值(MDA8)长期变化

Fig. 3 Long term variations of particulate matter (PM) and the maximum daily 8-hours average surface ozone (MDA8) at Shangdianzi (a) and Linan (b) stations

而2016年以后随着颗粒物浓度的进一步下降,MDA8又出现增长趋势^[10]。

以上结果显示近年来京津冀和长三角地区大力实施大气污染治理对颗粒物减低取得了显著成效,但同时也反映了颗粒物污染治理对地面O₃治理的不同影响,显示了O₃污染治理复杂性。由于对流层O₃主要是由光化学产生,影响地面O₃的因素复杂,除了气象条件引起的输送影响,还与一定气象条件下O₃前体物(如VOC、NO_x等)和辐射以及颗粒物(沙尘)表面非均相反应有关。颗粒物降低会导致辐射增加,沙尘表面O₃的非均相反应损耗也会减少,这都有利于O₃的生成^[11-13],同时由于O₃生成的光化学过程及其与前体物的关系是非线性的,因此开展O₃与颗粒物的协同控制是当前大气污染治理具有挑战性的工作。

此外,我国大气本底站地面臭氧及柱总量观测资料参与国际数据评估服务。近年来,我国大气本底

站气溶胶质量浓度、地面臭氧和降水化学等资料参与《中国气候变化蓝皮书》《大气环境气象公报》等多份国家决策服务报告,展示关键气候变量的长期变化特征,为气候变化和环境气象决策提供科学观测依据。

4 2020年我国本底大气温室气体观测结果

图4为瓦里关全球大气本底站1990—2020年大气CO₂、CH₄、N₂O长期变化和年增长率分布。表1为2020年全球和青海瓦里关站3种主要长寿命温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的年平均浓度、过去1年的增量和过去10年的年平均增量。

2020年,瓦里关站观测的大气本底CO₂、CH₄和N₂O年平均浓度分别为414.3±0.2 ppm(1 ppm=10⁻⁶)、1949±0.6 ppb(1 ppb=10⁻⁹)、333.8±0.1 ppb,与北半球中纬度地区平均浓度大体相当,但都略高于2020年全球平均值(表1)。2020年瓦里关站大气CO₂、CH₄和N₂O浓度相对于2019年的绝对增量分别为2.9 ppm、

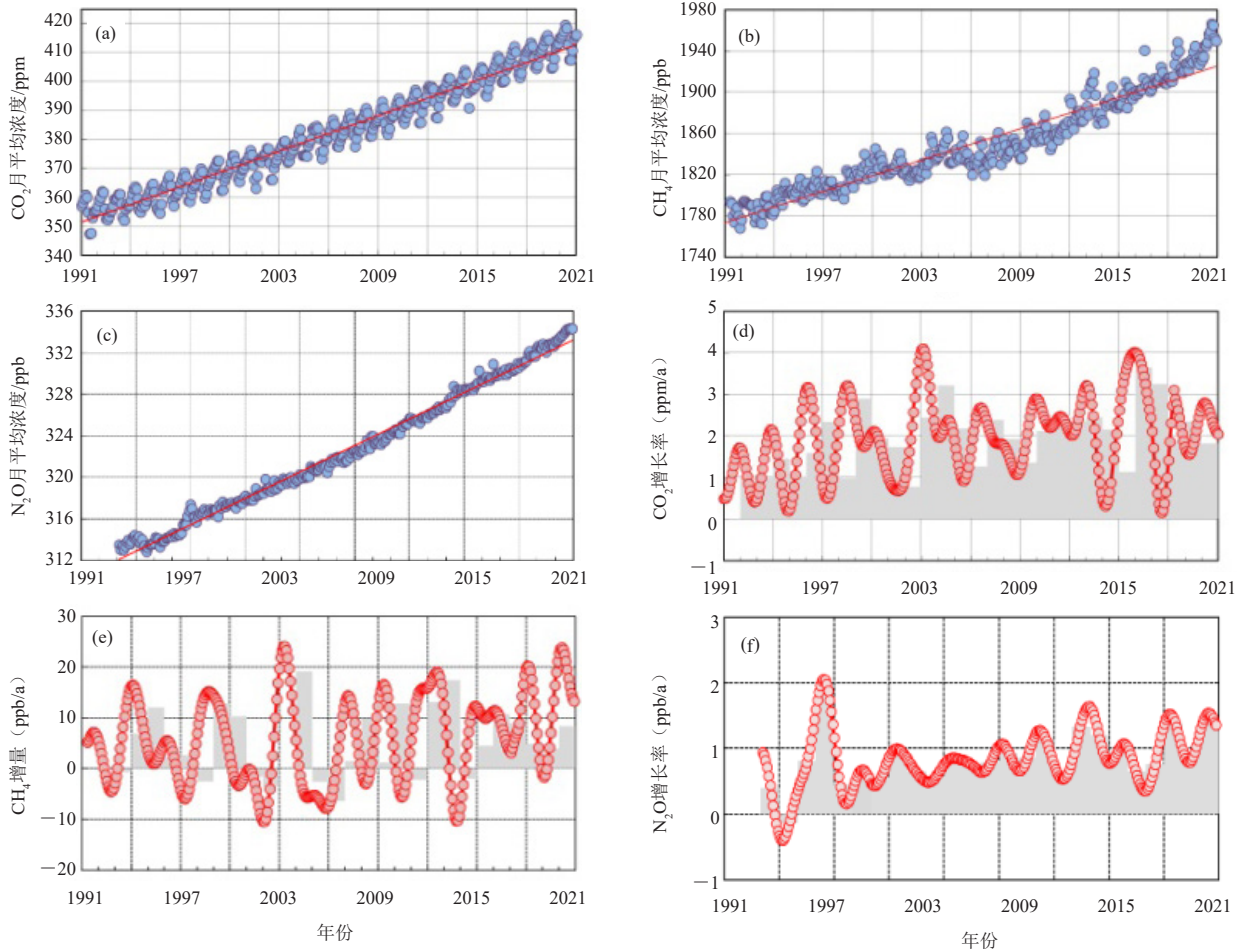


图4 1990—2020年青海瓦里关站大气CO₂、CH₄、N₂O浓度(a—c)及其增长率(d—f)

(a—c)中的蓝点表示月平均值,红线为其线性拟合曲线;(b—d)中的红点表示月增长率,灰色柱为增长率年平均

Fig. 4 Long term variations of CO₂、CH₄、N₂O concentrations (a—c) and annual growth rate (d—f) at Waliguan station on Qinghai Province during 1990—2020

表1 全球和青海瓦里关站主要温室气体浓度和增量

Table 1 Comparison of annual mean concentration and growth rate of main greenhouse gases at Mt. Waliguan with the value of the global and the Northern Hemisphere

	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	全球	瓦里关	全球	瓦里关	全球	瓦里关
2020年的年平均浓度	413.2±0.2 ppm	414.3±0.2 ppm	1889±2 ppb	1949±0.6 ppb	333.2±0.1 ppb	333.8±0.1 ppb
2020年相对于1750年的百分比	149%		262%		123%	
2020年相对于2019年的绝对增量	2.5 ppm	2.9 ppm	11 ppb	18 ppb	1.2 ppb	1.2 ppb
2020年相对于2019年的相对增量	0.61%	0.70%	0.59%	0.93%	0.36%	0.36%
过去10年的年平均绝对增量	2.40 ppm/y	2.42 ppm/y	8.0 ppb/y	8.8 ppb/y	0.99 ppb/y	1.02 ppb/y

18 ppb、1.2 ppb。过去十年(2011—2020年)瓦里关站大气CO₂、CH₄和N₂O的年平均绝对增量分别为2.42 ppm、8.8 ppb、1.02 ppb。

对6个区域大气本底站观测数据的分析结果显示,北京上甸子站、浙江临安站、黑龙江龙凤山站、云南香格里拉站、湖北金沙站和新疆阿克达拉站2020年的大气CO₂浓度的年平均值分别为421.3±0.3 ppm、

429.7±0.3 ppm、418.9±0.8 ppm、412.7±0.1 ppm、422.1±1.1 ppm和416.8±1.2 ppm; CH₄年平均浓度分别为2005±0.8 ppb、2061±1.6 ppb、2033±1.5 ppb、1936±1.0 ppb、2061±3.0 ppb和1990±4.3 ppb。均高于青海瓦里关大气本底站和全球平均。与2019年相比,6个站的CO₂增量分别为:1.1 ppm、3.5 ppm、2.7 ppm、1.7 ppm、5.2 ppm和3.9 ppm, CH₄增量分别为:23 ppb、

7 ppb、17 ppb、16 ppb、29 ppb、和20 ppb，都呈现增加趋势。

5 总结

总之，中国气象局大气本底观测起步较早，且已具有一定规模。有关观测数据在科学研究、决策服务和气候变化、环境评估基于我国履行国际公约等许多方面发挥了重要数据支撑作用，但我国大气本底站网规模仍无法与欧美等发达地区相比。因此气象部门还应从下面几个方面推动监测：1) 加快推进新增大气本底站建设，形成布局更为完善的大气本底观测网络和运行保障体系；结合我国应对气候变化、生态文明建设和环境污染治理需求，丰富和完善我国大气本底站观测内容，提升大气本底观测能力，拓展大气本底观测应用与服务领域；2) 加强温室气体监测网建设，提升温室气体综合立体监测和包括实验室CO₂、CH₄、N₂O同位素综合分析和站网在线观测能力；加强温室气体排放量反演技术和方法的研发和应用，深入认识和评估我国温室气体源汇问题，为实现碳达峰、碳中和目标发挥更大作用。

长期观测研究显示，位于青海的瓦里关站全球大气本底站长期大气二氧化碳(CO₂)浓度变化特征与同纬度地区的美国夏威夷冒纳罗亚Mauna Loa全球大气本底站基本一致，能很好地代表了北半球中纬度地区大气二氧化碳的平均状况。而对我国6个区域大气本底站，自观测以来，其CO₂、CH₄浓度水平平均高于瓦里关全球大气本底站，反映了人类活动对区域本底浓度水平的重要贡献。随着2013年9月国家开始实施《大气污染防治行动计划》加大对颗粒物污染治理后，华北上甸子和长三角临安这两个区域大气本底站点大气PM_{2.5}、PM₁₀质量浓度不断下降，而地面臭氧则呈现先下降又升高的复杂变化特点。反映了近年来京津冀和长三角地区大力实施空气环境治理对颗粒物减低取得了显著成效，但在对颗粒物污染治理取得成效的同

时，如何在区域范围内科学有效控制以臭氧为代表的化学污染，以及实现碳达峰和碳中和，相关的协同治理还面临很多挑战。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WMO. Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations Through 2019. Geneva: World Meteorological Organization, 2020.
- [3] Zhou L, Worthy D, Lang P M, et al. Ten years of atmospheric methane observations at a high elevation site in Western China. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(40): 7041-70548.
- [4] Zhou L. Long-term record of atmospheric CO₂ and stable isotopic ratios at Waliguan Observatory: Seasonally averaged 1991—2002 source/sink signals, and a comparison of 1998—2002 record to the 11 selected sites in the Northern Hemisphere. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20, GB2001, doi: 10.1029/2004GB002431.
- [5] Liu L X, Zhou L X, Zhang X C, et al. The characteristics of atmospheric CO₂ concentration variation of four national background stations in China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 52(11): 1857-1863.
- [6] Fang S X, Zhou L X, Masarie K A, et al. Study of atmospheric CH₄ mole fractions at three WMO/GAW stations in China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(10): 4874-4886.
- [7] Fang S X, Zhou L X, Tans P P, et al. In situ measurement of atmospheric CO₂ at the four WMO/GAW stations in China. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2014, 14(10): 27287-27326.
- [8] Thompson R L, Patra P K, Chevallier F, et al. Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s. *Nature Communications*, 2016, 7: 10724.
- [9] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586: 720-723.
- [10] Zhang Y, Jin J L, Yan P, et al. Long-term variations of major atmospheric compositions observed at the background stations in three key areas of China. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 11(4): 370-380.
- [11] 刘长焕, 邓雪娇, 朱彬, 等. 近10年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与O₃、PM_{2.5}的关系. *中国环境科学*, 2018, 38(8): 2820-2829.
- [12] Zhu S, Butler T, Sander R, et al. Impact of dust on tropospheric chemistry over polluted regions: a case study of the Beijing megacity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(8): 3855-3873.
- [13] 邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 等. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(1): 93-102.