

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.06.005

基于 AIRS 卫星的全球和东亚地区 CO₂ 时空特征分析

张绍会^{1,2}, 谢冰^{1,3}, 张华^{1,2}, 周喜讯²

(1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

3 中国气象局气候研究开放实验室, 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 利用 2002 年 12 月到 2016 年 11 月的大气红外探测仪 (Atmospheric infrared sounder, AIRS) 卫星观测资料, 分析了全球和东亚地区 (70~140°E, 10~55°N) CO₂ 浓度的时空变化和季节分布特征, 并与地面观测资料进行了对比。结果表明: 1) AIRS 反演的 CO₂ 资料与地表观测资料相关系数均在 0.9 以上, 且年均值相对误差均在 1% 以内。2) 全球 CO₂ 年平均浓度从 2003 年的 375.16 ml/m³ 增加到 2016 年的 401.24 ml/m³, 年平均增长率约 2.01 ml/m³; 同期, 东亚地区 CO₂ 平均浓度从 2003 年的 375.13 ml/m³ 增加到 2016 年的 402.22 ml/m³, 年增长率约为 2.08 ml/m³, 高于全球的年平均增长率。在 2010~2016 年, 北半球大部分地区 CO₂ 浓度增长率低于 2003~2009 年的增长率。CO₂ 增幅较明显的区域位于北半球高纬度地区如中西伯利亚和格陵兰岛等地上空。3) CO₂ 分布存在明显的区域性, 高值区主要位于北半球的中高纬度地区; 低值区主要位于青藏高原上空。在南半球, CO₂ 浓度的高值区主要位于南美洲中纬度地区; 低值区主要出现在低纬度 (0~20°S, 50°W~5°E) 的大西洋上空。在对流层中低层 (4~6 km), AIRS 反演的 CO₂ 浓度的季节变化特征准确性较高, 特别在冬季, 北半球大部分地区的 CO₂ 浓度随着时间变化呈现先减小后增加的趋势。4) 在东亚地区, CO₂ 高值区位于中国北方地区, 呈带状分布。

关键词: CO₂ 浓度; AIRS; 东亚地区; 时空分布

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)06-0442-013

Spatial-Temporal Distribution Characteristics of CO₂ over Globe and East Asia by AIRS Satellite

ZHANG Shaohui^{1,2}, XIE Bing^{1,3}, ZHANG Hua^{1,2}, Zhou Xixun²

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金 91644211, 41575002), National Key Research and Development Program of China (国家重点研发计划, 2017YFA0603502)

作者简介: 张绍会 (1991 -), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事温室气体卫星观测研究。

E-mail: 13261317699@163.com.

导师简介: 张华 (1965 -), 女, 吉林磐石人, 博士, 研究员, 主要从事大气辐射传输模式、温室气体和气溶胶辐射强迫与气候效应的研究。 **E-mail:** huazhang@cma.gov.cn.

收稿日期: 2018-11-22; **修改日期:** 2019-01-21

- (1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
3 Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on atmospheric infrared sounder (AIRS) satellite data from December 2002 to November 2016, the spatial-temporal characteristics of CO₂ concentration in different seasons over globe and East Asia (70~140°E, 10~55°N) were analyzed and compared with the surface observation data. The results show that: 1) the correlation coefficient between the CO₂ data of AIRS and the surface observation data is above 0.9, and the relative error of annual mean value is within 1%. 2) The global annual mean CO₂ concentration increased from 357.16 ml/m³ in 2003 to 401.24 ml/m³ in 2016, with an average annual growth rate of about 2.01 ml/m³. While it increased from 357.13 ml/m³ to 402.22 ml/m³ during the same period over East Asia, with an average annual growth rate of about 2.08 ml/m³ which is a bit higher than that of globe. Over most of the Northern Hemisphere, the CO₂ concentration growth rate during 2010~2016 is lower than that of during 2003~2009. In particular, mean CO₂ concentration increased markedly over central Siberia and Greenland. 3) The distributions of CO₂ concentrations had obviously regional features. The regions with high CO₂ concentration were over middle and high latitudes in the Northern Hemisphere, whereas the regions with low CO₂ concentration were mainly located over Tibet Plateau. In the Southern Hemisphere, the regions with high concentration was located in the middle latitudes, while the region with low concentration was located in the low latitudes of Atlantic (0~20°S, 50°W~5°E). In the middle and lower troposphere (4~6 km), the seasonal variation characteristics of CO₂ concentration retrieved by AIRS was highly reliable. Especially in winter, over most of the Northern Hemisphere, CO₂ concentration decreased first and then increased with time. 4) In East Asia, the high CO₂ concentration was located in the Northern China with zonal distribution.

Key words: CO₂ concentration; AIRS; East Asia; spatial-temporal distribution

1 引 言

自工业革命以来, 人类活动造成温室气体排放显著增加, 导致温室效应增强, 地表平均温度上升^[1-4]。2003~2008年 CO₂ 的辐射强迫相较于 1979~1984年增加了约 20%^[5]。CO₂ 作为最重要的温室气体, 其浓度的增加对整层大气, 尤其是近地面具有显著的加热作用^[6-7]。IPCC 第五次评估报告 (IPCC AR5) 指出二氧化碳 (CO₂) 和甲烷 (CH₄) 是全球变暖的主要贡献者 (约占 88%~90%)^[8]。然而由于农业、能源等领域的发展, 以及城市化进程的推进, 大气中碳含量持续增加^[9-10]; 同时森林草地等遭到破坏, 使得自然界固碳能力下降^[11]。到 2016 年, 全球大气中 CO₂ 的平均浓度已经达到 403.3 ml/m³, 打破了 2015 年 400 ml/m³ 的历史记录, 达到工业化前 (1750 年) 水平的 145%^[12]。

目前对大气中 CO₂ 浓度的监测手段主要有地基、空基和卫星遥感探测等 3 种^[13]。地基观测拥有观测时间序列长, 数据可靠性较高等优势, 但是受环境的限制, 拥有一定的空间局限性; 空基探测的优势在于能够实时探测高空尤其是对流层中上层乃至平流层, 但是其使用成本高昂, 造成探测时间序列短; 而卫星遥感探测不仅兼具前两者的优势, 同时监测范围广, 平均成本较为低廉, 并且基于该方面的研究成果得到广泛认同^[14-15]。目前, 国内外学者研究使用卫星反演的 CO₂ 资料主要来自 AIRS、GOSAT、SCIAMACHY

和 OCO-2, 以及中国的碳卫星 TANSAT, 且取得了一定的成果。其中, Barkley 等^[16]发现 SCIAMACHY 能够敏感地监测到对流层底层由于生物圈活动引起的 CO₂ 浓度变化。Pagano 等^[17]和白文广等^[18]认为 AIRS 反演 CO₂ 资料与空基探测一致性较好。Butz 等^[19]通过 GOSAT 反演了不同季节的 CO₂ 地表通量。Hammerling 等^[20]发现 OCO-2 能精确的估算 CO₂ 的分布。Yang 等^[21]通过处理碳卫星 TANSAT 反演的 CO₂ 资料能正确反映出中国东部、美国东部和欧洲地区的 CO₂ 浓度较高的现象。何茜等^[22]对比了 SCIAMACHY、GOSAT 和 AIRS 三种卫星资料, 发现 AIRS 数据产品相比前两者优势突出, 与本地站观测数据平均误差小于 2 ml/m³。前人对于 CO₂ 在东亚地区与全球的更长更新时间序列的变化趋势和分布特征及其比较等方面的研究较少, 因此本文利用 AIRS 反演的最新 CO₂ 产品, 进行全球范围内长时间序列的分析。此外, 由于在 2009 年初, 《京都议定书》的签约国达到了创纪录的 183 个国家, 因此本文初步尝试以 2010 年为界限, 对近年来北半球大部分地区采取的控制 CO₂ 浓度增长的措施是否取的成效进行初步验证。

2 数据和方法介绍

研究使用来自于搭载在 Aqua 卫星上的大气红外探测器 (AIRS) 的 CO₂ 卫星观测资料。该探测器观测的红外光谱区域覆盖了 4.2 μm 和 15 μm 的 CO₂ 探测带。利用 AIRS 观测的 2002 年 12 月至 2016 年 11 月的数据集 (经过科学数据处理后的自由大气 CO₂ 月平均观测数据。URL: https://airs.jpl.nasa.gov/data/get_data), 水平分辨率为 2°×2.5°。该数据集中, CO₂ 在对流层中垂直方向上是混合均匀的 (仅一层)。

此外, 选取了全球大气观测计划 (the Global atmosphere watch program of world meteorological organization, WMO GAW) 提供的大气本底站的 CO₂ 月平均数据和美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室 (National oceanic and atmospheric administration Earth system research laboratory, NOAA-ESRL) 提供的 CO₂ 月平均数据, 并分别与 AIRS 反演的全球 CO₂ 数据进行对比分析。同时, 选择同处于北半球中低纬度地区的夏威夷 Mauna Loa Observatory 天文台和瓦里关等地的 CO₂ 月平均数据, 与 AIRS 反演的东亚地区的 CO₂ 数据进行对比分析。为了研究长时间序列的数据变化趋势, 通过采用最小二乘法来计算不同地区增长率变化趋势, 以此判断全球和东亚的 CO₂ 浓度变化趋势。公式为

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} . \quad (1)$$

对于 CO₂ 的柱浓度来说, X_i 是每个月卫星遥感的 CO₂ 浓度, Y_i 是地表观测的 CO₂ 浓度, 其中 $i = 1, 2, \dots, 168$ (从 2002 年 12 月 ~ 2016 年 11 月共 16 年, 一共 168 个月)。

由于人类活动主要集中在北半球, 所以采用北半球季节变化为标准, 即春季期为 3~5 月; 夏季期为 6~8 月; 秋季期为 9~11 月; 冬季为前一年 12 月到当年的 2 月。赤道和南半球以月份代表季节变化。

3 分析和讨论

3.1 AIRS 卫星资料与地表观测资料对比验证

分别利用 GAW 和 NOAA 的 CO₂ 月平均值观测数据与 AIRS(全球) 反演的产品进行对比, 结果均表现了非常好的一致性。它们之间的相关系数均在 0.9 以上, 并且通过了 0.05 的显著性检验。AIRS 反演的 CO₂ 月平均值产品, 无论是全球还是东亚地区, 与地面观测资料一样, 从 2003 年 ~ 2016 年均呈现了明显的

增长趋势, 且呈现了相似的季节波动见图 1。但是 AIRS 反演的 CO₂ 产品与地面资料对比, 略有滞后, 尤其在冬季较为明显见图 1(a) 和图 1(b)。主要是由于地表 CO₂ 输送到大气对流层需要一定时间。同时, 无论是全球还是东亚地区, AIRS 反演的年均均值与地面观测资料对比, 其年均值相对误差均在 1% 以内, 见表 1 和表 2。综上所述, AIRS 反演的 CO₂ 资料与地表观测资料匹配效果较好。Pagano 等^[23] 通过观

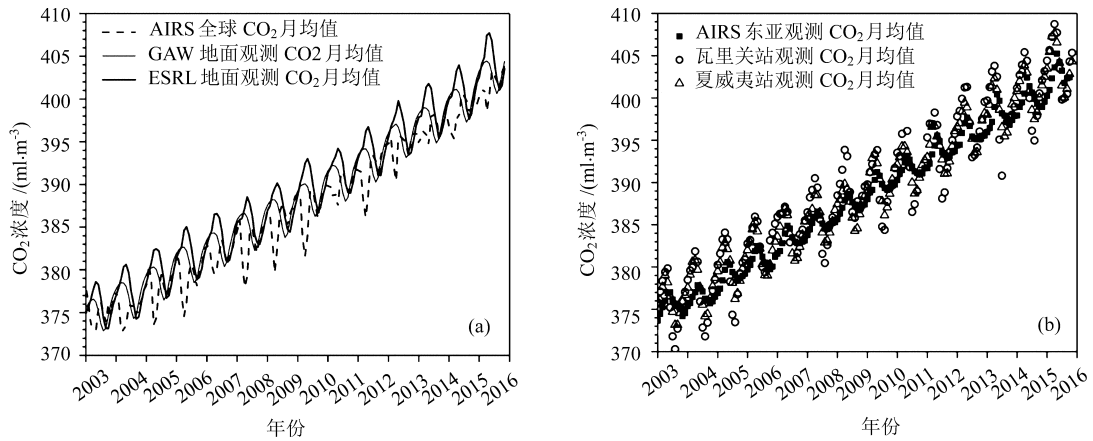


图 1 2003~2016 年 AIRS 反演 CO₂ 浓度。(a) 全球; (b) 东亚地区与地面资料对比

Fig.1 Comparisons between AIRS and surface observations from 2003 to 2016 over globe (a) and East Asia (b)

表 1 卫星(全球)CO₂ 数据与 GAW 和 NOAA 数据年平均值相对误差对比 (2003~2016)

Table 1 Comparison of relative errors of the annual mean satellite (Globe) data, GAW and NOAA data

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
GAW	0.02%	0.45%	0.39%	0.47%	0.60%	0.60%	0.44%
NOAA	0.11%	0.35%	0.26%	0.5%	0.21%	0.44%	0.26%
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
GAW	0.64%	0.33%	0.55%	0.43%	0.35%	0.53%	0.53%
NOAA	0.46%	0.18%	0.36%	0.18%	0.18%	0.28%	0.45%

表 2 卫星(东亚)CO₂ 数据与瓦里关和夏威夷数据年平均值相对误差对比 (2003 2016)

Table 2 Comparison of relative errors of the annual mean satellite (East Asia) data, Mt Wailiguan and Mauna Loa data

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
瓦里关站点	0.16%	0.45%	0.47%	0.29%	0.29%	0.26%	0.03%
夏威夷站点	0.08%	0.32%	0.60%	0.21%	0.27%	0.18%	0.10%
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
瓦里关站点	0.13%	0.10%	0.30%	0.43%	0.25%	0.20%	0.57%
夏威夷站点	0.12%	0.06%	0.13%	0.28%	0.24%	0.27%	0.50%

测对比也验证了 AIRS 能够较准确地反映对流层大气 CO_2 的时空分布特征和年际变化规律, 同样也发现 AIRS 反演的 CO_2 资料略有滞后。

3.2 CO_2 浓度时空变化分布

从 2003 年到 2016 年, 全球 CO_2 浓度一直在逐年增加, 其年平均浓度从约 375.16 ml/m^3 增加到约 401.24 ml/m^3 , 年平均增长 2.01 ml/m^3 (见图 2), 与 20 世纪 90 年代 (约 1.5 ml/m^3) 相比增加显著 [24]。2016 年全球 CO_2 浓度相较于 1991 年, 增加了约 44.8 ml/m^3 , 创 1958 年以来最高值 [25]。在此期间, 东亚地区 ($70^\circ \sim 140^\circ \text{E}$, $10^\circ \sim 55^\circ \text{N}$) CO_2 年平均浓度从 375.13 ml/m^3 增加到 402.22 ml/m^3 , 年平均增长 2.08 ml/m^3 , 高于全球平均水平。这与近些年中国经济高速发展, 对化石燃料的消耗较高有关。仅 2016 年, 中国地区占全球能源消费量的 23%, 占全球能源消费增长的 27% [26]。而且, 在 2010~2016 年, 北半球大部分地区的 CO_2 浓度的增长率见图 3(b), 低于 2003~2009 年的增长率见图 3(a)。可见, 近些年北半球大部分国家和地区采取的控制 CO_2 增长的措施取得一定成效。

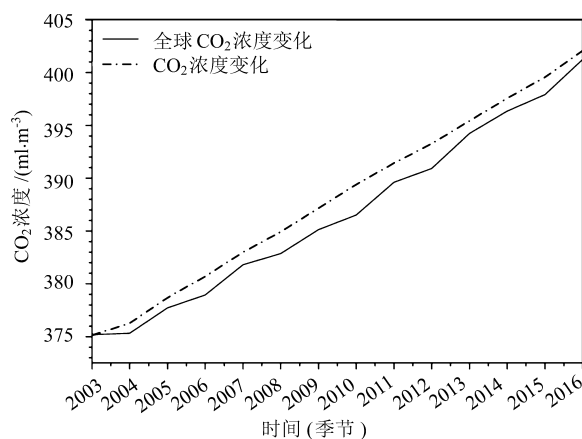


图 2 2003~2016 年全球 (实线) 和东亚地区 (虚线) CO_2 浓度变化趋势

Fig.2 Temporal trend of CO_2 concentration over globe (solid line) and East Asia (dashed line) from 2003 to 2016

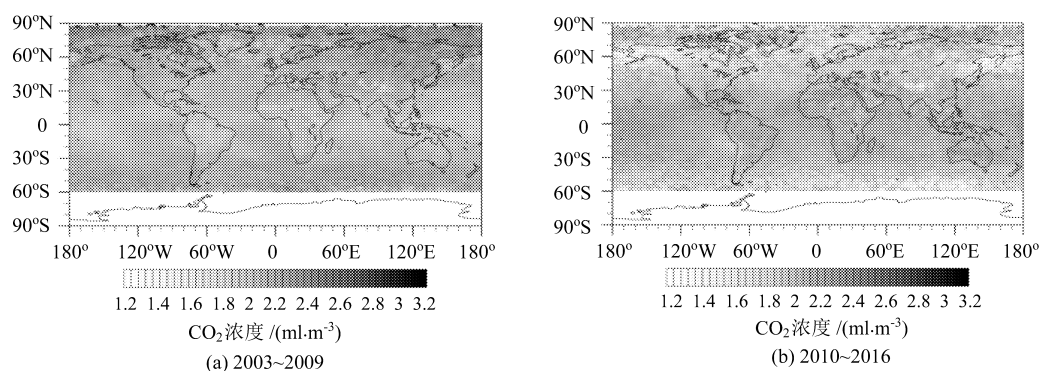


图 3 (a)2003~2009 年和 (b)2010~2016 年全球 CO_2 浓度增长率

Fig.3 Growth rate of CO_2 concentration during 2003 to 2009 (a) and during 2010 to 2016 (b)

CO_2 浓度在全球出现了不同程度的增长见图 4。其中增幅较为明显的区域主要位于北半球的高纬度地区, 如西伯利亚和格陵兰岛等地上空。这是由于人类的工业活动主要集中在北半球中纬度地区, 而近些年, 随着全球经济的快速发展, 大量燃料消耗产生的 CO_2 经过全球的大气环流系统输送到高纬度地区造成的 [27-28]。同时上述地区属于典型寒带气候, 地表常年积雪, 植被覆盖率低, 导致该地区通过植物的光合

作用固碳能力较弱, 因此 CO₂ 的累积较高^[29]。而 Forkel 等^[30] 也发现北半球高纬度地区 CO₂ 浓度的增幅要高于较低纬度, 并且认为高纬度地区 CO₂ 浓度增加受到气候变化引起北极地区基础生产总量 (Gross primary production, GPP) 增加的影响。

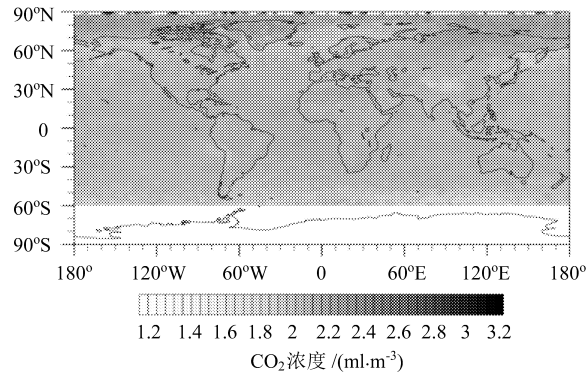


图 4 2003~2016 年全球 CO₂ 增长率

Fig.4 Global CO₂ growth rate from 2003 to 2016

3.3 全球 CO₂ 分布

在北半球, CO₂ 浓度较高 (388.0~390.0 ml/m³) 的区域主要位于美国东部、欧洲大部和亚洲中部等中纬度地区, 见图 5。CO₂ 浓度 (384.0~386.0 ml/m³) 较低的区域出现青藏高原上空。造成 CO₂ 的上述时空分布的原因有两个: 1) 亚洲中部地区植被稀疏, 造成植被固碳能力弱。2) 发达经济体主要位于北半球中纬度地区。在 2016 年, 北半球中纬度地区消耗化石燃料占全球的 74.9%^[26]; 其中, 美国和欧洲地区虽然植被覆盖率较高, 但是, 美国东部和欧洲地区消耗的化石燃料分别占全球 21% 和 20.3%。在南半球, CO₂ 浓度的高值区主要位于中纬度地区; 低值区域主要位于低纬度地区的大西洋 (0~20°S, 50°W~5°E) 上空。

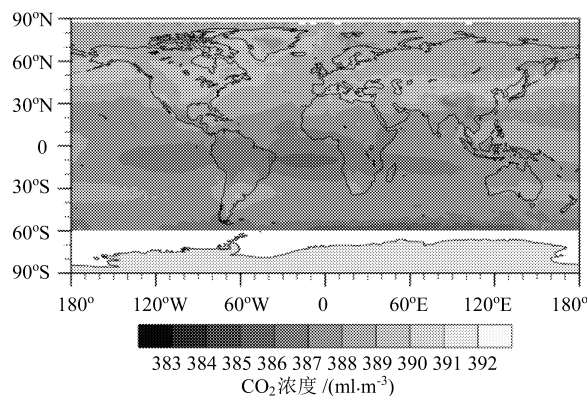


图 5 2003~2016 年全球 CO₂ 年平均浓度分布

Fig.5 Distribution of the global annual mean CO₂ concentration from 2003 to 2016

CO₂ 的全球分布存在比较明显的季节变化。变化最显著的区域位于北半球中高纬度地区, 见图 6。在北半球, 大部分地区, 冬季 CO₂ 浓度要低于夏季。这与地面观测有比较大的出入, 见图 7, 即同年份 (2009 年 12 月~2015 年 9 月) 同一地表观测站, 冬季的 CO₂ 浓度要高于夏季 (上甸子和 Ryori 分别是中国和日本两个较大地面区域观测站)。由于地表 CO₂ 受气象条件的影响, 其输送到大气对流层中需要一定的时间, 造成 AIRS 反演的数据略有滞后, 尤其在冬季较为明显见图 1(a) 和图 1(b); 同时, AIRS 的 CO₂ 卫星资料

是通过近红外光谱反演得到的, 然而 AIRS 卫星在近红外波段对 CO_2 的反演受到了地表处大气气溶胶的强烈干扰 (尤其是冬季), 使得地表处反演的 CO_2 卫星资料精确度较低。根据周曼蒂^[31]和白文广等^[18]的研究, AIRS 反演的全球 CO_2 资料在对流层中下层 (4~6 km) 的可信度较高, 即北半球大部分地区 CO_2 浓度在春季最高, 秋季最低。此外, 在冬季, 北半球大部分地区, CO_2 浓度随时间变化呈现先减小后增加

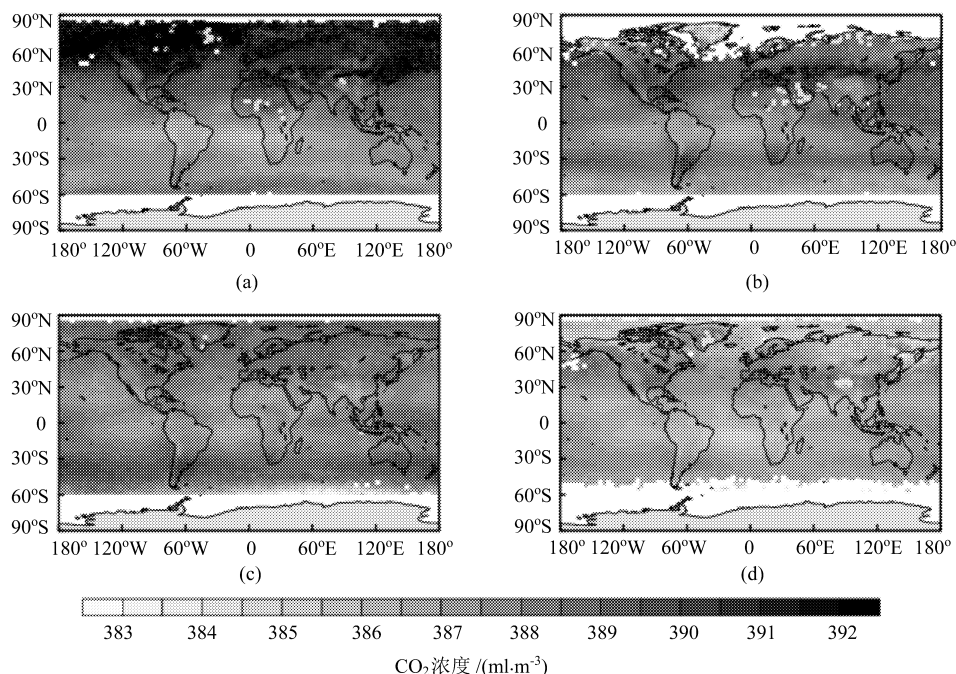


图 6 2003~2016 年全球 CO_2 平均浓度季节分布图。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig.6 Distribution of the global average CO_2 concentration. (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

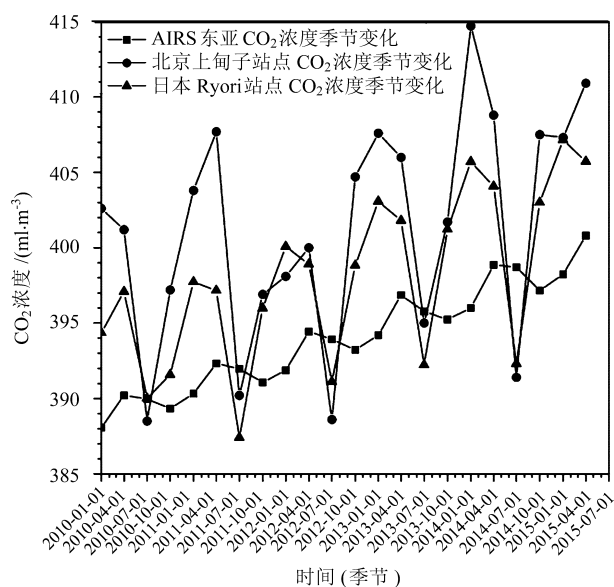


图 7 2010~2015 年卫星 (东亚) 资料和地面观测站点 CO_2 浓度季节变化

Fig.7 Seasonal change of CO_2 concentration of satellite data (East Asia) and surface observation data from 2010 to 2015

的趋势, 见图 8(a) 和图 8(b)。到了冬季, 虽然北半球大部分地区植被固碳能力逐渐减弱, 但是北半球中高

纬度地区拥有广袤的冻土带, 在冬季, 冻土带扮演着碳汇角色, 通过生物活动和物理冻藏等方式, 吸收了大气中部分 CO₂^[32-34]; 且 CO₂ 在高纬度地区及极地水温低的海洋溶解度高于低纬度及赤道地区水温高的海洋, 因此寒冷海洋也会吸收一定量的 CO₂^[11,35]; Sabine 等^[36] 估计海洋吸收人为 CO₂ 占全球的 48%。随着时间的变化, 海洋和冻土带等对于大气中 CO₂ 吸收逐渐达到饱和; 同时, 在冬季, 人为活动不断消耗化石燃料和生物质燃料如用于取暖等, 一直在增加大气中 CO₂ 浓度。在南半球, CO₂ 浓度高值区位于 30°S 附近的带状地区, 其浓度约为 388.0~390.0 ml/m³; CO₂ 浓度在 9~11 月达到最大, 在南半球的夏季(即上一年 12 月至当年 2 月) 最小。

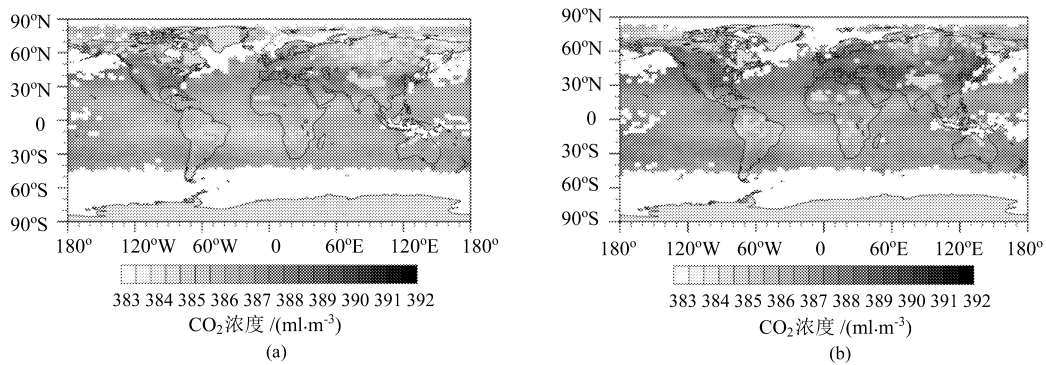


图 8 2003~2016 年全球 CO₂ 浓度在冬季 12 月份 (a) 和 1 月份 (b) 分布图

Fig.8 Global distribution of CO₂ concentration in December (a) and January (b) from 2003 to 2016

3.4 东亚地区 CO₂ 分布

在东亚地区上空, CO₂ 的浓度随着纬度的增加而增加, 见图 9。高值区主要位于中国北方地区, 其平均浓度为 388.0~391.0 ml/m³。中国北方地区的化石能源消耗比较大, 在 2016 年, 北方地区消耗的化石燃料占全国的 31.2%^[37]。造成该地区人为活动排放的 CO₂ 高于其他地区^[38]。而在内蒙古, 甘肃和新疆等

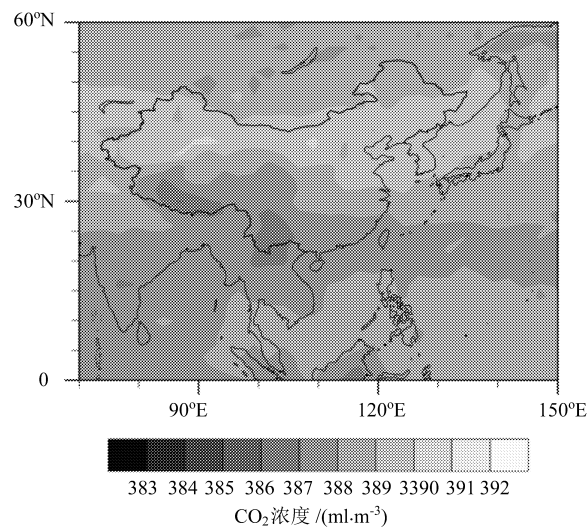


图 9 2003~2016 年东亚 CO₂ 年平均浓度分布图

Fig.9 Distribution of annual mean CO₂ concentration in East Asia from 2003 to 2016

地, 仅 2016 年, 该区域年消耗的化石燃料占全国的 11.4%。并且其森林覆盖率比较低, 植物通过光合作用固碳能力非常弱, 从而导致 CO_2 浓度较高。

东亚地区 CO_2 浓度季节变化与北半球总体变化趋势一致, 见图 10。并且 AIRS 反映东亚地区 CO_2 季节变化相比于地面观测资料也有一定的滞后。在冬季, CO_2 浓度的高值区主要位于山东、河南和江苏等地上空; 同时在新疆西部(塔什库尔干地区)上空 CO_2 浓度也比较高。山东和江苏等地属于中国人口稠密地区, 冬季取暖等消耗大量燃料增加了 CO_2 的排放^[39], 并且由于该地区经济的发展, 除去基础和房屋建设消耗大量的水泥制品产生的 CO_2 影响外, 大量的植被和农耕用地转化为建筑和工业用地, 土壤结构的改变使这些区域的土壤固碳能力大大下降^[40]。而位于新疆西部上空的 CO_2 高值是由于全球变暖导致冻土带和冰川融化^[41-44], 使得贮藏在里面的 CO_2 被释放到大气中所造成的^[44]; 同时由于近些年该地区冬季的温度较高, 不仅导致土壤本身 CO_2 的贮藏能力变弱, 还使得冻土带中的微生物更加活跃, 可能通过生物作用释放更多的 CO_2 ^[45]。

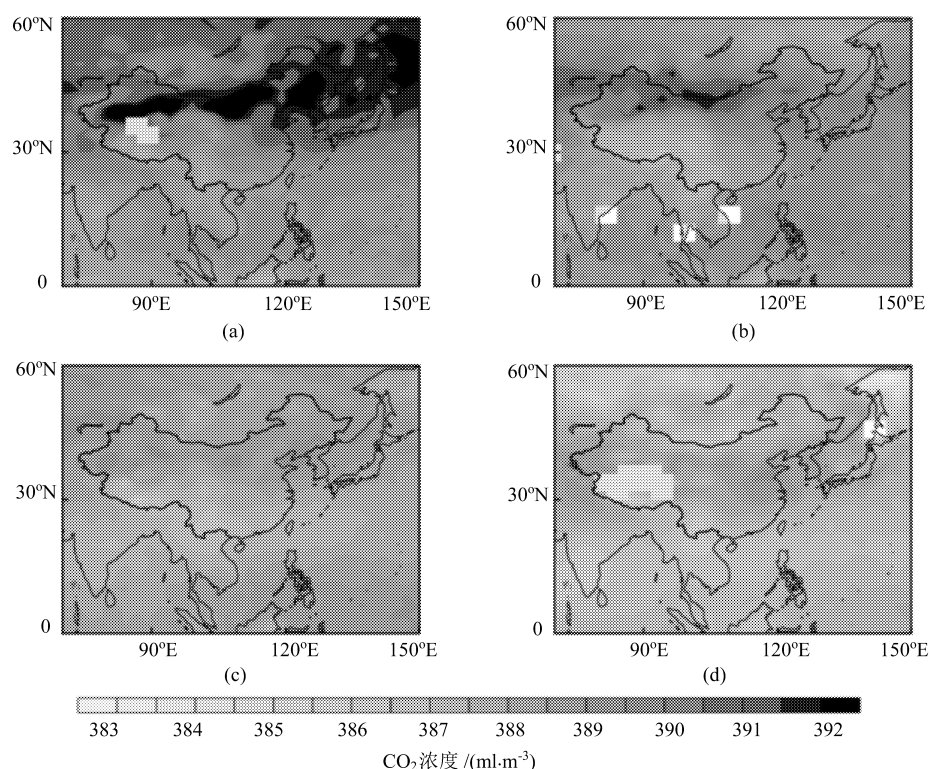


图 10 2003~2016 年东亚 CO_2 季节平均浓度分布图。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig.10 Distribution of the CO_2 concentration of East Asia at (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

4 结 论

利用 AIRS 观测得到的 CO_2 资料与地表观测资料进行对比分析, 得到了全球和东亚地区 CO_2 浓度的时空分布和季节变化特征, 主要结论如下。

AIRS 反演的 CO_2 资料与地面观测资料吻合度较高, 相关系数均在 0.9 以上, 其年平均值相对误差均在 1% 以内, 呈现出一致的增长趋势和一致的季节波动, 但 AIRS 反演的 CO_2 资料在季节变化中出现一定的滞后。

从 2003 年到 2016 年, 全球 CO_2 平均浓度从 375.16 ml/m^3 增加到 401.24 ml/m^3 , 年平均增长为 2.01

ml/m³, 同时, 东亚地区 CO₂ 平均浓度从 375.13 ml/m³ 增加到 402.22 ml/m³, 年平均增长为 2.08 ml/m³, 略高于全球水平。在 2010~2016 年, 北半球大部分地区 CO₂ 浓度增长率低于 2003~2009 年增长率。可见, 近年来北半球大部分国家和地区采取的控制 CO₂ 增长的措施取得了一定的成效。

在北半球, CO₂ 平均浓度高于南半球, 并存在较为明显的季节变化。CO₂ 浓度增幅较明显的区域位于北半球高纬度地区, 如中西伯利亚和格陵兰岛等地上空。CO₂ 分布存在明显的区域性, 高值区主要位于北半球的中高纬度地区; 低值区主要位于青藏高原上空。在南半球, CO₂ 浓度的高值区主要位于南美洲中纬度地区; 低值区主要出现在低纬度 (0°~20°S, 50°W~5°E) 的大西洋上空。AIRS 反演的 CO₂ 卫星资料, 在对流层中低层 (700~500 hPa, 4~6 km) 反映的全球季节变化可信度较高; 并且在冬季, 北半球大部分地区 CO₂ 浓度随时间变化呈现先减小后增大的趋势。南半球, CO₂ 浓度在 9 月、10 月和 11 月份最大, 在 12 月份至次年的 1 月和 2 月份最小。因此分析全球 CO₂ 浓度的时空分布和季节变化, 需要卫星遥感资料和地面观测资料的结合, 其结果可靠性更佳。

在冬季, 新疆西部 (塔什库尔干地区)、山东和江苏等地, 能很好地反映出不同的下垫面和环境因素对 CO₂ 浓度造成的影响。部分区域虽然有很高的植被密度, 但是 CO₂ 浓度还是比较高, 这主要是由于大量使用化石和生物质燃料的人为活动造成的。因此, 要减少全球 CO₂ 浓度, 不仅要增加绿色植被的覆盖率, 还要通过新能源技术的研发和普及应用, 逐渐减少对化石燃料的依赖。

(备注: 本文所用的 AIRS 观测资料由于受 2012 年及其后面五年左右时间观测设备老化, 卫星算法升级等因素的影响, 可能会对本文的相关结论产生影响。)

参考文献:

- [1] Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, 2003, **421**(6918), 57-60.
- [2] Zhang H, Zhang R Y, Shi Guangyu. The updated radiative forcing due to CO₂ and its effect on global surface temperature change [J]. *Advances in Atmospheric Sciences.*, 2013, **30**(4), 1017-1024.
- [3] Zhang Hua, Xie Bing, Chen Qi, et al. PM_{2.5} and tropospheric ozone in China and pollutant emission controlling integrated analyses [J]. *Progressus Inquisitiones D Mutatione Climatis*. 2014, **10**(4), 289-296(in Chinese).
张 华, 陈 琪, 谢冰等. 中国的 PM_{2.5} 和对流层臭氧及污染物排放控制对策的综合分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, **10**(4), 289-296.
- [4] Zhang H, Xie B, Chen Q, et al. PM_{2.5} and tropospheric ozone in China and pollutant emission controlling integrated analyses [J]. *Advance in Climate Change Research*. 2014, **5**(3): 136-141.
- [5] Sjögersten S, Black CR, Evers S, et al. Tropical wetlands: a missing link in the global carbon cycle? [J], *Global biogeochemical cycles*, 2015, **28**(12), 1371-1386.
- [6] Callendar G S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1938, **64**(275), 223-240.
- [7] Bacastow R B. The effect of temperature change of the warm surface waters of the oceans on atmospheric CO₂ [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(2), 319-333.
- [8] IPCC. *Climate change 2013: the physical science basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [9] Cooper M D A, Estoparagonés C, Fisher J P, et al. Limited contribution of permafrost carbon to methane release from thawing peatlands [J]. *Nature Climate Change*, 2017, **7**(7).

- [10] Ye Hong, Li Huijuan. Progress in research on urban soil carbon cycle [J]. *Ecology and Environment*, 2009, **18**(3), 1134-1138(in Chinese).
叶 红, 黎慧娟. 城市土壤碳循环特征研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 1134-1138.
- [11] Le Quéré C, Raupach M R, Canadell J G, *et al.* Trends in the sources and sinks of carbon dioxide [J]. *Nature geoscience*, 2009. **2**(12): 831.
- [12] World Metrological Association. *The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016* [M]. Geneva : WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2017.
- [13] Meng Qianwen, Yin Qiu. Remote sensing analysis of multi-years spatial and temporal variation of CO₂ in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, **31**(2): 203-213(in Chinese).
孟倩文, 尹 球. 中国区域 CO₂ 多年时空变化的卫星遥感分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, **31**(2): 203-213.
- [14] Shi Guangyu, Dai Tie, Xu Na. Latest progress of the study of atmospheric CO₂ concentration retrievals from satellite [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, **25**(1):7-13(in Chinese).
石广玉, 戴 铁, 徐 娜. 卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度研究最新进展 [J]. *地球科学进展*, 2010, **25**(1): 7-13.
- [15] Menzel W P, Schmit T J, Zhang P, *et al.* Satellite based atmospheric infrared sounder development and applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2018, **99**(3): 583-603.
- [16] Barkley M P, Monks P S, Hewitt A J, *et al.* Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FSI) WFM-DOAS [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2007, **7**(1):3597-3619.
- [17] Pagano T S, Chahine M T, Olsen E T. Seven years of observations of mid-tropospheric CO₂ from the Atmospheric Infrared Sounder [J]. *Acta Astronautica*, 2011, **69**(7): 355-359.
- [18] Bai Wenguang, Zhang Xingying, Zhang Peng. Temporal and spatial distribution of tropospheric CO₂ over China based on satellite observations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010. **55**(30): 2953-2960(in Chinese).
白文广, 张兴赢, 张 鹏. 卫星遥感监测中国地区对流层二氧化碳时空变化特征分析 [J]. *科学通报*, 2010. **55**(30): 2953-2960.
- [19] Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, *et al.* Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011. **38**(14): 130-137.
- [20] Hammerling D M, Michalak A M, Kawa S R. Mapping of CO₂ at high spatiotemporal resolution using satellite observations: Global distributions from OCO-2 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012. **117**(D6).
- [21] Yang D, Liu Y, Cai Z, *et al.* First global carbon dioxide maps produced from Tan Sat measurements [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, **35**(6):621-623.
- [22] He Qian, Yu Tao, Cheng Tianhai, *et al.* Atmospheric carbon dioxide satellite remote sensing retrieval accuracy inspection and spatio-temporal characteristics analysis [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, **14**(2): 250-257(in Chinese).
何 茜, 余 涛, 程天海等. 大气二氧化碳遥感反演精度检验及时空特征分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2012, **14**(2): 250-257.
- [23] Pagano T S, Olsen E T. Global variability of midtropospheric carbon dioxide as measured by the Atmospheric Infrared Sounder [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, **8**(1):4480-4494.
- [24] Tarasova O, Koide H, Dlugokencky E, *et al.* The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2011 [J]. *Egu General Assembly*, 2012, **8**, 110-112.

- [25] World Metrological Association. *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations Through 2004* [M]. Geneva: WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2006.
- [26] British Petroleum Company. *BP Statistical Review of World Energy June 2017* [M]. London: BP World Energy Review, 2017.
- [27] Jenny B, Liem J, Šavrič B, et al. Interactive video maps: A year in the life of Earth's CO₂ [J]. *Journal of Maps*, 2016, **12**(1): 1-7.
- [28] Pawson S, Gelaro R, Ott L, et al. A Study of the Carbon Cycle Using NASA Observations and the GEOS Model [EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20180000764&q&qs=N%3D4294966724>. 2018.
- [29] Chen C T A, Jones E P, Lin K. Wintertime total carbon dioxide measurements in the Norwegian and greenland seas [J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1990, **37**(9): 1455-1473.
- [30] Forkel M, Carvalhais N, Rödenbeck C, et al. Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems[C]// *EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2016.
- [31] Zhou Mandi. CO₂ in Mid-troposphere Satellite Remote Sensing Retrieval Accuracy Inspection and the Errors' Analysis [D]. Shanghai: Doctorial Dissertation of East China Normal University. 2013(in Chinese).
周曼蒂. 对流层 CO₂ 浓度卫星遥感反演及误差分析 [D]. 上海: 华东师范大学博士论文. 2013.
- [32] Christensen T R, Friberg T, Sommerkorn M, et al. Trace gas exchange in a high-arctic valley: 1. Variations in CO₂ and CH₄ flux between tundra vegetation types [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**(3): 701-713.
- [33] Welker J M, Fahnestock J T, Jones M H. Annual CO₂ flux in dry and moist arctic tundra: field responses to increases in summer temperatures and winter snow depth [J]. *Climatic Change*, 2000, **44**(1-2): 139-150.
- [34] Ostendorf B. Modeling the influence of hydrological processes on spatial and temporal patterns of CO₂ soil efflux from an arctic tundra catchment [J]. *Arctic & Alpine Research*, 1996, **28**(3):318-327.
- [35] Li Mingwei. *The Study of the Different Atmospheric Carbon Dioxide Concentration and Carbon Sink Between the Northern and Southern Hemispheres* [D]. Beijing: Master's Thesis of Tsinghua University, 2013(in Chinese).
李明威. 大气二氧化碳浓度及碳源汇的南北半球差异研究 [D]. 北京: 清华大学硕士论文, 2013.
- [36] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂ [J]. *Science*, 2004, **305**(5682): 367.
- [37] Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics of China. *China Energy Statistical Yearbook 2017*[M]. Beijing: China Statistics Press. 2017(in Chinese).
国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社. 2017.
- [38] Zhang Li, Lv Bihong, Li Wei. The present situation and characteristic of CO₂ emissions in different region of China over the past decade [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2012, **39**(5), 552-556(in Chinese).
张莉, 吕碧洪, 李伟. 近 10 年中国不同区域 CO₂ 排放现状和特征 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2012, **39**(5), 552-556.
- [39] Zhang Hongwu, Shi Linyun. The comparative analysis of CO₂ emission characteristics of various provinces and regions in China [C]// *Annual meeting of the Chinese academy of environmental sciences*. 2010(in Chinese).
张宏武, 时临云. 中国各省区 CO₂ 排放特征的比较分析 [C]// 中国环境科学学会学术年会. 2010.
- [40] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(4), 345-360.

- [41] Yao Zuoxin, Li Qin, Liu Weiping, *et al.* Response of seasonal frozen soil to climate change in Taxkorgan River Valley of Xinjiang during 1960-2015 [J]. *Arid Land Geography*, 2017, **40**(2), 257-265(in Chinese).
姚作新, 李 秦, 刘卫平等. 1960-2015 年新疆塔什库尔干河谷季节性冻土对气候变化的响应 [J]. 干旱区地理 (汉文版), 2017, **40**(2), 257-265.
- [42] Wang Enchong. Glacier Melting Water Storage on the Tibetan plateau had reduced the tenth in the past 30 years [J]. *Pratacultural Science*, 2007, (2), 104-104(in Chinese).
王恩重. 青藏高原冰川融化蓄水量近 30 年减少 1/10 [J]. 草业科学, 2007, (2), 104-104.
- [43] Zhao Yonghua, Zhao Lin, Wu Tianyun, *et al.* Variation of CO₂ Concentration in Active Layer in Beiluhe Permafrost Region of the Tibetan Plateau during Winter and Spring [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(2), 183-190(in Chinese).
赵拥华, 赵 林, 武天云等. 冬春季青藏高原北麓河多年冻土活动层中气体 CO₂ 浓度分布特征 [J]. 冰川冻土, 2006, **28**(2), 183-190.
- [44] Nuerpatiman·Maimaiti, Parhat·Abdulla. The temperature and precipitation changes in tashkurgan county, pamir plateau from 1960 to 2014 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, **9**(1), 54-58(in Chinese).
努尔帕提曼·买买提热依木, 帕尔哈提·阿不都拉. 帕米尔高原塔什库尔干县 1960-2014 年气温及降水变化 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, **9**(1): 54-58.
- [45] Li Changming. *Phylogenetic and functional Diversity of Bacterial Community in Permafrost-Affected Soils in Qinghai-Tibet Plateau* [D]. Lanzhou: Master's Thesis of Lanzhou University, 2013(in Chinese).
李昌明. 青藏高原多年冻土区土壤微生物及其与环境关系的研究 [D]. 兰州: 兰州大学硕士论文, 2012.