

引用格式: 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. [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.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.2.0203

中国区域 CO₂ 多年时空变化的卫星遥感分析

孟倩文^{1,2}, 尹 球³

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 为了更充分地了解 CO₂ 地面源和汇的分布特征, 利用中国区域地面观测数据和 AIRS 反演的 2003 年 1 月~2012 年 12 月 CO₂ 三级产品分析了中国地区对流层 CO₂ 浓度在不同季节的时空分布及多年变化特征。结果表明: ① AIRS 反演的 CO₂ 产品与地面观测数据具有较好的一致性, 相关系数 0.85 以上, 月平均值偏差在 3 ppmv 以内。CO₂ 随时间均呈增长趋势, 两者呈现一致的季节波动性, 卫星反演结果略有滞后。GOSAT 反演 CO₂ 比 AIRS 偏低, 两者的相关性较低; ② CO₂ 浓度呈现北高西南低的分布规律, 多年月平均增长率为 0.177。北方地区的 CO₂ 增长率大于南方, 东部的 CO₂ 增长率大于西部; ③ CO₂ 浓度整体在春季呈现增长趋势, 秋季呈现减小趋势。春季 CO₂ 浓度较高主要出现在东北地区、内蒙古和新疆, 多年平均浓度达到 389 ppmv 以上, 相应地这些地区在春季和夏季 CO₂ 浓度年增加量达到 2 ppmv 以上。秋季 CO₂ 浓度在内蒙古和西南地区减小趋势明显。

关键词: 遥感; CO₂; 时空尺度; 多年变化

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2016)02-0203-11

1 引言

CO₂ 是一种重要的温室气体, 虽然占大气总量不足 0.05%, 但其浓度增加会引起大气对长波热辐射吸收的增加, 从而影响到地球一大气系统的辐射平衡推动全球变暖^[1-2]。约有 15%~40% 的 CO₂ 排放量会存留在大气超过 1 000 年之久, CO₂ 对长生命周期温室气体辐射强迫的贡献率为 -64%。它对过去 10 a 辐射强迫增加的贡献为最大值 84%, 在过去 5 a 为最大值 82%^[3]。2012 年, 大气 CO₂ 达到工业化前水平的 141%, 全球平均摩尔分数为 393.1±0.1 ppm, 2011~2012 年的年平均增量为 2.2 ppm, 高于 2010~2011 年的增量、20 世纪 90 年代的平均增长率(-1.5 ppm/a)和过去 10 a 的平均增长率(-2.0 ppm/a)^[4]。CO₂ 排放增加导致的大部分人为气候变化, 在百年至千年的时间尺度上不可逆。

目前对大气中的 CO₂ 体积分数的监测主要有地基、空基和卫星遥感探测 3 种^[5-7]。地基观测站点能够进行高精度长时间序列的数据测量, 但是站点数量较少、空间分布不均, 尤其是在海洋、沙漠、高山和极地等人迹罕至地区观测数据非常少, 因此对 CO₂ 的观测研究具有一定的局限性。空基 CO₂ 的检测方式主要是利用飞机在指定区域进行采样观测, 主要在平流层进行, 它的观测范围比地基大, 但是相对于全球来说覆盖范围有限。卫星遥感探测不受时空限制, 能够得到稳定、长时间序列、大范围、地面或高空三维的探测结果^[8-9]。

反演监测 CO₂ 的传感器有 GOSAT、AIRS 和 SCIAMACHY 等^[10-12], 国内外学者已经开展了卫星遥感 CO₂ 的研究工作。其中短波红外 CO₂ 卫星遥感方面, Schneising 等^[13] 利用 SCIAMACHY 分

收稿日期: 2015-02-13; 修订日期: 2016-03-26

基金项目: 上海市气象局科技开发项目“红外高光谱大气垂直探测数据通道优选方法研究”(099002003)。

作者简介: 孟倩文(1985—), 女, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事卫星遥感信息处理与应用研究。E-mail: mengqianwen@163.com。

通讯作者: 尹 球(1963—), 男, 江苏太仓人, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星遥感信息处理与应用研究。E-mail: yinqiu@cma.gov.cn。

析了 2003~2009 年全球 CO₂ 柱含量变化,大气 CO₂ 浓度季节变化在北半球表现得更为显著,CO₂ 的年增加量约为 1.80 ± 0.13 ppm/a。Yoshida 等^[14]通过 GOSAT 卫星数据得出北半球 CO₂ 含量高于南半球,卫星数据和地面观测数据具有较好的纬度一致性。对于热红外 CO₂ 遥感反演,Pagano 等^[15]研究认为 AIRS 反演 CO₂ 数据与空基探测结果一致性较好。Crevoisier 等^[16]利用 IASI 数据分析了对流层中层 CO₂ 含量的变化规律。外国一些相关研究利用 AIRS 反演的 CO₂ 与 ESRL/GMD 飞机观测数据对比发现两者具有很好的时空变化一致性,偏差仅为 0.5% 左右^[10-11],说明 AIRS 反演的 CO₂ 数据可以真实反映对流层 CO₂ 的分布和变化。Chahine 利用卫星资料对于中国地区大气 CO₂ 含量的研究主要集中在 CO₂ 浓度含量的整体空间分布以及多年的平均年际变化上,对于 CO₂ 多年变化的区域和季节分布分析甚少。因此本文利用 AIRS 反演的 CO₂ 产品,对此开展了一系列分析研究。

2 数据源与数据分析方法

AIRS 搭载于地球观测系统 EOS-Aqua 上,是采用光栅分光的高光谱大气探测仪器,可以获得高准确度和精度的大气温度和大气成分廓线。AIRS 反演的 CO₂ 产品分为 level0、level1、level2、level3 4 级,其中 level2 CO₂ 数据包括标准数据产品(Standard Product)和支持产品(Support Product),空间分辨率为星下点 $90 \text{ km} \times 90 \text{ km}$,应用空间连贯性质量保证 QA(Quality Assurance)测试,以满足二级 CO₂ 标准产品的接受标准反演,不满足质量保证的被写入支持产品。CO₂ 三级产品由二级数据在相应的格点分辨率下计算得到,包括每天、8 天和月格点产品,其中多天产品采用逐日数据算数平均得到,格点分辨率为经度 $2.5^\circ \times$ 纬度 2° 。三级产品在有云情况下采用晴空辐射订正方法进行处理,对于 CO₂ 反演结果质量控制采用了临近视场反演结果均方根误差值进行控制^[17]。AIRS 反演 CO₂ 数据经过很多地基和飞机观测数据验证,与其他数据具有很好的一致性,平均偏差在 2 ppmv 之内^[10-12]。

本文选择 CO₂ 三级月产品数据分析 CO₂ 的时空变化特征,时间段为 2003 年 1 月~2012 年 12 月,选择整个中国作为研究区域(经纬度范围为 $15^\circ \sim 54^\circ \text{N}$, $69^\circ \sim 141^\circ \text{E}$),该数据反演的是对流层中层(500 hpa)左右的一段气柱内的 CO₂ 体积混合

比。由于 CO₂ 在对流层和平流层分布的均一性,可以用该产品代表整个平流层以下 CO₂ 的浓度含量。

另外还选取了温室气体世界数据中心 WDCGG(World Data Centre for Greenhouse Gases)所提供的 CO₂ 大气本底观测站的月平均数据,与 AIRS 反演 CO₂ 浓度进行对比分析,本底站数据来自于世界气象组织(WMO)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、加拿大气象局(MSC)和日本国立环境研究所(NIES)建立的覆盖全球的 CO₂ 观测站及小飞机 CO₂ 测量项目。中国大陆共有 1 个全球大气本底站瓦里关,6 个区域大气本底站,包括北京上甸子、浙江临安、黑龙江龙凤山、新疆阿克达拉、云南香格里拉和湖北金沙。WDCGG 网站提供的数据仅为瓦里关、上甸子和鹿林(中国台湾)。

GOSAT 数据产品相应分为标准产品和研究产品,标准产品为经过未检查、初步检查、定标、确认 4 个步骤后分发,供普通用户使用的 L1B、L2、L3 及更高级别产品。研究产品则不仅包括各级别标准产品,还包括定标步骤之前的各级别产品原始数据,以便满足 RA 用户定标与验证、数据处理与应用等研究需求。

为了 GOSAT 和 AIRS 产品对比研究,选取 GOSAT FTS SWIR L3 级最新数据产品(v02.21),该产品是根据 FTS SWIR 二级 CO₂ 浓度产品,经过克里金插值后得到的一个月内的全球 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的平均柱浓度数据。大气 CO₂ 分子在大气层中占空气柱总量的比率,简称为 XCO₂。时间段为 2009 年 6 月~2014 年 5 月。首先对 GOSAT 数据进行重采样,和 AIRS 格点分辨率匹配。选择两个数据共同的时段 2010 年 1 月~2012 年 12 月进行对比分析。

为了研究每个像元上时间序列数据的趋势,通过拟合一条适当的趋势线来分析这种长期的趋势是常用的一种时间序列分析方法。本文使用线性趋势线,通过最小二乘法实现趋势线方程的系数的求解。拟合趋势线斜率的计算公式如下:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1)$$

对 CO₂ 月浓度数据的某个气柱来说, x 表示年月($i=1,2,\dots,108$), y 表示 2003 年 1 月~2012 年 12 月每月的 CO₂ 浓度值(图 1)。

3 验证与结果分析

3.1 AIRS 数据与地面观测数据对比分析

从图 1 可以看出,AIRS 反演产品和地面观测

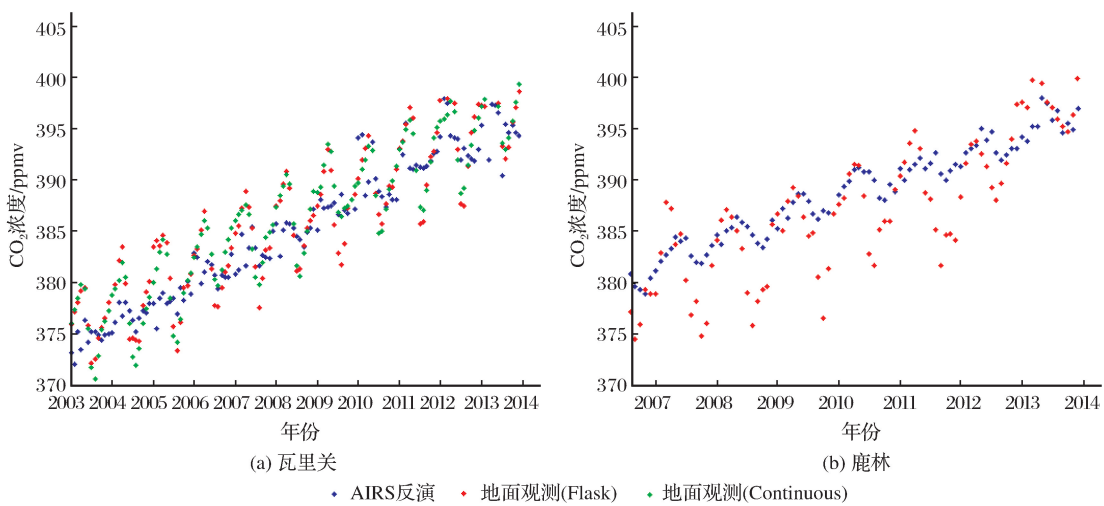


图 1 2003~2013 年地面观测 CO₂ 与 AIRS 反演月平均 CO₂ 浓度

Fig.1 monthly carbon dioxide concentration retrieved from AIRS and ground-based observation from 2003 to 2013

结果呈现一致的增长趋势,年增加量约为 2 ppmv,并且呈现一致的季节波动性,由于近地面 CO₂ 对对流层输送需要一定的时间,AIRS 反演 CO₂ 波动略有滞后,并且变化较为平缓。

分别利用两个 CO₂ 观测站数据与其相应的 AIRS 反演 CO₂ 产品数据对比(图 2),结果表明两者显示了很好的一致性,相关系数在 0.85 以上,并且通过了 0.01 的显著性检验,月平均偏差在 3 ppmv 以内(表 1)。由上可知 AIRS 反演 CO₂ 数据与本底观测数据匹配效果较好,可以较好地反映 CO₂ 季节及年际变化特征,Chahine 等^[11]对 AIRS 反演 CO₂ 数据的研究也表明 CO₂ 地面源的排放可以在对流层中层观测到,反演数据可以反映对流层大气 CO₂ 的分布特征和变化规律。

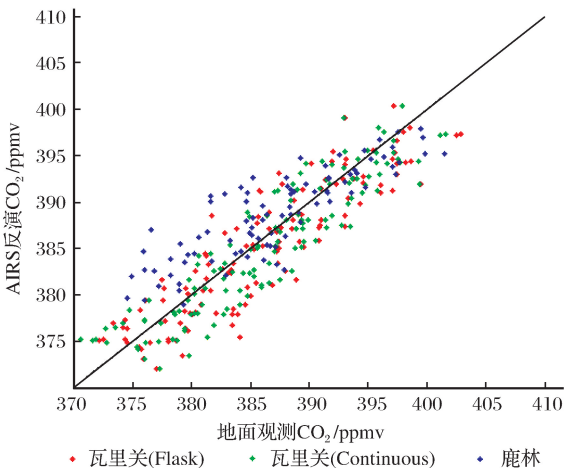


图 2 地面观测 CO₂ 与 AIRS 反演 CO₂ 产品对比

Fig.2 Comparison of ground-based observations with carbon dioxide concentration retrieved from AIRS

表 1 地面观测 CO₂ 与 AIRS 反演 CO₂ 产品对比

Table 1 Comparison of ground-based observations with carbon dioxide concentration retrieved from AIRS

站名	站点位置		年平均/ppmv		年增长/ppmv		月平均 偏差/ppmv	相关系数	平均偏差 /ppmv
	纬度/N°	经度/E°	地面	卫星	地面	卫星			
瓦里关	36.28°	100.9°	386.27	385.23	2.05	2.16	2.78	0.90 **	2.79
鹿林	23.47°	120.87°	387.10	388.72	2.5	2.09	2.94	0.85 **	1.62

注: ** 通过了 0.01 的显著性检验

3.2 AIRS 与 GOSAT 反演 CO₂ 数据对比分析

GOSAT 三级产品探测的是 CO₂ 的平均柱浓度,可以反映近地面的大气 CO₂ 变化特征。将 AIRS 和 GOSAT 对比发现,GOSAT 的 CO₂ 浓度比 AIRS 偏低,夏季尤为明显,约偏低 6 ppmv,其他季节偏差在 3 ppmv 以内(图 3)。GOSAT 反演 CO₂ 浓度随时间和 AIRS 有相同的变化规律,CO₂ 浓度 4 月相对较高,7、8 月相对较低,AIRS 的波峰

略滞后(表 3)。AIRS 反演的 CO₂ 与之有一定的相关性,但是相关性不如 AIRS 与地面观测数据明显,秋季相关性较好,Wang 等^[17]的研究表明 AIRS 与 GOSAT 反演 CO₂ 相关性较小,并且后者比前者偏低,可能的原因是 AIRS 分辨率比 GOSAT 粗,以至于一些变化被平滑,另外 GOSAT 反演 CO₂ 的有系统性偏差。除此之外,GOSAT 与地基观测数据相比,也偏低约 7~8 ppmv^[9]。

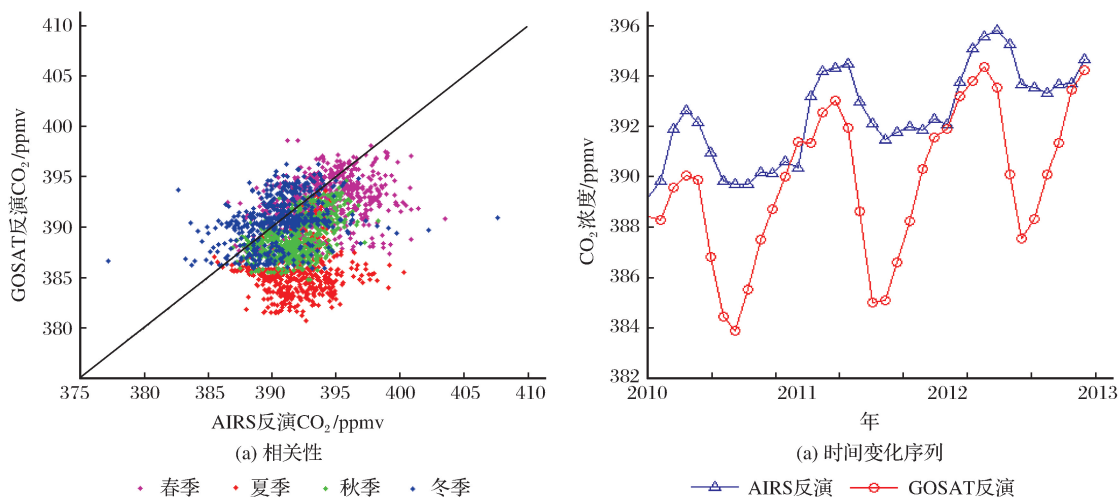


图 3 2010~2012 年不同季节下 AIRS 与 GOSAT 反演 CO₂ 浓度对比

Fig.3 Comparison of carbon dioxide concentration retrieved from AIRS with carbon dioxide concentration retrieved from GOSAT from 2010 to 2012

表 2 2010~2012 年不同季节下 AIRS 与 GOSAT 反演 CO₂ 浓度对比 (单位:ppmv)

Table 2 Comparison of carbon dioxide concentration retrieved from AIRS with carbon dioxide concentration retrieved from GOSAT from 2010 to 2012 (Unit:ppmv)

CO ₂ 浓度	春季		夏季		秋季		冬季	
	AIRS	GOSAT	AIRS	GOSAT	AIRS	GOSAT	AIRS	GOSAT
	394.15	392.47	391.85	385.65	391.92	389.01	390.52	390.57

表 3 2010~2012 年不同季节下 AIRS 与 GOSAT 反演 CO₂ 浓度的偏差和相关性

Table 3 Dviation and correlation of carbon dioxide concentration retrieved from AIRS and GOSAT from 2010 to 2012

CO ₂ 浓度	月平均偏差/ppmv				相关系数			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
	2.77	6.39	3.00	2.29	0.29 **	0.11 *	0.52 **	0.33 **

注: * 通过了 0.05 的显著性检验, ** 通过了 0.01 的显著性检验

3.3 CO₂ 多年平均分布及变化

图 4 显示的是 2003~2012 年 AIRS 反演的全球对流层 CO₂ 平均浓度分布,10 a 的全球平均 CO₂ 浓度为 384.0667 ppmv。从图中可以看出,北半球 CO₂ 浓度普遍高于南半球,这与 Schneising 和 Yokota 等利用不同卫星数据得到的分析结果一致^[13-14],尤其在 30°~60°N 的北半球中纬度地区,包括北美洲的中东部,亚洲的中部和北太平洋,CO₂ 浓度最高,约达到 386 ppmv,这主要是与该地区人口密集、工业水平较高、各种人类活动频繁以及大气环流造成的长距离输送有关。南半球低纬地区是全球的 CO₂ 浓度低值区,这与该地区的植被覆盖率较高、人类活动较少有密切关系,低值的中心位于南大西洋,平均浓度仅 381 ppmv。

图 5 显示的是 2003~2012 年中国对流层 CO₂ 平均浓度分布,CO₂ 平均浓度为 383.846 ppmv,呈现北高南低的趋势,35°N 以北的 CO₂ 浓度明显高于以南的区

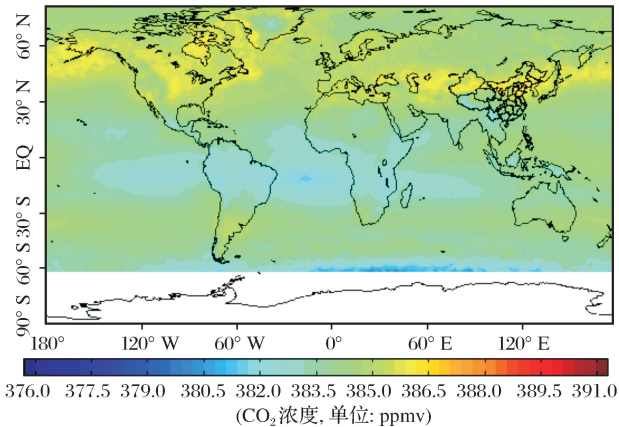


图 4 2003~2012 年全球对流层 CO₂ 平均浓度分布

Fig.4 The distribution of global tropospheric carbon dioxide from 2003 to 2012

域,与何茜^[9]分析得到的分布趋势一致,但是由于前者利用了 2002 年 9 月~2011 年 7 月共 9 a 的数据,所以本文得到的平均浓度比其结果高 1.608 ppmv。4 个高值

中心,其中两个位于塔里木盆地,一个位于内蒙古高原西部以及东北平原南部至华北平原北部一带,高值中心的 CO₂ 浓度均达到 386 ppmv。青藏高原西部和云南的 CO₂ 浓度较低,约为 383 ppmv。新疆塔里木盆地和内蒙古高原西部地表覆盖多为沙漠,植被稀疏,对于 CO₂ 的吸收消耗较少造成了其浓度较高。而在东北平原和华北平原,则与该地区人口密集、工业水平较高以及各种人类活动频繁有关。位于中国西南部的云南省,属于副热带季风气候,纬度较低、四季如春、植被覆盖率高,对 CO₂ 的消耗较多形成了其低值区。青藏高原的西北部人口非常稀少,人为 CO₂ 的排放很少,所以 CO₂ 含量相对较低。

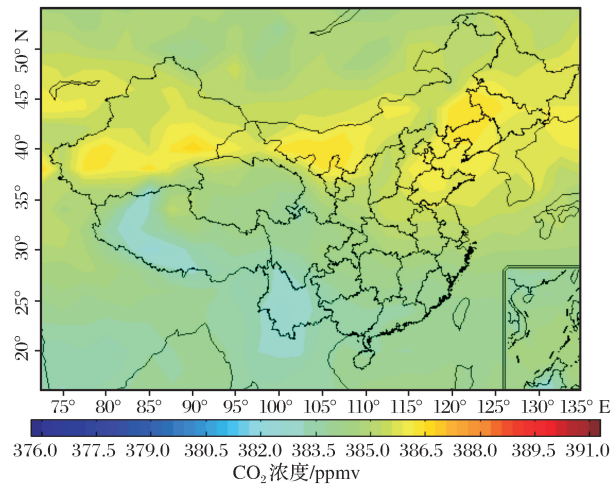
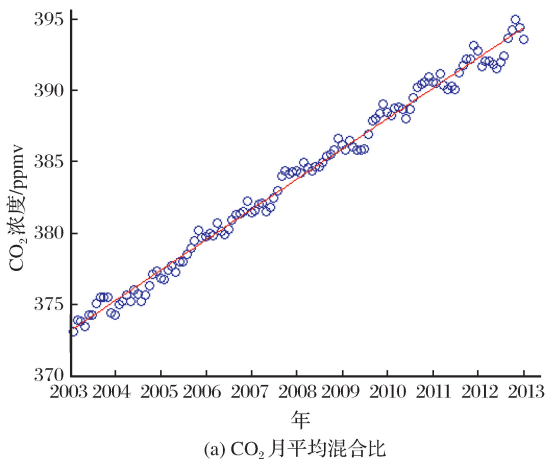
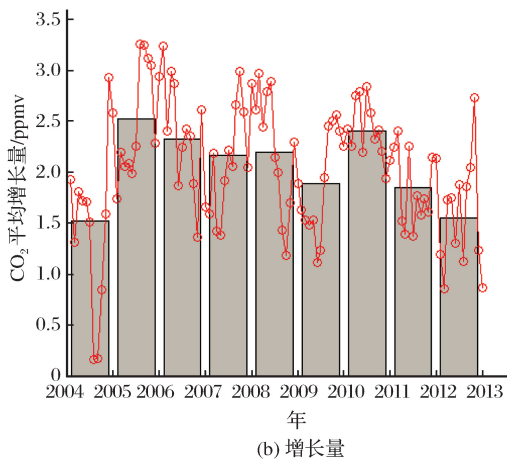


图 5 2003~2012 年中国对流层 CO₂ 平均浓度分布
Fig.5 The distribution of tropospheric carbon dioxide in China from 2003 to 2012



(a) CO₂ 月平均混合比



(b) 增长量

图 7 2003~2012 年中区域 CO₂ 浓度变化

Fig.7 The variations of carbon dioxide in China from 2003 to 2012

1 月的 373.0948 ppmv 增加到了 2012 年 12 月的 393.599 ppmv,高于 IPCC 第五次评估报告中提出的 2012 年全球 CO₂ 平均含量 391.1 ppmv^[19-21],月增长率为 0.177。

利用最小二乘法得到如图 6 所示 CO₂ 月平均增长情况。如图所示,CO₂ 呈现多年增长趋势,月平均增长率在 0.15~0.2 ppmv 之间,CO₂ 浓度增长最快的区域位于黑龙江省和内蒙古东部,月平均增长率约达到 0.185 ppmv,CO₂ 月平均增长最小的区域位于青海、西藏地区,月平均增长率约为 0.16 ppmv以内蒙古为主的北方地区的 CO₂ 增长率大于南方,东部的 CO₂ 增长率大于西部。

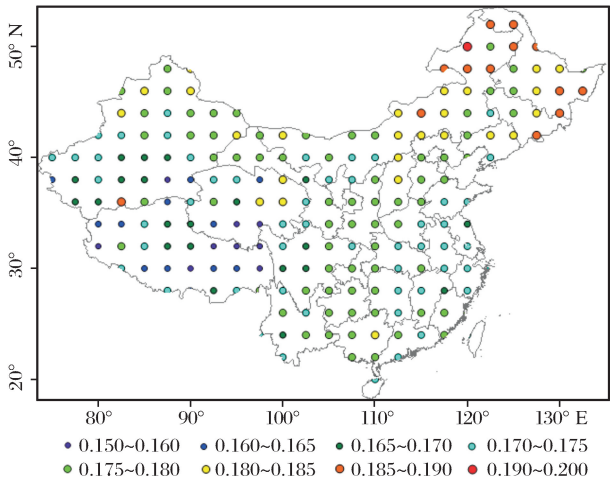


图 6 2003 年 1 月~2012 年 12 月中国对流层 CO₂ 的月平均增长率

Fig.6 The monthly average growth rate of tropospheric carbon dioxide in China from January 2003 to December 2012

图 7 显示了 2003 年 1 月~2012 年 12 月中国平均 CO₂ 浓度变化。可以看出,虽然一年之中 CO₂ 浓度有所波动,但其整体呈现出线性增加趋势,从 2003 年

2004~2005 年 CO₂ 的年平均增长量为 2003~2011 年 9 a 中最大,为 2.519 ppmv,其次为 2009~2010 年,其年平均增长量为 2.403 ppmv。CO₂ 平均浓度最高季节为秋季,

平均浓度最低的季节为春季或者冬季。

表 4 显示了 2003~2012 年中国区域 CO₂ 浓度的平均季节变化,以 3~5 月划分为春季,6~8 月划分为夏季,9~11 月划分为秋季,12~2 月划分为冬季。表中显示,秋季平均年增长率最高,达到了 2.179 ppmv/a,而且秋冬季 CO₂ 浓度变化较之春夏季节剧烈。何茜利用 2002 年 9 月~2011 年 7 月得到的年增长率为 2.198 ppmv/a,高于 2003~2012 年的年增长,说明近两年 CO₂ 增长不明显^[9]。

3.4 CO₂ 季节分布特征及变化规律

由上述分析可知,CO₂ 呈现线性增长趋势,月平均增长率在 0.15~0.2 ppmv 之间,为了充分分析

表 4 2003~2012 年中国不同季节 CO₂ 变化统计
Table 4 Seasonal variations of carbon dioxide in china from 2003 to 2012

	平均值/ppmv	均方差/ppmv	年增长率/ppmv · a ⁻¹
春季	383.02	5.88	2.04
夏季	383.80	5.98	2.08
秋季	385.01	6.26	2.18
冬季	383.57	6.22	2.16

CO₂ 在不同月份不同地区的变化,将数据去除线性增长趋势,得到每个月多年的平均变化情况^[21]。

图 8(a)、(c)、(e)显示了 2003~2012 年中国地区春季 CO₂ 浓度空间分布,图 8(b)、(d)、(f)显示的

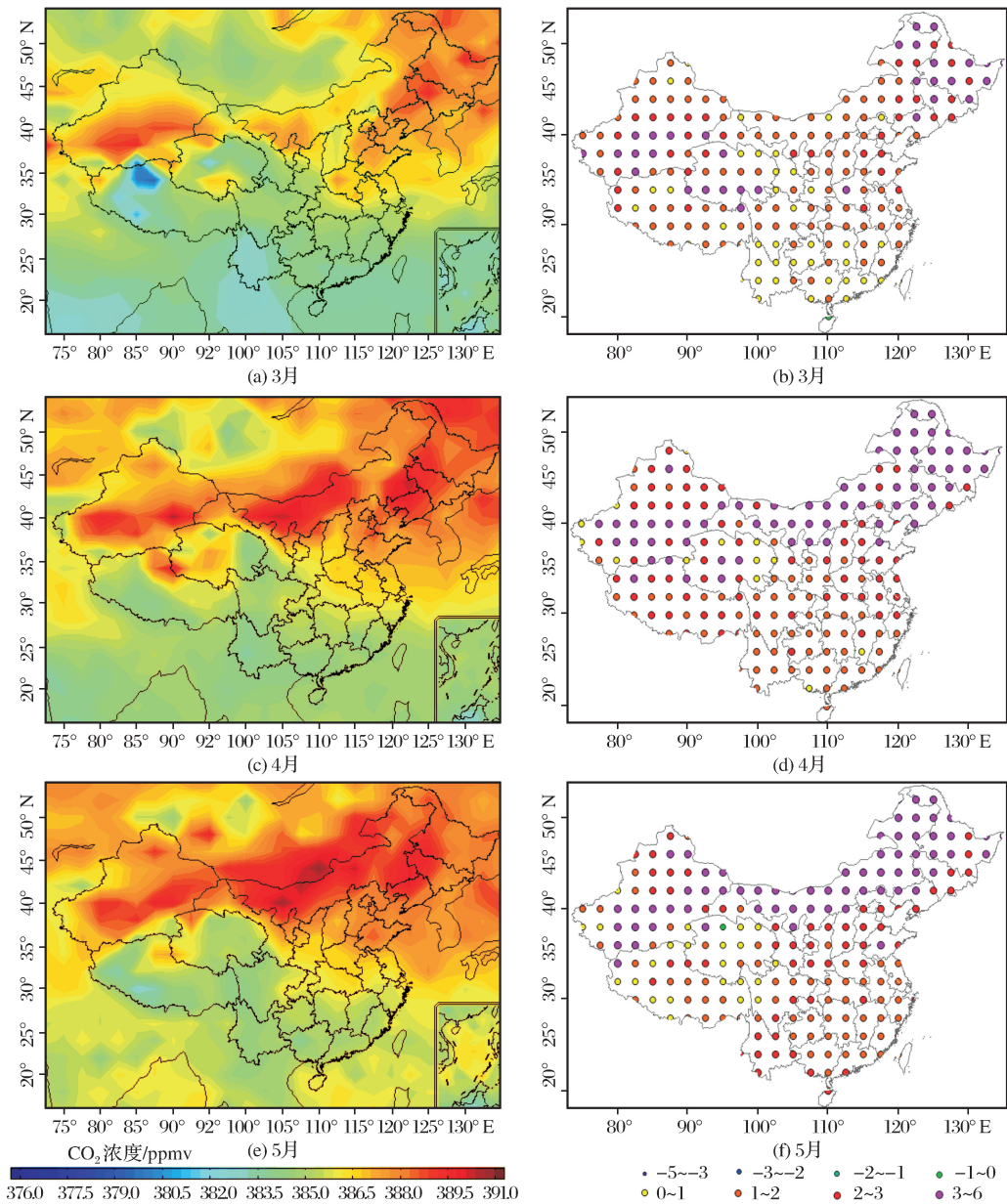


图 8 2003~2012 年春季中国对流层 CO₂ 月平均浓度分布和多年变化

Fig.8 The monthly average and variations of carbon dioxide in spring from 2003 to 2012

是去除线性趋势后的 CO₂ 变化。可以看出 CO₂ 浓度变化存在明显的季节性。春季 CO₂ 浓度最高,并且多年变化呈增加趋势。春季植被开始生长,对 CO₂ 的吸收消耗增加导致其浓度缓慢下降,但是地面和对流层中层大气的混合需要一段时间加上冬季化石燃料燃烧等造成的 CO₂ 积累,导致春季的 CO₂ 浓度仍较高。高值区主要分布在东北地区、内蒙古东部和新疆南部,CO₂ 浓度达到 389 ppmv 以上,年平均增长量 3~6 ppmv。并且随时间 CO₂ 高值区

不断扩张,尤其是 5 月,内蒙古的高值区向东延伸与东北地区的 CO₂ 高值区连成一片,该区域的 CO₂ 年增加量也相应的达到 3~6 ppmv。

与春季相比,夏季 CO₂ 浓度略有降低,这主要是由于进入 6 月,随着植被叶面积增大,光合作用增强,对 CO₂ 的吸收消耗迅速增加,导致 CO₂ 浓度下降。从图 9 可以看出:整个中国区域 CO₂ 浓度随着时间不断减小,内蒙古西部的 CO₂ 高值区范围也在逐渐缩小,最高浓度值从 389 ppmv 减小到 386 ppmv,

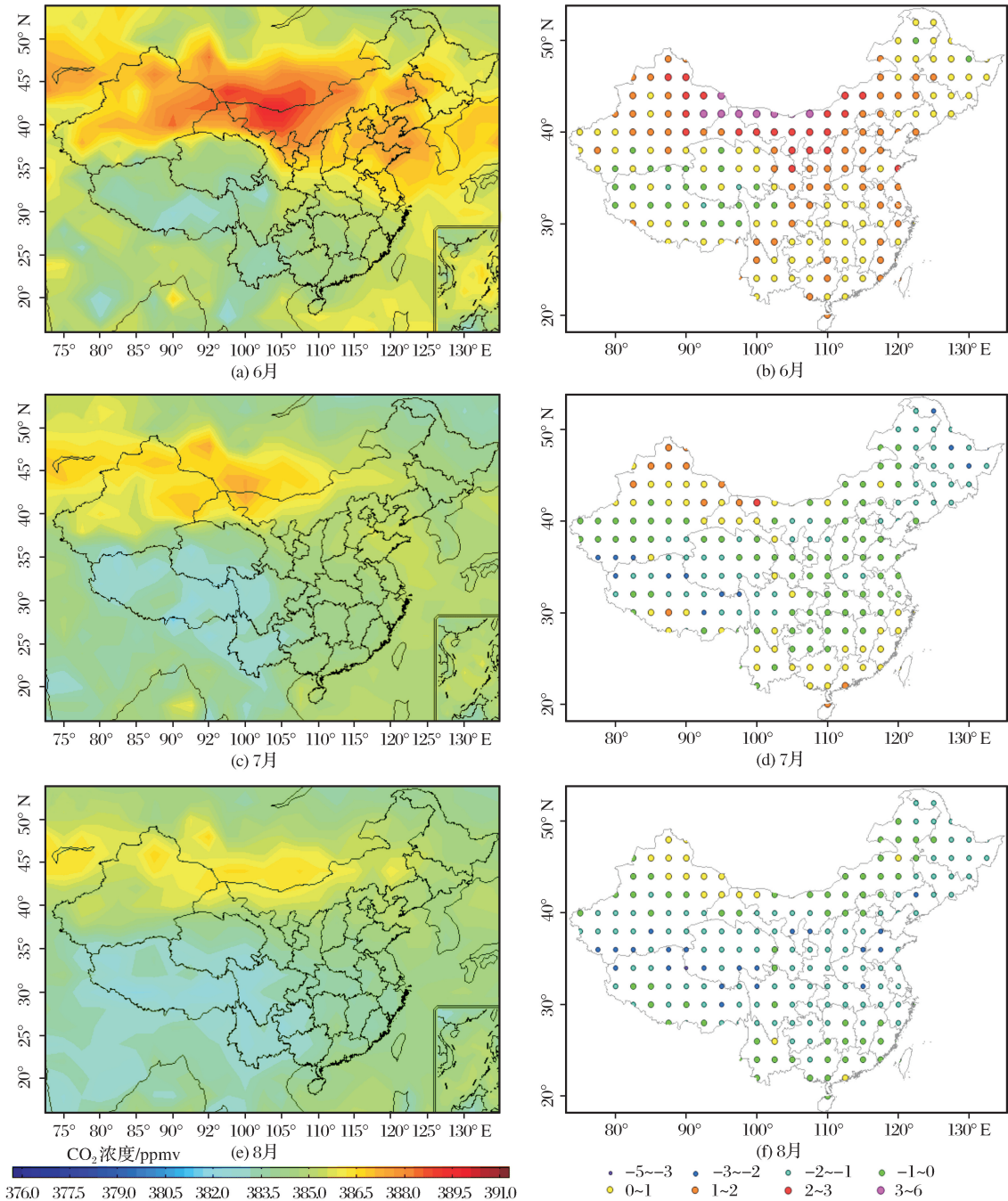


图 9 2003~2012 年夏季中国对流层 CO₂ 月平均浓度分布和多年变化

Fig.9 The monthly average and variations of carbon dioxide in summer from 2003 to 2012

其中 6 月年增加量达 3~6 ppmv。西南地区由于植被繁茂加之人类活动相对较少,CO₂ 浓度较之其他地区更低,仅为 382 ppmv 左右,多年变化呈现减小的趋势,尤其在 8 月减小趋势更加明显,其变化值可达-1~-3 ppmv。

秋季 CO₂ 浓度最低,多年 CO₂ 浓度呈减小趋势。自 9 月起,大部分植被停止生长,光合作用减弱,对 CO₂ 的吸收相应减少,但是由于上下层的 CO₂ 输送需要一定的时间,导致对流层中层 CO₂ 变

化略滞后,因此 CO₂ 浓度仍比较低。秋季 CO₂ 浓度整体依然呈现北高南低的分布,浓度相对高的区域是东北地区、内蒙古和新疆,年平均变化量-1~0 ppmv,浓度较低的区域分布在南方,其中云南 CO₂ 浓度最低,仅为 382 ppmv 左右,年平均变化量为-1~-2 ppmv 之间(图 10)。

由图 11 可知,冬季,随着植被的持续减少,植被对于 CO₂ 的吸收非常少,北方地区由于取暖等的化石燃料燃烧和秸秆等生物质的燃烧排放大量的

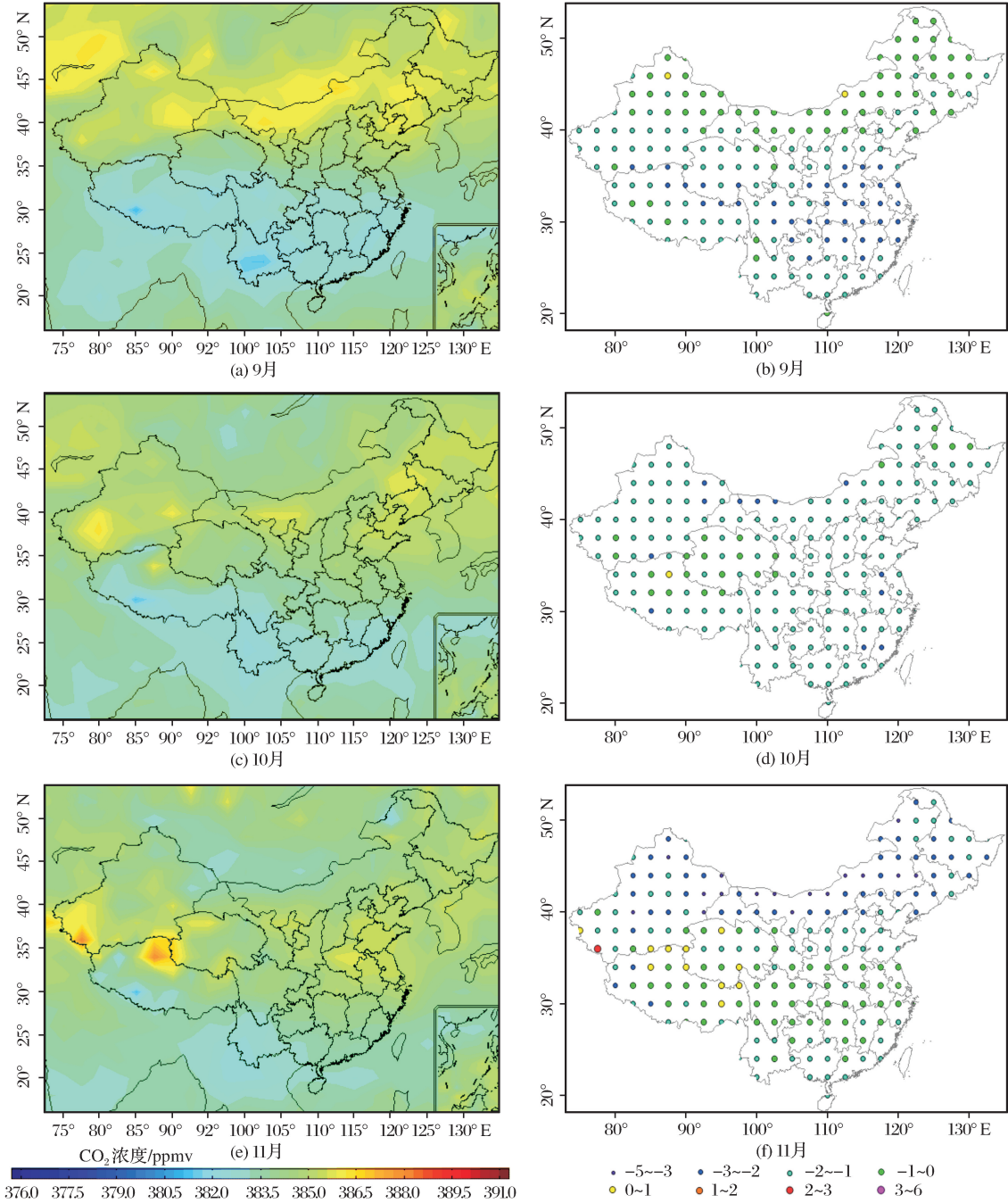


图 10 2003~2012 年秋季中国对流层 CO₂ 月平均浓度分布和多年变化
Fig.10 The monthly average and variations of carbon dioxide in autumn from 2003 to 2012

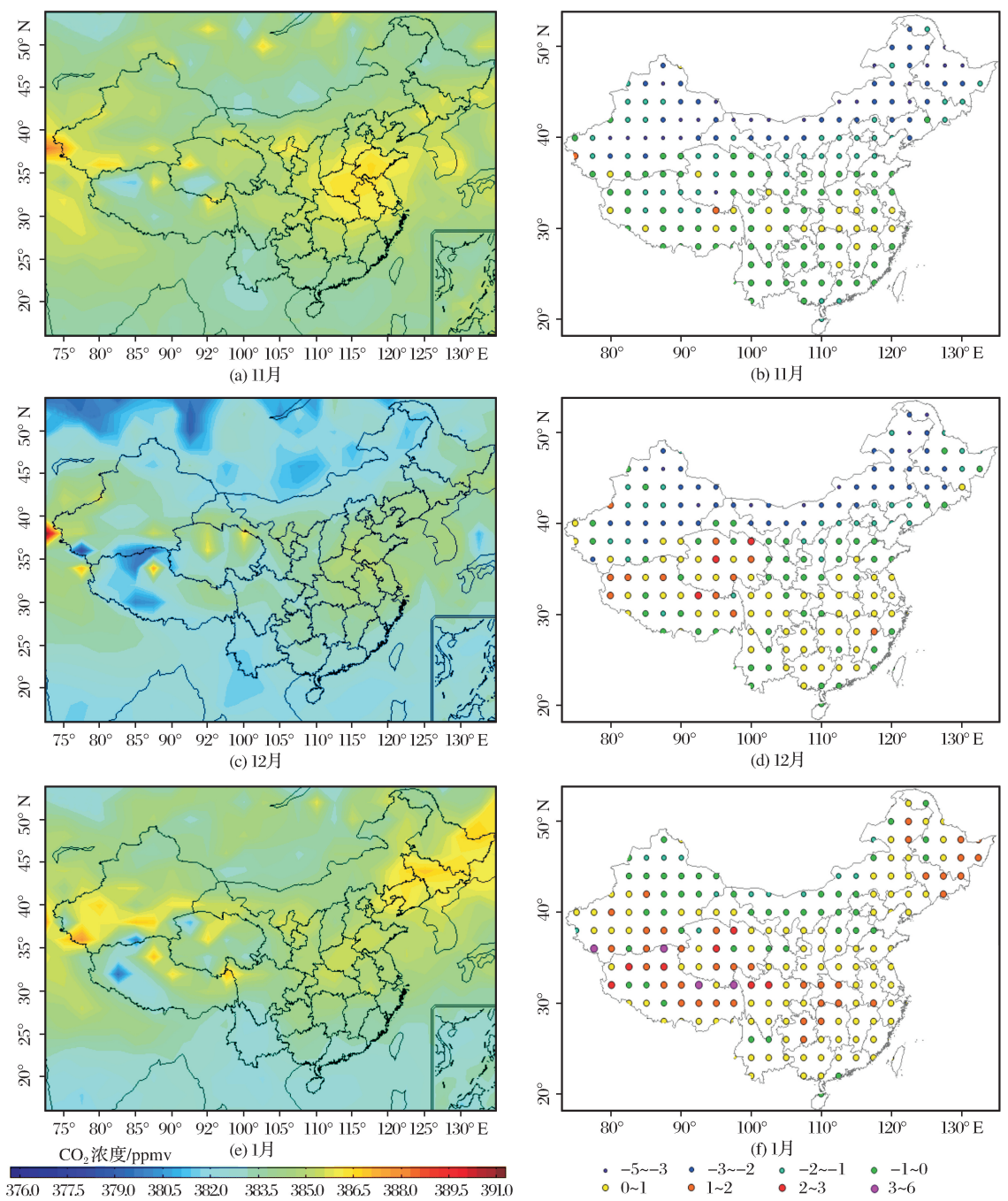


图 11 2003~2012 年冬季中国对流层 CO₂ 月平均浓度分布和多年变化

Fig.11 The monthly average and variations of carbon dioxide in winter from 2003 to 2012

CO₂,加之华北东北等地区的气象条件,导致 CO₂ 浓度的高值区主要分布在这些区域,达到 386 ppmv 左右。中部和南部地区 CO₂ 浓度年变化除 12 月整体呈现减小趋势,1 月和 2 月则呈现增加趋势。另外新疆南部西藏东北部地区由于地表覆盖多为荒漠,植被覆盖极少,因此 CO₂ 浓度较高,达到 386 ppmv 左右,呈增长趋势,年变化量约为 1~3 ppmv 之间。

4 结 语

本文利用 AIRS 反演 CO₂ 产品分析了中国地区 CO₂ 浓度的多年时空变化。主要结论如下:

(1)AIRS 反演的 CO₂ 产品与地面观测数据具有较好的一致性,相关系数 0.85 以上,月平均值偏差在 3 ppmv 以内,并且随时间均呈现增长趋势,年增加量约为 2 ppmv,并且呈现一致的季节波动性,

地面观测结果 4 月较高,8 月较低,卫星反演结果略有滞后。

(2)CO₂ 浓度多年变化呈现北高西南低的分布规律,月平均增长率为 0.177。CO₂ 浓度增长最快的区域位于黑龙江省和内蒙古的东部,月平均增长率达到 0.185 ppmv 左右,CO₂ 月平均增长最小的区域位于青海、西藏地区,月平均增长率在 0.16 ppmv 左右。北方地区的 CO₂ 增长率大于南方,东部的 CO₂ 增长率大于西部。

(3)CO₂ 浓度整体在春季呈现增加趋势,秋季呈现减小趋势。最高值出现在春季和夏季 6 月份,主要出现在东北地区、内蒙古和新疆,多年平均浓度达到 389 ppmv 以上,相应的这些地区在春季和夏季 CO₂ 浓度年增加量达到 2 ppmv 以上。秋季 CO₂ 浓度在内蒙古和西南地区地区减小趋势明显。

由于使用 AIRS 数据产品的格点分辨率一定,对于更细小区域的 CO₂ 时空分布特征的分析有限,希望可以利用更高分辨率的数据进一步深入研究。近地表的土地覆盖和人类活动对 CO₂ 的影响非常大,但是对于 CO₂ 观测的站点数量有限、分布不均导致地表 CO₂ 监测的空间连续性不好,而卫星遥感主要监测对流层中层 CO₂ 变化,因此如果将两者更好地结合起来,对于研究 CO₂ 时空分布的成因更加有效。

参考文献 (References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013-synthesis Report [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Luan Tian. Study on Concentration Characteristics and Emission/Sink of Greenhouse Gases at Longfengshan Regional Background Station in Heilongjiang Province of China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015. [栾天. 黑龙江龙凤山区区域大气本底站温室气体浓度特征及源汇研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015]
- [3] WMO. Greenhouse Gas Bulletin [R]. 2013. [WMO. 2012 年温室气体公报[R]. 2013.
- [4] Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B, *et al.* Increase in Observed Net Carbon Dioxide Uptake by Land and Oceans During the Past 50 Years [J]. Nature, 2012, 488, 70-72, doi: 10.1038/nature11299.
- [5] 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): 1-7. [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): 1-7.]
- [6] Liu Yi, Lv Daren, Chen Hongbin, *et al.* Advances in Technologies and Methods for Satellite Remote Sensing of Atmospheric CO₂ [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 247-254. [刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-254.]
- [7] Liu Yi, Cai Zhaonan, Yang Dongxu, *et al.* Optimization of the Instrument Configuration for TanSat CO₂ Spectrometer [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(27): 2787-2789. [刘毅, 蔡兆南, 杨东旭, 等. 中国二氧化碳科学实验卫星高光谱探测仪光谱指标影响分析及优化方案 [J]. 科学通报, 2013, 58(27): 2787-2789.]
- [8] Bai Wenguang, Zhang Xingying, Zhang Peng. Temporal and Distribution of Tropospheric CO₂ over China based on Satellite Observation [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 30(55): 2953-2960. [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.]
- [9] 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. [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]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 250-257.]
- [10] Cogan A J, Boesch H, Parker R J, *et al.* Atmospheric Carbon Dioxide Retrieved from the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT): Comparison with Ground-based TCCON Observations and GEOS-Chem Model Calculations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(21): D21301. Doi: 10.1029/2012JD01808.
- [11] Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, *et al.* Retrieval Algorithm for CO₂ and CH₄ Column Abundances from Short-wavelength Infrared Spectral Observations by the Greenhouse Gases Observing Satellite [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4: 717-734.
- [12] Chen Xi, Liu Yi, Cai Zhaonan. Review of Radiative Transfer Model in Retrieval of Atmospheric CO₂ from Satellite Short-wave Infrared Measurements [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(5): 825-834. [陈曦, 刘毅, 蔡兆男. 短波红外 CO₂ 反演辐射传输模式综述 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 825-834.]
- [13] Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, *et al.* Long-term Analysis of Carbon Dioxide and Methane Column-averaged Mole Fractions Retrieved from SCIAMACHY [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11: 2863-2880.
- [14] Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, *et al.* Improvement of the Retrieval Algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and Their Validation Using TCCON Data [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6: 1533-1547.
- [15] Pagano T S, Chahine M T, Oisen E T. Seven Years of Observations of Mid-tropospheric CO₂ from The Atmospheric Infrared Sounds [J]. Elsevier, 2011, 69: 355-359.
- [16] Crevoisier C, Chedin A, Matsueda H, *et al.* First Year of Upper Tropospheric Integrated Content of CO₂ from IASI Hy-

perspectral Infrared Bbervations[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2009,9:4797-4810.

[17] Edward T O.AIRS Version 5 Release Tropospheric CO₂ Products[R/OL].http://airs.jpl.nasa.gov/data/get_data.2009.

[18] Wand T X,Shi J C,Jing Y Y.Investigation of The Consistency of Atmospheric CO₂ Retrievals from Different Space-based Sensors:Intercomparison and Spatiotemporal Analysis[J].Chinese Science Bulletin,2013,58(33):4161-4170.

[19] Shen Yongping,Wang Guoya.Key Findings and Assessment Results of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1068-1076.[沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.]

[20] IPCC.Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report,Climate Change 2013:The Physical Science Basis;Summary for Policymakers[R/OL].<http://www.ipcc.ch/report/ar5/>.2013.

[21] IPCC.Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report(AR5),Climate Change 2013:The Physical Science Basis;Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment[R/OL].<http://www.ipcc.ch/report/ar5/>.2013.

[22] Thompson D W J,Kennedy J J,Wallace J M,*et al.*A Large Discontinuity in The Mid-twentieth Century in Observed Global-mean Surface Temperature[J].Nature,2008,453:646-650.

Remote Sensing Analysis ofMulti-years Spatial and Temporal Variation of CO₂ in China

Meng Qianwen^{1,2}, Yin Qiu³

(1.Chinese Academy of Meteorological Sciences,Beijing 100081,China ;
2.University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China ;
3.Shanghai Meteorological Bureau,Shanghai 200030,China)

Abstract: In order to understand the distribution of sources and sinks of CO₂, based on ground-based observations and Level 3 monthly gridded CO₂ retrieval products by AIRS from January 2003 to December 2012, the spatiotemporal pattern and multi-years variation characteristics of tropospheric CO₂ during different seasons in China was analyzed. The results show that ①AIRS retrieved CO₂ products and ground observations showed good consistency, correlation coefficient was above 0.85, monthly average deviation was within 3 ppmv. CO₂ showed a growth trend over time, both showed consistent seasonal variation, the satellite retrieval products lagged slightly. CO₂ retrieved from GOSAT is smaller than AIRS and their correlation is relatively low. ②CO₂ concentration was higher in northern China and lower in southwestern China, the average month growth rate was 0.177; ③CO₂ concentration showed an increasing trend in spring and decreasing trend in autumn. The higher CO₂ concentration appeared in northeast plain, Mongolia and Xinjiang, annual mean concentration in these corresponding regions reached 389 ppmv, and annual mean increase was 2 ppmv. In addition, CO₂ concentration in autumn showed a significant decreasing trend in Mongolia and southwestern China.

Key words: Remote sensing; Carbon dioxide; Spatiotemporal pattern; Multi-years variation characteristic