大气二氧化碳遥感反演精度检验及时空特征分析

何 茜[1,2,3],余 涛[1,3]*,程天海[1,3],顾行发[1,3],谢东海[1,2,3],吴 侃[1,2,3]

(1. 遥感科学国家重点实验室 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101;
2. 中国科学院研究生院,北京 100039; 3. 国家航天局航天遥感论证中心,北京 100101)

摘要: 利用卫星遥感探测大气二氧化碳(CO_2)浓度,相比传统的地面观测方法,具有稳定、连续、大尺度观测等诸多优点,能更好地获得全球 CO_2 的时空分布与变化特征。随着卫星遥感技术的发展,一系列具备大气 CO_2 探测能力的卫星相继发射升空,大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)、温室气体观测卫星(GOSAT)、大气红外探测仪(AIRS)等卫星传感器,已经获得了多年的全球 CO_2 浓度分布产品。对这些卫星资料进行对比分析,并与本底观测数据进行全球范围的长时间序列的对比验证。研究显示,3 种 CO_2 卫星遥感产品中,SCIAMACHY 数据系统性略高于本底数据,且观测范围局限性较大;GOSAT 数据稳定性较好,但系统误差较大,平均低于本底数据近 9ppmv;AIRS 数据产品相比前两者优势突出,单月全球覆盖率达到 90% 左右,与本底观测数据平均误差小于 2ppmv(0.5%),相关系数达到 0.9 以上,能够较好地反映全球大气 CO_2 浓度的时空特征。卫星遥感产品与本底观测资料显示,全球 CO_2 浓度空间分布呈现出明显的纬度分布规律与海陆分布规律,时间变化规律方面则表现出明显的季节性周期变化。

关键词: 卫星遥感;精度验证;CO_2;AIRS;时空特征

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00250

1 引言

观测数据显示,全球大气中二氧化碳(CO_2)浓度已由工业革命前约 280ppmv 增加到 2005 年的 379ppmv。1995 到 2005 十年间的 CO_2 浓度年增长率达到 1.9ppmv,远高于 1960 到 2005 年人类连续与直接大气观测以来的平均值 1.4ppmv[1]。

CO_2 是一种长寿命温室气体,其浓度增加将引起大气对长波热辐射吸收的增加,从而推动全球变暖。温室效应与全球变暖问题,已成为目前最重要、影响最深远的全球环境问题之一[1],正日益受到人们的关注。而温室效应与碳监测相关研究,需要对大气 CO_2 浓度进行大范围长时间的高精度测量[2],传统的地面观测方法,具有可信度高、瞬时获取、获取容易等优点,但也存在着站点少、成本高、缺乏宏观与垂直探测能力等许多不足[3-4],目前地面观测资料仍相当缺乏。

利用卫星遥感探测大气 CO_2 浓度,具有稳定、连续、大尺度观测等诸多优点,能更好地获得全球时空分布与变化特征,为人类提高对碳源汇与碳循环的认识,增强预测大气 CO_2 浓度的能力,进而增加温室效应与全球变暖研究和预测的可信度,将起着越来越大的作用[5]。随着卫星遥感技术的发展,一系列具备 CO_2 探测能力的卫星相继发射升空。大气制图扫描成像吸收光谱仪[4,6](SCIAMACHY, Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)、大气红外探测仪[7](AIRS, Atmospheric Infrared Sounder)、温室气体观测卫星[8](GOSAT, Greenhouse Gases Observing Satellite)等卫星传感器已经获得了多年的全球 CO_2 观测数据,轨道碳观测器[9](OCO, The Orbiting Carbon Observatory)、碳观测小卫星星座(Car-

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2012-03-05.

基金项目: 国家"973"计划项目(2010CB950800);国家自然科学基金项目(41001207);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100204)课题。

作者简介: 何茜(1988-),男,硕士研究生,主要从事温室气体反演与定量化研究。E-mail:1988heqian@163.com

*通讯作者: 余涛(1967-),男,博士,研究员,博导,现主要从事遥感机理研究工作。E-mail:yutao@irsa.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

bonSat)等新型碳监测卫星也正在研究之中。

本文首先对目前常见 CO_2 卫星观测平台进行研究;然后,对 SCIAMACHY、AIRS、GOSAT 已发布的 CO_2 卫星产品进行可视化对比分析,并与本底观测数据进行全球范围的长时间序列的对比验证,以检验卫星遥感 CO_2 反演产品的精度,评价各卫星传感器在反演 CO_2 浓度方面的优缺点;最后,利用已有数据,对 CO_2 的空间分布特征与季节变化规律进行了分析。

2　几种 CO_2 卫星观测平台的特性

对 SCIAMACHY、AIRS、GOSAT 3 种在轨 CO_2 观测卫星传感器的各项参数指标对比如表 1 所示,可以发现 CO_2 观测卫星具有以下特点:(1)波段范围宽,光谱分辨率高,空间分辨率相应较低;(2)除 SCIAMACHY 拥有多种观测模式外,其他卫星均采用天底观测模式。天底观测模式具有较好的水平分辨率,能够反演地表参数,且视场内云的出现概率小,是目前各种卫星主要采用的观测模式。但它的垂直分辨率差,而 SCIAMACHY 可选择的临边观测方式具有较高的垂直分辨率和较强的敏感性,能够获取对流层和平流层更高精度的大气垂直阔线;(3)光谱范围中都包含有 CO_2 某些特征吸收波段,及其他必要反演参数的光谱特征通道,如 AIRS 主要利用 CO_2 的 4.3μm、15μm 附近的两个热红外强吸收波段,两个波段分别对低层和中高层对流层 CO_2 浓度敏感;SCIAMACHY 主要利用 1.58μm 附近的对近地面 CO_2 浓度敏感的短波红外弱吸收波段;而 GOSAT 除采用前面几个波段之外,还利用了 2.06μm 附近的短波红外弱吸收波段。这些波段涵盖了目前碳监测研究中最常用的几个 CO_2 特征波段,对未来新型平台研制过程中 CO_2 探测波段的选取具有很大的指导意义[10]。

表 1　常见 CO_2 观测卫星参数指标

Tab. 1　Parameters of some CO_2 observation satellites

传感器	大气制图扫描成像吸收光谱仪 SCIAMACHY	大气红外探测仪 AIRS	温室气体观测传感器 GOSAT-TANSO
搭载平台	ENVISAT	Aqua	GOSAT
发射时间(机构)	2002 年 3 月(ESA)	2002 年 5 月(NASA)	2009 年 1 月(JAXA)
轨道高度(km)	799.8	705.3	666
空间分辨率(星下点)(km)	30×60	13.5	10.5
光谱范围(μm)	0.24～2.38	3.7～15.4	0.75～14.3
光谱分辨率(cm^{-1})	1.0～7.8	0.55～2.0	0.2
观测模式	天底、临边、掩星、交替观测	天底观测	天底观测

3 种卫星的全球月平均数据产品均经过了以下处理步骤:(1)原始数据经过辐射定标、地理信息匹配、云检测与晴空校正[11]等步骤获得校正后的传感器观测值;(2)通过特定算法反演获得 CO_2 的垂直柱浓度,并转化为垂直柱平均混合比(消除垂直柱浓度中气压的影响);(3)经过质量控制、时间序列平均、空间网格化与插值等步骤,输出单位时间单位网格内的 CO_2 平均浓度、均值拟合误差、标准差及有效观测数等。

3　卫星数据产品对比与地基验证

3.1　卫星数据的可视化对比分析

实验使用的 SCIAMACHY 数据来自于德国 Bremen 大学 SCIAMACHY/WFM-DOAS 科研小组提供的 2003-2009 七年间的全球 CO_2 浓度月平均数据,采样经纬网格大小为 0.5°×0.5°;AIRS 数据来自 NASA AIRS 网站(http://airs.jpl.nasa.gov/)发布的 2002 年 9 月至 2011 年 7 月期间的全球 2°×2.5°网格 CO_2 月平均数据;GOSAT 数据来自 NIES GOSAT 网站(https://data.gosat.nies.go.jp/)提供的 2009 年 4 月至 2011 年 6 月的 2.5°×2.5°网格全球 CO_2 月平均数据,该数据仅由短波红外波段获得,热红外波段反演产品尚在研究之中。

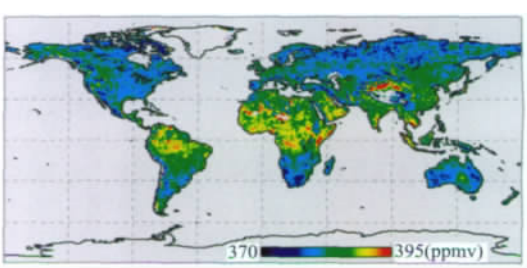

图 1　SCIAMACHY 反演获得的全球 CO_2 平均浓度分布图(2003 年 1 月-2009 年 12 月)

Fig. 1　The global average CO_2 concentration distribution map retrieved from SCIAMACHY from January 2003 to December 2009

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

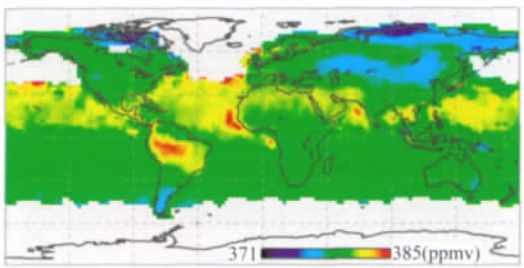

图 2 GOSAT 反演获得的全球 CO_2 平均浓度分布图
(2009 年 4 月-2011 年 6 月)

Fig. 2 The global average CO_2 concentration distribution map retrieved from GOSAT from April 2009 to June 2011

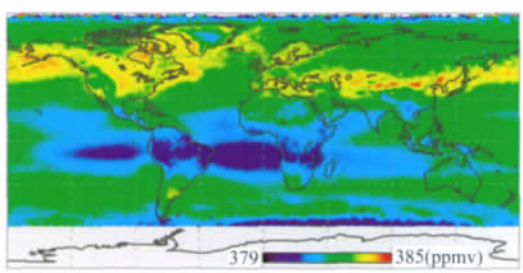

图 3 AIRS 反演获得的全球 CO_2 平均浓度分布图
(2002 年 9 月-2011 年 7 月)

Fig. 3 The global average CO_2 concentration distribution map retrieved from AIRS from September 2002 to July 2011

对 3 种卫星平台观测期间的全球 CO_2 平均浓度分布可视化显示如图 1-3 所示，图 1 中的 SCIAMACHY 数据覆盖范围局限于陆地，缺乏海洋上空 CO_2 的探测能力；图 2 中的 GOSAT 数据覆盖范围相比 SCIAMACHY 增加了 40°S～40°N 纬度范围内的海洋与部分近陆海域；而图 3 中的 AIRS 数据覆盖范围则有了很大提高，除 60°S 以南与北极点附近区域外，AIRS 监测范围覆盖了全球绝大部分地区。

图 1-3 均是多年的月数据平均后的结果，如果从单月份来看，如表2所示，SCIAMACHY数据产品的单月份全球覆盖率仅在 8%～20%之间；GOSAT 提高到了 32%～44%；而 AIRS 达到了 90%左右的稳定的单月全球覆盖率，相比前 2 种卫星数据优势明显。

表 2 三种卫星数据产品单月份覆盖能力的对比

Tab. 2 Comparison of monthly coverage ability of the three satellite products

卫星产品	单月全球覆盖率(%)	覆盖范围内每网格月平均观测数	网格内标准差 (ppmv)	网格大小
SCIAMACHY	8～20	5～10	1.3～1.7	0.5°×0.5°
GOSATS WIR	32～44	80～200	1.9～2.5	2.5°×2.5°
AIRS	86～93	20～50	2.9～3.7	2°×2.5°

AIRS 拥有前 2 种卫星无法比拟的高全球覆盖率的优势，其原因主要有：(1)在产品处理过程中，AIRS 为了达到更高的覆盖范围，牺牲了一定的精度。如 GOSAT 与 AIRS 产品处理过程中的观测数阈值设置方面存在差异，GOSAT 仅观测数≥20 时才录用，而后者观测数≥1 即可。这也是源于两者用途方面的差异：AIRS 偏重对大气各种组分的测量，CO_2 只作为其研究产品；而 GOAST 更偏重于对 CO_2 浓度的精确测量。(2) AIRS 使用的热红外波段敏感通道，相比前者使用的近红外波段，受到云和气溶胶的影响更小，且对较稳定的中层大气 CO_2 更为敏感，相比对近地面 CO_2 浓度变化敏感的近红外波段[12]，空间变化幅度较小。(3)热红外波段对海洋上空 CO_2 的探测能力要优于近红外波段：由于海水近红外波段的强吸收特性，海洋区域的太阳反射率很低，导致 CO_2 探测能力下降；而热红外波段所受影响相对较小，使得 AIRS 相比另外 2 种卫星平台拥有更强的海洋上空大气 CO_2 探测能力。

3.2 卫星数据的地基验证

地基验证实验中使用的地面观测数据来自于全球大气观测系统(GAW)的世界温室气体数据中心(WDCGG)。GAW 经过十多年发展，已形成目前全球最大、功能最全的大气本底观测网，由 65 个国家的 200 多个本底站组成。

表 3 地面观测站点

Tab. 3 Summary of sites used for research

站点名	站点 ID	纬度 (°)	经度 (°)	海拔 (m)	说明
Izana (Tenerife)	IZO	28.30	−16.50	2 367	特纳利夫火山岛，大西洋
Manua Loa	MLO	19.54	−155.58	3 397	莫纳罗亚火山岛，热带太平洋
Niwot Ridge (T-Van)	NWR	40.05	−105.59	3 523	落基山脉，美国科罗拉多州
Tierra del Fuego	TDF	−54.87	−68.48	20	火地岛，南美洲南端
Mt. Waliguan	WLG	36.28	100.90	3810	瓦里关山，青藏高原东北坡

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从 WDCGG 全球站点中选择 5 个具有代表性的本底观测站点,它们的地理位置分布覆盖南北半球、高低海拔、内陆与海岛等各种类型,它们的本底浓度能够较全面地反映全球 CO_2 浓度变化,从而更好地验证卫星产品的定量精度。各观测站点可能有多种传感器多种测量方法的数据,为了去除不同类型数据差异的干扰,本节中均使用 NOAA/ESRL 传感器 Flask 采样方法获得的数据。各站点具体信息如表 3 所示,其中,站点 ID 是指 GAW 站点的标准代码,为方便起见,下面涉及站点名的地方都用站点 ID 表示。

将上述 5 个本底观测站点月平均 CO_2 浓度数据与 SCIAMACHY、GOSAT 进行对比,如图 4 所示。其中,闭合符号代表 2009 年 4 月到 2011 年 6 月的 GOSAT 数据,开放符号代表 SCIAMACHY 数据,时间范围从 2003 年 1 月到 2009 年 12 月,SCIAMACHY 的 MLO 站数据由于位于覆盖范围之外将不参与比较。表 4、表 5 中分别列出了上述时间段内 SCIAMACHY 和 GOSAT 卫星数据与本底观测数据的共同观测月数、年均增长率、均值差、月均标准差、相关系数等。其中,共同观测月数代表上述时间序列内卫星与本底有效观测的重叠月数,该值越大代表实验样本越多,实验结果更具可信度。

从图 4 中可以看出,2 种卫星数据点的分布差异,SCIAMACHY 数据点分布范围较大,其中,2 个内陆站点(NWR、WLG)数据点整体位于等值线下方相距约2ppmv截距的平行线附近,匹配效果较好;但 2 个近陆海岛站点(IZO、TDF)数据点多位于等值线下方较远处且极为分散,匹配效果很差。这说明 SCIAMACHY 数据在内陆地区较好地反演结果,虽系统性的略高于本底数据,但差值低于2ppmv;近海地区则效果较差,系统误差较大。表 4 中的均值差数据也能说明上述结论,除位于南半球高纬度地区的 TDF 站外,其他站点的月均标准差与相关系数均在 4ppmv 与 0.8 附近,这表明 SCIAMACHY 数据在北半球地区精度与相关性较高,约 4ppmv 的平均误差(1%)与 O. Schneising 等[4]的研究一致。

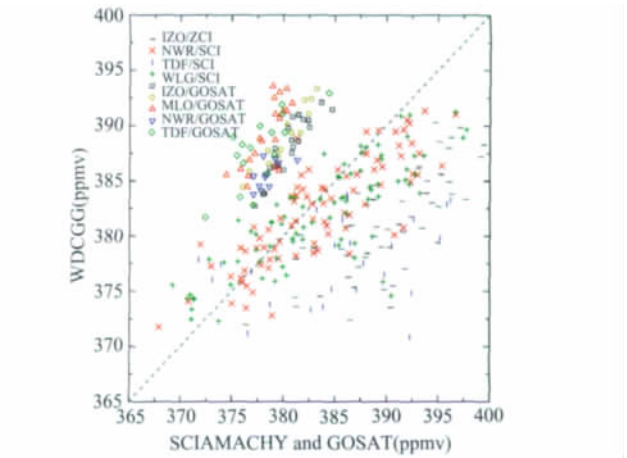

图 4　本底观测站点月平均 CO_2 浓度与 SCIAMACHY、GOSAT 观测数据对比

Fig. 4　Comparison of CO_2 concentration retrieved from SCIAMACHY and GOSAT with ground-based observations

表 4　本底观测站点月平均 CO_2 浓度与 SCIAMACHY 数据对比

Tab. 4　Comparison of CO_2 concentration retrieved from SCIAMACHY with ground-based observation

站点 ID	共同观测月数	年增长率(ppmv/a)		均值(ppmv)		均值差(ppmv)	月标准差(ppmv)	相关系数
		卫星	地面	卫星	地面			
IZO	58	2.057	2.256	391.684	381.577	10.107	4.583	0.753
NWR	84	1.752	1.850	383.947	382.256	1.691	3.887	0.820
TDF	26	2.017	2.000	384.578	377.687	6.891	7.491	0.394
WLG	84	1.580	1.771	383.946	382.097	1.849	4.712	0.793

而图 4 中的 GOSAT 数据点位于等值线上方相距约 9ppmv 截距的平行线附近,与 SCIAMACHY 数据点分布区域基本不重叠,表明 GOSAT 数据系统性的低于本底数据,且存在近 9ppmv 的差值,与 SCIAMACHY 数据差异较大。表 5 中各站点−7～−11ppmv 的均值差,也同样说明了这点。同时各站点的月均标准差与相关系数在 1.5ppmv 与 0.8 附近,其中,位于海岛上的 IZO 与 MLO 站匹配效果最好,相比 SCIAMACHY 有了较大提升。这说明 GOSAT 数据相比 SCIAMACHY 在全球范围内,特别是海洋与近海区域,数据的稳定性与相关性有了一定提高。

与前面类似,将 5 个本底观测站点月平均 CO_2 浓度数据与 AIRS 进行对比,如图 5 与表 6 所示,时间范围为 2002 年 9 月到 2011 年 7 月。图 5 中各数据点都分布在等值线附近,整体拟合线与等值线基

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

本重合，表 6 中显示的各站点均值差较小，绝对值不大于 2ppmv，与前两种卫星数据较大的系统误差相比，AIRS 数据系统误差很小。同时月标准差都在 2ppmv 附近，略微高于 GOSAT，但平均大于 0.9 的相关系数相比 GOSAT 有了较大提升，AIRS 数据约 2ppmv 的平均误差（0.5%）与 E. S. Maddy 等[13]的研究结论一致。

表 5 本底观测站点月平均 CO_2 浓度与 GOSAT 数据对比

Tab. 5 Comparison of CO_2 concentration retrieved from GOSAT with ground-based observations

站点 ID	共同观测月数	年增长率(ppmv/a)		均值(ppmv)		均值差(ppmv)	月标准差(ppmv)	相关系数
		卫星	地面	卫星	地面			
IZO	20	1.074	1.759	380.566	388.109	−7.543	1.254	0.900
MLO	13	0.974	1.153	380.177	389.029	−8.852	0.895	0.953
NWR	20	2.059	2.026	378.423	389.115	−10.692	2.091	0.738
TDF	11	2.021	2.014	378.441	385.552	−7.111	1.076	0.618
WLG	16	2.899	3.429	377.705	387.783	−10.078	2.202	0.733

表 6 本底观测站点月平均 CO_2 浓度与 AIRS 数据对比

Tab. 6 Comparison of CO_2 concentration retrieved from AIRS with ground-based observations

站点 ID	共同观测月数	年增长率(ppmv/a)		均值(ppmv)		均值差(ppmv)	月标准差(ppmv)	相关系数
		卫星	地面	卫星	地面			
IZO	100	2.159	2.114	381.672	381.604	0.067	1.690	0.956
MLO	100	2.149	1.986	380.967	382.290	−1.324	1.600	0.955
NWR	100	2.175	1.968	382.086	382.893	−0.807	2.650	0.884
TDF	94	2.127	1.967	381.126	379.499	1.628	1.977	0.935
WLG	100	2.127	1.913	381.997	382.658	−0.661	2.562	0.893

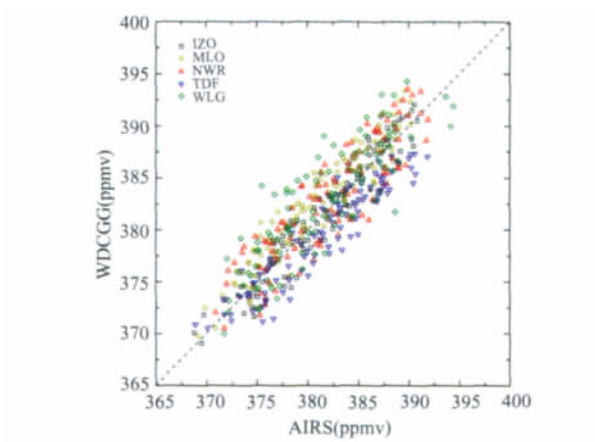

图 5 本底观测站点月平均 CO_2 浓度与 AIRS 数据对比

Fig. 5 Comparison of CO_2 concentration retrieved from AIRS with ground-based observations

综合以上分析，3 种 CO_2 卫星产品在覆盖范围方面的差异：SCIAMACHY 各项评价指标相对较差，且范围局限性较大，全球 CO_2 监测能力较弱；GOSAT 具有观测数目多、数据稳定性高等优势，但较大的系统误差是其最大的不足；而 AIRS 作为观测时间最长且依然在轨的卫星传感器，已经获得了最近 9 年的全球 CO_2 浓度数据，相比前两者具有覆盖范围大、系统误差小、测量精度高等优势，与本底观测数据匹配效果较好，能够更好地反映全球大气 CO_2 浓度分布特征与变化规律，因此，下一节中将采用 AIRS 数据与本底观测数据一起对全球 CO_2 的时空特征进行分析。

4 CO_2 的时空特征分析

4.1 CO_2 空间分布特征

图 3 中显示了 AIRS 反演的 2002 年 9 月至 2011 年 7 月之间的全球平均 CO_2 浓度分布，可以发现以下规律：(1)北半球 CO_2 浓度明显高于南半球，南北半球之间存在约 3～4ppmv 的平均浓度差异，表明近几十年来，大气 CO_2 浓度的增加可能主要源于北半球的人类活动[14]。(2)同纬度的陆地上空 CO_2 浓度明显高于海洋，说明人为活动与地表类型对 CO_2 浓度的影响。(3)CO_2 浓度分布存在着明显的高值与低值带。30°～60°N 范围内特别是中国北部、日本、美国中部、加拿大东部沿线上存在着一条明显的高值带，该区域人类活动频繁，人为 CO_2 排放

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较多;而 30°～60°S 范围内特别是太平洋东部、亚马逊流域、大西洋中部、非洲中部沿线则存在着一条明显的低值带,这与该区域人类活动较少、植被覆盖率高有密切关系。同时大气环流造成的 CO_2 长距离输送也对高低值带的形成有很大影响[15]。(4)AIRS 反演得到的近九年全球 CO_2 平均浓度为 382.238ppmv。

将 AIRS 获得的 2002 年 9 月至 2011 年 7 月之间的全球 CO_2 年均增长率与季节波动指数分别进行可视化显示,如图 6 与图 7 所示。其中,季节波动指数是指测量值与线性拟合值的差值在时间序列内的标准差,数值越大,代表季节波动幅度越大。从图 6 可以看出,全球范围内 CO_2 浓度年增长率的低值区多位于 30°S～30°N 范围内,青藏高原是中国地区的低值区,各低值区的年平均增长率低于 2ppmv/a;北半球高纬度地区则是全球年增长率的高值区,特别是西伯利亚地区的年增长率高于 2.4ppmv/a。北半球高纬度地区的冻土层是巨大的土壤碳库,随着全球变暖,尤其是冬季增温和冻土层的融化,使得土壤中存储的有机碳通过土壤呼吸作用大量释放[16-17],从而导致这些地区的 CO_2 年增长率偏高,甚至高于

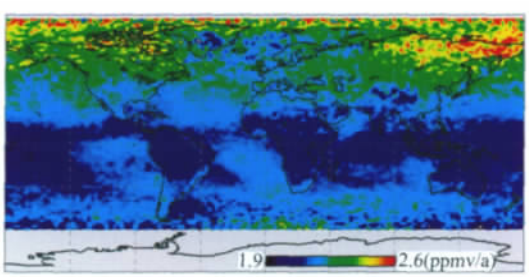

图 6　AIRS 反演获得的全球 CO_2 年增长率分布图
(2002 年 9 月-2011 年 7 月)

Fig. 6　The global CO_2 annual growth rate distribution map retrieved from AIRS from September 2002 to July 2011

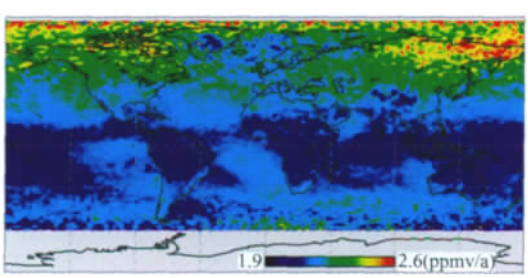

图 7　AIRS 反演获得的全球 CO_2 季节波动分布图
(2002 年 9 月-2011 年 7 月)

Fig. 7　The global CO_2 seasonal fluctuations distribution map retrieved from AIRS from September 2002 to July 2011

中纬度人类活动密集的地区。这也说明了高纬度冻土层与土壤呼吸作用在碳源汇中的重要地位。

从图 7 可以看出,全球 CO_2 的季节波动呈现更加明显的纬度分布规律,30°～0°S 范围内的海洋区域是 CO_2 季节波动的极低值地区,随着纬度的增加,季节波动幅度逐渐增加。高纬度地区不同季节的温度、地表覆盖类型变化较大,从而加剧了 CO_2 的季节波动,北半球高纬度地区是全球 CO_2 季节波动的高值区,这与前面提及的该地区冬季冻土层融化及有机碳的大量释放有很大关系。图中显示的青藏高原地区季节波动明显高于同纬度地区,除受高海拔与特殊植被覆盖类型影响较大外,还可能与 AIRS 数据在高海拔地区的有效观测数目少,观测误差大有关。同时陆地的季节波动略高于同纬度的海洋地区,这是由于陆地地表的复杂性与人类活动的干扰造成的。

4.2　CO_2 季节变化规律

大气 CO_2 浓度变化呈现出明显的季节变化特征,图 8 与图 9 中显示了 WLG 与 IZO 站的本底观测数据与 AIRS 数据时间序列的对比结果。图中代表 Flask 与 Continues 两种不同地基测量方法的数据点非常接近,说明了两种方法具有较好的相关性,两者可互为质量控制的依据。由于 AIRS 数据是较大范围内的平均,因而波动幅度相对较小,但变化趋势与本底观测数据基本一致。

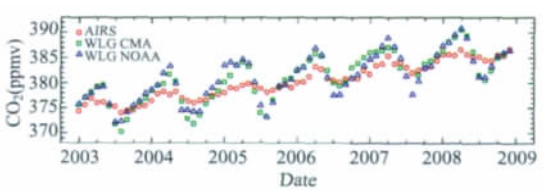

图 8　瓦里关站(WLG)本底观测结果与 AIRS 数据时间序列对比

Fig. 8　Comparison of CO_2 concentration retrieved from AIRS with surface observations from Mt. Waliguan(WLG)

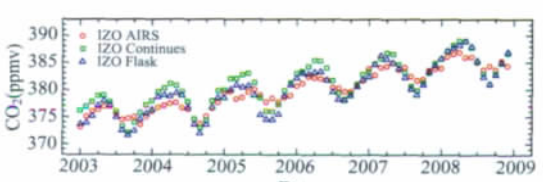

图 9　Izana 站(IZO)本底观测结果与 AIRS 数据时间序列对比

Fig. 9　Comparison of CO_2 concentration retrieved from AIRS with surface observations from Izana (IZO)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图 8 与图 9 可以看出，CO_2 浓度呈现明显的季节性周期变化。平均而言，北半球每年月平均浓度最高值多出现在 4 月份，最低值则常出现在每年 8 月份。大气 CO_2 浓度的季节变化主要受陆地生态系统吸收和排放 CO_2 的影响，同时海洋吸收，以及某些人类活动（如冬季取暖等）也会影响这种季节变化[15,18]。在夏秋季节，植物枝叶茂盛，光合作用强烈，导致大气中 CO_2 浓度下降，至 8 月左右降到最低；而冬春季节植物枯萎，光合作用弱，加上冬季供暖，导致 CO_2 浓度一直维持在较高水平，在 4 月左右达最高值。

5 结论

本文通过对 AIRS、SCIAMACHY、GOSAT 等卫星遥感 CO_2 产品进行可视化对比分析，并将它们与本底观测数据进行全球范围的长时间序列的对比验证，最后利用上述数据对 CO_2 的时空特征进行分析与总结，可以得到如下结论：

（1）SCIAMACHY、GOSAT、AIRS 等 CO_2 卫星遥感产品中，SCIAMACHY 各项评价指标相对较差，且观测范围局限性较大；GOSAT 数据具有一定的优势，但较大的系统误差是其最大的不足；AIRS 数据产品相比前两者在覆盖范围与测量精度方面优势突出，与本底观测数据匹配效果较好，能够较好地反映全球大气 CO_2 浓度分布特征与变化规律。

（2）近红外波段特别是 1.6μm 与 2.0μm 附近的 CO_2 吸收带，是目前研究使用最多的敏感波段，SCIAMACHY、GOSAT 等采用近红外波段获得了全球的 CO_2 数据产品。但 AIRS 数据产品的突出优势说明了热红外波段拥有较强的海洋探测能力、对中层大气敏感等许多近红外波段不具备的优势，利用两者进行 CO_2 浓度联合反演将是未来研究发展的方向。

（3）全球 CO_2 浓度、年增长率、季节波动等特征呈现出明显的纬度分布规律与海陆分布规律。AIRS 获得的 9 年来全球平均 CO_2 浓度与年平均增长率分别为 382.238ppmv 和 2.198ppmv/a，相比 IPCC2007 年发布的数据[1]有所增加，CO_2 浓度的持续升高将对全球气候变化产生重大影响。

（4）受陆地生态系统和人为活动影响，CO_2 浓度呈现明显的季节性周期变化，北半球一年中月平均浓度最高值多出现在 4 月份，最低值则出现在每年的 8 月份。

参考文献：

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007-Synthesis report[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

[2] BousquetP, Peylin P, Ciais P, *et al*. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980[J]. Science, 2000, 290(5495): 1342-1346.

[3] 程洁，柳钦火，李小文. 星载高光谱红外传感器反演大气痕量气体综述[J]. 遥感信息，2007(2)：90-97.

[4] 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(6): 2863-2880.

[5] Fan S, Gloor M, Mahlman J, *et al*. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and Oceanic Carbon Dioxide Data and Models [J]. Science, 1998, 282(5388): 442-446.

[6] Bovensmann H, Burrows J, Buchwitz M, *et al*. SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2):127-150.

[7] Aumann H, Chahine M, Gautier C, *et al*. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science, Objectives, Data Products and Processing Systems [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2):253-264.

[8] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, *et al*. Global Concentrations of CO_2 and CH_4 Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results [J], SOLA, 2009, 5: 160-163.

[9] Crisp D, Johnson C. The Orbiting Carbon Observatory Mission [J]. Acta Astronautica, 2005, 56:193-197.

[10] 石广玉，戴铁，徐娜. 卫星遥感探测大气 CO_2 浓度研究最新进展[J]. 地球科学进展，2010，25(1)：7-13.

[11] McNally A, Watts P. A Cloud Detection Algorithm for High－Spectral－Resolution Infrared Sounders [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003, 129(595): 3411-3423.

[12] Christi M, Stephens G. Retrieving Profiles of Atmospheric in Clear Sky and in the Presence of Thin Cloud Using Spectroscopy from the Near and Thermal Infrared: A Preliminary Case Study [J]. Journal of geophysical research, 2004, 109(D4).

[13] Maddy E, Barnet C, Goldberg M, *et al*. CO_2 retrievals from the atmospheric infrared sounder: Methodology and validation[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D11).

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[14] Enting I, Pierman G, Heimenn M. Average global distribution of CO_2 [C]. // Heimenn M (eds.). The Global Carbon Cycle. New York: Springer Verlag, 1993.

[15] 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: 2953-2960.

[16] Zimov S, Davidov S, Voropaev Y, *et al*. Siberian CO_2 efflux in winter as a CO_2 source and cause of seasonality in atmospheric CO_2 [J]. Climatic Change, 1996, 33: 111-120.

[17] Schaefer K, Tinglun Z, Bruhwiler L, *et al*. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming[J]. Tellus, 2011(2), 63: 165-180.

[18] Tiwari Y, Gloor M, Engelen R, *et al*. Comparing CO_2 retrieved from atmospheric infrared sounder with model predictions: Implications for constraining surface fluxes and lower-to-upper troposphere transport[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D17).

Atmospheric Carbon Dioxide Satellite Remote Sensing Retrieval Accuracy Inspection and Spatio-temporal Characteristics Analysis

HE Qian[1,2,3], YU Tao[1,3]*, CHENG Tianhai[1,3], GU Xingfa[1,3], XIE Donghai[1,2,3] and WU Yu[1,2,3]

(1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing* 100101, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: Atmospheric concentration of carbon dioxide (CO_2), which is one of the most important anthropogenic greenhouse gases, has increased significantly since the beginning of the industrial revolution. It is expected that further increase of CO_2 will definitely result in a warmer climate with adverse consequences including rising sea levels and increasing extreme weather conditions. A reliable prediction requires an accurate understanding of the sources and sinks of the greenhouse gases. Compared to traditional methods based on ground-based observations, an approach that uses satellite remote sensing to detect atmospheric CO_2 concentration has many other advantages such as stability, continuity, large-scale, as well as easily getting global spatial and temporal distribution of CO_2. As the technology of satellite remote sensing is growing rapidly, a series of satellites, launched for detecting atmospheric CO_2 concentration, including SCIAMACHY, GOSAT and AIRS, have been collecting a large amount of global CO_2 concentration distribution data for many years. This paper gives analyses by comparing those satellite data among themselves in some parameter indexes and conducts validation by comparing those remote sensing data to the long-term global ground-based observation records. The results indicate that, among those three CO_2 satellite remote sensing products, the SCIAMACHY data is systemically slightly higher than ground-based observations and limited in coverage, the GOSAT data is predominant in stability but inferior in systematic errors which is nearly 9ppmv on average lower than ground-based data, and the AIRS data, which is better than the aforementioned two satellites in both coverage and accuracy, whose monthly global coverage is up to 90%, the average error is less than 2ppmv(0.5%) from the ground-based observations and the correlation coefficient is greater than 0.9, can be able to better reflect the global distributions of atmospheric CO_2 concentration. An investigation from satellite and ground-based observations shows that the global spatial distribution of CO_2 concentration represent significant latitude distribution and land-sea distribution, and there is a significant seasonal variation in CO_2 concentration that illustrates a peak most likely in April and a valley in August.

Key words: satellite remote sensing; accuracy inspection; carbon dioxide; AIRS; spatial-temporal characteristics

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net