

基于卫星平台的全球大气一氧化碳柱浓度反演 方法及结果分析*

刘诚^{1)†} 白文广¹⁾ 张鹏¹⁾ 孙友文²⁾ 司福祺²⁾

1) (中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

2) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

(2012年4月6日收到; 2012年9月6日收到修改稿)

温室效应是全球气候变化的主要原因之一, 除温室气体外, 有毒气体一氧化碳(CO)作为一种非直接温室气体加剧了这种变化. 由于地基观测台站数量有限, 而大气化学模型的模拟又很大程度上依赖于模型假定, 因此, 卫星观测成为实时获取大气CO浓度分布信息的有效途径. Sciamachy是第一台搭载在卫星上, 利用观测到的近红外波段太阳反射光谱反演大气一氧化碳的仪器. 由于在近红外波段, 大气散射效应可以忽略, 所以Sciamachy观测数据能够很好地反演与人类活动息息相关的大气底层一氧化碳的时空变化信息. 本文基于迭代最大后验概率算法, 对Sciamachy的观测数据进行反演分析, 同时应用云效应校正与仪器本身问题校正方法, 得到了全球一氧化碳柱浓度时空分布结果; 通过与Atsr全球火点数据的比较, 分析了全球CO排放源的种类与时空分布; 最后选取中国地区CO柱浓度分布图, 并结合人口密度与煤田/煤矿分布, 对其排放源进行了初步推断.

关键词: 卫星观测, 一氧化碳, 云效应, 排放源

PACS: 07.88.+y, 93.85.-q, 93.85.Pq, 95.85.Jq

DOI: 10.7498/aps.62.030704

1 引言

一氧化碳(CO)是一种重要的大气污染气体, 高浓度的CO会对人体健康造成严重伤害. 此外, 由于CO的主要汇之一为OH自由基, 而OH自由基又是最主要的两种温室气体CO₂, CH₄的主要汇, CO的含量间接影响到温室气体CO₂, CH₄等在大气中的浓度分布和变化, 有资料显示, 每排放100 Tg的CO, 其造成的全球变暖潜能(global warming potential, GWP)与排放5Tg的CH₄等价, 所以CO也被称作间接温室气体, 对全球气候变暖产生重要影响^[1-5]. 由于地基观测台站数量有限, 大气化学模型的模拟又很大程度上依赖于模型假定, 因此, 卫星观测成为实时获取大气CO浓度分布信息的有效途径.

搭载在ENVISAT卫星上的Sciamachy是目前唯一采用近红外波段观测大气温室气体(CO₂, CH₄, CO)的高光谱传感器^[6-7]. 与其他热红外

卫星传感器如AIRS, MOPITT, IASI等相比, 由于Sciamachy观测的是近红外波段的地表太阳反射光, 而非热红外波段的大气发射信号, 所以其对与人类活动密切相关的底层大气具有更高的敏感性^[8]. 利用Sciamachy测量值可以有效地反演近地面的CO浓度信息, 对人类活动的CO监测具有非常重要的意义.

然而, 无论从光谱学的角度, 如: 近红外波段的CO吸收信号较弱, 且存在很强的CH₄和H₂O重叠吸收干扰^[8,9], 还是从目前Sciamachy仪器本身问题的角度, 如: 近红外波段探测器的结冰现象, 仪器线性度和探测器暗电流的漂移等^[10], 都会给CO的浓度反演带来很大挑战. 本文基于迭代最大后验概率-差分光学吸收光谱法^[11,12], 对Sciamachy的观测数据进行反演分析, 获得了初步的CO柱浓度结果, 并在此基础上, 校正了仪器本身问题及云效应对反演结果造成的影响^[13], 最后得到了长期的全球一氧化碳柱浓度(CO VCD)时空分布结果.

* 国家自然科学基金(批准号: 41105011)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liucheng2@cma.gov.cn

2 Sciamachy 仪器及数据处理

2.1 Sciamachy 仪器介绍

Sciamachy 搭载于 2002 年发射的欧洲环境卫星 ENVISAT 上, 主要利用太阳的透射、反射、散射光进行观测, 可以采用天低、临边和掩星方式进行观测 [6,7]. 其分为 8 个分光通道覆盖紫外到近红外的波段区间 (240—2400 nm), 光谱分辨率为 0.2—1.2 nm. 本文主要针对 Sciamachy 天低观测方式, 空间分辨率为 30 km (沿轨) × 120 km (穿轨), 赤道附近的全球覆盖周期为 6 d, 有关 Sciamachy 的更详细信息见文献 [6—8].

2.2 CO 反演算法

目前大气痕量气体的反演方法主要采用基于朗伯比尔定律 (Lambert-Beer' law) 的差分光学吸收光谱法, 其基本假设是目标成分的吸收截面不随温度、压强变化,

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp\left(-\int \sigma(\nu, p, T) c(s) ds\right) \approx I_0(\nu) \exp\left(-\sigma(\nu, p, T) \int c(s) ds\right), \quad (1)$$

其中, $I(\nu)$ 为卫星接收到的波长 ν 处的光强; $I_0(\nu)$ 为太阳发射光在波长 ν 处的光强; $\sigma(\nu, p, T)$ 为待反演气体在波长 ν , 气压 p , 温度 T 状况下的吸收截面; $c(s)$ 为待反演气体在光路 s 处的浓度.

而事实上, 在近红外波段, 气体吸收截面有很强的温度、压强依赖特性, 并且随波长的变化发生很大变化. 因此, 经典差分吸收光谱算法在该波段的反演会引入较大的误差. 本文采用的 CO 反演算法 — 最大后验概率吸收光谱算法是对经典差分吸收光谱算法的改进, 该算法考虑了大气温度、压强廓线变化的敏感性以及由于光谱解析能力有限造成的非线性吸收问题, 避免了干扰成分的强吸收影响. 最大后验概率差分吸收光谱算法的基本原理是通过目标成分光学厚度直接迭代, 最终实现模拟差分光学厚度与观测光谱的拟合 [12—14], 如 (2) 式所示.

$$y = F(x_0) + \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right|_{x_0} \cdot (x - x_0) + \varepsilon, \quad (2)$$

$$K_0 = \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right|_{x_0},$$

$$x_{i+1} = x_a + (K_i^T S_\varepsilon^{-1} K_i + S_a^{-1})^{-1} K_i^T S_\varepsilon^{-1} \times [y - F(x_i) + K_i(x_i - x_a)],$$

式中, $F(x_0)$ 为反演模型 $F(x)$ 在大气状态向量 x_0 下的大气光学厚度模拟值, y 为卫星实际观测的大气光学厚度模拟值, x_a 为大气先验状态向量, x_i 为第 i 次反演出的大气状态向量, S_ε 为反演误差协方差矩阵, S_a 为先验协方差矩阵, $F(x_i)$ 为反演模型 $F(x)$ 在大气状态向量 x_i 下的大气光学厚度模拟值, K_i 为反演模型在大气状态向量 x_0 处的雅可比矩阵.

有关最大后验概率差分吸收光谱算法的详细介绍见文献 [12]. 考虑到仪器响应随波长增大而减弱, 本文选用 2324—2335 nm 作为 CO 的反演波段. 图 1 为实际的 CO 光谱反演例子, 模拟光学厚度与观测光学厚度实现了很好的拟合, 拟合偏差小于 5%.

3 卫星数据反演结果与分析

在获得初步的 CO 柱浓度反演结果后, 文本采用 Liu 等的校正方法 [13], 对 Sciamachy 卫星传感器仪器本身问题以及云效应进行了校正, 最后得到了全球一氧化碳柱浓度时空分布结果, 如图 2 所示.

在全球 CO 柱浓度的年变化图中, 可以发现两点规律: 第一, 南半球的 CO 含量比北半球低, 并随纬度增加而升高; 第二, 全球主要 CO 排放源分布在南美洲北部、非洲中部与亚洲东南部 [14—17]. 其中南美洲、非洲与亚洲南部 CO 含量的年变化比较明显, 而亚洲东部的 CO 含量年变化较低. 考虑到 CO 的主要排放源 (动植物的生物燃烧和人类活动的工业排放) 具有不同的时空变化性, 本文计算出了 2003—2005 年间不同季节的全球 CO 柱浓度分布, 如图 3 所示.

全球 CO 柱浓度的季节变化图 (图 3) 显示, 非洲中部的 CO 峰值出现在 1—3 月与 7—9 月, 南美洲北部的 CO 峰值出现在 7—12 月, 亚洲南部的 CO 峰值出现在 1—6 月. 结合全球 2003—2005 年间的火点 (fire counts) 分布图 (图 4) 不难发现, 在这些区域 CO 峰值出现的时间内, 也伴随较高的火点密度, 两者的时空变化性符合良好, 因此推断出, 这些区域高浓度的 CO 排放主要来自于动植物的生物燃烧. 与之相反, 亚洲东部的 CO 含量的季节变化性较低, 且与其主要的汇 — 大气 OH 自由基 (OH 自由基夏季含量高, 冬季含量低) 含量密切相关, 因此初步推断其排放源主要为人类的工业生产排放 [18—20]. 但同时从图 4 还可看出, 在亚洲东部, 也长期存在少量的火点.

图 5 中就不同区域 CO 含量的时间变化性与火点数目的时间变化性进行了对比.

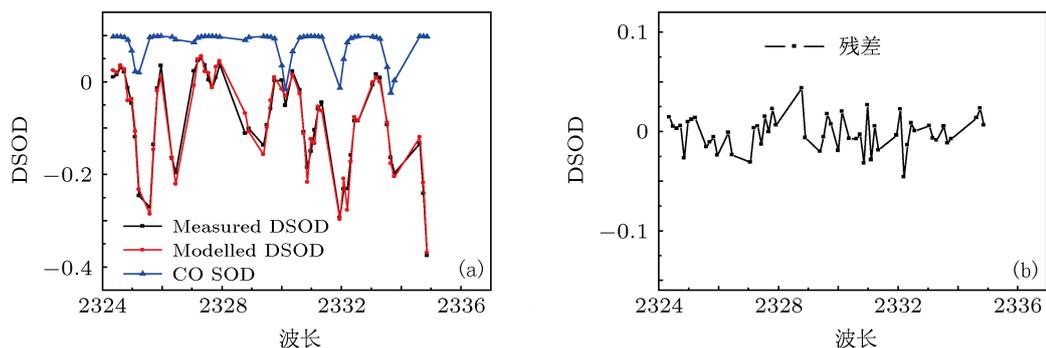


图1 基于 Sciamachy 观测的 CO 光谱反演实例 (a) 卫星观测的大气总光学厚度 (黑线) 与反演算法模拟的大气总光学厚度 (红线) 的比较, 其中蓝线是反演算法模拟的大气 CO 光学厚度; (b) 卫星观测光谱与反演算法模拟光谱的拟合残差

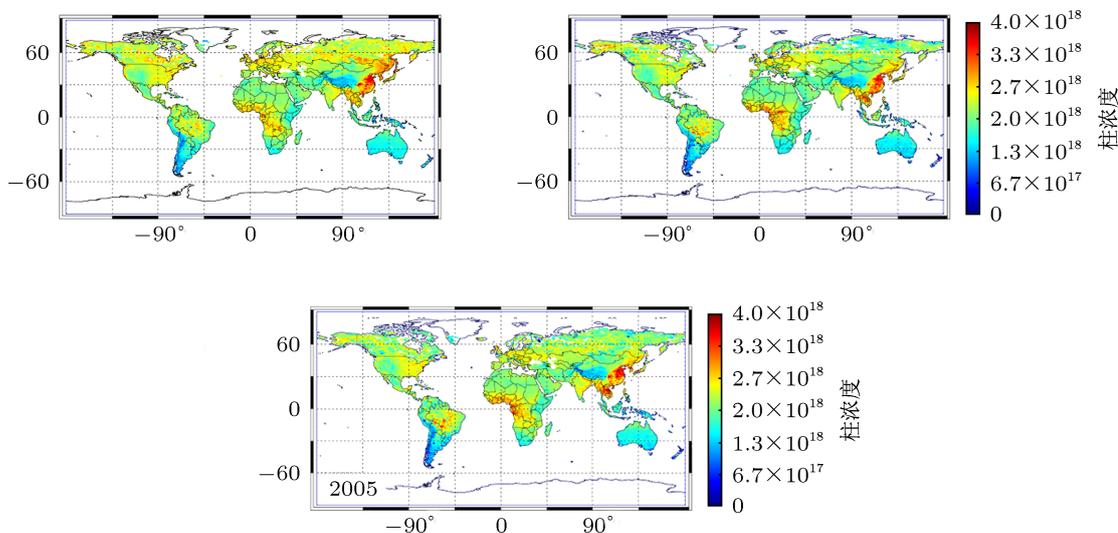


图2 全球大气 CO 柱浓度的年变化分布, 色柱单位为 molec/cm^2 , 均来自 Sciamachy 观测数据的反演结果

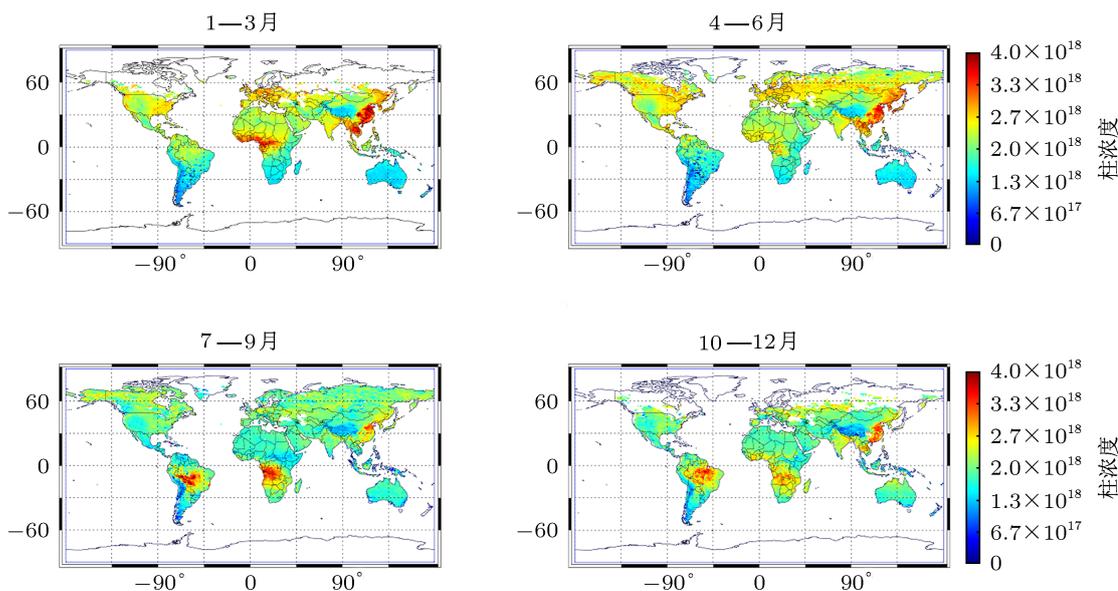


图3 全球大气 CO 柱浓度的季节变化分布, 色柱单位为 molec/cm^2 , 均来自 Sciamachy 观测数据的反演结果

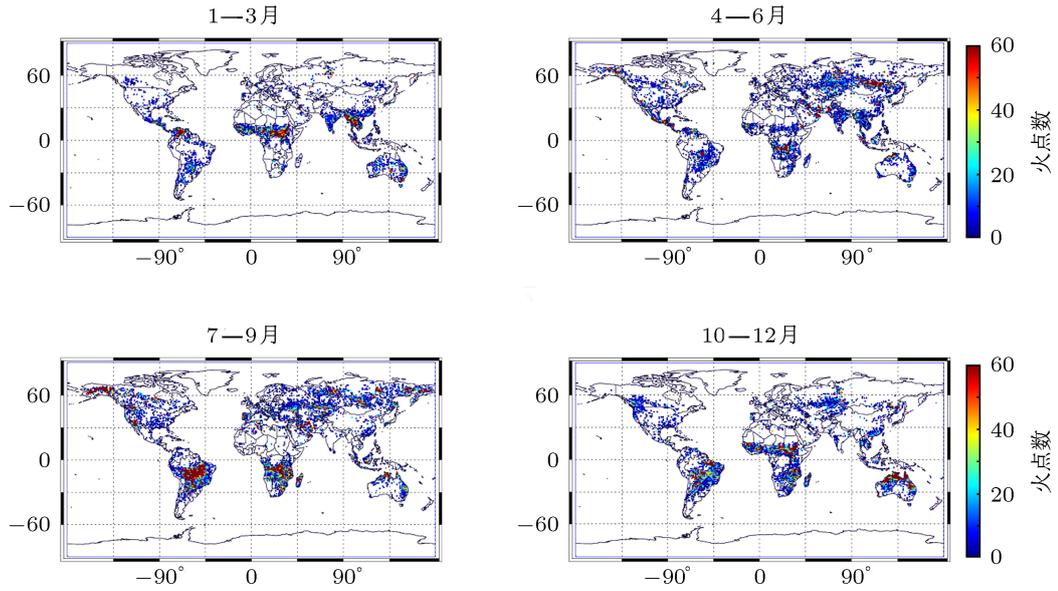


图4 全球火点分布季节变化, 数据来自搭载于 ERS-2 卫星上的 ATSR 传感器观测结果

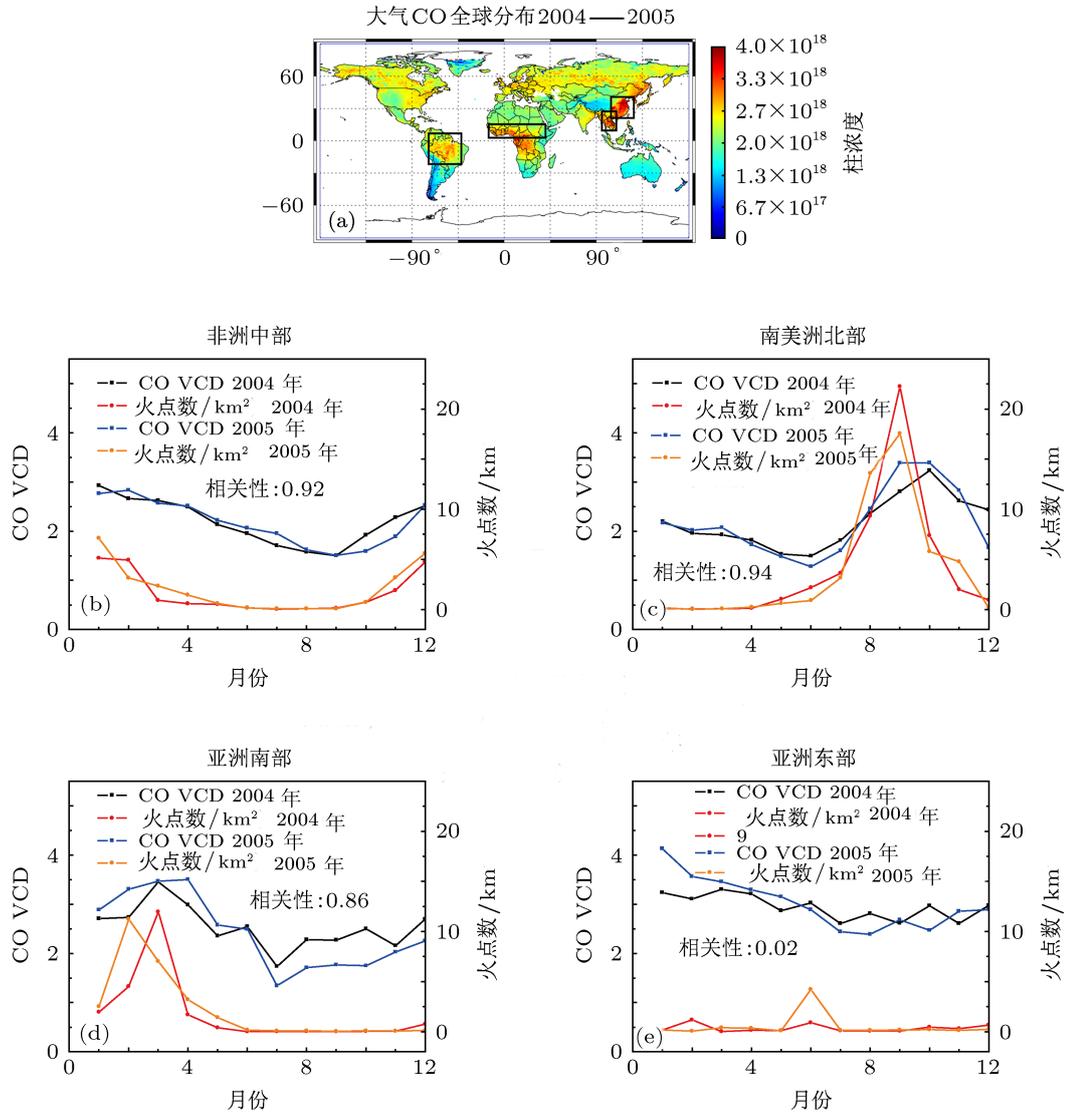


图5 2004 与 2005 年大气 CO 柱浓度与火灾点数目时间序列, CO 柱浓度单位: 10^{18} molec/cm², 火灾点数目单位: 10^{-4} (km²/日); (b)–(e) 选取的不同区域如 (a) 中的黑色方框所示

从图 5 中可以看出,在南美洲北部、非洲中部和亚洲南部这些生物燃烧区域,CO 含量与火点数目呈现很好的相关性.在火点数目较高的月份,大气中的 CO 含量也较高,并随火点数目的增加而增加.然而在亚洲东部,CO 含量与火点数目的相关性很低,由于与生物燃烧区域相比,亚洲东部的火点绝对数目很低,因此可以推断,这个区域的高浓度 CO 含量主要来自于人类工业活动的生产排放.

此外,我们还对中国地区的 CO 排放源进行了分析,图 6 为 2003—2005 年间中国地区的 CO 含量分布与人口密度、煤田/煤矿分布的比较图,图中还

标明了主要城市的位置.从图中可以发现卫星观测的 CO 含量分布与人口密度分布有较高的相关性,而与煤田/煤矿分布的相关性较差.由于 CO 的人为排放源主要来自工厂中碳的不完全燃烧,汽车尾气排放及煤矿开采的排放.所以初步推断,中国地区主要的 CO 排放来自与人类活动密切相关的工厂生产和汽车尾气排放^[21-23].考虑到本文中的煤田/煤矿分布图的精度局限性,并不能完全排除由煤田/煤矿产生的较低 CO 排放,在今后的研究中,将结合更多的地面资料对中国地区的碳排放源进行定量分析^[24-27].

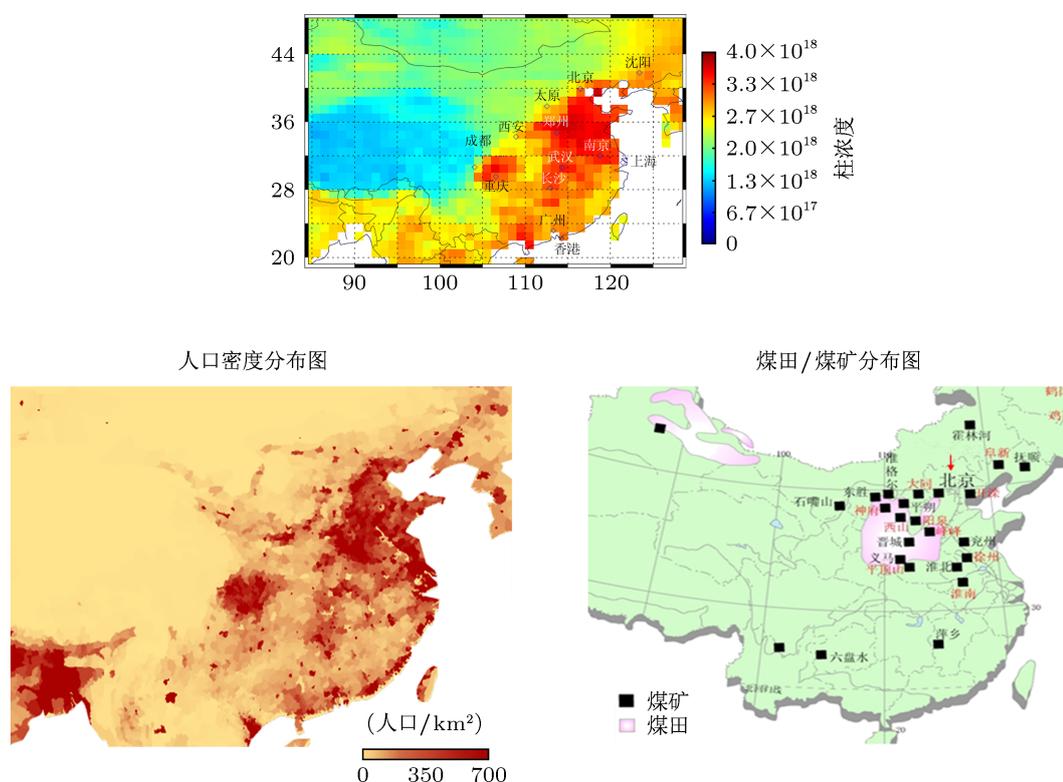


图 6 中国地区的 CO 柱浓度分布 (a) 与人口密度 (b), 煤田/煤矿 (c) 分布比较图 (人口密度分布图来自 <http://veimages.gsfc.nasa.gov/116/pop density. jpg>) (煤田/煤矿来自 <http://www.eku.cc/zxy/sctx/121261.htm>)

4 结论

本文基于迭代最大后验概率-差分吸收光谱算法,对 Sciamachy 的观测数据进行反演分析,同时应用云效应校正与仪器本身问题的校正方法,得到了全球一氧化碳柱浓度时空分布结果.研究分析发现,北半球 CO 含量要高于南半球,全球主要 CO 排放源位于南美洲北部、非洲中部与亚洲东南部.结合全球火点分布图发现,在南美洲北部、非洲中部与亚洲南部,CO 峰值出现的时间内,也伴随较高的火

点密度,推断出这些区域的高浓度 CO 排放主要来自自动植物的生物燃烧,具有明显的时空变化性;与生物燃烧区域相比,亚洲东部的火点绝对数目很低,其 CO 含量与其主要的汇——大气 OH 自由基含量相关,推断出这个区域的高浓度 CO 含量主要是由人类工业活动排放产生.

此外,本文还选取中国地区对 CO 含量与人口密度,煤田/煤矿的分布进行了比较,由于卫星观测的 CO 含量分布与人口密度分布有较高的相关性,而与煤田/煤矿分布的相关性较差,初步推断出中

国地区主要的 CO 排放来自于与人类活动密切相关的工厂生产和汽车尾气排放。考虑到本文中的煤田/煤矿分布图的精度局限性,并不能完全排除由煤

田/煤矿产生的较低 CO 排放,在今后的研究中,将结合更多的地面资料对中国地区的碳排放源进行定量分析。

- [1] Shine K P, Derwent R G, Wuebbles D J, Morcrette J J 1990 *The IPCC Scientific Assessment* (Cambridge, UK: Cambridge University Press), pp41-68
- [2] Fuglestedt J S, Isaksen I S A, Wang W C 1996 *Climatic Change* **34** 405 (Heidelberg Allemagne: Springer)
- [3] Prather M J 1996 *Geophys. Res. Lett.* **23** 2597
- [4] Isaksen I S A, Hov O 1987 *Tellus B* **39B** 271
- [5] Wild O, Prather M J 2000 *J. Geophys. Res. Atmos.* **105** 24647
- [6] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, Frerick J, Noel S, Rozanov V V, Chance K V, Goede A P H 1999 *J. Atmos. Sci.* **56** 127
- [7] Burrows J P, Holzle E, Goede A P H, Visser H, Fricke W 1995 *Acta Astronaut* **35** 445
- [8] Buchwitz M, Beek R, Bramstedt K, Noel S, Bovensmann H, Burrows J P 2004 *Atmos. Chem. Phys.* **4** 1945
- [9] Buchwitz M, Beek R, Noel S, Burrows J P, Bovensmann H, Bremer H, Bergamaschi P, Korner S, Heimann M 2005 *Atmos. Chem. Phys.* **5** 3313
- [10] Gloude-mans A M S, Krol M C, Meirink J F, Laar A T J, Werf G R, Schrijver H, Broek M M P, Aben I 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L16807
- [11] Krijger J M, Van W M, Aben I, Frey R 2007 *Atmos. Chem. Phys.* **7** 2881
- [12] Frankenberg C, Platt U, Wagner T 2005 *Atmos. Chem. Phys.* **5** 9
- [13] Liu C, Beirle S, Butler T, Liu J, Hoor P, Joeckel P, Penning M D V, Pozzer A, Frankenberg C, Lawrence M G, Lelieveld J, Platt U, Wagner T 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 6083
- [14] Rodgers C D 1976 *Rev. Geophys.* **14** 609
- [15] Perliski L M, Solomon S 1993 *J. Geophys. Res. Atmos.* **98** 10363
- [16] Wagner T, Burrows J P, Deutschmann T, Dix B, Friedeburg C, Frieß U, Hendrick F, Heue K P, Irie H, Iwabuchi H, Kanaya Y, Keller J, McLinden C A, Oetjen H, Palazzi E, Petritoli A, Platt U, Postylyakovo O, Pukite J, Richter A, van Roozendaal M, Rozanov A, Rozanov V, Sinreich R, Sanghavi S, Wittrock F 2007 *Atmos. Chem. Phys.* **7** 1809
- [17] Koelemeijer R B A, Stammes P, Hovenier J W, Haan J F 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 3475
- [18] Wang P, Stammes P, Van D A R, Pinardi G, Van R M 2008 *Atmos. Chem. Phys.* **8** 6565
- [19] Liu C 2010 *Ph. D Dissertation* (Heidelberg: University of Heidelberg)
- [20] Nakajima T, King M D 1990 *J. Atmos. Sci.* **47** 1878
- [21] Justice C O, Vermote E, Townshend J R G, Defries R, Roy D P, Hall D K, Salomonson V V, Privette J L, Riggs G, Strahler A, Lucht W, Myrneni R B, Knyazikhin Y, Running S W, Nemani R R, Wan Z M, Huete A R, Van L W, Wolfe R E, Giglio L, Muller J P, Lewis P, Barnsley M J 1998 *IEEE Trans. Geosci. Remote* **36** 1228
- [22] Eskes H J, Boersma K F 2003 *Atmos. Chem. Phys.* **3** 1285
- [23] Dils B, De Maziere M, Muller J F, Blumenstock T, Buchwitz M, de Beek R, Demoulin P, Duchatelet P, Fast H, Frankenberg C, Gloude-mans A, Griffith D, Jones N, Kerzenmacher T, Kramer I, Mahieu E, Mellqvist J, Mittermeier R L, Notholt J, Rinsland C P, Schrijver H, Smale D, Strandberg A, Straume A G, Stremme W, Strong K, Sus-smann R, Taylor J, van den Broek M, Velasco V, Wagner T, Warneke T, Wiacek A, Wood S 2006 *Atmos. Chem. Phys.* **6** 1953
- [24] Si F Q, Xie P H, Dou K, Zhan K, Liu Y, Xu J, Liu W Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2867 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, 窦科, 詹铠, 刘宇, 徐晋, 刘文清 2010 物理学报 **59** 2867]
- [25] Sun Y W, Liu W Q, Xie P H, Chen J L, Zeng Y, Xu J, Li A, Si F Q, Li X X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 140705 (in Chinese) [孙友文, 刘文清, 谢品华, 陈嘉乐, 曾议, 徐晋, 李昂, 司福祺, 李先欣 2012 物理学报 **61** 140705]
- [26] Sun Y W, Liu W Q, Wang S M, Huang S H, Zeng Y, Xie P H, Chen J, Wang Y P, Si F Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 140704 (in Chinese) [孙友文, 刘文清, 汪世美, 黄书华, 曾议, 谢品华, 陈军, 王亚萍, 司福祺 2012 物理学报 **61** 140704]
- [27] Zhang S N, Luo Z Y, Shen W D, Liu X, Zhang Y G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 14221 (in Chinese) [张淑娜, 罗震岳, 沈伟东, 刘旭, 章岳光 2011 物理学报 **60** 14221]

The inverse method of carbon monoxide from satellite measurement and the result analysis*

Liu Cheng^{1)†} Bai Wen-Guang¹⁾ Zhang Peng¹⁾ Sun You-Wen²⁾ Si Fu-Qi²⁾

1) (*Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

2) (*Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 6 April 2012; revised manuscript received 6 September 2012)

Abstract

Greenhouse effect is one of the main reasons for climate change. Carbon monoxide (CO) is a critical air pollutant because of its short-term harmful health effects. Furthermore, since CO emission has a global warming potential, it exacerbates the climate change as an indirect greenhouse gas. Due to the fact that the number of ground-based stations is less and the chemical model simulation is greatly dependent on assumption, satellite observation becomes the effective way to acquire the information about CO distribution. Sciamachy is the first satellite instrument to allow retrieval of CO by measuring absorption in the near infrared region from reflected and scattered sunlight, which is highly sensitive to the lower layers of the troposphere where the sources, such as biomass burning, are located, and where the bulk of the gases is usually found. In this study the Sciamachy CO vertical column density is successfully inverted; after applying the instrument and cloud correction, yearly and seasonal results are presented. Finally by comparing them with the fire counts of ATSR dataset and the distributions of population density and coal mines, the CO emission sources are preliminary deduced.

Keywords: satellite observation, CO, cloud effect, emission source

PACS: 07.88.+y, 93.85.-q, 93.85.Pq, 95.85.Jq

DOI: 10.7498/aps.62.030704

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41105011).

† Corresponding author. E-mail: liucheng2@cma.gov.cn