

拉曼激光雷达探测合肥西郊低对流层大气二氧化碳垂直分布的统计分析

孙培育^{1,2} 苑克娥^{1*} 胡顺星¹ 黄 见¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用拉曼激光雷达系统测量了合肥西郊低对流层(2 km 以下)大气二氧化碳浓度的垂直分布,并对获得的数据进行系统定标和滑动平均处理,反演出大气二氧化碳的垂直浓度廓线。对2014年7月到2015年12月激光雷达观测数据进行反演和统计分析,初步得到了合肥地区低对流层大气二氧化碳垂直浓度廓线的变化规律。结果表明:1)低对流层大气二氧化碳浓度垂直分布随高度增加而减小,在近地面150 m以下浓度较高,变化较剧烈,300 m以上大气二氧化碳的浓度廓线趋于平稳;2)低对流层大气二氧化碳垂直浓度廓线呈明显的季节性分布特征,夏季廓线的整体浓度最小,冬季廓线的整体浓度最大;3)低对流层大气二氧化碳垂直分布与月份有一定的相关性,整体廓线约以每年 2×10^{-6} 增长。通过实验发现,二氧化碳垂直浓度随着高度增加非单调递减,在大约300~700 m高度区间存在二氧化碳富集区,随着天空渐渐变亮,此区间大气二氧化碳浓度有减小的趋势。

关键词 大气光学; 拉曼激光雷达; 二氧化碳垂直廓线; 低对流层; 统计分析

中图分类号 X131.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1101001

Statistical Analysis of Lower-Troposphere CO₂ Vertical Distribution Measured by Raman Lidar in Hefei Western Suburb

Sun Peiyu^{1,2} Yuan Ke'e¹ Hu Shunxing¹ Huang Jian¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The vertical concentration distribution of lower-troposphere (2 km below) atmospheric CO₂ in Hefei western suburb is measured by Raman lidar system. By system calibration and moving average of the data, the vertical concentration profiles of atmospheric CO₂ are retrieved. Through statistical analysis of the retrieved results of lidar observation data from July 2014 to December 2015, the variation patterns of lower-troposphere atmospheric CO₂ vertical concentration distribution in Hefei western suburb are initially obtained. The results show that the CO₂ vertical concentration distribution of lower-troposphere decreases with the increase of altitude, the concentration is rather high and changes intensely under near-surface 150 m, but the concentration of atmospheric CO₂ above 300 m is getting stable. The lower-troposphere CO₂ vertical concentration distribution shows obvious connection with the season, with a minimum in summer and a maximum in winter. The lower-troposphere atmospheric CO₂ vertical distribution shows some correlation with the month, and the whole CO₂ vertical concentration goes up with a rate of about 2×10^{-6} per year. Through the experiments, it is found that the CO₂ vertical concentration shows a non-monotonical decrease with the altitude increase. There exists a CO₂-rich area from 300 m to 700 m, and the CO₂ concentration of this area decreases as the sky turns bright.

收稿日期: 2016-05-03; 收到修改稿日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(41575032, 41475001, 41505019)、中国科学院知识创新方向性项目(KJ CX2-EW-N07)

作者简介: 孙培育(1991—),男,博士研究生,主要从事激光雷达等方面的研究。E-mail: spy19910609@126.com

导师简介: 胡顺星(1966—),男,教授,研究员,博士生导师,主要从事激光大气探测等方面的研究。

E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: keyuan@aiofm.ac.cn

Key words atmospheric optics; Raman lidar; CO₂ vertical concentration profile; lower troposphere; statistical analysis

OCIS codes 010.3640; 010.1280; 010.1290; 010.0280

1 引 言

工业革命(1750年)以后,大气中的二氧化碳逐年增长。美国国家海洋大气总署地球系统研究实验室(NOAA/ESRL)公布的数据表明,过去10年大气中二氧化碳浓度(特指体积比,下同)每年平均增加 2×10^{-6} ,2016年1月和2月全球二氧化碳浓度月平均超过了象征性基准 400×10^{-6} ,其中2月二氧化碳浓度达到 402.59×10^{-6} [1]。大气二氧化碳浓度每增加1倍,地球表面的大气温度升高 $1.5 \sim 4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ [2]。二氧化碳浓度的增加会使温室效应增强,导致全球变暖,使大气、海洋环流规律发生变化,加剧“厄尔尼诺”、“玛尼娜”现象,导致大面积旱涝灾害频繁发生。

目前全球对大气二氧化碳空间分布的测量还处于起步阶段,主要为地面和高塔探测,依赖分布在世界不同地区的联合采样监测网进行观测。卫星观测虽然范围大,实时性好,且星载激光雷达也是未来发展趋势,但反演精度不够,中国科学院安徽光学精密机械研究所韦秋叶等[3-4]利用空间外差技术提高了探测精度。地基激光雷达作为一种主动遥感技术,具有较高的时空分辨率,广泛应用于大气二氧化碳的监测[5]。探测大气二氧化碳时空分布的激光雷达主要有差分吸收激光雷达与拉曼散射激光雷达。差分吸收激光雷达对激光发射波长要求苛刻,准确度较高,但结构复杂,造价昂贵;拉曼激光雷达结构则相对简单,设备经济性好。曾报道利用拉曼激光雷达探测大气二氧化碳浓度的是美国国家航空和宇宙航行局的报告中的Atmospheric CO₂ Profiling Using Raman Lidar的研究课题,由Whiteman博士负责,起始时间为2004年[6]。该报告给出了部分探测结果,没有详细介绍具体雷达系统。中国科学院安徽光学精密机械研究所洪光烈等[7]提出了利用拉曼激光雷达探测大气二氧化碳的具体方法,初步研制出了探测二氧化碳浓度的拉曼激光雷达系统,得到了拉曼雷达回波原始信号,并对系统进行了初步分析。赵曰峰等[8-9]和赵培涛等[10-11]进一步改善了拉曼激光雷达系统,增强了该拉曼雷达系统的系统化测量和系统参数标定。中国科学院安徽光学精密机械研究所于2010年12月成功研制出我国首台具有自主知识产权的测量低对流层大气二氧化碳时空分布的拉曼激光雷达系统(ARL-1)。与定点的二氧化碳分析仪相比,该拉曼激光雷达最大的优势为扩大了大气二氧化碳的检测范围,得到了大气二氧化碳在整个路径上的浓度廓线,中国科学院安徽光学精密机械研究所苑克娥等[12]证实了此系统的可靠性,本文不再进行验证。本文在此方法的基础上利用二氧化碳拉曼激光雷达所测的一年多的数据分析了合肥市西郊低对流层大气二氧化碳垂直浓度廓线的月变化、季变化及夜变化特点,为研究合肥地区所在区域二氧化碳统计变化及碳源与碳汇的变化规律提供了数据支持。

2 大气二氧化碳垂直浓度廓线的测量设备与原理

采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的我国第一台测量低对流层大气二氧化碳分布的拉曼激光雷达系统[13],主要由发射系统、接收系统、数据采集和控制系统以及数据处理系统组成,如图1所示,图中MCS-PCI、PMT分别为光子计数器和光电倍增管。

利用空气中氮气含量的稳定性,通过测量二氧化碳和氮气的拉曼散射强度比得到二氧化碳浓度。拉曼激光雷达对距离 z 处的大气二氧化碳分子进行探测,后向散射回波信号满足激光雷达方程,其表达式为

$$P_{\lambda_c}(z) = \frac{k_c}{z^2} \gamma_c(z) \beta_c(\pi) n_c(z) T_c^2(z_0, z), \quad (1)$$

式中 $P_{\lambda_c}(z)$ 为高度为 z 处气体分子的拉曼后向散射回波信号; λ_c 为二氧化碳分子的拉曼散射波长; k_c 为拉曼激光雷达中的仪器常数; $\gamma_c(z)$ 为探测通道的重叠系数; $\beta_c(\pi)$ 为二氧化碳分子的拉曼后向散射微分截面,单位为 cm^2/sr ; z_0 为拉曼激光雷达所在的高度; $n_c(z)$ 为高度为 z 处大气二氧化碳气体分子浓度,单位为 cm^{-3} ; $T_c^2(z_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha(z', \lambda) + \alpha(z', \lambda_c)] dz'\right\}$ 为激光雷达的双程透射率之差,其中 $\alpha(z', \lambda)$ 与 $\alpha(z', \lambda_c)$ 分别表示激光波长为 λ 时大气分子消光系数与拉曼散射波长为 λ_c 时大气分子消光系数,单位均为

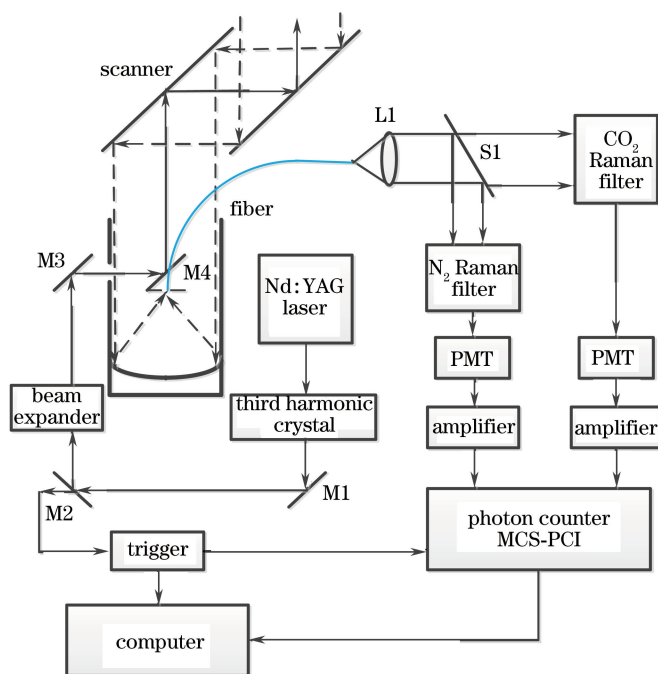


图 1 大气二氧化碳拉曼散射激光雷达系统结构图

Fig. 1 Structure of atmospheric CO₂ Raman lidar system

km⁻¹。氮气的后向散射回波信号也满足激光雷达方程

$$P_{\lambda_N}(z) = \frac{k_N}{z^2} \gamma_N(z) \beta_N(\pi) n_N(z) T_N^2(z_0, z), \quad (2)$$

式中参数与(1)式类似。结合(1)、(2)式,大气二氧化碳体积比 $w(z)$ 随高度 z 的分布可表示为

$$w(z) = \frac{n_C(z)}{n_{dry}(z)} = \frac{n_C(z)}{n_N(z)} \frac{n_N(z)}{n_{dry}(z)} = C_w O(z) \Delta P(z) \Delta T(z_0, z), \quad (3)$$

式中 $C_w = \frac{k_N}{k_C} \frac{\beta_N(\pi)}{\beta_C(\pi)} \frac{n_N(z)}{n_{dry}(z)}$ 为拉曼激光雷达的系统标定常数; $O(z) = \frac{\gamma_N(z)}{\gamma_C(z)}$ 为氮气分子通道与二氧化碳分子

子通道的重叠系数比值; $\Delta P(z) = \frac{P_{\lambda_C}(z)}{P_{\lambda_N}(z)}$ 为二氧化碳通道与氮气分子通道回波功率(即回波光子数)的比

值; $\Delta T(z_0, z) = \frac{T_N^2(z_0, z)}{T_C^2(z_0, z)}$ 为大气透射率修正函数,因 λ_C 与 λ_N 相差不多,在实际测量时通常忽略该项对散射回波信号的影响^[13]。

3 合肥西郊低对流层大气二氧化碳垂直分布的统计分析

3.1 原始回波信号图像及数据处理方法

采用的二氧化碳拉曼激光雷达位于合肥市西郊科学岛,对近两年多的探测数据进行了分析。测量二氧化碳垂直浓度廓线的常规实验一般选在晴朗少云的天气进行。因为白天易受太阳光强烈背景噪声影响,所以选取晚上天黑后开始实验,夏季一般是七点半开始,春季和秋季一般是七点开始,冬季一般是六点半开始。

图 2 为拉曼激光雷达信号采集程序采集的雷达原始回波信号图像。采集的二氧化碳拉曼回波信号的垂直空间分辨率为 30 m,采样点数为 256 点,一个点的距离为 30 m,即采样距离总共为 7680 m,采样脉冲数为 2400,即时间分辨率为 2 min。在较好的天气条件下,在高度为 1 km 范围内,测量不确定性可控制在 1.2×10^{-6} 以内,在高度为 2 km 范围内可控制在 2.5×10^{-6} 以内^[14]。

数据处理需首先扣除背景噪声。取高度为 4 km 以上的回波信号平均值为背景噪声。回波信号扣除背景噪声后,大气起伏和电子学系统的噪声干扰仍部分存在,需要对原始信号进行平滑处理以消除大气波动对

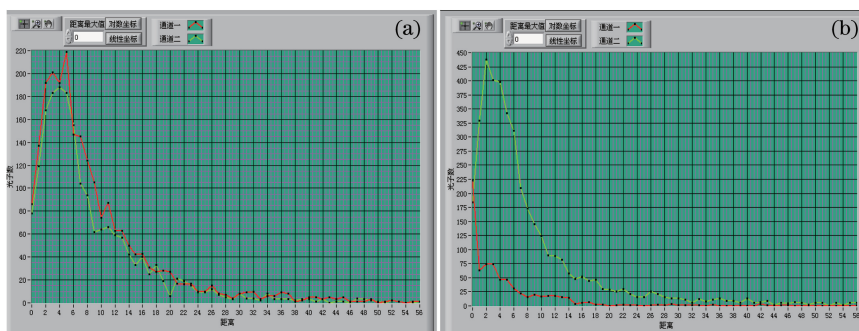


图 2 (a)双通道都是氮气的回波信号;(b)双通道分别为氮气和二氧化碳的回波信号

Fig. 2 (a) Echo signals under dual-channels filled by N₂; (b) echo signals under dual-channels filled by N₂ and CO₂, respectively

信号造成的影响。平滑的原则为在不引起信号较大失真的情况下,尽可能减小随机噪声。平滑的手段是采用相邻点平滑法对回波信号进行平滑,为

$$P'_i = \frac{P_{i-(j-1)/2} + \dots + P_{i-1} \cdot (j-2) + P_i \cdot j + P_{i+1} \cdot (j-2) + \dots + P_{i+(j-1)/2}}{(j^2 + 1)/2}, \quad (4)$$

式中 i 为第 i 个数据点, j 为平滑因子(一般取 $j=5$), P_i 为第 i 个数据点的激光雷达测量的回波信号的数值。

数据处理需再进行通道重叠系数校正。假设 600 m 处(即第 20 个点处)的重叠系数为 1,用整条路径上的重叠系数除以 600 m 处的重叠系数,即得到校正后的系统重叠系数。将之前经过扣除背景和平滑处理的二氧化碳和氮气通道信号比值乘以校正后的系统重叠系数比值,即得到修正后的双通道分别为氮气和二氧化碳的比值。最后将激光雷达二氧化碳与氮气的回波信号比与二氧化碳分析仪所测数据按照最小二乘法进行数据拟合获得标定关系 $Y=kx+b$,即得到标定后的二氧化碳的浓度。

3.2 不同月份、季节下二氧化碳垂直分布的变化特征

在对激光雷达测量低对流层大气二氧化碳浓度垂直分布的整理分析中,为避免恶劣天气对二氧化碳浓度垂直分布的影响,将恶劣天气的测量数据剔除。在少云无雨天气,如果标定高度的二氧化碳回波信号与相应高度的铁塔上二氧化碳分析仪的测量数据线性相关性不好,也将其剔除。一般情况下,标定高度的相关性很好,如果相关性不好,其原因可能是拉曼激光雷达反射镜片灰尘过多或光路未准直等,需对其继续实验。

如图 3 所示,从 2014 年 7 月到 2015 年 12 月期间选取了 100 d 的激光雷达测量数据。因为激光雷达系统出现故障,2015 年 9、10 月数据空缺,维修正常后实验继续。虽然数据量不够充分,但在一定程度上还是反映了二氧化碳浓度变化的基本趋势和特征。

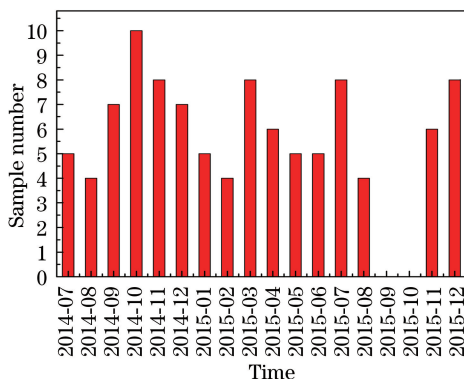


图 3 从 2014 年 7 月到 2015 年 12 月期间选取的实验天数

Fig. 3 Experiment days selected from July 2014 to December 2015

计算了 2014 年 7 月到 2015 年 12 月共 18 个月的低对流层大气二氧化碳数据,获得了大气二氧化碳浓度的垂直廓线分布,对相同月份内二氧化碳垂直分布结果求平均值并作为当月二氧化碳的平均浓度。合肥市西郊 2014 年 7 月到 2015 年 12 月低对流层大气二氧化碳垂直浓度廓线分布如图 4 所示。

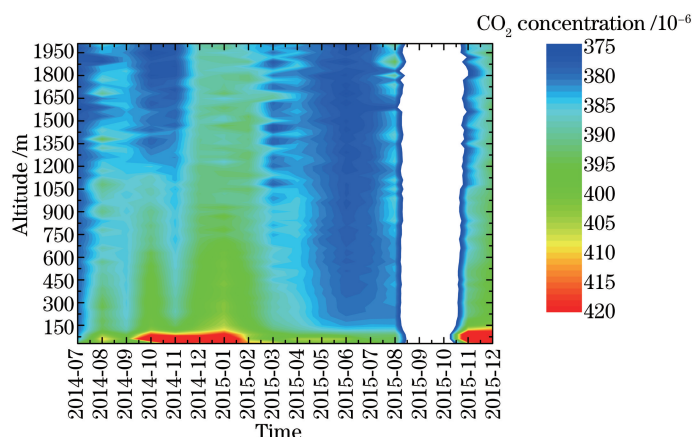


图4 合肥市西郊2014年7月到2015年12月低对流层大气二氧化碳垂直浓度廓线分布的月平均变化

Fig. 4 Lower-troposphere CO₂ vertical concentration profile in Hefei western suburb from July 2014 to December 2015

大部分时间内2 km以上大气二氧化碳混合比波动较大,拉曼回波信号较弱,噪声对测量精度影响较大,所以剔除2 km以上的数据,此拉曼激光雷达探测二氧化碳的有效距离约为2 km^[4]。从图4中可知,合肥市西郊科学岛在2014年7月到2015年12月期间的夜间少云无雨天气下低对流层大气二氧化碳浓度的垂直分布有如下两个主要特征。

1) 低对流层大气二氧化碳浓度垂直分布的总体特征是随高度的增加逐渐减小。在近地面150 m以下浓度较高,变化较剧烈,在约300 m以上浓度趋于平稳。原因可能是近地面150 m以下受人类活动的排放影响,大气二氧化碳的浓度较高,而300 m到2 km间大气对流较平稳,混合较均匀,因此大气二氧化碳的浓度变化也趋于平稳。

2) 低对流层大气二氧化碳的垂直浓度廓线分布随季节有较明显的变化。冬季11、12、1月明显偏高,夏季5、6、7月明显偏低。原因可能是为冬季取暖燃烧化石燃料,排放了二氧化碳。冬天气温低,植物光合作用较弱,使低对流层大气二氧化碳大量富集。夏季气温高且多雨,植物的光合作用较强,吸收二氧化碳,使低对流层的大气二氧化碳浓度偏低。上述规律与尹起范等^[15]在淮安地区得到的近地面二氧化碳浓度变化规律基本一致。

合肥市位于安徽省正中央,长江、淮河之间、巢湖之滨,属亚热带湿润性季风气候。图5为合肥西郊低对流层二氧化碳垂直分布的季节变化。春季为2、3、4月份数据的统计平均,夏季为5、6、7月份数据的统计平均,秋季为8、9、10月份数据的统计平均,冬季为11、12、1月份数据的统计平均。对比春夏秋冬4条曲线可以看出,冬季的低对流层大气二氧化碳整体廓线浓度最高,秋季次之,再次是春季,夏季的低对流层大气二氧化碳整体廓线浓度最低。

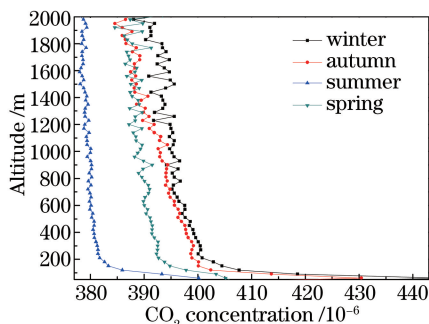


图5 合肥西郊低对流层二氧化碳垂直分布春夏秋冬四季的变化

Fig. 5 Lower-troposphere CO₂ vertical concentration profile in Hefei western suburb under four seasons

3.3 不同年份、相同月份的二氧化碳垂直分布对比

如图6(a)所示,合肥市西郊2014年7月和2015年7月低对流层大气二氧化碳浓度的垂直廓线的差别不大。用Origin对两条垂直廓线的数据进行线性拟合,得到 $R^2=0.72929$,可知其相关性系数 $R=0.85398$,

相关性大。用 Origin 对图 6(b)所示的两条垂直廓线的数据进行线性拟合,得到 $R^2=0.65086$,可知其相关性系数 $R=0.80676$,相关性较大。由此初步证明二氧化碳垂直廓线的变化和月份存在一定程度的相关性。可能是因为每年相对应月份的气温、湿度、风向、风速等气候条件相差不大,所以低对流层大气二氧化碳浓度的垂直廓线才会有较大的相关性。12月相关性不如7月,尤其是近地面 600 m 以下,原因可能是因为冬季烧秸秆等人为因素造成近地面大气二氧化碳浓度的不稳定。如图 6 所示,2015 年 7 月低对流层大气二氧化碳廓线的整体浓度要比 2014 年 7 月高出约 2×10^{-6} ,而 2015 年 12 月与 2014 年 12 月相比,在高度 600 m 以上二氧化碳浓度也高出约 2×10^{-6} 。如果能准确修正近地面人为因素的影响,上述结果大致符合 NOAA/ESRL 得出的大气二氧化碳浓度每年以约 2×10^{-6} 速率增加的结论。

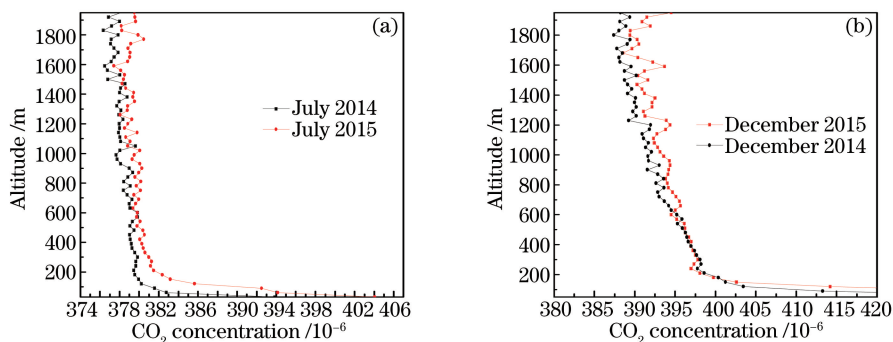


图 6 合肥市西郊低对流层大气二氧化碳垂直浓度廓线对比。(a)2014 年 7 月和 2015 年 7 月;
(b)2014 年 12 月和 2015 年 12 月

Fig. 6 Comparison of lower-troposphere atmospheric CO₂ vertical concentration profiles in Hefei western suburb. (a) July 2014 and July 2015; (b)December 2014 and December 2015

3.4 二氧化碳整夜时空分布特征

为了分析合肥地区西郊低对流层大气二氧化碳浓度垂直廓线整夜的变化特点,选取了 2014 年 10 月 14 日和 2014 年 12 月 4 日从晚上 20:00 开始到第二天 05:00 的实验的数据,对夜晚每半小时获得的二氧化碳垂直分布数据进行一次统计平均,得到合肥市西郊低对流层大气二氧化碳浓度垂直廓线整晚变化的分布图,如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,随高度增加,二氧化碳浓度非单调递减,在 300~600 m 高度之间存在二氧化碳的富集区,其浓度高于 150~300 m 区间的二氧化碳浓度。原因可能是由于观测地点位于合肥西郊科学岛上,科学岛四周环水,水的比热容比陆地的要大,产生温差,所以在 150~300 m 区间形成了一层风层,将二氧化碳吹到 300~700 m 区间,并在此区间富集。天空渐渐变亮后,植物的光合作用开始吸收二氧化碳,二氧化碳浓度有减小的趋势,尤其是在 300~600 m 区间变化比较明显。如图 7(a)所示,在 700 m 到 2 km 区间内同一高度二氧化碳浓度并没有明显的变化趋势,可能是这一区间内的大气比较稳定;而图 7 (b)所示的区间内浓度也有减小的趋势。这些原因目前还只是猜测,需要进一步通过实验结合温度垂直廓线和风速、风向等更多的气象数据进行解释。

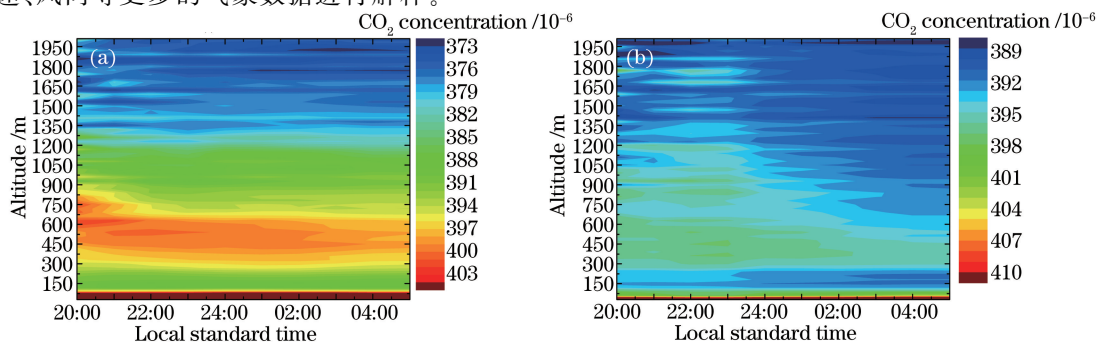


图 7 合肥西郊低对流层大气二氧化碳垂直分布的夜间变化。(a)2014 年 10 月 14~15 日; (b)2014 年 12 月 4~5 日

Fig. 7 Lower-troposphere atmospheric CO₂ vertical distribution in Hefei western suburb under the whole night.
(a) October 14 to 15, 2014; (b) December 4 to 5, 2014

4 结 论

根据拉曼激光雷达中两年多的二氧化碳时空探测数据,对研究合肥地区二氧化碳垂直廓线的时空特征提供了重要资料。在探测二氧化碳方面,拉曼激光雷达系统稳定性较好,测量精度较高,时空分辨率较高,为对比不同日期、不同年份之间二氧化碳浓度提供了可能性。对2014年7月到2015年12月的二氧化碳数据进行整理和统计分析,获得了合肥地区低对流层二氧化碳大致的月变化、季变化和夜间变化特点。结果表明:1)低对流层大气二氧化碳浓度垂直分布的总体随着高度的增加逐渐减小;2)低对流层大气二氧化碳的垂直浓度廓线分布呈较明显的季节变化,冬季11~1月明显偏高,夏季5~7月明显偏低,原因可能为每年相同月份的气温、湿度、风向、风速等气候条件相差不大,所以低对流层大气二氧化碳浓度的垂直廓线与月份才会呈较强的相关性,并且整体浓度以每年约 2×10^{-6} 增长;3)夜晚二氧化碳的垂直分布在300~700 m区间存在富集区,随天空渐渐变亮,此区间大气二氧化碳浓度有减小的趋势,700~2000 m区间内同一高度二氧化碳浓度波动很小。

参 考 文 献

- 1 NOAA/ESRL. Use of NOAA ESRL data [Z/OL]. [2016-03-23]. ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt.
- 2 Park B C, Prather M J. CO₂ source inversions using satellite observations of the upper troposphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(24): 4571-4574.
- 3 Wei Qiuye, Wang Xianhua, Ye Hanhan, *et al.* Research of spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric CO₂ remote sensing with high precision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0801006.
韦秋叶, 王先华, 叶函函, 等. 应用于高精度大气 CO₂ 遥感的空间外差技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0801006.
- 4 Jiang Xinhua, Wang Xianhua, Ye Hanhan, *et al.* Correction method of atmospheric scattering effect through optical path in CO₂ retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0801005.
江新华, 王先华, 叶函函, 等. CO₂ 反演中大气散射影响的光程校正方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0801005.
- 5 Yu Haili, Hu Shunxing, Yuan Ke'e, *et al.* Measurement of CO₂ concentration profiles of lower-troposphere with Raman lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 32(8): 812-817.
于海利, 胡顺星, 苑克娥, 等. 合肥上空大气二氧化碳 Raman 激光雷达探测研究[J]. *光子学报*, 2012, 32(8): 812-817.
- 6 NASA. Directors discretionary fund annual report[R]. [S.l.: s.n.], 2004: 1-3.
- 7 Hong Guanglie, Zhang Yinchao, Zhao Yuefeng, *et al.* Raman lidar for profiling atmospheric CO₂ [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(2): 983-987.
洪光烈, 张寅超, 赵曰峰, 等. 探测大气中 CO₂ 的 Raman 激光雷达[J]. *物理学报*, 2006, 55(2): 983-987.
- 8 Zhao Yuefeng, Zhang Yinchao, Hong Guanglie, *et al.* Scheme on acquisition and disposal for Raman lidar system[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(6): 734-738.
赵曰峰, 张寅超, 洪光烈, 等. 拉曼激光雷达信号采集及处理系统[J]. *中国激光*, 2006, 33(6): 734-738.
- 9 Zhao Yuefeng, Zhang Yinchao, Hong Guanglie, *et al.* Lidar system for detecting the atmospheric CO₂ [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3): 355-359.
赵曰峰, 张寅超, 洪光烈, 等. 大气 CO₂ 含量分布激光雷达监测[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3): 355-359.
- 10 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Hu Shunxing, *et al.* Design of beam-splitting optical path for differential absorption air pollution monitoring lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 957-961.
赵培涛, 张寅超, 胡顺星, 等. 差分吸收测污激光雷达光路分束设计[J]. *光学学报*, 2007, 27(6): 957-961.
- 11 Zhao P T, Zhang Y C, Wang L A, *et al.* Capability of Raman lidar for monitoring the variation of atmospheric CO₂ profile[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(1): 335-342.
- 12 Yuan Ke'e, Zhang Shiguo, Hu Shunxing, *et al.* Reliability analysis of Raman scattering lidar for measurement of atmospheric carbon dioxide profiles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1135-1139.
苑克娥, 张世国, 胡顺星, 等. 拉曼散射激光雷达反演二氧化碳测量结果的可靠性分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1135-1139.
- 13 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoqing, *et al.* Measurement of CO₂ concentration profiles of lower-troposphere with Raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0801003.
于海利, 胡顺星, 吴晓庆, 等. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0801003.
- 14 Hu Shunxing, Zhang Shiguo, Yuan Ke'e, *et al.* Atmospheric CO₂ uncertainty in Raman lidar measurements[J]. *Chinese*

Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 80-83.

胡顺星, 张世国, 苑克娥, 等. 拉曼激光雷达测量大气二氧化碳不确定性分析[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 80-83.

- 15 Yin Qifan, Sheng Zhenhuan, Wei Kexia, *et al.* Rule of atmospheric CO₂ variations and affecting factors in urban area of Huai'an[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(4): 54-57.

尹起范, 盛振环, 魏科霞, 等. 淮南市大气 CO₂ 浓度变化规律及影响因素的探索[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(4): 54-57.