

文章编号 1674-2915(2013)06-0834-07

大气光学遥感监测技术现状与发展趋势

曲 艺

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对开展环境空气中的痕量污染气体监测研究的需求,综述了目前应用较广的光谱遥感监测技术。阐述了利用光学遥感技术监测大气环境的工作原理,详细介绍了几种主流的大气监测技术,包括傅里叶变换红外光谱技术,差分吸收光谱技术,激光长程吸收技术,可调谐激光二极管吸收光谱技术,差分吸收激光雷达技术,指出了上述监测方法的特点并对它们的优缺点进行了分析与比较。

关键词:光学遥感;光谱遥感;大气监测;光谱技术

中图分类号:P407.4; X831 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130606.0834

Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring

QU Yi

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

** Corresponding author, E-mail: quyi@ciomp.ac.cn*

Abstract: In consideration of the requirements of monitoring and researching the harmful trace gases in the air, the widely used spectral remote sensing technologies are reviewed. The principle of the atmosphere optical remote sensing and monitoring is introduced and several practical measurement methods such as Fourier transform infrared spectroscopy, differential optical absorption spectroscopy, laser long path absorption, tunable diode laser absorption spectroscopy and differential absorption lidar are described. Furthermore, the characteristics of these methods are given, then their advantageous and disadvantageous are analyzed via comparing the aspects among these methods.

Key words: optical remote sensing; spectral remote sensing; atmosphere monitoring; spectroscopy

收稿日期:2013-09-19;修订日期:2013-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41074126)

1 引言

从上世纪开始,大气环境污染问题逐渐引起各国的关注,人们对环境质量的要求不断提升^[1]。大气环境监测的概念和方法不断深化,监测气体的种类与范围不断扩大。早期的环境监测是以化学分析为主,依靠物质间发生的化学反应,实现对测定对象间断的、定时、定点局部的分析,但该技术已经不能适应日益增长的及时、准确、全面大气环境监测需求^[2]。随着科学技术的不断进步,大气环境监测技术迅速发展,新的仪器设备、计算机控制等手段在大气环境监测中得到了广泛应用。大气环境监测从单一的依靠传感器进行分析,发展到化学监测、物理监测、生物检测、遥感卫星监测等技术手段。监测范围从一个点发展到一个区域,大气环境监测的气体种类也日益增多,一个以大气环境分析为基础,以物理测定为主导,以生物监测为补充的大气环境监测技术体系已初步形成^[3-4]。

随着工业发展产生的废气、灰尘不断地排入大气层,大气环境污染不断恶化。传统的大气环境监测技术已经不能满足监测的需要。由于大气中痕量气体的种类繁多、分布范围广,而且痕量气体之间还存在复杂的化学反应,使得对大气中的痕量气体进行监测具有挑战性。光学遥感监测技术最早出现在上世纪70年代,用于大气环境监测的商用仪器始于上世纪80年代中期。光学遥感监测技术具有安全、快速、准确、无污染、可远距离探测、监测范围广等诸多优点^[5],已经成为大气环境监测的主要技术手段。目前光谱遥感监测技术主要包括:傅里叶变换红外光谱技术,差分吸收光谱技术,激光长程吸收技术,可调谐二极管激光吸收光谱技术,差分吸收激光雷达技术。本文对这几种方法的工作原理、技术上的优缺点进行了分析与比较。

2 光学遥感监测技术工作原理

光学遥感监测技术主要是基于电磁辐射与物质间的相互作用。根据大气中痕量气体在紫外、

可见和红外波段的吸收来反演气体浓度。测量的原理基于 Beer-Lambert 定律。

$$I(\lambda)/I_0(\lambda) = \exp[-A(\lambda)], \quad (1)$$

$$A(\lambda) = \sigma(\lambda)CL. \quad (2)$$

式中: λ 为工作波长, $I_0(\lambda)$ 为光源发出光的强度, $I(\lambda)$ 为透过光经过大气吸收后的强度, $A(\lambda)$ 为气体的吸收率, L 为吸收长度, C 为气体的浓度, $\sigma(\lambda)$ 为气体的吸收系数。从公式中可以看出,气体吸收率 $A(\lambda)$ 正比于吸收长度、气体浓度。不同气体分子具有不同的特征吸收系数,而且随温度和压力会发生变化。

大气红外光谱区的吸收主要是二氧化碳、水蒸汽分子、甲烷、一氧化二氮和臭氧等,红外光谱区包括了几乎所有重要的大气气体分子吸收带,也被称为指纹区间,具有非常丰富的分子吸收特性,对于大气环境监测十分有利。大气紫外光谱区的吸收主要是臭氧和氧。同时气溶胶、大气温度、水汽含量的变化对大气监测产生明显的影响。

3 光谱遥感监测技术

3.1 傅里叶变换红外光谱技术 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)^[6-8]

傅里叶变换红外光谱技术工作原理为:红外光经准直系统后,变成平行光出射,经过大气气体分子吸收后,被探测系统接收,经干涉仪后会聚到探测器。干涉仪系统是 FTIR 的核心,这里以迈克耳逊干涉仪为例。探测系统接收的光束经分束片后,射向垂直的两面反射镜,一面反射镜在驱动装置的控制下前后移动,使两束光产生相位差,相

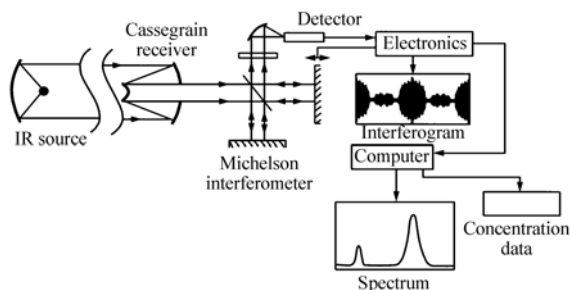


图1 FTIR 结构图

Fig. 1 Structural diagram of FTIR

位差大小与气体分子的吸收特性相关,两束光干涉产生信号幅度变化,由探测器接收。经傅里叶变换后,可以得到吸收气体的光谱信息。FTIR 基本结构如图 1 所示。

FTIR 不需要光谱扫描,通过一次测量可以获得 $2 \sim 15 \mu\text{m}$ 的数据,可同时监测红外波段的多种大气分子。早期 FTIR 系统的光谱分辨率高,但体积较为庞大。为实现快速测量,目前多采用低分辨率的光谱仪,不过降低分辨率使仪器的灵敏度也有所下降。剑桥大学的一个项目组,利用 FTIR 测量了火山烟羽,探测到火山烟羽主要成分包括水蒸汽、二氧化碳、二氧化硫、氯化氢、硫化氢等,所用仪器的光谱分辨率为 0.5 cm^{-1} , 1 s 可得到 $500 \sim 6000 \text{ cm}^{-1}$ 的光谱。通过多幅数据累加的方法来提高信噪比,最小可探测极限达到几个 10^{-9} 。

FTIR 的优点在于:不需要光谱扫描,一次可对整个红外波段进行测量;没有分光元件,光强利用效率高;可同时对多种气体进行测量。FTIR 的主要缺点是:灵敏度低、傅里叶变换计算耗时、探测系统需要冷却;设备体积庞大,价格昂贵。

3.2 差分吸收光谱技术 (Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS) ^[9-13]

DOAS 用于在光源和接收器之间的长光程测量。光源发出的光束由于大气分子作用而衰减,可以用公式(3)描述:

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L]. \quad (3)$$

对于实际大气开路测量,还需考虑其他因素引起的光衰减,包括瑞利散射和米氏散射。散射光不能被接收,通常散射作为吸收中的一部分。瑞利散射主要是由于空气分子与探测光的尺寸接近而发生的散射,散射截面 σ_R 与入射波长的四次方成反比,见式(4):

$$\sigma_R(\lambda) \approx \sigma_{R0} \lambda^{-4}. \quad (4)$$

瑞利散射系数用式(5)表示:

$$\varepsilon_R(\lambda) = \sigma_R(\lambda) N_{\text{air}}, \quad (5)$$

式中, N_{air} 是空气分子密度,在标准状态下, $N_{\text{air}} = 2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

米氏散射是指大气中粉尘对光的散射,散射颗粒的尺寸要远大于光波,米氏散射系数用式(6)表示:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_{M0} \lambda^{-n}. \quad (6)$$

将各类散射衰减和吸收都考虑后,透射光可写为:

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \exp\{-L \sum_i [\sigma_i(\lambda) C_i + \varepsilon_R(\lambda) + \varepsilon_M(\lambda)]\}, \quad (7)$$

式中, $\sigma_i(\lambda)$ 和 C_i 分别是第 i 种气体的吸收截面和分子数密度。

在开路测量过程中,仅由光源发出的光强和探测器接收到的光强来确定探测气体的浓度是非常困难的,有效的解决办法是差分吸收技术。由分子吸收而引起的衰减为总吸收的一部分,是探测光在分子特征吸收线位置的吸收,强度随光波长变化而迅速变化。如图 2 所示,把新强度 I'_0 (等于窄吸收峰两边的值)引入后,初始光强 I_0 已不重要。计算时,引进一个物理量,微分光密度,定义如下:

$$D' = \ln[I'_0(\lambda)/I(\lambda)] = L \sum_i [\sigma'_i(\lambda) C_i]. \quad (8)$$

如果已知吸收气体的吸收截面 $\sigma'_i(\lambda)$,可推导气体分子浓度 C_i 。在实际应用中,由于光谱仪的分辨率是有限的,将给探测带来误差,探测 D' 时必须考虑这一点。

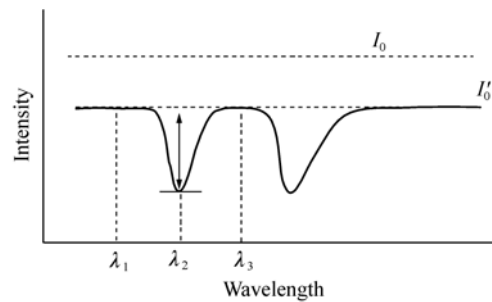


图 2 探测光强随波长变化关系图

Fig. 2 Variation relation of detection light intensity with wavelength

由于计算中忽略了被测气体中包含的连续吸收谱气体,因此该项技术所能探测的气体种类是有限的。

DOAS 原理见图 3,采用高发光强度的紫外-可见光源,经过准直系统后以平行光出射,经过大气长光程吸收后,由望远系统接收。光信号经光

纤耦合进入分光系统,从而得到紫外-可见的吸收光谱。对于获得的光谱数据,通过进行高阶多项式拟合或光谱平滑处理,得到光谱基线 I'_0 。吸收光谱除以光谱基线,则获得大气气体分子的特征差分光谱,将差分光谱与实验室的标准浓度的参考光谱作比较,则可以计算出探测气体的浓度。

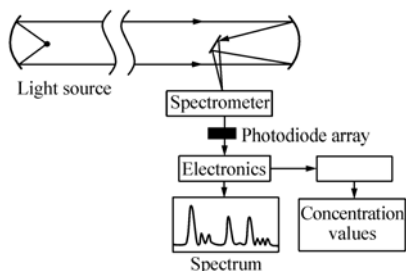


图3 DOAS原理图

Fig. 3 Schematic diagram of DOAS

为降低大气湍流对测量产生的影响,DOAS采用快速扫描结构,在短时间内采集和平均多条吸收光谱数据,从而获得高信噪比。

3.3 激光长程吸收 (Laser Long Path Absorption, LLPA) [14-17]

激光具有高强度、高单色性以及发散角小等优点,使其成为大气环境监测的理想工具。激光长程测量有两种工作方式,一种方式是利用大气后向散射,反演得到气体分布;第二种方式是利用反射元件,探测其反射回来的光强,获得探测气体浓度,称为激光长程吸收技术。激光长程吸收技术原理见图4,光源发出的激光束进入大气,激光

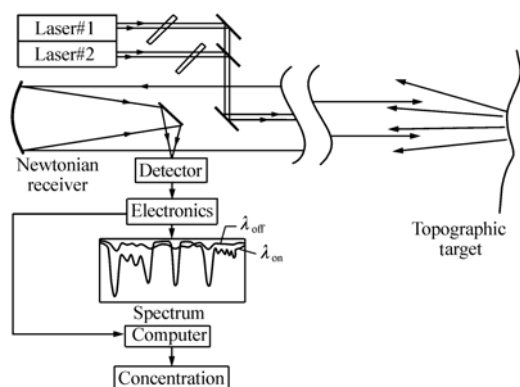


图4 激光长程吸收技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of long-range laser absorption technology

经过大气分子吸收和散射后,经反射器件反射回来,被望远系统接收。探测的信号强度与许多因素有关,如发射激光强度、探测气体浓度、工作距离、望远系统的接收口径、反射器件的反射率等。它们都会对反射信号强度产生影响,从而影响系统的探测灵敏度。

激光光源需要发射两个波长,一个波长位于气体分子的特征吸收峰 (λ_{on}) 处,另一波长需要偏离吸收峰,使待测气体对该波长基本没有吸收 (λ_{off}),忽略两个波长间的系统误差,根据 Beer-Lambert 定律:

$$P(\lambda_{on})/P(\lambda_{off}) = \exp[-2LC(\sigma_{on} - \sigma_{off})], \quad (9)$$

通过气体分子的吸收系数,就可以计算出其浓度:

$$C = \frac{-\ln[P(\lambda_{on})/P(\lambda_{off})]}{2L(\sigma_{on} - \sigma_{off})}. \quad (10)$$

由于激光长程吸收技术可进行远距离遥感测量,因此对于空气中的有毒气体,都可以采用激光长程技术进行测量,保证工作人员的安全,这是激光长程吸收技术一个突出的优点。

3.4 可调谐激光二极管吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TD-LAS) [18-20]

可调谐二极管激光器 (TDLs) 可以实现激光波长在一定范围内的连续输出,将其应用中红外区 ($2 \sim 15 \mu\text{m}$) 进行激光长程测量,称为可调谐二极管激光吸收光谱技术 (TDLAS)。TDLs 通过控制其化学组份、温度和电流,能够实现一定波长范围的输出,虽然 TDLs 的输出功率偏低,但随着探测器工艺的不断改进,光电探测器件能够探测到纳瓦甚至皮瓦级的信号。目前, TDLAS 技术的主要缺点就是 TDLs 的波长范围小,这极大限制了可探测的气体种类。可用于 TDLAS 技术的光源主要包括以下几类激光器:铅盐激光器,工作于 $2 \sim 20 \mu\text{m}$,能测量到 10^{-12} 量级; III ~ V 族化合物激光器,工作波长为 $0.78 \sim 1.6 \mu\text{m}$,可实现近红外与中红外波段的大气监测;分布反馈二极管激光器,其单模连续输出在室温可大于 100 mW 。美国 Monitor 公司在 1998 年夏天公开了第一台激光气体遥测系统,利用工作波长为 1550 nm 的 In-GaAsP 激光器来探测大气中的氨浓度。惰性气体

激光器如工作波长在 $3.39 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器, 可用来测量空气中的甲烷气体。

TDLAS 技术的优势在于其响应快、精度高、结构简单, 可实现高灵敏的监测。同时采用二极管激光器价格便宜, 可极大降低探测系统的尺寸与成本。中红外区间对于大气测量来说是一个丰富的波长区间, 几乎所有常见气体在这个区间都具有强的特征吸收, 为实现精确测量, 要求探测系统具有高光谱分辨率和高灵敏度。TDLs 在有限的波长区间通过精密控制, 可以输出很窄的线宽, 因此在高分辨率测量上具有明显的优势。TDLAS 技术不足之处在于激光器的波长范围和探测器, 限制了其使用范围及探测气体的种类。

3.5 差分吸收激光雷达技术 (Differential Absorption Lidar, DIAL) ^[21-23]

激光雷达 (lidar) 是几个英文单词的首字母缩写: light detection and ranging。DIAL 的工作原理如图 5 所示。

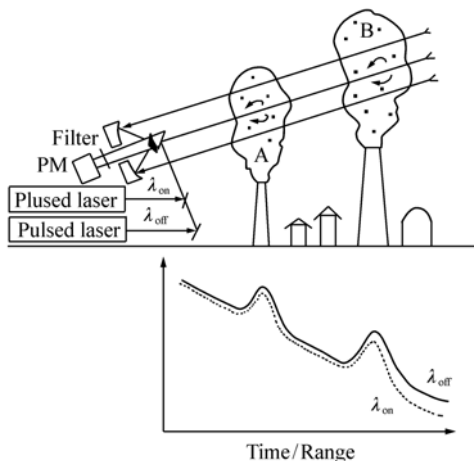


图 5 DIAL 测量原理图

Fig. 5 Schematic diagram of DIAL measurement

DIAL 使用脉冲激光作为光源, 发射光强经过大气分子吸收并散射后, 被望远系统接收。探测光强以时间函数的形式被探测器接收, 这种工作方式与雷达的模式相近似。根据探测光强可反演大气中气体分子与散射物的种类、浓度、距离等信息。

当工作波长为 λ , 探测距离为 R 时, 系统接收到的光功率用式(11)表示:

$$P(\lambda, R) = P_0(\lambda) \varepsilon(R, \lambda) \frac{A}{R^2} \cdot$$

$$\frac{c\tau}{2} n_b(R) \delta_b(R, \lambda) \cdot$$

$$\exp(-2 \int_0^R [\sigma(\lambda) N(r) + k_{\text{ext}}(r)] dr) \quad (11)$$

式中, $P_0(\lambda)$ 是工作波长在 λ, t_0 时刻激光发射的功率, $\varepsilon(R, \lambda)$ 是探测器的信号探测效率, A 是望远镜面积, c 是光速, τ 是激光脉冲时间长度, $n_b(R)$ 是背散射系数为 $\delta_b(R, \lambda)$ 的散射物粒子数密度, $c\tau/2$ 是接收雷达返回信号的面积, 它决定了探测系统的空间分辨率。指数因子反映了能量的吸收、衰减与后向散射, 大气中吸收分子粒子数密度为 $N(\lambda)$, 吸收截面为 $\sigma(\lambda)$, 散射微粒衰减系数为 $k_{\text{ext}}(r)$ 。在能见度好的条件下, DIAL 技术可探测距离是几千米。

在高层大气中, 空气中的颗粒物非常少, 因此瑞利散射 (正比于 λ^{-4}) 起主要作用; 而在对流层, 空气中的颗粒物较多, 因此米氏散射起主要作用。米氏散射取决于粒子大小分布, 并随着波长增加而减小, 近似于 $1/\lambda^2$ 的关系。背散射系数 δ_b 的值在分子拉曼散射 ($10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) 和大微粒的米氏散射 ($10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) 之间变化。

与气体分子的特征吸收相比, 散射系数 k_{ext} 与工作波长无关, 污染气体的信息可以通过分子吸收截面和波长的关系计算出来。由于激光束的偏振态包含了其他相关的信息, 如来自理想球形微粒的背散射保持原来的偏振态, 而非球形微粒的反射是部分偏振状态。因此通过测量激光雷达的返回信号的偏振态, 可以区分大气中不同类型的散射微粒, 例如区分对流层中由水滴构成的低云层和由冰针构成的高云层。

随着技术的发展, 激光雷达具有多种不同类型。包括差分吸收激光雷达、拉曼散射激光雷达、地面目标激光雷达、米氏散射激光雷达、荧光辐射激光雷达等。但 DIAL 是目前最常用的大气遥感检测系统。

利用 DIAL 测量工业排放气中的污染物的过程如下, 发射两束空间位置相同的激光, $\lambda_{\text{on}} = \lambda_{\text{abs}}, \lambda_{\text{off}} = \lambda_{\text{ref}}$ 进入大气, 背散射信号被望远系统接收。 λ_{on} 是污染气体的吸收峰波长, λ_{off} 是吸收峰旁的波长。工作的两束脉冲来自同一个激光器

或来自两个相同且同时发射的激光。根据探测返回的背散射信号,可明显看出能量具有 $1/R^2$ 衰减,污染气体的浓度可以由式(12)表示。

$$\frac{p(\lambda_{\text{off}}, R)}{p(\lambda_{\text{on}}, R)} = \exp[-2(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}) \int_0^R N(r) dr]. \quad (12)$$

对于很小的波长差 ($\lambda_{\text{on}} - \lambda_{\text{off}}$), 假定背散射系数 δ_b 和衰减系数 $k_{\text{ext}}(r)$ 与波长无关。那么探测的平均浓度 $N_{\text{av}}(R, R + \Delta R)$ 可由式(13)得到。

$$N_{\text{av}}(R, R + \Delta R) = \frac{1}{2(\Delta R)(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})} \cdot \ln \frac{p(\lambda_{\text{off}}, R + \Delta R)p(\lambda_{\text{on}}, R + \Delta R)}{p(\lambda_{\text{on}}, R + \Delta R)p(\lambda_{\text{off}}, R)}. \quad (13)$$

随着探测距离的从近到远,光信号按对数关系衰减。除真正的烟气信号外,背散射曲线还包含有烟气中微粒的信号。后者的散射信号对于两个波长是一样的,如果已知背散射系数 $\delta(\lambda_{\text{on}})$ 和 $\delta(\lambda_{\text{off}})$, 则可算出浓度。如果已知气体从烟囱出来的速度,甚至可求出每小时污染气体的排放量。

参考文献:

- [1] CLEMENT R E, EICEMAN G A, KOESTER C J. Environmental analysis[J]. *Anal. Chem.*, 1995, 67(12): 221R-255R.
- [2] CASS G R. Speciation of organic carbon in the atmosphere[J]. *J. Aerosol Sci.*, 2000, 31: S1-S4.
- [3] BROWN R H, ELLWOOD P A, GROVES J A, et al.. New methods for the determination of airborne isocyanates[J]. *Cellular Polymers*, 1987, 6(6): 1-8.
- [4] AGGARWAL I D, FARQUHARSON S, KOGLIN E. Optical sensors for environmental and chemical process monitoring [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1995, 23: 67.
- [5] 谢品华, 刘文清, 魏庆农. 大气环境污染气体的光谱遥感监测技术[J]. *量子电子学报*, 2000, 17(5): 385-394.
XIE P H, LIU W Q, WEI Q N. Spectroscopic remote techniques for atmospheric pollution monitoring[J]. *Quantum Electronics*, 2000, 17(5): 385-394. (in Chinese)
- [6] 陈友华. 遥测用多次反射式弹光调制傅里叶变换光谱技术研究[D]. 山西: 中北大学, 2013.
CHEN Y H. The study on multi-reflected photo-elastic modulator-based fourier transform spectroscopy for telemetry[D]. Shanxi: North University of China, 2013. (in Chinese)
- [7] ZHANG J, ZHEN X B, XUN Y L. Passive fourier-transform infrared spectroscopy monitoring of environmental pollution [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1998, 3505: 94-101.
- [8] VAZQUEZ G J. FTIR remote sensing of atmospheric species: application to air pollution[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1995, 2365: 438-463.
- [9] PLATT U, PERNER D, PATZ H W. Simultaneous measurement of atmospheric CH_2O , O_3 , and NO_2 by differential optical absorption[J]. *J. Geophysical Research*, 1979, 84(C10): 6329-6335.
- [10] PLATT U, PENER D. Direct measurements of atmospheric CH_2O , O_3 , NO_2 and SO_2 by differential optical absorption in the near UV[J]. *J. Geophysical Research*, 1980, 85(C12): 7453-7458.
- [11] EDNER H, RAGNARSON P, SPANNARE S, et al.. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system for urban atmospheric pollution monitoring[J]. *Appl. Optics*, 1993, 32(3): 327-333.
- [12] PLANE J M C, NIEN C F. Differential optical absorption spectrometer for measuring atmospheric trace gases[J]. *Rev.*

4 结束语

利用光学遥感技术对大气环境进行监测,在测量距离、测量速度、在线测量等方面具有明显的优势。傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR) 具有速度快、不需要光谱扫描等优点,适用于测量污染严重的空气,但该技术对于干净环境中痕量气体测量的灵敏度不够。差分吸收雷达技术 (DIAL) 可以实现对大气环境的三维监测,并且具有较高的光谱分辨率和灵敏度。可调谐激光二极管吸收光谱技术 (TDLAS) 的分辨率高于其他任何一种方法,它的主要局限性是受到光源波长范围的约束,使其可同时测量的气体种类较少。差分吸收光谱技术 (DOAS) 使用传统的光源和光谱仪相结合的测量方式,可对多种污染物进行监测。FTIR 可同时探测的污染物种类多于 DOAS,但 DOAS 具有更高的灵敏度,而且价格便宜,更适合广泛应用。

- Sci. Instrum.*, 1992, 63(3):1867-1876.
- [13] AXELSSON H, EILARD A, EMANUEISSON A, *et al.*. Measurement of aromatic hydrocarbons with the DOAS technique [J]. *Appl. Spectroscopy*, 1995, 49(9):1254-1960.
- [14] PUCKRIN E, MCMASTER D, EVANS W F J. A new technique for remote sensing of air pollution in the lower troposphere [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4574:44-51.
- [15] NOXON J F. Nitrogen dioxide in the stratosphere and troposphere measured by ground-based absorption spectroscopy [J]. *Science*, 1975, 189:547-549.
- [16] NOXON J F, WHIPPLE E C, HYDE R S. Stratospheric NO₂ Observation method and behavior at midlatitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84:5047-5076.
- [17] 黄宝库. 激光探测大气典型气体的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2012, 42(11):1222-1225.
HUANG B K. Research progress of laser detecting typical gases in atmosphere [J]. *Laser Infrared*, 2012, 42(11):1222-1225. (in Chinese)
- [18] KUZNETSOV A I, NADEZHINSKII A I, STEPANOV E V, *et al.*. Tunable-diode-laser-based monitoring of atmospheric gases; modern techniques [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Eng.*, 1993, 1715:151-162.
- [19] WERLE P W, MUECKE. In-situ trace gas analysis using high-frequency modulation spectroscopy with tunable diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1995, 2506:708-719.
- [20] VICET A, NICOLAS J C, GENTY F, *et al.*. Room temperature GaInAsSb/GaSb quantum well laser for tunable diode laser absorption spectroscopy around 2.35 μm [J]. *IEEE Proceedings: Optoelectronics*, 2000, 147(3):172-176.
- [21] DUBINSKY R N. Lidar moves toward the 21st century [J]. *Lasers Optronics*, 1988, 7(4):92-106.
- [22] 杨进川, 黄宝库, 章正宇, 等. 宽光谱激光雷达探测多种气体的仿真研究 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(7):743-746.
YANG J C, HUANG B K, ZHANG Z Y, *et al.*. Simulation study of detecting various gases based on far-infrared wide spectrum laser lidar [J]. *Laser Infrared*, 2013, 43(7):743-746. (in Chinese)
- [23] 刘继桥, 谢杨易, 李世光, 等. 用于全球大气温室气体探测的星载激光雷达研究 [J]. *红外*, 2013, 34(2):22-28.
LIU J Q, XIE Y Y, LI S G, *et al.*. Research on spaceborne lidar for global atmospheric greenhouse gas detection [J]. *Infrared*, 2013, 34(2):22-28. (in Chinese)

作者简介:



曲 艺(1978—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2006年于吉林大学获得博士学位,主要从事光学仪器设计、空间紫外遥感等方面的研究。E-mail:quyi@ciomp.ac.cn