

近地面层热通量和气体通量光学监测新方法研究

田勇志^{1,2} 刘建国¹ 曾宗泳¹ 张玉钧¹ 陆亦怀¹ 宋雪梅^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 监测地气间动量、热量和痕量气体等的交换对水文、气象和生态环境等有着重要的意义。阐述了一种利用自行研制的大口径闪烁仪(LAS)、光学温度梯度仪和基于可调谐二极管激光吸收光谱术(TDLAS)的开放光路痕量气体监测系统,实现了较大区域热通量和二氧化碳等气体通量快速监测的方法。实验结果表明,所测数据与涡动相关(EC)仪的数据比较,显热通量的相关系数为 0.91,二氧化碳通量的相关系数为 0.74。由此,用大口径闪烁仪监测区域热通量和基于 TDLAS 光学技术连续可靠监测陆地区域碳通量是完全有可能的,这种方法在大区域热通量和气体通量监测将会有很好的应用前景。

关键词 大气光学;热通量;二氧化碳通量;梯度法;开放光路;可调谐半导体激光吸收光谱术;大口径闪烁仪

中图分类号 P407 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0801001

A New Optical Method for the Determination of Heat and Gas Fluxes Measurement in the Surface Layer

Tian Yongzhi^{1,2} Liu Jianguo¹ Zeng Zongyong¹ Zhang Yujun¹
Lu Yihuai¹ Song Xuemei^{1,2}

¹ Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Routine estimates of the turbulent fluxes of momentum, heat and trace gas flux have important significance in many meteorological, hydrological and other related studies. Combining with large-aperture scintillometer (LAS), temperature-gradient measurement system and tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), sensible heat flux and carbon dioxide (CO₂) flux can be derived by iterative over a long optical path. This method has realized fast detection of heat flux in large natural areas and CO₂ flux. The measured fluxes of sensible heat and carbon dioxide are compared with the results measured by a eddy-covariance (EC) instrument. The results show correlation coefficient of sensible heat flux is 0.91 and that of CO₂ flux is 0.74, respectively. Experimental results show that optical measurement overcomes those limitations of traditional method, so this method is an inspiring method in heat and gas flux monitoring.

Key words atmospheric optics; heat flux; carbon dioxide flux; flux-gradient method; open optical path; tunable diode laser absorption spectroscopy; large-aperture scintillometer

OCIS codes 010.1030; 010.1300; 010.1330; 010.3920; 010.70601

1 引 言

地气间动量、热量、水分和痕量气体等的交换对大气的动力热力过程起着十分重要的作用。这些过

程特别是显热通量、潜热通量和二氧化碳通量的定量研究,对天气气候预报、水循环过程分析、农业和水资源管理以及碳循环等意义重大。

收稿日期: 2011-07-08; **收到修改稿日期:** 2012-03-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-411)资助课题。

作者简介: 田勇志(1983—),男,博士研究生,主要从事生态环境光学遥感方法方面的研究。E-mail: yztian@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事环境污染光学监测技术方面的研究。

E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

针对热通量的测量,目前存在的主要技术有涡动相关(EC)法、波文比-能量平衡方法和空气动力学方法等。上述方法尽管在多个国际大型陆面过程实验以及当前各种研究中已经得到广泛应用,却只能提供局地结果,即每个站点的地面代表性通常只有几百米左右。针对碳通量的测量,目前主要技术包括箱法(静态和动态)、涡动相关法、波文比法、质量平衡法和同位素法。箱法操作复杂,代表性差;波文比法对干湿度测量要求严格;质量平衡法由于垂直风速较小,测量水平面的碳通量误差大;同位素法精度高,但成本昂贵。而目前采用较多的涡动相关技术观测碳通量仍然受到采样点、观测过程、局部通量以及植被密度、风速大小等因素的限制,无法在山区、城市等复杂地形情况下使用。为了得到非均匀下垫面一个较大尺度上的平均感热、潜热通量和二氧化碳通量,需要多套相关设备组成观测网,其实现受到诸多限制^[1~3]。

光学遥感在大气监测方面有着本身独有的特点:测量区域广泛,监测区域在 200~5000 m 的范围;安装方便,能在城市建筑群、森林和农田等传统仪器难于安装的地形下应用;快速响应,在线监测,能满足环境应急保护,气象预报等实时性要求比较强的领域;适应性强,复杂下垫面对该方法影响比较小。

国外有文献报道了采用开放光路在水面上做过通量监测实验^[4],但陆地地表相对水面复杂,很多测量只能采用高精度点式仪器在局部测量^[5,6]。本文是基于光学方法遥感技术,利用大口径闪烁仪(LAS),温度梯度联合反演出大气参数和显热通量,再利用大气参数与可调谐半导体光谱吸收技术测量的二氧化碳浓度梯度反演出二氧化碳通量。三种光学遥感仪器的联合应用,实现了几百到几千米大尺度的地气通量测量。

2 设计原理

大口径闪烁仪是根据光波在大气湍流中传播时,温度或湿度变化造成大气折射率的起伏,从而引起光强起伏,测量这种光强起伏的统计特性,反演出折射率结构常数的原理设计的光学仪器。相对点式仪器,代表性可以达到 250~5000 m 的尺度。Wang 等^[7]根据近红外和可见光的特性,给出了大气中光强对数起伏方差和大气折射率结构常数的公式:

$$C_n^2 = 1.12\sigma_{\ln I}^2 D^{7/3} L^{-3}, \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\ln I}^2$ 为光强对数起伏方差, D 为发射端和接收端的孔径, L 为发射端与接收端之间路径长度。通

过(1)式计算出折射率结构常数后,再计算出温度结构常数,应用相似理论,在已经获取的温度梯度、零平面位移和地表粗糙长度前提下,可以用迭代的方法反演摩擦速度、奥布霍夫长度和特征温度,最后可以得出显热通量值^[8]。

温度梯度仪的原理是测量激光光源通过大气后在接收望远镜成像面上像点的位移变化,首先得到折射角的变化量,再由变化量计算出光路上的温度梯度^[9]。从射线弯曲变化几何关系可以推导出下面积分

$$\delta\beta = \int_0^J \left(1 - \frac{x}{J}\right) \delta\left(\frac{\partial n}{\partial z}\right) dx, \quad (2)$$

式中 J 为接收镜到光源的距离, x 为接收镜到光路上一点的距离, β 为折射角, $\frac{\partial n}{\partial z}$ 为折射率梯度。根据相似理论,温度梯度与大气稳定度有一定的关系,从上述射线方程出发,测量得到两个高度的折射角变化,组合成方程组,可以求出温度梯度^[10]。

可调谐半导体激光器吸收光谱技术(TDLAS)是利用二极管激光器波长扫描特性^[11],直接测量气体的特征吸收线,从而对所测气体进行定性或者定量分析^[12]。由于测量的是单根吸收线,测量其他气体时基本不受水汽影响。

根据比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律知道:当一束光强为 I_0 的平行光通过长度为 L 的吸收介质后,在接收端测量得到的光强 I 为^[13]

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)L], \quad (3)$$

式中 $I(\nu)$ 为气体吸收后的光强, ν 为光波数, $I_0(\nu)$ 为没有气体吸收时的光强, L 为总的气体吸收光程长, $\alpha(\nu)$ 为气体吸收系数。实验在近红外气波段进行,气体的吸收系数很小。可以得到^[14]

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0NL}{\pi} \int_0^\pi -\sigma_c(\nu_c + \delta\nu \cos \theta) \cos(m\theta) d\theta, \quad (4)$$

式中 ν_c 为激光的中心频率, $\delta\nu$ 为调制幅度, σ_c 为吸收截面, θ 为调制波调制频率, m 为谐波数。可见,每个谐波分量 A_n 与待测气体的浓度 N 和光程 L 直接成正比。

反演气体通量原理如图 1 所示。大口径闪烁仪测量出显热通量 H , 光学温度梯度仪测量出温度梯度后,可以由下面关系式直接得到系数 K :

$$K = K_C = K_H = -H / \left[\rho c_p \left(\frac{dT}{dz} \right) \right], \quad (5)$$

式中 K_C 为气体扩散系数, K_H 为热交换系数, ρ 为

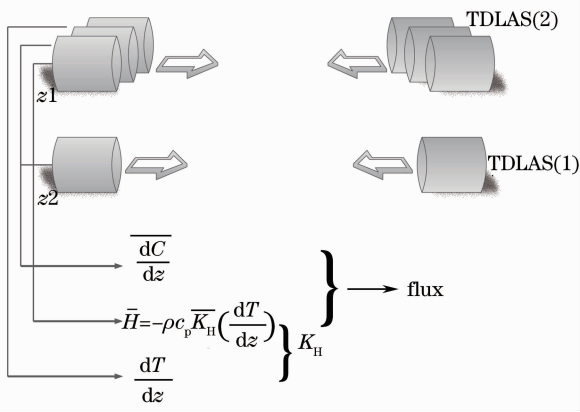


图1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system

空气密度 ($1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p 是常压下空气比热 ($1008 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。

垂直输运的主要机制是扩散过程,垂直通量可以由 Fick 扩散过程给出^[15]:

$$F_x = -K \frac{dC_x}{dz}, \quad (6)$$

式中 F_x 为气体 x 的通量, C_x 为气体浓度, z 为距离地面高度, K 是 x 气体在空气中的扩散系数。湍流扩散通常远远强于气体分子扩散,一般大几个数量级,因此 K 取决于(5)式中气体扩散系数,但在非中性大气条件下,(5)式中气体扩散系数和热交换系数都需要用普适函数作修正。本文中用两套开放光路的

表1 不同仪器和其精度

Table 1 Instruments employed in study and their accuracies

Measurement	Instrument	Accuracy
damp heat flux	LAS	1 W/m^2
temperature gradient	optical temperature-gradient measurement	$0.04 \text{ }^\circ\text{C/m}$ (500 m)
CO_2 concentration	TDLAS open path system	$5 \times 10^{-6} \text{ m}$
wind velocity	cup anemometer	$\pm 3 \%$ ($0.3 \sim 10 \text{ m/s}$)
pressure	barometer	$\pm 0.3 \text{ hPa}$

大口径闪烁仪接收端高度为 5.41 m,发射端高度为 5.29 m。温度梯度仪架设高度为 5.15 m。TDLAS 上层架设高度为 12.64 m,下层高度为 5.56 m。三套仪器的路径长度都为 339 m。为了保证实验的准确性,野外实验中三套仪器的光学路径基本平行,所代表的区域基本相同。测量仪器安装图如图 2 所示。

4 结果与讨论

4.1 大口径闪烁仪测量折射率结构常数结果

大口径闪烁仪的路径权重函数是一个钟形函数,最大值在路径中央,实验时涡动相关仪在路径的

TDLAS 测量出高低两层的浓度,然后计算出浓度梯度,最后给出气体垂直通量。这里应用开放光路是为了增大区域代表性,更重要的是和传统的闭路抽取式相比,不需要在测量前对气体作干燥、过滤等预处理,也避免了抽气管道的气流变化影响气体浓度的起伏,造成高频部分的损失而出现浓度值低估。

3 观测场地与仪器描述

3.1 观测场地

利用自行研制的三套光学测量装置,于 2010 年 4 月 1 至 4 月 30 日进行了地气通量监测的外场观测实验。实验是在中国科学院封丘农业生态站进行的,该站地处黄河北岸的黄淮海平原 ($35^\circ 00' \text{N}$, $114^\circ 24' \text{E}$),隶属中国科学院南京土壤研究所。地属半干旱、半湿润的暖温带季风气候。农业以生产冬小麦、夏玉米一年两熟为主。实验站呈 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的矩形,实验期间种植小麦,周围有防风林。观测场中央设有自动气象站。

3.2 测量仪器

实验中用到的仪器有大口径闪烁仪、温度梯度仪、TDLAS 系统、涡动相关仪、风速计和气压计。前 3 个仪器都是中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制的科研仪器,所有仪器实验前都经过标定,仪器性能如表 1 所示。

中央,处于大口径测量的通量贡献率最大位置。实验期间天气以晴天为主,后期为阴天,白天气温在 $10 \text{ }^\circ\text{C} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。图 3 为大口径闪烁仪测量的典型大气折射率结构常数图,其中采用半小时平均。图中显示在日出和日落时,大气稳定度会发生符号变化,出现临界值,大气折射率结构常数会有一个凹点出现。同时整体数据的数量级在 $10^{-15} \sim 10^{-13}$,和马晓珊等^[16,17]研究结果中折射率结构常数处于同一数量级。

4.2 温度梯度的测量结果

实验前用铂电阻温度梯度测量系统对该光学测量系统校验,通过记录两层的折射角变化,最后联合

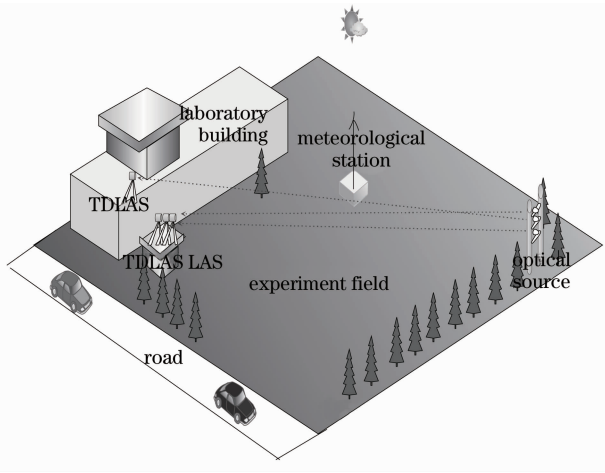


图 2 实验现场示意图

Fig. 2 Schematic overview of the experimental setup

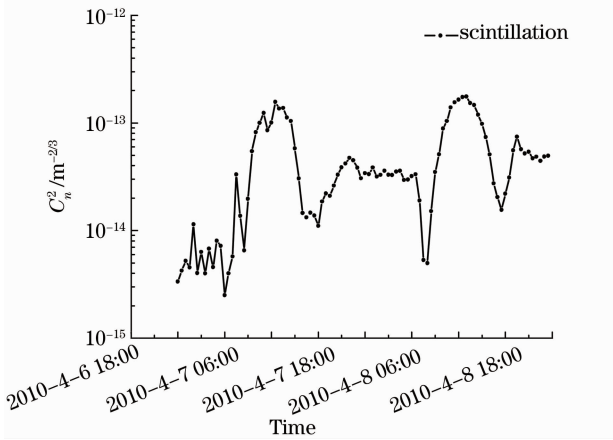


图 3 大口径闪烁仪测量的大气折射率结构常数(30 min 平均)

Fig. 3 Time variation of C_n^2 measured by the LAS (30-min average)

方程组反演出温度梯度。图 4 是选取的有代表性的一天的测量数据,图中可以看出早上和傍晚各有一次梯度变换符号的过程。白天温度梯度为负值,白天地面强烈受热,地表温度高于上层大气温度,形成负的温度梯度值;而夜间由于地表的冷却,大气层的保温效果,形成正的温度梯度值。

4.3 TDLAS 测量二氧化碳浓度(CO₂ 摩尔分数)结果

根据二氧化碳在光波段的吸收原理,应用 TDLAS 系统可以直接反演出二氧化碳浓度。本实验中是测量了两层的浓度,反演出二氧化碳的浓度梯度。图 5 中虚线是上层的二氧化碳的浓度,实线是下层的二氧化碳浓度,从图中可以看出二氧化碳夜间的浓度差要比白天的浓度差大。实际情况是,白天湍流上下交换活跃,气体浓度差小,夜间处于逆温状态,大气稳定,不利于气体上下交换,浓度差大。

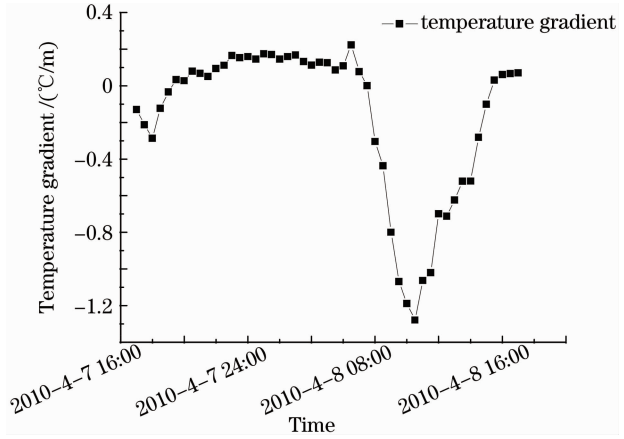


图 4 温度梯度曲线图

Fig. 4 Temperature-gradient curve

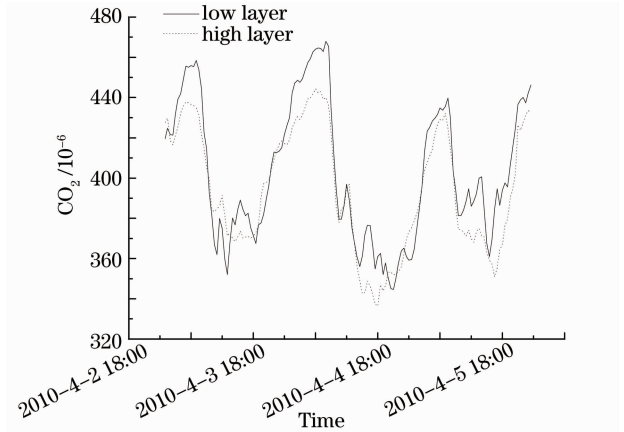


图 5 TDLAS 高低两层浓度曲线图

Fig. 5 Concentration of CO₂ in the low and the high layer from TDLAS

4.4 热通量、二氧化碳通量对比图

在分析显热通量前,先分析大口径闪烁仪工作时是否满足相似理论,将 $C_T^2(z-d)^{2/3}/T_*^2$ 和 $(z-d)/L_{MO}$ 绘制成图 6 的曲线,其中 C_T^2 为温度结构常数,

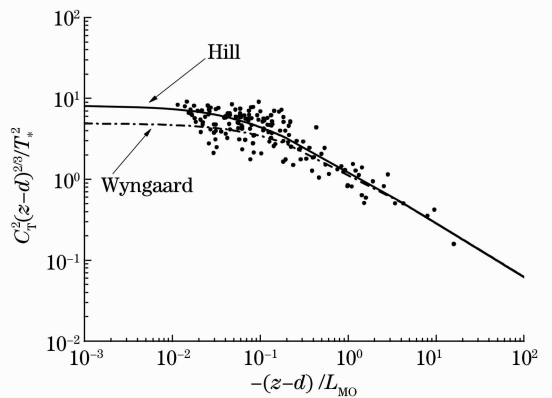


图 6 观测的 $C_T^2(z-d)^{2/3}/T_*^2$ 和 $(z-d)/L_{MO}$ 关系
Fig. 6 Observed values of $C_T^2(z-d)^{2/3}/T_*^2$ against observed $(z-d)/L_{MO}$

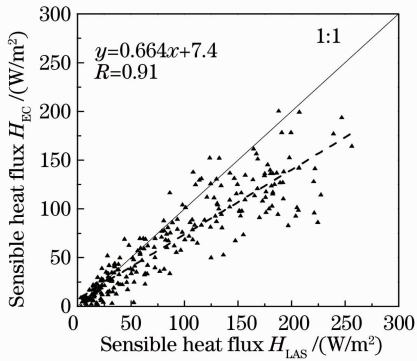


图7 大口径闪烁仪与涡动相关仪 30 min 平均显热通量对比图

Fig. 7 Comparison of the 30-min measurements of sensible heat flux derived from LAS and EC

z 为测量高度, d 为零平面位移, T_* 为特征温度, L_{MO} 为莫宁-奥布霍夫长度。实验结果表明, 满足 Hill 等^[18]提出的曲线关系, 在 $-(z-d)/L_{MO} > 1$ 后, Wyngaard 等^[19]提出的关系式和 Hill 提出的非常接近。由图可以看出大口径闪烁仪大多数情况是 $-(z-d)/L_{MO} < 1$ 的情况。分析数据之间, 取每天 09:00 到 16:30 的数

据共 208 组数据, 发现有 46 组数据明显不满足相似理论, 数据有效率为 77.9%。在满足相似理论前提下, 应用有效数据分析显热通量。

通过计算, 得到了显热通量和二氧化碳通量的数据(都仅给出白天的数据), 并与涡动相关仪测量的数据进行对比, 结果如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可以看出, 实验测量的显热通量数据整体偏大, 估计与实验场地的复杂风场有关, 原因如下: 1) 应用涡动相关仪测量的热通量数据, 通过能量平衡方程计算, 存在一个能量缺口, 如果能量闭合率增大, 大口径闪烁仪和涡动相关仪测量的显热通量差异会减小; 2) 两者的源区不同, 有研究用卫星遥感图像表明, 两者的源区不同点地表温度具有明显差异, 大口径闪烁仪的源区比涡动相关仪的源区大^[20]; 3) 由于地形的不平坦造成二次环流的存在, 单站涡动相关仪无法获取该数据, 造成涡动相关仪数据偏低, 有研究证实^[21], 用大尺度空间平均的测量方法, 闪烁法可以减小这种偏差, 在实验中所测的显热通量相比涡动相关仪高 20~50 W/m²。

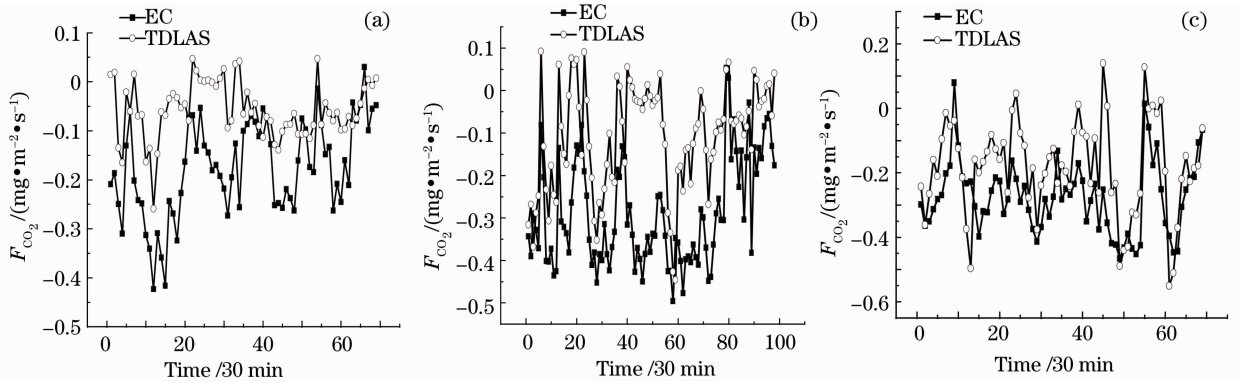


图8 TDLAS与涡动相关仪不同稳定度下 30 min 平均 CO₂ 通量对比图。(a) $-0.05 < \xi < -0.001$; (b) $-0.05 < \xi < -0.2$; (c) $-2.5 < \xi < -0.2$

Fig. 8 Comparison of the 30-min measurements of CO₂ flux derived from TDLAS and EC for different stabilities. (a) $-0.05 < \xi < -0.001$; (b) $-0.05 < \xi < -0.2$; (c) $-2.5 < \xi < -0.2$

从图 8 中可以看出, 二氧化碳通量数据普遍偏大、发散。发散的原因可能是因为在二氧化碳通量反演时用了相似理论, 所以根据大气稳定度情况对结果加以分析。用 ξ 代表关系式 $(z-d)/L_{MO}$ 。在分析中发现, 当 $-0.05 < \xi < -0.001$, 数据一致性较差, 但当 $-2.5 < \xi < -0.2$, 数据的结果一致性较好, 最好的结果相关度 R 达到 0.74。这说明在通过相似理论计算二氧化碳通量时, 在大气越不稳定时, 湍流中的热交换和气体交换过程就越相似。数据上偏大的主要原因如下: 1) 和前面大口径闪烁仪测量的显热通量偏大有关, 分析中用涡动相关仪测量的

显热通量数据可使二氧化碳通量值有减小的趋势; 2) 大口径闪烁仪的权重函数最大值在中间, 而温度梯度光学测量系统的权重函数最大值在接收端, 这样造成数据代表性不一致; 3) 理论中的湍流热交换系数与气体扩散系数相等的假设本身的不确定性造成的, Flesch 等^[22]在文献中指出这种不确定可以达到 20%, 这说明热交换过程和气体交换过程相似的假设不确定度也达到了 20%。

本实验中应该在路径上安装几套涡动相关仪的联合测量, 使得数据的对比更为严谨, 也便于分析路径上不同位置的数据特点。

实验中发现,即使都是由于折射率的影响,大气中温度梯度的变化与大口径闪烁仪测量的温度结构常数的变化并不完全一致,温度结构常数的最小值并非都出现在温度梯度为零的时刻。

5 结 论

利用自行研制的大口径闪烁仪、光学温度梯度仪和基于可调谐二极管激光吸收光谱术的开放光路痕量气体监测系统,实现了较大区域热通量和二氧化碳气体通量的快速监测,得出如下结论:

1) 通过对封丘农业生态站的显热通量和二氧化碳通量的实验数据分析,结果表明用光学遥感方法测量较大尺度区域范围的显热通量和二氧化碳通量,与涡动相关仪数据的相关度达到了 0.91 和 0.74;

2) 光学仪器的区域代表性都在几百米到几千米的范围,相比点式仪器,有更大的源区,区域代表性更好;

3) TDLAS 开放光路测量气体浓度,增大了区域代表性,而且与传统的闭路抽取式相比,不需要在测量前对气体作干燥、过滤等预处理,也避免了抽气管道的气流变化造成低频成分的损失,从而影响气体浓度的起伏;

4) 安装多组激光器,TDLAS 可以同时测量二氧化碳、甲烷和水汽等温室气体的浓度,从而计算出各自的通量,有很大的优势。

但目前也还存在一些问题待解决,如大口径闪烁仪测量夜间某些时刻的通量在弱湍流情况下出现奇异值,影响到气体通量的计算;温度梯度仪在非均匀地表的测量得不到不同高度的温度梯度算术平均;提高 TDLAS 技术的稳定性,比如减小温度漂移,避免吸收峰的偏离;采用中红外激光器提高 TDLAS 的精度,这都是以后研究要解决的问题。

致谢 作者对中国科学院封丘农业生态站提供涡动相关数据表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Wang Gengchen. A view on measurement methods for greenhouse gases emission from terrestrial ecosystem [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1997, **2**(3): 251~263
王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放吸收测量方法简评 [J]. 气候与环境研究, 1997, **2**(3): 251~263
- 2 M. B. Lavigne, M. G. Ryan, D. E. Anderon. Comparing nocturnal eddy covariance measurements to the estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at

- six coniferous boreal sites[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(24): 28977~28985
- 3 L. Mahrt. Flux sampling errors for aircraft and towers[J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1998, **15**(2): 416~429
- 4 M. Larzilliere, D. Roy, P. Chretien *et al.*. Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments[M]. Berlin: Springer, 2005
- 5 D. W. T. Griffith, R. Leuning, O. T. Denmead *et al.*. Air-land exchanges of CO₂, CH₄ and N₂O measured by FTIR spectrometry and micrometeorological techniques [J]. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**(11):1883~1884
- 6 E. Pattey, I. B. Strachan, R. L. Desjardins *et al.*. Application of a tunable diode laser to the measurement of CH₄ and N₂O fluxes from field to landscape scale using micrometeorological techniques [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 2006, **136** (3-4): 222~236
- 7 T. Wang, G. R. Ochs, S. F. Clifford. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n² [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(3): 334~338
- 8 Tian Yongzhi, Liu Jianguo, Zeng Zongyong *et al.*. Area-averaged sensible heat flux measurement based on the scintillation method[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(12): 1350~1354
田勇志, 刘建国, 曾宗泳等. 基于光闪烁法的区域平均显热通量测量系统[J]. 激光与红外, 2010, **40**(12): 1350~1354
- 9 Xiao Fenggang. Measuring Temperature-Gradient by Imaging Method Based on Atmosphere Refraction [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2008
肖锋刚. 折射法近地面大气温度梯度测量仪的研制[D]. 合肥:中国科学院合肥物质科学研究院, 2008
- 10 Zeng Zongyong, Xiao Fenggang, Liu Jianguo *et al.*. Optical measurement of temperature gradient in the inhomogeneous atmospheric surface layer[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, **4**(1): 3~5
曾宗泳, 肖锋刚, 刘建国等. 非均匀大气近地面层温度梯度的光学测量[J]. 大气与环境光学学报, 2009, **4**(1): 3~5
- 11 Li Jinyi, Du Zhenhui, Qi Rubin *et al.*. Measurement of absorption spectra of CO₂ at 6320~6336 cm⁻¹ using temperature tuning technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0130004
李金玉, 杜振辉, 齐汝宾等. 温度调谐技术测量 CO₂ 在 6320~6336 cm⁻¹ 波段的吸收光谱[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0130004
- 12 P. Werle. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 1998, **54**(2): 197~236
- 13 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1552~1556
陈东, 刘文清, 张玉钧等. 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1552~1556
- 14 Xia Hui, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. System design of open-path natural gas leakage detection based on Fresnel lens[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(3): 844~847
夏慧, 刘文清, 张玉钧等. 基于菲涅耳透镜开放光路天然气泄漏检测系统设计研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(3): 844~847
- 15 C. Thurtell, G. W. Wagner-Riddle, K. M. King *et al.*. Nitrous oxide and carbon dioxide fluxes from a bare soil using a micrometeorological approach [J]. *J. Environ. Quality*, 1996, **25**(4): 898~907
- 16 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 898~902
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径闪

- 激光闪烁仪[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 898~902
- 17 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Comparison of refractive index structure constant of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 538~542
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 利用闪烁和漂移效应测量大气折射率结构常数的对比分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(4): 538~542
- 18 R. Hill, G. R. Ochs, J. J. Wilson. Measuring surface-layer fluxes of heat and momentum using optical scintillation[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1992, **58**(4): 391~408
- 19 J. C. Wyngaard, Y. Izumi, A. Stuart *et al.*. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(12): 1646~1650
- 20 Shaomin Liu, Ziwei Xu, Weizhen Wang *et al.*. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2011, **15**(4): 1291~1306
- 21 T. Foken, M. Mauder, C. Liebethal *et al.*. Energy balance closure for the LITFASS-2003 experiment[J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 2010, **101**(1-2): 149~160
- 22 T. K. Flesch, J. H. Prueger, L. H. Jerry. Turbulent Schmidt number from a tracer experiment[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2002, **111**(4): 299~307

栏目编辑：谢 婧