

深圳气象梯度观测塔近地层通量数据初步分析

张春生 卢超 钟晓勇 高瑞泉 刘爱明 古锐昌

(深圳市国家气候观测台, 深圳 518040)

摘要: 涡度相关系统是测量近地面湍流输送通量最普遍的观测仪器, 利用2017年9月—2018年2月深圳石岩地区气象梯度塔的涡动通量观测资料, 分析了秋冬季节石岩地区近地面动量、感热、潜热和CO₂通量结果, 得出如下结论: 秋季和冬季近地面动量通量日变化非常一致。秋季近地面感热通量小于冬季, 但潜热通量远大于冬季, 导致总热通量大于冬季, 这可能与该地区秋冬季节下垫面性质, 如土壤湿度等的改变有关。秋、冬季CO₂通量日平均为负值, 表明该地区为碳汇, 秋季CO₂负值更强, 这可能与秋季植被更茂盛有关。

关键词: 涡度相关, 湍流通量, 梯度塔, 地气交换

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.021

Preliminary Analysis of Near-Surface Flux Data from Meteorological Gradient Observation Tower in Shenzhen

Zhang Chunsheng, Lu Chao, Zhong Xiaoyong, Gao Ruiquan, Liu Aiming, Gu Ruichang

(Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040)

Abstract: Eddy covariance system is the most common observation instrument for measuring turbulent transport flux near surface. Based on the eddy flux data observed by meteorological gradient pyramid in Shiyan Area of Shenzhen from September 2017 to February 2018, the near-surface momentum, sensible heat, latent heat and CO₂ fluxes in autumn and winter are analyzed, and the following conclusions are drawn. The diurnal variation of near-surface momentum fluxes is consistent in autumn and winter. In autumn, the sensible heat flux near surface is less than that in winter, but the latent heat flux is much larger in autumn, which causes the total heat flux to be larger in autumn than in winter. It may be related to the changes of underlying surface property, such as soil moisture. The daily average of CO₂ fluxes in autumn and winter is negative, indicating that this area is a carbon sink, and the negative value of CO₂ is lower in autumn, which may be related to the flourishing vegetation.

Keywords: eddy covariance, turbulent flux, meteorological gradient observation tower, land-atmosphere exchange

0 引言

流体力学的研究表明, 大气边界层内大气的主要运动方式是湍流, 湍流输送是地球生态系统和大气进行热量、水汽、CO₂等物质与能量交换的主要方式。进行湍流通量观测能够很好地掌握大气边界层各种物理量的分布和变化, 进而对边界层进行分析研究, 掌握地气间物质能量的运行形式。获取湍流通量对大气模式, 特别是陆面模式的检验和发展、遥感产品的地面验证等都具有非常重要的作用, 可以有效提高数值模式天气预报的精度。观测湍流通量的方法一般有空气动力学方法、热量平衡方法和涡度相关法^[1-4]。

19世纪末, 英国物理学家Osborne Reynolds逐步建立了涡度相关的理论基础, 受观测技术和仪器的性

能限制, 响应速度慢的传统观测仪器并不能满足涡度相关的观测的需要。随着现代观测技术的不断发展, 快速响应的观测设备如三维超声风速仪, 痕量气体分析仪等观测设备的出现, 加上计算机技术的发展, 使涡度相关法得到发展。20世纪末, 全球最大的通量观测网FLUXNET开始建设, 是一个由微气象塔组成的、以涡动相关方法为主观测地球生态系统与大气之间的水汽、CO₂和能量交换的通量观测网络^[5-7]。

深圳市气象局于2016年建成356 m气象梯度塔, 梯度塔位于石岩, 塔下植被以树木为主, 依托梯度塔建成了涡度相关系统, 进行通量和能量平衡观测, 获得了大量连续的观测资料。本文利用梯度塔上安装的涡度相关系统观测数据, 计算2017年秋季和冬季的近地面湍流输送通量, 对该地区地气间能量和物质交换进行了初步分析。

1 资料和方法

本文采用资料来源于涡度相关系统, 该系统安

收稿日期: 2018年11月30日; 修回日期: 2019年3月30日

第一作者: 张春生(1987—), Email: 253329827@qq.com

资助信息: 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2018M40)

装在深圳地区石岩综合气象观测基地的气象梯度塔上, 距离地面高度为10 m。该观测场地形平坦, 植被以热带常绿阔叶林为主, 植被高度一般为3~5 m。涡度相关系统主要由Cambell公司的CSAT3超声风速仪和LI-COR公司的水汽CO₂分析仪构成, 测量要素包括的三维风速、超声虚温, 以及水汽、CO₂浓度。测量要素的主要技术指标见表1。本文使用的观测资料时间跨度为2017年9月—2018年2月, 为便于分析, 定义9—11月为秋季, 12月—次年2月为冬季。

表1 观测要素主要技术指标
Table 1 Main technical indicators of observational elements

要素	单位	采样频率/Hz	测量仪器
三维风速	m/s	10	CSAT3超声风速仪
超声虚温	℃	10	CSAT3超声风速仪
水汽密度	g/m ³	10	LI-COR 7500水汽CO ₂ 分析仪
CO ₂ 密度	mg/m ³	10	LI-COR 7500水汽CO ₂ 分析仪

涡度相关系统是用于计算分析地气交换流量最常用的观测系统, 按原理其观测数据做简单的协方差和雷诺平均后即可算得湍流输送通量。但在实际操作中, 为了得到更加准确的结果, 需要对涡度相关系统观测数据进行一系列的处理, 包括异常数据剔除、坐标旋转、空气密度订正、频率响应修正等^[8-14]。在国际上也有一些通用的软件对涡度相关观测资料进行质量控制和通量计算, 如LI-COR公司的EddyPro, EddyPro软件界面友好, 功能全面, 可选方案多样, 本文使用该软件对涡度相关系统观测数据进行了质量控制和通量计算。

1.1 异常数据剔除

异常数据剔除的重要步骤是进行异常数据筛选, 在此假设通量计算时间段(30 min)内的观测值均服从正态分布, 认为过度偏离平均值的观测值即为异常数据。具体操作为: 计算30 min内观测值的平均值及标准差, 对偏离平均值超过3.5倍标准差的观测值标记为异常数据并赋为缺测值, 如此重复3次, 至数据符合要求^[14]。本文数据处理过程中不进行数据插补, 当30 min内缺测值数量大于20%时, 则该30 min的通量为缺测, 不再计算该时间段内的交换通量。

1.2 坐标旋转

常用的坐标旋转方法有二次旋转、三次旋转和平面拟合^[5], 研究表明三次旋转方法会引入较大的误差, 基本不再使用^[14-15]。平面拟合方法一度非常流行, 但其旋转角度需使用较长时间观测序列计算确定(一般要数天甚至几周), 后来有研究显示其旋转角度随风速风向变化较大, 如采用单一的旋转角度, 会

给通量计算带来很大的不确定性, 尤其是下垫面不平坦的情况^[6]。本文也曾对利用平面拟合法计算了不同时间段的旋转角度, 发现各月旋转角度差异较大, 贸然使用固定的旋转角度可能会给通量计算带来较大误差, 因此决定不采用平面拟合方法作坐标旋转。二次旋转法每次仅用30 min计算旋转角度, 旋转角度受风速风向变化的干扰小, 因此本研究采用二次旋转方法对涡度相关数据进行坐标旋转处理, 具体做法参考了宋涛等^[6]和刘辉志等^[7]的研究。

1.3 WPL 订正

WPL订正即空气密度订正。通常仪器在测量大气中的水汽、CO₂密度时, 通过测量空气中的分子数计算其密度, 将分子密度转换成绝对密度需要用到空气密度。由于空气密度会随温度和气压波动而发生变化, 因此在计算中我们需要考虑空气密度变化的影响, 对水汽、CO₂通量进行订正, WPL订正的具体做法参考Webb等的研究^[16]。

此外, 本文还对地气交换通量进行了高频和低频响应修正, 处理方案由EddyPro软件根据仪器的位置等参数确定。

为分析秋季和冬季的湍流输送通量特征, 本文选用2017年9月—2018年2月的观测数据计算湍流输送通量。为更好地反映所选数据时段的湍流交换特征, 计算了两个季节平均的湍流输送通量日变化并分析其特征。

2 结果分析

2.1 动量通量

图1为深圳气象梯度观测塔近地层秋季和冬季近地面动量通量日变化图, 从图中可以看出, 秋季和冬季近地面动量通量日变化非常一致。日出前(08时以前)动量通量数值较小且变化不大, 约为 $6 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ 。日出后, 动量通量迅速上升,

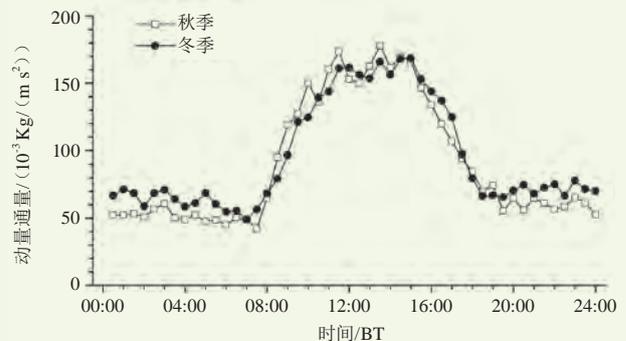


图1 秋季和冬季近地面动量通量日变化
Fig. 1 Diurnal variation of near surface momentum flux in autumn and winter

在正午达到最大值，约为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ 。到傍晚时分，动量通量开始从高值回落，日落后（18时以后）下降至日出前的水平。可见该观测站点地气交换与典型的边界层日变化过程比较一致，在凌晨和夜间，边界层稳定，湍流强度小，地气间交换弱，在白天，地面加热低层大气导致边界层稳定性被破坏，湍流发展强盛，地气间交换强。

2.2 感热通量

图2为秋季和冬季近地面感热通量日变化图，可以看出，深圳气象梯度观测塔秋季和冬季近地面感热通量存在明显的日变化，白天强夜间弱，且凌晨和夜间为负值。但冬季感热通量明显大于秋季，秋季感热通量平均值为 $13.2 \text{ W}/\text{m}^2$ ，最大值为 $82.9 \text{ W}/\text{m}^2$ （出现在12时），而冬季平均值为 $21.6 \text{ W}/\text{m}^2$ ，最大值可达 $118.0 \text{ W}/\text{m}^2$ （出现在13:30）。表面上看，感热通量冬季大于秋季不符合常识，原因是一般认为秋季太阳辐射大于冬季，但这里面还有个能量分配的问题，下面的分析会说明冬季感热通量大于秋季是可能且合理的。

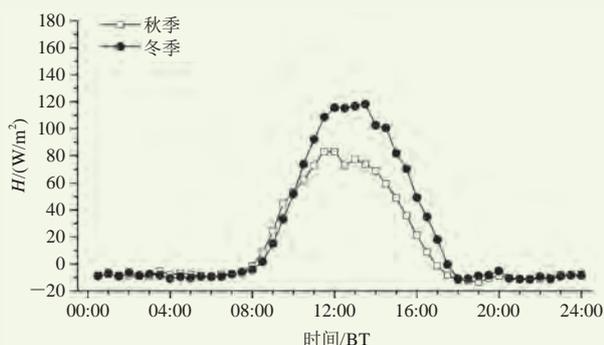


图2 秋季和冬季近地面感热通量日变化

Fig. 2 Diurnal variation of near surface sensible heat flux in autumn and winter

2.3 潜热通量

图3为秋冬季节潜热通量日变化图，图中显示秋

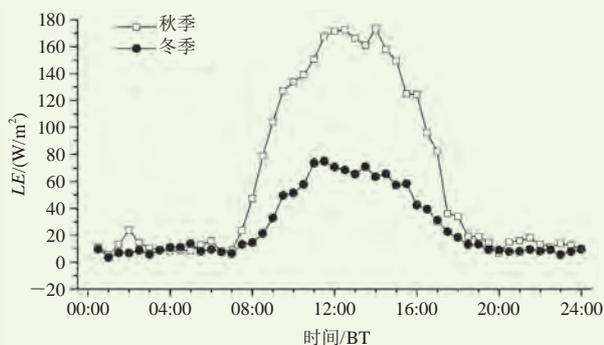


图3 秋季和冬季近地面潜热通量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of near-surface latent heat flux in autumn and winter

季和冬季潜热通量同样存在明显的日变化，白天大夜间小。与感热通量不同，潜热通量全天均为正值，在凌晨和夜间约为 $10 \text{ W}/\text{m}^2$ ，在白天可达 $50 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上。秋季潜热通量日平均值 $61.5 \text{ W}/\text{m}^2$ ，最大值高达 $173.4 \text{ W}/\text{m}^2$ （出现在14时）。冬季潜热通量明显小于秋季，日平均值为 $26.9 \text{ W}/\text{m}^2$ ，最大值为 $74.9 \text{ W}/\text{m}^2$ （出现在11:30）。

地面受太阳辐射加热后，主要以感热和潜热的方式加热大气，这两者之和为总热通量，与近地面净辐射成正比。图4显示，深圳气象梯度观测塔秋季近地面总热通量明显高于冬季，符合秋季净辐射高的特点。可见该区域冬季感热通量高于秋季是完全可能的，主要是秋季地面将更多的能量以潜热的形式输入大气，导致输入大气的感热能量减小。感热通量和潜热通量的比值称为波文比，一般不同下垫面的波文比差别很大，还有研究显示同一地区干湿季或季风爆发前后波文比差别也很大^[17-18]。深圳气象梯度观测塔秋季日平均波文比为0.21，冬季波文比为0.80，可见该地区波文比季节差异极大。许多研究表明^[19-20]，近地面感热和潜热通量的比例分配最主要受土壤湿度的影响，目前我们还缺乏该区域土壤湿度的数据，在将来的研究中可对此作进一步分析。

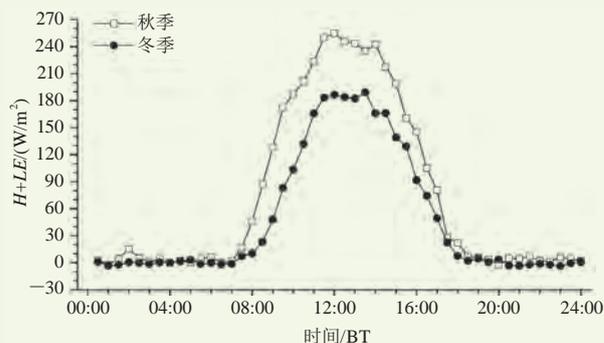


图4 秋季和冬季近地面总热通量日变化

Fig. 4 Diurnal variation of total near surface heat flux in autumn and winter

2.4 CO₂ 通量

从图5秋季和冬季近地面CO₂通量日变化图可以看出，深圳气象梯度观测塔近地层秋季和冬季的CO₂通量呈现相似的日变化特征，凌晨和夜间为较小的正值，白天为较大的负值。秋季CO₂通量日平均值为 $-1.89 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，夜间约为 $2.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，白天负值可达 $-10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上。冬季CO₂通量绝对值比较秋季小，日平均值为 $-1.33 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，白天负值可达 $-8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。上述结果表明该区域为碳汇，CO₂通量的季节变化可能是受下垫面植被影响，秋季

植被多,光合作用强,故向下的CO₂通量更大,固碳能力更强。

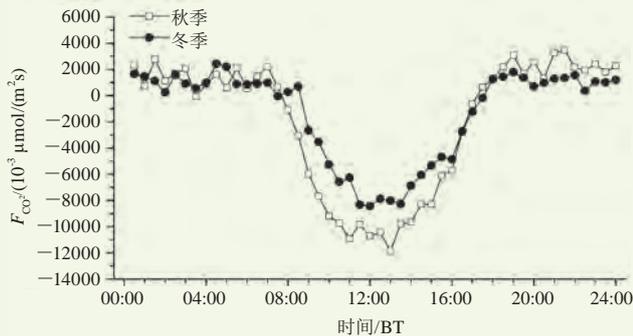


图5 秋季和冬季近地面CO₂通量日变化

Fig. 5 Diurnal variation of near surface CO₂ flux in autumn and winter

3 结论

利用深圳市气象梯度塔涡度相关资料计算了秋冬季近地面动量、感热、潜热和CO₂通量,发现该地区地气交换存在明显的日变化特征,而且秋季和冬季存在明显差异。主要结论有:1)秋季和冬季近地层动量通量日变化一致,最大值出现在正午,约为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ Kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^2)$;2)秋季总热通量日平均值为 61.5 W/m^2 ,大于冬季日平均值,主要原因是秋季潜热通量远大于冬季,但秋季感热通量小于冬季;3)秋冬季CO₂通量日平均为负值,表明该地区为碳汇,其中秋季碳汇作用更强。

参考文献

[1] 何文,刘辉志,冯健武.城市近地层湍流通量及CO₂通量变化特征.气候与环境研究,2010,15(1):21-33.
[2] 胡非,洪钟祥,陈家宜,等.白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析.大气科学,

2006,30(5):883-893.
[3] 王新平,王琳琳,高志球,等.夏季北京城市大气边界层湍流通量的塔层观测.气候与环境研究,2008,13(5):629-637.
[4] 王欣,卞林根,逯昌贵.北京秋季城区和郊区大气边界层特征参数研究.气候与环境研究,2003,8(4):475-484.
[5] 王介民,王维真,奥银焕,等.复杂条件下湍流通量的观测与分析.地球科学进展,2007(8):791-797.
[6] 宋涛,修天阳,孙扬,等.城市复杂环境下湍度相关通量观测的适用性分析.环境科学学报,2014,34(05):1089-1098.
[7] 刘辉志,洪钟祥.北京城市下垫面边界层湍流统计特征.大气科学,2002(02):241-248.
[8] Lee X, Massman W, Law B, Editors. Handbook of micrometeorology—A Guide for surface flux measurement and analysis, 2004. Kluwer Academic Publishers, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library.
[9] 王成刚,孙鉴泞,蒋维楣,等.不同地表通量计算方案的比较与改进.气象科学,2009,29(5):591-597.
[10] 汪瑛,卞林根,谌志刚.CO₂湍流通量误差的修正和不确定性研究进展.应用气象学报,2004,15(1):234-244.
[11] 傅敏宁,郑有飞,邓玮,等.鄱阳湖地区复杂地表条件下一次强降水过程的近地面边界层特征.大气科学学报,2013,36(1):60-67.
[12] 陈家宜,范邵华,赵传峰,等.涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究.大气科学,2006,30(3):423-432.
[13] 刘树华,茅宇豪,胡非,等.不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究.地球物理学报,2009,52(3):616-629.
[14] 徐自为,刘绍民,官丽娟,等.涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究.地球科学进展,2008,23(4):357-370.
[15] 谌志刚.近地层大气湍流参数求解方法的比较及其应用.北京:中国气象科学研究院,2004.
[16] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quart J R Met Soc, 1980,106:85-100.
[17] Zhou L, Zou H, Ma S, et al. The observed impacts of South Asian summer monsoon on the local atmosphere and the near - surface turbulent heat exchange over the Southeast Tibet. Journal of Geophysical Research: Atmos, 2015, 120: 11509-11518.
[18] 左洪超,胡隐樵,吕世华,等.青藏高原安多地区干、湿的转换器边界层特征.自然科学进展,2004,14(5):535-540.
[19] Elfatih A B. A soil moisture-rainfall feedback mechanism 1. Theory and observations. Water Resources Research, 1998, 34(4): 765-776.
[20] Fischer E M, Seneviratne S I, Vidale P L, et al. Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. J Climate, 2007, 20: 5081-5099.

深圳市气象局推出“预警铃”，精细化服务学生及家长

■ 李沛奕 易红梅

台风暴雨天气学生们该如何出行一直是备受社会关注的民生问题。深圳市气象局迎难而上,主动作为,探索在重点时段、面向特定人群进行精细化气象预警预报服务,将为全市学生及家长提供高级别台风暴雨上下学时段精细预警提示服务纳入市政府2019年40项民生实事之一,提升学生及家长在高级别台风暴雨天气下的安全防御能力。目前,深圳市气象局联合市教育部门依托“i深圳”手机app、“深圳天气”微

信公众号和“深圳天气”手机app,面向广大学生家长推出“预警铃”,广大学生和家長个性化定制上下学预警信息,掌握所在区域的天气预警信息,根据台风暴雨防御指引做出合理安排,安全出行。针对上下学期间的高影响天气,深圳市气象局共发布8次“预警铃”信息,服务超百万人次,得到学校、学生和家長等各方面的好评。

(作者单位:深圳市气象局)