

# 珠三角丘陵灌木下垫面湍流特征\*

卢栩诗<sup>1,2</sup>, 蓝长星<sup>1,3</sup>, 王宝民<sup>1,4</sup>

1. 中山大学大气科学学院 / 广东省环珠江口气候环境与空气质量变化野外科学观测研究站, 广东 珠海 519082
2. 广东省江门市气象局, 广东 江门 529000
3. 卡尔斯鲁厄理工学院气象和气候研究所, 德国 加尔米施-帕滕基兴 82467
4. 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室 / 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

**摘要:** 利用 2017 年珠三角野外观测站湍流连续观测资料, 对丘陵灌木下垫面的热量通量、CO<sub>2</sub> 质量浓度和通量、湍流动能等特征进行分析, 结果表明: 1) 丘陵灌木下垫面潜热通量在全年地表能量平衡中占主导地位, 对比其他类型下垫面则相反。2) CO<sub>2</sub> 质量浓度比其他类型下垫面低, 而 CO<sub>2</sub> 通量变化幅度远大于其他类型下垫面, 说明丘陵灌木下垫面的光合作用及呼吸作用比其他植被覆盖率和密集度较低的下垫面明显较强。3) 湍流动能白天大, 夜间小。白天夏季湍流动能最大, 冬季峰值出现时间略早于夏季。4) 无量纲速度标准差随稳定度的变化满足  $\frac{\sigma_w}{u_*} = a(1 + b\zeta)^{1/3}$  的形式, 归一化风速标准差符合  $\frac{\sigma_u}{u_*} > \frac{\sigma_v}{u_*} > \frac{\sigma_w}{u_*}$  的一般规律, 说明丘陵灌木下垫面的物理特性差异对垂直风速的统计量影响比水平风速的统计量小。当大气越偏离中性状态, 无量纲速度标准差越大, 水平方向无量纲速度标准差比垂直方向无量纲速度标准差的离散程度大。丘陵灌木下垫面的无量纲风速分量系数在三个方向上都比大部分其他类型下垫面偏高。5) 协谱基本符合 Kansas 实验的归一化协谱。不稳定条件下, 低频大涡对湍流通量有较显著的贡献。稳定条件下各协谱的谱峰所对应的无量纲频率较不稳定条件下大, 暗示着受浮力抑制作用, 对动量、水汽和感热有显著输送作用的涡旋尺度减小。

**关键词:** 珠三角地区; 丘陵灌木下垫面; 湍流通量; 湍流速度标准差; 湍流协谱

**中图分类号:** P41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)05-0063-10

## Turbulence characteristics of hilly shrubs of Pearl River Delta

LU Xushi<sup>1,2</sup>, LAN Changxing<sup>1,3</sup>, WANG Baomin<sup>1,4</sup>

1. School of Atmospheric Sciences / Guangdong Provincial Field Observation and Research Station for Climate Environment and Air Quality Change in the Pearl River Estuary, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Province Jiangmen Meteorological Administration, Jiangmen 529000, China
3. Institute of Meteorology and Climate Research-Atmospheric Environmental Research, Karlsruhe Institute of Technology, Garmisch-Partenkirchen 82467, Germany
4. Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies / Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

\* 收稿日期: 2024-02-28 录用日期: 2024-04-16 网络首发日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(U21A6001); 广东省基础和应用基础重大项目(2020B0301030004); 广东省重点实验室项目(2020B1212060025)

作者简介: 卢栩诗(1992年生), 女; 研究方向: 大气边界层与大气湍流;  
E-mail: 1348157407@qq.com

通信作者: 王宝民(1968年生), 男; 研究方向: 大气边界层与大气湍流;  
E-mail: wangbm@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240059

**Abstract:** Based on the continuous observation data of turbulence in 2017 from a field observation station in the Pearl River Delta region, the turbulence characteristics of heat flux, CO<sub>2</sub> concentration and flux, and the turbulent kinetic energy of hilly shrubs were analyzed. The results show that: (1) Latent heat flux plays a dominant role in the annual surface energy balance in suburban areas, while the opposite is true for the other land surface patterns. (2) The CO<sub>2</sub> concentration at the observation point is slightly lower than those at other land surface patterns, and the variation range of CO<sub>2</sub> flux is much greater, indicating that the photosynthesis and respiration of hilly shrubs are significantly stronger than that at lower vegetation coverage and density land surface patterns. (3) Turbulent kinetic energy is large during the day-time but small at night, maximum in summer daytime; the peak occurs slightly earlier in winter than in summer. (4) The variation of dimensionless velocity variance with atmospheric stability is accord the form of  $\frac{\sigma_i}{u_*} = a(I + b\zeta)^{1/3}$ ; the normalized wind speed standard deviation satisfies a general law of  $\frac{\sigma_u}{u_*} > \frac{\sigma_v}{u_*} > \frac{\sigma_w}{u_*}$ . It shows that the difference in physical characteristics of the hilly shrub has less effect on the vertical wind speed statistics than that of the horizontal wind speed statistics. The more the atmosphere deviates from the steady state, the greater the dimensionless velocity variance; The dimensionless velocity variance in the horizontal direction is more discrete than that in the vertical direction. The dimensionless wind velocity component coefficients in three directions of the hilly shrub are higher than those of most other land surface patterns. (5) The cospectra basically conforms to the Kansas normalized cospectra. Under unstable conditions, low-frequency vortices contribute significantly to turbulent flux. The dimensionless frequencies corresponding to the spectral peaks of each cospectra under stable conditions are larger those that under unstable conditions, suggesting that the vortex scale which has a significant transport effect on momentum, water vapor, and sensible heat is reduced under the effect of buoyancy suppression.

**Key words:** the Pearl River Delta region; hilly shrubs; turbulent flux; turbulent velocity standard deviation; turbulent cospectra

人类活动主要发生在大气边界层内, 工业生产和日常生活产生的污染物的扩散与大气湍流运动密不可分。大气边界层内的大气运动是湍流性的, 它影响着大气与下垫面间能量、动量和水汽的交换, 也影响着人类活动与气候变化之间的联系。要研究空气污染来源及跨区域传输特征, 则必须先了解大气边界层在不同气候及下垫面条件下的湍流运动机理及结构特征。

不同下垫面的热力和动力粗糙度不同, 可能造成地气交换以及湍流特征不同。目前国内已有一些针对不同下垫面大气湍流通量特征的研究, 如宁夏南部山区退耕还草区湍流通量和地表通量的分布和季节变化特征(张晓煜等, 2006); 淮河流域农田地气相互作用日、季节变化特征、作物不同生长期地表反照率、水热通量、CO<sub>2</sub>通量、总体输送系数以及能量平衡比率等的变化规律(伍琼, 2009); 北京城市近地层动量通量、感热通量、潜

热通量和CO<sub>2</sub>通量的典型日变化、月平均日变化和季节变化特征(何文等, 2010); 夏季珠江口外海域海气通量船基观测(夏华永等, 2008); 晴雨转换过程中林芝地区草地下垫面的近地层基本气象要素、湍流通量和辐射平衡各分量的变化特征(李宏毅等, 2018)。另外, 也有研究针对不同气象条件下, 同一下垫面类型的湍流特征分析, 如不同季节、高温、台风强天气过程下苏州的湍流特征(陈燕等, 2021); 大风过境时北京325 m气象观测塔47 m和120 m高度湍流通量演变特征及其影响因子, 以及与风速和稳定度等参数的关系(张宏升等, 2010); 西南季风爆发前后大理近地面层的风速及风向变化特征、风速廓线和垂直切变变化特征以及动量、感热和潜热通量变化特征(孙绩华等, 2015)。但这些研究主要集中在草地、不同放牧程度的草原、不同作物的农田、海洋、城市等下垫面(丁裕国等, 1986; 李锁锁等, 2012; 吴彬贵等,

2013), 偶有涉及沙漠、湖泊、河流、冻土等(艾力·买买提明等, 2008; 杨智等, 2008; 尚伦宇等, 2011)。国外的研究主要关注水面(Ikani et al., 2024)、高空(Vickers et al., 1997)、大陆架(Reimers et al., 2012)、沙丘(Behera et al., 2024)等的湍流特征。目前国内外对于郊区丘陵灌木下垫面湍流特征的研究还较少。

本文利用一年的连续观测资料, 对珠三角丘陵灌木下垫面的湍流量特征进行分析, 了解其能量和物质的地气交换方式, 包括 $\text{CO}_2$ 的质量浓度变化及主要来源等; 通过分析湍流动能特征, 了解其大气湍流扩散方式。另外, 可以充分利用前人研究的其他不同下垫面, 尤其是草原草地、沙漠等观测结果, 与本文的观测结果进行对比, 比

较植被密集程度对地气碳循环的影响, 为环境治理和气候改善提供理论依据。

## 1 数据及处理

### 1.1 数据

本文使用的观测数据来源于广东省环珠江口气候环境与空气质量变化野外科学观测研究站增城基地。该站位于丘陵地形(图1a), 周边为灌木丛(图1b), 属于丘陵灌木下垫面。观测仪器为EC150开路涡动协方差系统, 安装于70 m的气象塔50 m的高度, 采样频率为10 Hz。数据包括三维风速、 $\text{CO}_2$ 质量浓度( $\rho(\text{CO}_2)$ )、水汽质量浓度和超声虚温, 时间长度为2017年1月1日~12月31日全年连续观测数据。

(a) 增城基地地形图



(b) 增城基地周边环境



图1 增城基地地形图(a)和周边环境(b)

Fig. 1 Topographic map of Zengcheng Base (a) and surrounding environment (b)

### 1.2 原始数据预处理

因湍流观测数据会因下垫面不同或气象条件因素而产生观测偏差, 从而对数据准确性产生影响, 因此需通过对数据进行预处理, 能筛选出适用于珠三角丘陵灌木下垫面的湍流观测数据, 用于后续分析。本文采用涡动相关法进行分析, 为保证数据的可靠性和准确性, 在分析前对数据进行了野点剔除、坐标旋转校正、频率响应校正、超声虚温校正、空气密度校正等预处理(Reimers et al., 2012; 刘海坤等, 2017; 钟雪平等, 2017; 赵佳伟等, 2020)。

## 2 湍流热量通量特征

热量通量包括潜热和感热通量。从全年数据来看, 观测点的潜热通量全年平均值为 $52.3 \text{ W/m}^2$ , 最大值出现在8月, 最小值出现在3月; 感热通量

全年平均值为 $13.5 \text{ W/m}^2$ , 最大值出现在2月, 最小值出现在11月。感热与潜热通量年平均日变化均为单峰型(图2a), 峰值均出现在午间13:15前后, 夜间则热通量低且变化平缓。潜热通量年平均日变化范围为 $6.25 \sim 158.47 \text{ W/m}^2$ ; 感热通量年平均日变化范围为 $-8.32 \sim 75.42 \text{ W/m}^2$ , 日间潜热通量明显大于感热通量, 但夜间感热通量和潜热通量相差较小。

从热量通量月平均日变化(图2b)来看, 各月平均潜热通量均大于感热通量。感热通量变化幅度在四季相差不大, 潜热通量变化幅度在4~10月明显大于感热通量, 而在12月~翌年3月与感热通量基本持平, 2月的日变化幅度甚至小于感热通量。

可见观测点的潜热通量在全年地表能量平衡中的作用占主导地位。对比不同的下垫面条件, 半干旱草地(张晓煜等, 2005)的近地层通量主要由

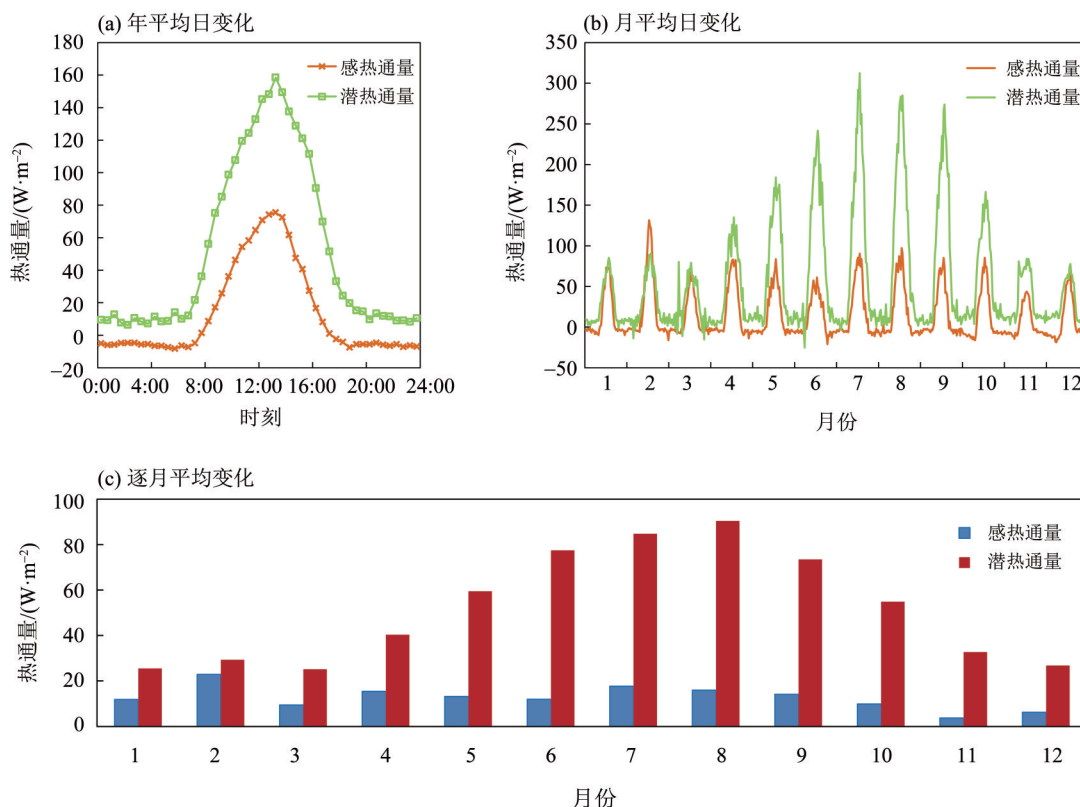


图2 珠三角丘陵灌木下垫面热通量变化

Fig. 2 The variation of heat flux at the hilly shrubs in the Pearl River Delta

感热通量控制, 潜热通量很小; 2011—2012年苏州城市(陈燕等, 2021)和2007年塔克拉玛干沙漠(艾力·买买提明等, 2008)观测试验中, 感热通量也明显高于潜热通量; 在2006年北京城市(何文等, 2010)观测试验中, 得出春、冬季感热为主, 夏、秋季潜热为主的结论。感热通量可以直接反映太阳辐射的情况, 但有时会受到人类活动热排放及下垫面散热情况的影响(何文等, 2010)。潜热通量反映地表水分的蒸发状况, 因夏季水分条件好、热量充足、湍流发展旺盛(陈燕等, 2021), 蒸发作用强烈, 一般夏秋季的潜热通量会明显大于冬春季。观测点所在的增城位于珠三角地区, 4~10月处于汛期, 多降雨, 导致潜热通量变化幅度较大。尤其是后汛期(7~10月)常出现午后热对流天气, 午间潜热通量会明显大于夜间的潜热通量, 日夜变化较前汛期(4~6月)更明显, 因此此时间段的潜热通量日变化幅度较大, 符合降雨导致潜热通量增大的一般规律。但观测点的下垫面类型为丘陵灌木, 属于常绿型植被, 冬春季植物蒸发作用仍存在, 因此即使冬春季降雨减少, 潜热通量仍大于感热通量。对比可见, 植被覆盖率、密集度高的下垫面, 地气间的热量输送受太阳辐射和

人为热源影响较小, 但受降雨等天气变化的影响较大, 植被覆盖率及密集度能影响区域局地热量交换的方式。

### 3 CO<sub>2</sub>质量浓度及通量特征

#### 3.1 CO<sub>2</sub>质量浓度时间变化特征

观测点全年CO<sub>2</sub>质量浓度 $\rho(\text{CO}_2) = 601.81 \sim 970.61 \text{ mg/m}^3$ , 平均 $708.06 \text{ mg/m}^3$ 。从 $\rho(\text{CO}_2)$ 季节平均日变化曲线(图3a)来看, 各季节 $\rho(\text{CO}_2)$ 日变化均呈现单峰型。峰值出现在04:00~09:00, 谷值均出现在14:00~16:00。其中, 春季、夏季季节平均 $\rho(\text{CO}_2)$ 日变化谷值出现在16:15, 秋季和冬季平均 $\rho(\text{CO}_2)$ 日变化谷值出现在15:45。从质量浓度高低来看, 全天 $\rho(\text{CO}_2)$ 从高到低依次为冬季、春季、秋季、夏季, 平均分别为 $733.86$ 、 $715.91$ 、 $699.87$ 和 $682.60 \text{ mg/m}^3$ ; 其中冬季凌晨至早晨的 $\rho(\text{CO}_2)$ 只略高于春季, 而明显高于秋季和夏季。从月平均日变化曲线(图3b)可以看出,  $\rho(\text{CO}_2)$ 有明显日变化, 各月的日变化趋势基本一致, 日间较夜间浓度低, 但6~9月的夜间 $\rho(\text{CO}_2)$ 明显低于其他月份。

因观测点位于郊区, 汽车排放的CO<sub>2</sub>和人类活

动排放的CO<sub>2</sub>也少, 这部分的CO<sub>2</sub>排放也主要具有白天多、夜间少的规律; 另外, 观测点附近的CO<sub>2</sub>质量浓度还反映了丘陵灌木下垫面的光合作用和呼吸作用情况。各季节平均ρ(CO<sub>2</sub>)日变化峰值出现时间均在04:00~09:00, 说明灌木植被的呼吸作用在清晨至早晨达到最强; 各季节平均ρ(CO<sub>2</sub>)开始下降的时间有差异, 主要原因可能是夏季日出时间早于春秋季, 而春秋季的日出时间早于冬季, 日出时间与灌木植被开始光合作用的时间基本一致。各季节平均ρ(CO<sub>2</sub>)差异主要反映各季节灌木植被光合作用与呼吸作用的强弱, 冬春季日照少、气温低, 光合作用吸收CO<sub>2</sub>的能力较弱; 秋季日照稍多、气温相对不低, 因此灌木植被光合作用稍强于冬春季; 夏季日照时间最长最充沛、气温明显高于其余季节, 因此光合作用最强, ρ(CO<sub>2</sub>)最低。春季ρ(CO<sub>2</sub>)波动大于冬季, 说明春季灌木植被的光合作用和呼吸作用强于冬季。观测点为代表的丘陵灌木下垫面的ρ(CO<sub>2</sub>)远低于2014年南京

主城区道路(张馨木等, 2020)和2016年黄河三角洲湿地非生长季不同深度土壤的CO<sub>2</sub>浓度的观测结果(王先鹤等, 2018)。

### 3.2 CO<sub>2</sub>通量时间变化特征

观测点全年CO<sub>2</sub>通量变化范围为-8.23~25.19 mg/(m<sup>2</sup>·s)。从CO<sub>2</sub>通量月平均日变化曲线(图4a)可以看出, CO<sub>2</sub>通量的日变化波动较多, 白天为负值, 夜间为正值; 3~10月波动明显多于其余月份, 且夜间的负值较其余月份更小。观测点的CO<sub>2</sub>通量变化则主要受到气温、太阳辐射、风速、垂直对流、水平输送和边界层状态等变化的共同影响, 主要反映近地层大气和植被下垫面之间的CO<sub>2</sub>输送关系。由于植物光合作用和呼吸作用, 在白天, CO<sub>2</sub>通量的输送方向为大气向植被输送, CO<sub>2</sub>通量为负值; 夜间CO<sub>2</sub>通量的输送方向为植被向大气输送, CO<sub>2</sub>通量为正值。说明以观测点为代表的丘陵灌木下垫面珠三角郊区, CO<sub>2</sub>通量输送方向主要取决于植被的光合作用和呼吸作用; 且3~10月的日

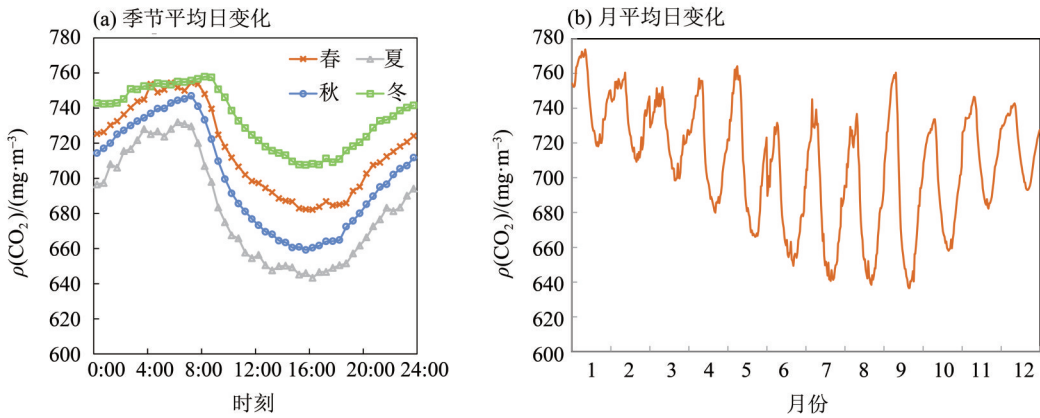


图3 CO<sub>2</sub>质量浓度季节平均日变化和月平均日变化

Fig. 3 Seasonal average daily changes and monthly mean daily changes of CO<sub>2</sub> concentration

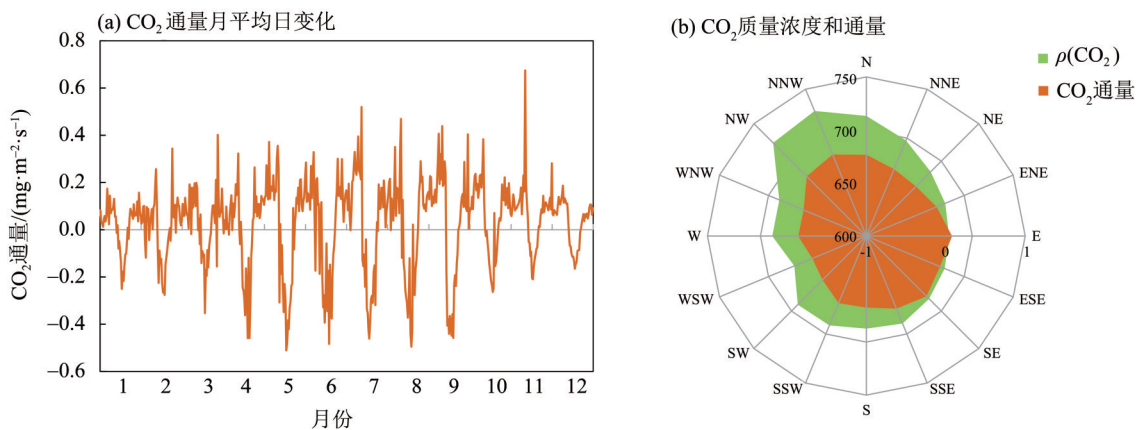


图4 CO<sub>2</sub>通量月平均日变化以及ρ(CO<sub>2</sub>)、通量(mg/m<sup>2</sup>s)随风向分布

Fig. 4 Monthly mean daily changes in CO<sub>2</sub> flux, wind distribution of CO<sub>2</sub> concentration and flux

间, 由于日照更长、气温更高、太阳辐射更强, 植物光合作用更强烈, 植物对大气中  $\text{CO}_2$  的吸收作用更强。 $\text{CO}_2$  通量变化幅度远大于 1993—1994 年观测沙丘、4 种放牧程度草原(无放牧、轻度放牧、中度放牧、重度放牧)( $-1.37 \sim 1.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 和大豆田、玉米田的观测结果(李婧等, 2006), 说明丘陵灌木下垫面的光合作用及呼吸作用比其它植被覆盖率和密集度较低的下垫面明显较强。

### 3.3 $\text{CO}_2$ 质量浓度和通量的空间分布特征

通过分析不同风向上  $\text{CO}_2$  的质量浓度和通量分布(图 4b)可见, 风向为 NW 到 NNW、W、SW 到 SSW 时,  $\rho(\text{CO}_2)$  较大;  $\text{CO}_2$  通量在各个方向的分布相对均匀。观测点的 NW 方向是 SW-NE 向的荔枝桥头大路, 路两边分布着密集居民建筑; SW 方向有密集村落建筑物, 沿圆弧形分布; NE、ESE 方向, 分别为增江的来流和去流方向; 其余方向均匀分布着灌木植被。

从  $\text{CO}_2$  质量浓度和通量分布及来源来看, 以观测点为代表的丘陵灌木下垫面, 人类活动频繁的来流方向  $\text{CO}_2$  质量浓度较高, 在人类活动较少且有灌木植被覆盖的来流方向分布均匀; 而  $\text{CO}_2$  通量受人类活动的影响较小, 主要由植被呼吸作用和光合作用决定, 因此在各来流方向分布较均匀, 变化主要体现在时间分布而非空间分布。

## 4 湍流动能特征

### 4.1 湍流动能

湍流动能(TKE)是湍流强度的量度,

$$\text{TKE} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}),$$

其中  $\overline{u'^2}$ 、 $\overline{v'^2}$ 、 $\overline{w'^2}$  分别为经向、纬向和垂直风速的方差。

湍流动能一般随风速的增大而增大。由图 5 可知, N、NNE 方向 TKE 较大, W、E、SSW 到 SSE 方向中等, 其余方向均较小。观测点周边地势开阔, 无明显的高耸建筑物或高大山脉遮挡, 因此 TKE 大小主要受水平和垂直方向上的风速影响, 而垂直方向上的风速又和下垫面粗糙度有关。在观测点 TKE 较大方向 3 km 范围内都是起伏的丘陵地形; 而 TKE 较小的 NE、ESE 方向, 分别为增江的来流和去流方向, 地势平坦; 同样 TKE 较小的 NW、SW 方向, 没有起伏明显的丘陵地形。因此, 观测点附近 TKE 的大小受下垫面的粗糙程度影响。下垫面复杂粗糙, 有丘陵起伏的方向, 可能因地形运动形成的风速加速, 造成垂直方向的风速较大, 导致 TKE 较大。

TKE 各季节的平均日变化均呈单峰型(图 5), 白天大, 夜间小。春季和秋季的波动相对平缓。白天夏季 TKE 最大, 凌晨至早晨冬季 TKE 明显大于其他季节, 而上半夜各季节的 TKE 相差不大。冬季 TKE 峰值出现的时间略早于夏季。

### 4.2 湍流标准差

了解大气的湍流输送特征, 对了解近地层的输送机制非常重要, 湍流谱分析等能描述大气湍流的机理和结构(刘海坤等, 2017)。莫宁-奥布霍夫相似理论的假设认为, 在近地边界层内各种大气参数和统计特征可以利用速度尺度或温度尺度归一化为大气稳定度的普适函数来表征(于贵瑞等, 2017)。

大多数无量纲速度标准差与稳定度的拟合关系式为

$$\frac{\sigma_i}{u_*} = a(1 + b\zeta)^{1/3},$$

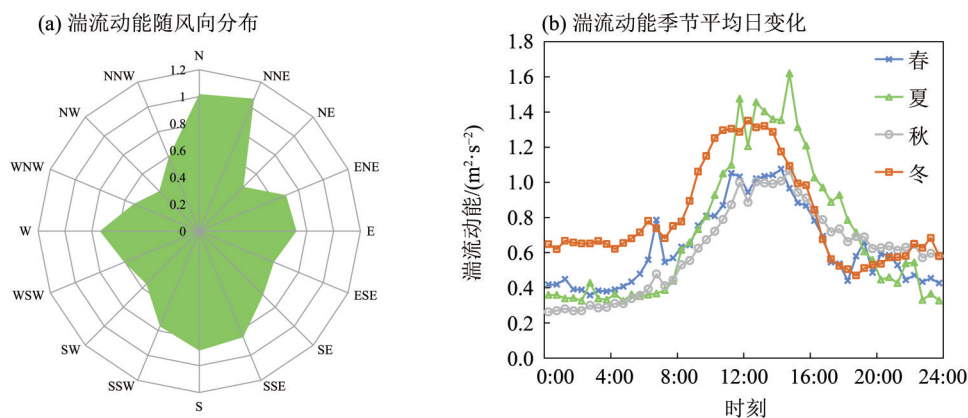


图 5 湍流动能的随风向分布和季节平均日变化

Fig. 5 Rose diagram of turbulent kinetic energy, and seasonal mean daily variation of turbulent kinetic energy

其中  $\frac{\sigma_i}{u_*}$  为风速分量无量纲速度标准差,  $i = u, v, w$ ,  $u_*$  为摩擦速度,  $a, b$  均为拟合系数,  $\zeta = z/L$  为大气稳定度 ( $z$  为仪器观测高度,  $L$  为莫宁-奥布霍夫长度)。当  $z/L > 0$  时, 大气稳定;  $z/L < 0$  时, 大气不稳定;  $z/L = 0$  时, 大气为中性状态。

以此形式对稳定条件和不稳定条件下的3个方向风速分量无量纲速度标准差和大气稳定度进行拟合, 得到无量纲速度标准差随稳定度变化的表达式, 并将各表达式记录于表1。从各自拟合函数式可以看出: 无量纲速度标准差随稳定度的变化满足1/3次方律, 湍流能够很好地发展与形成。归一化的水平风速标准差为常数, 且符合  $\frac{\sigma_u}{u_*} > \frac{\sigma_v}{u_*} > \frac{\sigma_w}{u_*}$  的一般规律, 说明丘陵灌木下垫面的物理特性差异对垂直风速的统计量影响比水平风速的统计量小。3个方向的风速分量的拟合系数  $a, b$  在稳定

表1 无量纲速度标准差与无量纲稳定度参数拟合关系式

Table 1 Fitting relation between dimensionless velocity variance and dimensionless stability parameter

项目	稳定条件	不稳定条件
经向	$\frac{\sigma_u}{u_*} = 3.3(1 + 0.8\zeta)^{1/3}$	$\frac{\sigma_u}{u_*} = 3.2(1 + 0.4\zeta)^{1/3}$
纬向	$\frac{\sigma_v}{u_*} = 2.4(1 + 0.8\zeta)^{1/3}$	$\frac{\sigma_v}{u_*} = 2.3(1 + 0.7\zeta)^{1/3}$
垂向	$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3(1 + 0.3\zeta)^{1/3}$	$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3(1 + 0.8\zeta)^{1/3}$

与不稳定条件下的值都很相近。稳定条件下水平方向的参数比不稳定条件下略高, 而垂直方向的参数则在稳定条件和不稳定条件都相同, 说明丘陵灌木下垫面垂直方向的统计量受大气稳定度影响比水平方向小。

从稳定条件下和不稳定条件下3风速分量无量纲速度标准差随稳定度变化图(图6)可见, 风速分

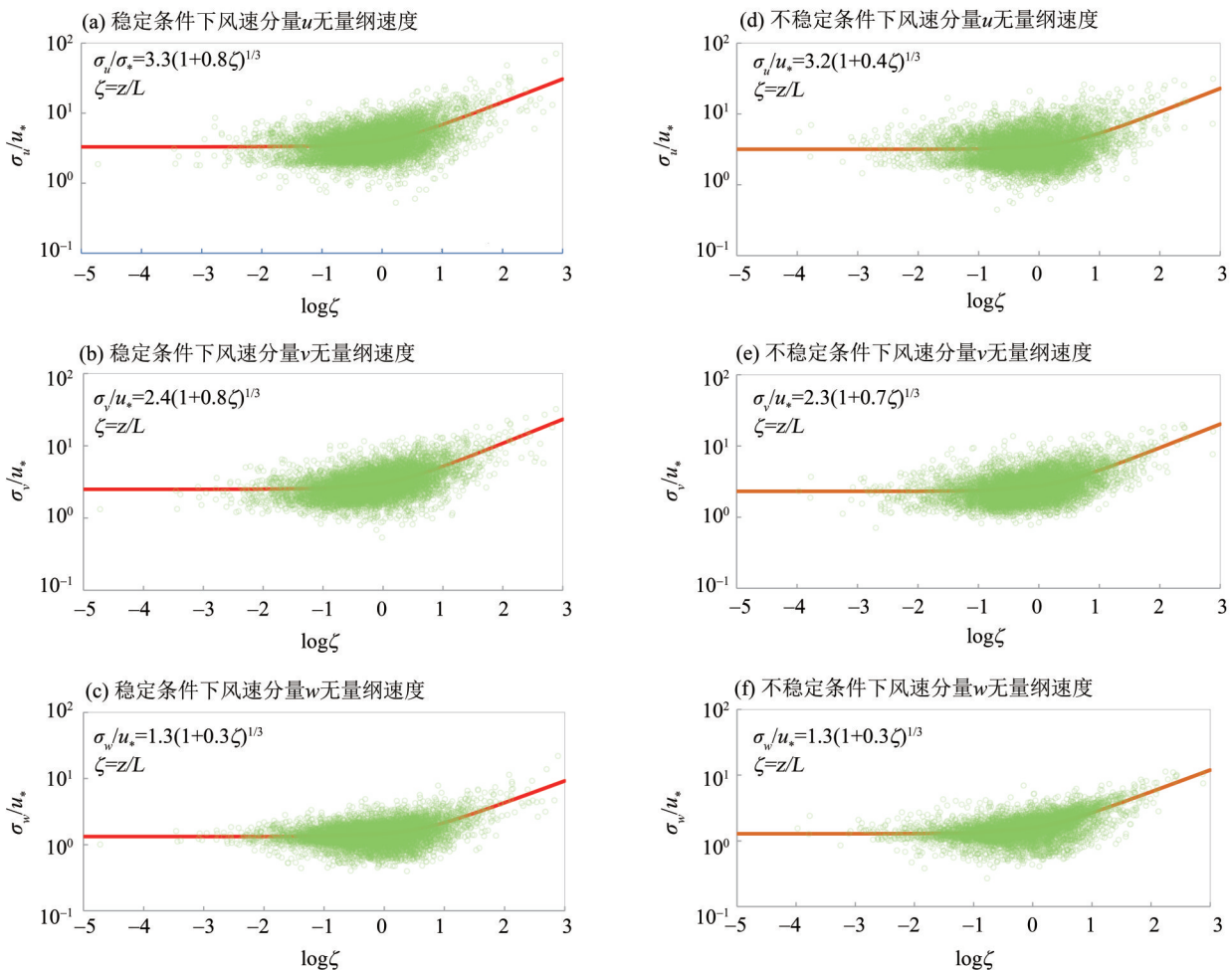


图6 稳定条件下三风速分量(a~c)和不稳定条件下三风速分量(d~f)无量纲速度标准差随稳定度变化

Fig. 6 The variation of dimensionless velocity variance of three wind velocity components (a~c) under stable conditions and three wind velocity components (d~f) under unstable conditions with stability

量的归一化标准差随  $z/L$  的增大而增大, 当大气越偏离中性状态, 无量纲速度标准差越大, 水平方向无量纲速度标准差比垂直方向无量纲速度标准差的离散程度大。

对比表 2 中不同下垫面的无量纲风速分量系数, 本文观测点丘陵灌木下垫面水平方向的无量纲风速分量系数小于黄河上游的玛曲草原观测值(李锁锁等, 2012), 高于其他类型下垫面(王霄雪

等, 2007; 姜海梅等, 2013); 而垂直方向的无量纲风速分量系数略小于浙江台州东海塘沿海, 与河北丘陵、江西湖陆交界冲积平原、内蒙古锡林浩特草原相近(姜海梅等, 2013), 明显高于城市水泥地和(王霄雪等, 2007)玛曲草原(李锁锁等, 2012)。丘陵灌木下垫面的无量纲风速分量系数在 3 个方向上都比大部分其他类型下垫面偏高, 推测植被密集的下垫面风速分量系数偏大。

表 2 不同下垫面无量纲风速分量系数  $a$

Table 2 The variation  $a$  of dimensionless velocity variance between different land surface patterns

下垫面	$\frac{\sigma_u}{u_*}$	$\frac{\sigma_v}{u_*}$	$\frac{\sigma_w}{u_*}$
城市水泥地(王霄雪等, 2007)	1.81	-	0.96
玛曲草原(李锁锁等, 2012)	3.42	3.34	1.02
浙江台州东海塘沿海(姜海梅等, 2013)	2.51	2.25	1.34
河北张家口尚义丘陵(姜海梅等, 2013)	2.53	2.17	1.21
江西鄱阳湖湖陆交界冲积平原(姜海梅等, 2013)	1.78	1.57	1.27
内蒙古锡林浩特草原(姜海梅等, 2013)	1.80	1.70	1.24
珠三角丘陵灌木下垫面(本文)	3.30	2.40	1.30

### 4.3 湍流谱

湍流互谱是描述大气湍流运动的重要手段(姜海梅等, 2013)。湍流谱特征分析可以确定涡动相关系统对高频湍流信号的响应能力, 协谱分析可以确定不同频率的垂直风速  $w$  和变量  $x$  的协方差, 也就是对湍流通量的总体贡献。在对数坐标条件下, 协谱在惯性子区应该符合  $-4/3$  律, 在没有进行标准化的情况下, 应该符合  $-5/3$  律(黄鹤等, 2011)。12月 2~12 日的原始高频湍流资料不存在硬点且无降水, 原始资料有较高的质量, 故选择该时段高频原始数据用于湍流能谱特征分析。通过对  $w$  和  $u$ 、 $w$  和温度  $T$ 、 $w$  和水汽  $q$  的脉动量进行傅里叶变换, 得到稳定条件和不稳定条件下的  $w-u$ 、 $w-T$  和  $w-q$  的协谱, 结果见图 7。

从结果可见, 本研究所的以增城基地为代表的珠三角丘陵灌木下垫面  $w-u$ 、 $w-T$  和  $w-q$  的协谱在大气稳定和不稳定条件下, 基本符合 Kansas 归一化协谱, 在一定程度上符合近地层莫宁-奥布霍夫相似理论。不稳定条件下, 各协谱的谱峰均出现在无量纲频率 0.02 附近, 说明低频大涡对湍流通量有较显著的贡献。与不稳定条件相比, 稳定条件下各协谱的谱峰所对应的无量纲频率较大 (0.08 附近), 暗示着近地层大气处于稳定条件下时, 受浮力抑制作用, 对动量、水汽和感热有显

著输送作用的涡旋尺度减小。另外, 各协谱在低频部分有较大波动, 通常大涡旋区容易受外界强烈影响, 因此可能是受到下垫面的非均匀影响; 在高频区的波形均有不同程度的上翘, 不稳定条件下的高频噪声更明显,  $w-u$  协谱的高频噪声比  $w-T$  和  $w-q$  的协谱明显, 表明  $w-u$  协谱的高频响应高于  $w-T$  和  $w-q$  的协谱。

## 5 结论

利用 2017 年珠三角的野外观测站的湍流连续观测资料, 分析了丘陵灌木下垫面的热量通量、 $\text{CO}_2$  浓度和通量、湍流动能等特征, 得到主要结论:

1) 感热与潜热通量白天大, 夜间小; 感热通量四季变化幅度不大, 潜热通量变化幅度在 4~10 月明显大于感热通量。潜热通量在全年地表能量平衡中占主导地位, 其他类型下垫面则相反。植被覆盖率、密集度及天气是影响局地热量交换的重要方式。

2)  $\text{CO}_2$  质量浓度日间较夜间低, 冬季最高, 夏季最低; 丘陵灌木下垫面  $\text{CO}_2$  质量浓度对比其他类型下垫面均较低。 $\text{CO}_2$  通量受植被光合作用和呼吸作用影响, 白天向下输送, 夜间向上输送; 春夏季  $\text{CO}_2$  通量日间谷值较低, 秋冬季日间谷值较高。观测点  $\text{CO}_2$  通量变化幅度远大于沙丘、草原、

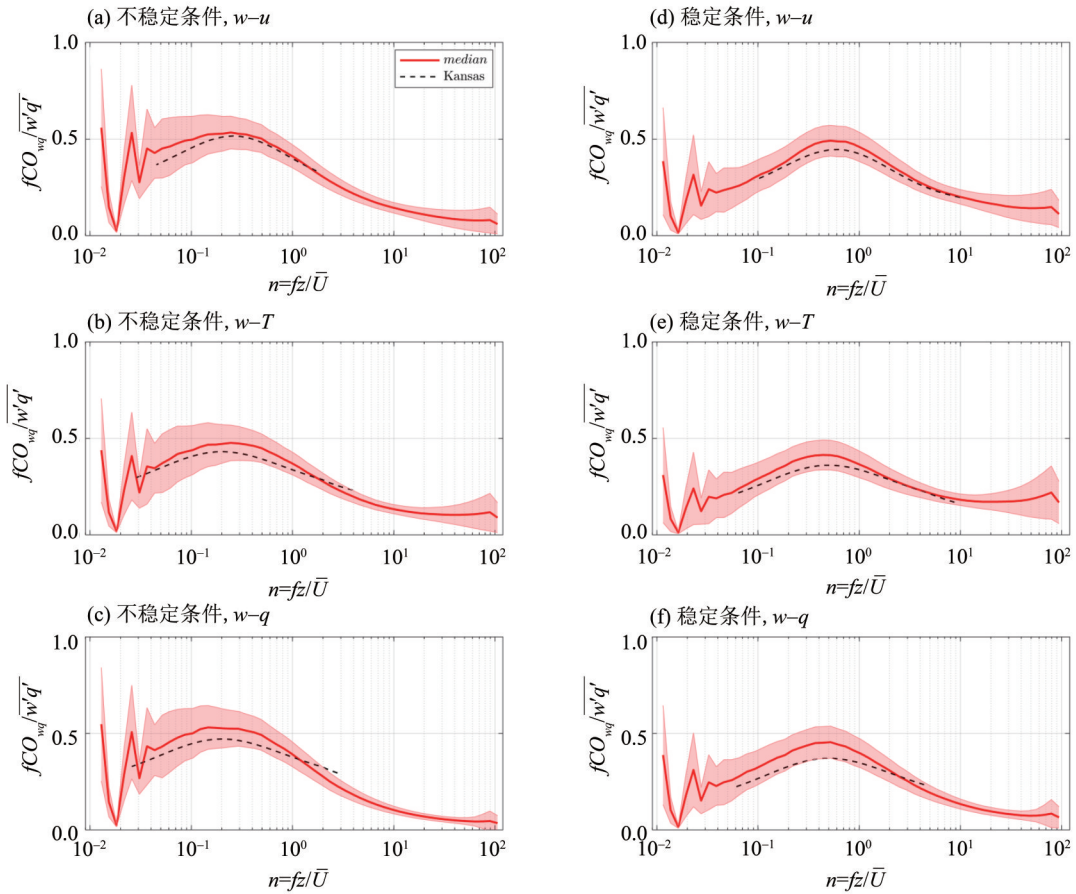


图 7 不稳定条件和稳定条件下的  $w-u$ 、 $w-T$  和  $w-q$  协谱

Fig. 7  $w-u, w-T$  and  $w-q$  cospectra under unstable conditions and stable conditions

大豆田和玉米田等的观测结果。 $CO_2$  浓度和通量分布取决于不同方位下垫面植被分布和人类活动强度。

3) 湍流动能白天大, 夜间小。夏季白天湍流动能最大, 冬季峰值出现时间略早于夏季。

4) 无量纲速度标准差随稳定度的变化满足

$$\frac{\sigma_i}{u_*} = a(1 + b\zeta)^{1/3}$$

的形式。归一化风速标准差符合

$$\frac{\sigma_u}{u_*} > \frac{\sigma_v}{u_*} > \frac{\sigma_w}{u_*}$$

的规律。稳定度越偏离中性状态, 无

量纲速度标准差越大。丘陵灌木下垫面无量纲风速分量系数在 3 个方向上都比大部分其他类型下垫面高。

5) 垂直风速与水平风速、温度和水汽的协谱基本符合 Kansas 归一化协谱。不稳定条件下, 低频大涡对湍流通量有较显著的贡献。稳定条件下谱峰所对应的无量纲频率较不稳定条件下大, 暗示着受浮力抑制作用, 对动量、水汽和感热有显著输送作用的涡旋尺度减小。

参考文献:

艾力·买买提明, 何清, 高志球, 等, 2008. 塔克拉玛干沙漠近地层湍流热通量计算方法比较研究[J]. 中国沙漠, 28(5): 948-954.  
 陈燕, 周学东, 汪宁, 等, 2021. 高温和台风影响下的苏州城市粗糙子层湍流通量特征[J]. 气象科学, 41(1): 60-69.  
 丁裕国, 孙风英, 1986. 小麦田水平风速的湍流统计特征[J]. 南京气象学院学报, 1: 38-46.  
 何文, 刘辉志, 冯健武, 2010. 城市近地层湍流通量及  $CO_2$  通

量变化特征[J]. 气候与环境研究, 15(1): 21-33.  
 黄鹤, 李英华, 韩素芹, 等, 2011. 天津城市边界层湍流统计特征[J]. 高原气象, 30(6): 1481-1487.  
 姜海梅, 刘树华, 刘和平, 2013. 扰动近地层湍流互谱特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 49(3): 435-442.  
 李婧, 刘树华, 茅宇豪, 等, 2006. 不同生态系统  $CO_2$  通量和浓度特征分析研究[J]. 地球物理学报, 49(5): 1298-1307.  
 李锁锁, 吕世华, 高艳红, 等, 2012. 黄河上游玛曲草原湍流统

- 计特征分析[J].地球科学进展,27(8):901-907.
- 李宏毅,肖子牛,朱玉祥,2018.藏东南地区草地下垫面湍流通量和辐射平衡各分量的变化特征[J].高原气象,37(4):923-935.
- 刘海坤,黄健,王鑫,等,2017.冬季增城丘陵灌木林基本气象要素与湍流特征[J].热带气象学报,33(5):706-715.
- 尚伦宇,吕世华,张宇,等,2011.青藏高原东部土壤冻融过程中近地层湍流统计特征分析[J].高原气象,30(1):30-37.
- 孙绩华,樊风,徐安伦,等,2015.西南季风爆发前后大理近地层风场及湍流通量的变化特征[J].气候与环境研究,20(4):369-379.
- 王霄雪,刘罡,蒋维楣,2007.城市水泥下垫面/郊区下垫面湍流统计特征分析[J].科学技术与工程,7(23):6014-6020.
- 王先鹤,王秀君,韩广轩,等,2018.黄河三角洲湿地非生长季土壤CO<sub>2</sub>浓度及地表CO<sub>2</sub>通量的动态变化[J].生态学杂志,37(9):2698-2706.
- 伍琼,2009.淮河流域农田近地层湍流通量特征研究[D].合肥:安徽农业大学.
- 吴彬贵,王兆宇,解以扬,等,2013.秋季天津城区雾中风速、温度和湿度的湍流统计特征[J].高原气象,32(5):1360-1367.
- 夏华永,张燕,段存志,2008.2006年夏季珠江口外海域船基海气通量观测资料质量评估[J].热带海洋学报,27(6):66-72.
- 杨智,刘劲松,孙绩华,2008.大理近地层山谷盆地湖陆风及湍流特征分析[J].气象与环境学报,24(5):32-37.
- 于贵瑞,孙晓敏,2017.陆地生态系统通量观测的原理与方法[M].北京:高等教育出版社,229-231.
- 张晓煜,王连喜,刘静,等,2005.宁南退耕还草区近地面的湍流通量特征研究[J].高原气象,24(6):988-993.
- 张宏升,刘新建,朱好,等,2010.北京北郊冬季大风过程湍流通量演变特征的分析研究[J].大气科学,34(3):661-668.
- 张馨木,胡凝,肖薇,等,2020.城市大气CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>浓度的车载移动观测分析[J].环境科学与技术,43(8):83-89.
- 赵佳伟,何清,金莉莉,等,2020.涡动相关法通量数据处理研究概述[J].气象科技进展,10(5):7-12.
- 钟雪平,张丽,卢超,等,2017.深圳市西部地区大气湍流通量特征分析[J].广东气象,39(6):28-55.
- IKANI H, PU J H, ZANG S, 2024. Detailed turbulent structures investigation around piers group induced flow [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 152: 111112.
- BEHERA P K, PATEL M, DESHPANDE V, et al, 2024. Patterns of turbulent flow structures over dune shaped bed features under the influence of downward seepage [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 153: 111128.
- REIMERS C E, ÖZKAN-HALLER H T, BERG P, et al, 2012. Benthic oxygen consumption rates during hypoxic conditions on the Oregon continental shelf: Evaluation of the eddy correlation method [J]. *J Geophys Res-Oceans*, 117(C2): C02021.
- VICKERS D, MAHRT L, 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data [J]. *J Atmos Ocean Tech*, 14: 512-526.

(责任编辑 秦社彩)