

刘雨佳, 韦志刚, 陈辰, 等. 2020. 珠海凤凰山森林下垫面干季和湿季气象要素的对比分析与动量和感热交换系数的参数化研究 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 457–468. LIU Yujia, WEI Zhigang, CHEN Chen, et al. 2020. Comparison of Meteorological Elements in Dry and Wet Seasons and Parameterization of Momentum and Sensible Heat Exchange Coefficients near the Underlying Surface of the Zhuhai Phoenix Mountain Forest [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 457–468. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19027

珠海凤凰山森林下垫面干季和湿季气象要素的对比分析与动量和感热交换系数的参数化研究

刘雨佳¹ 韦志刚^{1,2} 陈辰¹ 董文杰^{2,3} 朱献^{2,3} 陈广宇¹ 刘雅静¹

1 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学珠海分校未来地球研究院, 珠海区域气候—环境—生态预测预警协同创新中心, 广东珠海 519087

3 中山大学大气科学学院, 广东珠海 519082

摘 要 利用珠海凤凰山陆气相互作用观测塔站 2014 年 11 月至 2016 年 5 月的观测数据, 对比分析了干湿季森林下垫面能量通量和气象要素的变化特征, 分析了在不同稳定度下 3 个风向范围 ($315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 和 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$) 的动量和感热交换系数随冠层表面风速的变化特征, 并对动量和感热交换系数进行了参数化研究。结果表明: 干季感热和潜热通量值相当, 湿季潜热远大于感热。干季和湿季的夜晚都出现负感热现象, 感热从大气向森林输送。相对湿度的变化幅度大, 与该地气象状况密切相关, 相对湿度的垂直梯度夜晚较大, 白天较小。干季的气温垂直梯度比湿季的明显。风速在冬季变化平缓, 夏季变化剧烈, 低层风速随高度变化梯度明显, 高层较紊乱。各高度风向差异不大。中性和近中性状态下, 在风向为 $315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 和 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 时, 动量交换系数 C_{dm} 分别为 0.05、0.0055 和 0.022, 感热交换系数 C_{hm} 分别为 0.0055、0.003 和 0.004。在稳定和不稳定状态下, 动量交换系数 C_d 、感热交换系数 C_h 随冠层表面风速 v 明显发生变化, 稳定条件下, C_d 、 C_h 随 v 的增大而增大; 不稳定条件下, C_d 、 C_h 随 v 的增大而减小。分不同风向对森林冠层 C_d 、 C_h 在稳定和不稳定条件下与 v 的关系进行了拟合, 得到了参数化公式。

关键词 陆气相互作用 动量交换系数 感热交换系数 参数化

文章编号 1006-9585(2020)05-0457-12

中图分类号 P463

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19027

Comparison of Meteorological Elements in Dry and Wet Seasons and Parameterization of Momentum and Sensible Heat Exchange Coefficients near the Underlying Surface of the Zhuhai Phoenix Mountain Forest

LIU Yujia¹, WEI Zhigang^{1,2}, CHEN Chen¹, DONG Wenjie^{2,3}, ZHU Xian^{2,3},
CHEN Guangyu¹, and LIU Yajing¹

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 Zhuhai Joint Innovative Center for Climate–Environment–Ecosystem, Future Earth Research Institute, Beijing Normal

收稿日期 2019-03-07; 网络预出版日期 2020-05-05

作者简介 刘雨佳, 女, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用方面研究。E-mail: brilliant_pia@163.com

通讯作者 韦志刚, E-mail: wzg@bnu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 41875089

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41875089)

University, Zhuhai, Guangdong Province 519087

3 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong Province 519082

Abstract The variation characteristics of the energy flux and meteorological elements of the underlying surface of the forest during the wet and dry seasons were compared and analyzed by using observation data obtained from November 2014 to May 2016 from the Zhuhai Phoenix Mountain Land–Atmosphere Interaction Observation Tower Station. The variation characteristics of the momentum and sensible heat exchange coefficients in three wind direction ranges (315° – 45° , 45° – 135° , and 135° – 225°) along with the canopy–surface wind speed under different stability conditions, as well as the parameterizations of these coefficients were analyzed. The sensible heat and latent heat fluxes in the dry season were equivalent, whereas in the wet season latent heat is much higher than the sensible heat. Negative sensible heat occurs during the night in both the dry and wet seasons, with the sensible heat being transported from the atmosphere to the forest. The variation range of the relative humidity is large and is closely related to the meteorological conditions in the area. The vertical gradient of the relative humidity is larger at night and smaller during the day. The vertical gradient of the air temperature in the dry season is more significant than that in the wet season. The wind speed changes gently in winter but violently in summer. There is an obvious gradient in the low-level wind speed with height, whereas the high-level wind is chaotic. The wind direction at different heights does not differ significantly. In neutral and near-neutral states, the momentum exchange coefficients C_{dn} are 0.05, 0.0055, and 0.022, respectively, when the wind directions are 315° – 45° , 45° – 135° , and 135° – 225° , and the sensible heat exchange coefficients C_{hn} are 0.0055, 0.003, and 0.004, respectively. Under stable and unstable conditions, the momentum exchange coefficient C_d and the sensible heat exchange coefficient C_h obviously change with the wind velocity v on the canopy surface. Under stable conditions, C_d and C_h increase with increases in v , and under unstable conditions, C_d and C_h decrease with increases in v . We fitted the relationships between C_d , C_h in the forest canopy and v under stable and unstable conditions in different wind directions, and obtained the parameterized formula.

Keywords Land–atmosphere interaction, Momentum exchange coefficient, Sensible heat exchange coefficient, Parameterization

1 引言

陆气间的能量交换在区域及全球的气候和大气环流的变化中扮演着重要的角色 (Beljaars and Holtslag, 1991; 黄宝霞等, 2007; 张焱等, 2010; Ding et al., 2013)。针对陆面过程的特性和机理, 对陆地上不同类型下垫面与大气间相互作用的物理、化学、生物及水文等过程进行深入细致的研究, 能够帮助我们发展、改进和完善陆面过程模式, 提高对未来气候变化预测的准确性 (曾剑, 2011)。但地表覆盖类型多样, 涉及多种植被类型且受到不同地形的影响, 不同下垫面地表特征的差异会导致不同的动力、热力学特征, 导致陆气能量物质交换特征各异。森林生态系统作为陆地生态系统最主要的类型之一, 对维持区域生态平衡起着巨大的调节作用。

从 20 世纪 90 年代开始, 成立了主要由 AmeriFlux、AsiaFlux、EuroFlux、ChinaFlux 等 6 个地区性研究网络组成的国际通量观测网站 (FLUXNET), 开始了对全球陆地生态系统 CO_2 、水热通量长期连续的观测研究。Anthoni et

al. (1999) 分析比较了半干旱区松林下垫面年均净生态系统交换量差异, 并与高纬度的常绿森林下垫面的碳交换进行了对比研究。Lindroth et al. (1998) 测量了瑞典北方净生态系统通量, 显示森林的平衡对温度的变化高度敏感。Baldocchi et al. (2004) 针对草原, 研究比较了不同的植物类型、天气、季节性干旱和土壤物理性质对水热能量的影响。现阶段我国已有 50 余个不同类型生态系统的观测站开展陆地生态系统的观测和研究工作, 其目的是通过对全国不同区域和不同类型生态系统开展联网式动态观测研究, 探讨典型生态系统水热通量和碳通量的时空分布及变化规律的特征 (马虹等, 2012)。王秋凤等 (2004) 建立的针对长白山温带阔叶红松林生态系统通量日变化的模型较好地模拟出了潜热和感热通量的变化。李玮君等 (2007) 则主要针对玉米农田下垫面, 研究了该种下垫面类型下感热和潜热通量的日际、年际变化特征, 同时分析了通量强度与局部环境条件的具体关系。窦军霞等 (2007) 利用西双版纳热带季节雨林常规气象及水热通量观测资料, 对该下垫面类型中各能量的变化规律、能

量分配以及水量平衡特征等进行了分析研究。

目前对于热量、水汽和动量通量计算和观测方法主要有空气动力学方法 (Aerodynamics Method, AM)、总体输送法、涡动相关法 (Eddy Covariance Method, EC)、波文比—能量平衡法 (Bowen Ratio-Energy Balance, BREB) 等 (Baldocchi et al., 1988; 沈艳等, 2005; 楚良海, 2009)。张永强等 (2002) 利用波文比法和涡动相关法综合分析比较了华北平原典型农田水热和碳通量的变化特征。何奇瑾等 (2006) 利用廓线法、波文比方法和涡动相关方法计算盘锦芦苇湿地水热通量计算方法, 并比较各计算方式的优劣。刘辉志等 (2006) 利用涡动相关法观测得到的资料分析了水汽和 CO_2 通量的变化规律, 并且比较了农田和退化草地两种下垫面的物质和能量通量交换。冯健武等 (2012) 采用涡动相关法分析了通榆地区退化草地和农田下垫面的地表粗糙度及湍流通量整体输送系数的变化特征。陆面过程参数化是将大气模式中的水热和动量通量, 通过表达式的方式由其他相关要素进行准确描述, 一般情况下常采用常规的气象观测数据估算地表能量和物质向大气的输送通量。但无论是采用直接观测方法, 还是通过其他数据资料间接的计算, 在得到通量资料过程中选用到的湍流资料、高精度温湿梯度资料等是常规气象资料中没有的。因此, 许多参数化方案利用整体输送系数计算通量 (王澄海等, 2007)。但就目前我国对通量观测站研究内容来看, 关于总体输送系数的研究主要集中在干旱半干旱裸露或低矮植被下垫面, 对具有重要服务功能的森林生态系统相关研究较为少见。由于下垫面的不均匀性和复杂性, 根据观测资料用不同方法计算总体动量输送系数 C_d 、热力输送系数 C_h , 从而更加准确地描述陆气相互作用过程, 加强模式的预测性, 也是陆面过程研究的重要内容。本文选取广东省珠海凤凰山观测塔的观测资料, 讨论凤凰山森林下垫面的水热通量变化特征, 确定动量和感热交换系数并讨论其在不同大气稳定度条件下随冠层表面风速的变化规律。

2 研究区域与资料处理

2.1 研究区域介绍

珠海市位于广东省珠江口的西南部, 属南亚热带季风气候, 年内降水量分配不均, 有显著的干湿

季变化, 4~9 月降雨量较大为湿季, 10 月至次年 3 月为干季 (林良勋, 2006)。珠海凤凰山森林植被覆盖率达 90%。珠海凤凰山的陆气相互作用观测塔 ($22^\circ 21' 15.5'' \text{N}$, $113^\circ 31' 34.2'' \text{E}$) 位于珠海凤凰山北麓的北京师范大学珠海分校校园西部森林区, 海拔高度为 38.5 m, 塔高 60 m。观测塔塔站下垫面是岭南地区典型次生常绿阔叶林, 树木种类繁多以乔木和灌木为主, 森林冠层的坡度大约 5° , 冠层平均高度 18 m。塔站位置及周边环境如图 1 所示。观测塔拥有 3 套观测系统, 分别是气象观测系统、通量观测系统以及辐射观测系统, 能够观测到达森林冠层的太阳辐射, 冠层与大气之间的感热和潜热通量, 冠层表面和近冠层的风速、温度和湿度以及其他相关变量 (韦志刚等, 2016)。

2.2 资料质量控制

本文的研究选用 2014 年 11 月至 2016 年 5 月共 17 个月的珠海凤凰山站的通量和气象观测系统数据, 对这些原始湍流数据先进行检查和预处理 (剔除异常数据、去除野点等), 再进行坐标旋转 (

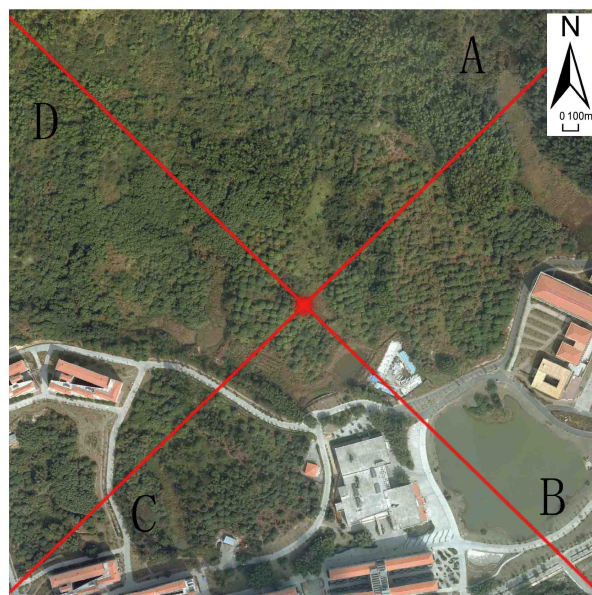


图 1 珠海南亚热带森林陆气相互作用与碳通量观测塔站位置及周围环境示意图 (红色实心圆表示塔站所处位置, 认为正北方向为 0° , 则 A 表示 $315^\circ \sim 45^\circ$, B 表示 $45^\circ \sim 135^\circ$, C 表示 $135^\circ \sim 225^\circ$, D 表示 $225^\circ \sim 315^\circ$)

Fig. 1 Schematic of the location and surrounding environment of the land-atmosphere interaction and carbon-flux observation tower station in the southern subtropical forest of Zhuhai (Red solid circle indicates the position of the tower station. If the north direction is 0° , A indicates $315^\circ \sim 45^\circ$, B indicates $45^\circ \sim 135^\circ$, C indicates $135^\circ \sim 225^\circ$, and D indicates $225^\circ \sim 315^\circ$)

倾斜修正)、频率响应修正、感热的超声虚温修正、WPL 修正, 对所使用的研究数据进行质量控制(陈辰等, 2018)。本文中典型晴天是根据雨量和总辐射的变化来挑选的。若降雨量观测资料显示全天降雨量为 0, 同时从日出后到日落前每 30 min 记录时段内日照时数大于 25 min, 且历史天气预报为晴天则判定为晴天。典型晴天在此条件下还要求总辐射日变化曲线为光滑的正弦曲线。

3 研究方法

根据边界层理论, 计算总体动量输送系数 C_d 和热力输送系数 C_h 的公式(左洪超和胡隐樵, 1992; 韦志刚等, 2006)为:

$$C_d = \frac{\kappa^2}{\left[\ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{Z-d}{L}\right) \right]^2}, \quad (1)$$

$$C_h = \frac{\kappa^2}{\left[\ln\left(\frac{Z-d}{Z_{0T}}\right) - \psi_h\left(\frac{Z-d}{L}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{Z-d}{L}\right) \right]}, \quad (2)$$

其中, κ 为卡曼常数, 取 0.4; Z_0 和 Z_{0T} 分别表示地表空气动力学粗糙度和热力学粗糙度, Z 为观测高度(单位: m); d 表示零平面位移高度; L 表示 Monin-Obkhov 长度; ψ_m 、 ψ_h 分别表示风速、温度 Monin-Obkhov 相似性函数的积分形式。

Z_0 和 d 采用刘伟(2017)通过粗糙元法计算的该地不同风向所对应的动力学粗糙度和零平面位移高度(见表 1)。目前对于大气稳定度有大约十几种分类方法(杨振等, 2008), 表征大气稳定度的参数常采用 Monin-Obkhov 大气稳定度参数 $\zeta = z/L$ 和梯度理查孙数 Ri 。本文采用由通量观测系统的观测值直接计算得到的 Monin-Obkhov 大气稳定度参数

$$\zeta = (Z-d)/L, \quad (3)$$

计算公式(Lewellen and Teske, 1973)如下:

$$L = \frac{u_*^2}{\kappa \frac{g}{T} \theta_*}, \quad (4)$$

其中, u_* 为摩擦速度(单位: m s^{-1}), θ_* 为特征位温(单位: K), $\bar{T}$ 表示绝对平均气温(单位: K), g 表示重力加速度(单位: m s^{-2})。

本文采用陆面模式中应用最多的 Businger-Dyer

表 1 运用粗糙元法计算得到的零平面位移高度(d)和动力学粗糙度(Z_0)

Table 1 Zero plane displacement height (d) and dynamic roughness (Z_0) in this area calculated by the rough element method

风向	d/m	Z_0/m
A($315^\circ \sim 45^\circ$)	30.29	1.80
B($45^\circ \sim 135^\circ$)	8.24	0.67
C($135^\circ \sim 225^\circ$)	16.46	1.35
D($225^\circ \sim 315^\circ$)	20.15	1.20

模式来作为风速、温度 Monin-Obkhov 相似性函数 ψ_m 、 ψ_h 的积分形式:

$$\psi_m = \begin{cases} \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - 2\tan^{-1}x + \frac{\pi}{2}, & \zeta \leq 0 \\ -5\zeta, & \zeta > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\psi_h = \begin{cases} 2\ln\left(\frac{1+y}{2}\right), & \zeta \leq 0 \\ -5\zeta, & \zeta > 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, x 、 y 分别计算如下:

$$x = (1 - 16\zeta)^{1/4}, \quad (7)$$

$$y = (1 - 16\zeta)^{1/2}, \quad (8)$$

其中, ζ 表示大气稳定度参数。由于热力学粗糙度 Z_{0T} 较小, 不易测量, 因此常采用热量传输附加阻尼 κB^{-1} 进行反向推导:

$$\kappa B^{-1} = \ln(Z_0/Z_{0T}), \quad (9)$$

κB^{-1} 不能直接测量得到, 需要通过其他相关要素的测量计算来间接获得。目前已发展了 κB^{-1} 多个参数方法, 经比较后选用更适宜该森林下垫面的 Sheppard(1958) 表达式:

$$\kappa B^{-1} = \ln(\kappa u_* Z_0 / \kappa_\theta), \quad (10)$$

其中, κ_θ 为常数, 取 $2.06 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

由于该观测塔站位于校区内部的森林, 西部和北部各方向为森林, 但东部和南部均存在不同面积的校园建筑下垫面(见图 1), 动力学粗糙度和零平面位移不尽相同, 因此本章对动量和感热交换系数的参数化过程分成不同风向进行考虑。考虑该地风向主要集中在北风、东风和南风, 西风出现频率低, 代表性不强, 最终选择对 A($315^\circ \sim 45^\circ$)、B($45^\circ \sim 135^\circ$)、C($135^\circ \sim 225^\circ$) 3 个方向的交换系数进行分析研究。

陈辰等(2018)已经对珠海凤凰山陆气相互作用

用观测塔通量数据的质量进行了控制与评价, 我们选择其中质量较好的 1~3 级数据, 选择 55 m 高度通量观测数据 (u_* 、 L 等), 计算了相应时刻的动量和感热交换系数, 并分析了它们与冠层表面风速 v (用 25 m 高度观测值代表) 的关系。

4 结果分析

4.1 森林冠层和大气间的感热、潜热通量及其气象要素的变化特征

图 2 表示干湿季感热和潜热通量的平均日变化特征和干湿季典型晴天水热通量的日变化特征。由图可知, 感热和潜热通量在干湿季的平均日变化与所选取的干湿季典型晴天的日变化类似, 干季的感热和潜热通量相当; 湿季受充足水汽的影响, 白天的潜热远大于感热; 并且干季和湿季的夜晚都出现负感热现象。不同的是在所选取的典型晴天的日变化中, 两者变化较不平缓, 有多个峰值; 典型晴天的潜热通量在干季白天和夜晚都为正, 在湿季的夜晚有个别时刻为负, 出现了逆湿的情况, 而在平均日变化图中潜热通量在干湿季的夜晚都为负。珠海凤凰山地处北回归线以南, 属于亚热带季风气候, 干湿季的潜热一般大于感热; 湿季盛行东南季风, 降水多, 为该地带来大量水汽; 而干季的降水少,

空气中水汽含量较少, 湿季感热和潜热差别大, 而干季二者的差别小。珠海凤凰山地区干湿季盛行风向不同, 湿季盛行的东南季风, 为该地带来大量水汽, 湿季潜热大于感热。图 2c、2d 中对应日期的干季温度最高温 17°C, 湿季温度最高温 35°C, 二者相差 18°C。但干湿季的潜热差异主要是由水汽造成的, 湿季东南季风带来大量水汽, 而干季雨水少, 空气中水汽含量少, 所以湿季的潜热比干季的潜热明显增大。

图 3 给出 2014 年 12 月至 2015 年 12 月候平均相对湿度的变化, 可以看出, 冬季 12 月至次年 2 月相对湿度较低, 3 月相对湿度迅速升高, 4 月有所下降, 5 月底后处于高值阶段, 到秋冬又趋于低值。相对湿度的变化幅度大, 最大变化可达 30% 以上, 其中 4 月出现一次剧烈下降情况, 这主要由该地天气过程的演变造成。由图 4 干湿季相对湿度的平均日变化和干湿季典型晴天相对湿度日变化可知, 无论在干季或在湿季, 越接近地面相对湿度的垂直梯度越显著, 即相对湿度的垂直梯度低层较大, 高层较小。相对湿度的垂直梯度白天较小, 夜晚较大。在湿季相对湿度的量值虽然比干季大, 但垂直梯度比干季小。干季和湿季相对湿度的日最大值均出现在凌晨, 最小值大概在 15:00 (北京时间, 下同) 左右。

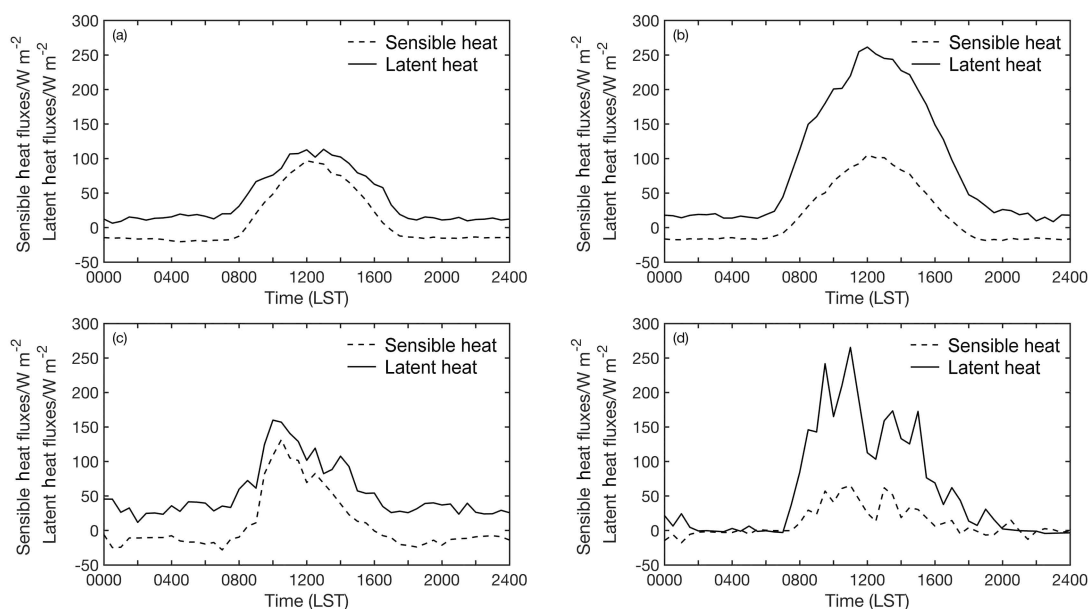


图 2 (a) 干季、(b) 湿季感热和潜热通量的平均日变化和 (c) 干季 2014 年 12 月 11 日、(d) 湿季 2015 年 8 月 20 日典型晴天感热和潜热通量的日变化

Fig. 2 Average diurnal variations of sensible heat and latent heat fluxes in (a) dry season and (b) wet season; diurnal variations of sensible heat and latent heat fluxes on a typical sunny day (c) 11 Dec 2014 (dry season) and (d) 20 Aug 2015 (wet season)

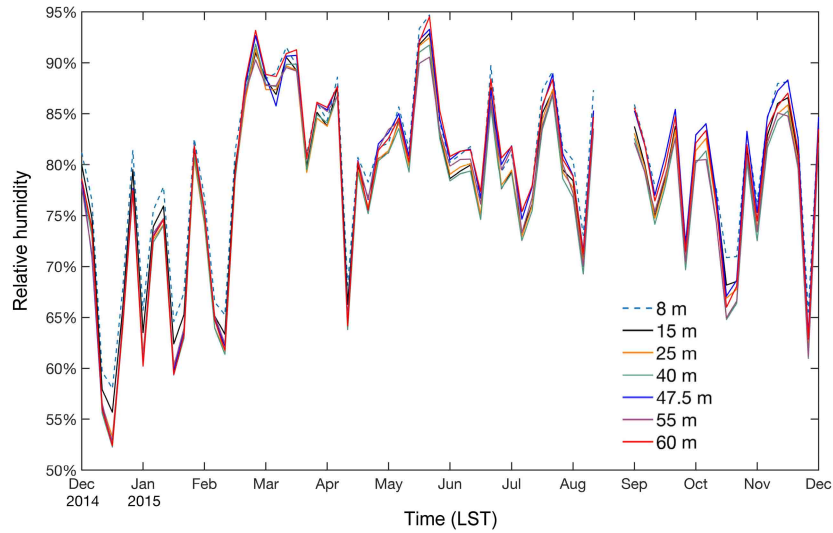


图3 2014年12月至2015年12月候平均相对湿度的变化(8 m表示距地8 m高度处的相对湿度, 余类推)

Fig. 3 Variation of pentad mean relative humidity from Dec 2014 to Dec 2015 (8 m indicates the relative humidity at 8 m from the ground, and so on)

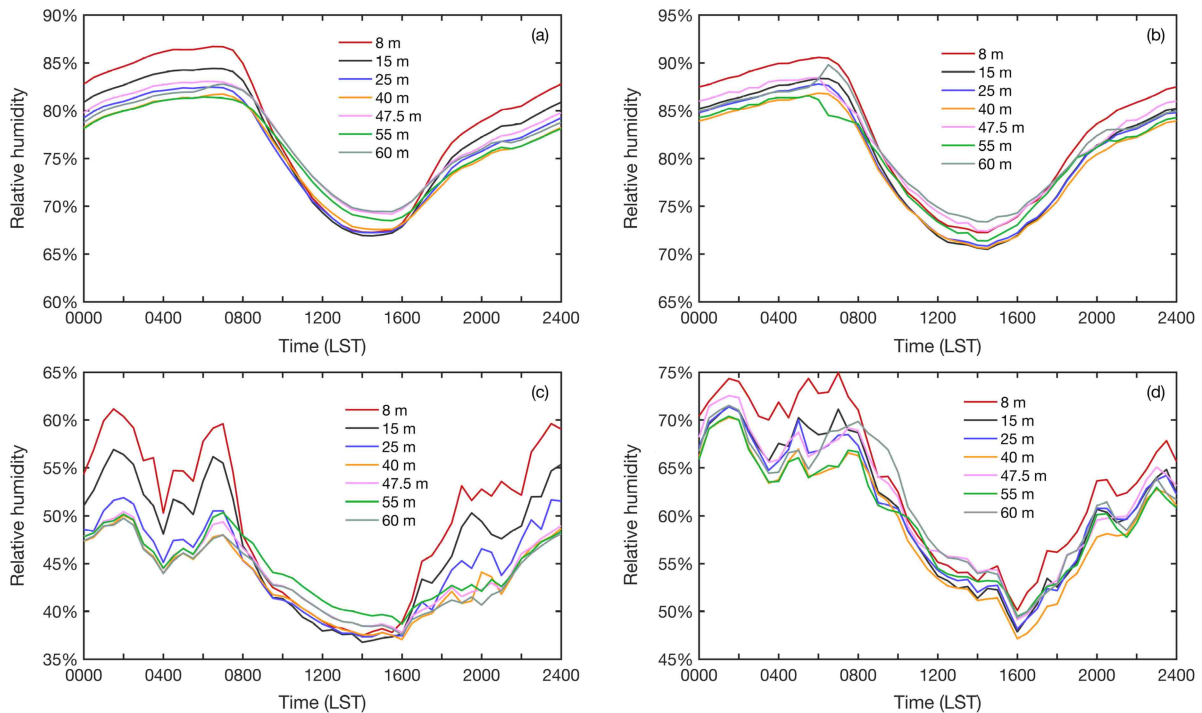


图4 (a) 干季、(b) 湿季相对湿度的平均日变化和 (c) 干季2014年12月13日、(d) 湿季2015年8月8日典型晴天相对湿度的日变化。8 m表示距地8 m高度处的相对湿度, 余类推

Fig. 4 Average diurnal variations in relative humidity in (a) dry season and (b) wet season; diurnal variations of relative humidity on typical sunny days (c) 13 Dec 2014 (dry season) and (d) 8 Aug 2015 (wet season). 8 m indicates the relative humidity at 8 m from the ground, and so on

图5为2014年12月至2015年12月候平均气温的变化, 可以明显看出波动变化, 气温的垂直梯度较小。图6给出的干湿季气温的平均日变化特征和干湿季典型晴天气温的日变化特征, 均呈现单峰特征, 最高值出现在15:00至16:00左右, 最低值出现在06:00至07:00左右。夜间高度越低温度越

低, 随着日出底层温度迅速增大, 逐渐成为最高值, 在日落后突然下降, 在夜间又成为最低值层。干季的最高气温平均 21°C 左右, 最低值 17°C 左右; 湿季的最高气温平均可达到 29°C 左右, 最低值 25°C 左右; 干季的气温垂直梯度比湿季的明显。而典型晴天的干季最高气温 17°C 左右, 最低值

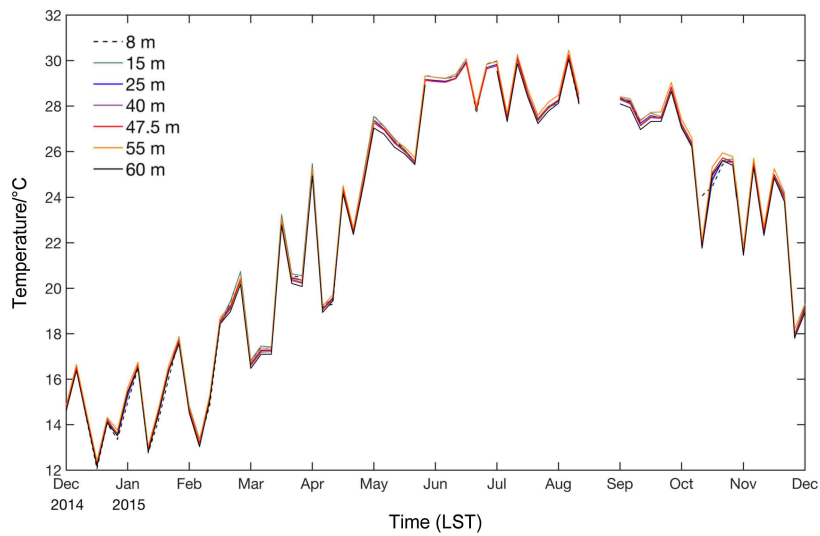


图 5 同图 3，但为候平均气温的变化

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for pentad mean air temperature

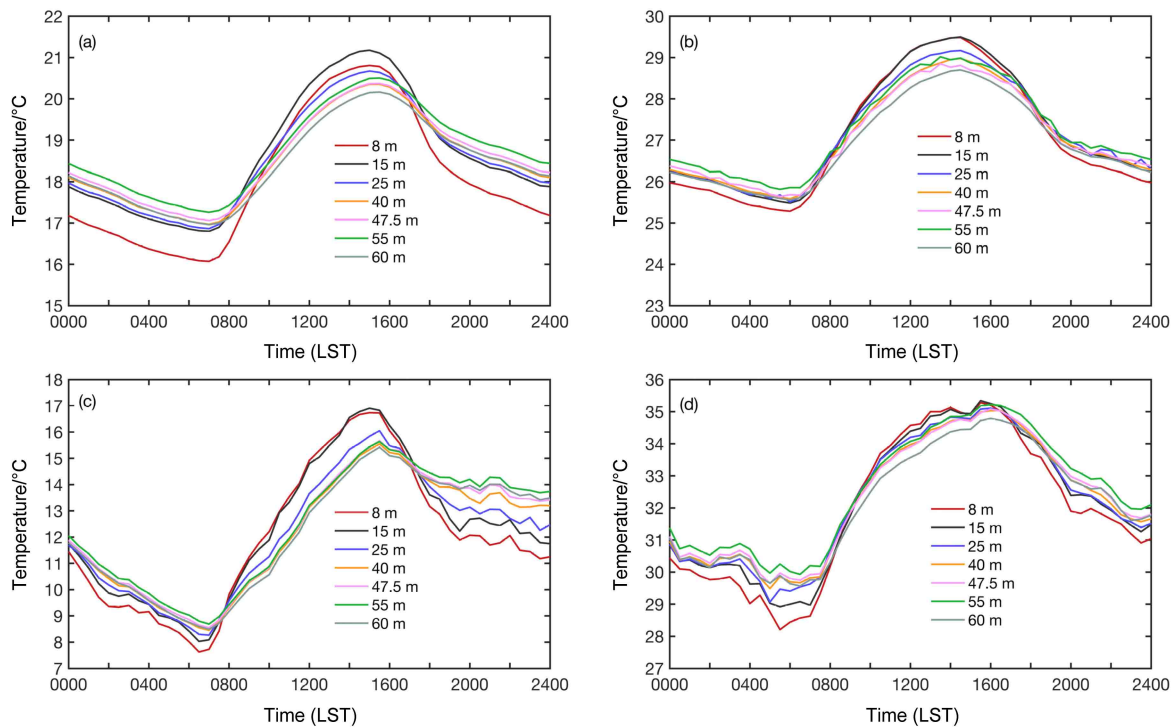


图 6 (a) 干季、(b) 湿季气温的平均日变化和 (c) 干季 2014 年 12 月 13 日、(d) 湿季 2015 年 8 月 8 日典型晴天气温的日变化。8 m 表示距地 8 m 高度处的气温，余类推

Fig. 6 Average diurnal variations of air temperature in (a) dry and (b) wet seasons; diurnal variations in temperature on a typical sunny day (c) dry season, 13 Dec 2014 and (d) wet season, 8 Aug 2015. 8 m indicates the temperature at 8-m height from the ground, and so on

7°C 左右，气温垂直梯度明显；湿季的最高气温可达到 35°C，最低值也能达到 28°C，但气温垂直梯度尤其是白天不显著。

图 7 表示候平均风速和风向在不同高度的变化，可以看出，风速（图 7a）在冬季变化平缓，且遵循随高度升高风速增加的规律；夏季变化剧烈，低

层风速随高度变化梯度明显，高层较紊乱。值得注意的是，8 m 高度处的风速一直围绕 0.2 m s^{-1} 的较小风速上下波动，这是由于该层位于森林冠层内。由图 7b 可以看出，各高度风向差异不大，12 月至次年 3 月的风向主要为偏东风，4 月夏季风爆发后，风向主要集中在东南和西南方向，9 月以后，风向

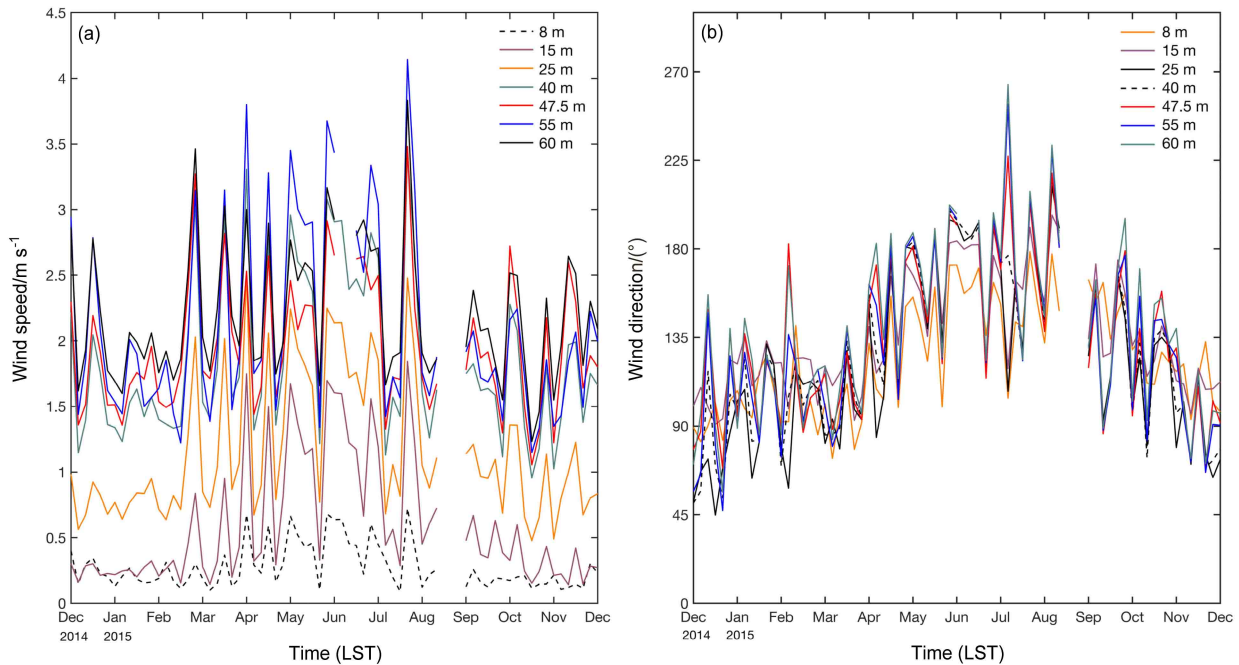


图7 同图3, 但为候平均 (a) 风速和 (b) 风向的变化

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for variations in pentad mean (a) wind speed and (b) wind direction

逐渐转回偏东风。图8表示干季和湿季典型晴天风速的日变化特征, 都是高层风速大于低层; 干季风速凌晨至中午大, 下午到晚上小; 而湿季 06:00 至 08:00 风速最低, 中午达到最大, 然后缓慢降低。

4.2 动量和感热通量交换系数的参数化研究

图9表示在不同稳定度下, 各风向 ($315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 和 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$) 的动量交换系数随冠层表面风速的变化曲线。风向为 $315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时为有较大零平面位移和动力学粗糙度的森林下垫面, 风向为 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 时为有零平面位移较低且粗糙度较小的大部分为校园的下垫面, 风向为 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 时为包含森林和一部分校园的下垫面类型 (参见图1)。

中性和近中性状态下, 在风向为 $315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时 (见图9a), 动量交换系数随风速的变化很小, 可以忽略不计, 动量交换系数 $C_{dr}\approx 0.05$, 大于刘和平等 (1997) 对长白山红松林计算的动量交换系数, 这可能与该风向的零平面位移和空气动力学粗糙度均较高有关, 根据刘伟 (2017) 的研究, 在该风向零平面位移达到 30.29, 空气动力学粗糙度达到 1.80。风向为 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 时 (见图9d), 中性和近中性状态的 $C_{dr}\approx 0.0055$, 此时对应的零平面位移和空气动力学粗糙度分别为 8.24 和 0.67。风向为 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 时 (见图9g), 中性和近中性状态的动

量交换系数 $C_{dr}\approx 0.022$, 此时零平面位移和空气动力学粗糙度分别为 16.46 和 1.35。可以很明显看出, 随着零平面位移和空气动力学粗糙度值的下降, 动量交换系数的值也迅速减小, 其中数量级的差别是由于此 3 个风向分别对应了风向为 $315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的有较大值零平面位移和动力学粗糙度的森林下垫面, 风向为 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 时有零平面位移较低且粗糙度较小的大部分为校园的下垫面, 以及风向为 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 时包含森林和一部分校园的下垫面类型, 可以认为该地区的动量交换系数受下垫面的粗糙度和零平面位移影响很大。

在稳定和不稳定状态下, 动量交换系数 C_d 随冠层表面风速 v (用 25 m 高度观测值代表) 明显发生变化, 稳定条件下, C_d 随 v 的增大而增大 (图9b、9e、9h), 不稳定条件下, C_d 随 v 的增大而减小 (图9c、9f、9i), 按照韦志刚等 (2006) 对戈壁通量交换系数与风速的拟合关系形式, 我们分不同风向对森林冠层 C_d 和 v 的关系进行了拟合, 具体表达形式如下:

$$C_{d_{315^{\circ}\sim 45^{\circ}}} = \begin{cases} 0.0054 \ln v + 0.0283, & \zeta > 0.01 \\ -0.055 \ln v + 0.2364, & \zeta < -0.01 \end{cases} \quad (11)$$

$$C_{d_{45^{\circ}\sim 135^{\circ}}} = \begin{cases} 0.0006 \ln v + 0.0033, & \zeta > 0.01 \\ -0.003 \ln v + 0.019, & \zeta < -0.01 \end{cases} \quad (12)$$

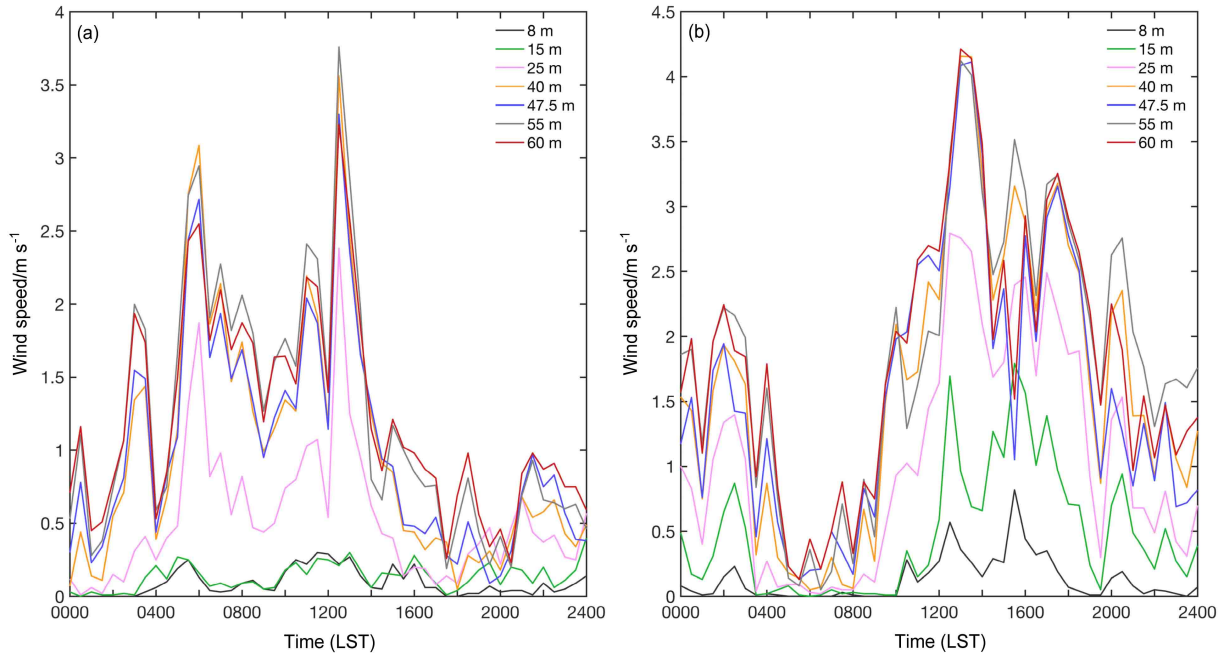


图 8 同图 3，但为 (a) 干季 2014 年 12 月 13 日、(b) 湿季 2015 年 8 月 8 日典型晴天风速的日变化

Fig. 8 Same as Fig. 3, but for diurnal variations of wind speed on typical sunny days (a) 13 Dec 2014 (dry season) and (b) 8 Aug 2015 (wet season)

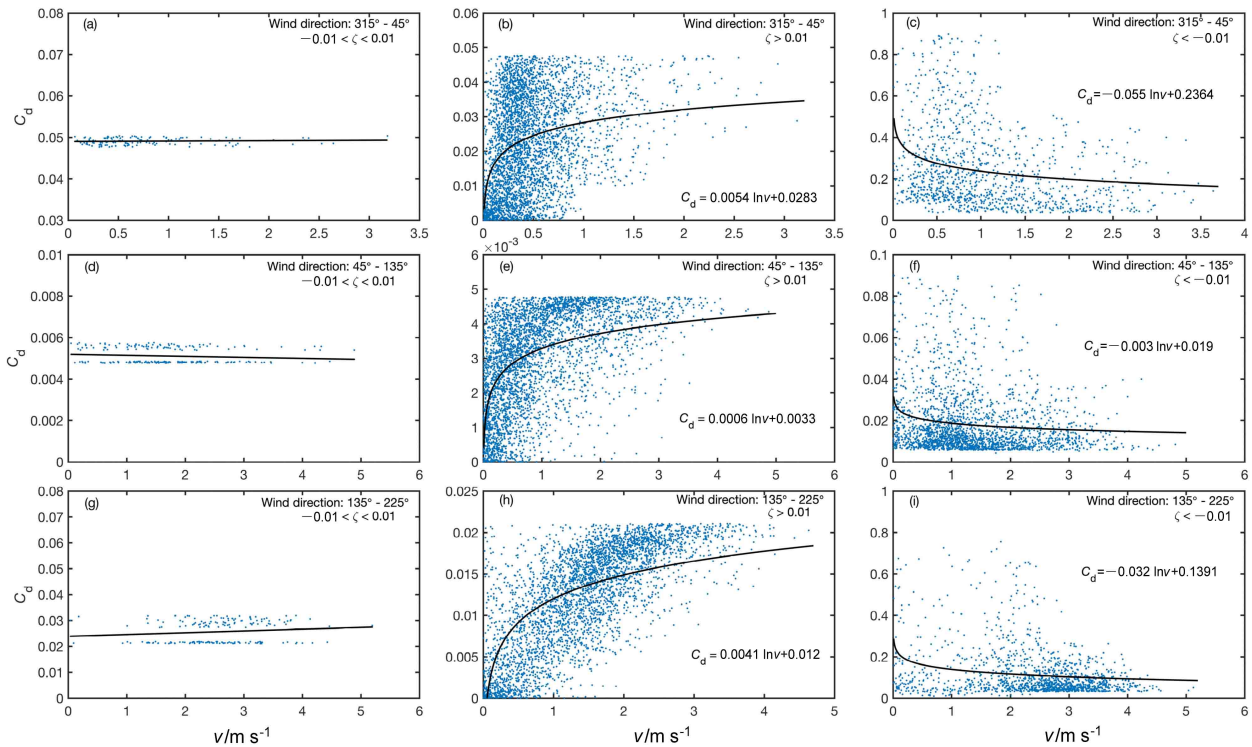


图 9 不同稳定度下各风向的动量交换系数 C_d 随冠层表面风速 v 的变化 (ζ 为大气稳定度参数)

Fig. 9 Variation in the momentum exchange coefficient C_d for each wind direction with the wind speed v of the canopy surface under different stability conditions (ζ denotes atmospheric stability parameter)

$$C_{d_{135^{\circ}-225^{\circ}}} = \begin{cases} 0.0041 \ln v + 0.012, & \zeta > 0.01 \\ -0.032 \ln v + 0.1391, & \zeta < -0.01 \end{cases} \quad (13)$$

这样，我们将计算动量交换系数的问题转化为计算在不同方向上不同稳定度下交换系数与风速关

系的问题。

此外，我们能很明显地看到在风向为 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 和 $135^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 时（图 9d、9g），中性和近中性条件下的动量交换系数出现明显的分层，这可能

与根据现有的风向分布,未能完全将不同方位的零平面位移和粗糙度区分开有关,在今后的研究中还需要对该地区的零平面位移和粗糙度进行更加细致的划分,以寻找更加精准的表达。

彭玉麟等(2013)对华南地区的感热交换系数进行估算,通过分析表明感热交换系数受季节和风速影响很大;岳平等(2013)建立了感热总体交换系数随近地层气温的关系。图10表示在不同稳定度下各风向($315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 和 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$)的感热交换系数随冠层表面风速的变化,3个风向所对应的中性和近中性条件下(图10a、10d、10g)的感热交换系数 $C_{h,n}$ 分别为0.0055、0.003和0.004。可以很明显地看到,与动量交换系数的变化一致,随着零平面位移和动力学粗糙度的增大,所对应的感热交换系数也增大。在稳定条件下,风速和感热交换系数普遍较小,随着大气转变为不稳定情况,较大风速出现频率升高,感热交换系数的值明显增加,甚至可以达到稳定条件下的10倍以上。刘和平等(1997)曾对长白山红松林的总体交换系数进行了理论计算,发现在该森林下垫面不稳定情况下感热交换系数值比稳定条件下高一个量级左右,与本次研究结论较为接近。

在稳定和不稳定状态下,感热交换系数 C_h 随冠层表面风速 v 的变化特征与动量交换系数基本一致,仅存在具体表达式的差异,具体表达形式如下:

$$C_{h,315^{\circ}-45^{\circ}} = \begin{cases} 0.0003 \ln v + 0.0037, & \zeta > 0.01 \\ -0.005 \ln v + 0.0241, & \zeta < -0.01 \end{cases} \quad (14)$$

$$C_{h,45^{\circ}-135^{\circ}} = \begin{cases} 0.0002 \ln v + 0.0022, & \zeta > 0.01 \\ -0.001 \ln v + 0.0129, & \zeta < -0.01 \end{cases} \quad (15)$$

$$C_{h,135^{\circ}-225^{\circ}} = \begin{cases} 0.0005 \ln v + 0.0027, & \zeta > 0.01 \\ -0.009 \ln v + 0.0179, & \zeta < -0.01 \end{cases} \quad (16)$$

综上所述,中性和近中性状态下,随着零平面位移和空气动力学粗糙度值的下降,对应的动量交换系数和感热交换系数减小,二者随冠层表面风速基本不变。稳定条件下,动量交换系数和感热交换系数随冠层表面风速增大而增大;不稳定条件下,动量交换系数随冠层表面风速增大而减小。

5 结论与讨论

本文利用珠海凤凰山陆气相互作用观测塔站2014年11月至2016年5月的观测数据,对比分析了干湿季森林下垫面能量通量和气象要素的变化

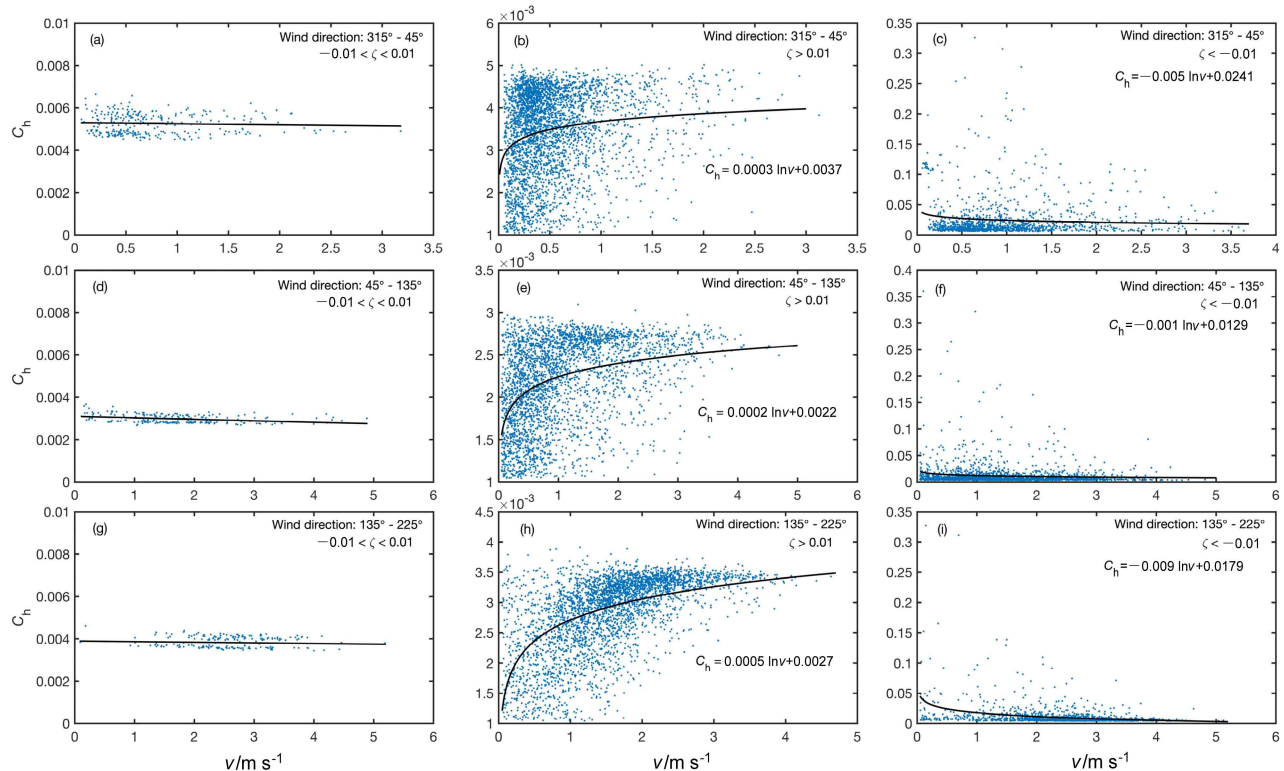


图10 同图9, 但为感热交换系数 C_h 随冠层表面风速 v 的变化

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for variation in the sensible heat exchange coefficient C_h for each wind direction with the wind speed v

特征, 分析了在不同稳定度下 3 个风向范围 ($315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 、 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$) 的动量和感热交换系数随冠层表面风速的变化特征, 对动量和感热交换系数进行了参数化研究, 得出以下结论:

(1) 干季感热和潜热通量值相当, 湿季潜热远大于感热。干季和湿季的夜晚都出现负感热现象, 感热从大气向森林输送。

(2) 相对湿度的变化幅度大, 与该地天气过程的演变密切相关。无论在干季或在湿季, 相对湿度的垂直梯度在低层较大, 高层较小, 夜晚较大, 白天较小。干湿季的气温垂直梯度较小, 干季的气温垂直梯度比湿季明显。风速在冬季变化平缓; 夏季变化剧烈, 低层风速随高度变化梯度明显, 高层较紊乱。干季和湿季典型晴天风速都是高层风速大于低层。各高度风向差异不大, 干季的风向主要为偏东风, 夏季风爆发后, 风向主要集中在东南和西南方向, 9 月以后, 风向又逐渐转回为偏东风。

(3) 中性和近中性状态下, 在风向为 $315^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 和 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 时, 动量交换系数 C_{dn} 分别为 0.05、0.0055 和 0.022, 感热交换系数 C_{hn} 分别为 0.0055、0.003 和 0.004。

(4) 在稳定和不稳定状态下, 动量交换系数 C_d 、感热交换系数 C_h 随冠层表面风速 v 明显发生变化, 稳定条件下, C_d 、 C_h 随 v 的增大而增大; 不稳定条件下, C_d 、 C_h 随 v 的增大而减小。我们分不同风向对森林冠层 C_d 、 C_h 在稳定和不稳定条件下与 v 的关系进行了拟合, 得到了参数化公式。

参考文献 (References)

- Anthony P M, Law B E, Unsworth M H. 1999. Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(3): 151–168. doi:10.1016/s0168-1923(99)00029-5
- Baldocchi D D, Hincks B B, Meyers T P. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. *Ecology*, 69(5): 1331–1340. doi:10.2307/1941631
- Baldocchi D D, Xu L K, Kiang N. 2004. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123(1–2): 13–39. doi:10.1016/j.agrformet.2003.11.006
- Beljaars A C M, Holtslag A A M. 1991. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models [J]. *J. Appl. Meteor.*, 30(3): 327–341. doi:10.1175/1520-0450(1991)030<0327:FPOLSF>2.0.CO;2
- 陈辰, 韦志刚, 董文杰, 等. 2018. 珠海凤凰山陆气相互作用观测塔通量数据的质量控制与评价 [J]. *热带气象学报*, 34(4): 561–569.
- Chen Chen, Wei Zhigang, Dong Wenjie, et al. 2018. Quality control and evaluation of flux data of observation platform about land-atmosphere interaction in Zhuhai Phoenix Mountain [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 34(4): 561–569. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.04.014
- 楚良海. 2009. 黄土塬区通量数据的质量评价及空间代表性研究 [D]. 西北农林科技大学硕士学位论文: 1–7. Chu Lianghai. 2009. Quality assessment and spatial representation of flux data on an upland of the Loess Plateau [D]. M. S. thesis (in Chinese), Northwest Agriculture and Forestry University: 1–7.
- Ding Z W, Wen Z P, Wu R G, et al. 2013. Surface energy balance measurements over a banana plantation in South China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 114(1–2): 349–363. doi:10.1007/s00704-013-0849-5
- 窦军霞, 张一平, 于贵瑞, 等. 2007. 西双版纳热带季节雨林水热通量 [J]. *生态学报*, 27(8): 3099–3109. Dou Junxia, Zhang Yiping, Yu Guirui, et al. 2007. Inter-annual and seasonal variations of energy and water vapour fluxes above a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 27(8): 3099–3109. doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2007.08.002
- 冯健武, 刘辉志, 王雷, 等. 2012. 半干旱区不同下垫面地表粗糙度和湍流通量整体输送系数变化特征 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 55(2): 254–261. Feng Jianwu, Liu Huizhi, Wang Lei, et al. 2012. Seasonal and inter-annual variation of surface roughness length and bulk transfer coefficients in a semiarid area [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 55(2): 254–261. doi:10.1007/s11430-011-4258-2
- 何奇瑾, 周广胜, 周莉, 等. 2006. 盘锦芦苇湿地水热通量计算方法的比较研究 [J]. *气象与环境学报*, 22(4): 35–41. He Qijin, Zhou Guangsheng, Zhou Li, et al. 2006. Model comparisons for estimating water and heat fluxes of reed wetland ecosystem in Panjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 22(4): 35–41. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.04.007
- 黄宝霞, 王澄海, 刘辉志, 等. 2007. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面近地面能量收支研究 [J]. *干旱区地理*, 30(2): 177–183. Huang Baoxia, Wang Chenghai, Liu Huizhi, et al. 2007. Energy budget in the surface layer over movable dune at Naiman in Inner Mongolia [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 30(2): 177–183. doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2007.02.005
- 李伟君, 许振柱, 王云龙, 等. 2007. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析 [J]. *植物生态学报*, 31(6): 1132–1144. Li Yijun, Xu Zhenzhu, Wang Yunlong, et al. 2007. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem [J]. *Journal of Plant Ecology (in Chinese)*, 31(6): 1132–1144. doi:10.17521/cjpe.2007.0141
- Lewellen W S, Teske M. 1973. Prediction of the monin-obukhov similarity functions from an invariant model of turbulence [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30(7): 1340–1345. doi:10.1175/1520-0469(1973)030<1340:potmos>2.0.co;2
- 林良勋. 2006. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 9–20. Lin Liangxun. 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 9–20.
- 刘和平, 刘树华, 朱廷曜, 等. 1997. 森林冠层空气动力学参数的确定

- [J]. 北京大学学报(自然科学版), 33(4): 522–528. Liu Heping, Liu Shuhua, Zhu Tingyao, et al. 1997. Determination of aerodynamic parameters of Changbai Mountain forest [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 33(4): 522–528. doi:10.3321/j.issn:0479-8023.1997.04.016
- 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 2006. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化 [J]. *大气科学*, 30(1): 108–118. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. 2006. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(1): 108–118. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.01.009
- 刘伟. 2017. 珠海凤凰山陆—气相互作用碳通量观测塔通量贡献区特征分析及相关问题研究 [D]. 北京师范大学硕士学位论文: 31–32. Liu Wei. 2017. The study of source area of Zhuhai tower station and related issues for interaction and CO₂ flux between land and atmosphere [D]. M. S. thesis (in Chinese), Beijing Normal University: 31–32.
- Lindroth A, Grelle A, Morén A S. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 4(4): 443–450. doi:10.1046/j.1365-2486.1998.00165.x
- 马虹, 陈亚宁, 李卫红. 2012. 陆地生态系统 CO₂ 与水热通量的研究进展 [J]. *新疆环境保护*, 34(2): 1–8. Ma Hong, Chen Yaning, Li Weihong. 2012. The research progress on CO₂, water and heat fluxes of the terrestrial ecosystem [J]. *Environmental Protection of Xinjiang (in Chinese)*, 34(2): 1–8. doi:10.3969/j.issn.1008-2301.2012.02.002
- 彭玉麟, 何春燕, 简茂球. 2013. 华南地气感热通量交换系数的估算 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 52(3): 139–142. Peng Yulin, He Chunyan, Jian Maoqiu. 2013. Estimation of transfer coefficient for sensible heat flux in southern China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 52(3): 139–142. doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2013.03.023
- 沈艳, 刘允芬, 王堰. 2005. 应用涡动相关法计算水热、CO₂ 通量的国内外进展概况 [J]. *南京气象学院学报*, 28(4): 559–566. Shen Yan, Liu Yunfen, Wang Yan. 2005. Advances in applying the eddy-covariance technique to calculate heat, moisture and CO₂ flux [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28(4): 559–566. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.04.018
- Sheppard P A. 1958. Transfer across the earth's surface and through the air above [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 84(361): 205–224. doi:10.1002/qj.49708436102
- 王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 2004. 长白山森林生态系统 CO₂ 和水热通量的模拟研究 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 34(S2): 131–140. Wang Qiufeng, Niu Dong, Yu Guirui, et al. 2004. Simulating the exchanges of carbon dioxide, water vapor and heat over Changbai Mountains temperate broad-leaved Korean pine mixed forest ecosystem [J]. *Science in China (Ser. D: Earth Sciences)*, 34(S2): 131–140. doi:10.1360/zd2004-34-S2-131
- 王澄海, 黄宝霞, 杨兴国. 2007. 陇中黄土高原植被覆盖和裸露下垫面地表通量和总体输送系数研究 [J]. *高原气象*, 26(1): 30–38. Wang Chenghai, Huang Baoxia, Yang Xingguo. 2007. A study on surface flux and the bulk transfer coefficients over middle Gansu region of Loess Plateau under the wheat and bare fields [J]. *Plateau Meteorology*, 26(1): 30–38. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2007.01.003
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文. 2006. 敦煌戈壁不同近地层大气稳定度下的感热交换系数 [J]. *高原气象*, 25(5): 834–839. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen. 2006. Transfer coefficients of sensible heat under the atmospheric stability in near surface layer over Dunhuang gobi [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25(5): 834–839. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.05.009
- 韦志刚, 胡嘉骢, 董文杰, 等. 2016. 珠海凤凰山陆气相互作用与碳通量观测塔的基本观测及晴天主要观测量的日变化特征 [J]. *大气科学*, 40(2): 423–436. Wei Zhigang, Hu Jiacong, Dong Wenjie, et al. 2016. Basic observations and diurnal variation of key meteorological variables on clear days in the Phoenix Mountain area of Zhuhai [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(2): 423–436. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.15111
- 杨振, 张一平, 于贵瑞, 等. 2008. 西双版纳热带季节雨林大气稳定度特征 [J]. *生态学杂志*, 27(1): 130–134. Yang Zhen, Zhang Yiping, Yu Guirui, et al. 2008. Characteristics of atmospheric stability at the boundary of atmosphere-tropical seasonal rainforest canopy in Xishuangbanna of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology (in Chinese)*, 27(1): 130–134. doi:10.13292/j.1000-4890.2008.0023
- 岳平, 张强, 李耀辉, 等. 2013. 半干旱草原下垫面动量和感热总体输送系数参数化关系研究 [J]. *物理学报*, 62(9): 099202. Yue Ping, Zhang Qiang, Li Yaohui, et al. 2013. Bulk transfer coefficients of momentum and sensible heat over semiarid grassland surface and their parameterization scheme [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 62(9): 099202. doi:10.7498/aps.62.099202
- 曾剑. 2011. 中国北方地区陆面过程特征和参数化及其与气候关系 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 102pp. Zeng Jian. 2011. The characteristics and parameterization of land surface processes and its relationship with climate over northern China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 102pp.
- 张焱, 李跃清, 李英, 等. 2010. 青藏高原东部草甸下垫面涡旋相关观测数据的质量控制及评价研究 [J]. *大气科学*, 34(4): 703–714. Zhang Lang, Li Yueqing, Li Ying, et al. 2010. A study of quality control and assessment of the eddy covariance system above grassy land of the eastern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(4): 703–714. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.04
- 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 2002. 华北平原典型农田水、热与 CO₂ 通量的测定 [J]. *地理学报*, 57(3): 333–342. Zhang Yongqiang, Shen Yanjun, Liu Changming, et al. 2002. Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China plain [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 57(3): 333–342. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2002.03.010
- 左洪超, 胡隐樵. 1992. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数 [J]. *高原气象*, 11(4): 371–380. Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. 1992. The bulk transfer coefficient over desert and gobi in Heihe region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 11(4): 371–380.