

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.

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

韦志刚^{1,2} 胡嘉骢² 董文杰^{1,2} 陈光巨^{1,2} 吴忠魁² 魏信²
郑志远^{1,2} 文小航² 石文² 邢飞² 张治国²

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100871

2 北京师范大学珠海分校未来地球研究院, 珠海 519087

摘 要 珠海凤凰山地处北回归线以南, 森林植被覆盖率达 90%, 植被类型为南亚热带常绿阔叶林群落, 是岭南地区典型的城市或村庄周边的再生森林, 我们选择在凤凰山麓森林冠层较为平缓的低矮坡地建立了陆—气相互作用和碳通量的观测铁塔塔站。本文详细介绍了观测塔的地理环境、初步的仪器布设和基本观测, 并利用已获得的资料分析了旱季典型晴天主要观测量的日变化特征。太阳总辐射及其分光辐射和反射辐射的日变化都是比较常规的中午最高的对称结构; 冠层接收到的长波辐射比向上长波辐射低; 气温日变化的峰值比太阳辐射滞后, 白天达到最高值前的气温是低层高于高层, 达到最高值后到落日气温陡然下降, 夜晚的气温是低层低于高层。相对湿度凌晨最大, 下午最小, 夜晚是低层相对偏湿, 白天正好相反; 11 月份, 珠海地区盛行旱季的偏北季风, 有明显的海陆风的作用, 白天的海风较强, 夜晚的陆风较弱; 森林冠层向大气释放的感热和潜热的量值基本相当, 潜热基本为正; 感热白天为正, 夜晚基本为负; 森林冠层吸收的二氧化碳的最高值出现在午后, 此时空气中水汽浓度达到最低, 向大气释放的二氧化碳在日出后的清晨最大, 此时空气中的二氧化碳浓度达到最大, 同时空气密度也最大; 由于森林冠层高、密度大, 土壤湿度基本没有日变化; 表层土壤温度日变化的振幅随土壤深度加深而变小, 土壤热流的变化是下午高, 清晨低。本文还发现了一些值得深入探讨的现象, 需要以后根据充沛的资料分析论证。

关键词 碳通量 陆气相互作用 南亚热带 常绿阔叶林 日变化

文章编号 1006-9895(2016)02-0423-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.15111

Basic Observations and Diurnal Variation of Key Meteorological Variables on Clear Days in the Phoenix Mountain Area of Zhuhai

WEI Zhigang^{1,2}, HU Jiacong², DONG Wenjie^{1,2}, CHEN Guangju^{1,2}, WU Zhongkui², WEI Xin²,
ZHENG Zhiyuan^{1,2}, WEN Xiaohang², SHI Wen², XING Fei², and ZHANG Zhiguo²

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

2 Future Earth Research Institute, Beijing Normal University, Zhuhai 519087

Abstract Zhuhai's Phoenix Mountain, where the forest vegetation coverage rate has reached 90%, is located just south of the tropic of cancer. The vegetation type is evergreen broadleaf forest, which represents the typical secondary forest type around cities and villages in Linnan in the south subtropical zone. A tower station for monitoring the interaction and

收稿日期 2015-01-16; 网络预出版日期 2015-03-11

作者简介 韦志刚, 男, 1966 年出生, 教授, 理学博士, 主要从事陆气相互作用和气候动力学的研究工作。E-mail: wzg@bnu.edu.cn

资助项目 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 2013AA122003, 国家重大科学研究计划项目 2014CB953903

Funded by National High-Tech R&D Program of China (863 Program, Grant 2013AA122003), National Important Project on Science (Grant 2014CB953903)

CO₂ flux between land and atmosphere has been built in the forest land at the foot of Phoenix Mountain. In this paper, the geographical environment, instruments and basic observations of this tower station are introduced in detail. The diurnal variations of key meteorological variables on a typical clear day in the dry season are analyzed. For total and spectral radiation and their reflection radiation values, results reveal a conventional symmetric structure, with the highest values at noon. Downward longwave radiation is lower than upward longwave radiation for the forest canopy. The peak value of air temperature lags that of solar radiation. The air temperature is lower in the upper layer than in the lower layer before its maximum; and then, after decreasing precipitously from this maximum to sunset during the day, it is lower in the lower layer than in the upper layer at night. For relative humidity, the maximum occurs in the early hours of the morning and the minimum occurs in the afternoon. The air is relatively wet in the lower layer at night, and vice versa during the day. In November, Zhuhai experiences a mainly northerly-blowing monsoon. The land and sea breezes play an obvious role, with the sea breeze being strong and the land breeze weak. The sensible heat fluxes are similar to the latent heat fluxes over the forest canopy, with the latter being basically positive. The sensible heat fluxes are positive during the day and negative at night. The maximum CO₂ uptake by the forest canopy occurs in the afternoon, when the water vapor concentration is smallest. The maximum CO₂ emission by the forest canopy occurs in the morning, after sunrise, when the CO₂ concentration and air density are largest. The soil moisture content is almost constant in the same layer under tall and dense forest. The amplitudes of surface soil temperatures become smaller with soil depth. The soil heat flux is stronger in the afternoon and weaker in the morning. Some of the phenomena revealed in this paper should be analyzed and verified in future work as the datasets of these variables grow.

Keywords CO₂ flux, Interaction between land and atmosphere, South subtropical zone, Evergreen broadleaf forest, Diurnal variation

1 引言

我国南方人口稠密,城市化水平高,随着全球气候变暖,该地区的极端气候事件如热浪、强降雨、跨季节连旱等事件的频率和强度都在增加,这些极端事件的发生及其变化使气象防灾减灾难度不断加大。而防灾减灾水平的提高很大程度上取决于对气候变异机理的认识,陆面过程是气候变异的一个重要影响因子,陆面和大气之间的能量和水分交换对区域和全球气候变化有重要的影响(Dickinson and Henderson-Sellers, 1988; Yasunari, 2007; Xue et al., 2010; 曾红玲等, 2010; 蒙伟光等, 2012)。目前,关于陆气相互作用的研究主要集中在以下方面:选取典型下垫面或关键区域开展大型野外观测试验,获取典型地区陆面过程的地表特征量,研究陆气相互作用的重要特征及机理;利用野外观测试验核遥感观测资料,改进陆面过程参数化方案和陆面过程模型;利用耦合陆面过程模型的气候模式研究陆气相互作用对气候的影响。

从 20 世纪 80 年代中期起,在国际上进行了许多大型陆气相互作用观测试验,通过这些大型的野外观测试验获取了大量有关不同下垫面陆气相互作用的观测资料,同时也发展了一系列陆-气相互作用模式(黄荣辉等, 2013)。在亚洲热带季风地区,国际上也已开展了一些相关研究,使我们对这

一特殊地域的陆气相互作用特征有了初步的认识(Toda et al., 2002; Tanaka et al., 2003; Tsai et al., 2007)。最近数十年,在我国也开展了大量的陆气相互作用观测试验。比如自 1979 年开始的一系列青藏高原科学试验(QXPMEEX、GAME-Tibet、TIPEX、CAMP/Tibet、第三次青藏高原大气科学试验等)、“黑河地区地气相互作用野外观测试验研究”(HEIFE)、“亚洲季风试验—淮河试验”(GAME-HUBEX)、“内蒙古半干旱草原土壤—植被—地气相互作用观测试验”(IMGRASS)、“中国西北干旱区陆气相互作用”(NWC-ALIEX)等(黄荣辉等, 2013; 徐祥德和陈联寿, 2006; 王介民, 1999; Wen et al., 2009),通过这些试验对陆气相互特征以及与气候的相互影响有了比较深入的认识(Liu et al., 2008; 张美根等, 2008; Zhou and Huang, 2011; 刘辉志等, 2013; 姜超等, 2013),由这些试验所建立的一些陆气相互作用的野外观测塔站也得到了长期维护和发展。但是这些观测试验和站点大多都位于青藏高原和北方地区,而且较少在森林下垫面进行。李梓铭等(2014)分析了草甸草原生态系统通量的日变化特征,Bi et al.(2007)观测研究了中国华南草地与大气的能量交换特征,Ding et al.(2013)观测分析了华南香蕉林与大气的相互作用特征,发现华南地区的陆气相互作用有其特殊性,应该加强观测试验和分析。

全球变暖主要归因于二氧化碳等温室气体的增加,全球各类系统二氧化碳的源/汇问题已成为科学家关注的焦点。陆地生态系统受人类活动影响最大、碳储量仅次于海洋,森林约占陆地生态系统总面积的 1/3,森林与大气碳交换量占陆地生态系统与大气碳总交换量的 90%以上(王妍等,2006)。森林是地球生物圈的重要组成部分,森林绿色植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,森林是重要的碳汇;另一方面,森林中的动物、植物和微生物的呼吸及枯枝落叶的分解氧化等过程以二氧化碳、一氧化碳等形式向大气排放碳,森林又是碳的释放源。热带森林物种丰富多样,群落结构复杂,并且有巨大的生物量,成为支配全球碳平衡的主要因素,是许多生态环境领域科学研究的焦点区。有关碳通量的研究在温带地区已经较为成熟,多数学者认为温带地区为碳汇,而热带地区的碳通量研究相对较少(赵双菊和张一平,2005)。热带森林占地球表面 7%,但它拥有全球 50% 的物种和 70%~80% 的树种,热带森林储存有全球生物量碳的 40%,每年通过光合作用吸收的碳相当人类通过化石燃料释放于空气碳的 6 倍(曹福祥等,2010)。热带森林究竟是碳源还是碳汇?以往的研究存在争议,祁承经等(2010)对此问题专门进行了归纳分析,一种观点认为自 20 世纪 80 年代后期起热带森林的生物量、茎个体密度、茎个体周转率均呈现显著增长,进而推断热带森林现今和今后数十年,它仍然是一个中等的碳汇;另一种观点认为热带森林生物量并无增加,其森林碳汇已沦为碳源;未来人类开发森林及林地利用改变将日益加剧,在自然和人为的综合影响下,不论是对热带森林生物量增加持肯定立场的生态学家,或对此持反对立场的生态学家,都一致认为未来退化的热带森林系统碳汇必然转变为碳源,甚至是一大规模的碳源。因此,监测和分析热带森林生态系统的碳通量变化对研究陆地生态系统碳循环以及全球碳的源/汇具有相当重要的意义。

美国、加拿大、苏联、英国、德国、瑞典等国家先后分别进行了森林生态系统的碳通量以及全球碳循环之间的相关性研究,以区域甚至全球为中心的研究网络(FLUXNET)也迅速发展起来。高塔监测系统使得森林与大气之间的交换通量研究成为可能,随着微气象学原理在通量研究领域的应用,森林生态系统的碳、水和能量通量研究也得

到了快速发展(赵双菊和张一平,2005)。截至 2014 年 4 月,由各区域通量网构成的全球通量观测网络已经拥有 683 个观测站(<http://fluxnet.ornl.gov> [2015-01-10])。中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)有超过 22 个森林、草地、农田站,结合野外植被、土壤生理生态学实验对碳、水及能量通量进行观测(<http://www.chinaflux.org> [2015-01-10])。目前,ChinaFLUX 有 9 个森林塔站,其中呼中、大兴安岭、帽儿山和长白山 4 个站在东北地区,代表寒温带的不同类型森林;江西的大岗山和千烟洲、以及云南的哀牢山 3 个站代表亚热带不同类型森林;云南的西双版纳站代表热带季节雨林;位于广东省肇庆市的鼎湖山站代表亚热带常绿阔叶林。鼎湖山站是北回归线附近保存完好的亚热带地带性植被。植物种类繁多,亚热带植物类型为优势种,热带植物类型也有较多分布。但是岭南地区植被种类复杂,城市或村庄周边丘陵和坡度的再生森林分布很广且比较典型。

珠海市位于北纬 21°48'~22°27'与东经 113°03'~114°18'之间,是珠江三角洲南端的一个重要城市,位于广东省珠江口的西南部,地势由西北向东南倾斜,地形多样,以平原、丘陵为主,兼有低山、滩涂等。土壤由花岗石和沙页岩发育而成赤红壤、三角洲沉积土、滨海沉积土和洪积土等。广大丘陵山地的上层普遍脊薄,有机质含量较低,多露石。珠海属亚热带季风气候(郑景云等,2010),常受亚热带季风侵袭,多雷雨;年平均气温 22.3°C,最低气温 2.5°C,年降雨量为 1770~2300 mm。4~9 月盛行东南季风,为雨季,降水量占全年的 85%;10 月至次年 3 月盛行偏北季风,为旱季。珠海大气相对湿度较高,年平均相对湿度为 79%。

珠海原生性森林已不复存在,主要植被类型有常绿针叶林、常绿阔叶林、常绿季雨林、红树林、灌丛、草丛、滨海沙生植被、沼生植被和人工植被等。地带性森林植被为常绿季雨林。灌丛是珠海市山地分布较广的次生植被,主要分布于山顶或人为破坏较为严重的低海拔山地。草丛在岛屿、海滨或山顶较为干热的地段较为常见。人工林大都是在 20 世纪 80 年代以后才营建起来的,主要树种有台湾相思、大叶相思、落羽杉和水松(庄雪影等,2010)。森林是陆地生态系统的主体,同时也是城市生态系统赖以维持和循环的重要条件,在珠海市这种城市快速发展、企业高度密集的区域,森林已经成为高

强度城市化地区生态安全体系构建的核心成分。

珠海凤凰山地处北回归线以南,位于珠海市城区北面,属沿海丘陵地区,森林植被覆盖率达 90%,植被类型为南亚热带常绿阔叶林群落,树木种类繁多,天然乔木树种主要有阴香、山乌桕、鸭脚木、小叶榕、高山榕、孔雀豆、山龙眼、猴耳环等,人工栽培的乔木树种主要有马尾松、湿地松、台湾相思、大叶相思、桉树类等。凤凰山区林地已经全部划为国家级生态公益林。凤凰山一带地形地貌丰富多样,山岳峦峰较多,水源充沛,溪流众多,水土保持状况良好,属环境空气一类功能区。北京师范大学珠海分校位于珠海市北端唐家湾镇高新区大学园区内,凤凰山环绕校园四周。学校周边主要为覆盖森林的丘陵和坡地,是岭南地区典型的城市或村庄周边再生森林,我们通过考察和论证,选择在学校西边凤凰山麓森林冠层较为平缓的低矮坡地建立了陆气相互作用和碳通量的观测铁塔塔站和观测系统,观测到达森林冠层的太阳辐射、光合有效辐射、太阳分光辐射及其反射辐射,森林冠层与大气间的二氧化碳通量、感热和潜热通量,观测森林冠层表面和近冠层的风、温度、湿度和其他相关量,进行陆气相互作用观测研究,以订正已有的陆面过程参数和改进陆面过程模式,建立陆面参数和能量的卫星遥感模型。本文详细介绍了该塔站的地理环境、初步的仪器布设和基本观测,并利用已获得的资料分析了主要观测量的日变化特征。

2 观测塔、观测量和观测仪器精度

珠海铁塔位置的经、纬度为 $22^{\circ}21'15.5''N$, $113^{\circ}31'34.2''E$,海拔高度为 38.5 m。具体位于珠海凤凰山北麓北京师范大学珠海分校校园西部森林区,图 1 为位置示意图,铁塔位置与森林边界的最短距离为 230 m,为东南偏南方向,铁塔距森林南边界距离为 240 m。森林主要向东、北、西方向展开,铁塔距森林东、北、西边界的距离分别为 1.2 km、1.0 km 和 1.1 km。塔站所在位置地表南北向有大约 7° 的坡度,南低北高,从森林南边界向北,过塔站位置再向北 140 m 到海拔最高处。由于地形低处的森林长势较好,森林冠层的坡度大约为 5° 。

由于珠海地区是台风登陆的一个较活跃地区,尽管我们的观测站在凤凰山的北麓,巍峨的凤凰山对强势的台风有所阻挡,但建立一个牢固可靠的铁塔是非常必要的。我们希望建立一个长期稳定的观

测塔站,所以拉线铁塔也不甚适合需要。最后,我们设计了 1 个钢珠单管塔(图 2a),单管塔高 60 m,塔底面直径约 1.8 m,塔直径随高度递减。塔体可承受瞬时风速为 70 m s^{-1} ,在风速为 40 m s^{-1} 下,塔的摆动幅度不超过 $1/300$,裹冰 7 mm。在 58.5、53.5、46、38.5、31、23.5、13.5、6.5 m 高处建有共 8 个平台,以便架设仪器。塔体采用圆型,平台半径不小于 800 mm,平台承载不小于 150 kg,平台防护围栏高 1.2m,具备安全防护措施。在地表和每个平台上方 1.5 m 处,安装 3 根或 2 根 5 m 长的横臂,具体在 1.5、25 和 47.5 m 高处有 2 根横臂,分别朝向正南和正北方向,在 8、15、40、55 和 60 m 高处有 3 根横臂,成 120° 夹角,分别朝向东南、东北和偏西方向。这些横臂伸向塔体外,用来安装仪器探头,高度越高,向塔体外伸的越长。横臂长度 5 m,安装仪器探头的横臂头部距塔的中心距离为 4.2 m,距塔体距离为 3.3 m,是塔体底面半径的 3.7 倍,塔愈高,该比例值愈大,观测数据受塔体的影响愈小。塔的材料为钢材,规格和型号能够保证塔身坚固耐用。所有钢材经过热浸锌处理,并在热浸锌外层进行喷塑颜料,保证颜色耐久不脱落。珠海地区雷雨较多,铁塔建有符合当地规定的防雷设施。根据当地天气气候特点,供电方案选择电缆加变压器供电系统。

塔站下垫面(图 2b)为亚热带典型森林,以相思类、桉类等林和各种灌丛草坡为主,森林冠层平均高度 18 m。由于立塔施工时对塔体周边偏西偏北方向约 5 m 范围,偏东偏南方向约 10 m 范围内的树木有破坏和移除,在塔体建设完成后,我们对 5~10 m 范围内的树木以相同的树种进行了移栽和补种,到仪器安装完毕调试试验后的正常观测期,移植和补种的树木已经有一定长势和密度,当然与周边林木相比,覆盖率和高度都仍有较大差别,估计需要 1~2 年时间塔体近旁树木与周边才能一致。我们初步架设了 3 套观测系统,来进行陆气相互作用和二氧化碳通量的长期观测,这 3 套系统分别是:

(1) 气象观测系统:观测森林冠层上、冠层内层空气风速风向、温度、湿度;冠层表面温度、湿度;雨量。土壤温度、湿度,土壤热通量。风速、风向、空气温度和相对湿度有 7 层观测,冠层中 2 层,分别设在 8 m 和 15 m 高度,冠层上 5 层,分别设在 25、40、47.5、55 和 60 m 高度。在 25 m 和 1.5 m 高度分别用红外温度计测量冠层表面温度和



图1 珠海南亚热带森林陆气相互作用与碳通量观测塔位置示意图

Fig. 1 Sketch map of Zhuhai's tower station, set up to monitor the interaction and CO_2 flux between land and atmosphere in the south subtropical zone

地表温度。土壤温度和湿度观测分为4层，分别在土壤5 cm、10 cm、20 cm和40 cm深处，土壤热通量观测分为3层，分别在土壤7.5、15和30 cm深处。雨量桶分别安装在25 m和1.5 m高处，观测降雨量和冠层截留后的降雨量。气压计安装在约1 m高的采集箱内，观测地表气压。另外还选用TCAV型土壤热平衡传感器观测土壤表层温度。

(2) 通量观测系统：观测植被冠层和大气间二氧化碳通量、感热通量、潜热通量、二氧化碳浓度等。按照陆气相互作用和森林通量站的观测规范，超声探头和二氧化碳/水汽分析仪的仪器探头必须安装在冠层上常通量层并且伸向主风向，架设高度与风浪区的比率确定为1:100，在下垫面均一的情况下，仪器安装高度不应低于冠层高度的1.5倍。范绍佳等(1998, 2005)根据气象台站1986~1990和1995~2000年连续5年的常规观测资料分别对广东沿海地区和珠江三角洲的风场特征进行了分



图2 珠海南亚热带森林陆气相互作用与(a)碳通量观测塔和(b)下垫面状况图片

Fig. 2 Photographs of (a) Zhuhai's tower station and (b) its underlying surface

析，发现珠江三角洲地区受季风影响显著，还受海陆风、城市热岛环流、越南岭下沉气流等的复合影响，珠海夏季地面盛行风向为东南偏南(SSW)，冬季为西北偏北(NNW)。由于珠海观测场森林冠层的平均高度为18 m，同时地表面有7°的坡度，森林冠层面的坡度虽然比地表要小，但森林冠层有较大的粗糙度，所以，我们将通量观测系统的超声探头和二氧化碳/水汽分析仪安装在55 m高度(为冠层高度的3.06倍)，面朝155°(SSE)方向，以保证仪器探头在常通量层内并朝向主风向。

(3) 辐射观测系统: 观测太阳总辐射、光合有效辐射、紫外辐射及其它们的反射辐射, 向上、向下长波辐射、散射辐射。所有辐射监测仪器朝南向安装, 架设高度比通量探头低 1 层, 在 47.5 m 高度, 以保证正确观测森林冠层面的反射太阳辐射和长波辐射。

观测所用仪器和采集器均为目前国际上最先进的观测设备, 风速和风向用美国 RM Young 公司的 05103 型风速风向传感器, 空气温度和湿度用芬兰 Vaisala 公司的 HMP155A 型温湿度传感器, 冠层表面温度和地表温度用美国 Apogee 仪器公司的 SI-111 型红外辐射传感器, 土壤温度和湿度分别选用美国 Campbell 公司的 109 型温度传感器和 CS616 型湿度传感器, 土壤热通量用美国 Hukseflux 公司的 HFP01SC 型土壤热通量板, 土壤表层温度用美国 Campbell 公司的 TCAV 型土壤热平衡传感器, 雨量用澳大利亚 Hydrological Services Pty Ltd 公司的 TB4MM 型雨量桶, 地面气压用芬兰 Vaisala 公司的 CS106 型大气压力传感器。能量通量、二氧化碳通量和二氧化碳/水汽密度观测用美国 Campbell 公司的 3 维超声 CSAT3A 和开路气体分析仪 EC150 组成的涡动相关系统。太阳总辐射和反射辐射用荷兰 Kipp&Zonen 公司的 CMP21 型短波辐射传感器, 光合有效辐射和反射辐射用美国 Apogee 仪器公司的 SQ-130-L-10 型光量子辐射传感器, 紫外辐射和反射辐射用荷兰 Kipp&Zonen 公司的 CUV5 型紫外

辐射表, 散射辐射用英国 DELTA-T 公司的 SPN1 型日照辐射传感器, 冠层向下和向上长波辐射用荷兰 Kipp&Zonen 公司的 CGR 4 型长波辐射传感器。数据采集用美国 Campbell 公司的 CR3000 型数据采集器。所有仪器都是 2013 年或 2014 年出厂的新设备。表 1 列出了各观测量的观测仪器及其型号、制造商和观测精度。气象和辐射观测系统的观测频率因观测量或仪器不同有所不同, 采集数据每 30 分钟输出均值或累积值。涡度相关系统的观测频率为 10 Hz, 采样时间间隔为 100 mSec, 我们收集了高频的原始数据, 也收集了观测程序初步订正处理计算的 30 分钟平均的通量数据。表中只给出了这些仪器最基本的参数, 详情可参考相关公司网站的仪器手册。

3 晴天主要观测量的日变化特征

珠海亚热带森林陆气相互作用与碳通量观测塔于 2014 年 8 月底建成和安装好仪器, 在经过 9 月和 10 月两个月的试运行, 并检查调试正常后, 于 2014 年 11 月 10 日开始正式观测。10~12 月为珠海地区阴雨天气较少、气候宜人的黄金期, 2014 年 11 月 21 日是珠海地区连续 10 天未下雨的一个晴好天气, 我们选择该天为典型晴天的一个代表, 来研究主要观测量的日变化特征。前面已经指出, 立塔时施工影响了塔体 5~10 m 范围内的树木密度和高度, 尽管我们以相同的树种进行了移栽和补种, 此

表 1 观测仪器及其型号、制造商和观测精度

Table 1 Observation instruments and their models, manufacturers and precision levels

编号	仪器名称	型号	制造商	观测量和观测精度
1	数据采集器	CR3000	美国 Campbell	/
2	温湿度传感器	HMP155A	芬兰 Vaisala	气温: $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$; 相对湿度: $\pm 1.0\%$
3	风速风向传感器	05103	美国 RM Young Young	风速: $\pm 0.3 \text{ m s}^{-1}$ 或读数的 1%; 风向: $\pm 3^{\circ}$
4	气压计	CS106	芬兰 Vaisala	大气压力: $\pm 0.3 \text{ hPa}$ (20°C 时); $\pm 0.6 \text{ hPa}$ ($0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 时)
5	雨量桶	TB4MM	澳大利亚 Hydrological Services Pty Ltd	雨量: $\pm 2\%$ ($< 250 \text{ mm h}^{-1}$ 时); $\pm 3\%$ ($250\sim 500 \text{ mm h}^{-1}$ 时) 分辨率: 0.2 mm
6	红外温度传感器	SI-111	美国 Apogee	地表和冠层表面温度: $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$
7	土壤温度传感器	109	美国 Campbell	土壤温度: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ($0^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 时), $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (-50°C 时)
8	土壤热通量板	HFP01SC	荷兰 Hukseflux	土壤热通量: $\pm 5\%$; 灵敏度: $50 \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$
9	土壤水分传感器	CS616	美国 Campbell	土壤含水量: $\pm 2.5\%$ VWC (体积含水量)
10	土壤热平衡传感器	TCAV	美国 Campbell	土壤表层温度: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
11	短波辐射传感器	CMP 21	荷兰 Kipp & Zonen	太阳总辐射 (285~2800 nm) 和反射辐射: $\pm 1.4\%$; 灵敏度: $7\sim 14 \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$
12	长波辐射传感器	CGR 4	荷兰 Kipp & Zonen	向上和向下长波辐射 (4500~42000 nm): $\pm 3\%$; 灵敏度: $5\sim 15 \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$
13	光量子辐射传感器	SQ-130-L-10	美国 Apogee	光合有效辐射 (410~655 nm) 和反射辐射: $\pm 5\%$; 灵敏度: $200 \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$
14	紫外辐射表	CUV 5	荷兰 Kipp & Zonen	紫外辐射 (280~400 nm) 和反射辐射: $\pm 5\%$; 灵敏度: $300\sim 500 \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$
15	日照辐射传感器	SPN1	英国 Delta-T Devices Ltd	总辐射和散射辐射 (400~2700 nm): $\pm 8\%$; $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$
16	超声	CSAT3A	美国 Campbell	超声虚温 T_s : $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$, 风速 U_x 和 U_y : $\pm 1 \text{ mm s}^{-1}$, U_z : $\pm 0.5 \text{ mm s}^{-1}$
17	开路气体分析仪	EC150	美国 Campbell	二氧化碳密度: 0.2 mg m^{-3} , 水汽密度: 0.0035 g m^{-3}

范围内的树木覆盖率和高度比周边要明显偏小, 需要一段时间才能一致, 这对一些量值特别是反射辐射的观测结果有一定影响, 目前不宜分析计算反射率等量, 但对日变化的影响应该较小, 所以我们只先分析各量值的日变化。

3.1 典型晴天各辐射量的日变化特征

图 3 给出 2014 年 11 月 21 日森林冠层净太阳辐射量及其分量的日变化, 可以看出, 太阳总辐射及其反射辐射都是比较规则的, 从日出前为 0, 渐渐升高, 12 时 (当地时间, 下同) 最高, 然后逐渐降低, 到日落后最低为 0。冠层向上长波辐射白天高、夜晚低, 夜晚的值基本稳定, 而白天存在峰值, 最高值在 14 时, 这与森林冠层表面温度的变化 (图略) 一致。冠层接收到的长波辐射比向上长波辐射低, 白天平缓, 夜晚扰动较强。净辐射白天为正值, 变化与总辐射基本一致, 12 时最高, 表示森林接收辐射能量; 夜晚为负值, 是因为冠层接收到的长波辐射比向上长波辐射低。

图 4 为太阳辐射各波段辐射量的日变化, 光合有效辐射、紫外辐射及其它们的反射辐射日变化特征与总辐射 (图 3) 相同, 光合有效辐射的量值明显低于总辐射, 中午最高值是总辐射的 43.6%; 紫外辐射更低, 中午最高值是总辐射的 4.7%。冠层反射的光合有效辐射与反射总辐射的比值比接收的光合有效辐射与总辐射的比值要小的多, 冠层反射的光合有效辐射中午最高值是反射总辐射的 13.7%, 表明森林冠层对光合有效辐射的反射率比总辐射的反射率明显低; 而冠层反射的紫外辐射与反射总辐射的比值比接收的紫外辐射与总辐射的比值更小, 冠层反射的紫外辐射中午最高值是反射总辐射的 0.74%, 表明森林冠层对紫外辐射的反射率比总辐射的反射率明显更小。关于森林冠层对总辐射和分光辐射反射率的研究在资料充沛后将深入进行, 这里不再赘述。散射辐射也随总辐射而变, 但受天气状况的影响有扰动, 最高值并不在 12 时, 上午与下午各有一峰值, 散射辐射日最高值占总辐射的 33.5%。

3.2 典型晴天气温、湿度和风的日变化特征

气温、相对湿度和风是最基本的气象要素, 对这些量都是分层观测的, 以便将来对其近地层廓线进行深入研究。与太阳辐射的日变化相比, 气温的最高值往往是滞后在下午的, 该塔站也不例外。图 5 为各层气温的日变化, 可以看出, 气温的日变化

呈现单峰特征, 最高值在 15~16 时, 冠层内 8 m 和 15 m 的日最高温度出现在 15 时, 冠层上 25 m 的出现在 15 时 30 分, 40、47.5、55 和 60 m 的出现在 16 时, 高处的最高值比低处滞后。最低值出现在凌晨。白天达到最高值前的气温是低层高于高层, 达到最高值后到落日气温陡然下降。夜晚的气温是低层低于高层。另外, 在白天, 冠层上 40、47.5 和 55 m 气温值接近, 冠层内 8 m 和 15 m 的气温值也很接近, 气温随高度变化不明显; 在夜晚, 60 m 高处的气温与 47.5 m 处的接近, 低于 55 m 处的; 这些微小的特征可能具有季节性, 需要进一步分析验证。相对湿度 (图 6) 与气温的日变化正好相反, 是凌晨最大, 14~16 时最小。夜晚是低层相对偏湿, 高层相对偏干; 白天正好相反。

图 7 为各层风速和风向的日变化, 11 月份, 珠海地区开始盛行旱季的偏北季风, 在我们选择的代表日, 凌晨开始时为西北风, 后转为东北风, 从上午到下午, 由东北风转东南风, 傍晚到夜间又从东南转西南风到偏西风, 珠海地区东南为海, 西北为陆, 有明显的海陆风的作用。风速呈现白天和高层高、夜晚和低层低的特征, 白天的海风较强, 夜晚的陆风较弱。由于森林的作用, 冠层内风向比较杂乱, 风速明显减弱。

3.3 典型晴天森林冠层与大气间能量和二氧化碳交换的日变化特征

在珠海干季的 11 月份, 森林冠层向大气释放的感热和潜热 (图 8) 的量值基本相当, 都是白天高, 夜晚低, 因为风、温、湿等因素日变化的作用, 它们的变化并不平缓, 有多个峰值; 潜热基本为正, 仅夜晚个别时次为负值, 表明森林向大气释放潜热通量; 感热白天为正, 夜晚基本为负, 表明森林白天向大气释放感热通量, 夜晚大气反而向森林输送感热, 这是由于夜晚森林冠层上空气的温度高于冠层表面气温的缘故。图 8 也给出了净辐射的日变化 (图 3 中红线), 根据能量平衡特征, 冠层的净辐射主要用于感热、潜热和冠层表面的向下热流。冠层表面的向下热流没有直接测量, 需要进一步根据土壤热流和冠层内其他补充观测量进行分析计算, 这里不进行它的分析研究。

森林冠层向大气释放的二氧化碳通量 (图 9) 白天为负值, 夜晚为正值, 表明森林白天吸收二氧化碳, 夜晚释放二氧化碳。白天, 森林进行光合作用, 吸收的二氧化碳在 14 时 30 分有一极大值, 比

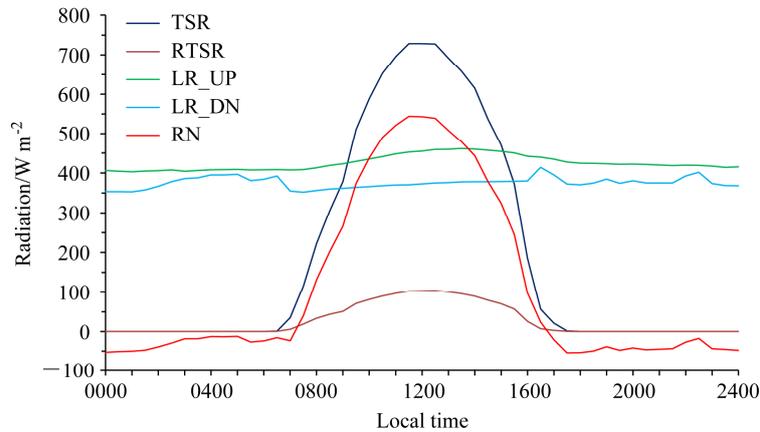


图3 2014年11月21日森林冠层净辐射及其分量的日变化。TSR: 总太阳辐射; RTSR: 冠层反射的总太阳辐射; LR_UP: 冠层向上长波辐射; LR_DN: 天空向下的长波辐射; RN: 森林冠层的净辐射

Fig. 3 Diurnal variation of net radiation and its components over the forest canopy on 21 November 2014. TSR, total solar radiation; RTSR, reflection radiation of TSR; LR_UP, upward longwave radiation; LR_DN, downward longwave radiation; RN, net radiation

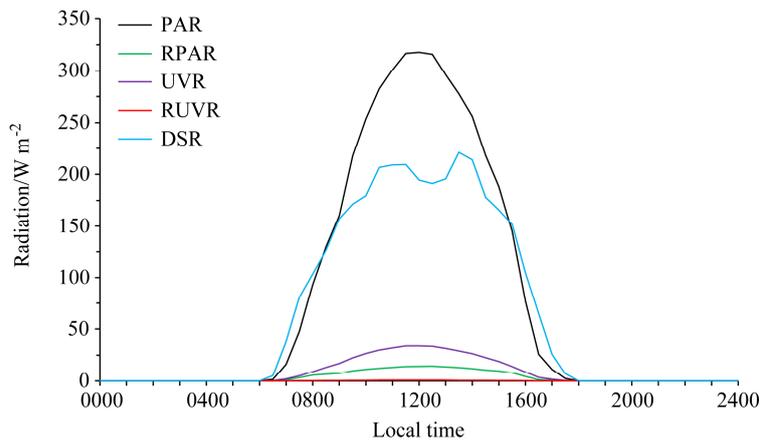


图4 2014年11月21日各波段太阳辐射量的日变化。PAR: 光合有效辐射; RPAR: 冠层反射的光合有效辐射; UVR: 紫外辐射; RUVR: 冠层反射的紫外辐射; DSR: 散射辐射

Fig. 4 Diurnal variation of the solar spectral radiation over the forest canopy on 21 November 2014. PAR, photosynthetically active radiation; RPAR, reflection radiation of PAR; UVR, ultraviolet radiation; RUVR, reflection radiation of UVR; DSR, diffuse solar radiation

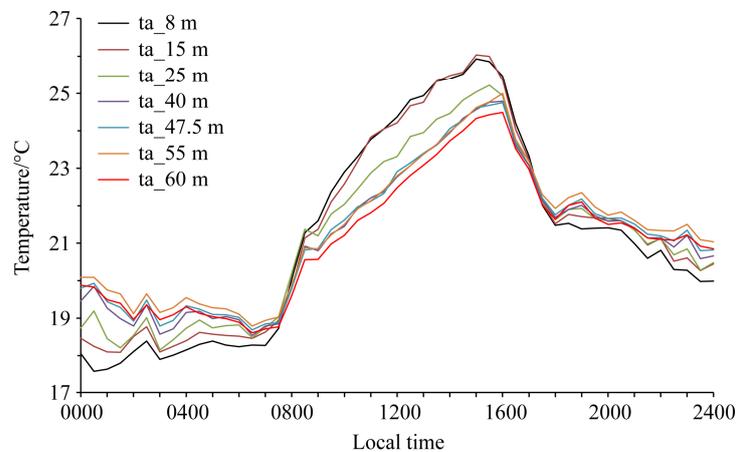


图5 2014年11月21日气温的日变化。ta_8m表示距地8m高处的气温, 余类推

Fig. 5 Diurnal variation of air temperature on 21 November 2014. The term ta_8m indicates temperature at 8 m above the ground, and the rest may be deduced by analogy

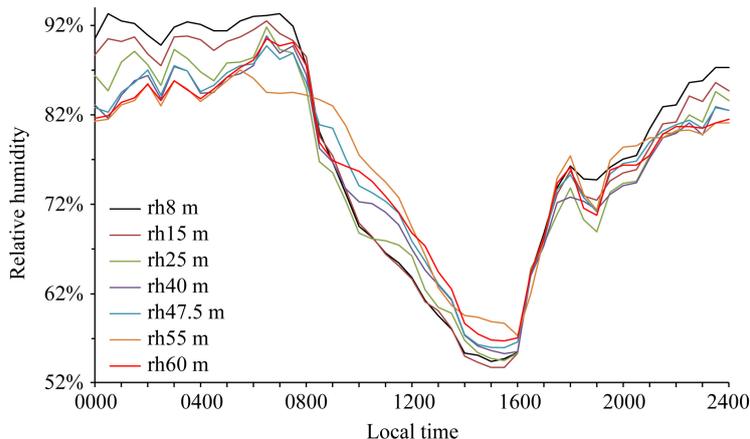


图6 2014年11月21日相对湿度的日变化。rh8m表示距地8m高处的相对湿度，余类推

Fig. 6 Diurnal variations of relative humidity on 21 November 2014. The term rh8m indicates relative humidity at 8 m above ground, and the rest may be deduced by analogy

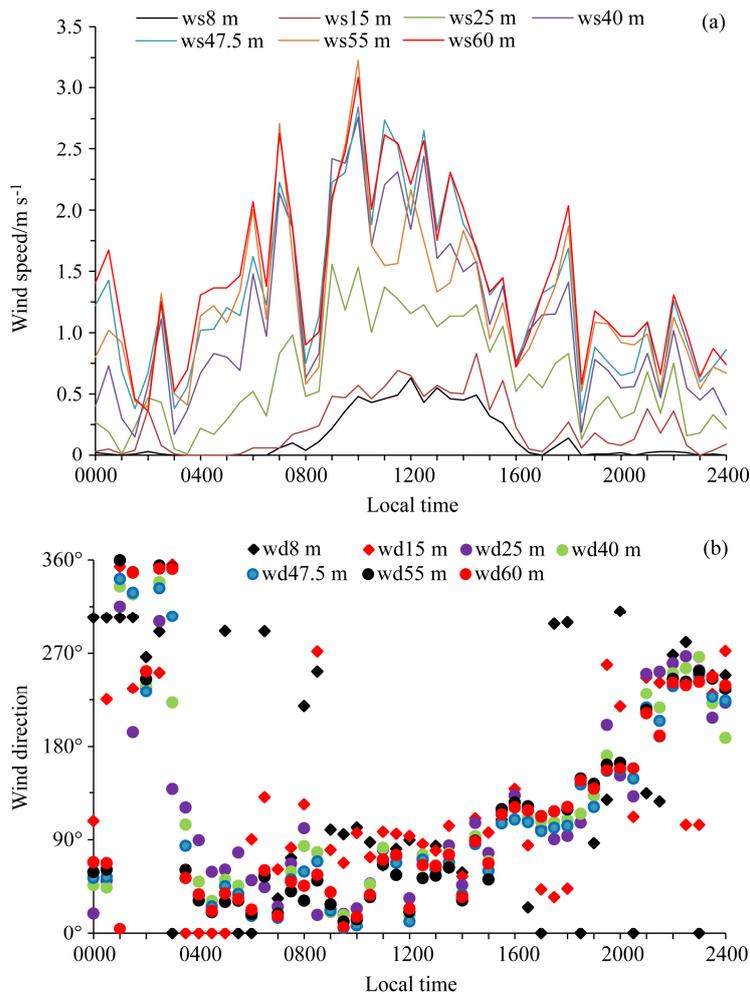


图7 2014年11月21日 (a) 风速和 (b) 风向的日变化。ws8m、wd8m 分别表示距地8m高处风速、风向，余类推

Fig. 7 Diurnal variation of (a) wind speed and (b) wind direction on 21 November 2014. The terms ws8m and wd8m indicate wind speed and wind direction at 8 m above the ground, respectively, and the rest may be deduced by analogy

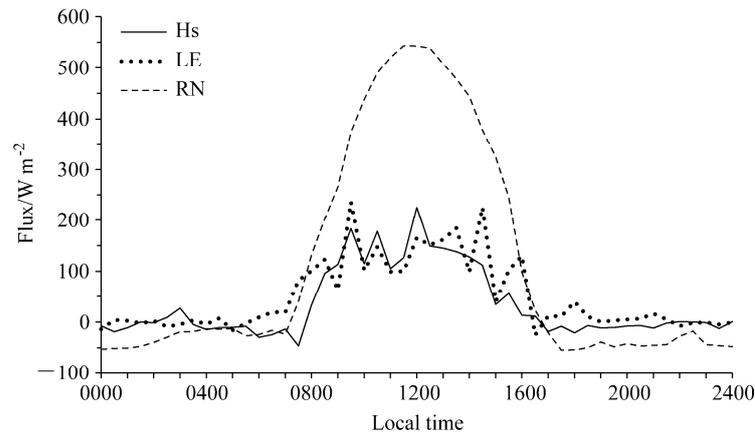


图 8 2014 年 11 月 21 日到达森林冠层的净辐射 (RN) 和森林冠层输向大气的感热 (Hs)、潜热 (LE) 通量的日变化

Fig. 8 Diurnal variation of the net radiation (RN), sensible heat flux (Hs) and latent heat flux (LE) over the forest canopy on 21 November 2014

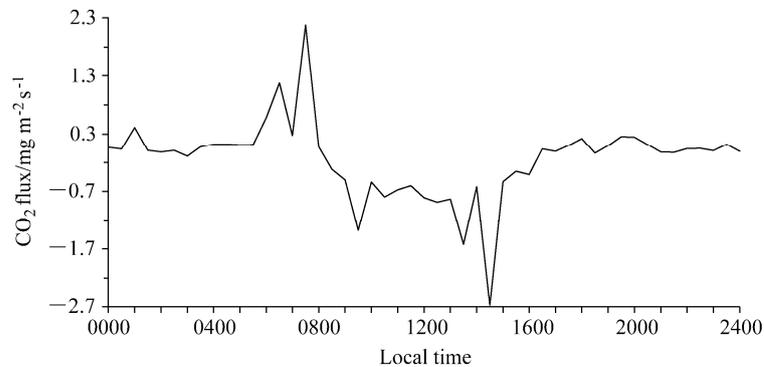


图 9 2014 年 11 月 21 日森林冠层输向大气的二氧化碳通量的日变化

Fig. 9 Diurnal variation of the CO₂ flux over the forest canopy on 21 November 2014

光合有效辐射最强的 12 时滞后。看来, 森林吸收的二氧化碳通量的值除光合有效辐射外, 还与其他因素比如水汽密切相关, 地方时 14 时 30 分空气中水汽浓度达到最低 (图 10a)。森林向大气释放的二氧化碳在日出后的清晨 07 时 30 分有一极大值, 此时空气中的二氧化碳浓度达到最大 (图 10b), 同时空气密度也最大 (图 10c)。珠海森林吸收的二氧化碳极大值达到 $2.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。而这个季节北方长白山红松阔混交林在白天吸收的二氧化碳已很小 (关德新等, 2006), 最大值不到 $0.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。同为岭南地区的鼎湖山常绿阔叶混交林在旱季 (1 月) 吸收的二氧化碳极大值为 $0.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (王春林等, 2006)。相比之下, 珠海森林吸收值偏大, 但它与水汽、二氧化碳等的极值一致或相近, 并非一个异常值。森林冠层与大气间的二氧化碳通量日变化与水汽浓度、二氧化碳浓度和空气密度的关系有待通过大量的资料来深入分析。

森林冠层上水汽浓度是夜晚高, 白天低, 08 时

和 23 时各有一极大值, 14~16 时为极小值, 最小值时段与空气相对湿度一致。二氧化碳浓度清晨日出前后最高, 子夜前最低, 浓度值在 $700 \sim 750 \text{ mg m}^{-3}$ 之间, 相当于 $390 \sim 400 \text{ ppm}$ 。空气密度是夜晚和上午高, 最高值出现在 07 时 30 分, 下午低, 最低值在 15~16 时。

3.4 典型晴天森林土壤温度和土壤热通量的日变化特征

在森林下面土壤中我们有 4 层土壤温度和土壤湿度观测, 3 层土壤热流观测, 另外还有土表温度的观测。由于森林冠层较高, 该地区连续 10 天未下雨, 土壤湿度 (图略) 基本没有日变化, 5 cm 和 10 cm 深土壤的体积含水量分别为 13% 和 15%, 20 cm 和 40 cm 深土壤的体积含水量都为 21%。图 11 给出 2014 年 11 月 21 日土壤温度 (a) 和土壤热流 (b) 的日变化, 其中表层土壤温度由 TCAV 型土壤热平衡传感器观测得到, 可以看出, 表层土壤温度波动较大, 夜晚到上午低, 下午高, 最高值出现

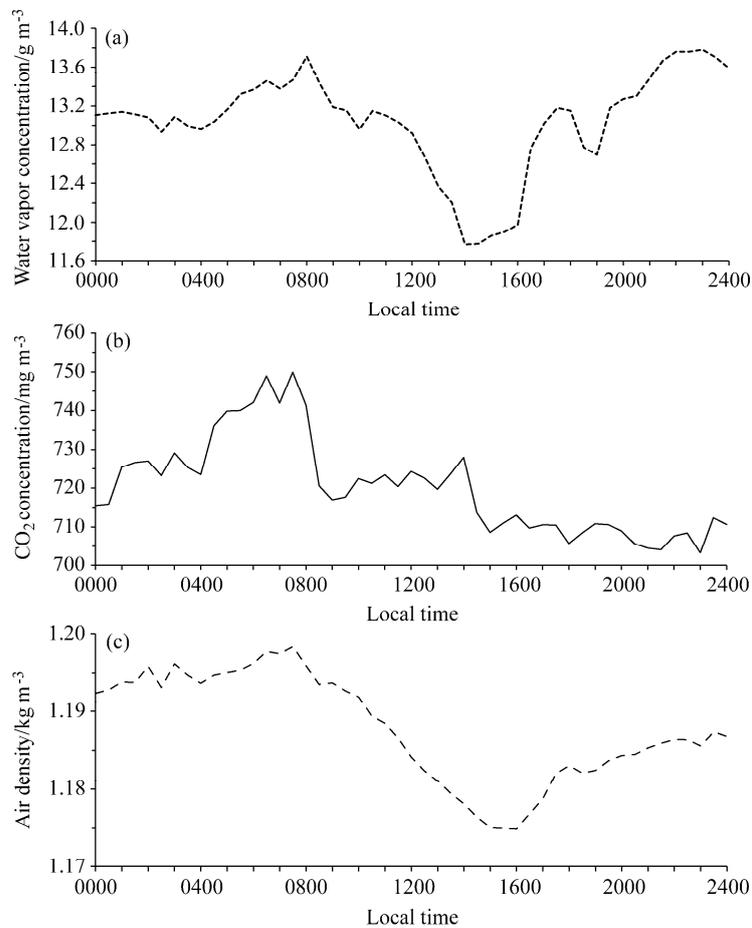


图 10 2014 年 11 月 21 日 55 m 高度大气中的 (a) 水汽浓度、(b) 二氧化碳浓度、和 (c) 空气密度的日变化

Fig. 10 Diurnal variation of (a) water vapor concentration, (b) CO₂ concentration, and (c) air density at 55 m above the ground on 21 November 2014

在 16 时 30 分。5、10 和 20 cm 深土壤温度与表层土壤温度的变化特征类似，但最高值随着土壤越深，越滞后，且日变化的振幅也随土壤深度加深而变小。40 cm 深处的土壤温度已无日变化，是定值。40 cm 深处的土壤温度比 5、10 和 20 cm 深的值要高。这可能是由于森林密而高，森林下土壤吸收的太阳能很有限所导致。

表层 7.5 cm 和 15 cm 深处的土壤热流(图 11b)的变化也是下午高，清晨低。7.5 cm 深处的土壤热流在 14~21 时为正，表示向土壤深处传送热流，其他时间为土壤向上输送热流。15 cm 深处的土壤热流在 15~21 时 30 分为正，特征与 7.5 cm 的相同，但正值的时间滞后减短。30 cm 深处的土壤热流全为负值，土壤向上输送热流。随深度加深，土壤热流的振幅变小。土壤深处热流的来源是夏季储存，还是从森林周边平流而来，也需要进一步观测分析

才能理清。

4 结论和讨论

本文详细介绍了珠海凤凰山陆气相互作用与碳通量观测塔的地理环境、初步的仪器布设和基本观测，并利用已获得的资料分析了旱季典型晴天主要观测量的日变化特征。结果表明：

(1) 太阳总辐射及其分光辐射和反射辐射的日变化都是比较常规的中午最高的对称结构；光合有效辐射、紫外辐射的最高值分别是总辐射的 43.6% 和 4.7%；散射辐射随总辐射而变，但受天气状况的影响有扰动，散射辐射日最高值占总辐射的 33.5%；冠层接收到的长波辐射比向上长波辐射低；净辐射白天为正值，变化与总辐射基本一致，夜晚为负值。

(2) 气温日变化的峰值比太阳辐射滞后，最高值在 15~16 时，铁塔高处的最高值比低处滞后，

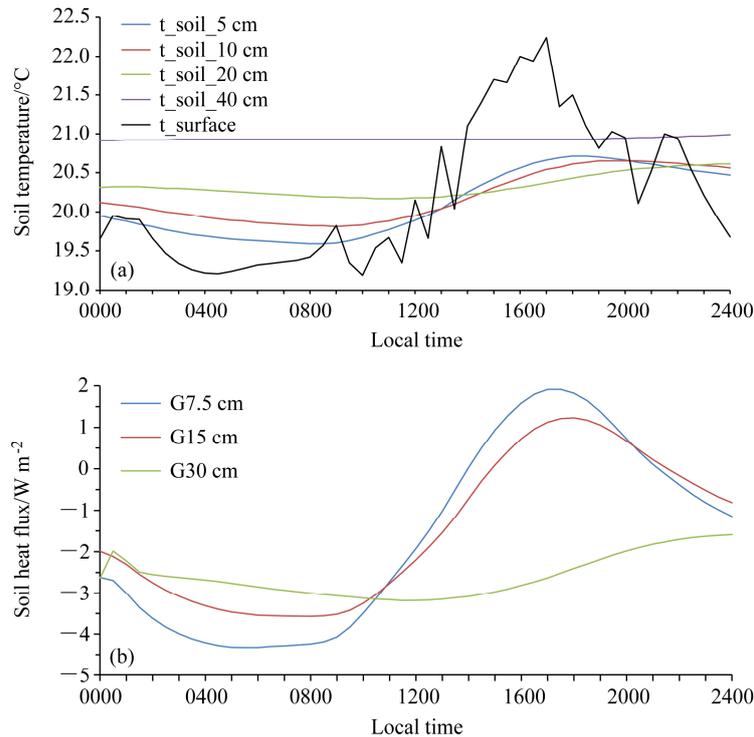


图 11 2014 年 11 月 21 日 (a) 土壤温度和 (b) 土壤热流的日变化。 t_{surface} 表示森林冠层下的土壤表面温度； $t_{\text{soil-5cm}}$ 表示 5 cm 深处的土壤温度，G7.5cm 表示 7.5 cm 深处的土壤热流，余类推。土壤热流正值表示方向向下

Fig. 11 Diurnal variation of (a) soil temperature and (b) soil heat fluxes on 21 November 2014. The term t_{surface} indicates surface soil temperature under the forest, $t_{\text{soil-5cm}}$ indicates soil temperature at 5 cm underground, G7.5cm indicates soil heat flux at 7.5 cm underground, and the rest may be deduced by analogy. The positive values of soil heat fluxes indicate the transport direction is downward

最低值出现在凌晨；白天达到最高值前的气温是低层高于高层，达到最高值后到落日气温陡然下降；夜晚的气温是低层低于高层。相对湿度与气温的日变化正好相反，是凌晨最大，下午最小；夜晚是低层相对偏湿，高层相对偏干；白天正好相反。11 月份，珠海地区盛行旱季的偏北季风，有明显的海陆风的作用；风速呈现白天和高层高、夜晚和低层低的特征，白天的海风较强，夜晚的陆风较弱。

(3) 森林冠层向大气释放的感热和潜热的量值基本相当，它们的变化并不平缓，有多个峰值；潜热基本为正；感热白天为正，夜晚基本为负，原因是夜晚冠层的气温低于上层的空气温度。森林冠层向大气释放的二氧化碳通量白天为负值，夜晚为正值。白天，森林进行光合作用，吸收的二氧化碳的最高值出现在午后，此时空气中水汽浓度达到最低；森林冠层向大气释放的二氧化碳在日出后的清晨最大，此时空气中的二氧化碳浓度达到最大，同时空气密度也最大。

(4) 由于森林冠层高、密度大，土壤湿度基本

没有日变化。表层和浅层土壤温度夜晚到上午低，下午高，最高值出现时间随着土壤越深，越滞后，日变化的振幅随土壤深度加深而变小。表层土壤热流的变化是下午高，清晨低；随深度加深，土壤热流的振幅变小。

(5) 本文还发现了一些值得深入探讨的现象，例如森林冠层对光合有效辐射、紫外辐射的反射率比对总辐射的反射率都明显低，白天冠层上空气温梯度小，深层土壤温度比表层高，土壤热流无论白天夜晚都向上输送，森林吸收的二氧化碳极值偏高等，需要以后根据充沛的资料分析论证。

参考文献 (References)

- Bi X Y, Gao Z Q, Deng X J, et al. 2007. Seasonal and diurnal variations in moisture, heat and fluxes over grassland in the tropical monsoon region of southern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D10): D10106.
- 曹福祥, 祁承经, 徐永福. 2010. 热带增宽及其对中国东部亚热带森林植被的影响 [J]. *生态环境学报*, 19 (3): 745-750.
- Cao Fuxiang, Qi Chengjing, Xu Yongfu. 2010. Tropical belt widening and its impact on China eastern subtropic forest vegetation [J]. *Ecology and Environmental*

- Sciences (in Chinese), 19 (3): 745–750.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A. 1988. Modeling tropical deforestation: A study of GCM land surface parameterizations [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114 (480): 439–462.
- Ding Z W, Wen Z P, Wu R G, et al. 2013. Surface energy balance measurements of a banana plantation in South China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 114 (1–2): 349–363.
- 范绍佳, 谭康初, 李智勤, 等. 1998. 广东沿海地区风场特征 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 37 (4): 94–97. Fan Shaojia, Tan Kangchu, Li Zhiqin, et al. 1998. Wind field over the coast land of Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 37 (4): 94–97.
- 范绍佳, 祝薇, 王安宇, 等. 2005. 珠江三角洲地区边界层气象特征研究 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 44 (1): 99–102. Fan Shaojia, Zhu Wei, Wang Anyu, et al. 2005. Analysis on the boundary layer meteorological features of the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 44 (1): 99–102.
- 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 等. 2006. 长白山红松阔混交林 CO₂ 通量的日变化与季节变化 [J]. *林业科学*, 42 (10): 123–128. Guan Dexin, Wu Jiabing, Jin Changjie, et al. 2006. Diurnal and seasonal variation of CO₂ flux above the Korean pine and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae (in Chinese)*, 42 (10): 123–128.
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 2013. 关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 189–210. Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progress in studies of air–land interaction over the arid area of northwest China and its impact on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 189–210.
- 姜超, 徐永福, 季劲钧. 2013. 东亚季风区夏季陆地生态系统碳循环对东亚夏季风的响应 [J]. *气候与环境研究*, 18 (3): 329–341, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11062. Jiang Chao, Xu Yongfu, Ji Jinjun. 2013. Response of the summer terrestrial carbon cycle in the East Asian monsoon region to East Asian monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (3): 329–341.
- 李梓铭, 杜睿, 杜鹏瑞, 等. 2014. 生长旺盛期呼伦贝尔草甸草原生态系统呼吸与 CH₄ 吸收通量的日变化研究 [J]. *气候与环境研究*, 19 (6): 743–752, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13108. Li Ziming, Du Rui, Du Pengrui, et al. 2014. Diurnal variation in methane flux and ecosystem respiration rate during the growing season in Hulunbair grassland, Inner Mongolia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (6): 743–752.
- Liu H Z, Tu G, Fu C B, et al. 2008. Three-year variations of water, energy and CO₂ fluxes of cropland and degraded grassland surfaces in a semi-arid area of northeastern China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (6): 1009–1020.
- 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 467–476, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315. Liu Huihui, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. 2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 467–476.
- 蒙伟光, 李昊春, 张艳霞, 等. 2012. 珠三角城市环境对对流降水影响的模拟研究 [J]. *大气科学*, 36 (5): 1063–1076, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.10205. Meng Weiguang, Li Haorui, Zhang Yanxia, et al. 2012. A modeling study of the impacts of Pearl River Delta urban environment on convective precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 1063–1076.
- 祁承经, 曹福祥, 曹受金. 2010. 热带森林碳汇或碳源之争 [J]. *生态学报*, 30 (23): 6613–6623. Qi Chengjing, Cao Fuxiang, Cao Shoujin. 2010. Debate around tropical forests: Carbon sink or carbon source [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 30 (23): 6613–6623.
- Tanaka K, Takizawa H, Tanaka N, et al. 2003. Transpiration peak over a hill evergreen forest in northern Thailand in the late dry season: Assessing the seasonal changes in evapotranspiration using a multilayer model [J]. *J. Geophys. Res.* 108 (D17): 4533.
- Toda M, Nishida K, Ohte N, et al. 2002. Observations of energy fluxes and evapotranspiration over terrestrial complex land covers in the tropical monsoon environment [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 80 (3): 465–484.
- Tsai J L, Tsuang B J, Lu P S, et al. 2007. Surface energy components and land characteristics of a rice paddy [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46 (11): 1879–1900.
- 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 等. 2006. 鼎湖山常绿阔叶混交林 CO₂ 通量估算 [J]. *中国科学 (D 辑 地球科学)*, 36 (增刊 I): 119–129. Wang Chunlin, Yu Guirui, Zhou Guoyi, et al. 2006. CO₂ flux evaluation over the evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49 (Supplement 2): 127–138.
- 王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. *高原气象*, 18 (3): 280–294. Wang Jiemin. 1999. Land surface process experiments and interaction study in China—From HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (3): 280–294.
- 王妍, 张旭东, 彭镇华, 等. 2006. 森林生态系统碳通量研究进展 [J]. *世界林业研究*, 19 (3): 12–17. Wang Yan, Zhang Xudong, Peng Zhenhua, et al. 2006. Review on research and development of forest ecosystem carbon flux [J]. *World Forestry Research (in Chinese)*, 19 (3): 12–17.
- Wen J, Wang L, Wei Z G. 2009. An overview of the Loess Plateau mesa region land surface process field experiment series (LOPEXs) [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 945–951.
- 徐祥德, 陈联寿. 2006. 青藏高原大气科学试验研究进展 [J]. *应用气象学报*, 17 (6): 756–772. Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2006. Advances of the study on Tibetan Plateau experiment of atmospheric sciences [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (6): 756–772.
- Xue Y K, De Sales F, Vasic R, et al. 2010. Global and seasonal assessment of interaction between climate and vegetation biophysical process: A GCM study with different land–vegetation representations [J]. *J. Climate*, 23 (6): 1411–1433.
- Yasunari T. 2007. Role of land–atmosphere interaction on Asian monsoon climate [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 85: 55–75.
- 张美根, 胡非, 邹捍, 等. 2008. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 923–934. Zhang Meigen, Hu Fei, Zou Han, et al. 2008. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC [J]. *Chinese Journal of*

- Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 923–934.
- 赵双菊, 张一平. 2005. 热带森林碳通量研究综述 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 29 (4): 96–100. Zhao Shuangju, Zhan Yiping. 2005. Review on tropical carbon flux research [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 29 (4): 96–100.
- 曾红玲, 季劲钧, 吴国雄. 2010. 全球植被分布对气候影响的数值试验 [J]. 大气科学, 34 (1): 1–11. Zeng Hongling, Ji Jinjun, Wu Guoxiong. 2010. Numerical experiment of the influence of global vegetation distribution on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 1–11.
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案 [J]. 地理学报, 65 (1): 3–12. Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. 2010. A new scheme for climate regionalization in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (1): 3–12.
- Zhou Degang, Huang Ronghui. 2011. Characterization of turbulent flux transfer over a Gobi surface with quality-controlled observations [J]. Science China Earth Sciences, 54 (5): 753–763.
- 庄雪影, 彭逸生, 黄久香, 等. 2010. 珠海市山地森林及其植物多样性研究 [J]. 广东林业科技, 26 (1): 56–65. Zhuang Xueying, Peng Yisheng, Huang Jiuxiang, et al. 2010. Study on forests and their floristic diversity of Zhuhai City, Guangdong [J]. Guangdong Forestry Science and Technology (in Chinese), 26 (1): 56–65.