

中国科学技术大学

学士学位论文



城市与郊区的能量平衡

作者姓名：崔延宣

学科专业：大气科学专业

导师姓名：袁仁民 副教授

完成时间：二〇一七年五月

University of Science and Technology of China
A dissertation for bachelor's degree



**Urban and suburban energy
balance**

Author's Name: Yanxuan Cui
Speciality: Atmospheric science
Supervisor: Prof. Renmin Yuan
Finished Time: May, 2017

摘 要

本文利用中科大站与科学岛站 2015 年 10 月 21 日至 2016 年 6 月 1 日的观测数据研究分析了合肥市向下、向上短波辐射通量密度, 向下、向上长波辐射通量密度, 感热、潜热通量密度, 以及储热通量密度在城市和郊区的差异。发现城市平均温度比郊区平均温度高出 0.48°C , 城市的向上长波辐射通量密度平均比郊区高出 $12.46\text{W}/\text{m}^2$, 且向上长波辐射通量密度-温度关系与 Stefan-Boltzmann 定律符合的比较好; 白天城市和郊区的向上短波辐射通量密度平均值分别为 $23.82\text{W}/\text{m}^2$ 和 $25.76\text{W}/\text{m}^2$, 而城市和郊区的反照率平均分别为 0.096 和 0.119, 地面材质的不同造成了反照率的差异, 进而影响了向上短波辐射通量密度, 郊区的净辐射通量密度比城市平均高出 $15.56\text{W}/\text{m}^2$; 城市的感热通量密度平均比郊区高出 $10.71\text{W}/\text{m}^2$, 白天的感热通量密度普遍高于夜间, 晴天夜晚的感热通量密度为负值, 但是绝对值不大; 城市和郊区的潜热通量密度分别为 $20.86\text{W}/\text{m}^2$ 和 $28.44\text{W}/\text{m}^2$, 郊区比城市高出 $7.58\text{W}/\text{m}^2$, 这种差异在晴天更加明显, 晴天郊区的潜热通量密度比城市平均高出 $15.18\text{W}/\text{m}^2$, 而阴天城市和郊区的潜热通量密度都比较低, 分别为 $16.10\text{W}/\text{m}^2$ 和 $14.23\text{W}/\text{m}^2$, 差异也很小; 本文还研究了城市和郊区的储热, 并简要分析了人类活动可能对城市能量平衡产生的影响。

关键词: 能量平衡 辐射收支 感热通量 潜热通量 城市和郊区的储热

Abstract

This article uses the the data observed by the weather stations in USTC and HFCAS from October 21, 2015 to June 1, 2016. We analyzed the downward/upward shortwave irradiance, downward/upward long-wave irradiance, sensible heat flux, latent heat flux, and compared the heat stored in city and suburb. We found that the average temperature of the city is 0.48°C higher than the suburb, and the city's average upward long-wave irradiance is $12.46\text{W}/\text{m}^2$ higher than the upward long-wave irradiance of the suburb. The relationship between upward long-wave irradiance satisfies the Stefan-Boltzmann's law; The average of the upward shortwave irradiance in urban and suburban areas during the day are $23.82\text{W}/\text{m}^2$ and $25.76\text{W}/\text{m}^2$, while the urban and suburban albedo are 0.096 and 0.119. The differences of the albedo affects the upward shortwave irradiance. The average net irradiance of the suburb is $15.56\text{W}/\text{m}^2$ higher than the average of the city; The city's sensible heat flux density is $10.71\text{W}/\text{m}^2$ higher than the suburb's. The daytime sensible heat flux density is generally higher than the night. And the night sensible heat flux density in sunny days is negative, while the absolute value is not large; Urban and suburban latent heat flux density are $20.86\text{W}/\text{m}^2$ and $28.44\text{W}/\text{m}^2$ which means the latent heat flux density of the suburb is $7.58\text{W}/\text{m}^2$ higher then the city. This difference is more obvious in the sunny day, the suburb's latent heat flux density can be $15.18\text{W}/\text{m}^2$ higher then the city's. While in rainy days, the latent heat flux density are relatively low in both city and suburb, respectively $16.10\text{W}/\text{m}^2$ and $14.23\text{W}/\text{m}^2$, the difference is very small; This paper also studied the heat stored in city and suburb, and we give a brief analysis of impact of the human activities on urban energy balance.

Key Words: Energy balance, Radiation budget, Sensible heat flux, Latent heat flux, Heat stored in city and suburb

致 谢

感谢我的父母，他们是我坚强的后盾，给予了我极大的支持。在我的整个研究期间，我的指导老师袁仁民教授给予我很大的帮助，使我受益颇多，衷心感谢袁老师的教导和帮助。整个大学期间，我有幸得到了许多良师的教导，不仅有地球和空间科学学院的老师，还包括数学科学学院、计算机科学与技术学院、信息科学技术学院、物理学院等学院的老师，他们的悉心教导使我获得了知识，增强了能力，感谢曾经教导过我的老师们。

另外，我还要感谢 Harold Abelson, Gerald Jay Sussman 以及 Julie Sussman, 正是他们的著作 *Structure and Interpretation of Computer Programs* 为我打开了计算机科学的大门，使我获得了用计算机研究这个世界的能力。在我的研究过程中使用了许多开源软件，感谢所有开源社区的贡献者，他们使这个世界变得容易。

目 录

| | |
|-----------------------|----|
| 摘要 | |
| Abstract | |
| 第一章 引言 | 5 |
| 第二章 实验介绍 | 6 |
| 第三章 数据处理 | 8 |
| 第一节 晴天阴天判断 | 8 |
| 第二节 时间同步与数据校正 | 8 |
| 第三节 野点值去除 | 10 |
| 第四章 数据分析 | 18 |
| 第一节 辐射通量密度与辐射收支 | 18 |
| 第二节 感热通量密度 | 27 |
| 第三节 潜热通量密度 | 30 |
| 第四节 城市与郊区的储热 | 33 |
| 第五章 结论 | 38 |
| 参考文献 | 40 |

图目录

| | |
|---|----|
| 2.1 中科大站 (USTC) 与科学岛站 (HFCAS) 的地理位置····· | 6 |
| 3.1 2016 年 5 月 25 日至 26 日向下短波辐射通量密度原始数据····· | 9 |
| 3.2 2016 年 5 月 25 日至 26 日经过时间同步数据校正之后的向下短波辐射通量密度····· | 10 |
| 3.3 潜热通量密度原始数据 ····· | 12 |
| 3.4 去除野点值后的潜热通量密度 ····· | 13 |
| 3.5 向上短波辐射通量密度 ····· | 14 |
| 3.6 2016 年 1 月 28 日至 2016 年 2 月 6 日向上短波辐射通量密度····· | 15 |
| 3.7 2016 年 1 月 28 日至 2016 年 2 月 6 日向下短波辐射通量密度····· | 16 |
| 3.8 2016 年 2 月 1 日附近反照率····· | 17 |
| 4.1 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向下短波辐射通量密度····· | 19 |
| 4.2 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向上短波辐射通量密度····· | 20 |
| 4.3 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日反照率····· | 21 |
| 4.4 2016 年 1 月 21 日至 2016 年 1 月 26 日中科大站与科学岛站两地向下长波辐射通量密度····· | 22 |
| 4.5 2016 年 1 月 21 日至 2016 年 1 月 26 日中科大站与科学岛站两地的相对湿度····· | 23 |
| 4.6 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日中科大站与科学岛站两地向上长波辐射通量密度与温度····· | 24 |
| 4.7 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向上长波辐射通量密度····· | 25 |

| | |
|--|----|
| 4.8 2015 年 12 月科学岛站向上长波辐射通量密度的观测值与通过 Stefan-Boltzmann 定律和温度计算的理论值比较····· | 26 |
| 4.9 2015 年 11 月至 2016 年 5 月半月平均辐射通量密度····· | 27 |
| 4.10 2015 年 11 月至 2016 年 6 月感热通量密度····· | 28 |
| 4.11 2016 年 4 月 29 日至 2016 年 5 月 5 日的感热通量密度····· | 30 |
| 4.12 2016 年 2 月 15 日至 2016 年 2 月 19 日潜热通量密度····· | 31 |
| 4.13 2016 年 2 月 15 日至 2016 年 2 月 19 日两地相对湿度····· | 33 |
| 4.14 城市与郊区的储热····· | 34 |
| 4.15 城市与郊区储热的半月平均值····· | 35 |
| 4.16 城市(考虑冬季供暖)与郊区储热的半月平均值····· | 37 |

表目录

| | |
|-----------------------------|----|
| 4.1 中科大站与科学岛站感热通量密度比较 | 29 |
| 4.2 中科大站与科学岛站潜热通量密度比较 | 32 |
| 4.3 中科大站与科学岛站储热通量密度比较 | 36 |

第一章 引言

为了更好的研究气候以及气候变化等问题，我们首先需要对地球能量的收支有一个很好的认识。辐射与热量交换是地球-大气系统的能量交换的重要形式，也是影响地球能量收支的重要因素。^[1] 太阳是地球最重要的能量来源，太阳以辐射的形式向地球输送能量，一部分辐射直接到达地面，一部分被大气中的水汽、二氧化碳、尘埃等颗粒物吸收、散射、反射，这其中又有一部分向下传到地面，地面通过热传导过程向土壤深层传导热量，大气、地面又会释放出长波辐射，同时感热与潜热等热力学过程也会对地面的能量收支产生很大影响。^[2]

城市是人类重要的生活环境，城市的发展事关国计民生。城市由人类开发建设，直接受到人为因素的影响，因此与原有的自然环境有很大不同，城市中的钢筋混凝土建筑与沥青公路街道等改变了自然原有的下垫面环境，植被覆盖率较低，人类的生产生活活动大量消耗化石能源，释放出较多的二氧化碳与颗粒物，同时也会产生一部分人为热，改变了大自然原有的能量平衡方式。为了改善我们居住的城市环境，绿色、协调、可持续地发展我们的城市，需要我们对城市的辐射收支、热量交换等大气物理过程有比较深刻的理解。目前，这方面的研究以取得一些有价值的成果，但是由于城市环境直接受到人类活动的干预^[3]，不同城市下垫面的环境还是存在不小的差异，局部环境不尽相同，因此研究城市的能量平衡需要针对某一城市，通过大量的观测数据来进行研究，而合肥市这方面的研究还比较少。

本文研究了合肥市的能量平衡，合肥市是安徽省的省会，地处中纬度地带，属亚热带季风气候。为了更好的研究合肥市的辐射、热量平衡，本文选取了位于市中心附近的中科大站以及位于郊区的科学岛站这两个测站进行研究，通过城市和郊区数据的对比，研究分析了城市和郊区各辐射分量、感热通量密度、潜热通量密度等有何异同，分析了城市储热和郊区储热的差异，并对观察到的现象给出了比较合理的理论解释。

第二章 实验介绍

为了比较合肥市城市与郊区能量以及其它气象要素的差异，使用了中科大站（USTC）和科学岛站（HFCAS）两气象观测站的观测数据，它们的地理位置如图2.1，中科大站的观测设备位于合肥市金寨路 96 号中国科学技术大学东区第一教学楼楼顶，地处市中心附近，中科大站的观测塔共三层科学岛站的五层气象观测塔设在庐阳区科学岛大气成分与光学重点实验室一处开阔草坪上，它位于郊区且在董铺水库水边。两座铁塔可观测温度、气压、湿度、风速、风向、辐射、二氧化碳、水汽等气象要素。



图 2.1 中科大站（USTC）与科学岛站（HFCAS）的地理位置

注：图片来自 Google 地图

科大站的气象观测塔由 1 台 EC50 涡动相关系统（CSAT3A 三维超声风速仪头和 EC150 开路分析仪），1 个 CNR4 净辐射表，3 个 HMP155A 空气温湿度，3 个 03002 风速风向传感器，1 台 CR3000 数据采集器，及其他备件组成。EC150 开路分析仪作为涡动相关系统的一部分，其本身也可测量二氧化碳和水汽的浓度、大气温度以及气压，配合 CSAT3A 使用还可测量三维风速和超声大气温度。CNR4 由两对辐射测量仪组成，一对可测向下向上的短波辐射通量密度（DSR，USR），另一对可测向下向上的长波辐射通量密度（DLR，ULR），向下辐射与向

上辐射做差可得净辐射通量密度 (R_n)。观测塔每层设有一个 HMP155A 空气湿度温度传感器, 一个 03002 风速风向传感器, HMP155A 用来测量相对湿度 (RH) 和大气温度 (T_a), 03002 由风杯和风向标组成用来测量各层的风速风向。数据采集箱位于距塔脚 10 米处, 各传感器均引线连接到 CR3000 数据采集器, CR3000 将各传感器获取的气象数据存入存储器中。科学岛站的气象观测塔与科大站的类似不再赘述。

第三章 数据处理

第一节 晴天阴天判断

根据历史观测的气象数据判定晴天阴天有多种方法，其中一种比较简单有效的方法是利用总辐射通量密度（即向下短波辐射通量密度）的观测值与理论值的比作为判据进行判断。目前，有多种模式可以计算总辐射通量密度在晴天时理论值。简单的模式只需考虑时间、太阳与地球上观测点的相对位置、太阳常数等，更加准确的模式还会将大气密度、大气压强等因素考虑进去。本文使用 PVLIB Python^[4] 提供的模式计算向下短波辐射通量密度在晴天时的理论值，PVLIB Python 实现了 Ineichen-Perez 晴天模式^[5] 以及 Simplified Solis 模式^[6]，可以根据需要进行选择。

晴天时的向下短波辐射通量密度的理论值与观测值符合的很好，在得到晴天总辐射通量密度的理论值之后，对一天内进行积分可以得到一天里的总辐射量的理论值 T ，同样对总辐射通量密度的观测值在一天内积分可得总辐射量的观测值 R ，令：

$$\alpha = \frac{R}{T} \quad (3.1)$$

当 $\alpha > 0.7$ 时认为当天是晴天，当 $\alpha < 0.3$ 时认为当天是阴天。由此可以利用历史观测的向下短波辐射通量密度结合理论值进行晴天阴天判断。

第二节 时间同步与数据校正

科大站在采集数据后，按照 30 分钟平均值存储在计算机中，而科学岛站采集数据后按 10 分钟平均存储，为了便于研究，对科学岛站做 30 分钟平均，统一两地的数据采集频率。科学岛站在 2015 年的 8、9 月份缺失大量数据，这期间仪器在进行维护，然而为了和科大站进行比较需要选取它们的公共部分，最终选取了 2015 年 10 月 21 日至 2016 年 6 月 1 日的数据进行分析。

在分析向下短波辐射即总辐射时发现科大站与科学岛站的数据存在微小的相位差，相差 30 分钟左右，以 2016 年 5 月 25 日和 26 日两天为例，如图 3.1：

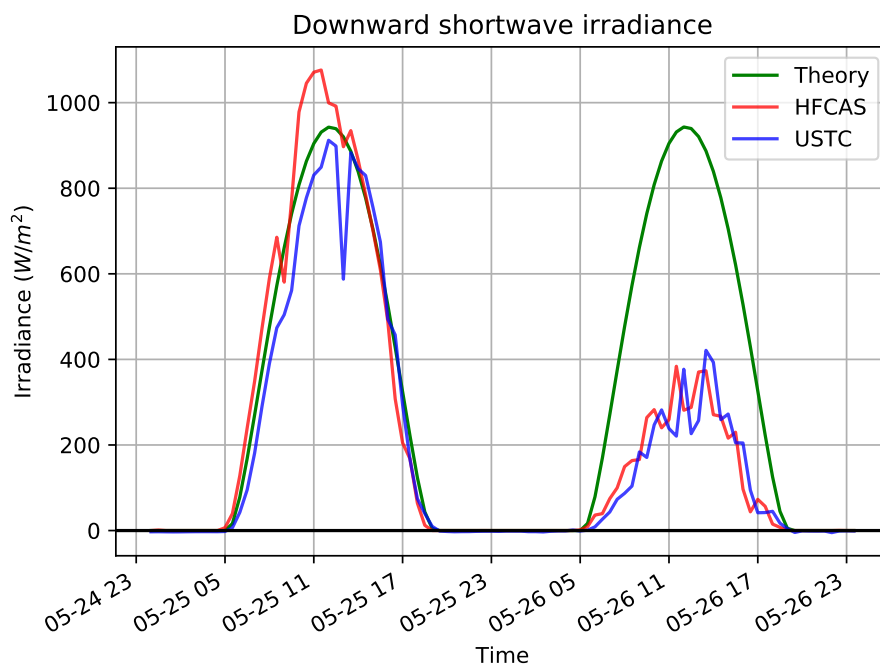


图 3.1 2016 年 5 月 25 日至 26 日向下短波辐射通量密度原始数据

注：图中绿色表示向下短波辐射通量密度的理论值，红色表示科学岛站观测的向下短波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向下短波辐射通量密度。2016 年 5 月 25 日是晴天，2016 年 5 月 26 日是阴天。从这两天的原始数据中可以看出，与理论值相比，晴天的数据观测值与理论值符合的比较好，阴雨天由于云层的遮挡，向下短波辐射通量密度会明显降低。时间上中科大站存在一定的滞后，滞后大约 30 分钟

科大站较晚出现向下短波辐射，而两地距离较近，日出时间可以认为相同，且科学岛在科大西边，因此这个相位差不会是由日出时间差引起，经过分析，这种现象可能是由科大站和科学岛站隶属于不同单位，两地计算机的时间事先没有很好地同步造成的。为了对时间进行校正，我们可以先计算出向下短波辐射通量的理论值，在晴天里，向下短波辐射的理论值与观测值应基本吻合，因此，可以以向下短波辐射的理论值为基准，对时间作适当修正，即加上或减去一个偏移量，使得两地的时间同步，两地都是在整点或半点采集数据，发现将科大站的时间轴向左移动 30 分钟后，两地的数据一致性更好，因此取偏移量为 30 分钟。另外，两地的向下短波辐射通量密度观测值基本都不应超出理论值，然而科学岛站的原始数据观察发现存在异常偏高，如图 3.1，通过对原始数据和向下短波辐射通量密度理论值对比分析，尤其是对晴天数据的认真分析比较，发现将科学岛的

向下短波辐射通量密度乘以 0.86 后与总辐射通量密度的理论值符合的很好，猜测可能是科学岛站短波辐射测量仪器的灵敏度出现了问题，相应地向上反射的短波辐射通量密度也乘上了这一修正系数，此后的数据分析研究中使用修正后的数据。经过时间同步和数据校正之后的结果如图3.2，此时，两地的时间基本同步，向下短波辐射通量密度与理论值符合的也比较好。

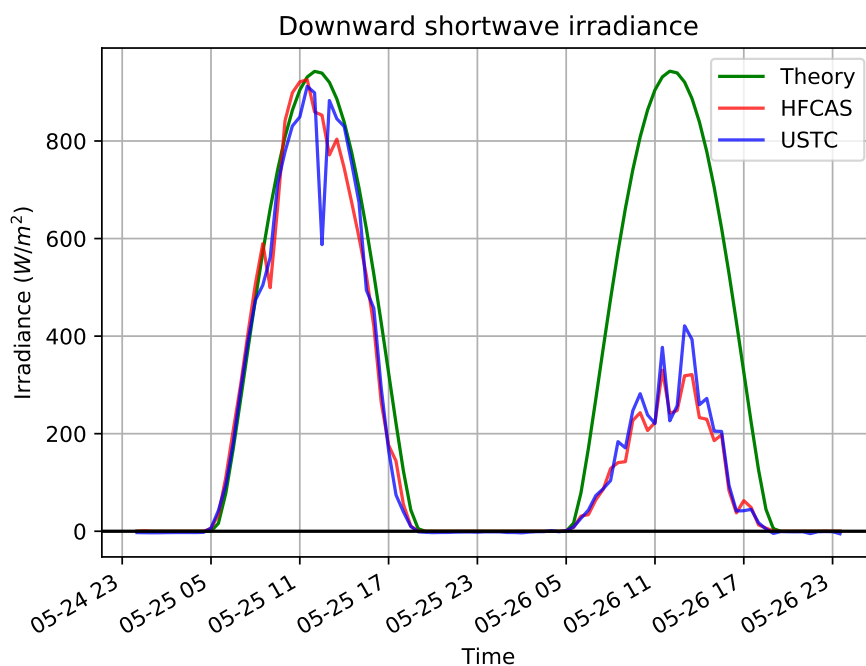


图 3.2 2016 年 5 月 25 日至 26 日经过时间同步数据校正之后的向下短波辐射通量密度

注：图中绿色表示向下短波辐射通量密度的理论值，红色表示科学岛站观测的向下短波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向下短波辐射通量密度。因为数据都是在整点或者半点采集，对科大的原始数据向左移动了 30 分钟，这样既保证了两地时间的同步性，又保证了数据采集时间的一致性。对科学岛的原始数据乘上了 0.86 的修正系数，使得修正之后向下短波辐射通量密度不会高处理论值。

第三节 野点值去除

气象观测数据由于受到仪器、天气、环境等各方面因素的影响，通常会存在一些与其它值相差较大的野点。例如，超声风速仪利用超声发射至反射回来的时

间间隔进行测量,当发生降水过程时,雨滴、冰雪等如果经过超声波的传播路径会对测量结果产生极大干扰。为了进一步研究分析气象观测数据,需要通过合适的方法将观测数据中的野点值去除。

首先,仪器的观测结果通常用浮点数表示,一些特殊的浮点数如 IEEE 754 中定义的 NaN (not a number) 需要在数据分析前剔除。然后,由于气象数据都是有界的,可以根据历史数据,设定一个经验阈值,将过高和过低的野点去掉,这种方法虽然简单可行,但经验阈值的设定受主观人为因素影响较大,我们可以换一种思路:对于大气系统,各气象要素都是连续变化,很少会出现剧烈跳变,对于某一气象要素时间序列,相邻两个时刻的差值可以认为是一个随机变量,它近似服从正态分布。由此,为了去除气象要素观测值中的野点,可先计算该气象要素时间序列后一时刻与前一时刻的差值,即错位做差,然后通过 3σ 原则去除差值大于 3 倍标准差的点。实际处理数据时,可以先设定一个比较大的阈值区间,将明显没有物理意义的点去除,然后再通过错位做差 3σ 原则去除剩余的野点。通常这个过程执行一次便可去除绝大多数野点,得到比较理想的结果,如果一次执行后依然存在比较明显的野点,可迭代多次直到野点全部去除。潜热通量密度、二氧化碳浓度、水汽浓度等的野点值便通过上述方法去除。

以去除潜热通量密度的野点为例:潜热通量密度的观测受水汽影响较大,出现降水过程会对仪器测量结果产生较大影响,通过观察原始数据,如图3.3,可以发现中存在较多异常点,只是将图像放大后的结果,实际的数据中,有些点甚至超过 250000 W/m^2 ,这显然是不符合客观事实的,经过 1 次去除野点的操作之后得到结果如图3.4,可以看出大部分野点都被除掉。

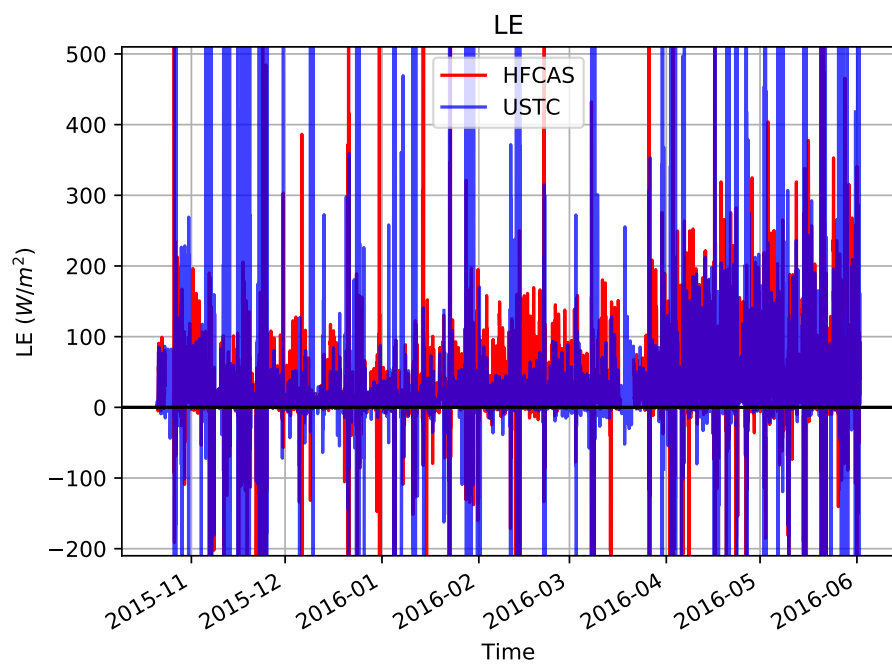


图 3.3 潜热通量密度原始数据

注：图中红色为科学岛站的潜热通量密度，蓝色为科大站的潜热通量密度。原始数据中潜热通量密度受到降水的影响存在较多异常点，波动巨大，而实际的潜热通量密度通常不会超过 400 W/m^2 。

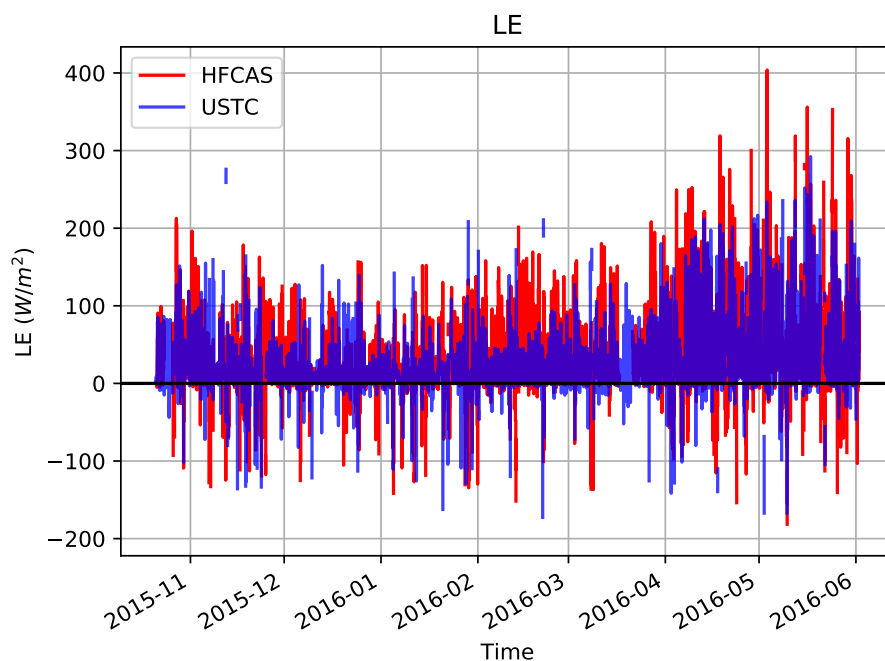


图 3.4 去除野点值后的潜热通量密度

注：图中红色为科学岛站的潜热通量密度，蓝色为科大站的潜热通量密度。由于大气运动是一个连续的演化过程，潜热通量密度应具有一定的连续性，对潜热通量密度的原始数据作错位差，对每一时刻，用下一时刻的值减去本时刻的值，这一列差值都应维持在一区间内，通过对这列差值的分析，它们近似服从正态分布，这样便可利用 3σ 原则，将绝对值高出 3 倍标准差的潜热数据滤掉。这是经过一次过滤后的结果，已将大部分野点去除。

在处理向上短波辐射时发现，2016 年 1 月 23 日以及 2016 年 2 月 1 日科大站和科学岛站两地都有出现“异常”偏高，如图3.5所示。

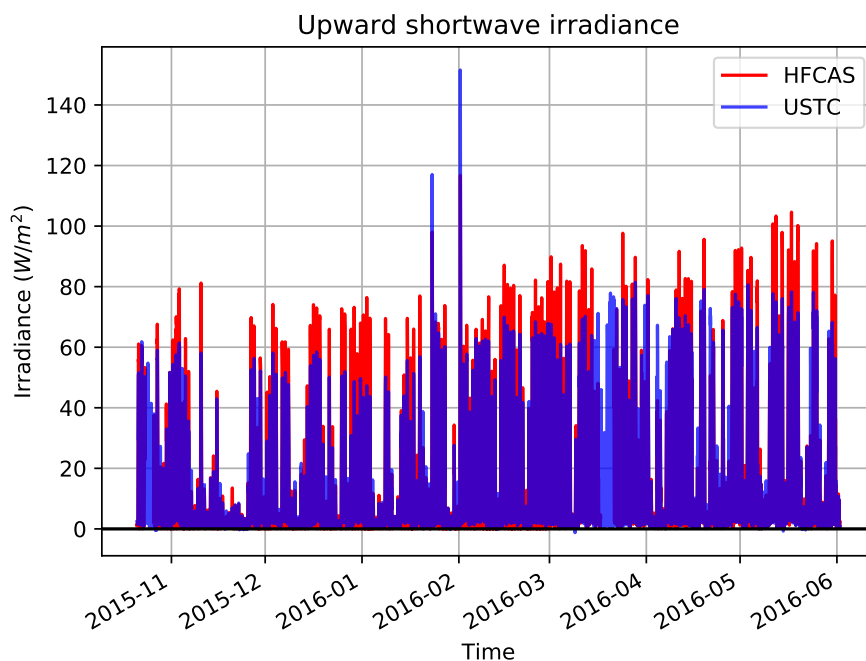


图 3.5 向上短波辐射通量密度

注：图中红色表示科学岛站的向上短波辐射通量密度，蓝色表示科大站的向上短波辐射通量密度。从图中可以明显看出 2016 年 1 月 23 日以及 2016 年 2 月 1 日向上短波辐射通量密度均出现突增跳变。这种现象可能与降雪有关，积雪导致反照率上升，雪停后向上反射的短波辐射增强。

经过进一步研究发现这种向上短波辐射突增的现象与较强的降雪有关：以 2016 年 2 月 1 日向上短波辐射的突增为例，如图 3.6：

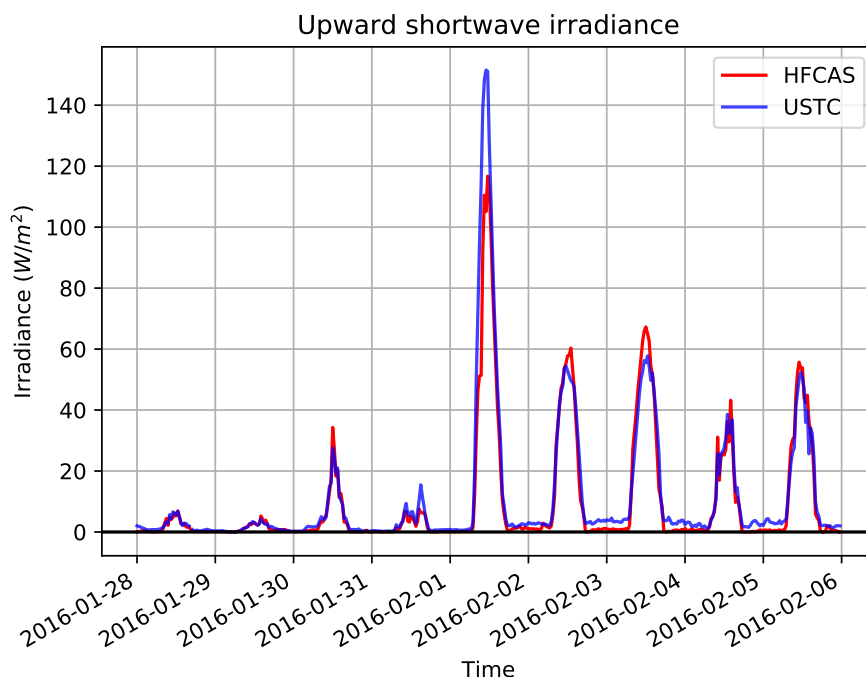


图 3.6 2016 年 1 月 28 日至 2016 年 2 月 6 日向上短波辐射通量密度

注：图中红色表示科学岛站的向上短波辐射通量密度，蓝色表示科大站的向上短波辐射通量密度。2016 年 1 月 28 日至 1 月 31 日，向上短波辐射通量密度均不超过 40 W/m^2 ，而到了 2 月 1 日中午突增到 100 W/m^2 以上，2 月 2 日以后又降至 60 W/m^2 。

从 2016 年 1 月 28 日起至 2016 年 1 月 31 日，向上短波辐射通量密度一直低于 40 W/m^2 ，而到了 2 月 1 日中午，科大和科学岛两地向上短波辐射通量密度均增至 110 W/m^2 以上，2 月 2 日之后又回复到 60 W/m^2 附近。通过图 3.7 可以看出 2 月 1 日前都是阴天，结合历史天气数据，2 月 1 日之前发生过一次比较强的降雪过程，2 月 1 日是这次降雪后的第一个晴天。

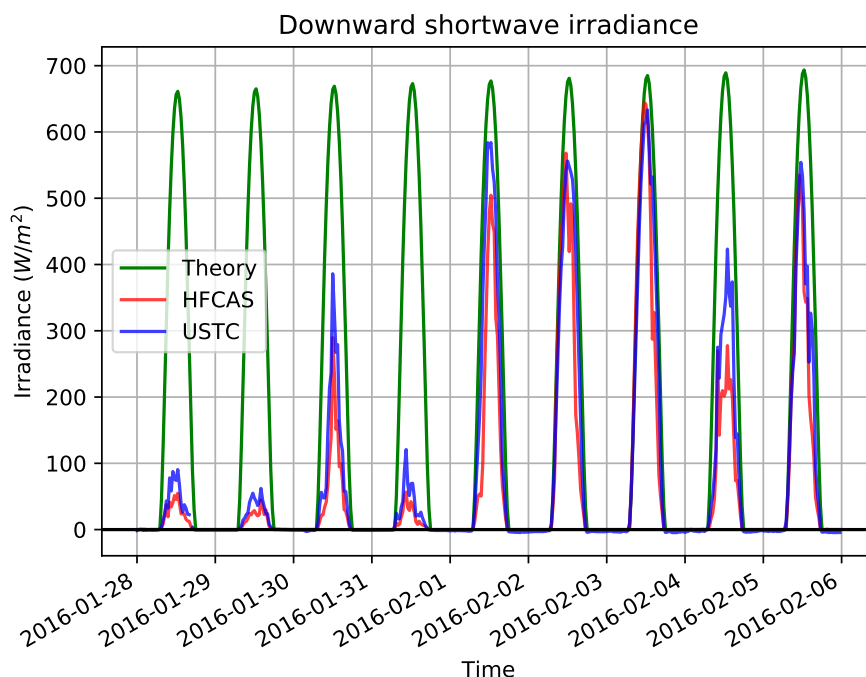


图 3.7 2016 年 1 月 28 日至 2016 年 2 月 6 日向下短波辐射通量密度

注：图中绿色表示向下短波辐射通量密度，即总辐射通量密度的理论值，红色表示科学岛站观测的向下短波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向下短波辐射通量密度。从图中可以看出 2016 年 1 月 28 日起至 2016 年 1 月 31 日均是阴天，向下短波辐射比较低，同时根据历史气象数据，1 月 31 日还发生过一次降雪过程。而到了 2 月 1 日，天气转晴，总辐射升高，晴天一直维持到 2 月 3 日。

通过分析 2 月 1 日附近反照率的变化，如图 3.8 所示，1 月 31 日中午之前，两地反照率维持在 0.1 附近，1 月 31 日下午反照率突增至 0.6，2 月 1 日上午两地峰值均超过 0.7，可以推断是这次降雪过程地面积雪增加了地面的反照率。

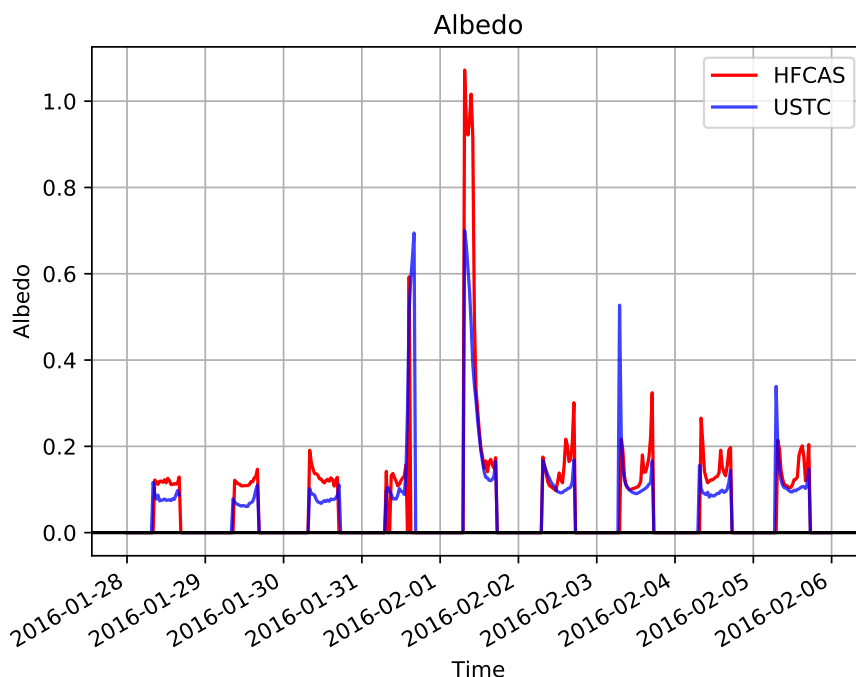


图 3.8 2016 年 2 月 1 日附近反照率

注：图中红色表示科学岛站的反照率，蓝色表示科大站的反照率。1 月 28 日至 1 月 31 日中午以前，反照率都比较低，到了 1 月 31 日下午产生了一次降雪过程，反照率陡增，2 月 1 日中午逐渐衰落，此后又维持在较低水平。同时还可以看出与科学岛站相比，科大站的反照率要更低一些，这可能与测站地面的材质有关，科学岛站塔下为草坪，而科大站在楼顶，下方铺有黑色防水油毡纸，对太阳光的吸收能力更强，反射率更低。

这样便可以解释 2 月 1 日的向上短波辐射通量密度突增现象：2 月 1 日以前持续阴天，总辐射比较低，向上反射的短波辐射也较低，1 月 31 日产生了一次降雪，积雪使地面反照率升高，2 月 1 日天气晴朗，总辐射升高，升高的总辐射与升高的反照率使得 2 月 1 日向上短波辐射通量密度突增，2 月 2 日以后，积雪融化，地面反照率回复到原来较低水平，使得向上短波辐射降低。类似地，2016 年 1 月 23 日的向上短波辐射通量密度突增也是由于地面积雪导致。在处理向上短波辐射通量密度数据时，不应简单将这种数据当作野点。

第四章 数据分析

第一节 辐射通量密度与辐射收支

测站测量的辐射分为长波辐射和短波辐射。短波辐射通量密度由辐射仪观测，有向下、向上两个分量，分别记为 $R_s \downarrow$, $R_s \uparrow$ 。太阳辐射传播到地球，一部分穿过大气层直接射到地面为直接太阳辐射；另外一部分被大气层中的水汽、二氧化碳、颗粒物等散射、吸收、反射，被散射的太阳辐射一部分方向向上远离地面，一部分方向向下到达地面，到达地面的这部分为散射太阳辐射。向下短波辐射包括直接太阳辐射和散射太阳辐射，向上短波辐射主要是地面反射的短波辐射。长波辐射也有向下、向上两个分量，分别记作 $R_l \downarrow$, $R_l \uparrow$ 。大气释放长波辐射，一部分向下到达地面被测站接收，这部分为向下长波辐射，地面也会释放向上的长波辐射，这部分构成向上长波辐射。^[2] 向下辐射通量密度与向上辐射通量密度的差值构成测站接收的净辐射通量密度，记作 R_n ，即：

$$R_n = R_s \downarrow - R_s \uparrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow \quad (4.1)$$

2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日的向下短波辐射通量密度如图 4.1，白天有太阳辐射，向下短波辐射通量密度大于 0，夜晚降为 0。这 5 天里，前两天是阴天，后两天是晴天，晴天里科大站和科学岛站的向下短波辐射通量密度的观测值与理论值非常接近，误差平均不超过只有 16.5 W/m^2 ，晴天的向下短波辐射通量密度在正午达到峰值。

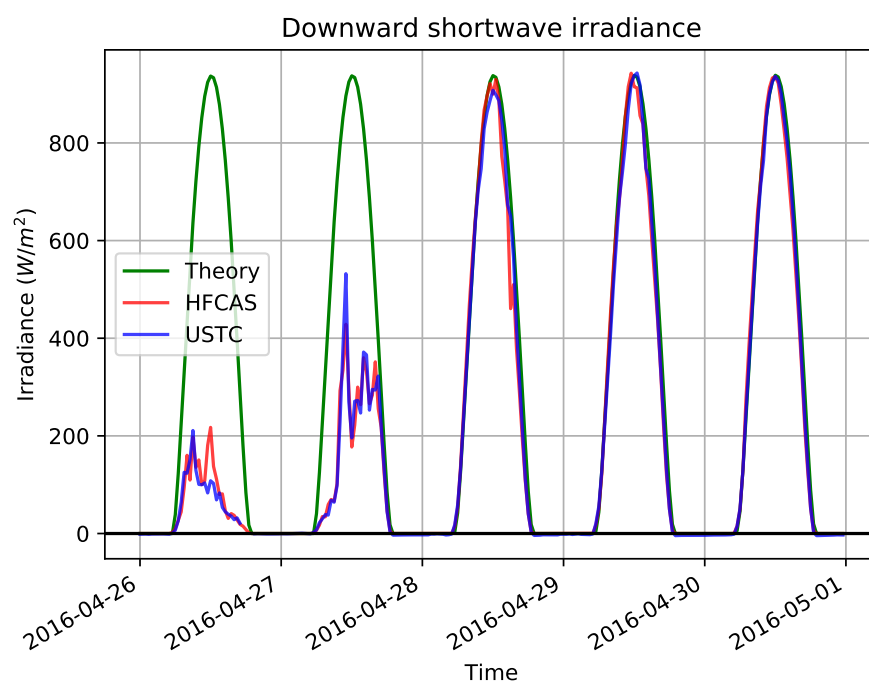


图 4.1 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向下短波辐射通量密度

注：图中绿色表示向下短波辐射通量密度的理论值，红色表示科学岛站观测的向下短波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向下短波辐射通量密度。4 月 26 日、27 日阴天，接下来 3 天是晴天。

2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向上短波辐射通量密度如图 4.2

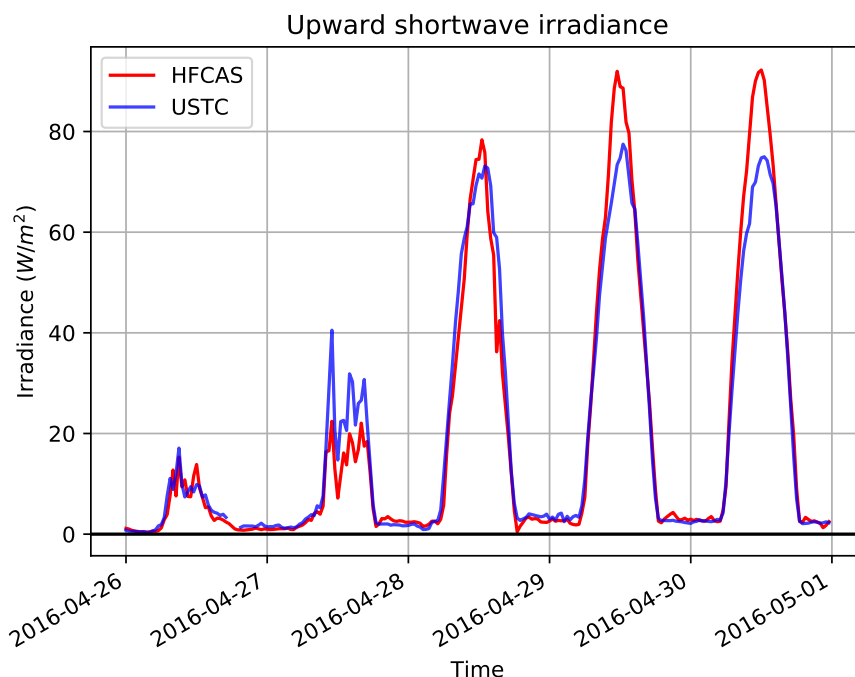


图 4.2 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向上短波辐射通量密度

注：红色表示科学岛站观测的向上短波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向上短波辐射通量密度。

向上短波辐射通量密度与向下短波辐射通量密度的变化趋势保持一致。4 月 26 日、27 日是阴天，总辐射较少，相应的向上反射的短波辐射也比较弱；后三天是晴天，总辐射强，相应的向上反射的短波辐射也比较强，在正午达到峰值。夜间向上短波辐射通量密度平均为 $3 W/m^2$ ，不为零的现象可能与人类活动有关，夜晚建筑和路灯的灯光会辐射出一定的短波辐射。同时注意到晴天里，科学岛站的向上短波辐射通量密度较高，分析反照率，如图 4.3，4 月 29 日正午和 4 月 30 日正午，与科大站相比科学岛站的反照率分别高出 0.017 和 0.019，向上短波辐射通量密度分别高出 $14.17 W/m^2$ 和 $17.45 W/m^2$ ，这可能与测站下垫面的材质有关，科大站在楼顶，下方铺有黑色防水油毡纸，对太阳光的吸收能力更强，科学岛站塔下为绿色草坪，对太阳光的反射能力更强。

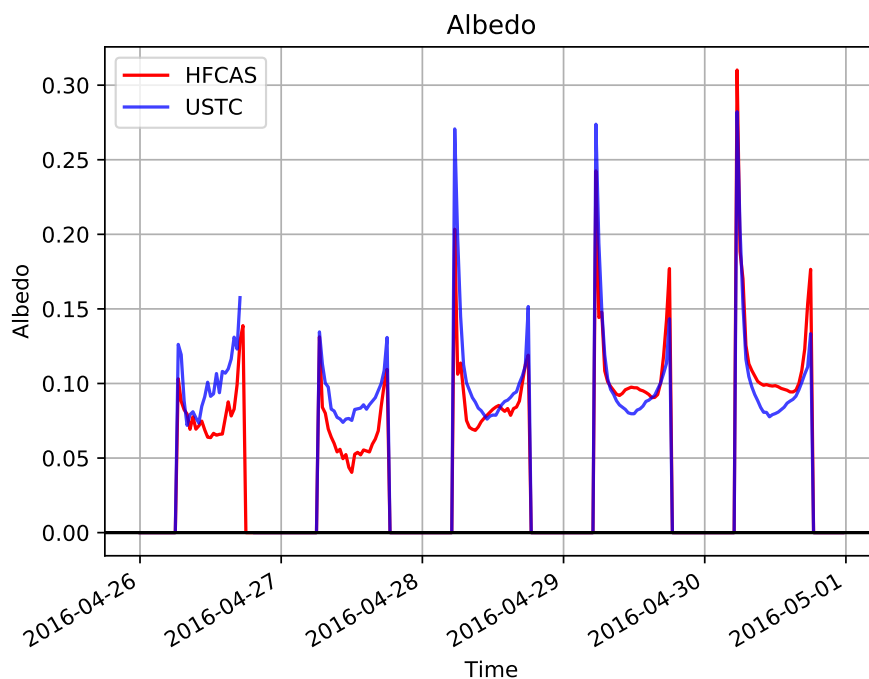


图 4.3 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日反照率

注：红色表示科学岛站观测的反照率，蓝色表示中科大站观测的反照率。

下面再来看长波辐射，首先分析 2016 年 1 月 21 日至 2016 年 1 月 26 日两地的向下长波辐射，如图 4.4，这 6 天里，前两天是阴天，后两天是晴天，两地的相对湿度如图 4.5，阴天时相对湿度较高，平均为 83%，之后天气转晴，相对湿度降到 60% 以下，并且向下长波辐射通量密度变化趋势与相对湿度的变化趋势符合的比较好，在 1 月 23、24、25 日这三天晴天里，科学岛站的向下长波辐射通量密度高于中科大站，同样这三天科学岛站的相对湿度也比较高，向下长波辐射由测站上空大气释放，水汽对向下长波辐射的影响较大。

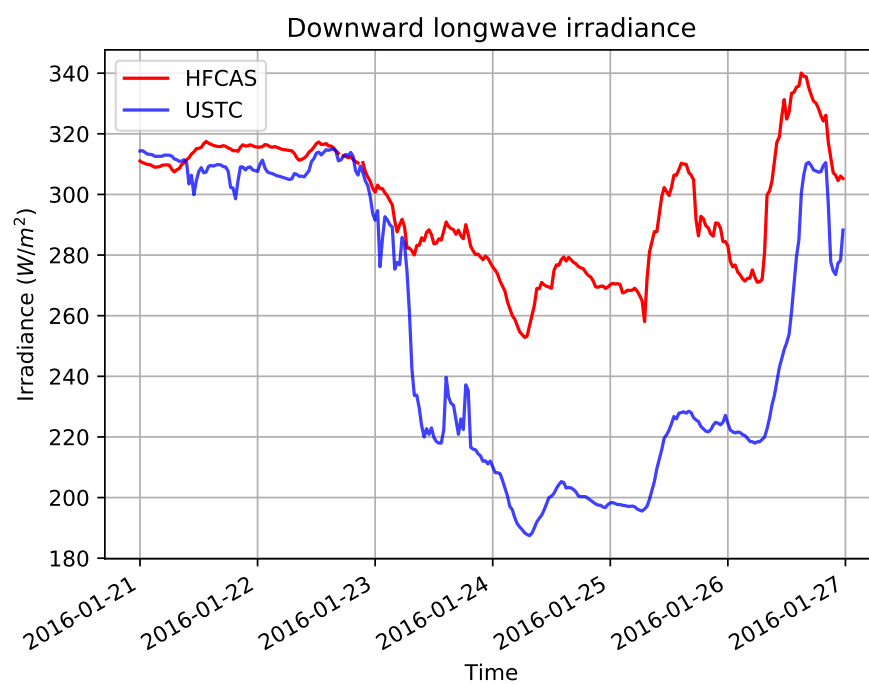


图 4.4 2016 年 1 月 21 日至 2016 年 1 月 26 日中科大站与科学岛站两地向下长波辐射通量密度

注：图中红色表示科学岛站测得的向下长波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向下长波辐射通量密度。

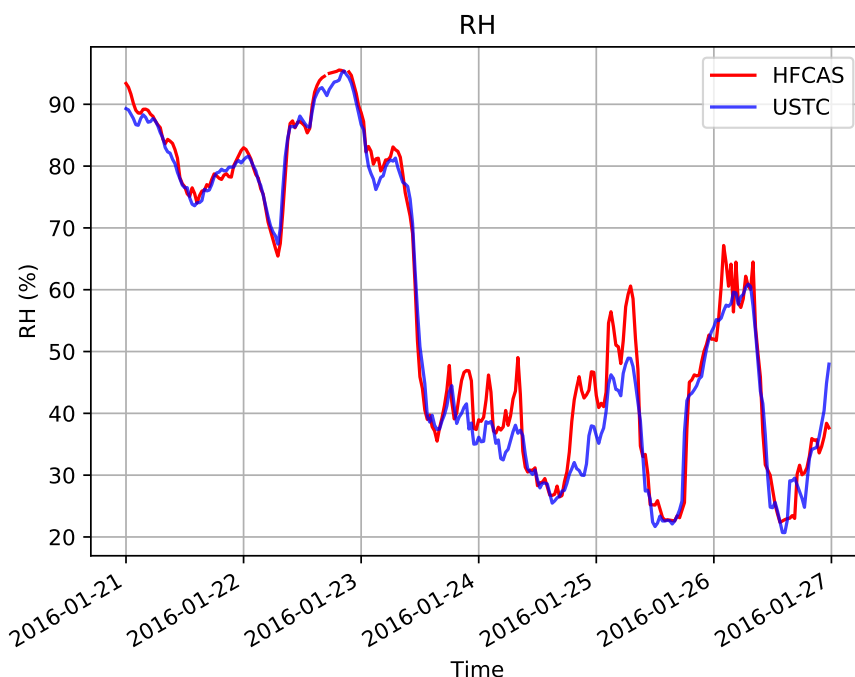


图 4.5 2016 年 1 月 21 日至 2016 年 1 月 26 日中科大站与科学岛站两地的相对湿度

注：图中红色表示科学岛站测得的相对湿度，蓝色表示中科大站观测的相对湿度。

关于向上长波辐射，以 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日的向上长波辐射通量密度为例，如图 4.7 向上长波辐射由地面以及仪器下方的一部分大气向上辐射，主要反映了地面附近的温度变化。中科大站和科学岛站向上长波辐射通量密度平均值分别为 $384.68W/m^2$ 和 $371.21W/m^2$ ，中科大站比科学岛站高出 $12.46W/m^2$ ，晴天白天中科大站和科学岛站的向上长波辐射通量密度平均值分别为 $436.70W/m^2$ 和 $416.11W/m^2$ ，中科大高出 $20.60W/m^2$ 。中科大站与科学岛站晴天白天的平均温度分别为 $16.54^{\circ}C$ 和 $15.55^{\circ}C$ ，中科大站高出 $0.99^{\circ}C$ 。2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日中科大站与科学岛站两地向上长波辐射通量密度与温度的关系如图 4.6，由于没有地面温度的观测数据，只能使用观测塔最低层的数据近似作为地面温度，图中向上长波辐射通量密度与温度存在一个相位差，这个时间差可能是由地面与大气的热量交换过程导致的。

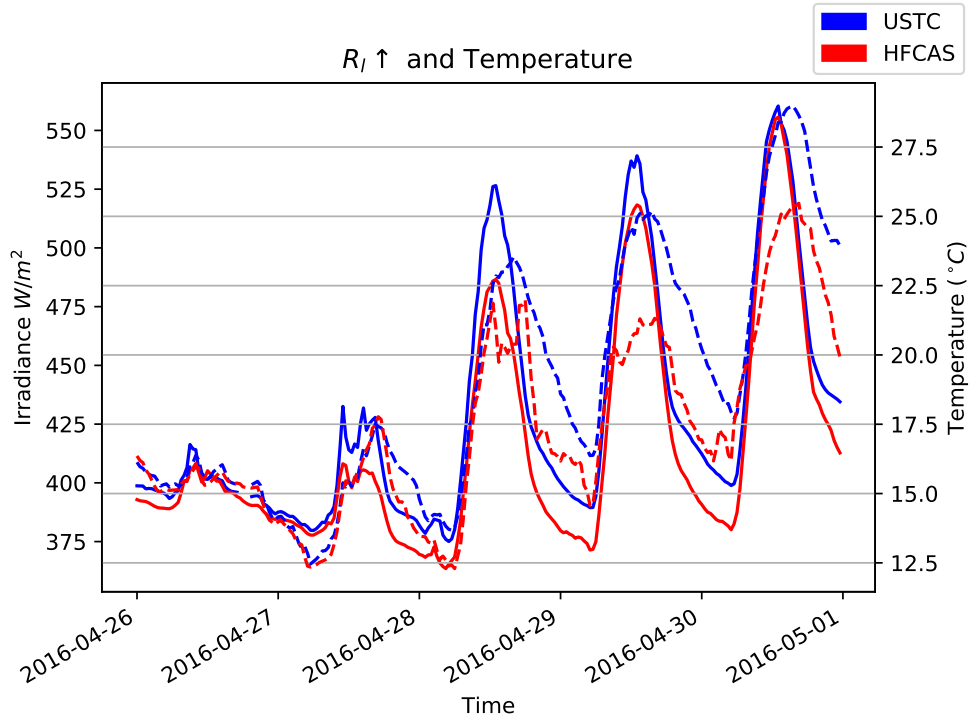


图 4.6 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日中科大站与科学岛站两地向上长波辐射通量密度与温度

注：图中蓝色实线表示中科大站的向上长波辐射通量密度，蓝色虚线表示中科大站测量的最低层温度，红色实线表示科学岛站的向上长波辐射通量密度，红色虚线表示科学岛站测量的最低层温度。

事实上，黑体辐射与温度的关系有 Stefan-Boltzmann 定律：

$$F = \sigma T^4 \quad (4.2)$$

其中， F 为辐射通量密度， σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 $5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ， T 为温度。理论上我们可以利用 Stefan-Boltzmann 定律和地面的温度数据计算出向上的长波辐射通量密度，如图 4.8 为 2015 年 12 月科学岛站向上长波辐射通量密度的观测值与通过 Stefan-Boltzmann 定律和温度计算的理论值比较，可以看出两者符合的比较好，经过对全部数据的分析，科大站向上长波辐射通量密度平均值为 $384.68 W/m^2$ ，科学岛站向上长波辐射通量密度平均值为 $371.21 W/m^2$ ，而科大站向上长波辐射通量密度的观测值与理论值平均相差 $7.36 W/m^2$ ，科学岛站向上长波辐射通量密度的观测值与理论值平均相差 $-2.58 W/m^2$ ，两地的观测值与理论值之差均不超过观测值的 2%。

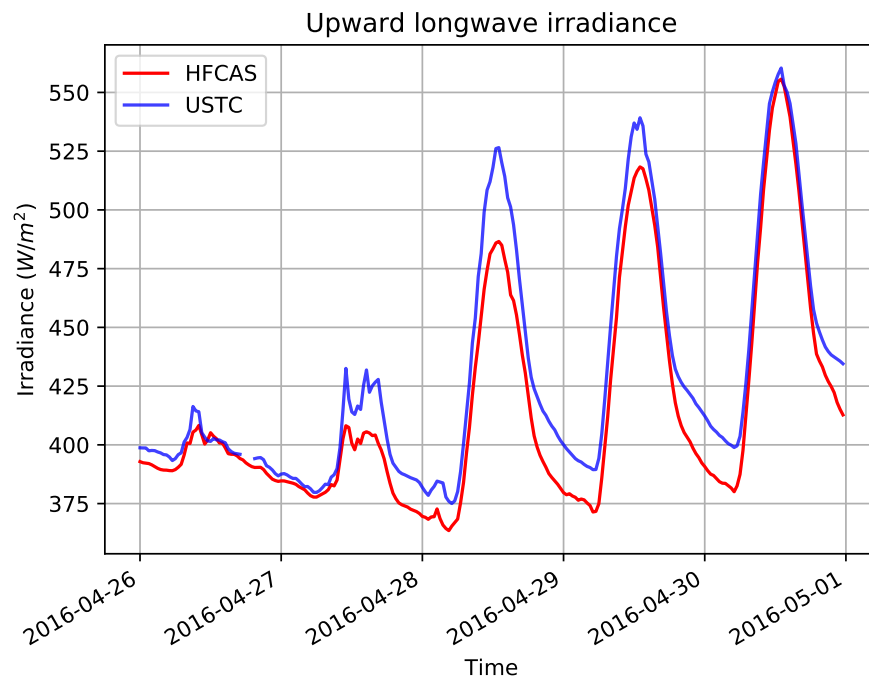


图 4.7 2016 年 4 月 26 日至 2016 年 4 月 30 日向上长波辐射通量密度

注：红色表示科学岛站观测的向上长波辐射通量密度，蓝色表示中科大站观测的向上长波辐射通量密度。

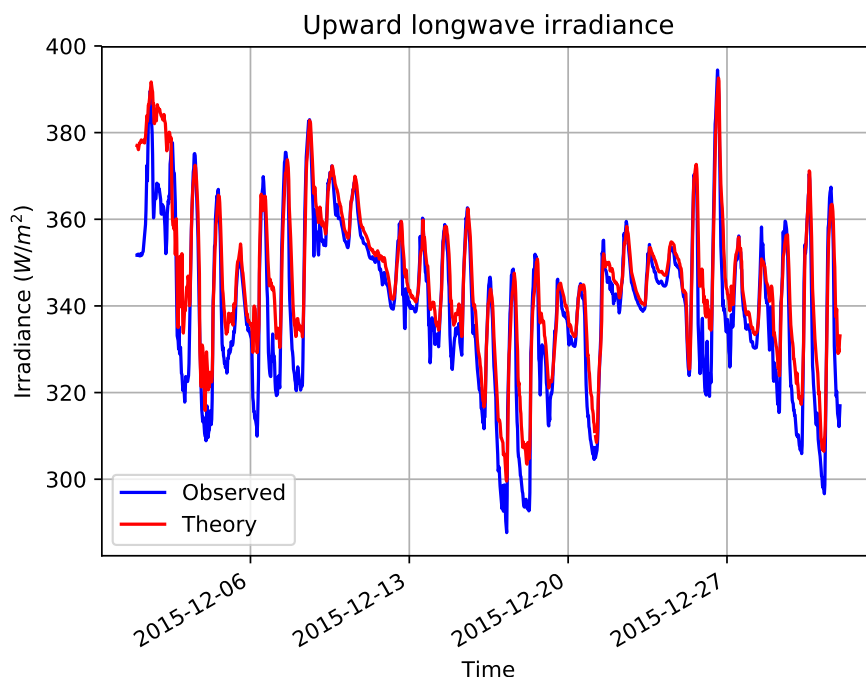


图 4.8 2015 年 12 月科学岛站向上长波辐射通量密度的观测值与通过 Stefan-Boltzmann 定律和温度计算的理论值比较

注：图中，蓝色为辐射仪观测的向上长波辐射通量密度，红色为利用 Stefan-Boltzmann 定律和温度计算计算得到的向上长波辐射的理论值

无论是向上长波辐射通量密度还是温度，中科大站（城市）普遍都要高于科学岛站（郊区），这体现了合肥市的城市热岛效应。城市里存在大量的建筑、沥青街道等对太阳光的吸收能力强，反照率低，而郊区里绿色的植被、农作物等对太阳光的吸收能力较弱，反照率高，这样，与郊区相比，城市吸收了更多的太阳辐射；城市内建筑、街道等可能会改变自然原有的物理化学性质；绿色植物的光合作用可以吸收二氧化碳，而城市中植被覆盖率比较低，人们生产生活又会时刻释放出的二氧化碳，使得城市的温室效应比郊区更加严重。此外还有很多因素可能对城市热岛效应产生影响，这些因素共同作用，使得城市地面的温度高于郊区，释放出更强的向上长波辐射。

有了向下、向上短波辐射通量密度以及向下、向上长波辐射通量密度这 4 个分量的辐射数据之后，便可根据式 4.1 计算出净辐射通量密度 R_n ，将观测的数据每半个月做平均得到图 4.9，图中显示了向下、向上短波辐射通量密度，向下、向上长波辐射通量密度，向下短波辐射通量密度理论值，以及净辐射通量密度的变化趋势。

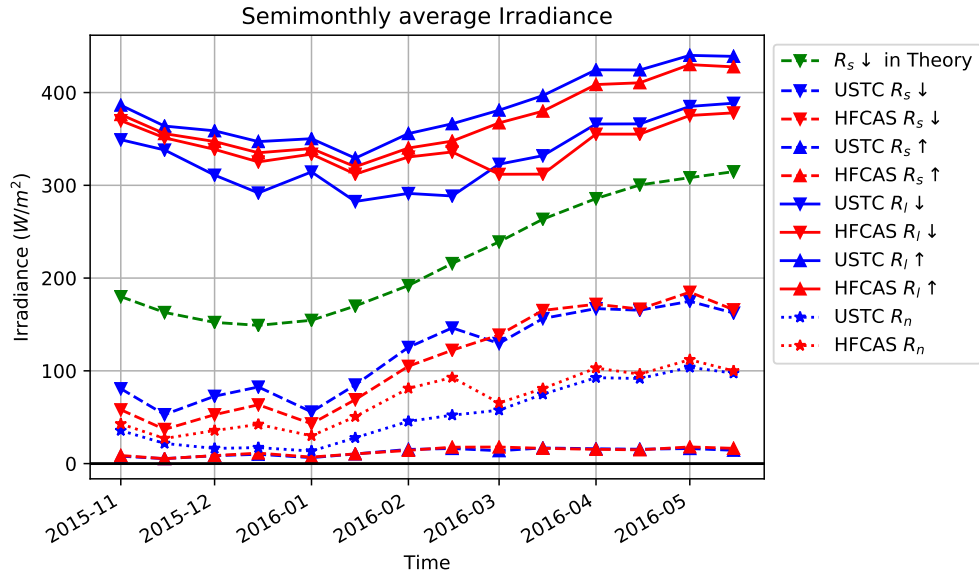


图 4.9 2015 年 11 月至 2016 年 5 月半月平均辐射通量密度

注：图中，绿色代表理论值，蓝色代表中科大站，红色代表科学岛站，实线表示长波辐射通量密度，虚线表示短波辐射通量密度，点线表示净辐射通量密度，向下三角表示方向向下，向上三角表示方向向上，五角星表示方向向下的净辐射通量密度。例如：图中向上三角的蓝色实线表示中科大站观测的向上长波辐射通量密度。

第二节 感热通量密度

感热又称显热，是指物体在不发生相变的加热或冷却过程中所吸收或放出的热。感热通量密度 (H_s) 描述了由于温度的变化导致的大气与下垫面之间发生的湍流热交换。^[2] 2015 年 11 月至 2016 年 6 月中科大站与科学岛站的感热通量密度如图 4.10，可以明显看出中科大站的感热通量密度（蓝色）普遍比科学岛站的感热通量密度（红色）要高，具体可见表 4.1。

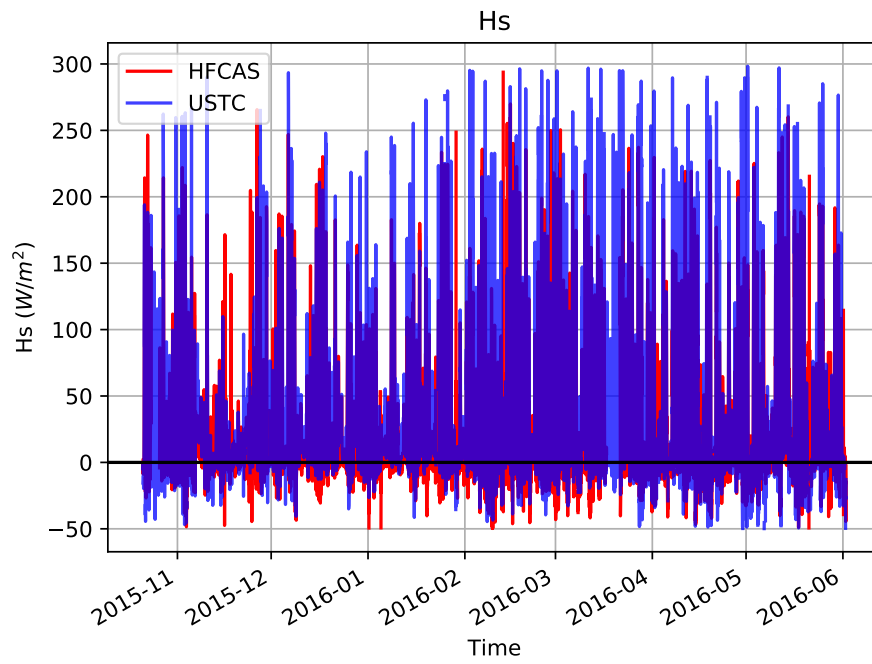


图 4.10 2015 年 11 月至 2016 年 6 月感热通量密度

注：红色表示科学岛站观测的感热通量密度，蓝色表示中科大站观测的感热通量密度。

表 4.1 中科大站与科学岛站感热通量密度比较

| | 中科大站 | | 科学岛站 | |
|------|---------|--------|--------|--------|
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 全部 | 30.391 | 60.838 | 19.677 | 48.495 |
| 晴天 | 50.331 | 85.225 | 32.141 | 63.374 |
| 阴天 | 11.204 | 19.541 | 6.935 | 21.997 |
| 白天 | 64.628 | 72.229 | 47.077 | 57.145 |
| 夜晚 | -1.361 | 14.163 | -5.463 | 13.885 |
| 晴天白天 | 105.869 | 88.737 | 73.447 | 66.743 |
| 阴天白天 | 17.907 | 22.357 | 14.260 | 22.658 |
| 晴天夜晚 | -6.674 | 14.879 | -9.536 | 10.764 |
| 阴天夜晚 | 5.319 | 14.295 | 0.459 | 19.204 |

注：单位： W/m^2

结合图4.10以及表4.1中可以发现如下规律：

1. 感热通量密度存在季节变化；
2. 中科大站（城市）的感热通量密度普遍高于科学岛站（郊区）；
3. 晴天的感热通量密度普遍高于阴天；
4. 白天的感热通量密度普遍高于夜间，晴天夜晚的感热通量密度为负值，但是绝对值不大。

下面具体分析 2016 年 4 月 29 日至 2016 年 5 月 5 日的感热通量密度变化，如图4.11。这 7 天里，除 5 月 2 日是阴天外，其余 6 天都是晴天，观察晴天的数据可以发现：感热通量密度白天为正在正午达到峰值，峰值在 $250 W/m^2$ 附近，且科大站测得的感热通量密度要高于科学岛站，感热通量密度夜晚为负但不超过 $50 W/m^2$ 。

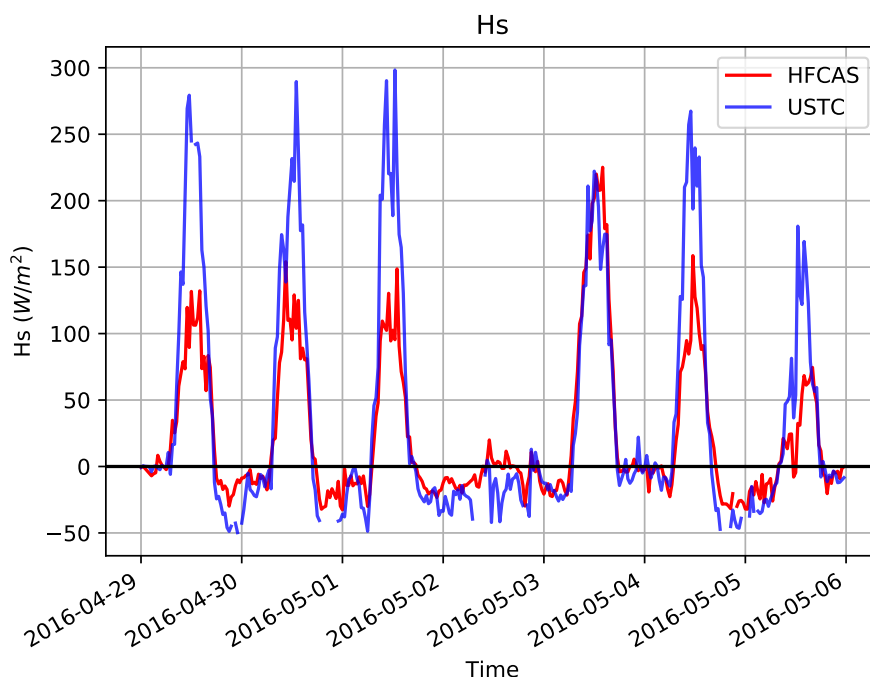


图 4.11 2016 年 4 月 29 日至 2016 年 5 月 5 日的感热通量密度

注：红色表示科学岛站观测的感热通量密度，蓝色表示中科大站观测的感热通量密度。

第三节 潜热通量密度

在一定条件下，加热一个系统，这个系统温度没有发生变化但是发生了相变，在这种情况下系统中分子之间的相互作用发生了变化而动能没有增加。这种温度不发生改变但是发生物态变化时吸收或放出的热称为潜热（LE）。天气系统中常常伴随着物态的变化，尤其是水的三态变化，潜热对能量平衡的影响力不容忽视。^[2]

图3.4给出了中科大站与科学岛站两地去除野点之后的潜热通量密度数据，以 2016 年 2 月 15 日至 2016 年 2 月 19 日这 5 天的潜热通量密度为例，2 月 15 日至 2 月 18 日均为晴天，2 月 19 日为阴天，从图4.12中可以看出，无论是中科大站（城市）还是科学岛站（郊区），两地夜间的感热通量密度都比较低，通常不会超过 $25\text{W}/\text{m}^2$ ，事实上，对全部的潜热通量密度数据进行分析，中科大站的感热通量密度夜晚平均为 $8.10\text{W}/\text{m}^2$ ，科学岛站的感热通量密度夜晚平均为 $7.28\text{W}/\text{m}^2$ ，详见表4.2。到了白天，潜热通量密度明显上升，正午达到峰值 $150\text{W}/\text{m}^2$ 左右，

且白天科学岛站（郊区）的潜热通量密度明显高于中科大站（城市），晴天白天科学岛站比科大站平均高出 29.06 W/m^2 。阴雨天中科大站与科学岛站两地的潜热通量密度都比较低，和晴天相比，中科大站阴天的潜热通量密度比晴天平均低 14.96 W/m^2 ，科学岛站阴天的潜热通量密度比晴天平均低 32.00 W/m^2 ，详见表4.2。

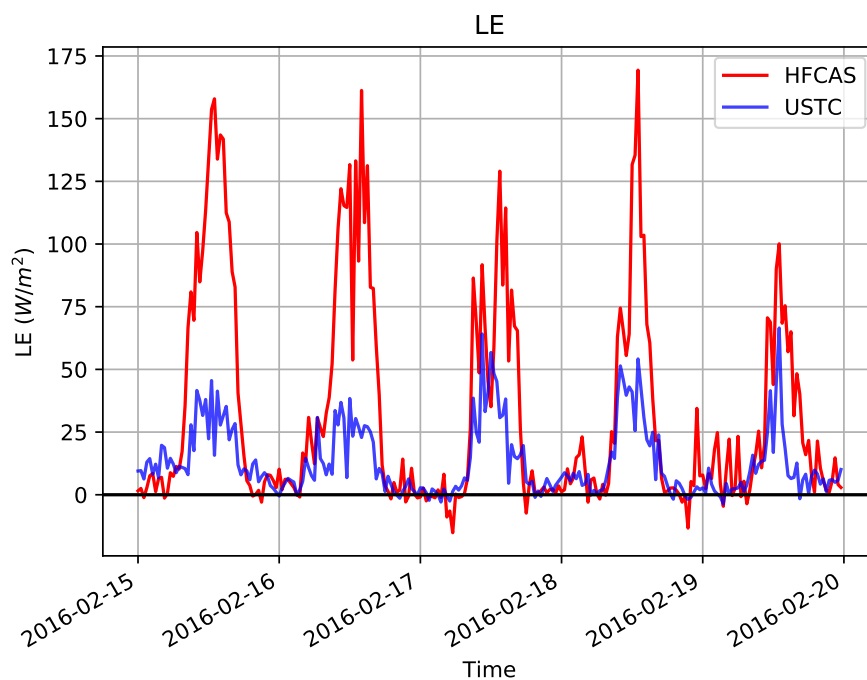


图 4.12 2016 年 2 月 15 日至 2016 年 2 月 19 日潜热通量密度

注：红色表示科学岛站观测的潜热通量密度，蓝色表示中科大站观测的潜热通量密度。

表 4.2 中科大站与科学岛站潜热通量密度比较

| | 中科大站 | | 科学岛站 | |
|------|--------|--------|--------|--------|
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 全部 | 20.857 | 36.834 | 28.439 | 47.406 |
| 晴天 | 31.053 | 44.676 | 46.231 | 61.797 |
| 阴天 | 16.096 | 41.126 | 14.233 | 39.429 |
| 白天 | 34.418 | 42.185 | 51.607 | 54.671 |
| 夜晚 | 8.099 | 24.971 | 7.280 | 25.151 |
| 晴天白天 | 54.184 | 51.529 | 83.244 | 66.992 |
| 阴天白天 | 20.872 | 41.586 | 22.765 | 42.418 |
| 晴天夜晚 | 7.030 | 13.381 | 8.828 | 18.976 |
| 阴天夜晚 | 11.929 | 40.278 | 6.881 | 35.054 |

注：单位： W/m^2

潜热通量密度的变化与水的物态变化密切相关，液态水汽化变成气态水这个过程会吸收能量，水的多少会直接影响潜热通量密度的大小。科学岛站位于合肥市庐阳区董铺水库科学岛上，科学岛为西北-东南走向的半岛，被水环绕，水量充足，而中科大站位于合肥市包河区金寨路，四面都是建筑、街道，处在城市中，水量很少。水量的差异还可以从湿度数据得到反映，如图4.13，相对湿度夜晚通常比较高，2016年2月15日至2016年2月19日中科大站测得的相对湿度峰值平均为51.54%而科学岛站的相对湿度夜晚明显高于中科大，这5天里科学岛站相对湿度的峰值平均为81.78%，比中科大站高出30.24%，到了白天，太阳出来之后相对湿度迅速下降，跌至30%以下。科学岛站水量更多，使得科学岛站的潜热通量密度相对中科大站更大。

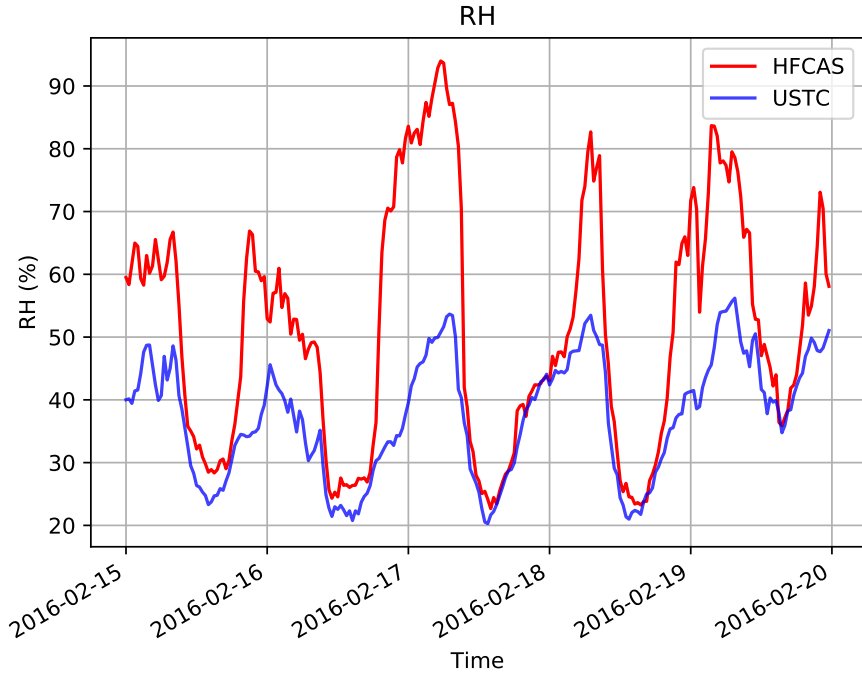


图 4.13 2016 年 2 月 15 日至 2016 年 2 月 19 日两地相对湿度

注：图中红色表示科学岛站测得的相对湿度，蓝色表示中科大站测得的相对湿度。

第四节 城市与郊区的储热

辐射通量密度、感热通量密度以及潜热通量密度等共同影响着地面的能量平衡，此外，人类活动产生的人为热，以及向土壤中传导的热也会对能量平衡产生影响，因此下垫面的能量平衡方程可以写为：

$$R_n + Q = H_s + LE + G_s + \Delta S \quad (4.3)$$

其中 R_n 为下垫面接收的净辐射通量密度，它可以用向下、向上短波辐射通量密度以及向下、向上长波辐射通量密度这 4 个分量计算得到，见式 4.1， Q 是由人类活动产生的热通量密度， H_s 为感热通量密度， LE 为潜热通量密度， G_s 是向下传入土壤中的热通量密度， ΔS 为空气层内作物或障碍物储存的热通量密度，即城市或郊区的储热。

式 4.3 中， R_n 、 H_s 、 LE 可以从中科大站与科学岛站的观测数据中直接获取，向下传入土壤中的热通量密度 G_s 科学岛站有仪器测量但是中科大站没有，因此

只能忽略这一项，而人类活动产生的热 Q 不好直接测量，也先将其忽略，这样便得到：

$$R_n = H_s + LE + \Delta S' \quad (4.4)$$

其中 ΔS 与 $\Delta S'$ 的关系如下：

$$\Delta S = \Delta S' - G_s + Q \quad (4.5)$$

如果不考虑向下传入土壤中的热通量密度 G_s 以及人类活动产生的热 Q ，那么 $\Delta S'$ 可以作为 ΔS 的近似值， $\Delta S'$ 可由式4.4 计算，结果如图4.14，半月平均值如图4.15，白天夜晚以及不同天气情况的 $\Delta S'$ 具体可见表4.3。

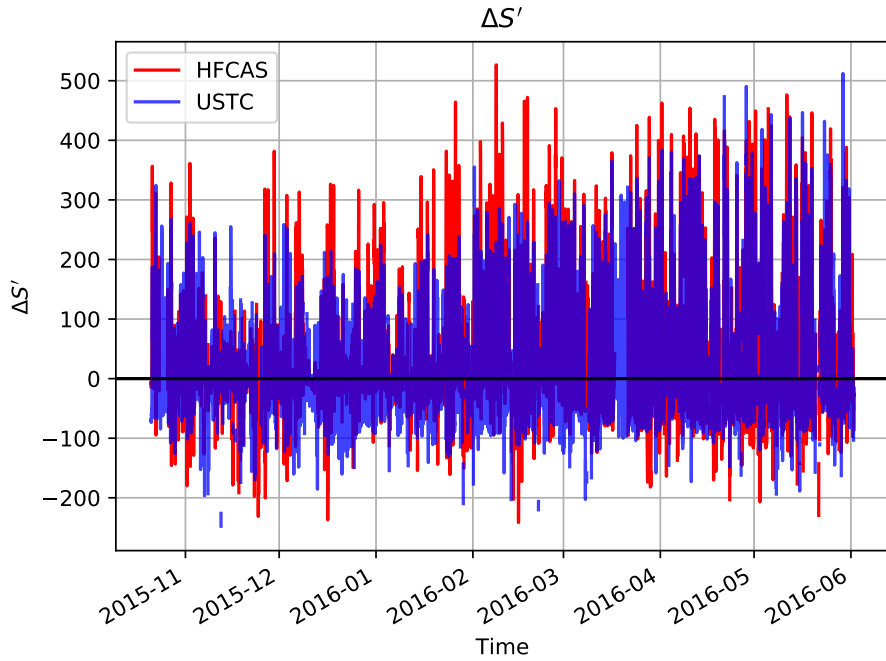


图 4.14 城市与郊区的储热

注：图中蓝色表示中科大站（城市）的储热，红色表示科学岛站（郊区）的储热。

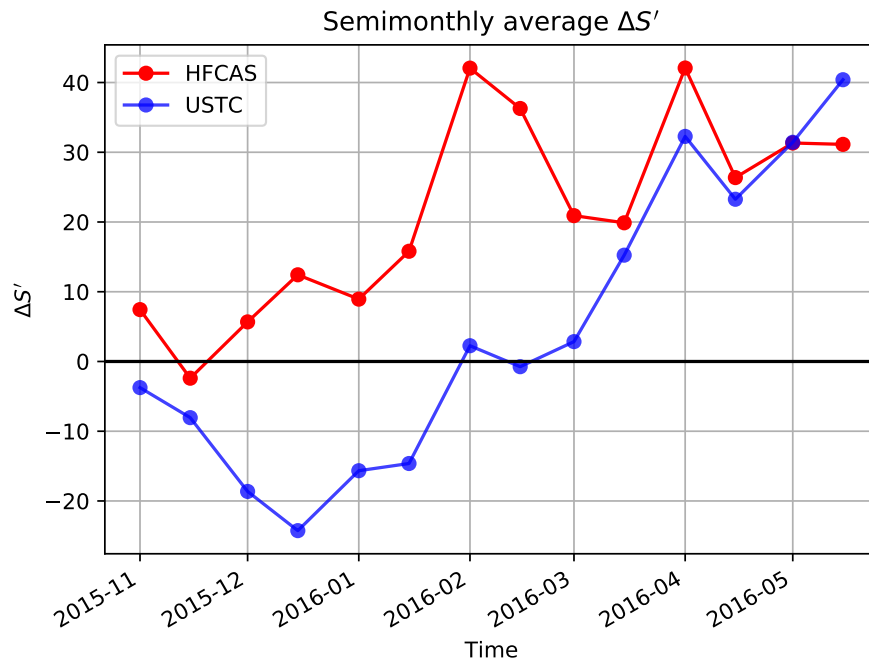


图 4.15 城市与郊区储热的半月平均值

注：图中蓝色表示中科大站（城市）的储热的半月平均值，红色表示科学岛站（郊区）的储热的半月平均值。

表 4.3 中科大站与科学岛站储热通量密度比较

| | 中科大站 | | 科学岛站 | |
|------|---------|---------|---------|---------|
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 全部 | 4.012 | 94.894 | 21.038 | 96.737 |
| 晴天 | 22.263 | 122.930 | 49.693 | 139.151 |
| 阴天 | -16.767 | 52.446 | -5.944 | 43.269 |
| 白天 | 64.269 | 101.833 | 66.513 | 119.802 |
| 夜晚 | -52.625 | 33.185 | -20.473 | 34.489 |
| 晴天白天 | 107.334 | 119.863 | 133.214 | 152.465 |
| 阴天白天 | 5.119 | 54.437 | 2.132 | 47.047 |
| 晴天夜晚 | -65.951 | 24.449 | -34.459 | 36.676 |
| 阴天夜晚 | -35.890 | 42.214 | -12.895 | 38.418 |

注：单位： W/m^2

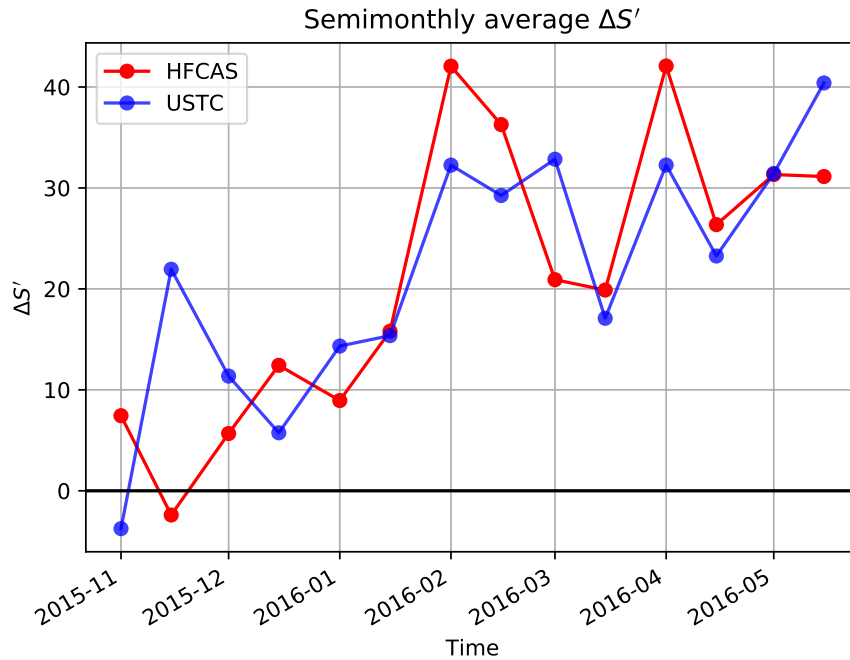


图 4.16 城市 (考虑冬季供暖) 与郊区储热的半月平均值

注：图中蓝色表示中科大站（城市）的储热的半月平均值，红色表示科学岛站（郊区）的储热的半月平均值，通过对科大的供暖数据进行分析，发现冬季供暖期间会造成 $30W/m^2$ 的人为热释放，将其叠加至城市的储热中。

储热通量密度 $\Delta S'$ 为正值表示吸热，为负值表示放热，从表4.3可以看出：晴天平均都是吸热，阴天平均都是放热；白天平均都在吸热，夜晚平均都在放热；晴天白天吸收的热量明显高于阴天白天吸收的热量，晴天夜晚放出的热也要高于阴天夜晚。图4.15中，中科大站（城市）在 2016 年 2 月之前基本都是负值，之后都是正值，而科学岛站（郊区）观测期间内几乎都是正值，这种现象可能与多种因素有关：首先城市人类活动明显强与郊区，尤其在冬季供暖期间，释放的人为热要比郊区高出不少，供暖期间内（2015 年 11 月 15 日至 2016 年 3 月 15 日），郊区的 $\Delta S'$ 比城市平均高出 $29.10W/m^2$ ，人类活动可能贡献了一部分差异；另外，平衡方程4.3只考虑了竖直方向的能量收支，并没有考虑水平方向的能量输送，竖直方向的能量不平衡可能是由水平方向的能量输送所造成。

由于没有土壤传输热通量的数据，使用 $\Delta S'$ 估计 ΔS 还是会有一定差异，城市的人类活动比郊区繁忙得多，城市中的人为热也会比郊区高一些，忽略人为热可能会导致计算出的城市储热偏低。为了更准确地计算出城市和郊区的储热，需要添加测量传导到土壤中的热通量的仪器，这些工作有待后续的研究。

第五章 结论

本文利用中科大站与科学岛站 2015 年 10 月 21 日至 2016 年 6 月 1 日的观测数据研究分析了合肥市向下、向上短波辐射通量密度, 向下、向上长波辐射通量密度, 感热、潜热通量密度, 以及储热通量密度在城市和郊区的差异, 得到的主要结论如下:

1. 城市平均温度比郊区平均温度高出 0.48°C , 城市的向上长波辐射通量密度平均比郊区高出 $12.46\text{W}/\text{m}^2$, 且向上长波辐射通量密度-温度关系与 Stefan-Boltzmann 定律符合的比较好, 科大站向上长波辐射通量密度平均值为 $384.68\text{W}/\text{m}^2$, 科学岛站向上长波辐射通量密度平均值为 $371.21\text{W}/\text{m}^2$, 利用 Stefan-Boltzmann 定律和地面的温度数据分别计算出向上的长波辐射通量密度的理论值, 科大站向上长波辐射通量密度的观测值与理论值平均相差 $7.36\text{W}/\text{m}^2$, 科学岛站向上长波辐射通量密度的观测值与理论值平均相差 $-2.58\text{W}/\text{m}^2$, 两地的观测值与理论值之差均不超过观测值的 2%。
2. 白天城市和郊区的向上短波辐射通量密度平均值分别为 $23.82\text{W}/\text{m}^2$ 和 $25.76\text{W}/\text{m}^2$, 郊区比城市平均高出 8.14%, 这与地面的材质有关, 城市和郊区的反照率平均分别为 0.096 和 0.119, 地面材质的不同造成了反照率的差异, 进而影响了向上短波辐射通量密度。郊区的净辐射通量密度高于城市, 平均高出 $15.56\text{W}/\text{m}^2$, 冬季供暖期 (11 月 15 日至 3 月 15 日) 郊区与城市的净辐射通量密度差异更大, 郊区比城市平均高出 $21.78\text{W}/\text{m}^2$ 。
3. 城市的感热通量密度平均比郊区高出 $10.71\text{W}/\text{m}^2$, 这与城市的对流活动旺盛有关, 城市晴天、阴天的感热通量密度分别为 $50.33\text{W}/\text{m}^2$ 和 $11.20\text{W}/\text{m}^2$, 郊区晴天、阴天的感热通量密度分别为 $32.14\text{W}/\text{m}^2$ 和 $6.94\text{W}/\text{m}^2$, 晴天的感热通量密度普遍高于阴天, 城市白天、夜晚的感热通量密度分别为 $64.63\text{W}/\text{m}^2$ 和 $-1.36\text{W}/\text{m}^2$, 郊区白天、夜晚的感热通量密度分别为 $47.08\text{W}/\text{m}^2$ 和 $-5.46\text{W}/\text{m}^2$, 白天的感热通量密度普遍高于夜间, 晴天夜晚的感热通量密度为负值, 但是绝对值不大。感热通量密度的变化与对流活动有关, 对流活动旺盛感热通量密度也会比较大。
4. 城市和郊区的潜热通量密度分别为 $20.86\text{W}/\text{m}^2$ 和 $28.44\text{W}/\text{m}^2$, 郊区比城市高出 $7.58\text{W}/\text{m}^2$, 这种差异在晴天更加明显, 晴天郊区的潜热通量密度比

城市平均高出 $15.18\text{W}/\text{m}^2$ ，而阴天城市和郊区的潜热通量密度都比较低，分别为 $16.10\text{W}/\text{m}^2$ 和 $14.23\text{W}/\text{m}^2$ ，差异也很小。潜热通量密度与水汽、温度、风等很多因素有关，郊区紧邻董铺水库，水汽充足，城市和郊区的相对湿度平均值分别为 65.88% 和 71.90%，因而郊区的潜热通常高于城市，阴天时，城市和郊区的相对湿度平均值都比较高，分别为 82.25% 和 86.29%，但是阴雨天太阳辐射比较弱，温度低，因而城市和郊区在阴天的潜热通量密度都比较低且差异不大。

5. 城市和郊区的储热关系不是很明显，因为向土壤中传递的热未知，如果可以测量出两地向土壤中传导的热通量，并合理地估计出人类活动产生的热通量密度，便可利用式4.3计算出真正的储热。不过由图4.15以及图4.16还是可以看出人类活动确实对城市的能量平衡产生了不小的影响。

参考文献

- [1] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Second edition. [S.l.]: Academic Press, 2002.
- [2] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric Science (Second Edition)[M/OL]. Second edition. San Diego: Academic Press, 2006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127329512500016>. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-732951-2.50001-6>.
- [3] 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 城市人为热对北京热环境的影响[J]. 气候与环境研究. 2004, 9 (3): 409–421.
- [4] Holmgren W F, Mueller B, Andrews R W, et al. pvlib/pvlib-python[EB/OL]. 2017. <https://github.com/pvlib/pvlib-python>.
- [5] Ineichen P, Perez R. A new airmass independent formulation for the linke turbidity coefficient[J/OL]. *Solar Energy*. 2002, 73 (3): 151-157. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:17184>.
- [6] Ineichen P. A broadband simplified version of the solis clear sky model[J/OL]. *Solar Energy*. 2008, 82 (8): 758 - 762. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000406>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.009>.