

# 广东龙门地区草地下垫面地表辐射和 能量平衡观测和分析\*

丁张巍<sup>1</sup>, 温之平<sup>1</sup>, 黎伟标<sup>1</sup>, 简茂球<sup>1</sup>, 颜昭潮<sup>2</sup>, 李伟权<sup>2</sup>

(1. 中山大学季风与环境研究中心//大气科学系, 广东 广州 510275;

2. 广东省惠州市龙门县气象局, 广东 龙门 516800)

**摘要:** 利用2009年9月-2010年1月在广东省龙门县收集的涡动相关观测资料, 比较了广东龙门地区草地下垫面秋、冬季不同天气条件下的地表通量特征。发现地表辐射平衡分量和能量平衡分量都存在明显的月际变化。典型晴天辐射通量除长波辐射外均表现为标准的单峰日循环形态。在阴、雨天, 辐射通量日变化曲线波动大, 出现双峰甚至是多峰的形态。地面长波辐射略大于大气长波辐射, 两者的差值在雨天、阴天、晴天依次增大。在辐射平衡中, 地面长波辐射贡献最大, 大气长波辐射次之, 再依次为太阳短波辐射、净辐射和反射辐射。与晴天相比, 阴天潜热、感热均减少。与秋季相比, 冬季潜热减少, 感热增加。在晚上存在负水汽输送现象。降水天里地热流量全天为负值, 土壤从深层向地表释放热量。无论晴天还是阴天, 地表和浅层土壤温度都表现为准正弦曲线。土壤温度的活动层基本在10cm土壤层内, 各层土壤温度峰(谷)值出现的时间随着土层厚度增加而延迟, 10cm以下土壤温度几乎无日变化特征, 雨天时地面和浅层土壤温度呈下降趋势。各层土壤温度不仅跟天气状况有关, 晴天高于阴天, 还存在秋季地温高于冬季的季节变化。

**关键词:** 龙门; 下垫面; 辐射平衡; 能量平衡; 土壤温度

**中图分类号:** P422.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0529-6579(2011)03-0123-07

## Observation and Analysis of Surface Radiation and Energy Balance in the Longmen Area

DING Zhangwei<sup>1</sup>, WEN Zhiping<sup>1</sup>, LI Weibiao<sup>1</sup>, JIAN Maoqiu<sup>1</sup>, YAN Zhaochao<sup>2</sup>, LI Weiquan<sup>2</sup>

(1. Center for Monsoon and Environment Research//Department of Atmospheric Sciences,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Longmeng Meteorological Bureau, Longmen 516800, China)

**Abstract:** The characteristics of grass surface heat flux under different weather conditions in autumn and in winter have been analyzed based on data measured with Eddy Covariance method at Longmen long-term observation station during the period of September 2009 to January 2010. The results indicate that there is a large monthly variation in the energy balance under different weather conditions. The daily variation shows a typical single-peak circle on clear days (except long-wave radiation) and a double-peak or more-peak curve on cloudy and rainy days. The value of upward long-wave radiance is slightly larger than that of downward long-wave radiance. The difference of values between these two kinds of radiance is the smallest on rainy days and increases on cloudy and clear days. The upward long-wave radiation, the downward long-wave radiation, the solar radiation, the net radiation and the upward shortwave radiation show the descending contribution to the radiation balance. Each component of surface energy flux shows obvious synoptic conditions and seasonal and monthly variations. The latent heat flux is larger in autumn than in winter, whereas the sensible heat flux is opposite. The latent heat flux and the sensible heat flux

\* 收稿日期: 2010-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2009CB421404)

作者简介: 丁张巍(1984年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 温之平; E-mail: eeswzp@mail.sysu.edu.cn

are both reduced on cloudy and rainy days. A negative water-vapor transfer exists at night. The soil heat flux is negative on rainy days and the daily average value of rainy days is higher than that of clear and cloudy days. The soil temperature of surface and shallow-layer (5cm) presents accurate sine curve changes regardless of clear days and cloudy days. The soil temperature active layer is in the 10cm scope. The time when the soil temperature reaches the maximum (minimum) is delayed with increasing soil depth. There is no diurnal variation below 10cm depth. The soil temperature of surface and shallow-layer decreases with time on rainy days. The soil temperature of each layer is higher on clear days than that on cloudy days and higher in autumn than in winter.

**Key words:** Longmen; surface; radiation balance; energy balance; soil temperature

20世纪80年代以来,人们逐渐认识到“土壤-植被-大气”之间物理、化学、生物等过程的相互作用对全球气候、环境变化影响的重要性<sup>[1]</sup>。中国相继实施了黑河(HEIFE)、内蒙(IMGRASS)、青藏高原(GAME-Tibet/TIPEX)、敦煌(DLSPFE)、淮河(GAME-HUBEX)及黄土高原(LOPEX)等为典型的一系列陆面过程试验,获得了大量陆气观测数据,取得不少成果:其中,在干旱区发现由绿洲和沙漠的相互作用而产生的绿洲的“冷岛效应”和其临近的沙漠和戈壁地区的“逆湿现象”,干旱地区地表热量平衡中以感热为主,潜热可以忽略不计,从而指出,干旱地区可能是一个水汽输送和热能的“汇”<sup>[2-4]</sup>。内蒙草原试验则分析了草原温室气体、碳氮循环及其源汇特征,探讨了半干旱草原生态对气候变化与人类活动的响应及其在全球变化中的作用<sup>[5]</sup>。青藏高原试验揭示了许多观测事实,如不同地区不同时间感热、潜热等分量对能量平衡及热量输送贡献不同;干季近地面层能量收支中,感热占主导地位,远大于潜热通量;湿季,潜热通量与感热通量相当;青藏高原东部地区,夏季,潜热明显大于感热<sup>[6-8]</sup>,而在高原西部,地面热源中以感热加热为主,潜热只在高原雨季有较明显的贡献等<sup>[9]</sup>。黄土高原试验中,则将不同季节的热量平衡与作物生长阶段结合起来研究,获得了热量平衡及分量对作物生长的影响方面的一些新认识<sup>[10-12]</sup>。另外,淮河观测试验发现水面、稻田、旱地下垫面能量收支中,潜热均大于感热<sup>[13-14]</sup>。这些成果为全面理解了各主要地表类型的陆气相互作用特征,揭示不同尺度下对天气气候的影响,在发展和改进具有代表性的地理、生物和气候区域的陆面过程及参数化方案上起到重要作用。然而,上述这些科学试验中除GAME-HUBEX在东亚副热带半湿润地区实施外,其他观测主要集中在我国北方典型干旱、半干旱区及青藏高原寒区,在华南季风湿润区开展陆面过程

观测研究则较少,已有的少量观测和研究也多为加强期的湍流通量的观测或者农田等下垫面进行<sup>[15-17]</sup>,缺少连续长时间地气间物质和能量通量的连续观测和分析。本文利用龙门站2009年9月至2010年1月观测资料,初步分析了秋、冬季华南季风湿润区地表辐射特征及能量平衡各分量的日变化规律,并为进一步探索华南季风湿润区陆气相互作用的物理过程和气候变化提供依据。

## 1 观测场地和仪器

在教育部“985”计划一期经费的支持下,中山大学季风与环境研究中心在广东龙门县建立了长期观测实验站,该站于2006年正式建成并连续观测至今,是华南地区为数不多的对地气界面物质和能量交换过程进行长期监测的野外科研实验站。它坐落于广东惠州龙门县城西郊龙门气象局内(23°44'N, 114°14'E),海拔高度70.3 m,该地位于广东省中部,地处珠江三角洲边缘,属亚热带季风气候,年平均气温为20.5℃,雨量充沛,1979-2009年均降水量为2 219 mm,是广东暴雨中心之一,年日照时数为1 628 h。观测站西面为龙门气象局观测场,其余三面均为农田,地势平坦,四周开阔,当地盛行西南风,其风向上均无树木和高层建筑遮挡,观测站下垫面为草地,夏季茂盛时长有高约20 cm杂草,冬季杂草退化,基本上可以代表华南草地下垫面特征。

观测项目包括辐射、湍流通量、风速风向、空气湿(湿)度、土壤热通量及土壤温(湿)度。辐射观测包括用安装在6 m高度上四分量辐射仪(CNR-1,日精度10%)测量的太阳短波辐射、反射辐射、地表长波辐射、大气长波辐射,空气温度和湿度传感器(HMP45C,温度精度:±0.2℃,湿度精度:±2%),土壤热通量测量则依靠分别埋设于2.5 cm和5 cm深处2层土壤热流量板(HFP01,精度:±5%),土壤温(湿)度则采用

4 层 (0, -5, -10, -20 cm) 土壤温度传感器 (107-L, 精度:  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ) 和土壤湿度传感器 (CS616, 精度:  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ )。湍流观测仪器由三维超声风速仪 (CAST3, 精度:  $U_x, U_y < \pm 4.0 \text{ cm/s}$ ,  $U_z < \pm 2.0 \text{ cm/s}$ ) 和  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  脉动仪 (Li7500,  $\text{CO}_2$  精度:  $0.11 \text{ mmol/mol}$ ,  $0.0043 \text{ mmol/m}^3$ ,  $0.19 \text{ g/m}^3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  精度:  $0.047 \text{ mmol/mol}$ ,  $0.18 \text{ mmol/m}^3$ ,  $0.0033 \text{ g/m}^3$ ) 构成, 测量动量、热量、水汽及  $\text{CO}_2$  湍流通量。湍流仪器安分别被安装在距地面 6 m 高度上, 采样频率为 10 Hz, 通过数据采集器 (CR5000) 采集并按 30 min 计算平均值进行输出。

常规气象要素和天气现象观测由龙门县气象观测站根据日常业务观测完成, 为保证观测资料的质量, 从仪器的调试和观测等各个环节均采取严格的质量控制。观测资料分析前, 去掉因天气或仪器故障产生的野点, 并进行了水汽及感热通量影响的订正<sup>[18]</sup>。

## 2 观测结果与分析

### 2.1 地表辐射收支基本特征

2.1.1 地表辐射通量月际变化 选取 2009 年 9 月 -2010 年 1 月每日的半小时输出数据得到逐月辐射平衡分量各分量的变化特征, 由图 1 可以看出, 辐射平衡各分量的月变化特征明显, 由于受日地距离增远的影响, 太阳短波辐射 (DR) 从 9 月的  $579 \text{ W/m}^2$ , 逐渐减弱到 1 月  $327 \text{ W/m}^2$ , 降幅将近 50%, (10 月例外, 由于 10 月中无降水发生)。地面向上长波辐射 (ULR) 由于短时间内下垫面情况变化不大, 其值在  $0 \sim 100 \text{ W/m}^2$  波动。地面向上长波辐射 (ULR) 和大气向下长波辐射 (DLR) 都比

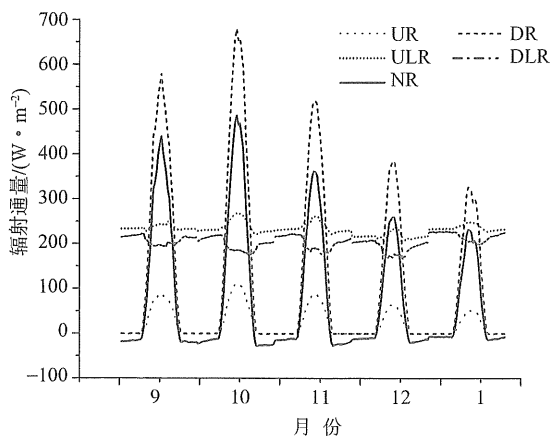


图 1 2009 年 9 月 -2010 年 1 月各月地表辐射平衡分量的平均日变化

Fig. 1 Diurnal variation of monthly mean surface radiation budget from Sep 2009 to Jan 2010.

较稳定, 其值均在  $200 \sim 250 \text{ W/m}^2$  之间。净辐射 (NR) 是各辐射分量平衡的结果, 是衡量地表面最终通过辐射获得能量的大小。夜晚, 地表支出的辐射多于吸收的太阳短波辐射, 净辐射为负值; 日出后, 地表吸收的太阳短波辐射多于其支出的辐射, 净辐射为正值。由于长波辐射基本维持在一个不变的水平, 地表反射辐射月变化又不大, 所以净辐射与太阳短波辐射保持了比较一致的变化趋势, 由此看来, 龙门地区草地下垫面净辐射的月际变化主要受太阳短波辐射变化控制。

2.1.2 典型天气下地表辐射通量特征 为了研究各辐射分量在不同天气条件下日变化特征, 分别选取观测期间秋、冬季典型天气条件下的一天 (秋季晴、阴、雨日为 2009 年 10 月 10 日、10 月 11 日和 11 月 15 日, 冬季晴、阴、雨日为 2010 年 1 月 14 日、1 月 15 日和 1 月 11 日), 分别代表秋、冬两季典型天气条件下各辐射通量的日变化情况, 其中阴天是选取当日总云量  $> 8$  成的情况, 秋、冬季典型雨日降水量则分别为 7.8 和 23.5 mm。

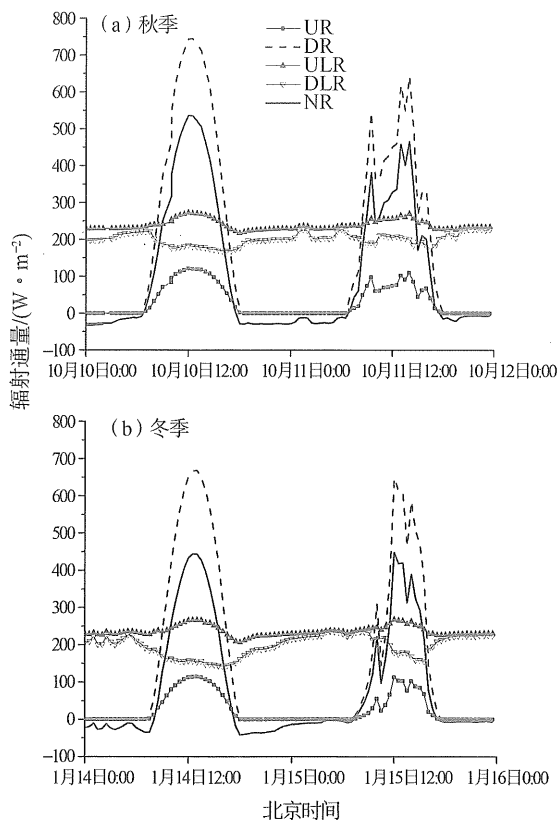


图 2 秋冬两季典型晴阴天下辐射收支日变化特征  
Fig. 2 Diurnal variations of surface radiation budget under typical weather conditions in autumn (a) and winter (b) 10 Oct and 14 Jan for clear sky, 11 Oct and 15 Jan for cloudy sky

图 2 和图 3 分别为观测期间秋、冬季典型天气条件下 (各选一天) 地表辐射平衡各分量日变化曲线特征。从图中可以看出, 除了地面长波辐射 (ULR) 和大气长波辐射 (DLR) 的日变化比较小外, 地表辐射平衡各分量的日变化十分明显。受不同天气条件影响, 日变化曲线在形状上有一定的差异, 在日变幅、日峰值等方面都存在显著的季节变化。太阳短波辐射 (DR) 在晴天时表现为非常平滑的抛物线形态: 日出后, 太阳短波辐射随太阳高度角增大而增加, 在正午 12 点左右达到最大值, 然后逐渐减小, 在夜间出现最小值。反射辐射 (UR)、净辐射 (NR) 日间变化趋势和太阳短波辐射类似。随着天气状况改变, 太阳短波辐射受云量、降水分布波动较大, 所以阴、雨天条件下其曲线极不规则, 出现了双峰或多峰型。阴天时, 由于云对太阳总辐射的削弱, 秋、冬阴天时太阳短波辐射 (DR) 最大值分别从其秋 (冬) 季晴天时的  $743 \text{ W/m}^2$  ( $668 \text{ W/m}^2$ ) 减小到  $642 \text{ W/m}^2$  ( $647 \text{ W/m}^2$ ), 而在雨天, 削减尤甚, 秋、冬季其峰值均不超过  $150 \text{ W/m}^2$ 。

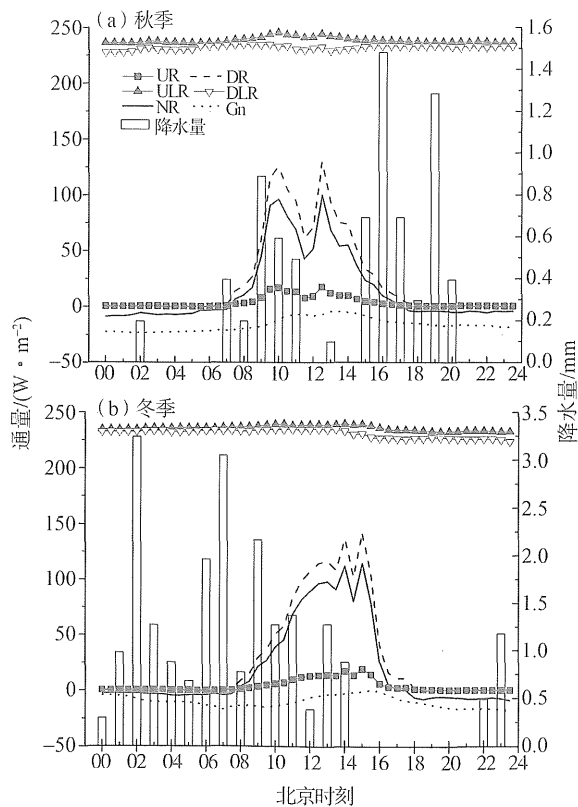


图 3 秋冬两季典型雨天时辐射通量和土壤热通量的日变化特征

Fig. 3 Diurnal variations of surface radiation fluxes and soil heat flux on rainy days in autumn (a) and winter (b)

反射辐射 (DR) 的日变化趋势与太阳总辐射 (UR) 一致, 这主要是因为反射辐射只随太阳总辐射和地表反照率的变化而发生变化, 而在较短的时间内, 地表反照率变化不大, 所以反射辐射与太阳短波辐射保持一致的变化。地面长波辐射 (ULR) 和大气长波辐射 (DLR) 日变化不明显, 但地面长波辐射略大于大气长波辐射, 秋、冬季典型晴、阴、雨天里两者的日平均差值分别为  $45, 31, 6 \text{ W/m}^2$  和  $53, 25, 5 \text{ W/m}^2$ , 说明两者差值幅度雨天最小, 阴天次之, 晴天最大, 这可能是因为阴天和雨天的温差变化小的缘故。

净辐射 (NR) 是各辐射分量平衡的结果, 是衡量地表面最终通过辐射获得能量的大小。它在日变化中, 与太阳短波辐射保持了比较一致的变化趋势, 说明太阳短波辐射是净辐射变化的主导因子。夜晚, 地表支出的辐射多于吸收的太阳短波辐射, 净辐射为负值; 日出后, 地表吸收的太阳短波辐射多于其支出的辐射, 净辐射为正值; 中午前后净辐射达到极大值, 随后逐渐减小, 日落时又恢复为负值, 并完成一天的循环。秋、冬季晴天净辐射日平均值分别为  $126, 89 \text{ W/m}^2$ 。而在阴天, 由于云对太阳短波辐射的削弱, 其日平均值同比减小  $28, 10 \text{ W/m}^2$ , 日变化曲线也表现出双峰型甚至多峰型结构。雨天, 受其主要贡献者太阳短波辐射严重减少的影响, 净辐射峰值只在  $100 \sim 110 \text{ W/m}^2$  之间, 只有非降水天最大值的  $1/5$  左右。

2.1.3 辐射分量日总量月际变化特征 地面长波辐射、大气长波辐射、反射辐射和净辐射在 2009 年 9 月 - 2010 年 1 月期间月平均日积分值如图 4 所示, 从图中可以看出在辐射平衡中地面长波辐射 (ULR) 贡献最大, 大气长波辐射 (DLR) 次之, 之后依次为太阳短波辐射 (DR)、净辐射 (NR) 和反射辐射 (UR)。地面长波辐射月平均日积分值数月来一直稳定在  $20 \text{ MJ/m}^2$  左右, 大气长波辐射日积分值不低于  $17 \text{ MJ/m}^2$ , 太阳短波辐射主要受地球与太阳距离的影响, 从 9 月开始一直处于减小的趋势 (除 10 月外, 由于 10 月中为无降水发生), 地面反射辐射日积分值月际变化与太阳短波辐射类似。

## 2.2 地表能量平衡特征

2.2.1 地表能量月际变化特征 图 5 为 2009 年 9 月 - 2010 年 1 月期间, 每个月晴天的潜热通量 (LE)、感热通量 (HS)、土壤热通量 (Gn) 和净辐射 (NR) 的月际变化。由图看出, 潜热通量、感热通量、土壤热通量和净辐射日变化是很明显

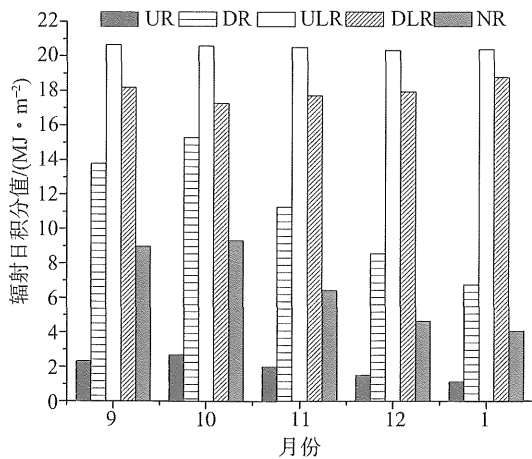


图 4 辐射分量月际日积分值

Fig. 4 The monthly mean daily-integral values of the surface radiation

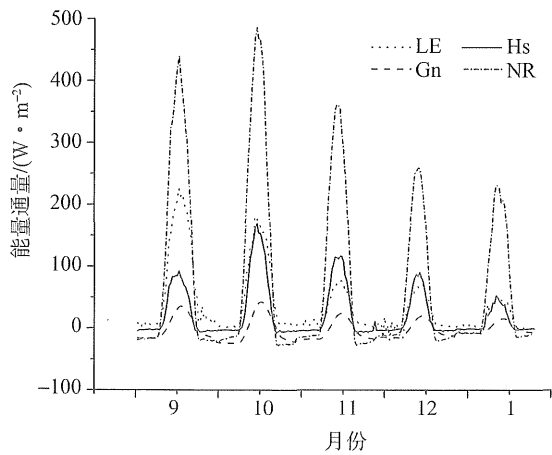


图 5 2009 年 9 月 -2010 年 1 月各月地表能量通量的平均日变化

Fig. 5 Diurnal variation of monthly mean surface energy budget from Sep 2009 to Jan 2010

的。其日变化特征都是一天中随着日出逐渐增大，继而在中午达到顶峰，然后逐渐减小，晚上为负值。9 月份，潜热通量峰值可达  $226 \text{ W/m}^2$ ，明显高于感热通量  $92 \text{ W/m}^2$  的峰值，这是由于此时地面长有茂密的草地，植被生长旺盛，蒸腾作用大，植物潜热交换强烈。此后，潜热通量减小，感热通量增大，11 月份，感热通量达到  $115 \text{ W/m}^2$ ，潜热通量减小为  $76 \text{ W/m}^2$ ，感热通量开始超过潜热通量，因为此时地表已为枯草，植物枯亡，植物潜热活动减弱，感热交换加强。土壤热通量 ( $G_n$ ) 的变化比较平缓，并且值比较小。

2.2.2 典型天气下地表能量特征 图 6 为观测期间典型天气条件下能量平衡各分量日变化曲线特征，由于雨天期间超声仪器观测得通量不可信，故不讨论雨天期间通量变化。由图 6 可知，能量平衡各分量日变化比较明显，潜热通量和感热通量日变

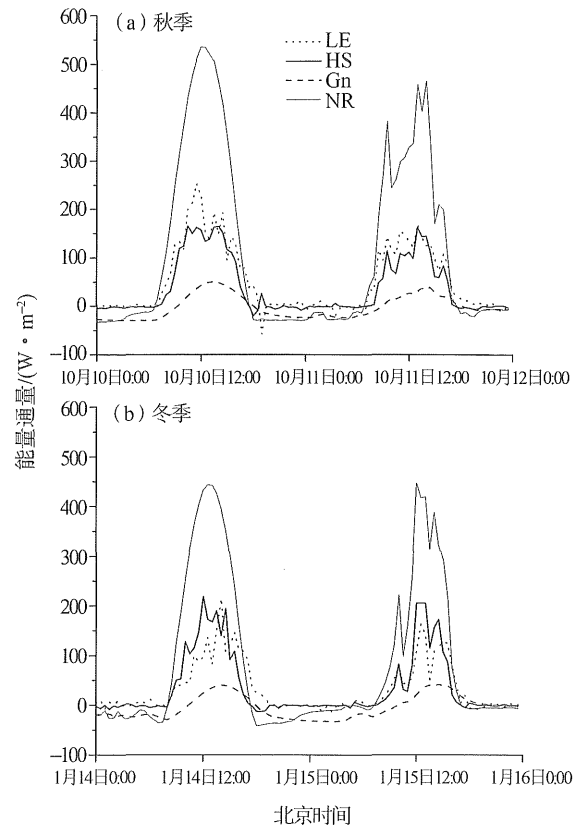


图 6 秋冬两季典型晴、阴天时地表能量收支日变化特征

Fig. 6 Diurnal variations of surface energy budget under typical weather conditions in autumn (a) and winter (b)

化趋势相似，但由于它们的变化还受着下垫面、平流等复杂因素的影响，即使晴天它们的变化曲线也不像净辐射那样光滑，日变化呈无规则型。白天日出后，随着太阳辐射加热地表，植物的蒸腾作用或水分的蒸发引起潜热的增大，产生自地面有向大气的水汽蒸发过程，潜热通量值大于零，并在中午前后达到峰值；夜间，潜热交换没有白天强烈，产生很小的潜热通量正值，同时还伴随潜热通量为负值的现象，说明这段时间地面不断吸收水汽，水汽有从大气向地表输送；感热通量在白天同样由于太阳短波辐射的增加而增加，地面向大气输送热量，为正值，日落后由于地表辐射冷却损失热量，为负值，大气向地面输送热量。此外，还发现感热、潜热通量日变化有明显的季节性。从数值上看，秋、冬季晴（阴）天日潜热通量最大值分别为  $253 (166) \text{ W/m}^2$ 、 $214 (162) \text{ W/m}^2$ ，其秋季日峰值比冬季值高；感热通量变化则相反，其日峰值在秋季比冬季值低，秋、冬两季晴（阴）天感热通量最大值分别为  $169 (164) \text{ W/m}^2$ 、 $218 (205) \text{ W/m}^2$ ，这可能因为天气状况和下垫面变化有关，此

时天气干燥,降水少,草地处于枯亡期,植被耗水少,植株蒸腾作用小,植物覆盖率低,使得草地潜热活动相对减弱,感热交换相对增强。

白天,地表吸收的净辐射除了以感热、潜热通量的形式传播到大气中,还有部分能量向下传导到土壤中去,即为土壤热通量( $G_n$ )。土壤热通量也存在明显日变化,但变幅相对小,达到日峰值的时间滞后于净辐射。在非雨天里,白天土壤热通量为正值,即土壤温度上层暖下层冷,从暖地面向下传导热量进入地下;夜间为负值,对应土壤温度下层暖上层冷,下层土壤向上释放能量。而由雨天期间的土壤热通量日变化(图4)可以看出,土壤热通量全天为负值,且其日平均值的绝对值比晴、阴天时值都大,说明土壤不光在降水天释放热量,而且比非降水天向地面向深层土壤输送的能量比都多。

### 2.3 土壤温度日变化特征

地表和大气间能量的传输将直接引起土壤温度的变化。图7和图8揭示了秋、冬季典型晴天、阴天和雨天地表和土壤温度日变化特征。土壤温度日变化主要集中在距地面以下0~10 cm土壤层,越往深处振幅变化越小。典型晴、阴天时土壤表层( $T_s$ )和5 cm深度( $T_5$ )的温度变化基本一致,表现为正弦曲线,但表层土壤温度日变幅大于5 cm深层土壤。地表温度在早7时左右降到谷底,日出后随太阳辐射增加,地表和5 cm深层土壤温度上升,在15时左右达到最高,但由于土壤吸收热量后,地温的升高会有相对滞后的过程,5 cm深土壤温度谷值和峰值出现的时间就比地表滞后约2 h,说明土壤温度变化不光受太阳辐射影响,还跟热量传导引起的温度时滞有关。10 cm深处温度( $T_{10}$ )显示为幅度很小的反相变化,即在午后温度达到最低,在午夜为最高。20 cm深处地温( $T_{20}$ )基本已不存在日变化,全天几乎同一温度值。各层土壤温度变化不仅跟天气状况有关,晴天各层地温高于阴天,同时还跟季节变化相关,秋季各层地温明显要高于冬季。雨天时,地表和浅层5 cm深土壤温度会因降水引起温度的降低导致下降很快,日变化远比晴、阴天时小,而10 cm深土壤温度呈递减趋势。

## 3 结论

利用2009年9月-2010年1月在广东龙门地区草地下垫面运用涡动相关法测得的湍流、辐射和地热通量观测资料,分析了龙门草地地表辐射和能

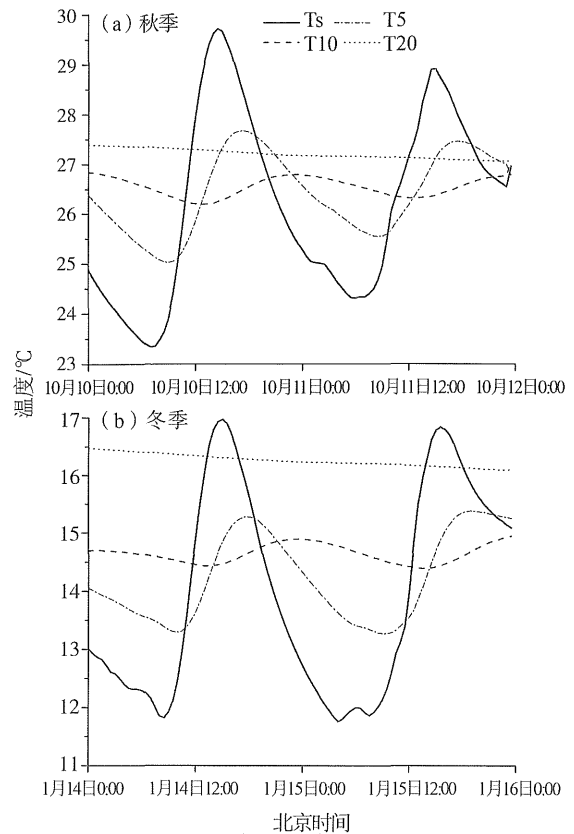


图7 秋冬两季典型晴阴天时土壤温度日变化特征

Fig. 7 Diurnal variations of surface and soil temperature under typical weather conditions in autumn (a) and winter (b)

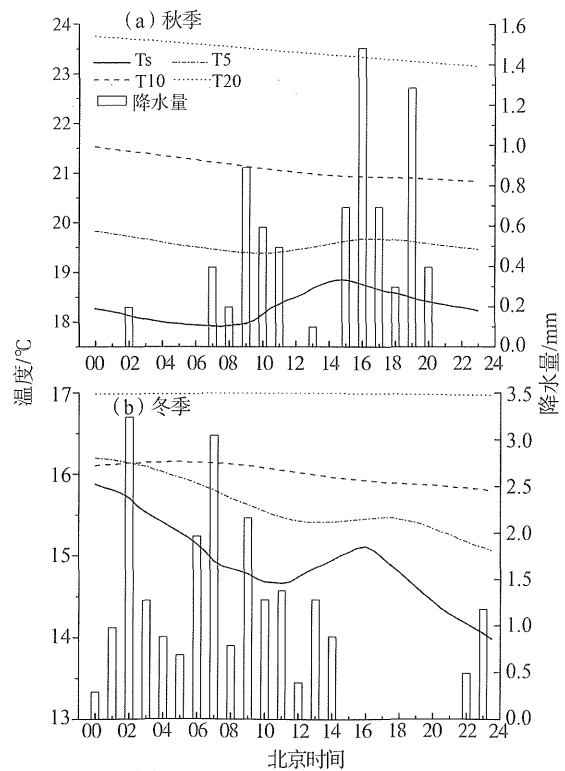


图8 秋季、冬季典型雨天时土壤温度日变化特征

Fig. 8 Diurnal variations of the surface and soil temperature on rainy days in autumn (a) and winter (b)

量平衡特征, 结果分析表明:

1) 地表辐射平衡分量和能量平衡分量的月际变化明显。辐射平衡分量中太阳短波辐射在9月份最大, 1月份最小。地面反射辐射和长波辐射都比较稳定。净辐射月变化与太阳短波辐射月变化一致。地表能量平衡分量中, 潜热通量在9月份明显高于感热通量, 此后, 潜热通量开始减小, 感热通量增加, 10月份, 两者数值相当, 11月份开始, 感热通量已经反超潜热通量。

2) 在典型晴天下辐射通量除长波辐射外均表现为标准的单峰日循环形态, 白天达到最大值, 夜晚落至最小值。在阴、雨天, 由于受云和降水的影响, 各分量受到不同程度减弱, 曲线波动大, 日变化曲线表现为双峰甚至是多峰的形态, 地面长波辐射略大于大气长波辐射, 两者的差值雨天最小, 阴天次之, 晴天最大。在秋季到冬季的各月辐射平衡中辐射平衡中, 地面长波辐射贡献最大, 大气长波辐射次之, 之后依次为太阳短波辐射、净辐射和反射辐射。

3) 与晴天相比, 阴天潜热、感热都减少。与秋季相比, 冬季潜热减少, 感热增加。在秋、冬季典型天气条件下, 潜热白天有自地表向大气的水汽蒸发过程, 夜间则反之, 存在水汽从大气向地表输送负水汽输送现象。感热白天自地面向大气输送热量, 日落后反向运输, 由大气向地面输送热量。在典型降水天里地热流量全天为负值, 土壤从深层向地表释放热量。

4) 无论秋、冬季晴天还是阴天, 地表和浅层土壤温度都表现为准正弦曲线。土壤温度的活动层基本在10 cm土壤层内, 10 cm以下土壤温度几乎无日变化特征, 土壤温度变化不仅受太阳辐射影响, 而且还受热量传导引起的时间滞后效应影响, 各层土壤温度峰(谷)值出现的时间随着土层厚度增加而延迟, 雨天时地面和浅层土壤温度呈下降趋势。各层土壤温度不仅跟天气状况有关, 晴天各层地温要高于阴天, 还跟季节变化相关, 秋季各层土壤温度高于冬季。

致谢: 广东省惠州市气象局、龙门县气象局同仁对观测的支持与协助。

#### 参考文献:

[1] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用—从 HEIFE 到 IMGASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280 - 294.

- [2] 胡隐樵, 高由禧, 王介民. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. 高原气象, 1994, 13(3): 225 - 236.
- [3] 张强, 黄荣辉. 西北干旱区陆 - 气相互作用试验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 27(5): 673 - 679.
- [4] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245 - 254.
- [5] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜. 内蒙古半干旱草地 - 土壤 - 植被 - 大气相互作用 (IMGASS) 综合研究 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 295 - 306.
- [6] 王介民, 邱华盛. 中日合作亚洲季风实验—青藏高原实验 (GAME-Tibet) [J]. 中国科学院院刊, 2000, 15(5): 386 - 388.
- [7] 李跃清, 刘辉志. 高山草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 2009, 33(5): 1003 - 1014.
- [8] 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原大气科学实验进展 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 756 - 772.
- [9] 李国平, 段廷扬. 青藏高原西部的地面热源强度及地面热量平衡 [J]. 地理科学, 2003, 23(1): 13 - 18.
- [10] 李振朝, 韦志刚, 文军. 黄土高原典型源区冬小麦地表辐射和能量平衡特征 [J]. 气候与环境研究, 2008, 13(6): 751 - 758.
- [11] 韦志刚, 文军, 吕世华. 黄土高原陆 - 气相互作用预试验及地表能量平衡特征 [J]. 高原气象, 2005, 24(5): 494 - 497.
- [12] 刘远永, 文军, 韦志刚. 黄土高原源区地表辐射和热量平衡观测与分析 [J]. 高原气象, 2007, 26(5): 928 - 937.
- [13] 张雁. 淮河流域能量与水分循环试验和研究 (HUBEX) 项目进展 [J]. 气象科技, 2000, 28(1): 11 - 15.
- [14] 胡国权, 丁一汇. HUBEX 试验期间不同地面的能量收支研究 [J]. 气候与环境研究, 2001, 6(2): 228 - 233.
- [15] 邓雪娇, 毕雪岩, 吴兑. 广州番禺地区草地陆气相互作用观测研究 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 59 - 66.
- [16] 邓雪娇, 李春晖, 毕雪岩. 南海季风建立前后珠江三角洲的陆气热量交换和热力边界层结构特征 [J]. 气象学报, 2007, 65(2): 280 - 292.
- [17] 郭晓峰, 康凌等. 华南农田下垫面地气交换和能量收支的观测研究 [J]. 大气科学, 2006, 30(3): 453 - 463.
- [18] WEBB E K, PEARMAN G I, LEUNING R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106: 85 - 100.