

文章编号:1006-2467(2019)08-0891-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.08.001

上海地区夏季地表热通量特征及其影响因素

陆一凡¹, 李 勇¹, SHIGETOSHI Ipposhi², YASUMITSU Nomura², 王如竹¹

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240;

2. 三菱电机公司 先进技术研发中心, 兵库县 661-8661, 日本)

摘 要: 通过土壤温度预报校正(TDEC)法验证了地表下 5 mm 处测量土壤热通量的准确性,并以此代表地表热通量.总结了上海地区 3 种典型日(晴天、多云、雨天)地表下 5 mm 处土壤热通量的日变化情况,并通过控制变量法综合分析不同因素(太阳辐射量、土壤含水量、云量等)对土壤热通量的影响.结果表明:土壤热通量的波动晴天时最剧烈,波动范围为 $-23.62 \sim 111.81 \text{ W/m}^2$;随着土壤深度的递减,土壤热通量在多云和雨天的波动范围依次减小;未下雨时太阳辐射量与土壤热通量之间的相关性较强($R^2 > 0.74$);土壤热通量的波动范围随土壤含水量的增加而缩小;在不同典型日,土壤热通量受到不同因素的影响.

关键词: 地表热通量; 太阳辐射量; 土壤含水量; 土壤温度预报校正法; 典型日

中图分类号: P 422.4

文献标志码: A

Characteristics of Surface Heat Flux in Shanghai During Summer and Its Influencing Factors

LU Yifan¹, LI Yong¹, SHIGETOSHI Ipposhi², YASUMITSU Nomura², WANG Ruzhu¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, Hyogo 661-8661, Japan)

Abstract: The test accuracy of soil heat flux at 5 mm is verified through thermal diffusion equation-correction (TDEC) method, which can represent the surface heat flux. Meanwhile, considering different factors (solar radiation, soil moisture content and cloud cover, etc.), the diurnal variations of heat flux on three kinds of typical days (clear, cloudy and rainy days) are summarized in Shanghai. The influence of different factors on soil heat flux at 5 mm and the principles are comprehensively analyzed through variable control approaches. The results show that soil heat flux at 5 mm obviously fluctuates on clear days, from -23.62 W/m^2 to 111.81 W/m^2 . The fluctuation range decreases with the decrease of soil depth on cloudy and rainy days. The correlation ($R^2 > 0.74$) between solar radiation and soil heat flux is strong on days without rain. The fluctuation range of soil heat flux is reduced by the increase of soil moisture content. Soil heat flux of different typical days is mostly affected by different factors.

Key words: surface heat flux; solar radiation; soil moisture content; thermal diffusion equation-correction (TDEC) method; typical days

收稿日期:2018-03-09

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51561145012)

作者简介:陆一凡(1993-),男,江苏省海门市人,硕士生,主要研究方向为地源热泵及其与微气候的关系.

通信作者:李 勇,男,副教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34206056;E-mail:liyo@sjtu.edu.cn.

地源热泵技术是一种清洁的、可再生新能源技术,由于能源效率高被广泛地应用于城市建筑的供暖制冷系统.地源热泵系统在实际运行过程中由于产生的与土壤之间的热交换不平衡,致使出现地下热堆积以及换热效率下降的现象^[1].地表土壤热通量作为地表能量平衡的重要组成部分,是表征地面-大气能量交换的重要物理量^[2],对其进行深入研究将有助于了解地面-大气之间热量传递的过程,对进一步研究埋管与地表间的换热特性有着重要意义.

目前,地表土壤热通量主要通过实验测量或理论计算的方法得到.在实验测量方面,一般用地表下某一深度埋设的土壤热通量板或三针热脉冲探头直接测量土壤热通量.Heitman等^[3]利用三针热脉冲探头测量浅层(1~6 cm)土壤热通量,发现由于存在线性热源,相邻探头之间互相干扰而导致的测量误差在雨后尤为突出.Lu等^[4]分别利用热通量板和三针热脉冲探头测量北京地区不同深度的土壤热通量,发现利用热通量板测量时,为使所测值可以更好地代表地表土壤热通量,土壤热通量板必须埋在浅层土壤中(如:深度为1 cm).但是,由于浅层土壤水分的垂直移动过快,导致土壤热通量被低估.同时,为了避免太阳辐射等干扰,热通量板一般有一定的埋深(至少是地表下1 cm)^[2,5].在理论计算方面,一般结合观测资料中土壤的多层温度和湿度推算得到地表土壤热通量^[6].土壤热通量的计算方法主要有基于土壤温湿资料的一维热传导方程(TDE)法^[7-10]、谐波分析法^[11]和耦合热传导-对流法^[12].有研究发现土壤温度预报校正(TDEC)法的估算结果在热通量的方向及相位上均与实测结果相差很小,与土壤温度的垂直梯度有很好的线性关系^[2,5,13].该方法最大的优点是不需要事先准确地给定热传导率或热扩散率,对热传导率及土壤温度不敏感,故利用TDEC法计算得到的土壤热通量与实际情况大致相符.

基于上述研究,本文通过TDEC法验证地表下5 mm处利用热通量板测量土壤热通量的准确性,并研究在上海夏季气候条件、垫面为裸土的情况下,3种典型日(晴天、多云、雨天)地表土壤热通量的日变化规律及不同因素(太阳辐射量、土壤含水量、环境湿度、环境温度和云量)对其的影响,以期为研究不同天气条件下的地表土壤热通量提供一定的参考依据.

1 数据与方法

1.1 数据获取

数据采集区位于上海交通大学某实验楼旁,检

测装置安装于3 m×3 m区域的裸土下方.土壤温度和土壤含水量共分3层进行观测,其深度分别为5、45和300 mm;采样频率为30 s;观测仪器分别为DS18B20数字温度传感器和FDR型自动土壤水分传感器,测量精度分别为±0.5℃和±3%;实验楼设有自动气象站,其观测项目包括太阳辐射量、风速、环境温度及环境湿度,采样频率为10 min;云量数据来源于气象网站.为了比较不同天气条件下的地表土壤热通量(G_{sur}),于2017年6月内挑选不同典型日进行研究.

1.2 数据处理与验证

1.2.1 土壤热通量板直接测量 使用HF-1型热通量板测量土壤热通量(G),埋深分别为5、45和300 mm,测量精度为满量程的±5%.根据热电效应原理,将热通量板上下表面的温度差转换成电势差信号,通过傅里叶定律计算得到

$$G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda E}{\delta C'} = EC \quad (1)$$

式中: x 为传热方向上的距离; λ 为热通量板导热系数; T 为土壤温度; δ 为热通量板厚度; C' 为热电偶系数; E 为电势差,电势差信号由Keithley 2700数据采集器/多路综合测试系统采集; C 为热通量板系数, $C = \lambda/(\delta C')$.

1.2.2 TDEC法验证 土壤一维热传导方程为

$$\frac{\rho_s c_s \partial T}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial z} \quad (2)$$

$$G = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

式中: t 为时间; z 为土壤深度,向下为正; $\rho_s c_s$ 为土壤体积热容量; λ_s 为土壤导热系数; G 向下为正.

对式(2)进行积分可得

$$G(z) = G(z_{\text{ref}}) + \int_{z_{\text{ref}}}^z \frac{\rho_s c_s \partial T(z)}{\partial t} dz \quad (4)$$

式中: $G(z_{\text{ref}})$ 为任一参考位置 z_{ref} 处的 G ; $T(z)$ 为土壤温度廓线.若 $G(z_{\text{ref}})$ 、 $\rho_s c_s$ 和 $T(z)$ 均已知,则可以通过式(4)计算 G_{sur} .其中, $\rho_s c_s$ 可通过下式计算得到^[14]:

$$\rho_s c_s = \rho_{\text{dry}} c_{\text{dry}} + \rho_w c_w \theta \quad (5)$$

$$\rho_{\text{dry}} c_{\text{dry}} \approx 2.1(1 - \theta_{\text{sat}}) (\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})) \quad (6)$$

$$\rho_w c_w \approx 4.2 (\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})) \quad (7)$$

式中: θ 为土壤含水量; θ_{sat} 为饱和土壤含水量,此处取0.451^[7]; $\rho_{\text{dry}} c_{\text{dry}}$ 为干燥土壤的体积热容量; $\rho_w c_w$ 为液态水的体积热容量.

若给定 $T(z)$,则可通过式(5)~(7)计算出任一深度处的 G .阳坤等^[15]假设土壤热传导系数为常数,由传热方程求得土壤温度廓线,将实际温度与观

测温度的偏差线性插值到各计算节点,得到各节点的温度偏差,再叠加于由热扩散方程求得的温度值,进而得到最终的温度廓线。

2 结果分析

2.1 地表热通量测试方法的准确性验证

利用 TDEC 法计算 G 时,为简便起见,文献[16]对温度进行线性或三次样条插值。本文对 TDEC 法进行以下简化:由于浅层土壤物理性质均一、密度均匀,不同深度土壤的体积热容量、土壤含水量及土壤温度可通过线性插值得到,故式(4)可以简化为

$$G(z) = G(z_{ref}) + \frac{\rho_s c_s \Delta z [\overline{T(t_2)} - \overline{T(t_1)}]}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

式中: $z_{ref}=45\text{ mm}$; $(t_2 - t_1)$ 为两次测量的时间差; $[\overline{T(t_2)} - \overline{T(t_1)}]$ 为两次测量的土壤平均温度差,以所求深度到任一参考深度的中间值代替土壤平均温度。下文提到的 G 和 T 均为 30 min 时的平均值。

考虑到水分对土壤热物性的影响以及不同典型日天气条件的变化,参考天气学标准^[17],以日照时数、降雨量和云量作为划分依据,选取 3 种不同的典型日,选取标准如表 1 所示。

根据标准选取 3 种不同典型日(晴天、多云和雨天)的数据计算 G 。典型日的天气情况如表 2 所示。其中, \overline{W} 为日均太阳辐射量。

图 1 所示为 3 种典型日在地表下 5 mm 处 G 的 TDEC 法计算值(G_{ca})与热通量板实测值(G_{mea})的散点图。由图 1 可知,不同典型日 G_{ca} 与 G_{mea} 均具有良好的线性关系, R^2 分别达到了 $0.91, 0.84$ 和 0.88 。

图 2 所示为 3 种典型日在地表下 5 mm 处 G_{ca}

表 1 典型日的选取标准
Tab. 1 The selection standard of typical days

典型日	日照时数/h	降雨量/mm	云量/成
晴天	≥ 9.0	0.0	$\leq 2/8$
多云	2.5-9.0	0.0	3/8~7/8
雨天	/	>0.0	$\geq 7/8$

表 2 典型日的天气情况
Tab. 2 The weather condition on typical days

日期	类别	$\overline{W}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	降雨量/mm	云量/成
06-01	多云	147.08	0.0	7/8
06-10	雨天	50.07	62.3	8/8
06-17	晴天	319.80	0.0	1/8

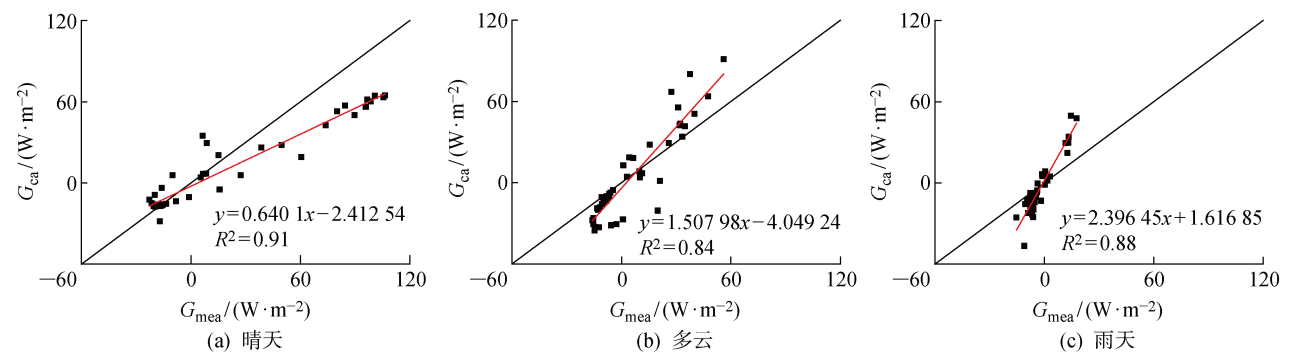


图 1 G_{ca} 与 G_{mea} 的分布 ($z=5\text{ mm}$)
Fig. 1 Distribution of G_{ca} and G_{mea} ($z=5\text{ mm}$)

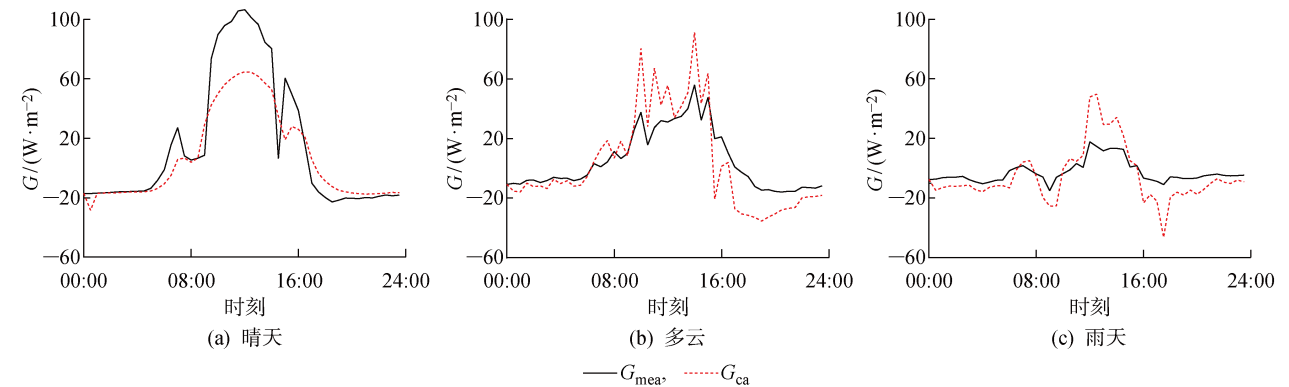


图 2 G_{ca} 与 G_{mea} 的日变化情况 ($z=5\text{ mm}$)
Fig. 2 Daily variation of G_{ca} and G_{mea} ($z=5\text{ mm}$)

与 G_{mcn} 的日变化情况. 由图 2 可知, 不同典型日 G_{cn} 和 G_{mcn} 在热通量的方向及相位上有较好的一致性, 某些时间段中尺度较小的波动也较为吻合, 这与文献[2]中的研究结果一致. 总体而言, 以上结果说明在地表下 5 mm 处利用热通量板测试 G 具有一定的准确性.

2.2 典型日土壤热通量的比较

由于受天气影响较大, 浅层 G 波动明显, 能较好地反映 G_{sur} 的变化情况, 故本文以地表下 5 mm 处的 G 代表 G_{sur} 研究分析影响其日变化规律的因素.

晴天时, 不同深度 G 的日变化情况如图 3(a) 所示. 由图 3(a) 可见: G_{sur} 在 06:00 后为正值, 土壤开始吸热; 由于露水的蒸发带走了土壤的一部分热量, 07:00 后 G_{sur} 出现明显的骤降; 09:00 后 G_{sur} 开始回

升; 在 12:00 时达到峰值后开始下降; 15:00 左右 G_{sur} 再次出现明显的骤降, 这可能是由于太阳高度角发生变化, 导致周围建筑物对测试土壤有了一定的遮挡, 测试土壤接收到的太阳辐射量(W)骤然减小, 土壤中的热量向上传递, 补充地表损失的热量, 随着地表热量的快速恢复, 环境温度依然大于土壤温度, 热量再次向土壤内部传递; 17:00 后 G_{sur} 变为负值, 土壤开始散热; 夜间 G_{sur} 变化较小, 最小值出现在 18:00~24:00 之间. 随着深度的增加, G 的波动范围逐渐减小, 变化趋于平缓; 地表下 5 mm 处 G 的波动最剧烈, 变化范围为 $-23.62 \sim 111.81 \text{ W/m}^2$; 地表下 45 mm 处 G 的变化范围次之; 地表下 300 mm 处 G 的变化范围最小.

如图 3(b) 所示, 多云天 G 的整体变化趋势与晴

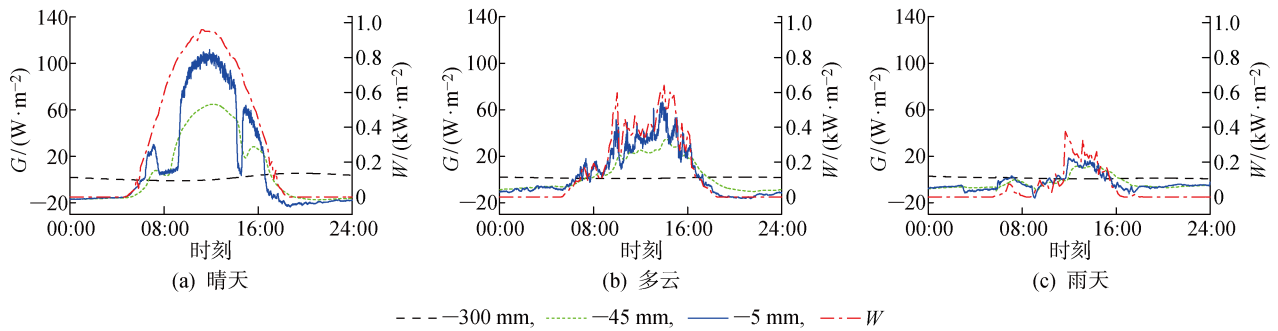


图 3 典型日 G 及 W 的日变化情况
Fig. 3 Daily variation of G and W on typical days

天类似. 由于多云天太阳辐射频繁地变化, G_{sur} 在日间出现明显的波动. 随着太阳辐射量对 G_{sur} 影响的降低, 各深度的 G 波动范围都有所减小, G_{sur} 的波动范围减小为 $-16.42 \sim 66.78 \text{ W/m}^2$. 雨天时 G 的整体变化趋势如图 3(c) 所示. 由于受到降雨的影响, 太阳辐射量昼夜变化幅值较小, G_{sur} 的波动范围减小为 $-15.88 \sim 18.56 \text{ W/m}^2$, 约有 80% 以上的时间土壤处于散热状态. 除此之外, 相比于较深层 (300 mm), G 在浅层 (5 mm) 时受天气条件变化的影响更大.

2.3 地表热通量与其影响因素的关系

2.3.1 太阳辐射量 由图 3 可知, G_{sur} 与 W 变化趋势的一致性较好, 各峰值出现的时间一一对应; 而不同典型日 W 的变化规律有很大差异, 对 G_{sur} 的影响程度也不同. 图 4 所示为利用线性拟合的方法对归一化参数 W^* 和 G_{sur}^* 相关性的分析结果. 归一化公式如下:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{9}$$

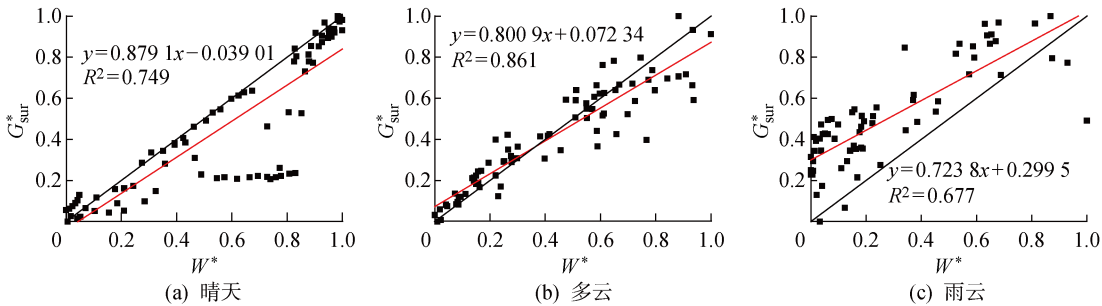


图 4 典型日 W^* 与 G_{sur}^* 的散点分布
Fig. 4 Distribution of W^* and G_{sur}^* on typical days

由图 4 可见:晴天和多云时,两者相关性较高, R^2 分别达到 0.749 和 0.861;雨天时,两者相关性较弱.说明晴天和多云时, G_{sur} 的变化受太阳辐射量影响较大.

2.3.2 土壤含水量 不同典型日 θ 的日变化情况如图 5 所示.由图 5 可知:晴天时浅层(5 mm) θ 的日变化趋势呈正弦曲线分布,振幅较小;多云天与晴天有相似的变化规律,但波动范围减小;雨天时 θ 由于降雨而急速增加,并维持在一个较高的水平.相较于其他地区^[18-19],上海地区浅层 θ 的峰值出现得较早,大约在 11:00~12:00,这与文献[17]的研究结果一致.

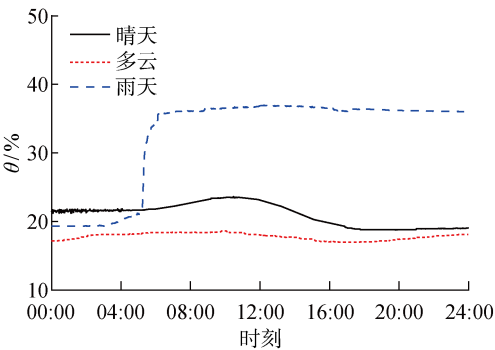


图 5 典型日 5 mm 处 θ 的日变化情况
Fig. 5 Daily variation of θ at 5 mm on typical days

结合图 3 和图 5 可以发现,增加 θ 能够改变土壤热物性,进而影响 G 的传递过程.例如:土壤体积热容量增加致使 G 变化的剧烈程度降低, G_{sur} 的波动范围缩小.除此之外,由于降雨导致环境湿度增大,土壤通过水分蒸发向环境传输的潜热通量减少;同时太阳辐射减少,大气通过从土壤中吸收热量来补充夜间的热量损失,导致 G_{sur} 大部分时间处于负值,说明土壤向环境散热.

2.4 地表热通量及其影响因素的综合分析

为了更清楚地体现各影响因素对 G_{sur} 变化的影响,采用控制变量法逐一分析各影响因素.数据范围选取 6 月 7 日至 6 月 21 日,共 15 天. G_{sur} 的变化情况由地表下 5 mm 处 G 的日变化及其平均值体现, G_{sur} 及其影响因素的日变化情况如图 6 所示,有关天气情况的数据如表 3 所示.

综合分析图 6 和表 3 的数据可以看出,晴天时(7、8、15、16、17 日,15 日部分 G_{sur} 数据缺失),土壤最大吸热通量($G_{\text{d,max}}$)及日均 G_{sur} ($\overline{G_{\text{sur}}}$) 由大至小的排序与 \overline{W} 的排序基本相同,说明在晴天时太阳辐射量是影响 G_{sur} 的主要因素.

多云天时(9、14、18、20 日),考虑到 θ 和环境湿

度等对潜热通量的影响,可分为两类情况进行分析:①晴后多云;②雨后多云.对比 9 日与 18 日的数据(晴后多云),9 日的云量较大,日间增强对太阳辐射的吸收和反射,夜间增强大气逆辐射,补偿土壤夜间散失的热量,导致最大吸热通量和最大散热通量($G_{\text{r,max}}$)都较小.对比 14 日与 20 日数据(雨后多云),14 日的环境湿度较小,雨后 θ 骤增,土壤与空气的湿度梯度大,水分蒸发带走的潜热通量造成了较大的最大散热通量.

6 月 7 日至 6 月 21 日间土壤的温度变化如图 7 所示.结合图 7 与表 3 可以发现,雨天时(10、11、12、13、19、21 日)最大吸热通量和散热通量的排序与日间和夜间 0 mm 与 5 mm 土壤温度的最大差值一致.由此可知雨天时, G_{sur} 主要受土壤温度梯度的影响.

从日均 G_{sur} 的变化情况来看,晴天皆为正值,说明地表从外界接收的热量大于散失的热量;雨天皆为负值,说明地表从外界接收的热量小于散失的热量;晴后阴天皆为正值,与晴天相似;雨后阴天皆为负值,主要是由于刚经过降雨后的地表从散热到吸

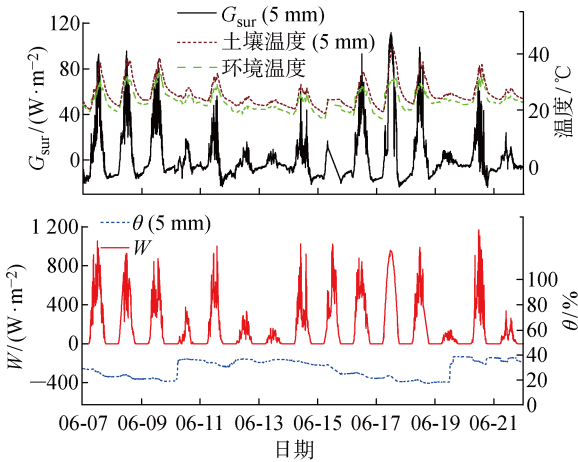


图 6 G_{sur} 及其影响因素的变化
Fig. 6 Variation of G_{sur} and its influencing factors

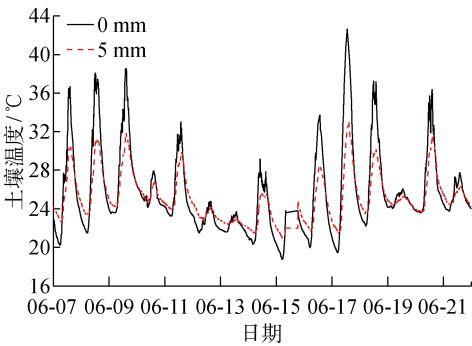


图 7 土壤温度的变化
Fig. 7 Variation of soil temperature

表 3 天气情况数据
Tab.3 Weather condition data

日期	环境温度/℃	环境湿度/%	降雨量/mm	\overline{W} / (W · m ⁻²)	云量/成	\overline{G}_{sur} / (W · m ⁻²)	$G_{d,max}$ / (W · m ⁻²)	$G_{r,max}$ / (W · m ⁻²)
06-07	23.3	67.2	0.0	242.66	6/8	5.19	92.92	-19.35
06-08	24.4	70.1	0.0	229.22	3/8	9.10	95.44	-16.31
06-09	26.8	77.8	0.0	187.08	7/8	10.59	85.78	-12.97
06-10	24.1	96.3	62.3	50.07	8/8	-2.94	18.56	-15.88
06-11	24.5	81.6	4.4	173.33	7/8	-1.58	56.03	-23.32
06-12	21.7	93.0	2.8	59.75	8/8	-4.86	15.93	-16.39
06-13	21.6	97.8	8.5	29.92	8/8	-2.90	9.41	-8.55
06-14	22.3	80.6	0.0	153.16	6/8	-2.65	60.23	-21.33
06-15	22.6	70.4	0.0	201.16	6/8	—	—	-20.31
06-16	23.1	68.3	0.0	220.37	7/8	7.19	93.23	-19.27
06-17	22.4	67.3	0.0	319.80	1/8	14.90	111.81	-23.62
06-18	25.0	81.4	0.0	176.19	6/8	7.28	98.81	-17.90
06-19	24.2	95.9	12.2	33.34	8/8	-1.70	8.43	-10.41
06-20	25.9	87.3	0.0	193.37	7/8	-2.37	67.46	-23.84
06-21	24.6	96.6	7.9	50.43	7/8	-2.22	23.81	-10.42

热需要一段恢复期。

3 结论

通过 2017 年 6 月 1 日至 6 月 30 日的多层土壤温湿、热通量观测资料,分析了上海地区夏季 G_{sur} 的变化特征及其影响因素,所得主要结论如下:

(1) 地表下 5 mm 处 G_{ca} 和 G_{mea} 有良好的线性关系,同时在相位及变化方向上有较强的一致性,证明了地表下 5 mm 处测试 G 的准确性。

(2) 不同典型日 G_{sur} 的变化规律有明显差异,晴天时 G_{sur} 波动最剧烈,变化范围为-23.62~111.81 W/m²,且随着土壤深度递减,多云和雨天时 G_{sur} 波动范围依次减小;晴天和多云时, G_{sur} 与 W 的相关性较好,雨天时 θ 增加并维持在一个较高水平, G_{sur} 的波动范围缩小。

(3) 晴天 G_{sur} 日间主要受 W 的影响,夜间主要受环境温度的影响;晴后多云主要受云量影响;雨后多云主要受环境湿度和 θ 影响;雨天主要受土壤温度梯度的影响。

本研究尚需更长的时间周期对数据及其结论进行验证.此外,还需要进一步考虑不同城市下垫面 G_{sur} 的时空变化特征。

参考文献:

[1] 席加,秦祥熙,李少华,等. 杭州地区大型地源热泵系统全年运行性能研究[J]. 制冷技术, 2017, 37(1): 48-54.
XI Jia, QIN Xiangxi, LI Shaohua, *et al.*. Research on annual operation performance of large scale ground source heat pumps in Hangzhou [J]. **Chinese Journal of Refrigeration Technology**, 2017, 37(1): 48-54.

[2] 冯璐,仲雷,马耀明,等. 基于土壤温湿度观测资料估算藏北高原地区土壤热通量[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 297-308.
FENG Lu, ZHONG Lei, MA Yaoming, *et al.*. Estimation of soil heat flux over the Northern Tibetan Plateau based on in-situ soil temperature and moisture data [J]. **Plateau Meteorology**, 2016, 35(2): 297-308.

[3] HEITMAN J L, HORTON R, SAUER T J, *et al.*. Latent heat in soil heat flux measurements [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2010, 150(7/8): 1147-1153.

[4] LU S, MA C M, MENG P, *et al.*. Experimental investigation of subsurface soil water evaporation on soil heat flux plate measurement [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2016, 93: 433-437.

[5] 李娜娜,贾立,卢静. 复杂下垫面地表土壤热通量算法改进:以黑河流域为例[J]. 中国科学:地球科学,

- 2015, 45(4): 494-507.
- LI Nana, JIA Li, LU Jing. An improved algorithm to estimate the surface soil heat flux over a heterogeneous surface: A case study in the Heihe River Basin [J]. **Science China: Earth Sciences**, 2015, 45(4): 494-507.
- [6] 左金清, 王介民, 黄建平, 等. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响[J]. **高原气象**, 2010, 29(4): 840-848.
- ZUO Jinqing, WANG Jiemin, HUANG Jianping, *et al.* Estimation of ground heat flux for a semiarid grassland and its impact on the surface energy budget [J]. **Plateau Meteorology**, 2010, 29(4): 840-848.
- [7] MURRAY T, VERHOEF A. Moving towards a more mechanistic approach in the determination of soil heat flux from remote measurements. I. A universal approach to calculate thermal inertia [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2007, 147(1/2): 80-87.
- [8] WANG Z H, BOU-ZEID E. A novel approach for the estimation of soil ground heat flux [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2012, 154/155: 214-221.
- [9] ARIAS-PENAS D, CASTRO-GARCÍA M P, REY-RONCO M A, *et al.* Determining the thermal diffusivity of the ground based on subsoil temperatures: Preliminary results of an experimental geothermal borehole study QThermie-UNIOVI [J]. **Geothermics**, 2015, 54: 35-42.
- [10] BENSE V F, READ T, VERHOEF A. Using distributed temperature sensing to monitor field scale dynamics of ground surface temperature and related substrate heat flux [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2016, 220: 207-215.
- [11] HORTON R, WIERENGA P J, NIELSEN D R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface [J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1983, 47: 25-32.
- [12] 高志球, 卞林根, 张雅斌, 等. 土壤热传导方程解析解和那曲地区土壤热扩散率研究[J]. **气象学报**, 2002, 60(3): 352-360.
- GAO Zhiqiu, BIAN Linggen, ZHANG Yabin, *et al.* Study on analytical resolution to soil thermal conductive equation and soil thermal diffusivity over Nagqu area [J]. **Acta Meteorologica Sinica**, 2002, 60(3): 352-360.
- [13] 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究[J]. **地球科学进展**, 2013, 28(8): 875-889.
- XU Ziwei, LIU Shaomin, XU Tongren, *et al.* The observation and calculation method of soil heat flux and its impact on the energy balance closure [J]. **Advances in Earth Science**, 2013, 28(8): 875-889.
- [14] SELLERS P J, RANDALL D A, COLLATZ G J, *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. I. Model formulation [J]. **Journal of Climate**, 1996, 9(4): 676-705.
- [15] 阳坤, 王介民. 一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法[J]. **中国科学(D辑: 地球科学)**, 2008, 38(2): 243-250.
- YANG Kun, WANG Jiemin. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data [J]. **Science in China (Series D: Earth Sciences)**, 2008, 38(2): 243-250.
- [16] OGEE J, LAMAUD E, BRUNET Y, *et al.* A long-term study of soil heat flux under a forest canopy [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2001, 106(3): 173-186.
- [17] 张皓, 李军, 孙国武, 等. 上海地区土壤水分的时间变化特征分析[J]. **高原气象**, 2008, 27(增刊): 190-195.
- ZHANG Hao, LI Jun, SUN Guowu, *et al.* Characteristics of temporal variability of soil moisture in Shanghai [J]. **Plateau Meteorology**, 2008, 27(sup): 190-195.
- [18] 张婕, 张文煜, 王晓妍, 等. 半干旱地区土壤湿度变化特征[J]. **兰州大学学报(自然科学版)**, 2012, 48(2): 57-61.
- ZHANG Jie, ZHANG Wenyu, WANG Xiaoyan, *et al.* Changes characteristics of the soil moisture in semiarid areas [J]. **Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)**, 2012, 48(2): 57-61.
- [19] 王修信, 付洁, 张晓朋, 等. 喀斯特地区气象因素日变化对不同深度土壤湿度的影响分析[J]. **广西物理**, 2012, 33(4): 10-13.
- WANG Xiuxin, FU Jie, ZHANG Xiaopeng, *et al.* Effects of diurnal variation of meteorological factors on different depth of soil moisture in Karst regions [J]. **Guangxi Physics**, 2012, 33(4): 10-13.

(本文编辑:石易文)