

热脉冲技术测定土壤热通量的原理和方法

陆森¹, 张劲松¹, 孟平¹, 孙世友²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北 石家庄 050051)

关键词: 土壤热通量; 热脉冲; 热通量板

中图分类号: S125.8

文献标识码: A

Soil Heat Flux Measurement Based on Heat Pulse Method

LU Sen¹, ZHANG Jin-song¹, MENG Ping¹, SUN Shi-you²

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry,

Beijing 100091, China; 2. Institute of Agro-resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture

and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract: The principles and methods of measuring soil heat flux with three-needle heat pulse sensor are introduced based on the theory of thermophysics. The soil heat flux plate method was employed to validate the heat pulse method. The results indicated that the soil heat flux calculated by the heat pulse method generally agreed well with the soil heat flux plate method. Compared with the soil heat flux plate, the bias of heat pulse method was $0.674 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. It proved that the heat pulse method was able to provide accurate soil heat flux measurement. Analysis on the phase of soil heat flux showed that the time of the maximum value occurred had 1 hour's hysteresis for the soil temperature compared to the soil heat flux. Due to the advantage of lower soil disturbance and contact resistance, the heat pulse method will have a wide prospect.

Key Words: soil heat flux; heat pulse; soil heat flux plate

土壤热通量是地表能量平衡的重要组成部分,是研究陆-气能量交换的主要物理量。在农林业研究上,大部分土壤热通量研究主要关注于土壤热通量对种子萌发、植物根系生长、小气候效应、土壤碳氮循环过程的影响^[1-3];在地球物理学和土木工程学研究上,重点研究土壤热通量在大地热流、埋地管道、地铁工程等方面的应用^[4-5]。传统的土壤热通量测定方法主要是土壤热通量板直接测定法,但对土壤的扰动比较大。由于存在一定的厚度,土壤热通量板其自身导热材料的传热性能和土壤会存在差异,导致热通量板埋设处的热流场与真实热流场相比存在偏差。此外,较大的通量板面积会阻断土壤水流,因此热通量

板只能埋设在土表以下一定深度,而且较大的表面积还会引起通量板与土壤之间的热接触阻力问题。近年来,随着热脉冲技术的发展,热脉冲技术被广泛应用于土壤热导率、树木茎流量的研究^[6-7]。本文将热脉冲技术与土壤热通量研究结合起来,探索研究热脉冲技术在土壤热通量计算过程的应用,为农林气象、土木工程等方面的研究提供依据。

1 研究方法

对于均一初始温度下的各向同性均质土壤,如果加热源为无限长的线形热源,柱坐标下的热传导方程为^[8-9]:

收稿日期: 2012-07-13

基金项目: 北京市自然科学基金(6133035); 国家自然科学基金(41371240)

作者简介: 陆森(1982-),男,江苏人,副研究员. E-mail: lusen@caf.ac.cn

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

式中: T 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$); t 为时间(s); α 为土壤热扩散系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); r 为径向距离(m)。

对于线形热源为一定加热时长 t_0 (s) 的热脉冲来说,式(1)的解为^[8-9]:

$$\Delta T(r, t) = -\frac{Q'}{4\pi\alpha} \text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4\alpha t} \right) \quad 0 < t < t_0 \quad (2)$$

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q'}{4\pi\alpha} \left\{ \text{Ei} \left[\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)} \right] - \text{Ei} \left[\frac{-r^2}{4\alpha t} \right] \right\} \quad t > t_0 \quad (3)$$

式中: ΔT 为温度变化值($^{\circ}\text{C}$); Q' 为单位时间内的线形热源强度($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 定义为 $Q' = q' / \rho c$, q' 为单位时间内单位长度线形热源所释放的热量($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); ρc 为土壤的容积热容量($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); $\text{Ei}(x)$ 为指数积分, x 是被积函数。

本文选用的热脉冲探头为三针式探头^[10-12], 该探头既可只使用中间加热针并完成单针法测定, 也可以使用全部三根针并完成三针法测定。一般地, 单针法只能得到热导率 1 个参数, 而三针法可同时得到热导率、热扩散系数、热容量 3 个参数。考虑到单针计算法加热量比较低, 且对土壤水分对流的影响较小^[13-15], 而本文的热通量计算只需要热导率 1 个参数, 故本文选用单针计算法进行热脉冲测定。在单针法测定时, 中间加热针用于热脉冲放热, 两边的温度感应探针仅用于记录环境温度的变化以计算温度梯度。

在探针加热时期, 当 $r^2/(4\alpha t)$ 值较小时, 式(2)可近似为:

$$\Delta T \cong q' / (4\pi\lambda) \ln(t) + b \quad (4)$$

式中: λ 为土壤热导率($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); b 为不依赖于时间 t 的系数。当试验获取中间加热针温度变化值 ΔT 与时间的系列数据后, 将 ΔT 与时间对数 $\ln(t)$ 做直线回归, 利用斜率即可获得 λ 。需要指出的是, 由于初始加热时间的温度值受到探针材料热特性的影响, 在通常的计算过程中需要将初始(5~10 s)的几组数据去掉。加热后期记录的数据较好地反映了探针周围测定介质的热特性^[13]。

土壤热通量利用 Fourier 定律计算:

$$J_h = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

式中: J_h 为计算深度的热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);

$\partial T/\partial z$ 为温度梯度, 可利用上下感应探针的温差和探针间距计算获取。

通过以上方法, 土壤热通量可利用热脉冲技术方便地计算出来。

2 试验概况

为了检验热脉冲方法计算土壤热通量的可靠性, 进行了野外试验测试。试验选择在中国农业大学西校区(位于北京市海淀区)的大型土壤蒸渗仪中进行, 该蒸渗仪的规格为长宽高均 2 m, 下界面自由排水, 土壤质地为砂壤。本文使用的热脉冲探头为三针式探头, 其中, 中间针为加热针, 两侧探针为温度感应探针, 每个探针的规格为长度 4 cm, 探针直径 1.3 mm。在试验之前, 利用已知热容量的 5% 浓度琼脂材料进行探头标定以获取准确探针间距^[10]。试验时, 将蒸渗仪土壤挖 1 个深约 15 cm 的剖面, 将三针热脉冲探头垂直插入土壤剖面, 保证中间探针的土壤深度为 10 cm, 中间探针的上下各 6 mm 处为两侧感应探针。

独立检验使用最通用的土壤热通量板(HFP01, Hukseflux Thermal Sensors, 荷兰), 在距离热脉冲探头水平距离约 10 cm 处安装, 其埋测土深也为 10 cm。此外, 在试验地的 10 cm 深度处还埋设了土壤水分探头(ECH2O, Decagon Devices, USA) 监测水分变化情况。试验于 2011 年 10 月进行, 热脉冲探头数据采集、热通量板数据采集、加热电流控制均通过数据采集器(CR23X, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) 完成。热脉冲测定每小时进行 1 次, 从加热前背景温度记录至探针冷却, 整个过程记录 3 min 的温度数据, 数据采集间隔为 1 s。在非加热时期, 感应探针的温度测定间隔为 30 min, 以用于计算温度梯度。

3 结果与分析

3.1 10 cm 深处土壤热通量的日变化

从图 1 可以看出: 夜晚的热通量均为负值, 这表明夜晚热通量的方向为垂直向上, 土壤处于放热状态, 此时的土壤温度高于气温, 深层土壤的热量不断向上传输, 通过热传导的方式到达地表, 并完成与大气的热量交换。在白天, 随着太阳辐射的逐渐增大, 在上午 10:00 左右, 10 cm 深处的土壤热通量为 0; 而之后的土壤热通量数值均为正值, 这说明 10 cm 深度的土壤热通量方向已变为向下传输, 土壤处于

增温吸热状态。在下午 15:00 时刻,10 cm 深度的土壤热通量达到峰值,为 $26.675 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;之后随着太阳辐射的逐渐下降,土壤热通量数值也在不断下降,并在 18:30 形成方向逆转,之后的夜间土壤热通量数值始终为负值,说明在夜间土壤始终维持着向上的热量传输。

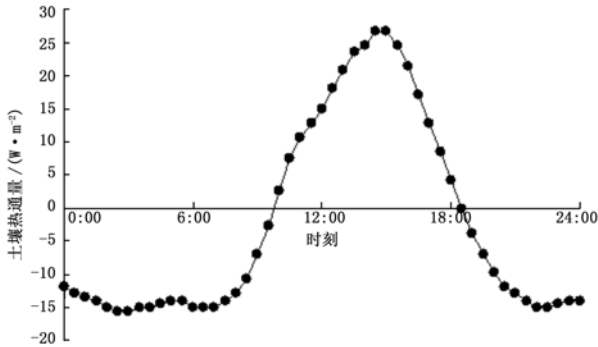


图1 2011年10月12日典型晴天日10 cm深处土壤热通量的日变化规律

3.2 10 cm 深处土壤温度的日变化规律

图2表示:10 cm 深处地温的日变化趋势大约与图1相似,夜间的温度较低,白天的地温较高,10月12日的最高地温峰值为 $20.635 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最低地温峰值为 $16.949 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在这里,主要关注达到峰值时间相位的变化。10 cm 深处地温达到最高值的时刻为 16:00,而太阳辐射一般在正午时分左右达到最大,这主要是由于土壤埋层较深引起的滞后现象^[16]。与之对比的是,10 cm 土壤热通量到达峰值的时刻为 15:00,10 cm 深处地温峰值出现的时间比之滞后约 1 h。

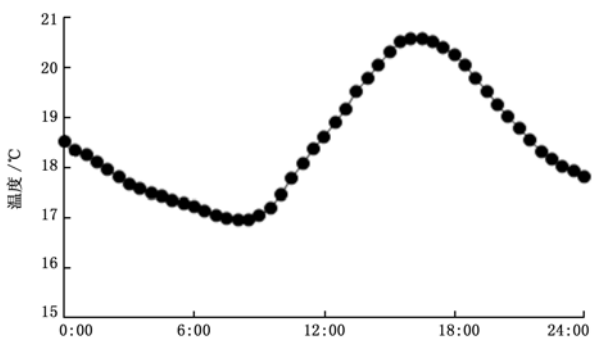


图2 2011年10月12日典型晴天日10 cm深处土壤温度的日变化规律

3.3 热脉冲方法计算热通量与热通量板法的对比

本文利用热脉冲技术计算方法计算了测定时间内的热脉冲法土壤热通量数值,并与热通量板法进行了对比分析(图3)。试验中发现,在10月19日以后,随着气温的逐渐降低,表层地温在清晨会偶尔

出现负值,考虑到对冻土加热存在的相变问题,本文只使用了上冻之前的数据进行对比。

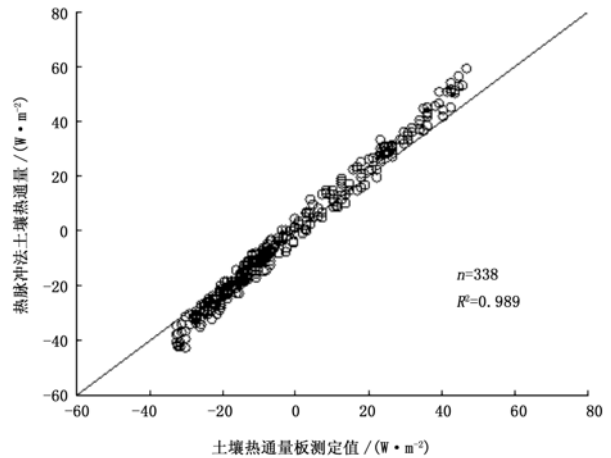


图3 2011年10月9日至17日热脉冲法土壤热通量与热通量板测定值的对比分析

从图3可以看出:测定值散点大都分布在1:1线两侧。与热通量板法测定值进行对比,误差分析表明:热脉冲方法土壤热通量值的标准偏差为 $0.674 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,回归分析的决定系数为 0.989,这表明热脉冲方法可以准确地测定土壤热通量值。由于热脉冲探头体积较小,对土壤的扰动远低于热通量板法,其针式的设计使其对土壤上下水流的影响很小,可应用于表层土壤热通量的测定;此外,热脉冲传感器和土壤之间存在较小的热接触面,可显著降低传感器与土壤接触面的热接触阻力,并增加了热通量测定的精度。

4 结论

(1) 土壤热通量和地温均存在显著的时间变化特征,观测结果表明,10 cm 深度的土壤热通量在 15:00 达到峰值,而同深度的地温达到最高值的时刻为 16:00。10 cm 地温峰值出现的时间比热通量滞后约 1 h,这说明在 10 cm 土深处,向下的土壤热通量还需要加热 1 h 才能使地温达到峰值。

(2) 本文基于热脉冲方法的土壤热通量计算结果表明,热脉冲方法可准确用于土壤热通量的测定,与热通量板法比较的标准偏差为 $0.674 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。考虑到热脉冲技术对土壤水流动场的影响很小,加上热接触阻力较小的优势,该方法可广泛应用。

参考文献:

- [1] 范兴海,黄寿波,傅懋毅,等. 杉—茶间作热量平衡的研究[J]. 林业科学研究, 1996, 9(2):170-175.

- [2] 张劲松,宋兆民,孟 平,等. 银杏-小麦间作系统水热效应的研究[J]. 林业科学研究,2002, 15(4):457-462.
- [3] 王可丽,程国栋,江畅畅,等. 青藏高原那曲地区非均质土壤导热率的变化及土壤温度数值模拟[J]. 冰川冻土,2007, 29(3):470-474.
- [4] 肖 琳,李晓昭,赵晓豹,等. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内实验[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2008, 9(3):241-247.
- [5] 陆 森,任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. 农业工程学报,2009,25(7):13-18.
- [6] 陆 森,任图生,杨 泱,等. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析[J]. 农业工程学报,2010, 26(6):20-25.
- [7] 管 伟,叶 兵,王彦辉,等. 生长季内官厅库区小叶杨单株树干液流密度研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(5):638-643.
- [8] Bristow K L. Thermal conductivity[M]// Dane J H, Topp C. Methods of Soil Analysis; Part. 4. Physical Methods. SSSA Book Series, Madison, WI: SSSA, 2002:1209-1226.
- [9] Kluitenberg G J, Ham J M, Bristow K L. Error analysis of the heat pulse method for measuring the volumetric heat capacity of soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57:1208-1215.
- [10] Ren T, Noborio K, Horton R. Measuring soil water content, electrical conductivity and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63:450-457.
- [11] Ochsner T E, Ren T, Horton R. Simultaneous water content, air-filled porosity, and bulk density measurements with thermo-time domain reflectometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65:1618-1622.
- [12] Lu S, Ren T, Gong Y, *et al.* An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71: 8-14.
- [13] Shiozawa S, Campbell G S. Soil thermal conductivity[J]. Remote Sensing Rev, 1990, 5:301-310.
- [14] Bristow K L, White R D, Kluitenberg G J. Comparison of single and dual-probes for measuring soil thermal properties with transient heating[J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32:447-464.
- [15] Abu-Hamdeh N H. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes[J]. J Agric Engng Res, 2001, 80(2):209-216.
- [16] Horton R, Wierenga P J. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47:14-20.