

# 用土壤温度估算表层土壤导温率与热通量的研究\*

莫兴国 李宏轩 刘苏峡 林忠辉

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

**摘要** 对比研究了6种用土壤温度计算表层土壤导温率的方法结果表明,振幅法、相位法、反正切法、对数法虽参考观测值,计算简单,但结果却不太稳定;谐波法计算过程虽较复杂,但导温率的估算值较稳定,是最可靠的方法之一,利用计算的土壤导温率估算近地表土壤热通量,结果与由温度积分法决定的土壤热通量值非常一致。

**关键词** 土壤导温率 土壤温度 土壤热通量

**Estimation of the soil thermal conductivity and heat flux in near surface layer from soil temperature.** MO Xing-Guo, LI Hong-Xuan, LIU Su-Xia, LIN Zhong-Hui (Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101), *CJEA*, 2002, 10(1):62~64

**Abstract** Six methods of calculating the soil thermal conductivity and the soil heat flux in the soil near surface layer are studied with observation of soil temperature. The amplitude, phase, arctangent, and logarithm require only a few measurements of temperature and their calculations are simple. However, the results are erratic. Numerical and harmonic methods, which use much more temperature measurements, generally provide more reliable results. The estimation of soil heat flux, based on the calculated thermal conductivity, is consistent well with values of heat flux determined with the temperature integral method.

**Key words** Soil thermal conductivity, Soil temperature, Soil heat flux

土壤热通量是地球表面能量平衡的重要分量之一。对于郁闭冠层,日净土壤热通量不超过净辐射的10%~15%<sup>[1]</sup>;对稀疏植被或裸地而言,土壤热通量可高达净辐射的50%。土壤导温率和热容量通常用于估算土壤热通量,土壤导温率常用的计算方法有振幅法、相位法、反正切法、对数法、数值法和谐波法<sup>[3]</sup>,不同方法的前提假设条件不同,所得结果也有一定差异。Horton R.等<sup>[2]</sup>用在实验室测定的土温分析这些方法的可靠性,结果发现数值法和谐波法所得结果可靠性最好;Anne Verhoef等<sup>[4]</sup>对比了除数值法外的其他5种方法,认为振幅法和谐波法能给出最好的结果。本研究采用上述6种较常用方法,用田间有作物覆被状况下的土壤温度观测值估算土壤导温率,并对所得结果进行分析,进一步检验这些方法的可靠性,最后用所得导温率计算土壤热通量,检验计算结果与实测热通量的一致性。

## 1 土壤导温率、土壤热通量计算方法与实验

土壤导温率计算方法。一维均质土壤热传导方程可表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中, $T$ 为温度, $t$ 为时间, $z$ 为深度, $\alpha$ 为土壤导温率,6种导温率计算方法在对式(1)求解的基础上得出,振幅法计算公式为:

$$\alpha = \frac{\omega}{2} \left[ \frac{z_2 - z_1}{\ln A_1 / A_2} \right]^2 \quad (2)$$

式中, $\omega$ 为地球自转角频率; $A_1$ 、 $A_2$ 分别为深度 $z_1$ 、 $z_2$ 的振幅,由4个温度即 $z_1$ 、 $z_2$ 深度的最高和最低温度确定。深度 $z_1$ 、 $z_2$ 处土壤温度最大值出现的时间差 $\delta t = (t_2 - t_1)$ ,则可得相位法计算公式:

$$\alpha = \frac{1}{2\omega} \left[ \frac{z_2 - z_1}{\delta t} \right]^2 \quad (3)$$

式中, $\omega$ 意义同式(2)。反正切法的计算公式为:

\* 国家自然科学基金项目(49890330)和中国科学院地理科学与资源研究所创新项目(CXJ0G-C00-05-01)资助

收稿日期:2000-06-20 改回日期:2000-09-30

$$\alpha = \frac{\omega(z_2 - z_1)}{2 \left\{ \arctan \left[ \frac{(T_1 - T_3)(T_2' - T_2') - (T_2 - T_4)(T_1' - T_3')}{(T_1 - T_3)(T_1' - T_3') - (T_2 - T_4)(T_2' - T_4')} \right] \right\}} \quad (4)$$

式中,  $T_i, T_i'$  ( $i=1, \dots, 4$ ) 分别为  $z_1, z_2$  深度每 6h 测定的土壤温度。根据波的相位, 可得对数法计算公式:

$$\alpha = \left[ 0.012(z_2 - z_1) \left/ \ln \frac{(T_1 - T_3)^2 - (T_2 - T_4)^2}{(T_1' - T_3')^2 - (T_2' - T_4')^2} \right. \right]^2 \quad (5)$$

式中,  $T_i, T_i'$  ( $i=1, \dots, 4$ ) 意义同式(4)。将式(1)进行有限差分离散, 得数值法计算公式:

$$\frac{T_{j+1}^{n+1} - T_j^n}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{j+1}^n - 2T_j^n + T_{j-1}^n}{(\Delta t)^2} \quad (6)$$

其中,  $j$  为深度层数,  $n$  为时步。据式(6)和最小二乘法可得土壤导温率  $\alpha$ 。数值法求土壤导温率需测定 3 个深度的土壤温度, 而以上其他方法只需测定 2 个深度的土壤温度。谐波法计算公式, 假定式(1)边界条件:

$$T(0, t) = \bar{T} + \sum_{n=1}^M C_{0n} \sin(n\omega t + \Phi_{0n}) \quad (7)$$

$$T(\infty, t) = \bar{T} \quad (8)$$

任意深度的土壤温度可分解成:

$$T(z, t) = \bar{T} + \sum_{n=1}^M C_{0n} \exp(-z \sqrt{n\omega/2\alpha}) \sin(n\omega t + \Phi_{0n} - z \sqrt{n\omega/2\alpha}) \quad (9)$$

式中,  $C_{0n}, \Phi_{0n}$  分别为  $n$  阶谐波的振幅和相角。根据式(9)估算土壤导温率  $\alpha$  的方法是给定某一导温率  $\alpha$  值, 计算一  $T$  值, 当计算的  $T$  与实测  $T$  之差小于某一精度时, 该  $\alpha$  即为所求的值。

土壤热通量计算方法。土壤热通量可表示为:

$$G = -\alpha C_m \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)便可得出任意时刻的土壤热通量表达式:

$$G(z, t) = \sum_{n=1}^M \left\{ A_{0n} C_m \sqrt{n\omega\alpha} \exp(-z \sqrt{n\omega/2\alpha}) \sin\left(n\omega t + \Phi_{0n} + \left(\frac{\pi}{4}\right) - z \sqrt{n\omega/2\alpha}\right) \right\} \quad (11)$$

式中,  $C_m$  为土壤体积热容量。温度积分法也可确定土壤热通量  $G$ :

$$G = \frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

式中,  $Q_1, Q_2$  分别为  $t_1, t_2$  时刻的土壤热贮量。对某一时刻时间  $t$ , 土层足够厚, 则:

$$Q = \int_{z_1}^{z_2} C_m T(z) dz \quad (13)$$

于 1994 年夏玉米生长期, 用热敏电阻测定田间沙质壤土的温度, 测定深度分别为 0cm、5cm、10cm、15cm、20cm、30cm、50cm 土层, 每 5min 记录 1 个温度值, 土壤热通量由热通量板测定。

## 2 结果与分析

以 7 月 20 日为例, 用上述 6 种方法计算土壤导温率(见表 1)。振幅法求土壤导温率非常简单, 只需 2 个深度的 4 个温度值。用相位方程求土壤导温率  $\alpha$ , 把  $z_1, z_2$  深度的最高温度对应的时间带入式(3)就可方便求出该层土壤导温率  $\alpha$ 。用反正切法和对数法求得的土壤导温率均与起始时刻的选取有关, 不同起始时刻往往产生不同的导温率。数值法求得的土壤导温率  $\alpha$  与用于计算的温度值个数的多少有密切关系, 使用的个数越多则土壤导温率  $\alpha$  就越接近一稳定值。利用谐波方程求土壤导温率, 首先根据表层温度求出  $C_{0n}, \Phi_{0n}, \bar{T}$  为某一深度的平均土温, 取  $n=6$ , 对某一深度, 给 1 个  $\alpha$  值, 利用式(9)可得到一系列土壤温度, 把它与实测的土温相比, 平方差最小的  $\alpha$  即为所求的导温率。用谐波方程求导温率, 每个深度只取 8 个温度就可得到较稳定的  $\alpha$ 。若每 2h 取 1 值, 即取 12 个温度,  $\alpha$  的结果更稳定, 再增加观测值, 改善效果则不明显。

将 5 种方法(相位法误差太大, 不予考虑)得到的 5cm 深度的土壤热通量  $\alpha$  分别代入式(9)拟合出土壤温度, 并与实测土壤温度相比较, 二者偏差为:

$$dev = \frac{\sum_{n=1}^{288} T_m(n) - T_n(n)}{288} \quad (14)$$

5 种不同方法计算的 5cm 土层土壤温度偏差为振幅法 0.183、反正切法 0.312、对数法 0.123、数值法 0.161、谐波法 0.113,且谐波方程拟合的土壤温度与实测的偏差最小,效果最好。图 1 给出 7 月 21 日用式 (9)由谐波法拟合得出的 5cm 深度土温与实测土温比较,二者一致性较好。

表 1 6 种方法计算表层土壤导温率

Tab 1 Soil thermal conductivity in near surface layer calculated by six different methods

方法 Methods	土壤导温率( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) Soil thermal conductivity			
	土层/cm Layer			
	0~5	5~10	10~15	15~20
振幅法	0.30	0.44	0.59	0.74
相位法	0.40	0.53	0.85	0.24
反正切法	0.96	0.47	0.54	0.11
对数法	0.50	0.36	0.38	0.81
数值法	-	0.68	-	0.48
谐波法	0.57	0.50	0.50	0.55

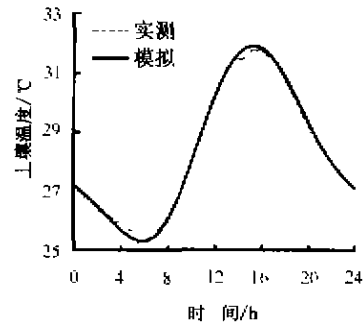


图 1 5cm 深度模拟与实测土壤温度日变化  
Fig 1 Comparison between the measured and the computed temperature with the harmonic equation at 5cm

以谐波法为基础,用式(11)估算土壤热通量,并与温度积分法相比较。对相对均质土壤,只需要 2 个深度的土温就可估算土壤热通量。取  $z = 2\text{cm}$ ,土壤的体积热容量取常数  $209 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{C}$ ,代入式(11),得 2cm 深度的热通量。图 2 计算的土壤热通量与实测热通量比较一致,但在起始阶段的 5、6 点之前及结尾阶段的 17、18 点之后,二者相差较大。为改善开始阶段、结尾阶段土壤热通量的估算,在求  $A_{0n}, \Phi_{0n}$  时,应把这阶段之前及之后也包括在内。当  $z = 0\text{cm}$  时,得出地表土壤热通量,并与用温度积分法求得的表层土壤热通量相比较(见图 3)。

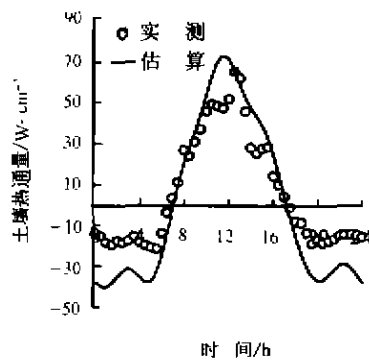


图 2 2cm 深度谐波法估算热通量与实测值比较  
Fig 2 Comparison between the measured dot and the computed values of soil heat flux line with harmonic method at 2cm

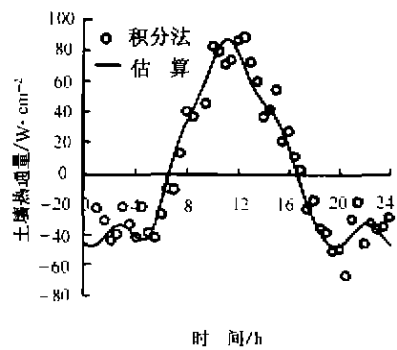


图 3 谐波法与由温度积分法估算热通量的比较  
Fig.3 Comparison between the soil heat flux computed with harmonic method line and the value of heat flux determined with the temperature integral method circle at 0cm

二者求出的土壤热通量一致性非常好。与温度积分法相比,用式(11)求土壤热通量仅需 2 个深度的土壤温度,而温度积分法需要多个深度的许多值,谐波法具有明显的优越性。

### 3 小结

利用土壤温度估算土壤导温率,数值法和谐波法虽计算比较复杂,但计算值稳定,是比较可靠的方法。利用谐波方程得出的土壤导温率来估算土壤热通量并与实测土壤热通量的比较及与温度积分法得出的结果比较也证明了这一点。

### 参 考 文 献

- 1 莫兴国,林忠辉等. 玉米群体辐射传输特征. 生态农业研究,2000,8(1):1~4
- 2 Horton R., Wierenga P. J. Estimating the soil heat flux from observation of soil temperature near the surface. Soil Sci. Soc. Am. J. 1983, 47:14~20
- 3 Horton R., Wierenga P. J., Nielsen D. R. Evaluation of method for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. Soil Sci. Soc. Am. J. 1983, 47:25~32
- 4 Anne Verhoef, Bart J. J. M. van den Hurk, Adrie F. g. Jacobs, Bert G. Heusinkveld, Thermal soil properties for vineyard (EFEDA-1) and savanna (HAPEX-Sahel) sites. Agriculture and Forest Meteorology. 1996, 87:1~18