

# 两种估算浅层土壤热参数及热通量的方法对比

安可栋<sup>1,2</sup>, 王文科<sup>1,2</sup>, 王周峰<sup>1,2</sup>, 杨泽元<sup>1,2</sup>, 陈立<sup>1,2</sup>, 张在勇<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** 土壤热参数对估算地表热通量和研究地表能量平衡具有重要的意义。基于土壤温度实测资料, 利用谐波法和热传导对流法估算了浅层土壤热扩散率, 进而计算了土壤热通量的值, 并将结果与热通量板观测值进行对比, 验证了这两种方法的可靠性。结果表明: 谐波法和热传导对流法估算的风积沙热扩散率结果均比较合理; 谐波法能够较好地模拟土壤剖面温度, 而热传导对流法的模拟结果较差; 谐波法会低估白天热通量最大值和晚上热通量最小值, 而热传导对流法能够较好地模拟夜间的土壤热通量。

**关键词:** 温度; 谐波法; 热传导对流法; 热扩散率; 土壤热通量

**中图分类号:** S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1143-04

## Comparison of two methods to estimate soil thermal parameters and heat flux

AN Ke dong<sup>1,2</sup>, WANG Wen ke<sup>1,2</sup>, WANG Zhou feng<sup>1,2</sup>, YANG Ze yuan<sup>1,2</sup>, CHEN Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Zai yong<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region Shanxi, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Soil thermal parameters play an important role in estimating ground heat flux and investigating ground energy balance. In this paper, based on the measured soil temperature data, thermal diffusivity of shallow soil was estimated using the harmonic method and heat conductivity and convection method, and then the heat flux was calculated and compared with that measured by the heat flux plate to verify the applicability of the two methods. The results showed that (1) the thermal diffusivities estimated by both the harmonic method and conductivity and convection method are reasonable; (2) the harmonic method can simulate the soil temperature of vertical profile better than the heat conductivity and convection method; and (3) the harmonic method underestimates the maximum heat flux during daytime and minimum heat flux at night, whereas the heat conductivity and convection method can perform good simulation of soil heat flux at night.

**Key words:** temperature; harmonic method; heat conductivity and convection method; thermal diffusivity; soil heat flux

土壤的热通量是地表能量平衡的重要组成部分, 而土壤热通量的大小受到土壤热参数的影响, 因此, 准确赋值热参数对研究地球表面能量平衡具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

计算土壤热通量需要确定三个参数: 土壤热扩散率、土壤热传导率和土壤体积热容。由于土壤热传导率等于热扩散率和体积热容的乘积, 因此, 二者知其一即可<sup>[2-4]</sup>。目前, 估算土壤热参数具有很多种方法<sup>[5-10]</sup>, 一些研究者<sup>[11-15]</sup>假定土壤热扩散率不随深度和含水率变化, 在一维热传导方程的基础上分别利用相位法、振幅法、对数法、反正切法和谐波法推导出浅层土壤的热扩散率, 并通过模拟浅层土壤温度和热

通量与观测值进行对比, 认为高阶谐波法结果最为稳定。然而事实上, 土壤中热的传输不仅包含热传导过程, 还包括热对流过程。Gao 等<sup>[16-19]</sup>考虑了土壤中液态水的对流作用, 利用一阶谐波模型推导出了—种新的估算土壤热扩散率和热通量的方法, 然而, 这种方法的可靠性并未得到广泛验证。

为了深入了解热对流过程对估算土壤热参数和热通量的影响, 本文以干旱半干旱地区陕北风积沙为研究对象, 利用地下水埋深 2 m 时土壤剖面上温度资料, 分别采用谐波法和热传导对流法推求浅层土壤热扩散率进而估算热通量的大小, 同时与观测结果进行对比, 进一步验证这两种方法

收稿日期: 2015-01-30 修回日期: 2015-04-20 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2100.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“旱区地表-地下水系统界面动力学与水循环研究”(41230314); 国家自然科学基金项目“毛乌素沙地地表干沙层形成机理及其水文生态效应研究”(41272247); 国家青年科学基金项目“渭河流域地下水对气候变化的响应研究”(41202164); 陕西省自然科学基金“陕北风沙滩区河水-地下水转化的温度示踪”(2014JQ5187)

作者简介: 安可栋(1986), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事旱区包气带水汽热耦合研究。Email: ankedong@163.com

通讯作者: 王文科(1962), 男, 陕西岐山人, 教授, 主要从事旱区地下水资源合理开发与生态保护研究。E-mail: wenkew@chd.edu.cn

的可靠性,为准确描述包气带中水汽热运移提供理论支持。

## 1 试验场地介绍

试验观测站位于陕西省西安市长安大学渭水校区,试验区设置圆柱形玻璃钢观测井一个,直径为 1 m,井中水位埋深为 2 m。试验介质取自陕北毛乌素沙地的均质风积沙<sup>[20]</sup>,含水率为 0.07~0.34 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,干容重为 1.52 mg/m<sup>3</sup>。在观测井地下 5 cm、10 cm、20 cm、30 cm 处设置 4 个温度探头,对包气带土壤剖面上的实时温度进行连续观测,数据自动记录于数据采集器内,监测频率为每 30 min 一次。在同样深度每 30 min 测量一次含水率,仪器为美国公司生产的 TDR。

数据观测时间为 2013 年 10 月 18 日至 22 日,数据完整,且试验期间无降雨等特殊天气。

## 2 理论方法

### 2.1 谐波法(HM)

假定土壤热参数不随深度和时间变化,则描述土壤热传导的方程可以表示为

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

式中: $T$  为温度(°C); $t$  为时间(s); $k$  为土壤热扩散率(m<sup>2</sup>/s); $z$  为深度(m)。假如土壤温度上边界是一个傅里叶级数:

$$T(0, t) = \bar{T}(0) + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2)$$

式中: $\bar{T}(0)$  为地表平均温度(°C); $n$  为谐波阶数; $\omega$  为地球自转角速度(rad/s), $\omega = \pi/12$  h; $A_i$  及  $\varphi_i$  分别表示第  $i$  阶谐波的振幅和相位。

用分离变量法可得热传导方程的解析解如下:

$$T(z, t) = \bar{T}(z) + \sum_{i=1}^n A_i \exp(-B_i z) \sin(\omega t + \varphi_i - B_i z) \quad (3)$$

式中: $B_i$  为与热扩散率  $k$  有关的参数,  $B_i = \sqrt{i\omega/2k}$ 。

考虑到模型的精度和计算的简便性,本文选择阶数为 2。综上,谐波法计算热通量的表达式为

$$G(z, t) = kC_v \frac{\Delta T}{\Delta z} + kC_v \sum_{i=1}^n A_i \sqrt{2} B_i \exp[-B_i(z - z_1)] \times \sin\left[i\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{4} - B_i(z - z_1)\right] \quad (4)$$

式中: $C_v$  为土壤体积热容,是含水率和干容重的函数,  $C_v = 4.180 + 0.850\theta_b$ 。

### 2.2 热传导对流法(CCM)

事实上,土壤热传输不仅有热传导,同时还有热对流的作用,此时描述热运动的方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

式中: $W$  为土壤中竖直方向上水流运动。

假定方程上边界是一阶谐波模型,此时方程的解为

$$T(z, t) = T_0 + A \exp\left[\left(-\frac{W}{2k} - \frac{\sqrt{2}}{4k} \sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16k^2\omega^2}}\right)z\right] \times \sin\left[\omega t - z \frac{\sqrt{2}\omega}{\sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16k^2\omega^2}}}\right] \quad (6)$$

此时方程的热扩散率为

$$k = -\frac{\omega(z_1 - z_2)^2 \ln(A_1/A_2)}{(\varphi_1 - \varphi_2) / (\varphi_1 - \varphi_2)^2 + \ln^2(A_1/A_2)} \quad (7)$$

综上,土壤热通量表达式为

$$G(z, t) = kC_v \frac{\Delta T}{\Delta z} + kC_v A_1 \exp[-M(z - z_1)] \times \sin[\omega t + \varphi_1 - N(z - z_1)] - NA_1 \exp[-M(z - z_1)] \times \cos[\omega t + \varphi_1 - N(z - z_1)] \quad (8)$$

$$\text{其中 } M = \frac{W}{2k} - \frac{\sqrt{2}}{4k} \sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16k^2\omega^2}}; N = \frac{\sqrt{2}\omega}{\sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16k^2\omega^2}}}$$

## 3 结果与讨论

为了解西北旱区风积沙土壤剖面的土壤温度和热通量的变化特性,图 1 给出了观测期间不同水位埋深土壤中各观测要素的时间序列。图 1(a) 反映了地下水位埋深为 2 m 的土壤剖面上不同深度土壤温度的日变化特征,可以看出,随着深度增加,土壤温度振幅明显减小,相位后移。图 1(b) 为不同深度土壤热通量的时间序列,可以看出,与温度变化规律一致,热通量也具有随深度增加振幅衰减和相位后移的趋势。值得注意的是,越接近地表,土壤热通量波动越大。这是因为热通量不仅与热扩散率,土壤温度和湿度有关,更受到风速,太阳辐射等因素的影响。

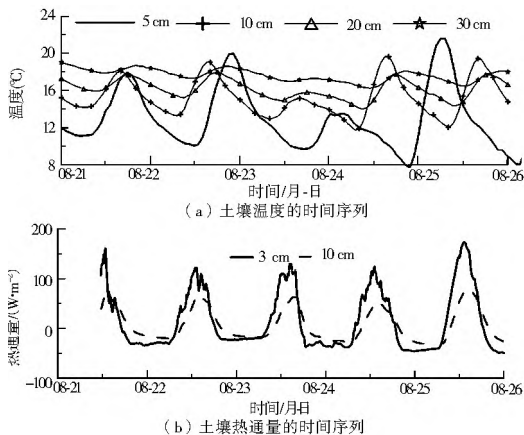


图 1 土壤温度和热通量的时间序列

Fig. 1 Time series data of soil temperature and soil heat flux

### 3.1 土壤热扩散率的计算

针对水位埋深为 2 m 的土壤剖面,不同深度的土壤温度实测值,分别利用谐波法和热传导对流法计算 5~10 cm、5~20 cm、5~30 cm 土壤层的热扩散率。

(1) 谐波法估算。假设上边界是一个傅里叶级数,由于 2 阶谐波法已满足精度需求<sup>[19]</sup>,同时考虑到计算的复杂性,本文利用 10 月 19 日土壤剖面上 5 cm 处的土壤温度观测数据,利用最小二乘法将其拟合为 2 阶的谐波模型,求得谐波模型的温度振幅和相位值,结合(4)式,分别利用 10 cm、20 cm、30 cm 土壤温度实测值迭代得到各个土层的土壤热扩散率的最优估计值,结果见表 1。

(2) 热传导对流法估算。利用各层土壤温度实测值拟合成(6)式,将其中参数带入公式(7),最终求得不同土层的土壤热扩散率(表 1)。具体计算过程请参考文献[16-18]。

利用谐波法和热传导对流法计算热扩散率,相关系数值分别为 0.94 和 0.88。二者估算所得的热扩散率数量级均在

$10^{-6} \sim 10^{-7}$ 之间,与繆育聪<sup>[19]</sup>及 Gao 等<sup>[12-14]</sup>估算青藏高原和黄土高原的土壤热扩散率结果一致。由于土壤温度的日变化并不是一个绝对的正弦变化曲线,而高阶谐波模型在迭代过程中利用了更多的土壤温度信息,使得其拟合结果比一阶谐波模型好。

表 1 谐波法和热传导对流法求不同深度土壤热扩散率

Tab.1 Thermal diffusivity values in different depths estimated by HM and CCM

方法	埋深/cm		
	5~ 10	10~ 20	20~ 30
谐波法	1.01E- 06	1.00E- 06	9.27E- 07
热传导对流法	9.49E- 07	1.01E- 06	8.82E- 07

### 3.2 土壤剖面温度和热通量估算

由于热传导对流法考虑了水分对土壤热传导过程的影

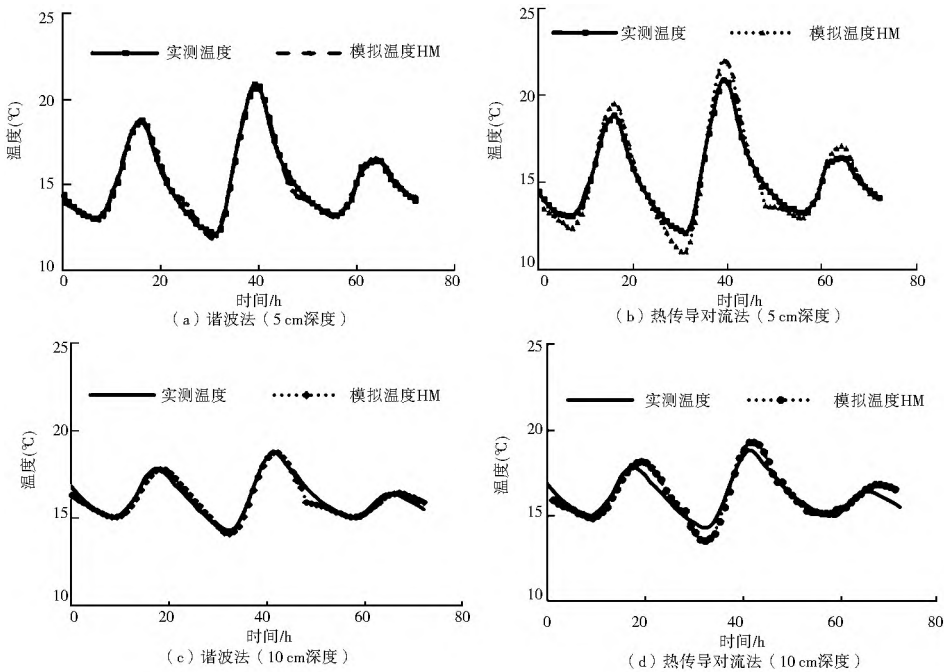


图 2 谐波法和热传导对流法模拟温度与观测值

Fig.2 Simulated and measured soil temperature in different depths

### 3.2.2 土壤剖面热通量

为了弄清楚两种热扩散率估算方法对土壤热量传输的影响,本文模拟了 3 cm 和 10 cm 深处的土壤热通量值,并将结果与热通量板观测值进行对比,结果(图 3)显示,在距地表 3 cm 处,谐波法和热传导对流法大体上均反映了土壤热通量的变化,但未能明显表现热通量的局部震荡现象,模拟结果较实测曲线显得更为光滑。同时,由于忽略了垂直方向上水分的运动,谐波法高估了白天的热通量,低估了晚上的热通量,而由于考虑了液态水对土壤热量运移的影响,热传导对流法较好的模拟了晚上的土壤热通量值。在 10 cm 处,由于受风速等影响因素较小,热通量曲线比 3 cm 处热通量曲线光滑,此时,利用两种方法估算所得热通量曲线也较浅层土壤光滑。尽管夜间所得热通量值与实测值基本一致,但二者均低估了土壤热通量的最大值。总之,在长期干旱的条件下,浅层土壤中水分运移不明显,此时,谐波法估算土壤热通量整体上能够取得较好的结果;但热传导对流法能够更好的

响,这在一定程度上弥补了其在迭代过程中仅利用较少的土壤温度信息这一缺陷,因此利用该法估算热扩散率结果仍然可信。但由于缺乏直接的验证手段,本文将计算所得热扩散率带入热传导方程,反求了土壤温度和热通量,通过与实测结果对比来判断这两种方法的可靠性。

### 3.2.1 土壤剖面温度

假定土壤热扩散率一日中不随深度和时间变化,分别将谐波法和热传导对流法估算所得热扩散率值带入式(3)和式(5)对土壤剖面 5 cm 和 10 cm 深度上的温度进行模拟,结果(图 2)显示,在同一土层(5 cm 处),谐波法能够准确地模拟土壤温度的日变化,而热传导对流法则在白天高估了土壤温度,晚上低估了土壤温度;在较深层土壤(10 cm 处),两种方法模拟效果均有所下降。总的来说,从土壤剖面的模拟温度看,与热传导对流法相比,谐波法在模拟土壤温度时能够更加接近真实值。

模拟夜间的土壤热通量。

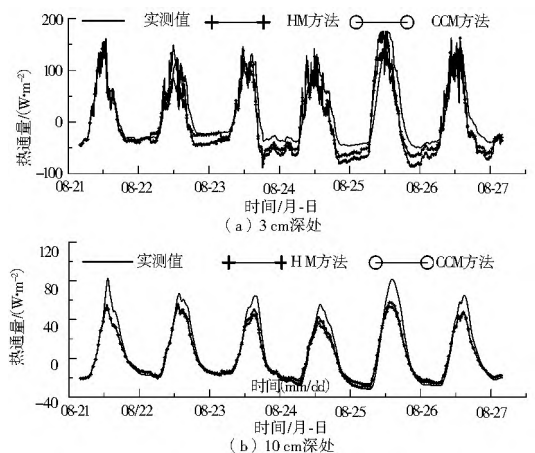


图 3 模拟热通量与实测值随时间变化

Fig.3 Simulated and measured soil heat flux

## 4 结论

本文利用试验观测到的裸土剖面上温度资料,分别采用谐波法和热传导对流法计算了土壤剖面上的土壤热扩散率,进而模拟了土壤的热通量,并将其与实测结果进行了对比。研究发现:谐波法和热传导对流法估算的风积沙热扩散率与他人研究结果基本一致,说明这两种方法估算热扩散率均比较合理。在模拟土壤温度时,谐波法能够较好地模拟土壤剖面温度,而热传导对流法的模拟结果距离实际观测结果较远。在估算土壤热通量时,谐波法在估算土壤热通量时,整体上能够取得较好的结果,但有低估白天热通量最大值和晚上热通量最小值的现象,而热传导对流法则能够较好的模拟夜间的土壤热通量。因此,在长期干旱的土壤环境中,模拟浅层土壤温度,估算土壤热参数时,建议采用谐波法;如果夜间的估算误差不可忽略,则推荐使用热传导对流法估算浅层土壤的热通量。

### 参考文献(References):

- [1] 刘树华,潘英,胡非,等.沙漠绿洲地区夏季地表能量收支的数值模拟[J].地球物理学报,2009,52(5):1197-1207. (LIU Shu hua, PAN Ying, HU Fei, et al. Numerical simulation of summer land surface energy budget in desert and oasis regions[J]. Chinese Journal Geophysics, 2009, 52(5): 1197-1207. (in Chinese))
- [2] de Silans A, Passerat M B, Monteny B A, et al. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX Sahel experiment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 81(3): 20F-216.
- [3] VAN WIJK W R. Physics of plant environment[J]. Physics of Plant Environment, 1963.
- [4] Tyagi B, Satyanarayana A N V. Modeling of soil surface temperature and heat flux during pre monsoon season at two tropical stations[J]. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 2010, 72(2): 224-233.
- [5] Chung S O, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. Water Resources Research, 1987, 23(12): 2175-2186.
- [6] Liu H, Wang B, Fu C. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi arid area of Tongyu, northeastern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25: 757-764.
- [7] Usowicz B, Lipiec J, Usowicz J B, et al. Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model predicted data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(2): 536-541.
- [8] Kunii D, Smith J M. Heat transfer characteristics of porous rocks[J]. AIChE Journal, 1960, 6(1): 7F-78.
- [9] Riha S J, McInnes K J, Childs S W, et al. A finite element calculation for determining thermal conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(6): 1323-1325.
- [10] Bhumralkar C M. Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model[J]. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14(7): 1246-1258.
- [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(1): 25-32.
- [12] 莫兴国,李宏轩,刘苏峡,等.用土壤温度估算表层土壤导热率与热通量的研究[J].中国生态农业学报,2002,10(1):62-64. (MO Xing guo, LIU Hong xuan, LIN Su xia, et al. Estimation of the soil thermal conductivity and heat flux in near surface layer from soil temperature[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2002, 10(1): 62-64. (in Chinese))
- [13] Noborio K, McInnes K J. Thermal conductivity of salt affected soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2): 329-334.
- [14] Kunii D, Smith J M. Heat transfer characteristics of porous rocks[J]. AIChE Journal, 1960, 6(1): 7F-78.
- [15] Riha S J, McInnes K J, Childs S W, et al. A finite element calculation for determining thermal conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(6): 1323-1325.
- [16] Gao Z, Horton R, Wang L, et al. An improved force - restore method for soil temperature prediction[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(5): 972-981.
- [17] Gao Z, Fan X, Bian L. An analytical solution to one dimensional thermal conduction convection in soil[J]. Soil science, 2003, 168(2): 99-107.
- [18] 代成颖,高志球,王琳琳,等.两种土壤温度算法的对比分析[J].大气科学,2009,33(1):135-144. (DAI Cheng ying, GAO Zhi qiu, WANG Lin lin, et al. Intercomparison between two soil temperature algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2009, 33(1): 135-144. (in Chinese))
- [19] 缪育聪,刘树华,吕世华,等.土壤热扩散率及其温度、热通量计算方法的比较研究[J].地球物理学报,2012,55(2):441-451. (MIAO Yu cong, LIU Shu hua, LYU Shi hua, et al. A comparative study of computing methods of soil thermal diffusivity, temperature and heat flux[J]. Chinese Journal Geophysics, 2012, 55(2): 441-451. (in Chinese))
- [20] 赵贵章,王文科,侯莉莉,等.干旱半干旱地区包气带热参数模型研究[J].水文地质工程地质,2009(5):107-110. (ZHAO Gui zhang, WANG Wen ke, HOU Li li, et al. Determination of thermal parameter of aerated zone in the arid and semi arid region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009(5): 107-110. (in Chinese))