

土壤传导 - 对流热通量计算的初步结果^①

范新岗 汤懋苍

(中国科学院兰州高原大气物理研究所,甘肃省兰州市 730000)

提 要:本文利用气象站的地温资料,设计了一种同时考虑传导、对流两种传热方式时的土壤热通量计算方法,计算了土壤中的传导热通量、对流热通量及总热通量。发现对流热通量与传导热通量具有同样的量级,均为 $10^1 - 10^2 \text{ m W/m}^2$ 。另外还初步分析了三种热通量结果与地震的关系,单站热通量序列表明地震前地热能量是持续累积的。

关键词:传导热通量;对流热通量;计算方法;地震。

1 引 言

众多研究^[1-3]表明,地球内部热状态对地球物理现象如地震、旱涝等都有显著的影响。深入研究地球内部的热现象,对提高旱涝、地震等自然灾害的预测水平以及地热学、地球物理学、当代气候学等地球科学的发展均有积极意义。目前所做的有关地热流的研究工作大都是基于深层钻井测温资料进行的,而且较少涉及对流热通量。文献[4]对地温变化的机制进行了初步探讨,认为地热状态随时间的变化与热传导、岩体运动及孔隙水运动引起的对流或平流热传输有关。由于深井资料目前我国乃至全球都是很贫乏的,而且分布极不均匀,故本文利用丰富的气象站地温资料计算了同时考虑传导、对流两种传热方式时的浅层地热通量并对其结果作初步分析。气象站地温资料包括 0、5、10、15、20、40、80、160 和 320 cm 9 个层次。据胡泽勇等^[5]的研究,各层月平均地温距平的自后延相关系数的衰减随深度是逐渐变缓慢的,即深度愈深,持续性愈好。80 cm 以上各层地温因受大气的强烈影响,很难用来说明深层变化,故本文选用 80、160 和 320 cm 3 层的资料进行研究。

2 方程及解

地热向外传输的方式有三种,即传导、对流和辐射。本文主要研究传导和对流传热,在土壤的浅层即为传导、对流热通量。假定土壤里无水的相变过程发生,无热源(汇),且不考虑热量水平扩散,即只考虑无热源(汇)情况下地热的垂直一维输送问题。

据文献[5],传导热流为单位时间沿温度梯度方向流过单位面积的能量流

^① 1992年5月18日收到,1993年11月11日收到第二次修改稿。

$$\overline{Q_d} = -K \cdot \text{Grad}(T) \quad (1)$$

式中负号表示热流方向与梯度方向相反, K 为介质热导率。定义导温率(或热扩散率)

$k = \frac{K}{\rho c}$ 之后,并用 z 表示垂直方向坐标,则一维传导热通量为

$$Q_d = -\rho c k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

其中 ρ, c 分别为介质密度、比热,一般取它们为常值。本文参考文献[6]取容积热容量

$C_w = \rho c = 0.3 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{C}$ 。 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 为地温梯度,计算中一般用差分代替, $\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{\Delta T}{\Delta z}$ 。

对流热通量表示单位时间通过单位面积由于物质运移所造成的对流换热量 Q_v ,假定热溢流体的垂直运动速度为 w ,密度、比热分别为 ρ', c' ,则^[5]

$$Q_v = \rho' c' w \Delta T \quad (3)$$

其中 ΔT 为热溢流体与周围介质之间的温差。

由于在地壳浅部存在着地下水的垂直运动,而且它对地温场的相貌有着显著的影响^[7]。在本文所考虑的一维情况下,选 z 为垂直坐标,向下为正,因而可以取水平方向孔隙率为 ϕ 的单位体积元 dV (如图1),底面积为 dS ,孔隙截面积则为 $\phi \cdot dS$,体积元高为 dz ($dz = w dt$,其中 w 为孔隙中热溢流体的垂直速度),土壤和热溢流体的容积热容量分别为 ρc 和 $\rho' c'$,体积元上下边界的温度分别为 T_1 和 T_2 。在 dt 时间内, dV 内能量的净变化引起的 dV 内温度的变化 dT ,则共有三部分能量:

(1) 温度上升 dT 所需能量: $\rho c dV dT$

(2) 传导热能流: $Q_d = -\rho c k \frac{\partial T}{\partial z}$, dt 内净流入量(即流入减流出)

$$-\frac{\partial Q_d}{\partial z} dz dS dt = \rho c \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} dV dt$$

这里忽略了热溢流体的传导传热,因为这部分能量与其周围土壤中的传导传热相比是一个小量。

(3) dt 内流入 dV 的热溢流体(ρ', c')放出的热量

$$\rho' c' w \Delta T \cdot \phi dS dt$$

因为不考虑热量的水平扩散,可设热溢流体的温度处处与周围介质(土壤固态物)相同,即处于热平衡态,则 $\Delta T = -\frac{\partial T}{\partial z} dz$ (式中负号是因 z 向下为正),故

$$\rho' c' w \Delta T \cdot \phi dS dt = \rho' c' w \left[-\frac{\partial T}{\partial z} dz \right] \cdot \phi dS dt = -\rho' c' w \frac{\partial T}{\partial z} dz \cdot \phi dV dt$$

由以上三项就可得到传热方程

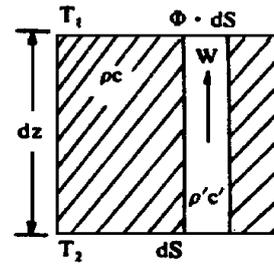


图1 传导-对流示意图

Fig.1 Sketch map of conduction and convection.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\rho' c'}{\rho} \phi w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

在推导过程中已经考虑了 w 为常数, 即不随深度变化, 在此也同样忽略 κ 随深度的变化。另外, 方程(4)第二项中的 ϕ 及热溢流体的 ρ', c' 都很难确定, 我们采取如下措施: 令 $W = \frac{\rho' c'}{\rho} \phi w$, 求得 W 后乘以土壤的 ρc 则可计算对流热通量。 W 可以理解为单位体积元 dV 的平均运动速度。这样方程(4)简化为一线性传热方程

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

此方程与文献[8]中同时考虑传导、对流热时的传热控制方程具有类似的形式。在半无界空间中, 方程(5)无初始条件的问题可解, 给波动边界条件

$$T(z_0, t) = \bar{T}|_{z=z_0} + A \sin(\omega t + \beta) \quad (6)$$

其波动量: $T' = T - \bar{T} = A \sin(\omega t + \beta)$, 同样满足方程(5)。

可得方程(5)的解析解

$$\begin{aligned} T'(z, t) &= T(z, t) - \bar{T}|_{z=z} \\ &= A \exp \left[\left| \frac{W}{2\kappa} - \frac{\sqrt{2}}{4\kappa} \sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16\kappa^2 \omega^2}} \right| (z - z_0) \right] \\ &\quad \cdot \sin \left[\omega t + \beta + (z_0 - z) \frac{\sqrt{2} \omega}{\sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16\kappa^2 \omega^2}}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

可以看出, 对流速度 W 对波动的振幅、位相均有影响, 那么由某一频率波动的振幅 (A) 和位相 (Φ) 随深度的变化就可反算出导温率 κ 及垂直对流速度 W

$$\begin{cases} \kappa = \frac{(z_1 - z_2)^2 \omega \ln(A_2/A_1)}{(\Phi_2 - \Phi_1) [(\Phi_2 - \Phi_1)^2 + (\ln(A_2/A_1))^2]} \\ W = \frac{\omega(z_1 - z_2)}{\Phi_2 - \Phi_1} \left| 1 - \frac{2(\ln(A_2/A_1))^2}{(\Phi_2 - \Phi_1)^2 + (\ln(A_2/A_1))^2} \right| \end{cases} \quad (8)$$

最后得到计算总热通量的公式为(热流向上为正)

$$\begin{cases} Q_d = c_w \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \\ Q_v = -c_w W \Delta T \\ Q_t = Q_d + Q_v = c_w \kappa \frac{\Delta T}{\Delta z} - c_w W \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

3 热通量的计算

根据公式(9)计算热通量, 主要是要得到导温率 κ 和垂直对流速度 W 。地质部门计算地热流是利用实测深层岩石热导率, 这在气象部门对于大范围的多种多样的土壤层并

不适用,所以我们考虑利用公式(8)计算它们。

分析 0.8—3.2 m 地温资料序列发现,三层中周期为一年的波动的方差贡献最大,大部分站达到 98% 以上,最小也在 95% 以上,这已基本满足公式(8)的波动边界条件,用 0.8 m 和 3.2 m(下面在求 κ 和 W 时就用这两层资料,因为这个范围已包含了 0.8—1.6 m 和 1.6—3.2 m 两层)两层温度序列年波的振幅比或位相差就可求 κ 和 W 。从公式(8)中可以看出,这种算法在一个周期 t_0 ($t_0 = 2\pi/\omega$) 上只能求得一个 κ 和 W 值,而实际上,导温率受温度、湿度的影响在冬季和夏季将会有差别,垂直对流速度 W 的变化更不会小于导温率,为使所求 κ 与 W 值更接近实际,拟采用分段求法。将一年的资料分成冬夏两段分别拟合年波获得振幅和位相,分段时尽量使每段都取在峰值附近,这样有利于提高拟合精度。根据实测温度序列的位相分布分段如下:0.8 m 以 5—10 月为夏季,以 11 月—次年 4 月为冬季,3.2 m 以 7—12 月为夏季,以 1—6 月为冬季。我们知道,年波从 0.8 m 传到 3.2 m 大约需要两个月的时间,所以这种分段方法与实际是相符的。分段以后,利用最小二乘法由半年资料拟合年波求得振幅和位相,再由(8)式即可求出冬夏半年的导温率和垂直对流速度。

由于有些地方如东北、西藏等常年有冻土层存在和另外一些地方的土壤湿度等的影响,使得某些站计算的 κ 值出现不稳定现象,对这些问题采用面平滑方法予以处理,用周围站点的 κ 值内插得到。另外从初步计算结果来看,这样得到的 W 值随时间变化较大,对研究热通量的时间变化有些粗糙,故本文采用迭代法求取。根据(8)式所计算的 W 值,给出一个 W 的可能初始值,然后以 $\Delta W = 5 \times 10^{-9}$ cm/s 逐步改变 W 值,使计算的 $T(3.2, t)$ 逼近实测值,达到精度后即可得到 W 。本文计算过程中取逼近精度为 0.01 °C,迭代得到的 W 的量级为 $W \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/s。这与文献[7]利用实测钻井资料推算出的地下水垂直运动速度量级 (0.9×10^{-6} cm/s) 接近。最后将 κ 、 W 代入(9)式计算热通量。

4 结果分析

我们选取地温资料序列较长较完整的北京、兰州、太原、哈尔滨 4 站,计算了单站传导、对流及总热通量,图 2a—c 给出北京、兰州及太原 3 站的演变序列,图中分别标出了该站周围 100 km 以内的 5 级以上地震、200 km 以内的 6 级以上地震及 500 km 以内的 7 级以上地震。从图 2a 可以看出,地震爆发具有阶段性、群发性,主要地震爆发段有三个,分别为 1955—1960 年、1965—1970 年、1975—1980 年,与这三个阶段对应的总地热通量曲线均存在明显的上升段,震前上升幅度约 300 mW/m²,或者一直维持约 200 mW/m² 的较高正热通量。图 2b 中同样在震前对应着热通量的持续上升,尤其在 1954 年和 1976 年两次 7 级以上大地震及 1982 年 5 级以上地震前,热通量上升幅度均达 400 mW/m²。图 2c 中,1965 年及 1975 年以后均维持较长时间的正热通量,地震前对应着较小幅度的热通量上升。

综上所述,图 2 反映出在大地震前,总热通量一般都存在明显的上升(约 300—400 mW/m²),或者是在较长时间的正热通量背景(约 200 mW/m²) 下有小幅度的上升(约 100—200 mW/m²),在持续上升后约半年到一年的时间里爆发地震。这表明地震前地热

能量有一个积累过程。

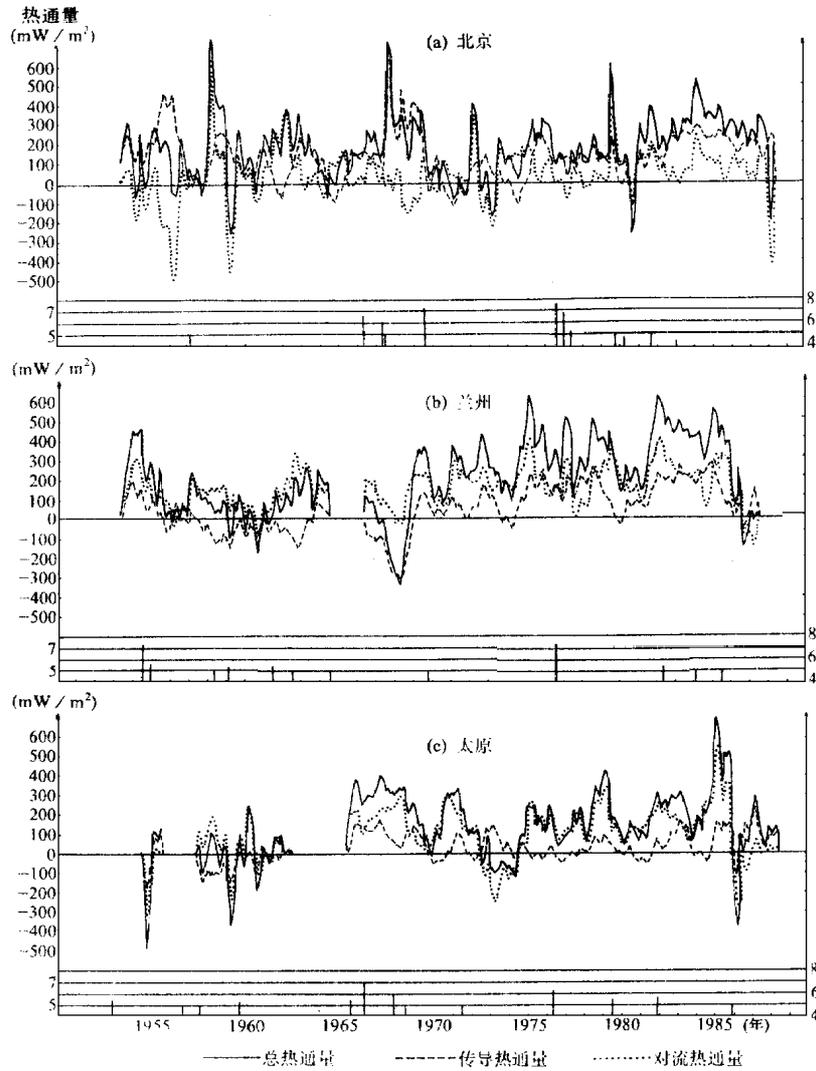


图 2 传导、对流及总热通量的单站演变曲线

Fig. 2 Evolution curves of conductive, convective and total heat flux at single station.

5 结论与讨论

通过以上的分析研究大致可以得出如下结论：

- (1) 可以利用气象站地温资料反演获得浅层地热场的信息。
- (2) 对流热通量与传导热通量具有同样的量级,均为 $10^1 - 10^2 \text{ mW/m}^2$ 。
- (3) 同时考虑传导及对流两种传热过程时,总热通量在震前一般表现为持续上升,震后迅速还原。
- (4) 由浅层地温场反演得到的地热场信息对地震会有一些的指示意义。

对于考虑了对流传热后的热通量计算,由于计算方法还不太成熟,本文只作了单站分析,还有待于今后进一步完善及广泛深入地研究。

参 考 文 献

- [1] 苏]В. И. 莫伊谢延科等著,高莉青等译,地热研究与应用,北京:地震出版社,1990年,1—129页。
- [2] 汤懋苍等著,理论气候学,北京:气象出版社,1989年,241—250页。
- [3] 胡泽勇等,地热异常是气候异常的重要因子,天地生综合研究,北京:中国科学技术出版社,1989年,257—260页。
- [4] 张永仙等,地温地震前兆的物理机制,1990年地球物理年会集刊,北京:地震出版社,1990年,293页。
- [5] 德]O. 卡普迈耶,R. 海涅尔著,北京大学地质学系地热研究室译,地热学及其应用,北京:科学出版社,1981年,3—44页。
- [6] 汤懋苍等,我国土壤热流场及深层大地热流场的比较,地球科学进展,第6卷,第4期,1991年,10—17页。
- [7] 邓 孝,地下水垂直运动的地温场效应与实例剖析,地质科学,1989年,第1期,77—81页。
- [8] Rybach, L. and L. J. P. Muffler, Geothermal Systems: Principles and Cases Histories, Chichester, New York, Wiley, 1981, P. 10—16.

A PRELIMINARY STUDY ON CONDUCTIVE AND CONVECTIVE SOIL HEAT FLUX

Fan Xingang Tang Maocang

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000)

Abstract: The heat flux including the conductive and the convective heat flux has been calculated by using soil temperature data of meteorological stations. The order of magnitudes of convective heat flux is $10^1 - 10^2 \text{ m W/ m}^2$, it is the same as conductive heat flux. From the series of heat flux of single station, it can be seen that geothermal energy has been accumulating continuously before the eruption of earthquakes.

Key words: Conductive heat flux; Convective heat flux; Computational method; Earthquake.