

广东土壤的温度波

黄 润 本

(地 理 系)

土壤热量的主要来源是太阳辐射能。分子导热为土壤中热量传播基本的物理方式。热量传播的实现既依靠土壤的矿物化学成分、孔隙度和散布性，也依靠含在土粒之间的空气和水。同时，辐射热交换和对流热交换对于土壤中热的传播也起了一定的作用。辐射热交换通过土壤质点向各方向的辐射而进行，对流热交换则通过土壤中的水和土壤空气的对流作用而进行。所以，土壤的增温和冷却过程与空气的增温和冷却过程比较起来是有很大差别的。

土壤温度变化规律性的探讨，在农业生产上最具有实用价值。举凡植物根的吸收水分和无机养料、根的生长和呼吸、对于高等植物关系重大的土壤微生物的生活、腐殖质的形成、有机物质的分解、水在土壤里的流动等等，都受到土壤温度直接的影响。过低的土壤温度，可使物理学的潮湿土壤，变成生理学的干燥的土壤，而造成植物的凋萎。土壤温度也最显著地影响近地气层的温度。植物和土壤的地理分布、耕作业的地区差异，都应与土壤温度的分布有关。

本文根据广东韶关、汕头、广州、湛江、加积、北黎等六个台站的土壤温度实际观测资料，计算土壤的温度波，旨在从理论上分析广东土壤温度变化的一些规律。近年么枕生^[1]及谢义炳^[2]等，曾根据我国其他地区的土壤温度资料，作过类似的理论分析研究。上述六个台站，都有一定的地区代表性。除北黎、加积二地记录为0、5、10、20厘米深度外，其余四个地方的记录为0、5、10、20、40、80、160及320厘米。各台站不同土壤深度的记录统计年限有如表1所示。

表 1 韶关等地各层土壤温度的统计年限

地 点 深 度 (厘米) 统计 年限	韶 关	广 州	汕 头	湛 江	加 积	北 黎
0	1956—1960	1954—1960	1956—1960	1953—1960	1956—1960	1950—1960
5	1953—1960	1954—1960	1952—1960	1953—1960	1953—1960	1953—1960
10	1953—1960	1954—1960	1956—1960	1953—1960	1953—1960	1953—1960
20	1953—1955	1954—1960	1952—1960	1953—1960	1953—1960	1953—1960
40	1958—1960	1954—1960	1956—1960	1956—1960	—	—
80	1958—1960	1954—1955	1956—1960	1956—1960	—	—
140	1958—1960	1954—1955	1956—1960	1956—1960	—	—
320	1958—1960	1954—1955	1956—1960	1956—1960	—	—

一 计算方法的理论根据

土壤温度变化问题，可以根据下面形式的热传导方程求解：

$$C\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} \theta) + \epsilon. \quad (1)$$

式中 C 为单位热容量， ρ 为土壤密度， λ 为导热系数， θ 为温度， ϵ 为土壤内热源强度（通常可以认为 ϵ 不存在，不予考虑）。 C 、 ρ 及 λ 都不是常数，要求得式(1)的解，还必须简化。

假设土壤为均一性的和均向性的介质，任何时间温度只随深度变化，在水平方向则没有变化，式(1)可简化成

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}. \quad (2)$$

上式的 K 为导热系数， z 轴的方向从上向下。

观测指出，土壤表面温度有年变程和日变程，在最简单的情况下，这种温度的周期变化可以写为时间的简谐函数。当 $z = 0$ 处的边界条件：

$$\theta(0, t) = \theta_0 + A \sin \omega t. \quad (3)$$

式中 A 为振动的振幅， θ_0 为土壤表面温度的年平均（日平均）值， $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ （其中 τ 为振动周期）。利用边界条件(3)来解方程(2)可得[3]，

$$\theta(z, t) = \theta_0 + Ae^{-z\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau}t - z\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}\right), \quad (4)$$

或

$$\theta(z, t) = \theta_0 + Ae^{-z\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}} \sin\left[\frac{2\pi}{\tau}\left(t - \frac{z}{2}\sqrt{\frac{\tau}{\pi k}}\right)\right]. \quad (4')$$

式(4)或(4')即代表土壤中的溫度波。

二 年平均導溫係數與年振幅

土壤導溫係數是衡量溫度在土壤中傳播的量數。在分層討論土壤的熱力狀況時，需要知道該層土壤的平均導溫係數。現根據振幅隨深度變化的規律來計算平均導溫係數。由式(4)可知，深度 z 處溫度振動的振幅決定於式

$$A_z = Ae^{-z\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}} \quad (5)$$

設 z_1 及 z_2 深度第一階諧量的振幅分別為

$$A(z_1) = Ae^{-z_1\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}}, \quad A(z_2) = Ae^{-z_2\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}}.$$

以後者除前者，得

$$\ln \frac{A(z_1)}{A(z_2)} = (z_2 - z_1)\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}},$$

由是

$$k = \frac{\pi(z_2 - z_1)^2}{\tau \left(\ln \frac{A(z_1)}{A(z_2)}\right)^2}. \quad (6)$$

由於實測土壤溫度的年變化曲線與正弦曲線有一定的差別，本文應用富里哀級數的分析方法，求第一階諧量的振幅，並將所求得的振幅代入式(6)計算導溫係數，計算結果見表2。

表2 韶關等地土壤的年平均導溫係數($k \times 10^{-3}$ 厘米²·秒⁻¹)

地 點	韶 關	廣 州	汕 頭	湛 江	加 積	北 黎
0厘米振幅(°C)	11.56	8.25	7.80	6.90	6.68	5.98
0—5厘米導溫係數	0.16	0.63	0.35	1.87	4.80	1.97
5厘米振幅(°C)	10.19	7.75	7.17	6.73	6.40	5.72
5—10厘米導溫係數	2.52	5.50	1.60	1.53	1.43	3.42
10厘米振幅(°C)	10.07	7.60	7.08	6.39	6.00	5.53

10—20厘米导温系数	1.28	1.84	4.57	8.40	2.16	3.19
20厘米振幅 (°C)	9.37	7.14	6.75	6.28	5.90	5.23
20—40厘米导温系数	1.24	4.76	3.86	1.18	—	—
40厘米振幅 (°C)	7.84	6.25	6.10	5.23	—	—
40—80厘米导温系数	4.50	9.78	6.49	17.85	—	—
80厘米振幅 (°C)	6.50	5.75	5.23	4.76	—	—
80—160厘米导温系数	5.40	2.15	9.28	19.80	—	—
160厘米振幅 (°C)	4.62	3.32	4.03	3.98	—	—
160—320厘米导温系数	4.66	9.76	8.07	5.30	—	—
320厘米振幅 (°C)	2.21	2.01	2.30	2.05	—	—
0—20厘米各层导温系数平均值	1.32	2.66	2.17	3.93	2.79	2.44
20—320厘米各层导温系数平均值	3.95	6.61	6.93	11.03	—	—
0—320厘米各层导温系数平均值	2.82	4.92	4.88	7.99	—	—

我們知道, 导温系数是导热系数与容积热容量的比值, 所以导温系数的变化是导热系数和热容量共同变化的結果。土壤的导热系数以土壤的物理性质为轉移, 但受湿度的影响很大, 当土壤湿度不大时, 随着湿度的增大, 导热系数急剧上升, 但当土壤湿度增长到一定限度时, 导热系数的上升便趋于减弱, 因为此时土壤的导热系数已接近于水的导热系数。土壤的热容量則以土壤湿度、土壤空气、孔隙度和矿物組成轉移, 其中受湿度的影响也最显著, 它随湿度的增大而增大。由于导温系数的变化是如此的复杂, 所以根据表 2 的計算結果, 只能作一般性的說明:

(一) 深度为 0—20 厘米各层的平均导温系数显著地比深度为 20—320 厘米各层的平均导温系数为小, 前者仅及后者的三分之一左右。这是因为 20—320 厘米的土壤平均湿度通常較 0—20 厘米的为高的緣故。深层土壤的孔隙度較上层的小可能也有关系, 因为导热系数是随孔隙度的减小而增大的[4]。

(二) 土壤温度的振幅, 随深度的增加而减小, 随緯度的增加而增大。由于緯度不同而发生的差别, 在地表处最大, 随着深度的增加其差别渐趋减小。在 160 厘米深处, 各地振幅的差别已甚小, 在 320 厘米深处基本上已无差别。

(三) 韶关上层土壤温度的振幅虽然比其余各地大得多, 但由于平均导温系数最小, 温度变化影响的深度不大, 所以在 160 厘米深处的振幅便与其余各地相埒了。湛江上层土壤温度的振幅虽然比韶关、广州、汕头都較小, 但由于平均导温系数最大, 温度变化亦可以影响到深层土壤中, 在地表处湛江的振幅虽比广州低 1.35° , 但在 160 厘米深处却比广州高出 0.66° , 并且与汕头的振幅不相伯仲了。

三 温度波的波長与波速

土壤温度波的波长与波速的理論探討, 可根据式 (4) 中相时的落后来計算, 即

$$r = z \sqrt{\frac{\pi}{\tau k}} \quad (7)$$

如温度波在某一深度落后 $r=2\pi$ 时, 这个深度即为这一温度波的波长 λ , 就是

$$\lambda = 2\sqrt{\frac{\pi}{\tau k}} \quad (8)$$

而波速 V 则为

$$V = 2\sqrt{\frac{\pi k}{\tau}} \quad (9)$$

根据式(8)和(9)计算韶关等地土壤温度波的波长和波速列于表3和表4中。表3是采用0—20厘米各层导温系数的平均值计算, 表4则采用0—320厘米各层导温系数的平均值计算的, 后者的计算数据, 实用价值当然较大。

表3 韶关等地土壤温度波的波长与波速(采用0—20厘米各层导温系数平均值计算)

地 点		韶 关	广 州	汕 头	湛 江	加 积	北 黎
波 长 (厘米)	日	37.94	53.86	48.53	64.34	55.14	51.58
	年	740.2	1027.6	929.6	1252.2	1054.6	936.0
波 速 (厘米/秒)	日	0.0004382	0.0006212	0.0005618	0.0007536	0.0006356	0.0005964
	年	0.00002290	0.00003256	0.00002932	0.00003954	0.00003328	0.00003112

表4 韶关等地土壤温度波的波长与波速(采用0—320厘米各层导温系数平均值计算)

地 点		韶 关	广 州	汕 头	湛 江	加 积	北 黎
波 长 (厘米)	日	55.32	73.48	72.66	92.96	—	—
	年	1058.4	1400.0	1394.2	1779.8	—	—
波 速 (厘米/秒)	日	0.0006388	0.0008438	0.0008414	0.0010752	—	—
	年	0.00003346	0.00004422	0.00004410	0.00005640	—	—

由于湛江的土壤平均导温系数最大, 所以湛江土壤温度波的波长和波速也最大, 同样地, 韶关的土壤平均导温系数最小, 所以韶关土壤温度波的波长和波速也最小。

由式(5)与(7), 可知

$$r = \ln \frac{A}{A_s} \quad (10)$$

如果年(日)温波落后半年(半日), 则

$$A_s' = \frac{A}{23.13}, \quad (11)$$

年(日)温波落后整年(整日), 则

$$A_s'' = \frac{A}{534.9}. \quad (11')$$

由此, 根据表 2 可得韶关等地年溫波落后半年与整年深度处的振幅 (表 5)。

表 5 韶关等地年溫波落后半年与整年深度处的振幅 (°C)

地 点	韶 关	广 州	汕 头	湛 江	加 积	北 黎
年溫波落后半年深度的振幅	0.49	0.35	0.34	0.30	0.28	0.26
年溫波落后整年深度的振幅	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

从表 5 可見, 年溫波落后整年深度处的振幅 仅为 0.01—0.02° 而已, 实际上可认为这一深度为年溫波可能达到的极限。故根据表 4 可知, 湛江土壤年溫波可达 18 米左右, 广州及汕头可达 14 米左右, 而韶关则仅达 11 米左右而已。在此深度下的土层全年溫度不变, 这就是所谓常年溫层。这些数据比我国緯度較高的地区都要低, 例如, 根据么枕生計算^[1] 沈阳、南京、酒泉土壤年溫波可能达到的深度大致为 20 米, 这种差别, 是符合一般規律性的。

四 相 时 的 落 后

大家知道, 深度愈大, 不但土壤溫度的振幅愈小, 并且最高、最低溫度出現的时间愈迟。代表落后的相时为

$$r = z \sqrt{\frac{\pi}{\tau k}}, \quad (7)$$

或

$$r = \ln \frac{A}{A_z} \cdot \quad (10)$$

显然, 具有各深度振幅的資料, 采用式 (10) 計算是很方便的。計算結果, 有如表 6 所示。地表溫度最高、最低的出現日期, 系根据第一阶諧量的相角計算的。

表 6 韶关等地不同深度土壤溫度年变程中相时的落后 (天数)

項 目	土 层		韶 关	广 州	汕 头	湛 江	加 积	北 黎
最高、最低 溫出現日期	0 厘米	最 高	7 月 26 日	7 月 26 日	7 月 26 日	7 月 26 日	7 月 3 日	7 月 2 日
		最 低	1 月 26 日	1 月 26 日	1 月 26 日	1 月 26 日	1 月 3 日	1 月 2 日
相 时 的 落 后	5 厘 米	8	3	5	2	2	3	
	10 厘 米	9	5	6	4	5	5	
	20 厘 米	13	8	8	5	6	8	
	40 厘 米	24	16	14	16	—	—	
	80 厘 米	34	21	23	22	—	—	
	160 厘 米	54	53	39	32	—	—	
	320 厘 米	97	82	72	71	—	—	

从表6可見，每深1米，最高、最低土壤溫度出現日期，約比地表延迟20—30昼夜。導溫系数大的土壤易熱易冷，湛江的導溫系数最大，所以相時向土壤深层傳播最速，韶關的導溫系数最小，所以相時向土壤深层傳播最慢。例如，在320厘米深度处，湛江最高、最低溫度出現日期（分別為10月5日及4月7日）比地表迟71天，相時向土壤深层傳播的速度比其余各地都快，其次為汕頭，最高、最低溫度出現日期（分別為10月6日及4月8日）比地表迟72天，再次為廣州，最高、最低溫度出現日期（分別為10月16日及4月18日）比地表迟82天，最后為韶關，最高、最低溫度出現日期（分別為10月31日及5月3日）則須比地表迟97天，相時向土壤深层傳播的速度比其余各地都慢。

$$\text{因为 } e^{-z_1 \sqrt{\frac{\pi}{k\tau_1}}} = e^{-z_2 \sqrt{\frac{\pi}{k\tau_2}}}$$

$$\text{由此, } z_1 : z_2 = \sqrt{\tau_1} : \sqrt{\tau_2} . \quad (12)$$

将这个关系应用于年振動和日振動，得到

$$z_1 : z_2 = \sqrt{1} : \sqrt{365} = 1 : 19.1 .$$

因此，根据这个关系，按照表6亦可推求以一天為周期的相時在土壤中不同深度的落后情况，其結果有如表7。

表7 韶關等地不同深度土壤溫度日变程中相時的落后（小时数）

地 点 土 层 相 时 落后	韶 关	广 州	汕 头	湛 江	加 积	北 黎
0.26厘米	0.5	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2
0.53厘米	0.6	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
1.05厘米	0.9	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
2.10厘米	1.6	1.1	0.9	1.1	—	—
4.20厘米	2.3	1.4	1.5	1.5	—	—
8.40厘米	3.6	3.5	2.6	2.1	—	—
16.80厘米	6.5	5.5	4.8	4.7	—	—

表7的数值表明：在以一天為周期的土壤溫度变化中，每深1厘米，最高、最低溫度出現的时间大約比地表迟0.3—0.9小时。

此外，在前面表3及表4中日波长与年波长的計算值，亦分別表示了土壤日溫波落后整日及年溫波落后整年的深度，而波长数值的半数，則分別表示土壤日溫波落后半日及年溫波落后半年的深度。根据表4，在土壤溫度的日变化中，最高、最低溫度出現时间比地表落后24小时的深度，在韶關為55.32厘米，廣州為73.48厘米，汕頭為72.63厘米，湛江為92.96厘米，最高、最低溫度出現时间比地表落后12

小时的深度(一天中,地表最冷时,此处最热,反之亦然),在韶关则为27.66厘米,广州为36.74厘米,汕头为36.33厘米,湛江为46.48厘米。在土壤温度的年变化中,最高、最低温度出现日期比地表落后整年的深度,在韶关为1058.4厘米,广州为1400.0厘米,汕头为1394.2厘米,湛江为1779.8厘米,最高、最低温度出现日期比地表落后半年的深度(一年中,地表最冷时,此处最热,反之亦然),在韶关则为529.0厘米,广州为700.0厘米,汕头为697.1厘米,湛江为889.9厘米。

本文写作过程中,得到黄鈞榮、李仕鴻二位同志帮助作过一部分统计工作,特致谢意。

参 考 文 献

- 〔1〕 么枕生,由土壤温度論微气候,气象学报,21卷1—4期,1950。
- 〔2〕 謝义炳、陶祖文,北京地温的年日变化与土壤的导温率,北京大学学报,1956年第1期。
- 〔3〕 Тверской П. Н. 气象学教程,第二册,高等教育出版社,1954。382—383頁。
- 〔4〕 Вершинин П. В. и др. Основы агрофизики. Физматгиз, М. 1959. стр. 478.