

# 冬小麦田土壤中热交换研究

周 英 帅士章<sup>①</sup>

(南京气象学院应用气象系, 210044)

## 提 要

根据田间试验观测资料, 计算了土壤容积热容量和土壤导温率, 分析了麦田土壤温度的时空分布规律, 着重讨论了台站规范法和土柱热含量法计算土壤热容量的误差大小及提高准确性的途径。

**关键词:** 容积热容量 土壤导温率 台站规范法 土柱热含量法

## 引 言

由于作物活动层的存在产生了与裸地不同的农田小气候, 构成了土壤不同的热力学特性, 从而影响农田土壤温度变化和土壤热通量的传递速度。本文从土中热交换角度出发, 探讨冬小麦田土壤温度和土壤热通量的分布规律, 分析比较了计算热通量的方法, 找出提高计算准确性的途径, 为利用热量平衡方程分析研究农田土壤中的热交换和温度变

化, 进而为与农田小气候有关的田间管理措施实践提供参考依据。

## 1 试验概述

试验设在陕西泾阳农试站冬小麦田, 小麦品种为阿勃, 属半春性。观测地段地势平坦, 土壤为重壤土。种植制度为一年二熟(小麦-玉米)。观测时段为1988年4月26日至5月31日, 正值冬小麦拔节后期~成熟阶段。观测项目见表1。

表1 冬小麦田间观测一览表

| 观测项目 | 观测部位/cm                                    | 测定次数/日 | 仪器或方法   |
|------|--------------------------------------------|--------|---------|
| 土壤温度 | 0.5, 10, 15, 20, 40, 80                    | 6~8    | 地温表     |
| 土壤湿度 | 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 | 不定     | 土钻法     |
| 土壤吸力 | 10, 15, 20, 30, 50, 70, 85, 100            | 2      | U型汞柱张力计 |
| 土壤容重 | 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 | 仅1次    | 环刀法     |

## 2 计算方法

### 2.1 容积热容量的计算方法

$$C_m = 0.2 \times \rho_b + \theta_v [1]$$

$$\theta_v = w \times \rho_b$$

$C_m$  为容积热容量 ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\rho_b$  为土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $w$  为重量含水量 (%)。

### 2.2 导温率的计算方法

引入台站规范法导温率  $K$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ) 的计算式<sup>[2]</sup>

$$K = \frac{M}{N}$$

因为本资料的观测时间间隔为2小时, 故

$$M = 26.67(0.06\Delta\theta_0 + \Delta\theta_5 + 1.62\Delta\theta_{10} + \Delta\theta_{15} + 0.06\Delta\theta_{20})$$

$$N = \frac{b-a}{n} \times 2 \left( \frac{D_0 + D_n}{2} + D_1 + D_2 + \dots + D_{n-1} \right)$$

式中,  $M$  的单位为  $^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ,  $N$  的单位为  $^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ,  $\Delta\theta_0, \Delta\theta_5, \dots, \Delta\theta_{20}$  为各深度初终时刻的地温差(由终时刻减去初时刻),  $a$ : 初时刻,  $b$ : 末时刻,  $n$ : 时段数,  $D_0, D_1, D_2, \dots, D_n$  则表示 8 点、10 点、12 点到末时刻的土温分布的特征量, 有:

<sup>①</sup> 南京气象学院96届毕业生

$$D = \frac{\theta_0 + \theta_{20}}{2} - \theta_{10}$$

$\theta_0, \theta_{20}, \theta_{10}$  为各时次的0, 20, 10cm 的地温值。

## 2.3 土中热通量的计算方法

### 2.3.1 热平衡规范法

$$\theta_s = \frac{C_m}{\tau} (S_1 - \frac{K}{10} S_2)$$

$$S_1 = 20(0.082\Delta\theta_0 + 0.333\Delta\theta_5 + 0.175\Delta\theta_{10} + 0.156\Delta\theta_{15} + 0.004\Delta\theta_{20})$$

$$S_2 = \frac{\tau}{2} [\theta(20, t_1) - \theta(10, t_1) + \theta(20, t_2) - \theta(10, t_2)]$$

式中,  $\tau = 120$ 分时,  $\theta_s$  为2小时时段值( $\text{cal} \cdot \text{cm}^2$ ),  $\tau = 1$ 天时,  $\theta_s$  为日值,  $\Delta\theta_0, \Delta\theta_5, \dots, \Delta\theta_{20}$  为两次时刻各深度的地温差,  $\tau = t_2 - t_1$ ,  $\theta(20, t_1)$  和  $\theta(10, t_1)$  分别为  $t_1$  时刻20, 10cm 深度的地温值,  $\theta(20, t_2)$  和  $\theta(10, t_2)$  分别为  $t_2$  时刻20, 10cm 深度的地温值。

### 2.3.2 土柱热含量法

将  $C_m$  当作常量进行计算:

$$\theta_s = \frac{\bar{C}_m}{\tau} (2.5\Delta\theta_0 + 5\Delta\theta_5 + 5\Delta\theta_{15} +$$

$$12.5\Delta\theta_{20} + 30\Delta\theta_{40} + 20\Delta\theta_{80})$$

式中,  $\bar{C}_m$  为0到80cm 的平均热容量,  $\tau$  为120分或1天,  $\Delta\theta_0, \Delta\theta_5, \dots, \Delta\theta_{80}$ : 各深度  $t_2$  时刻与  $t_1$  时刻的地温差值。

$C_m$  分层进行计算:

$$\theta_{sd} = 2.5C_{m0}\Delta\theta_0 + 5C_{m0-5}\Delta\theta_5 + 5C_{m5-10}\Delta\theta_{15} + 12.5C_{m15-20}\Delta\theta_{20} + 30C_{m20-40}\Delta\theta_{40} + 20C_{m40-80}\Delta\theta_{80}$$

其中,  $\theta_{sd}$  为日值,  $C_{m0}$  为0cm 容积热容量,  $C_{m0-5}$  为0到5cm 的容积热容量,  $\dots$ ,  $C_{m40-80}$  为40到80cm 的容积热容量,  $\Delta\theta_0, \Delta\theta_5, \dots, \Delta\theta_{80}$  同前。

## 3 结果分析

### 3.1 土壤热力特性量的分析

土壤导热率、导温率、容积热容量是土壤热力特性的3个基本特性量, 它们满足以下关系式:

$$\frac{\lambda}{C_m} = K$$

根据实测容重、土壤湿度、土壤温度, 即可计算  $C_m$  和  $K$ 。

表2 各日期0~20cm 的  $C_m$  及  $K$  计算值

| 日期/月·日                                                            | 4.26 | 4.28 | 4.30 | 5.14 | 5.17 | 5.21 | 5.22 | 5.23 | 5.24 | 5.26 | 5.31 |
|-------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C_m / \text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ | 0.58 | 0.54 | 0.53 | 0.60 | 0.55 | 0.53 | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.52 |
| $K / \text{cm}^2 \cdot \text{hr}^{-1}$                            | 16.7 | 17.6 | 19.7 | 14.7 | 12.4 | 12.4 | 9.18 | 10.4 | 14.0 | 11.0 | 9.91 |

由表2可知, 0到20cm 深度,  $C_m$  的取值范围在0.49到0.60 $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , 而  $K$  则在9.18到17.60 $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$  之间取值。  $C_m$  和  $K$  不仅是时间的函数, 并随土壤深度而变。由于土壤容重、土壤湿度等的差异, 导致了  $C_m$  和  $K$  的空间变化。图1是  $C_m$  随深度变化的曲线。可以看出,  $C_m$  总的变化趋势是随深度增加而逐渐减小的。而  $K$  则相反, 随深度增加按指数规律增大<sup>[2]</sup>。

进一步分析  $C_m$  和  $K$  与土壤湿度  $W$  之间的关系, 可以发现, 随着  $W$  的增加,  $C_m$  线性增大(图2)。  $K$  则是呈抛物型曲线, 当  $W < W_K$  时,  $K$  单调增加, 当  $W > W_K$  时,  $K$  单调下降(图3)。  $W_K = 0.21$ , 与苏联学者科斯基的研究结果十分接近<sup>[2]</sup>。

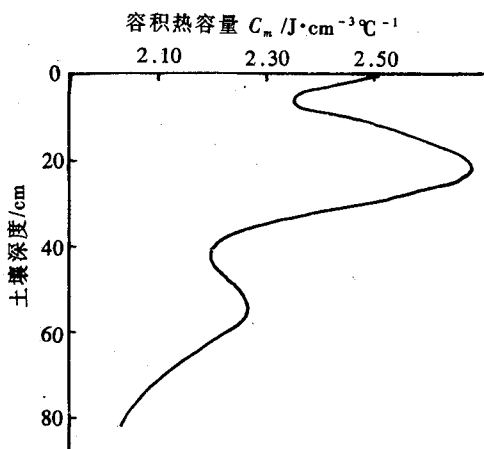


图1 容积热容量随土壤深度的变化

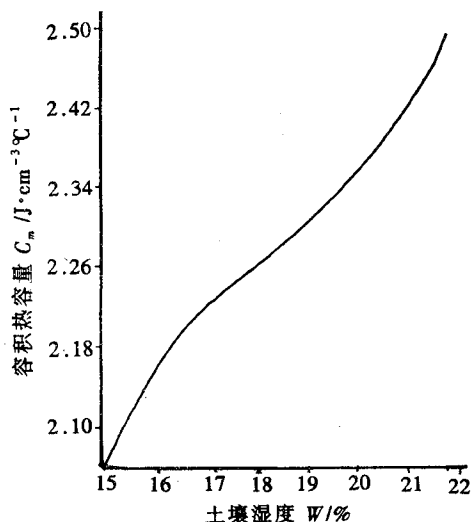


图2 容积热容量随土壤湿度的变化

### 3.2 土壤热通量分析

#### 3.2.1 台站规范法计算土壤热通量

采用两种方法计算土壤热通量。方法一是把初始时刻(8时)和终止时刻(20时)之间的时间以两小时分段,先求各时段的土壤热

通量,再对整个时段积分求得8~20时的总土壤热通量;方法二是直接把8~20时看作一个时段求土壤热通量。结果发现两种方法计算结果十分接近,平均相对误差小于6%,从而得出用长时段来计算 $\theta_s$ 是可行的,能满足精度要求。

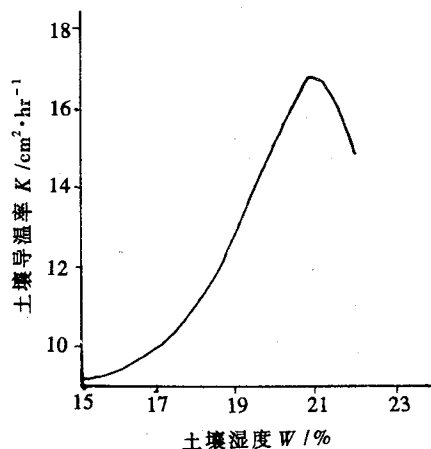


图3 导温率随土壤湿度变化

表3 台站规范法两种计算 $\theta_s$ 方法比较

| 日期/月·日             | 4.26 | 4.28 | 4.30 | 5.14 | 5.17 | 5.21 | 5.22 | 5.23 | 5.24 | 5.26 | 5.31 | 平均   |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 方法1: $\theta_{s1}$ | 60.8 | 55.3 | 50.7 | 50.3 | 43.8 | 24.2 | 31.0 | 23.0 | 25.2 | 29.2 | 39.8 | 39.5 |
| 方法2: $\theta_{s2}$ | 62.4 | 58.6 | 52.2 | 43.3 | 41.9 | 26.5 | 32.3 | 24.3 | 27.4 | 31.0 | 40.3 | 40.0 |
| $n^*$              | 2.47 | 5.62 | 2.87 | 16.1 | 4.48 | 8.48 | 4.05 | 5.14 | 8.04 | 5.96 | 1.29 | 5.87 |

$$* n = \frac{|\theta_{s1} - \theta_{s2}|}{\theta_{s2}} \times 100\%$$

#### 3.2.2 土柱热含量法计算土壤热通量

采用分层计算 $C_{mi}$ 和把 $C_m$ 当作常数处理来求 $\theta_s$ ,结果发现两者差别很小,平均相对

误差小于3%,说明在该地用简化的土柱法计算 $\theta_s$ 对其准确性影响极小,因此大大减轻了计算工作量。

表4 土柱法 $C_m$ 为常量与 $C_m$ 分层计算 $\theta_s$ 比较

| 日期/月·日                   | 4.26 | 4.28 | 4.30 | 5.14 | 5.17 | 5.21 | 5.22 | 5.23 | 5.24 | 5.26 | 5.31 | 平均   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C_m$ 为常量: $\theta_{s1}$ | 56.4 | 55.3 | 44.6 | 44.4 | 40.5 | 28.3 | 34.4 | 26.2 | 25.1 | 39.3 | 48.2 | 40.3 |
| $C_m$ 分层: $\theta_{s2}$  | 59.7 | 55.8 | 44.2 | 46.1 | 40.8 | 28.7 | 33.6 | 25.5 | 24.2 | 38.1 | 50.3 | 40.6 |
| $n^*$                    | 5.72 | 0.07 | 0.87 | 3.9  | 0.72 | 1.13 | 2.29 | 2.48 | 3.39 | 3.22 | 4.16 | 2.54 |

$$* n = \frac{|\theta_{s1} - \theta_{s2}|}{\theta_{s2}} \times 100\%$$

#### 3.2.3 两种方法的比较

因土柱法考虑了土壤热容量随深度的变化,假设少,方程严谨,故应用面广,精确度高,并把它当作真值来检验台站规范法。结果

发现两种方法所得的相对误差很接近,均未超过10%。从而进一步验证了台站规范法计算 $\theta_s$ 的准确性和没有必要把计算时段分得太小。

表5中下标1表示以2小时为一时段, 表示根据初终时刻直接求日 $\theta_s$ 值。先求时段的平均 $\theta_s$ ,再积分得日 $\theta_s$ 值;下标2

表5 两种方法对 $\theta_s$ 计算结果的比较

| 日期/月·日           | 4.26 | 4.28 | 4.30 | 5.14 | 5.17 | 5.21 | 5.22 | 5.23 | 5.24 | 5.26 | 5.31 | 平均   |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 台站法 <sub>1</sub> | 60.8 | 55.3 | 50.7 | 50.3 | 43.8 | 24.2 | 31.0 | 29.6 | 25.8 | 29.2 | 39.8 | 39.4 |
| 土柱法 <sub>1</sub> | 52.9 | 53.8 | 42.8 | 44.7 | 41.0 | 23.4 | 32.2 | 29.2 | 21.9 | 32.3 | 44.7 | 37.6 |
| 相对误差/%           | 14.9 | 2.80 | 18.4 | 12.5 | 6.87 | 3.33 | 3.84 | 7.70 | 14.9 | 9.71 | 10.9 | 9.65 |
| 台站法 <sub>2</sub> | 63.4 | 58.6 | 52.2 | 43.3 | 41.9 | 26.5 | 32.3 | 24.3 | 27.4 | 31.0 | 40.3 | 40.0 |
| 土柱法 <sub>2</sub> | 56.4 | 55.8 | 44.6 | 44.4 | 40.5 | 28.3 | 34.4 | 26.2 | 25.1 | 39.3 | 48.2 | 40.3 |
| 相对误差/%           | 10.5 | 5.11 | 17.0 | 2.34 | 3.48 | 6.60 | 6.13 | 7.22 | 9.50 | 21.2 | 16.4 | 9.59 |

为了进一步说明土壤通量在一天中各时刻的分布,绘出了土壤热通量随时间的变化曲线(图4)。由图看出,热通量的日变化相对于地面温度日变化有位相提前现象。其最大值在11时左右出现,比地面最高温度出现时间提前2~3小时;最低点在19时前后出现,两次通过0点的时间分别是凌晨5时和下午15时左右。

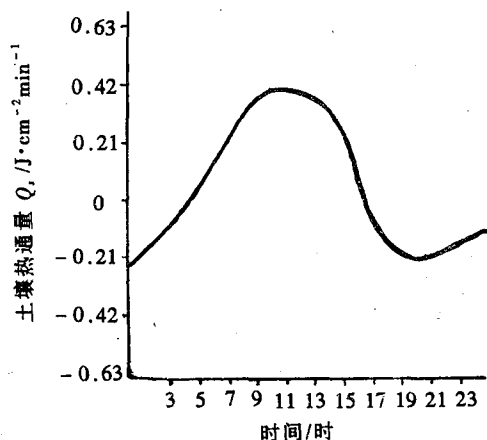


图4 夏季土壤中热交换的日变化

### 3.3 土壤温度振幅、位相及恒温层的确定

$$A_{zn} = A_{0n} \exp \left[ -\sqrt{\frac{n\pi}{KT}} \cdot z \right]$$

$$\varphi_{zn} = \varphi_{0n} - \sqrt{\frac{n\pi}{KT}} \cdot z$$

式中,  $A_{zn}$ ,  $\varphi_{zn}$  分别表示  $z$  深度处的振幅和位相,  $A_{0n}$ ,  $\varphi_{0n}$  分别表示地面温度的振幅和位相。

我们计算了5月15日5cm、10cm、15cm和20cm处的土温振幅和位相,发现两者的

计算值与实测值很接近(表6)。

表6 各深度振幅及位相落后时间的比较

| 深度/cm        | 5    | 10   | 15   | 20   |
|--------------|------|------|------|------|
| 实测 $A$       | 3.1  | 2.1  | 1.1  | 0.7  |
| 计算 $A$       | 3.2  | 2.1  | 1.3  | 0.8  |
| 实测 $\varphi$ | 2.02 | 4.01 | 6.00 | 8.02 |
| 计算 $\varphi$ | 1.80 | 3.60 | 5.40 | 7.20 |

由恒温层计算公式:  $z_H = \sqrt{\frac{KT}{n\pi}} \ln \frac{1}{\beta}$

$$\beta = \frac{A_{zn}}{A_{0n}}$$

$z_H$  处振幅为温度表测定精度:  $A_{zn} = 0.05^\circ\text{C}$ ,  $A_{0n}$  为地表振幅:  $5.2^\circ\text{C}$ 。因为深层(80cm以下)的土壤温度正弦波接近一阶正弦曲线,而恒温层较浅,故  $n$  取值为2。计算得  $z_H = 34.86\text{cm}$ ,与实际  $z_H = 35\text{cm}$  十分接近。

## 4 结论

4.1 土壤容积热容量  $C_m$  和土壤导温率  $K$  是时间和空间的函数。 $C_m$  随土壤湿度的增加而增大,  $K$  随土壤湿度变化先升后降,临界土壤湿度为0.21。

4.2 短时段(2小时)累积求和与长时段(12小时)计算土壤热通量时,台站规范法相对误差为6%,故时段大小不影响其计算精度。分层求  $C_{mi}$  和用平均  $C_m$  计算  $\theta_s$  的土柱热含量法比较,相对误差为3%,所以将  $C_m$  当作常量处理是可行的。

4.3 用土柱法计算值为真值,检验台站规范法的准确性,相对误差在10%以内,说明该地两种方法均适用。

(下转第32页)

(上接第57页)

4.4 恒温层深度为35cm,其计算值与测定值完全一致,从而证明在较浅层次正弦波的阶数取2是合理的。

### 参考文献

1 日本土壤物理特性测定委员会编. 土壤物理性测定法.

翁德衡译. 重庆: 科学出版社重庆分社, 1979: 420~

4212 翁笃鸣等. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1991: 33~35

3 周英, 申双和. 陕西泾阳冬小麦农田蒸散. 中国农业气象. 1992, 13(3): 6~9.

4 傅抱璞等. 土壤中热量交换和土壤温湿状况. 小气候学. 北京: 气象出版社, 1994: 38~82.

## A Study on Heat Exchanges in Winter Wheat Field

Zhou Ying Shuai Shizhang

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044)

### Abstract

On the basis of experimental data collected from winter wheat field in Jingyang Agrometeorological Experimental Station of Shaanxi Province, soil volumetric thermal capacity and temperature conductivity were calculated, and the vertical and temporal changes of soil temperature were analyzed. Besides, the soil heat flux was estimated using Station Rule Method and Soil Volume-Thermal Content Method respectively, the errors rising from both methods were compared and attempt to increase the accuracy was discussed.

**Key Words:** Volumetric thermal capacity, soil temperature conductivity, Station Rule Method, Soil Volume-Thermal Content Method