

台灣土壤熱擴散係數年變化推估

吳清吉 蔡子矜 許武榮

國立台灣大學大氣科學系

一、中文摘要

土壤溫度變化受到土壤物理性質的影響，其中土壤熱擴散是一個主要的參數。土壤熱擴散的大小除了和土壤質地有關，也隨土壤溼度改變。吳和許曾利用中央氣局 8 個測站的平均土壤溫度年變化，推估土壤熱擴散係數氣候值。本文進一步使用觀音茶業改良場的逐時土壤溫度觀測資料，分季統計，分析平均土壤溫度日變化，由平均土壤溫度日變化振幅和相位隨土壤深度的改變，推估土壤熱擴散的季節變化。

關鍵詞：土壤熱擴散係數、阻尼深度

Abstract

Soil temperature variations are controlled by soil properties, in which the soil thermal diffusivity is a key factor. Soil thermal diffusivity is a function of soil moisture. This study used the past soil temperature records at Kuan-yin to analyze the annual and the diurnal variations, damping depths, and thermal diffusivities of soil temperature. The results show that annual soil temperature is nearly sinusoidal in time with amplitudes decreasing exponentially with the soil depth. In addition, the time lags in soil temperature are proportional to the soil depth.

Key words: Soil thermal diffusivity, damping depth

二、前言

地表土壤溫度、土壤含水量、植被等在氣-地交互作用中，扮演重要角色。地表土壤溫度的變化受到地表能量收支的控制，能量收支項除了受到大氣狀況影響之外，也受到地表土壤種類、土壤含水量、植被的影響。土壤熱擴散係數為土壤溫度變化的一個

重要因素。土壤含水量增加時，熱擴散係數也隨土壤含水量增加而增加，但當土壤含水量到達一定程度以後，熱擴散係數達後極大值後，反而隨土壤含水量增加而微幅的減小。

在大氣模式中常使用強迫-恢復法 (force-restore method) 預報地表土壤溫度 (Arya, 2001; Bhumralhar, 1975; Blackadar, 1976; Deardorff, 1978)。這是一個近似兩層的土壤模式，其近地層深度由土壤的阻尼深度(damping depth)決定，一般設為阻尼深度的一半(Arya, 2001)。阻尼深度為土壤熱擴散係數的函數，因此土壤熱擴散係數的決定，對於地表土壤溫度的預報有直接和重要的影響。

不少學者利用探針進行土壤熱力性質和熱擴散係數的實驗，以決定土壤熱擴散係數，例如：De Vries(1952)，Van Wijk (1967) 等。除此之外，也可利用土壤溫度觀測紀錄，由土壤溫度振幅隨著深度增加而呈指數變小，或由時間落後(time lag)隨深度增加而增加的特性，推估土壤熱擴散係數(Sellers, 1965; Arya, 2001, 吳和許, 2003)。

吳和許(2003)由中央氣象局 8 個測站的土壤溫度平均年變化的振幅和時間落後推估阻尼深度和土壤熱擴散係數大小。結果顯示，表面土壤溫度振幅大小隨測站緯度增加而增加，在恆春(22°00')為 4.5°C，到了新竹為(24°49')7.4°C；8 個測站推估的阻尼深度分布在 2.1m 和 3.6m 之間，由此結果得到的土壤熱擴散係數在 $4.69 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ 和 $1.28 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ 之間。

為了解臺灣土壤阻尼深度和土壤熱擴散係數的季節變化，筆者收集 8 個農業改良

場(桃園、台中、台南、台南義竹、高雄、蘭陽、台東)、農業試驗所和觀音茶業改良場的逐時土壤溫度觀測資料,分季計其日變化,以估計各季的土壤阻尼深度和土壤熱擴散係數。本報告只呈現觀音茶業改良場的結果。

三、研究方法

觀音茶業改良場的逐時土壤溫度觀測有 5cm、10cm、20cm、30cm、50cm 和 100cm 六層,使用資料時間由 1992 至 1998 年。分析資料時,首先將各年同日土壤溫度作平均,得到不同深度的平均日土壤溫度年變化。然後再分季對每天相同時間的土壤溫度作平均,得到不同深度的平均土壤溫度日變化。然後再對平均土壤溫度作調和分析(Harmonic analysis)。

1. 調和分析

根據 Panofsky and Brier (1965),一個時間變數 X ,有 N 個觀測,可以由 $N/2$ 個調和波的和來代表:

$$X = \bar{X} + \sum_{i=1}^{N/2} C_i \cos \left[\frac{2\pi i}{P} (t - t_i) \right] \quad (1)$$

式中 t 為時間, \bar{X} 為平均, P 為基本周期; 振幅 C_i 和相位 t_i 分別為:

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad (2)$$

$$t_i = \frac{P}{2\pi i} \tan^{-1} \left(\frac{A_i}{B_i} \right) \quad (3)$$

A_i 和 B_i 分別為第 i 個調和波的正弦波和餘弦波振幅。 A_i 和 B_i 可由下式得到:

$$A_i = \frac{2}{N} \sum X \sin \left(\frac{2\pi i t}{P} \right) \quad (4)$$

$$B_i = \frac{2}{N} \sum X \cos \left(\frac{2\pi i t}{P} \right)$$

2. 土壤熱擴散係數推估

一維土壤溫度 T_s 的傳導方程式為:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (5)$$

假設土壤熱擴散係數 K_s 不是深度 z 的函數,地表土壤溫度隨時間為正弦變化,即:

$$T_s = \bar{T}_{s0} + A_s \sin \left[\frac{2\pi}{P} (t - t_m) \right] \quad (6)$$

式中 \bar{T}_{s0} 是地表平均土壤溫度, A_s 是地表土壤溫度變化的振幅, t_m 為相位, P 為週期。則式(6)的解析解可寫為(Arya, 2001):

$$T_s = \bar{T}_{s0} + A_s e^{-z/d} \sin \left[\frac{2\pi}{P} (t - t_m) - \frac{z}{d} \right] \quad (7)$$

式中 d 為阻尼深度,它與土壤熱擴散係數、週期的關係為:

$$d = \left(\frac{PK_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (8)$$

土壤溫度振幅隨深度呈指數減少,時間落後和土壤深度成正比。因此可估計阻尼深度和土壤熱擴散係數。

四、結果與討論

1. 土壤溫度年變化和日變化

圖 1 為觀音茶改場近地平均日氣溫的年變化,大致呈正弦波的形式,夏季溫度最高,冬季最低。

不同深度的平均土壤溫度年變化示於圖 2。大致而言,各測站土壤溫度變化的振幅隨深度減小,時間落後則隨著深度增加,這些特性符合土壤溫度解析解(式(7))的描述。5 cm 的土壤溫度在一月下旬最低,在七月中旬最高,年變化的振幅約為 7.5°C。100cm 深的土壤溫度,最低溫出現在二月上旬,最高溫出現在九月。

各季不同深度的平均土壤溫度日變化分別示於圖 3 中。一般而言,各季土壤溫度的日變化只到達 30cm 左右,5cm 深的最高溫約出現在 17 時,最低溫約出現在 9 時;日變化振幅仍隨深度減小,時間落後則隨著深度增加;50cm 以下的土壤溫度沒有日變化。日變化振幅在夏季最大,可達 1.9°C,在冬季最小,只有 0.9°C(表 1)。

2. 土壤熱擴散係數推估

圖 4 為 5cm 深的平均土壤溫度年變化和第一調和波的比較。第一個調和波的貢獻可達 98%,已充分代表平均土壤溫度年變化,可以充分代表土壤溫度的年變化。

5cm 深的平均土壤溫度變化日變化和第一調和波的比較,以春季為代表,示於圖 5。雖然第一個調和波的貢獻可達 95%,但是細觀圖 5,調和波波峰和波谷的出現時間和觀測結果有些微的差異,此差異可能減少

由時間落後估計阻尼深度和土壤熱擴散係數的可靠性。

圖 6 為土壤溫度年變化振幅和時間落後隨深度的變化，曲線套配(curve fitting)也同時示於圖中。由時間落後變化估計之阻尼深度(d_2)為 212.8cm，此數值和由振幅變化估計之結果(243.9cm)相當吻合(表 1)。由阻尼深度 d_1 和 d_2 ，利用式(8)得到的土壤熱擴散係數分別為 $5.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 和 $4.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 。

圖 7 為土壤溫度日變化振幅和時間落後隨深度的變化，曲線套配(curve fitting)也同時示於圖中。因為土壤溫度日變化只到達 30cm 深度，因此圖中只表示到 30cm。由振幅變化估計之春、冬、秋和冬的阻尼深度(d_1)分別為 12.8cm、13.0cm、15.3cm 和 14.2cm(表 1)。理論上，日變化的阻尼深度約為年變化阻尼深度的十九分之一 (12.8cm)，上述數字接近此結果。但是由時間落後估計之結果(d_2)則在 21.9cm-32.7cm 之間，遠大於 d_1 。此可能因為調和波波峰和波谷的出現時間和觀測的差異所致。

由阻尼深度 d_1 和 d_2 ，推估的土壤熱擴散係數分別示於表 1 中。由 d_1 和推估的結果在 $5.96 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 到 $8.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 之間，和年變化的結果相近。

五、結語

由觀音茶改場的逐時土壤溫度觀測資料分析，結果顯示土壤溫度年變化的振幅隨深度呈指數減小，時間落後則隨深度增加而增加，符合土壤溫度傳導方程式解析解的特性。5 cm 深度的最低土壤溫度發生在一月中旬左右。

各季土壤溫度日變化的只到達 30cm 深度；日變化振幅也隨深度呈指數減小，而時間落後則隨深度增加而增加。5cm 深的最高土壤溫度約出現在 17 時，最低土壤溫度約出現在 9 時

由土壤溫度年變化振幅所估計的阻尼深度為 243.9cm，和由時間落後所估計的結果(212.8cm)相近。由此得到的土壤熱擴散係數分別為 $5.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 和 4.51×10^{-7}

m^2s^{-1} 。由土壤溫度日振幅變化估計之春、冬、秋和冬四季的阻尼深度分別為 12.8cm、13.0cm、15.3cm 和 14.2cm，約為年變化阻尼深度的十九分之一，由此推估的土壤熱擴散係數在 $5.96 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 到 $8.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 之間。

誌謝

本文是在國科會研究計畫編號 NSC 92-2111-M-002-014-AP2 的支助下完成，所使用資料由中央氣象局提供，詹明華先生協助本研究的進行，特此致謝。

參考文獻

- 吳清吉、許武榮，2003：台灣土壤溫度分析和土壤熱擴散係數推估，*大氣科學*，31，115-130
- Arya, S. P., 2001: *Introduction to micrometeorology*. 2th Ed., Academic Press, 415 pp.
- Bhumralkar, C. M., 1975: Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. *J. Apply Meteor.*, 14, 1246-1258.
- Blackadar, A. K., 1976: Modeling the nocturnal boundary. *Proceedings of the Third Symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality*, 46-49, Amer. Meteor. Soci.
- Deardorff, J. W., 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, 83, 1889-1903.
- De Vries, D. A., 1952: A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. *Soil Sci.*, 73, 83-89.
- Sellers, P. J., 1965: *Physical climatology*. Chicago Press., 272 pp.
- Van Wijk, W. R., 1967: New method for measuring heat flux density at the surface of soils or of other bodies. *Nature*, 213-214

表1:表面土壤溫度年變化振幅 \bar{T}_{so} 、阻尼深度 d 和熱擴散係數 K_s 的估計值。 d 和 K_s 的下標1:由土壤溫度振幅推估的結果,下標2:由時間落後隨推估的結果。

		年變化	春季日變化	夏季日變化	秋季日變化	冬季日變化
振幅 \bar{T}_{so} (°C)		7.5	1.5	1.9	1.3	0.9
深度5cm第1調和波貢獻(%)		98.0	95.5	95.2	91.8	91.1
阻尼深度(cm)	d_1	243.9	12.8	13.0	15.3	14.2
	d_2	212.8	32.7	26.5	24.0	21.9
土壤熱擴散係數 ($10^{-7} m^2 s^{-1}$)	K_{s1}	5.93	5.96	6.14	8.51	7.33
	K_{s2}	4.51	38.9	25.5	20.9	17.4

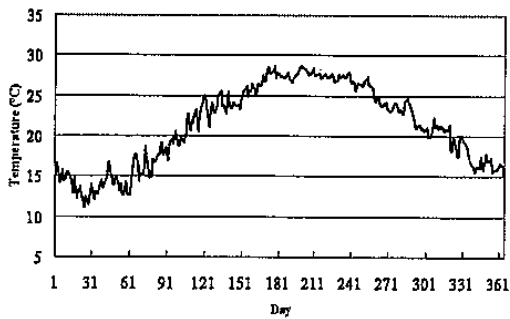


圖1 觀音茶改場近地平均日氣溫的年變化

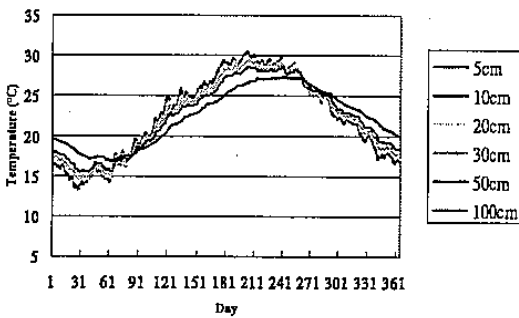
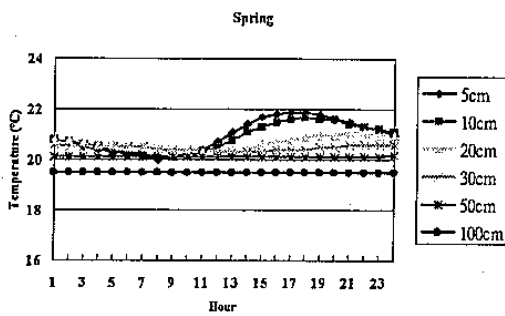
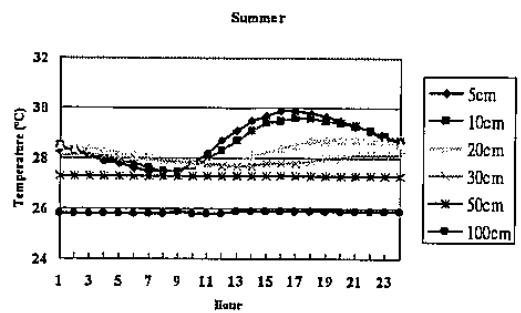


圖2 不同深度的平均土壤溫度年變化

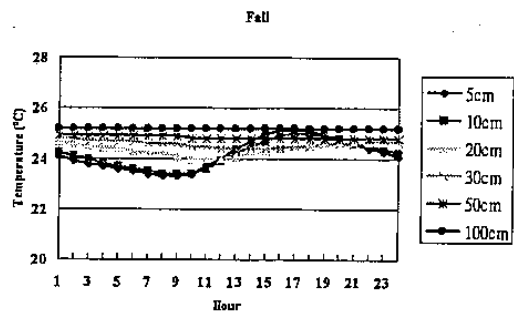
(a)



(b)



(c)



(d)

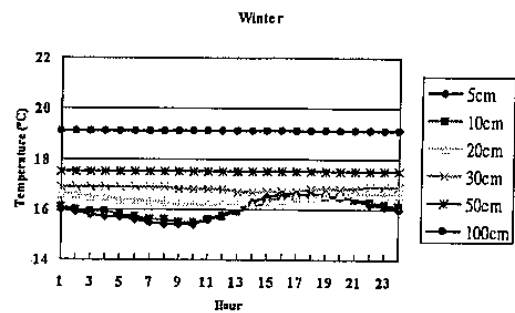


圖3 各季不同深度的平均土壤溫度日變化:(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

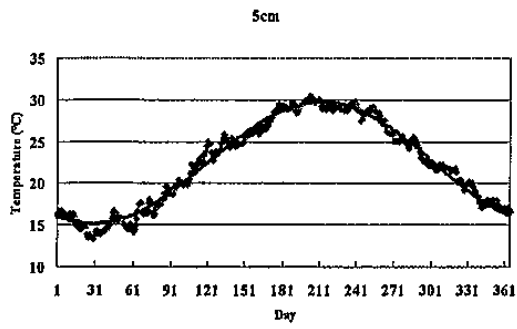


圖4 深度5cm的平均土壤溫度年變化(紅色點)和第一調和波(藍色線)的比較

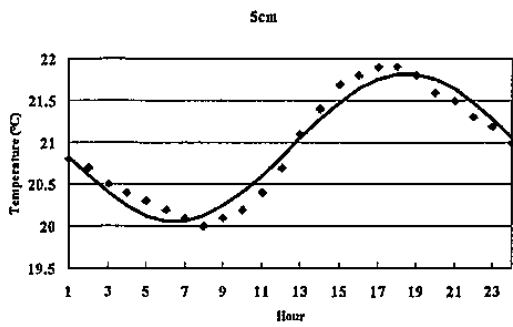


圖5 春季深度5cm的平均土壤溫度日變化(紅色點)和第一調和波(藍色線)的比較

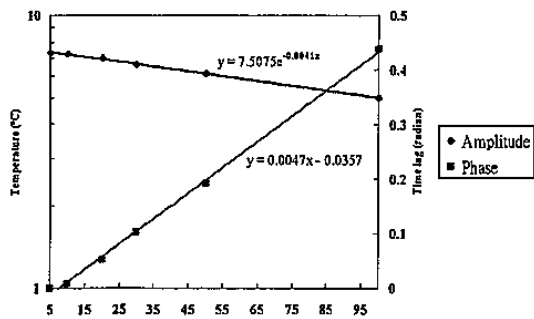
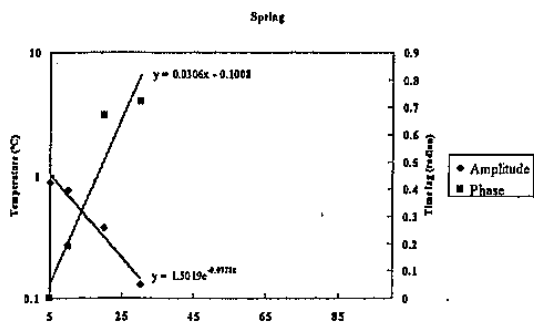
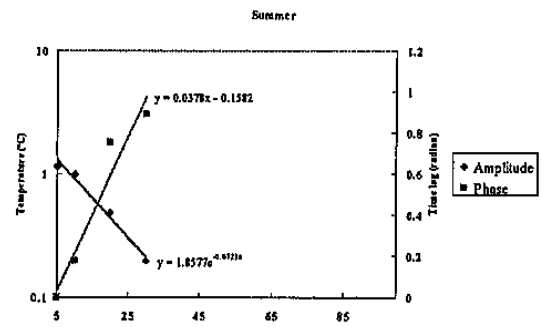


圖6 土壤溫度年變化振幅和時間落後隨深度的變化

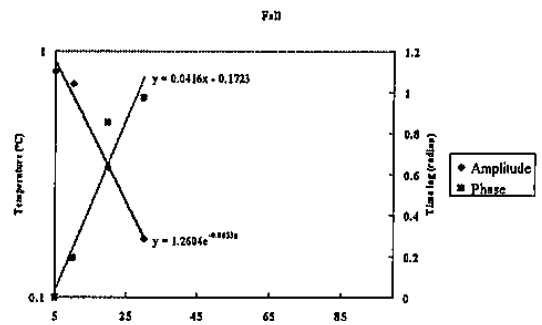
(a)



(b)



(c)



(d)

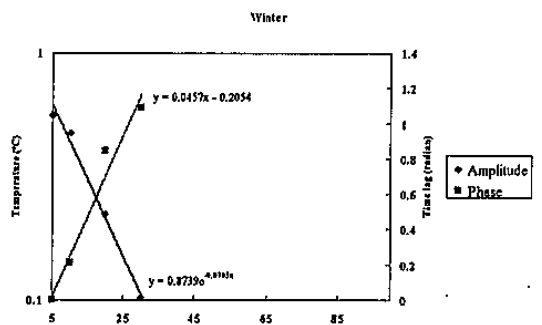


圖7 各季土壤溫度日變化振幅和時間落後隨深度的變化：(a)春季，(b)夏季，(c)秋季，(d)冬季