

不同深度土壤熱擴散係數之推估與探討

林明毅⁽¹⁾ 林佩佩⁽²⁾ 曹舜評⁽³⁾ 林俐玲⁽⁴⁾

摘 要

本研究利用台北縣華梵大學坡地試區 2004 年 3 月至 2005 年 1 月間兩種植生狀態不同深度之土壤溫度進行研究。為排除重力水對溫度之影響。先以無雨日之資料推估土壤熱擴散係數，再利用兩種方法計算月平均土壤熱擴散係數，其一以 24 小時平均溫度推求，其二以無雨日之平均熱擴散係數得之。探討不同深度平均熱擴散係數之特性，並討論以月平均熱擴散係數推估之土壤溫度與實測溫度之關係。結果顯示，土壤溫度正弦曲線之振幅隨深度增加而減少，各深度達峰值溫度之時間也隨著深度增加而有延遲的現象。兩種計算月平均熱擴散係數之方法則以各月中無雨日平均熱擴散係數推估之溫度與實測溫度差異較小，所得結果較佳。

(**關鍵詞**：土壤溫度、熱擴散係數)

Estimation of the Thermal Diffusivity for Different Soil Depth

Ming-Yi Lin⁽¹⁾ Pei-Pei Lin⁽²⁾ Shun-Ping Tsao⁽³⁾ Li-Ling Lin⁽⁴⁾

Graduate Student⁽¹⁾, Master⁽²⁾ and Professor⁽⁴⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

Assistant Professor⁽³⁾, Department of Environmental and Hazard-Resistant Design, Huaan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

This study measured the daily soil temperature of different vegetated and depth during March 2004 to January 2005 from the isolated area of two experimental plots of Huaan University in Taipei. For eliminating influence of gravitational water, estimated the thermal diffusivity of non-raining days and the mean monthly thermal diffusivity was calculated by two method: one was calculated by mean monthly temperature, and the other was estimated from non-raining days. The properties of thermal diffusivity in different depths were discussed and estimating the relation between measured and predicted soil temperature by monthly mean thermal diffusivity. The results indicated that the

(1)國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

(2)國立中興大學水土保持學系碩士生

(3)華梵大學環境與防災設計學系助理教授

(4)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail: lllin@dragon.nchu.edu.tw)

amplitude of the temperature sine curve decrease due to the soil depth increase and the time of achieving the peak temperature also delay with soil depth increase. Monthly percentage of mean variation between measured and predicted soil temperature, estimated from two methods were used to analyze the mean monthly thermal diffusivity, showed that temperature calculated with non-raining days mean daily of thermal diffusivity had better result.

(**Keyword** : Soil temperature, Thermal diffusivity)

前言

台灣地處亞熱帶地區海島型氣候，終年溫暖潮濕，中部及花蓮地區四季如春；北回歸線以南，則幾乎全年如夏。而土壤表層所接收之輻射能、熱能及潛能交換等能量收支的過程即會反應至土壤溫度(soil temperature)的變化。

除了季節、緯度不同之外，土壤性質、含水量及植生覆蓋也是影響土壤溫度的重要因素。日間土壤溫度上升的主要因為太陽輻射熱，土壤深度越深傳導越慢，溫度變化越小。觀察不同深度土壤之溫度日變化資料，可發現溫度大致呈現正弦曲線變化，且振幅隨深度增加而減小。在鋒面通過時，不同深度土壤溫度下降的情況不同，愈接近地表的土壤溫度下降幅度愈大。與溫度相關的土壤參數有比熱容量(specific heat capacity)、熱傳導度(thermal conductivity)及熱擴散係數(thermal diffusivity)等。其中土壤熱擴散係數較大時，白天地表受太陽輻射加熱，熱能容易傳送到較深的土壤，使得地表土壤增溫減緩；而夜間地表冷卻，亦容易從較深的土壤得到熱能補充，使得地表土壤降溫減緩，造成地表土壤溫度日夜變化的範圍變小。反之熱擴散係數較小時，日夜溫度變化範圍則較大。

本研究以台北縣華梵大學坡地試區之實測溫度為基本資料，對每月不同深度、植生覆蓋的熱擴散係數進行探討，並利用兩種不同推估熱擴散係數之方法，推估溫度與實測值比較後探討其適用性，希望找出本試區每月不同深度下具代表性之熱擴散係數。

前人研究

土壤溫度是一個在土壤物理和大氣變化下能量及物質轉換過程中決定速率及方向的重要因子。不同深度日平均土壤溫度年變化可由正弦曲線的函數來估計，其正弦曲線之偏差受氣溫及太陽輻射影響，土壤深度越深，正弦曲線之振幅越小，週期之起始亦隨土壤深度增加而延滯(Hillel, 1982; Marshall and Holmes, 1988; 盧惠生等, 2000)。Hares et al.,(1985)假設土壤熱通量為隨時間變化之正弦函數，發現推估之結果與實際量測值有相當的一致性，但水分會造成兩者間有些微差異。

利用 Fourier 法則分析長期觀測之每日土壤溫度變化可有效描繪出土壤內部熱傳導的過程(Carlsaw and Jaeger, 1959; Gupta et al., 1983)。影響土壤熱傳導度的因子大致分成兩部分：一部分為土壤自身固有的性質，另一部分則可藉由人為的管理控制。土壤之熱傳導度與土壤粒徑(soil particle size)、

孔隙度 (porosity) 及含水量 (moisture content) 有關 (Wierenga et al., 1969; Yafav and Saxena, 1973)，亦可從土壤的組成及顆粒形態預測土壤熱傳導度和體積熱容量 (De Vries, 1952、1963)。其中水分含量對土壤熱傳導度的影響大於其他物理特性的影響 (Fritton et al., 1974; Parikh et al., 1979; Riha et al., 1980)。沈志軒(2006)指出孔隙中水分含量隨降雨產生變化，當土壤水分含量增加時，土壤熱傳導係數升高。Abu-Hamdeh et al. (2000) 利用探針量測不同質地之土壤熱傳導度，顯示土壤熱傳導度會隨土壤總體密度及水分含量增加。

土壤熱擴散係數是地熱通量和土壤溫度變化的重要因子。由於土壤熱擴散係數為土壤熱傳導度及土壤比熱容量之函數，則土壤含水量、密度及土壤溫度的變異，亦會造成土壤熱擴散係數改變。植生的改變使土壤密度增加可能造成土壤熱擴散係數增加 (Dědeček et al., 2005)，土壤中之有機質含量亦可能使熱擴散係數改變。Jaramillo et al. (2000) 研究發現有機質含量會增加土壤排水的程度，且斥水性 (hydrophobic) 的土壤之熱擴散係數較非斥水性 (nonhydrophobic) 之土壤低 (Bachmann et al., 2001)。

而土壤熱擴散係數與土壤深度關係之研究上，盧惠生等(2000)觀測不同深度之土壤溫度日變化，利用系統搜尋法求得最佳熱擴散係數。其研究結果顯示，土壤熱擴散係數隨深度增加，且呈線性相關。蔡子衿等 (2008) 利用土壤溫度作調和分析，顯示土壤溫度年變化呈正弦變化，而且振幅隨著深度增加呈指數減少。

由於土壤中地下水位上之含水量及總體密度皆隨深度改變，近地表之土壤應是非均質狀態，Silans et al.(1996)根據 Nassar and Horton(1989)熱擴散在非均質土壤中之 Lettau 理論(1954)及穩定週期的溫度變化，得到 NHS 方法 (Lettau's non homogeneous soil method)。此方法推求出之公式為：

$$K(z) = \frac{\lambda(z)}{C} = \frac{\omega \sin \varepsilon(z) \sin \delta(z)}{\frac{\partial \varphi(z)}{\partial z} \frac{\partial \beta(z)}{\partial z}} \quad (1)$$

式中 $K(z)$ 為熱擴散係數， ω 為頻率， $\varepsilon(z)$ 、 $\delta(z)$ 為相位角， $\varphi(z)$ 、 $\beta(z)$ 為振幅。推估出之土壤熱擴散係數隨深度變動，深度 0-5cm 左右有上升趨勢，10-20cm 左右則下降，大於 20cm 時熱擴散係數則又開始上升。

研究材料與方法

1. 研究試區概況

本研究之觀測資料源自台北縣華梵大學坡地試區。華梵大學位於台北縣石碇鄉境內之大崙山上，校區為一陵線分隔為東西兩部分，此分隔之陵線在南段為南北走向；北段為東北-西南走向。校區西側高程在 430-570 公尺之間，地形為面向西南之凹型坡地，為校舍建築所在，其北界亦為陵線，為東南-西北走向。校區東側高程在 350-570 公尺之間，地形較為陡峭，主要為坡向面東之坡地，校區之東界有一地勢低窪之谷地，有常流水通過。校區之地質主要屬中新世之木山層，為砂頁岩互層中夾有煤層。位在屈尺斷層以西，屬西部麓山帶。

華梵氣象站建於 2002 年，2002-2006 年

年均溫為 19.7℃，年平均降雨量為 3737.5 mm。經土壤理化性質分析，試區土壤總體密度為 1.50 g/cm³，孔隙率 42.98%，砂粒含量 51.80%，粘粒含量 20.80%，質地為砂質粘壤土。

2. 研究材料

試區分為三個處理小區，每區長 13 公尺、寬 5 公尺，坡度為 55.4%，植生處理差異如表 1。每小區中心位置埋設溫度感測器，深度分別 5cm、10cm、20cm 及 30cm，另在地表上方 120cm 及地表設置溫度計，每 30 分鐘記錄一筆資料。由於受到寒假斷電及第二區感測器之電線破損，資料缺漏太多，則本研究使用 2004 年 3 月至 2005 年 1 月第一區與第三區之資料進行分析。

表 1 第一區及第三區之植生處理差異

Table 1 Treatment differences in vegetation at 1st and 3rd plots

第一區	第三區
保持裸露至草長 20 公分。	初期裸露，間隔一段時間便刈割至 40 公分。

3. 研究流程

由於水分含量會造成土壤溫度之變化差異很大，研究首先篩選出試區無雨日之土壤溫度資料進行分析，將無雨日實測溫度資料代入式(12)得土壤熱擴散係數 D，再將求得 D 值代入式(7)得推估之土壤溫度。研究中計算各深度月平均土壤熱擴散係數分為兩種方法，其一將每月平均實測溫度代入公式計算，另一則將每月中無雨日之熱擴散係數平均而得，再將兩方法求得之熱擴散係數代入推算土壤溫度變化，分析兩種方法推估出之

土壤溫度與實測土壤溫度間之差異百分率 E%，進而比較兩種月平均熱擴散係數推估方法之優劣。

4. 研究方法

4.1. 土壤溫度推估式

由熱傳導第一定律，即 Fourier 法則得知土壤熱傳導公式可用類似流體傳導之 Darcy 定律推求：

$$q_h = -K \nabla T \quad (2)$$

式中 q_h 為熱通量 (heat flux) (cal cm⁻² sec⁻¹)，即為單位時間通過單位橫斷面積之熱量，K 為熱傳導度 (thermal conductivity) (cal cm⁻¹ sec⁻¹ °C⁻¹)， ∇T 為溫度之空間梯度 (°C cm⁻¹)。若以單一方向微分形式表示，則可改寫為：

$$q_z = -K_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

$\partial T / \partial z$ 指土壤深度之垂直方向 z (cm) 之溫度變化， $z=0$ 為土壤表面。且式中負號表示熱傳導是較高溫流向較低溫，即負溫度梯度。根據能量不減定律，即可用連續方程式表示：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q_h = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad (4)$$

ρ (g cm⁻³) 為物質之密度， c (cal g⁻¹ °C⁻¹) 為單位質量之比熱容量 (specific heat capacity)，即單位溫度變化物體單位質量熱含量之變化， t 為時間 (sec)。

實際上熱傳導度 K 應有 X、Y、Z 三方向，假設三方向之傳導差異不大，且本研究主要

討論與土壤深度之關係，故僅列出單一 z 方向形式。單一 z 方向連續方程式可表示為：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

$K/\rho c$ 可用熱擴散係數 D (thermal diffusivity) 表示，則式(5)可改寫為：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (6)$$

將式(6)偏微分方程式利用分離變數法，得到代表不同深度土壤溫度變化之解：

$$T(z, t) = T_a + ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z} \sin \left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2D}}z + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{12} t_m \right) \quad (7)$$

z 為土壤深度 (cm)， t 為時間 (hr)， T_a 為平均溫度 (°C)。 a (°C) 為地表溫度變化之 sine 曲線之振幅，本研究以地表最高與最低溫度間差距之半表示。 ω 為 $2\pi/P$ ， P 為週期 24 hr。 D 為熱擴散係數 ($\text{cm}^2 \text{hr}^{-1}$)。 t_m 則為地表日間最大溫度之時間。

4.2. 熱擴散係數推估式

本研究以直接計算出之熱擴散係數 D 代回式(7)，觀察實測溫度與推估溫度之關係。相同深度之土壤溫度日變化為正弦曲線形式，且最高溫時 $\sin$ 函數值為 1，最低溫時 $\sin$ 函數值為 -1，則利用式(7)可得：

$$T_{\max} = T_a + ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z} \quad (8)$$

$$T_{\min} = T_a - ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z} \quad (9)$$

計算式(8)及式(9)之差：

$$T_{\max} - T_{\min} = 2ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z} \quad (10)$$

將式(10)取自然對數 $\ln$ 計算：

$$\ln(T_{\max} - T_{\min}) = \ln \left(2ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}z} \right) \quad (11)$$

$$D = \frac{\pi}{24} \left[\frac{z}{\ln \left(\frac{2a}{T_{\max} - T_{\min}} \right)} \right]^2 \quad (12)$$

於先依照實際溫度計算出熱擴散係數，再代回式(7)計算推估值，其中誤差之關係以平均差異百分率 $E\%$ 討論。

$$E\% = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (T_c - T_0)^2 \right]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N T_0} \cdot 100\% \quad (13)$$

其中 T_c 為推估溫度 (°C)， T_0 為實測溫度 (°C)。

結果與討論

1. 研究期間試區氣溫變化

利用第一試區之實測氣溫資料，取得 2004 年 3 月至 2005 年 1 月之每月平均溫度、最高及最低溫度，結果如表 2 所示。最高溫發生於七月 30.25°C，最低溫於一月 9.56°C。

2. 研究試區土壤溫度變化

2.1. 日平均土壤溫度年變化

由試區雨量紀錄中選取無降雨且無數據缺漏之資料，自 2004 年 3 月至 2005 年 1 月共計 92 日，分別將兩區塊一日內之土壤溫度作平均，得不同深度之日平均土壤溫度年變化，如

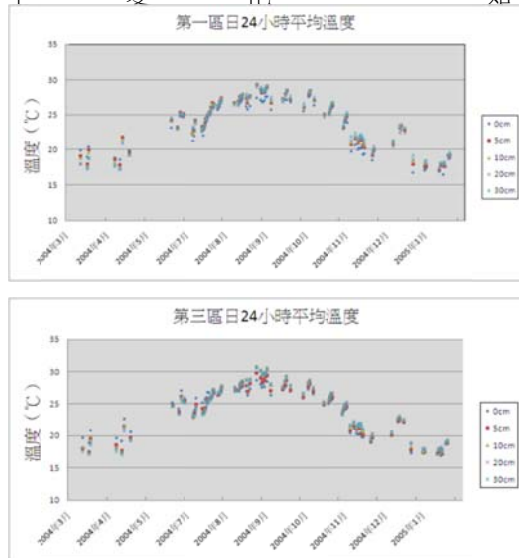


圖 1 所示。顯示不同深度土壤日平均溫度年變化大致呈正弦曲線型式。

表 2 第一試區各月份平均氣溫、最高及最低氣溫

Table 2 Mean, maximum and minimum values of atmospheric temperature for month in test plot

年/月	平均 (°C)	最高 (°C)	最低 (°C)
04/3	18.62	23.26	15.00
04/4	19.78	23.00	16.68
04/5	24.17	27.01	22.06
04/6	24.10	27.38	22.11
04/7	26.31	30.25	24.36
04/8	26.26	29.97	24.52
04/9	25.65	29.29	23.08
04/10	20.15	24.29	17.55
04/11	20.33	24.23	17.78
04/12	17.82	21.25	15.71
05/1	11.69	14.32	9.56

第一區深度 5cm 之年度最高溫及最低溫分別為 29.34°C、10.43°C，年變化之振幅約 9.46°C；於 30cm 深時，最高溫 29.37°C、最低溫 11.41°C，振幅 8.98°C。第三區 5cm 深之最高溫 29.74°C、最低溫 10.77°C，振幅 9.49°C；深度 30cm 之最高溫 30.51°C、最低溫 11.57°C，振幅為 9.47°C。其中可能因地表有雜草覆蓋，植物之保暖與隔熱效果使得土壤受氣候變化之影響較小，造成第三區 5cm 和 30cm 深之土壤溫度振幅差異 0.02°C 與第一區 0.48°C 相比無明顯降低。

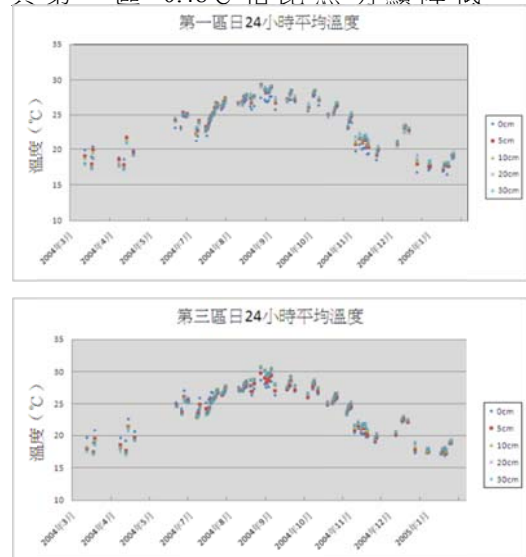


圖 1 各深度之振幅變化整理於表 3。

2.2.月平均土壤溫度日變化

日間土壤溫度主要受太陽輻射熱影響，越接近地表受輻射加熱上升之幅度越明顯；而夜間之輻射冷卻作用，亦使越接近地表之土壤溫度下降越快。將每月相同時間所觀測之土壤溫度平均之後，整理出不同深度之月平均土壤溫度日變化，下列以 2004 年七月

及第一區 04 年七月（圖 2-i），地表 0cm、

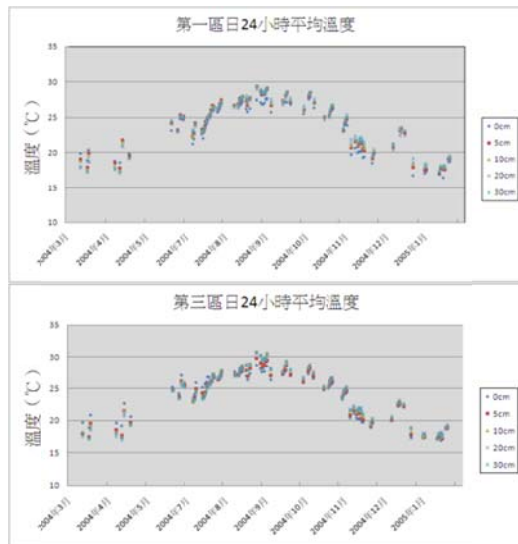


圖 1 第一區與第三區不同深度日平均土壤溫度年變化

Figure 1 Mean daily values of the soil temperature for different soil depth during March 2004 at 1st and 3rd plot

地下 5cm、10cm、20cm 及 30cm 之振幅，依序為 2.94°C、2.23°C、1.84°C、0.83°C 與 0.73°C，變化情況符合土壤溫度變化之振幅隨深度增加而減少（Jaynes, 1990）。而各深度達最高溫之時間由淺到深依序為 13.5hr、16.5hr、17 hr、17.5 hr 及 17.5 hr，大致可看出土壤溫度達最高峰之時間亦隨深度增加而具有延滯現象。其中發生最低溫之時間亦有此延滯情況，但以下僅以最高溫來討論。2005 年一月為例（圖 2）。

表 3 日平均土壤溫度年變化各土壤深度之最高溫度、最低溫度及振幅

Table 3 Maximum, minimum and amplitude values of mean daily values of the soil

temperature for different soil depth						
第一區			第三區			
	T _{max}	T _{min}	振幅	T _{max}	T _{min}	振幅
0cm	27.91	8.49	9.71	28.69	10.65	9.02
5cm	29.34	10.43	9.46	29.74	10.77	9.49
10cm	29.46	10.52	9.47	30.88	10.76	10.06
20cm	28.98	11.13	8.93	30.68	11.64	9.52
30cm	29.37	11.41	8.98	30.51	11.57	9.47

第一區 05 年一月（圖 2-ii）振幅依深度排列為 2.38°C、1.31°C、1.17°C、0.48°C、0.40°C；各深度達最高溫時間依序 13 hr、16 hr、16 hr、18.5 hr、20 hr。

第三區 04 年七月（圖 2-iii）振幅依序為 3.85°C、2.76°C、2.10°C、1.38°C、1.04°C；達最高溫時間 15 hr、15 hr、17 hr、18 hr、18.5 hr。

第三區 05 年一月（圖 2-iv）振幅 1.55°C、1.26°C、1.09°C、0.71°C、0.56°C；尖峰時間 13.5 hr、16 hr、17.5 hr、19 hr、19.5 hr。

隨季節之改變，相同區域相同深度下之振幅七月皆大於一月，顯示七月溫度之日變化較一月大，且冬季因持續低溫或鋒面影響使日夜溫差較夏季不明顯。而地表達最高溫與地下 30cm 達最高溫之延滯時間相比，顯示出一月地表溫度向下傳遞之速率較七月緩慢，原因為土壤理化性質改變，造成溫度傳遞速率改變，如有機質含量、密度及水分含量等。

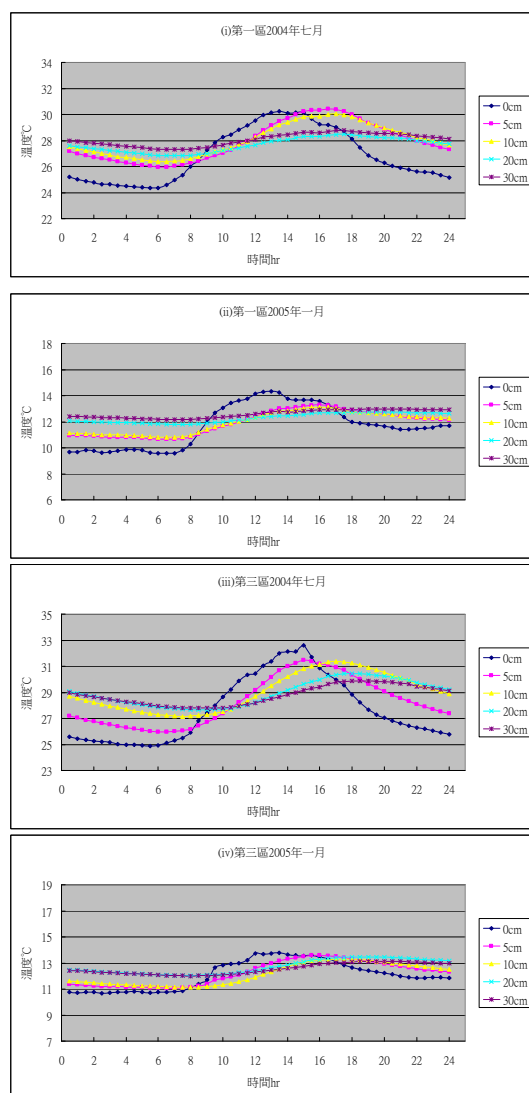


圖 2 第一區與第三區各深度之月平均土壤溫度日變化(i)第一區 04 年七月(ii)第一區 05 年一月(iii)第三區 04 年七月(iv)第三區 05 年一月

Figure 1 Mean monthly values of the soil temperature for different soil depth in 1st and 3rd plot(i)1st plot July 2004(ii)1st plot January 2005(iii)3rd plot July 2004(iv)3rd plot January 2005

3.土壤熱擴散係數及土壤溫度之推估

土壤熱擴散係數為推估土壤溫度變化主要參數之一。其計算由 Fourier 法則及連續方程式，代入初始及邊界條件，且具有物理參數的不變性之假設而得。典型 Fourier 形式是排除及忽略瞬間現象之長期影響，使得熱擴散係數的計算並沒有考慮到短期氣候條件，但結果可能能夠反應穩定影響土壤內部熱傳導因子所造成的變化。

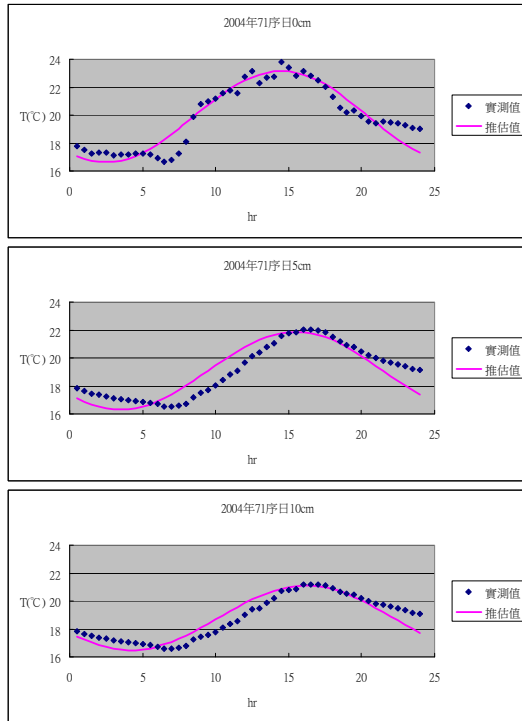
3.1.每日之熱擴散係數

將篩選過後之無雨日不同深度實測之土壤溫度代入式(12)，推估出每日各深度之熱擴散係數 D 。且將計算出各深度之 D 值代入式(7)推估出每日之溫度變化，以第一區 2004 年第 71 序日為例，如圖 3。

其 71 序日之實測土壤溫度與推估土壤溫度之平均差異百分率 $E\%$ 於地表、深度 5cm、10 cm、20 cm 及 30 cm 依序為 3.93 %、4.60 %、3.22 %、1.20 %、1.41 %。地表之土壤溫度主要受氣溫影響，故未完全依正弦曲線變化，但土壤溫度之振幅隨深度增加而減少。

相同深度下熱擴散係數值之大小，主要由式(12)中分母 $\{\ln[2a/(T_{\max}-T_{\min})]\}^2$ 決定。其中地表振幅 a 與各深度 $T_{\max}-T_{\min}$ 之差距越大，分母會越大， D 值則越小。若從 $D = K / \rho c$ 來看， D 為土壤種類及含水量的函數，例如在相同地區相同深度下之熱擴散係數主要決定於各深度之振幅，而振幅差異可能受到土壤含水量影響。降雨過後或土壤水分含量較高時，土壤溫度易隨水份傳遞至較深層之土壤，使得深層土壤與淺層土壤之溫度值趨於接近，此時振幅差異變小則 D 值變大。

除此之外，D 值亦可能受土壤深度、環境變



化及有機質含量等因子影響。

而不同深度之熱擴散係數，以 2004 年第 71 序日為例，第一區深度 5cm 時為 $49.51 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 、10cm 為 $67.57 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 、20cm 為 $39.69 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 、30cm 為 $80.84 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ ；第三區深度 5cm 時為 $15.32 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 、10cm 為 $16.61 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 、為 $32.88 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 、30cm 為 $52.08 \text{ cm}^2 \text{ hr}^{-1}$ 。於 5cm 及 10cm 時大致隨深度增加，但達 20cm 時第一區之 D 值卻下降，而至 30cm 皆又上升。觀察其餘日子，在 10cm 及 20cm 時 D 值有較深度 5cm 低之情況，造成此差異之原因研判受地表植生根系之影響，雜草根系深度約 10-20cm，根系會增加土壤之孔隙，可增加滲透及改善深層土壤條件，使得此範圍受根系附近垂直方向含水量變化之影響，當水分下滲後水分含量減少，可能使地表溫度振幅與 10cm、20cm 之振幅差異增加，且

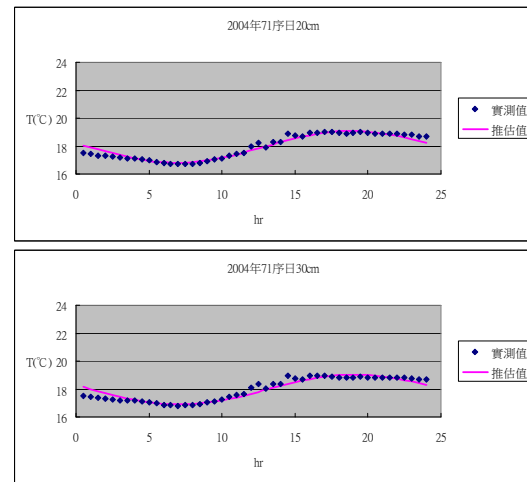


圖 3 第一區第 72 序日之土壤溫度實測值與推估值關係圖

Figure 2 Comparison of measured and predicted soil temperature for different soil depth in successive day 71 at 1st plot

增加之比例較深度增加之比例高，亦因根系造成土壤孔隙變大，使土壤中空氣含量增加。空氣孔隙越大會使熱傳導度、比熱容量及熱擴散係數越小 (Ochsner *et al.*, 2001)。

3.2. 月平均之熱擴散係數

本研究之月平均熱擴散係數以兩種方法計算，其一係以每月各深度相同時間之平均溫度代入式(12)求得 D_1 (錯誤! 書籤的自我參照不正確。-a)；另一以相同月份每日不同深度之熱擴散係數平均而得 D_2 (錯誤! 書籤的自我參照不正確。-b)，錯誤! 書籤的自我參照不正確。中灰色區塊為熱擴散係數下降之深度。且將不同深度 z 與熱擴散係數 D_1 及 D_2 之關係示於錯誤!

找不到參照來源。

錯誤！書籤的自我參照不正確。

中顯示，利用每月相同時間之平均溫度代入公式計算出之 D_1 值大致比用各深度每日熱擴散係數平均之 D_2 值大。造成此大小 差異

之原因，可能為各月之每日相同時間溫度平均之後使溫度之日變化變小，當溫度振幅變小時，則 D 值變大；而將各月每日之熱擴散係數平均取得之 D_2 值，較能保留每日溫度變化差異之特性。使得前者計算結

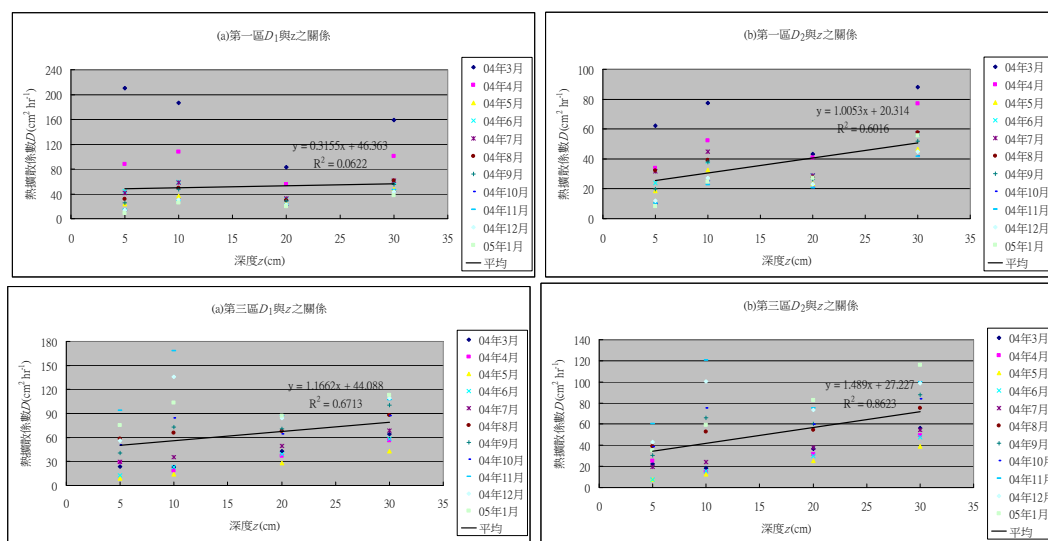


圖 4 (a) 深度 z 與 D_1 之關係圖 (b) 深度 z 與 D_2 之關係圖

Figure 3 (a) Comparison of z and D_1 (b) Comparison of z and D_2

表 4 各月份之平均熱擴散係數(a)以平均溫度計算 D_1 (b)以日平均 D 求得 D_2 (灰色區塊為 D 值下降之深度)

Table 4 Mean monthly of thermal diffusivity (a) D_1 depended on mean temperature
(b) D_2 depended on mean daily thermal diffusivity

(a)	第一區				第三區			
年/月	5cm	10cm	20cm	30cm	5cm	10cm	20cm	30cm
04/03	210.22	186.98	82.64	158.61	23.58	22.63	42.65	64.35
04/04	87.73	107.39	55.02	101.11	28.65	18.36	36.56	56.11
04/05	23.32	37.01	25.12	47.59	8.77	13.94	28.18	42.43
04/06	44.36	59.46	31.39	59.24	12.87	22.76	39.14	58.06
04/07	41.88	58.74	32.57	61.04	29.52	35.66	49.77	68.44
04/08	31.34	49.40	30.06	60.79	58.59	65.99	68.18	87.86

04/09	25.98	47.56	28.46	55.14	40.88	73.07	70.85	100.19
04/10	12.92	30.99	21.68	43.48	50.10	84.05	64.10	87.39
04/11	14.33	28.73	22.57	46.46	93.89	168.28	87.31	107.01
04/12	14.17	30.82	22.85	43.67	55.89	135.87	84.20	109.40
05/01	9.23	25.83	20.24	37.37	75.30	103.34	86.94	112.67

(b)	第一區				第三區			
年/月	5cm	10cm	20cm	30cm	5cm	10cm	20cm	30cm
04/03	62.32	77.19	43.24	87.97	22.36	18.39	36.55	56.51
04/04	33.70	52.33	40.83	76.89	25.34	14.98	31.32	49.16
04/05	18.60	32.46	23.53	46.48	7.62	12.40	25.35	39.02
04/06	23.83	38.38	28.65	56.24	7.60	15.28	30.04	47.75
04/07	31.63	44.82	29.01	57.24	19.77	24.25	37.59	54.65
04/08	31.97	39.01	27.78	57.62	39.06	52.66	54.52	75.11
04/09	19.80	37.81	26.21	51.80	30.52	65.80	60.36	87.90
04/10	9.95	24.98	20.62	41.71	38.62	75.24	59.71	83.77
04/11	10.41	22.71	20.39	41.71	60.41	120.63	75.38	99.75
04/12	11.84	26.96	22.88	45.01	43.08	100.38	73.41	98.76
05/01	8.4	24.79	27.36	55.53	34.72	58.83	82.48	115.62

果較後者大，且後者數值下降幅度平均約

70%左右。**錯誤！找不到參照來源。**中之直線為各深度熱擴散係數平均後之線性迴歸線，其中(a)第一區迴歸線： $y = 0.3155x + 46.363$ 、 $R^2 = 0.0622$ ，第三區 $y = 1.1662x + 44.088$ 、 $R^2 = 0.6713$ ；(b)第一區 $y = 1.0053x + 20.314$ 、 $R^2 = 0.6016$ 、第三區 $y = 1.489x + 27.227$ 、 $R^2 = 0.8623$ 。在相同熱擴散係數推估方法時，第三區之斜率皆比第一區之斜率高，顯示第三區平均之熱擴散係數隨深度加深而增加之幅度較第一區大。

於化及有機質含量等因子影響。

而不同深度之熱擴散係數，以 2004 年第 71 序日為例，第一區深度 5cm 時為 49.51 cm² hr⁻¹、10cm 為 67.57 cm² hr⁻¹、20cm 為 39.69 cm² hr⁻¹、30cm 為 80.84 cm² hr⁻¹；第三區深度 5cm 時為 15.32 cm² hr⁻¹、10cm 為 16.61 cm² hr⁻¹、為 32.88 cm² hr⁻¹、30cm 為 52.08 cm² hr⁻¹。於 5cm 及 10cm 時大致隨深度增加，但達 20cm 時第一區之 D 值卻下降，而至 30cm 皆又上升。觀察其餘日子，在 10cm 及 20cm 時 D 值有較深度 5cm 低之情況，造成此差異之原因研判受地表植生根系之影響，雜草根系深度約 10-20cm，根系會增加土壤之孔隙，可增加滲透及改善深層土壤條

件，使得此範圍受根系附近垂直方向含水量變化之影響，當水分下滲後水分含量減少，可能使地表溫度振幅與 10cm、20cm 之振幅差異增加，且增加之比例較深度增加之比例高，亦因根系造成土壤孔隙變大，使土壤中空氣含量增加

。空氣孔隙越大會使熱傳導度、比熱容量及熱擴散係數越小 (Ochsner *et al.*, 2001)。

3.2.月平均之熱擴散係數

本研究之月平均熱擴散係數以兩種方法計算，其一係以每月各深度相同時間之平均溫度代入式(12)求得 D1 (錯誤! 書籤的自我參照不正確。-a)；另一以相同月份每日不同深度之熱擴散係數平均而得 D2 (錯誤! 書籤的自我參照不

正確。-b)，錯誤! 書籤的自我參照不正確。中灰色區塊為熱擴散係數下降之深度。且將不同深度 z 與熱擴散係數 D1 及 D2 之關係示於錯誤! 找不到參照來源。。

錯誤! 書籤的自我參照不正確。中顯示，利用每月相同時間之平均溫度代入公式計算出之 D1 值大致比用各深度每日熱擴散係數平均之 D2 值大。造成此大小 差異之原因，可能為各月之每日相同時間溫度平均之後使溫度之日變化變小，當溫度振幅變小時，則 D 值變大；而將各月每日之熱擴散係數平均取得之 D2 值，較能保留每日溫度變化差異之特性。使得前者計算結

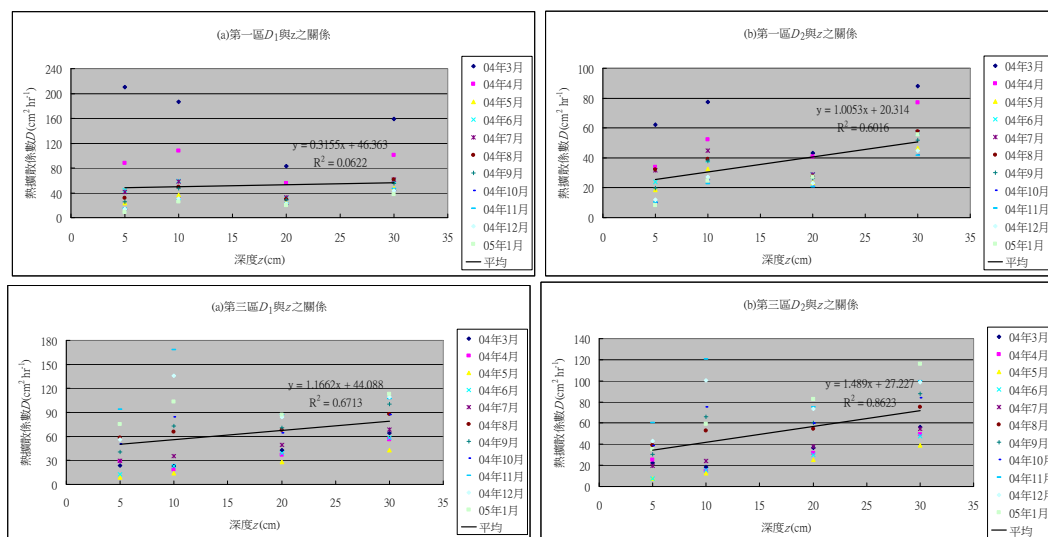


圖 4 (a) 深度 z 與 D1 之關係圖(b) 深度 z 與 D2 之關係圖

Figure 3 (a) Comparison of z and D1 (b) Comparison of z and D2

表 4、錯誤! 找不到參照來源。可看出，D 值在深度 10-20cm 處有下降趨勢，之後則又繼續上升，此情況亦符合 Silans *et*

al.(1996)中利用 NHS 模式 (Lettau's non homogeneous soil method) 所推估之熱擴散係數於深度 10cm 左右下降，過 20cm 後又上升之情況。

而上述兩種 D 值推估出之月平均溫度日變化與實測溫度之平均差異百分率 $E\%$ 示於表 5。第一區之推估結果，以每月中每日相同時間之平均溫度計算之 D_1 所推估之溫度變化在深度 5-10cm 時與實測溫度之差異百分率 $E\%$ 較大，深度 20-30cm 時則以 D_1 較佳。第三區大致上以各月中每日之熱擴散係數平均得之 D_2 推估結果較佳。以下以第一區 2004 年 3 月為例 (圖 5)。

圖 5 顯示推估值大致可代表實測溫度之變化，而因為本研究僅挑選無雨日進行分析，資料組數不足且非連續性，造成在 14 至 15 時之實測土壤溫度有大幅躍升的情況。另外，土壤深度越深，推估值越接近實測溫度。兩種計算月平均熱擴散係數之方法則以 D_2 所推估之土壤溫度與實測值較接近，即與實測溫度之差異百分率 $E\%$ 較小，僅第一區

20-30cm 處較 D_1 大。比較兩種推估方法與實測溫度之差異百分率 $E\%$ ， D_1 與 D_2 差異大

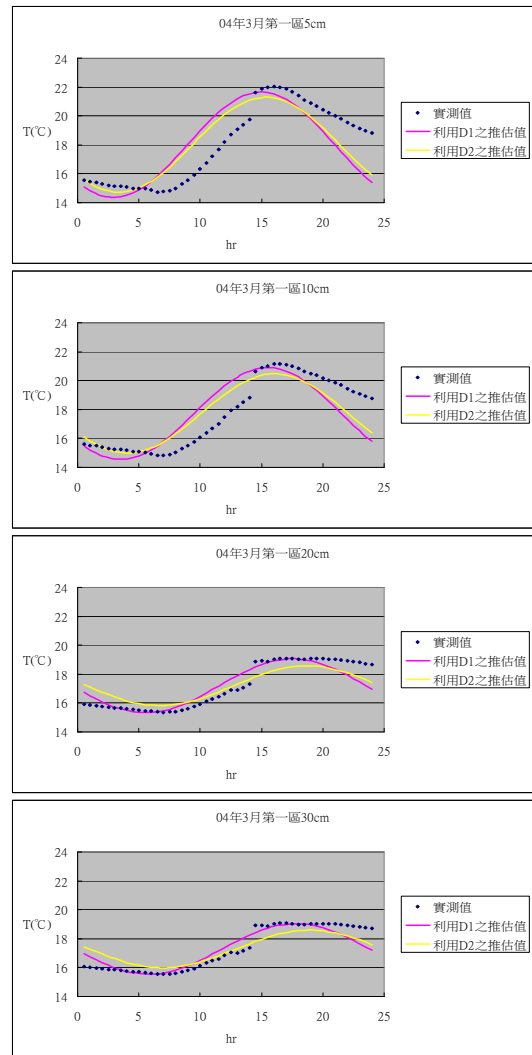
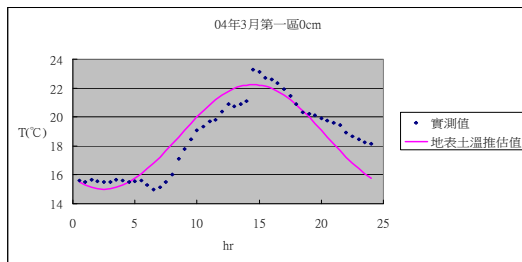


圖 5 第一區 04 年 3 月不同深度實測與推估之月平均土壤溫度關係

Figure 4 Comparison of monthly measured and predicted soil temperature for different soil depth in 1st plot, March 2004

表 5 各月份之平均熱擴散係數 D_1 值與 D_2 值代入推估溫度變化與實測溫度變化之平均差異百分率 $E\%$

Table 5 Monthly percentage of mean variation between measured and predicted soil temperature, estimated from D_1 and D_2

第一區								
年/月	5cm		10cm		20cm		30cm	
	(a) $E\%$	(b) $E\%$	(a) $E\%$	(b) $E\%$	(a) $E\%$	(b) $E\%$	(a) $E\%$	(b) $E\%$
04/03	9.76	8.17	8.27	6.55	3.70	4.06	3.21	3.87
04/04	8.85	7.49	7.18	5.75	2.41	1.88	1.88	1.52
04/05	2.58	2.33	1.62	1.45	0.38	0.42	0.49	0.51
04/06	1.40	0.96	0.67	0.58	0.95	1.05	1.04	1.09
04/07	3.43	3.15	2.31	1.95	0.33	0.38	0.46	0.50
04/08	1.59	1.61	0.87	0.68	0.79	0.86	0.91	0.95
04/09	1.29	1.15	0.89	0.92	1.43	1.51	1.45	1.51
04/10	1.72	1.69	1.50	1.56	1.67	1.71	1.69	1.72
04/11	3.82	3.17	2.47	1.96	0.61	0.62	0.72	0.75
04/12	3.75	3.41	2.58	2.30	0.50	0.50	0.62	0.59
05/01	3.49	3.27	2.69	2.59	0.85	0.95	0.98	1.01

第三區								
年/月	5cm		10cm		20cm		30cm	
	(a) $E\%$	(b) $E\%$	(a) $E\%$	(b) $E\%$	(a) $E\%$	(b) $E\%$	(a) $E\%$	(b) $E\%$
04/03	3.65	3.54	3.08	2.56	1.68	1.54	1.14	1.32
04/04	6.78	6.48	4.81	4.05	2.84	2.36	1.63	1.40
04/05	2.10	1.88	1.79	1.54	0.99	0.80	0.37	0.35
04/06	1.55	1.28	2.20	1.53	1.15	0.85	0.48	0.52
04/07	1.86	1.73	1.49	1.17	0.69	0.75	0.44	0.77
04/08	2.14	1.87	2.24	1.98	1.07	0.83	0.42	0.41
04/09	2.48	2.22	3.08	2.95	1.67	1.44	0.99	0.83
04/10	2.56	2.32	3.19	3.05	1.32	1.22	0.60	0.55
04/11	3.95	3.61	4.62	4.27	2.26	2.02	1.27	1.16
04/12	3.93	3.67	5.15	4.77	2.50	2.25	1.50	1.32
05/01	5.20	4.41	5.70	4.86	2.85	2.76	1.83	1.87

致小於 1%，兩種推估熱擴散係數之方法並無明顯差異。

結論與建議

綜合前述對實測溫度之分析及對熱擴散係

數 D 值與溫度變化之推估結果進行探討後，可得以下結論：

1. 由實測之日平均土壤溫度年變化及月平均土壤溫度日變化可看出土壤溫度變化大致呈正弦曲線型式，振幅隨土壤深度越深減少，且溫度變化的峰值時刻隨深度增加而有延滯之現象。
2. 植生對熱擴散係數之影響在於根系影響土壤中水分及空氣的組成。根系會增加土壤孔隙，水份向下流失的速度較快，造成空氣含量增加，使得熱擴散係數下降。而雜草根系約 10-20 公分，故造成熱擴散係數皆在深度 10-20 公分處下降，至 30 公分處又趨上升。
3. 月平均之熱擴散係數由兩種方法計算：一以每月各深度相同時間之 24 小時平均溫度推估而得，另一以相同月份每日之平均熱擴散係數平均得之。將兩種熱擴散係數推估出不同深度之溫度變化與實測溫度比較後發現以相同月份每日熱擴散係數平均之推估結果較佳。

參考文獻

1. 沈志軒(2006)，「蓮華池試驗集水區淨輻射與土壤熱能變化特性之探討」，國立台灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
2. 蔡子衿、吳清吉、許武榮(2008)，「台灣土壤溫度變化和土壤熱擴散係數推估」，大氣科學，第 36 卷，第 83-100 頁。
3. 盧惠生、林壯沛、黃良鑫(2000)，「蓮華池地區天然闊葉林不同土壤深度的溫度日週期變化」，中華水土保持學報，第 31 卷，第 267-278 頁。
4. Abu-Hamdeh, N. H. and R. C. Reeder (2000), "Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1285-1290.
5. Bachmann, J., R., T. Ren Horton and R. R. van der Ploeg (2001), "Comparison of thermal properties of four wettable and four water-repellent soils," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1675-1679.
6. Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger (1959), "Conduction of Heat in Solids," Clarendon Press, Oxford.
7. Dedecek, P., J. Safanda, M. Kresl, and V. Cermak (2005), "Interannual changes of soil temperature, moisture and thermal diffusivity under surface," *Geophysical Research Abstracts*, 7: 05321.
8. De Vries, D. A. (1952), "A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ," *Soil Sci.*, 73:83-89.
9. De Vries, D. A. (1963), "Thermal properties of soils," In *Physics of plant environment*. W.R. van Wijk(Ed). North-Holland, Amsterdam.
10. Fritton, D. D., W. J. Busscher, and J. E. Aplett (1974), "An inexpensive but durable thermal conductivity probe for field use," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 38:854-855.
11. Gupta, S. C., W. E. Larson, and R. R. Allmaras (1983), "Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage-surface residue condition," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:223-232.

12. Hares, M. A., J. Ben-Asher, A. D. Matthias, and A. W. Warrick (1985), "A simple method to evaluate daily positive soil heat flux," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:45-47.
13. Hillel, D. (1982) "Introduction to Soil Physics," Academic Press, San Diego, CA.
14. Jaramillo, D. F., L. W. Dekker, C. J. Ritsema and J. M. H. Hendrickx (2000), "Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates," *J. Hydro.*, 231:105-111.
15. Jaynes, D. B. (1990), "Temperature variation effect on field-measured infiltration," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:305-312.
16. Lettau, H. H. (1954), "Improved models of thermal diffusion in the soil," *Trans. Am. Geophys. Union*, 35:121-132.
17. Marshall, T. J. and J. W. Holmes (1988), "Soil Physics," 2nd ed. Cambridge Univ. Press, New York.
18. Nassar, I. N. and R. Horton (1989), "Determination of the apparent thermal diffusivity of a nonuniform soil," *Soil Sci.*, 147:238-244.
19. Ochsner, T. E., R. Horton and T. Ren (2001), "A new perspective on soil thermal properties," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1641-1647.
20. Parikh, R. J., J. A. Havens and H. D. Scott (1979), "Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:1050-1052.
21. Riha, S. J., K. J. McInnes, S. W. Childs and G. S. Campbell (1980), "A finite element calculation for determining thermal conductivity," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:1323-1325.
22. Silans, A. M., B. P. Buno A. Monteny and J. P. Lhomme (1996), "Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX-Sahel experiment," *Agricultural and Forest Meteorology*, 81: 201-216.
23. Wierenga, P. J., D. R. Nielsen, and R. M. Hagan (1969), "Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 33: 354-360.
24. Yadav, M. R. and G. S. Saxena (1973), "Effect of compaction and moisture content on specific heat and thermal capacity of soils," *Journal Indian Soc. Soil Sci.*, 21:129-132.

100 年 03 月 31 日收稿

100 年 04 月 18 日修改

100 年 06 月 02 日接受