土壤溫度概述

陸象豫[1]、孫銘源[2]

土壤溫度的重要性

土壤溫度及其變動將影響土壤水分和空氣傳輸、土壤結構形成、土壤動物與微生物活動、植物殘株分解及養分吸收等，因而被視為主要的土壤特性之一。土壤中有機物質的分解與氮、磷、鉀等養分元素之礦質化作用，常隨土壤溫度增高而增強，這些養分的含量，將影響植物與土壤微生物生長。土壤溫度能影響植物對水分與養分之吸收效率，植物根系對水分的吸收效率將隨溫度升高而提高，直到溫度達到植物生長範圍的溫度上限為止。而土壤溫度亦影響植物種子的萌芽，不同的種子各有其發芽最適溫，以及可萌芽的最高與最低溫度的限制；在低溫的土壤中，種子萌芽多屬緩慢，超過30℃的溫度亦不利萌芽。植物根系發育，很明顯地受土壤溫度影響，多數植物的根系在土壤溫度低於2℃或高於35℃時，生長即受到阻礙。此外土壤溫度對土壤水、土壤構造以及對土壤凍結現象的影響，間接影響植物的生長。土壤溫度亦左右流經其間次地表逕流水的溫度，常為決定溪流水溫的主要因素，因此土壤溫度在生態系中扮演重要的角色。

土壤熱能的來源

土壤熱能主要來源有三，分別為太陽的輻射能、地熱能及土壤本身的熱能。對多數地區而言，太陽輻射為表層土壤最主要的熱源，它的強弱與緯度、坡向、地表狀況有關。陽光的入射角為決定單位面積所吸收輻射量的最主要因素，而入射角與緯度有絕對關係，赤道與近赤道地區陽光入射角接近垂直，地表可吸收最大的輻射量，高緯度地區入射角較小，地表接受的太陽輻射量顯著減少。赤道區大氣層表面的垂直輻射量約2 cal/cm^2/min，此輻射量隨緯度增高而遞減。南向坡面可較其它坡向的坡面較早接受陽光熱能，且一天中最熱的時段，陽光可直接照射至南向坡面，因此南向坡面通常吸收較多的

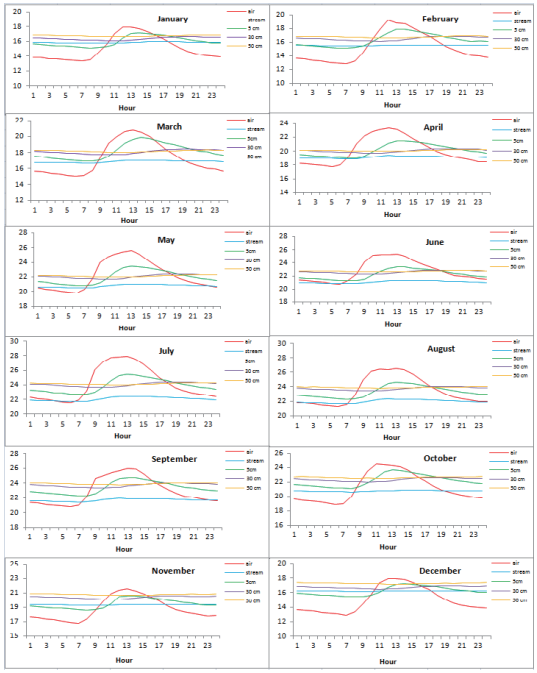

圖1 蓮華池3號集水區濱水帶各月監測溫度之日變化量(℃)。

林業試驗所・[1]集水區經營組、[2]六龜研究中心

輻射能，其土壤溫度多較其它坡向者(尤以北向者為甚)為高。植物可吸收約三分之二強的太陽輻射能以進行光合作用，並具有阻絕熱能散射的功能，可顯著地減少土壤吸收太陽輻射能，以及夜晚以長波輻射(波長4~100 μ)方式散失的地表熱能；因此有植物覆蓋土壤的表層溫度日變化量較裸露地表者為小。此外地表吸收輻射能的多寡決定於地表的反射率(albedo)，而反射率依地面狀況、陽光入射角而異 (在赤道地區入射的輻射能僅有7%反射回大氣，而極地地區則接近56%)、土壤類型及其含水量而定，故地表狀況可影響熱能的接收與流動，進而影響土壤溫度。

地熱以傳導與輻射的方式傳遞熱能，在火山活動地區為顯著的土壤熱能來源，但大多數地區的表層土壤均僅能接收微量的地熱能。土壤中微生物活動可放出熱能，土壤含有較高的有機質、礦質養分，或空氣及水分含量適宜，比無生物活動之土壤溫度要高出數度。此現象最常見於有機質堆積的堆肥區，然而一般土壤接受為生物活動所釋出的熱能亦多屬不顯著。此外土壤水分無論是由氣態凝結成液態或由液態凍結為固態，皆釋放熱能，而與之相反的為吸收熱能的蒸發與融解作用；凝結、蒸發、凍結與融解等現象均會影響土壤的溫度。

土壤熱能的傳遞

土壤層某定點的溫度會因與週遭環境的熱能交換、土壤本身的熱傳導、蒸發、凝結及微生物分解等物理化學作用過程中所吸收或釋放的熱能而發生變化。這些因子可將之歸納為影響土壤熱能接收(諸如：日照輻射量、

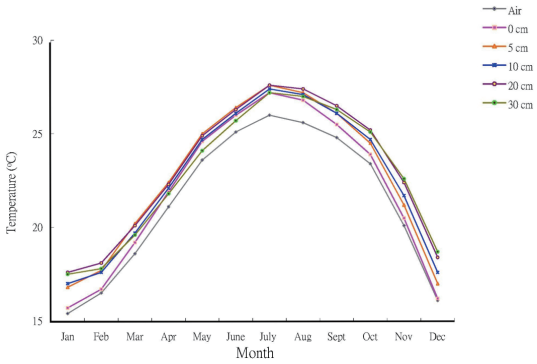

圖2 蓮華池氣象站所觀測的大氣及表土層溫度月記錄(1982~1991年)。

土壤顏色等)及影響能量散失與轉變(諸如：敷蓋與覆蓋、土壤含水量等)兩大類。土壤熱能的接收與散失與土壤之熱含量(heat content，為一個系統內能夠轉換成熱能的總能量，雖無法計算出其量，但一系統內熱含量的改變量是可被計算出的，單位為 calorie)、熱容量(heat capacity，一定量物質改變溫度所需的熱量，單位為cal cm^{-3} ℃$^{-1}$ 或 cal g^{-1} ℃$^{-1}$)、熱傳導度(thermal conductivity，為單位時間單位面積之物質熱能傳遞的速率，單位為cal cm^{-1} s^{-1} ℃$^{-1}$等)及比熱(specific heat，物質1 g升高1℃所需之熱能，以cal 表示，而物質的熱容量為該物質的比熱與質量的乘積)有關，此等因子決定土壤熱能的傳遞。其中又以比熱對土壤溫度的影響最顯著，水的比熱為1.00 cal/g，土壤礦物的比熱多接近於0.2 cal/g，幾乎所有物質的比熱都小於水的比熱。土壤物質的比熱以石英 (約0.19 cal/g)為最低，腐植質 (約0.44~0.47 cal/g) 為最高。此外當土壤孔隙內之水分含量增高時，土壤之導熱性及熱之擴散性均迅速增高；因此腐植質與水的存在對土壤的比熱影響甚大，亦間接決定土壤溫度。

熱能的輸入、散失與傳遞將影響土壤溫度，而土壤溫度亦可反應出土壤熱能的傳輸。表層土壤溫度依所吸收的輻射能或地熱能，經由熱和潛在能量的交換過程而變化，熱能交換的速率則決定於上述的熱容量、傳導度與比熱。這些現象通過一系列複雜的傳輸過程擴及土壤剖面中，使土壤溫度呈現日與季節性變。

土壤溫度的變動

土壤溫度隨氣象因子變動以及土壤和大氣的相互作用而不斷變化。影響土壤溫度變化的因子計有：日照輻射、土壤水含量、地表狀況、土壤結構及生物活動等因子影響，其中又以前三者的影響為最顯著。太陽輻射能為多數地區表層土壤的主要熱能來源，它的強弱隨季節及時辰大致呈周期性波狀的變動，因此表層土壤溫度也呈類似的變化；惟變動的幅度較日照輻射量的變動為不顯著，且依地表與土壤狀況而異，並隨深度增加而遞減，直至甚微而趨近恆定。

日變動量以表土為最大，在離地表30 cm處的土壤其日溫差多在3℃以下，在60 cm深處的土壤溫度日變動量多不會超過1℃，而在100 cm深處的土壤日溫差則幾乎趨近於零。若地表有植物覆蓋，或者是土壤水含量高，則土壤溫度的日變動將更為不顯著。在日出前每日土壤的溫度以表土為最低，且隨深度之增加而溫度遞增。表層土壤每日最高溫度發生時間幾乎與最高氣溫發生時間相接近，越深處的土壤溫度最高與最低溫發生的時間越向後移，此種稽延時間(lag time)依地表狀況、土壤類別及含水量而異。

土壤溫度變動幅度雖不如氣溫變動之大，但地表溫度的季節變動幅度亦屬顯著，且變化深度可達到地表下10 m深處。變動的最大幅度與深度發生在溫帶的大陸氣候區，因為其冬季與夏季的地面氣溫差異最大；熱帶及海洋氣候區變動的幅度則較小，影響的深度亦相對地較淺。森林及其它密集植物覆蓋的區域，比裸露地或僅有稀疏植物覆蓋的地區的季節性土壤溫度變動幅度為小，且影響的深度亦較淺。

蓮華池研究中心曾於1982年至1991年間，每日三次(09:00、14:00及21:00)於土壤0、5、10、20、及30 cm深處進行溫度觀測；集水區經營組亦於2009年3月1日至2012年2月29日，監測蓮華池三號試驗集水區濱水帶之大氣、溪流水及表土5、30與50 cm處的溫度，所收集的紀錄可用以說明該地區表層土壤的日變動及季節變動情形。圖1為濱水帶各月份各監測溫度的日變化情形，其中以大氣溫度變化最為顯著，僅表土5cm深的土壤日變化量有大於3℃的紀錄，其它深度土壤溫度的

中央氣象局農業氣象站監測地表下5、10、20、30、50及100 cm深處的土壤溫度。(孫銘源 攝)

日變化量均在3℃以下，且深度超過5 cm的日變化量在任何季節均為不顯著，顯示深層土壤溫度幾乎無日變化。表土5 cm最高溫發生時間比大氣最高溫發生時間延遲約1~2小時，其它較深土層的日最高溫度發生更往後延，惟冬季或50 cm深處的土壤溫度幾無日變化，也難以判定最高溫度發生時間。

1982年至1991年每日觀測的土溫紀錄，獲知觀測期間該地區之大氣溫度及土壤0、5、10、20、及30 cm深處之年均溫度分別為21.4、22.0、22.7、22.7、23.1 及22.8℃，變化幅度則分別為：14.3、13.2、13.0、11.6、11.1、10.5℃，顯示越深的土壤層溫度變化越小，並且各土壤層次與大氣的最高月均溫及最低月均溫均發生在7月及1月，表土的稽延時間小於1個月，如圖2所示。

表土溫度與氣溫間關係

大致上一日中早晨9點至下午5點，大氣溫度高於表層土壤溫度，其他時間則土壤溫度較高；然平均溫度多以表層土壤較高，致多數地區年平均土壤溫度比年平均氣溫高約2~4℃。由於大氣溫度是最常監測的項目，且表土溫度會顯著地受到大氣溫度影響，原則上大氣與表土日均溫有某種關係存在。如蓮華池3號試驗集水區表土5cm (T_{s05})處與大氣溫度(Tair)，經由回歸分析可得其關係為：

$$T_{s05} = -0.659 * T_{air} + 33.406$$

其間具有90%以上的正相關性 (correlation coefficient = 0.917)。概大氣、表土及低流量河川之主要熱能來自太陽輻射能，此種熱能將會同時直接或間接加熱大氣、地表及地表水，因此彼此間有較高的關連性。大氣溫度較容易取得，以氣溫推算表土溫度，雖有地域性，然仍不失為一種可行方法。

福山1號試驗集水區土壤溫度計埋設作業情形。集水區組由2005年1月迄今持續監測大氣溫度(℃)、相對溼度(%)、溪流水溫(℃)，及表土5、30和50 cm處的土壤溫度(℃)。(陸象豫 攝)

結論

土壤溫度是驅動種子發芽、植物開花和各種其他過程的主要因素，對植物、微生物及地棲動物有許多直接或間接的影響，並為土壤化育、構造、養分循環的重要的因子。雖然透過人為的處理如敷蓋、灌溉與排水等措施，能改變能量收支，並些微地改變土壤溫度，但由於土壤溫度細微地變動對植物生長可產明顯的影響，因此土壤溫度管理已被視為促進作物生長的重要工作之一。以往土壤溫度並非大多數氣象站收集的標準變量，而現今多數農業用氣象站已將之列為主要觀測項目，長期監測地表下1 m內的土壤溫度變化，其重要性早已受重視。