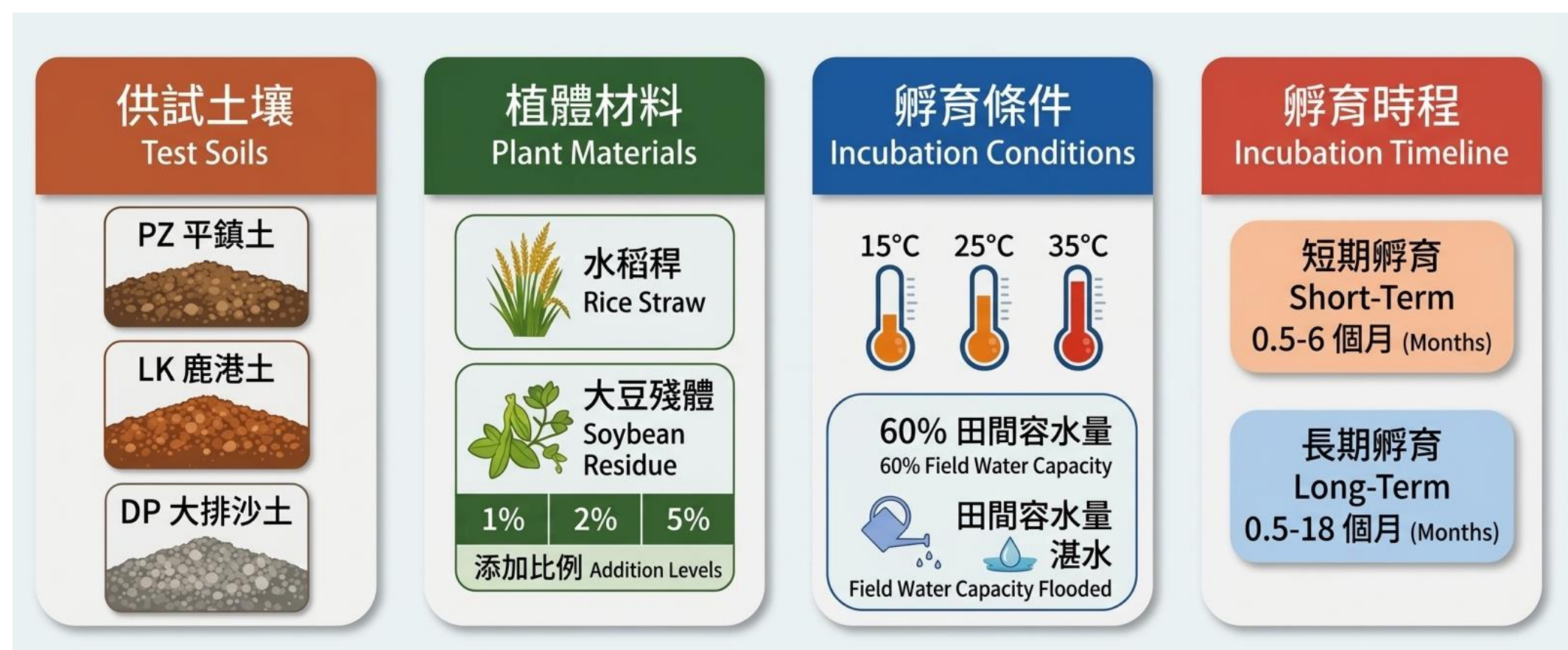


前言

提升農耕土壤碳匯是減緩氣候變遷的關鍵策略，然而土壤有機碳 (soil organic carbon, SOC) 的降解速率受環境、土壤特性與殘體性質等多重因子交感影響，且各因子的主導地位隨時間尺度的變化仍有待釐清。本研究旨在透過長、短期孵育實驗，量化環境與作物殘體對 SOC 降解速率常數 (k) 的貢獻度，揭示驅動土壤有機碳降解之主導因子的時間演替，期許能為農業推動因地制宜、具時間意識的精準碳管理提供量化依據。

材料方法

孵育試驗設計



統計分析

- 多因子變異數分析 (Multi-way ANOVA) 檢定土壤、水分、溫度、植體種類與添加比例之主效應與交互作用。
- partial eta squared (η_p^2) 作為效應量指標，藉此量化並排序各驅動因子在不同時間尺度下的相對重要性。

降解速率常數 (k) 計算

以土壤與植體之加權平均計算理論初始總碳量 (C_0) (式一)，並將各時間點實測 SOC 換算為相對剩餘碳比例 (C^*) (式二)。接著，利用一階動力學模型進行線性擬合，斜率負值即為降解速率常數 (k) (式三)

$$C_0 = \frac{[(\text{Soil \%OC} \times 100) + (\text{Plant \%OC} \times \text{Input rate})]}{(100 + \text{Input rate})} \quad (1)$$

$$C^* = \frac{SOC_{\text{measured}}}{C_0} \quad (2)$$

$$\ln(C^*) = -k \times t \quad (3)$$

結果與討論

本研究顯示，土壤有機碳降解速率 (k) 之控制機制具有明顯的時間尺度差異，並受環境因子與土壤性質交互影響。

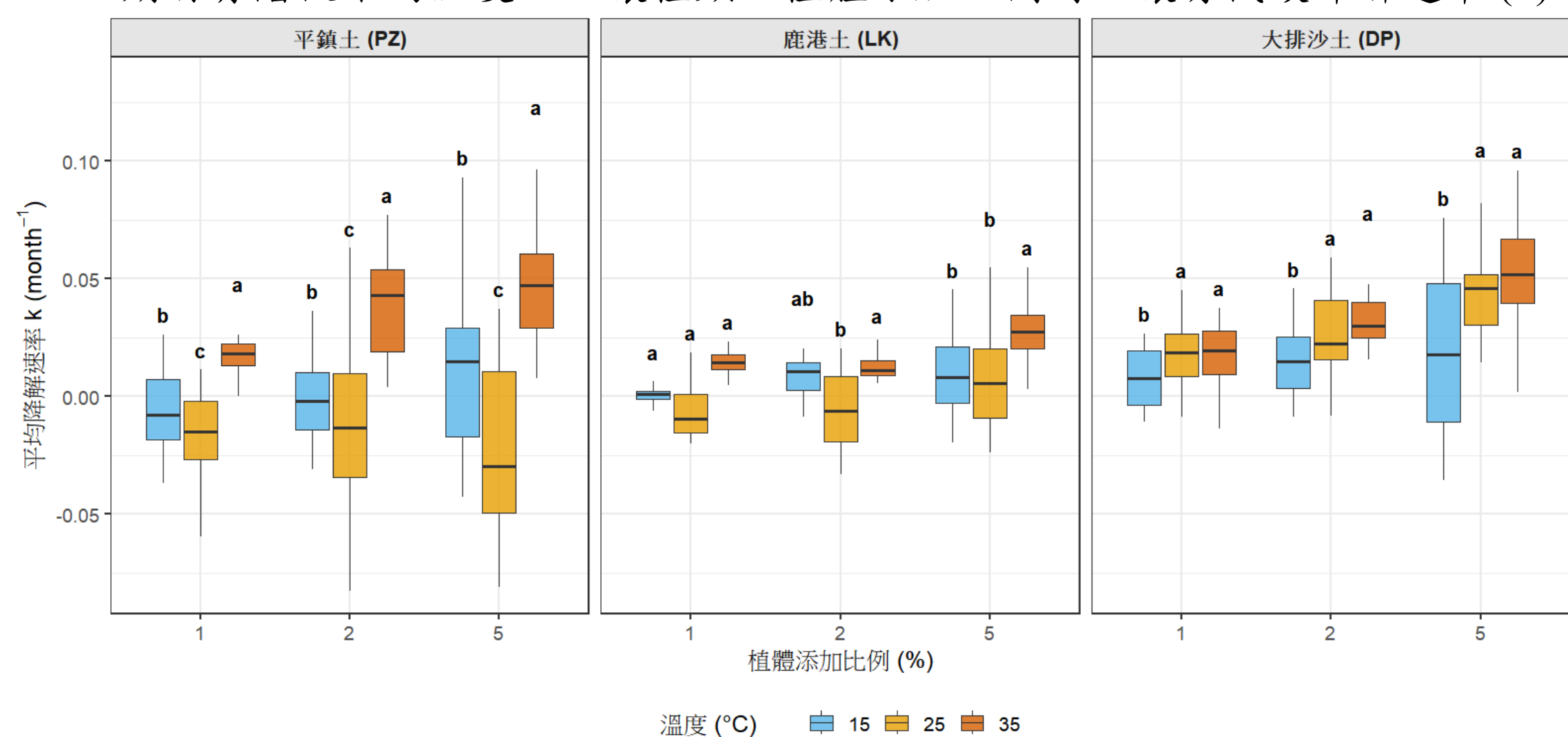
一、短期階段 (0.5-6 個月)：

結果顯示，溫度是主導短期降解速率 (k) 的最主要因子 ($\eta_p^2 = 0.238$ ，圖三A)。隨溫度升高 (15°C 至 35°C)， k 值明顯增加，顯示高溫加速了土壤有機碳的礦化 (圖一)。然而，此升溫效應受土壤性質顯著調控 (土壤 $\times$ 溫度 $\eta_p^2 = 0.177$ ，圖三A)。其中，平鎮土 (PZ) 對高溫 (35°C) 的反應最為顯著，降解速率呈現突破性提升；相反地，大排沙土 (DP) 對高溫的反應則趨於平緩，由 25°C 升至 35°C 時已無顯著差異 (圖一)。此外，雖然植體添加比例也是影響降解的重要主效應 ($\eta_p^2 = 0.111$)，但其與溫度的交互作用並不顯著 ($p > 0.05$ ，圖三A)，代表升溫的加速效果在不同添加量下具有一致性。

二、全期階段：

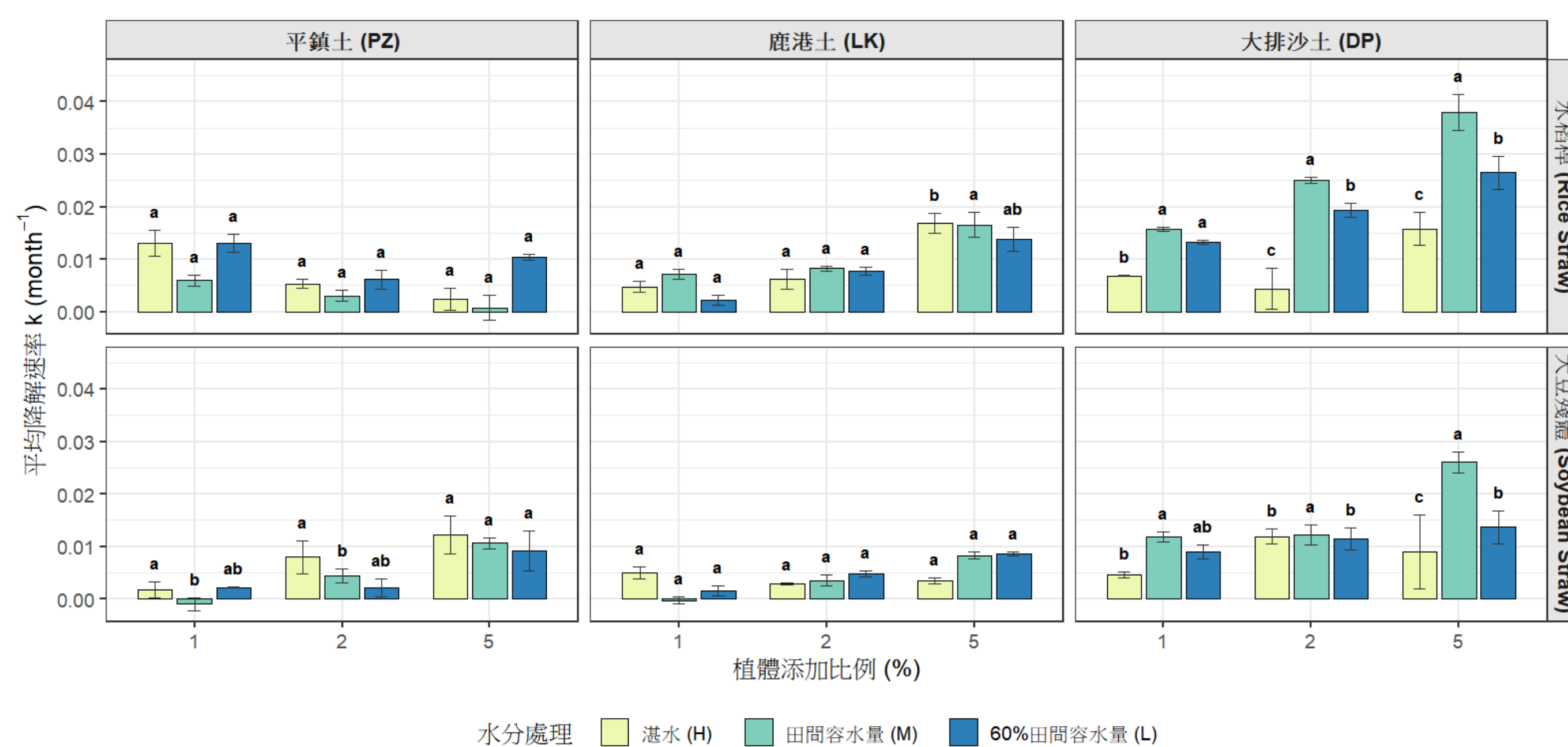
在恆溫條件下，土壤種類為影響降解速率的最主要因子 ($\eta_p^2 = 0.498$ ，圖三B)。其中，大排沙土 (DP) 降解潛力最高 (圖二)，推測與其通氣佳、黏粒低及有機-礦物保護作用較弱有關。植體添加比例為第二重要因子 ($\eta_p^2 = 0.334$ ，圖三B)。高添加比例能持續供應充足的易分解植體 (decomposable plant material) 供微生物利用，相反的，低添加組因易分解碳源提早耗盡而使降解速率變緩。此外，水分效果高度依賴土壤特性 (土壤 $\times$ 水分 $\eta_p^2 = 0.307$ ，圖三B)。大排沙土在田間含水量 (M) 時降解最快，平鎮土則在此條件下降至最低，鹿港土幾無差異。顯示水分的影響必須與土壤結構及通氣條件共同解釋。

圖一、短期孵育階段不同溫度、土壤種類及植體添加比例對土壤有機碳降解速率 (k) 之影響



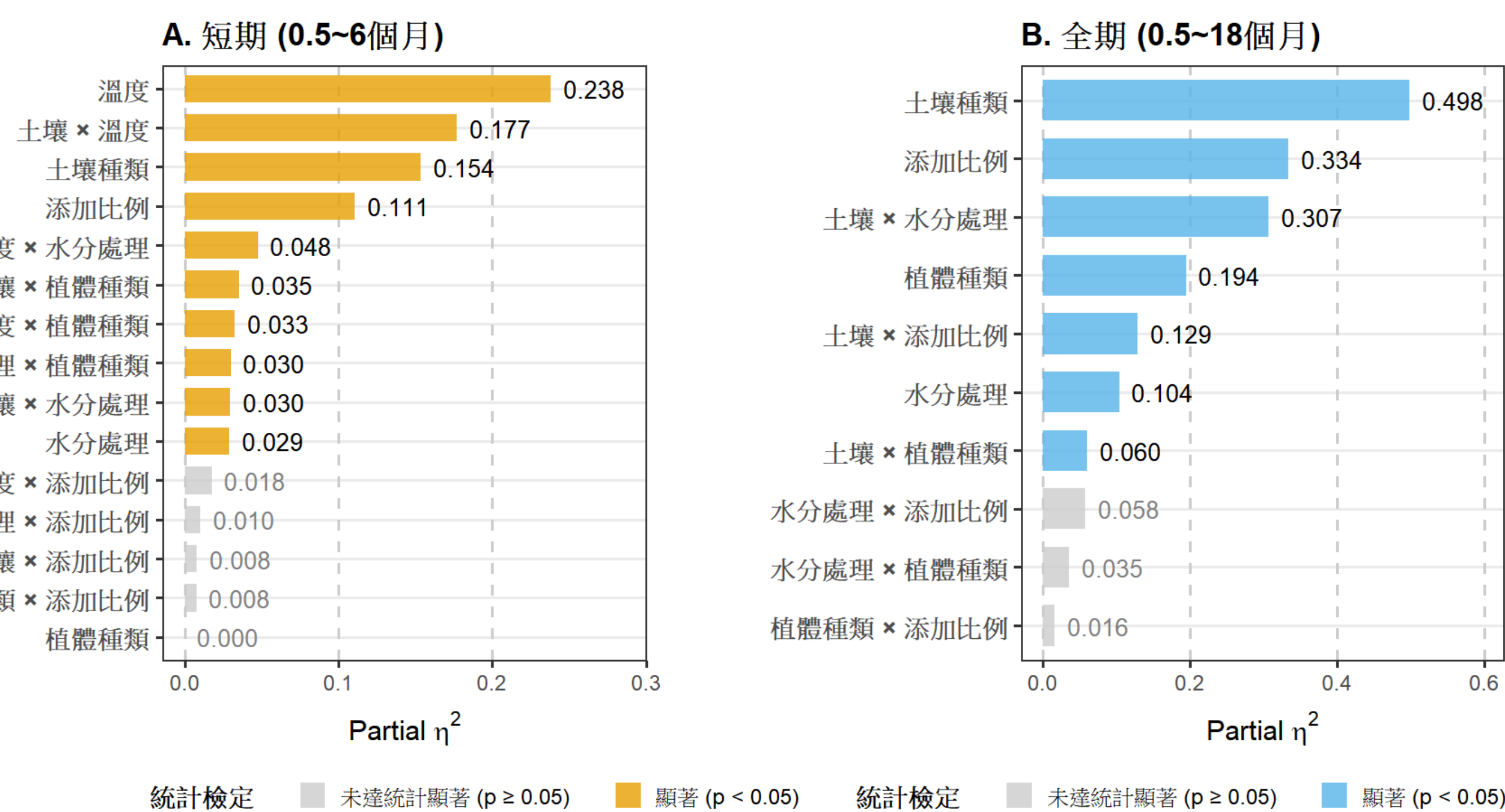
不同孵育溫度 (15°C、25°C、35°C) 在不同植體添加比例下對土壤有機碳降解速率 (k) 之影響。圖中依平鎮土 (PZ)、鹿港土 (LK) 及大排沙土 (DP) 進行分組呈現。箱型圖上方之相異字母代表在固定土壤與添加比例下，不同溫度間的差異達統計顯著水準 (Tukey HSD, $p < 0.05$)。

圖二、全期階段不同土壤、植體種類、水分處理及添加比例對土壤有機碳降解速率 (k) 之影響



本圖呈現試驗全期，不同土壤、植體、水分處理及添加比例對平均土壤有機碳降解速率 (k) 之影響。長條顏色代表不同水分處理，誤差棒顯示數據變異程度；小寫字母為 Tukey HSD 檢定結果，字母不同即表示處理間統計上具顯著差異 ($p < 0.05$)。

圖三、短期與全期各試驗因子對土壤有機碳降解速率常數之相對效應量 partial eta squared (η_p^2) 排序圖



本圖呈現各試驗因子及其二元交互作用在 (A) 短期 (0.5~6 個月) 與 (B) 全期 (0.5~18 個月) 兩個階段中，對土壤有機碳速率常數 (k) 的相對解釋力 (以 Partial η_p^2 表示)。圖中彩色長條 (圖 A 為橘黃色，圖 B 為淺藍色) 代表該因子之主效應或交互作用達統計顯著水準 ($p < 0.05$)，灰色長條則表示未達統計顯著水準 ($p \geq 0.05$)。長條圖旁之數值為各因子對應之 Partial η_p^2 值。

本研究證實土壤有機碳降解機制存在時間尺度差異：在短期變溫條件下，溫度主導初期礦化速率，其中平鎮土對高溫極為敏感，降解速率呈現突破性加速，而大排沙土對高溫的反應則相對趨緩；在長期恆溫條件下，降解機制回歸土壤本質主導，物理保護較弱的大排沙土展現最高的長期降解潛力，且植體添加比例成為關鍵限制因子。未來農業碳匯評估與模型預測應納入時間尺度差異，並針對不同土壤質地發展因土制宜的精準管理策略，以優化長期的土壤固碳效益。

在恆溫條件下，土壤種類為影響降解速率的最主要因子 ($\eta_p^2=0.498$ ，圖三B)。其中，大排沙土 (DP) 降解潛力最高 (圖二)，推測與其通氣佳、黏粒低及有機-礦物保護作用較弱有關。植體添加比例為第二重要因子 ($\eta_p^2=0.334$ ，圖三B)。高添加比例能持續供應充足的易分解植體 (decomposable plant material) 供微生物利用，相反的，低添加組因易分解碳源提早耗盡而使降解速率變緩。此外，水分效果高度依賴土壤特性 (土壤 $\times$ 水分 $\eta_p^2=0.307$ ，圖三B)。大排沙土在田間含水量 (M) 時降解最快，平鎮土則在此條件下降至最低，鹿港土幾無差異。顯示水分的影響必須與土壤結構及通氣條件共同解釋。