

外加電場對植物初生根向電性之影響： 以玉米與豌豆為模式

歐翰倫¹ 鄭楷騰¹ 房樹生^{2*}

¹國立臺南第一高級中學

²國立臺南家齊高級中學

壹、前言

植物作為固著生物，其生長與發育高度依賴對環境刺激的精確感知。根系作為植物吸收水分和養分、固定植株的關鍵器官，其向地生長（*gravitropism*）是植物適應地球重力場的重要策略，確保根部能有效地向下深入土壤。然而，除了重力，環境中還存在多種物理因子，可能影響根系的生長方向，其中電場即為一個潛在的重要因素。

自古以來，電與生命現象之間的關聯性便引發科學家的廣泛興趣。早在 19 世紀，就有研究指出植物根部能夠感應電場並調整其生長方向，此現象被稱為向電性（*electrotropism*）。Elfving (1882) 與 Ewart 及 Bayliss (1905) 的研究證實，植物根尖能夠在短時間內（數分鐘）偵測並響應強度達 0.1 V/cm 級別的外加電場，產生可量化的彎曲反應。儘管向電性現象已被廣泛觀察，但其確切的感知器與細胞內的訊號傳導途徑至今仍未完全釐清。

值得注意的是，地球大氣中普遍存在一個垂直於地表的穩態電場，稱為大氣電場（*atmospheric electric field*）。在晴朗天氣下，地表附近的大氣電場平均強度約為 1.0 V/cm (Rycroft & Harrison, 2008)。這個強度級別與實驗室中用於誘發植物向電性的電場強度（通常為 0.1-7.5 V/cm）相當。這使得我們思考，植物是否可能不僅能響應實驗室中施加的強電場，也能感應並利用自然界中普遍存在的大氣電場作為引導根部生長方向的輔助訊號。此外，許多研究探討了不同植物物種在電場下的反應差異。例如，對玉米（*Zea mays*）根向電性的研究顯示，其反應模式較為複雜，在高電場強度（2.8 – 7.5 V/cm）下傾向朝向陽極（正極）彎曲 (Stenz & Weisenseel, 1993)，而在低電場強度（<1 V/cm）下則可能朝向陰極（負極）彎曲，且此低場陰極趨性可能依賴根冠的感知與生長素（IAA）的不對稱運輸 (Ishikawa & Evans, 1990)。

*為本文通訊作者

相較之下，阿拉伯芥（*Arabidopsis thaliana*）的研究則指出其根尖穩定表現單相陰極向電性，且此反應機制可能依賴細胞分裂素而非生長素的不對稱分布 (Salvalaio et al., 2022)。這些研究表明植物向電性的機制具有物種特異性，並可能涉及不同的激素調控途徑。

儘管大氣電場普遍存在，且其強度足以誘發植物的向電性反應，但鮮少有研究直接探討大氣電場對植物生長，特別是根部向地生長的影響。因此，本研究旨在深入探討植物根部對電場的感應能力，特別是針對自然大氣電場的潛在影響。我們選取了具有不同向電性反應模式的玉米和豌豆初生根作為實驗材料，設計了水平外加電場實驗，以比較其向電性極性與場強依賴性。更重要的是，本研究創新性地利用法拉第籠裝置隔絕大氣電場，以評估大氣電場對根部彎曲的影響，進而探討植物是否能感應並整合大氣電場訊號，以及向電性與向地性在根部向下生長過程中的協同或拮抗作用。

貳、研究目的

本研究主要有以下三點研究目的：

1. 比較玉米與豌豆初生根在不同水平外加電場強度下之向電性極性與場強依賴性。
2. 量化大氣電場對植物根部彎曲角度的影響，並探討其與向地性的相對貢獻。
3. 利用法拉第籠隔絕大氣電場，評估大氣電場對向電性實驗結果的潛在影響。

研究設備及器材

生物材料：玉米種子、豌豆種子。

設備器材：蒸餾水、Murashige & Skoog (MS) 液態培養液 (0.5 M)、矩形培養皿、碳電極板 (10 cm × 10 cm × 1 mm)、吸管、鱷魚夾、直流電源供應器 (Power Supply)、紙箱、鋁箔紙、智慧型手機、三腳架、Tracker Physics 軟體、Python 軟體。

參、研究過程與方法

（一）植物培養與預處理

玉米與豌豆種子首先經蒸餾水浸種 24 小時（每 12 小時更換蒸餾水一次）。隨後將浸泡後的種子置於潮濕濾紙上垂直萌發（比照實驗情形），並維持在室溫環境下。待初生根長度約 3 公分時，選取生長狀況良好且根部筆直的幼苗進行實驗。實驗期間，植物根部浸潤於以蒸餾水配製的 0.5X Murashige & Skoog (MS) 液態培養液中，以提供植物生長所需之基本養分。

（二）水平外加電場實驗設置

本研究使用一組簡易電場裝置：矩形培養皿內置兩片尺寸為 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1\text{ mm}$ 的碳電極板，兩電極板間距固定為 16 cm 。初生根幼苗利用吸管固定於培養皿中央，確保根尖位於兩電極板連線的中心點。電極板透過鱷魚夾連接至直流電源供應器。實驗設定的電壓分級為 3 、 6 、 9 、 18 、 27 、 36 、 45 、 54 V ，相應的電場強度範圍約為 0.19 V/cm 至 3.38 V/cm 。所有實驗均在相同的光照條件下進行。

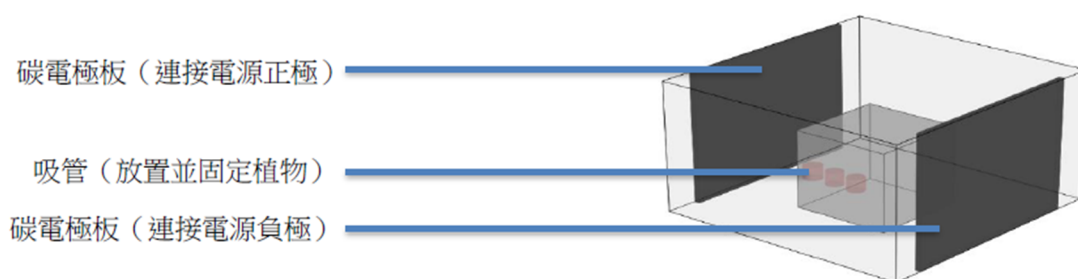


圖 1：水平外製電場實驗裝置示意圖

（三）法拉第籠隔絕實驗

為排除大氣垂直電場的干擾，本研究使用一個由紙箱外覆至少三層鋁箔紙製成的法拉第籠，所有接縫處均緊密黏合並妥善接地。將水平外加電場裝置置於已接地的法拉第籠內，施加固定水平電場，以量化豌豆初生根在純水平電刺激下（無大氣電場影響）之彎曲角度，並與無屏蔽條件下的結果進行比較。

（四）影像紀錄與分析

植物根部彎曲行為透過縮時攝影記錄。將固定的智慧型手機（置於三腳架上）對準實驗裝置進行縮時攝影，每 1 分鐘拍攝一張影像，總拍攝時長為 3 小時。所有影像隨後匯入開源物理追蹤軟體 **Tracker Physics** 進行分析。研究人員手動標定每張影像中根尖的中心位置，獲取根尖在二維座標系中隨時間變化的位置資料。彎曲角度的定義為根尖的位移方向相對其初始生長基準軸線所形成的偏角。本研究以實驗開始後 3 小時結束時的根尖偏角作為最大彎曲角度的代表。為確保數據準確性，每次實驗使用三個樣品，實驗重複三次，每個樣品於每個時間點的根尖位置均重複標定三次，並計算其平均值。

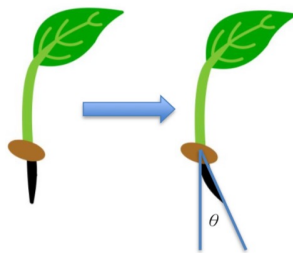


圖 2：彎曲角度計算示意圖

肆、研究結果與討論

（一）玉米初生根於水平電場下之彎曲反應與機制探討

玉米初生根在水平外加電場下呈現出具有電場強度依賴性的彎曲反應。如圖一所示，在低電場強度（ $<1.2 \text{ V/cm}$ ）時，玉米根部傾向朝向負極（陰極）彎曲。然而，當電場強度提升至約 1.2 V/cm 時，根部與對照組（無電場）皆無明顯彎曲。而當電場強度超過 1.2 V/cm 進入高場強區時，玉米根部轉而朝向正極（陽極）彎曲，且彎曲角度隨電場強度增強而顯著增加。如圖二所示，當電場強度超過約 3 V/cm 時，根部彎曲角度趨於飽和，最大彎曲角度可達近 90° 。此結果顯示玉米根的向電性存在一個極性轉折點。

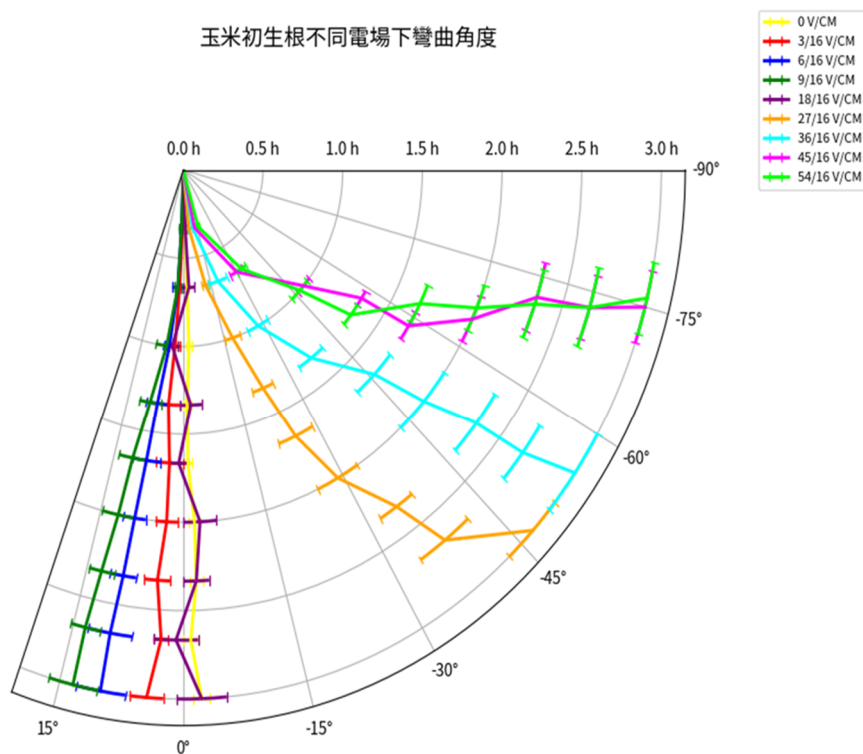


圖 3：不同電場強度下玉米初生根 3 小時內的彎曲軌跡極座標圖

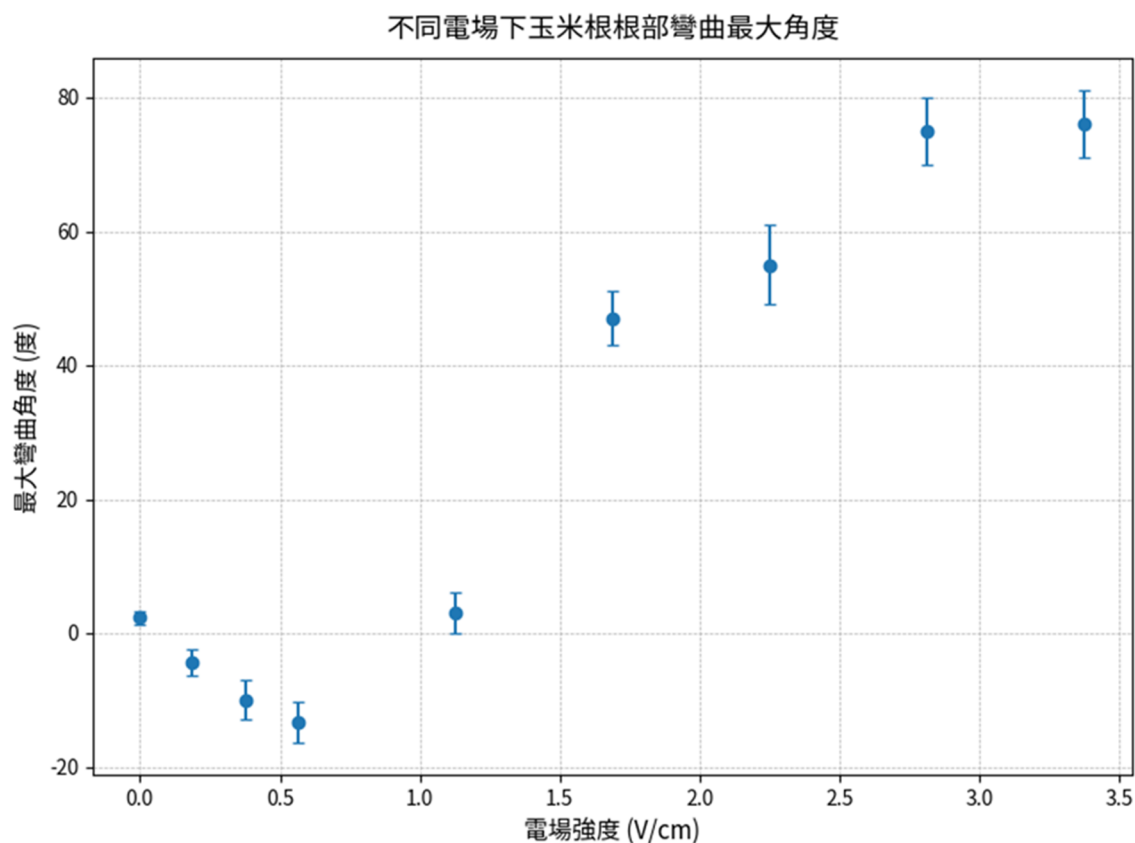


圖 4：不同電場強度下玉米初生根的最大彎曲角度與電場強度關係圖

這種極性轉折現象與現有文獻相符，如 Stenz 和 Weisenseel (1993) 曾指出玉米在高電場下表現陽極趨性。低電場下的陰極趨性可能與根冠細胞感知電場並透過生長素 (IAA) 不對稱運輸來調控生長有關，正如 Ishikawa 和 Evans (1990) 對低電場下玉米根向電性的描述。然而，高電場強度下觀察到的陽極趨性，暗示玉米根可能同時存在另一種獨立的或疊加的電場感應機制，該機制在高電場時佔主導地位並導致根部向正極彎曲。這兩種機制的交互作用和閾值轉變，值得未來進一步在細胞生理和分子層面進行探討。

(二) 豌豆初生根於水平電場下之彎曲反應與場強依賴性分析

相較於玉米，豌豆初生根對外加電場表現出相對單一且穩定的彎曲反應。如圖三所示，在所有測試電場強度 (0–3.4 V/cm) 下，豌豆初生根皆穩定朝向負極 (陰極) 彎曲，而對照組在 3 小時內僅表現出微小角度變化。彎曲的速度與最終角度均隨電場強度的增加而顯著提升。圖四進一步量化顯示，豌豆初生根的最大彎曲角度與外加電場強度呈現正相關，

但此關係為非線性，在較高電場區（ ≥ 2.5 V/cm）彎曲角度的增加速率趨於平緩，暗示可能存在飽和效應。此外，如圖五所示，實驗測得的豌豆根部彎曲角度（橘色數據點）的整體趨勢雖與靜電場合成向量方向角 θ_e （綠色線條）變化一致，但實際測得的彎曲角度始終低於純靜電場合成向量所預期的方向。

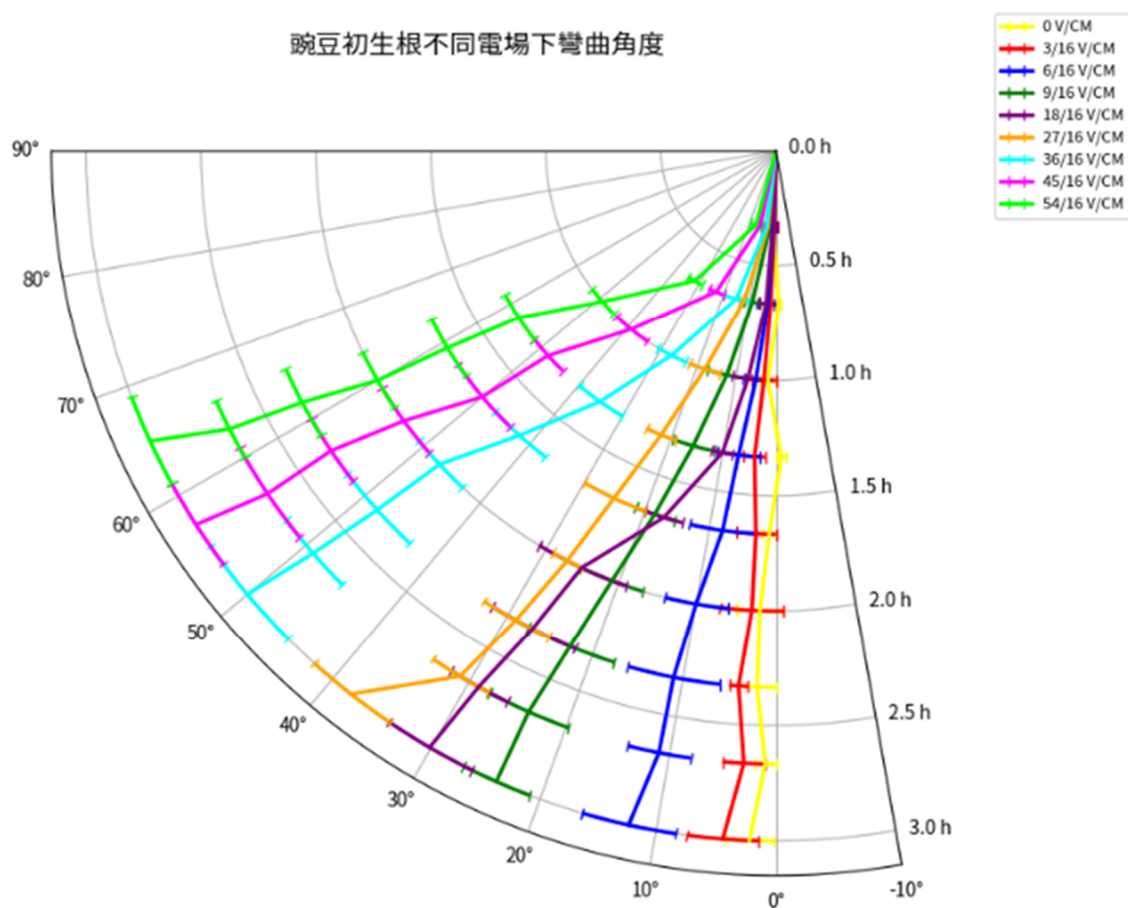


圖 5：不同電場強度下豌豆初生根 3 小時內的彎曲軌跡極座標圖

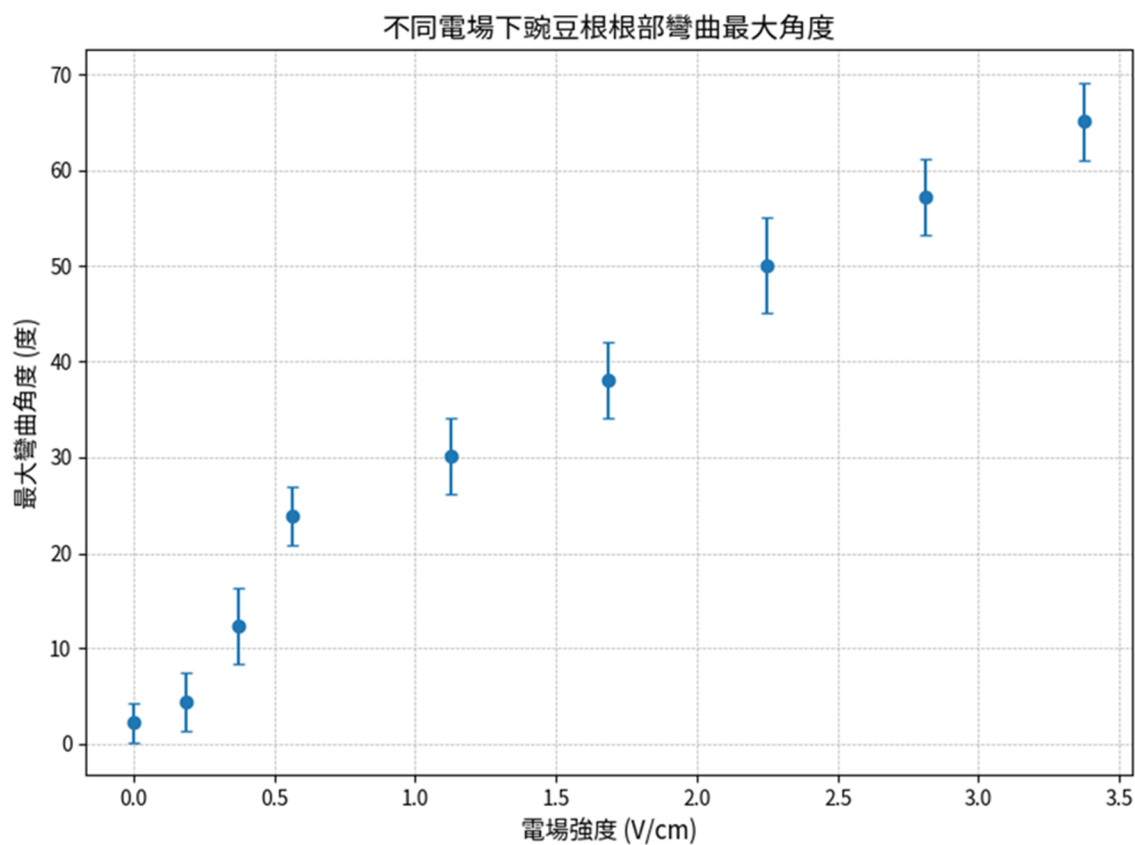


圖 6：不同電場強度下豌豆初生根的最大彎曲角度與電場強度關係圖

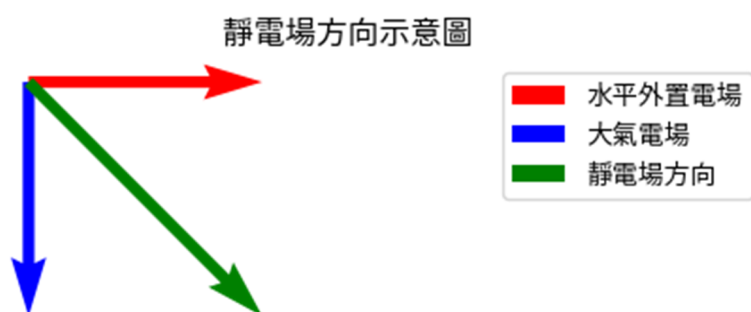


圖 7：靜電場合成向量方向的示意圖

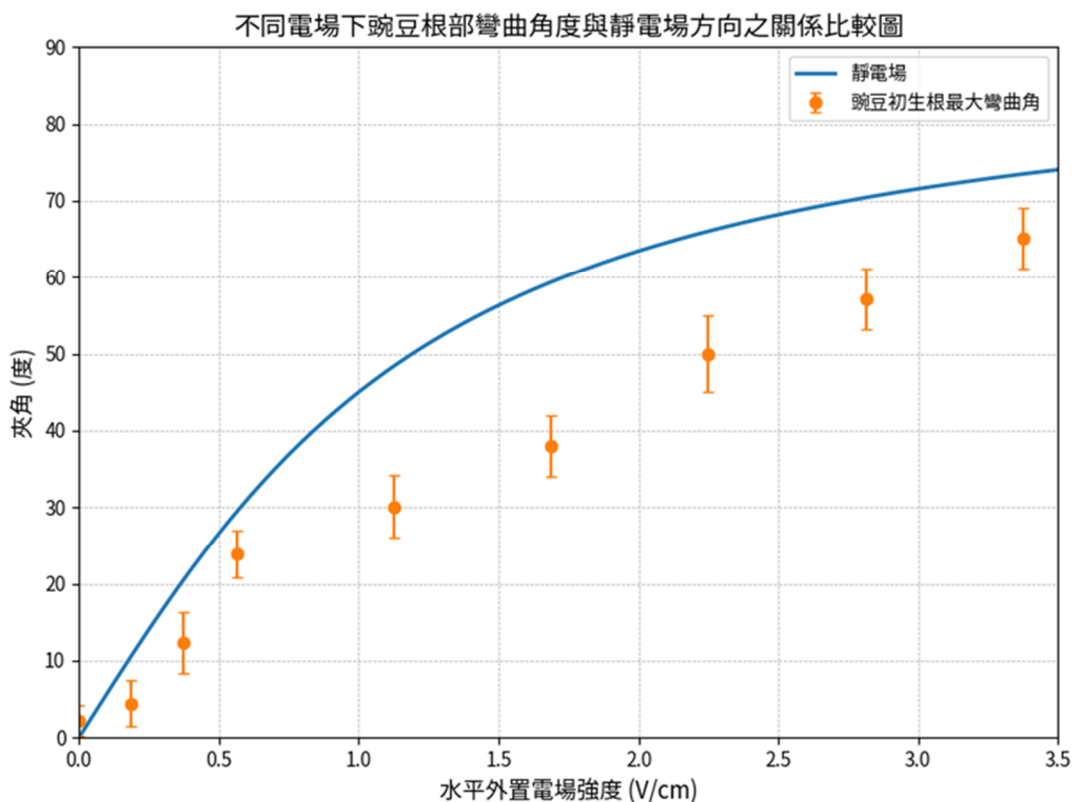


圖 8：豌豆根部彎曲角度與靜電場合成向量方向的比較圖

豌豆初生根在所有測試電場強度下均表現出穩定的陰極向電性，其彎曲角度隨電場強度增加而呈非線性增加，並顯示出飽和趨勢。這與 *Arabidopsis thaliana* 等植物的單相陰極向電性相似 (Salvalaio et al., 2022)。非線性關係和飽和現象可能反映了根細胞感知電場或產生彎曲響應的生理極限。這暗示植物細胞可能存在特異性的電場感受器，當電場強度超過一定閾值後，細胞的響應能力達到上限，導致彎曲角度不再顯著增加。未來研究可探討豌豆根向電性是否也受細胞分裂素或其他激素的調控，以及其分子感知路徑與玉米的差異。

（三）法拉第籠隔絕實驗結果與大氣電場影響評估

為初步評估大氣垂直電場對根部彎曲的影響，本研究進行了法拉第籠隔絕實驗。在施加固定 $27 \text{ V}/16 \text{ cm}$ 水平電場且垂直方向（即大氣電場方向）完全屏蔽的條件下，豌豆初生根的最大彎曲角度約 $45 \pm 4^\circ$ （如圖六所示）。此結果顯著高於在無屏蔽條件下、相同水平電場強度下所測得的豌豆初生根最大彎曲角度約 $38 \pm 3^\circ$ 。透過獨立樣本 t 檢定顯

示 $p < 0.001$ ，這表明屏蔽大氣電場後，根部彎曲角度顯著增加，效果量顯示為非常大的效果。儘管數據量有限，但此結果初步支持大氣電場會對植物根部彎曲行為產生可測量的影響。

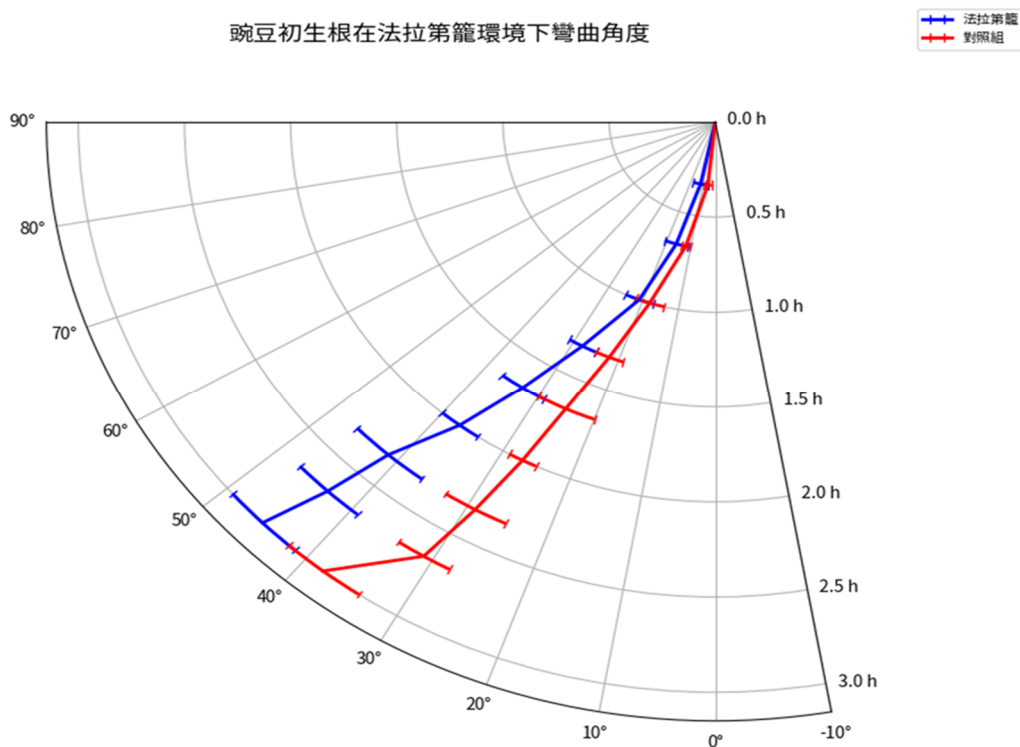


圖 9：法拉第籠內外豌豆初生根在相同水平電場下的彎曲角度比較圖

伍、結論與建議

本研究針對植物初生根對外加電場的感應能力及其與向地性之交互作用進行探討，獲得以下幾點結論：首先，玉米初生根展現出明顯的場強依賴性與極性轉折行為：在電場強度低於約 1.2 V/cm 時呈現陰極趨性，超過該閾值則轉為陽極趨性，並在高電場條件下達到彎曲角度飽和。這一現象顯示玉米根部可能同時具備兩種不同電場感應機制，分別於不同場強下主導反應。其次，豌豆初生根則表現出穩定一致的陰極向電性，彎曲角度隨電場強度增加而提升，呈現非線性正相關並趨於飽和，顯示其感應與彎曲反應可能存在生理或訊號傳遞上的上限。更重要的是，透過法拉第籠隔絕自然大氣電場的實驗結果顯示，在相同的水平外加電場條件下，隔絕大氣電場能顯著提升豌豆根部的彎曲反應幅度。此結果首次提供植物能感應大氣電場並受其影響的實驗性證據，並進一步暗示大氣電場與重力訊號可能以合力方式共同調控根部的向下生長路徑。

儘管本研究已獲得具啟發性的初步成果，仍存在樣本數偏少、物種選擇有限等限制，未來研究建議方向包括：

1. 擴大實驗樣本數與重複試驗次數，提升統計分析的可靠性與推論的普遍性。
2. 進一步探討向電性與向地性之交互影響，可設計純電場或純重力條件下的對照實驗，並透過向量分解方法定量評估各因子的貢獻比例。
3. 比較多種植物物種的向電性行為差異，建立不同物種間的生理與分子機制對照模型。
4. 導入分子與細胞層級技術（如激素螢光標記、離子通道活性監測、基因表現分析等），以揭示電場感知的關鍵路徑與訊號調控機制。

綜合而言，本研究不僅確認植物初生根具有感應並整合外加與自然電場的能力，也為理解植物根系在多物理場環境中的定向生長機制奠定重要基礎，未來可望應用於精準農業、植物導向栽培等領域之技術開發。

參考文獻

- Elfving, F. (1882). Ueber den Galvanotropismus der Pflanzenwurzeln [On the galvanotropism of plant roots]. *Botanische Zeitung*, 40, 665-676.
- Ewart, A. J., & Bayliss, J. S. (1905). On the nature of the galvanotropic irritability of roots. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 77, 63-66.
- Ishikawa, H., & Evans, M. L. (1990). Electrotropism of maize roots: Role of the root cap and relationship to gravitropism. *Plant Physiology*, 94(3), 913-918.
- Rycroft, M. J., & Harrison, R. G. (2008). An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity. *Space Science Reviews*, 137, 83-105.
- Salvalaio, M., Oliver, N., Tiknaz, D., Schwarze, M., Kral, N., Kim, S.-J., & Sena, G. (2022). Root electrotropism in *Arabidopsis* does not depend on auxin distribution but requires cytokinin biosynthesis. *Plant Physiology*, 188(3), 1604-1616.
- Salvalaio, M., & Sena, G. (2024). Long-term root electrotropism reveals habituation and hysteresis. *Plant Physiology*, 194(4), 2697-2708.
- Stenz, H. G., & Weisenseel, M. H. (1993). Electrotropism of maize (*Zea mays* L.) roots: Facts and artifacts. *Plant Physiology*, 101(3), 1107-1111.