

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 植物學科

052110

飛天遁地 豆豆先生-探討豆類在微重力及高重
力環境的型態變化

學校名稱： 國立中央大學附屬中壢高級中學

作者：	指導老師：
高二 游鈞睿	張儼齡

關鍵詞： 微重力、高重力、綠豆

摘要

本研究以綠豆為主要研究對象，探討微重力環境($<10^{-6}g$)對植物種子的影響。結果顯示，綠豆在微重力環境中易形成不定根，回到一般重力後約需 8 天型態完全回復；輻射環境對綠豆胚莖與胚根長度變化無顯著影響。此外，微重力環境造成不定根形成，推測可能與乙烯產生有關。

針對高重力(900g)環境，綠豆的細胞內澱粉體分佈未顯著改變，但內部機能可能受影響。在酶活性實驗中，不定根率較高的綠豆過氧化氫酶活性降低，顯示微重力對植物內部生理機制有持續影響。而切片實驗發現，微重力可能促進胚內澱粉粒的分佈與儲存形式改變。

本研究系統性探討微重力環境返回一般重力後植物種子的型態變化，為未來太空種子銀行的發展提供參考依據。

壹、前言

透過參加太空生醫國際論壇認識太空生醫發展，了解生物細胞在微重力環境生長型態會發生改變，植物細胞內的蛋白質分布也會產生變化，結合種子銀行的概念，想了解如果將種子放在微重力環境下保存是否也會對種子造成影響，而這種影響是否會因為重力環境的回復而消失，甚至更進一步模擬太空環境加上輻射，或模擬地下高重力環境會不會也有這樣的改變。

豆類作物如綠豆、黃豆和四季豆，是全球重要的蛋白質來源，因其富含植物性蛋白質及必需胺基酸，對於替代動物性蛋白具有重要意義。在全球人口不斷增長及可持續發展需求日益迫切的背景下，研究豆類生長的影響因子，如微重力環境對其型態與功能的影響，對於未來實現糧食安全及探索太空農業具有重要價值。此外，豆類的耐逆性和適應性，使其成為研究植物生理與環境交互作用的理想材料。透過分析豆類在極端環境下的表現，能為太空探索提供參考，並促進地球農業資源的高效利用。

過去的研究指出，植物的次級代謝產物在改變的重力環境下會發生顯著變化。一般而言，在微重力環境($<10^{-6}g$)下，植物會增加小型次級代謝物的累積，而在超重力環境($>1g$)下，這些代謝物的累積則會減少(Lindsey K Tuominen,2009)。根據過去的研究，豆類作物的高營養價值和氮固定能力使其成為太空農業的重要候選者。發現微重力條件促進了根系的發展和養分吸收，從而提高了幼苗的整體生長。研究顯示，豆類作物在太空中能夠維持良好的發芽率和生長表現，激素平衡在促進幼苗生長中扮演了重要角色，尤其是生長素和細胞分裂素的調節，在模擬微重力環境下，綠豆幼苗的生長顯著增強，顯示出特定的生理適應機制(Shusaku Nakajima,2021)。而在高重力環境下，小麥的根系發展更加健康，顯示出增強的生長潛力。研

究結果表明，超重力處理可能是提升小麥生產力的一種有效方法(Basavalingayya K. Swamy,2021)。還有暴露在輻射環境底下，伽瑪輻射對綠豆的發芽和幼苗生長參數產生了顯著影響，隨著輻射劑量的增加，種子的發芽率和幼苗高度逐漸降低，最適的輻射劑量可促進種子的生長，而過高的劑量則會導致生長抑制。此研究為綠豆的突變育種提供了重要的數據，幫助優化育種策略(Priyanka J. Bonde,2020)。為了瞭解這些機制，而進行以下實驗。

探討不同重力與輻射環境對豆類生長形態變化的影響。

一、探討微重力對不同豆類植物種子的影響

二、探討綠豆待在微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響

三、探討植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

四、探討高重力環境對綠豆的影響

五、探討微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

六、探討綠豆種子在微重力及一般重力作用下胚內澱粉粒變化

貳、研究設備及器材

一、植物培養箱 1臺（圖 1）

二、72 孔穴盤 4 個（圖 2）

三、電子秤 1臺

四、培養土 1 箱

五、糯玉米 數包

六、水果玉米 數包

七、綠豆 數包

八、紅豆 數包

九、黃豆 數包

十、花豆 數包

十一、荷蘭豆 數包

十二、大莢荷蘭豆 數包

十三、四季豆 數包

十四、離心管 數個

十五、離心機 一臺

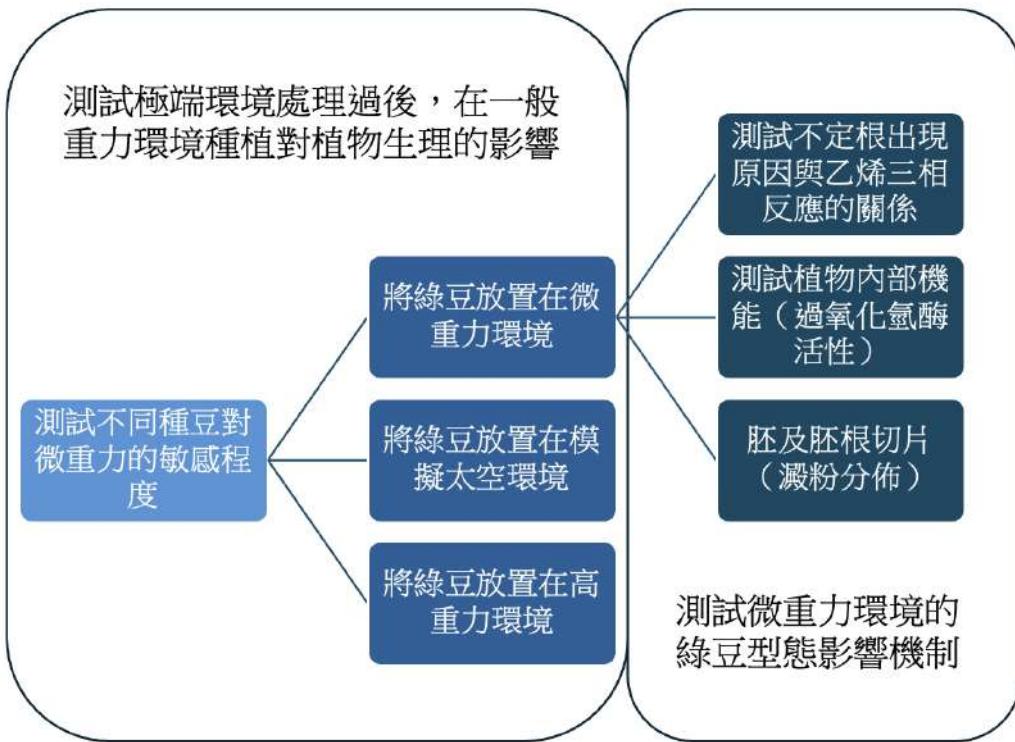
十六、微重力機 一臺（圖 3）

十七、高重力機 一臺（圖 4）

- 十七、雙氧水 數毫升
 十八、維他命 C 數毫升
 十九、複試顯微鏡 一臺
 二十、解剖刀片 一片

植物培養箱 (圖 1)		72 孔穴盤 (圖 2)	
微重力機 ($10^{-6}g$) (圖 3)		高重力機 (900g) (圖 4)	

參、研究過程或方法



▲圖 5. 研究架構圖

二、實驗設計與原理

(一) 不同豆類微重力測試

比較不同種豆子（包括：綠豆、紅豆、四季豆、黃豆（本土豆類）、花豆、荷蘭豆及大莢荷蘭豆（未來可發展性），共七種）在微重力下及一般重力下的差異，設計放置在微重力環境 2 小時及 4 天，再放回一般重力 3 天，測試不同種豆對微重力的敏感程度。

(二) 模擬太空環境對綠豆進行測試

比較綠豆在不同微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響。

(三) 植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

透過文獻探討瞭解，在乙烯存在下，黃化幼苗呈現光形態形成表型，稱為三相反應(triple response)：頂端鉤之曲率擴大、胚莖徑向脹大，以及胚莖及根縮短(Ecker, J. R., 1995)，因想瞭解綠豆出現不定根的機制是否與微重力環境可能觸發植物乙烯三相反應有關，所以進行此實驗。根據文獻探討，玉米在乙烯三相反應實驗有較明顯觀察的型態改變。玉米的乙烯反應，會抑制玉米的生長（王慶裕，1993）。本實驗設計將水果玉米及糯玉米放置將玉米放在微重力環境 3 天，觀察種出來後的型態變化。

(四) 高重力環境對綠豆的影響

想了解綠豆待過高重力環境的型態變化是否和微重力一樣。設計將綠豆放在高重力環境 1 小時，觀察種出來後的型態變化。

(五) 微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

除了型態的改變，本研究也好奇微重力環境是否會影響植株的生理功能。在查詢文獻後得知微重力環境可能造成植物氧化壓力，因此本實驗測試綠豆待在微重力環境的實驗組豆芽過氧化氫酶活性是否會與對照組相同。取綠豆微重力實驗種出來的綠豆胚莖研磨，加入雙氧水，觀察其在試管內的冒泡高度。

(六) 探討綠豆種子在微重力及一般重力作用下胚內澱粉粒變化

由於微重力環境影響了豆芽的型態與生理功能，推測在過程中也影響其最重要的養分分解作用，所以在能力可及範圍內將綠豆微重力第三次實驗的種子及胚根做切片，觀察綠豆胚及胚根細胞內澱粉分佈。

三、實驗步驟

(一)、分裝豆子

- 1.準備種子(綠豆、紅豆、黃豆、花豆、荷蘭豆、四季豆、大莢荷蘭豆、糯米玉米、水果玉米)
- 2.將種子放入離心管

(二)、放上微重力或高重力機

- 1.準備分裝過後的豆子
- 2.放上高重力機或微重力機(圖 6)
- 3.設置旋轉時間
- 4.等待
- 5.時間到取下
- 6.種子按照實驗設置靜置數天

(三)、種豆苗

- 1.種子泡水 7 小時
- 2.在穴盤中裝入適量培養土
- 3.待種子泡完水後放入土中
- 4.種植 7 天採收

(四)、測量數據及觀測變化



▲圖 6.種子放置在微重力

1.測量豆苗胚莖及胚根長度

2.觀察豆苗根系是否有變化

3.紀錄並統整

(五)、將多筆數據進行分析找出結果

(六)、測定豆芽過氧化氫酶活性

1.取 0.78 克豆芽莖

2.加 2ml 水並研磨

3.取 1ml 豆汁液加入 1ml 雙氧水

4.紀錄第 10 分鐘氣泡高度

(七)、種子胚切片觀察

1.將種子泡軟

2.挑出種子胚

3.胚切片

4.觀察

(八)、豆芽胚根切片

1.種出來的胚根切片

2.觀察

肆、研究結果

一、探討微重力對不同植物種子的影響

比較不同種豆子(表 1)在微重力下及一般重力下的差異(表 2)(表 3)(表 4)，發現綠豆及紅豆出現較相近的結果。轉 2 小時靜置 3 天的結果中，綠豆和紅豆出現不定根的比例相同 (豆類正常為軸根型態)，但在轉 4 天靜置 3 天的結果中，綠豆出現不定根的機率高於紅豆。在轉 2 小時靜置 3 天的結果中觀察到花豆也有出現不定根，但在轉 4 天靜置 3 天的結果中，卻沒觀察到此現象。此外，觀察到黃豆與四季豆觀察到多數無發芽的現象。

表 1.各種豆及植物不定根

綠豆		紅豆	
荷蘭豆		大莢荷蘭豆	
花豆		黃豆	
四季豆		綠豆不定根	

表 2. 對照組數據

靜置(對照組) n=20						
平均莖長 (cm)	平均根長 (cm)	不定根率 (%)	平均莖長 (cm)	平均根長 (cm)	不定根率 (%)	
綠豆 發芽率100% 14.30±5.90	10.60±5.67	0	荷蘭豆 發芽率35% 17.39 ± 3.56	10.02±3.07	0	
紅豆 發芽率100% 13.99±4.75	10.29±3.87	0	大莢荷蘭豆 發芽率40% 19.22± 5.52	9.82±4.83	0	
黃豆 發芽率20% 0	1.40±0.14	0	花豆 發芽率45% 16.06± 7.53	10.50±5.29	0	
四季豆 發芽率25% 8.20±8.05	3.17 ± 4.10	0				

表 3. 轉 2 小時靜置 3 天實驗組數據

轉2h靜置3天 n=20						
平均莖長 (cm)	平均根長 (cm)	不定根率 (%)	平均莖長 (cm)	平均根長 (cm)	不定根率 (%)	
綠豆 發芽率100% 26.18±8.41	10.53±6.63	9	荷蘭豆 發芽率20% 12.19 ± 1.03	9.98±3.60	0	
紅豆 發芽率100% 24.98±9.55	8.76 ± 4.65	9	大莢荷蘭豆 發芽率20% 11.84± 3.98	12.67± 3.77	0	
黃豆 發芽率0% 爛掉			花豆 發芽率45% 10.40± 9.82	8.28 ± 7.38	2	
四季豆 發芽率0% 爛掉						

表 4. 轉 4 天靜置 3 天實驗組數據

轉4天靜置3天 n=20						
平均莖長 (cm)	平均根長 (cm)	不定根率 (%)	平均莖長 (cm)	平均根長 (cm)	不定根率 (%)	
綠豆 發芽率100% 10.38±6.52	6.73 ± 6.01	16	荷蘭豆 發芽率35% 16.81 ± 6.90	10.00±4.44	0	
紅豆 發芽率100% 8.52 ± 5.74	7.53 ± 3.35	4	大莢荷蘭豆 發芽率40% 16.59± 6.56	10.16± 5.16	0	
黃豆 發芽率5% 0	0.68±0.21	0	花豆 發芽率45% 2.00 ± 3.03	5.30 ± 7.43	0	
四季豆 發芽率0% 爛掉						

更進一步將各組出現不定根比例的數據整理成下表（表 5）。

表 5.不同種豆不定根率比較

不定根率(%)	綠豆	紅豆	花豆	黃豆	荷蘭豆	大夾荷蘭豆	四季豆
沒轉(對照組)	0	0	0	0	0	0	0
轉2小時	9	9	2	0	0	0	0
轉4天	16	4	0	0	0	0	0

由以上結果發現，綠豆在以上 7 種豆中最容易出現不定根。

二、探討綠豆待在微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響

經由以上的結果，進行下一步實驗，比較綠豆待在微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響。在三次實驗中看到微重力對綠豆胚莖及胚根長度沒有規律影響，不過只要待過微重力環境，綠豆的根系就有機會出現變化。透過三次的實驗數據整理出以下結果（表 6）（表 7）（表 8）（表 9）（表 10）（表 11）。

表 6.第一次實驗結果-1

綠豆沒轉vs.有轉的比較(第一次實驗-1)					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒轉 發芽率100%	6.66±3.66		6.74±4.41		0%
轉3hr靜置4天 發芽率100%	7.65±2.40	0.83164	6.73±2.93	0.34063	0%
轉3hr靜置6天 發芽率100%	7.88±4.52	0.06813	7.73±4.22	0.97614	0%
轉3hr靜置7天 發芽率100%	11.72±4.58	0.65354	8.57±5.03	0.39878	5.2%

表 7.第一次實驗結果-2

綠豆沒轉vs.有轉的比較(第一次實驗-2)					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒轉 發芽率100%	6.66±3.66		6.74±4.41		0%
轉2天靜置4天 發芽率100%	8.11±1.83	0.17458	6.86±2.83	0.09287	0%
轉2天靜置6天 發芽率100%	7.62±4.45	0.00518 明顯變長	6.56±4.61	0.25367	10%
轉2天靜置7天 發芽率100%	10.42±5.83	0.21506	6.76±5.83	0.39878	17.6%

表 8.第一次實驗結果-3

綠豆沒轉vs.有轉的比較(第一次實驗-3)					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒轉 發芽率100%	6.66±3.66		6.74±4.41		0%
轉4天靜置4天 發芽率100%	6.01±2.41	0.53667	6.33±2.68	0.74694	0%
轉4天靜置6天 發芽率100%	9.01±5.44	0.35122	9.49±5.01	0.28189	5.5%
轉4天靜置7天 發芽率100%	15.3±7.91	0.15914	9.31±4.19	0.54546	10.5%

表 9.第二次實驗結果-1

綠豆沒轉vs.有轉的比較(第二次實驗-1)					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒轉 發芽率100%	14.30±5.90		10.59±5.67		0%
轉2hr靜置3天 發芽率100%	26.19±8.41	0.00000 明顯變長	10.53±6.63	0.96836	9%
轉2hr靜置7天 發芽率100%	7.37±4.14	0.00000 明顯變短	7.13±5.32	0.26144	11%
2hr靜置11天 發芽率100%	11.82±6.26	0.81867	6.56±4.26	0.09033	0%

表 10.第二次實驗結果-2

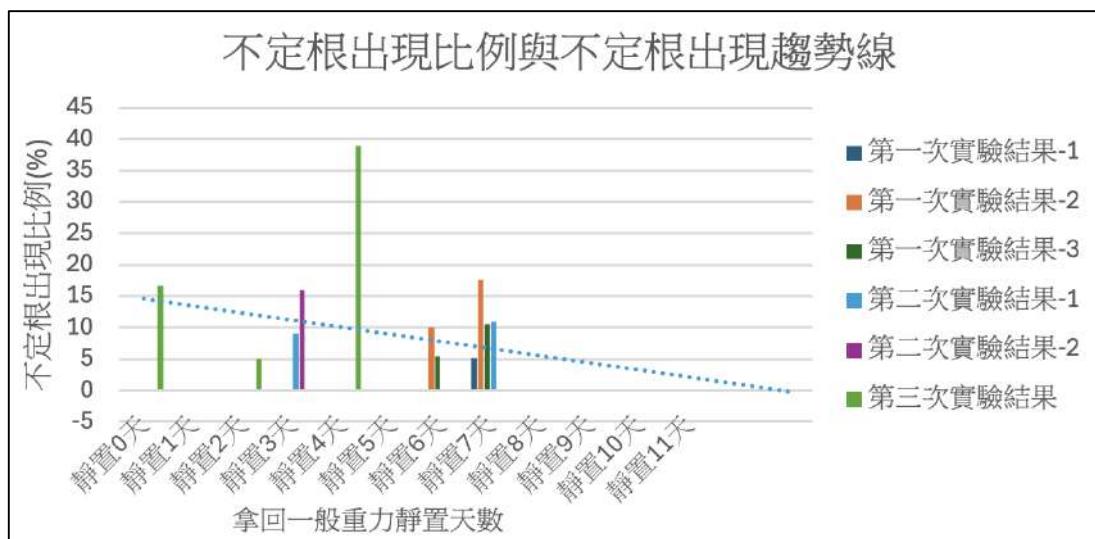
綠豆沒轉vs.有轉的比較(第二次實驗-2)					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒轉 發芽率100%	14.30±5.90		10.59±5.67		0%
轉4天靜置3天 發芽率100%	10.38±6.52	0.00639 明顯變長	6.73±6.00	0.00429 明顯變短	16%
轉4天靜置7天 發芽率100%	17.7±5.12	0.52332	11.50±5.64	0.26144	0%
轉4天靜置11天 發芽率100%	13.42±2.75	0.09031	11.14±3.82	0.34147	0%

表 11.第三次實驗結果

綠豆沒轉vs.有轉的比較(第三次實驗)					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒轉 發芽率100%	4.2±2.37		9±4.62		0%
轉4天靜置0天 發芽率100%	3.21±2.17	0.18994	5.07±3.85	0.00759 明顯變短	16.7%
轉4天靜置2天 發芽率100%	5.05±3.72	0.40190	6.18±3.2	0.03718 明顯變短	5%
轉4天靜置4天 發芽率83%	4.67±3.71	0.64871	2.9±2.87	0.00008 明顯變短	38.9%
轉4天靜置8天 發芽率100%	4.23±1.01	0.96350	9.82±2.26	0.50096	0%

將以上多組實驗數據整理，綠豆胚莖與胚根長度變化 p value 並無明顯規律，而不繼續

探討；將不定根率數據整理，得出下圖（圖 7）。



▲圖 7.不定根出現趨勢

不定根出現趨勢圖顯示，當綠豆回復到一般重力越天數，其不定根出現比例會越少。為模擬太空環境將綠豆放置在微重力環境 4 天再加上輻射後，拿回一般重力放置 3 天，將結果整理成以下數據（表 12）（表 13）。

表 12. 綠豆沒有待在微重力照輻射（對照組）

沒照沒轉vs. 有照沒轉					
	平均莖長 (cm)	p value	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒照沒轉 發芽率100%	10.87±5.13		8.44±5.47		0%
照5min沒轉 發芽率100%	23.59±8.47	0.00000 (明顯變長)	9.37±5.96	0.63423	0%
照10min沒轉 發芽率100%	18.82±4.82	0.00000 (明顯變長)	9.53±4.60	0.54756	0%
照30min沒轉 發芽率100%	11.29±4.26	0.82385	10.25±4.95	0.32742	0%

表 13. 綠豆有待在微重力照輻射（實驗組）

沒照沒轉vs. 有照有轉(2小時)					
	平均莖長 (cm)	PValue	平均根長 (cm)	p value	不定根率
沒照沒轉 發芽率100%	10.87±5.13		8.44±5.47		0%
照5min有轉 發芽率100%	10.35±6.77	0.82785	6.89±6.16	0.45136	0%
照10min有轉 發芽率100%	14.92±6.08	0.04175 (明顯變長)	7.63±5.34	0.67974	0%
照30min有轉 發芽率100%	17.7±5.12	0.00000 (明顯變長)	11.5±5.64	0.12583	0%

透過實驗發現，無論有無加上輻射，綠豆胚莖與胚根長度變化 p value 並無發現特別的規律，且綠豆的型態變化並無因加上輻射而有明顯變化，所以後續實驗不再討論綠豆胚根、胚莖長變化，及輻射的影響。實驗結果中，觀察到綠豆只要待過微重力環境就有機會出現不定根，而種子回到一般重力環境後約 8 天時間種出來的豆芽會回到一般型態。

三、探討植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

表 14. 水果玉米和糯玉米

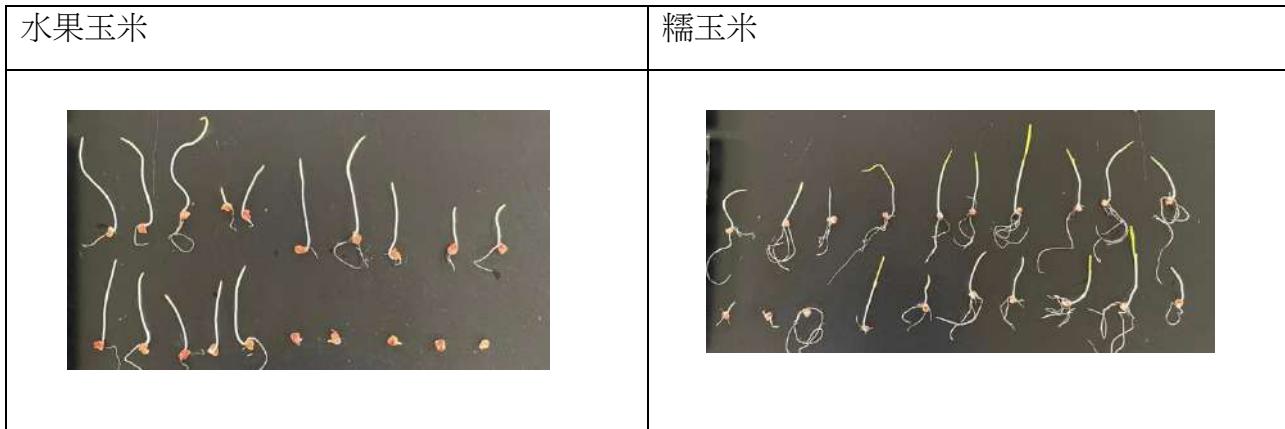


表 15. 水果玉米實驗結果

水果玉米			
轉3d 18個	平均鬚根數 (個數) 1 ± 0	平均最長鬚根長 (cm) 5.35 ± 4.03	沒發芽率 89%
沒轉 22個	1.16	4.22 ± 3.2	18%

表 16. 糯玉米實驗結果

糯玉米			
轉3d 22個	平均鬚根數 (個數) 2.79 ± 1.12	平均最長鬚根長 (cm) 7.57 ± 4.36	沒發芽率 36%
沒轉 22個	3.43 ± 1.12	9.8 ± 4.48	5%

從以上實驗結果觀察發現，水果玉米有在微重力下待過的沒發芽率很高，不過對照組沒發芽率也有近 2 成。糯玉米實驗組的發芽率也高過對照組，不過其比例並沒有水果玉米高。

四、探討高重力環境對綠豆的影響

將綠豆放在高重力環境 1 小時，觀察種出來後的型態變化，且整理成以下結果（表 17）。

表 17.高重力實驗結果

普通重力vs.高重力(1小時)				
	平均莖長 (cm)	p value	平均胚長 (cm)	p value
普通 發芽率100%	17.5±6.67		7.61±4.71	
		0.231		0.850
高重力 發芽率100%	12.5±7.56		7.15±3.82	
				0%

由實驗發現，實驗組及對照組的胚根及胚根的長度皆無明顯變化，且皆無出現不定根。

五、探討微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

取綠豆微重力實驗種出來的綠豆胚莖研磨，加入雙氧水，觀察其在試管內的冒泡高度，並整理成以下結果（表 17）。

表 18.綠豆過氧化氫酶的活性實驗結果

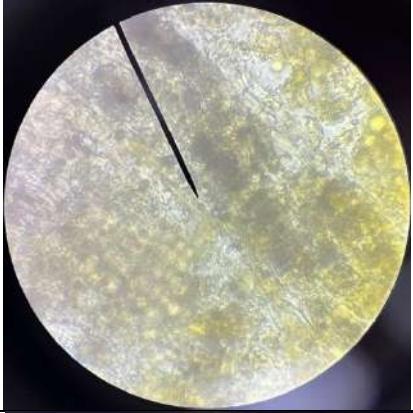
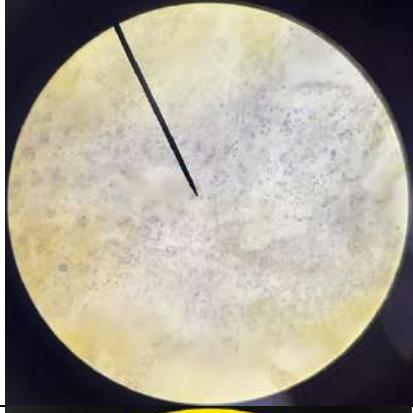
過氧化氫酶活性比較		與沒轉高度比較之長度百分比	
	不定根率	反應10min的氣泡高度(cm)	
沒轉	0%	5.4	100%
轉4天靜置0天	16.7%	2.7	50%
轉4天靜置2天	5%	3.1	57%
轉4天靜置4天	38.9%	1.4	25%
轉4天靜置8天	0%	3.5	65%

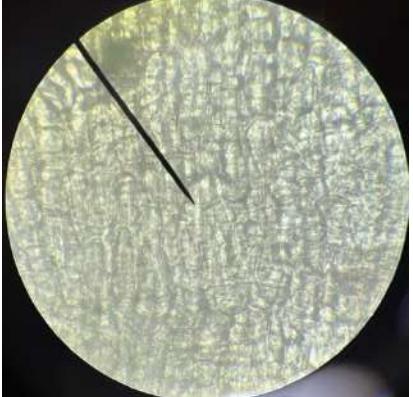
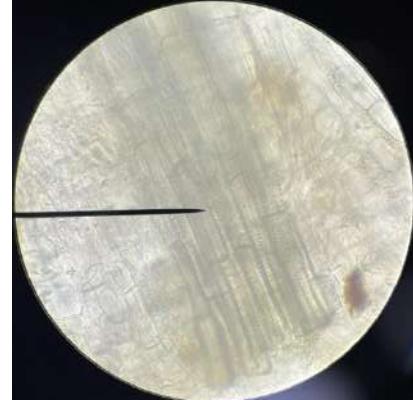
由實驗結果發現，不定根率越高之實驗組，過氧化氫酶活性越低。

六、探討綠豆種子在微重力及一般重力作用下胚內澱粉粒變化

將綠豆胚細胞及胚根細胞放到顯微鏡底下觀察，放大比例皆為 400 倍，結果整理成下表（表 19）所示。

表 19.回到一般重力不同時間段的綠豆胚及胚根切片

標本與處理方式	照片	觀察說明
胚轉 4 天放 0 天 (不定根率 16.7%)		可明顯觀察到染色的澱粉粒
胚轉 4 天放 2 天 (不定根率 5%)		可明顯觀察到染色的澱粉粒
胚轉 4 天放 4 天 (不定根率 5%)		可明顯觀察到染色的澱粉粒

標本與處理方式	照片	觀察說明
胚轉 4 天放 8 天 (不定根率 0%)		無明顯染色澱粉粒
胚沒有轉 (不定根率 0%)		無明顯染色澱粉粒
胚根轉 4 天放 0 天 (不定根率 16.7%)		無明顯染色澱粉粒

觀察以上圖表發現，綠豆胚在回到一般重力 0 天、2 天、4 天的染色結果較佳，且會發現澱粉分佈在細胞的各處，不侷限在邊緣。對應其相同操縱變因實驗組，有出現不定根結果的實驗組，皆有觀察到被染色的澱粉粒，而沒有不定根的實驗組及對照組則皆無觀察到被染色的澱粉粒；而在回到一般重力 8 天和沒待過微重力環境的胚染色結果較不明顯。

伍、討論

一、探討微重力對不同植物種子的影響

在多種豆的比較中發現，雖然出現不定根的比例皆不高，不過綠豆出現不定根的效果最明顯，為此實驗中對微重力最敏感的豆類，可能與其內部相關機能有關，未來可以進一步探討。而黃豆與四季豆觀察到多數無發芽的狀況，可能微生長環境不適合所致。

二、探討綠豆待在微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響

綠豆放在微重力環境的實驗中，觀察到綠豆只要待過微重力環境就有機會出現不定根，而種子回到一般重力環境後約 8 天時間種出來的豆芽會回到一般型態。

透過實驗發現，無論有無加上輻射，綠豆胚莖與胚根長度變化 *p value* 並無發現特別的規律，且綠豆的型態變化並無因加上輻射而有明顯變化。過去文獻探討微重力環境會通過影響生長素的極性運輸和 DNA 修復基因的表現，從而抑制植物對輻射的適應性反應(Deng, C.,2017)，不過因輻射而造成植物微重力適應性反應的抑制，未來還需做探討，故後面的實驗不探討綠豆胚莖胚根及輻射相關的結果。

第一次實驗中，靜置 7 天出現最高比例的不定根，但沒有觀察到綠豆型態完全回復的結果，所以第二次實驗設計讓綠豆從微重力環境取下後，靜置在一般重力多至 11 天，結果發現胚根型態完全回復的現象，接著第三次實驗，放置一週內的實驗組皆有出現胚根型態改變，而 8 天的實驗組也完全回復，與過去文獻探討植物中的重力感知系統回到一般重力約一週便可回復，使植物型態回到原本的狀態相符(De Micco,2014)。

三、探討植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

原本假設綠豆的不定根形成可能是微重力環境導致種子產生乙烯，進而產生衰敗現象，因而玉米萌發對乙烯反應，故選用玉米進行乙烯反應的檢測，但在乙烯反應檢測的實驗中，得出的結果和預期的不相同，玉米沒有因為待過微重力環境而都有出現明顯的乙烯三相變化，所以推測微重力環境可能會引發少量乙烯產生，但型態變化可能非完全都是乙烯反應造成。另外植物出現不定根的原因也可能與生長素(IAA)有關，過去的文獻顯示，在一般環境中，生長素的極性運輸受到重力影響，通常在根的向地生長中為關鍵作用。但在微重力條件下，生長素的分佈可能更加隨機，從而導致不定根的形成增加(Desmond G Mortley,2008)。

四、探討高重力環境對綠豆的影響

由實驗發現，實驗組及對照組的胚根及胚根的長度皆無明顯變化，且皆無出現不定根。推測微重力環境使綠豆重力感知系統中的澱粉體 (amyloplasts) 散佈在細胞中，找不到方向；

不過高重力長時間給予綠豆種子相同方向的力，與一般重力相似，故無明顯型態改變。但內部是否有機能受到影響，未來可以繼續探討。

五、探討微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

透過微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性實驗觀察到，不定根率越高的實驗組過氧化氫酶與對照組比較活性越低，雖然轉 4 天放置 8 天的實驗組不定根率回復到 0%，不過過氧化氫酶與雙氧水反應的氣泡高度並沒有回復到與對照組高度相比的 100%，推測其原因可能為綠豆自微重力回到一般重力後，不同機制回歸到原本狀態所需時間不同，其內部的相關反應，未來可進一步研究。

六、探討綠豆種子在微重力及普通重力作用下胚內澱粉粒變化

切片實驗中，回到一般重力較少天的綠豆胚細胞中的澱粉粒較容易觀察，且分佈在細胞各處，而放置超過一個禮拜的綠豆胚細胞及沒有待過微重力環境的綠豆，澱粉染色不明顯，可能為植物種子在逆境時，改變儲存在胚中的養分形式，使在微重力環境待過的種子胚澱粉較明顯。與過去文獻探討植物種子在逆境時，可能會改變儲存在胚中的養分形式相符。而在胚根切片實驗中，由於手切的困難及設備限制，切片太厚導致無法染色，故往後的實驗並無繼續進行。不過胚切片的結果也能讓實驗有進一步的探討。

本研究與其他研究較不同的是，過去的實驗主要是探討植物直接在微重力環境生長的情況及型態改變，而本研究是將待過微重力環境的種子放回一般重力種植，設計不同的操縱變因，並觀察種出來的型態改變。關於未來可以運用的方面，如果發展出太空種子銀行，從太空拿回種子至地面上種植，本篇研究的結果可以提供參考價值。

陸、結論

一、綠豆是所有比較豆類中出現不定根率最高的豆。

二、綠豆只要待過微重力環境就有機會出現不定根，且種子回到一般重力環境後約一週時間種出來的豆芽會回到一般型態。其出現不定根的原因可能與微重力環境導致的多種激素改變有關（如乙烯的生成、IAA 的重新分布等）。

三、高重力為長時間向同一方向施力，與一般重力相似，故外型上無特別改變。

四、不定根比例越高的實驗組過氧化氫酶活性，相較對照組越低，兩者間可能有關聯，未來需更進一步研究。

五、微重力會改變種子內澱粉分佈，從胚切片可以觀察到，而重力系統回復的種子不易觀察胚內澱粉分佈。

六、期望為未來的太空農業及極端環境下的植物栽培提供參考數據。

柒、參考資料及其他

- 一、Swamy, B. K., Hosamani, R., Sathasivam, M., Chandrashekhar, S. S., Reddy, U. G., & Moger, N. (2021). Novel hypergravity treatment enhances root phenotype and positively influences physio-biochemical parameters in bread wheat (*Triticum aestivum L.*). *Scientific reports*, 11(1), 15303.
- 二、Nakajima, S., Nagata, M., & Ikehata, A. (2021). Mechanism for enhancing the growth of mung bean seedlings under simulated microgravity. *npj Microgravity*, 7(1), 26.
- 三、Bonde, P. J., Thorat, B. S., & Gimhavnekar, V. J. (2020). Effect of gamma radiation on germination and seedling parameters of mung bean (*Vigna radiata*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, Special Issue*, 11, 1582-1587.
- 四、Atteh, A., & Adeyeye, A. (2022). Effect of low gamma irradiation on the germination and morphological characteristics of broad beans (*Vicia faba L.*), mung beans (*Vigna radiata L.*), and peas (*Pisum sativum L.*) seedlings. *Natural Resources*, 13(5), 105-125.
- 五、Tuominen, L. K., Levine, L. H., & Musgrave, M. E. (2009). Plant secondary metabolism in altered gravity. *Methods in molecular biology* (Clifton, N.J.), 547, 373 – 386.
https://doi.org/10.1007/978-1-60327-287-2_30
- 六、Ecker, J. R. (1995). The ethylene signal transduction pathway in plants. *Science*, 268(5211), 667-675.
- 七、王慶裕. (1993). 乙烯釋放劑矮化玉米之研究 (Doctoral dissertation).
- 八、Mortley, D. G., Bonsi, C. K., Hill, W. A., Morris, C. E., Williams, C. S., Davis, C. F., Williams, J. W., Levine, L. H., Petersen, B. V., & Wheeler, R. M. (2008). Influence of Microgravity Environment on Root Growth, Soluble Sugars, and Starch Concentration of Sweetpotato Stem Cuttings. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science, 133(3), 327 – 332.
- 九、Deng, C., Wang, T., Wu, J., Xu, W., Li, H., Liu, M., Wu, L., Lu, J., & Bian, P. (2017). Effect of modeled microgravity on radiation-induced adaptive response of root growth in *Arabidopsis thaliana*. *Mutation research*, 796, 20 – 28.十、De Micco, V., De Pascale, S., Paradiso, R., & Aronne, G. (2014). Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle. *Plant Biology*, 16, 31-38.

註：整份作品中的照片及圖片均為作者親自製作。

【評語】052110

1. 本研究以綠豆種子為材料探討微重力對其發育的影響，結果發現微重力可誘導不定根形成並影響過氧化氫酶活性與澱粉粒分佈，顯示微重力對植物形態與生理具有可逆且持續的影響。
2. 本研究雖具有太空農業與種子儲存之應用潛力，但不同豆類在微重力下出現不定根的情形有差異，綠豆最好，而黃豆與四季豆甚至出現多數無發芽的狀況，因此微重力對不同植物生長的影響，應具有相當的變異性，須進一步探討才能有所結論。
3. 實驗穩定度，有加強的空間，才能有說服力。
4. 未來可針對其假設設計實驗分析過氧化氫酶的活性測定和植物體內賀爾蒙濃度測定，將可增加此研究深度。

作品海報

飛天遁地 豆豆先生

探討豆類植物在微重力及高重力的型態變化

摘要

本研究以綠豆為主要研究對象，探討微重力環境($<10^{-6}$ g)對植物種子的影響。結果顯示，綠豆在微重力環境中易形成不定根，回到一般重力後約需8天型態完全回復；輻射環境對綠豆胚莖與胚根長度變化無顯著影響。此外，微重力環境造成不定根形成，推測可能與乙烯產生有關。針對高重力(900 g)環境，綠豆的細胞內澱粉體分佈未顯著改變，但內部機能可能受影響。在過氧化氫酶活性實驗中，不定根率較高的綠豆過氧化氫酶活性降低，顯示微重力對植物內部生理機制有持續影響。而切片實驗發現，微重力可能促進胚內澱粉粒的分佈與儲存形式改變。本研究系統性探討微重力環境返回一般重力後植物種子的型態變化，為未來太空種子銀行的發展提供參考依據。

研究動機

透過參加太空生醫國際論壇認識太空生醫發展，了解生物細胞在微重力環境生長型態會發生改變，植物細胞內的蛋白質分布也會產生變化，結合種子銀行的概念，想了解如果將種子放在微重力環境下保存是否也會對種子造成影響，而這種影響是否會因為重力環境的回復而消失，甚至更進一步模擬太空環境加上輻射，或模擬地下高重力環境會不會也有這樣的改變。

豆類作物如綠豆、黃豆和四季豆，是全球重要的蛋白質來源，因其富含植物性蛋白質及必需胺基酸，對於替代動物性蛋白具有重要意義。在全球人口不斷增長及可持續發展需求日益迫切的背景下，研究豆類生長的影響因子，如微重力環境對其型態與功能的影響，對於未來實現糧食安全及探索太空農業具有重要價值。此外，豆類的耐逆性和適應性，使其成為研究植物生理與環境交互作用的理想材料。透過分析豆類在極端環境下的表現，能為太空探索提供參考，並促進地球農業資源的高效利用。

研究目的

探討微重力對不同豆類植物種子的影響

探討綠豆待在微重力環境合併輻射環境回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響

探討植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

探討高重力環境對綠豆的影響

探討微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

探討綠豆種子在微重力及一般重力作用下胚內澱粉粒分佈

植物培養箱



主要研究器材

植物培養箱	穴盤	微重力機(10^{-6} g)	高重力機(900 g)
多種豆類（綠豆、紅豆、黃豆、四季豆、荷蘭豆、大莢荷蘭豆、花豆）			

研究架構

測試極端環境處理過後，回到一般環境種植對植物生理的影響

測試不同種豆對微重力的敏感程度

測試微重力環境的綠豆型態影響機制

將綠豆放置在 10^{-6} g 環境

將綠豆放置在太空模擬環境

將綠豆放置在900 g 環境

觀察莖長根長與不定根比例

測試不定根出現原因與乙烯三相反應的關係

測試植物內部機能（過氧化氫酶活性）

胚及胚根切片

（澱粉分佈）

研究結果

實驗一.比較不同種豆類植物在微重力(10^{-6} g)下及一般重力(1 g)下的差異

表1. 對照組數據

1 g 處理

種類	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	平均根長(cm)	不定根率(%)	種類	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	平均根長(cm)	不定根率(%)
綠豆	20	100	14.30 ± 5.90	10.60 ± 5.67	0	荷蘭豆	20	35	17.39 ± 3.56	10.02 ± 3.07	0
紅豆	20	100	13.99 ± 4.75	10.29 ± 3.87	0	大莢荷蘭豆	20	40	19.22 ± 5.52	9.82 ± 4.83	0
黃豆	20	20	0	1.40 ± 0.14	0	花豆	20	45	16.06 ± 7.53	10.50 ± 5.29	0
四季豆	20	25	8.20 ± 8.05	3.17 ± 4.10	0						

表2. 10^{-6} g 處理2小時，1 g 處理3天實驗組數據

10^{-6} g 處理2小時，1 g 處理3天

種類	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	平均根長(cm)	不定根率(%)	種類	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	平均根長(cm)	不定根率(%)
綠豆	20	100	26.18 ± 8.41	10.53 ± 6.63	9	荷蘭豆	20	20	12.19 ± 1.03	9.98 ± 3.60	0
紅豆	20	100	24.98 ± 9.55	8.76 ± 4.65	9	大莢荷蘭豆	20	20	11.84 ± 3.98	12.67 ± 3.77	0
黃豆	20	0				花豆	20	45	10.40 ± 9.82	8.28 ± 7.38	2
四季豆	20	0									

表3. 10^{-6} g 處理4天，1 g 處理3天實驗組數據

10^{-6} g 處理4天，1 g 處理3天

種類	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	平均根長(cm)	不定根率(%)	種類	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	平均根長(cm)	不定根率(%)
綠豆	20	100	10.38 ± 6.52	6.73 ± 6.01	16	荷蘭豆	20	35	16.81 ± 6.90	10.00 ± 4.44	0
紅豆	20	100	8.52 ± 5.74	7.53 ± 3.35	4	大莢荷蘭豆	20	40	16.59 ± 6.56	10.16 ± 5.16	0
黃豆	20	5	0	0.68 ± 0.21	0	花豆	20	45	2.00 ± 3.03	5.30 ± 7.43	0
四季豆	20	0									

表4. 不同種豆不定根率比較

不定根率(%)	綠豆	紅豆	花豆	黃豆	荷蘭豆	大莢荷蘭豆	四季豆
沒轉(對照組)	0	0	0	0	0	0	0
轉2小時	9	9	2		0	0	
轉4天	16	4	0	0	0	0	

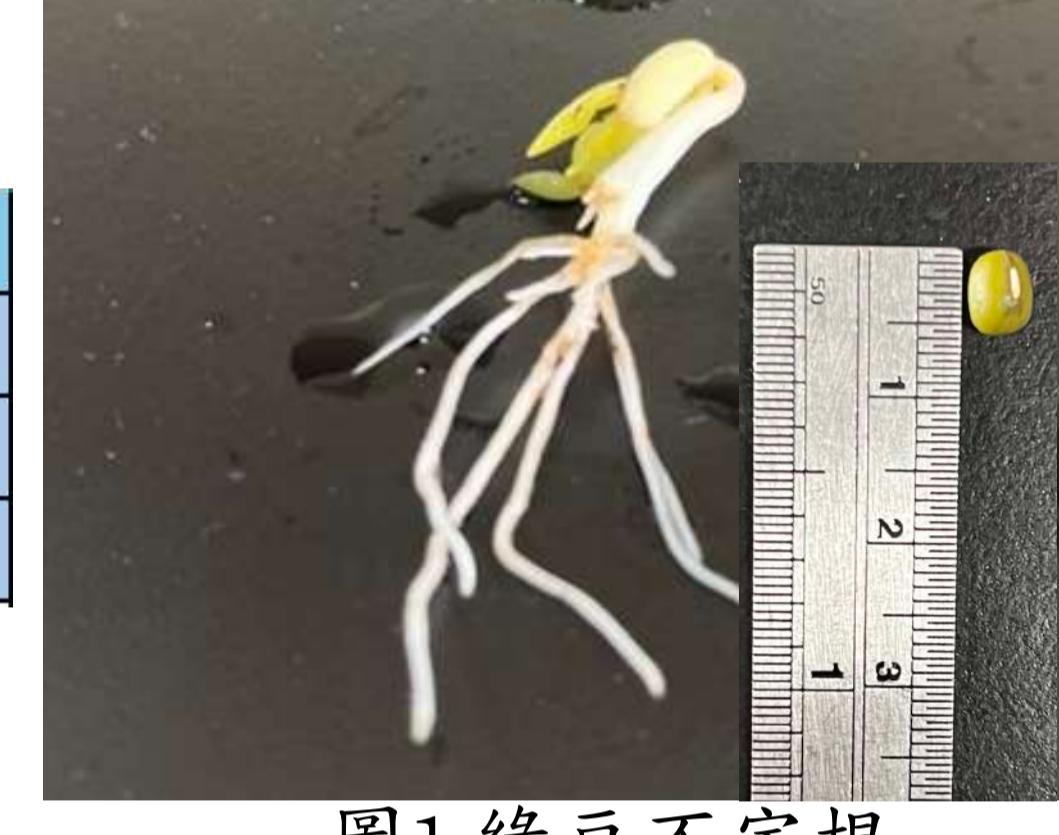


圖1. 綠豆不定根

實驗二. 比較綠豆待在微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響

表5. 第一次實驗不定根率

表6. 第二次實驗不定根率

表7. 第三次實驗不定根率

表8. 太空環境模擬實驗不定根率

不定根率(%)	沒轉	轉3hr	轉2天	轉4天
靜置4天	0.00	0.00	0.00	0.00
靜置6天	0.00	0.00	10.00	5.50
靜置7天	0.00	5.20	17.60	10.50

不定根率(%)	沒轉	轉2hr	轉4天
靜置3天	0.00	9.00	16.00
靜置7天	0.00	11.00	0.00
靜置11天	0.00	0.00	0.00

不定根率(%)	沒轉	轉4天
靜置0天	0.00	16.70
靜置2天	0.00	5.00
靜置4天	0.00	38.90
靜置8天	0.00	0.00

平均莖長

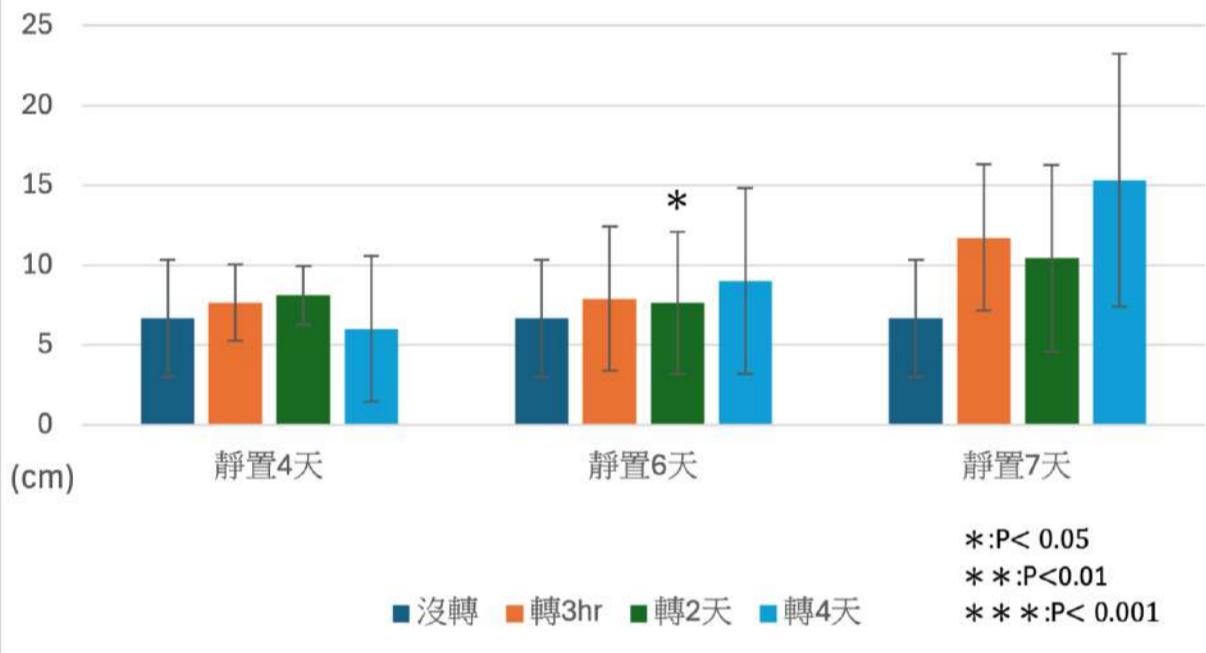


圖2.第一次實驗平均莖長

平均莖長

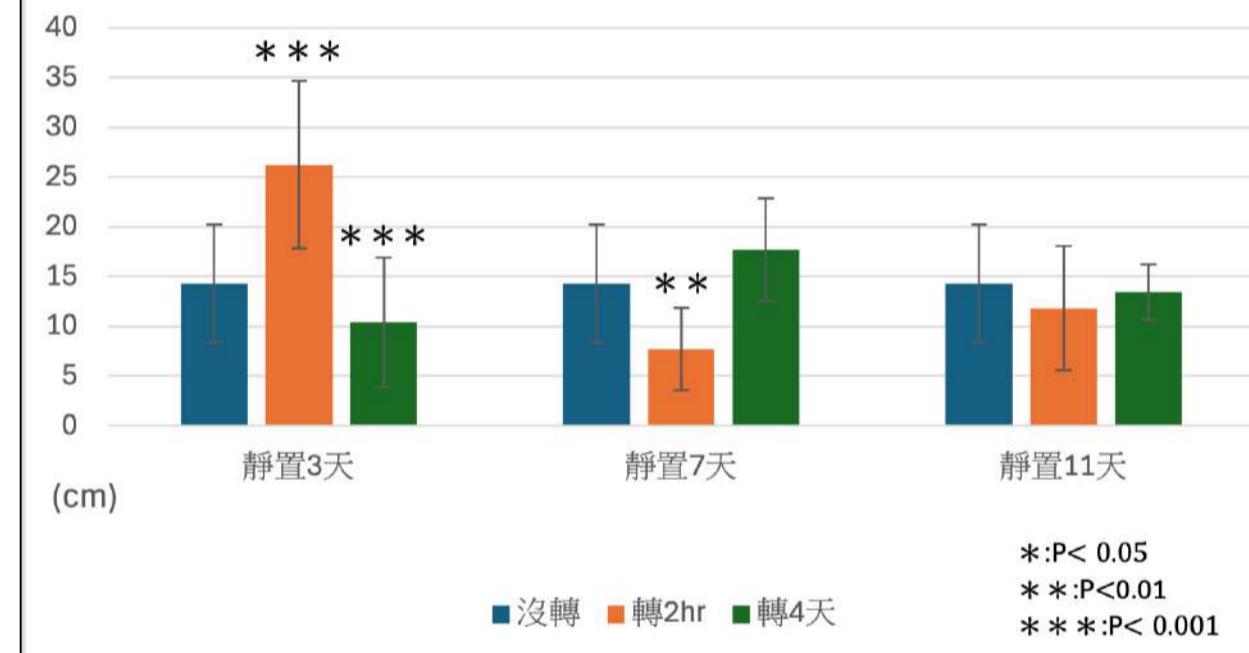


圖4.第二次實驗平均莖長

平均莖長

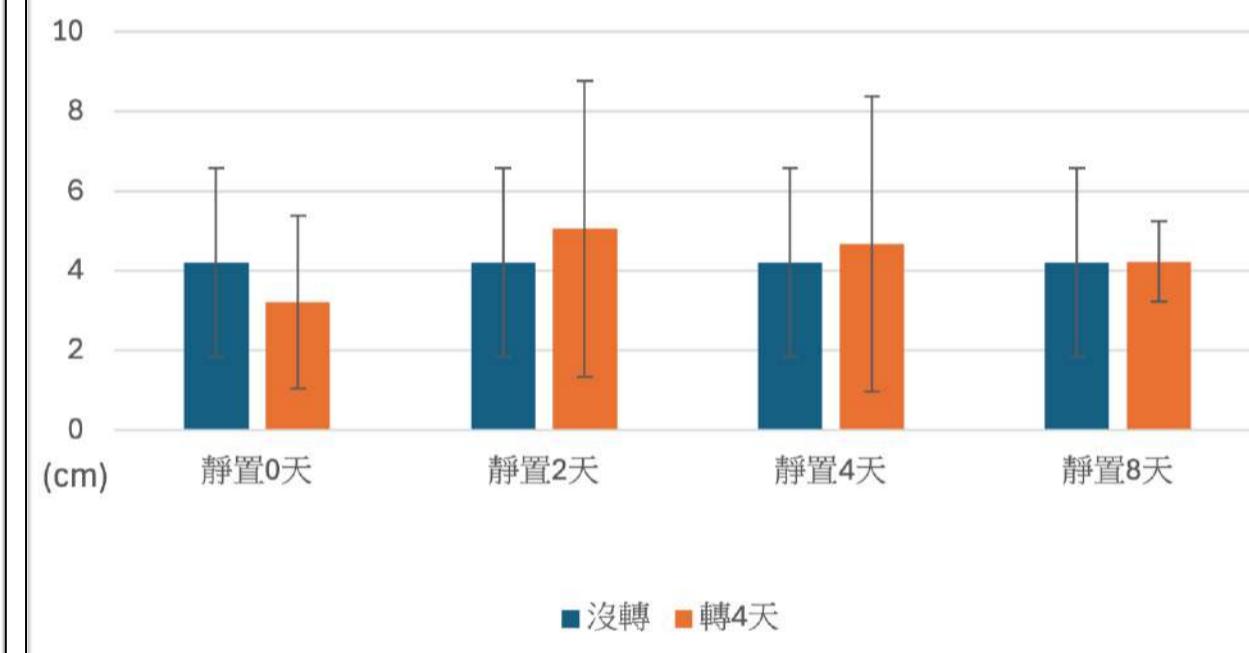


圖6.第三次實驗平均莖長

平均莖長

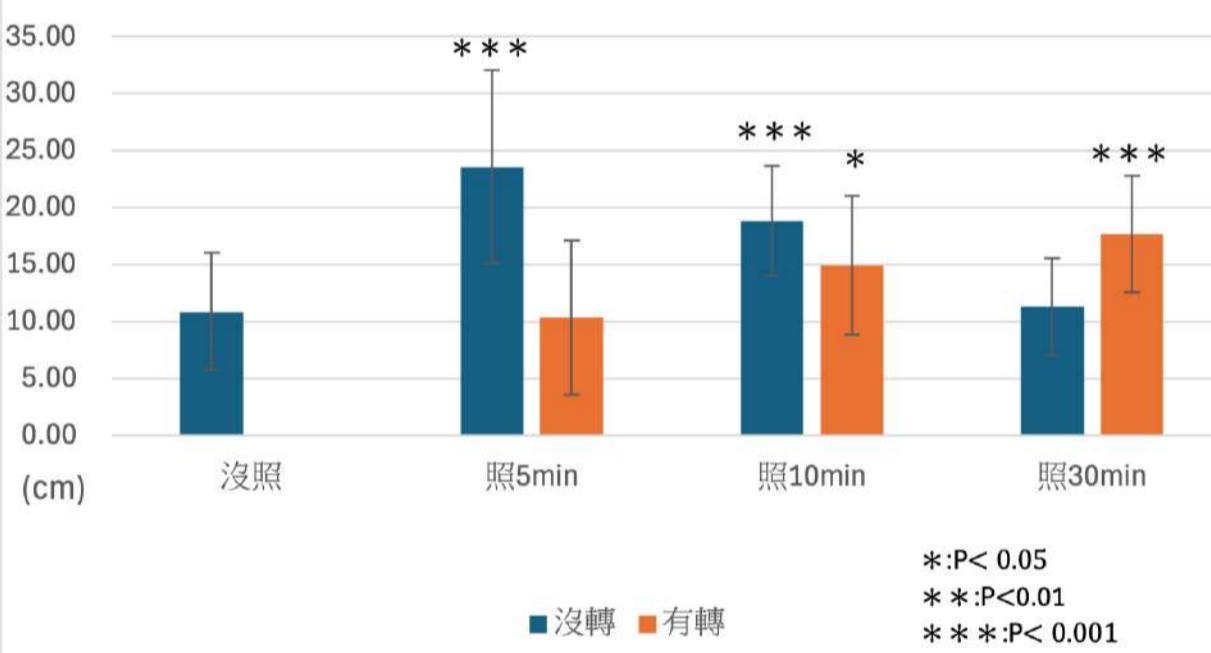


圖8.太空環境模擬實驗平均莖長

平均根長

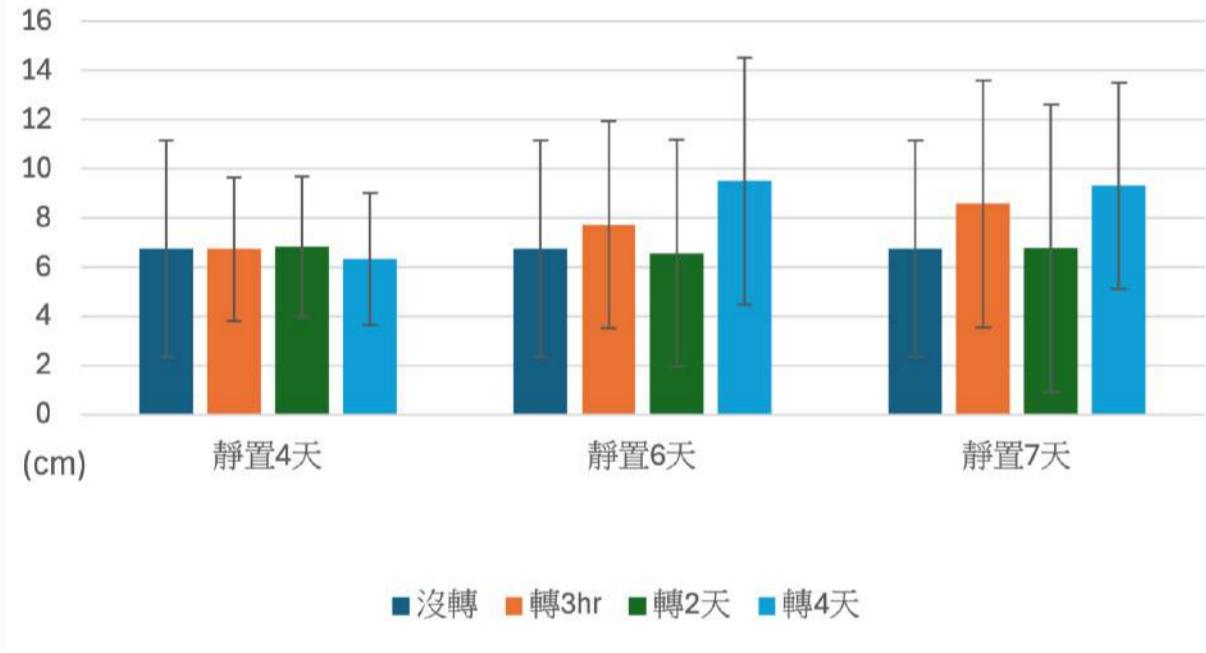


圖3.第一次實驗平均根長

平均根長

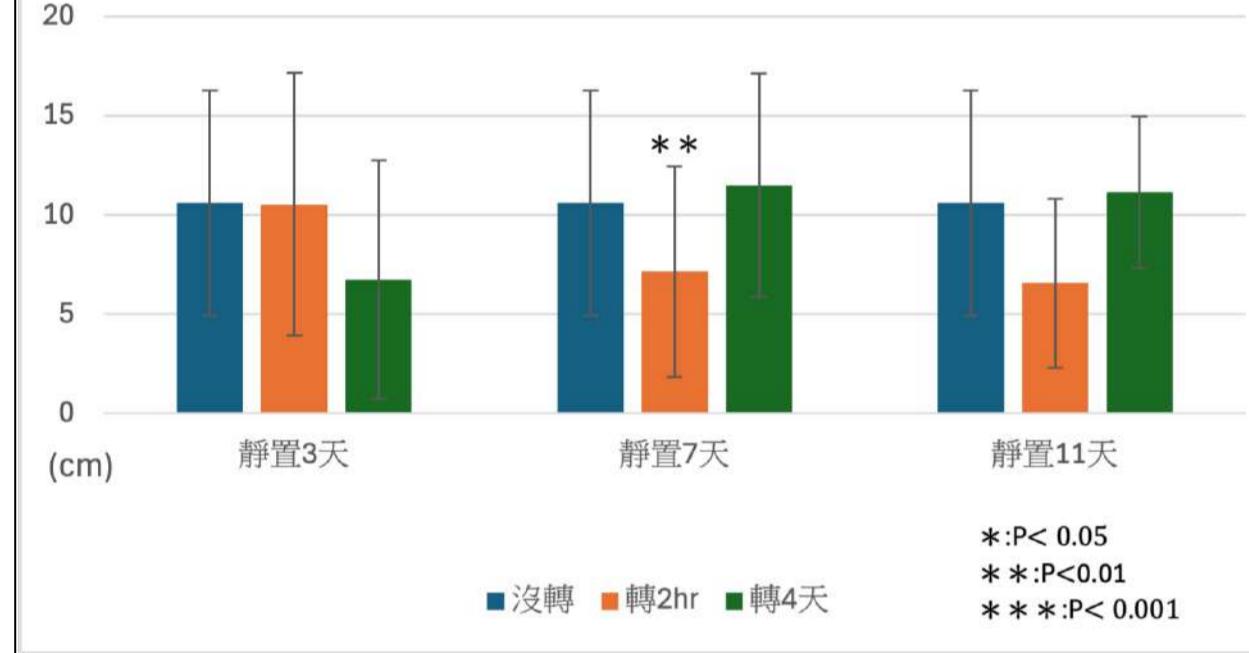


圖5.第二次實驗平均根長

平均根長

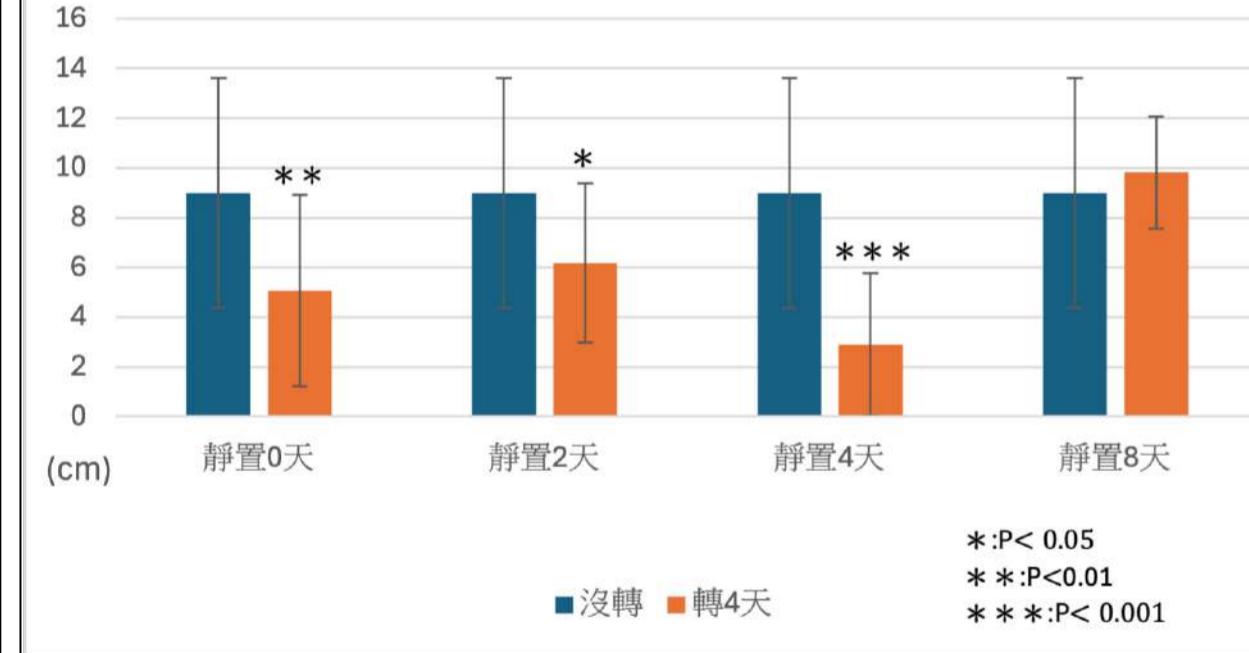


圖7.第三次實驗平均根長

平均根長

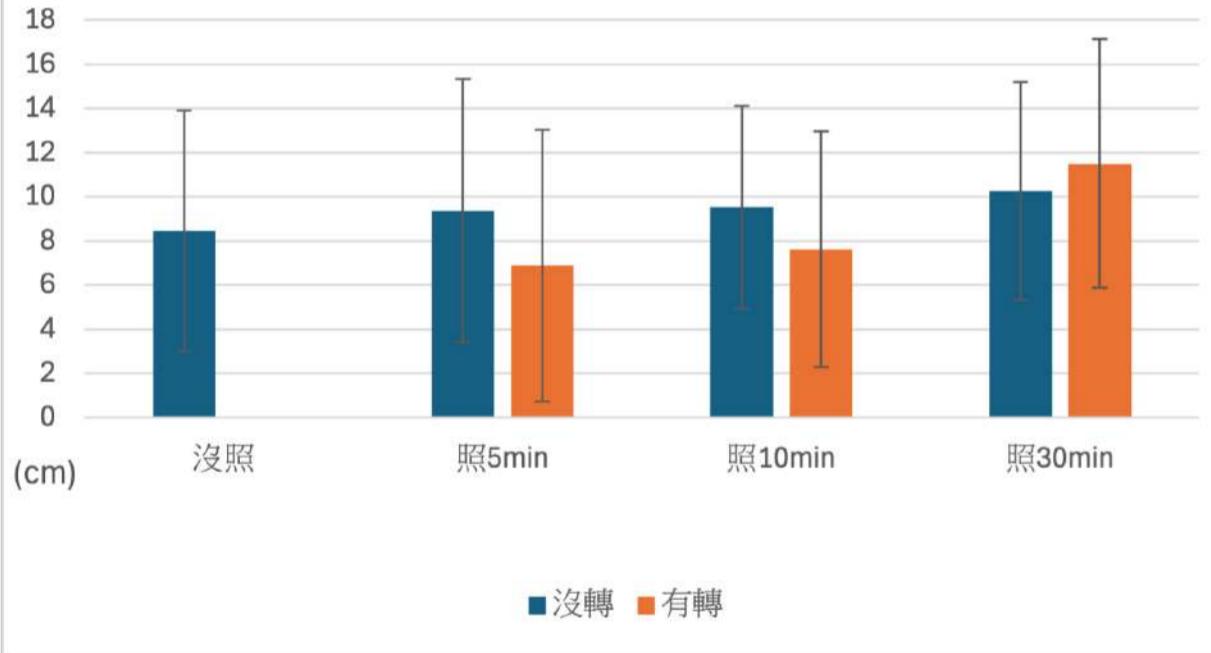


圖9.太空環境模擬實驗平均根長

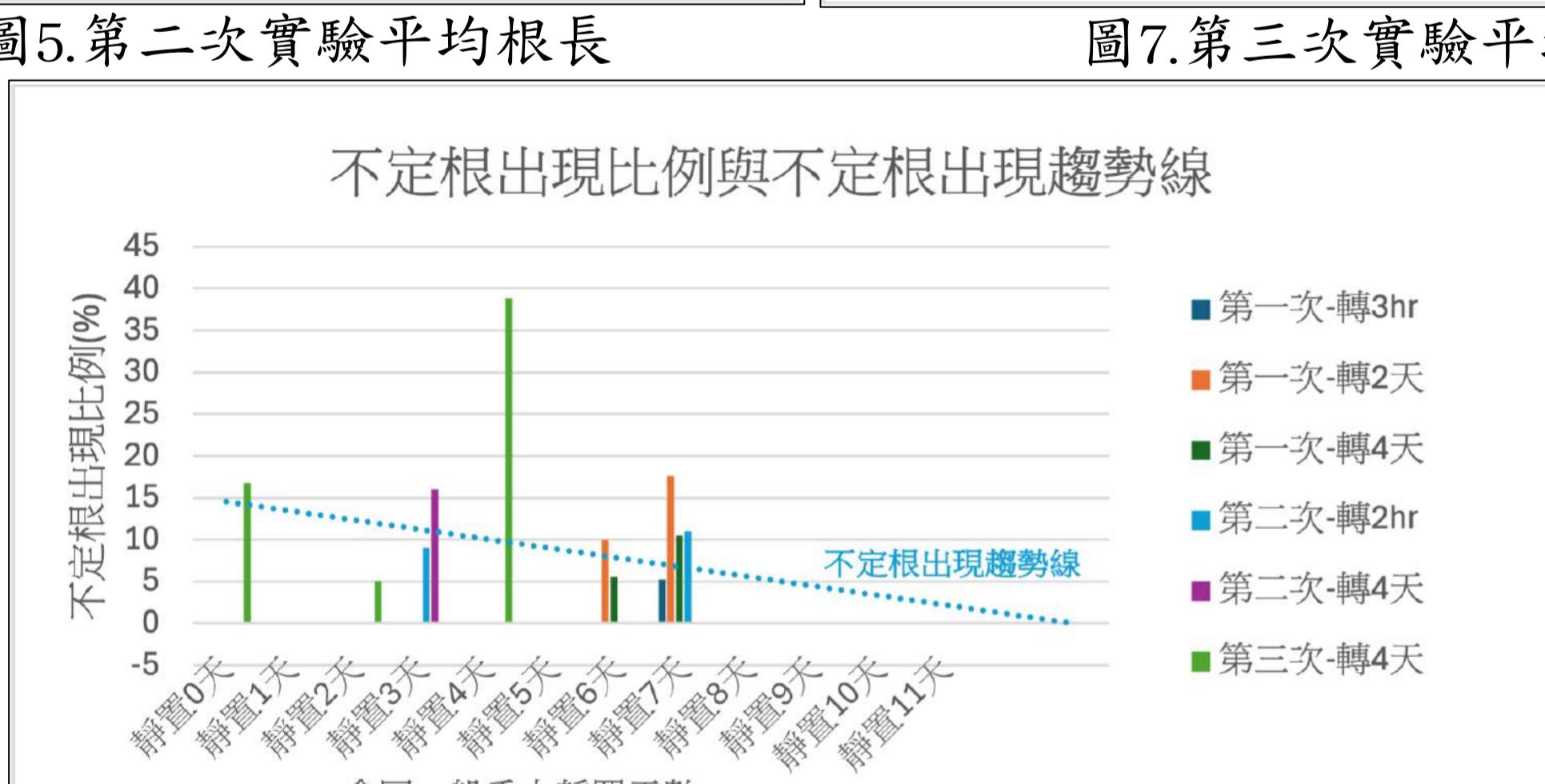


圖10.綠豆從微重力拿回一般重力放置天數不定根出現趨勢

實驗三. 探討植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

表9.水果玉米實驗結果

	個數	發芽率(%)	平均鬚根數(個數)	平均最長鬚根根長(cm)
10^{-6} g 處理3天	18	11	1.00 ± 0.00	5.35 ± 4.03
1 g 處理3天	22	82	1.16 ± 0.38	4.22 ± 3.20

表10.糯玉米實驗結果

	個數	發芽率(%)	平均鬚根數(個數)	平均最長鬚根根長(cm)
10^{-6} g 處理3天	22	44	2.79 ± 1.12	7.57 ± 4.36
1 g 處理3天	22	95	3.43 ± 1.12	9.80 ± 4.48



圖11.水果玉米



實驗四.探討高重力環境對綠豆的影響

表11. 900 g與1 g處理綠豆實驗結果

900 g 與1 g 處理綠豆實驗結果比較							
	個數	發芽率(%)	平均莖長(cm)	p value	平均根長(cm)	p value	不定根率(%)
900 g 處理1小時	20	100	12.5 ± 7.56	0.23	7.15 ± 3.82	0.85	0
1 g 處理1小時	20	100	17.5 ± 6.67		7.61 ± 4.71		0

實驗五.探討微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

表12.綠豆過氧化氫酶的活性實驗結果

綠豆過氧化氫酶活性實驗			
	研磨胚莖重(g)	與雙氧水反應10分鐘氣泡高度(cm)	與對照組氣泡高度比較之長度百分比(%)
1 g 處理4天	0.78	5.4	100
10 ⁻⁶ g 處理4天, 1 g 處理0天	0.78	2.7	50
10 ⁻⁶ g 處理4天, 1 g 處理2天	0.78	3.1	57
10 ⁻⁶ g 處理4天, 1 g 處理4天	0.78	1.4	25
10 ⁻⁶ g 處理4天, 1 g 處理8天	0.78	3.5	65

實驗六.探討綠豆種子在微重力及一般重力作用下胚內澱粉粒分佈(400x)

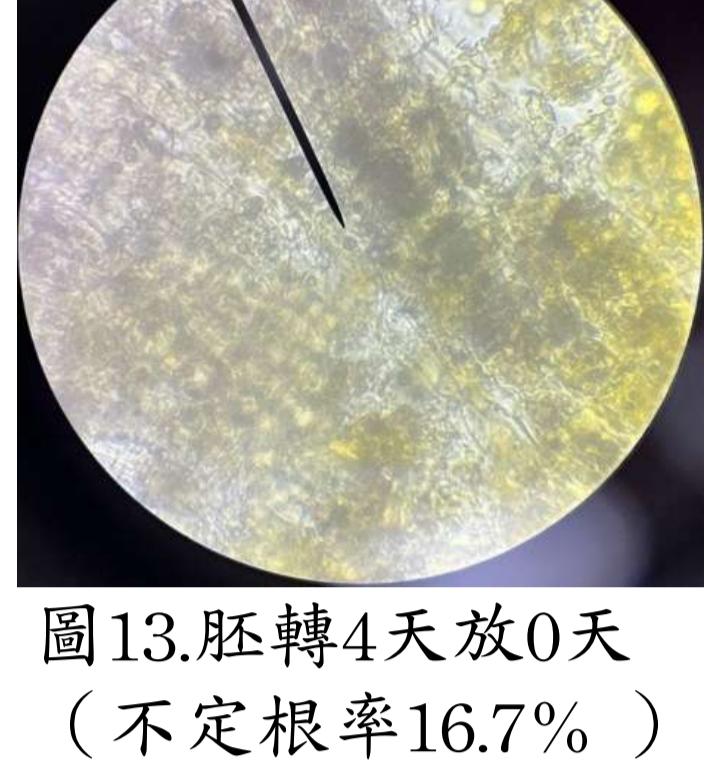


圖13.胚轉4天放0天
(不定根率16.7%)

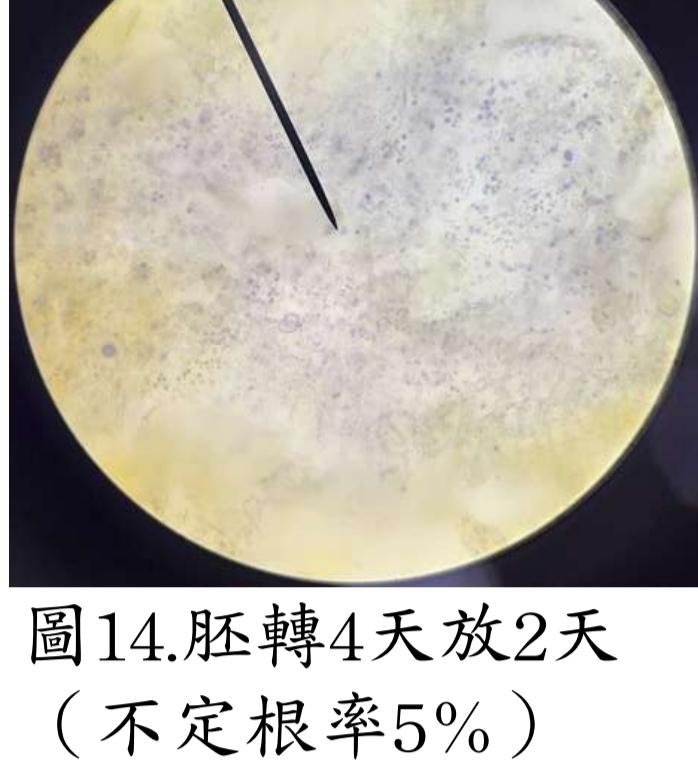


圖14.胚轉4天放2天
(不定根率5%)

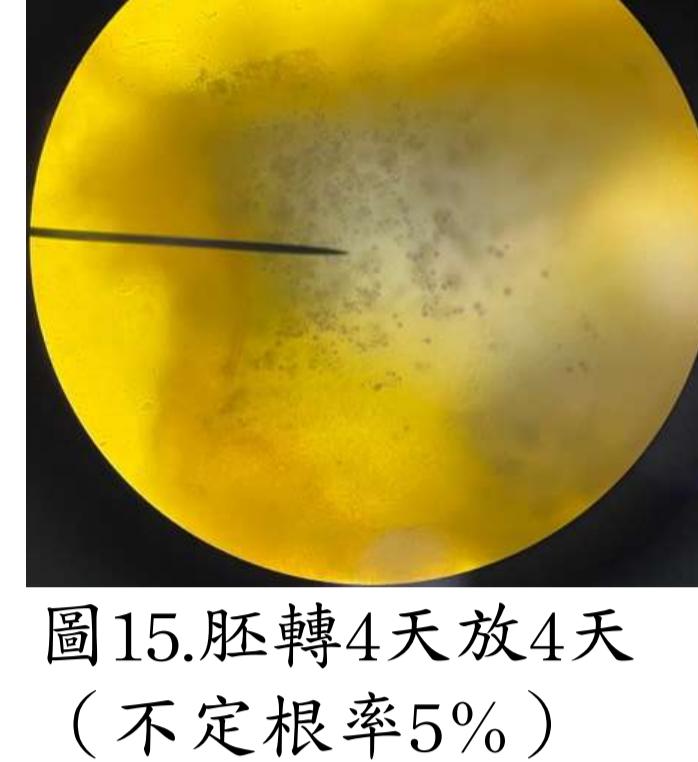


圖15.胚轉4天放4天
(不定根率5%)

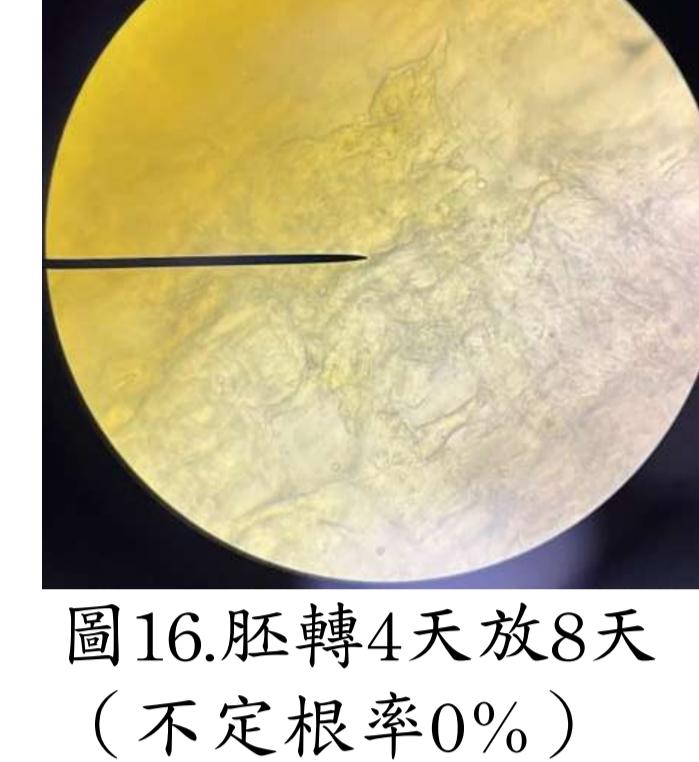


圖16.胚轉4天放8天
(不定根率0%)

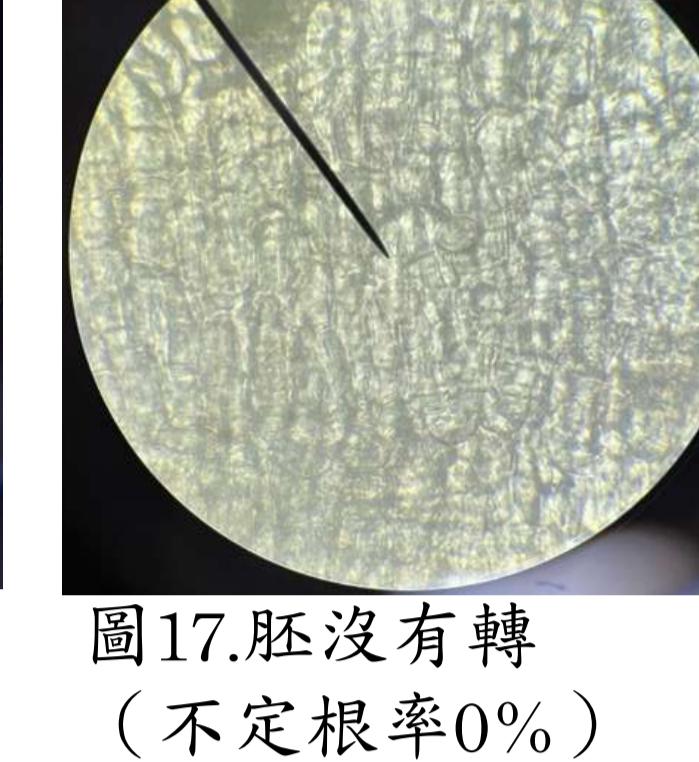


圖17.胚沒有轉
(不定根率0%)

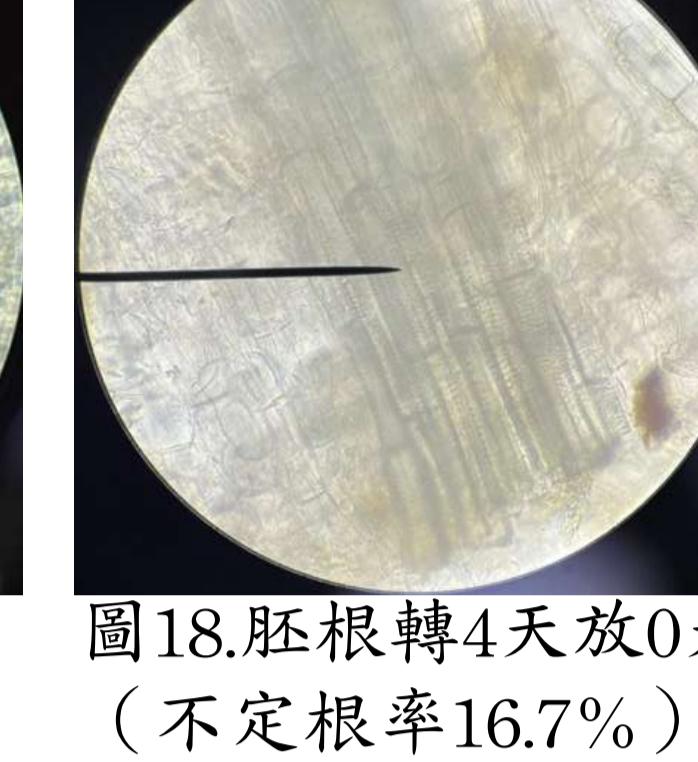


圖18.胚根轉4天放0天
(不定根率16.7%)

討論

一、探討微重力對不同種豆類植物種子的影響

在多種豆的比較中發現雖然出現不定根的比例皆不高，不過綠豆出現不定根的效果最明顯，為此實驗中對微重力最敏感的豆類，可能與其內部相關機能有關，未來可以進一步探討。

二、探討綠豆待在微重力環境時間及回復重力環境時間的長短對其豆芽型態變異的影響，以及微重力合併輻射環境對綠豆的影響

透過實驗發現，無論有無加上輻射，綠豆胚莖與胚根長度變化p value大部分皆無顯著差異，且綠豆的型態變化並無因加上輻射而有明顯變化。過去文獻探討微重力環境會通過影響生長素的隨機分佈和DNA修復基因的表現，從而抑制植物對輻射的適應性反應(Deng, C.,2017)，不過因輻射而造成植物微重力適應性反應的抑制，未來還需做探討。

在三次實驗中，放置一週內的實驗組皆有出現胚根型態改變，而放置8天過後的實驗組也完全回復，與過去文獻探討植物中的重力感知系統回到一般重力約一週便可回復，使植物型態回到原本的狀態相符(De Micco,2014)。

三、探討植物根型態變化是否和乙烯三相反應有關係

在乙烯反應檢測的實驗中，玉米沒有因為待過微重力環境而都有出現明顯的乙烯三相變化，所以推測微重力環境可能會引發少量乙烯產生，但型態變化可能非完全都是乙烯反應造成。植物出現不定根的原因也可能與生長素(IAA)有關，在微重力條件下，生長素的分佈隨機，從而導致不定根的形成增加(Desmond G Mortley,2008)。

四、探討高重力環境對綠豆的影響

高重力長時間給予綠豆種子相同方向的力，與一般重力相似，故無明顯型態改變。但內部是否有機能受到影響，未來可以繼續探討。

五、探討微重力環境處理後的綠豆，其豆芽植株過氧化氫酶的活性

透過實驗觀察到，不定根率越高的實驗組過氧化氫酶與對照組比較活性越低，雖然轉4天放置8天的實驗組不定根率回復到0%，不過過氧化氫酶與雙氧水反應的氣泡高度並沒有回復到與對照組高度相比的100%，推測其原因可能為綠豆自微重力回到一般重力後，不同機制回歸到原本狀態所需時間不同，其內部的相關反應，未來可進一步研究。

六、探討綠豆種子在微重力及普通重力作用下胚內澱粉粒變化

切片實驗中，回到一般重力較少天的綠豆胚細胞中的澱粉粒較容易觀察，且分佈在細胞各處，而放置超過一個禮拜的綠豆胚細胞及沒有待過微重力環境的綠豆，澱粉染色不明顯，可能為植物種子在逆境時，改變儲存在胚中的養分形式，使在微重力環境待過的種子胚澱粉較明顯。

結論

一、綠豆是所有比較豆類中出現不定根率最高的種類。

二、綠豆只要待過微重力環境就有機會出現不定根，且種子回到一般重力環境後約一週時間種出來的豆芽就不會長出不定根。

三、出現不定根的原因可能與微重力環境導致的多種激素改變有關（如乙烯的生成、IAA的重新分布等）。

四、高重力為長時間向同一方向施力，與一般重力相似，故外型上無特別改變。

五、不定根比例越高的實驗組過氧化氫酶活性，相較對照組越低，兩者間可能有關聯，未來需更進一步研究。

六、微重力會改變種子內澱粉粒分佈，從胚切片可以觀察到，而細胞內重力系統回復的種子不易觀察胚內澱粉粒分佈。

參考資料

一、Swamy, B. K., Hosamani, R., Sathasivam, M., Chandrashekhar, S. S., Reddy, U. G., & Moger, N. (2021). Novel hypergravity treatment enhances root phenotype and positively influences physio-biochemical parameters in bread wheat (*Triticum aestivum L.*). *Scientific reports*, 11(1), 15303.二、Nakajima, S., Nagata, M., & Ikehata, A. (2021). Mechanism for enhancing the growth of mung bean seedlings under simulated microgravity. *npj Microgravity*, 7(1), 26.三、Bonde, P. J., Thorat, B. S., & Gimhavnekar, V. J. (2020). Effect of gamma radiation on germination and seedling parameters of mung bean (*Vigna radiata*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, Special Issue, 11, 1582-1587.四、Atteh, A., & Adeyeye, A. (2022). Effect of low gamma irradiation on the germination and morphological characteristics of broad beans (*Vicia faba L.*), mung beans (*Vigna radiata L.*), and peas (*Pisum sativum L.*) seedlings. *Natural resources*, 13(5), 105-125.五、Tuominen, L. K., Levine, L. H., & Musgrave, M. E. (2009). Plant secondary metabolism in altered gravity. *Protocols for In Vitro Cultures and Secondary Metabolite Analysis of Aromatic and Medicinal Plants*, 373-386.六、Ecker, J. R. (1995). The ethylene signal transduction pathway in plants. *Science*, 268(5211), 667-675.七、王慶裕. (1993). 乙烯釋放劑矮化玉米之研究 (Doctoral dissertation).八、Mortley, D. G., Bonsi, C. K., Hill, W. A., Morris, C. E., Williams, C. S., Davis, C. F., ... & Wheeler, R. M. (2008). Influence of microgravity environment on root growth, soluble sugars, and starch concentration of sweetpotato stem cuttings. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 133(3), 327-332.九、Deng, C., Wang, T., Wu, J., Xu, W., Li, H., Liu, M., Wu, L., Lu, J., & Bian, P. (2017). Nine、Deng, C., Wang, T., Wu, J., Xu, W., Li, H., Liu, M., ... & Bian, P. (2017). Effect of modeled microgravity on radiation-induced adaptive response of root growth in *Arabidopsis thaliana*. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 796, 20-28.十、De Micco, V., De Pascale, S., Paradiso, R., & Aronne, G. (2014). Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle. *Plant Biology*, 16, 31-38.

註：整份作品中的照片及圖表均為作者親自製作。