



# 完全人工光控制型植物工廠 系統設計

方煒

臺灣大學生物產業機電工程學系教授  
生物產業自動化教學及研究中心主任

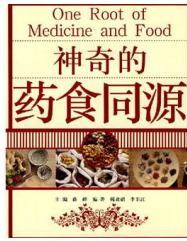
[weifang@ntu.edu.tw](mailto:weifang@ntu.edu.tw)

1

多投資教育  
可減少蓋監獄

2

# 食



# 悟

多投資植物工廠  
可減少蓋醫院

3

目標：改善人類的生活

作法：發展可以以最少的資源，對環境最低的汙染  
大規模量產高品質植物的系統（植物工廠）



4

## FRESH (新鮮)的新意涵

<b>F</b>	Food safety 食品安全
<b>R</b>	Reduce, Reuse, Recycle 減量、再利用、循環
<b>E</b>	Environmental friendly 環境友善
<b>S</b>	Sustainability 永續
<b>H</b>	Healthy 健康

5



## 植物工廠

環境可控制且允許全年穩態量產植物的設施

1. 太陽光利用型 (精密溫室)	美國
綜合型 (人工光源 + 太陽光)	荷蘭
2. 完全控制型 (人工光源)	日本

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 高效</li> <li>• 節能、節水、節地</li> <li>• 在地生產、在地消費</li> <li>• 人土不二</li> <li>• 健康、安全</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 糧食自給</li> <li>• 還地於山林</li> <li>• 環保、永續</li> <li>• 生態循環</li> </ul> |
|--|--|

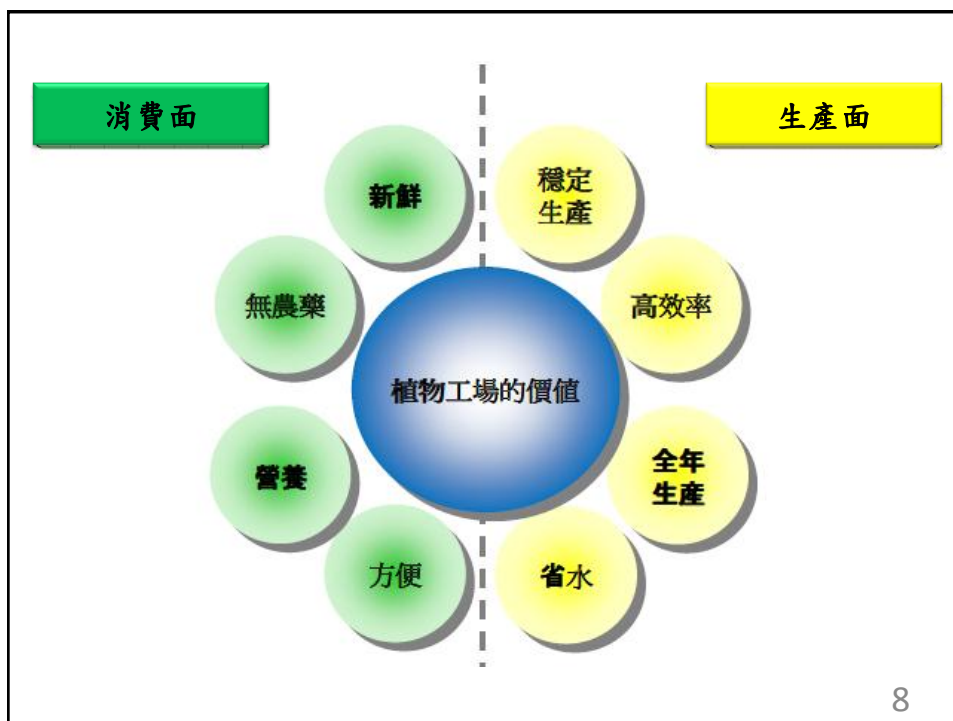
21世紀生產型農業的核心價值

人們對於以下社會情勢的關心  
帶動起植物工廠的蓬勃發展

類別	社會情勢
與食物相關	消費者對於蔬果安心、安全、無農藥之要求，市場對於穩定提供食品之要求，LCA (Life Cycle Assessment/Analysis)，產地直銷、食物里程 (Food mileage)，GAP (Good Agricultural Practice)
與環境相關	溫室效應、減少二氧化碳排放量、氣象異常、環境保護等地球課題
與資源相關	石油價格上漲、節省能源、水資源匱乏

2012/6/6

7



8

## 完全人工光型植物工廠

- 日本
  - 2009/4 為 34 家
  - 2011/4 達 80 家
  - 2012/4 達 120 家
- 台灣、中國、韓國形成熱潮
- 中東、俄羅斯開始引進
- 荷蘭、美國受到重視

## 完全人工光型植物工廠

- 全球盛行的主要原因：
  - 2009~2012日本政策實質支持
  - 2011/3/11 日本東北地震與海嘯
  - 日本部分廠家開始獲利
  - 民眾認知與理解增加(相關書籍出版，研習會、研討會、論壇、國際會議陸續舉辦)
  - 異業結盟擴大投入者廣度

## (橫向)異業結合形成產業聯盟

植物工廠產業發展協會  
中華植物工廠協會  
LED應用於農漁牧產業協會  
南臺灣綠能科技發展協會

## (縱向)異業結合形成產業鍊

- 大家感受到了完全人工光型植物工廠結合了
  - 綠色生活
  - 培育生命的體驗
  - 智慧先端技術

## (縱向)異業結合形成產業鍊

大家看到了完全人工光型植物工廠將成為一種

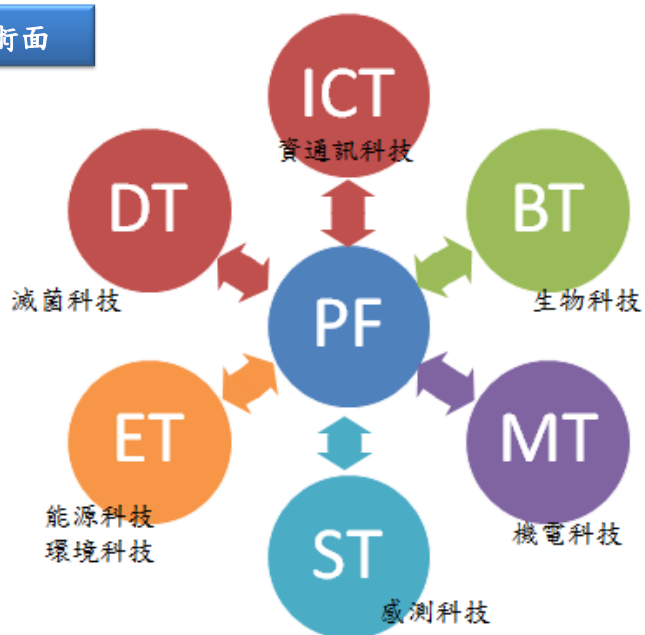
- 新的生活型態
- 新的產業（兼顧環境、健康與福利）
- 新的生活文化

### 植物工廠規模與分類

型式	備註	規模
家用型、趣味型、教育型		< 1 m <sup>2</sup>
展示型	餐廳、超市、 三明治店、披 薩店等	10~50 m <sup>2</sup>
社區型	住宅區、醫院、 飯店、便利商 店等	50~100 m <sup>2</sup>
量產型	日產300株	約 100 m <sup>2</sup>
	日產1000株	約 300 m <sup>2</sup>

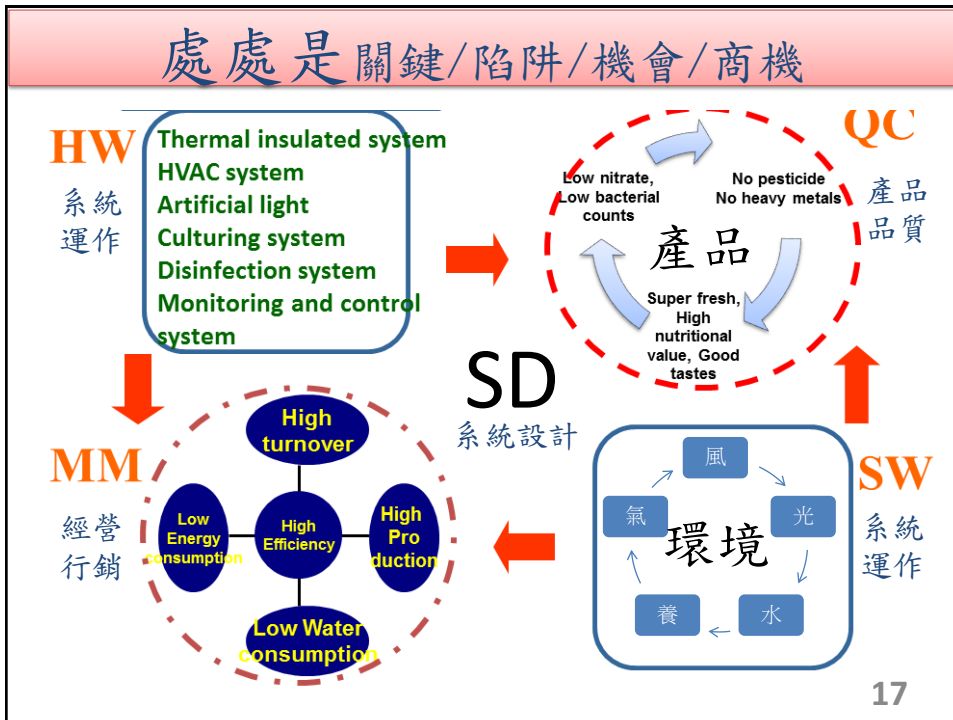
以下有關  
系統設計  
之適用範疇  
以量產型為主

技術面



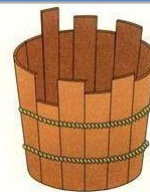
16





## 如何成功營運

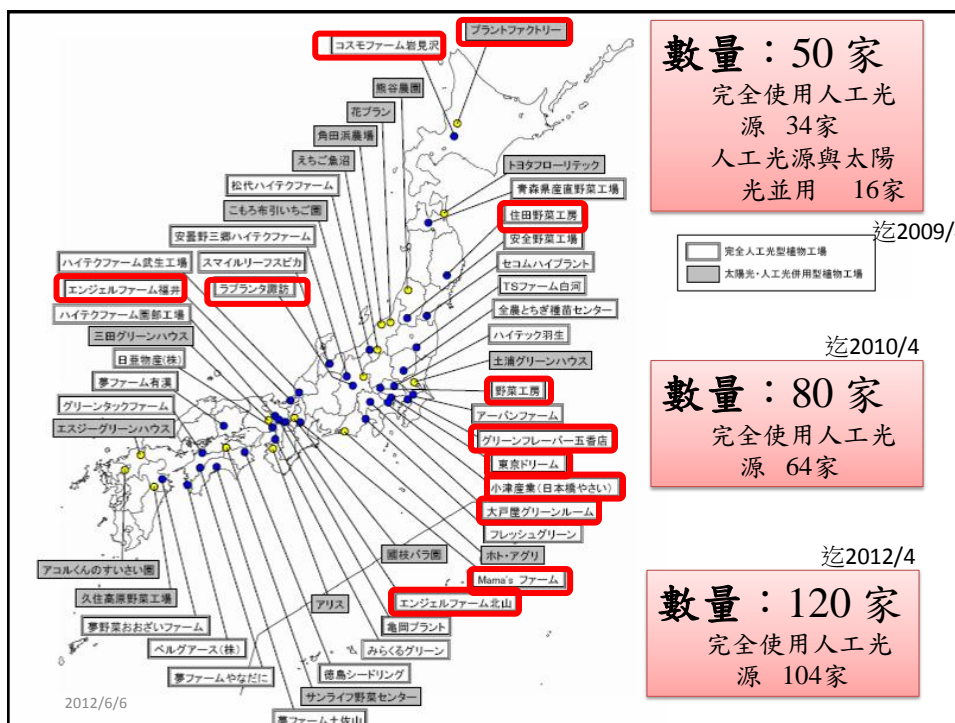
- 系統運作 (HW, SW) 正常
  - 產品品質 (QC) 特優/極優/優
  - 高效經營 (Managing)
  - 市場行銷 (Marketing) 多元、高調、品牌
- 先要有高品質才能談品牌
- 系統設計 (System Design) 最關鍵 (慎始)



# 投資

## 工程經濟分析

19



## 局部資料 彙整

廠名	總面積 (栽培面積) m <sup>2</sup>	層數	產能 株/日	單位面積 年產能* kg/m <sup>2</sup> /yr	造價 ¥	造價 萬¥/株	造價 萬¥/m <sup>2</sup>
Green Flavor	(66)	7	300	(166)	2178萬	7.26	33
OoToya	(160)	7	350	(80)	5280萬	15	33
Urban Farm	546 (400)	9	1200	67 (91)	1.2億	10	(30)
Ozu	(500)	7	1500	(110)	1.65億	11	33
Mirai (規劃)	1000	10	4000	146	3.3億	8.25	33
Fairy Angle	2870	10	8000	102	15億	18.7	51.9
Mirai (規劃)	3000	10	10000	122	9.9億	9.9	33

\* 假設每株 100 g，全年 365 天連續量產

售價：0.3 NT\$/g

PF 工程經濟分析										
每株成本	20	年收穫天數		350						
每株售價	36	單株均重		120 g	設廠成本	1.4	萬NT\$/株			
日產量		年產量		年營業額	年淨利	投資金額	投資報酬 IRR			
株/日	kg/日	萬株/年	噸/年	萬	萬	萬	2年	3年	4年	5年
300	36	10.5	12.6	378	168	420	-14%	10%	22%	29%
400	48	14	16.8	504	224	560	-14%	10%	22%	29%
500	60	17.5	21	630	280	700	-14%	10%	22%	29%
600	72	21	25.2	756	336	840	-14%	10%	22%	29%
700	84	24.5	29.4	882	392	980	-14%	10%	22%	29%
800	96	28	33.6	1008	448	1120	-14%	10%	22%	29%
900	108	31.5	37.8	1134	504	1260	-14%	10%	22%	29%
1000	120	35	42	1260	560	1400	-14%	10%	22%	29%
1500	180	52.5	63	1890	840	2100	-14%	10%	22%	29%
2000	240	70	84	2520	1120	2800	-14%	10%	22%	29%

日本的設廠投資為 7 萬日圓/株，約 2.8 萬台幣/株

每株成本	20	年收穫天數	350	售價：0.3 NT\$/g				
每株售價	36	單株均重	120 g					

設廠成本	1 萬NT\$/株					
投資金額	投資報酬 IRR					
萬	2年	3年	4年	5年		
300	8%	31%	42%	48%		
400	8%	31%	42%	48%		
500	8%	31%	42%	48%		
600	8%	31%	42%	48%		
700	8%	31%	42%	48%		
800	8%	31%	42%	48%		
900	8%	31%	42%	48%		
1000	8%	31%	42%	48%		
1500	8%	31%	42%	48%		
2000	8%	31%	42%	48%		

設廠成本	1.1 萬NT\$/株					
投資金額	投資報酬 IRR					
萬	2年	3年	4年	5年		
330	1%	25%	36%	42%		
440	1%	25%	36%	42%		
550	1%	25%	36%	42%		
660	1%	25%	36%	42%		
770	1%	25%	36%	42%		
880	1%	25%	36%	42%		
990	1%	25%	36%	42%		
1100	1%	25%	36%	42%		
1650	1%	25%	36%	42%		
2200	1%	25%	36%	42%		

設廠成本	1.2 萬NT\$/株					
投資金額	投資報酬 IRR					
萬	2年	3年	4年	5年		
360	-4%	19%	31%	37%		
480	-4%	19%	31%	37%		
600	-4%	19%	31%	37%		
720	-4%	19%	31%	37%		
840	-4%	19%	31%	37%		
960	-4%	19%	31%	37%		
1080	-4%	19%	31%	37%		
1200	-4%	19%	31%	37%		
1800	-4%	19%	31%	37%		
2400	-4%	19%	31%	37%		

設廠成本	1.3 萬NT\$/株					
投資金額	投資報酬 IRR					
萬	2年	3年	4年	5年		
390	-9%	14%	26%	33%		
520	-9%	14%	26%	33%		
650	-9%	14%	26%	33%		
780	-9%	14%	26%	33%		
910	-9%	14%	26%	33%		
1040	-9%	14%	26%	33%		
1170	-9%	14%	26%	33%		
1300	-9%	14%	26%	33%		
1950	-9%	14%	26%	33%		
2600	-9%	14%	26%	33%		

設廠成本	1.5 萬NT\$/株					
投資金額	投資報酬 IRR					
萬	2年	3年	4年	5年		
450	-17%	6%	18%	25%		
600	-17%	6%	18%	25%		
750	-17%	6%	18%	25%		
900	-17%	6%	18%	25%		
1050	-17%	6%	18%	25%		
1200	-17%	6%	18%	25%		
1350	-17%	6%	18%	25%		
1500	-17%	6%	18%	25%		
2250	-17%	6%	18%	25%		
3000	-17%	6%	18%	25%		

設廠成本	2 萬NT\$/株					
投資金額	投資報酬 IRR					
萬	2年	3年	4年	5年		
600	-31%	-8%	5%	12%		
800	-31%	-8%	5%	12%		
1000	-31%	-8%	5%	12%		
1200	-31%	-8%	5%	12%		
1400	-31%	-8%	5%	12%		
1600	-31%	-8%	5%	12%		
1800	-31%	-8%	5%	12%		
2000	-31%	-8%	5%	12%		
3000	-31%	-8%	5%	12%		
4000	-31%	-8%	5%	12%		

23

PF 工程經濟分析										售價：0.5 NT\$/g				
每株成本	20	年收穫天數	350											
每株售價	60	單株均重	120 g	設廠成本	2 萬NT\$/株									

日產量		年產量		年營業額	年淨利	投資金額	投資報酬 IRR			
株/日	kg/日	萬株/年	噸/年	萬	萬	萬	2年	3年	4年	5年
300	36	10.5	12.6	630	420	600	26%	49%	59%	64%
400	48	14	16.8	840	560	800	26%	49%	59%	64%
500	60	17.5	21	1050	700	1000	26%	49%	59%	64%
600	72	21	25.2	1260	840	1200	26%	49%	59%	64%
700	84	24.5	29.4	1470	980	1400	26%	49%	59%	64%
800	96	28	33.6	1680	1120	1600	26%	49%	59%	64%
900	108	31.5	37.8	1890	1260	1800	26%	49%	59%	64%
1000	120	35	42	2100	1400	2000	26%	49%	59%	64%
1500	180	52.5	63	3150	2100	3000	26%	49%	59%	64%
2000	240	70	84	4200	2800	4000	26%	49%	59%	64%

24

每株成本	20	年收穫天數	350
每株售價	60	單株均重	120 g

**售價：0.5 NT\$/g**

設廠成本 1 萬NT\$/株						設廠成本 1.5 萬NT\$/株						設廠成本 1.75 萬NT\$/株					
投資金額		投資報酬 IRR				投資金額		投資報酬 IRR				投資金額		投資報酬 IRR			
萬	2年	3年	4年	5年	萬	2年	3年	4年	5年	萬	2年	3年	4年	5年			
300	107%	128%	135%	138%	450	54%	76%	85%	90%	525	38%	61%	71%	75%			
400	107%	128%	135%	138%	600	54%	76%	85%	90%	700	38%	61%	71%	75%			
500	107%	128%	135%	138%	750	54%	76%	85%	90%	875	38%	61%	71%	75%			
600	107%	128%	135%	138%	900	54%	76%	85%	90%	1050	38%	61%	71%	75%			
700	107%	128%	135%	138%	1050	54%	76%	85%	90%	1225	38%	61%	71%	75%			
800	107%	128%	135%	138%	1200	54%	76%	85%	90%	1400	38%	61%	71%	75%			
900	107%	128%	135%	138%	1350	54%	76%	85%	90%	1575	38%	61%	71%	75%			
1000	107%	128%	135%	138%	1500	54%	76%	85%	90%	1750	38%	61%	71%	75%			
1500	107%	128%	135%	138%	2250	54%	76%	85%	90%	2625	38%	61%	71%	75%			
2000	107%	128%	135%	138%	3000	54%	76%	85%	90%	3500	38%	61%	71%	75%			

設廠成本 2.5 萬NT\$/株						設廠成本 3 萬NT\$/株						設廠成本 4 萬NT\$/株					
投資金額		投資報酬 IRR				投資金額		投資報酬 IRR				投資金額		投資報酬 IRR			
萬	2年	3年	4年	5年	萬	2年	3年	4年	5年	萬	2年	3年	4年	5年			
750	8%	31%	42%	48%	900	-4%	19%	31%	37%	1200	-21%	2%	15%	22%			
1000	8%	31%	42%	48%	1200	-4%	19%	31%	37%	1600	-21%	2%	15%	22%			
1250	8%	31%	42%	48%	1500	-4%	19%	31%	37%	2000	-21%	2%	15%	22%			
1500	8%	31%	42%	48%	1800	-4%	19%	31%	37%	2400	-21%	2%	15%	22%			
1750	8%	31%	42%	48%	2100	-4%	19%	31%	37%	2800	-21%	2%	15%	22%			
2000	8%	31%	42%	48%	2400	-4%	19%	31%	37%	3200	-21%	2%	15%	22%			
2250	8%	31%	42%	48%	2700	-4%	19%	31%	37%	3600	-21%	2%	15%	22%			
2500	8%	31%	42%	48%	3000	-4%	19%	31%	37%	4000	-21%	2%	15%	22%			
3750	8%	31%	42%	48%	4500	-4%	19%	31%	37%	6000	-21%	2%	15%	22%			
5000	8%	31%	42%	48%	6000	-4%	19%	31%	37%	8000	-21%	2%	15%	22%			

25

## 台(美國進口)日韓(植物工廠量產)生鮮萵苣產品超市售價





199~249 NT\$ for 142 g (1.4~1.75 NT\$/g)

¥360 for 120 g (1.2 NT\$/g)

¥198 for 60 g (1.32 NT\$/g)

70 NT\$ for 50 g (1.4 NT\$/g)




26

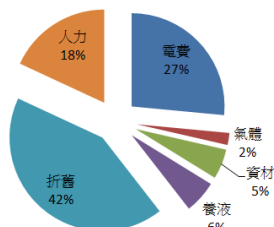
成本：20 元/株

## LED vs. T5

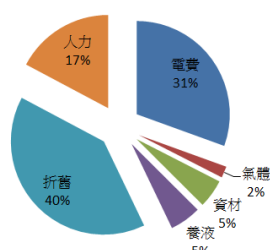
## 20呎貨櫃式植物工廠

栽培天數	21	天	LED單價	700	NT\$			
每禮拜收穫	120	株	T5單價	333	NT\$			
電費	3	NT	LED總價	18900	NT\$/層			
硬體	500000	NT\$/間	T5總價	6993	NT\$/層		每株電費	
LED一層	27	支(20W)	LED電費	77.76	NT\$/Day		4.54	
T5一層	21	支(28W)	T5電費	95.26	NT\$/Day		5.56	
層架層數	3	層						
人力	2150	NT\$/月	工人月薪3萬，每次移植需花費1人2hrs (1/4 天)，每周收成兩次每月收成8					

LED 燈管



T5 燈管



27

成本：20 元/株

## LED vs. T5

LED燈管				T5燈管					
燈管	4.54	NT\$/head	電費	6.12	燈管	5.56	NT\$/head	電費	7.40
冷氣(COP4)	1.13	NT\$/head	氣體	0.48	冷氣(COP4)	1.39	NT\$/head	氣體	0.48
風扇	0.41	NT\$/head	資材	1.2	風扇	0.41	NT\$/head	資材	1.2
氣泵	0.01	NT\$/head	養液	1.314	氣泵	0.01	NT\$/head	養液	1.314
水泵	0.03	NT\$/head	折舊	9.80	水泵	0.03	NT\$/head	折舊	9.67
二氧化碳	0.48	NT\$/head	人力	4.18	二氧化碳	0.48	NT\$/head	人力	4.18
種子	1	NT\$/head			種子	1	NT\$/head		
海綿	0.2	NT\$/head			海綿	0.2	NT\$/head		
養液	1.31	NT\$/head			養液	1.31	NT\$/head		
水	0.004	NT\$/head			水	0.004	NT\$/head		
硬體折舊(10年)	7.99	NT\$/head			硬體折舊(10年)	7.99	NT\$/head		
LED折舊(5年)	1.81	NT\$/head			T5折舊(2年)	1.68	NT\$/head		
人力	4.18	NT\$/head			人力	4.18	NT\$/head		
總和	23.10	NT\$/head			總和	24.24	NT\$/head		
收成重量	148.3	g/head			收成重量	72.8	g/head		
每100g成本	15.58	NT\$			每100g成本	33.29	NT\$		

28

## 投資評估補述1

株距, cm		2	3	4	5	6	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
密度, 株/m <sup>2</sup>		2500	1089	625	400	256	144	100	81	64	49	49	36	36	25	25	25	25	
株/片(A栽培浮板)	60	90	1350	600	330	216	150	77	54	40	35	24	24	24	15	15	15	12	12
株/片(B栽培浮板)	60	100	1500	660	375	240	160	84	60	45	40	28	28	24	18	15	15	15	15
株/片(C栽培浮板)	60	120	1800	800	450	288	200	105	72	50	50	36	32	32	21	21	18	18	18

	天數	株距	密度	時空指標	淘汰率	栽培株數	需要栽培板數量	實際產能			真正的淘汰率			株/片						
								(A)	(B)	(C)	(A)	(B)	(C)	(A)	(B)	(C)				
播種	7	4	625	4375	1.00	0.3	17	680	2.1	1.8	1.5	990	750	900				330	375	450
育苗	14	10	100	1400	3.13	0.03	25.75	1030	19.1	17.2	14.3	1080	1080	1080				54	60	72
育成	14	18	25	350	12.50	0	25	1000	66.7	66.7	55.6	1005	1005	1008	98%	50%	80%	15	15	18



	層數		
播種架	1.00		使用五層的床架，一層用於育苗，其他用於育成
育苗架	3.13	1	使用一個 n 層的床架做育苗
育成架	12.50	4	使用四個 n 層的床架作育成 長度為14 個栽培板的倍數
			使用任意層的床架，長度為5個栽培板的倍數

29

## 投資評估補述2

日產株數	株/日	100	200	300	400	500	800	1000	
投資金額	萬/株	1	100	200	300	400	500	800	1000
日本行情		2	200	400	600	800	1000	1600	2000
7~8萬日幣/株		3	300	600	900	1200	1500	2400	3000
約 2.8~3.2 萬NT/株		4	400	800	1200	1600	2000	3200	4000
需要栽培面積	m <sup>2</sup>	70	140	210	280	350	560	700	

30

### 投資評估補述3

計算依據	m <sup>2</sup> 栽培	25 株							
	每株獲利	30 元			m <sup>2</sup> 每月獲利	1607 元			
	栽培天數	14 天			m <sup>2</sup> 年獲利	1.929 萬			
投資金額	萬/株	萬/m <sup>2</sup>	回收年限	投資報酬率	Yr0	-1.43	-2.857	-4.2857	-5.71
	1	1.43	0.741	133%	Yr1	1.929	1.929	1.9286	1.93
	2	2.86	1.481	61%	Yr2	1.929	1.929	1.9286	1.93
	3	4.29	2.222	35%	Yr3	1.929	1.929	1.9286	1.93
	4	5.71	2.963	20%	Yr4	1.929	1.929	1.9286	1.93
					Yr5	1.929	1.929	1.9286	1.93

31

### 投資評估補述4

投資金額		回 收 年 限	每株獲利，元/株					
萬/株	萬/m <sup>2</sup>		10	20	30	40	50	60
1	1.43		2.22	1.11	0.74	0.56	0.44	0.37
2	2.86		4.44	2.22	1.48	1.11	0.89	0.74
3	4.29		6.67	3.33	2.22	1.67	1.33	1.11
4	5.71		8.89	4.44	2.96	2.22	1.78	1.48
投資金額		投 資 報 酬 率	每株獲利，元/株					
萬/株	萬/m <sup>2</sup>		10	20	30	40	50	60
1	1.43		35%	86%	133%	179%	224%	270%
2	2.86		4%	35%	61%	86%	110%	133%
3	4.29		-9%	15%	35%	53%	70%	86%
4	5.71		-17%	4%	20%	35%	48%	61%

32



## 植物工廠空間需求設計

每天產能	1000 株/日				
育成天數	21 日		總株數	21000	
栽培層數	4 層				
株距	18 cm	密度	30.9 株/m <sup>2</sup>		
總栽培面積		680.4 m <sup>2</sup>			
栽培區面積		170.1 m <sup>2</sup>			
其他設施面積		150 m <sup>2</sup>			
總面積		320.1 m <sup>2</sup> =		97 坪	

33

## 植物工廠燈具需求設計

每天產能	1000 株/日			總栽培面積	680.4 m <sup>2</sup>	
育成天數	21 日	總株數	21000	栽培區面積	170.1 m <sup>2</sup>	
栽培層數	4 層			其他設施面積	150 m <sup>2</sup>	
株距	18 cm	密度	30.9 株/m <sup>2</sup>	總面積	320.1 m <sup>2</sup> =	97 坪
光量需求	150 μmol/m <sup>2</sup> /s	總光量需求 (照明效率=1)			102060 μmol/s	
照明效率	0.7	總光量需求 (照明效率如左)			145800 μmol/s	
人工光源	no. of chips	umol/s				
LED chip	1	0.06	2,430,000	顆 LED chips	115.71	顆 LED chips/ 株 0.009 株/LED chip
LED 燈管	200	12	12,150	根 LED 燈管	0.58	根 LED 燈管/株 1.728 株/LED 燈管
LED 光盤	400	24	6,075	片 LED 光盤	0.29	片 LED 光盤/株 3.457 株/LED 光盤
TFL 燈管	1	15	9,720	根 TFL 燈管	0.46	根 TFL 燈管/株 2.160 株/TFL 燈管

34

## 高效能量產之關鍵

以 40 呎貨櫃為例

40呎貨櫃式植物工廠								
貨櫃	40	呎	長, m	12.192	寬, m	2.2	總面積	26.82 m <sup>2</sup>
使用比率	0.5	層數	4	總栽培面積	53.64			m <sup>2</sup>
栽培天數	28			單株面積	0.0324	m <sup>2</sup> /株	總株數	1656
株距, cm	18			栽培密度	30.9	株/m <sup>2</sup>	日收穫株數	59
燈管單價, NTS	700	燈管長, cm	110					
燈管間距, cm	12	燈管數, 支	406	燈管成本	28.45	萬		
			淨利率	淨利, 萬				
年收穫天數	350		0.1	14.9				
年總株數	20696		0.2	29.8				
g/株	120		0.3	44.7				
售價NT\$/g	0.6		0.4	59.6				
粗收益, 萬	149		0.5	74.5				

35

單位面積的造價頗高，但也比日本便宜許多（小於1/3）

	造價	造價/m <sup>2</sup>
燈具之外的硬體	600000	22369.36
燈管	284480	10606.06

日本設廠造價 33~50 萬日圓/m<sup>2</sup>  
約 13~20 萬台幣/m<sup>2</sup>

36

## 以產能來估算的 單株折舊成本並不高

	造價	造價/m <sup>2</sup>
燈具之外的硬體	600000	22369.36
燈管	284480	10606.06

	折舊年數	折舊金額 NT\$/年	折舊金額 NT\$/m <sup>2</sup> /年	折舊金額 NT\$/株/年
燈具之外的硬體	10	60000	2237	2.90
燈管	5	56896	2121	2.75

sum= 5.65

37

## 透過關鍵參數的微調，還可提升產 能，進而降低單株折舊成本

使用比例	株距	栽培天數	層數	燈管間距	燈具之外的 硬體折舊， NT\$/株/年	燈管造價折 舊，NT\$/株/ 年
0.5	15	21	5	15	1.21	1.15
0.5	18	28	4	12	2.9	2.75
0.4	15	21	5	15	1.51	1.15
0.4	18	28	4	12	3.62	2.75
0.7	15	21	5	15	0.86	1.15
0.7	18	28	4	12	2.07	2.75

sum= 5.65

6.37

2.01

38

## 栽培系統配置

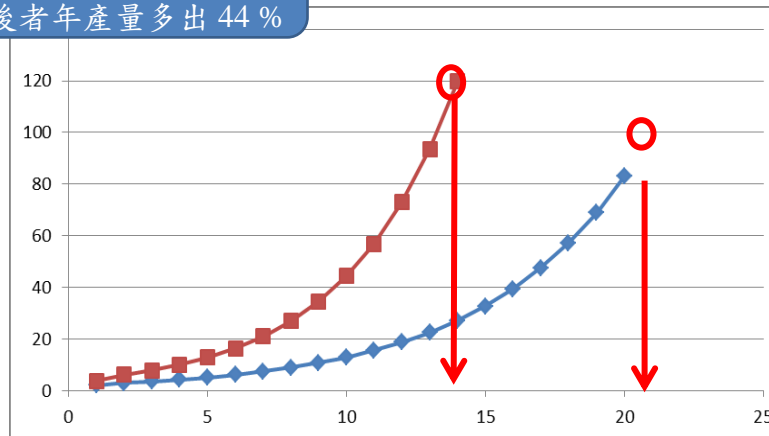
- 植株生長速率
- 植株含水率 (1-乾溼重比) → 品質
- 植株大小 → 株距
- 株高，光源表面溫度 → 光源至栽培板距離
- 植株重量 → 收穫日數，累積光量

39

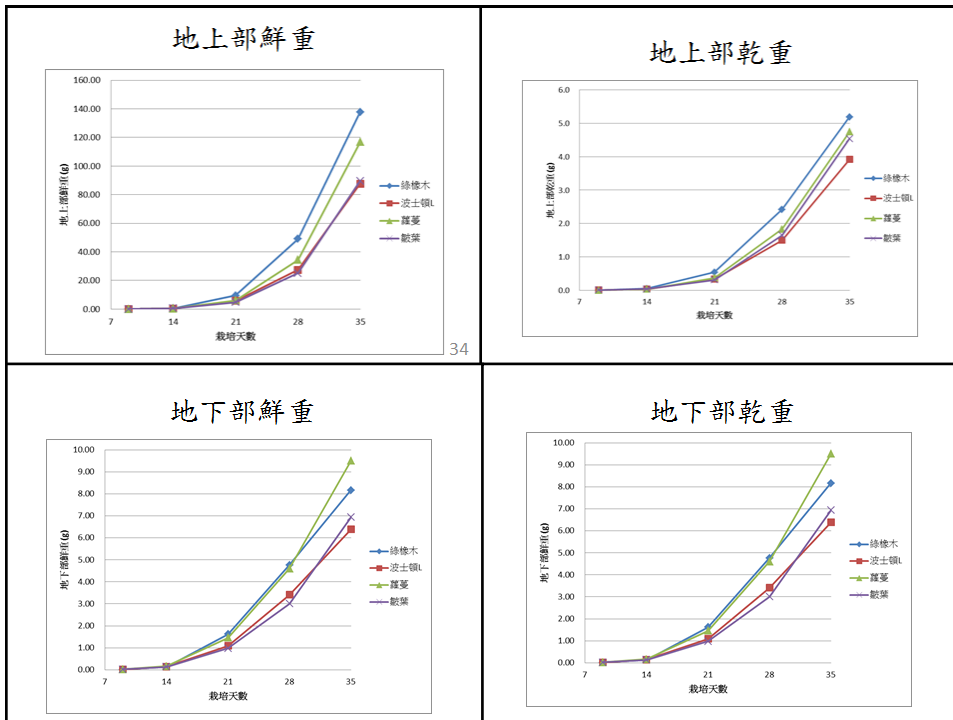
## 作物生長速率

收穫鮮重	M	100	120 g
定植鮮重	Mo	2	3.69 g
計算	$\ln(M/Mo)$	3.912	3.482
生長天數	t	21	14 日
成長速率			
公式	$r = \ln(M/Mo) / t$	0.186	0.249

21 天：年產 18 批次  
14 天：年產 26 批次  
後者年產量多出 44 %



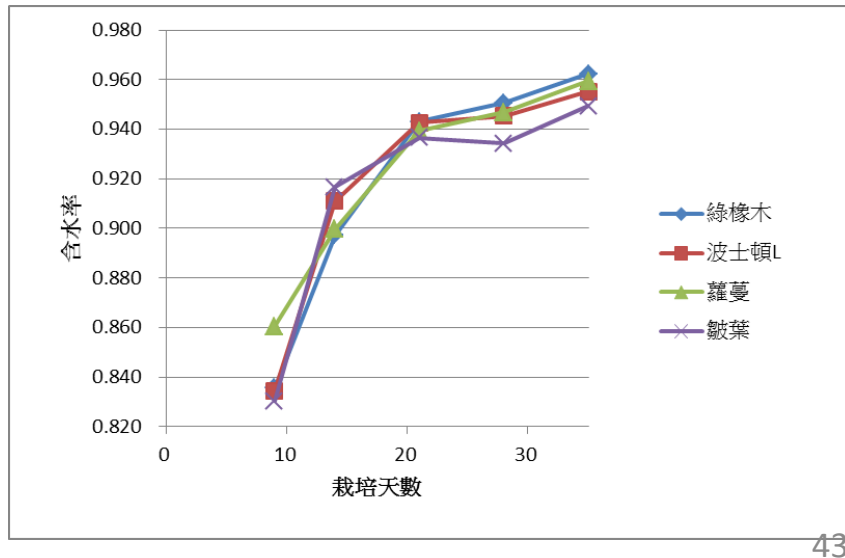
40



## 地下部代表根系

- 根系生長旺盛
  - 營養吸收良好
  - 營養缺乏的症狀較少發生
  - 管理容易
- 
- 根系較少，地上部也能生長旺盛，代表地下部空間可以再小，營養液水深可以再少

## 含水率 = 1 - 乾溼重比



43

## 含水率

- 乾溼重比 = 乾重/濕重；溼乾重比 = 濕重/乾重
- 含水率 = 1 - 乾溼重比 = 濕基含水率
- 水重 = 濕重 - 乾重
- 含水倍數 = 水重/乾重 = 乾基含水率 = 溼乾重比 - 1

範例：

栽培天數	鮮重 (g)		乾重 (g)		含水率	乾濕重比	濕乾重比	含水倍數
	平均	標準差	平均	標準差				
9	0.0375	0.0042	0.0062	0.0009	83.56%	0.164	6.08	5.08
14	0.5000	0.1124	0.0514	0.0110	89.71%	0.103	9.72	8.72
21	9.5250	2.7055	0.5417	0.1563	94.31%	0.057	17.58	16.58
28	49.017	4.3357	2.4187	0.2637	95.07%	0.049	20.27	19.27
35	137.7650	7.3982	5.1892	0.4005	96.23%	0.038	26.55	25.55

44

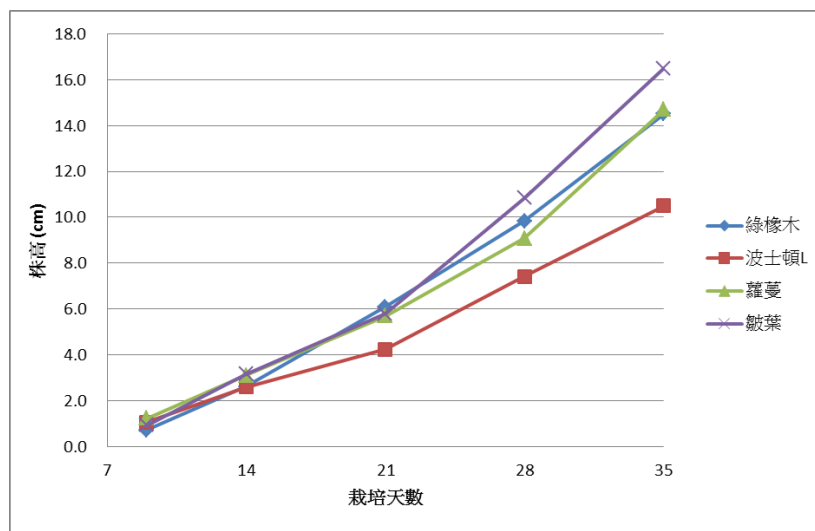
含水率(含水倍數)差一點點，  
乾重差異擴大20多倍

乾重	濕重	含水率	含水倍數	含水率差異	乾重差異
4.50	100	95.50%	21.222	0	0
4.45	100	95.55%	21.472	0.05%	-1.1%
4.40	100	95.60%	21.727	0.10%	-2.2%
4.35	100	95.65%	21.989	0.15%	-3.3%
4.30	100	95.70%	22.256	0.20%	-4.4%
4.25	100	95.75%	22.529	0.25%	-5.6%
4.20	100	95.80%	22.810	0.30%	-6.7%
4.15	100	95.85%	23.096	0.35%	-7.8%
4.10	100	95.90%	23.390	0.40%	-8.9%
4.05	100	95.95%	23.691	0.45%	-10.0%

含水率大幅影響品質

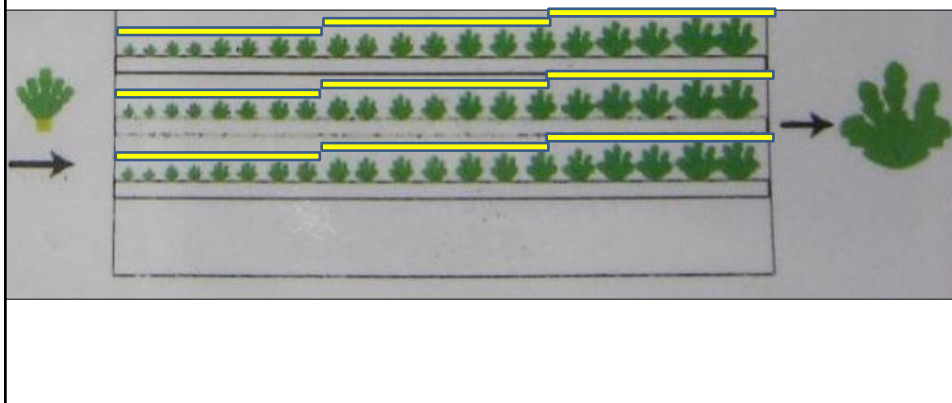
45

株高，公分

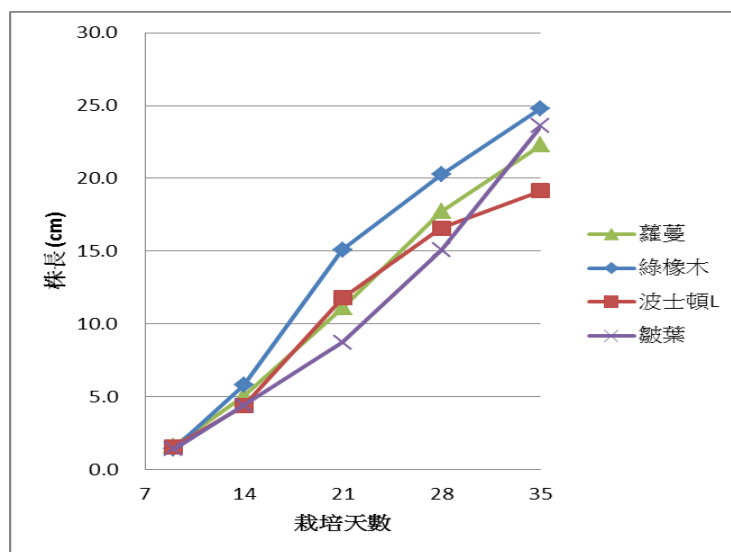


## 燈具高低隨植株高度調整

光量與距離平方成反比

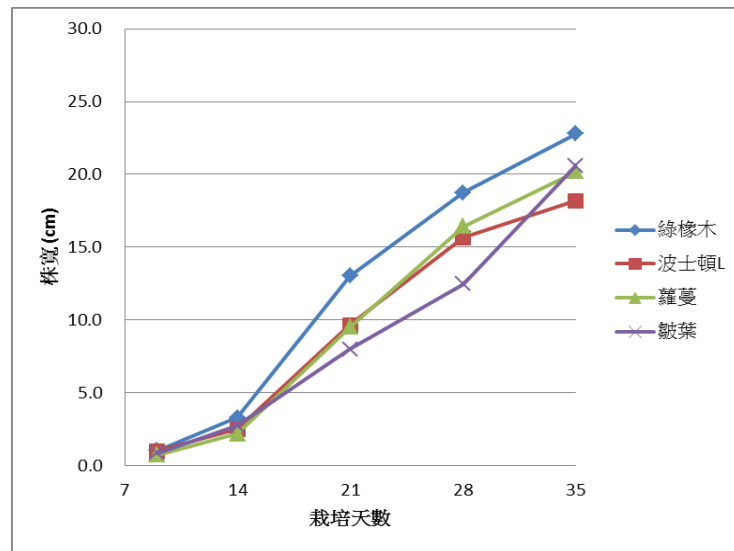


## 株長，公分





## 株寬，公分



## 長 x 寬 x 高 (in cm)

	Day 9	Day 14	Day 28	Day 35
綠橡木	1.7x1.3x0.8	6.5x4x3	22x21x10	27x25x22
波士頓L	1.9x1.1x1.3	5x2.9x3	19x18x9	21x20x12
蘿蔓	2x1x1.5	6.5x2.6x4	19x18x11	25x22x17
皺葉	1.8x1.2x1	5x4x4	17x13x12	25x22x18

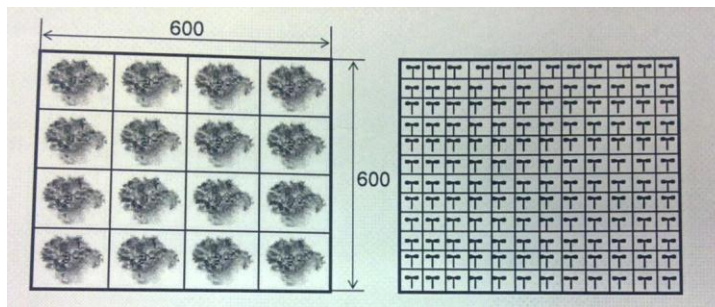
## 株距 vs. 栽培密度

植株間距, cm	栽培密度, 株/m <sup>2</sup>
A 12	B 69
C 2.000	D 2500

- $B = 10000 / A^2$   
計算例：  $69 = 10000 / (12^2)$
- $C = 100 / \text{sqrt}(D)$   
計算例：  $2 = 100 / \text{sqrt}(2500)$

51

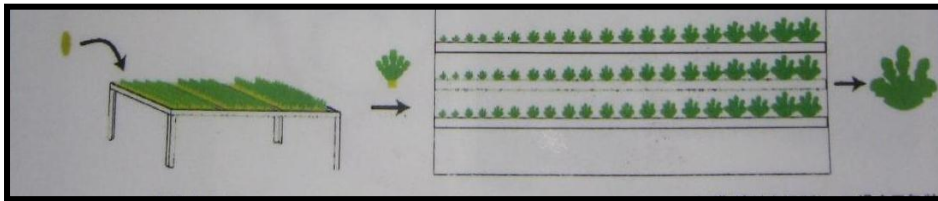
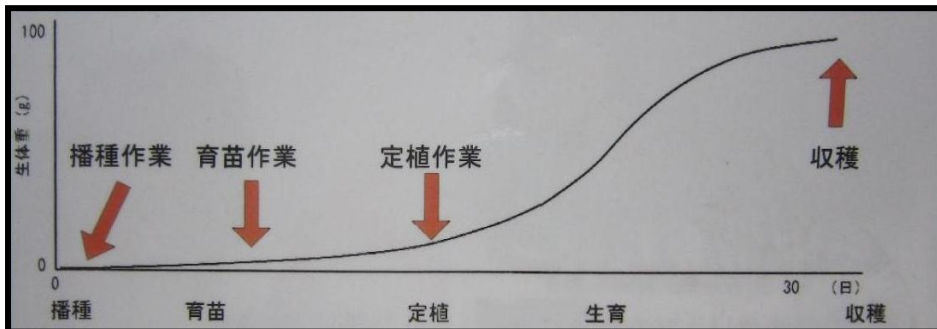
## 植株長寬決定株距

16 株/盤 = 44 株/m<sup>2</sup>144 株/盤 = 400 株/m<sup>2</sup>

## 株距決定單位面積產能

52

## 隨植株大小分階段調整栽培密度



## 隨人工成本與自動化程度調整階段數

RUI = 1 / $\Sigma$ (1000 Wi / (52Di))						
	spacing, cm	Di, plts/m <sup>2</sup>	Wi, wks	1000*Wi/(52*Di)	RUI	Ratio
2 stages	6.16	264	2	0.15	0.45	1
	18.9	28	3	2.06		
3 stages	2	2500	1	0.01	0.65	1.44
	6.16	264	2	0.15		
	18.9	28	2	1.37		
4 stages	6	278	1	0.07	0.78	1.73
	8	156	2	0.25		
	12	69	1	0.28		
	18.9	28	1	0.69		
5 stages	2	2500	1	0.01	0.89	1.96
	4	625	1	0.03		
	8	156	1	0.12		
	12	69	1	0.28		
	18.9	28	1	0.69		

\* RUI: 時空資源利用指標

54

## 如何選光源：光照 vs. 耗電

	Case A	Case B	
PAR	244.72	180	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
光照面積	4.212	4.212	$\text{m}^2$
支數	36	36	no.
單支耗電	25.3	26	W
光照效率	1.13	0.81	$\mu\text{mol}/\text{s}/\text{W}$
相對效率	1	0.72	
相對效率	1.4	1	

55

## 栽培流程的訂定範例1

### 育苗期

第一階段 (14天)

- 浸種48 hr後移入育苗系統
- 栽培密度：333 plants/ $\text{m}^2$

### 育成期

第二階段 (14天)

- 栽培密度：40 plants/ $\text{m}^2$

### 調質期

第三階段 (7天)

- 栽培密度：20 plants/ $\text{m}^2$

56

## 栽培流程的訂定範例2

### 播種期

第一階段 (7天)

- 浸種48 hr後選擇有發芽者移入育苗盤
- 栽培密度：333 plants/m<sup>2</sup>

### 育苗期

第二階段 (14天)

- 第一次移植 (又稱為疏植)
- 栽培密度：40 plants/m<sup>2</sup>

### 育成期

第三階段 (14天)

- 第二次移植 (又稱為定植)
- 栽培密度：20 plants/m<sup>2</sup>

57

## 環境參數設定範例

環境參數	育苗期	育成期	調質期
	第一階段	第二階段	第三階段
光量 (μmol/m <sup>2</sup> /s)	230±30	270±30	
光週期 (明/暗, hr)	24/0	16/8	
DLI (mol/m <sup>2</sup> /day)	20	16	
氣溫 (明/暗, °C)	22/20		
相對溼度 (%)	80 ~ 90		
電導度 (mS/cm)	1.2±0.1		
pH	5.8±0.1		
二氧化碳濃度 (ppm)	1200±100		

58

## 要種甚麼？每株耗電狀況的量化

	A	B	C	D	E	F	G
階段	hrs/day	W	no.Lamp	Days	kW.hr	plts	kW.hr/plt
播種	24	15	5	7	12.6	300	0.042
育苗	24	15	5	14	25.2	78	0.323
育成	16	15	5	14	16.8	20	0.840
						累計	1.205

- $E = A * B * C * D / 1000$
- $G = E / F$
- 1 kW.hr = 1 度

35 天

品種	g/株	度/株	g/度
綠橡木	137.8	1.205	114.3
蘿蔓	116.9	1.205	97.0
皺葉	89.5	1.205	74.3

59

## 栽培條件(z1)的標準化

	A	B	C	D	E	F	
階段	株/m <sup>2</sup>	PPF	hrs	DLI	days	mol/株	
播種	918	266	24	23	7	0.18	2.1%
育苗	142	266	24	23	14	2.27	27.2%
育成	36	266	16	15	14	5.90	70.7%
					Sum	8.34	100%

- $D = B * C * 3.6 / 1000$
- $F = D * E / A$
- PPF 光合作用有效光，單位：μmol/m<sup>2</sup>/s
- DLI 日總累積光量，單位：mol/m<sup>2</sup>/day

60

## 量化指標的訂定

$$QY = FW/TLI \quad (\text{單位 g/mol})$$

- Quantum Yield: 一個 mol 光子的蔬菜產量
- FW: 收穫時單株鮮重，g/plant
- TLI: 單株之累計總光量，mol/plant

62

### 栽培全程 單株累計總光量 TLI的計算

s	A	B	C	TLI(s)=B*C/A
階段	株/m <sup>2</sup>	DLI	days	mol/株
1	333	20	14	0.84
2	40	16	14	5.6
3	20	17	7	5.95
			<b>Sum</b>	<b>12.39</b>

- DLI = PPF x hrs x 3.6 / 1000
- PPF 光合作用有效光，單位：μmol/m<sup>2</sup>/s
- hrs 日給光時間，單位：小時
- DLI 日總累積光量，單位：mol/m<sup>2</sup>/day
- TLI : Total Light Integral per plant

$$TLI = \sum_{s=1}^n TLI(s)$$

## 各作物之間用電效能 (g/度) 之評比

	A	B	C	D
	g/株	g/mol	g/度	mol/度
蘿蔓	116.9	14.0	97.0	6.9
綠橡木	137.8	16.5	114.3	6.9
皺葉	89.5	10.7	74.3	6.9

- $D = C / B$ ，此數值要相同
- 此欄僅作為確認計算有無失誤

63

## 另一栽培條件(z2)

	株/m <sup>2</sup>	光量	hour	DLI	days	mol/株	
播種	918	70	24	6	7	0.05	0.9%
育苗	142	190	16	11	14	1.08	20.2%
育成	36	190	16	11	14	4.21	78.9%
					Sum	5.34	100%

	A	B	C	D
	g/株	g/mol	g/度	mol/度
蘿蔓	94	17.6	47.7	2.7
綠橡木	106.0	19.9	53.8	2.7
皺葉	76.0	14.2	38.6	2.7

64



## 兩栽培條件(z1 vs. z2)之比較

- 弱光 (z2) 時
  - g/mol 值較高 (投資報酬遞減定律)
- 強光 (z1) 時
  - g/株值較高 (鮮重較重)
  - g/度值較高 (每度電產出較多的鮮重)
  - mol/度值較高

65

## 參數代碼

N??\_E??\_F??\_D??

N??\_E??\_L??\_??\_D??

N?	E?	F? L??_??	D?
營養液配方	營養液濃度 以電導度表示 (mS/cm, dS/m)	人工光源種類 F 螢光燈管 L 發光二極體 與光量值 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	日累積光量 ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )
N1, N2	E1.2 E0.1, E0.6, E1.2	F 230, 270 L 9R 100 L 8R1B 100 L 4CW4R1B 100 L 9CW 100  L RB 270	D 16 D 20, 16, 9 D 15, 16, 17, 18

66

# 單位面積之日累積光量 (DLI 單位 mol/m<sup>2</sup>/day)

- DLI = 光量值 x 每日光照時數 x 3.6 / 1000
- 計算例：

光量值	230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	270
每日光照時數	24 hrs	16 hrs
DLI	$230 \times 24 \times 3.6 / 1000$ = 19.87 約 20	$270 \times 16 \times 3.6 / 1000$ = 15.55 約 16

67

## 1. 養液配方 (第2,3階段) 與養液濃度 (第3階段)

處理組別	第一階段育苗期 (1~14天)	第二階段育成期 (15~28天)	第三階段調質期 (29~35天)
1	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E1.2_F270_D16
2		同上	N1_E0.6_F270_D16
3		同上	N2_E1.2_F270_D16
4		同上	N3_E0.1_F270_D16
5		同上	N3_E0.1_F270_D16*
6		N2_E1.2_F270_D16	N2_E1.2_F270_D16
7		同上	N2_E0.6_F270_D16

E：電導度值 (mS/cm)

F：色溫 3000 K 的螢光燈管光量值 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )D：日累積光量值 ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )

\*：處理組別5之第三階段的處理期間為33~35天(收穫前三天)·其他均為收穫前七天

68

## 2. 光質處理 (第3階段)

處理組	第一階段 (1~14天)	第二階段 (15~28天)	第三階段 (29~35天)
8	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E1.2_L9R_100_D9
9	同上	同上	N1_E1.2_L8R1B_100_D9
10	同上	同上	N1_E1.2_L4CW4R1B_100_D9
11	同上	同上	N1_E1.2_L9CW_100_D9

E：電導度值(mS/cm)

F：螢光燈管光量值(3000K) ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

LX\_Y：光質為X之LED燈管，光量值為Y ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )

D：日累積光量值 ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )

69

## 3. 日累積光量 (DLI) (第3階段)

- 燈管：三波長高頻 T5 燈管，色溫 3000 K (Wellpower, Taiwan)

處理組	第一階段 (1~14天)	第二階段 (15~28天)	第三階段 (29~35天)
12	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E1.2_F270_D15
13	同上	同上	N1_E1.2_F270_D16
14	同上	同上	N1_E1.2_F270_D17
15	同上	同上	N1_E1.2_F270_D18

E：電導度值 (mS/cm)

F：螢光燈管光量值 (3000K) ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

D：日累積光量值 ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )

70

#### 4. 配方 (第2,3階段)、濃度 (第3階段)、日累積光量 (第3階段)

處理組	第一階段 (1~14天)	第二階段 (15~28天)	第三階段 (29~35天)
16	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E0.6_F270_D17
17		同上	N2_E1.2_F270_D17
18		N2_E1.2_F270_D16	同上
19		同上	N2_E0.6_F270_D17

E：電導度值 (mS/cm)

F：螢光燈管光量值 (3000K) ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

D：日累積光量值 ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )

71

#### 5. 養液濃度、光質、日累積光量 (第3階段)

處理組	第一階段育苗期 (1~14天)	第二階段育成期 (15~28天)	第三階段調質期 (29~35天)
20	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E0.6_LRB_270_D17
21	同上	同上	N1_E0.2_LRB_270_D17

E：電導度值 (mS/cm)

F：螢光燈管光量值 (3000K) ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

LX\_Y：光質為X之LED燈管，光量值為Y ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

D：日累積光量值 ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )

第一階段(1~14天)處理為N1\_E1.2\_F230\_D20

第二階段(15~28天)處理為N1\_E1.2\_F270\_D16

72

## QY的計算

Treatments	Stage 1 (Day 1~14)	Stage 2 (Day 15~28)	Stage 3 (Day 29~35)	Total LI	Shoot FW	QY	
1	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E1.2_F270_D16	12.04	138.86	11.52	
2			N1_E0.6_F270_D16		106.50		
3			N2_E1.2_F270_D16		125.68		
4			N3_E0.1_F270_D16		79.89	6.63	
5		N3_E0.1_F270_D16*	109.55				
6		N2_E1.2_F270_D16	N2_E1.2_F270_D16		91.89		
7			N2_E0.6_F270_D16		85.16		
			units	Stage 1	Stage 2	Stage 3	
① DLI			mol/m <sup>2</sup> /day	20	16	16	
② Duration			Days	14	14	7	
③ Density			plants/m <sup>2</sup>	333	40	20	
TLI(stage) = ① x ② / ③			mol/plant	20x14/333 = 0.84	16x14/40 = 5.6	16x7/20 = 5.6	
TLI = Σ TLI(stage)			mol/plant	12.04			73

## 最高與最低 QY的比較

Treatments	Stage 1 (Day 1~14)	Stage 2 (Day 15~28)	Stage 3 (Day 29~35)	TLI/plt	Shoot FW/plt	QY
16	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E0.6_F270_D17	12.39	136.5	11.01
17			N2_E1.2_F270_D17		125.2	
18		N2_E1.2_F270_D16	N2_E0.6_F270_D17		112.4	
19			N1_E0.6_LRB_270_D17		104.6	
20	N1_E1.2_F230_D20	N1_E1.2_F270_D16	N1_E0.6_LRB_270_D17	12.39	159.5	12.87
21			N1_E0.2_LRB_270_D17		104.2	
Treatment no.	Shoot FW/plt, g/plt		TLI/plt, mol/plt	QY, g/mol		
The best: no. 20	159.5		12.39	12.87		
The worst: no. 4	79.89		12.04	6.63		

The best vs. the worst:

$$(12.87-6.63)/6.63 \times 100 = 94.1 \%$$

74

## QY的比較：收穫前七天更換燈管

- 全程35 天 (五週) **FL (3000 K色溫) vs. RB LED (R:B=9:1)**
- 只有收穫前七天 (一週) 有差別：FL vs. RB LED
- **鮮重 16.9 % 差異** (RB LED is better due to spectral difference)

處理組別	FW 鮮重g/株	TLI mol/株	QY g/mol
20. FL+FL+LED	159.5	12.39	12.87
16. FL+FL+FL	136.5	12.39	11.01

QY= FW/TLI (in g/mol)

75

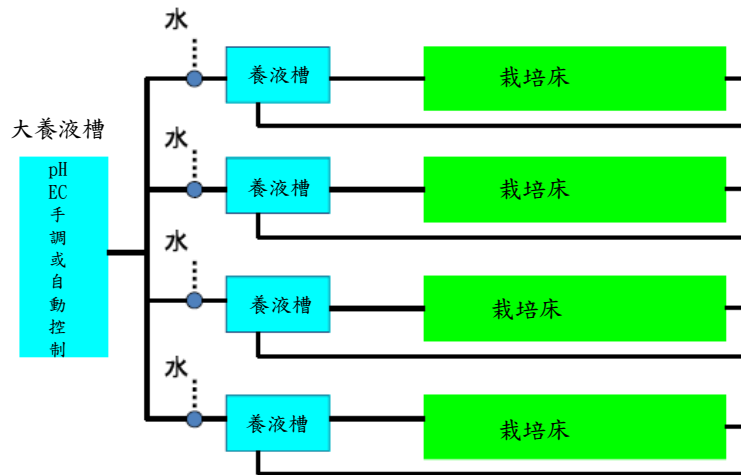
## 收穫前七天的燈管差異影響鮮重與硝酸鹽含量

- 全程35 天 **FL (3000 K色溫) vs. RB LED (R:B=9:1)**
- 只有收穫前七天有差別：FL vs. RB LED
- **硝酸鹽 8 % 差異** (RB LED is better due to more RED)

處理組別	鮮重 g/株	硝酸鹽 ppm
20. FL+FL+LED	159 (高者優)	2291 (低者優)
16. FL+FL+FL	136	2475

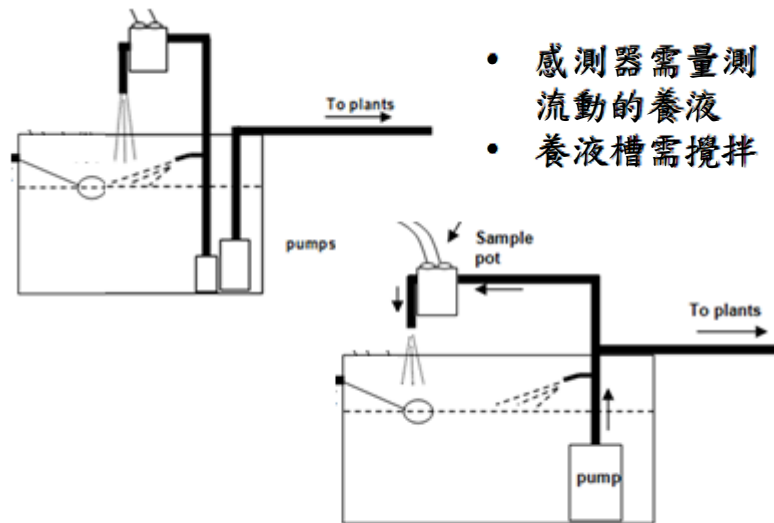
76

## 避免交叉感染的系統設計



77

## 水槽與沉水馬達的管路設計



78

## 整合環境控制

風 使用風扇將氣流速率調整到 0.3~1 m/s

光 各階段日累計光量調整到最適當 (< 17 mol/m<sup>2</sup>)

溫 葉片溫度與空氣溫度維持在日夜最適值

濕 空氣濕度維持在70~85% (VPD 調整到最適當)

氣 CO<sub>2</sub> 濃度維持在1000~2000 ppm

養 養液調整到最適當，變動達最小

菌 有害微生物的繁殖與生長控制在最低

The End