

康乃爾大學 水耕栽培研究成果彙整



方煒 台大生機系教授

CEA

- Controlled Environment Agriculture
 - an advanced and intensive form of hydroponically-based agriculture
- 需要各領域人才
 - 工程相關、園藝、植物生理、植物病理等



研究目標

- 發展SOP用於量產水耕萵苣
- 確保產品新鮮、高品質、無農藥



相關設施

環控項目	環控室 (播種期)	精密溫室 (育苗+育成期)
風	降溫 空氣循環 濕度維持	加溫 降溫 空氣循環
光	人工補光	人工補光 遮光系統
水	灌溉時機 灌溉量	水溫 溶氧
養	pH、EC 調控 配方1	pH、EC 調控 配方2
氣	二氧化碳濃度	二氧化碳濃度
介質	固態介質	營養液
系統	非循環	循環 NFT 或 DFT

流程與名詞

播種期

- 人工或半自動播種
- 篩選後至期滿進行人工**移植**

育苗期

- 密度 80 株/m²
- 期滿後進行人工**定植**

育成期

- 密度 35 株/m²
- 期滿進行人工**收穫**與**包裝**

播種

- 奶油萵苣 或稱 波士頓萵苣
Butterhead lettuce (*Lactuca sativa*)
- 使用穴盤播種
- 種子：
 - 有造粒：較貴、發芽率高、免滅菌
 - 無造粒：便宜、發芽率低、需滅菌
- 可播種在介質上
 - 有機介質：泥炭土+蛭石 (1:1 體積比)
 - 無機介質：海綿或岩綿

播種期

- 播種後栽培 11 天
- 維持 恆溫 24 度C
- 光量 PPF = 200 x 24 hr
- 前兩天要加蓋做保濕
- 補充CO₂



目視篩選

- 播種後**第 6 天**進行第一階段目視篩選
- 依據**第一子葉** (true leaf) 的大小來篩選
- 選用最大的**前80%**

育苗期

- 播種後**第11天**進入育苗期
- 移植到浮板上
- 可用 NFT 或 DFT 系統進行栽培
- NFT 系統
 - 用水少，水深 < 1 cm
 - 系統比較沒有容錯性
- DFT
 - 用水多，水深 10~20 cm
 - 系統具緩衝性，但須打氣，補充溶氧

移植後

- 營養液
 - pH: 5.6~6.0
 - EC: 1150~1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- 康乃爾配方接近於 $\frac{1}{2}$ strength of Hoagland

Table 2 - Set points for the macro and micro-nutrients of the fertilizer solution.

Macro-nutrients:

Micro-nutrients:

N	8.9	mmol l^{-1}	(125 ppm)	Fe	16.8	mmol l^{-1}	(0.94 ppm)
P	1.0	mmol l^{-1}	(31 ppm)	Mn	2.5	mmol l^{-1}	(0.14 ppm)
K	5.5	mmol l^{-1}	(215 ppm)	B	15.0	mmol l^{-1}	(0.16 ppm)
Ca	2.1	mmol l^{-1}	(84 ppm)	Cu	0.4	mmol l^{-1}	(0.03 ppm)
Mg	0.5	mmol l^{-1}	(24 ppm)	Zn	2.0	mmol l^{-1}	(0.13 ppm)
S	0.6	mmol l^{-1}	(35 ppm)	Mo	0.3	mmol l^{-1}	(0.03 ppm)

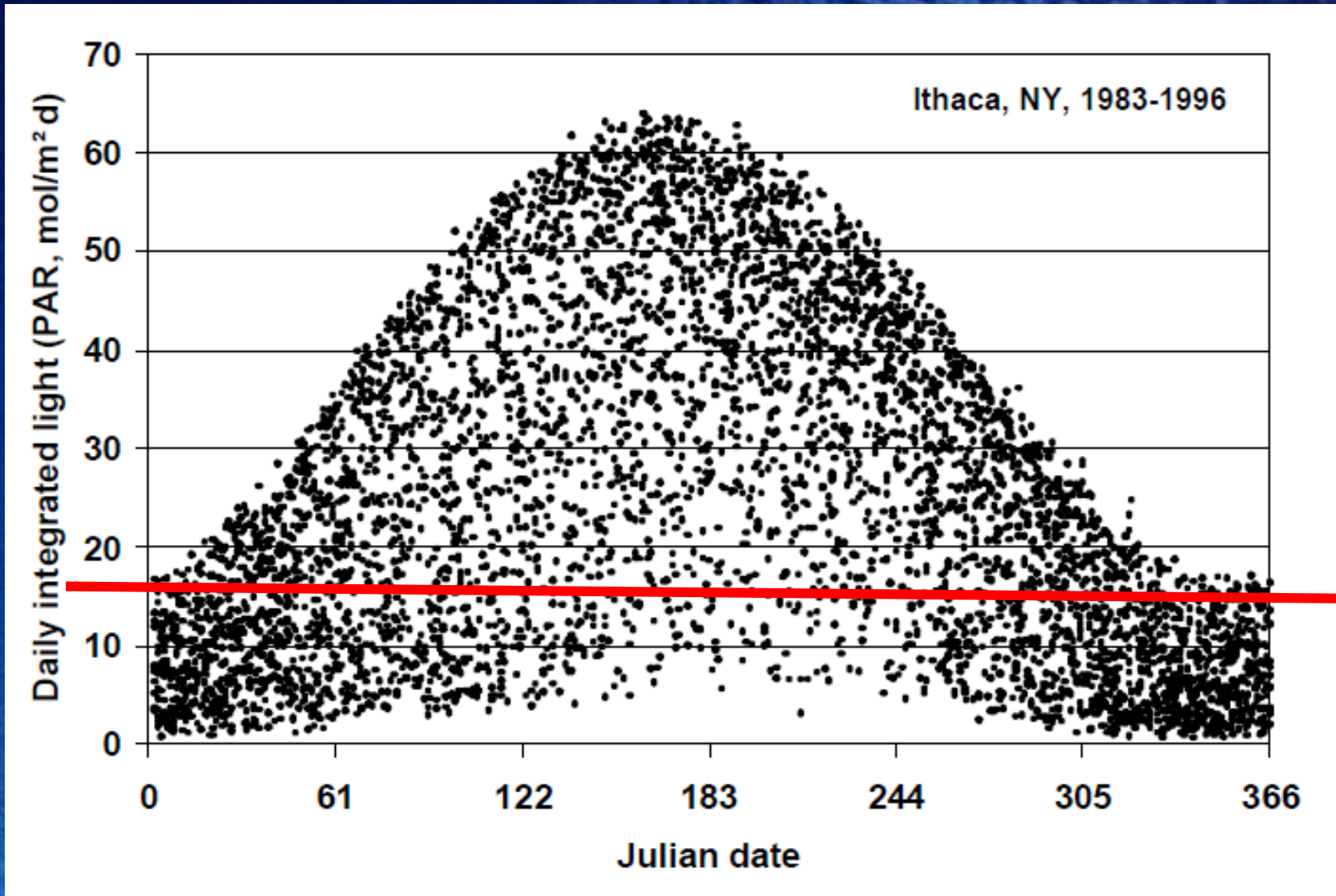
育苗期 → 育成期

- 育苗期
 - 為期10 天
 - 栽培密度 80 plt/m²
- 定植後進入育成期
 - 為期 14 天
 - 栽培密度 35 pl/m² (後續有調整)
- 當 DLI 維持在 17 mol/m²/d
且 CO₂ 濃度在350-400 ppm
- 播種後總計35天，可收穫150 g/株

累計十年的研究成果



所在地之日累積光量



PPFD 與 DLI 換算

- 光量(PPFD)與給光時間(h)影響日累積光量(DLI)
 - $DLI = PPFD \times 60 \text{ sec} \times 60 \text{ min} \times h \div 10^6$
- 為了達到預期的 DLI (ex.17 mol/d/m²)，
光量足夠可減少給光時間，光量不足則相反

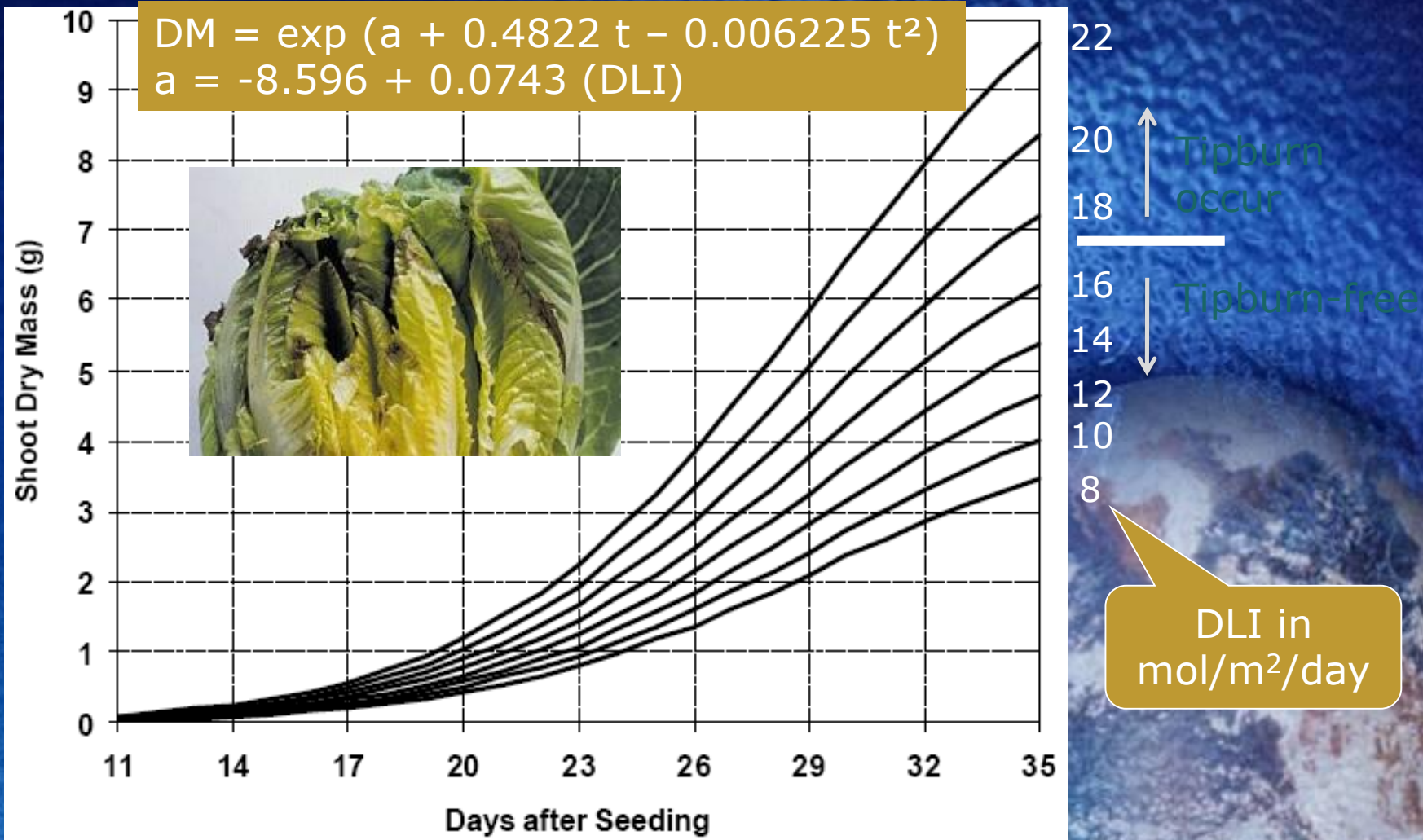
光量 $\mu\text{mol/s/m}^2$	給光時間 hrs/day	日累積光量 mol/day/m^2	35天收穫鮮重 g/plt
400	12	17	150
300	16		
240	20		
200	24		

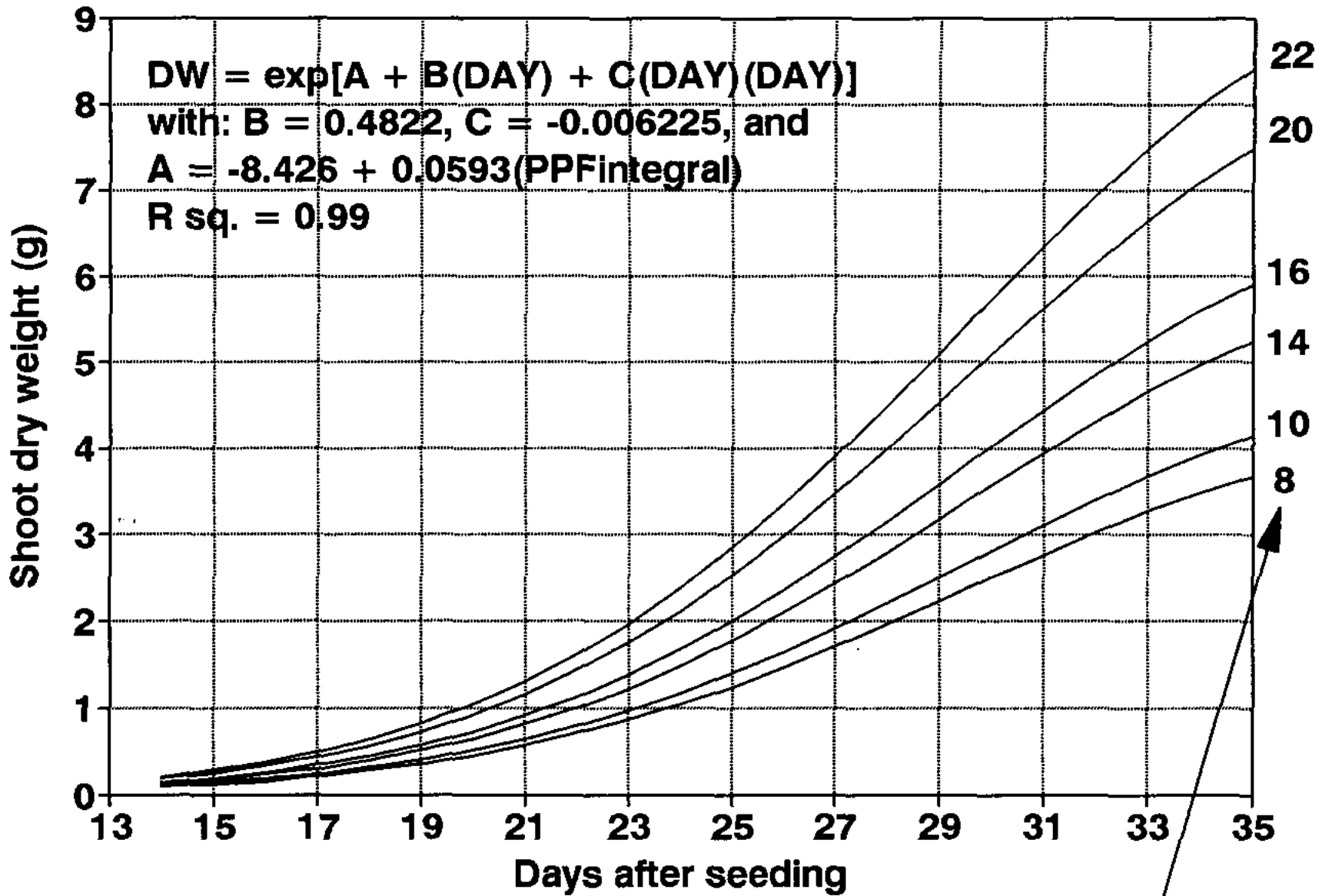
日總光量 (DLI, Daily Light Integral)

$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	HR:MN	DLI, mol/m^2
100	16:40	6
200	16:40	12
300	15:45	17
400	11:49	17
500	09:30	17

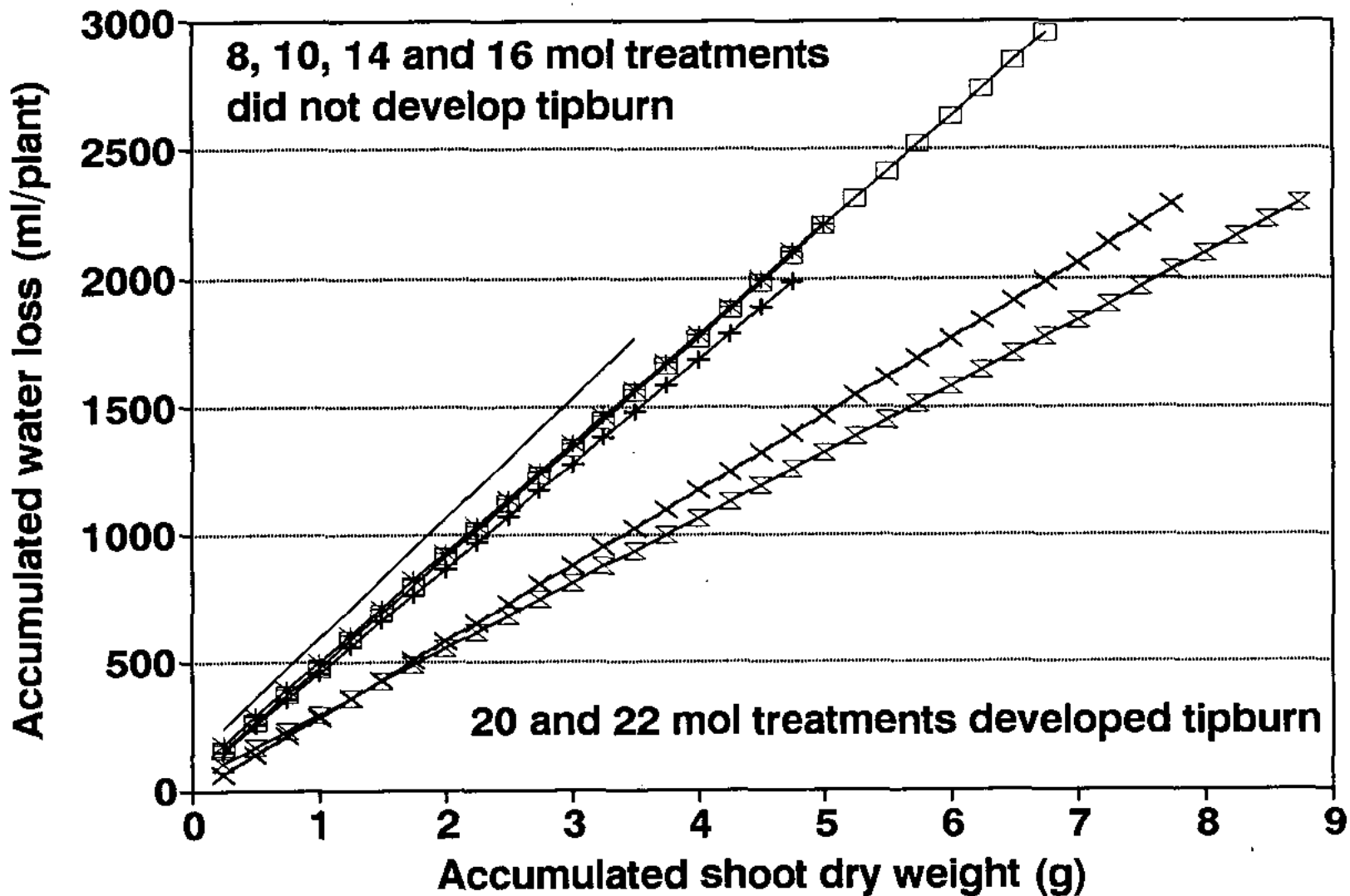
Shoot DM vs. DLI & Days after seeding

找出最佳的日總光量 (DLI)





PPFIntegral (mol/(m²*d))



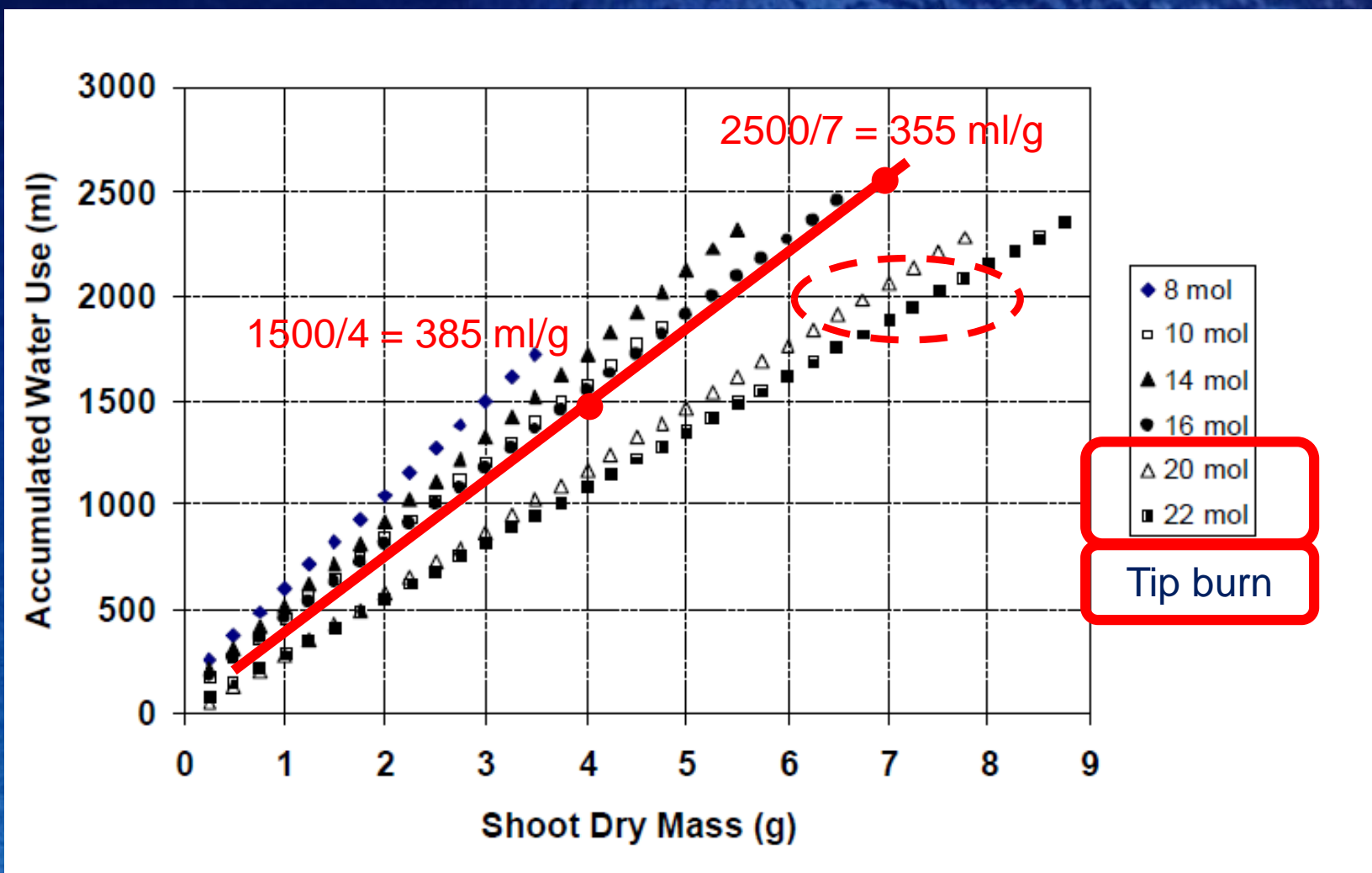
- | | | | | | |
|----|----------------------------|----|----------------------------|----|----------------------------|
| — | 8 mol/(m ² *d) | —+ | 10 mol/(m ² *d) | —* | 14 mol/(m ² *d) |
| —□ | 16 mol/(m ² *d) | —x | 20 mol/(m ² *d) | —x | 22 mol/(m ² *d) |

Tip burn



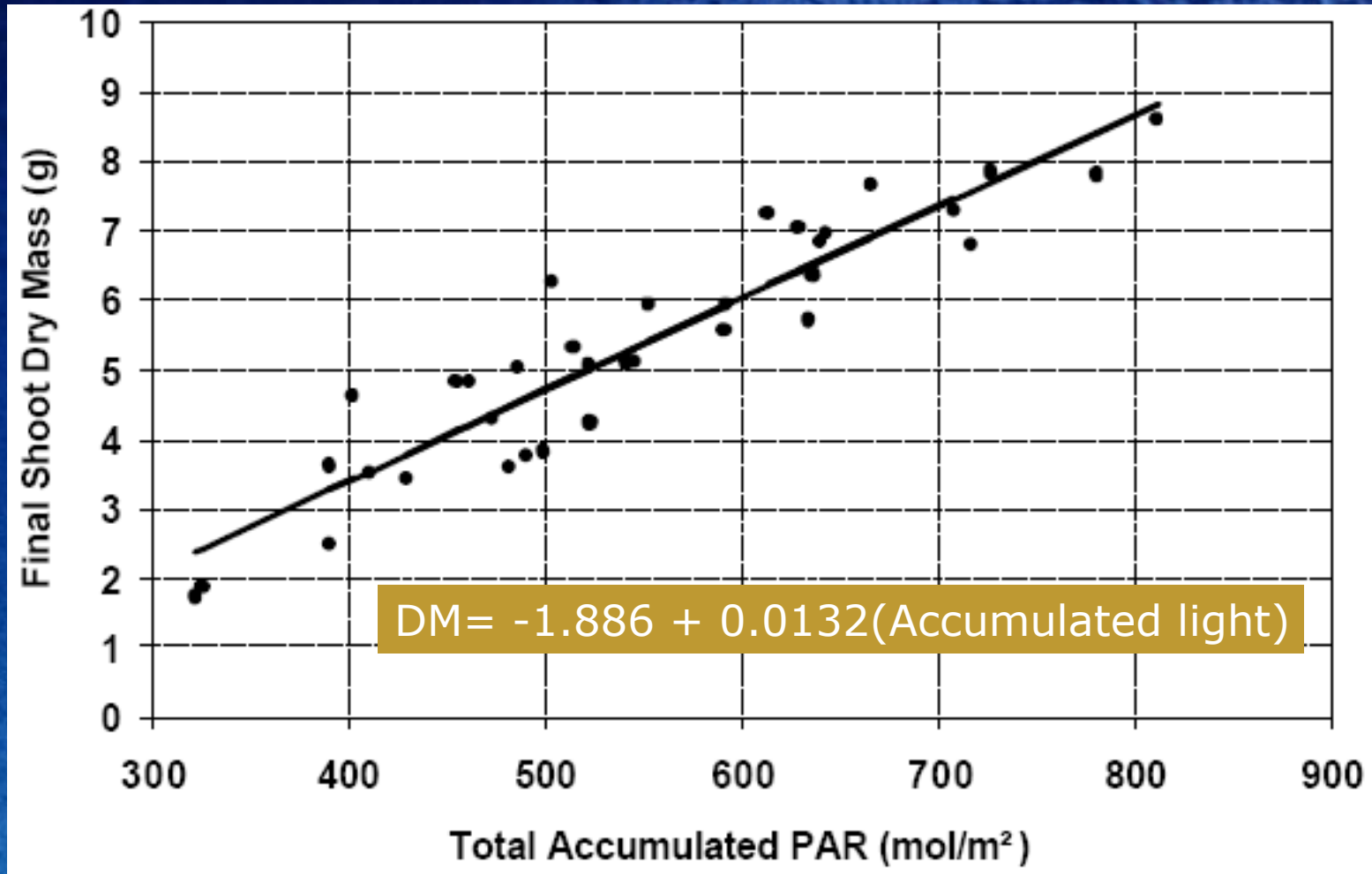
日累積光量 $>17 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-2}$ (Both et al., 1997)

用水量與 DLI



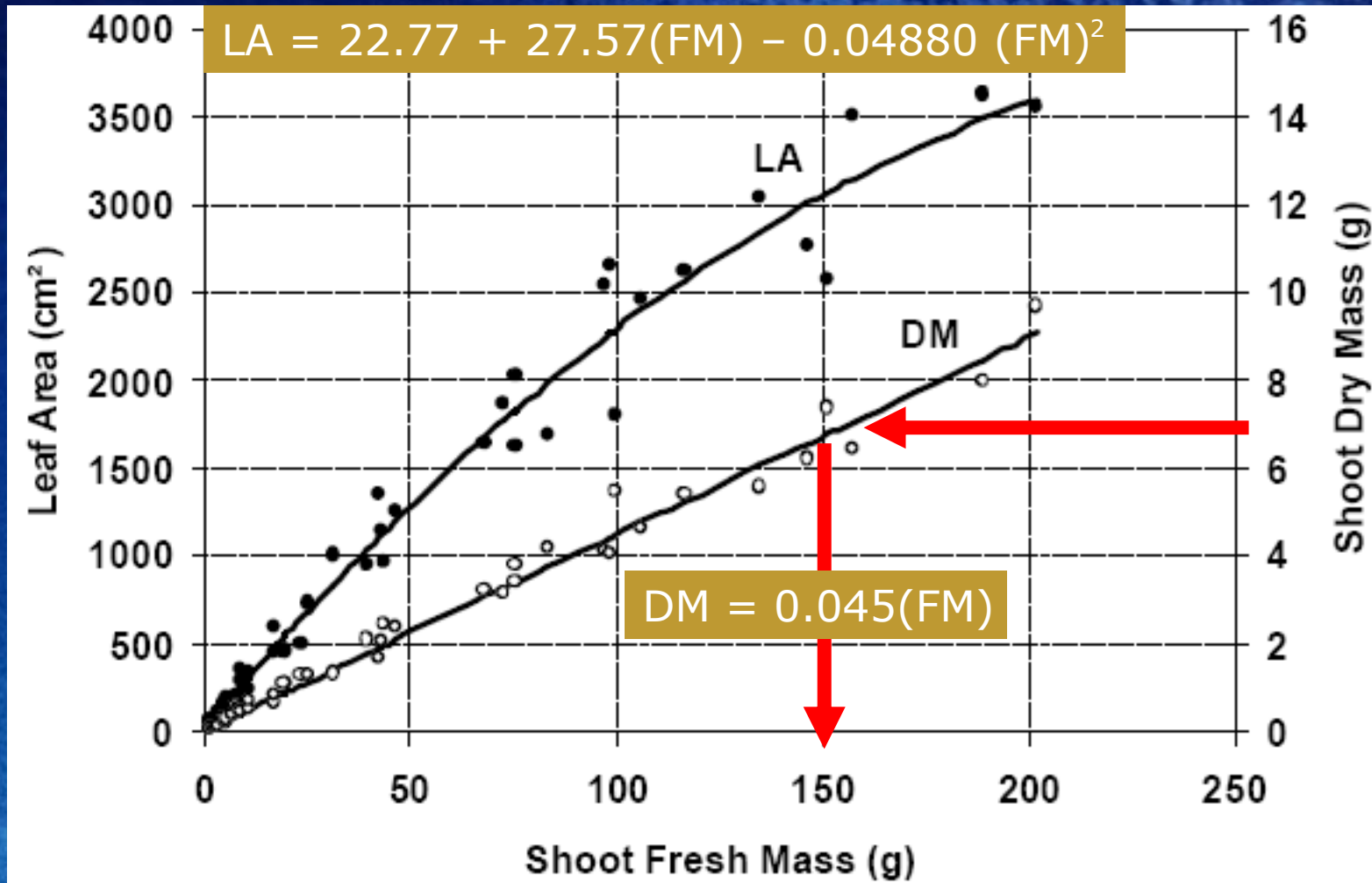
Final shoot DM vs. Total PAR

Lettuce (cultivar Ostinata)

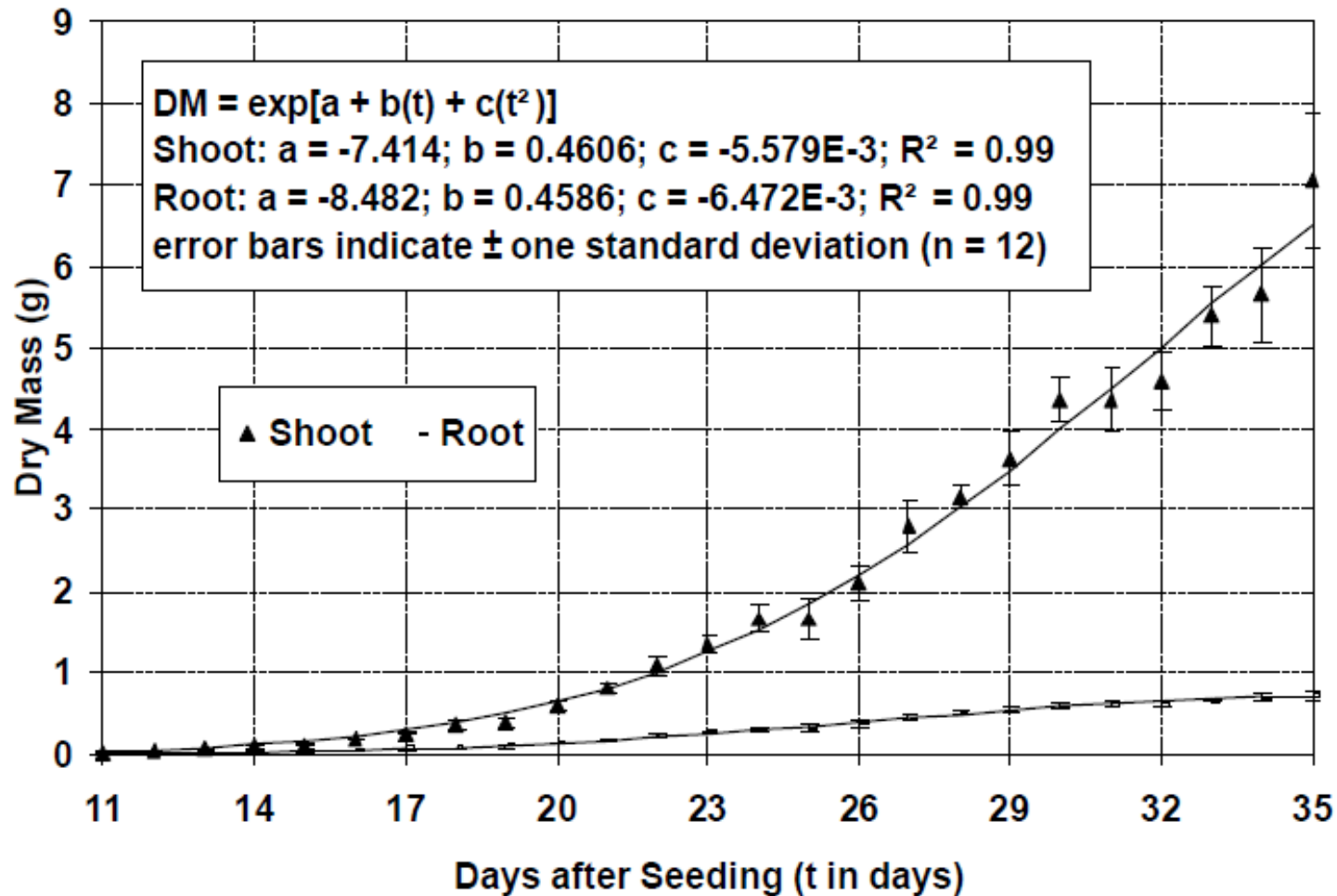


LA and Shoot DM = f(Shoot FM)

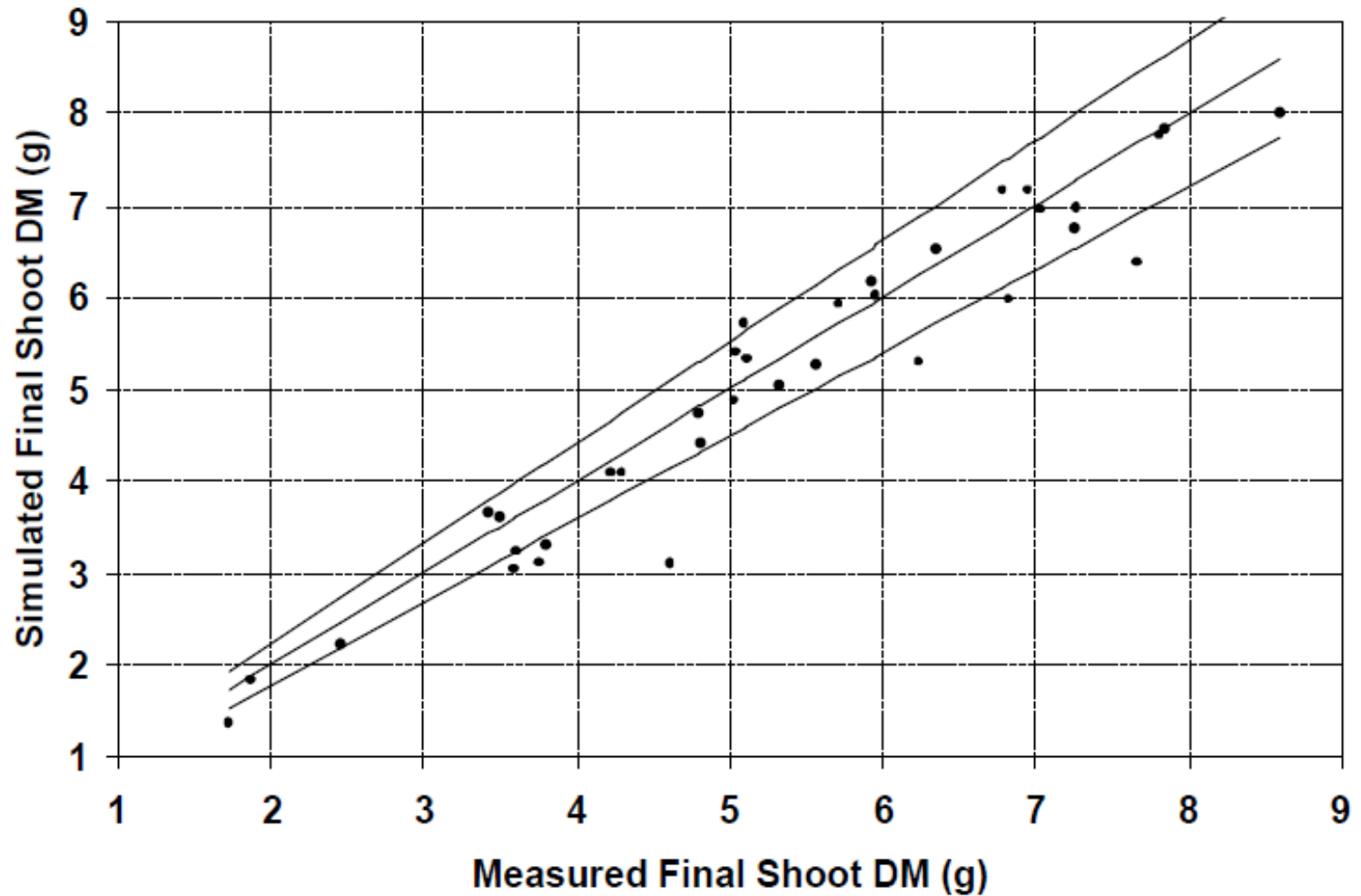
Lettuce (cultivar Ostinata)



Shoot & Root DM vs. days after seeding



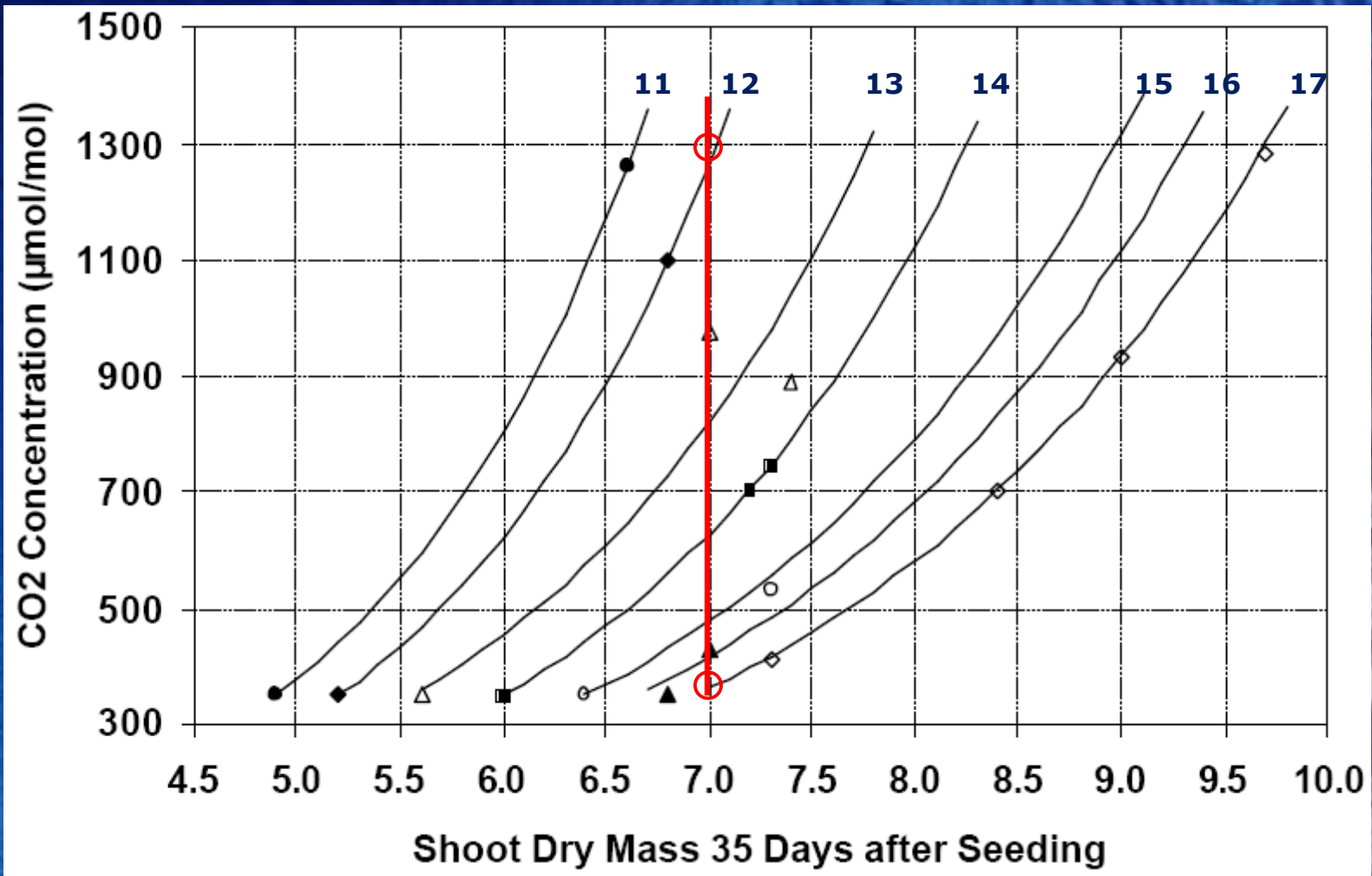
Simulated vs. Measured



Impact of CO₂ and DLI on Shoot DM

CO₂ 施肥濃度與日總光量DLI影響產能

Lettuce (cultivar Vivaldi)



量產7 g 乾重的萵苣 所需的等效環控條件

光量	每日給光 時間	每日累計光量 DLI	CO ₂ 濃度
$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	hr:mn	mol/m^2	ppm
200	16:40	12	1300
300	15:45	17	345

Coordinated management strategy

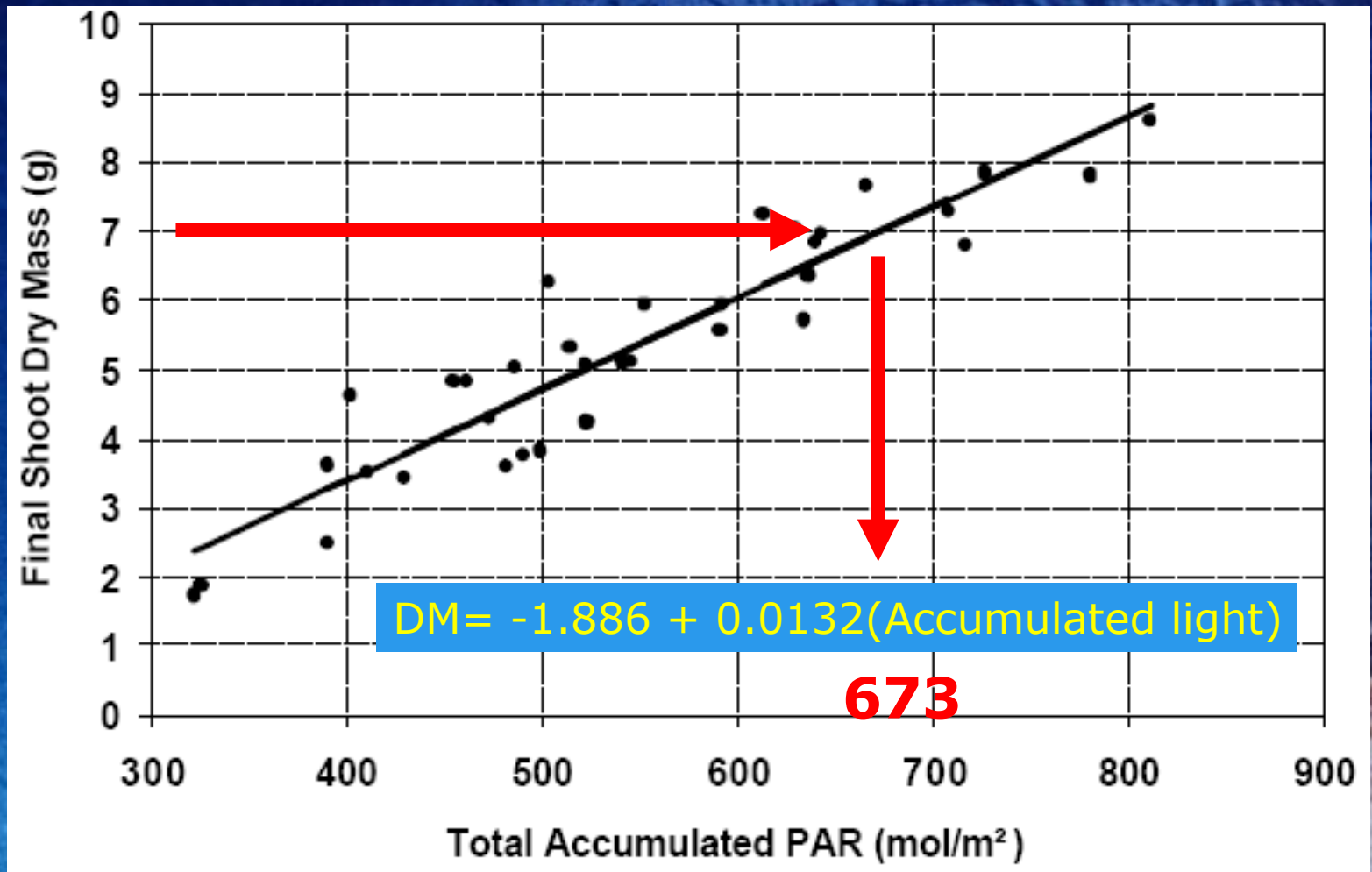
CO₂ 與 光量耦合控制策略

量產 7 g 乾重的萵苣所需的等效環控條件

Lettuce (cultivar Vivaldi) 35 天收穫 190 g/株

DLI	Δ DLI	CO ₂	Δ CO ₂
17	6	350	0
16	5	420	70
15	4	480	130
14	3	630	280
13	2	820	470
12	1	1270	920
11	0	1600	1250

Final shoot DM vs. Total PAR



量產7 g 乾重的萵苣 所需的等效環控條件

累計總光量	每日累計光量 DLI	所需栽培天數
mol/m^2	mol/m^2	Days
673	17	39.6

產能可預測

- $\text{CO}_2 = 345 \text{ ppm}$
- $\text{DLI} = 17 \text{ mol/m}^2/\text{day}$, 播種後 35 天
- 累計總光量 $17 \times 35 \text{ 天} = 595 \text{ mol/m}^2$.
- 地上部乾重 6.75 g
- 鮮重為每株 $6.75 / 0.045 = 150 \text{ g}$

CO₂ 施肥的效益：1. 增加產量

- DLI 為 17 mol/m²
- CO₂ 調到 1200 ppm
- 相同栽培天數 (35天)
- 半結球萵苣每株為 200 g

CO₂ 345 ppm → 1200 ppm

35 天 **150 g** 鮮重 → 35 天 **200 g**

CO₂ 施肥的效益：2. 縮短產期

- 目標同樣是生產 150 g 的半結球萵苣
- DLI同樣是 17 mol/m²
- CO₂濃度提高到 1200 ppm
- 可提早七天收穫

CO₂ 345 ppm → 1200 ppm

150 g 鮮重 **35 天** → 150 g **28 天**

產業化驗證平台-外觀



產業化驗證平台-內貌



設施

- 溫室 29.3 m (東西向) * 25.6 m = 750 m²
 - 工作區 25.6 m * 6.1 m
 - 栽培區
 - 25.6 m * 6.1 m * 3 區 = 468.48 m²
 - 25.6 m * 4.9 m * 1 區 = 125.44 m²
 - 東牆設有 44 台風扇
 - 西牆1.2 m高處設有蒸發冷卻水簾
- 溫室 4.3 m高處有透光率50%遮陽網
- 栽培區共安裝144 組600 W高壓鈉燈
- $144 * 600 / (25.6 * (6.1 * 3 + 4.9)) = 145.5 \text{ W/m}^2$
約0.242盞/m²

工作區

- 作業室
 - 含注肥系統，淋洗室，收穫區，包裝區，播種區
- 植物生長室
 - 播種面積 $6.1*7.3 \text{ m}^2$
 - 使用 26 盞 600W 高壓鈉燈，約 0.58 盞/m^2
 - 光量 $350 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 日溫 24°C 夜溫 19°C
 - EC: 1.2 mS/cm ，pH: 5.8
 - CO_2 : 1000ppm
 - $\text{DO} > 4\text{mg/L}$ (Goto et al., 1996)
- 冰水機房，洗手間，電腦室等
- 氣象站安裝於工作區屋頂
- 液態二氧化碳鋼瓶位於工作區外

營養液管理與維護

- 水深 25 cm，由感測器控制
- PVC管配線，以馬達幫助養液循環
- 水溫24°C (Thompson et al., 1998)
- 以自來水補充養液
- 以打氣機增加溶氧量(DO)，維持不低於 4 mg/L (Goto,1996)
- 每隔一段時間檢查養液成分

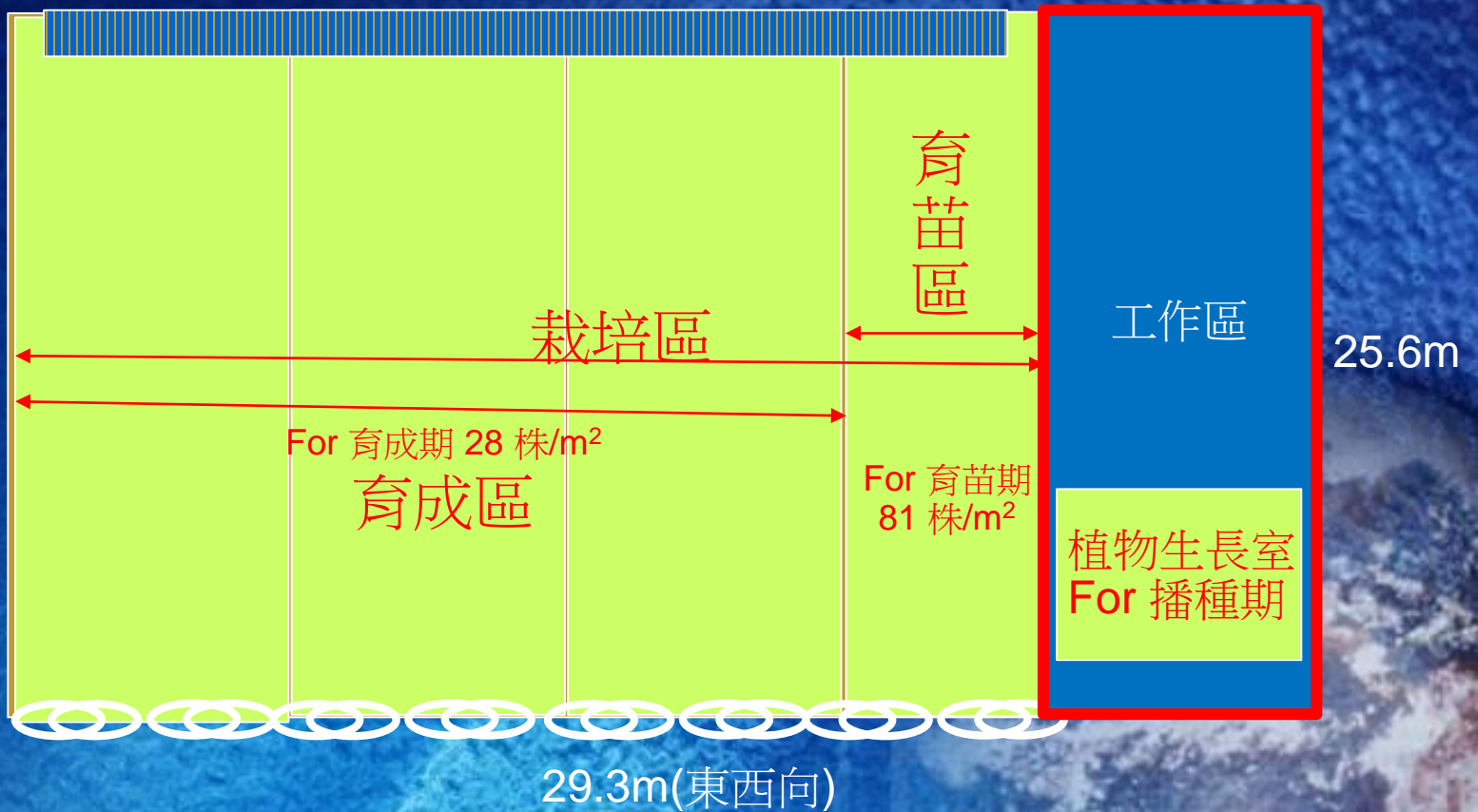
三階段浮板栽培

- 播種期（11天、育苗區）
 - 高密度：96 株/浮板 = 130株/m²
- 育苗期（10天、溫室）
 - 中密度：72 株/浮板 = 81株/m²
- 育成期（14天、溫室）
 - 低密度：24 株/浮板 = 28株/m²
 - 第 35 天收穫

產業化驗證平台

- 用地 750 m² 的水耕萵苣栽培示範點
- 每日量產 945 株萵苣，每日播種1200顆
- 產程 35 天，其中 24 天在溫室內
- 溫室內同時有多少株？
 - $945 * 24 = 22680$ 株，其中
 - 第二階段 $945 * 10 = 9450$ 株，占地 $9450 / 81 = 116.7 \text{ m}^2$
 - 第三階段 $945 * 14 = 13230$ 株，占地 $13230 / 28 = 472.5 \text{ m}^2$
- 單位面積年產能 (150 g/株)
 - $945 * 360 * 0.15 / 1000 = 51$ 噸/yr
 - $945 * 360 * 0.15 / 750 = 68 \text{ kg/m}^2/\text{yr}$

配置











72 株/浮板
6 * 12



24 株/浮板
4 * 6

量產的萵苣已在市場上販售

