

# 光合作用测量 系统解决方案



**上海泽泉科技股份有限公司**

上海泽泉科技股份有限公司  
上海乾菲诺农业科技有限公司

Zealquest Scientific Technology Co., Ltd.  
Zealquest AgriPheno Co., Ltd.

# 目录

1	背景 .....	4
2	解决方案 .....	5
2.1	野外调查光合作用测量解决方案 .....	5
	● 手持式光合作用测量系统——CI-340 .....	5
	● 超便携式调制叶绿素荧光仪——MINI-PAM-II .....	6
2.2	植物生理研究光合作用测量解决方案 .....	6
	● 便携式光合-荧光测量系统——GFS-3000 .....	7
	● 便携式调制叶绿素荧光仪——PAM-2500 .....	8
	● 调制叶绿素荧光成像系统——IMAGING-PAM.....	9
2.3	深入光合机理研究光合作用测量解决方案 .....	10
	● 便携式光合-荧光测量系统——GFS-3000 .....	10
	● 双通道 PAM-100 测量系统——Dual-PAM-100.....	11
	● 多激发波长调制叶绿素荧光仪——Multi-Color-PAM.....	12
	● 同步测量 CO <sub>2</sub> 气体交换、P700 与叶绿素荧光——GFS-Dual .....	13
	● 同步测量 CO <sub>2</sub> 气体交换与叶绿素荧光成像 GFS-Imaging.....	14
2.4	光合生理连续监测解决方案 .....	14
	● 植物光合生理及环境监测系统——PTM-48A.....	15
	● 多通道连续监测叶绿素荧光仪——MONITORING-PAM.....	16
	● 植物生理生态监测系统——Plant-Watch .....	16
2.5	藻类光合作用测量解决方案 .....	17
	● 水样荧光仪——Water-PAM.....	17
	● 浮游植物分类荧光仪——PHYTO-PAM-II .....	18
	● 水下调制荧光仪——DIVING-PAM .....	19
3	应用实例 .....	20
3.1	光合荧光同步测量 .....	20
3.2	同步测量叶绿素荧光与 O <sub>2</sub> 浓度 .....	22
3.3	在多云天气里测定荧光 .....	23
3.4	模拟研究全球变暖对光合的影响 .....	24
3.5	极地海洋研究 .....	25
3.6	极端环境下的荧光连续监测 .....	26

---

3.7	自由大气 CO <sub>2</sub> 浓度升高实验 .....	- 28 -
3.8	不同光质下绝对电子传递速率的测定 .....	- 30 -
3.9	叶绿素荧光、P700、P515/535 同步测量 .....	- 32 -
3.10	利用光合荧光等多种测量手段研究 ATP 酶在光合调控过程中的作用 .....	- 36 -

# 1 背景

光合作用是地球上最重要的化学反应，也是植物的核心生命过程之一。对植物的光合作用进行测量一直是科研界的热点，相关测量技术也在不断发展，不断深入。

目前常用的光合作用测量技术有 CO<sub>2</sub>气体交换（光合仪）、调制叶绿素荧光（PAM）、差示吸收技术（P700, P515/535）和光合放氧等。由于 CO<sub>2</sub>气体交换、调制叶绿素荧光和差示吸收技术都可以做到无损、原位、活体测量，因此得到了更为广泛的应用。光合放氧测定由于需要破碎叶片，其应用受到一定的限制。

光合作用是一个复杂的链式反应，包含光反应、暗反应等多个过程，不同的光合测量技术都是从不同的侧面来反映光合作用的运转情况，例如：

**CO<sub>2</sub>气体交换**通过测定进出叶室空气的 CO<sub>2</sub>及 H<sub>2</sub>O 浓度差来测定叶片的 CO<sub>2</sub>同化速率、蒸腾速率、气孔导度和细胞间隙 CO<sub>2</sub>浓度等光合气体交换参数，从而获取光合作用暗反应、气孔及水汽散失等相关信息。GFS-3000、CI-340、LCPro-SD 等型号光合仪可测定。

**调制叶绿素荧光**通过测定 PSII 捕光天线在光能转换过程中发出的荧光强度来测定叶片暗适应后的 PSII 最大光化学效率 Fv/Fm、PSII 光下实际光合量子产量 Y (II)、非光化学淬灭系数 NPQ、PSII 的电子传递速率 ETR (II) 等叶绿素荧光参数，从而获取光合作用光系统 II 的运转情况信息。全系列 PAM 荧光仪均可测量。

**P700** 通过测定 PSI 反应中心氧化还原过程中对 830nm 的光吸收变化来测定 P700 的氧化还原动力学、PSI 的光下实际光合量子产量 Y (I)、PSI 的电子传递速率 ETR (I)、PSI 供体侧和受体侧的信息 Y (ND) 和 Y (NA)、质体醌 PQ 库的大小等，从而获取光合作用光系统 I 相关运转情况信息。双通道 PAM-100 测量系统 Dual-PAM-100 & Dual-PAM/F 可测量。

**P515/535** 通过测定类囊体膜上部分色素（主要是叶绿素 b 和类胡萝卜素）的电致变色效应 (ECS)，来测定类囊体膜的跨膜电位  $\Delta \psi$ 、跨膜质子浓度梯度差  $\Delta \text{pH}$ 、质子动力势 pmf、叶黄素循环、ATP 酶的 H<sup>+</sup>通透性、H<sup>+</sup>流速等，从而获取光合膜能量运转等相关信息。选配有 P515/535 模块的 Dual-PAM-100 可测量。

**光合放氧**通过测量光合机构中放氧复合体在光下裂解水释放氧气的速率，从而获取光合放氧的相关信息。光纤式氧气测量仪——Firesting O<sub>2</sub>可测量。

随着光合研究的不断深入，单一测量方式有时已经无法满足光合研究的需要，这就要求将几种不同测量方式获取的光合信息结合起来分析，甚至需要对同一个叶片进行多种方式的同步测定，以期了解光合作用的全貌，了解光合各部分之间的相互关系，才能深入阐明

环境因素或光合组分的变化对植物光合作用各过程的影响及其内在机制。

作为国际领先的专业光合研究设备制造商，德国 WALZ 公司在光合研究的多种测量技术领域均有深厚的技术积累，产品线涵盖了 CO<sub>2</sub> 气体交换（光合仪）、调制叶绿素荧光（PAM）和差示吸收技术（P700， P515/535）等多种测量领域。特别在多种测量方式联用方面，掌握了多项最先进的技术，不仅联用方式灵活多样，还实现了 CO<sub>2</sub> 气体交换、调制叶绿素荧光和差式吸收三大测量方式的同步测量，让人们能够更全面地深入探究植物的光合作用。

## 2 解决方案

### 2.1 野外调查光合作用测量解决方案

**适用范围：**适合于大样本量的调查型测量，如农田、温室大规模多重复光合测量及野外生态调查等。可在高光合品种选育、作物栽培优化、生态研究等领域应用。

**方案特点：**仪器选型突出野外便携性，操作快速简便，可进行大规模调查，可进行光合日变化测量

**仪器选型：**

- 手持式光合作用测量系统——CI-340



**特点：**仪器轻便，特别适合野外研究使用。可测量全部光合气体交换参数。适合纯自然条件下的测定，也可选配控光模块等进行基本环境控制。

测量参数：净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、细胞间隙 CO<sub>2</sub> 浓度、环境 CO<sub>2</sub> 浓度、环境湿度、饱和水汽压亏缺、大气压、光强等

产地：美国 CID

● 超便携式调制叶绿素荧光仪——MINI-PAM-II



特点：仪器轻便，特别适合野外研究使用。经典 MINI-PAM 的全新升级。采用 LED 光源，触屏操作。5 号充电电池供电，便于野外随时更换电池。可选配 O<sub>2</sub> 传感器。

测量参数：F<sub>o</sub>, F<sub>m</sub>, F, F<sub>m</sub>' , F<sub>o</sub>' , F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, Y(II) = ΔF/F<sub>m</sub>' , qP, qL, qN, NPQ, Y(NPQ), Y(NO), rETR, PAR、叶温和相对湿度等，可测定慢速荧光诱导动力学曲线和快速光曲线(RLC)等。

产地：德国 WALZ

## 2.2 植物生理研究光合作用测量解决方案

**适用范围：**适用于植物生理研究中的光合作用测定，如逆境生理研究等领域。

**方案特点：**仪器选型兼顾便携性和功能性，可对光合生理过程进行更深入的探究。

**仪器选型：**

- 便携式光合-荧光测量系统——GFS-3000



特点：除测量精度较高以外，GFS-3000 具有很强的叶室微环境控制能力。可精准控制叶室空气温度、湿度、光强和 CO<sub>2</sub>浓度，且可控范围广。适合于植物生理研究中精确控制条件下的光合作用测定，可测定光响应曲线、CO<sub>2</sub>响应曲线、温度响应曲线、湿度响应曲线等。

GFS-3000 还具有极强的可扩展性。可与 Mini-PAM-II、Imaging-PAM、Dual-PAM-100 等多种 PAM 荧光仪联用，进行同步测量。

测量参数：参比室和样品室的 CO<sub>2</sub>绝对值 (CO<sub>2</sub>abs, CO<sub>2</sub>sam)，参比室和样品室的 H<sub>2</sub>O 绝对值 (H<sub>2</sub>Oabs, H<sub>2</sub>Osam)，流速 (gas flow)，环境气压 (Pamb)，叶室温度 (Tcuv)，叶片温度 (Tleaf)，环境温度 (Tamb)，环境 PAR (PARamb)，叶室内叶片正面 PAR (PARTop)，叶室内叶片背面 PAR (PARbot)，叶室相对湿度 (RH %)，蒸腾速率 (E)，水气压饱和亏 (VPD)，叶片气孔导度 (GH<sub>2</sub>O)，净光合速率 (A)，胞间 CO<sub>2</sub>浓度 (Ci)，环境 CO<sub>2</sub>浓度 (Ca) 等。与不同类型的荧光模块连接可扩展测量相对应的荧光参数。

产地：德国 WALZ

- 便携式调制叶绿素荧光仪——PAM-2500



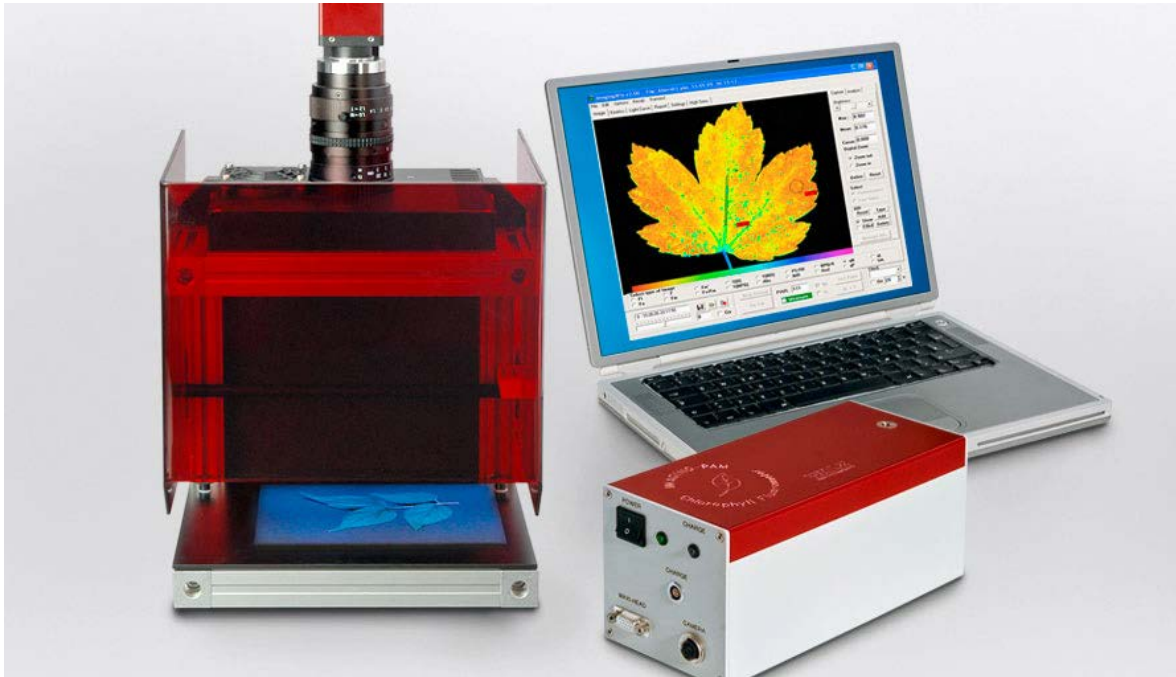
特点：在超便携式调制叶绿素荧光仪——MINI-PAM-II 的基础上，采用更高的采样时间分辨率，可进一步测定荧光快相诱导动力学即 O-J-I-P 相，反映 QA 到 QB 的电子传递等 PSII 原初光化学反应的信息。

测量参数：可测定荧光快相诱导动力学曲线 O-J-I-P 相、慢速荧光诱导动力学曲线并进行淬灭分析 ( $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F$ 、 $F_o'$ 、 $F_m'$ 、 $F_v/F_m$ 、 $Y(II) = \Delta F/F_m'$ 、 $q_L$ 、 $q_P$ 、 $q_N$ 、 $NPQ$ 、 $Y(NPQ)$ 、 $Y(NO)$ 、 $ETR$ 、 $C/F_o$ 、 $PAR$  和叶温等)、快速光曲线 (RLC) 等。

产地：德国 WALZ



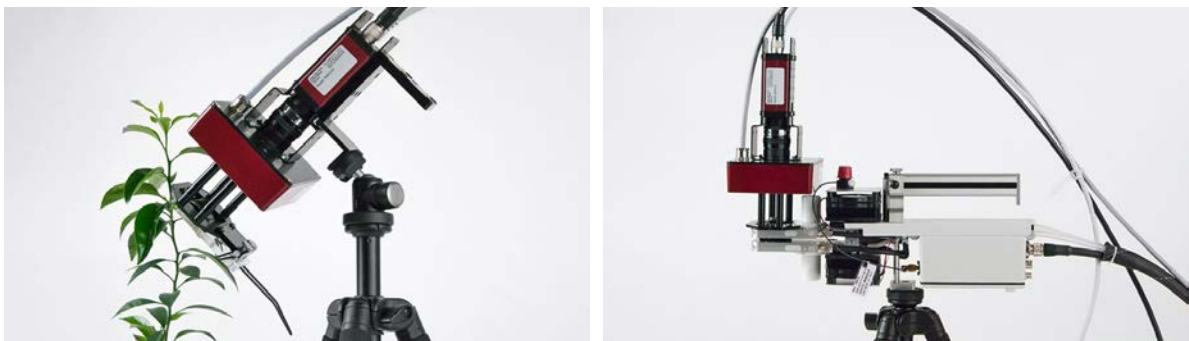
● 调制叶绿素荧光成像系统——IMAGING-PAM



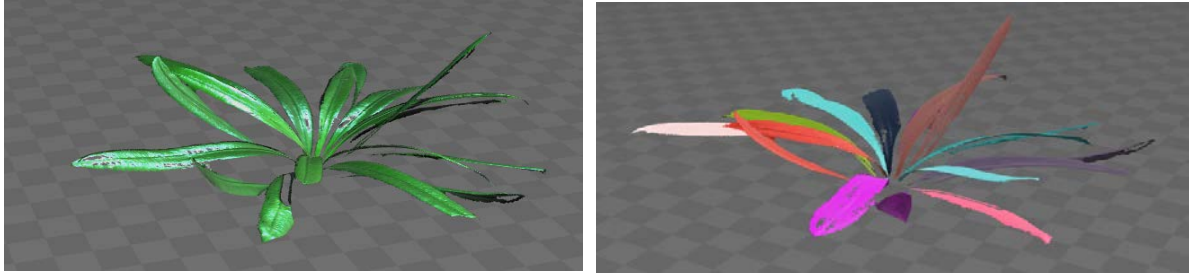
特点：荧光成像的最大的特点是直观，可直观看到叶片不同部位的光合差异。典型应用有病斑、衰老、胁迫等导致的叶片光合差异，及早期检测。也可放置多个叶片直接比较或进行高通量突变株筛选等。在测量所有 PAM 经典荧光参数的同时，还能测量叶片的吸光系数 Abs. 和毒理抑制系数 Inh.

除参数测量外，Imaging-PAM 具有强大的图像分析功能：可选择图像中感兴趣的区域进行分析和比较；可对图像中任意两点之间的数据进行异质性分析；可得到图像中特定数值范围内的区域面积。

Imaging-PAM 主机可连接大、小两种探头，其中 Maxi 探头成像面积  $10 \times 13$  cm，可满足更多研究需要；Mini 版成像面积  $24 \times 32$  mm，可与 GFS-3000 光合仪联用。



最新的 3D 版本还可对材料的 3D 结构进行测定和分析，可以方便地获取突变株、严重胁迫等处理对植物表型（如叶片角度、大小、个数、形状等）的影响。



测量参数:  $F_o$ ,  $F_m$ ,  $F$ ,  $F_m'$ ,  $F_o'$ ,  $F_v/F_m$ ,  $Y(II)=\Delta F/F_m'$ ,  $qP$ ,  $qL$ ,  $qN$ ,  $NPQ$ ,  $Y(NPQ)$ ,  $Y(NO)$ ,  $rETR$ ,  $Abs.$   $Inh.$  等, 可测定慢速荧光诱导动力学曲线和快速光曲线 (RLC) 等。

产地: 德国 WALZ

## 2.3 深入光合机理研究光合作用测量解决方案

适用范围: 适用于光合作用机理研究, 转基因或光合突变体光合作用特性鉴定、环式电子传递、光保护机制、光合作用与环境互动与适应机制、叶黄素循环、光合色素及蛋白功能研究等领域。

方案特点: 突出仪器测量技术的先进性、测量参数的精确性和所能反映问题的深度。

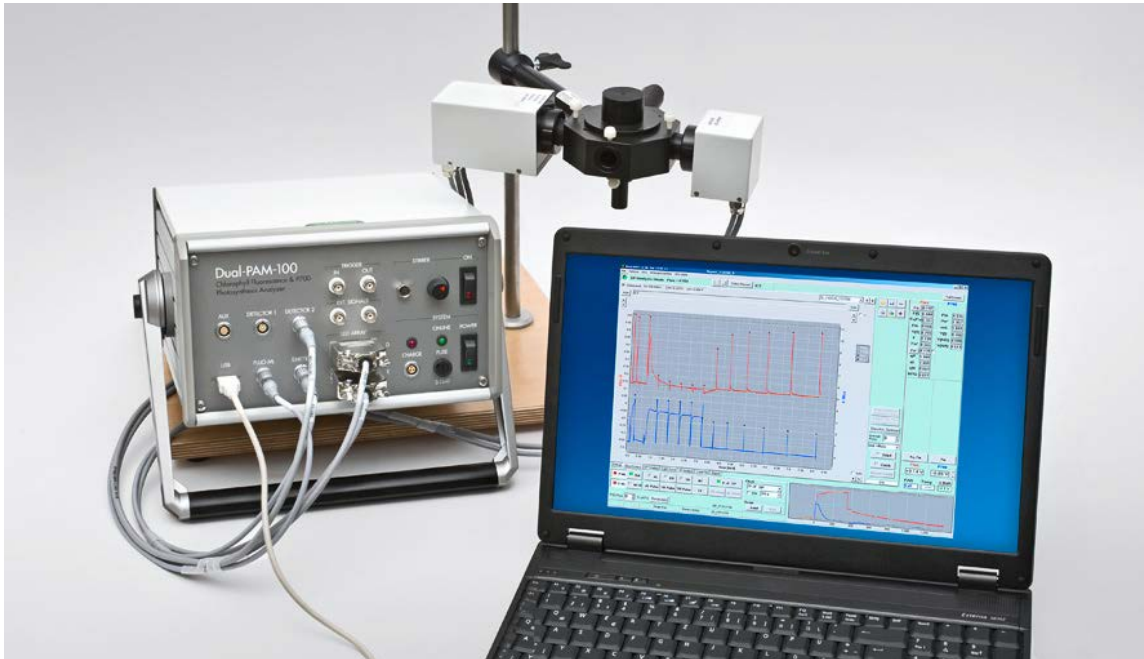
仪器选型:

- 便携式光合-荧光测量系统——GFS-3000



详见 2.2 节。其特点主要体现在 GFS-3000 极强的可扩展性, 通过与 Mini-PAM-II、Imaging-PAM、Dual-PAM-100 等多种 PAM 荧光仪联用, 实现同步测量, 以更全面的视角了解光合作用的全貌, 阐明光合作用各部分间的互动关系和调控过程。

● 双通道 PAM-100 测量系统——Dual-PAM-100



特点：其荧光测量功能相当于 PAM-2500，还可互不干扰地同时测量叶绿素荧光和 P700 信号，从而同时得到 PSII 和 PSI 两个光系统的信息。通过扩展连接其他探头，还可测定 P515/535 信号，了解光合膜的能量运转情况。可与 GFS-3000 光合仪联用。

如需测定水果或岩石、土壤、树干表面的苔藓、地衣等无法透射的样品，可选择光纤版双通道 PAM-100 测量系统——Dual-PAM/F。但光纤板不能扩展 P515/535 功能。

测量参数：**P700 参数：**P700 氧化还原动力学、PQ 库、Y(ND)、Y(NA)、Y(I)、ETR(I)；**P515/535 参数：** $\Delta\psi$ ， $\Delta\text{pH}$ ， $\text{pfm}$ ，ATP 酶通透性，H<sup>+</sup>流速；**荧光参数：**可测定荧光快相诱导动力学曲线 O-J-I-P 相、慢速荧光诱导动力学曲线并进行淬灭分析 ( $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F$ 、 $F_o'$ 、 $F_m'$ 、 $F_v/F_m$ 、 $Y(II) = \Delta F/F_m'$ 、 $q_L$ 、 $q_P$ 、 $q_N$ 、NPQ、 $Y(NPQ)$ 、 $Y(NO)$ 、ETR、 $C/F_o$ 、PAR 和叶温等) 和快速光曲线 (RLC) 等

产地：德国 WALZ

● 多激发波长调制叶绿素荧光仪——Multi-Color-PAM



特点: Multi-Color-PAM 作为顶级叶绿素荧光仪的巅峰之作, 功能强大精准。具有远红光到紫光 7 种波长的测量光和光化光, 可满足不同样品的特殊光质要求, 可获取很多未被深入了解的与光质有关的光合作用过程。具有极高的灵敏度和时间分辨率 ( $10 \mu s$ ), 测量对象从高等植物叶片和低浓度微藻均可适用。将叶绿素荧光的测量技术提升到前所未有的高精度, 可得到极为精确的 PSII 捕光天线光学截面积, 可精确到  $nm^2$ , 并得到 PSII 的绝对电子传递速率 (electrons/PSII  $\cdot$  s), 可精确到单个 PSII 每秒传递的电子个数, 可为高精度要求的光合速率研究提供精准的测量工具。

测量参数: PSII 捕光天线在不同波长下的光学截面积  $\Sigma(II)_{\lambda}$ , PSII 的绝对电子传递速率  $ETR(II)_{\lambda}$ ,  $p$ ,  $J$ ,  $\tau$ ,  $PAR(II)$ , 及 PAM-2500 可测量的全部参数: 可测定荧光快相诱导动力学曲线 O-J-I-P 相、慢速荧光诱导动力学曲线并进行淬灭分析 ( $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F$ 、 $F_0'$ 、 $F_m'$ 、 $F_v/F_m$ 、 $Y(II) = \Delta F/F_m'$ 、 $qL$ 、 $qP$ 、 $qN$ 、 $NPQ$ 、 $Y(NPQ)$ 、 $Y(NO)$ 、 $ETR$ 、 $C/F_0$ 、 $PAR$  和叶温等)、快速光曲线 (RLC) 等。

产地: 德国 WALZ

● 同步测量 CO<sub>2</sub> 气体交换、P700 与叶绿素荧光——GFS-Dual

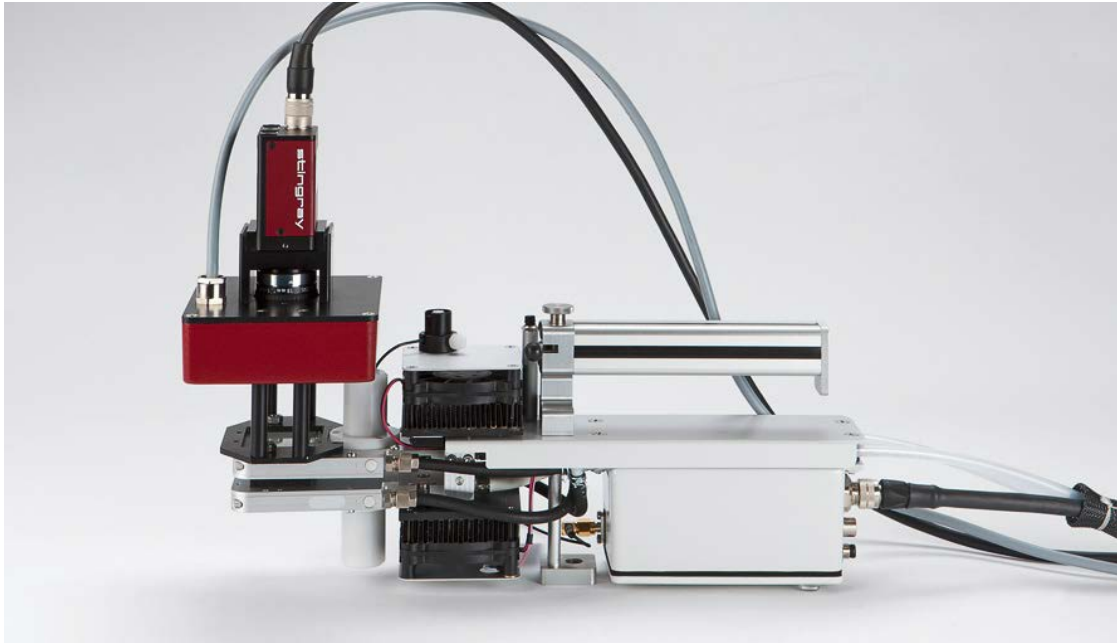


特点：将便携式光合-荧光测量系统——GFS-3000 与双通道 PAM-100 测量系统——Dual-PAM-100 联用，目前国际上唯一可实现从 PSII 到 PSI 到 CO<sub>2</sub> 同化的光合作用全景式测定的商业化设备。借助 GFS-3000 的强大控制能力，可进行特定 CO<sub>2</sub> 浓度、湿度、温度、光强下的精细光合作用测量。

测量参数：**光合气体交换参数**：参比室和样品室的 CO<sub>2</sub> 绝对值 (CO<sub>2</sub>abs, CO<sub>2</sub>sam)，参比室和样品室的 H<sub>2</sub>O 绝对值 (H<sub>2</sub>Oabs, H<sub>2</sub>Osam)，流速 (gas flow)，环境气压 (Pamb)，叶室温度 (Tcuv)，叶片温度 (Tleaf)，环境温度 (Tamb)，环境 PAR (PARamb)，叶室内叶片正面 PAR (PARTop)，叶室内叶片背面 PAR (PARbot)，叶室相对湿度 (RH %)，蒸腾速率 (E)，水气压饱和亏 (VPD)，叶片气孔导度 (GH<sub>2</sub>O)，净光合速率 (A)，胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 (Ci)，环境 CO<sub>2</sub> 浓度 (Ca) 等；**P700 参数**：P700 氧化还原动力学、PQ 库、Y(ND)、Y(NA)、Y(I)、ETR(I)；**P515/535 参数**：Δψ，ΔpH，pfm，ATP 酶通透性，H<sup>+</sup> 流速；**荧光参数**：可测定荧光快相诱导动力学曲线 O-J-I-P 相、慢速荧光诱导动力学曲线并进行淬灭分析 (Fo、Fm、F、Fo'、Fm'、Fv/Fm、Y(II)= ΔF/Fm'、qL、qP、qN、NPQ、Y(NPQ)、Y(NO)、ETR、C/Fo、PAR 和叶温等) 和快速光曲线 (RLC) 等

产地：德国 WALZ

- 同步测量 CO<sub>2</sub> 气体交换与叶绿素荧光成像 GFS-Imaging



特点：将便携式光合-荧光测量系统——GFS-3000 与调制叶绿素荧光成像系统——IMAGING-PAM 联用，从而实现气体交换与叶绿素荧光成像的同步测定。借助 GFS-3000 的强大控制能力，可进行特定 CO<sub>2</sub> 浓度、湿度、温度、光强下的叶绿素荧光成像与气体交换测量。

测量参数：**光合气体交换参数：**参比室和样品室的 CO<sub>2</sub> 绝对值 (CO<sub>2</sub>abs, CO<sub>2</sub>sam)，参比室和样品室的 H<sub>2</sub>O 绝对值 (H<sub>2</sub>Oabs, H<sub>2</sub>Osam)，流速 (gas flow)，环境气压 (Pamb)，叶室温度 (Tcuv)，叶片温度 (Tleaf)，环境温度 (Tamb)，环境 PAR (PARamb)，叶室内叶片正面 PAR (PARTop)，叶室内叶片背面 PAR (PARbot)，叶室相对湿度 (RH %)，蒸腾速率 (E)，水气压饱和亏 (VPD)，叶片气孔导度 (GH<sub>2</sub>O)，净光合速率 (A)，胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 (Ci)，环境 CO<sub>2</sub> 浓度 (Ca) 等；**叶绿素荧光成像参数：**F<sub>o</sub>, F<sub>m</sub>, F, F<sub>m</sub>' , F<sub>o</sub>' , F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, Y(II)=ΔF/F<sub>m</sub>' , qP, qL, qN, NPQ, Y(NPQ), Y(NO), rETR, Abs. Inh. 等，可测定慢速荧光诱导动力学曲线和快速光曲线 (RLC) 等

产地：德国 WALZ

## 2.4 光合生理连续监测解决方案

适用范围：在不影响植物正常生长的条件下，实现对植物光合气体交换、叶绿素荧光等光合生理指标进行长期多点连续监测，结合对其他生理指标及多种环境因子的监测，从而精确反映环境因子的变化对植物光合生理状态的动态影响，适用于植物生理生态研究、作物栽培、灌溉决策、农业自动化控制、长期定位生态学等领域。

方案特点：可设置采样间隔，对光合作用的动态变化进行定点长期连续监测。可结合环境因子（如空气温湿度、辐射量、土壤含水量等）及植物生理指标（如茎秆直径微变化、果实直径微变化、茎流、叶温等）分析光合作用与这些参数间的互作关系。可无人干预自动监测日变化、周变化甚至整个生长季节的光合变化。

仪器选型：

- 植物光合生理及环境监测系统——PTM-48A



特点：PTM-48A 是一台光合仪，但它不是一台普通的光合仪。它专为长期连续监测而设计，监测时间可长达数周。特殊的自动开合式叶室，可将叶室关闭对叶片生长的影响降到最低。4 个叶室通道的设计，使研究者可同时监测多个植株或叶片。

PTM-48A 是一台光合仪，但它不仅仅是一台光合仪。它还是一台多通道植物生理及环境监测系统。它可以连接多达 8 个传感器通道，实现对环境因子 (PAR、空气温湿度、土壤

温湿度等)和植物生理指标(叶片温度、茎流速率、茎杆微变化、果实生长量等)的同步监测。

测量参数：可 24h 连续监测：光合气体交换测量值：CO<sub>2</sub>同化速率、蒸腾速率、气孔导度、参比和叶室 CO<sub>2</sub>浓度、参比和叶室 H<sub>2</sub>O 浓度、叶室空气流量、水汽压饱和亏、大气压等；外接传感器测量值：植物茎流量、茎杆微变化、树干直径生长量、果实生长量、叶面温度、PAR、空气温湿度、土壤温湿度等

产地：以色列 BF-Agritech

● 多通道连续监测叶绿素荧光仪——MONITORING-PAM



特点：全防水设计，可野外长期连续监测植物的叶绿素荧光参数变化。一台主机最多可连接 7 个探头，同时监测多个样品

测量参数：可 24h 连续监测：F<sub>0</sub>, F<sub>m</sub>, F, F<sub>m</sub>' , F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, ΔF/F<sub>m</sub>' , qP, qL, qN, NPQ, Y(NPQ), Y(NO), ETR, PAR 和温度等

产地：德国 WALZ

● 植物生理生态监测系统——Plant-Watch

特点：Plant-Watch 植物生理生态监测系统是一款根据用户需要可定制的系统解决方案，主要通过核心组件数据采集器、太阳能供电组件、安装组件、植物探头等连接工作，可以进行对不同植物、植物不同部位、不同环境植物同时多点或单点进行连续生育期或时间段的监测，为探知植物全生育期内不同部位的生理变化提供数据支持，实现更多参数更灵活的长期、连续监测方案，适应个性化的研究需要。

测量参数：可 24h 连续监测：叶绿素荧光参数：F<sub>0</sub>, F<sub>m</sub>, F, F<sub>m</sub>' , F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, ΔF/F<sub>m</sub>' ,



qP, qL, qN, NPQ, Y(NPQ), Y(NO), ETR, PAR 和温度等。还可选配植物生理及环境因子传感器监测：茎流、茎杆和果实生长、叶片温度、光辐射、空气温湿度、土壤水分和温度等。

产地：澳大利亚 DataTaker

## 2.5 藻类光合作用测量解决方案

适用范围：适合于叶绿体悬浮液、微藻、大型海藻、沉水植物、珊瑚等水生生物的研究。

方案特点：可测定液体样品，或可在水下测定。部分仪器可兼顾液体样品和叶片样品。

仪器选型既有高端深入研究型号也有基础调查型号，可满足多种不同研究需要。

仪器选型：

- 水样荧光仪——Water-PAM



特点：适合野外自然水体原位测量，也可测定实验室培养的微藻样品的光合作用（叶绿素荧光诱导加淬灭分析、光响应曲线等），也可测量总叶绿素 a 含量。除了测浮游植物外，可扩展探头测量附着藻类或大型藻类。除了取水样到样品杯中测量外，可扩展探头进行水下原位、连续测量，特别适合于连续监测海洋、湖泊、水库、河流等水体的叶绿素含量以及光合活性。

测量参数： $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F$ 、 $F_m'$ 、 $\Delta F/F_m'$ 、 $F_0'$ 、qP、qN、NPQ、rETR 和 PAR，可测定快速光响应曲线（RLC）、荧光诱导动力学曲线进行淬灭分析，可测量总叶绿素 a 含量。

产地：德国 WALZ

- 浮游植物分类荧光仪——PHYTO-PAM-II



特点：新的紧凑型设计的高端浮游植物光合研究设备 PHYTO-PAM-II 融合了前期多款产品的优点，在多激发波长调制叶绿素荧光仪——Multi-Color-PAM 的基础上，灵敏度更高，可以测定稀薄的自然水体中的浮游植物叶绿素荧光。通过先进的多波长分析技术可检测浓度低至 0.5  $\mu\text{g}/\text{l}$  悬浮样品的叶绿素荧光，包括慢相和快相（Kautsky 效应，O-II 荧光上升），可根据浮游植物主要色素类型对四种藻（绿藻，硅藻，隐藻，蓝藻）进行实时在线分类测定。适合高端深入研究应用。

测量参数：叶绿素荧光参数同 Multi-Color-PAM，可测定总叶绿素 a 含量及四种藻（绿藻，硅藻，隐藻，蓝藻）的叶绿素 a 含量。

产地：德国 WALZ

● 水下调制荧光仪——DIVING-PAM



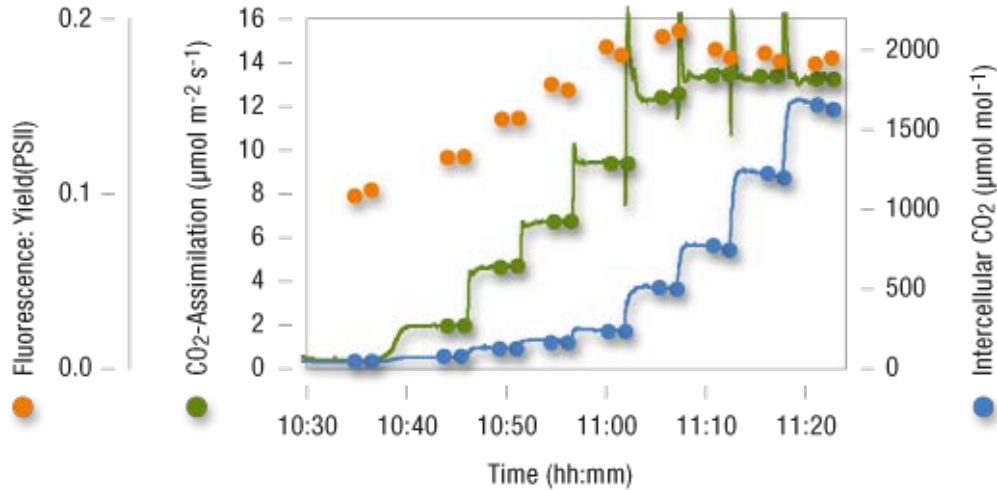
特点：荧光测量功能与 MINI-PAM-II 类似。仪器为全防水设计，水陆两用。可浸泡入水中测定，耐受 50 m 水压。是沉水植物、大型海藻、珊瑚等原位测量的必备仪器。也可在地面上使用，测量高等植物。

测量参数： $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F$ ,  $F_m'$ ,  $F_0'$ ,  $F_v/F_m$ ,  $Y(II) = \Delta F/F_m'$ ,  $qP$ ,  $qL$ ,  $qN$ ,  $NPQ$ ,  $Y(NPQ)$ ,  $Y(NO)$ ,  $rETR$ ,  $PAR$ 、水深和温度等，可测定慢速荧光诱导动力学曲线和快速光曲线（RLC）等。

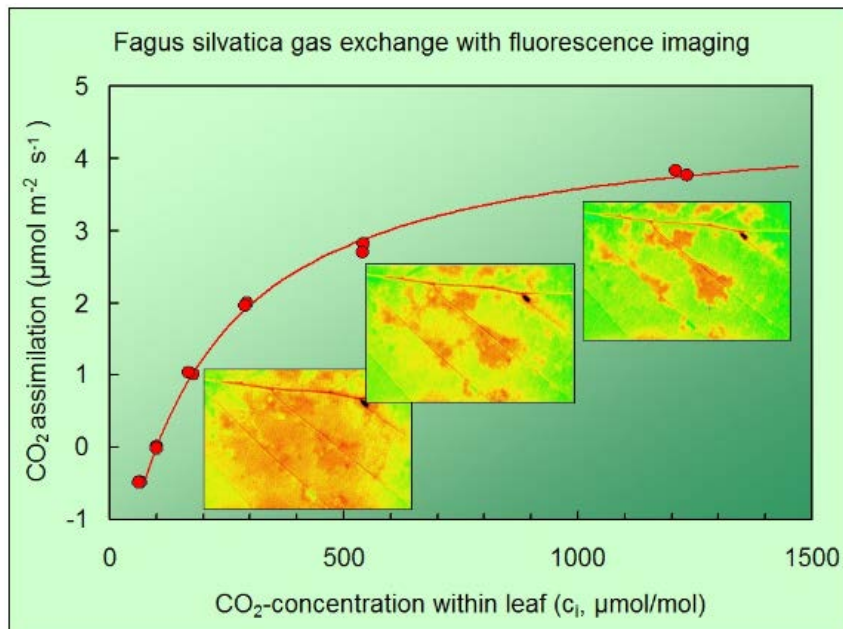
产地：德国 WALZ

### 3 应用实例

#### 3.1 光合荧光同步测量

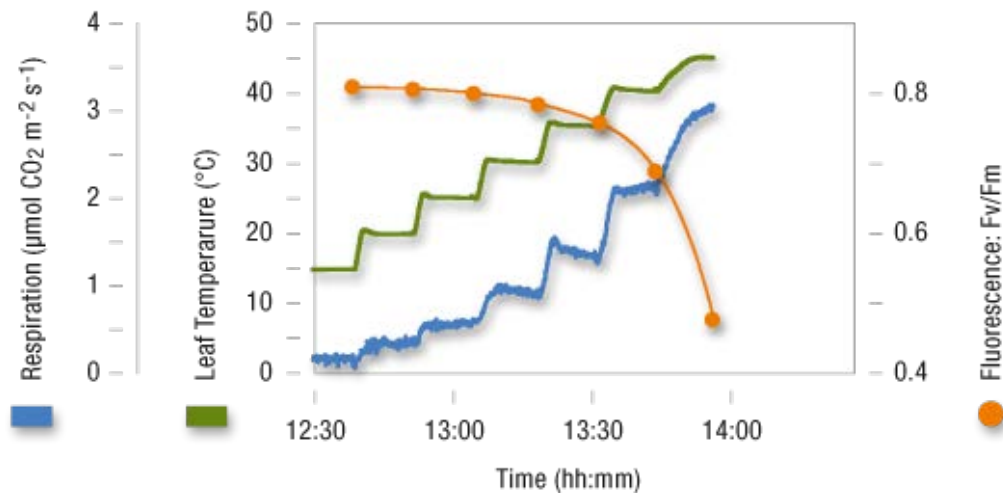


CO<sub>2</sub>同化速率、胞间二氧化碳浓度与 Yield (PSII) 的同步测定 CO<sub>2</sub>响应曲线。可以注意到，在高 CO<sub>2</sub>浓度下 Yield (PSII) 开始出现下降趋势，但 CO<sub>2</sub>同化速率并未出现这一变化。



通过 GFS-Imaging 同步测量 CO<sub>2</sub>气体交换与叶绿素荧光成像可得到，荧光成像的 CO<sub>2</sub> 响应曲线。从图中可以看到叶片部分区域对 CO<sub>2</sub>的浓度变化不敏感，存在光合作用的异质性。荧光成像可以非常直观地定位和展现这些异常区域并对差异程度进行定量描述。如需进一步探究这些异常部位的发生机制，可借助 GFS-Dual 同步测量 CO<sub>2</sub> 气体交换、P700 与叶绿素

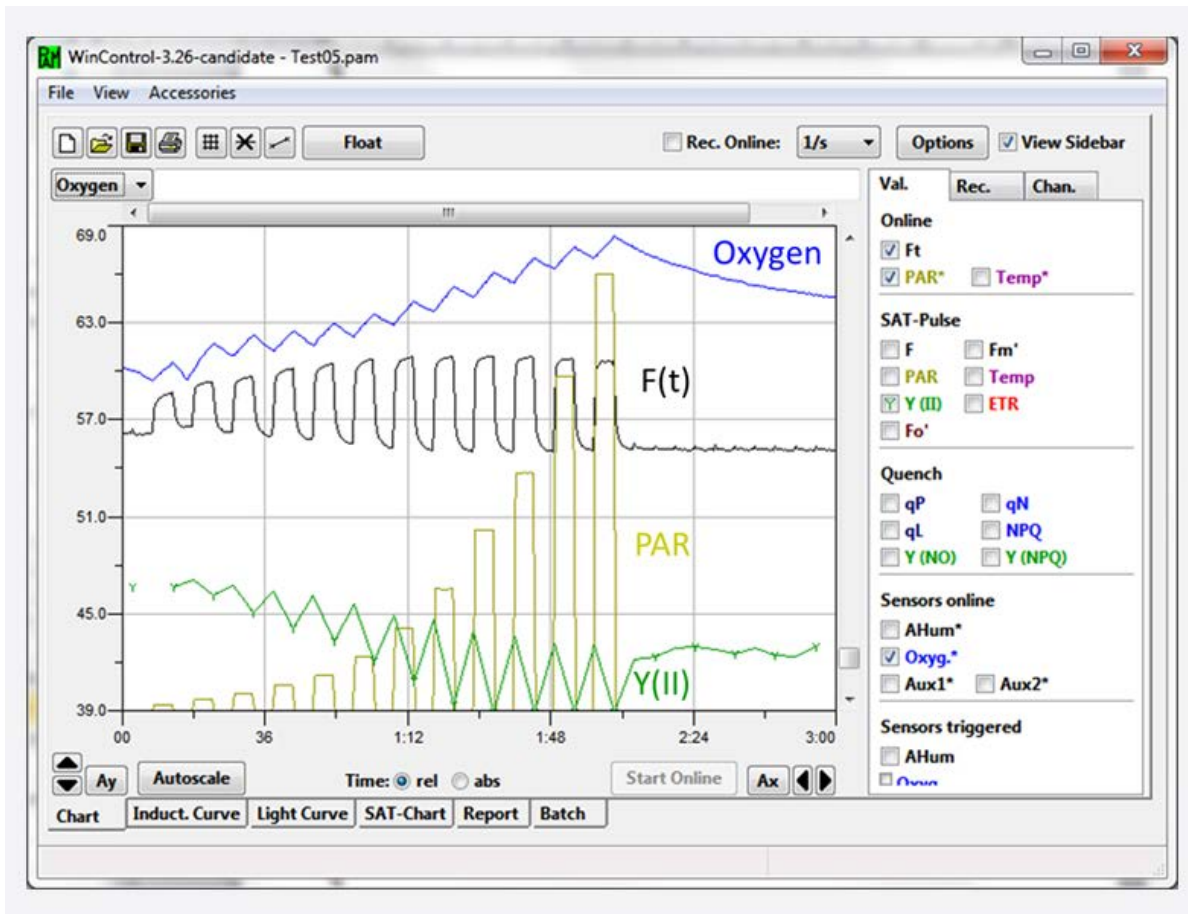
荧光，看一下叶片中这些异常部位的 P700 的氧化还原动力学、PSI 的光下实际光合量子产量  $Y(I)$ 、PSI 的电子传递速率  $ETR(I)$ 、PSI 供体侧和受体侧的信息  $Y(ND)$  和  $Y(NA)$ 、质体醌 PQ 库的大小等光系统 I 相关运转情况信息，以及类囊体膜的跨膜电位  $\Delta\psi$ 、跨膜质子浓度梯度差  $\Delta pH$ 、质子动力势  $pmf$ 、叶黄素循环、ATP 酶的  $H^+$  通透性、 $H^+$  流速等光合膜能量运转等相关信息，来进一步阐明这种光合变化的内在机理。



烟草叶片暗呼吸速率及  $F_v/F_m$  随温度的变化。从图中可以看到，随着温度的上升，叶片的暗呼吸速率持续升高，当温度超过  $30^{\circ}\text{C}$  以后， $F_v/F_m$  开始明显降低。

所用仪器：GFS-3000 及联用的 PAM 荧光仪

### 3.2 同步测量叶绿素荧光与 O<sub>2</sub> 浓度



上图为同步测定蓝藻悬浮液的叶绿素荧光和氧浓度的屏幕截图。其中蓝线为氧浓度，黑线为实时荧光信号，黄线为光强，绿线为实际光化学效率。

所用仪器：Mini-PAM-II

### 3.3 在多云天气里测定荧光



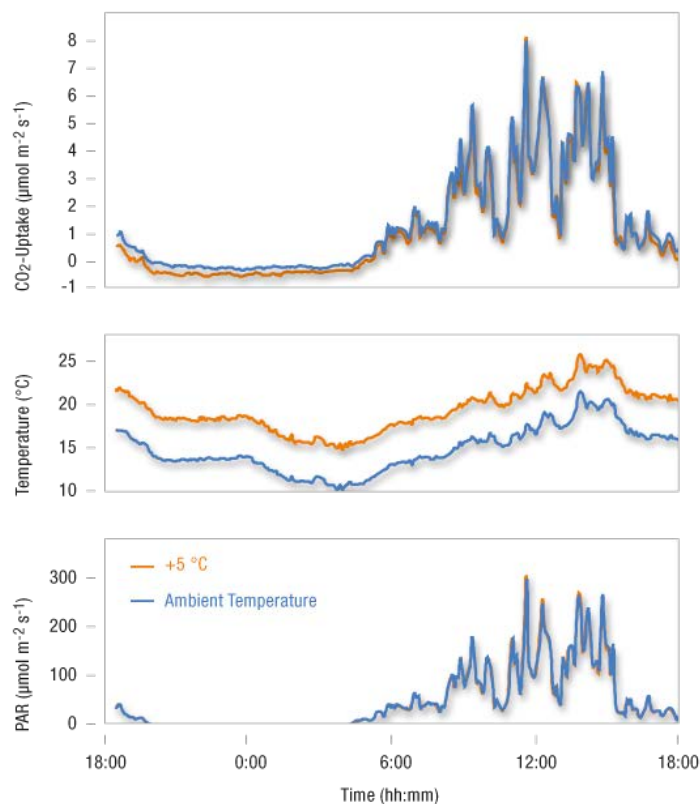
本实验在一个多云天气里的测定。上图横轴为时间，纵轴橘色为 Yield，蓝色为 PAR。可以看到，在多云时，PAR 会发生剧烈波动，Yield 也随之发生相应的大幅波动。下图是将上图中同样的数据转化为另一种体现形式。横坐标为 PAR，纵坐标为 ETR（可由 MINI-PAM-II 自动计算得到）。图中蓝线根据 Jassby and Platt (1976, Limnol Oceanogr 21: 540-547) 的模型拟合而来，可得到最大电子传递速率  $ETR_{max}$ ，初始斜率  $\alpha$ ，半饱和光强  $I_k$  等拟合参数。

所用仪器：MINI-PAM-II

### 3.4 模拟研究全球变暖对光合的影响



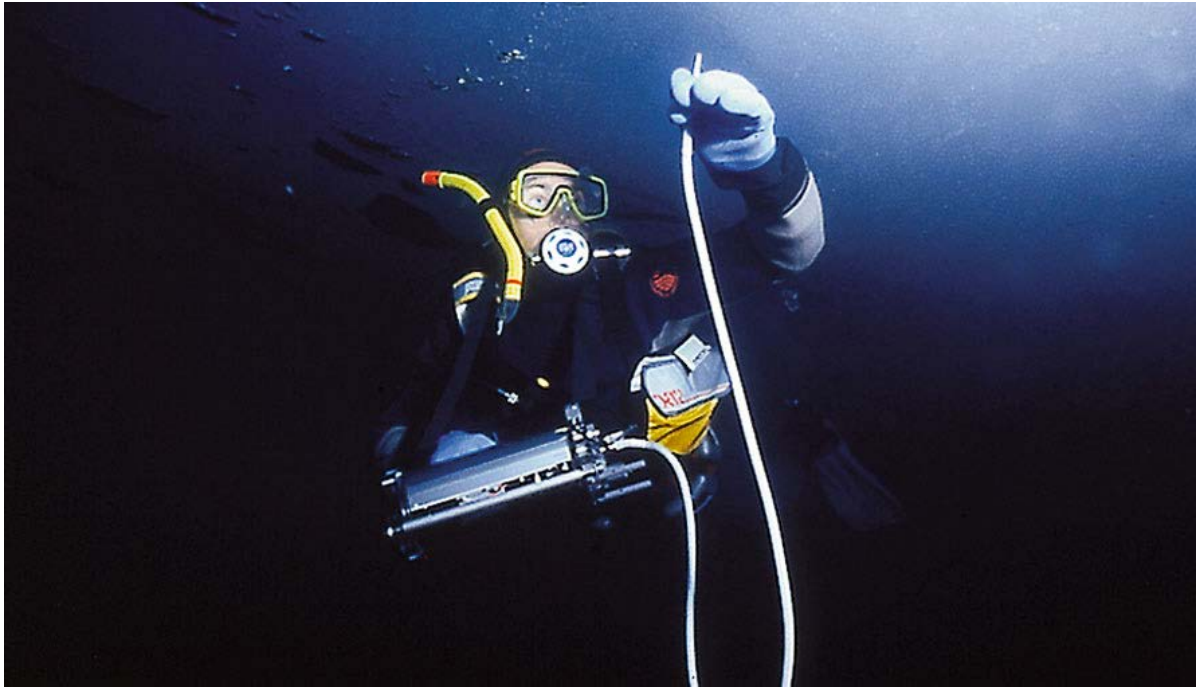
除叶室温度传感器外，GFS-3000 独有的环境空气温度传感器和控温模块赋予了其强大且多样的温度控制功能。除了可设置固定温度外，可以实现叶室温度跟随环境温度变化，或叶室温度与环境温度呈特定温差。上图为两台 GFS-3000 做控温实验。其中一台叶室温度跟随环境温度，另一台叶室温度跟随环境温度+5℃。下图为测量结果：



从图中可以看出，夜间增温叶片的暗呼吸速率增加。在低光强下，增温叶片的光合速率也低于未增温叶片。

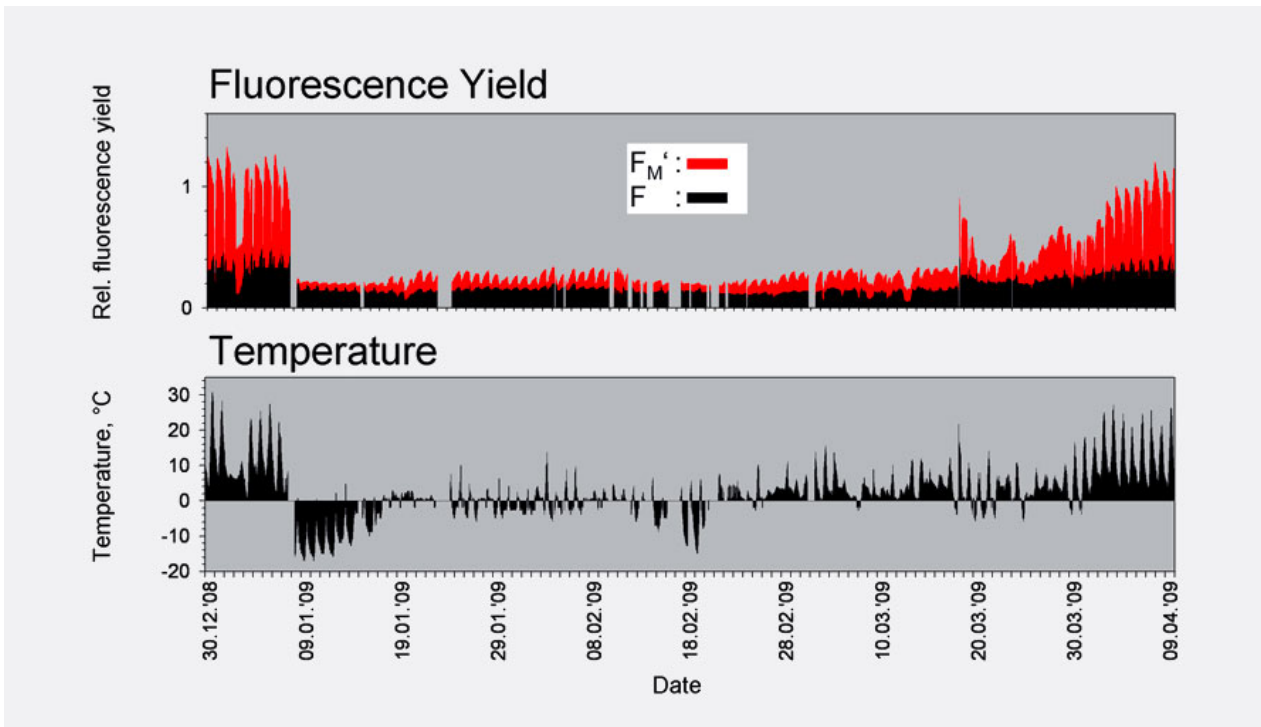


### 3.5 极地海洋研究



所用仪器：Diving-PAM

### 3.6 极端环境下的荧光连续监测

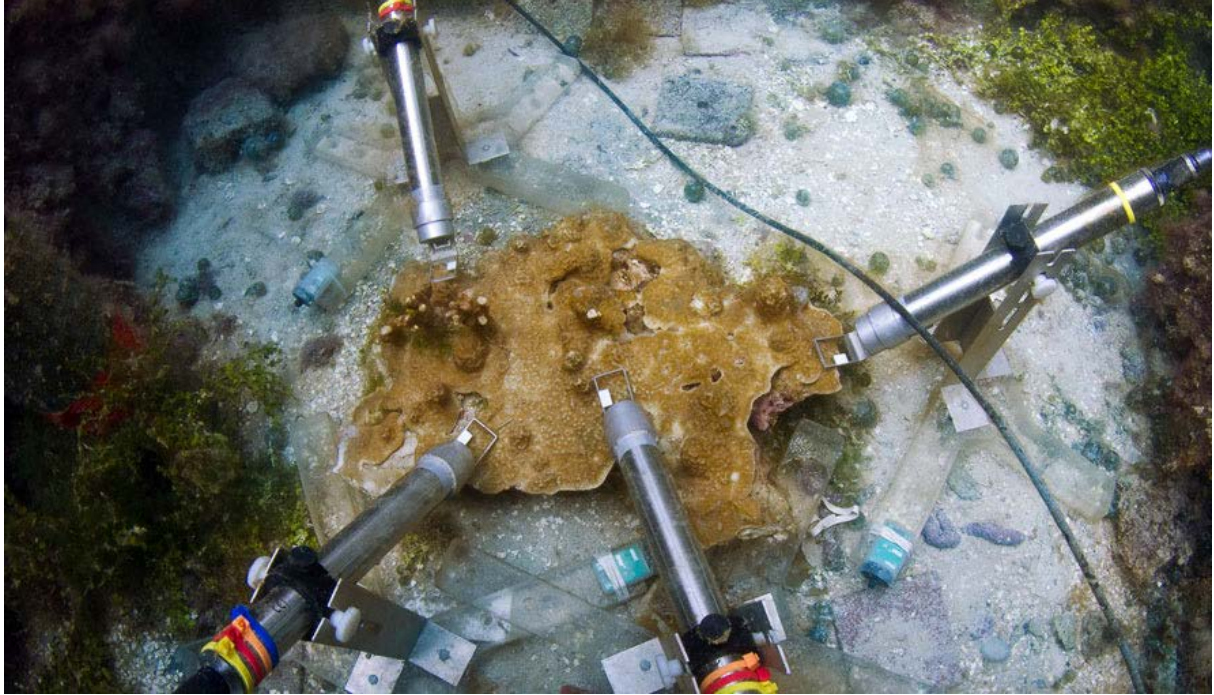


低温环境下对万年青叶片的连续监测数据。





科学家在极地科考中监测苔藓地衣的叶绿素荧光



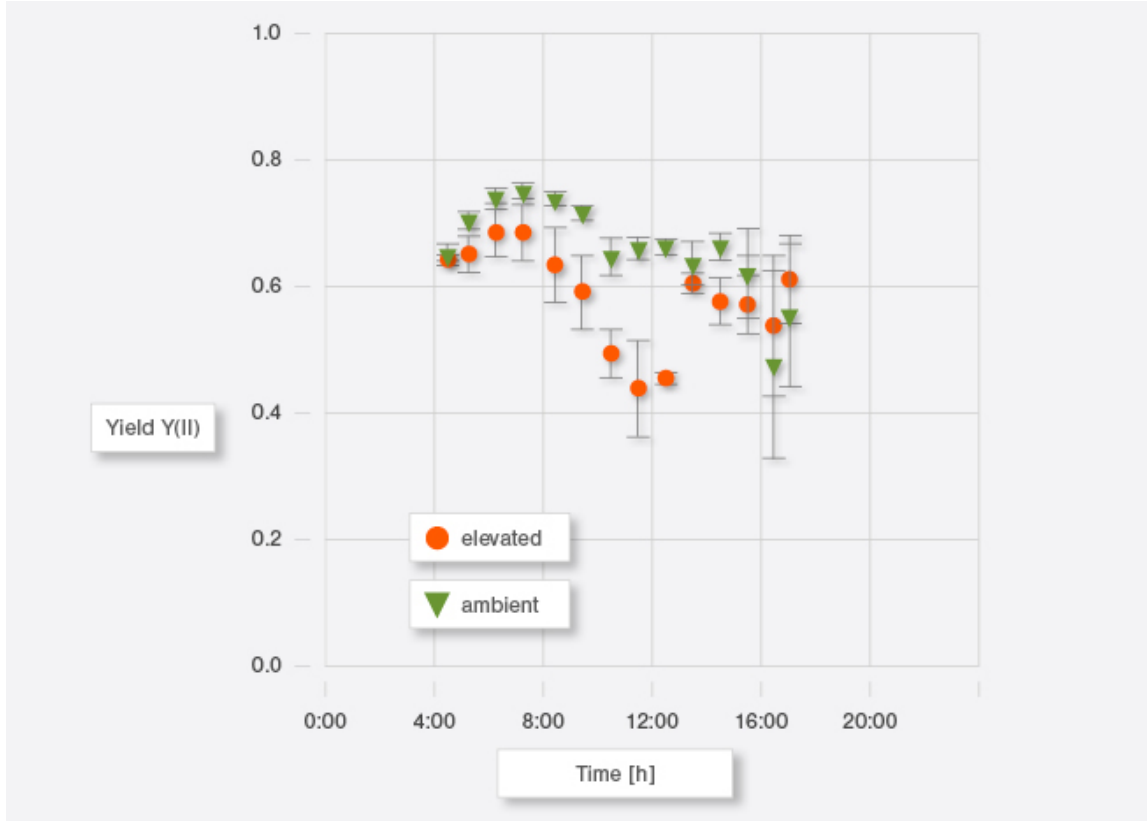
对海底珊瑚进行长期连续监测。

所用仪器：Monitoring-PAM

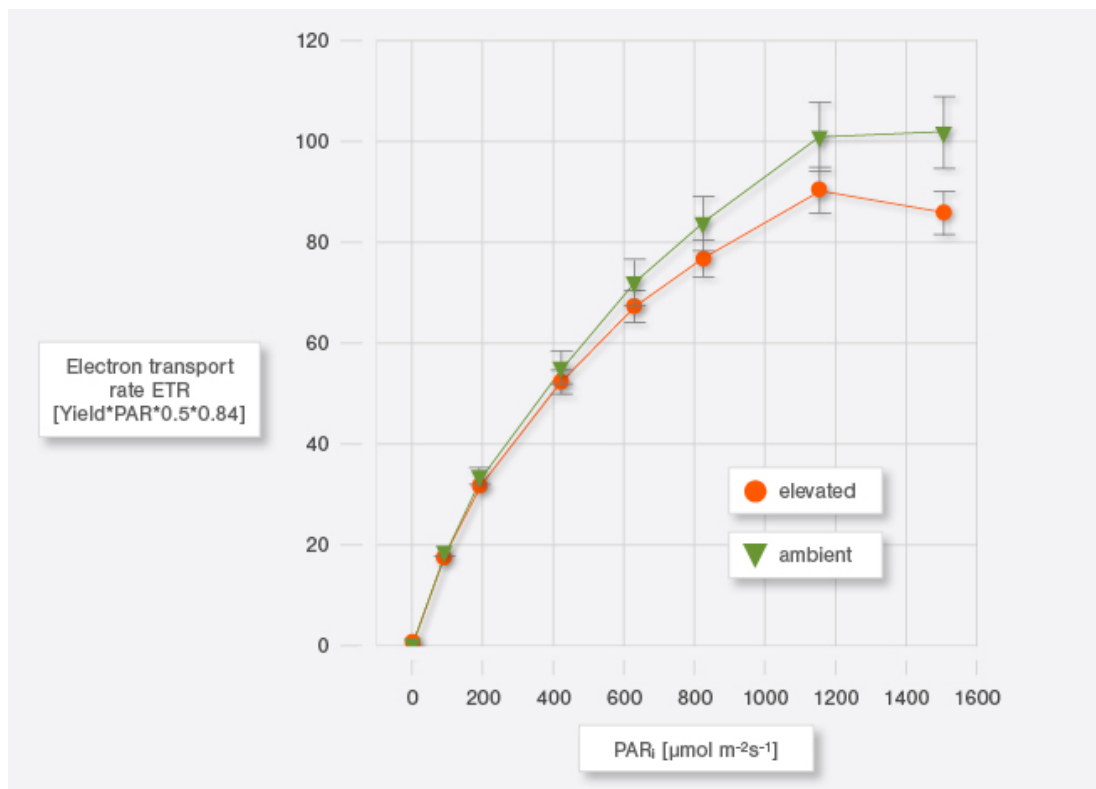
### 3.7 自由大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高实验



通过自由大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高实验可以帮助科学家了解未来地球大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高对生命活动的影响。左图为位于德国盖森海姆的 FACE 设施中的 Monitoring-PAM 的探头。右图为 CO<sub>2</sub> 释放装置。以下为部分研究结果：

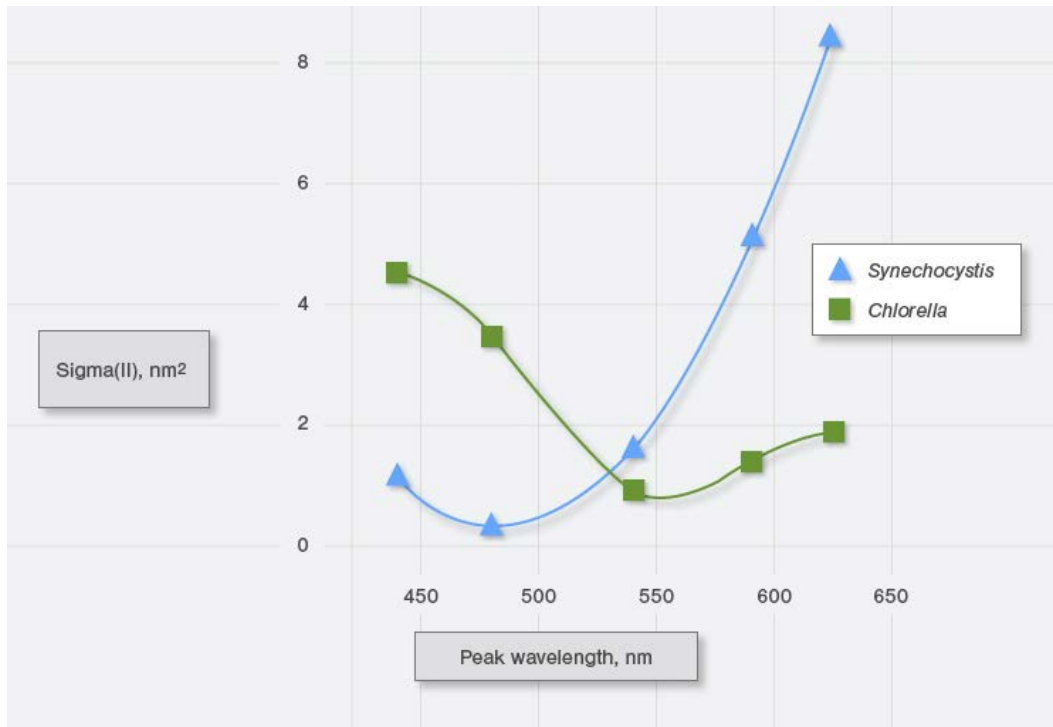


上图为 14 天日变化数据的平均值。可见 elevated 组上午到中午的 Yield 显著低于对照，特别是在中午发生了严重的下降。

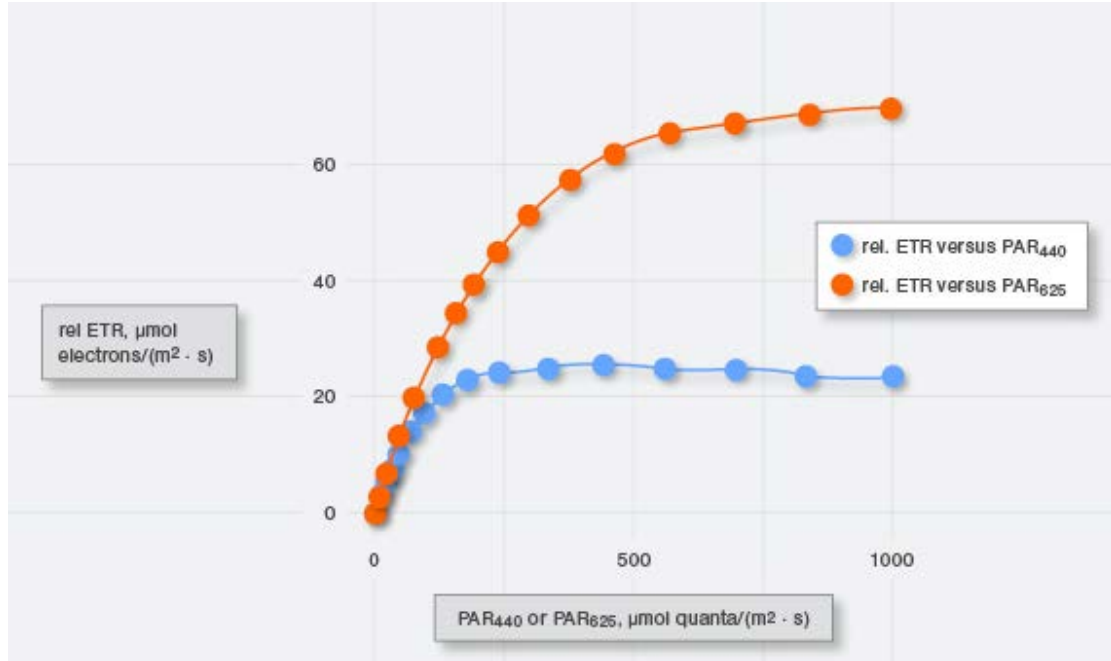


上图为测得的快速光曲线数据。可见 elevated 组在高光强下的电子传递速率显著降低。

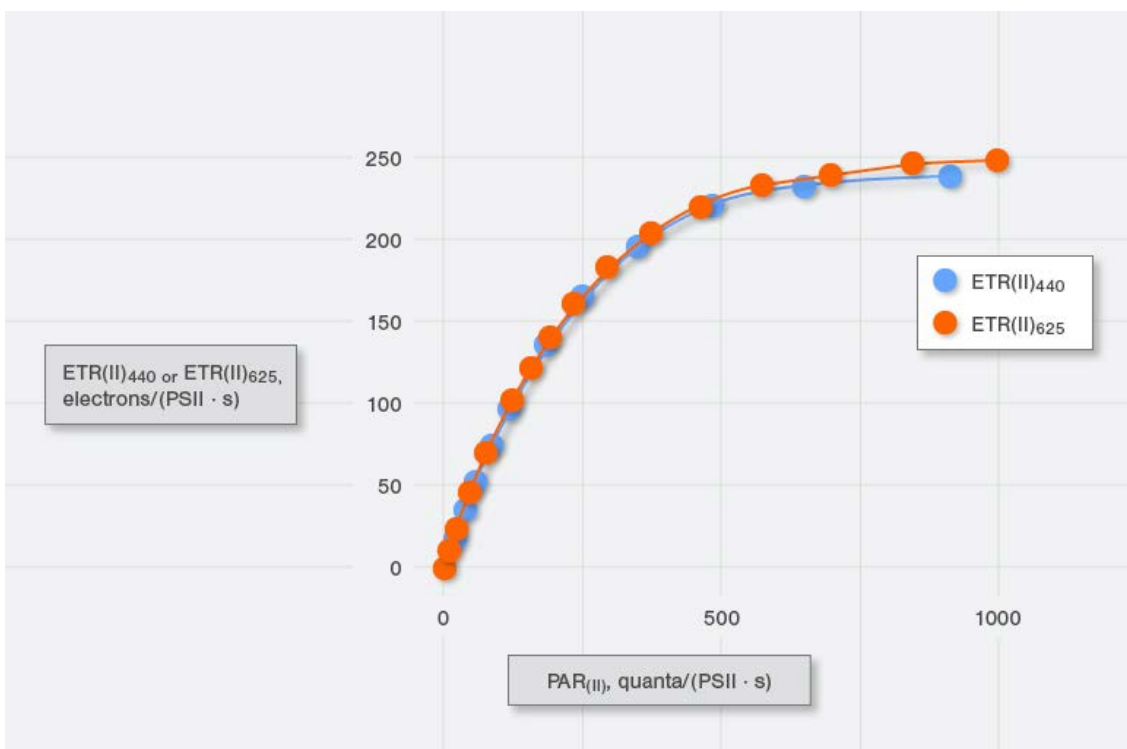
### 3.8 不同光质下绝对电子传递速率的测定



植物对不同波长光的吸收能力是不同的，例如蓝藻对于红光的吸收能力要远远高于蓝光。借助 Multi-Color-PAM 多种光质的测量功能可以帮助我们定量描述植物对不同波长光的吸收情况。上图为一种绿藻和蓝藻。其中纵坐标 Sigma (II) 是 PSII 的捕光截面积，单位为  $\text{nm}^2$ 。该参数是借由 Multi-Color-PAM 或 Phyto-PAM-II 的 O-I1 相荧光快速上升动力学曲线拟合计算而来。可以看出同一种藻对不同波长光的吸收能力有很大差异，不同藻类的光谱曲线也是大相径庭。



上图为小球藻在蓝光和红光下测得的快速光响应曲线。相对电子传递速率 rel. ETR 的吸光系数均采用默认的 0.84 计算。但根据前面的数据我们已经很明确地知道，红光和蓝光的吸光系数是不同的，如果用相同的默认值来计算，得到的结果可能包含巨大的误差，导致我们对数据错误的理解。也就是说，从数据上看，ETR 在红光下远高于蓝光下，但这一数据可能无法准确地反映真实情况。



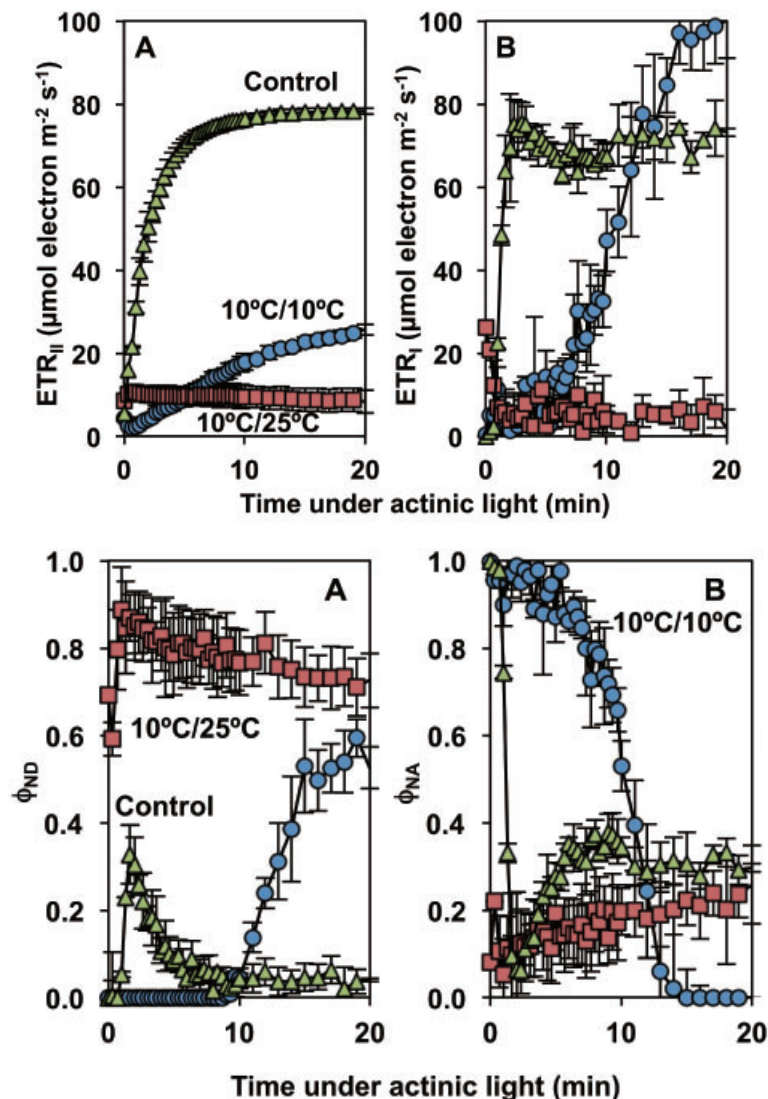
由于可以精确地测定 PSII 对不同光质的捕光截面积  $\Sigma_{II}$ ，Multi-Color-PAM 或 Phyto-PAM-II 可直接将传统的入射光强 PAR 和相对电子传递速率 rel. ETR 转化为更为精

确的绝对光强 PAR (II), 单位为 quanta/(PSII · s) 及绝对电子传递速率 ETR (II), 单位为 electrons/(PSII · s)。计算过程中, 440 和 625nm 对应的 Sigma (II) 值分别为 4.547 和 1.669。从上图可以看到, 经转换后, 两条曲线高度吻合, 仅在高光强下蓝光略低于红光。进一步的研究表明 (数据未列出), 这一微小差异是真实存在的。较短的波长的蓝光包含更高的能量, 因此才强蓝光照下, 样品发生了轻微的光抑制。这也从另一个角度证实了这种测量方式的高度精确。

所用仪器: Multi-Color-PAM 或 Phyto-PAM-II

### 3.9 叶绿素荧光、P700、P515/535 同步测量

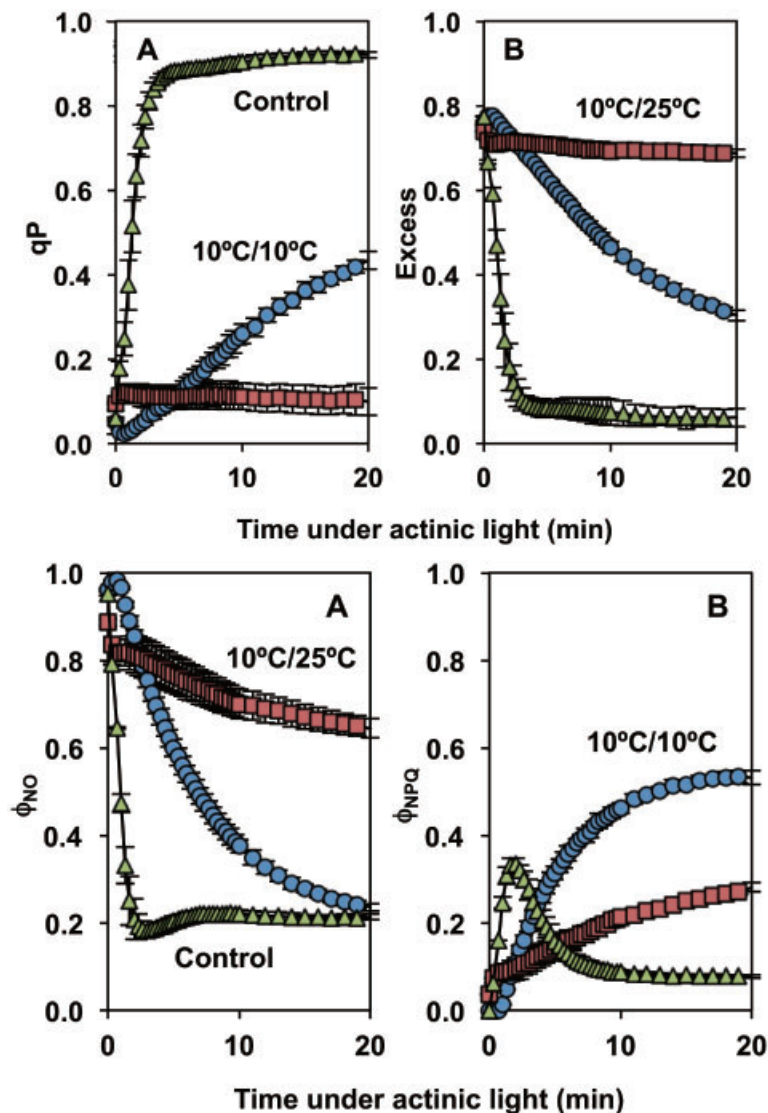
科学家在研究低温对水稻的影响时发现, 如果在低温时对根系保暖, 叶片会受到更为严重的损伤。研究人员通过 Dual-PAM-100 的叶绿素荧光、P700、P515/535 模块对材料进行了一系列测量, 揭示了其内在机理。





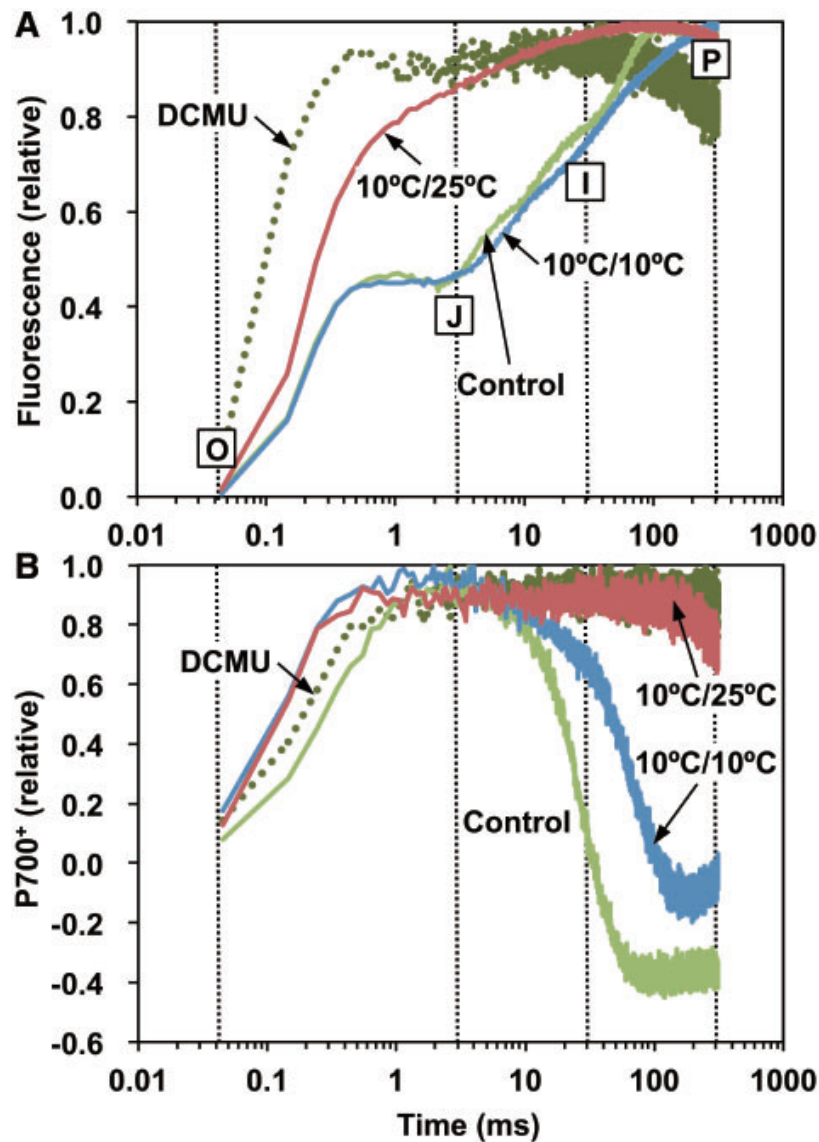
Dual-PAM-100 可以同时获得 PSII 和 PSI 两个光系统的运转情况。从上图中可以看出，根系保暖的水稻叶片（10°C/25°C）光系统 II 的电子传递速率（ETR<sub>II</sub>）和光系统 I 的电子传递速率（ETR<sub>I</sub>）均受到最为严重的抑制，但通体低温的水稻（10°C/10°C）ETR<sub>I</sub> 却明显升高，表明围绕 PSI 的环式电子传递有所增加，这是植物在逆境下光保护的重要机制，但在根系保暖的叶片未观察到这一机制。

Dual-PAM-100 还可以获得 PSI 供体侧和受体侧的信息。根系保暖的叶片 PSI 供体侧的限制（ $\phi_{ND}$ ）大大增加，但 PSI 受体侧的限制（ $\phi_{NA}$ ）却没有增加，表明根系保暖的叶片的电子传递受抑制很可能是由 PSI 的供体侧引起的。进一步的测定证实了这一点。

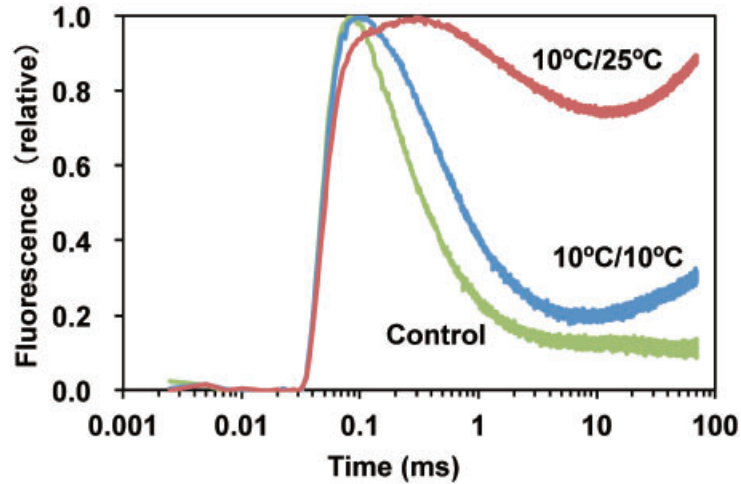


Dual-PAM-100 也可测定常规叶绿素荧光参数，如光化学淬灭系数  $qP$ ，过剩光能 Excess，非调节性能量耗散  $\phi_{NO}$  和调节性能量耗散  $\phi_{NPQ}$ 。从上图可以看到，根系保暖的水稻叶片（10°C/25°C）的过剩光能 Excess 极高，且由失活反应中心引起的耗散  $\phi_{NO}$  也非常高，表

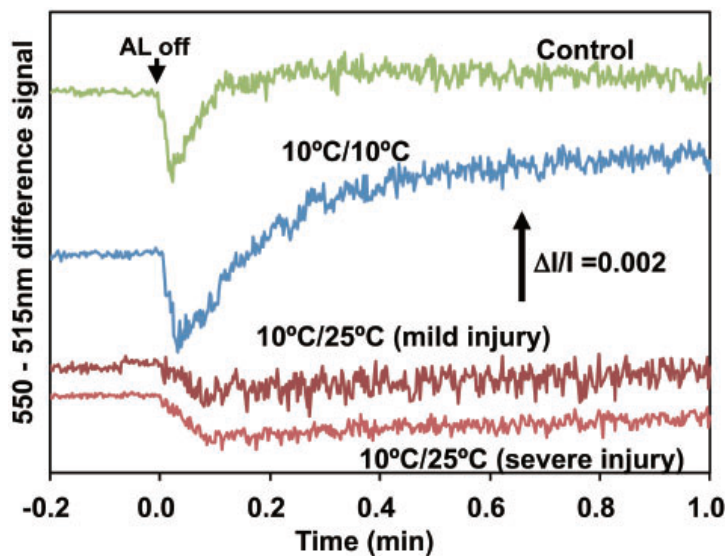
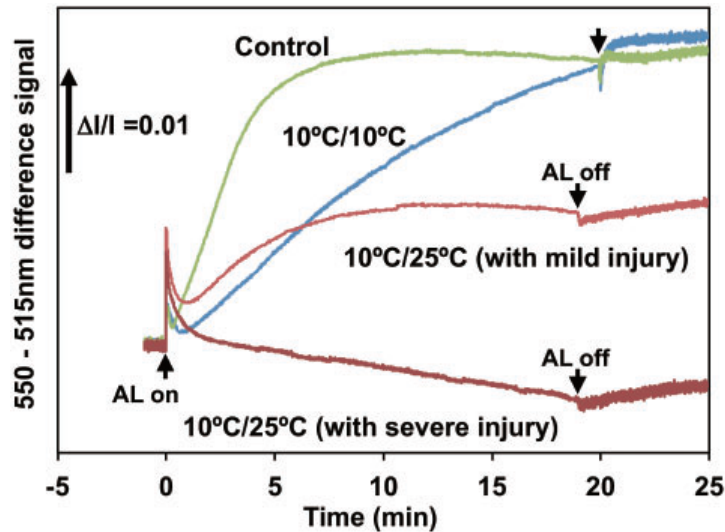
明其过剩光能耗散机制完全没有启动，导致了大量的 PSII 反应中心处于没有功能的失活状态。



快相荧光可以获得原初光化学反应的信息。该功能在 Dual-PAM-100、PAM-2500、Multi-Color-PAM、Phyto-PAM-II 中均具备。根系保暖的水稻叶片 (10°C/25°C) 的快相荧光在 J 点上升，与 DCMU 处理的叶片很接近，表明其 QA 到 QB 的电子传递受到阻断。从 P700+ 的快相曲线中也可以看到，根系保暖的水稻叶片 (10°C/25°C) 的 P700+ 信号没有出现下降的过程，这进一步证实了 PSII 没能将电子传递给 PSI。

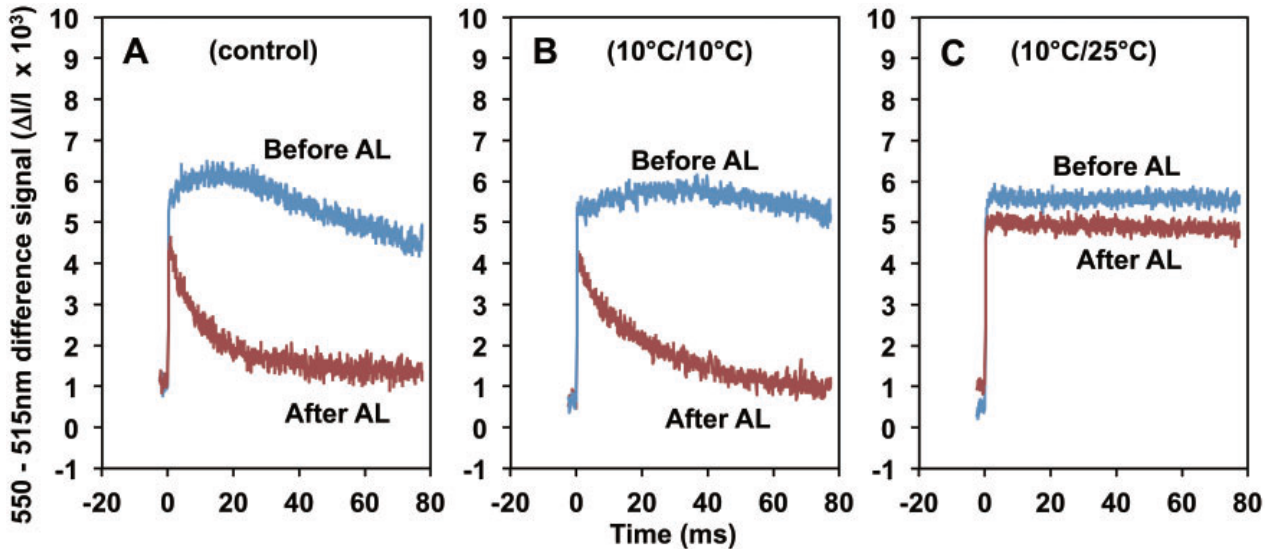


单周转快相荧光动力学曲线的测定（上图）进一步揭示了根系保暖的水稻叶片（10°C/25°C）电子传递被阻断的真正原因是 PQ 未与 QB 结合。



Dual-PAM-100 的 P515 模块可以测定出跨膜电位，跨膜  $\Delta PH$  以及叶黄素循环等丰富的

信息。从上图可以清晰地看出，根系保暖的水稻叶片（10°C/25°C）其类囊体膜  $\Delta PH$  无法正常构建，这也导致了依赖类囊体腔酸化的叶黄素循环无法启动，而后者是光保护的重要机制。这可能是叶片受到严重损伤的直接原因。



从 P515 信号的单周转快相动力学曲线可以帮助我们了解位于类囊体膜上的 ATP 酶的通透性。上图 C 可以看出，根系保暖的水稻叶片（10°C/25°C）在照光后，其 ATP 酶无法正常激活。

所用仪器：Dual-PAM-100

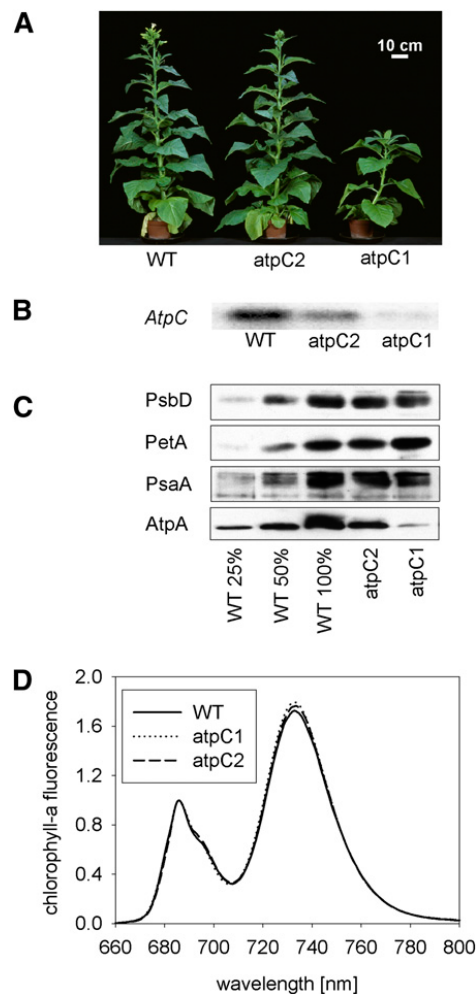
参考文献：High Root Temperature Blocks Both Linear and Cyclic Electron Transport in the Dark During Chilling of the Leaves of Rice Seedlings. Kensaku Suzuki et.al. *Plant Cell Physiol.* 52(9): 1697 - 1707 (2011)

### 3.10 利用光合荧光等多种测量手段研究 ATP 酶在光合调控过程中的作用

这是德美科学家运用光合荧光及 P700 同步测量技术在 *Plant Cell* 上发表的研究成果。研究通过分子生物学技术构建突变体，然后结合 GFS-3000 气体交换测定系统、Dual-PAM-100 双通道叶绿素荧光及 P700 测量系统以及 KLAS-100 动态 LED 阵列差示吸收光谱仪等尖端光合生理研究设备，对突变体光合作用的光反应、暗反应、电子传递、跨膜质子动力势，电子传递体的活性等进行了直接全面的测定和分析。为研究提供了可靠的直接证据支持。

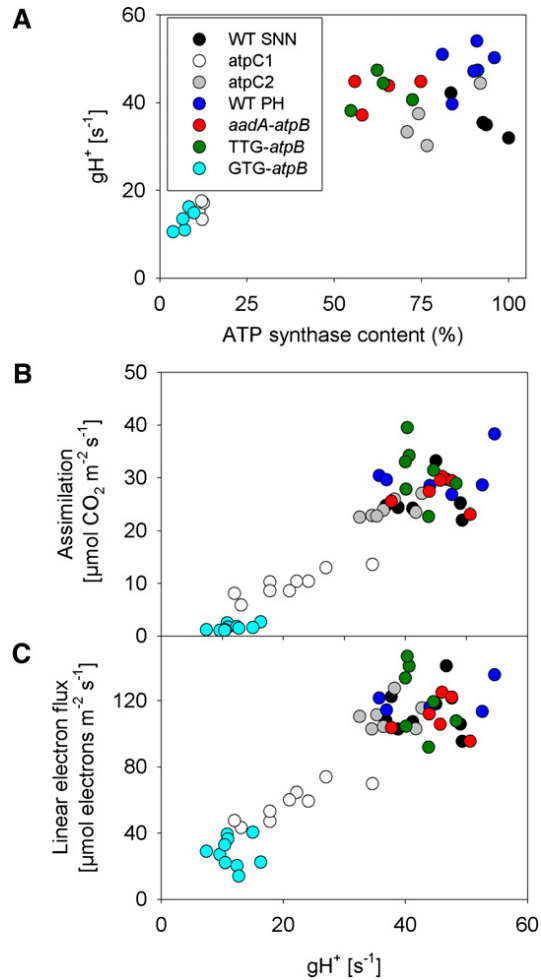
摘要：烟草能够根据合成 ATP 和 NADPH 的需要严格控制 ATP 酶和细胞色素  $b_6f$  复合体的量。虽然细胞色素  $b_6f$  复合体能够通过催化光合电子传递的限速步骤调控光合同化过程，

但同样重要的 ATP 酶在光合调控过程中的意义和作用尚不明确。该研究分别通过反义转基因技术抑制细胞核编码的  $\gamma$  亚基 (AtpC) 的合成, 同时通过叶绿体转基因技术对叶绿体中 atpB 基因 (编码  $\beta$  亚基) 的起始密码子进行点突变来抑制 ATP 酶的合成。两种策略所得转基因植株中 ATP 酶的含量可降至野生型的 100 到 <10%。结果表明, 虽然电子传递链的组分并未发生太大的改变, 但由于质体醌在细胞色素  $b_6f$  复合体处的再氧化速率下降 (光合调控) 使得线性电子传递被严重抑制。另外, 非光化学淬灭在很低的光强下即被激发, 这大大降低了  $CO_2$  同化的量子效率。研究发现其原因是稳态下跨膜质子动力势升高, 导致类囊体腔过度酸化, 从而诱导了光合调控及位于天线的激发能耗散, 最终导致了光合的下降。



AtpC 反义植株 ATP 酶含量下降发育迟缓。

- (A) 野生型 (WT)、弱 (atpC2) 和强 (atpC1) 反义株系
- (B) RNA 凝胶条带, 可见植株表型与 AtpC mRNA 受抑制程度相关。
- (C) AtpC 反义植株蛋白质凝胶条带。为便于相对比较, 依次为野生型 25 和 50% 稀释样品, 野生型样品, 弱和强反义植株样品。PSII 核心亚基 (PsbD), cyt-bf (PetA), PSI (PsaA) 及 ATP 酶 (AtpA)。
- (D) 77K 叶绿素 a 荧光发射光谱, 表明转基因植株天线结构未发生改变。

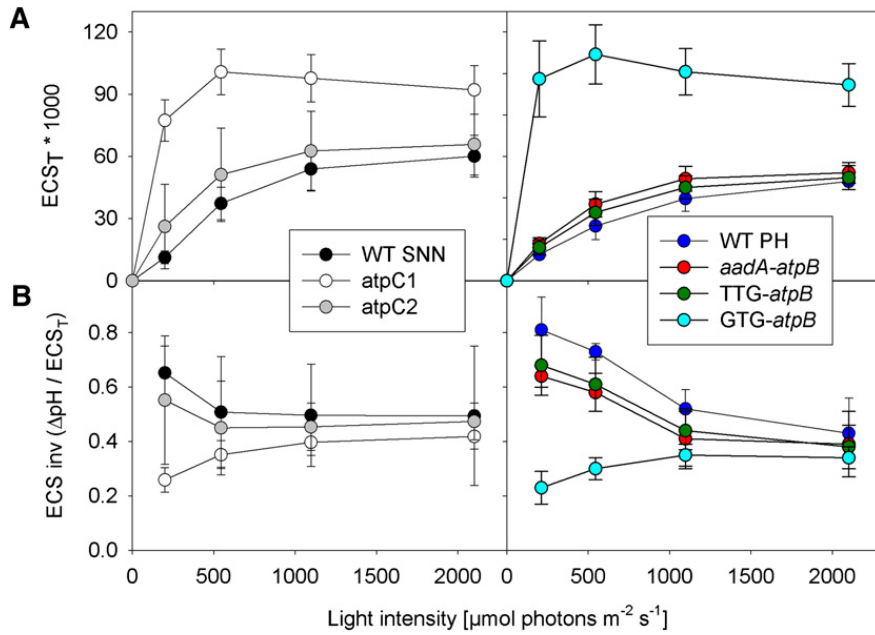


同化能力及线性电子传递受到 ATP 酶活性的限制

(A) ATP 酶活性 ( $g_{H^+}$ ) 与 ATP 酶含量的关系

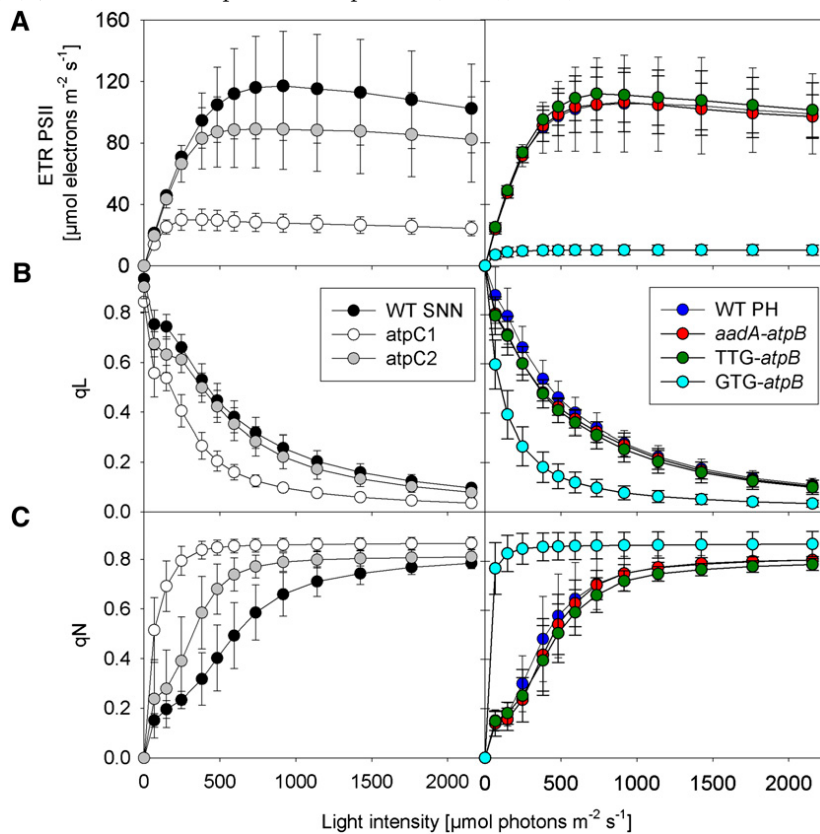
(B) 同化速率 (基于单位叶面积) 与 ATP 酶活性 ( $g_{H^+}$ ) 的关系

(C) 线性电子传递 (基于单位叶面积。通过叶绿素 a 荧光分析得到, 并经叶片吸光系数修正。) 与 ATP 酶活性 ( $g_{H^+}$ ) 的关系



ATP 酶含量下降导致稳态类囊体跨膜 PMF 升高

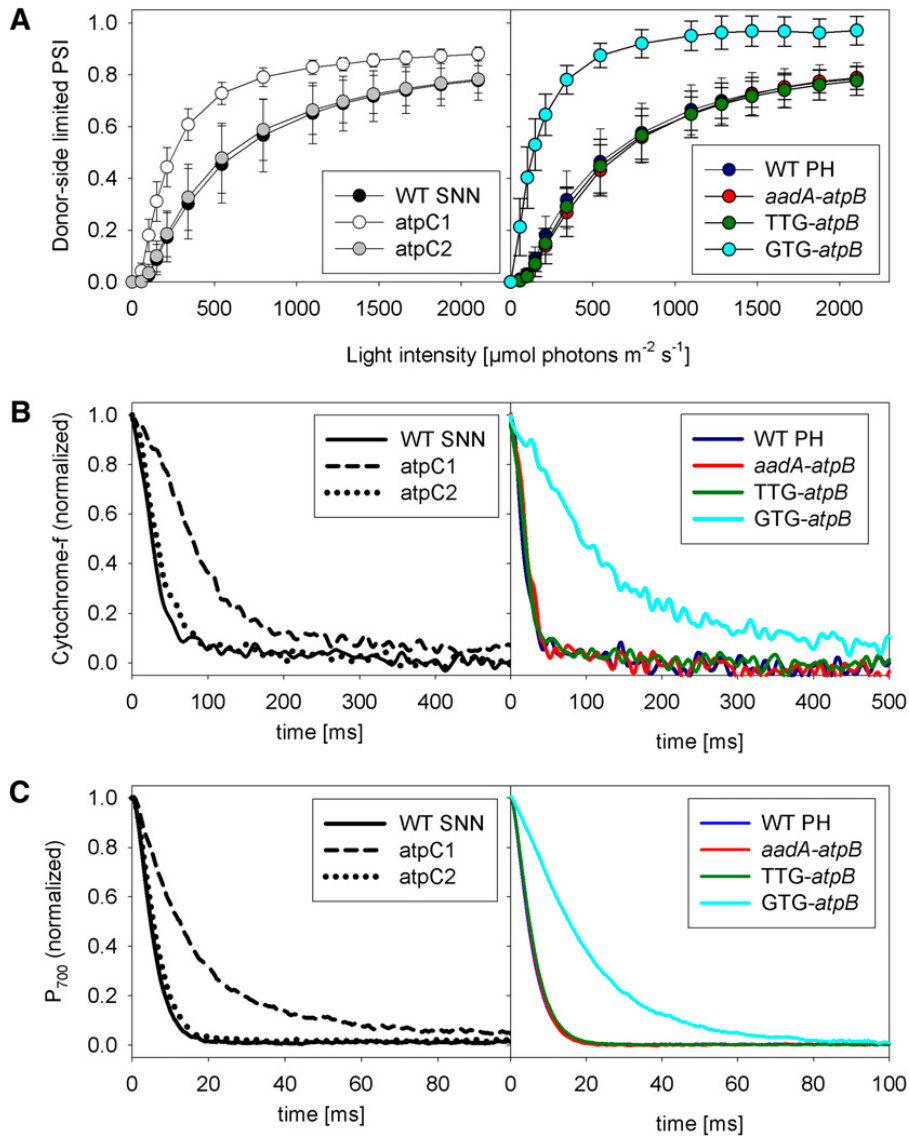
- (A) 类囊体跨膜总 pmf 对不同光强的响应，由 ECS 信号在光暗转换时的最大振幅 (ECS<sub>T</sub>) 得到。
- (B) Pmf 的组分  $\Delta\text{pH}$  和  $\Delta\Psi$  对不同光强的响应。根据慢弛预动力学中由相反离子通过类囊体膜的 ECS 的比例求得 (ECS<sub>inv</sub>)，与 ECS<sub>T</sub> 有关。在 GTG-atpB 及反义株系中，总 pmf 大幅增加，特别是在低光强下。pmf 的  $\Delta\text{pH}$  组分略有下降。



线性电子传递速率下降，PSII 受体侧过度还原，以及 ATP 酶减少加速诱导了 qN 的升

高。

- (A) 线性电子传递的光饱和曲线，通过 PSII yield 测定并经过叶片吸光系数修正。ATP 酶含量下降严重抑制了线性电子传递。
- (B) PSII 受体侧的氧化还原状态 (qL)。随着光强升高，PSII 受体侧逐渐下降。需注意强反义株系和 GTG-atpB 在低光强下即表现这种效应。
- (C) 非光化学淬灭 (qN)。反义株系和 GTG-atpB 在较低光强下 qN 即开始升高，这导致了激发能的热耗散增加，光合量子效率下降，因此光能利用率较低。



ATP 酶突变体中流经 cyt-bf 的线性电子传递受抑制

- (A) PSI 和高能链依赖光强的供体侧氧化态随光强的变化
- Cyt-f (B) 和 P<sub>700</sub> (C) 的还原速率减缓，表明光合调控导致线性电子传递受到抑制

所用仪器：

光合气体交换及叶绿素荧光同步测定：[GFS-3000](#)光合测定系统+3055FL 荧光附件

质子动力势 pmf 测定：[KLAS-100](#) 动态 LED 阵列差示吸收光谱仪

PSI 差示吸收测定：[Dual-PAM-100](#)双通道 PAM-100 测量系统



参考文献: <http://www.plantcell.org/cgi/doi/10.1105/tpc.110.079111>

如果您需要了解更多, 或有问题需要与我们交流, 请按如下方式与我们联系:

地址	邮编	电话	传真
上海总部	普陀区金沙江路 1038 号华东师大科技园 2 幢 8 层	200062 021-32555118	021-32555117
北京分公司	海淀区北三环西路 43 号青云当代大厦 1907 室	100048 010-88824075/76/77	转 605 分机
广州代表处	天河区潭村路 348 号马赛国际商务中心 2206 室	510632 020-85645707	020-85645359
成都代表处	人民南路一段 97 号现代之窗 1018 室	610016 028-86722096, 86719836	028-86721922

**高新技术: [www.zealquest.cn](http://www.zealquest.cn) 产品销售: [www.zealquest.com](http://www.zealquest.com)**

**微博: [weibo.com/zealquest](http://weibo.com/zealquest) E-mail: [sales@zealquest.com](mailto:sales@zealquest.com) [service@zealquest.com](mailto:service@zealquest.com)**

**QQ 技术讨论群: 154279317 (陆地环境应用); 222678293 (水环境应用)**

如果您需要植物表型、植物生理生态、植物基因型、植物培养、种子纯度鉴定等方面的测试服务或项目合作, 请联系:

地址	邮编	电话	传真
AgriPheno 平台	上海浦东新区沔北路 185 号 C9-1	201210 021-50199251/3/6/8	021-50199252

**网址: [www.agripheno.com](http://www.agripheno.com) E-mail: [phenotype@zealquest.com](mailto:phenotype@zealquest.com)**