

温室内 CO₂ 浓度的计算机控制 及其在估算作物光合作用中的应用

R.B.Matthews, B.Marshall, R.A.Saffell, D.Harris

摘要 本文介绍一个监测并控制五个玻璃试验温室内 CO₂ 浓度的计算机自动控制系统。在计算机控制下,通过一个 CO₂ 测定系统向每个温室输入纯 CO₂ 气体,使其内部 CO₂ 浓度与室外保持相等(CO₂ 浓度由红外气体分析仪测定)。在 CO₂ 浓度测定的间隔期间,温室所需要的 CO₂ 输入速率根据通风速率、未来的和现时的 CO₂ 浓度计算确定。通过预先用 N₂O 气体跟踪确定的风机定位状态和风速的关系计算通风率。通过放在地面上的容器内获得的碳酸盐的重量观测土壤呼吸。在其它 CO₂ 通量已确定后,用其剩余额估算作物净光合作用。该系统很可靠,且已在许多热带作物净光合作用的光响应特征曲线研究中得到应用。

一、前 言

将整片叶子或叶子的一部分装入密闭容器,通过测定其内部空气 CO₂ 浓度下降的幅度来估算净光合作用的方法,已得到一定应用(Marshall 等, 1977)。后来,有人使用能容纳整个植株的大型密闭容器,通过对各单片叶片光合作用的积分方法,估算整个植株的净光合作用(Glauert, 1983)。Lake (1966)提出建立一个能容纳生长在自然土壤上的作物群体的温室,通过对各植株性状的积分来估算冠层光合作用。Hand 等(1969)也提出一个类似的系统模型,采用一套输气管,根据室内作物所需 CO₂ 浓度按不同的时间长度向温室内输送纯 CO₂ 气体,并可

控制其输送速率。

英国一项在可控温室内研究热带作物生长的试验计划(Montieth 等, 1983)发现,由于作物光合速率加快使室内 CO₂ 浓度迅速下降。他们设计了一套向室内补充 CO₂ 的系统,发现通过确定室内 CO₂ 的输入、输出通量,可用该系统估算作物冠层的光合速率。这样就使测定作物光合作用的工作在很短时间内(1小时)完成,比常规生长分析法(1周)快得多。以往已有不少有关这方面的研究报告,这些报告介绍了可控环境系统的原理和设计(Montieth 等, 1983),所采用的微处理机控制(Saffell 等, 1986)以及温度(Saffell 等, 1983)和湿度(Matthews 等, 1986)的控制。

二、过 程

1. CO₂平衡

Lake(1966)指出, 决定系统内CO₂平衡的各分量主要是: 通风交换、CO₂输入、土壤呼吸、光合作用及内部CO₂浓度的变化。其中通风的影响很难测定, 从而可给CO₂平衡的估算带来较大误差, 但是, 若系统内外CO₂浓度差较小, 则其误差将会减小, 因而在设计控制系统时, 通常尽可能地使室内外CO₂浓度保持相近。

设室内CO₂浓度经搅拌后(风扇)理想地呈均匀分布, 则其CO₂平衡方程为:

$$I + S - P - VN(C_i - C_e) - \frac{dC_i}{dt} = 0 \quad (1)$$

其中 I 为人为向室内输送CO₂气体的速率(gCO₂/h), S 是土壤呼吸速率(gCO₂/h), P 是光合作用消耗速率(gCO₂/h), V 是温室容积(120 m³), N 是通风交换CO₂通量(AC/h, AC—变化量), C_i 和 C_e 分别是室内、外CO₂浓度。这些分量除 P 要通过计算得到外, 其它的均可观测。方程中未考虑人呼吸所放出的CO₂对室内CO₂平衡的影响, 这一估算较困难, 因而只有当工作人员不在室内时, 方程才能较精确地计算CO₂平衡。实际上, 由于本研究采用了规范而详细的生理测定, 因而只有周末才不存在这种影响(即温室不受人干扰的影响)。

下面分别介绍各分量的观测或计算方法。

1) 土壤呼吸 S

我们采用 Montieth 等(1965)介绍的方法测定土壤呼吸放出的CO₂通量, 即在土壤上倒放一个装有一定量碳酸盐的塑料容器, 通过观测一定时段内(通常为3天)碳酸盐重量的变化来估算 S 值。虽然 S 随温度略有变化, 但由于土壤热变化的惰性(作用), 这种变化很缓慢。本项研究设 S 在观测期间(3天内)为一恒量。

2) 通风交换率 N

向温室内输入一定量的既不会被土壤和植物吸收、也不会由它们产生的N₂O气体, 进行气体监测跟踪试验。通过监测该气体浓度的衰减过程估算 N 值的变化 (Goedhare, 1984)。采用 ADC Mk II 225 系列 N₂O 红外气体分析仪(IRGA)测定 N₂O 浓度。 N 的算式为:

$$N = \frac{-1}{t_1 - t_0} \ln \frac{\phi_{t_1} - \phi_0}{\phi_{t_0} - \phi_0} \quad (2)$$

其中 ϕ_{t_0} 、 ϕ_{t_1} 分别是监测开始和结束时的 IRGA 值, ϕ_0 是自然空气中游离的 N₂O 的 IRGA 值, t_0 和 t_1 分别是监测开始和结束的时刻。

Marshall (1987) 详细地研究了这个方法, 他发现, 这些温室内的 N 值主要取决于通风机的状态和风速, 相比之下, 其它因素, 如风向及室内外温差产生的浮力的影响都很小。为了免除直接测定通风率所必需的设备, 我们通过一系列风机定位变化, 找出 N 与风速的关系式为:

$$N = 2.33 + 0.14p + 0.13u + 0.12pu$$

其中 p 是风机定位时刻(从完全关闭状态中开机, 以秒表示), u 是风速(m/s), 这样便可估算出 N 值。

3) 室外环境 CO₂ 浓度的测定

取室外与温室风机等高处的空气样本, 用 ADC Mk II 255 CO₂-IRGA 分析仪进行测定, 以每分钟间隔记录分析结果, 得到室外 CO₂ 浓度(C_e)。在每小时的前两分钟关闭室外气流, 让 IRGA 自检, 然后将已通过碳酸盐容器吸收其全部 CO₂ 的气流输入 IRGA 内, 待一分钟后, 仪器保持稳定时, 其读数作为 CO₂ 浓度的零点校准。再打开气流开关, 使已知 CO₂ 浓度(400 ppm)的空气通过 IRGA, 再过一分钟后作进一步校准。用此过程对 IRGA 校准更新后, 将气流开关转回到室外常规的空气 CO₂ 浓度监测状态。

4) 室内 CO₂ 浓度的测定

室内用于分析的空气样本是每小时一次从安装在温室中心横梁下面东西向的一套输

气管中通过的大气中抽取的。导管为直径 8 mm 的铜管，上面每隔 23 cm 钻一个直径 1 mm 的小孔，空气以 10 l/min (升/分) 的速度由小孔进入管内，并输入到样本变换器中。每根导管内的气流流速恒为 3.3 m/s，经过 100 m 长(从最远的温室到控制室)，一次取样时间为 30 秒钟。为防止冷凝，用一些与输气管形状类似的塑料管输送由控制室提供的水，使输气管加热到 50—60°C。气管和水管用隔热物质捆在一起，再用防水聚氯乙烯管密封，通过一个混凝土管道，使水在温室和控制室之间循环流动。

因仅有一台差分 CO₂ 分析仪，故设计了一个控制各温室的样本依次分别进入分析仪的系统(图 1)，与计算机和数据记录器一起

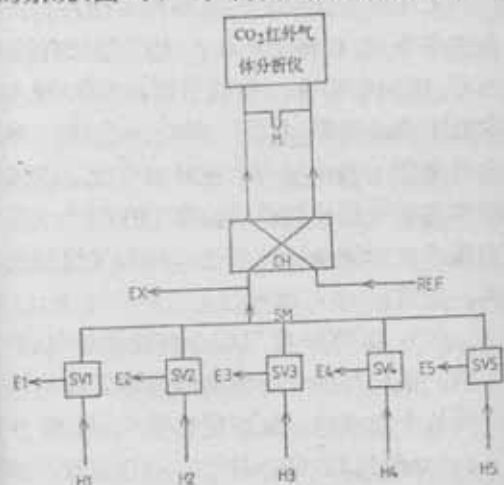


图 1 气体取样系统图示。H1—H5，温室 1—5，SV，电磁阀，E_i，出气口，SM，样本汇集管，EX，排气口，REF，标准对比气流，CH，交换器，M，气压表（用于平衡通过 IRGA 的气压），CO₂-IRGA，CO₂ 红外气体分析仪

放在控制室内。现以 1 号温室为例说明该系统的原理：操纵电磁阀(SV₁，EVP 302)改变数字输出端的数值，选定 1 号温室。借助继电器将出口 E₁ 关闭，使 1 号温室的样本进入集气管 SM 中。样本的大部分(9 l)从排气口 EX 排出，余下的 1 l 样本进入差分 CO₂-IRGA 的样本室，这样便可测定该温室内的 CO₂ 浓度 C_i 和与风机等高处的室外 CO₂ 浓度 C_a 的差值。在选定温室 30 秒后可读出 IRGA 的输出电压，并储存于计算机中。操

纵转换阀门 CH，将样本和基准线对换，再过 30 秒读第二个电压值。显然，初始电压与转换后的电压的差值等价于两个 CO₂ 浓度差。采用这一转换技术可以不用进行零点校准，从而避免出现与零点漂移类似的问题。试验发现，在每次转换后到读出下一个数据前，两次读数之间取 30 秒钟，对于气流通过 IRGA 达到稳定状态是足够的。每周用标准 CO₂ 气钢瓶和标称浓度为 300、350 和 400 ppm 的 CO₂ 气体对 IRGA 进行一次校准，校准的最大允许误差为 ±50 ppm。

当 1 号温室进行测定工作时，由 E₂—E₅ 出气口依次排出 2—5 号温室的残留样本，测定完成(共 1 分钟)后，1 号电磁阀关闭，由 E₁ 排出 1 号温室的样本，然后选定 2 号温室。

2. 作物 CO₂ 需要量

本项研究选用谷子、高粱和花生三种作物。C₄ 植物(谷子、高粱)的干物质(DM)生产速率最快，Fischer 和 Wilson(1975)指出高粱的平均生长速率是 30 g DM/m²·d (d 代表日)，若按 Nomoto 等(1969)指出的 1 g 干物质(DM)相当于 1.6 g CO₂ 计算，则约为 50 g CO₂/m²·d，若将其转换为体积单位，在标准温度和气压下(STP)为 25 l CO₂/m²·d。因每个温室内作物生长面积为 32 m²，故 5 个温室每天约需 4000 l 的 CO₂。工业用标准 CO₂ 钢瓶每个贮存 18600 l (STP 下) CO₂，也就是说，即使在最高光合速率条件下，一个新充满的 CO₂ 瓶至少使用 4 天以上(实际上还要长一点)。这里指的是生长在适宜田间条件下的作物光合率。考虑到英国日接受太阳辐射较少，加上温室建筑物的遮阴，作物光合速率不会太高。瞬间作物光合速率看来也不会高于 6 g CO₂/m²·h (Goudriaan 等，1978)，这相当于每个温室每小时(光合吸收)需要 192 g CO₂，或在 STP 下每分钟(光合吸收)需要 1.8 l CO₂。

3. CO₂ 输入速率测定及其控制

为了便于向温室输入纯 CO₂ 气，我们将

工业用压缩 CO_2 钢瓶进行两步减压, 第一步调压器将气压从 5700 kPa 降到 480 kPa, 第二步再降到 0—200 kPa 之间。试验表明, 经两步减压后, 向温室输入 CO_2 的气压以 35 kPa 为好。与上述取样系统类似, 当不需要输入 CO_2 时, 先分别将继电器控制电磁阀拨到指定的温室以切断该温室的 CO_2 供给。

为减少室内 CO_2 浓度的极端变化, CO_2 输入速率应尽量稳定, 而不应突然改变, 为此设计了一套控制向每个温室输入 CO_2 速率的闭路调控系统(图 2 a), 当气流通过电磁阀时, 用一个针形阀(GEC, 型号 B 37864/3)调控其流率(I)。该阀由一个电压为 24 伏(10 转/min)的直流步进电动机(82/765, B)带动, 电机与针形磁阀间用橡胶杆连接, 形成一个类似于离合器的系统。在气流进入温室前, 用一个容量气流计(Litre-meter)(型号: LM 25/GN)测定流率。一系列定宽脉冲输出信号, 通过数模电路加以平滑, 产生一个与 CO_2 流率达到 3.5 l/min 线性对应的输出量, 以满足温室所需要的速率。

采用以下方法确定温室所要求的流率(图 2 b): 由数模转换器(DAC)产生一个基

容量气流计的输出信号经缓冲运算放大器(741)放大, 再与经过另一个放大器(741)的 DAC 基准电压比较, 把第二个 741 运算放大器输出信号经两个三极管加以放大, 使之足以驱动电动机, 并带动针形阀到某一位置, 使 DAC 的输出电压与气流计输出的电压相等, 通过阴极反馈电阻(1 k 和 100 k 电阻)保证最小振幅波动。这样便可实现由计算机通过输出脉冲数量, 逐步调整 DAC 基准电压的升降, 改变 CO_2 的流率。

将每个 DAC/容量气流计控制电路校准为流率(l/min·V), 这样, 计算机可通过控制气流计的输出来决定 CO_2 流率, 并调整 DAC 电压, 使其与新的流率相对应。

上述气流计测定的流率是根据具有高光合速率的 C_4 植物设计的, 对于低光合速率的 C_3 植物如花生, 则通常要求 CO_2 输入速率低于启动流率(0.3 l/min)。为此, 我们在气流计上部外加一个室外空气流, 以保持流率高于气流计的启动流率(图 2 a), 采用变压或定容流量计控制这一外加气流的流率为一定值(0.5 l/min)。

CO_2 或 CO_2 -空气混合气流通过气流计后, 采用与供气系统类似的导管将其输送到每个温室内。温室顶部装有两部直径 1.5 m 的风扇(每分钟可移动与温室同体积的空气)使输入气体与室内气体既快又好地混合。

4. 软件设计

CO_2 浓度测控子程序每分钟与主程序连接一次, 为方便起见, 分四个阶段分别概述如下:

1) 室内流率的测定

该阶段主要是测定容量气流计的电压, 计算每个温室内总的空气流率。在计算 CO_2 流率时, 需扣除基础空气流率(BAFR), 若某一温室此刻没有输入 CO_2 (如电磁阀关闭时), 则流过气流计的空气流率即是该室的 BAFR。也可在每小时运行开始时, 关闭电磁阀, 停止 CO_2 输送 1 分钟, 以确定

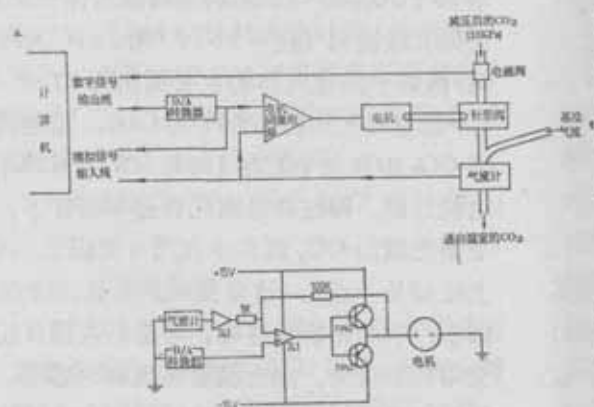


图 2 a. 温室 CO_2 浓度监测系统图示。与计算机相连的“开集器”, 数字输出线形成一个接地电路, 控制磁阀并输出脉冲到数模转换器; 模拟信号输入线由一个与计算机相联系的数字电压表测定。电动机与针形阀由橡胶杆连接。b. 由气流计和数模转换等效输出的电动机伺服电路

准电压, 该电压的升降由计算机向 DAC 发出的脉冲数加以控制(Saffell, 1983)。来自

BAFR 值, 这样校验 BAFR 的最大时间间隔为 1 小时, 而若在这一小时内某一温室处于非输入(关闭)状态, 此周期还要短一些。这种定期的校验便于估计气泵工作性能的变化。每次气流计电压测定结果都与 DAC 电压比较, 如果气流计电压低于 DAC, 通常意味着该 CO₂ 钢瓶内的 CO₂ 快要耗尽了, 并发出警报信号。该过程每次都与空气分析子程序连接, 即使在 CO₂ 输入系统关闭时也不例外。

2) CO₂ 输入系统判定

如果某一温室的 BAFR < 0.25 l/min, 则认为存在供气故障, 发出警报并关闭 CO₂ 输入系统。一旦故障排除, BAFR > 0.25 l/min, CO₂ 输入系统重新自动启动。在夜间, 尽管系统因室内作物呼吸 CO₂ 浓度增加而会停止 CO₂ 输入, 但为防止意外, 仍规定 CO₂ 输入系统为关闭状态。为此, 若室外太阳辐射观测值 < 50 W/m², 则关闭供气系统, 而在早晨太阳辐射 > 50 W/m² 以后, 系统重新开始运行。即使 CO₂ 供应系统呈关闭状态, CO₂ 浓度监测仍连续进行, 因而仍可计算夜间的 CO₂ 通量。每次表明系统关闭的打印记录均保存起来。

3) 单个温室 CO₂ 浓度的测定

气体分析子程序每分钟与计算机连接一次, 但每次只进行一个温室的测定工作, 因而这一过程(3)通过某一指定温室的周期是 5 分钟。在分配给每个温室的一分钟内, 要进行两次 CO₂ 浓度观测(第一次在一分钟的开始时, 30 秒钟后再进行第二次), 以便计算 CO₂-IRGA 差分值。如前所述, 需在样本气体与基准气流之间进行交换, 以解决零点漂移问题。

从第一阶段中的 5 次气流计读数, 计算出该温室自最后一次观测以来的 5 分钟内的平均 CO₂ 输入率(l/min), 同时计算该 5 分钟内室内外 CO₂ 浓度差。通过这些数据, 加上启动通风速率的估算结果, 可采用下列方法计算出下一个 5 分钟内的所期望的 CO₂ 流

率。

由气体取样系统测得 CO₂ 浓度差 $\Delta C = C_t - C_{t-\Delta t}$, 并假定 C_t 的变化较缓慢, 故可设 $dC_t/dt = d(\Delta C)/dt$, 将其代入方程(1)中, 并加以整理得:

$$I = P - S + VN(\Delta C) + V[d(\Delta C)/dt] \quad (3)$$

图 3 反映了 t 时间的情况, 令 I_t, P_t, S_t, N_t 和 ΔC_t 分别表示 t 时刻的输入率, 光合率, 土壤呼吸率, 通风 CO₂ 交换率和 CO₂ 浓度差, 其对应项在 $t-t+\Delta t$ 时间内的平均值分别为 $\bar{I}_t, \bar{P}_t, \bar{S}_t, \bar{N}_t$ 和 $\overline{\Delta C}_t$, 令 $\overline{\Delta C}_t$ 为该时段开始和结束时刻 ΔC 的平均值, 即

$$\overline{\Delta C}_t = (\Delta C_t + \Delta C_{t+\Delta t})/2,$$

并假设 $d\Delta C/dt$ 可用 $(\Delta C_{t+\Delta t} - \Delta C_t)/\Delta t$ 代替, 代入方程(3), 并整理后得到:

$$\begin{aligned} \bar{I}_t = & \bar{P}_t - \bar{S}_t + \Delta C_{t+\Delta t} \left(\frac{V\bar{N}_t}{2} + \frac{V}{\Delta t} \right) \\ & + \Delta C_t \left(\frac{V\bar{N}_t}{2} - \frac{V}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

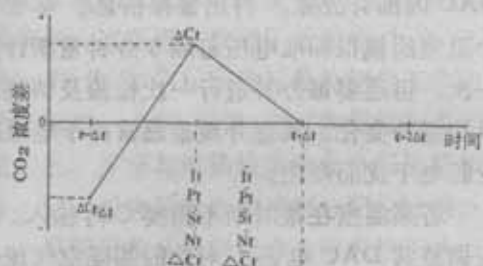


图 3 计算下一时段末 ΔC 趋于 0 的新流率的原理图示。图中显示了 t 时刻的各参数值及其 $t-t+\Delta t$ 时段的平均值

同理, $t-\Delta t$ 时刻的方程为:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{t-\Delta t} = & \bar{P}_{t-\Delta t} - \bar{S}_{t-\Delta t} + \Delta C_t \left(\frac{V\bar{N}_{t-\Delta t}}{2} + \frac{V}{\Delta t} \right) \\ & + \Delta C_{t-\Delta t} \left(\frac{V\bar{N}_{t-\Delta t}}{2} - \frac{V}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

流率的变化量 $\Delta I = \bar{I}_t - \bar{I}_{t-\Delta t}$, 当 $\Delta C_{t+\Delta t}$ 趋于 0 时并假设 $\bar{P}, \bar{S}, \bar{N}$ 在两时段内为常数, 则方程(4)减方程(5), 可得到 ΔI 的简化式为:

$$\Delta I = (V/\Delta t) [\Delta C_{t-\Delta t} (1 - \bar{N}_t \Delta t / 2) - 2 \Delta C_t] \quad (6)$$

当 \bar{N}_t 趋于 0 时, 方程(6)可简化成 Monteith 等人(1983)介绍的形式, 事实上, 他们

在很大程度上忽视了通风速率较大使得 CO_2 输入过多的可能性。计算机通过方程 (6) 算出下一个 5 分钟内温室所需要的 CO_2 输入速率的变化量, 而在 $t + \Delta t$ 时刻, 输入率应有进一步改变, 否则该系统将失去平衡。因此, 从理论上讲, 除非 P 、 S 、或 N 某一项发生变化, 否则不需要对系统进行调整。

所期望的 CO_2 流率加上基础空气流率, 即获得所要求的总气体流率, 而后通过适当的容量气流计校准值, 将对应的模拟基准电压施加到 DAC 上去。

4) 实现期望流率的 DAC 电压的调整

在总的 CO_2 输入系统运行的条件下, 该过程每分钟运行一次。要测定每个温室的 DAC 电压, 并同上述阶段 3 中预先计算和储存的期望模拟标准电压相比较, 若两个电压差 > 0.1 伏, 则需施加一组脉冲, 修正 DAC。若这样三次修正都未改善 DAC, 即认为 DAC 内部有故障, 打出警报信息。尽管每个温室的模拟标准电压每隔 5 分钟重新计算一次, 但还要每分钟进行一次检验及调整, 以防意外变化。其意外现象通常由于电磁阀受静电干扰而产生。

若某温室在某时期不需要 CO_2 输入, 则应调整其 DAC 电压与对应的基础空气流率一致, 并关闭电磁阀, 以防止 CO_2 流入室内。

三、运行情况

以其中的一个温室为例说明该系统的运行情况。运行期为两天, 室内作物是播种后 60 天的花生, 叶面积指数是 6.5, 太阳辐射截获系数为 0.9, 土壤水份供应良好。两天内每小时平均风速由 4.5 m/s 减弱到 0.5 m/s。

从图 4 的 a、b 可看出两天内温室内、外 CO_2 浓度及其差值的变化。由于 CO_2 输入系统及时补充了作物需要的 CO_2 , 故白天室内外 CO_2 浓度差趋于 0。夜间由于土壤和植物呼吸放出 CO_2 , 而使室内 CO_2 浓度

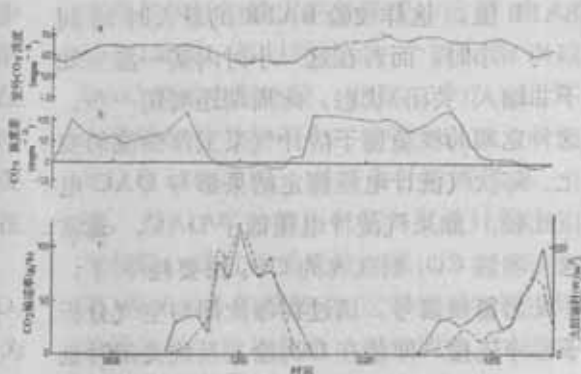


图 4 两天内的室外 CO_2 浓度 (a) 及室内外 CO_2 浓度差 (b), CO_2 输入量 (—) 和作物表面每小时平均截获的太阳辐射 (·····) (c)

升高。尽管夜间为保持室内热量而关闭了风机, 但仍存在一定的通风, 使室内 CO_2 浓度升高到一定水平后, 呼吸放出的 CO_2 又因通风而损失了一部分, 随着外界风速的变化, 室内的 CO_2 浓度维持在 50—100 mg/m^3 (25—50 ppm) 之间。图 4c 表明, CO_2 输入速率与采用管状辐射表测定的作物表面太阳辐射量关系很密切。

图 5 给出两天内室内 CO_2 平衡时各分量通量的变化 ($\text{gCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)。进入室内的通量为正, 出去的为负。由于作物的 CO_2 交换过程, 因此当通量为负时, 表明作物净光合作用消耗 CO_2 ; 而当通量为正时, 作物呼吸放出 CO_2 。土壤呼吸放出的 CO_2 通量与 Hand 和 Bowman 1969 年引用的数值相近, 并假设在这两天内为恒量。夜间室内因 CO_2 浓度增加则通风所引起的 CO_2 流出通量最大, 但在白天, 当 CO_2 供应系统使室内、外 CO_2 浓度接近时, 通风引起 CO_2 净通量的变化则可忽略。类似地, 除清晨作物开始进行光合作用使室内 CO_2 浓度迅速降低, 傍晚随着作物暗呼吸作用开始, 室内 CO_2 浓度刚刚开始增加外, 其余大部分时间内, 与室内 CO_2 绝对浓度变化有关的各通量也是可忽略的。这主要因为日间这些通量很小, 且土壤呼吸假定为常数, 故所计算的作物净光合速率很如实地反映了 CO_2 输入率。

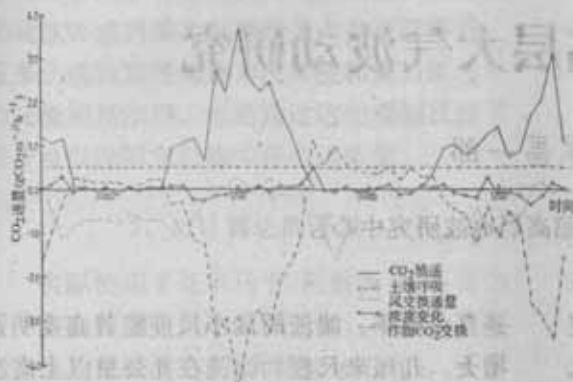


图5 两天内CO₂平衡各分量的变化情况

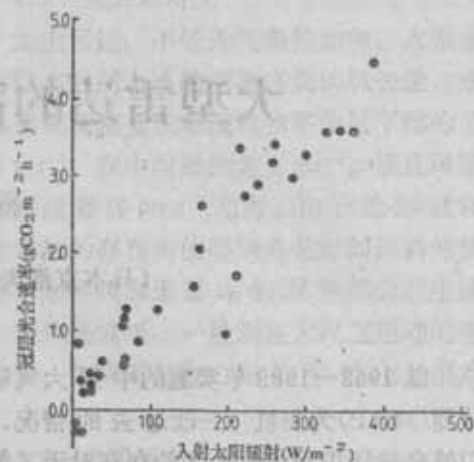


图6 花生光合作用的光响应曲线(根据图5、图4c绘成)

图6为根据两天内白天作物表面获得的太阳辐射观测值和作物净光合作用率计算值(图5)所绘制的光响应曲线,其斜率为 3.06 g/MJ 。考虑到作物对太阳辐射截获系数为 0.9 ,并假设 1 gCO_2 相当于 1.6 g 干物质(Nomoto等,1969),且白天作物固定的CO₂的23%因夜间暗呼吸而损失,因此作物截 1 MJ 太阳辐射能可形成 1.64 g 干物质。这一结果同Ong等(1987)根据同样的温室、相同的试验获得的作物枝条干物质资料所测得的生长季平均值(1.88 gDM/MJ ,干物质/北焦)是可以比拟的。

四、问题及改进(略)

五、总结

本文介绍了一个全自动的、可用于估算冠层光合作用的温室CO₂测控系统,该系统

只需在指定时段内对CO₂供应进行检验和补充即可估算光合作用。作为一个较广泛的研究领域的一部分,该系统还可以为热带作物光合作用对环境因子(温度、太阳辐射、空气湿度和土壤水分差额等)的反应研究提供信息。这项研究改进了传统的生长分析法,使作物CO₂同化过程的测定工作由一周缩短到一小时,另外,它可获得作物总干物重信息,并可与植株枝条生长分析资料相结合,估计干物质生产向根部分配的比例。尽管目前该系统只作为研究的工具,但对它作进一步改进,即可应用于商业性生产,以成为作物CO₂施肥的最有效的手段。

马树庆译自《Agricultural and Forest Met.》Vol.40, No. 3 1987:8

刘柯、王毓棠校