



ChinaFLUX第十四次通量观测理论与技术培训

(魏杰, 陈昌华, 王晶苑, 温学发. 2019.箱式通量观测技术和方法的理论假设及其应用进展. 植物生态学报. 生态技术和方法专辑. 组织评审中)

箱式通量观测技术和方法的理论假设 及其应用进展

温学发

**中国科学院地理科学与资源研究所
生态系统网络观测与模拟重点实验室**

中国 北京 2019年8月6-8日

汇报提纲

一、研究背景与意义

二、系统组成、分类及原理

三、系统设计的理论要求与假设

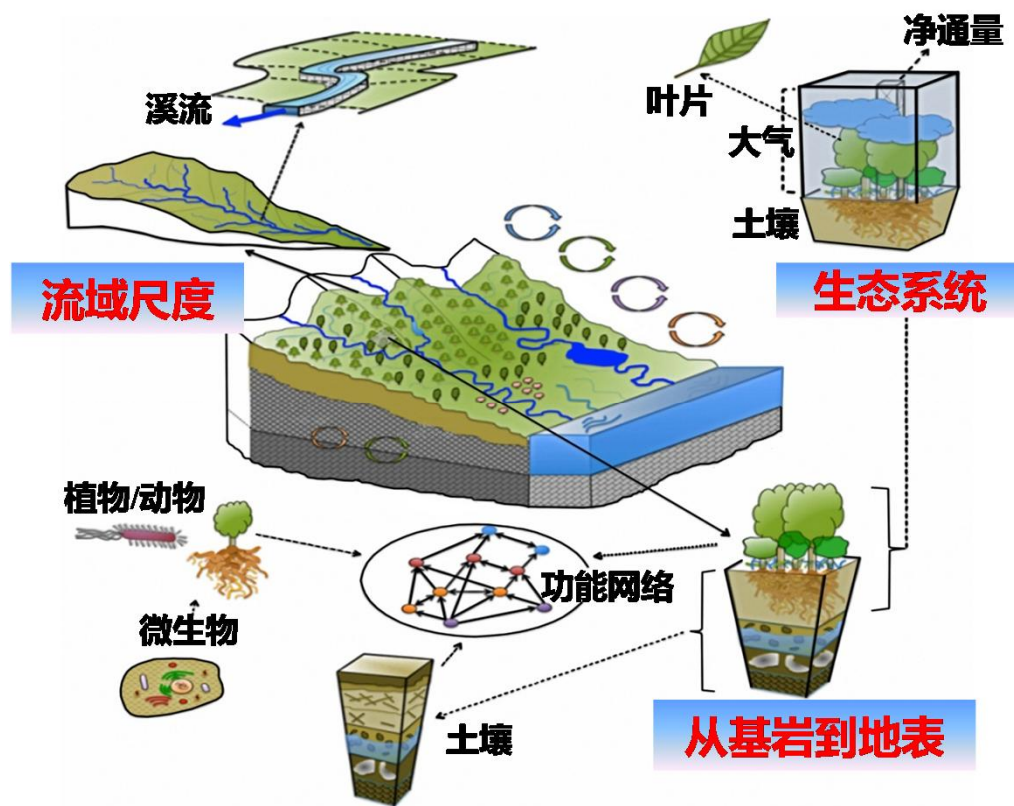
四、土壤和植物箱式技术及应用

五、应用注意事项与建议

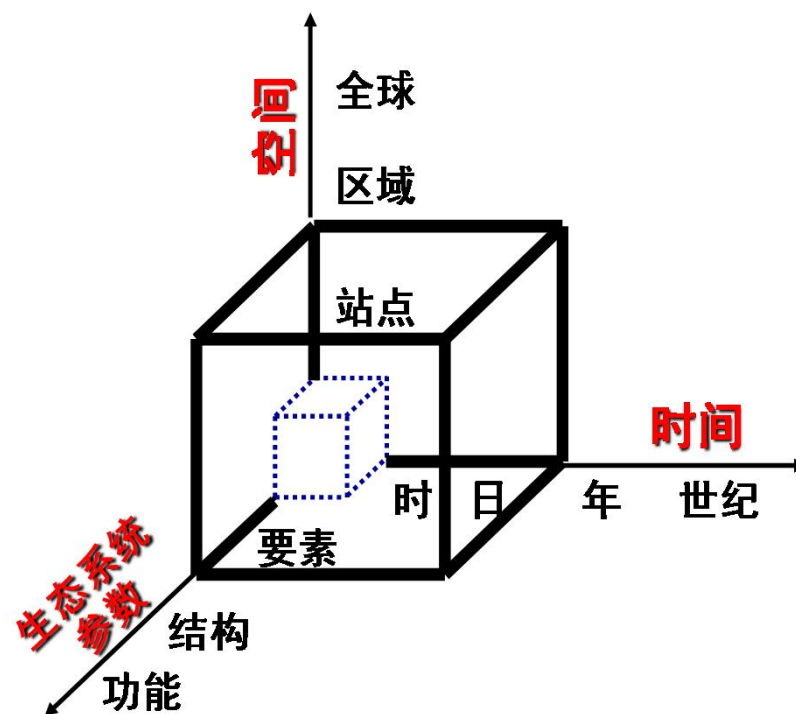
生态系统研究的对象与尺度

生态系统生态学：

研究生态系统的组成要素、结构与功能、发展与演替、系统内和系统间的能流和物质循环以及人为影响与调控机制的学科。



“生态系统”与“地球关键带”的区别与联系



生态系统研究的时空尺度特征

生态系统研究的技术与方法



调查/采样分析



定位观测

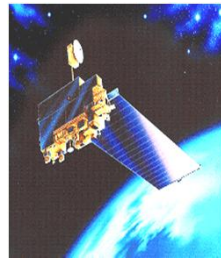


控制/模拟实验

样点+样带+区域

C0309: 生态学理论与方法

- 1) 理论生态学;
- 2) 生态观测技术与方法;
- 3) 生态模拟与评价。

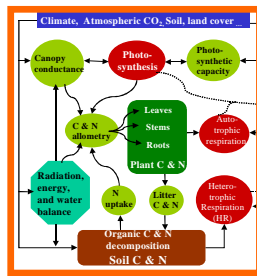


高空/遥感观测

生态+大数据



观测+模拟+评价



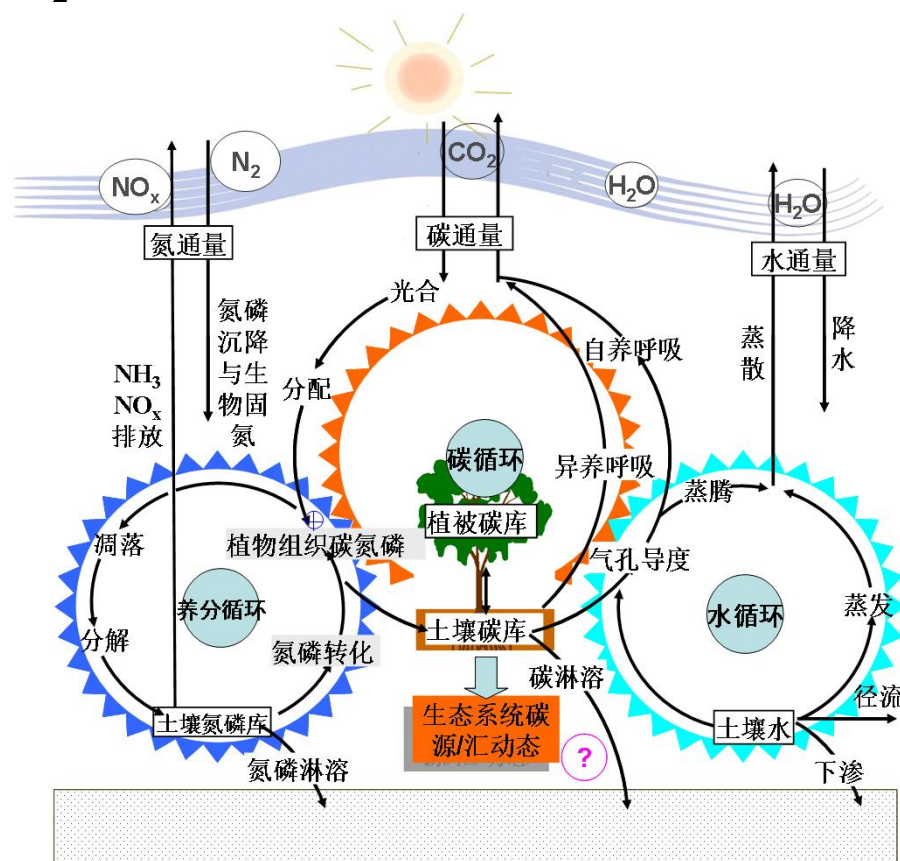
模型模拟



系统评价

生态系统碳-氮-水耦合循环——库与流

- | 温室气体浓度与通量：碳(CO₂、CH₄、CO)、氮(N₂O)和水(H₂O)
- | 同位素比值与通量：δ¹³C和δ¹⁸O(CO₂)、δ¹³C(CH₄)、δ¹⁵N和δ¹⁸O(N₂O)、δD和δ¹⁸O(H₂O)-同位素技术具有指示、示踪和整合功能



生态系统碳-氮-水耦合循环(于贵瑞等, 2014)

以碳同位素为例:

ρ [CO₂]计算方法

$$[\text{CO}_2] = [^{12}\text{CO}_2] + [^{13}\text{CO}_2] + f [\text{CO}_2]$$

ρ 同位素组成 δ¹³C计算方法

$$\delta_{\text{sample}} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) * 10^3$$

式中 R_{sample} 是所测样品的同位素比率,

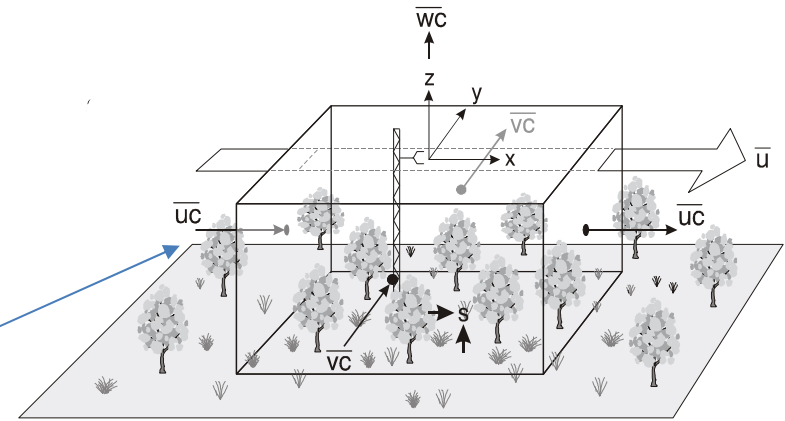
$$R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} = {}^{13}\text{CO}_2/{}^{12}\text{CO}_2$$

式中 R_{standard} 是碳同位素标准物(VPDB)的同位素比率, 为0.0111797。

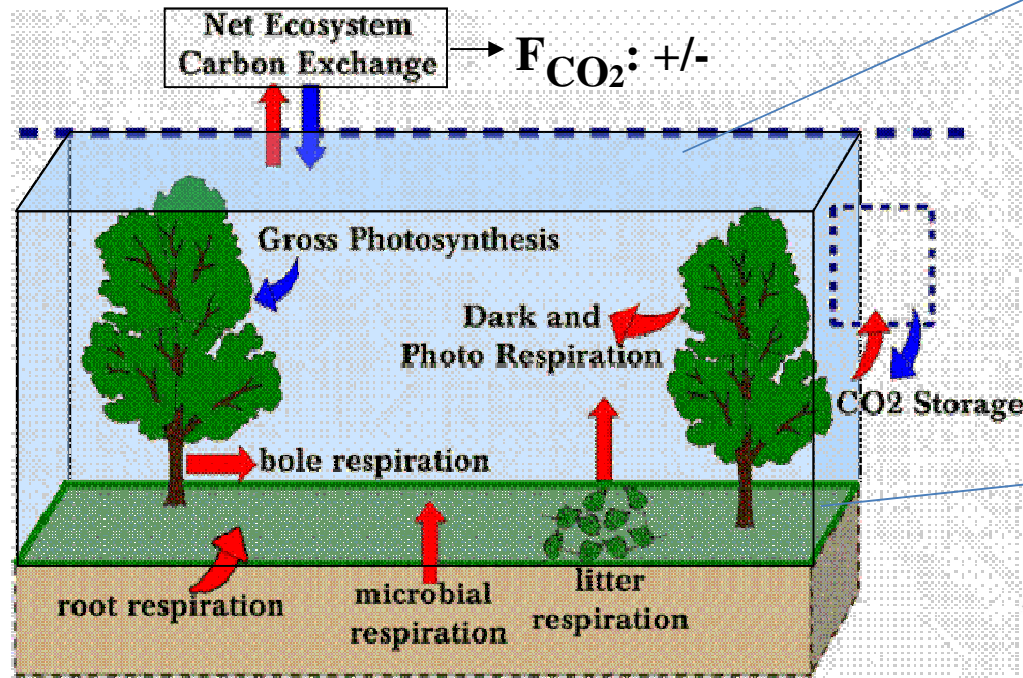
箱式技术和方法应用：“物质守恒方程” 求解通量

•物质守恒方程
$$\frac{\partial \bar{r}_c}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i r_c}}{\partial x_i} - D \frac{\partial^2 \bar{r}_c}{\partial x_i^2} = S(x_i, t)$$

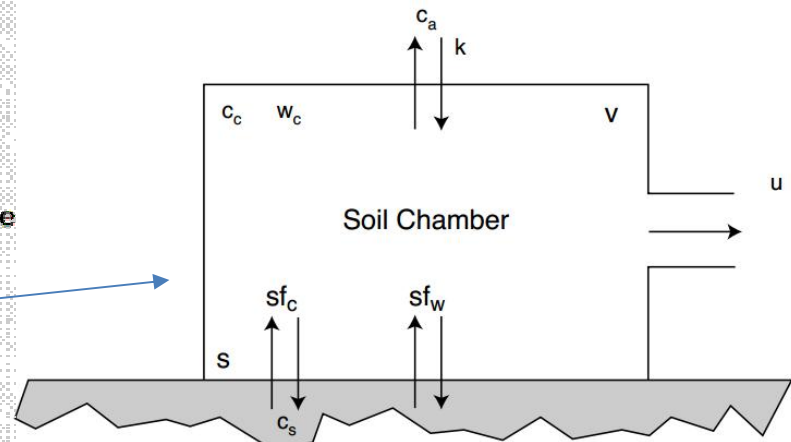
- √ 左边第一项是单位体积内CO₂密度变化的平均速率
- √ 左边第二、三项是引起标量物质守恒方程控制体积的边缘发生净平流和分子扩散的通量散度；
- √ 右边第一项为控制体积内的源汇项。



涡度协方差技术(虚拟的chamber)



生态系统净碳交换量的示意图



箱式观测技术(现实的chamber)

箱式通量观测技术和方法现状与问题

- ρ 由于原理简单且操作方便而在**自然或控制条件土壤、植物乃至生态系统**尺度温室气体通量观测研究中得到广泛应用。
- ρ 从早期的**静态箱-碱液吸收滴定**和**静态箱-气象色谱测定**等**人工离线测定**模式，发展到目前通常采用的**自动箱-红外光谱测定**等**自动在线测定**模式。
- ρ 缺乏对观测系统设计的理论要求和假设等的综合考虑和评价：
 - ∅ 首先，如何**保证系统测定数据的精度和准确度**，即保证系统气密性及气体混合、箱体内外气体浓度和压力保持一致等；
 - ∅ 其次，如何**保证系统测定数据的代表性**，即待测气体的产生和运输不受影响等。

汇报提纲

一、研究背景与意义

二、系统组成、分类及原理

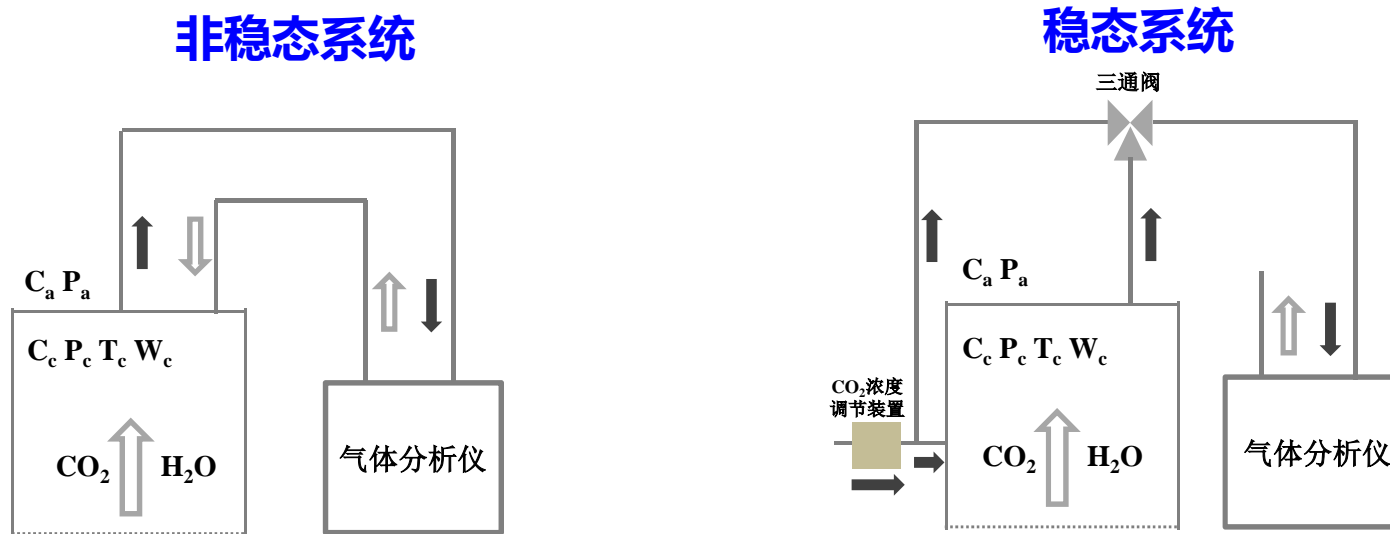
三、系统设计的理论要求与假设

四、土壤和植物箱式技术及应用

五、应用注意事项与建议

系统组成及分类

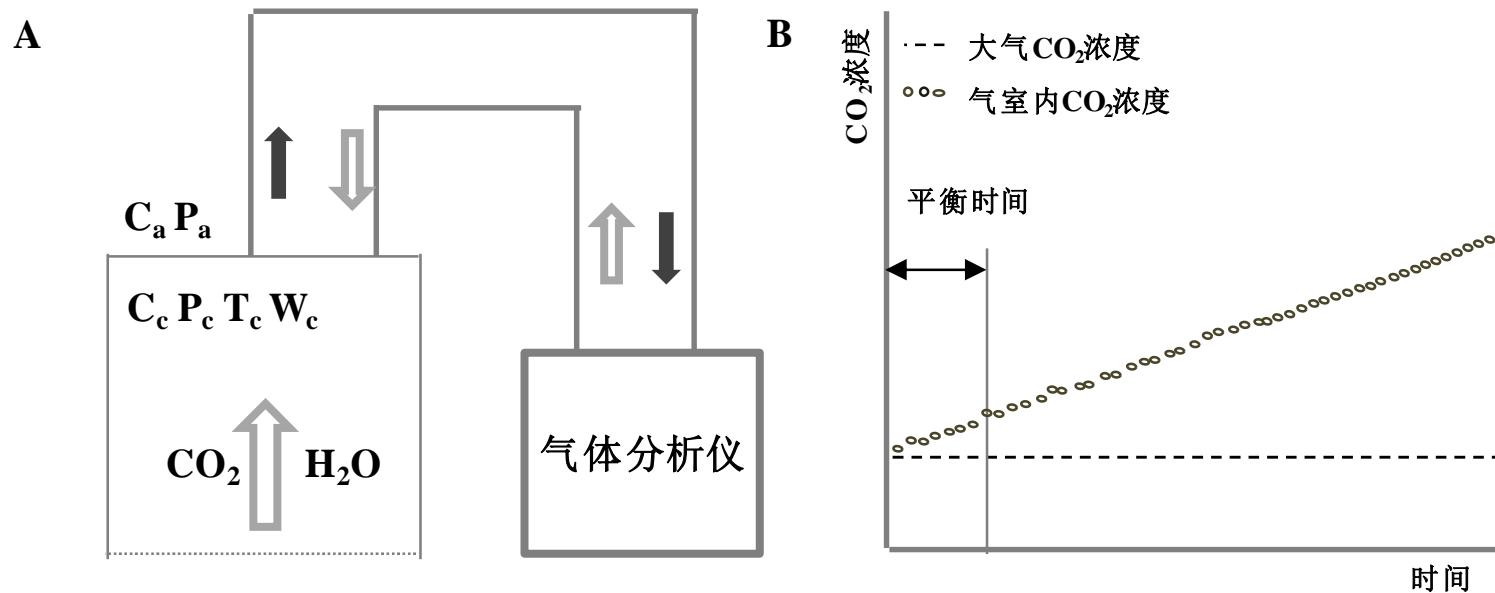
- 组成：由气室箱体、采样气路、气体分析仪、系统控制等构成。
- 分类：根据箱体内CO₂浓度变化特征可以分为非稳态(也称为闭路)系统和稳态(也称为开路)系统。
- 分类：也可以根据箱体内气体是否持续流动分为静态或动态系统，根据箱体内气体浓度测定方式分为离线或在线系统，根据箱体开闭方式可以分为人工或自动系统，根据箱体是否透光分为明箱或暗箱系统等。



箱式通量观测技术和方法的示意图(魏杰等, 2019)

非稳态系统箱式观测系统

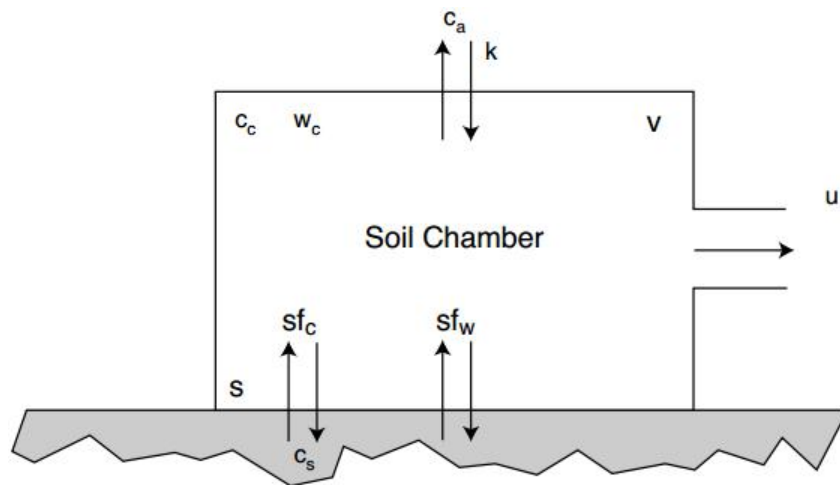
- ρ 通过使箱体内气体形成闭路循环，允许箱体内 CO_2 浓度持续上升，通过一定时间内箱体内 CO_2 浓度的变化速率计算通量。
- ρ 测定过程中，箱体内总 CO_2 浓度逐渐升高，同时 $^{12}\text{CO}_2$ 和 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度均逐渐升高。



非稳态系统(A, B)及其气室箱体内 CO_2 浓度变化特征的示意图。

C_c , C_a 分别表示气室内和气室外 CO_2 浓度； P_c , P_a 分别表示气室内和气室外大气压； T_c , W_c 表示气室内温度和湿度

非稳态系统箱式观测系统



非稳态系统闭路气室示意图(LI-8100手册)

CO₂质量守恒方程

$$v \frac{d\rho_c^c}{dt} = sf_c - c_c u$$

H₂O质量守恒方程

$$v \frac{d\rho_c^w}{dt} = sf_w - w_c u$$

空气质量守恒方程

$$v \frac{d\rho_c}{dt} = sf_c + sf_w - u$$

∅ 碳(CO₂)通量理论方程:

$$F_{CO_2} = g \times (CO_2^{soil} - CO_2^{chamber}) \longrightarrow F_{CO_2} = \frac{VP_0(1 - W_0)}{RS(T_0 + 273.15)} \frac{dC}{dt}$$

∅ 碳同位素($\delta^{13}C$ -CO₂)通量理论方程:

(1) Keeling plot模型:

$$C_E = C_a + C_s$$

$$\delta_E C_E = \delta_a C_a + \delta_s C_s$$

$$\delta_E = C_a(\delta_a - \delta_s)(1/C_E) + \delta_s$$

(2) Flux ratio模型:

$$\delta^{13}C_R = \left(\frac{F^{13}CO_2}{F^{12}CO_2} - 1 \right) \times 1000$$

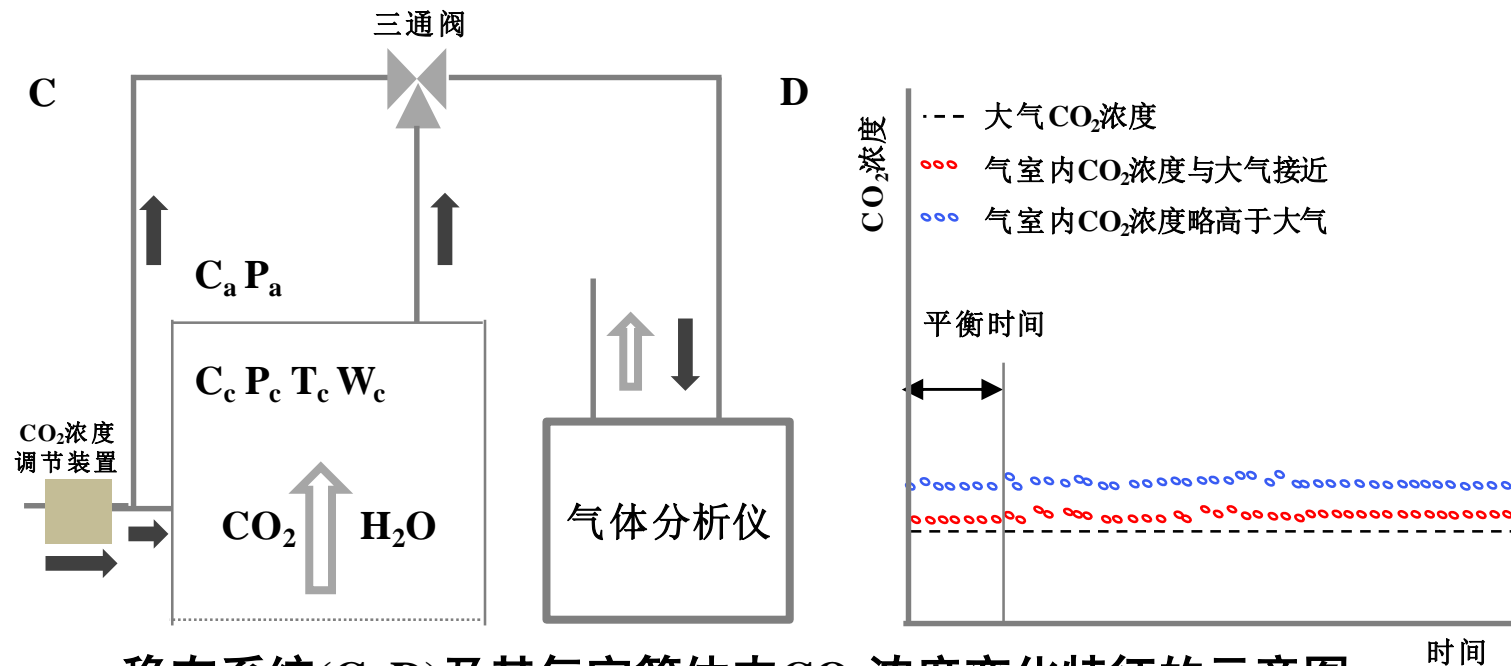
∅ F为排放通量, v为气室体积, S为气室底面积, P₀、W₀、T₀分别为初始大气压、水汽浓度和温度, dC/dt表示经水汽校正后的CO₂摩尔浓度的初始变化速率。

∅ C_E、C_a、C_s分别为混合大气CO₂浓度、本底大气CO₂浓度、源增加的CO₂浓度。δ_E、δ_a、δ_s分别为混合大气、本底大气和源增加的CO₂的δ¹³C。

∅ F¹³CO₂和F¹²CO₂分别为¹³CO₂和¹²CO₂的同位素通量, R_{VPDB}=0.0111797。

稳态系统箱式观测系统

- 通过使箱体内气体形成开放气路，保持箱体内外 CO_2 浓度一致或仅略高于大气，通过测定箱体进气口和出气口 CO_2 浓度差计算通量。
- 根据是否增加 CO_2 浓度调节装置，分为：1) 在测定过程中，箱体内总 CO_2 浓度仅略高于大气；2) 通过向箱体内注入无 CO_2 空气，使箱体内总 CO_2 浓度始终与箱体外总 CO_2 浓度保持一致。



稳态系统(C, D)及其气室箱体内 CO_2 浓度变化特征的示意图。

C_c, C_a 分别表示气室内和气室外 CO_2 浓度； P_c, P_a 分别表示气室内和气室外大气压； T_c, W_c 表示气室内温度和湿度

稳态系统箱式观测系统

Ø 碳(CO₂)通量理论方程:

$$Flux = \frac{(C_o - C_i)Flow}{A}$$

其中, C_o和C_i分别是流过气室的进气口和出气口的空气中CO₂的摩尔浓度(μmol mol⁻¹), “Flow”表示流过气室的空气流速(mol s⁻¹), A表示气室覆盖的面积(m²)。

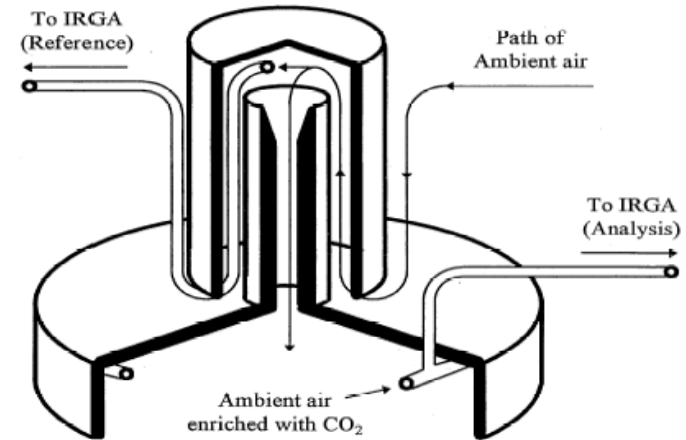


Figure 1. Schematic diagram of a section through an open system soil CO₂ efflux chamber.

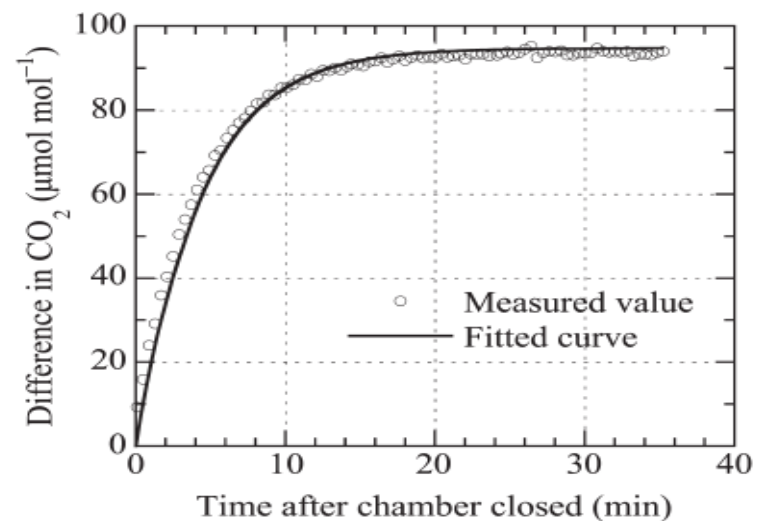
Ø 碳同位素(δ¹³C- CO₂)通量理论方程:

$$\delta^{13}C_{SR} = \frac{(C_o * \delta_o) - (C_i * \delta_i)}{C_o - C_i}$$

其中, δ_o和δ_i分别为气室进气口和出气口CO₂的δ¹³C值(‰)。

Ø 通常, 稳态系统测定过程中, 气室内CO₂浓度略高于周围大气(右图);

Ø 或者, 通过注入无CO₂空气等, 实时调节CO₂浓度, 使其维持在周围大气水平(技术要求高)。



汇报提纲

一、研究背景与意义

二、系统组成、分类及原理

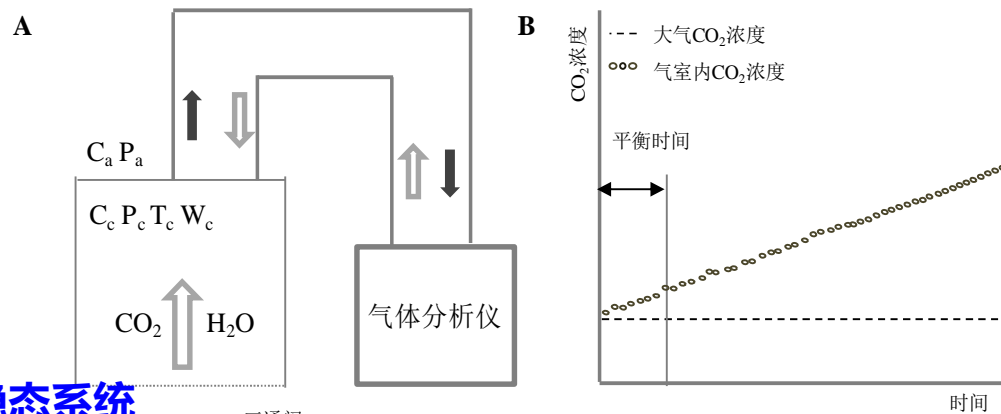
三、系统设计的理论要求与假设

四、土壤和植物箱式技术及应用

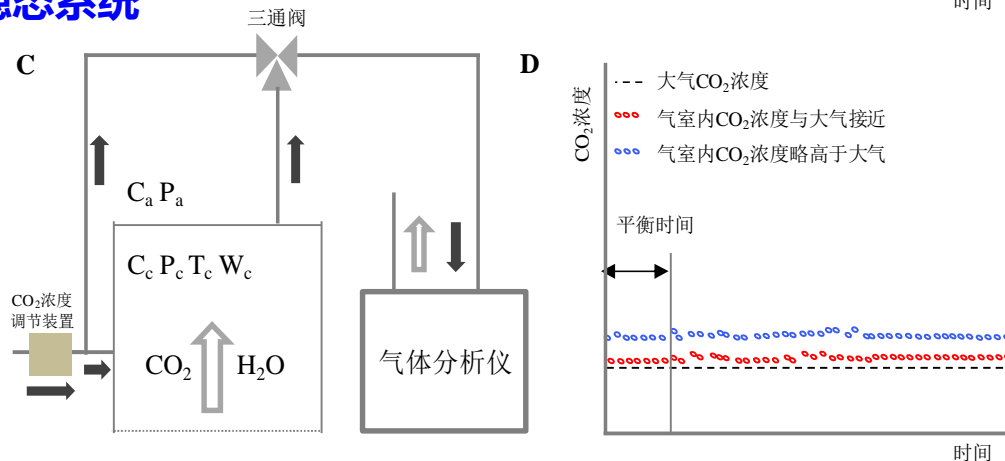
五、应用注意事项与建议

系统设计的理论要求与假设

非稳态系统



稳态系统



非稳态系统(A, B)和稳态系统(C, D)及其气室箱体内 CO_2 浓度变化特征的示意图(魏杰等, 2019)

ρ 保证系统测定数据的
精度和准确度

∅ 保证系统气密性及气
体混合;

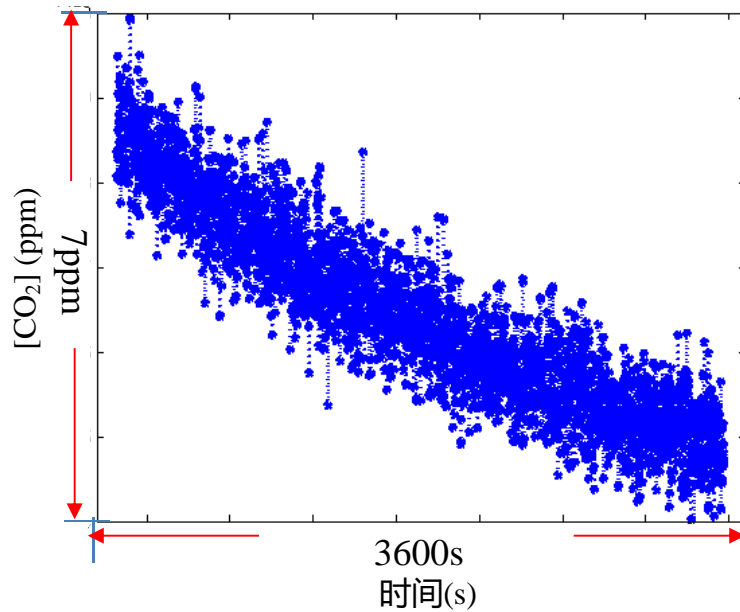
∅ 箱体内外气体浓度和
压力保持一致等;

ρ 保证系统测定数据的
代表性

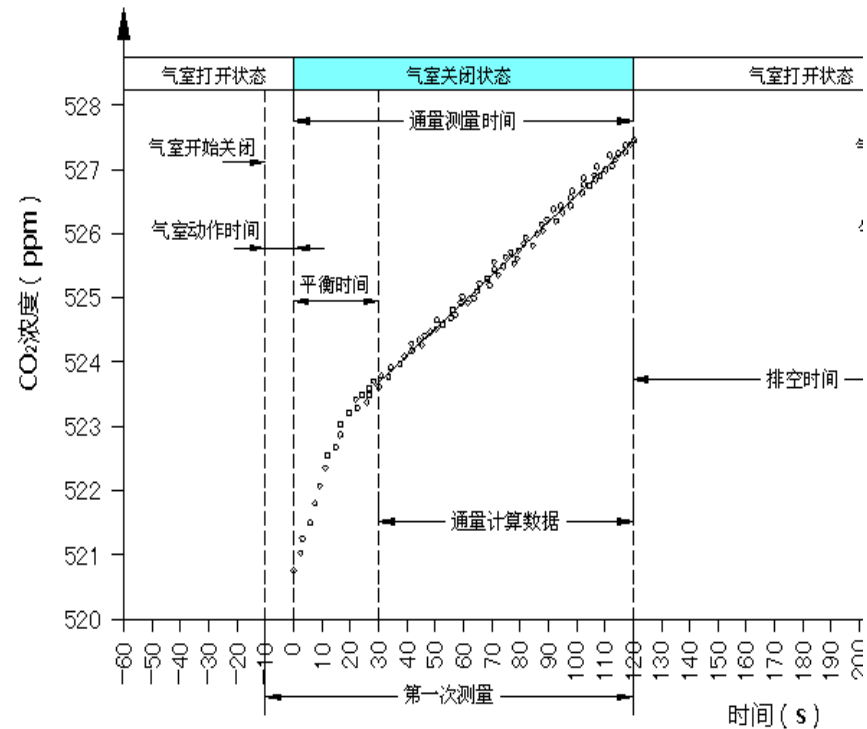
∅ 待测气体的产生和运
输不受影响等。

系统气密性及气体混合程度

- 气密性**：保证气体分析仪以及系统气路的气密性，即不存在与外界大气的
气体交换过程——**漏率测试**。
- 混合程度**：测定过程中，箱体以及系统内的气体充分混合——**混合程
度(不建议风扇混合)与切换效率测试**。



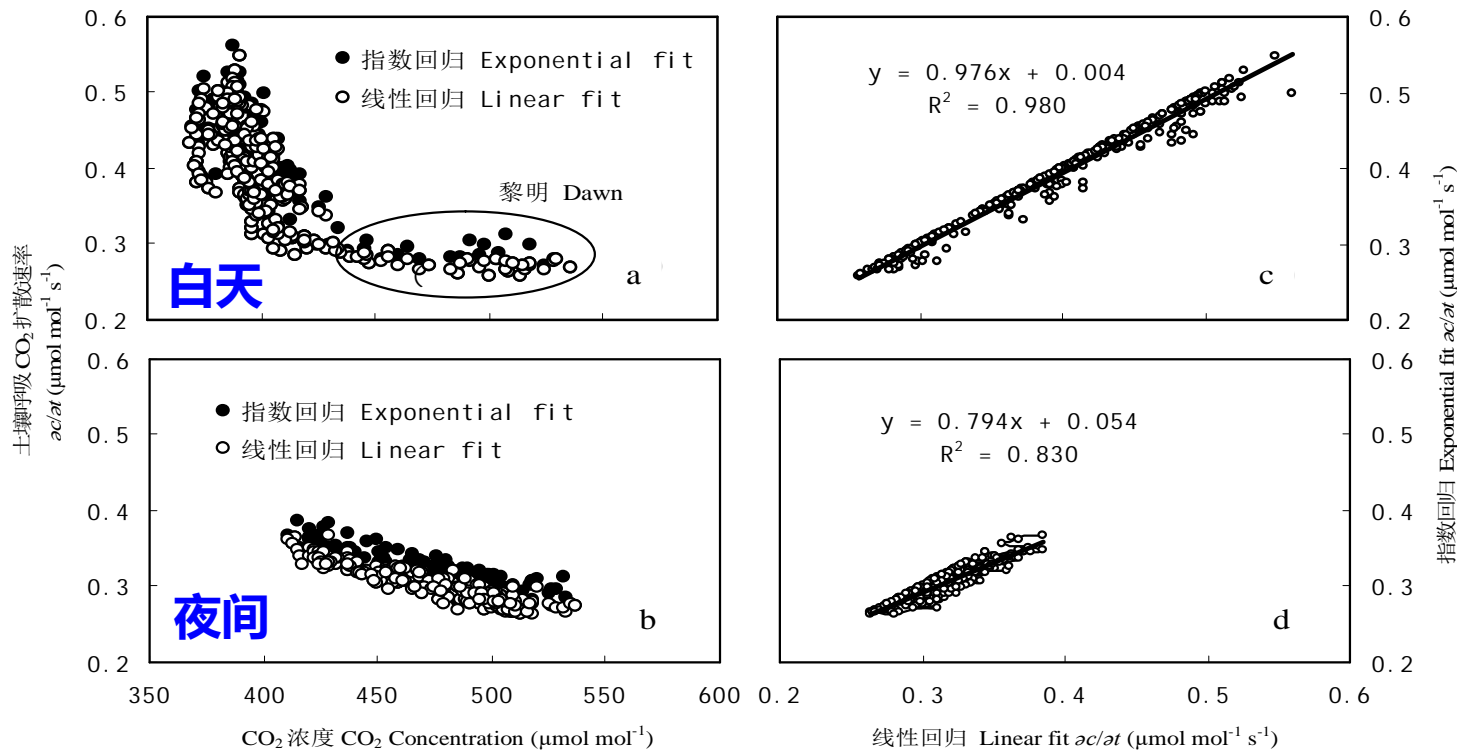
分析模块漏率测试结果



箱体间有效切换(残余气体排空时间)

保证箱体内外气体浓度一致

- 非稳态系统：线性回归方法估算箱体内CO₂浓度随时间变化速率($\partial c/\partial t$), 而指数回归方法则可以准确地估算外界CO₂浓度条件下的 $\partial c/\partial t$ 。
- 稳态系统：通过增加CO₂浓度调节装置向箱体内注入无CO₂的空气, 使箱体内总CO₂浓度始终与箱体外总CO₂浓度保持动态平衡。

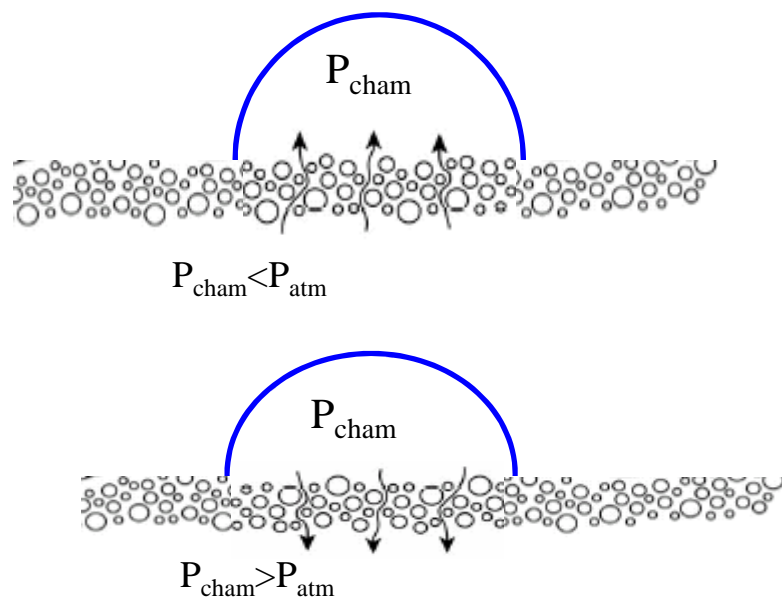


昼夜CO₂扩散梯度变化对土壤呼吸CO₂扩散速率($\partial c/\partial t$)的影响(温学发等, 2007)

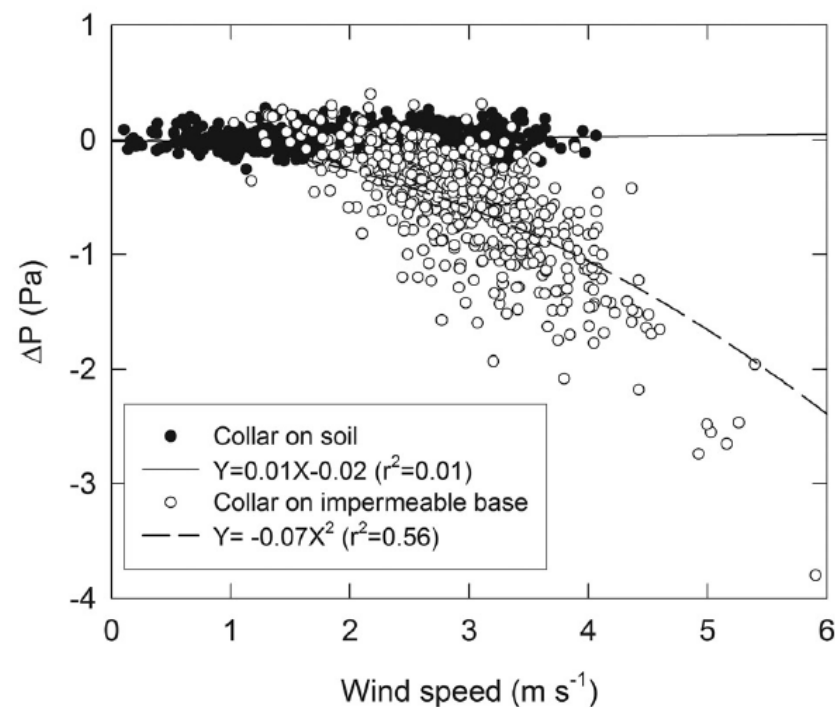
保证箱体内外气体压力一致

p 压力泵效应: 气室箱体内压力增加, 会抑制排放源 CO_2 释放, 反之, 则会促进排放源 CO_2 释放或周围大气进入气室。

p 压力平衡装置: 系统设计中可以通过压力平衡装置保持气室内与气室外周围空气的压力平衡。



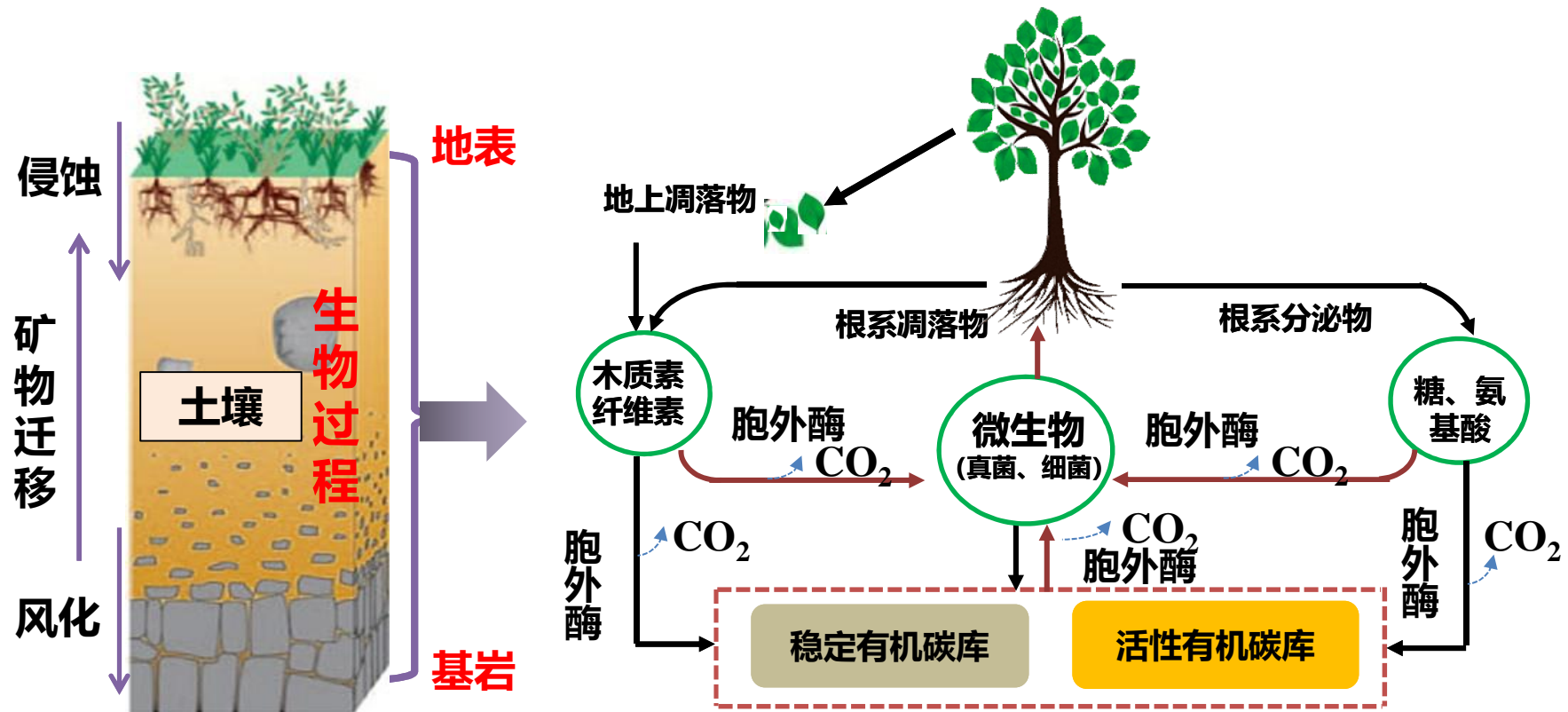
压力泵效应示意图(Liukang Xu)



风速与箱体内外压力差的关系(Liukang Xu)

待测气体的产生与运输不受影响

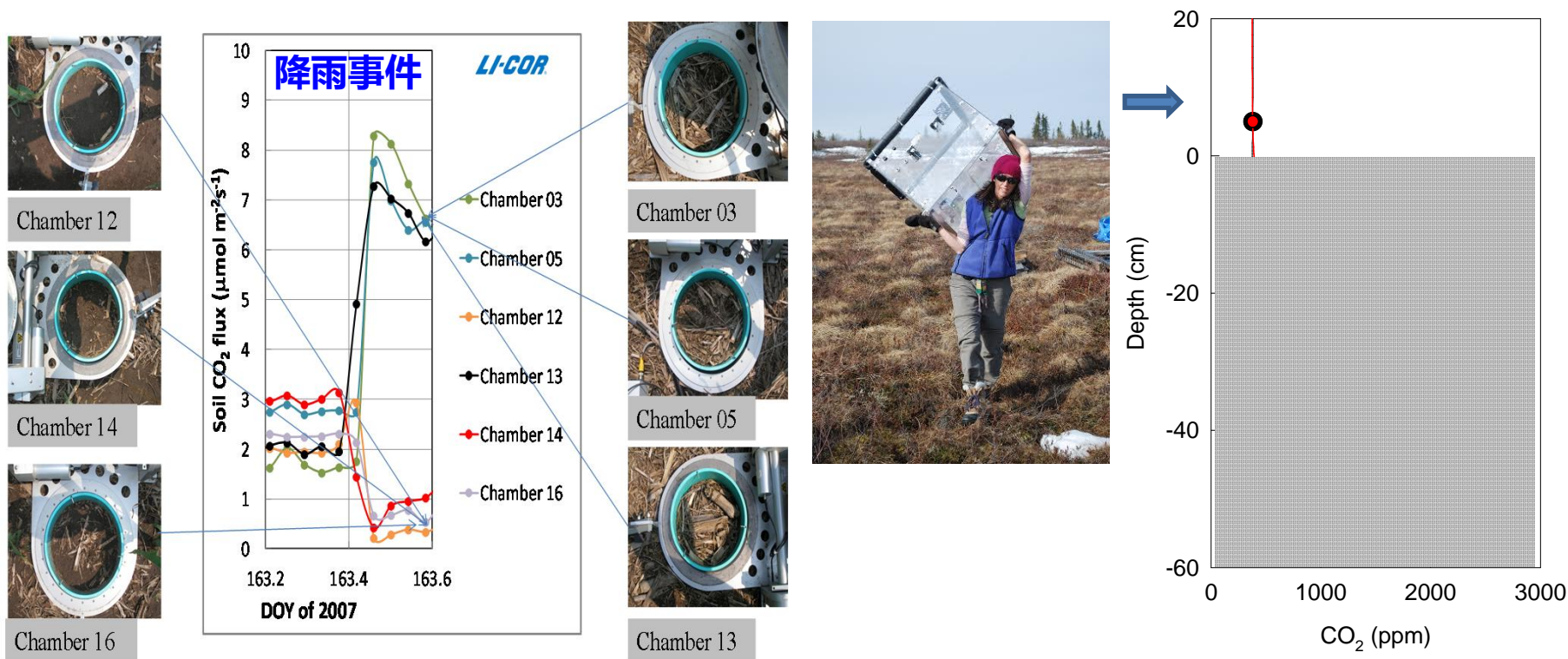
- ρ **产生**: 测定过程中, 不能改变待测气体源汇的底物特征及环境条件, 影响待测气体的产生。
- ρ **运输**: 测定过程中, 待测气体运输需要只能受扩散过程影响, 且全部扩散至气室箱体, 同时箱体没有其它源汇项干扰。



土壤碳分解与转化过程与通量的示意图(温学发等, 2019)

待测气体的产生与运输不受影响

- 物理扩散**: CO_2 通过物理扩散向地上、地下或侧向迁移, 主要受控于土壤 CO_2 产生的深度以及土壤孔隙度。
- 非物理扩散**: CO_2 会溶解在水中(降雨)进入水体或湖泊; 碳酸盐溶解(吸收 CO_2)-再沉淀(释放 CO_2); 化学风化产生 CO_2 。



物理扩散过程对土壤 CO_2 扩散过程的影响(Liukang Xu)

汇报提纲

一、研究背景与意义

二、系统组成、分类及原理

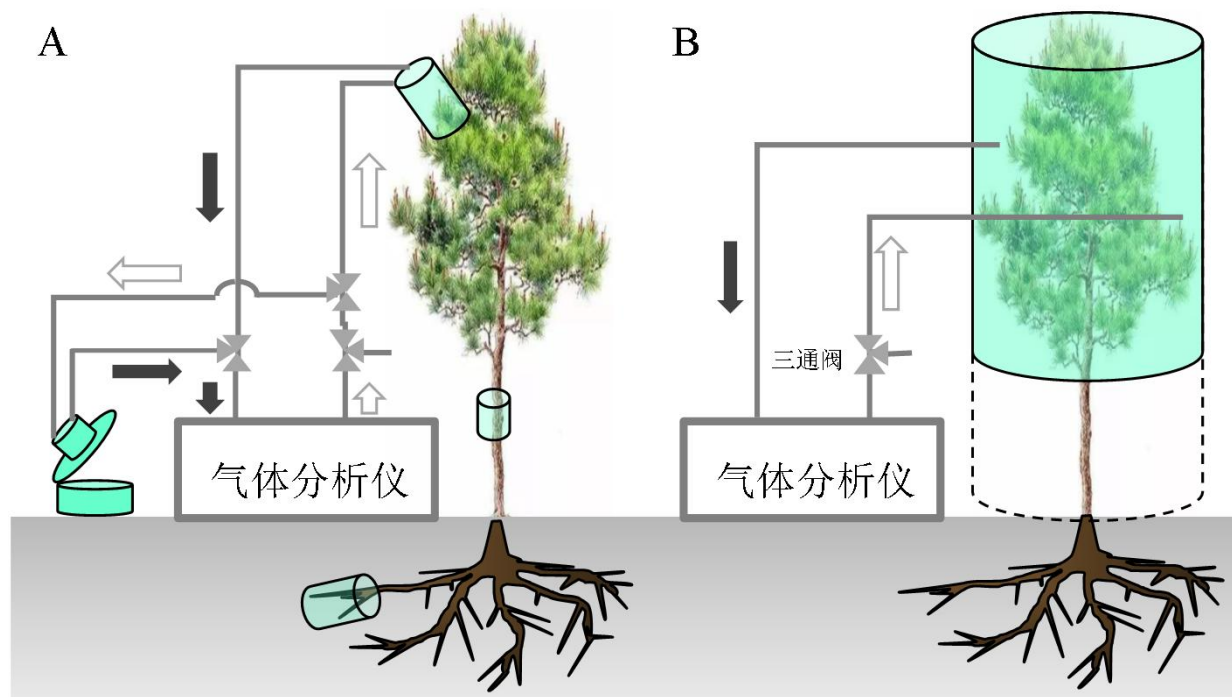
三、系统设计的理论要求与假设

四、土壤和植物箱式技术及应用

五、应用注意事项与建议

土壤和植物箱式技术及应用

- ρ 非稳态和稳态系统在自然以及控制条件下**土壤和植物根-茎-叶乃至生态系统尺度**CO₂及其 δ¹³C通量均得到应用。
- ρ 如果观测系统形成**闭路循环气路**则为**非稳态系统**，而形成**开路循环气路**则为**稳态系统**。



土壤和植物通量协同观测系统(A)及冠层和生态系统通量观测系统(B)示意图(魏杰等, 2019)

土壤CO₂通量观测：非稳态系统

LI-6400-09

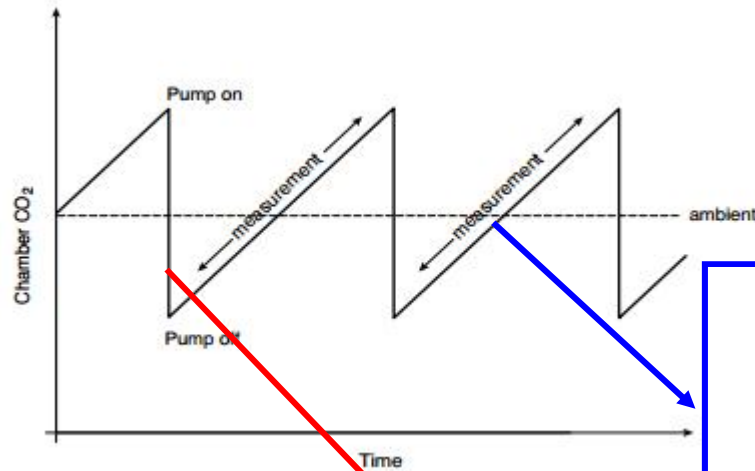
系统主要由IRGA、控制系统和闭路气室组成，为单通道观测系统。

CO₂浓度预降低过程

气室关闭后，首先通过CO₂浓度预降低系统，使气室内CO₂浓度下降至低于大气水平；

CO₂浓度测量过程

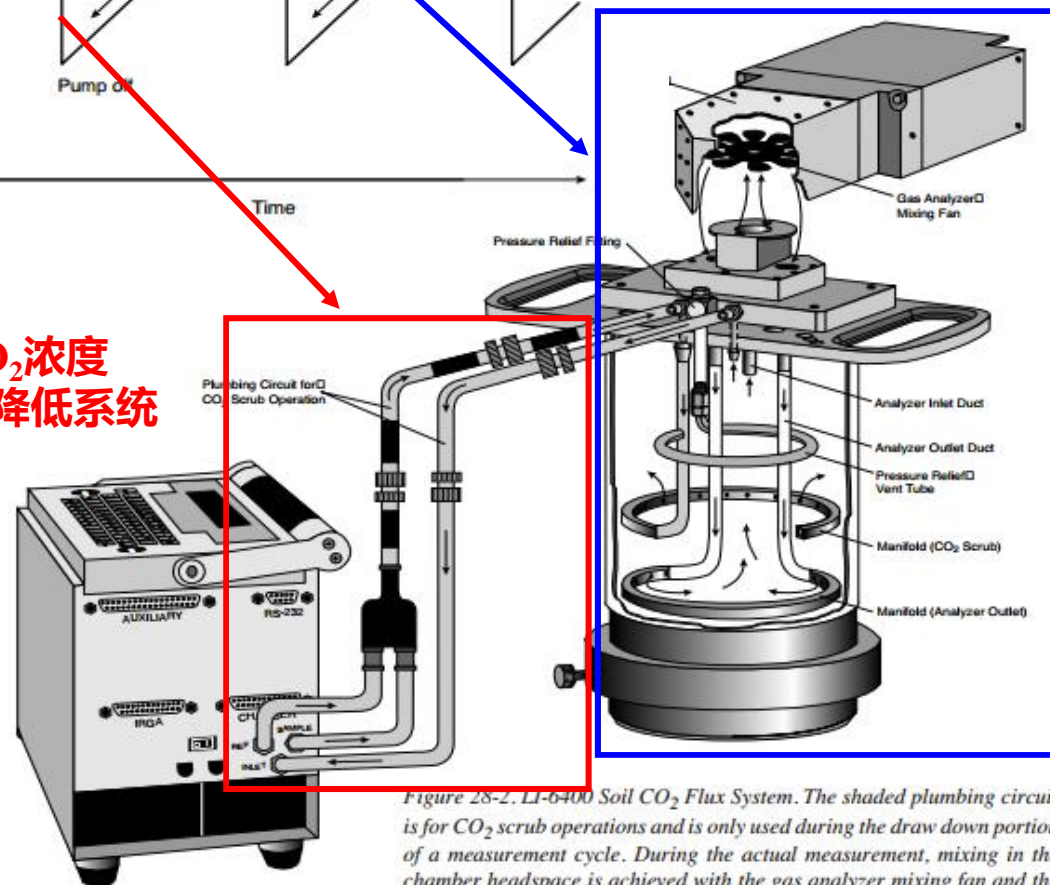
CO₂浓度预降低系统与气室断开，气室内CO₂浓度逐渐升高，在风扇混匀的前提下，通过IRGA测定。



IRGA内没有泵，只依靠CO₂自动扩散

CO₂浓度测量系统

CO₂浓度预降低系统



主机内有内置泵

Figure 28-2. LI-6400 Soil CO₂ Flux System. The shaded plumbing circuit is for CO₂ scrub operations and is only used during the draw down portion of a measurement cycle. During the actual measurement, mixing in the chamber headspace is achieved with the gas analyzer mixing fan and the associated plumbing.

LI-6400手册

土壤CO₂通量观测：非稳态系统

LI-8100/8150

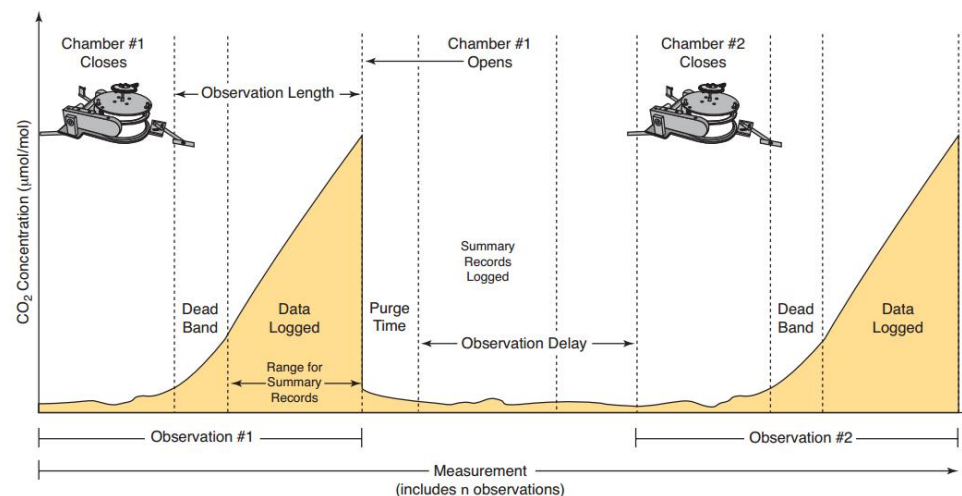
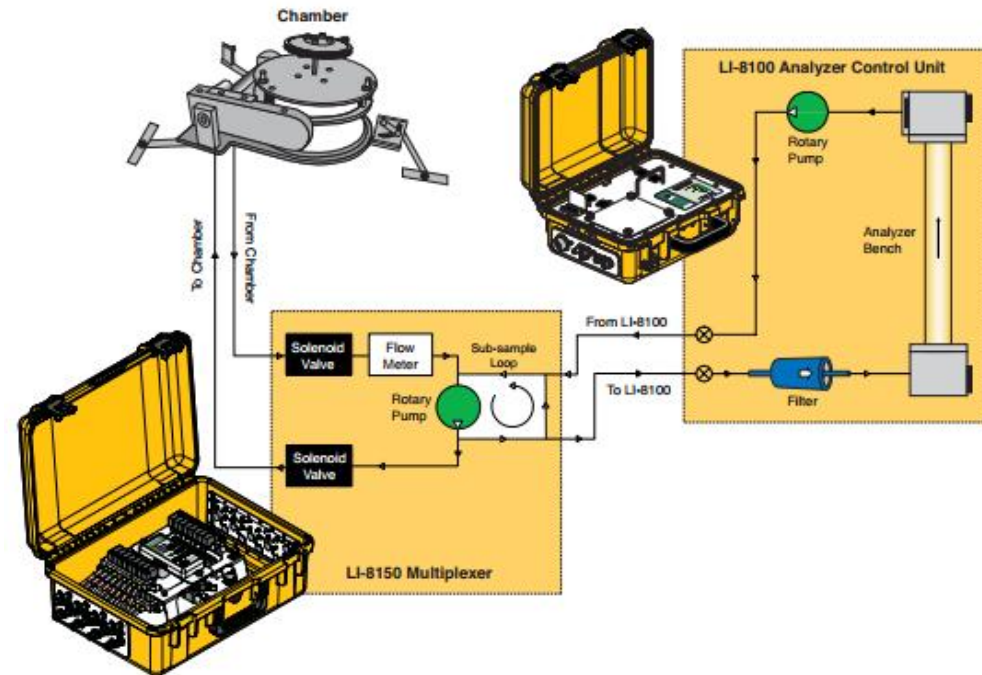
系统主要由LI-8100分析系统、LI-8150控制系统和闭路气室组成，为多通道自动观测系统。

CO₂浓度测量过程

气室关闭后，气室内CO₂浓度开始持续上升，通过截取有效测量数据，使用线性或指数回归方程斜率等计算CO₂通量；

气室切换过程

气室1测定完成后，首先经过一段时间的吹扫过程，然后切换至气室2，切换后，气室封闭，开始观测。



土壤CO₂通量观测：稳态系统

ρ 系统主要由分析系统、控制系统和开路气室组成。

∅ CO₂浓度略高于周围大气

通过气室顶端的开口设计，使气室内CO₂浓度略高于大气水平，但CO₂浓度保持稳定。

∅ CO₂浓度与周围大气相同

利用无CO₂空气稀释方法或者CO₂吸收装置预降低方法保持气室内CO₂浓度与周围大气相同。

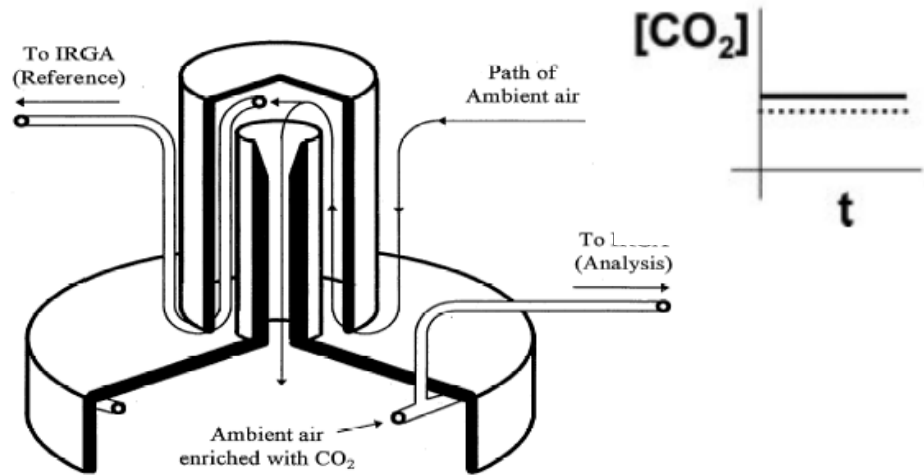
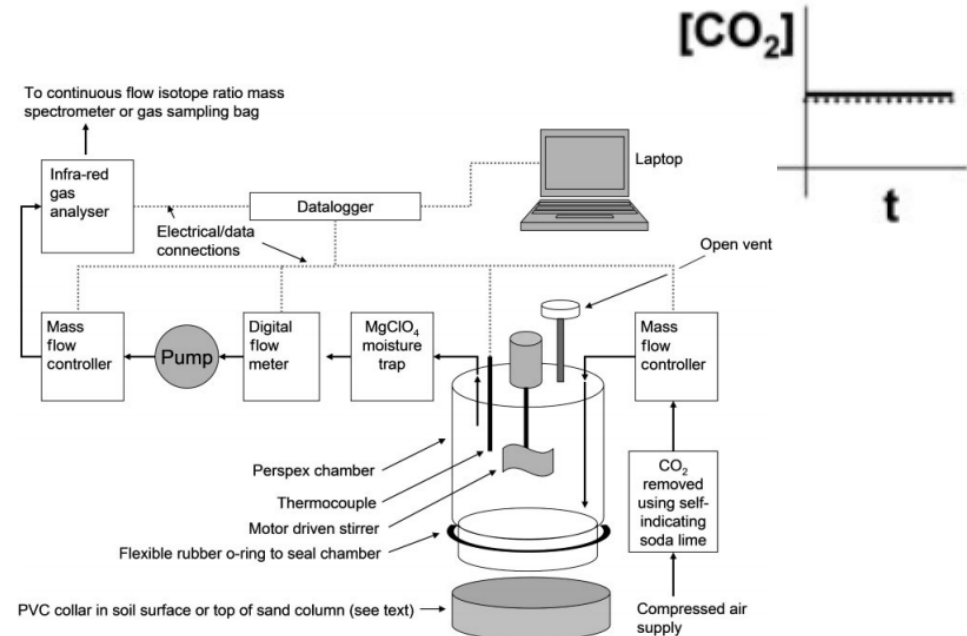


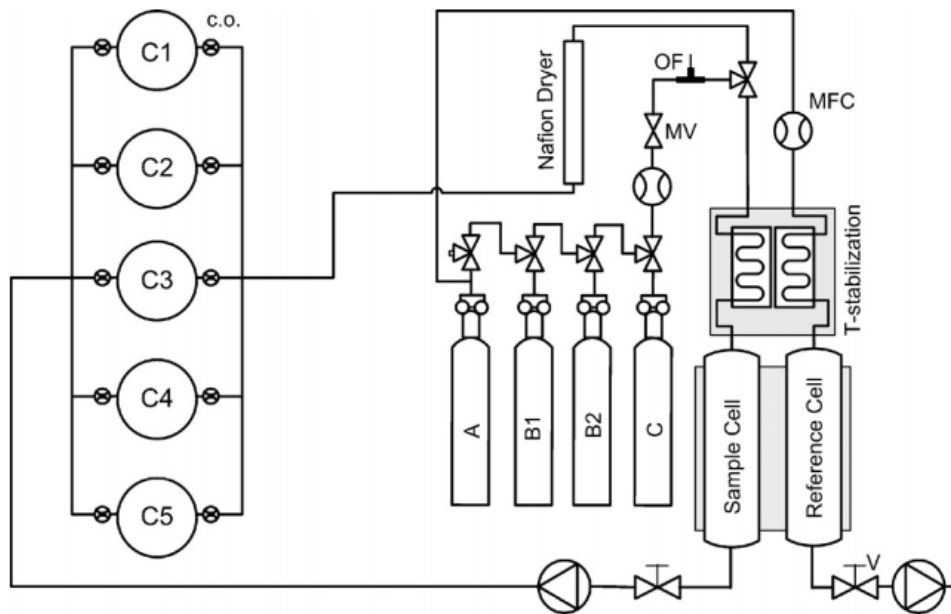
Figure 1. Schematic diagram of a section through an open system soil CO₂ efflux chamber.



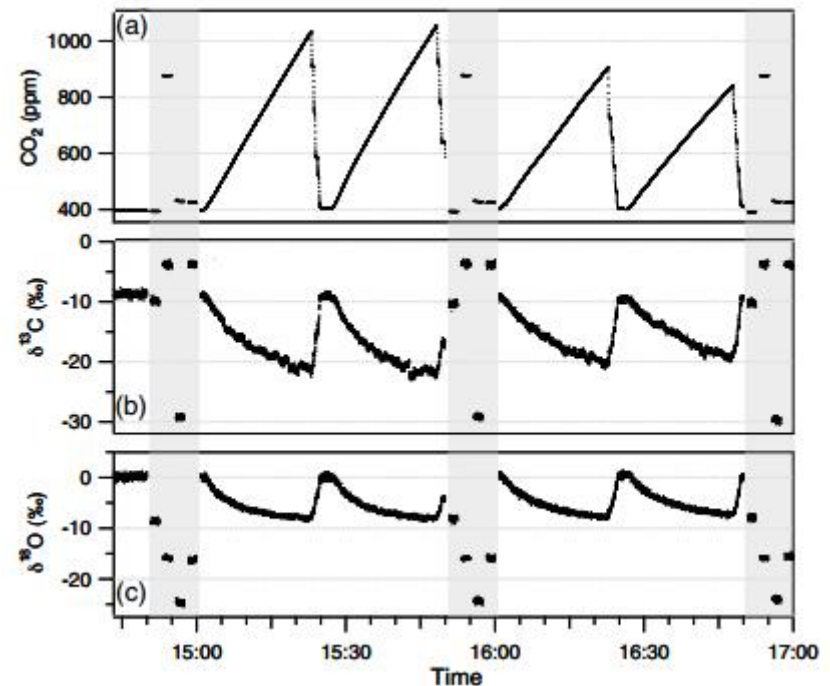
Midwood and Millard, 2010

土壤CO₂ δ¹³C通量观测：非稳态系统

- 通常包括分析仪（IRIS或IRMS）、控制系统、采样系统（闭路气室）和标定系统4个部分。其中IRIS分析仪主要包括TDLAS、WS-CRDS、OA-ICOS 和QCLAS等。
- 测定过程中，气室内CO₂浓度持续上升，利用Keeling plot和Flux ratio方法计算通量。



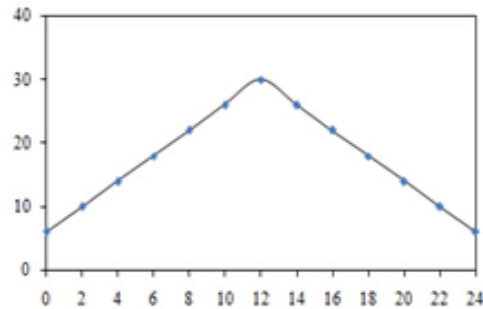
闭路气室（5个气室混合）+IRIS非稳态系统



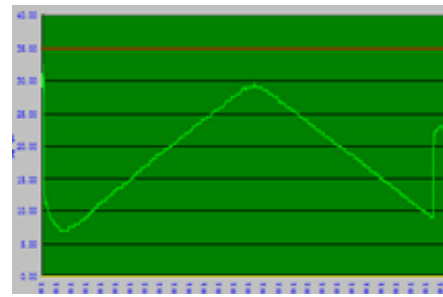
非稳态系统测定[CO₂]、δ¹³C和δ¹⁸O的时间序列图

控制条件土壤CO₂ δ¹³C通量观测：非稳态系统

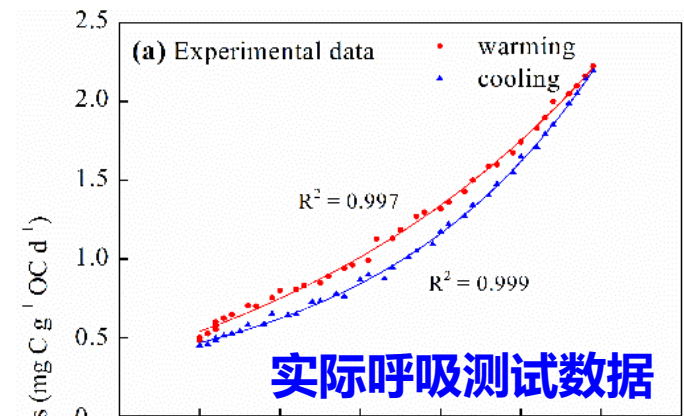
- ∅测定过程中，实际呼吸测试温度与培养箱设定温度相同；
- ∅重复测试间的相关分析结果中R²值高于0.97，表明仪器状态非常稳定；
- ∅模拟升/降温过程可以观察到SOM分解速率变化过程。



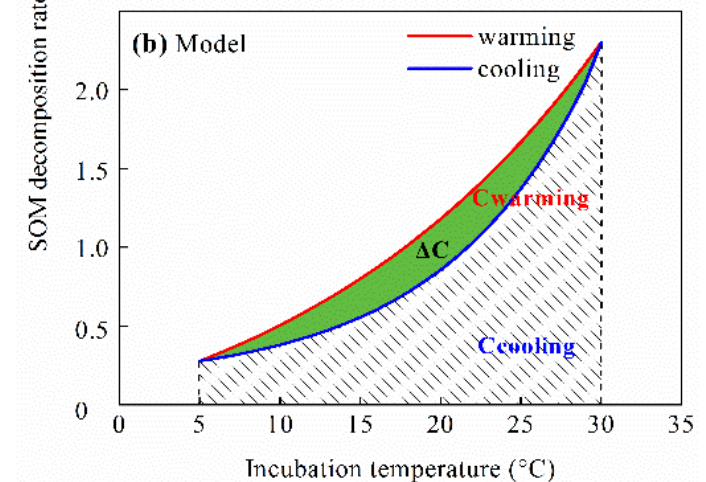
培养箱培养温度设定



实际呼吸测试温度



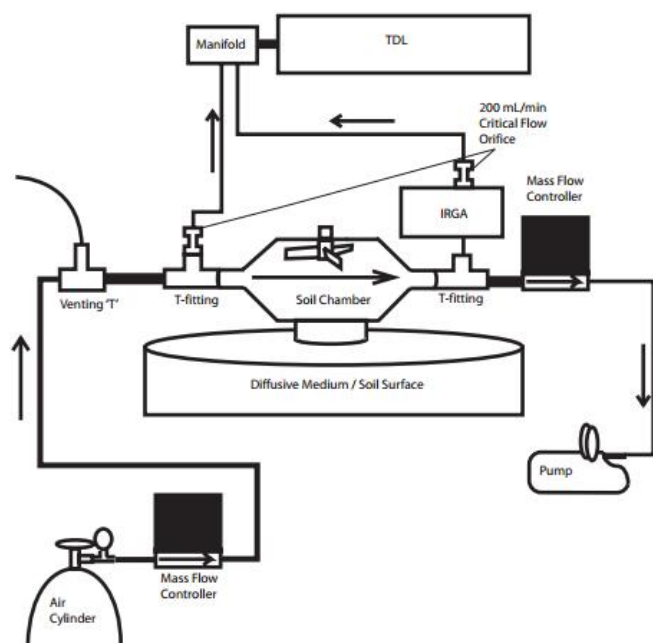
实际呼吸测试数据



土壤碳矿化δ¹³C变温模拟与测定技术(温学发等, 2019, 授权发明专利)

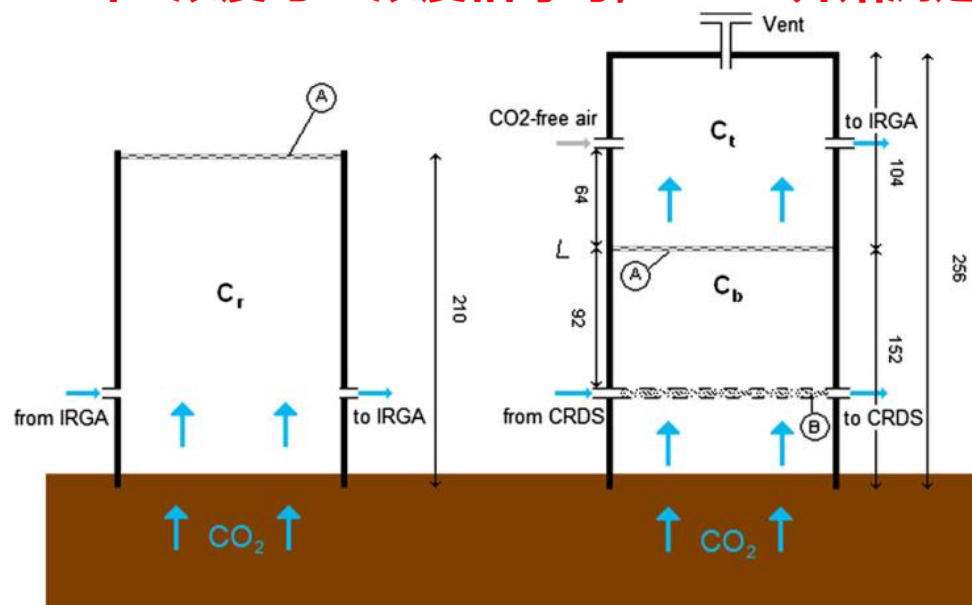
土壤CO₂ δ¹³C通量观测：稳态系统

- 通常包括分析仪（IRIS或IRMS）、控制系统、采样系统（开路气室）和标定系统4个部分。其中IRIS分析仪主要包括TDLAS、WS-CRDS、OA-ICOS和QCLAS等。
- 测定过程中，通过测定进气口和出气口的浓度差计算通量；需要精确测定进、出气室的CO₂ δ¹³C值。



开路气室+IRIS稳态系统

当C_t浓度与C_r浓度相等时，CRDS开始测定

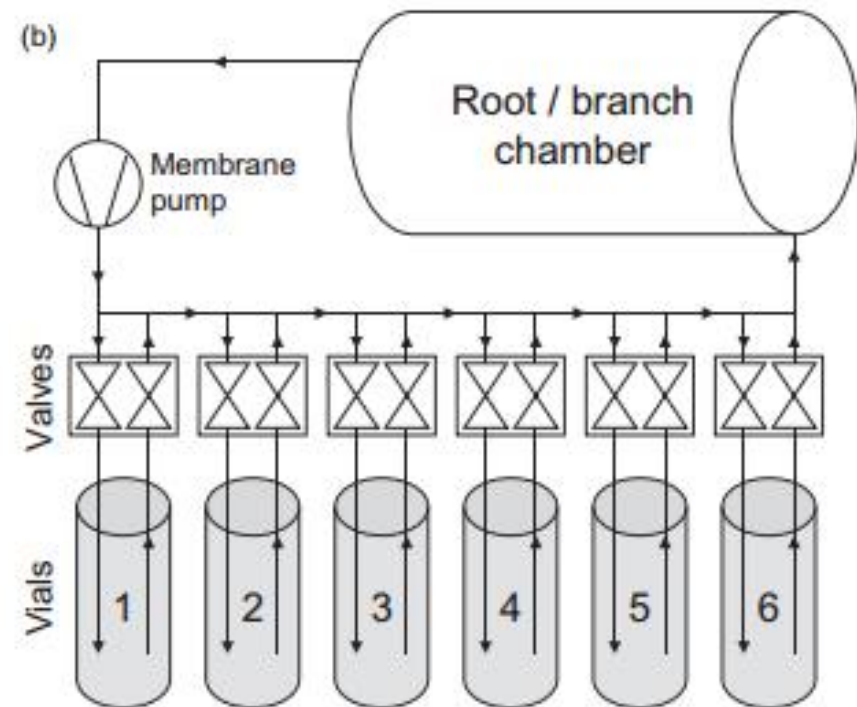
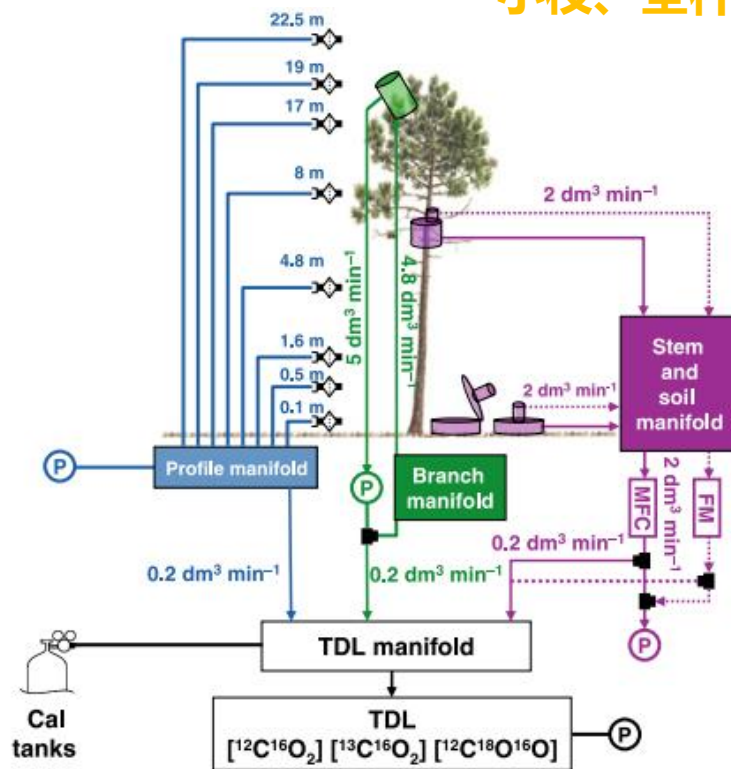


开路气室(参考室+双气室)+IRIS：土壤CO₂ δ¹³C值

叶片CO₂ δ¹³C通量观测：**非稳态系统**

- Ø 系统主要由IRIS或IRMS分析仪、控制系统、采样系统和标定系统组成；
- Ø 通常包括闭路气室（非稳态系统）和开路气室（稳态系统）两种方法。

小枝、茎杆和土壤呼吸协同观测系统

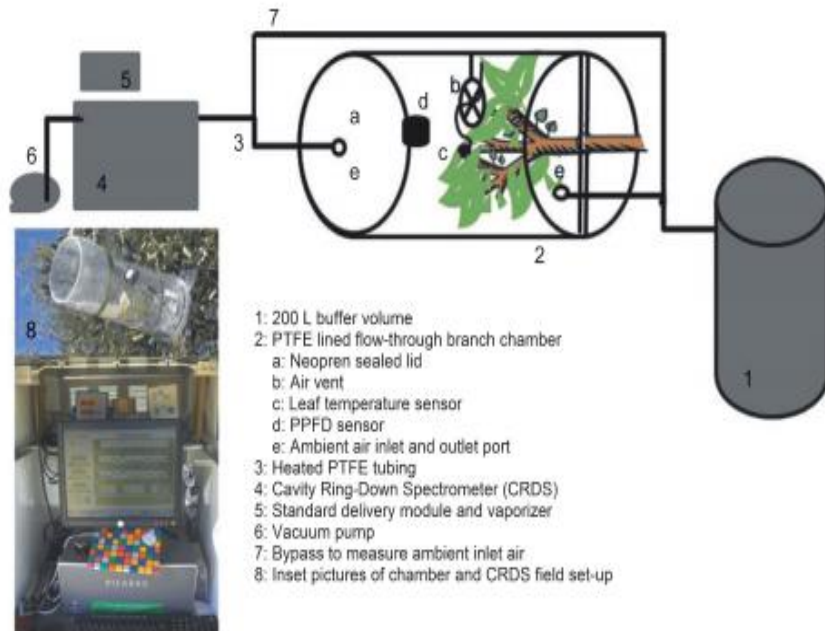


叶片：**非稳态系统**；茎杆和土壤：**稳态系统**

茎杆和根系：**非稳态系统**

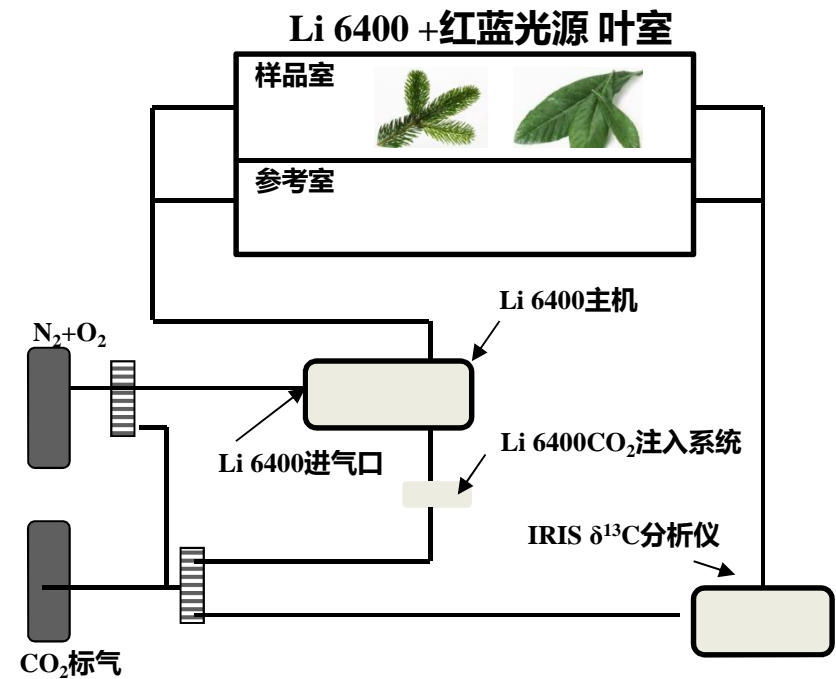
叶片CO₂ δ¹³C通量观测：**稳态系统**

- 将稳定同位素光谱技术与传统叶片光/CO₂响应测定技术结合(LI6400/6800)
- 获取A、g_s、g_m和V_{cmax}等参数，量化植物光合CO₂供应和需求关系



开路气室/LI6400/6800+IRIS稳态系统

Dubbert *et al.* New Phytologist (2014)

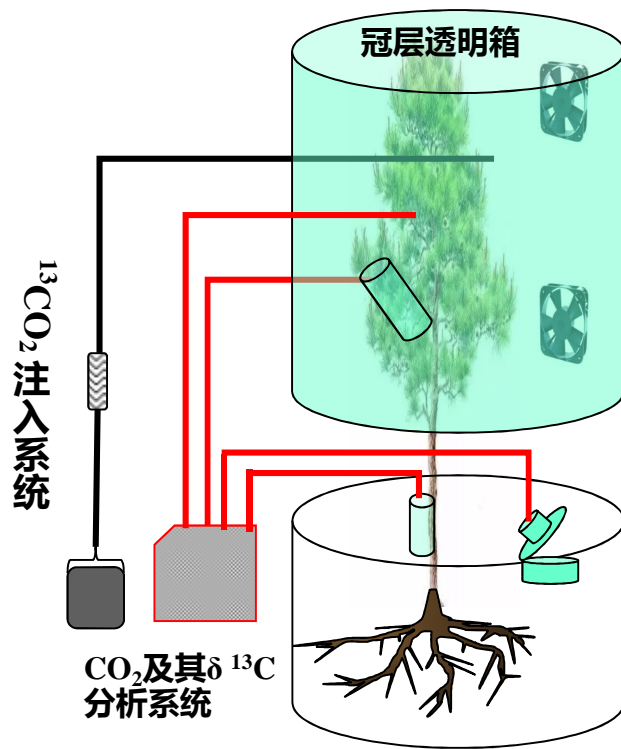


$$g_m = \frac{\left(b - a_i - \frac{eR_d}{A + R_d}\right) \times \frac{A}{p_a}}{a + \frac{(b-a)p_i}{p_a} - \Delta - \frac{eR_d(p_i - \Gamma^*)}{(A + R_d)p_a} - \frac{f\Gamma^*}{p_a}}$$

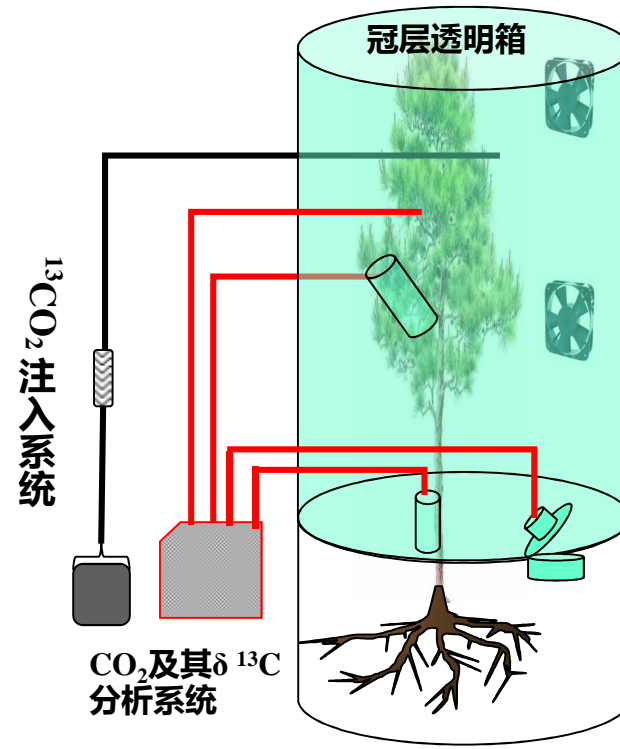
在线气体交换与叶片光合碳判别测定技术

冠层/生态系统CO₂ δ¹³C通量观测系统

- Ø 生态系统箱式通量观测系统主要分为两种：冠层通量测定（不包括土壤）和生态系统通量测定（包括土壤），可以采用明箱或暗箱测定。



冠层观测（不包括土壤）



生态系统观测（包括土壤）

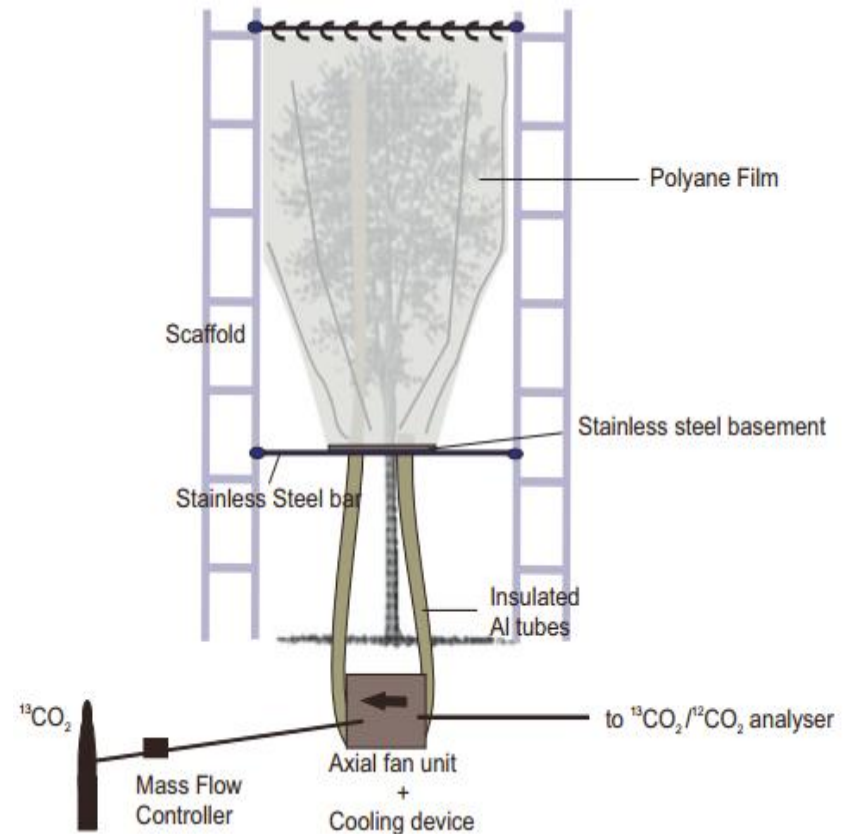
冠层/生态系统CO₂ δ¹³C通量观测系统

- Ø 生态系统通量观测多应用于草本或小灌木生态系统通量观测研究。
- Ø 高大乔木可以选择进行冠层或生态系统CO₂及其δ¹³C通量观测。



Figure 16-77. Plexiglass chamber measuring Prostrate Spurge

生态系统通量观测（包括土壤呼吸）



冠层通量观测（不包括土壤呼吸）

Plain et al., 2009; Epron et al., 2015

汇报提纲

一、研究背景与意义

二、系统组成、分类及原理

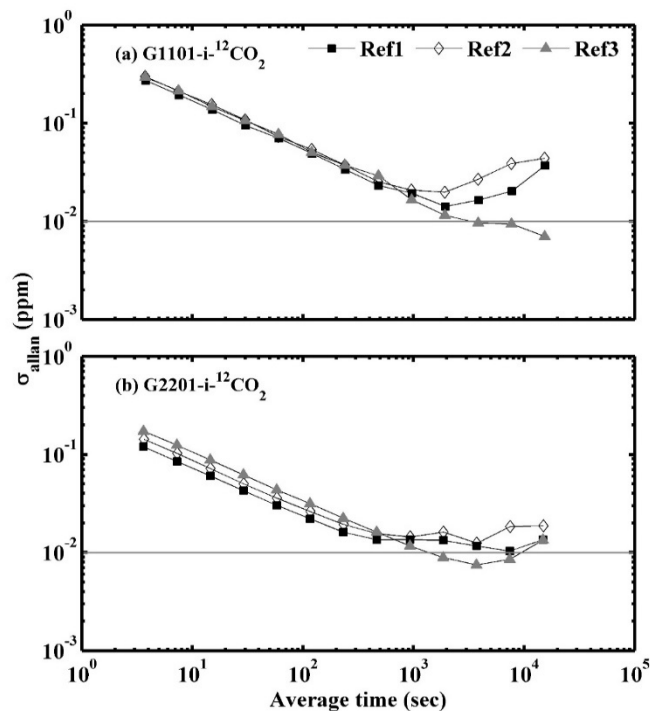
三、系统设计的理论要求与假设

四、土壤和植物箱式技术及应用

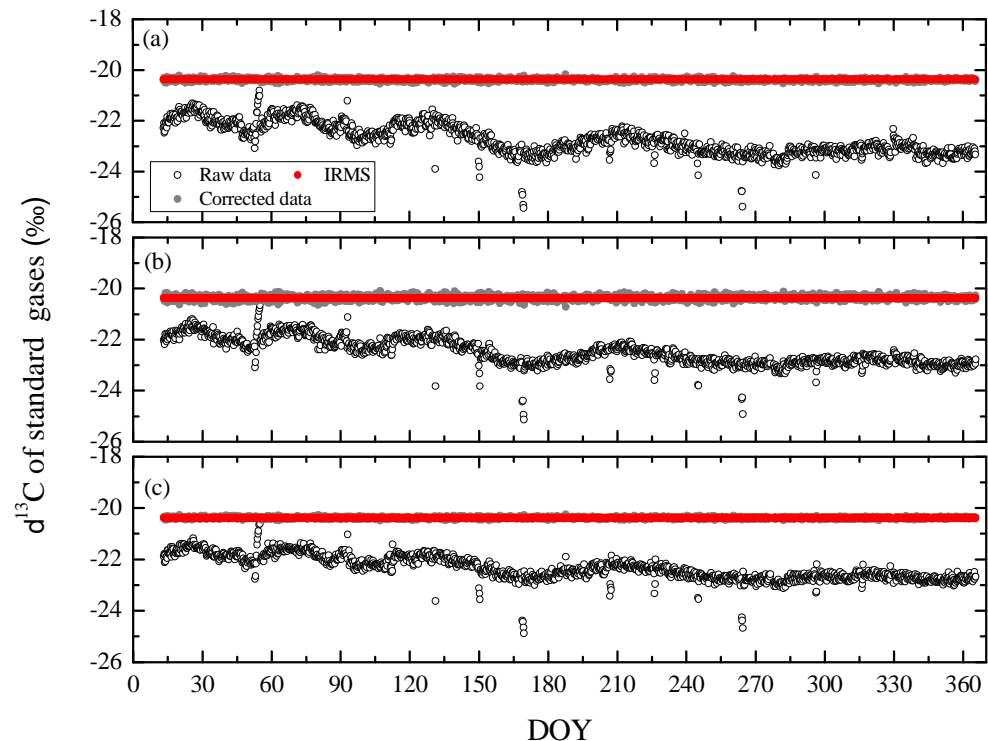
五、应用注意事项与建议

气体分析仪精度和准确度的校正

- ρ 均需要对气体分析仪进行定期标定(考虑水汽密度对CO₂密度的影响)。
- ρ 推荐利用3个或3个以上已知CO₂浓度和δ¹³C真值的CO₂标准气体涵盖待测气体CO₂浓度, 进行气体分析仪的**浓度依赖性校正**, 同时通过设置适当的校正频率, **校正时间漂移**并进行**数据溯源**(庞家平&温学发, 2018)。



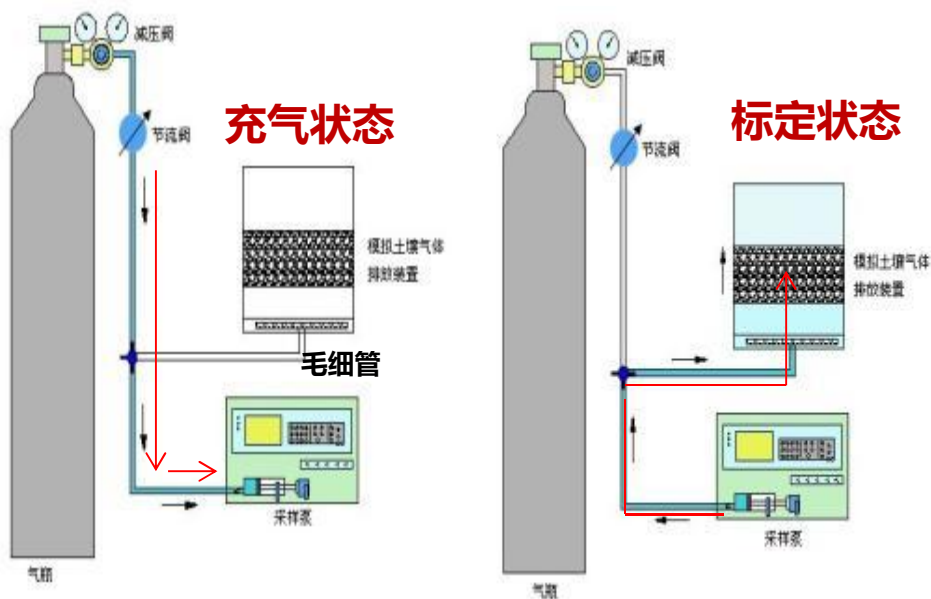
Allan方差分析确认分析仪短期最优性能(Pang et al., 2016)



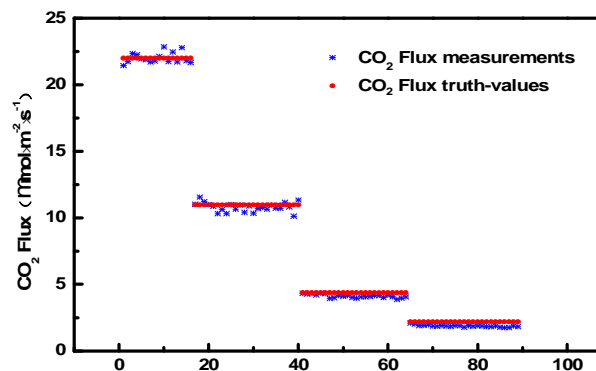
三组标气δ¹³C三点标定结果(Chen et al., 2017)

系统测定数据精度和准确度的评价

- 均需要对系统测定数据的精度和准确度进行评价，通过**零通量测试**和**模拟通量测试**对测定数据精度和准确度进行评价。
- 零通量测试与系统漏率测试类似，但不需要使用标气，只要将气室箱体密封进行正常测定即可。



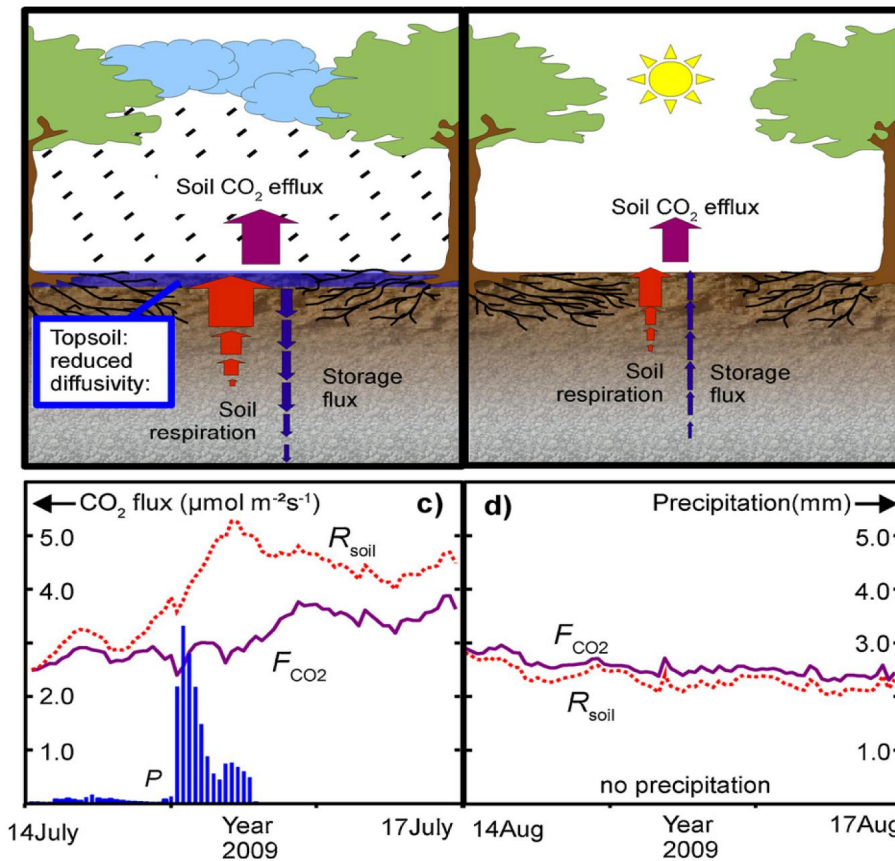
验证系统的结构设计示意图(于贵瑞等, 2015, 授权发明专利)



项目	CO ₂ Flux ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			
流速 (mL·min ⁻¹)	实测值	真实值	重复性	准确度
1	22.04±0.41	22.00	0.04	-0.18%
0.5	10.79±0.35	10.97	-0.18	-1.64%
0.2	4.12±0.13	4.38	-0.26	-5.94%
0.1	1.88±0.08	2.19	-0.31	-14.16%

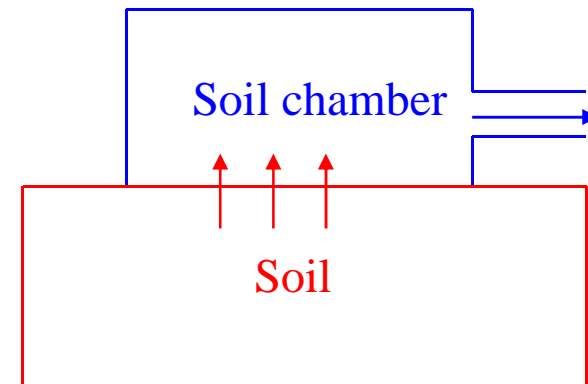
系统测定数据代表性的评价

- 测定过程保证待测气体的产生和扩散不受影响，并且所有气体均扩散至箱体、有效消除气室的边缘效应、气体非扩散过程可以忽略等。



注意“物质守恒方程”边界条件假设

“土壤呼吸”不一定等于“土壤CO₂释放量”

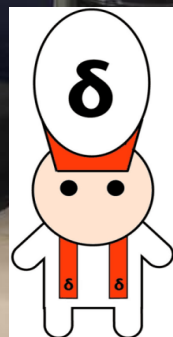


- 土壤呼吸：单位面积、单位时间内生态系统从土壤中产生的CO₂数量
- 土壤CO₂释放量：单位面积、单位时间从土壤进入大气的CO₂数量(箱式系统)

土壤CO₂向上传输受土壤剖面状况影响(Maier et al. 2011)

稳定同位素质谱(IRMS)和光谱(IRIS)实验室

敬请批评指正



中国科学院地理科学与资源研究所
生态系统网络观测与模拟重点实验室
所级中心室内分析平台

——生态要素分析实验室