

ChinaFLUX第十七次通量观测理论与技术培训

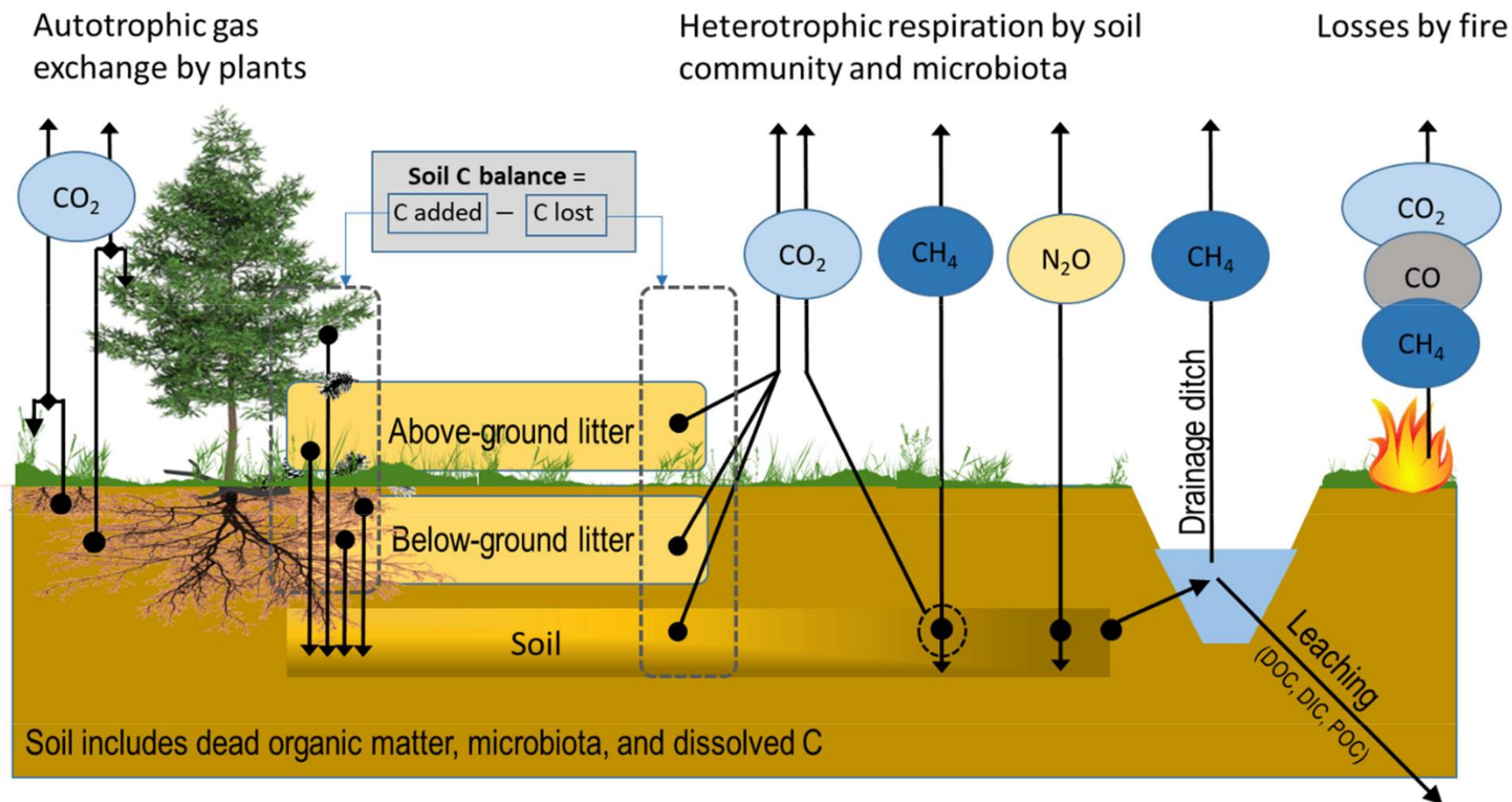
土壤温室气体通量测量原理与技术

贾子毅

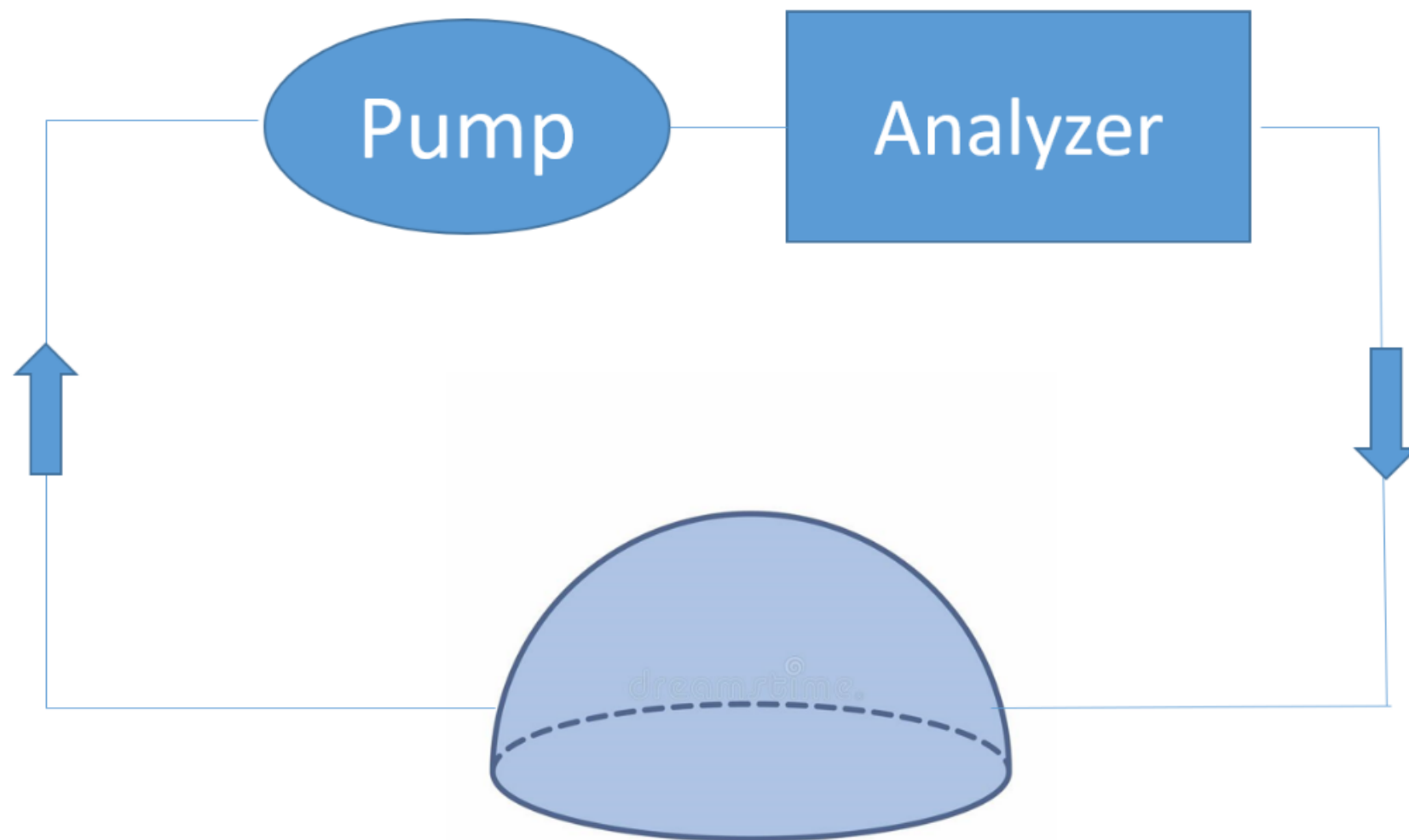
北京力高泰科技有限公司市场部
2022年8月19日



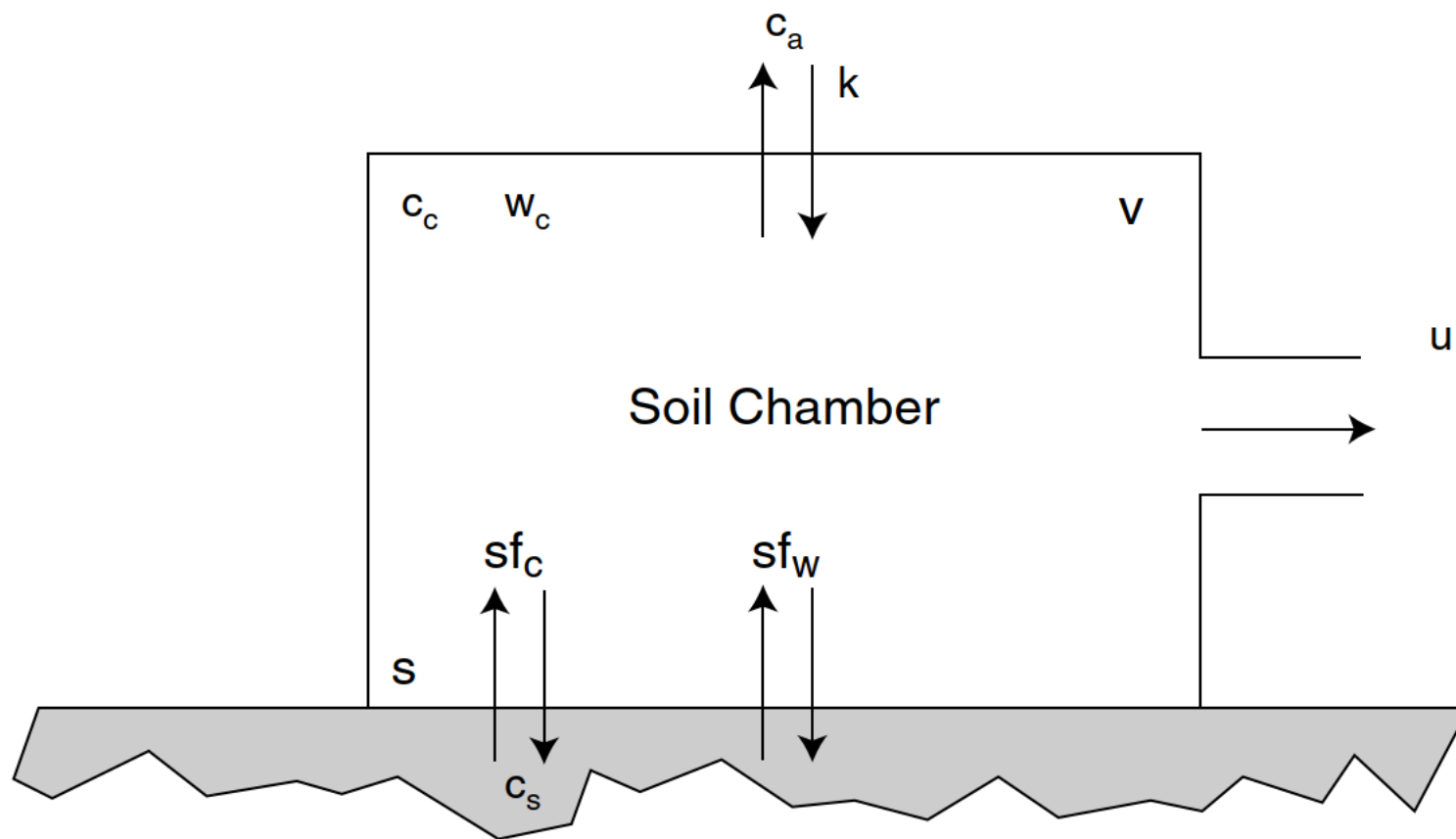
生态系统土壤温室气体通量过程



Chamber式测量方法



土壤温室气体通量计算模型



C_a 大气 CO_2 浓度 mol mol^{-1}

k “泄露”释放常数 s^{-1}

C_c 测量室内 CO_2 浓度 mol mol^{-1}

W_c 测量室内 H_2O 浓度 mol mol^{-1}

V 测量系统总体积 m^3

S 待测土壤面积 m^2

f_c 土壤温室气体通量 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

f_w 土壤水汽通量 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

C_s 土壤表面温室气体浓度 mol mol^{-1}

u 出气速度 mol s^{-1}

物质平衡方程Mass Balance Equations

CO₂ 物质平衡方程

$$V \frac{\partial \rho_c^c}{\partial t} = sf_c - c_c u$$

【1】

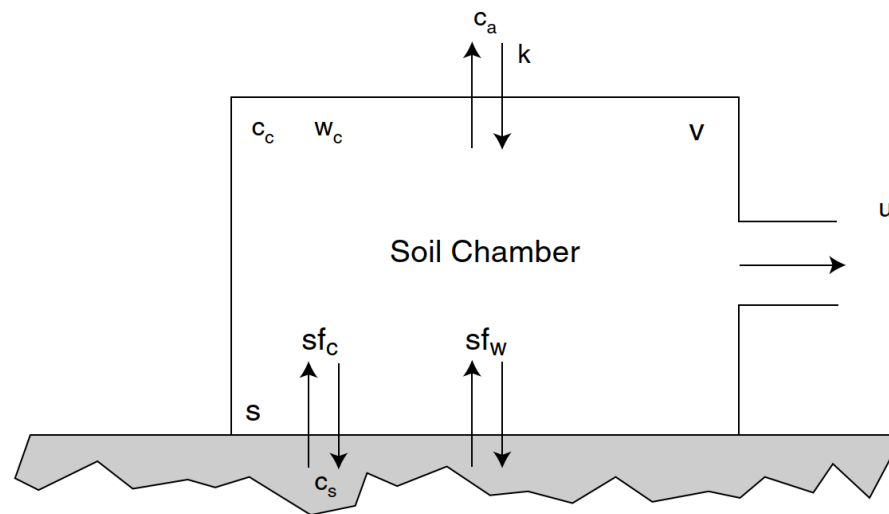
物质浓度随时间的变化（大部分情况下是增加）率符合物质平衡定律。

等式左边代表测量室内CO₂/H₂O随时间的变化率等于单位时间通过土壤表面进入测量室的CO₂/H₂O与离开测量室的差值(单位mol s⁻¹)。

H₂O 物质平衡方程

$$V \frac{\partial \rho_c^w}{\partial t} = sf_w - w_c u$$

【2】



V 测量系统总体积 m³,
pcc 测量室内CO₂的摩尔密度 mol m⁻³
pcw测量室内H₂O的摩尔密度 mol m⁻³

t 时间 s,
S 待测土壤面积 m²

fc 土壤温室气体通量 mol m⁻² s⁻¹
fw 土壤H₂O通量 mol m⁻² s⁻¹
cc 测量室内CO₂的摩尔浓度 mol mol⁻¹
wc 测量室内H₂O的摩尔浓度 mol mol⁻¹

u 离开速度 mol s⁻¹

物质平衡方程Mass Balance Equations

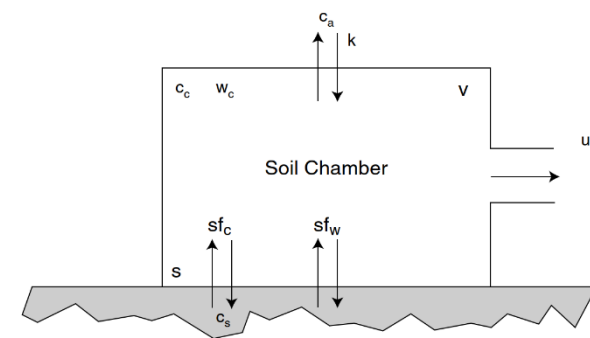
测量室内空气物质平衡方程

$$V \frac{\partial \rho_c}{\partial t} = sf_c + sf_w - u \quad \text{【3】}$$

$$U = sf_w \quad \text{【4】}$$

根据理想气体状态方程 $P V = n R T$,
 $n/V = P/RT$, n/V 气体摩尔密度, P 压强, R 气体常数, T 绝对温度
所以当压强和温度不变时, 气体摩尔密度是不变的。因此【3】等式左边为0。

$Sf_w \gg Sf_c$, 可把 sfc 忽略, 因此得到公式【4】



土壤表面水汽通量的计算

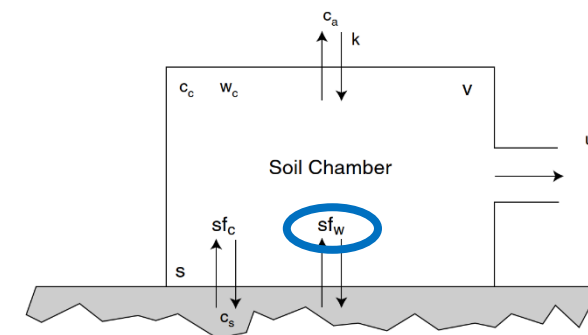
$$\rho_c^w = \rho_c w_c$$

测量室内H₂O摩尔密度(mol m⁻³)=测量室内空气摩尔密度(mol m⁻³)×测量室内H₂O摩尔浓度(mol mol⁻¹)

$$v \frac{\partial \rho_c^w}{\partial t} = sf_w - w_c u \quad [2]$$

$$u = sf_w \quad [4]$$

$$sf_w = \frac{v \rho_c}{1 - w_c} \frac{\partial w_c}{\partial t} \quad [5]$$

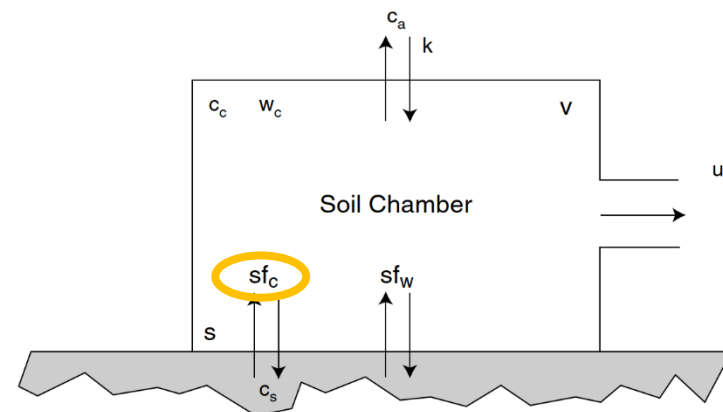


土壤温室气体通量的计算

$$v \frac{\partial \rho_c^c}{\partial t} = sf_c - c_c u \quad \text{【1】}$$

$$u = sf_w \quad \text{【4】}$$

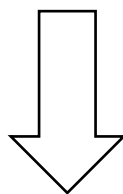
$$sf_w = \frac{v \rho_c}{1 - w_c} \frac{\partial w_c}{\partial t} \quad \text{【5】}$$



$$f_c = \frac{v \rho_c}{s} \left(\frac{\partial c_c}{\partial t} + \frac{c_c}{1 - w_c} \frac{\partial w_c}{\partial t} \right) \quad \text{【6】}$$

引入一个新参数 C_c' : 经过水汽修正后的 CO_2 浓度 C_{dry}

$$C_C' = C_C (1 - w_C)^{-1} \quad 【7】$$



将 C_c' 微分, 得到 C_{dry} 随时间的变化 (大部分情况下是增加) 率

$$(1 - w_c) \frac{\partial c_c'}{\partial t} = \frac{\partial c_c}{\partial t} + \frac{c_c}{1 - w_c} \frac{\partial w_c}{\partial t} \quad 【8】$$

土壤温室气体通量计算新公式

$$(1 - w_c) \frac{\partial c_c'}{\partial t} = \frac{\partial c_c}{\partial t} + \frac{c_c}{1 - w_c} \frac{\partial w_c}{\partial t} \quad \text{【8】}$$

$$f_c = \frac{v\rho_c}{s} \left(\frac{\partial c_c}{\partial t} + \frac{c_c}{1 - w_c} \frac{\partial w_c}{\partial t} \right) \quad \text{【6】}$$

$$f_c = \frac{v\rho_c}{s} (1 - w_c) \frac{\partial c_c'}{\partial t} \quad \text{【9】}$$

【9】显著好于【6】，【6】中需要计算测量室中H₂O摩尔浓度的增加速率，多数情况下，H₂O摩尔浓度的增加速率并不是以线性方式，如果以线性方式估算，会存在偏差。

使用【9】 计算测量室“刚刚闭合时的”土壤温室气体通量

$$f_c = \frac{V\rho_c}{S} (1 - w_c) \frac{\partial c_c'}{\partial t} \quad \text{【9】}$$

f_c 土壤温室气体通量 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

V 测量系统总体积 m^3

ρ_c 测量室刚闭合时内部空气的摩尔密度 mol m^{-3} 可以根据理想气体状态方程计算 $PV=nRT$, $\rho_c = n/V = P_o/RT_o$

S 待测土壤面积 m^2

w_c 测量室刚闭合时 H_2O 的摩尔浓度 mol mol^{-3}

$\frac{\partial c_c'}{\partial t}$ 初始 C_{dry} 的增速

计算测量室“刚刚闭合时的”土壤温室气体通量公式

$$F_c = \frac{10VP_0\left(1 - \frac{W_0}{1000}\right)}{RS(T_0 + 273.15)} \frac{\partial C'}{\partial t}$$

F_c 土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ;

V 系统中的总体积 (cm^3) ;

P₀ 测量室中的初始气压 (kPa) ;

W₀ 测量室中的初始水汽浓度 (mmol mol^{-1}) ;

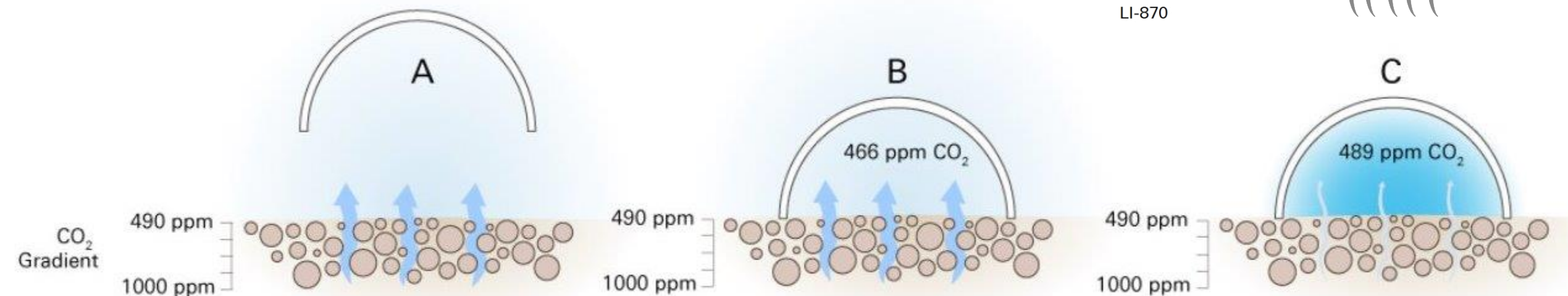
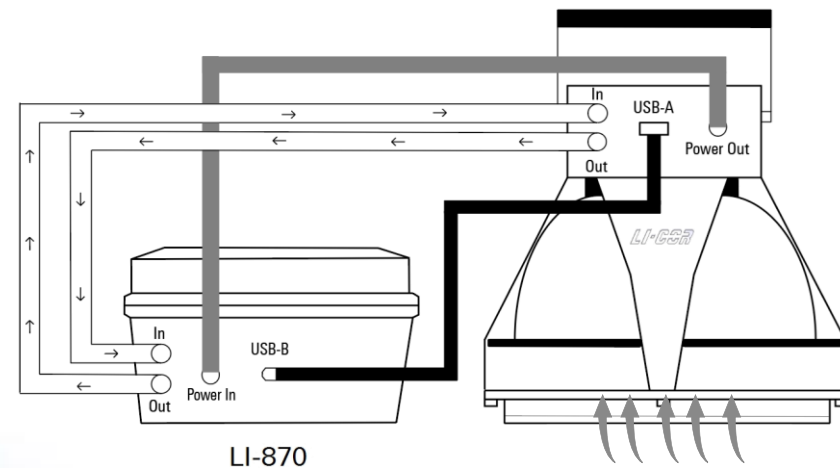
R 理想气体常数 ($8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ;

S 测量室所圈定的土壤面积 (cm^2) ;

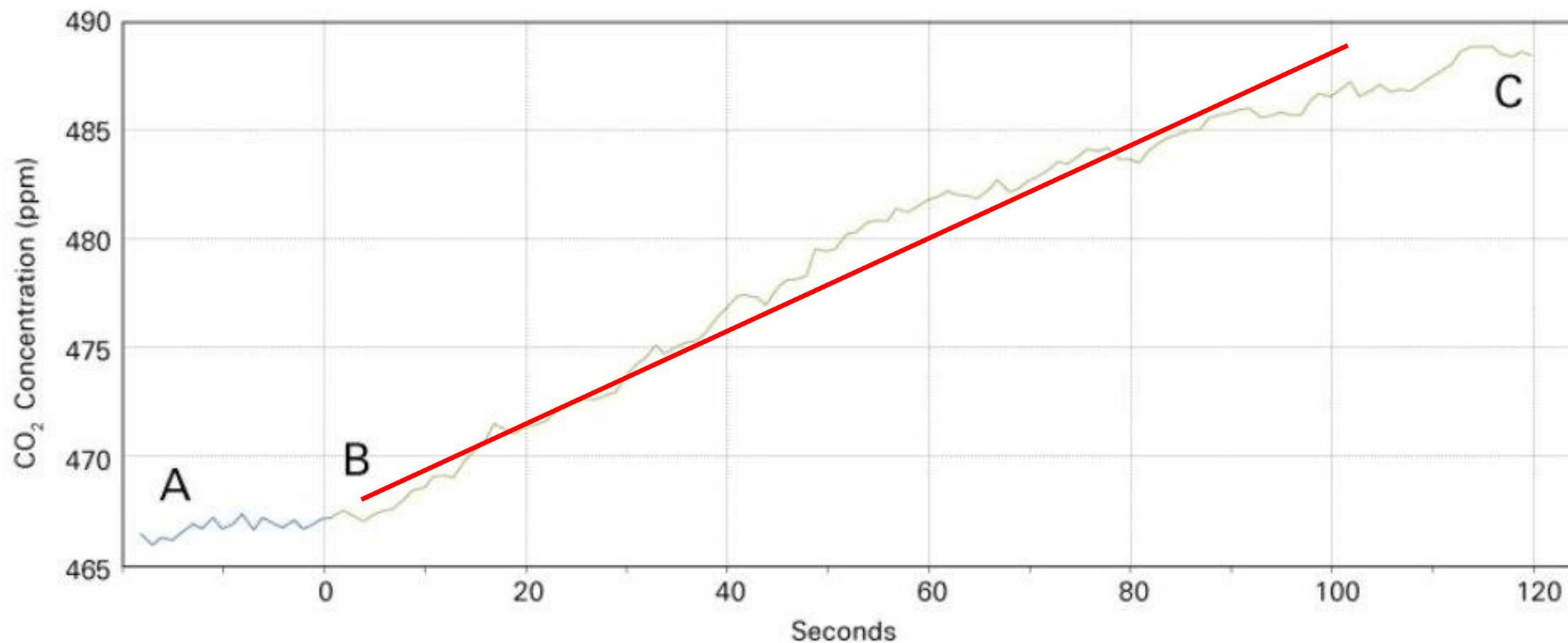
T 测量室中的初始空气温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

$\frac{\partial C'}{\partial t}$ 测量室中经过水汽修正后的初始CO₂浓度的增速 ($\mu\text{mol mol}^{-1}\text{s}^{-1}$) 。

测量前，测量开始时，测量一段时间后
测量室内CO₂浓度的升高



测量前, 测量开始时, 测量一段时间后 测量室内CO₂浓度的升高



线性模型对土壤温室气体通量的影响

Biogeosciences, 4, 1005–1025, 2007
www.biogeosciences.net/4/1005/2007/
© Author(s) 2007. This work is licensed
under a Creative Commons License.



CO₂ flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression

L. Kutzbach¹, J. Schneider¹, T. Sachs², M. Giebels³, H. Nykänen⁴, N. J. Shurpali⁴, P. J. Martikainen⁴, J. Alm⁵, and M. Wilmking¹

¹Institute for Botany and Landscape Ecology, Ernst Moritz Arndt University Greifswald, Grimmer Straße 88, 17487 Greifswald, Germany

²Foundation Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Research Unit Potsdam, Telegrafenberg A43, 14473 Potsdam, Germany

³Institute of Geocology, Technical University Braunschweig, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig, Germany

⁴Department of Environmental Science, Biogeochemistry Research Group, University of Kuopio, P.O. Box 1627, 70211 Kuopio, Finland

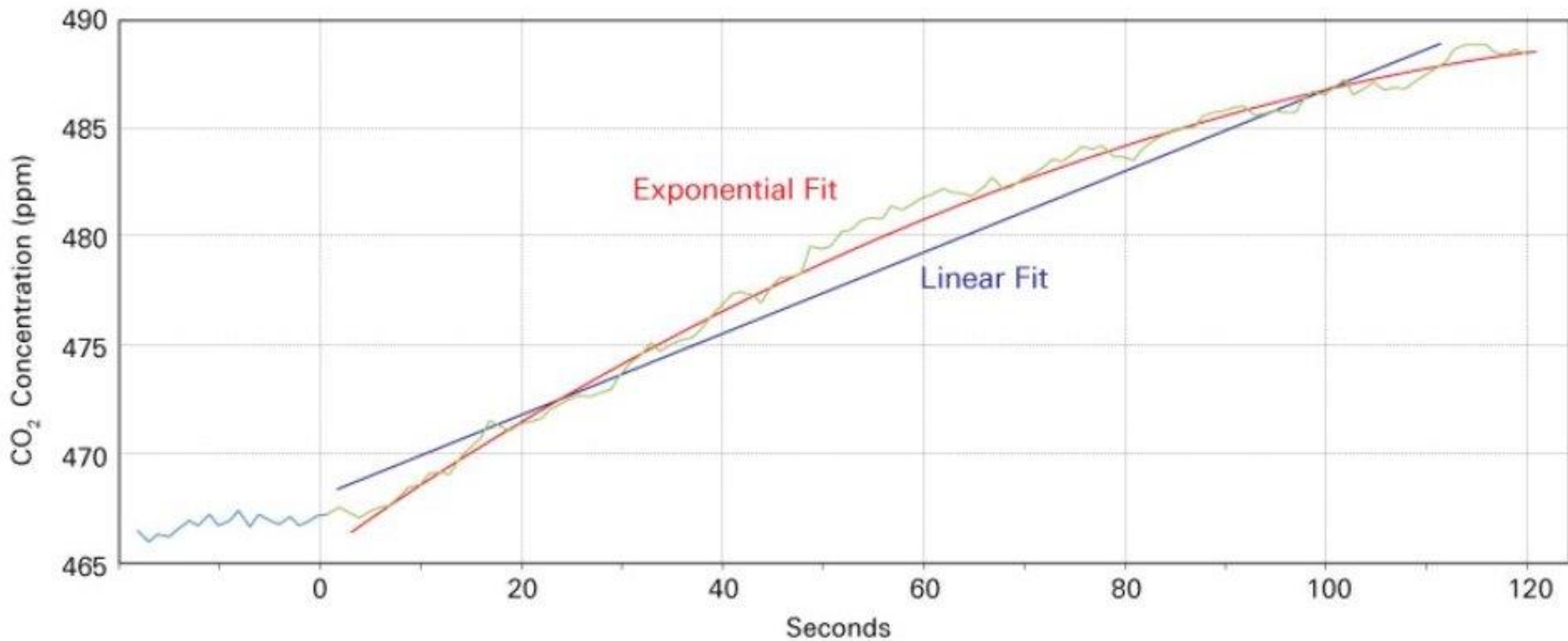
⁵Finnish Forest Research Institute, Joensuu Research Unit, P.O. Box 68, 80101 Joensuu, Finland

Received: 23 May 2007 – Published in Biogeosciences Discuss.: 6 July 2007

Revised: 1 November 2007 – Accepted: 2 November 2007 – Published: 20 November 2007

指数方程拟合(Exponential Fit)

$$\frac{\partial C'}{\partial t}$$



计算测量室“刚刚闭合时的”土壤温室气体通量公式

$$F_c = \frac{10VP_0\left(1 - \frac{W_0}{1000}\right)}{RS(T_0 + 273.15)} \frac{\partial C'}{\partial t}$$

F_c 土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ;

V 系统中的总体积 (cm^3) ;

P₀ 测量室中的初始气压 (kPa) ;

W₀ 测量室中的初始水汽浓度 (mmol mol^{-1}) ;

R 理想气体常数 ($8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ;

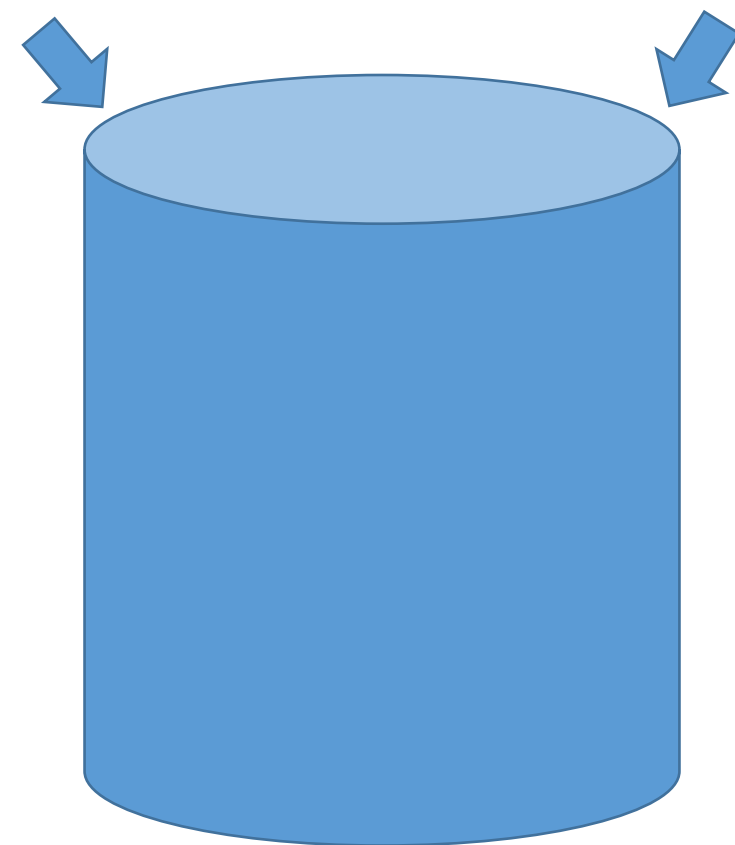
S 测量室所圈定的土壤面积 (cm^2) ;

T 测量室中的初始空气温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

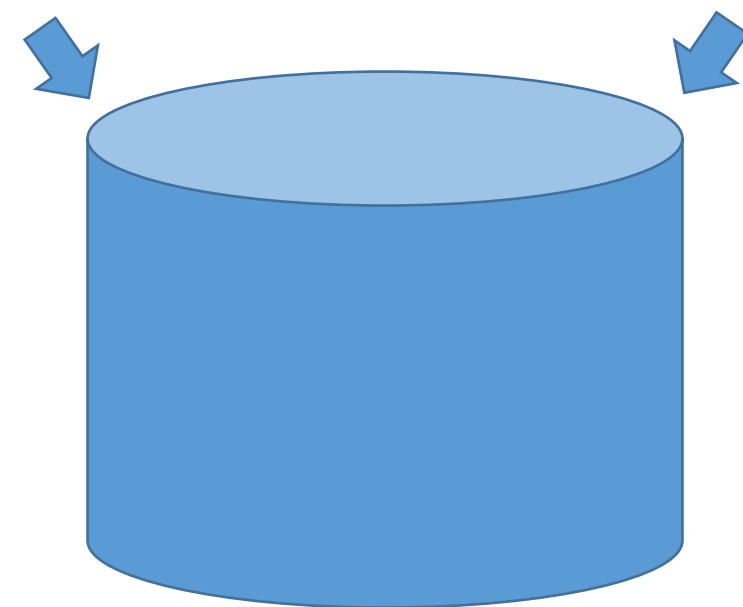
$\frac{\partial C'}{\partial t}$ 测量室中经过水汽修正后的初始CO₂浓度的增速 ($\mu\text{mol mol}^{-1}\text{s}^{-1}$) 。

第1个问题：你打算做一个什么形状의测量室？

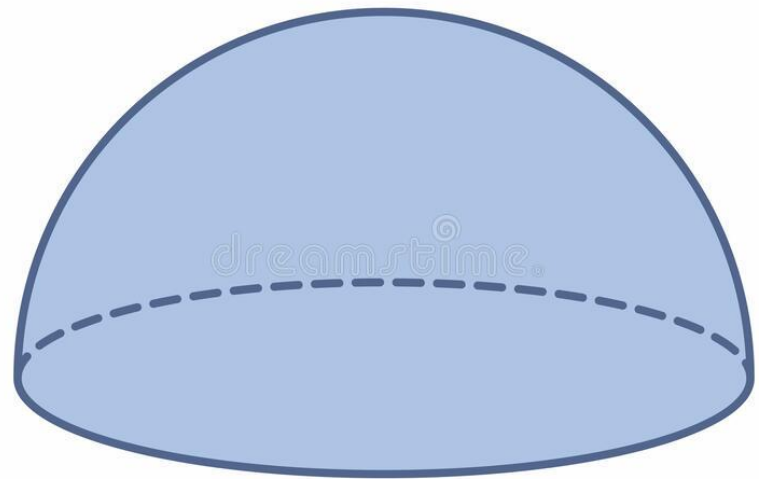
“圆柱形”体积可调测量室



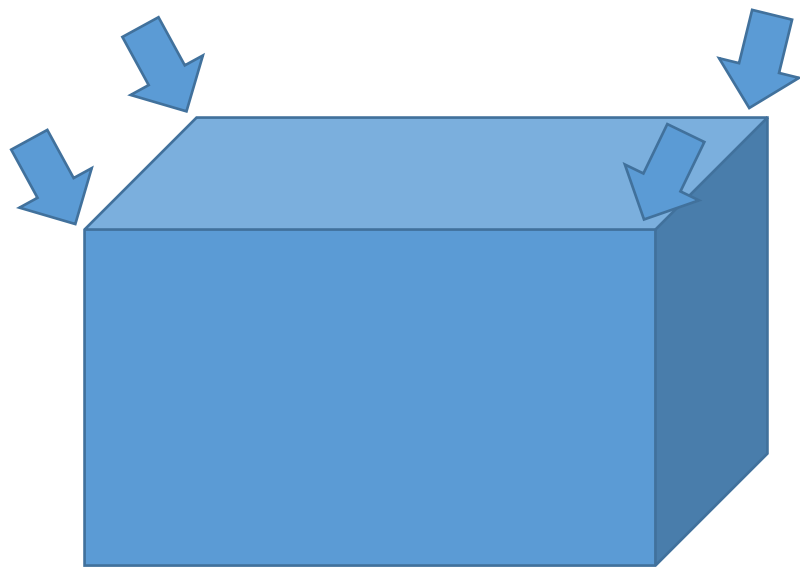
“圆柱形”固定体积测量室



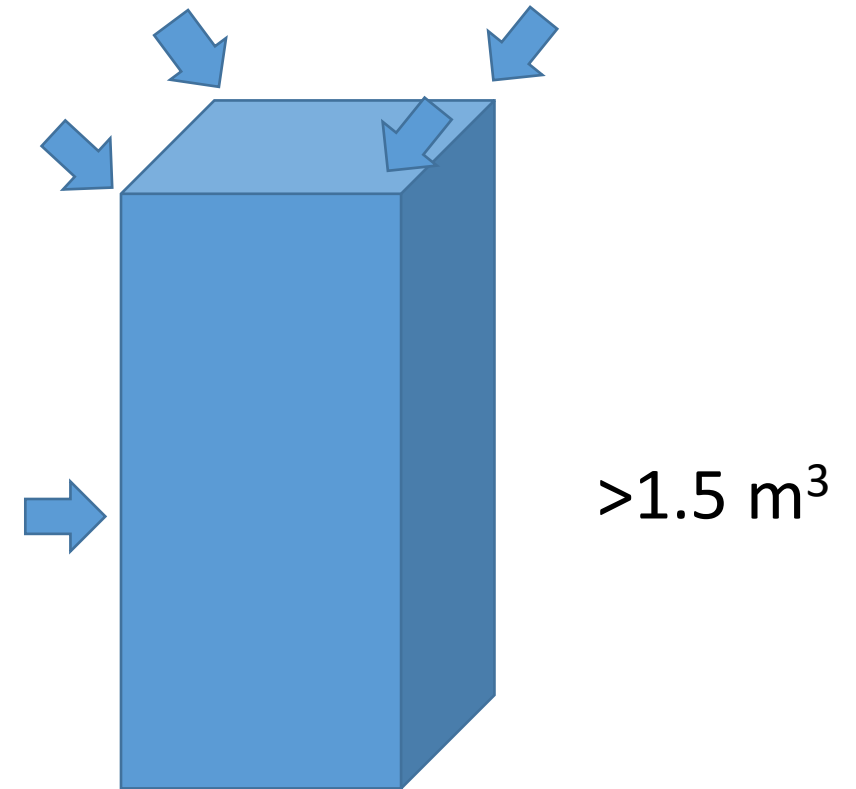
“碗形”体积固定测量室



“箱式”固定体积测量室



“箱式”固定体积NEE测量室



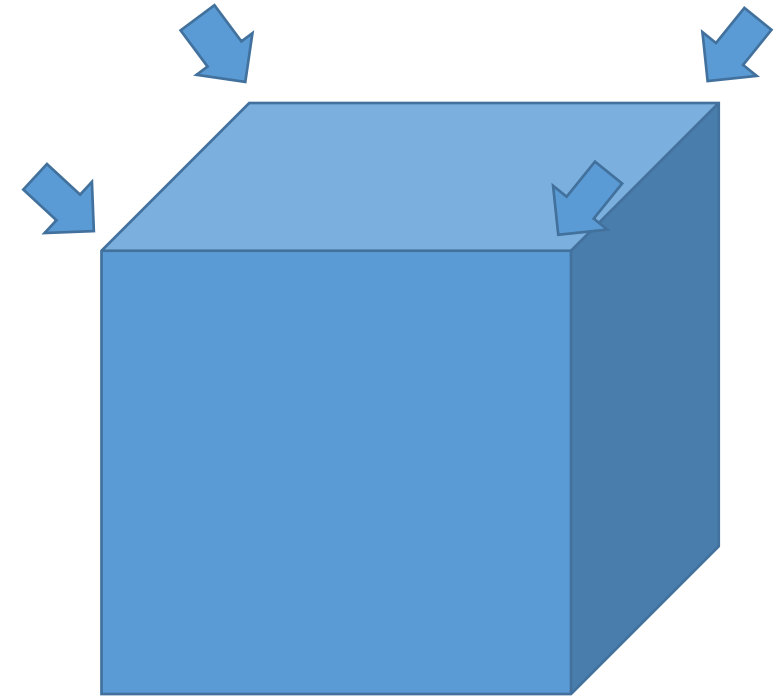
Li C, Han W, Peng M, et al. Developing an automated gas sampling chamber for measuring variations in CO₂ exchange in a maize ecosystem at night[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6117.

“箱式” 固定体积NEE/RS测量室

Transparent chamber for
 CH_4 and N_2O measurement

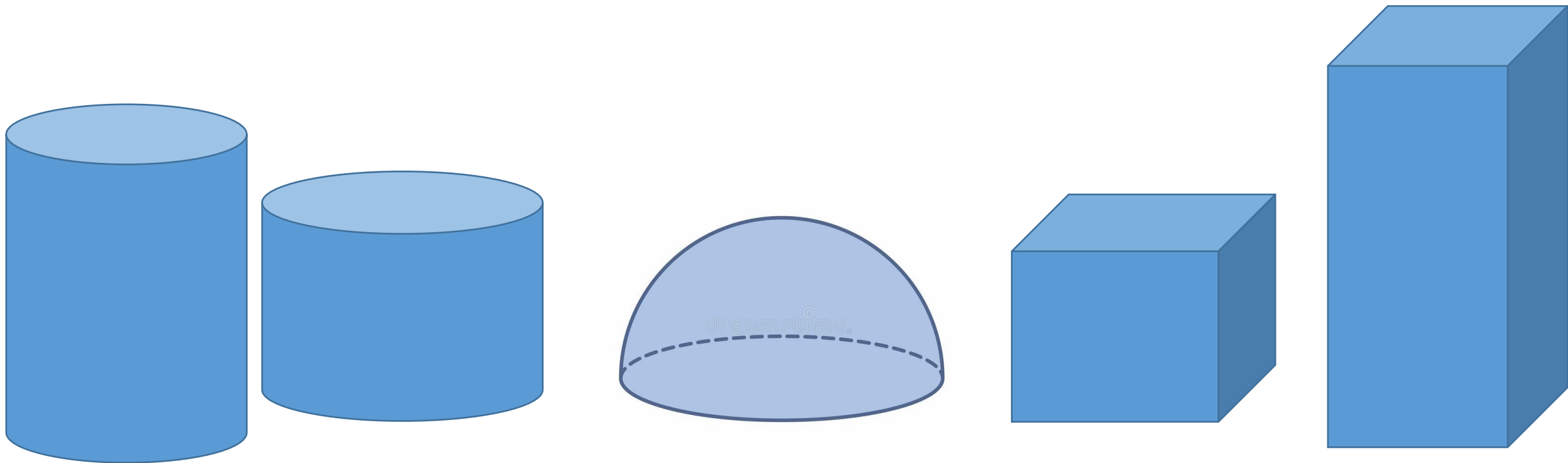


Dark chamber for
 R_m measurement

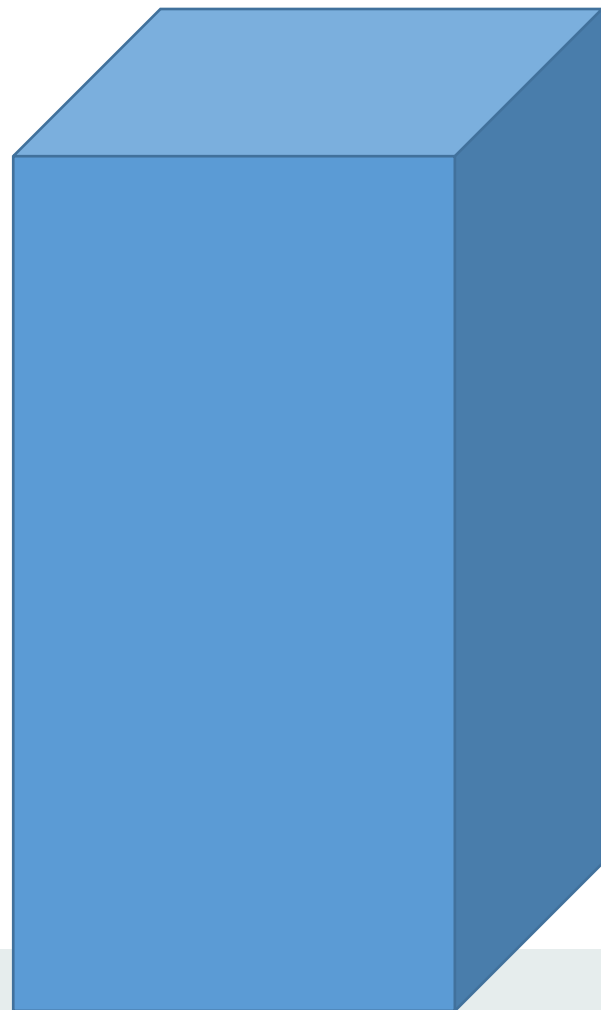


第2个问题：你怎么确保从测量室抽取的气体有“代表性”？

是否有代表性取决于气体是否已经“充分的混合”



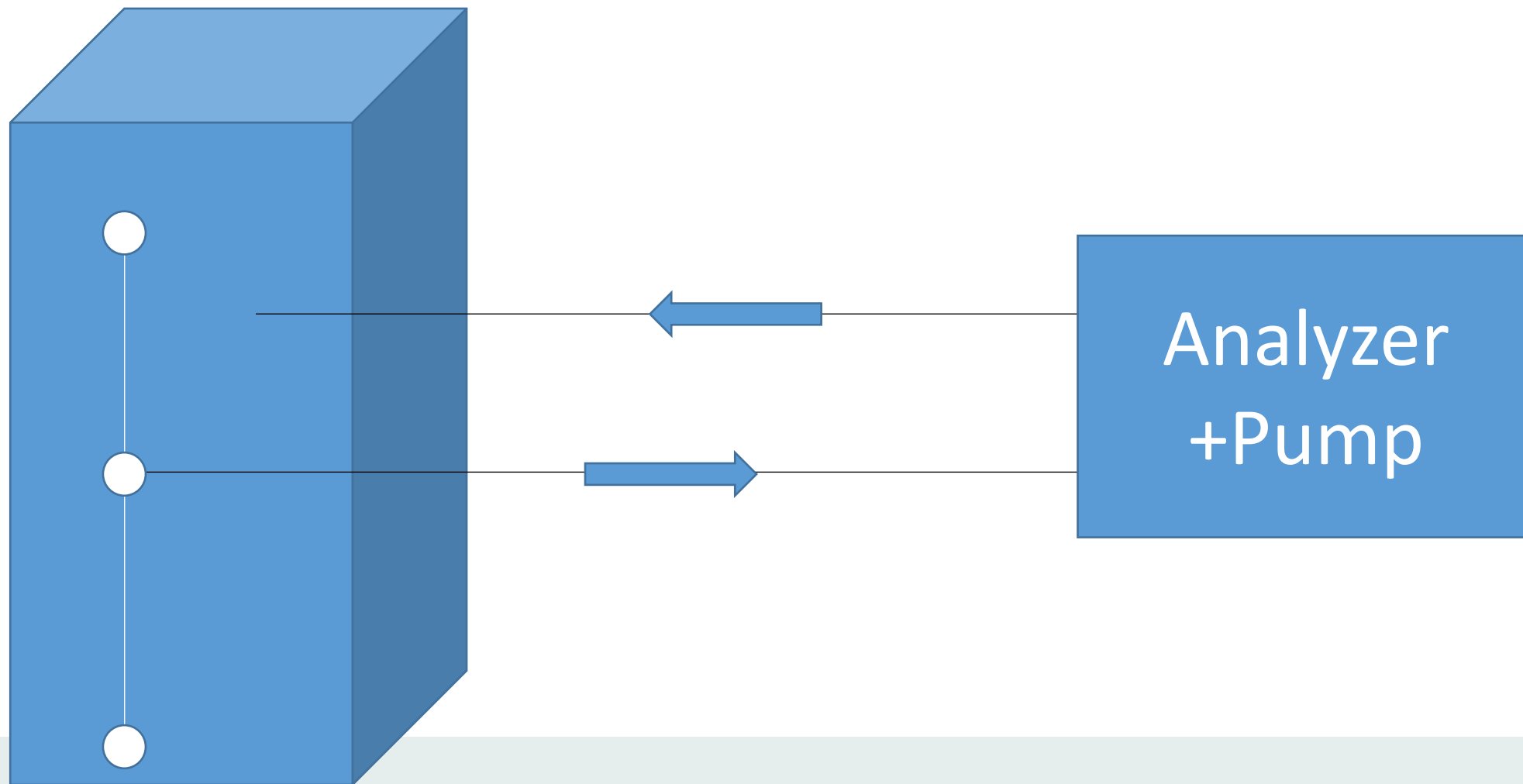
进气口、出气口的位置？



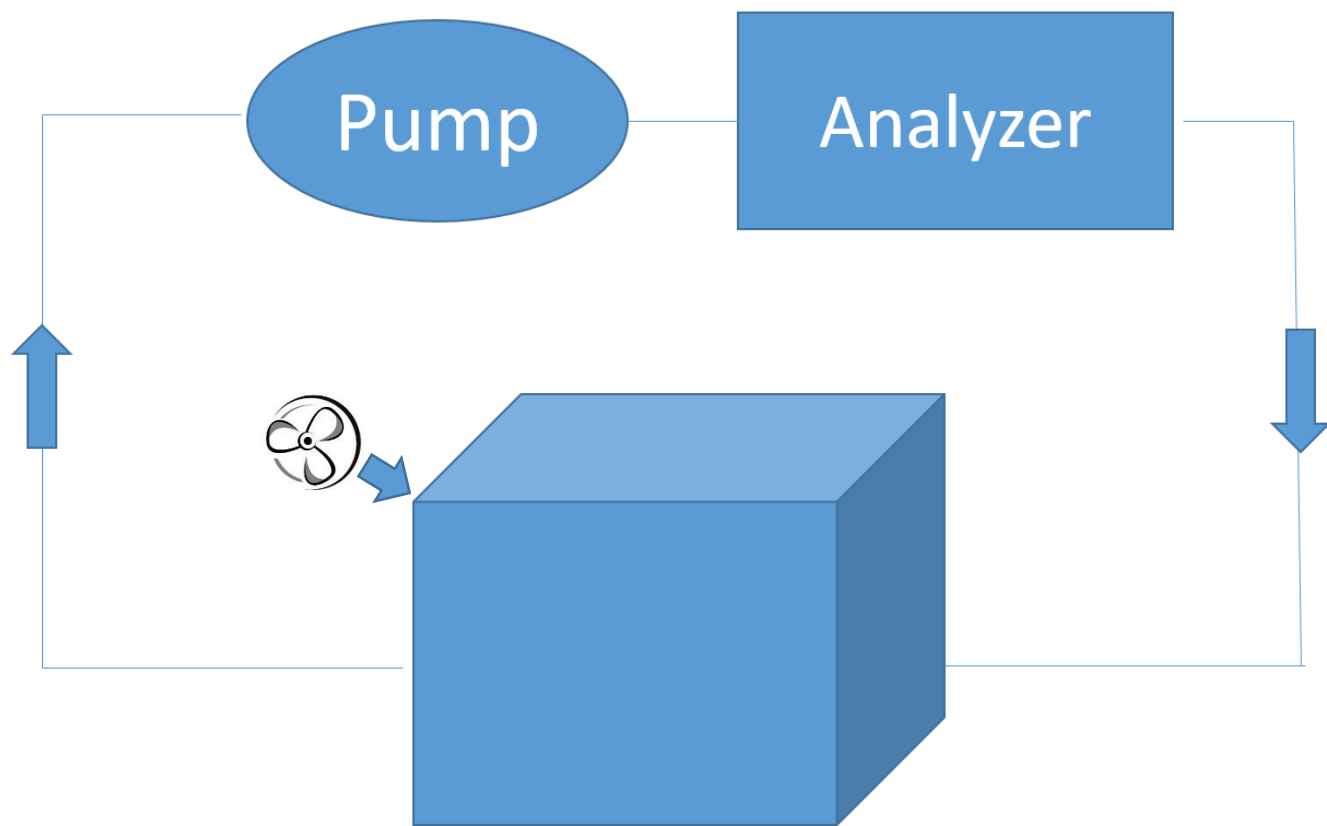
植物光合作用会导致这层的 CO_2 浓度偏低

土壤 CO_2 释放会导致底层的 CO_2 浓度偏高

进气口、出气口的位置？



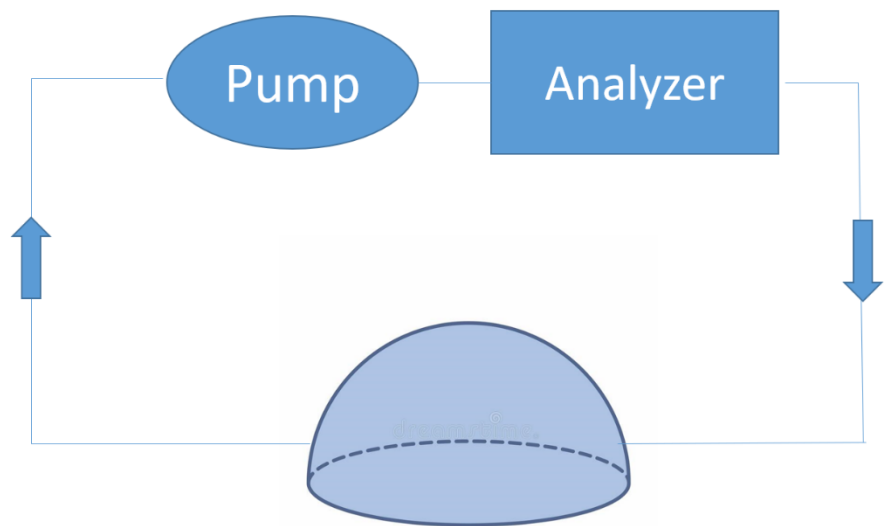
另一种促进测量室内的气体“充分”混合的方法
答：加混合风扇。



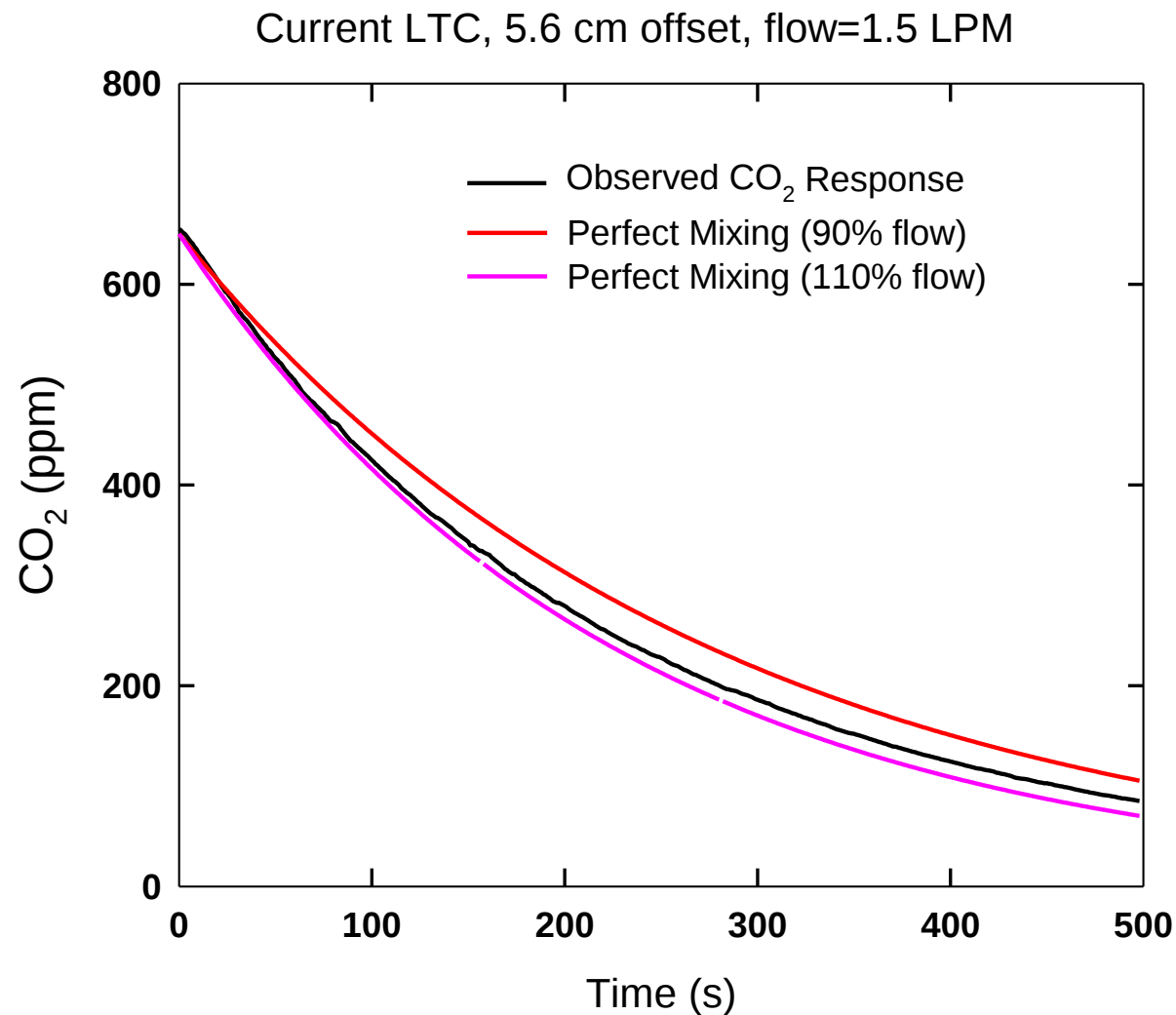
1 混合风扇启动后影响
温室气体的通量释放吗？

2 如何知道混合风扇已
经达到了“充分混合”的
目标？

不加风扇，仅通过“合理”的形状，能达到充分混合的效果吗？

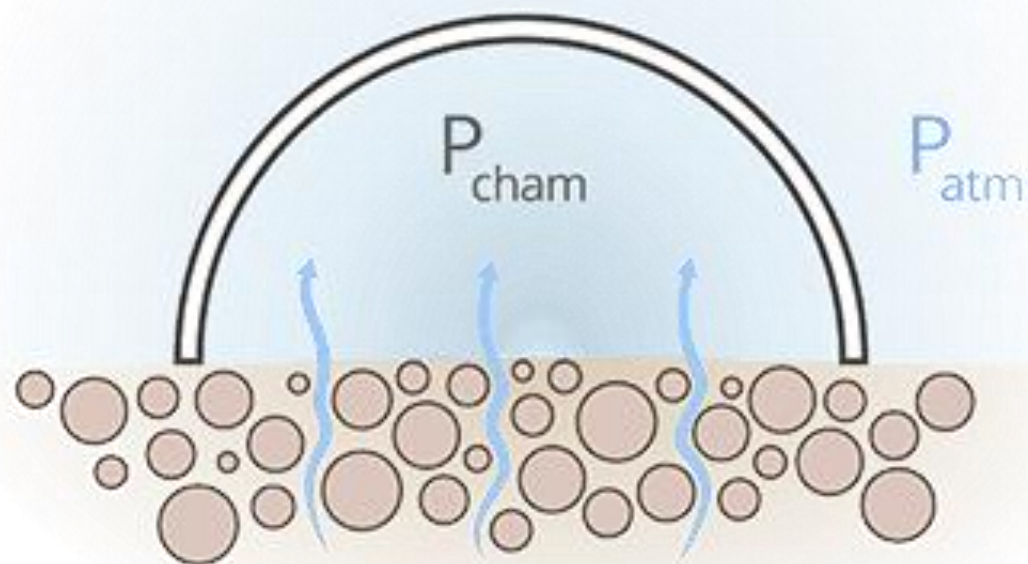


$$C_t = C_o e^{-\frac{f}{V}t}$$



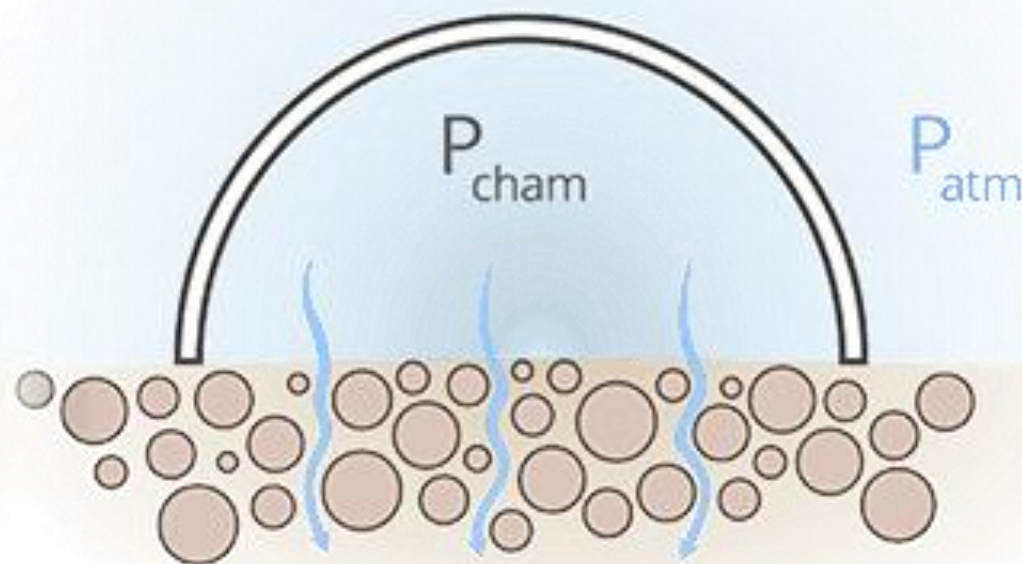
第2个问题：你怎么确保测量室与外界的大气“气压一致”？

$P_{\text{chamber}} < P_{\text{air}}$ 会怎样？ $P_{\text{chamber}} > P_{\text{air}}$ 会怎样？



$$P_{\text{cham}} < P_{\text{atm}}$$

causes upward mass flow,
leading to overestimation of flux



$$P_{\text{cham}} > P_{\text{atm}}$$

causes downward mass flow,
leading to underestimation of flux

专利(U.S. Patent 7,856,899)压强平衡口

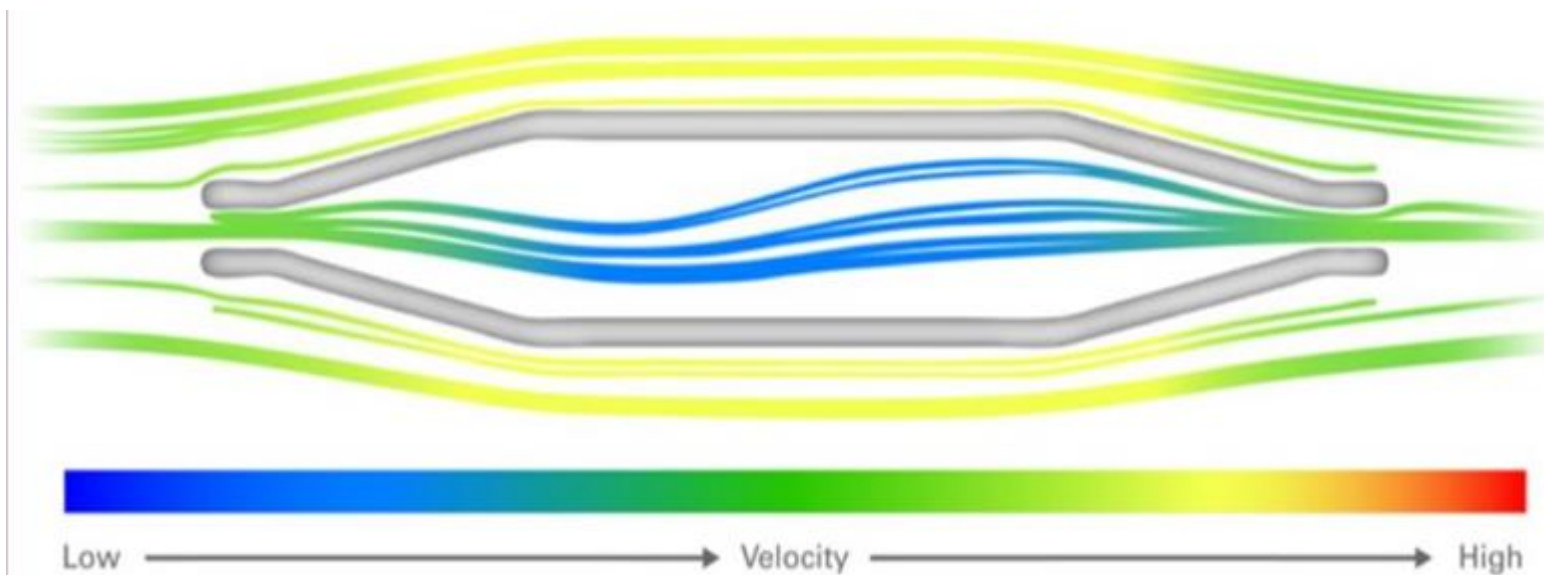


Fig. 1. Cross section of pressure vent. For more information about the patented vent design, see Xu L., et al. 2006. On maintaining pressure equilibrium between a soil CO₂ flux chamber and the ambient air. Journal of Geophysical Research. 111, D08S10, doi:10.1029/2005JD006435.



专利(U.S. Patent 7,856,899)压强平衡口

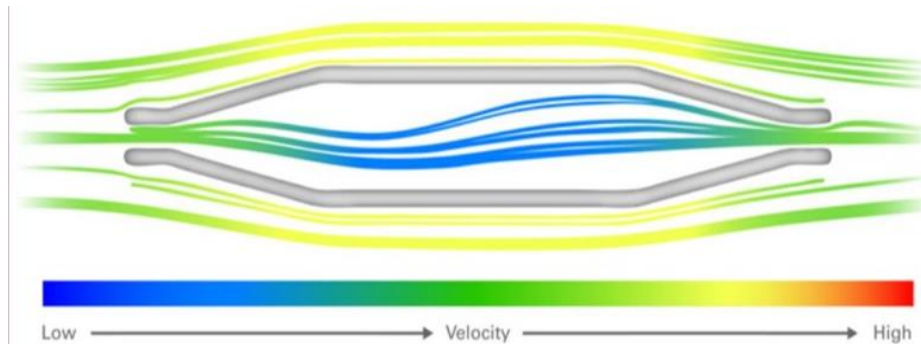
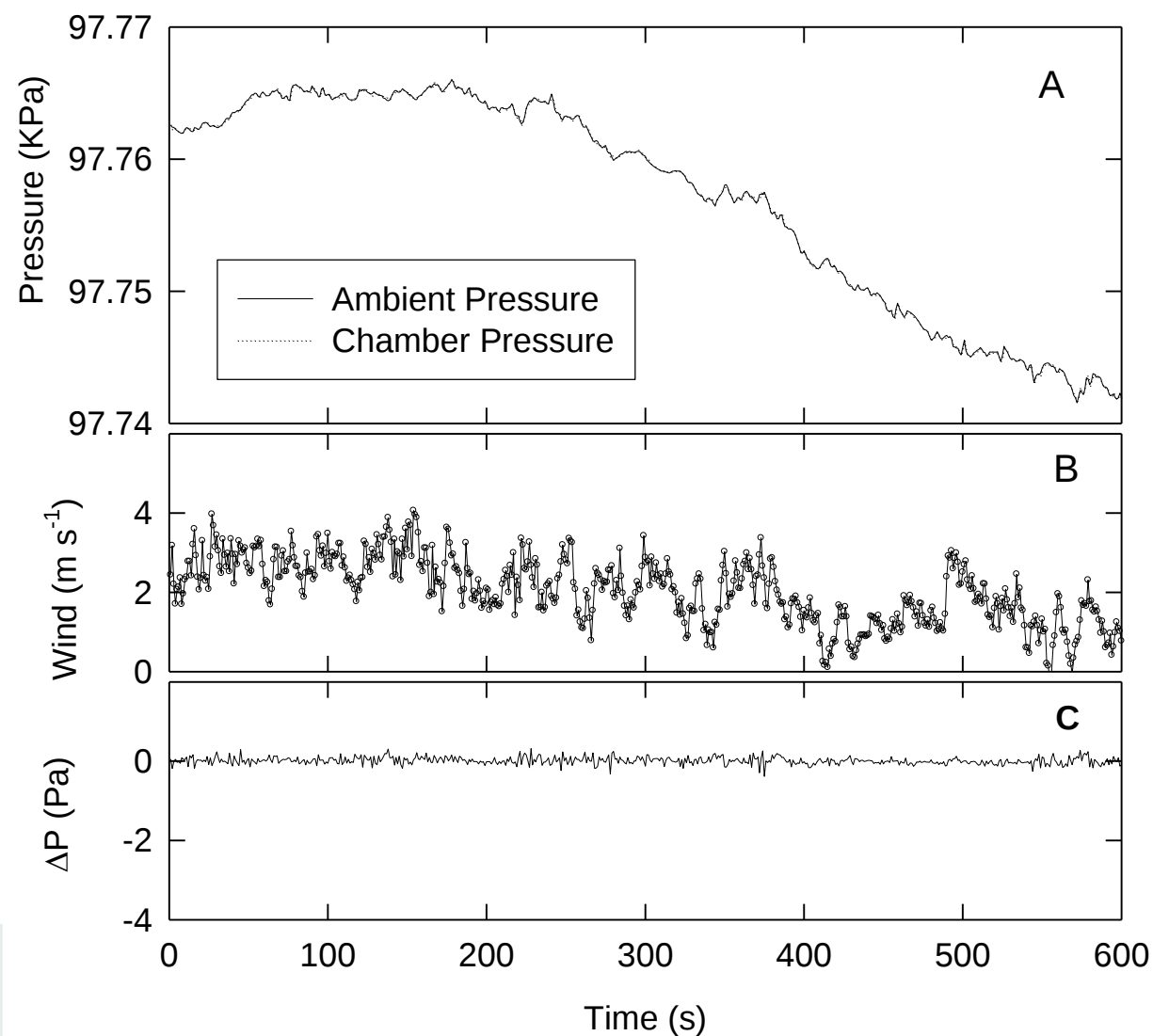
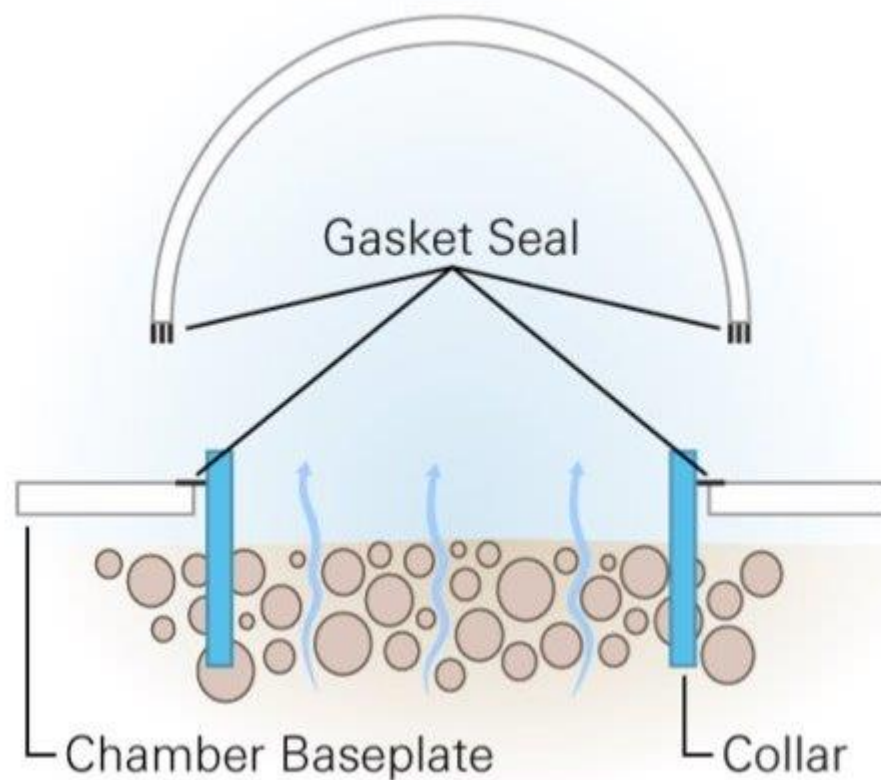
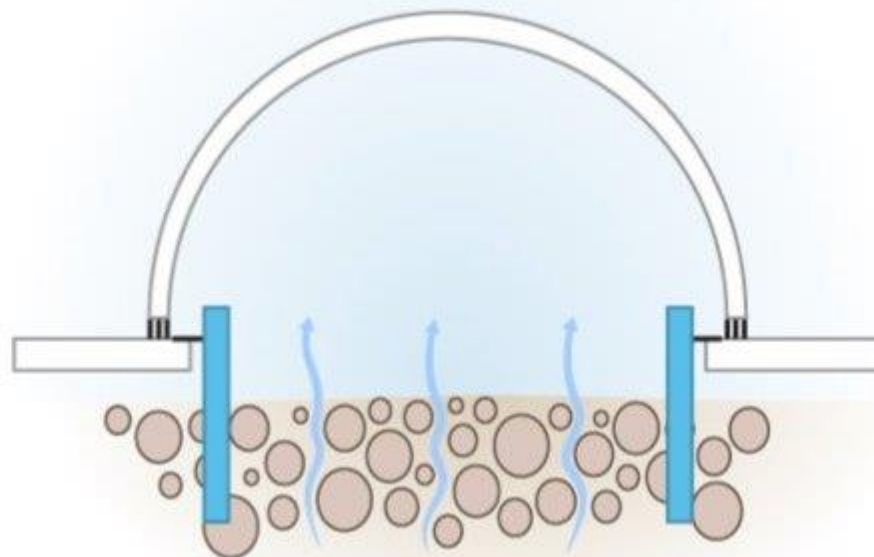


Fig. 1. Cross section of pressure vent. For more information about the patented vent design, see Xu L., et al. 2006. On maintaining pressure equilibrium between a soil CO_2 flux chamber and the ambient air. *Journal of Geophysical Research*. 111, D08S10, doi:10.1029/2005JD006435.

如何减小测量过程对土壤的扰动？



The chamber never touches the soil collar.



如何减小测量过程对土壤的扰动？



长短期测量室



8200-01s
4244.1cm³



8200-104
3955cm³



8200-104C
3955cm³

短期/调查测量室

多种连接选项，适用于各种气体分析仪（连接面板未显示）

内置 SoilFluxPro™
土壤温室气体通量分析软件

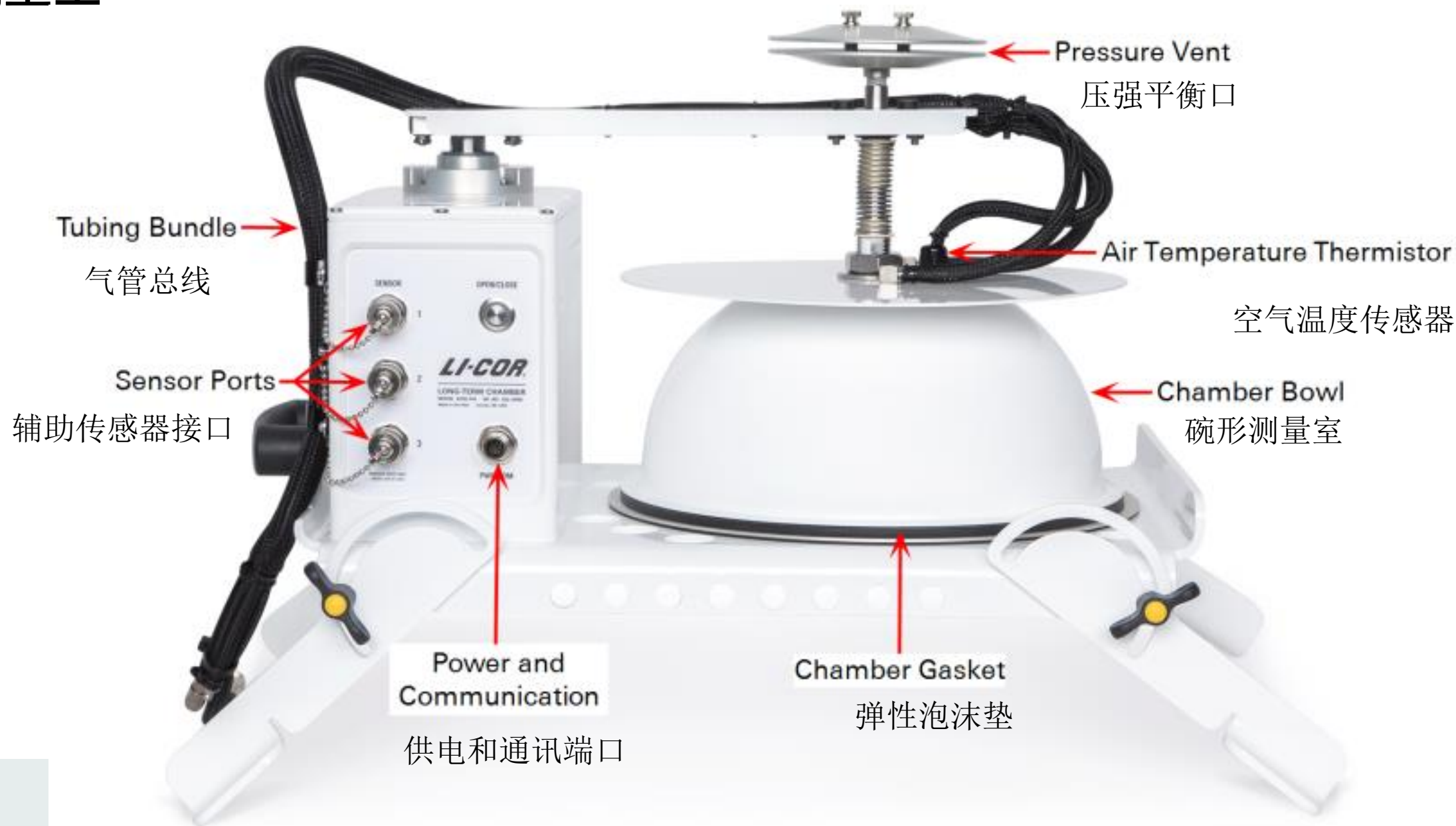
配备 GPS 和 Wi-Fi 通讯功能

锂电，34 小时续航

配备 Stevens HydraProbe
土壤温度、水分含量传感器



长期测量室



调查式测量解决方案

温室气体分析仪

LI-COR 温室气体分析仪提供了精确的测量,并与智能测量室无缝连接,实时计算通量数据。

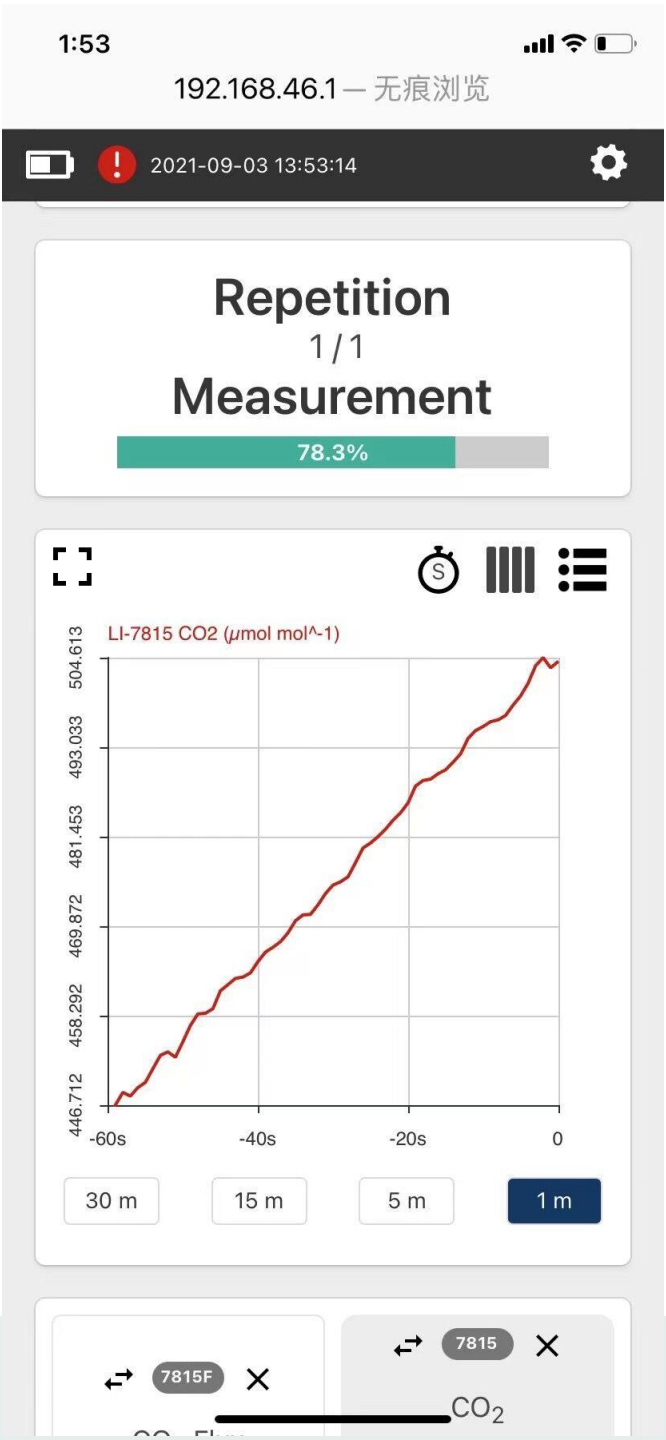
智能测量室

智能测量室由锂电池供电,内置微处理器和存储单元,连接 LI-COR 温室气体分析仪(如 LI-870、LI-7810、LI-7815、LI-7820)后,用于实时通量测量与计算。

SoilFluxPro™ 软件

SoilFluxPro™ 软件使用来自智能测量室的数据,能实现数据优化,地图显示土壤温室气体浓度和通量,数据质量控制 QC 等功能。

调查式测量解决方案

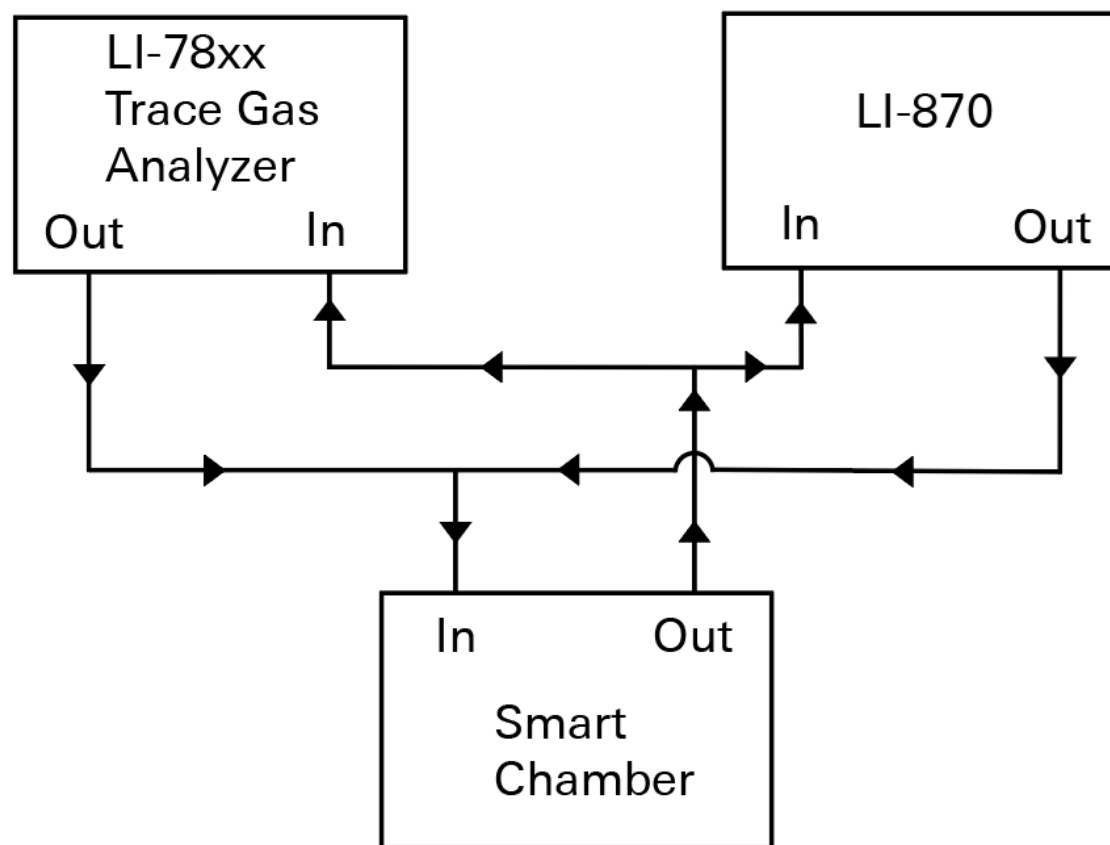


调查式测量解决方案

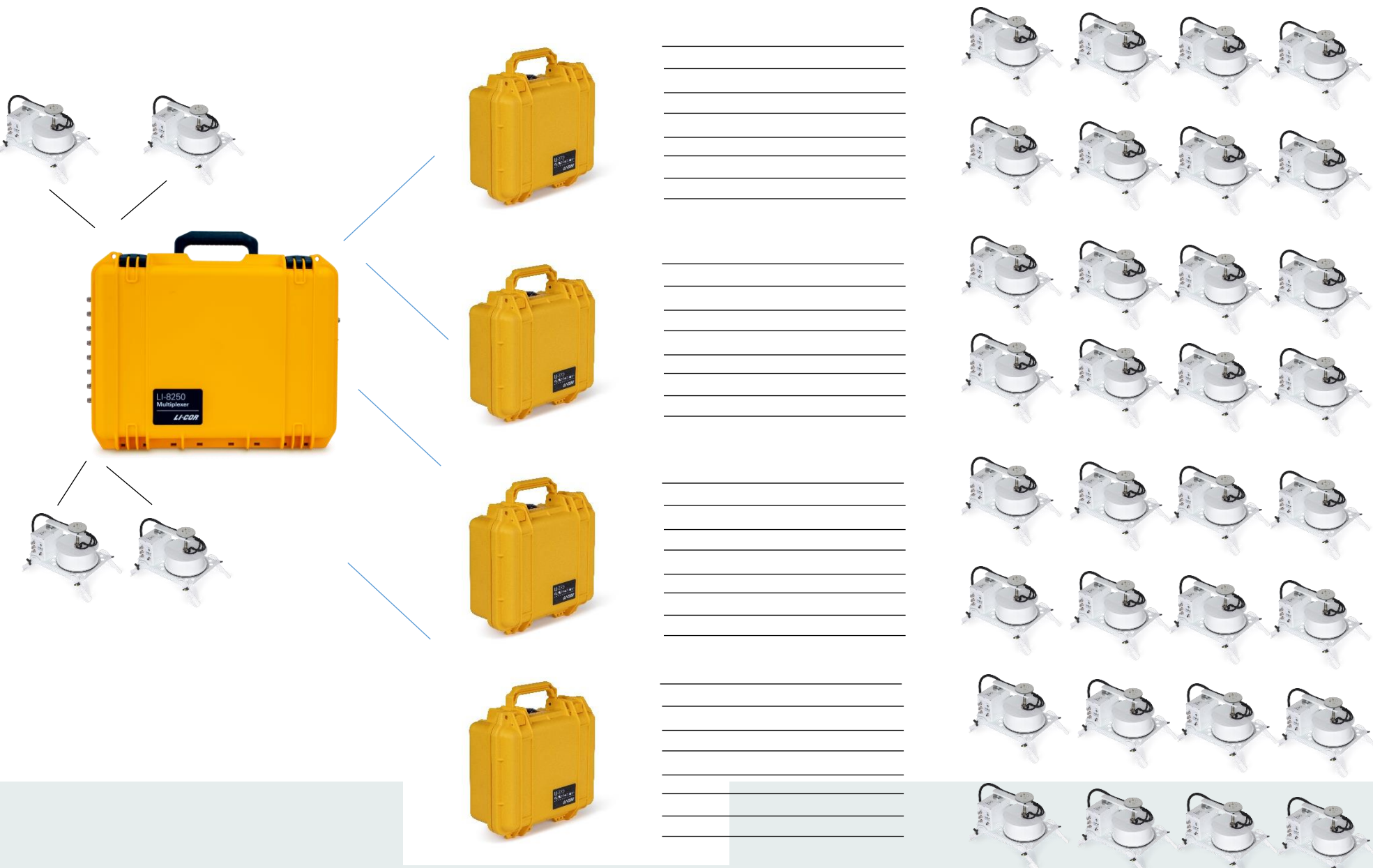


LI-7810便携式
CH₄/CO₂/H₂O
通量自动测量系统

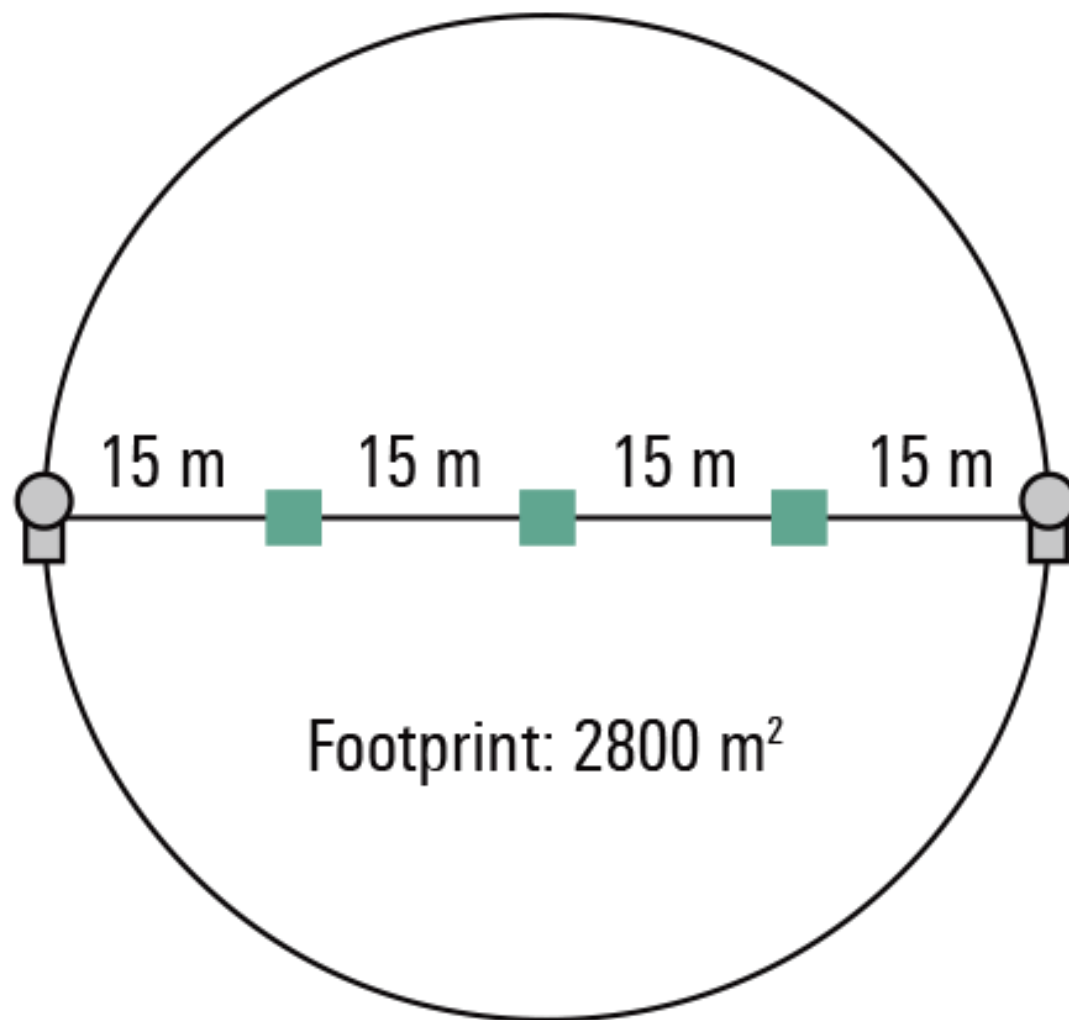
LI-870 和LI-7810/LI-7820等痕量气体分析仪同时连接



36通道LI-8250 土壤CO₂/CH₄/N₂O/H₂O通量测量系统



36通道LI-8250 土壤CO₂/CH₄/N₂O/H₂O通量测量系统



LI-8250 多通道测量系统

作为长期测量系统的核心，LI-8250 具备连接、配置和控制长期测量系统其他组件的功能。

温室气体分析仪

LI-COR 温室气体分析仪（如 LI-870、LI-7810、LI-7815、LI-7820）与 LI-8250 多通道测量系统能无缝连接，精确测量温室气体浓度，LI-8250 实时计算通量数据。

8250-01 扩展模块

多个测量室能共享一个 LI-8250 通道，将测量室数量从 8 个扩展至 36 个。

长期测量室

LI-COR 测量室使用专利（U.S. Patent 7,856,899）技术，尽可能减少仪器本身对测量结果的影响。

SoilFluxPro™ 通量数据专业分析软件
使用 SoilFluxPro™ 通量数据专业分析软件，能批量处理数据集数据。修订相关参数，使用新数据重新计算。

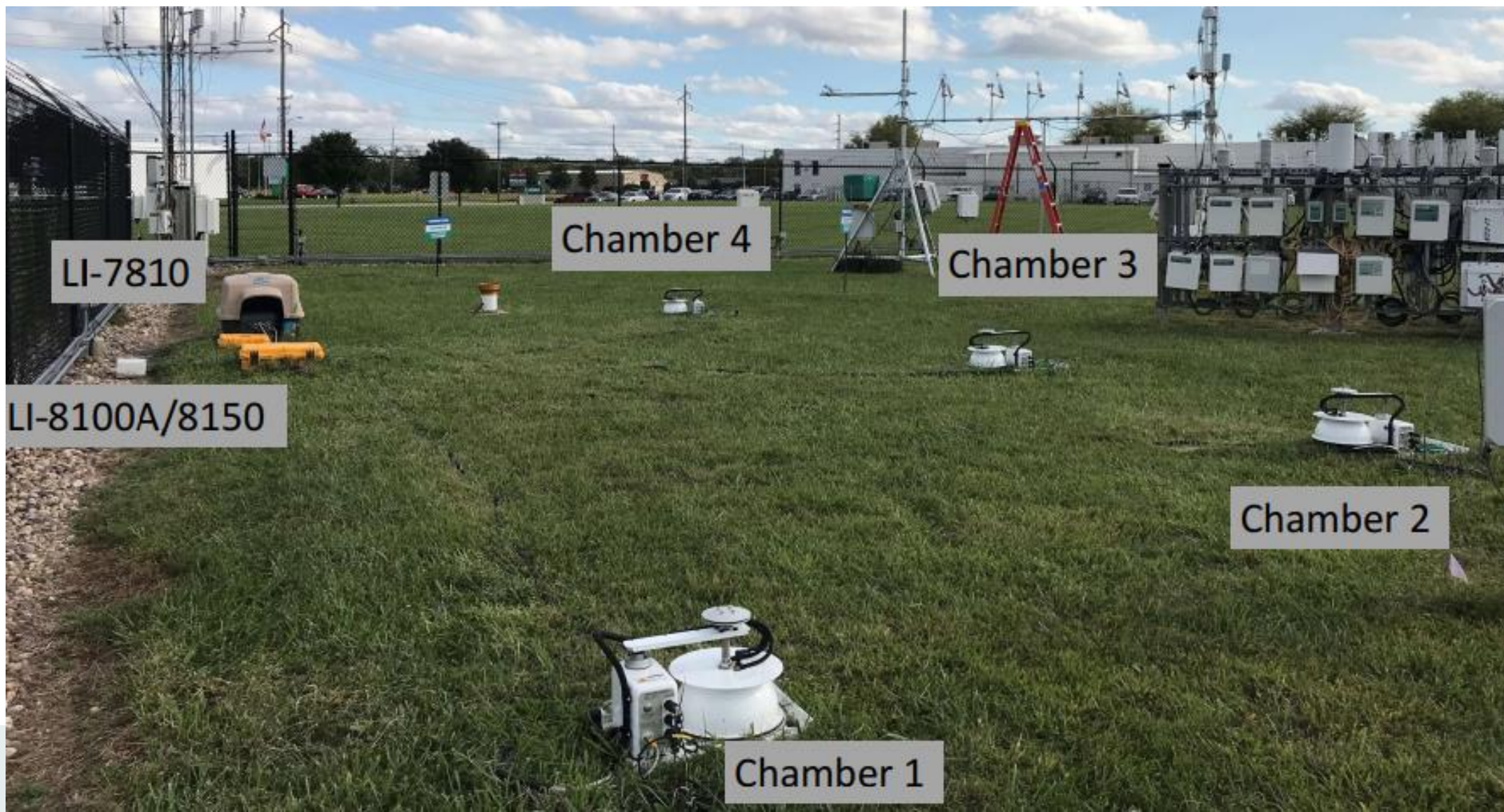
36通道LI-8250 CO₂/CH₄/N₂O/H₂O 通量自动测量系统



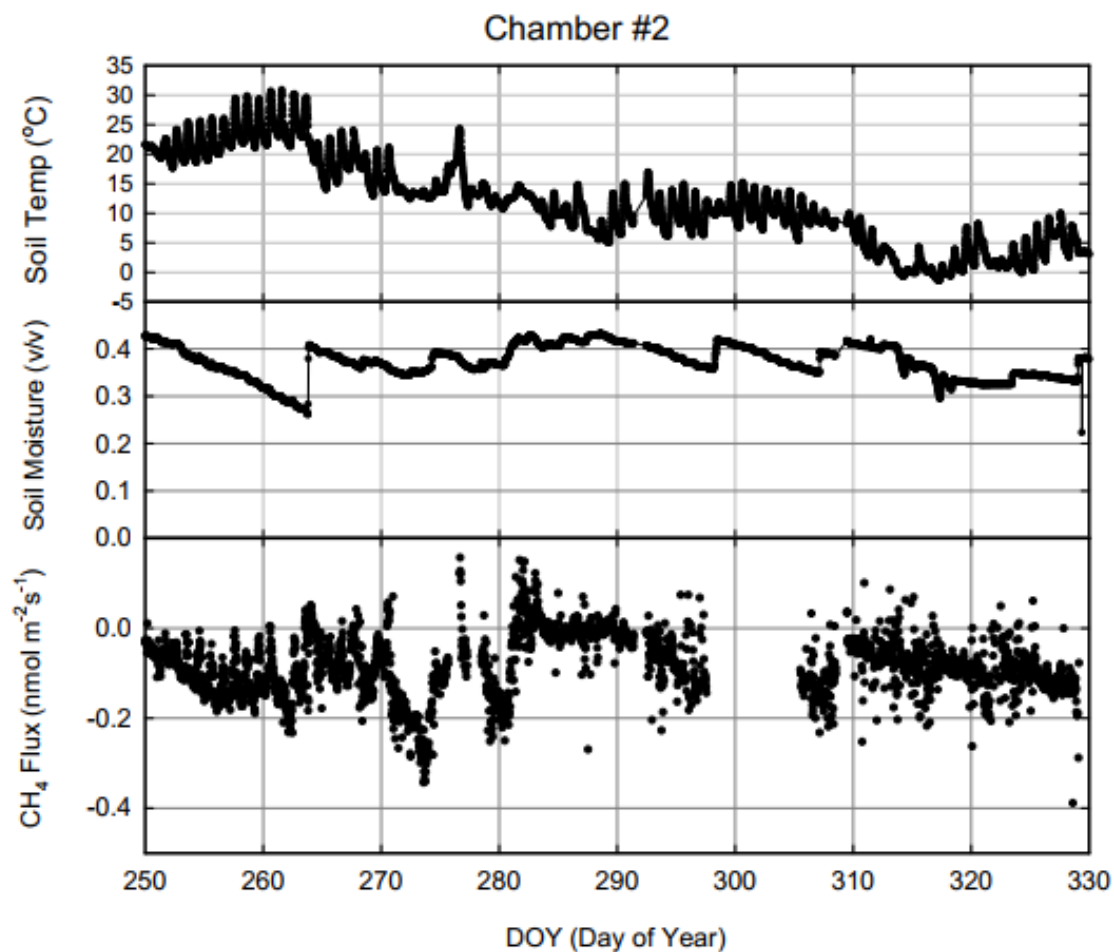
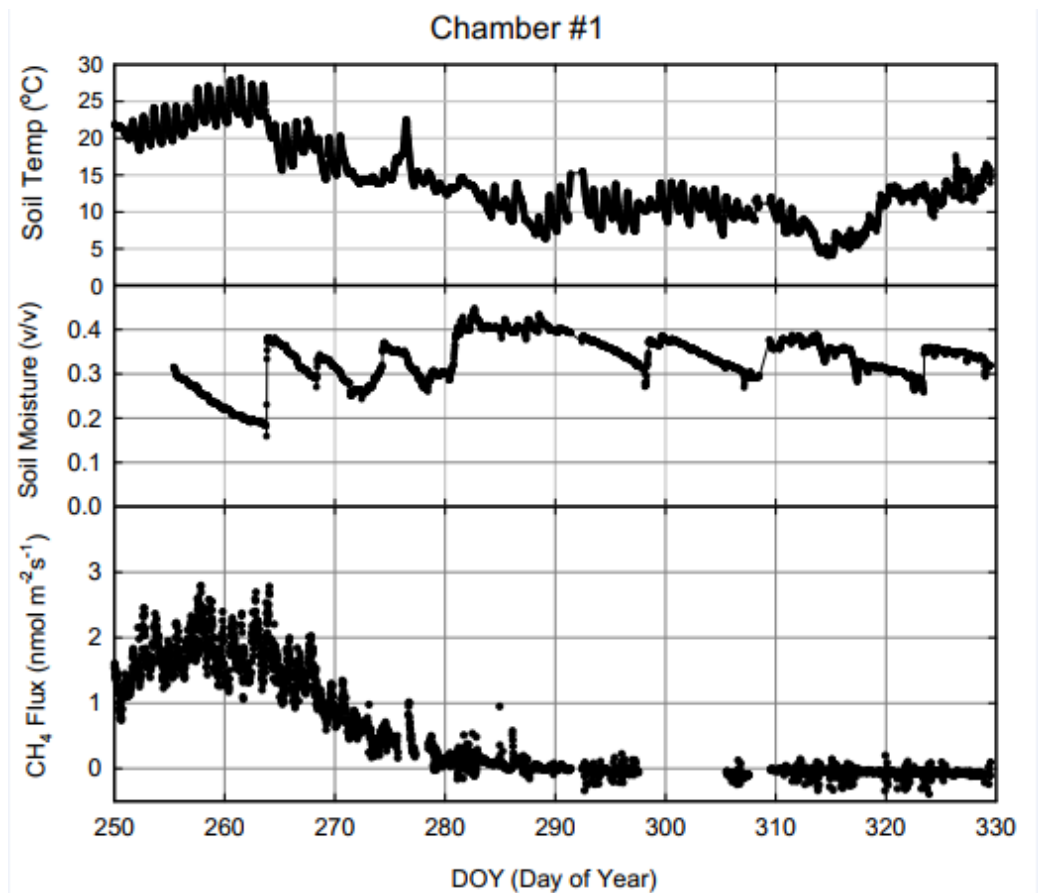
LI-8150 土壤温室气体通量测量系统



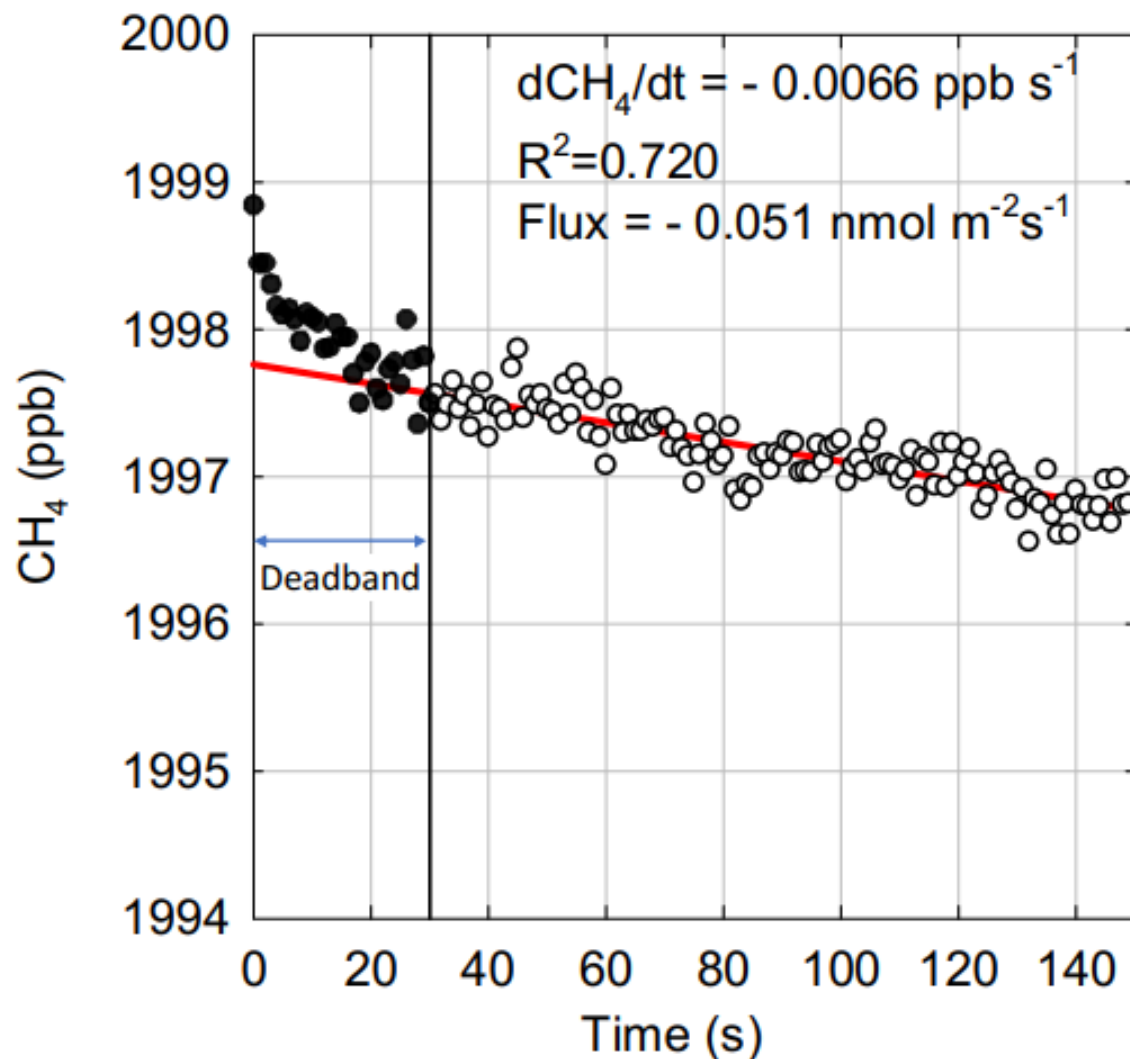
LI-8150 土壤CO₂/CH₄/H₂O通量测量系统



城市草坪CH₄排放存在不确定性?



2min内测量 $0.05\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的 CH_4 通量



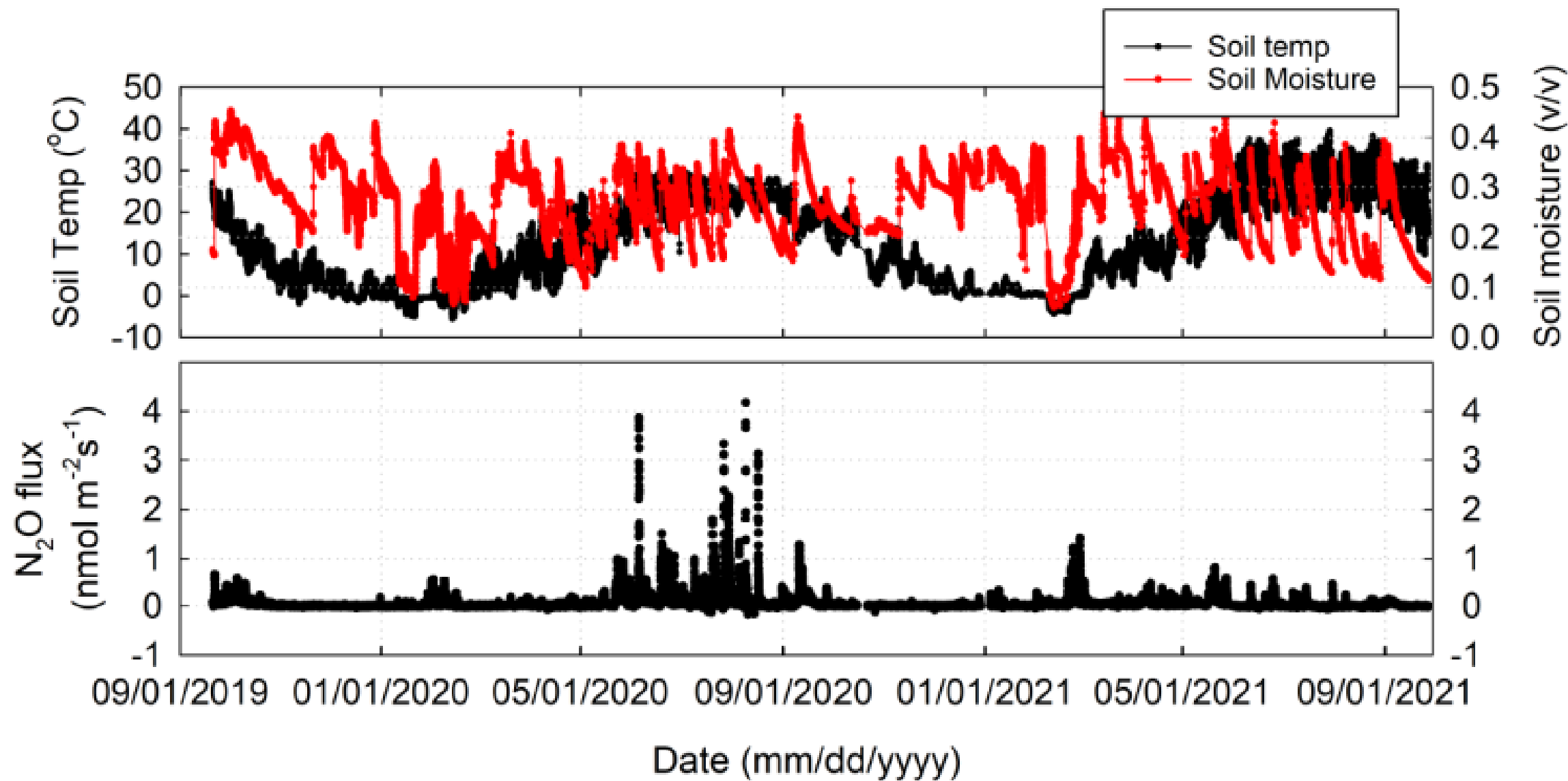
基于长期实测数据，表明该系统检测到的可信的土壤 CH_4 通量最小值是 $0.05\text{nmol/m}^2/\text{s}$ 。

2min的测量中， CH_4 浓度降低了 0.79ppb ，是LI-7810测量精度（ 0.25ppb ）的3倍

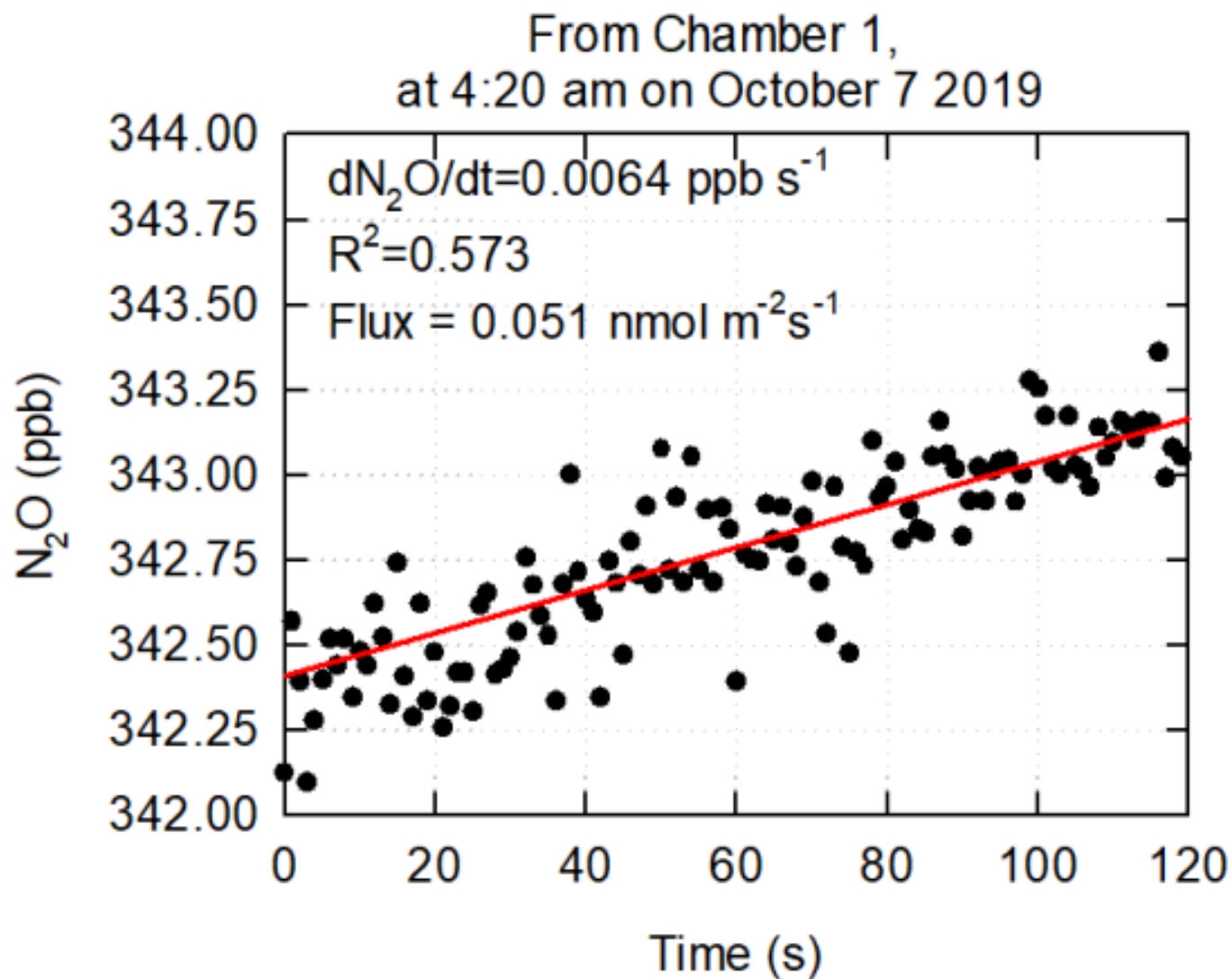
土壤温度和土壤水分是如何调控城市草坪土壤N₂O通量的？



城市草坪土壤N₂O通量



2min内测量 $0.05\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的 N_2O 通量



基于长期实测数据，表明该系统检测到的可信的土壤 N_2O 通量最小值是 $0.05\text{nmol/m}^2/\text{s}$ 。

2min的测量中， N_2O 浓度增加了 0.768ppb ，是LI-7820测量精度（ 0.2ppb ）的3.5倍

在天然湿地生态系统中的应用



在人工湿地稻田中的应用



在青藏高原高寒草甸中的应用



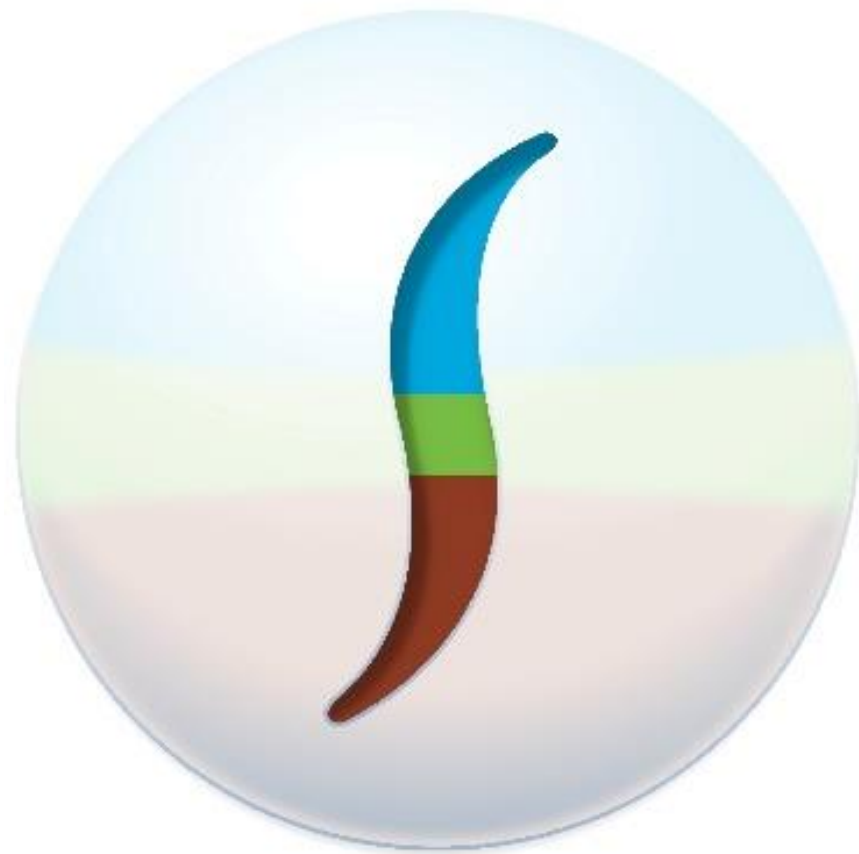
在枯倒木测量上的应用



土块样品、种子呼吸、昆虫呼吸等的应用

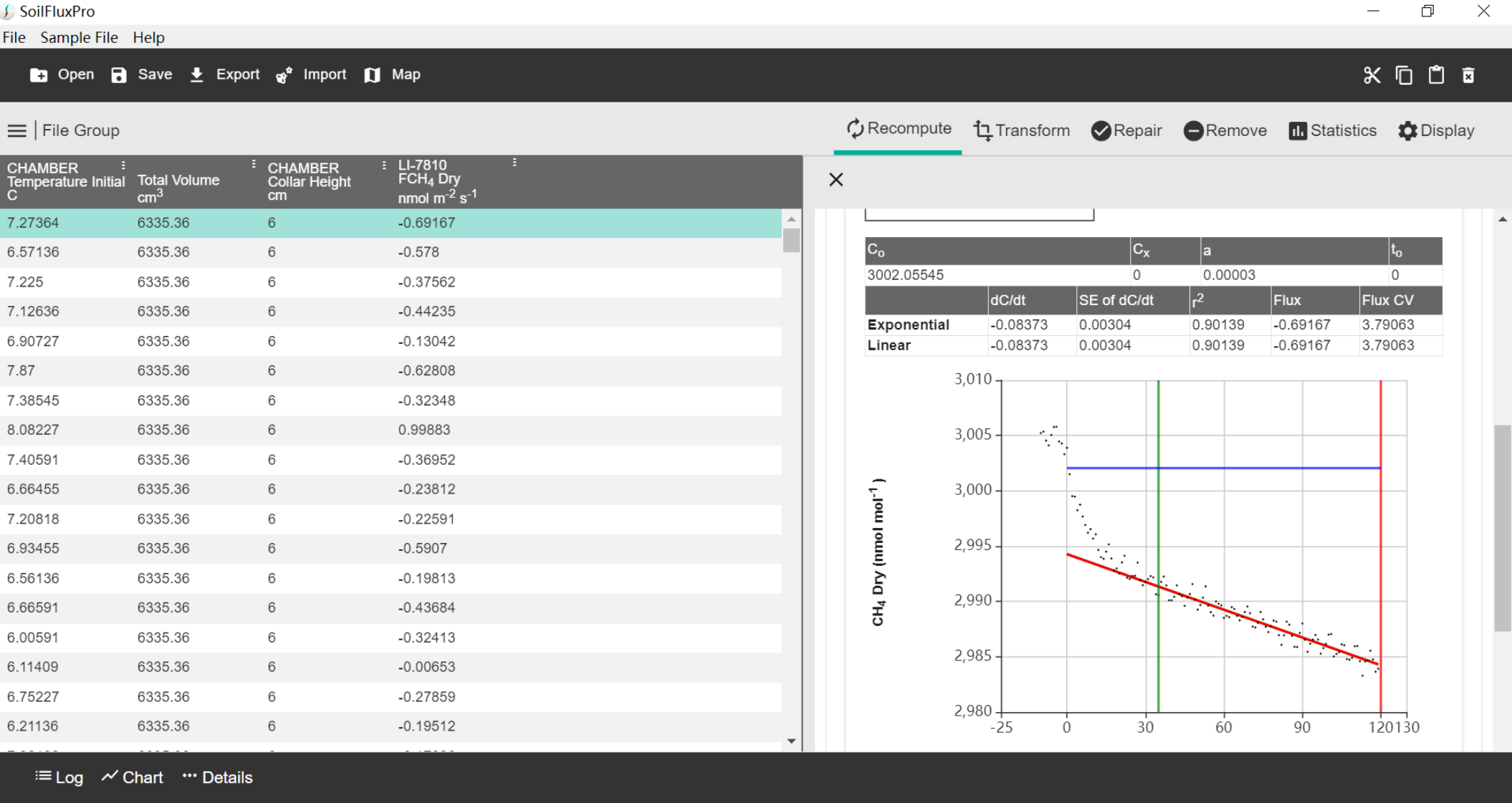


土壤温室气体通量的数据处理

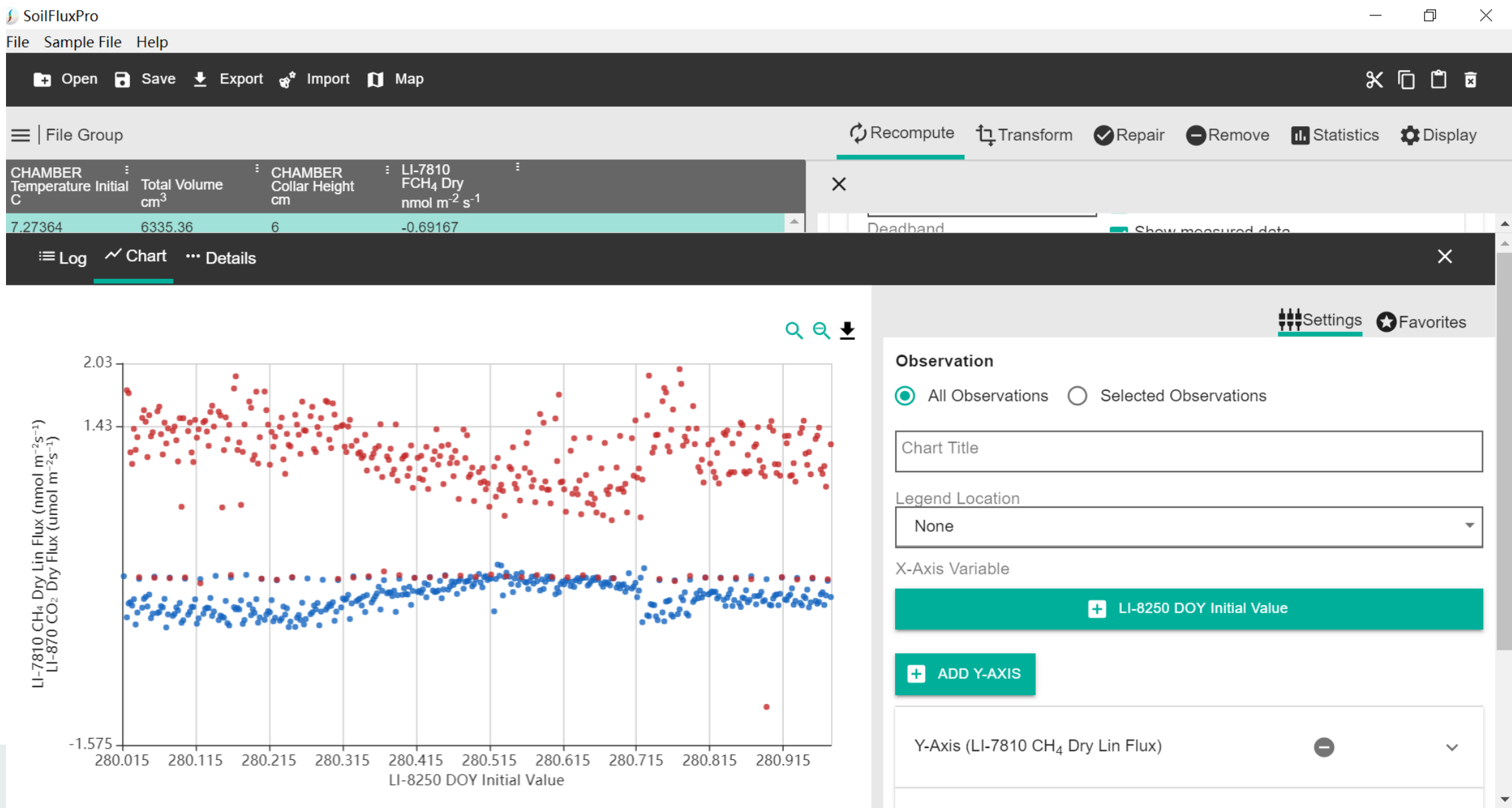


SoilFluxProTM

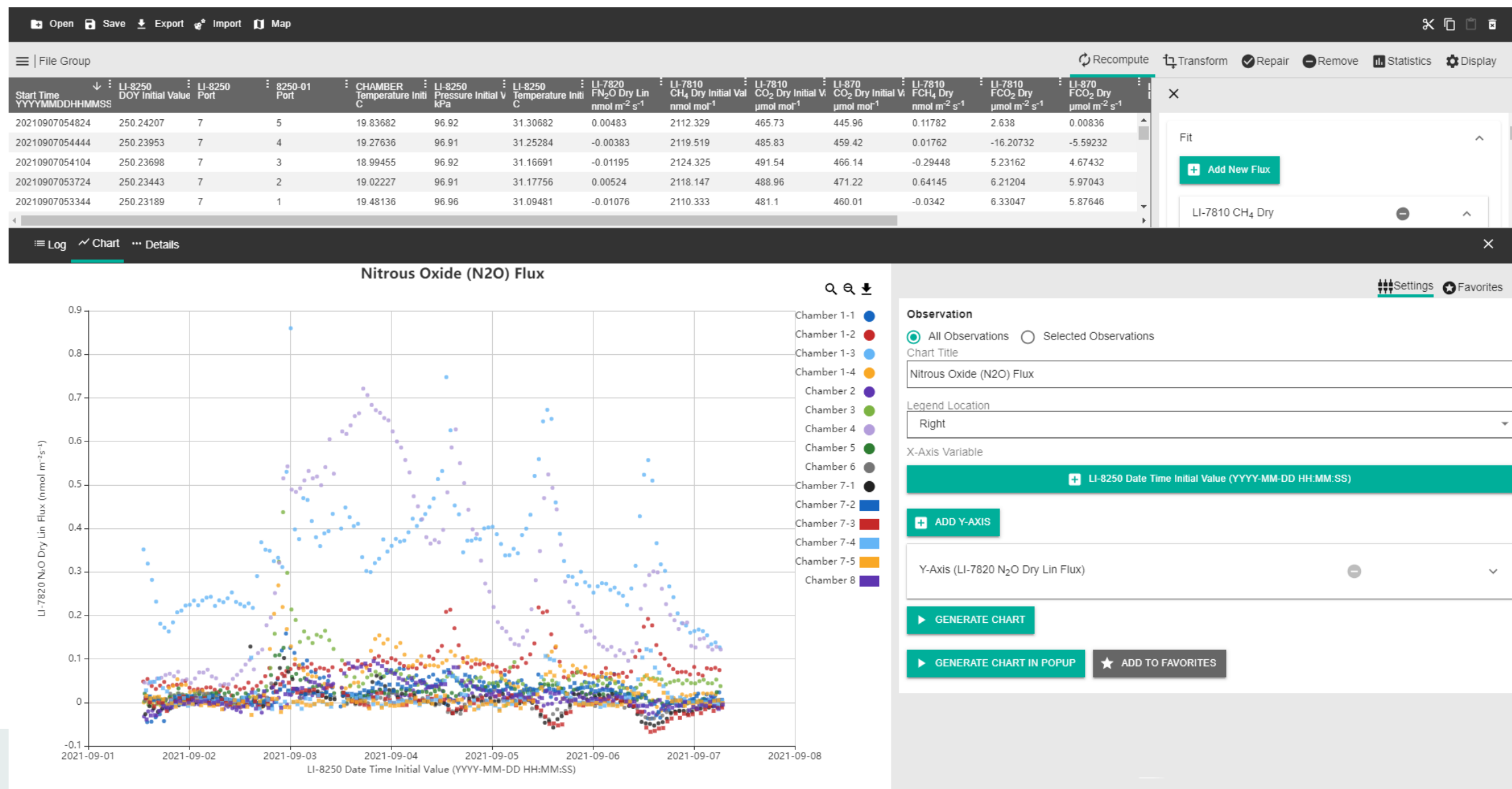
修订关键参数，如测量开始和停止时间，之后重新计算通量结果



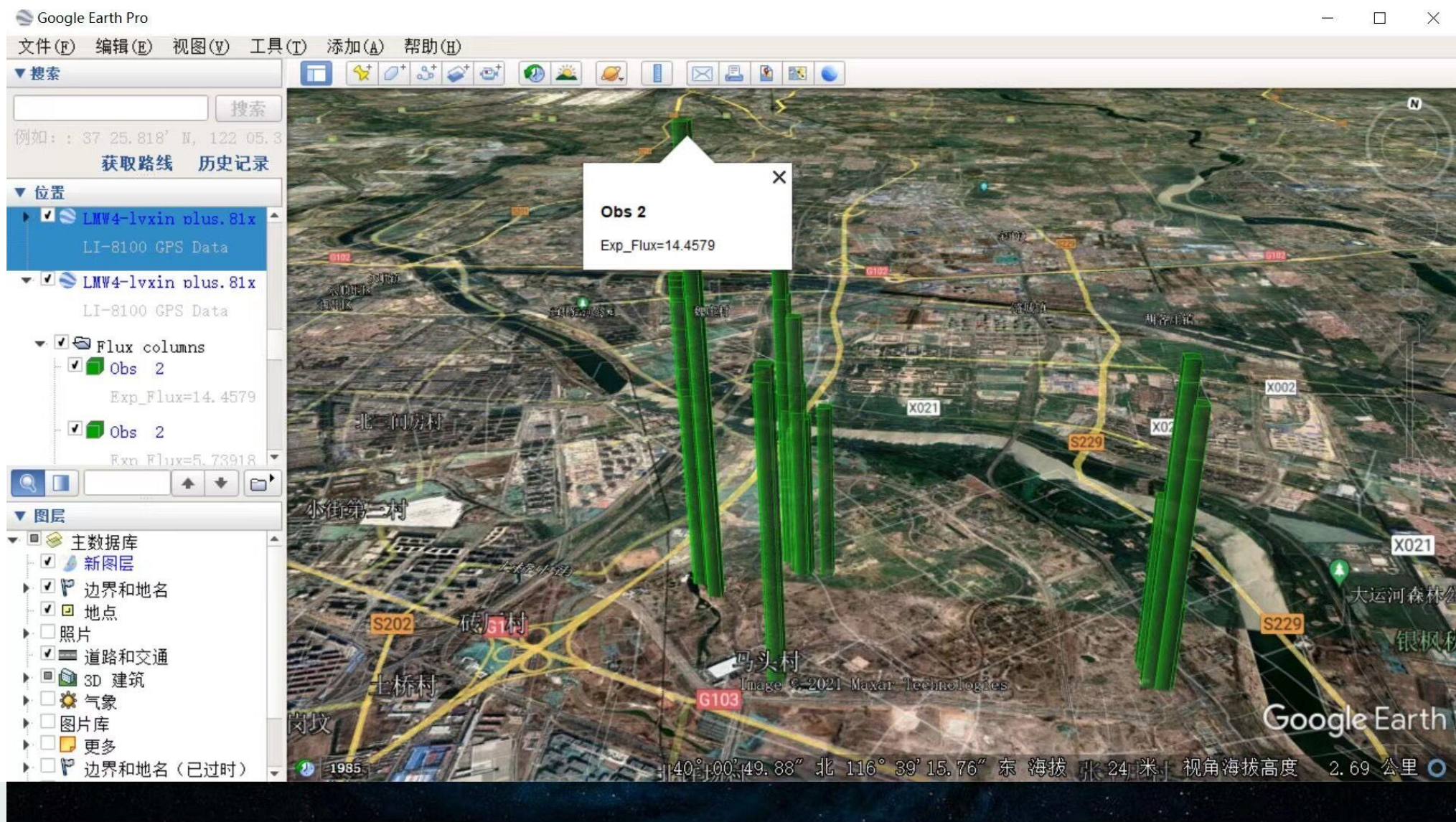
来自不同分析仪的数据同时显示



同时比对所有通道的通量数据



绘制土壤温室气体通量图



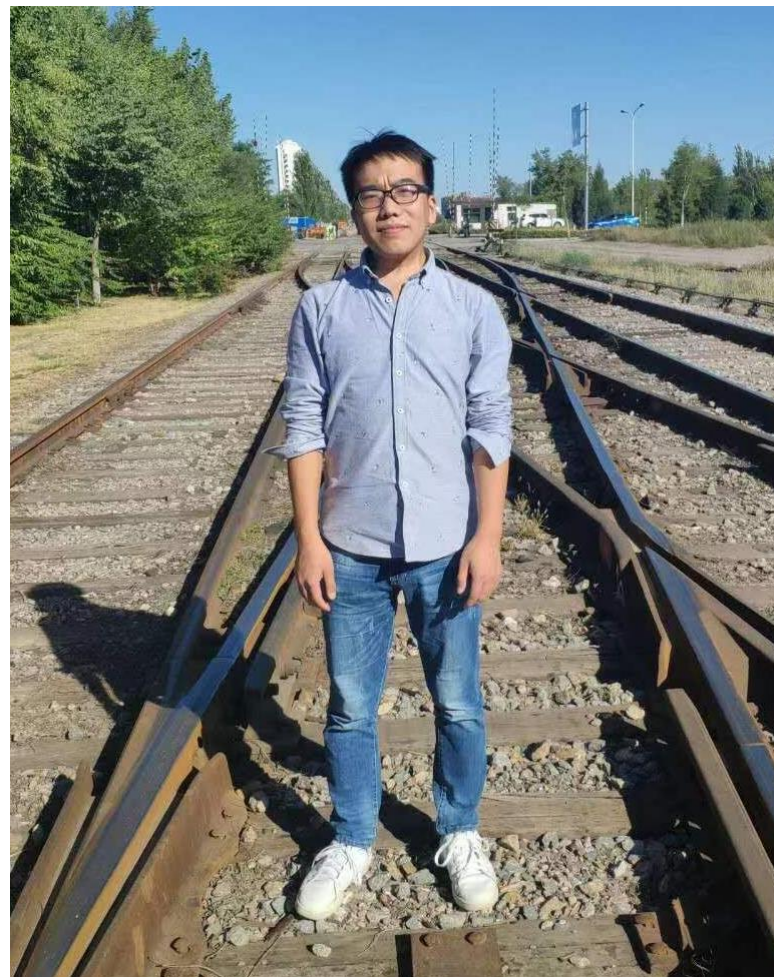
土壤温室气体通量测量系统 Take Home Message

- 1 测量室形状是否能促进测量室内的气体混合？
- 2 采样口设计在什么地方合适？怎么让抽样取气具有代表性？
- 3 如果要加装风扇？应该怎么减轻对温室通量释放过程的影响？
- 4 压强平衡很重要
- 5 如何减少对土壤的机械扰动？
- 6 如何计算最终的通量数据更合理？

谢谢大家的聆听！



徐粒



朱晓伟

特别感谢徐粒工程师、朱晓伟工程师在内容制作整理方面的大力帮助！

