

基于 Picarro G2508 的新型弛豫涡旋累积系统 (REC) 同时测定生态系统 H₂O、CO₂、CH₄、N₂O 通量



Affordable relaxed eddy accumulation system to measure fluxes of H₂O, CO₂, CH₄ and N₂O from ecosystems

Achim Grelle^{*}, Hannes Keck

Department of Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

1、前言

微气象方法在陆地生态系统之上的微量气体通量测量中越来越重要。其能够在较长时间内测量较大尺度的平均气体通量，并具有较高的时间分辨率。应用最广泛的是涡动相关法(EC)，其典型可测定面积(或“通量足迹”)可达几公顷。但由于缺乏快速响应的气体分析仪和较低的信噪比，仍然局限于测定少数气体种类。此外，EC 对小分子的大气成分如氧化亚氮的适用性往往受到高功率消耗的限制。涡流累积是另一种湍流交换测量系统的代表，在 1990 年 Businger 和 Oncley 提出了一种使用恒定流量涡流累积的“松弛”版本(松弛涡流累积，REA)。

近年来，光腔衰荡光谱(CRDS)分析仪的发展为小分子大气组分的浓度测量提供便利，特别为通过 REA 技术测量气体流量开辟了机会。虽然通过慢响应分析仪进行气体分析相对容易，但开发一种精确、可靠且耐用的快速响应空气采样系统仍然是一种技术挑战。

为了可靠地估算区域一氧化二氮的排放，监测全区域的 N₂O 通量具有重要意义，通常传统的 EC 和 REA 系统都可以提供这种类型的数据。然而，EC 系统测定时初始成本高，能耗高，而且运输到偏远地区以及现场为系统供电相对困难。此外，为了使用 EC 系统测量陆地生态系统的温室气体通量，目前还没有快速响应气体分析仪可满足条件。然而，对于 REA 系统，光腔衰荡光谱仪(例如 Picarro G2508)可以同时用于分析水蒸气、甲烷、二氧化碳和一氧化二氮。

本文提出了一个新的 REA 系统。该系统能可靠地测量多季节变化下的区域 CO₂、N₂O、CH₄ 和水汽的通量，并对其在 2018 和 2020 年季节变化下的测定性能进行了评估。

2、材料与方法

理论基础

平均流速与上方气体浓度与下方气体浓度的差值有对应关系。

$$F = \beta \cdot \sigma_w (C_{up} - C_{down})$$

其中： σ_w 为运行在 10 hz 的声学风速计确定的垂直风速的标准偏差， β 是值为 0.6 的经验系数。该研究通过将涡旋相关系数(HEC)估计的感热通量与 REA (H_{REA})估计的感热通量相关联来确定 β 。

$$H_{EC} = \rho \cdot c_p \cdot \overline{w'T'}$$

$$H_{REA} = \rho \cdot c_p \cdot \beta \cdot \sigma_w \cdot (T_{up} - T_{down})$$

其中 ρ 为空气密度, c_p 为恒压比热, $w'T'$ 为垂直风速和空气温度的协方差。当 $H_{REA} = H_{EC}$ 时, 参数 β 变为

$$\beta = \frac{\overline{w'T'}}{\sigma_w (T_{up} - T_{down})}$$

根据对农田 5 个月的测量, 平均系数为 $\beta = 0.475 \pm 0.29$ (标准差)。

为适应湍流条件, 利用“动态静带区”来调整采样设置, 发现如下规律:

$$w_0 = \frac{\sigma_w}{3.5}$$

系统原理

系统主要组件包括: 3D 超声风速计、2 个双空气储存室 (当一对储存室用于收集空气样本时, 另一对可以进行分析)、一个 Picarro G2805 CRDS 分析器和 CR1000 测控数据记录仪。为避免污染, 将 SLFA 05010 聚四氟乙烯过滤器安装在每个管道入口处。该系统由于模块化设置, 几乎可以与任何气体分析仪器兼容。

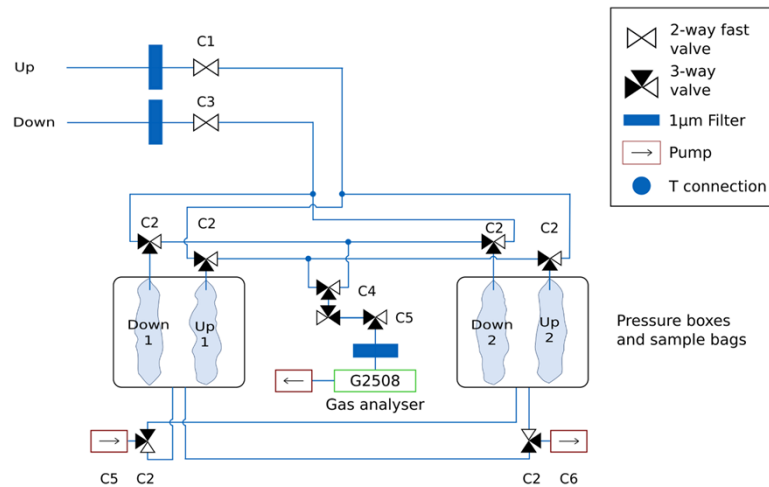


图 1. REA 系统原理示意图 (C1 - C6 为 SDM-CD16AC 继电器驱动的控制端口)

操作原则:

测试前, 保证 2 对双空气储存室负压状态。当数据记录仪中存储室的低压保持恒定时, 第一对储存室中的上升气流室和下降气流室会快速充满样品空气。典型的 30 分钟的采样周期后, 样品空气流向第二对储存室, 同时将第一对储存室设置为超压。当第二对气体储存室以与第一对相同的方式充入样本空气的同时, 第一个储存室中的空气会被引导通过 Picarro G2508 CRDS 分析仪。每个储存室的样品分析时间约为 5 分钟 (采样速率为 1 HZ)。10 分钟后, 储存室被完全清空, 为下一个采样周期做好准备。该过程的原始数据、处理过的通量和平均值均存储在数据记录仪的 CF 存储卡上。

检测限:

因为每种气体的检测限与 σ_w 成线性比例，所以可以通过使用图 3 中相应回归线的斜率作为比例参数来计算特定值。因此，平均 $\sigma_w=0.273\text{m s}^{-1}$ 的检测限为： $DL_{N_2O} = 2.98 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $DL_{CH_4} = 0.299 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $DL_{CO_2} = 0.119 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $DL_{H_2O} = 0.019 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

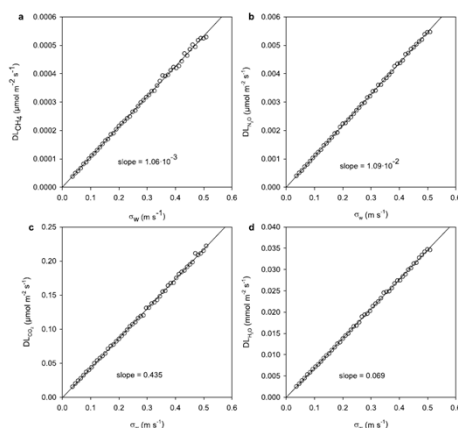


图 2. 由蒙特卡罗模拟确定的作为垂直风速标准偏差函数的气体通量检测极限(DL)

3、性能测试结果:

测试结果

第一次试验应用，REA 系统被部署在瑞典 Harbo 附近($60^{\circ} 5' N, 17013' E$)的一个指定的农田场地。与 REA 测试并行的是，声学风速计与 LI6262 红外气体分析仪(LI-COR,美国)连用测量 CO_2 通量。图 3 显示，在每个循环中，10 分钟后的两个显著下降(由箭头表示)表示在分析结束后，两个气体储存层室已被清空。

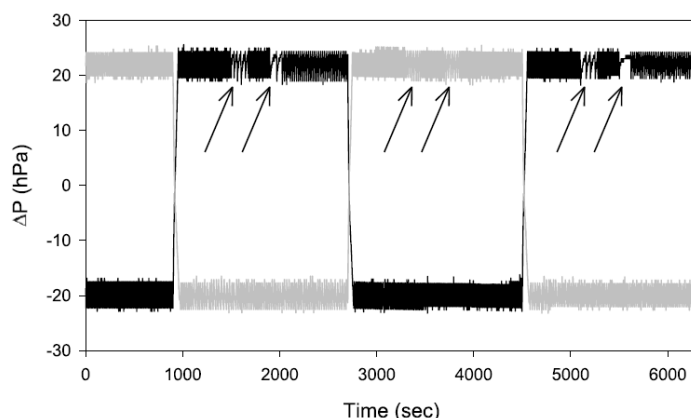


图 3. 气体储存室内压差图线，2018-07-11,04:45 - 06:30。黑线对应储存室 1，灰线对应储存室 2。箭头表示样品库在分析后被清空的时间。

图 4 中 CO_2 的摩尔分数的变化代表环境空气的某些特征，图中每一个周期均具有两个平台期，其中第一个平台期（5min）代表对“下降气流储存室“空气的分析，第二个平台期代表对“上升气流储存室“空气的分析。总体而言，上升气流中 CO_2 的摩尔分数均高于下降气流，说明向上的 CO_2 通量，即生态系统的 CO_2 排放阶段。

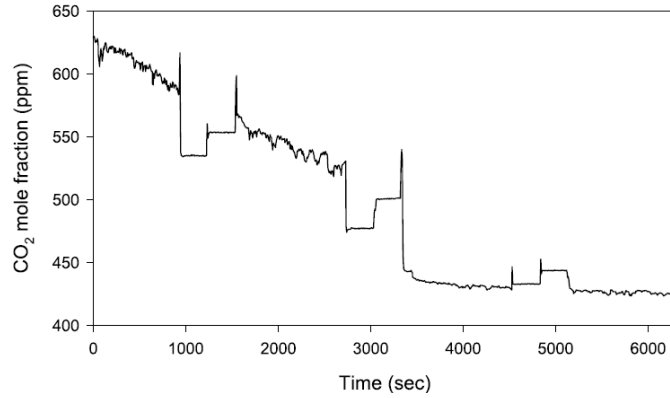


图 4. CO₂ 摩尔分数 2018-07-11,04:45 - 06:30。每个序列中的第一个平台期对应下降气流分析，第二个对应上升气流分析

图 5 显示动态静带区的必要性，若采用静态静带区则会导致日间测定的样本数目增加，造成通量高估。

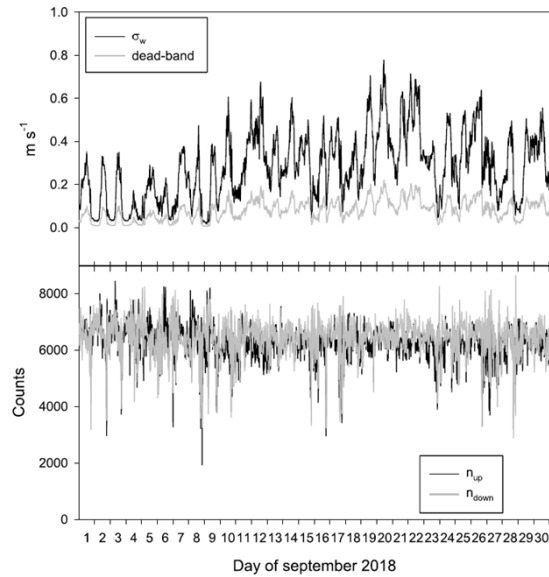


图 5. 垂直风速和对应静带区(上图)的标准差 σ_w ，以及对向下(n_{down})和向上(n_{up})采样时所产生的开启阀情况计数(下图)。

REC 与 EC 对比

在两种系统的平行测量期间，对 CO₂ 和 H₂O 通量进行了比较。通量表现出了反映该监测点季节变化动态的相似模式。因此该结果表明，REA 系统通常能够测量 CO₂ 和 H₂O 的湍流通量，其性能与 EC 系统相似。两者之间偶尔会有偏差系统可以部分解释为技术差异。

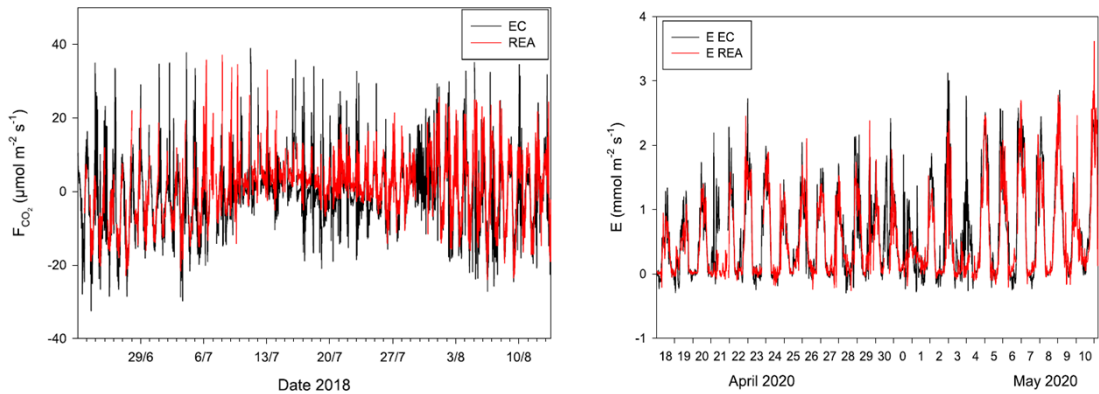


图 8. 用 EC(黑线)和 REA(红线)测量的 2018 年夏季 CO₂ 及 H₂O 通量

4、技术优势：

经评估新型 REA 系统具有如下优点：

1. 易扩展：几乎可以与任何气体分析仪连用、可更换的分析仪也为测量包括同位素示踪剂在内的非粘性气体的通量提供了机会；
2. 适用范围广：系统可在 12v 直流电下运行，采用坚固、便携和模块化的方式设计，可适用于野外或远程测量活动；
3. 潜在污染小：由于采用“气囊”原理而不是安装泵的一般方法来填充储存室，避免了取样过程中与泵的直接接触，从而防止了潜在的污染。

5、亮点结论：

REC 系统在北欧气候条件下可连续可靠地工作几个月，且工作的环境温度变化范围巨大（-20 到+30°C），说明仪器稳定性强。所测量的 CO₂ 和 H₂O 的通量与单独用 EC 系统测量的通量一致。技术上的相似性和确定的检测限度使研究者确信 REA 系统也可以对 CH₄ 和 N₂O 的通量进行准确测定。

展望：

基于 CRDS（光腔衰荡光谱）技术的 Picarro 产品，为环境监测与科学研究提供了巨大便利，自身的模块化设置与供电便利性等优势使其系列产品适用场合更为广泛，未来 Picarro 将继续发挥便捷、稳定、兼容性高的优势，结合多种科学方法，为更多领域提供研究基础。