



Campbell

S C I E N T I F I C ®

ChinaFLUX第十八次通量观测理论与技术培训

(沈阳, 2023年8月17-18日)



通量研究最新测量技术

杨柏 (byang@campbellsci.com)

Campbell Scientific Inc



I. 日光诱导叶绿素荧光

(Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence, SIF)

What is SIF?

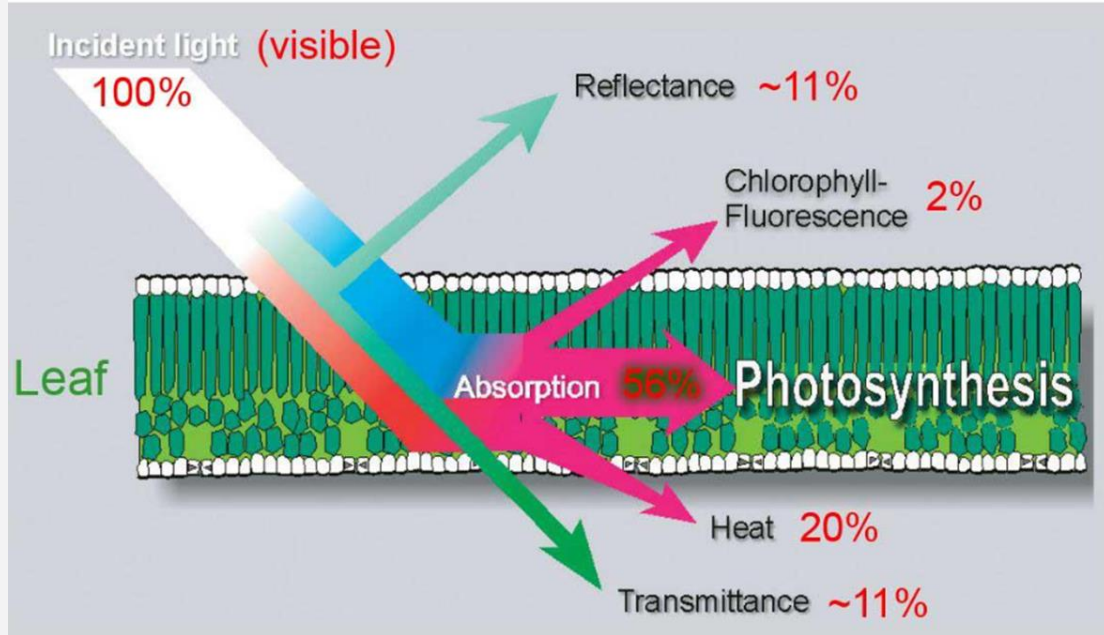


Image from European Space Agency

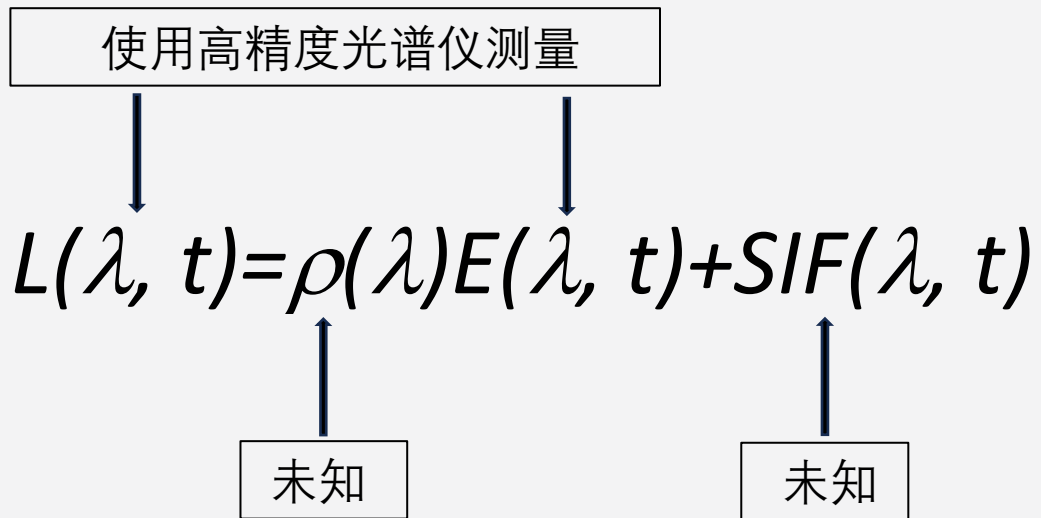
- SIF是在光合作用过程中，作物叶片吸收太阳光后由其叶绿素片(chlorophyll α)发出的叶绿素荧光
- SIF 波谱范围在650 nm to 800 nm (red and far-red fluorescence) 之间，两个峰值大约在685 and 740 nm之间
- SIF是一个直接和光合作用过程相关的信号，任何影响光合作用过程的因素都会影响SIF

SIF的重要性

- SIF 是唯一的可以通过遥感手段（地面或者卫星）测量的光合作用信号
- 与光合作用过程有内在的联系，可以用来作为生态或者作物模型的输入来估算GPP
- 可以作为作物或者植被受胁迫后的早期预警信号，在作物灾害出现之前SIF的变化就能被测到
- 可以用来做作物受害（干旱，火灾等）后的评估

如何测量SIF?

(Spectral Fitting Methods ; Meroni et al, 2010)



L : outgoing irradiance

E : incoming irradiance

ρ : reflectance

λ : wavelength

t : time

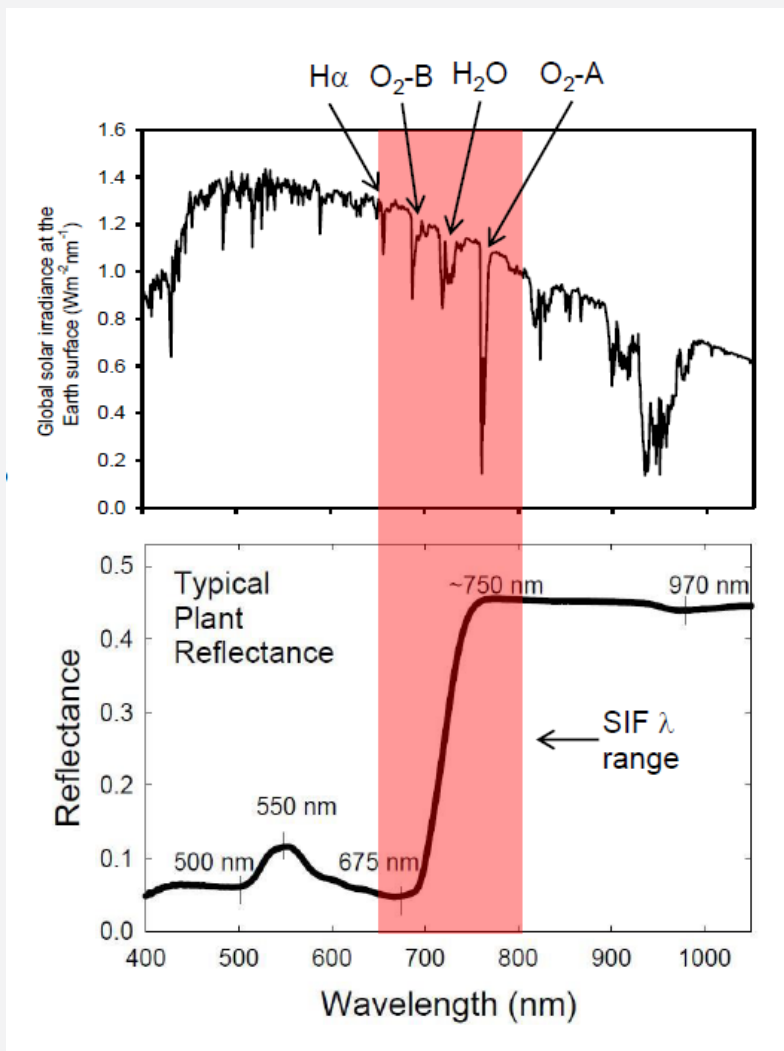
为了推导求得 SIF ，我们假设: ρ 和 SIF 在测量的波谱区间随波长的变化不是杂乱无章的，而是可以被相对简单的数学方程（比如一元多项式或者其他）来描述的

$$\rho(\lambda) = a_0 + a_1 * \lambda + a_2 * \lambda^2 + a_3 * \lambda^3 + \dots$$

$$SIF(\lambda) = b_0 + b_1 * \lambda + b_2 * \lambda^2 + b_3 * \lambda^3 + \dots$$

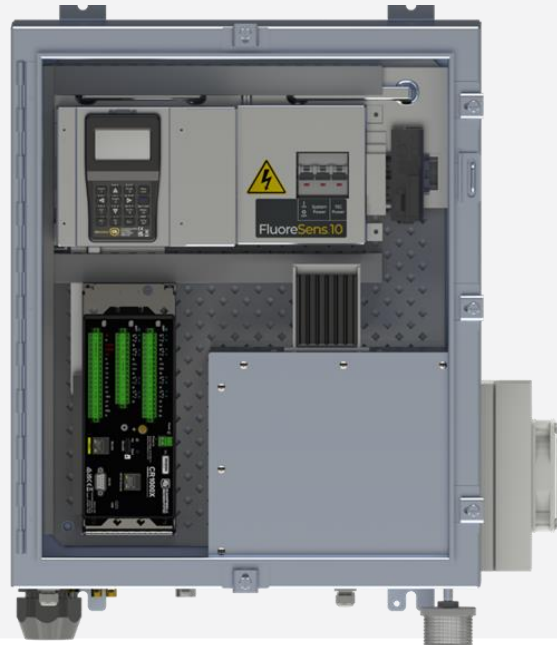
对 L 和 E 在不同波段重复观测，我们可以得到足够多的相对独立的方程来求解上面方程中的系数 (a and b)，然后计算得到 ρ 和 SIF

选择哪个波段来测量SIF?



- ❑ 最理想的情况是我们能找到一个波段使得 $E = 0$ ，但这样的理想情况不存在
- ❑ 但是，在一些波段上 E 是比较低的，比如 Fraunhofer lines (e.g., $\text{H}\alpha$) 和 Telluric 氧气吸收线 ($\text{O}_2\text{-B}$ and A)
- ❑ 在这些吸收线上， SIF/E 相对较高，或者说 SIF 对 L 的贡献相对其他波段较大

地面仪器来测量SIF

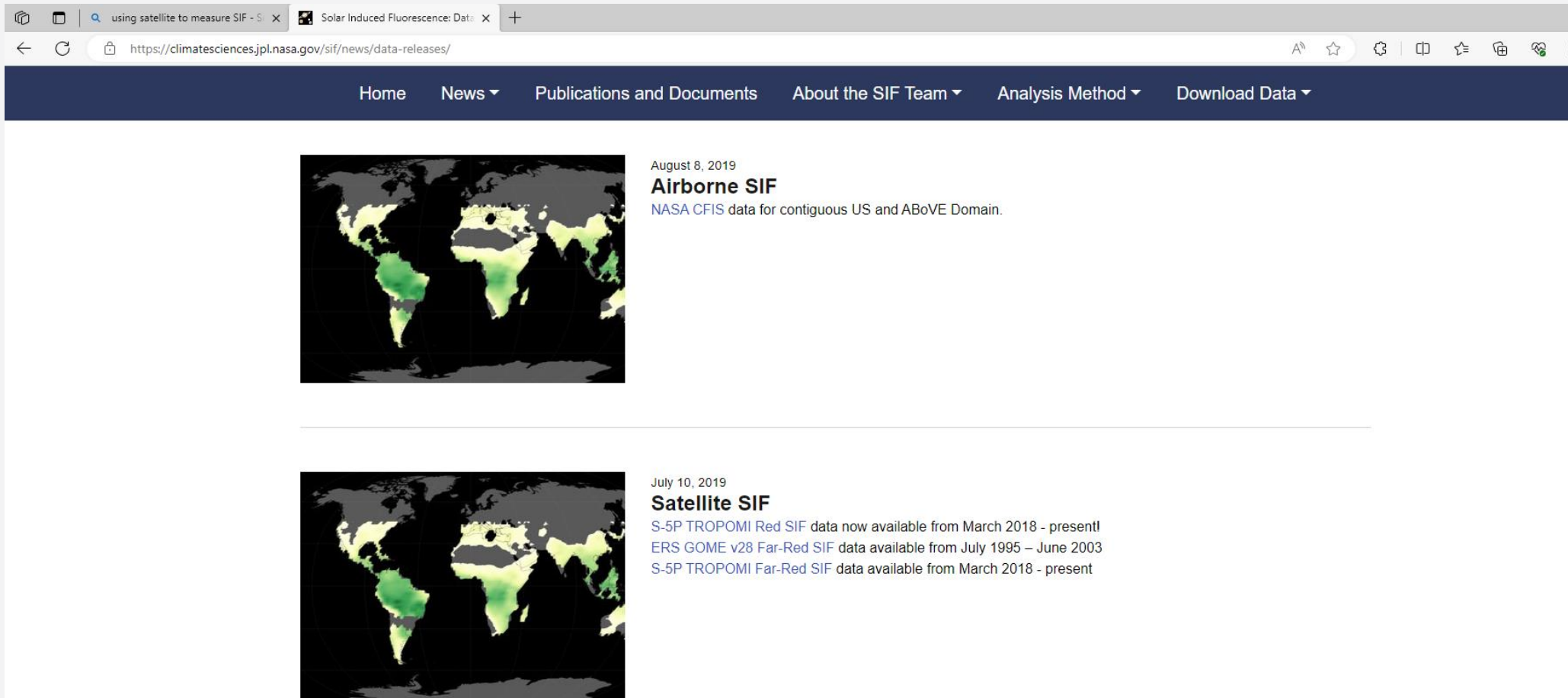


- Mains (AC) powered (ca. 150W)
- Main spectrometer: QE Pro (oxygen band A and B, 690 and 760 nm with excellent resolution 0.41nm)
- Rotating optical fiber (single field of view, 180°)
- Provides expansion to EC technology (partition NEE, input to calculate GPP)
- Based on CR1000x
- Temperature controlled housing



卫星遥感手段来测量SIF

(<https://climatesciences.jpl.nasa.gov/sif/news/data-releases/>)



The screenshot shows a web browser window with the URL <https://climatesciences.jpl.nasa.gov/sif/news/data-releases/>. The browser's address bar and tabs are visible at the top. Below the browser window is a dark blue navigation bar with the following menu items: Home, News, Publications and Documents, About the SIF Team, Analysis Method, and Download Data. The main content area features two news items, each with a world map image showing SIF data over the Americas and a text block.

News Item 1:

August 8, 2019
Airborne SIF
NASA CFIS data for contiguous US and ABoVE Domain.

News Item 2:

July 10, 2019
Satellite SIF
S-5P TROPOMI Red SIF data now available from March 2018 - present!
ERS GOME v28 Far-Red SIF data available from July 1995 – June 2003
S-5P TROPOMI Far-Red SIF data available from March 2018 - present

使用SIF建模估算GPP

$$\text{GPP} \approx \text{SIF}(\lambda) \times \frac{\text{LUE}_P}{\text{LUE}_F(\lambda)}, \quad [3]$$

Guanter, et al. (2014). <https://doi.org/10.1073/pnas.1320008111>

Porcar-Castell, et al. (2014). Linking **chlorophyll a fluorescence** to **photosynthesis** for remote sensing applications: Mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, 65(15), 4065–4095. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru191>

Guan, et al. (2016). Improving the monitoring of **crop productivity** using spaceborne **solar-induced fluorescence**. *Global Change Biology*, 22(2), 716–726. <https://doi.org/10.1111/gcb.13136>

⋮

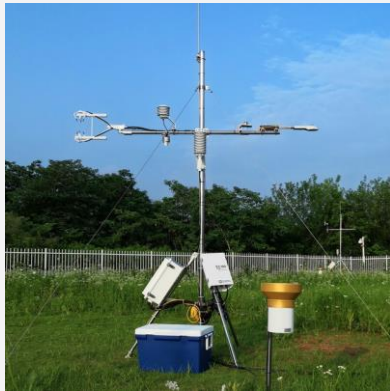
$$\text{GPP} = \frac{C_c - \Gamma^*}{4C_c + 8\Gamma^*} q_L \frac{\Phi_{\text{PSIImax}}(1 + k_{\text{DF}})}{(1 - \Phi_{\text{PSIImax}})\epsilon} \times \text{SIF} \quad (\text{Eqn } 23)$$

Gu, et al. (2019). <https://doi.org/10.1111/nph.15796>

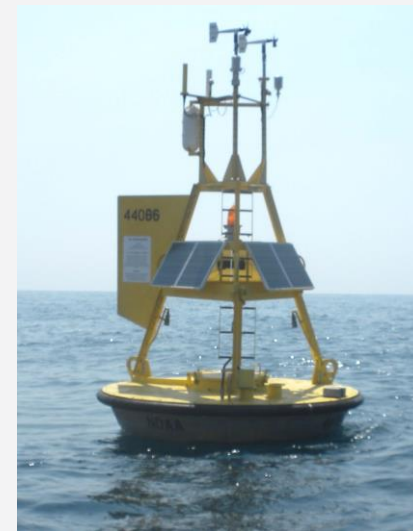
Liu, et al. (2019). Advantage of multi-band **solar-induced chlorophyll fluorescence** to derive **canopy photosynthesis** in a temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 279, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107691>

Wood, et al. (2017). Multiscale analyses of **solar-induced fluorescence** and **gross primary production**. *Geophysical Research Letters*, 44, 533–541. <https://doi.org/10.1002/2016GL070775>

⋮

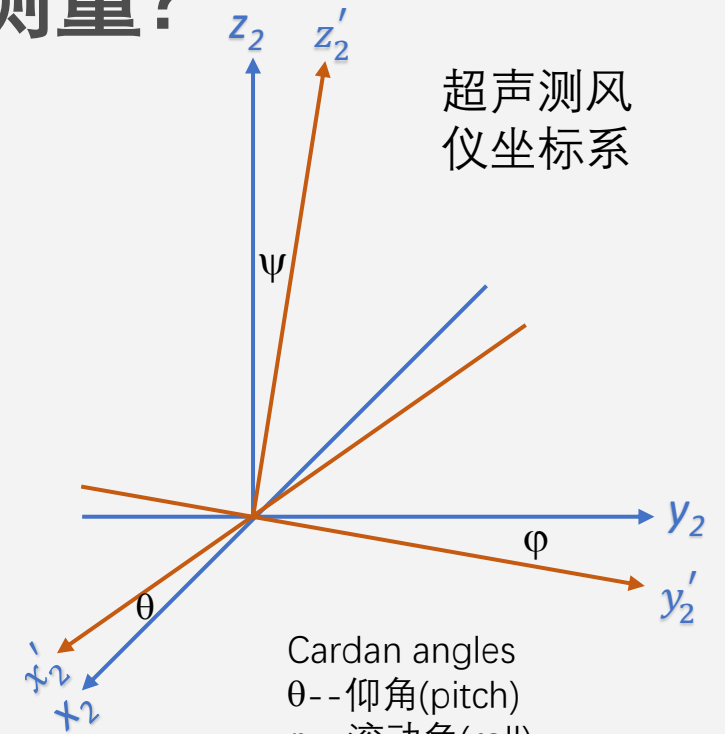
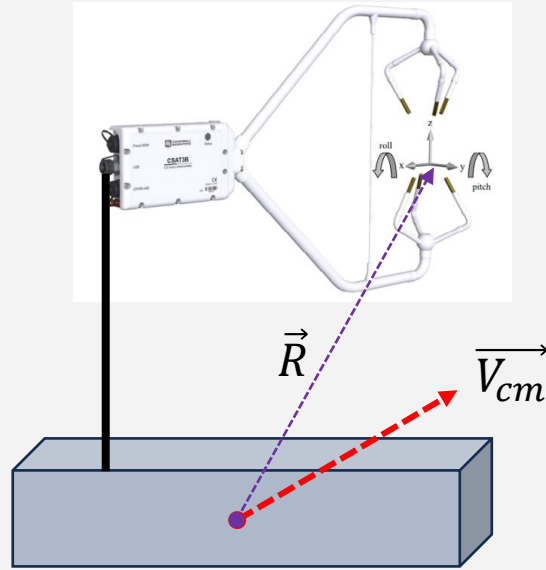
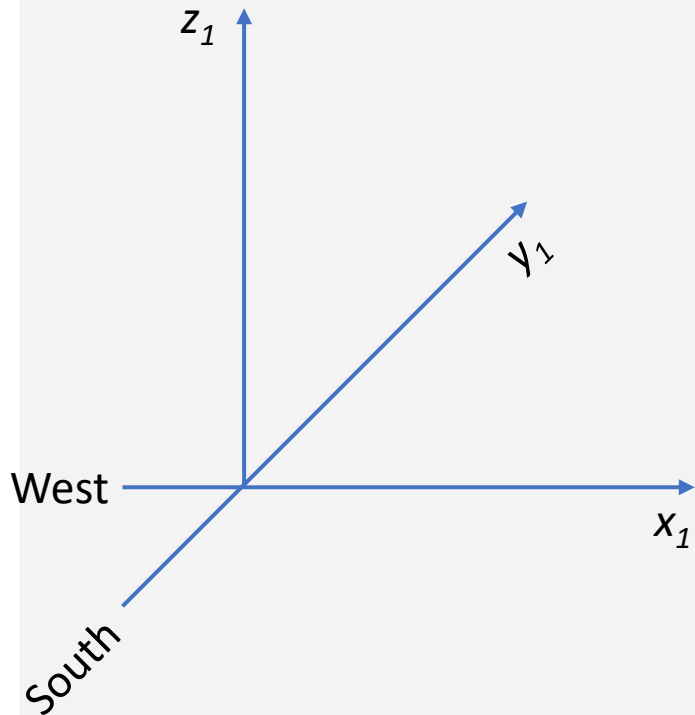


II. 在移动平台上应用通量观测技术



在移动平台上如何矫正风速测量?

气象学中常用风观测坐标系



超声测风仪坐标系

Cardan angles
 θ --仰角(pitch)
 ϕ --滚动角(roll)
 ψ --转动角(yaw)

$$\underbrace{(x_1, y_1, z_1)}_{\vec{V}_{true}} = \underbrace{(x_1, y_1, z_1)}_{\vec{V}_{cm}} + \underbrace{T \left(\underbrace{(x'_2, y'_2, z'_2)}_{\vec{V}_{obs}} + \underbrace{(x_2, y_2, z_2)}_{\vec{\Omega} \times \vec{R}} \right)}_{(x_2, y_2, z_2)}$$

$\vec{\Omega}$: (x'_2, y'_2, z'_2) 相对于 (x_2, y_2, z_2) 的转动角速度
 T : 从 (x_2, y_2, z_2) 到 (x_1, y_1, z_1) 的转换方程

其他考虑因素

- 通常使用陀螺姿态仪测量Cardan angles(仰角, 滚动角, 转动角) 而后计算 $\vec{\Omega}$, 一定要清楚它们的定义和测量顺序
- 有时会用加速测量器直接测量 $\vec{\Omega}$, 需要考虑加速器和移动平台重心的相对距离, 及加速器 (如果是分离式的) 形成的坐标系是否是正交的, 是否和超声测风仪的坐标系是重叠一致的
- 由于移动平台的移动, 在一些位置的周围会诱发生成非自然湍流 (船的尾部, 飞机的侧面和尾部), 应避免在这些位置架设通量仪器; 否则需要进行通量的波谱订正
- 由于平台的移动或者晃动, 所测到的通量不是在一个固定点上的结果, 大多时候是沿着行进路线或者在某一点周围的平均值
- 在沿海地区或者海上使用通量仪器时, 海水 (盐类) 对仪器的腐蚀作用非常强

一些有价值的参考文献

Fujitani, T., 1985: Method of turbulent flux measurement on a ship by using a stable platform system. *Pap. Meteor. Geophys.*, **36**, 157–170.

Edson, J. B., A. A. Hinton, K. E. Prada, J. E. Hare, and C. W. Fairall, 1998: Direct covariance flux estimates from mobile platforms at sea. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 547–562.

Miller, S. D., T. S. Hristov, J. B. Edson, and C. A. Friehe (2008), Platform motion effects on measurements of turbulence and air-sea exchange over the open ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 1683 – 1694, doi:10.1175/2008JTECHO547.1.

III. 通量观测技术在城市环境中的应用



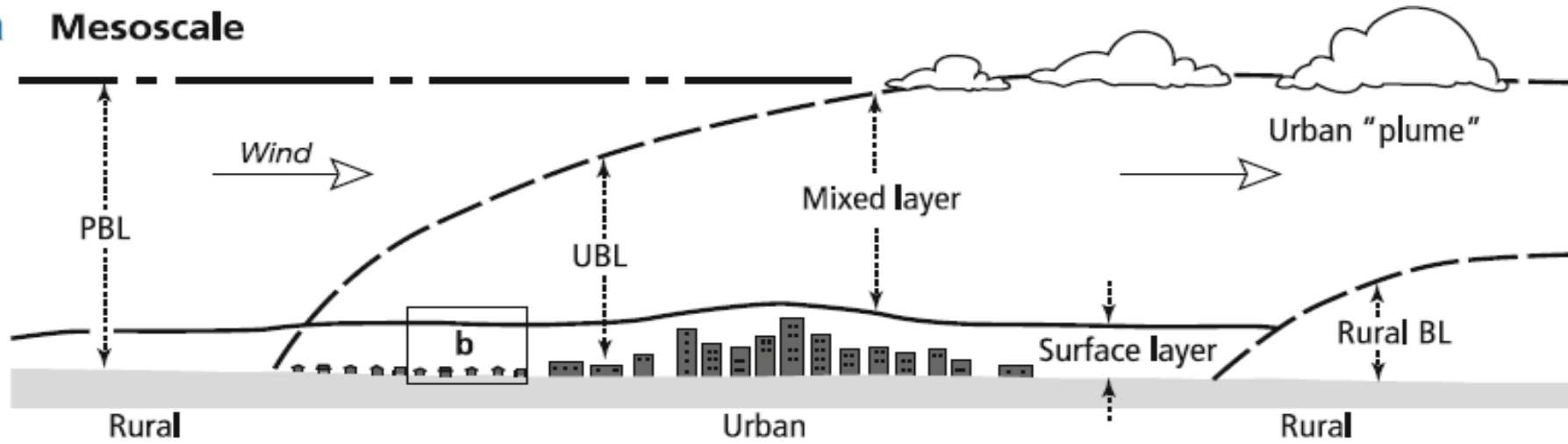
城市环境与自然生态环境的区别

人的因素 + 人的行为 + 人的参与

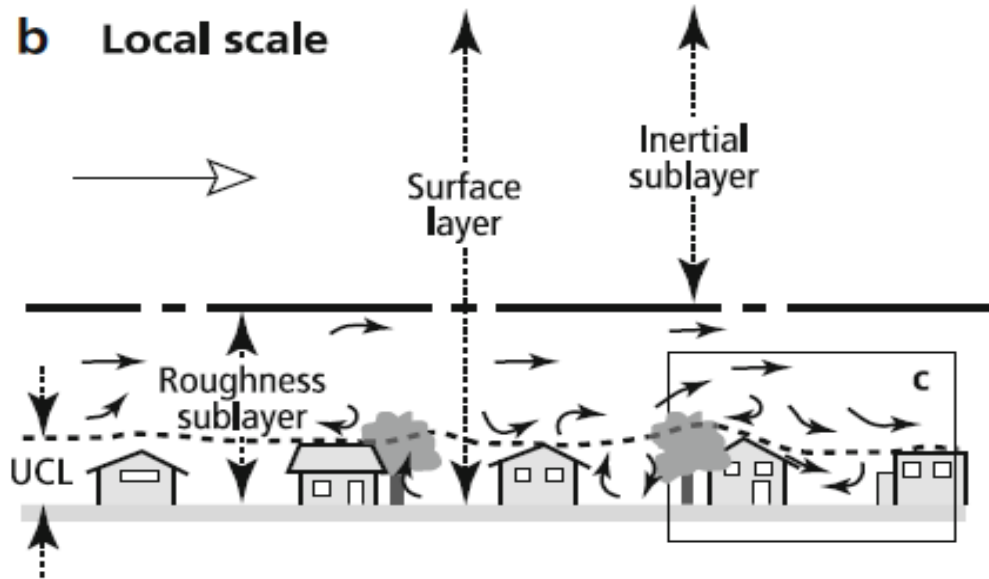
- 大气边界层湍流的角度：建筑物高低大小参差不齐，改变了地表的粗糙度及均一性；高大建筑物改变了风场并在其周围诱引出复杂湍流场
- 能量过程的角度：改变了地表反照率，地表的导热传输特性和储存能力；人为地产生了各种热源，而且分布极不均一，季节变化差异大；人类对热源的利用改变了大气边界层的日变化及季节变化特征，比如热岛效应
- 水分平衡过程角度：改变了地表蒸发渗透能力，蓄水能力，及径流排水过程；人为因素产生了水汽的源汇，比如灌溉，人工湖，污水处理，电热厂冷却塔等，而且分布不均一
- 物质平衡（温室气体，污染物）的角度：人为地增加了大量的源或者汇，分布不均一，而且流动性强，比如人类自己，车辆，工厂（发电厂），垃圾处理站等

城市大气边界层

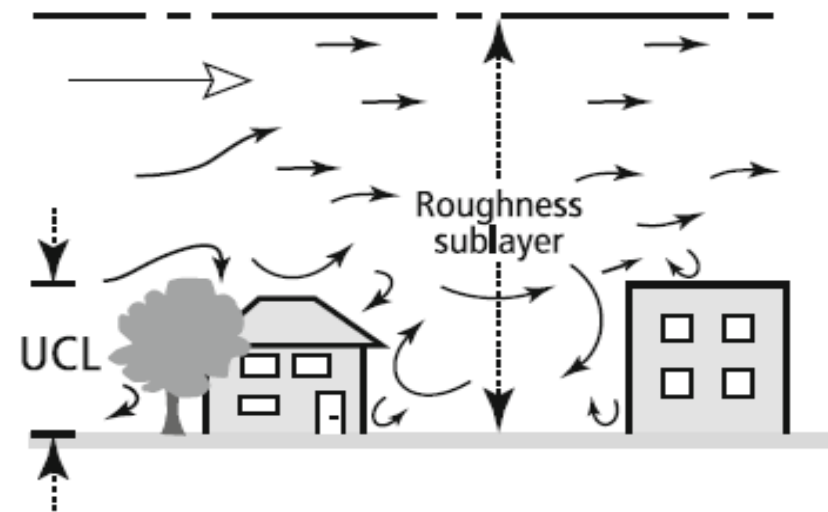
a Mesoscale



b Local scale

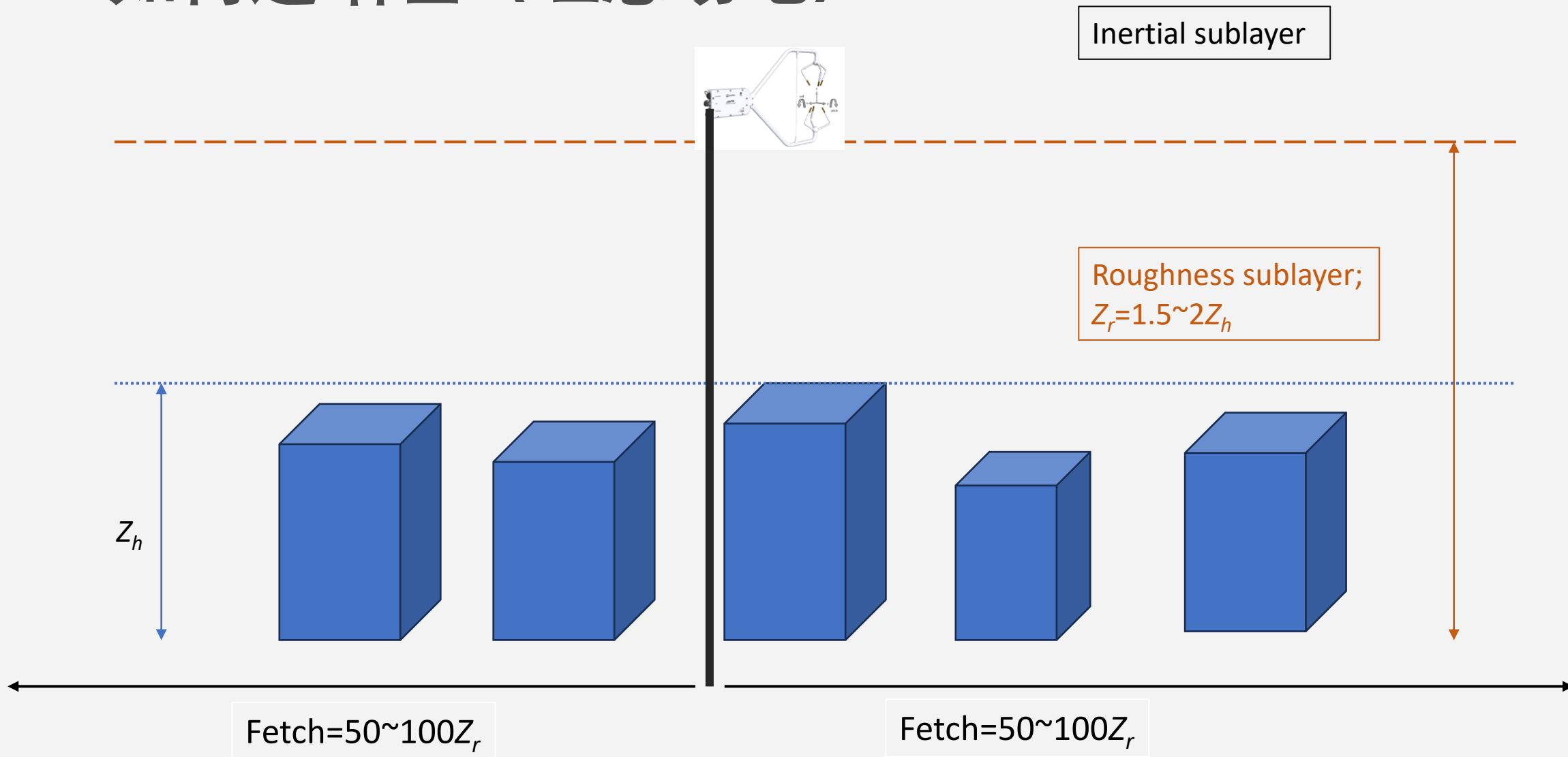


c Microscale



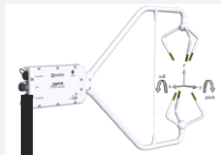
来自 Oke,
2006

如何选站址（理想场地）？



理想观测场地：建筑物（或者城中森林公园，草地）高度基本一致，下垫面均一，在各个方向都能达到 Fetch 的要求；与自然林地非常相似

如何选站址（高塔）？



100-300米高

使用城市中高塔：由于观测高度比较高，地表面相对平滑；但一定要注意Footprint（通量仪器的测量区域）是否超出研究目标区域的界限，或者说测量结果的代表性如何？

城外

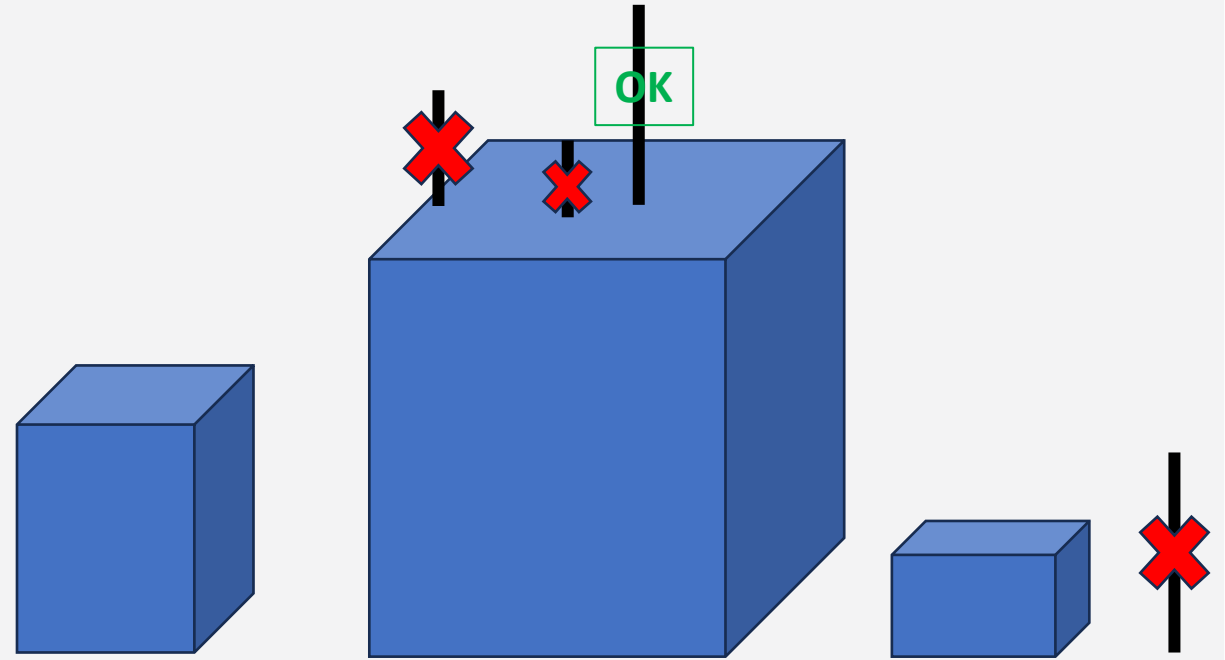
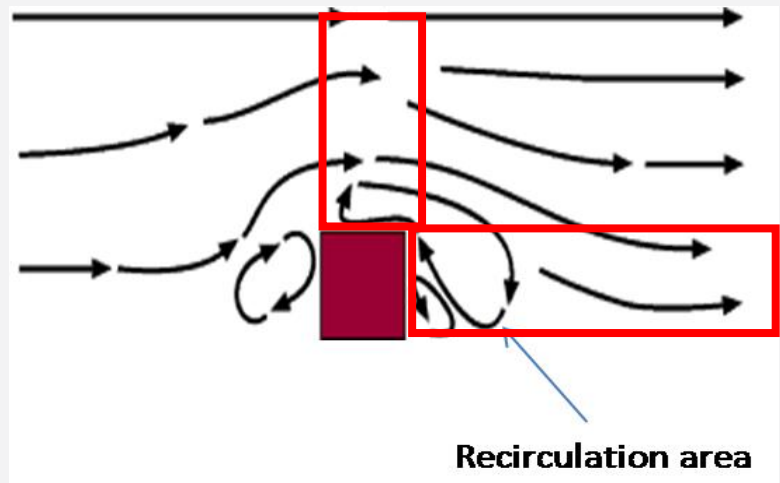
城外

Footprint是否在城市界限以内？

Footprint是否在城市界限以内？

如何选站址（高楼）？

建筑物对流场的影响在其上方可达到相当于建筑物宽度5倍的高度
对流场的影响在其下风方向（尾流区）可达到相当于建筑物高度10 - 15倍的距离



- ❑ 在高大建筑物顶部：不要在边缘测量；在中间测量时，相对于屋顶要有一定的高度；同时，像高塔一样，要考虑这个观测位置的Footprint范围是否在研究目标区以内
- ❑ 在高大建筑物周围：远离此建筑物的距离要相当于建筑物高度的10 - 15倍

能量和物质平衡

$$R_n + Q_F = H + LE + \Delta Q_S + \Delta Q_B + (H + LE)_{adv}$$

净辐射 R_n 感热, 潜热通量 $H + LE$ 土壤热通量或者热储存 ΔQ_S

人为热源 (取暖, 车, 工厂等) Q_F 建筑物热储存 ΔQ_B 感热, 潜热平流项 $(H + LE)_{adv}$

$$C_F + NEE = \int_0^{z_r} \Lambda_a \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz + \int_0^{z_r} (\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) dz + (\bar{w} \bar{c} + \overline{w'c'})_{z=z_r}$$

城市林地草地净交换 NEE 地上空气层内储存项 $\int_0^{z_r} \Lambda_a \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz$ 水平平流项 $\int_0^{z_r} (\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) dz$ 涡动相关通量 $(\bar{w} \bar{c} + \overline{w'c'})_{z=z_r}$

人为碳排放源 (人呼吸, 车, 电厂, 各种燃料使用) C_F 空气在测量空间中所占比例 Λ_a

- 人为热能源和碳源占有很大比例, 分布不均一, 而且有流动性, 其昼夜变化及季节变化和自然生态系统不一样
- 由于地表不均一, 平流项不可忽略; 由于建筑物存在, 边界层空间结构复杂, 储存项也不可忽略, 并且空气所占空间比例减小; 影响因子多, 过程复杂化

资料质量控制

在自然生态系统中常用的方法在城市环境中还能使用吗？

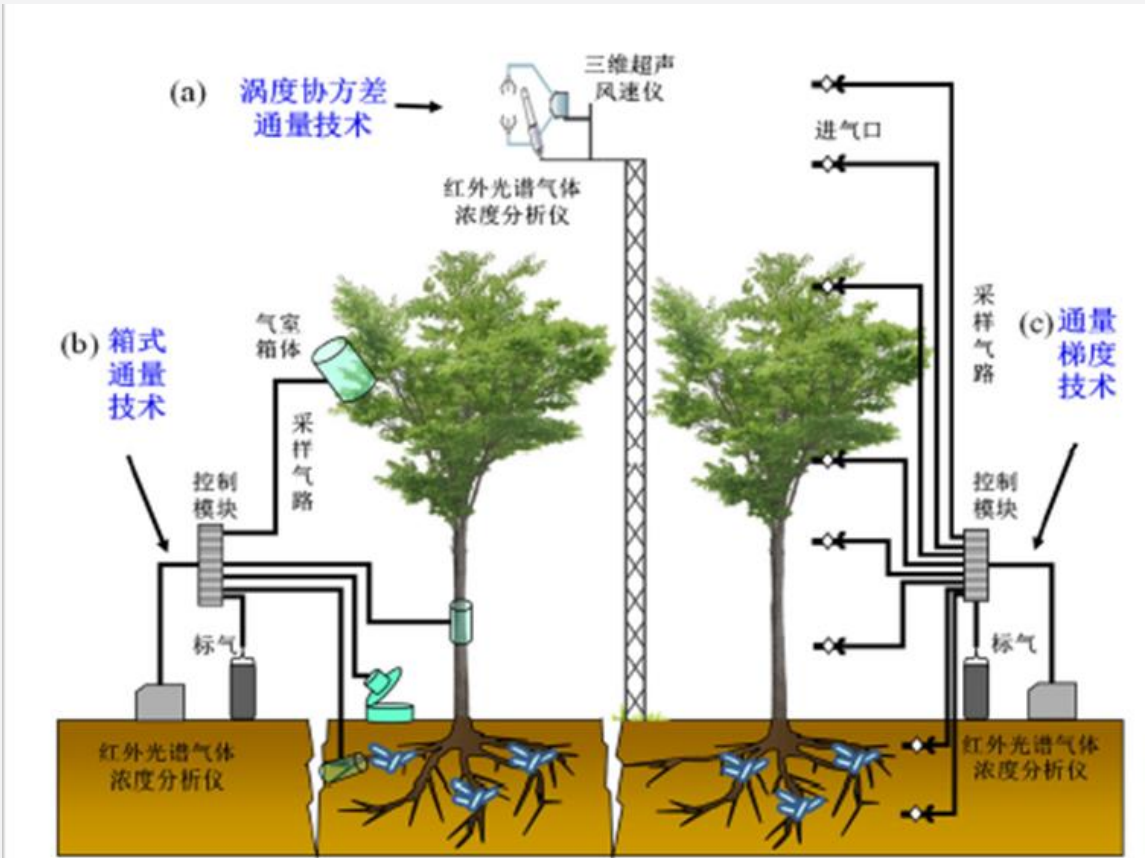
- (maybe) 高频资料或者30分钟资料序列中极端值的剔除：需要小心，由于人为活动及城市突发事件，也许一些极值（由统计方法判定为outlier）是真的
- (maybe) 高频资料De-trending：需要小心，也许有时候一些随时间递增或者递减的趋势是真实的反映
- (maybe) 通量资料的评级打分：Foken的评分方法是在比较观测值和理论值；在城市环境中有时候一些湍流理论是不完全成立的
- (maybe) 质量评估的统计方法：由于人为因素，某一日的日变化可能与其相邻日相关性很差（相关性分析），或者时间序列会有突变，不连续（方差分析）
- (yes) 能量闭合：但要注意城市环境中能量平衡项目中增加了几个人工热源项
- (yes) 根据源区(Footprint)的分析结果来剔除资料
- (yes) 根据 U^* 阈值来剔除资料

资料补缺

在自然生态系统中常用的方法在城市环境中还能使用吗？

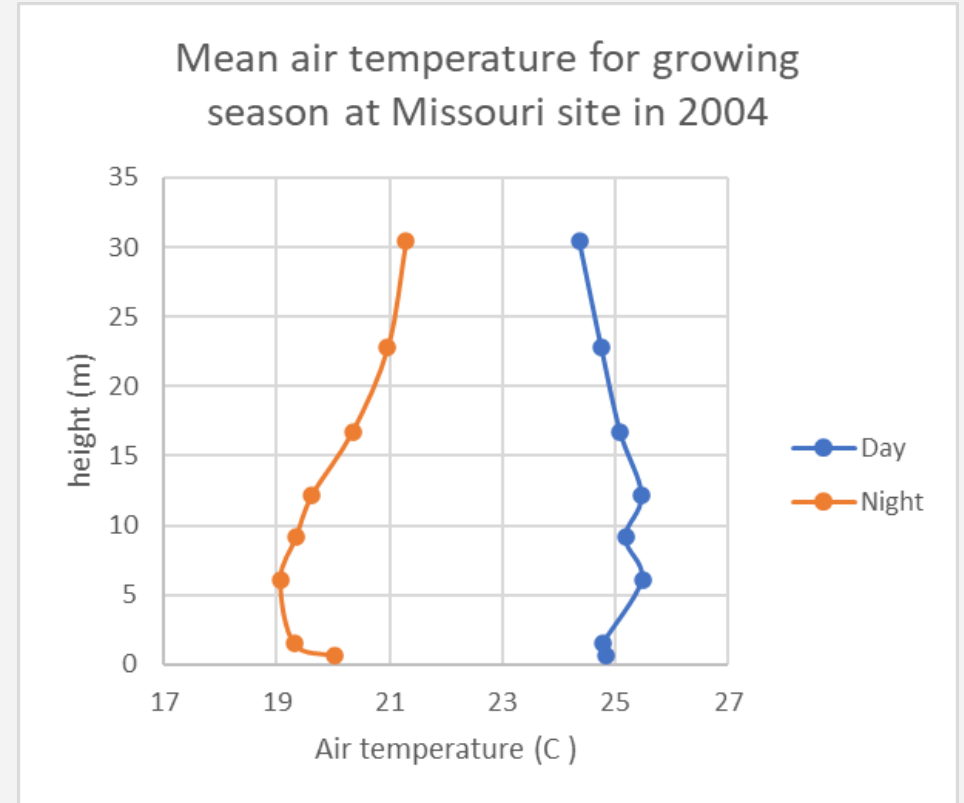
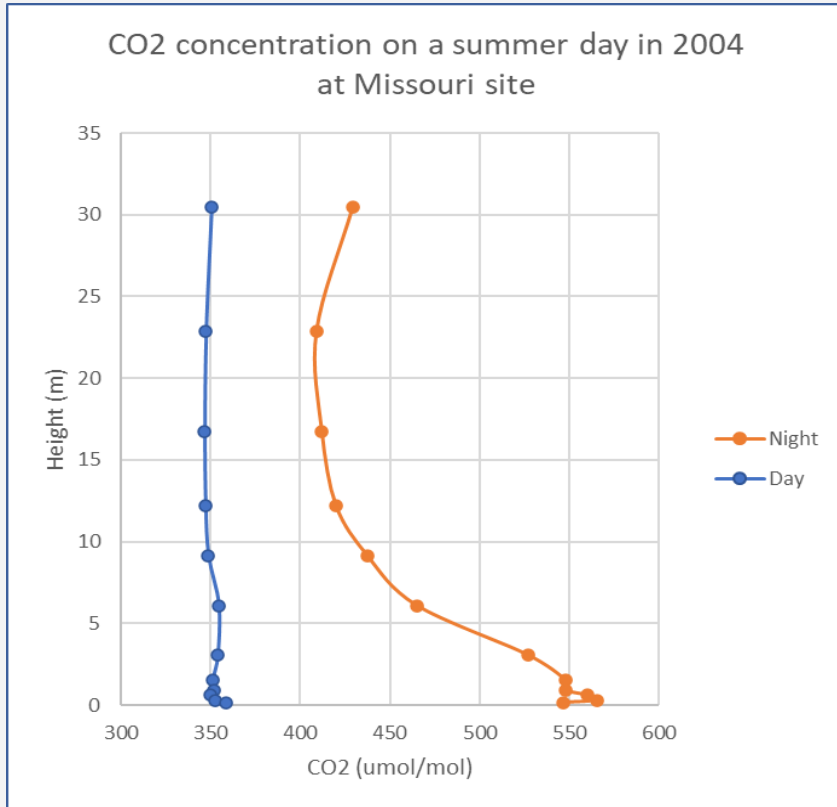
- (maybe) 线性或者非线性回归：需要小心，由于人为活动及城市突发事件，也许一些极值（由统计方法判定为outlier）是合理的，统计方法很难能正确补缺这些合理极值或者时间序列的突变
- (maybe) 日变化平均值(mean diurnal variation; MDV)：由于人为因素及城市突发事件，某一日的日变化可能与其相邻日相似性很差
- (no) 查表法(look-up table; LUT), Marginal Distribution Sampling (MDS)
- (no) 机理模型：光响应曲线，土壤呼吸（Q10）方程
- (yes) 数学模型：机器深度学习(machine learning), 人工神经网络(artificial neural network)

IV. 其它的通量观测方法



涡度协方差通量、箱式通量和通量梯度系统的示意图

梯度法



$$\overline{w'c'} = -K_c \frac{\Delta \bar{c}}{\Delta z}$$

$$\overline{w'T'} = -K_T \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta z}$$

- 在热量，动量及CO2沿梯度传输过程中，它们的系数K极有可能是不一样的值
- 在地表面K = 0
- K随湍流强度（湍流动能或者风速）增加而增加
- K随大气稳定性变化而变化
- 在边界层内有强对流运动（存在）时，这个梯度传输原理有可能不成立

箱式法



不观测时段，气室是打开的
观测之前，先关闭几分钟(Δt)，让气室内部CO₂浓度达到一个稳定平衡态；然后同时观测气室内外的CO₂浓度（或者密度）， C_{in} 和 C_{out}

$$soil\ efflux(R_s) = \frac{(C_{in} - C_{out}) * V}{A * (\Delta t)}$$

V --- 气室体积

A --- 气室横截面积

V. 使用涡动相关技术测量C同位素通量

EC-TDL系统

超声测风仪(sonic anemometer)

+

可调谐半导体激光吸收光谱仪 (Tunable diode laser absorption spectroscopy; TDLAS)

- 测量频率可以达到10 – 20Hz
- TDLAS直接测量C同位素浓度，然后使用标准的涡动通量数据处理和计算方法估算同位素通量
- 仪器花费贵，维护成本高
- 需要液态氮或者其它冷却方法保持激光头的低温稳定工作环境
- 需要标准气体频繁（比如每隔5分钟）做在线仪器标定
- 需要较大功率抽气泵
- 耗电高，需要工业用交流电

Griffis, et al. (2008): Direct measurement of biosphere-atmosphere isotopic CO₂ exchange using the eddy covariance technique, J. Geophys. Res., 113, D08304, doi:10.1029/2007JD009297.1.

Thank you!

