



ChinaFLUX第十四次通量观测理论与技术培训

生态系统CO₂/H₂O/痕量气体净交换 测定中的储存项估算

王兴昌, 周新华

东北林业大学 哈尔滨;

Campbell Scientific Inc, UT, USA

E-mail: xcwang_cer@nefu.edu.cn; xzhou@campbellsci.com

北京, 2019.08.07



提 纲

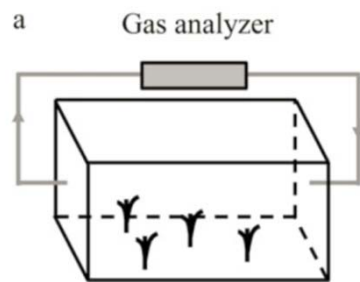
1. NEE方程中的储存项
2. 储存项理论
3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法
4. 储存项的密度效应
5. 储存通量时间变化
6. 储存通量空间变异
7. 研究实例



1. NEE方程中的储存项

密闭静态箱或密闭动态箱法的NEE方程

封闭箱体，箱内与外界没有任何形式的气体交换
净生态系统交换 (NEE) = 箱内目标气体量的变化速率



NEE=储存项 (非稳态)

NEE=气体摩尔混合比变化速率在
高度上积分×干空气摩尔密度

高度=矩形体积/底面积=单位面积

Lee X. 著. 王伟等译. 2018. 科学出版社

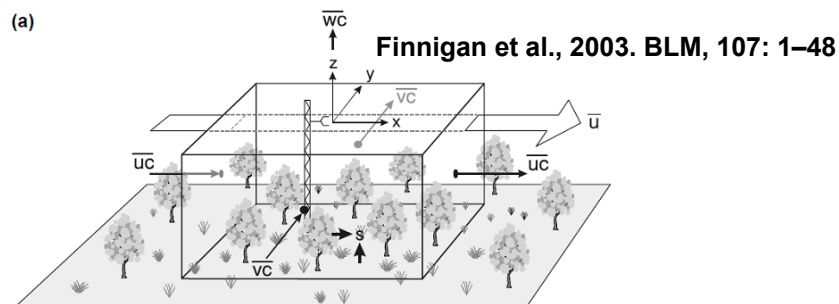


1. NEE方程中的储存项

• 涡动相关法的NEE方程

$$NEE = F_c + F_s + F_a + F_d$$

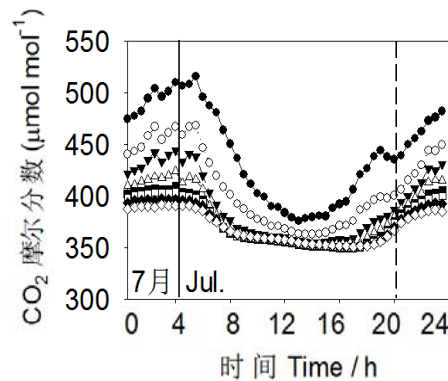
各项依次为垂直湍流通量项、**储存项**、平流项和辐散项





1. NEE方程中的储存项

• CO₂浓度日变化格局:大多处于非稳态



帽儿山温带落叶阔叶森林

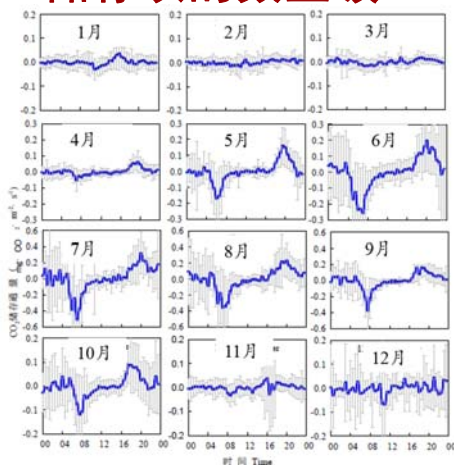
- 各层均为夜间大于白天
- 日出前最大，午后最低
- 正是由于CO₂浓度的时间变化导致了控制体积内的“储量变化”，即储存项 F_s
- 其他气体也存在波动

焦振等, 2011. 植物生态学报, 35: 512-522



1. NEE方程中的储存项

• 储存项的数量级



帽儿山温带落叶阔叶森林

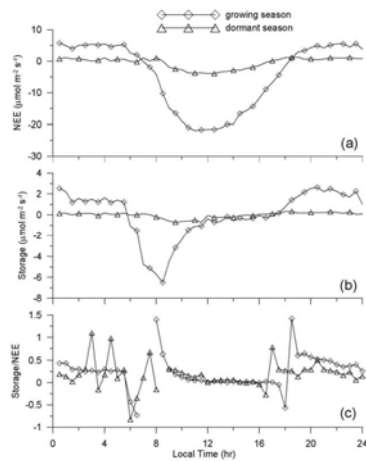
- F_s 极值出现在清晨或傍晚，可达 $\pm 0.4 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($9 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- 此时NEE值约为 $\pm 0.5 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($11 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)，几乎全部由 F_s 贡献。

王静, 2013. 硕士学位论文. 东北林业大学



1. NEE方程中的储存项

• 储存项的数量级



MOFlux温带落叶阔叶森林

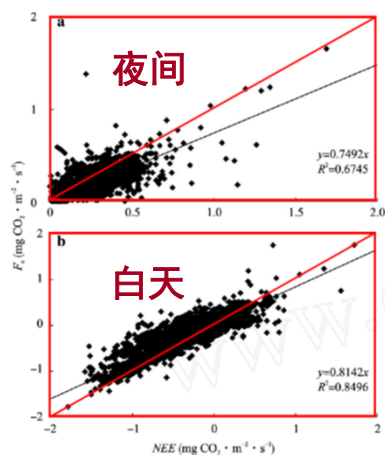
- F_s 变化格局与帽儿山的情况高度一致
- 清晨和傍晚 F_s 是NEE的主体
- 正午前后, F_s 几乎为零; 夜间, F_s 占NEE的50%左右

Yang et al., 2007. JGR-A, 112: D20123



1. NEE方程中的储存项

• 30min尺度储存项对NEE的意义



长白山针阔混交林

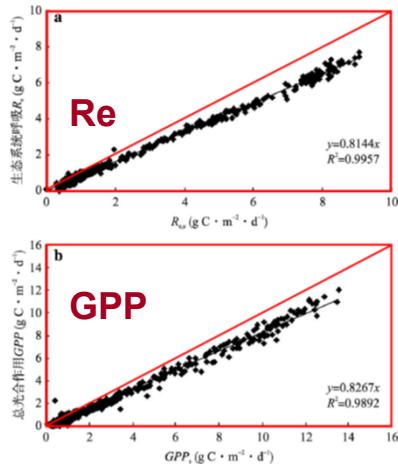
- 忽略 F_s 导致30 min 尺度夜间和白天的NEE 分别低估25%和19%。

张弥等, 2010. 应用生态学报, 21: 1201-1209



1. NEE方程中的储存项

• 年尺度储存项对NEE的意义



长白山阔叶红松林

- 忽略 F_s 导致年尺度上 R_e 和 GPP 低估 20% 左右
- 数量级可达 $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$

复杂地形条件

- 高低较小，山坡和谷底较大

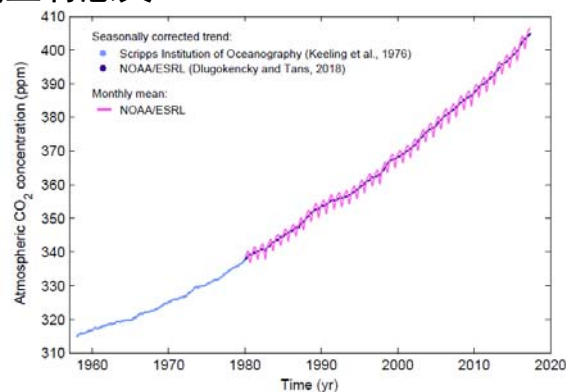
张弥等, 2010. 应用生态学报, 21: 1201-1209

De Araújo et al., 2010. AFM, 150: 226-237



1. NEE方程中的储存项

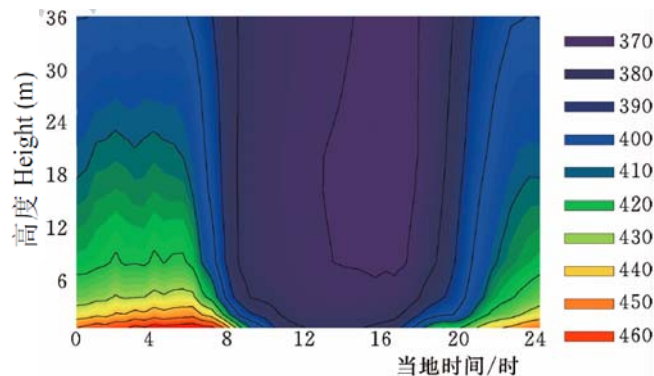
- 特别地，将地球看做一个“生态系统”，全球大气 CO_2 浓度升高也是地球碳平衡中大气层的 CO_2 储存项。它在长时间尺度上有意义。





2. 储存项理论

- 涡动相关通量观测的控制体积内的CO₂浓度经常处于非稳态，所以NEE方程需要包含储存项。



Wang et al., 2016. AFM, 28-229, 327-338



2. 储存项理论

- 理论上，在大气稳态（温度/气压不变）时，储存项是通量观测控制体积内CO₂/H₂O/痕量气体储量的时间变化率（**change of storage**）。
- 大气温度/气压变化时，EC观测平面上存在干空气的垂直通量，干空气组分（如CO₂）也产生通量（**密度效应**）。

$$F_s = \int_0^h \frac{\partial \overline{\rho_s}}{\partial t} dz - \overline{\chi_s}(h) \int_0^h \frac{\partial \overline{\rho_d}}{\partial t} dz$$

- ρ_s —气体密度
- ρ_d —干空气密度
- χ_s —气体摩尔混合比
- h —EC观测高度
- z —距地表垂直距离

改自Gu et al., 2012. AFM, 152: 135-148



2. 储存项理论

- 与密闭静态箱类似， CO_2 浓度变化速率是通量测量周期结束与开始时刻浓度差除以平均周期。
- 这需要测量瞬时空间平均 CO_2 浓度，即快速响应仪器系统。但 CO_2 浓度很容易受到阵风性的波动影响而存在很大的随机波动，应用瞬时 CO_2 浓度会给 F_s 带来很大的不确定性。
- 因此绝大多数研究都采用时间平均或增加缓冲瓶的方法平滑的 CO_2 浓度变化。

Finngan et al., 2006. AFM, 136: 108-113
Wang et al., 2016. AFM, 28-229, 327-338



3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

• 气体采样和测量系统

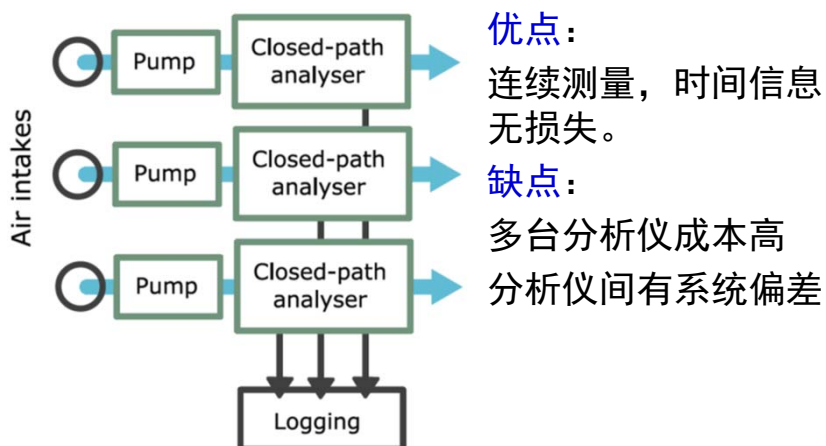
有4种方法测量 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 储存通量：

- (1) 多分气体析仪分别采样法（1例）
- (2) 单气体分析仪慢速响应依次采样法
- (3) 单气体分析仪快速响应依次采样法
- (4) 单气体分析仪快速响应同时混合采样法



3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

(1) 多分气体分析仪分别采样法



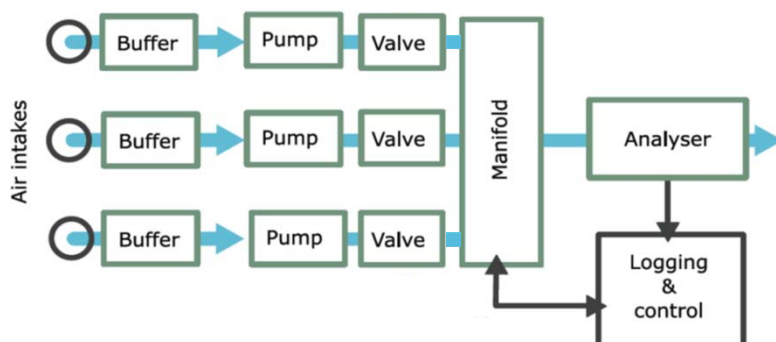
Montagnani et al., 2018. International Agrophysics, 32, 551-567



3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

(2) 单气体分析仪慢速响应依次采样法

- 优点:** 成本低, 功耗低
缺点: 有效测量时间短, 间歇性测量



Montagnani et al., 2018. International Agrophysics, 32, 551-567

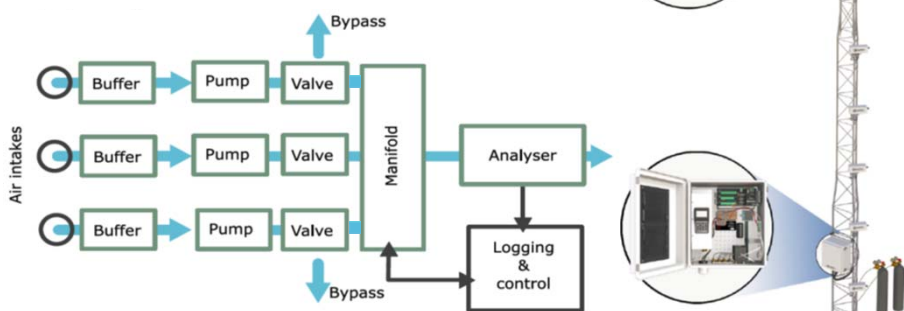


3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

(3) 单气体分析仪快速响应依次采样法

优点：成本低，响应快，有效测量时间长

缺点：功耗高，间歇性测量



Montagnani et al., 2018. International Agrophysics, 32, 551-567

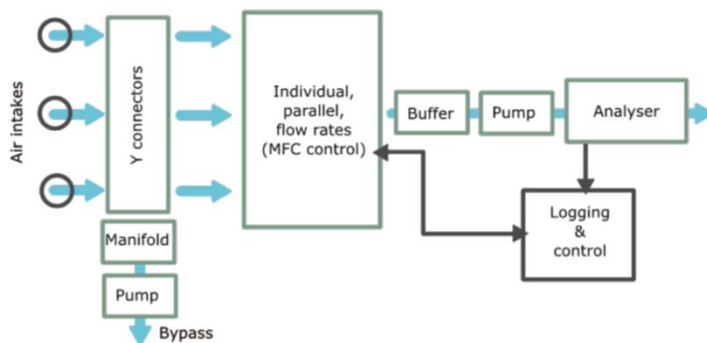


3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

(4) 单气体分析仪快速响应同时混合采样法

优点：可测量垂直平均浓度瞬时测量

缺点：成本高，功耗高，无法获取浓度廓线



Montagnani et al., 2018. International Agrophysics, 32, 551-567



3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

• 储存项估算方法（廓线法）

$$F_s = \int_0^h \overline{\frac{\partial \rho_s}{\partial t}} dz - \overline{\chi_s}(h) \int_0^h \overline{\frac{\partial \rho_d}{\partial t}} dz \quad (\text{气体密度})$$

$$\approx \overline{\rho_d}(h) \int_0^h \overline{\frac{\partial \chi_s}{\partial t}} dz \quad (\text{气体摩尔混合比})$$

浓度廓线系统分层（AP200为8层）测定后垂直积分：

$$F_{s_p} = \overline{\rho_d}(h) \int_0^h \frac{\partial \chi_c}{\partial t} dz = \overline{\rho_d}(h) \sum_i^8 \frac{\Delta \chi_{ci}}{\Delta t} h_i$$

Gu et al., 2012. AFM, 152: 135-148



3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

$$F_{s_p} = \overline{c_d}(h) \int_0^h \frac{\partial \chi_c}{\partial t} dz = \overline{c_d}(h) \sum_i^8 \frac{\Delta \chi_{ci}}{\Delta t} h_i \quad (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

- 干空气密度 ρ_d 等于湿空气密度 ρ_a 减去水汽密度 ρ_v ：

$$\rho_d = \rho_a - \rho_v \quad (\text{mol m}^{-3})$$

$$\rho_d = \frac{(P_a - e) \times 10^3}{R \times (T_a + 273.15)}$$

$$e = c_v \times P_a \times 10^{-3}$$

- CO₂摩尔混合比：

$$\chi_c = \frac{c_c \times 10^{-6}}{1 - c_v \times 10^{-6}}$$

R —为理想气体常数(8.314 J K⁻¹ mol⁻¹)

P_a —大气压(kPa)

e —水汽压(kPa)

T_a —空气温度(°C)

c_c —CO₂摩尔分数(μmol mol⁻¹)

c_v —水汽摩尔分数(mmol mol⁻¹)

Gu et al., 2012. AFM, 152: 135-148

王静等, 2013. 应用生态学报, 24: 975-982



3. 浓度廓线仪器系统设计与储存项估算方法

分层计算，需要估计各层大气压和空气温度

- 大气压按照梯度公式计算： $G_{Pa} = -M_d \times \rho_a \times g \times 10^{-3} \times \Delta Z$ (kPa m⁻¹)

!注意用湿空气密度 ρ_a

$$\rho_a = \frac{P_a - 0.378e}{R \times (T_a + 273.15)}$$

M_d —干空气摩尔质量
(28.966 g mol⁻¹)

g —重力加速度(m s⁻²)

ΔZ —高度差(m)

R —8.314 J K⁻¹ mol⁻¹

0.378=1- M_v/M_d

- 空气温度梯度用温湿度传感器测定
- 缺测层次空气温度用三次样条或线性内插
- CO₂摩尔混合比也用三次样条或相邻两层平均估计

Gu et al., 2012. AFM, 152: 135-148

Wang et al., 2016. AFM, 28-229, 327-338



4. 储存项的密度效应

- 湍流通量用气体密度或摩尔分数计算时，需要校正密度效应（自由大气过程引起的，如气压、温度和水汽浓度变化），我们称之为WPL校正。
- 同样，储存项也需要考虑自由大气过程导致的空气密度效应。



4. 储存项的密度效应

考虑以下3种情况：

- 大气压力变化引起干空气密度变化，即干空气进出通量观测的控制体积。即便没有生物学源汇，也将产生CO₂交换。这是自由大气过程。
- 大气压不变，气温升高/降低，引起干空气密度降低/升高，也是自由大气过程产生的CO₂交换。
- 气压和温度均不变，水汽浓度波动也会导致干空气密度发生变化，同样会导致自由大气过程CO₂交换。



4. 储存项的密度效应

下面比较三种气体浓度单位（密度、摩尔分数和摩尔混合比）计算储存项的差异，说明密度效应。

• 密度 $F_{s-d} = \int_0^h \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial t} dz$ (mgCO₂ m⁻² s⁻¹)
(mg m⁻³)

• 摩尔分数 $F_{s-c} = M_c \bar{\rho}_a(h) \int_0^h \frac{\partial \bar{c}_c}{\partial t} dz \times 10^{-3}$
(μmol mol⁻¹)

• 摩尔混合比 $F_{s-x} = M_c \bar{\rho}_d(h) \int_0^h \frac{\partial \bar{\chi}_c}{\partial t} dz \times 10^3$
(μmol mol⁻¹)

王静等, 2013. 应用生态学报, 24: 975-982

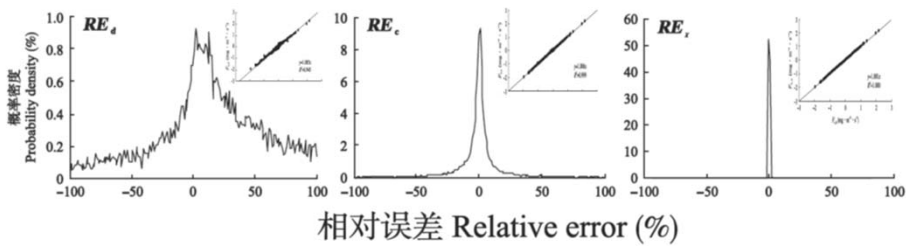


4. 储存项的密度效应

三种气体浓度单位（密度、摩尔分数和摩尔混合比）
计算储存项的相对误差概率分布

相对误差大小：密度 > 摩尔分数 > 摩尔混合比

密度：8.5% 摩尔分数：0.6% 混合比：0.1%

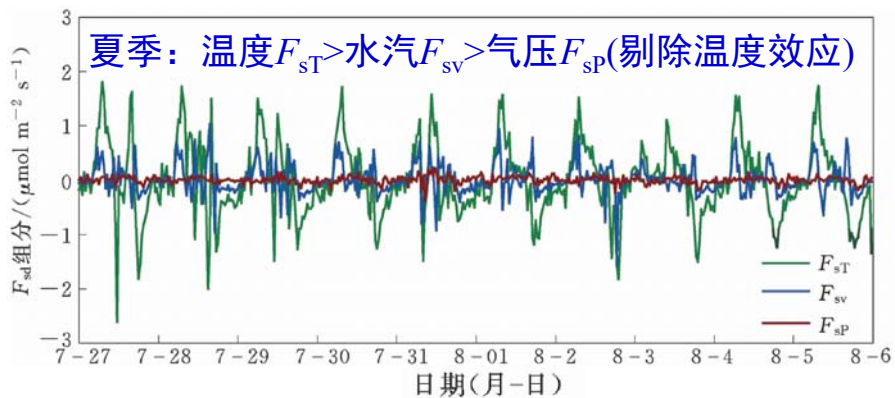


王静等, 2013. 应用生态学报, 24: 975-982



4. 储存项的密度效应

• 密度效应误差来源

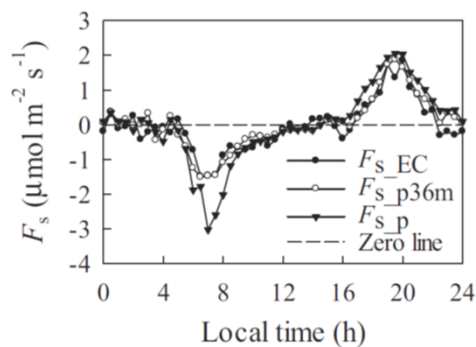


王静等, 2013. 应用生态学报, 24: 975-982



5. 储存项时间变化

• 储存项典型日变化格局



帽儿山站

清晨负极值

傍晚正极值

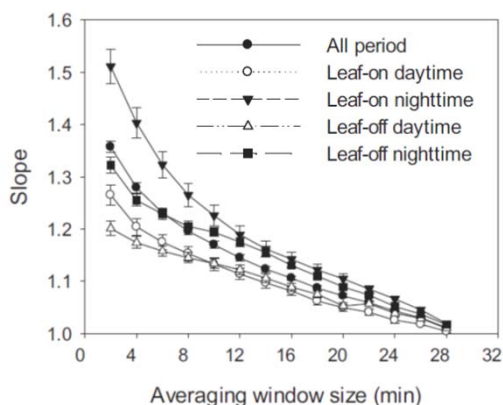
后半夜较低 (山谷地形)

Wang et al., 2016. AFM, 28-229, 327-338



5. 储存项时间变化

• CO₂混合比时间平均造成显著的储存项低估



帽儿山站

不同时间窗口与
30min时间窗口平均
CO₂混合比计算的储
存项的标准主轴回归
斜率表明时间窗口越
大越低估。

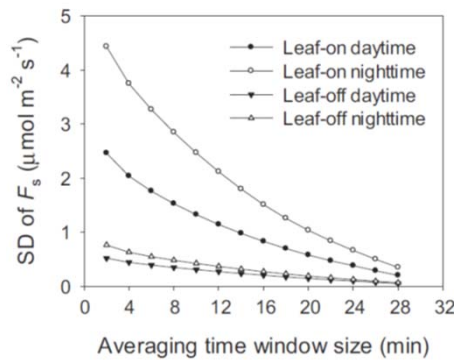
Finngan et al., 2006. AFM, 136: 108-113

Wang et al., 2016. AFM, 28-229, 327-338



5. 储存项时间变化

- CO₂混合比时间平均会显著降低储存项不确定性(SD)



帽儿山站

但时间窗口越小，储存项不确定性越大。因此系统误差与不确定性是现有廓线系统不可调和的矛盾。

Finngan et al., 2006. AFM, 136: 108-113
Wang et al., 2016. AFM, 28-229, 327-338



5. 储存项时间变化

西双版纳热带雨林站

- 日尺度、月尺度和年尺度上，储存项的平均值接近零，主要是由于每天的正负值大致抵消（选择性系统误差）。NEE平均值有生态学意义，但储存项平均值意义不大。

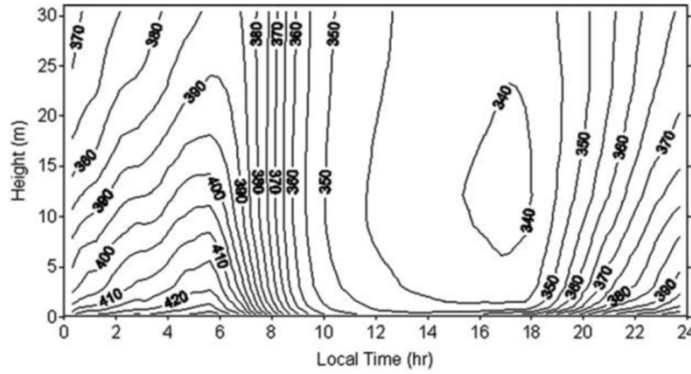
Month	F_c ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	F_{s-PM} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	NEE_{PM} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Dec 2008	-1.50 ± 1.40	0.01 ± 0.72	-1.49
Apr 2009	-1.11 ± 1.00	0.00 ± 1.00	-1.11
Jul 2009	0.21 ± 1.83	-0.01 ± 1.84	0.20
Oct 2009	-1.16 ± 2.25	0.00 ± 1.39	-1.16

Yao et al., 2012. JFR, 17: 241-252



6. 储存项空间变异

• CO₂浓度垂直变化格局

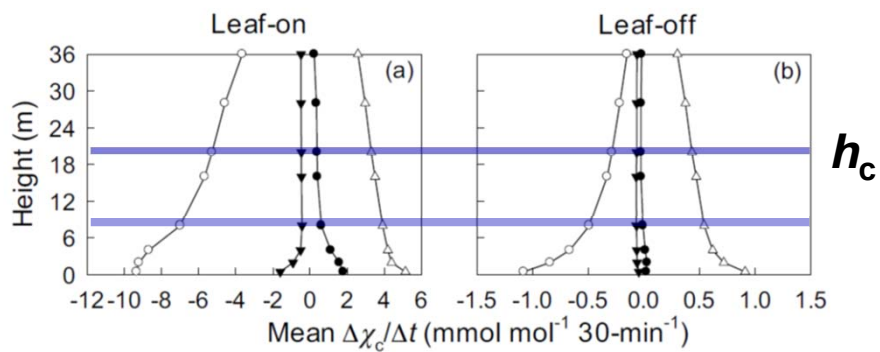


Yang et al., 2007. JGR-A, 112: D20123



6. 储存项空间变异

• CO₂浓度垂直变化格局

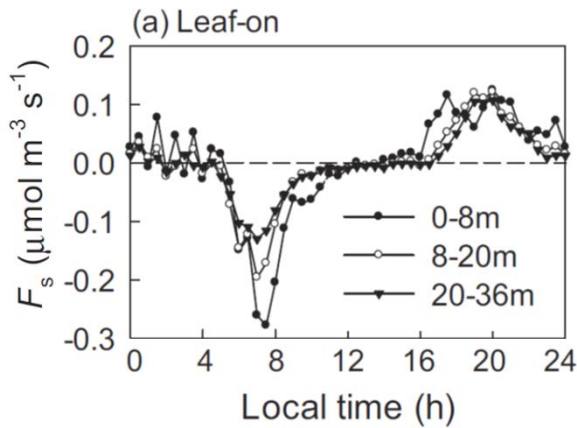


Wang et al., 2016. AFM, 228-229: 327-338



6. 储存项空间变异

• 储存项垂直变化格局



- 林冠下贡献最大
- 林冠层次之
- 林冠上最小

垂直配置林冠下应加密!

Wang et al., 2016. AFM, 228-229: 327-338

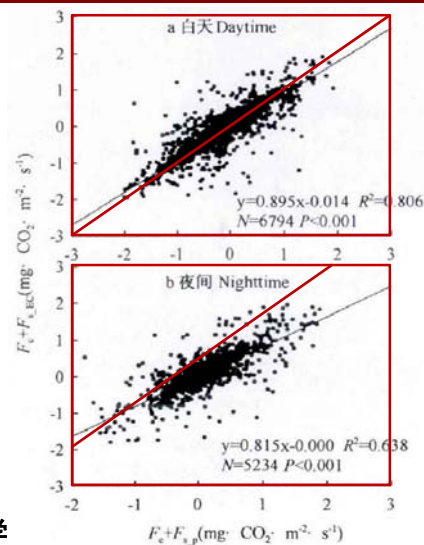


6. 储存项空间变异

• 单点法低估森林NEE

半小时尺度上白天 (a) 和夜间 (b) $F_c + F_{s_p}$ 与 $F_c + F_{s_EC}$ 比较:

白天低估10.5%
夜间低估18.5%

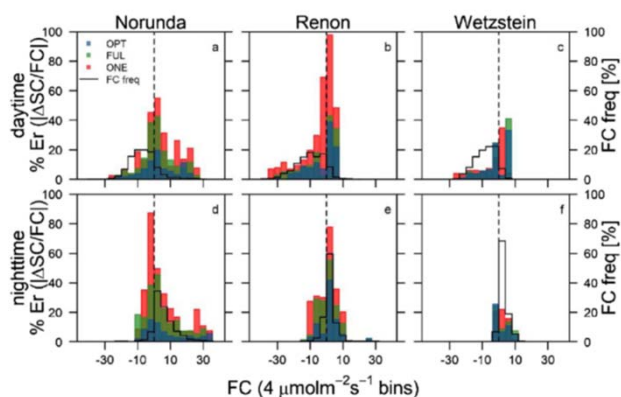


王静, 2003. 硕士毕业论文. 东北林业大学



6. 储存项空间变异

水平变异：单一廓线不确定性



ADVEX试验

储存项绝对误差与湍流项比值的绝对值的概率密度分布表明可超过20%，但对年NEE影响不大。

Nicolini et al., 2018. AFM, 248: 228-239



6. 储存项空间变异

水平变异：单一廓线不确定性

Manaus站：复杂地形影响大，山谷和山坡大于高地。

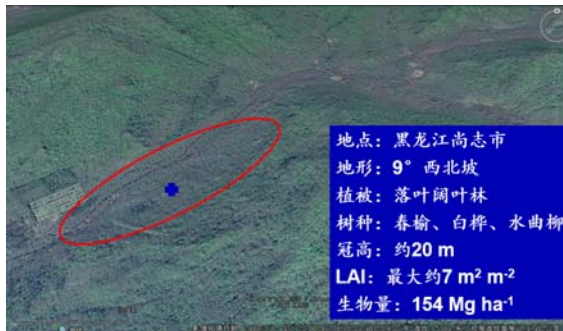
Period	Threshold	Time interval	F_c	S		
				P	S	V
Dry	$u > 0$	17:30-06:30	1.96	2.60	3.38	3.12
		17:30-24:00	1.69	2.60	4.00	3.91
		00:30-06:30	2.28	2.60	2.67	2.37
	$u \leq 0.2$	17:30-06:30	1.06	2.82	3.80	3.97
		17:30-24:00	1.03	2.65	4.01	4.92
		00:30-06:30	1.10	3.03	3.58	3.12
	$u \leq 0.15$	17:30-06:30	0.78	2.77	3.68	4.05
		17:30-24:00	0.79	2.53	4.29	4.97
		00:30-06:30	0.77	3.03	3.09	3.30

De Araújo et al., 2010. AFM, 150: 226-237



7. 研究实例

- 帽儿山站
- CO₂浓度时空动态及其成因
- CO₂储存项密度效应
- 垂直配置、时间平均、不确定性



7. 研究实例

参考文献

- Yang PC, Black T, Neumann H, Novak M, Blanken P (1999) Spatial and temporal variability of CO₂ concentration and flux in a boreal aspen forest. *Journal of Geophysical Research*, 104, 27653-27661.
- Finnigan J (2006) The storage term in eddy flux calculations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 108-113.
- Yang B, Hanson PJ, Riggs JS et al. (2007) Biases of CO₂ storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO₂ density averaging. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- Nicolini G, Aubinet M, Feigenwinter C et al. (2018) Impact of CO₂ storage flux sampling uncertainty on net ecosystem exchange measured by eddy covariance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 228-239.



7. 研究实例

参考文献

- Gu L, Massman WJ, Leuning R et al. (2012) The fundamental equation of eddy covariance and its application in flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 135-148.
- Montagnani L, Grünwald T, Kowalski A et al. (2018) Estimating the storage term in eddy covariance measurements: the ICOS methodology. *International Agrophysics*, 32, 551-567.
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M et al. (2006) Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3: 571-583.



7. 研究实例

参考文献

- De Araújo AC, Dolman AJ, Waterloo MJ et al. (2010) The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 226-237.
- Yao Y, Zhang Y, Liang N, Tan Z, Yu G, Sha L, Song Q (2012) Pooling of CO₂ within a small valley in a tropical seasonal rain forest. *Journal of Forest Research*, 17, 241-252.
- 张弥, 温学发, 于贵瑞, 张雷明, 伏玉玲, 孙晓敏, 韩士杰 (2010) 二氧化碳储存通量对森林生态系统碳收支的影响. *应用生态学报*, 21: 1201-1209.



7. 研究实例

参考文献

- 焦振, 王传宽, 王兴昌 (2011) 温带落叶阔叶林冠层CO₂浓度的时空变异. 植物生态学报, 35, 512-522.
- 王静, 王兴昌, 王传宽 (2013) 基于不同浓度变量的温带落叶阔叶林CO₂储存通量的误差分析. 应用生态学报, 24, 975-982.
- Wang X, Wang C, Guo Q, Wang J (2016) Improving the CO₂ storage measurements with a single profile system in a tall-dense-canopy temperate forest. Agricultural and Forest Meteorology, 228-229, 327-338.
- 王兴昌 (2019) 山地森林涡动通量观测关键技术: 以帽儿山温带森林为例, 北京, 中国水利水电出版社.



Thanks!

