

第17届中美碳联盟年会

The 17th US-China Carbon Consortium Annual Meeting (USCCC)

通量资料处理与分析

徐自为

北京师范大学

2021.7.30

中国·重庆

主要内容

一. 研究背景

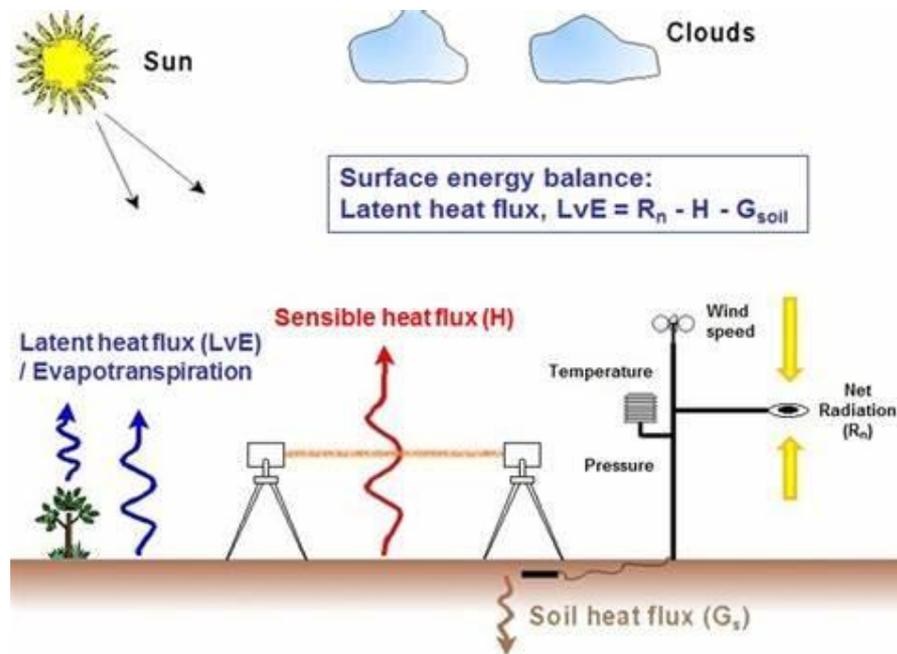
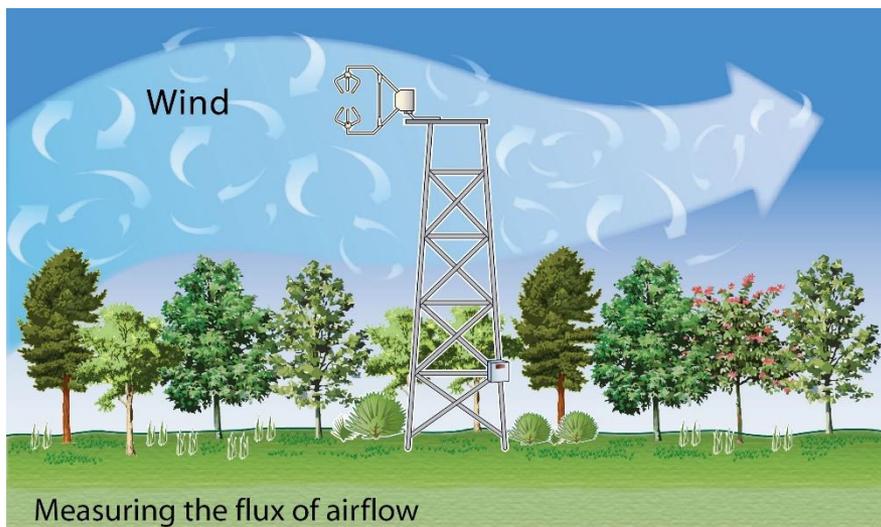
二. 百米级通量观测仪器——涡动相关仪

三. 公里级通量观测仪器——闪烁仪

四. 小结

一、研究背景

地表与大气间**能量和水分的输送与转化**发生在近地层，既是表征下垫面强迫及其与大气相互作用的一个重要参数，又决定了大气边界层内湍流及扩散的强度和稳定度，并控制风、温度和湿度的变化，**对大气的动力、热力过程起着十分重要的作用**，在数值预报和气候模式中占有重要的地位。



二、百米级通量观测仪器—涡动相关仪

1. 测量原理
2. 仪器的安装与维护
3. 数据处理与质量控制

二、百米级通量观测仪器——涡动相关仪

1. 测量原理

涡动相关通量观测系统随着传感器和计算技术的发展成为地气间动量、热量、水汽、CO₂等通量观测的主要手段。每年都有大量相关的文章发表。

准确地获取涡动相关仪测量的水热以及CO₂等通量，对遥感估算与模式模拟结果的验证等意义重大。

许多站点设在地形起伏、斑块植被下垫面上长期运转，一些通量站已连续运行10年以上。因此下垫面的复杂性不可避免；长时间的运转，必然会遇到种种不利气象条件。资料处理方法、观测结果的精度和代表性问题，急需解决。

涡动相关仪的测量原理



- * 大气边界层以湍流运动为主要特征
- * 湍流由许多涡旋组成
- * 每个涡旋都是三维的

WHAT IS FLUX?

什么是通量?

- Flux – how much of something moves through an area per unit time
- Flux is dependent on: (1) number of things crossing the area; (2) size of the area being crossed, and (3) the time it takes to cross this area

For example, if 100 birds fly through a 1x1' window each minute - the flux of birds is 100 birds per 1square foot per 1 minute ($100 \text{ B ft}^{-2} \text{ min}^{-1}$). If the window were 10x10', the flux would be 1 bird per 1square foot per 1 minute (because $100 \text{ birds}/100 \text{ sq. feet} = 1$), so now the flux is $1 \text{ B ft}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

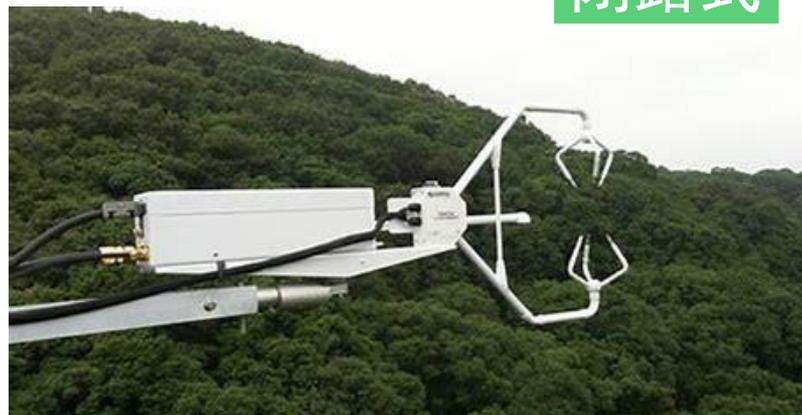
If net flux is away from the surface, the surface may be called a **source**.
If the opposite is true, the surface is called a **sink**.

涡动相关仪



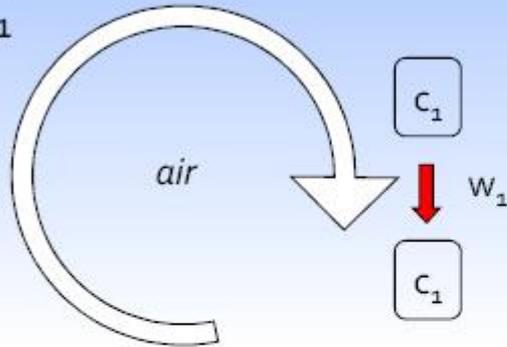
开路式

闭路式

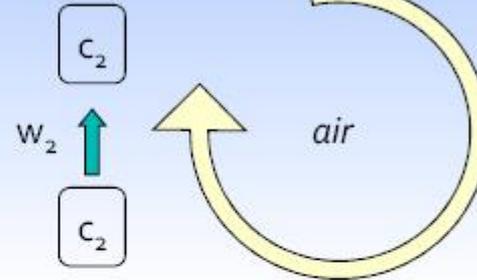


EDDIES AT A SINGLE POINT

time 1
eddy 1



time 2
eddy 2



At a single point on the tower:

Eddy 1 moves parcel of air c_1 down with the speed w_1
then Eddy 2 moves parcel c_2 up with the speed w_2

Each parcel has concentration, temperature, humidity;
if we know these and the speed – we know the flux

涡动相关仪测量通量的基本原理：计算感兴趣标量和垂直风速的方差

* **基本原理:**

If we know how many molecules went up with eddies at time 1, and how many molecules went down with eddies at time 2 at the same point – **we can calculate vertical flux at that point and over that time period.**

* **挑战:**

Turbulent fluctuations occur **very rapidly**, so measurements of up and down movements and of the number of molecules should be done with very fast

基本理论

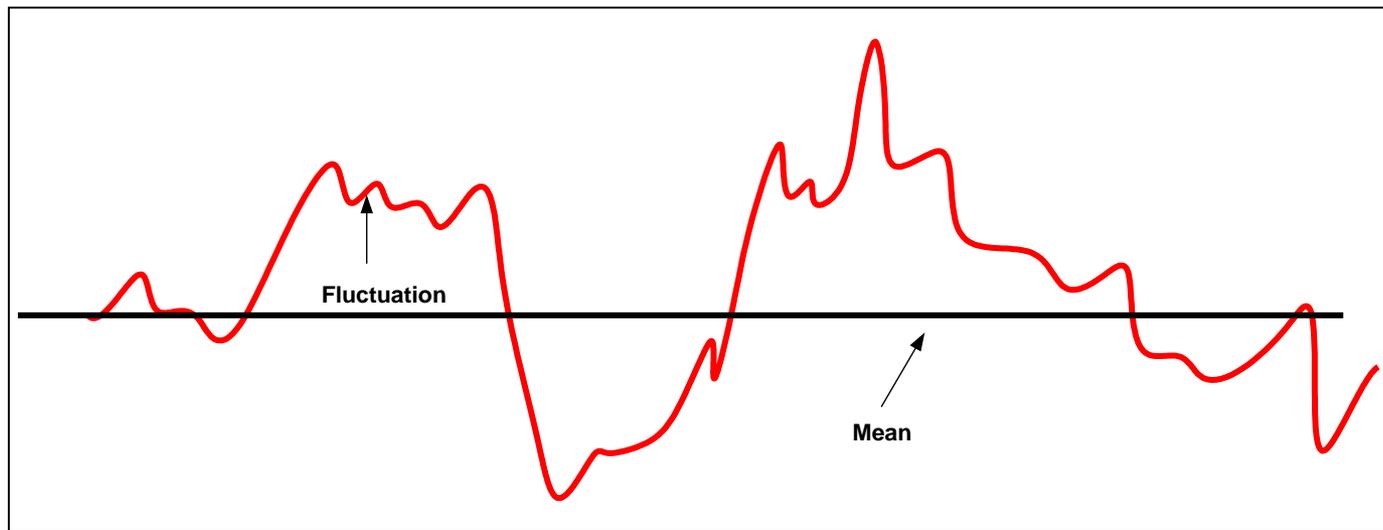
瞬时信号

平均量

脉动量

$$X = \bar{X} + x'$$

泰勒假设;
雷诺平均
和分解



All atmospheric entities show short-period fluctuations about their long term mean value.

* 标量C的守恒方程，二维情况下，Reynolds分解与平均后有：

$$\int_0^{z_r} S(t, z) dz = \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial t} dz + \overline{w'c'(z_r)} + \int_0^{z_r} \bar{w}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial z} dz + \int_0^{z_r} \left(\bar{u}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial x} + \bar{v}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial y} \right) dz$$

Source / Sink Storage Turbulent flux Vertical advection Horizontal advection

Average vertical flux of entity
over 30 minute period

Fluctuation of entity
about it's mean

Density of air
kg air m⁻³

g kg air⁻¹

$$F = \rho w' x'$$

Velocity of air being moved upwards or
downwards m s⁻¹

由较为‘理想’到‘真实’的复杂条件

理想微气象条件

平坦地形

均匀fetch

低的均匀植被

平稳湍流

湍流充分发展，
MOST成立。

实际复杂条件

地形起伏

斑块状植被分布

森林等高冠层

非定常气象条件

夜间稳定层结及低风速下的
弱湍流，间歇，波动及
流动分裂等。

涡动相关仪的主要假设：

- * 涡动相关仪点尺度测量能够代表其上风区域的范围
- * 测量在常通量层内感兴趣区域开展
- * 足够的上风向区域 - 测量的通量能够代表感兴趣的范围
- * 湍流充分发展 - 净的垂直交换都由涡旋运动产生
- * 地表是水平和均匀的：一段时间内平均垂直波动为0；
- * 空气密度波动，气流的辐合/辐散可以忽略；
- * 测量仪器须是高精密的，能够测量气流在高频率、细微的变化。

Latent heat of vaporization
($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

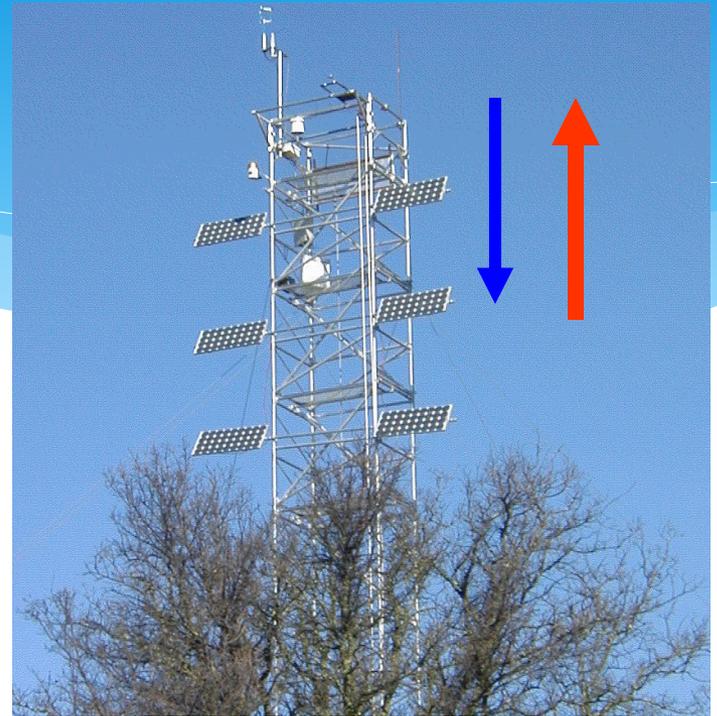
Mean density of air

$$Q_E = \overline{\rho} L_v \overline{w' \rho_v'}$$

潜热通量

Fluctuation about
the mean of
vertical wind speed

Fluctuation about
the mean of
density of water
vapor in air



Specific heat of air at constant pressure
($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

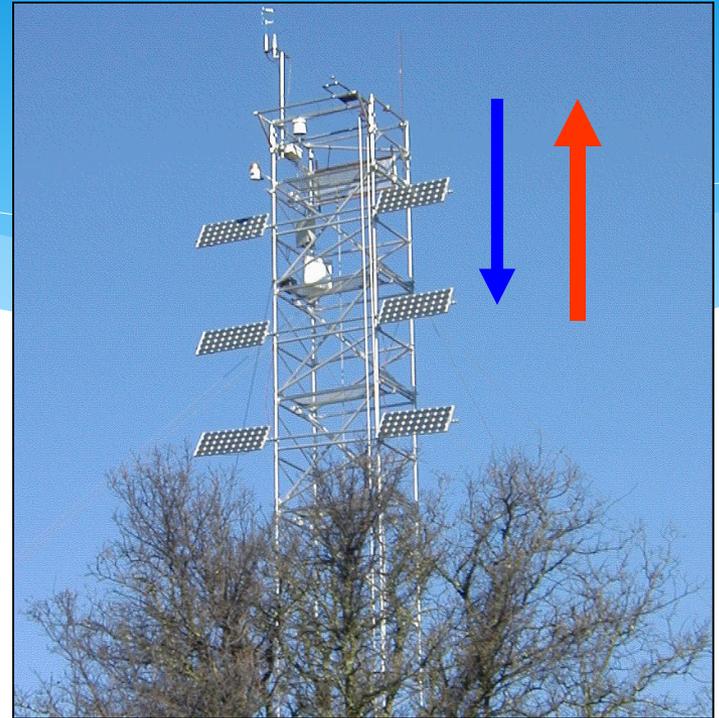
Mean density of air

$$Q_H = \rho C_p w' T'$$

感热通量

Fluctuation about
the mean of
vertical wind speed

Fluctuation about
the mean of
air temperature

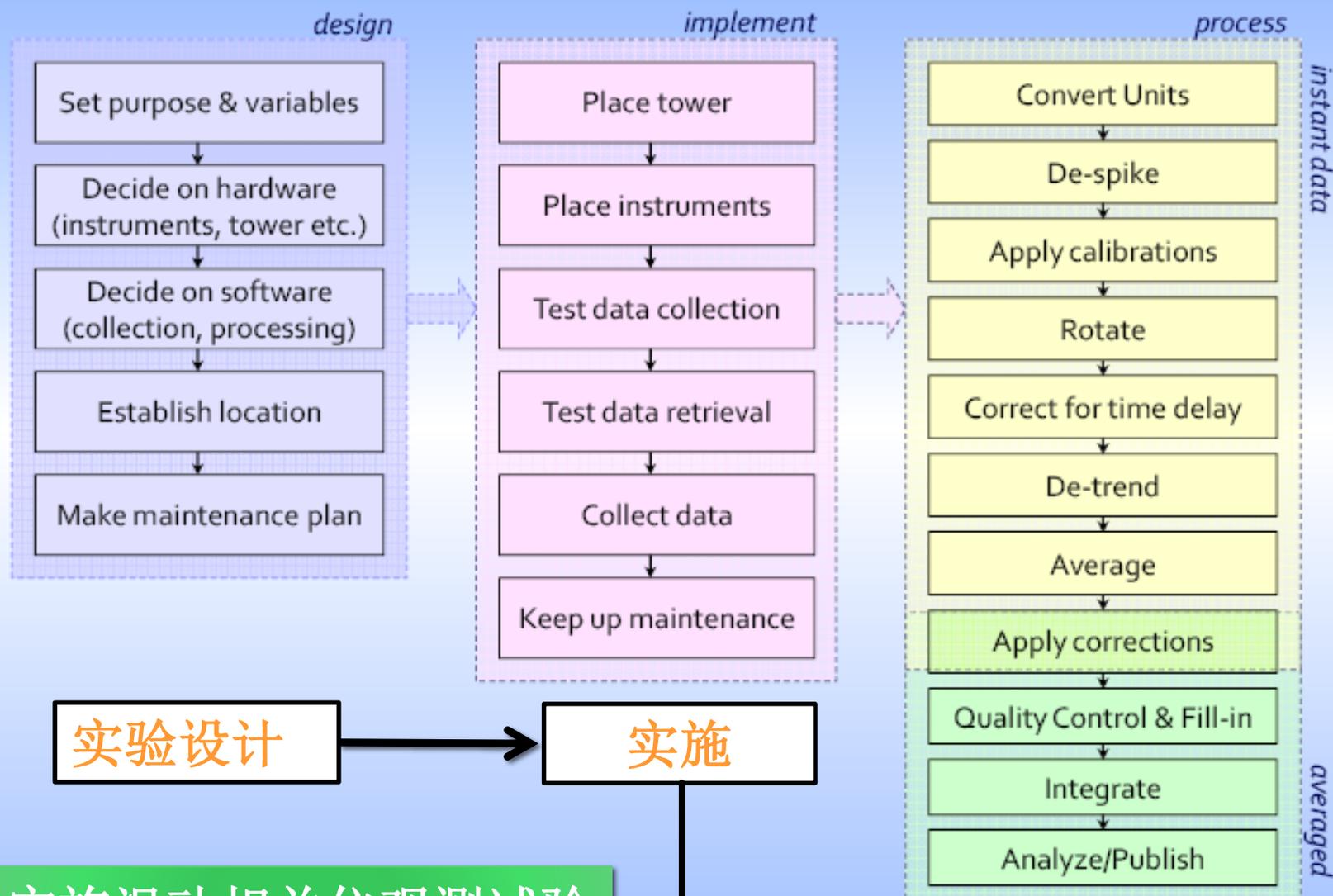


小结



- 测量涡旋引起的通量
- 需有湍流发生
- 需要精密的测量仪器
- 计算垂直风速和标量的协方差
- 满足一定的假设
- 计算过程较复杂
- 可以直接测量到通量
- 持续发展之中

2. 涡动相关仪的安装与维护



实验设计

实施

数据处理等

实施涡动相关仪观测试验的主要步骤

开展一次试验前需要准备:



Purpose

有明确的科学目的可以确定需要观测的变量，有明确的观测变量后可以确定需要架设的传感器，以及怎样进行观测。

Hardware

Instrument Requirements

Overall Instrumentation

有明确的科学目的同样可以决定观测地点，观测塔架设的具体地方，以及传感器在塔体的架设位置。

Auxiliary Measurements

Software

Location

一旦科学目的确定，可以准确确定数据采集方案以及采集程序的撰写等，进而开始处理与分析数据。

Maintenance

涡动相关仪的架设

架设过程中需注意以下几个问题：

1. 架设的高度以及下垫面的代表性需根据具体观测目的而定；
2. SAT的安装务必保持水平；
3. 安装CO₂/H₂O红外分析仪时应避免其遮挡超声风速仪的受风方向；
4. 应尽量使超声风速仪面向当地盛行风向；
5. 超声风速仪和CO₂/H₂O红外分析仪与支架（塔）的距离应当大于2米或塔宽的3倍；
6. IRGA（开路）架设时应将设备的主轴放置成与水平成 15-30度角,雨水或露水不易影响探测窗口。
7. 涡动相关仪的耗电量较大，应考虑交流供电；
8. 安装涡动相关仪的支架（塔）要牢固，避免晃动。

涡动相关仪的维护

涡动相关系统的结构较复杂，传感器如镜面等灵敏度高，容易受到内部电路、电源的不稳定和外部空气中的雾滴、尘粒或人为操作不当等原因的影响，引发异常超大信号（即野点）的出现。

LI-7500镜面在必要的时候需要清理（一般当AGC的值达到100%）。如果镜面变脏，会造成光路受阻，校准分析相对也较困难。在清理时用柔软的清洁用品，如眼睛布或衣料擦拭镜头均可。

当有水滴完全覆盖在超声风速传感器表面上时，传感器不能测量到风速。传感器上有丝网套在传感器探头上，小网可以部分消除一些水滴的影响，但在一些条件下并不完全好用。只有当水滴完全蒸发或擦拭后，传感器才能正常工作。（注意：如擦拭，应使用柔软的物品缓慢擦拭）

需要做详细的维护计划

- Sensor cleaning
- Sensor replacement
- Sensor calibrations
- Cable replacements
- System repair



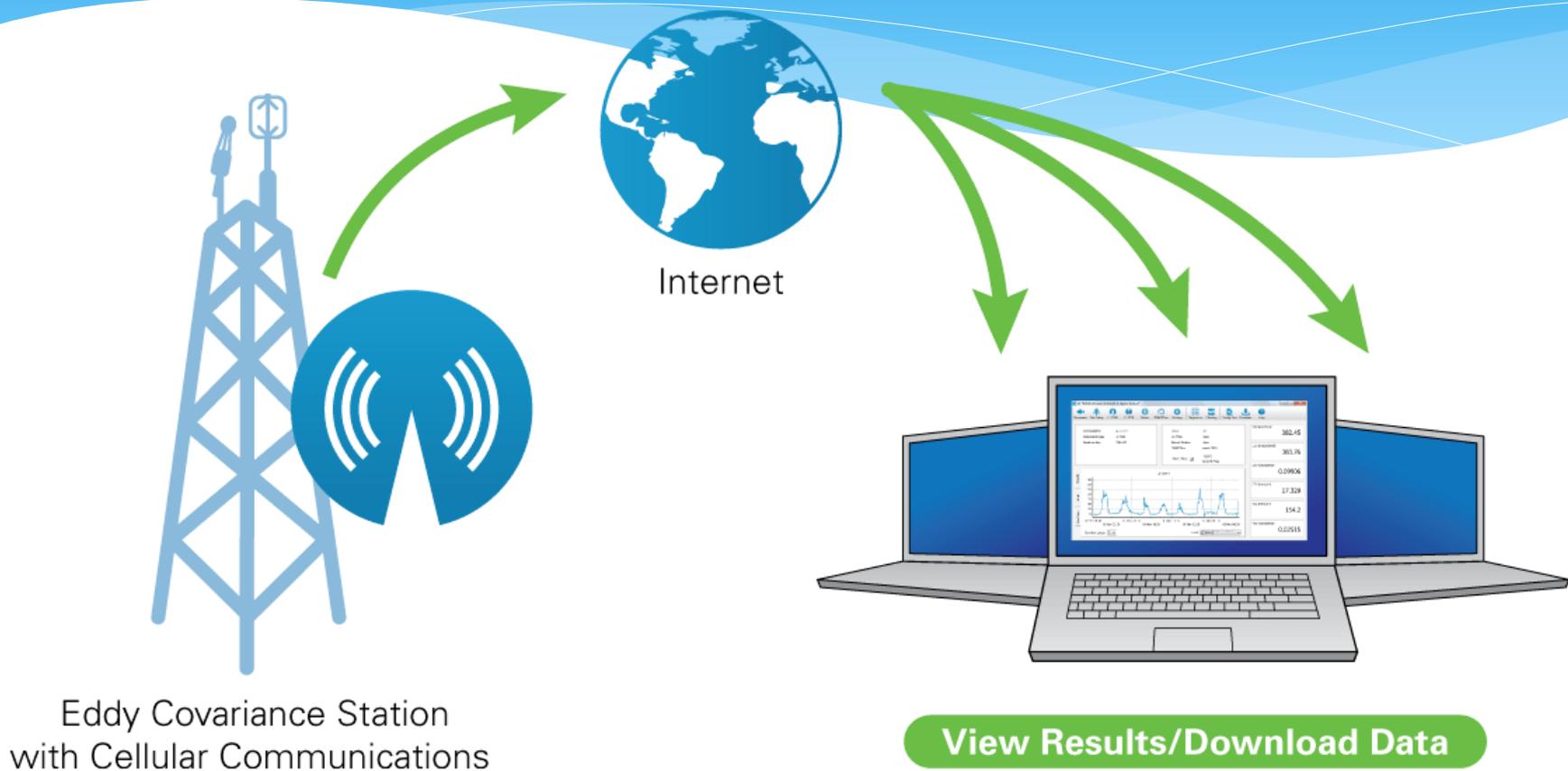
- Maintenance plan is very important to avoid unnecessary data loss
- Each maintenance item may be trivial, while interaction of all items gets complex: example, 20 sensors to calibrate every year
- One or two spare sensors are desirable for each measurement

涡动相关仪的维护在观测之中是一个容易被忽视的环节，特别是对于初始使用者；恰当的维护计划将有助于减少未来潜在的数据损失。

一般我们到现场时须注意：

- 1、仪器是否正常工作；
- 2、仪器的供电状况；
- 3、仪器的接线有无松动，以及各个安装部件的接口是否牢靠；
- 4、仪器是否有遭受人为破坏的痕迹，以及大风、雨水、灰尘等外在环境因素是否对仪器造成影响；
- 5、超声风速仪是否水平。

观测数据的无线传输



每天通过无线传输监测观测数据的质量！

涡动相关仪架设、维护、标定小结

- * **主要步骤：** 试验设计、试验目的、测量变量、观测仪器、安装塔/支架、架设、维护、标定
- * **试验设计阶段**非常重要，是开展后续分析工作的基础和保障，也是避免后续分析工作遇到困难的一次机会。
- * **保留原始10/20Hz观测数据非常重要**，一些观测结果需要原始数据进行进一步校准和验证。
- * **安装地点和方式根据实验目的和当地气象条件而定**，涡动相关仪安装要**稳固、水平**，避免晃动。
- * 仪器的维护是获取质量好的数据关键一步，需要非常详细的计划。
- * 定期对仪器进行标定。

2. 数据处理与质量控制

野点去除

湍流原始资料的野点由如下原因产生：

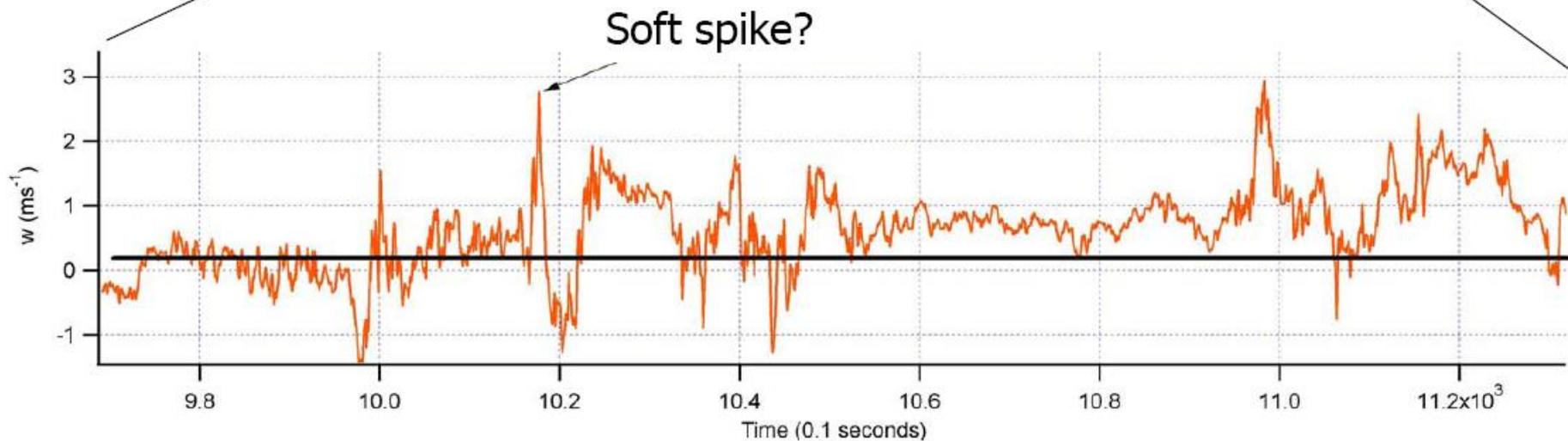
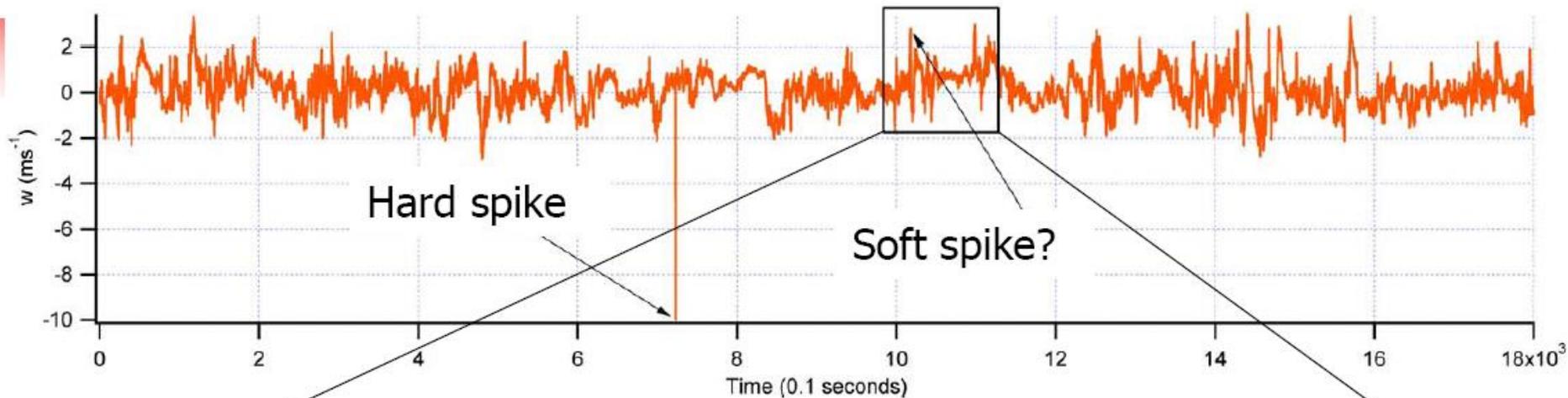
- 1) 环境因子如雨、雪、尘粒等对传感器声光程的干扰，瞬间断电等（‘**Hard spikes**’）
- 2) 电子电路(如A/D转换器)，电缆(特别是长电缆)，电源不稳定等(‘**Soft spikes**’)

野点可能对方差、协方差值产生明显影响。

‘**Hard spikes**’,一般CSAT3或LI-7500出现异常标志（**diag**≠0），可直接排除。其它野点判别与去除方法，多根据*Hoistrop(1993)*或*Vickers & Mahrt(1997)*。

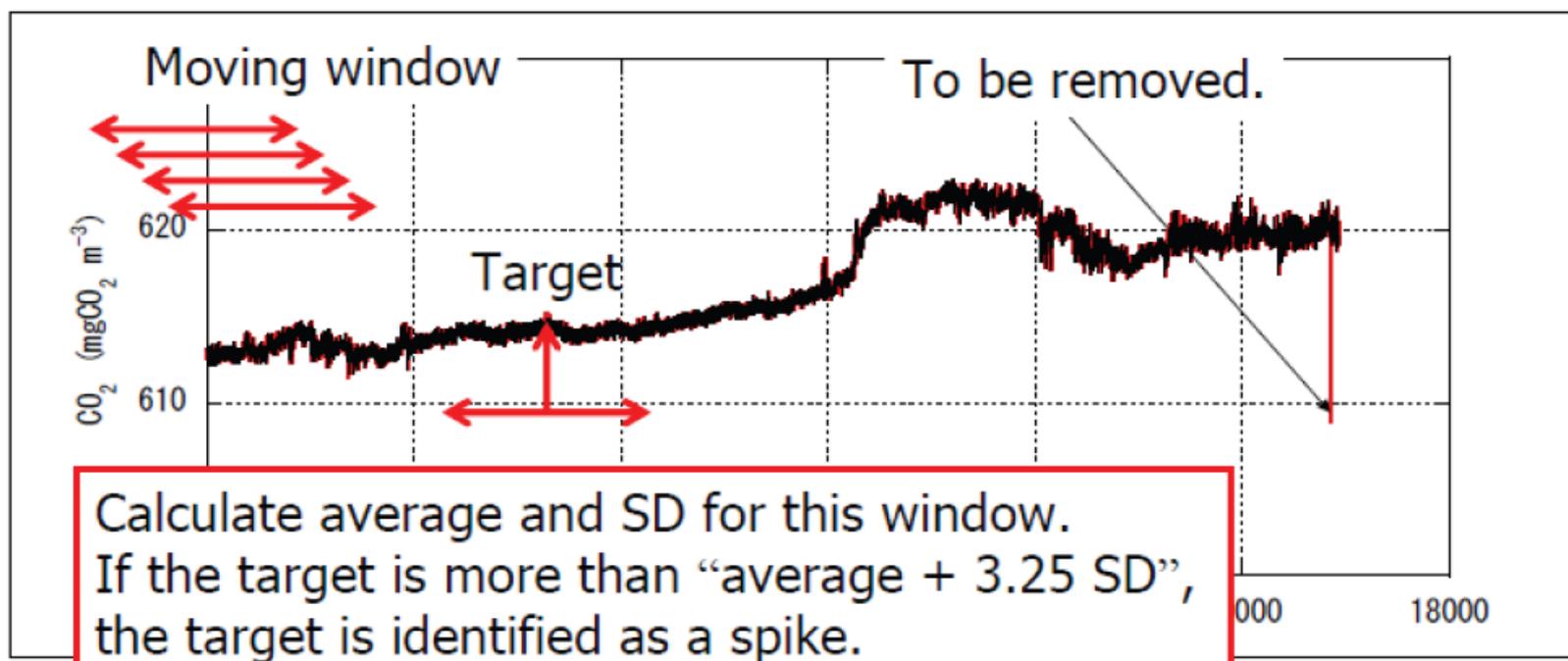
对于30min资料，一般野点数少于10-100，野点过多时，剔除该时次。

Determining spikes...



对一移动窗口(如5 min), 计算平均值及SD。任一点如其值偏离均值 $\geq 3.25 \times \text{SD}$, 则为‘野点’。

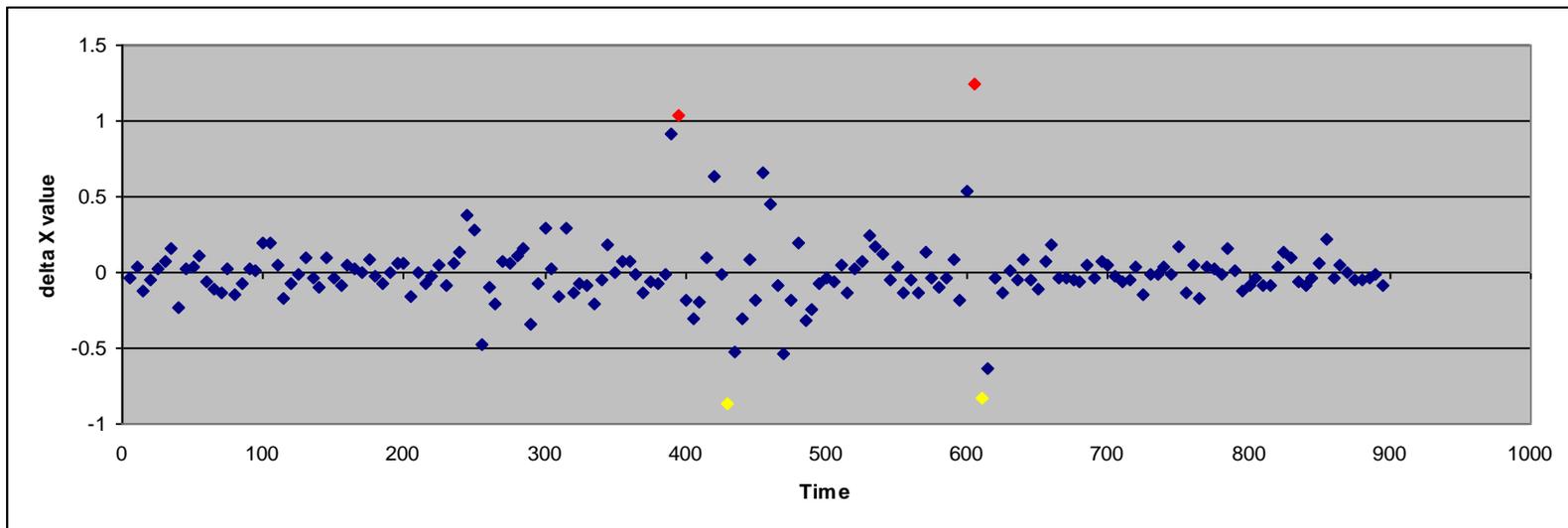
不同作者的移动窗口大小差别很大(数秒至30分)。窗口大时, 建议重复逐次(SD前的因子逐次加大)。



间野 (2004)

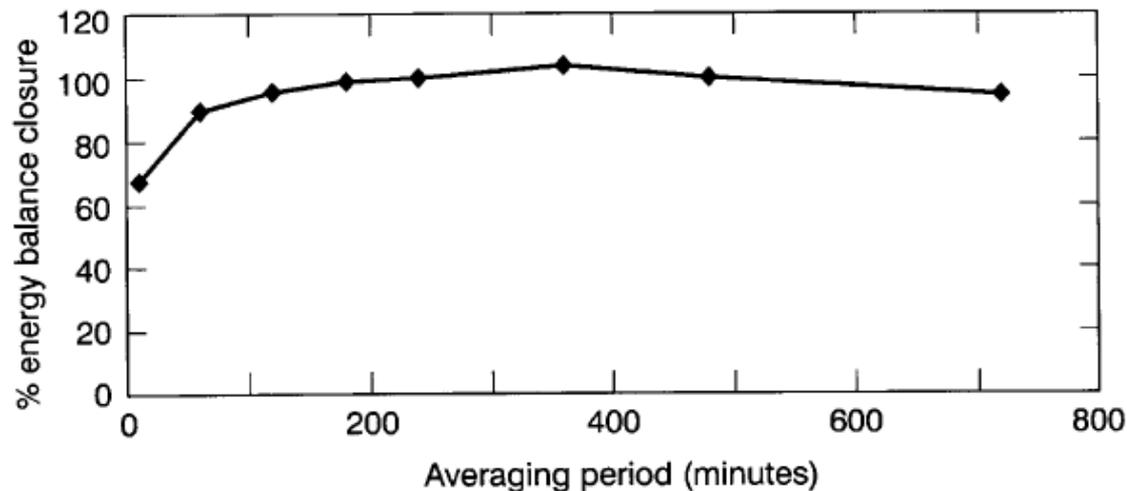
Edire中所用方法

- * 由原始时间序列 x 求相邻点之差 Δx 的总体标准差 ($\sigma\Delta x$)。逐点检查, 如某点 $\Delta x \geq n \sigma\Delta x$ (如令 $n=4$), 则为野点。 Δx 为负值所取 n 值可与正值时不同。
- * 连续数(如5)点都符合以上判据, 则不做‘野点’处理。
- * 为便于野点判断, 可对序列 x 做预处理, 先去除一些特大值。



平均周期的影响

如果平均周期太长，由于大气的非定常性，将会对通量计算结果产生影响，同时会忽略地表通量的一些细节变化（高频信息）；如果平均周期太短，则会过滤掉很多低频信息，造成通量计算结果的低估。因此在确定平均周期时需结合实际状况综合考虑，目前国际上多采用30分钟。



不同平均周期对能量闭合的影响（Finnigan et al., 2002）

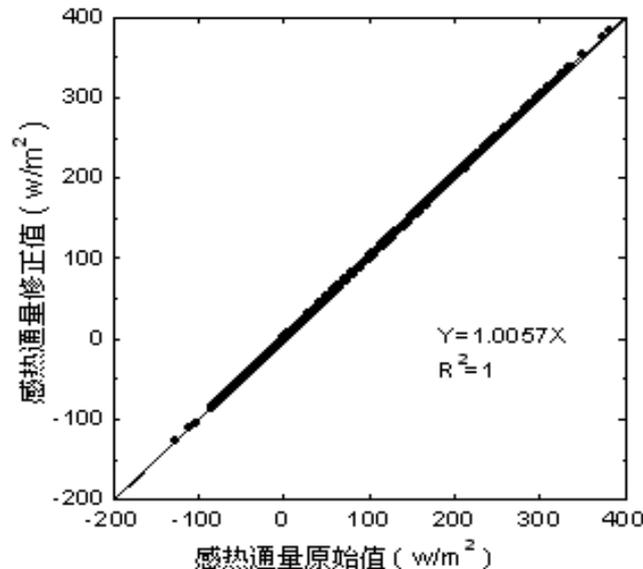
超声虚温订正

由超声虚温 T_s (观测值) 求算实际气温 T , 进而修正感热通量结果。(虚温: 在等压条件下, 具有和湿空气相等的密度时的干空气具有的温度)

考虑到超声风速计(CSAT3)结构设计时已经对侧向风的影响进行了修正, 这里只讨论湿度的影响

$$\overline{w'T'} = \overline{w'T_s'} - 0.51\overline{T}w'q'$$

q 为比湿, T 为空气温度, T_s 为超声虚温。

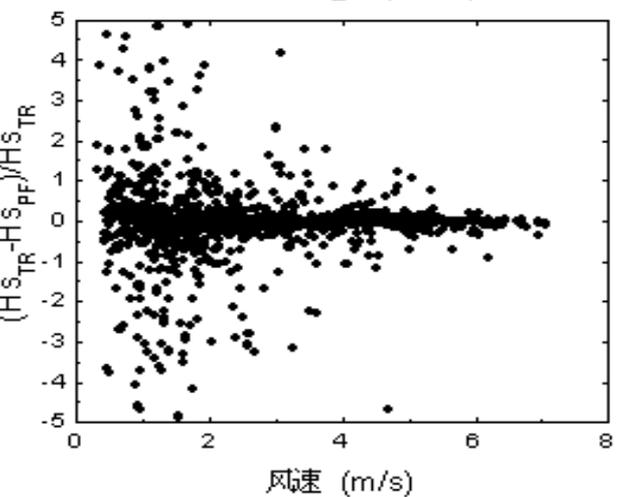
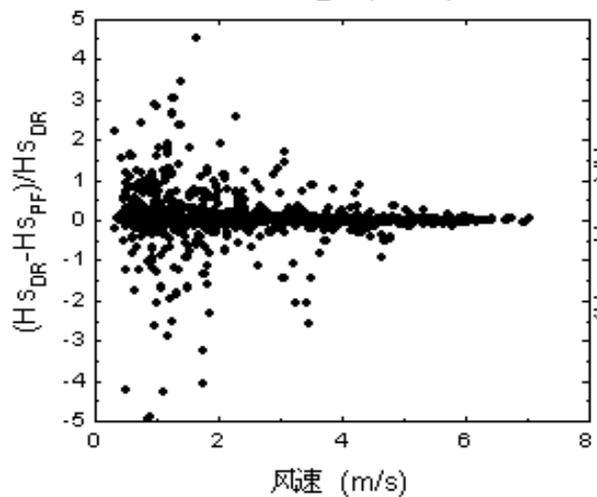
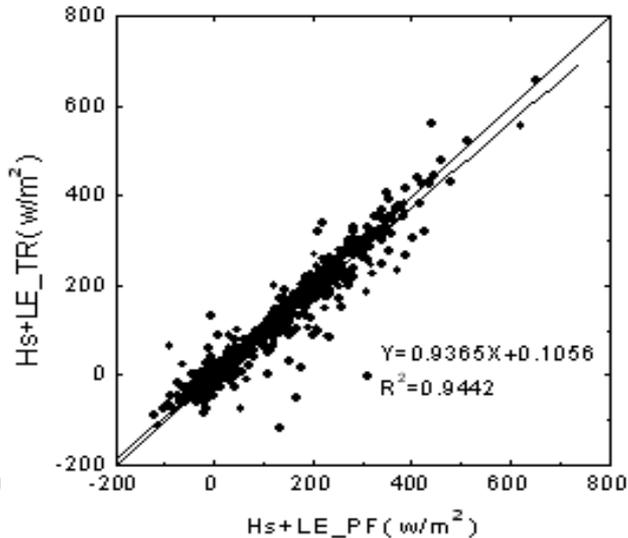
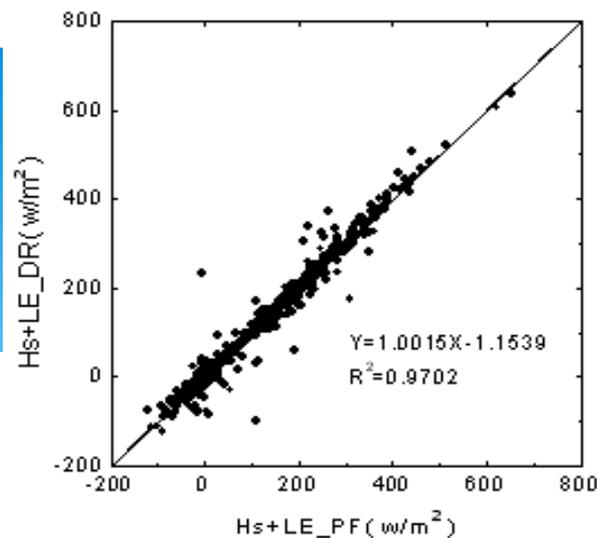


超声虚温修正前后的通量值比较(密云站,07.04)

坐标旋转

应用涡动相关系统测量地表通量一个重要假设是在某一段时间内平均垂直风速为零。一个观测时间（30min）内，特别在理想下垫面和理想天气下，认为流动是一维的；风速和标量的梯度只在垂直向存在。使超声风速仪垂直于地面，以消除“倾斜”误差或湍流通量不同分量间的交叉干扰。

动量通量对“倾斜”十分敏感， 1° 的倾斜，会引起 τ 的偏差10%（中等不稳定下）到100%（自由对流下）。 u^* 是近地层相似理论的重要尺度参数，影响稳定度确定及通量资料的QA/QC等。但对通量影响较小， 2° 的倾斜，只引起约5%的误差。但对长期通量累计计算，因误差的符号昼夜相反，可能带来更显著误差。（*Li et al. 2004*）



不同坐标旋转方法间的差异 (密云站,07.04)
坐标旋转前后通量值及湍流平均统计量的比较(密云站,07.04)

	Hs	LE	u*	σ_u	σ_v	σ_w	σ_u/u^*	σ_v/u^*	σ_w/u^*
RMSD(W/m²&m/s)	3.15	2.71	0.13	0.25	0.26	0.004	10.22	10.44	4.90
MAPD(%)	3.37	5.46	42.97	16.18	16.61	0.53	62.97	62.94	59.67

频率响应订正

'true' cospectrum

$$C_F = \frac{\int_0^{\infty} C_{wc}(f) df}{\int_0^{\infty} G_{wc}(f) \cdot C_{wc}(f) df}$$

filter function

filtered cospectrum

风速传感器与LI-7500间的距离d，可测涡旋尺度 $\langle =2d$ 。低风速下，高频严重衰减。



损失的大小与仪器间距和测量高度的比值、大气稳定度以及风速有关。

涡动相关仪观测中存在的误差

$$F = \dot{F} + \delta + \varepsilon$$

F ~ 观测值
 \dot{F} ~ ‘真’值

系统误差 δ

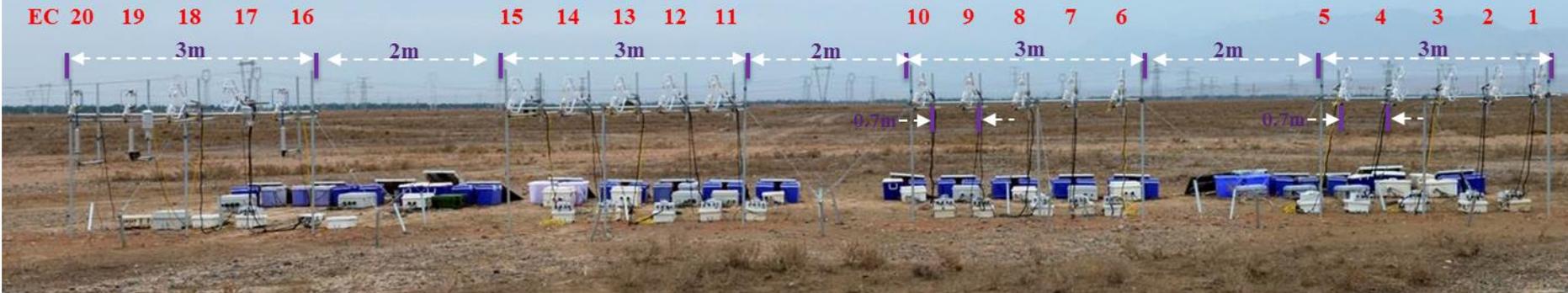
- * 传感器问题: 传感器的结构, 漂移等.
- * 不合适的采样频率&平均周期
- * 不当的数据处理方法
- * 环境因子的限制:
 - * 弱湍流;
 - * 非稳态;
 - * 风浪区不足;
 - * 平流的影响, ...

随机误差 ε

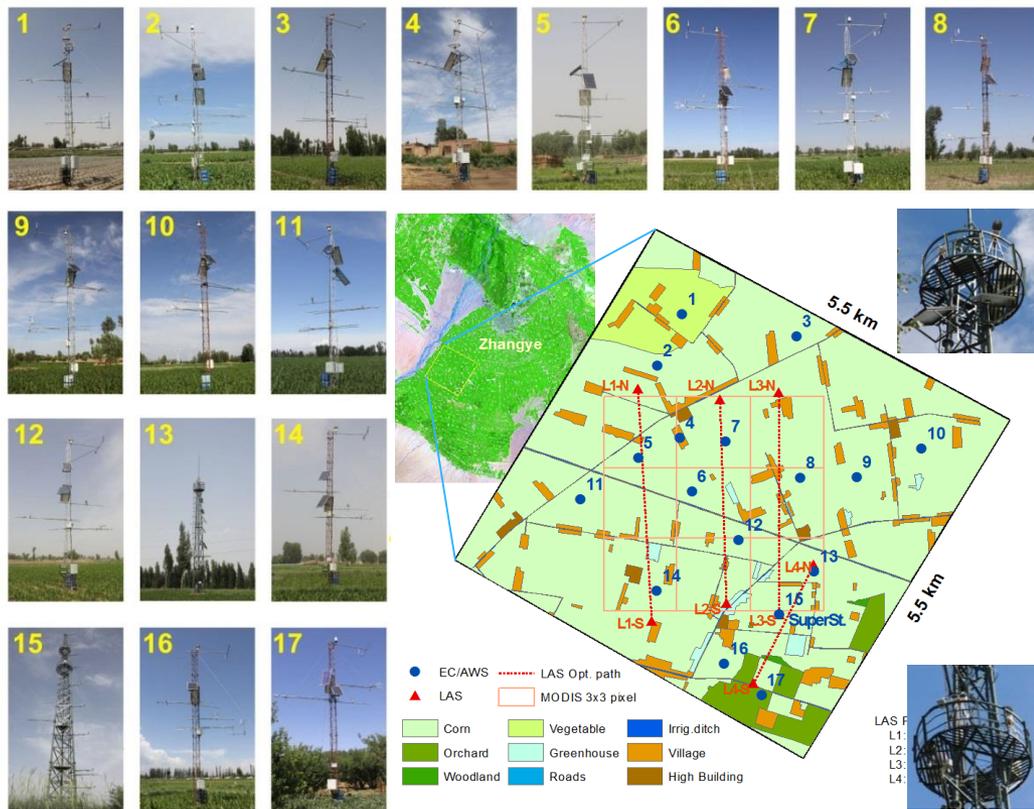
湍流固有的特性—‘采样误差’:
涡动观测中采样的限制

仪器的噪声

非均匀下垫面上足迹的变化



巴吉滩戈壁站20台 涡动相关仪比对



通量观测矩阵

误差分析的基本方法

$F \sim$ 观测值 $\dot{F} \sim$ “真值”

总的误差: $\Delta F \stackrel{\text{def}}{=} F - \dot{F} \quad (\sigma_T) \quad (1)$

系统误差: $\Delta F_S = E[\Delta F] \approx \overline{\Delta F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta F_i (\sigma_S) \quad (2)$

随机误差: $\Delta F_r \stackrel{\text{def}}{=} \Delta F - \Delta F_S \quad (\sigma \text{ or } \sigma_r) \quad (3)$

通常以方差的形式表示:

$$\sigma^2 = E[(\Delta F_r)^2] \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta F_i - \overline{\Delta F})^2 \quad (4)$$

如果期望值 \hat{F} 可通过线性回归方式得到, 那么总体误差(σ_T^2) 可以分成系统(σ_S^2)和随机(σ_r^2)误差两部分:

$$\sigma_T^2 = \sigma_S^2 + \sigma_r^2 \quad \text{其中,} \quad \begin{cases} \sigma_T^2 = \sigma^2(F - \dot{F}) \\ \sigma_S^2 = \sigma^2(\hat{F} - \dot{F}) \\ \sigma_r^2 = \sigma^2(F - \hat{F}) \end{cases} \quad (5)$$

不确定性分析方法

● Mann & Lenschow (1994) 方法（基于原始湍流数据）

仅由随机采样误差引起的通量观测的不确定性:

湍流积分时间尺度 τ_f

$$\frac{\sigma_F}{F} = \left(\frac{2 \cdot \tau_f}{T} \right)^{1/2} \left(\frac{1 + r_{wc}^2}{r_{wc}^2} \right)^{1/2} \quad r_{wc} = \frac{\text{COV}(w, c)}{\sigma_w \sigma_c} \text{ 相关系数, } T \text{ 通量平均时长, 观测通量}$$

● Finkelstein & Sims (2001) 方法（基于原始湍流数据）

计算‘协方差的方差’

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{p=-m}^m \overline{w'w'_p} \cdot \overline{c'c'_p} + \sum_{p=-m}^m \overline{w'c'_p} \cdot \overline{c'w'_p} \right]}$$

其中, $\overline{w'w'_p}$ 和 $\overline{c'c'_p}$ 是滞后为 p 的自协方差, $\overline{w'c'_p}$ 和 $\overline{c'w'_p}$ 分别为 c 滞后 p 和 w 滞后 p 的互协方差。

● 双塔法 (基于处理后的数据) 假设两个观测塔测量的误差是相互独立的 & 相同的环境条件 (塔1和塔2的采样误差不相关, 并且通量贡献源区无重叠), 那么

$$\sigma(\varepsilon_t) = \frac{\sigma(x_{1,t} - x_{2,t})}{\sqrt{2}}$$

观测误差—巴吉滩戈壁比对试验

数据选择:

风向: 280° - 0° - 80°

QC 标识 = 0

样本数: 166, 30-min runs

6个新的CSAT3超声涡动、所有8个新的超声涡动(包括CSAT3和Gill)、以及所有20台涡动测量的感热通量非常一致(回归斜率0.99-1.02, $R^2=1.00$)

因此, 将20台同时运行的涡动相关仪测量的感热通量均值作为“真值”。

系统误差在5%以内, 随机误差在10%以内。

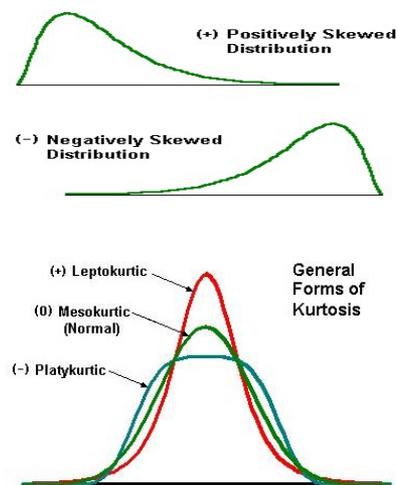
EC No.	Mean \bar{H}	Eq. (1) & (2)		WillMott (1981), Eq. (3) & (4)		ML94
		$\overline{\Delta H}$	σ_r	σ_s	σ_r	σ_r
1	97.07	3.38	9.72	4.37 (5%)	8.68 (9%)	9.48 (10%)
2	96.60	3.33	9.67	3.21 (3%)	9.12 (9%)	9.26 (10%)
3	96.53	1.56	7.97	0.75 (1%)	7.94 (8%)	8.81 (9%)
4	96.22	1.32	11.11	1.45 (2%)	11.01 (11%)	8.99 (9%)
5	67.70	-0.91	7.20	0.12 (0%)	7.20 (11%)	7.07 (10%)
6	79.51	-0.81	7.14	1.09 (1%)	7.06 (9%)	7.72 (10%)
7	93.82	-1.89	8.62	1.57 (2%)	8.47 (9%)	8.94 (10%)
8	82.16	-3.77	7.97	3.74 (5%)	7.04 (9%)	7.96 (10%)
9	87.47	1.32	7.25	0.59 (1%)	7.23 (8%)	8.53 (10%)
10	87.44	2.12	13.05	0.15 (0%)	13.05 (15%)	8.49 (10%)
11	78.10	0.09	8.16	0.43 (1%)	8.15 (10%)	7.95 (10%)
12	95.53	-1.12	8.04	0.72 (1%)	8.01 (8%)	9.03 (9%)
13	93.60	-0.92	7.49	2.50 (3%)	6.91 (7%)	8.82 (9%)
14	94.94	-0.76	8.93	0.84 (1%)	8.89 (9%)	9.11 (10%)
15	97.76	0.41	10.61	0.97 (1%)	10.56 (11%)	9.36 (10%)
16	67.60	-3.25	8.38	1.08 (2%)	8.31 (12%)	7.26 (11%)
17	93.27	-1.41	7.89	1.81 (2%)	7.68 (8%)	5.86 (6%)
18	89.30	-2.27	8.10	2.57 (3%)	7.69 (9%)	8.47 (9%)
19	71.05	-6.41	10.81	5.47 (8%)	9.32 (13%)	7.11 (10%)
20	92.01	8.68	12.14	7.45 (8%)	9.58 (10%)	9.80 (11%)

观测数据的质量评价

1) 偏度与峰度检验

- 湍流具有随机性，湍流脉动量的分布一般正态规律。对湍流量正态性的检验，即偏度和峰度检验，是一些作者采用的质量控制方法之一，可检查由仪器或数采仪问题引起的异常记录 (Outliers)。

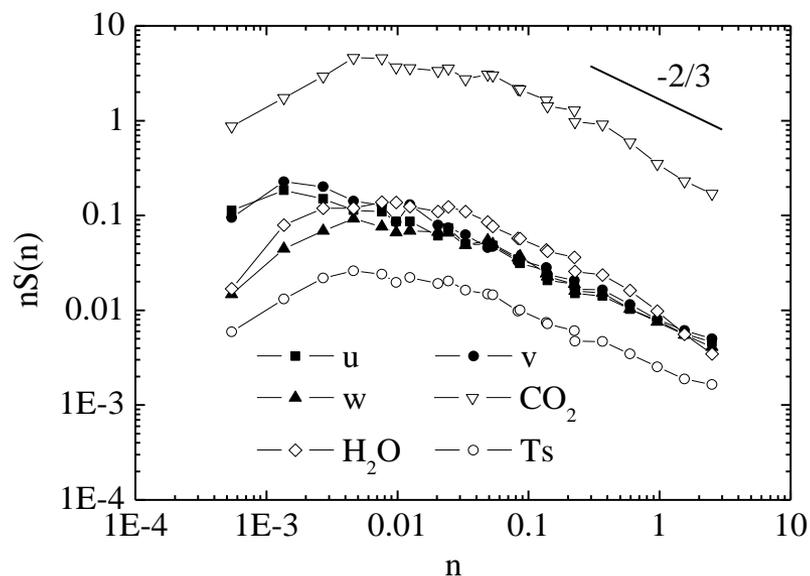
$$\text{偏度 (Skewness)} \quad S_k = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1)\sigma^3}$$
$$\text{峰度 (Kurtosis)} \quad K_u = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N-1)\sigma^4} - 3$$



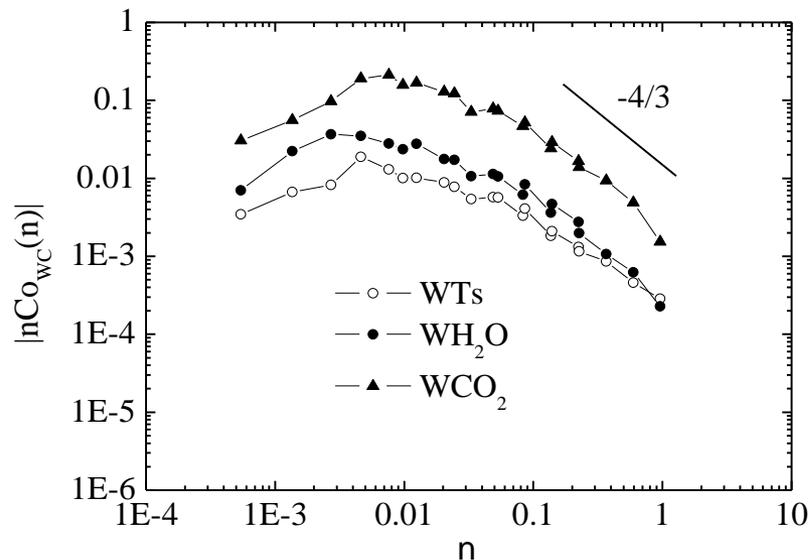
σ 为标准差。Sk>0，峰值左偏；Sk<0，右偏。Ku>0，分布陡峭；Ku<0，平缓。窗口宽度N根据情况选定。二者的阈值可参考： $|Sk_T| = 3.6$ ， $Ku_T = 10$ （大的Ku值表示可能有大的异常值）。

2) 湍流能量谱

- * 在近地边界层小尺度湍流是各向同性的，在惯性子区内能量即不产生也不消耗，对数坐标系下，功率谱应遵循 $-2/3$ 的规律向更小的尺度传递；协谱在惯性子区应该符合 $-4/3$ 定律。



功率谱(u, v, w, CO_2, H_2O, Ts)



协谱(wTs, WCO_2, WH_2O)

密云站2009年7月7日10:00-14:00共8个30分钟各变量功率谱/协谱的平均值

低频段斜率不随频率减小明显减小

- * 取平均时间偏短（一般低频端谱值应比谱峰值低一个量级以上）

谱中包含可疑的峰值或野点

- * 原始资料被电源和仪器噪音污染

高频段斜率大于 $-2/3$

- * 传感器响应劣化，信号被平滑；随机噪音过大

高频段斜率小于 $-2/3$

- * 原始资料含有似野点噪音或量化噪音（A/D转换缺位）

3) 湍流的平稳性检验

湍流平稳性 (Stationarity) 指一个观测时次内主要统计量保持稳定。非平稳情况, 在30 min内, 有变化趋势, 或出现结构性变化。

检验方法 (Foken, 2004) : 每个分时段协方差 (5min) 的平均值和全时段协方差 (30min) 之间差值与全时段协方差之比。

$$\Delta_{st} = \left| \frac{\overline{(x' y')_5} - \overline{(x' y')_{30}}}{\overline{(x' y')_{30}}} \right| * 100\%$$

Class	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Range (%)	0-15	16-30	31-50	51-75	76-100	101-250	251-500	501-1000	>1000%

4) 湍流发展的充分性检验

湍流发展的充分性检验（方差相似性规律）可以检验湍流是否能够很好地发展与形成。湍流充分发展情况下，符合莫宁-奥布霍夫相似理论（MO理论）。

$$ITC = \left| \frac{(\sigma_w / u_*)_{model} - (\sigma_w / u_*)_{measurement}}{(\sigma_w / u_*)_{model}} \right| * 100\%$$

分类标准 (Foken, 2004)

Class	Range
1	0–15 %
2	16–30 %
3	31–50 %
4	51–75 %
5	76–100 %
6	101–250 %
7	251–500 %
8	501–1000 %
9	> 1000 %

数据质量分类标准 (Foken, 2004)

综合两种以上质量划分指标

steady state (flag)	integral turbulence characteristic (flag)	Final flag
1	1-2	1
2	1-2	2
1-2	3-4	3
3-4	1-2	4
1-4	3-5	5
5	≤5	6
≤6	≤6	7
≤8	≤8	8
9	9	9

Flag1-3可用于研究使用，质量较好；

4-6在连续通量观测实验中可用；

7-8只能定性的使用，但比Gap filling计算结果好；

9应该剔除；

5) 能量平衡闭合状况



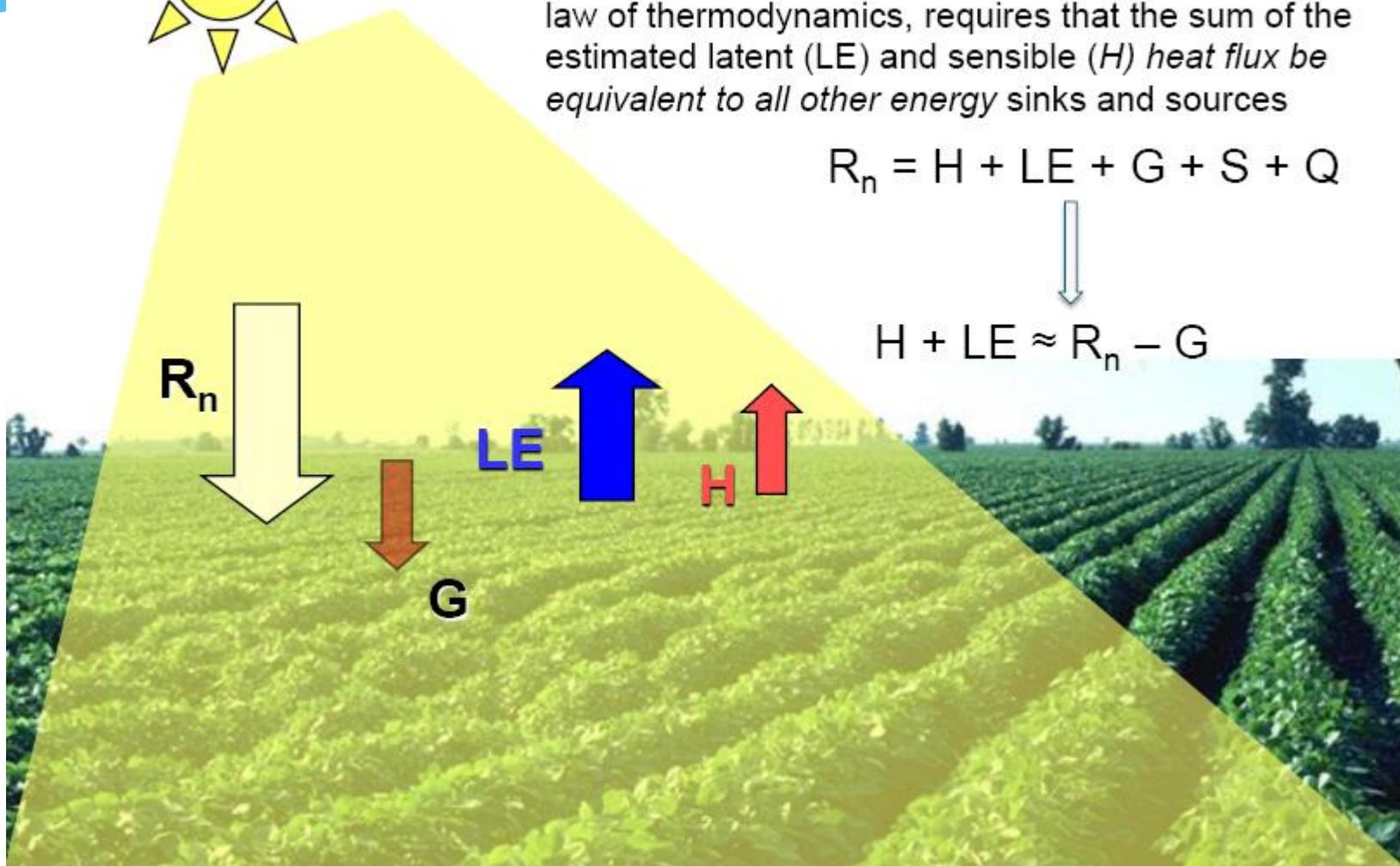
The Energy Budget

Energy balance closure, a formulation of the first law of thermodynamics, requires that the sum of the estimated latent (LE) and sensible (H) heat flux be equivalent to all other energy sinks and sources

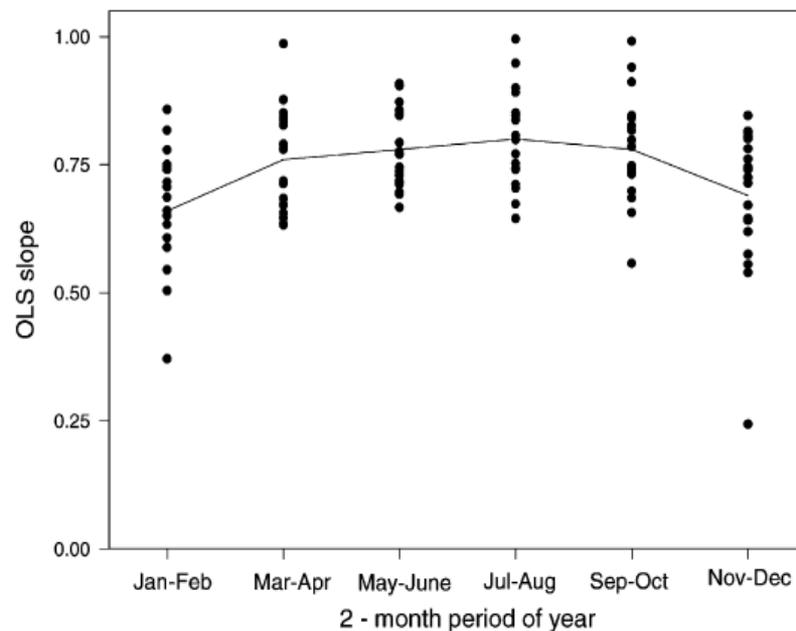
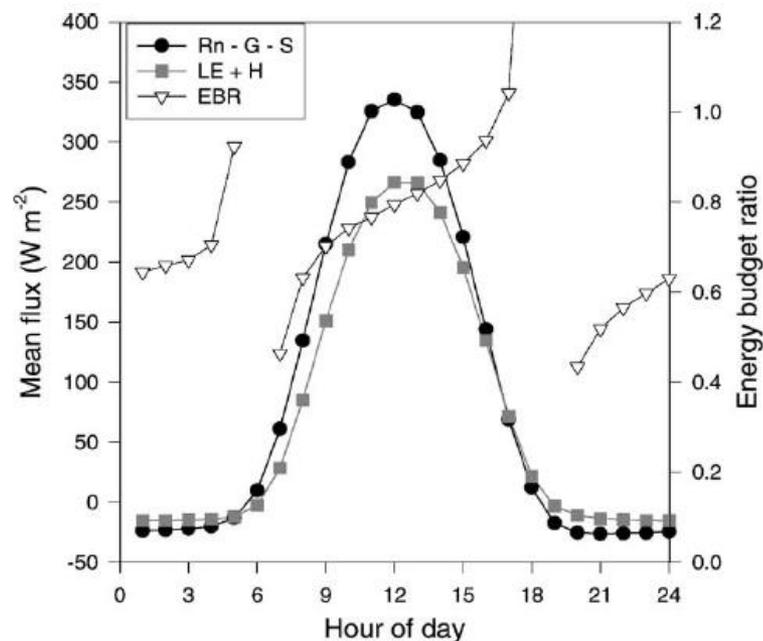
$$R_n = H + LE + G + S + Q$$



$$H + LE \approx R_n - G$$



能量平衡闭合被认为是检验涡动相关测量数据的一个重要标准，FLUXNET许多站点都把能量平衡闭合状况分析作为一种标准的程序用于通量数据的质量评价。



能量平衡比率EBR的日变化与季节变化 (Wilson et al.,2002)

导致能量平衡不闭合的原因有很多，目前还没有定论。

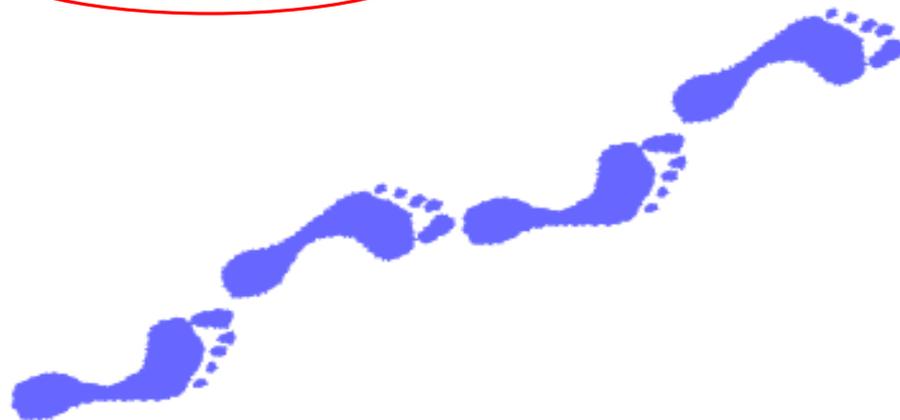
什么是足迹 footprint?

* **Footprint:** 足迹、印痕、印记、印迹、踪迹?

* 与实验观测密切相关

* 观测: 原因 \Rightarrow 结果

* 足迹: 结果 \Rightarrow 原因



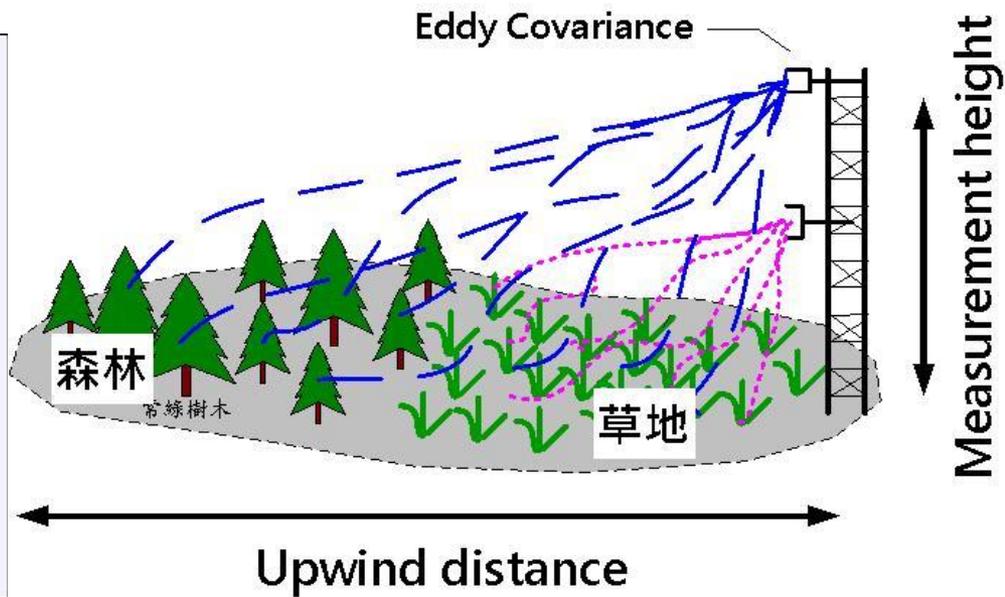
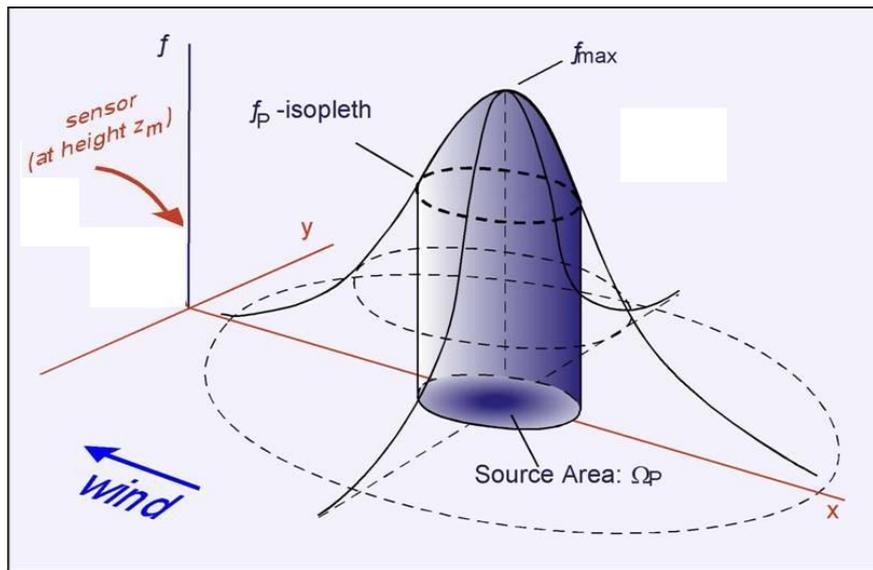
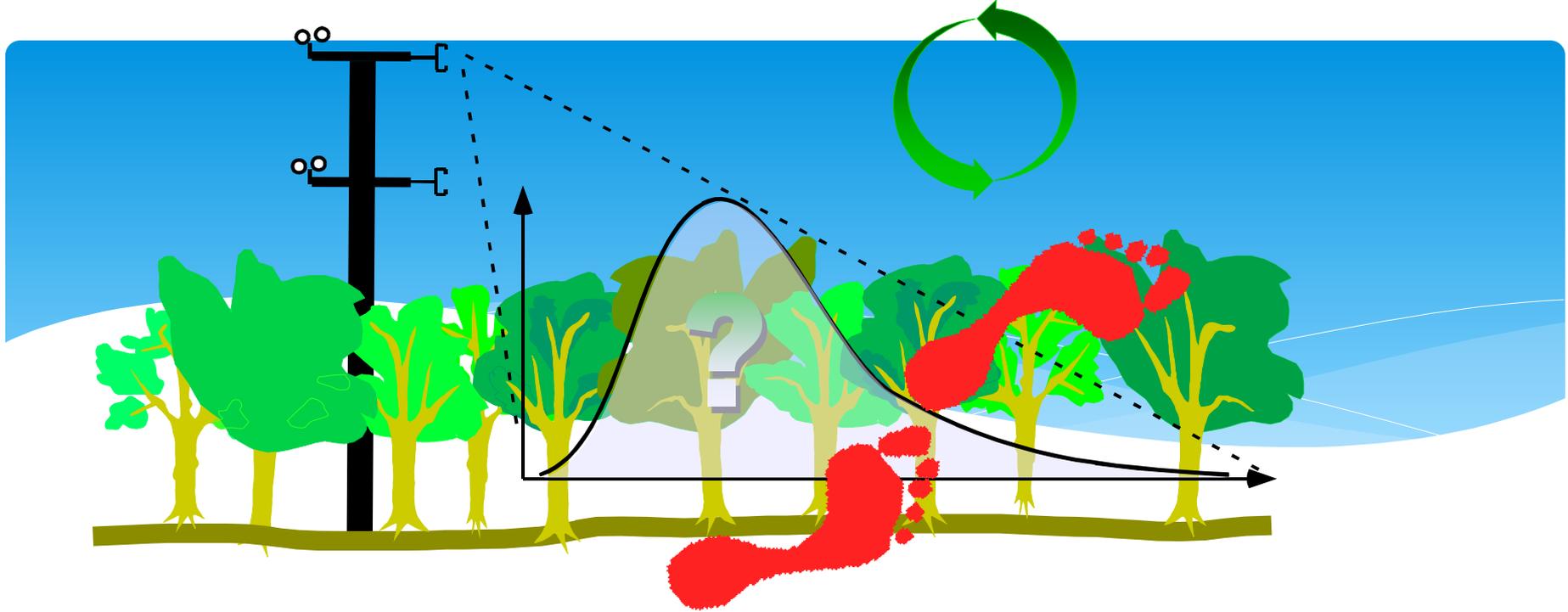
足迹可以用来对下垫面的观测区域进行质量评估，以确定观测到的通量值是否来源于我们所关心的研究区域。

观测通量的空间代表性是指仪器的测量值能在多大程度上反映实际下垫面的平均或累积的状况。足迹又称为源权重函数，是描述近地面层表面源或汇的空间分布和仪器观测值之间关系的函数，与仪器架高、大气状况（稳定度、风速、风向等）以及下垫面粗糙度等因素有关。

✦ 选用Kormann和Meixner的解析函数，建立了单点（涡动相关仪）的足迹模型 (Korman and Meixner, 2001) :

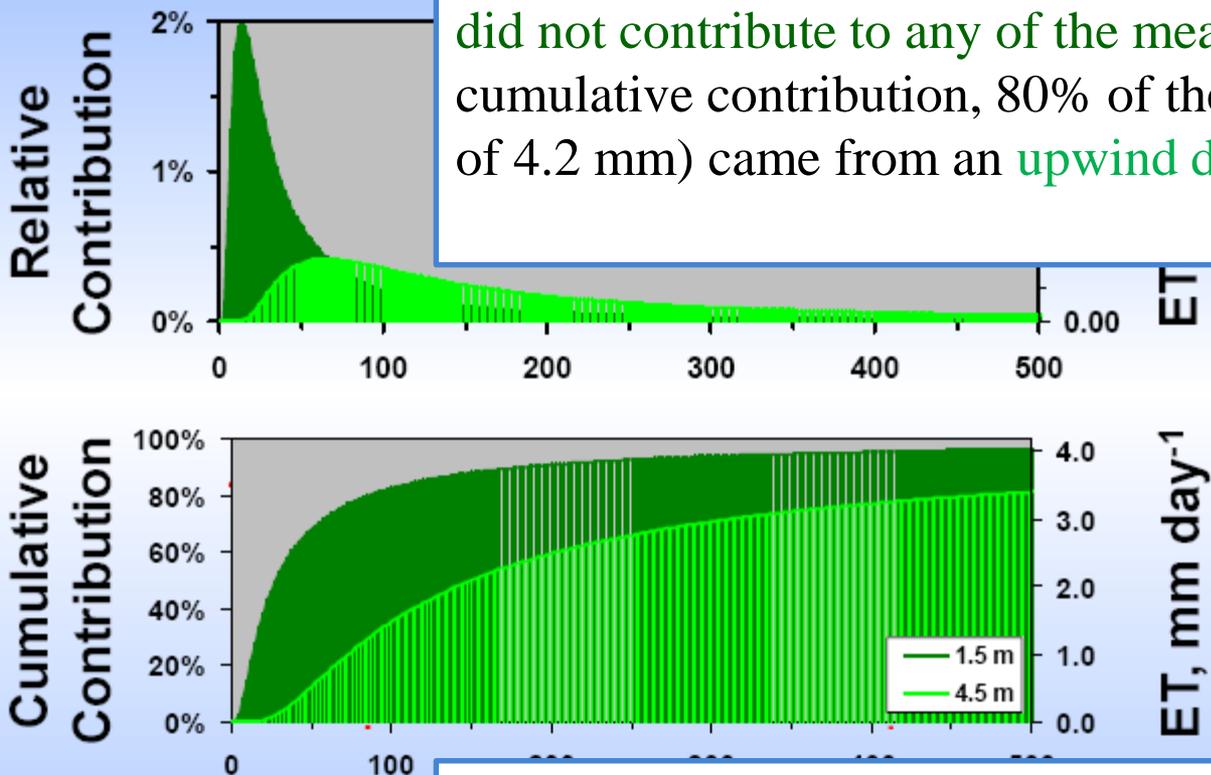
$$f = D_y f^y(x, z_m)$$

D_y 为侧风向湍流扩散分布函数， $f^y(x, z_m)$ 为通量侧向积分函数， z_m 为观测高度。



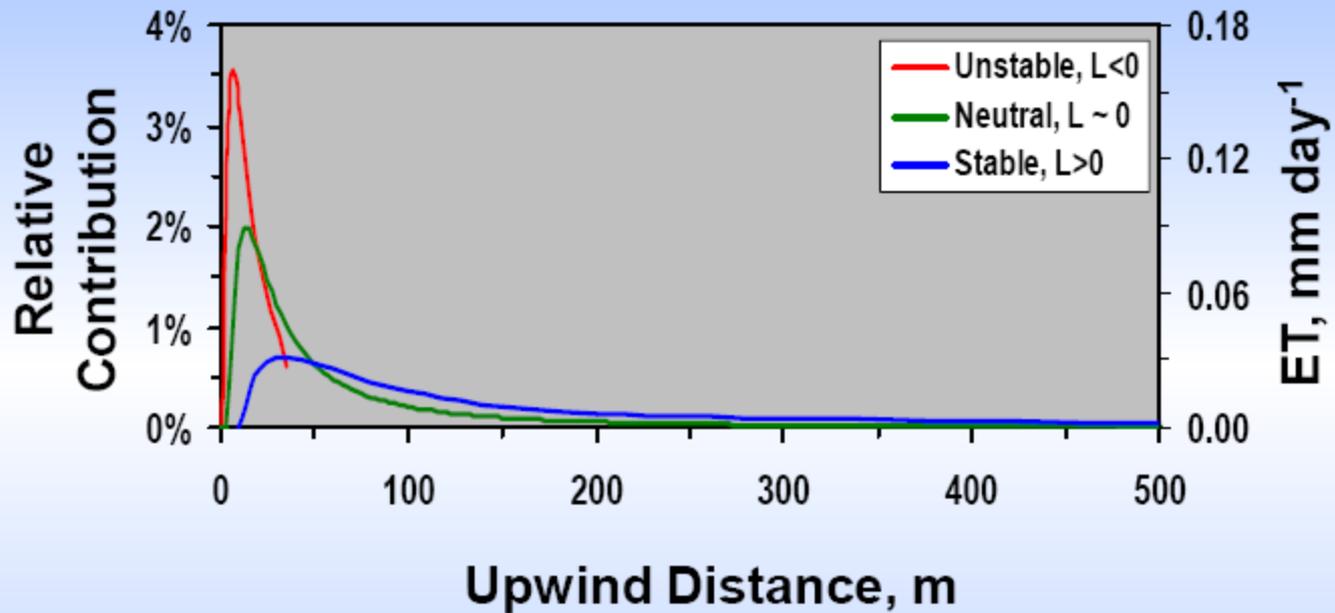
EFFECT OF

When measured at the height of 4.5 m, the peak contribution of the ET came from the upwind distance of about 60-65 m, while an area within 20 m from the station did not contribute to any of the measured flux. In terms of cumulative contribution, 80% of the total daily flux (3.4 out of 4.2 mm) came from an upwind distance of 20-450 m.



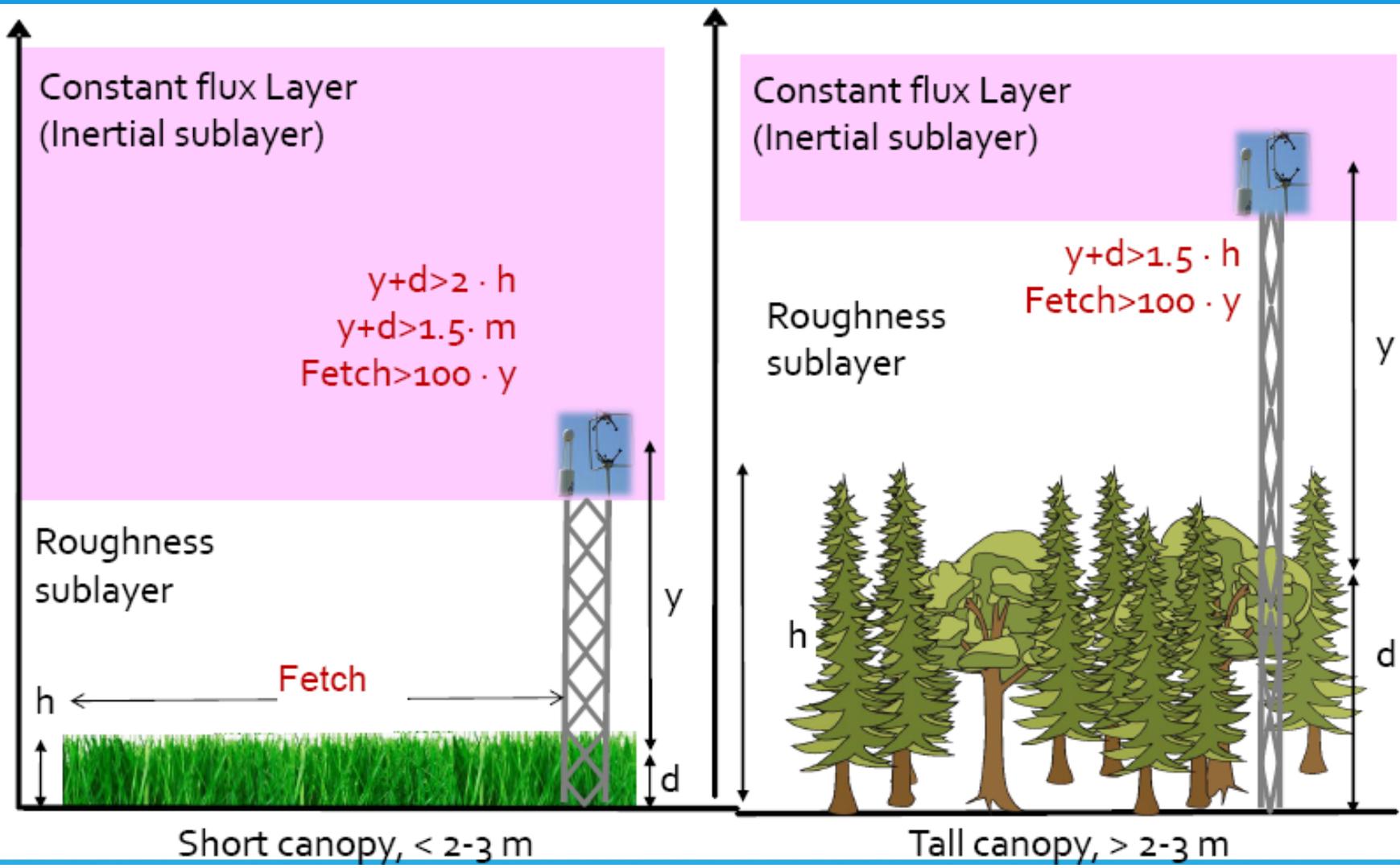
At the height of 1.5 m a dramatic change in the contribution is observed. Peak contribution came from an upwind distance of about 12-18 m. Over 80% of daily ET came from an area within 80 m from the station (versus a 20-450 m zone for the 4.5 m measurement height).

EFFECT OF STABILITY

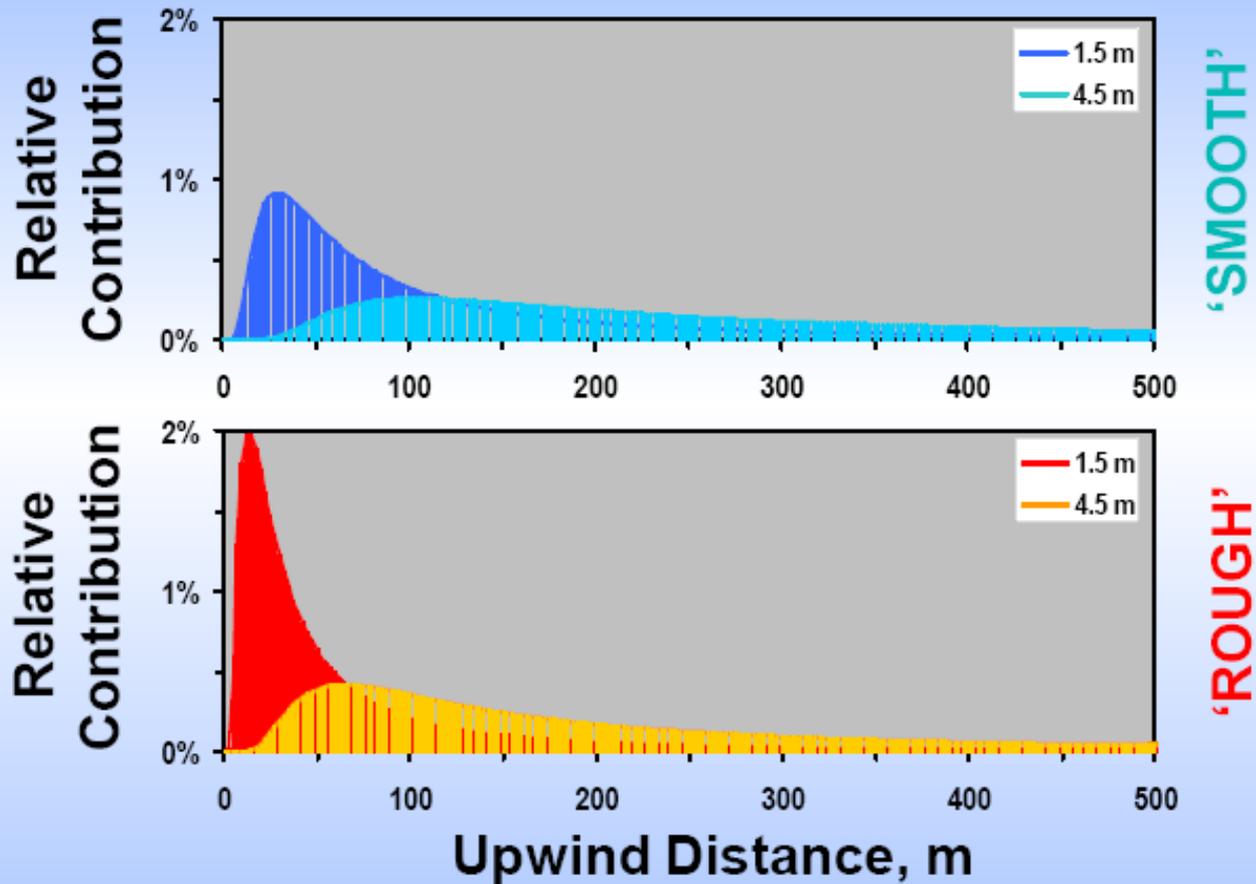


Adopted from Leclerc and Thurtell (1990)

稳定度对通量贡献源区的影响

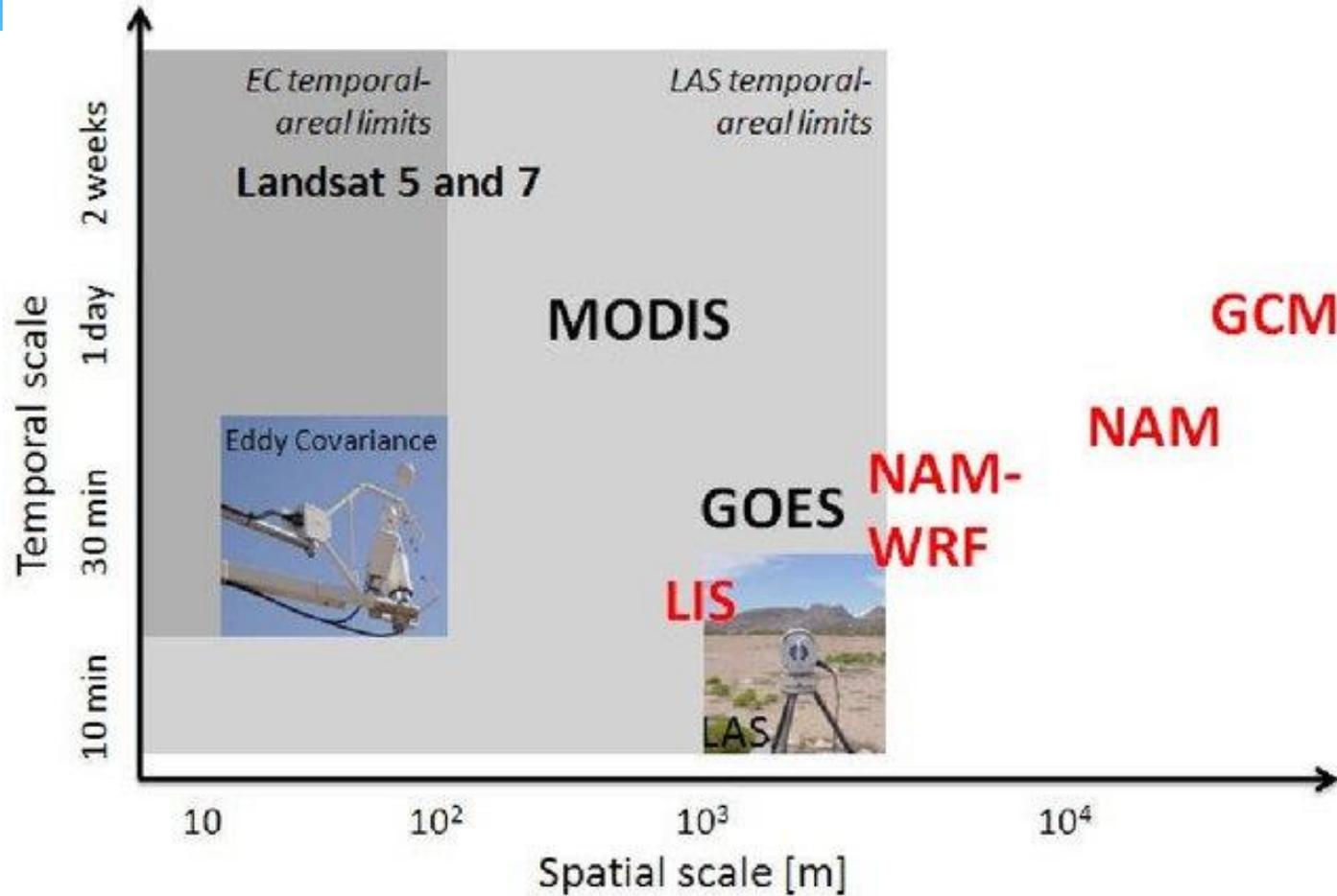


HEIGHT AT DIFFERENT ROUGHNESSES

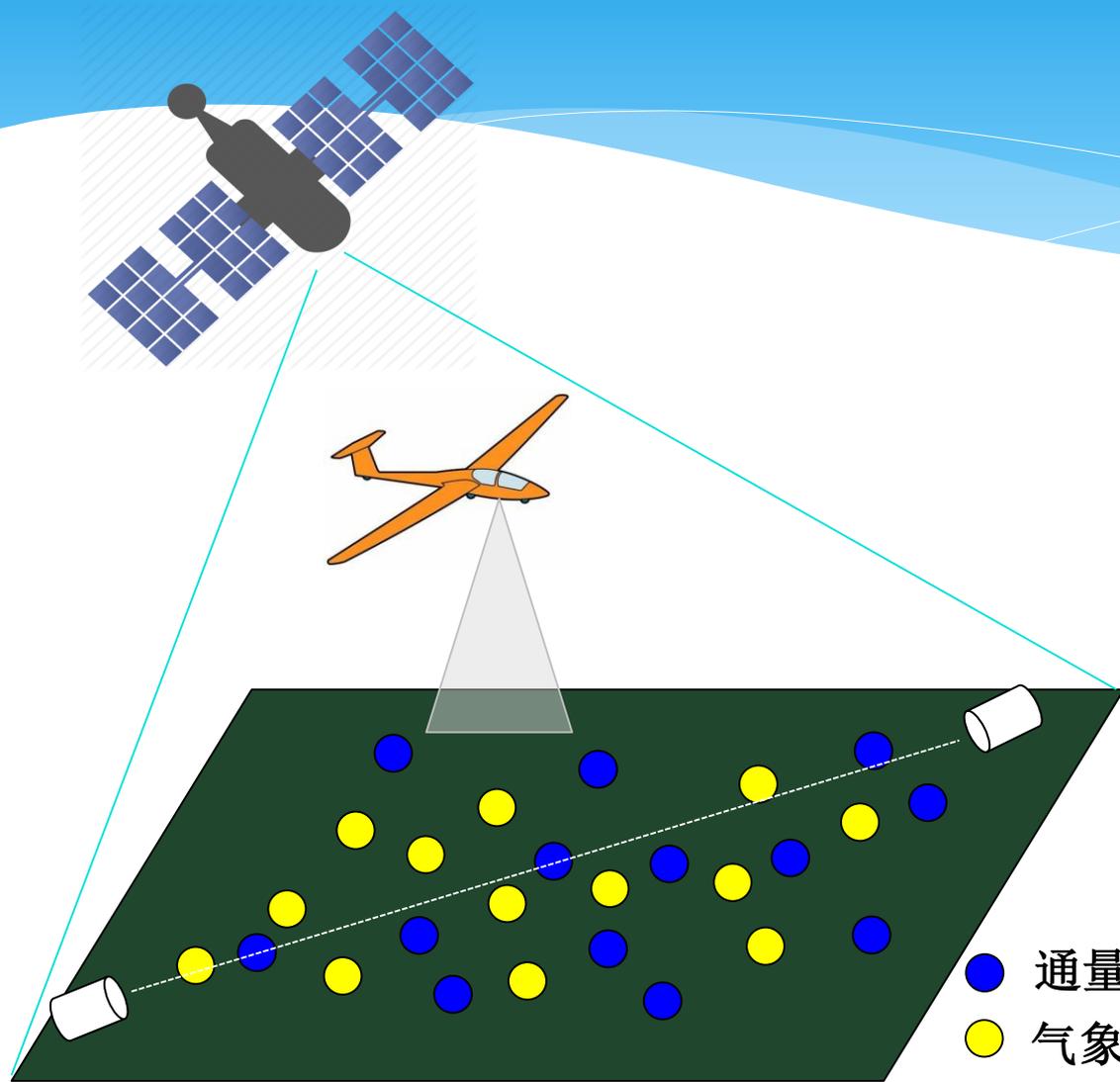


粗糙度对通量贡献源区的影响

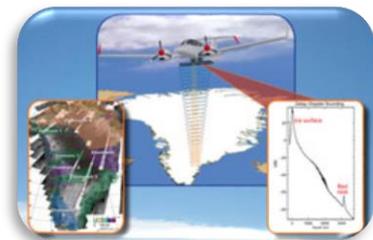
三、公里级通量观测仪器—闪烁仪



面积平均通量的观测方法



卫星



机载



闪烁仪



通量矩阵

- 通量观测
- 气象观测

闪烁仪测量通量回顾

- * A new branch in atmospheric science developed in the 1970s
- * The textbooks by *Tatarskii* (1961) and *Monin and Yaglom* (1975) can be considered as milestones in scintillometry history.
- * Ting i Wang (1978), large aperture scintillometer
- * Practical application of theoretical results \Rightarrow *renaissance of scintillometry* by *de Bruin* et al. in 1990s. Research to commercial products of scintillometers; Successful application in various field over the world, with special focus on water management and irrigation.



V.I. Tatarski (1929 -)



Henk de Bruin (1943-)

国际上商用的主要闪烁仪：

近红外闪烁仪

* 荷兰Kipp&Zonen公司

* 德国Scintec公司

微波闪烁仪

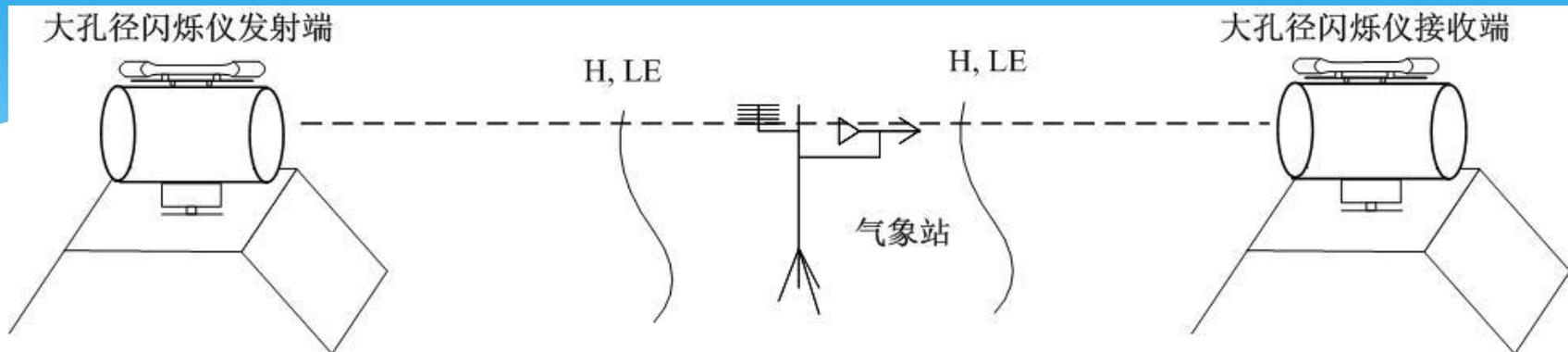
* 德国RPG公司



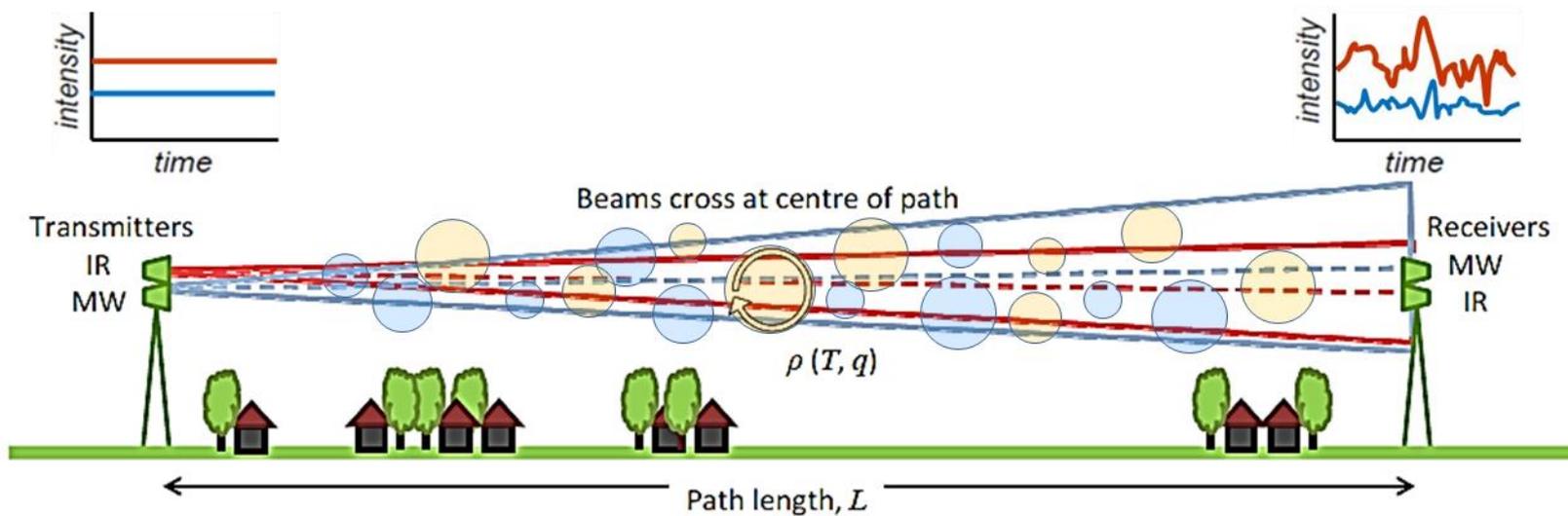
闪烁仪的测量原理

闪烁：一束光在大气中传播时，能量会受到各种形式的衰减，导致信号的减弱。其中影响最大是传播路径上由于**温度、湿度的波动引起空气密度的波动**，进而引起**空气折射系数的波动**。这个波动再进一步引起**光强度的波动**，即闪烁。

闪烁仪就是测量闪烁的“量”的仪器。它由发射仪（Transmitter）、接收仪（Receiver）组成，二者相隔一定的距离（一般0.5-10公里）分开放置，距地面有一定的高度（几米到几十米）。



大孔径闪烁仪架设示意图



双波段闪烁仪架设示意图

发射仪发射一定波长和直径的波束，在大气中传播。接收仪接收受到光程路径上**温度、湿度和气压波动影响**的光（光强波动的自然对数的方差），再结合闪烁仪的**孔径，光径长度，波数**等计算出空气折射指数结构参数（ C_n^2 ）。

C_n^2 表征了大气的湍流强度，而大气的湍流强度决定了输送热量、水汽等标量的能力。

通过迭代过程，进而**根据相似理论**计算出感热、潜热通量。

根据发射波长的不同分为：

- **近红外波段闪烁仪**
(Large aperture scintillometer, LAS)

发射波长在可见和近红外波段的闪烁仪 ($\sim 1 \mu\text{m}$)，**主要对温度引起的波动敏感**，由它测量感热通量，再根据能量平衡余项法 ($LE=Rn-G0-H$)，可间接得到潜热通量。

- **毫米级微波闪烁仪**
(MWS, Microwave Scintillometer)

发射波长在毫米级的闪烁仪 (1~3 mm)，**主要对水汽引起的波动敏感**。因此，在同一路径上结合两个波段闪烁仪的测量 (Optical-Microwave scintillometer, OMS)，可以直接得到感热、潜热通量。即所谓的“双波长法” (Two-Wavelength Method)。

根据孔径的不同分为：

- 工作波长 λ 及孔径 D ，决定受影响的气象参数及可探测的光程长度 L
- D 与第一菲涅尔区尺度 $F=\sqrt{\lambda L}$ 的相对大小决定影响测量的涡旋尺度

Type	λ	D	L	$F = \sqrt{\lambda L}$	Length scale in Turbulence	Parameter Sensitivity	Scintillometers
LAS 大孔径, 红外	0.9 μm	≈ 15 cm	0.5 - 5 km	≈ 4 cm	$L_0 > D > F > l_0$ (惯性区)	$C_n^2 \rightarrow C_T^2 \rightarrow H$ \uparrow (u_*)	Kipp & Zonen LAS Scintec BLS450, 900
XLAS 特大孔径, 红外	0.9 μm	≈ 30 cm	5 - 10 km	≈ 10 cm			Kipp & Zonen XLAS Scintec BLS2000
DBLS 小孔径双光束激光	0.7 μm	2.5 mm	≈ 100 m	≈ 1 cm	$L_0 > F \geq D \approx l_0$ (惯性区+耗散区)	$l_0, C_n^2 \rightarrow \varepsilon, C_T^2 \rightarrow u_*, H$	Scintec SLS20, 40
MWS* 毫米波	1.86-11 mm	30-40 cm (天线直径)	1 - 10 km	$\approx 3-4$ m	$L_0 > F > D > l_0$ (惯性区)	$C_n^2 \rightarrow (C_T^2, C_Q^2) \rightarrow H, LE$ \uparrow (u_*)	CEH/RAL94, RPG-160 (与LAS组合成 双波长闪烁仪)

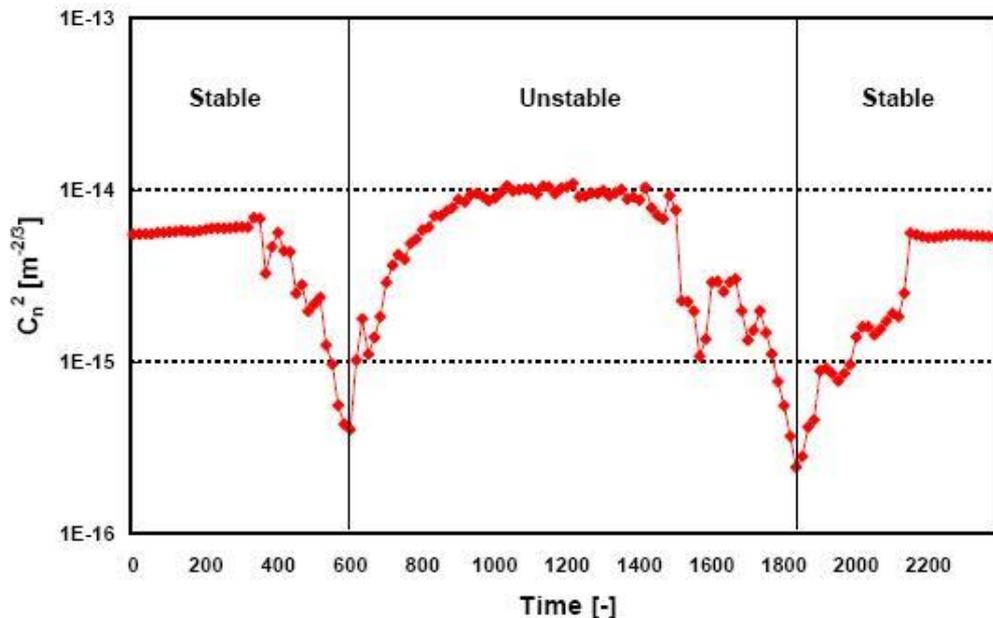
(1) 建立折射系数结构参数 C_n^2 与接收到的波束强度 I 的关系:

闪烁仪直接测量的光强波动的自然对数的方差 $\sigma_{\ln I}$, 与 C_n^2 有如下关系:

$$C_{n,LAS}^2 = A_{LAS} \sigma_{\ln I,LAS}^2 D^{7/3} L^{-3}$$

$$C_{n,MWS}^2 = A_{MWS} \sigma_{\ln I,MWS}^2 K^{-7/6} L^{-11/6}$$

D : 闪烁仪孔径大小, L : 光径长度, K : 波数。
 C_n^2 的典型值在 $10^{-13} \sim 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ 之间。



典型晴天条件下 $C_{n,LAS}^2$ 的日变化

(2) 由折射系数结构参数 C_n^2 得到气象结构参数

由于温度 T 、湿度 q 以及气压 P 的波动都会引起空气折射系数的波动 (n)，因此：

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 + 2 \frac{A_T A_q}{Tq} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2$$

其中 C_T^2 、 C_q^2 是温度结构参数和湿度结构参数， C_{Tq} 是两者的共变项。 A_T 、 A_q 是波长以及气温、湿度和气压的函数，表征了右边各项对 C_n^2 的相对贡献量。

单独针对大孔径闪烁仪：

对于大孔径闪烁仪的发射波段（近红外，880nm），主要对温度引起的波动敏感， $A_T \gg A_q$ ， C_n^2 的表达式简化为：

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 (1 + 0.03 / \beta)^2 \quad \text{即：} \quad C_n^2 = \frac{(-0.78 \times 10^{-6} P)^2}{T^2} C_T^2 (1 + 0.03 / \beta)^2$$

其中波文比 β 项，是对湿度引起的闪烁的修正项。在干旱地表， β 值较大 (>3)，修正项的作用很小，可以忽略。在湿润地表， β 值较小 (<0.5)，接收仪接收到的很大一部分闪烁由湿度波动引起，修正项不可忽略。

(3) 利用近地层相似关系计算通量

在 C_T^2 ， C_q^2 已知条件下，感热、潜热通量可通过迭代根据近地层相似理论（MOST）计算得到：

$$\frac{C_T^2 (z_{OMS} - d)^{2/3}}{T_*^2} = f_T(\zeta)$$

不稳定条件

$$f_T(\zeta) = c_{T1} (1 - c_{T2}\zeta)^{-2/3}$$

稳定条件

$$f_T(\zeta) = c_{T1} (1 + c_{T2}\zeta)^{2/3}$$

$$\frac{C_q^2 (z_{OMS} - d)^{2/3}}{q_*^2} = f_q(\zeta)$$

$$f_q(\zeta) = c_{q1} (1 - c_{q2}\zeta)^{-2/3}$$

$$f_q(\zeta) = c_{q1} (1 + c_{q2}\zeta)^{2/3}$$

$$u_* = \frac{ku}{\ln((z_u - d) / z_{0m}) - \Psi_m((z_u - d) / L) + \Psi_m(z_{0m} / L)}$$

$$H = -\rho_a C_p u_* T_*$$

$$LE = -L_v u_* Q_*$$

单独针对大孔径闪烁仪：

估算了 d 、 z_{0m} ，给 L 一个初始设定值后迭代开始进行，直至 L 收敛，由此得到感热通量 H 。

质量控制后 C_n^2

空气温度

波文比系数

大气压

温度结构系数 C_T^2

空气温度

零平面位移

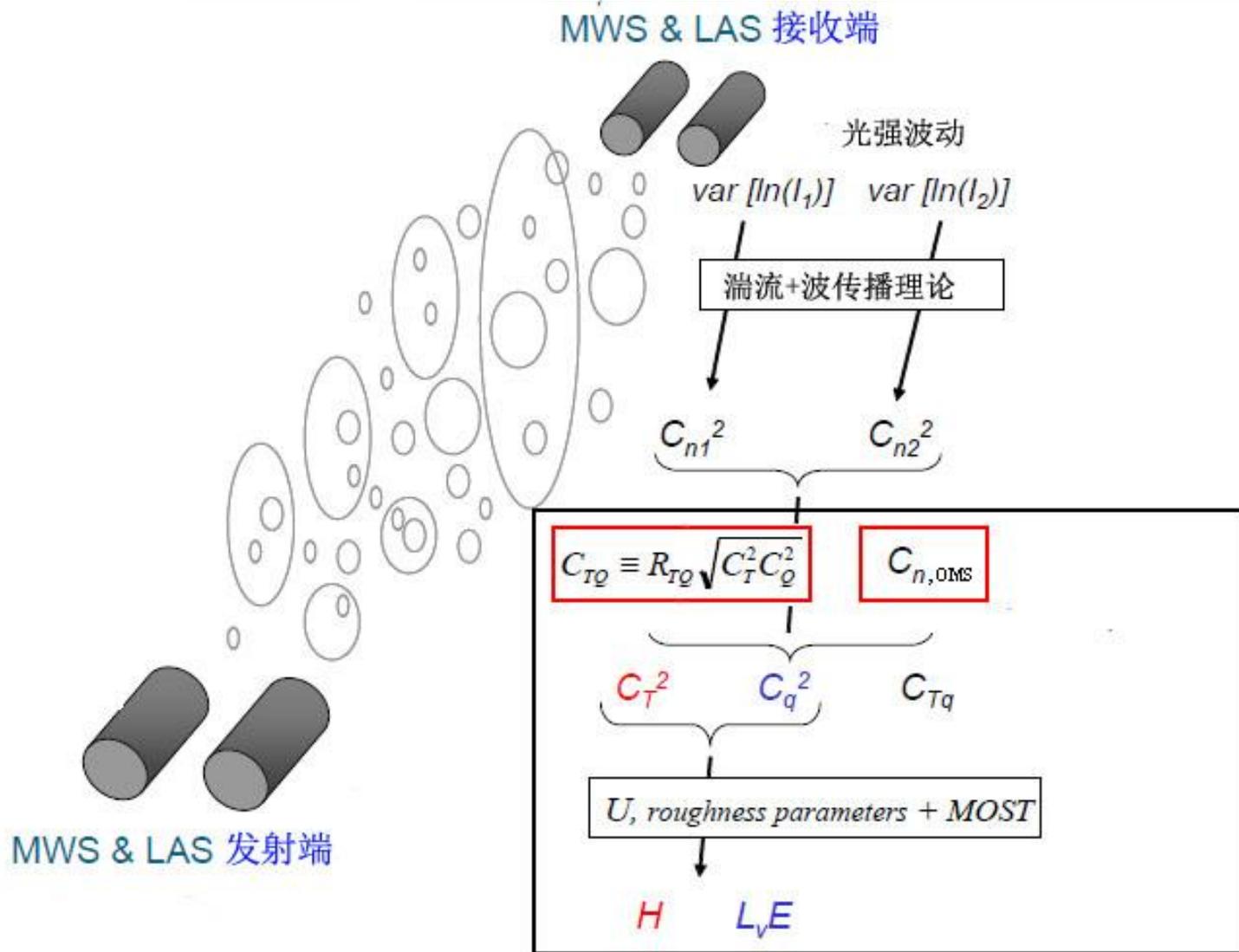
LAS有效高度

地表粗糙度

$$LE = R_n - G_0 - H$$

感热通量(H)

LAS测量感热通量的计算流程



双波段闪烁仪测量感热通量的计算流程



观测通量的空间代表性

- 观测通量的空间代表性是指仪器的测量值能在多大程度上反映实际下垫面的平均或累积的状况。
- 足迹又称为源权重函数，是描述近地面层表面源或汇的空间分布和仪器观测值之间关系的函数，与仪器架高、大气状况（稳定度、风速、风向等）以及下垫面粗糙度等因素有关。

✦ 选用Kormann和Meixner的解析函数，建立了单点（涡动相关仪）的足迹模型 (Korman and Meixner, 2001) :

$$f = D_y f^y(x, z_m)$$

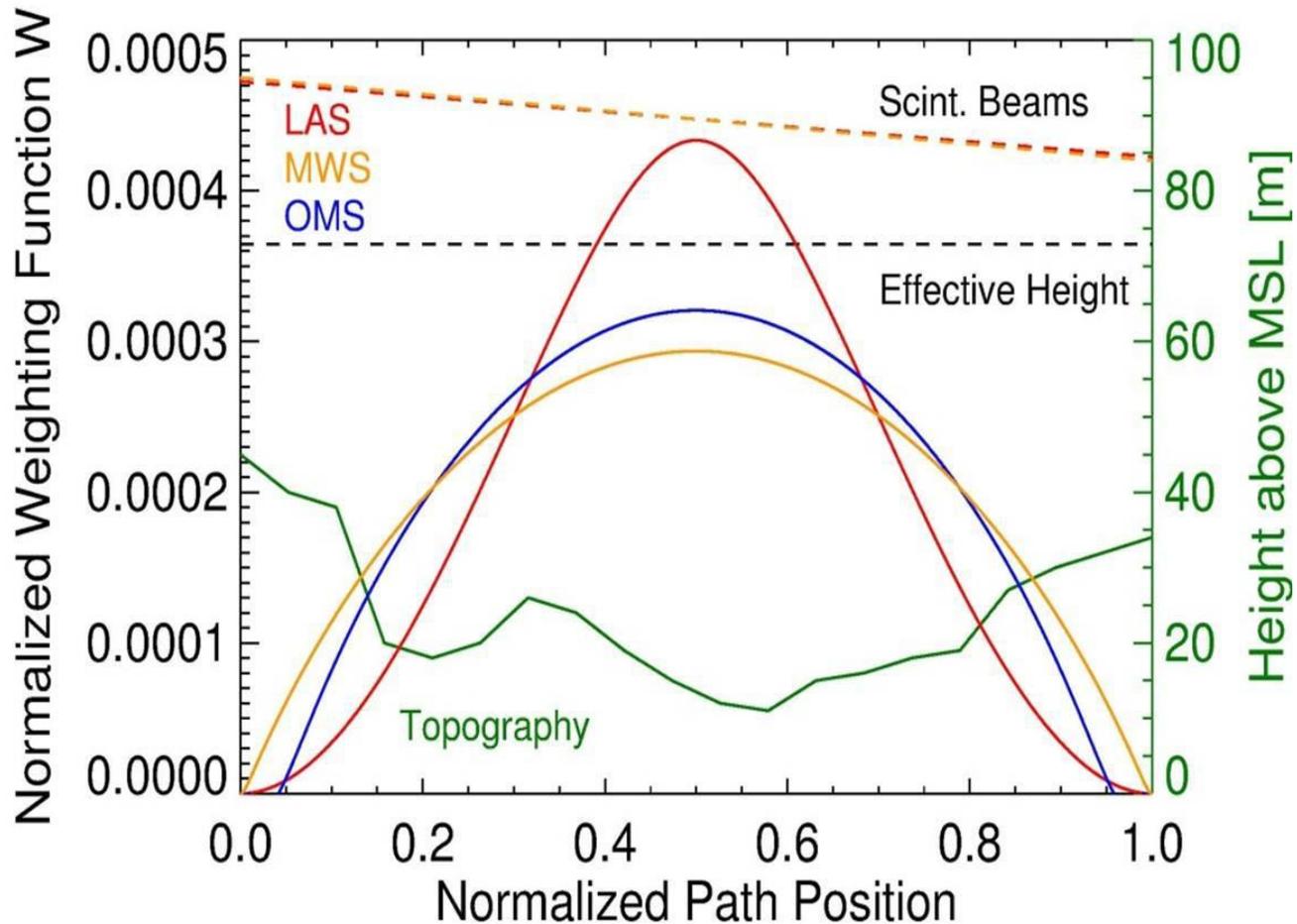
D_y 为侧风向湍流扩散分布函数， $f^y(x, z_m)$ 为通量侧向积分函数， z_m 为观测高度。

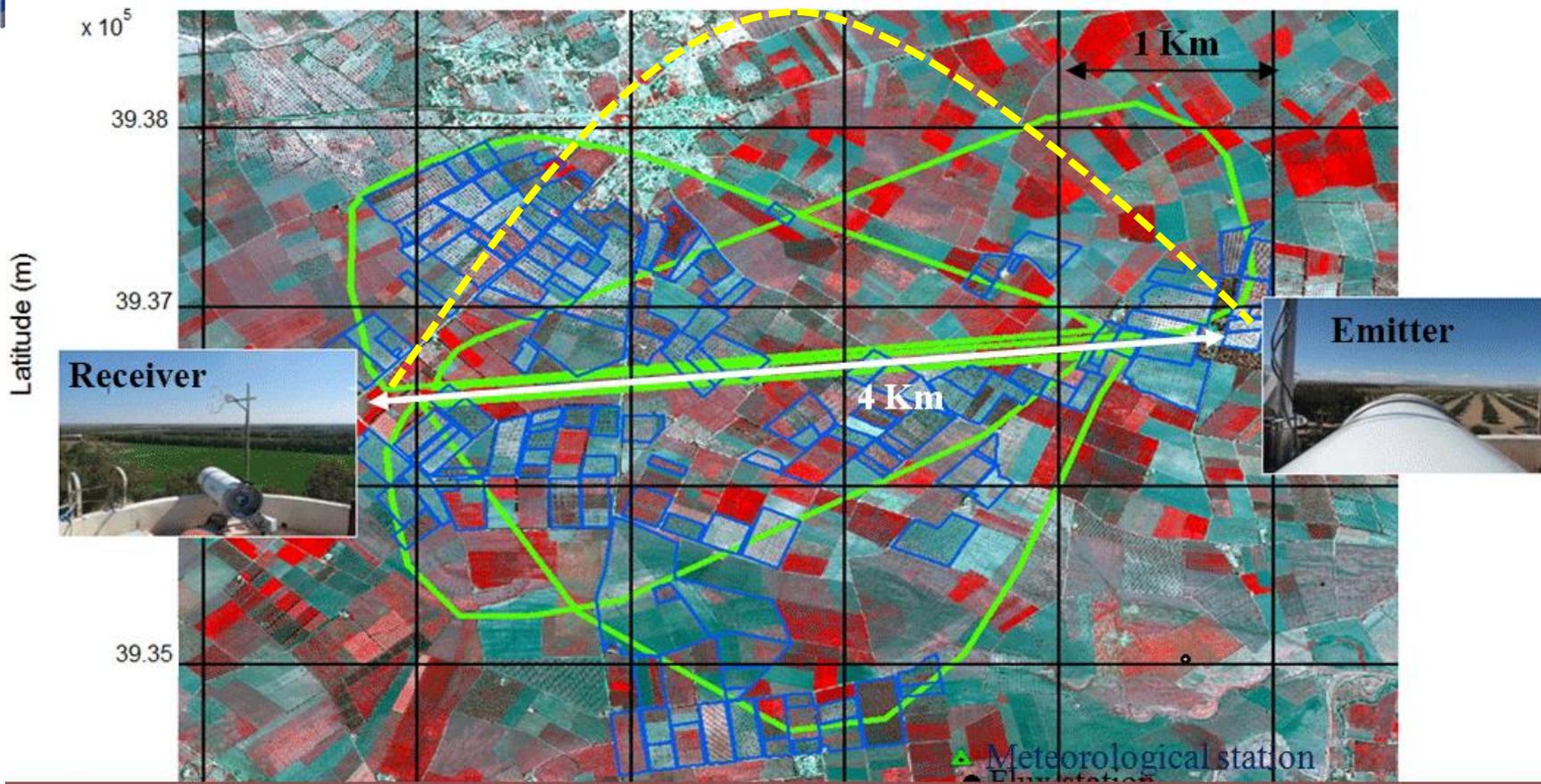
✦ 将点通量的足迹函数与LAS光径的权重函数相结合，建立了大孔径闪烁仪通量的足迹模型 (双喜等, 2009, 蔡旭晖等, 2010) :

$$f_{LAS} = \int_{x_2}^{x_1} W(x) f(x - x', y - y', z_m) dx$$

$W(x)$ 为LAS的权重函数， x_1 和 x_2 分别表示LAS发射仪和接收仪的位置， x 和 y 表示LAS光径上每个点的坐标， x' 和 y' 表示LAS光径上每个点在上风方向的坐标。

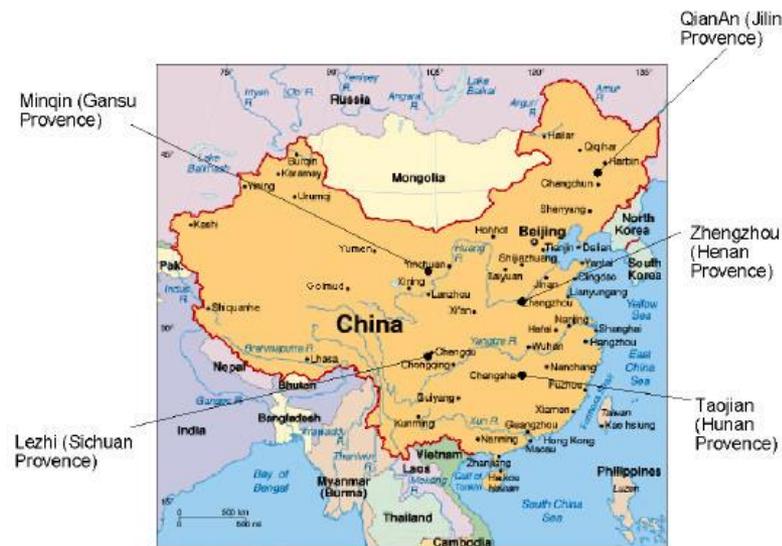
闪烁仪权重&有效高度





四、应用

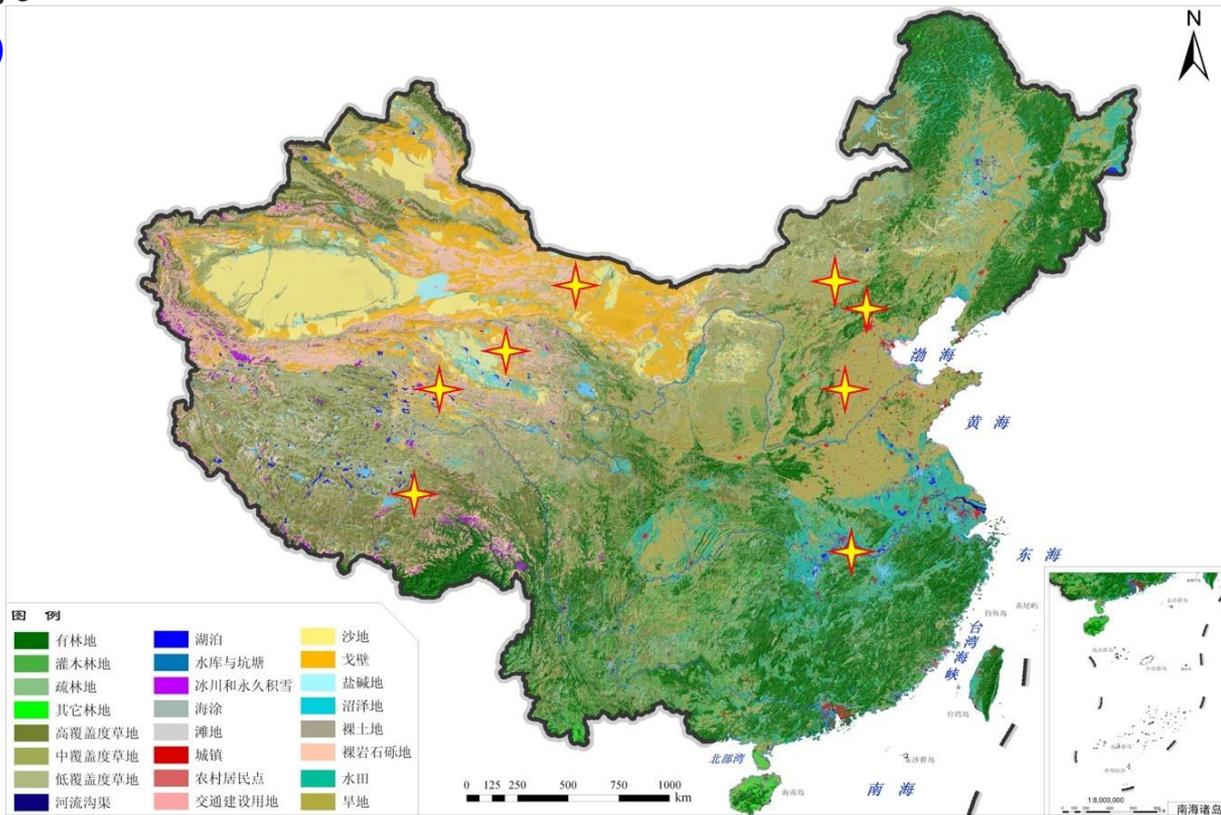
- 国内，基于中荷合作项目“中国能量与水平衡监测系统”项目于**2000年**分别在四川乐至、甘肃民勤、吉林乾安、湖南桃江和河南郑州5个地点安装了大孔径闪烁仪。
- **2005年**的中荷合作项目“基于卫星的黄河流域水监测与河流预报系统”在河源区兴海、玛沁、唐克与泾河流域的泾川设立了大孔径闪烁仪观测站点。
- **2015年**在河南济源站架设微波闪烁仪---双波段闪烁仪。



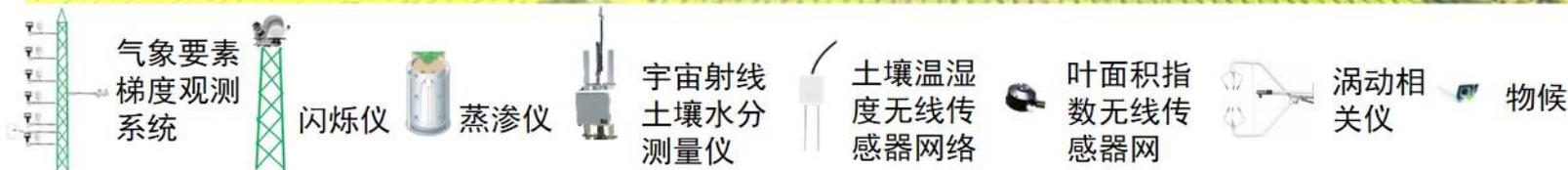
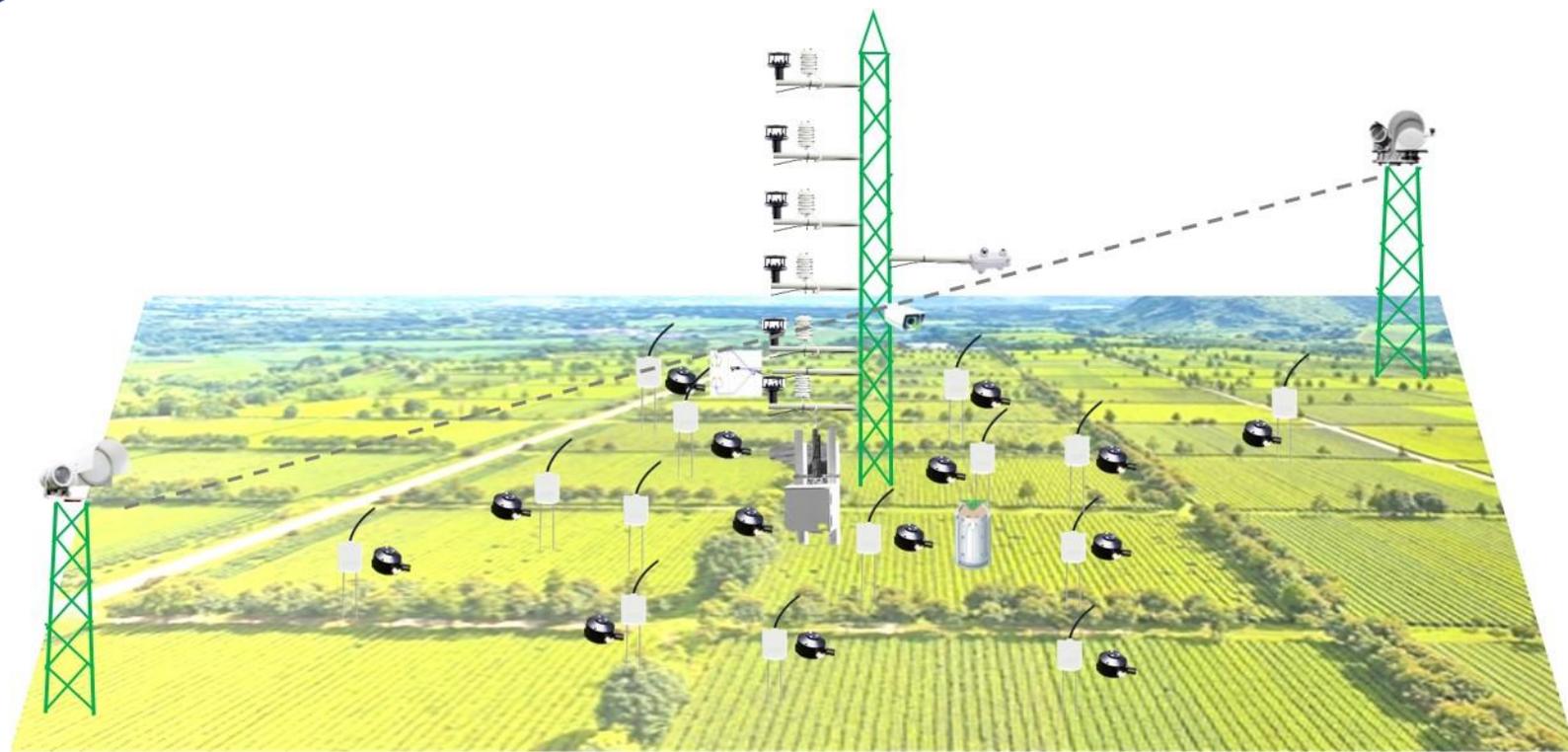
四、应用

自2004年起，北师大刘绍民老师团队开展闪烁仪的观测以及数据分析研究。

- 北京小汤山（2004、2005）
- 北京密云（2006-2011）
- 北京大兴（2008-2011）
- 江西千烟洲（2005）
- 河北馆陶（2007-2011）
- 西藏那曲（2009-2011）
- 青海祁连（2008-）
- 河北怀来（2011-）
- 甘肃张掖（2012-）
- 内蒙古额济纳旗（2013-）



四、应用—架设方案

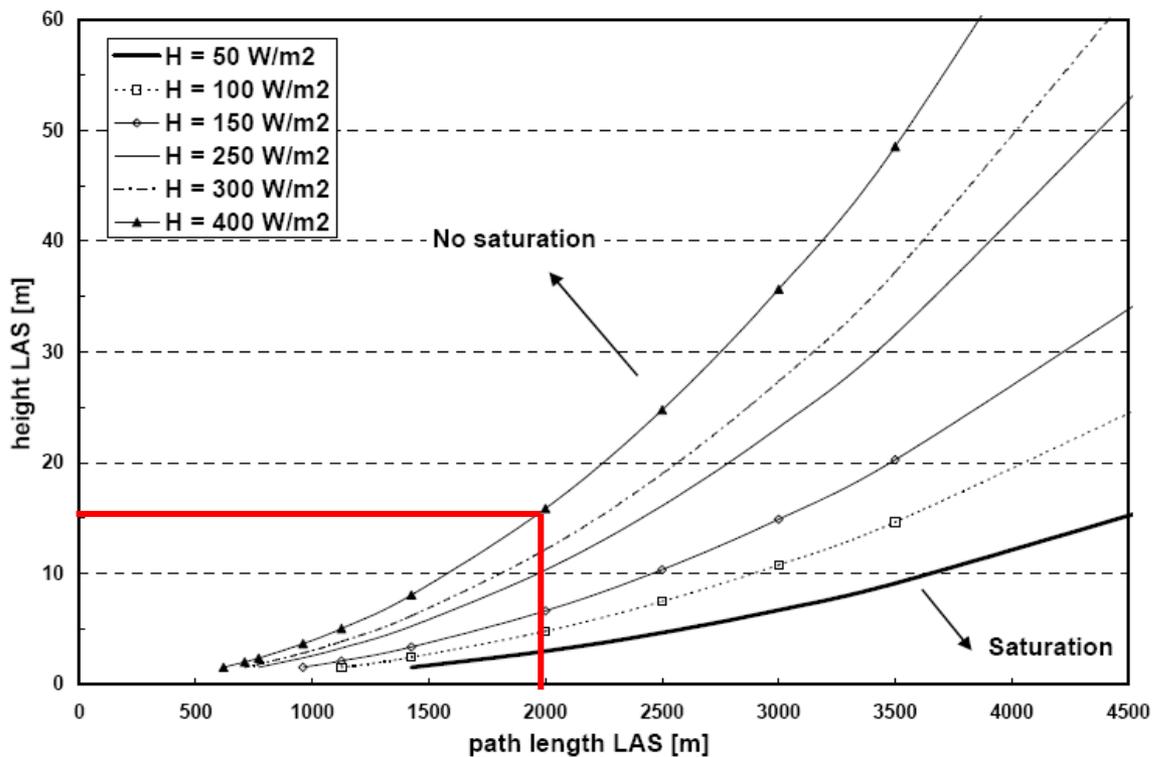


单站多尺度观测方法

四、应用—架设方案

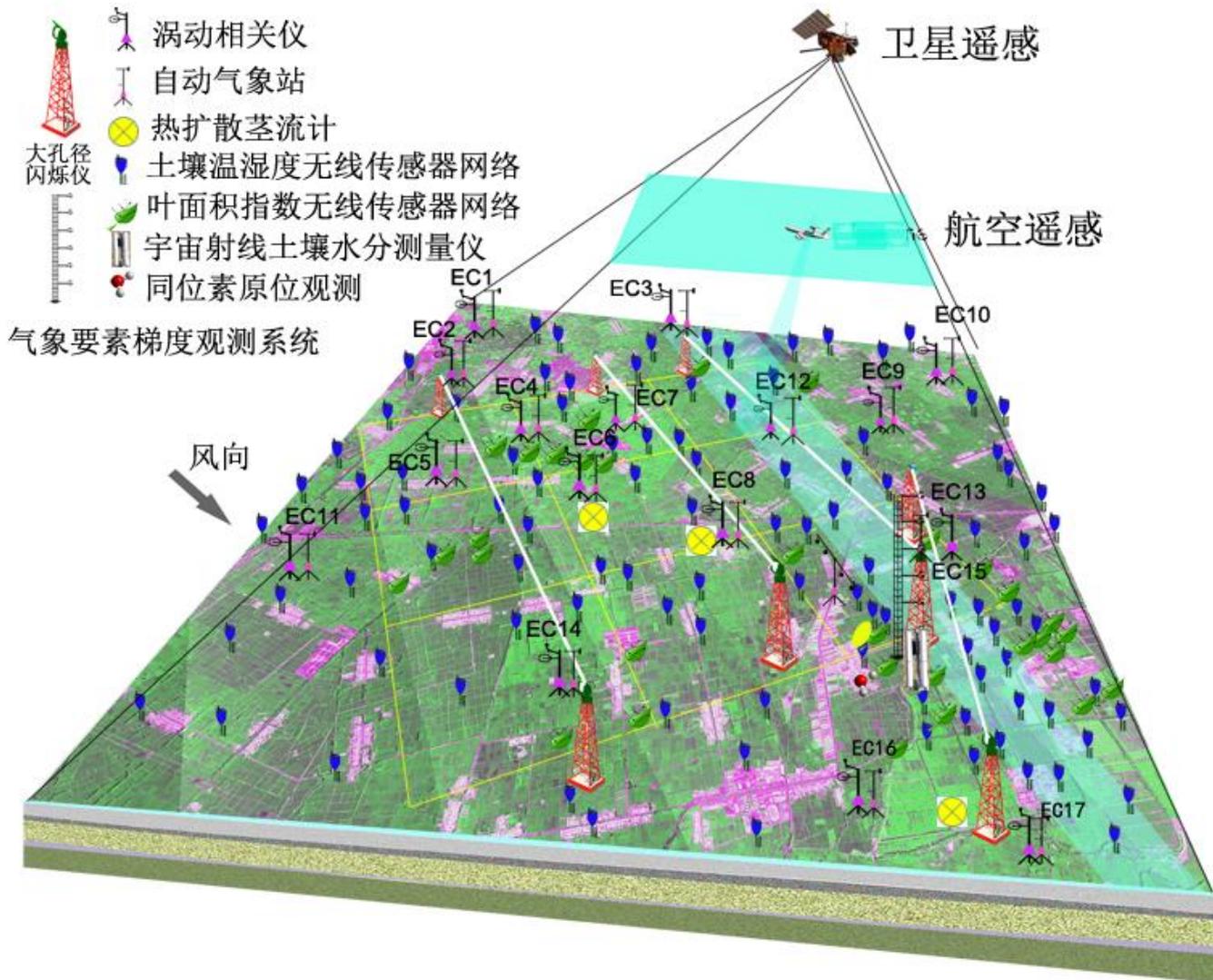
矩阵式观测





LAS架设高度的确定与观测地点干湿程度以及路径长度有关，为避免LAS的饱和效应，一般路径长度越长，架设高度需越高。

四、应用—黑河流域为例



星机地立体观测

四、应用—比对试验

地点：张掖市城西巴吉滩

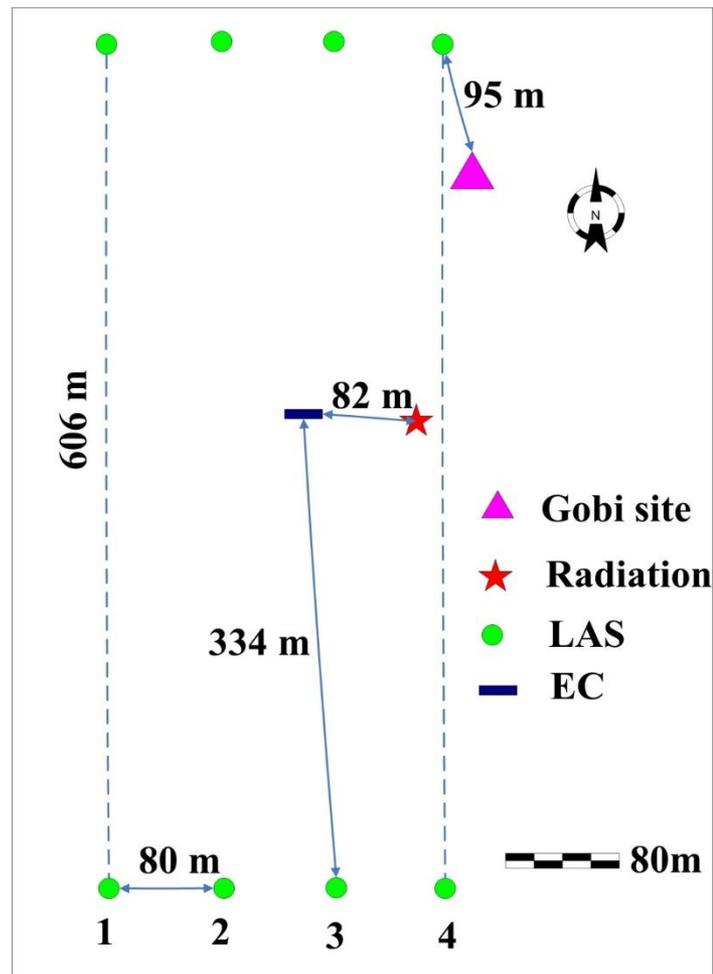
下垫面：戈壁

时间：2012.5.14-5.24

仪器：18台辐射仪，20台涡动相关仪(EC)，7台大孔径闪烁仪(LAS)



仪器比对场





辐射仪

CSAT3&Li7500: 10台; CSAT3&Li7500A: 6台; CSAT3&EC150: 1台
 Gill&Li7500: 1台; Gill&Li7500A: 2台

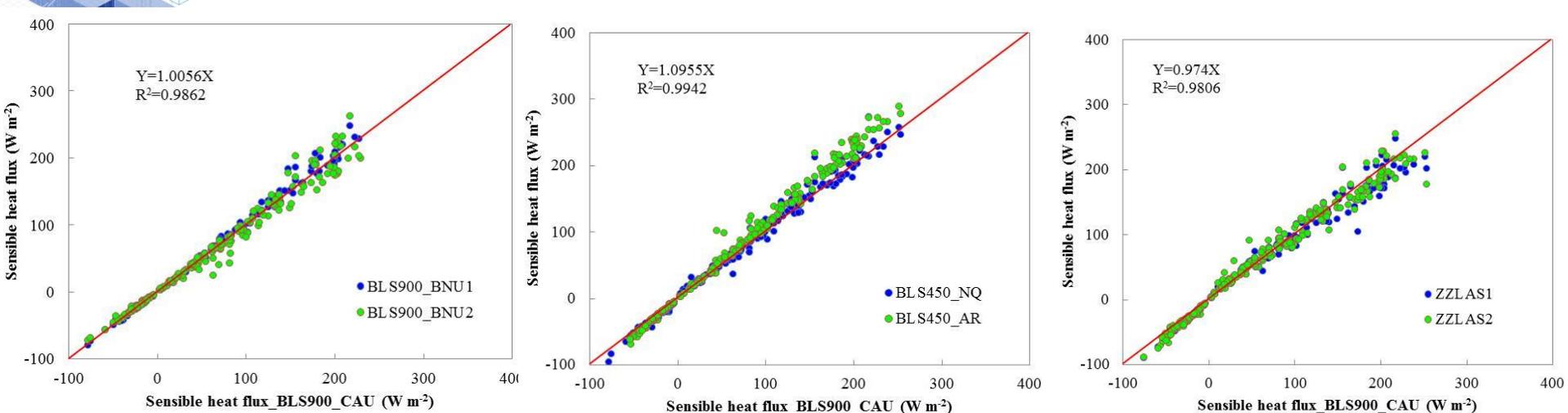


EC

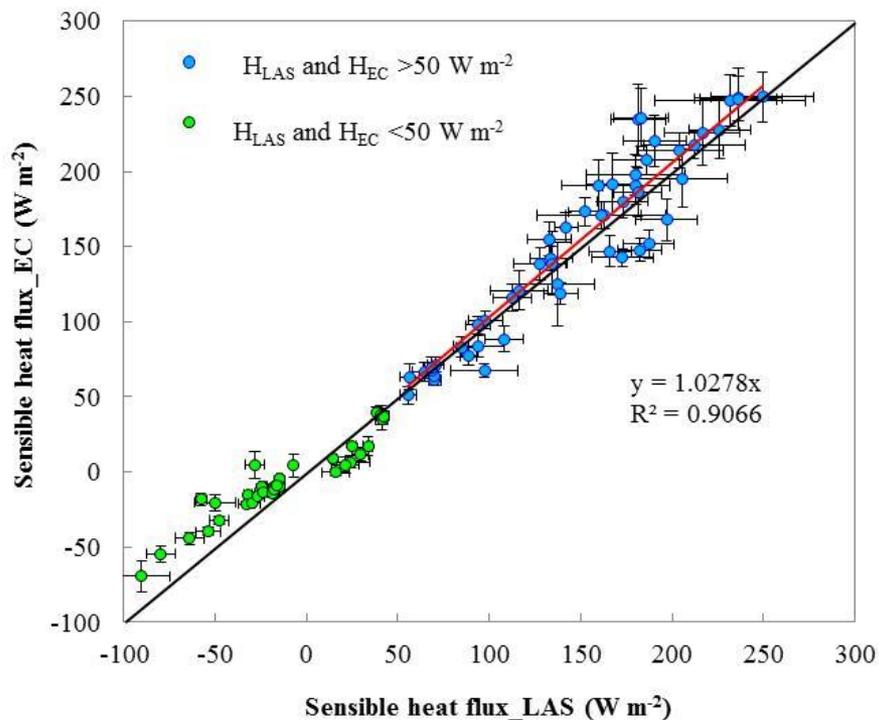


LAS

辐射仪、涡动相关仪和大孔径闪烁仪的比对试验



不同型号大孔径闪烁仪的一致性比较

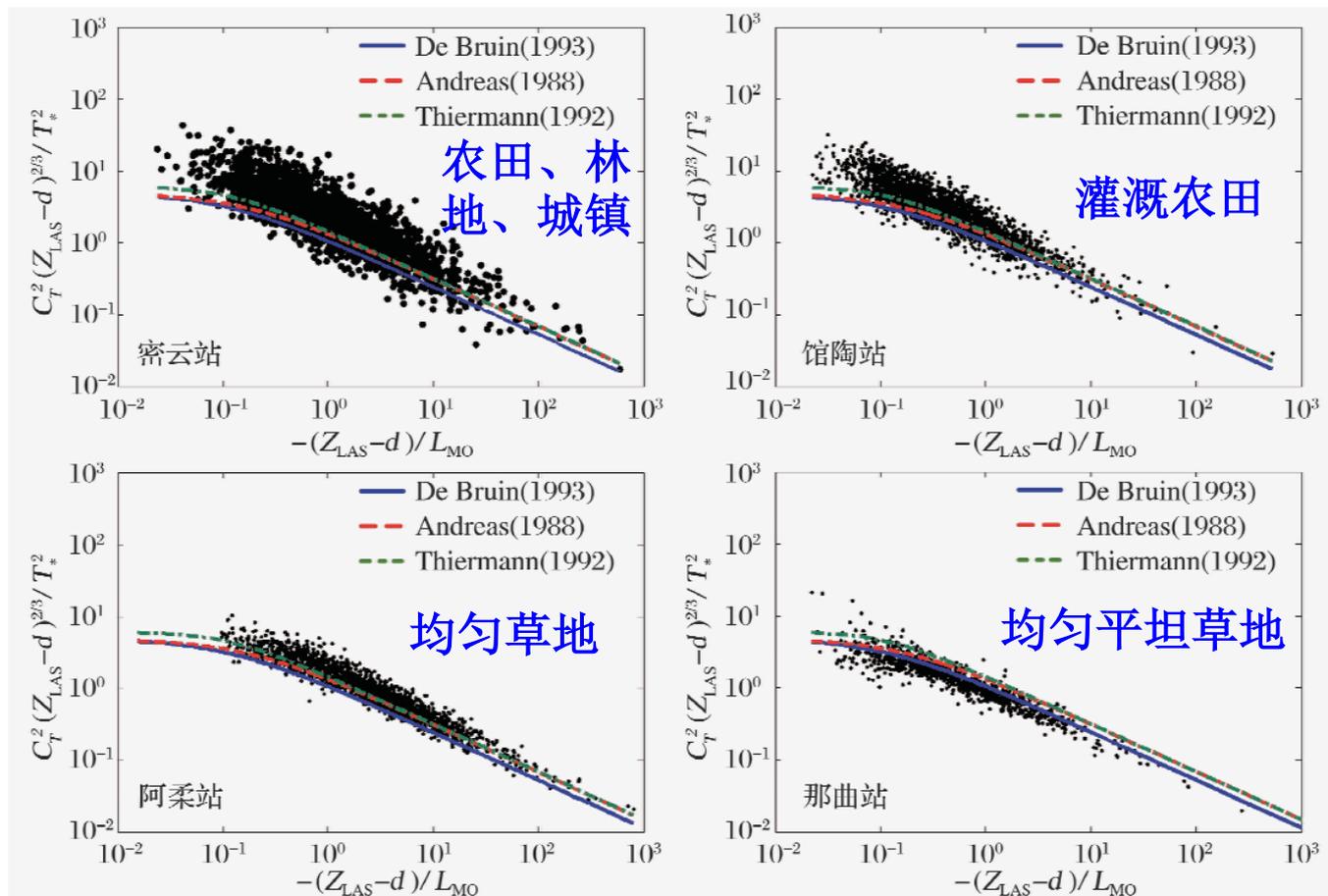


不同型号大孔径闪烁仪有较好的一致性，同时与涡动相关仪测量值有很好的
一致性。

20台涡动相关仪测量感热通量的平均值与7台大孔径闪烁仪测量感热通量平均值的比较(风向角: 315-0, 0-45)

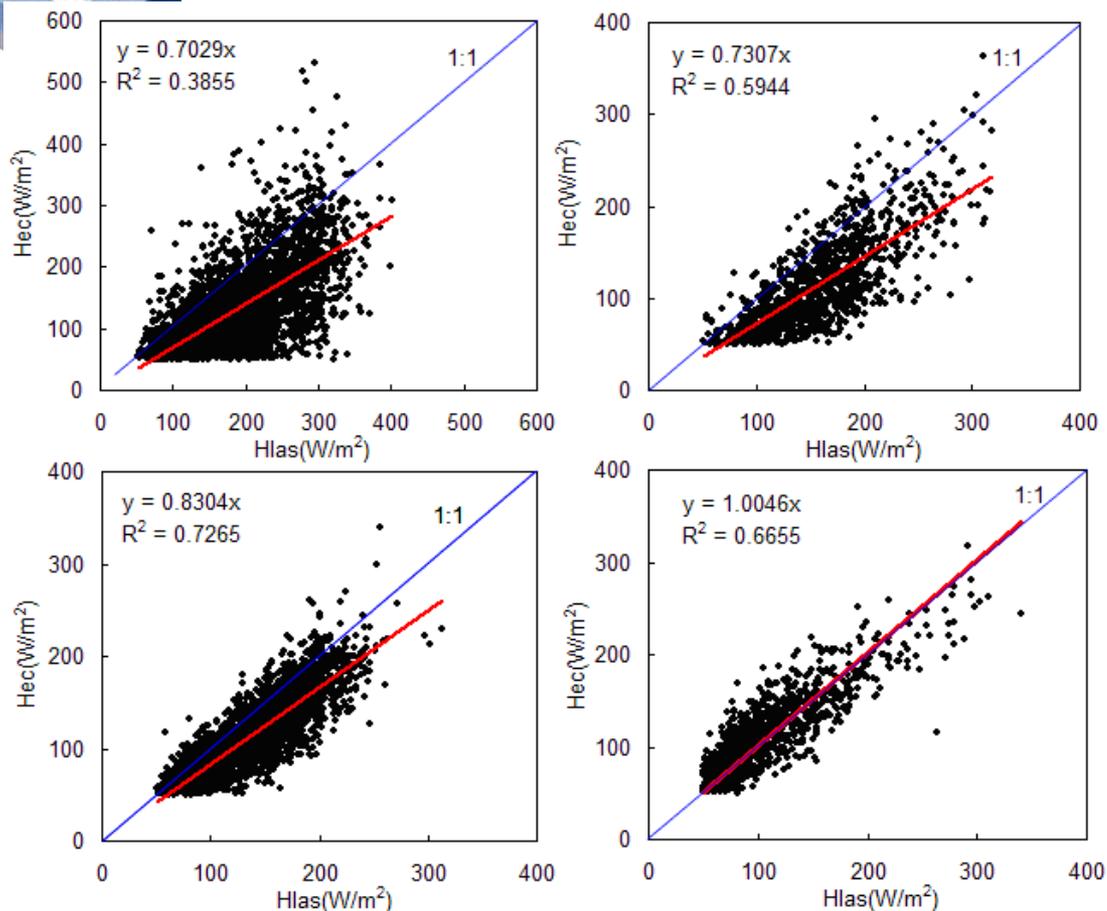
四、应用—观测数据分析—数据质量

相似理论的符合程度检验：气象结构参数 (C_T^2 , C_q^2) 与温度和湿度尺度 (T_* , q_*) 结合，与理论关系式的比较。



刘绍民等, 2010, 地球科学进展;
Liu et al., 2011, HESS; Liu et al., 2013, JoH

四、应用—观测数据分析—数据质量



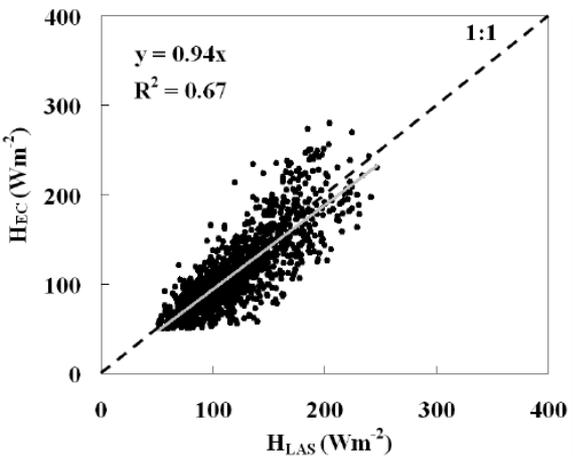
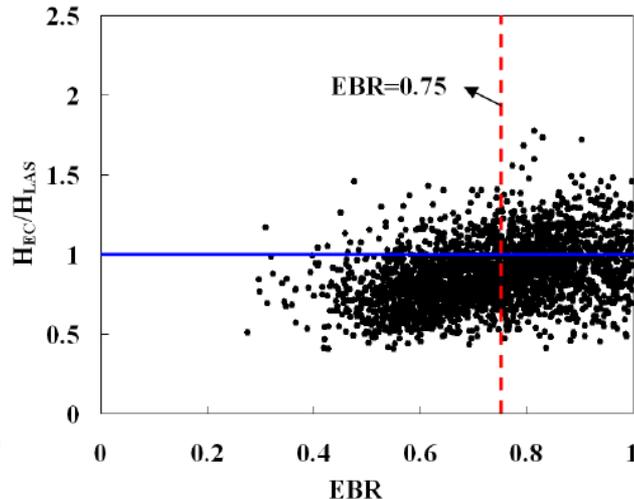
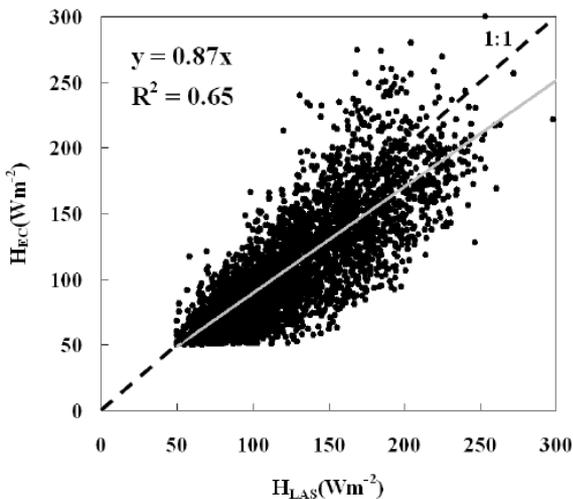
□ 两者的差异从低到高分别是：那曲、阿柔、馆陶、密云站

□ 其原因与涡动相关仪的能量平衡闭合程度、两者源区的差异、下垫面非均匀性等有关

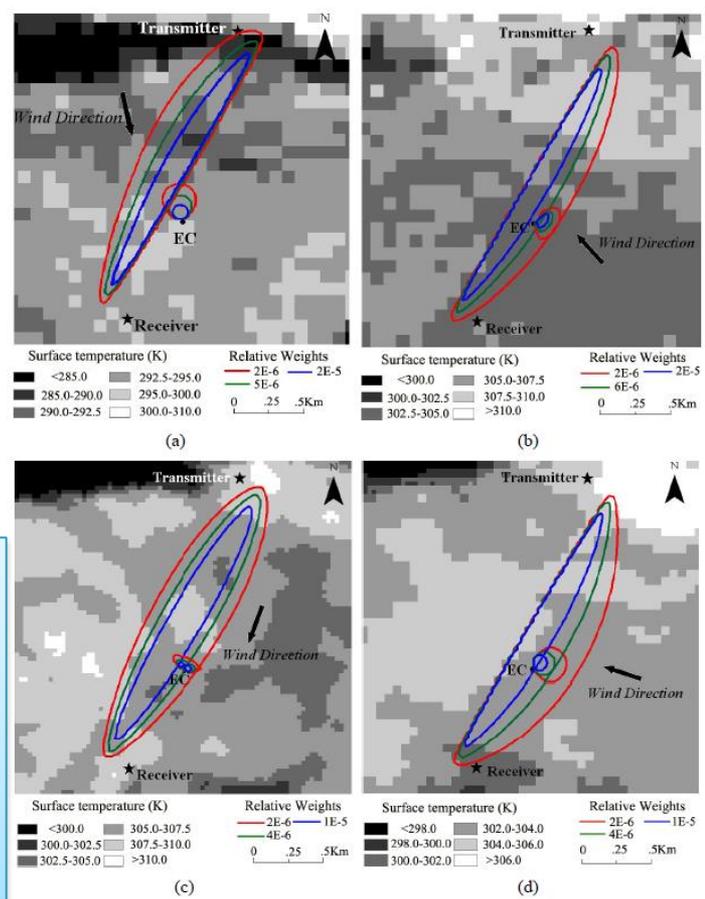
2009年密云、馆陶、阿柔（1-6月，10-12月）与那曲（8-10月）站大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测感热通量的比较（ $H > 50 \text{ W/m}^2$ ）

刘绍民等，2010，地球科学进展

四、应用——观测数据分析—与涡动相关仪差异的比较



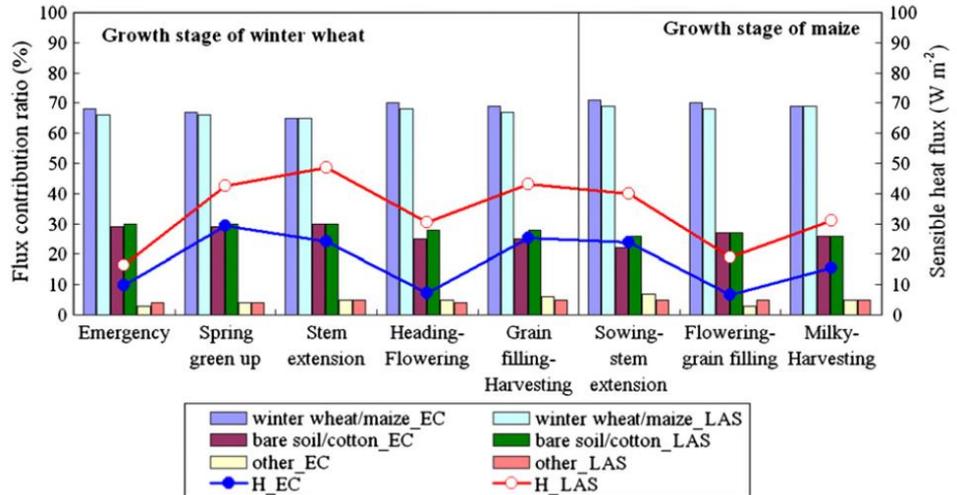
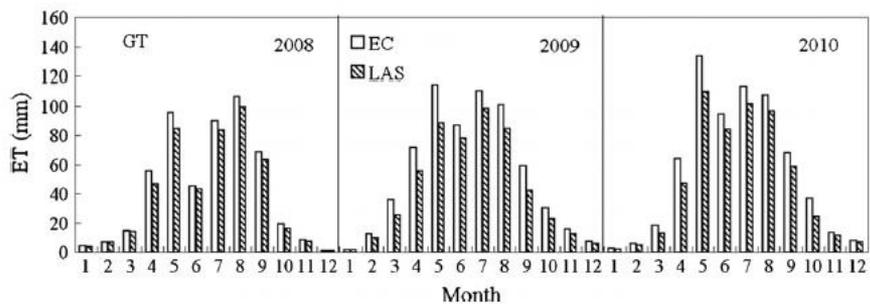
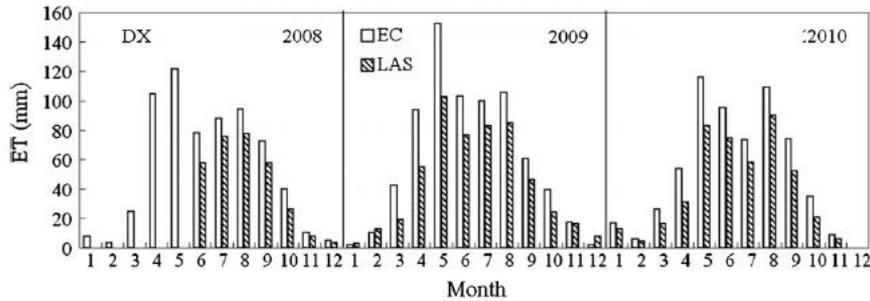
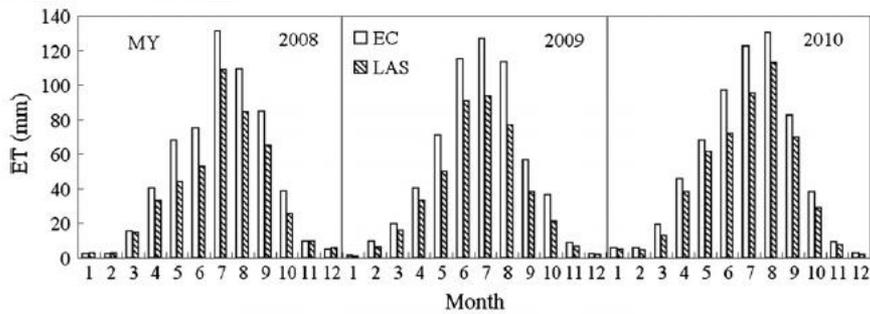
EC与LAS的差异与EC的能量闭合度、两者源区的重叠程度以及下垫面的异质性有关。



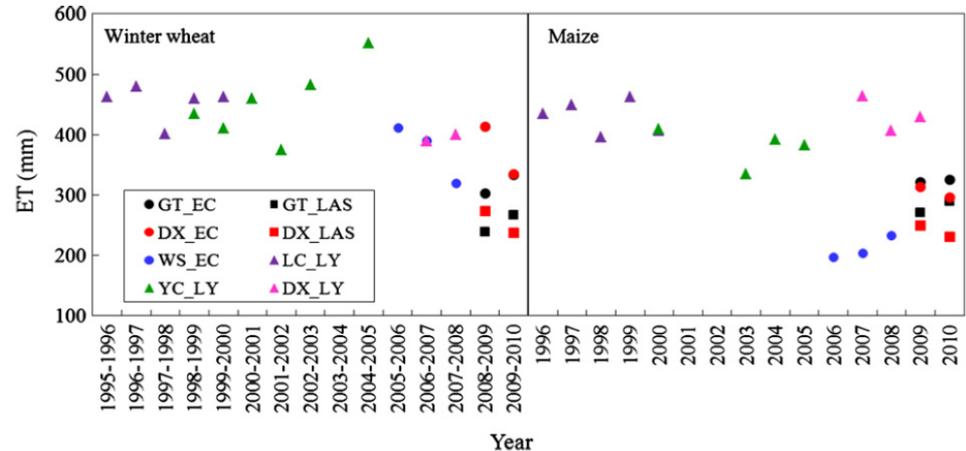
EC与LAS的比较
(阿柔超级站)

EC与LAS的源区

四、应用—观测数据分析—季节、年际变化



EC与LAS测量ET一个生长季变化及差异分析



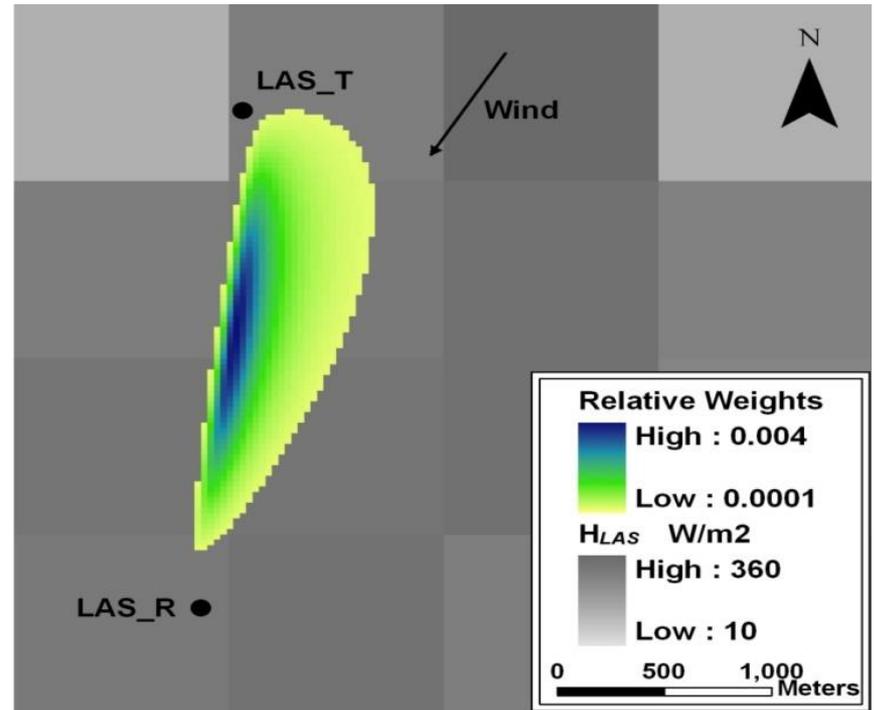
EC与LAS测量的ET比较
(海河流域3个站点)

EC与LAS测量ET的年际变化

四、应用—真实性检验-遥感产品的验证

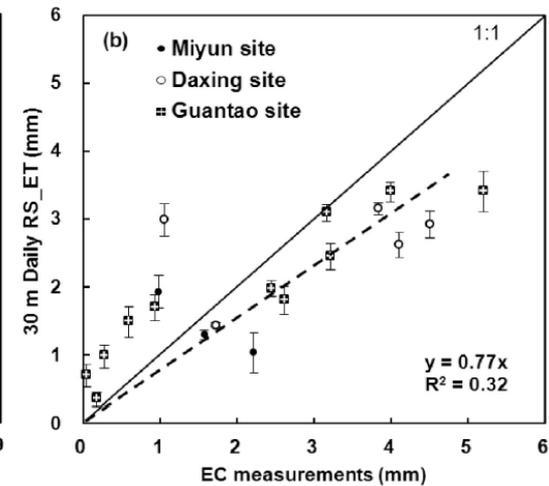
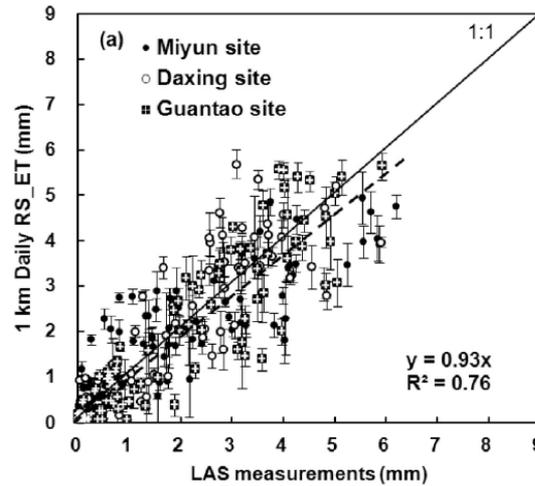
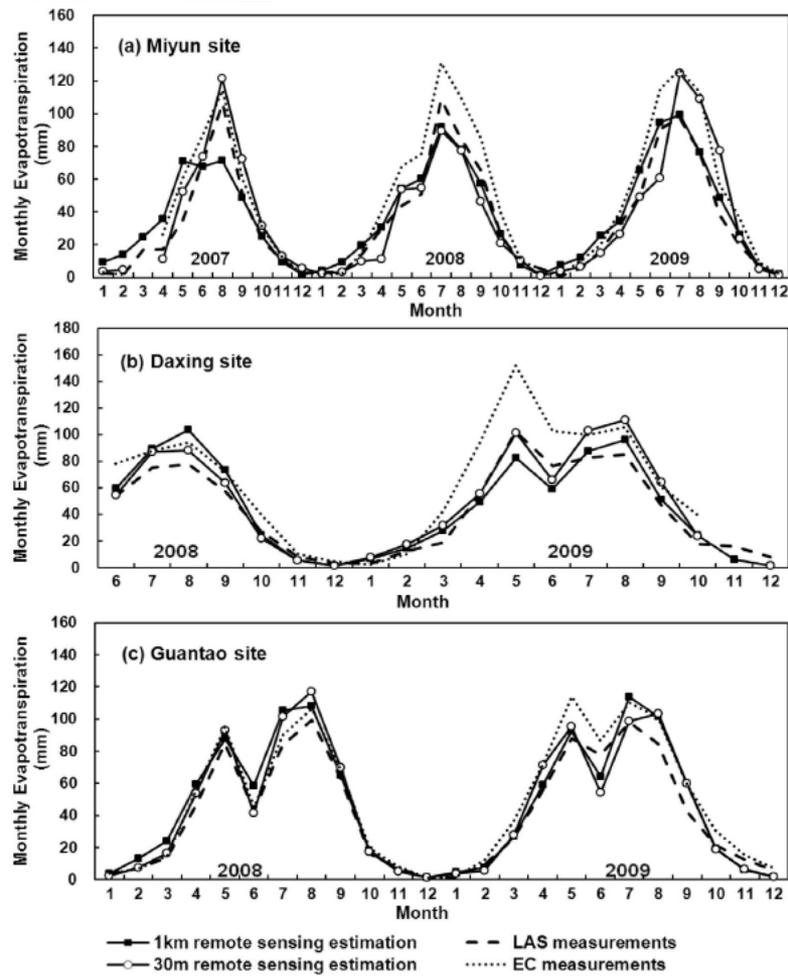
利用密云 (2007.01-2009.12), 大兴 (2008.06-2009.12), 馆陶 (2008.01-2009.12)的大孔径闪烁仪观测数据, 采用该验证流程, 对结合MODIS数据估算的地表蒸散发量进行的验证:

$$Y_{\text{weighted}} = \sum_{i=1}^n y_i \times f_i$$



观测瞬时感热通量的源区与卫星过境时刻
遥感估算结果的叠加图
(2009年6月2日, 馆陶站)

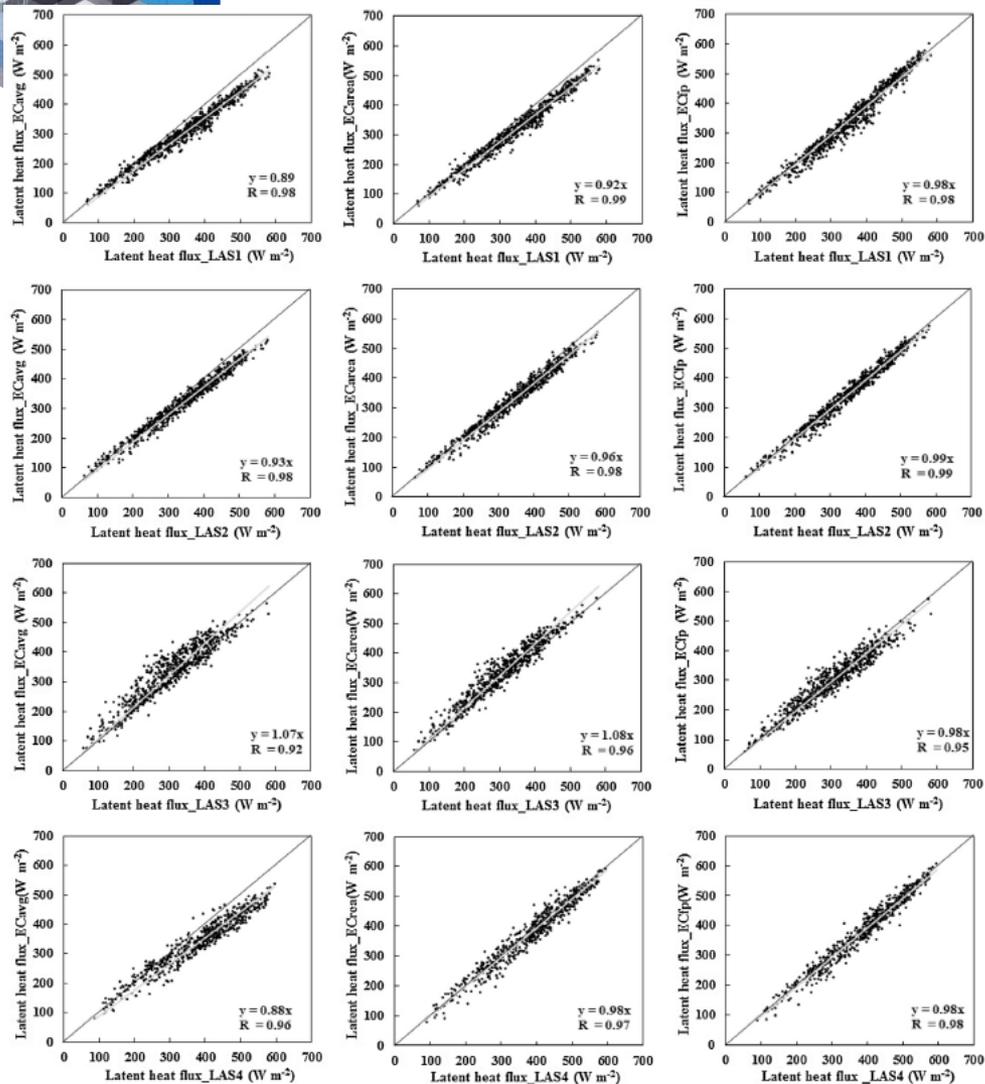
四、应用—真实性检验—遥感产品的验证



EC观测尺度为百米级，
 LAS观测尺度为公里级，
 可用于检验不同尺度的遥
 感产品反演值。

EC与LAS测量的ET与不同尺度遥感产品比较（海河流域3个站点）

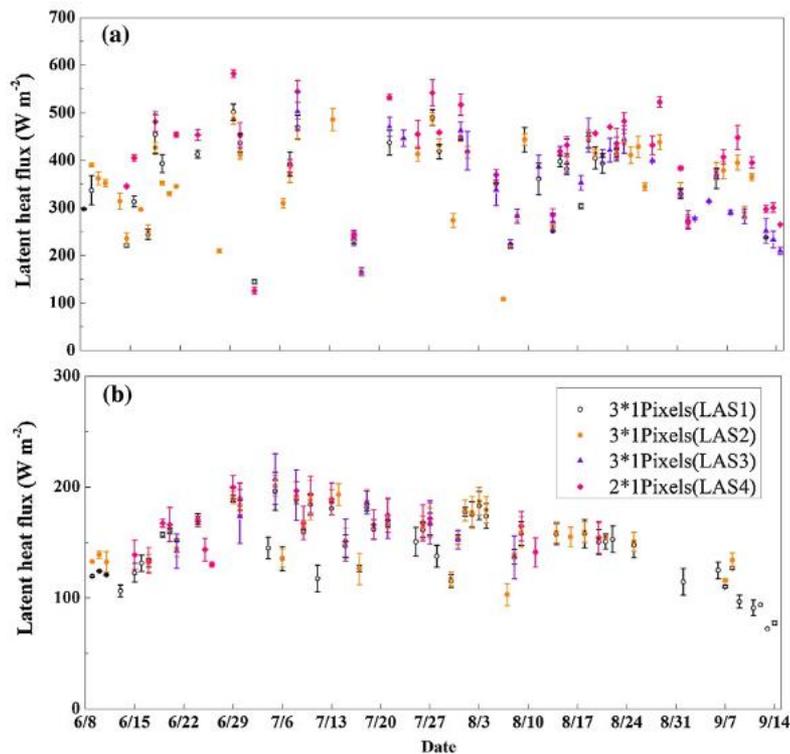
四、应用—升尺度方法的验证



算数平均

面积平均

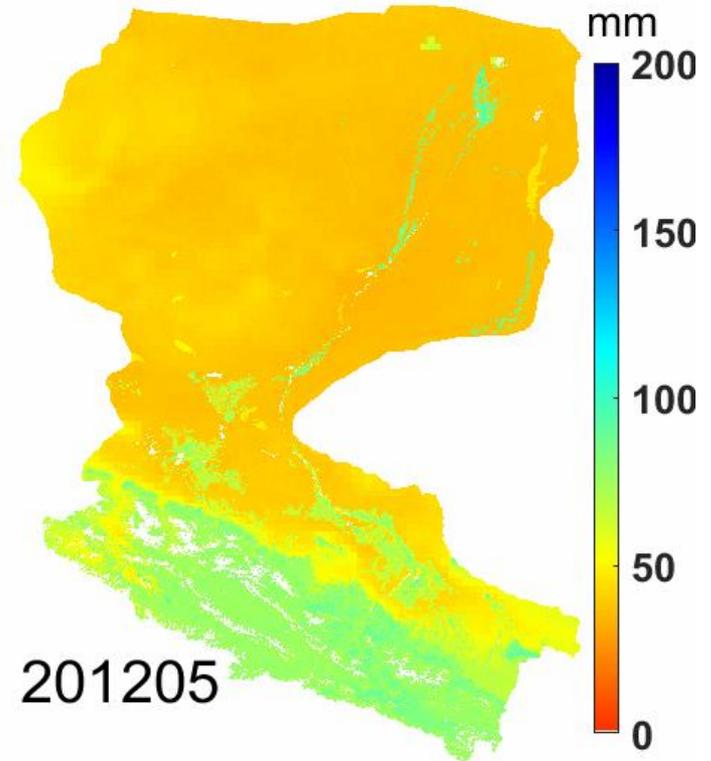
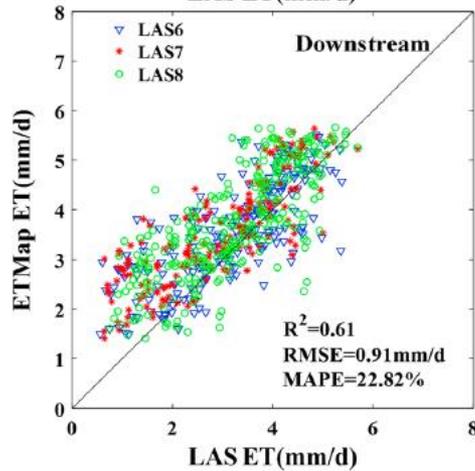
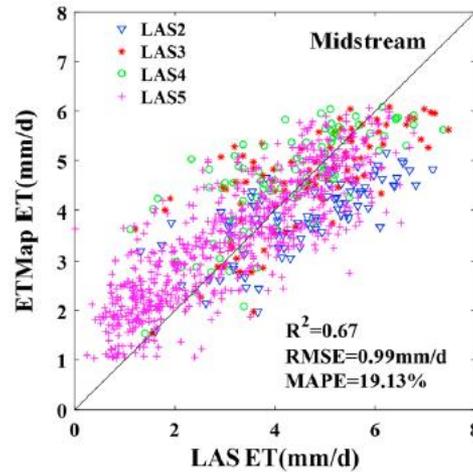
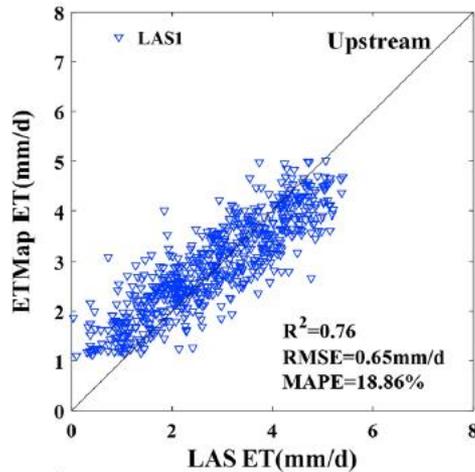
加权平均



像元尺度真值
(黑河中游通量观测矩阵)

Liu et al., AFM, 2016

四、应用—升尺度方法的验证

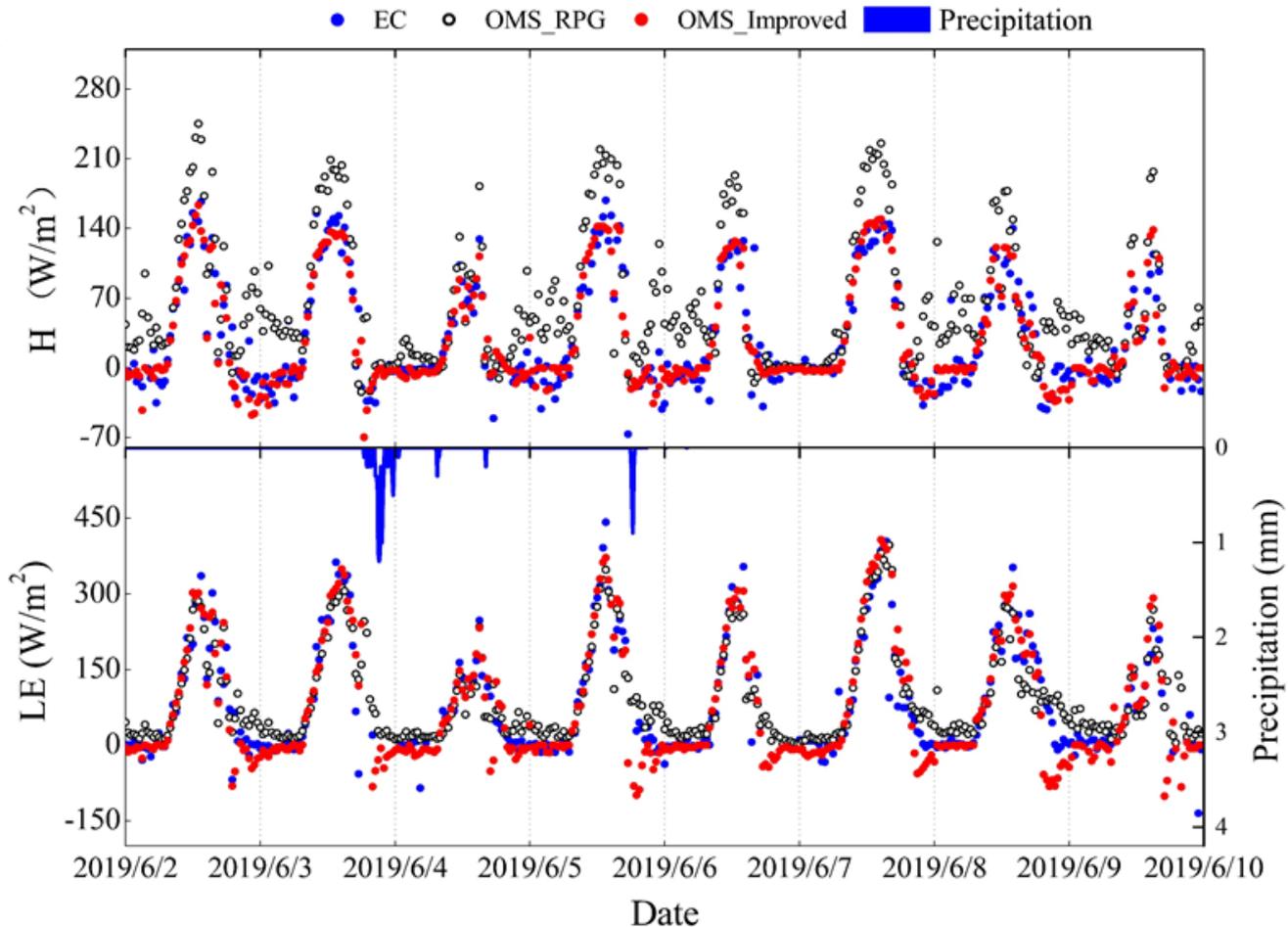


2012-2016年生长季（5-9月）黑河流域
逐日1km地表蒸散发(ETMap)

LAS测量ET验证多站点结合遥感
升尺度结果ETMap

Xu et al., JGR, 2018

四、应用—双波段闪烁仪在黑河流域的应用



阿柔站双波段闪烁仪与涡动相关仪测量值的比较

涡动相关仪和闪烁仪的比较

涡动相关仪

- ✓ 需要捕获各种大小不同的涡旋对湍流通量的贡献。因而不仅要求足够快的采样频率（10--20 Hz），而且要求足够长的取平均时间（30--60 min）。要求较好的大气平稳性（至少在取平均时间30--60 min内）和湍流发展较好的大气环境。
- ✓ 要求所在的下垫面不是太复杂，最好是平坦均匀的，以减小平流输送的影响（或垂直风速的平均值 $w \approx 0$ ）。
- ✓ EC观测的代表性尺度较小。作为一种固定的‘单点’观测，与常用的大气模式网格尺度有较大的差别。

闪烁仪

- ✓ 工作在大气湍流谱的惯性区，或惯性区到耗散区的一个尺度较小且范围很窄的涡旋尺度上。在闪烁仪较长的光程尺度上，存在大量的如此对光闪烁敏感的涡旋，故而在很短的取平均时间内（<1 min）即可得到统计上稳定的通量结果。众所周知，当前许多遥感ET（Evapotranspiration）模式都是基于瞬间拍摄的遥感影像资料运行的；闪烁仪的短时特征对遥感模式的结果验证尤其重要。
- ✓ 闪烁仪敏感涡旋尺度较小的特点，带来一个主要优势，即其可工作于较复杂的下垫面，包括地形起伏甚至城市地区
- ✓ 由电磁波的发射端到接收端数百米至10 km尺度上的面积（加权）平均通量

➤ 所处理的黑河流域地表过程综合观测网和海河流域观测数据均已在国家青藏高原科学数据中心发布共享 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。

刘绍民, 屈永华, 车涛, 徐自为, 任志国

doi: 10.11888/Ecolo.tpdc.271601 72 12 申请获取 2021-07-07

流域水文气象观测网

+ 2012

+ 2013

+ 2014

+ 2015

+ 2016

+ 2017

+ 2018

+ 2019

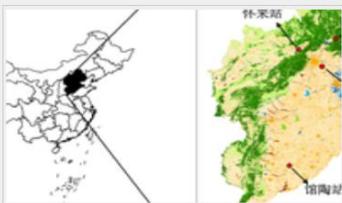
+ 2020

祁连山综合观测网: 黑河流域地表过程综合观测网 (四道桥超级站物候相机观测数据集-2020)



该数据集包含了2020年5月31日以前, 和2020年9月2日以后的黑河流域地表过程综合观测网下游四道桥超级站的物候相机观测数据。2020年5月31日至2020年9月2日, 由于物候相机供电故障, 造成时间缺失, 另外, 在9月2日重新安装相机时, 由于相机经过移动重新安装, 造成视场内的目标物与5月31日以前有所变化, 可能会造成前后数据的不一致性。站点位于内蒙古额济纳旗达来呼布镇四道桥, 下垫面是柽柳。观测点的经纬度是101.1374E, 42.0012N, 海拔873m。仪器由北京师范大学自主研发并进行处理...

海河流域多尺度地表通量与气象要素观测数据集



简介: 为定量揭示海河流域主要下垫面地表水热通量交换特征, 同时也为遥感估算地表蒸散量的验证提供像元尺度“地面真值”, 自2006年起陆续在海河流域北部山区的林地(北京密云)与农田(河北怀来)、中部城郊农田(北京大兴)、南部平原农田(河北涿州)建立了多尺度地表通量与气象要素的观测网, 涵盖了海河流域主要的下垫面类型。

排序 请输入搜索内容



海河流域多尺度地表通量与气象要素观测数据集: 怀来站蒸渗仪 (2018)

该数据集包含了2018年1月1日至2018年12月31日的蒸渗仪观测数据。站点位于河北省怀来县东花园镇, 下垫面为玉米。观测点的经纬度是115.7880E, 40.3491N, 海拔480m。蒸渗仪的采集频率是1Hz, 发布数据为10min输出数据。蒸渗仪为圆柱形结构, 表面积为1m², 土柱埋深1.5m, 蒸散量观测精度为0.01mm。蒸渗仪安装有两台, 一...

2021-01-07 1389 16 申请获取



海河流域多尺度地表通量与气象要素观测数据集: 怀来站蒸渗仪 (2019)

该数据集包含了2019年1月1日至2019年12月31日的蒸渗仪观测数据。站点位于河北省怀来县东花园镇, 下垫面为玉米。观测点的经纬度是115.7880E, 40.3491N, 海拔480m。蒸渗仪的采集频率是1Hz, 发布数据为10min输出数据。蒸渗仪为圆柱形结构, 表面积为1m², 土柱埋深1.5m, 蒸散量观测精度为0.01mm。蒸渗仪安装有两台, 一...

2021-01-07 1269 18 申请获取



海河流域多尺度地表通量与气象要素观测数据集: 怀来站-自动气象站 (40m塔) (2019)

该数据集包含了2019年1月1日至2019年12月31日的40m塔自动气象站观测数据。站点位于河北省怀来县东花园镇, 下垫面为水浇地玉米。观测点的经纬度是115.7923E, 40.3574N, 海拔480m。自动气象站安装在40m塔上, 采集频率为30s, 且10min输出一次。观测要素包括7层空气温度、相对湿度(3m、5m、10m、15m、20m...

2021-01-07 1161 20 申请获取



谢谢，请批评指正！