



耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心
Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment



中国通量观测研究网络
ChinaFLUX

通量数据预处理

王伟
南京信息工程大学

ChinaFLUX第十六次通量观测理论与技术培训
2021年8月18日

认识原始数据

□ 10 Hz原始数据

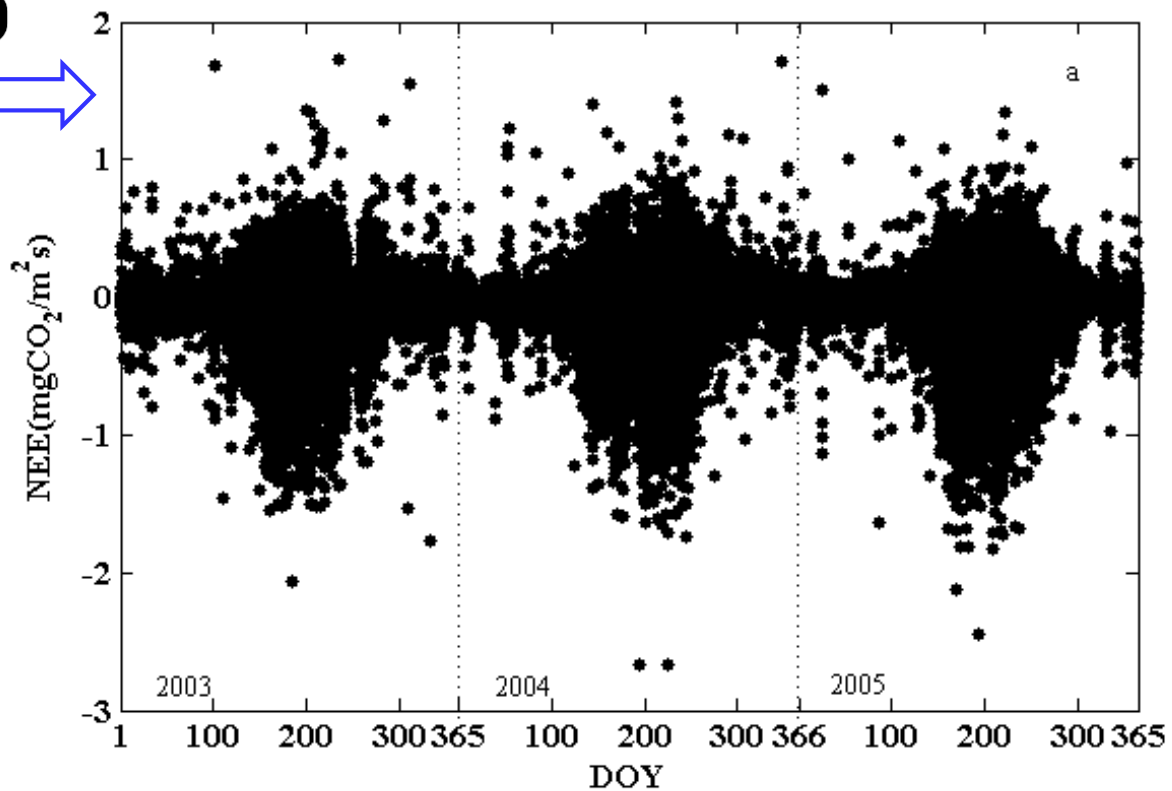
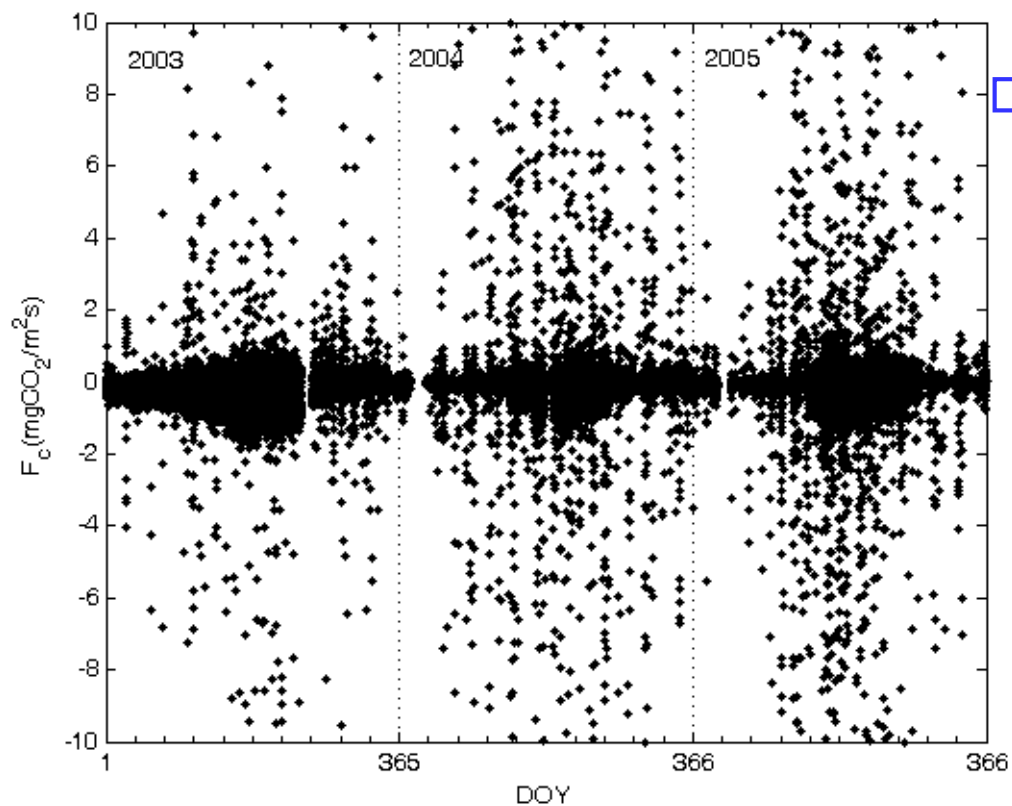
<u>Time</u>	<u>Ux</u>	<u>Uy</u>	<u>Uz</u>	CO2	H2O	Ts	P	diag_csat(1)
	m/s	m/s	m/s	mg/(m ³)	g/(m ³)	°C	kPa	unitless
"2007-08-01 00:00:00.1"	-2.27125	-2.47825	0.27325	658.43600	19.26270	29.3450	99.2013	0
"2007-08-01 00:00:00.2"	-1.00000	-1.00000	-1.00000	657.78900	19.26500	-1.0000	99.2368	61441
"2007-08-01 00:00:00.3"	-2.34100	-2.37700	0.27550	661.32000	19.24380	29.2860	99.2368	0
"2007-08-01 00:00:00.4"	-2.61450	-2.41975	0.14725	662.26600	19.25770	29.2791	99.2368	0
"2007-08-01 00:00:00.5"	-2.44650	-2.40625	0.07275	662.00700	19.24030	29.2721	99.2368	0
"2007-08-01 00:00:00.6"	-2.54300	-2.24825	0.01875	661.89600	19.25020	29.2635	99.2013	0
"2007-08-01 00:00:00.7"	-2.57250	-2.06250	-0.08200	662.22100	19.23170	29.2686	99.2368	0
"2007-08-01 00:00:00.8"	-2.60150	-1.92950	-0.09100	662.12700	19.25470	29.2721	99.2818	0
"2007-08-01 00:00:00.9"	-2.71975	-2.00350	-0.24975	662.34200	19.24390	29.2773	99.2274	0
"2007-08-01 00:00:01"	-2.52325	-1.96200	-0.24900	661.31400	19.26040	29.2600	99.2440	0

现实与理想

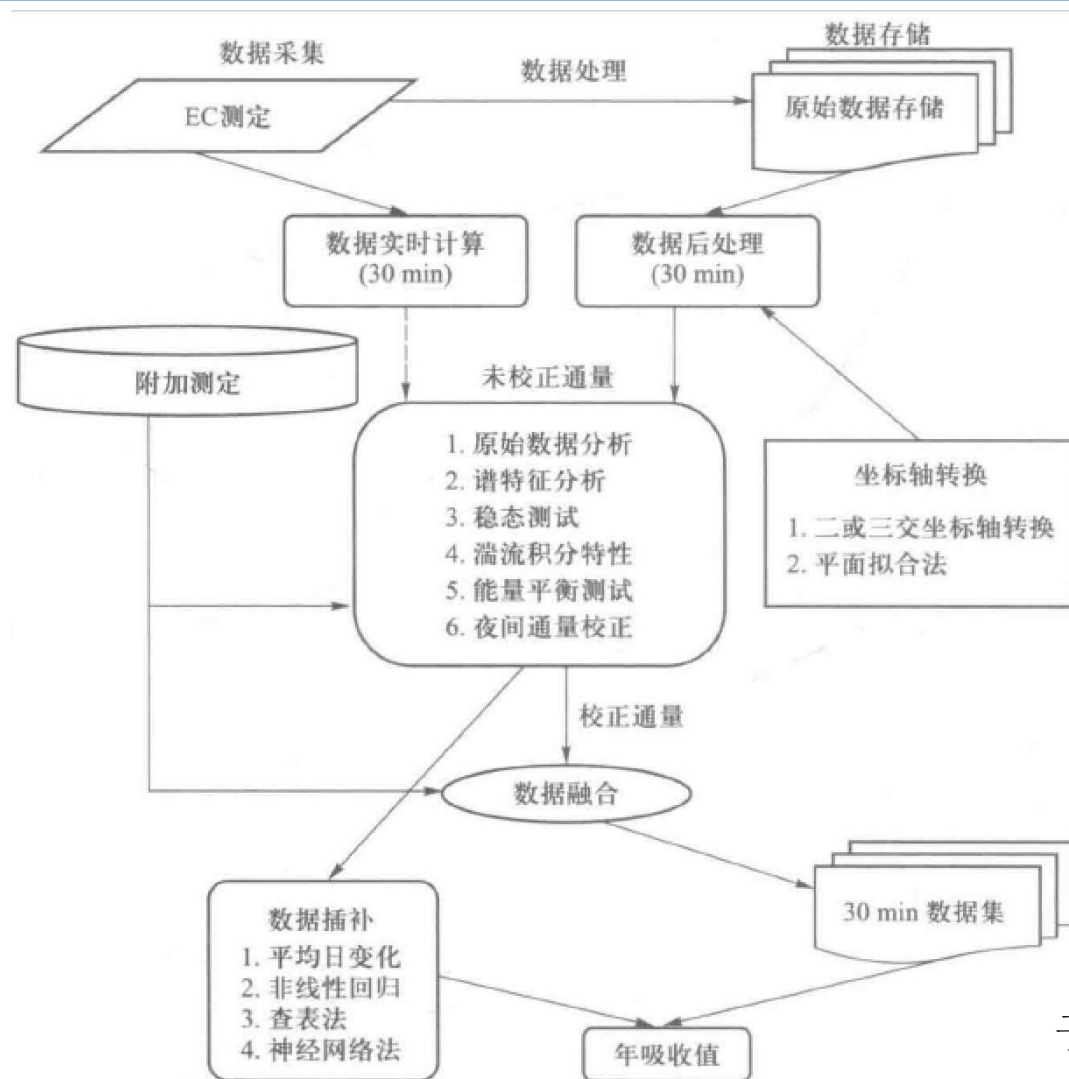
预处理前



预处理后



ChinaFlux 数据采集、处理和存储流程图



通量数据处理流程

原始数据预处理

- 单位转换
- 延迟校正
- 野点剔除
- 趋势去除
- 计算统计量

平均数据后处理

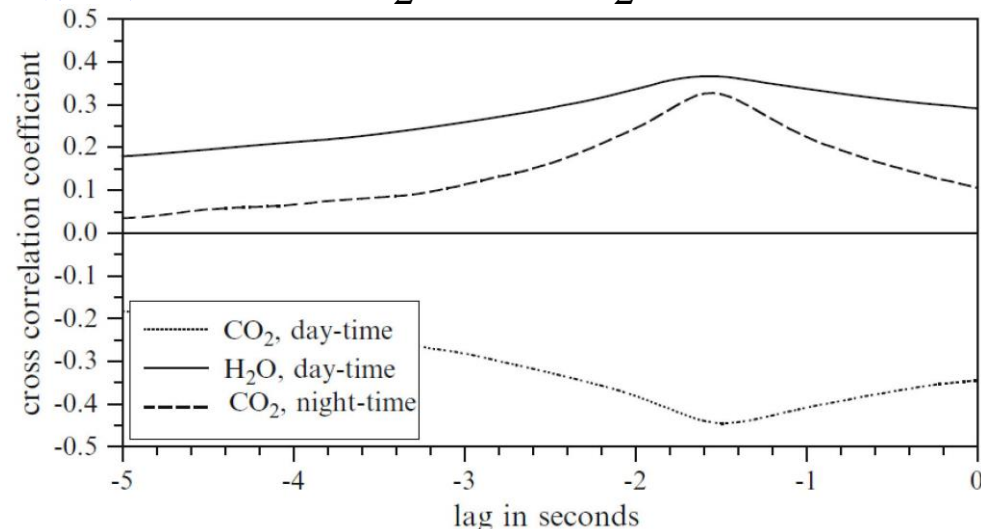
- 坐标旋转
- 频率响应校正
- 感热虚温订正
- 密度效应订正
-

质量控制/评价

- 质量控制
- 缺测插补
- 质量评价 (偏差度、峰度、湍流平稳性、方差相似性检验)
- 能量闭合
- 质量评级
- 贡献源区

延迟校正

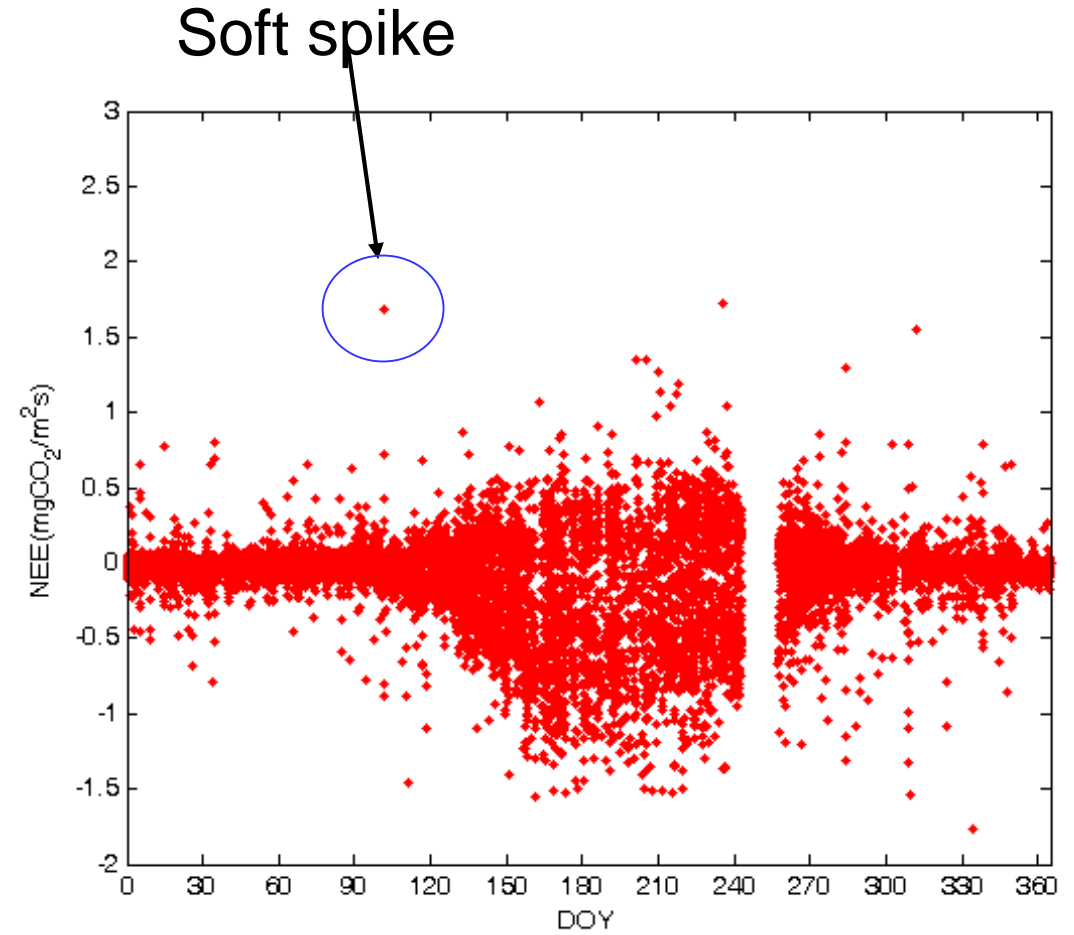
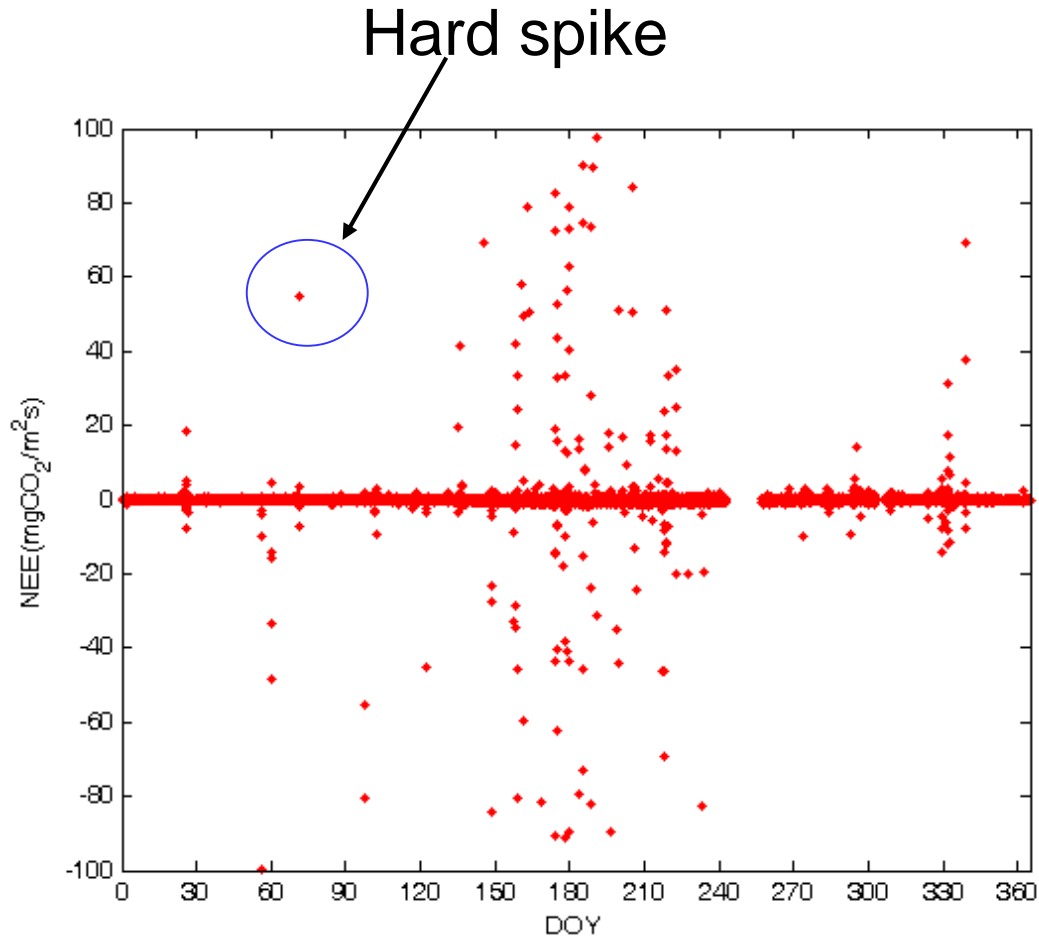
- IRGA信号通常滞后于三维超声，开路EC短于0.5 s；闭路EC长达几s，取决于管路长度和内径、气流速率、过滤器、管路加热和相对湿度等，H₂O较CO₂延迟更明显；
- 校正方法
 - ▣ 固定延迟时长（不推荐）：由管路长度和气流速率确定
 - ▣ **最大协方差法（推荐）**：由H₂O或CO₂与垂直风速的最大协方差出现的时间决定



野点剔除 (despiking)

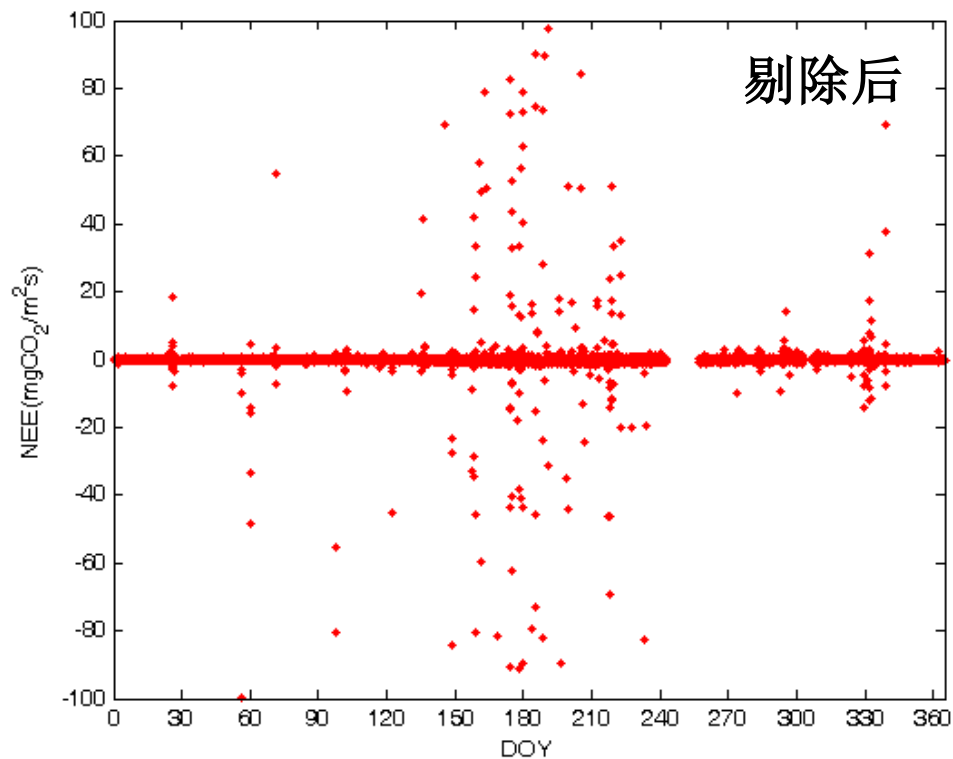
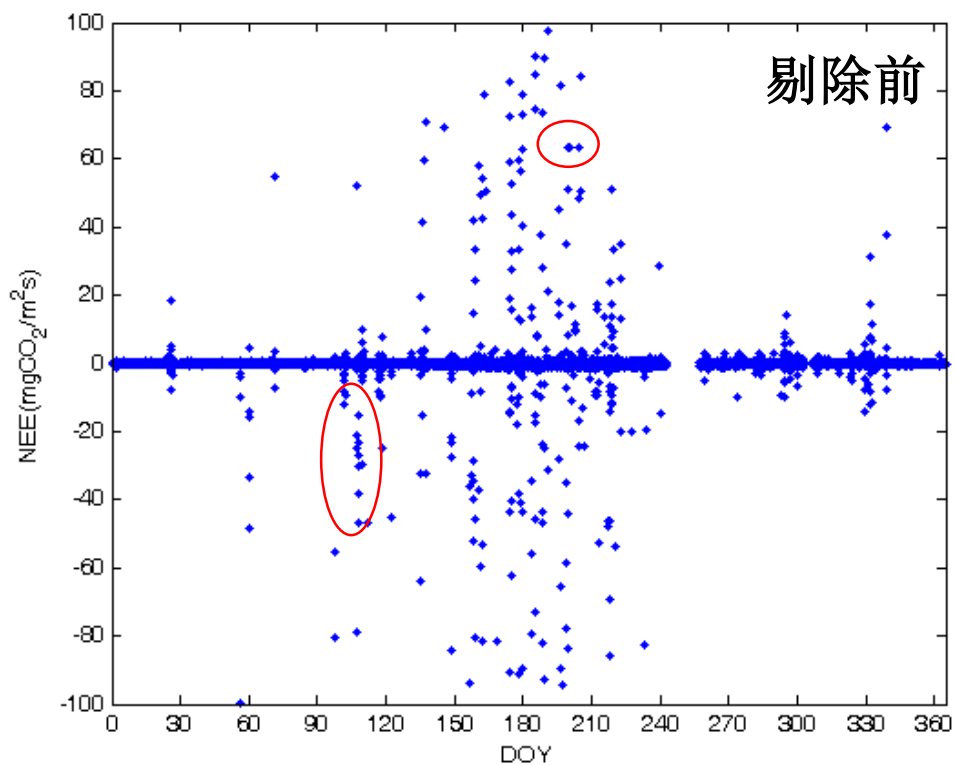
- 野点：由于环境因素或电子器件导致的不合理的高值或低值，会导致通量计算错误。
- 产生原因
 - ▣ 环境因子：如雨、雪、尘粒等对传感器声光程干扰，瞬间断电等，为 **Hard spikes**，依据三维超声或IRGA的诊断值 (**diag≠0**)剔除；
 - ▣ 电子电路（如A/D转换器）、长电缆、电源不稳定等，为 **Soft spikes**，根据 **Hoistrop (1993)** 或 **Vikers and Mahrt (1997)** 等统计方法剔除。
- 若某时间序列野点占比超过1%，剔除该时次 (**Foken, 2008**)。

Hard spike vs. Soft spike

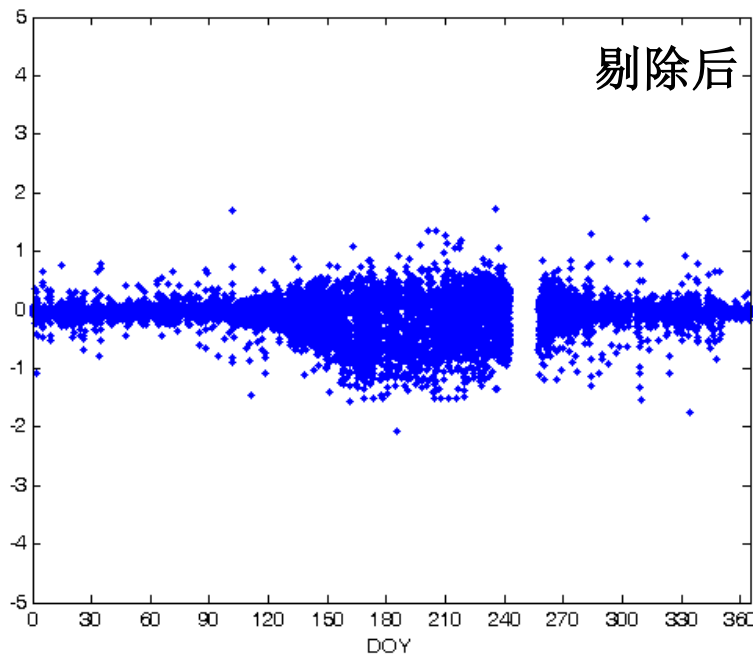
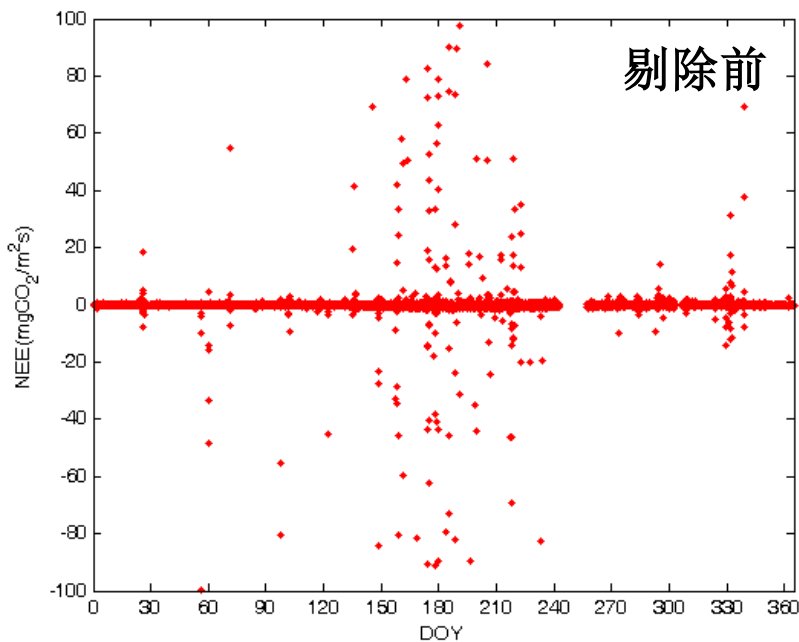


降水影响数据剔除（开路）

- 需要高频的降水观测资料作为依据
- 剔除降水时和降水前后某一时段（如30 min）的通量数据

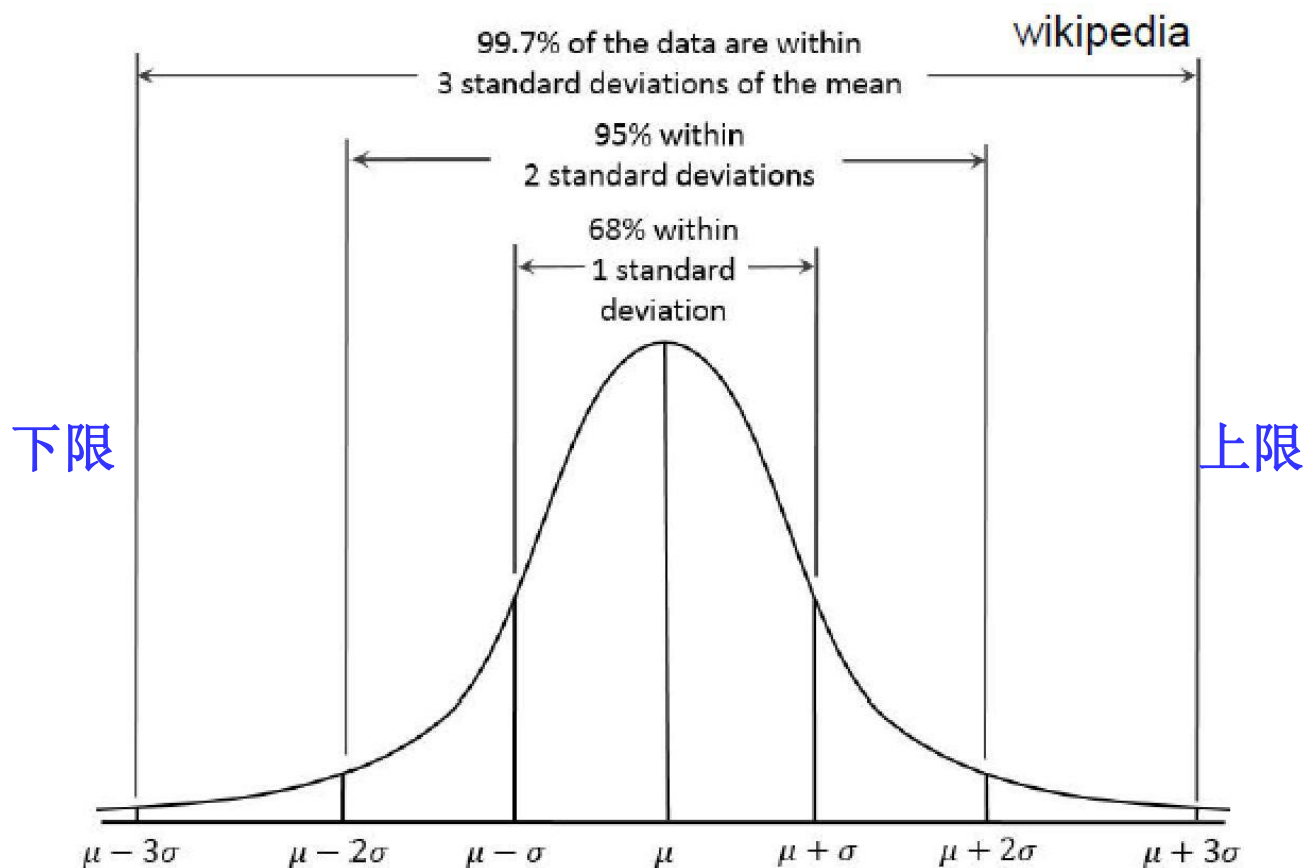
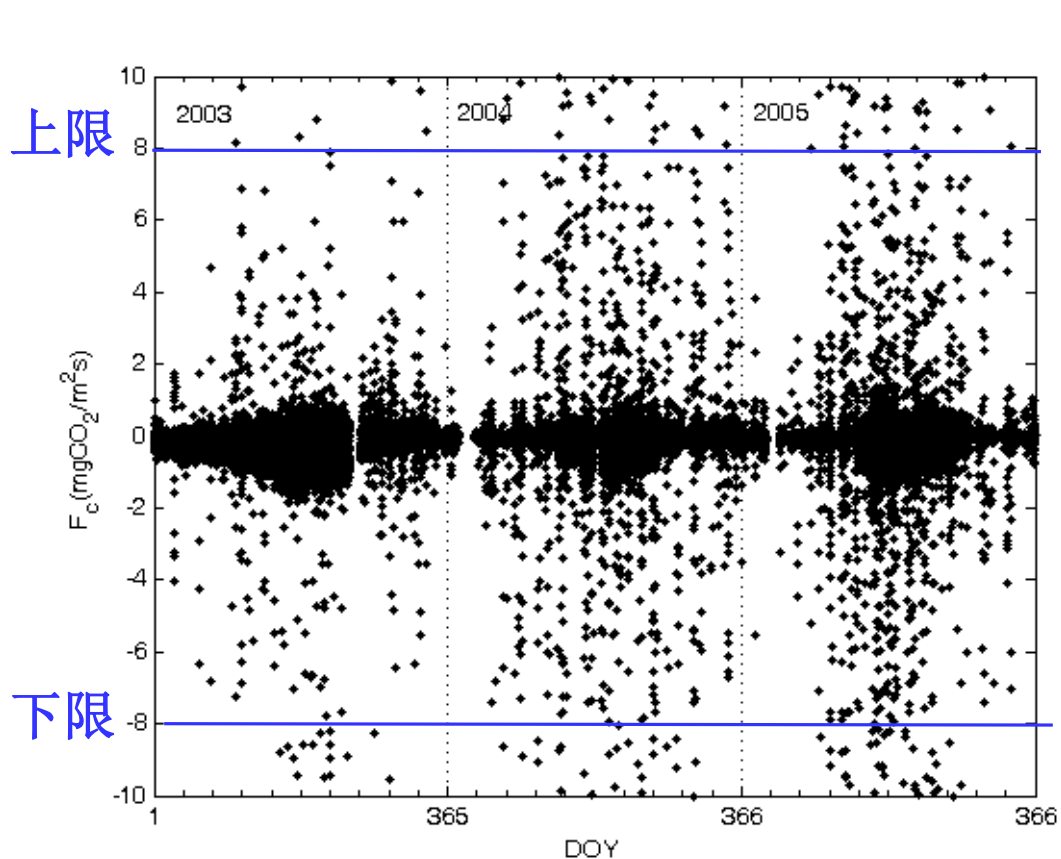


值域法剔除野点



- 剔除超出各物理量值域范围的数据；
- 值域范围不能过窄，应包括变量（尤其温度）的季节变化；
- 值域依据观测地点、仪器、变量而定；
- 变量的频率分布图、时间序列图有助于确定值域。

- 变量的时间序列图和频率分布图有助于确定值域。

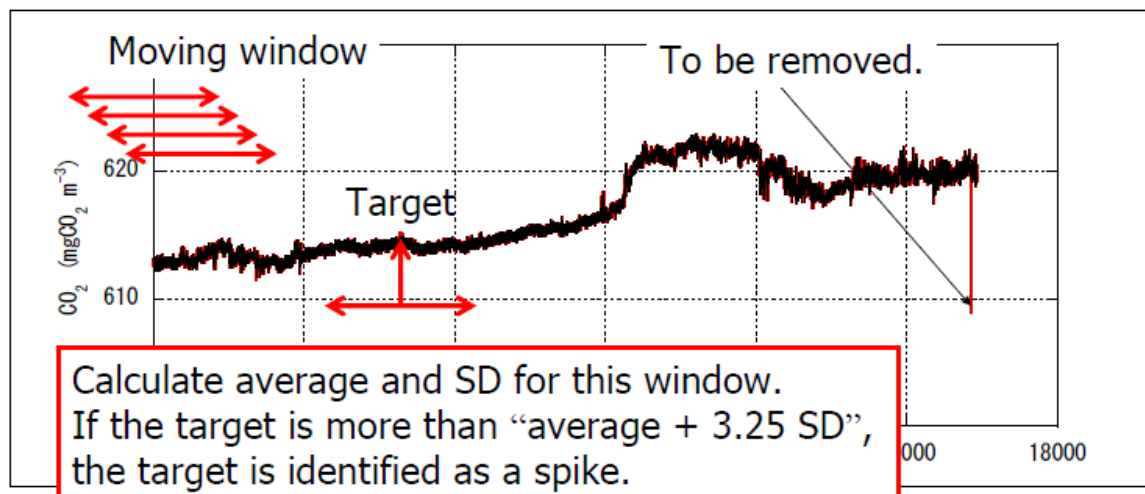


观测变量的值域

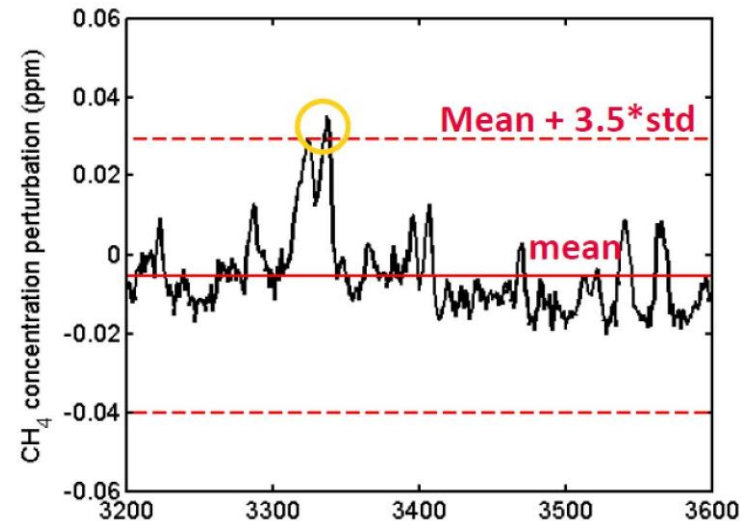
观测变量	值域
水平风速 u, v	$-30 \sim 30 \text{ m s}^{-1}$
垂直风速 w	$-5 \sim 5 \text{ m s}^{-1}$
超声温度 T_s	$-50 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 或 $ T_s - T_m < 20 \text{ K}$
CO ₂ 浓度	$100 \sim 1000 \text{ mg m}^{-3}$
H ₂ O浓度	$0 \sim 50 \text{ g m}^{-3}$
CSAT诊断值	0

滑动平均标准差法

- 野点：对一移动窗口（如5 min），计算平均值 \bar{x} 和标准差 σ ，若 $|x_i - \bar{x}| \geq n\sigma$ ；
- 移动窗口大小从数s至30 min；
- n 值不固定（3~8），取3.25、3.5较多，需依据实际观测数据而定；
- 要重复多次，且 n 需要逐次加大， $n_k = n_{\text{初始}} + 0.3k$



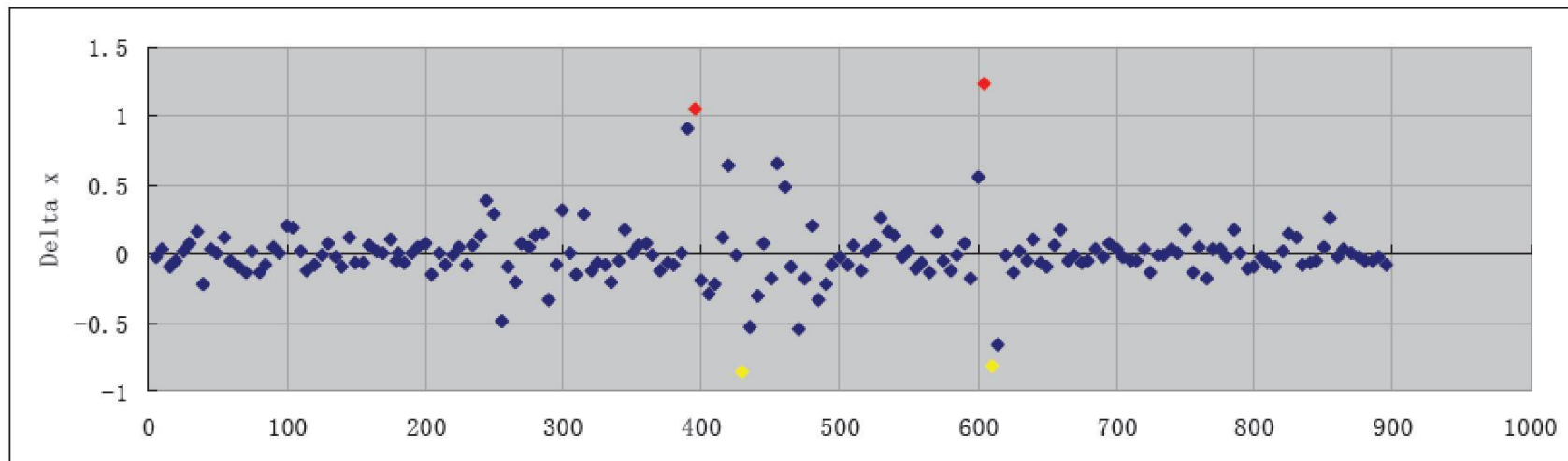
间野, 2004



Ivan Mammarella, 2015

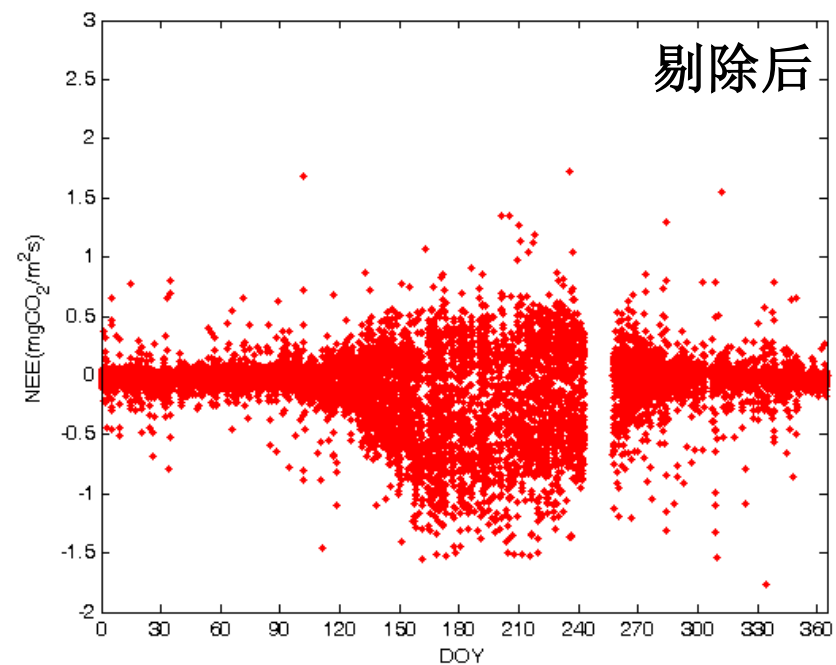
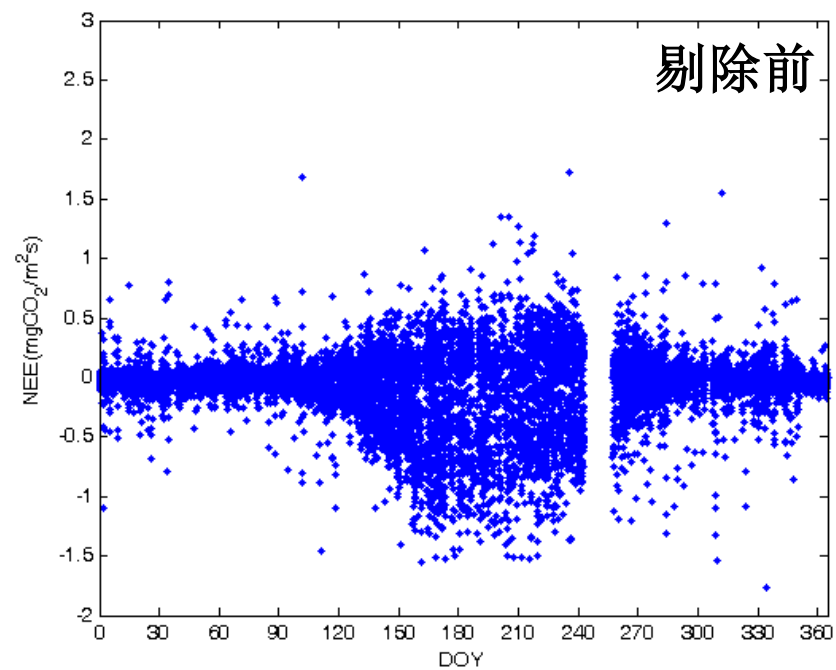
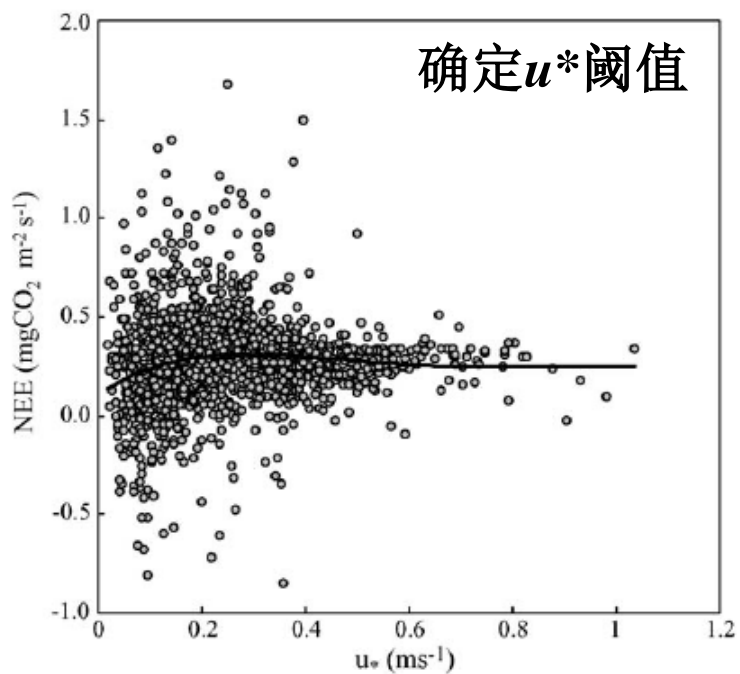
连续点标准差法

- 点对点自相关法：若 $|x_i - x_{t,i}| \geq n\sigma_{x \sim xt}$ ， n 取3.3~4.9， x_i 为野点；
- 相邻点差值法（EDIRE）：求相邻点之差 $\Delta x_i = |x_i - x_{i-1}|$ ，若 $|\Delta x_i - \overline{\Delta x}| \geq n\sigma_{\Delta x}$ ， x_i 为野点；
- 连续数点（如5）都符合以上判据，不做野点处理；
- 上述两种方法需谨慎使用，以免导致误删。



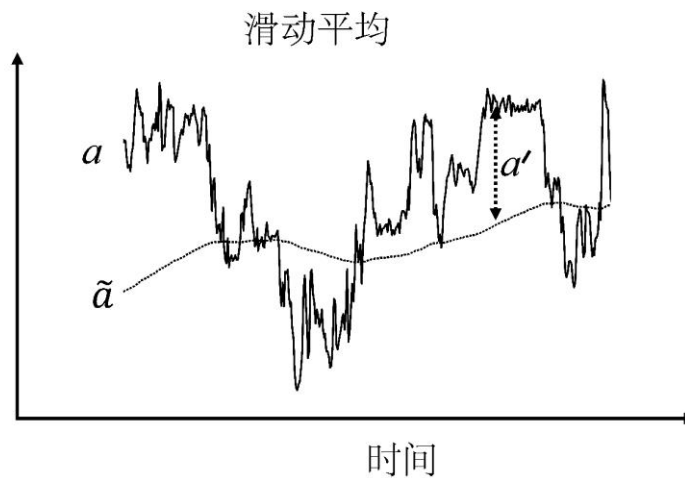
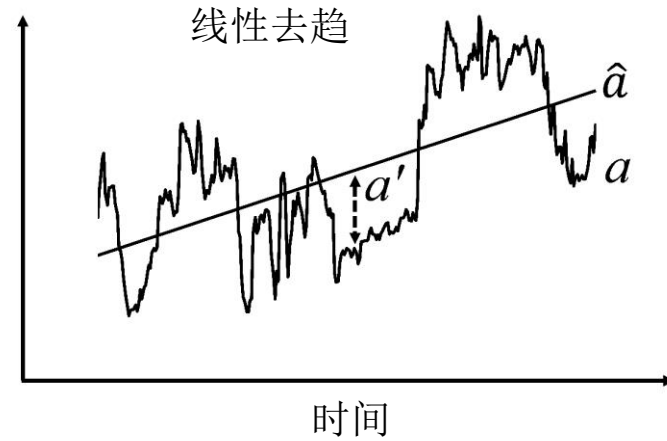
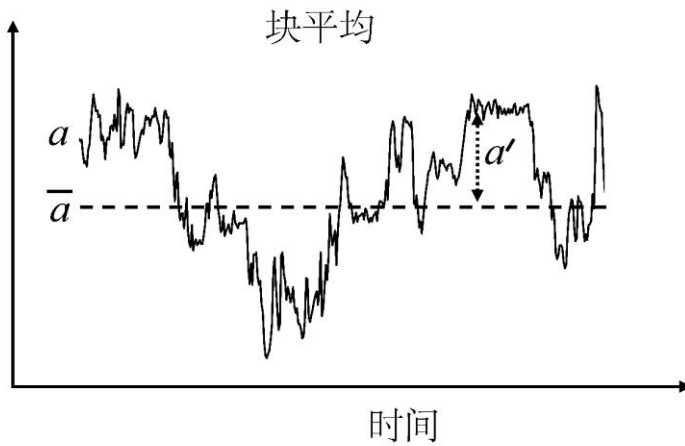
u^* 检测

- 夜晚，大气边界层稳定，湍流弱，与EC方法前提假设不符。



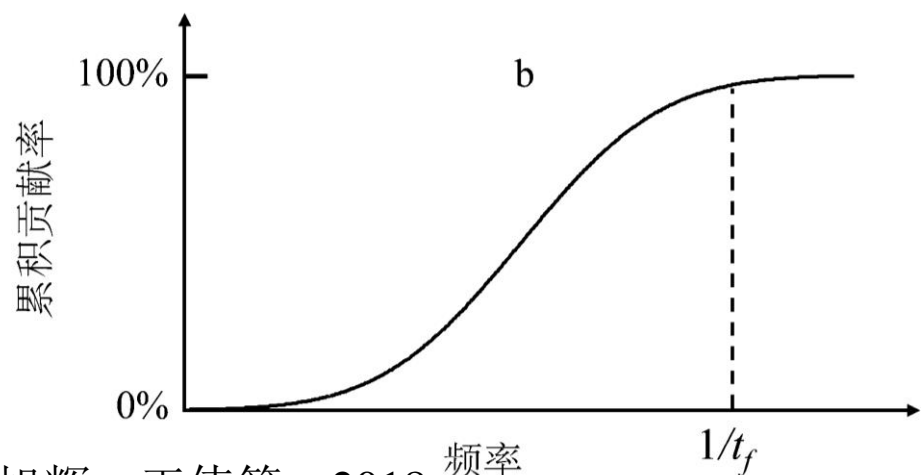
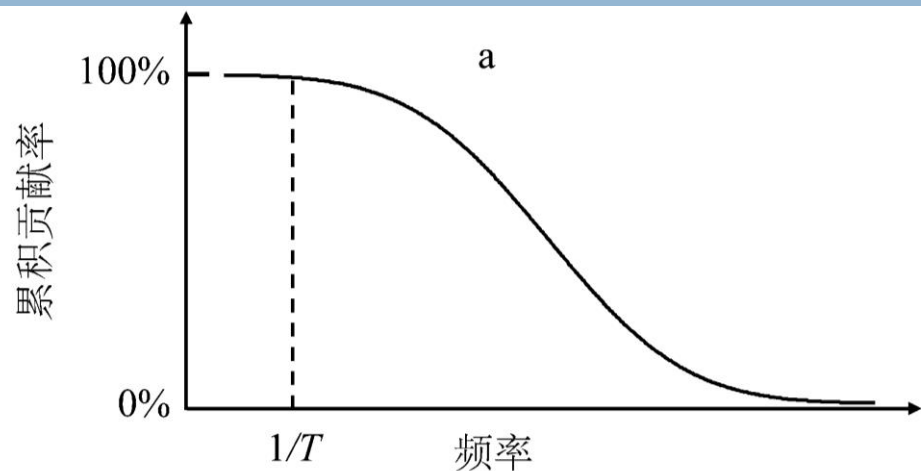
Guan et al., 2006

趋势去除



- 线性去趋和滑动平均不符合雷诺法则；
- 野外观测时，块平均（时间平均）是单点测量唯一可行的平均方法；
- 飞机上测湍流时需使用线性去趋。

如何确定平均时长和采样间隔？



- 平均时长通常为30 min，采样间隔为0.1 s；
- 可用 $\overline{w'T'}$ 的Ogive累计频率曲线确定最佳平均时长和采样间隔；
- 平均时长：从**高频**开始累积频率，寻找累积频率的渐近线位置，所对应频率的倒数是最佳平均时长 T ；
- 采样间隔：从**低频**开始累积频率，寻找累积频率的渐近线位置，使频率大于 $1/t_f$ 的小湍涡对协方差的贡献可忽略不计。

数据预处理后

- 画出时间序列，再次检查数据
- 时间序列是否完整？
 - ▣ 30 min平均平年17520个、闰年17568个。
 - ▣ 缺测记录用统一的数据标记补齐。
- 是否存在数据格式问题？
 - ▣ 如：-9999、NAN、.....
 - ▣ 用统一的数据标记替换。

Jili Qiu	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210811-20210818
.(19)				
Yuzhu Lee	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210804-20210811
Yuzhu Lee	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210728-20210804
Jili Qiu	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210721-20210728
Yuzhu Lee	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210714-20210721
Jili Qiu	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210707-20210714
Yuzhu Lee	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210630-20210707
Yuzhu Lee	🚩	[收件箱]	一周数据图	20210630-20210707



耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心
Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment



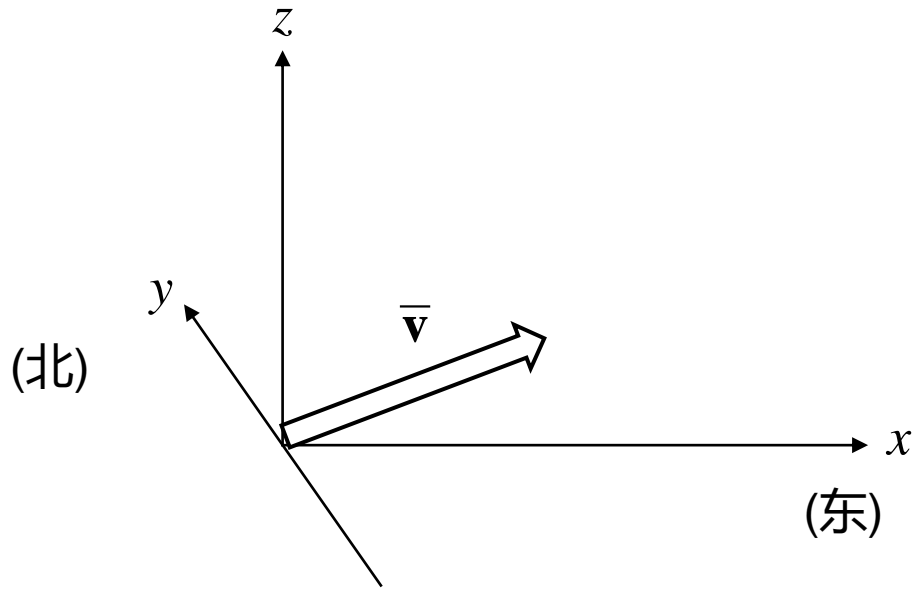
中国通量观测研究网络
ChinaFLUX

坐标旋转

王伟
南京信息工程大学

ChinaFLUX第十六次通量观测理论与技术培训
2021年8月18日

右手笛卡尔坐标系



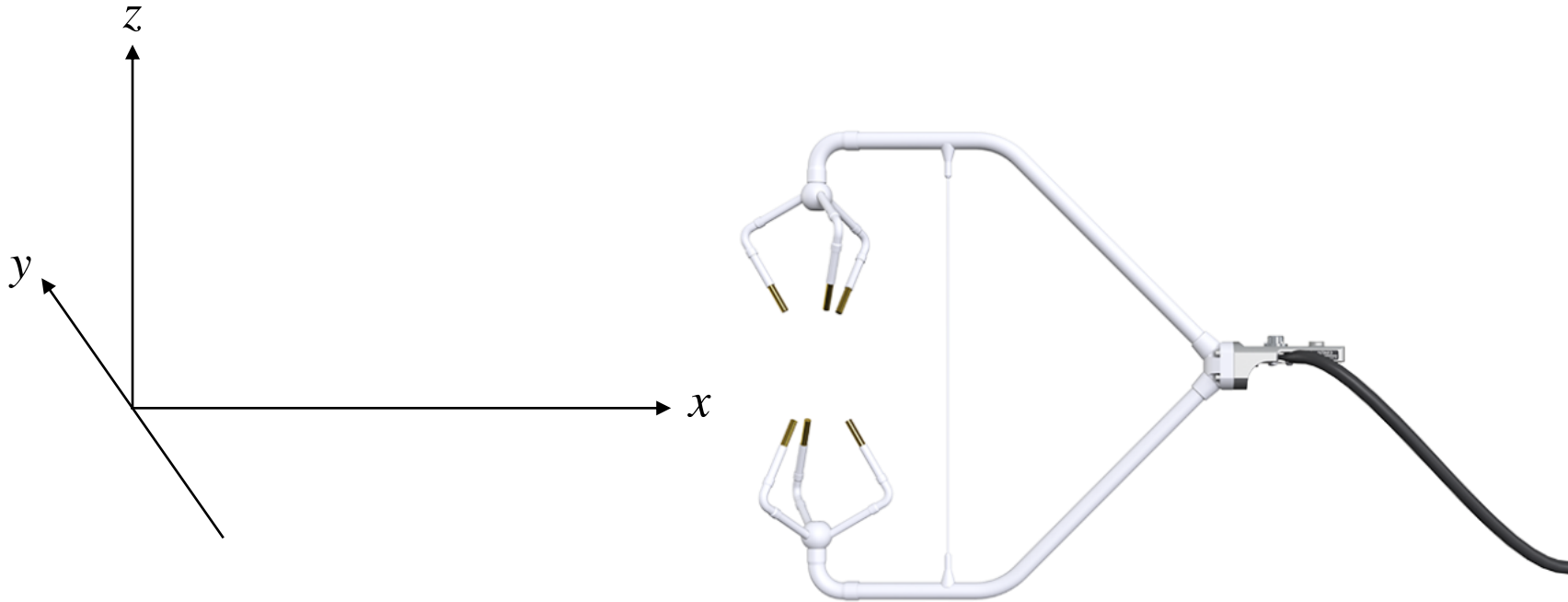
□ 速度矢量 $\mathbf{v} = \{u, v, w\}$

□ 梯度向量 $\nabla a = \left\{ \frac{\partial a}{\partial x}, \frac{\partial a}{\partial y}, \frac{\partial a}{\partial z} \right\}$

□ 气压梯度力 $-\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right\}$

□ 科氏力 $\{fv, -fu, 0\}$

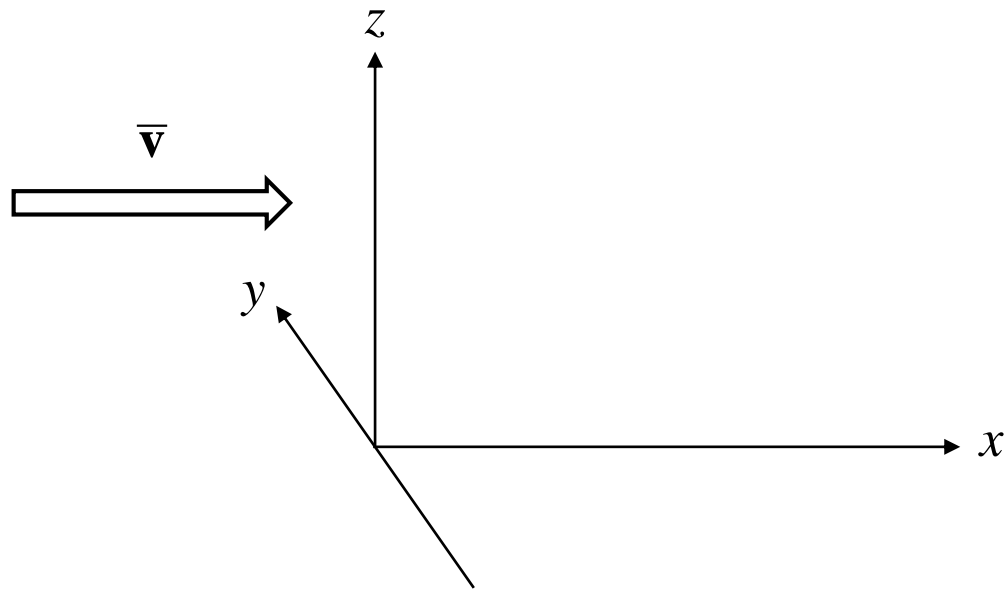
三维超声坐标系



<https://www.campbellsci.com/csat3a>

- x 和 y 轴位于水平的三维超声风速计的平面内；
- x 轴的指向与三维超声风速计的朝向**相反**；
- z 轴垂直向上，与重力方向相反。

微气象学坐标系



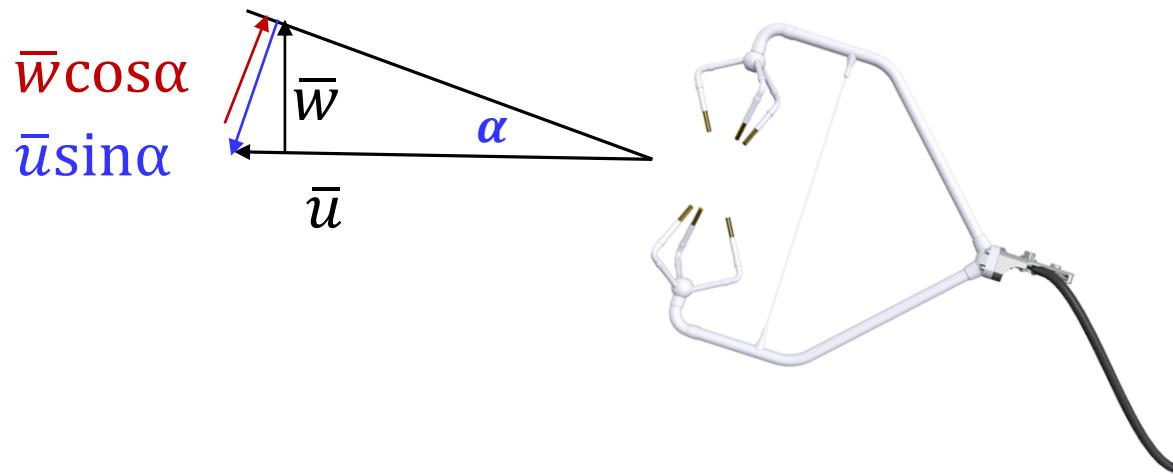
- 是一种特殊的笛卡尔坐标系；
- x 轴与水平风矢量方向一致， y 轴为侧风或横风方向， z 轴垂直于地面；
- 会随着水平风向改变而改变。
- 平均风速 = $\{\bar{u}, 0, 0\}$

通量观测中为何要进行坐标旋转？

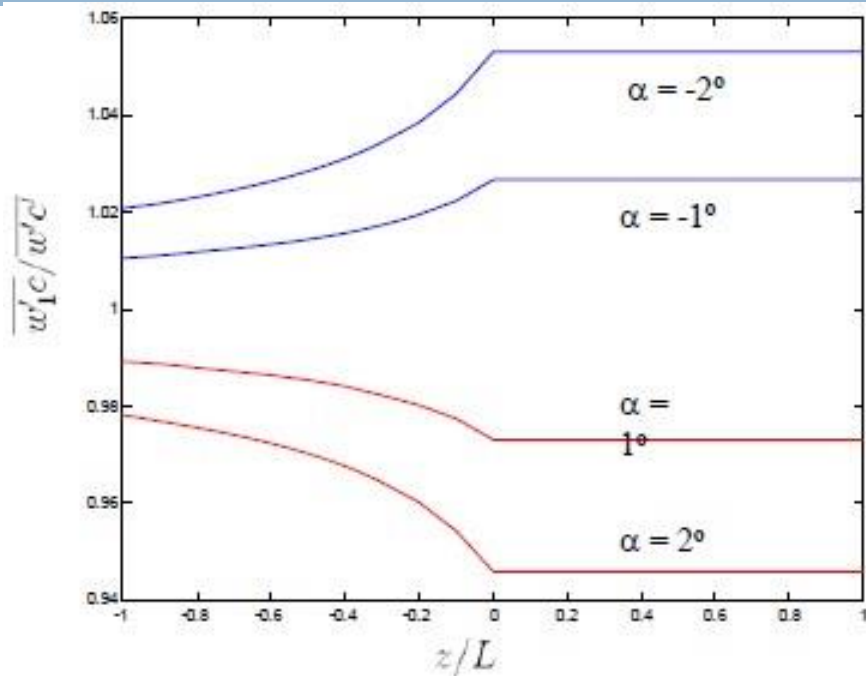
- z 轴应垂直于平均气流，保证 $\bar{w} = 0$ ，当超声风速计不水平或地形有坡度时，无法满足，垂直风速会受水平风速干扰。
- **Kaimal and Haugen (1969)**建议在非常理想的平坦下垫面上，风速计与水平方向之间的夹角要小于 0.1° ，而事实是：
 - ▣ 仪器器件构造中带来的垂直风速的电子偏差；
 - ▣ 仪器倾斜；
 - ▣ 由中尺度大气运动引起的非零的垂直风速；
 - ▣ 观测系统几何结构带来的动力扰动；
 - ▣ 水平风在垂直方向的分量。

仪器倾斜

- 垂直风速对仪器倾斜（倾斜角 α ）最为敏感。
- $\overline{w}_1 = \overline{w}\cos\alpha + \overline{u}\sin\alpha \approx \overline{w} + \overline{u}\sin\alpha$
- 仪器倾斜 1° ，水平风速 $\overline{u} = 3 \text{ m s}^{-1}$ ，则仪器倾斜造成的误差为 0.05 m s^{-1} 。
- 实际近地层中的平均垂直风速量级 $\leq 0.01 \text{ m s}^{-1}$ 。



标量通量



Flux in tilted coordinate

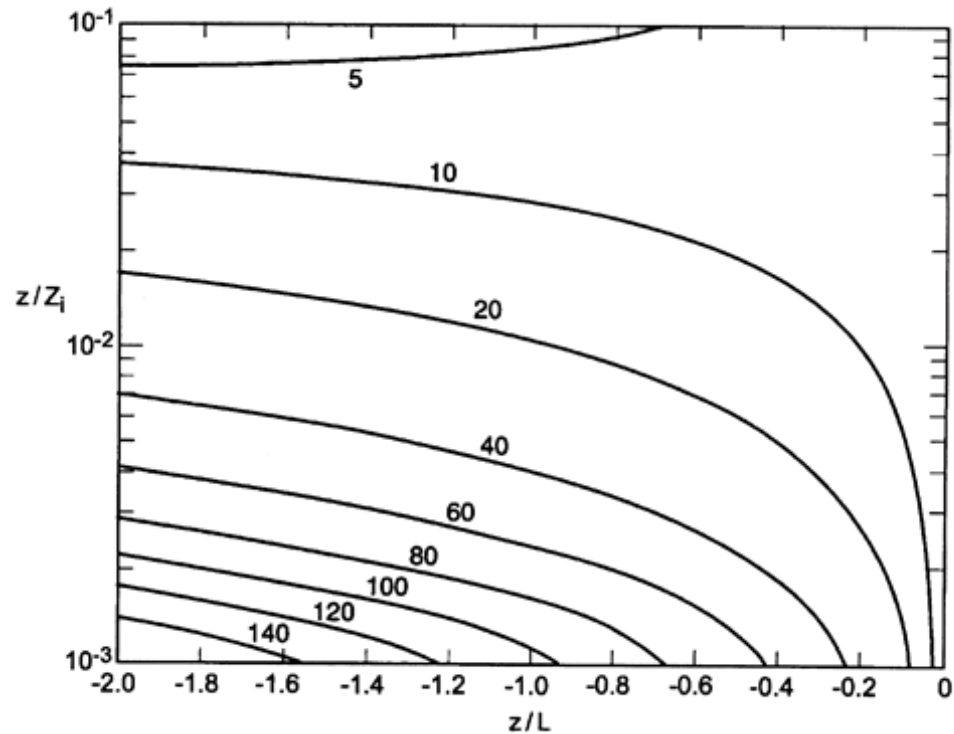
True flux

$$\overline{w_1'c'} = \overline{w'c'} \cos(\alpha) + \overline{u'c'} \sin(\alpha)$$
$$= \overline{w'c'} \cos(\alpha) + a \frac{\overline{u'w'}}{w'^2} \overline{w'c'} \sin(\alpha)$$
$$\sigma_w/u_* = 1.25(1 - 3z/L)^{1/3}$$

courtesy of Lee, 2013

- 与动量通量相比，标量通量对仪器倾斜不太敏感；
- 仪器倾斜误差在大气稳定时较大，大气不稳定时更大，总体无法抵消；
- 若风有日变化，倾斜误差将会给累积通量带来系统误差。

动量通量



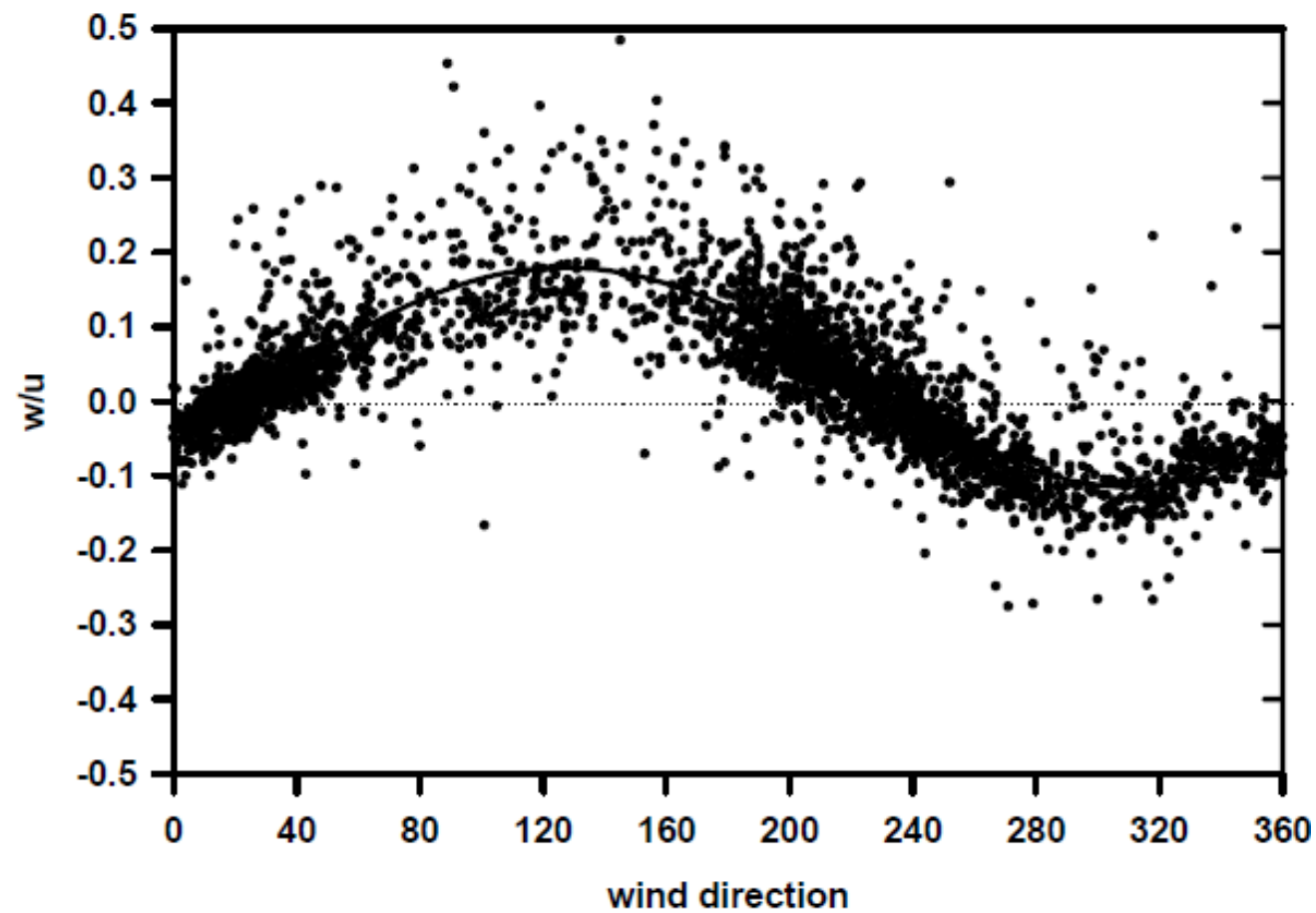
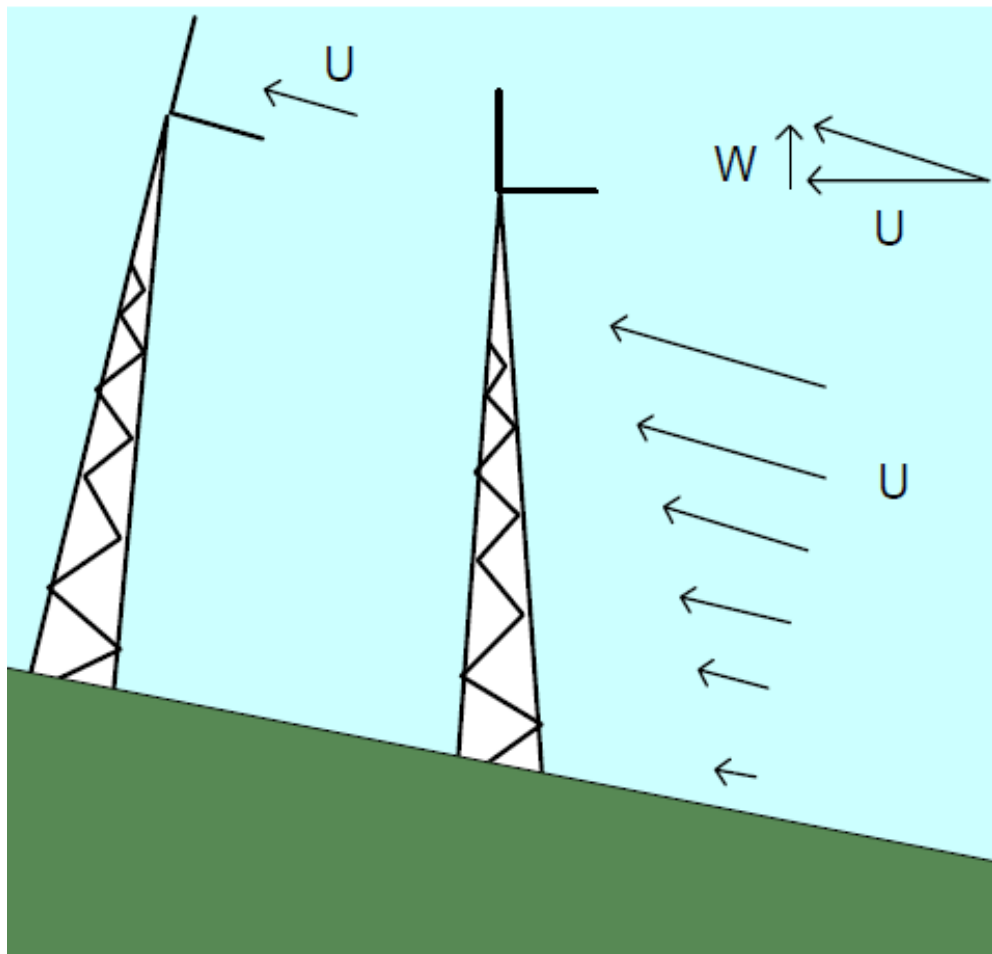
Flux in tilted coordinate

True flux

$$\overline{u'_1 w'_1} = \overline{u' w'} \cos(2\alpha) + \frac{1}{2} (\overline{w'^2} - \overline{u'^2}) \sin(2\alpha)$$
$$\sigma_u / u_* = (12 - 0.5 Z_i / L)^{1/3}$$
$$\sigma_w / u_* = 1.25 (1 - 3z/L)^{1/3}$$

- 在中等不稳定时， 1° 倾斜带来的动量通量误差超过10%；在自由对流时，误差可高达100%；在大气稳定时，误差更大；

需要进行坐标旋转的实例



坐标旋转的方法

□ 目的

- 使 $\bar{w} = 0$

- 平均风速沿 x 轴方向

- 通量和梯度沿 z 方向

- 消除仪器倾斜误差

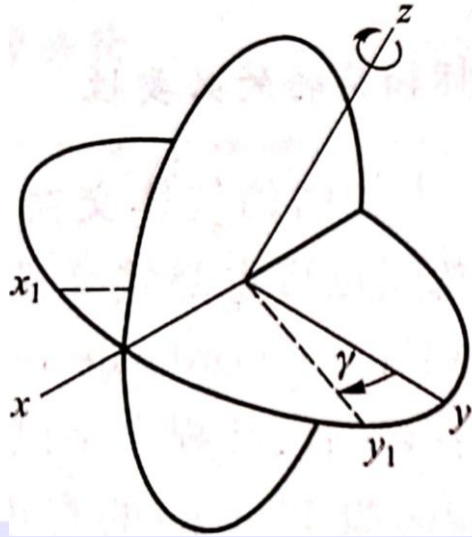
□ 方法

- 两次坐标旋转

- 三次坐标旋转

- 平面拟合

第一次坐标旋转



- 以z轴为中心旋转x-y平面，使平均侧风 $v=0$ ，旋转角度记为yaw角 γ 。

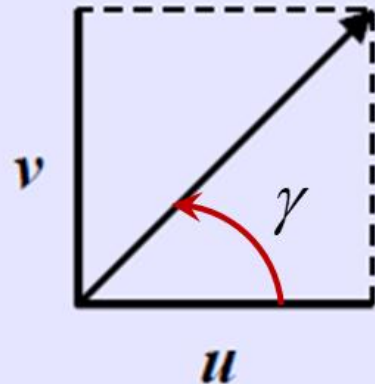
$$u_1 = u_m \cos \gamma + v_m \sin \gamma$$

$$v_1 = -u_m \sin \gamma + v_m \cos \gamma = 0$$

$$w_1 = w_m$$

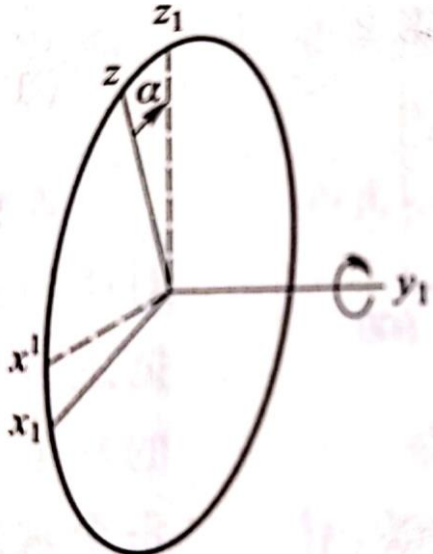
$$\gamma = \arctan \left(\frac{\overline{v_m}}{\overline{u_m}} \right)$$

1st Rotation



$$U = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

第二次坐标旋转



- 第二次以 y_1 轴为中心，旋转新的 x_1 - z 平面，使平均垂直风速 $w=0$ ，旋转角度记为pitch角 α 。

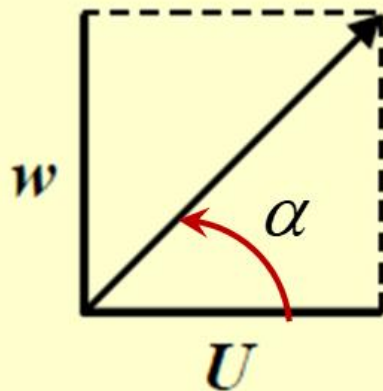
$$u_2 = u_1 \cos \alpha + w_1 \sin \alpha$$

$$v_2 = v_1$$

$$w_2 = -u_1 \sin \alpha + w_1 \cos \alpha = 0$$

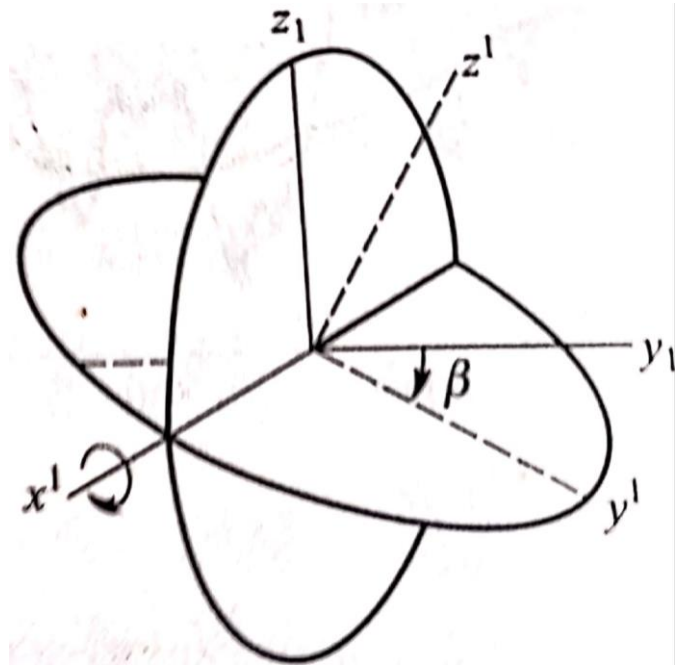
$$\alpha = \arctan \left(\frac{\overline{w_1}}{\overline{u_1}} \right)$$

2nd Rotation



$$S = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$$

第三次坐标旋转



- 第三次以 x^1 轴为中心旋转新的 y_1-z_1 平面，使 $w'v'=0$ ，旋转角度记为roll角 β 。

$$u_3 = u_2$$

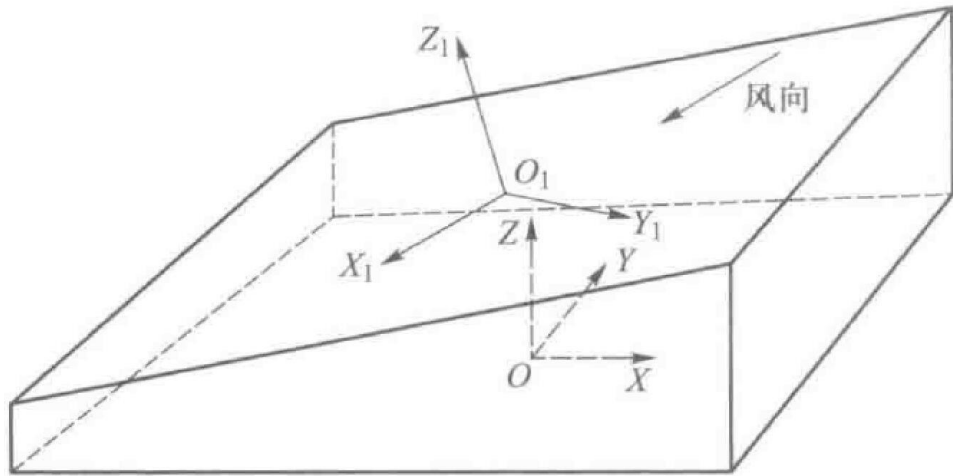
$$v_3 = v_2 \cos \beta + w_2 \sin \beta$$

$$w_3 = -v_2 \sin \beta + w_2 \cos \beta = 0$$

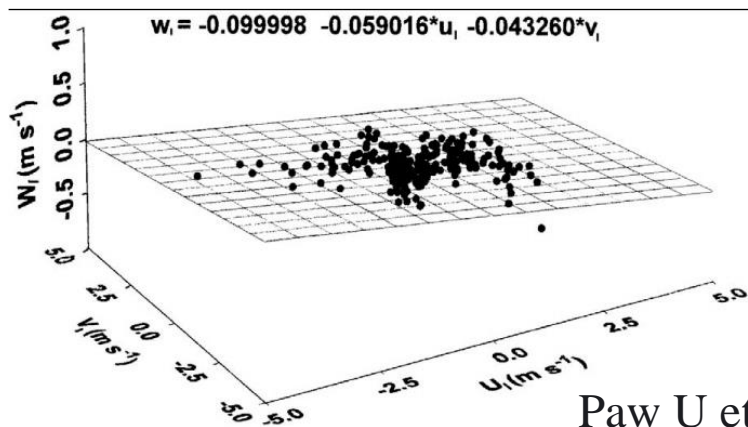
$$\beta = \frac{1}{2} \arctan(2Y) \quad Y = \frac{\overline{v_2 w_2}}{v_2^2 - w_2^2} = \frac{\overline{v_2' w_2'}}{v_2'^2 - w_2'^2}$$

- 存在旋转过度嫌疑，不推荐使用。

平面拟合



于贵瑞, 孙晓敏等, 2017



Paw U et al. 2000

- 适用于复杂地形或存在中尺度环流的条件
- 通量平均期内实际平均垂直风速不为0;
- 根据一段时间 (5~10天) 的观测资料, 含各种风向和风速, 通过数学和统计方法拟合得到一个新平面 $O_1X_1Y_1$, 在该平面上, 平均垂直风速可以表达为经向和纬向水平风速的函数, 并且新的垂直风速平均值为0。

$$\bar{w} = b_0 + b_1\bar{u} + b_2\bar{v}$$

平面拟合

$$S = \sum_{i=1}^n (\bar{w}_i - b_0 - b_1 \bar{u}_i - b_2 \bar{v}_i)^2$$

微分

$$nb_0 + (\sum \bar{u}_i) b_1 + (\sum \bar{v}_i) b_2 = \sum \bar{w}_i$$

$$(\sum \bar{u}_i) b_0 + (\sum \bar{u}_i^2) b_1 + (\sum \bar{u}_i \bar{v}_i) b_2 = \sum \bar{u}_i \bar{w}_i$$

$$(\sum \bar{v}_i) b_0 + (\sum \bar{u}_i \bar{v}_i) b_1 + (\sum \bar{v}_i^2) b_2 = \sum \bar{v}_i \bar{w}_i$$

解三个系数

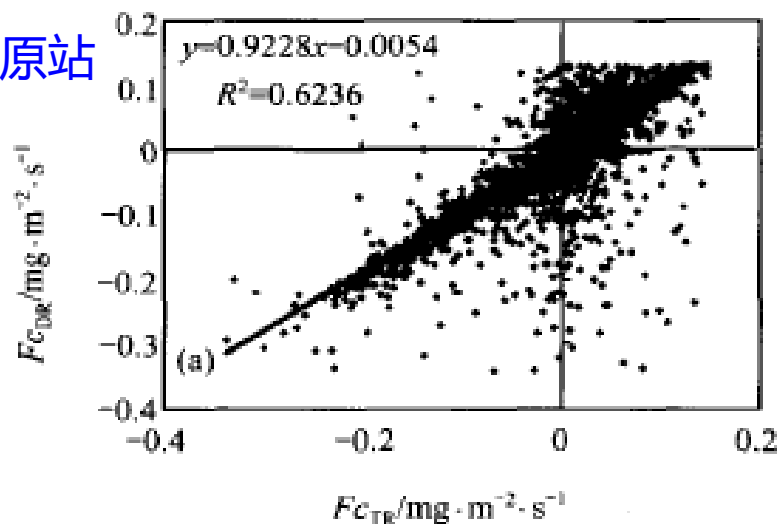
$$F_{PF} = \overline{w'_p s'} = P_{31} \overline{u'_m s'} + P_{32} \overline{v'_m s'} + P_{33} \overline{w'_m s'}$$

$$P_{31} = \frac{-b_1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \quad P_{32} = \frac{-b_2}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \quad P_{33} = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}}$$

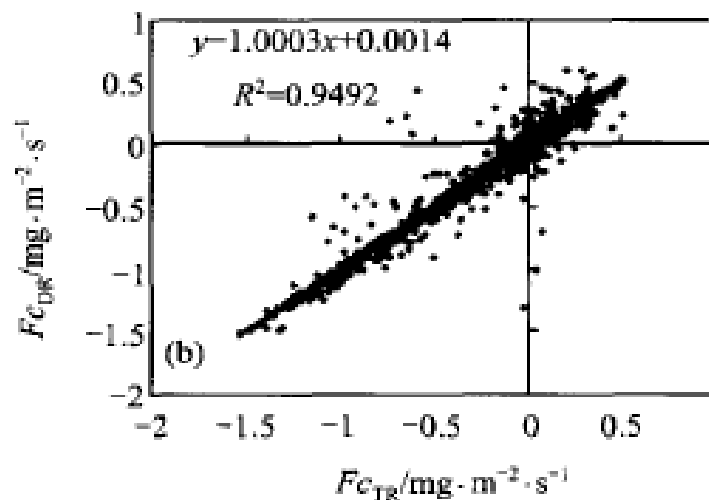
- 定义了单点或单塔通量观测的首选坐标系，但不能用于单个通量的实时计算，必须有多组通量数据的平均周期时才能使用。
- 仪器安装不变，在非均一下垫面，倾斜角度会随风向改变。

CO₂通量两次和三次坐标旋转对比

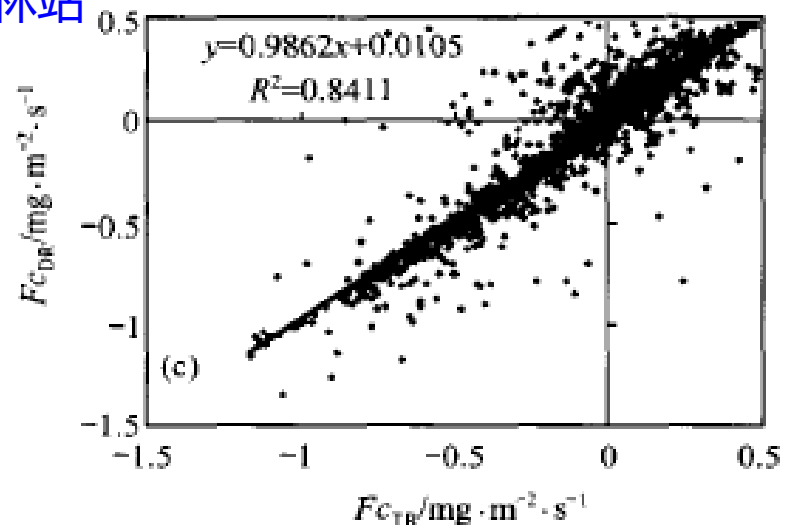
内蒙古草原站



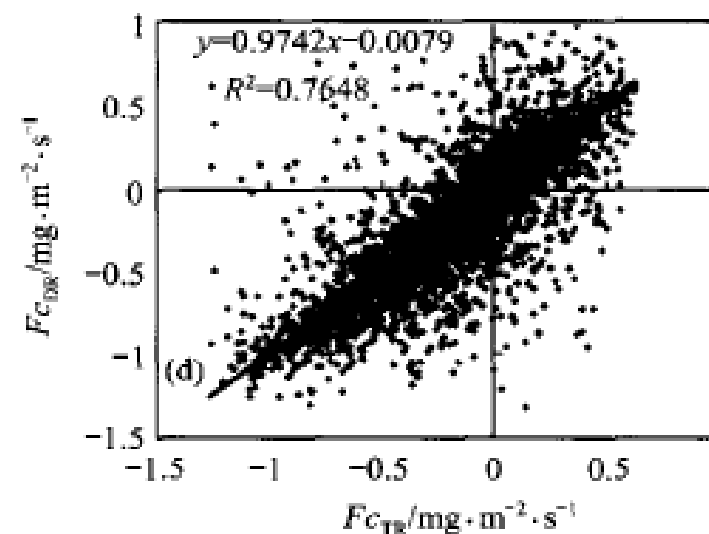
禹城农田站



长白山森林站

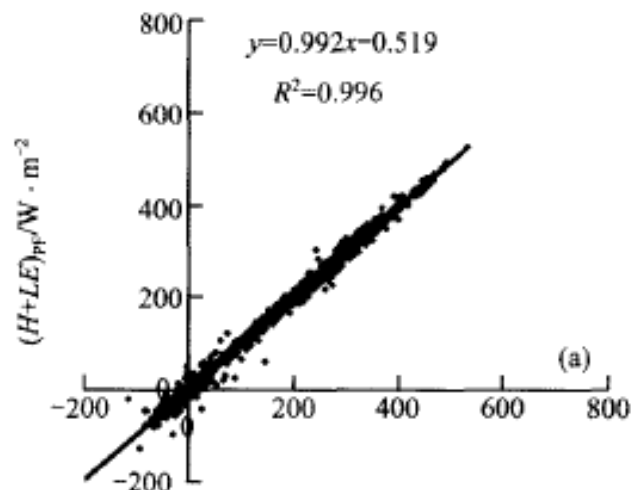


干烟洲森林站

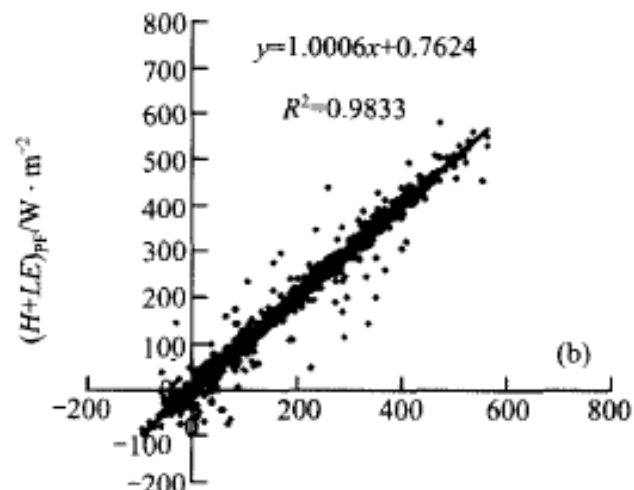


热量通量平面拟合和三次坐标旋转对比

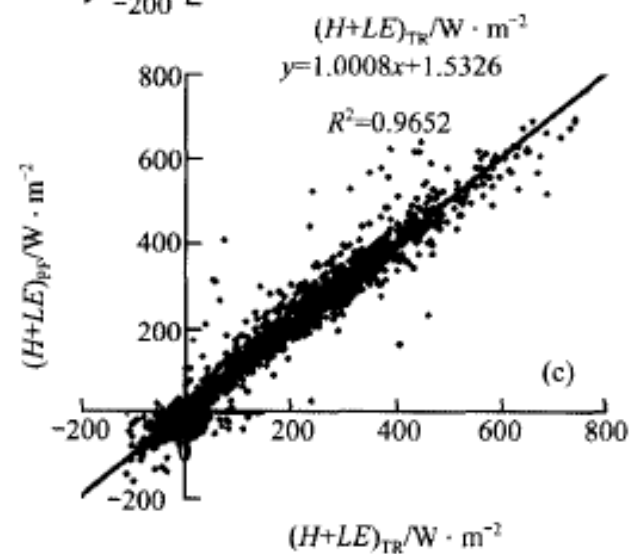
内蒙古草原站



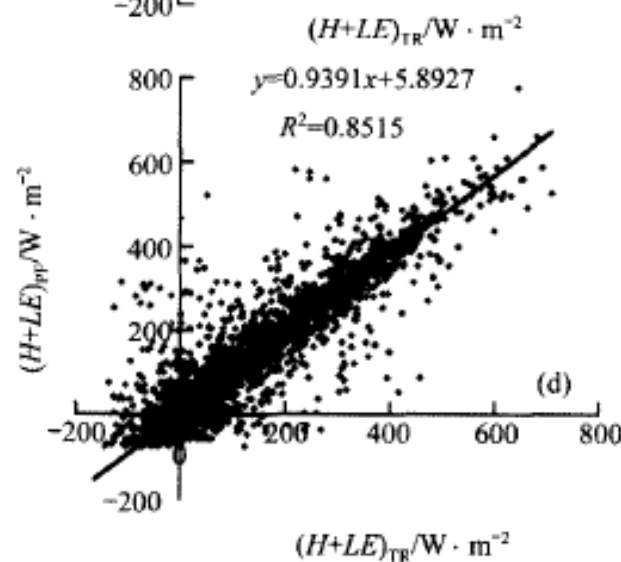
禹城农田站



长白山森林站



干烟洲森林站

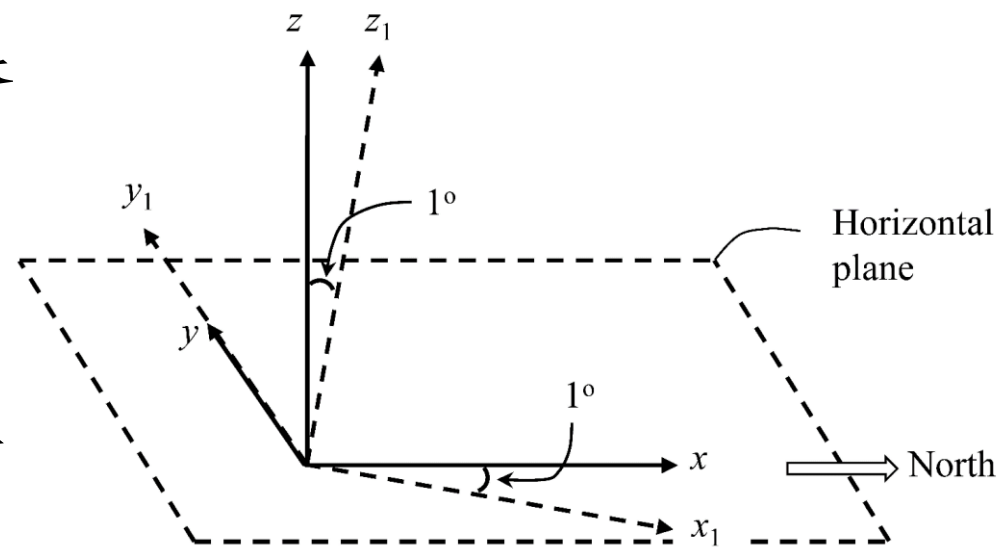


坐标旋转的方法

- 两次坐标旋转：最常用，适用于绝大部分下垫面
- 三次坐标旋转：有争议，不推荐使用
- 平面拟合：有挑战，积累数据时间长，仪器安装不能有调整，适用于起伏下垫面或存在中尺度环流

思考题

- 超声风速计朝北安装，在水平方向上向上倾斜了 1° 。仪器测量速度的参考坐标系选择用 $\{x_1, y_1, z_1\}$ 表示的右手笛卡尔坐标系。假设真实的空气速度是 5.00 m s^{-1} ，且速度矢量与水平面完全平行。请确定 z_1 方向上的垂直速度 w_1 的数值（即仪器观测的垂直风速）及其与风向的关系。其中，定义从正北吹来的风向为 0° ，从正东吹来的风向为 90° ，以此类推。





耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心
Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment



中国通量观测研究网络
ChinaFLUX

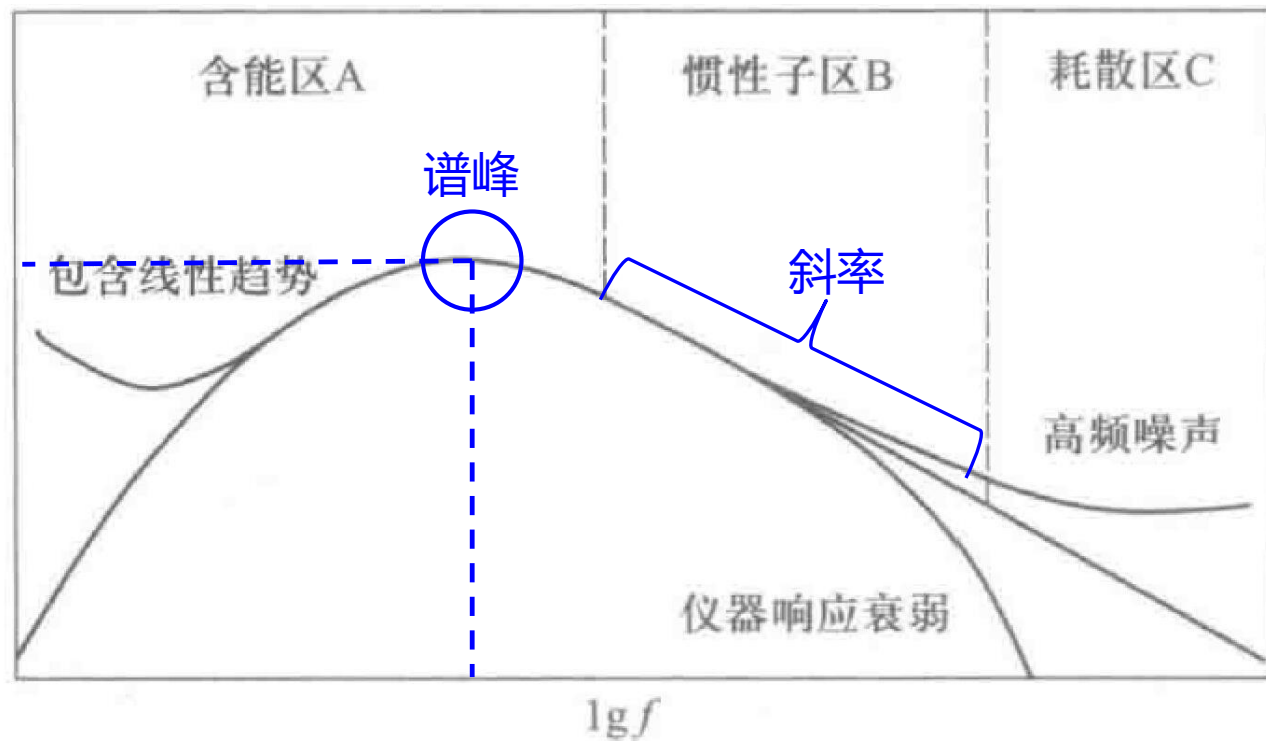
大气湍流谱分析

王伟
南京信息工程大学

ChinaFLUX第十六次通量观测理论与技术培训
2021年8月18日

功率谱或协谱的基本特征

功率谱或协谱的不同表达形式



- 近地层中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，而是由大涡传向小涡，对数坐标系下，惯性子区内，功率谱应遵循 $-2/3$ 的规律，协谱应符合 $-4/3$ 定律。
- 谱峰和斜率是功率谱和协谱两个最突出的特征。

为何要分析功率谱和协谱？

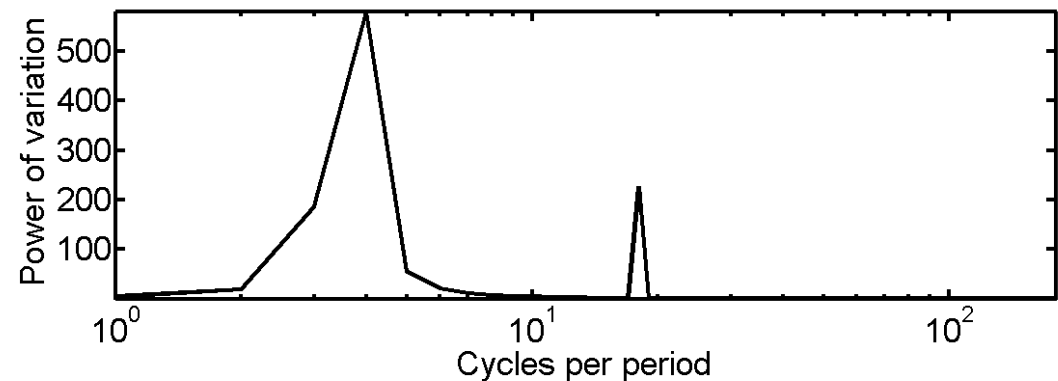
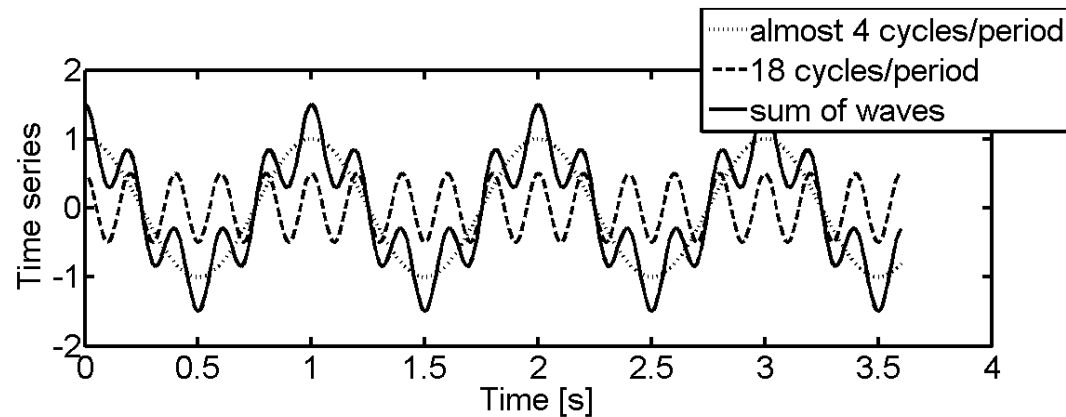
- 不仅知道通量数值，也想知道传输通量的湍涡的大小和贡献；
- 检查仪器观测性能的有效指标
 - ▣ 是否能观测到所有尺寸的湍涡？
 - ▣ 采样频率是否足够？
 - ▣ 平均时长是够合适？
- 从谱分析中可以获得额外有用的信息（如仪器老化、噪音等）。

傅里叶变换

- 快速傅里叶变换 (FFT) 或小波变换等数学方法可用于谱分析;
- 频率通常采用归一化频率 ($n = f \frac{h_m - d}{\bar{u}}$)，考虑了观测高度 (h_m)、零平面位移 (d) 和平均风速 (\bar{u}) 的影响，便于不同站点间比较。

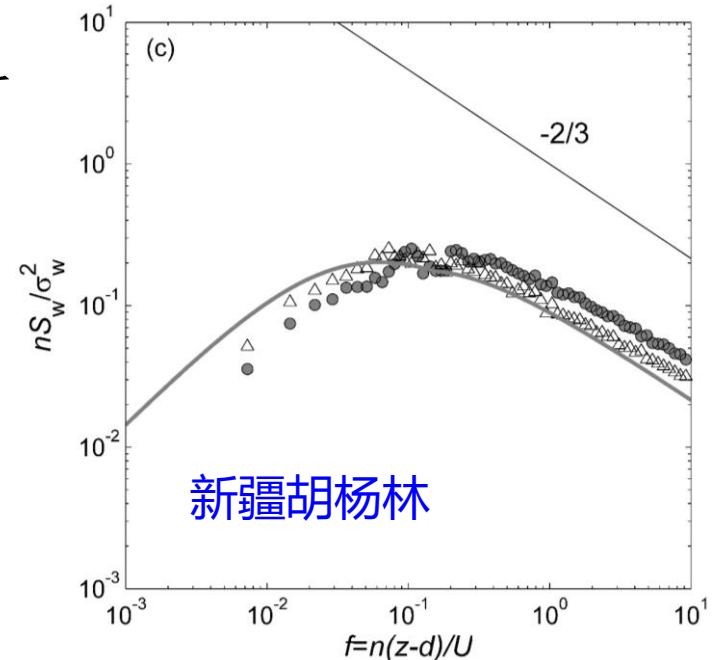
傅里叶变换

- 将一个时间序列拆解成多个sin和cos函数的和；
- 将时间序列转换为随频率变化的量，即由时域转换为频域；
- 特定周期上三角函数的振幅对应频域上的湍流强度；
- 频域上分布可以反映物理量随湍涡大小和运动频率的变化。



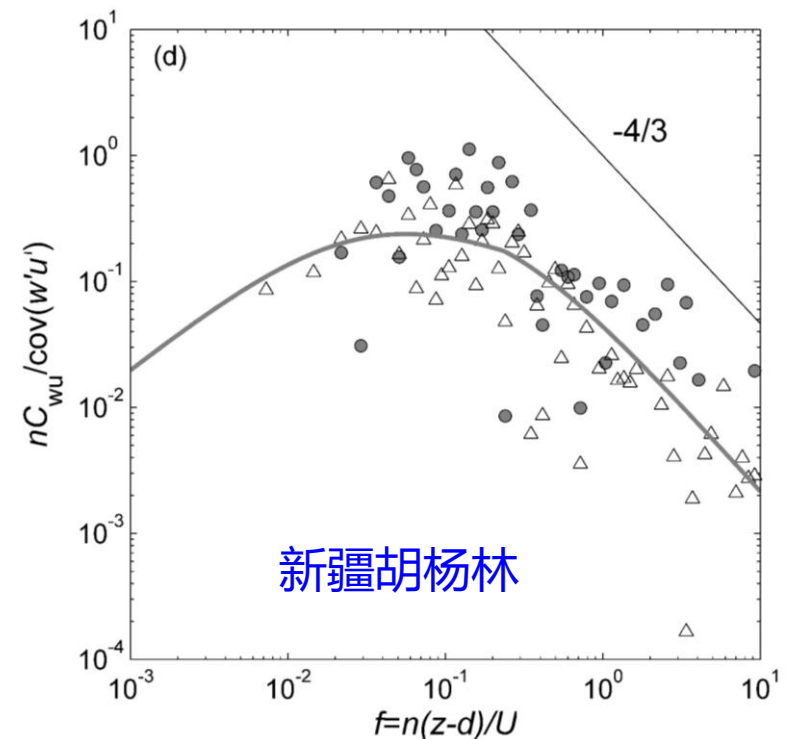
功率谱

- 功率谱：不同频率的湍涡对方差的贡献分别是多少
- $A = FFT(x)$ ：快速傅里叶变换得到的振幅，复数，有实部（cos）和虚部（sin）。
- $P = |A|^2$ ：功率为振幅绝对值的平方， $Re(A)^2 + Im(A)^2 = A \cdot A^*$ 。
- $E = \frac{2P}{N^2}$ ：谱能为2倍的功率除以 x 序列长度的平方
- $S = \frac{E}{\Delta f}$ ：谱密度，单位为方差除频率
- $\frac{fS}{\sigma^2}$ ：无量纲，始终为正值



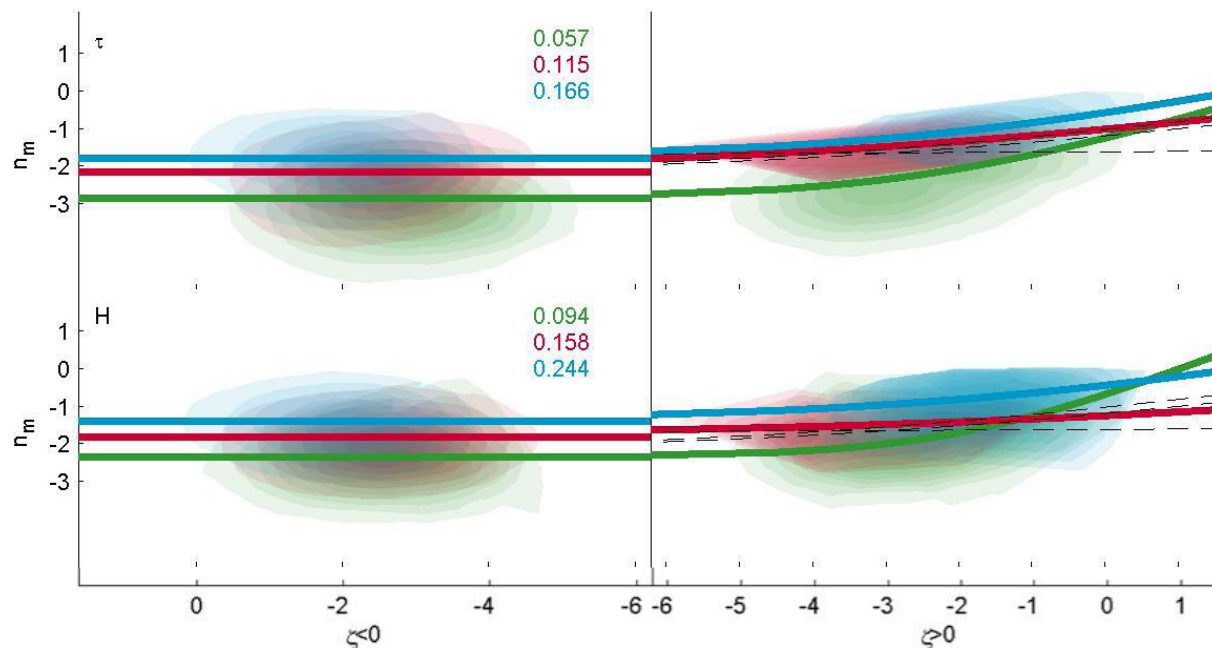
协谱

- 协谱：不同频率的湍涡对两个变量之间的协方差的贡献分别是多少
- A_x 和 A_y ：变量 x 和 y 的振幅；
- $P_{xy} = \text{Re}(A_x) \cdot \text{Re}(A_y) + \text{Im}(A_x) \cdot \text{Im}(A_y)$
- $E_{xy} = \frac{2P_{xy}}{N^2}$
- $C = \frac{E_{xy}}{\Delta f}$
- $\frac{fC}{w'c'}$ ：无量纲，可正可负



谱峰位置与大气稳定度

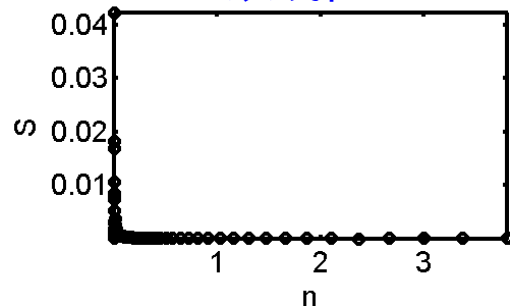
- 下垫面越粗糙，谱峰位置对应的频率越高；
- 大气不稳定时，谱峰位置对应频率为常数；
- 大气稳定时，谱峰对应频率随稳定度增加而增大，大气稳定时小湍涡贡献更大。



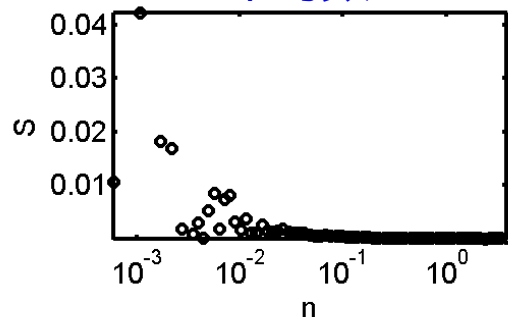
功率谱和协谱的不同展示方式

坐标轴

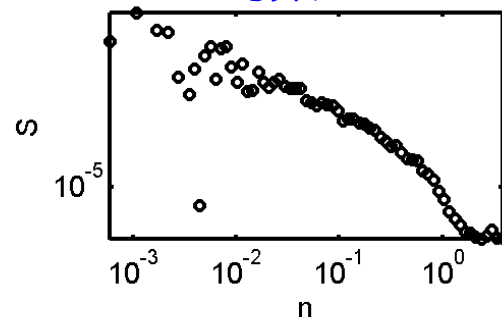
双线性



半对数

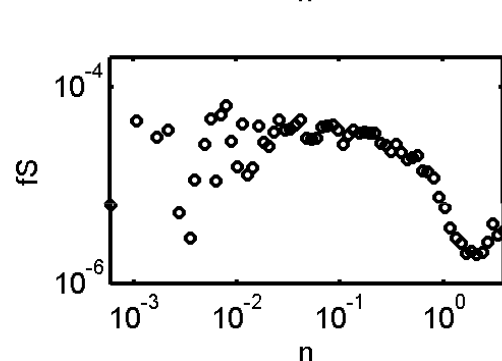
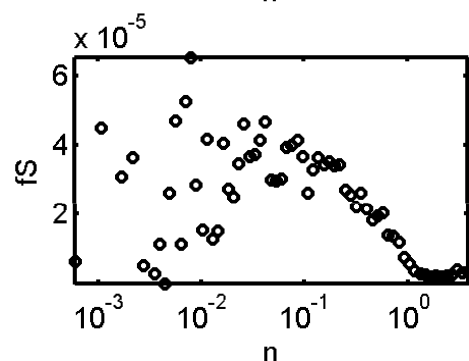
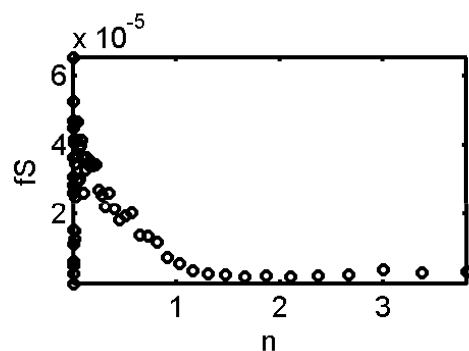


对数

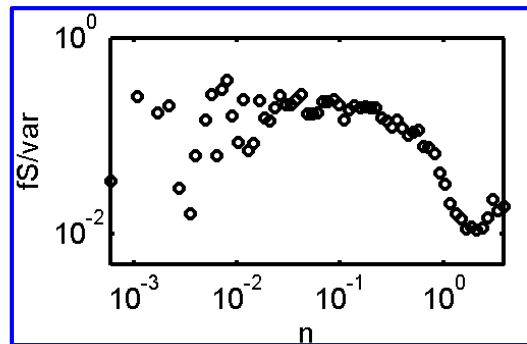


单位

方差除频率



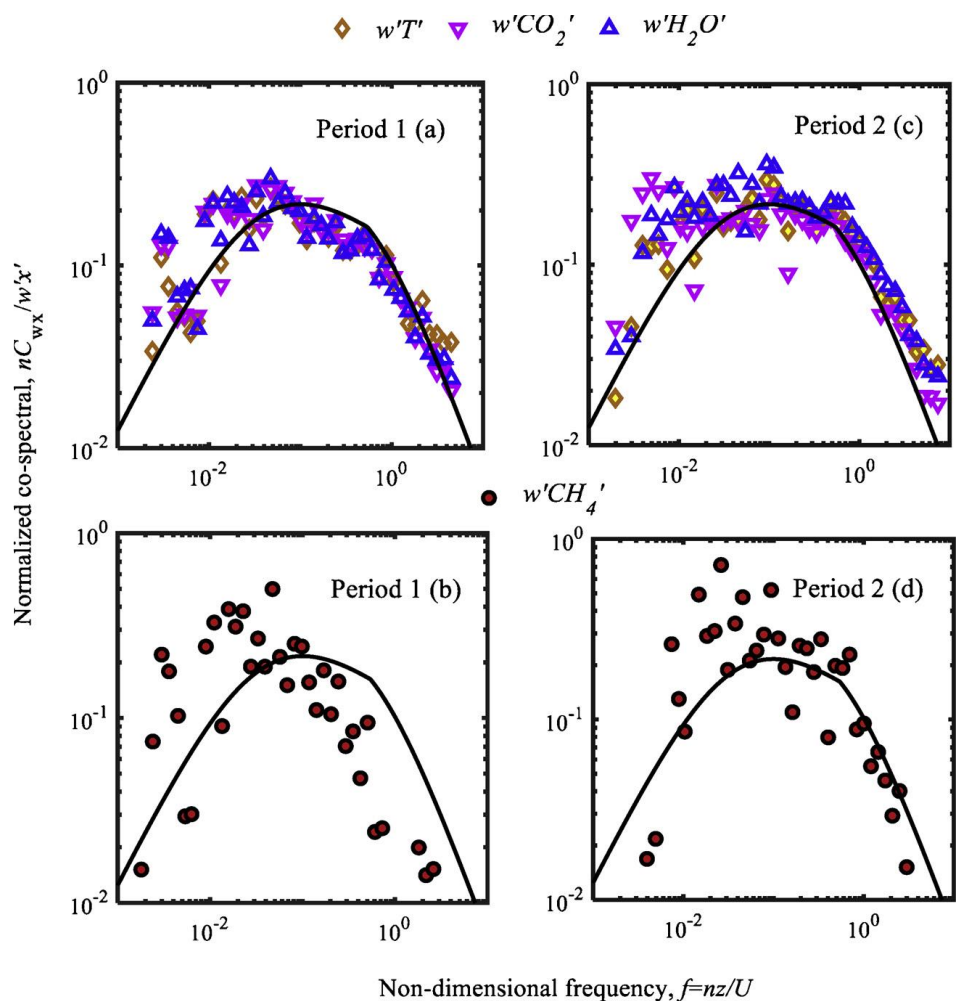
方差



无量纲

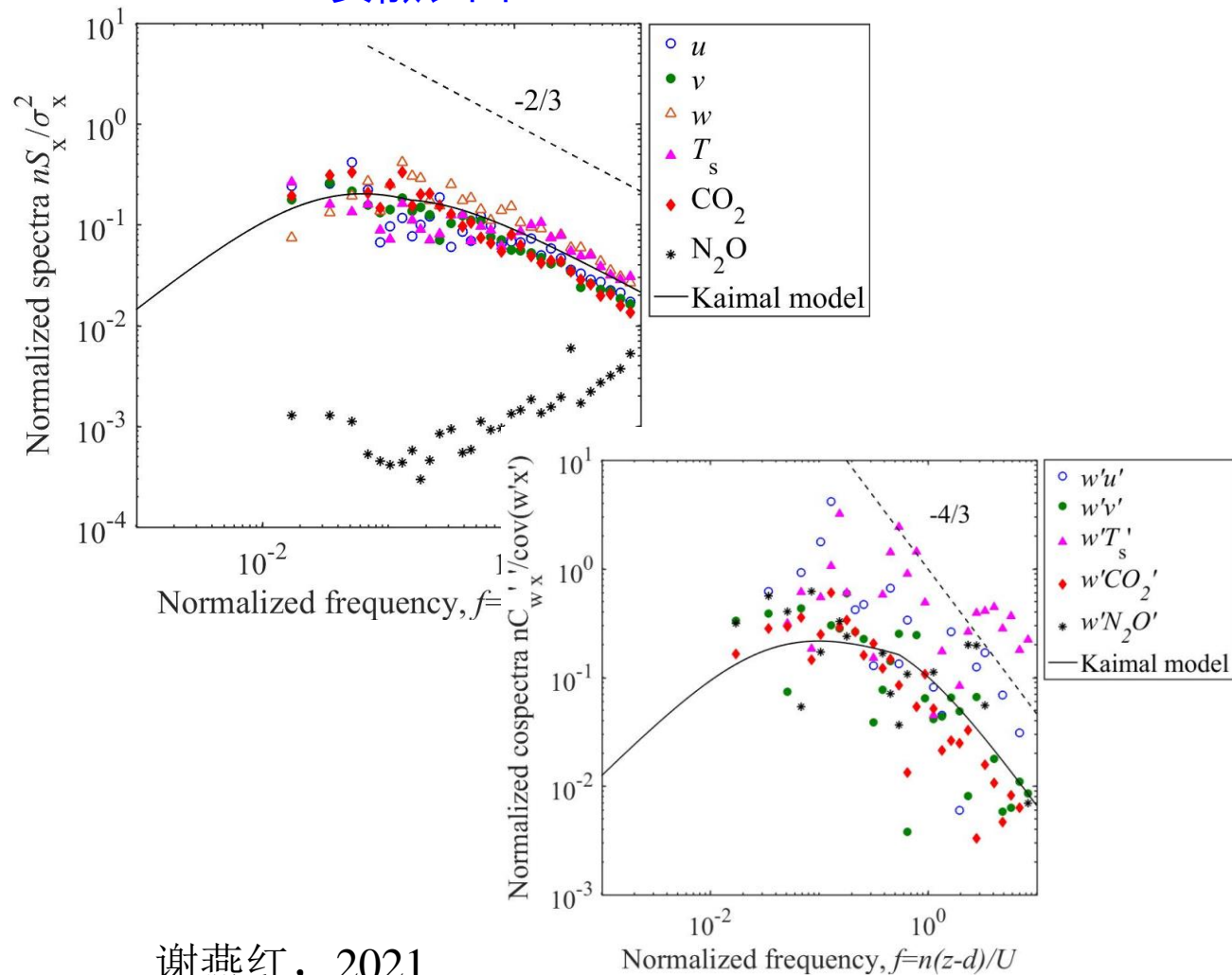
观测实例

安徽农业养殖塘



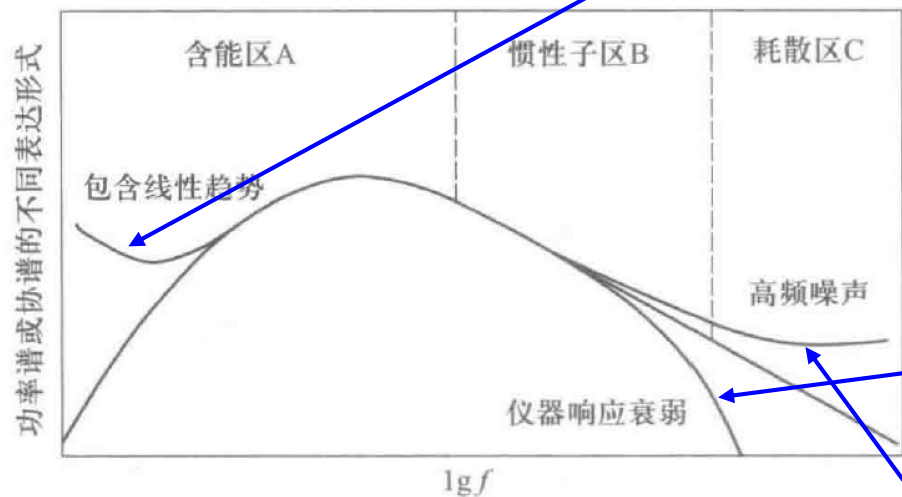
Zhao et al., 2019, AFM

安徽农田



谢燕红, 2021

常见特征



- 低频段斜率不随频率减小明显减小，即谱峰不明显
 - ▣ 平均时间偏短或数据存在某种长期的趋势，低频段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，信号衰减；随机噪音过大
- 高频段斜率小于 $-2/3$
 - ▣ 原始资料含有野点噪音或量化噪音（A/D转换缺位）