



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)



大气边界层, 湍流及涡动相关基本理论

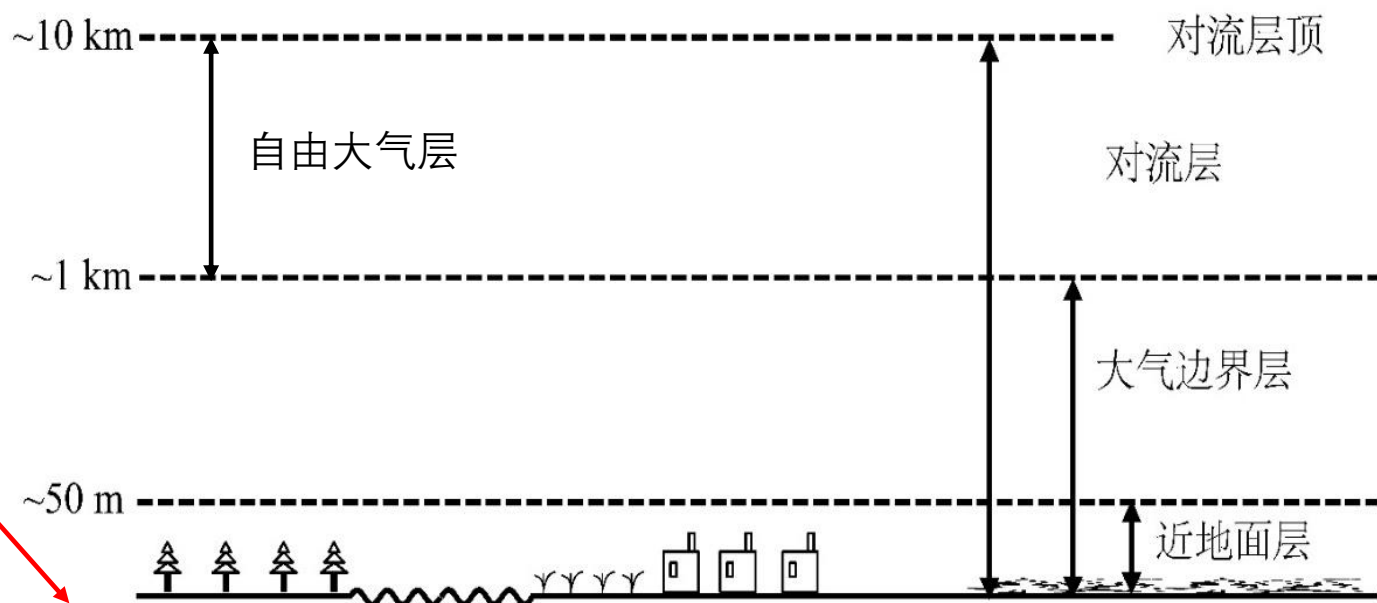
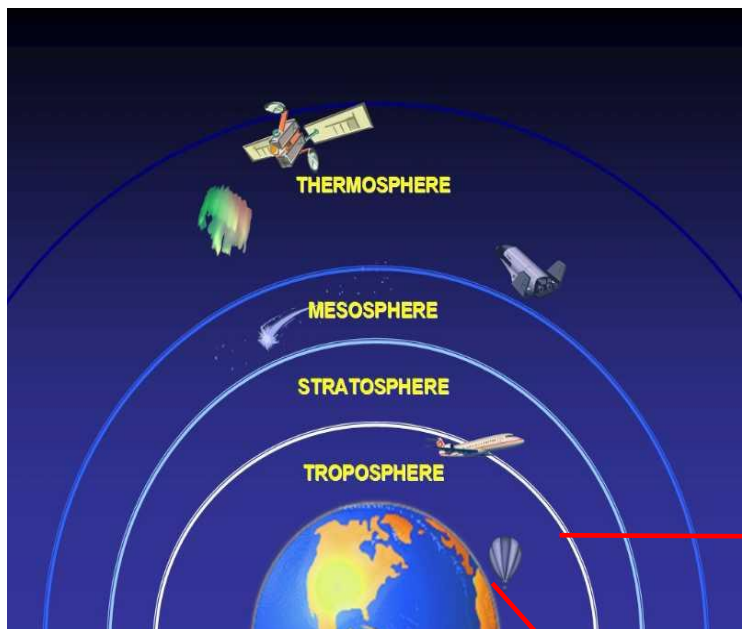
杨柏 (byang@campbellsci.com)

Campbell Scientific Inc

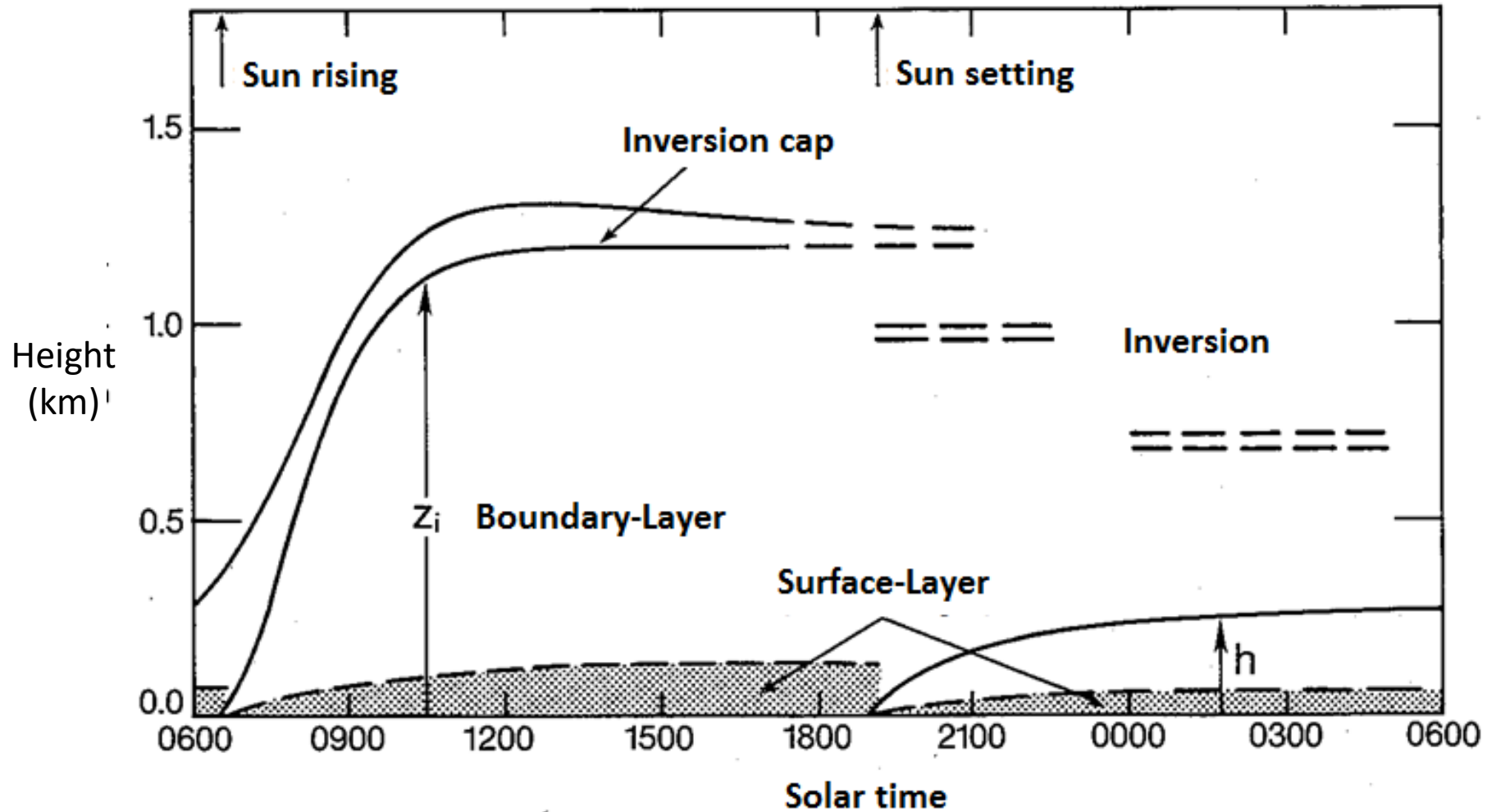
涡动通量(Eddy Covariance)的本质

- 基于气象学中（大气运动过程中）质量守恒的原理
- 利用测量湍流的高频率高精度仪器(超声测风仪和红外气体分析仪)
- 在大气边界层中测量大气与周围生态系统之间的物质（CO₂，水分，其他温室气体）及能量（潜热，感热）交换

大气的垂直分层



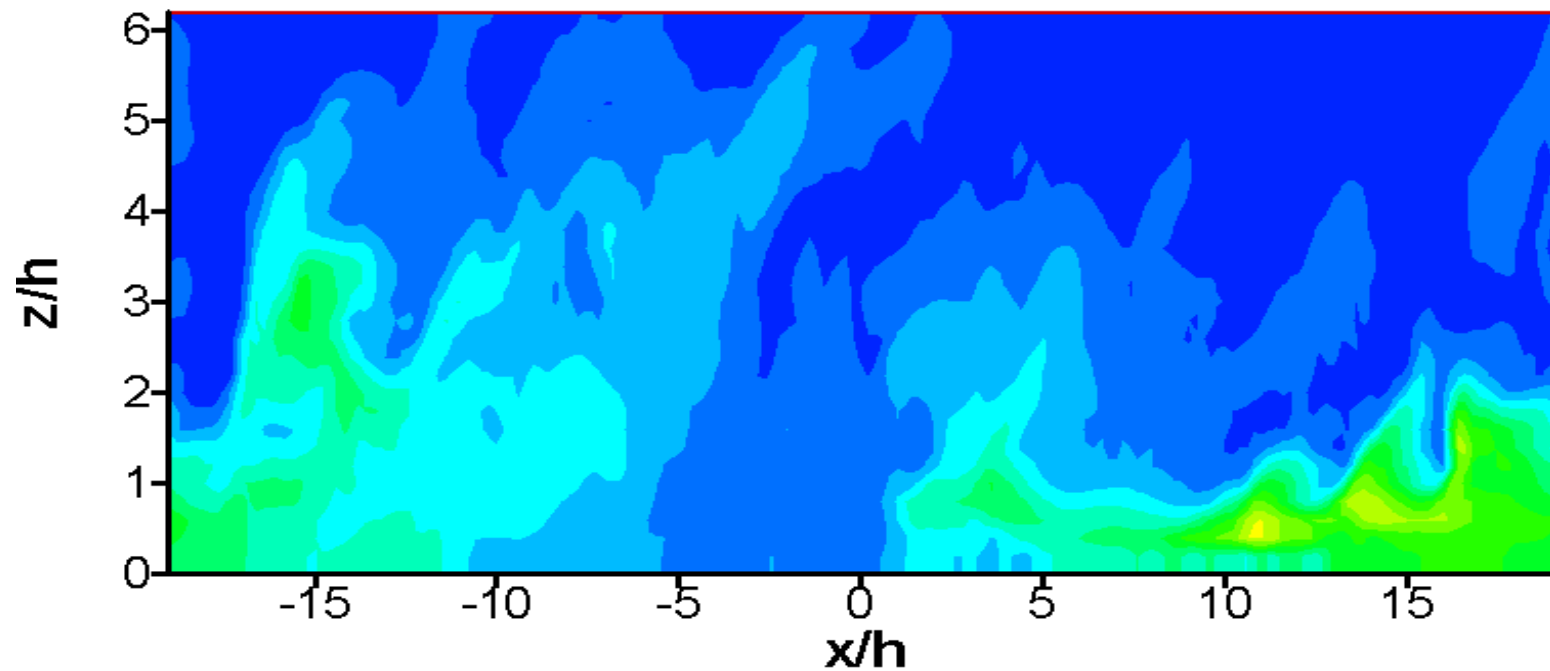
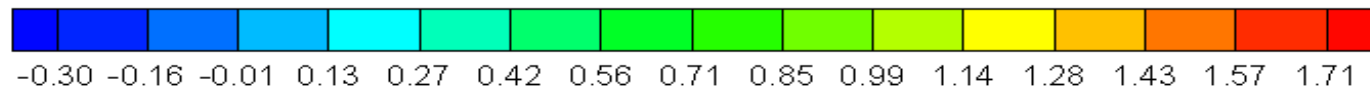
大气边界层的日变化



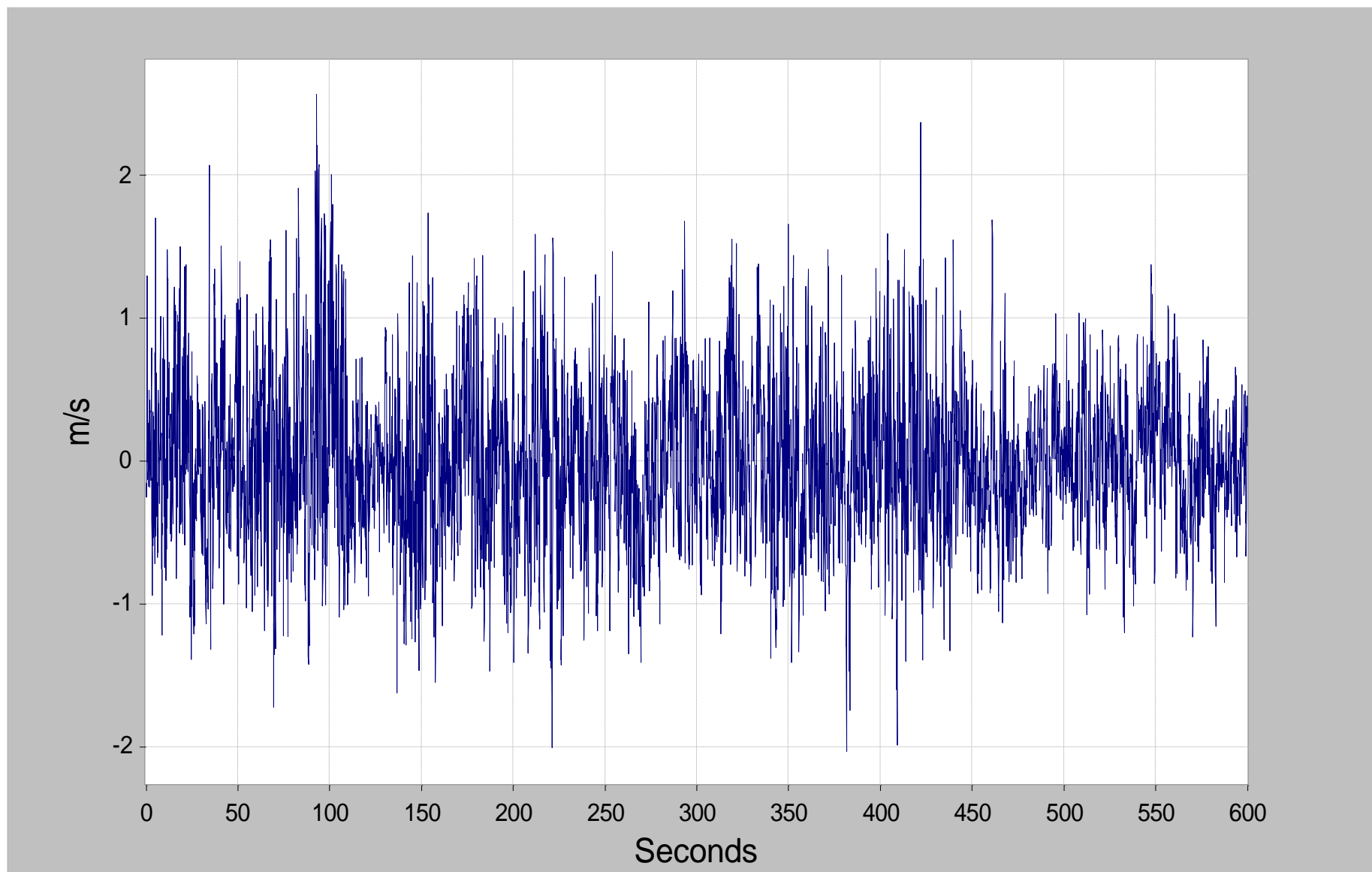
大气湍流例一



大气湍流例二



大气湍流例三

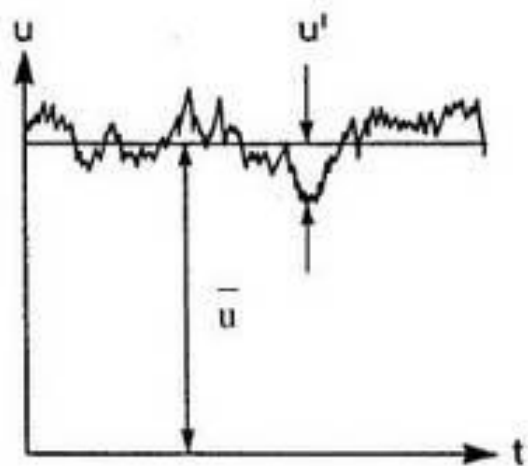


大气边界层湍流的特征

- 无规则， 随机， 混沌的大气运动
- 变化快， 频率高 - 其空间尺度小（从厘米到几米）， 并且时间尺度短（小到一秒以下）
- 但携带了大量的动能
- 主要存在于大气边界层（地面到一公里高度）， 在垂直方向能有效地混合大气， 是地球表面和高层大气之间传输物质， 能量和动量的有效机制
- 大气边界层湍流的特征和结构与上层自由大气运动有显著不同

如何从数学上量化和描述大气湍流？

Reynolds分解法:



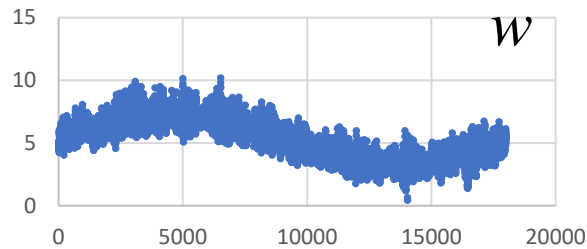
$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (i=1,2,3; u_1=u, u_2=v, u_3=w)$$

$$T = \bar{T} + T'$$

$$c = \bar{c} + c'$$

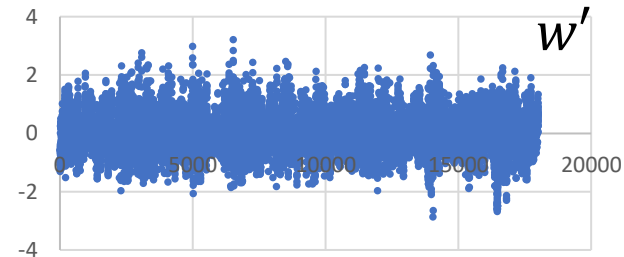
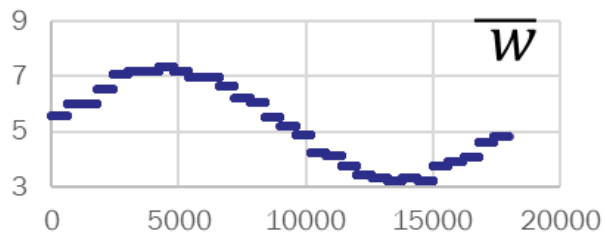
$$q = \bar{q} + q'$$

Reynolds分解的实质



10Hz观测资料,
总共30分钟长

做一分钟平均
处理之后



- 信号处理上，求平均就相当于信号过滤器，滤掉了短波而同时保留了长波部分
- Reynolds分解的实质就是把一个大气波动信号（时间序列）分成了两个部分：低频（平均值）和高频（扰动）部分
- 在气象学上（尤其是天气模拟预报上），由于模型精度的限制，经常使用不同方法来处理低频波动与高频扰动部分

Reynolds平均法则

$$\bar{u}_i = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n u_i$$

$$\bar{u}'_i = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n u'_i = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n u_i - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \bar{u}_i = 0$$

$$\overline{uw} = \overline{(\bar{u} + u')(\bar{w} + w')} = \bar{u}\bar{w} + \overline{u'w'}$$

$$\overline{\bar{u} + u'} = \bar{\bar{u}} + \bar{u}' = \bar{u}$$

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad \overline{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

描述湍流的统计量

一阶统计量 (平均值) : $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{T}, \bar{c}, \bar{q}$

二阶统计量:

- 方差: $u'u', v'v', w'w', T'T', c'c', q'q'$
- 标准差: $\sigma_u = \sqrt{\overline{u'u'}}$
- 协方差: $u'v', u'w', v'w'$ (动量通量)
 $w'T', w'c', w'q'$ (标量通量)
 $u_* = \sqrt{\overline{u'w'}}$ (摩擦速度)
- 湍流动能: $e = \frac{1}{2}(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})$

三阶统计量: 偏度 = $\frac{\overline{(u')^3}}{(\sigma_u)^3}$

四阶统计量: 峰度 = $\frac{\overline{(u')^4}}{(\sigma_u)^4}$

自由大气的运动和控制方程

理想气体状态方程 $P = \rho RT$

质量守恒方程
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

运动方程（牛顿第二定律）

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fv$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fu$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g$$

大气边界层流体的运动方程

运动方程
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f v$$

- 1: Reynolds分解 $\rho = \bar{\rho} + \rho'$, $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$, $P = \bar{P} + P'$
- 2: 把第一步的表达项目代入原公式
- 3: 第二步基础上做Reynolds平均
- 4: 做不可压缩流体的假设

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + f \bar{v} + \bar{F}_r \end{aligned}$$

大气边界层流体的质量守恒方程

质量守恒方程
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

1: Reynolds分解 $\rho = \bar{\rho} + \rho'$, $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$

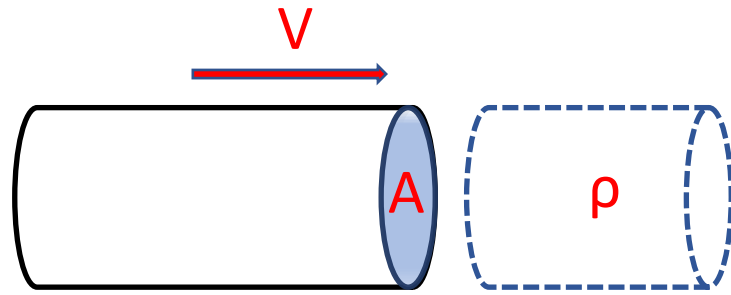
2: 把第一步的表达项目代入原公式

3: 第二步基础上做Reynolds平均

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{w})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(\overline{\rho'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{\rho'w'})}{\partial z} = 0 \end{aligned}$$

什么是通量？

定义：单位时间内通过单位面积的质量或者能量。



$$\text{通量} = \frac{\rho V A}{A} = \rho * V$$

V—流体速度

A—截面积

ρ—流体密度

生态系统净交换量 vs. 涡动相关通量

- 生态系统净交换量 (NEE)：一个生态系统（包括植被和其下面的土壤层）和其周围大气之间的物质或者能量的净交换量
- 涡动相关通量：被涡动相关系统（仪器）在其安装高度观测到的单位时间内，单位面积上通过的物质（CO₂, H₂O）或者能量（感热，潜热）

??

1. 在气候及天气研究，天气预报，生态系统和森林科学中，我们经常谈到碳循环，水循环和能量循环。哪个量是我们最关心，最想要得到的？生态系统净交换量 (NEE)，还是涡动相关通量？
2. 生态系统净交换量与涡动相关通量的相关和不同？

从气象学角度来定义NEE

1: 从质量守恒方程开始, $\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} = S$

2: Reynolds分解, $c = \bar{c} + c'$, $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$

3: 把第二步的表达项目代入原公式 (第一步)

4: 第三步基础上做Reynolds平均

5: 对第四步的方程做垂直方向的积分 (从地面到涡动相关系统的安装高度, Z_r)

地上植被的
源或汇 土壤呼吸

$$NEE = \int_0^{Z_r} S dz + (\bar{w} \bar{c} + \overline{w'c'})_{z=0}$$

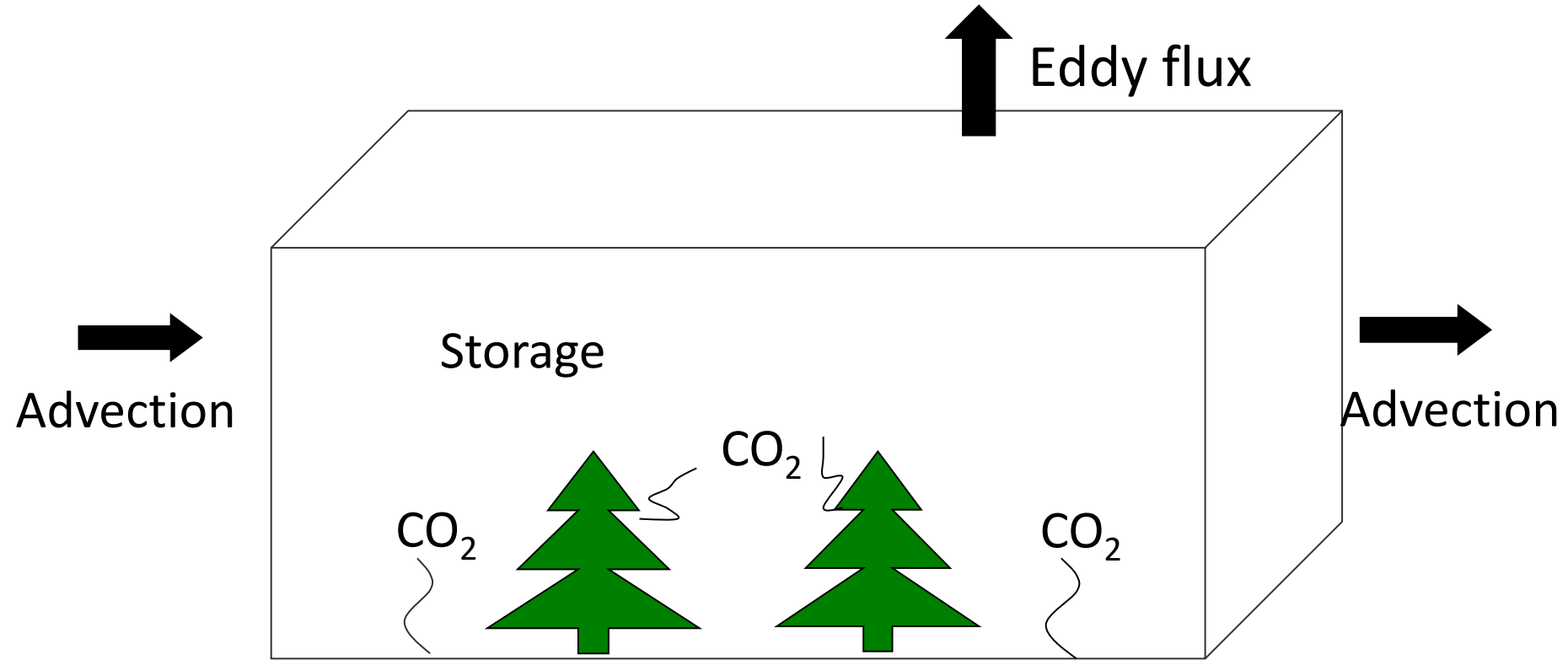
$$= \int_0^{Z_r} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz + \int_0^{Z_r} (\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) dz + (\bar{w} \bar{c} + \overline{w'c'})_{z=Z_r}$$

地上空气层内
储存项

水平平
流项

涡动相关
通量

组成NEE的三个分量

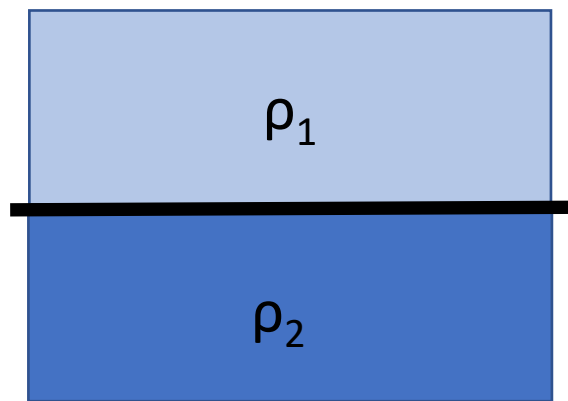


小结:

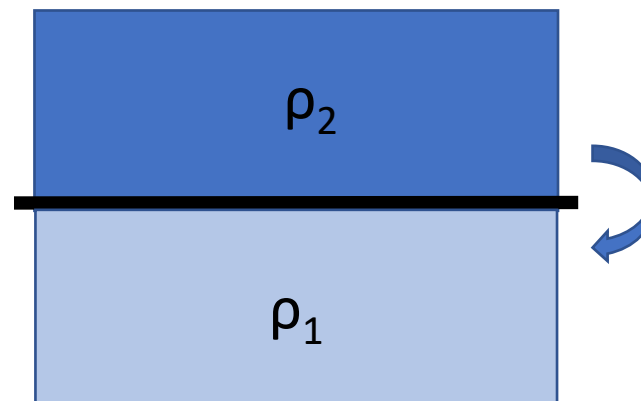
1. 理论上讲，NEE和涡动相关通量(F_c)是不一样或者不等量的
2. 在特殊情况下（平流项和储存项都可以忽略不计）， $NEE \cong F_c$
3. 在条件（地形，大气，植被）不利的情况下， $NEE \neq F_c$

稳定性的概念

两种流体有着不同的密度, $\rho_1 < \rho_2$

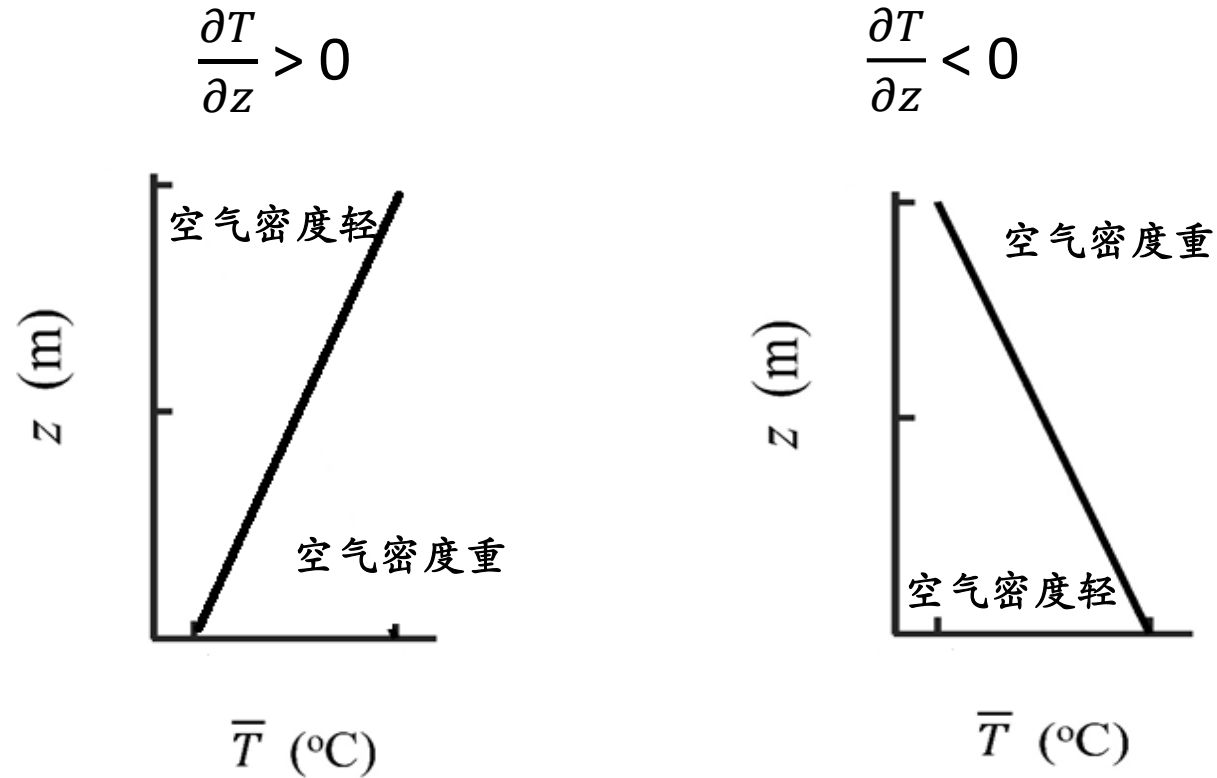


稳定



不稳定

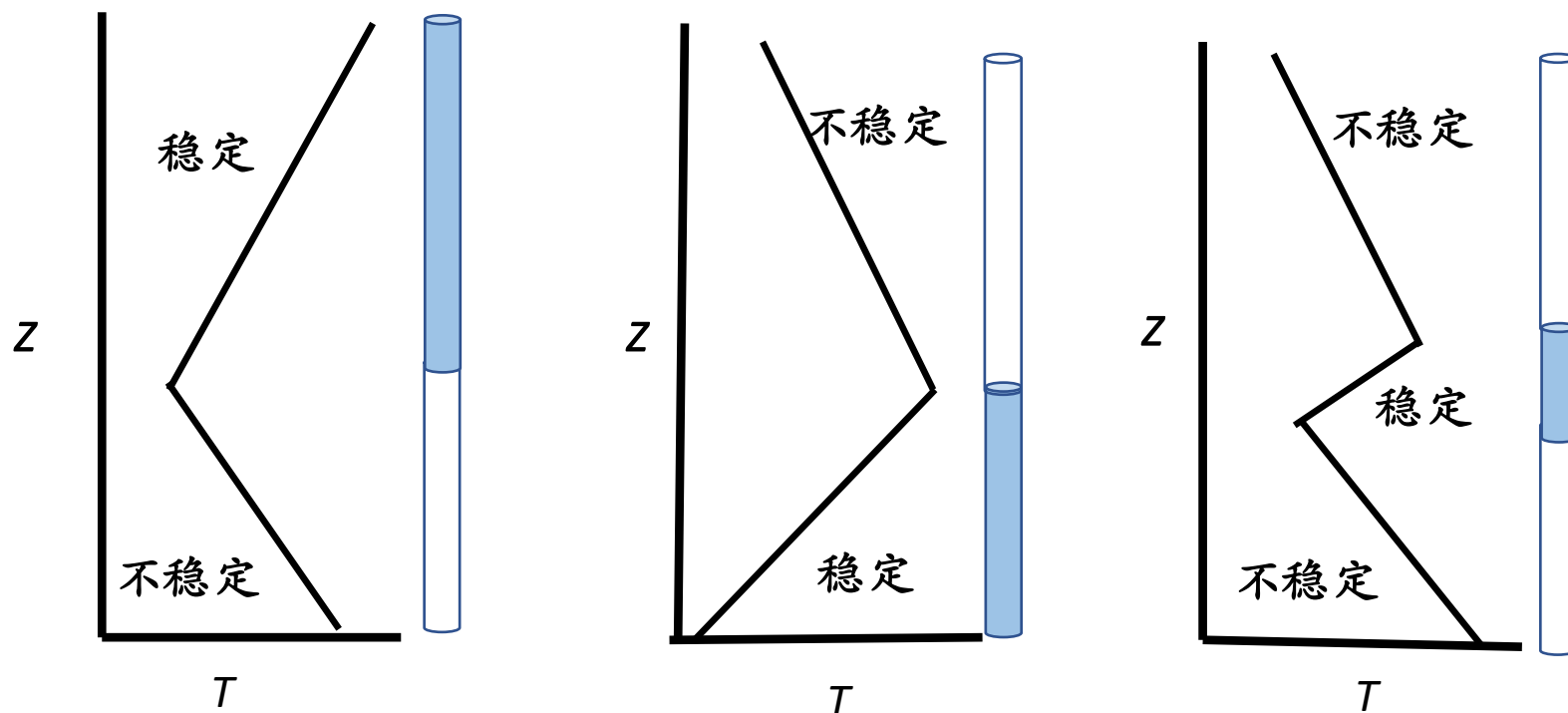
大气边界层稳定性



为什么 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 会改变符号?

哪一种情况下是稳定的或者是不稳定的, 白天对黑夜? 晴天对阴天?
稳定性是如何影响大气边界层湍流的?

大气中逆温层



??

大气中逆温层是如何影响涡动相关通量观测的?

涡动相关通量观测的理想条件

大气: (1) 不稳定 ($\frac{\partial(\bar{T})}{\partial z} < 0$, 无逆温层, 较强地表面加热), 较强湍流和垂直方向混合运动; (2) 状态变量不随时间变化, $\frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial t} = 0$

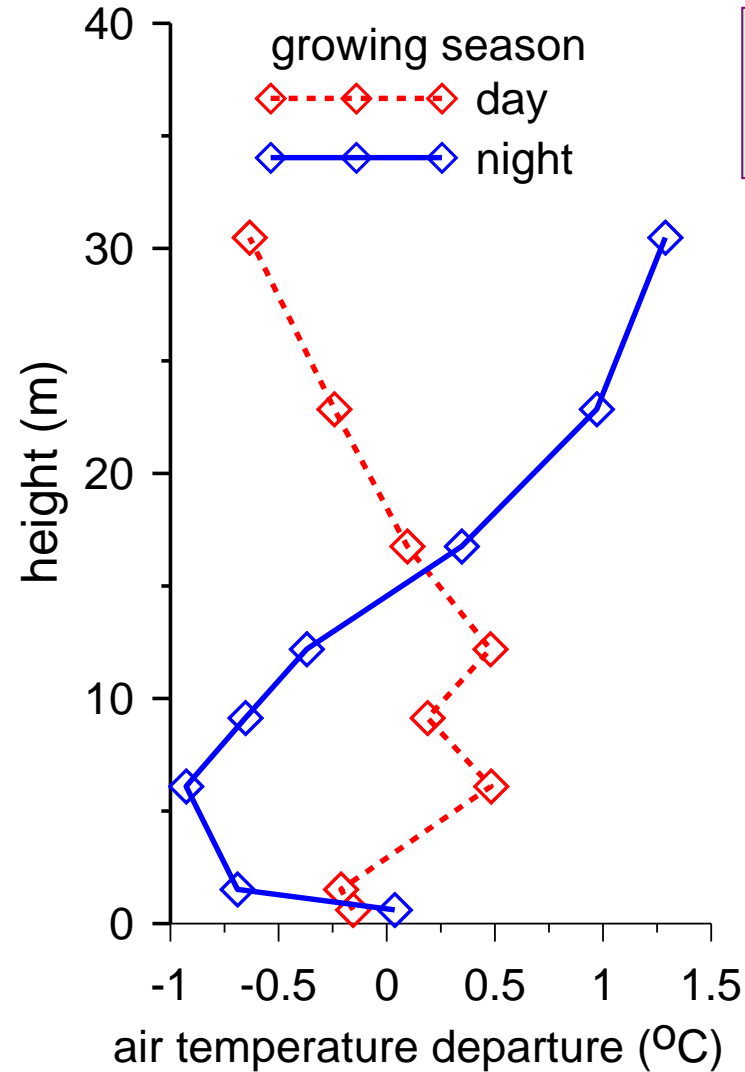
$$NEE \cong \left(\overline{w\bar{c}} + \overline{w'c'} \right)_{z=z_r}$$

地形与植被: (1) 地表及植被层均一, $\frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial y} = 0$; (2) 地表水平 (坡度尽量小), 没有因为坡度或者地形引起的地形风; (3) 盛行风向与超声测风仪的x方向平行, $\bar{v} = 0$, $\bar{w} = 0$

林地冠层内的逆温层结

夜间逆温情况下的稳定层结，间歇性弱湍流，垂直方向不能重分混合

$NEE \neq \overline{(w'c')}_{z=z_r}$
储存项不能被忽略!!



$$T = \frac{1}{z_r} \int_0^{z_r} T dz$$

如何测量储存项?

Campbell Sci
AP200



$$\text{Storage} = \sum_{i=1}^n \frac{C_t - C_{t-1}}{\Delta t} \Delta Z_i$$

非均一地表及带坡度地形



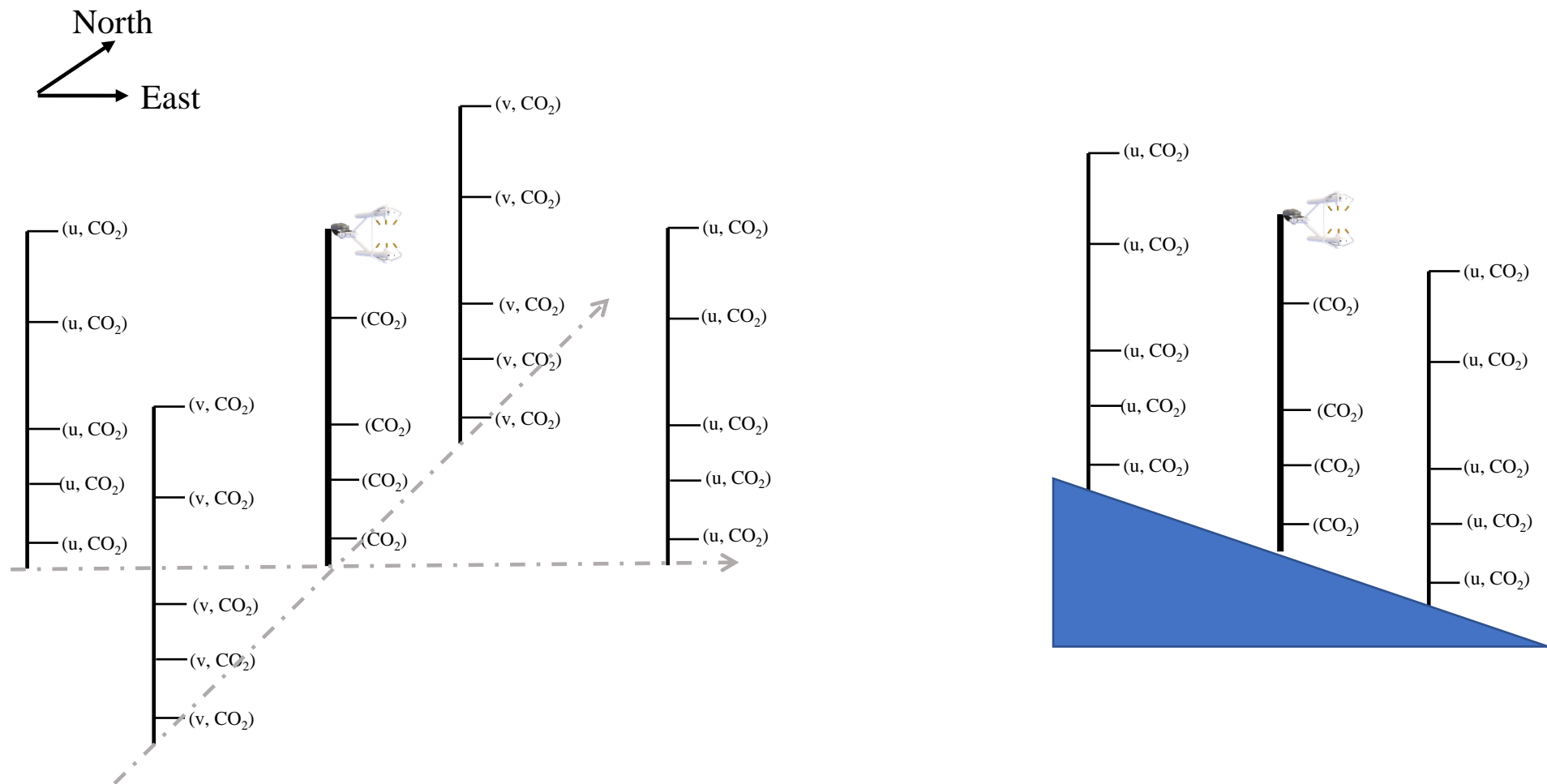
$$\frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial x} \neq 0, \quad \frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial y} \neq 0$$

地形导致比较复杂的气流，
很难确定盛行风向

$$NEE \neq \overline{(w'c')}_{z=z_r}$$

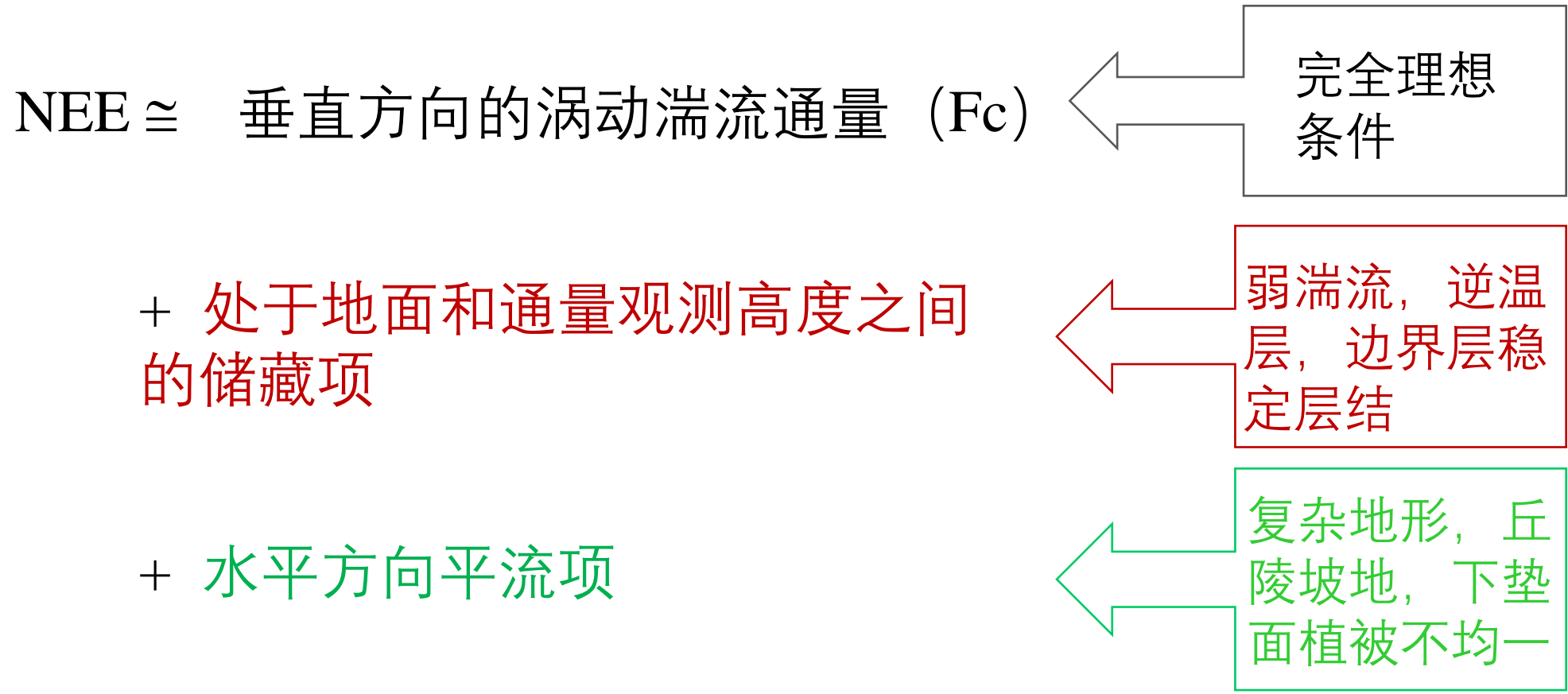
平流项不能被忽略！！

如何测量平流项?



$$\text{Advection} = \sum_{i=1}^n \left(u_i * \frac{c(x,i) - c(x-\Delta x,i)}{\Delta x} + v_i * \frac{c(y,i) - c(y-\Delta y,i)}{\Delta y} \right) \Delta z_i$$

小结(Eddy Covariance)



Thank you!

