



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

# 通量观测中的密度效应

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

# 主要内容

- 密度效应
- 涡度相关观测中的密度效应
- 通量梯度观测中的密度效应
- 箱式法测定通量的密度效应
- 其他引起虚假 $\text{CO}_2$ 吸收的原因

# 停车场零CO<sub>2</sub>通量试验

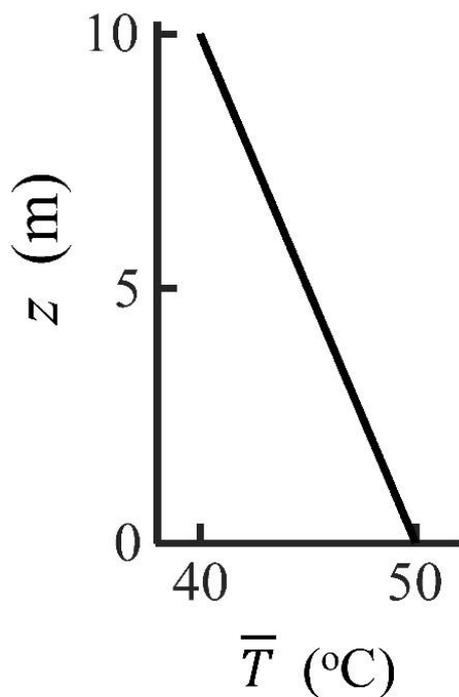
3



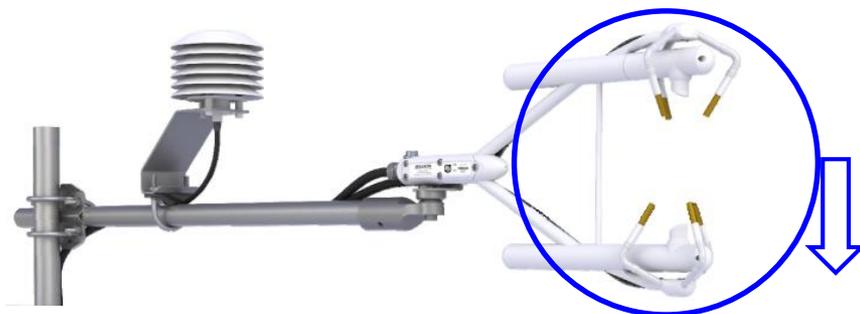
Courtesy of Leuning, 2010

# 试验一

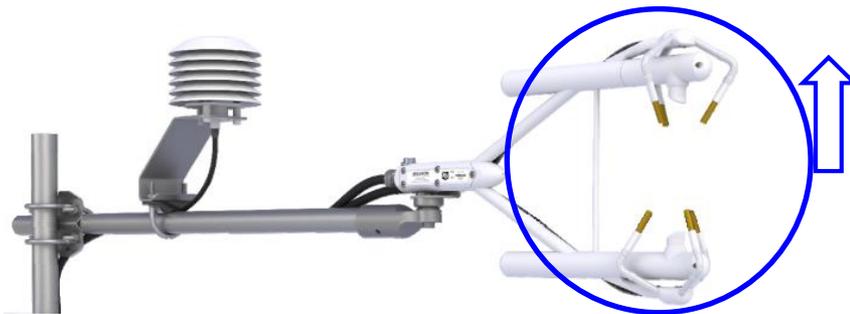
4



□ 炎热的夏季午后，干燥的停车场



$$\begin{aligned}w' &< 0 \\T' &< 0 \\ \rho'_c &> 0\end{aligned}$$

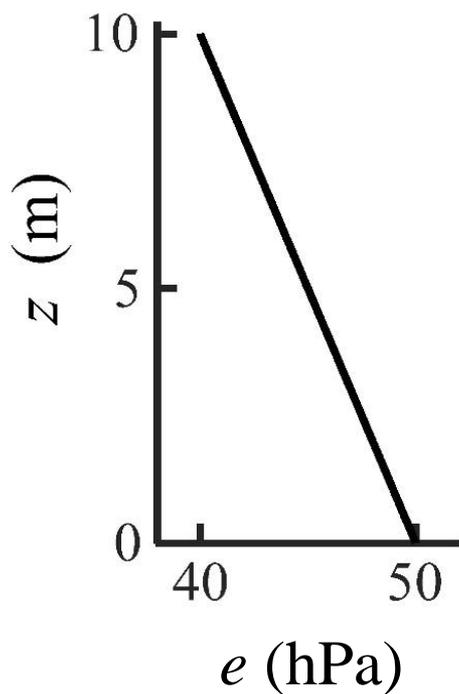


$$\begin{aligned}w' &> 0 \\T' &> 0 \\ \rho'_c &< 0\end{aligned}$$

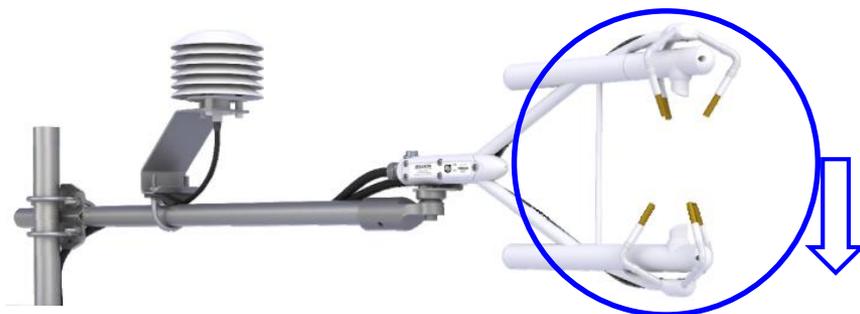
$$\overline{w' \rho'_c} < 0 \quad \text{吸收?}$$

# 试验二

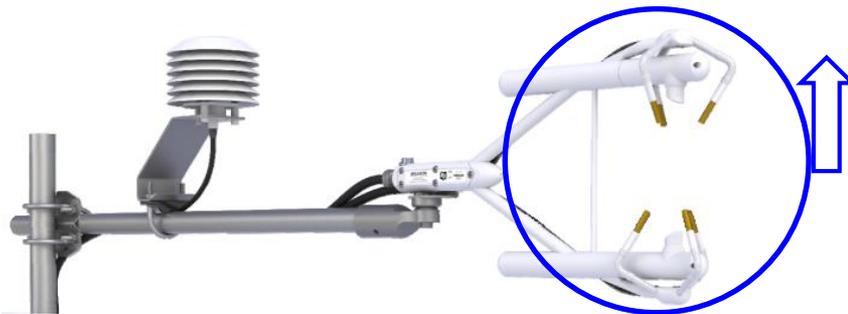
5



□ 炎热的夏季午后，湿润的停车场



$$\begin{aligned} w' &< 0 \\ \rho'_v &< 0 \\ \rho'_c &> 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} w' &> 0 \\ \rho'_v &> 0 \\ \rho'_c &< 0 \end{aligned}$$

$$\overline{w' \rho'_c} < 0 \quad \text{吸收?}$$

# 大气边界层中的主动和被动标量

6

- 干空气是热量、水汽和痕量气体进行湍流扩散的媒介。
- 主动标量（温度、湿度、气溶胶）扩散和传输会改变干空气动力性质，运动方程中需考虑。
  - ▣ 温度变化 → 密度变化 → 大气稳定度变化(气压梯度)
  - ▣ 湿度变化 → 密度变化(相态变化) → 大气稳定度变化
  - ▣ 气溶胶 → 吸收和发射辐射 → 温度变化
- CO<sub>2</sub>和污染气体等被动标量不会改变干空气动力性质。

# 密度效应

- 干空气密度 $\rho_d$ 变化的原因
  - ▣ 标准大气中，气压随高度指数递减， $\rho_d$ 随高度指数下降。
  - ▣ 湍流尺度上， $\rho_d$ 会随温度和湿度脉动而改变。
  - ▣ 仪器工作产生的热量会引起 $\rho_d$ 改变。
  - ▣ 通量箱中 $\rho_d$ 会随外界背景条件改变而变化。
- 密度效应:干空气密度波动对气体通量观测的干扰。
- $\text{CO}_2$ 和水汽密度随源汇强度和干空气密度的变化而改变，如何考虑干空气密度变化，将源汇强度信号从观测信号中分离出来？

# 理解密度效应的前提

8

- 理想气体状态方程

$$p_d = \rho_d R_d T \quad p_v = \rho_v R_v T \quad p_c = \rho_c R_c T$$

- 道尔顿分压定律

$$p = p_d + p_v + p_c + \dots \simeq p_d + p_v$$

- 干空气通量为零（约束方程）：大气边界层中无干空气的源和汇，既没有干空气生成也没有干空气消耗。

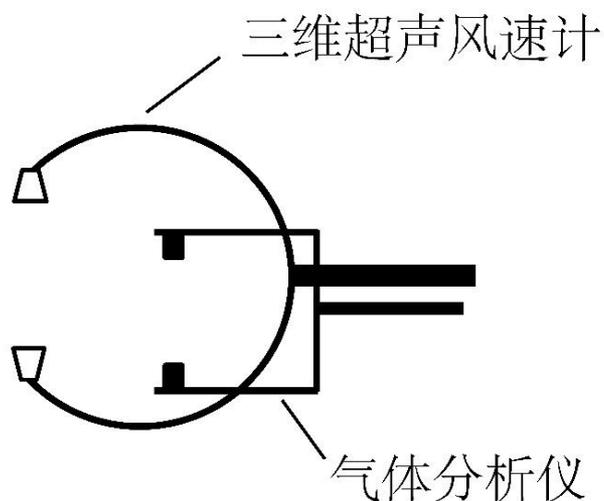
# 主要内容

9

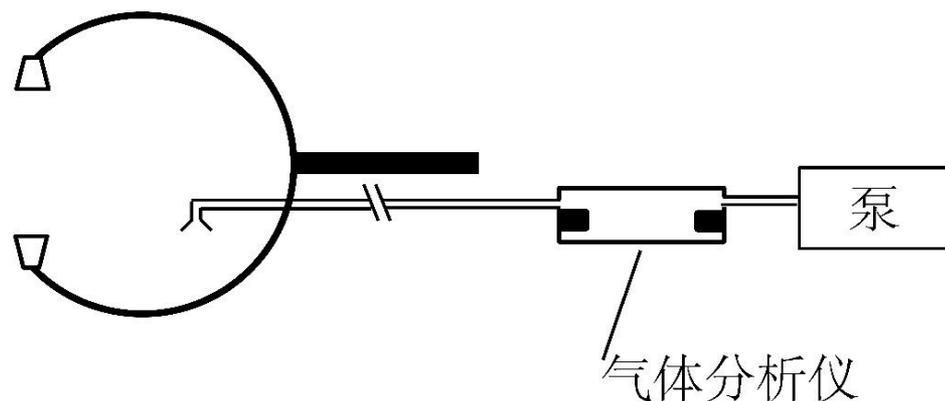
- 密度效应
- 涡度相关观测中的密度效应
- 通量梯度观测中的密度效应
- 箱式法测定通量的密度效应
- 其他引起虚假CO<sub>2</sub>吸收的原因

# 开路 and 闭路 湍度相关系统及其输出

10



$u, v, w, T_s, \rho_v, \rho_c, p$



$u, v, w, T_s, \rho_v(s_v), \rho_c(s_c), p$

$$s_v = \frac{\rho_v}{\rho_d} \quad s_c = \frac{\rho_c}{\rho_d}$$

- 气体分析仪依据比尔定律测定目标气体的质量密度，而非混合比，当气压和温度测定准确时，质量密度可以转换为质量混合比。

# NEE的计算

11

## □ NEE完整表达式

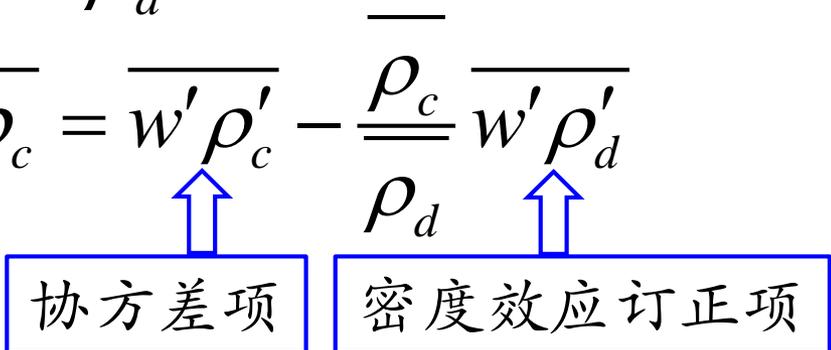
$$\begin{aligned} \text{NEE} = & \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial t} dz'}_{\text{储存项}} + \underbrace{\bar{\rho}_d \overline{w' s'_c}}_{\text{涡度协方差项}} \\ & + \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \bar{u} \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial x} dz'}_{\text{水平平流项}} + \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \bar{w} \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial z} dz'}_{\text{垂直平流项}} + \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \frac{\partial \overline{u' s'_c}}{\partial x} dz'}_{\text{水平通量辐散项}} \end{aligned}$$

## □ 无平流、无辐散且稳态

$$\text{NEE} = \bar{\rho}_d \overline{w' s'_c}$$

# WPL 理论 (Webb, Pearman, Leuning, 1980)

12

- 真实的CO<sub>2</sub>通量  $F_c = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho'_c} + \overline{w\rho_c}$
- 干空气通量  $F_d = \overline{w\rho_d} = \overline{w'\rho'_d} + \overline{w\rho_d} = 0 \Rightarrow$
- WPL速度 (<1 mm s<sup>-1</sup>)  $\overline{w} = -\frac{\overline{w'\rho'_d}}{\rho_d}$
- 真实的CO<sub>2</sub>通量  $F_c = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho'_c} - \frac{\rho_c}{\rho_d} \overline{w'\rho'_d}$   


**Table 1.1** History of the development of the eddy covariance method

| Historical milestone   | References  | See chapter/<br>section    |
|--|---|----------------------------|
| Theoretical basis of the eddy covariance method                      | Montgomery (1948), Swinbank (1951), Obukhov (1951)                          | Section 1.2                |
| Three-dimensional sonic anemometer                                   | Bovscheverov and Voronov (1960), Kaimal and Businger (1963), Mitsuta (1966) | Chapter 2                  |
| Instrumental requirements  | McBean (1972)   | Chapter 2                  |
| Gas analyzer for water vapor (UV)                                    | Buck (1973), Kretschmer and Karpovitsch (1973), Martini et al. (1973)       |                            |
| Gas analyzer for water vapor (IR)                                    | Elagina (1962), Hyson and Hicks (1975), Raupach (1978)                      | Chapter 2                  |
| Correction of the effect of the air density                          | Webb et al. (1980)  | Section 4.1                |
| Gas analyzer for carbon dioxide (IR)                                 | Ohtaki and Matsui (1982), Elagina and Lazarev (1984)                        | Chapter 2                  |
| Transformation of buoyancy flux into sensible heat flux              | Schotanus et al. (1983)   | Section 4.1                |
| System of transfer functions for spectral correction                 | Moore (1986)  | Section 4.1                |
| Fetch conditions   | Gash (1986)   | Chapter 8                  |
| Real-time data processing software                                   | McMillen (1988)   | Chapter 3                  |
| Source regions for fluxes (footprint), based on Gash (1986)          | Schmid and Oke (1990), Schuepp et al. (1990)                                | Chapter 8                  |
| Relaxed eddy accumulation method, based on Desjardins (1977)         | Businger and Oncley (1990)  |                            |
| Influence of tubing of closed path sensors                           | Leuning and Moncrieff (1990)  | Section 4.1.3<br>Chapter 3 |
| Theoretical basis for flux footprints and sampling strategies        | Horst and Weil (1994), Lenschow et al. (1994)                               | Chapter 8                  |
| Addressing the problem of the unclosed energy balance at the surface | Foken and Oncley (1995)   | Section 4.2                |
| Quality tests for eddy covariance data                               | Foken and Wichura (1996), Vickers and Mahrt (1997)                          | Section 4.3                |
| Addressing the problem of vertical advection                         | Lee (1998) and many others  | Section 1.3,<br>Chapter 5  |
| Methodology for FLUXNET network (EuroFlux)                           | Aubinet et al. (2000)   | All chapters               |
| Gap filling in the FLUXNET network                                   | Falge et al. (2001a, b)   | Chapter 6                  |
| Organization of an international network (FLUXNET)                   | Baldocchi et al. (2001)   | All chapters               |

Foken et al. (1995), Foken (2008), Moncrieff (2004), modified

- 气体分析仪依据比尔定律测定气体质量密度，而非质量混合比，需要将 $\overline{w's'_c}$ 转换为 $\overline{w'\rho'_c}$ 。
- 根据质量混合比定义，密度的脉动量远小于平均量，泰勒级数展开后。

$$\text{NEE} = \bar{\rho}_d \overline{w's'_c} = \overline{w'\rho'_c} - \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{\rho}_d} \overline{w'\rho'_d}.$$

# 干空气密度波动（无法观测）

15

$$\begin{aligned}
 p_d &= \rho_d R_d T \\
 p_v &= \rho_v R_v T \\
 p &\simeq p_d + p_v
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \rho_d = \frac{M_d p}{RT} - \mu \rho_v = \frac{M_d (\bar{p} + p')}{R(\bar{T} + T')} - \mu(\bar{\rho}_v + \rho'_v)$$

$\downarrow$  雷诺平均

$$\bar{\rho}_d = \frac{M_d \bar{p}}{R \bar{T}} - \mu \bar{\rho}_v$$

$$\rho'_d = \rho_d - \bar{\rho}_d$$

水汽密度脉动

$$\mu = \frac{M_d}{M_v}$$

$$\rho'_d = \bar{\rho}_d \left( 1 + \mu \bar{s}_v \right) \left( \frac{p'}{\bar{p}} - \frac{T'}{\bar{T}} \right) - \mu \rho'_v$$

气压脉动

温度脉动

# 开路式EC密度效应订正完整表达式

16

$$F_c = \overline{w'\rho'_c} - \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_d}} \overline{w'\rho'_d}$$
$$\rho'_d = \bar{\rho}_d(1 + \mu\bar{s}_v) \left( \frac{p'}{\bar{p}} - \frac{T'}{\bar{T}} \right) - \mu\rho'_v$$
$$\text{NEE} = \overline{w'\rho'_c} - \bar{\rho}_c(1 + \mu\bar{s}_v) \left( \frac{\overline{w'p'}}{\bar{p}} \right) + \bar{\rho}_c(1 + \mu\bar{s}_v) \left( \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}} \right) + \mu\bar{s}_c \overline{w'\rho'_v}$$

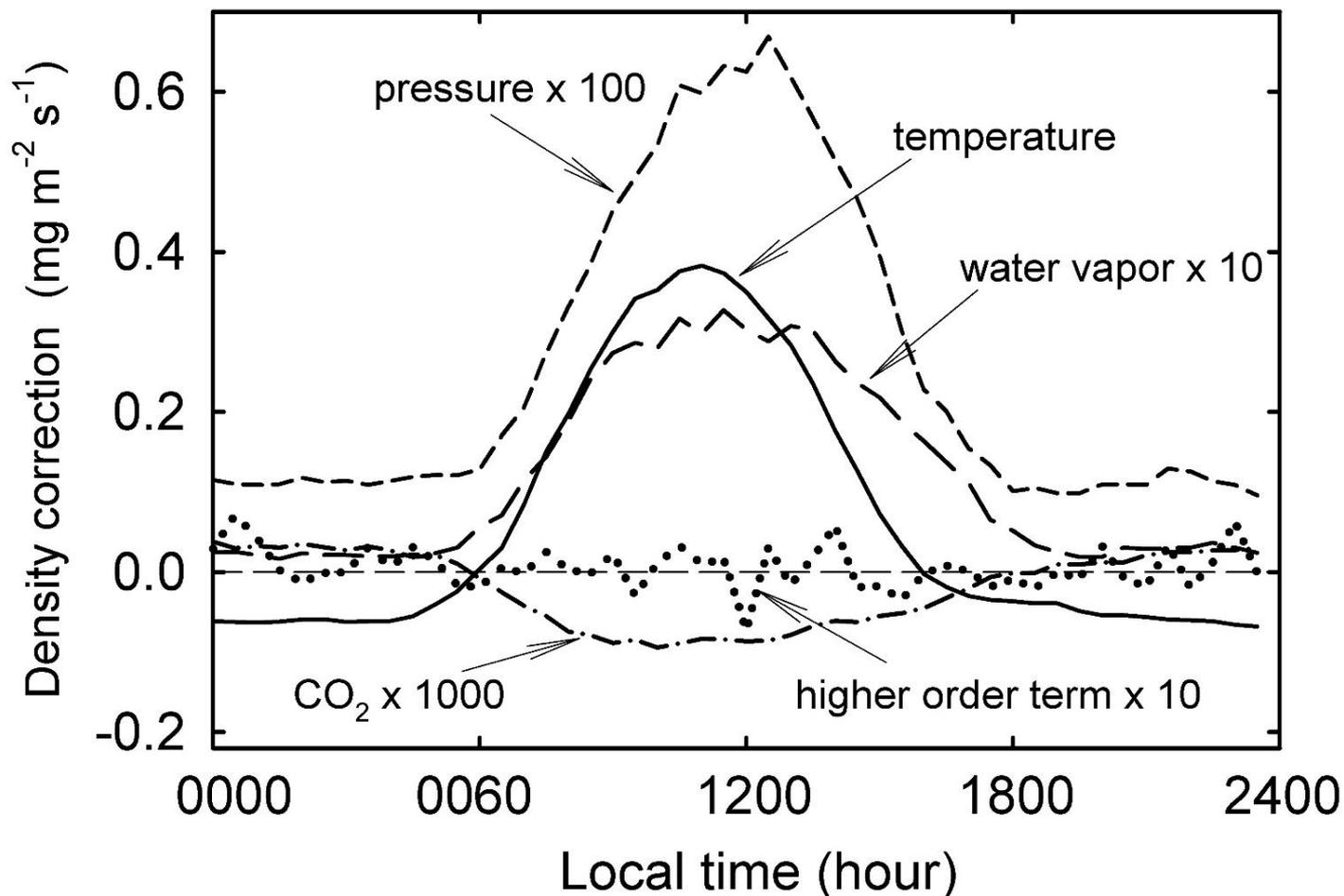
气压校正项  
可忽略

温度校正项  
最大

水汽校正项  
干燥可去除

# 密度效应订正项的日变化

17



# 密度效应订正项量级大小

18

$$F_{d,T} = (1 + \mu_v \bar{\omega}_v) \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}} \bar{\rho}_c,$$

$$F_{d,v} = \mu_v \frac{\overline{w'\rho'_v}}{\bar{\rho}_d} \bar{\rho}_c,$$

$$F_{d,p} = -(1 + \mu_v \bar{\omega}_v) \frac{\overline{w'p'}}{\bar{p}} \bar{\rho}_c,$$

$$F_{d,c} = \mu_c \frac{\overline{w'\rho'_c}}{\bar{\rho}_d} \bar{\rho}_c,$$

$$F_{d,h} = -(1 + \mu_v \bar{\omega}_v) \frac{1}{\bar{T}} \left( \frac{\overline{w'T'^2}}{\bar{T}} \right) \bar{\rho}_c.$$

**Table 1** Density corrections to the annual net ecosystem carbon exchange at a mixed forest in north-east China (Zhang et al. 2011)

| Term       | $F_{d,T}$ | $F_{d,v}$ | $F_{d,p}$ | $F_{d,c}$ | $F_{d,h}$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Annual sum | 552       | 88        | 40        | 5         | -0.1      |

All correction terms are in  $\text{g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$

Zhang et al., 2011; Lee and Massman, 2011

# 忽略气压校正项后

19

$$NEE \approx \boxed{\overline{w' \rho'_c}} + \boxed{\bar{\rho}_c (1 + \mu \bar{s}_v) \left( \frac{\overline{w' T'}}{\bar{T}} \right)} + \boxed{\mu \bar{s}_c \overline{w' \rho'_v}}$$

$$E = \overline{w' \rho'_v} - \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_d} \overline{w' \rho'_d} \approx \boxed{\overline{w' \rho'_v}} + \boxed{\bar{\rho}_v (1 + \mu \bar{s}_v) \left( \frac{\overline{w' T'}}{\bar{T}} \right)} + \boxed{\mu \bar{s}_v \overline{w' \rho'_v}}$$

协方差项

温度校正项

水汽校正项

# 闭路式EC密度效应修正

20

- 开路式EC密度效应修正（温度、水汽、气压校正项）

$$\begin{aligned} \text{NEE} = & \overline{w'\rho'_c} - \bar{\rho}_c(1 + \mu\bar{s}_v)\left(\frac{\overline{w'p'}}{\bar{p}}\right) \\ & + \bar{\rho}_c(1 + \mu\bar{s}_v)\left(\frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}}\right) + \mu\bar{s}_c(\overline{w'\rho'_v}) \end{aligned}$$

- 闭路式EC密度效应修正（水汽校正项）

$$\text{NEE} = \overline{w'\rho'_c} + \mu\bar{s}_c(\overline{w'\rho'_v})$$

# 加干燥装置闭路式EC密度效应订正

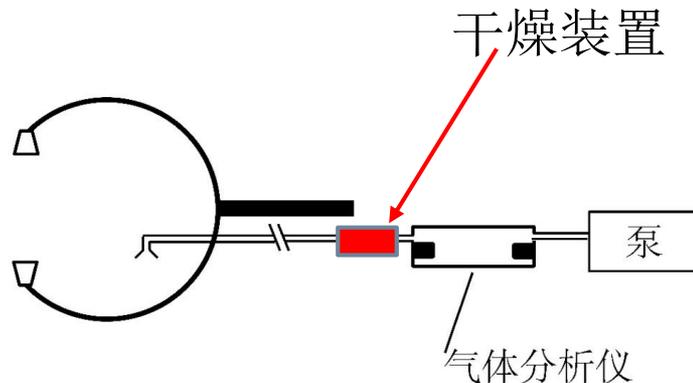
21

- 闭路式EC密度效应订正（水汽校正项）

$$NEE = \overline{w'\rho'_c} + \mu\bar{s}_c(\overline{w'\rho'_v})$$

- 加干燥装置后，闭路式EC无需密度效应订正，适合于海洋等低通量下垫面，但无法测定水汽密度。

$$NEE = \overline{w'\rho'_c}$$



# 主要内容

22

- 密度效应
- 涡度相关观测中的密度效应
- 通量梯度观测中的密度效应
- 箱式法测定通量的密度效应
- 其他引起虚假 $\text{CO}_2$ 吸收的原因

# 通量梯度关系中密度效应

23

- 菲克定律：流体中的气体分子通量与其浓度梯度成正比，系数即为分子扩散率。

$$\text{Flux} = g(C_s - C_a)$$

- 通量梯度关系（质量密度）

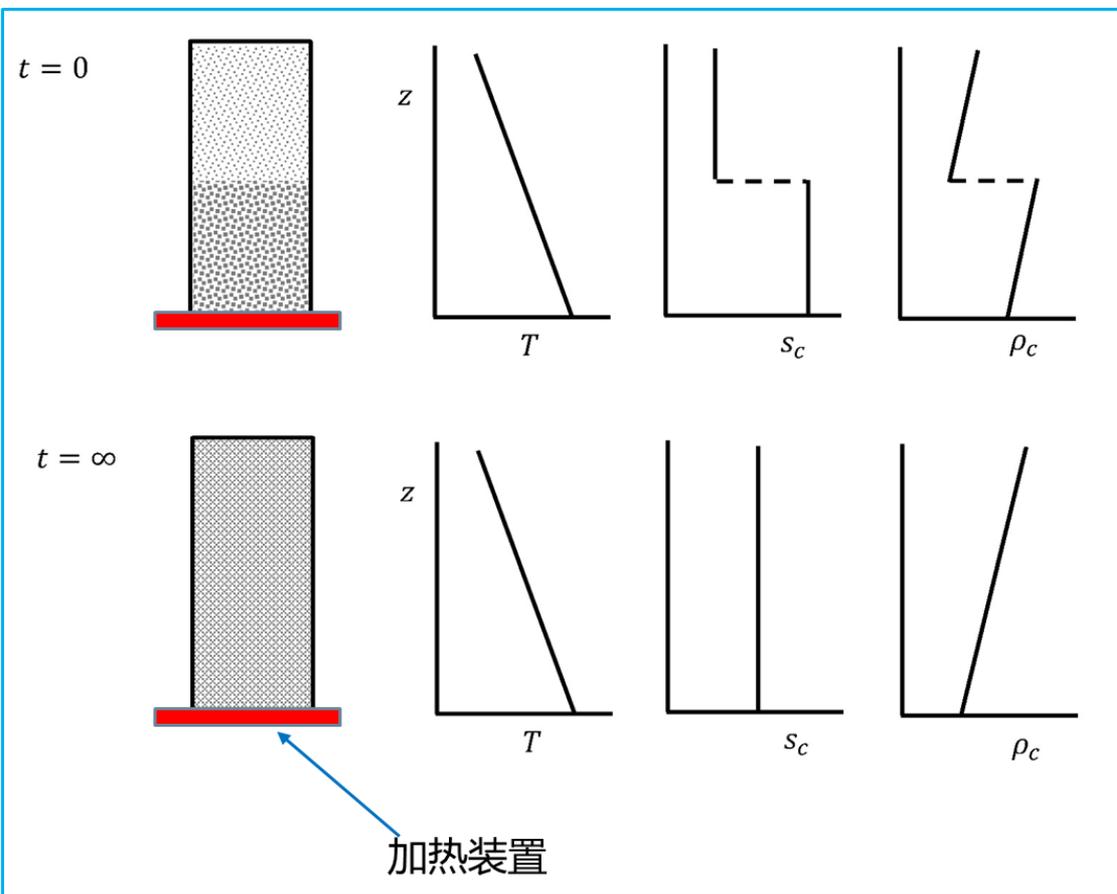
$$F_c = -K_c \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial z}$$

- 通量梯度关系（质量混合比）

$$F_c = -K_c \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial z}$$

# 密闭空间中CO<sub>2</sub>扩散试验

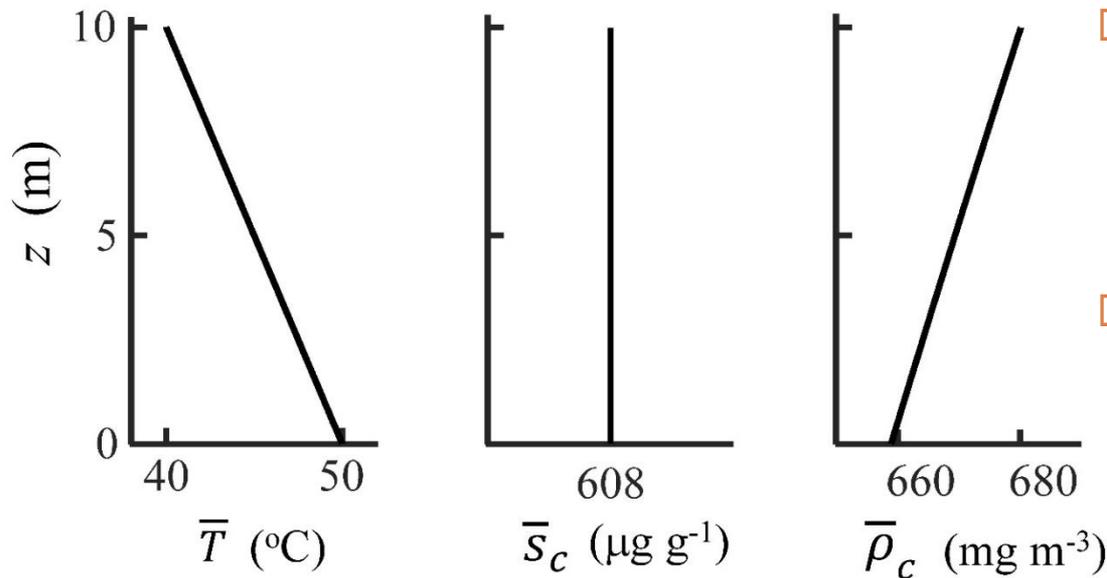
24



- $t=0$ , 密闭箱体被分为上下两个隔间;
- $t=\infty$ , 撤离挡板许久后的新稳态;
- 利用通量梯度关系 (密度) 在  $t=\infty$  时得到向下的CO<sub>2</sub>通量;
- 利用通量梯度关系 (质量混合比) 可避免密度效应。

# 沙漠中虚假的CO<sub>2</sub>通量

25



- 实际CO<sub>2</sub>通量为0;
- 利用通量梯度关系 (密度) 得到向下的CO<sub>2</sub>通量;
- 湍流扩散系数为0.3 m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>时, 虚假CO<sub>2</sub>通量为-0.6 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 即-52 t C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>。

# 通量梯度关系中密度效应订正

- 密度效应订正（忽略垂直气压梯度）：

$$F_c = -K_c \left[ \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial z} + (1 + \mu \bar{s}_v) \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \mu \bar{s}_c \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} \right]$$

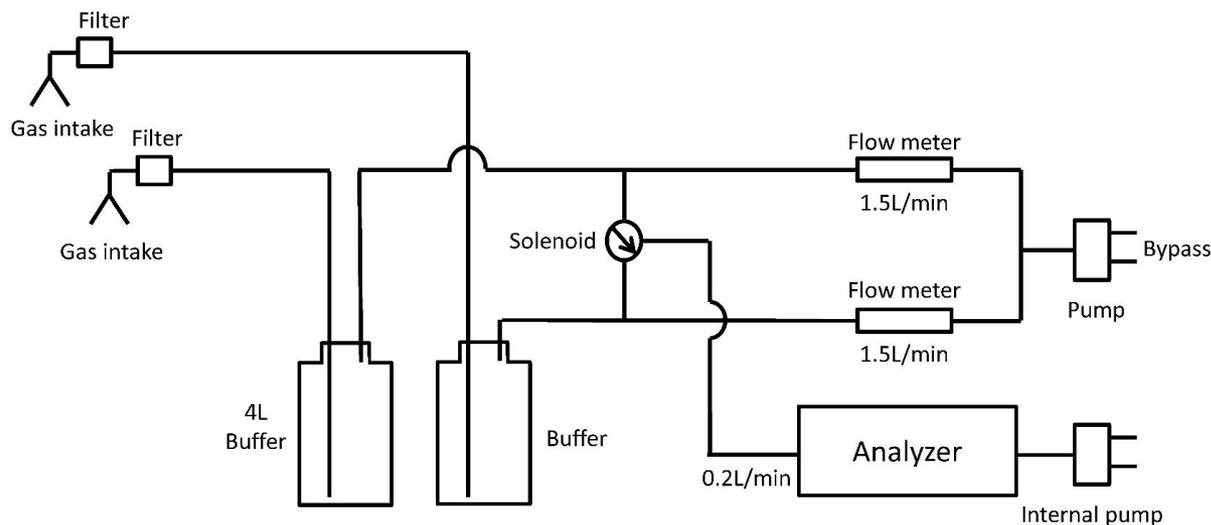
$$F_v = -K_v \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{s}_v}{\partial z} = -K_v (1 + \mu \bar{s}_v) \left( \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} + \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)$$

- 式中，所有的梯度变量都由原位观测获得。

# 气体浓度梯度由闭路分析仪测得

27

- 从两个进气口将气样连续抽入，利用分析仪轮流测定两股气流中目标气体的浓度，无温度梯度。



$$F_c = -K_c \left[ \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial z} + (1 + \mu \bar{s}_v) \frac{\bar{\rho}_c}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + \mu \bar{s}_c \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} \right]$$

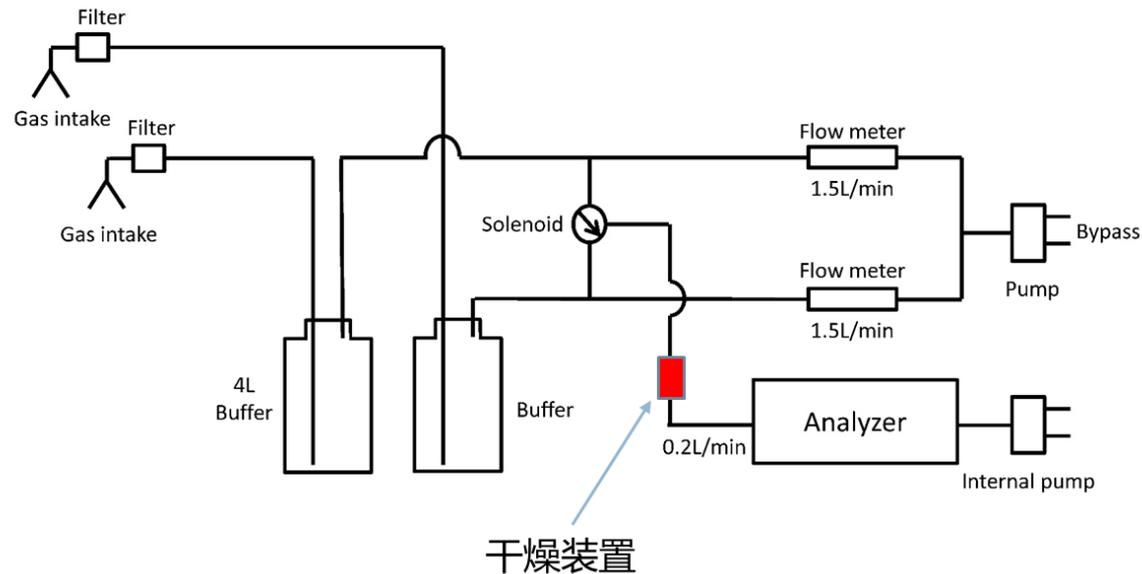
↓

$$F_c = -K_c \left[ \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial z} + \mu \bar{s}_c \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} \right]$$

# 加干燥装置后

28

- 两股气样被抽入温度相同的腔室，且在测量前过滤了水汽。



$$F_c = -K_c \left[ \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial z} + (1 + \mu \bar{s}_v) \frac{\bar{\rho}_c}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + \mu \bar{s}_c \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} \right] \Rightarrow F_c = -K_c \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial z}$$

# 主要内容

29

- 密度效应
- 涡度相关观测中的密度效应
- 通量梯度观测中的密度效应
- 箱式法测定通量的密度效应
- 其他引起虚假CO<sub>2</sub>吸收的原因

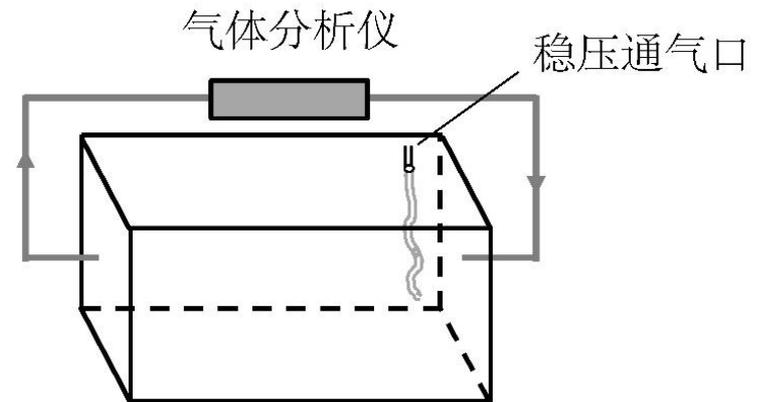
# 箱式法测定通量的密度效应

30

## □ 密闭的静态箱

$$F_c = \rho_d \frac{V}{A} \frac{\partial s_c}{\partial t} \quad F_c = \frac{V}{A} \frac{\partial \rho_c}{\partial t}$$

## □ 装有稳压通气口的静态箱



$$F_c = \frac{V}{A} \left[ \frac{\partial \rho_c}{\partial t} + (1 + \mu \bar{s}_v) \left( \frac{\rho_c}{T} \frac{\partial T}{\partial t} + \mu \bar{s}_v \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \right) \right]$$



# 主要内容

32

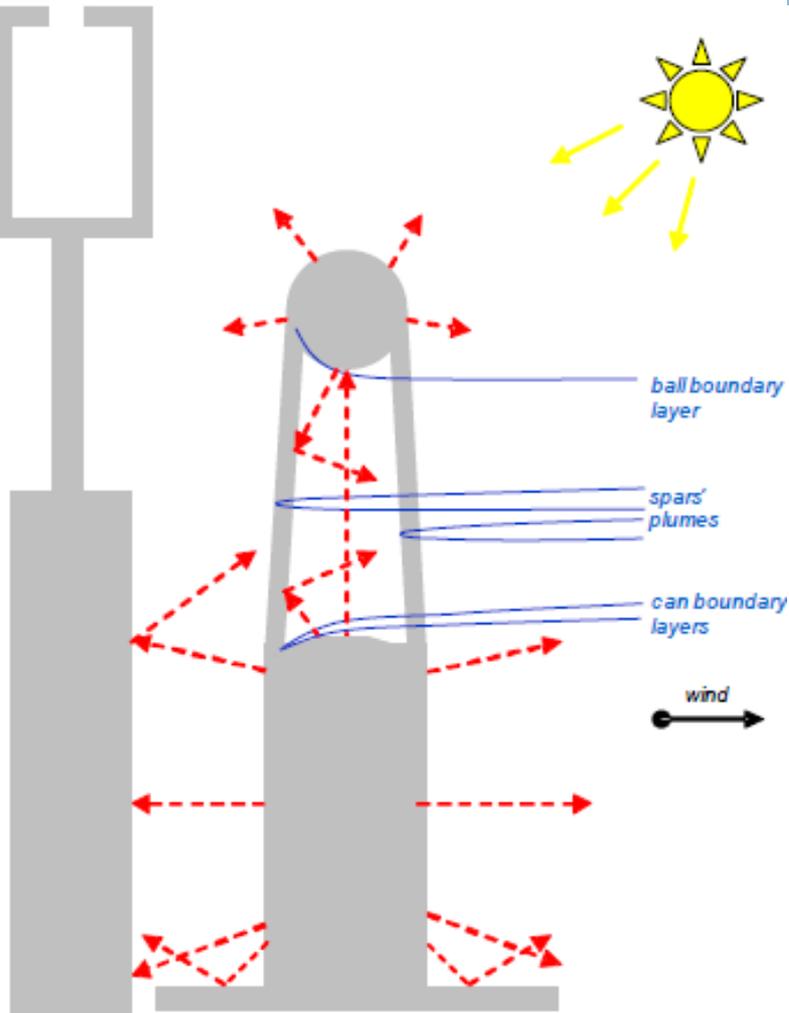
- 密度效应
- 涡度相关观测中的密度效应
- 通量梯度观测中的密度效应
- 箱式法测定通量的密度效应
- 其他引起虚假 $\text{CO}_2$ 吸收的原因

# 三个导致虚假CO<sub>2</sub>吸收的情况

- 自加热：仪器电子器件工作产生的热量或太阳辐射照射到镜面，如LI-7500 (Burba et al., 2008)。
- 光谱效应（光谱增宽）：高频温度观测损失或光谱交叉干扰，EC150和IRGASON (Bogoev et al., 2014; Wang et al., 2016)。
- 误差传递：CO<sub>2</sub>浓度观测误差通过密度效应订正传递，所有的IRGAs (Wang et al., 2017)。

# 开路式EC自加热效应

34



- $t_1$ 时, 低风速,  $U' < 0$ ,  $U'w' < 0$ ,  $w' > 0$ , 表面加热, 空气膨胀,  $CO_2' < 0$ 。
- $t_2$ 时, 高风速,  $U' > 0$ ,  $U'w' < 0$ ,  $w' < 0$ , 自加热微弱, 空气膨胀微弱,  $CO_2' \approx 0$ 。
- 上升气流传输的 $CO_2$ 少于下沉气流传输的 $CO_2$ , 虚假 $CO_2$ 吸收。

In blue – flow patterns of warmed air (boundary layers & wakes)

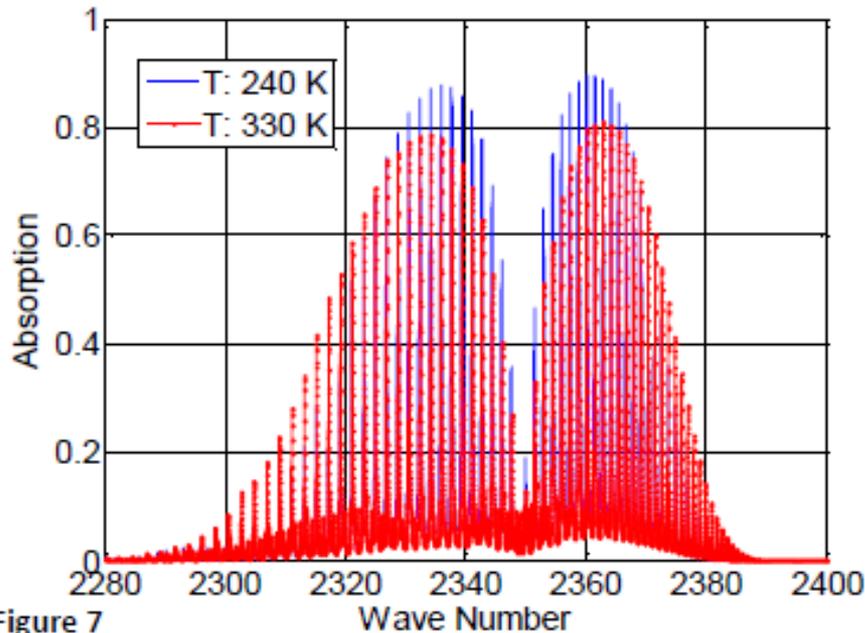
In dotted red – thermal heat dissipation (longwave)

Burba and Anderson, 2010

# 高频温度损失引起的光谱效应

35

$$A = \frac{N}{(\Delta\nu)} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \left\{ 1 - \exp \left( - \frac{S_i \alpha_i CL}{\pi \left[ (\nu - \nu_{0i})^2 + \alpha_i^2 \right]} \right) \right\} d\nu$$



$$S_i = f_1(T, P) \quad \alpha_i = f_2(T, P)$$

$$\alpha_i(P, T) = \alpha_0 \frac{P}{P_0} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/2}$$

Jamieson et al. 1963

$$F'_c = F_c + 0.014257H - 0.066828$$

Bogoev et al. , 2015

Figure 7

# 沙漠冬季观测试验

36



Wang et al, 2016

# CO<sub>2</sub>浓度观测误差传递

37

$$F_c = \overline{w'\rho'_c} + \frac{(\overline{\rho_c} + \delta\overline{\rho_c})}{\overline{T}C_p\overline{\rho_a}} \left( 1 + \frac{\overline{\rho_v}M_a}{\overline{\rho_a}M_v} \right) H + \frac{(\overline{\rho_c} + \delta\overline{\rho_c})M_a}{\overline{\rho_a}M_v} \lambda E$$
$$= F'_c + bH$$

$$b = \frac{\delta\overline{\rho_c}}{\overline{T}C_p\overline{\rho_a}} \left( 1 + \frac{\overline{\rho_v}M_a}{\overline{\rho_a}M_v} \right) \left( \frac{\delta\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_c}} \right) \approx 0.05 \frac{\delta\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_c}}$$

- $F_c$ 为经WPL校正后的CO<sub>2</sub>观测通量， $F'_c$ 为真实CO<sub>2</sub>通量。
- 全球64个通量站分析得到， $\frac{\delta\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_c}} = -5\%$
- $b$ 约为 $-0.0025 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ per W m}^{-2}$

# 总结

- 开路EC通量观测结果必须进行密度效应订正（WPL校正），闭路EC观测结果无需温度订正，密度效应大大降低，如果加水汽干燥装置，闭路EC无需进行密度效应订正。
- 通量梯度法观测结果需要进行密度效应订正，如果两股气流被抽入同一腔体内测定，无温度梯度校正项，如果加水汽干燥装置，无需进行密度效应订正。
- 除密度效应订正外，自加热效应、光谱效应和观测误差传递也会影响EC通量观测结果。