



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

# 通量观测中的密度效应

王伟

南京信息工程大学

wangwnuist@163.com 15195915526

ChinaFLUX第十四次通量观测理论与技术培训  
北京 2019年8月7日

1

## 测定通量的主要方法

2

- 涡度相关法（开路 and 闭路）
- 通量梯度法
- 箱式法（静态箱 and 动态箱）
- 闪烁仪法（部分需要依靠地表能量平衡）
- 薄边界层法（多用于水体）

## 主要内容

3

- 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 $\text{CO}_2$ 通量试验

4

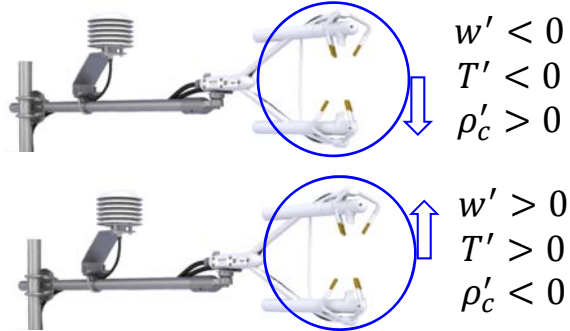
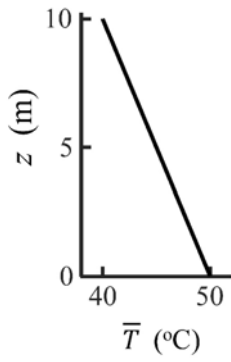


Courtesy of Leuning, 2010

# 试验一

5

□ 炎热的夏季午后，干燥的停车场

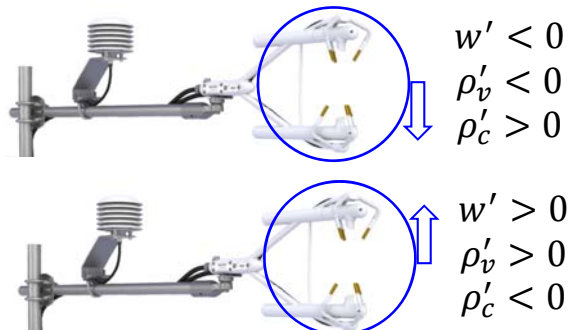
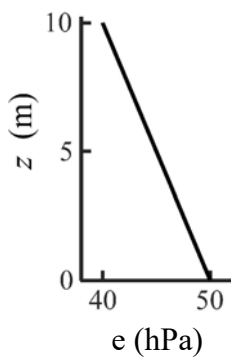


$\overline{w'\rho'_c} < 0$  吸收?

# 试验二

6

□ 炎热的夏季午后，湿润的停车场



$\overline{w'\rho'_c} < 0$  吸收?

## 大气边界层中的主动和被动标量

7

- 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

8

- 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。
- CO<sub>2</sub>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

9

- 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。

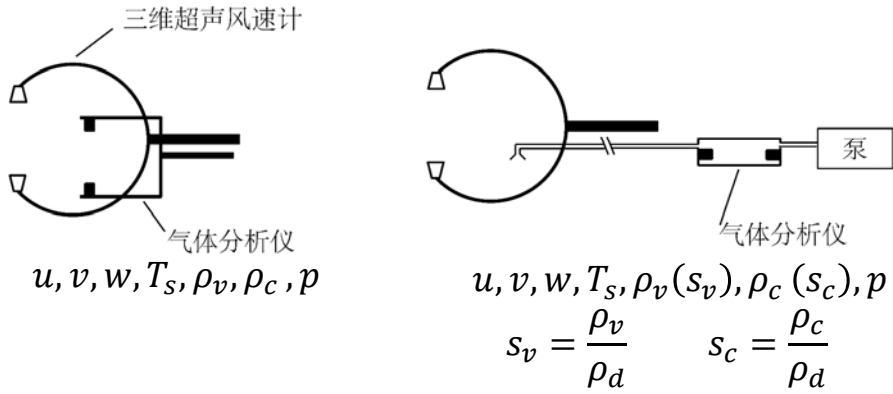
## 主要内容

10

- 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

## 开路和闭路涡度相关系统及其输出

11



- 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。

李旭辉、王伟等，2018

## NEE的计算

12

- NEE完整表达式

$$NEE = \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial t} dz'}_{\text{储存项}} + \underbrace{\bar{\rho}_d \overline{w's'_c}}_{\text{涡度协方差项}}$$

$$+ \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \bar{u} \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial x} dz'}_{\text{水平平流项}} + \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \bar{w} \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial z} dz'}_{\text{垂直平流项}} + \underbrace{\int_0^z \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{u}'s'_c}{\partial x} dz'}_{\text{水平通量辐散项}}$$

- 无平流、无辐散

$$NEE = \int_0^z \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{s}_c}{\partial t} dz' + \bar{\rho}_d \overline{w's'_c}$$

- 无平流、无辐散且稳态  $NEE = \bar{\rho}_d \overline{w's'_c}$

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

13

- 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  $F_c = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho'_c} - \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_d}} \overline{w'\rho'_d}$
- 协方差项      密度效应订正项

14

Table 1.1 History of the development of the eddy covariance method

Historical milestone	References	See chapter/section
Theoretical basis of the eddy covariance method	Montgomery (1948), Swinbank (1951), Obukhov (1951)	Section 1.2
Three-dimensional sonic anemometer	Bovascheverov 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), Rappach (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 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, 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

Aubinet et al., 2012

15

- 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。

$$NEE = \overline{\rho_d w' s'_c} = \overline{w' \rho'_c} - \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_d}} \overline{w' \rho'_d}$$

## 干空气密度波动（无法观测）

16

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

水汽密度脉动

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

气压脉动      温度脉动



## 开路式EC密度效应订正完整表达式

17

$$F_c = \overline{w'\rho'_c} - \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{\rho}_d} \overline{w'\rho'_d}$$

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

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

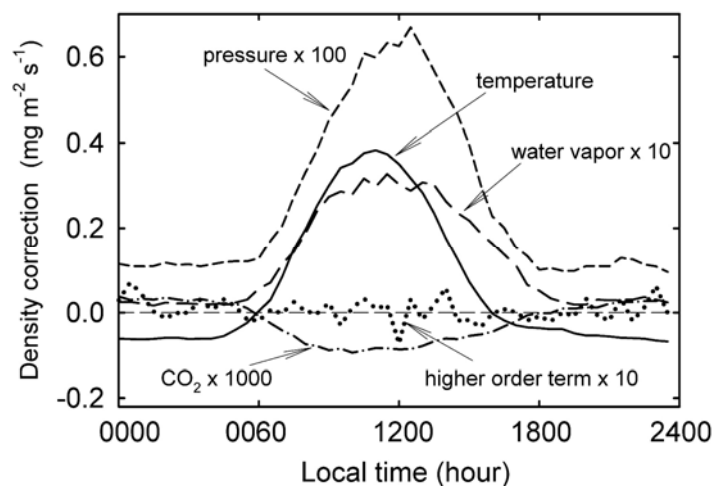
气压校正项  
可忽略

温度校正项  
最大

水汽校正项

## 密度效应订正项的日变化

18



Lee and Massman, 2011

## 密度效应订正项量级大小

19

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

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

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

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

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

**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

20

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

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

协方差项

温度校正项

水汽校正项

Webb et al., 1980; 李旭辉、王伟等, 2018

## 闭路式EC密度效应订正

21

- 开路式EC密度效应订正（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密度效应订正（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

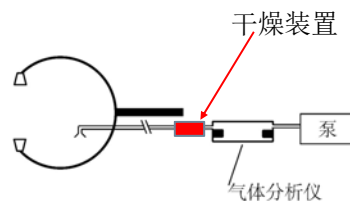
22

- 开路式EC密度效应订正

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

- 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。

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



## 主要内容

23

- 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

## 通量梯度关系中密度效应

24

- 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）

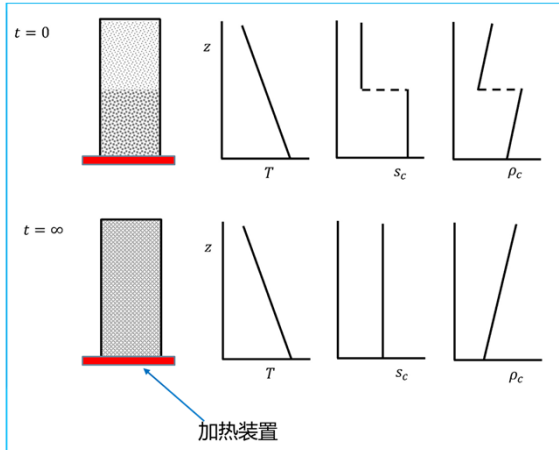
$$F_c = -K_c \frac{\partial \rho_c}{\partial z}$$

- 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

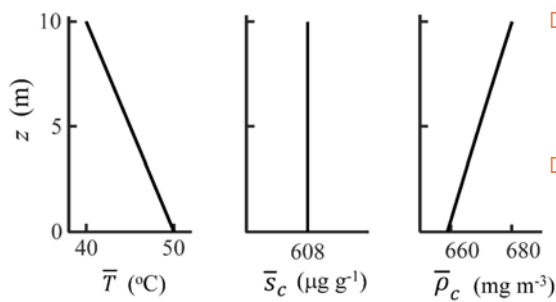
25



- $t=0$ , 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

26



- 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

27

- 密度效应订正（忽略垂直气压梯度）：

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

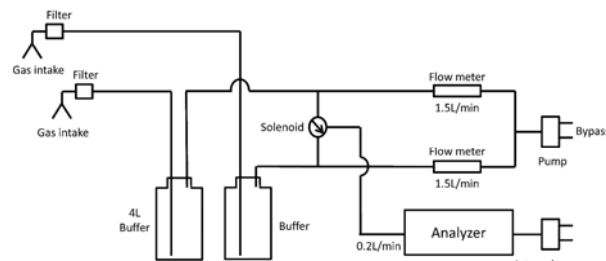
$$F_v = -K_v \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{s}_v}{\partial z} = -K_v (1 + \mu \bar{s}_v) \left( \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} + \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)$$

- 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

28

- 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。



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

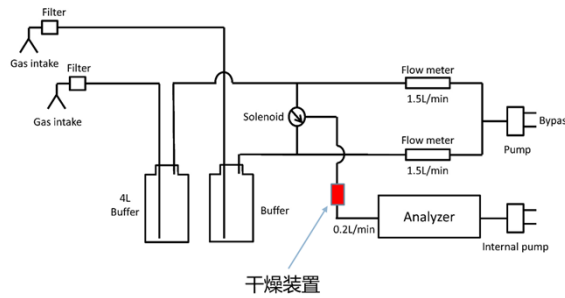
↓

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

## 加干燥装置后

29

- 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

30

- 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

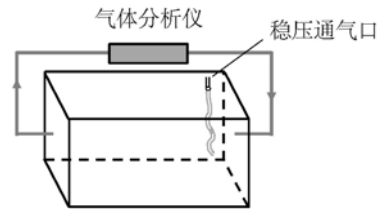
## 箱式法测定通量的密度效应

31

- 密闭的静态箱

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

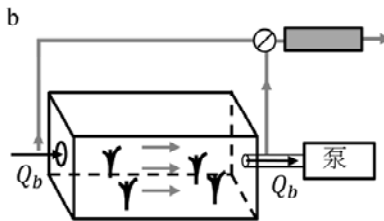
- 装有稳压通气口的静态箱



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

32

- 动态箱



$$F_c = \rho_d \frac{Q_b}{A_b} (s_{c,o} - s_{c,i}) = \frac{Q_b}{A_b} (\rho_{c,o} - \rho_{c,i})$$

- $Q_b$  为基准流量 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )，迄今无统一方法测定  $Q_b$ 。



## 主要内容

33

- 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

## 三个导致虚假CO<sub>2</sub>吸收的情况

34

- 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

35

- $t_1$ 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

36

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

Figure 7

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

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

Jamieson et al. 1963

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

Bogoev et al. , 2015

## 沙漠冬季观测试验

37



## CO<sub>2</sub>浓度观测误差传递

38

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

$$= F_c' + bH$$

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

- $F_c$ 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 $-0.0025 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ per W m}^{-2}$

Wang et al, 2017

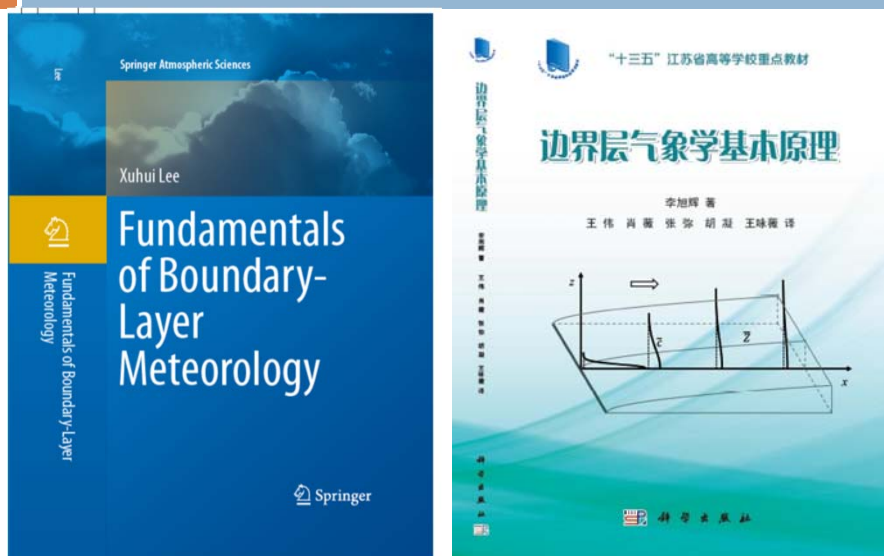
## 总结

39

- 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。

## 参考书

40



# 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心 <https://yncenter.sites.yale.edu>

