

大气边界层基本变量及其测定传感器和仪器系统



康宝智信测量技术（北京）有限公司

李彦磊, 2021-08

主要内容

- 一. 温室气体: CO_2 , N_2O , CH_4 等
- 二. 通量观测系统: 气体分析仪, 三维超声风, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{H}/\text{LE}/\text{TAU}$ 通量
- 三. 辐射: 向上、向下短波和长波辐射、净辐射、PAR
- 四. 土壤: 土壤热通量, 土壤温度, 土壤水分
- 五. 小气候: 温度, 湿度, 风, 降水, 气压



IPCC, AR6

- › 2021, AR6: 毫无疑问, 人类的影响使大气、海洋和陆地变暖
- › 2014, AR5: 人类活动极有可能导致了20世纪50年代以来的大部分全球地表平均温度升高
- › 2007, AR4: 全球升温非常可能是由于人为排放的温室气体浓度增加导致



6月22日科威特某城市温度达到53.2°C



温室气体

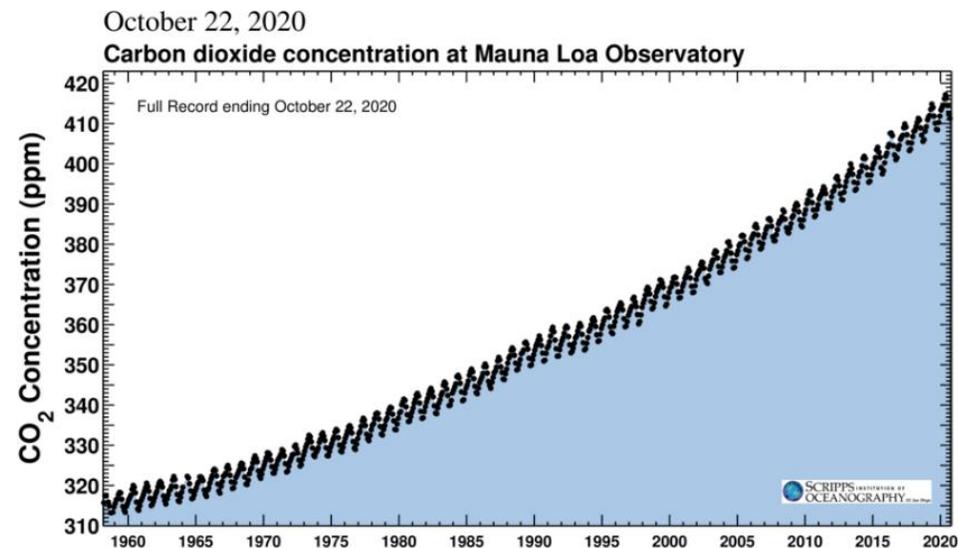
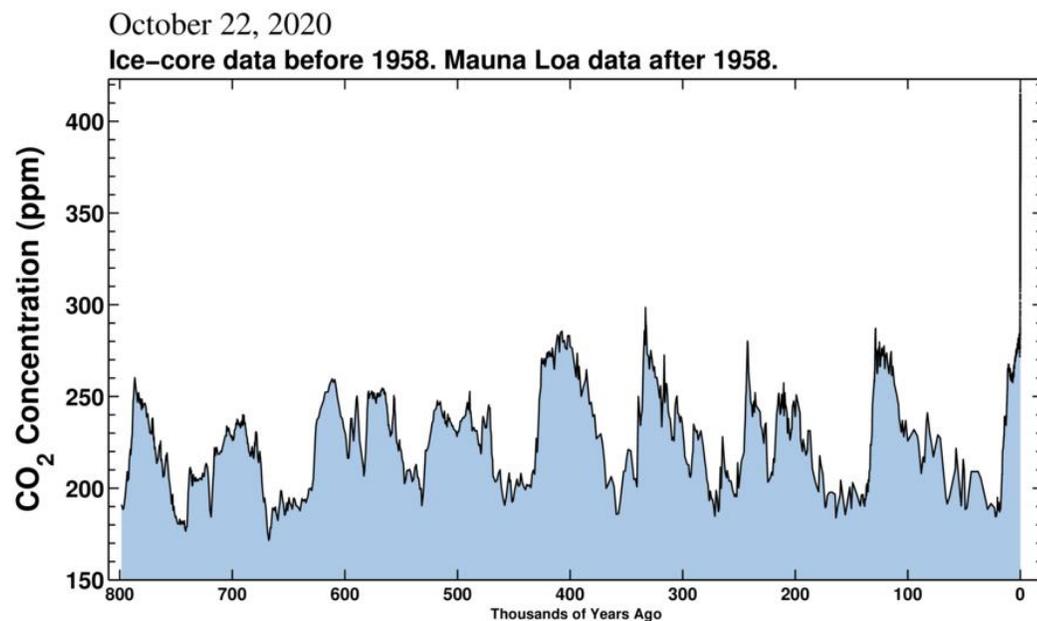
温室气体：大气成分中能够吸收和发射长波辐射，引起温室效应的气体

主要温室气体的有： H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O 等，常用单位有ppm, ppb等

GHG	Strength of GHG effect
H_2O	-
CO_2	1
CH_4	21~23
N_2O	296~310
O_3	
CHF_3	11700
氟代乙烷	9200
SF_6	22200
三氯氟甲烷	4600
硫酰氟	4800



温室气体-CO₂



<https://sioweb.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

- ◆ ~1960s: CO₂浓度在200~300ppm间变化
- ◆ 1960s~2020: CO₂平均浓度从315ppm上升到410ppm左右 (~30%)



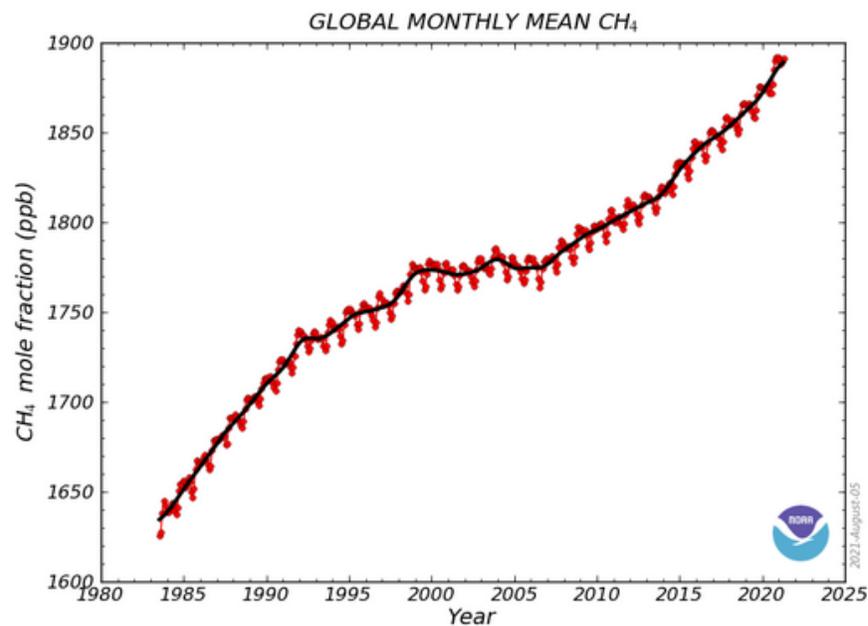
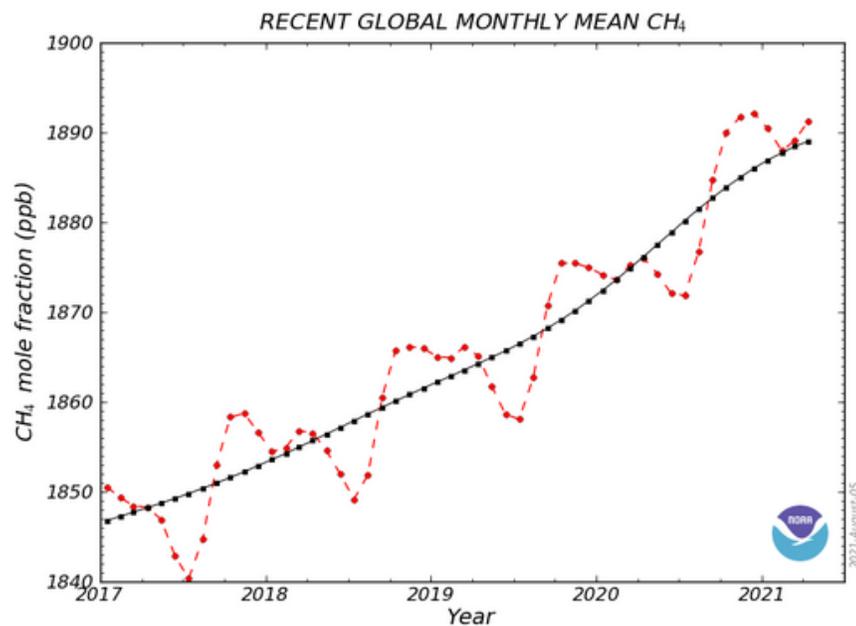
温室气体-CH₄

Global CH₄ Monthly Means

April 2021: 1891.3 ppb

April 2020: 1876.0 ppb

Last updated: August 05, 2021



◆ 1980s~2021: CH₄平均浓度从1630ppb升高到1891ppb左右 (~15%)



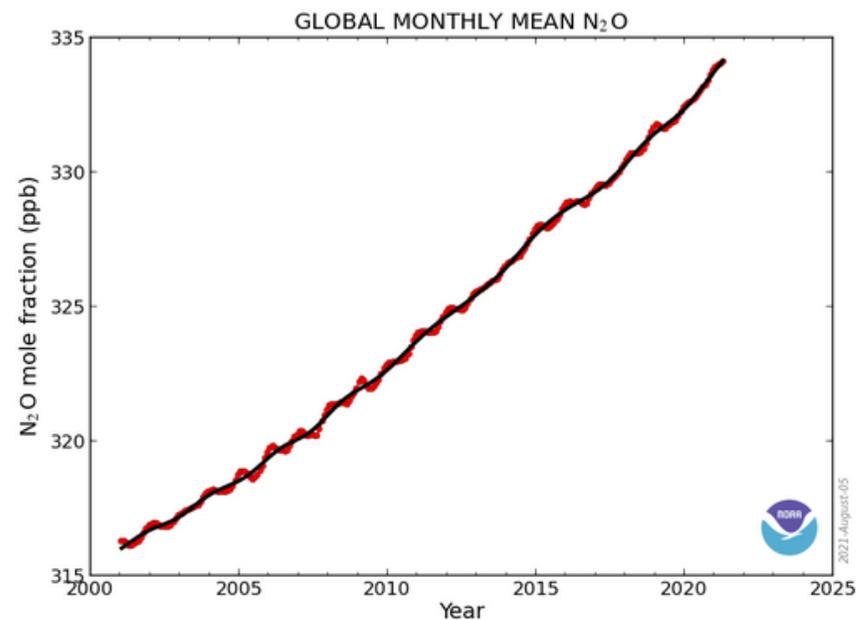
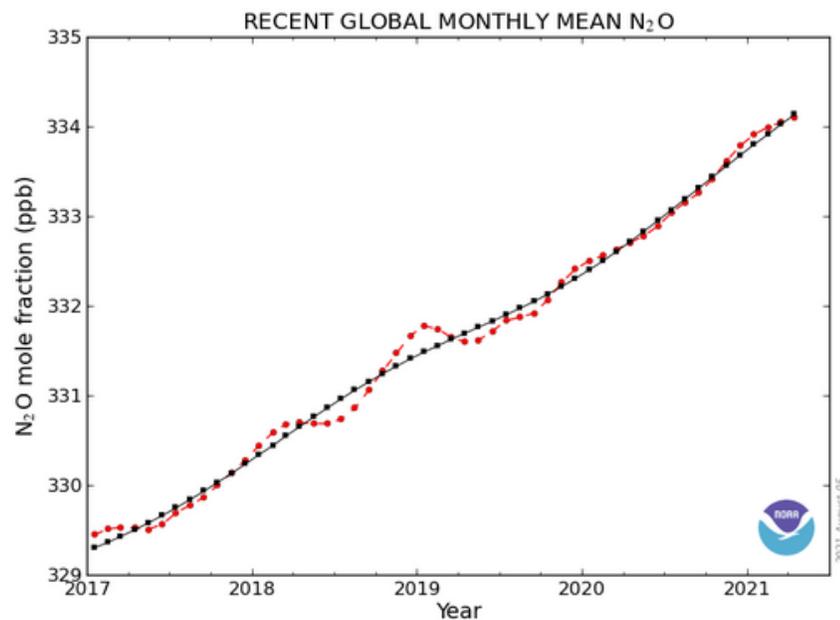
温室气体-N₂O

Global N₂O Monthly Means

April 2021: 334.1 ppb

April 2020: 332.7 ppb

Last updated: August 05, 2021



◆ 1970s~2021: N₂O平均浓度从300ppb升高到334ppb左右 (~10%)

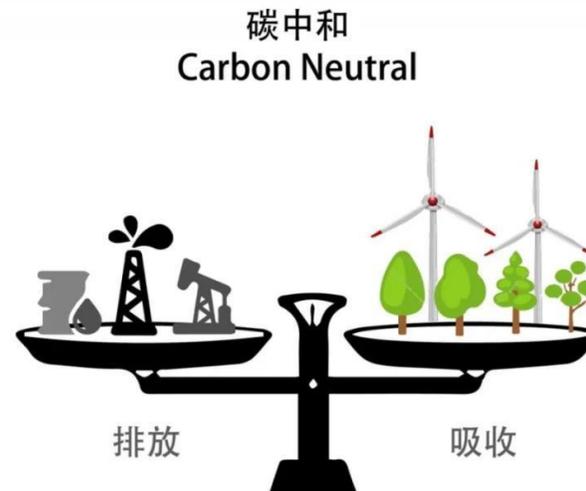


温室气体减排

2015年12月全球197个国家/地区签署巴黎协定：本世纪末将全球升温幅度控制在2°C以内，并致力于将这一阈值降至1.5°C。



2020年9月中国宣布重大减排目标：力争在2030年之前实现“碳达峰”，2060年之前实现“碳中和”



主要内容

- 一. 温室气体: CO_2 , N_2O , CH_4 等
- 二. 通量观测系统: 气体分析仪, 三维超声风, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{H}/\text{LE}/\text{TAU}$ 通量
- 三. 辐射: 向上、向下短波和长波辐射、净辐射、PAR
- 四. 土壤: 土壤热通量, 土壤温度, 土壤水分
- 五. 小气候: 温度, 湿度, 风, 降水, 气压

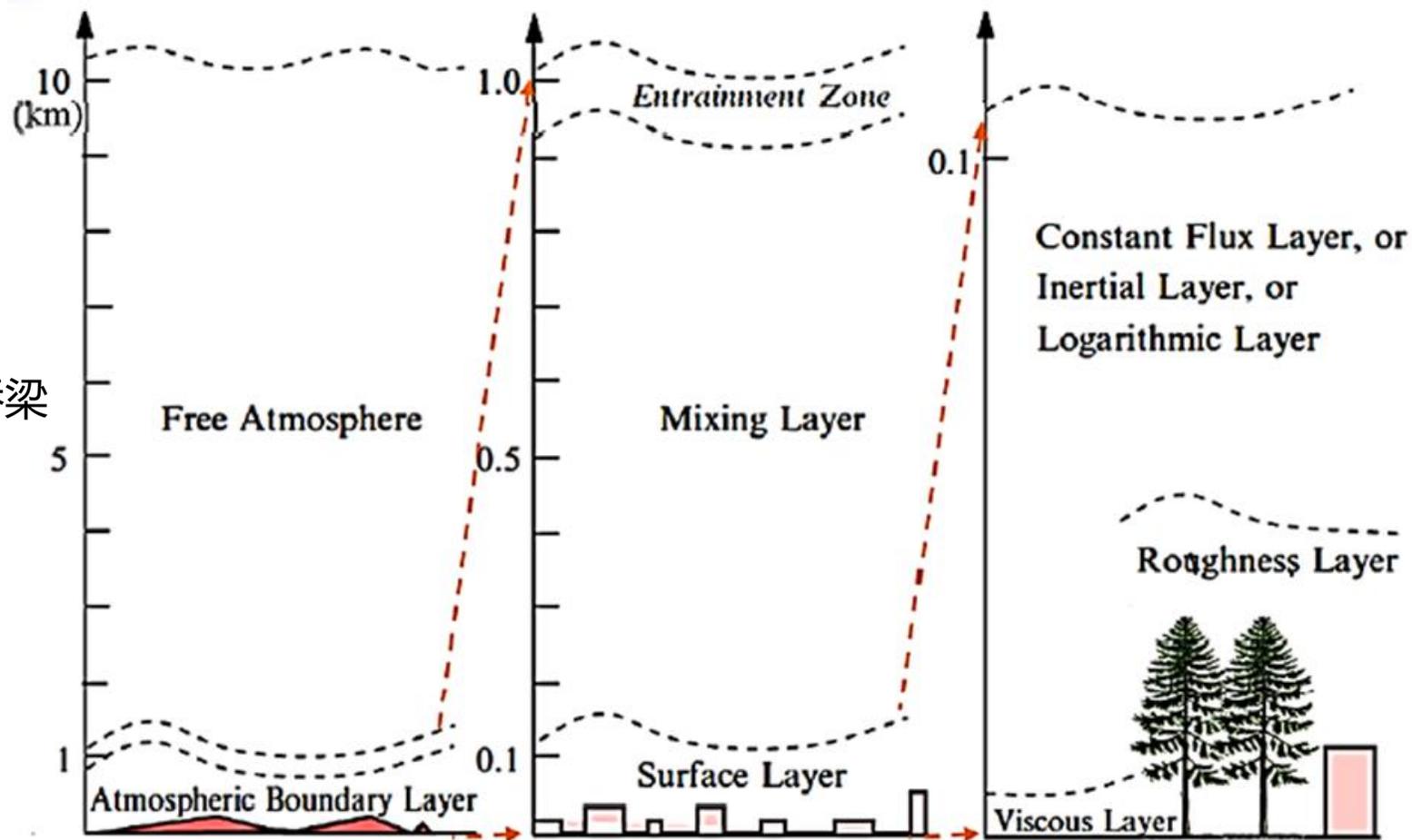


大气边界层

大气边界层 (ABL)

生物活动的主要区域

地表和大气间物质和能量交换的桥梁



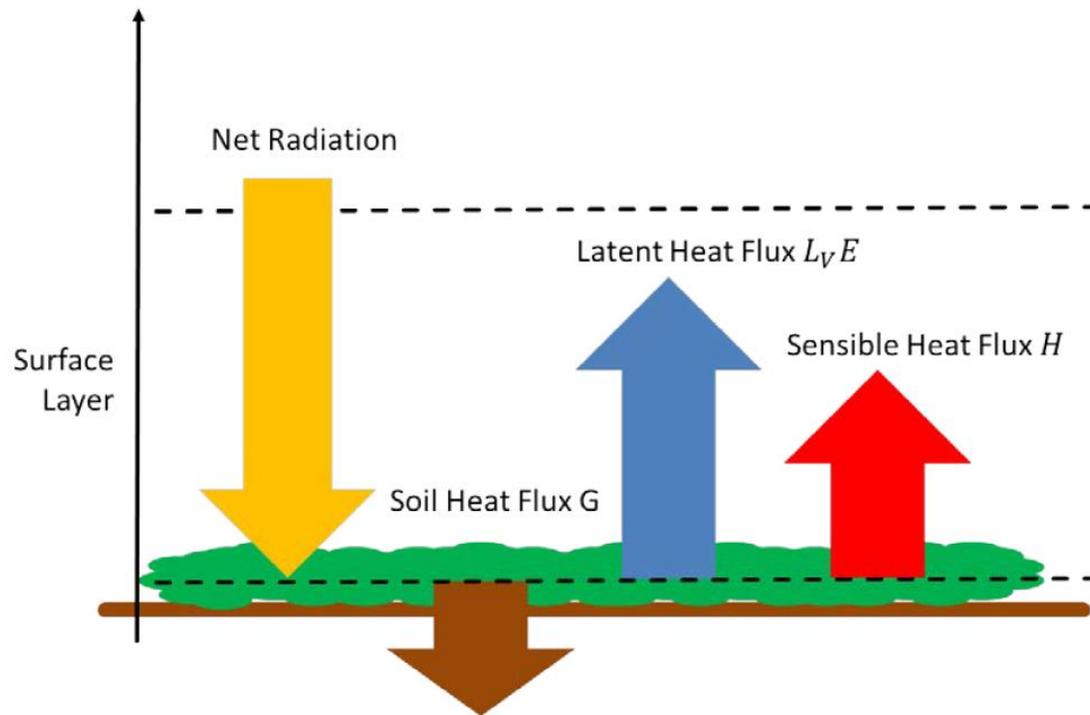
Based on Y Shao (2000)

通量定义

通量（密度）：单位时间内通过单位面积的物质或能量

通量是矢量，有大小和方向，在微气象观测中，我们定义 H 、 LE 和 CO_2 ：

- ◆ 从地面向大气传输，方向为正（ CO_2 排放）
- ◆ 从大气向地面传输，方向为负（ CO_2 吸收）



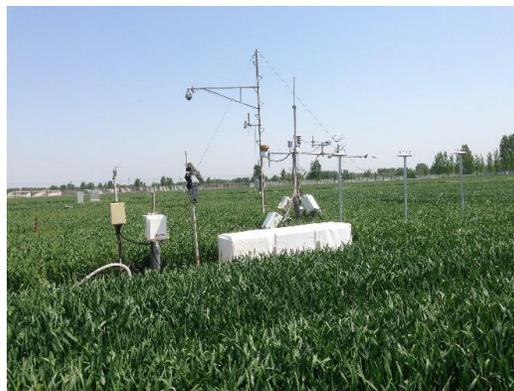
温室气体监测设备



湿地



农田



林地



高原



涡动相关系统

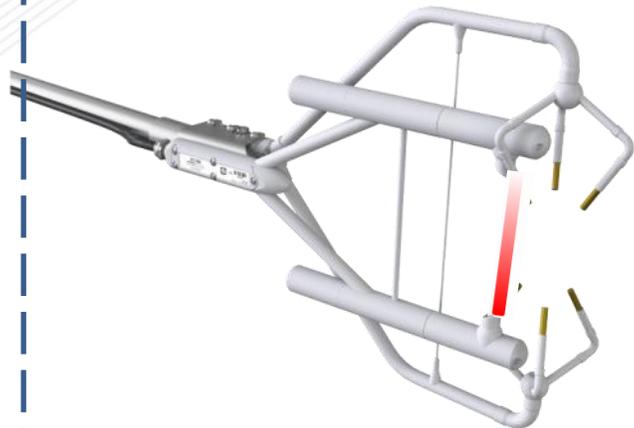
TGA200A



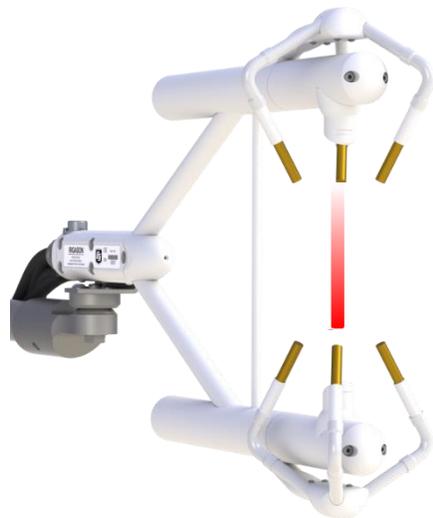
涡动相关系统组成

分离式

一体式



EC150 + CSAT3A



IRGASON

开路式涡动相关系统



CPEC300 Series

闭路式涡动相关系统



感热与潜热通量

也叫做显热通量,是指由于温度变化而引起的大气与下垫面之间发生的热交换, 单位 W/m^2

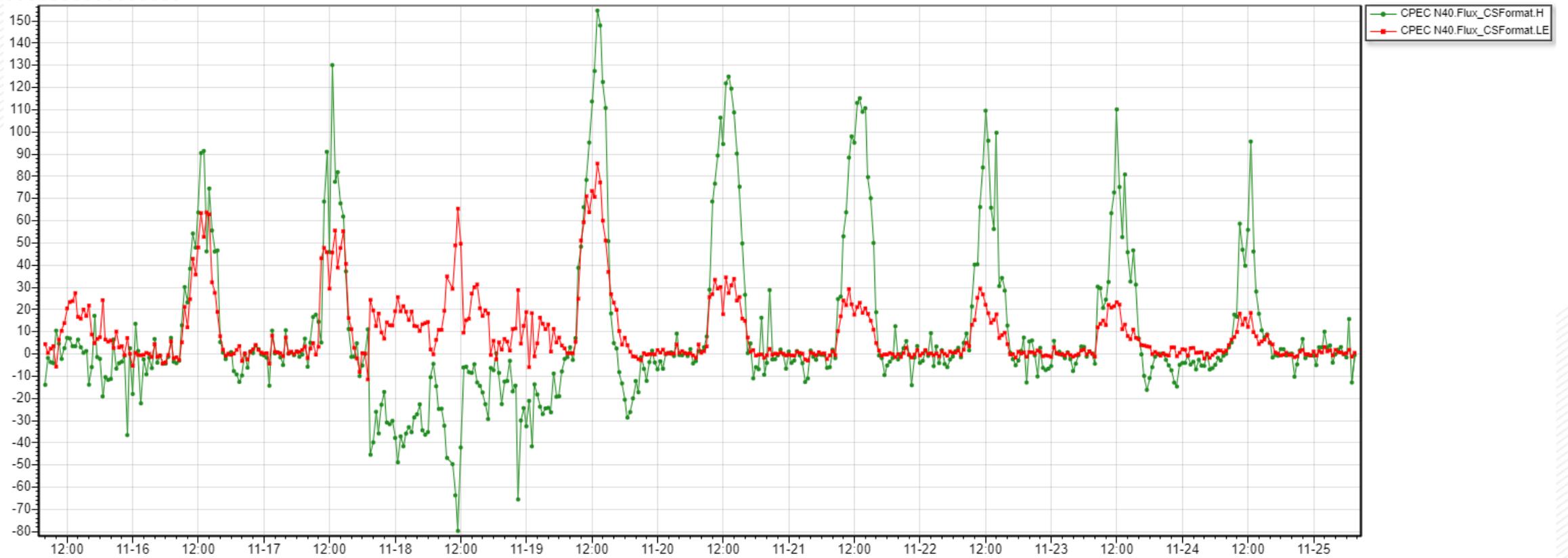
$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \cdot \frac{m}{s} \cdot K$$

由于水的相变(凝结、蒸发等)所吸收或释放的热量, 单位 W/m^2

$$\lambda E = \lambda \overline{w'\rho'_W} \quad \frac{J}{kg} \cdot \frac{m}{s} \cdot \frac{kg}{m^3}$$



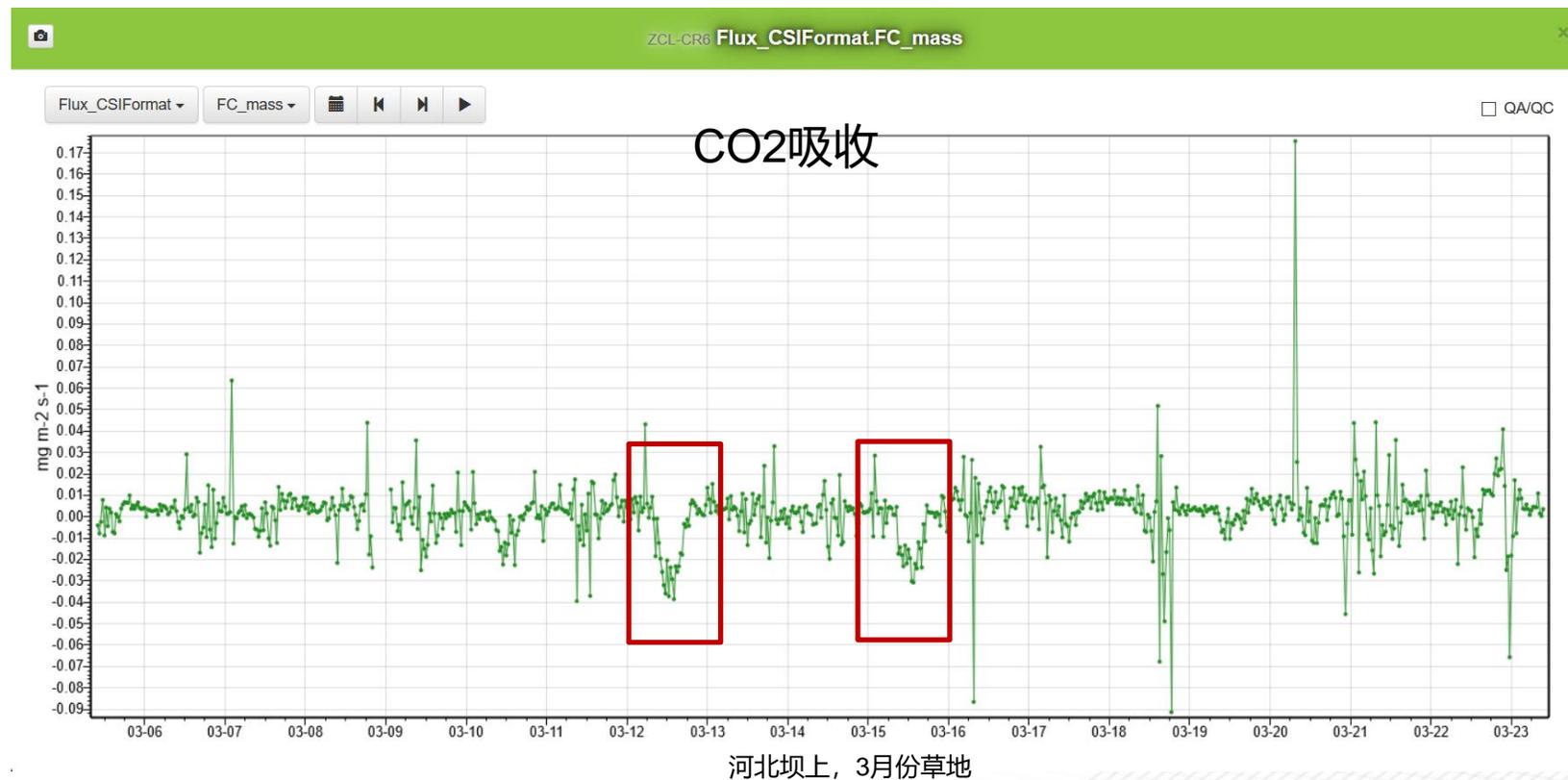
感热与潜热通量



CO₂通量

一定时间通过一定面积的二氧化碳的量，单位mg/m²·s

$$F_C = \overline{w' \rho'_c} \quad \frac{m}{s} \cdot \frac{kg}{m^3}$$



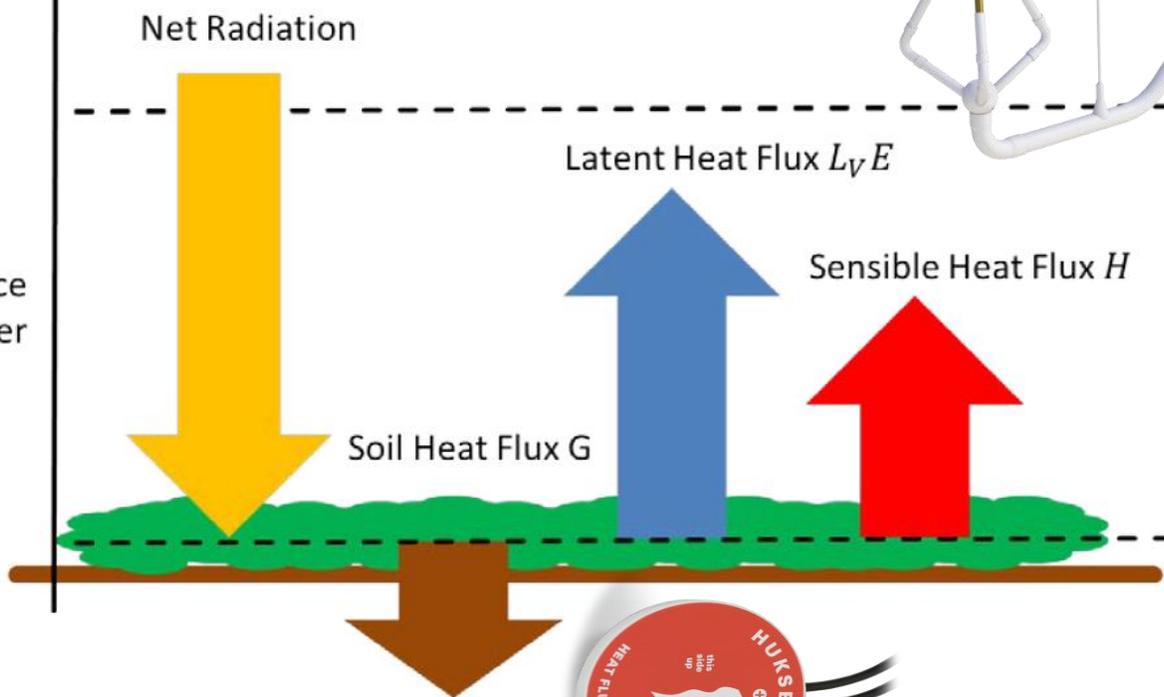
能量平衡

$$ERB = \frac{\sum(H + LE)}{\sum(R_n - G)}$$



CNR4

Surface Layer



CPEC310



HFP01SC

能量平衡闭合被认为是检验涡动相关数据质量的重要标准之一，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。



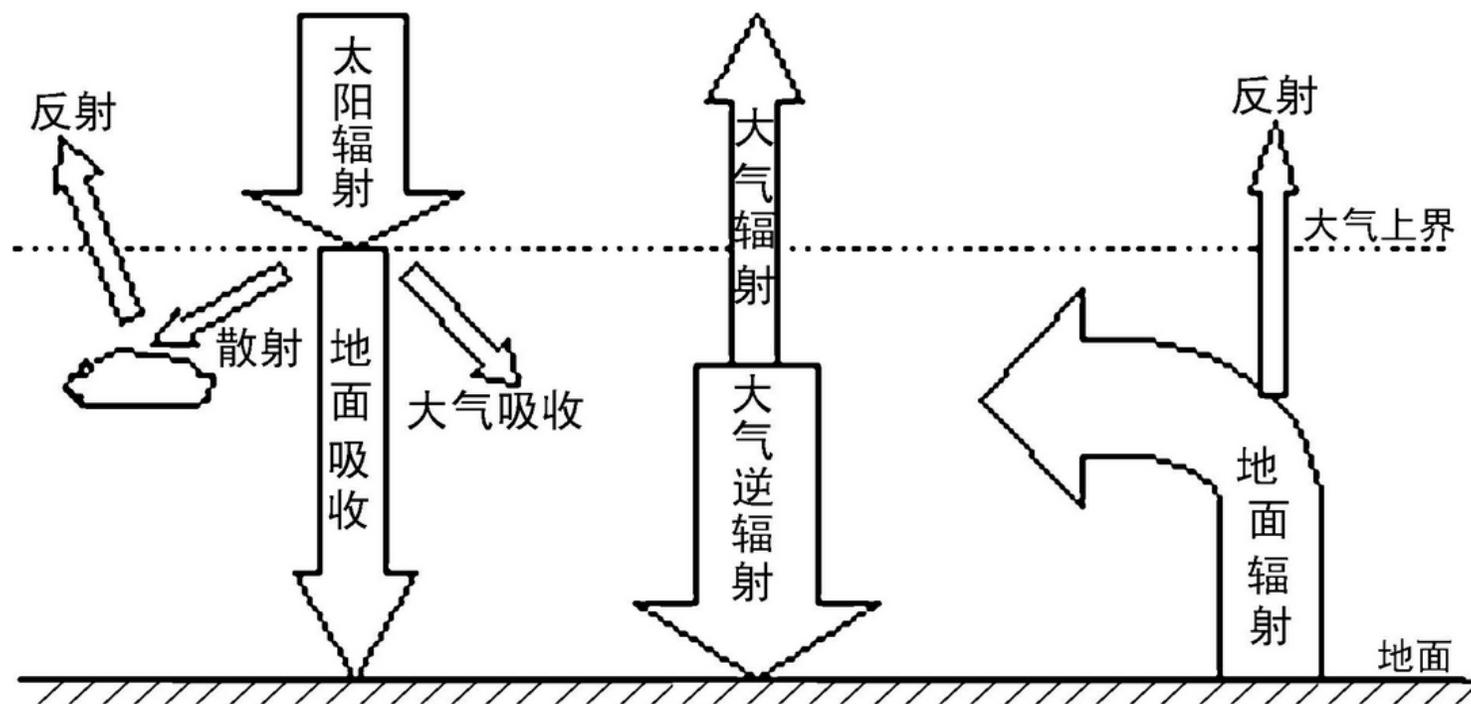
主要内容

- 一. 温室气体: CO_2 , N_2O , CH_4 等
- 二. 通量观测系统: 气体分析仪, 三维超声风, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{H}/\text{LE}/\text{TAU}$ 通量
- 三. 辐射: 向上、向下短波和长波辐射、净辐射、PAR
- 四. 土壤: 土壤热通量, 土壤温度, 土壤水分
- 五. 小气候: 温度, 湿度, 风, 降水, 气压



太阳辐射

太阳辐射光谱的99%以上在 $0.15 \sim 4.0\mu m$ 之间。由于太阳辐射波长较地面和大气辐射波长（约 $3 \sim 120\mu m$ ）小得多，所以通常又称太阳辐射为短波辐射，称地面和大气辐射为长波辐射。以 $4\mu m$ 为分界



短波辐射

- ▶ **向下短波辐射** R_{sw}^{\downarrow} ：也称总辐射，为太阳辐射的直接辐射和散射辐射之和，可由CS320或CNR4的短波辐射传感器测量获得,单位是 W/m^2
- ▶ **向上短波辐射** R_{sw}^{\uparrow} ：总辐射到达地面后被下垫面向上反射的那部分短波辐射，可用总辐射表感应面朝下或CNR4的短波辐射传感器测量获得,单位是 W/m^2
- ▶ **反照率**： $albedo = R_{sw}^{\uparrow}/R_{sw}^{\downarrow}$



长波辐射

- ▶ **向下长波辐射** R_{lw}^{\downarrow} ：大气以长波辐射形式向下发射的辐射，也称**大气逆辐射**，可由CNR4的长波辐射传感器测量获得,单位是 W/m^2
- ▶ **向上长波辐射** R_{lw}^{\uparrow} ：地表以长波形式向上发射的辐射和向下长波辐射被反射的部分，可由CNR4的长波辐射传感器测量获得,单位是 W/m^2
- 自然界中的一切物体，只要温度不是绝对温度，都会向外辐射能量，在测量长波辐射时，需要消除设备本身的长波辐射。根据**斯蒂芬-玻尔兹曼定律**： $F_T = \varepsilon\sigma T^4$ 可以计算得到辐射度。 ε 为比辐射率，介于0和1之间， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}W/(m^2 \cdot K^4)$



净辐射

净辐射：太阳与大气向下发射的全辐射和地面向上发射的全辐射之和,单位是 W/m^2

$$R_n = R_{sw}^{\downarrow} + R_{lw}^{\downarrow} - R_{sw}^{\uparrow} - R_{lw}^{\uparrow}$$

常用测量设备有CNR4, NR01, NR-Lite2等



NR01



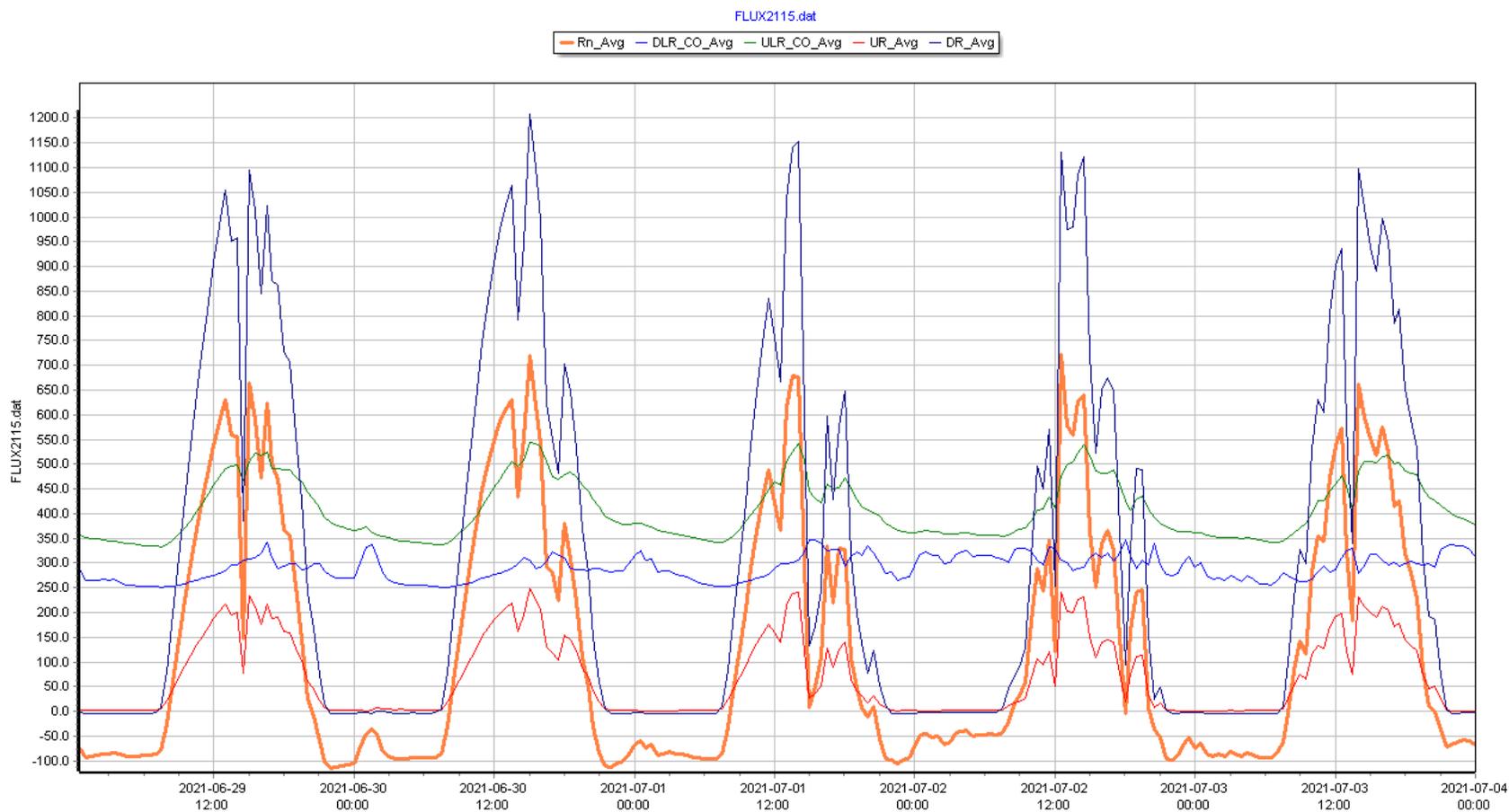
NR-Lite2



CNR4

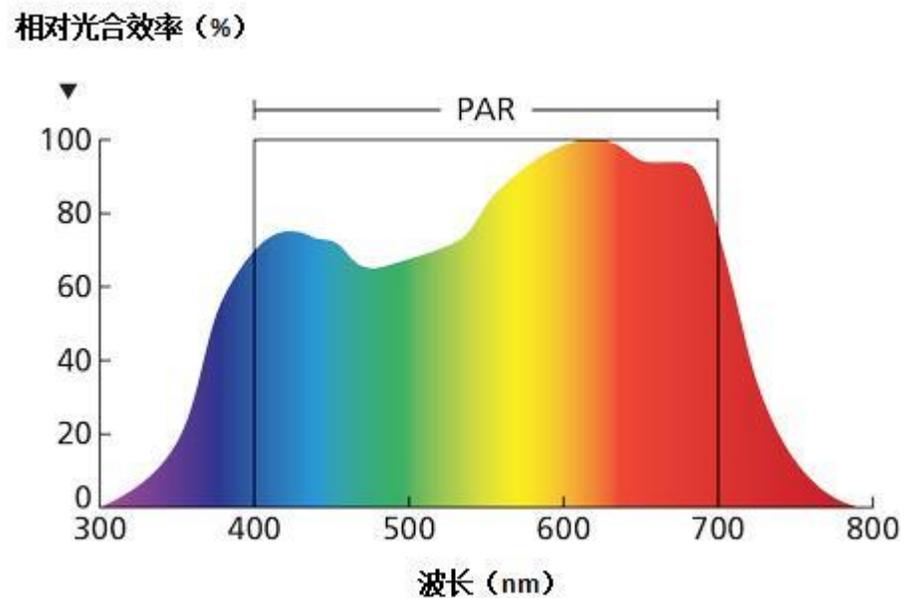


辐射变化趋势



光合有效辐射

- ▶ **光合有效辐射** (PAR, photosynthetically active radiation) : 太阳辐射中对植物光合作用有效的光谱成分, $0.4\sim 0.7\mu m$, 单位有 $\mu mol/m^2s^{-1}$, W/m^2 和lux



CS310光合有效辐射传感器

$$1W/m^2 = 250 \text{ lux}$$

$$1 \mu mol/ m^2s^{-1} = 55.6 \text{ lux}$$

$$1 W/m^2 = 4.6 \mu mol/ m^2s^{-1}$$



主要内容

- 一. 温室气体: CO_2 , N_2O , CH_4 等
- 二. 通量观测系统: 气体分析仪, 三维超声风, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{H}/\text{LE}/\text{TAU}$ 通量
- 三. 辐射: 向上、向下短波和长波辐射、净辐射、PAR
- 四. 土壤: 土壤热通量, 土壤温度, 土壤水分**
- 五. 小气候: 温度, 湿度, 风, 降水, 气压



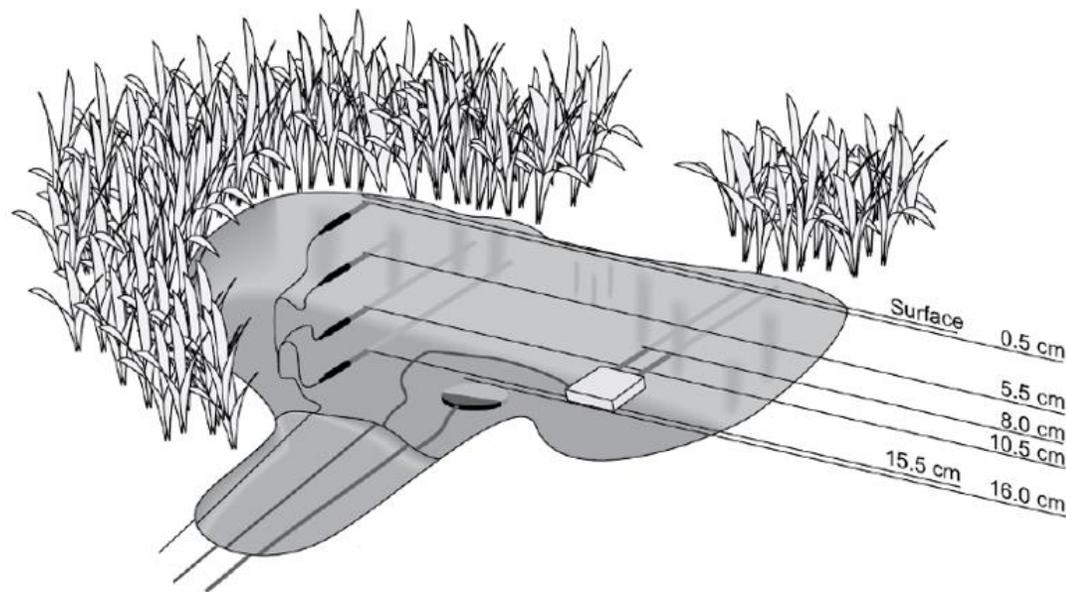
土壤热通量

土壤热通量是单位时间、单位面积上的土壤热交换量，反映土壤表层与深层之间热量的交换情况，其大小和正负决定了土壤热量的收支。通常使用热通量板测量获得，单位为 W/m^2



土壤热通量

地表土壤热通量(G_0)是指发生在地表(即0cm处)土壤的热量交换,通常(G_0)无法直接测量,一般是将土壤温度、湿度传感器和土壤热通量板埋设在土壤中某一深度处,根据观测的土壤温度、土壤含水量和土壤热通量值进行估算地表土壤热通量(G_0)。



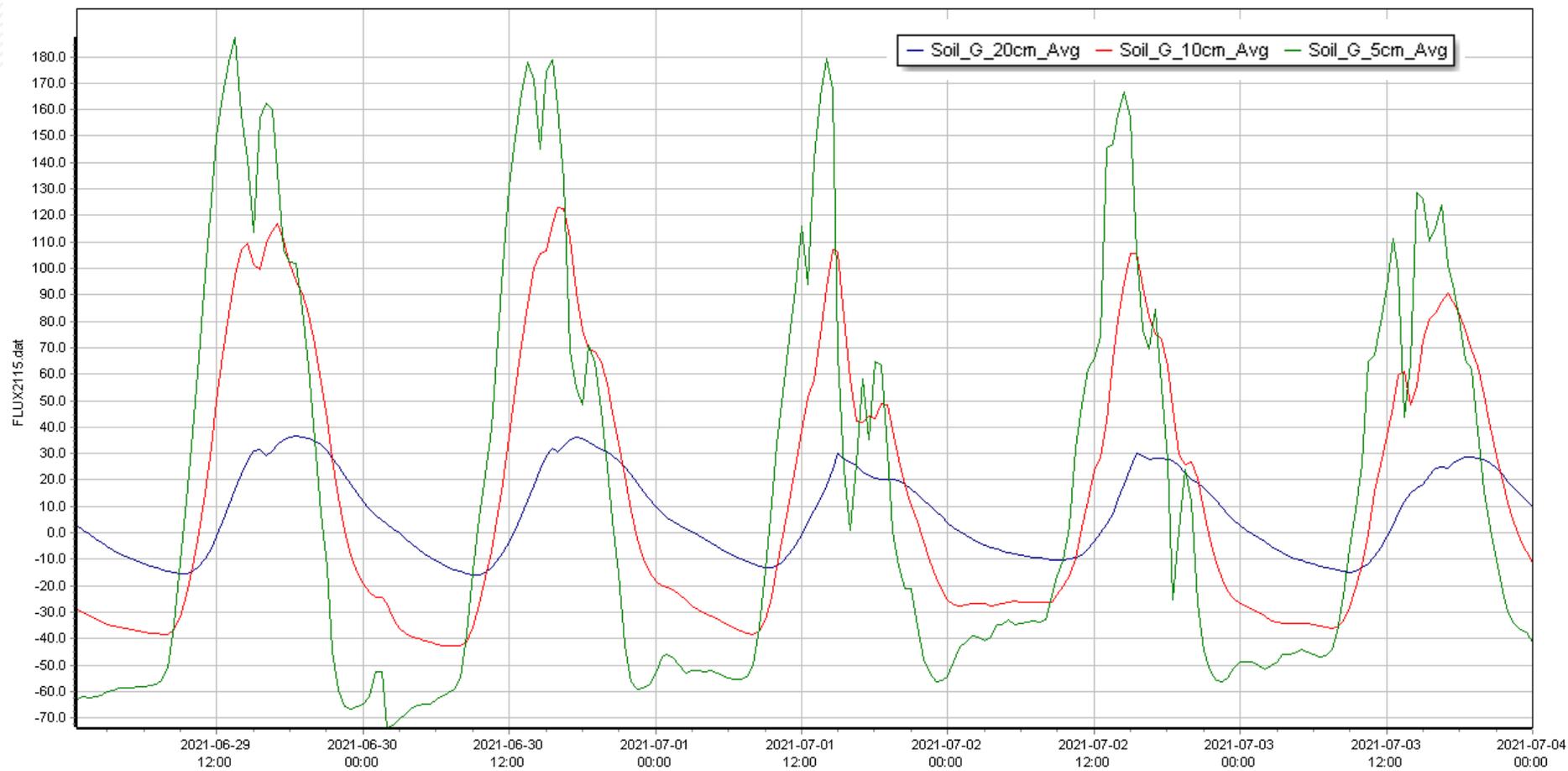
土壤传感器布置示意图

$$G = G_{Depth} + \Delta_{storage}$$

$$\Delta_{storage} = \frac{[c_s \rho_s (T_{soil,f} - T_{soil,i}) + c_w \rho_w (T_{soil,f} q_{v,f} - T_{soil,i} q_{v,i})] D}{\Delta t}$$

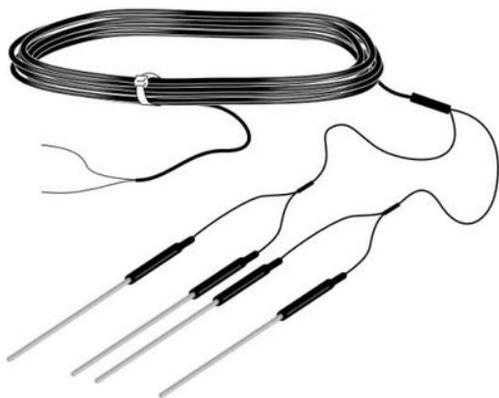


土壤热通量

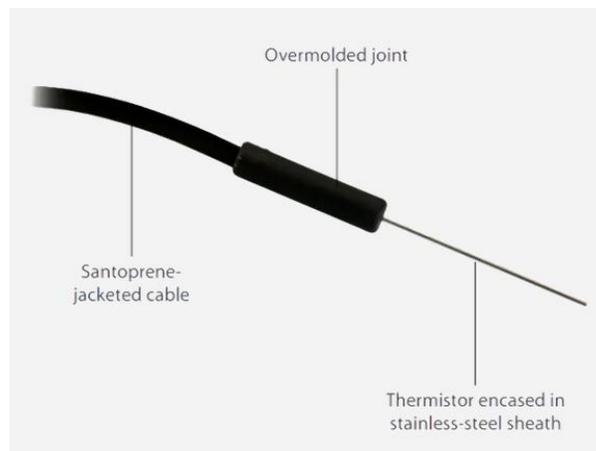


土壤温度

- ▶ 土壤温度：描述土壤冷热程度的物理量
- ▶ 常用的测量传感器有：TCAV,109L,SI-111等



TCAV



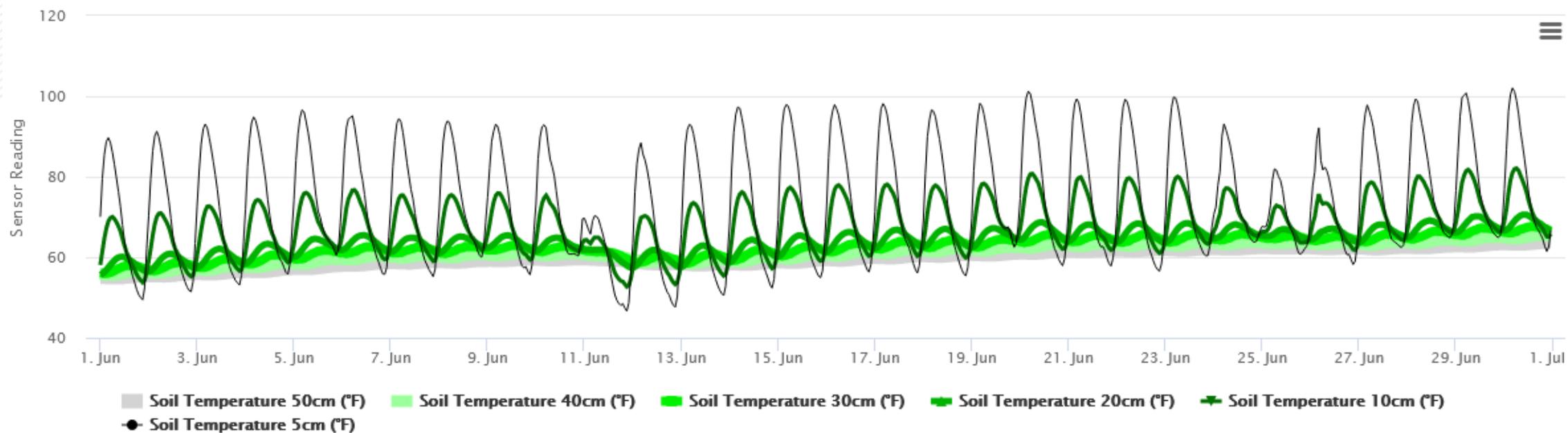
109L



SI-111



土壤温度

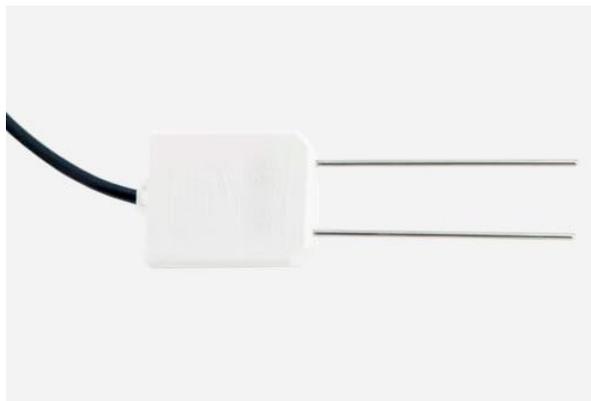


土壤温度日变化趋势



土壤水分

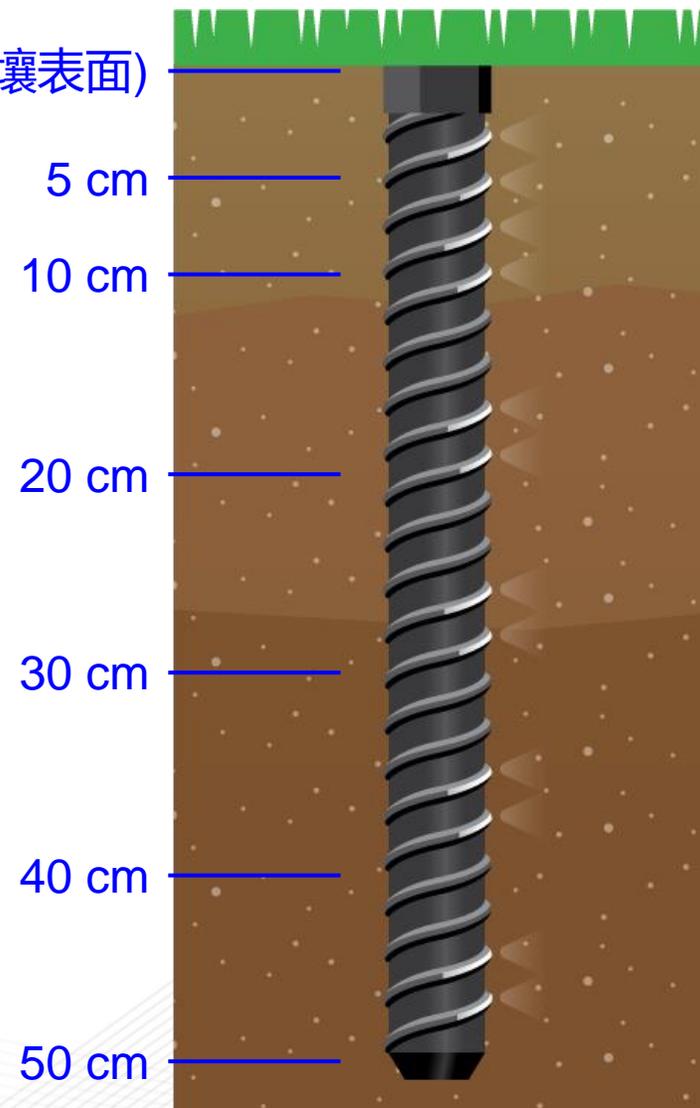
- ▶ **土壤水分**：描述土壤中水分含量多少的物理量，通常用土壤体积分含水量或重量含水量表示，单位为%。
- ▶ 常用的测量传感器有：CS655, SoilVUE等



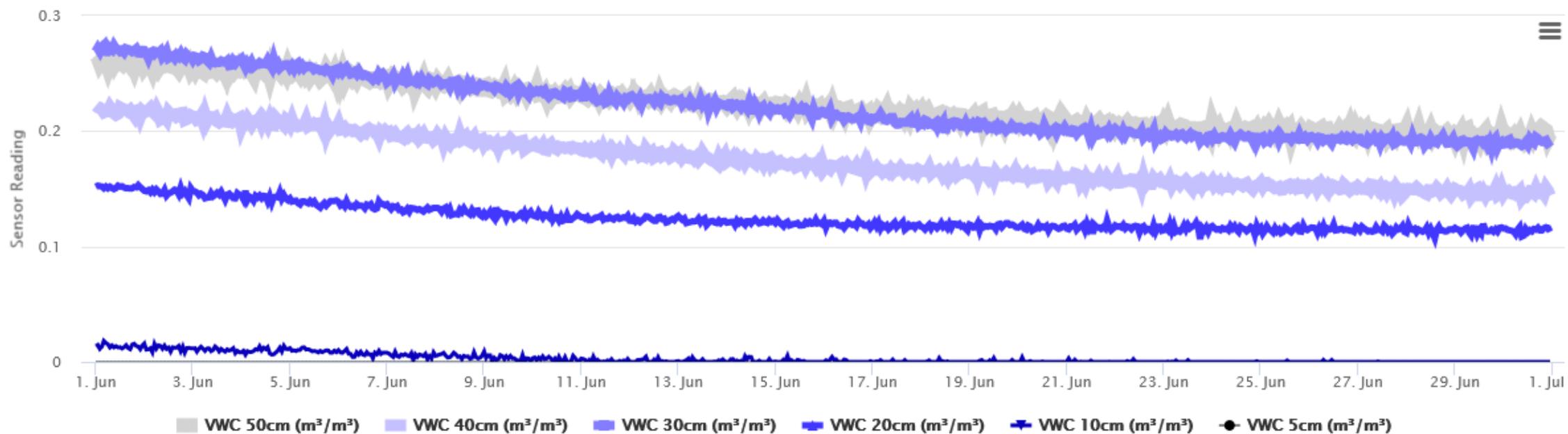
CS655



SoilVUE



土壤水分



主要内容

- 一. 温室气体: CO_2 , N_2O , CH_4 等
- 二. 通量观测系统: 气体分析仪, 三维超声风, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{H}/\text{LE}/\text{TAU}$ 通量
- 三. 辐射: 向上、向下短波和长波辐射、净辐射、PAR
- 四. 土壤: 土壤热通量, 土壤温度, 土壤水分
- 五. 小气候: 温度, 湿度, 风, 降水, 气压



空气温湿度

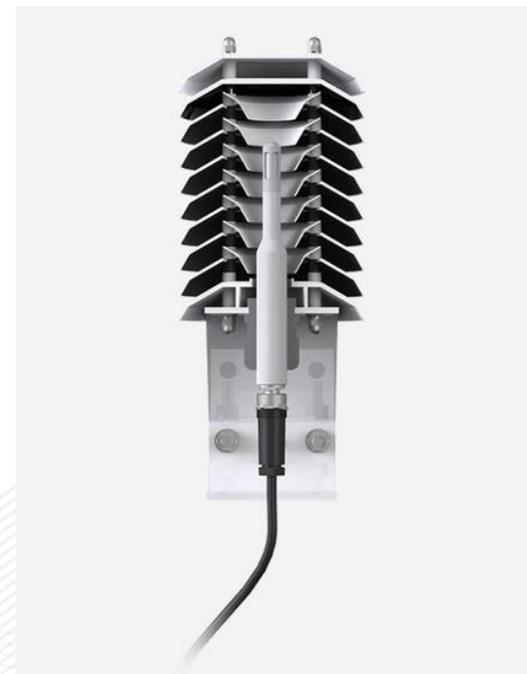
- › 空气温度：表示空气冷热程度的物理量，单位： $^{\circ}\text{C}$ ，K
- › 空气湿度：表示空气中水汽含量多少的物理量
 - 相对湿度和绝对湿度（水汽密度）
 - 混合比，比湿，
 - 水汽摩尔分数，
 - 水汽压，饱和水汽压等



HygroVUE10

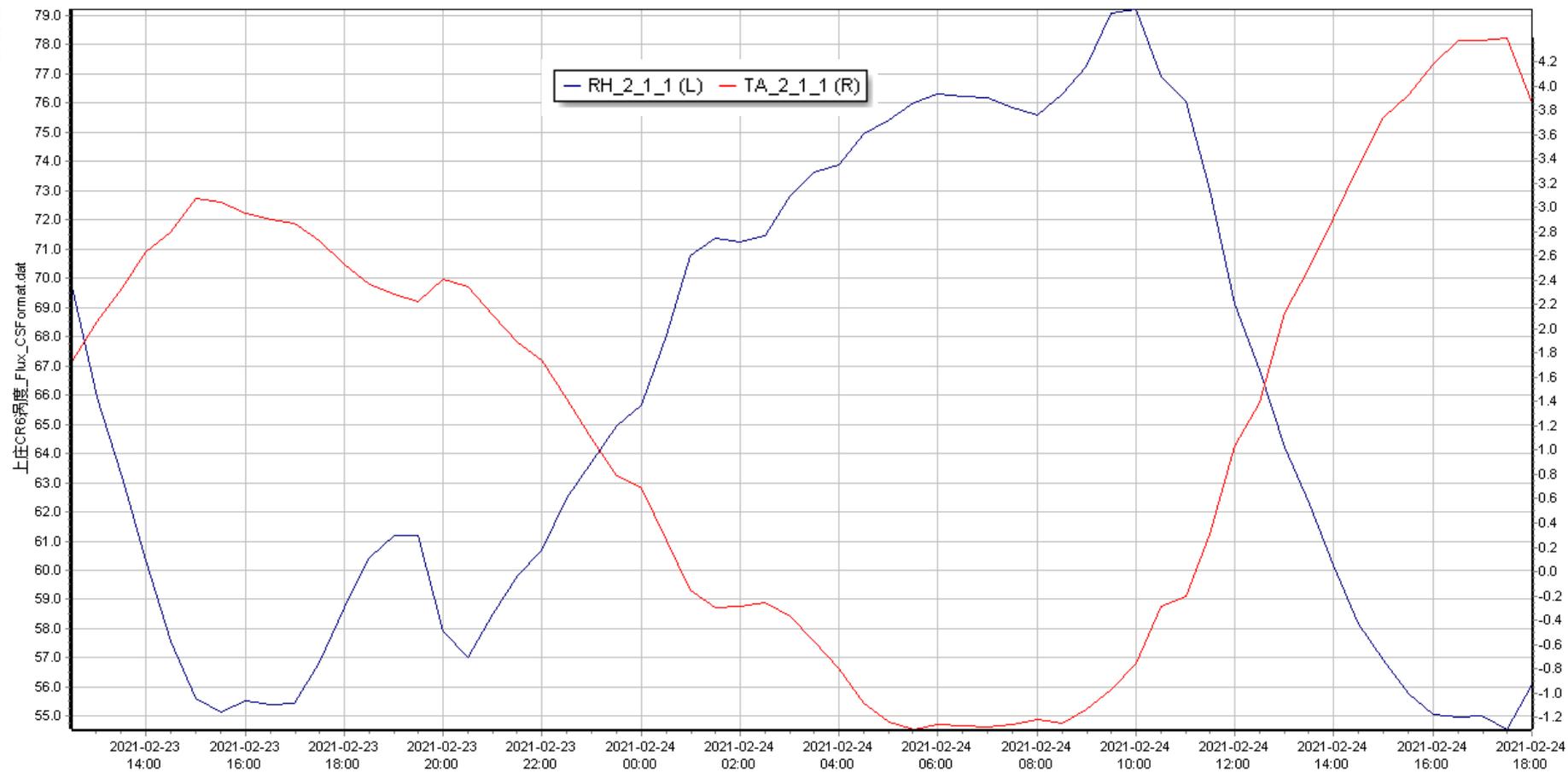


HMP155



EE181

空气温湿度



空气温湿度

- ▶ **相对湿度**：一定温度和压强下，大气实际水汽和饱和水汽压之比，%。
- ▶ **水汽密度**：单位体积湿空气中水汽的质量，单位 kg/m^3 或 g/m^3
- ▶ **水汽摩尔分数**：水汽摩尔数与湿空气摩尔数的比值

$$\chi_v = \frac{n_v}{n_v + n_d}$$

- ▶ 水汽密度与水汽压的关系： $e = \rho_v R_v T$



空气温湿度

› 水汽质量**混合比** r : 水汽与干空气的质量之比, 单位g/g,kg/kg或g/kg

$$r = \frac{m_v}{m_d}$$

› **比湿** q : 水汽与湿空气的质量之比, 单位g/g,kg/kg或g/kg

$$q = \frac{m_v}{m_a}$$

› **实际水汽压** e_a : 大气压中的水汽分压, 单位为hPa或kPa

› **饱和水汽压** e_s : 一定温度下水汽与水(冰)处于气液相态平衡时的水汽压, hPa或kPa

$$\text{水面: } e_s = E_0 10^{\frac{7.5 \times t}{237.3 + t}}$$

$$\text{冰面: } e_s = E_0 10^{\frac{9.5 \times t}{265.5 + t}}$$

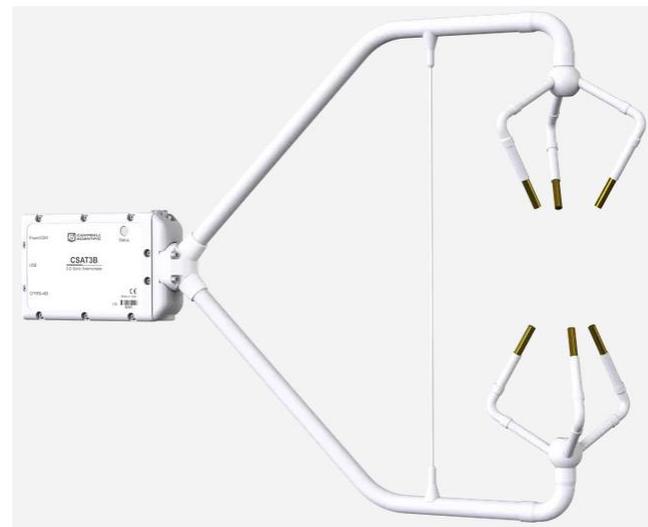
› **饱和水汽压差**: $VPD = e_s - e_a$, 单位为hPa或kPa

大气中混合比和比湿不会超过0.04g/g(40g/kg), 气团在无相变的绝热过程中, 混合比保持常量

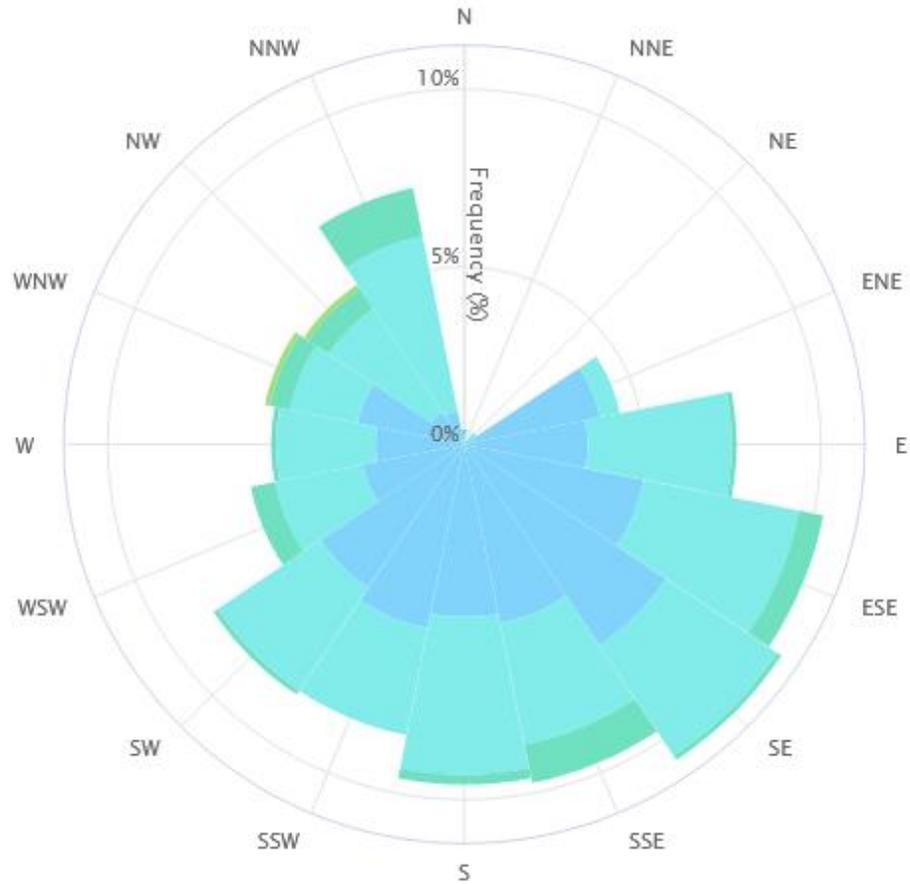


风

- › 风速：单位时间内空气移动的距离，单位为m/s
- › 风向：风的来向，单位为度（°）
- › 常用测量设备有机械类和超声类传感器：



风



mph

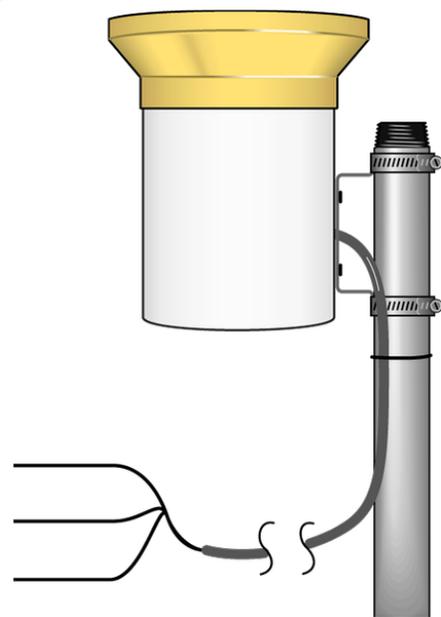
- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 7.0
- 7.0 - 12.0
- 12.0 - 17.0
- 17.0 - 24.0
- 24.0 - 30.0
- 30.0 - 38.0
- 38.0 - 46.0
- 46.0 - 54.0
- 54.0 - 63.0
- 63.0 - 73.0
- >73.0



降水

降水：从天空降落到地面的液态（降雨）或固态（降雪，雨夹雪）的水，单位为mm

液态降水通常使用翻斗式雨量计测量



传统雨量筒

翻斗式雨量计

容易受风的影响

深漏斗，防雨水飞溅



RainVUE

独特的空气动力学外形设计

减少风对降雨影响

深漏斗，防雨水飞溅



降水

固态降水通常通过加热或使用不冻液的方式融雪，进而测量



52202-L

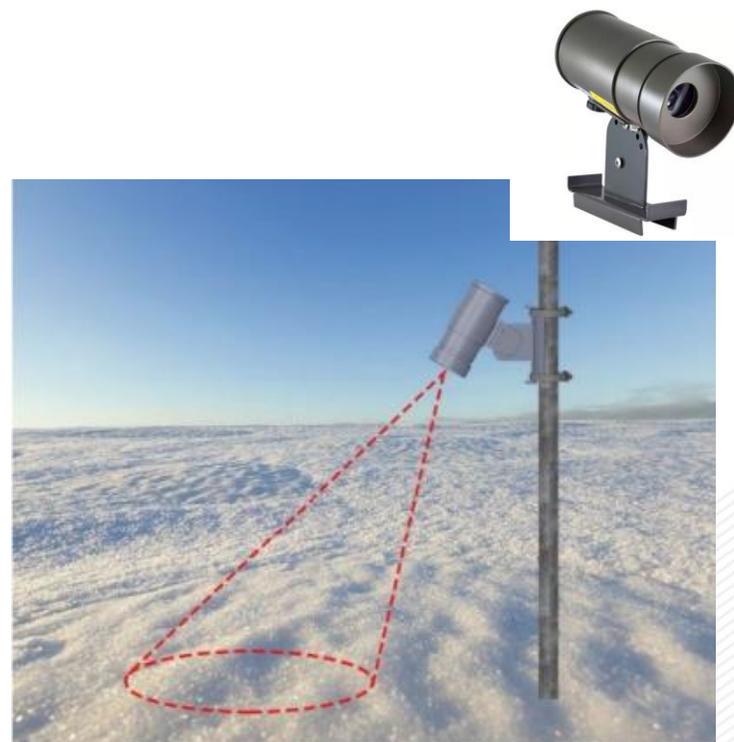
加热式



CS700H

CS700H

不冻液



SDMS40激光测距

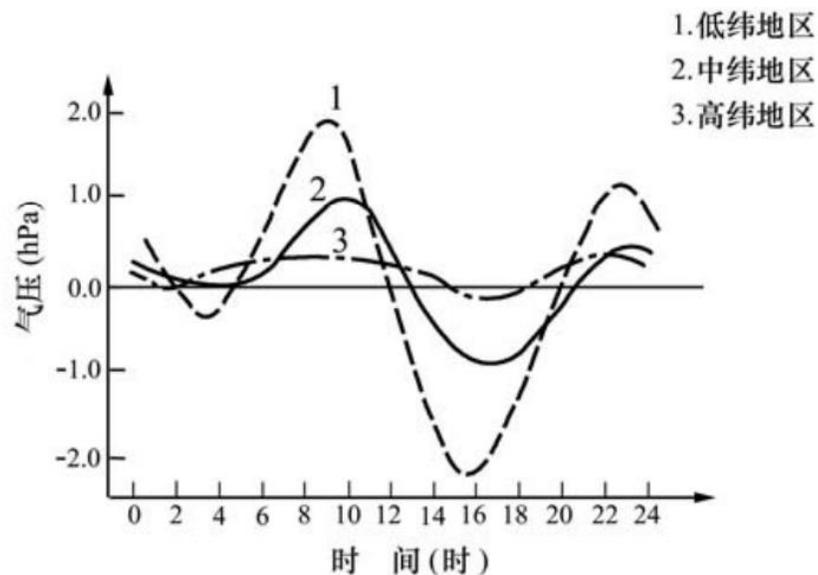


气压

- ▶ 气压：是作用在单位面积上的大气压力，即在数值上等于单位面积上向上延伸到大气上界的垂直空气柱所受到的重力，单位通常是hPa
- ▶ 标准大气压：标准大气条件下海平面的气压，大小为760mm水银（汞柱）高度或1013.25hPa



气压传感器



谢谢

