

几个野外实验观测应该注意的问题

孙晓敏

中国科学院地理科学与资源研究所

中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室
中国生态系统研究网络(CERN)水分分中心

2018.7.19宁夏中卫

几个问题

在地表过程研究的很多的观测过程中，存在有很多的问题，今天具体谈谈下面三个方面的问题，供大家参考和理解。

一、温度测量原理及应用问题

1、空气温度测量仪原理及应用问题（气象）

2、地面温度*测量仪原理及应用问题（气象、红外、遥感）

二、土壤水分测定仪原理及应用问题**

三、控制实验原理及应用问题（增温、减雨增雨）

* 地面温度（ground temprature）是指地表面和以下不同深度处土壤温度的统称。

**在测量学里，测定是指使用测量仪器和工具，通过测量和计算，得到一系列测量数据。

一、温度测量原理及应用问题

测温指向和位置明晰的温度测量：全球变暖 1.5°C （气温）、气温（气象站百叶箱空气温度）、体温（腋下、口腔）、烘箱温度、冰箱温度、实验室温度、太阳表面温度、.....

测温指向清晰、位置不明晰的温度测量：气温（非气象站百叶箱空气温度）、土壤温度、海（湖）水温度、植物冠层温度、化学反应温度、.....

常用的温度测量的传感器和仪器

电测温度传感器

- 热电阻 (1848)
- 热电偶 (1885)
- 热敏电阻
- 集成电路
-



目测水银温度计

(1709)



红外温度计

(1800理论, 1960S)



红外热像仪

(1960S)

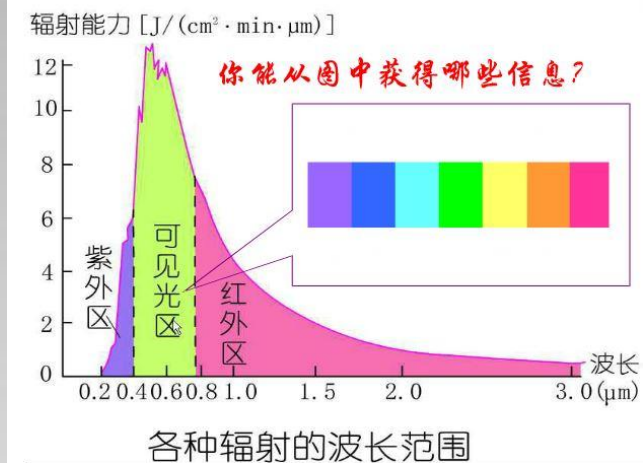
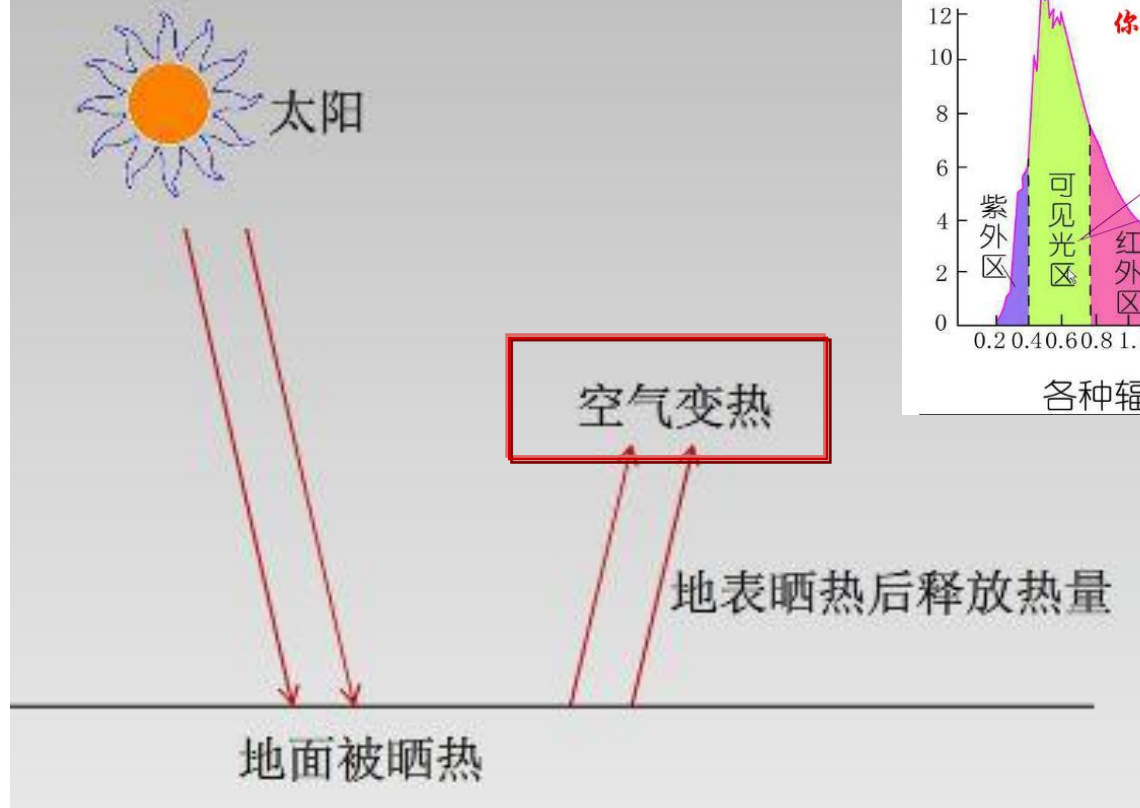
1、空气温度测量原理及应用问题

空气是一种看不见、摸不到的流动物质，充满了地球表面，所以对“空气温度”需要给出专门的“定义”。

- 太阳辐射对观测的影响
- 测温仪器的热滞效应
- 全球范围的观测规范和可比性（标准气象站温度）

气温—空气被加热的观测量度

太阳辐射为短波+红外+长波



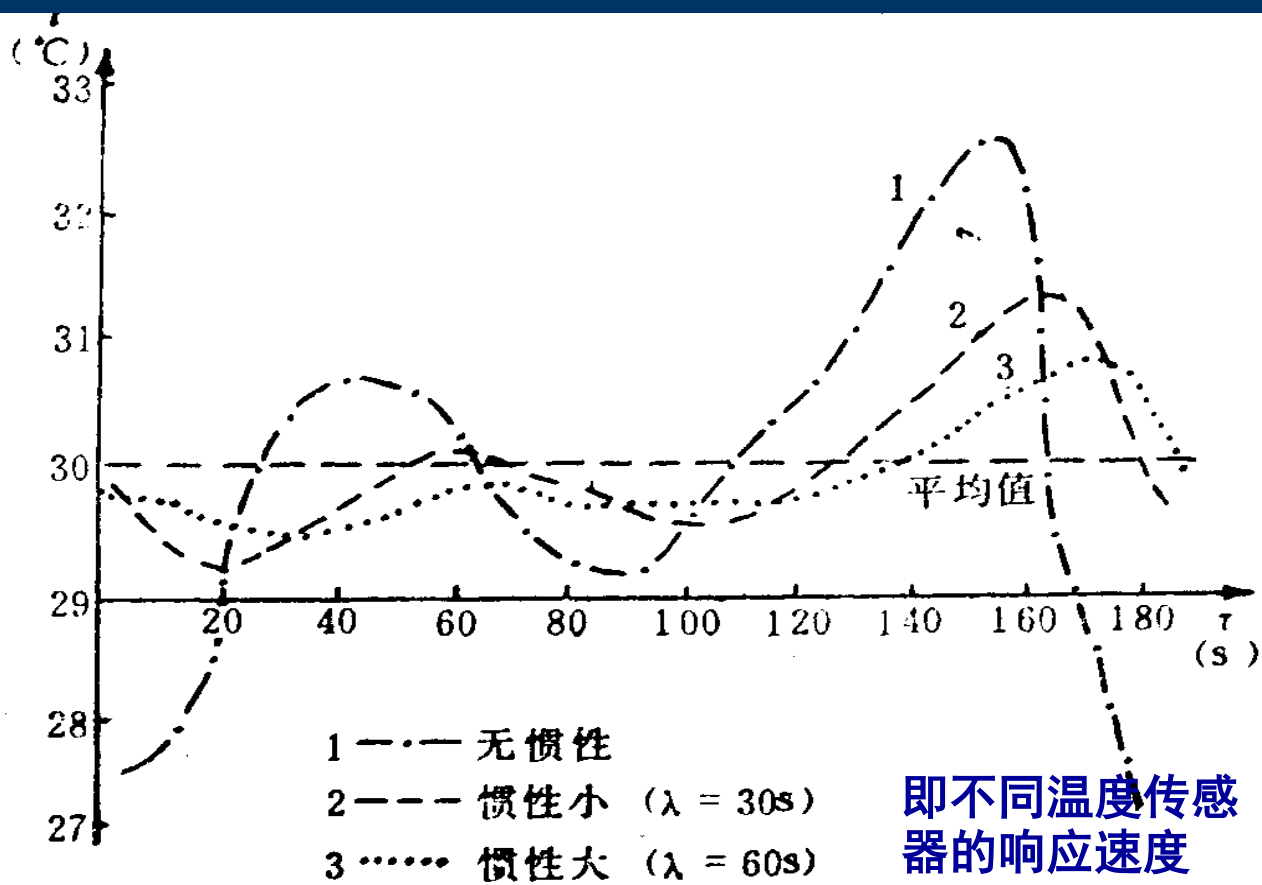
□地球辐射的辐射源是地球，其波长范围约为4~120微米，为长波辐射。辐射能量的99%集中在3微米以上的波长范围内。地球辐射的最强波长约为9.7微米。空气是被长波辐射加热的。

空气温度观测的特点

- 空气对太阳产生的短波辐射能吸收的本领不大，所以自然空气受辐射的影响基本可以忽略。
- 但是构成温度传感器的材料受太阳辐射的影响却必须考虑，否则可能会导致空气温度观测产生较大和不可接受的误差。
- “辐射误差” 往往可达相当数值，观测时必须采取适当措施，以保证必要的准确度。比如典型的空气温度传感器一般都有**防辐射罩**，有的还有**通风装置**，在关注防辐射的同时还加快了温度传感器与空气的平衡过程。
- 各种不同形状、尺寸的防辐射措施（包括通风速度）的效果之间是有差距的，对精确的温度测量是有影响的。
- 天气预报中的气温，是特指标准气象站百叶箱中距地面**1.5米**处测量得到的空气温度，具有全球观测的可对比性。



测温仪器的热滞效应和平均值测量示意



气象台站百叶箱





水银温度计

发条式自记式
温、湿度计



常见的温湿度传感器防辐射罩和组合式气象站（非标准）



在气象测量中，铂电阻温度传感器目前基本取代了已延续使用了 400 多年的玻璃温度表，其测量误差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。但是在考虑了百叶箱的综合影响后，精度情况会有所降低变化。

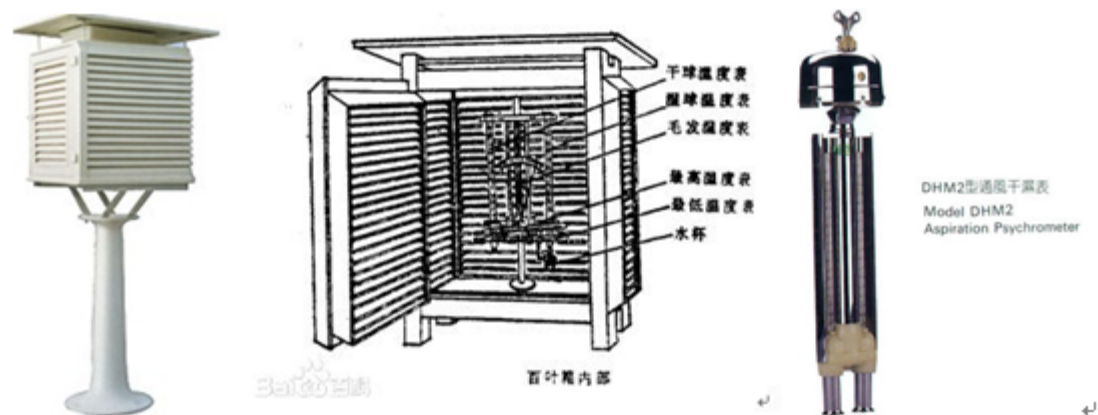


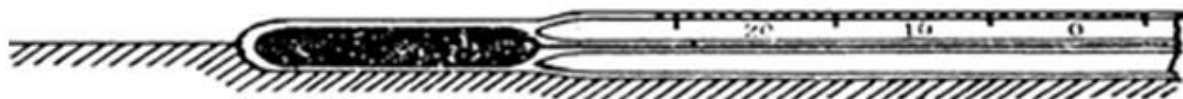
图 1 气象站百叶箱的外形、内部仪器布设和手持通风阿斯曼通风干湿表

多年前，由 Fuch 和 Tannery 在美国波士顿进行的两年实验中给出了百叶箱气温值与阿斯曼通风干湿表气温值之差的数据。说明 WMO 推荐的两个不同形式的温度测量仪器和形式，会有一定的差别。

时间	7:00	14:00	21:00
利用全部资料所得差值 ($^{\circ}\text{C}$)	+0.02	+0.20	-0.14
强日射条件下所得差值 ($^{\circ}\text{C}$)	+0.08	+0.40	-0.03

2、地面温度测量原理及应用问题 （气象、红外、遥感反演）

a.地面温度和地表温度 （红外温度、遥感反演温度LST）



0cm处地面温度表安装示意图

“地面温度”（0cm处）是水银温度计（温度传感器）受太阳辐射和土壤表层温度共同作用的结果；而“地表温度”是土壤表面的红外辐射温度，这个表面的厚度很难具体的给出，通常认为是物体表面几个微米的厚度（如果是地被就更复杂）。所以，两者在应用时注意不要混淆。

□地面温度（ground temperature）是指地表面和以下不同深度处土壤温度的统称。

气象站地面温度的安装和使用问题（裸地）



气象站地面温度的安装和使用问题（草地）



b. 红外测温仪原理示意

$$F_u = \varepsilon \sigma T_s^4$$

红外测温仪的基本原理是：基于任何物体只要其温度高于绝对零度，就能发射红外辐射，且该辐射能量的大小和物体表面绝对温度的4次方成正比 ($T(K) = 273.15 + t(°C)$)，还与物体的比辐射率 ε 有关。

Infrared Thermometers

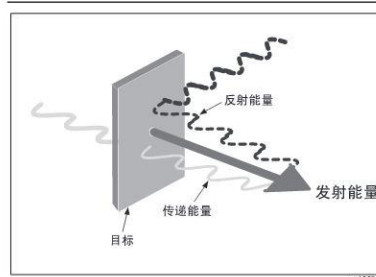
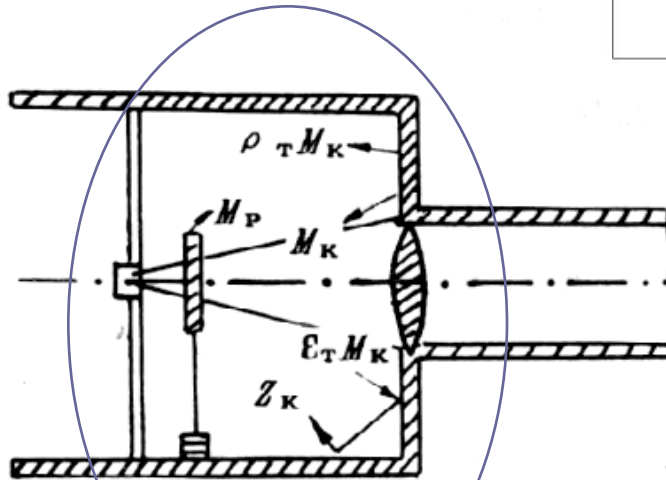


图3. 测温仪如何工作

红外温度计



背景环境辐射影响

物体辐射

各部件间的辐射影响（干扰）

红外辐射温度计：通过对被测物体表面的红外辐射的测量，计算出被测物体的表面温度

忽略环境辐射和比辐射率所引起的误差

一方面，由于目前国内外的红外测温仪（热像仪）都没有考虑测量环境辐射对被测物体的影响，把仪器显示的读数直接认为就是被测物真正的表面温度，客观上将导致较大的观测误差。这种误差还与测量环境的变化高度复杂性相关联。

另一方面，由仪器本身所提供的比辐射率调节功能，在应用时常常会有误区。这个调节实质上是对测温电路信号放大器的调节，不是真正意义的比辐射率调节。当测温仪内部自身温度条件与被测物体之间存在足够大的温度差时，这个调节可呈现出有序合理的结果，反之亦可呈现无序且不合理的结果。

问题的关键是这点常常不被人们所认识。

物质的比辐射率和现实的应用示意

单一物质的比辐射率，本身就是一个非常复杂的物质表面特性参数，与物质所处的温度、形状、表面粗糙度等相关，文献中给出的物体比辐射率都是在特定的物质表面法向和一定温度条件下取得的观测值。

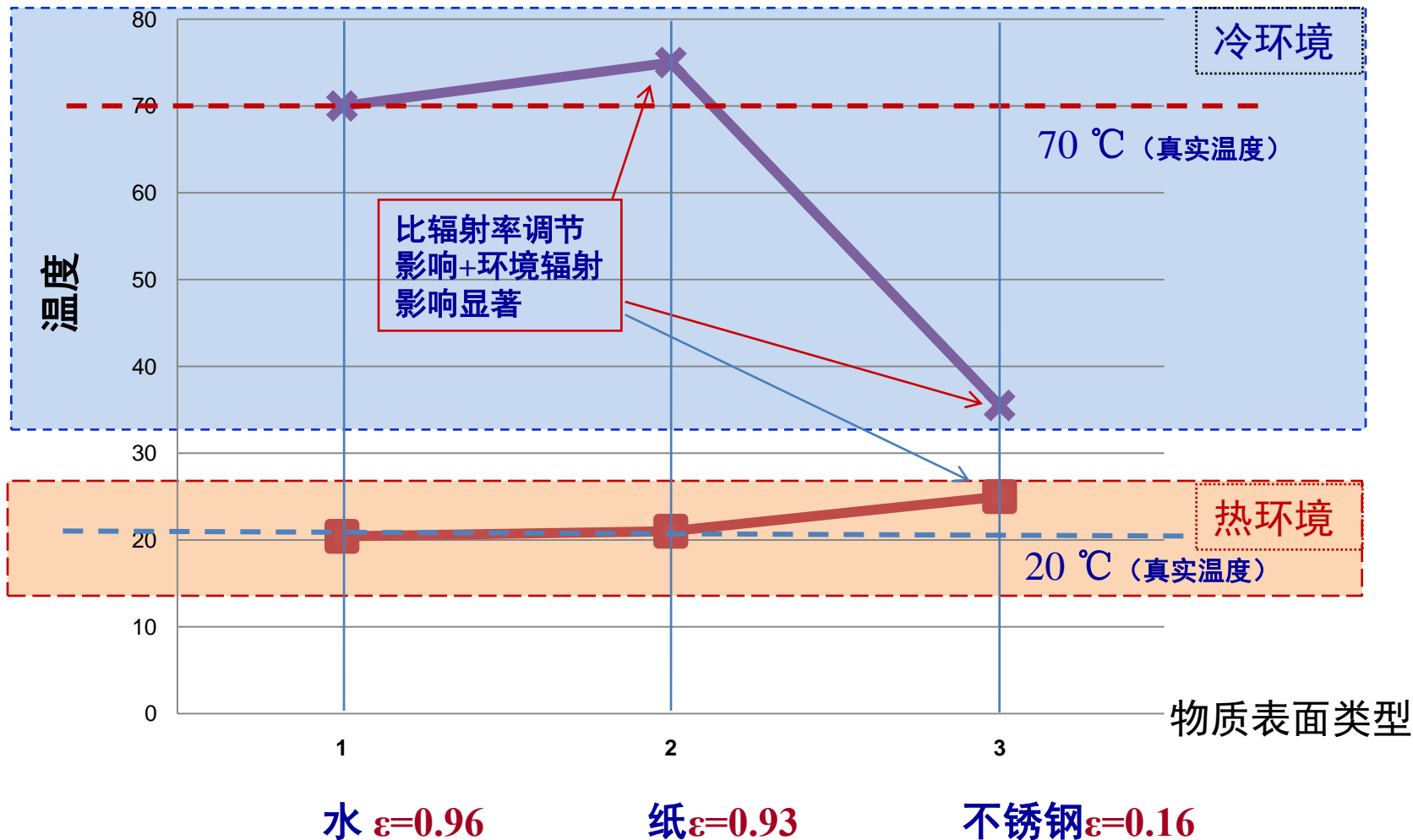
但一般使用时都把它作为常数来使用，给实际应用带来了较大的不确定性。如果被测目标为各种物质的混合时，那么每一种物质作为目标物的一个组分，给使用红外测量带来影响是显而易见的，不能忽视。结合后面的两个实验观测实例说明这个问题。

几个典型物质的比辐射率 (20℃)

水	$\epsilon=0.96,$	土壤 (干)	$\epsilon=0.92$
纸	$\epsilon=0.93,$	土壤 (湿)	$\epsilon=0.95$
不锈钢	$\epsilon=0.16,$		

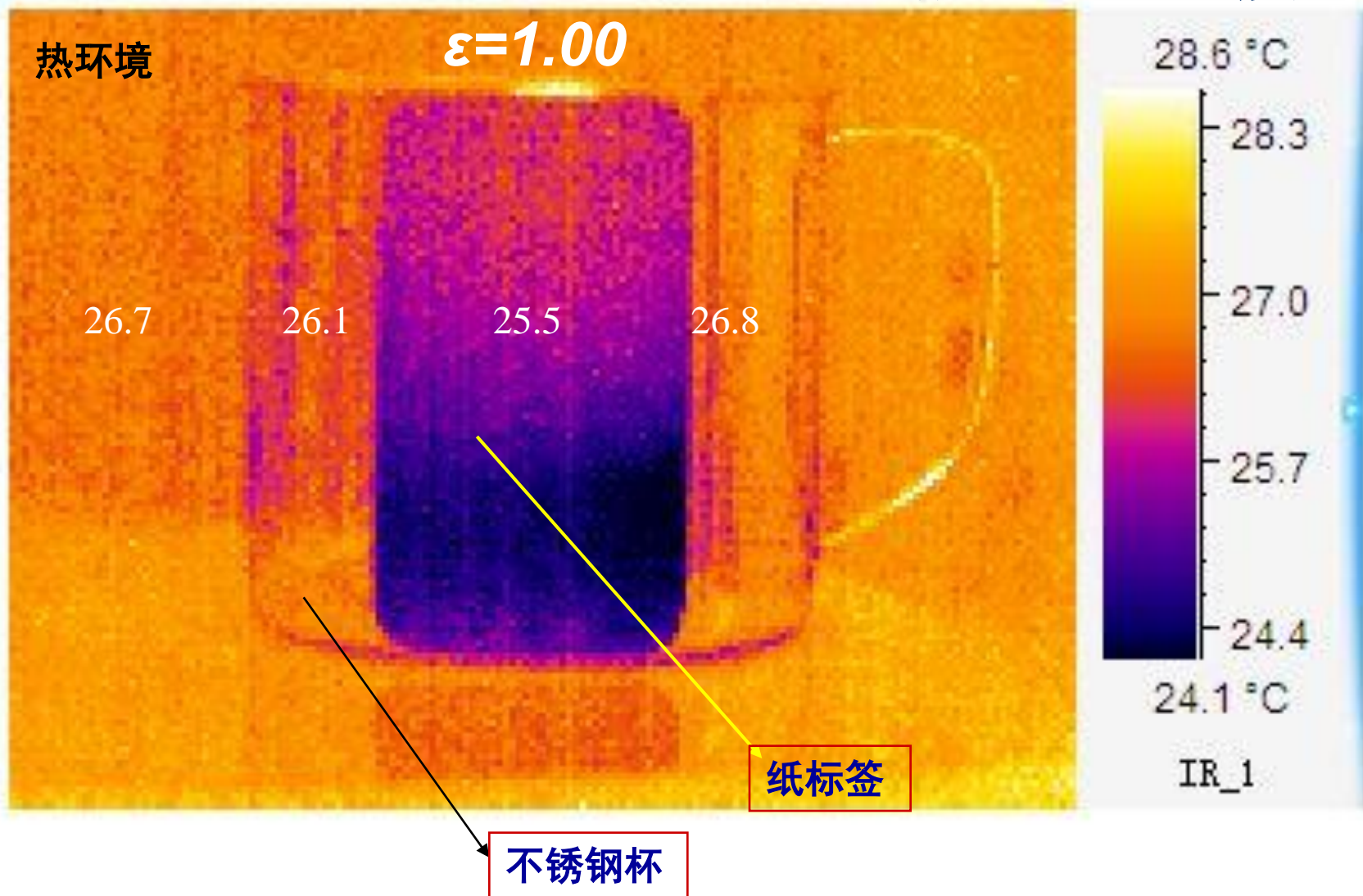
一个等温体上不同材料红外温度的测量实验

固定比辐射率 ($\epsilon=1.0$) 的红外表面温度观测结果 室温 $25\text{ }^\circ\text{C}$

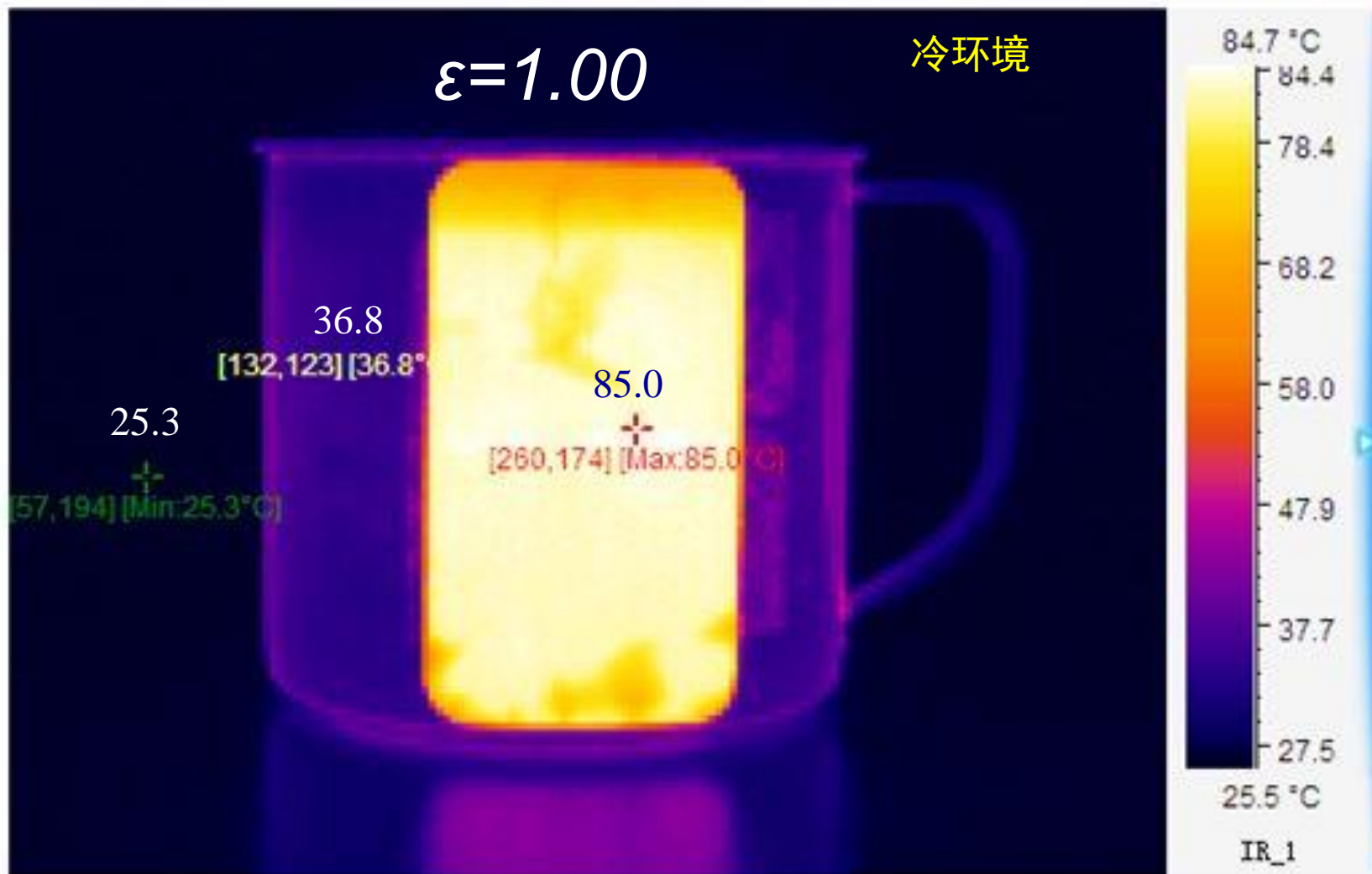


红外观测实验的热红外图像 (室温26.7℃、杯中水温25.7℃，

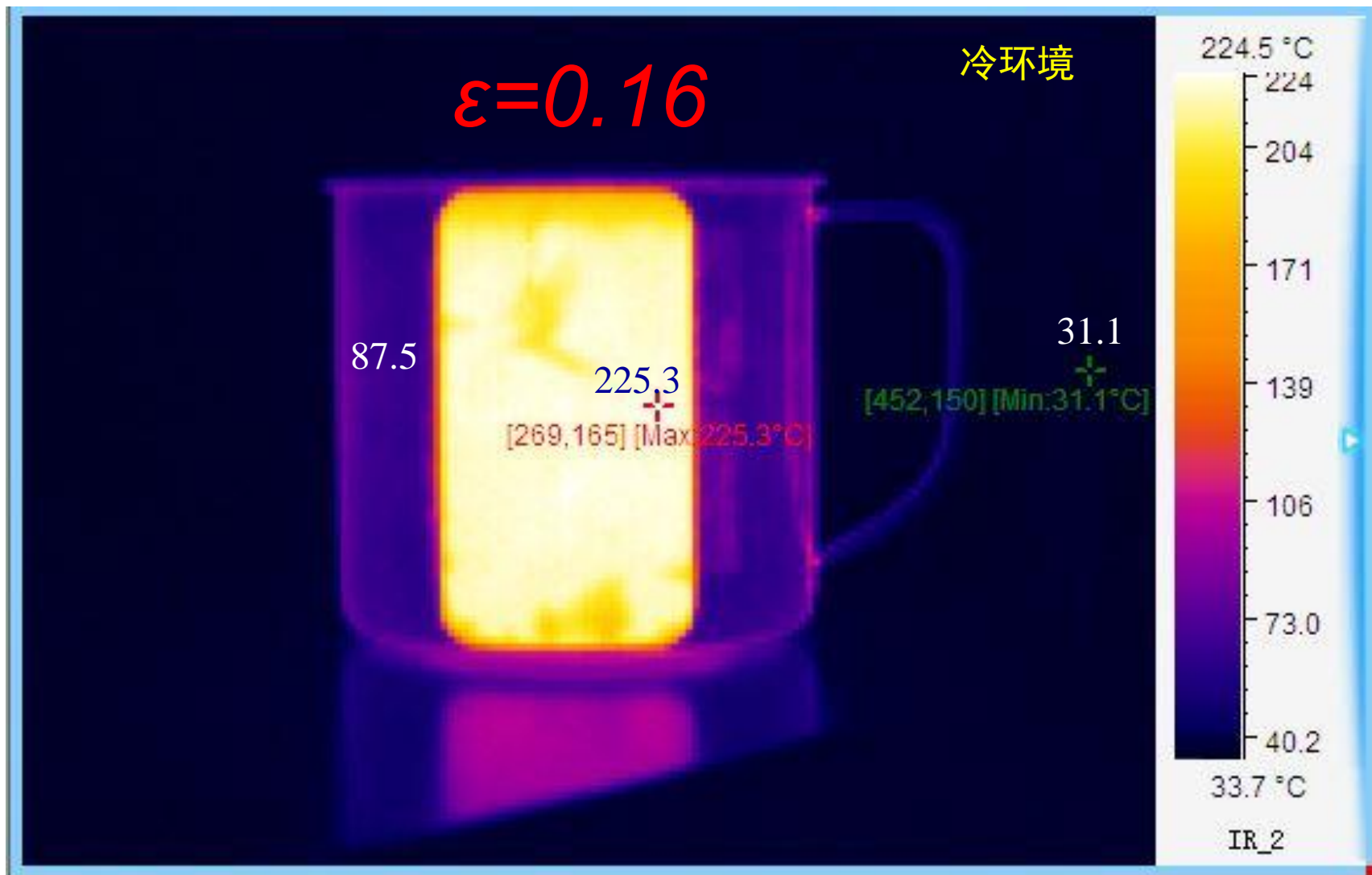
测量目标：纸、不锈钢)



红外观测实验的热红外图像 (室温25.3 °C, 杯中水温85°C, 纸、不锈钢)



红外观测实验的热红外图像 (室温25.3 °C, 杯中水温85°C, 纸、不锈钢)



对红外测温数据的分析示意

首先假设不锈钢水杯表面由两种物质表面平分，即一半是不锈钢，一半是贴纸（假设水与纸和不锈钢杯表面接触良好，导热热阻为零），当杯中加注了85℃的热水后，这时不锈钢和纸的表面的物理温度都应该是85℃。

热像仪的比辐射率虽然可以调节，在使用时只能设定在一个固定值。而事例中的观测目标有两种物质表面（即纸和不锈钢表面），我们分别以接近纸和不锈钢的比辐射率来观测目标的红外温度。

按纸的辐射率调节热像仪 $\varepsilon=1.0$ ，则观测结果：纸的红外温度为85℃，不锈钢的红外温度36.8℃，二者的平均红外温度为60.9℃（显然这时的不锈钢的红外温度和目标的平均红外温度是不对的）。

按不锈钢的比辐射率调节热像仪 $\varepsilon=0.16$ ，则观测结果：纸的红外温度为225.3℃，不锈钢的红外温度87.5℃，二者的平均红外温度为156.4℃（显然这时的纸的红外温度和目标的平均红外温度是不对的）。

如果把不锈钢杯处理为 n 个物质表面的情形就会更为复杂（但更接近现实）。只有被测物质与仪器所设比辐射率比较接近时，其红外温度观测才比较接近准确。在这个实例中，两次测量的环境辐射的影响是基本一致的，显性的体现了红外温度观测中比辐射的影响，也显性的体现了环境辐射对观测的影响，需要大家来理解和体会。

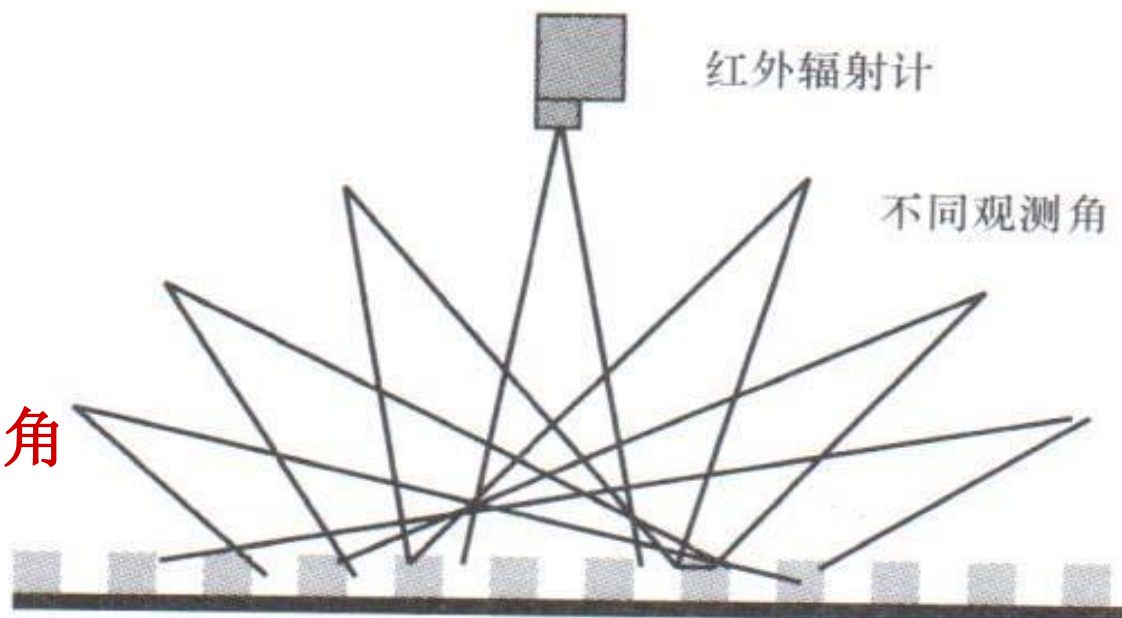
地被表面多角度热红外温度观测

多传感器、全方位多角度
测定平台

ZL02160132.1



晴空下的红外温度的方向性问题



不同方位角下不同天顶角的观测结果表明

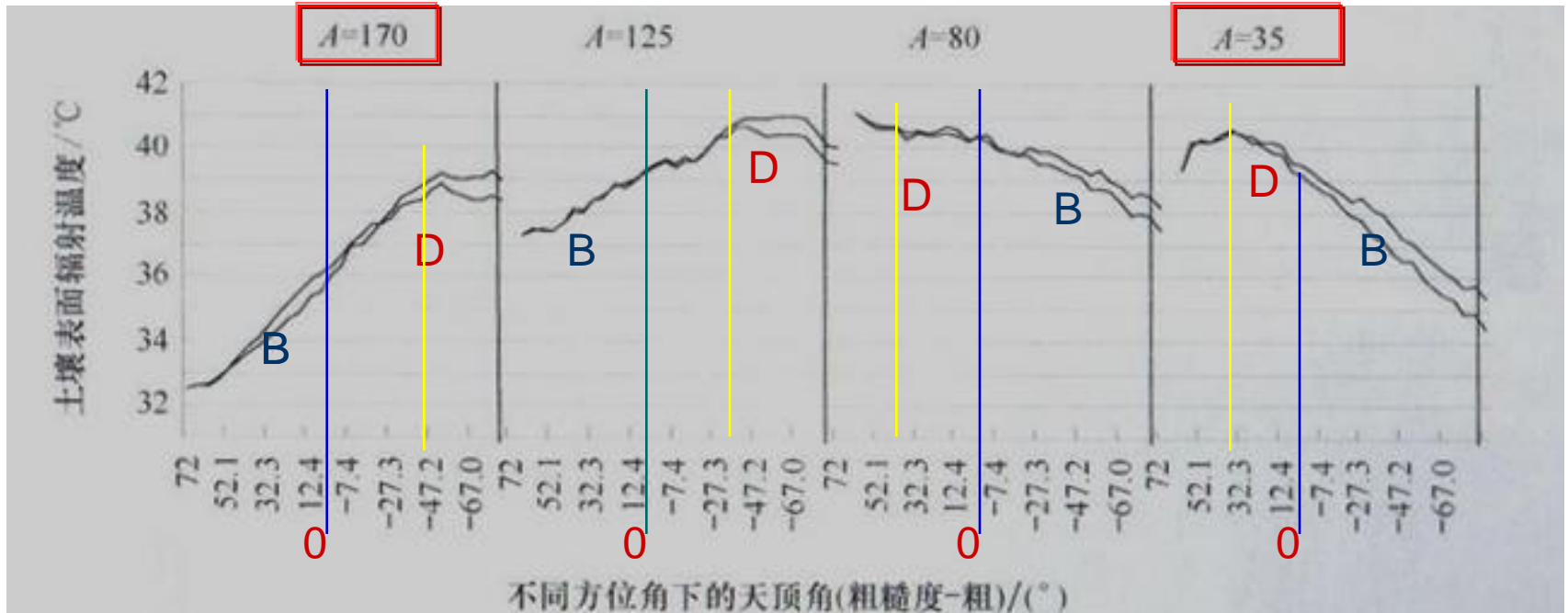
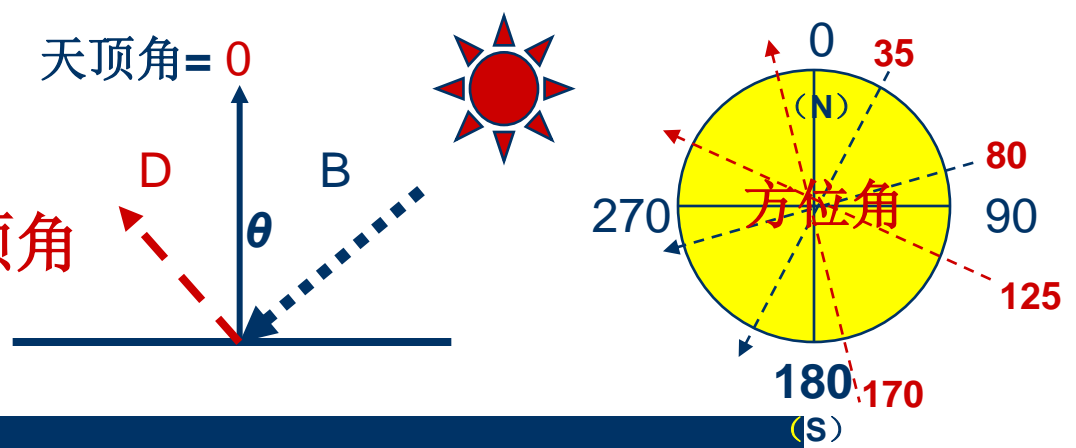
- 红外多角度地表温度测量沿天顶角变化存在不对称现象；
- 红外多角度地表温度测量沿天顶角变化存在变异临界角度现象。



不同观测角所造成的不同视场

图示给出了以红外辐射计多角度测量所形成可变视场的示意

麦田不同方位角下不同天顶角的观测结果



图示给出了土壤(粗糙度-粗)不同角度的表面辐射温度
(观测天顶角的轨迹为 $90^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow -90^\circ$, 正负号对称于 0° 天顶角)

野外红外温度仪的安装要规范：建议方位角为0，天顶角为 45 ± 5 。

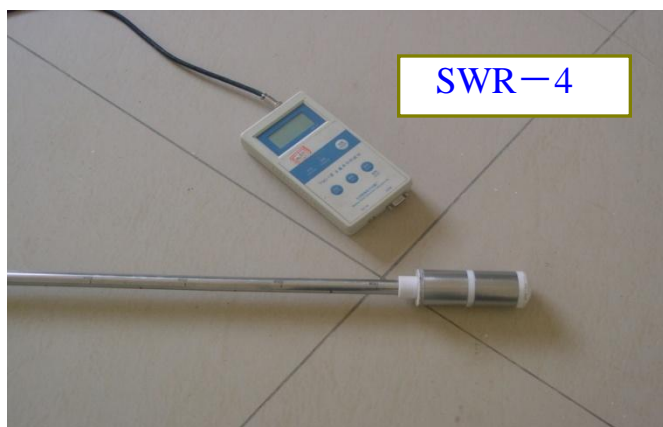
二、土壤水分测定仪原理及应用问题

- 烘干法
 - 张力计
 - 中子水分测定仪
 - TDR水分测定仪
 - FDF水分测定仪
 - 宇宙射线水分测定仪（中尺度）
 -
-
- 间接测量原理、经验方程标定曲线
 - 没有标准（厂家相对标准）
 - 单位换算时基本参数缺失（土壤容重真值）
 - 冻土的土壤水分观测
 - 仪器的安装和使用

导入式土壤水分测定仪

主要特点：

1. 不破坏土壤结构；
2. 土壤剖面测点可以根据需要扩展；
3. 传感器不与土壤直接接触；通过预先埋在土壤里的导（测）管设施测量；
4. 适于分时的、多点的土壤水分剖面测量；
5. 无法自动化连续观测，重复性差，工作强度大；
6. 传感器与导管、导管与土壤的接触不好时，会影响测量的质量（TDR、FDR）；
7. 维护性差（测管）；



埋入式土壤水分测定传感器

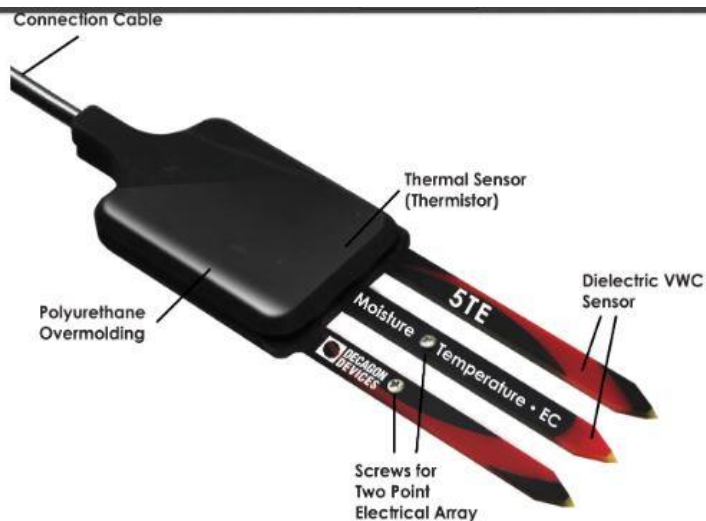
SOILS

土壤张力计传感器



主要特点:

1. 避免破坏土壤结构;
2. 传感器易受土壤盐碱腐蚀, 影响测量的稳定;
3. 传感器与土壤接触紧密, 有利测量的稳定和真实;
4. 适于土壤水分剖面的多层同步连续自动化测量;



SOILS

土壤水分传感器



Soil Moisture Sensors

由土壤介电特性测量含水量的方法

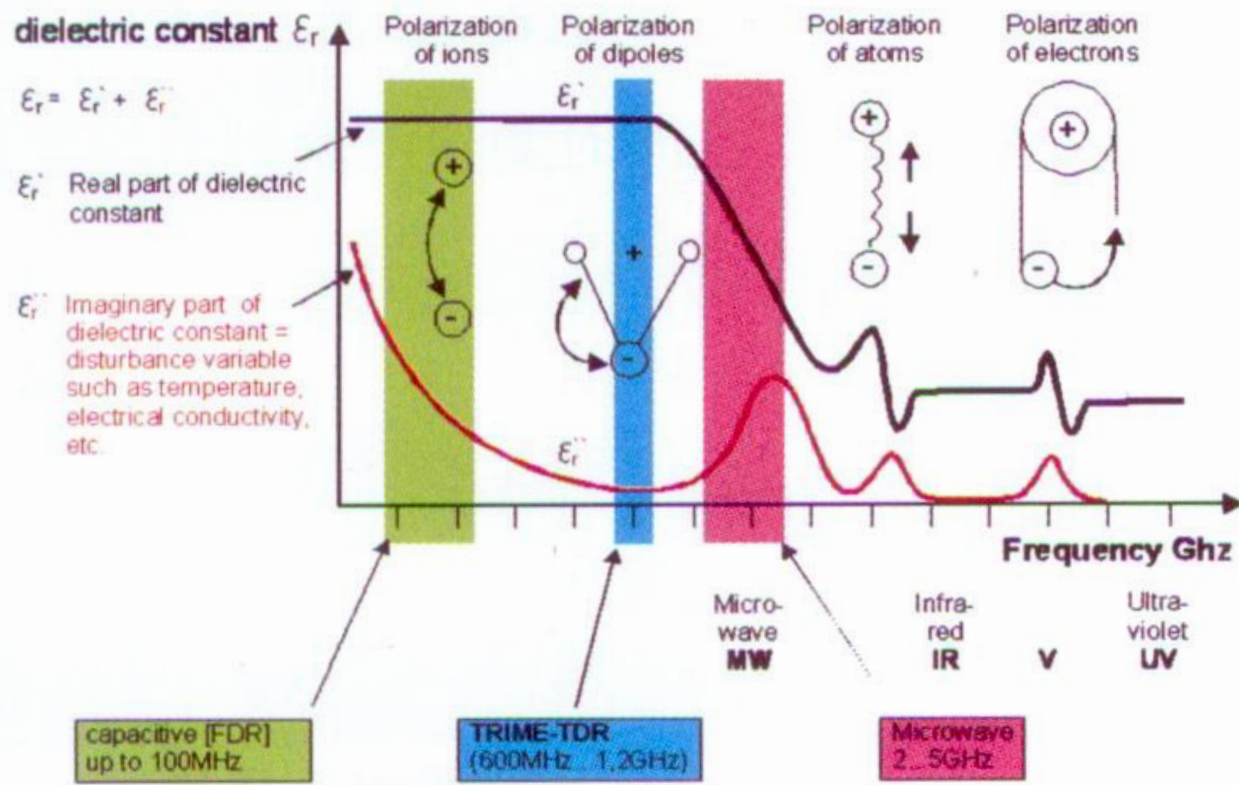
TDR和FDR是通过测量土壤表观介电常数和表观电容来得到土壤容积含水量的。

从电磁角度看，土壤由4种介电物质组成：空气、土壤固体物质、束缚水和自由水。在无线电频率、标准状态时（20℃，1大气压）纯水的介电常数为**80.4**，土壤固体物质约**3~7**，空气为**1**。

总的说来，土壤介电特性是下面几个因子的函数：**1）**电磁频率、温度和盐度；**2）**土壤容积含水量；**3）**束缚水与土壤总容积含水量之比；**4）**土壤容重；**5）**土壤颗粒形状及其所包含的水的形态。

与土壤水分相关物质的介电常数

材料	介电值	速度 毫米/纳秒
空气	1	300
水 淡	81	33
水 咸	81	33
极地雪	1.4 - 3	194 - 252
极地冰	3 - 3.15	168
温带冰	3.2	167
纯冰	3.2	167
淡水湖冰	4	150
海冰	2.5 - 8	78 - 157
永冻土	1 - 8	106 - 300
沿岸砂 干燥	10	95
砂 干燥	3 - 6	120 - 170
砂 湿的	25 - 30	55 - 60
粉沙 湿的	10	95
粘土 湿	8 - 15	86 - 110
粘土土壤 干	3	173
沼泽	12	86
农业耕地	15	77
畜牧土地	13	83
土壤 平均	16	75



图示中黑色曲线是介电常数实部，红色曲线是介电常数虚部，它受温度、电导率等很多因素的影响。从图中可以看出，TRIME（蓝色条）使用的1GHz高频电磁波受到的外界温度、电导率等很多因素的影响最小，测量最稳定。FD原理（绿色条）的测量显然受到介电常数虚部的影响比较大，也就是会受到温度和电导率很大影响。

TDR的基本原理

高频电磁脉冲沿传输线在土壤中传播的速度依赖于土壤的介电特性。在一定的电磁波频率范围内（50M~10GHz），矿物质、空气和水的介电特性为常数，因此土体的介电常数主要依赖于土壤容积含水量（极微弱地依赖于土壤类型、紧实度、束缚水等），这样可以建立土壤容积含水量与土壤介电常数的经验方程。TDR通过测量高频电磁脉冲在土壤中的传播速度求得土壤的介电常数，从而计算出土壤的含水量。

高频电磁波在土壤中的传播速度 v 与土壤介电常数 $\sqrt{\epsilon_r}$ 存在下面的关系式：

$$L = \frac{V * T}{2} = \frac{C * T}{2\sqrt{\epsilon_r}} \rightarrow V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{因为 } V = \frac{L}{t}, \quad \text{所以 } t = \frac{L\sqrt{\epsilon_r}}{C}$$

因为土壤水分与 $\sqrt{\epsilon_r}$ 有关系，所以 t 与土壤水分也有了关系。

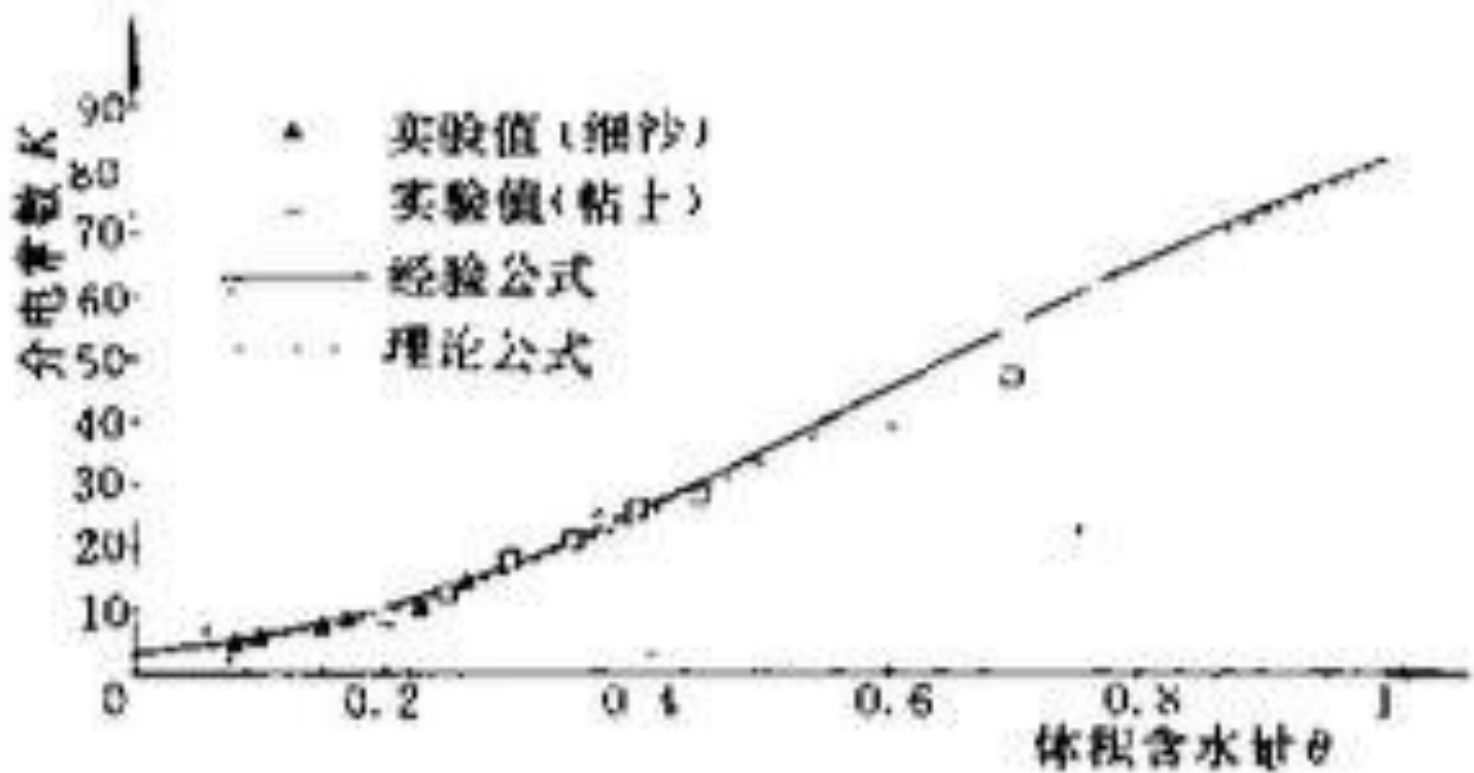


图 1 未冻结土壤介电常数与体积含水量的关系

特征：存在非线性

频域反射仪 (FDR) 与电容法 (Capacitance)

频域反射仪 (Frequency Domain Reflectometry) 测量土壤含水量的原理与 TDR 类似。TDR 与 FDR 的探头统称为介电传感器 (Dielectric Sensor)。FDR 的传感器主要由一对电极 (平行排列的金属棒或圆形金属环) 组成一个电容, 其间的土壤充当电介质, 电容与振荡器组成一个调谐电路, 振荡器工作频率 F 随土壤电容的增加而降低:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} * \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right)^{0.5}$$

式中, L 为振荡器的电感, C 为土壤电容, C_0 为与仪器有关的电容。 C 随土壤含水量的增加而增加, 于是振荡器频率与土壤含水量呈非线性反比关系。

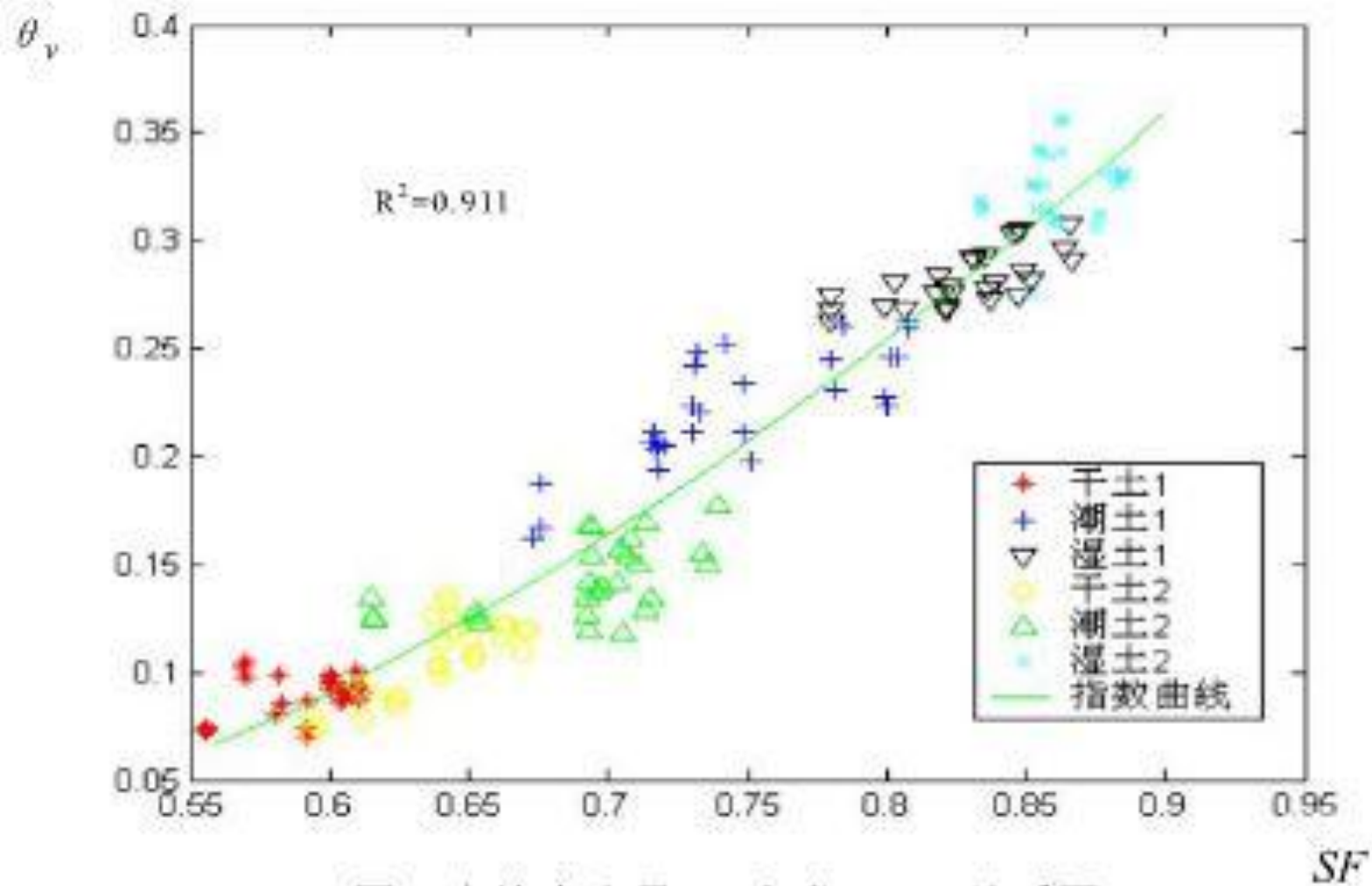
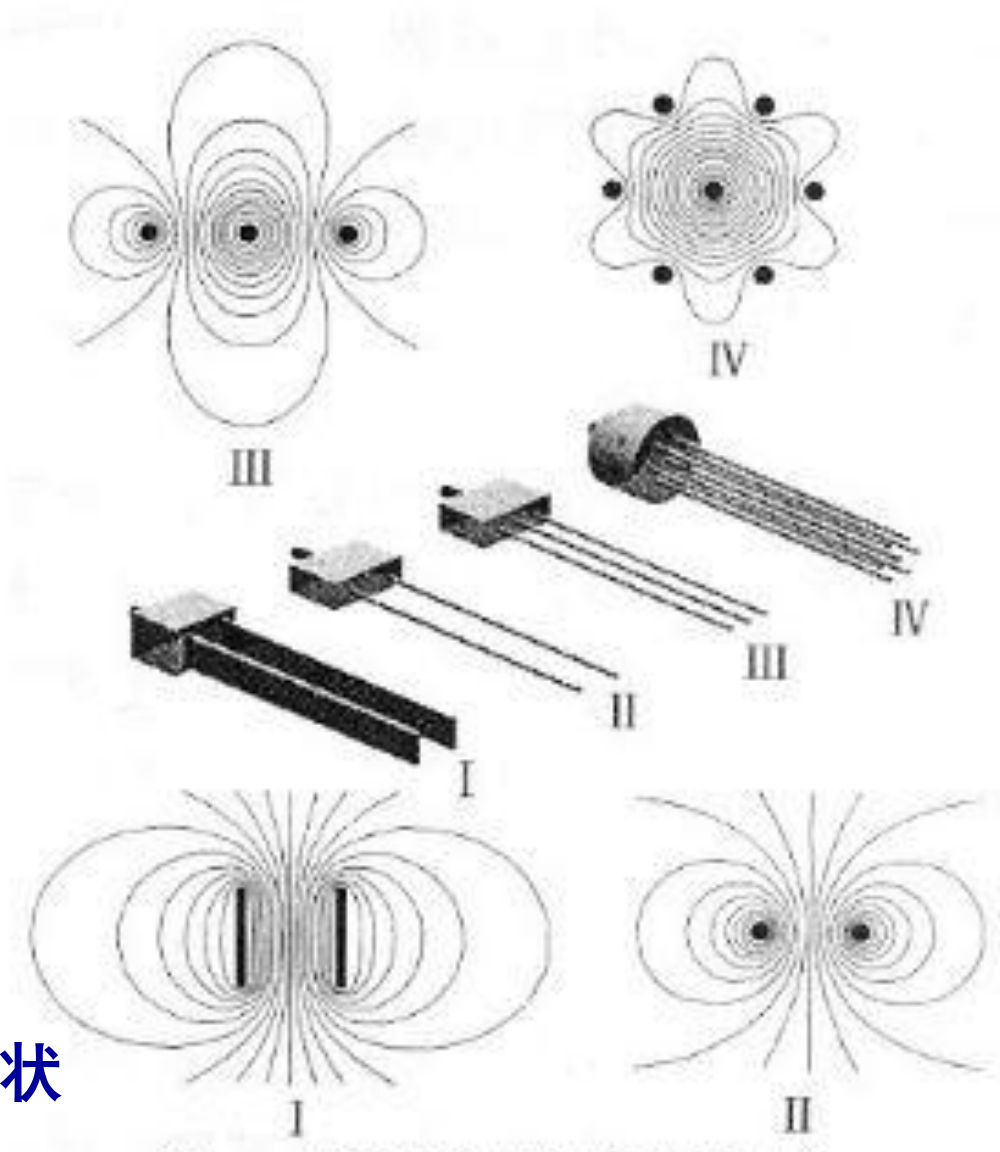
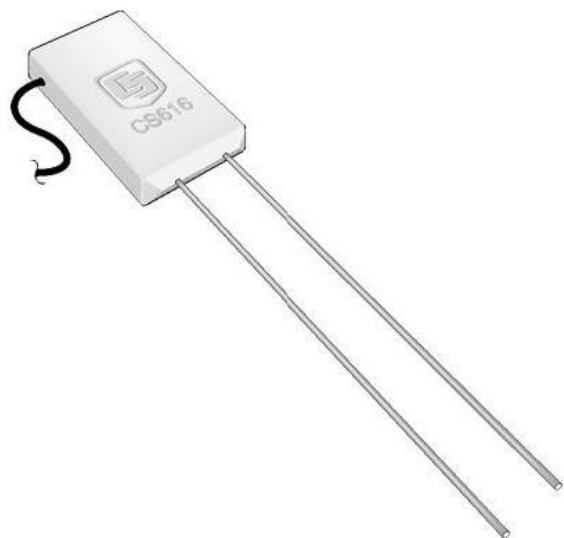


图1 土壤含水量 θ_v 与仪器 SF 关系图



典型TDR传感器的形状

几种结构探针的磁场分布

The distribution of magnetic field for several TDR probes

土壤水分观测数据质量的经验约束阈值

土壤水分传感器的标定策略

- 土壤饱和含水量 (saturated moisture) 是指土壤颗粒间所有孔隙都充满水时的含水量, 亦称持水度。在沙质土壤中, 饱和容积含水量在25~50%范围内, 粘质土土壤的饱和容积含水量可达60%, 有机土如泥炭土或腐泥土的饱和含水量可达100%。
- 土壤容重, 粘质土的容重(1.0-1.5g/cm³), 沙质土的土容重(1.2-1.8g/cm³), 耕作可以降低土壤容重。

- **野外对比标定 (推荐开展)**: 野外标定场地的选取要平坦均匀, 用烘干法和TDR (FDR) 开展对比标定;
- **室内标定 (专业、相对标准, 但与现实土壤脱节)**: 将风干土土壤粉碎并通过规定孔径的筛子以除去大团块, 然后将土样搅拌均匀, 备用。
- 在规定体积的圆形标定容器内壁刻画等距的刻度, 然后按刻度逐层的装填风干土壤。每一层回填之前先按规定容重计算应回填土壤的重量称出所需的土壤, 每回填一层, 需要从四个位置取样, 合格后继续回填下一层, 直至填满, 然后按重量含水量添加水, 放置24小时。
- 期间用塑料布封口, 减少蒸发。需要沿埋深取四个位置得土样, 用称重法标定。



导入管式土壤水分测定仪工厂标定和精度检验的“标准土壤环境土体”

常用土壤水分含量单位和换算

质量含水量与体积含水量:

$$\theta_m = \frac{M_{water}}{M_{solid}} \quad \text{g g}^{-1}$$

$$\theta_v = \frac{V_{water}}{V_{soil}} \quad \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_b$$

定义有单位，计算、换算没单位

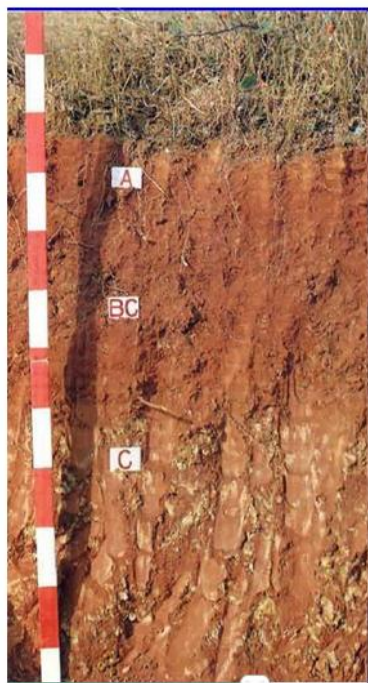
沙质土壤 容重 1.2~1.8 g/cm³

粘质土壤容重 1.0~1.5 g/cm³

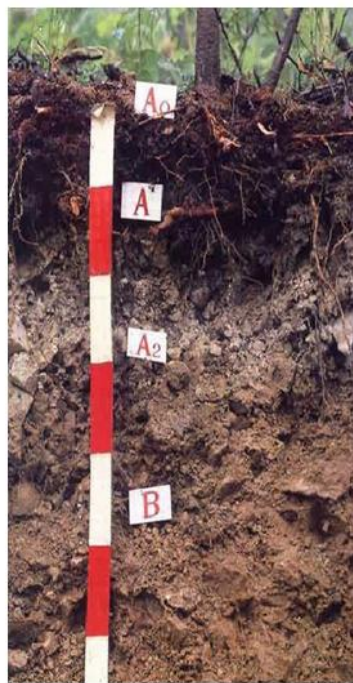
你真的知道你测定的土壤是什么类型吗？

如果知道，那值到底该是多少？毕竟有50~33%的差距在这里！

典型的自然土壤



红壤剖面



灰化土剖面




暗棕壤剖面

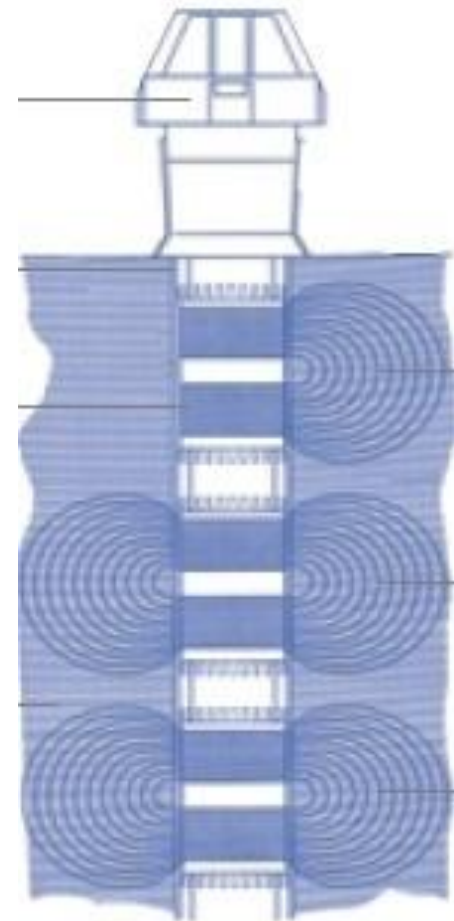
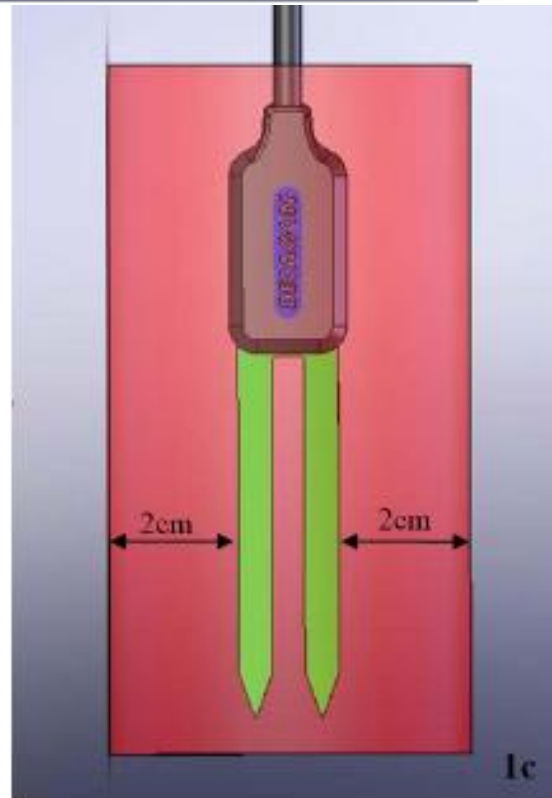
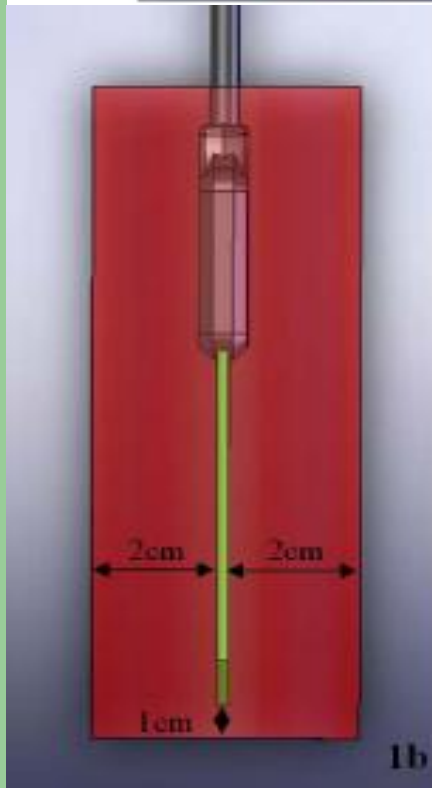
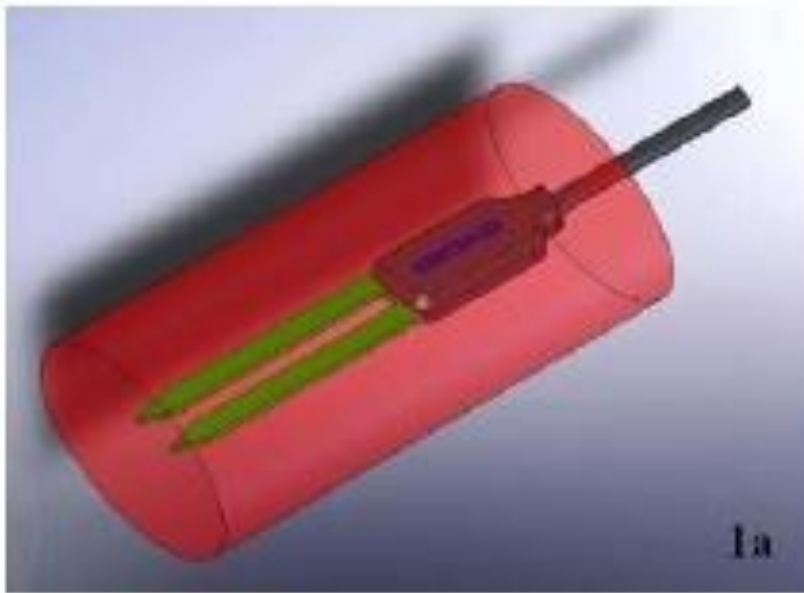


黑钙土剖面

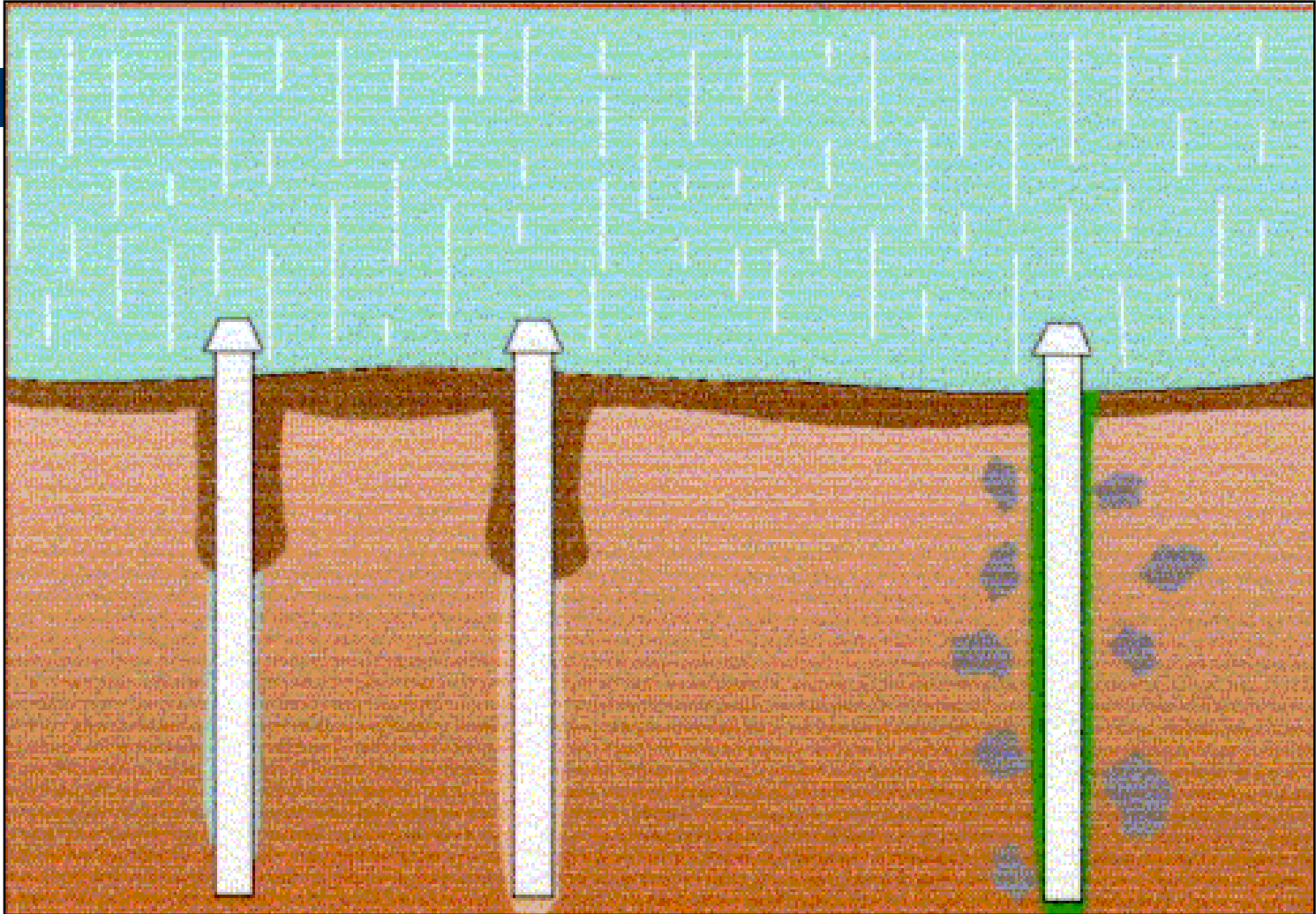
典型的自然土壤结构

O 层	有机残落物层 □ 枯枝落叶有机 物残体		厚度 < 10cm
A 层	淋溶层 □ 较强度风化 □ 富含有机质 □ 颜色深暗		厚度可达 25 cm
B 层	淀积层 □ 中度风化 □ 颜色较浅		厚度约 30—100cm
C 层	母质层 □ 弱度风化		深度在 1m 以下
R 层	基岩 □ 未受风化影响		

传感器的测量空间



安装和其他影响



三、野外控制实验及应用问题

a. 控雨实验

- 条形截雨棚设计的去水量存在高估的问题
- 标准测雨方法存在的不确定性
- 截雨棚的安装、使用问题

b. 增温实验

- 不同增温方法的增温途径不同
- 增温的温度参考点没有标准
- 增温实验之间的结果可比性差
- 辅助观测要素缺乏

国外降水处理实验

a. 控雨实验

美国中部草原降水处理实验



亚利桑那沙漠降水处理实验



堪萨斯高草草原降水处理实验



哈佛森林降水处理实验



加拿大森林降水处理实验



橡树岭森林降水处理实验



国内降水处理实验

a. 控雨实验

坝上草原降水处理实验



东灵山森林降水转移实验



长白山培育池栽控水实验



古田山培育池栽控水实验



东灵山培育池栽控水实验



鼎湖山培育池栽控水实验



降水转移实验设施

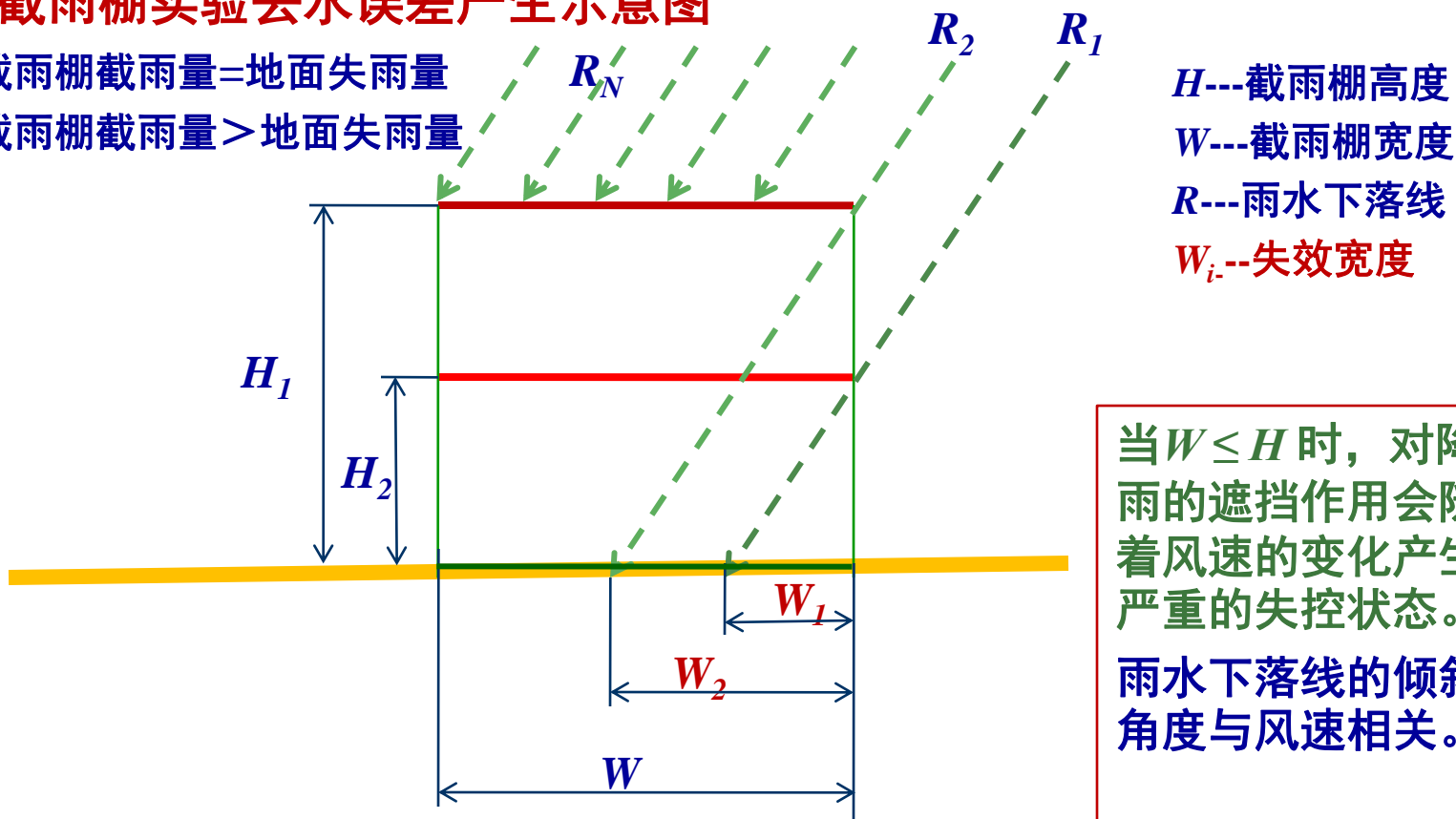


条型截雨实验---设计的去水量存在高估的问题

条型截雨棚实验去水误差产生示意图

理想：截雨棚截雨量=地面失雨量

实际：截雨棚截雨量>地面失雨量



H ---截雨棚高度

W ---截雨棚宽度

R ---雨水下落线

W_i ---失效宽度

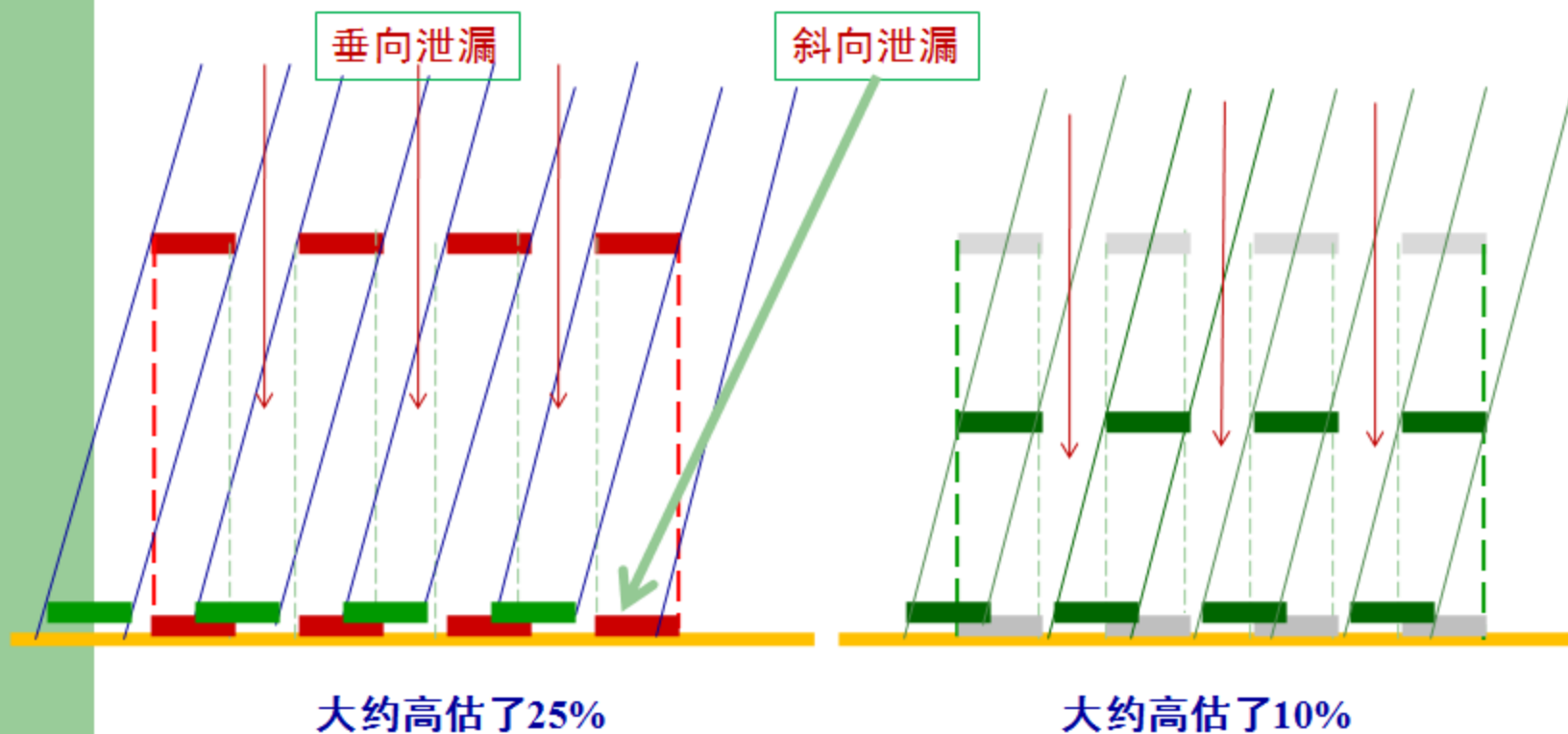
当 $W \leq H$ 时，对降雨的遮挡作用会随着风速的变化产生严重的失控状态。

雨水下落线的倾斜角度与风速相关。

设计的去水量存在高估的问题示意

常见的减（增）雨额度：
25%、50%、30%、
60%、100%

表观高估的相对去雨量+垂向泄露+风吹的斜向泄露+截雨条两端高度差 = ? ? ?



几种现实的去雨和增雨实验“观测”模式

- 1.按设计的条形截雨棚理想化（概念化）运行，**计算**得到截雨量和转移水量（实验的水账存在较大的系统误差和不确定性）；
- 2.现实中的一些相对小面积的条形去雨单元，通常采取**实际收集**的方法来测量水量。这样的操作可以很大程度的弱化设计环节可能带来不确定的影响，这就需要雨量的收集应该是少耗损的。但在实际运行中截留水量非常容易在蒸发、滴漏、堵塞、材料变形等环节发生问题（特别是林下截雨）。结果是低估实际的截水量，如果再转移到邻地增水时，会在雨水转移过程中产生新的误差；
- 3.每个条形截雨棚单元下都设置一个对应的**雨量筒**，由于雨量筒的安装位置相对截雨棚的不一致而对测雨的客观性带来影响。关键是截雨棚下的雨量筒测量的雨量可能与截雨棚实际的截雨量之间存在很大的差距，需要获取数据相互印证，不能简单的单独的应用雨量筒的数据（还要包括试验场地对照的雨量计）。

总之，该类控制实验线条粗犷，但是细节决定实验的质量和实效

降水转移实验设施 (带雨量计)

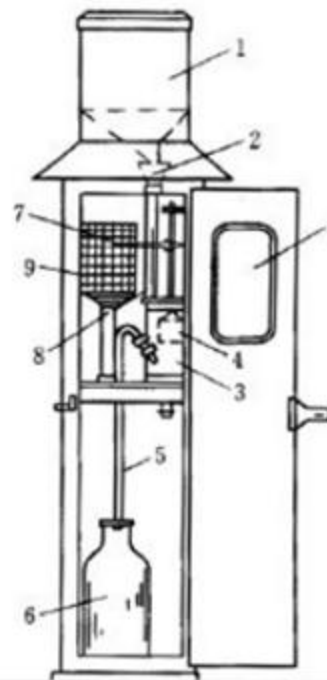
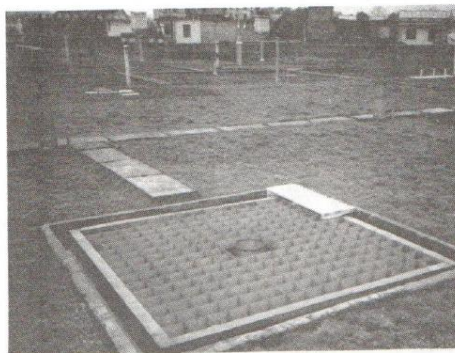


降水转移实验设施

(带雨量计、地面围挡?)



降雨观测的标准与误差



雨量筒安装规范：截雨器口水平，一般离地面高70厘米

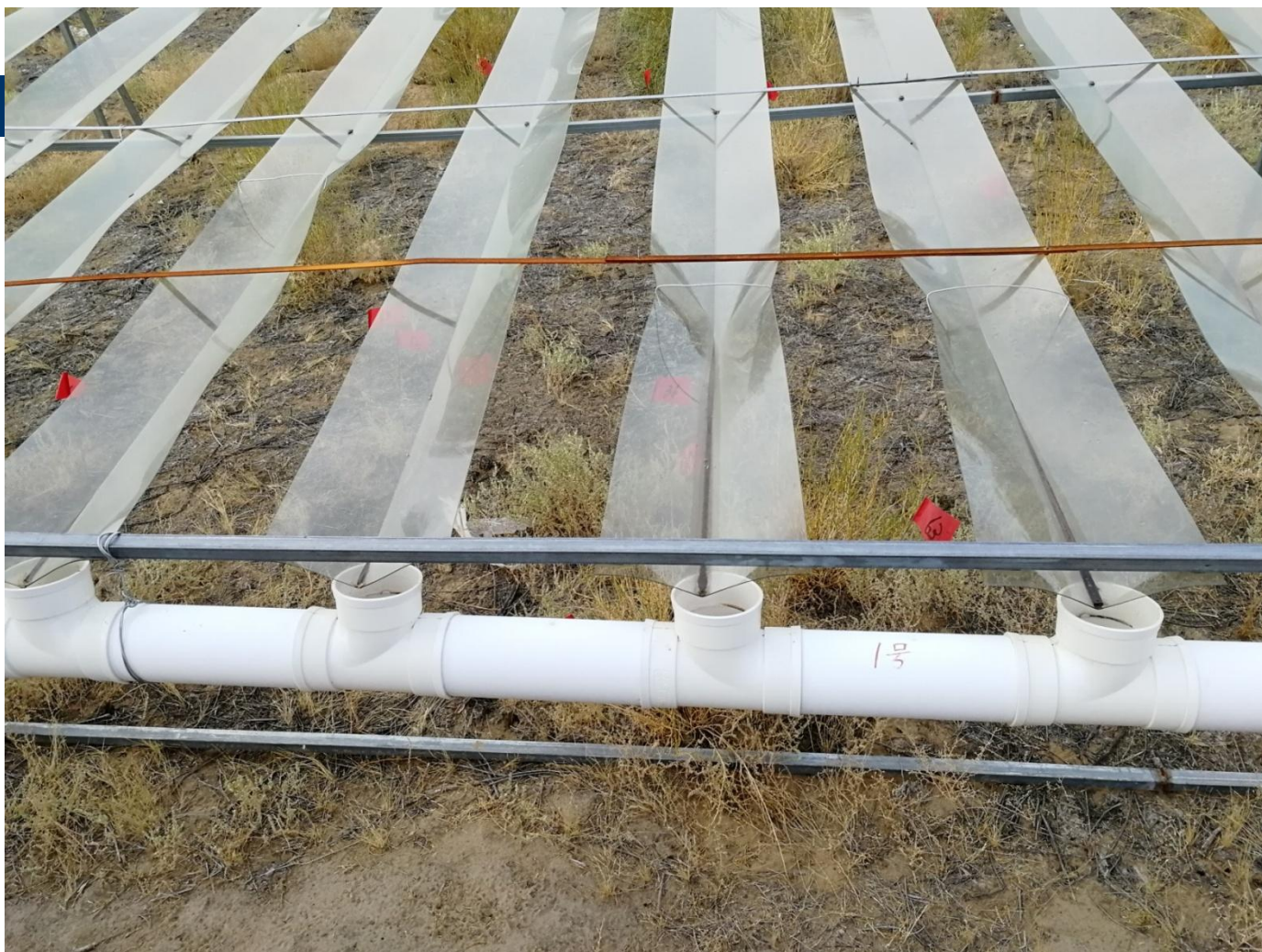
表 3.6 七年降水(雨、雪)测量平均误差%

雨量	误差	站名	风引起的误差	沾湿误差	合计误差
	最大	青海刚察	7.91	7.37	15.28
最小	福建福州	1.18	3.24	4.42	
全国平均	30个站	3.17	3.35	6.52	
雪量	误差	站台	风引起误差	沾湿误差	合计误差
	最大	内蒙古海伦	24.76	12.23	36.99
	最小	上海宝山	2.18	3.99	6.17
	全国平均	26个站	10.97	6.79	17.76

由此可见,由于风场和雨量筒沾湿的影响使得测量的降水量比实际降水偏小平均达6%~7%,而固体降水偏小则更多,个别站高达近40%。这种误差目前在降水资料中还没有进行订正。

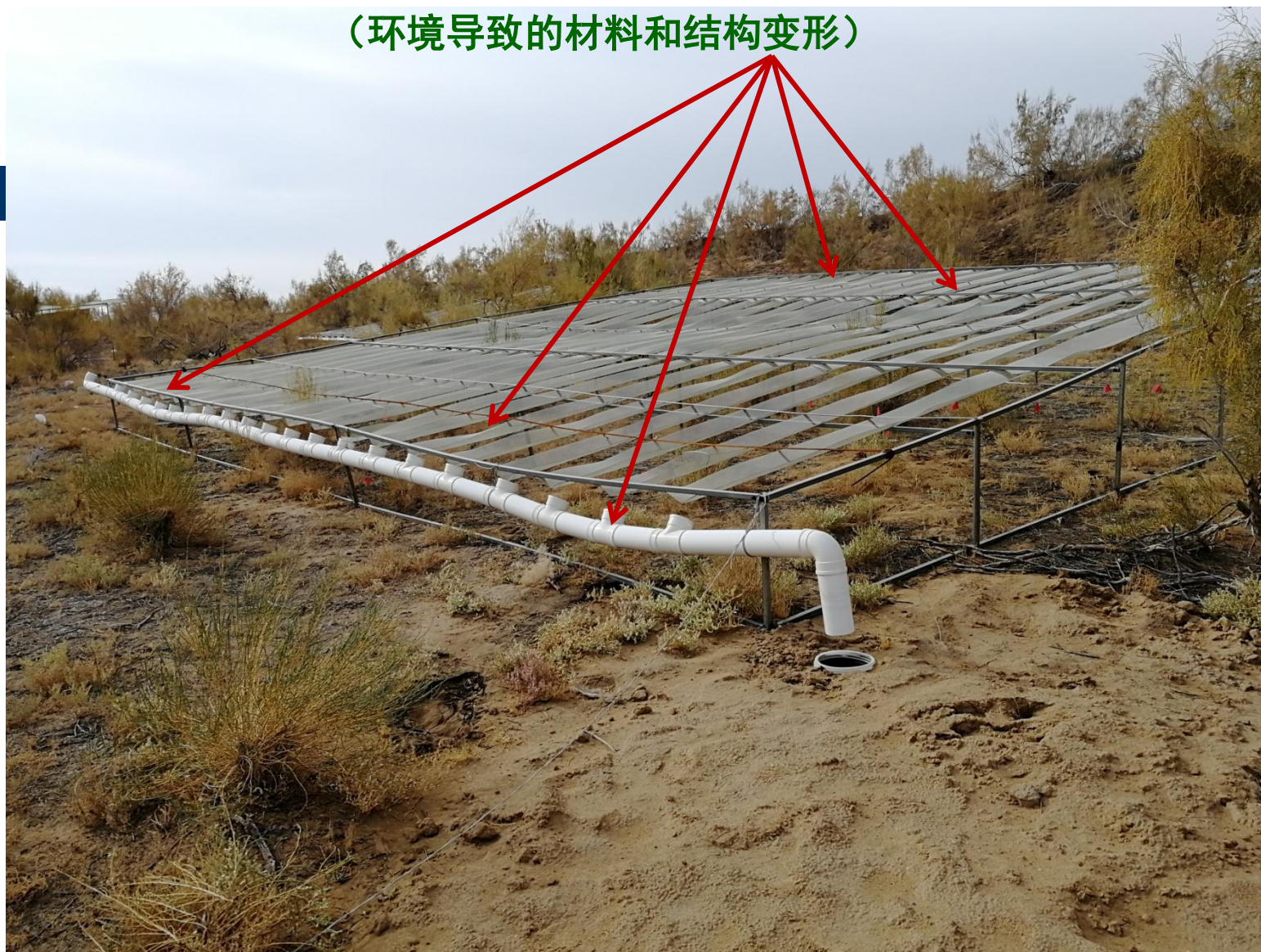
降水转移实验设施的实际效果

(环境导致材料变形和水的截存)



降水转移实验设施的实际效果

(环境导致的材料和结构变形)



降水转移实验设施的实际效果

(环境导致的结构变形和泄漏)



存在严重的跑冒滴漏

三、野外控制实验及应用问题

a. 控雨实验

- 条形截雨棚设计的去水量存在高估的问题
- 标准测雨方法存在的不确定性
- 截雨棚的安装、使用问题

b. 增温实验

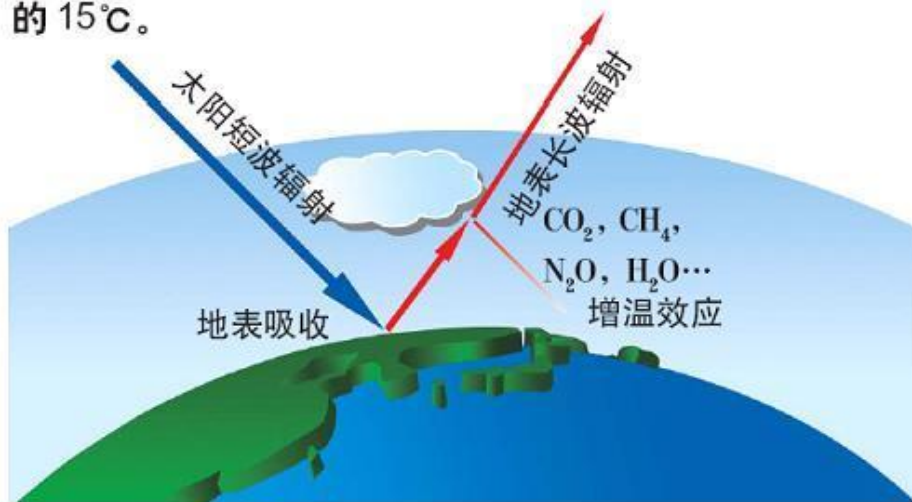
- 不同增温方法的增温途径不同
- 增温的温度参考点没有标准
- 增温实验之间的结果可比性差
- 辅助观测要素缺乏

增温实验，就是增温实验 与全球变暖的“仿真”关系不大

温室气体效应是一个在全球尺度讨论的效应，而且存在明显的区域的差异，无法清晰地把它与地球的（局地）天气状况和气候分离讨论，所以一个相对关于地球而言的十分微小的局部的增温实验，就是一个单纯实验的过程，与全球变暖的“仿真”关系不大。

温室气体能吸收地表长波辐射，使大气变暖，与“温室”作用相似。

若无“温室效应”，地球表面平均温度是 -18°C ，而非现在的 15°C 。



牛书丽 韩兴国 马克平 万师强*
(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100931)

表 1 几种野外增温装置的比较
Table 1 The comparison among field warming facilities

增温装置 Warming facilities	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	应用实例 Implication instances
开顶箱温室加热 温室/开顶箱 Greenhouse/open-top chamber	简单易行, 不需电力, 经济 Low cost in construction and maintenance. No electric power needed	不能模拟全球变暖条件下增温的日变化, 影响小气候(光照、风速、湿度和降雨)和动物活动 Different diurnal patterns of temperature change from those under natural condition. Disturbance to microclimate (light, wind speed, humidity and rainfall) and animal activities	Chapin <i>et al.</i> , 1995 Marion <i>et al.</i> , 1997 Norby <i>et al.</i> , 1997 Shaver <i>et al.</i> , 1998 Klein <i>et al.</i> , 2005
加热管(电缆)加热 土壤加热管道和电缆 Heating fluid pipes and electric resistance cables	能精确的控制土壤温度 Close control soil temperature	不能模拟全球变暖增温的季节和日变化, 空间加热不均匀, 干扰土壤, 影响土壤动物和微生物的活动, 不能加热空气和植物地上部分 No temporal fluctuations of temperature increase. Spatial heterogeneity of warming effect. Disturbance on soil and soil fauna. No warming on air temperature and aboveground parts of plants	van Cleve <i>et al.</i> , 1990 Hiller <i>et al.</i> , 1994 Peterjohn <i>et al.</i> , 1994 Ineson <i>et al.</i> , 1998 Bergh & Linder, 1999 Hartley <i>et al.</i> , 1999
红外反射加热 红外线反射器 Infrared reflectors	能模拟全球变暖的增温机制和日变化, 对土壤及植被无物理干扰 Better simulation of diurnal warming patterns. No physical disturbance on soil and plants	只能夜间增温, 影响夜间小气候和动物活动以及清晨露水的输入 No warming during daytime. Possibly affect animal activities and dew input	Zeiher <i>et al.</i> , 1994 Luxmoore <i>et al.</i> , 1998 Beier <i>et al.</i> , 2004 Emmett <i>et al.</i> , 2004
红外辐射加热 红外线辐射器 Infrared radiators	能模拟全球变暖的增温机制和日变化, 对土壤及植被无物理干扰, 不改变小气候状况 No disturbance on windspeed, soil and plant	耗费电力较多, 在没有电力的地方和森林生态系统使用受到限制 Expensive in terms of energy cost. Limited use in forest ecosystems and area without electric power	Harte <i>et al.</i> , 1995 Bridgham <i>et al.</i> , 1995 Luo <i>et al.</i> , 2001 Wan <i>et al.</i> , 2002a Noornets <i>et al.</i> , 2004 Kimball, 2005

增温实验， 可以研究部分的全球变暖的增温机理

文献中常见的野外的增温实验参照点。

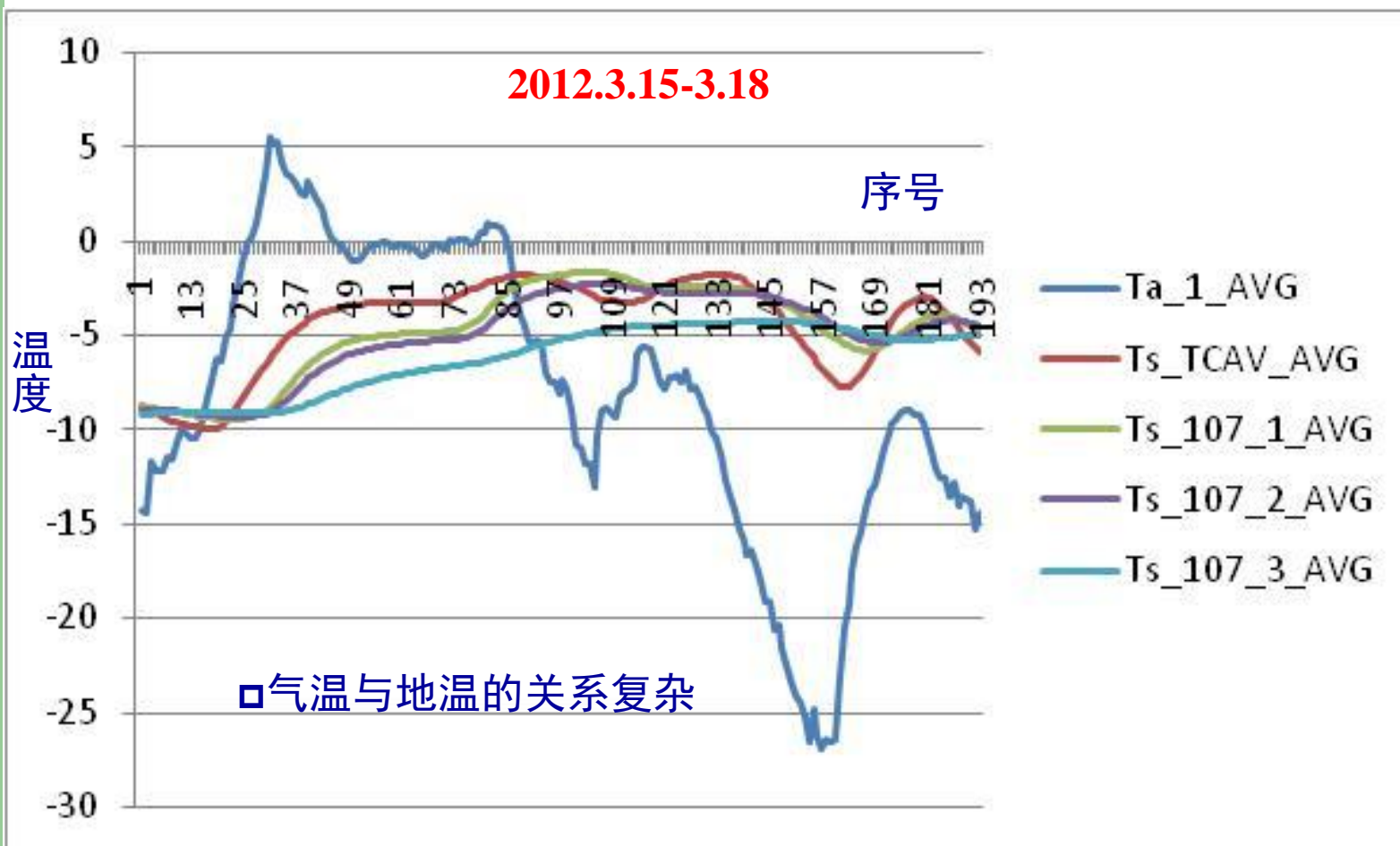
	温度参照 ¹	温度参照 ²	温度参照 ³	增温效果
OTC:	5cm地温	地表空气温度	空气温度 (位置不详)	被动、随机 ^{2、3}
红外加热:	5cm/10cm 地温	地表红外温度	空气温度 (位置不详)	可定量 ¹ 、准定量 ²
电热管 土壤加热:	10cm/20cm 地温			可定量 ¹

如果按照IPCC报告，实验的参考点温度应该是**气温**，但是在**野外**一般不具有可操作性；或者是把**地表温度**作为参考点，但会有很大的不确定性；所以把不太深的**土壤温度**作为参考温度，有助于实验的定量控制。

气温和土壤温度实况 (30min平均)

(北方某站-2012年, 30min平均的日变化曲线)

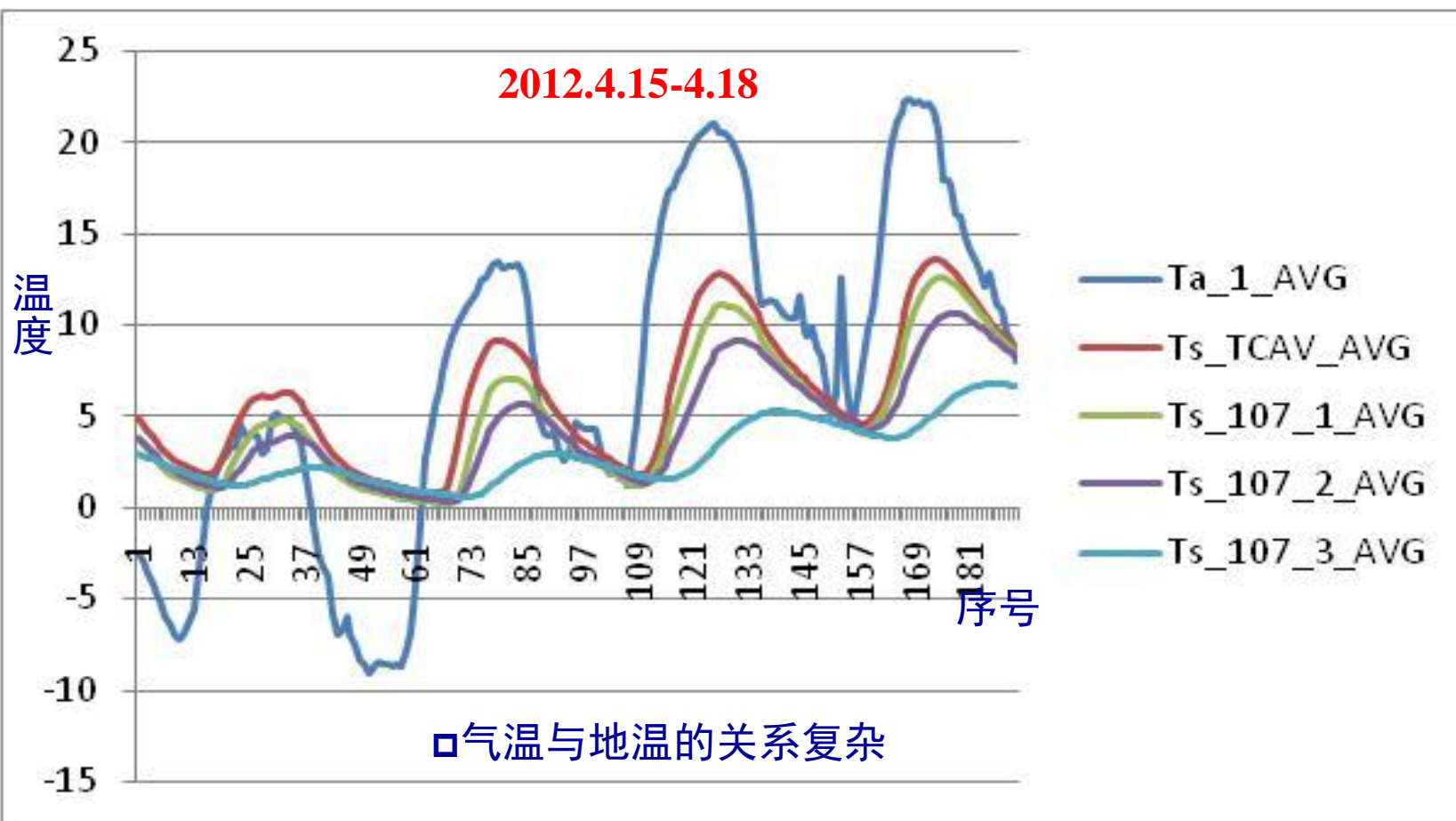
1.5m气温, 地面下0.5cm,5cm,10cm,20cm土壤温度



气温和土壤温度实况 (30min平均)

(北方某站-2012年, 30min平均的日变化曲线)

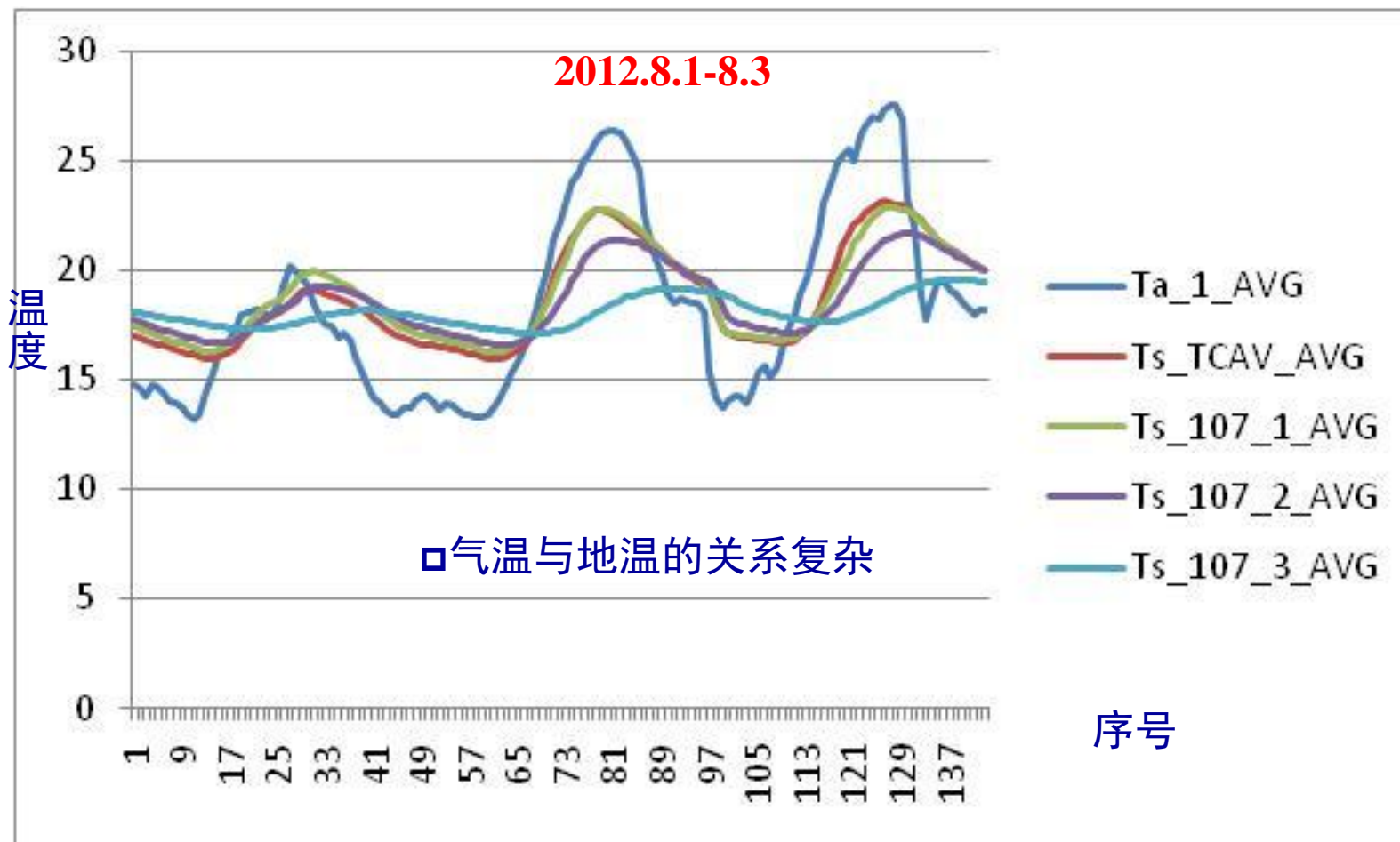
1.5m气温, 地面下0.5cm,5cm,10cm,20cm土壤温度



气温和土壤温度实况 (30min平均)

(北方某站-2012年, 30min平均的日变化曲线)

1.5m气温, 地面下0.5cm,5cm,10cm,20cm土壤温度



常见的增温设施

开顶箱



图1 用于我国北方温带草原的开顶箱 (照片由万师强提供)

主动红外加热器

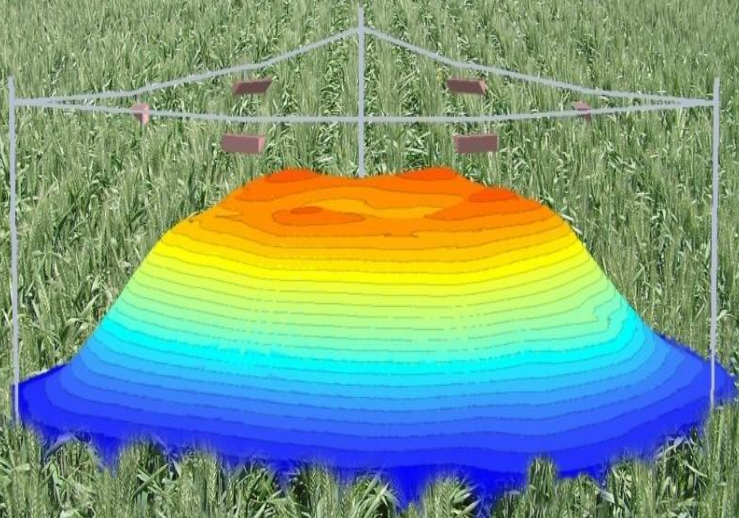


图2 用于我国北方温带草原的红外线辐射器 (照片由万师强提供)



对增温实验的问题讨论

热红外增温的温度分布示意



■ 增温的温度参考点标准不统一

地面温度（5cm,10cm）

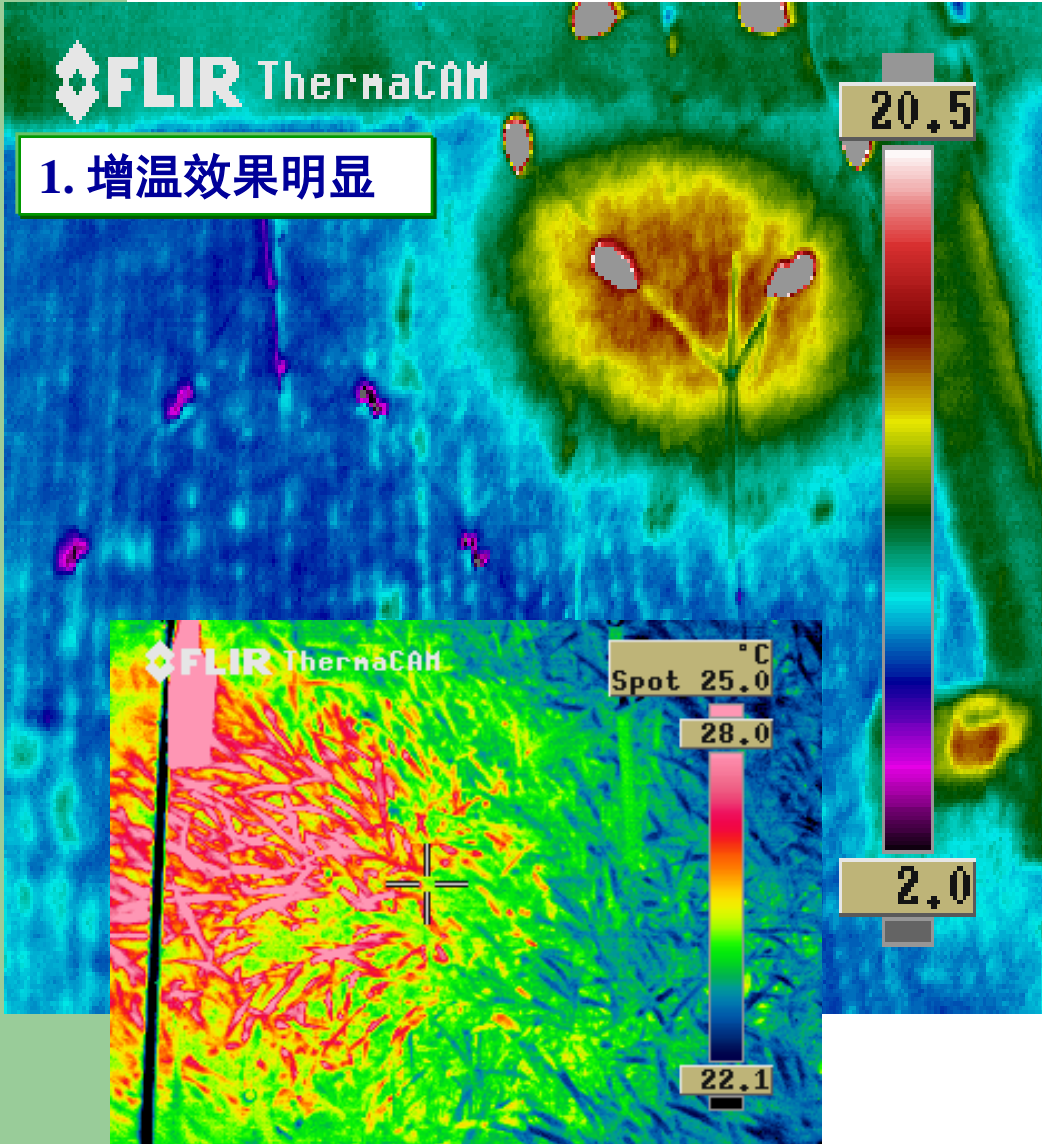
地表温度（采用红外温度监测跟踪，受实验样地和对照样地各自地被变化的影响显著）

气温（增温幅度与天气相关、观测位置不规范）

■ 重点关注与对照的表观变化

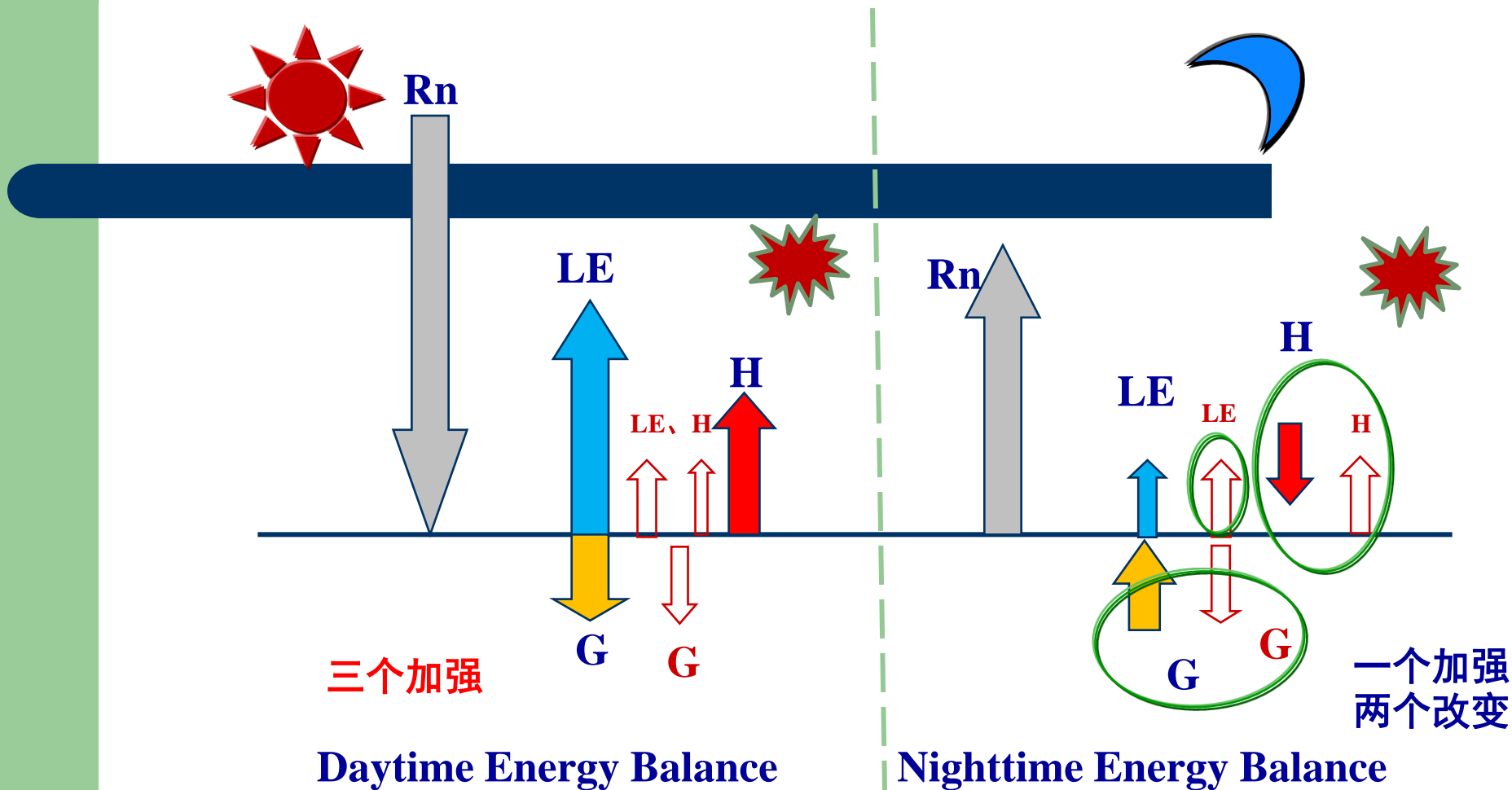
■ 缺少比较完备的配套辅助观测能力（土壤温度和土壤水分廓线）

野外增温试验的实际效果



地表能量平衡要素框架

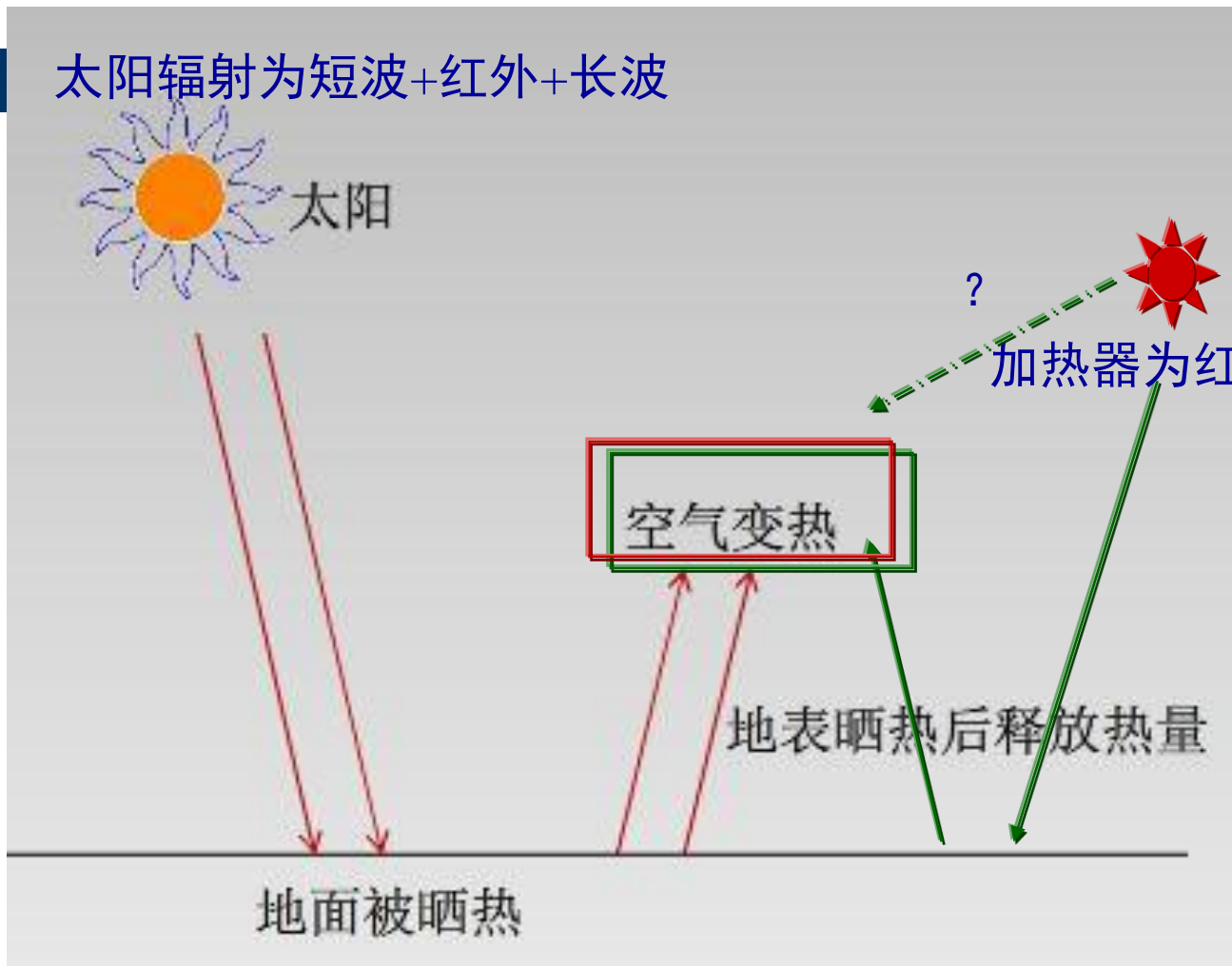
$$R_n = H + \lambda E + G$$



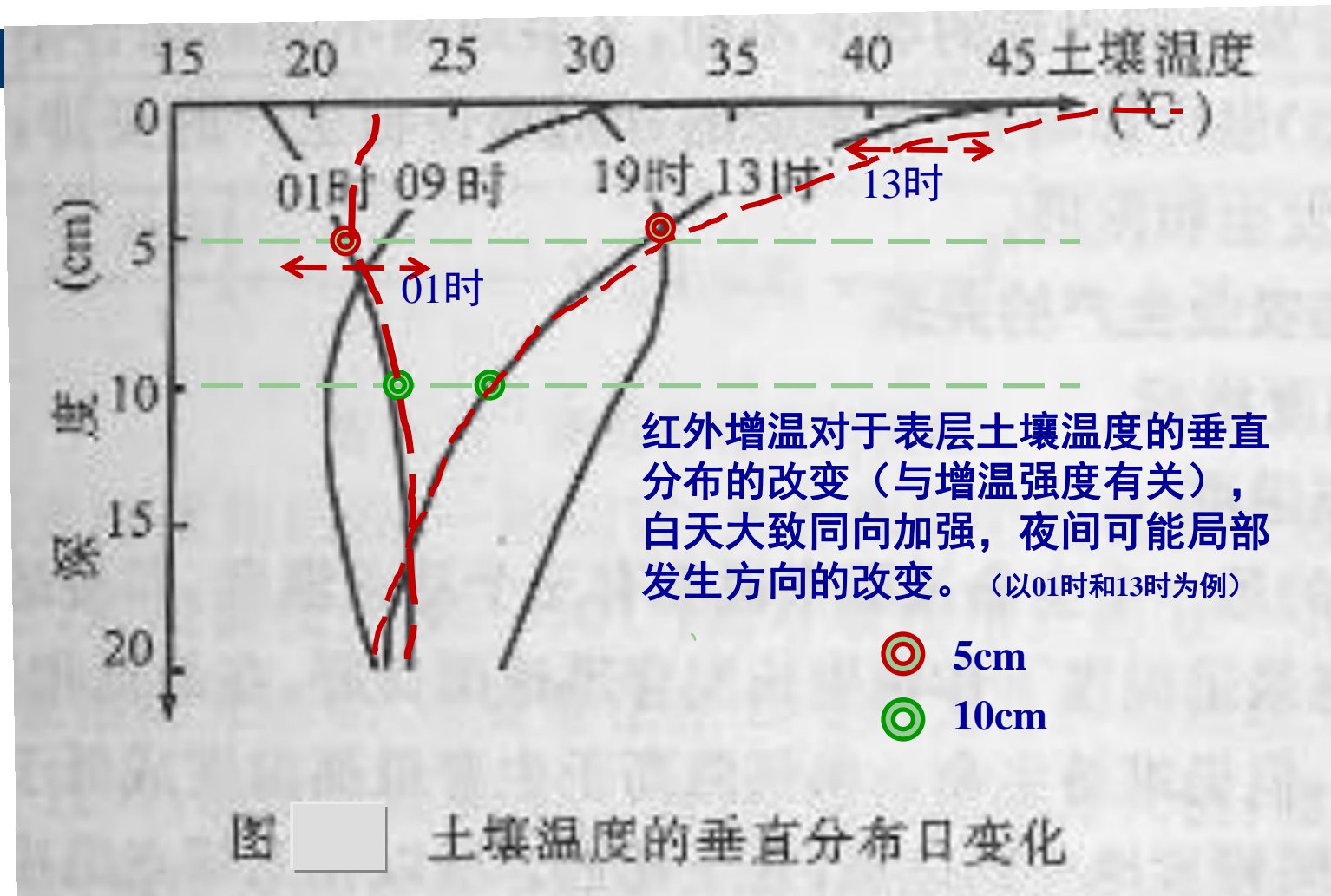
热红外加温部分的改变了实验地点的能量平衡方式？！

对增温设备下部空气温度的影响示意

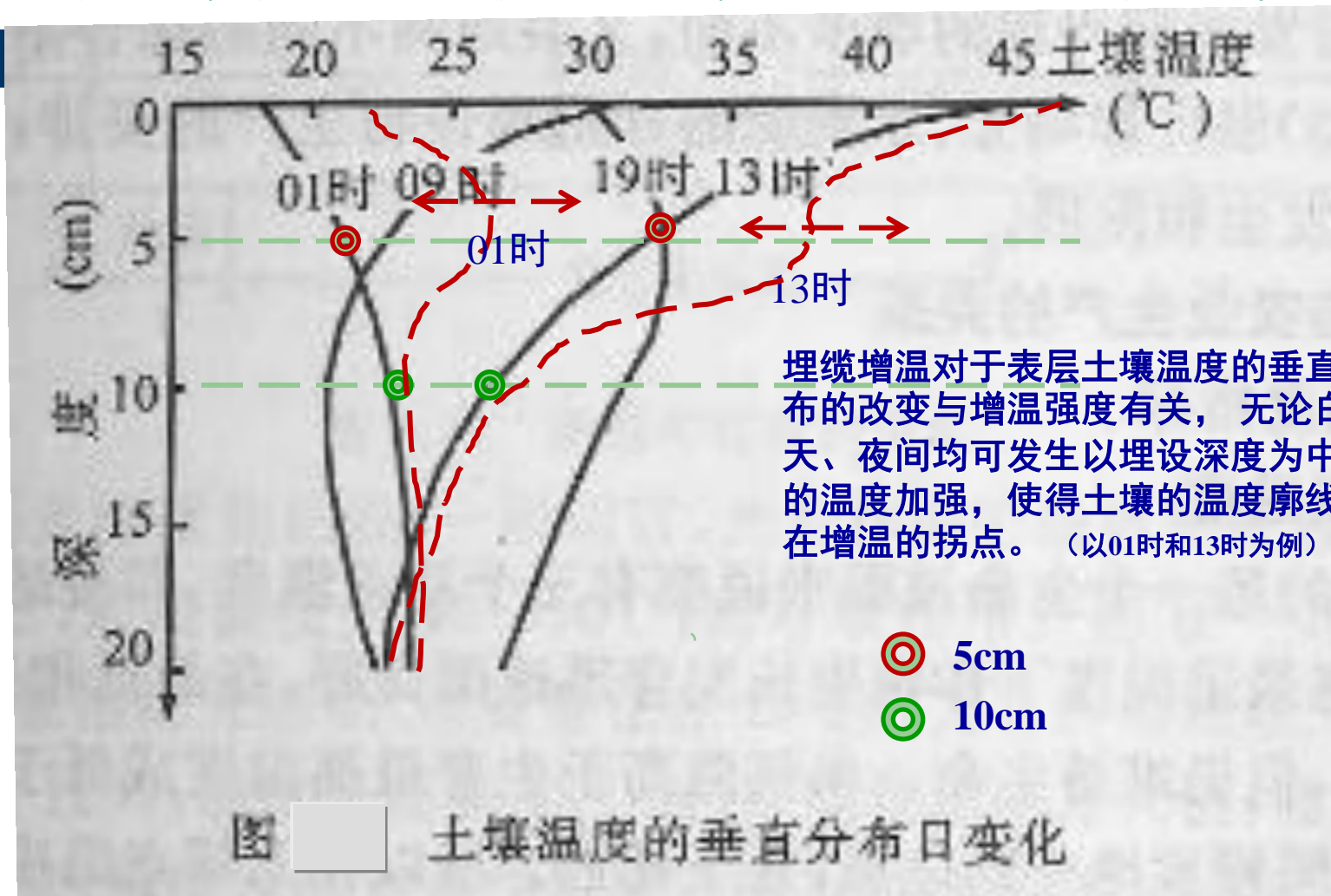
太阳辐射为短波+红外+长波



土壤温度的垂直分布日变化和增温影响示意



土壤温度的垂直分布日变化和增温影响示意





谢谢！ 敬请批评指正！