

仪器国产化

中尺度土壤水分观测技术介绍

孙晓敏

中国科学院地理科学与资源研究所

2021.8.19北京（宁波）

一、土壤水分观测的方法

土壤水分测定方法

测定方法：

1. 烘干法
2. 中子水分测定法
3. TDR水分测定法， FDF水分测定法
张力计、称重法 ……
- n. 宇宙射线水分测定法

应用问题：

- 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

观测土壤水分的意义

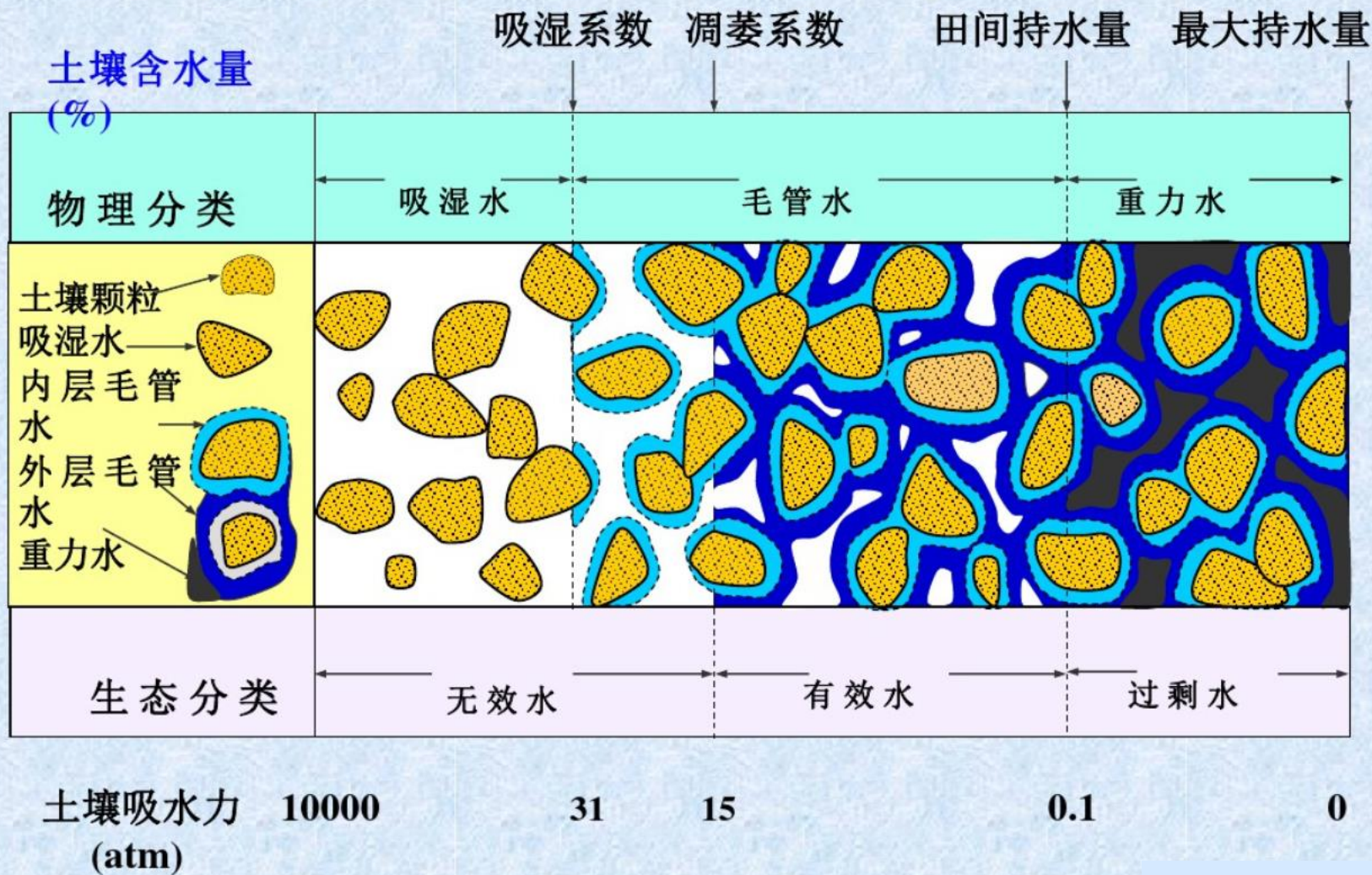


图 土壤水分类型示意图 (据D. Stella并加修改)

壤水分含量单位和换算

质量含水量与体积含水量：

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

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

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_b \quad ?$$

沙质土壤容重 1.2~1.8 g/cm³ ?

粘质土壤容重 1.0~1.5 g/cm³ ?

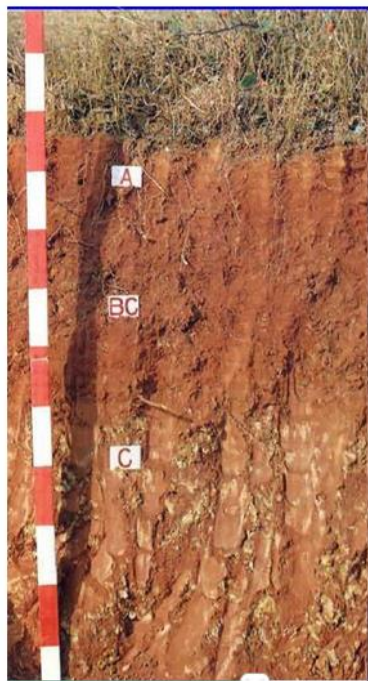
0.1的不确定性，大致引入于6%的不确定性

$$\theta_v = \theta_m \cdot (\rho_b / \rho_w)$$

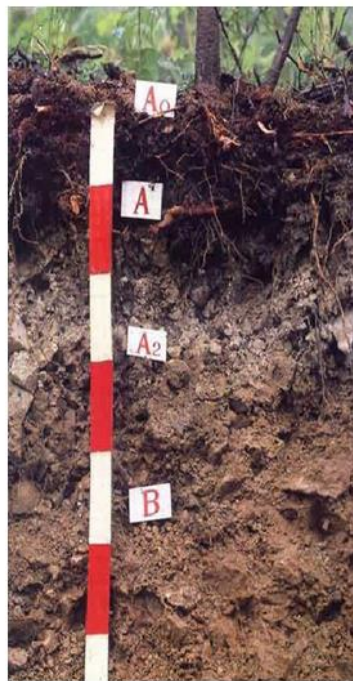
定义：重量含水率 是指土壤中水分的重量与相应固相物质重量的比值；
体积含水率 是指土壤中水分占有的体积和土壤总体积的比值。体积含水率与重量含水率两者之间可以换算。

定义：土壤容重 应称为干容重，又称土壤假比重，一定容积的土壤（包括土粒及粒间的空隙）烘干后的重量与同容积水重的比值，用符号 ρ_b 表示：质量或重量(g/cm³或吨/米³)，称为土壤容重。

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		

典型的耕作土壤结构



耕作层

养分多，根系密，由原土壤表层经长期灌溉耕作而成，富含有机质

犁底层

紧实，长期耕作中受到农机具的压实而成，可阻滞水分下渗，具有保水保肥的功效

渗育层

土色较浅，多呈灰色，由季节性灌溉导致土壤铁还原并随下渗水淋失所致

水耕氧化还原层

水耕条件下，上层淋失的铁锰氧化淀积形成棕色铁锈斑纹和铁锰结核等，有时还残有原有母质的铁氧化物，漂白部分指示了非均质的还原淋失过程

土壤水分观测，主要存在“一个复杂”和“三个并存”困扰的问题

即水分在土壤中存在形式具有一定的**复杂性**，土壤的**异质性和类型的多样性**并存，**破坏性和原位性**并存，**干扰性和不确定性**并存。

- ◆ **水分在土壤中存在形式具有一定的复杂性**。土壤中的水分或者被吸附在土粒表面，或者在孔隙中，而且可以有固态、液态和气(汽)态三种物理形态。而“土壤水分”在与土壤结合的形态上，大致可以分为化学结合水、吸湿水和自由水。化学结合水要在**600°C**以上才能脱离土粒；吸湿水是土粒表面分子粒所吸附的单分子水层，须在**105-110°C**的温度下变为气态脱离土粒表面分子力的束缚力而跑掉；自由水则可以在土壤颗粒的空隙间移动，又可分为膜状水、毛管悬着水、毛管支持水和重力水。
- ◆ **土壤的异质性和类型的多样性**并存。土壤和土壤水分分布都具有广泛的异质性，根据**Holmes**等人的研究，田间取样的变异系数为**10%**或更大，自然的土壤的变异会更大些。点尺度观测的代表性差是一个重要的缺陷；同时由于土壤类型众多，使得**TDR**和**FDR**这样的测量方法受到应用效果差的挑战。

- ◆ **破坏性和原位性并存。**经典的烘干法需要通过土壤取样来完成土壤水分的测量，精度高和适应任何类型的土壤可能是唯一的优点，但数据获取时间长，劳动强度大，对样方的破坏性大，不能满足长期样地的观测需求，不具连续原位观测的能力。而中子法、TDR和FDR法具有原位连续观测的能力，便于半自动化和自动化测量，但受土壤质地千差万别的影响明显，观测精度并不理想，与烘干法结果对比验证时一般都会有所差距，监测土壤水分变化趋势的相对性和连续性成为它们最大的优势。在生态学研究，两者即不能相互替代也不能独善其身。
- ◆ **干扰性和不确定性并存。**现实中的土壤，富含各类杂质，沙、石、根等物质是干扰，但这些物质在土壤中的分布和多少是随机的，会引发测量结果的不确定性。使得现实中的土壤水分测量“理论很丰满，现实很骨感”。在现实的土壤中，使得TDR和FDR方法原理受到干扰和不确定性的挑战。

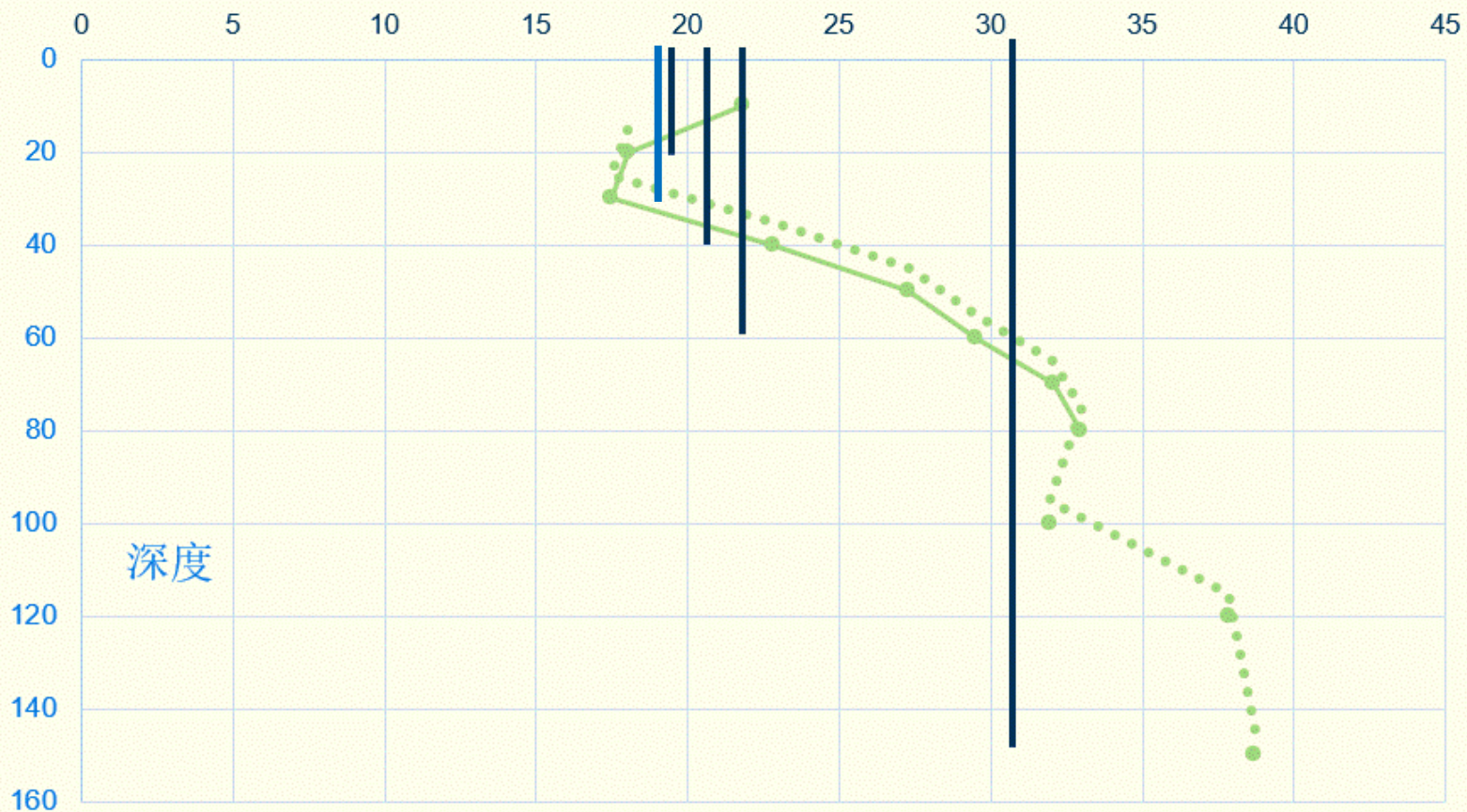
土壤水分传感器的标定策略

- **野外标定 (?)** : 野外标定场地的选取要平坦均匀, 主要关注平行对比试验;
- **室内标定 (?)** : 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。
- **传递标定 (?)** : 集各种方法实施标定。



管式土壤水分传感器及仪表进行测试

“点尺度”与“平均尺度”观测的比较示意



二、宇宙射线土壤水分观测系统

The Cosmic-ray Soil Moisture Observing System
(COSMOS-2008)

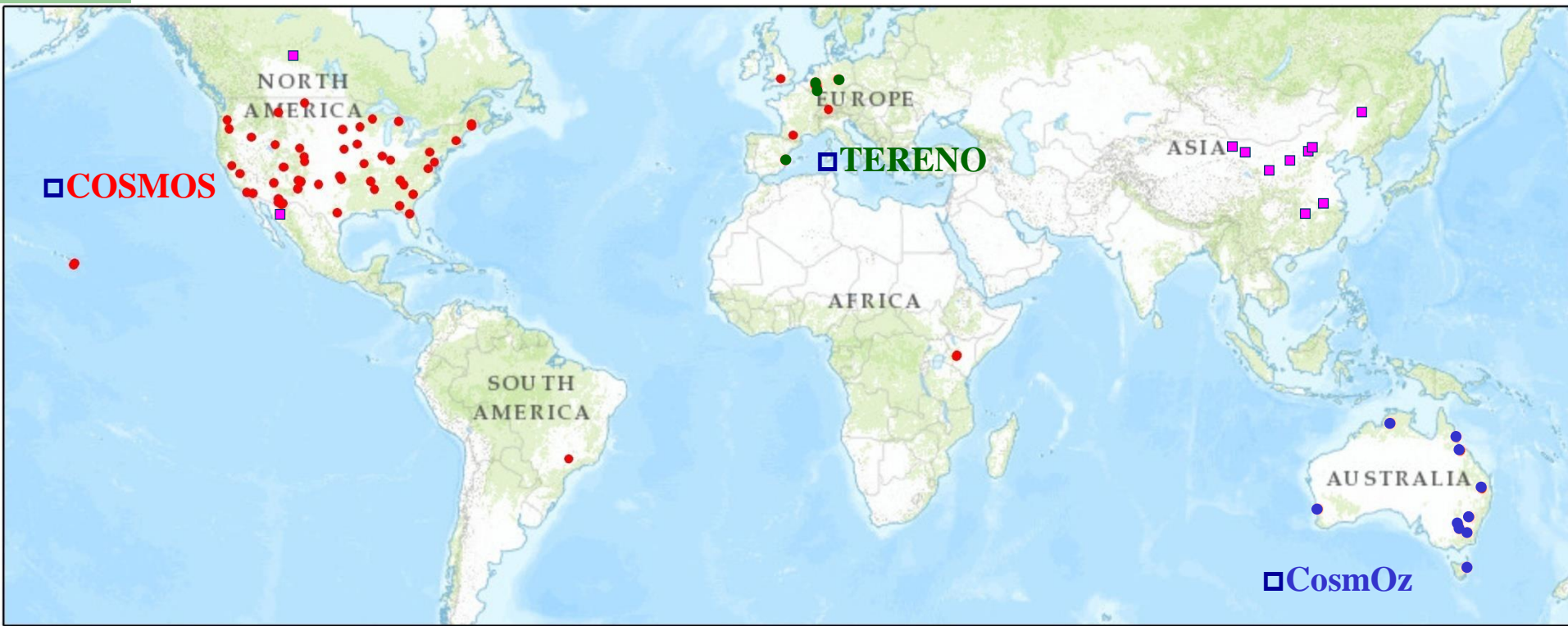
双接收天线



单接收天线



Cosmic-ray probes - global

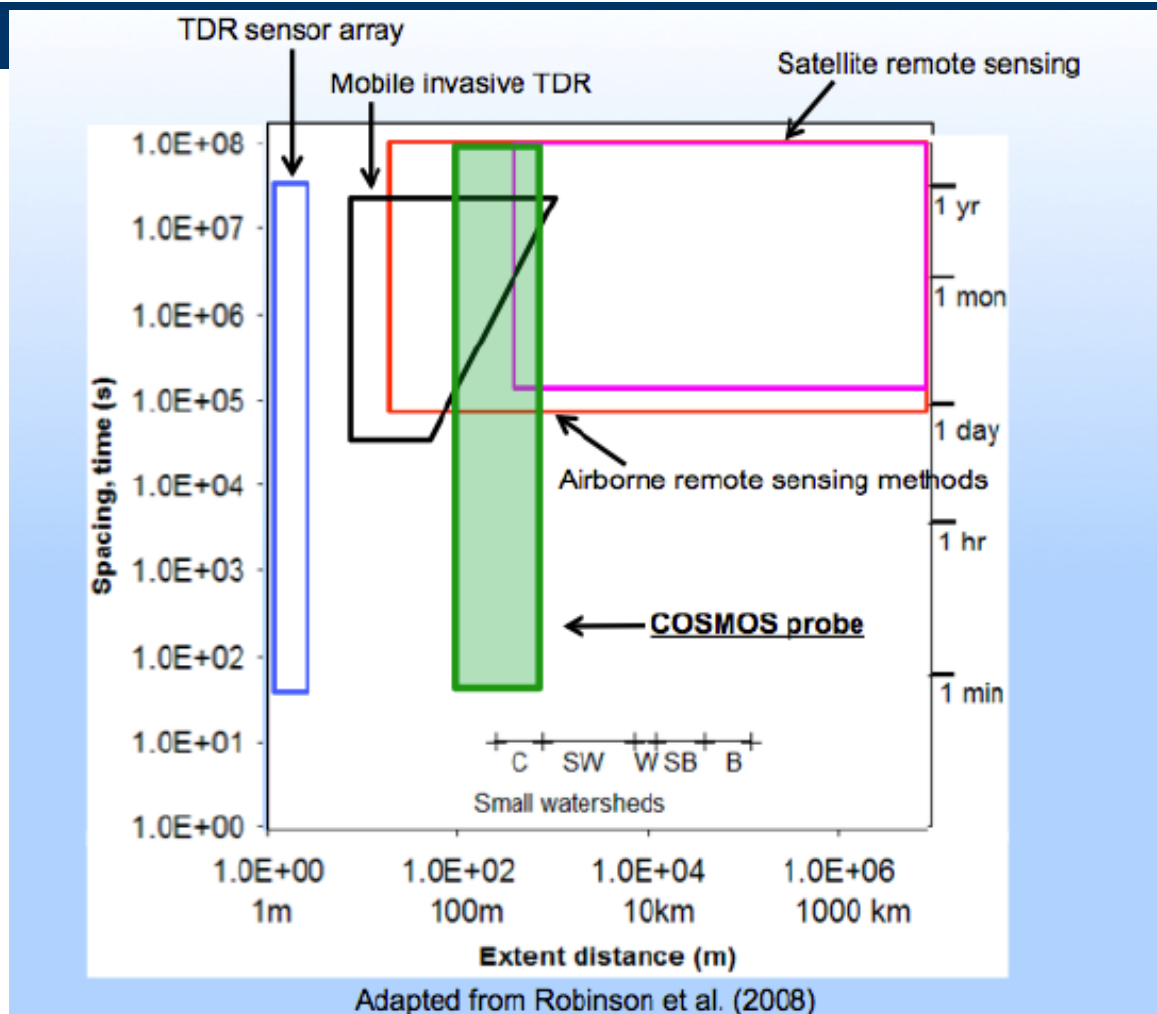


- 2008年，设备及算法成型（Zreda et al.,2008， Desilets et al.,2010）
- 美国科学基金于2009年创办成立了COSMOS（The Cosmic-ray Soil Moisture Observing System），目标是要设置500套宇宙射线中子仪，到2012年3月为止共部署了53套仪器

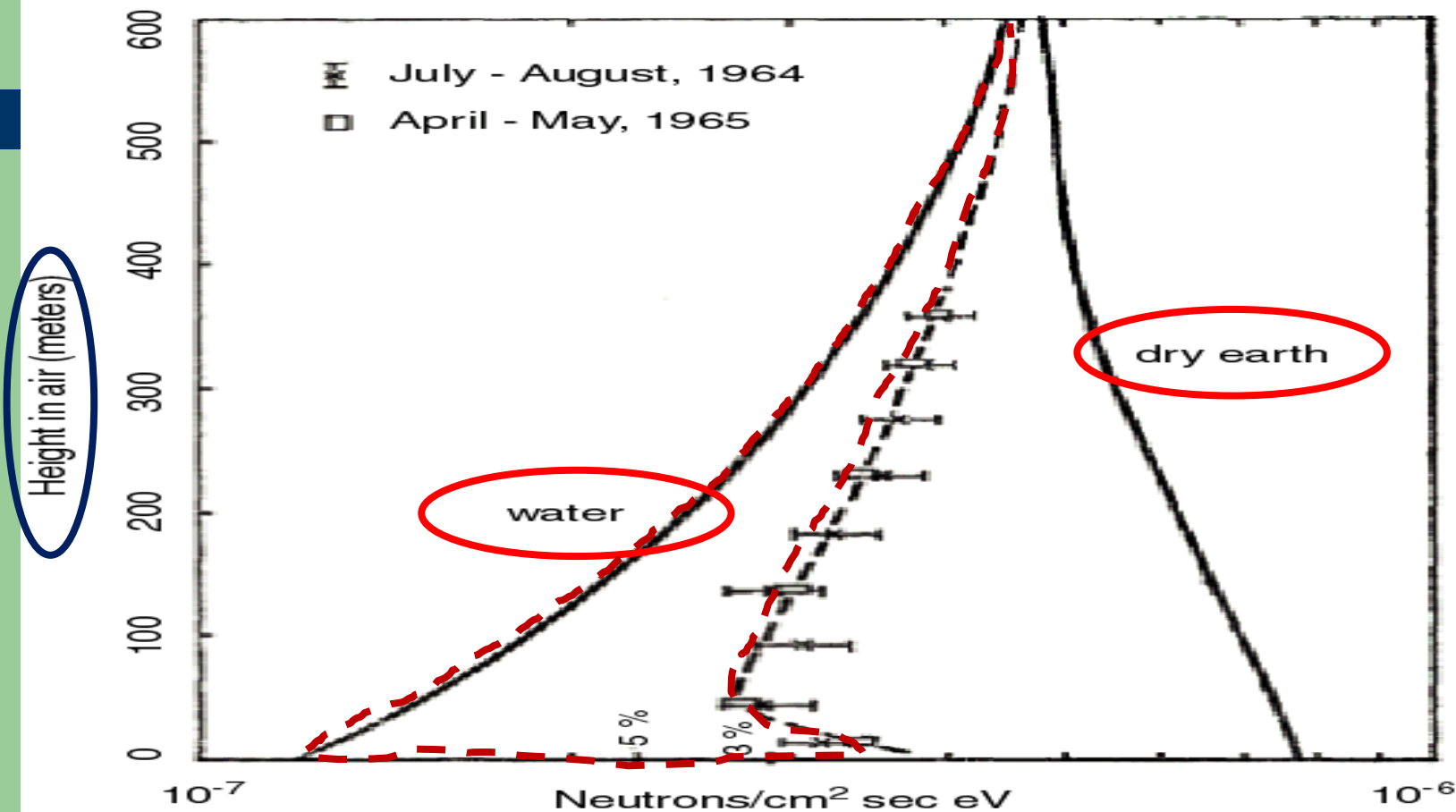
□ COSMOS	61
□ CosmOz	13
□ TERENO	17
□ Other	12
□ Ordered	20
□ TOTAL	123

□ 2013-2014

□ 美国Hydroinnova LLC公司创新性设计了一种基于近地面环境宇宙射线中的快中子浓度与土壤含水量关系，无危害、非接触、无破坏、不受土壤质地和盐分等影响、测量范围大、测量深度适中的宇宙射线土壤水分传感器系统（CRS1000/B），该系统可野外连续自动测定大面积的土壤含水量，是遥感反演土壤含水量的有效验证手段。



宇宙射线激发下的近地面层的中子数通量密度

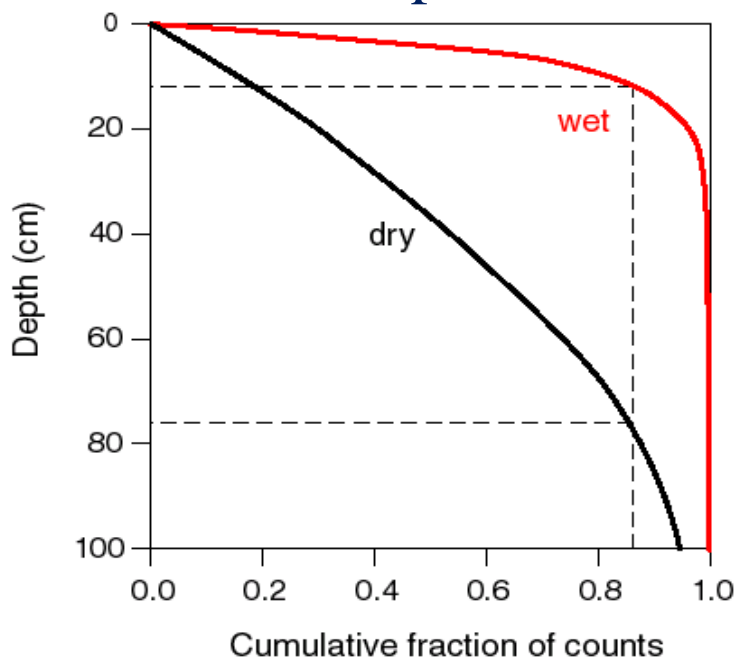


■ Hendrick and Edge (1966) Cosmic-ray neutrons near the *Earth Physical Review Series II*, 145:1023-1025.

Measurement Volume

(modeled by tracking neutron collisions)

Depth

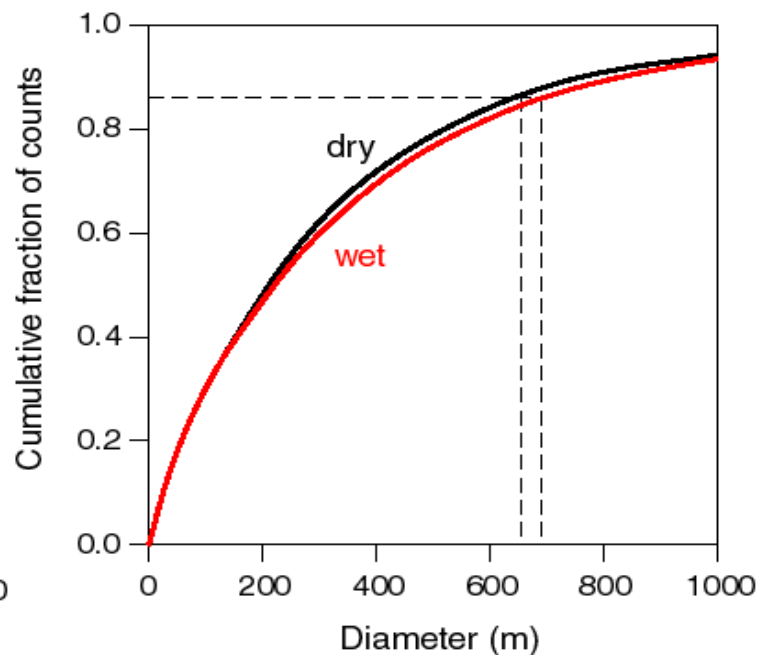


▣ 86% of neutrons from within a depth of 70 cm (dry)

▣ Depth decreases to 12 cm in wet soils

▣ Independent of altitude (and pressure)

Radius



▣ 86% of neutrons from within a radius of 350 m

▣ Independent of soil moisture

▣ Increases with increasing altitude (decreasing pressure)

反演深度可用下式计算得到:

$$Z = 5.8 / (\rho_{bd} / \rho_w \times \tau + \theta + 0.0829)$$

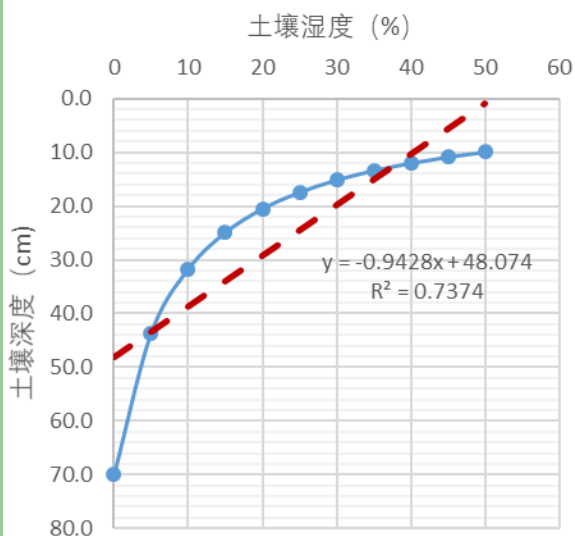
式中: ρ_{bd} 为土壤的容重(g/cm^3), ρ_w 为液体水的容重($\text{1g}/\text{cm}^3$), τ 为晶格含水量, 定义为晶格水在矿物质和束缚水中的质量比, 通常比较小, 约为0~0.05, 计算中可忽略不计, θ 为土壤容积含水量(m^3/m^3), Z 为反演深度(cm).

通常情况下源区半径与气压关系:

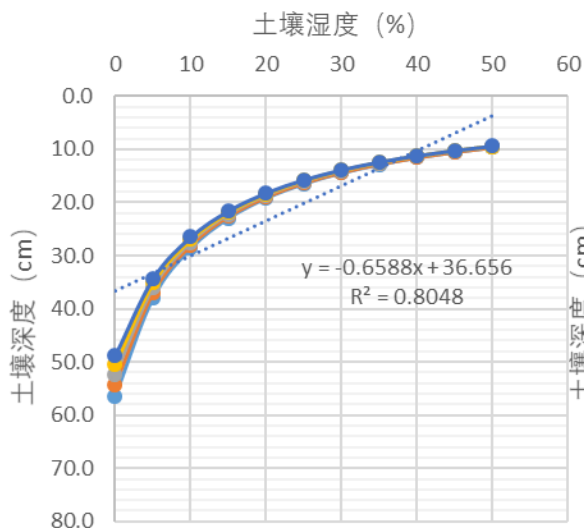
$$R_s = R_{s,0} (P_{s,0} / P_s)$$

式中: $R_{s,0}$ 为参考气压 $P_{s,0}$ 下的源区半径 (通常使用1个标准气压下的半径值, 为300m); R_s 为当前气压 P_s 下的半径值.

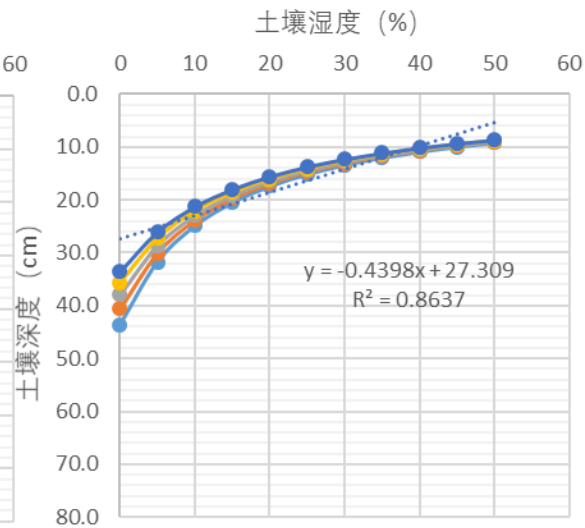
土壤水分含量观测深度
(不考虑晶格水)



土壤水分含量观测深度
(考虑晶格水0.02)



土壤水分含量观测深度
(考虑晶格水0.05)



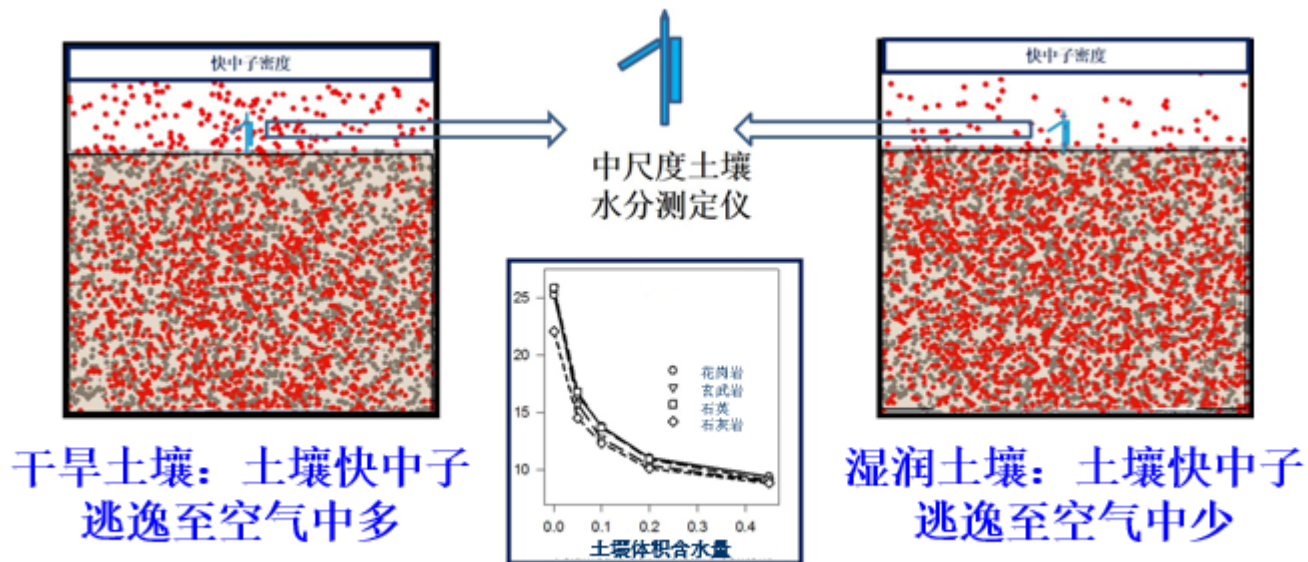
- 观测深度 (容重1.0)
- 观测深度 (容重1.2)
- 观测深度 (容重1.4)
- 观测深度 (容重1.6)
- 观测深度 (容重1.8)
- 线性 (观测深度 (容重1.8))

- 观测深度 (容重1.0)
- 观测深度 (容重1.2)
- 观测深度 (容重1.4)
- 观测深度 (容重1.6)
- 观测深度 (容重1.8)
- 线性 (观测深度 (容重1.8))

COSMOS土壤水分含量
观测深度示意

中尺度土壤水分测定仪原理

针对生态监测中获取面尺度土壤含水量的实际需求，研发可测量700m直径范围土壤水分的中尺度土壤水分测定仪。



近地面环境宇宙射线中的快中子强度—地表土壤含水量关系

宇宙射线土壤水分观测系统原理

由于快中子传播过程中受气压影响较大，在反演土壤水分时要去除气压随时间变化带来的影响，根据相关资料中提供的公式对测量得到的快中子数进行气压订正，见以下公式：

$$N = N_{raw} \times \text{Exp} \{ \beta \times (P - P_0) \}$$

式中： N_{raw} 为原始快中子数， β 为常数0.0077， P 为测量气压值， P_0 为当地气压理论值。

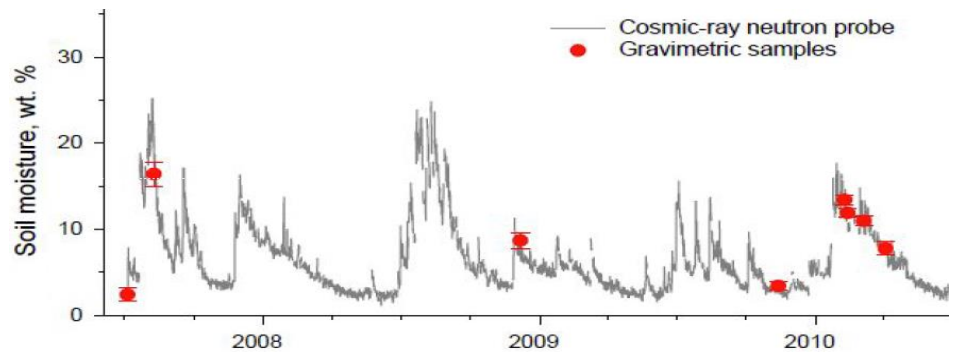
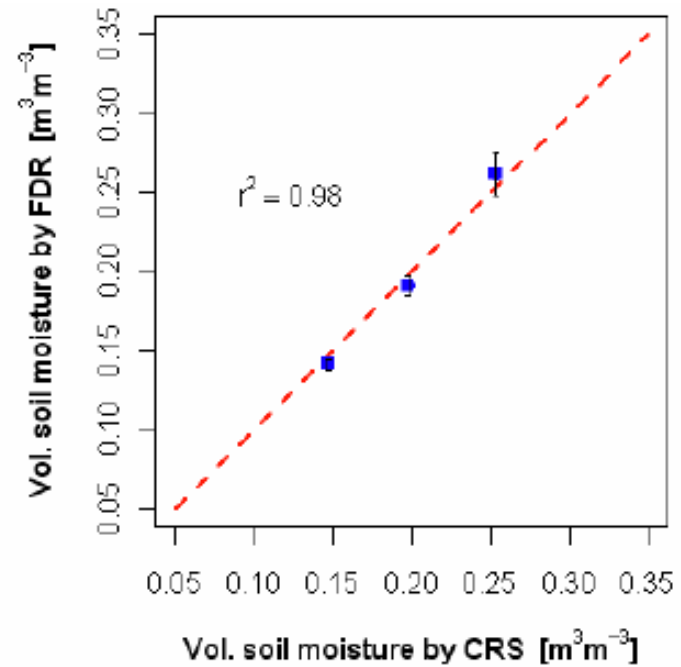
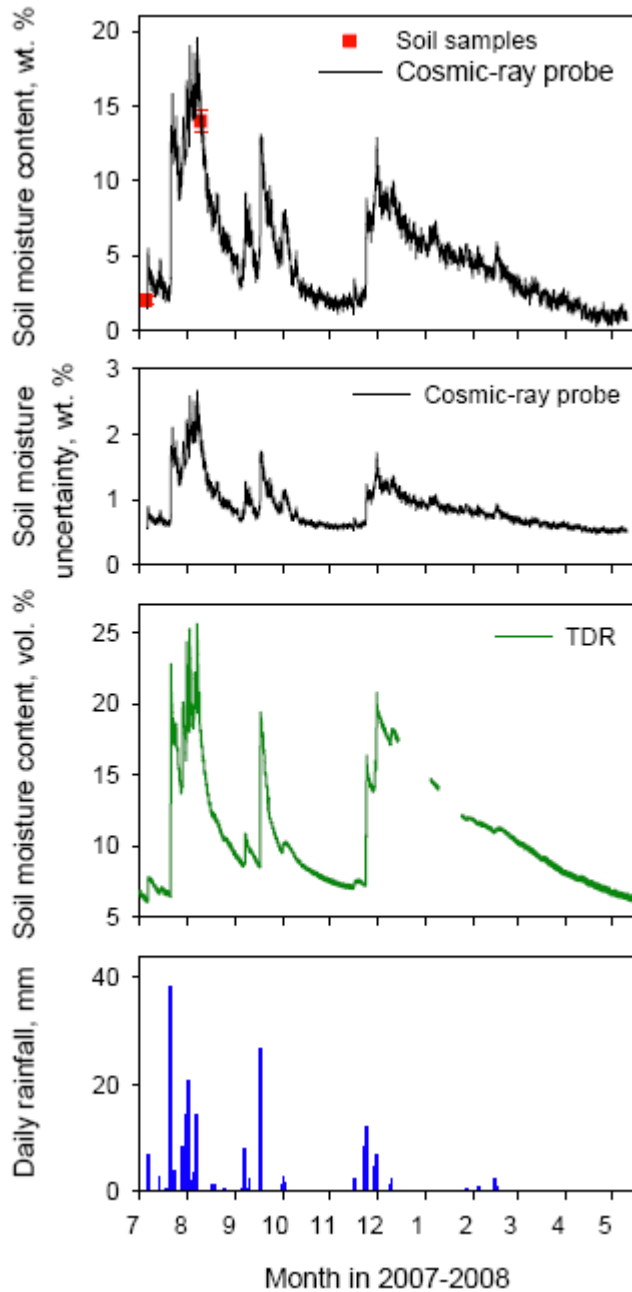
经过气压订正的快中子数与土壤容积含水量存在非线性关系,土壤含水量(百分容积含水量)计算公式如下式：

$$\theta = \frac{1}{a_1} \left(\frac{a_2}{(N/N_0) - a_3} - a_4 \right)$$

式中： θ 为百分容积含水量， N 为订正后快中子数， N_0 为干燥条件下的快中子数，需要根据源区实测土壤含水量进行标定， $a_1=0.079$ ， $a_2=0.64$ ， $a_3=0.37$ 和 $a_4=0.91$ 为常数项。

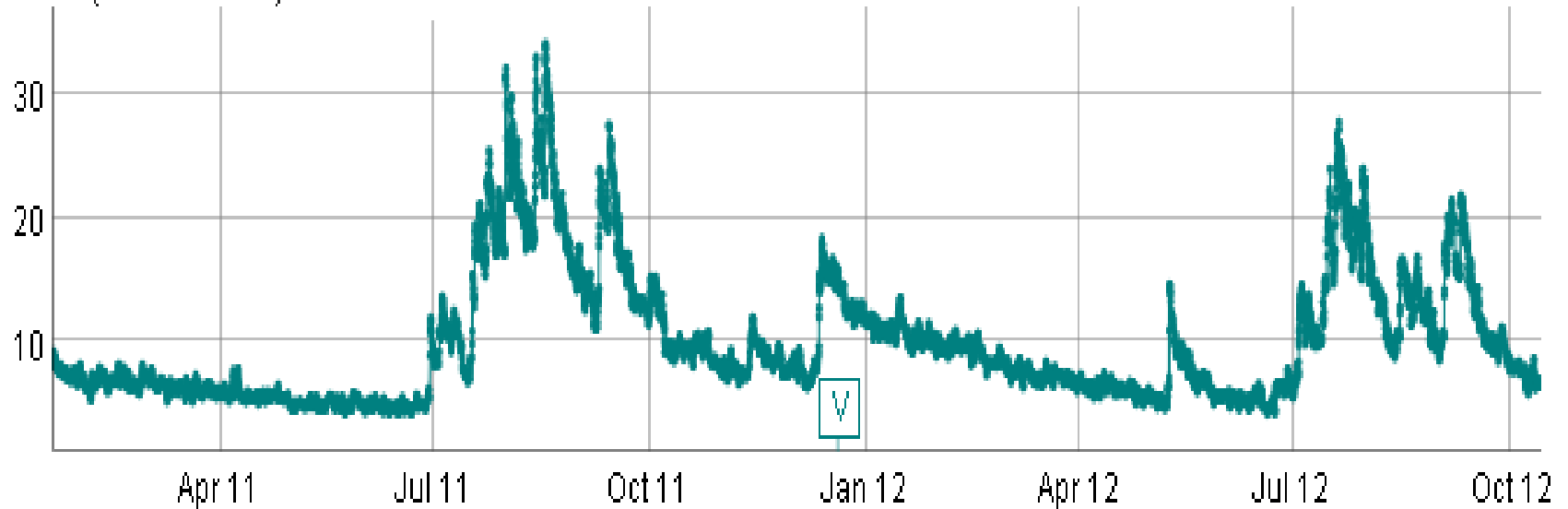
为计算地表土壤含水量，需要对宇宙射线土壤水分观测系统进行标定，以确定标定公式中的 N_0 。即把在观测区域实测的土壤水分上述公式中， N 是由仪器观测得到的，来反算 N_0 。

观测数据和验证数据（国外）



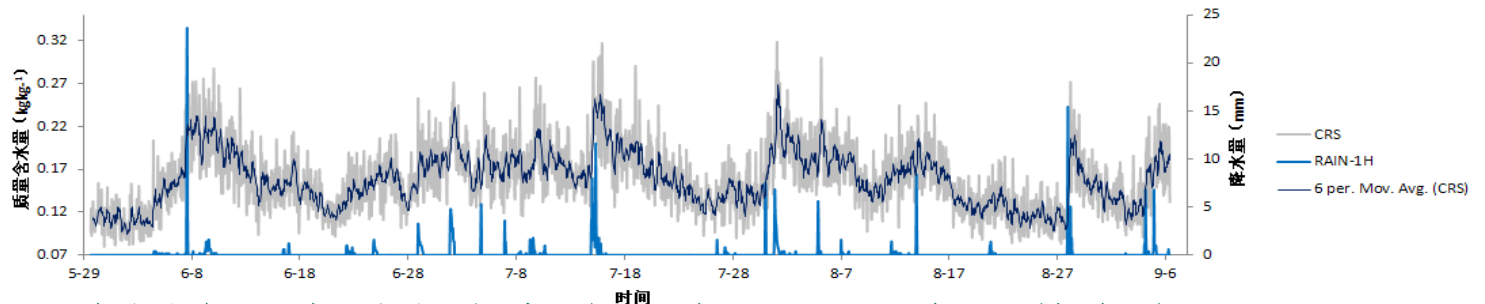
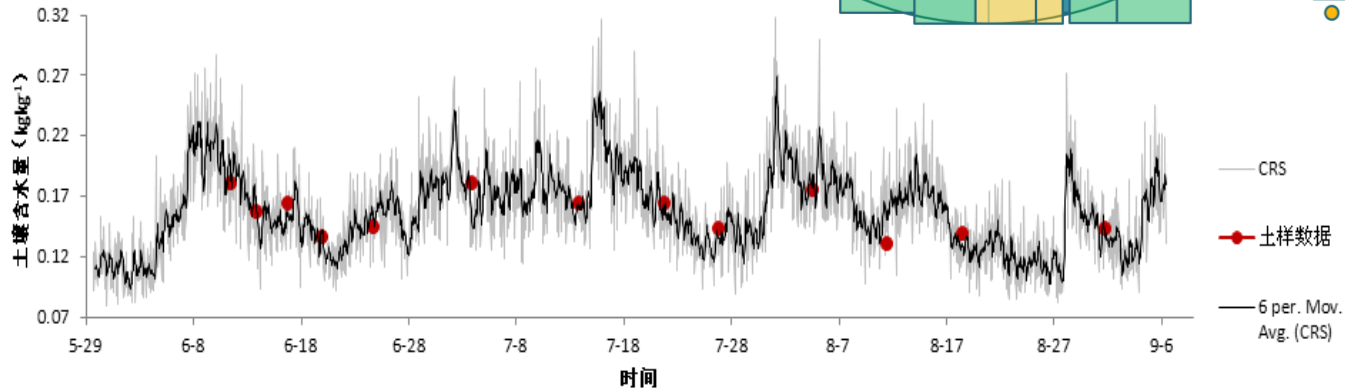
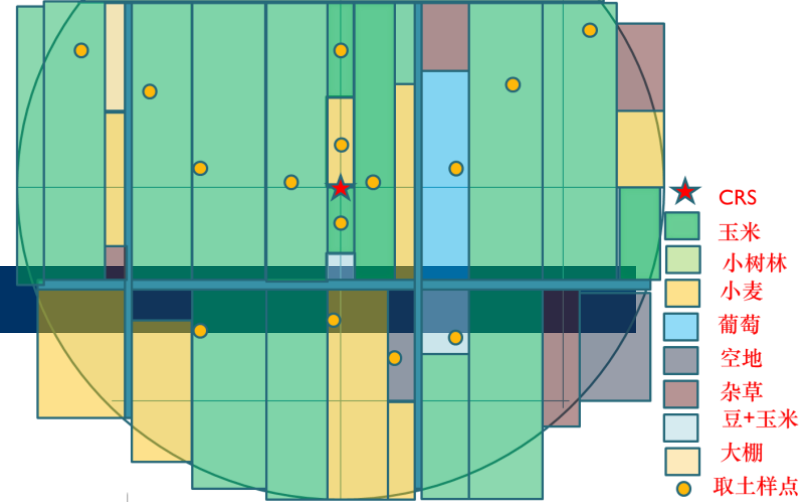
COSMOS连续土壤水分数据特征

Soil Moisture (% Volumetric)



□ 美国 San Pedro2 站点监测数据 2012

观测数据和验证数据（国内）



中国农业大学上庄实验站结果 2013年（待发表）

中尺度土壤水分测定仪 （国内研制）

● 技术指标

- 探头供电：9-15V DC；
- 系统供电：6-26V DC，由太阳能供电；
- 探头耗电：超低功耗设计，功耗3mA@12V；系统功耗：30mA@12V；
- 采集间隔：5min~4h可选；
- 数据存储：4M存储空间；数据接口：RS232；
- 测量范围：最大测量范围700m（直径），最大测量深度70cm；
- 水分测量范围：0~饱和；不确定性：0-5%；
- 探头尺寸：圆柱体结构，外径约100mm，高约600mm。

中尺度土壤水分测定仪国产化

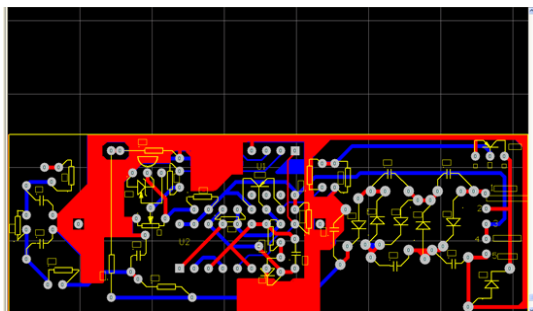
组成：中尺度土壤水分测定仪主要由供电模块、中子探测模块、前置放大模块、信号甄别模块、数据采集与集成模块、数据远距离传输模块等组成。

关键技术：

- 采用了基于宇宙射线 He^3 中子捕获技术的传感器，提高了中子捕获效率；
- 数据采集电路采用低功耗设计，实现了系统的稳定运行，并延长了使用寿命。



结构设计



电路图

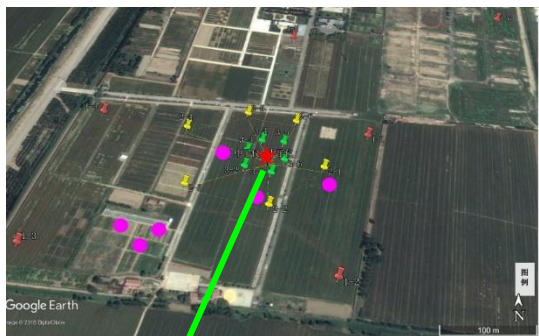


样机

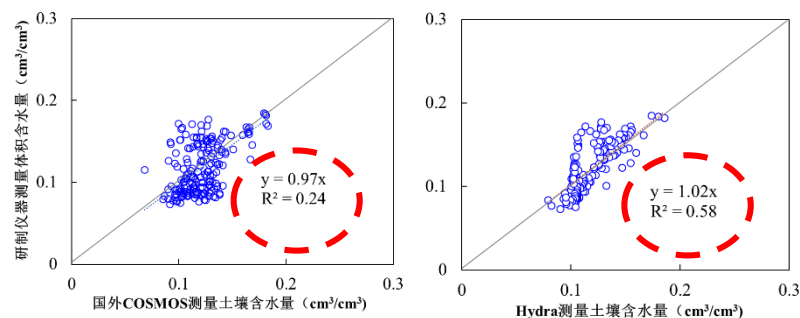
中尺度土壤水分测定仪的对比观测

● 野外对比测试

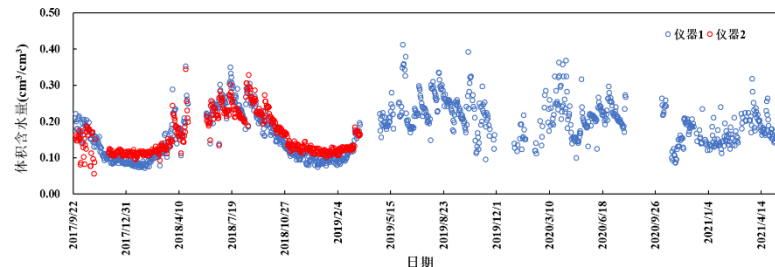
2017年9月起在山东禹城站进行野外对比测试，已连续运行3年以上。与国外同类设备比较，一致性较高（3%）。



中尺度土壤水分测定仪的野外测试及样地土壤水分采样点分布



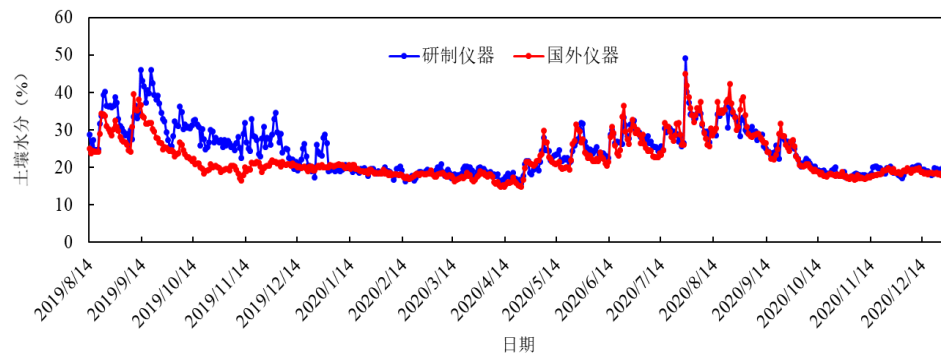
研制设备与国外同类仪器以及6个点土壤水平均值的比较（2017.9-2021.4）



研制设备的长期野外观测（2017.9-2021.4）

中尺度土壤水分测定仪的对比观测

2019年7月起，研制的中尺度土壤水分测定仪在甘肃大满站进行了野外对比测试，与国外同类观测仪器进行比较。



中尺度土壤水分测定仪在大满站野外对比测试（2019.8-2020.12，日值）

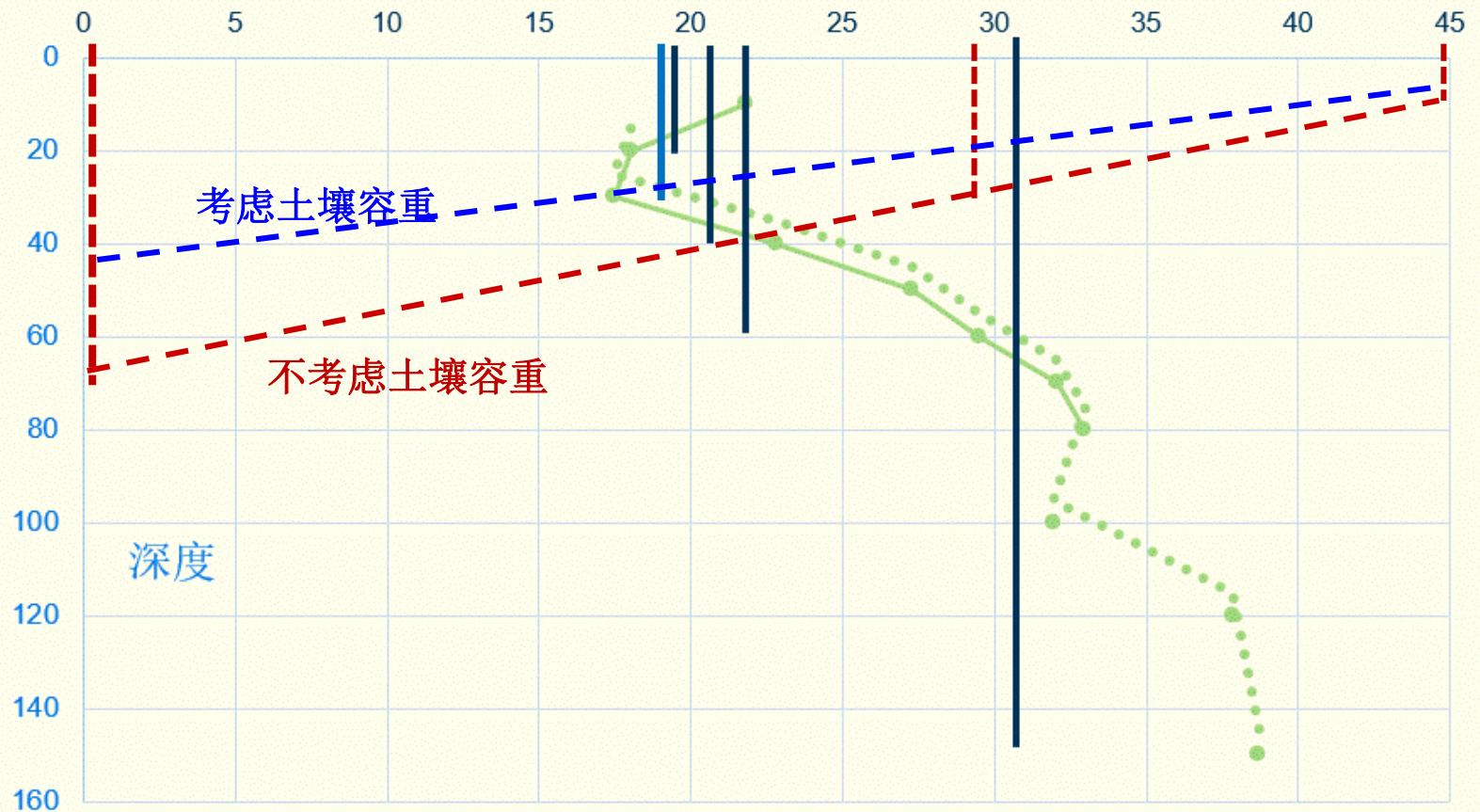
研制的中尺度土壤水分测定仪与国外同类设备具有较好的一致性（差异小于3%），工作较稳定。

三、中尺度土壤水分测定仪的 适用性分析示意

其中土壤水分数据图均来自网络图片

“点尺度”与“平均尺度”观测的比较示意

宇宙射线土壤水分观测系统测量深度示意



随时间变化，平均值的不确定性变化！

不同土地利用方式的土壤水分含量分布示意

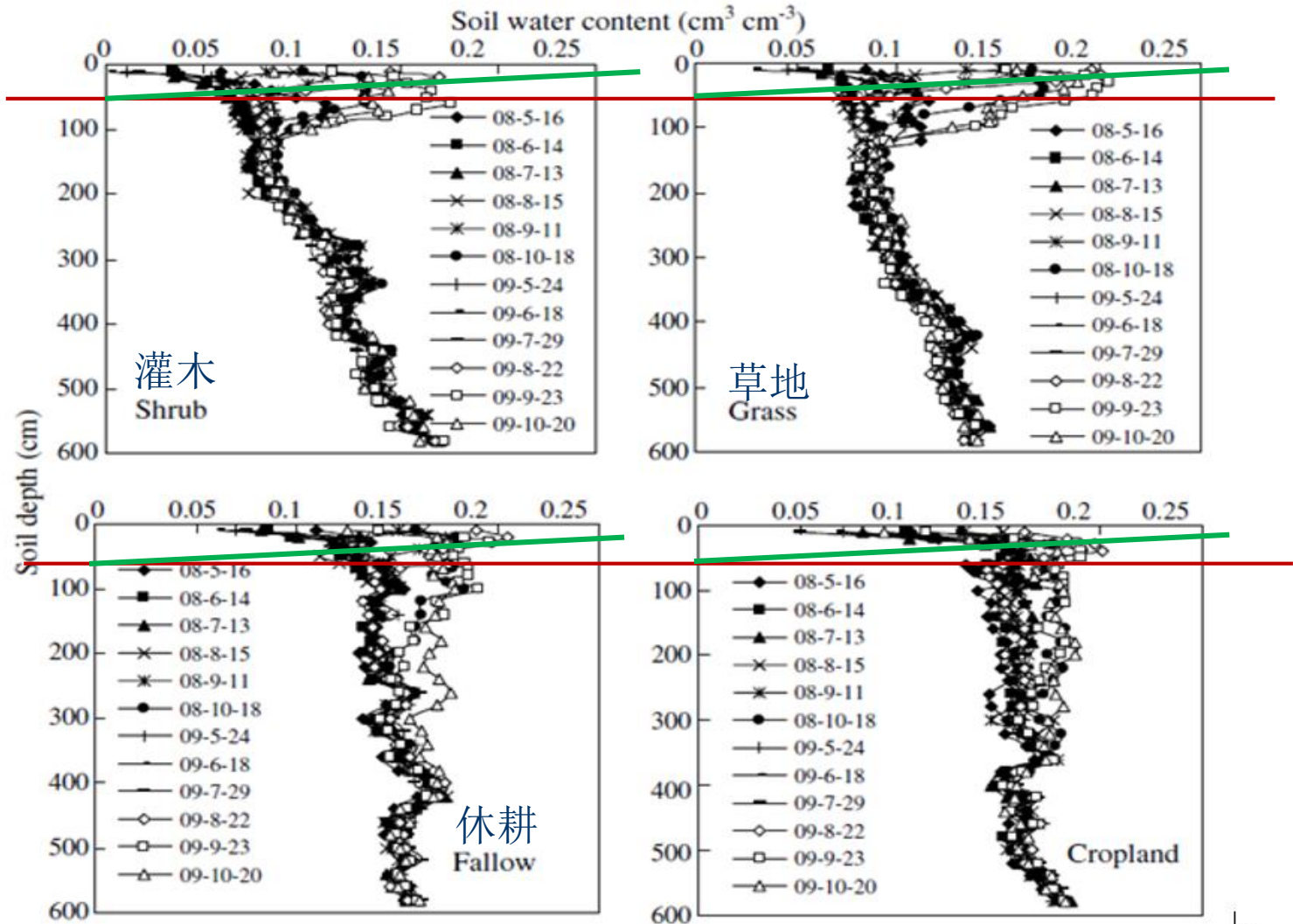


图 不同土地利用方式的实测土壤水分剖面 (0-600cm, 11 个探头)

随时间变化，平均值的不确定性变化！

农田和荒草地的土壤水分含量分布示意

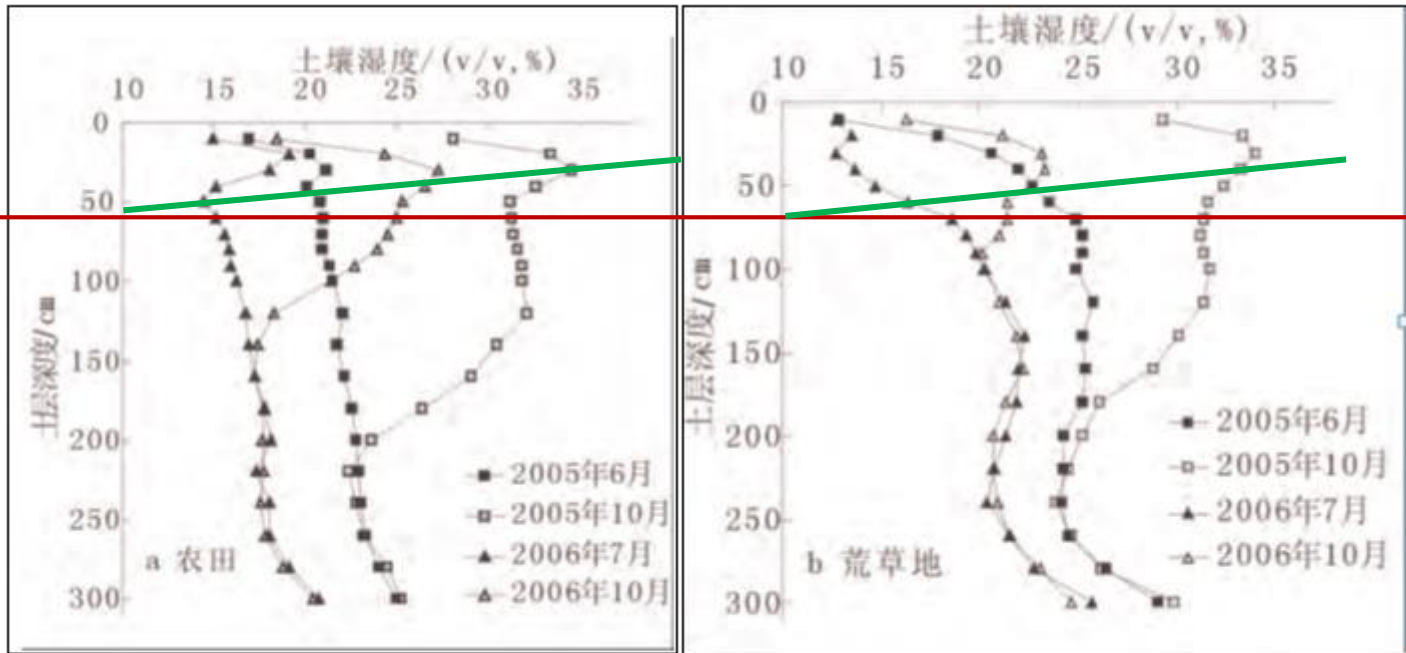
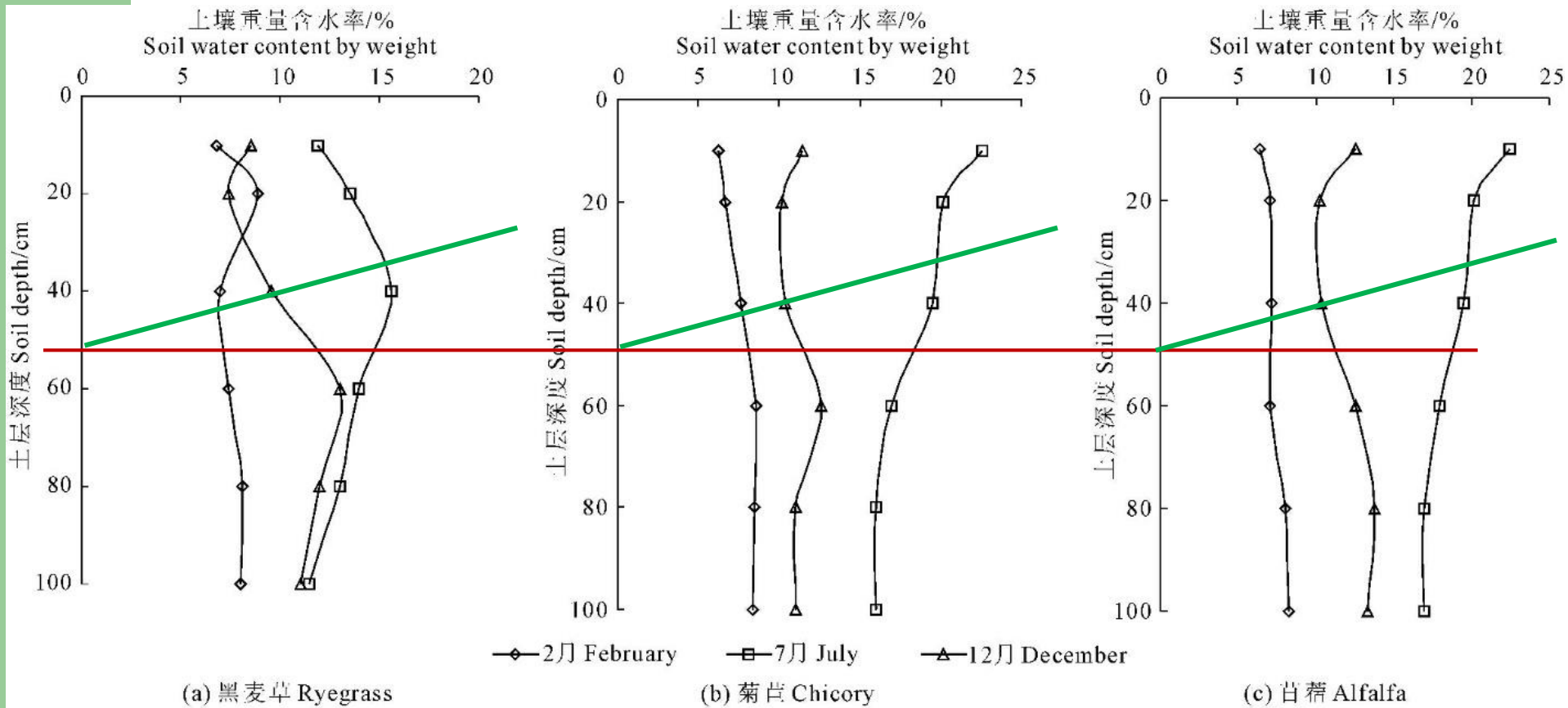


图 农田 (a)与荒草地(b)实测土壤水分剖面

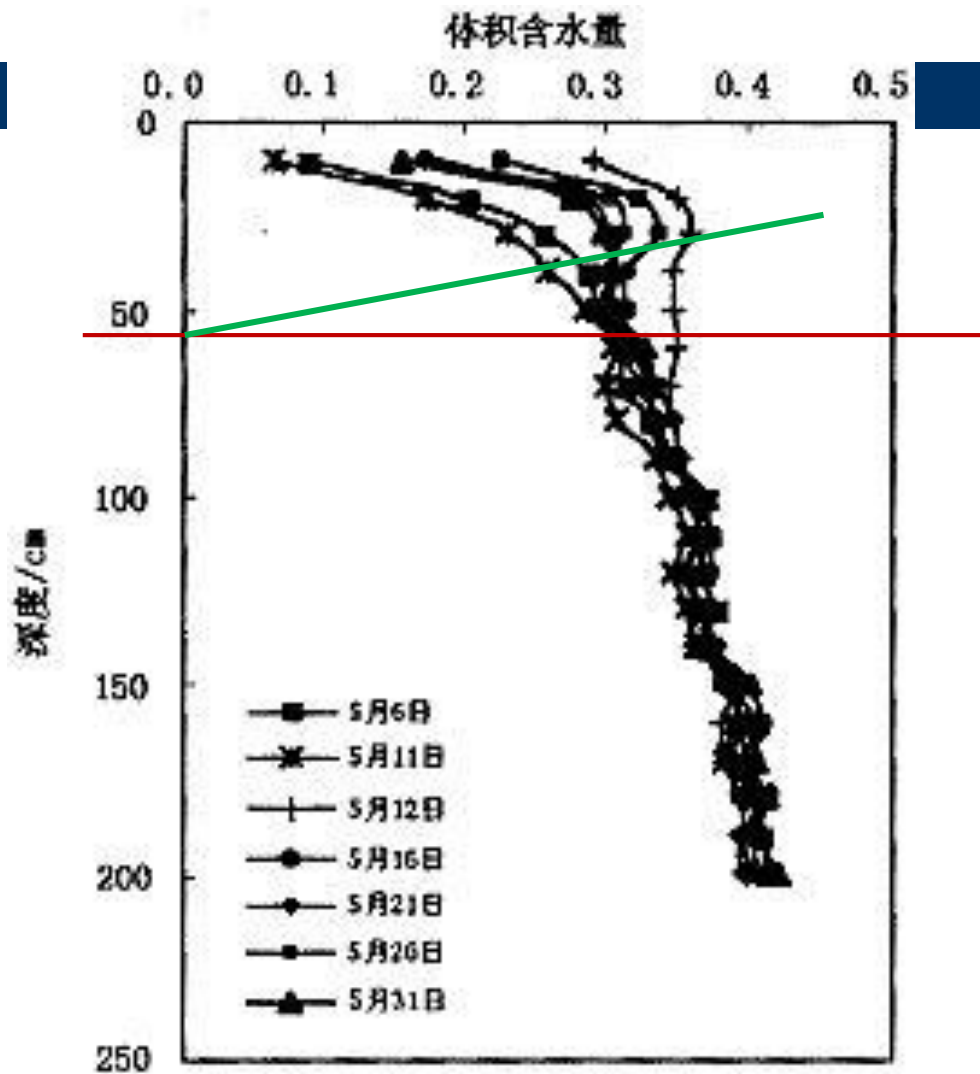
总体变化不大，平均值不确定性小！

典型植物的土壤水分含量分布示意



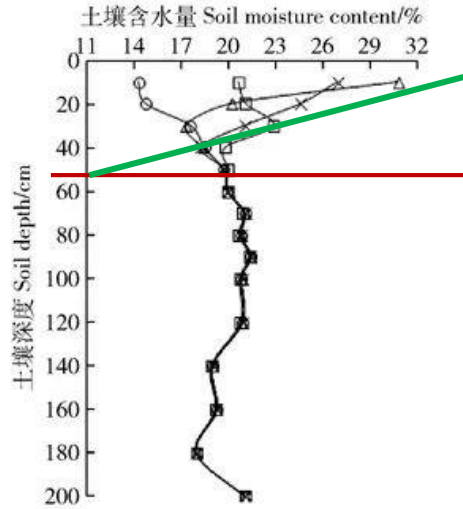
主体单调变化，平均值的不确定性小！

土壤水分含量随时间变化的分布示意

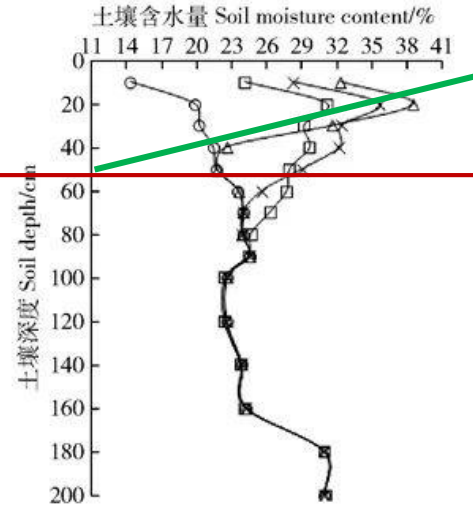


浅层不是单调变化，平均值的不确定性大！

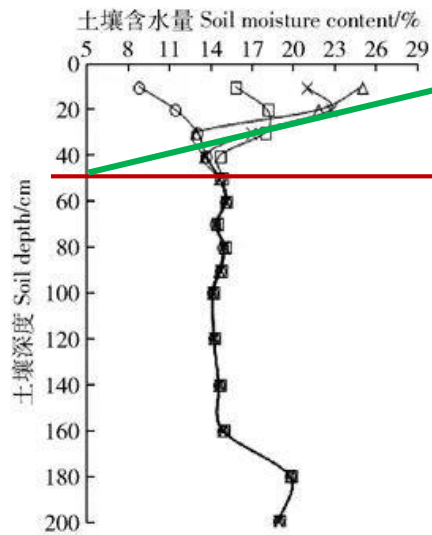
降雨前后的土壤水分含量分布示意



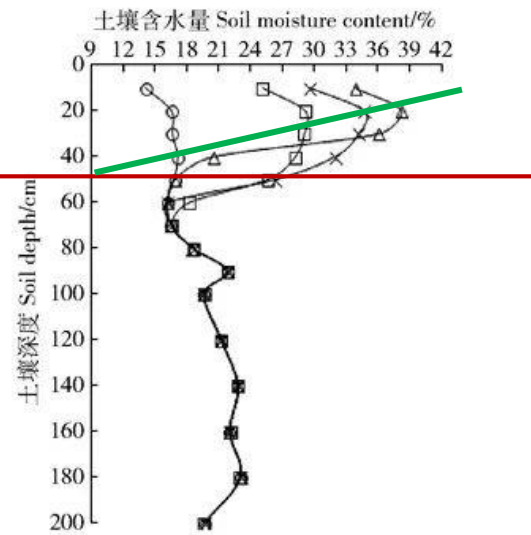
(a) 侧柏林地坡面 Slope of *Platycladus orientalis*



(b) 侧柏林地水平阶 Level-terrace of *Platycladus orientalis*



(c) 油松林地坡面 Slope of *Pinus tabulaeformis*



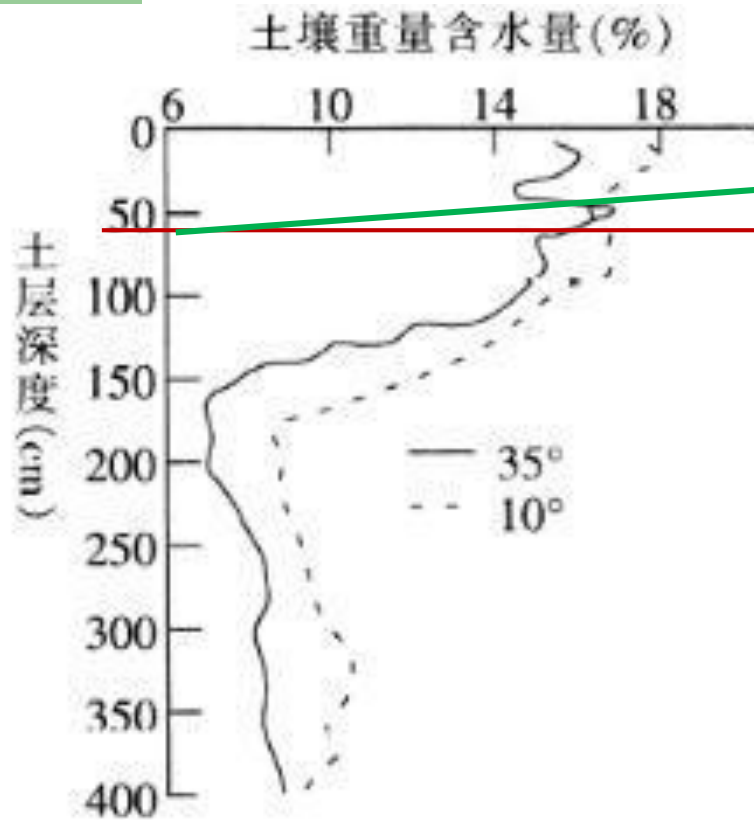
(d) 油松林地水平阶 Level-terrace of *Pinus tabulaeformis*

○ 开始降雨 Rain starts
 △ 停止降雨 Rain stops

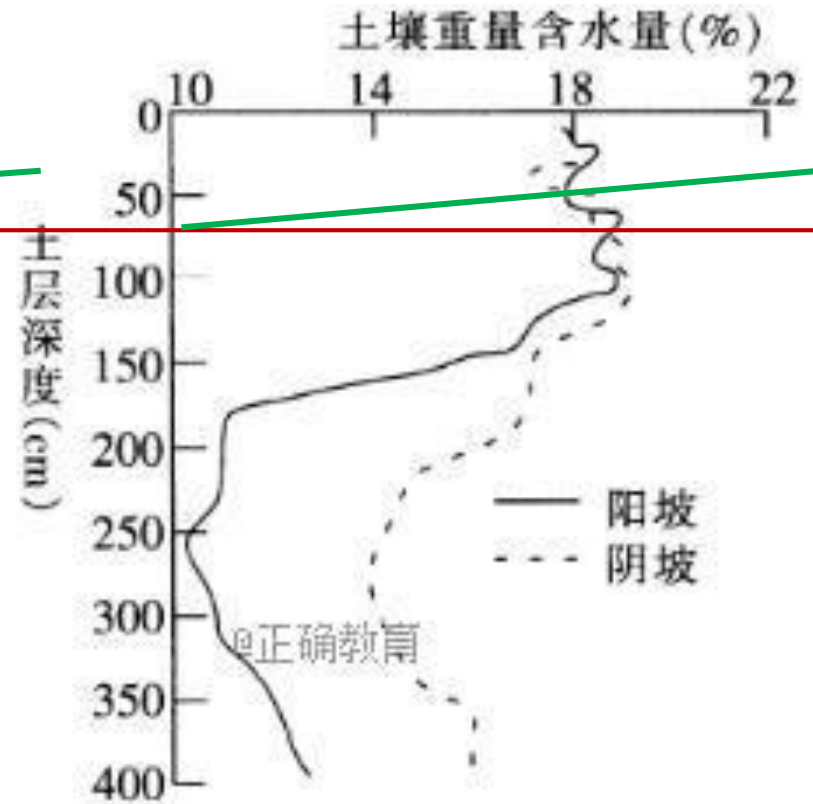
× 雨停24 h 24 h after rain stops
 □ 再分布停止 Redistribution stops

浅层变化不大，平均值的不确定性小！

坡地的土壤水分含量分布示意



甲

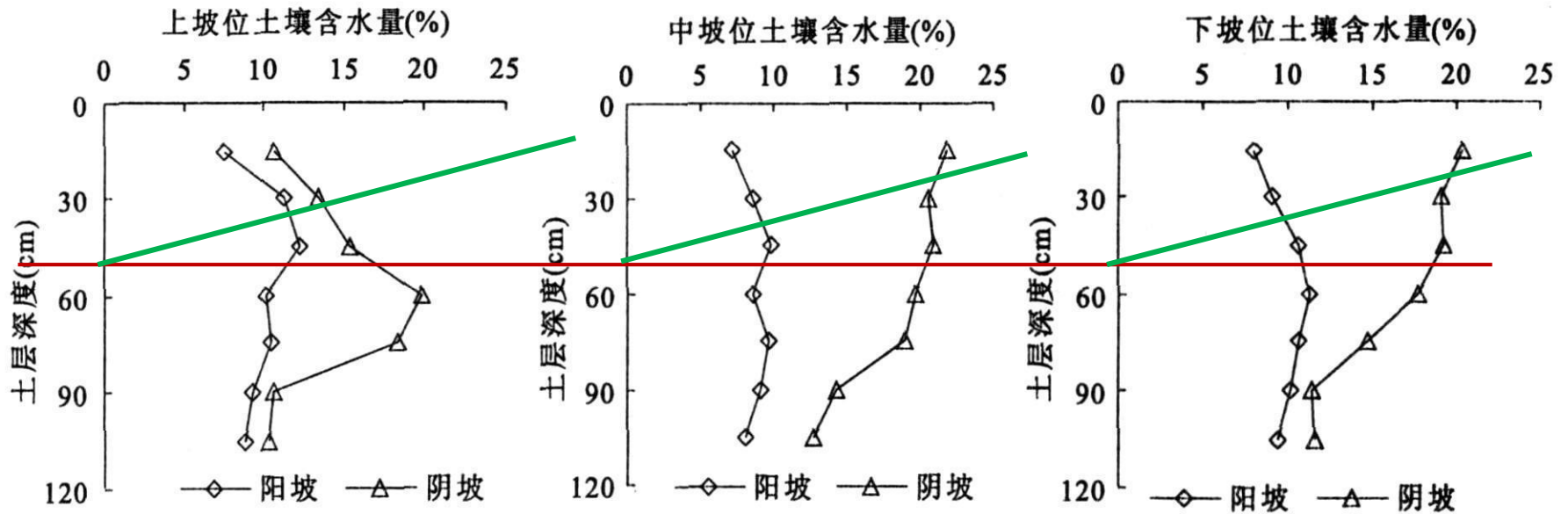


乙

@正确教育

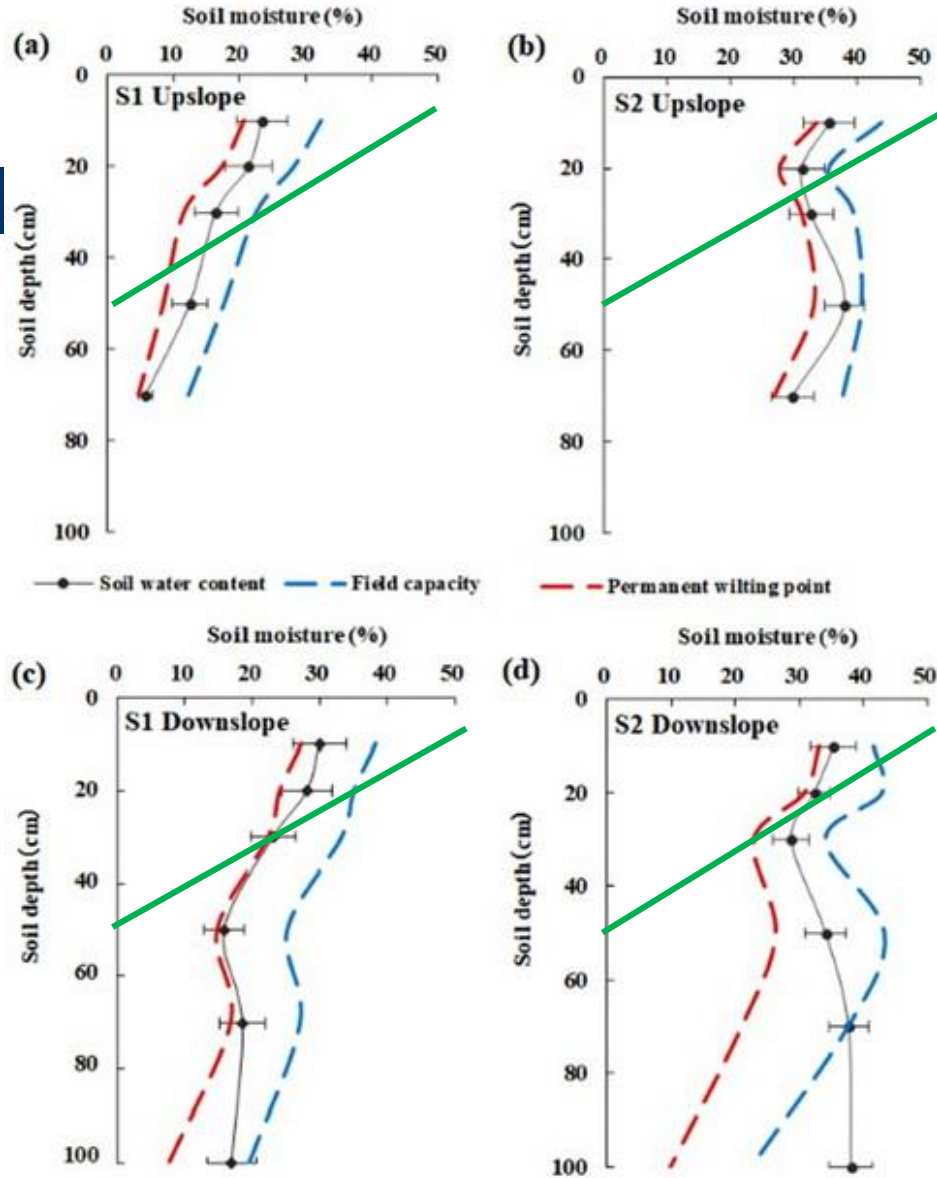
浅层变化不大，平均值的不确定性小！

坡地的土壤水分含量分布示意



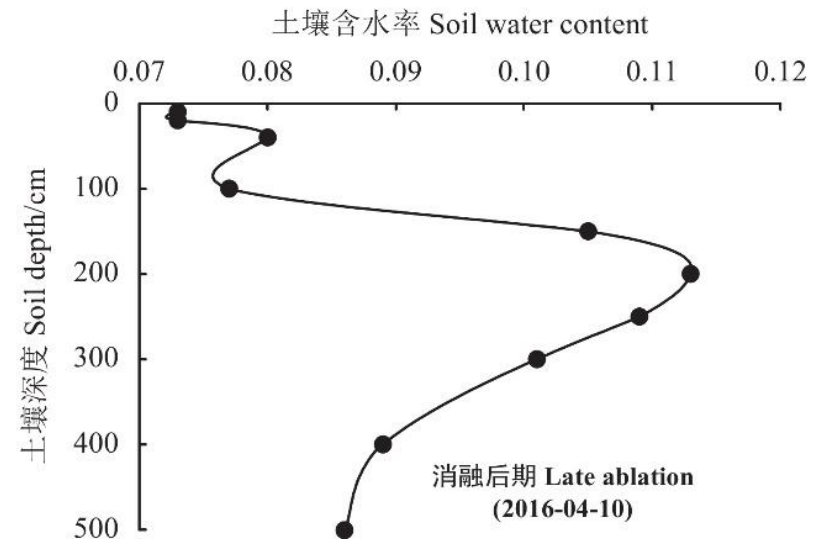
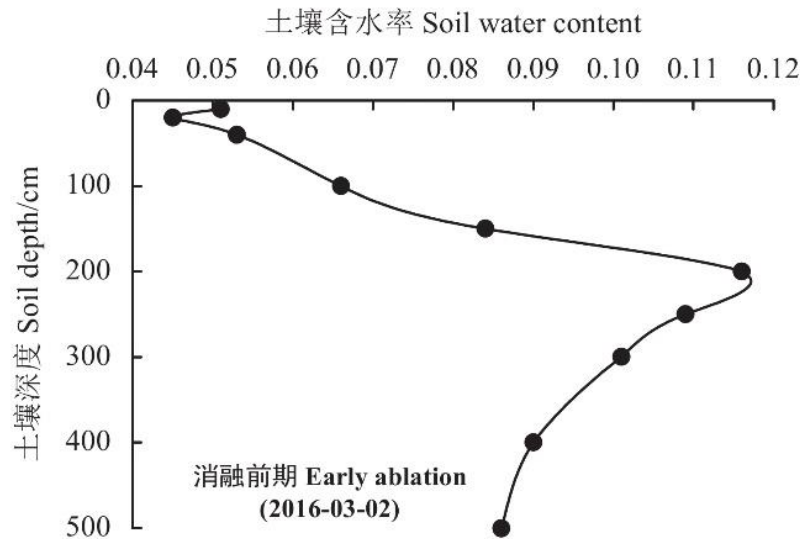
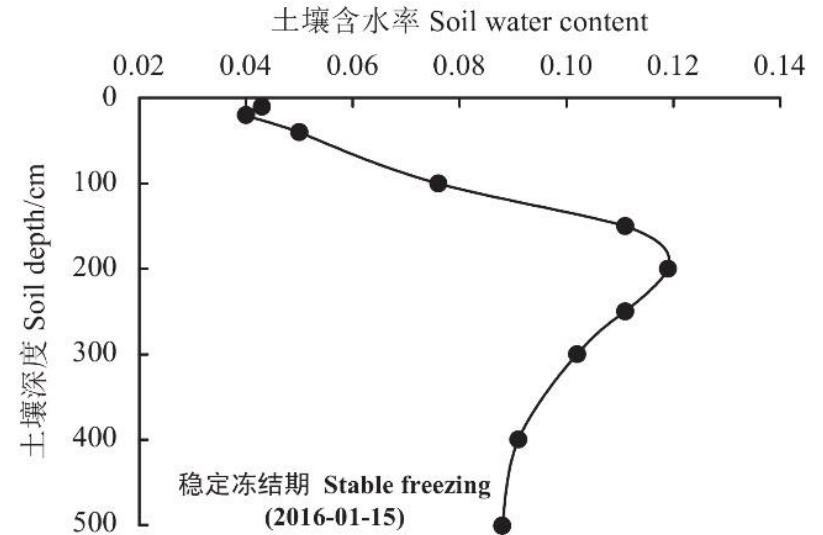
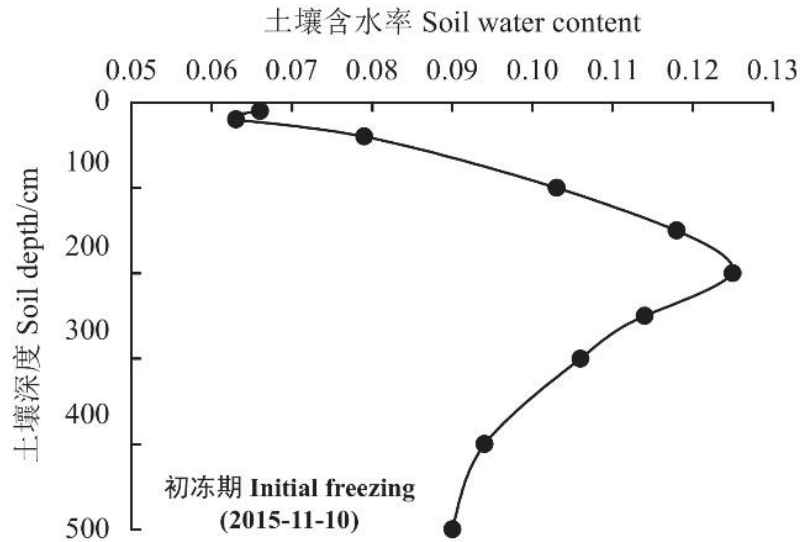
总体变化不大，平均值的不确定性小！

坡地的土壤水分含量分布示意



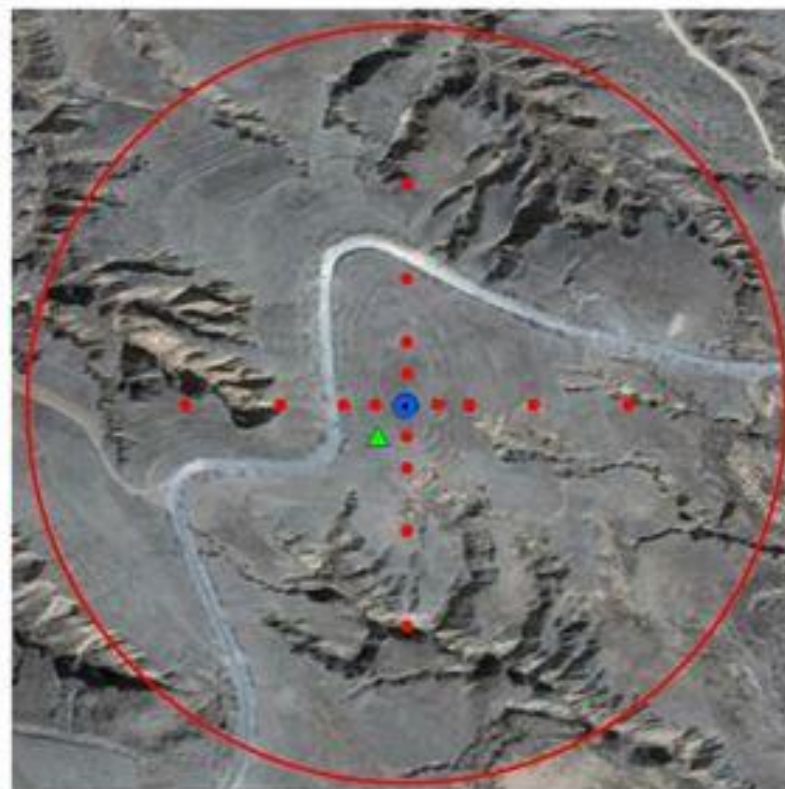
不是单调变化，平均值的不确定性大！

冻融前后的土壤水分含量分布示意



四、实例分析

- ◆ 三种土壤水分观测方法和传感器布局、范围、代表性；
- ◆ **COSMOS**与烘干法数据关系；
- ◆ **COSMOS**与**TDR**数据关系。



图例 Legend

0 60 120 240 m



● 宇宙射线土壤水分观测系统 COSMOS

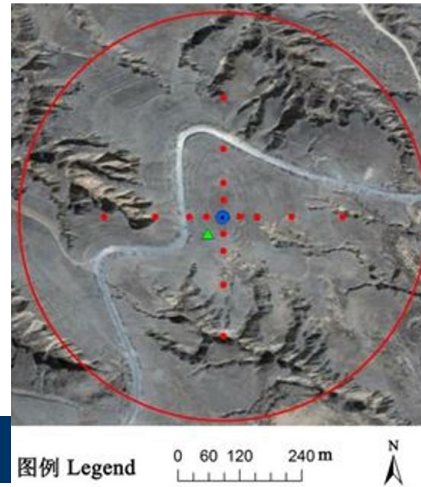
▲ HydraProbe II 土壤湿度传感器 Soil moisture sensors

● 采样点 Sampling site ○ 观测范围 Area under observation

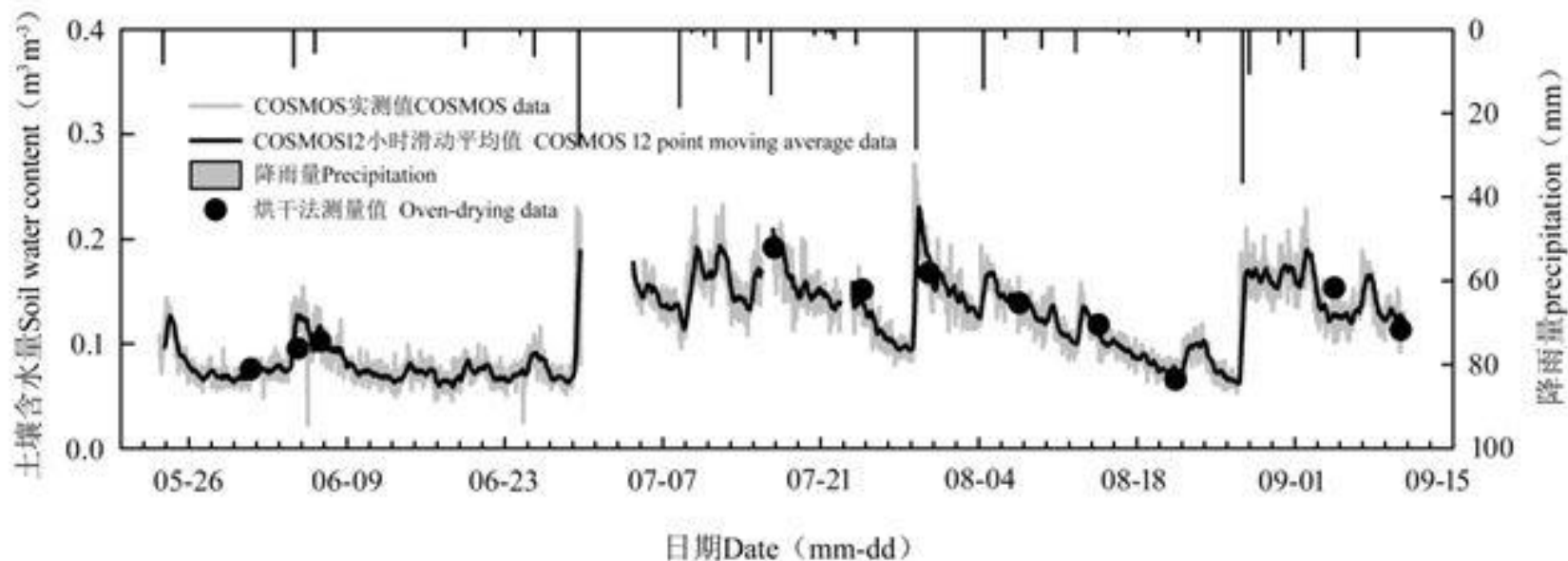
图 2 仪器测量区域与烘干法采样点分布位置图

实例源自DOI: [10.11766/trxb201503110122](https://doi.org/10.11766/trxb201503110122), 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用, 赵纯 袁国富 刘晓 邵明安 易小波

实例分析



- ◆ 受黄土高原破碎地形限制，采样点的分布为以COSMOS观测系统为圆心，在距仪器东南西北四个方向25、50、100、175 m处，共选取16个观测采样点，每个观测点30 cm深度范围内每5 cm取样。同时分析这 $6 \times 16 = 96$ 个点的土壤容重，用这16个点0~30 cm的平均土壤体积含水量代表该仪器测量范围内的表层土壤平均含水量，作为标定仪器所需要的数据。
- ◆ 对COSMOS观测进行验证的后续土壤水分采样的时间分别是5月31日、6月4日、6月6日、7月16日、7月24日、7月30日、8月7日、8月14日、8月21日、9月4日以及9月10日，共11次，沿用标定的模式。
- ◆ 为进一步分析COSMOS仪器的测量数据合理性，本研究还在离COSMOS仪器约30 m处不同深度埋设了HydraProbe II土壤湿度传感器（TDR，美国Stevens公司），埋设深度分别为5、10、20、30、50 cm。该仪器从2014年5月25日开始正常采集数据，利用对照的烘干法数据对仪器输出结果进行了校正。

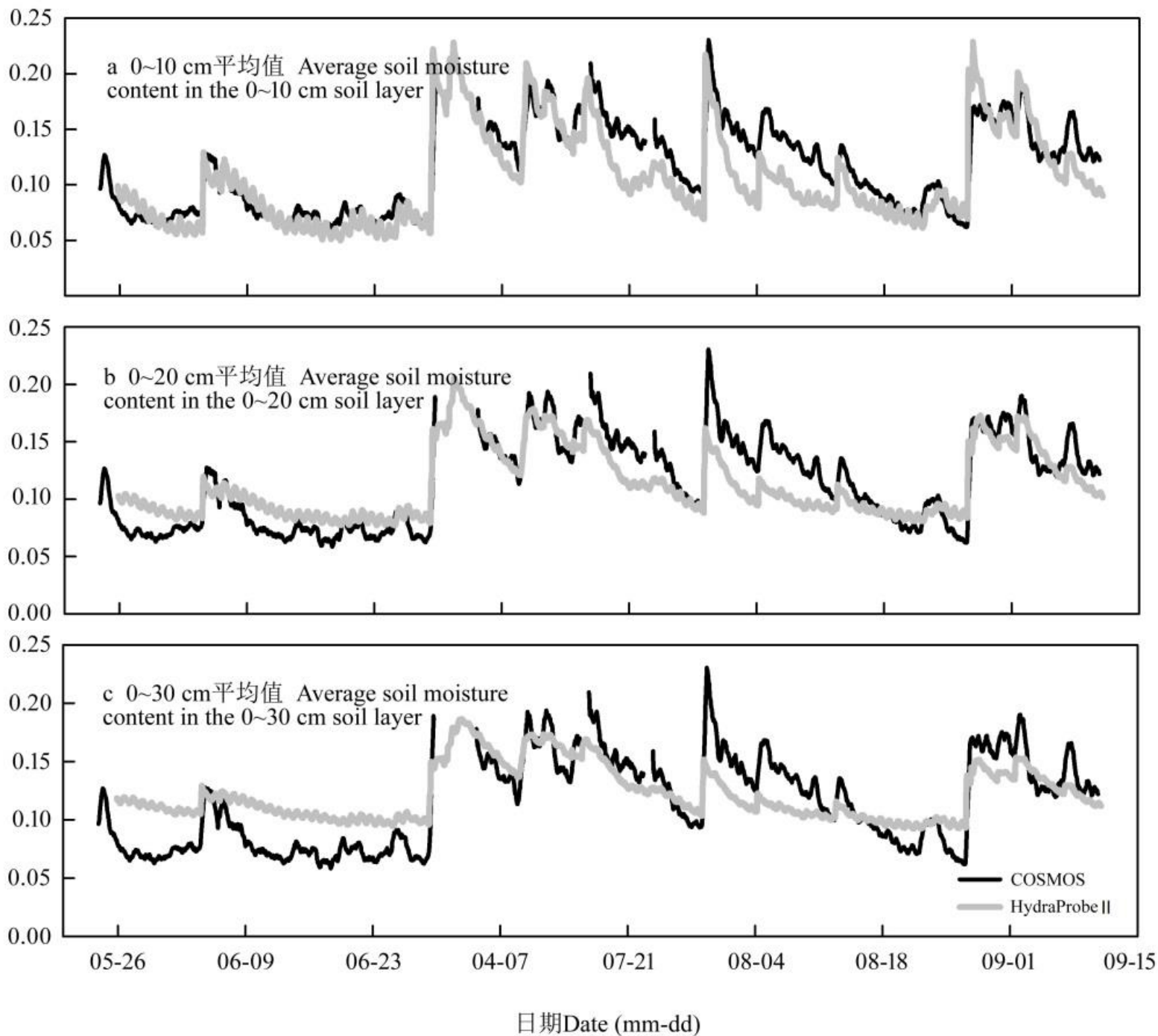


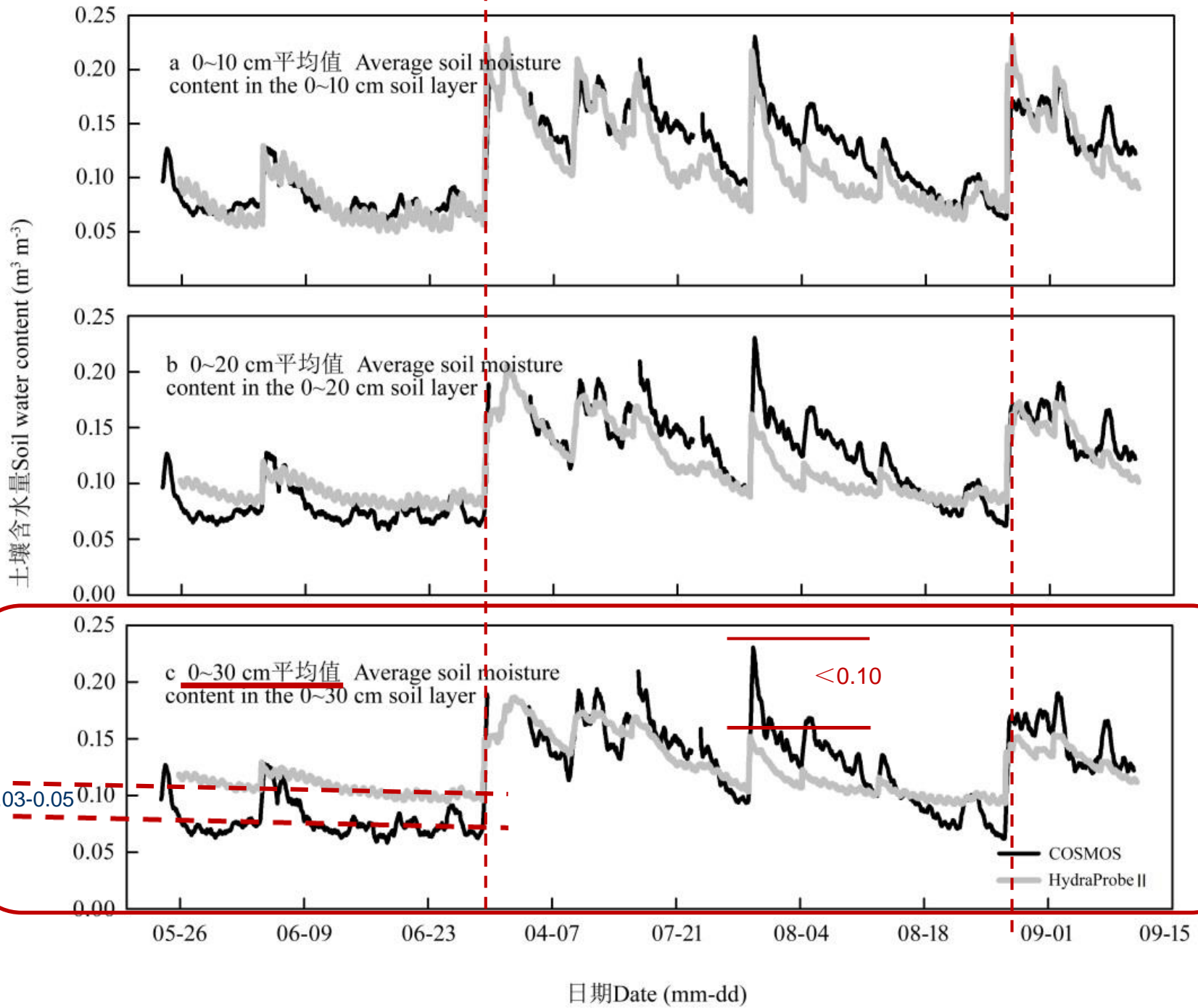
Comparison between the COSMOS instrument and the oven-drying method in measurement, and their relationships with precipitation

COSMOS 测量结果(12h 滑动平均值)与 11 次烘干法采样分析获得的结果非常接近(图4),

1. 土壤取样方法, 5 cm 间隔一个, 至 30 cm, 6 个样混合平均;
2. TDR 埋设深度: 5、10、20、30、50 cm; (如何平均?)
3. 土壤水分的单位需要换算统一;

土壤含水量 Soil water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)





致谢：国家重点研发计划——“典型脆弱生态修复与保护研究”之“生态系统关键参量监测设备研制与生态物联网示范”

谢谢！ 敬请批评指正！