

WET Sensor

W.E.T 土壤水分、温度、电导率传感器



安装及使用说明书



澳作生态仪器有限公司

Aozuo Ecology Instrumentation Ltd.

目录

WET传感器介绍	3
概述	3
WET传感器的工作原理	3
配置	4
简要操作步骤 (Quick Start)	5
测量	5
连接	5
插入	5
测量	5
选项	7
校准	9
土壤校准	9
土壤间隙水电导率 (Pore Water Conductivity)	12
维护	14
保养	14
重新校准	14
详细说明	14
测量范围和误差源	15
技术说明	16
电介质特性	16
土壤水分测量	16
土壤水分亏缺值(Water Deficit)	17
间隙水电导率 (Pore Water Conductivity)	17
土壤总电导率(Bulk Soil Conductivity)和间隙水电导率 (Pore Water Conductivity)	18
参考文献	22
术语定义	23



WET 传感器介绍

概述

Wet 传感器是一种应用于土壤、堆肥和其他人工基质的多用途传感器。通过测量土壤的电介质的特性然后计算：

- ✧ 土壤水分
- ✧ 电导度
- ✧ 温度



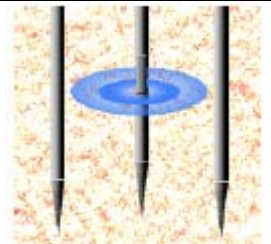
采用校准表，可以利用传感器测量土壤的电介质特性值，计算出土壤水分含量（0~100%）。通用的校准方法应用于常见的土壤。对于大多数人工基质，需要专门的校准（WET—CL）。WET 传感器还可以计算孔隙水电导率（Pore Water Conductivity，土壤空隙内水分的电导度 EC_p）。计算结果基于唯一的公式，该公式使探头接触状况与土壤含水量对测量结果的影响降到最低。采用嵌在测量探针中的微型温度探头测量温度。WET 传感器可以与 HH2 水分测量仪测量一起使用。也可以与控制系统连接，进行灌溉控制。

WET 传感器的优点

- ✧ 测量时间短（5S），同时测量三个参数。
- ✧ 测量土壤间隙水的电导率。
- ✧ 安装方便。
- ✧ 校准后，可用于多种土壤和生长基质。
- ✧ 稳定，准确测量范围：
 - ✓ 0~100%含水量
 - ✓ 0~600mS·m⁻¹
 - ✓ 0~40℃
- ✧ 轻型的优化设计。

WET 传感器的工作原理

测量原理

	当把传感器插入土壤，并开始测量…
	产生 20MHz 的信号
	信号应用于中心的探针，在土壤内部产生小的电磁场



澳作生态仪器有限公司

Instrumentation Consultancy Technologies



公司地址：北京市海淀区中关村东路 89 号·恒兴大厦 19B-24G

邮编：100080

	土壤周围的土壤水分含量、电导率和土壤组成决定…
ϵ	…土壤的电介质特性
	WET 传感器通过 20MHz 信号的变化判断土壤的电介质特性
	把产生的信号传递给 HH2 测量仪
	HH2 根据校准表计算土壤水分含量（水分电介质常数 $\epsilon \sim 81$ ，土壤 ~ 4 ，空气的 1）
	计算间隙水的电导度（Pore Water Conductivity）
	显示土壤温度

配置

系统主要有以下部分组成：

名称	号	说明
WET 传感器		2m 长的导线，与 HH2 连接 25 针的 D—型连接器； 或与控制系统连接的 9 针 D—型连接器（D-Connector）
软盘		校准文件
使用手册		

可能有下列组成

土壤水分测量仪		HH2	带有电池和连接盖
附件			见 HH2 说明书
基础校准		WET-CL1	对于许多普通温室基质，可以选择校准

加上

网站：<http://www.aozuo.com.cn>

Email: sales@aozuo.com.cn


support@aozuo.com.cn

电话：(010) 82675321、82675322、82675323 传真：(010) 82623152



包装盒		WCC2	放置 WET 传感器, HH2 测量仪和多余的电池
-----	---	------	---------------------------

简要操作步骤 (Quick Start)

1. WET 传感器与 HH2 测试仪连接。
2. 按下 ESC 键, 打开 HH2;
3. 按下 Set 键, 选择 Device, 再次按下 Set 键, 检查设备设置为 WET 传感器;
4. 再次按下 Set, 选择合适的传感器;
5. 把探头插入土壤。
6. 按下 Read, 读取测量数据。
7. 按下  键, 显示不同的测量数据 (水分含量, 空隙水分导度 (Pore water Conductivity) 和温度)。
8. 按下 Store 键, 存贮数据, 准备下一次测量。

测量

该部分详细描述采用 WET 传感器和 HH2 测量仪如何测量。

连接

一般情况下, WET 传感器有一个 25 针的 D-connector, 可以直接连接到 HH2 测量仪上。

注意: 虽然 WET 传感器是串行输出, 但是不是 RS232 接口。

电压为 TTL 电平, HH2 的电池通过内部连接的电压控制器, 控制电源的输出。针的输出情况如下:

针号	颜色	信号
7	绿	GND
3	黄	串行数据
13	红	+9V
外壳 (shell)	青绿色	屏蔽 (Screen)

插入

注意传感器的探针。不要把传感器插入到石头或特别坚硬的土壤中。

掩埋

WET 传感器完全密封, 可以埋到 2m 的深度。连接器如果暴露的话需要保护。

测量

按下下述步骤, 测量和数据存储。接着叙述了选择项以及设置选项。

连接 (Plug in)	WET 传感器与 HH2 连接 (通过 25 针 D—connector)
--------------	---------------------------------------







澳作生态仪器有限公司

Instrumentation Consultancy Technologies

公司地址：北京市海淀区中关村东路 89 号·恒兴大厦 19B-24G

邮编：100080

供电 (power up)	<p>如果显示屏空白，按下 ESC 键，启动 HH2。 如果必须的话，再次按下 ESC 键，直到 HH2 显示：</p> <p>Delta-T Devices ΔT Moisture Meter</p>
设置 (Set Device)	<p>按下 Set 键，再按  键，直到 HH2 显示 Options: ◆ Device</p> <p>在次按下 Set 键，再按  键，直到 HH2 显示 Device: ◆ WET</p> <p>按下 Set 键，再按下 Esc 键。</p> <p>注意：如果 Wet 选项没有显示，需要向 HH2 加载 Wet 传感器校准文件。需要使用 HH2 读程序，在 HH2 使用手册中有详细说明。</p>
检查 (check)	<p>按下 Set 键，按  键选择直到 HH2 显示 Options: ◆ Status</p> <p>按下 Set 键，按  键选择直到 HH2 显示 Status: ◆ Resources</p> <p>按下 Set 键，HH2 显示当前内存使用和电池电压。</p> <p>Mem 11% Batt 27% Readings #96</p> <p>内存使用 11%，电池电压使用时间剩下为 27%</p>
选择 (Options)	<p>下面是详细信息。然而… …虽然 HH2 默认的设置能够得到合理的测量结果。但是水分含量 (water Content) 和空气导水率 (Pore Water Conductivity) 随不同的土壤类型和校准值而变化。很有可能需要设置土壤类型。</p>
安装 (Insert)	<p>把 Wet 传感器插入土壤或其他介质中。如果土壤坚硬或者含有石块，需要专门的安装工具首先钻孔。</p>
读数 (read)	<p>按下 Read 键，测量土样。几秒钟后，屏幕显示：</p> <p>WET Store? 25.6%vol ◆wet</p> <p>该例中，土壤含水量 (Water Content) 计算值为 25.6%。可以采用箭头显示其他的参数：</p>



澳作生态仪器有限公司

Instrumentation Consultancy Technologies

公司地址：北京市海淀区中关村东路 89 号·恒兴大厦 19B-24G

邮编：100080

	气孔导水率 (Pore Water Conductivity) WET Store? 316mS.m ⁻¹ ◆EC _p 如果土壤水分含量较低, HH2 将不能准确地计算气孔导水率, 将显示: WET Store? Too Dry ◆EC _p 温度: WET Store? 22.9°C ◆T _{mp}
保存 (Store)	按下 Store 键, 保存测量结果, 或者按下 Esc 键, 放弃保存。
关闭 (off)	一分钟后, HH2 自动进入休眠状态。可以按下 Esc 键直到显示屏不再显示。

选项

下表详细列出了 HH2 使用 Wet 传感器时可选项数据:

测量 ID (Plot ID)	只用一个字母表示 (A...Z)
取样 (Sample)	每次试验的每个读数顺序值。自动增加, 可以手动设定为 1...2000
设备 ID (Device ID)	卷标, 既然每个不同的探头需要加载新的校准文件, 通常不需要设定。
根系深度 (Root Depth)	输入作物的根系深度 (0...9950mm)。通常用来计算缺水 (Water Deficits)
传感器深度 (Sensor Depth)	描述每个传感器的测量深度, 生成土壤剖面上的水分分布。
擦除 (Erase)	用来清除内存数据。

单位:

电导率 (Conductivity)	可以选择显示和存储电导率的单位为 ms.m ⁻¹ ms.cm ⁻¹ , us.m ⁻¹
水分含量 (Water Content)	%vol 或者 m3.m ⁻³

显示:

WET	默认情况下, HH2 计算、显示和存储土壤含水量 (Water Content), 气穴导水率 (Pore Water Conductivity) (EC _p) 和温度
WET EC _b ε _b	显示电介质常数 (permittivity, ε _b), (Bulk Soil Conductivity, EC _b)
WETmmDef	可以计算、显示土壤水分亏缺量,

土壤类型:



澳作生态仪器有限公司

Instrumentation Consultancy Technologies

公司地址：北京市海淀区中关村东路 89 号·恒兴大厦 19B-24G

邮编：100080

无机土 (Mineral) 有机土 (Organic) 沙性土 (Sand) 粘土 (Clay)	HH2 需要输入土壤类型，把土壤电介质常数 (ϵ' , b) 转变为土壤含水量。可选项如下： 四种土壤 (无机土，有机土，沙土和粘土)
Custom1 ... Custom5	用户设定的五种校准曲线
椰子壳 (coir) Min wool V ...	五种专门校准温室土壤基质 (仅使用于 WET-CL)

土壤参数设置

参数	土壤参数当计算 EC_p (Pore Water Conductivity) 时，在公式中显示土壤参数默认值是 4.1，但是可以利用 1.0...9.0 之间的任意值 校准部分解释了如何测量土壤参数值和技术参考手册部分描述如何利用参数计算 EC_p 值
容重 (Capacity)	土壤容积可以设置在 0...100%Vol 土壤含水量之间。 在 技术参考 中，详细介绍了如何利用该值计算土壤亏水量 mmDef. HH2 使用说明书有关于不同土壤容重方法和建议
b0	该选项仅适合于 Custom1...Custom5 型土壤 土壤含水量通过土壤电介质常数 (Dielectric, ϵ'_b)，和补偿值 b0 以及比例因子 b1
b1	B1 可以设定在 0...49.9 之间，正常值为 6.0~12.0 之间

补偿：

温度	电导率值 (both Pore water and Bulk) 受温度的影响。常采用校准的方法。通常使用的补偿温度为 20℃或 25℃。
百分比	当采用温度补偿时，设定百分比值。默认值为 2.0。可以在 -1.0~4.0%之间选择。

输出文件格式



Device >>	WET							
Root Depth >>				0				
Sensor Depth >>				0				
Soil >>				Mineral				
B0 >>				1.6				
B1 >>				8.4				
Soil Parameter				4.1				
Field Capacity				0.38				
EC Compensation				None				
Time	Sample	Plot	Device	VWC	ECp	Tmp	E'b	ECb
				% Vol	mS.m-1	degC		mS.m-1
01/01/00 23:51	1 A		0	27.5	166.1	27.6	15.3	24
01/01/00 23:51	2 A		0	32	176.9	28.3	18.4	32.8
01/01/00 23:53	3 A		0	41.6	187.8	29.9	25.9	53.7
01/01/00 23:53	4 A		0	21.4	246.7	29.7	11.5	24

校准

该部分注意描述了不同土壤校准曲线（Soil Calibration），把 WET 传感器的所测量的电介质数值转换为土壤水分含量。

为了测量土壤电导度（Pore Water Conductivity），还需要土壤参数和温度补偿值。在计算土壤水分亏缺值时，需要根系深度和土壤容积（Field Capacity）。

土壤校准

WET 传感器根据简单的公式计算土壤水分值，该公式为：

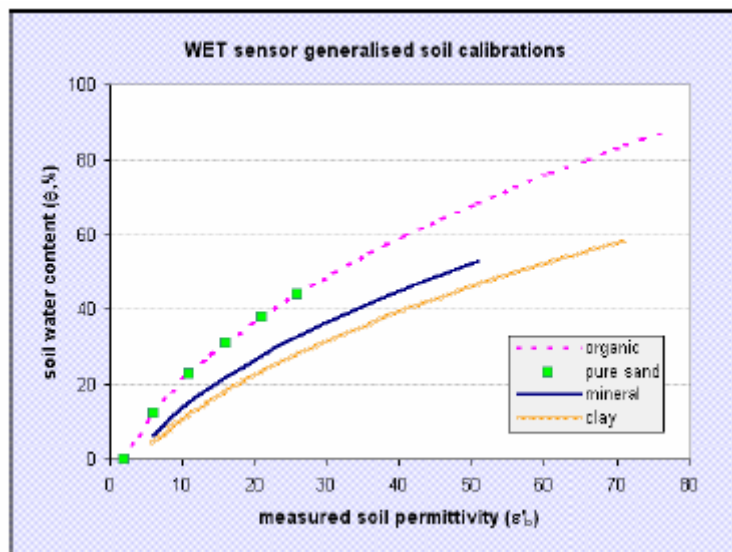
$$\theta = (\sqrt{\epsilon'} - b_0) / b_1$$

其中： θ ——土壤含水率； ϵ' ——测量土壤的介电质数值。

传感器能够直接测量 ϵ'_b ，校准系数包括一对 b_0 和 b_1 值。

常见土壤参数的校正值

校准	b_0	b_1
无机土	1.8	10.1
有机土	1.4	8.1
沙土	1.4	8.4
粘土	2.0	11.0



注意：进行正确的校正是十分必要的。从 WET 传感器的测量和安装服务；

WET-CL 土壤校准

校准	说明	密度 Kg.m-3	空隙比 (Porosity) %
椰子壳 (Coir)	主要成分为椰子壳	85	98
泥炭 (Peat Based)	主要成分为泥炭 可能包括粘土或者珍珠岩 Perlite	75~250	55~80
Min Wool v	Mineral wool or glasswool Wet 传感器垂直放置	45~60	96
Min Wool h	Mineral wool WET 传感器水平放置	60	96
Glass Wool h	Glasswool WET 传感器水平放置	45	96
Min g/h soil	Average of a wide range of greenhouse soil	1100	55
Pot soil	Potting composts including roots		

如果常见的土壤或WET-CL校准值不适合所要测量的土壤。需要进行专门的校准。目的是得出 b_0 、 b_1 ，把该值输入到HH2中。



理想的情况下，校准的方法是，采用一个体积一定的中心孔，盛放一定的潮湿土壤，仔细的干燥处理，干燥过程中，测量其电介质特性（ ϵ' ）和重量（采用一定的土样，使其具有不同的含水量，测量土样在不同含水量下的电介质特性和重量）。采用测量的湿土重量，干土重量和体积计算含水百分比，以及相应的电介质特性值。最后得到关于 $\sqrt{\epsilon'}$ 与含水量 θ 的回归曲线， b_0 和 b_1 分别是截距和斜率。然而在大多数情况下，采用两点校准就能够满足要求。具体方法如下：

一个 WET 传感器

一个 HH2 测试仪，设置选项为 “WET EC_b ϵ_b ”。

采用非金属密封烤箱容器取 1L 土。

采用干燥箱干燥样品。

步骤 1 (Step 1)	采集潮湿的土壤样品，尽可能混合均匀，使其各项同行。把 WET 传感器插入到样品中，测量其电介质常数。 E_w 。测量样品的重量 (W_w)，测量其体积。
第二步 (Step two)	<p>采用干燥试验箱把干燥样品，并称重。</p> <p>把 WET 传感器插入干燥土壤中 ($\theta \approx$)</p> <p>测量电介质常数 ϵ'_0。</p> $b_0 = \sqrt{\epsilon'_0}$ $\theta_w = \frac{(W_w - W_0)}{L}$ $b_1 = \frac{\sqrt{\epsilon'_w} - \sqrt{\epsilon'_0}}{\theta_w}$ <p>然后根据 $\sqrt{\epsilon'_w} = 3.01$ $b_0 = \sqrt{\epsilon'_0}$，常在 1.0~2.5 之间</p> $\theta_w = 0.13 / 0.75 = 0.173 m^3 \cdot m^{-3}$ $EC_p = \frac{\epsilon'_p \times EC_b}{(\epsilon'_b - \epsilon'_{\sigma_b=0})}$ $\epsilon'_{\sigma_b=0} = \epsilon'_b - \frac{(\epsilon'_w \times EC_b)}{EC_w}$
步骤 3 (Step3)	<p>计算体积含水量 (θ_w)</p> $\theta_w = \frac{(W_w - W_0)}{L}$
步骤 4 (step4)	$b_1 = \frac{\sqrt{\epsilon'_w} - \sqrt{\epsilon'_0}}{\theta_w}$ <p>常在 7.5~11.5 之间</p>

例子

1. WET 传感器测量值 $\epsilon'_w = 9.06$ ，可得出 $\sqrt{\epsilon'_w} = 3.01$ ，样品重 1.08kg，体积为 0.75L
2. 把土壤烘干，WET 传感器测量值为 $\epsilon'_0 = 2.56$ ，可以计算出 $\sqrt{\epsilon'_0} = b_0 = 1.59$ 。
3. 样品干重为 1.05kg，所以样品中水体积为 $1.18 - 1.05 = 0.13L$ 。样品体积含水量为 $\theta_w = 0.13 / 0.75 = 0.173 m^3 \cdot m^{-3}$



4. 得出 $b1=8.19$ 。

土壤间隙水电导率 (Pore Water Conductivity)

WET 传感器采用下式计算土壤电导率

$$EC_p = \frac{\epsilon'_p \times EC_b}{(\epsilon'_b - \epsilon'_{\sigma_b=0})}$$
 符号的定义在参考部分

WET 传感器直接测量 ϵ'_b 和 EC_b ，根据温度计算 ϵ'_p 。另外一个参数 $\epsilon'_{\sigma_b=0}$ 称为土壤参数，不同的土壤变化很小。

土壤参数

默认值适合于农田有机和无机土。但是如果测量重粘土，沙性土或特殊的基质，需要进行专门的校准。注意：土壤参数默认值为 4.1，除非已经进行了准确的测量，否则不要修改。该值显著的影响 EC_p 值，特别是在干燥土壤。

建议采用下述方法：

1. 取约 300ml 左右的土壤，装入带有密封盖的广口瓶中。土壤的量不是关键，需要把 WET 传感器完全插入土壤中，减小边缘的影响。
2. 添加两倍于土壤体积的自来水（约 600ml）。自来水的电导率影响不大，但是水量需要足够使土壤达到饱和状态。并使土壤上方有足够的水浸没 WET 传感器。
3. 充分混合，大约振动 10 分钟。
4. 土壤静置 1 个小时。
5. 利用 WET 传感器测量土壤上方自由水的电介质特性（ ϵ_w ）和电导率（ EC_w ）。测量时 HH2 设置为 WET $\epsilon_b EC_b$ 。
6. 把 WET 传感器插入土壤中，测量总电导率（ EC_b ）和饱和土壤电介质特性（ ϵ'_b ）
7. 土壤的 $\epsilon'_{\sigma_b=0}$ 值根据下式计算得出：

$$\epsilon'_{\sigma_b=0} = \epsilon'_b - \frac{(\epsilon'_w \times EC_b)}{EC_w}$$

温度补偿

如果需要的话，WET 传感器的读数可以进行温度补偿。

在一定的情况下，需要准确知道一定温度下的土壤的电导度。在那些情况下需要非补偿值，这是 WET 传感器所默认的。

然而，大多数情况下，电导率是间隙水所有离子浓度的估计平均值。在这种情况下，需要比较标准温度下的值。但这不太明确。原因如下：

标准温度即可以是 20℃ 也可以是 25℃。

温度补偿百分比主要与间隙土壤水离子组成有关。



ion	temperature sensitivity of EC*
Na^+	2.1
K^+	1.9
$\frac{1}{2} \text{Ca}^{++}$	2.1
H^+	1.5
NH_4^+	1.9
Cl^-	1.9
NO_3^-	1.8
OH^-	1.5
P_2O_5^-	not known

上述引用值为约 25℃时的值。

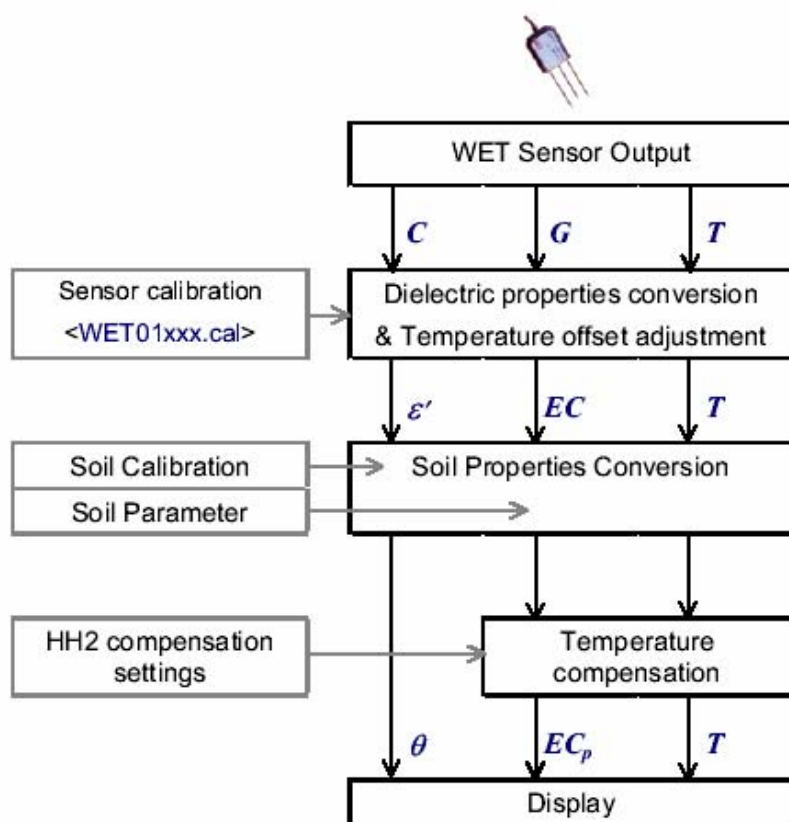
根据实际应用中的补偿目的，确定补偿温度值和补偿百分比。

传感器校准

通常认为采用 WET 传感器测量电介质特性，但这并不完全正确。

传感器实际测量材料在电极间的电容 (C) 和电阻 (G)。利用传感器校准曲线计算出电介质特性。

《WET01xxx.cal》，XXX 为传感器的序列号。每个校准文件中有系列的电容和电阻值，通过在各种只电介质特性流体校准传感器。





维护

保养

- 爱护传感器探头。不要用力把探头插入到石头或坚硬的土壤中。如果必须使用，先用工具钻孔，再插入传感器。
- 不要通过电缆线，拔出传感器。
- WET 传感器完全密封可以插入水中。但接头没有密封，需要注意放水。
- 测量完毕，用干净的水把传感器冲洗干净。
- 保持探针稳定。不用时放置在泡沫塑料中。

重新校准

通过把传感器放入到低电导率的水溶液中，测量其电导率和电介质特性，定期的判断 WET 传感器的精度。应该通过在精确的电导率溶液中，判断间隙水电导率值。注意温度要等于标准温度。

通过下式，在温度 T 时水的电介质常数 (ϵ'_b)，比较 HH2 测量仪的显示值

$$\epsilon'_b(T) = 80.37 - 0.37(T - 20)$$

如果 WET 传感器读数超过表示范围，需要送到厂家进行校准。

详细说明

传感器输出		范围	精度	单位	说明
串行数据	电介质常数 ϵ'	1~80	± 2.5	无	0~40℃, 0.1~
	土壤总电导率 EC_b	0~300	± 10	mS.m-1	0.55m3.m-3 土壤含水量
计算中采用的数据	水分含量 θ	0.2~0.8 0~0.55 0~0.55	± 0.04 ± 0.05 ± 0.03	m3.m-3	WET—CL 校准 With supplied soil calibration 专门的土壤 校准
	土壤间隙水电导率 EC_p	见下述曲线			
	温度	-5~50	± 1.5	℃	平衡后 (~ 20s)
频率	20MHz				
校准	Individual sensor calibration supplied				
环境	温度范围为 0~40℃				
电源	测量 2.5S，典型值为 38mA，				
尺寸	探头：68mm 长×3mm 直径 空间：55×45×10mm				
样品体积	~500ml				
重量	75g				



【1】20℃水分含量精度

测量范围和误差源

水分含量测量精度

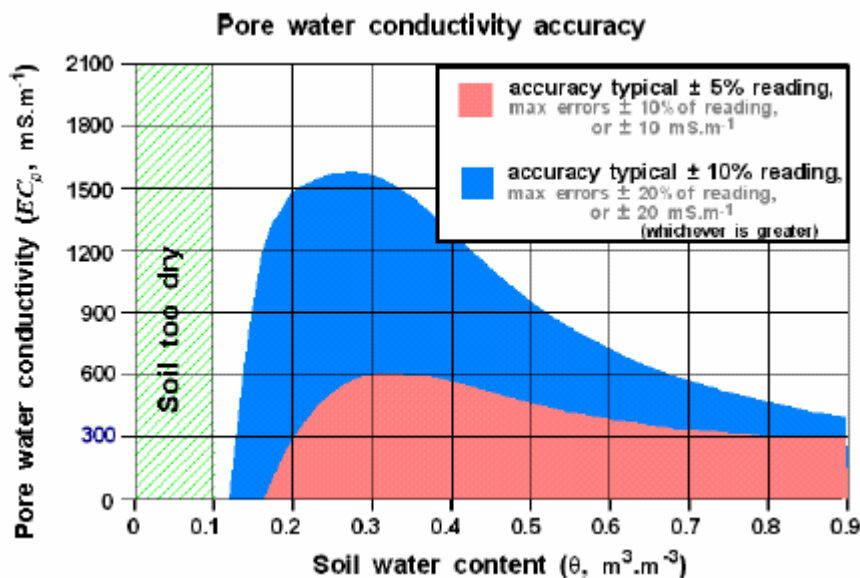
误差源	相关	说明
校准	校准土壤与实际测量土壤不同	无机土和沙性土通常小于 3~4%。不进行专门校准时，对于粘性土和有机土误差达 5~10%。
土壤类型	特别粘的粘性土壤	显示特别的电介质常数值，降低精度。需要进行专门的校准
	磁性土壤	
土壤盐分含量	测量值高	见下表
传感器安装	WET 传感器与土壤接触不好	可以故意的摇动 WET 传感器，观察测量值的变化

土壤间隙水电导率测量精度 (Pore Water Conductivity Accuracy)

误差源	原因	说明
土壤类型	特粘的粘性土	显示不正常的电介质特性值，降低精度
	磁性土	
	人造土	如果土壤水分含量较低 (<30%) 需要专门的土壤参数。
含盐量 (碱性)	含盐量特高	见下图
土壤水分	干土	见下图
温度	离子电导率随温度变化	见上述温度补偿说明
传感器的安装	传感器与土壤接触差	土壤与传感器的接触对土壤水电导率影响较小，但是良好的接触能够改善精度

测量范围

下图给出了 WET 传感器能够进行准确测量的土壤间隙水的电导率 (EC_p) 值的变化范围



技术说明

电介质特性

当电磁场在物质（比如土壤）中传播时，一部分能量在土壤中传递（不发生变化），一部分被反射，一部分被吸收转化为热能贮存在土壤中。

物质的电介质特性决定了电磁场的传播，反射和吸收百分比。采用材料的相对电磁场介电常数（ ϵ ），该常数能够描述对所应用电磁场的极化影响。

通常表示为虚数形式：

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

其中实部 ϵ' 表示贮存的能量； ϵ'' 虚部表示吸收或者损失的能量。两者都与频率和温度有关。对于静止的（稳定的）电磁场，通常把实部 ϵ' 作为电磁常数处理。能量损失包括电磁损失 ϵ''_d 和离子损失：

$$\epsilon'' = \epsilon''_d = \frac{EC_i}{\omega \epsilon_0}$$

其中： EC_i 为物质的离子电导率， ω 辐射频率 rads^{-1} ，已Hz为单位则 $f = \omega / 2\pi$ 。自由空间的电介质特性为 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

注意：下文中采用 σ 表示 EC（电导率值）。

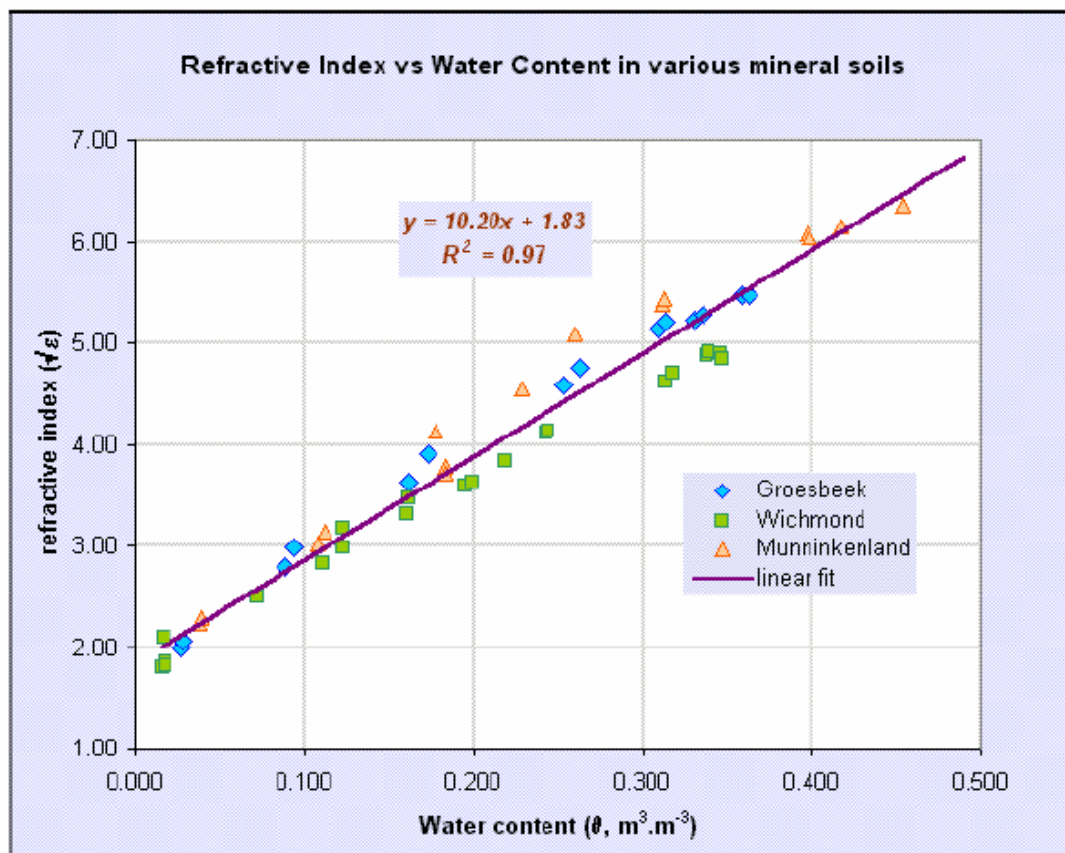
土壤水分测量

whalley(ref[1], White, Knight, and Zeggelin(ref[2]))和 Topp(ref[3])研究表明复数的反射系数（等于 $\sqrt{\epsilon}$ ），和土壤体积含水量 θ 之间的关系为

$$\sqrt{\epsilon} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \theta \quad [4]$$

上式对于大多数非磁性土壤和人造介质在磁场频率 $\sim 1\text{MHz}$ 和 $\sim 10\text{GHz}$ 相关性良好。

下图表示了采用 WET 传感器测量的不同农业土壤组成数据的曲线（频率为 20MHz）



从上图可以看出，通过对不同的土壤进行校准，水测量精度可以得到提高。但是改善量很小（典型值为 2~3%）。所以通用无机土校准适合与大多数农田土壤。

注意：上述结果不适合与粘性土。进行专门的校准可能提高精度>10%。对于有机土同样适用，因为

计算土壤水分亏缺值(Water Deficit)

水分亏缺值是指为了使土壤含水量增加到田间持水量的水平，必须的灌溉用水量或下雨量（mm）。水分亏缺值与土壤深度有关（通常认为作物根系深度的函数值）

对于 WET 传感器，水分亏缺值 D（mm）的定义式为：

$$D = I(\theta_{FWC} - \theta)$$

其中：

I——为根系深度，mm。

θ_{FWC} ——根系深度处的田间持水量

θ ——测量的土壤含水量。

间隙水电导率（Pore Water Conductivity）

土壤总的电导率 σ_b 为土壤含水量 θ 和间隙水电导率 σ_p 。三者的关系与土壤总的电介质常数 ϵ_b ，间隙



水的电介质常数 ϵ_p 和含水量 θ (Nyfors and Vainikainen, 1989). Malicki 等 (1994) 发现许多土壤的 σ_b 和 ϵ_b 有很好的线性相关性。下面讨论 σ_b 和 ϵ_b 关系的理论基础，并解释 WET 传感器为什么采用其关系。

土壤总电导率(Bulk Soil Conductivity)和间隙水电导率 (Pore Water Conductivity)

从水分存在与土壤基质间隙中。间隙水的电介质特性和电导率特性标有下表 p。间隙水的电介质常数虚部表示为 ϵ_p'' 。在土壤学中，采用 σ_p 表示间隙水的电导率是十分现实的。定义为：

$$\sigma_p = \omega \epsilon_0 \epsilon_p'' = \omega_{\epsilon 0} \left(\epsilon_{dp}'' + \frac{\sigma_{ip}}{\omega_{\epsilon 0}} \right) \quad [5]$$

其中 σ_{ip} 代表土壤间隙水的离子电导率。介电损失与频率有关，在松弛频率(Relaxation Frequency)达最大值。温度 20 时，水的最大松弛频率为 17GHz (Kaatzte and Uhlenndorf, 1978)。WET 传感器的工作频率为 20MHz，在该情况下， ϵ_{dp}'' 可以忽略，所以公式[5]为

$$\sigma_p = \sigma_{ip} \quad [6]$$

一般情况下， σ_p 为间隙水的电导率 (Electrical Conductivity)。离子的导电性为温度的函数。对于 NaCl 溶液，温度每升高 1 摄氏度，导电性增加 $\sim 2.1\%$ 。采用的 σ_p 值在温度为 20 摄氏度 (25 摄氏度) 时是正确的。温度校准系数与溶液的离子组成有关。WET 传感器不能自动调整。

间隙水的介电常数 ϵ_p 与纯水的相同。20 摄氏度时，实部 $\epsilon_p' = 80.3$ ，温度补偿系数为 $-037/\text{摄氏度}$ (Kaatzte and Uhlenndorf, 1981)。通过分析公式[3]，可以得出 ϵ_p 的估计值：

$$\epsilon_p \approx \epsilon_p' - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0} \quad [7]$$

土壤的介电常数和土壤的总的电导率以下标 b 标志。土壤的复数介电常数， ϵ_b 与 ϵ_p 以及 θ 的函数， $g(\theta)$ 有关。对于干土，没有水分溶解离子，所以土壤的电导率 $\sigma_b \approx 0$ 。但是土壤仍然可以极化，所以 $\sigma_{\sigma_b} \neq 0$ 。把 $\sigma_{\sigma_b=0}$ 作为 ϵ_b 的补偿值。

假设 $g(\theta)$ 为比例常数，可得出土壤总的复数电介质常数：

$$\epsilon_b = \epsilon_{\sigma_b=0} + \epsilon_p g(\theta) \quad [8]$$

注意 $\epsilon_{\sigma_b=0}$ 为复数包括电磁和离子损失。既然 $\sigma_b = 0$ ， $\epsilon_{\sigma_b=0}$ 约等于其实部 $\epsilon_{\sigma_b=0}'$ 。根据此，再把[7]代入式[8]，则 ϵ_b 为：

$$\epsilon_b = \epsilon_{\sigma_b=0}' + \epsilon_p' g(\theta) - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0} g(\theta) \quad [9]$$

像土壤这类电介质材料在两个电极之间的电学模型是一个有损耗电容 (Lossy Capacitor)。根据电学知识，可以计算充满土壤电容的导纳值，Y。导纳值是阻抗 Z 的倒数，是一个复数值，与土壤电介质常数 ϵ_b 有一定的相关关系，其定义式为：



$$Y = j\omega\epsilon_0\epsilon_b\kappa \quad [10]$$

κ 为几何参数，与电极之间的距离以及与土壤之间的接触面积有关。与土壤的接触问题从 κ 值中体现出来。

对于上述有损耗电容的等效电路可以看作无损电容 (Loss-free Capacitor) C，以及并行的导体，G。C 表示土壤的能量存储性能与 ϵ'_b 有关。G 表示能量的损失状况与 σ_b 有关。Y 可以表示成下式：

$$Y = G + j\omega C \quad [11]$$

从公式[10]以及公式[11]，并联系公式[3]~[9]，Y 的实部和虚部为

$$G = \sigma_p g(\theta)\kappa \quad [12]$$

和

$$C = \epsilon_0(\epsilon'_{\sigma_b=0} + \epsilon'_p g(\theta))\kappa \quad [13]$$

根据测量的 σ_b 和 ϵ'_b

$$\sigma_b = \sigma_p g(\theta) \quad [14]$$

和

$$\epsilon'_b = \epsilon'_{\sigma_b=0} + \epsilon'_p g(\theta) \quad [15]$$

从公式[14]和[15]土壤间隙水离子的电导率表示为：

$$\sigma_p = \frac{\epsilon'_p \sigma_b}{(\epsilon'_b - \epsilon'_{\sigma_b=0})} \quad [16]$$

公式[16]描述了土壤间隙水（从土壤间隙间的水分）的 σ_p 和采用介电常数传感器测量的土壤 ϵ'_b 和 σ_b 之间的关系。补偿值可以通过测量任何自由水的 ϵ'_b 和 σ_b 计算得出 $\epsilon'_{\sigma_b=0}$ 。

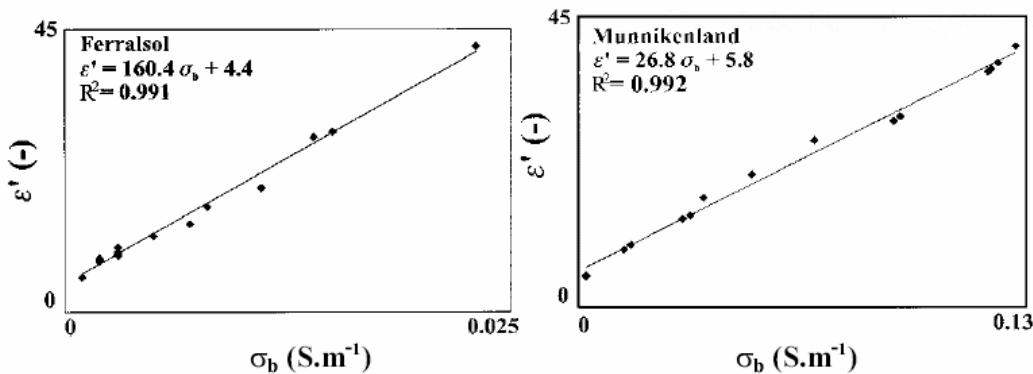


Fig. 1 Examples of the relationship between ϵ'_b and σ_b , showing the offset $\epsilon'_{\sigma_b=0}$ for two different soils.

当水作为土壤基质一部分时和自由水时，其土壤参数 ϵ'_b 和 σ_b 和相应的间隙水的参数 ϵ'_p 和 σ_p 的关系是不同的。由于离子在干燥或几乎完全干燥的土壤晶格运动，式[16]不能用来计算电导率。该式仅适用于基质中的自由水。如果土壤含水量 $\theta = 0$ ， $\epsilon'_{\sigma_b=0}$ 的值并不是 ϵ'_b 。对于沙土，自由水含量对应于 $\theta > 0.01$ 的情况。对于粘土 $\theta > 0.12$ 。（Dirksen and Dasberg, 1993）。如果 $\theta > 0.10$ ，作为一条较笨的规则，模



型（公式）适用于大多数正常的土壤和生长基质，比如盐棉。

传感器的设计

在式[14]和[15]中，仅 $g(\theta)$ 受电极形状，电极于土壤的接触状况和土壤组成的影响。基于公式形式的考虑，公式[16]忽略了 $g(\theta)$ 。所以根据公式[16] 测量土壤间隙水电导率时，很容易受土壤与电极接触状况的影响。

WET 传感器研究开发了一种技术，在相对较小的样品容积内和同样的频率下，能够通过同时测量 ϵ'_b 和 σ_b 值。根据专门开发的用于电介质的 ASIC 技术，设计制造了该传感器。该方法采用矢量电压表（Vector Voltmeter）进行准确测量 ϵ'_b 和 σ_b 值。测量原理如下图。

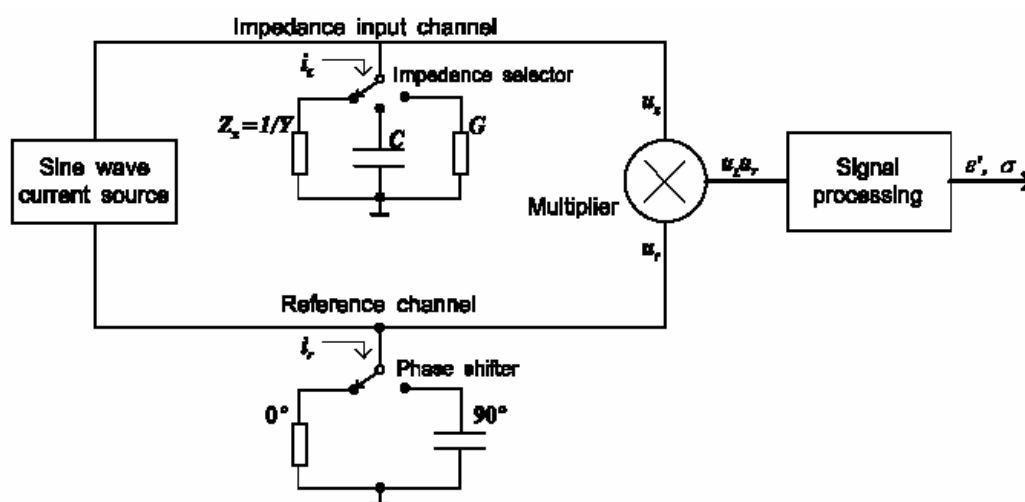


Fig 2. Schematic representation of the ASIC circuitry for measuring dielectric properties

理论的有效性分析

采用五种不同的土壤、直径为 0.2mm 的玻璃珠和盐棉垫分别试验评价模型[公式 16]的有效性。土壤样品同 Dirksen 与 Dasber（1993）实验采用的样品。其组成如表 1。土壤的含盐量不变。采用 NaCl 溶液，把盐棉和玻璃珠的盐分含量分别调整到 $\sigma_p = 0.3S.m^{-1}$ 和 $\sigma_p = 0.1S.m^{-1}$ 。取样品上方多余的盐溶液作为样品测量其 σ_p 值。WET 传感器用来测量 ϵ'_b 和 σ_b 以及样品上方盐溶液的 σ_p 值。 σ_p 的测量结果采用试验使用的 4 电极电导率测量仪进行测量（其频率为 1kHz）。每种材料从饱和到完全干燥分十个等级，逐步烘干处理并充分混合。从而得到包括饱和状况下的 10 个水平的水分含量，其平均间隔为 $\theta = 0.1$ 。采用天平称量 θ 的变化。既然不允许间隙水的电导率并不随水分含量的变化而变化，但是蒸发损失是不可避免的。测量的 8 列 σ_p 值如表 1。每一个 θ 水平下，通过公式[16]计算的带有标准方差的 σ_p 平均值，如



表中最后两列所示。第 17 列为测量的间隙水的 σ_p 值。

土壤溶液 σ_p 的测量值和通过 ε'_b 和 σ_b 的计算值证明公式[16]（模型）是正确的。当 $\sigma_b=0$ 时， $\varepsilon'_{\sigma_b=0}$ 的值如第六列所示。

Table 1. Soil composition and validation results.

Soil	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Organic matter (%)	Offset $\varepsilon'_{\sigma_b=0}$ (-)	Conductivity of pore water, σ_p (mS.m ⁻¹)		
						Measured	Calculated	
							Average	Std. devn.
Glass beads	-	-	-	-	7.6	100	90	10
Rockwool	-	-	-	-	4.1	300	310	10
Groesbeek	10	70	20	0.95	2.7	250	200	10
Wichmond	14	31	55	4.3	1.9	100	110	5
Ferralsol-A	63	26	11	0	4.4	80	50	6
Munnikenland	40	56	3	5	5.8	310	290	20
Attapulgate	100	0	0	0	3.1	130	130	10

结论

采用同样的频率同时测量电介质常数的实部 ε'_b 和土壤的电导率 σ_b 近似成线性关系。电极形状、电极与土壤接触状况和土壤的成分都影响两者的测量值。一般情况下，当 $\theta > 0.10$ 时，上述关系适用于任何土壤。

因为 ε'_b 和 σ_b 线性相关，通过同时测量 ε'_b 和 σ_b 发现，间隙水离子电导率 σ_p 与土壤水分含量 θ 无关。接触状况对 σ_p 的影响很小。一般情况下，为了便于校准，可以取 $\varepsilon'_{\sigma_b=0}=4.1$ 。在这种情况下，不需要校准传感器的 σ_p 值。

注意：当为纯净的水溶液时，公式[16]将产生错误的结果（除非土壤参数设定为 0）。为了克服上述问题，当电介质常数非常接近于 0 时，HH2 改变了上述公式，简单的设定 $\sigma_p = \sigma_b$ 。



参考文献

1. Topp, G. C., J. L. Davis, A. P. Annan (1980). *Electromagnetic determination of soil water content*. *Water Resour. Res.* **16**(3) 574-582
2. Whalley, W. R. (1993). *Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil moisture content*. *Journal of Soil Sci.* **44**, 1-9
3. White, I., Knight, J. H., Zegelin, S. J., and Topp, G. C. (1994). *Comments on 'Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content' by W. R. Whalley*. *Journal of Soil Sci.* **45**, 503-508
4. Roth, C. H., Malicki, M. A., and Plagge, R. (1992). *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements*. *Journal of Soil Sci.* **43**, 1-13
5. Knight, J. H. (1992). *Sensitivity of Time Domain Reflectometry measurements to lateral variations in soil water content*
6. Dirksen, C., Dasberg, S. (1993). *Improved calibration of time domain reflectometry for soil water content measurements*. *Soil Science Society of America Journal*, **57**, 660-667.
7. Hilhorst, M. A., Balendonck, J., Kampers, F. W. H. (1993). *A broad-bandwidth mixed analog/digital integrated circuit for the measurement of complex impedances*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **28**, No. 7, 764-769.
8. Hilhorst, M. A. (1998). *Dielectric characterisation of soil*. Doctoral Thesis, ISBN 90-5485-810-9, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
9. Kaatze, U., Uhlenhof, V. (1981). *The dielectric properties of water at microwave frequencies*. *Zeitschrift für Phys. Chem., Neue Folge*, Bd. 126, 151-165.
10. Mualem, Y., Friedman, S. P. (1991). *Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil*. *Water Resources Research*, **27**, 2771-2777
11. Malicki, M. A., Walczak, R. T., Koch, S., Flühler, H. (1994). *Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR*. Proceedings: *Symposium on TDR in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, September 1994, held at Northwestern University, Evanston, Illinois, USA. Special Publication SP 19-94, US Department of Interior Bureau of Mines, 328-336
12. Nyfors, E., Vainikainen, P. (1989). *Industrial microwave sensors*. Artech House, Norwood, USA.
13. Rhoades, J. D., Shouse, P. J., Alves, W. J., Manteghi, N. A., Lesch, S. M. (1990). *Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates*, *Soil Science Society of America Journal*, **54**, 46-54.



术语定义

材料的电导率 (Electrical Conductivity, EC) 表示材料的导电能力。电极插入到材料中的本质的特性，比如一个性质被定义为一点的特性而与材料的多少无关（密度）。对于导电系数 (Electrical Conductance, G) 用来度量有一定尺寸的材料运送电荷的能力，与专门的测量装置有关，特别是长度 (L)，截面积 (A)。

电导率与导电系数的关系如下式所示：

$$EC = G \frac{L}{A} \\ = G \cdot C \quad (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$$

C 表示单位常数。

电导率的单位为西门子每米 ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)。该说明书采用 $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。其转换关系为：

$$1 \text{mS} \cdot \text{m}^{-1} = 0.01 \text{mS} \cdot \text{cm}^{-1} = 10 \mu \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$$

间隙水电导率 (ECp or σ_p) 是土壤间隙水的电导率值。其值与土壤间隙水中的离子浓度和温度有关。

总电导率 (Bulk Electrical Conductivity, ECb or σ_b) 是土壤的总电导率。与土壤间隙水电导率、土壤粒子的电导率、土壤水分含量和土壤成分有关。

饱和提取液 (Saturation Extract) 是从处于饱和状态的土壤得到的土壤水溶液。一般很难确定饱和水溶液的含盐量，通过添加过量的水得到饱和提取液（向 1L 土壤中添加 5L 水），然后调整读数。

土壤提取物 (Soil Extract) 是通过过滤、吸收或分离，从土壤中分离的溶液（不管土壤是否处于饱和或不饱和状态）。由于提取物与土壤间隙水显著的不同，将造成误差。

土壤含盐量 (Soil Salinity) 是指土壤中所有的可溶性盐的浓度。一般需要试验分析才可以直接确定土壤的含盐量，所以比较方便的方法是通过测量饱和溶液提取物 (Saturation Extract, ECse) 的电导率值进行确定。

土壤含盐量主要分成下述方法进行描述：

非盐碱化 (Non-saline)	0~200	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$
轻度盐碱化 (Slightly Saline)	200~400	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$
普通盐碱化 (Moderately Saline)	400~800	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$
高度盐碱化 (Strongly Saline)	800~1600	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$
极度盐碱化 (Extremely Saline)	> 1600	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$

土壤含水量 (Soil Water Content) 可以定义为体积含水量：

$$\theta = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{sample}}} \quad \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3},$$

或与土壤干物质有关的量

$$w = \frac{m_{\text{water}}}{m_{\text{sample}}} \quad \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$$

介电常数 (Permittivity, ϵ) 反应了材料对所采用电磁场极化影响的特性。通常表示成复数形式。 $\epsilon = \epsilon' - j$



澳作生态仪器有限公司

Instrumentation Consultancy Technologies

公司地址：北京市海淀区中关村东路 89 号·恒兴大厦 19B-24G

邮编：100080

ϵ'' ，其中实部 ϵ' 表示存贮的能量，虚部表示吸收或损失的总能量。两者与温度和频率有关。

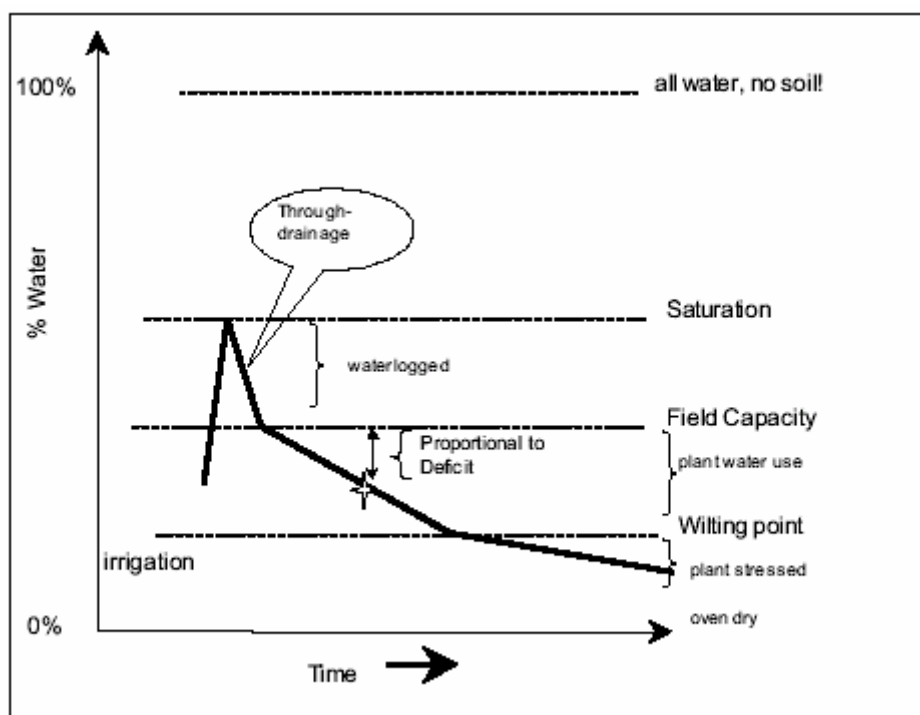
电介质特性通常表示为测量水分含量的平均值。在 25℃，20MHz 时，水的实际介电常数为~80。而土壤颗粒的介电常数为 3~8。

电介质（Dielectric）最好用作术语。比如“电介质材料”通常指相对高介电常数的绝缘材料。

电介质常数（Dielectric Constant）通常可以与介电常数（Permittivity）通用，但是在稳态（静止）磁场中采用介电常数（Permittivity）更合适。

饱和态（Saturation）是指土壤中所有的空气全部被水分取代时的土壤水分含量。该状态并不是稳定状态，水分会迅速的流走。仅是土壤的一种特性。

土壤水分容量（Field Water Capacity or Field Capacity）是指饱和含水量开始失水的时的水分含量（有时两天后，有时损失量可以忽略）。仅是土壤的一种特性，对于沙性土其典型的变化为 0.1，对于粘性土典型值为 $0.45\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ 。



枯萎点（Wilting Point，WP）是指作物不能够从土壤中吸收任何水分，开始枯萎时的土壤水分含量。一般情况下当基质势为-1500kPa 时，土壤的含水量，但实际含水量可能有较大的变化。该值是土壤类型和作物类型的一种性质。沙性土波动范围为 0.04，粘性土为 0.22。

干土（Dry）是指土壤水分含量为 0。

可用田间持水量（Available Water Capacity）是田间持水量与枯萎点的差值。

水分亏缺量（Water Deficit）是为使土壤剖面水分含量达到田间持水量所需的灌溉用水量或雨水量