

高胜国,翁海腾,朱忠礼. 探地雷达在监测地表土壤水分中的研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(12):1-6.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.12.001

探地雷达在监测地表土壤水分中的研究进展

高胜国¹,翁海腾²,朱忠礼²

(1. 北京师范大学资源学院,北京 100875; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院/遥感科学国家重点实验室,北京 100875)

摘要:探地雷达(ground penetrating radar,GPR)作为监测中小尺度或田块尺度地表土壤含水量的一种极有潜力的技术,在近几年来得到了快速的发展。在介绍探地雷达测量地表土壤含水量基本原理的基础上,总结探地雷达在地表土壤含水量监测中的应用进展,主要包括反射波法、地面波法和地表反射系数法。同时,结合国内外最新的研究成果,分析每种方法的特点,讨论每种方法的测量精度以及测量的代表深度。最后,对探地雷达在地表土壤含水量监测方面的应用进行展望。

关键词:探地雷达;土壤水分;反射波法;地面波法;地表反射系数法;测量深度;卫星遥感;地面验证数据

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)12-0001-05

土壤水作为水资源的重要组成部分,是陆地生态系统尤其是农田生态系统最重要的因素之一。掌握农田尺度土壤水分在空间上的分布,对于农田灌溉管理等农业生产实践活动意义重大。长期以来,对农田地表土壤含水量测定方法的研究一直被业内人士所重视。目前为止,国内外科研人员提出的土壤含水量测定方法多达几十种,比较传统的方法主要包括土钻取土称质量法、中子仪法、电容法、时域反射法(TDR)、频域反射仪(FDR)法等^[1-3]。虽然以上方法在探测精度上基本可以满足应用的需求,但它们只能探测小尺度的土壤含水量,准确地讲均属于单点测量。由于土壤含水量空间变异性很大,这几种方法难以直接得到土壤含水量在面上的分布数据,也不能反映土壤含水量在空间上的连续变化。如果要实施大面积土壤含水量的监测,这些技术需要大量的观测数据以满足一定的采样密度,而后空间插值,均耗时耗力。另外,这些方法均属于有损测量,测量的同时破坏了土层结构,难以实现重复测量^[4]。随着遥感技术的发展,应用遥感手段观测地表土壤含水量已广泛开展,并且已经取得了一些实质性的进展^[5],这使得区域尺度或大尺度土壤含水量实时动态监测成为可能。作为传统野外土壤含水量观测(点观测)和大尺度遥感观测的一种补充,探地雷达(GPR)是一种快速、无损测量技术,可以用来填补在中小尺度或是田块尺度上测量土壤含水量技术上的空白^[2]。大量的研究应用工作证明,探地雷达可以实现田块尺度上土壤含水量的观测,并且在保证原位测定精度的同时,快速、便捷地获取较大区域的土壤含水量信息,大大提高传统区域范围土壤含水量观测的工作效率,也为卫星遥感土壤监测提供地面验证数据。

1 探地雷达监测土壤水分理论基础

探地雷达是一种地球物理无损探测技术,从 20 世纪 70 年代开始逐渐被应用到水文和农业领域当中。从原理上来讲,探地雷达技术和地震波法、声纳法相似,由主机产生一定频率(1 MHz ~ 1 GHz)的电磁波,由发射天线向地下介质发射脉冲信号,然后由接收天线接收和处理回波信号,这样回波信号的双程传播时间、电磁场强度和波形等特征会反映脉冲信号所通过介质的电磁特性以及几何形态变化等特征^[6-7]。在探地雷达的回波信号中可以识别及利用的回波类型主要有空气直达波、地面直达波和反射回波 3 种(图 1)。空气直达波为发射天线发出的脉冲信号通过空气直接被接收天线所接收,由于电磁波在空气中衰减较小,因此该回波强度较大,在应用中可以用其代表发射脉冲信号的强度。地面直达波为在接触地表测量过程中,由发射天线端沿地表直线传播到接收天线端的脉冲信号,反射回波是接收到的介质中反射界面的反射波,利用这些回波可以分析传播介质的电磁特性。

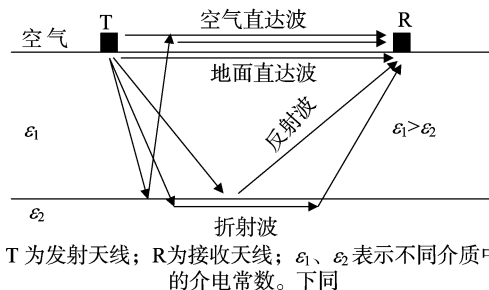


图1 探地雷达回波类型图示^[8]

利用探地雷达测量地表土壤含水量的主要理论基础可以概括为:(1)探地雷达信号传播速度或反射率可以反映土壤介电常数特征。(2)常温下,干土壤的相对介电常数是 4,空气的相对介电常数是 1,淡水的相对介电常数是 81,淡水的相对介电常数远大于空气和干土壤的相对介电常数,则土壤含水量可以对土壤的相对介电常数产生很大的影响,那么可以通过测定介电常数来反映土壤含水量^[9-11]。(3)在土壤含水

收稿日期:2016-03-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:41071225);国家自然科学基金重点项目(编号:91125002)。

作者简介:高胜国(1986—),男,山西忻州人,博士,研究方向为农业遥感。E-mail: cugbgaoshengguo@126.com。

通信作者:朱忠礼,博士,讲师,研究方向为遥感水文。E-mail: zhuzl@bnu.edu.cn。

量研究及应用领域最经典的土壤体积含水量(θ)和介电常数(ε)的关系是 Topp 等提出的 Topp 公式^[12]:

$$\theta = -0.053 + 0.029 3\varepsilon - 0.000 55\varepsilon^2 + 0.000 004 3\varepsilon^3. \quad (1)$$

2 探地雷达监测土壤含水量应用进展

按照天线端接收回波类型,将现阶段常用的探地雷达监测土壤含水量的方法分为反射波法、地面波法和地表反射系数法 3 种。

2.1 反射波法

反射波法是依据土壤介质中反射波的传播距离和双程走时来计算电磁波在土壤中的传播速度,进而确定土壤的相对介电常数,最后根据 Topp 公式确定土壤含水量^[13]。根据测量过程中发射天线和接收天线相对位置的差异,可以将这种方法分为固定天线距模式和变天线距模式。

2.1.1 固定天线距模式 固定天线距模式测量土壤含水量一般适用于土壤中有明显的反射界面,而且可以知道或估计反射界面的深度。测量过程中收发天线在一定的天线距下同向向同一方向移动,每次移动间隔进行 1 次测量,保证连续测量。

如图 2 所示,假设土壤中存在明显的反射面,反射层深度为 h ,以天线间距为 x 进行测量,测得的雷达回波的双程走时为 t ,这样可以计算得到雷达信号波在土壤中的平均传播速度 v :

$$v = \sqrt{h^2 + (x/2)^2} / t. \quad (2)$$

则土壤的相对介电常数 ε_r 可表达为:

$$\varepsilon_r = \frac{c^2}{v^2} = \frac{4c^2 t^2}{h^2 + x^2}. \quad (3)$$

Stoffregen 等基于此方法利用 1 GHz 天线测定蒸渗仪箱体中沙质土壤的含水量,经过对比验证,发现此方法测定的土壤体积含水量和蒸渗仪测量数据的标准差为 $0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[14]。Lunt 等利用此测量方法,并且利用试验站定标后的介电常数

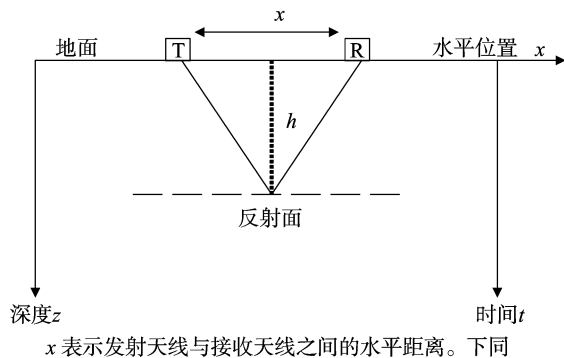


图2 固定天线距模式图示

和土壤体积含水量的关系计算得到 GPR 土壤体积含水量,同时和中子仪的测量结果相比较得到的均方根误差为 $0.018 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[15]。Shengguo 等比较了一定采样体积下, GPR 测量土壤含水量数据和称质量法的测量结果,得到均方根误差为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[16]。

固定天线距模式操作方便、计算简单,它得到的土壤相对介电常数为地面到反射面路径上的相对介电常数的平均值,因此该方法得到的土壤含水量可以代表测点周围的局部区域情况,这种方法的使用前提是反射层面存在且已知深度,如可以利用农田的犁底层作为反射面。

2.1.2 变天线距模式 在土壤层中存在连续反射面的情况下,可通过变天线距模式来估计土壤体积含水量,变天线距模式又可以分为共中心点模式(common - midpoint, CMP)和广角模式(wide angle reflection and refraction, WARR)。共中心点模式即雷达系统收发天线分离,测量时,收发天线分别向两边等距移动,在每次移动后进行数据获取,探测示意图如图 3-a 所示。广角测量模式也采用收发天线分离,测量时与共中心点测量相类似,只是其中的一个天线固定,另一个天线向一边等间距移动,其测量示意图如图 3-b。

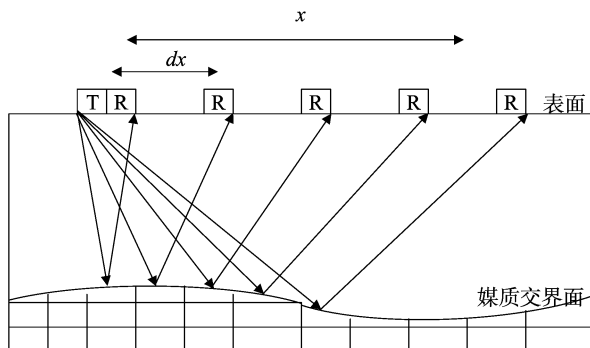
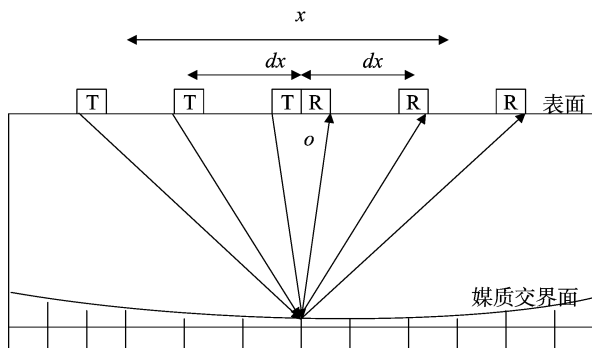


图3 共中心点模式与广角模式图示

假设 2 次测量中发射、接收天线的水平间距分别为 x_1 和 x_2 ($x_1 \neq x_2$), 测量相应的双程进行时间, 分别为 t_1 和 t_2 。土壤中电磁波速可表示为:

$$v = \sqrt{\frac{x_2^2 - x_1^2}{t_1^2 - t_0^2}}. \quad (4)$$

那么可以得到土壤媒质的相对介电常数为:

$$\varepsilon_r = \frac{c^2}{v^2} = \frac{c^2(t_1^2 - t_0^2)}{x_2^2 - x_1^2}. \quad (5)$$

Grote 等比较了称质量法和 CMP 法土壤含水量测量结果,发现 900 MHz 天线的数据结果和称质量法相关性(0.98)比 450 MHz 天线结果的线性相关性(0.92)强,并且它们都有

很小的均方根误差(分别为 0.017 、 $0.011 \text{ m}^3/\text{m}^3$)^[17]。此外, Huisman 等利用地面回波的斜率估计土壤体积含水量, 225 MHz 天线的精度为 $\pm 0.024 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 450 MHz 天线为 $\pm 0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[18]。

利用变天线距模式测量土壤含水量的优点是它不须要知道地下反射层的深度信息, 只须接收到雷达的反射数据即可, 但是这种方法也存在一些局限, 即它和固定天线距模式一样, 必须是在地下反射层存在的条件下才可以进行; 变天线距模式在每一个位置需要多次测量才可以估算土壤含水量; 在非均匀土壤介质中, 共中心点模式所得测量结果只能反映靠近共中心点的区域土壤含水量, 广角测量模式的测量结果反映靠近固定的天线附近区域土壤含水量^[19]。

2.2 地面波法

在雷达天线接触地面测量模式下, 地面波什发射脉冲在地面散射后剩余的一部分能量沿着土壤表层由发射天线传播到接收天线, 它可以反映表层土壤的电磁特性。这种方法在土壤下没有明显反射层的情况下, 仍然可以使用, 地面波的传播如图 1 所示。由于地面波具有能量容易耗散的特点, 为了使测量精度更高, 测量过程中须将接收天线和发射天线尽量紧挨土壤表层。在利用地面波估计土壤体积含水量时, 可以利用广角模式、共中心点模式和固定天线距模式 3 种测量模式, 其中广角模式(WARR)和共中心点模式(CMP)测量数据空间分辨率低而且在每个位置上测量所需时间较长, 固定天线距模式(FO)具有更高空间分辨率且节省测量时间, 更适合大区域土壤含水量快速监测。

Du 等提出了利用地面波法测量土壤体积含水量的程序: (1) 利用变天线距法估计不同的天线间距下地面波的传播时间; (2) 选择一个能够使地面波清晰的区别于空气波和反射波的天线间距; (3) 在这种天线距离下利用固定天线距法建立地面波传播时间和介电常数之间的关系^[8,20]。

在利用地面波测量地表土壤含水量过程中, 须要估算电磁脉冲在地表的传播时间, 因此地面波传播时间的精度对于准确估计土壤含水量非常重要。在地面波传播时间的估计中一般会有 $1 \sim 2 \text{ ns}$ 的误差, 其主要来源有: (1) 波的前缘难以被识别; (2) 零时刻的定标不一定准确; (3) 地面波传播距离的不确定。Galagedara 等中关于零时刻的定标如下: 假设在一定天线距离 $x(\text{m})$ 下, 计算得到的空气波传播时间为 t_{air} , 观测得到的空气波传播时间为 t_{aw} ^[21], 这样零时刻校准量 t_0 为:

$$t_0 = t_{\text{air}} - t_{\text{aw}} \quad (6)$$

假设观测得到地波的传播时间为 t_{gw} , 则校准后的地波传播时间 t_{ab} 为:

$$t_{\text{ab}} = t_{\text{gw}} - t_0 \quad (7)$$

地面波在地表土壤中传播的速度 v 可以表示为:

$$v = \frac{x}{t_{\text{ab}}} \quad (8)$$

土壤相对介电常数可以表达为:

$$\varepsilon_r = \frac{t_{\text{ab}}^2}{\frac{c^2}{x^2}} \quad (9)$$

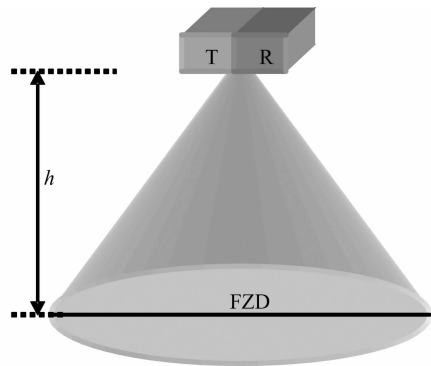
另外, Sperl 等通过公式推导直接给出了比较简单的介电常数和空气波、地面波传播时间之间的关系^[8]:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v} \right)^2 = \left[\frac{c(t_{\text{gw}} - t_{\text{aw}}) + x}{x} \right]^2 \quad (10)$$

Huisman 等利用 225 MHz 的天线以及固定天线距法中的地面波估计地表土壤含水量, 并且和 TDR 数据作对比, 指出 GPR 的误差为 $\pm 0.036 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[17]。Grote 等通过试验比较固定天线距法地面波估计的土壤含水量和称质量法估计的土壤含水量, 对于 900 MHz 的天线均方根误差为 $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[16], 对于 450 MHz 天线均方根误差为 $0.17 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 并且最大的误差出现在土壤非常干燥的情况下。Galagedara 等通过和 TDR 测量土壤含水量数据相比较, 指出 100 MHz 天线的地面波所估计的土壤含水量应该主要是地表 10 cm 以内的平均含水量, 并且用空气波进行零时刻定标比较精确, 这样得到土壤含水量误差在 $0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以内^[21]。另外, 探地雷达的天线频率和探测深度始终是 1 对矛盾关系, 天线频率越高, 探测深度越浅。但采用地面波法测定土壤含水量时, 由于测定的是土壤表层含水量, 不需要很深的探测深度, 所以应该优先采用较高的天线频率, 天线频率越高, 土壤含水量的测定精度相对越高。目前, 利用地面波法估计土壤含水量也存在如下缺陷: (1) 将地面波区别于回波中的反射波和折射波比较困难, 尤其是固定天线距法; (2) 难以确定合适的天线间距; (3) 由于地面波的衰减比较快, 这样就限制了天线分离距离的可变化范围^[22-23]。

2.3 地表反射系数法

地表反射系数法是将天线置于空气-土壤分界面上方(图 4), 每次测量可以估计雷达足迹范围内的土壤含水量。为了测量方便, 可以将天线架设在可移动装置或是低空飞行平台上实现区域内的快速覆盖。



T为发射天线; R为接收天线; h 为高度; FZD为雷达足迹

图4 反射系数法示意图

这种方法利用了空气-土壤分界面的振幅反射系数 R (R 可以表示为反射回波信号的振幅与理想完全反射面的反射回波信号振幅的比值), 这里的理想界面可以用比雷达足迹面积大的铁板来代替, 也可以利用空气直达波振幅代替铁板的回波信号振幅使用, 而振幅反射系数和土壤介电常数 $\varepsilon_{\text{soil}}$ 之间的关系可表示为^[24-25]:

$$R = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_{\text{soil}}}}{1 + \sqrt{\varepsilon_{\text{soil}}}} \quad (11)$$

如果应用空气直达波作为理想完全回波, 土壤介电常数可以利用反射波振幅和空气直达波振幅表示为^[25-26]:

$$\varepsilon_{\text{soil}} = \left(\frac{1 + A_r/A_m}{1 - A_r/A_m} \right)^2 \quad (12)$$

式中: A_r 为反射波振幅; A_m 为空气直达波振幅。由于回波信

号受直流偏移的或杂波的影响而难以消除,在一些研究中认为将回波中最大波峰值和最小波谷值之间的差定义为振幅 A

更为合理(图 5)^[8,27]。

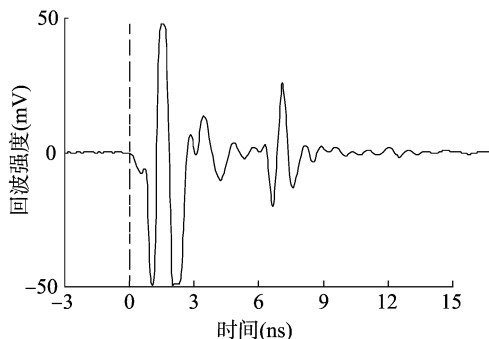


图5 振幅 A 的定义

利用此方法估计得到土壤相对介电常数后,同理可以根据 Topp 公式计算得到土壤体积含水量。Huisman 等指出,利用这种方法得到的地表土壤含水量和 0.20 m 长度探针的 TDR 数据非常相似,但土壤含水量测量结果在短距离上的差异非常大;同时分析了可能导致这种差异的 3 种解释:(1)土壤含水量随土层深度的变化会影响反射系数;(2)地表粗糙度会对反射系数产生影响;(3)振幅测量过程中存在误差^[26]。Redman 等又指出,现在的 GPR 设备对振幅的测量完全可以达到要求的精度,所以振幅的测量误差不是导致土壤含水量观测误差的主要原因,而地表粗糙度和土壤含水量廓线(也可以认为是探测深度问题)对反射系数的影响成为当前研究的重点^[27]。Weihermüller 等指出,面反射法所反映的地表土壤含水量空间上的差异要比实际小,最可能的原因是面反射法对表面的土壤更加敏感,而表层干燥土壤的相对均一分布会导致土壤含水量测量结果空间差异变小^[28]。Redman 等数字模拟土壤含水量的层状分布(上层干燥下层湿润、上层湿润下层干燥)对 GPR 测量的影响,结果表明,土壤含水量层状结构会严重影响探测到的含水量大小,并且表层的湿度会影响探测的深度^[25]。要应用面反射法检测区域土壤含水量,则须要严格考虑地表粗糙度、表层干燥土壤的影响。在植被覆盖区域,还须要考虑植被覆盖的影响。目前这种方法还没有被大量地实践应用。

3 探地雷达监测土壤含水量的代表深度

探地雷达监测地表土壤含水量所代表的深度一直是此应用研究的一个瓶颈,也是一个研究热点。在常用的几种方法中,反射波法所代表的深度由反射层的深度决定,目前大部分的研究是针对地面波法和地表反射系数法。探地雷达测量土壤含水量所代表的深度受土壤基质、土壤含水量廓线以及所使用的天线频率的影响,由于土壤基质及土壤含水量的空间异质性,探地雷达测量土壤含水量的深度仍处于数字模拟以及条件试验的探究阶段^[29-30]。Redman 等通过数字模拟的方法探究地表反射系数法探测的深度,指出土壤含水量的层状分布会严重影响反射系数法所测得的土壤含水量,须要进一步改进模型反映地表散射和采样体积内土壤含水量空间分布差异的影响^[25]。Galagedara 等通过试验的方法将灌溉过程中 GPR 地面波法得到的土壤含水量数据和 TDR 数据相比较发现,对于 100 MHz 的天线,GPR 所得到的土壤含水量数据和

探针长为 0.1 m 的 TDR 土壤含水量数据最接近,并且回归分析后没有明显的差异;对于 450 MHz 的天线而言,GPR 所测量的土壤含水量大于试验所使用几种长度 TDR 探针测量值,但是和最浅层(20 cm)的 TDR 测量值最接近^[21]。Galagedara 等通过 GPRMAX2D 软件模拟了在只有 2 个不同含水量土壤层的土壤剖面条件下地面波测量土壤含水量的试验,通过改变上层土壤层的厚度来测试 GPR 地面波的探测深度,结果表明 GPR 地面波在上层土壤干燥下层土壤湿润的模式下的探测深度比上层土壤湿润下层土壤干燥模式的探测深度大;GPR 地面波的探测深度和所使用频率呈负相关,并且给出了通过试验拟合的上层干燥下层湿润和上层湿润下层干燥 2 种模式下 GPR 探测深度和频率的线性方程,且具有很高的相关性;同时发现在 450 MHz 天线条件下,不同的电导率并没有对 GPR 地面波的探测深度产生明显的影响^[31]。Galagedara 等通过 GPR 数据和一系列探针长度的 TDR 数据作比较,指出在灌溉过程中,地面直达波的采样深度在距离地表 0.1 ~ 0.5 m 之间;在同一试验中还利用土壤湿润峰移动的理论来研究 GPR 在灌溉过程中的探测深度,并指出 450 MHz 天线在灌溉条件下的探测深度小于 0.56 m^[32]。Grote 等也通过试验的方法探究 250、500、1 000 MHz 的天线在沙土中的探测深度,试验结果表明,地面波的探测深度和使用的频率成正比,在湿润土壤中的探测深度要比干燥土壤小一些,但是探测深度对土壤湿度的依赖程度远比通过数字模拟预期的小;在该试验中探测的最小深度出现在利用 1 000 MHz 天线在湿润土壤中测量的情况下,深度为 12 cm,探测的最大深度出现在利用 250 MHz 在干燥土壤测量的情况下,深度为 30 cm^[33]。通过控制条件试验以及大量的农田试验给出探地雷达测量地表土壤含水量参考深度的可行途径。

4 总结与展望

理论研究和大量的应用实践表明,探地雷达(GPR)是测量区域土壤含水量的潜有力工具。现阶段基于探地雷达测量地表土壤含水量的方法中,反射波法是一种发展相对成熟且应用较多的方法。而在农业和水文领域地面波法的研究和应用更多,尤其在农田尺度上开展土壤含水量监测,因为地面波法不需要地下有明显的反射层作为辅助条件,地面波法比反射波法更容易推广使用。地表反射系数法测量地表土壤含水量的研究和应用还相对较少,但是这种方法具有更加独特的

优势。因为这种方法是和地表非接触测量,可以凭借地面移动装置或飞行平台更加容易实现区域土壤含水量监测,并且可以应用到地表有低矮植被覆盖的环境条件下,适合于混合下垫面的测量。同时,鉴于探地雷达地表反射系数法可以更加快速获取中小尺度区域土壤含水量空间数据,且地表反射系数法的机理和星(机)载主动微波遥感有相似之处,这种方法可以发展成为目前遥感反演土壤含水量的理想地面验证手段^[14,34]。

近几年来,探地雷达监测地表土壤含水量的研究应用工作取得了实质性的进展,但在农业、水文等领域的大范围应用推广仍有较大的改进空间,有多个技术瓶颈问题须要解决如地表粗糙度的影响,非均匀土壤介质条件下获取的土壤含水量所代表的深度、空间分辨率以及植被覆盖的影响等。另外,为了满足实际应用的需求,还须要在包括 Topp 公式在内的经验或半经验的 $\varepsilon - \theta$ 关系基础上,针对不同探地雷达天线频率、不同土壤基质等建立相应的经验或物理 $\varepsilon - \theta$ 关系模型^[35]。传统的小尺度(点测量)测量数据和探地雷达测量的土壤含水量数据之间,由于观测尺度的差异会导致明显的验证误差,因此也有必要设计更多的控制条件试验为 GPR 技术提供更加可信的验证途径。随着技术的不断进步、试验条件的改善以及国内外研究应用经验的不断积累,探地雷达可以成为中小尺度测量地表土壤含水量的一种更加有效的手段。

参考文献:

- [1] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:57-61.
- [2] Evett S R, Parkin G W. Advances in soil water content sensing[J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 986-991.
- [3] Topp G P. Measuring soil water content[J]. Encyclopedia of Hydrological Sciences, 2006, 5(2): 1077-1089.
- [4] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 358-389.
- [5] 仝兆远,张万昌. 土壤水分遥感监测的研究进展[J]. 水土保持通报, 2007, 27(4): 107-113.
- [6] 雷少刚,卞正富. 探地雷达测定土壤含水率研究综述[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1179-1183.
- [7] Schmalz B, Lennartz B. Analyses of soil water content variations and GPR attribute distributions[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(3/4): 217-226.
- [8] Sperl C. Determination of spatial and temporal variation of the soil water content in an agro-ecosystem with ground-penetrating radar[D]. Munich: Technische Universität München, 1999.
- [9] Benedetto A. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain[J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 71(1): 26-35.
- [10] 曾昭发,刘四新,王者江,等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006:36-49.
- [11] 栗毅,黄春林,雷文太. 探地雷达理论应用[M]. 北京:科学出版社,2006:23-29.
- [12] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.
- [13] Causse E, Senechal P. Model-based automatic dense velocity analysis of GPR field data for the estimation of soil properties[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2006, 3(2): 169-176.
- [14] Stoffregen H, Zenker T, Wessolek G. Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(3/4): 201-206.
- [15] Lunt I A, Hubbard S S, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1/2/3/4): 254-269.
- [16] Gao S G, Zhu Z L, Jiao Q S, et al. Application of GPR surface reflection method for estimating soil water content of bare soil[C]. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2012: 639-645.
- [17] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques[J]. Water Resources Research, 2003, 39(11): 1321.
- [18] Huisman J A, Sperl C, Bouten W, et al. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar[J]. Journal of Hydrology, 2001, 245(1/2/3/4): 48-58.
- [19] Huisman J A, Bouten W. Accuracy and reproducibility of measuring soil water content with the ground wave of ground penetrating radar[J]. Geophys, 2003, 8: 65-73.
- [20] Du S. Determination of water content in the subsurface with the ground wave of ground penetrating radar[D]. Munich: Ludwig Maximilians Universität, 1996.
- [21] Galagedara L W, Parkin G D. An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(18): 3615-3628.
- [22] 朱安宁,吉丽青. 基于探地雷达的土壤水分测定方法研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 1039-1044.
- [23] Oden C P, Olhoeft G R, Wright D L, et al. Measuring the electrical properties of soil using a calibrated ground-coupled GPR system[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 171-183.
- [24] Charlton M B. Principles of ground-penetrating radar for soil moisture assessment[M/OL]. 2008; [http://www. publication. mb-charlton. com/ResearchNote. html](http://www.publication.mb-charlton.com/ResearchNote.html).
- [25] Redman D G L, Parkin G. Measuring soil water content with the ground penetrating radar surface reflectivity method: effects of spatial variability[J]. ASAE Meeting Paper NO. 032276, 2003.
- [26] Lambot S, Weiermüller L, Huisman J A, et al. Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content[J]. Water Resources Research, 2006, 42(11): 2526-2528.
- [27] Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: a review[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 476-491.
- [28] Weiermueller L, Huisman J A, Lambot S, et al. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques[J]. Journal of Hydrology, 2007, 340(3/4): 205-216.
- [29] Redman J D, Davis J L, Galagedara L W, et al. Field studies of GPR air launched surface reflectivity measurements of soil water content[C]. Ninth International Conference on Ground Penetrating

李文明, 辛建攀, 魏驰宇, 等. 植物抗寒性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 6-11.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.12.002

植物抗寒性研究进展

李文明¹, 辛建攀¹, 魏驰宇², 田如男¹

(1. 南京林业大学风景园林学院, 江苏南京 210037; 2. 南京市金陵中学, 江苏南京 210005)

摘要:低温不仅影响植物的生长和分布, 严重时还会导致植物死亡。因此, 研究植物抗寒性具有非常重要的意义。根据国内外植物抗寒性研究现状对低温胁迫对植物显微结构和超微结构的影响、生理生化指标的变化、抗寒相关基因的研究、外源生长调节剂对植物抗寒性的调控作用以及植物抗寒性鉴定方法进行综述, 并提出植物抗寒性的研究重点及应重视的研究对象, 旨在为植物抗寒性研究提供理论参考。

关键词:低温胁迫; 抗寒性; 解剖结构; 超微结构; 生理生化; 抗寒基因; 鉴定方法

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)12-0006-06

低温是一种常见的影响植物地理分布、生长发育和品质产量的非生物胁迫因素, 严重时会导致植物死亡。近年来, 低温伤害造成了巨大的经济损失, 整个农林业面临着严峻的挑战, 对植物抗寒性提出更高要求^[1]。本文从低温胁迫对植物外部形态、显微结构、超微结构的影响, 生理生化指标的变化, 抗寒相关基因的研究, 外源生长调节剂对植物抗寒性的调控作用以及植物抗寒性鉴定方法等方面进行综述, 旨在为植物抗寒性研究提供理论参考。

1 形态结构和微观结构与抗寒性的关系

有关研究发现, 抗寒性强的植物具有相应结构(叶片的气孔密度小、角质层和上下表皮厚, 叶肉细胞排列紧密, 叶脉中的导管发达, 具有更大的叶片厚度、组织结构紧密度、栅栏组织厚度、栅栏组织/海绵组织, 木质部所占比例较大, 皮层所占比例较小)来适应低温环境^[2-4]。谢晓金等研究了常绿阔叶树种的形态结构与抗寒性之间的关系, 认为具有鳞芽(或

冬芽)与苞片的常绿阔叶植物抗寒性较强^[5]。武军艳等通过研究北方旱寒区冬油菜的根冠比与抗寒性之间关系发现, 根冠比大的冬油菜抗寒性强^[6]。这些方法简单而又直接, 但需要一定的经验。

植物受到低温胁迫时, 通过改变相应结构来应对低温伤害^[7-8], 如气孔器减小、气孔呈关闭或半关闭状态、气孔器与气孔的长度和宽度减小, 可能是通过这些方式来降低光合速率和呼吸速率, 减少与外界环境之间的 O₂、CO₂、H₂O 的交换, 降低能量消耗, 增强对低温环境的适应性。植物受到低温胁迫后, 外部形态发生显而易见的变化, 根据叶片受冻害程度、枝条萎蔫程度和干枯程度以及在适宜生长条件下恢复生长的状况等来鉴定植物抗寒性^[9-10], 还可以根据枝条中木质部、韧皮部和髓的褐变程度来鉴定植物抗寒性, 褐变程度越小, 植物抗寒性越强^[11]。

植物花器官对低温非常敏感, 很容易受到损伤。钟海霞等通过研究低温胁迫下野扁桃和栽培扁桃花原基的解剖结构发现, 抗寒性强的品种在胚珠和花药原基的细胞间隙、细胞大小以及厚度等方面极显著大于抗寒性弱的品种; 随着低温胁迫的加剧, 扁桃的胚珠细胞和花药原基细胞变大、排列变疏松、间隙增大, 抗寒性降低, 但抗寒性强的品种较抗寒性弱的品种变化小^[12]。

低温胁迫不仅影响植物外部形态和内部组织器官结构, 而且会引起植物细胞超微结构发生不可逆的变化^[13-15], 如液泡中囊泡数量增加、内含物含量上升, 严重时导致液泡膜破裂解体, 产生许多小泡; 叶绿体由原来扁球状变为圆球形, 膜结

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家林业局“948”项目(编号: 2012-4-33); 江苏高校品牌专业建设工程项目(编号: PPZY2015A063)。

作者简介: 李文明(1990—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为园林植物生理生态。E-mail: 1522253127@qq.com。

通信作者: 田如男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为园林植物种质资源、应用、生理生态、繁殖与栽培。E-mail: beike0607@aliyun.com。

Radar, 2002, 156-161.

[30] Cosenza P, Marmet E, Rejiba F, et al. Correlations between geotechnical and electrical data: a case study at Garchy in France [J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 60(3/4): 165-178.

[31] Galagedara L W, Parkin G W, Redman J D, et al. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(14): 182-197.

[32] Galagedara L W, Redman J D, Parkin G W, et al. Numerical modeling of GPR to determine the direct ground wave sampling depth [J].

Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1096-1106.

[33] Grote K, Crist T, Nickel C. Experimental estimation of the GPR groundwave sampling depth [J]. Water Resources Research, 2010, 46(10): 103-112.

[34] Bian Z F, Lei S G, Inyang H I, et al. Integrated method of RS and GPR for monitoring the changes in the soil moisture and groundwater environment due to underground coal mining [J]. Environmental Geology, 2009, 57(1): 131-142.

[35] 何亮, 王旭东, 杨放. 探地雷达测定土壤含水量的研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1673-1679.