

基于低频探地雷达的土壤累积入渗量的探测方法研究*

王瑞燕^{1, 2} 尹 涛² 胡盈盈² 高 鹏² 赵庚星^{1, 2} 陈红艳^{1, 2}

(1 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018)

(2 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘 要 农田尺度上土壤累积入渗量的准确获取是目前土壤入渗研究中的难题。通过土工模拟和灌水实验, 探讨利用低频探地雷达(GPR)技术探测土壤累积入渗量的方法。在分析灌水前后GPR剖面特征的基础上, 分别构建和对比了基于波速法和振幅法的土壤累积入渗量计算模型。结果表明, 基于振幅的探测模型在精度和稳定性方面均优于波速法, 反射波振幅模型精度高于地面波模型, 利用反射波波谷1构建的累积入渗量的GPR探测模型的决定系数达到0.96。因此, 使用低频探地雷达可以实现对土壤累积入渗量的准确探测。研究结果为农田尺度上土壤累积入渗量的探测方法提供了一种新思路, 同时, 也为GPR在土壤学领域中的进一步应用提供了科学依据。

关键词 低频探地雷达(GPR); 土壤累积入渗量; 无损探测

中图分类号 P426.68 **文献标识码** A

土壤入渗一般是指水自土表垂直向下进入土壤的过程, 是水文循环的重要环节, 它决定着降水或灌溉水进入土壤的数量^[1-2]。累积入渗量是降水或灌溉过程中的土壤入渗总量, 即地表水转化为土壤水的总量, 田间灌溉量的设计, 盐渍土洗盐量的控制等均关系到土壤累积入渗量的计算^[3], 是重要的土壤入渗参数之一。传统测量土壤入渗量的方法主要包括双环法、圆盘入渗仪法、人工降雨法、降雨入流积水法、降雨入流产流法和线源入流测量方法等, 但这些方法在野外使用时, 存在耗费体力和时间较多、需水量大且空间连续测量困难等弊端^[4-8], 亟待研究能在一定的空间范围内快速连续测定土壤累积入渗量的方法。

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是用高频无线电波来确定介质内部物质分布规律的一种探测方法^[9-10]。由于GPR具有对液态水的敏感性, 近二十年的研究表明, GPR特别适合于监测

近地面土壤含水量的变化^[11], 因此, GPR能对研究土壤入渗过程提供一种非破坏性的监测手段^[12]。许多学者在探地雷达监测土壤入渗方面做了很多富有价值的研究。Saintenoy等^[13]通过在沙子中进行地下渗灌实验, 利用GPR记录的剖面图, 分析监测了水分湿润区的上下界线。Mangel等^[14]使用多补偿GPR, 通过往沙箱中注水实验分析水文足迹。Léger等^[15]基于高频GPR雷达天线记录的水分入渗过程中湿润锋反射波的旅行时间为特定土壤计算了一整套水力参数。这些研究大多是利用高频GPR图像的剖面特征分析土壤水在低耗介质中的扩散范围, 有关土壤入渗累积量的GPR定量探测研究较少, 尤其是在有耗介质土壤中的研究更是少见。土壤入渗量本质上是由于地表水下渗导致的土壤含水量的增加, 有关土壤含水量的GPR探测, 目前的GPR技术是通过获取电磁波在土壤中的运行时间、波速等信息来估计土壤的介电常数, 进而利用土壤

* 国家自然科学基金项目(41401239)、山东省重点研发计划(2015GNC110010)、山东农业大学青年教师成长计划经费和青年创新基金(23694)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41401239), the Key Research and Development Project of Shandong Province (No. 2015GNC110010), the Cultivate Plan Funds for Young Teacher and the Science and Technology Innovation Foundation for Youth of Shandong Agricultural University (No.23694)

作者简介: 王瑞燕(1979—), 女, 博士, 主要研究方向为土壤水的探地雷达反演。E-mail: wry@sdau.edu.cn

收稿日期: 2017-01-04; 收到修改稿日期: 2017-02-28; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-03-17

介电常数和土壤含水量的经验公式或半理论关系式如Topp公式等来计算土壤的含水量^[16-19]。目前,土壤含水量GPR探测是针对稳态条件下土壤中的含水量,多是采用波速法。而土壤入渗却蕴含着土壤水的运动,这是与传统土壤含水量GPR探测不同的地方。此外,目前研究结果表明,在估测土壤表层0~20cm含水量时,高频探地雷达精度高于低频雷达^[20-21]。但是,当有效降水进入土壤后,土壤水开始向下入渗并进行分配,土壤水分入渗不局限于土壤表层,因此土壤累积入渗量探测时,需要使用低频雷达。鉴于土壤入渗的上述特点,目前适用于探测土壤表层含水量的波速法能否运用于低频GPR对土壤累积入渗量的探测尚未可知,需要进行实验和探索。因此,本文通过模拟灌水实验,获取GPR数据,在分析累积入渗量的GPR剖面特征基础上,探索适用于低频GPR的准确反演土壤累积入渗量模型的构建方法,为低频GPR在土壤入渗参数的获取方面提供方法支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验在山东省泰安市山东农业大学资源与环境学院实验站(36°18'N, 117°12'E)进行。试验区的土壤类型为棕壤,质地为黏壤土,在试验站内采集耕层(0~60 cm)土壤240 kg,混合均匀,将供试土壤全部风干,过5mm筛备用。混合后的土壤的基本理化性状为:全氮0.51 g kg⁻¹,有机质10.1 g kg⁻¹,碱解氮46.3 mg kg⁻¹,有效磷22.5 mg kg⁻¹,速效钾57.8 mg kg⁻¹,pH 7.27。黏粒15.3%,粉粒44.7%,砂粒40.0%。

采用木制土槽进行室内试验。低频雷达的探测深度较深(>10m),但考虑到模拟实验的土工量、作物的根系活动层深度,将土槽尺寸设计为:长(200 cm)×宽(100 cm)×高(100 cm)。为了模拟土壤分层特性,将模型设计为两层:土体模型高90cm,箱体底部铺设厚度为16cm的湿土层,土壤湿度为32%。其上覆盖74cm的自然风干土,土壤湿度为3.1%。箱底下面为水泥地,将其作为计算波速的反射界面。分层填装试验土壤,将每层土壤放入土槽内并整平,压实到设计厚度并将装好的土层用工具打毛,再装入上一层土壤。覆土结束后静置24h后在其表面进行模拟降水的灌水实

验,为了研究累积入渗量,湿润土层深度小于干土层。灌水使用去离子水,喷洒方式,均匀喷洒,按1.65L的增量(换算为土壤体积含水量为0.21%)多次灌水,共构成0、1.65、3.3和4.95L四个灌水梯度,灌水后自下而上形成湿土、干土和湿土三层土体模型,每次灌水结束后,静置,等土面看不到明水后,进行GPR扫描,扫描结束后,测量土壤入渗层深度。

1.2 GPR数据采集及图像预处理

GPR数据采集系统为加拿大Pulse-EKKO低频探地雷达,频率为250 MHz,介质参数设置为壤土,采样间隔0.6 ns。考虑到农田尺度上的应用,GPR采集采用固定间距法。采样时窗根据下列公式计算:

$$W = 1.3 \frac{2 \times D}{V} \quad (1)$$

式中, D 表示预期能达到的探测深度,m; V 为土壤介质中的平均雷达波速度,m ns⁻¹; W 为采样时间窗,ns。

实验中,探测深度为1m;随着土壤入渗过程的进行,土壤含水量增加,土壤介质的平均雷达波速度在变化,根据从干土到最后灌溉实验结束时对应的雷达波速和TOPP模型,得出波速变化范围为1.66 m ns⁻¹~1.18 m ns⁻¹,对应的时窗分别为2.2 m和1.57 m。

为了验证探测模型精度,每次灌水结束后,分别采用2.2 m和1.57 m两个时窗进行扫描,共获得两组试验样本,每组4个样本,除含水量外每组控制变量属性均相同。

调整好雷达波的起点后,雷达的发射天线和接收天线以固定间距沿测线同步移动,为了避免周围容器壁的反射所造成的影响,测线尽量沿模型的中间缓慢前进。系统自动记录和存储数据,每次探测操作重复三次。土工实验结束后,选用GPR随机的EKKO-View和EKKO-View Deluxe软件进行去直流漂移、静校正、增益等雷达数据预处理。

1.3 基于波速法的累积入渗量估算

GPR剖面特征显示,随着土壤入渗量的增加,水泥反射界面以上的土体介电常数增加,波速降低,参考目前常用的估算土壤体积含水量的Topp模型,构建土壤累积入渗量与介电常数的关系模型如下:

$$g=f(\varepsilon) \quad (2)$$

式中, g 为土壤累积入渗量; ε 为介电常数。

对于大多数的低耗土壤, 介质介电常数 ε 可由下式给出:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (3)$$

式中, c 为电磁波在空气中的传播速度, 值为 $3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ 。 v 为电磁波在从地面到水泥反射面的传播速度 (m ns^{-1})。

在已知水泥反射介质深度 h (m) 的情况下, 根据电磁波传播理论, 可以得到电磁波传播速度 v (m ns^{-1}):

$$v = \frac{2h}{t} \quad (4)$$

式中, t 为雷达波从地面到水泥反射面的走时 (ns), h 为水泥界面距地面的深度 (m);

1.4 基于振幅的土壤累积入渗量的探测方法

雷达波在传播过程中, 遇到不同电性介质界面时, 电磁波会发生反射, 经由雷达接收天线接收并记录下来, 电性差异越大, 振幅的变化也会越大。随着土壤累积入渗量的增大, 雷达回波振幅随之发生变化, 根据这一现象, 本文选择地面波和反射波的波峰振幅、波谷振幅以及波峰与波谷的距离等几个振幅参量考察振幅与土壤累积入渗量的关系, 其中波峰到波谷的距离示意图如图1所示。首先对振幅参量与土壤累积入渗量进行相关分析, 然后通过相关系数选择对土壤累积入渗量敏感的回波振幅参量, 最后根据统计分析拟合两者的关系, 构建土壤

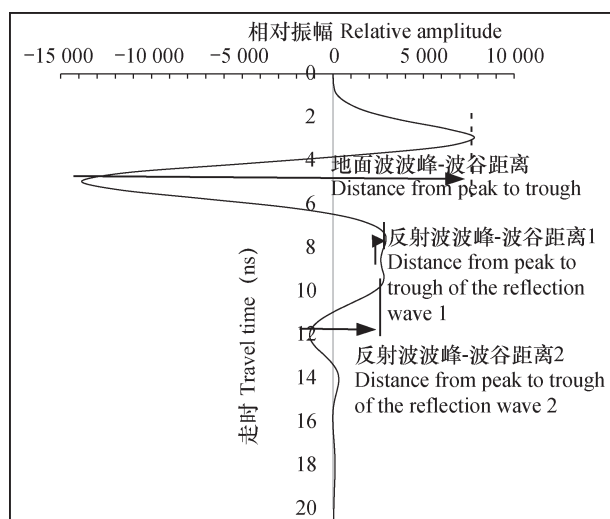


图1 电磁波波峰到波谷的距离示意图

Fig. 1 Distance from peak to trough of electromagnetic wave

累积入渗量的振幅探测模型。

1.5 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2013计算探地雷达平均走时和振幅, 绘制GPR剖面图, 并进行建模和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤入渗的GPR剖面特征

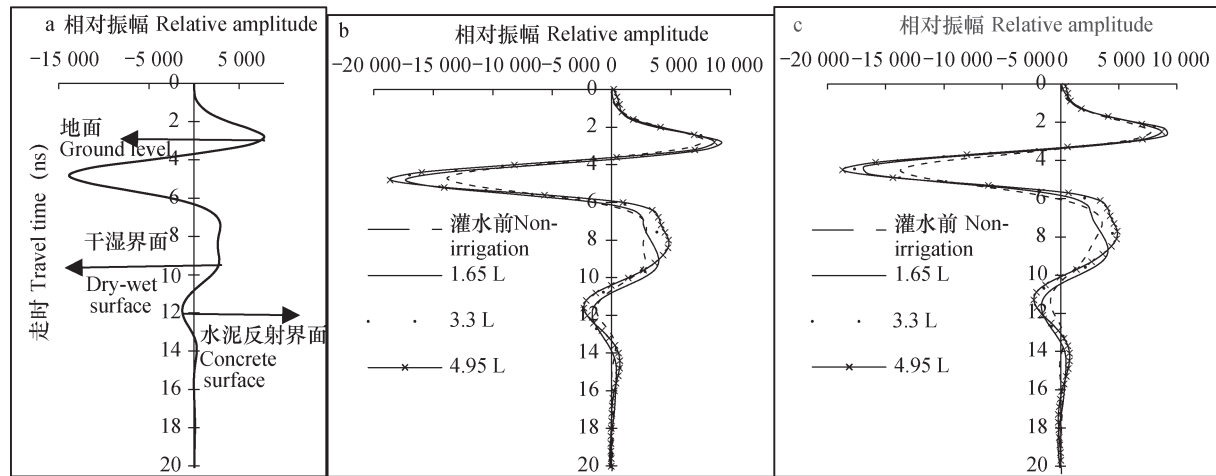
为了消除箱壁和土壤间隙引起的优先流对测量结果的影响以及模型箱壁对雷达波的干扰, 将预处理后的雷达数据去除左右各5道雷达数据后取均值作为每个样点的GPR剖面, 灌水前后的GPR剖面如图2所示。

灌水前GPR剖面图显示, 低频雷达振幅较强, 地面直达波的波谷值接近15 000, 随着雷达波向下传播, 能量逐渐衰减, 20 ns之后能量很弱。在约10 ns处形成明显的波形跳动, 这个层次对应土体中的干湿界面。水泥界面在12 ns附近。两种时窗的波形有所差异, 但振幅的基本规律维持不变。

不同灌水量的GPR剖面图显示, 随着灌水量的递增, 地面波振幅增加。灌水后干湿界面形成的反射波的相位相比于灌水前上移, 随着灌水量的增加, 界面也随之向上移动, 这是由于灌水后, 土壤表层湿润, 与下面的干土层构成了一个新的层面即湿-干界面, 在该界面上电磁波也会产生反射, 该反射波与下层的干湿界面的反射波叠加, 从而造成干湿界面反射波的上移, 随着灌水量的增多, 湿-干界面的反射增强, 因此干湿界面逐渐上移, 同时振幅逐渐增大。在2.2 m时窗下, 灌水量为1.65 L时, 水泥界面的走时有微量增加, 但当灌水量增加至3.3 L和4.95 L时, 水泥界面的走时不增反降, 1.57 m时窗情形与之类似。水泥界面的振幅变化较为明显, 波谷值和波峰值随着灌水量的增多而增大, 这是由于随着灌水量的增大, 水泥界面上方的含水量增大, 介电常数增大, 波速变慢, 走时增加, 界面下移, 但是在其上方干湿界面上移带动下, 水泥界面也随之上移, 电磁波走时减少, 随着灌水量的增加, 干湿界面上移幅度超过了波速的降低程度, 因此水泥界面产生小幅上移。

2.2 基于波速法的累积入渗量的探测精度

采用波速法计算2.2 m时窗和1.57 m时窗的累积入渗量对应的介电常数, 并拟合两者关系, 结果



注: a.灌水前2.2 m时窗剖面, b.灌水后2.2 m时窗剖面, c.灌水后1.57 m时窗剖面

Note: a. the GPR profile of 2.2 m time window before irrigation, b. the GPR profile of 2.2 m time window after irrigation, c. the GPR profile of 1.57 m time window after irrigation

图2 灌水前后雷达剖面图

Fig. 2 GPR profiles of the soil before and after irrigation

表1 不同时窗情况下与土壤累积入渗量对应的GPR走时、速度、介电常数及其决定系数

Table 1 GPR travel time, velocity, dielectric constant and determination coefficient corresponding to soil cumulative infiltration relative to time window

时窗 Time window	累积入渗量 Cumulative infiltration (L)	走时 Travel time (ns)	速度 Velocity (m ns^{-1})	介电常数 Dielectric constant	决定系数 Determination coefficient R^2
2.2 m	0	11.9	0.198	2.300	0.820
	1.65	11.95	0.197	2.326	
	3.3	11.8	0.200	2.250	
	4.95	11.7	0.202	2.200	
1.57 m	0	11.3	0.205	2.151	0.1
	1.65	11.9	0.191	2.454	
	3.3	11.5	0.200	2.250	
	4.95	11.3	0.205	2.151	
总样本 Total samples	—	—	—	—	0.119

如表1所示, 两种时窗合并后得到的总样本的拟合关系如图3所示。

从表中可以看出, 累积入渗量增大后, 介电常数与累积入渗量并没有构成对应的递增关系, 两者的关系依赖时窗设置, 不同时窗的决定系数差异较大, 两种时窗合并后形成的总样本的相关系数低, 说明该模型的精度低、稳定性差, 不能准确反映土壤累积入渗量。

2.3 基于振幅法的土壤累积入渗量的探测精度

地面波和反射波的振幅与土壤累积入渗量的对应关系和相关性最高的决定系数如表2和表3所示, 其中 Pd 表示地面波波峰, $Pr1$ 表示反射波波峰1, $Pr2$ 表示反射波波峰2, Gd 表示地面波波谷, $Gr1$ 表示反射波波谷1, $Gr2$ 表示反射波波谷2。 A_d 表示地面波波峰到波谷的距离, A_{r1} 表示反射波波峰到波谷的距离1, A_{r2} 表示反射波波峰到波谷的距离2。

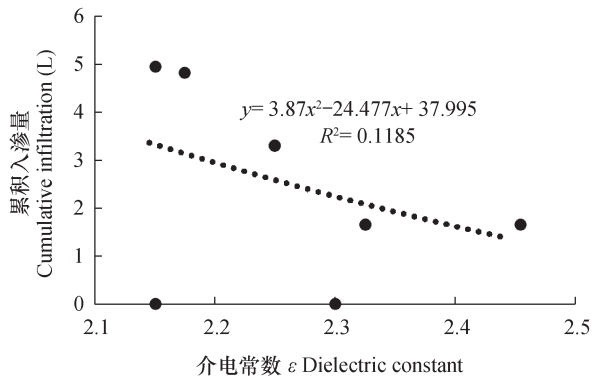


图3 介电常数与土壤累积入渗量的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of dielectric constant and soil cumulative infiltration

从表中可以看出，不同的时窗设置下，两者的相关系数略有差异，但两者的总体规律不变，相关系数低的，在分时窗及总样本中的相关系数均低，反之，均高，三种情况下，与累积入渗量相关性高的GPR电磁波的振幅主要包括：反射波波谷1 > 反射波波谷2 > 地面波波谷，说明电磁波波谷对土壤累积入渗量变化响应最为剧烈，三个振幅中以反射波波谷1的相关性最高，在三种情况下决定系数均在0.96以上，其次是反射波波谷2，这三个参量与累积入渗量的总样本拟合关系见图4。

通过比较决定系数的高低，选择反射波波谷1的振幅作为累积入渗量的建模变量，两者的拟合关

表2 不同累积入渗量对应的地面波和反射波的振幅

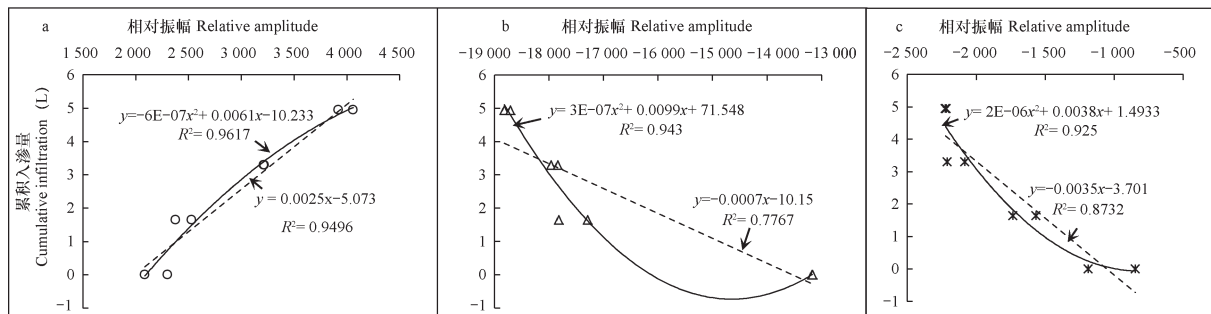
Table 2 Amplitudes of ground wave and reflection wave relative to soil cumulative infiltration

累积入渗量 Cumulative infiltration	Pd	Gd	A_d	$Pr1$	$Gr1$	A_{r1}	$Pr2$	$Gr2$	A_{r2}
0	7.470×10^3	-1.317×10^4	2.064×10^4	3.038×10^3	2.086×10^3	9.523×10^3	2.489×10^3	-1.189×10^3	3.677×10^3
1.65	9.439×10^3	-1.782×10^4	2.726×10^4	2.589×10^3	2.528×10^3	6.067	3.836×10^3	-1.567×10^3	5.403×10^3
3.3	8.563×10^3	-1.783×10^4	2.640×10^4	3.295×10^3	3.220×10^3	7.500	3.909×10^3	-2.083×10^3	5.991×10^3
4.95	8.916×10^3	-1.871×10^4	2.762×10^4	3.903×10^3	3.917×10^3	-1.400	4.527×10^3	-2.224×10^3	6.752×10^3

表3 不同时窗及总样本情况下累积入渗量与GPR振幅的决定系数

Table 3 Determination coefficient of cumulative infiltration (R^2) and GPR amplitude relative to time windows and total samples

样本Sample	Pd	Gd	A_d	$Pr1$	$Gr1$	A_{r1}	$Pr2$	$Gr2$	A_{r2}
1.57 m时窗1.57 m time window	0.823	0.965	0.940	0.854	0.986	0.917	0.929	0.999	0.968
2.2 m时窗2.2 m time window	0.602	0.920	0.857	0.913	0.999	0.919	0.925	0.981	0.983
总样本Total samples	0.701	0.943	0.896	0.812	0.962	0.890	0.866	0.925	0.917



注：a.反射波1波谷；b.地面波波谷；c.反射波2波谷 Note: a. the reflection wave 1, b. the ground direct wave, c. the reflection wave 2

图4 波谷振幅与累积入渗量的总样本拟合关系

Fig. 4 Fitting relationship between trough amplitude and total of the soil cumulative infiltration samples

系如下式所示:

$$\Delta W = -6 \times 10^{-7} A_{r1}^2 + 0.0061 A_{r1} - 10.233 \quad (R^2 = 0.962) \quad (5)$$

式中, ΔW 为累积入渗量(L); A_{r1} 为反射波波谷1振幅

3 讨论

相比于波速法, 基于振幅法的估测模型可以更准确地估测土壤累积入渗量。这与目前土壤含水量的GPR探测研究结果有所不同, Wijewardana等^[22]用带有200 MHz天线的GPR系统(脉冲EKKO Pro)测定菜园土壤(质地类型为砂质黏壤土)0.1m深范围内土壤水分含量, 采用波速法构建的介电常数与土壤含水量的模型的决定系数为0.754。Weihermüller等^[21]使用450MHz天线的GPR系统对德国莱茵省南部农田土壤(粉砂质黏壤土)1m深范围内土壤含水量探测实验表明, 采用波速法构建的介电常数与土壤含水量的模型的决定系数为0.79。周立刚等^[20]分别采用1GHz和2GHz频率的GPR系统探测土壤模型箱中厚度为0.25m的粉砂质黏壤土的土壤水分含量, 采用波速法构建的两种雷达频率的介电常数与土壤含水量的模型的决定系数分别为0.94和与0.97。而本文采用250MHz的探地雷达, 通过波速法构建的土壤累积入渗量的探测模型的决定系数却只有0.119, 因此, 虽然波速法可以用于土壤含水量的探测, 但其用于低频雷达探测土壤累积入渗量却不理想。分析其原因, 土壤累积入渗量的变化, 对土壤的GPR电磁波的影响体现在两个方面: 一是在土壤剖面的表层形成了湿干界面, 二是增加了土壤含水量。GPR介电常数与土壤体积含水量关系最为密切, 但是当探测的土壤体积较大时, 入渗量的增量对提升土壤体积含水量作用微弱, 本文中入渗量的增量为1.65L, 换算为整个实验土体中的土壤体积含水量的增量约为0.2%, 这样小的增量, 对介电常数的贡献是微弱的, 因此, 要想准确计算土壤累积入渗量, 必须准确获取介电常数, 然而, 由于低频雷达的空间分辨率低, 无法获取准确和稳定的波速, 因此波速法构建的累积入渗量模型精度较低, 此外, 波速法模型的精度与采样时窗设置密切相关, 随着土壤累积入渗量的变化, 采样时窗需要随之调整, 这样无疑增加了操作的难度和不确定性。但是由于低频雷达具

有高能特性, 振幅对累积入渗量变化响应敏感, 且与采样时窗的设置无关, 模型的稳定性高, 构建的模型优于波速法, 因此, 在使用低频雷达探测土壤累积入渗量时应使用基于振幅的模型。

在振幅法建模中, 基于反射波的建模精度要高于地面波的精度。分析其原因, 地面波是由发射天线横向传输到接收天线, 它对空气和土壤界面的含水量敏感, 而天线接收的反射回波是来自土体中, 土体中形成的湿润锋面由于介质干湿度的强烈差异会造成很强的回波能量, 而土壤表层含水量的变化相对缓和, 因此反射波对土壤累积入渗量较地面波更敏感。第二个原因可能是浅反射对地面波的干涉, 在土壤灌水试验中, 当灌水量较少时, 会在土壤表层形成一个湿土薄层, 由于该薄层与下方干土的介电常数的差异较大, 从而对电磁波形成强反射, 该回波信号与地面波叠加, 从而对地面波产生影响。这与前人的研究结论一致, Huisman等^[23]通过在3 600 m²的农田土壤中(质地类型为砂壤土)进行灌溉实验发现, 利用225 MHz天线和地波方法估计土壤表层体积含水量时被高估, 他认为浅表层反射是造成这一现象的原因之一。

本文所提方法的适宜性可能会受到计划湿润层中的土壤初始含水量的影响。本实验是利用风干土构建的土体模型, 因此会在土壤表层湿润后, 形成明显的湿干界面, 从而会有振幅的强烈响应, 但是, 如果在土壤初始湿度较大的情况下进行灌水, 这时, 湿润后形成的湿干界面不明显, 反射波的振幅变动可能不会对累积入渗量产生显著响应, 因此该模型的使用具有一定的局限性, 它适用于土壤初始含水量较小的情况。当然, 在农田灌溉管理实践中, 只有在耕层土壤缺水时才进行灌溉, 这时灌溉, 会形成明显的湿干界面, 因此, 模型还是具有较强的实践应用性。

4 结论

使用低频探地雷达可以实现对土壤累积入渗量的定量探测, 基于振幅的探测模型在精度和稳定性方面均优于波速法。两个采样时窗下的波速法和建模法的累积入渗量的精度分析结果表明, 振幅法对入渗的湿润界面具有明显的反射能量变化, 因此, 对累积入渗量的响应更加敏感和明显, 波速法依赖于时窗和土壤体积含水量。因此, 在使用低频雷达

探测土壤累积入渗量时应使用基于振幅的模型。就地面波和反射波而言，反射波对土壤累积入渗量变化的敏感性要高于地面波，这是与高频探地雷达不同和需要注意的地方。与高频雷达相比，低频雷达存在探测深度大、能量强但分辨率低的特点，尽管湿润层较薄时，无法精细探测其范围，但在表面灌水情况下，却可以通过湿干界面上形成的强烈能量反射准确实现累积入渗量的探测。因此利用低频雷达实现土壤累积入渗量探测是可行的。同时，本文所提方法更符合自然土壤的剖面特征，适宜性更广。因此，本研究针对低频雷达应用于土壤累积入渗量的探测提供了一种有效的方法，可为农田灌溉管理提供技术参考。

参考文献

- [1] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程. 生态学报, 2012, 32 (3) : 871—878
Liu M X, Nie Y, Yu J. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (3) : 871—878
- [2] 张婧, 雷廷武, 张光辉, 等. 环式入渗仪测量土壤初始入渗率效果试验方法研究. 农业机械学报, 2014, 45 (10) : 140—146
Zhang J, Lei T W, Zhang G H, et al. A new experimental method for observing the initial soil infiltration under ring infiltrometer (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (10) : 140—146
- [3] 姚建中. 红壤水分入渗率和累积入渗量的确定. 土壤通报, 1991, 22 (7) : 61—63
Yao J Z. Measurement of infiltration rate and cumulative infiltration in red loam (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22 (7) : 61—63
- [4] Bouwer H. Intake rate: Cylinder infiltrometer//Methods of soil analysis, Part I: Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 825—844
- [5] Perroux K M, White I. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52 (5) : 1205—1215
- [6] Peterson A E, Bubenzer G D. Intake rate: Sprinkler infiltrometer//Methods of soil analysis, Part I: Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 845—870
- [7] Lei T W, Pan Y H, Liu H, et al. A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts. *Journal of Hydrology*, 2006, 319 (1) : 216—226
- [8] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2006
Zeng S F, Liu S X, Wang Z J, et al. Theory and application of ground penetrating radar (In Chinese). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006
- [9] 杨峰, 彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究. 北京: 科学出版社, 2010
Yang F, Peng S P. Theory and application of ground penetrating radar (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [10] 王升, 陈洪松, 付智勇, 等. 基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测. 土壤学报, 2015, 52 (5) : 1024—1030
Wang S, Chen H S, Fu Z Y, et al. Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using ground penetrating radar (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5) : 1024—1030
- [11] Steelman C M, Endres A L. Assessing vertical soil moisture dynamics using multi-frequency GPR common-midpoint soundings. *Journal of Hydrology*, 2012, 436: 51—66
- [12] Alsharahi G, Driouach A, Faize A. Performance of GPR influenced by electrical conductivity and dielectric constant. *Procedia Echnology*, 2016, 22 (19) : 570—575
- [13] Saintenoy A, Schneider S, Tuscholka P. Evaluating ground penetrating radar use for water infiltration monitoring. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7 (1) : 208—214
- [14] Mangel A R, Moysey S M J, Ryan J C, et al. Multi-offset ground-penetrating radar imaging of a lab-scale infiltration test. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8 (6) : 10095—10123
- [15] Léger E, Saintenoy A, Coquet Y. Hydrodynamic parameters of a sandy soil determined by ground-penetrating radar inside a single ring infiltrometer. *Water Resources Research*, 2014, 50 (7) : 5459—5474
- [16] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground penetrating radar ground wave techniques. *Water Resources Research*, 2003, 39 (11) : 1321—1334
- [17] Lunt I A, Hubbard S S, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*, 2003, 307 (1/4) : 254—269

- [18] Stoffregen H, Zenker T, Wessolek G. Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: Comparison of ground penetrating radar and lysimeter data. *Journal of Hydrology*, 2002, 267 (3/4): 201—206
- [19] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 1980, 16 (3): 574—582
- [20] 周立刚, 于东升, 王玺洋, 等. 基于高频探地雷达的土壤表层含水量测定. *土壤学报*, 2016, 53 (3): 621—626
Zhou L G, Yu D S, Wang X Y, et al. Determination of top soil water content using high-frequency ground penetrating radar (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (3): 621—626
- [21] Weihermüller 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. *Journal of Hydrology*, 2007, 340 (3/4): 205—216
- [22] Wijewardana Y G N S, Galagedara L W. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 2010, 391 (1): 24—33
- [23] Huisman J A, Snepvangers J J J C, Bouten W, et al. Mapping spatial variation in surface soil water content: Comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 2002, 269 (3/4): 194—207

Method for Measurement of Soil Cumulative Infiltration Based on Low Frequency GPR

WANG Ruiyan^{1, 2} YIN Tao² HU Yingying² GAO Peng² ZHAO Gengxing^{1, 2} CHEN Hongyan^{1, 2}

(1 *National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources*, Tai'an, Shandong 271018, China)

(2 *College of Resources and Environment*, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract 【Objective】 Accurately assessing soil cumulative infiltration is essential to many field irrigation management and saline soil amelioration projects. However, the measurement of soil cumulative infiltration using the conventional methods has a number of defects, like costly, destructive and time-consuming. In addition, because soil infiltration is spatially variable, these point measurement techniques are of limited value in assessing the soil cumulative infiltration over a large area. The technique of Ground Penetrating Radar (GPR) can be used to collect the data non-destructively and instantly over a large area. Therefore, the technique is much higher than the conventional methods in potentiality and applicability for use to assess soil cumulative infiltration on a field scale. 【Method】 In order to show that soil cumulative infiltration can be extracted from low frequency GPR data in the case of a loamy soil, a controlled soil and irrigation experiment was carried out. During the experiment, a 250 MHz antenna was used to collect GPR data for analysis of radargrams before and after the irrigation. Based on the radargrams obtained a soil infiltration estimation model was constructed using the electromagnetic wave amplitude recorded by the GPR. Then the model was compared with the electromagnetic wave speed model in accuracy and time window stability. 【Result】 Results show that the determination coefficient of electromagnetic wave speed and soil cumulative infiltration was 0.8, 0.1 and 0.12 in the 2.2 m time window, 1.57 m time window and total of the samples, respectively, indicating that the electromagnetic wave speed model depends on time windows, and is low in stability and precision, so the model is not good enough to reflect soil cumulative infiltrations. While GPR amplitude was found to be more sensitive to variation of soil cumulative infiltration. Among the electromagnetic wave amplitude parameters, the determination coefficient of trough amplitude of Reflection Wave I and soil cumulative infiltration was 0.999, 0.986 and 0.962 in the 2.2 m time window, 1.57 m time window and total of the samples, respectively, and the determination coefficient of the trough amplitude



of Reflection Wave II and soil cumulative infiltration was 0.981, 0.999 and 0.925, respectively. while the determination coefficient of trough amplitude of the ground direct wave and soil cumulative infiltration was 0.920, 0.965 and 0.943, respectively. By following the principle of the highest determination coefficient, this paper selected the trough amplitude of Reflection Wave I in constructing the GPR model for detection of soil cumulative infiltration, thus bringing the determination coefficient up to 0.96. 【Conclusion】 In brief, the electromagnetic wave amplitude model is higher than the wave speed model in precision and stability, and can be used to monitor and estimate soil cumulative infiltration. The trough amplitude of Reflection Wave I is an ideal indicator to be used to effectively monitor soil cumulative infiltration. Therefore, the low frequency GPR can be used to accurately detect soil cumulative infiltration. All the findings in this research may provide a new way for the detection of soil cumulative infiltration on field scales, and also a scientific basis for further application GPR to the field of soil science.

Key words Low frequency GPR; Soil cumulative infiltration; Non-destructive detection

(责任编辑：檀满枝)