

胡健, 张志傲, 曹涛, 刘鑫月, 甄庆. 基于探地雷达的砒砂岩区土壤厚度测定研究[J]. 土壤学报, 2026,
HU Jian, ZHANG Zhiao, CAO Tao, LIU Xinyue, ZHEN Qing. Determining Soil Thickness Using Ground-Penetrating Radar in the Pisha
Sandstone Area, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

基于探地雷达的砒砂岩区土壤厚度测定研究*

胡 健¹, 张志傲¹, 曹 涛², 刘鑫月², 甄 庆^{2†}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室 陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持科学与工程
学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要: 砒砂岩区上覆黄土层厚度对区域生态恢复至关重要,但目前尚缺乏高效探测手段。尽管探地雷达凭借其快速、无损的技术优势已在残积母质区获得成功应用,但其在运积母质(黄土)覆盖区探测土岩界面的适用性仍未得到系统验证。以砒砂岩区灌木林地、乔木林地和草地三种典型植被类型坡面为研究对象,利用探地雷达探测黄土层厚度,通过野外开挖与预埋铁管原位标定黄土介电常数,并对比介电常数实测值与 Topp 模型预测值,检验探地雷达测定精度。结果表明,灌木林地、乔木林地和草地的黄土相对介电常数实测值分别为 13.33、19.57 和 13.92。Topp 模型预测精度为 92.51%~97.23%,与实测值无显著差异。探地雷达测定黄土厚度的精度为 87.16%~97.78%,测定深度与实际埋深无显著差异。三个坡面黄土厚度均呈自坡上向坡下递增的趋势,草地平均厚度最大(36.16 cm),乔木林地最小(19.06 cm)。本研究可为砒砂岩区土壤厚度调查提供一种高效准确的方法,并为该区域水土保持及水文过程研究提供基础数据支撑。

关键词: 探地雷达; 砒砂岩; 黄土厚度; 介电常数; Topp 模型; 空间变异

中图分类号: S159 **文献标志码:** A

Determining Soil Thickness Using Ground-Penetrating Radar in the Pisha Sandstone Area, China

HU Jian¹, ZHANG Zhiao¹, CAO Tao², LIU Xinyue², ZHEN Qing^{2†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The thickness of the loess layer overlying the Pisha sandstone area is crucial for regional ecological restoration; however, efficient detection methods are still lacking. Although ground-penetrating radar (GPR), owing to its rapid and non-destructive advantages, has been successfully applied in areas underlain by residual parent material, its suitability for detecting the soil-rock interface in regions covered by transported parent material (loess) has not yet been systematically validated. This study therefore aimed to evaluate the applicability of GPR for loess thickness determination in the Pisha sandstone area and to assess the performance of the Topp model in estimating the dielectric permittivity of loess in this region.

【Method】 GPR was employed to measure loess thickness on three typical vegetation slopes (shrubland, arbor land, and

*国家重点研发计划项目(2024YFF1308003)和国家自然科学基金项目(42107363)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFF1308003) and the National Natural Science Foundation of China (No. 42107363)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhenqing10@nwfau.edu.cn

作者简介: 胡 健(1996—),男,山西长治人,博士研究生,主要从事土壤物理及水文研究。E-mail: 2020050717@nwfau.edu.cn

收稿日期: 2026-04-21; 收到修改稿日期: 2026-07-08; 网络首发日期(www.cnki.net): 202 - -

grassland) in the Pisha sandstone area. The dielectric permittivity of loess was calibrated *in situ* through field excavation and pre-buried iron pipes. The measured permittivity values were compared with predictions from the Topp model to assess the model's performance in this region, and the GPR-derived loess thicknesses were compared with actual excavation depths to evaluate the measurement accuracy of GPR. 【Result】The results showed that the measured relative dielectric permittivities of loess were 13.33, 19.57, and 13.92 for shrubland, arbor land, and grassland, respectively. The Topp model predicted loess dielectric permittivity with an accuracy ranging from 92.51% to 97.23%, showing no significant difference from the measured values. Also, the accuracy of GPR in determining loess thickness ranged from 87.16% to 97.78%, and the measured depths did not differ significantly from the actual burial depths. On all three slopes, loess thickness exhibited a clear increasing trend from the upper to the lower slope positions. The grassland had the largest average thickness (36.16 cm), while the arbor land had the smallest (19.06 cm). 【Conclusion】This study provides an efficient and accurate method for soil thickness investigation in the Pisha sandstone area and offers fundamental data support for soil and water conservation and hydrological process research in this region.

Key words: Ground-penetrating radar; Pisha sandstone; Loess thickness; Dielectric permittivity; Topp model; Spatial variation

砒砂岩集中分布于黄河上游的鄂尔多斯高原, 总面积约 1.67 万 km², 是黄河粗泥沙的主要来源区之一。作为一种形成于古生代二叠纪至中生代白垩纪的陆相碎屑沉积岩系, 砒砂岩由厚层砂岩、砂页岩及泥质砂岩互层构成。因其成岩程度低、胶结性差、结构强度弱, 该区水土流失极为剧烈, 年均侵蚀模数超过 20 000 t·km⁻²[1]。根据上覆物质的不同, 砒砂岩区可划分为裸露区、盖土区(黄土覆盖)和盖沙区[2]。盖土区表现为“黄土戴帽, 砒砂岩穿裙”的地貌景观, 即梁峁顶部被黄土覆盖, 砒砂岩主要在沟谷中出露。黄土作为典型的风积成因的运积母质[3], 其疏松多孔的结构与下伏致密砒砂岩形成鲜明对比[4]。这种独特的“上土下岩”二元结构, 使土壤厚度成为控制该区植被恢复、水文过程及侵蚀响应的关键变量。

土壤厚度(或称可移动风化层厚度)指从土壤表面至下层风化基岩的垂直距离, 控制着作物生长[5]、养分循环[6]、径流响应、土壤侵蚀、景观演化以及滑坡预测等多种过程, 也是水文与生态模型中的关键变量。准确评估土壤厚度对于生态脆弱地区的恢复与可持续发展至关重要, 但大面积准确测定仍面临挑战。传统方法(土壤剖面法、土壤探针、插钎法等)虽结果准确, 但破坏性强、效率低[7]。建模预测方法(包括过程模型、经验统计模型、插值模型和机器学习模型)在处理非线性关系或大范围应用时仍存在偏差[8]。近年来, 地球物理技术如电磁感应(ERI)、电阻率断层扫描(ERT)、地震勘测(SS)和探地雷达(GPR)等因高效、无损、经济而备受关注[9]。

探地雷达在土壤调查中展现出巨大潜力, 并已广泛应用于工程、环境和土壤学等领域[10]。在土壤厚度测量方面, 已有研究证实探地雷达能有效探测残积母质发育区的土岩界面。例如, 于秀秀等[11]在新疆伊犁新垦区的试验表明, 探地雷达可有效识别土层与砾石层交互分布的复杂层状结构。王升等[12]及 Doolittle 和 Collins [13]在喀斯特地区的研究发现, 因石灰岩与残积土层之间存在显著的电性差异, 探地雷达能有效识别土岩界面。此外, Yan 等[14]在浙江风化丘陵斜坡的研究验证了探地雷达在残积土厚度探测中的适用性, Han 等[15]在太湖流域源头山坡的研究成功识别了残积土壤中的不同土层结构, 而 Aranha 等[16]在巴西半湿润热带地区的研究则为探地雷达在复合风化剖面中的应用提供了参考。上述研究多聚焦于残积母质发育的土壤, 如喀斯特地区的石灰岩残积土、丘陵斜坡的基岩风化残积土等, 这类土壤通常土层较薄, 且与下伏基岩的物性差较大, 因此, 探地雷达能够较好地进行识别与分层。然而, 对于运积母质(如黄土)覆盖区, 探地雷达能否有效探测其与下伏地层的分界, 目前尚缺乏系统研究。已有研究表明, 黄土的介电常数主要受含水率控制[17]。砒砂岩作为结构致密、透水性差的岩层[18], 其含水率通常显著低于上覆黄土层[19]。据此可推断, 黄土与砒砂岩之间可能存在由含水率差异驱动的介电常数差异, 从而为探地雷达探测提供了物理基础。然而, 基于该推断的探地雷达实测研究尚不多见, 尤其是在砒砂岩覆黄土区, 探地雷达能否有效识别黄土与砒砂岩的分界及其探测精度如何, 仍缺乏系统的野外验证。

因此,本研究以砒砂岩区覆黄土坡面为研究对象,采用探地雷达技术开展土层厚度探测,并结合开挖验证,定量评估探地雷达在运积母质发育区探测土岩界面的精度,尤其是在下伏地层具有特殊水文地质特征的砒砂岩覆黄土区,以期为该区域土壤厚度快速调查提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市暖水乡(39°42′–39°50′N, 110°25′–110°48′E),属于砒砂岩裸露区向盖土区的过渡地带。气候为中温带半干旱大陆性季风气候,年均气温为6.2~8.7℃,年均降水量为400 mm,年均蒸发量为2 093 mm,年均日照时数达3 100 h。地貌以岗状丘陵及黄土丘陵沟壑为主。土壤类型主要为黄绵土(母质为黄土),少数为栗钙土(母质为砒砂岩)。土壤质地主要为砂壤土、壤土和粉壤土,砒砂岩质地主要为砂壤土、壤砂土和壤土。土壤及砒砂岩的基本性质如表1所示。草本植被主要以大针茅(*Stipa grandis*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和百里香(*Thymus mongolicus*)组成。灌木包括沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。乔木主要以山杏(*Prunus sibirica*)和山桃(*Prunus davidiana*)为主。

区内砒砂岩主要为2.5亿年前至6 500万年前沉积的陆相碎屑岩系,物源为鄂尔多斯北部阴山一大青山古陆的花岗岩类^[20]。覆盖其上的黄土为260万年前由风力搬运堆积形成的风积物,物源来自亚洲内陆干旱区的风尘^[21]。这种“上土下岩”的二元结构是数亿年前形成的古老岩层与数百万年前开始堆积的年轻沉积物在时间上的叠置。由于形成时代、成岩程度及物质来源的根本差异,黄土与砒砂岩在理化性质上存在显著差异:黄土的土壤容重显著低于砒砂岩,而质量含水量、粉粒含量和有机质含量显著高于砒砂岩(表1)。这种性质差异使黄土层与砒砂岩层之间形成了鲜明的物性界面,为探地雷达探测提供了物理基础。

表1 黄土及砒砂岩层土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil in loess and Pisha sandstone

样地	土层	土壤容重	质量含水量	砂粒	粉粒	黏粒	有机质
Plot	Soil layer	Bulk	Mass water	Sand/%	Silt/%	Clay/%	Soil organic
		density/(g·cm ⁻³)	content/(g·g ⁻¹)				matter/(g·kg ⁻¹)
灌木林地	黄土 ^①	1.34±0.01b	0.18±0.03a	50.27±4.91b	42.26±4.38a	7.47±0.79a	9.01±1.49a
Shrub land	砒砂岩 ^②	1.48±0.06a	0.13±0.02b	68.21±6.57a	26.86±5.51b	4.94±1.18b	3.72±1.46b
乔木林地	黄土 ^①	1.43±0.03b	0.22±0.01a	45.20±7.76a	44.42±4.98a	10.38±2.96a	11.08±4.73a
Arbor land	砒砂岩 ^②	1.52±0.08a	0.16±0.03b	56.40±8.98a	35.13±5.91b	8.46±3.20a	5.81±1.59b
草地	黄土 ^①	1.44±0.03b	0.17±0.01a	52.52±5.28b	39.53±4.39a	7.95±0.92a	8.10±0.72a
Grass land	砒砂岩 ^②	1.53±0.07a	0.10±0.03b	69.28±3.74a	25.97±2.75b	4.76±1.03b	3.71±0.76b

注:同一采样点位置的黄土与砒砂岩层样品为同一剖面内采集。采用Master 2000激光粒度仪测定各粒径土壤颗粒的体积百分含量。平均值±标准差(n=5,下同)。同列不同小写字母表示同一样地黄土与砒砂岩的理化性质差异显著(P<0.05)。Note: The loess and Pisha sandstone samples at the same position are from the same profile on each slope. The volume percentage content of soil particles of various sizes was determined using the Master 2000 laser particle size analyzer. Mean ± standard deviation (n=5, the same below). Different lowercase letters in the same column indicate significant differences in physicochemical properties between loess and Pisha sandstone at the same site (P<0.05). ①Loess, ②Pisha sandstone.

1.2 探地雷达工作原理

探地雷达系统主要由电磁波脉冲发生器、发射天线、接收天线和电源等组成。探地雷达基于电磁差异原理:发射天线向地下发射高频电磁波,接收天线捕获来自不同介质界面的反射波,通过分析反射波的走时、振幅和波形等特征,识别和探测地下不同电磁性质介质的分界面^[10]。探地雷达的

输出结果通常以一维波形图和二维时间剖面图呈现。

常用的探测方法包括共偏移距法（剖面法）、多偏移距法（共中心点法）和宽角法。本研究采用剖面法，该方法具有操作简单、移动快速、结果直观、数据连续以及探测范围广等优点，是目前土壤层次探测中应用最广泛的方式^[22]。探测时，发射与接收天线以固定间距同步移动，沿预设测线进行等间距扫描，实现对目标区域的连续覆盖探测，获取的土壤剖面结构图像能直观反映不同层次反射界面的变化特征。

影响探地雷达探测深度和精度的主要因素包括天线频率、采样速度和介电常数^[23]。高频天线分辨率高但穿透深度有限，低频天线分辨率低但探测深度大。已有研究表明，400 MHz 天线最适合探测自然条件下 1 m 深度范围内的黄土与基岩界面^[24]。鉴于砒砂岩区土层浅薄，本研究选用 400 MHz 天线。此外，介电常数是控制电磁波传播的关键参数，介电常数越大，电磁波波速越慢，有效探测深度越小^[25]。岩石的相对介电常数为 3~5，空气接近 1，土壤和沉积物为 4~30，而水高达 80~81^[23, 26]。

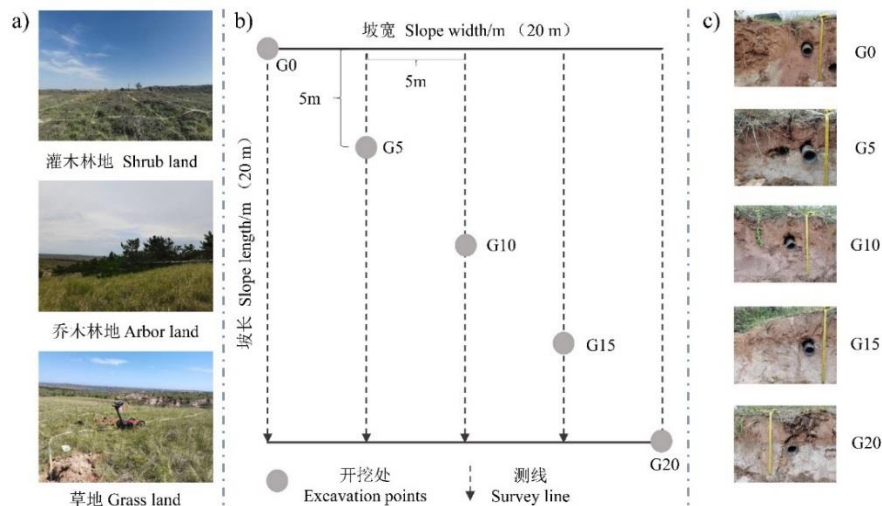
本研究使用的探地雷达型号为美国 GSSI 公司生产的 SIR4000。该设备轻便，可兼容 GSSI 单数字天线、单模拟天线或双频率天线，应用领域广泛。实际探测前，需根据介质类型手动输入介电常数的估计值。根据设备技术手册^[27]，干土的相对介电常数约为 9，湿土约为 20，介于两者之间的土壤约为 14。

1.3 试验设计

在研究区选择三种植被类型的坡地：灌木林地坡面（39° 45′ 06″ N，110° 35′ 11″ E），长 20 m，宽 20 m，平均坡度 8.20° ± 1.92°，海拔 1 223.62 m，优势种为沙棘（*Hippophae rhamnoides*）；乔木林地坡面（39° 45′ 02″ N，110° 35′ 14″ E），长 32 m，宽 32 m，平均坡度 9.40° ± 2.07°，海拔 1 214.82 m，优势种为山杏（*Prunus sibirica*）；草地坡面（110° 35′ 08″ E，39° 45′ 10″ N），长 16 m，宽 16 m，平均坡度 9.80° ± 2.28°，海拔 1 204.32 m，优势种为长芒草（*Stipa bungeana*）。

每个样地内按坡宽均匀布设 5 条测线，灌木林地、乔木林地和草地的测线间距分别为 5 m、8 m 和 4 m（图 1a）。每条测线上选择一处点位进行开挖，各点位间距大致相等（图 1b）。每个样地共开挖 5 个点位，深度至砒砂岩层以下 20 cm，并记录实际土壤厚度。在开挖点位，将长 60 cm、内径 5.2 cm、外径 6 cm 的铁管垂直砸入土壤层和砒砂岩层的分界面处（图 1c）。随后采用 400 MHz 天线，结合剖面法沿测线进行扫描。

探地雷达扫描结束后，在开挖点位使用环刀（体积为 100 cm³）和土钻（内径为 5 cm）分层（每 5 cm）采集土壤及砒砂岩样品。土壤样品采集至土岩界面，砒砂岩样品采集深度为 20 cm。环刀样品带回室内，采用烘干法测定土壤质量含水量和土壤容重。土钻样品经风干后，使用激光粒度仪（Master 2000，APA 2000，英国）测定各粒径土壤颗粒的体积百分含量，并依据美国农业部分类方法确定土壤质地。土壤有机质含量采用硫酸-重铬酸钾外加热法测定。



注：箭头方向代表侧向方向；G0、G5、G10、G15、G20 为灌木林地的五个挖掘点位。下同。 Note: The arrow indicates the survey direction; G0, G5, G10, G15, G20 denote the five excavation points in the shrubland. The same below.

图 1 野外样地 (a) 的探地雷达 (GPR) 测线布设 (b) 及剖面铁管 (c) (以灌木林地为例)

Fig. 1 Field plot (a), layout of ground-penetrating radar (GPR) survey lines (b), and iron tube profiles (c), using shrub land as an example

1.4 数据处理

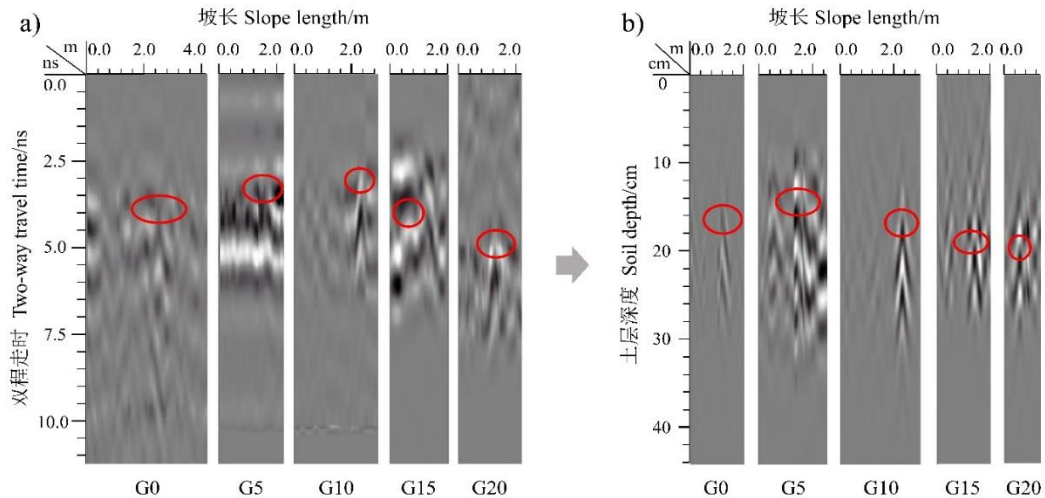
1.4.1 介电常数的校正 土壤的介电常数在取样和运输过程中可能发生变化，因此需在野外进行原位测量^[10]。鉴于砒砂岩上覆黄土的介电常数未知，初始介电常数暂设为 14。铁管与土壤的介电性质差异较大，当探地雷达经过铁管上方时，雷达图像（时间剖面图像）上会出现明显的波动现象，其中“双曲线”的顶端对应铁管的实际位置，可作为土岩界面的标识物（图 2a）。通过读取雷达图像中的双程走时，结合铁管埋深（实际土壤厚度），利用式（1）计算电磁波在土壤中的传播速度，再根据式（2）标定出实际土壤介电常数。将 5 个点位的实际介电常数取平均值^[10]，作为该样地土壤介电常数的校准值，输入探地雷达后再次扫描，将时间坐标转换为深度坐标，并在深度剖面图像上读取各点位的土壤厚度测量值（图 2b）。通过对比土壤厚度测量值与真实值，获得探地雷达的探测精度。

$$v = \frac{2h}{t} \quad (1)$$

式中， v 为电磁波在砒砂岩上覆黄土中的传播速度， $\text{m}\cdot\text{ns}^{-1}$ ； h 为铁管埋深或实际土壤厚度， m ； t 为电磁波信号在黄土中的双程走时， ns 。

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

式中， ε 为土壤相对介电常数； c 为电磁波在真空中的传播速度（ $3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{ns}^{-1}$ ）。



注：红色圆圈表示铁管布设位置。 Note: Red circles indicate the locations of the installed iron pipes.

图 2 土壤介电常数校正前 (a)、后 (b) 的雷达图像对比图 (以灌木林地为例)

Fig. 2 Comparison of radar images before (a) and after (b) soil dielectric permittivity calibration, using shrub land as an example

1.4.2 介电常数的预测 鉴于土壤水分是介电常数的主导影响因素，本研究基于各样地土壤含水量，结合 Topp 经验公式对黄土介电常数进行预测。Topp 介电模型为^[28]：

$$\varepsilon = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.0\theta_v^3 \quad (3)$$

式中， ε 为土壤相对介电常数； θ_v 为土壤体积含水量，是土壤容重与质量含水量的乘积；公式中的系数均为针对矿质土壤建立的原始经验系数。

1.4.3 雷达图像的处理 本研究使用 Radan7 软件对探地雷达图像进行预处理，包括时间零点校正、

反褶积、滤波、增益调整和层位追踪。

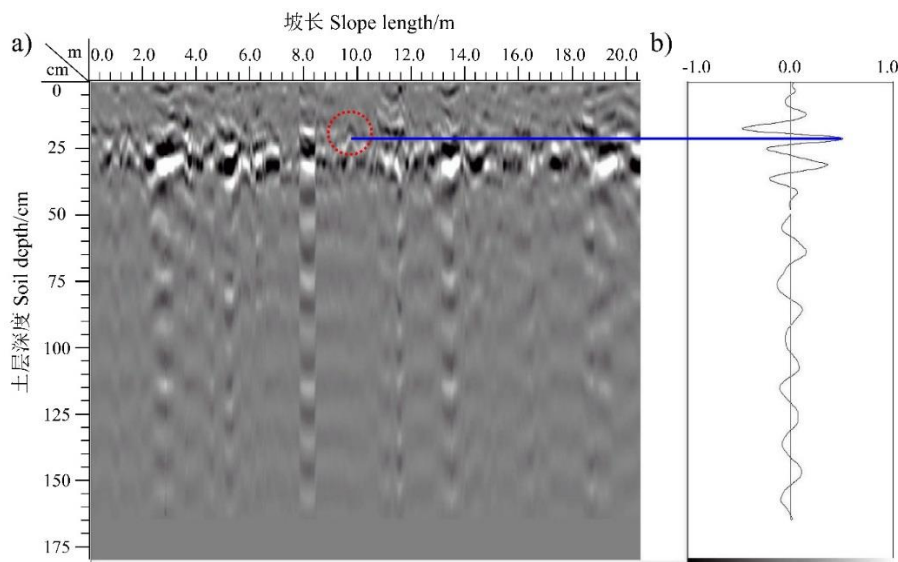
由于雷达记录的起始时间较实际探测时间早,需校正时间轴上的“偏移”,重新定义土壤表面的位置。本研究以第一个正峰值作为时间零点^[29]。

信号传播过程中易受雷达自身和探测环境的影响,产生杂波信号,需进行滤波处理以降低噪声并去除杂波。滤波方式可分为有限冲激响应(FIR, Finite impulse response)滤波器和无限冲激响应(IIR, Infinite impulse response)滤波器。前者无反馈回路、稳定性强,能保持滤波前后反射信号的相位一致,后者易改变反射信号的相位。研究区内黄土层含水量显著高于下层砒砂岩(表1),且水分含量对介电常数起主导作用^[17],据此可判断黄土的介电常数大于砒砂岩。因此,电磁波从高介电常数介质进入低介电常数介质时,反射系数为正,反射波与入射波同相^[30],雷达图像中土岩界面表现为正反射特征。基于此,本研究选择FIR滤波器,其中通道数量设为“1”,滤波器窗口形状为“方块”。水平类型采用“背景去除”,其长度(扫描数)参数决定了滑动平均或者背景去除所用的扫描数量。较小的长度值(3~5)通常用于“平滑”处理,而较高的值(最大可达20 001)则用于背景去除。经试验发现,长度设为“1 000”左右时,雷达图像较为清晰。此外,FIR滤波器的低通频率设为0 MHz,高通频率设为300 MHz。所有测线均使用相同的参数进行处理。

反褶积处理可消除目标体下方的多次反射,提高纵向分辨率。处理时通道数量设为“1”。运算器长度越大,处理效果越好,但耗时也会相应增加。通过反复调试“运算器长度”(取值范围1~31),并根据雷达图像清晰度的变化确定最终取值,本研究设为“8”左右。预测滞后设为“5”,白化设为“10%”,总体增益设为“3”。

雷达信号在土壤中传播时会产生衰减,需进行增益处理以弥补能量损失,获取深部信号,使土壤层次图像更加清晰。本研究选择“指数”增益类型,设置增益点数为“16”,通过调整各点位处的增益值改善局部图像清晰度。

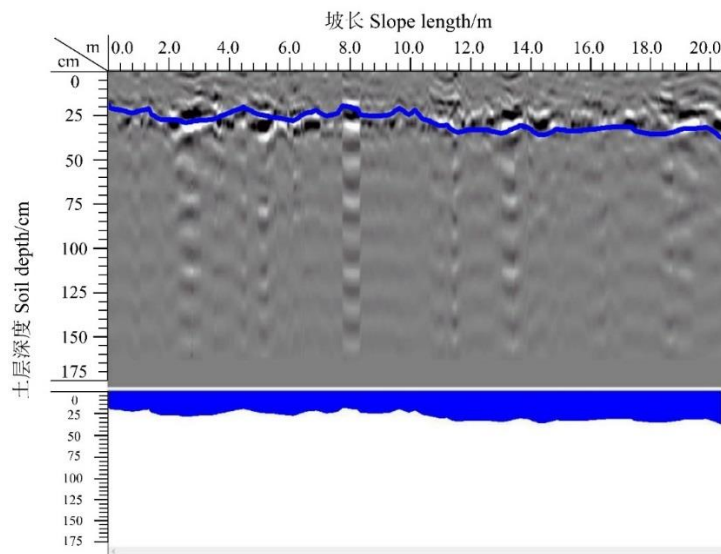
层位追踪是指在雷达剖面图像上识别并连续勾画出代表同一地质界面的反射波同相轴的过程。根据所埋设铁管在雷达图上产生的明显“双曲线”绕射波,可确定追踪的起始点位(图3a)。土岩界面的反射波为正反射,对应一维波形图中的正波,在雷达图像中呈现白色条带状(图3b)。一维波形图中的最大正峰值代表天线接收到的最大反射能量^[24],据此可确定土壤与砒砂岩的边界。进而沿整条测线连续追踪土岩界面的反射波同相轴,最终得到该测线上土壤厚度的连续变化曲线(图4)。



注:红色圆圈代表铁管位置,且白色条带代表土岩界面。Note: The red circle indicates the locations of iron pipes, and the white bands represent the soil-rock interface.

图3 通过识别铁管位置并结合波形图确定土岩界面的起始追踪点(a)为探地雷达测线的深度剖面图像(以灌木林地内的代表性测线为例);b)起始追踪点处的一维波形图)

Fig. 3 Determination of the starting tracking point for the soil-rock interface by identifying iron pipe locations in combination with waveform analysis (a) Depth profile image of a representative GPR line within the shrub land; b) One-dimensional waveform at the starting tracking point)



注：蓝色线条代表追踪的土岩界面。Note: The blue line represents the traced soil-rock interface.

图 4 探地雷达代表性测线的土壤厚度分布

Fig. 4 Soil thickness distribution along a representative GPR line

1.4.4 统计分析 采用夏皮罗-威尔克 (Shapiro-Wilk) 检验验证数据的正态性, 莱文 (Levene) 检验验证数据的方差齐性。采用独立样本 t 检验比较黄土层与砒砂岩层各理化指标的差异 ($P < 0.05$)。采用单因素方差分析 (ANOVA) 和邓肯 (Duncan) 事后检验评估各样地不同坡位之间土壤厚度的差异 ($P < 0.05$)。所有数据统计分析使用 R 4.4.0 完成。将 Radan7 软件解译的土壤厚度值导出为 CSV 文件, 设定距离间隔 0.1 m, Origin 2021 软件绘制土壤厚度空间三维分布图。

2 结果

2.1 黄土的介电常数

通过分析野外原位雷达图像, 并应用式 (1)、式 (2), 获得砒砂岩上覆黄土介电常数实测值 (表 2)。灌木林地、乔木林地和草地五个开挖点位的相对介电常数平均值分别为 13.33、19.57 和 13.92。灌木林地和草地的平均值接近初始设定值, 而乔木林地相对偏高, 归因于其较高的土壤含水量 (表 1)。

将介电常数实测值与 Topp 模型预测值进行对比, 两者差异较小, 预测精度为 92.51%~97.23% (表 2), 且实测值与预测值无显著差异 ($P > 0.05$), 表明 Topp 经验公式可较好地适用于砒砂岩上覆黄土的介电常数预测。

表 2 黄土介电常数的实测值与预测值

Table 2 The actual and predicted values of the dielectric permittivity of loess

样品编号 Sample No.	$t/$ ns	$v/$ ($m \cdot ns^{-1}$)	实测值 Actual value	预测值 Predicted value	误差值 Errors/%	P 值 P-value	RMSE	MAPE/%
G0	3.90	0.08	14.24	13.79	3.21	0.725	0.635	4.602
G5	3.57	0.08	13.64	13.07	4.19			
G10	3.52	0.09	11.60	11.21	3.39			

G15	3.91	0.09	10.05	9.37	6.79			
G20	5.21	0.07	17.10	16.17	5.42			
Q0	4.08	0.07	17.81	17.15	3.73	0.242	1.126	5.524
Q8	3.89	0.07	18.68	17.70	5.24			
Q16	5.56	0.06	21.47	20.41	4.92			
Q24	5.28	0.07	19.36	18.15	6.24			
Q32	7.70	0.07	20.52	18.98	7.49			
C0	6.58	0.08	14.98	13.90	7.19	0.309	0.755	5.118
C4	8.21	0.08	14.45	13.57	6.08			
C8	15.12	0.08	14.68	14.27	2.77			
C12	7.05	0.08	12.76	12.09	5.24			
C16	7.14	0.08	12.74	12.20	4.31			

注: Q0、Q8、Q16、Q24、Q32 代表乔木林地的五个挖掘点位, C0、C4、C8、C12、C16 代表草地的五个挖掘点位。黄土介电常数的初始值均设置为 14.00, t 代表电磁波在黄土中的实际双程走时, v 代表电磁波在黄土中的实际传播速度。 $P>0.05$ 表示实测值与预测值不具有显著性差异。RMSE 和 MAPE 分别代表实测值与预测值之间的均方根误差和平均绝对百分比误差。下同。Note: Q0 to Q32 represent five excavation points for arbor land, and C0 to C16 represent five excavation points for grass land. The initial values of the dielectric constant for loess are set to 14.00; t denotes the actual two-way travel time of the electromagnetic wave in loess, and v denotes its actual propagation velocity. $P>0.05$ indicates no significant difference between the measured value and the predicted value. RMSE and MAPE represent the root mean square error and the mean absolute percentage error between observed and predicted values, respectively. The same below.

2.2 探地雷达测定黄土厚度的精确度

根据野外开挖剖面试验, 获得各植被类型坡面铁管的实际埋深, 并通过雷达图像(深度剖面图)读取其测定深度。三种植被类型下五个挖掘点位的铁管实际埋深及探地雷达测定深度见表 3。结果表明, 探地雷达测定砒砂岩上覆黄土厚度的误差值为 2.22%~12.84%, 精度为 87.16%~97.78%, 且测量深度与实际埋深无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 不同植被类型的坡面铁管埋深和探地雷达测量深度

Table 3 Actual buried depth and GPR-measured depth of iron pipes on slopes with different vegetation types

样品编号 Sample No.	实际深度 Actual depth/cm	GPR 测定深度 GPR-measured depth/cm	误差值 Errors/%	P 值 P-value
G0	15.5	15.1	2.58	0.782
G5	14.5	13.5	6.90	
G10	15.5	16.4	5.81	
G15	18.5	19.6	5.95	
G20	18.9	20.6	8.99	
Q0	14.5	14.1	2.76	0.901
Q8	13.5	14.5	7.41	
Q16	18.0	17.2	4.44	
Q24	18.0	17.6	2.22	
Q32	25.5	24.3	4.71	
C0	25.5	28.6	12.16	0.816
C4	32.4	30.4	6.17	
C8	59.2	51.6	12.84	
C12	29.6	28.4	4.05	
C16	30.0	28.6	4.67	

注: GPR 为探地雷达。Note: GPR is ground penetrating radar.

2.3 坡面黄土层厚度的空间变化

通过探地雷达对坡面黄土层厚度进行探测, 得到图 5 所示的黄土层厚度沿坡面的连续变化。灌木林地坡面土壤平均厚度为 23.30 ± 7.71 cm, 乔木林地为 19.06 ± 7.14 cm, 草地为 36.16 ± 14.17 cm (表 4)。灌木林地坡面土壤厚度自坡上 (19.48 ± 6.77 cm) 至坡中 (23.01 ± 6.24 cm) 增加幅度较小, 至坡下 (27.36 ± 7.92 cm) 明显增大, 变异系数由坡上的 34.76% 降至坡下的 22.80%, 表明坡下土壤厚度分布更为均匀。乔木林地坡面的土壤厚度沿坡面变化的趋势与灌木林地相似, 但整体数值较低, 坡上、坡中和坡下分别为 14.87 ± 5.71 cm、 17.38 ± 5.20 cm 和 24.87 ± 6.23 cm, 其变异系数在坡上最大 (38.39%), 坡下最小 (25.05%)。草地坡面各坡位土壤厚度均显著高于灌木林地和乔木林地, 坡上为 28.42 ± 12.74 cm, 坡中为 36.74 ± 13.04 cm, 坡下为 43.21 ± 12.64 cm, 变异系数同样呈现坡上最高 (44.84%)、坡下最低 (29.25%) 的变化规律。综上, 不同植被类型坡面的土壤厚度均表现出沿坡面自上而下逐渐增加的空间格局, 坡下土层最厚且变异性最小, 坡上土层最薄且空间异质性最强。

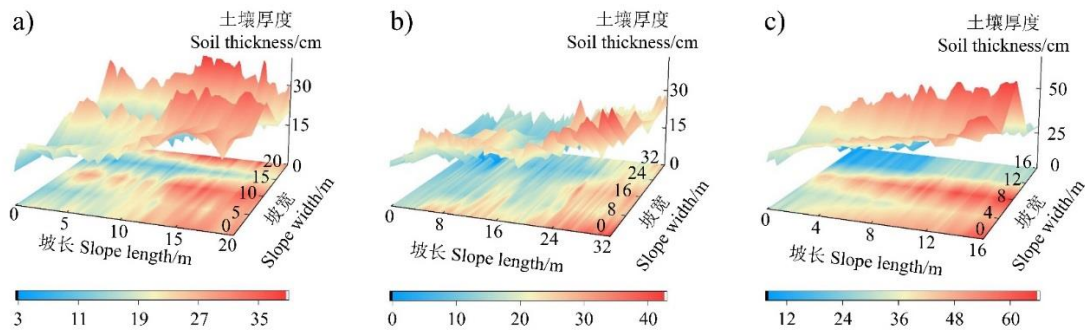


图 5 灌木林地 (a)、乔木林地 (b) 和草地 (c) 坡面土壤厚度空间变化

Fig. 5 Spatial variation of soil thickness on slopes of shrub land (a), arbor land (b), and grass land (c)

表 4 坡面不同坡位土层厚度

Table 4 The thickness of the soil layer at different positions on the slope

样地 Plot	坡位 Slope position	样本数 Number of samples	土壤厚度 Soil thickness/cm	变异系数 Coefficient of variation/%	平均厚度 Average thickness/cm
灌木林地 Shrub land	坡上 Upper slope	331	19.48 ± 6.77 c	34.76	23.30 ± 7.71
	坡中 Middle slope	343	23.01 ± 6.24 b	34.41	
	坡下 Lower slope	331	27.36 ± 7.92 a	22.80	
乔木林地 Arbor land	坡上 Upper slope	529	14.87 ± 5.71 c	38.39	19.06 ± 7.14
	坡中 Middle slope	547	17.38 ± 5.20 b	29.94	
	坡下 Lower slope	529	24.87 ± 6.23 a	25.05	
草地 Grass land	坡上 Upper slope	265	28.42 ± 12.74 c	44.84	36.16 ± 14.17
	坡中 Middle slope	275	36.74 ± 13.04 b	35.49	
	坡下 Lower slope	265	43.21 ± 12.64 a	29.25	

注: 坡上、坡中和坡下分别占坡长的 33%、34% 和 33%。不同小写字母表示同一样地坡面不同坡位的土壤厚度差异显著 ($P < 0.05$)。Note: The upper, middle, and lower slopes account for 33%, 34%, and 33% of the total slope length, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences in soil thickness among the three slope positions on the same slope ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 探地雷达测定砒砂岩区黄土厚度的适用性与精度

探地雷达在残积母质发育区的土壤厚度探测中已得到广泛应用并取得良好效果, 但在运积母质 (如黄土) 覆盖区的适用性尚缺乏系统验证。本研究以砒砂岩区典型覆黄土坡面为对象, 通过野外

原位开挖验证,系统评估了探地雷达对黄土-砒砂岩界面的探测能力。结果表明,探地雷达能够有效识别黄土与砒砂岩的物性界面,探测精度为 87.16%~97.78%,且测定深度与实际埋深无显著差异(表 3, $P>0.05$)。该结果与已有研究一致。例如,罗方舟等^[31]在黑土区的研究表明,探地雷达对黑土层厚度的原位识别具有较好的准确性和适用性,高增益采样方式的检测率可达 96.6%, R^2 为 0.80。Lu 等^[32]采用变分模态分解与振幅包络平均值相结合的方法,在黑土区坡耕地实现了黑土层厚度的自动探测,相对误差在 10%以内,绝对误差小于 5 cm。上述研究与本研究的发现共同表明,探地雷达在不同土壤类型区均具有较好的探测能力,本研究进一步证实了其在砒砂岩区覆黄土坡面的适用性。

本研究获得较高的探测精度主要归因于黄土与砒砂岩之间的电性差异。反射信号的强度取决于界面两侧介质的介电常数对比度,差异越大,反射越强,界面识别越清晰^[30]。本研究中,黄土层的介电常数实测值为 13.33~19.57(表 2)。结合表 1 中砒砂岩层较低的含水量及其与介电常数的正相关关系,可推断砒砂岩的介电常数显著低于黄土。这种由水分驱动的介电常数差异为探地雷达探测提供了良好的物理基础。已有研究表明,探地雷达在斜坡地层识别中具有较高的探测精度,相对误差可控制在 $\pm 5\%$ 以内^[33]。此外,探地雷达在坡度较陡($6^\circ\sim 15^\circ$)、非岩石类母质区域的探测精度较高^[31],这与本研究中各坡面坡度($8.20^\circ\sim 9.80^\circ$)的条件基本一致,进一步佐证了结果的可靠性。

3.2 黄土介电常数的实测值与预测值对比

介电常数是探地雷达数据处理中的关键参数,直接决定了时间-深度转换的准确性。本研究发现,灌木林地(13.33)和草地(13.92)的实测介电常数接近初始设定值(14),而乔木林地(19.57)则明显偏高(表 2)。本研究野外探测工作在连续无雨的晴天进行,排除了短期降雨事件的直接干扰,因此,观测到的差异主要反映了不同植被类型长期水分平衡的结果。乔木林地树冠截留较强,地表蒸发较低,加之土壤有机质含量较高(表 1),保水能力更强,其黄土层质量含水量($0.22\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于灌木林地($0.18\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)和草地($0.17\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)(表 1)。介电常数与土壤含水量呈正相关关系^[28],因此,乔木林地的实测介电常数明显偏高。廖红建等^[17]通过对不同含砂量黄土的系统试验研究,同样证实了黄土介电常数与体积含水率之间存在明确的定量关系。该结果强调,在土壤厚度探测中,介电常数的设定不能简单套用经验值,而应充分考虑植被类型对土壤水分的影响,并尽可能进行原位校正。

本研究将 Topp 经验模型预测的介电常数与实测值进行对比。单个点位的预测精度在 92.51%~97.23%之间,灌木林地、乔木林地和草地的均方根误差(RMSE)分别为 0.635、1.126 和 0.755,平均绝对百分比误差(MAPE)分别为 4.60%、5.52%和 5.12%(表 2)。整体而言,预测值与实测值之间的偏差较小,且两者之间无显著差异($P>0.05$),表明 Topp 模型可较好地适用于砒砂岩上覆黄土的介电常数预测。然而,部分点位仍存在一定偏差(表 2),这可能与土壤水分的空间变异、容重变化以及土壤异质性有关。介电常数对土壤含水量高度敏感,而同一坡面内不同点位的含水量通常因微地形、植被盖度和根系分布的不同而有所差异。体积含水量的计算又依赖于容重,本研究中黄土容重在三种植被类型间为 $1.34\sim 1.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,同一坡面内也有一定波动(表 1),因此,容重的空间变异同样也是误差的来源之一^[34]。此外,砒砂岩区上覆黄土为风积成因的运积母质,其颗粒组成和孔隙结构存在一定空间异质性(表 1),这也会影响介电特性与 Topp 模型的匹配程度。

就本研究的具体条件而言, Topp 模型适用的体积含水量范围为 $0.23\sim 0.32\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ (表 1),容重范围为 $1.34\sim 1.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。这一含水量区间处于 Topp 模型经典标定范围($0\sim 0.5\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)之内,容重也大于 Dirksen 和 Dasberg^[34]建议的 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 阈值,符合模型具有较高准确性的条件。Topp 模型是基于多种土壤类型建立的介电常数-含水量关系经验模型^[28],已被广泛应用于探地雷达数据处理和土壤水分反演研究中。罗古拜等^[35]在黄土露天矿区重构土壤的研究中也发现,该模型计算得到的体积含水量与实测值具有较好的一致性,平均偏差率为 13.42%。本研究的验证结果进一步拓展了 Topp 模型在黄土覆盖区的适用性,为今后大尺度土壤厚度调查中介电常数的估算提供了简便有效的方法。

3.3 土壤厚度沿坡面的空间变化及影响因素

土壤厚度作为表征地表过程的关键变量,其空间分布受地形、植被及土壤属性等多种因素共同控制。本研究中(图5,表4),三种植被类型坡面的土壤厚度均呈现出由坡上至坡下逐渐增大的空间格局,坡下土壤厚度显著高于坡上和坡中($P < 0.05$),且坡下的变异系数最小(22.80%~29.25%),而坡上的变异系数最大(34.76%~44.84%)。该分布规律与坡面侵蚀-沉积过程的基本原理相吻合。Mohammadi 等^[36]在伊朗北部山地森林的研究同样发现,土壤厚度自坡顶至坡中逐渐减小,而后向坡下逐渐增大,不同坡位的土壤厚度差异显著,且主要受地形和植被覆盖的共同控制。Zhang 等^[37]也指出,地形是调控土壤厚度空间变异的关键因子之一。坡上侵蚀强度较高,细颗粒物易被径流搬运,导致土层较薄且空间异质性较强。坡中和坡下则以堆积作用为主,上部侵蚀产物在此发生沉积,形成较厚且相对均匀的土层。

植被类型对土壤厚度的影响同样显著,草地坡面平均土壤厚度(36.16 cm)显著大于灌木林地(23.30 cm)和乔木林地(19.06 cm)(表4),这主要与不同植被类型对土壤理化性质(表1)的调控作用密切相关。草地土壤砂粒与粉粒比例适中,结构相对稳定,加之密集的须根系可有效拦截侵蚀物质,促进沉积,从而形成较厚土层^[38]。灌木林地土壤容重最低,结构较为疏松,抗蚀性相对较弱,土壤厚度居中。乔木林地虽黏粒与有机质含量最高,但容重较大,地表覆盖度较低,侵蚀强度较高,导致土层最薄。植被类型对土壤养分和理化性质具有显著影响^[39],通过调控土壤容重、颗粒组成及有机质含量,影响坡面侵蚀与沉积过程的强度,进而决定土壤厚度的空间格局。其中,草地在固土、促淤与土层增厚之间形成了正向反馈关系^[40],而乔木林地则因土壤紧实、覆盖度低而土层偏薄。上述结果表明,植被与土壤之间存在协同演化关系,在砒砂岩区生态修复中,优先选择根系密集的草本植物更有利于快速增厚土层,为后续乔灌木恢复创造条件。

3.4 研究意义及局限性

本研究以砒砂岩区覆黄土坡面为研究对象,通过野外原位开挖验证,系统评估了探地雷达在沉积母质发育区探测土岩界面的适用性,验证了 Topp 模型在黄土介电常数预测中的可靠性,并揭示了不同植被类型下土壤厚度沿坡面的空间变化规律。研究结果为砒砂岩区土壤厚度快速调查提供了一种高效、无损的技术手段,为该区域生态恢复和水土保持工作提供了基础数据支撑。本研究的探测精度(相对误差约 10%)与 Lu 等^[32]的研究结果(相对误差在 10%以内)基本一致,这表明探地雷达技术在土壤厚度探测领域具有较好的应用前景。

然而,本研究仍存在一定的局限性。每个坡面仅设置了 5 个开挖验证点(共 15 个点),虽然这些点位上 GPR 测量值与实际埋深无显著差异,但整条测线上其余数百个数据点的准确性缺乏独立的直接验证。土岩界面的反射波同相轴追踪依赖于起始点的标定,而介电常数在坡面不同位置可能会发生微小变化,因此,有限点位的校正难以完全代表整条测线的速度分布。此外,探地雷达的探测精度受土壤含水量影响较大^[41],本研究仅在某一时间点(单次调查)进行探测,而砒砂岩区降水集中、干湿交替明显,土壤水分在季节尺度甚至单次降雨事件前后均可能发生剧烈变化。水分变化会引起介电常数的改变,进而影响电磁波速度及土岩界面的反射特征,因此,本研究所获得的探测结果仅代表该特定水分条件下的情况。后续研究需要评估不同水分条件下 GPR 探测结果的稳定性,并探索建立适用于该区域的水分修正函数,以校正不同季节或降雨事件后的探测偏差。此外,本研究仅测定了表层黄土厚度,未涉及砒砂岩风化层内部的精细结构。同时,研究区位于砒砂岩盖土区与裸露区的过渡带,所得结论是否适用于其他类型区(如盖沙区)尚需进一步验证。未来研究可沿测线增加多个介电常数实测点(如每隔一定距离进行小型开挖或使用时域反射仪),以校正电磁波速度的空间变化,从而提高整条测线土壤厚度反演的可靠性。此外,结合多频率天线、三维探地雷达技术及地球物理联合反演方法,有望进一步提高土壤厚度探测的精度和深度,并深入探讨土壤厚度与植被恢复、水文过程及侵蚀响应的定量关系。

4 结 论

本研究以砒砂岩区覆黄土坡面为研究对象,采用探地雷达技术并结合野外原位开挖验证,系统评估了该方法在运积母质覆盖区探测土岩界面的适用性。通过铁管标识物对黄土介电常数进行原位标定,灌木林地、乔木林地和草地的实测介电常数分别为 13.33、19.57 和 13.92。Topp 模型预测精度达 92.51%~97.23%,与实测值无显著差异,表明该模型适用于砒砂岩区上覆黄土的介电常数估算。基于此,探地雷达测定黄土厚度的精度介于 87.16%~97.78%之间,测定深度与实际埋深无显著差异,验证了该技术在砒砂岩区土壤厚度快速调查中的可靠性。土壤厚度沿坡面呈自坡上至坡下逐渐增大的空间格局,坡下土层最厚、变异性最小,坡上土层最薄、异质性最强。草地平均厚度为 36.16 cm,显著大于灌木林地(23.30 cm)和乔木林地(19.06 cm),表明植被通过调控土壤容重、颗粒组成及有机质含量影响侵蚀与沉积过程,进而决定土层厚度。上述空间分布特征意味着不同坡位和植被类型下的土壤厚度差异显著,这种差异将直接影响土壤水分储存、入渗能力以及径流响应过程。综上,探地雷达技术可高效、无损地测定砒砂岩区覆黄土厚度,结合 Topp 模型预测介电常数可进一步提升探测效率。后续研究应进一步探讨土壤厚度对坡面水文过程的影响机制,包括不同土层厚度条件下的土壤水分动态、垂向入渗与侧向流的发生规律,以及植被恢复对水文过程的调控作用,从而为砒砂岩区生态修复与水土保持提供更为系统的科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Ma W M, Zhang X C. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(3): 331-340.
- [2] Li C M, Fu Y B, Di L F, et al. Progress in the physicochemical properties and harness and utilization of pisha sandstone in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2023, 44(5): 41-50. [李长明, 符玉冰, 狄龙飞, 等. 黄河中游砒砂岩的物化性质与治理利用研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 41-50.]
- [3] Pye K. The nature, origin and accumulation of loess[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14(7/8): 653-667.
- [4] Dong X Y, Qin F C, Li L, et al. Study on water vertical infiltration characteristics and water content simulation of sandstone overlying loess[J]. *Water*, 2022, 14(22): 3716.
- [5] Zhou L, Zhou Y, Chen X C, et al. Appropriate soil thickness can improve growth of machine-transplanted seedlings in factory seedling raising mode[J]. *Agronomy*, 2026, 16(4): 440.
- [6] Liu H T, Zhang J H, Chen S H, et al. Effect of soil thickness on crop production and nitrogen loss in sloping land[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 304: 109080.
- [7] Ruan W M, Liu H J, Sui Y Y, et al. Quantitative prediction of black soil horizon thickness at the watershed scale in Northeast China's black soil region[J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 256: 106886.
- [8] Xue Z H, Yi X Y, Feng W K, et al. Prediction and mapping of soil thickness in alpine canyon regions based on whale optimization algorithm optimized random forest: A case study of Baihetan Reservoir area in China[J]. *Computers & Geosciences*, 2024, 191: 105667.
- [9] Luo Z D, Lian J J, Nie Y P, et al. Improving soil thickness estimations and its spatial pattern on hillslopes in karst forests along latitudinal gradients[J]. *Geoderma*, 2024, 441: 116749.
- [10] Zajíčov K, Chuman T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review[J]. *Geoderma*, 2019, 343: 116-129.
- [11] Yu X X, Ma X W, Di L, et al. Using ground penetrating radar in determination of soil depth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 874-878. [于秀秀, 马兴旺, 迪力夏提, 等. 探地雷达在土层厚度调查中的试验研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 874-878.]
- [12] Wang S, Chen H S, Fu Z Y, et al. Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1024-1030. [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[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1024-1030.]
- [13] Doolittle J A, Collins M E. A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst[J]. *Geoderma*, 1998, 85(1): 83-102.
- [14] Yan Y J, Yan Y S, Zhao G Z, et al. Combined ERT and GPR data for subsurface characterization of weathered hilly slope: A case study in Zhejiang Province, southeast China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7616

- [15] Han X L, Liu J T, Zhang J, et al. Identifying soil structure along headwater hillslopes using ground penetrating radar based technique[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(3): 405-415.
- [16] Aranha P R A, Augustin C H R R, Sobreira F G. The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 49(4): 195-210.
- [17] Liao H J, Sun J Y, Zan Y W, et al. Dielectric constant model for soil and its application in engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 36-41. [廖红建, 孙俊煜, 咎月稳, 等. 土的介电常数模型及其工程运用探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 36-41.]
- [18] Liu W F, Huang Z, Guo Z X, et al. A nature-based solution to reduce soil water vertical leakage in arid sandy land[J]. Geoderma, 2023, 438: 116630.
- [19] Liu H T. Study on characteristics of soil moisture and nutrients and new regulation techniques in the thin loess covered pisha sandstone area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021. [刘鸿涛. 薄层覆土砒砂岩区土壤水分养分特征及新型调控技术研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.]
- [20] Fan S H, Qin F C, Che Z H. Geochemical indicators to constrain weathering, provenance and tectonic setting of the Pisha Sandstone (Early-Middle Triassic) in Northeast Ordos Basin, China[J]. Heliyon, 2024, 10(8): e29120.
- [21] Jin Z. Loess tableland-A flat land among thousands of valleys and valleys[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(1): 119-124. [金钊. 黄土塬——千沟万壑之中的平坦之地[J]. 地球环境学报, 2020, 11(1): 119-124.]
- [22] Fu M L, Chen Y M, Zhu X M, et al. Soil layer identification based on ground penetrating radar technology[J]. Soil and Crop, 2024, 13(3): 280-293. [富美玲, 陈一民, 朱向明, 等. 基于探地雷达的土壤分层识别研究[J]. 土壤与作物, 2024, 13(3): 280-293.]
- [23] Liu C, Liu G, Li H R, et al. Using ground-penetrating radar to investigate the thickness of mollic epipedons developed from loessial parent material[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105047.
- [24] Gerber R, Salat C, Junge A, et al. GPR-based detection of Pleistocene periglacial slope deposits at a shallow-depth test site[J]. Geoderma, 2007, 139(3/4): 346-356.
- [25] Lu S, Zhao D H, Qian J C, et al. Study on the maximum penetration depth of GPR based on soil electromagnetic properties[J]. Scientific Reports, 2026, 16: 6265.
- [26] Zajícov K, Chuman T. O and A soil horizons' boundaries detection using GPR under variable soil moisture conditions[J]. Geoderma, 2022, 422: 115934.
- [27] Geophysical Survey Systems, Inc. SIR-4000 Manual [M]. Rev K. Nashua: GSSI, 2024.
- [28] 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.
- [29] Wang P, Li X J, Min X Y, et al. Investigating soil layers with ground penetrating radar in the modern Yellow River Delta of China[J]. Near Surface Geophysics, 2024, 22(3): 339-357.
- [30] Davis J L, Annan A P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy[J]. Geophysical Prospecting, 1989, 37(5): 531-551.
- [31] Luo F Z, Hu W Y, Yang S H, et al. *In-situ* identification of the thickness of black soil layer based on ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(4): 941-952. [罗方舟, 胡文友, 杨顺华, 等. 基于探地雷达技术的黑土层厚度原位识别[J]. 土壤通报, 2025, 56(4): 941-952.]
- [32] Lu H P, Zhu X M, Zheng W J, et al. Mapping mollic epipedon thickness via ground-penetrating radar based on the combined method of Variational Mode Decomposition and Average Envelope Amplitude[J]. Soil and Tillage Research, 2026, 261: 107160.
- [33] Wang T C, Zhang W S, Li J H, et al. Identification of complex slope subsurface strata using ground-penetrating radar[J]. Remote Sensing, 2024, 16(2): 415.
- [34] Dirksen C, Dasberg S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 660-667.
- [35] Luo G B, Cao Y G, Bai Z K, et al. Representation and inversion of reconstructed soil volumetric water content in loess open pit mining area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(4): 529-537. [罗古拜, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区重构土壤体

积含水率表征与反演[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(4): 529-537.]

- [36] Mohammadi M F, Jalali S G H, Kooch Y, et al. Slope gradient and shape effects on soil profiles in the northern mountainous forests of Iran[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(12): 1366-1374.
- [37] Zhang Y K, Hartemink A E, Vanwalleghe T, et al. Climate and land use changes explain variation in the A horizon and soil thickness in the United States[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5: 129.
- [38] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(4): 371-384.
- [39] Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Soil and plant components ecological stoichiometry in four steppe communities in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2016, 147: 481-488.
- [40] Burylo M, Rey F, Mathys N, et al. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(14): 1463-1470.
- [41] Arendt B, Schneider M, Mayer W, et al. Environmental influences on the detection of buried objects with a ground-penetrating radar[J]. Remote Sensing, 2024, 16(6): 1011.

(责任编辑: 陈荣府)