

DOI: 10.11766/trxb202212120687

刘畅, 刘勤, 张琼, 淡晨希, 刘刚. 利用探地雷达测定东北黑土层厚度在坡面的空间变化[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 952–963.

LIU Chang, LIU Qin, ZHANG Qiong, DAN Chenxi, LIU Gang. Spatial Variation of Black Soil Thickness on Slope Measured by Using Ground Penetrating Radar in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 952–963.

利用探地雷达测定东北黑土层厚度在坡面的空间变化*

刘 畅¹, 刘 勤², 张 琼^{1, 3†}, 淡晨希¹, 刘 刚^{1, 3}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所)黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100; 2. 四川水利职业技术学院, 四川崇州 611231; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

摘要: 准确掌握黑土层厚度分布信息对于黑土资源评价和保护具有重要意义。然而, 传统土层厚度测定方法包括土壤剖面法、插钎法和钻孔法等对于大范围的土壤厚度测定效率较低且连续性较差。本研究利用探地雷达探测了东北黑土区直型、凸型和凹型 3 种坡型坡面的黑土层厚度。室内模拟试验对黑土及黄土母质土壤分别设置不同的容重和含水量, 探究土壤含水量和容重对土壤介电常数的影响以及探地雷达测定黑土厚度的可行性。野外试验通过开挖剖面 and 预埋标识物, 验证了探地雷达测量黑土厚度的准确性。结果表明: 土壤介电常数随容重的增大而增大, 随土壤含水量的增加而减小; 黑土和黄土母质层土壤含水量、容重和介电常数之间的关系可以用两个对数方程来描述, 其精确度为 95.26%~99.66%。探地雷达测量黑土厚度与剖面实测厚度相比, 精确度为 87.05%~95.58%。3 个坡面的黑土厚度空间分布不同, 且坡脚发生沉积处的黑土厚度较大, 坡肩和坡背土壤侵蚀较严重处的黑土厚度较薄。本研究可为进一步探明和保护黑土资源提供一种高效、准确的土壤厚度调查方法。

关键词: 探地雷达; 介电常数; 土层厚度; 空间变化

中图分类号: S159-3 **文献标志码:** A

Spatial Variation of Black Soil Thickness on Slope Measured by Using Ground Penetrating Radar in Northeast China

LIU Chang¹, LIU Qin², ZHANG Qiong^{1, 3†}, DAN Chenxi¹, LIU Gang^{1, 3}

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou, Sichuan 611231, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The black soil region of Northeast China is an important commodity grain production base in China. However, long-term high-intensity reclamation and unprotected utilization have led to serious soil erosion and continuous reduction of black soil thickness. In some areas, the low-nutrient loess parent material was exposed, resulting in decreased land

* 黑土地保护与利用科技创新工程(XDA28010201)专项资助 Supported by the Black Land Protection and Utilization Science and Technology Innovation Project (No. XDA28010201)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zqiswc@nwfufu.edu.cn

作者简介: 刘 畅 (1996—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: liuchang.nwfufu@foxmail.com

收稿日期: 2022-12-15; 收到修改稿日期: 2023-02-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-21

productivity, and food production was seriously threatened. However, determination of the distribution of soil thickness on the slope is challenging. The traditional soil thickness measurement methods, including the soil profile method, soil probes, and the drilling method, are inefficient and cannot ensure continuity along the slope. Therefore, this study aims to apply a new method, ground penetrating radar (GPR), to measure the continuous variation of black soil thickness on slopes. 【Method】In this study, the GPR was used to continuously measure the black soil thickness on three slopes (straight, convex, and concave) in northeast China. Firstly, two types of soil, black soil and loess parent material were probed in a wood box to investigate the effect of soil moisture and bulk density on the soil permittivity and to prove the feasibility of GPR determination for black soil thickness. Then, the accuracy of the GPR in measuring black soil thickness was verified in conjunction with field trial excavation profiles and pre-buried iron pipes. 【Result】(1) The soil permittivity increased and decreased with the increasing bulk density and soil moisture, respectively. The relationships among soil moisture, bulk density, and soil permittivity for both black soil and loess parent material can be represented by logarithmic equations with an accuracy of 95.26%~99.66%. (2) Compared with the actual thickness of the soil profile, the accuracy of GPR measurements for black soil thickness was 87.05%~95.58%. (3) The spatial distribution of black soil thickness differed among the three slopes. However, the overall wave-like variation was observed. Deposition occurred at the slope foot and the black soil thickness was thick, while the black soil thickness at the shoulder and back of the slope was thin where soil erosion was more serious. 【Conclusion】Soil moisture content and bulk density had a significant effect on soil permittivity and the soil permittivity decreased with the increasing clay content. Also, there were differences in the permittivity of black soil and loess parent material. It was observed that electromagnetic waves could be reflected at their interfaces, which means that GPR can be applied to detect the black soil thickness on loess parent material. Our analysis revealed that topographic factors significantly affected the spatial variation of black soil thickness among the three slope types studied. Based on these results, this study could provide an efficient and accurate method to investigate soil thickness for further evaluation and conservation of black soil resources.

Key words: Ground penetrating radar; Soil permittivity; Soil thickness; Spatial variation

黑土具有土壤表层疏松和有机质含量高等特征, 适宜农作物的生长^[1]。黑土区的开发已将近百年, 但由于过度开垦, 重用轻养, 中国东北地区土壤侵蚀面积达 22.16 万 km², 占土地总面积的 20.38%^[2]。严重的水土流失导致黑土层厚度急剧下降, 初垦时黑土层厚度为 60~80 cm, 开垦 40 年厚度变为 50~60 cm, 开垦 70~80 年厚度仅为 20~30 cm^[3]。而形成 1 cm 厚的黑土需要 300~400 a^[4]。水土流失严重制约了农业生产, 土壤生产力的大规模降低对我国粮食安全造成直接威胁^[5]。

土壤厚度能够反映土壤的发育程度, 与土壤肥力密切相关, 并且能够用来判定土壤侵蚀程度, 在作物的种植与生长过程中起着至关重要的作用^[6]。传统的土壤厚度获取方法有土壤剖面法、插钎法和钻孔法等^[7], 虽然测量结果准确度高, 但这些方法大多需要对样点进行破坏性挖掘或钻探, 工作强度大、成本高、效率低, 且难以获取土层厚度在坡面的连续变化特征。为了解决这些问题, 一些新的技术方法逐渐被应用于土壤厚度测量, 如电阻率技术

和探地雷达技术^[8-9]。它们可以快速且经济地对一个地区进行整体探测, 而探地雷达被认为是最有可能用于土壤调查中的一项无损探测技术^[10]。

目前, 探地雷达的应用范围已从介质相对均匀的地质环境, 如冰层、盐层等扩展至道路病害检查、地下污染物检测、土壤水分含量、浅层地下水位埋深以及土壤厚度等领域^[11]。此外, 探地雷达在土壤厚度测量方面也取得了一些进展。胡振琪等^[12]发现探地雷达可以有效用于复垦土壤的分层结构检测。Aranha 等^[13]利用探地雷达研究了土壤的风化剖面。于秀秀等^[14]应用探地雷达对新疆伊犁新垦区进行了土层厚度的调查, 发现该区土层较薄且土层和砾石层交互分布。王升等^[15]对探地雷达技术在典型的喀斯特坡地中的适用性进行了探讨, 喀斯特地区岩溶发育强烈, 土层薄且分布不均, 碎石含量高, 岩石与土层之间存在较大的电性差异, 探地雷达测定结果与开挖实测值基本吻合。但以上均是对残积母质土壤层进行的研究, 由残积物发育的土壤一般土层较薄且与岩层性质差异较大^[16], 探地雷达可以进行

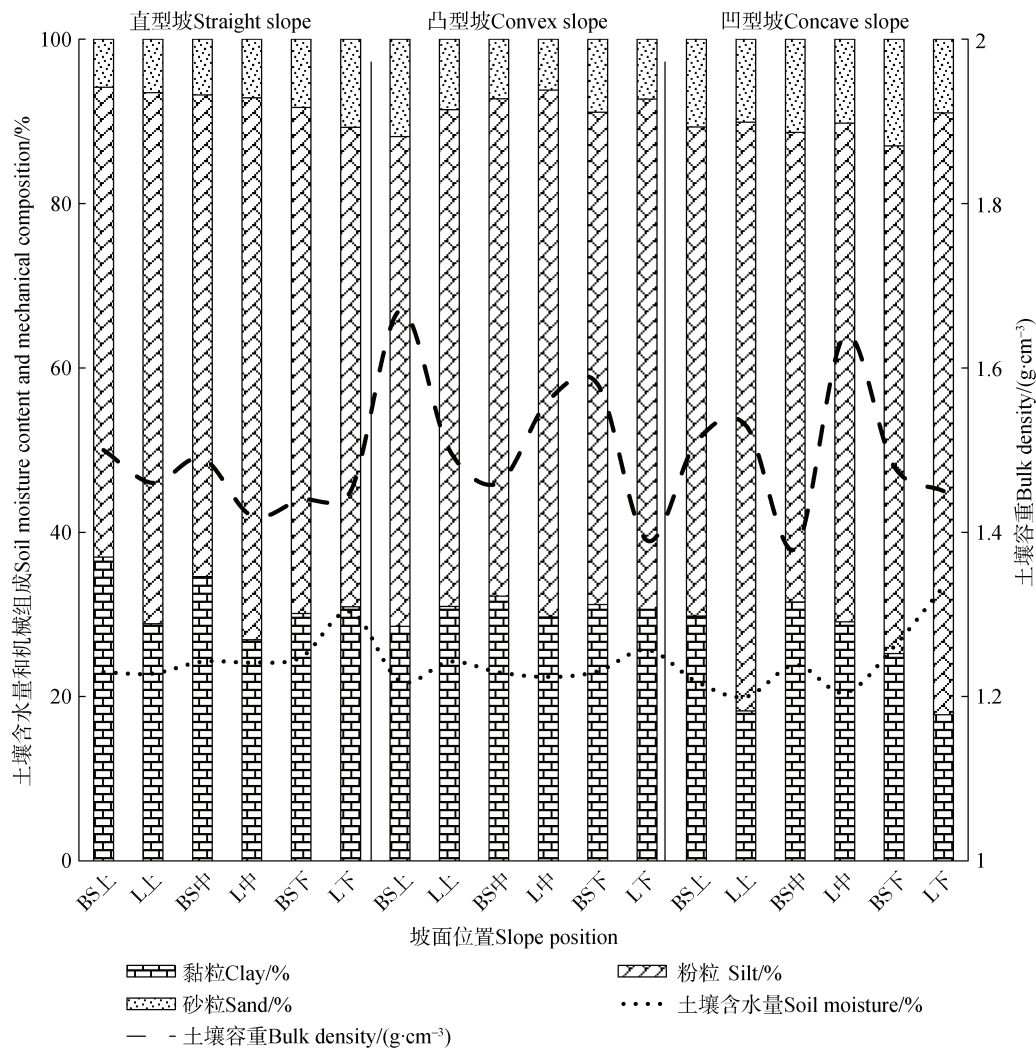
较好地区分。然而，探地雷达能否用于测定由运积母质（如黄土状母质）发育而来的黑土层厚度，目前尚不清楚。由于运积母质与其上层发育土壤的物理性质差异较小^[17]，因此应用探地雷达技术测定黑土层厚度的可行性仍需开展深入研究。

本研究将探讨运用探地雷达技术探测东北典型黑土坡面土层厚度的可行性，并对其精确度进行评估，从而为准确掌握黑土层厚度空间分布信息提供一种新的技术，为黑土资源评估与保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市宾县（45°52'17"N，127°28'51"E），气候类型属于中温带大陆性季风气候。年平均气温为 3.9℃，年平均积温为 3 200℃，年平均降水量为 630 mm，其中 80%的降水量主要集中在 5—9 月，无霜期 148 d 左右。地貌类型主要以漫岗丘陵为主。土壤类型主要为典型黑土，土壤质



注：BS 为黑土，L 为黄土母质。上、中、下分别代表采样位置为坡顶、坡中和坡脚。并且同一采样点位置的黑土与黄土母质层土壤样品为同一剖面内采集。BS is the black soil and L is the loessial parent material. The upper, middle, and lower sampling positions respectively represent the top, middle, and foot of the slope. The black soil and loessial parent material samples at the same position are from the same profile on each slope.

图 1 黑土及其黄土母质层土壤基本物理性质

Fig. 1 Basic physical properties of black soil and loessial parent material

地为粉质黏壤土，土壤基本性质如图 1 所示。主要粮食作物为玉米、大豆。

由于土壤发育的自然因素以及耕作、施肥和灌溉等人为活动的干扰，使得表层土壤与其黄土母质层（第四纪全新世砂粒黏土层）理化性质存在一定差异。黄土母质层颗粒组成主要为粗粉砂（0.05~0.01 mm）和黏粒，其质地较为黏重，透水性较差，有机质含量低于 1%^[18]。

1.2 探地雷达基本原理

探地雷达技术是利用高频电磁脉冲波的反射来探测地下目标体分布形态及其特征的一种方法^[19]，电磁波由发射天线向地下发送，且在传播过程中遇到不同介质时发生反射，返回至地面被接收天线接收^[12]。利用所接收到的电磁波反射信号，来分析反射信号的时频特征和振幅特征，从而推断地下目标体的空间位置、结构、电性及其几何形态等特征^[20]。

探地雷达探测方式主要有剖面法、共中心点法和宽角法三种探测方式^[9]，本文所采用的是剖面法，也是目前最为常用的探测方式。如图 2 所示，发射天线沿测线进行移动，发射的电磁波遇到不同介质时会发生反射，在地面被接收天线接收。且发射天线与接收天线的间距固定，每移动一次就获得一个运动记录，最终将所得记录整合成为时间剖面

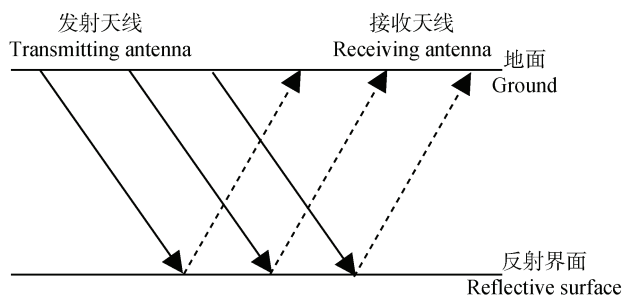


图 2 探地雷达探测方式

Fig. 2 Profile method for ground penetrating radar detection

图像^[21]。影响探地雷达探测深度及精度的因素主要包括天线频率、采样速度以及介电常数等方面。其中空气的介电常数为 1，水的介电常数为 81，而土壤和沉积物的介电常数介于 4~30 之间。

1.3 试验设计

(1) 室内模拟试验。探地雷达的探测精度及深度很大程度上受探测目标的介电常数、电导率所影响^[22]。因此，本研究针对不同土壤在不同含水量和容重条件下介电常数的变化情况进行了模拟试验。分别将研究区黑土和黄土母质装入长 3 m、宽 1 m、深 30 cm 的土槽中，且底部放置 1 cm 厚的铁板。其中供试黑土黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 33.89%、59.13%、6.98%，有机质含量为 27.5 g·kg⁻¹；黄土母质黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 28.91%、62.96%、8.13%，有机质含量为 7.5 g·kg⁻¹。采用环刀法和酒精燃烧法测量土壤容重和含水量。控制其含水量分别为 10%、20%、30%，土壤容重分别为 1.1 g·cm⁻³、1.3 g·cm⁻³、1.5 g·cm⁻³，并采用 400 MHz 天线的探地雷达（SIR-4000，GSSI，美国）对土槽内土壤进行探测。

(2) 野外试验。在研究区选取三个不同坡型的坡耕地（表 1）：直型坡，长 200 m，宽 130 m，平均坡度 1.91°；凸型坡，长 168 m，宽 70 m，平均坡度 2.48°；凹型坡，长 150 m，宽 60 m，平均坡度 3.19°。三个坡耕地均采用顺垄耕作方式且均种植玉米。

每个研究区域内按照坡宽均匀布设五条测线，采用 400 MHz 频率的天线结合剖面法进行测量，采取传统挖剖面法进行验证。在每条测线上选取一处进行开挖实测黑土层的深度，根据测线长度，每间隔 37.5~50 m 进行采样。土壤容重、含水量和颗粒组成样品每 5 cm 进行分层采样。其中黑土土壤样品采样深度为 25 cm，黄土母质层土壤样品取自黑土

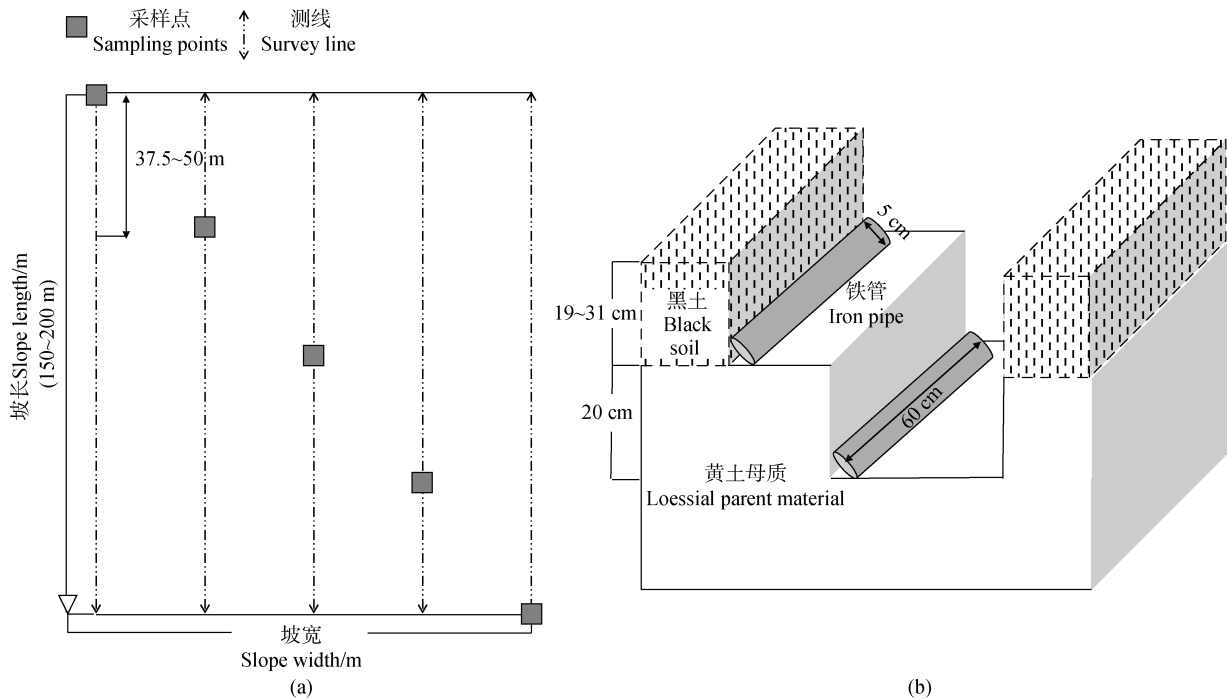
表 1 研究区不同坡型坡面地形特征

Table 1 Topographic features of the different slope shapes in the study area

坡型 Slope shape	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡长 Slope length/m	坡宽 Slope width/m	坡度 Slope gradient/°
直型坡 Straight slope	127°28'51"E	45°52'17"N	200	130	1.91±0.39
凸型坡 Convex slope	127°24'28"E	45°45'41"N	168	70	2.48±0.25
凹型坡 Concave slope	127°27'03"E	45°46'04"N	150	60	3.19±1.13

与黄土母质层界面以下 25 cm。对土壤样品进行室内实验分析,获取黑土层及其母质层土壤容重和含水量等数据(图 1)。在开挖剖面位置垂直于测线埋设 2 根长 60 cm,直径 5 cm 的铁管,其中一根位于黑土层及其黄土母质层分界面,另一根位于该界

面以下 20 cm 处(图 3)。由于铁管与土壤介电性质差异较大,会在雷达图像中出现明显的跳跃现象,以此作为标识物计算探地雷达探测精度。此外,根据已知的标识物深度以及双程走时可计算出电磁波在土体中的传播速度,从而得出各介质的介电常数。



注:(a)为铁管及测线在坡面上的布置;(b)为土壤剖面的侧视图。Note:(a) is the layout of iron pipes and survey lines on the slope surface; (b) is the lateral view of the soil profile.

图 3 探地雷达测线及剖面铁管分布图

Fig. 3 Slope survey lines and iron pipe distribution map

1.4 数据处理

根据雷达波的传播时间和深度,运用下述公式计算不同含水量和容重条件下土壤介电常数的变化。电磁波在土壤中传播速度可由下述公式^[22]表示:

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

式中, v 为电磁波在介质中的传播速度(m); h 为已知地下目标体的深度(m); t 为电磁波反射信号在介质中的双程走时(ns)。

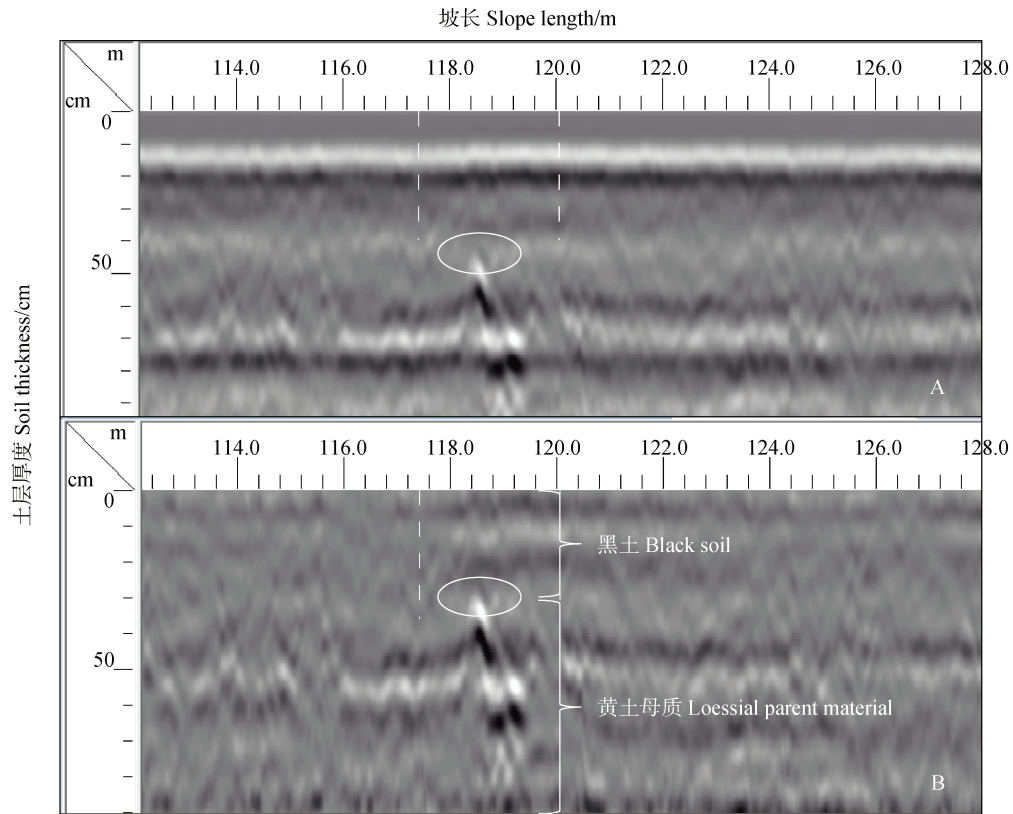
根据试验中土壤的已知深度和双程走时可得出介电常数值,由下述公式计算^[23]:

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

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

由于探地雷达利用宽频带记录结果,因此探测过程中会受到各种噪声的影响,并且记录下各种干扰噪声,因而要对所探测到的雷达图像进行降噪,即在 RANDB7 软件(GSSI,美国)中进行背景去除处理。随后在软件中进行手动/自动去除零点操作,消除电磁波在空气中(雷达发射和接收天线与地表之间的空气)传播的距离(图 4A),从而使得探测到的深度更加精确。图 4 所示为探地雷达探测土层图像处理前后对比,图中圆圈标注为所埋设铁管位置。

探地雷达剖面图像横坐标为雷达天线在地面测线上的位置,纵坐标为雷达反射波的双程走时(电



注：圆圈表示铁管布设位置为黑土层与黄土母质层分界面处。Note: The location of the buried iron pipe at the interface between black soil and the loessial parent material layer is marked by a circle.

图 4 处理前 (A) 后 (B) 雷达图像对比图

Fig. 4 (A) before and (B) after calibration of the radar image for field test

磁波由发射天线发出后遇到地下不同介质的分界面而发生反射,由接收天线接受所需要的时间即为双程走时^[23]。根据双程走时,图像纵坐标可调整为深度(图 4)。根据 RANDA7 软件解译出的黑土层厚度数据运用 Origin 2022 中 3D smoother App 绘制,采用 MATLAB R2018b 中三次样条插值方法进行插值。

2 结 果

2.1 黑土及黄土母质的介电常数

根据室内模拟试验获取的雷达图像以及式(1)和式(2)计算得到的黑土及其黄土母质层介电常数如图 5 所示。两种土壤介电常数在含水率相同的条件下,随着土壤容重的增加而增加;在土壤容重相同的条件下,两种土壤的介电常数随着含水率的增加而呈现减小的趋势。然而,在相同的土壤含水率和容重的条件下,两种土壤的介电常数存在差异,由图 5 可知黄土

母质层的介电常数略高于黑土层的介电常数。

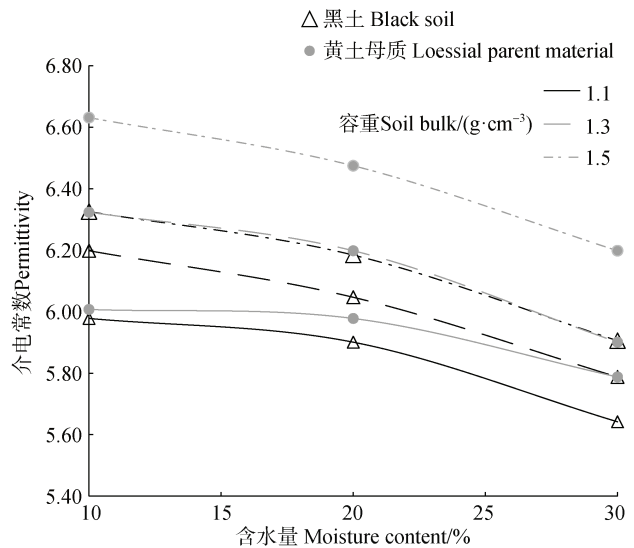


图 5 不同容重和含水率条件下的土壤介电常数

Fig. 5 Permittivity of black soil and loessial parent material with different bulk density and moisture content

对土壤含水量、土壤容重和介电常数进行相关性分析,黑土介电常数与黄土母质介电常数和土壤容重之间的相关系数分别为 0.598 和 0.799,二者与土壤含水量之间的相关系数分别为-0.776 和-0.561。而土壤容重和土壤含水量的共同作用对土壤介电常数也具有显著影响。因此,土壤介电常数与土壤容重和含水量之间存在显著的相关关系。

黑土及其黄土母质介电常数与土壤含水量和容重的关系可用以下拟合方程表示:

黑土 BS:

$$SP = 6.14 + 0.97 \ln(BD) - 1.95SM \quad R^2 = 0.96 \quad (3)$$

黄土母质 LPM:

$$SP = 6.11 + 1.65 \ln(BD) - 1.79SM \quad R^2 = 0.95 \quad (4)$$

式中, SP 为土壤介电常数; BD 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); SM 为土壤含水量 (%)。

根据式 (3) 和式 (4) 土壤介电常数预测方程,利用野外实测数据 (土壤含水量和土壤容重) 计算得到黑土及其黄土母质介电常数的预测值。根据式 (1) 和式 (2) 计算黑土及其黄土母质的实际介电常数 (表 2), 其中双程走时 (t) 和土层厚度 (h) 由雷达图像获取。结果表明, 预测方程所得出的介电常数值与实测值差异较小, 精确度介于 95.26%~99.66% 之间。黑土及其黄土母质层介电常数存在显著差异 (表 2, $P < 0.05$), 探地雷达可以对两种不同介电特性的土壤进行区分。

表 2 黑土及其黄土母质土壤介电常数

Table 2 Permittivity of black soil and loessial parent material

土层	样品标号	实际值	预测值	误差值	组内分析	组间分析
Soil layer	Sample name	Actual value	Predicted value	Error rate/%	<i>P</i> -value (within groups)	<i>P</i> -value (inter-group)
黑土层	ZBS 上	5.72±0.06	5.83±0.05	1.92	0.05	0.005
Black soil layer	ZBS 中	5.73±0.04	5.78±0.06	0.87		
	ZBS 下	5.76±0.31	5.76±0.04	0.00		
	TBS 上	5.70±0.12	5.97±0.02	4.74		
	TBS 中	5.79±0.17	5.84±0.02	0.86		
	TBS 下	5.71±0.06	5.97±0.09	4.55		
	ABS 上	5.80±0.06	5.84±0.08	0.69		
	ABS 中	5.55±0.22	5.59±0.00	0.72		
	ABS 下	5.81±0.21	5.89±0.03	1.38		
	黄土母质层	ZL 上	5.84±0.07	5.99±0.01	2.57	0.13
Loessial parent material layer	ZL 中	5.89±0.03	5.91±0.01	0.34		
	ZL 下	5.74±0.00	5.76±0.01	0.35		
	TL 上	5.92±0.15	5.97±0.02	0.84		
	TL 中	6.04±0.13	6.18±0.07	2.32		
	TL 下	5.77±0.06	5.91±0.09	2.42		
	AL 上	5.96±0.03	6.15±0.01	3.19		
	AL 中	6.19±0.05	6.24±0.02	0.81		
	AL 下	5.80±0.03	6.04±0.05	4.14		

注: Z 代表直型坡, T 代表凸型坡, A 代表凹型坡, BS 代表黑土, L 代表黄土母质。上、中、下分别代表采样位置为坡顶、坡中和坡脚。同一采样点位置的黑土与黄土母质层土壤样品为同一剖面内采集。Z is the straight slope, T is the convex slope, and A is the concave slope. BS is the black soil, and L is the loessial parent material. The upper, middle, and lower sampling positions respectively represent the top, middle, and foot of the slope. The black soil and loessial parent material samples at the same position are from the same profile on each slope.

2.2 探地雷达测定黑土层厚度的精确度

根据野外开挖剖面试验获取各坡面铁管的实际埋深，并由雷达图像读取铁管的测量深度。3 个不同坡型坡面上、中、下三个位置预埋铁管实际埋深及探地雷达实测深度如表 3 所示。结果表明，探地雷达测定黑土层厚度的精确度为 87.05%~95.58%，探地雷达测量深度与实际埋深无显著差异。

表 3 不同坡面铁管实际埋深和探地雷达测量深度

Table 3 Actual buried depth and GPR measured depth of iron pipe with different slope shapes

坡型 Slope shape	实际深度 Actual depth/cm	探地雷达测定深度		<i>P</i>
		GPR measurement/cm	误差值 Errors/%	
直型坡 Straight slope	31 22.5 20	33.22±0.29 23.72±0.95 21.68±0.43	7.16 5.42 8.40	0.744
凸型坡 Convex slope	19 25 29	21.46±0.13 26.97±0.52 32.36±0.57	12.95 7.88 11.59	0.482
凹型坡 Concave slope	28.5 26.5 22.5	30.30±0.26 27.67±0.06 24.01±0.37	6.32 4.42 6.71	0.683

注： $P>0.05$ 表示不具有显著性差异。 $P>0.05$ indicates no significant difference.

2.3 坡面黑土层厚度的变化规律

通过探地雷达对坡耕地黑土层厚度进行探测，得到图 6 所示的坡耕地黑土层厚度沿坡面的连续变化，宾县直型坡、凸型坡和凹型坡平均黑土层厚度为 28.3 cm、28.6 cm、27.2 cm (表 4)。直型坡面 0~50 m 土层厚度总体上呈现下降的趋势，黑土层厚度在 60~75 m 和 110~130 m 左右有增加的情况，130~160 m 处黑土层厚度明显变薄，随着坡长的增加至坡脚处黑土层厚度逐渐增加。凸型坡面在坡长 100~140 m 范围内土层厚度相对较薄，平均厚度约为 26.59 cm，随着坡长的增加，土层厚度也逐渐增加至坡脚处。凹型坡面，坡背 (55~85 m) 土层厚度最薄，平均厚度为 25.33 cm，坡底处较厚平均厚度为 30.74 cm，在整个坡面呈现波浪式变化。

表 4 坡面不同坡位黑土层厚度

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

坡型 Slope shape	坡位 Slope position	黑土层厚度 BS thickness/cm	平均厚度
			Average thickness/ cm
直型坡 Straight slope	坡顶	28.9±1.3a	28.3±0.7
	坡肩	28.6±1.1a	
	坡背	29.3±1.8a	
	坡脚	26.6±1.1b	
凸型坡 Convex slope	坡底	28.0±1.4ab	28.6±0.6
	坡顶	29.0±0.4a	
	坡肩	28.7±1.1a	
	坡背	26.9±0.7b	
凹型坡 Concave slope	坡脚	28.8±0.6a	27.2±0.7
	坡底	26.7±0.6b	
	坡顶	28.0±0.7ab	
	坡肩	26.3±1.8b	
	坡背	25.3±0.6b	
	坡脚	26.7±1.1b	
	坡底	30.7±1.3a	

注：坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡底分别占坡长的 15%、15%~35%、35%~60%、60%~82%和 82%~100%。同列不同字母表示同一坡型不同坡位具有显著差异 ($P<0.05$)。Note: The summit, shoulder, back, foot, and toe of the slope were 15%, 15%~35%, 35%~60%, 60%~82%, and 82%~100% of the slope length, respectively. Different letters in the same column meant that different slope positions of the same slope shape have significant differences at 0.05 level.

3 讨论

土壤介电常数的影响因素众多，其中土壤含水量、容重对土壤介电常数的影响最大^[24]。通过模拟试验得知，两种土壤介电常数随着土壤含水量的增大而减小，而土壤容重的增加导致土壤孔隙度的降低，从而使得电磁波传播速度下降，最终导致土壤介电常数的增大 (图 5)。此外，在相同的土壤含水量和容重条件下，黑土与黄土母质的介电常数差异可能与土壤机械组成有关，随着黏粒含量的增加，土壤介电常数减小。黄志珍和吕军^[25]认为黏粒为带电固相，其含量的增大将改变土壤中固相的介电性质，从而引起介电损失。

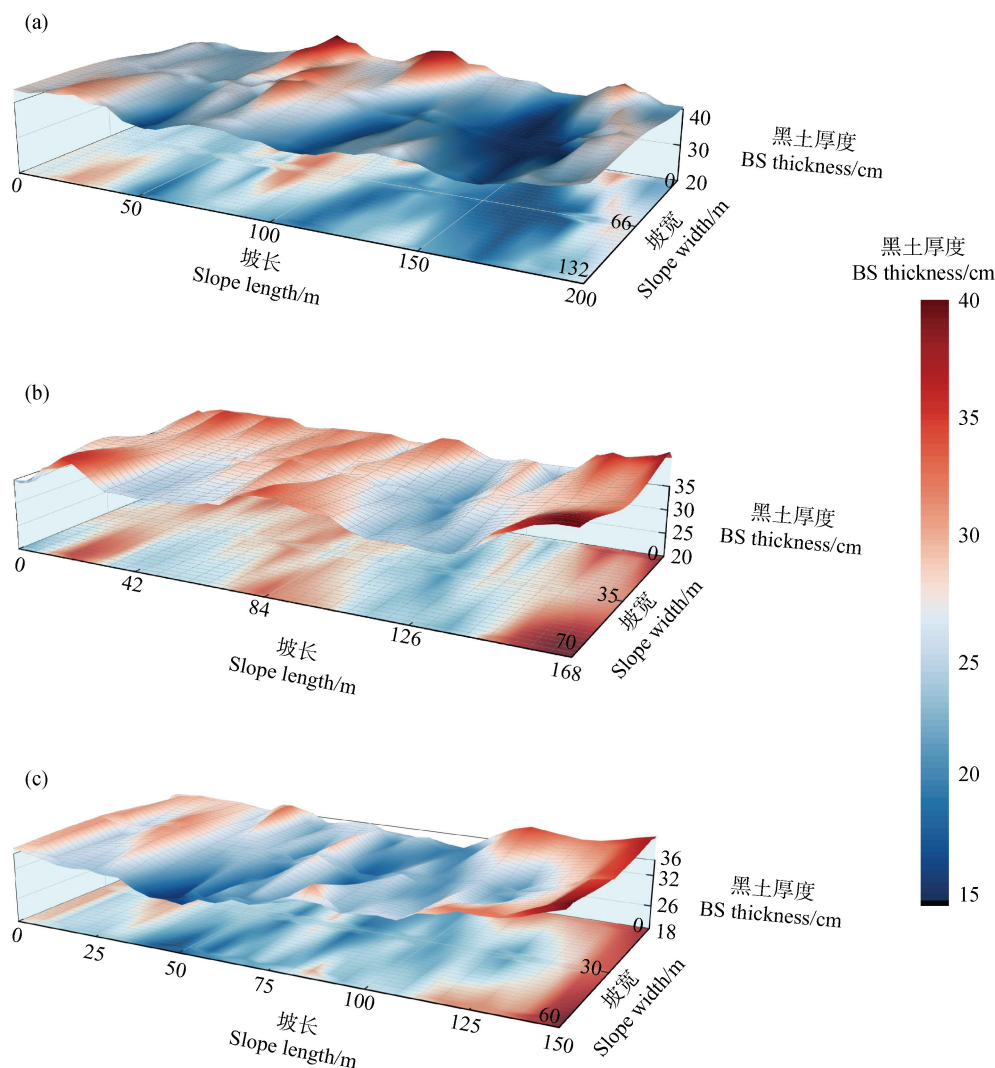


图 6 不同坡型坡面黑土层厚度空间变化 (a) 直型坡 (b) 凸型坡 (c) 凹型坡

Fig. 6 The variation of black soil layer thickness and gradient along slopes with different shapes (a) Straight slope (b) Convex slope (c) Concave slope

东北黑土区独特的气候条件有利于黑土层的发育和形成,但由于大量的自然植被被农作物所替代,每年秋收后裸露的土壤使得土壤有机质含量降低且土壤侵蚀加重导致黑土层变薄^[26]。同时,近年来气温的显著升高也导致东北黑土区黑土层厚度呈现下降的趋势^[27]。黑土层厚度一方面受到自然成土过程的影响,另一方面还受到土壤侵蚀-沉积的影响^[28]。本研究中不同坡型坡面黑土层厚度的空间变化不同(图 6),主要是由于地形而导致坡面侵蚀-沉积分布存在差异^[29]。Fang 等^[30]发现土壤侵蚀速率随着地形变化而具有明显的变化规律,从坡顶至坡肩逐渐增加,再逐渐减小至坡脚。An 等^[31]研究表明凸型坡和凹型坡的侵蚀程度存在显著差异,凸型坡侵蚀最严

重的位置是坡背,凹坡侵蚀最严重的位置是坡肩。王禹等^[32]研究则表明黑土区直型坡土壤侵蚀速率沿坡面存在明显的周期性变化规律。然而同一坡型不同坡位其土壤侵蚀速率也有差异,但均在坡脚处发生沉积,引起黑土层厚度的增加。阎百兴和汤洁^[33]研究发现坡肩、坡背土壤侵蚀较为严重,而坡脚则出现沉积现象。这与本研究中黑土层厚度变化规律基本一致(表 4)。

东北黑土区水土流失严重,由土壤侵蚀引起的土壤退化将导致作物生产力下降^[5, 34],冯志珍^[35]探究了黑土层厚度对玉米产量的影响,结果表明玉米产量随表层土壤厚度的减小而降低,其中表层土壤厚度小于 20 cm 时玉米产量下降幅度更大。因此,

为保护黑土资源需对黑土厚度进行准确的测定。但传统土层厚度测定方法大多为剖面法耗时费力, 由图 6 和表 4 结果可知坡面不同位置黑土厚度差异较大, 传统方法难以准确测定土层厚度沿坡面的空间变化规律。本文利用探地雷达探测技术可以快速探测大面积土层厚度分布状况, 为获取坡面连续分布的黑土层厚度提供一种高效探测方法, 为开展黑土资源保护提供一定的理论依据。

然而, 这项技术仍然存在一些局限性, 比如其探测精度与深度之间的矛盾暂时还难以解决。随着探测深度的增加, 电磁波传播能量损耗, 探测精度将会大幅下降^[36]。因此在土层较厚地区是否适用仍需进一步探讨, 在什么样的临界深度能够准确探测土层厚度仍需进一步研究。此外, 由于介质不均匀所造成测量误差有待解决。如秸秆还田造成表层土壤介质不再均匀单一, 因此探地雷达探测的土壤深度与实际测得土壤深度存在 1~3 cm 的误差(表 3)。

4 结 论

本研究利用探地雷达技术对东北典型黑土区黑土层厚度开展研究。在对黑土及黄土母质土壤介电常数差异的试验研究中表明, 土壤含水量和土壤容重同时影响着土壤介电常数。随着土壤含水量的增加, 介电常数呈递减的趋势, 而随着土壤容重的增加, 介电常数呈增加的趋势。其中土壤容重对介电常数的影响更为显著。此外, 土壤机械组成对介电常数也存在一定的影响。由此表明, 在利用探地雷达探测土壤厚度时, 研究区土壤自身物理性质的变化不容忽视。由模拟试验得到的土壤介电常数预测方程可以根据野外实测土壤含水量和容重计算黑土及其黄土母质层介电常数, 其精确度为 95.26%~99.66%。探地雷达测得的黑土层厚度与人工开挖剖面测得的黑土层厚度一致, 精确度为 87.05%~95.58%。3 个坡面的黑土层厚度空间分布存在差异, 坡脚发生沉积, 黑土层厚度较厚, 坡肩和坡背土壤侵蚀严重, 黑土厚度较薄。因此, 探地雷达技术可以用于探测运积母质发育的坡面连续黑土层厚度分布, 从而为黑土层厚度调查提供一种精确高效的方法。

参考文献 (References)

- [1] Wei D, Kuang E J, Chi F Q, et al. Status and protection

strategy of black soil resources in northeast of China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016 (1): 158-161.

- [魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016 (1): 158—161.]
- [2] Wen L L, Wang J H, Ren M, et al. Effect of comprehensive control of soil erosion in black soil region of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021 (6): 4—7. [温磊磊, 王教河, 任明, 等. 东北黑土区水土流失综合治理成效[J]. 中国水土保持, 2021 (6): 4—7.]
- [3] Li F P, Li J Y, Xu Z X. The status quo of black soil degradation and water and soil loss in northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13 (3): 50—54. [李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006, 13 (3): 50—54.]
- [4] Zhang X C. Factors analysis on soil and water erosion in Songnen valley[J]. Territory and Natural Resources Study, 2000 (1): 35—36. [张秀池. 松嫩流域水土流失原因分析[J]. 国土与自然资源研究, 2000 (1): 35—36.]
- [5] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2009, 52 (7): 1005—1021. [王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2009, 39 (10): 1397—1412.]
- [6] Wang S Q, Zhu S L, Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. Geographical Research, 2001, 20 (2): 161—169. [王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20 (2): 161—169.]
- [7] Li L, Fu X, Cui J, et al. Soil layer identification based on envelope detector and STFT spectrum analysis of ground penetrating radar signals[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22 (2): 316—327. [李俐, 付雪, 崔佳, 等. 基于包络检波和 STFT 谱分析的探地雷达土壤分层信息识别[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22 (2): 316—327.]
- [8] Xie Y G, Li X, Zhang F B, et al. Detection of soil thickness in forest land based on electrical resistivity tomographic scanning technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (4): 212—216. [解迎革, 李霞, 张凤宝, 等. 基于电阻率断层扫描技术探测林地土层厚度[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (4): 212—216.]
- [9] He R Z, Hu Z Q, Wang J, et al. The progress of using ground penetrating radar to detect the soil quality[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24 (4): 1483—1492. [何瑞珍, 胡振琪, 王金, 等. 利用探地雷达检测土壤质量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2009, 24 (4): 1483—1492.]

- [10] Morey R M. Continuous subsurface profiling by impulse radar , subsurface explorations for underground excavation and heavy construction[M]. New York , American Society of Civil Engineers, 1974: 212—232.
- [11] Jol H. Ground penetrating radar theory and applications[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2008: 509—524.
- [12] Hu Z Q, Chen B Z, Chen X T. Study on layer structure of rehabilitated soil using ground-penetrating radar[J]. China Mining Magazine, 2005, 14 (3): 73—75. [胡振琪, 陈宝政, 陈星彤. 应用探地雷达检测复垦土壤的分层结构[J]. 中国矿业, 2005, 14 (3): 73—75.]
- [13] 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.
- [14] 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.]
- [15] Wang S, Chen H S, Fu Z Y, et al. Estimation of soil thickness of typical Karst slope based on 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.]
- [16] Aide M T, Dunn D, Stevens G. Fragiudults genesis involving multiple parent materials in the eastern Ozarks of Missouri[J]. Soil Science, 2006, 171 (6): 483—491.
- [17] Koop A N, Hirmas D R, Sullivan P L, et al. A generalizable index of soil development[J]. Geoderma, 2020, 360: 113898.
- [18] Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (2): 66—70. [范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (2): 66—70.]
- [19] Bai B, Zhou J. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (4): 527—531. [白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (4): 527—531.]
- [20] Dai Q W, Lü S L, Xiao B. A discussion on the applied condition of GPR[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24 (2): 157—160. [戴前伟, 吕绍林, 肖彬. 地质雷达的应用条件探讨[J]. 物探与化探, 2000, 24 (2): 157—160.]
- [21] Li H, Lu G Y, He X Q, et al. The progress of the GPR and discussion on its future development[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25 (4): 1492—1502. [李华, 鲁光银, 何现启, 等. 探地雷达的发展历程及其前景探讨[J]. 地球物理学进展, 2010, 25 (4): 1492—1502.]
- [22] Conyers L B. Ground penetrating radar, 2nd edition[J]. Geoarchaeology, 2006, 21 (7): 763—764.
- [23] 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.
- [24] He L, Wang X D, Yang F, et al. Estimation of soil water content by Ground Penetrating Radar[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22 (5): 1673—1679. [何亮, 王旭东, 杨放, 等. 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.]
- [25] Huang Z Z, Lü J. Calibration and validation of Ks value for measurement of soil water content by TDR in red soil and paddy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17 (1): 145—147, 151. [黄志珍, 吕军. TDR 在红壤和水稻土含水量测定中 Ks 值的标定及验证[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (1): 145—147, 151.]
- [26] Cui M, Zhang X D, Cai Q G, et al. Relationship between black soil development and climate change and geomorphological evolution in Northeast China[J]. Geographical Research, 2008, 27 (3): 527—535. [崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. 地理研究, 2008, 27 (3): 527—535.]
- [27] Liu K, Wei M H, Dai H M, et al. Spatiotemporal variation of black soil layer thickness in black soil region of northeast China[J]. Geology and Resources, 2022, 31 (3): 434—442, 394. [刘凯, 魏明辉, 戴慧敏, 等. 东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J]. 地质与资源, 2022, 31 (3): 434—442, 394.]
- [28] Feng Z Z, Zheng F L, Hu W, et al. Impacts of mollic epipedon thickness and overloaded sediment deposition on corn yield in the Chinese Mollisol region[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 257: 175—182.
- [29] Cui M, Cai Q G, Fan H M. Research progress of soil erosion in black soil region of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 (5): 28—32. [崔明, 蔡强国, 范昊明. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14 (5): 28—32.]
- [30] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using ¹³⁷Cs tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China[J]. Pedosphere, 2006, 16 (2): 201—209.
- [31] An J, Zheng F L, Wang B. Using ¹³⁷Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China[J]. Catena, 2014, 123: 243—251.
- [32] Wang Y, Yang M Y, Liu P L. The wavelet analysis on the soil erosion intensity in the black soil straight cultivated

- slope[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24 (1): 98—103, 87. [王禹, 杨明义, 刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. *核农学报*, 2010, 24 (1): 98—103, 87.]
- [33] Yan B X, Tang J. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion[J]. *Geographical Research*, 2005, 24 (4): 499—506. [阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. *地理研究*, 2005, 24 (4) 499—506.]
- [34] Zhang X Y, Meng L Q, Liu X B, et al. Effect of soil erosion on dry matter accumulation and yield of maize in black soil region[J]. *China Water Resources*, 2007 (22): 47—49. [张兴义, 孟令钦, 刘晓冰, 等. 黑土区水土流失对玉米干物质积累及产量的影响[J]. *中国水利*, 2007 (22): 47—49.]
- [35] Feng Z Z. Effects of soil erosion-deposition on soil properties and maize yield in thin black soil region of northeast China[D]. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University. [冯志珍. 东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学水土保持研究所, 2018.]
- [36] Jol H M, Lawton D C, Smith D G. Ground penetrating radar: 2-D and 3-D subsurface imaging of a coastal barrier spit, Long Beach, WA, USA[J]. *Geomorphology*, 2003, 53 (1/2): 165—181.

(责任编辑: 檀满枝)