

基于探地雷达的苏打盐碱地土壤分层信息获取

朱向明¹, 富美玲¹, 陆海鹏^{1,2}, 王明明¹, 张于¹, 马亮乾^{1,2},
彭伟¹, 冉恩华^{1,2}

(1. 黑土地保护与利用全国重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 东北松嫩平原西部地区苏打盐碱地面积巨大并且改良难度大, 严重制约着当地农业生产力的发展。快速了解土体中的土壤层次信息对于评价、改良与利用盐渍化土壤具有重要意义。该研究以位于吉林西部松嫩平原的典型苏打盐碱地为研究对象, 利用探地雷达对不同盐碱程度的盐碱土进行野外探测, 分别基于雷达图像波形图和 Hilbert 谱瞬时属性确定土壤分层时域位置, 并采用扩展后的 Dobson 介电常数模型估算各层介电常数, 从而获得土壤分层厚度信息, 最后将两种方法检测结果与实地挖掘剖面进行对比分析。结果表明: 1) 土壤盐分含量对探地雷达信号的影响十分明显, 大于 7 ns 时, 电磁波幅值已很小。苏打盐碱土介电常数仍主要由实部决定, 但介电常数虚部不能被忽略; 2) 基于雷达图像波形图和基于 Hilbert 谱瞬时属性两种方法均可较为准确地识别耕层 (Ap) 时域位置, 但由于电磁波能量的衰减, 基于波形图像的方法无法识别耕层以下层次, 而基于 Hilbert 谱瞬时相位方法除个别过渡层外, 可准确识别 60 cm 内绝大多数土壤层次; 3) 除个别过渡层外, 基于 Hilbert 谱瞬时相位方法获得的土层厚度绝对误差基本在 5 cm 以内, 相对误差在 15% 以内, 基本能满足盐碱地野外探测需求。Hilbert 谱瞬时相位对盐碱地探地雷达信号具有明显增强作用, 有助于客观识别土壤分层时域位置, 该研究可为快速、无损获取盐渍化土壤层次信息提供借鉴。

关键词: 探地雷达; 土壤分层; 土壤介电常数; 希尔伯特变换; 苏打盐碱地

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407254

中图分类号: S152

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-04-0099-09

朱向明, 富美玲, 陆海鹏, 等. 基于探地雷达的苏打盐碱地土壤分层信息获取[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 99-107.
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407254 <http://www.tcsae.org>

ZHU Xiangming, FU Meiling, LU Haipeng, et al. Acquiring the soil stratification of soda saline-alkali soils using ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(4): 99-107. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407254 <http://www.tcsae.org>

0 引言

位于中国东北松嫩平原西部地区的苏打盐碱地是世界三大片苏打盐碱地集中分布区之一^[1], 目前其面积已达到 393.70 万 hm²^[2], 并且近 50 年来仍以每年 1.1% 的速度增长^[3]。该区域盐碱地土壤 Na⁺含量高、碱性强、透气性差, 是盐碱土类型中改良利用难度最大的土壤类型^[4]。盐碱地改良的关键在于“排水洗盐”, 而土壤剖面层次决定着土壤的水、盐迁移。因此, 快速、准确地获取土壤剖面层次信息, 对于改良苏打盐碱地具有重要意义。

传统的土壤分层信息调查仍然主要采用剖面挖掘法, 该方法虽然直观、清晰, 但费时费力、破坏性大^[5], 而且盐碱地空间变异性大, 剖面挖掘法仅能获取点位尺度信息, 在生成区域尺度信息时误差较大^[6]。探地雷达

(ground penetrating radar, GPR) 因其快速、连续、非侵入等优点被证明是一种探测中小尺度土壤层次的有效工具, 可快速地测量大面积、多变地形条件下的土壤深部信息^[7]。探地雷达技术是基于土壤发生层介电特性的差异, 通过发送高频电磁波, 分析回波信号波谱特征来区分土壤层次的^[8]。1980 年, JOHNSON 等^[9]在美国佛罗里达州最早证明了探地雷达用于细砂层调查的可行性, 随后该技术逐步被用于土壤有机层、泥炭层、冻土层的探测^[10-11]。由于探地雷达可以有效表征地层的连续性^[12], 该技术被越来越多的应用于土壤层位调查^[13]。2004 年 ROTH 等^[14]利用识别雷达图像中同相轴的方法实现了对农田土壤层次结构探测, 并认为探地雷达在未来农田土壤制图中将具有很大应用潜力。随着探地雷达技术的不断发展, 国内学者也在特定层次如碱化层^[15]、喀斯特坡地^[16]、网纹红土层^[17]等探测中开展了大量验证试验。

由于自然土壤的复杂性以及噪声、杂波的干扰, 仅依靠雷达图像的同相轴判读土壤分层, 有很大的主观性, 容易出现多解现象^[18]。因此, 如何有效地对探地雷达这种非平稳、非线性信号进行处理, 以获取包含土壤分层信息的回波信号成为探地雷达识别土壤分层的关键^[19]。与小波变换、S 变换等时频信号分析方法相比, 希尔伯

收稿日期: 2024-07-30 修订日期: 2024-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500102); 黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28010401); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划(131323KYSB20210004)

作者简介: 朱向明, 博士, 副研究员, 主要从事土壤资源调查与利用。
Email: zhuxm@iga.ac.cn

特 (Hilbert) 变换不仅能够揭示原信号多尺度振荡变化特征, 而且能够使信号分解具有唯一性。张海如等^[20]认为, 探地雷达信号经 Hilbert 变换后的瞬时属性组合分析, 能够很好地提高探地雷达的层位识别能力, 特定是对于薄层介质识别具有明显增强作用。李俐等^[21]提出了一种基于包络检波和 STFT 谱分析的分层识别方法, 并成功在河北曲周潮土区进行了验证, 该方法探测结果对于 70 cm 深度以上土层厚度计算误差大都保持在 10% 以下。吴全等^[22]同样采用包络检波的方法提取包络信号, 借助 Hilbert 变换分析瞬时相位来确定分层位置, 识别了内蒙古土默特左旗典型土壤剖面分层情况, 该方法探测结果每层土壤厚度相对测量误差均小于 10%。RUAN 等^[23]在东北典型黑土区借助 Hilbert 变换及小波变换方法探究了探地雷达识别土壤分层的有效性, 该方法探测结果绝对误差保持在 15 cm 之内。

以上研究大多集中在盐分含量低的低损耗土壤中, 而盐碱地与普通土壤在土壤结构、密度、湿度、有机质含量、含盐量、pH 值等物理化学性质方面存在明显差异, 这些差异使得电磁波信号在盐碱地中相较于在普通土壤中的衰减更为强烈。存在着探测深度与精度难以平衡的现象, 导致探地雷达在盐碱地分层识别研究中应用较少, 甚至一度被认为不适宜探地雷达的应用^[24]。目前主要通过多种频率天线组合探测的复杂方式^[23]或对雷达数据进行精细处理等方式来应对这一难题。本研究在苏打盐碱地典型分布区尝试开展探地雷达调查试验, 分析不同盐碱程度对探地雷达波谱特征的影响, 比较基于雷达图像波形图和 Hilbert 谱瞬时属性两种土壤分层划分方法, 测算各层次土壤厚度并与实地挖掘剖面进行对比, 探究探地雷达在苏打盐碱地分层信息获取中的有效性, 以期为快速、无损盐碱地分层信息获取提供思路。

表 1 各采样点土壤剖面层次信息
Table 1 Stratified information of all soil profiles

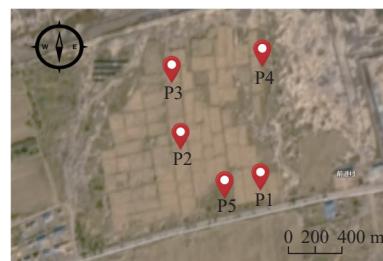
样地 Sample plot	发生层 Soil horizon	深度/ Depth/ cm	根系 Root	质地 Texture	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	pH 值 pH value	含水率 Water content/%	含盐量 Salt content/ (g·kg ⁻¹)	电导率/ Conductivity/ (mS·cm ⁻¹)	粒径占比 Proportion of particle size/%			介电常数 Dielectric constant		
										砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	实部 Real part	虚部 Imaginary part	
P1	Ap	0~22	多量	砂质黏壤	1.53	8.37	14.38	2.28	0.41	52.77	9.15	38.08	6.16	0.55	6.18
	ACz1	22~32	少量	砂质壤土	1.61	8.65	15.59	0.37	0.24	59.38	10.43	30.19	6.73	0.48	6.75
	ACz2	32~53	无根系	砂质壤土	1.67	9.51	16.05	1.50	0.34	56.15	15.38	28.47	6.96	0.47	6.98
P2	Ap	0~20	中量	砂质黏壤	1.54	9.96	14.25	10.30	1.15	73.00	5.50	21.50	7.46	1.25	7.56
	ACz	20~53	极少量	砂质黏壤	1.75	10.26	17.95	14.78	1.56	59.60	11.10	29.30	8.33	1.40	8.45
	C	53~71	无根系	砂质黏壤	1.74	10.18	19.63	11.89	1.29	57.30	16.40	26.30	9.22	1.33	9.32
P3	Ap	0~22	多量	砂质黏壤	1.40	9.29	14.18	9.74	1.10	46.70	19.60	33.70	7.20	1.32	7.32
	ABz	22~32	少量	砂质黏壤	1.73	10.24	18.18	15.73	1.65	59.20	10.70	30.10	7.76	1.45	8.01
	Bz	32~59	无根系	砂质黏壤	1.65	10.36	20.45	21.73	2.20	63.90	3.70	32.40	8.66	1.98	8.78
P4	Ap	0~32	多量	砂质黏壤	1.45	9.40	23.07	5.21	0.68	69.40	0.40	30.20	8.83	1.02	8.49
	ABz	32~62	极少量	砂质壤土	1.68	10.21	24.07	12.77	1.38	61.90	18.10	20.00	9.02	2.05	9.25
P5	Ab	0~25	中量	砂质黏土	1.63	10.10	24.07	12.35	1.34	53.80	11.00	35.20	9.53	1.90	9.72
	ABz	25~54	极少量	壤土	1.65	10.32	24.16	15.67	1.64	48.20	36.80	15.00	10.36	2.12	10.58

自 2003 年开始, 该区域陆续被开垦种植水稻, P1~P4 样地种植水稻年限为 10~20 a, 5 号样地为撂荒地, 基本保持了种稻前状态。2023 年 4 月中旬在研究区

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省大安市红岗子乡中国科学院大安碱地生态试验站 (45°35'58"N, 123°50'27"E) 附近, 地处松嫩平原腹地, 为苏打盐碱土典型分布区。地势低平, 土壤质地黏重, 渗透性差, 水分子上下运移不畅, 不利于土壤中盐分的有效淋洗。气候属于半干旱半湿润大陆性季风气候, 该地区干旱少雨, 年平均降水量 460 mm, 年平均蒸发量高达 1 800 mm, 年平均气温 4.3 °C, 年日照时数 3 000 h, 无霜期 137 d, 海拔 131~136 m。该区地质构造为松辽凹陷中部, 成土母质主要为冲积沉积物与湖积沉积物, 土壤类型多为草甸土、盐土、碱土以及盐化或碱化土, 土壤 pH 值通常在 8.5 以上, 属中度或重度盐碱土。浅层地下水阴离子以 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 为主, 阳离子以 Na^+ 为主, 埋深在 1.0~3.2 m 之间。研究区位置及采样点分布如图 1 示。



注: P1 样地为轻度盐碱土, P2~P5 样地为中重度盐碱土。

Note: P1 plot is mild saline alkali soil, and P2~P5 plots are moderate to severe saline alkali soil.

图 1 苏打盐碱地采样点分布图

Fig.1 Sampling locations in soda saline-alkali soil area

1.2 试验设计及数据获取

试验选取该区域具有不同盐碱化程度的 5 个典型样地作为研究对象 (表 1)。

翻耕前开展了土壤剖面挖掘和探地雷达探测试验。首先在样地中间位置挖掘土壤剖面, 由于该时间段研究区土壤仍存在冻层, 因此各样地均挖掘至冻层深度, 由土壤

分类专家依据土壤颜色、土粒结构、松紧度及新生体等按发生层进行土壤剖面层次划分、拍照。然后按发生层分层采集土壤容重环刀、土壤样品，并用 TDR300 (美国) 现场测定各层土壤体积含水量、介电常数、土壤温度等。将采集的土壤样品带回实验室经风干、研磨过 2 mm 筛后: ①按土水比 1:5 浸提, 使用 HQ30 d 数字化分析仪 (美国) 测定土壤电导率 EC, 并用 $y = 10.87x - 2.18$ ^[25] (y 为含盐量, g/kg; x 为电导率, mS/cm) 计算含盐量; ②采用沉降法测定土壤机械组成, 并按美国制确定土壤质地。

本次探地雷达探测试验采用的是加拿大产 pluseEKKO PRO 系列探地雷达 (Sensors & Software 公司), 主要包括雷达天线、主机、电源等几个部分, 具有集控制、显示、记录为一体的 DVI 数据显示器, 可在现场进行滤波、增益等处理。由于受到冻层影响, 此次验证剖面大约挖掘至深度 60 cm 左右, 同时考虑到盐碱地探地雷达信号衰减较强, 因此本次试验选用了中心频率为 500 MHz 的屏蔽式天线采用剖面法 (固定间距法) 进行探测。根据样地长度, 沿土壤剖面观察面方向布设多条 10~20 m 的测线进行往返数据采集。采样时窗设置为 75 ns, 叠加次数为 64 次, 步长为 0.05 m。

1.3 土壤分层信息获取方法

1.3.1 雷达图像预处理

利用探地雷达获取土壤分层信息的关键在于确定土层分界面的时域位置以及电磁波在各土层中的传播速度。由于自然土壤的非均匀性、复杂性以及其他随机噪声干扰, 探地雷达回波信号往往与发射波信号有较大差别, 因此需要对采集的图像进行预处理, 以提高数据信噪比、锐化波形, 得到较为清晰的雷达图像^[26]。本研究中图像预处理主要包括以下几个步骤: 首先为基础滤波处理, 根据收发天线间距以及土壤的介电特性, 发射信号可能会在高频反射信号中包含低频信号杂波, 因此选择 Dewow 滤波, 去除不必要的低频信号, 同时保留高频信号; 其次为空气波校正, 用以获取准确的雷达起点位置; 再次为增益处理, 旨在放大 GPR 数据信号的强度, 弥补电磁波信号在传播过程中的能量损失。由于本研究中盐碱土导电性强, 能量损失大, 因此选择 SEC2 (指数补偿增益), 同时根据盐碱程度不同设置不同的初始增益值和最大增益值; 最后调整图像显示窗口, 如提高图像对比度、改变显示深度等。

1.3.2 基于雷达图像波形图的土壤层次划分

雷达信号在遇到不同介电特性的土壤层次时会产生不同波形幅度与相位的回波, 相位一致的反射信号所组成的轴线为同相轴, 可形象地表征地下反射面, 因此可通过识别雷达图像中的同相轴来确定土壤分层界面的位置。雷达图像上的时间剖面图 (又称 x-y 平面, 横坐标为雷达天线在水平方向的位置, 纵坐标为雷达信号的双程传播时间) 的颜色变化可在一定程度上反映电磁波幅值的变化, 有助于对整条测线进行整体判读, 但难于精准判定分层界面的时域位置, 主观性较强。因此本研究

在对雷达图像整体判读的基础上, 采用 1/4、1/2、3/4 测线处的单道波形图 (又称 y-z 平面, 横坐标为雷达信号的双程传播时间, 纵坐标为信号振幅) 作为精细判读的依据, 利用电磁波幅值的跳变 (波峰或波谷) 来确定分层界面的双程走时, 以增强判读结果的客观性和准确性。

1.3.3 基于 Hilbert 谱瞬时属性的土壤层次划分

在实地探测中, 干扰噪声不可避免, 这使得仅仅依据雷达图像进行土壤层次划分具有一定的局限性。探地雷达具有高频、短波、强介质吸收等特点, 其低频回波信号中包含了土壤分层信息。

瞬时振幅是反射强度的量度, 它与该时刻雷达信号的总能量的平方根成正比, 当地下存在明显的分层时, 在分界面位置瞬时振幅产生强烈变化, 利用此特征可以确定不同介质分界面的位置; 瞬时相位是雷达剖面上同相轴连续性的量度, 当电磁波在各向同性均匀介质中传播时, 其相位是连续的, 否则其相位会发生明显的跳变, 利用此特征可以对地下分层和地下异常进行判别; 瞬时频率是相位的时间变化率, 当电磁波通过不同介质的分界面时, 其频率会发生显著变化, 此特征有助于识别地层。Hilbert 变换能够有效地提取回波信号的瞬时参数信息, 提高探地雷达信号的解释精度。本研究采用 Hilbert 变换进行瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率分析, 进而确定土壤分界面的时域位置。

探地雷达回波信号 $r(t)$ 进行 Hilbert 变换, 可表示为

$$\bar{r}_u(t) = r(t) \frac{1}{\pi t} \quad (1)$$

式中 $\bar{r}_u(t)$ 为回波信号 Hilbert 变换所得结果; t 为雷达信号双程走时 (ns)。

雷达回波信号的瞬时幅度 $\Psi(t)$ 可表示为

$$\Psi(t) = \sqrt{r^2(t) + \bar{r}_u^2(t)} \quad (2)$$

雷达回波信号的瞬时相位 $\varphi(t)$ 可表示为

$$\varphi(t) = \arctan \frac{\bar{r}_u(t)}{r(t)} \quad (3)$$

雷达回波信号的瞬时频率 $\omega(t)$ 可表示为

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (4)$$

1.3.4 土壤介电常数计算方法

土壤作为复杂的混合物, 其介电常数 ϵ 可表示为复数形式, 即实部和虚部两部分。实部主要由土壤含水量决定, 影响着电磁波的传播速度, 含水量越高介电常数越大, 传播速度越低。虚部主要由土壤含盐量决定, 影响着电磁波的衰减系数, 土壤溶液中溶解盐的浓度越高, 电磁波的衰减系数越大。

Dobson 模型是目前运用最为广泛的半经验土壤介电常数模型, 胡庆荣^[27] 将土壤盐分作为一个因子, 加入到已有 Dobson 模型中, 使之适用于含盐土壤, 扩展后的 Dobson 模型表示为 $\epsilon = \sqrt{\epsilon' + \epsilon''^2}$, 模型中各参数计算方法如下:

$$\varepsilon' = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^a - 1) + m_v^{\beta'} \varepsilon_{fw}^{\alpha} - m_v \right]^{1/\alpha} \quad (5)$$

$$\varepsilon'' \approx \gamma m_v^{\beta''/(\alpha-2)} \frac{S}{f} \quad (6)$$

$$\beta' = (127.48 - 0.519S_{and} - 0.152C_{lay})/100 \quad (7)$$

$$\beta'' = (133.797 - 0.603S_{and} - 1.66C_{lay})/100 \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{A \xi \chi (\rho_s - \rho_b) \rho_b}{2 \pi \varepsilon_0 \rho_s} \quad (9)$$

$$\chi = \left[1 - 1.962 \times 10^{-2} \Delta + 8.08 \times 10^{-5} \Delta^2 - \Delta N \left\{ 3.02 \times 10^{-5} + 3.922 \times 10^{-5} \Delta + N \left(1.721 \times 10^{-5} - 6.584 \times 10^{-6} \Delta \right) \right\} \right] \quad (10)$$

式中 ε 为介电常数, ε' 为介电常数实部; ε'' 为介电常数虚部; α 为形状因子, 取值为 0.65; ρ_b 为土壤容重, g/cm^3 ; ρ_s 为土壤颗粒的密度, 取值为 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$; ε_s 为土壤中固态物质介电常数, 约为 4.7; ε_0 为真空介电常数, 取值 8.854×10^{-12} ; m_v 为土壤体积含水量; ε'_{fw} 为不同温度不同频率下纯水的介电常数实部; γ 为盐分修正因子; A 为与盐离子种类相关的系数, 研究区属苏打盐碱土土壤取值为 0.76; χ 为温度修正系数; S 代表土壤含盐量, g/kg ; f 为频率, GHz ; ξ 为电导率与含盐量的拟合系数, 取值为 0.14; N 为离子浓度, mol/L ; Δ 为相对温度差 ($\Delta=25-T$, T 为土壤温度); β' 、 β'' 为与土壤砂粒含量 (S_{and})、黏粒含量 (C_{lay}) 相关的系数。

1.3.5 土层厚度计算方法

土壤剖面各层次的厚度可根据探地雷达反射波的波速 v (m/s) 及双程走时 t (ns) 获得:

$$h_i = v(t_i - t_{i-1})/2 \quad (11)$$

式中 h_i 为土壤剖面中第 i 层的厚度, m , t_i 及 t_{i-1} 分别为第 i 层和第 $i-1$ 层反射波的双程走时。对于土壤介质来说, 雷达反射波在土壤中的传播速度 v 可由介电常数 ε 来确定^[28]:

$$v = c_0 \varepsilon^{-1/2} \quad (12)$$

式中 c_0 为电磁波在真空中的传播速度, 其值为 $3 \times 10^8 \text{ m}/\text{s}$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面特征分析

5 块样地的土壤剖面如图 2 所示, 各土壤剖面均包含了 2~3 个土壤发生层, 其中样地 P1~P4 由于垦种植稻 10~20 a, 有明显的耕作层 (Ap), P5 基本保持了垦种植稻前的状态, 土壤层次分化并不明显。由表 1 可以看出, P1 的 pH 值及含盐量最低, 属于轻度盐碱土, P5 的 pH 值及含盐量最高, 属于重度盐碱土, P2~P4 介于中重度盐碱土之间^[29]。从土壤质地来看, 各剖面以砂质黏壤、砂质壤土为主; 砂砾及黏粒含量较高, 粉粒含量较低; 除耕作层以外, 容重基本在 $1.60 \text{ g}/\text{cm}^3$ 以上, 是较为典型的苏打盐碱土质地构型。

将各土壤剖面发生层含水量、含盐量、砂砾含量、黏粒含量、容重等土壤参数代入扩展后的 Dobson 介电常数模型 (式 (5) ~ (11)) 求得各层次介电常数实部、虚部及总介电常数 (表 1)。由表 1 可以看出, 各发生层介电常数实部远大于虚部, 特别是轻度盐碱土 P1 更为明显, 介电常数基本由实部决定, 但对于中重度盐碱土, 虚部变的不可忽略。本研究中, 由于各剖面砂砾含量、黏粒含量差异不大, 因此机械组成对实部、虚部的影响均不大。介电常数实部主要受到容重和含水量的影响, 各剖面耕作层容重、含水量均最低, 介电常数实部也最低。介电常数虚部主要受含盐量的影响, 各剖面发生层虚部的变化趋势基本和含盐量变化趋势一致。

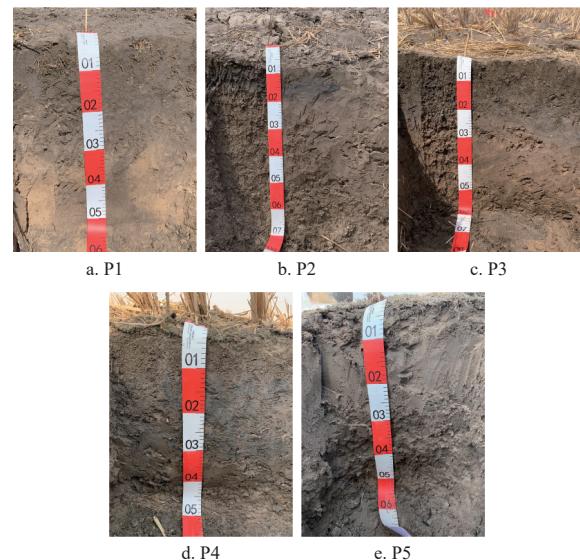


图 2 各采样点土壤剖面图
Fig.2 Soil profile images of all sampling points

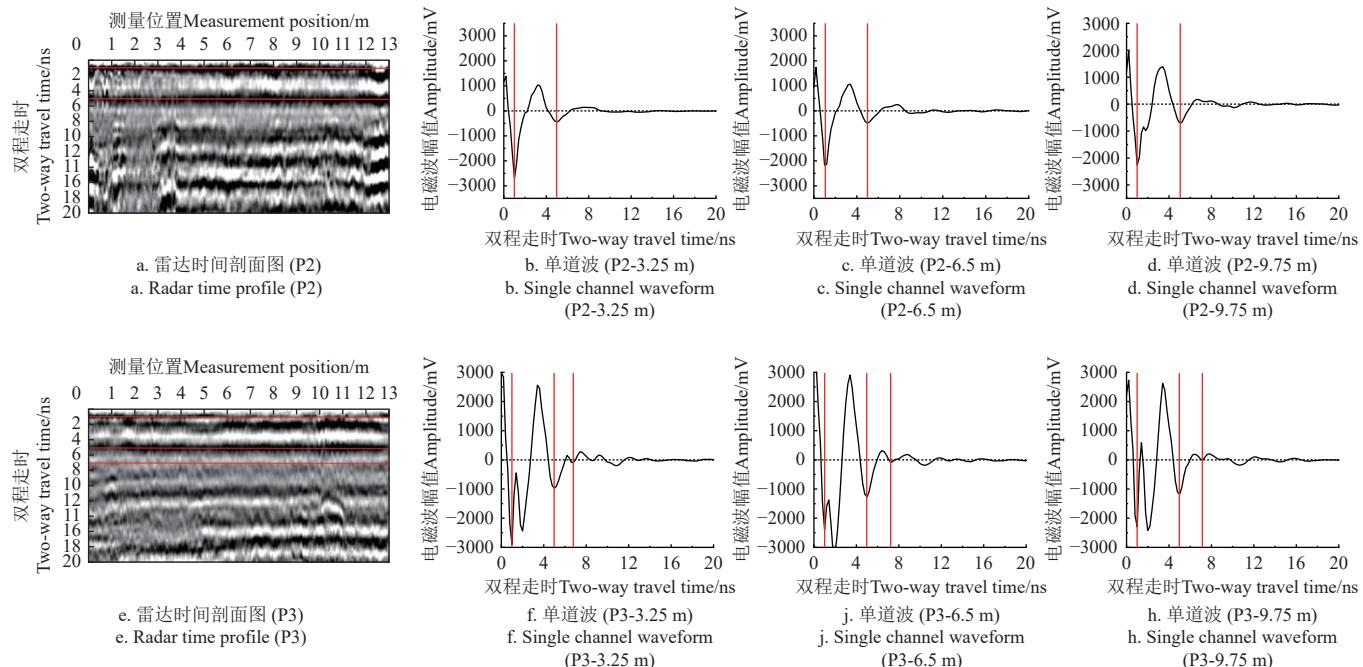
2.2 基于雷达图像波形图的土壤层次划分

利用该款雷达自带的雷达图像处理软件 LineView 提取了各样地的时间剖面图像和测线 1/4、1/2 及 3/4 处的单道波形图。由于篇幅所限, 这里仅展示了 P2、P3 两块样地的雷达图像。从图 3 可以看出, 测线不同位置的单道波形图精细展示了雷达回波振幅和相位的变化, 而各点的单道波形图叠加形成了时间剖面图, 时间剖面图以色度变化表征电磁波幅值的变化。时间剖面图可以直观地展示雷达回波幅值在整条测线上的变化趋势, 除 P2 在 0~4 m 测线区域有一定起伏外, 图像整体比较平滑, 说明测线区域土体构型在水平方向上排列较为整齐。从 P2、P3 单道波形图可以看出, 雷达信号在苏打盐碱地衰减剧烈, 大于 7 ns 时, 电磁波幅值已很小。

去除时间零点是确定地表、划分土壤层次必不可少的一步, 也是准确估算层次厚度的基础。目前时间零点的确定有多种方式, 本研究结合该款雷达 “Scope” 功能, 采用的是 “第一负峰” (即波谷) 的位置作为地表^[30]。从图 3 测线不同位置单道波形图可以清楚地看到, P2、P3 电磁波分别在 1.05、1.02 ns 到达地表, 可确定为时间零点。以 P3 为例, 电磁波在 5.05 ns 处振幅明显增强,

相位形态显示发生正反射(即先出现波峰,后出现波谷),可确定为第1个土层分界面。该处为耕作层(Ap)与下层(ABz)的分界面,两层的介电常数差异较大,分别为7.32、8.01(表1),反射系数为-0.023,满足探地雷达识别层次界面的条件(反射系数绝对值大于0.02)^[31]。电磁波传播至7.02 ns时,振幅出现小幅波动,相位形态显示仍为正反射,反射系数为-0.023,结合时间剖面图,

可确定为第2个土层分界面。从表2可以看出,采用该方法Ap层均可被清晰识别,这主要是因为Ap层容重、含水量均与下层土壤差异较大,导致两层介电特性存在明显差异,易被探地雷达识别。但除P3外,Ap或Ab以下层次由于回波信号衰减强烈难以通过单道波形图确定,时间剖面图虽可大致判定层次分布,但很难客观地确定准确的分层时域位置。



注: 红线代表识别的土壤分层时域位置,下同。

Note: The red line represents the time-domain position of soil stratification, the same as below.

图3 基于雷达图像波形图的土壤分层识别结果

Fig.3 Soil layer identification results based on GPR waveform image

表2 探地雷达探测分层厚度与实测厚度对比

Table 2 Comparison of soil layer thickness between GPR detection and actual measurement

样地 Sample plot	土壤分层 Soil horizon	实测分层 厚度 Measured layer thickness/cm	探地雷达判读层次厚度 GPR interpretation layer thickness				误差分析 Error analysis			
			基于雷达波形图方法 Method based on radar waveform		基于 Hilbert 谱瞬时相位方法 Method based on instantaneous phase of Hilbert spectrum		基于雷达波形图方法 Method based on radar waveform		基于 Hilbert 谱瞬时相位方法 Method based on instantaneous phase of Hilbert spectrum	
			双程走时 Two-way travel time/ns	计算值 Calculated value/cm	双程走时 Two-way travel time/ns	计算值 Calculated value/cm	绝对误差 Absolute error/cm	相对误差 Relative error/%	绝对误差 Absolute error/cm	相对误差 Relative error/%
P1	—	0	1.85		1.95					
	Ap	22	5.02	17.12	6.35	23.76	4.88	22.18	-1.76	8.00
	ACz1	10	—	—	—	—	—	—	—	—
	ACz2	21	—	—	11.72	28.99	—	—	-7.99	38.05
P2	—	0	1.05		1.15					
	Ap	20	5.15	20.91	5.32	21.27	-0.91	4.55	-1.27	6.35
	ACz	33	—	—	10.83	28.10	—	—	4.90	14.85
	C	18	—	—	13.92	16.69	—	—	1.31	7.28
P3	—	0	1.02		1.05					
	Ap	22	5.05	20.75	5.08	20.75	1.25	5.68	1.25	5.68
	ABz	10	7.02	10.14	7.73	13.64	-0.14	1.40	-3.64	36.40
	Bz	27	—	—	11.82	22.09	—	—	4.91	18.19
P4	—	0	1.08		1.06					
	Ap	32	6.25	27.91	6.72	30.56	4.09	12.78	1.44	4.50
	ABz	30	—	—	12.85	33.1	—	—	-3.10	10.33
P5	—	0	1.16		1.17					
	Ab	25	6.87	30.83	6.02	26.19	-5.83	23.32	-1.19	4.76
	ABz	29	—	—	10.52	24.30	—	—	4.70	16.21

2.3 基于 Hilbert 谱瞬时属性的土壤层次划分

以 Hilbert 变换为基础, 提取了 5 块样地探地雷达弱回波信号的瞬时幅度、瞬时频率和瞬时相位信息。为了展示不同瞬时属性信息在识别土壤分层时域位置的有效性, 同样以 P2、P3 为例, 提取了测线 1/4、1/2 及 3/4 处的单道“三瞬”信息 (图 4), 由于篇幅所限瞬时振幅与瞬时频率仅展示 1/2 处单道图像。由图 4 可以看出, 瞬时幅度随双程走时的增加 (即土壤深度的增加)

逐渐趋近于 0, 反映了土壤层次对雷达信号的吸收能力。各点的瞬时幅度没有明显的跳变规律, 无法识别分层位置。而瞬时频率与瞬时相位均对弱回波信号起到了增强作用, 表现出明显的跳变现象, 可在一定程度上体现相邻层次介电特性的差异。但从瞬时频率来看, 其跳变时间跨度较小, 变化剧烈, 随机性大, 易出现虚警现象。因此本研究以测线多点的瞬时相位识别分界面时域位置。

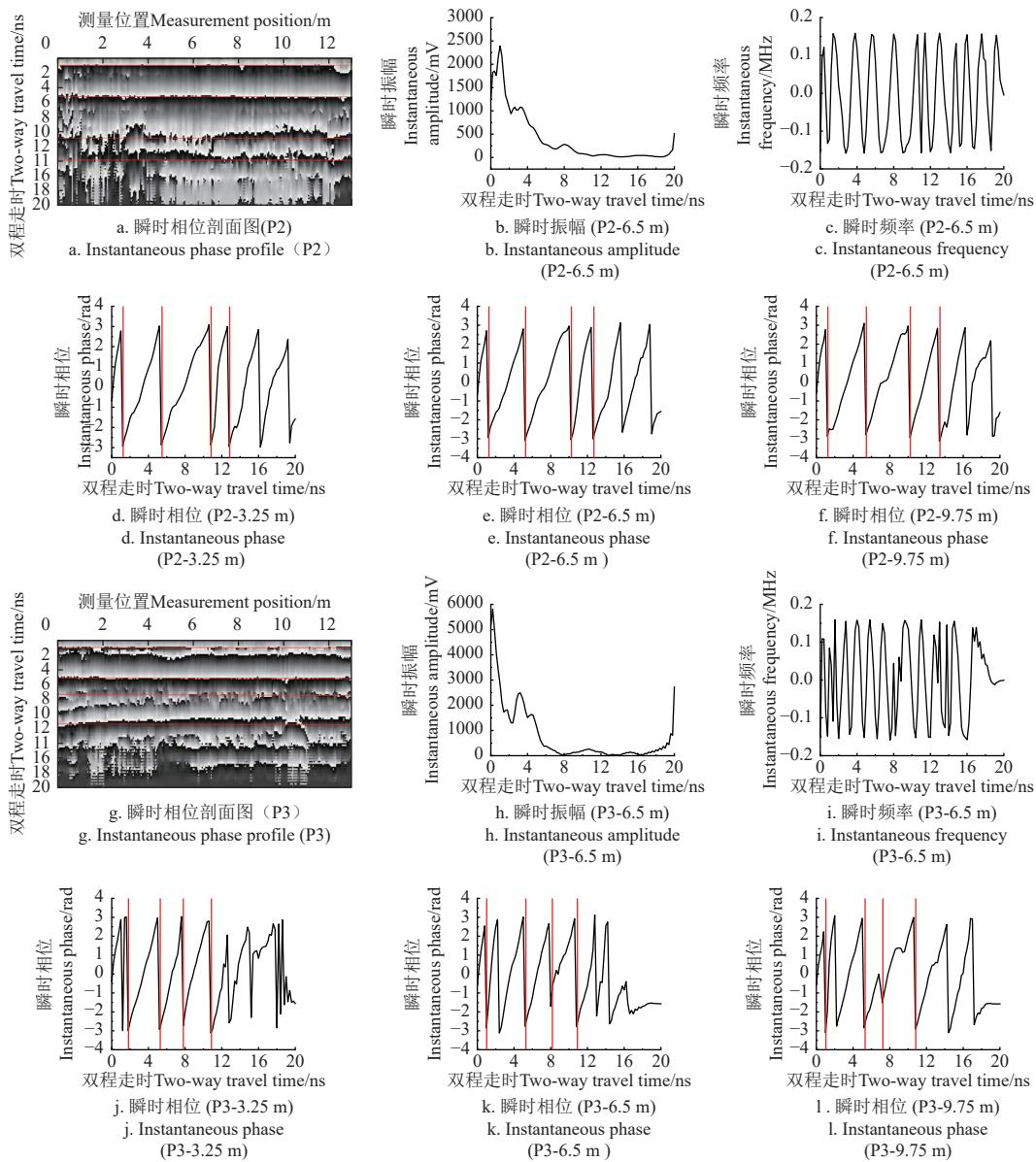


图 4 基于雷达 Hilbert 谱瞬时属性的土壤分层识别结果

Fig.4 Soil layer identification results based on instantaneous parameters of GPR Hilbert spectrum

如图 4 所示, 基于 Hilbert 变化的瞬时相位信息可以清晰准确地识别地表和土层分界面位置。P2、P3 的时间零点分别为 1.15、1.05 ns, 这与基于雷达图像波形图识别的时间零点位置基本一致 (表 2)。与波形图不同的是, 除 Ap 层外, 基于 Hilbert 变化的瞬时相位图同样可以客观地识别深部土壤层次 (图 4、表 2)。但在 P1 样地出现了漏检现象, 未能识别出 AC1 和 AC2 的分界面,

这主要是由于这两层物理化学性状均较为接近, 呈现出一定的渐变性, 反射系数也仅为 -0.008, 很难被识别。但土壤发生分类和探地雷达识别土层原理不同, 土壤发生分类专家根据目视特征 (颜色、根系、砾石等) 与触觉特征 (土壤质地、土壤结构体坚硬度或松紧度、土壤干湿情况等), 并结合对土壤发生过程的理解, 将其判读为不同的层次 (图 2)

2.4 土壤分层厚度分析

首先利用式(13)将各样地不同层次的介电常数(表1)转化为电磁波波速,然后将电磁波在不同层次的波速以及基于雷达图像波形图和Hilbert谱瞬时相位两种方法识别的分层时域位置代入式(12),即可获得研究区不同样地土壤分层厚度信息(表2)。从表2可以看出,两种方法均能较好地获取Ap层厚度信息,绝对误差在5 cm以内,基于Hilbert谱瞬时相位方法探测精度明显高于基于雷达波形图方法。基于Hilbert谱瞬时相位方法对土壤层次估算的最大绝对误差和相对误差分别为7.99 cm、38.05%,这主要是由于P1样地中该方法无法识别ACz1和ACz2分界面,将两个层次识别为同一层。总体而言,土壤表层的误差小于下层误差,除P1外各层次的最大绝对误差均在5 cm以内,相对误差在15%以内,基本能满足盐碱地野外探测的需求。

3 讨论

探地雷达对土壤层次的识别主要是基于不同土壤层次间的介电特性差异以及土壤分界面的平整程度^[14],本研究中探地雷达对耕作层的精准识别也充分证明了这一观点。连年的耕作培肥措施导致耕作层紧实度、容重、含水量、机械组成等物理化学性质与下层土壤形成了明显差异,进而导致介电常数产生差异,满足了探地雷达识别分层对反射系数的要求^[31]。此外,由于每年耕作深度基本一致,使得耕层与下层土壤的分界面也较为平整、清晰(图2),这也有助于探地雷达对耕层的识别。目前探地雷达对土壤的分层识别研究多集中在复垦土壤也主要是这个原因,复垦土壤在覆土、平整、压实过程中易形成层次分明、界限清晰的分界面,有利于探地雷达的识别^[32]。自然土壤空间变异性大、结构复杂导致雷达图像在测线方向上连续性差、起伏大(如图3、P2),增加了土壤层次识别难度。土壤分类专家对土壤发生层的划分主要依据土壤颜色、紧实度、土粒结构、根系、新生体等指标进行判读,这与探地雷达识别土壤分层原理并不吻合。虽然多数发生层间存在介电常数差异,但由于自然土壤的渐变性,也存在相邻发生层介电常数差异不显著的情况,如P1中的AC1层和AC2层,探地雷达出现了漏检情况(表2)。

苏打盐碱地由于盐碱的高电导性,导致探地雷达信号高度衰减,极大限制了其探测深度和精度。有研究认为,电导率大于4 mS/cm的盐碱土不适宜探地雷达的应用^[24]。本研究中雷达回波信号振幅在大于7 ns时已变得很小(图3),这也导致基于雷达图像波形图识别土壤分层的方法变得十分困难。虽然经预处理的时间剖面图像非常直观,但难以客观地划定分界面时域位置,易存在主观臆断的可能^[18]。本研究利用Hilbert变换,获取了雷达弱回波信号的“三瞬”参数,其中瞬时频率和瞬时相位明显增强了耕层以下深度的有效信号,瞬时相位跳变位置可较好地与土壤分层位置相吻合,这与李俐等^[21]在潮土区和RUAN等^[23]在白浆土区的结果基本一致。

也有研究将不同的瞬时参数进行组合构成新的参数以识别介质的分层,如张海如等^[20]提出了利用瞬时幅度与归一化瞬时频率相乘积的联合瞬时参数对GPR信号进行分析,以提高相邻介质分界面的识别精度,值得今后研究中借鉴。此外,为减少水稻植株、耕作等对探地雷达的干扰,本次试验于春季翻耕前进行,此时冻层仍在存在,因此土壤剖面挖掘基本在60 cm左右,下层土壤层次识别还有待进一步研究。

层厚计算的准确性除受土壤层次分界面时域位置的影响,电磁波传播速度的计算同样关键,而电磁波传播速度主要取决于介电常数^[23]。对于非盐土壤,一般认为含水量是影响土壤介电数的主要因素,为此人们建立了众多经验模型,比较著名的有Topp模型^[33]、Roth模型^[34]等。这些模型虽然简单,但仅考虑了介电常数实部,对于盐碱土并不适应,忽略了盐分含量对介电常数虚部的影响,特别是中重度盐碱土更是如此(表1)。为此本研究采用了扩展后的Dobson盐渍土介电常数模型,采用实测数据进行测算,虽然提高了计算精度(表1),但模型需要的参数较多,计算繁琐。此外,为了计算方便,本研究将每层的介电常数作为一个常数进行计算,不再考虑层内介电常数的差异。但总体而言,其误差对于盐碱地的野外探测基本在可接受的范围内。

4 结论

本文利用探地雷达对不同盐碱程度的苏打盐碱地进行了探测,比较了基于雷达图像波形图和Hilbert谱瞬时属性两种方法在识别土壤分层时域位置上的差异,并通过扩展后的Dobson介电常数模型估算了各层介电常数,进而获取了土壤分层和层厚信息,主要结论如下:

1) 苏打盐碱土区土壤盐分对探地雷达信号的影响十分明显,特别是中重度苏打盐碱土电磁波振幅能值衰减严重。各土壤层次介电常数实部主要受到容重和含水量的影响,介电常数虚部主要受含盐量的影响。虽然苏打盐碱土介电常数仍主要由实部决定,但介电常数虚部不能忽略。

2) 基于雷达图像波形图和基于Hilbert谱瞬时属性两种方法均可较为准确地识别苏打盐碱土耕层位置,但由于电磁波能量的衰减,基于波形图像的方法无法识别耕层以下层次。以Hilbert变换为基础的瞬时相位信息对弱回波信号具有明显的增强作用,可较为准确地识别绝大多数土壤层次。由于土壤发生分类和探地雷达识别土层原理的不同,使得探地雷达对过渡层或介电特性差异小的层次识别能力较弱。

3) 基于扩展的Dobson介电常数模型对不同层次介电常数及波速进行估算,同时结合探地雷达分层识别结果,可获得土壤分层和层厚信息。除漏检层次外,基于Hilbert谱瞬时相位方法获得的土层厚度绝对误差基本在5 cm以内,该方法可准确获取苏打盐碱土60 cm以内土壤分层信息。

[参考文献]

[1] WEI Y, LI LH, HU WJ, et al. Suppression of rice blast by bacterial strains isolated from cultivated soda saline-sodic soils[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 14(17): 5248-5248.

[2] 孙广友, 王海霞. 松嫩平原盐碱地大规模开发的前期研究、灌区格局与风险控制[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 407-413. SUN Guangyou, WANG Haixia. Large scale development to saline-alkali soil and risk control for the Songnen Plain[J]. Resources Science, 2016, 38(3): 407-413. (in Chinese with English abstract)

[3] 李秀军, 李取生, 王志春, 等. 松嫩平原西部盐碱地特点及合理利用研究[J]. 农业现代化研究, 2002, 23(5): 361-364. LI Xiujun, LI Qusheng, WANG Zhichun, et al. Characteristics and rational utilization of saline alkali land in the Western Songnen Plain[J]. Research on Agricultural Modernization, 2002, 23(5): 361-364. (in Chinese with English abstract)

[4] 李取生, 李秀军, 李晓军, 等. 松嫩平原苏打盐碱地治理与利用[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 15-20. LI Qusheng, LI Xiujun, LI Xiaojun, et al. Treatment and utilization of soda saline alkali land in Songnen Plain [J]. Resource Science, 2003, 25(1): 15-20. (in Chinese with English abstract)

[5] 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.

[6] HOU J S, YAN Y Q, CONG P T. Application of technology of UAV-Mounted ground penetrating radar in the study of the thickness of soil plow layer[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering, IOP, 2021: 2387-2394.

[7] ZHANG X L, DAO L G, ZHANG C S, et al. Mapping the spatial distribution of soil depth in a grassland ecosystem with the aid of ground penetrating radar and GIS[J]. Grassland Science, 2018, 64(4): 217-225.

[8] JOL H M, BRISTOW C S, FISHER I E, et al. Ground penetrating radar: theory and applications[M]. UK: Elsevier Science, 2009: 4-4.

[9] JOHNSON R W, GLACCUM R, WOJTASINSKI R. Application of ground penetrating radar to soil survey[J]. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings, 1982, 23(3): 17-17.

[10] SHIH S F, DOOLITTLE J A. Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(3): 651-656.

[11] DAVIS J, ANNAN A. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy[J]. Geophysical Prospecting, 1989, 37(5): 531-551.

[12] COLLINS M E, SCELENTRAGER G W, DOOLITTLE J A, et al. Using ground-penetrating radar to study changes in soil map unit composition in selected histosols[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(2): 408-412.

[13] TINA W, BENTE S M, DENNIS W, et al. What Is Beyond Hyperbola Detection and Characterization in Ground-Penetrating Radar Data?-Implications from the Archaeological Site of Göttingen, Germany[J]. Remote Sensing, 2024, 16(21): 4080-4080.

[14] ROTH K, WOLLSCHLAGER U, CHENG Z H, et al. Exploring soil layers and water tables with ground-penetrating radar[J]. Pedosphere, 2004, 14(3): 273-282.

[15] 薛建, 曾昭发, 田刚, 等. 探地雷达在吉林西部地区探测土壤碱化层[J]. 物探与化探, 2005, 28(5): 421-424. XUE Jian, ZENG Zhaofa, TIAN Gang, et al. The application of GPR to detecting the saline-alkali layer in west Jilin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2005, 28(5): 421-424. (in Chinese with English abstract)

[16] 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. WANG Sheng, CHEN Hongsong, FU Zhiyong, 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. (in Chinese with English abstract)

[17] 曹棋, 宋效东, 杨顺华, 等. 基于探地雷达的典型红壤区网纹红土层识别[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 813-824. CAO Qi, SONG Xiaodong, YANG Shunhua, et al. Identification of plinthitic red earth layers in red soil regions typical of south China with ground penetrating radar[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 813-824. (in Chinese with English abstract)

[18] 宋文, 张敏, 吴克宁, 等. 潮土区农田土体构型层次的探地雷达无损探测试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 129-138. SONG Wen, ZHANG Min, WU Kening, et al. Test on nondestructive detection of farmland solum structure in fluvo-aquic soil area using ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 129-138. (in Chinese with English abstract)

[19] 李光辉, 马嘉辉, 王哲旭, 等. 基于深度神经网络的探地雷达杂波抑制和根参数预测方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 171-180. LI Guanghui, MA Jiahui, WANG Zhixu, et al. Suppressing ground penetrating radar clutter to predict root parameters using deep neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 171-180. (in Chinese with English abstract)

[20] 张海如, 王国富, 张法全. 联合瞬时参数分析用于探地雷达目标增强[J]. 微波学报, 2017, 33(1): 16-20. ZHANG Hairu, Wang Guofu, ZHANG Faquan. Conjoin instantaneous parameters analysis for GPR targets enhancement[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(1): 16-20. (in Chinese with English abstract)

[21] 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. LI Li, FU Xue, CUI Jia, 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. (in Chinese with English abstract)

[22] 吴全, 姚喜军, 陈晓东, 等. 基于探地雷达的土体构型无损探测方法研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1860-1869. WU Quan, YAO Xijun, CHEN Xiaodong, et al. Nondestructive inspection method for soil profile configuration based on ground penetrating radar[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1860-1869. (in Chinese with English abstract)

[23] RUAN W M, LIU B J, LIU H J, et al. Ground Penetrating radar (GPR) identification method for agricultural soil stratification in a typical mollisols area[J]. Chinese Geographical Science, 2023, 33(4): 664-678.

[24] DOOLITTLE J A, MINZENMAYER F E, WALTMAN S W, et al. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States[J]. Geoderma, 2007, 141: 416-421.

[25] 李彬, 王志春, 迟春明. 吉林省大安市苏打碱土含盐量与电导率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2006(4): 168-171. LI Bin, WANG Zhichun, CHI Chunming. The relationship between salt content and electric conductivity of soda solonetz in Da'an City[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,

2006(4): 168-171. (in Chinese with English abstract)

[26] REYNOLDS, JOHN M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics[M]. 2nd ed. New Jersey, USA: Wiley-Blackwell, 2011: 4-4.

[27] 胡庆荣. 含水含盐土壤介电特性实验研究及对雷达图像的响应分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003: 99-100.

HU Qingrong. Studies on Mierowave Dielectric Behavior of Moist Salt Soil and Its Effect on Backscattering Coefficients Extracted From Radar Image[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications), 2003: 99-100. (in Chinese with English abstract)

[28] 张金珠, 邹杰, 王振华, 等. 利用 GPR 多频天线振幅包络平均值法估算滴灌棉田土壤盐分含量[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 99-107.

ZHANG Jinzhu, ZOU Jie, WANG Zhenhua, et al. Estimation of soil salt content in drip irrigation cotton field using GPR multi-frequency antenna amplitude envelope average method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(8): 99-107. (in Chinese with English abstract)

[29] 田玉福, 窦森, 张玉广, 等. 暗管不同埋管间距对苏打草甸碱土的改良效果[J]. *农业工程学报*, 2012, 29(12): 145-153.

TIAN Yufu, DOU Sen, ZHANG Yuguang, et al. Improvement effects of subsurface pipe with different spacing on sodic-alkali soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural*

Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 29(12): 145-153. (in Chinese with English abstract)

[30] YELF R. Where is true time zero? [C]// Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar. Netherlands, Delft: IEEE, 2004: 279-282.

[31] 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.

[32] 程琦, 叶回春, 董祥林, 等. 采用探地雷达频谱分析的复星土壤含水率反演[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(6): 108-116.

CHENG Qi, YE Huichun, DONG Xianglin, et al. Inversion of reclaimed soil moisture based on spectrum analysis of ground penetrating radar[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(6): 108-116. (in Chinese with English abstract)

[33] TOPP GC, DAVIS JL, ANNAN AP. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines[J]. *Water Resource Research*, 1980(3): 574-582.

[34] ROTH C H, MALICKIM A, PLAGGE R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, 43(1): 1-13.

Acquiring the soil stratification of soda saline-alkali soils using ground penetrating radar

ZHU Xiangming¹, FU Meiling¹, LU Haipeng^{1,2}, WANG Mingming¹, ZHANG Yu¹, MA Liangqian^{1,2},
PENG Wei¹, RAN Enhua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A large area of soda saline-alkali soil has seriously restricted the local agricultural productivity in the western Songnen Plain of Northeast China. The soil layers can also dominate the movement of water and salt in soil. It is of great significance to rapidly obtain the stratification in this area, in order to evaluate and improve the soda saline-alkali soils. Taking the typical saline-alkali soils in this area as the research object, this study aims to acquire the soil stratification using ground penetrating radar. Firstly, the soda saline-alkali soils with different salt contents were selected to conduct the ground penetrating radar (GPR) detection experiment. Then, the time domain location of stratification was then determined by radar image waveform and Hilbert spectrum instantaneous attributes. In waveform diagram of radar image, multi-point single channel waveform diagrams were combined with the radar time profiles. The soil layering was then determined as the time domain position in the overall soil layer division of the studied plot. The "three instantaneous" attributes of radar signals (instantaneous amplitude, frequency, and phase) were compared to determine the soil layering, according to Hilbert spectral instantaneous attributes. As such, the multi-point instantaneous phase maps and profiles were combined to determine the time domain position of the overall soil layer division in the studied plot. Then, the dielectric constant of each soil layer was calculated using the extended Dobson dielectric constant model. The propagation velocity of electromagnetic wave was estimated in each soil layer, according to the dielectric constant. The thickness of each soil layer was calculated to combine the time domain position of the soil layer. Finally, the field excavation profile was compared after data acquirement. The stratification of the field excavation profile was also evaluated by the soil classification experts, according to the visual and tactile characteristics of the soil. The results indicated that: 1) The content of soil salinity shared a significant impact on the ground penetrating radar signal. There was the very small amplitude of electromagnetic wave, when the two-way travel of GPR exceeded 7 ns. 2) Both radar image waveform and Hilbert spectral instantaneous attributes were accurately identified the time domain position of the plow layer (Ap). However, the waveform failed to recognize the layers below the plow layer, due to the attenuation of electromagnetic wave energy. On the contrary, the Hilbert spectral instantaneous phase was accurately identified the most soil layers within 60 cm, except for a few transition layers; 3) The absolute and relative errors of soil thickness were basically within 5 cm, and 15%, respectively, using Hilbert spectrum instantaneous phase and real soil profile. The performance was fully met the needs in the field exploration of saline-alkali land. This finding can provide a strong reference for the rapid and nondestructive access to the salinized soil layers.

Keywords: ground penetrating radar; soil stratification; soil dielectric constant; Hilbert transform; soda saline-alkali soil