

罗古拜, 曹银贵, 白中科, 等. 露天矿区排土场复垦地土壤容重差异、GPR特征识别与反演[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 441-452.

LUO Gu-bai, CAO Yin-gui, BAI Zhong-ke, et al. Soil bulk density difference, ground penetrating radar feature identification, and simulation for a reclaimed soil profile in the dumping site of an open pit mine[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 441-452.

露天矿区排土场复垦地土壤容重差异、GPR特征识别与反演

罗古拜¹, 曹银贵^{1,2*}, 白中科^{1,2}, 黄雨晗¹, 王舒菲¹

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘要:为揭示复垦地不同剖面土壤容重的总体特征和深度差异,以中煤平朔安太堡露天矿南排土场为研究对象,基于探地雷达(GPR)图像特征分析土壤容重差异,构建介电常数与土壤容重之间的关系。分析方法采用环刀采样称重法、探地雷达探测法、方差分析法、拟合分析法等。结果表明:矿区排土场平台土壤容重大于边坡,边坡坡度越大,土壤容重越小。在土壤含水率较小时,各个剖面0~30 cm处有较多大振幅信号,土壤容重较小,探地雷达信号图上大振幅信号的多少与土壤容重大小成反比。土壤容重随介电常数的增大而呈线性增加趋势,且二者拟合后的 R^2 值达0.813 9,相伴概率小于0.01。研究表明,矿区排土场不同位置及同一剖面不同深度土壤容重大小差异明显,通过探地雷达可对土壤容重差异进行分析。

关键词:土壤容重;土壤重构;土地复垦;探地雷达;介电常数

中图分类号:S152

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0441-12

doi: 10.13254/j.jare.2018.0286

Soil bulk density difference, ground penetrating radar feature identification, and simulation for a reclaimed soil profile in the dumping site of an open pit mine

LUO Gu-bai¹, CAO Yin-gui^{1,2*}, BAI Zhong-ke^{1,2}, HUANG Yu-han¹, WANG Shu-fei¹

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: In this study, the southern dumping site of the Antaibao open pit mine in Pingshuo, China was taken as the research subject. This study aimed to reveal the overall characteristics and depth differences in soil bulk density in different profiles of the reclaimed land. The difference in soil bulk density was based on the characteristics of ground penetrating radar (GPR) images. The relationship between the dielectric constant and soil bulk density was determined. In this study, the soil bulk density at different depths of the reconstructed soil profile was obtained using two methods, namely ring knife sample weighing and GPR detection. The data were analyzed by analysis of variance and fitting analysis. The results showed that the soil bulk density varied greatly at different locations of the dumping site and at different depths of the same profile. The soil bulk density of the platform was greater than that of the slope. The slope of the slope was larger, the soil bulk density was smaller, and the more herbs, the greater the soil bulk density. When the soil moisture content was low, the amplitude of the large amplitude signal on the GPR map was inversely proportional to the soil bulk density. The soil bulk density could be qualitatively analyzed. The soil bulk density increased linearly with the dielectric constant, and the two were fitted. The R^2 value was 0.813 9, and the associated probability was less than 0.01. The results of this study could provide strong support for GPR to quickly and non-destructively detect soil bulk density and effective reclamation.

Keywords: soil bulk density; soil reconstruction; land reclamation; ground penetrating radar; dielectric constant

收稿日期: 2018-10-21 录用日期: 2018-12-03

作者简介: 罗古拜(1992—),男,宁夏固原人,硕士研究生,研究方向为土地复垦与土地利用管理。E-mail: 1091915713@qq.com

*通信作者: 曹银贵 E-mail: caoyingui1982@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701607, 41571508); 中央高校基本科研业务费优秀教师项目(2-9-2018-025)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41701607, 41571508); The Basic Scientific Research Foundation for Excellent Supervisors (2-9-2018-025)

我国煤炭产量远高于其他国家,截至2017年底,我国公告生产和建设煤矿4980处,产能43.6亿t^[1]。但矿区煤炭开采会引发滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等地质灾害,土地资源的压占与损毁,废水、废渣等对地下水和地表水的污染等矿区环境问题^[2-3],此外,矿区煤炭开采还会导致一系列用地矛盾^[4]。所以,对矿区损毁土地进行复垦与生态重建,不仅可以改善矿区生态环境,而且还可以缓解矿区用地矛盾。

露天煤矿排土场排土过程中土壤经过机械压实,土壤孔隙度减少^[5],容重增加,复垦后土壤质量需要长时间恢复,影响植被正常生长^[6-8]。机械压实后的排土场土壤容重大于原地貌,但复垦后的排土场土壤容重有一定程度的降低,研究表明排土场复垦13年后土壤容重与未受损地差异不显著^[6]。土壤容重表征土壤孔隙数量和固体颗粒密度大小,是田间自然垒结状态下单位容积土体(包括土壤颗粒和孔隙)的质量,是衡量土壤紧实度和土壤肥力的重要指标之一^[9-10]。在排土场平台,土壤容重较高,影响植被根系发育,导致单位面积植被的生物量下降^[11-12]。在排土场边坡,土壤容重相对较低,当降雨量和坡度较大时,易引发沟蚀,破坏地表,造成水土流失^[13]。土壤经过压实,土壤容重过大是矿区排土场水土流失的根本原因^[14]。受土石混排及造地复垦工艺影响,复垦地土壤剖面土层厚度差异明显,且层间介质类型不同,导致同一地点不同土层厚度土壤容重有显著差异^[14-15]。土壤容重基本上呈现随土层深度增加而增大的趋势,并且复垦地土壤容重的剖面变化有别于普通原生土

壤,其差异主要体现在60 cm以上土层^[16-18]。

国内外探地雷达(GPR)在土壤探测方面的应用逐渐展开^[19-22],而在矿区尤其是大型露天矿区重构土壤探测的应用较少,特别对矿区典型土壤物理性质土壤容重的研究很少,但有研究证明其可能性。Wang等^[23]研究表明探地雷达可以探测土壤容重,其准确度可达到70%以上,并且存在很大的提升空间。郭淑丽^[24]用电磁波波速、电磁波振幅反演土壤容重,研究表明土壤容重与电磁波波速存在明显的正相关关系,电磁波平均振幅与土壤穿透阻力呈现明显的负相关关系。

因此,本文以中煤平朔安太堡露天煤矿南排土场为研究对象,通过剖面实测和GPR探测两种方法获取南排土场平台和边坡处土壤容重,分析排土场平台和边坡土壤容重的总体特征和深度特征,以及土壤容重的差异在GPR信号图上的呈现,建立基于GPR的土壤容重-介电常数拟合模型。本研究成果可为利用GPR进行快速无损探测土壤容重及精准复垦提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省朔州市平鲁区内(图1),是中煤平朔安太堡露天矿早期的一个外排土场,排土时间是1985—1989年,海拔高度为1360~1465 m,边坡坡度为20°~40°。排土结束后其岩土容量达到 $1.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[25],属于土石混排类型,其中大于或等于50 mm的

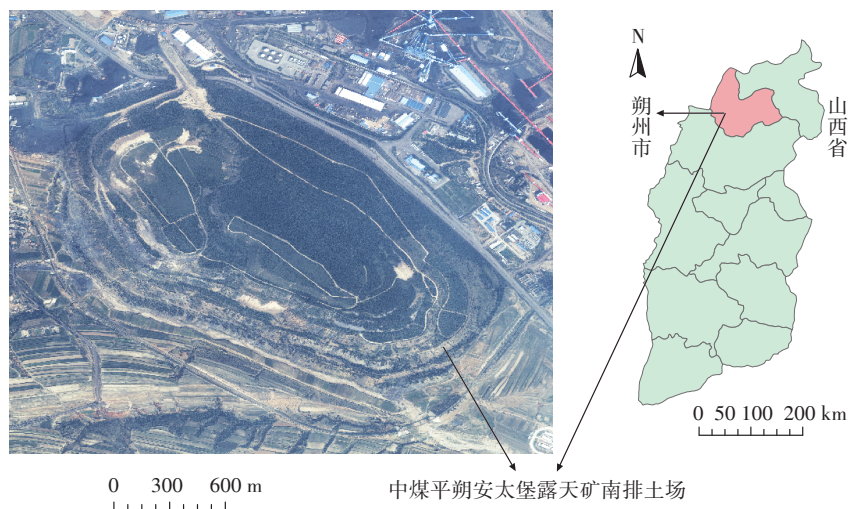


图1 中煤平朔安太堡露天矿南排土场

Figure 1 South dumping site of Antaibao open pit mine, China

岩石占46.98%, 50~5 mm砾石占15.48%, 小于5 mm的砾石、土砂占37.54%^[26]。地表覆盖以黄土、红土、红黄土为主。1990年开始进行复垦,采用草-灌-乔的植被配置模式。该研究区所在的原地貌为黄土山地丘陵,土壤侵蚀严重,同时冬春季节风大风多,地表干燥,是黄土高原典型的生态脆弱区。

1.2 样方与剖面建立

根据排土场海拔高度、坡度和坡向,在排土场的不同位置建立了5个样方,样方编号分别为S₁、S₂、S₃、S₄、S₅。在排土场平台上,样方的大小设置为10 m×10 m,在排土场边坡上,样方的宽度设置为10 m,样方的长度根据边坡的坡度来确定。在样方内挖土壤剖面,剖面编号分别为P₁、P₂、P₃、P₄、P₅。土壤剖面的平均深度为100 cm,个别剖面因障碍层太浅,开挖困难,最终开挖深度为60 cm。

1.3 GPR探测与参数确定

1.3.1 GPR探测

剖面挖好以后,在GPR探测面上,把管径3 cm和5 cm的钢管分别打进不同深度的剖面,然后在地表利用GPR进行探测,包括小样方探测和大样方探测(图2)。探测时设定的速度是0.1 m·ns⁻¹,设定的介电常数是8。标定探测后进行剖面长样线探测。为了减小钢管对信号的影响,在离剖面1 m以内沿着剖面方向用GPR进行探测。

1.3.2 介电常数

介电常数表示物质保持电荷的能力,其计算公式如式(1)所示。

$$\varepsilon = (c/v)^2 \quad (1)$$

式中: ε 为介电常数; c 为光速 $3.00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; v 为电磁波信号在介质中传播的速度,在本文中是土层深度与电磁波传播时间的比值。

1.4 土壤样品采集与测试

在剖面内每10 cm采集土壤环刀样。土壤环刀样采集之后,立即测定湿质量。带回试验室进行烘干,在烘箱中105 ℃烘干至恒重,测定干质量。土壤容重即为环刀内干土质量与环刀体积的比值,其计算公式如式(2)所示。

$$\rho_b = \frac{M_s}{V} \quad (2)$$

式中: ρ_b 是土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; M_s 是环刀内干土质量, g ; V 是环刀体积,为 100 cm^3 。

土壤孔隙度定义为土壤中孔隙的体积与土壤体积的比值,其计算公式如式(3)所示。

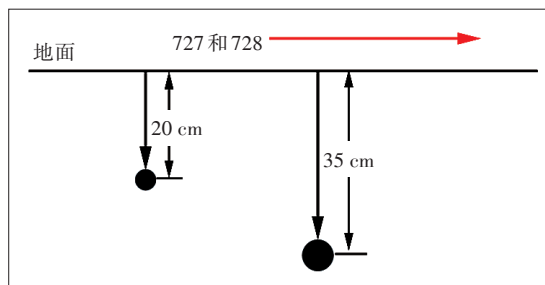
$$n = 1 - \frac{\rho_b}{2.65} \quad (3)$$

式中: n 是土壤孔隙度;2.65是土壤密度平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤容重总体特征

各剖面0~60 cm深度内土壤样品容重的平均值和标准偏差如表1所示。从表1可以看出,各个剖面土壤容重的均值相差较大,土壤容重均值最高的是P₅剖面,其值达到 $1.66 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤容重均值最低的是P₃剖面,其值为 $1.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。另外,平台剖面P₁、P₄、P₅土壤容重的均值较高,在 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上。而



727和728为探地雷达沿剖面方向的两条测线
727 and 728 are two detection routes of ground penetrating radar along the profile direction

图2 样方内剖面深度标定

Figure 2 Calibration of profile depth in quadrat

表1 各剖面不同深度土壤容重及总体特征($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)Table 1 Soil bulk density and overall characteristics at different depths of each profile($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

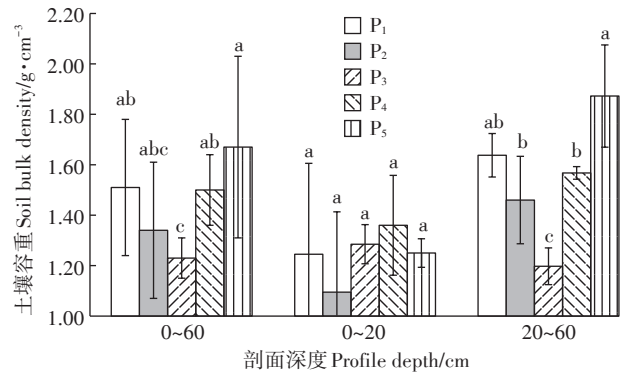
深度 Depth/cm	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
0~10	0.99	0.87	1.34	1.22	1.21
10~20	1.50	1.32	1.23	1.50	1.29
20~30	1.71	1.25	1.13	1.54	1.57
30~40	1.59	1.52	1.15	1.60	1.95
40~50	1.71	1.41	1.22	1.56	1.97
50~60	1.54	1.66	1.29	1.57	2.00
均值 Mean	1.51	1.34	1.23	1.50	1.66
标准偏差 Standard deviation	0.27	0.27	0.08	0.14	0.36

边坡剖面P₂、P₃的土壤容重均值相对较低,在 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下。

2.2 土壤容重深度差异

从各剖面土壤容重的标准偏差(表1)来看,在0~60 cm深度内,P₅剖面土壤容重的标准偏差最大,其值达到 $0.36\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,主要是由于0~20 cm深度内,土壤容重较低,低于 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,而20 cm以下土层的土壤容重明显增加,均高于 $1.50\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,尤其是30~60 cm各层土壤容重均超过 $1.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,并且50~60 cm土层土壤容重达到 $2.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。P₁、P₂剖面土壤容重的标准偏差为 $0.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,两个剖面0~10 cm土层的土壤容重相对较小,低于 $1.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,而10 cm以下土层的土壤容重呈现明显增加趋势,并呈起伏状态。P₄剖面土壤容重的标准偏差为 $0.14\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,相对较低,一是由于0~10 cm土层的土壤容重较低,其值为 $1.22\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,而10 cm以下土层的土壤容重虽呈现增加趋势,但是变化相对比较平稳,为 $1.50\sim 1.60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,与0~60 cm深度内土壤容重均值接近。P₃剖面土壤容重的标准偏差最小,为 $0.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,虽然0~10 cm土层土壤容重高于10 cm以下土层,但是总体上变化比较平稳,各层土壤容重值比较接近0~60 cm深度内土壤容重均值。5个剖面对比来看,0~20 cm土层深度内,土壤容重相对较小,在 $1.50\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下。

从5个剖面不同深度土壤容重差异(图3)来看,在0~60 cm整体深度内,P₁与P₂、P₄、P₅差异不显著,而与P₃差异显著。P₂与其他剖面差异都不显著。P₃与P₂差异不显著,而与其他剖面差异显著。P₄与P₃差异显著,而与其他剖面差异不显著。P₅与P₃差异显著,而与其他剖面差异不显著。在0~20 cm深度内,所有剖面差异都不显著。在20~60 cm深度内,P₁与P₃差异显著,而与其他剖面差异不显著。P₂与P₃、P₅差异



同一深度下不同字母表示剖面间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters for the same depth indicate significant difference among profiles($P<0.05$). The same below

图3 各剖面不同深度土壤容重差异

Figure 3 Difference of soil bulk density at different depths of each profile

显著,与其他剖面差异不显著。P₃与其他剖面差异都显著。P₄与P₁、P₂差异不显著,而与P₃、P₅差异显著。P₅与P₁差异不显著,而与其他剖面差异都显著。

从所有剖面不同深度的差异(图4)来看,0~10 cm深度土壤容重与0~20 cm深度土壤容重差异不显著,而与其他深度土壤容重差异显著。10~20 cm深度土壤容重与0~10 cm深度土壤容重差异显著,而与其他深度土壤容重差异不显著。0~20 cm深度土壤容重与20~60 cm深度土壤容重差异显著,而与其他深度土壤容重差异不显著。20~60 cm深度土壤容重与0~10、0~20 cm深度土壤容重差异显著,而与其他深度土壤容重差异不显著。0~60 cm深度土壤容重与0~10 cm深度土壤容重差异显著,而与其他深度土壤容重差异不显著。由此可见,10、20 cm深度是剖面土壤容重的重要分界点。

2.3 土壤容重GPR特征识别

土壤容重的大小与土壤孔隙度有一定的关系,土

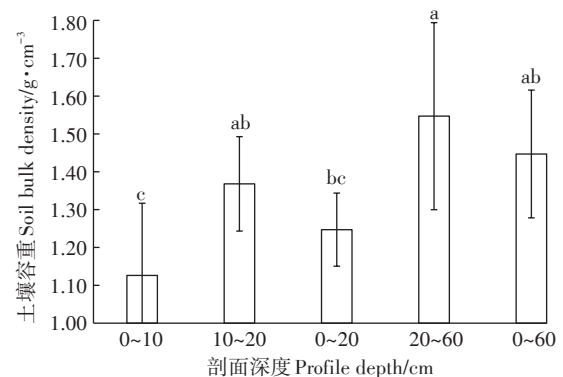


图4 不同深度土壤容重差异

Figure 4 Difference of soil bulk density at different depths

壤孔隙度越大,容重越小。土壤孔隙度越大,充满的空气越多,对电磁波的吸收越不明显,振幅越大。电磁波在传递过程中,遇到不同质地时,探地雷达信号图上会出现明显的振幅反射。所以本文利用土壤剖面孔隙度的差异在探地雷达信号图上反演土壤容重的差异。

各剖面0~60 cm内各深度土壤孔隙度的平均值和标准偏差如表2所示。从表2可以看出,各个剖面土壤孔隙度的均值相差较大,土壤孔隙度均值最大的是边坡剖面P₃,其值达到0.537,剖面P₂次之,其值为0.495。土壤孔隙度均值最低的是平台剖面P₅,其值为0.372。另外,平台剖面P₁、P₄土壤孔隙度的均值都在0.40以上。

表2 各剖面不同深度土壤孔隙度及总体特征
Table 2 Soil porosity and general characteristics at different depths of each profile

深度Depth/cm	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
0~10	0.627	0.672	0.493	0.541	0.545
10~20	0.434	0.503	0.535	0.434	0.513
20~30	0.355	0.529	0.575	0.419	0.408
30~40	0.398	0.426	0.567	0.396	0.266
40~50	0.355	0.469	0.539	0.412	0.255
50~60	0.419	0.373	0.513	0.407	0.245
均值Mean	0.431	0.495	0.537	0.435	0.372
标准偏差 Standard deviation	0.101	0.103	0.031	0.054	0.136

从各剖面土壤孔隙度的标准偏差来看,剖面P₅土壤孔隙度标准偏差最大,达到0.136,主要是由于30~60 cm深度内,土壤孔隙度较低,都低于0.30,而30 cm以上土层的土壤孔隙度都在0.40以上。P₁、P₂剖面土壤孔隙度的标准偏差都在0.10左右,两个剖面0~10 cm土层的土壤孔隙度相对较大,达到0.60以上,而10 cm以下土层的土壤孔隙度呈现减小的趋势。P₃、P₄剖面土壤孔隙度的标准偏差都较小,分别为0.031和0.054。

从剖面长样线探测信号(图5)来看,剖面P₁、P₂、P₄大振幅信号数量接近,各剖面土壤孔隙度均值接近,土壤容重均值差异较小。P₃剖面与其他剖面相比,土壤孔隙度较大,但探地雷达信号图上并没有明显的大振幅信号,主要因为该剖面是纯土壤剖面,土壤孔隙度沿深度方向差异不明显,即介质电性差异不明显。P₅剖面因表层具有较多大振幅信号,土壤孔隙度较大,但表层以下大振幅信号很少,土壤孔隙度较

小,导致土壤孔隙度均值较小,土壤容重较大。从不同深度差异来看,剖面P₁、P₂约0~10 cm处具有更多的大振幅信号,土壤孔隙度较大,土壤容重较小,10 cm以下大振幅信号减小,土壤孔隙度减小,土壤容重增加。剖面P₃、P₄剖面没有较明显的大振幅信号,探地雷达信号较均一。P₅剖面在约0~30 m处有较多大振幅信号,土壤孔隙度较大,土壤容重较小,30 cm以下大振幅信号明显减少,土壤孔隙度变大,土壤容重变小。

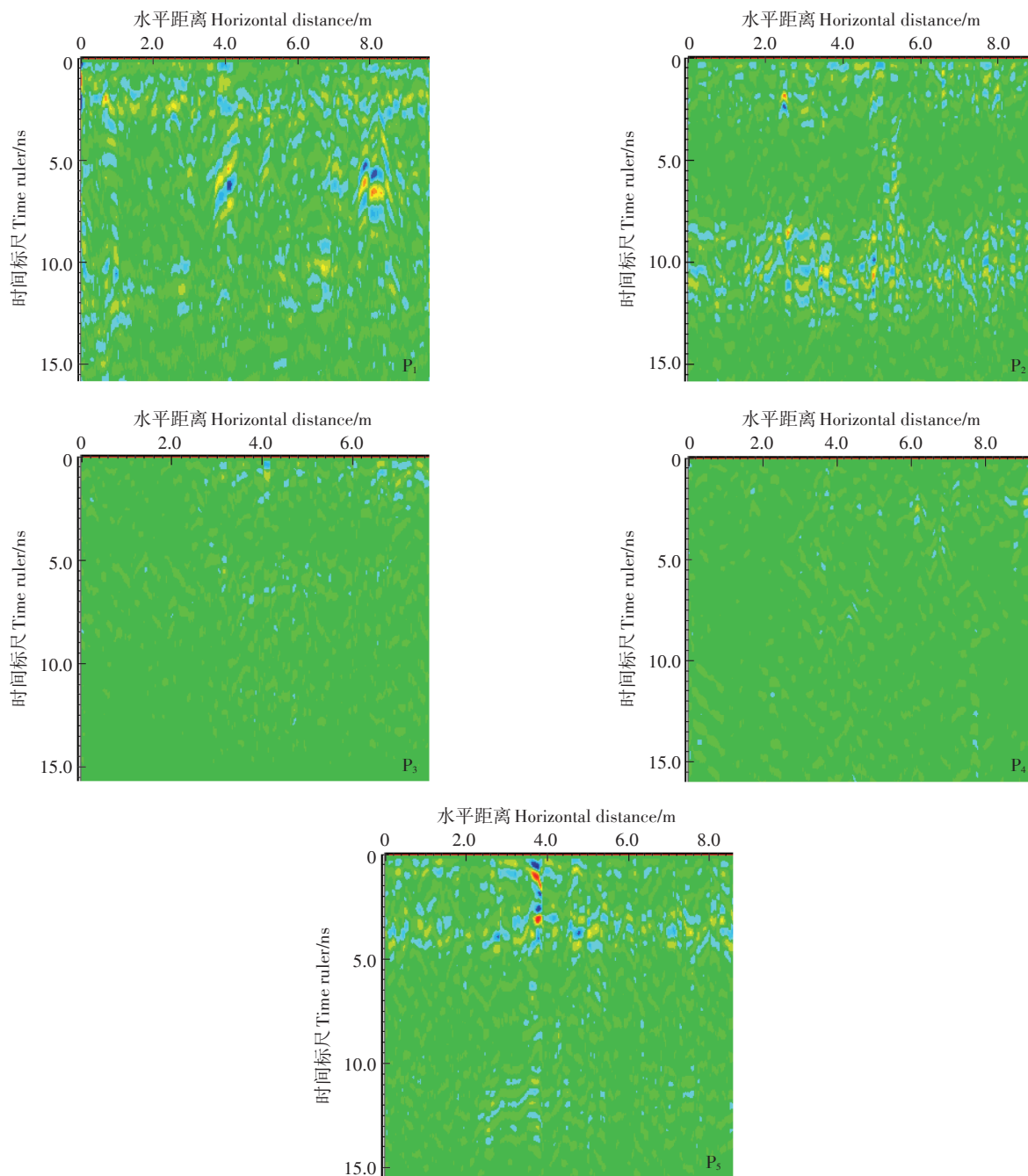
在每个长样线探测信号图上,截取2 m长的图像作为剖面深度和振幅关系的研究图谱(图6)。2 m测线内共有370道信号,沿深度方向上每道有512个采样点,每个采样点间距是0.2 cm,均匀选取其中21道,共21×512=10 752个采样点,即10 752个振幅,取每个长样线探测信号图的21道信号中每一道信号的同一采样点间距的平均振幅代表该采样点深度的平均振幅,平均振幅共512个。

如图7所示,从不同深度差异来看,剖面P₁、P₂约0~10 cm处振幅较大,土壤容重较小,10 cm以下振幅逐渐减少,土壤容重逐渐增加;P₂剖面沿深度方向上振幅有一个波峰,因为30~40 cm处是明显的表土与煤矸石的分层。P₃剖面沿深度方向振幅趋于线性减小,说明土壤容重变化较小。P₄剖面可能因地下存在孤立体,振幅出现波峰,振幅波动也较小,土壤容重较均一。P₅剖面在约0~30 m处振幅较大,土壤容重较小,30 cm以下振幅逐渐减小,土壤容重逐渐增加并趋于稳定。

2.4 土壤容重GPR介电常数反演

2.4.1 剖面各层土壤介电常数确定

从图8可以看出,在剖面P₁中,两根钢管标定的深度分别是19、43 cm,GPR电磁波传播至标定深度的时间分别是2.50、7.10 ns,同时根据两处标定深度的时间差确定19~43 cm处电磁波传播的时间为4.60 ns。在剖面P₂中,存在明显的土壤和煤矸石分层界面,并且分层信息在图像中反映明显,可以确定的分层深度分别是31、33、43、47 cm。选定31、47 cm作为标定深度,GPR电磁波传播至标定深度的时间分别是6.69、9.06 ns,同时根据两处标定深度的时间差确定31~47 cm处电磁波传播的时间为2.37 ns。在剖面P₃中,两根钢管标定的深度分别是13、30 cm,GPR电磁波传播至标定深度的时间分别是1.38、3.85 ns,同时根据两处标定深度的时间差确定13~30 cm处电磁波传播的时间为2.47 ns。在剖面P₄中,两根钢管标定的深度分别是22、33 cm,GPR电磁波传播至标定深度



大振幅信号在探地雷达信号图上用颜色表示,颜色越深表示振幅越大。低含水率条件下,颜色越均一,表示介质质地越均一。
The large amplitude signal is represented by the color depth on the ground penetrating radar signal map, and the darker the color, the larger the amplitude.
Under the condition of low water content, the more uniform the color, the more uniform the texture of the medium

图5 基于GPR图像的土壤容重差异

Figure 5 Difference of soil bulk density based on GPR image

的时间分别是3.60、3.85 ns,同时根据两处标定深度的时间差确定22~33 cm处电磁波传播的时间为2.30 ns。在剖面P₅中,两根钢管标定的深度分别是20、35 cm,GPR电磁波传播至标定深度的时间分别是4.37、7.32 ns,同时根据两处标定深度的时间差确定20~35 cm处电磁波传播的时间为2.95 ns。根据标定深度和

传播时间,确定电磁波在不同土壤层中传播的速度。利用公式(1)计算出不同层介质的介电常数(表3)。

2.4.2 介电常数反演

利用剖面各层采样的土壤容重实测数据和对应层的GPR介电常数进行拟合,并构建拟合关系模型。在进行拟合分析之前,假定采样深度的土壤容重与标

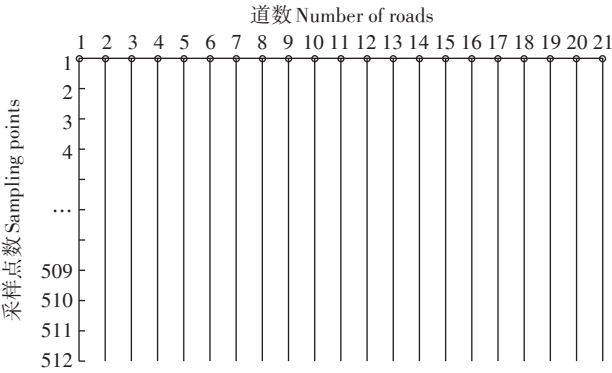


图6 振幅获取方式

Figure 6 Diagram of amplitude acquisition mode

定深度的土壤容重接近。一共有 15 组土壤容重实测值与介电常数值,根据土壤剖面不同深度土壤含水率大小和质地均一性情况,最后选择 11 组具有代表性的土壤容重实测值与 GPR 介电常数进行拟合分析,拟合分析结果如图 9 所示。通过拟合关系来看,其拟合关系的 R^2 值高达 0.813 9,拟合效果较好,且在 SPSS 中相伴概率小于 0.01,表示在 0.01 的显著水平上极显著,即土壤容重和介电常数呈线性正相关关系。

将 15 个介电常数值代入图 9 中的拟合关系模型进行土壤容重反演,其反演结果如表 4 所示。通过对

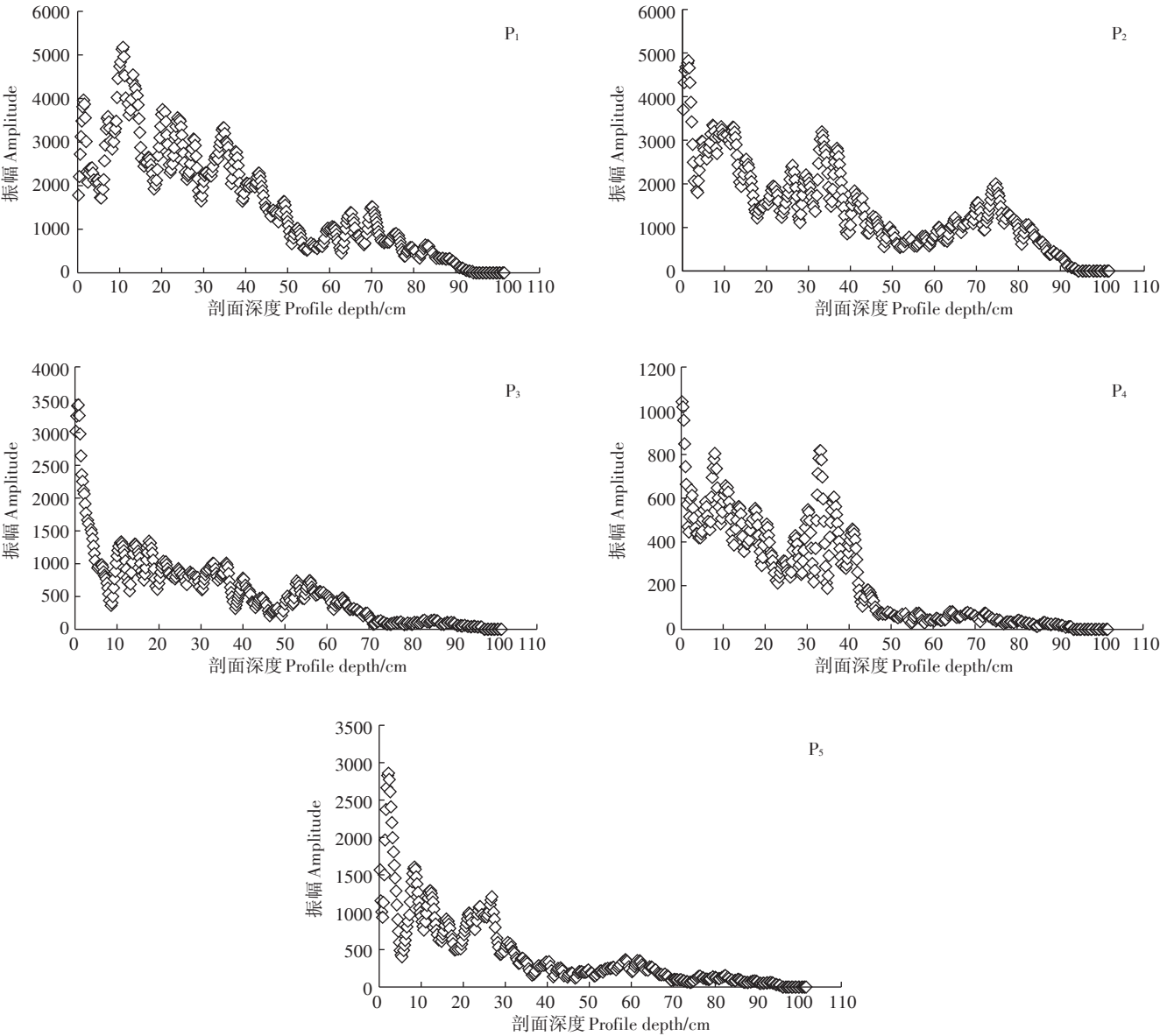


图7 各个剖面深度方向振幅变化

Figure 7 Amplitude changes of each profile along the depth direction

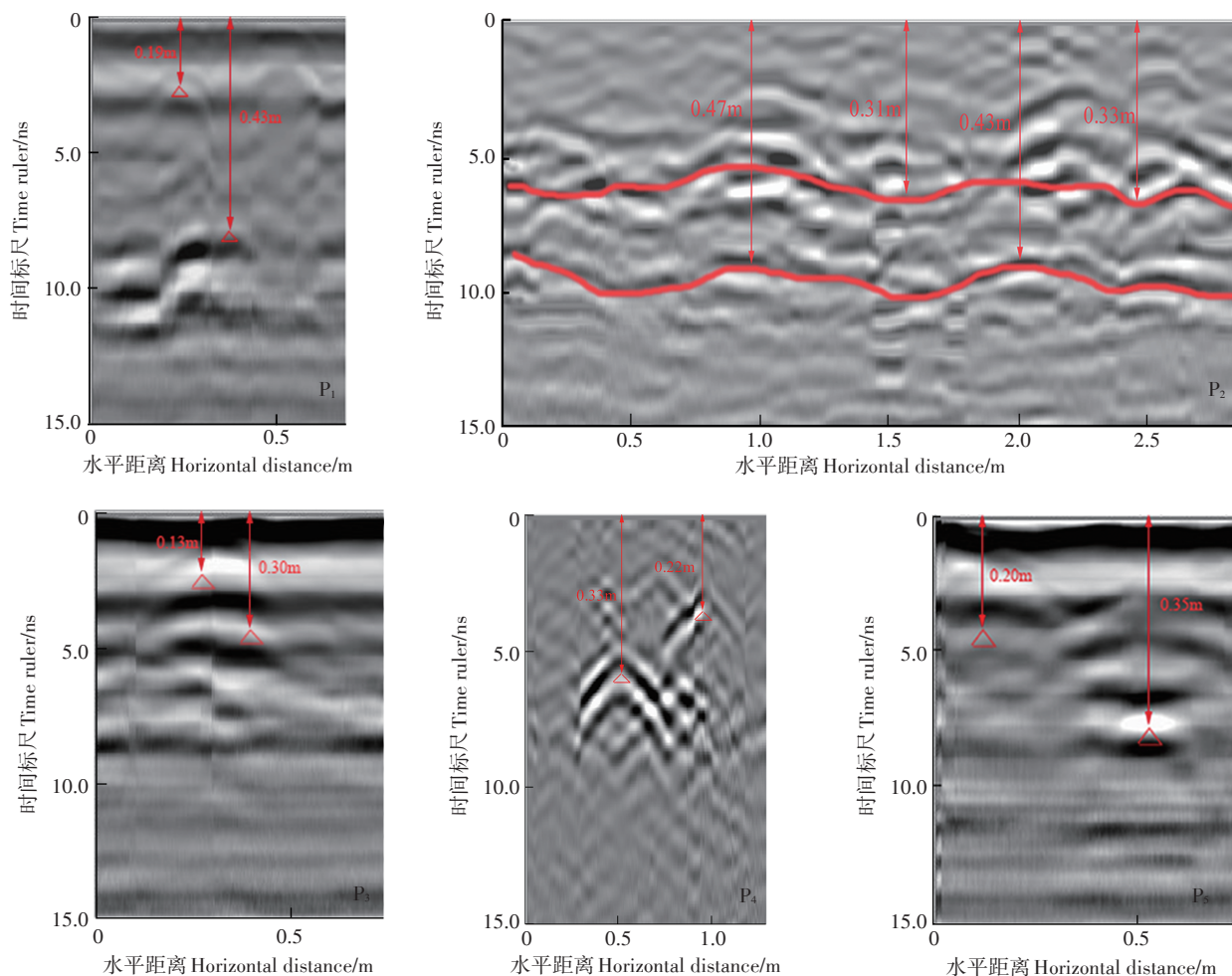


图8 基于GPR图像的各剖面深度标定

Figure 8 Depth calibration of each profile based on GPR image

比发现,模型反演出的土壤容重略低于采样实测出的土壤容重;两种方式测量出的土壤容重差值的绝对值最大为 $0.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (包含异常值),最小为 $0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;实测值与反演值的平均偏差率为 7.20%。

3 讨论

3.1 土壤容重差异原因分析

矿区排土场不同位置土壤容重大小差异明显。对比平台剖面 and 边坡剖面土壤容重的均值发现,平台剖面土壤容重均值较高,边坡剖面土壤容重均值较低。平台 P_5 剖面的土壤容重大于其他平台的土壤容重,边坡 P_3 剖面的土壤容重小于边坡 P_2 剖面。露天矿区排土场平台经过大型机械压实,孔隙度变小,土壤容重变大,大于边坡土壤容重。 P_2 剖面坡度在 22° 左右, P_3 剖面坡度在 33° 左右, P_2 剖面坡度小于 P_3 剖面坡度,所以边坡 P_3 剖面的土壤容重小于 P_2 剖面土壤容

重。这与冯强等^[27]和Cao等^[28]的研究成果相吻合。 P_5 剖面 0~30 cm 为表土,30 cm 以下是典型土石混排,土壤容重明显增加,使得平台 P_5 剖面土壤容重均值大于其他平台。

矿区排土场同一剖面不同深度土壤容重大小差异明显。 P_5 剖面不同深度土壤质地均一性差异明显。 P_5 剖面 0~30 cm 是表土层,30 cm 以下是典型的土石混排,所以 30 cm 以下土壤容重明显大于 20 cm 以上,土壤容重标准偏差较大^[29]。 P_1 、 P_2 、 P_4 剖面 0~10 cm 土壤容重较小,且土壤容重随深度增加而增加。表层土壤植物根系发达,土壤孔隙度大,土壤容重较小,随着深度的增加,植物根系越来越少,土壤容重逐渐增加,并逐渐趋于稳定^[30]。剖面 P_3 沿深度方向土壤容重差异不明显。剖面 P_3 是边坡,坡度大,草本稀少,所以 P_3 剖面沿深度方向,土壤容重变化不大。

通过对不同剖面(0~60、0~20、20~60 cm)土壤容

表3 各剖面不同深度GPR的探测参数值

Table 3 Detection parameter values of GPR at different depths of each profile

剖面 Profile	剖面标定深度 Profile calibration depth/cm	传播时间 Propagation time/ns	传播速度 Propagation velocity/m·ns ⁻¹	介电常数 Dielectric constant
P ₁	0~19	2.50	0.095 3	3.90
	19~43	4.60	0.095 9	8.27
	0~43	7.10	0.096 7	6.13
P ₂	0~31	6.69	0.098 6	9.84
	31~47	2.37	0.109 8	7.63
	0~47	9.06	0.101 8	9.15
P ₃	0~13	1.38	0.188 4	2.54
	13~30	2.47	0.137 8	4.75
	0~30	3.85	0.155 8	3.71
P ₄	0~22	3.60	0.111 1	7.29
	22~33	2.30	0.113 0	7.04
	0~33	5.90	0.111 9	7.19
P ₅	0~20	4.37	0.091 5	10.74
	20~35	2.95	0.095 6	8.70
	0~35	7.32	0.101 7	9.84

表4 各剖面不同深度采样实测与模型反演土壤容重对比

Table 4 Comparison of sample measurement and model inversion of soil bulk density at different depths of each profile

剖面 Profile	剖面标定深度 Profile calibration depth/cm	采样深度 Sampling depth/ cm	土壤容重 Soil bulk density/g·cm ⁻³		
			模型反演 Model inversion	采样实测 Sample measurement	实测-反演 Measurement- inversion
P ₁	0~19	0~20	1.21	1.23	0.02
	19~43	20~40	1.57	1.65	0.08
	0~43	0~40	1.40	1.47	0.07
P ₂	0~31	0~30	1.70	1.64	-0.06
	31~47	30~50	1.52	1.47	-0.05
	0~47	0~50	1.65	1.26	-0.39
P ₃	0~13	0~10	1.10	1.32	0.22
	13~30	10~30	1.28	1.17	-0.11
	0~30	0~30	1.19	1.23	0.04
P ₄	0~22	0~20	1.49	1.38	-0.11
	22~33	20~30	1.47	1.56	0.09
	0~33	0~30	1.48	1.44	-0.04
P ₅	0~20	0~20	1.78	1.25	-0.53
	20~35	20~40	1.61	1.69	0.08
	0~35	0~40	1.70	1.44	-0.26

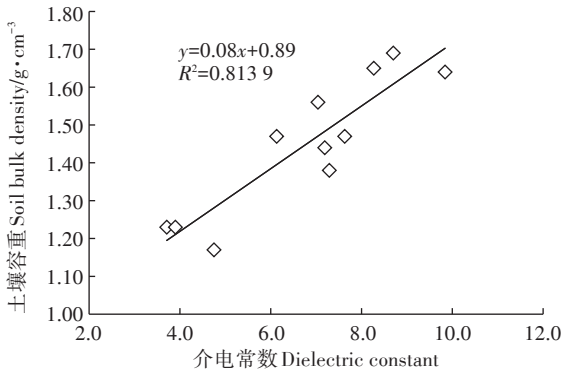


图9 土壤容重实测值与介电常数的拟合关系

Figure 9 The fitting relationship between measured values of soil bulk density and dielectric constant

重显著性分析可知,P₃剖面与其他剖面都存在显著差异,其他剖面之间差异不显著。P₃剖面属于边坡,没有经过大型机械压实,并且坡度大,保水能力差,草本稀少,土壤容重较小,所以与其他剖面存在显著差异。通过对所有剖面(0~10、10~20、0~20、20~60、0~60 cm)土壤容重显著性分析可知,10、20 cm深度是剖面土壤容重的重要分界点。表土植被细根发达,特别是草本植物的根系非常密集,植物残渣丰富,增大了土壤孔隙,降低了土壤容重,随着深度的增加,植物根系越来越少,土壤容重逐渐增加并趋于稳定^[30-31]。

整体来看,各个剖面0~30 cm土壤容重较小,且土壤容重随深度的增加而增加并逐渐趋于稳定。表土植被细根发达,增大了土壤孔隙,降低了土壤容重,随着深度的增加,植物根系越来越少,土壤容重逐渐增加并趋于稳定^[32]。

3.2 土壤容重探地雷达图像识别及拟合效果评价

在土壤含水率较小时,探地雷达信号图上大振幅信号的多少与土壤容重大小成反比。探地雷达发射电磁波,在能量传递过程中,遇到具有足够电性差异的介质,电磁波发生反射,能量衰减,且介质间电性差异越大,反射越强烈,能量衰减越快,在探地雷达信号图上表现为更多的大振幅信号^[33]。电磁波在传播的过程中,在土壤含水率较低的情况下,土壤孔隙度会影响一定深度土壤的介电常数或电性差异,从而影响能量的衰减程度,在信号图上表现为大振幅信号的多少^[34]。土壤孔隙度越大,充满孔隙的空气越多,对应的介电常数越小,介质对电磁波的吸收越弱,在探地雷达信号图上对应的是更多的大振幅信号^[35]。

土壤电导率随着土壤含水量的增加而增加,能量随电导率的增加而衰减得越快,在探地雷达信号图上呈现的大振幅信号越多^[36]。本次试验采样时间选在非雨季,土壤含水率较低,土壤容重成为影响电磁波能量衰减的一个重要因素,即可以通过探地雷达信号

图中振幅大小定量分析土壤容重差异。

由拟合结果可知,土壤容重随着介电常数的增大而增大,拟合关系的 R^2 值为0.813 9。在影响介电常数大小的因素中,土壤含水率是主要因素^[37]。本次室外试验选在非雨季,土壤处于非饱和状态,含水率低,且在拟合分析之前,剔除了几个土壤含水率相对较大的值,有效避免了土壤含水率对试验结果的影响。这与Jackson等^[38]和王萍^[39]对介电常数和土壤容重的关系研究结论相同。

3.3 探地雷达对土壤容重无损探测的可行性

重构土壤典型物理性质空间分异特征明显,形成条件复杂,传统的土壤采样方法由于复垦地障碍限制了采样深度和采样数量,给科学合理揭示空间分异特征与形成机理带来了一定的困难^[40-42],并且对土壤破坏性大,操作繁琐,不适于大范围使用。探地雷达是近几十年发展起来的一种探测地下目标的无损探测技术,与其他常规的地下探测方法相比,具有探测速度快、探测过程连续、分辨率高、操作方便灵活等优点^[43]。

在土壤含水率较低时,探地雷达可实现对土壤容重的定性和定量分析。电磁波在遇到两种电性差异较大的介质时,在两种介质的分界面上会发生反射,能量会衰减,这在探地雷达信号图上呈现为大振幅信号。在矿区土壤重构过程中,受土石混排及造地复垦工艺影响,复垦地土壤剖面出现土层厚度差异明显、土壤质地不均一、土壤砾石含量高、土壤容重增大等现象,导致介质的电性存在差异,这是探地雷达探测土壤容重的有利条件。当某一剖面不同深度土壤容重大小有差异时,介质的电导率或者介电常数也会存在差异,这种电性差异会在探地雷达信号图上表现为大振幅信号,为基于探地雷达信号图定性分析土壤容重提供了理论依据。

基于探地雷达的土壤容重的定量分析在国内外相继展开。王萍^[39]和郭淑丽^[24]用电磁波波速和振幅反演土壤容重,认为土壤容重与电磁波波速呈反比关系,与电磁波最大振幅呈负相关关系,Wang等^[44]建立了土壤容重-介电常数的数学模型,土壤容重和介电常数呈正相关关系。国外一些学者通过室内实验研究发现,在土壤处于非饱和状态时土壤介电常数与土壤容重呈正相关关系^[38,45]。综上所述,在土壤非饱和状态下,利用介质电导率参数可在探地雷达信号图上定性分析土壤容重相对大小,利用介质介电常数-土壤容重模型可定量分析土壤容重真实值。

4 结论

(1)矿区排土场不同位置及同一剖面不同深度的土壤容重大小差异明显。

(2)在土壤含水率较低时,电磁波振幅与土壤容重大小成反比,可分析土壤容重的相对大小。

(3)通过土壤的介电常数反演土壤容重,土壤容重随着介电常数的增大而呈线性增加趋势。

参考文献:

- [1] 李 帅. 煤炭:2018年22个工作要点,产能公告43.6亿吨[J]. 能源, 2018, 114(5):17.
LI Shuai. Coal: 22 work points in 2018, capacity announcement 4.36 billion tons[J]. *Energy*, 2018, 114(5):17.
- [2] Cao Y G, Bai Z K, Sun Q, et al. Rural settlement changes in compound land use areas: Characteristics and reasons of changes in a mixed mining-rural-settlement area in Shanxi Province, China[J]. *Habitat International*, 2017, 61:9-21.
- [3] 马小强, 毕海良, 孙 莹, 等. 青海省矿山环境地质问题及防治建议[J]. 青海环境, 2012(3):135-137.
MA Xiao-qiang, BI Hai-liang, SUN Ying, et al. Environmental geological problems and prevention and control suggestions for mines in Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2012(3):135-137.
- [4] Cao Y G, Dallimer M, Stringer L, et al. Land expropriation compensation among multiple stakeholders in a mining area: Explaining "skeleton house" compensation[J]. *Land Use Policy*, 2018, 74:97-110.
- [5] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于CT分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12):229-236.
WANG Jin-man, GUO Ling-li, BAI Zhong-ke, et al. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12):229-236.
- [6] 曹银贵, 白中科, 张耿杰, 等. 山西平朔露天矿区复垦农用地表层土壤质量差异对比[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2422-2428.
CAO Yin-gui, BAI Zhong-ke, ZHANG Geng-jie, et al. Soil quality of surface reclaimed farmland in large open-cast mining area of Shanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2422-2428.
- [7] Pan J, Bai Z K, Cao Y G, et al. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30):23953-23965.
- [8] 吴永波, 刘 爽. 土壤压实对土壤性质及植物生长的影响[J]. 林业科技开发, 2010, 24(1):15-17.
WU Yong-bo, LIU Shuang. Advance in impacts of soil compaction research on the soil properties and plant growth[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2010, 24(1):15-17.

- [9] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 82(2): 121-145.
- [10] Liu X Y, Cao Y G, Bai Z K, et al. Evaluating relationships between soil chemical properties and vegetation cover at different slope aspects in a reclaimed dump[J]. *Environmental Earth Science*, 2017, 76(23): 508-560.
- [11] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 112-113.
HUANG Chang-yong, XU Jian-ming. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 112-113.
- [12] 刘美英, 高永, 汪季, 等. 矿区复垦地土壤碳氮含量变化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 94-97.
LIU Mei-ying, GAO Yong, WANG Ji, et al. Variation of soil carbon and nitrogen contents in the reclamation of coal mine area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 94-97.
- [13] 徐良骥, 黄臻, 章如芹, 等. 煤矸石充填复垦地理化特性与重金属分布特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 211-219.
XU Liang-ji, HUANG Can, ZHANG Ru-qin, et al. Physical and chemical properties and distribution characteristics of heavy metals in reclaimed land filled with coal gangue[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 211-219.
- [14] 曹银贵, 程烨, 白中科. 安太堡露天矿区土地景观格局变化及土地复垦的原则[J]. 资源与产业, 2006, 8(5): 7-11.
CAO Yin-gui, CHENG Ye, BAI Zhong-ke. The changes of landscape structure and principles of land reclamation in the Antaibao opencast area[J]. *Resources & Industries*, 2006, 8(5): 7-11.
- [15] Kuchenbuch R O, Ingram K T. Effects of soil bulk density on seminal and lateral roots of young maize plants (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2004, 167(2): 229-235.
- [16] 白中科, 胡振华. 露天矿排土场人为加速侵蚀及分类研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 34-40.
BAI Zhong-ke, HU Zhen-hua. Artificial accelerated erosion and classification of the dump in surface mine[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 34-40.
- [17] 于亚军, 任珊珊, 郭李凯, 等. 两种利用类型煤矸山复垦重构土壤贮水特性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 44-48.
YU Ya-jun, REN Shan-shan, GUO Li-kai, et al. Study on soil water-holding capacity between two types of reclamation agroforestry land on a coal waste pile[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 44-48.
- [18] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水文-物理性质特征分析[J]. 中南林业学院学报, 2005, 25(2): 1-6.
TIAN Da-lun, CHEN Shu-jun. Analysis of soil hydrology-physic properties in the artificial forest of *Cinnamomum camphora* (L.) presl [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 25(2): 1-6.
- [19] Hubbard S. Mapping the volumetric soil water content of California vineyard using high-frequency GPR ground wave data[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(6): 552-559.
- [20] 雷少刚, 卞正富. 探地雷达测定土壤含水率研究综述[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1179-1183.
LEI Shao-gang, BIAN Zheng-fu. Review on soil water content measurement with ground penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1179-1183.
- [21] 王前锋, 周可法, 孙莉, 等. 基于探地雷达快速测定土壤含水量试验研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 881-887.
WANG Qian-feng, ZHOU Ke-fa, SUN Li, et al. A study of fast estimating soil water content by ground penetrating radar[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 881-887.
- [22] Ratto C R, Morton K D, Collins L M, et al. Analysis of linear prediction for soil characterization in GPR data for countermining applications [J]. *Sensing & Imaging*, 2014, 15(1): 86-93.
- [23] Wang J M, Wang H D, Cao Y G, et al. Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22058.
- [24] 郭淑丽. 基于GPR的复垦土壤压实探测模型研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
GUO Shu-li. The soil compaction detection model based on ground penetrating radar in reclamation area[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013.
- [25] 马锐, 韩武波, 白中科. 黄土区大型露天矿排土场水土流失致灾因子的确定——以安太堡露天煤矿南排土场为例[J]. 能源环境保护, 2006, 20(2): 50-53.
MA Rui, HAN Wu-bo, BAI Zhong-ke. Research of ravaged indexes of water and soil loss of dumping site of large opencast coal mine in loess area: Example for the south dumping site of Antaibao opencast coal mine[J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, 20(2): 50-53.
- [26] 白中科, 王治国, 赵景逵, 等. 安太堡露天煤矿水土流失特征与控制[J]. 煤炭学报, 1997(5): 542-547.
BAI Zhong-ke, WANG Zhi-guo, ZHAO Jing-kui, et al. Characteristics of soil erosion and its control in Antaibao open-pit coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997(5): 542-547.
- [27] 冯强, 段宝玲, 姜硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(1): 39-45.
FENG Qiang, DUAN Bao-ling, JIANG Shuo. Spatial heterogeneity of bulk density and its influencing factors at small watershed scale[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(1): 39-45.
- [28] Cao Y G, Wang J M, Bai Z K, et al. Differentiation and mechanisms on physical properties of reconstructed soils on open-cast mine dump of loess area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8): 6367-6380.
- [29] 甄庆. 新构土体土壤质量及水分与溶质运移研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
ZHEN Qing. Soil quality and water and solute transport in new soils [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [30] 徐宁, 吴兆录, 李正玲. 滇西北亚高山不同土地利用类型土壤容重与根系生物量的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(5): 1961-1963.
XU Ning, WU Zhao-lu, LI Zheng-ling. Comparative studies on soil bulk density and underground roots biomass under different land use types in northwestern Yunnan Province[J]. *Journal of Anhui Agriculture*

- al Sciences*, 2008, 36(5):1961-1963.
- [31] 潘金梅, 张立新, 吴浩然, 等. 土壤有机物质对土壤介电常数的影响[J]. 遥感学报, 2012, 16(1):1-24.
PAN Jin-mei, ZHANG Li-xin, WU Hao-ran, et al. Effects of soil organic matter on soil dielectric constant[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1):1-24.
- [32] 单梦颖, 杨永刚, 吴兆录. 云南省中部3种森林土壤含水率、容重和细根重及其垂直分布[J]. 云南地理环境研究, 2013, 25(4):38-44.
SHAN Meng-ying, YANG Yong-gang, WU Zhao-lu. Soil moisture content, bulk density and fine root weight and their vertical distribution of three forests in central Yunnan Province[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2013, 25(4):38-44.
- [33] 伍敏. 探地雷达在沥青路面检测中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WU Min. Application of ground penetrating radar in asphalt pavement detection[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [34] 隋吉东, 李天和, 史拓, 等. 土壤紧实度对电磁波衰减的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1991(1):51-54.
SUI Ji-dong, LI Tian-he, SHI Tuo, et al. The effect of different soil solidity on the attenuation of electromagnetic waves[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 1991(1):51-54.
- [35] 张 建. 土质路基含水量与介电性的关系研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
ZHANG Jian. Study on the relationship between the dielectric properties and water content of soil subgrade[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014.
- [36] 周立刚. 高频探地雷达测定土壤含水量研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
ZHOU Li-gang. Study on determination of soil water content by high frequency ground penetrating radar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [37] Lunt I A, Hubbard S S, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1/2/3/4):254-269.
- [38] Jackson T J. Effect of soil properties on microwave dielectric constants[J]. *Transportation Research Record*, 1987, 1119:126-131.
- [39] 王 萍. 探地雷达检测土壤紧实性的实验研究和信号反演[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
WANG Ping. The experimental study and signal inversion of ground penetrating radar for soil compaction detection[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2010.
- [40] Cao Y G, Bai Z K, Zhou W, et al. Characteristic analysis and pattern evolution on landscape types in typical compound area of mine agriculture urban in Shanxi Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7):585-599.
- [41] Wang J M, Yang R X, Feng Y. Spatial variability of reconstructed soil properties and the optimization of sampling number for reclaimed land monitoring in an opencast coal mine[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10:46-58.
- [42] 白 哲. 基于探地雷达的路基土压实度确定[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(2):58-62.
BAI Zhe. Compactness determination of subgrade soil based on GPR[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2015, 34(2):58-62.
- [43] 李成方. 探地雷达信息处理算法与信息管理系统研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
LI Cheng-fang. Research on GPR information processing arithmetic & information management system[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006.
- [44] Wang P, Hu Z, Zhao Y, et al. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 126:128-137.
- [45] Raper R L, Asmussen L E, Powell J B. Sensing hard pan depth with ground-penetrating radar[J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(1):41-46.