

复垦土壤盐分污染的微波频谱分析

胡振琪¹, 陈星彤^{1,2}, 卢霞¹, 许鸿飞³, 张建¹

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 河北理工大学交通与测绘学院, 唐山 063009; 3. 山西省水利科学研究所, 山西 030002)

摘要: 复垦工程完成后, 复垦土壤的结构、层次等受到破坏, 易发生盐碱化, 微波的穿透性为土地质量的监测提供可能。该试验通过对复垦土壤在不同水分条件下, 不同盐分污染程度的探地雷达探测, 旨在揭示盐分污染下, 微波信号的变化规律。结果表明: 中心频率为 400 MHz 的天线在不同程度的盐分污染下, 主频发生偏移, 出现在 250 MHz。随着盐分污染的加重, 出现双峰现象, 次主频出现在 530 MHz, 且随着盐分污染的加重次主频的相对振幅逐渐加强, 不同的水分含量系列下, 出现相同的现象。由于探地雷达可以快速、大面积的无损探测, 因此, 能够及时提供复垦土壤盐分变化的信息, 可以对复垦土地的质量实时监测、及时治理。

关键词: 复垦土壤; 盐分污染; 探地雷达; 中心频率; 主频; 次主频

中图分类号: TD88; S151

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)06-0056-05

胡振琪, 陈星彤, 卢霞, 等. 复垦土壤盐分污染的微波频谱分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 56-60.

Hu Zhenqi, Chen Xingtong, Lu Xia, et al. Microwave spectrum analysis of salinity pollution about reclamation soil[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 56-60. (in Chinese with English abstract)

0 引言

耕地因矿区的开采, 大面积土地遭到沉陷、剥蚀、压占等多种形式的破坏, 目前, 复垦工程也在积极开展^[1,2]。复垦工程在铲、运、卸、铺、平整的过程中, 土壤的结构遭到严重损害, 其压实程度、团粒结构、空隙结构均发生变化, 造成复垦后的土壤在水分、盐分运移与原生土壤均不相同, 易发生盐碱化, 且填充材料不同, 如粉煤灰、风化煤、煤矸石等原料重金属含量高, 存在二次污染的可能^[3-5]。由于复垦技术的特殊性, 例如泥浆泵复垦、铲运机复垦及多种机械联合作业复垦, 在复垦土壤形成过程中, 造成复垦后的土壤赋存状态难以种植(如泥浆泵复垦后土壤表层之下数年保持泥浆状态)、缺乏层次性、土壤压实偏高(如铲运机复垦产生较强的土壤压实)等, 人为、机械的深层次干扰造成复垦后的部分土地生产力低下甚至土壤恶化。因此, 复垦土壤质量的监测势在必行。

探地雷达(简称 GPR, Ground penetrating radar)采用微波信号的发射接收技术, 具有穿透能力, 它是一种无损探测地下目标特征的地球物理方法。使用探地雷达进行水分的研究已在多个应用领域开展。探测地下水主要有以下方面: GPR 技术被用于探测地下水资源^[6]; GPR 土壤水分的分布模型通过容器试验建立^[7,8]; GPR 的土壤水分空间变化的 2D 和 3D 成像^[9,10]; 在灌溉和排水期, 田间土壤水分 GPR 的测

量^[11-13]; 地下水位深度的定位^[14]等。

以上所述的 GPR 探测均是针对土壤水分的研究, 对土壤盐分污染的研究很少, 且主要是关于非扰动土壤, 对复垦土壤的研究则很少涉及。本文主要从水-盐系列模型出发, 研究 GPR 对复垦土壤探测的信号特征。

1 试验方法

1.1 试验模型

用 GPR 直接进行复垦田块的大田探测, 由于土壤结构、湿度、盐分等多种因素的影响, 因而导致表征大地电磁特性的几个参数(介电常数, 导磁率, 导电率)也随之而变, 接收的反射信号难以解释, 因此, 本着寻找复垦土壤自身不同状态信息和 GPR 信号的对应关系, 通过设置一定的约束条件(如一定的水分、盐分、重金属含量、pH 值、压实程度、一定宽度裂隙等可人为控制的条件), 简化复垦土壤的背景条件, 收集 GPR 的信号数据, 探索相应复垦土壤状态下信号的变化规律, 给予合理的解释, 亦可进一步进行标定。因此, 采用搭建模型的方法, 进行 GPR 探测试验。

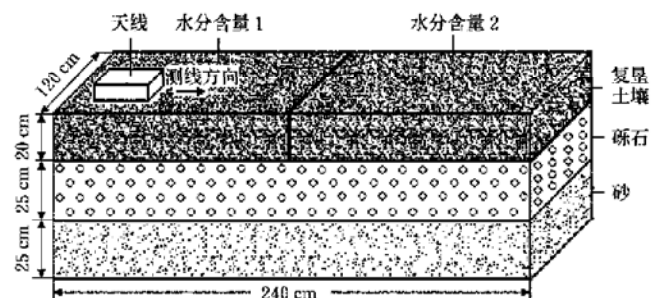


图 1 复垦土壤测试模型

Fig. 1 Test model of reclamation soil

试验模型示意如图 1, 模型的大小为 240 cm × 120 cm × 70 cm, 底层为砂, 厚度 25 cm, 中部为砾石, 粒

收稿日期: 2005-10-31 修订日期: 2006-03-01

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0484); 国土资源部重点科技项目

作者简介: 胡振琪(1963-), 男, 安徽嘉山人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事土地复垦与生态重建的、污染土壤修复和生态环境材料的研制等。北京海淀区学院路丁 11 号 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建所, 100083. Email: xingtongchen@126.com

径 2~ 6 cm, 平均粒径 3 cm, 厚度 25 cm, 表层为复垦土壤, 厚度 20 cm。

1.2 试验材料及方法

由于 GPR 对水分非常敏感, 因此, 探测土壤中的其他信息(如盐分、pH 值、压实程度等), 水分是获取相关信息的主要影响因素, 因此, 本次试验在添加不同盐分的背景下, 均设计了同盐分下水分系列的测试。

1) 复垦土壤的准备, 包括未添加任何成分的复垦土壤, 根据自然状态下, 盐分污染的轻度、中度、重度的含盐量, 添加盐分到复垦土壤中, 形成 3 种盐度类型的复垦土壤, 试验中填加的盐分为 CaCl₂。

2) 对不同成分的土壤进行自然风干处理, 尽可能降低水分含量, 以方便水分系列的添加。

3) 不同盐分污染的土样均按照一定量的水分进行添加, 建立盐分- 水分模型, 用 GPR 测量, 同时环刀取土样, 3 次重复, 保证数据的非偶然性。采用烘干法获得质量水分含量。

4) 数据收集设备为 GPR, 为美国劳雷公司 (Geophysical Survey Systems, Inc., 简称: GSSI) SIR-2 系统, 天线的中心频率为: 400 MHz。

5) 环刀、烘箱、电子天平、pH 计、电导仪等。

2 数据处理及结果

2.1 数据结果

2.1.1 土样测试数据

土样经实验室测试, 获取土壤组成数据(见表 1, 表 2, 表 3)。

表 1 土壤的颗粒组成

	粒径/mm			
	2~ 0.2	0.2~ 0.02	0.02~ 0.002	< 0.002
所占比例	20.36	47.21	22.65	9.78

表 2 土壤盐分含量

	全盐/%	氯盐(Cl ⁻)/%
原土	0.31	0.023
轻度盐分	1.36	0.347
中度盐分	3.35	0.696
重度盐分	5.28	1.245

表 3 不同盐分污染土壤的容重、体积水分含量、孔隙度

Table 3 Bulk density, volumetric water content and porosity of soil with different salinity content

水分系列	原始土壤			低度盐污染土			中度盐污染土			高度盐污染土		
	ρ_b /g·cm ⁻³	θ_v /%	p /%	ρ_b /g·cm ⁻³	θ_v /%	p /%	ρ_b /g·cm ⁻³	θ_v /%	p /%	ρ_b /g·cm ⁻³	θ_v /%	p /%
水分含量 1	1.07	9.41	59.62	1.05	10.78	60.38	1.03	9.90	61.13	1.05	7.74	60.38
水分含量 2	1.11	13.15	58.11	1.08	14.60	59.25	1.07	14.28	59.62	1.12	11.79	57.74
水分含量 3	1.13	16.84	57.36	1.12	18.34	57.74	1.09	16.63	58.87	1.15	16.95	56.60
水分含量 4	1.16	21.22	56.23	1.16	22.79	56.23	1.16	21.38	56.23	1.26	23.59	52.45
水分含量 5	1.21	25.21	54.34	1.20	26.94	54.72	1.20	25.66	54.72	1.29	28.87	51.32
水分含量 6	1.30	35.12	50.94	1.37	34.22	48.30	1.32	33.13	50.19	1.38	37.16	47.92

注: 表中 θ_v 为体积含水率(%), ρ_b 为复垦土壤的容重(g/cm³), p 为孔隙度(%).

表 4 不同盐分污染土壤的电导率

Table 4 Electrical conductivity of soil with different salinity content

水分系列	无污染土 /mS·cm ⁻¹	低度盐污染土 /mS·cm ⁻¹	中度盐污染土 /mS·cm ⁻¹	高度盐污染土 /mS·cm ⁻¹
水分含量 1	0.78	0.93	1.08	1.23
水分含量 2	0.80	0.97	1.16	1.30
水分含量 3	0.82	0.99	1.20	1.37
水分含量 4	0.86	1.05	1.28	1.43
水分含量 5	0.90	1.11	1.34	1.57
水分含量 6	1.13	1.23	1.47	1.69

表 5 不同盐分污染土壤的介电常数

Table 5 Dielectric constant of soil with different salinity content

水分系列	无污染土 /%	低度盐污染土 /%	中度盐污染土 /%	高度盐污染土 /%
水分含量 1	9.07	9.11	9.07	8.26
水分含量 2	10.33	10.73	10.69	10.45
水分含量 3	11.65	12.29	11.60	11.69
水分含量 4	13.61	13.99	13.66	14.04
水分含量 5	15.16	15.92	15.21	16.99
水分含量 6	20.61	20.25	19.54	22.34

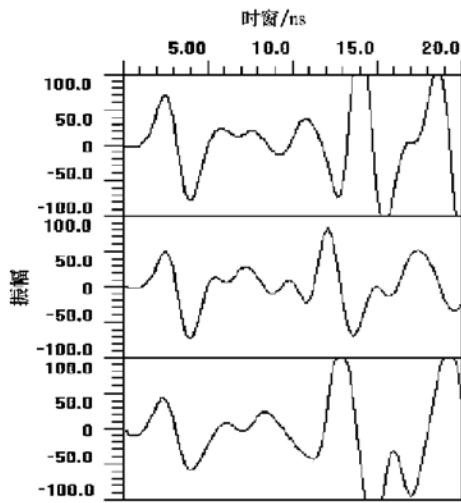
2.1.2 时域微波信号

模型中土壤来源相同, 水分虽然按照一定量进行添加, 但是由于搭建模型土方量大, 人为操作过程的误差, 表 3 中显示的土壤水分含量在一定范围内浮动。

本试验测试了 6 种水分系列下不同程度盐分污染的波谱信号, 由于篇幅限制, 本文只选择 3 个水分系列加以说明, 不同盐分污染的 GPR 可接收到 N 列(即 N 个位置)的回波数据, 这里只取出一位置上接收到回波信号加以说明, 单列扫描的时域波谱信号见图 2~ 5。

图 2~ 5 中横坐标的时窗表示往深部探测所经过的时间, 时间越长深度越深。模型中土壤层的信号在 10 ns 的范围内, 因此, 重点观察 10 ns 范围内的信号。

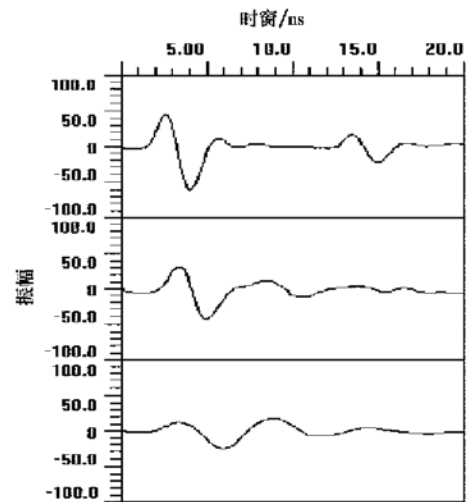
图 2 显示的是不同水分系列下无污染的复垦土壤的信号曲线, 从图中可以看出随着水分的增加, 信号振幅呈递减序列, 图 3~ 5 显示相同的规律。通过图 2~ 5 的横向对比, 当盐分含量增加时, 相近的水分含量条件下, 信号的振幅明显降低。综合考虑, 信号振幅的降低是由于水分含量的增加和盐分含量的增加双重影响的结果。这可以用电磁波信号衰减的原理来解释。



(上为水分 9.41%, 中为水分 16.84%, 下为水分 35.12%)

图 2 无污染的复垦土壤

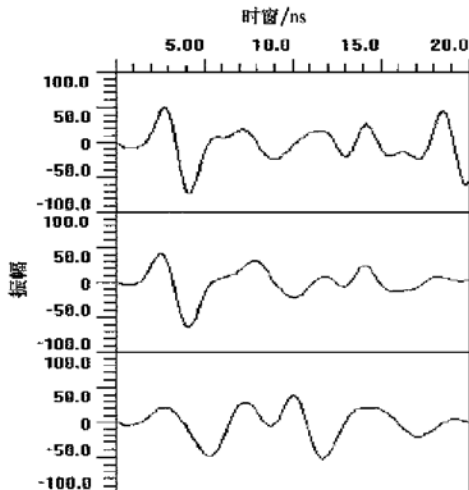
Fig. 2 No-pollution reclamation soil



(上为水分 7.74%, 中为水分 16.95%, 下为水分 37.16%)

图 5 重度盐分污染复垦土壤

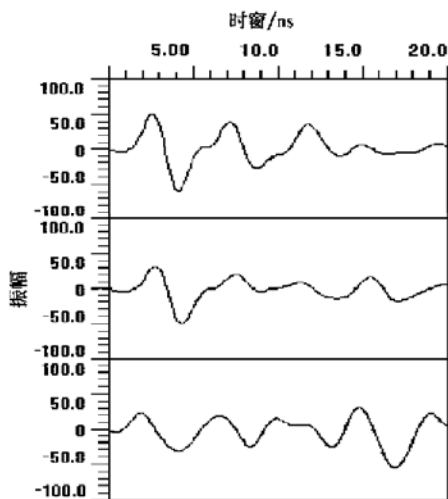
Fig. 5 High salinity pollution reclamation soil



(上为水分 10.78%, 中为水分 18.34%, 下为水分 34.22%)

图 3 轻度盐分污染复垦土壤

Fig. 3 Low salinity pollution reclamation soil



(上为水分 9.90%, 中为水分 16.63%, 下为水分 33.13%)

图 4 中度盐分污染复垦土壤

Fig. 4 Middle salinity pollution reclamation soil

当应用电磁波进行土壤检测时, 土壤为有耗介质, 电磁波在土壤中传播时, 就会有能量的损耗和衰减, 其衰减公式如下

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\mu/\epsilon} \quad (1)$$

式中 α ——衰减系数, Np/m; α 的物理意义是单位距离上振幅的衰减; μ ——磁导率, H/m; σ ——电导率, S/m。

一般的土壤都属于非磁性材料, 于是, $\mu = 1$, (1) 式简化为

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

上式表明衰减系数与频率无关, 而与 σ 成正比, 与 $\sqrt{\epsilon}$ 成反比, 一般介质的电导率越大, 电磁波的衰减程度越强。

经计算, 衰减常数见表 6。

表 6 不同盐分土壤信号的衰减常数

Table 6 Attenuation constant of soil with different salinity content $\times 10^{-2} \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$

水分系列	无污染土	低度盐污染土	中度盐污染土	高度盐污染土
水分含量 1	1.295	1.541	1.793	2.140
水分含量 2	1.245	1.481	1.774	2.011
水分含量 3	1.201	1.412	1.762	2.003
水分含量 4	1.166	1.404	1.732	1.908
水分含量 5	1.156	1.391	1.718	1.904
水分含量 6	1.134	1.367	1.606	1.788

从表 6 的列和行, 可以知道, 复垦土壤水分和复垦土壤盐分对电磁波信号均有影响, 同一复垦土壤背景条件下, 随着水分含量的增加, 信号衰减系数缓慢降低, 然而, 图 2~ 5 的电磁波的时域信号曲线表现为: 当水分含量增加时, 信号振幅的衰减更强烈。这是由微波的特性所决定的。通常, 一些介质材料由极性分子和非极性分子组成, 在微波电磁场作用下, 极性分子从原来的热运

动状态转向依照电磁场的方向交变而排列取向。产生类似摩擦热, 在这一微观过程中交变电磁场的能量转化为介质内的热能, 使介质温度出现宏观上的升高, 水是吸收微波最好的介质, 所以凡是含水的物质均吸收微波能量。微波能量部分转化为热能, 这部分能量的损失远远超过了信号衰减系数的降低, 表现为 GPR 接受的电磁波反射信号能量降低, 导致信号振幅的减弱。

表 6 横向数据显示在相近的水分条件下, 随着盐分含量的增加, 土壤的衰减系数迅速增大, 其增加数量级远大于水分系列(纵向)。这说明土壤盐分对电磁波反射信号的影响比土壤含水率要大得多。

为了能更好的表现电磁波对盐分的识别, 在信号处理时采用的如下分析。

2.2 频谱分析理论^[15]

对于 GPR 数据, 频谱分析总是针对经过离散采样后某项记录的一段来进行的, 这段离散的雷达记录是有限长序列 $x_{mT}(m = N_1, N_2, \dots, N_m)$, 若令 $t < N_1T$ 及 $t > N_mT$ 的记录均为零, 则对雷达记录进行频谱分析的公式为

$$X(\nabla f) = \sum_{k=N_1}^{k=N_m} x_{kT}^{-2\pi j \nabla f kT \Delta t} \quad (3)$$

式中 x_{kT} —— 进行频谱分析的雷达记录; T —— 雷达记录的采样间隔; ∇ —— 记录离散频率的频率间隔, $\nabla = \frac{1}{(N_m - N_1 + 1)T}$; $X(\nabla f)$ —— 雷达记录的频谱。

2.3 分析结果

分析采用 400 MHz 中心频率天线获取的探地雷达数据经过频谱分析, 见图 6~ 9。

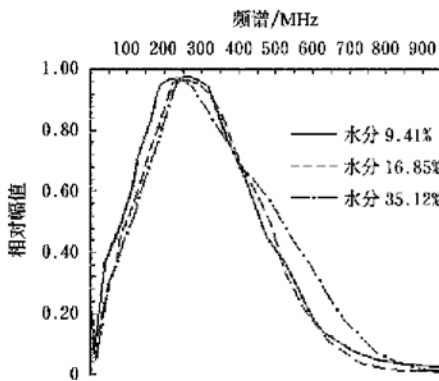


图 6 无污染的复垦土壤
Fig. 6 No-pollution reclaimed soil

图 6 可以看出, 水分的差异很大, 其频谱分析后曲线的相关度却很高, 曲线几乎重合, 这一现象在图 7、图 8、图 9 中相似, 因此, 通过频谱分析, 并不能有效的区分水分含量的差异。而图 6~ 8 却可以明显看出: 无污染复垦土壤振幅频谱图主频在 250 MHz 左右, 随着盐分含量的增加, 530 MHz 出现的一个次主频的出现, 次主频的相对幅值随着盐分含量的增加而增强。

由于吸收的影响, 波在土壤传播过程中, 高频成份的衰减程度是不一样的。故对接收的信号作频谱分析

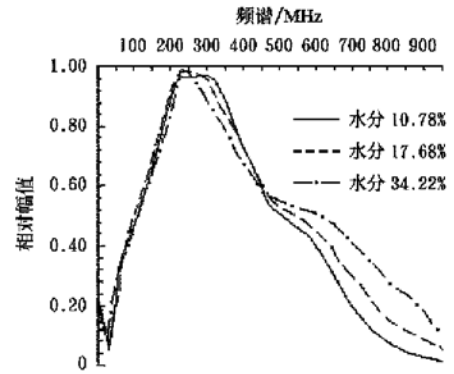


图 7 轻度盐分污染复垦土壤
Fig. 7 Low salinity pollution reclaimed soil

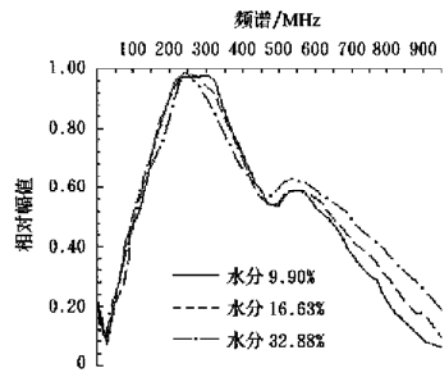


图 8 中度盐分污染复垦土壤
Fig. 8 Middle salinity pollution reclaimed soil

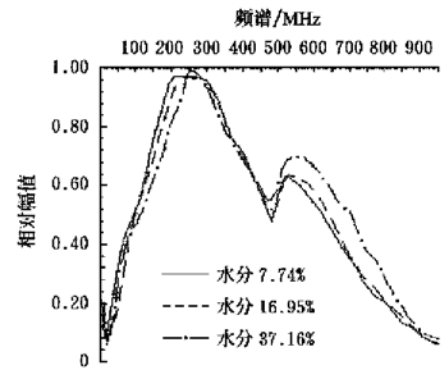


图 9 重度盐分污染复垦土壤
Fig. 9 High salinity pollution reclaimed soil

后, 其振幅谱与发射的振幅谱, 是不会一致的。表现为

- 1) 频率高的部分衰减的多一些;
- 2) “主频”也会相应向低频方向漂移;
- 3) 甚至还会出现振幅谱除主频的峰值之外, 还有几个次峰, 即振幅谱是多峰的。

本次试验采用的 400 MHz 的天线, 频率高的部分发生衰减, 频谱分析后, 从振幅谱可以看出, “主频”向低频方向漂移, 从 400 MHz 移至 250 MHz 左右, 同时在 530 MHz 左右出现一个次峰值, 图 6~ 9 中由于土壤条件相似, 氯盐含量的变化是其限定条件, 因此, 可以解释为 530 MHz 是氯盐的敏感波段。

3 结论和讨论

400 MHz 的 GPR 天线探测复垦土壤的时域信号显示,随着水分含量的增加,信号有振幅降低的趋势,同时,从时域谱上,亦可以观察盐分含量的增加导致信号振幅的降低,虽然两者的贡献大小不同,但是难以具体区分。通过频谱分析后,振幅谱显示随着盐分污染程度的增加,主频之外出现次主频,其值在 530 MHz 左右,盐分污染愈重,次主频的相对幅值愈高。因此,GPR 不仅具有探测复垦土壤水分的能力,还具有探测其盐分污染的潜力。

GPR 探测无需取样,只需在地表拖动天线,即可快速、大面积获取地下的电磁波信息,其探测尺度为中尺度(5~1000 m),和传统方法相比,省时省力,效率更高。目前,急需解决 GPR 信号的水分、盐分标定,为在复垦土壤领域的探测应用奠定基础,这在后续研究中将继续。

[参考文献]

- [1] 王晚苗, 乔刚. 潞安矿业集团公司土地复垦规划综述[J]. 煤矿环境保护, 2002, 16(4): 14-16.
- [2] Hu Zhenqi, Hu Fen, et al. Impact of coal mining subsidence in eastern China[J]. Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1997, 11(2): 91-94, A. Balkema Publishers, Netherlands.
- [3] 胡振琪. 煤矿塌陷区泥浆泵复田的理论基础研究[A]. 1992年学术年会论文集[C]. 郑州: 中国煤炭, 1992.
- [4] 刘超, 赵海峰, 胡振琪, 等. 皖北煤电公司土地复垦的技术模式[J]. 选煤技术, 2004, 5(5): 56-61.
- [5] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 214-218.
- [6] Jandyr de Menezes Travassos, Paulo de Tarso Luiz Menezes. GPR exploration for groundwater in a crystalline rock terrain[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55: 239-248.
- [7] Stoffregen H, Yaramanci U, Zenker T, et al. Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267: 201-206.
- [8] Schmalz B, Lennartz B, Wachsmuth D. Analyses of soil water content variations and GPR attribute distributions[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267: 217-226.
- [9] Huisman J A, Snepvangers J J C, Bouten W, et al. Mapping spatial variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269: 194-207.
- [10] Young R A, Slatt R M, Staggs J G. Application of ground penetrating radar imaging to deepwater (turbidite) outcrops[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 809-821.
- [11] Lakshman Wasantha Galagedara. The GPR direct ground wave method for soil moisture content estimation: field experiments and modeling[D]. The University of Guelph, 2003.
- [12] Galagedara L W, Parkin G W, et al. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301, 182-197.
- [13] Yuichi Nakashima, Hui Zhou, Motoyuki Sato. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47, 241-249.
- [14] Yuichi Nakashima, Hui Zhou, Motoyuki Sato. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47: 241-249.
- [15] 尹长川, 郝建军, 罗涛, 等. 数字通信基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 35-42.

Microwave spectrum analysis of salinity pollution about reclamation soil

Hu Zhenqi¹, Chen Xingtong¹, Lu Xia¹, Xu Hongfei², Zhang Jian¹

(1. Institute of Land reclamation and Ecological Reconstruction, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. School of Traffic and Survey Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009; 3. Institute of Water Resources and Hydraulic Research of Shanxi Province, Shanxi 030002, China)

Abstract: After reclamation engineering completed, the structure and layer of reclamation soil is damaged and the soil is easy to become saline-alkali soil. Microwave has the penetrability that provides the possibility to detect the reclamation soil quality. The different degree saline pollution soils under the different water contents by ground penetrating radar were detected, which discover the microwave change law of different salinity pollution. Results show that basic frequency of the antenna which center frequency is 400 MHz change to 250 MHz under salinity pollution. With salinity pollution aggravating, the double peak phenomenon comes forth. Subdominant frequency is 530 MHz. With salinity pollution aggravating, the relative amplitude of subdominant frequency enhanced, and it shows similar phenomena in different water content series. The ground penetrating radar could realize non-destructively investigates the subsurface quickly and widely, so it could provide the changing information in time. It can be used to real-time inspect the reclamation land quality and to control deterioration of reclamation soil as soon as possible.

Key words: reclamation soil; salinity pollution; ground penetrating radar; dominant frequency; subdominant frequency