

文章编号: 1006-4710(2015)01-0040-05

黄土机场近地表填土层含水率快速无损检测研究

苏立海^{1,2}, 李宁¹, 吕高¹, 秦佳佳^{1,3}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038;
3. 中铁二十四局集团安徽工程有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要: 黄土高填方机场施工期间容易形成填土缺陷等问题, 导致机场运行期存在安全隐患。地质雷达无损检测的方法通过研究场地介电常数和电导率等因素, 对填土机场存在的不可见缺陷具有较好的检测效果。本文利用电磁波数值模拟的方法, 对考虑到介电常数以及电导率影响下的典型缺陷进行数值模拟, 同时通过二维数据的介电常数递推计算含水率, 对可能存在的缺陷体进行及时监测, 从而达到快速无损的检测目的。

关键词: 黄土; 介电常数; 含水率; FDTD 正演

中图分类号: U459.2 **文献标志码:** A

Loess soil moisture content fast nondestructive testing of airport surface

SU Lihai^{1,2}, LI Ning¹, LÜ Gao¹, QIN Jiajia^{1,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
3. China Railway twenty-four Bureau Group Anhui Engineering Co. Ltd, Hefei 230011, China)

Abstract: It is likely to form filling defects during the period of construction in loess-filled foundation of Airport, whereby leading to the great hidden troubles in airport operating period. Through studying such factors as the site dielectric constant and permittivity, etc. The geologic radar non-destructive testing method may have the better detecting effects upon the existing invisible defects in the loess-soil-filled airport. This paper uses the electromagnetic numerical simulation method to carry out the numerical simulation of the typical defects affected by dielectric constant and permittivity, and at the same time, the recursive calculation of moisture content can be conducted through two-dimensional dielectric constant, and likely existing defects masses are monitored in time, whereby achieving the purpose of the rapid non-destructive testing.

Key words: loess; permittivity; moisture content; FDTD forward

随着对我国西部黄土地区的开发, 黄土的变形规律^[1]研究逐渐深入, 目前研究已取得了显著成果。在西部大开发的各项工程建设中, 都有可能遇到各种各样的黄土问题^[1-3]。对厚度超过百米的黄土填方及其高边坡变形、稳定、优化设计进行深入系统的研究, 在国内外均属首次。由于设计中缺乏相应的工程类比^[4-5], 如果填方地基处理不好, 出现局部含水率过高或过低、内部存在空洞、软弱夹层等情况, 可能导致运营期道面开裂、不均匀沉降以及局部塌

陷, 给工程安全性带来许多不安定因素。传统的一些检验方法是在施工阶段或者完工后采用灌砂法进行压实度检测, 造价较高且费时费力, 严重影响施工进度。因此, 发展一种快速、高效、精度高、非破损的工程质量无损检测技术已是势在必行。

含水率是体现土体含水状况, 反映土体组成的一个非常重要的指标^[6-7]。在工程建设中, 地基含水率是必须要严格控制的一个物理指标, 含水率过高, 不仅会影响地基的承载力, 还会在很大程度上影响

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179153); 西安理工大学博士创新基金资助项目(207-002j1407)。

作者简介: 苏立海, 男, 讲师, 博士生, 研究方向为机场填方、边坡稳定性分析以及岩体动力学等。E-mail: 75272984@qq.com。

通讯作者: 李宁, 男, 教授, 博导, 研究方向为岩体动力学特性的试验研究与裂隙动力学数值仿真模型分析、寒区冻土力学与工程。E-mail: ningli@xaut.edu.com。

土的压实度、整体强度和刚度;如果正值冬季施工,可能产生的冻融破坏也必须要考虑。所以,确保孔隙水处于最佳含水率,是保证地基施工质量的重要指标之一。

本文拟通过对岩土介质的物质结构特性及其电性参数的研究,结合室内试验分析介电常数与含水率的关系,建立起二者之间的数学模型;再通过介电常数与含水率关系有效的评价黄土填土层质量,为后续施工提供可靠的科学依据。

1 检测原理及基本思路

1.1 反射波幅法递推介电常数

电磁波在遇到两种不同介质的交界面时,波的传播路径将会改变,一部分能量反射回来由接收天线接受,余下的能量则在另一种介质中继续传播,如图 1;同样,在多层次的介质中入射电磁波就会产生周而复始、往复循环的过程。地质雷达波是由反射波叠加形成的多层次电磁波信号,这些信号构成一系列振幅不同的波峰及波谷,而地下结构的分布形态也就蕴藏在这些信息中。最终随着电磁波能量的不断衰减和损耗,振幅值也将相应减小^[8-10],如图 2 所示。

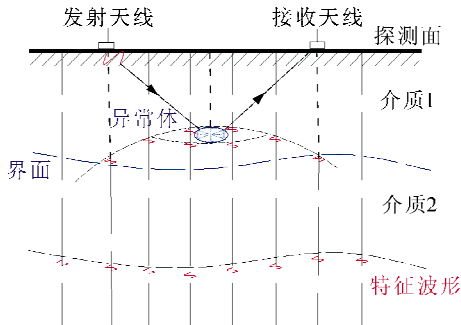


图 1 地质雷达工作原理

Fig. 1 Working principle of Ground-penetrating radar

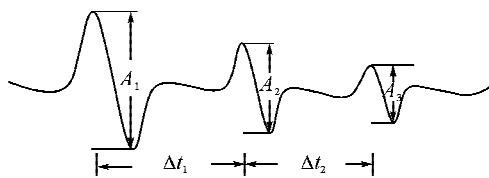


图 2 反射电磁波示意图

Fig. 2 The reflecting electromagnetic waves

其中, Δt_1 和 Δt_2 是一个波形的时间段,根据该时间窗信号可直观得出,波幅 A_1 、 A_2 和 A_3 依次减小,其中 A_1 的值最大。我们把反射的雷达波能量与入射的雷达波能量之比叫做反射系数 R ,透射的雷达波能量与入射的雷达波能量之比叫做透射系数^[11-12] T ,其表达式分别如式(1)、(2)所示。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (1)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

可以将上式改写成如下形式:

$$\sqrt{\epsilon_{r2}} = \frac{1+R}{1-R} \sqrt{\epsilon_{r1}} \quad (3)$$

$$R = \frac{A}{A_m} \quad (4)$$

其中, ϵ_{r1} 是上层介质的介电常数; ϵ_{r2} 是下层介质的介电常数。

R 是反射系数,它是反射波波幅 A 和全反射波波幅 A_m ^[13] 的比值。

首次发生反射时,上层是空气,其介电常数 $\epsilon_1 = 1$, $R_0 = \frac{A_1}{A_m}$,代入(3)式:

$$\sqrt{\epsilon_2} = \frac{1+R_0}{1-R_0} \sqrt{\epsilon_1} = \frac{1+\frac{A_1}{A_m}}{1-\frac{A_1}{A_m}} \quad (5)$$

乘以反射层能量损失系数 $1-R_0^2$:

$$\frac{A_2}{A_m} = R_1(1-R_0^2) \quad (6)$$

其中 R_1 是由上层介质进入下层介质的反射系数,可得:

$$\sqrt{\epsilon_3} = \frac{1+R_1}{1-R_1} \sqrt{\epsilon_2} \quad (7)$$

等式右边上下同乘以 $1-R_1^2$ 并化简得:

$$\sqrt{\epsilon_3} = \sqrt{\epsilon_2} \frac{1-R_0^2}{1-R_0^2-R_1(1-R_0^2)} = \frac{1-\left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m}\right)}{1-\left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_m}\right)} \quad (8)$$

以此类推,即可求出各层不同介质的介电常数。

1.2 Q_3 黄土的相对介电常数与含水率关系

在本项目设计的机场填土工程中,含水率对黄土体的介电常数影响较大,随着含水率升高,土体介电常数会进一步增大。介电常数与材料含水率曲线大致如图 3 所示。

Topp 公式是目前较为常用的、根据介电常数确定含水量的经验公式。这也是本文对介电常数与含水率关系进行对比的经验模型。

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.6\theta_v^3 \quad (9)$$

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (10)$$

式中 ϵ_r 是相对介电常数, θ_v 是土体的体积含水率。

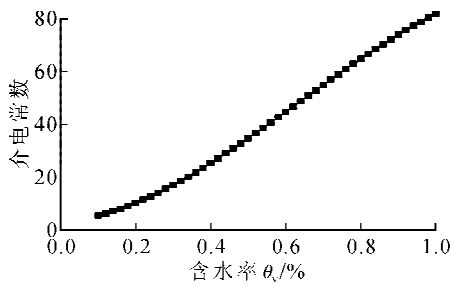


图 3 含水率与介电常数关系曲线
Fig. 3 The relation of dielectric constant and moisture content

2 填土层缺陷成像二维正演分析

本文意在通过地质雷达正演模拟程序对极具代表性的地电模型进行时域有限差分(FDTD)正演模拟, FDTD把 maxwell 方程组离散为差分形式,具有二阶精度。可以兼顾研究对象的几何参数、材料参数、计算精度、计算复杂度、计算稳定性等多方面的问题。

探究雷达电磁波在不同介质中的传播机理以及有效地验证了时域有限差分法在地质雷达正演模拟中应用的可行性;通过对模拟结果的进一步分析,不仅能够提高对地质雷达反射剖面的认识,以便增强解释人员的解释精度;从另一个方面来说,亦可以运用模拟得到的正演结果进行反演,同时可以验算反演结果的正确与否,为反演算法提供了有效的前提依据^[14-16]。

图 4 中,建立宽 1 m,高 0.5 m 的压实黄土层模

型,假设模型中部存在 0.05 m×0.05 m 的缺陷,通过时域有限差分的方法对该缺陷区域的不同介电性能的成像特征进行对比分析,研究成像的反射强度差异及反射形状形态。

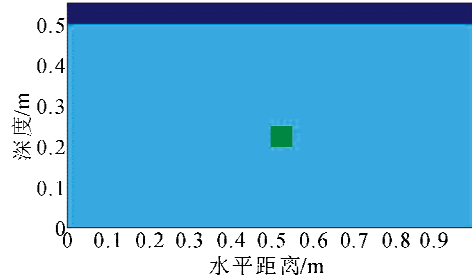
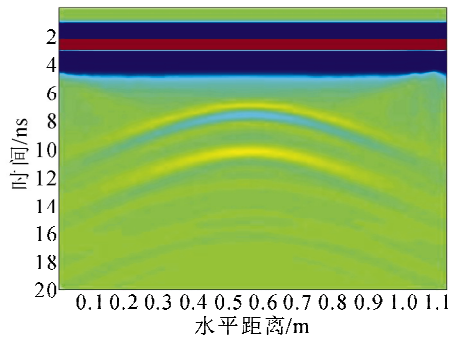
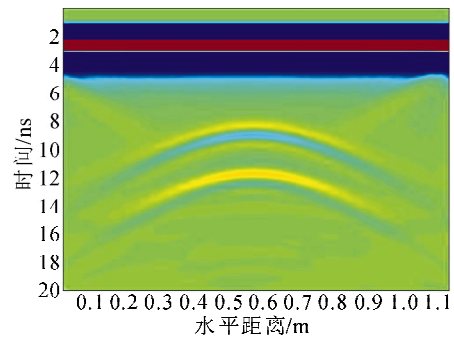


图 4 地电模型
Fig. 4 The model of aqueous geoelectric

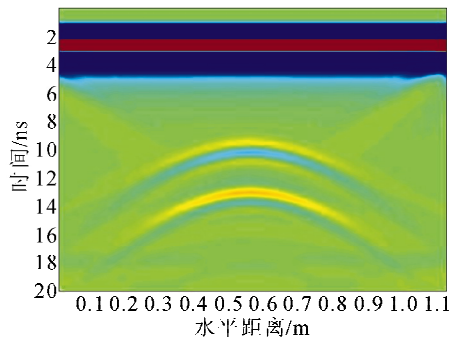
含水地电模型地质雷达正演模拟的天线中心频率为 400 MHz,最上层 0.05 m 为电磁波抗干扰媒介,起到屏蔽的作用以避免外界对其的干扰,地电模型的尺寸为宽 1.0 m、高 0.5 m,矩状含水模型尺寸为宽 0.05 m、高 0.05 m,埋深在 0.25 m 处,周围介质是含水率及压实度不等的 Q₃ 重塑黄土;网格的空间步长取为 0.01 m,时间步长取为 20 ns,模拟区域内每个单元网格的大小是 0.002 5 m×0.002 5 m,共计 80 000 个单元,模拟地质雷达向前推进的步长为 0.01 m,共计总步数 90 步。本文通过选取不同含水率对应的介质的介电常数和电导率,分别做正演模拟,并做具体分析。图 5 为缺陷模型的 FDTD 正演模拟图。



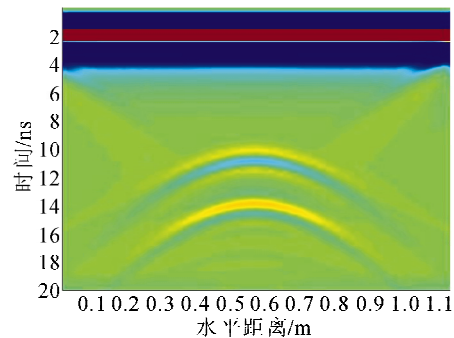
(a) 介电常数 $\epsilon=8.89$, 电导率 $\sigma=0.052$ s/m



(b) 介电常数 $\epsilon=14.36$, 电导率 $\sigma=0.052$ s/m



(c) 介电常数 $\epsilon=20.48$, 电导率 $\sigma=0.052$ s/m



(d) 介电常数 $\epsilon=26.12$, 电导率 $\sigma=0.052$ s/m

图 5 介电常数二维正演波形图

Fig. 5 The two-dimensional forward waveform of dielectric constant

由上述正演模拟图像可知,当电导率一定时,随着介电常数的增大,反射波双曲线开口度逐渐缩小且整体沿时间轴下移,波的强度无明显衰减;根据前述电磁波理论可知,介电常数增大波速降低,双程走时就将增大;进一步说明了通过改变介电常数达到电磁波能量的衰减,效果不明显。当介电常数 $\epsilon=14.36$ 时,对应的双程走时和雷达波速分别为 6.2 ns 、 0.0789 m/ns ,计算埋深为 0.245 m ;当介电常数 $\epsilon=20.48$ 时,对应的双程走时和雷达波速分别为 7.6 ns 、 0.0564 m/ns ,计算埋深为 0.214 m ;当介电常数 $\epsilon=26.12$ 时,对应的双程走时和雷达波速分别为 8.9 ns 、 0.0409 m/ns ,计算埋深为 0.182 m ,水平位置均在 $0.5\sim 0.6\text{ m}$ 之间,可见随着介电常数的增大,计算精度随之降低。

3 填方层现场监测结果分析

陇南成州机场为国内支线机场,选址位于陇南市成县城关镇、店村镇和徽县泥阳镇交汇处,建设内容为新建一条 $2\,800\text{ m}\times 45\text{ m}$ 的跑道和一条垂直联络滑行道,新建站坪机位 4 个;新建 $3\,500\text{ m}^2$ 航站楼, $3\,300\text{ m}^2$ 停车场;配建导航、通信、后勤服务等基础设施,占地面积为 187.4 hm^2 。

对该机场的局部填土层进行地质雷达快速无损检测,效果图及电磁波衰减趋势图如图 6、7 所示。

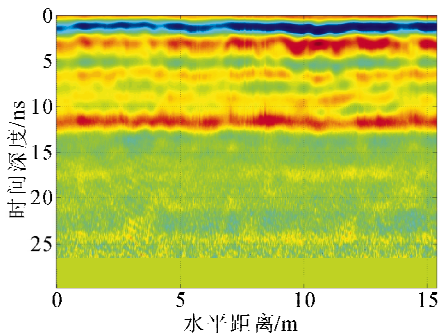


图 6 二维数据图像

Fig. 6 The diagram of two-dimensional data

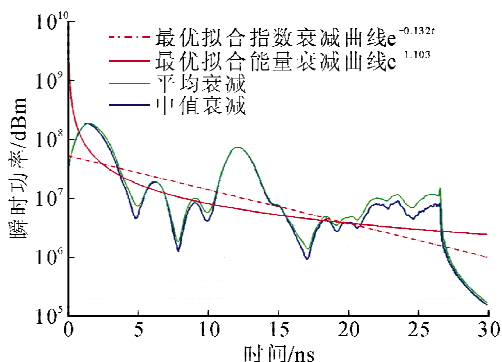


图 7 电磁波衰减曲线

Fig. 7 Electromagnetic wave attenuation curve

通过图 6 及图 7 中,雷达二维扫描图像可以初步推断,在地下 $0\sim 3\text{ ns}$ 以内分层明显,该区域可视为近地表填土层,电磁波波动较大,振幅及能量衰减明显,因此近地表含水率较高,通过递推计算可得出该区域内平均相对介电常数约为 25,根据含水率与介电常数关系,含水率约为 40% ; $3\sim 6\text{ ns}$ 区域内存在第二分层,该分层内波幅反射较小,反射信号一般,经递推计算,平均相对介电常数值约为 13,含水率约为 22% ; $6\sim 9\text{ ns}$ 区域内为第三填土层,介电常数值与含水率与第二层类似。其中第 $12\sim 15\text{ ns}$ 的明显反射界面为原地基与填土层接触面,土体碾压程度以及含水率等土性参数差异较大,因此反射明显。

4 结 论

以室内实验、数值实验以及现场监测的实例,对地质雷达在黄土填方工程中的应用进行研究,得到以下结论:

- 1) 通过对正演模拟结果的分析可知, GprMax2D 的模拟效果较好,基本可以确定目标体的具体位置及尺寸大小;随着周围介质介电常数的不断提高,目标体的计算埋深与实际埋深的绝对偏差分别是 0.007 m 、 0.005 m 、 0.036 m 和 0.068 m ,对应的相对偏差分别为 2.8% 、 2.0% 、 14.4% 及 27.2% ,可见介质的介电常数越大,目标体埋深的计算精度越低,说明在实际检测过程中,当含水率大于 16% 时,可通过适当降低天线发射频率来减小误差。
- 2) 通过电磁波和黄土含水率的经验模型,以及电导率对图像影响程度可知,介电常数是影响电磁波速度的最主要因素,其对雷达成像的影响明显。
- 3) 周围介质介电常数增大将导致目标体的双曲线反射弧开口度减小,同时随着二者介电常数差值的增大,反射弧的振幅随之增大。
- 4) 含水模型的反射弧有两道较为明显的双曲线,而空洞模型只有一道双曲线,电磁波遇水的反射强度较遇到空气更为强烈,这可以为后续的反演计算提供有利的依据,对实际工程检测具有指导意义。

参考文献:

[1] 朱才辉. 深厚黄土地基上机场高填方沉降规律研究[D]. 西安:西安理工大学,2012.
Zhu Caihui. Settlement regularity study of locss-high filled airport foundation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2012.

[2] 朱才辉,李宁. 基于土电阻率的黄土高填方地基细观变形机制[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(3):640-648.

- Zhu Caihui, Li Ning. Mesoscopic deformation mechanism of loess high-fill foundation based on soil electrical resistivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 640-648.
- [3] 高永宝, 刘奉银, 李宁. 确定非饱和土渗透特性的一种新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3258-3261.
- Gao Yongbao, Liu Fengyin, Li Ning. A new method for determination of permeability of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3258-3261.
- [4] 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [5] 刘奉银, 赵然, 谢定义, 等. 黄土高填方路堤沉降分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(6): 23-28.
- Liu Fengyin, Zhao Ran, Xie Dingyi, et al. Settlement of loss-filled highway embankment[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 26(5): 715-718.
- [6] 冯启宁, 李晓明, 郑和华. 1kHz-15MHz 岩石介电常数的实验研究[J]. 地球物理学报, 1995, 38(S1): 331-336.
- Feng Qining, Li Xiaoming, Zheng Hehua. A laboratory research of rock's complex permittivity from 1 kHz to 15MHz[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S1): 331-336.
- [7] 程玉梅, 张小刚, 魏国. 介电扫描测井技术在长庆油田的应用[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 277-281.
- Cheng Yumei, Zhang Xiaogang, Wei Guo. Application of dielectric scanner logging in Changqing oilfield[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(3): 277-281.
- [8] 刘海, 谢雄耀. 上海盾构隧道壁后土体介电常数测试实验[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 294-297.
- Liu Hai, Xie Xiongyao. Dielectric constant tests on soils behind shield tunnel segment in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 294-297.
- [9] 刘敦文, 古德生, 徐国元, 等. 采空区充填物探地雷达识别技术研究及应用[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(1): 13-16.
- Liu Dunwen, Gu Desheng, Xu Guoyuan, et al. Exploration study of gob filling by ground penetrating radar and its application[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(1): 13-16.
- [10] 陈权, 曾江源, 李震, 等. 遥感监测介电常数与土壤含水率的关系模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 171-175.
- Chen Quan, Zeng Jiangyuan, Li Zhen, et al. Relationship model of soil moisture and dielectric constant monitored with remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 171-175.
- [11] 程九龙, 胡克锋, 王玉和, 等. 探地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学, 2004(25): 79-81.
- Cheng Jiulong, Hu Kefeng, Wang Yuhe, et al. Research on detecting of underground mined-out areas by using GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(25): 79-81.
- [12] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297-1307.
- Li Shucai, Xue Yiguo, Zhang Qingsong, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1297-1307.
- [13] 王晋国, 于晓明. 应用探地雷达数据提取填土路基含水量的方法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 61-62.
- Wang Jinguo, Yu Xiaoming. A study of the methods to extract water content of soil roadbed using ground penetrating radar data[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 61-65.
- [14] 邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 416-423.
- Shao Yun, LV Yuan, Dong Qing, et al. Study on soil microwave dielectric characteristic as salinity and water content[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(6): 416-423.
- [15] Sasmita C, Do T T, Thapliyal P K, et al. Assessment of the AMSR-E soil moisture product over India[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(23): 7955-7970.
- [16] 李玉玲, 张宇晓. 介电常数确定含水饱和度的方法研究和应用[J]. 测井技术, 1994, 18(3): 172-177.
- Li Yuling, Zhang Yuxiao. Method of determining water saturation with dielectric constant and its application[J]. Well Logging Technology, 1994, 18(3): 172-177.

(责任编辑 周蓓)