

地质雷达技术及其在侵蚀产沙中的应用初探

李 豪^{1, 2}, 文安邦¹, 张信宝^{1, 3}, 刘中港¹, 贺秀斌¹

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710054)

摘 要: 侵蚀泥沙资料对于研究土壤侵蚀规律具有重要的意义。地质雷达(GPR)为侵蚀产沙的研究提供了一种快速、和高精度经济的地球物理方法; 地质雷达利用高频电磁波在介电特性不均匀的介质中产生反射获得剖面图像, 通过解译可确定地下沉积物的性质和结构。在简要阐述地质雷达技术的基本工作原理的基础上, 介绍了地质雷达技术在成都市百工堰水库进行塘库沉积物调查的具体应用。研究结果表明, 地质雷达具有较强的勘察能力, 水体与沉积物及基岩间的界面在雷达图像中清晰可见, 通过雷达剖面可清楚地观察到水底的起伏情况与沉积物的分布情况。

关键词: 地质雷达; 土壤侵蚀; 沉积
中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006)05-0272-04

Application of Ground Penetrating Radar to the Soil Erosion Study

LI Hao^{1, 2}, WEN An-bang¹, ZHANG Xin-bao^{1, 3}, LIU Zhong-gang¹, HE Xi-bin¹
(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;
2. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China;
3. Xi'an Laboratory of Loess and Quaternary Geology, CAS, Xi'an 710054, China)

Abstract: Ground Penetrating Radar (GPR) is a reliable, high-resolution and economical method for studying the soil erosion, especially the sediments. Application of ground penetrating radar technology in soil erosion are described systematically, including the basic theory, the measuring method, data processing technology, data explanation, etc. Furthermore, GPR survey was carried out to investigate the bottom profile and sediment at Baigongyan Reservoir. The result shows that GPR can be used to rapidly produce high quality sub-bottom profiles showing sediment location and thickness.
Key words: Ground Penetrating Radar; soil erosion; sediment

1 概 述

土壤侵蚀量和河流泥沙资料是水土流失资料的重要组成部分。传统的获取这些资料的方法包括径流小区观测和水文观测等, 这两者都是建立在长时间序列观测的基础之上的。近年来, 在传统方法的观测资料积累很少的地区, 遥感技术和元素示踪技术在获取侵蚀产沙资料方面发挥着重要作用, 但其精度和准确性决定于对各侵蚀因子的判读和侵蚀预报或评价模型的有效性^[1]。另外传统的土壤采样调查技术具有破坏性、扰动性、难以做到持续的监测等诸多不足, 因此, 新技术的探索势在必行。地质雷达(GPR)技术的兴起为侵蚀产沙资料的获取提供了一种快速、高精度、经济的新方法。

本文在简要阐述地质雷达技术的基本工作原理的基础上, 介绍了地质雷达技术在成都市百工堰水库进行塘库沉积物调查的具体应用, 并对地质雷达技术在侵蚀产沙中的应用现状和前景作一个初步探讨。

2 地质雷达技术的工作原理

2.1 基本原理

地质雷达(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)是 20 世纪 80 年代发展起来的一种利用频率介于 10⁶~10⁹ Hz 的

高频电磁波的反射探测地下目标分布形态及特征的物探方法。目前, 地质雷达技术以其高精度、高效率、快速经济、无损、适合大面积勘探等优点, 已广泛应用于矿产资源勘探、灾害地质勘查、岩土工程调查、公路工程质量检测、工程建筑物调查以及考古等众多领域。

地质雷达系统一般都由 4 个主要部分组成: 控制装置、发射装置、接收装置和计算机^[2]。地质雷达的工作原理是基于高频电磁波理论。地质雷达(GPR)利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式由地面发射天线(T)发射入地下, 经地下地层或目的体反射返回地面, 再由地面接收天线(R)接收电磁波反射信号。雷达图形常以脉冲反射波的形式记录, 波形的正负峰分别以黑、白色表示, 或者以灰阶或彩色表示, 这样同相轴或等灰线、等色线可形象地表示地下反射界面。通过对电磁波反射信号的走时、幅度、波形等资料的分析, 就可以判识地下介质或目标体的特征信息, 从而达到探测地下目标体和地质现象的目的(图 1)。

如图 2 所示, 置于地面的接收天线 R 所接收到的电磁脉冲波的行程时间为:

$$t = \frac{\sqrt{4z^2 + x^2}}{v} \tag{1}$$

式中: t——电磁波反射信号的双程旅行时间; z——目标体

* 收稿日期: 2005-09-29
基金项目: 国家 973 计划资助(2003CB415202)
作者简介: 李 豪(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事小流域土壤侵蚀过程与预报研究。

埋深; x —— 天线间距; v —— 电磁波在介质中的传播速度。

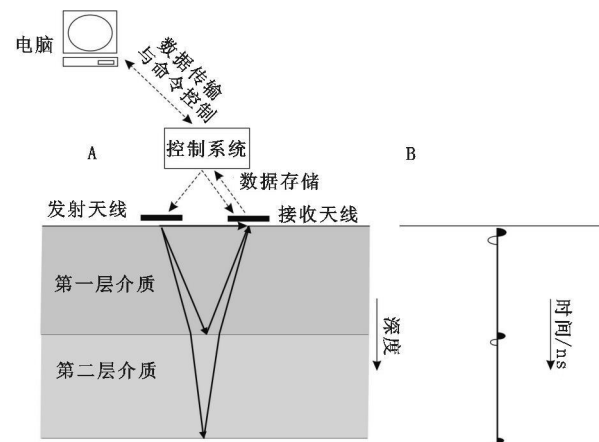


图1 地质雷达系统(A)与雷达剖面记录示意图(B)

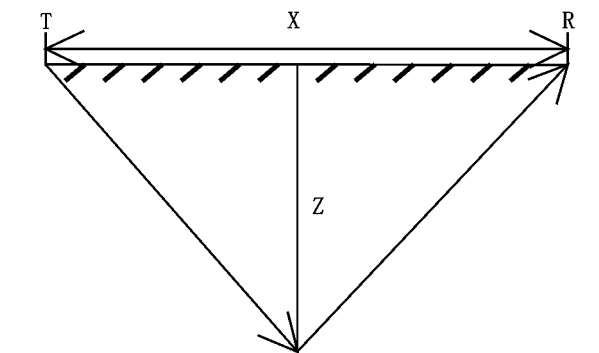


图2 地质雷达工作原理示意图

上式表明,若已知地下介质波速 v 时,可以根据测得的 t 计算出目标体的深度 z 。 v 值可用经验资料标定、宽角法或共中点法直接测定、理论公式估算等方法获得。

根据电磁波理论,高频电磁波在介质中的传播速度主要取决于介质的介电常数,其速度 $V = c/\sqrt{\epsilon}$,式中, c 为光速, ϵ 为相对介电常数。当相邻两介质有差异时,高频电磁波会在两种不同介质的界面产生反射,可用反射系数 R_{12} 表示,即

$$R_{12} \approx \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \approx \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2)$$

式中 1、2 分别表示第一层介质、第二层介质。反射系数

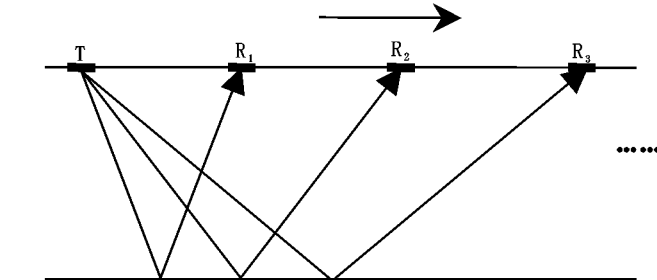


图3b GPR宽角法探测示意图

2.3 地质雷达的信息处理

地质雷达信息处理主要包括两方面的内容:数据处理和图像解译。

地质雷达数据处理主要是对所记录的波形进行处理。由于地下介质相当于一个复杂的滤波器,不同介质对电磁波有着不同程度的吸收以及介质的不均匀性,使得接收的电磁波波形与原始发射波形有较大的差别,同时各种随机噪声和干扰波也对雷达记录过程产生严重的干扰,使得雷达图像难

反映了介质的电性差异。因此,在一定深度范围内,可以利用不同介质的电性差异,采用一定的技术来识别地下介质或目标体的特征信息。

2.2 地质雷达的探测方法

按探测目的及内容的不同,地质雷达探测方法通常分为三种^[3,4]。

(1)反射剖面法(Reflection profiling)。这是使用最为广泛的一种方法。发射天线(T)和接收天线(R)以固定间隔距离沿测线同步移动进行测量。这种方法的测量结果是地质雷达时间剖面图像,其横坐标为天线在地表测线上的位置,纵坐标为由发射天线到反射物的双程走时(图3a)。这种记录可以准确反映出正对测线下方地下各个反射面的起伏变化情况。如果测得电磁波在介质中的传播速度,或者通过钻孔数据,那么就可以确定反射物所在的深度。

(2)宽角法(Wide angle reflection and refraction, WARR)和共中点法(Common midpoint, CMP)。这两种方法主要用于求取地下介质的电磁波传播速度以及计算反射面的深度。其应用前提是地下介质相对均匀且反射界面近水平状态。WARR法将一个天线固定在地面某点上不动,另一个天线沿测线移动,记录地下各个不同层面反射波的双程走时(图3b);在CMP方法中,发射天线和接收天线同时从一中点开始,沿测线分别向两侧以固定间隔距离同步移动(图3c),并以相应的公式计算电磁波的传播速率。

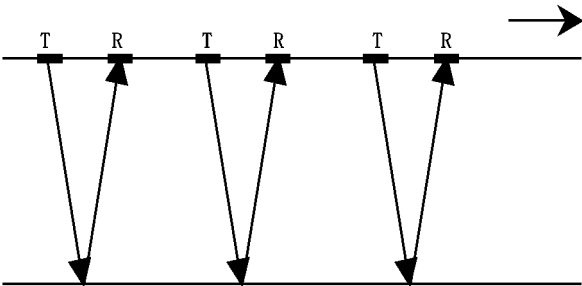


图3a GPR反射剖面法探测示意图

(3)透射法(Cross-scanning),又称井间层析测量(Tomography)。是利用两个井间直达波走时(透射旅行时)和振幅数据构制两孔间电性变化层析图象的一种数据采集和处理方法(图3d)。但由于信号频率高、衰减快,此法一般只用于古建筑、桥梁等状态检测及近距离的孔间观测。

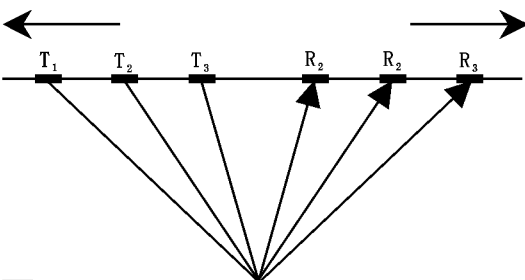


图3c GPR共中点法探测示意图

以直接判读解译。因此,必须对接收的雷达数据进行处理,为图像解译提供可靠的依据。目前,地质雷达数据处理的手段主要有多次重复测量平均处理、滤波处理、时频变换处理、偏移处理和反褶积等。

目前最常用的雷达图像解译方法是根据资料的外观特征(如反射强弱、振幅、相位特征等)并结合钻孔资料及其他调查资料,对反射信号做出定性和定量解释。雷达图像解译是一个经验积累的过程,不仅需要一定的理论基础,而且需

要不断累积经验,同时结合各种先验资料进行综合分析,将会获得更好的效果。

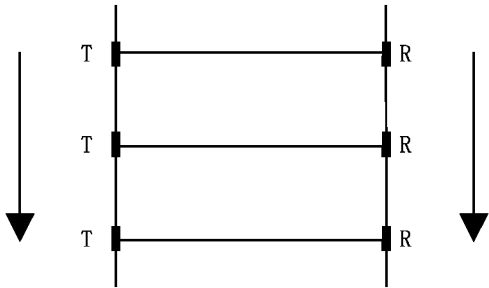


图 3d GPR 透射法探测示意图

2.4 地质雷达的应用条件及影响因素

地质雷达的应用效果主要受到应用条件,如环境导电率、介电常数等因素的制约,同时也受仪器的性能,如天线的频率特性以及工作方法的影响。

研究表明,高频电磁波在地下介质的传播过程中会发生明显的衰减。James A. et al. 研究表明,介质电导率越大,高频电磁波的衰减越快,探测深度越小,反之,探测深度将较大。并且,由于黏粒的存在,其中可溶盐、矿物含量的提高正是提高介质电导率的主要原因^[5]。可以通过对土壤介质的分析判断 GPR 是否在该区具有优势。一般地说,低电导率条件($\sigma < 10^{-7} \text{ S/m}$) 是很好的雷达应用条件,如空气、干燥花岗岩、混凝土等, $10^{-7} \text{ S/m} < \sigma < 10^{-2} \text{ S/m}$ 为中等应用条件,如纯水、冰、砂、干黏土等, $\sigma > 10^{-2} \text{ S/m}$ 为较差的应用条件,如湿黏土,湿的页岩,海水等^[6](表 1)。

表 1 电磁波在常见介质中的传播参数

介质	电导率 $\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	介电常数 $\epsilon / (\text{相对值})$	速度 $v / (\text{m} \cdot \text{ns}^{-1})$	衰减系数 $(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$
空气	0	1	0.3	0
纯水	$10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	81	0.033	0.1
新鲜水	5×10^{-4}	81	0.033	0.1
海水	4	81	0.01	103
花岗岩(干)	10^{-8}	5	0.15	0.01~1
花岗岩(湿)	10^{-3}	7	0.1	0.01~1
页岩(湿)	10^{-1}	7	0.09	1~100
砂(干)	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15	0.01
砂(湿)	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	30	0.06	0.03~0.3
淤泥	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	5~30	0.07	1~100
黏土(湿)	$10^{-1} \sim 1$	8~12	0.06	1~300

由于地质雷达是通过接收反射波的信息来探测目标体的,而反射信号的强弱取决于不同介质间介电常数的差异。由式 2 可以看出,介电常数差别愈大,反射系数愈大,反射波的能量亦愈大。此外,电磁波在地下介质中的传播速度,也与介质的介电常数有关。物理性质差异是地质雷达应用的先决条件,介电常数差异愈大,界面反映愈明显,探测效果就愈好,反之亦然。

地质雷达的探测频率主要影响到探测深度及其分辨率(表 2)。高频电磁波在传播过程中会发生衰减,其衰减的程度随电磁波频率的增加而增加。随着探测频率的升高,地质雷达信号的衰减加剧,其探测深度降低,但水平分辨率精度较高。相反,雷达探测频率降低可以加大探测的深度,但降低了探测的精度。实际应用中,往往需要在两者之间进行折衷。

3 地质雷达技术在土壤侵蚀中的应用实例

近年来,国外已将地质雷达应用于侵蚀产沙和湖泊塘库沉积物的研究^[7~12],而国内这方面的工作才刚刚起步。地

质雷达技术在侵蚀产沙研究中的应用例子很少。我们应用地质雷达技术对成都市百工堰水库的沉积物状况进行了调查,通过对雷达资料的解译,对水库沉积物的地质雷达反射特征、内部结构进行初步探讨。

表 2 地质雷达天线配置及探测深度和精度

天线配置/ MHz	探测深度/ m	探测精度/ m
200	≤ 10.00	± 0.05
100	≤ 40.00	± 1.00
50	≤ 120.00	± 2.00

3.1 研究区域

百工堰水库位于成都市东南约 15 km 处,原是一个小型农灌堰塘,50 年代将堤坝加宽加高改建为水库。水库最大蓄水深度 15 m,水域面积达 39 万 m^2 ,常年蓄水量 236 万 m^3 ,最大容量 330 万 m^3 ,湖中有一孤岛——螺蛳岛,面积达 2.73 万 m^2 (图 4)。研究区是成都平原的一个典型小型塘库,其集水区可认为是一个完整小流域,流域面积较小,每年 5~10 月份的雨季,洪水携带的泥沙基本都停积在水库内,由于排洪口较为狭小,冲刷能力有限,库内存在一定淤积。

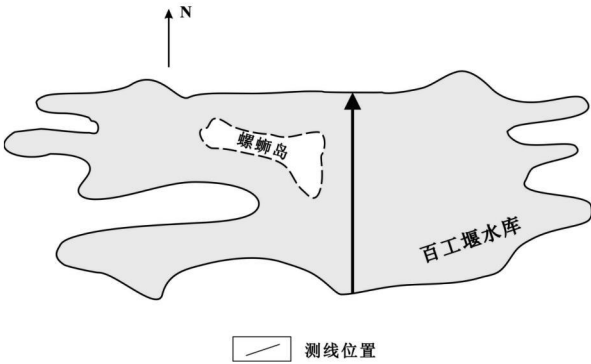


图 4 百工堰水库略图与地质雷达测线位置

3.2 研究方法

本次探测调查采用了瑞典 MALA Geoscience 公司开发的 RAMAC/GPR 地质雷达系统。该系统硬件包括控制单元 CUII、发射和接收天线、笔记本电脑、电池包、光缆和其他配件,软件主要包括采集软件 Ground Vision、处理软件 Reflexw 等。通过这套系统沿测线按一定的间距测量,可获得一系列的雷达电磁波反射对应于时间轴的数字记录,由这些数字记录组成的剖面图即为地下介质的电导结构图。通过对雷达剖面图的解译可获得有关水面深度、沉积物厚度和沉积序列等多种信息。本次探测我们采用了等距反射剖面法,即发射和接收天线之间的距离保持不变,沿测线同步移动并隔固定的间距进行采样探测。6 个技术参数的设置如下:

- 天线中心频率(Antenna Normal Frequency) = 50 MHz Unshielded
- 测量道数(Number of Traces) = 955
- 采样频率(Sampling Frequency) = 522.8 MHz
- 时间窗口(Time Windows) = 979 ns
- 采样间距(Trig Interval) = 0.05 m
- 天线距离(Antenna Separation) = 4.0 m

3.3 结果与分析

图 5 显示的是测线 1 的地质雷达反射剖面,该剖面长约 45 m,与水库长轴走向近乎垂直。地质雷达图像的左侧坐标为电磁波的双程旅行时间,单位为 ns,右侧是深度坐标,单位为 m,横坐标为测点距离,表示剖面的水平距离(图 5)。由于本次研究采用的是非屏蔽地质雷达天线,测区附近的建

筑物、树木会产生很强的空中直接反射,加上地质雷达本身引入的系统噪声,使得雷达的原始图像波形杂乱,难以判读解译,因此必须要对原始数据进行处理(图 5a)。图 5b 显示的是经过滤波处理后的雷达剖面图。由雷达剖面图像可见,由于上覆水体的电导率高,对电磁波吸收较强,与周围地物电性差异明显,反射强度也大,因此水体与空气电性界面清楚,波形粗黑,呈水平层状,同时也导致电磁波信号快速衰减,水面以下的深部信息相对模糊(图 5c)。沉积物主要是由淤泥和砂砾组成,淤泥的电阻率较低,传播速度在 0.09 m/ns 左右,对电磁波也有较强的反射作用,淤泥与水体及基岩的交接面将有较大的电性差异,因此在雷达剖面图上有较清晰的显示。推测剖面图中部 17~32 m 区间距水面 5 m 处

的连续强反射波组可能为沉积物与水体界面。剖面图两侧在距水面 3 m 处出现一同相轴连续、强振幅反射波组,该反射波组呈凹形,中部最深处达 13 m,推测为水体(沉积物)与基岩界面,由于基岩的电磁波速约比沉积物大一倍,电性差异大,故两者的分界面反射强烈,在雷达图像上清晰可见。此界面以下为基岩,其原岩结构基本未变,岩体完整性好,岩性相对均一,电性差异甚小,故波形较均匀,无杂乱反射。沉积物上部为连续平行的反射波组,可能代表了淤泥沉积,只含有少量的细砂砾;底部出现了一些无规律的杂波,推断可能是沉积物内砂砾等粗颗粒数量的增加所造成。通过雷达剖面可清楚地观察到水底的起伏情况,水深在 3~5 m 之间,水库底部呈盆状,中部有少量沉积物,而两侧基本没有沉积。

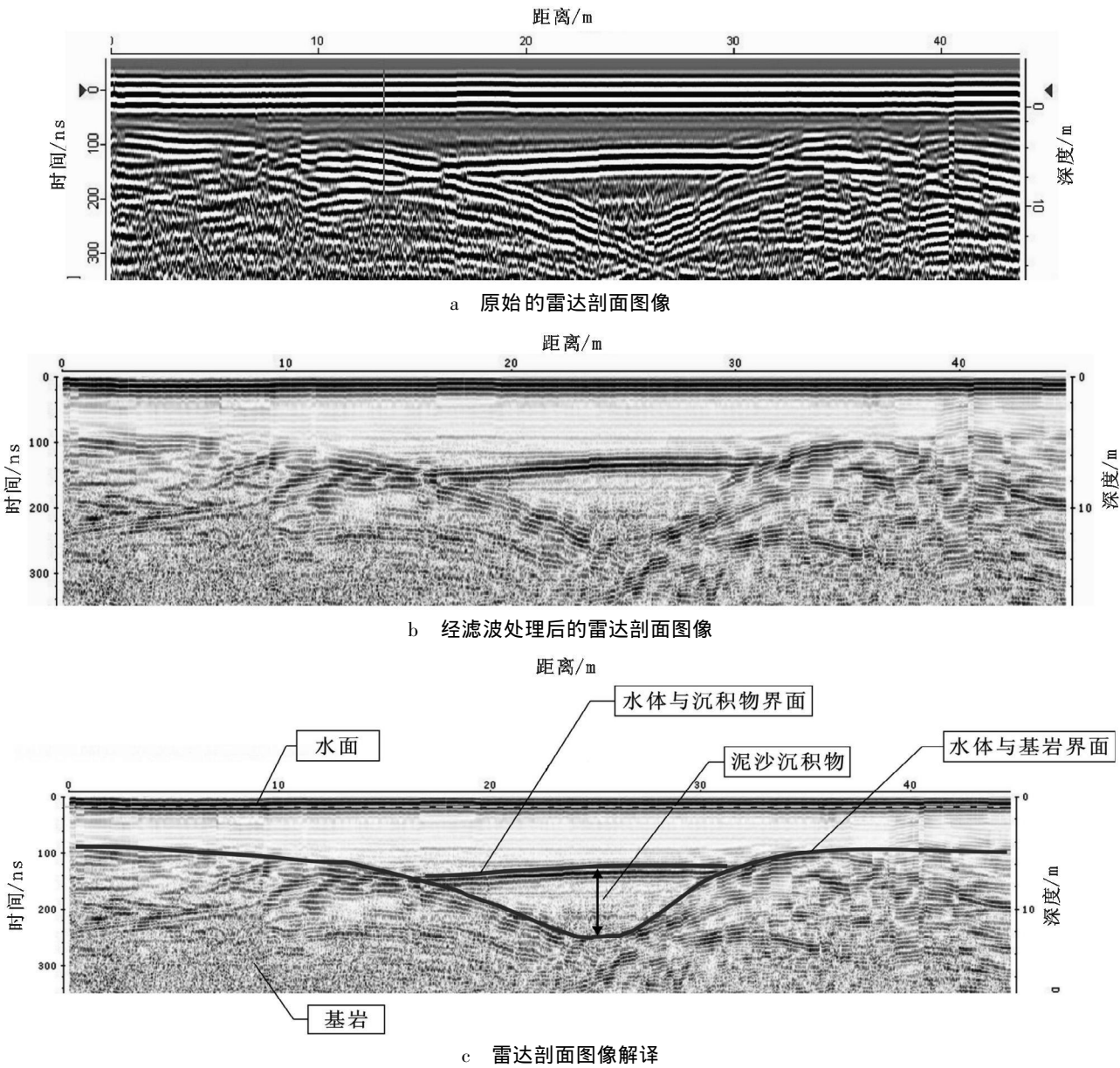


图 5 测线 1 的地质雷达剖面图

4 结 语

研究表明,地质雷达技术在侵蚀产沙的研究,特别是沉积物调查中具有很大的潜力。地质雷达具有较强的勘察能力,它不需要很费力费时就能获得高质量、高分辨率和连续的反射剖面,为科学地推断沉积物精确深度和介质的地质特征

提供可靠的依据。地质雷达的探测结果所反映的是地下连续变化的剖面,能极大地补充了钻孔一孔之见的不足。少量的钻孔配合全区的地质雷达探测,可达到事半功倍的效果。

利用地质雷达并配合其他技术手段,如遥感、同位素示踪技术等,在研究流域不同尺度土壤侵蚀和泥沙运移规律方

(下转第 279 页)

黔东南云质砂石山乔灌草结合型治理模式。^[15]

3.4 区域农林经营开发提高土地资源的利用效率

石漠化治理,发展农林经营模式已成为喀斯特山区生态环境建设、社会、经济持续发展的必由之路。农林经营是按照生态学、经济学的原则、方法和技术,研究如何把农、林、牧、副、渔有机结合在一起,从而形成多种群、多层次、多效益、高产出、稳定的人工复合生态系统。按照农林经营的指参考文献:

[1] 朱安国,林昌虎. 山区水土流失因素综合研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1995.

[2] 苏维词,朱文孝,熊康宁. 贵州喀斯特山区的石漠化及其生态经济治理模式[J]. 中国岩溶, 2002, 21 (1): 20.

[3] 曹清尧,潘红星,何绍明. 加快我国石漠化治理刻不容缓[J]. 林业经济, 2002, (4): 18- 19.

[4] 贵州省林业厅. 贵州省喀斯特石漠化地区生态重建工程的讨论[J]. 贵州林业科技, 1998, 26(4): 2- 4.

[5] 王世杰,李阳兵,李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23 (6): 657- 666. .

[6] 李昌来. 贵州石漠化的治理及可持续发展[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2004, 22(1): 47- 51.

[7] 但新球,喻甦,吴协保. 我国石漠化地区生态移民与人口控制的探讨[J]. 中南林业调查规划, 2004, 23 (4): 49- 51.

[8] 黄吉遇. 一个可持续发展模式- 中澳合作忻城县喀斯特环境恢复项目调查[J]. 当代广西, 2005, 3(6): 9- 10.

[9] 梅再美,熊康宁. 贵州喀斯特石漠化土地的植被恢复技术研究[J]. 贵州林业科技, 2004, 32(3): 2- 6.

[10] 龙忠富,唐成斌,杨义成. 草本植物在石漠化综合治理与可持续发展中的作用探讨[J]. 贵州农业科学· 百年院庆专刊, 2005 , 33 (增刊): 69- 71.

[11] 陇光国. 喀斯特山区生态建设与金银花(黄褐毛忍冬) 产业发展[J]. 贵州农业科学, 2005 , 33 (2): 103- 104.

[12] 张锦林. 林业生态工程是石漠化地区治理的根本措施[J]. 中国林业, 2003, 6(A): 9- 10.

[13] 蔡道雄,卢立华. 浅谈石漠化治理的造林技术措施[J]. 世界林业研究, 2002, 15(2): 77- 80.

[14] 张喜. 贵州省竹产业开发途径与措施[J]. 贵州林业科技, 2002, 30(1): 38- 42.

[15] 苏维词,张中可,等. 发展生态农业是贵州喀斯特(石漠化) 山区退耕还林的基本途径[J]. 贵州科学, 2003, 21(1- 2): 123- 127.

[16] 覃选. 河池市石山区农林经营开发的几种模式[J]. 林业实用技术, 2004, (1): 13.

(上接第 275 页)

面有着广阔的前景。同时应用地质雷达、同位素示踪与遥感等多种技术可以使侵蚀产沙沉积的计算定量化,多种方法相互印证,使侵蚀产沙的研究更为准确。总之,地质雷达技术为侵蚀产沙研究提供了一种快速、高精度、经济的新技术方法,值得加以推广。

参考文献:

[1] 贺秀斌,张信宝,文安邦. 川中丘陵区侵蚀产沙的尺度单元及其研究方法[J]. 水土保持通报, 2004, 24(3): 18- 20.

[2] RAMAC/GPR Operating Manual Version 1.0 [M]. Mala GeoScience, 2001. 6- 11.

[3] RAMAC/GPR Operating Manual Version 1.0 [M]. Mala GeoScience, 2001. 18- 19.

[4] Moorman, B J. Ground- penetrating radar applications in paleolimnology [A]. Last, W M, Smol, J P. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Chemical Techniques [C]. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001. 23- 47.

[5] James, A D, Collins, M E. Use of soil information to determine application of ground penetrating radar [J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33: 101- 108.

[6] 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(4): 157- 160.

[7] Haeni, F P, McKeegan, D K, Capron, D R. Ground- penetrating radar study of the thickness and extent of sediments beneath Silver Lake, Berlinn and Meriden, Connecticut [R]. U. S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 85- 4 108, 1987. 19

[8] Jol, H M, Smith, D G. Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1991, 28: 1 939- 1 947.

[9] Smith, D G, Jol, H M. Ground-penetrating radar investigation of a Lake Bonneville delta, Provo level, Brigham City, Utah [J]. Geology, 1992, 20: 1 083- 1 086.

[10] Mellett, J S. Profiling of ponds and bogs using ground penetrating radar [J]. Journal of Paleolimnology, 1995, 14: 233 - 40.

[11] Haeni, F P. Use of ground penetrating radar and continuous seismic reflection profiling on surface-water bodies in environmental and engineering studies [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1996, 1: 27- 35.

[12] Moorman, B J, Michel, F A. Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground penetrating radar [J]. Journal of Paleolimnology, 1997, 18: 61- 73.

导思想,总结推出几种农林经营模式:(1) 封山模式;(2) 林一农模式;(3) 林一草一牧模式;(4) 果一农一猪一沼气;(5) 果一农(草)一鸡(鹅、渔)。^[16]

在喀斯特地区实施生态修复的过程中一定要注重循序渐进,按照石漠化程度的不同,立地条件的不同,分别采取不同的治理方式,一步步完成石漠化地区的生态修复。最终打造生态贵州,实现环境与人的和谐发展。