

文章编号: 1001- 6112(2004) 02- 0212- 05

# 探地雷达在露头地质研究中的应用

——以塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩露头为例

张兴阳<sup>1</sup>, 罗平<sup>1</sup>, 顾家裕<sup>1</sup>, 曾校丰<sup>2</sup>, 汪圣国<sup>1</sup>, 林鹏<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 油气储层重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:** 探地雷达方法是一种确定浅层地下介质分布的高分辨率电磁探测技术。国外已将该技术应用到露头地质研究的众多领域中, 如三维储层建模研究、沉积相研究、高分辨率层序地层学研究、三维裂缝成像、浅层断层识别、岩溶地质研究等。塔里木盆地巴楚达吾孜塔格地区奥陶系碳酸盐岩出露良好, 礁滩复合体、火成岩侵入、岩溶地貌等地质现象丰富, 使用 32~ 500 MHz 探地雷达对该区露头进行了试验性研究。结果表明, 探地雷达的探测深度最大可达 20 m, 分辨率最大可达到分米级。生物礁、水道充填体、浅层小断层、溶洞等地质现象在探地雷达剖面上均有特征性反映, 且与野外露头对比良好。这为碳酸盐岩露头地质研究提供了新的辅助手段。

**关键词:** 碳酸盐岩; 生物礁; 奥陶系; 塔里木盆地; 露头地质建模; 探地雷达

**中图分类号:** TE19

**文献标识码:** A

野外露头的精细地质研究对于油气勘探与开发愈来愈显示出其重要性, 探地雷达技术使地质露头内部三维结构的解剖更加精细可靠。探地雷达可直观地对浅层地下地质结构进行高精度成像, 分辨率可达到厘米级, 探测深度可达到 50 余米。

塔里木盆地奥陶系生物礁滩灰岩是台盆区重要的油气储集层<sup>[1-4]</sup>, 为了明确塔里木盆地巴楚地区奥陶系礁滩复合体的发育特征, 笔者使用探地雷达对巴楚达吾孜塔格奥陶系露头进行了试验性研究。本文首先将简要介绍探地雷达技术的基本原理及露头地质主要应用研究领域, 其次介绍此次研究的试验流程及初步结果。

## 1 探地雷达基本原理及其露头地质应用领域

### 1.1 探地雷达基本原理

探地雷达 (ground penetrating radar, 简称 GPR) 或地质雷达 (georadar) 方法是一种用于确定浅层地下介质分布的广谱 (1 MHz~ 1 GHz) 电磁技术<sup>[5]</sup>。探地雷达利用一个天线发射高频宽频带电磁波, 另一个天线接收来自地下介质界面的反射波。

电磁波在介质中传播时, 其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化。因此, 根据接收波的旅行时间 (亦称双程走时)、幅度与波形资料, 可推断介质的结构。

探地雷达资料处理过程中涉及的最基本的关系函数是介质的电磁波波阻抗及不同介质界面上电磁波的反射系数。电磁波在介质中传播的波阻抗近似表达式为:

$$\eta = [\mu / (\epsilon + j\sigma / \omega)]^{1/2} \quad (1)$$

式中  $\mu$  为磁导率,  $\epsilon$  为介电常数,  $\sigma$  为电导率,  $\omega$  为角频率。

在电导率  $\sigma$  有限、电磁波角频率  $\omega$  较高的情况下, 可将 (1) 式简化为:

$$\eta = (\mu / \epsilon)^{1/2} \quad (2)$$

在垂直入射和垂直反射条件下, 忽略磁导率  $\mu$  的差异, 两介质界面上的电磁波反射系数可表示为:

$$R = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}) \quad (3)$$

式中  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  为上、下介质的介电常数。这表明电磁波反射系数主要与介质的介电常数  $\epsilon$  有关。相邻介

收稿日期: 2002- 08- 13; 修订日期: 2004- 01- 12.

基金项目: 国家“973”项目 (G1999043311).

作者简介: 张兴阳 (1973-), 男 (汉族), 安徽郎溪人, 博士, 主要从事沉积储层领域的研究工作。

表 1 探地雷达露头地质应用领域一览表

Table 1 Application fields of ground penetrating radar (GPR) in outcrop geological study

应用领域	研究原理、内容或成果	典型研究实例
岩相	利用不同岩性有不同的雷达响应进行剖面岩相识别	法国 Paris 盆地海相灰岩层序 <sup>[6]</sup>
沉积相	利用不同相类型的雷达相特征进行沉积相的平面成图	德国西南部侏罗系碳酸盐建隆 <sup>[7]</sup>
层序地层学	雷达层序地层学、高分辨率层序地层学研究	美国犹他州滨岸相及河流相 <sup>[8]</sup>
现代沉积	三角洲、河道砂体、沙丘沉积内部结构的高精度成像	加拿大 Peyto 湖现代三角洲 <sup>[9]</sup>
储层建模	储层 3D 描述、用 3D GPR 数据建立 3D 渗透率模型	美国犹他州 Ferron 砂岩 <sup>[10]</sup>
岩溶研究	古岩溶溶洞型储层的内部结构研究	美国德克萨斯 Ellenburger 云岩 <sup>[11]</sup>
构造研究	构造背斜、断层、断块及地堑的三维可视化研究	文献[12]

质的介电常数差异越明显, 反射系数越大, 雷达反射信号就强。

### 1.2 探地雷达露头地质应用领域

探地雷达自 1910 年由 Letmbach 正式提出以来, 特别是 70 年代后, 随着探地雷达软、硬件的不断发展和完善, 探地雷达的应用范围现已覆盖考古、矿产资源勘探、岩土勘查、无损检测及工程建筑物结构调查等众多领域, 并开发了用于地面、钻孔与航空卫星上的探地雷达技术<sup>[5]</sup>。国外于 20 世纪 80 年代末开始将探地雷达技术应用到露头地质研究中(表 1)。除露头地质研究外, 探地雷达技术还应用于油田环境工程、输油管线监测、油田开发动态监测(4D GPR 监测) 等多个领域。

## 2 研究区地质概况

研究区为新疆塔里木盆地巴楚县达吾孜塔格地区, 地理位置上位于巴楚县城东北 50 km 处, 构造位置上位于巴楚断隆西北缘, 西北与柯坪断隆相邻(图 1)。研究区内出露的地层包括下奥陶统上丘里塔格群顶部、中奥陶统一间房组及上奥陶统吐木休克组及良里塔格组。受良里塔格低角度逆冲断层影响, 奥陶系地层重复叠置。奥陶系出露的主要岩石类型为各种类型的灰岩。一间房组生物礁发育, 生物礁为出露长度小于 140 m、出露高度小于 15 m 的小型礁体。除生物礁灰岩外, 研究区露头主要岩石类型还包括颗粒灰岩、泥粒灰岩及泥灰岩, 局部出露火成岩。探地雷达工区选择在山体两侧(图 1), 重点探测一间房组的生物礁体。

## 3 探地雷达试验流程

目前国内引进的探地雷达主要是美国 SIR 系

列与加拿大 EKKO 系列。本次使用的仪器为美国地球物理测量系统公司制造的 SIR- 2 型探地雷达系统, 它由主机、控制与显示、天线 3 大部分组成, 系统由一台内置 486 微机控制数据采集、简单的数据处理和显示。系统加电源共约 100 kg, 野外操作时, 4~ 6 人即可完成探测。图 2 所示为探地雷达资料处理流程。



图 1 探地雷达试验位置图

Fig. 1 Location map of the ground penetrating radar survey

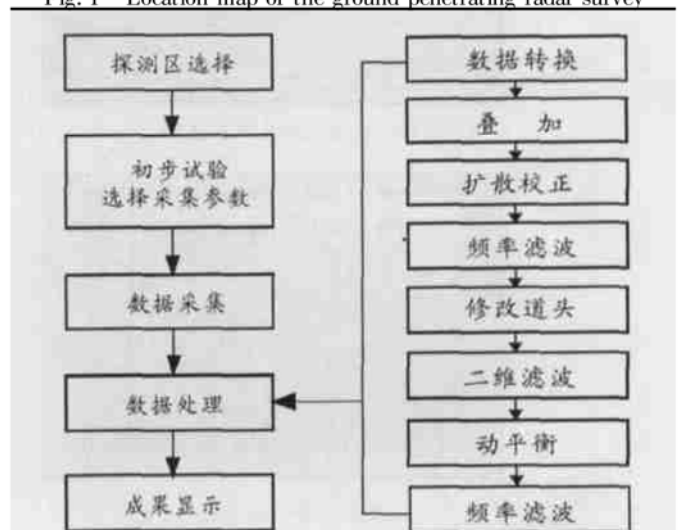


图 2 探地雷达试验流程图

Fig. 2 Flow chart of the ground penetrating radar experiment

### 3.1 探测区选择

选择的探区即要满足地质研究要求,又要满足雷达探测要求。选择时首先要考虑研究目标体的发育位置,如为了探测生物礁体的内部及外部形态,就要选择礁体最可能发育的部位。如在断崖剖面上能观察到礁体,则在断崖顶面上进行探测是比较理想的,因为可将探测剖面与地质剖面进行对比。其次,要选择地表平坦、土壤覆盖层薄、离潜水面高的位置进行探测。地表起伏及较大的坡度不平整会使电磁波能量衰减的程度随介质孔隙水中矿物质含量及导电性的增大而增大。离山崖太近( $< 150\text{ m}$ )的探测将受到山崖侧向反射波的干扰。

### 3.2 初步试验、选择采集参数

主要采集参数有中心频率、时窗大小(与探测深度有关)、增益点数和大小、采集方式(连续测量、点测)、样点位数、扫描叠加次数等。最主要的是选择中心频率和时窗大小。此次试验天线主频率可从16 MHz到500 MHz,天线中心频率的高低与探测深度成反比,与探测分辨率成正比。根据探测深度及探测的要求不同,选择不同频率的天线。用500、100、80、40、32 MHz等几种中心频率对1、15、16号

生物礁体进行初步试验后,确定以100 MHz天线为主、500 MHz天线为辅。对于100 MHz天线,最佳记录长度为250~300 ns,对应勘探深度为12~15 m,最大探测深度可达20 m;500 MHz探测深度在5 m以内,但分辨率高,可达到分米级别。

### 3.3 数据采集

经过初步试验后,在所选择的探测区地表进行了100 MHz及500 MHz两种频率的连续测量,探测点距约为1~2 cm。测量过程中,拖动天线时尽量使天线平稳,以保障信号的稳定性。先后进行了100 MHz垂直及平行岩层面探测、100 MHz网格化垂直岩层面探测、100 MHz纵向剖面叠接探测及500 MHz垂直岩层面探测等几种类别的探测。

### 3.4 数据处理

如图2右图所示,对采集数据进行了叠加、扩散校正、频率滤波等一系列处理,处理方法与常规地震数据处理方法相似。也可以将所采集的数据转换成SEGY格式的数据,直接在地震工作站上进行解释。

### 3.5 成果显示

最终处理的成果被绘制成时间剖面图(图3)。图中纵坐标为电磁波的双程走时( $\text{ns}$ ,  $1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$ ),

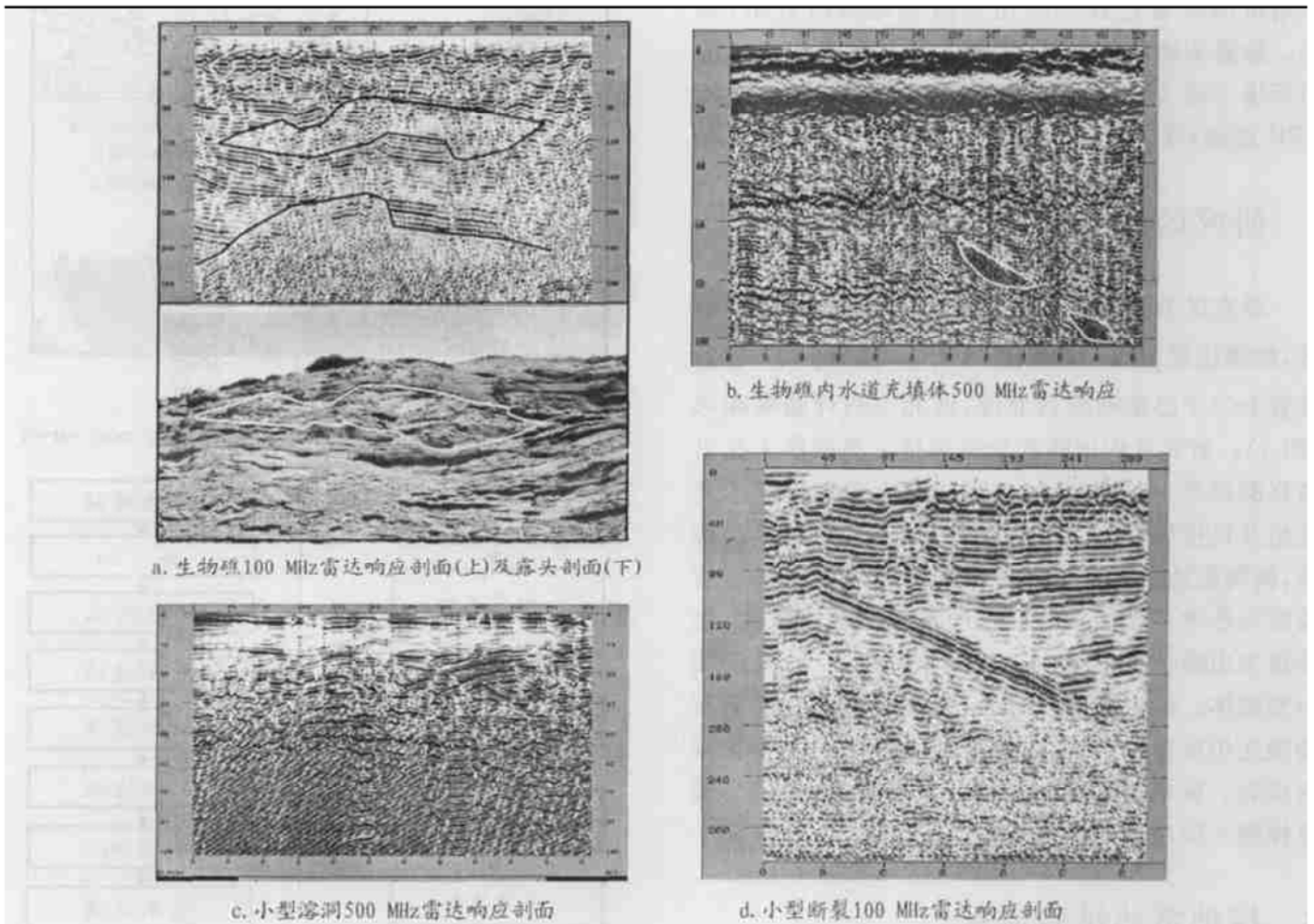


图3 塔里木盆地达吾孜塔格奥陶系碳酸盐岩露头典型探地雷达剖面

Fig. 3 Typical GPR profiles of the Ordovician carbonate outcrops in Dawuzitage hills, the Tarim Basin

灰岩地层中 20 ns 相当于 1 m。横坐标为测点号,探测长度根据野外测量记录进行换算。

## 4 结果分析

对雷达剖面的解释遵循了由已知到未知的原则,即首先选择露头断崖顶面的探测剖面进行解释,这样可将露头地质剖面与雷达剖面进行对比,明确各种地质现象的雷达剖面特征;其次再解释无直接露头剖面可对比的雷达剖面。经过常规解释,从雷达剖面上获得以下认识:

1) 生物礁在雷达剖面上表现为透镜状,内部同相轴零乱,内部反射弱或无反射(图 3a)。周围生屑灰岩成层性明显,礁体与上下地层的接触界面显得零乱,不象围岩层间接触面那样平整连续。生物礁个体较小,部分礁体横向相连,或纵向相叠呈双层分布。地表网格化探测表明,部分生物礁体横向厚度变化平缓,呈扁平的透镜状或层状。

2) 500 MHz 探地雷达的分辨率可达到分米级。生物礁体内部发育亮晶棘屑灰岩组成的水道充填体,水道充填体宽 1~2 m,高几十厘米到数米。雷达剖面上表现为呈透镜状的细反射波组,可反映出水道充填体内的斜层理,分辨率可达到分米级别(图 3b)。

3) 达吾孜达格东部微波站断崖剖面表生岩溶现象明显,断崖上部垂向溶蚀沟发育,断崖下部水平溶蚀现象明显,发育众多出水孔。出水孔内多为泥级至砾级沉积物填充,显流水层理构造。水平小型溶洞在 500 MHz 探地雷达剖面上主要表现为一双曲线(弧形),并伴有多次反射,这是地层内空洞的典型雷达反射特征,说明水平溶洞并未全充填(图 3c)。

4) 地下浅层小断裂在雷达剖面上有清晰反映,在时间剖面上表现为以一定的倾角向深部延伸的反射波组,可连续追踪,频率变化不大,推断其为小断裂或破碎带(图 3d)。

## 5 结语

探地雷达技术以其高分辨率、高效率、便携可操作性、半定量的三维解释成果已逐渐为广大研究人员所认可,目前已召开了 6 次世界性的探地雷达应用专题讨论会。国外将这项技术应用到油气勘探开发领域已有十几年的历史,取得了丰硕成果。已研究出一系列探地雷达地质资料从采集到解释的软、

硬件,对露头储集体的雷达数据采集已发展到全 3D 的采集,并已建立了真正意义上的全 3D 可视化露头储集模型。而目前国内还没有有关探地雷达应用于露头地质研究的报道,说明我们在这一领域已较国外落后了至少十几年。通过对塔里木盆地巴楚达吾孜塔格奥陶系灰岩地层的探测表明,探地雷达对于生物礁、水道充填体、小断裂、溶洞等地质现象有良好的反映,为研究区奥陶系露头碳酸盐岩地质研究提供了新的辅助手段。实际上探地雷达在碎屑岩露头上应用效果更好,因为砂岩、泥岩的电性差异性远大于不同碳酸盐岩之间的电性差异。愿此次尝试性研究能为国内今后开展探地雷达露头地质研究起到抛砖引玉的作用。

## 参考文献:

- [1] 翟晓先,俞仁连,何发岐,等.塔里木盆地奥陶系一间房组微裂隙颗粒灰岩储集体的发现与勘探意义[J].石油实验地质,2002,21(5):388-392.
- [2] 刘文.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩沉积相及地层学研究[J].石油实验地质,2002,24(2):104-107.
- [3] 周玉琦.塔里木盆地塔河油田的勘探实践与认识[J].石油实验地质,2001,23(4):363-366.
- [4] 何幼斌,张兴阳,戴福贵,等.塔中 iv 号断裂带中奥陶统灰岩储层特征[J].江汉石油学院学报,1999,21(3):17-20.
- [5] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.5-26.
- [6] Dagallier G, Laitinen A I, Malartre F, et al. Ground penetrating radar application in a shallow marine Oxfordian limestone sequence located on the eastern flank of the Paris basin, NE France[J]. Sedimentary Geology, 2000, 130: 149-165.
- [7] Asprien U, Aigner T. An initial attempt to map carbonate buildups using ground-penetrating radar: an example from the Upper Jurassic of SW-Germany[J]. Facies, 2000, 42: 245-252.
- [8] Jol H M, Smith D G, Meyers R A, et al. Ground penetrating radar: high resolution stratigraphic analysis of coastal and fluvial environments[C]. 17<sup>TH</sup> Annu SEPM Gulf Coast Secters Conf, 1996. 153-163.
- [9] Smith D G, Jol H M. Radar structure of a Gilbert-type delta, Peyto Lake, Banff national park, Canada[J]. Sedimentary Geology, 1997, 113: 195-209.
- [10] Corbeau R M, Soegaard K, Szerbiak R B, et al. Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D ground-penetrating radar: example from the middle Cretaceous Ferron sandstone, east-central Utah [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(9): 1583-1608.
- [11] McMechan G A, Loucks R G, Zeng Xiaoxian, et al. Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas[J]. J Applied Geophysics,

1998, 39: 1- 10.

- [12] Meschede M, Asperion U, Reicherter K. Visualization of tectonic structures in shallow-depth high-resolution ground-pene-

trating radar (GPR) profiles[J]. Terra Nova, 1999, 9(4): 167 - 170.

## APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR IN OUTCROP GEOLOGICAL STUDY

—AN EXAMPLE OF THE ORDOVICIAN CARBONATE OUTCROPS IN THE TARIM BASIN

ZHANG Xing-yang<sup>1</sup>, LUO Ping<sup>1</sup>, GU Jia-yu<sup>1</sup>, ZENG Xiao-feng<sup>2</sup>, WANG Shen-guo<sup>1</sup>, LING Peng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Oil and Gas Reservoirs, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China ; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Ground penetrating radar (GPR) is a high-resolution electromagnetic method to inspect the shallow subsurface features. Foreign geologists have used GPR in many fields of outcrop geological studies such as 3D reservoir molding, sedimentary facies analysis, high-resolution sequence stratigraphy, 3D fracture imaging, shallow-fault finding, paleokarst study and so on. The Ordovician carbonate outcrops of Bachu Dawuzitage hills in the Tarim Basin are well developed and present abundant geological phenomena including bioherm-beach assemblages, intrusion of igneous rocks, karst features and so on. Ground penetrating radar experimental survey with frequency of 32-500 MHz has been conducted in this area. The results indicated that the penetrating depth can be up to 20 m with the maximum resolution of decimeter. Many geological features, such as reefs, channels in the reef, small-scale faults and karst caves, have typical responses in the high-resolution GPR profiles and can be corresponded well with outcrops. This provides a new associate approach for the outcrop study of carbonate rocks.

**Key words:** carbonate rock; reef; Ordovician; the Tarim Basin; outcrop geological molding; ground penetrating radar