

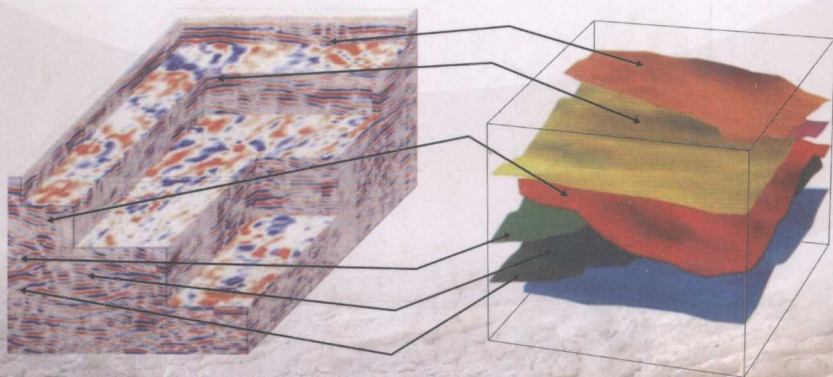


中国石油勘探开发研究院出版物

探地雷达技术在沉积物研究中的应用

[英] C. S. Bristow [美] H. M. Jol 主编

高兴军 宋新民 译



科学出版社

中国石油勘探开发研究院出版物

探地雷达技术在沉积物研究中的应用

〔英〕C. S. Bristow 〔美〕H. M. Jol 主编

高兴军 宋新民 译

科学出版社

北 京

图字：01-2016-7482 号

内 容 简 介

本书阐述了探地雷达（GPR）在沉积物研究领域的主要应用，内容涵盖 GPR 数据采集、处理、解释等方面的主要技术方法，以及其在不同环境沉积物构型解剖、断层同生沉积物研究、冻土层及烃类污染监测等方面的应用。

本书可供油气田勘探、开发、沉积储层领域的科研人员及高校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

探地雷达技术在沉积物研究中的应用/（英）查利·布里斯托（C. S. Bristow），（美）哈里·乔尔（H. M. Jol）主编；高兴军，宋新民译. —北京：科学出版社，2016.11

书名原文：Ground Penetrating Radar in Sediments

ISBN 978-7-03-050531-6

I. ①探… II. ①查… ②哈… ③高… ④宋… III. ①探地雷达-应用-沉积物-研究 IV. ①TN959.1 ②P588.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 268821 号

责任编辑：孟美岑 韩 鹏 李 静/责任校对：何艳萍

责任印制：张 伟/封面设计：北京图阅盛世

©The Geological Society of London 2003

This translation of Ground Penetrating Radar in Sediments first published in 2003 is published by arrangement with The Geological Society of London

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本：720×1000 B5

2016 年 11 月第一次印刷 印张：12 1/4

字数：232 000

定价：98.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

译者序

随着我国油田进入高含水开发阶段,不同沉积环境油藏内部精细结构对剩余油的控制作用日益增强,其表征难度越来越大,迫切需要精细解剖露头和现代沉积建立储层精细的原型地质模型。传统的地质研究方法只能针对露头和现代沉积的有限出露局部特征进行描述,对沉积体的控制程度很低,极大地限制了露头与现代沉积在储层精细表征中的作用。探地雷达是一种高效的浅层地球物理探测技术,它通过向地下发射高频电磁脉冲,利用地下介质电性参数差异,根据回波的振幅、波形和频率等特征,来分析和推断浅层沉积体结构和物性特征。随着探地雷达技术的不断进步,近年来国外高校和科研机构将探地雷达与沉积学研究结合,开展了一系列古代及现代沉积探地雷达勘测工作,也取得了一系列的研究成果。

2003年伦敦地质协会由英国伦敦大学伯贝克学院 C. S. Bristow 教授和美国威斯康星大学欧克莱尔分校 H. M. Jol 教授共同担任主编,编辑出版了 *Ground Penetrating Radar in Sediments* 一书,系统论述了探地雷达在沉积物研究中的各种技术方法和针对不同沉积环境的研究实例,内容贴近沉积储层非均质性研究的实际,对油田储层精细刻画具有很大的指导意义。而国内在该领域起步较晚,将探地雷达技术与沉积学研究结合的成功案例较少。本书的翻译,恰恰填补了这一空白,对于促进该技术在我国的沉积领域的发展具有很强的学术参考价值。

原著涵盖的内容较多,覆盖面广。为了突出重点,本次翻译结合我国油藏沉积特点,优选可比性、代表性较强的十篇文章加以翻译,其中第1章、第2章系统介绍了探地雷达在沉积学方面的研究进展及实际测量、处理、解释中的技术方法与步骤;第3章~第6章介绍了探地雷达技术在河流、冲积扇和扇三角洲沉积环境中的应用实例;第7章介绍了探地雷达技术对活动断层及同生沉积物的研究;第8章、第9章介绍了探地雷达技术在三角洲及浊流水道沉积中的研究成果;最后考虑到探地雷达测量方式的全面性,第10章介绍了井中雷达在冻土层及烃类污染监测方面的研究成果及应用实例。本书第1章、第2章由高兴军、宋新民合译;第3章~第6章由高兴军负责翻译,宋新民审校;第7章~第10章由宋新民负责翻译,高兴军审校;全书最后由高兴军负责统校。原文中引用的参考文献列表完

整附在译文后面，便于读者检索。胡峰、王兴龙、李艳然、徐薇薇、周新茂、牛博、张丹锋、贺婷婷、曾小明、杨沛广、和丽娜、孔艳军、刘建宙等同志也参与了很多基础工作，在此一并感谢。

本书在翻译和出版的过程中得到了中国石油勘探开发研究院国家重大专项办公室的大力支持，科学出版社地质分社韩鹏社长和中国地质图书馆马冰老师也给予了大量无私的指导与帮助，在此致以真诚的感谢。

由于译者水平有限，本书翻译过程中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

译 者

2016年7月

前 言

近年来, 勘查浅部地层的探地雷达方法已经改变了对沉积物的研究方式。探地雷达目前被地球科学家接受并广泛应用, 使得对现代和古代沉积物进行无损探查成为可能。基于这一领域的快速发展, 2001 年 8 月在伦敦地质学会和伦敦大学学院, 我们组织召开了“探地雷达在沉积领域的应用和解释”国际学术会议。会议的目的是: 把地质学家、地貌学家、工程师和地球物理学家聚集在一起, 针对探地雷达技术的应用交换想法, 加强合作, 尽最大努力把探地雷达应用好。这次会议非常成功, 来自世界各地的 80 多位代表参加了此次会议。这本出版物代表了此次会议的成果, 值得一提的是, 几乎所有与会者都希望相关论文都集合于一本书中, 可以充分体现研究者之间的密切联系和共同兴趣。我们很高兴听到与会者分享他们的感受, 如一些研究者过去一直感到很孤单, 但现在他们找到了可以分享想法和经验的伙伴和国际化协会组织。我们希望这本书能巩固已取得的最新成果并激励其他人在研究中应用探地雷达方法。

编委会对以下参与审阅的同事表示衷心感谢: P. Annan, A. Bichler, M. Bakker, D. Belknap, G. A. Botha, N. Cassidy, L. Clemmensen, R. Ll. Collier, D. J. Daniels, J. Degenhardt, C. Ekes, T. Elliot, R. J. Ferguson, D. M. Fitzgerald, A. Gardiner, J. Heinz, J. Hendrickx, K. Holliger, P. Huggenberger, L. Hunter, P. R. Jakobsen, S. Kruse, J. W. Lane, M. Leopold, I. Lunt, G. McMechan, S. McGeary, I. Moller, M. Mulligan, A. Neal, M. L. O’Neal, M. Pedley, K. Pedersen, B. R. Pratt, J. Pringle, D. Redman, K. R. Reicherter, S. Reiss, G. Roberts, M. C. Roberts, G. L. Running IV, G. Sambrook Smith, D. G. Smith, D. Stow, R. van Dam, B. Whiting, P. Wilson 和 J. Woodward.

此次会议及论文集的出版得到了以下机构的大力支持:

英国沉积学研究组 (British Sedimentological Research Group, BSRG);

Geomatrix 地球科学公司 (Geomatrix Earth Science Ltd.);

地球物理勘测系统公司 (Geophysical Survey Systems, Inc. GSSI);

国际沉积学家协会 (International Association of Sedimentologists, IAS);

传感器与软件公司 (Sensor and Software, Inc.)。

我们对上述机构提供的经费支持表示诚挚的感谢，这些资金促成了此次会议并为参加会议的研究生提供了资助。

最后，向整个过程中给予支持的伦敦大学伯贝克学院地质和地球物理科学研究所和威斯康星大学欧克莱尔分校表示衷心感谢。

Charlie Bristow

Harry Jol

目 录

译者序

前言

第 1 章 探地雷达在沉积物研究中的应用概述	1
1.1 引言	1
1.2 现代沉积研究中的应用	2
1.2.1 风成沉积与海岸沉积环境	2
1.2.2 河流和冲积扇环境	3
1.2.3 冰川环境	4
1.2.4 湖泊环境	4
1.3 古代沉积物研究中的应用	5
1.4 构造研究中的应用	5
1.5 工程和环境应用	6
1.6 GPR 方法论	6
1.7 结论	7
参考文献	7
第 2 章 探地雷达技术沉积物研究实用指南——关于数据采集、基本处理 和解释的建议	13
2.1 引言	13
2.2 数据采集和测量设计	14
2.2.1 背景	14
2.2.2 反射剖面测量	15
2.2.3 速度探测	22
2.2.4 试测	24
2.2.5 地貌	24
2.2.6 后勤保障与测量工作安排	25
2.2.7 极端环境	28
2.3 处理和显示	29
2.4 解释方法	32
2.5 雷达地层学概述	33
2.6 结论	35

参考文献	35
第 3 章 加拿大卑诗省西南部 Cheekye 扇沉积构型及其后冰期演化	41
3.1 沉积背景	43
3.2 Cheekye 扇沉积特征	44
3.3 GPR 研究方法	47
3.4 GPR 雷达相	49
3.4.1 空白反射相	50
3.4.2 基岩相	51
3.4.3 冲积扇相 1	52
3.4.4 具有电缆和管道等公用设施的冲积扇相	52
3.4.5 冲积扇相 2	52
3.4.6 冲积扇相 3	53
3.4.7 冲积扇相 4	53
3.4.8 河道充填相	53
3.4.9 三角洲前积相	53
3.4.10 河流相	54
3.5 Cheekye 扇内部构型	54
3.6 结论	55
参考文献	56
第 4 章 加拿大卑诗省西温哥华市 Cypress Creek 扇三角洲沉积构型与雷达	
 相研究	59
4.1 自然环境	60
4.2 海平面变化史	62
4.3 GPR 研究方法	63
4.4 扇三角洲雷达相	64
4.4.1 雷达相 I: 斜坡雷达相	65
4.4.2 雷达相 II: 丘状雷达相	67
4.4.3 雷达相 III: 波状起伏近水平状雷达相	67
4.4.4 雷达相 IV: 下凹雷达相	68
4.4.5 雷达相 V: 水平雷达相	69
4.5 沉积与地貌环境	69
4.5.1 三角洲平原	69
4.5.2 河道带	71
4.5.3 海滩带	72
4.5.4 三角洲前缘	73

4.6 讨论	74
4.6.1 海平面变化与三角洲演变的关系	74
4.6.2 强潮涌扇三角洲:标志性的雷达相特征	75
4.6.3 提出的 Cypress Creek 沉积模式	75
4.7 结论	77
参考文献	78
第 5 章 德国西南部第四纪不同类型砾石河床辫状河沉积三维探地雷达分析	80
5.1 沉积学	81
5.2 GPR 反射、数据采集及处理	84
5.3 成果	85
5.3.1 GPR 剖面标定	85
5.3.2 实例研究	87
5.4 讨论	92
5.5 结论	93
参考文献	94
第 6 章 探地雷达在砂质河流相沉积环境中的应用:方法探讨	96
6.1 研究区地点	97
6.2 野外工作方法	97
6.2.1 GPR 系统选择	99
6.2.2 数据采集方式	99
6.2.3 叠加测试	101
6.2.4 测点间距	101
6.2.5 频率选择	102
6.2.6 地表构造绘制	103
6.3 处理方法	103
6.3.1 时间零点校正	104
6.3.2 DEWOW 处理	104
6.3.3 带通滤波	106
6.3.4 背景消除	108
6.3.5 偏移	108
6.3.6 海拔静校正和深度转换	108
6.3.7 增益应用	108
6.4 速度分析	109
6.5 GPR 数据解释	110
6.5.1 地下实况约束 GPR 解释	110

6.5.2 GPR 反射和沉积学解释	111
6.6 活动河道沙坝的 GPR 反射解释	113
6.7 结论	115
参考文献	116
第 7 章 应用高分辨探地雷达进行活动正断层及其共生沉积物的成像及表征	119
7.1 GPR 在构造研究中的应用	119
7.1.1 GPR 设备、数据处理及研究方法	120
7.1.2 活动正断层研究区的构造及地质背景	122
7.2 高分辨雷达图像上的断层和同生沉积构造	123
7.2.1 实例研究	123
7.2.2 与断崖共生的沉积构造实例	123
7.3 讨论	129
7.4 结论	130
参考文献	130
第 8 章 犹他州 Bonneville 湖三角洲重复 GPR 反射振幅分析	132
8.1 地质背景和 GPR 测量	135
8.2 模拟 GPR 电磁波传播	138
8.3 实测 GPR 对模型中介电常数差异的形式及其相对幅度的约束	139
8.3.1 大型地层	139
8.3.2 小型地层	141
8.4 实测 GPR 对模型中电导率的约束	142
8.5 用 AVO 模拟约束介电常数	146
8.6 直达地面波振幅分析	147
8.7 结论	148
参考文献	148
第 9 章 西爱尔兰 Clare 郡石炭系 Ross 组浊流水道沉积构型 GPR 三维成像研究	151
9.1 石炭系 Ross 组	153
9.2 Ross 大桥研究区	155
9.3 GPR 采集和测试	156
9.4 研究区速度计算技术	160
9.4.1 共中心点采集	160
9.4.2 垂直雷达剖面	160
9.5 GPR 固定偏移剖面测量及解释	161
9.6 三维模型的建立	164

9.7 下一步的工作·····	164
9.8 结论·····	165
参考文献·····	166
第 10 章 应用井下探地雷达进行 Alaska 州 Fairbanks 附近地下介质属性 高分辨率分析·····	168
10.1 研究方法·····	169
10.2 冻土观测·····	171
10.2.1 Chena 河永冻带·····	171
10.2.2 Fox 永冻土隧道·····	172
10.3 被污染区观测·····	177
10.4 速度和衰减分析结果·····	182
10.5 结论·····	182
参考文献·····	183

第 1 章 探地雷达在沉积物研究中的应用概述

CHARLIE S. BRISTOW¹ & HARRY M. JOL²

1 School of Earth Sciences, Birkbeck University of London, Malet Street, London, WC1E 7HX, UK
(e-mail: c. bristow@ucl.ac.uk)

2 Department of Geography and Anthropology, University of Wisconsin-Eau Claire, 105 Garfield Avenue, Eau Claire, WI 54702-4004, USA (e-mail: jolhm@uwec.edu)

1.1 引言

在沉积地质学中, 探地雷达(以下简称 GPR)主要用于地层学方面的研究。连续的、具有高分辨率的 GPR 剖面有助于研究以下几个方面的问题: ①地层结构; ②砂体的几何形态; ③沉积构造的对比与定量分析。以往, 为了研究沉积物的横向连续性及其变化, 我们必须通过分析钻孔之间、露头之间或浅沟之间的相互对比关系来进行判断。如今, 在适当的地底条件下(沉积物具有高电阻率, 如砂和砂砾), 我们可以通过采集 GPR 剖面来揭示地下的地层。此外, 三维 GPR 勘探更有助于我们认识砂体的几何形态及结构。然而 GPR 不是万能的, 在某些情况下, 由于通过 GPR 确定地下岩性具有多解性, 因此我们仍然需要地下的真实信息——即钻孔数据或露头数据, 来证实 GPR 的测量结果。实践也证明确实如此, 最新的 GPR 测量数据包括了三维深度偏移信息, 这就需要应用钻孔与露头数据来建立三维速度模型(Corbeanu and Soegaard, 2001)。此外, 低阻的细粒沉积物和地下水含盐的区域也会引起雷达信号快速衰减, 从而导致信号的穿透效果变差。

本章为开篇的概述, 将英文原著中各篇文章与已经公开发表的相关文献联系起来, 加以综述, 并突出了未来需要进一步研究的重点领域。本书第 2 章也是一篇综述性的文章, 该章则系统介绍了探地雷达数据采集、处理及解释的基本技术方法和实际操作的注意事项(Jol and Bristow, 2003)。本书第 3 章到第 10 章是译者根据中国主要油田储层的沉积特点, 从英文原著(共六大部分)的 23 篇文章中精选其中 8 篇文章翻译而成(译者注)。英文原著的六大部分内容简述如下: 第一、第二、第三部分共包括 13 篇文章, 系统介绍了探地雷达在风成、海岸、河流、冲积扇、冰川以及湖泊等沉积环境的应用实例(译者选择其中的 4 篇文章加以翻译, 作为本书的第 3 章到第 6 章); 第四、第五部分共包括 5 篇文章, 重点

介绍了探地雷达在古代沉积物、构造、工程及环境领域的应用实例（译者选择了其中 1 篇文章加以翻译，作为本书的第 7 章）；第六部分共包括 5 篇文章，重点介绍了探地雷达相关研究的方法和理论探讨（译者选译了其中 3 篇文章，作为本书的第 8 章到第 10 章）。另外本书中探地雷达的研究实例，覆盖了欧洲和北美等地不同的沉积环境。

本书作者在论述中遵从以下约定：①用 GPR profiles 或 GPR images 作为“GPR 剖面图”的术语，而不用 radargrams；②对 GPR 剖面图进行描述时，应使用反射 [reflection (s)] 作术语，而不用反射面 [reflector (s)]（反射面是地下产生反射的实体界面）；③在对 GPR 剖面进行初步解释时，应使用客观的地层学术语（如倾斜的、连续的）来描述反射模式，初步描述完成之后，方可使用更多的解释性术语。应当把解释与描述区分开。

1.2 现代沉积研究中的应用

20 世纪 80 年代晚期和 90 年代早期的一系列文章表明，GPR 有望成为地下浅部地层成像的工具。Jol 和 Smith (1991, 1992a, b)，以及 Smith 和 Jol (1992a, b) 的文章清楚地证明，在湖泊三角洲沉积环境中可以获得清晰的 GPR 剖面。几乎与此同时，Davis 和 Annan (1989)、Beres 和 Haeni (1991)、Gawthorpe 等 (1993) 的文章也提出了 GPR 测量和解释的步骤。随后开展了 GPR 在沉积物中探测深度和分辨率的测试 (Jol, 1995; Smith and Jol, 1995a)。早期的 GPR 测量经常与露头观察或者探槽剖面描述结合，以便验证这种地球物理测量的结果 (如 Jol and Smith, 1992a; Huggenberger, 1993; Bristow, 1994; Bristow et al., 1996)。然而早期 GPR 与露头剖面对比大部分是定性的。近来越来越多的露头分析已更加量化，旨在确定 GPR 的反射成因 (Van Dam and Schlager, 2000)，并为三维深度偏移提供进行约束的速度剖面，从而提高解释精度 (Corbeanu and Soegaard, 2001)。

1.2.1 风成沉积与海岸沉积环境

风成砂具有高电阻率，GPR 在其中的穿透能力较好（大于 10m）。在沙丘中，庞大的沉积构造能够很清晰地显示在 GPR 剖面中 (Harari, 1996; Bristow et al., 1996, 2000a, b; Jol et al., 1998)，这使得风成沉积很适合开展 GPR 测量。GPR 剖面能够反映沙丘中的交错层理和界面，揭示其内部结构和相对地质年代。Botha 和 Havholm 在 2003 年各自的两篇文章中描述了抛物线形沙丘。与其他风成沉积 GPR 测量相比，Havholm 等 (2003) 在 Lauder Sandhills 开展的 GPR 测量，穿透深度相当有限，少于 5m。这是由于粉砂岩、黏土岩和碳酸盐岩的成壤化，以及氧化铁的存在导致信号衰减造成的。Botha 和 Bristow (2003) 把 GPR 与激光断代法

结合来研究南非 Maputaland 海岸的沙丘活动。建立沙丘演化地质年代顺序是了解沙丘形成动力机制的重要一步 (Bailey et al., 2001; Clemmensen et al., 2001), 并且该领域的研究还能进一步扩展。

尽管临近大量导电的盐水, GPR 在海岸沉积中依然能够很好地工作, 但前提是其中沉积物中含的是淡水。Leatherman (1987) 回顾了 GPR 在海岸沉积中潜在的应用领域, 随后 Neal 和 Roberts (2000) 更进一步总结了该领域的后续发展。在沙嘴和障壁滩 (Jol et al., 1996a; Van Heteren et al., 1996; Smith et al., 1999) 以及进积滩地 (Neal and Roberts, 2000) 开展的 GPR 研究, 展示了 GPR 对前积临滨大型沉积构造良好的分辨率。Møller 和 Anthony (2003) 将雷达地层学与雷达相结合, 研究了丹麦全新世障壁滩的沉积结构和地层分布。O'Neal 和 Dunn (2003) 用一种层序地层学方法来解释 GPR 剖面, 描述了第四系 Cape May 组中的三个不整合接触的高位单元。GPR 剖面也用来为光释光测年 (OSL) 确定钻孔和取样位置。在 Smith 等 (2003) 的文献中描述了 Bonneville 湖粗砂砾障壁和沙嘴沉积的结构和地层。尽管与海岸沉积伴生的细粒沉积物, 如盐沼 (盐碱滩) 沉积会导致雷达信号的严重衰减, 但他们的研究证明 GPR 在解释海岸沉积层序中的有效性。

未来, 预计 GPR 的应用将在以下几个领域有所增加: ①确定海岸沉积地层分布; ②识别海进冲沟侵蚀面的地层层位 (O'Neal and Dunn, 2003); ③推定相对地质年代顺序; ④在地质年代测定中辅助确定取样点的位置。

1.2.2 河流和冲积扇环境

对河流沉积环境的 GPR 研究要多于其他沉积环境, 这是由于河流沉积分布广泛、易于接近以及它作为自然界中浅层含水层的重要地位。河流体系类型多样, 其沉积物的岩性各异, 沉积样式 (如点坝沉积) 规模较大, 同时其中含有的水为淡水。这些特点都使得河流沉积物特别适合用 GPR 来研究。有关这方面的研究已发表了很多重要文章, 如 Beres 和 Haeni (1991)、Gawthorpe 等 (1993)、Huggenberger (1993) 和 Beres 等 (1995)。Woodward 等 (2003) 以加拿大南 Saskatchewan 砂床辫状河的 GPR 剖面为例, 说明了数据采集和处理的过程。对水文地质学家来说, GPR 对河流沉积物二维、三维几何形态和相特征的成像及表征方面的能力是至关重要的 (Beres and Haeni, 1991; Huggenberger et al., 1994; Beres et al., 1995)。正如河流沉积物 GPR 测量可以提供河流地层和沉积结构信息一样, 在水文地质学研究中, 对冲积沉积的含水层, 应用 GPR 进行表征的工作也将继续进行 (Heinz and Aigner, 2003)。Heinz 和 Aigner (2003) 利用三维 GPR 测量, 识别了冰水砾石沉积中三种建筑结构类型的几何形态和叠加方式。

本书中有两篇关于应用 GPR 剖面描述和解释冲积扇沉积的文章。Ekes 和 Friel (2003) 提出 GPR 可以用来评价冲积扇沉积层序的演化, 还可以结合地质年代数

据来评价本例中冲积扇形成过程中泥石流和洪水的往复频率。虽然他们也指出,应用 GPR 剖面分辨泥石流相和漫流相存在一定的困难,但其研究提供的信息对于了解冲积扇的演化及其危害性评价却是有用的。Roberts 等(2003)描述了加拿大全新世扇三角洲沉积体雷达相剖面,并用雷达相识别出了扇三角洲中的海滩沉积。他们认为,在三角洲层序中保留下来的海滩沉积可以作为大潮环境的标志,而且可容空间、水深和沉积物供给等因素,对于确定扇三角洲构型至关重要。

1.2.3 冰川环境

在欧洲、加拿大和美国, GPR 已经用于研究较粗粒冰川和冰水沉积物(Ulriksen, 1982; Sutinen, 1992; Beres et al., 1995; Fisher et al., 1995; Jol et al., 1996c)。Cassidy 等(2003)描述了冰岛 Skeiðarársandur 的 Jokulhlaup 冰水沉积物。他们把 GPR 剖面、露头观察和已经发表的对露头的描述相结合,用以解释沉积地质年代。其研究识别出三种不同的沉积区域(冰壁峡谷、近端冰水扇、远端冰水扇)和四个沉积阶段(早上升期、上升/峰值期、衰退期和后洪水期)。他们建议,将来应把该模式用于基岩河流系统和冲积扇供给系统的研究中。Degenhardt 等(2003)用 GPR 研究了石冰川的构造,冰川内的层被解释为冰碛舌,这说明冰川具有复合结构特征。

Bakker 和 Van Der Meer(2003)展示了荷兰冰川构造推进冰碛物的 GPR 剖面。这个剖面展示了在近端的叠瓦逆冲逐渐变成褶皱和逆断层带,而在远端褶皱波长变长。他们以此作为冰川构造事件期间变形的证据。GPR 在冰川沉积中之所以具有很好的穿透性(多达 45m)和连续反射,主要归因于变形后沉积物的特性。而这些沉积物大部分都是冰水砾石。黏土基质含量高的冰碛物衰减较大,降低了 GPR 的穿透深度。Leopold 和 Völkel(2003)应用 GPR 帮助解决了一个晚更新统到早全新统斜坡沉积物中的地层问题,这些沉积物局部被泥炭所覆盖。其 GPR 剖面展示了泥炭内部多种反射类型以及与泥炭底部呈上超关系的典型实例。

1.2.4 湖泊环境

淡水湖具有电阻性强的特点,因此能被 GPR 所穿透。在淡水湖中,雷达能用来绘制浅底地层剖面,并研究水深、沉积物的厚度和范围(Haeni, 1996; Moorman and Michel, 1997)。Hunter 等(2003b)在冬季水库被完全冰冻的时候开展 GPR 测量,从而改善了雷达对地接触,提高了数据采集的速度。他们用 GPR 去评价水库中最新的沉积物以及基岩上部的沉积物厚度。沉积物聚集速率可以通过与早期的水深测量比较计算出来。沉积物厚度数据可用于约束潜在的疏浚深度,而沉积物聚集速率可用于评价沉积泥沙捕集器的设计。

Jol 和 Smith(1991)、Smith 和 Jol(1992a, b, 1997)研究了湖泊三角洲。

在湖泊三角洲粗粒沉积中,大型前积层为 GPR 提供了极好的研究地点。Smith 等 (2003) 描述了在 Bonneville 湖形成的粗砂粒障壁和沙嘴沉积的内部结构,同时, Bonneville 湖泊三角洲大型前积层也为评价重复层的雷达反射特征提供了试验区 (Kruse and Jol, 2003)。

1.3 古代沉积物研究中的应用

从露头采集的二维和三维 GPR 数据可用于与地下油气储层的类比,也可以为石油和水文地质储层建模提供定性和定量数据 (Thompson et al., 1995; Jol et al., 1996b; Corbeau et al., 2001)。Pringle 等 (2003a) 将露头沉积、地貌数据与 GPR 相结合,建立了浊流河道沉积的三维地质模型。GPR 测量的目的是在常规露头数据基础上提供一些补充信息,以提高油气储层建模的数据质量,该成果包括了一个可用于指导油气储层建模的定量的三维体积 (原型) 模型。Pringle 等 (2003b) 用垂直雷达剖面 (VRP) 进行 GPR 剖面的时间深度校正,这使得 GPR 剖面上的反射同相轴与沉积岩中观测到的岩性界面之间具有很好的可比性。该研究包括了奥陶系、石炭系的浊流沉积层序和古近系、新近系河流砂岩的实例,其中 65m 深的石炭系岩石中依然取得了令人满意的分辨率。

关于碳酸盐岩的 GPR 文献较少,碳酸盐沉积学家将 GPR 运用于灰岩或碳酸盐沉积物方面的研究落后于碎屑岩沉积学家。明显的原因在于,由于盐水造成衰减,导致在许多现代碳酸盐环境中无法使用 GPR。然而,由于灰岩具有高电阻,已开展的几个研究 (Pratt and Miall 1993; Liner C L and Liner J L, 1995; Sigurdsson and Overgaard, 1998; Dagallier et al., 2000) 表明,在灰岩中应用 GPR 也应该具有很好的潜力。Pedley 等 (2000)、Pedley 和 Hill (2003) 指出, GPR 可以用来研究具有不同岩性特征的石灰华,可以形成不同的雷达反射特征。Pedley 和 Hill (2003) 根据此信息对沼泽石灰华沉积进行了 GPR 测量,并且区分了线源石灰华和点源堆状石灰华沉积。除描述碳酸盐沉积特征之外, GPR 还能用来探测灰岩空洞、喀斯特地区的溶洞和渗坑。

1.4 构造研究中的应用

GPR 已经用于对浅表地层中的断层进行成像,并取得了一定程度的成功 (Bilham and Seeber, 1985; Smith and Jol, 1995b)。Reiss 等 (2003) 描述了西班牙东北、西班牙南部和西西里岛错断的冲积和塌积沉积。他们的研究表明,可以用 GPR 来描绘正断层,并建议 GPR 应作为先于探槽方法的一种古地震研究工具。另外,他们建议高分辨率 GPR 剖面定量分析应该用来追踪沿走向的断层分布,