

电磁勘探方法 及其在南方碳酸盐岩 地区的应用

严良俊

张翔

苏朱刘

胡文宝

金祖发

郑仁淑

杨绍芳

陈清礼

胡家华

编著

石油工业出版社

电磁勘探方法 及其在南方碳酸盐岩地区的应用

严良俊 胡文宝 杨绍芳
张翔 金祖发 陈清礼 编著
苏朱刘 郑仁淑 胡家华

石油工业出版社

内 容 提 要

由于南方复杂地形和恶劣的地表地质条件,电磁勘探方法在我国南方油气勘探中的应用受到较大影响。本书以“九五”期间作者及相关单位在南方碳酸盐岩地区进行电磁勘探方法试验及以寻找礁体为目标勘探取得的成果和资料编写而成,内容新颖,深入浅出。书中内容主要分为两大部分,前半部分为电磁勘探方法;后半部分为电法地质综合应用效果。

本书可供从事电磁勘探方法研究的科技人员及相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁勘探方法及其在南方碳酸盐岩地区的应用/严良俊
等编著. —北京:石油工业出版社, 2001.12

ISBN 7-5021-3627-4

I. 电…

II. 严…

III. 碳酸盐油气田—电磁法勘探—中国

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 088831 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 330 千字 印 1—1500

2001 年 12 月北京第 1 版 2001 年 12 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3627-4/TE·2673

定价: 38.00 元

序

在我国南方碳酸盐岩出露山区应用电磁方法进行油气勘探，从地质及物探的专业角度来看，似应平白易晓，但其思路的形成并进而得到支持与认可，却经历了相当一段时间。

1985年5月，中国石油学会物探专业委员会根据“学术活动应当多学科综合”的要求，在贵阳市举行了滇黔桂地区石油地质学术交流会。贵州指挥部和地质矿产部05工程（地震大剖面国际项目）的地质家们做了系统的介绍性发言。给人们总的印象是，南方油气远景良好，但物探方法远未过关。沿公路用可控震源尚能得到可用资料，离开公路则寸步难行，而构造勘探却要求远离公路，深入山区。

1988年8月，中国石油学会物探专业委员会与美国勘探地球物理学家学会（SEG）在大庆联合召开了开发地震技术研讨会。会议期间，与SEG达成协议，决定于1990年8月在成都举行碳酸盐岩专题研讨会。会议如期举行，并在会前进行了三天技术讲座。通过研讨，人们认识到，就碳酸盐岩作为储集层而言，找到构造只算成功一半，另一半是寻找孔隙发育带。美方的经验限于地面条件较好、地震资料也较好条件下的地震解释，有关山区的采集方法没有更多涉及。但会议中有两篇论文引起了大家注意，一篇是我国石油地质学家曾鼎乾的“中国在生物礁研究中的进展与各地质历史时期生物礁简介”，论文指出：中国南方泥盆系和二叠系礁体发育，是油气勘探的重要对象；另一篇论文是美国专家凯伦·克里斯多弗逊（Karen Christopherson）女士的“在巴布亚新几内亚的大地电磁法勘探”，测出了由出露地表厚逾千米的碳酸盐岩覆盖下的碎屑岩构造起伏，经钻探获天然气田。

我国南方地区海相沉积地层分布面积近80万 km^2 ，厚度6000~10000m，具备了形成丰富天然气藏的物质基础。其生储盖组合总体上可分成上古生界（含中生界三叠系）和下古生界两大套。以西南地区而言，经燕山运动全面褶皱和喜山期强烈抬升后，地质构造非常复杂，封闭与保存条件成为关键。南方地区地形十分复杂，滇黔桂碳酸盐岩山区尤为恶劣，以致物探方法难度极大，长期以来投入工作量很少，且效果欠佳。

1990年10月，原石油部唐克部长在无锡召集了近20名专家，座谈讨论南方海相地层的勘探问题。广西勘探指挥部魏宜义地质师在题为“从破坏了的古油藏剖析探讨广西海相地层分布区油气勘探前景”的报告中，提到了宁明县亭亮二叠系生物礁和南丹县大厂泥盆系生物礁。唐克老部长在总结时鼓励大家，如能从南方海相地层中获得单井每天稳产一吨的石油便值得祝贺，他对勘探人员提出了殷切希望。

怎样开展南方碳酸盐岩山区的勘探工作？看来，（1）在地表条件有利，且能获得较好地震资料的地区，如中、下扬子区，可望找到构造后研究孔隙发育带。被地质家们关注的下古生界，由于埋深大、断块发育，在必须进行三维地震以前，应大致测绘志留系高家边泥岩（低电阻率）盖层，划出三维工区；（2）在碳酸盐岩山区，地震工作困难，埋深不大的含孔隙的生物礁在电阻率上与围岩应有差异，采用电磁方法可望为摆脱南方勘探的困境迈出关键的一步；（3）借助石油物探学会的活动，发出呼吁，争取多方支持，并探寻有效的工作方法。具体的行动有：

①在 1991 年冬季召开的云南省油气勘探会议上，提出在南方用电磁法找礁的书面建议。认为地面既然多处出露，必有一部分尚埋于地下，对其中埋藏不深者可以用电磁方法界定。

②1992 年冬，在原中国石油天然气总公司阎敦实总地质师的支持下，在苏皖两省南部进行了十三条 MT 大剖面测量，力图测绘高家边泥岩。

③1993 年，我为石油物探学会活动写的比较系统的一篇论文“论碳酸盐岩地区石油物探”，探讨了海相地层的地震与非地震勘探问题，后被载入《中国南方海相碳酸岩油气勘探文集》（欧庆贤主编，江苏科学技术出版社 1994 年出版），以下是其中一段的引述：

碳酸盐岩山区的地震勘探除上述两问题外，在观测系统、数据处理、解释方法等方面，还有一系列问题。明显的问题是地震工作方法复杂，进度缓慢，代价高昂。因此，多年来在这方面的方法试验不多。

海相地层系列中除碳酸盐岩外还有含泥质为主的碎屑岩，这是我们要寻找的隔层或盖层，其电阻率低得多，可以用大地电磁方法进行概查。如果注意消除地表的静态影响和地形影响，收集各层系电性参数，作好二维反演，便可以进一步普查盖层的构造形态。对于与油气勘探有关的主要层系，如能在地质人员配合下，用电法进一步区分出盆地相、台地边缘相、开阔台地相甚至潮间带与潮上带，便可进一步缩小范围、优选勘探目标。

在碳酸盐岩出露区发现多处含沥青的礁体，显然还有未发现的埋藏于地下的礁体。按礁体分布来看，有产生于致密的碳酸盐岩之中的含孔隙的礁体，也有位于泥质为主的岩层之中的礁体。前者为高电阻率背景下的低值，后者则相反，总之有电性异常。对埋藏深度不大的，可试用人工场音频电磁法或时间域电磁方法进行探测，将层面构造异常研究简化成块体异常研究，这可能是走出困境的一条路子。

电磁方法找礁建议在几经呼吁后，原中国石油天然气总公司勘探局丁贵明局长明确表示支持，很快便在新区事业部和南方经理部领导下于 1993 年 4 月开会议标付诸实施。通过议标由三家单位（石油地球物理勘探局第五地质调查处、江汉石油学院和华北有色地勘局物探公司）分别到广西十万大山、湖北利川和贵州秧坝展开选区概查和方法试验，技术管理上由石油地球物理勘探局的金祖发和熊识仲二人负责。

电磁方法中使用较多的是大地电磁测深法（MT），其优点是装备轻便，施工成本低，缺点是易受表层不均匀性的影响，分辨能力受埋深限制，完成每个测点的观测时间较长。地质家从南盘江已钻井地下 2000m 仍见淡水的事例，提出勘探目标须在 2500m 以下方可望免遭地面水冲刷。因此，项目从一开始便有不同看法。认为礁体露头附近可以试验，接着必须往深处努力。因此，在第一年甚至第二年测出的一批浅异常未能引起地质家的兴趣。另一方面，工作量有限，要求地质家在大范围内指出深部的古台地边缘（块体较大的台地边缘礁所在地）又不太现实。一条折衷或迂回的道路只能是：先以海相沉积序列中的泥质岩（低阻）地层作为勘探对象，只要地电剖面适宜，便切实可行；而后再从电阻率横向变化上或孤立的高电阻率局部凸起上做文章，找礁块。寻找泥质岩覆盖下的构造也符合重视保存条件的原则。概查选区，是工作环节上关键的一步。

对事物有不同看法是正常的，但对有待扶植的本项目而言都可能导致半途而废。曾有人提出在黔南大片地带概查低阻层赋存与埋深情况的建议，但被否定。理由是地层出露如此广泛的地区，情况已基本清楚。后经中国石油勘探开发研究院周堃地质师竭力推荐，1994 年

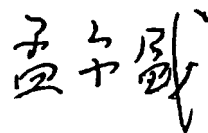
冬派出一个 MT 队进入桂中坳陷柳州以西一带做路线概查。发现河池以北一带工作条件理想，地表不厚的高阻层之下有约 500m 厚的低阻碎屑岩，再经 500m 的高阻层后便是千米厚的下泥盆统碎屑岩段。金祖发高级工程师及时写出了“广西桂中坳陷电磁法概查初步成果及下一步工作意见”，对利用 MT 方法进行南方泥盆系勘探的能力充满信心。南方经理部补齐了经费缺口，在 1995 年冬季用两个队进一步开展面积普查，找到了水源、普乐和新材三个电性高点。1996 年 7 月在三亚召开的南方地区勘探会议上受到原中国石油天然气总公司领导的肯定。在没有立项的情况下，由于总公司领导的支持，电法找礁试验进一步深入。1996 年冬季对已发现的高点加密测点，同时，在黔南做出两条概查大剖面；在有所发现的基础上于 1997 年冬季再派出三个队对黔南继续进行概查和局部普查。其间又曾发生的分歧起源于对保存条件的认识。较传统的意见认为，保存条件上必须具备大范围较厚的中上三叠统盖层；另一种意见认为，泥盆系自身稍厚的泥质碎屑岩已经足够。自然对泥盆系也要避开断裂破碎带，注意淡水冲刷。对大片三叠系碎屑岩出露的山区，应更多更早地发挥地震方法的作用。

在碳酸盐岩山区用电磁法普查构造，并没有现成的经验，须在技术上不断探索，在确保资料质量和提高解释水平上狠下功夫。为了获得可靠的观测资料，参加方法试验的技术人员跋山涉水、风餐露宿，常年在南方碳酸盐岩山区进行野外施工。针对地表条件和勘探目标的不同，先后在多个工区试验了大地电磁测深（MT）、同步阵列大地电磁测深（SAMT）、音频大地电磁测深（AMT）、可控源音频大地电磁测深（CSAMT）、长偏移距瞬变电磁测深（Low-TEM）等方法，总结出适用于不同地电模式的方法系列。在湖北利川、贵州秧坝、广西十万大山和桂中等地进行了区域性详查和局部异常目标详查，圈定了一批有利构造，有些目标的进一步勘探工作仍在进行之中。在技术创新方面，针对山区的特殊问题，研究人员深入进行了资料处理和解释方法的攻关研究，先后就静态偏移校正、地形影响校正、复杂地电模型的三维正演、多参数联合二维反演成像、瞬变电磁测深资料的解释参数定义等问题研究了新的算法，编制了计算机程序，并在实际资料处理与解释中应用。这些研究成果不仅大大提高了电法资料的应用效果，确立了复杂地区油气勘探必须走“综合勘探”的技术路线和电磁方法在综合物探中不可或缺的地位，而且还将我国在该领域的技术水平推进到国际先进地位，在与 SEG 共同举办的专题国际研讨会上得到国外专家充分肯定。

为了总结南方电磁勘探方法的试验工作，中国石油天然气集团公司原新区勘探事业部委托江汉石油学院进行系统总结，形成此书。该书系统地介绍了在南方电磁勘探方法试验中采用过的电磁方法的基本原理、方法特点，以及针对山区特点而发展起来的资料采集、处理和解释新技术；介绍了各个试验工区的地质背景、试验方案及试验效果；总结了南方碳酸盐岩山区油气勘探的技术难点、技术路线、经验教训及攻关方向。该书的内容是电法试验项目组近六年攻关试验研究成果的结晶，基本反映了我国复杂山地非地震勘探的技术水平，希望能成为从事石油勘探的地质和物探技术人员的一本有价值的参考书。

值此书出版之际，再次对支持该项研究工作的中国石油天然气集团公司以及原勘探局、新区勘探事业部和南方油气勘探项目经理部的各级领导，对参与该项目研究工作的石油地球物理勘探局、江汉石油学院、华北有色地勘局物探公司等单位的技术人员深表谢意。特别是原南方勘探项目经理部马力经理一贯关心和支持本项目的工作进展，并亲自组织实施；担任项目管理工作的金祖发、熊识仲及汤祖伟三位高级工程师在工作中付出了比常规生产管理上更多的智慧与劳动；此外，还有周堃、徐志川、杨惠民、王家映等多位地质和物探专家的热

情支持和指导，推动了本试验项目的顺利进行。我相信，经过前赴后继的努力，不断提高对碳酸盐岩沉积地层的认识，不断提高物探方法的技术水平，南方油气勘探的突破一定为期不远。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '孟' (Meng), '彦' (Yan), and '彦' (Yan), written in a cursive style.

2001 年 8 月于涿州

前 言

我国南方中古生界出露的碳酸盐岩地区是油气勘探的主要领域。但是, 艰难的物探工作条件, 成为石油地质研究的重大障碍。由于古老岩层裸露, 地下构造复杂, 常规地震勘探的资料品质普遍不高, 且代价昂贵, 因此, 投资风险很大。能否寻找一种作为地震勘探的先行或部分代替和弥补地震功能不足的方法途径, 以实现构造层面的测绘以及岩性异常的探测, 便成为众多地质、物探专家所关注的目标。孟尔盛老总在“论碳酸盐岩地区石油物探”一文中提出, 可利用大地电磁测深方法在碳酸盐岩地层系列中实施探测低阻碎屑岩为基础的构造概查, 并为划分相带、优选勘探目标提供依据。还进一步提出将层面构造异常的研究简化成块体异常研究, 发现那些在致密碳酸盐岩中含孔隙的低阻体或由泥质岩包裹下的高阻碳酸盐岩块体, 从而实现礁体勘探的思路。此外, 不少地质家在研究了我国晚震旦至晚三叠世出露生物礁的分布规律并通过对几个已破坏的古礁油藏进行剖析后认为, 生物礁应是我国南方碳酸盐岩地层重要的储集形式, 而中泥盆世及中、晚二叠世是我国南方几次重要的成礁期。在海侵的前提下, 在特定的古地理位置的有利相带上, 回避那些构造运动强烈的大断裂及岩浆活动区, 就有可能找到有价值的含油气礁体(曾鼎乾 1990)。为此, 孟尔盛老总于 1991 年 11 月向原中国石油天然气总公司领导提交了“电法找礁可能是滇黔桂海相地层寻找油气的突破口”的建议书, 建议利用现有电磁勘探方法的探测能力及轻便灵活、成本低廉的特点, 以礁体与围岩的电性差异为基础, 以浅埋的潜伏生物礁为突破口, 在滇黔桂选择有利区块, 在地质专家的指导和配合下, 开展电磁法找礁方法试验。该建议得到原中国石油天然气总公司及其勘探局领导的积极支持, 于 1993 年 4 月由原中国石油天然气总公司新区勘探事业部在南方经理部设立项目组, 开展电磁法找礁试验。

电磁法找礁试验工作历时五载有余, 参加试验的单位主要有石油地球物理勘探局第五地质调查处、滇黔桂石油勘探局、江汉石油学院、华北有色地勘局物探公司和石油大学(北京)。在实施过程中, 项目组始终遵循由点到面、从大到小、先试验后铺开的方针。坚持经常性的技术研讨和咨询制度, 倾听各方地质、物探专家的意见, 及时调整工作部署, 不断改进方法与技术。1996 年 5 月, 还特邀了 SEG 部分电磁专家, 在杭州召开了专题国际研讨会, 研讨和交流了电磁方法和技术的最新进展和成果, 促进了试验工作水平的提高。电磁法找礁试验的主要成果体现在两个方面。

1. 电磁勘探方法研究与试验取得进展

五年来, 参加研究的单位针对南方地区碳酸盐岩覆盖、地形恶劣、地表地质条件复杂以及电磁干扰严重等特点, 进行了多种电磁勘探方法的研究与试验工作。

(1) 针对南方高阻碳酸盐岩出露区噪声干扰大、地表条件复杂的特点, 为了提高数据采集质量, 试验了张量方式的 CSAMT 方法; 在电磁阵列剖面(EMAP)方法研究的基础上, 进行了张量方式的阵列大地电磁测深(SAMT)方法试验; 对常规的 MT 方法, 采用了 Robust 资料处理技术, 成功试验了远参考方式的 MT 资料采集和处理技术。

(2) 为了研究电磁勘探方法的分辨率, 探索提高分辨率的方法技术, 先后进行了高密度的 EMAP 方法试验、共中心回线瞬变电磁测深和长偏移距瞬变电磁测深(LowTEM)的面

积勘探方法试验。

(3) 针对近地表电性异常体对 MT 资料的静态偏移影响, 进行了利用共中心回线瞬变资料进行 MT 曲线校正的野外方法试验; 研究了阻抗张量分解法、空间域滤波技术、相权校正法、考虑近地表异常的二维多参数联合反演方法, 在资料处理过程中有效地抑制了静态偏移的影响。

(4) 针对南方山区地形复杂的特殊情况, 研究了二维、三维不同类型地貌对电法资料采集的影响特征, 提出了用正演模拟技术校正地形影响的比值法和考虑地形的二维多参数联合反演方法。

(5) 在电法资料的解释中, 为了得到合理的初始地层电性模型, 除充分利用各种地层和地球物理资料建立区域性的地层电性柱状图外, 还利用视电阻率曲线首枝建立地层-电性平面图; 利用浅瞬变和小四极方法测定地表露头的电阻率, 对不同工区的数千块岩样进行了电阻率与孔隙度的测试分析; 从多个方面为确定电性标志层, 建立初始电性模型提供可靠的依据。

(6) 为了利用电法资料更好地对地下电性构造进行成像, 研究了连续介质二维反演算法, 有限差分二维多参数联合反演算法。为了获得高分辨率电法成像, 研究了 MT 视电阻率曲线极化模式识别方法, 考虑地形和近地表不均匀体的模型网格剖分原则, 根据不同极化视电阻率曲线的特点及数据误差进行加权的反演技术。

(7) 进行了瞬变电磁测深的适用性和解释新方法研究, 研究了 LowTEM 方法的场源效应影响和地形影响特征; 研究了瞬变电磁测深资料的全区视电阻率定义, 获得了较高分辨率的电阻率构造图。

(8) 电磁法找礁是各种电磁方法的综合试验, 根据试验结果对各种电磁方法进行了综合评价(特点、应用条件), 并根据各种电磁方法在油气勘探中的特点提出了南方石油电法勘探方法系列和勘探思路。此外, 新方法试验也为行业技术标准的建立提供了依据。

2. 取得了良好的应用效果

该项目先后在鄂西地区、广西十万大山盆地、贵州秧坝地区、桂中拗陷、南盘江地区进行了电磁法找礁试验与研究。其研究工作遵循由表及里、由简单到复杂、地质与地球物理综合的原则。

(1) 开展了礁的地质特征与碳酸盐岩沉积相研究。在此基础上, 对工区内采集的生物礁标本进行了测试, 分析研究了碳酸盐岩沉积环境中生物礁的电性特征及其与围岩的电性组合关系, 为电磁法找礁提供了地球物理基础。

(2) 通过电法与地质综合解释, 对试验工区进行了初步评价, 发现了一批构造异常显示, 主要有:

①在桂中的环江地区发现了水源和新材两个局部构造异常显示。该工区的上泥盆统上部有近 500m 的泥质岩盖层, 中泥盆统有近 1000m 泥砂岩, 中间夹有高阻的碳酸盐岩。这两个构造的下低阻层顶面埋深均小于 2500m。此外, MT 成果还展示了江南古陆的西南缘呈现为斜坡状地质结构, 在环江附近为中泥盆世台缘相带。

②十万大山盆地北缘的邕宁地区, 即南宁以南约 50km 处, 发现了浅部环状高阻异常带, 总面积约 40km², 推断为中生界覆盖之下的二叠系生物礁体。

③在南盘江地区的独山-南丹一线以西的乐业至秧坝约 13000km² 面积上, 通过 MT 解释结果证实了该区条块相间的盆台结构。根据从地面标定地下的原则, 解释了具有相当规模

的局部构造异常九个。其中，蔗香街、里高、赖子山不仅圈闭面积大（ $>200\text{km}^2$ ），或由三叠系砂泥岩覆盖或在浅部存在低阻盖层，而且目标深度均为一般钻探能力所及。

④在鄂西利川地区，从见天坝堤礁露头向南，发现了呈南北走向的浅堤二叠系生物礁带。此外，由MT反演结果展示，在该区千米以下，追踪到呈低阻响应的志留系岩层，并发现有大型隆起迹象。

上述的地质成果为下一步深入勘探和为地震勘探选线提供了靶区。

（3）确立了找礁模式。试验认为，电磁法找礁应从找相带、找含泥质性的盖层入手，通过电法资料划分盆—台结构与相带，圈定不同相带内的电性异常体，来确定礁体异常显示。

（4）试验建立了一套南方山区电法勘探的程序，即地质先行，电法扫面，地震标定，地质与电法综合。

在该项目的推动下进行的上述方法研究和试验，促进了电磁勘探技术的发展。通过该项目多年的野外试验，物探电法人员和地质人员紧密结合，使得电法在区域概查、面积详查和目标勘探等方面均取得了较好的应用效果，得到了越来越多的地质家的认可。应该说，该项目为推动我国电磁方法在困难地区油气勘探中的应用起到了良好的示范作用，促进了物探技术进步，培养和锻炼了一批电磁勘探技术人才，使得我国在该领域的研究水平和应用效果达到了国际先进水平。该项目的意义和影响已远远超出了“电磁法找礁试验”本身。

为了进一步推动电磁勘探方法的研究与应用工作，孟尔盛老总和原中国石油天然气总公司新区事业部南方油气勘探项目经理部委托江汉石油学院进行电磁法找礁试验工作的总结，形成此书。在本书的编写过程中，自始至终得到了孟尔盛老总和原中国石油天然气总公司新区事业部南方油气勘探项目经理部的大力支持与悉心指导。1997至1998年间，孟总多次召集有关专家和参研单位负责人就本书的编写工作进行专题研讨，对书的框架结构、内容、写作等技术问题提出了宝贵建议，并亲自作序。编著任务的具体分工是：第一章由杨绍芳、严良俊执笔；第二章由张翔、陈清礼、苏朱刘执笔；第三、四章由严良俊、胡家华执笔；第五章由郑仁淑执笔；第六章由杨绍芳、严良俊、金祖发执笔。孟尔盛老总、金祖发高工、张或丹教授认真校阅了书稿全部内容，最后由胡文宝教授和严良俊副教授审阅和统稿。值得提出的是，华北有色地勘局物探公司的姚治龙教授、谈达高工、胡玉平高工及石油地球物理勘探局第五地质调查处的何展翔和刘宏两位老总为本书的编写提供了大量的珍贵资料，中国石油天然气集团公司物探重点实验室给予了资助，在此一并致谢！

南方电磁勘探方法试验与找礁项目所跨时间之长，工区范围之广，试验方法及研究内容之多，在我国石油非地震勘探中实属少见，其总结难度之大可想而知。该书凝聚着南方电磁方法试验项目组六个单位数十名管理和研究人员多年辛勤劳动的成果，我们唯恐辜负了各级领导和参研单位的重托与期望，唯恐不能将近六年来各单位工作的成果完全展示出来。虽在各方专家的大力支持下，该书得以付梓，然言毕而意犹未尽。书中不足和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 南方碳酸盐岩地层电磁勘探的地质—地球物理基础	(1)
第一节 南方海相地层沉积、构造演化简况.....	(1)
第二节 南方海相碳酸盐岩沉积相带的主要特征.....	(3)
第三节 生物礁地质特征及我国南方泥盆、二叠纪礁的分布.....	(7)
第四节 南方电法找礁的可行性	(13)
第五节 电磁法勘探原理及特点	(16)
第二章 大地电磁测深法	(22)
第一节 方法原理	(22)
第二节 二维介质的 MT 方法	(24)
第三节 野外工作方法与技术	(27)
第四节 资料处理	(29)
第五节 资料解释	(61)
第三章 瞬变电磁测深法	(77)
第一节 LowTEM 法及视电阻率定义	(78)
第二节 LowTEM 野外采集方法与技术	(82)
第三节 LowTEM 资料处理与反演解释技术	(85)
第四节 中心回线瞬变电磁法及视电阻率定义	(93)
第五节 中心回线瞬变电磁法的应用	(96)
第四章 可控源音频大地电磁测深	(99)
第一节 CSAMT 的基本理论	(99)
第二节 野外工作方法与技术.....	(102)
第三节 CSAMT 的资料处理和解释	(104)
第五章 岩石电性参数测试分析与应用	(108)
第一节 岩石样品电性参数的测试方法.....	(108)
第二节 岩石电性参数的分析方法.....	(110)
第三节 岩石电性参数的测量与应用实例.....	(111)
第六章 南方电磁勘探试验的地质效果	(120)
第一节 电法试验概况.....	(120)
第二节 广西十万大山盆地电磁法试验效果分析.....	(122)
第三节 鄂西电法找礁试验及其效果分析.....	(142)
第四节 南盘江拗陷电法试验效果.....	(155)
第五节 广西环江地区电磁法试验效果分析.....	(178)
结束语	(188)
参考文献	(191)

第一章 南方碳酸盐岩地层电磁勘探的地质—地球物理基础

我国南方碳酸盐岩发育区是重要的含油气资源远景区之一，与世界各国碳酸盐岩地层中油气田发育区相比，我国南方碳酸盐岩分布极其广泛，剖面厚度达 8000~10000m，有利勘探面积达 80 万 km²，其间存在着众多的生油层系和储集岩体，在地面和井下已发现有大量的油气苗和沥青，并在相似沉积环境的四川盆地已发现储量较为丰富的油气藏，预示着我国碳酸盐岩沉积区含油气资源十分丰富。但南方经历了多期构造运动，特别是中三叠世后，印支、燕山和喜山运动使古生代油气藏受到了不同程度的破坏，造成部分油气逸失，地表、地质条件复杂化，地球物理勘探尤其是地震勘探极其困难。针对南方碳酸盐岩沉积特点，利用非地震的勘探方法为地震勘探寻找靶区是多年来人们一直关注的焦点。生物礁作为碳酸盐岩中一种重要的油气储集体，不仅在形态上有其独特的外形，而且在岩石组成和岩石物性方面有别于其它碳酸盐岩体，这一特征有助于物探方法的探测。世界上许多碳酸盐岩区勘探的突破也是从礁油气藏开始的。我国生物礁分布十分广泛，从震旦纪到三叠纪各海相沉积地层都发育有各种类型的礁体，其中裸露地表的礁大都含丰富的沥青，这些古礁油藏的存在表明至今仍深埋地下的礁体应是有价值的勘探目标。而电磁方法对低阻层敏感，易于穿透高阻层，且对不同岩性的地层有一定的分辨能力，这在一定程度上有助于预测潜伏礁，进而扩大勘探领域。

第一节 南方海相地层沉积、构造演化简况

南方海相地层发育于震旦至三叠纪，在长久的演变过程中经历了大陆边缘演化、板内裂陷和褶皱冲断推覆三大构造演化期，形成了不同的沉积特征（表 1.1）。

表 1.1 南方海相地层构造与沉积演化特征简表

地层时代	Q-K	K ₁ -T ₃ 晚	T ₃ 中-T ₃ 早	T ₂ -T ₁	P ₂ -D ₁ 中	D ₁ 早	S-O ₂	O ₁ -Z ₂	Z ₁
构造期	褶断-冲断推覆期		板内裂陷期				大陆边缘演化期		
构造和沉积特征	喜山期的抬升剥蚀、太平洋板块俯冲和印度板块的侧向挤压出现燕山期。强烈褶皱推覆断裂和断陷盆地。印支运动后转化为大型陆相盆地		一次完整的地裂旋回，经历了陆内拉张-裂谷作用，出现了早期块断盆地和晚期拉张浊流盆地沉积				广西运动使华南区与扬子区形成统一的南华板块，扬子区内形成大型隆拗格局。陆缘海经历了裂谷作用阶段、被动大陆边缘成熟阶段和闭合造山阶段		
沉积格局	抬升剥蚀	褶断推覆	丘台-台盆				隆起-拗陷		

续表

地层时代	Q-K	K ₁ -T ₃ 晚	T ₃ 中-T ₃ 早	T ₂ -T ₁	P ₂ -D ₁ 中	D ₁ 早	S-O ₂	O ₁ -Z ₂	Z ₁
沉积组合	陆相		海相						
	内陆断陷、拗陷盆地红层组合		浅海碳酸盐岩及碎屑岩的地台型稳定型沉积及深水泥质岩碳酸盐岩硅质岩沉积组合				浅海碳酸盐岩及碎屑岩的地台型稳定型沉积组合和陆架海盆地泥质、硅质、复理石、碳酸盐岩等活动沉积组合		
古油藏分布	古油藏抬升，地表遭受破坏		以岩性圈闭的古礁油藏为主，分布于台地或丘台边缘				以构造圈闭的古油藏为主，分布于台地或盆地的过渡相区		

一、大陆边缘演化期

扬子板块早期以裂谷阶段为主，沉积了一套岩性为碳酸岩夹砂泥岩，晚震旦-早奥陶世被动大陆边缘成熟，为相对稳定的陆表海沉积，地层横向变化稳定，并随斜坡的前积作用，台地边缘向海推进，在古台地边缘发育生物礁、滩。中奥陶世-志留纪伴随造山运动，中、上志留统多有不同程度的缺失，保留较全的有下扬子区和川东南、湘鄂西等地区，主要为浅海相陆源碎屑沉积。志留纪末的加里东运动形成了如黔东褶皱隆起、黔中-滇东等隆起及其隆起之间的大型拗陷如黔南拗陷，这对于扬子地台震旦系及下古生界的油气生成、运移和聚集有重要影响，特别是主要生油岩系下寒武统（在湘鄂西、川东南、黔东、浙西等下古生界厚度较大地区）已进入生油期，并与加里东期形成的圈闭相匹配，构成了有效的含油气系统。

二、板内裂陷期

加里东运动的结果，华南板块与扬子板块对接拼为一体，开始了新的构造发育阶段，这一时期以台地内部裂陷为特征，断裂活跃，从而构成不同于上古生代的另一沉积格局。滇黔桂地区由于裂陷作用形成了独特的“台盆（沟）”古地理景观。泥盆系是华南加里东活动带上的新的沉积盖层，与下覆地层呈不整合接触。泥盆系和石炭系最发育地区为华南区和其相邻的扬子区的黔南与滇东、龙门山等地区，扬子地台区沉积较薄，层位不全或缺失，地台边缘的拗陷区发育有泥盆系砂岩、砂页岩、石灰岩与白云岩，有大规模的沥青脉和油砂。泥盆纪末的构造运动使海水从部分地区退出，经短暂侵蚀后，早石炭世初期再次海浸，在中、下扬子区和部分上扬子区沉积了海陆交互相的碎屑岩、碳酸盐岩，部分地区夹煤层，中、晚石炭世海侵范围最大，为台地相碳酸盐岩沉积。早二叠世沉积时海水逐渐变浅，向局限台地转化，晚二叠世南方东部和西部逐渐抬升，为海陆交互相沉积。中下三叠为南方上升为陆前，最后的海相沉积，在上二叠沉积格局的基础上又有新的变化，表现在盆地相与台地相之间形成一套浊积岩。在扬子区的中、东部和华南区的部分地区，因受江南隆起抬升的影响，转变为局限台地相并与滨海相-陆相红色碎屑岩横向过渡。

三、褶皱冲断推覆期

中三叠世以后南方的地壳运动进入了强烈活动时期，印支运动后海水退缩，形成了四川和十万大山陆相沉积盆地。燕山运动导致了全区褶皱、断裂。喜山运动导致了海相地层抬升剥蚀、裸露地表，最终导致了海相部分油气散逸和改造。

第二节 南方海相碳酸盐岩沉积相带的主要特征

碳酸盐岩台地相沉积类型广泛，著名的地质学家 J.L.Wilson 提供了典型的碳酸盐岩台地相沉积模式（图 1.1）。这种模式往往形成于平缓正向构造缓倾海底，海底由陆逐渐向海变深，在远离岸边形成有利于生物生长的高能地带，构成台地边缘，边缘之后为广阔的台地相沉积，台地前缘主要为海盆沉积。Wilson 将这种模式阐明为三区九带，虽然并不一定出现全部相带，但总是存在着相似的序列。分述如下：



图 1.1 碳酸盐岩理想的标准相带模式

岩相 1：盆地相。

盆地相的远洋沉积物沉积于广阔的大洋或深水以及造山带狭窄盆地中。在深水缺氧的条件下，海槽和盆地中的底水是停滞的，因而形成了粉砂质或粘土泥岩及富含有机质的黑色页岩，古生代岩层的深水盆地沉积中一般都是页岩，页岩中的钙质通常朝台地方向增加，盆地相远洋沉积物在大洋环境中的沉积缓慢，每百万年仅 1~4m。但在狭窄海槽环境中，可形成快速堆积。这些黑色泥页岩、泥灰岩是优等生油岩，特别是陆架内盆地及狭窄海槽沉积物的有机质丰度甚高。如阿拉伯地盾的上侏罗统，墨西哥西北部著名的中泥盆统罗富相带也发育着极好的生油岩，由于这种地层缺乏渗透性，可形成封闭性能优越的盖层。

岩相 2：浅海陆架。

浅海陆架的海水具有正常盐度，深度较小，水充氧条件好，沉积物通常为灰泥结构与占优势的粒泥灰岩，也可能出现点礁和沙滩，并形成局部的粘结碳酸盐岩和骨骼粒碳酸盐岩。沉积速率与深盆相似。沉积构造有广布的生物扰动、潜穴及结核层。

岩相 3：深陆架边缘。

其沉积环境位于开阔的碳酸盐岩台地或镶边陆架的最下部，但其沉积环境比较复杂，包括异地沉积和原地形成物，沉积物包括碎石流和滑塌岩、碳酸盐浊积岩以及颗粒流。此外某些生物岩隆远离台地沿斜坡下延，这些较深水的有机质堆积形成圆形或波状岩丘。

岩相 4：前缘斜坡。

这里的沉积环境比岩相 3 更近上斜坡，化石碎片是前缘斜坡沉积物的主要岩性，表征着镶边台地上斜坡和外缘生存着丰富的正常海洋生物。这些沉积物由生物碎屑和颗粒碳酸盐岩，以及原地的灰泥质混合。前缘斜坡带沉积速率相对较高（大约 20~50m/Ma）。由于礁前角砾原始孔隙大，而且通过白云岩化及大气溶解作用，增强了渗透性，所以前礁沉积中有大量的油气储存，如墨西哥 Campeche 外滨的白垩系地层。

岩相 5：生物岩隆。

有机岩隆或生物礁是由原地各种海洋生物作用形成大量碳酸钙骨架组成。由于礁的生长极快,沉积速率可达 $100\sim 300\text{m/Ma}$ 。而生物礁可形成良好的储集体,因为(1)它们普遍向上建造,自身形成构造圈闭;(2)它们普遍由文石组成,易遭大气环境的淋滤;(3)除了有较高的原始孔隙以外,可发生充分的白云岩化。但是,由于灰泥充填和岩盐、石膏或方解石次生胶结,某些礁变得很致密,不经改造很难成为良好的储集体。

岩相 6: 礁滩。

由于风浪和潮汐作用的上涌扰动,在礁后形成了经过冲洗、分选的碳酸盐岩颗粒砂体,即礁滩。在潮汐恒量运动的地方,颗粒大小非常均匀。礁滩是极佳的油气储集体,如沙特阿拉伯的布尔干是罕见的中新世砂坝型特大油田。礁滩带的沉积速率往往与生物礁同步或稍慢。

岩相 7: 开阔海泻湖。

该相带处于正常盐度的海水中,深度在几米至几十米,水的充氧条件好。沉积物常是碳酸盐岩、白云岩夹薄层泥质页岩。在地质剖面上这个相带可在非常广泛的范围内追踪到。通过白云岩化、淋滤和破裂,也可发育某些次生孔隙,形成储集体。

岩相 8: 局限台地。

这里的沉积物是灰泥,是由潮汐作用所形成。海水深度从几公分到几米,并处于缺乏循环的高盐度状态,是陆地、淡水、海水和大气会聚的地方。在地质历史上都以白云岩、膏岩居聚多,许多油田都出现在这类白云岩旋回中,如美国南部、伊朗的阿斯玛组、得克萨斯中的二叠世等。

岩相 9: 蒸发台地。

蒸发性的潮上环境是由平坦台地上的平均高潮线以上的沉积物组成,仅偶尔为高潮所覆盖。这类地层中广泛发育着薄层白云岩。

上述台地相模式是理解碳酸盐岩相、原生孔隙的分布以及保存情况的基石,也是物探工作的基础。J.Freed Read (1985) 进一步阐述了不同碳酸盐岩台地(斜坡型、镶边型和孤立台地型)随沉积、盆地沉降或海平面上升的作用形成的沉积序列及其演化特征:碳酸盐斜坡可能是单斜或远端变陡的(图 1.2),最初可能由边缘浅水复合体(潮坪、泻湖、鲕粒、碎屑滩复合沉积体)开始,在随台地的推进过程中,这些边缘复合体可能演化为堡坝复合体,也可能演化为沉没的斜坡或镶边斜坡,在此过程中可能形成一些边缘或坡下的礁或滩。镶边大陆架的形成一般与具有高速碳酸盐的沉积斜坡的发育有关,礁体的高速向上建造,增大了边缘的起伏,并使其变陡。在海退过程中,边缘礁可能由加积和进积型变为过水型(沟蚀型和陡坎型),继而变为侵蚀型(图 1.3 (d) ~ (g)),终止边缘礁体的发育。而在礁体生长与海平面上升基本一致的地带,产生礁后深水泻湖和上长的边缘,并可能在泻湖内产生一些点礁(图 1.3 (i)),增大海平面相对上升速度或盆地下降速度,都可能使边缘礁向台地方向迁移,产生一些塔礁(图 1.3 (j))。孤立台地的演化较为简单,它们通常发育在孤立斜坡上。随海进过程,常围绕台地边缘形成镶边台地。边缘礁的发展,可能在台地内部形成泻湖相,也可能由于海退而遭受侵蚀。所有台地类型随海平面变迁或盆地沉降作用形成的礁体可用图 1.4 来表示。

我国南方海相碳酸盐岩沉积模式与 J.Freed Read 描述的既相似,又有差别。贵州区域地质志将其分为三种类型(图 1.5):陆棚边缘海沉积型、陆棚台盆相型和陆棚-广海型。

陆棚边缘海沉积型与 J.Freed Read 的斜坡型类似,岸外为宽阔平坦的碳酸盐浅水沉积台

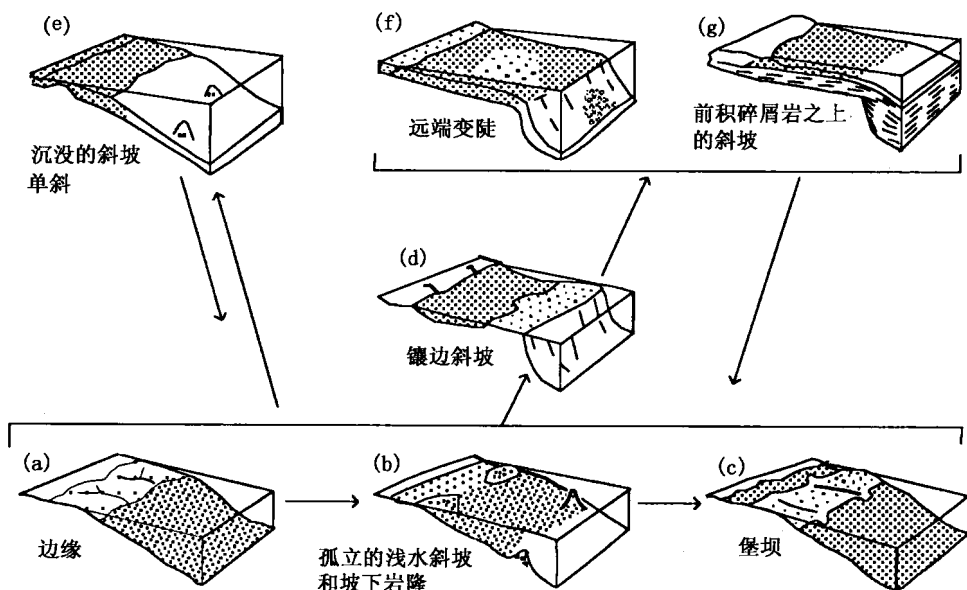


图 1.2 斜坡的变化 (据 J.Freed Read, 1985)

斜坡可由边缘的浅水复合体 (a) 开始, 随着时间的推移, 可能因浅水斜坡岩隆的合并 (b) 而演变为堡坝复合体 (c)。这些斜坡可演化成镶边大陆架 (d) 或沉没的单斜斜坡 (e)。在镶边大陆架沉没的地方, 它们形成远端变陡的斜坡 (f)。在碎屑岩淹没镶边大陆架的地方, 如果碳酸盐岩沉积恢复则发育斜坡 (g)

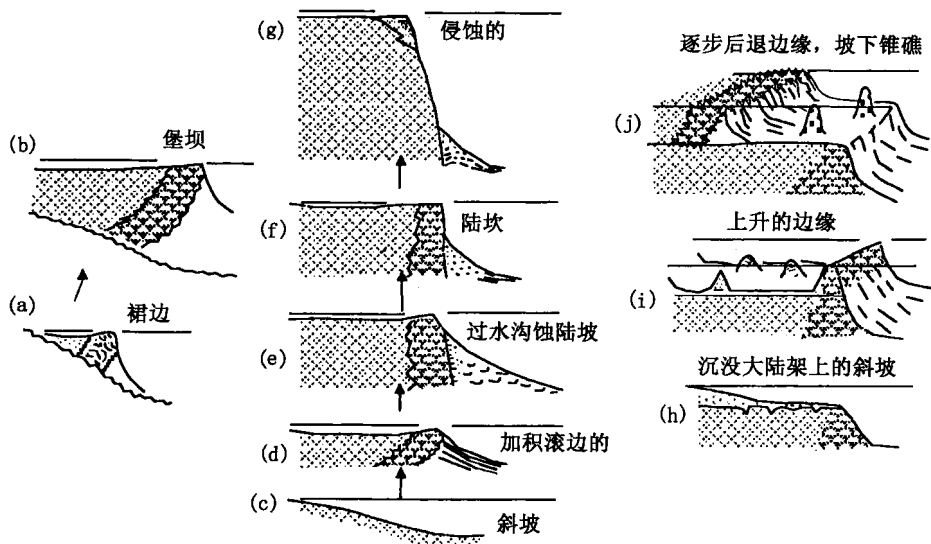


图 1.3 镶边大陆架的演化过程 (据 J.Freed Read, 1985)

(a) 随海进而发育的裙边礁复合体, 随后演化为堡礁复合体 (b)。许多的镶边大陆架由早期的斜坡 (c) 发育而成, 通过加积 (d), 沟蚀过水斜坡 (e), 陡坎过水区 (f) 到侵蚀的镶边边缘 (g)。随着不断沉没, 镶边大陆架可演化为具有上升的边缘 (i) 和深泻湖中的高起伏体的初始沉没大陆架 (h), 或者具有向后抬升的边缘及其向海一侧深水大陆架塔礁的沉没大陆架 (j)

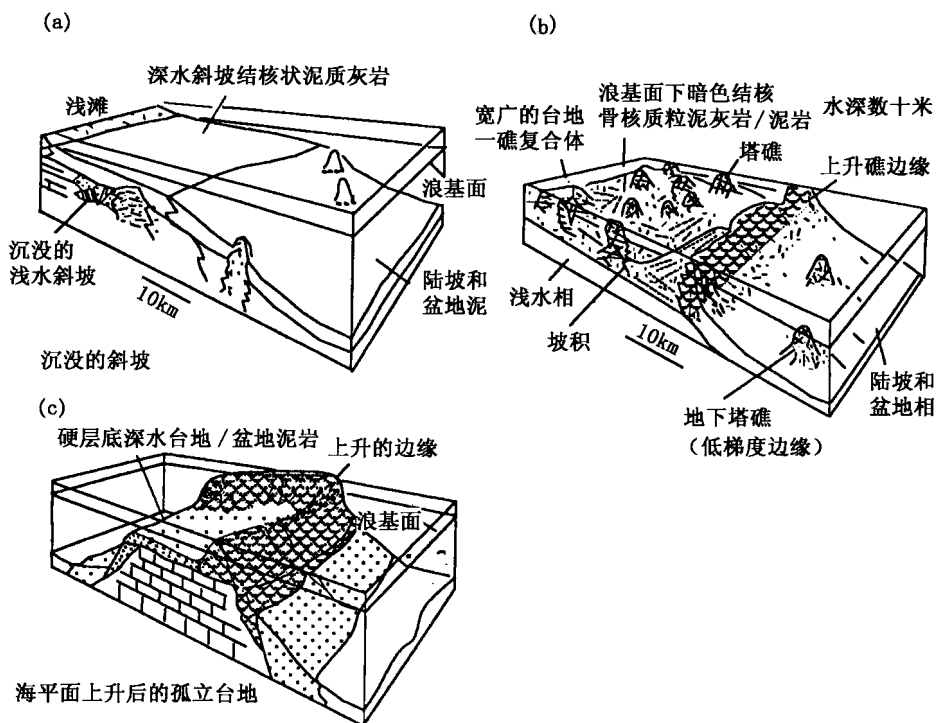


图 1.4 沉没大陆架 (据 J.Freed Read, 1985)

- (a) 海平面迅速上升之后的斜坡, 展示出盆地和深水斜坡相上超在浅水斜坡碳酸盐岩之上;
 (b) 海平面迅速上升之后的镶边大陆架, 表明上升边缘的发育以及深泻湖中和坡下塔礁的发育;
 (c) 海平面迅速上升之后的孤立台地, 展示上升边缘和深水台内相的发育

地, 台地边缘以较陡的坡度进入深水盆地, 台地边缘通常发育有礁、滩, 这种模式多发育在早古生代。

陆棚台盆相型是我国特有的海相碳酸盐沉积模式, 与 J.Freed Read 镶边型相比, 其孤立台地较发育, 陆棚上发育的浅水碳酸盐台地, 被槽状或线状相对深水盆地所分割, 构成排列有序的台地-台盆(沟)格局。其主要特征是: (1) 台地与台盆(沟)往往分别是断裂作用形成的地垒和边堑; (2) 一些高位的地垒, 有相当发育的碳酸盐岩沉积, 其边缘的滩、礁颇常见; (3) 在台盆边缘斜坡上常出现钙屑重力流沉积(多以碎屑流为主); (4) 台盆中心则对深水的细屑或炭硅质沉积。这种模式主要发育在南方泥盆一二叠纪。

陆棚-广海型与 J.Freed Read 的镶边型相近, 由陆棚通过斜坡直接与广海相连, 陆棚上为碳酸盐岩台地, 其地形起伏不大, 除礁外, 其它相带难以区分, 由陆棚通向广海盆地的斜坡陡峻, 各类重力流发育, 广海中常出现孤立的碳酸盐台地, 其上生物礁发育, 这种模式多发生于南方早中三叠世沉积中。

上述三种沉积模式中以陆棚台盆型中生物礁发育最为广泛, 其中分布地台地边缘沉积区的台缘礁, 延伸长, 规模大, 丘台也多有生物礁、滩, 这些生物礁中多有油苗或沥青分布, 应是南方油气勘探的主要对象之一。同时对这一领域的勘探也有助于深化了解南方碳酸盐岩沉积特征, 促进油气勘探进展。