

油气资源与勘探技术教育部重点实验室资助

川东南—湘鄂西地区 构造特征与页岩气勘探潜力

CHUANDONGNAN-XIANGEXI DIQU GOUZAOTEZHENG YU YEYANQI KANTAN QIANLI

杨飞 叶建中 著



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

油气资源与勘探技术教育部重点实验室资助

川东南—湘鄂西地区构造特征与页岩气勘探潜力

CHUANDONGNAN—XIANGEXI DIQU GOUZAO TEZHENG YU YEYANQI KANTAN QIANLI

杨 飞 叶建中 著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

川东南—湘鄂西地区构造特征与页岩气勘探潜力/杨飞,叶建中著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2011.12

ISBN 978-7-5625-2752-7

I. 川…

II. ①杨…②叶…

III. 油页岩-油气勘探-中国

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 231650 号

川东南—湘鄂西地区构造特征与页岩气勘探潜力

杨 飞 叶建中 著

责任编辑:胡 珞 兰

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:220 千字 印张:8.5

版次:2011 年 12 月第 1 版

印次:2011 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉市教文印刷厂

印数:1-1 000 册

ISBN 978-7-5625-2752-7

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

页岩气是保留在生油岩层中的天然气,是非常规天然气的一种,与煤层气、致密气同属一类。页岩气的形成和富集有着自身的特点,往往分布在盆地内厚度较大、分布广的页岩地层中。与常规天然气相比,页岩气开发具有开采寿命长和生产周期长的优点,大部分产气页岩分布范围广、厚度大,且普遍含气,这使得页岩气井能够长期地以稳定的速率产气。

我国页岩气在储量方面并不匮乏,资源量远远超过常规天然气。据专家估算,我国页岩气可采资源量约 26 万亿 m^3 ,主要分布在四川、鄂尔多斯、吐哈、塔里木和准噶尔等含油气盆地。尽管如此,我国的页岩气开发还处于初级阶段,目前的投资规模还不是很大,但可以肯定的是,中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)、中国石油化工集团公司(以下简称中石化)等国内主要石油企业都会加大对页岩气的开发力度。

2010 年,地处上扬子地台的川东南—湘鄂西地区被国土部油气资源战略研究中心选定为页岩气勘探先导试验区,开展页岩气资源前期调查研究。

据前人广泛的地表露头地质调查和钻井地层复查资料,川东南—湘鄂西地区下寒武统牛蹄塘组海相富有机质黑色页岩、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组海相富有机质笔石页岩在区域上分布稳定,岩性基本特征与美国主要产气页岩的特征相似。鉴于上扬子区古生界优越的页岩气成藏条件,中石化华东分公司围绕页岩气的勘探与开发设立多个研究项目,以勘探取得页岩气勘探的突破。长江大学于 2010 年度承担了“川东南—湘鄂西页岩气成藏特征研究”项目,所完成的课题报告经有关专家评审,认为取得了多项进展。本书主要介绍其中川东南—湘鄂西地区的页岩气勘探潜力。

川东南—湘鄂西地区下寒武统牛蹄塘组及上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩形成于与海湾体系密切相连的深水陆棚沉积相,富有机质黑色页岩发育,区域分布厚度大,有机碳含量高,脆性矿物丰富,热演化高,过成熟,页岩气形成条件优越。根据前期的区域地质资料结合实地野外地质调查和区内地震资料,本书对川东南—湘鄂西地区构造演化特征进行了研究,认为川东南—湘鄂西地区构造复杂,是一个多种类型构造的复合叠加和联合作用的地区,依据构造的形变特征、变形强度、主要断裂的性质、褶皱类型特征,将川东南—湘鄂西地区划分为 6 个一级构造单元、18 个二级构造单元。研究区历经了多期次、多旋回的沉积构造

演化,印支运动以前为海相沉积构造发展阶段,印支运动使得中上扬子地区两侧的秦岭和江南雪峰隆起皱褶造山,海水全部退出中上扬子地区,结束海相沉积历史,开创了前陆盆地发展演化的新纪元。到燕山运动早期即晚侏罗世,中上扬子地区受太平洋板块和印支板块向中国板块斜向俯冲的影响,发生一次地壳上升运动,彻底结束了该区的海相沉积的历史,进入内陆湖盆沉积阶段,并在侏罗纪时形成内陆大型坳陷湖盆。燕山期构造活动主要以逆冲褶皱冲断带为主,形成了龙门山、米仓山、大巴山和雪峰山等逆冲推覆构造,这一次构造事件是研究区最为重要的构造运动,它横向上几乎席卷整个中上扬子地区,纵向上从板溪群至整个古生代—中生代地层均卷入褶皱。在构造形态上,川东南地区主要发育隔挡式褶皱带,湘鄂西地区则发育隔槽式复合断褶带。在研究过程中,还首次系统编制了川东南—湘鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩顶面构造图、顶面埋深图及厚度图以及上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩顶面构造图、顶面埋深图及厚度图。

本书根据页岩气成藏主控地质因素,详细分析了页岩气赋存的基本特征(有机质特征、矿物组成、物性特征、储渗空间特征),从有机质丰度、热成熟度、有机质类型、脆性矿物含量、页岩层厚度、埋藏深度、构造形态七大关键地质因素出发,对川东南—湘鄂西地区古生代页岩气选区进行评价,作出主要页岩气目的层系牛蹄塘组、五峰组—龙马溪组页岩气勘探的综合评价,最后优选了研究区各层系页岩气的勘探有利目标区,认为下寒武统牛蹄塘组页岩气勘探有利区带总面积约为 $52\,300\text{ km}^2$,其中,I类区域有2块,面积为 $12\,625\text{ km}^2$;II类区域有4块,面积为 $20\,705\text{ km}^2$;III类区域则有4块,面积为 $18\,977\text{ km}^2$ 。对于上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩,主要页岩气勘探有利区总面积超过 $19\,000\text{ km}^2$,其中,I类区域有3块,面积约为 $5\,025\text{ km}^2$;II类区域面积约为 $4\,024\text{ km}^2$,III类区域则有11块,面积为 $10\,070\text{ km}^2$ 。

本书由杨飞、叶建中编写,姚俊详、陈振林、郭战峰、左中航、张玉玺、王庆之、李俊飞、雷海飞、杨红、张光友、周伯炯等同志参加了研究工作。

感谢中国石化勘探开发研究院无锡石油地质研究所地质实验中心完成了相关野外页岩气样品的实验测试工作。

感谢长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室对本书出版的资助。

笔者于湖北荆州

长江大学地球物理与石油资源学院

2011年9月

目 录

1 概 述	(1)
1.1 国内外页岩气勘探开发现状	(1)
1.2 页岩气成藏的主控因素	(3)
1.3 研究的意义及研究区构造位置	(5)
1.4 采用的主要技术	(6)
1.5 主要研究内容	(6)
1.6 成果与认识	(9)
2 地质概况	(11)
2.1 工区勘探程度	(11)
2.2 地层特征	(15)
2.3 主要页岩层系的分布	(31)
2.4 构造-沉积发展简史	(31)
3 川东南—湘鄂西地区构造演化特征	(38)
3.1 断裂特征	(38)
3.2 构造特征	(51)
3.3 构造演化	(59)
4 主要页岩层系展布特征	(64)
4.1 牛蹄塘组分布	(64)
4.2 上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组分布	(64)
4.3 页岩层系沉积特征	(65)
4.4 川东南—湘鄂西构造演化与页岩气保存关系分析	(75)
5 页岩气形成条件分析	(91)
5.1 主要页岩层系有机质类型	(91)
5.2 主要页岩层系有机质丰度	(99)
5.3 主要页岩层系热演化特征	(103)
5.4 主要页岩层系埋藏史分析	(106)
6 页岩气选区评价	(110)
6.1 有机质丰度	(110)

6.2	有机质成熟度	(112)
6.3	有机质类型	(114)
6.4	脆性矿物含量	(114)
6.5	页岩的厚度	(119)
6.6	页岩的埋深	(119)
6.7	构造形变	(119)
6.8	有利页岩气分布区域	(120)
7	结 论	(125)
	参考文献	(127)

1 概述

页岩气是指泥岩或页岩在各种地质条件下生成且尚未完全排出的天然气,属于非常规天然气资源,往往以吸附、游离、溶解等多种形式存在,页岩气的形成和富集有着自身的特点,往往分布在盆地内厚度较大、分布广的泥页岩地层中。与常规天然气相比,页岩气开发具有开采寿命长和生产周期长的优点,大部分产气页岩分布范围广、厚度大,且普遍含气,这使得页岩气井能够长期地以稳定的速率产气。

1.1 国内外页岩气勘探开发现状

页岩气正获得全球范围的认同,其资源勘探和开采已引起越来越多国家和企业的关注。据《21 世纪经济报道》,页岩气产量占北美天然气产量的比重已从 2006 年的 1% 升至 2010 年的 17%,预计到 2030 年这一比重将升至 50%。能源跨国巨头相继参与美国页岩气开发,2009 年 12 月,埃克森美孚以 410 亿美元收购了美国 XTO 能源公司,正式拉开了石油巨头角逐页岩气开采的序幕。2010 年 1 月,法国的道达尔石油公司以 8 亿美元购买了美国切萨皮克能源公司在巴尼特页岩区的 1/4 资产,还将为切萨皮克能源公司的钻井及设备改造提供 60% 的资金支持;同年 5 月,英国天然气公司以 9.5 亿美元收购了美国 EXCO 公司在阿巴拉契亚盆地 2 650 km² 区域内一半的页岩气资产;5 月底,英荷壳牌公司以 47 亿美元收购了得克萨斯州南部伊格尔福德地区 1 010 km² 页岩气的开采权;7 月,波兰宣布参加美国页岩气的开采项目。近日,全球最大的矿产企业必和必拓公司也宣布,将斥资 47.5 亿美元收购位于美国阿肯色州的一处页岩气项目,并称这项收购标志着该公司进入美国页岩气市场。

与此同时,能源公司也在研究开发欧洲的页岩气资源。2010 年 3 月,俄罗斯联邦国家杜马能源委员会举行了“页岩气资源开发前景”的圆桌会议,主题是如何应对“美国依靠开发页岩气新技术,使其天然气产量超过俄罗斯,成为世界第一天然气生产大国并改变世界天然气市场的现状”。俄罗斯专家认为,美国掌握了开采页岩气的技术并一跃成为世界第一产气大国,对俄罗斯构成了挑战。印尼从 2010 年起开始开发页岩气资源。

全球页岩油气资源非常丰富。据美国《油气》杂志援引专家们的预测,全世界页岩油储量约为 $(11 \sim 13) \times 10^{12} \text{ t}$,远远超过 4 000 多亿吨的世界常规石油储量。其中页岩气在全世界资源量储量大约为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是常规天然气资源量的两倍。

我国页岩气在储量方面并不匮乏,资源量远远超过常规天然气。据专家估算,我国页岩气可采资源量约 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在四川、鄂尔多斯、吐哈、塔里木和准噶尔等含油气盆地。

我国的页岩气开发还处于初级阶段,目前的投资规模还不是很大,但可以肯定的是,接下来,中石油、中石化等国内主要石油企业都会加大对页岩气的开发力度。中国石油经济技术研究院专家指出,对于企业来说,页岩气开采技术也是很大的难点。因此,与世界能源巨头合作

页岩气项目已成为目前我国能源巨头的主要选择。

2009年11月,中石油与英荷壳牌公司(以下简称壳牌)合作开发的中国首个页岩气项目“富顺—永川区域页岩气项目”在成都启动,双方联合对页岩气的勘探与开发潜力进行了评价研究,区域合作面积达3 818 km²,2010年12月28日,中石油发布公告称,与壳牌合作的第一口页岩气井于22日顺利开钻。壳牌的首席执行官傅赛表示,如果壳牌目前正在中国进行的页岩气勘探作业被证实是成功的,则壳牌打算在今后5年间每年向中国的页岩气投资10亿美元。前不久,法国能源巨头道达尔公司首席执行官马哲睿宣布,将与中石油联手在中国内蒙古地区投资20亿美元,建设一个非常规天然气生产项目,预计在2012年或2013年投产。

中石化宣布,中石化勘探南方分公司成功对元坝9井自流井组东岳庙段页岩气层实施大型压裂测试,探明页岩气日产量为1.15万m³。

2010年10月,中国海洋石油总公司(以下简称中海油)宣布,其全资子公司中海石油国际有限公司将购入美国切萨皮克公司鹰滩页岩油项目1/3的权益,面积达2 428 km²。这是中国油企首次对美国陆上能源进行大规模投资,也是中海油首次涉足页岩气资源领域,被称为中海油“探路”美国页岩气资源开发。

2010年国土资源部启动川南、川东南、黔北、渝东南以及渝东北5个重点目标区的先导性实验工作,共优选出20个页岩气富集有利区,估计总资源量为 $8.50 \times 10^{12} \sim 14.72 \times 10^{12}$ m³。

2011年将全国划分为上扬子及滇黔桂区、中下扬子及东南地区、华北及东北区、西北区、青藏区5个大区,在全国范围内,对我国页岩气资源潜力进行总体评价。

目前,国土资源部与国家能源局正在组织编制页岩气专项发展规划,研究制定相关政策。国土资源部已正式启动“全国页岩气资源潜力调查评价与有利区优选”工作,拟通过3年时间对我国陆域页岩气资源潜力进行系统评价。到2014年提交一批页岩气有利区和勘查目标区,解决页岩气重大地质问题和关键技术方法,形成页岩气资源技术标准和规范。据国土资源部预计,到2020年,国内页岩气年产量将达到 $150 \times 10^8 \sim 300 \times 10^8$ m³,2030年达到 $1\ 100 \times 10^8$ m³,届时页岩气将占到中国天然气总产量的25%。中国石化北京化工研究院副总工程师张明森说:“页岩气可能成为未来中国重要的持续资源,可供使用100年或200年。如果这一预言得以实现,国内能源供应格局将发生重大转变。”

对于中国来说,最紧迫的问题是页岩气开采技术问题。据张金川介绍,中国的大陆面积主体都是沉积岩,“有沉积岩的地方,就可能有页岩,有页岩就可能有页岩气,所以分布面积很广”。页岩气的投资前景甚好。张金川认为,从地质角度来说,页岩气的投资风险相对可控性强,在某一特定区域内,含气特点、条件和含气量等相对容易估算,“我们对很多地方都已经建立出模型,基本都有一个估算方法,应该是八九不离十的东西”。对于大力发展页岩气,张大伟说,中国还存在技术、政策、体制等一系列限制。一位石油行业资深专家告诉《财经国家周刊》记者“中国在发展页岩气上需要突破一系列障碍。”例如,如何快速发展技术,打破垄断,制定适当的鼓励和补贴政策以及完善管网等配套的基础设施建设等。

尽管看起来困难重重,但对于页岩气能够改变国家能源结构这一良好前景,中国已将页岩气发展规划提上日程。张大伟说,“到2020年,我们要在全国优选出50~80个有利目标区和20~30个勘探开发区;页岩气可采储量稳定增长,达到 1×10^{12} m³;页岩气产量快速增长,达到常规天然气产量的8%~12%,页岩气成为中国重要的清洁能源资源。”

川东南—湘鄂西地区作为我国页岩气开发最有潜力地区之一,与美国东部地区页岩气发

育盆地具有相似的地质条件,均是古生代海相沉积背景下形成的富含有机碳页岩,后期大幅度的构造抬升、富含腐泥型干酪根的泥/页岩直接产气及高演化程度下的原油裂解气导致盆地具有页岩气勘探的良好前景。与北美地区不同的是,川东南—湘鄂西地区经历了多期构造运动,且在喜马拉雅期遭受了强烈的构造变形,形成了一系列北东向“隔挡”式褶皱,使得本区大部分常规油气藏遭受毁灭性破坏。虽然页岩气具有一定的抗破坏能力,但在对页岩气勘探潜力的评价中,不能不考虑断裂发育程度、向斜的宽缓程度等构造变形特征,因此,开展构造特征与页岩层系勘探潜力研究具有十分重要的意义。

1.2 页岩气成藏的主控因素

页岩气藏是一种区域性连续聚集型非常规天然气藏;页岩具有一定厚度、有机质含量丰富、处于生气窗演化阶段以上、天然裂缝发育、位于构造低部位或盆地中心等是页岩气藏形成的主要条件;自生自储、不间断供气与连续聚集、未经运移或极短距离运移等是页岩气藏形成机理的重要特征;页岩有效厚度、有机碳含量、基质孔隙与天然裂缝发育程度是页岩气富集成藏的关键因素。控制页岩气成藏的因素则主要有内部和外部地质因素。

1.2.1 内部因素

内部因素是指页岩本身的因素,主要包括有机质类型及含量、成熟度、裂缝、孔隙度和渗透率、矿物组成、厚度、湿度等,其中内部因素中的有机质类型和含量、成熟度、裂缝以及孔隙度和渗透率是控制页岩气成藏的主要因素。正确评价这些参数的作用及其影响对合理评价页岩气藏具有重要意义。

有机质类型及含量 有机碳含量是页岩气聚集成藏最重要的控制因素之一,不仅控制着页岩的物理化学性质,包括颜色、密度、抗风化能力、放射性和硫含量,也在一定程度上控制着页岩裂缝的发育程度,更重要的是控制着页岩的含气量。福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏生产表明,气体产量大的地方,有机碳含量对应也高,有机碳含量和气体含量有很好的正相关关系。同时干酪根类型也影响着气体含量、赋存方式及气体成分。不同类型的干酪根,其微观组分也不一样,微观组分也是控制气体含量的主要因素。关于页岩气藏形成的有机碳下限值,很多学者都进行过研究。Jarvie 等(2009)认为,有机碳含量和热成熟度是决定页岩产气能力的重要变量。Schmoker(2009)认为产气页岩的有机碳含量下限值大约为 2%。下限值说法不一,认为 2%较好。

成熟度 美国主要产页岩气盆地的页岩成熟度变化较大,从未成熟到成熟均有发现。张金川等(2008)指出,页岩气的成因包括生物成因、热成因以及两种成因的混合。根据页岩成熟度可将页岩气藏分为对应的 3 种类型:高成熟度页岩气藏、低成熟度页岩气藏以及高低成熟度混合页岩气藏。低成熟度页岩气藏主要是生物成因,基本上为埋藏后抬升,经历淡水淋滤而形成的二次生气;高成熟度的页岩气藏是由高成熟度条件下原油裂解形成的。成熟度最高的页岩只有干气,次成熟的页岩可能含有湿气,成熟度再低的页岩只有液态石油。

裂缝 裂缝有助于页岩层中游离态天然气体积的增加和吸附态天然气的解析。裂缝的发育程度是决定页岩气藏品质的重要因素。一般来说,裂缝较发育的气藏,其品质也较好。实际上,裂缝对页岩气藏具有双重作用:一方面裂缝为天然气和地层水提供了运移通道和聚集空

间,有助于页岩总含气量的增加。页岩具有非常低的原始渗透率,如果天然裂缝发育不够充分,就需要进行压裂来产生更多的裂缝,以使有更多的裂缝与井筒相连,为天然气解析提供更大的压降和面积。另一方面,如果裂缝规模过大,可能导致天然气散失。

目前普遍认为,在相同的力学背景下,有机碳含量、石英含量等是影响裂缝发育的重要因素。阿巴拉契亚盆地的钻井表明,滑脱及其相关的伸展和收缩裂缝带更倾向于在富含干酪根的黑色页岩中发育,而不是在夹层的灰色页岩和粉砂岩中发育。黑色页岩通常比其附近灰色页岩的裂缝发育程度较高,裂缝频率也较高,并且裂缝通常在岩性界面处终止。因此,裂缝发育程度与页岩层厚度存在一定的相关性。石英含量的高低也是影响裂缝发育的重要因素,富含石英的黑色页岩段脆性较强,裂缝的发育程度比富含方解石且塑性较强的灰色页岩强烈。Nelson(2009)认为,除石英之外,长石和白云石也是黑色页岩段中的易脆组分。因此,在相同的构造背景下,预测页岩的岩性、颜色、厚度以及矿物成分是准确判断裂缝发育程度的基础。

孔隙度和渗透率 在常规储层分析中,孔隙度和渗透率是储层特征研究中最重要两个参数,这对页岩气也同样适用,孔隙大小直接控制着游离态天然气的含量。在阿巴拉契亚盆地 Ohio 页岩和密执安盆地 Antrim 页岩中,局部孔隙度可高达 15%,游离气体积占孔隙总体积的 50%。渗透率是判断页岩气藏是否具有开发经济价值的重要参数。页岩的基质渗透率非常低,平均喉道半径不到 $0.005\mu\text{m}$,但随裂缝的发育而大幅度提高,储层“总”渗透率与储层中天然裂缝系统的发育程度是否一致通常是由测井和生产数据分析来确定。由于页岩具有低渗透率,因此,就需要产生大量的裂缝(人工压裂)来维持商业生产。

矿物组成 大多数页岩含有很多的黏土,然而 Barnett 页岩的黏土含量并不高,在寻找 Barnett 型页岩气藏中,勘探工作者必须寻找可以被压裂的页岩,这些页岩的黏土含量小于 50%,能被成功压裂。X 射线衍射分析表明:构成 Antrim 页岩的主要矿物组成为石英、黏土和碳酸盐,次要矿物组成为黄铁矿、干酪根、长石、高岭石和绿泥石。气体的生产速度依赖于裂缝的发育程度,而裂缝发育程度取决于页岩的矿物组成,故页岩的矿物组成在很大程度上影响页岩气的产能。例如富含硅的页岩比富含黏土的页岩易于压裂,同等情况下可以采出更多的天然气。矿物组成分析能对页岩压裂提供进一步的资料,同时也能为钻井和完井提供参考。

厚度 页岩厚度控制着页岩气藏的经济效益。根据页岩厚度及展布范围可以判断页岩气藏的边界。到目前为止,还没有明确提出具有经济价值页岩气藏的页岩厚度下限。密执安盆地 Antrim 页岩气藏页岩的最小厚度大约为 9.1m;福特沃斯盆地的 Barnett 页岩气藏为 30.5 m 的页岩厚度已被证明具有商业开采价值。页岩厚度可由有机碳含量的增大和成熟度的提高而适当降低。

湿度 页岩的湿度直接影响着吸附态天然气的含量。岩石润湿后,因为水比气吸附性能好,从而会占据部分活性表面导致甲烷吸附容量降低。湿度往往随页岩成熟度的增加而减小,故成熟度高的页岩其含气量可能更高。密执安盆地 Antrim 页岩气藏、伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏以及阿巴拉契亚盆地北部湖区 Ohio 页岩气藏的湿度均较大,含气饱和度较低,而演化程度较高的阿巴拉契亚盆地南部 Ohio 页岩气藏、圣胡安盆地 Lewis 页岩气藏和福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏(平均含水饱和度为 25%)则含水较少,含气量较高。含水量高将降低气体的生产速度,导致处理产出水的麻烦,所以有利的页岩区应该是产水较少的区域。

1.2.2 外部因素

深度 页岩气藏的深度变化较大。深度不是页岩气藏发育的决定因素,关键问题是该页岩气藏是否具有商业开发价值。随着科技和工艺的进步,埋藏更深的页岩气也将得到开发。

温度与压力 温度主要影响着吸附气体含量,温度增高,则气体分子的运动速度加快,降低了吸附态天然气的含量,这也是福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏中吸附气含量较少的原因之一。一般情况下,随压力的增大,无论以何种赋存方式存在的气体,含量都呈增大趋势,但压力增大到一定程度以后,含气量增加缓慢,因为孔隙和矿物(有机质)表面是一定的。前者控制游离态气体含量,后者控制吸附态气体含量。当压力较低时,吸附态气体含量相对较高,如圣胡安盆地 Lewis 页岩气藏具有异常低地层压力梯度。

1.3 研究的意义及研究区构造位置

我国南方地区的油气勘探开发已有 100 多年历史,但从未进行过以页岩地层为目的的页岩气勘探开发工作,其中专门针对页岩层构造特征和演化特征的研究几乎为空白。通过与国外页岩气对比,我国南方海相地层发育区特别是川东南、湘鄂西及周缘地区具有优越的页岩气形成的地质条件和丰富的页岩气资源,有望成为我国油气资源的重要战略接替新领域。目前,我国页岩气勘探开发刚刚起步,对页岩气的基本认识还存在许多误区,对页岩层中勘探开发有利区域或评价指标或影响因素也不明确。需要尽快提高对页岩气资源的正确认识,加强资源评价工作,评价优选有利勘探开发区带及目标,存在的主要问题突出表现在以下几方面。

(1)针对川东南—湘鄂西地区下古生界两套主要页岩发育层系(下寒武统牛蹄塘组、晚奥陶世五峰组—下志留统龙马溪组)原始沉积特征与赋存状态需进一步加强研究。

(2)川东南—湘鄂西地区的构造特征及演化较为复杂,目前还缺乏针对研究区泥页岩目的层的构造图、厚度图等基础图件,同时,多期构造演化阶段对页岩气的分布是否有影响或具体影响程度需继续研究,而下古生界页岩在油气生成之后经历多次构造挤压、抬升改造,是否会导致泥页岩出现脱吸现象或哪些因素导致脱吸也需进一步研究。

(3)国内缺乏对页岩气勘探的成功实例,类比国外页岩气分布的主控因素,在该区较为复杂的构造特征及演化背景下是否合适,还有待深入研究,即对川东南—湘鄂西地区有利于页岩气赋存的条件、主控因素不清。

针对这些存在的问题,开展川东南—湘鄂西地区构造特征与页岩气勘探潜力的研究工作显得尤为重要。通过研究区构造特征分析,进一步深化对南方页岩气的基本地质条件的认识,初步建立适合南方地质背景的页岩气评价指标,对南方中、古生界页岩气的油气资源潜力进行初步摸底,探索南方页岩气总体勘探思路,从而加快页岩气的勘探开发步伐,形成规模资源。

川东南及湘鄂西地区横跨黔、湘、鄂等省,大地构造位置位于中—上扬子地块东南部湘鄂西褶皱带和川东南构造带(图 1-1),与江南—雪峰构造带北缘毗邻。

川东南及湘鄂西地区分布的震旦纪—中三叠世的海相层序中,黑色页岩层数多、厚度巨大,后期构造作用改造频繁、强烈,黑色泥、页岩广泛出露于地表,其中寒武系牛蹄塘组、奥陶系五峰组—志留系龙马溪组泥页岩有机质丰度高、干酪根处于成熟或过熟阶段,结合美国东部地区页岩气形成的地质条件进行初步对比,判断研究区上述两套页岩赋存有丰富的页岩气,因而

是开展页岩气地质研究及勘探开发生产的有利层位。但由于研究区页岩层经历了漫长的地质演化过程,且区域地质背景复杂、构造破坏严重,不仅使得页岩排烃经历二次运移后形成的油气藏难以保存下来,而且使得赋存于页岩中的页岩气在平面上分布极不均衡,因此,针对目的层开展构造及成藏等研究将有助于指出页岩气有利赋存区域,开拓新的油气勘探领域。

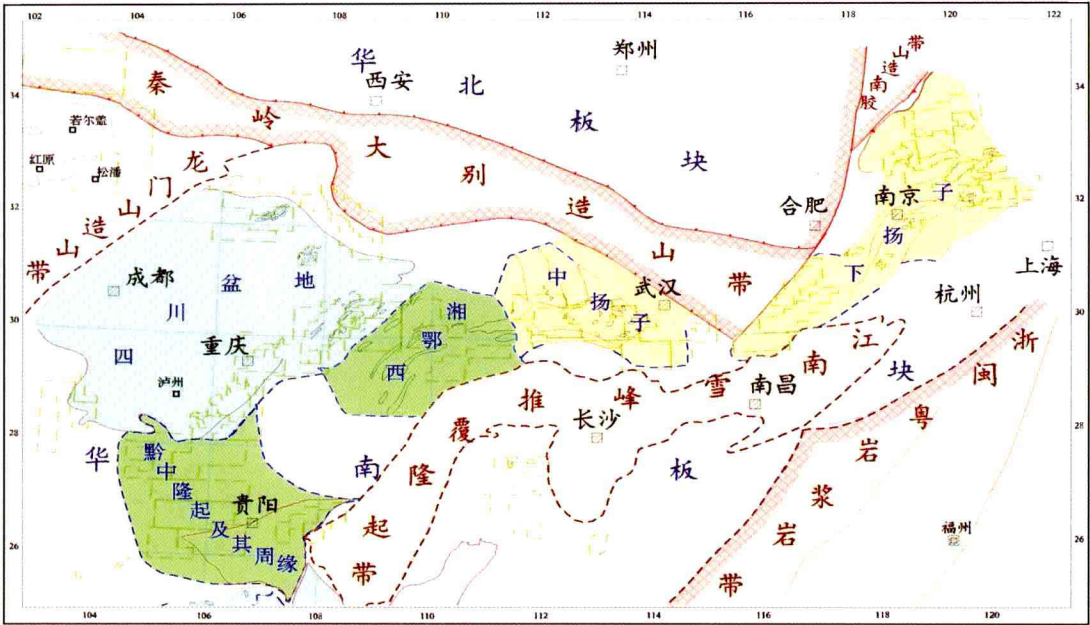


图 1-1 川东南—湘鄂西构造位置图
(据中石化江汉油田分公司)

1.4 采用的主要技术

采用现代构造解析技术,在充分利用现有地质、地球物理资料的基础上,充分利用地震资料,辅以地面路线调查,样品测试分析,建立研究区海相地层区域构造格架,以构造及盆地演化分析为主线,充分吸收和应用盆-山耦合、逆冲推覆等现代构造理论和技术方法,开展构造几何学、运动学及动力学研究,深入研究川东南—湘鄂西地区海相构造地质结构及其形成、展布与演化特征。结合研究区页岩纵、横向展布规律和与已知成功页岩气勘探区构造特征及演化的类比,指出页岩气勘探有利区带。项目技术实施方案如图 1-2。

1.5 主要研究内容

1.5.1 区域地质结构、构造样式及展布特征研究

(1) 基底结构及展布特征研究。充分利用非地震资料及地面露头资料,结合前人的研究成果,研究基底构造的结构和展布特征,分析其对研究区沉积、构造发展演化的控制作用。

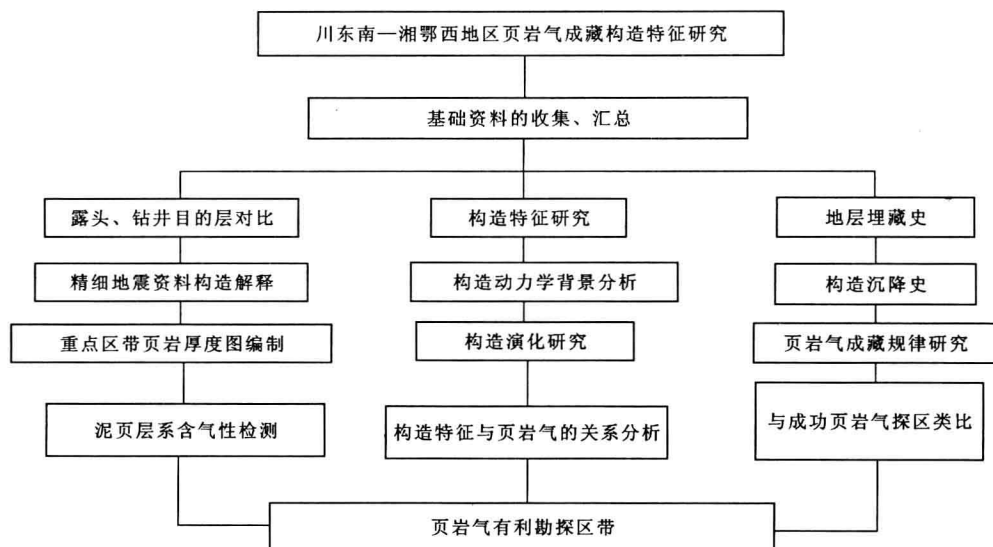


图 1-2 项目研究技术路线图

(2)区域断裂及其展布研究。在总结研究区主要断裂的地质、地球物理特征的基础上,对区内出露的重点断裂(如建始-彭水断裂、齐岳山断裂等)开展野外断裂带调查,测制断裂结构剖面 20~50km/5~10 条,补充采集断裂带样品,研究断裂结构、断裂两侧构造接触关系及构造样式的差异,分析其纵、横向展布与空间组合样式。

结合前人的断裂调查资料,对重点断裂进行系统的分析,研究断裂带主要活跃时期、活动期次、规模,分析不同构造期(印支、早燕山、晚燕山和喜马拉雅)断裂活动的应力场性质。

(3)构造样式及展布特征研究。川东南—湘鄂西地区的构造由多期不同方向的挤压应力作用形成。构造的复杂程度、隆升幅度、走向、上下变异程度等要素因其所处构造位置的不同存在差别,这些差别的存在是由受挤压应力场、边界条件及介质条件决定的。

利用地震大剖面及 MT 大剖面、地震及钻井资料,同时,补充开展研究区川东南綦江地区 1:10 万构造路线调查 100~150 km,分析局部构造的构造样式及构造在纵向上(不同构造变形层)和横向上的变形及分布特征,研究构造样式及展布特征。

各类构造样式的生成发展有其内在成因机制,本次研究试图通过挤压应力场、边界条件及介质条件等因素分析,依据构造位置的差异,分区粗浅地探讨构造样式的成因机制。

(4)区域地质结构解剖。利用区内已有的 MT 大剖面、构造地质大剖面及地震大剖面,开展地质综合解释,解剖区域地质结构;结合构造及断裂调查成果,分析区域构造格局,包括区域构造及断裂展布,建立区域构造格架,编制现今构造纲要图。

1.5.2 区域构造动力学背景及演化研究

(1)古构造分析及演化研究。利用各时期地层厚度图成果,采用沉积厚度与古地形相结合的方法,编制主要页岩层系构造顶面(下寒武统泥岩顶、下志留统泥岩顶和二叠系顶)在不同构造演化阶段(加里东、印支、早燕山等)的古构造图,研究古构造的形成、演化,重点研究加里东

期及印支期古隆起的形成演化。

(2)变形变位阶段构造演化研究。利用平衡剖面技术,对区域地震大剖面进行构造发育史研究,研究变形变位以来的构造发展演化,重点研究早燕山期和晚燕山期构造及断裂的形成、演化过程,分析构造带的形成序次及相互作用、改造的方式以及不同演化阶段的局部构造样式、类型及分布规律。

(3)区域构造动力学分析。应用地球物理及构造地质调查资料,结合前人的资料及成果,补充采集岩石薄片样品及年龄样品,深入分析盆缘造山带挤压隆升剥蚀的活动期次、强度及其对区内沉积盖层变形变位和演化的影响控制作用。

1.5.3 川东南地区页岩层系构造沉降史与地层埋藏史研究

选择地震大剖面进行区域地质结构、构造样式特征、构造演化史分析,运用构造动力学理论,研究川东南地区页岩层系构造沉降史与地层埋藏史。

根据区域地质资料及构造运动特点,选择川东南地区林1井、丁山1井等剖面和湘鄂西地区杨家坪等剖面为重点研究对象,采用合适的数学模型和应用软件,恢复印支期、燕山期及喜马拉雅期的地层剥蚀量。在此基础上,研究区内东西向二维剖面地层厚度随时间变化趋势以及地层原始沉积厚度的横向变化规律。在此研究成果的基础上,结合多种方法(构造横剖面法、图解法、沉积速率法、地质综合法等)估算盆地不同构造部位在不同时期的地层剥蚀量,编制不同时期(印支期、早燕山期)地层剥蚀量的平面展布图,研究盆地在不同构造部位纵向上构造活动的期次与构造活动的强度以及平面上不同时期构造运动的波及范围与横向变化特点等,重点研究燕山早期的构造活动特点;对古生界而言主要应用构造沉积外推法,辅之以镜质体(沥青)反射率法、伊利石结晶度法、流体包裹体法、沉积过程波动法加以确定;对于中生界陆相层系,则以镜质体反射率法为主,辅之以流体包裹体法、黏土矿物法等加以确定。

1.5.4 页岩层系构造特征、断裂分布特征及其演化研究

(1)主要页岩层系剖面观察。在川东南—湘鄂西地区震旦系—志留系地层均有出露,广泛分布于背斜核部及其两翼。在川东南—湘鄂西地区震旦系—志留系出露区,植被大都覆盖严重,且断裂构造复杂,特别是靠近背斜核部受断裂破坏而导致震旦系—志留系各岩组残缺不全,尤其是寒武系的植被覆盖及断裂破坏都比较严重;考虑到所观察剖面的连续性、代表性和实用性,并尽可能地在同一地区测齐震旦系—志留系各层系地层和取全、取准野外第一手资料。

设计对川东南地区习水县城东南的桑木背斜西段和西端的北翼观察震旦系—志留系剖面、湘鄂西地区石门县杨家坪观察震旦系—寒武系剖面和秀山县溶溪志留系剖面。

(2)页岩层系构造特征、断裂分布特征及其演化。针对选择剖面重点观察下寒武统、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩层系的构造变形特征,定性分析页岩层系自身物质组成与构造变形的关系以及页岩层系构造变形与围岩的关系。

收集下寒武统、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组泥页岩层系断裂、裂缝、裂隙发育规模(长度、宽度、产状)和分布特征。

结合区域构造研究特征,分析页岩层系构造特征、断裂分布特征及其演化。

1.5.5 页岩的展布特征研究

(1)在湘鄂西地区针对上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩、下寒武统牛蹄塘组页岩,在收集、整理、归纳、提升前人研究成果的基础上,编制重点地区的主要钻井、露头剖面泥页岩发育层段综合柱状图、钻井地层对比图、露头剖面图等,分析泥页岩纵、横向展布特征;结合上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、下寒武统牛蹄塘组沉积时期相图,编制主要层段泥页岩平面分布图、泥页岩厚度图。

(2)对川东南地区充分利用已有的地震、钻井资料,利用林1井、丁山1井进行地层层位标定,重点对下寒武统、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组泥页岩发育层段进行构造解释,编制页岩层系顶面、底面构造图,编制页岩层系厚度图,开展页岩的展布特征研究。

1.5.6 研究构造特征及构造演化与页岩气形成条件的关系

在充分收集美国东部页岩气勘探区构造资料的基础上,进行构造特征及演化的类比研究,分析异同点,总结构造特征及演化与页岩气形成条件的关系。

(1)在沉积、古构造、盆地后期叠加等研究的基础上,分析原型沉积背景及其多期构造活动对页岩气形成条件的控制作用,尤其是古构造隆升、剥蚀作用对页岩气成藏地质条件的影响。

(2)在研究区构造变形变位和构造演化研究成果的基础上,分析印支期以来构造变形变位演化过程中的页岩气地质响应。

1.6 成果与认识

(1)湘鄂西区块总体构造格局以北东—北东东向为主,局部出现东西向构造,从西往东由北东—北东东向过渡到东西向,明显反映了受到江南古陆的作用,由南往北逐步呈弧形分布。

(2)川东南可分为两个构造区,一个是良村—赶水—涪陵—黄泥塘的北东向褶皱带,另一个为研究区天堂坝至綦江地区的北西向褶皱带。两个构造区均受控于齐岳山断裂,齐岳山断裂具左旋性质,北段逆冲位移规模大,形成良村—涪陵—黄泥塘北东向褶皱带,南端位移小,形成川南东西向构造带,它们的构造转折带则构成天堂坝—綦江的北西向构造带。

(3)川东南、湘鄂西地区的地层埋藏史具有埋藏期长、抬升期短、早期沉降、晚期抬升的特点。

(4)川东南—湘鄂西地区构造复杂,是一个多种类型的构造复合叠加和联合作用的地区。以构造的形变特征、变形强度、主要断裂的性质、褶皱类型作为依据,结合主要逆冲断裂,将川东南—湘鄂西地区划分为6个一级构造单元、18个二级构造单元。

(5)下寒武统牛蹄塘组分布于整个研究区,仅在东南部见有小范围的剥蚀。总体上看,下寒武统南高北低,海拔最高处为400m,部分地区甚至出露地表,剥蚀殆尽。在西北处,整体呈现为由东南向西北倾斜的斜坡,构造海拔超过-4000m,南薄北厚,南部较薄部位的厚度普遍在50~200m,在西北斜坡带上厚度大部超过200m,最厚处超过500m。厚度最大的部位在湘鄂西褶皱带上,彭水—黔江—咸丰—鹤峰—五峰区域以及酉阳—桑植区域厚度均较大,普遍大于300m,最厚处在咸丰地区,超过1000m。

(6)川东南—湘鄂西地区牛蹄塘组主要为厚层黑色页岩,属深水陆棚沉积。牛蹄塘组下部

为黑色碳质页岩,中上部为黑色碳质页岩夹灰绿色砂质页岩,底部为黑色硅质页岩、硅质岩夹黑色磷块岩,与下伏灯影组和上覆明心寺组均系整合接触。

(7)上奥陶统一志留统(五峰组—龙马溪组)主要分布于研究区西部及北部,东南部分地区发育北东向隔挡式皱褶,并大量出露,遭受剥蚀。东南部各隔挡式向斜区域的埋深相对较浅,埋深大多在 2 000m 以内,西北斜坡区的埋深大多在 3 000~5 000m 之间,最深处超过 6 000m。

(8)志留系在川东南—湘鄂西属稳定的浅海台地—陆棚相碎屑岩—碳酸盐岩沉积。下志留统龙马溪组的主要岩性为一套灰黑色泥页岩、碳质页岩、硅质岩—黄绿色泥页岩、砂质页岩及粉砂岩,产笔石,是主要的烃源岩。

(9)页岩的地球物理特征表现为高伽玛(γ)、低密度、高声波时差,与上下围岩具有明显的波阻抗差。在地震剖面上,页岩的顶、底界面表现为强振幅、长连续,页岩内部反射为弱振幅。地震属性上表现为较大的反射强度、相位连续、较低频率。

(10)根据野外样品所测的镜质体反射率,整体上、下寒武统牛蹄塘组和上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组的 R_o 值都在 2.0% 以上,达到了干气生成阶段。川东南—湘鄂西下寒武统大部分地区的 R_o 达到 3.0% 以上,显示这一时期的有机质演化进入过成熟阶段,即进入生成干气阶段。五峰组—龙马溪组烃源岩有机质的成熟度明显比上寒武统的低, R_o 基本为 1.0%~2.0%,有机质处在生成油和湿气阶段。

(11)川东南、湘鄂西地层埋藏史都属于早期沉降、晚期抬升的类型,相对而言,川东南地区沉降期长、抬升期短,而湘鄂西地区沉降期短、抬升期长。川东南地区五峰组—龙马溪组烃源岩已达到过成熟阶段,成熟度为 2.0%~4.0%,而川东南地区下寒武统牛蹄塘组烃源岩基本也达到过一高成熟阶段,以生成干气为主,但五峰组—龙马溪组烃源岩成熟度为 1.5%~2.5%,相比川东南而言较低,生烃潜力大。

(12)上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气勘探 I 类有利区有两大块,总面积超过 5 000km²。第一块位于黔江—宣恩一带,包括湘鄂西 II 区块的东南角,其内的构造主要为翟河坝—大集场向斜、桑柘坪向斜,其面积可达 4 435km²;第二块位于道真县一带,其内构造主要为道真向斜。

(13)下寒武统牛蹄塘组页岩气勘探 I 类有利区带有两块,面积为 12 625km²。第一块为建始至宜昌一带,面积为 6 400 km²,其内的构造主要为马家湾向斜、蛇口向斜、支井河向斜等;第二块为务川—沿河县以北,面积为 6 200 km²,其内构造主要为黄郎坪向斜、龚滩向斜、高山石朝复向斜、红坳向斜等。