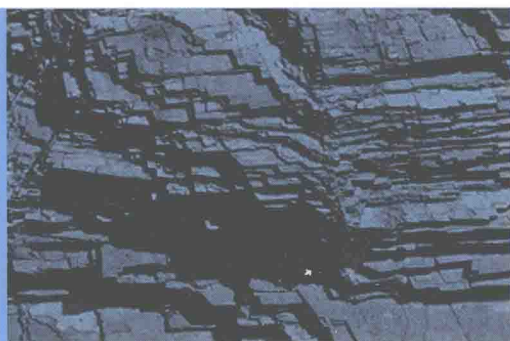


中上扬子地区

震旦系—志留系富有机质页岩 岩相古地理及页岩气资源潜力评价

胡明毅 胡忠贵 邱小松 邓庆杰 著



 科学出版社

中上扬子地区震旦系—志留系富有机质页岩 岩相古地理及页岩气资源潜力评价

胡明毅 胡忠贵 邱小松 邓庆杰 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

富有机质页岩时空展布和页岩气资源潜力评价是页岩气勘探开发的关键基础地质问题。本书利用大量露头剖面、钻井资料和测试分析资料系统阐述中国南方中上扬子地区陡山沱组、牛蹄塘组、五峰组—龙马溪组等富有机质页岩层段沉积相及岩相古地理特征,探讨该区页岩气储层特征及非均质性、有机地球化学特征、保存条件等,提出页岩气资源潜力评价的指标体系和评价标准,计算页岩气资源量,优选页岩气有利富集区块。

本书资料翔实,论述深入,可供从事页岩气勘探开发的研究人员参考,也可供高等院校地质专业的师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

中上扬子地区震旦系—志留系富有机质页岩岩相古地理及页岩气资源潜力评价/胡明毅等著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050507-1

I. ①中… II. ①胡… III. ①扬子板块-震旦纪-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 269269 号

责任编辑: 闫 陶 何 念/责任校对: 董艳辉

责任印制: 彭 超/封面设计: 苏 波

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>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16

2016 年 11 月第 一 版 印张: 11 3/4

2016 年 11 月第一次印刷 字数: 278 000

定价: 109.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

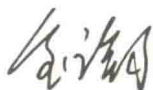
序

石油和天然气是关系国家安全和国民经济发展的重要能源。随着我国国民经济的快速发展,对石油和天然气等能源的需求越来越大。近年来我国石油对外依存度已高达 50% 以上,且这一比例将持续加大。目前我国大多油田勘探开发已进入中后期,在现有理论认识水平和技术条件下,常规油气的储量和产能不可能有大的突破性增长,因此加快和加速寻找新的非常规油气资源成为我国能源工业发展的首要任务。“十二五”期间,国土资源部以及中石化、中石油和中海油都加快了非常规油气资源潜力评价和勘探开发的进程。通过对国内外地质条件和大量勘探实例对比分析表明,中国南方中上扬子地区海相富有机质页岩资源潜力巨大,该区是我国非常规油气资源中最具勘探前景的地区之一。尽管如此,由于中上扬子地区海相富有机质页岩演化程度高,后期构造改造强烈,其页岩气资源潜力评价和区带预测存在诸多理论和技术难题亟待解决,具体包括以下几个方面的问题:①富有机质页岩的时空展布问题;②高演化程度海相富有机质页岩成藏条件;③复杂构造改造区的页岩气保存条件;④高成熟海相页岩气资源量潜力评价和区带优选。上述问题是制约中国南方中上扬子地区海相富有机质页岩气勘探开发前景的关键科学问题。

在上述背景条件下,胡明毅教授领导的科研团队近年来在国土资源部、油田企业和非常规油气湖北省协同创新中心等单位的支持下,围绕中国南方中上扬子地区海相富有机质页岩时空分布与非常规资源潜力评价、区带预测中的关键科学技术问题开展了深入研究,取得了有新意的基础性研究成果:①系统编制了中上扬子地区富有机质页岩岩相古地理图,揭示了富有机质页岩时空分布规律,明确指出深水陆棚硅质和碳质页岩为富有机质页岩发育的有利相带,为中国南方海相页岩气资源潜力分析和选区评价奠定了基础;②阐明了海相页岩富有机质页岩储层发育特征,指出中国南方高成熟海相页岩气储层以有机质孔隙为主,有利页岩储层位于海侵体系域和早期高位体系域,揭示了页岩气储层的纵向非均质性特征;③提出了复杂构造区“整体-动态-层次”页岩气保存条件的评价思路,立足于断裂强度和顶底板封闭性,构建了从宏观保存条件到微观保存标志两个层次的评价体系与标准;④建立了适合中国南方高成熟海相页岩气资源评价的指标体系和评价标准,优选了页岩气有利富集区块,对我国南方海相页岩气勘探开发实践具有一定的指导意义。应当指出的是,该书中所做出的各项预测还有待于勘探实践的验证,所制定的评价参数也必将随着勘探的深入而调整。

总之,该书反映了近年来中国南方海相富有机质页岩岩相古地理与非常规资源潜力评价研究的最新进展,丰富和发展了细粒岩沉积学和非常规油气地质理论。愿该书的出版,不断推动我国非常规油气地质理论创新与技术进步,不断推动我国页岩气的发现,为我国能源工业的快速发展做出更大的贡献。

中国科学院院士



2016年6月15日

前 言

随着国民经济的快速发展,我国的能源需求逐年增高,能源的对外依存度随之提高,给我国的经济发展和能源安全带来巨大的挑战。世界石油天然气工业已进入常规油气与非常规油气并重发展的年代,而且非常规油气在世界油气新增储量和产量中所占的比例越来越大,因此发展我国的非常规油气已成为石油与天然气工业发展的必然趋势和必经之路。近年来,非常规油气资源的研究在我国的学术界、工业界以及政府部门日益引起重视。基于成藏聚集机理、赋存方式等特性,非常规天然气主要包括致密砂岩气、煤层气、页岩气及天然气水合物等多种类型,天然气包括生物成因气、热解气、裂解气等类型。

页岩气作为一种非常规气藏,具有巨大的资源前景,可以有效增加我国天然气储量,页岩气相关领域的研究已经成为国内外学者研究的热点和前沿问题。页岩气是指主体位于黑色富有机质泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。其中吸附气主要吸附于干酪根、黏土矿物及孔隙表面,游离气主要赋存于微孔隙和微裂缝中,仅有少量的溶解气溶解于沥青质或石油中。天然气生成之后,在源岩层内的就近聚集表现为典型的原地成藏模式,即富含有机质的页岩,在一系列地质作用下,生成的大量烃类,部分被排出、运移到渗透性岩层中,聚集形成了构造、岩性等油气藏,其余部分仍滞留在页岩中,富集形成页岩气藏。美国和加拿大油气勘探技术相对较成熟,非常规油气尤其是页岩气已经取得了大规模的商业开发。据世界能源理事会、美国地质调查统计局等机构统计,世界页岩气的资源量为 $636.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,相当于煤层气和致密砂岩油气的总和,其主要分布在北美、中亚、中国、中东和北非、拉丁美洲、俄罗斯等地。中国页岩分布范围广,海相页岩分布于扬子、华北、塔里木地区,陆相页岩分布于四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、松辽盆地、塔里木盆地及准噶尔盆地等。2012年国土资源部油气资源战略研究中心开展了“全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选”研究,结果表明我国页岩气地质资源潜力为 $134.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源潜力为 $25.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中中国南方中上扬子地区海相页岩气地质资源潜力巨大。

近年来,国内众多学者对中国南方海相页岩气勘探开发做了大量的研究工作,结果表明中国南方下寒武统牛蹄塘组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组两套海相地层黑色泥页岩发育,具有分布面积广泛、沉积厚度大、有机质丰度高和成熟度较高的特点,具备页岩气成藏的基本地质条件,有望成为中国页岩气勘探开发的热点区域。尽管如此,由于中国南方海相页岩形成时代老,热演化程度高,一般达到过成熟阶段,形成后经历了多期强烈的构造运动改造,页岩气保存条件发生很大的变化,因此中国南方海相页岩资源潜力评价与勘探区带选择存在以下几个方面的关键技术难题:①富有机质页岩岩相古地理与时空分布;②富有机质页岩差异性成藏条件;③复杂构造改造区页岩气保存条件研究;④海相页岩气资源量潜力评价方法和页岩气有利区带预测。针对上述科学问题,笔者以中国

南方中上扬子地区富有机质页岩层段为研究目标,开展了精细岩相古地理及页岩气资源潜力评价研究,取得了一些可喜的研究成果。全书共五章。第一章阐述页岩气基本特征及国内外勘探开发现状;第二章阐述中上扬子地区震旦纪—志留纪构造背景、地层划分与对比特征及沉积演化规律,明确下震旦统陡山沱组、下寒武统牛蹄塘组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为富有机质页岩发育层段;第三章阐述富有机质页岩沉积相类型及发育特征,编制富有机质页岩层段岩相古地理图,揭示富有机质页岩时空展布,明确指出深水碳质陆棚和硅质陆棚为有利富有机质页岩相带;第四章阐述页岩气成藏条件和成藏机理,系统剖析中上扬子地区海相富有机质页岩分布特征、有机地球化学特征、储层特征和非均质性以及页岩气含气性和保存条件;第五章阐述页岩气资源潜力评价标准及有利区带优选,建立适合中国南方海相页岩气资源评价的指标体系和评价标准,明确各评价参数的赋值方法,计算中上扬子地区页岩气资源量,优选页岩气有利富集区块。

本书研究内容是作者近年来从事中国南方页岩气相关研究基础上的成果总结,本书由胡明毅、胡忠贵、邱小松和邓庆杰编写完成,汤济广参与了本书第四章第六节的编写工作,本书统编和定稿工作由胡明毅完成。博士研究生杨巍、蔡全升、黎荣和硕士研究生赵恩璋、王晓培、代龙、朱文平、周喆、王伟、王志峰、潘勇利、王振鸿、邓猛、黎祺、薛丹、杨卓伟、韩露、左洛滔、秦鹏等参加了项目资料收集整理、野外露头调查、岩心观察、室内综合研究及图件清绘工作。

感谢国土资源部油气资源战略研究中心、中石化江汉油田分公司、中海油研究总院、中石油西南油气田分公司、中国地质调查局武汉地质调查中心、非常规油气湖北省协同创新中心、湖北省科学技术厅给予的支持和帮助;感谢康玉柱院士、金之钧院士、郝芳院士、邓运华院士、李思田教授、张金川教授、于炳松教授、徐国盛教授、乔德武研究员、李玉喜研究员、潘继平研究员、吴景富教授、徐强教授、张功成教授、梁建设教授、包书景研究员、姚华舟研究员、陈孝红研究员、王传尚研究员、白云山研究员等专家在研究过程中给予的悉心指导和帮助!

在本书即将出版之际,承蒙我国著名石油地质学家、中国科学院金之钧院士欣然为本书作序,特此致谢!

由于作者的水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正!

作者

2016年7月

目 录

第一章 页岩气概述.....	1
第一节 页岩气基本特征.....	1
一、页岩气生成机理	1
二、页岩气聚集机理	2
第二节 国内外页岩气勘探开发现状.....	3
一、国外页岩气勘探开发现状	3
二、国内页岩气勘探开发现状	5
第二章 区域地质背景.....	8
第一节 区域构造特征.....	8
一、构造演化	9
二、盆地类型演化	11
第二节 地层划分与对比	13
一、震旦系地层划分和对比	13
二、寒武系地层划分和对比	15
三、奥陶系地层划分和对比	16
四、志留系地层划分和对比	18
第三节 区域沉积演化	19
第三章 富有机质页岩沉积相及岩相古地理特征	21
第一节 沉积相类型及特征	21
一、岩石类型及特征	21
二、沉积相划分及特征.....	27
第二节 典型剖面沉积相分析	38
一、陡山沱组典型剖面沉积相分析	38
二、牛蹄塘组典型剖面沉积相分析	45
三、五峰组—龙马溪组典型剖面沉积相分析	56
第三节 沉积相横向展布特征	64
一、陡山沱组沉积相横向展布特征	64

二、牛蹄塘组沉积相横向展布特征	65
三、五峰组—龙马溪组沉积相横向展布特征	65
第四节 岩相古地理特征	69
一、陡山沱期岩相古地理特征	69
二、牛蹄塘期岩相古地理特征	69
三、五峰期岩相古地理特征	71
四、龙马溪期岩相古地理特征	71
 第四章 页岩气成藏条件分析	76
第一节 页岩分布特征	76
一、页岩厚度分布特征	76
二、页岩埋深分布特征	76
第二节 页岩储层有机地球化学特征	80
一、有机碳含量	84
二、有机质类型	87
三、有机质成熟度	94
第三节 页岩储层储集特征	100
一、矿物学特征	101
二、孔渗分布特征	107
三、储集空间类型	111
四、孔喉分布特征	120
第四节 页岩储层储集非均质性	121
一、陡山沱组页岩储层非均质性	121
二、牛蹄塘组页岩储层非均质性	123
三、五峰组—龙马溪组页岩储层非均质性	125
第五节 页岩储层含气性特征	128
一、含气性	128
二、含气量	129
三、含气量影响因素	133
第六节 页岩气保存条件研究	136
一、页岩气保存条件评价思路	136
二、页岩气宏观保存条件评价	137
三、页岩气保存条件微观标志	144

第五章 页岩气资源潜力评价及有利区带优选	150
第一节 页岩气资源评价方法	150
一、页岩气资源评价方法类型及特点	150
二、页岩气资源评价方法对比	152
第二节 页岩气资源潜力评价参数选取与确定	153
一、体积法计算原理	153
二、评价单元	155
三、评价参数取值方法及赋值结果	156
第三节 页岩气资源潜力评价结果	161
一、资源分布特征	161
二、评价结果合理性分析	162
第四节 页岩气有利区带优选	163
一、页岩气储层有利区优选标准	163
二、页岩气储层有利区分布特征	168
参考文献	172

第一节 页岩气基本特征

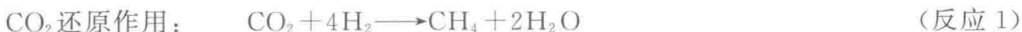
页岩气是指主体位于暗色富有机质泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集,属于自生自储、原位饱和气藏(邹才能等,2010)。页岩气成因类型可以是生物成因、热裂解成因或混合成因,其与常规天然气资源的不同之处在于它具有典型的过渡性成藏机理及“自生、自储、自封闭”成藏模式,即富有机质泥页岩既是天然气生成的源岩,也是聚集和保存天然气的储层和盖层(陈更生等,2009;邹才能等,2009;Hill et al.,2007;Jarvie et al.,2007;张金川等,2004;Curtis,2002)。

一、页岩气生成机理

国外学者通过对页岩气组分及成熟度特征分析,表明页岩气是连续生成的生物化学成因气、热成因气或两者的混合。生物化学成因气是有机质在低温条件下经微生物分解和还原作用形成的天然气,热成因气是有机质在较高温度及持续加热期间经热降解或裂解作用形成的天然气。相对于热成因气,生物成因的页岩气分布有限,主要分布于盆地边缘的泥页岩中(Martini et al.,2008,1998;Robert et al.,2007;金之钧等,2002;Hill et al.,2002;Curtis,2002)。

1. 生物化学成因气

富有机质泥页岩在低温、缺氧、缺硫酸盐的还原环境下,厌氧的甲烷菌等微生物在泥页岩孔隙中大量生长繁殖,在这些微生物的生物化学降解作用下,将沉积有机质选择性分解,生成甲烷等小分子气体。生物化学成因作用还可以通过二氧化碳的还原作用和醋酸盐的发酵作用生成甲烷。



在微生物生成甲烷的过程中二氧化碳还原作用和醋酸盐发酵作用是同时作用的。但是在不同的情况下,它们所生成的数量是不同。据同位素成分分析,大多数古代生物成因气聚集可能是由二氧化碳还原作用生成的,而近代沉积环境中两种作用都广泛存在。近地表的、未固结的沉积物可以通过上述两种作用形成生物气(Martini et al.,1998)。

2. 热成因气

热成因作用是指富有机质泥页岩随着埋深增加,温度、压力增大,页岩中大量的有机质发生降解或热裂解作用。通过有机质的热模拟试验表明,在整个热演化过程中,干酪根、沥青和原油均可以生成天然气,因此在泥页岩热演化过程中可以连续生成天然气。热演化早期,在黏土矿物的催化作用下干酪根发生降解作用,杂原子(O, N, S)的化学键断裂产生二氧化碳、水、氨、硫化氢等挥发性物质逸散,同时获得大量低分子液态烃和气态烃,该过程多次发生后有机质大量转换为石油和天然气;热演化中晚期,随着埋深增大,温度和压力不断升高,地温超过烃类物质的临界温度,C—C键大量断裂使得干酪根、沥青和原油等烃类物质,发生裂解作用产生大量的天然气。随着热演化程度的加大,热成因气在页岩中的体积分数逐渐增加。

总之,页岩气形成的本质是沉积物中的有机质在一定的温度、压力和还原环境下经生物化学作用和热裂解作用生成甲烷等烃类物质。

二、页岩气聚集机理

对页岩气来说,富有机质页岩是气源岩也是储集层,页岩气的运移、聚集始终在页岩层系内部进行,因此页岩气具无运移或者短距离运移的特点。其主要以三种方式赋存在页岩层系中,即以吸附态吸附于有机质和黏土矿物表面;以溶解态溶解于有机质及地下流体中;以游离态充填于孔隙与裂缝中(Curtis, 2002)。

1. 吸附机理及吸附气聚集过程

吸附作用是指天然气吸附于固体或者液体物质表面上的作用。吸附作用方式可分为物理吸附和化学吸附。物理吸附是由于分子间存在范德华力,它能发生多级吸附。根据能量最小原理得出固体总是优先选择能量最小一个能级范围内的分子吸附,接着进行下一能级的分子吸附。物理吸附是页岩的主要吸附方式,具有吸附时间短、普遍性、可逆性、无选择性。化学吸附作用是物理吸附作用的继续,当达到某一条件就可以发生化学键的形成和断裂。化学吸附所需的活化能比较大,所以在常温下吸附速度比较慢。页岩气的化学吸附具有吸附时间长、不连续性、不可逆性、有选择性。两者共同作用使页岩完成对天然气的吸附,但两者占主导优势的地位随聚集条件以及页岩和气体分子等的改变而发生变化。吸附作用开始很快,越来越慢,由于是表面作用,被吸附到的气体分子容易从页岩颗粒表面解析下来,进入溶解态或游离态,在吸附和解吸速度达到相等时,吸附达到动态平衡。

在天然气形成初期,主要由生物化学作用产生的天然气在范德华力的作用下就近吸附在有机质和黏土矿物表面。当达到某种特定条件下,有机质中原有的化学键和天然气分子的C—H键发生断裂,并形成新的化学键,使得天然气分子吸附在有机质内表面,这种吸附是不可逆的,该阶段为吸附气聚集阶段(Strapoc et al., 2010; Chalmers et al., 2008a, 2008b; Ross et al., 2007)。

2. 溶解机理及溶解气聚集阶段

溶解作用是指天然气在一定的物理、化学条件下进入流体的过程。溶解作用可以分为间隙填充溶解及气体水合作用溶解。间隙填充是指在一定温压条件下,石油、沥青等液态烃类分子之间存在一定的间隙,天然气分子可以填充于这些间隙之中;气体水合作用是指天然气分子与水分子接触并发生相互作用结合或者分解,当结合速率与分解速率相等时其达到一个动态平衡。

当页岩中产生的天然气在吸附位上的吸附量达到饱和时,气源岩还连续不断地生气,天然气分子就会离开有机质进入页岩层流体中,填充在流体孔隙中或者与地层水发生水合作用保存下来,该阶段为溶解气聚集阶段。

3. 扩散机理及游离气聚集阶段

扩散作用是指由于页岩层系内部的非均质引起生气的差异,在分子热运动的影响下天然气分子由浓度高的位置运移到浓度相对较低的位置,直到页岩层系孔隙内天然气达到平衡为止。

当吸附、溶解均达到饱和时,页岩层中生成的天然气充填于其内部微孔隙和微裂缝中。当页岩层内部的储集空间被天然气占据而页岩层还继续生气时,聚集于页岩中的天然气量逐渐增加。随着天然气量的增加页岩内部压力不断地增大,当内压力超过地层负荷重量的外压力时,页岩体就会产生微裂隙,游离态天然气顺着微裂隙运移至页岩层系泥质粉砂岩、粉砂岩夹层中,页岩内压力瞬间释放造成的微裂隙闭合。页岩层中仍然有足够量的有机质生成天然气,生气量又开始增加,又会产生微裂缝供天然气运移出页岩层,连续不断重复以上过程使页岩层系内部充满天然气,该阶段为游离气聚集阶段。

第二节 国内外页岩气勘探开发现状

一、国外页岩气勘探开发现状

美国是页岩气商业性开发最早的国家,拥有世界领先的勘探开发技术,在开发上取得了丰富的成果。目前,美国在阿巴拉契亚盆地(Appalachian Basin)的俄亥俄(Ohio)页岩、密歇根盆地(Michigan Basin)的安特里姆(Antrim)页岩、福特沃斯盆地(Fort Worth Basin)的巴尼特(Barnett)页岩、伊利诺斯盆地(Illinois Basin)的新奥尔巴尼(New Albany)页岩和圣胡安盆地(San Juan Basin)的刘易斯(Lewis)页岩等页岩层系中(图 1-1),已发现丰富的页岩气资源,进入了页岩气勘探开发的快速发展阶段。自 2007 年开始,美国页岩气呈现井喷式发展,生产井近 42 000 口,页岩气年产量 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$,占美国年天然气产量的 9%;2009 年美国页岩气产量接近 $876 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过我国常规天然气的年产量,页岩气快速勘探开发使美国天然气储量增加了 40%(US Energy Information Administration, 2011;徐国盛等, 2011);2013 年美国页岩气总产量已超过 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$,已占美国年天然气总产量的 1/3;

加拿大是另一个页岩气资源开发的重要国家,虽然实现了页岩气的商业开采,但仍处于初级阶段。2008年,加拿大天然气产量已占据北美天然气市场将近50%的份额,其中页岩气的商业开采起到了重要的作用。在加拿大西部地区沉积盆地中三叠系蒙特尼(Montney)页岩、泥盆系马斯夸(Muskwa)页岩和科罗拉多(Colorado)页岩段页岩气潜力巨大,据统计其页岩气储量达到 $15.8 \times 10^{12} \sim 24.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中 Montney 页岩和 Muskwa 页岩为加拿大页岩气的主要产层。另外,欧洲的英国、法国、德国、奥地利、波兰、匈牙利和瑞典等也在逐步开展页岩气勘探,根据调查统计可知欧洲的可开采页岩气达 $11.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (Faraj et al., 2004; Milici, 1993)。

二、国内页岩气勘探开发现状

中国是继美国和加拿大之后,正式开始页岩气资源勘探开发的国家。我国页岩气资源丰富,勘探开发潜力很大。据不完全统计,中国已在四川、鄂尔多斯、渤海湾、沁水、泌阳等盆地,云南昭通、贵州大方、四川建南、贵州铜仁等地区开展了页岩气钻探与水力压裂试气(董大忠等, 2011; 刘洪林等, 2010; 李建忠等, 2009)。另外,四川盆地、云南昭通地区古生界海相页岩气取得突破,四川盆地、鄂尔多斯盆地陆相页岩气见到良好显示(图 1-3, 图 1-4)。在“十二五”期间实施的《全国油气资源战略调查实施方案》中,页岩气已经被摆在了非常规油气调查的战略首选地位。工作目标为“在今后 10 年内对中国的页岩气进行全面系统的调查和评价、技术创新攻关、优选目标区和勘探基地、制定技术规范标准,力争在 2015 年全国页岩气产量达到 $65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。”

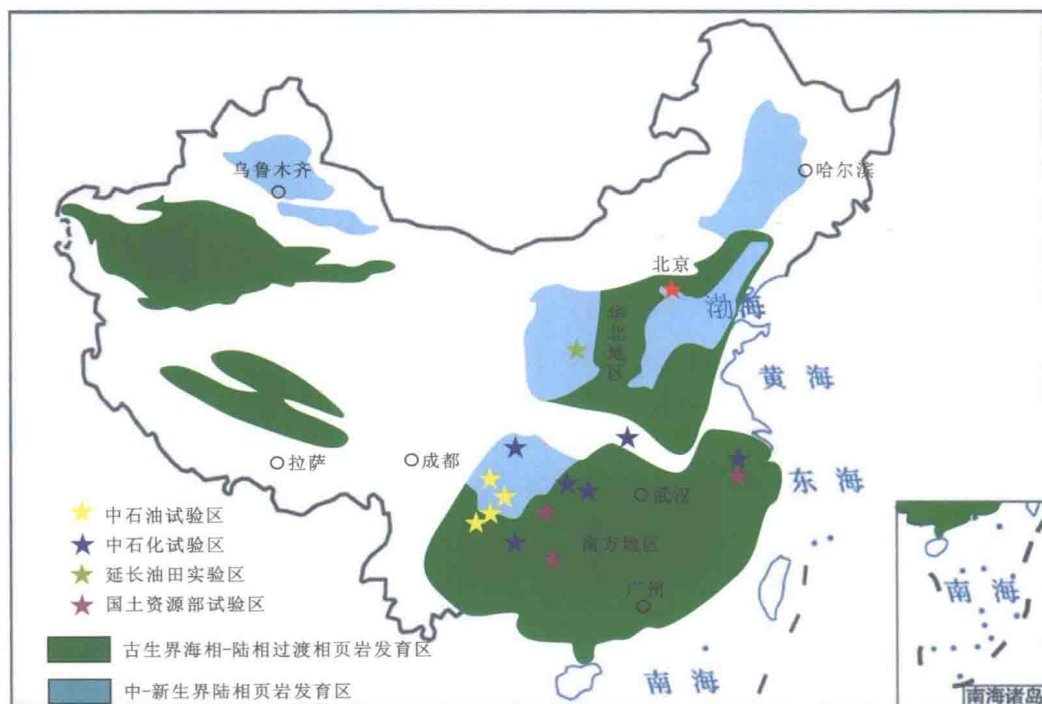


图 1-3 中国页岩气勘探形势图

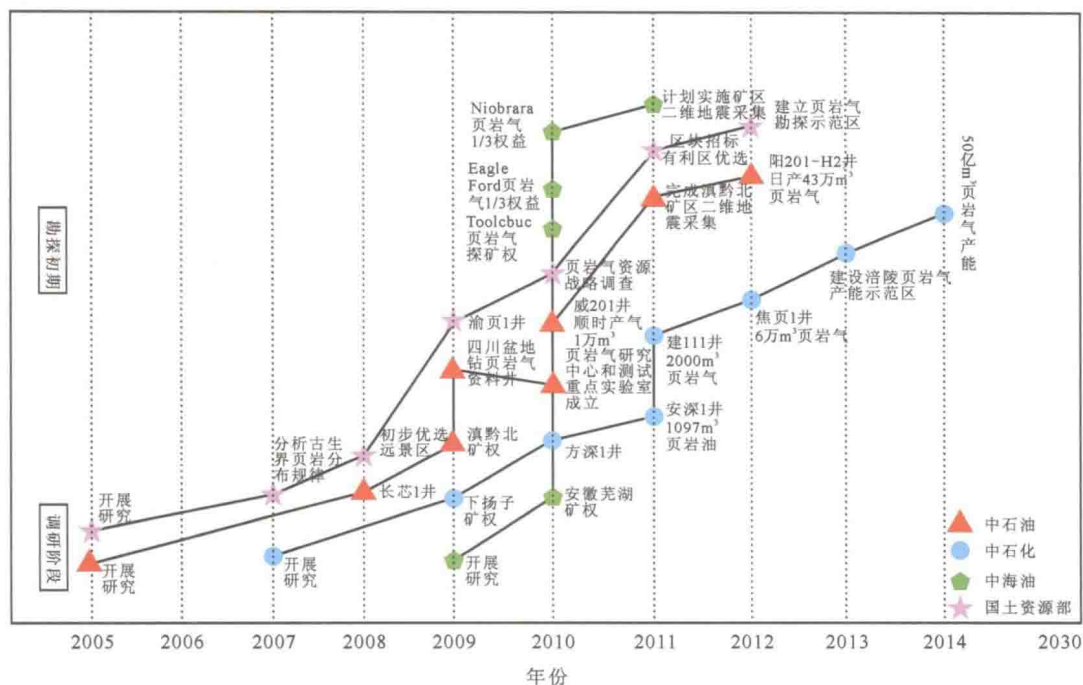


图 1-4 国内页岩气勘探进展示意图

1. 中石油和中石化在中国南方的勘探开发实践

中石化勘探南方分公司自 2001 年开始在川东南涪陵、綦江、綦江南等区块开展油气勘探工作。2006 年,针对林滩场、丁山、焦石坝等构造开展目标评价,从油气地质条件等方面对四川盆地东南缘下组合油气勘探进行了区带评价,明确了包括焦石坝、丁山、林滩场和良村等多个局部构造在内的震旦系—志留系油气有利勘探方向。随着页岩气勘探开发热潮在中国的兴起,2008 年,中石化首先从页岩气基础研究开始,开展了川东南地区与北美典型页岩气形成条件对比,常规油气探井的老井复查、复试和钻探评价工作,部分井获得了低产天然气流。2009 年,中石化与埃克森美孚、康菲等国际实力雄厚的公司开展页岩气勘探合作。2011 年,中石化勘探南方分公司论证并部署了第一口海相页岩气参数井——焦页 1HF 井,在 2012 年 11 月测试获得高产(郭旭升,2014;郭战峰等,2013,2008)。

2013 年 5 月,为贯彻落实国务院关于加强页岩气勘探开发工作的指示精神,中石化正式启动“涪陵大安寨页岩(油)气产能示范区”项目建设,拟作为中石化的首个页岩气产能建设项目。项目首选 60 km² 作为一期产能建设区,一期首批部署了 6 口评价井,由江汉油田、勘探南方分公司共同完成,其中江汉油田主要负责产能建设,勘探南方分公司主要负责勘探评价。

自焦页 HF-1 井在海相志留系龙马溪组获得高产页岩气后,这一重大的勘探突破使中石化认识到海相页岩地层真正的页岩气前景:岩性简单、有机碳含量(TOC)高、脆性矿物含量高特点,并且高的 TOC 与高的脆性矿物含量形成良好匹配。由此,焦石坝地区

已接替涪陵—大安寨成为中石化的重点区块。截至 2015 年 9 月底,以五峰组—龙马溪组为主力页岩气产层的焦石坝区块累计开钻 252 口井,气田已建成 40 亿 m^3 产能,累计产气 32 亿 m^3 。

中石油率先在蜀南威远开展页岩气开发试验,通过威 201 井、威 201-H1 和宁 201 井的钻探、压裂和试生产后,认为寒武系的筇竹寺组较志留系的龙马溪组具有好的页岩气前景。但随着先导性试验在富顺—永川、威远、长宁这三个区块的进一步展开,结果还是显示:志留系的龙马溪组较寒武系的筇竹寺组具有更好的页岩气开发前景(黄文明等, 2011)。

2. 中国页岩气勘探开发存在的问题

从前述中石油和中石化在中国南方的勘探开发实践来看,并没有像美国那样从一开始就展现出顺利的希望来验证我们的期盼,而认识的迂回还需地质指导的技术突破。虽然四川盆地与美国伍德福德(Woodford)盆地具有大致相当的纬度,但中美之间的地质条件有着巨大差异(李世臻等,2010;张金川等,2008)。

(1) 从大地构造背景来看,美国是花岗岩基底的克拉通地台,构造演化稳定,地层遭受破坏的程度低。而中国是变质岩基底,先后遭受了东西向太平洋板块、南北向印度洋板块和菲律宾板块从印支期到喜马拉雅期的多期挤压碰撞,构造形变剧烈,地层改造破坏严重。背斜顶部和向斜底部都是裂缝发育的地带,页岩气保存条件差,有利的地带仅限构造的翼部,呈条带状分布,勘探区带受限。

(2) 从地层分布、演化和保存条件来看,美国的主要页岩气层为上古生代地层,部分为中生代地层,演化程度适中。而中国南方的勘探显示下古生界地层比上覆地层具有更好的前景,但热演化程度太高,已生成的油气不容易保存。再加上后期构造改造强烈,保存条件差,残存的气量就更有限了。

(3) 尽管美国成功的开采经验可以借鉴,特别是在工程技术上,如威 201-H1 井分 11 段进行压裂,有效压裂体积达到了 4353.6 万 m^3 ,但产气量却不是很高。这就意味着中国页岩气赋存条件比较复杂,经济有效的开采必须依赖于地质综合评价,需要确定页岩气“甜点”的分布。

中上扬子地区西南以宝兴—荣经—昭觉—六盘水为界，西北以宝兴—广元—汉中为界，北部以汉中—襄樊—九江为界，东南以修水—岳阳—常德—吉首—贵阳为界。涉及滇、黔、川、渝、陕、鄂、湘和赣 8 个省市，包括东经 102°~116°，北纬 26°~33° 的广大区域，面积约为 $50 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 2-1)。中上扬子地区是我国大型的含油气叠合盆地发育区，沉积盖层发育齐全，研究区下震旦统陡山沱组到中三叠统主要为海相沉积，并以天然气丰富、碳酸盐岩沉积厚度大、裂缝型储层发育和高陡复杂构造为特色而闻名于世，具有多旋回、多层系、多烃源层、多产层、油气多期成藏的特点(陈洪德等, 2009, 2007)。

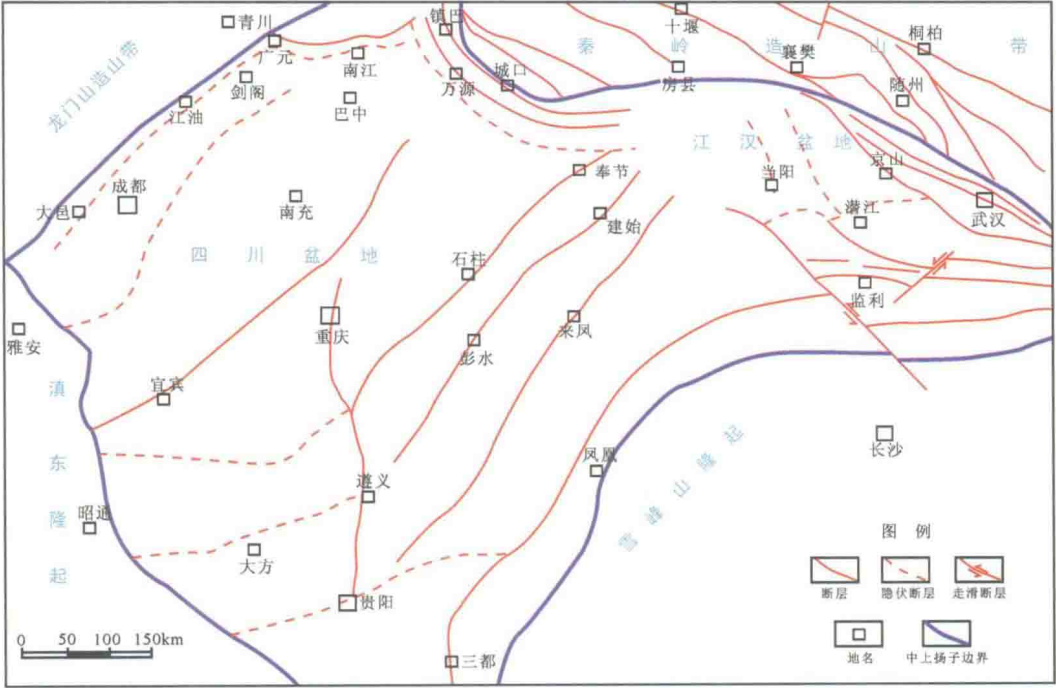


图 2-1 中上扬子地区构造位置图

第一节 区域构造特征

中上扬子地区经新元古代末晋宁运动由前震旦纪地槽型沉积转化为稳定的地台型沉积，进入了板块运动机制的克拉通盆地演化阶段，经历了加里东期、海西期、印支期、燕山