

YOUJIYEYAN GEJING YANSHIWULI

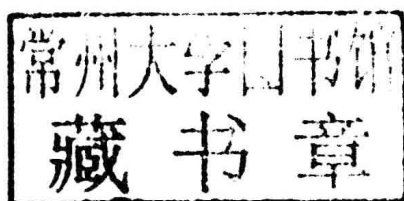
有机页岩测井岩石物理

© 谭茂金 著

石油工业出版社

有机页岩测井岩石物理

谭茂金 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书从有机页岩的地质和岩石物理特征出发,论述了其测井响应机理和特征,系统建立了测井解释理论和模型,基于测井资料研究了岩石物理建模方法和岩石力学评价技术,并结合实例进行了方法应用和效果的分析。本书在介绍新理论、新概念和新方法的同时,注重介绍了基本概念和基本方法,并融入了近年的最新科研成果。

本书适合广大测井研究人员、地质勘探人员以及高校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

有机页岩测井岩石物理/谭茂金著.

北京:石油工业出版社,2015.11

ISBN 978-7-5183-0550-6

I. 有…

II. 谭…

III. 油页岩-油气测井-岩石物理学-研究

IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 287933 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523736

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.25

字数: 300 千字

定价: 80.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

序

近年来,世界各国都在关注页岩气和页岩油等非常规油气的勘探开发。地球物理测井技术是石油行业十大学科之一,更是油气资源探测不可或缺的手段。但是,有机页岩矿物组成复杂,储集空间多样,油气赋存方式特殊,有机页岩油气测井技术面临严峻的挑战。国外页岩油气勘探实践表明,测井在有机页岩识别、生烃能力评价、储层参数计算等方面取得一些进展,并正在发挥越来越大的作用。然而,我国有机页岩测井解释理论和应用研究才刚刚开始,发表的文章也不多,理论书籍更是稀少。谭茂金教授在国家自然科学基金和中国石油科技创新基金联合资助下开展的研究迎合了当前的迫切需求,具有前瞻性。

几年来,本书作者立足页岩油气地质特点与特殊性,结合勘探需求和难点,凝练测井科学技术问题,以理论研究为根本,数值模拟为手段,岩石物理与地质实验为桥梁,较系统探索了测井响应机理与解释模型,建立的一整套测井解释理论与评价技术,可为有机页岩的地质甜点和工程甜点评价提供了准确的决策参数。据我所知,这是我国第一部系统研究有机页岩测井解释与岩石物理学的专著。作为一个工作多年的老测井工作者,我很高兴为这部专著作序。翻阅全书,我真切地感受到作者在有机页岩测井响应机理、解释理论与算法、岩石物理建模与特性分析等方面做了切切实实的探索,并取得了实实在在的进步。全书具有如下特点和亮点:

(1) 紧紧围绕有机页岩的特殊性,针对“页岩气在哪”“生烃能力如何”“储层品质怎样”这三个问题开展研究,结构清晰,内容丰富,论述严谨,方法研究与实例分析相得益彰。较系统地论述了其测井岩石物理问题与解决方案,显示出我国有机页岩测井解释与岩石物理研究的新特点,值得推荐阅读。

(2) 充分利用对比和比较的方法与研究思路,主要包括国内外含气页岩地质特征对比、测井响应特征对比、测井解释理论与最优化算法对比以及岩石物理建模方法对比,有些方法甚至是通过对比得到完善和改进的。该研究思路充分考虑不同页岩的地质特征,便于选择更适用的解释模型和评价方法,计算结果更可靠,值得推荐学习。

(3) 积极移植新方法,敢于探索新技术。提出一些新的参数预测方法、解释模型和最优化算法,在有机碳含量计算、最优化测井解释理论、径向基函数插值算法等方面创新点突出,应用效果显著。尤其是基于实验分析构建的核磁共振测井解释模型,分析过程严谨,模型构建巧妙,建议推广使用。

尤其本书作者较系统研究并优选了适用有机页岩的岩石物理建模方法,较好地解决了地

震储层预测中横波估算这一关键难题，而且，在此基础上开展的岩石弹性属性与各向异性评价恰好满足了页岩储层改造与可压裂性评价所需。这方面的研究与可贵探索开拓了测井信息应用的新领域，值得肯定。当然，本书对于考虑页岩气与页岩油的不同特点方面还有待深化完善的地方。

我相信，本书的出版必将会对我国的页岩油气测井评价技术的推广产生深远的影响。同时，希望本书作者及课题组再接再厉，把现有成果不断深化、升华和完善，为我国的页岩油气勘探事业做出更大的贡献。

中国石油学会测井专业委员会主任

陆大卫 教授

2015 年 10 月

前 言

页岩气、页岩油是一类重要的非常规油气资源，该类油气赋存的岩石为富含有机质的泥页岩，称之为有机页岩。有机页岩与常规油气赋存的砂岩、碳酸盐岩、火山岩等岩性的矿物组成不同，其储集空间复杂多样，油气赋存方式也大相径庭。因此，对有机页岩进行定性识别和定量评价面临着严峻挑战。

测井技术是沿井眼进行测量的地球物理探测技术。该技术能够沿井眼剖面测量电学、声波和放射性等地球物理数据，经处理后能够获得孔隙度、渗透率、饱和度等地层参数。测井技术具有方法多、信息量大、纵向分辨率高、连续、方便、灵敏等优势，是油气田和煤田资源探测不可或缺的手段，被喻为地质家和油藏工程师的“眼睛”。近几年来，以成像、核磁共振、阵列声波等为代表的测井新技术正在特殊油气藏和非常规油气勘探中发挥越来越大的作用。页岩气测井识别、评价及其资源量计算均可通过测井技术得以实现。但是，由于页岩油气藏的岩性和赋存类型不同于常规油气藏，又有别于煤层气和天然气水合物，现有的油气和煤田测井识别与评价理论不能照搬到页岩气层评价中。为此，迫切需要对有机页岩的测井响应机理、解释理论方法以及岩石物理学开展深入研究。

“有机页岩测井岩石物理”的含义主要包括有机页岩测井响应（Geophysical well logging）、测井解释评价（Petrophysics）与岩石物理（Rock physics）特性研究。本书着眼于上述三个内容的阐述和研究。本书共分九章，第一章主要介绍国内外页岩气勘探开发现状与测井技术研究进展，阐述了有机页岩测井岩石物理的研究内容、工作方法。第二章主要介绍有机页岩的矿物组成、储集空间、成因类型、成藏机理和富集规律等地质特征以及岩石物理特征，系统总结了国内外主要有机页岩的地质—岩石物理特征，并进行了比较和分析。第三章在介绍烃源岩的组成、物理性质的基础上，开展了含气页岩的测井响应机理和响应特征分析，并详细介绍了国内外的页岩气测井实例。第四章主要内容为成熟度和有机质丰度的评价，针对有机碳含量的各种计算方法进行了系统研究，并进行了对比和适用性分析。第五章主要内容包括测井解释模型建立、矿物含量、孔隙度、渗透率、饱和度计算以及含气量的评价。第六章主要包括有机页岩的岩石物理建模方法和岩石物理特性分析。第七章主要研究了有机页岩岩石弹性参数以及地应力参数计算方法，并对可压裂系数与脆性指数评价开展了研究。第八章介绍了前述的方法在焦石坝地区主要页岩气层的应用，并依据解释结果进行了重点分析。第九章为发展趋势和展望。第三至第八章为全书的重点和亮点。

本书是国家自然科学基金“页岩气测井响应机理与解释模型”（41172130）和中国石油科技创新基金“页岩测井响应特征与储层品质基础研究”（2011D-5006-0305）的主要研究成果，同时本书的出版也得到了地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室的资助。在本书撰写过程中，得到了中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院常务副院长孟小红教

授的大力支持和鼓励。中国地质大学（北京）测井学科带头人邹长春教授仔细审阅了书稿，提出了很多具体意见和建议。同时，中国石油大学（北京）肖立志教授，中国石油勘探开发研究院李宁教授、周灿灿教授、李潮流博士在课题的研究中提出了很好的指导和宝贵建议；中国石化石油勘探开发研究院李军教授、张松扬博士、武清钊高级工程师提供大量帮助和指导，并进行多次有益的讨论；中国石化石油工程技术研究院赵文杰教授、谢关宝博士在岩石物理实验和软件模块编写方面提供了热情的指导；中石化胜利石油工程有限公司测井公司张晋言教授、毛克宇高级工程师给予了热情的帮助和资料支持。在此对上述专家的指导和帮助表示衷心感谢！

在课题研究和本书编纂过程中，笔者指导研究生开展了大量研究工作。刘琼承担了测井响应特征、生烃能力评价和含气量评价研究，邹友龙研究了页岩矿物含量预测的径向基函数插值方法，彭骁承担了岩石物理建模方法和岩石力学参数计算的研究，王鹏开展了页岩裂缝双侧向测井评价方法研究，徐晶晶开展了有机页岩最优化解释和弹性属性分析研究，宋晓东开展了核磁共振响应方面的研究并做了大量校对工作，郭越、范璐娟、张哲涵、白泽、王黎雪、王琨、苏梦宁等研究生参与了部分图件的绘制与修改。在此一并表示感谢！

本书着眼于有机页岩的测井解释与岩石物理学的理论和方法研究，适合于测井、石油地质研究人员和地质、石油院校师生阅读参考。有机页岩测井岩石物理研究还处于不断攻关中，认识还有待于进一步深化，希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。同时，由于笔者水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正！

谭茂金

2014年11月16日于北京

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 页岩油气概述	(1)
第二节 国内外页岩气研究进展	(2)
一、页岩气勘探开发研究进展	(2)
二、页岩气测井技术研究进展	(6)
三、存在的问题	(10)
第三节 研究内容与思路	(11)
一、研究内容	(11)
二、基本思路与方法	(12)
第二章 有机页岩地质与储层特征	(14)
第一节 有机页岩地质特征	(14)
一、页岩基本特性	(14)
二、储集空间	(17)
三、成因类型	(21)
四、成藏机理	(21)
五、富集规律	(22)
第二节 有机页岩储层参数特征	(22)
一、页岩储层参数特征	(22)
二、有效储层划分标准	(24)
第三节 有机页岩特征描述与对比	(24)
一、美国含气页岩特征	(24)
二、加拿大含气页岩特征	(27)
三、中国含气页岩特征	(30)
第三章 有机页岩测井响应机理与特征分析	(32)
第一节 有机页岩测井响应机理	(32)
一、有机页岩的物理性质	(32)
二、测井响应机理	(33)
第二节 有机页岩测井响应特征与实例分析	(34)
一、有机页岩测井响应特征	(34)
二、有机页岩测井综合识别方法	(36)
三、页岩测井实例与特征分析	(36)
四、不同地区含气页岩测井响应对比	(44)
第四章 有机页岩测井生烃能力评价	(46)
第一节 成熟度指标评价	(46)
一、热成熟度指标	(46)

二、镜质组反射率	(48)
第二节 总有机碳含量测井评价方法	(50)
一、经验公式法	(50)
二、 $\Delta \log R$ 方法	(56)
三、RBF 神经网络预测方法	(58)
四、有机碳含量计算方法的比较	(65)
第三节 生烃能力评价标准	(67)
一、干酪根类型划分	(67)
二、有机质含量与干酪根的关系	(68)
三、国内外页岩生烃能力对比	(68)
第五章 有机页岩测井解释方法	(69)
第一节 常规测井解释方法	(69)
一、有机页岩体积模型	(69)
二、多矿物模型最优化方法	(69)
三、储层参数计算方法	(83)
第二节 多映射 RBF 插值法矿物含量预测	(88)
一、方法原理	(88)
二、计算实例	(90)
第三节 核磁共振解释模型和解释方法	(95)
一、核磁共振弛豫机理	(95)
二、核磁共振实验与响应特征	(96)
三、影响因素分析	(97)
四、核磁共振测井解释模型	(98)
五、实例分析	(104)
第四节 有机页岩测井裂缝评价方法	(106)
一、成像测井裂缝评价	(107)
二、双侧向测井裂缝评价	(109)
三、实例研究与验证	(113)
第五节 有机页岩含气量评价	(115)
一、含气量计算概述	(115)
二、游离气含量计算	(115)
三、吸附气含量计算	(116)
四、总含气量计算	(122)
第六节 页岩气测井评价实例分析	(123)
一、钻井概况	(123)
二、测井概况	(123)
三、页岩储层评价结果	(124)
第六章 有机页岩岩石物理学	(128)
第一节 有机页岩岩石物理建模方法	(128)
一、岩石物理建模理论	(128)

二、方法集成与精度分析	(131)
三、应用实例	(133)
第二节 有机页岩岩石物理特性分析	(135)
一、岩石弹性参数计算方法	(135)
二、有机页岩弹性参数与 TOC 的关系	(136)
三、有机页岩弹性参数特性分析	(138)
四、弹性属性数值模拟与分析	(140)
五、有机页岩刚性指数特性	(142)
第七章 有机页岩岩石力学参数计算	(144)
第一节 各向同性岩石力学参数评价	(144)
一、有效应力系数计算	(144)
二、地应力计算	(145)
三、岩石脆性评价	(148)
第二节 各向异性岩石力学参数评价	(151)
一、各向异性有效介质模量	(151)
二、各向异性岩石弹性模量	(152)
三、实例分析	(154)
第三节 可压裂评价	(154)
一、可压裂参数构建	(155)
二、实例分析	(156)
第四节 测井岩石力学实例分析	(157)
一、地应力分析	(157)
二、岩石力学参数分析	(157)
第八章 焦石坝地区页岩测井岩石物理	(160)
第一节 焦石坝地区地质特征	(160)
一、地层特征	(160)
二、岩性特征	(161)
三、有机质特征	(162)
四、储集空间	(163)
第二节 测井评价与岩石物理特征	(166)
一、测井响应	(166)
二、生烃能力评价	(166)
三、矿物组成与物性参数评价	(168)
四、含气量计算与特征分析	(170)
五、岩石弹性参数与力学参数分析	(172)
第三节 页岩甜点评价与分析	(174)
第九章 发展趋势及展望	(176)
一、发展趋势	(176)
二、展望	(176)
参考文献	(177)

第一章 绪 论

第一节 页岩油气概述

有机页岩是指富含有机质的泥页岩，其中所含的油气是潜力巨大的非常规天然气资源。常规天然气是指主要受浮力作用控制的、聚集于储层顶部的所有天然气。页岩气是指以吸附和游离状态同时存在于泥页岩地层中的天然气，是以热成熟作用或连续的生物作用为主以及两者相互作用生成的并聚集在烃源岩中的天然气。页岩气的赋存状态多样，一部分以游离相存在于天然裂缝与粒间孔隙中，一部分吸附在干酪根或黏土颗粒表面，还有的溶解于干酪根和沥青中。页岩气藏是天然气生成后在烃源岩内或短距离运移就近聚集的结果，是一种连续型天然气藏。可以看出，有机页岩本身既是烃源岩又是储层，它与常规天然气藏最明显的区别是“自生自储”。但是，典型页岩油气与传统泥页岩油气有不同点，也有一些共同点，见表1-1。

表 1-1 传统泥页岩油气与典型页岩气异同点（据张金川，2008）

特点	泥页岩裂缝油气	页岩气	共 性
界定	赋存于泥页岩裂缝中的油气	同时以吸附和游离状态赋存于以泥页岩为主的地层中的天然气	泥岩或页岩地层中含烃
天然气成因	热成熟	从生物气到高、过成熟气	热成熟产气为主
赋存介质	泥岩或页岩裂缝	泥页岩及其砂岩夹层中的裂缝、孔隙、有机质等	泥岩或页岩裂缝
赋存相态	游离	游离+吸附	游离
主控因素	构造裂缝	各类裂缝、有机碳含量、有机质成熟度等	裂缝
理论模式	岩石破裂理论、幕式理论、浮力理论	吸附理论、活塞式与置换式复杂理论	岩石破裂理论、复杂成藏理论
成藏特点	以油为主的原地、就近或异地聚集	以气为主的原地聚集	近邻或烃源岩内部成藏
保存特点	良好的封闭和保存条件	抗破坏（构造运动）能力较强	适当保存
生产特点	采收率高，产量递减快	采收率低，生产周期长	特殊开发技术

研究表明，页岩气藏有不同于常规天然气藏的特殊性。页岩气藏的储层特征、压力系统以及产气机理明显不同于常规气藏。第一，页岩气藏有独特的天然气存储特征。主要表现为：（1）在形式上游离气和吸附气并存。由于页岩一般含有较高的有机质和黏土矿物，同时，其孔隙结构使其具有较大的比表面积，有利于在基质孔隙表面吸附大量的天然气，因此，除游离气外，吸附气也是页岩气藏重要的天然气存在形式。（2）在存储空间上基质孔隙

和次生裂缝并存。页岩气藏中天然气由 3 部分组成：裂缝中的游离气、基质孔隙中的游离气、吸附气。第二，页岩气藏有特殊的产气机理。与常规低渗气藏不同，页岩气在裂缝和基质中的流动机理是微小的基质孔隙中的气体向大孔隙和裂缝作扩散运动，遵循达西定律；基质孔隙表面的吸附气不再是达西流，而是在一定压力下发生解吸。由于裂缝空间是有限的，早期以游离气为主的天然气产量快速下降并达到稳定，稳定期的产量主要是基质孔隙里的游离气和解吸气。美国泥盆系页岩气藏 90% 的工业性气井需要经过压裂增大裂缝空间和连通性，从而使更多的吸附气发生解吸而向裂缝聚集。可见，页岩气的产出主要有 3 个过程：裂缝中游离气的产出、基质孔隙中游离气的产出、解吸。

作为另一类非常规天然气，煤层气是以甲烷为主要成分的矿产，是在煤化作用过程中形成、储集在煤层及其临近岩层中的非常规天然气（孙建孟，2013）。为了理解页岩气与煤层气、常规天然气藏的特点和区别，对天然气、煤层气和页岩气藏进行了对比研究，见表 1-2。

表 1-2 页岩气与煤层气、常规天然气对比表

项 目	页岩气	煤层气	天然气
界定	主要以吸附和游离状态聚集于泥岩/页岩系中的天然气	主要以吸附状态聚集于煤系地层中的天然气	浮力作用影响下，聚集于储层顶部的天然气
成因类型	有机质热演化成因，生物成因	有机质热演化成因，生物成因	有机质热演化成因，生物成因，原油裂解成因
天然气赋存状态	20%~85% 为吸附，其余为游离和水溶	85% 以上为吸附，其余为游离和水溶	各种圈闭的顶部高点，不考虑吸附影响因素
储层条件	低孔、低渗特征孔隙度 ϕ 为 4%~6%，渗透率 $K<0.001\text{mD}$	双重孔隙（基质和割理系统）， ϕ 为 1%~5%， K 为 0.5~5.0mD	低渗： ϕ 为 8%~20%， K 为 0.1~50mD；中渗： ϕ 为 20%~25%， K 为 50~300mD；高渗： $\phi>25\%$ ， $K>300\text{mD}$
成藏特点	自生、自储、自保	自生、自储、自保	生、储、盖合理组合
分布特点	盆地古沉降—沉积中心及斜坡	具有生气能力的煤岩内部	构造较高部位的多种圈闭
成藏及勘探区	4000m 以浅的页岩裂缝带	3000m 以浅的煤岩成熟区，高渗带	正向构造（圈闭）的高部位
流动机理	早期以大孔隙和裂缝中游离气的达西流为主，稳定期以基质孔隙内的游离气和吸附气为主	在基质中的流动是由浓度梯度所引起的扩散，然后由于压力梯度的作用在裂隙中引起的渗流	流动是由压力梯度所引起的层流，并服从达西定律；在近井地带可出现紊流
开采特点	排气降压解吸开采	排水降压解吸开采	自然压力开采

第二节 国内外页岩气研究进展

一、页岩气勘探开发研究进展

1. 世界页岩气勘探概况

全球页岩气资源丰富，据美国国家石油委员会（NPC）统计，截至 2007 年底，全球页

岩气资源量约为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占全球非常规气资源量的近 50%。页岩气资源主要分布在北美洲（占 23.8%）、中亚和中国（占 21.9%）、中东和北非（占 15.8%）、拉美（占 13.1%）等国家和地区（图 1-1），其中北美洲最多。其中美国是世界上最大规模商业化开采的国家，也是开展研究最多的国家，其次为加拿大，其他国家还普遍处于起步阶段。据美国能源信息署（EIA）2013 年最新发布，世界页岩气地质资源量为 $1013 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

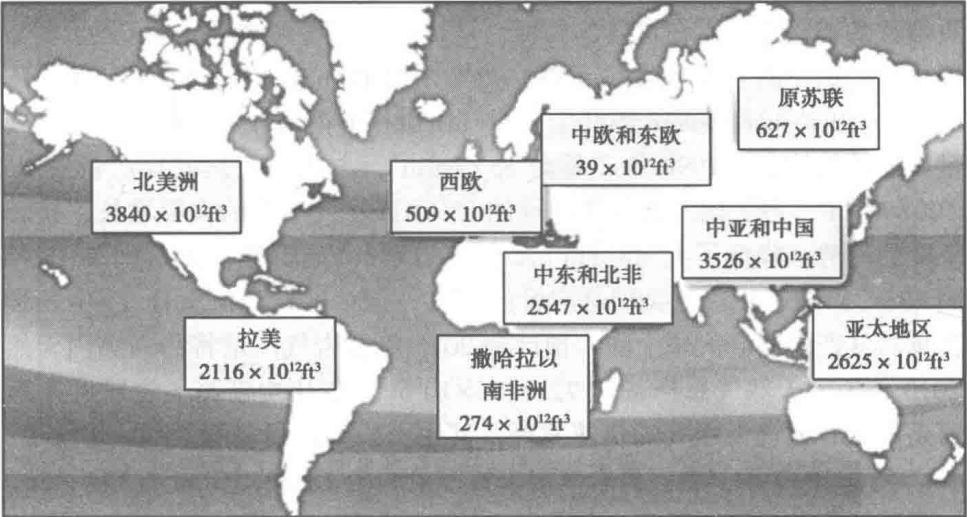


图 1-1 全球页岩气资源分布图（据赵群等，2008）

全球页岩气勘探开发活动悄然兴起。北美页岩气的大规模生产引起了全球其他国家和地区对页岩气资源研究的重视，在过去的十年里，北美的页岩气开发取得了飞速的发展，图 1-2 为美国和加拿大 2000—2010 年几个主要页岩气田的产量图（Advanced Resources International, Inc, 2009）。2009 年 5 月，欧洲启动了一个由行业资助、德国国家地质实验室协作的研究项目——“Gas Shales in Europe (GASH)”；在南美洲，阿根廷和智利也正在评估其页岩气的潜力；在亚洲，印度国有石油公司（ONGC）已经开始评估印度的页岩气可采量；中国也钻了一些页岩气评价井，并在页岩气勘探和有利区块筛选中取得了一定成果。

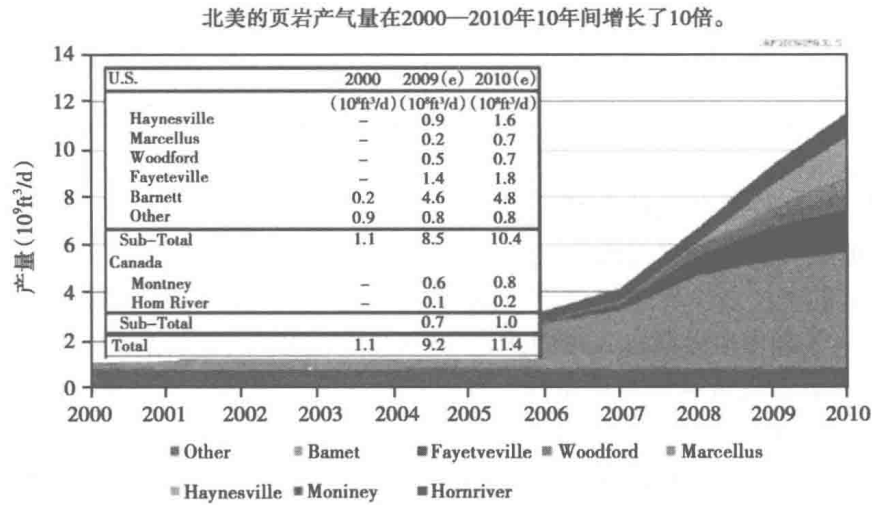


图 1-2 北美页岩气的产量递增与分布（据 Rogner，2010）

全球各大石油公司也纷纷开始采取行动：埃克森美孚石油公司在德国展开钻探工程，美国戴文能源公司（Devon Energy）和法国道达尔公司联手在法国钻探页岩气，康菲石油公司将在波兰展开页岩气勘探工作，中国石油天然气集团公司和壳牌石油宣布将联手开发四川的页岩气资源，挪威国家石油公司、美国页岩气开发最为成功的切萨皮克能源公司（Chesapeake）和南非石化巨头萨索尔公司（Sasol）共同向南非政府有关部门申请对南非 Karoo 盆地页岩气资源的勘探权。

美国页岩气的勘探开发走在世界的前列，是目前页岩气大规模商业开发取得成功的唯一国家。美国页岩气最早的规模开发始于得克萨斯州的 Barnett 页岩。最近几年，Haynesville、Fayetteville、Marcellus 和 Woodford 等几个页岩气田也相继得到开发。在过去的十几年，美国页岩气产量呈指数级增长：1998 年产量为 $85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占美国天然气年产量的 1.6%；2008 年产量达 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占美国天然气年产量的 8%。页岩气产量的大幅增长，扭转了美国天然气产量下降的趋势，降低了美国对进口天然气的依赖（赵群等，2008）。2010 年美国页岩气产量达到 $1359.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占美国总产量的 23%。据美国能源信息署（EIA）预测，未来二十多年，页岩气产量还会大幅上涨，预计到 2035 年页岩气产量将占到美国天然气总产量的 45%。2013 年美国天然气总产量达 $7256.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，创历史新高，位居世界第一大产气国，这主要是由于非常规天然气的快速发展，其中页岩气产量高达 $3100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占天然气总产量 45%。截至 2013 年，美国页岩气可采资源量约为 $18.83 \times 10^{12} \text{ m}^3$ （EIA，2013）。

目前，页岩气藏的勘探开发正由北美向全球迅速扩展，正成为全球油气勘探开发的新亮点。

2. 中国页岩气勘探概况

自 2004 年开始，我国国土资源部油气资源战略研究中心和中国地质大学（北京）合作调研国外页岩气研究和勘探开发进展，初步优选上扬子地区为页岩气资源远景区。2009 年，国家启动了“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区优选”项目，以川渝黔地区为主，兼顾中下扬子和北方，开展页岩气资源调查，并在重庆市彭水县实施了我国第一口页岩气资源战略调查井——渝页 1 井。渝页 1 井的目的层为下志留统龙马溪组富有机质泥页岩层系，通过岩心测试分析获取了页岩气资源潜力评价参数。该井的成功钻探标志着页岩气资源勘查工作正式开始。

2010 年，国土资源部在全国有重点地开展页岩气资源战略调查，先后针对上扬子川渝黔地区下古生界海相泥页岩和华北、东北、西北部分地区陆相、海陆过渡相泥页岩开展资源前景研究，总结了富有机质页岩类型、分布规律及页岩气富集特征，确定了页岩气调查主要领域及评价重点层系，探索了页岩气资源潜力评价方法和有利区优选标准。

研究发现，中国许多盆地具有泥页岩成藏条件，页岩气资源潜力大，分布面积广，发育层系多。中国地质历史时期富有机质页岩十分发育，既有有机质含量高的古生界海相页岩，也有有机质丰富的中、新生界陆相页岩（图 1-3），已在多处发现油气藏或油气显示（刘洪林，2010）。元古宇和古生界页岩分布面积达 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上，演化程度高，总有机碳含量（TOC）高，具备页岩气成藏的地质条件，开发潜力巨大。许多盆地高碳泥页岩的 TOC 高达 30%，尤其是中国南方扬子地区沉积岩经历地质时代长、地质背景复杂、构造破坏严重、油气保存条件较差，页岩气将有可能成为区域性油气勘探发现的重要突破口（闫存章，2009）。

由于我国陆相、海相沉积都比较发育，且油气资源丰富，这良好的地质因素为页岩气的富集创造了非常有利的条件。经初步估算，中国主要盆地和地区的页岩气资源量约为 $21.5 \times$



图 1-3 中国大陆页岩气富集分区图 (据刘洪林等, 2010)

$10^{12} \sim 45 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 平均为 $30.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 主要分布在南方聚气区、华北聚气区, 古生界页岩气资源量大约是中生界页岩气资源量的 2 倍。目前, 四川盆地东部和南部下寒武统和下志留统页岩是目前勘探的主要层系。通过寒武系筇竹寺组、志留系龙马溪组页岩的研究, 初步估算四川盆地寒武系页岩气资源量为 $7.14 \times 10^{12} \sim 14.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 志留系页岩气资源量为 $2 \times 10^{12} \sim 4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (米华英, 2010)。

我国页岩气资源丰富, 有利区分布广泛, 已在川南、川东、渝东南、黔北、鄂西, 共 233 个有利区, 预测地质资源储量 $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 可采资源储量 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (图 1-4)。

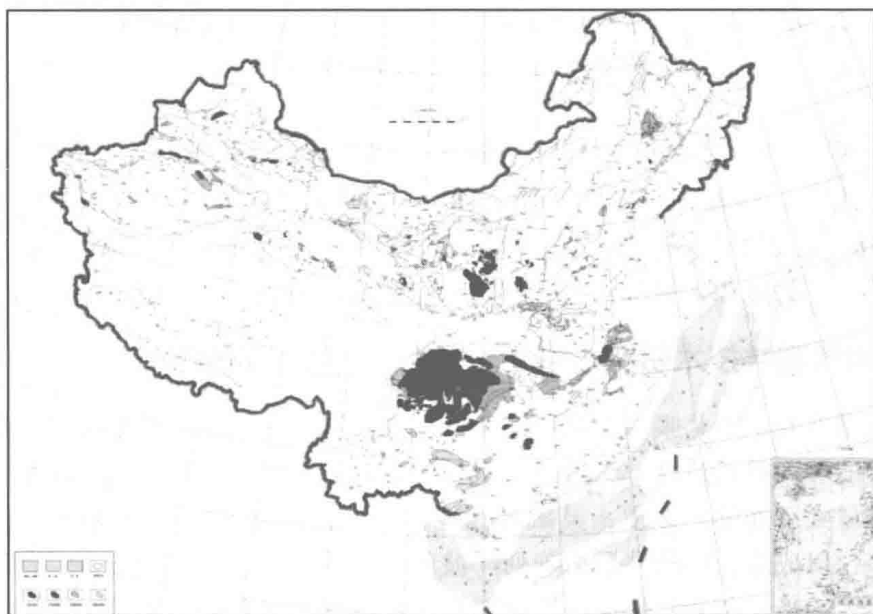


图 1-4 中国页岩气有利区分布图

2011 年, 中国启动“全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选”项目, 将我国陆地划分为上扬子及滇黔桂区、中下扬子及东南区、华北及东北区、西北区、青藏区 5 个大区, 组织开展全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选。中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司相继在四川、重庆等地区开展海相页岩气先导试验, 陕西延长石油(集团)有限责任公司在鄂尔多斯盆地开展陆相湖盆页岩气勘探, 均相继获得重大突破。2012 年, 中国石化在四川盆地涪陵地区焦石坝区块成功钻探了 JY1 井, 在五峰—龙马溪组钻遇黑色泥页岩 89.5m/15 段, 压裂后日产气 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。勘探表明, 该页岩气藏压力系数高, 气藏组分好, 是典型的优质海相页岩气, 目前已实现了页岩气开发的“井工厂”化作业(图 1-5), 标志着中国首个大型页岩气田正式诞生。此外, 中国石油在川南成功部署了威 201 井、宁 201 井, 并在志留系龙马溪组海相页岩中发现页岩气; 建 111 井在鄂西侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩也取得勘探突破; 湘页 1 井在二叠系大隆组海陆过渡相页岩取得勘探突破, 最高日产气 2409.9 m^3 。柳评 177 井、柳评 179 井等在鄂尔多斯盆地延长组长 7 段陆相页岩也取得勘探突破, 日产气 $2000 \sim 3000 \text{ m}^3$ 。



图 1-5 页岩气开发功勋井—JY1 井

截至 2014 年 10 月, 全国共设置页岩气探矿权 54 个, 累计完成页岩气钻井 400 口, 其中调查井 122 口(直井)、探井 143 口(直井)、评价井 130 口(水平井), 压裂日产超 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 38 口(直井 18 口、水平井 20 口), 超 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 24 口(直井 3 口、水平井 21 口)。2012 年产量 $2500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 2013 年产量 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至 2014 年 11 月, 已累计生产约 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

二、页岩气测井技术研究进展

测井技术是在井中沿井眼剖面测量地层电阻率、声波和放射性等地球物理特性的勘探手段, 经处理后能够获得孔隙度、渗透率、饱和度等地层参数, 测井技术具有方法多、纵向分辨率高、信息量大、连续、方便、灵敏等优势, 是油气和煤等常规资源探测不可或缺的手段。近几年来, 以成像、核磁共振、阵列声波等为代表的测井新技术正在特殊油气藏(肖立志等, 2008, 2015)和非常规油气勘探中发挥越来越大的作用。页岩气测井识别与评价及其资源量计算可通过测井技术来得以实现(谭茂金等, 2010)。近年来, 页岩气测井技术研

究工作在国内外已经取得了一定进展。

1. 含气页岩测井识别和响应特征

与普通页岩相比,含气页岩具有自然伽马强度高、电阻率大、地层体积密度和光电效应低等特征(Rick等,2004;John Nieto等,2009;潘仁芳等,2009;谭茂金等,2010)。普通泥页岩的视电阻率值都较低,但在泥岩裂缝含油气层段,表现出较高的视电阻率值,反映油气的富集;声波时差测井曲线上呈现高值,其原因是裂缝的发育和油气存在均使声波时差变大;自然伽马曲线高异常,可能指示有油气聚集,也反映了油气的原生性。电成像测井能够清晰地显示层理、裂缝的产状和发育程度。

2. 含气页岩测井生烃能力的评价

通过对页岩气藏地球化学机理研究知道,总有机碳含量(TOC)和成熟度指标(MI)反映页岩的生烃能力,为页岩气评价的主要参数,其总有机碳含量与页岩气产率密切相关。这两个参数常可以通过测井资料确定。国内外学者对于这两个参数的测井评价方法作了一些探索。

利用测井资料评价有机碳含量的计算方法有很多种。最早的有机碳含量测井预测方法通常是通过构建岩心总有机碳含量实验结果与密度测井、自然伽马测井或自然伽马能谱测井的线性关系(Schmoker,1979;Schmoker等,1983;Fertl等,1988)实现有机碳含量预测。Daniel Rose等(2008)提出用密度测井和自然伽马测井来对总有机碳含量进行评价。谭茂金等(2011)认为电阻率、声波和密度测井为评价生烃能力的敏感测井方法,基于三种敏感测井方法利用多元回归技术构建了有机碳评价的解释模型,在胜利油田页岩油评价中取得较好的应用效果。此外,埃克森石油公司Passey等(1990)提出用电阻率和孔隙度曲线叠加的方法来评价总有机碳含量,即 $\Delta\log R$ 方法,该方法在页岩气勘探开发中也得到了成功应用。John等(2009)利用 $\Delta\log R$ 方法计算了Barnett页岩和Montney页岩的TOC,应用效果较好;Passey等(2011)介绍了 $\Delta\log R$ 方法在页岩油和页岩气的应用,给出了高成熟页岩气条件下的 $\Delta\log R$ 方法中成熟度参数(LOM)的刻度或校正方法。法国石油研究院Carpentier等(1991)提出了Carbolog法,该方法借助于岩心的有机碳分析对常规测井曲线(主要是电阻率与声波测井)进行标定,初步实现了基于测井数据的总有机碳含量估算,该方法在济阳坳陷古近系沙三段烃源岩的评价中得到了精确验证(运华云等,2000),而且通过改进其理论公式中的相应系数可提高该方法的可操作性和总有机碳的评价精度(刘俊民等,2008)。潘仁芳(2009)利用Carbolog法对含气页岩进行了有机碳含量的评价,找到了成熟的页岩气烃源岩。上述的 $\Delta\log R$ 法和Carbolog法均是基于生油岩有机质对测井曲线的响应特征建立解释模型,用电阻率测井和声波或其他孔隙度测井定量计算有机碳含量,针对不同成熟度的烃源岩通过修正反映成熟度的模型参数,实现有机页岩有机碳含量的正确评价。然而, $\Delta\log R$ 技术需要人工选择基线,而不同地区TOC背景值也不同。近年来,智能系统和神经网络预测方法也在TOC预测中得到了应用和发展。Kadkhodaie等(2009)应用机器从测井数据对有机碳含量进行了预测。Khoshnoodkia等(2011)采用智能方法基于常规电缆测井数据实现了Gadvan地层的TOC预测。然而,采用神经网络预测TOC的过程比较复杂,它涉及许多参数,如何选择这些参数是该项技术的关键。近年来,随着测井新技术的推广应用,国外采用元素俘获能谱测井(ECS)对总有机碳含量进行计算,该方法先计算干酪根的体积百分比,然后再通过干酪根和总有机碳含量的关系来实现总有机碳含量的计算,例如,斯伦贝谢公司岩石物理学家Rick Lewis等(2004)针对页岩提出了干酪根和总有机碳含量的关