

■ 准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书 ■

准噶尔盆地 火山岩油气藏测井 评价技术的应用

杨迪生 孙仲春 朱 明 任军民 胡婷婷 张福明 等/著

Logging Evaluation Technology and
Application of Volcanic Hydrocarbon
Reservoir in Junggar Basin



科学出版社

准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书

准噶尔盆地火山岩油气藏 测井评价技术及应用

Logging Evaluation Technology and Application
of Volcanic Hydrocarbon Reservoir in Junggar Basin

杨迪生 孙仲春 朱 明 任军民 胡婷婷 张福明 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以准噶尔盆地为例,在调研了国内外大量火山岩测井评价已有成果的基础上,根据准噶尔盆地火山岩的勘探实践和相关研究成果,以火山岩测井评价基础、火山岩岩性岩相测井识别技术、火山岩储层物性测井评价技术及火山岩储层油气评价技术中几个关键和特色因素为主线,从而了解盆地内储层的岩性、物性特点及油气富集规律,为测井分析研究奠定基础,最后,对克拉美丽气田、金龙油田的储层综合评价及其应用效果进行分析。

本书可供从事油气勘探的科研工作者、技术管理人员及高等院校师生科研和教学时参考。

图书在版编目(CIP)数据

准噶尔盆地火山岩油气藏测井评价技术及应用 = Logging Evaluation Technology and Application of Volcanic Hydrocarbon Reservoir in Junggar Basin / 杨迪生等著. — 北京:科学出版社,2016.7

(准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书)

ISBN 978-7-03-049276-0

I. ①准… II. ①杨… III. ①准噶尔盆地-火山岩岩性油气藏-油气测井 IV. ①TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 150892 号

责任编辑:万群霞 李久进 / 责任校对:张林红

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年7月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:360 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

杨迪生 孙仲春 朱 明 任军民

胡婷婷 张福明 姚卫江 陈国军

高 明 贾春明 潘 拓 高衍武

李 静 范小秦 徐春丽 霍进杰

准噶尔盆地位于中国西部,行政区划属新疆维吾尔自治区(简称新疆)。盆地西北为准噶尔界山,东北为阿尔泰山,南部为北天山,是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长 700km,南北宽 370km,面积为 13 万 km^2 。盆地腹部为古尔班通古特沙漠,面积占盆地总面积的 36.9%。

1955 年 10 月 29 日,克拉玛依黑油山 1 号井喷出高产油气流,宣告了克拉玛依油田的诞生,从此揭开了新疆石油工业发展的序幕。1958 年 7 月 25 日,世界上唯一一座以油田命名的城市——克拉玛依市诞生了。1960 年,克拉玛依油田原油产量达到 166 万 t,占当年全国原油产量的 40%,成为新中国成立后发现的第一个大油田。2002 年原油年产量突破 1000 万 t,成为中国西部第一个千万吨级大油田。

准噶尔盆地蕴藏丰富的油气资源。油气总资源量为 107 亿 t,是我国陆上油气资源超过 100 亿 t 的四大含油气盆地之一。虽然经过半个多世纪的勘探开发,但截至 2012 年年底,石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,均处于含油气盆地油气勘探阶段的早中期,预示着准噶尔盆地具有巨大的油气资源和勘探开发潜力。

准噶尔盆地是一个具有复合叠加特征的大型含油气盆地。盆地自晚古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等构造运动。其中,晚海西期是盆地拗隆构造格局形成、演化的时期,印支-燕山运动进一步叠加和改造,喜马拉雅运动重点作用于盆地南缘。多旋回的构造发展在盆地中造成多期活动、类型多样的构造组合。

准噶尔盆地沉积总厚度可达 15000m。石炭系—二叠系被认为是由海相到陆相的过渡地层,中、新生界则属于纯陆相沉积。盆地发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系六套烃源岩,分布于盆地不同的凹陷,它们为准噶尔盆地奠定了丰富的油气源物质基础。

纵观准噶尔盆地整个勘探历程,储量增长的高峰大致可分为准噶尔西北缘深化勘探阶段(20 世纪 70~80 年代)、准噶尔东部快速发现阶段(20 世纪 80~90 年代)、准噶尔腹部高效勘探阶段(20 世纪 90 年代至 21 世纪初)、准噶尔西北缘滚动勘探阶段(21 世纪初至今)。不难看出,勘探方向和目标的转移反映了地质认识的不断深化和勘探技术的日臻成熟。

正是由于几代石油地质工作者的不懈努力和执着追求,使准噶尔盆地在经历了半个多世纪的勘探开发后,仍显示出勃勃生机,油气储量和产量连续 29 年稳中有升,为我国石油工业发展做出了积极贡献。

在充分肯定和乐观评价准噶尔盆地油气资源和勘探开发前景的同时,必须清醒地看到,由于准噶尔盆地石油地质条件的复杂性和特殊性,随着勘探程度的不断提高,勘探目

标多呈“低、深、隐、难”特点,勘探难度不断加大,勘探效益逐年下降。巨大的剩余油气资源分布和赋存于何处,是目前盆地油气勘探研究的热点和焦点。

由中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司(以下简称新疆油田分公司)组织编写的《准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书》在历经近两年时间的努力,终于面世了。这是由油田自己的科技人员编写出版的一套专著类丛书,这充分表明我们不仅在半个多世纪的勘探开发实践中取得了一系列重大的成果,积累了丰富的经验,而且在准噶尔盆地油气勘探开发理论和技术总结方面有了长足的进步,理论和实践的结合必将更好地推动准噶尔盆地勘探开发事业的进步。

该系列专著汇集了几代石油勘探开发科技工作者的成果和智慧,也彰显了当代年轻地质工作者的厚积薄发和聪明才智。希望今后能有更多高水平的、反映准噶尔盆地特色的地质理论专著出版

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。希望从事准噶尔盆地油气勘探开发的科技工作者勤于耕耘、勇于创新、精于钻研、甘于奉献,为“十二五”新疆油田的加快发展和“新疆大庆”的战略实施做出新的更大的贡献。



新疆油田分公司总经理

2012年11月

前 言

随着全球能源需求的不断攀升,火山岩油气藏已日益成为油气资源勘探开发的一个重要领域,全球多个国家已发现并进行了火山岩油气藏开发。我国自 1960 年以来,先后在准噶尔盆地、四川盆地、渤海湾盆地、辽河盆地和松辽盆地等区域发现了火山岩油气藏,特别是准噶尔盆地的火山岩油气区已具较大规模。火山岩储层作为盆地深层油气储集的主体,是今后油气勘探的重要领域。

准噶尔盆地范围大,涉及的储层岩性复杂,储层特征差异较大与我国其他区域的特点不同,主要表现为:本区火山岩岩性以中基性为主,喷发期次多,规模较大;构造环境变化大,后期改造强,火山机构保存不完整且有较大变化;火山岩储层储集空间类型多为原生孔隙、次生溶孔和裂缝,并且由于遭受长期风化淋滤剥蚀,发育大量次生溶蚀孔、洞及构造裂缝,对储层发育具有重要作用,从而对岩性与储集空间复杂的火山岩油气藏的测井评价技术提出了更高的要求,需要在夯实火山岩测井评价基础的同时,系统了解准噶尔盆地火山岩实验项目及其对测井评价的作用。虽然如今的测井技术对油田勘探开发发挥了重要作用,但仍是难题,所以一方面要对准噶尔盆地目前常用的、对应资料丰富的火山岩测井评价技术和方法进行推广,另一方面又对一些目前使用受限或未完全开展应用的技术进行原理分析,为进一步提升和应用奠定基础。

目前,火山岩油气藏的测井评价仍然是世界性的难题,而且针对准噶尔盆地这类火山岩油气藏的测井评价目前国内外还没有系统的著述。为了满足火山岩油气藏勘探开发的需求,新疆油田分公司陆续开展了以准噶尔盆地火山岩油气藏为主的测井评价技术联合攻关,对不同测井资料的适用性、采取的技术路线和方法等均开展了大量有针对性的研究,不断挖掘各种测井技术手段的优势,力求探寻一套系统有效的火山岩油气藏测井评价技术和方法。经过逾 10 年的研究和实践,取得了很大进展。首先综合利用常规测井和元素俘获能谱、成像等特殊测井资料对火山岩岩性、岩相进行识别;由于火山岩储层通常为裂缝、孔隙双重介质,利用常规测井资料、核磁共振和微电阻率成像等特殊测井技术对基质物性进行评价,而裂缝识别和评价则主要利用电成像测井;火山岩流体性质的识别通常在储层划分及物性评价的基础上进行。因此,有必要对已形成的方法技术及准噶尔盆地火山岩油气藏评价的最新研究和应用成果进行总结和提炼。

全书共六章。第 1 章简要阐述了准噶尔盆地的地质背景 and 不同区域的储层特征,并详细分析火山岩储层测井评价的技术现状;第 2 章从岩心分析实验和火山岩测井系列两方面介绍火山岩测井评价基础,为后续章节中资料的应用做重要铺垫;第 3 章主要阐述火山岩岩性和岩相的测井识别技术;第 4 章介绍储层物性的测井评价方法与技术,特别分析准噶尔盆地火山岩储层的物性控制因素,并针对性地从基质物性评价和裂缝评价两个方

面进行系统阐述;第5章论述火山岩储层油气评价技术,综合利用各种测井资料和技术手段对流体性质定性判断和流体饱和度进行定量评价的技术;第6章着眼于测井评价技术和手段在准噶尔盆地火山岩油气藏勘探开发中的应用,以克拉美丽气田和金龙油田为代表,系统展示测井技术在这两个地区储层综合评价和开发中所起的重要作用。

本书编写历时一年半,自2014年8月启动编写以来,得到了中国石油天然气股份有限公司“新疆大庆”重大科技专项“天然气勘探战略目标优选与规模增储关键技术研究”项目的资助,并得到了新疆油田分公司勘探开发研究院孙仲春总监、副总地质师李学义等的悉心指导,全书由杨迪生、张福明负责统稿,新疆油田分公司勘探开发研究院勘探所测井项目组提供了大量克拉美丽气田测井评价资料及参与了部分编写工作,中国石油集团测井有限公司的高衍武等也参与了大量资料整理与编写工作。值本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢!

限于作者水平,书中定会存在某些局限性和不足之处,敬请专家和读者们提出宝贵意见。

作者

2016年1月

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 准噶尔盆地地质背景及储层特征	1
1.1.1 区域构造背景和勘探现状	1
1.1.2 准噶尔盆地典型火山岩储层特征	2
1.2 火山岩储层测井评价技术概述	6
1.2.1 火山岩岩性的测井识别	6
1.2.2 火山岩储层物性评价及有效储层划分	8
1.2.3 储层流体性质识别及饱和度计算	10
1.2.4 测井技术在火山岩地层评价中的其他应用	11
1.2.5 火山岩测井评价技术发展趋势	11
第 2 章 火山岩测井评价基础	12
2.1 岩心分析实验	12
2.1.1 岩性实验分析	13
2.1.2 物性实验分析	17
2.1.3 含油性实验分析	23
2.2 测井系列选择	27
2.2.1 常规测井系列	27
2.2.2 特殊测井系列	29
2.2.3 准噶尔盆地火山岩测井系列	32
第 3 章 火山岩岩性、岩相测井识别技术	34
3.1 火山岩岩性、岩相的测井学分类	34
3.1.1 火山岩岩性的测井学分类	34
3.1.2 火山岩岩相的测井学分类	36
3.2 火山岩岩性的测井识别	38
3.2.1 火山岩测井响应特征分析	38
3.2.2 基于测井响应特征的岩性识别	51
3.3 火山岩岩相的测井识别	75
3.3.1 火山岩岩相的测井响应特征	76
3.3.2 单井剖面火山岩岩相连续划分	80

第4章 火山岩储层物性测井评价技术	84
4.1 火山岩储层物性控制因素分析	84
4.1.1 火山岩储集空间类型	85
4.1.2 岩性、岩相对物性的影响	89
4.1.3 后期改造作用对物性的影响	94
4.2 火山岩储层基质物性评价	98
4.2.1 基质物性的定性评价	99
4.2.2 基质物性参数定量评价	115
4.3 火山岩储层裂缝评价	129
4.3.1 裂缝的定性识别	129
4.3.2 裂缝有效性分析	138
4.3.3 裂缝参数的定量计算	143
4.4 火山岩储层分类评价标准	149
第5章 火山岩储层油气评价技术	152
5.1 流体性质的定性判别	152
5.1.1 常规曲线重叠和交会图法	153
5.1.2 声电成像测井法	155
5.1.3 核磁共振测井法	161
5.1.4 直接测试法判别流体性质	164
5.2 火山岩储层饱和度的定量计算	168
5.2.1 火山岩基岩的岩电实验分析	169
5.2.2 基于电阻率测井的方法	171
5.2.3 基于毛管压力测试的饱和度计算	175
5.2.4 核磁共振测井饱和度计算方法	176
第6章 火山岩储层综合评价及应用效果	182
6.1 克拉美丽气田储层综合评价	182
6.1.1 储层测井评价	183
6.1.2 应用效果	200
6.2 金龙油田储层综合评价	204
6.2.1 储层测井评价	204
6.2.2 综合应用效果	212
主要参考文献	227

1.1 准噶尔盆地地质背景及储层特征

1.1.1 区域构造背景和勘探现状

近年来,随着石油工业的发展和勘探技术的提高,火山岩储集层作为油气勘探的新领域,已引起广泛关注。火山岩油气藏在国外已有 120 多年的勘探历史,我国自 20 世纪 50 年代以来,先后在准噶尔盆地、松辽盆地、吐哈盆地、渤海湾等地发现了火山岩油气藏,特别是准噶尔盆地的火山岩油气区已具较大规模。火山岩储层作为盆地深层油气储集的主体,必将成为今后相当长时期内油气勘探的重要领域。目前发现的准噶尔盆地火山岩油气藏主要分布在石炭系和二叠系。

准噶尔地层区在我国石炭纪地层分区图上属于准噶尔-兴安地层大区中部,并以额尔齐斯缝合带和中天山—康古尔塔格缝合带为界,自北而南分为阿勒泰、准噶尔和天山 3 个地层分区。依据次一级构造及沉积特点,准噶尔地层分区分为 7 个地层小区,天山地层分区分为 2 个地层小区(图 1.1)。

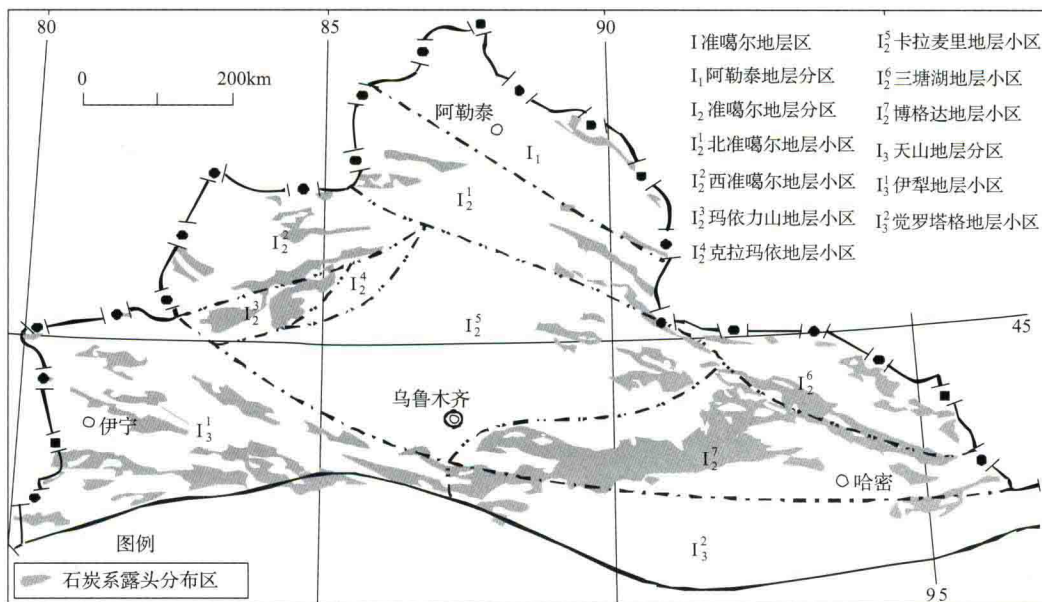


图 1.1 准噶尔地层石炭纪区划图

石炭系与下伏老地层主要为不整合接触,在不同地区可分别与泥盆系、奥陶系乃至更老地层接触。石炭系与上覆地层以不整合接触关系为主,在不同地区可分别可与二叠系、

三叠系、侏罗系甚至更新地层接触,野外露头及地震资料均可证实,局部地区可出现整合或假整合接触关系。

准噶尔盆地石炭系二分为上、下石炭统。下石炭统在全盆地广泛发育,为安山岩、英安岩、流纹岩和火山碎屑岩、火山沉积岩组成的多期次火山喷发产物。在盆地周缘露头上均有分布,岩性岩相复杂,各区域之间变化大,地面调查时在不同地区命名为不同组,横向关系尚不十分明确。目前钻井钻揭较多的主要集中在克拉美丽山前区域,该区下石炭统命名为松喀尔苏组,松喀尔苏组下段以安山岩、玄武岩、(沉)凝灰岩、火山碎屑岩及少量的酸性侵入体为主,上段以沉积岩、凝灰岩为主,局部发育火山熔岩,是已经证实的有效烃源岩。上石炭统在盆地周缘露头区也广泛分布,以中基性火山岩、火山碎屑岩为主,局部有海相碳酸岩沉积分布,在盆地内上石炭统局部剥蚀尖灭。目前钻井钻揭较多的也主要集中在克拉美丽山前区域,该区上石炭统为巴塔玛依内山组和石钱滩组,巴塔玛依内山组岩性为基性-中酸性火山熔岩、凝灰质角砾岩、凝灰岩夹不稳定的陆相碎屑岩、煤线及劣质煤层,以陆相碎屑岩为主;石钱滩组下部以黄绿色砾岩为主,夹砂泥岩和煤线,上部以砂泥岩、灰岩、生物碎屑灰岩不均匀互层为主,并含大量海相生物化石,总体显示为由陆相向海陆环境过渡。

二叠纪火山岩主要分布在准噶尔盆地西北缘及东部地区。在西北缘地面露头上二叠系佳木河组为紫灰色、棕灰色、灰绿色的凝灰质碎屑岩及火山熔岩(安山岩及安山玄武岩等),露头剖面未见底。在西北缘钻井上佳木河组可分为上、中、下三个亚组,其中上、下亚组火山岩较为发育;下亚组为一套杂色砾岩、火山碎屑岩夹熔岩,是该层主要的含油气层段;上亚组在克拉玛依油田内的五区、八区广泛钻遇,为一套火山熔岩夹火山碎屑岩。在陆梁地区为安山玄武岩及安山质熔结角砾岩夹棕红色砂质泥岩、细砂岩。在东部地区,金沟组火山岩较为发育,主要分布于帐北断褶带、原大井凹陷内及露头区。帐北地区与大井地区岩性差异较大,帐北地区主要为巨厚的火山岩与正常的碎屑岩互层。

从勘探历史来看,准噶尔盆地火山岩的油气勘探时间较早,1956 年发现第一个火山岩油藏——克拉玛依古 3 井区石炭系油藏,1992 年发现沙漠整装火山岩稀油油藏——石西石炭系油藏。自 2005 年以来,火山岩油气田的勘探开发才进入快速发展阶段,2008 年发现整装千亿方气田——克拉美丽气田,2014 年发现了金龙油田。目前在盆地内已发现克拉玛依油田、石西油田、克拉美丽气田等 47 个火山岩油气藏,探明地质储量近 3 亿 t,展现了火山岩勘探的广阔前景。

多年的勘探实践证实,火山岩储集体表现为成带分布、分区发育的特点,其中克拉美丽山前带巴山组与下石炭统的中酸性火山岩、克拉玛依带的中基性火山岩等是准噶尔盆地石炭系火山岩油气藏勘探的重要区域。

1.1.2 准噶尔盆地典型火山岩储层特征

准噶尔盆地范围大,涉及的储层岩性复杂,不同地区储层特征差异较大,下面主要针对西北缘的克拉玛依地区、红车地区、中拐地区和盆地腹部石西地区及陆东-五彩湾等地区(图 1.2)进行总体介绍,便于读者从总体上了解盆地内储层的岩性、物性特点及油气富集规律,为测井分析研究奠定基础。

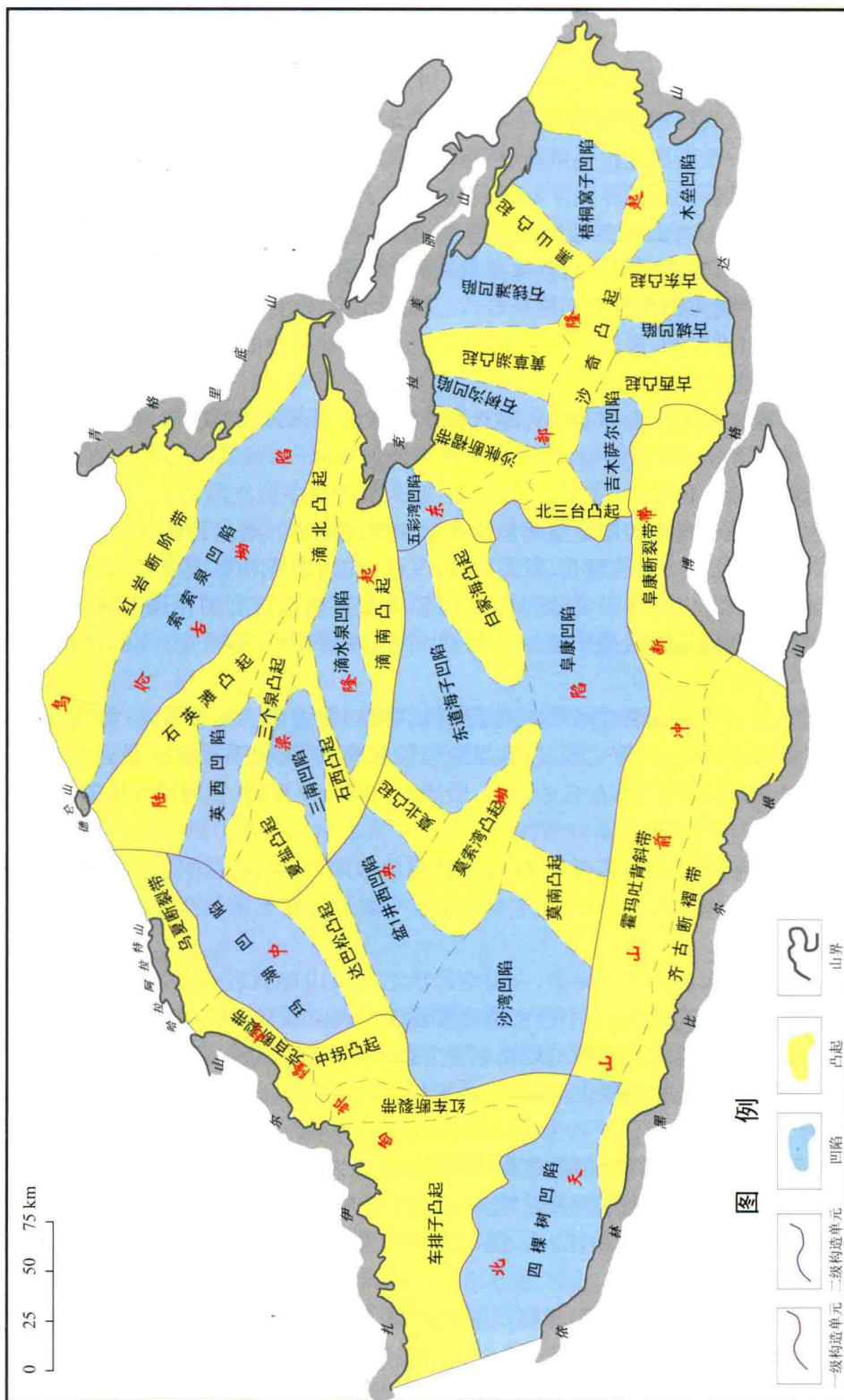


图 1.2 准噶尔盆地构造单元图

1. 盆地西北缘地区

1) 克拉玛依地区

克拉玛依地区火山岩油气藏位于准噶尔盆地西北缘克百断裂带内(图 1.2 中红色框),油田内发育一级断层克拉玛依断层、南白碱滩断层及其他次级断层。该区在火山喷发和喷发间歇期沉积的共同作用下,在晚石炭世形成了一套巨厚的火山岩沉积岩建造,地层自下而上由若干个火山岩砂砾沉积岩序列组成。根据大量的岩心和薄片鉴定统计资料,克拉玛依地区石炭系火山岩岩性主要包括火山熔岩类的玄武岩、安山岩、流纹岩、霏细岩,火山碎屑岩类的火山角砾岩和凝灰岩,以及以火山岩为主的变质砂砾岩等。该区火山活动受断裂控制,爆发相、溢流相沿主断裂一线分布。远离主断裂,火山岩逐渐为沉积岩所代替,火山岩相转为沉积岩相。

火山岩储集层具有裂缝和基质孔隙双重介质特点,基质孔隙度、渗透率比较低,平均孔隙度一般为 6%~9%,渗透率大部分小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该区储层孔隙度、渗透率按安山岩、玄武岩、火山角砾岩、霏细岩、砂砾岩、凝灰岩的顺序依次降低。

克拉玛依地区石炭系的储集空间包括孔隙和裂缝两类。通过铸体薄片、岩石薄片和荧光薄片分析,孔隙包括斑晶溶孔、粒间溶孔、气孔、粒内溶孔和基质溶孔;而裂缝则包括岩石在成岩作用过程中收缩形成的网状收缩缝,以及在构造应力的作用下破裂而形成的构造裂缝。该区石炭系储层属于裂缝孔隙型,个别为裂缝型,孔隙是火山岩的主要储集空间。

该区石炭系火山岩含油性好坏取决于岩性、物性、裂缝的匹配关系,一般情况下石炭系含油性好的岩心,溶蚀孔隙比较发育,裂缝也较发育,匹配关系较好。受岩性、物性、裂缝的非均质性影响,油藏内部存在非产层,形成的油藏为不规则、非均质性强的块状油藏。

2) 红车地区

红车地区位于准噶尔盆地西北缘南段,其东为沙湾凹陷,西北为扎依尔山,构造上位于西部隆起与中央拗陷的接合部位,主要包括红车断裂带和车排子凸起的一部分(图 1.2 中蓝色框)。

该区石炭系以火山碎屑岩为主,火山熔岩次之。火山碎屑岩中以基性玄武质火山角砾岩和玄武质角砾凝灰岩为主,中性火山碎屑岩少。火山熔岩中以基性玄武岩为主,中性安山岩较少。车排子石炭系储层的岩相主要为爆发相、溢流相和火山沉积相。

各个岩相的孔渗性相差较大,总体上爆发相的物性最好,火山沉积相的物性最差。储层孔隙度为 2.7%~25.5%,平均为 12.94%;渗透率为 $0.015 \times 10^{-3} \sim 120.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层属中高孔、低渗储层。

该区火山岩储层的储集空间类型繁多,石炭系储层为裂缝孔隙型双重介质,裂缝的储集空间相比孔隙的储集空间要小得多,但对油井的产能起着重要作用。

3) 中拐地区

中拐地区在区域构造上位于准噶尔盆地西部隆起,西与红车断裂带、东与达巴松凸起、北与玛湖凹陷、南与沙湾凹陷和盆 1 井西凹陷为邻,两面临凹,为一大型继承性鼻状隆起构造,是油气聚集的有利地区,目前的金龙油田即位于这一地区(图 1.2 中黄色框)。

该区石炭系岩石类型主要包括火山角砾岩、安山岩、玄武安山岩、英安岩及花岗岩等,储层岩性以火山角砾岩为主,熔岩次之。火山岩相主要为爆发相、溢流相和火山沉积相,局部发育次火山岩相。金龙油田位于爆发相的火山角砾岩和溢流相的安山岩区。油层孔隙度为 $5.0\% \sim 15.9\%$,平均值为 7.6% ;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 597.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.447 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层属中孔、低渗储层。

该区石炭系储层是裂缝-孔隙双重介质储层。根据岩心观察及铸体薄片、荧光薄片等资料分析,石炭系储层孔隙类型主要有溶蚀孔、气孔和微裂缝。从微电阻率成像测井资料(FMI)看,石炭系储层裂缝较发育,裂缝类型主要有斜交缝、直劈缝及网状缝,熔岩的裂缝较火山角砾岩更发育。

2. 盆地腹部石西地区

盆地腹部的石西地区石炭系火山岩体构造上为一古潜山,是被石西2井北断裂、石西1井南断裂和石002井西断裂三条相向的逆断裂所夹持的不规则三角形垒块(图1.2中绿色框)。

该区火山岩分为三类,即熔岩类、普通火山碎屑岩类和过渡岩类。熔岩最为发育,占钻探总厚度的 52.65% 。熔岩类岩性包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩,其中安山岩是分布最广泛的岩石类型,条带状熔岩在该区广泛发育。该区石炭系火山岩自下而上划分为基性-中基性岩、中性岩和中酸性岩三段,是一个完整的喷发旋回。岩相有爆发相和溢流相,以溢流相为主。

根据石西石炭系火山岩物性资料统计,储集岩基质物性以较高孔隙度、低渗透率为主。基质岩块孔隙度为 $0.9\% \sim 28.8\%$,平均为 13.12% ;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 4489.92 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $11.738 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

储集空间为与裂缝连通的溶蚀孔隙。常见孔隙类型有基质溶孔、缝内充填物溶孔、气孔充填物溶孔、角砾间溶孔等,孔隙连通性较差。较大的裂缝在该区火山岩中也非常发育。

3. 陆东-五彩湾地区

陆东-五彩湾地区是指准噶尔盆地东道海子北凹陷以北、莫北凸起以东、克拉美丽山以西、乌伦古拗陷以南的广大地区,包括滴南凸起、滴北凸起、滴水泉凹陷、五彩湾凹陷及石西凸起、东道海子凹陷与白家海凸起的一部分。新疆油田第一个千亿立方米级的大气田克拉美丽气田即位于该地区(图1.2中紫色框)。

陆东地区储层岩性十分复杂,火山岩是该区主要的储层岩石类型,包括火山熔岩、火山碎屑岩和浅成侵入岩。火山熔岩主要包括玄武岩、安山岩和流纹岩,火山碎屑岩主要包括凝灰岩和火山角砾岩,其中凝灰岩最为发育,浅成侵入岩主要包括花岗斑岩和二长玢岩等。岩相以爆发相、溢流相、次火山岩相和火山沉积相为主。

克拉美丽气田石炭系储层孔隙度分为 $0.1\% \sim 27.9\%$,平均为 9.6% ,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 844.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.161 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为中孔、低渗储层。

克拉美丽气田石炭系气藏发育的孔隙类型有原生孔隙和次生孔隙,风化淋滤形成的

次生孔缝占全部孔隙的 78.3%,原生孔缝占 21.7%,储集空间主要以次生孔缝为主。从储集空间组合类型来看,克拉美丽气田石炭系火山熔岩类主要的储集空间以气孔、基质溶蚀孔及构造缝为主,孔缝组合类型主要为溶孔裂缝型和气孔裂缝型;火山碎屑岩主要的储集空间类型包括基质溶孔、构造缝和溶蚀缝,孔缝组合类型主要为裂缝溶孔型。

4. 准噶尔盆地与我国东部盆地火山岩油气藏的主要差异

根据文献和已有研究成果分析,以准噶尔盆地为代表的西部和以松辽盆地为代表的东部火山岩油气藏储层差异主要体现在地质成因背景、岩性岩类和次生改造程度等几个方面。

从成因背景来看,东部火山岩油气藏形成的时代较新,以中、新生代陆内裂谷为主,主要为典型的自生自储型近源含油气组合,多与火山岩、潜火山岩及浅成侵入岩有关,而西部准噶尔盆地火山岩油气藏形成时代相对偏老、持续时间长,以古生代岛弧和碰撞后陆内裂谷为主,发育近源与远源两种成藏组合类型,总体属于不整合面下的火山岩体圈闭;从岩性岩类来看,东部地区以中酸性火山岩为主,喷发期次较单一,火山岩规模总体偏小,而西部地区火山岩以中基性为主,喷发期次多,规模较大;从后期的次生改造作用比较,东部火山岩油气藏原位性保持好,火山机构较完整,而西部火山岩油气藏则因构造环境变化大,后期改造强,火山机构保存不完整,有较大变化。从储集空间类型分析,东部松辽盆地火山岩储集空间主要为原生气孔和裂缝,而西部准噶尔盆地火山岩储层储集空间类型多为原生孔隙、次生溶孔和裂缝,并且由于遭受长期风化淋滤剥蚀,发育大量次生溶蚀孔、洞及构造裂缝,次生洞、缝的作用较东部地区更为重要。

这些差异的存在,导致我国东、西部火山岩储层评价时测井资料的适用性、采取的技术路线和方法等均有许多不同之处,需要在实际勘探开发中开展更有针对性的研究。

1.2 火山岩储层测井评价技术概述

与沉积岩储层相比,火山岩储层的测井评价更具挑战性,主要表现在火山岩岩性和储集空间复杂多样及由此造成的储层物性和含油性评价困难等。国内外学者们在火山岩油气藏测井评价方面已经做了大量工作,取得了许多研究成果。总体来看,火山岩油气藏的测井评价主要包括岩性识别、储层物性评价及流体性质评价等,其中储层物性评价中的裂缝识别及储层参数(包括孔隙度、渗透率和含水饱和度等)的确定是储集层评价的关键。

1.2.1 火山岩岩性的测井识别

岩性识别是火山岩储层测井评价的基础。通常以常规测井资料为主,基于不同测井曲线的响应特征,通过构建各种形式的交会图等进行岩性识别。此外,近些年来微电阻率成像、阵列声波、元素俘获能谱(element capture spectroscopy, ECS)等特殊测井的推广应用,也为岩性识别提供了更多更有利的技术手段。由于岩性变化复杂,火山岩岩性识别中特别需要重视岩心、薄片刻度测井的思想(匡立春等,2010),当存在成像测井资料时,常采用“成像测井识别岩性结构、常规测井识别岩石成分”的多层次综合识别思想(王建国等,2008a,2008b;谭伏霖等,2011;张勇等,2012)。

以常规测井为主的岩性识别,主要是利用不同岩性的火山岩在各种常规测井曲线上表现出的岩石物理差异性,以曲线重叠图、交会图等方式判断岩性。常用图件包括 M-N 交会图,声波、密度、中子三孔隙度测井交会图,自然伽马-声波时差交会图,电阻率-自然伽马交会图等。例如,早期的 Khatchikian(1982)以 M-N 交会图为主进行火山岩岩性识别,后来的多数研究者(范宜仁等,1999;赵建和高福红,2003;冯翠菊等,2004;王树寅等,2006;邵维志等,2006;张家政和赵广珍,2008;陈冬等,2011;谭伏霖等,2010,2011;尚玲等,2013;赵宏波等,2014)也大量采用了这种交会图识别岩性的思路。当然,在具体构建这些图件时,需要分析不同测井资料的变化规律及其对岩性的敏感性(匡立春等,2010;姜传金等,2014;张大权等,2015),并且常常需要几种资料和交会图组合应用。再进一步结合岩心、地层测试、钻录井等资料并辅以成像、阵列电阻率等可提高常规测井的岩性识别效果(Ran et al,2006;郑雷清等,2009)。

微电阻率成像、阵列声波、元素俘获能谱和核磁共振等特殊测井在火山岩岩性识别中更具优势。电成像测井可在一定程度上替代实际岩心,在图像上显示的颗粒大小、形状、磨圆度、球度、粒序或韵律等均可作为岩性判断的重要直观依据(陈钢花等,2001),基于这些显示特征,成像测井图既可以用来直观识别岩性(张莹等,2007;王智等,2010;王坤等,2014),也发展了一些利用神经网络、计算机图形学、支持向量机等技术手段的自动识别方法(Li et al,2006;胡刚等,2011);由于不同岩性具有不同的岩石强度,利用阵列声波测井(DSI、XMAC 等)提供的纵、横波速度及速度比等资料,结合密度测井估算岩石的强度参数如泊松比、体积模量、切变模量等,能较好地地区分岩性(刘呈冰等,1999;刘之的,2010a);火山岩岩性复杂,矿物成分多变,由元素俘获测井处理得到的地层常见元素含量和矿物含量可以识别岩性,目前应用效果较好(袁祖贵等,2004;王飞等,2008;杨英波等,2011)。

为了综合利用以上这些测井资料和岩性识别技术、适应不同地区火山岩岩性的差异,在测井响应特征分析的基础上,常常综合利用神经网络(邹长春等,1997)、对应分析和模糊数学(刘为付等,2002;Pan et al,2003;潘保芝等,2003a,2009;赵武生等,2010;张伯新等,2010)、主成分分析(潘保芝,2002;潘保芝等,2009)、逐步判别(李祖兵等,2009)或 Fisher 判别(张家政等,2008;刘喜顺等,2010;张家政和赵广珍,2008;王坤等,2014)、层次分解(谭伏霖等,2010;赵武生等,2010)等数学方法来提高测井资料识别岩性的能力。这些数学方法或计算机手段在不同地区适用性可能差别较大,需要结合实际地质情况优选使用(汤小燕等,2009a;赵武生等,2010;张莹和潘保芝,2011a,2011b;朱怡翔和石广仁,2013;周金昱等,2014)。

根据已有的研究成果和实践认识,火山岩岩性识别时要特别强调岩心等第一性资料的重要性,在岩心分析基础上,尽可能发挥元素俘获能谱、电成像等各种特殊测井的作用,常规测井与特殊测井相结合是目前最有效的火山岩岩性识别途径(张大权等,2015)。

另外,岩相识别也是火山岩研究的重要内容之一。目前利用测井资料识别火山岩岩相多采用测井相分析技术(黄隆基和范宜仁,1997;郭振华等,2006;黄晨,2007),比较有效的手段是常规测井与特殊测井相结合,前者主要根据曲线相对数值大小反映岩石成分(朱爱丽等,1997;张程恩等,2011),后者则主要从岩石结构和构造特征上区分不同岩相(徐晨等,2011;曾巍,2015)。但总体来看,仅凭测井资料识别岩相难度很大,需要充分发挥取心分析资料及地质、地震等专业领域的技术优势,多学科有机结合以提高岩相划分精度。