

■ 准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书 ■

准噶尔盆地玛湖凹陷 碱湖轻质油气成因与分布

雷德文 阿布力米提·依明 秦志军 曹剑 陈刚强 杨海波 等/著

Origin and Occurrence of the
Light Oil and Gas in the Alkaline Lake of
Mahu Sag, Junggar Basin



科学出版社

准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书

准噶尔盆地玛湖凹陷 碱湖轻质油气成因与分布

Origin and Occurrence of the Light Oil and Gas in the
Alkaline Lake of Mahu Sag, Junggar Basin

雷德文 阿布力米提·依明 秦志军 曹 剑 陈刚强 杨海波 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

准噶尔盆地玛湖凹陷是我国典型的富烃凹陷,除了发育全球极具特色的下二叠统风城组碱湖优质烃源岩外,还有石炭系—二叠系其他三套海相—陆相烃源岩,具有重要的基础科学与实践应用意义。本书针对“碱湖生烃”这一重大科学问题开展系统的地质地球化学研究,目的是查明碱湖沉积的岩相学与沉积学特征,建立发育模式,再结合其他三套烃源岩,剖析油气成因,恢复成藏过程,建立成藏模式,总结油气分布与富集规律。

本书可供从事油气勘探与地质地球化学研究,以及西北地区岩相古地理研究的专家学者和大专院校高年级学生和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

准噶尔盆地玛湖凹陷碱湖轻质油气成因与分布=Origin and Occurrence of the Light Oil and Gas in the Alkaline Lake of Mahu Sag,Junggar Basin/雷德文等著. —北京:科学出版社,2017.6
(准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书)

ISBN 978-7-03-051043-3

I. ①准… II. ①雷… III. ①准噶尔盆地-碱湖-轻质油-石油成因②准噶尔盆地-碱湖-轻质油-分布规律 IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 290840 号

责任编辑:万群霞 吴凡洁 / 责任校对:桂伟利

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:311 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

雷德文 阿布力米提·依明

秦志军 曹 剑 陈刚强

杨海波 卞保力 赵 龙

姚爱国

序

准噶尔盆地位于我国西部,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,东西长为700km,南北宽为370km,面积为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。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,成为我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,晚海西期是盆地拗陷构造格局形成、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世纪初期)、准噶尔西北缘滚动勘探阶段(21世纪初期至今)。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》历经近两年的时间终于面世。这是由油田自己的科技人员编写出版的一套专著类丛书,这充分表明我们不但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

准噶尔盆地是我国西部的一个典型大型叠合含油气沉积盆地,面积约 13 万 km²,最大沉积厚度可达 15000m,是我国西部最重要的含油气盆地之一。盆地油气勘探历史悠久,早在 20 世纪 50 年代,就建成了我国第一个大油田——克拉玛依油田,此后,勘探频频突破,特别是在西北缘地区的玛湖凹陷含油气系统,不仅在发现克拉玛依大油田后围绕断裂带建成百里大油区,最近还在斜坡-凹陷区建成新的百里大油区,表明玛湖凹陷是一个大型富烃凹陷。因此围绕玛湖凹陷展开油气生成与成藏研究具有重要的理论基础与勘探指导意义,是我国陆(湖)相生油与叠合盆地成藏的一个典型实例。

准噶尔盆地玛湖凹陷在深层石炭系—二叠系发育了 4 套潜在烃源岩系,沉积环境从海相-陆相形成了一个系统的演化序列,其下二叠统风城组发育了全球迄今最古老的碱湖优质烃源岩,这为玛湖大油区的形成奠定了物质基础,具有重要意义。然而,迄今为止,对这 4 套烃源岩,特别是风城组碱湖优质烃源岩的研究还很不系统。有鉴于此,本书从油气形成的物质基础——烃源岩入手,重点针对“碱湖生烃”这一重大科学问题,开展系统的地质地球化学研究,目的是查明玛湖凹陷碱湖沉积的岩相学与沉积学特征,建立发育模式,再结合其他 3 套烃源岩,剖析油气成因,恢复成藏过程,建立成藏模式,总结油气分布与富集规律,期望研究结果不仅能加深对科学问题的认识,也为勘探提供依据。

本书是近几年来玛湖凹陷油气生成和成藏研究工作的系统总结,参与工作的高校、科研院所和研究人员很多,谨向他们致以深深的谢意。研究得到中国石油天然气股份有限公司(简称中石油)“新疆大庆”油气勘探重大专项“富烃凹陷岩性地层油气藏富集规律与关键技术研究”(编号 2012E-34-01)、“十二五”国家科技攻关项目子专题“准噶尔盆地岩性地层油气藏富集规律及目标评价”(编号 2011ZX05001-06)的资助。新疆油田分公司总经理陈新发欣然为本丛书作序,在此深表感谢。

准噶尔盆地玛湖凹陷大油气区的勘探成功凝聚了新疆油田分公司几代石油人的辛勤汗水和聪明才智,是勘探地质人员锐意进取、积极探索的结果,是勘探理念创新带来的突破,闪耀着勘探家的哲学思想。希望本书的出版能够促进勘探家进一步活跃思维、解放思想,不断将勘探工作推向纵深、取得新的更大成就。感谢新疆油田分公司勘探开发研究院广大科研人员的不懈努力及在研究过程中的支持。

由于作者水平有限,文中难免有疏漏之处,恳请广大专家读者不吝指正。

作 者

2017 年 1 月

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 油气勘探概况	1
1.2 碱湖的概念与基本特征	3
1.2.1 碱湖与盐湖	3
1.2.2 碱湖的基本特征	6
第 2 章 地质背景	10
2.1 构造特征及演化	10
2.1.1 大地构造背景	10
2.1.2 构造演化	11
2.2 地层与沉积演化	12
2.2.1 地层	12
2.2.2 沉积特征及演化	16
2.3 生储盖组合	19
第 3 章 玛湖凹陷风城组碱湖沉积特征与发育模式	21
3.1 玛湖凹陷风城组古碱湖沉积背景	21
3.1.1 盆地类型与古地貌	21
3.1.2 古气候	23
3.1.3 古盐度	24
3.1.4 古水温	25
3.1.5 古水深	26
3.2 风城组碱湖沉积主要岩石类型与特征	29
3.2.1 主要岩石类型及其基本特征	30
3.2.2 岩石组合与分布特征	40
3.3 风城组碱湖沉积相类型及特征	42
3.3.1 主要沉积相类型	42
3.3.2 主要沉积组合类型与特征	45
3.4 风城组碱湖沉积发育模式	47
3.4.1 沉积垂向演化特征	47
3.4.2 沉积展布特征	54

3.4.3	连井沉积相对比	61
3.4.4	碱湖沉积发育模式	66
第4章	碱湖烃源岩特征	69
4.1	风城组碱湖烃源岩生烃特征与机理	69
4.1.1	风城组碱湖烃源岩发育的确证	69
4.1.2	风城组碱湖烃源岩生烃特征	72
4.1.3	风城组碱湖烃源岩生烃机理	78
4.2	石炭系—二叠系烃源岩基础地球化学特征	80
4.2.1	烃源岩分布	80
4.2.2	有机质丰度	81
4.2.3	有机质类型	85
4.2.4	有机质成熟度	92
4.2.5	烃源岩生烃潜力综合评价	95
4.3	石炭系—二叠系烃源岩分子与同位素地球化学特征	96
4.3.1	正构烷烃	96
4.3.2	无环类异戊二烯烃与 β -胡萝卜素	97
4.3.3	萜烷类	98
4.3.4	甾烷类	101
4.3.5	稳定碳同位素	102
第5章	碱湖轻质油气成因	103
5.1	原油地球化学与来源	103
5.1.1	原油地球化学特征	103
5.1.2	原油分类与来源	108
5.2	天然气地球化学与来源	119
5.2.1	天然气组分	119
5.2.2	天然气稳定碳同位素	120
5.2.3	天然气成因分类	129
5.3	轻质油气的碱湖成因	134
5.3.1	玛湖凹陷轻质油气基本特征	134
5.3.2	玛湖凹陷轻质油气来源与成因	136
第6章	油气成藏与分布	139
6.1	油气成藏条件	139
6.1.1	前陆碱湖优质高效烃源岩	139
6.1.2	立体输导体系	140
6.1.3	三类规模有效储层与储盖组合	141
6.2	典型油气藏成藏实例分析	143
6.2.1	乌-夏断裂带乌40和乌36井区百口泉组油藏解剖	143
6.2.2	玛北斜坡区玛131井区百口泉组油藏解剖	152

6.2.3 斜坡带玛2—玛6井区百口泉组油藏解剖	164
6.3 油气成藏模式与高产机理	171
6.3.1 油气成藏模式	171
6.3.2 油气富集规律	172
6.3.3 油气高产机理与控制因素	176
6.4 高熟油气分布与有利勘探领域	182
6.4.1 高熟轻质油气分布	182
6.4.2 三大勘探领域	183
参考文献	189

1.1 油气勘探概况

准噶尔盆地是我国西部的一个典型大型叠合含油气沉积盆地,位于我国新疆维吾尔自治区北部,坐标东经 $81^{\circ}\sim 92^{\circ}$,北纬 $43^{\circ}\sim 48^{\circ}$ 。盆地周围被褶皱山系环绕,其西北与扎伊尔山和哈拉阿拉特山相邻,东北靠着青格里底山和克拉美丽山,南面与伊林黑比尔根山和博格达山相依,平面形状呈南宽北窄的近三角形,东西长约 700km,南北宽约 370km,面积约 13.6 万 km^2 ,平均海拔约 500m(王绪龙和康素芳,1999;Cao et al., 2005)(图 1-1)。根据区域构造演化及勘探习惯,将盆地划分出 6 个一级构造单元和 34 个二级构造单元(杨海波等,2004),其中,乌伦古拗陷、陆梁隆起、中央拗陷、西部隆起、北天山山前冲断带及东部隆起为一级构造单元(图 1-1)。

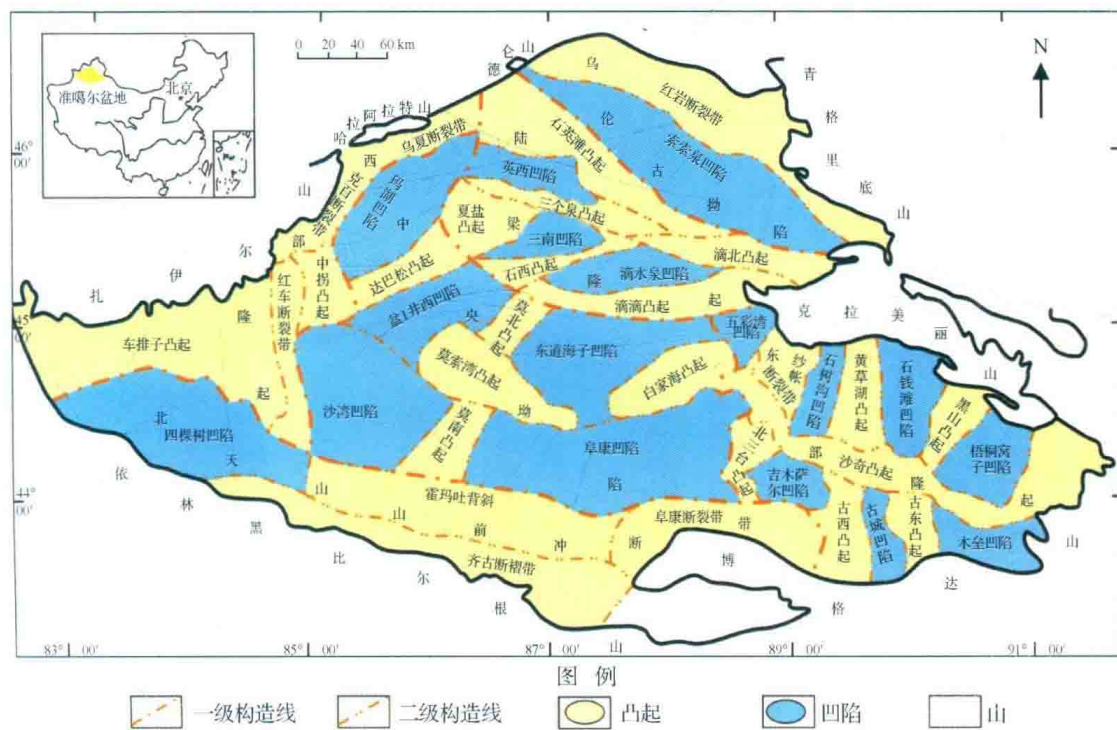


图 1-1 准噶尔盆地构造单元划分图

本书所研究的玛湖凹陷位于盆地西北缘(匡立春等,2014;雷德文等,2014),是准噶尔盆地中央拗陷分布最北的一个二级构造单元,其与扎伊尔山和哈拉阿拉特山紧靠,西侧与乌-夏断裂带及克百断裂带相邻,西南侧与中拐凸起毗邻,东南侧则分布有达巴松凸起、夏盐凸起以及英西凹陷,北边是石英滩凸起(图 1-1)。

准噶尔盆地玛湖凹陷是中国典型的富烃凹陷(匡立春等,2012),过去六十多年来围绕玛湖凹陷油气勘探取得丰硕成果(图 1-2)。1955 年 10 月 29 日,黑油山 1 号井喷出黑色油流,标志着新中国第一个大油田在准噶尔盆地西北缘诞生。此后围绕克拉玛依(克)-乌尔禾(乌)、乌尔禾(乌)-夏子街(夏)和红山嘴(红)-车排子(车)三大断裂带勘探工作不断深入,截止到西北缘精细勘探(2005 年),三大断裂带共发现 8 个油田,累计探明石油储量 12.26 亿 t,百里油区逐步形成(匡立春等,2012)。

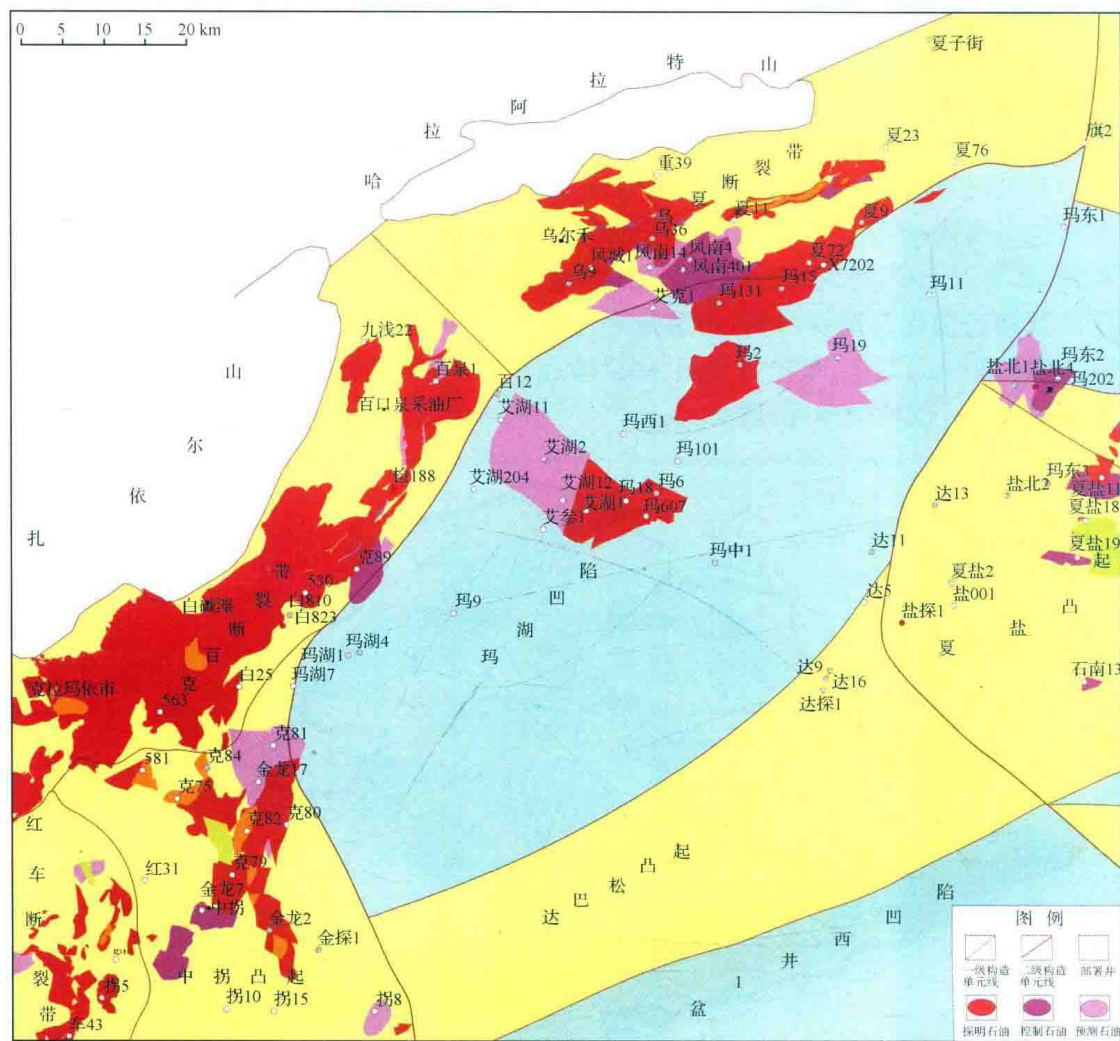


图 1-2 准噶尔盆地玛湖凹陷勘探成果示意图

20 世纪 80 年代末,西北缘油气勘探首次提出“跳出断裂带,走向斜坡区”的勘探思路,1993 年 5 月初,在上斜坡区发现了玛北油田。此后,限于当时低渗透砂砾岩储层改造技术的限制,勘探一直未取得实质性突破。2010 年后,储层改造技术取得了跨越式进步,处于同一有利构造带、埋藏更浅的夏子街扇体时隔二十年后再次进入勘探家的视野。通过对环玛湖凹陷斜坡带的整体研究,明确玛湖凹陷西环带是石油预探的重大战略领域,优选夏子街-玛湖中央构造带岩性地层目标为突破口,之后上钻的玛 13、玛 131 井均获工业油流,其中玛 131 井采用二级加砂压裂新工艺,提产效果明显。通过深入研究,首次提出

了夏子街扇西翼百口泉组具有三面遮挡大面积整体含油特征。

玛北斜坡岩性地层油气勘探取得初步成功后,在全球连续型油气藏勘探的背景下,开始构造连续型油气藏的勘探,发现玛北斜坡区构造平缓、储层低渗、边底水不活跃,且发育沟通储集层(下三叠统百口泉组)和烃源层(石炭系一二叠系)断裂,因此可能大面积成藏。因此,重新厘定百口泉组油层标准,开展老井复查,多井恢复试油获得工业油流,并且新部署井目的层均钻遇良好油气显示,逐步验证了连续型油气大面积成藏新构想。按这一模式,加快勘探节奏,采用直井控面、水平井提产的思路对玛北斜坡区百口泉组展开了整体勘探,2012~2013年,10几口井获得工业油层,逐步证实玛北斜坡区大面积整体含油特征,整装亿吨级油藏落实。

2013年后,在玛西斜坡又取得重大突破,发现并落实了玛18井—艾湖1井区亿吨级整装高效优质储量区块。2014年4月,在玛19井百口泉组试油获得工业油流,进一步证实玛西斜坡区百口泉组具有大面积成藏潜力。2014年8月,玛南斜坡区玛湖4井百口泉组获工业油流,最高日产油 14.7m^3 。玛北斜坡区夏子街扇东翼新钻井玛21井和玛22井在百口泉组钻遇油层。同时,玛东斜坡区的甩开探井达10井、玛中1井等井也见到良好油气显示。截至目前,玛湖凹陷西斜坡百里油区基本形成,准噶尔盆地展现出一个新的大油(气)区,是今后盆地油气储量与产量的新基地。

2016年,玛湖凹陷东斜坡地区的勘探也取得重要进展,达13井百口泉组试油获高产工业油流,这是该区百口泉组勘探首次获得重大突破,证实了这一地区具备优质、高效、规模储量区块,预示着玛湖凹陷东斜坡地区是玛湖凹陷继西斜坡百里新油区发现后下一个寻找效益规模储量区的现实勘探领域。

综合上述,可见玛湖凹陷的勘探重大发现得益于勘探思路从构造型油气藏向岩性地层油气藏、再向连续型油气藏的转变,勘探理念指导了油气发现。因此,系统地总结玛湖凹陷的烃源岩形成及其油气成因和分布规律不仅对中国西部油气精细勘探具有重要指导意义,在理论上对发展陆(湖)相生烃理论也有学术意义。

1.2 碱湖的概念与基本特征

研究发现,准噶尔盆地玛湖凹陷在深层石炭系一二叠系发育了4套潜在烃源岩系,沉积环境从海相—陆相形成了一个系统的演化序列。尤其有意义的是,其下二叠统风城组发育了全球迄今最古老的碱湖优质烃源岩,这为玛湖大油区的形成奠定了物质基础。然而迄今为止,对这4套烃源岩,特别是风城组碱湖优质烃源岩的研究还很薄弱。因此,下面将重点评述碱湖的基本特征,为后续烃源岩地球化学以及油气成因与成藏研究提供基础。

1.2.1 碱湖与盐湖

现代地质学将湖泊定义为陆地上洼地积水形成、水域比较宽广、换流缓慢的水体,由湖盆、湖水及水中所含矿物质、有机质和生物等所组成(施成熙,1979),它是大陆封闭洼地的一种水体,并参与自然界的水分循环(许秋瑾等,2006)。湖水的来源多种多样,有的来

自降水、地面径流及地下水,有的则来自冰雪融水,其消耗主要是蒸发、渗漏、排泄和开发利用。湖泊的大小和类型差别很大,从数十万平方公里到几公顷皆有分布,在深度上,深则千余米,浅则仅几厘米(接近干涸的湖)(王洪道,1995;伍光和等,2000)。湖泊的外部形态特征千差万别,这取决于其成因和发展过程,在其形成至消亡的过程可能会有较大的改变(黄锡荃等,1985;王洪道,1995)。

湖泊的类型多种多样,基于研究目的不同,划分湖泊类型的方法和依据也不同,主要分类方法有按湖盆成因、按湖水补给与径流的关系、按湖水盐度和湖水的水化学特性分类等(郑绵平,2001;舒良树,2010)。

按湖盆的成因划分,有以内力作用为主形成的构造湖、火口湖和阻塞湖等,以外力作用为主形成的河成湖、风成湖、冰成湖、海成湖及溶蚀湖等(伍光和等,2000;舒良树,2010)。但需要注意的是,有不少湖泊的成因具有作用混成的特点(伍光和等,2000)。有石油地质学意义的主要是一些与构造作用相关的大中型湖泊(柳广弟,2009),并按湖水补排情况可分为畅流湖盆(吞吐湖)和闭流湖盆两类。前者河水既能注入,又能流出,注入湖盆的水量大于蒸发量和地下渗流量之和,湖平面的位置维持在与湖盆的最低溢出口相同的高程上,多余的水通过泄水通道流出湖盆;后者闭流湖盆只有入湖河流,没有出湖水流。

还有一些按其他标准划分的各类湖泊,如按湖水与海洋沟通情况可分外流湖与内陆湖两类,外流湖是指湖水能通过出流河汇入大海,内陆湖则与海隔绝(郑绵平等,1989;张焜等,2010);根据湖水温度的高低,可分为暖湖、温湖和冷湖(王洪道,1995);根据湖水中的营养物质分为富营养湖、中营养湖和贫营养湖(王洪道,1995;伍光和等,2000);根据湖水所含主要阴离子的种类不同分为碳酸盐水、硫酸盐水和氯化物水等(王洪道,1995;郑绵平,2001)。

总体而言,考虑到湖盆是湖泊形成的基础,湖盆的成因不同、湖泊的形态及湖底的原始地形也有各异,而湖泊的形态特征往往对湖水的运动、理化性质、水生生物生长及湖泊的演化,都有不同程度的影响,因而按湖盆成因分类得到广泛的应用(黄锡荃等,1985;伍光和等,2000)。

湖水含盐量是衡量湖泊类型的重要标志。含盐量系指湖水中总的离子浓度,通常是根据钠、钾、镁、钙、碳酸盐、硅酸盐及卤化物的浓度来计算(王洪道,1995)。按湖水含盐度的大小,可分为淡水湖、微(半)咸水湖、咸水湖及盐水湖4类,分别指湖水含盐度小于1g/L、在1~24g/L、在24~35(50)g/L、达到或超过35(50)g/L(Zheng et al., 1993)。其中,盐度大于35(50)g/L的通常称为盐湖或卤水湖,此时卤水的含盐量,已经接近或达到饱和状态,甚至出现自析盐类矿物的结晶或者直接形成盐类矿物的沉积。另外有的盐湖因表面卤水干涸而没有湖表卤水,但有湖表盐类沉积,湖表往往形成坚硬的盐壳,由含盐沉积与晶间卤水组成地下卤水湖,此类盐湖一般称为干盐湖,有的盐湖的湖表面被砂或黏土粉砂覆盖成沙下湖(王洪道,1995)。

盐湖是一种咸化水体,多数为湖泊发展到老年期的产物,它富集着多种盐类,沉积的盐类矿物达200余种,是重要的矿产资源(黄锡荃等,1985;郑绵平等,1989)。人类已经从盐湖中开采大量石盐、碱、芒硝和钾、锂、镁、硼、溴、硝石、石膏和医用淤泥等基础化工、农业、轻工、冶金、建筑和医疗等重要原料(郑绵平,2001)。盐湖中还赋存着具有工业意义

的铷、铯、钨、锶、铀以及氯化钙、菱镁矿、沸石、锂蒙脱石等资源,发育有大量具有重要经济价值与科学意义的嗜盐藻、盐卤虫、螺旋藻、轮虫等特异生物资源和耐旱、耐盐碱基因资源,它们为人类获取蛋白质、天然食物色素、能源、多种工业科学材料和净化环境,为盐湖变为“良田”开拓了良好的前景(郑绵平,2001)。同时盐湖又是重要的旅游资源和医疗淤泥资源。盐湖卤水的储热特点,已开始用于太阳能盐水池发电(郑绵平,2001)。盐湖也是自然环境信息和天然实验室,还是“碳沉积池(carbon sinks)”“自然生物反应器(nature bioreactors)”。此外,盐湖沉积占世界陆表面积相当大,有大量碳酸盐沉积,能在一定程度上延迟温室效应(黄锡荃等,1985)。

研究认为,盐湖的形成条件主要有两点。首先是封闭的地形和一定盐分与水量的补给(张彭熹,2000;郑喜玉等,2002)。封闭的地形使流域内的径流或泉水向湖泊汇集,湖水不致外泄,盐分通过径流或泉水源源不断地从流域内向湖泊输送,在强烈的蒸发作用下,湖水咸度越来越高,盐分越积越多,久而久之,就形成了盐湖。其次是干旱或半干旱的气候环境(张彭熹,2000;郑喜玉等,2002)。在干旱或半干旱的气候条件下,湖泊的蒸发量往往超过湖泊的补给量,湖水不断浓缩,盐度日渐增加,使水中各种元素达到饱和或过饱和的状态,在湖滨和湖底形成了各种不同类型盐类矿物的沉积。如我国的柴达木盆地,空气干燥,降水量稀少,是一个典型的内陆荒漠盆地。位于盆地东北缘的茶卡盐池,年降水量约210mm,盆地中心的察尔汗盐湖年降水量仅30mm左右,这里的年蒸发量却达2400~2600mm,蒸发量远远大于降水量及地下水对湖泊的补给量,这样的气候条件十分有利于盐湖的形成,因而在盆地内部分布了众多的盐湖。由于各种盐类的溶解度不同,在盐类矿物质出时呈现出一定的沉淀顺序,从物源的上游到盐湖之间,各种盐类沉积物常呈有明显的环带状分布(郑绵平等,1989;郑喜玉等,2002)。例如在昆仑山北麓的一些盐湖地区,靠近山区的地段为硼盐带,近湖地段为芒硝带,湖内则沉积有食盐和光卤石。这种现象说明盐类物质是自流域向盐湖迁移的。盐湖不仅可以形成于大陆,也可由海湾演变而成(郑绵平等,1989;郑喜玉等,2002)。如果海湾因某种原因与海洋隔离,成为封闭状态,兼之气候干燥炎热,水体在强烈的蒸发作用下盐度将不断增高,最后也会形成盐湖,产生各种盐类沉积。

从盐湖的形成条件可以看出,盐湖的分布有明显的规律。以中国为例,盐湖的分布几乎全部集中在北部的内陆区域。大致在冈底斯山、念青、唐古拉山、秦岭、吕梁山及大兴安岭以北的地区,介于北纬 $32^{\circ}\sim 49^{\circ}$,这一广大地区被称为中国盐湖区。藏北、青海、新疆和内蒙古的盐湖数量最多,相比而言,甘肃、宁夏及黑龙江等省区只有少数盐湖。盐湖之所以集中在上述地区,是由于这些地区处在干旱或半干旱的气候环境,年蒸发量远大于年降水量。例如,藏北年蒸发量大于年降水量为10~40倍,青海为70~120倍,新疆为25~250倍,内蒙古为15~60倍。

盐湖的类型有很多,根据盐湖卤水赋存状态、盐湖沉积的主要盐类矿物和卤水的化学成分可划分出不同类型的盐湖。按盐湖卤水赋存状态,盐湖可分为卤水湖、干盐湖和沙下湖(黄锡荃等,1985)。卤水湖的特征是盐类沉积仅见于岸边或湖底某些部位,湖水在一年四季中有涨有落,但湖中总有自由表面卤水。干盐湖的主要特征是在一年内大部分时间是干枯的,只有在潮湿季节才有暂时性的表面卤水。裸露地表的干盐滩由于日晒和强烈

蒸发,地下卤水析盐膨胀造成地表龟裂,更由于常年风吹、雨淋、日晒蒸发形成了巨大的盐壳,比如位于我国青海的察尔汗盐湖就是一个巨大的干盐湖。沙下湖是以全年内均无表面卤水为特征的一类盐湖,晶间卤水的水位远比干盐湖的埋藏深度大,并且因卤水很少跟外界交换,水位较为平稳,只有降水下渗或盐类自析才稍微引起水位的微小波动。沙下湖另一个直观的特点是在其盐类沉积的顶部往往有或厚或薄的浮土和流沙覆盖,全年均无地表径流的补给。

卤水化学成分指示湖水物理化学作用的特点和水盐平衡体系,按盐湖卤水水化学成分分类在盐湖分类上应用最广,可分为碳酸盐类型、硫酸盐类型(包括硫酸钠亚型和硫酸镁亚型)和氯化物类型(黄锡荃等,1985;王洪道,1995;郑喜玉等,2002)。

碱湖是湖水的水化学类型为碳酸盐的盐湖,是众多盐湖类型中的一种,按盐湖的主要盐类沉积矿物,盐湖可分为石盐湖、芒硝湖、碱湖、硼酸盐盐湖和钾镁盐盐湖等。碱湖湖水的主要阴离子为 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} ,其化学沉积产物主要为碳酸盐类,以碳酸钠盐和碳酸氢钠盐为主,如 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$ (苏打), $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ (天然碱)、单斜钠钙石(碳钠钙石、斜钠钙石) $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ 等,还可能伴有不同数量的石膏和石盐,此类湖泊也称苏打湖。

1.2.2 碱湖的基本特征

1. 碱湖湖盆的主要成因类型

碱湖湖盆的成因类型目前最常见和最重要的基本都是构造湖,除此之外,风成湖和火山口湖也有一定的发育(杨清堂,1996;郑绵平,2001)。

构造湖是受构造运动控制,由于构造运动所产生的地壳断陷、拗陷和沉陷所产生的构造湖盆(王洪道,1995;舒良树,2010)。如以世界最重要的两大碱湖带东非裂谷碱湖带和北美西部碱湖带为例,二者均为构造湖。东非地区沿东非裂谷的东支发育一串依构造线排列的构造湖群,是目前世界最发育的碱湖带,其中最著名的碱湖有马加迪湖、纳特龙湖等,均为断陷湖盆(Eugster, 1980; Garrett, 1992);北美地区的碱湖主要发育在美国西部,大致呈北西南东向分布,是目前已知全球储量最多的碱湖带和碱矿床发育带,以断陷-凹陷为主,主要的如阿伯特湖、欧文斯湖、西尔斯湖等(Spencer et al., 1984; Kowalewska and Cohen, 1998)。青藏高原碱湖带和内蒙古高原碱湖带是我国两大碱湖带,大部分也是构造湖或在构造湖基础上被改造的碱湖(郑绵平等,1983;郑绵平等,1989;杨清堂,1996)。受强烈隆升的影响,青藏高原断陷作用发育,湖泊长轴与区域构造线方向相吻合,高原上的大部分碱湖为构造湖,如马日错、懂错、蓬错等(郑绵平等,1983;郑绵平等,1989);内蒙古高原碱湖带中断陷和拗陷湖盆均有发育,前者如查干诺尔等,后者如大布苏湖等(杨清堂,1996)。此外,一些著名的古碱湖盆地也以构造湖盆为主,如美国的绿河盆地,它是目前发现储量最大的天然碱矿床,形成于古近纪,为一大型拗陷盆地(Mello and Maxwell, 1990; Horsfield et al., 1994),我国的泌阳凹陷也发现了国内最重要的碱矿(李敏禄,1984;邱隆伟等,2001)。

除构造湖外,有的碱湖也为火山口湖和风成湖,火山口湖主要发育在东非裂谷,而风

成湖则在内蒙古高原碱湖群中有一定发育,主要是一些风蚀洼地(杨清堂,1996;贾国东和蔡克勤,1997)。这些天然碱湖处于半沙漠区,四周多被沙丘所环绕,岸边至湖底高差为10~20m(孙大鹏,1990)。

综上,碱湖的湖盆类型较多,规模大小悬殊,即便同是构造湖,其形成作用和特征也有很大的差异。总的来说,碱湖的形成与湖盆的成因类型似乎没有特定的关系,有的湖盆可能是两种或多种成因联合作用形成,湖盆形成之后会受到各种地质作用的改造,直至消亡,主要的改造作用是陆源碎屑沉积和气候的影响,后期的地质构造作用也是重要的因素。

2. 碱湖的主要自生矿物与成碱作用

如前所述,碱湖为碳酸盐型盐湖,所以这类盐湖中发现的矿物主要为碳酸盐类矿物,现已发现二十余种,常见的主要矿物组合包括:单斜钠钙石(碳钠钙石、斜钠钙石) $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ 、斜方钠钙石(钙水碱) $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ 、碳酸钠钙石 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{CaCO}_3]$ 、天然碱 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3]$ 、泡碱 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$ 、水碱 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 、碳酸氢钠盐 $[\text{NaHCO}_3]$ 、碳氢钠石 $[\text{Na}_5\text{H}_3(\text{CO}_3)_4]$ 、硅硼钠石 $[\text{NaBSi}_3\text{O}_8]$ 、氯碳钠镁石 $[\text{MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaCl}]$ 、碳钠镁石 $[\text{NaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 、片钠铝石 $[\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2]$ 、碳酸钠钒 $[\text{NaCO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4]$ 、水菱镁矿 $[\text{Mg}_4(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ 等。夹层中方解石、白云石等矿物较发育,菱镁矿和菱铁矿也常见到,同时常见数量不等的石膏、石盐、芒硝等。在不同温度的湖水中可能出现不同类型的矿物,如泡碱在寒冷的湖水中结晶,而水碱一般在温暖的湖水中晶出,含水矿物在较高温度的成岩压实过程中可能发生脱水作用而形成新的矿物,如碳酸钠钙石可能在一定成岩条件下由单斜钠钙石转化而来。与构造相关的大型碱湖盆地(火山洼地或断陷盆地)常发育一些特殊的矿物,如硅质岩、燧石、硅硼钠石、高 P_{CO_2} 分压矿物如碳酸氢钠石、高温矿物如富铁白云石、沸石类及萤石类矿物等。

碱湖的成碱作用是一个复杂的过程,现在还不十分清楚,不同的矿物形成过程也不相同,甚至有的矿物是否能在自然条件下沉积也是个争议的问题,但可能存在下列三种成碱作用:化合成碱作用、硫酸盐还原成碱作用及置换成碱作用(郑喜玉和吕亚平,1995a,1995b)。大部分碱湖处于半干旱沼泽草原地带,具有良好的 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的水化学背景,有利于碳酸盐盐湖的形成和天然碱的沉积。富含阴离子 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和阳离子 Na^+ 的卤水,在干旱气候影响下,阴阳离子作用生成 NaHCO_3 或 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 等盐类沉积是普遍存在的成碱过程,即化合成碱作用。从大部分的碱湖盐类沉积与白云石共生来看,化合成碱是重要的成碱方式(郑喜玉和吕亚平,1995b)。

成碱过程中硫酸盐还原作用是人们讨论较多的一个问题。碱湖形成和天然碱沉积通过微生物脱硫作用完成,该作用以有机质为还原剂且在硫酸盐还原细菌的参与下进行,硫酸钠盐(主要为 Na_2SO_4)在细菌(脱硫细菌)参与下产生还原作用,分解成 Na^+ 与 SO_4^{2-} 离子,迅速同富含 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的碳酸盐湖水反应,生成不同类型碳酸氢钠盐或碳酸钠盐和 H_2S ,其结果能消耗沉积物和水中的 SO_4^{2-} ,同时向环境释放 HCO_3^- 和 H_2S 。因此菌藻类生物和湖边耐盐碱植被的生物化学作用在碳酸钠矿床形成中占有不容忽视的地位,