

吐哈盆地台北凹陷 天然气成因及气源对比

The origin of gas in Taibei Depression,
Tupan-Hami basin and gas-source correlation

赵红静 著



石油工业出版社

吐哈盆地台北凹陷 天然气成因及气源对比

赵红静 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以吐哈盆地天然气和中—下侏罗统烃源岩为主要研究对象,从烃源岩、天然气和伴生原油多层面系统剖析了研究对象的地球化学特征,对烃源岩进行了倾油倾气性判识,认为台北凹陷从西向东,其烃源岩倾油性减弱、倾气性增强,结合地质体热演化规律,为凹陷“东气西油”的油气分布格局提供了源控依据;对天然气成因和成熟度进行了深入研究,判识天然气主体为低熟气,但伴有少量油型气的输入;以轻烃为基础进行了气源直接对比,厘定了主力气源岩。本书建立了以轻烃为基础的烃源岩热模拟产物—原油—天然气的三元直接气源对比法,将天然气与具体的气源岩系相匹配,实现了精细气源对比。

本书可供从事有机地球化学、石油天然气地质研究及油气勘探的科研人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

吐哈盆地台北凹陷天然气成因及气源对比/赵红静著.

北京:石油工业出版社,2013.6

ISBN 978-7-5021-9593-9

I. 吐…

II. 赵…

III. 石油天然气地质—含油气盆地—天然气成因—研究—新疆

IV. P618.130.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 104789 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.cn

编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9.75

字数:236 千字

定价:50.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

吐哈盆地是我国西北地区富含油气资源的富煤陆相盆地,台北凹陷则是其主要油气发现区,该凹陷发现油气储量占全盆的80%。台北凹陷侏罗系蕴含的油气资源促成了我国煤成烃理论的发展,但油气勘探实践表明其气油发现储量比远低于预期。就已发现的天然气而言,其地球化学特征多样,难以将其简单地归因为煤成气或油型气。对该区主力烃源岩和天然气进行深入地球化学剖析,厘定主力气源岩无疑对该区的天然气勘探有很大裨益。

本书以吐哈盆地台北凹陷为主要研究对象,采用多种地球化学分析技术和方法,系统剖析天然气、部分原油以及潜在烃源岩样品的有机地球化学与有机岩石学特征,深入探讨了天然气的成因类型,通过气—油—源三元对比厘定主要气源岩。通过几年的系统研究,主要取得以下进展。

台北凹陷中一下侏罗统烃源岩有机质丰度变化范围大,但总体上无论是煤、碳质泥岩还是泥岩,其有机碳含量均较高,但生烃潜量和氯仿沥青“A”的含量不高。烃源岩显微组分组成和热解参数指标表明台北凹陷中一下侏罗统水西沟群煤系烃源岩绝大部分属于Ⅲ型干酪根,但也有个别样品落在Ⅱ型干酪根区域。而中侏罗统七克台组(J_2q)则大部分样品属于Ⅱ型干酪根,仅有部分样品落在Ⅲ型区域。镜质组反射率 R_o 值表明台北凹陷侏罗系烃源岩热演化程度不高:其中小草湖洼陷样品埋深2245~3407m, R_o 为0.45%~0.65%,处于未成熟到低成熟阶段,其地温梯度为台北凹陷各洼陷中最高;丘东洼陷样品埋深2647~5104m, R_o 介于0.51%~0.90%,为低成熟到成熟阶段;胜北洼陷样品埋深2068.7~5004m, R_o 介于0.42%~0.97%,为未成熟到成熟阶段。综合烃源岩有机质丰度、类型和成熟度指标,可得出台北凹陷不同洼陷不同层系烃源岩评价:小草湖洼陷中七克台组为好的油气源岩,而三间房组(J_2s)和西山窑组(J_2x)均为中等油气源岩或气源岩,丘东洼陷西山窑组为气源岩或非烃源岩,下侏罗统三工河组(J_1s)为中等油气源岩,八道湾组(J_1b)属气源岩;胜北洼陷七克台组有机质丰度高,部分烃源岩为中—好油气源岩,而西山窑组则为中等油气源岩。

台北凹陷烃源岩有机显微组分整体上贫惰质组、富镜质组和壳质组+腐泥组,表征烃源岩主体为倾油和油气并举。分子组成方面,煤岩和碳质泥岩富含芳香烃化合物, J_2q 湖相泥岩则以富正构烷烃为特征,基于烃源岩氯仿沥青“A”气相色谱质谱分析(GC/MS)的总离子流图面貌、正构烷烃和芳香烃的绝对含量和相对含量,建立了吐哈盆地中一下侏罗统烃源岩倾油倾气性的定量判识标准,并对所研究的烃源岩样品倾油倾气性进行了判识,指出台北凹陷湖沼相煤岩和碳质泥岩以倾气性为主;而中一下侏罗统泥岩则以倾油和油气并举为主。不同层位倾油倾气性不同,台北凹陷从 J_1b 到 J_1s 再到 J_2x 、 J_2q ,其倾油性逐渐增强,可能与其沉积环境变迁有关;而 J_2s 倾气性较强,则与这些样品均取自小草湖洼陷有关。平面上,除 J_2q 湖相泥岩外,台北凹陷中一下侏罗统煤系烃源岩中倾油的样品均集中在西部的胜北洼陷,而东部的丘东洼陷和小草湖洼陷的样品则为倾气或倾油气,与凹陷内“东气西油”的油气分布格局相吻合。另一

方面,台北凹陷东部的小草湖洼陷具有相对较高的地温梯度,其烃源层相应热演化程度稍高。烃源岩的倾油倾气性与热演化程度从不同侧面影响了研究区的油气分布格局。

吐哈盆地不同类型烃源岩氯仿沥青“A”中正构烷烃分布特征不同:部分煤岩和碳质泥岩具中高碳数奇数碳优势和 nC_{33} 和 nC_{35} 优势。 nC_{33} 和 nC_{35} 优势随成熟度增加而减弱,而且与中高碳数奇数碳优势正相关,表征其与中高碳数奇数碳链烷烃具相似生源。台南凹陷海陆过渡相 C—P₁ 泥灰岩和部分台北凹陷中一下侏罗统湖相和湖沼相泥岩氯仿沥青“A”则具中低碳数偶碳优势(nC_{14} — nC_{20})。该偶碳优势与烃源岩的热演化程度无明显相关性,与饱和烃馏分中伽马蜡烷含量无明显相关性,但多见于具低 Pr/Ph 特征的样品;而且具有偶碳数正构烷烃碳同位素轻、奇碳数正构烷烃碳同位素重的特点,表征了还原水体中水生生物的贡献。

吐哈盆地烃源岩生物标志化合物和芳香烃化合物组合特征表明:煤岩、碳质泥岩具高 Pr/Ph、贫伽马蜡烷,部分碳质泥岩和煤具有强 nC_{33} 和 nC_{35} 优势,低 C_{29} Ts、高 C_{29} 甾烷、贫二苯并噻吩、低芘含量的特征,表征湖沼相沉积环境。作为参照的台南凹陷 C—P 泥灰岩具高伽马蜡烷含量、低 Pr/Ph、高中低碳数偶碳优势、低重排藿烷、高 C_{29} Ts、高 C_{27} 甾烷、富二苯并噻吩、贫二苯并呋喃、高芘含量的特征,表征海陆过渡相的沉积环境。

台北凹陷天然气地球化学特征为低非烃含量、高烷烃气含量、气体湿度大;烷烃气碳同位素主体呈正碳同位素系列,乙烷碳同位素($\delta^{13}C_2$)主体介于 -29‰ ~ -25‰ 之间,比正常油型气重、但比正常煤成气轻;天然气浓缩轻烃中甲基环己烷含量高,喻示煤成气的输入。天然气碳同位素组成间 $\delta^{13}C_2$ 与 $\delta^{13}C_3$ 正相关性较强,表征同成因;但天然气的 $\delta^{13}C_1$ 变化范围较大,与乙烷之间无明显正相关性,暗示甲烷可能有多成因。基于 $\delta^{13}C_2$ 所计算出的天然气 R_o 介于 0.4% ~ 0.8% 之间,总体上表征了低成熟气——热演化程度低的煤成气的贡献。部分样品的碳同位素组成明显轻于其他样品,其 $\delta^{13}C_1 < -42\text{‰}$ 、 $\delta^{13}C_2 < -29\text{‰}$,且同一口井内不同深度样品的碳同位素组成随埋深变浅而加重,表征了油型气的混入。研究区还存在部分样品的某一或某些组分碳同位素异常偏重,表现出碳同位素系列倒转,与此相对应会出现该组分的体积百分比明显偏低和 iC_4/nC_4 比值较高,曾遭受细菌氧化等次生蚀变作用所致。

天然气伴生原油具有高 Pr/Ph 比、贫伽马蜡烷、富四环萜烷、富 C_{29} 甾烷、贫芘的特征,在油源对比时明显与煤系烃源岩的煤岩和碳质泥岩的生物标志化合物组成特征一致,表征原油源于煤系烃源岩的煤岩和碳质泥岩。在对台北凹陷气源岩的地质和地球化学特征详细研究的基础上,利用气—油—源三元直接对比法,即利用烃源岩在 450°C 热模拟生成的轻烃、天然气浓缩轻烃和原油溶解轻烃进行对比的结果表明台北凹陷天然气主力气源岩为台北凹陷中一下侏罗统煤系烃源岩。

本书在完成过程中得到博士生导师张昌民和张敏两位教授的精心指导,在此致以衷心感谢。研究过程中还得到了长江大学地球环境与水资源学院包建平教授、张春明教授、朱翠山高级工程师和陈祖林、陈小慧讲师等同仁的大力帮助及吐哈油田勘探开发研究院金颖高级工程师和张品工程师的鼎力支持,在此一并致以诚挚谢意。

全书由赵红静博士撰写,张敏教授审阅全书并修改。由于笔者水平所限,书中难免出现疏漏甚至错误,恳请读者予以批评指正。

目 录

绪论	(1)
第一章 区域地质背景	(6)
第一节 盆地演化与构造特征	(7)
第二节 区域沉积特征	(9)
第三节 烃源岩展布与封盖层特征	(13)
第二章 实验方法与样品概况	(18)
第一节 实验方法	(18)
第二节 样品概况	(19)
第三章 烃源岩评价与倾油倾气性判识	(23)
第一节 烃源岩评价	(23)
第二节 煤系烃源岩倾油倾气性判识	(46)
第三节 倾油倾气性判识标准的建立	(55)
第四章 烃源岩可溶烃分子地球化学	(57)
第一节 饱和烃的分布与组成特征	(57)
第二节 芳香烃的分布与组成特征	(91)
第五章 天然气地球化学特征	(101)
第一节 天然气化学组成	(101)
第二节 天然气同位素组成	(107)
第三节 天然气轻烃组成	(112)
第四节 天然气成因	(115)
第六章 气源对比	(129)
第一节 伴生原油油源对比	(129)
第二节 气—油—源三元对比	(133)
参考文献	(140)

绪 论

天然气作为一种绿色能源,在能源市场的地位日见高涨。作为全世界人口大国以及经济的高速发展使我国的能源供需矛盾日渐突出,除了进口石油和液化天然气外,从2010年开始我国也开始进口气态天然气。随着天然气供需缺口逐步加大和“西气东输”工程的建设,天然气的勘探开发已成为各大油田的一项非常重要的工作。

吐哈盆地位于我国西北,是一个富煤陆相盆地,天然气资源基础雄厚,截至2006年底,探明石油地质储量 2.9×10^8 t、天然气及溶解气地质储量为 910.6×10^8 m³,气/油发现储量比为314m³/t(苏传国等,2009)。许多学者对于吐哈盆地天然气地质条件和成因类型进行了研究,获得了很多认识(徐永昌,2008,2009;苏传国,2008;王作栋,2008;高岗,2007,2008;李成明,2001;曾凡刚,1998;王志勇,1997;戴金星,1993;龙道江,1993)。但是仍然存在许多争论,天然气的成因并未获得统一认识,精细气源对比更是罕见报道。有鉴于此,本书的主要目的是通过对吐哈盆地台北凹陷的油—气—源进行全方位的地球化学综合分析,以期建立一种较为直观的烃源岩倾油倾气性评价方法,对研究区煤系烃源岩做出倾油倾气性评价;并对天然气的成因和来源展开详细研究,实现精细气源对比,厘定主力气源岩,从而对吐哈盆地的天然气勘探有所裨益。

一、煤系烃源岩倾油倾气性判识

随着煤成油理论的提出和实践,煤系烃源岩在生烃高峰期,其主力产物是液态烃还是气态烃成为地球化学家和油气勘探家们的关注焦点之一。煤成油系指煤和煤系地层中集中和分散的陆源有机质,在煤化作用的同时生成的液态烃类(黄第藩,1992)。Brooks和Smith(1967,1969)最早注意到煤中植物类脂的意义。Tissot和Welte(1984)指出,煤除生成甲烷和挥发性非烃化合物以外,也能生成重质的不挥发烃类,但是,煤生成高分子量烃,即液态烃的潜力很有限,主要生成气。Littke和Leythaeuser(1993)总结了对煤的观察,认为煤是重要的油源。随着一些重要的中、新生代的煤成油在很多盆地相继被发现(Huang et al., 1991; Thomas, 1982; Hoffmann et al., 1984; Monthieux et al., 1986; Lane et al., 1980; Snowdon, 1980, 1982),煤成油越来越被重视。从其地球化学特征来看,煤成油多为轻质油或凝析油,相对富含饱和烃,芳香烃含量较高,非烃和沥青质含量很低;Pr/Ph高,一般大于2.8;具低碳数正构烷烃优势;组分碳同位素偏重(戴金星,1987)。

随着越来越多的煤成油田被发现,煤系烃源岩能够生油也已经越来越被认可(Huang et al., 1991; Huang, 1999; 黄第藩等, 1995; 程克明, 2004; Willkins and George, 2002)。煤系油源岩也受到广泛关注(黄第藩等, 1995; Hunt, 1991; Powell and Boreham, 1991, 1994; Hunt, 1996; Cook and Struckmeyer, 1986; Durand and Paratte, 1983; Diessell, 1992; Levine, 1993; Fleet and Scott, 1994)。研究表明,不但壳质组,甚至富氢镜质组在煤化过程中能生成液态烃,因此,各种热模拟、红外光谱、元素分析、核磁共振等实验技术被用来评价煤的生油潜力(Willkins and George, 2002)。煤系烃源岩的倾油倾气性判识也成为地球化学界的热门话题(程克明, 2004; Tissot,

1984;张宝等,2006;Isaksen et al.,1998),该问题的实质是煤系烃源岩,尤其是煤岩作为油源岩的可能性及潜力。

目前针对煤系烃源岩倾油倾气性的研究多以间接和定性方法较多。主要依据是有机显微组分中富氢组分(藻类体、孢子体、角质体等)的含量(Hunt,1991;钟宁宁,陈恭洋,2002;Snowdon,1991;Mukhopadhyay et al.,1991)、氢指数(HI)的高低(Killops et al.,1998;Suggate and Boudou,1993,Suggate,2002;Skyke and Snowdon,2002)等。钟宁宁等(2002)从煤系烃源岩显微组分组成分布的特点出发,提出显微组分组合为镜质组—壳质组—腐泥组类型的烃源岩倾油;为镜质组—惰质组类型的倾气;过渡型则为油气并存。有机显微组分中壳质组富含氢,因此其含量的高低往往被用作倾油性判识的依据。不同学者提出的倾油煤中富氢显微组分含量下限不同,Hunt(1991)将其下限定为大于15%~20%的壳质组+树脂体,Snowdon(1982)将其下限定为至少含10%的富氢显微组分,Mukhopadhyay(1991)将其下限定为15%~20%的壳质体。但是,也有研究表明并不是所有的壳质组都有相同的生油潜力,脂族碳才是生油的主要贡献者(程克明,2004;程克明等,2004;Qin et al.,1991)。富氢镜质体在煤化过程中也具有生液态烃能力,因此也可能成为液态烃的主要贡献者(Pepper and Corvi,1995)。¹³C核磁共振波谱则被用于检测干酪根中油、气潜力碳的相对含量,进而直接判别各类烃源岩在“液态窗”阶段的倾油、倾气性(程克明,2004;程克明等,2004;Qin et al.,1991)。烃源岩倾油倾气性的判识还可根据样品岩石热解过程中释放出来的液态烃含量。Powell等(1994)认为,H/C原子比为0.9,岩石热解氢指数(HI)为200~300mg/g(烃/TOC),可能是煤成油有效烃源岩的界限。Killops(1998)则认为界限值应为沥青指数(S_1 /TOC)大于10mg/g(HC/TOC)。Suggate(1993,2002)经过多年研究,建立了煤阶Rank(Sr)和氢指数之间的关系,Sykes(2002)提出了基于Rank(Sr)的有效氢指数概念,并认为做倾油倾气性判识时需做校正。利用上述多种方法得到的结论往往并不一致,存在一定争议,究竟怎么评价煤系烃源岩是否具有生成液态烃的能力并无定论。那么,如何从根本上去认识这个问题,或者说是否可以通过一种手段较直观地判断一个烃源岩倾油倾气性则是解决问题的关键所在。是否可以利用有机地球化学倚重的分子参数来进行煤系烃源岩倾油倾气性评价?因此,建立煤系烃源岩倾油倾气性的生物标志物定量指标无疑能推动该研究领域的发展。

二、天然气成因判识及气源对比

天然气的利用在我国有着十分悠久的历史,但是,天然气科学研究却比较薄弱,截至20世纪80年代初,我国的探明天然气储量仅为石油的1%~2%。1979年,煤成气理论开始在我国提出,经过4次国家重点科技攻关,不仅在天然气地质理论研究方面取得进展,天然气勘探也取得了极其丰硕的成果,天然气储量从1949年的 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到2007年的 $5.94 \times 10^{12} \text{ m}^3$,已发现12个大型气田,形成6大气区(石宝珩,2009),随着准噶尔盆地克拉美丽大气田的发现,意味着我国第7大气区的发现,正是天然气成因理论的发展推动了我国天然气工业的发展。

在20世纪60年代以前,传统的石油地质学认识只有以低等生物为主的腐泥型有机质才能生成天然气,而以陆生高等植物为主的腐殖型有机质不能生气,指导天然气勘探的只有“一元论”。20世纪40年代德国学者得出了煤成气理论,并用该理论指导于1959年在荷兰北部发现了格罗宁根大气田,标志着天然气成因理论从一元论发展为二元论(戴金星等,1992)。

煤成气理论被引进我国的标志则是《成煤作用中形成的天然气与石油》(戴金星,1979)一文的发表。煤成气理论为我国天然气勘探开辟出一个全新的领域,引起了轰轰烈烈的煤成气勘探,使我国天然气探明储量成倍增加,大中型气田发现速率加快。建国后,在“一元成气论”指导找气期间,我国仅发现6个中型气田,平均约每5年发现1个中型气田;“二元成气论”指导找气期间发现大中型气田36个,平均约1年发现1个大中型气田。截至2008年底,我国在除台湾省以外的四川、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、松辽、莺琼、东海、珠江口和渤海湾等9个含气盆地内共发现了36个大气田(戴金星等,2007),总储量为 $37092.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,占中国天然气总储量的66.24%;中型天然气田78个,储量为 $9667.13 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国探明天然气的17.3%;大中型天然气田探明储量合计占全国探明天然气的83%以上(张水昌、朱光有,2007)。天然气的系统和深入研究表明,尽管大部分天然气是有机成因的,但是,仍有相当多的天然气是无机成因的。18世纪中叶俄国学者就注意到油气的成因与火山作用有关,Jeffrey(1988)认为花岗岩带的烃类气体是无机合成的;菲律宾超基性岩石中溢出的富含 CH_4 和 H_2 的气体被认为是幔源的(Abrajano et al., 1988)。戴金星(1992)总结了天然气的无机来源,认为无机烷烃气主要由上地幔高温生气、蛇纹石化生气和基性岩浆冷却生气三种方式生成。另外,许多行星上的大气也含有以甲烷为主的烃类气体,并且地球原始甲烷的存在已经被各种科学研究所证实。无机成因因而成为烃类气体成因之一。无机成因气概念的提出使得指导天然气勘探的天然气成因理论也相应发展成为“多元论”。

随着多元成气理论的提出,一大批有关天然气成因鉴别和分类的成果也随之涌现,建立了以天然气碳同位素、组分、轻烃、生物标志物等为依据的较完善的天然气成因鉴别体系(戴金星等,1992,2008)。戴金星(1992)、徐永昌(1993a, 1993b)、刘文汇(1997)、王涛(1997)等均提出了各自的天然气分类方案。这些分类方案在根据成气母质分类时均将天然气分为有机成因气、无机成因气和混合成因气。但在对有机成因气进一步细分时则略有差异,总的来说,有机成因气根据其有机质类型不同又可分为油型气和煤成气。再根据其烃源岩热演化程度的不同,又可将其进一步划分为生物气、生物—热催化过渡带气(未熟—低成熟)、热降解气(成熟)和热裂解气(过成熟)四大类。至此,天然气理论方面建立了较为完善的多元成气理论及成因判别体系,对指导天然气的勘探卓有贡献。“多元多阶成气理论”的提出,为我国天然气勘探指明了方向,使得天然气勘探有了重大进展。赵文智(2005)认为液态烃滞留于烃源岩体内是普遍现象,有些情况下,排出量远小于滞留量,在高一过成熟阶段发生热裂解,使烃源岩仍有良好的生气潜力;干酪根降解成气与液态烃裂解成气在时机和贡献上构成接力,从而提出有机质接力成气理论。徐永昌(2009)则提出 R_o 介于0.4%~0.8%之间所生成的气为低熟气,并认为低熟气实质是煤成气理念的延伸。接力成气和低熟气的提出丰富了有机质生气模式,拓展了天然气勘探方向。

世界上大多数天然气藏是烃类气体和非烃气体的混合气藏。在进行天然气的成因鉴定时通常是对各种气体组分(至少是主要成分)进行成因鉴别,从而确定天然气的主要成因归属。戴金星(1993)根据中国大量有机和无机烷烃气的碳同位素数据、 ^3He 含量和 R/R_a 比值,并结合了美国等其他国家大量分析数据,提出无机成因烷烃气具有负碳同位素系列($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$)、甲烷碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_1$)一般大于-30‰、 $R/R_a > 0.5$ 和 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 > 0$ 、 $\text{CH}_4/^3\text{He} \leq 10^6$ 的特征;无机成因 CO_2 则具有 $\text{CO}_2 > 60\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -9\%$ 的特征(戴金星,

1993)。在识别出有机与无机成因后,对于有机成因气判识的指标多集中在煤成气与油型气的判识方面。戴金星(1992,1993)从天然气化学组成、碳氢同位素组成、轻烃组成和伴生凝析油轻烃组成等多方面提出了有机成因气类型判识方法。有机成因烃类气体的碳氢同位素随成熟度增加而变重,很多学者根据单体烃气与热成熟之间的密切联系,提出了各自有针对性的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与镜质组反射率(R_o)之间的关系(戴金星等,1992;Stahl,1975,1977;Galimov,1988;Clayton,1991;徐永昌等,1985,1990;沈平等,1987;刘文汇等,1999;Whiticar,1996)。Whiticar(1996)在总结了在各种沉积过程中的碳同位素分馏情况的基础上,比较了Stahl、Berner、Faber等人提出的回归公式,提出了正常热成熟过程中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 之间的相关性。Chung(1988)提出利用单体烃碳同位素与其碳数倒数之间的相关性来判别天然气的原生程度。碳同位素因此成为判识有机成因气的关键性指标。

气源对比是天然气勘探开发和油气理论研究的重要内容,但是,天然气组分单一,可供选择的指标较少,且这些指标受热演化、运移效应、生物降解作用等影响较大,因此气源对比相对于油源对比难度更大。

目前常用的气源对比方法主要有两种,一种主要是通过伴生凝析油(或原油)作为中间桥梁,利用生物标志物等分布特征建立原油与烃源岩关系,再通过油源关系得到气源关系,这种方法间接,只能确定液态烃与烃源岩之间的关系,并不能直接确定天然气与烃源岩之间的关系。另一种常用的气源对比方法是通过气—气对比来确定烃源岩,也就是说,在大量天然气分析资料的基础上,总结出不同类型天然气地球化学特征的判识指标,然后根据该地区的天然气性质确定天然气成因类型,最后根据烃源岩的发育特点和有机质类型来解决气源问题,该方法只能用于大套烃源岩的对比,如在同一地区存在几套性质、热演化程度相近的烃源岩则适用程度低。随着天然气分析测试技术的进步,一些新的气源对比方法被提出,如K—Ar关系(郑建京等,2005)、苯和甲苯的同位素对比法(蒋助生,2000)。Hakan Hoggörmez(2005)对天然气进行模拟,然后再与各烃源岩进行匹配,以判断主力气源岩。Boreham(2008)则利用新戊烷的碳、氢同位素进行已降解的天然气—源岩对比。这些对比方法都是推论法,并没有实现直接对比,如果能开发出一种直接的气源对比方法无疑对明确天然气的具体烃源岩层系具有开创性的意义。

三、吐哈盆地天然气研究现状

吐哈盆地位于新疆东部,盆地面积 $5.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中有效勘探面积 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。截至2006年底,已发现24个油气田,其中纯气田2个,探明石油地质储量 $2.9 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气地质储量 $381.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、溶解气地质储量 $464.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ (苏传国,2008)。就盆地类型而言,吐哈盆地是一个具有双重基底、前陆结构、多旋回的复合型含油气盆地,盆地发育历史长,充填层系多,其中三叠系和侏罗系含油气层系最重要。盆地发育了石炭系一下二叠统海陆交互相泥质岩和碳酸盐岩、上二叠统一三叠系湖相泥岩和中一下侏罗统煤系地层和湖相泥岩三套生油岩,形成了上、中、下三套生烃成藏组合和含油气系统,其中台北凹陷主要发育的是上含油气系统(袁明生,1998)。吐鲁番坳陷是吐哈盆地的主体,而台北凹陷则是吐鲁番坳陷的重要组成部分(李成明,2001),面积为 9600 km^2 ,集中了吐哈盆地85%以上的勘探工作量(袁明生等,2002),对台北凹陷产出天然气地球化学特征做出详尽的成因分析,将对吐哈盆地的油气勘探具有重要的参考价值。

就其油气成因来看,吐哈盆地被认为是煤成油和煤成气的典型盆地(戴金星,1993;戴金星等,1993;黄第藩,1992;程克明,1994;袁明生等,2001;张晓宝,1998;George等,1995),但是,也有很多地质学家和地球化学家存在不同看法:陈建平认为煤系泥岩是主要的油源岩而不是煤和碳质泥岩(陈建平,1999;Chen et al.,2001);Li和Bao(2001)基于生物标志物的绝对含量,认为侏罗系的煤系烃源岩不是唯一的油源,上二叠统和中一下侏罗统的湖相泥岩也有重要贡献。苏传国(2005)则认为吐哈盆地的原油是煤成油与湖相油的混源油。关于吐哈盆地天然气成因,也是众说纷纭。徐永昌(2008,2009)认为天然气在烃源岩演化程度较低时也能生成,从而提出低熟气的概念,并提出低熟气是煤成气的延伸,即低热演化程度的煤成气,并提出吐哈盆地的天然气是较为典型的低熟气。但也有许多学者则认为吐哈盆地的天然气可分成油型气、煤成气、混源气和生物改造气等多种类型(苏传国,2008;高岗等,2007,2008;王志勇等,1997),台北凹陷同样存在这4种天然气类型(Zhao等,2010)。也就是说,煤成气很可能是吐哈盆地天然气的主要组成部分。

吐哈盆地作为一个富煤盆地,其探明油气储量比与其盆地地质背景不符,表明天然气勘探面临着许多理论和实际问题。从其油气分布格局来看,吐哈盆地台北凹陷在东部小草湖洼陷以气藏为主,在西部葡北一胜南一带则以油藏为主(袁明生等,2002)。是何原因造成吐哈盆地形成“东气西油”的格局?天然气到底是煤成气还是低熟气或是油型气与煤成气的混合气?烃源岩体系中,如果煤系烃源岩是主力烃源岩,那么到底是煤层还是煤系地层中泥岩产烃贡献大?这些问题直接涉及天然气的成因与来源,是天然气勘探的关键所在。对吐哈盆地重中之重的台北凹陷的天然气成因进行深入剖析并进行精细气源对比是吐哈盆地天然气勘探的研究趋势。

第一章 区域地质背景

吐哈盆地系吐鲁番—哈密盆地之简称,位于我国新疆维吾尔自治区的东部疆域内,呈东西向展布,东西长约 660km,南北宽 60 ~ 130km,面积 $5.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,是天山山脉中的一个含煤、含油气盆地。盆地四周环山,西为喀拉乌成山,东为梧桐窝子泉,北依博格达山、巴里坤山和哈尔里克山,南抵觉罗塔格山。盆地地势总体南高北低、东高西低,形成向中南部分倾斜的地貌景观。盆地平均海拔 300 ~ 800m,火焰山海拔最高,为 815m,艾丁湖洼地海拔最低,为 -154.43m。其中台北凹陷位于吐哈盆地中部,凹陷北邻博格达山,南依火焰山—七克台断裂,西与布加尔凸起、托克逊凹陷相接,东与了墩隆起相邻,呈东西向条型展布,面积 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ (王志勇等,2004)。

吐哈盆地位于哈萨克斯坦板块的东南部,其东北侧为西伯利亚板块,南侧为塔里木板块—中朝板块三角地带,属准噶尔—吐鲁番微板块的一部分,其构造地理位置处于哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块和塔里木板块的交会处(图 1-1)。石炭纪末,由于陆间洋壳俯冲殆尽、弧陆碰撞拼贴造成强烈的板缘造山运动,形成觉罗塔格和哈尔里克晚古生代岛弧,带内普遍发育象征造山作用结束的华力西期钙碱性花岗岩。由此奠定了吐哈盆地与南北界山盆山构造体系的基本格局。

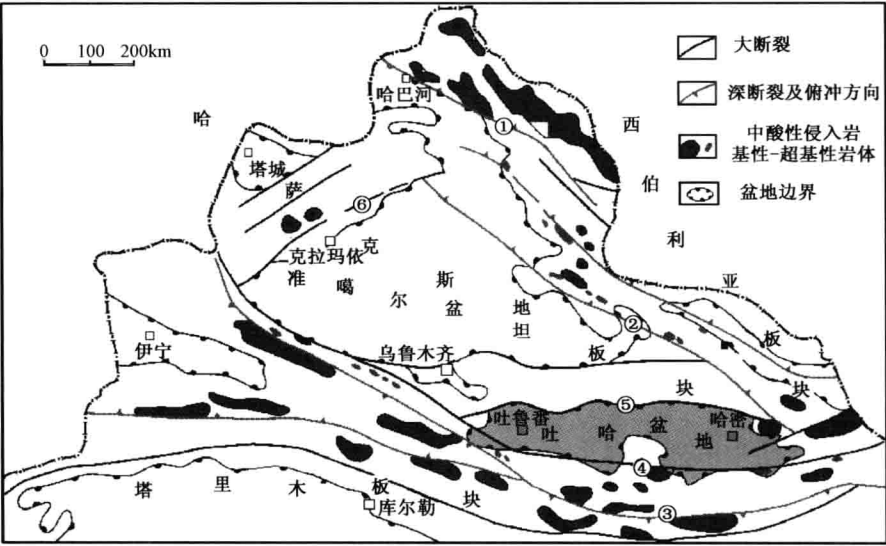


图 1-1 吐哈盆地大地构造位置图(据吐哈油田勘探开发研究院)

吐哈盆地在早古生代以前与准噶尔盆地和博格达山脉具有统一的陆壳,即前寒武系结晶基底。古生界则为变质岩。因此它既不同于典型的山间盆地,也不同于克拉通盆地,是多期多类型盆地叠置的复合型含油气盆地。

盆地南缘的觉罗塔格山主体自晚二叠世以来一直处于隆升剥蚀状态,是盆地中新生代的

主要物源供给区。盆地北缘的博格达山自晚二叠世以来,其主体经历多次冲断造山,规模愈演愈烈,中侏罗世以后,博格达山取代觉罗塔格山成为盆地的主要物源供给区。盆地西北缘的喀拉乌成山的形成时间和博格达山相近,于中侏罗世末封闭了盆地西北边界,对吐鲁番坳陷的地质演化有较大影响。盆地东北缘的巴里坤—哈尔里克山于石炭纪末期形成后与博格达山归并,亦成为盆地东北部的物源区之一。

依据吐哈盆地复杂的周边地质条件、多旋回的盆地发展阶段,结合区域构造、基底、沉积、盖层以及重力、航磁、地震和钻井、地面地质资料等,将盆地划分为中西部的吐鲁番坳陷、中东部的了墩隆起和东部的哈密坳陷三个一级构造单元。吐鲁番坳陷是吐哈盆地的主体坳陷,大致以火焰山为界,又进一步分为北部的台北凹陷、西部的科牙依凹陷、布尔加凸起、托克逊凹陷和南部的鲁西凸起、台南凹陷、塔克泉凸起等七个二级构造单元;哈密坳陷又进一步分为三堡凹陷、火石镇凹陷和黄田凸起三个二级构造单元(图1-2)。台北凹陷沉积厚度最大,地层发育最全,是持续沉陷沉降的凹陷,也是吐哈盆地主要产油凹陷。



图1-2 吐哈盆地构造单元划分图(据吐哈油田勘探开发研究院)

第一节 盆地演化与构造特征

吐哈盆地不是一个原型盆地,而是一个多阶段多类型盆地叠置形成的多旋回复合盆地,其盆地演化过程可分为周缘前陆盆地、早期再生前陆盆地和晚期再生前陆盆地等三个演化阶段(袁明生等,2002)。

一、盆地类型与演化

1. 周缘前陆盆地演化阶段(晚二叠世—三叠纪)

吐哈盆地北部,在早二叠世仍有海域沉积,呈北厚南薄楔形体。早二叠世末期,博格达陆间裂谷开始回返褶皱隆起,并向两边盆地逆冲。在其南边,形成了以台北为中心的陆相前陆盆地,沉降中心在胜北、丘东以北一带,上二叠统最大厚度可达3000m。前陆盆地一直延续到三叠纪。

2. 早期再生前陆盆地演化阶段(侏罗纪—古近纪)

三叠纪末期的晚印支运动是盆地内一次强烈的褶皱抬升运动,使盆地内前侏罗系构造被剥蚀、夷平,形成准平原,前侏罗纪构造带基本形成,盆地演化进入再生前陆盆地演化阶段。

早—中侏罗世,整个盆地表现为沼泽、平原相沉积。台北凹陷形成了胜北、丘东和小草湖三个洼陷,其他地区则为沼泽沉积。中—下侏罗统水西沟群煤系广布于吐鲁番坳陷,成为盆地主力烃源岩之一。中侏罗世末期,台北凹陷开始进入早期再生前陆盆地阶段。侏罗纪末期,产生一系列北东向构造带将原先统一的凹陷分割成轴向北东的三个洼陷,即西部胜北洼陷、中部丘东洼陷和东部小草湖洼陷。

白垩纪—古近纪是盆地均衡沉降阶段。早白垩世,盆地挤压抬升,坳陷范围进一步收缩。晚白垩世后期至古近纪,以河流相及冲积—洪积相为主的鄯善群、桃树园组和葡萄沟组,呈广覆式沉积,超覆在下伏不同层位的地层之上,沉积范围扩大到全盆地,吐哈盆地通过广大范围的河流相及洪积—冲积扇的衔接得以实现完全统一。

3. 晚期再生前陆盆地演化阶段(新近纪—第四纪)

这一时期,博格达山形成“V”字形仰冲成扇形结构,并向吐哈盆地及准噶尔盆地两侧逆冲推覆,导致吐鲁番坳陷各凹陷格局产生变化,自北向南强大的挤压应力在台北凹陷产生沿八道湾组、西山窑组两套煤系地层的大型盖层滑脱,前锋带形成火焰山—七克台断褶带,西段的火焰山构造带将早期的胜北洼陷一分为二,形成山北的胜北洼陷与山南的胜南洼陷。同时,由于基底断裂的影响,在台北凹陷产生4条近南北向的平移断层,将凹陷分割成5块。至此,吐鲁番格局定型成南北分带、东西分块,次级凹陷的迁移变化终止。

二、构造特征

吐哈盆地基底断裂主要发育在南部地区,据航磁解释出的基底断裂有50余条,其中13条为基底大断裂,按其走向可分为三组:北西西向、近东西向、北东东向(图1-3),具有长期性和继承性特点,空间延伸远、切割深度大,并且基底断裂控制着盆地的沉积和构造发展。

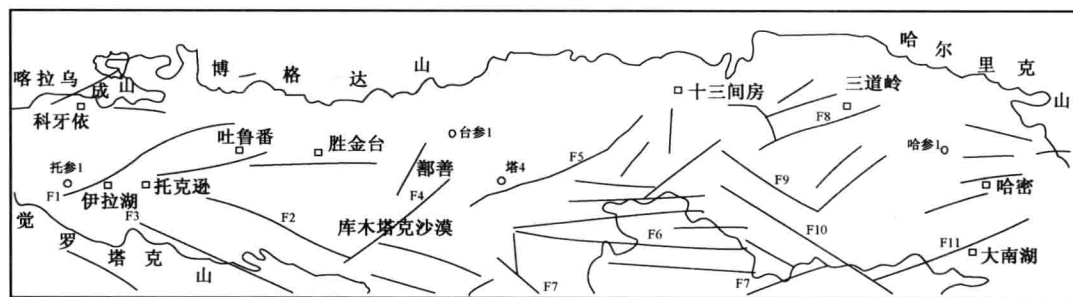


图1-3 吐哈盆地基底断裂分布图(据吐哈油田勘探开发研究院)

盖层断裂比较发育(图1-4),多分布于盆地北部,走向以北东东和北西西两组为主,基本都为断面北倾的逆断层,近南北向的平移断层在台北凹陷较发育。断层具多期活动的特点,深层断距大,浅层断距小,部分断层在侏罗系及其以下的深层断而浅层不断,主要活动是燕山期、喜马拉雅期。

台北凹陷南北分带、东西分块的特征极为明显,按照现今的构造格局可将台北凹陷自北向南划分为北部山前冲掩构造外带、山前冲掩构造内带、中部压扭型冲断背斜带、南部滑脱逆掩背斜带;东西向上则被撕裂断层分割成五大区块。山前冲掩构造带外带构造上呈左行雁行排

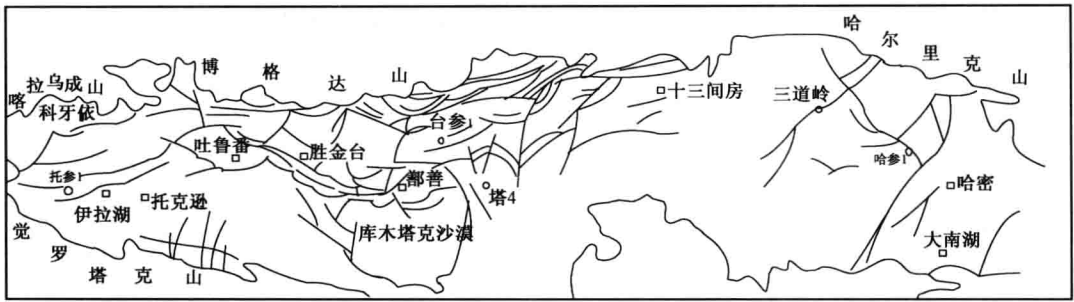


图 1-4 吐哈盆地盖层断裂分布图(据吐哈油田勘探开发研究院)

列,与山界排列一致。山前冲掩构造带由一系列的山前逆冲断裂及背斜构造组成,该构造带在平面上具有明显的分段性,从西段到中段到东段的构造样式分别为背冲构造、三角带构造和叠瓦式逆冲断裂。中部压扭型构造带则以鄯善构造为界,西段为胜北构造带,走向北西,局构造左行雁行排列;东段由丘东—温吉桑、大墩—金水—小草湖、红台、十三间房等构造带组成,走向北东,局部构造右行雁行排列。南部滑脱逆掩背斜带也可分为东西两段,东段七克台冲掩背斜带呈北东东走向,构造样式主要为复合式;西段火焰山背斜带呈北西走向。

第二节 区域沉积特征

一、沉积层系

吐哈盆地台北凹陷地层从下到上依次由石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近—新近系和第四系所组成(表 1-1)。

第四系位于地层的最上部,广泛分布,与下部呈不整合接触,主要为杂色砾石层。

古近—新近系主要为干燥气候条件的季节性河流、浅湖沉积,岩性主要为杂色砂泥岩。其中上新统岩性主要为浅棕、褐黄色砾岩夹棕红色泥岩;渐新统中上部为浅棕、棕红色砂质泥岩夹厚层砂岩,含介形虫;下部为灰白色钙质砂岩;渐、始新统岩性为褐色砂泥岩夹中砂岩,含石膏和脊椎化石;古新统为棕红色砂岩夹厚层泥岩,含动物化石。白垩系同样是干旱气候条件下的沉积,岩性以杂色砂泥岩为主;上统岩性主要为褐红色砾岩、砂岩夹泥岩,含脊椎化石与灰蓝、棕红色砂、砾岩夹泥岩条带;下统岩性是棕红、蓝绿色砂泥岩夹细砂岩条带,暗绿色砂泥岩与粉砂岩,含鱼化石,棕、紫色砂、砾岩夹砂泥岩。

上侏罗统沉积于继承性的干燥气候环境下,岩性为棕红色块状砂岩夹泥灰岩薄层,含钙质结核,棕红色砂泥岩夹细砂岩粉砂岩条带,含介形虫。中侏罗统沉积于较温暖、潮湿的滨浅湖、沼泽、河流、三角洲环境下,其上部为暗色砂质泥岩,下部为介壳砂岩夹泥岩,中部为杂色砂泥岩夹灰白色砂岩、灰绿色砂岩,下部为暗色砂泥岩夹褐、灰白色砂岩、煤层。下侏罗统也主要沉积于滨浅湖、河流、湖沼、三角洲等环境中,岩性是灰绿色泥岩与灰白色砂岩互层,夹碳质泥岩,其中中—上部深灰色砂泥岩、页岩及煤层夹灰白色含砾砂岩;下部灰白、浅灰色砾岩,砾状砂岩、砂岩夹煤层。

吐哈盆地台北凹陷天然气成因及气源对比

表 1-1 吐哈盆地地层系统简表(据袁明生等,2002)

界	系	统	群	组	年代 (Ma)	岩性简述
新生界	第四系	下更新统		西域组 Q _{1x}	2.48	灰黑、灰绿色砾石层
		上新统		葡萄沟组 N _{2p}	23.3	浅棕、土黄色砾岩夹棕红色泥岩
	古近—新近系	中—渐新统		桃园组 (E ₃ —N ₁)t	65	浅棕、棕红色砂质泥岩夹砂岩及石膏,灰白色钙质
		渐—始新统	鄯善群 K ₂ —E ₂ sh	巴坎组 E ₂ b		褐色砂泥岩夹中砂岩,含石膏和脊椎化石
		古新统		台子村组 E ₁ t		棕红色砂岩夹厚层泥岩,含动物化石
中生界	白垩系	上统		苏巴什组 K _{2s}	95	褐红色砾岩、砂岩夹泥岩,含脊椎化石
				库穆塔克组 K _{2k}		灰蓝、棕红色砂、砾岩夹泥岩条带,见泥裂
		下统	吐谷鲁群 K ₁ tg	连木沁组 K _{1l}	136 (140)	棕红、蓝绿色砂泥岩夹细砂岩条带
				胜金口组 K _{1sh}		暗绿色砂泥岩与粉砂岩,含鱼化石
				三十里大墩组 K _{1s}		棕、紫色砂、砾岩夹砂泥岩,见泥裂
	侏罗系	上统		喀拉扎组 J _{3k}	154	棕红色块状砂岩夹泥灰岩,含钙质结核
				齐古组 J _{3q}		棕红色砂泥岩夹细砂岩、粉砂岩,含轮藻化石
		中统		七克台组 J _{2q}	175	上部暗色泥岩,下部介壳砂岩夹泥岩
				三间房组 J _{2s}		杂色砂泥岩夹灰白色砂岩,底部为灰绿色砾岩
				西山窑组 J _{2x}		暗色砂泥岩夹褐、灰白色砂岩、煤层、菱铁矿
		下统	水西沟群 J ₁₋₂ sh	三工河组 J _{1s}	203	灰绿色泥岩与灰白色砂岩互层,夹碳质泥岩
				八道湾组 J _{1b}		深灰色砂泥岩、页岩及煤层,浅灰色砾岩、砂岩
	三叠系	上—中统	小泉沟群 T ₂₋₃ xq	赫家沟组 T _{3h}	240	灰黄色砂砾与深灰色泥岩互层,夹煤线、菱铁矿结核
				黄山街组 T _{3hs}		灰绿、深灰泥岩夹砂岩,碳质泥岩,含菱铁矿结核
				克拉玛依组 T ₂₋₃ k		灰绿色砂泥岩与砂岩互层,有灰绿色底砾岩
		下统	上苍房沟群 T ₁ cf ^b	烧房沟组 T _{1s}	250	蓝绿色砂砾岩与紫红色砂泥岩互层
				非菜园组 T _{1j}		紫红色、紫灰色泥岩夹红褐色砂岩及石灰岩薄层
古生界	二叠系	上统	下苍房沟群 P ₂ cf ^a	锅底坑组 P _{2g}	255	紫红色、灰绿色砂泥岩不等厚互层
				梧桐沟组 P _{2w}		灰绿色泥岩与砂岩不等厚互层夹黑色泥岩
				泉子街组 P _{2q}		灰绿色砾岩与褐红色泥岩互层夹灰黑色泥岩
			桃东沟群 P ₂ td	塔尔朗组 P _{2t}	260	灰黑、灰色泥页岩夹粉砂岩及泥灰岩薄层,底部为砾岩
				大河沿组 P _{2d}		杂色砂砾岩夹红泥岩
		下统		依尔希土组 P _{1y}	290	火山岩、火山碎屑岩、凝灰岩与砂岩

三叠系以湖相、河流相、三角洲相沉积为主,中—上统上部岩石为灰黄色砂砾岩与深灰色泥岩互层、夹煤线;灰绿、深灰泥岩夹砂岩,中部为碳质泥岩,含菱铁矿结核;下部为灰绿色砂泥岩与砂岩互层,有灰绿色底砾岩。下统岩性为蓝绿色砂砾岩与紫红色砂泥岩、紫灰色砾状砂泥夹红褐色砂岩及灰岩薄层。

二叠系则以河流相、湖泊相等沉积环境为主,上统上部主要为灰绿色泥岩与砂岩不等厚互层夹黑色泥岩、煤线及石灰岩,下部为灰绿色砾岩与褐红色泥岩互层夹灰黑色泥岩;中上部为灰黑、灰色泥页岩、粉砂岩、钙质砂岩;下部为泥页岩夹泥灰岩、灰岩及细、粉砂岩;底部为灰黄、灰棕色砾岩、砂岩夹砂泥岩及暗褐色砂砾岩夹灰白色泥岩。下统岩性主要为火山碎屑岩、凝灰岩与砂岩。

石炭系主要为海相砂、泥岩及凝灰岩、火山岩与碳酸盐岩。由于石炭系埋藏深,盆地中心井位少有钻遇,但近两年逐渐成为盆地周缘地区的勘探目标层。

二、侏罗纪沉积岩沉积相及沉积体系展布

吐哈盆地自从形成独立的盆地以来,一直处于相对封闭的沉积环境,由于其东西走向的狭长形展布,多发育近物源、浅水、以快速堆积为特点的横向沉积体系。根据沉积物的岩石类型、岩性组合、沉积构造、粒度特征、电性特征、生物化石等可以将吐哈盆地沉积相划分为:冲积扇相、扇三角洲相、河流相、辫状河三角洲相、曲流河三角洲相、湖泊相及沼泽相。其中扇三角洲相、辫状河三角洲相是吐哈盆地的主要储集体类型,湖泊相及沼泽相是有利的烃源岩发育相带。

八道湾组沉积时期是吐哈盆地沼泽相极其发育的时期之一,发育以湿地扇、扇三角洲、河流和湖泊相为主的沉积体系,同时在湿地扇扇缘、河流泛滥平原、三角洲平原、三角洲侧翼、废弃三角洲以及滨浅湖等地区沼泽非常发育,堆积了一套巨厚的含煤碎屑岩建造。平面上托克逊凹陷主要以沼泽相和滨浅湖相沉积为主,台北凹陷中西部分布有双向的湿地扇—滨浅湖沉积体系,向东至小草湖洼陷以湿地扇—滨湖沼泽体系为主(图1-5)。

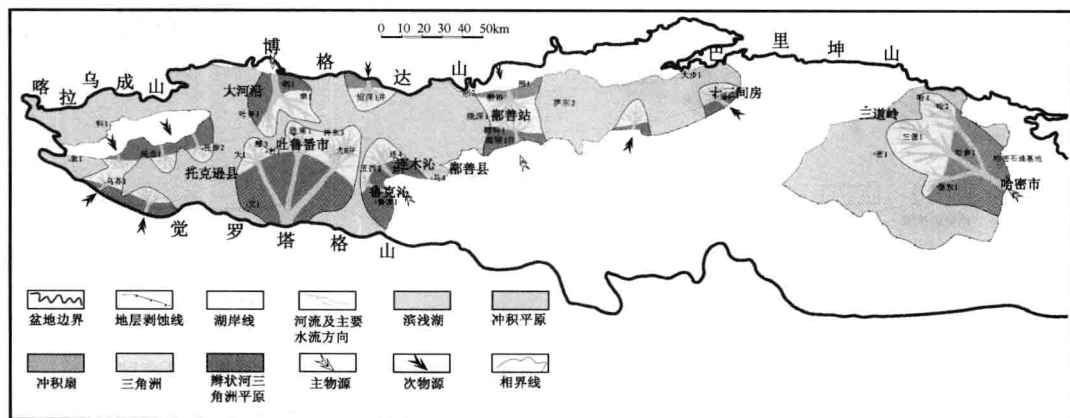


图1-5 吐哈盆地下侏罗统八道湾组沉积体系分布图(据吐哈油田勘探开发研究院)

三工河组是吐哈盆地第三次分布较为广泛的湖侵沉积层序,但湖泊水体不深,以发育滨浅湖亚相最为典型,在吐鲁番坳陷南斜坡、了墩隆起西侧可见一定范围的湿地扇和三角洲分布,在北部山前也残存了几个小型的扇三角洲;在三堡凹陷主要为滨浅湖沉积体系,在东南部哈参1井附近、四道沟地区有湿地扇、扇三角洲残留(图1-6)。

中侏罗统以滨浅湖背景下的浅湖—沼泽相沉积为特征,发育一系列的辫状河三角洲、扇三角洲砂体,以及部分的河流—冲积扇砂体和滨湖滩坝砂体等储集层。其中西山窑组沉积广泛,厚度巨大,其早期发育了以湖泊沼泽相为主的第二套含煤沉积建造,与八道湾组一起构成了盆地内水西沟群两套独特的煤系生烃层系。台北地区的胜北、丘东、小草湖洼陷发育早期沼泽相,晚期则是吐哈盆地侏罗系重要的砂体发育时期(图1-7)。

三间房组沉积时期是吐哈盆地侏罗系最重要的储油砂体发育时期,北部形成了冲积扇—