

大型油气系统形成的盆地动力学背景

李思田

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 找寻大油气田的急迫任务带动了当今新一轮战略性、区域性的基础地质和石油地质研究。在盆地中识别富生烃凹陷及其所控制的油气系统具有关键意义。没有富生烃凹陷就没有大油气田赖以形成的首要基础。富生烃凹陷及大型油气系统的形成又有其特有的盆地动力学背景, 认识后者对前者的控制关系可提供战略性预测。渤海湾盆地作为中国东部陆上及海域伸展类盆地最重要也最典型的代表, 其数十年勘探和研究历程揭示了富生烃凹陷、大型油气系统和盆地动力学过程的内在联系。岩石圈伸展和裂陷的背景下, 盆地内隆拗分异的构造格架、快速沉降、高地温和异常高压系统提供了富生烃凹陷和大型油气系统形成的构造背景, 与古近系中晚期有利的古气候、古环境条件匹配形成了最有利生烃的超富养湖盆类型。根据多个富生烃凹陷的典型研究提出了大型油气系统形成的模式, 进一步分析了富生烃凹陷形成背景的多样性。值得指出的是, 目前所知西北地区大型叠合盆地中最重要的富生油凹陷, 如准噶尔盆地的二叠纪中央凹陷、塔里木盆地的满加尔凹陷可能都形成于伸展和裂陷背景下, 中新世代则以挤压、挠曲占优势。提出用当代盆地动力学和油气系统的思路与方法重新认识含油气盆地及其油气系统演化的动力过程, 进行新一轮基础性、区域性研究, 为发现新领域、找寻大油气田提供地质理论基础。

关键词: 富生烃凹陷; 大型油气系统; 盆地动力学。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2004)05-0505-08

收稿日期: 2004-06-12

Basin Geodynamics Background of Formation of Huge Petroleum Systems

LI Si-tian

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: A new stage of the basic and strategic research of petroleum geology has already started in recent years for discovering significant hydrocarbon accumulation in China. Geologists are facing great challenge and opportunities in this decade and the near future. A critical research field is to recognize the hydrocarbon-rich depressions and their relative petroleum systems in petroliferous basins. Based upon case studies of the Chinese basins, all hydrocarbon-rich depressions have their special basin dynamics background. The Bohaiwan basin is a most important representative one in eastern China. During rifting phase structure framework comprised by a number of half-grabens and associated horsts, rapid subsidence, high geothermal and overpressured chambers within source rocks offered excellent conditions for the formation of huge petroleum systems under the lithospheric extension setting. Optimum paleo-climate and lake types in Eocene time may be favorable for the formation of high quality oil source rocks. Two concept models on petroleum system in the Bohaiwan rift basin have been proposed based upon the integrated research of basin evolution and case studies of hydrocarbon accumulation in typical depressions. It is worthy to note that most of important hydrocarbon-generating depressions in large scale superpositional basins of northwest China are also formed in extensional setting, such as the Permian central depression of the Junggar basin, the Manjiaer depression of the Tarim basin. The research results elaborate the dynamic processes of hydrocarbon-generating depressions and provide an important theoretical base for the exploration of large oil and gas fields.

Key words: hydrocarbon-rich depression; huge petroleum system; basin geodynamics.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 40238059).

作者简介: 李思田 (1934—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积盆地分析及其能源资源效应方面的教学和科研工作。

E-mail: lisitian@263.net

0 引言

由于国民经济的快速增长,我国油气资源在供求关系方面正面临严峻形势.在寻求多种渠道解决国民经济对能源需求快速增长的同时,最关键和最根本的问题仍然是在我国陆上及海域发现新的勘探领域,找寻大型油气田,进而发现包含油气田群的大型油气系统,这对地质工作者提出了新的挑战和机遇.近十余年来的勘探历程表明我国仍具备这样的资源潜力,许多新的发现不仅令人振奋,也发人深省.实现这一目标需要先进的地球科学理论、多学科结合的勘探新技术和高素质的研究及勘探队伍.数十年来,我国在勘探实践中对大油气田形成条件的理论研究已有诸多积累,但需要更为深入的理论总结.

在我国东部地区诸多大、中型盆地中,以渤海湾盆地在勘探上取得的新突破最具典型意义.在渤海中部环渤中坳陷地带 10 个大油气田的发现,揭示了一个巨型的结构复杂的油气系统,其形成的前提条件是渤中坳陷及环渤中坳陷多个较小的富生烃凹陷的存在提供了丰富的油源,以及在新构造运动控制下,形成连通深部生烃灶的输导系统(龚再升和王国纯,2001;邓运华,2003).2003 年在南堡凹陷取得亿吨级储量的勘探成果,有力地证明了富生烃凹陷虽然规模较小,但也能有很大的生烃潜力,并再次证明与喜山期构造运动相关,在新近系中成藏是一个重要的勘探新领域.济阳坳陷是众所周知的高成熟勘探区,对其可采石油资源已作了多年密集勘探和高强度开发,但由于加强了地质研究,综合应用地球物理新技术,不断发现新领域,仍保持了年均增长 1 亿吨可采石油储量的成绩,其中特别是近年来在隐蔽油藏领域取得的重大突破(潘元林等,2003;李丕龙等,2003).

上述令人振奋的成果来自于思路、方法和技术方面的一系列创新,或者是成功地应用了当代石油地质、地球物理等相关的理论与技术.从油气勘探战略研究的角度思索,已发现的大型和巨型油气系统均受控于富生烃凹陷,可以说“没有富生烃凹陷就没有大油田”,而富生烃凹陷的形成又需要特殊的盆地动力学和古环境背景.渤海湾盆地作为我国研究程度较高、最具有石油资源潜力的盆地,对其演化的动力学和油气成藏过程的再认识不仅有助于该盆地资源的挖潜,也有助于全国范围油气资源战略选区新思路的形成.

1 盆地的构造格架和油气系统的分布——以渤海湾盆地为例

渤海湾盆地是我国规模最大的裂谷型含油气盆地,其主要演化期为古近纪—新近纪的裂陷作用.像多数大型盆地一样,盆地的形成演化受控于多重机制,源于深部过程的裂陷作用为主导机制,郯庐断裂及与之近平行的断裂系统的右旋走滑过程,对盆地的演化也有重要影响.盆地的构造格架由 NNE, NW 和 EW 向大断裂为主干,这些巨型断裂切穿盆地基底,多数属于先存断裂再活动,并在盆地演化过程中对沉降和沉积充填起控制作用.在几组巨型断裂中郯庐断裂系对盆地演化的作用最为重要,新生代这些断裂表现为右旋走滑—拉伸性质,近期在渤海海域进行的三维地震观测及时间切片提供了新的证据(Hsiao *et al.*, 2004).渤海湾盆地的总体方向 NNE,但中部为 EW 向,平面形态为“膝状”.部分研究者根据盆地的形态,特别是盆地中部走向显示其受南北向的拉伸并与郯庐断裂系的右旋拉分效应吻合,将盆地类型解释为拉分盆地,此种论点把走滑运动作为盆地形成的主要机制.事实上盆地的 NNE 向部分,如辽河区—辽东湾和整个盆地西部的裂陷过程都是沿 NW 向伸展的,这一特征不可能用郯庐断裂系的拉分来解释.上述渤海湾盆地双向拉伸的特点用裂陷作用和走滑拉分的联合效应给以解释则更为合理,其中裂陷作用对盆地的形成演化起主导作用.

在盆地的裂陷阶段形成了一系列断陷和断隆(图 1),前者多为半地堑形态,部分为复式地堑构造.在油气勘探中已形成的习惯性术语将负向构造单元按级别称之为“坳陷”、“凹陷”和“洼陷”,这些术语仅表示盆地中的沉降和充填的单元,而不表示严格的构造性质.事实上在渤海湾盆地古近纪形成的这些负向单元均为断陷性质.在油气勘探中精确划分这些次级的正向和负向单元及其控制性边缘断裂,是重建盆地构造格架最为重要的工作,这一工作在 20 世纪 80 年代即已初步奠定,它为后来的一系列突破提供了基础.

在渤海湾盆地的一系列断陷中有许多个已经被勘探证实的富生烃凹陷,即具有非常优质的烃源岩,演化过程中形成相当规模的生烃灶,向各种类型的圈闭提供了丰富的油气,如东营、沾化、大民屯、辽河

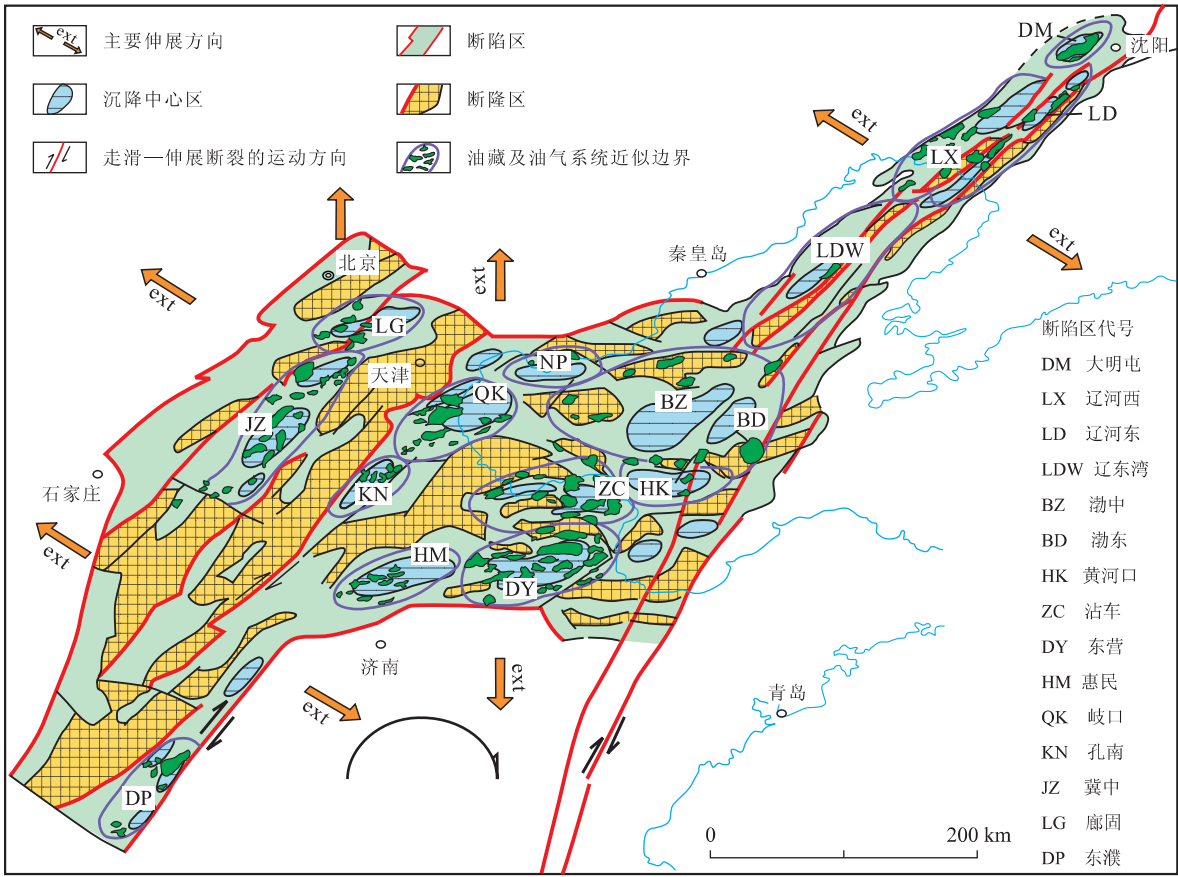


图 1 渤海湾盆地构造格架、富生烃凹陷与油气系统分布关系

Fig. 1 Relationship between tectonic framework, hydrocarbon-rich depression and petroleum system

本图的编制:陆上部分参阅了池英柳(1997)、翟光明等(2002)、谯汉生等(2003);渤海部分参阅了龚再升(2001)、邓运华(2003)等中国海洋石油系统的研究成果

西部、大港、冀中、东濮等以及近期证实的渤中坳陷。对已发现油气田分布及其与凹陷中烃源体关系的研究,展示了以富生烃凹陷为中心控制着含油气系统的分布。在油源极其丰富的条件下其沿输导格架运移成藏可呈辐射状,其中的大油田又与主运移通道相关。在渤海湾盆地中多数油气系统受一个富生烃凹陷所控制,少数则是复式的或边界叠合的。特别是一些形成于断隆上的油藏可能受双源甚至多源供烃,如渤海南部的油田群(图 1)。“No basin, no oil”,Perrodon(1983)的这句简明突出的结论早已成为广大油气地质工作者的共识:“没有富生烃凹陷就没有大油田”也日益成为勘探家们制定勘探战略选区的重要原则。我国石油地质家早已提出源控论的思想(胡朝元,1982),在许多大型油气系统的勘探中进一步得到了共识。

2 富生烃凹陷形成的古环境和古构造条件

建国 50 年来的油气勘探历程中,我国在陆相和海相领域均取得了重要成就,其中尤以对陆相领域油气聚集规律的认识深入,已形成体系,并发表了大量论著,积累了浩瀚的资料(胡见义和黄第藩,1991;田在艺和张庆春,1996;李德生,2002;李思田等,2002;翟光明等,2002)。在海相领域许多基本的、关键性的问题有待进一步深入研究,因此,本文仅探讨陆相湖盆条件下富生烃凹陷的形成条件。

2.1 地质时代和古环境条件

优质湖相烃源岩的形成需要最佳的古环境条件的匹配,其中古气候条件和古湖盆类型最为重要。始新世成为中国东部及海域第一主力烃源岩的层位,首先是由于其良好的潮湿、温暖的古气候条件,利于湖盆中藻类等微生物的高产能(刘传联和徐金铨,

2002). 湖盆类型、物源补给及相应的水动力条件对有机质的产率及保存有重要意义,如松辽、渤海湾及南海大陆边缘盆地的优质湖相烃源岩,多形成于超富养半深湖及深湖条件,湖水的分层性使浅部富氧的湖水难以循环至湖底,使有机质在还原条件下得以保存. 一些周期性的在海平面期有海水进入的近海湖泊更有利于形成此种分层性,如松辽中央坳陷青山口期和嫩江期的大型近海湖泊(高瑞琪和蔡希源, 1997; Bohacs *et al.*, 2000; Carroll and Bohacs, 2001). 有利的古气候、古环境常常是大区域或全球性事件,因此有明显的时代特征. 正如全球占首位的烃源岩是晚侏罗—早白垩世,形成了一批世界上最重要的巨型油气系统,如沙特、伊朗、墨西哥湾、大西洋两侧边缘盆地的许多油气系统(Klemme, 1994). 中国东部及海域最好、最广泛分布的烃源岩来自始新世,松辽则来自白垩纪中期,这都决定于当时的古气候和古环境.

2.2 构造条件

我国陆上和海域古近纪的主力烃源岩都形成于盆地的主裂陷幕. 裂陷期的快速沉降(一般 $300 \sim 500 \text{ m/Ma}$)和较低的欠补偿环境,为形成半深水—深水湖盆提供了条件. 基底的深沉降使烃源岩大部或全部进入生油窗范围,有效烃源岩体积大,因此凹陷基底的深度被看作早期预测的第一要素.

松辽盆地的主力烃源岩则形成于盆地裂后阶段,即上白垩统下部青山口组. 早白垩世裂陷阶段虽然也广泛发育烃源岩,但其规模和有机质丰度都远逊于青山口组. 因为青山口期处于最有利古气候、古地理条件,这表明富生烃凹陷的形成需有利的古构造和古环境条件相匹配.

富生烃凹陷是形成大型油气系统的基础和前提,但还必须各项有利的成藏基本要素,包括生、储、盖组合,输导系统,上覆地层和圈闭,以及成藏过程(生、排、运、聚)的时空匹配,才能形成大型油气系统(Klemme, 1994).

3 富生烃凹陷及大型油气系统的盆地动力学背景

盆地动力学思路和研究内容的系统提出标志着盆地研究的新阶段(Dickinson, 1994, 1997). 其基本思想是以先进的地球动力学理论为基础,研究盆

地形成演化的动态过程,并系统应用先进的信息技术进行过程模拟. 以 Dickinson 为首席科学家所提出的盆地动力学的研究纲要中有 2 个方面最为突出:(1)不仅要在板块构造格架中研究沉积盆地,还要从地幔对流系统研究沉积盆地,揭示盆地形成演化与深部过程的关系. 此项任务显然十分艰巨和具有探索性. 由于地球物理技术特别是地震层析技术的进展,岩石—地球化学参数作为地幔状态标记的研究以及盆地的定量动力学模拟技术等方面的巨大发展,已初步具备了探索盆地深部的手段.(2)盆地流体研究. 以往的盆地分析对盆地结构、沉积充填和构造等相对静态的要素已有许多成熟的方法,但对以流体为中心的动态要素则由于其研究难度高而较为薄弱,因此被作为盆地动力学研究中的最优先领域. 与之密切相关的盆地能量场、运移输导系统的研究也被提到了更为重要的日程.

纵观中国东部及海域新生代及白垩纪的富生烃凹陷及其相关的大型油气系统皆具有特殊的盆地动力学背景,笔者等人于 1999 年(中国近海富生烃凹陷形成机制、充填和发育特征科研报告)曾在我国全海域盆地和坳陷编图的基础上对我国海域的惠州、崖南、渤中等 8 个富生烃凹陷的形成条件和盆地动力学背景进行过初步分析. 研究了盆地形成的动力学背景,现结合近十年的新进展作如下概括:

(1)盆地快速沉降,并具备较大的基底埋深,裂陷期沉积充填可达 $3 \sim 8 \text{ km}$,从而保证了有效烃源岩的形成和体积.(2)高的大地热流背景,通常能达到 $60 \sim 80 \text{ mW/m}^2$ 或更高,有利于烃源岩的高效转化,如莺歌海盆地可达到 80 mW/m^2 (汪集暘和黄少鹏, 1990). 上述盆地中的高大地热流主要源于地壳减薄和软流层界面向上隆起. 在此种条件下幔源热的比例远超过壳源热,约占总来源的 70%.(3)凹陷中深部通常有异常超压体,压力系数一般为 $1.1 \sim 2.0$,强超压区则 > 2.0 . 超压体的范围通常与富泥地层段相吻合,在渤海湾盆地作为主力烃源岩产出的沙河街四段和三段即常处于超压体范围,当发生流体突破时,在高压驱动下可产生快速的和高效的运移.(4)有良好的生、储、盖组合及适当厚度的上覆地层. 裂陷期的快速沉降与区域性有利的古气候、古环境条件,利于形成富养的和超富养的湖盆类型,形成了高生烃指数的烃源岩. 断陷—断隆相间的构造格局造成多物源条件,发育了扇三角洲、三角洲、湖底扇和河流等多种类型的储集体. 周期性的湖泛层则

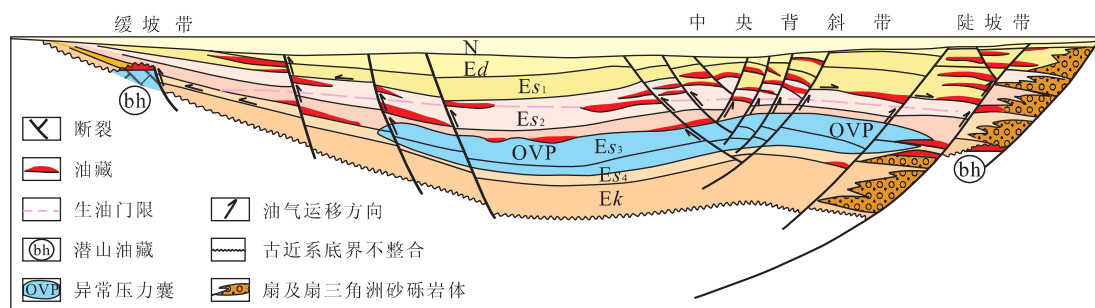


图2 渤海湾盆地富生烃凹陷中的油气系统形成模式——以东营凹陷为代表

Fig. 2 Forming model of petroleum system in hydrocarbon-rich depression, Bohaiwan basin taking Dongying depression as a case

提供了良好的盖层。在海域大陆边缘盆地条件下,以珠江口盆地为例,以文昌组为代表的湖相生油层与优质海相储盖层,形成了最佳的成藏组合。(5)盆地后期反转形成有利的构造圈闭条件。在陆内及大陆边缘的裂陷作用形成的盆地中均存在着深部过程变化导致的构造反转。在中国东部及海域,中新世盆地中反转运动普遍存在,有时是多幕的,如松辽、渤海湾和东海陆架盆地。反转运动形成了重要的构造圈闭,如松辽盆地的大庆长垣和东营凹陷的中央构造带。(6)构造运动对输导系统和晚期成藏的巨大影响。新构造运动和晚期成藏是近十年来石油界的研究热点,勘探中的重大发现始于海域含油气盆地,逐渐扩展到大陆广大区域(龚再升和王国纯,2001;孙肇才,2003)。与裂谷演化自身机制导致的后期反转不同,盆地中的新构造运动多来自于区域性的构造应力场变化,甚至来自于板块边界力和板块构造的重组。如5 Ma 以来的菲律宾板块向东挤压碰撞导致东海陆架及台西盆地晚期强烈的挠曲变形。

新构造运动的力源是大区域性的,其在盆内的效应首先体现在控制性构造运动方式和方向的改变及所派生的构造,如渤海湾盆地以郯庐断裂带为主的断裂系在上新世—第四纪早期的运动和穿过莺歌海盆地基底的古红河断裂的右旋扭动在盆地内部产生的断裂(龚再升等,1997;Li *et al.*, 1999)。前者与渤海海域的晚期成藏密切相关。正是这些断裂的活动产生了新的输导系统,使油气大规模运移到馆陶组和明化镇组,形成了大油田群;后者即古红河断裂带在中新世以来的右旋扭动,在盆地内部产生的近南北向张剪性断裂组,触发了大规模的高压流体自高压囊中突破,并形成了底辟构造及相应的圈闭,是迄今为止该盆地发现的主要气藏类型。

上述6个方面的有利条件的耦合形成了我国东

部及海域多个大油气系统,在渤海湾盆地成藏的层位可从古老基底到新生代晚期,圈闭类型丰富多彩,以东营凹陷为代表所概括的模式,如图2所示。以沙河街组三段及四段下部形成的超压烃源体为中心,经过输导系统运移至多种构造及非构造圈闭中形成了包括油气藏群的大型油气系统。

在渤海海域新近纪和古近纪东营期的沉降达到了巨大的深度,盆地基底埋深>12 000 m,形成了2套主力烃源岩和多个成藏组合,喜山期构造运动导致了新近系中大型油气系统的形成(图3)。

以上所列举的在中国东部及海域大型油气系统的形成具有的共同性的特征,皆取决于岩石圈大规模裂陷作用的动力学过程。这一过程受控于板块相互作用和地幔动力学系统。后者至今尚未能阐明其细节。

根据多年来进行的多学科的探索,均证明了这些盆地发育部位岩石圈的强烈减薄和软流层的上隆(Zhang and Tanimoto, 1991; Griffin *et al.*, 1998)。利用大地电磁、幔源玄武岩岩石—地球化学参数和盆地定量动力学模拟技术获得的岩石圈厚度数据都大致相吻合(李思田等,1997)。在陆内以渤海湾盆地为代表,在海域以东海陆架盆地、珠江口盆地及莺歌海等盆地为代表,岩石圈最薄处约为55~65 km,模拟计算的岩石圈拉伸系数 β 值为1.4~2或更大(Lin *et al.*, 2002)。上述数据有待于更精确的探测技术检验,但岩石圈的大幅度减薄和软流层的上隆则是无疑的。至于软流层上隆的原因有多种假说,这些假说提出与俯冲板片的深部效应或大陆碰撞引起的侧向地幔流相关,板块相互作用与地幔动力过程在地球系统演化中处于不可分割的整体之中。Zeigler(1992)、Zeigler and Cloetingh(2004)认为裂陷类盆地的伸展机制受控于多重因素的联合作

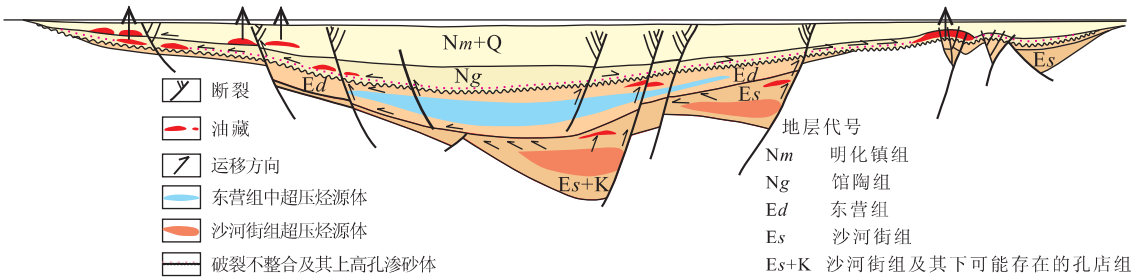


图 3 渤海晚期深沉降区大型油气系统的形成模式——以渤中凹陷为代表

Fig. 3 Forming model of large scale petroleum system in late deep subsidence area, Bohaiwan basin taking Bozhong depression as a case

用,包括板块边界应力、软流层对流加之于岩石圈底部的磨擦力以及软流层对流系统上涌的分支引起的偏张应力等。了解地幔流的方向较之于了解软流层的顶界面埋深更难,除重力资料反演和天然地震层析所提供的变化趋势外,Flower *et al.* (1998)根据岩石地球化学参数论证了印度板块与欧亚板块碰撞以来发生的自西向东的侧向地幔流,并将这些成果作为所提出的边缘海成因假说的证据,即认为侧向地幔流使太平洋俯冲板片后退导致岩石圈拉张和边缘海形成。这一假说也提供了新生代伸展类盆地的发生背景。

深部过程是导致盆地快速沉降、高热流和产生异常高压系统的根本原因,这一系列过程不仅提供了可形成多套成藏组合的可容空间,也提供了油气成藏过程有利的能量场。

4 富生烃凹陷类型及形成条件多样性的讨论

以上阐述了中国东部裂陷类盆地富生烃凹陷及大型油气系统的形成条件。在其他类型盆地中由于盆地动力学背景的差异,富生烃凹陷及相应所控制的油气系统各有其特色(宋建国和张光亚,1997)。此外与煤成气相关的生烃凹陷更有显著差异。

我国西部的大型叠合盆地生油的主力烃源岩主要在古生界。中三叠世以后在我国西部和中部的多数大型盆地在板块会聚背景下发育了前陆类盆地,并有其特有的成藏组合。但准噶尔和塔里木最优质的古生界烃源岩却并非形成于挤压、挠曲背景,塔里木盆地最受关注的生烃单元—满加尔坳陷中有厚达 6 000 m 左右的中上奥陶统,这可能形成于岩石圈减薄的背景,尽管其是否属于裂陷槽性质尚需进一步

取得深部结构的证据(梁狄刚等,2000)。迄今所知,准噶尔盆地第一主力烃源层位在上二叠统,其形成是在前期海相残余盆地(remnant basin)基础上,经过泻湖阶段过渡形成的富生烃湖盆,在构造性质上仍处于伸展和裂陷背景(蔡忠贤等,2000)。可见在我国包括西部盆地在内的许多富生烃凹陷多与伸展、裂陷背景相关。

鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期生烃凹陷则是在挠曲背景下形成的,经过漫长的勘探历程在其周边以晚三叠世三角洲为主的砂体和上侏罗统底部的下切谷砂体中发现了一系列油田,证明其富生烃凹陷性质(杨俊杰,2002)。

与富生烃凹陷明显不同,煤成气相关的生烃凹陷则大多形成于盆地演化的相对稳定期,通常为浅水湖盆或陆表海条件,这是含煤地层大面积发育所要求的。如作为库车大气田群源岩的侏罗纪含煤地层和作为鄂尔多斯盆地古生界气田的重要烃源岩的石炭—二叠系煤系,以及四川盆地的晚二叠世煤系,均形成于盆地演化的相对稳定阶段。

由于国民经济对油气资源供应高速增长的需求,地质工作者面临着严峻的挑战。数十年勘探历程的经验,人们意识到只有开拓新领域才能找到更多的对可持续发展起支柱作用的大油气田。这就需要新理论、新技术对含油气盆地开展新一轮区域性、基础性的研究,识别富生烃凹陷及其相关油气系统的形成和分布的规律性及其特有的盆地动力学背景,此种研究将是庞大的多学科聚焦的系统工程,并可能对今后长时间内的勘探工作有重要指导意义。

References

Bohacs, K. M., Carroll, A. R., Neal, J. E., et al., 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic-geochemical frame-

- work. In: Gierlowski-Kordesch, E. H., Kelts, K. R., eds., Lake basins through space and time, *AAPG Studies in Geology*, 46: 3—34.
- Cai, Z. X., Chen, F. J., Jia, Z. Y., 2000. Types and tectonic evolution of Junggar basin, *Earth Sciences Frontiers*, 7 (4): 431—440 (in Chinese with English abstract).
- Carroll, A. R., Bohacs, K. M., 2001. Lake-types controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins, *AAPG Bulletin*, 85(6): 1033—1053.
- Chi, Y. L., 1997. Formation of the petroleum system of Bohaiwan basin and the characteristics of oil-gas accumulation. In: New development of the petroleum system research in China, Petroleum Industry Press, Beijing, 195—206 (in Chinese).
- Deng, Y. H., 2003. Types and accumulation controls of Neogene oil reservoirs in Bohai Bay basin, *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(6): 359—364 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson, W. R., 1994. Basin geodynamics, *Basin Research*, 5: 195—196.
- Dickinson, W. R., 1997. The dynamics of sedimentary basins. USGC, National Academy Press, Washington, D. C., 43.
- Flower, M., Tamaki, K., Hoang, N., 1998. Mantle extrusion: A model from dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East and the Western Pacific. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, *Geodynamics*, 27: 67—88.
- Gao, R. Q., Cai, X. Y., 1997. Forming condition and distribution of the oil-gas fields in Songliao basin, Petroleum Industry Press, Beijing, 329 (in Chinese).
- Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., 1997. Continental basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea, Science Press, Beijing, 510 (in Chinese).
- Gong, Z. S., Wang, G. C., 2001. Neotectonism and hydrocarbon accumulation in Bohai Sea, *Acta Petrolei Sinica*, 22 (2): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Zhang, A., O'Rilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, *Geodynamics*, 27: 107—126.
- Hu, C. Y., 1982. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China, *Acta Petrolei Sinica*, (2): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. Y., Huang, D. F., 1991. The bases of nonmarine petroleum geology in China, Petroleum Industry Press, Beijing, 322 (in Chinese).
- Hsiao, L. Y., Graham, S. A., Tilander, N., 2004. Seismic reflection imaging of a major strike-slip fault zone in a rift system: Paleogene structure and evolution of the Tan-Lu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China, *AAPG Bulletin*, 88: 71—97.
- Klemme, H. D., 1994. Petroleum systems of the world involving upper Jurassic source rocks. In: Magoon, L. B., Dow, W. G., eds., The petroleum system from source to trap, *AAPG Memoir*, 60: 1809—1851.
- Li, D. S., 2002. Tectonics of petroliferous basins in China, Petroleum Industry Press, Beijing, 675 (in Chinese).
- Li, P. L., Jin, Z. J., Zhang, S. W., et al., 2003. The present research status and progress of petroleum exploration in the Jiyang depression, *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1999. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea, *Chinese Science Bulletin*, 44(1): 10—22.
- Li, S. T., Lu, F. X., Lin, C. S., et al., 1997. Evolution of Mesozoic and Cenozoic basins in eastern China and their geodynamic background, China University of Geosciences Press, Wuhan, 239 (in Chinese).
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27 (5): 592—598 (in Chinese with English abstract).
- Liang, D. G., Zhang, S. C., Zhang, B. M., et al., 2000. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim basin, *Earth Science Frontiers*, 7(4): 534—547 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Li, S. T., Zhang, Y., et al., 2002. Quantitative modeling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some Tertiary rift basins in eastern China, *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 324—330.
- Liu, C. L., Xu, J. L., 2002. Estimation method on productivity of oil-producing lake and a case study, *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 144—150 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Y. L., Zhang, S. W., Xiao, H. Q., 2003. Exploration of subtle oil pools in Jiyang fault basin, Petroleum Indus-

- try Press, Beijing, 277 (in Chinese).
- Perrodon, A., 1983. Dynamics of oil accumulation. *Bulletin Des Centres De Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine, MEMS* (English Edition), 1—80.
- Qiao, H. S., Fang, C. L., Niu, J. Y., et al., 2002. Petroleum geology of deep horizon in East China. Petroleum Industry Press, Beijing, 912 (in Chinese).
- Song, J. G., Zhang, G. Y., 1997. The classification of petroleum systems in China and the targets of exploration. In: New development of petroleum system research in China. Petroleum Industry Press, Beijing, 25—32 (in Chinese).
- Sun, Z. C., 2003. Intra-plate deformation and oil accumulation in late evolution stage. Petroleum Industry Press, Beijing, 332 (in Chinese).
- Tian, Z. Y., Zhang, Q. C., 1996. Chinese petroliferous basins. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, J. Y., Huang, S. P., 1990. Compilation of heat flow data in the Chinese continental area (2nd edition). *Seismology and Geology*, 12(4): 351—366 (in Chinese).
- Yang, J. J., 2002. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 228 (in Chinese).
- Zhai, G. M., Song, J. G., Jin, J. Q., et al., 2002. Plate tectonic evolution and its relationship to petroliferous basins. Petroleum Industry Press, Beijing, 460 (in Chinese).
- Zhang, Y. S., Tanimoto, T., 1991. Global Love wave phase velocity variation and its significance to plate tectonics. *Phys. Earth Planet. Int.*, 66: 160—202.
- Ziegler, P. A., 1992. Geodynamics of rifting and implications for hydrocarbon habitat. *Tectonophysics*, 215: 221—253.
- Ziegler, P. A., Cloetingh, S., 2004. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins. *Earth Science Reviews*, 64: 1—50.
- 附中文参考文献
- 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远, 2000. 准格尔盆地的类型和构造演化. *地学前缘*, 7(4): 431—440.
- 池英柳, 1997. 渤海湾盆地含油气系统形成与油气分布特征. *中国含油气系统的应用与进展*. 北京: 石油工业出版社, 195—206.
- 邓运华, 2003. 渤海湾盆地上第三系油藏类型及成藏控制因素分析. *中国海上油气*, 17(6): 359—364.
- 高瑞琪, 蔡希源, 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律. 北京: 石油工业出版社, 329.
- 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 510.
- 龚再升, 王国纯, 2001. 渤海新构造运动控制晚期成藏. *石油学报*, 22(2): 1—7.
- 胡朝元, 1982. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论. *石油学报*, (2): 9—13.
- 胡见义, 黄第藩, 1991. 中国陆相石油地质理论基础. 北京: 石油工业出版社, 322.
- 李德生, 2002. 中国含油气盆地构造学. 北京: 石油工业出版社, 675.
- 李丕龙, 金之钧, 张善文, 等, 2003. 济阳坳陷油气勘探现状及主要研究进展. *石油勘探与开发*, 30(3): 1—4.
- 李思田, 路凤香, 林畅松, 等, 1997. 中国东部及邻区中生代盆地演化及地球动力学背景. 武汉: 中国地质大学出版社, 239.
- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等, 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 592—598.
- 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等, 2000. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. *地学前缘*, 7(4): 534—547.
- 刘传联, 徐金鲤, 2002. 生油湖泊生产力的估算方法及应用实例. *沉积学报*, 20(1): 144—150.
- 潘元林, 张善文, 肖焕钦, 2003. 济阳断陷盆地隐蔽油气藏勘探. 北京: 石油工业出版社, 277.
- 谯汉生, 方朝亮, 牛嘉玉, 等, 2002. 中国东部深层石油地质. 北京: 石油工业出版社, 912.
- 宋建国, 张光亚, 1997. 中国油气系统分类与勘探方向. *中国含油气系统的应用与发展*. 北京: 石油工业出版社, 25—32.
- 孙肇才, 2003. 板内形变与晚期成藏. 北京: 地质出版社, 332.
- 田在艺, 张庆春, 1996. 中国含油气盆地论. 北京: 石油工业出版社.
- 汪集暘, 黄少鹏, 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). *地震地质*, 12(4): 351—356.
- 杨俊杰, 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社, 228.
- 翟光明, 宋建国, 靳久强, 等, 2002. 板块构造演化与含油气盆地形成和评价. 北京: 石油工业出版社, 460.