

文章编号:0253-9985(2011)04-0606-09

全球前陆盆地层序沉积学新进展

吴因业¹, 邹才能¹, 胡素云¹, 李青², 张天舒¹, 郭彬程¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团外事局, 北京 100007)

摘要:从前陆盆地的油气勘探应用角度总结了沉积学与层序地层学研究的新进展,展示了全球前陆盆地的石油地质新理论和油气勘探远景。首先论述了全球前陆盆地冲断带的分布特征及其动力学机制,前陆盆地沉积水系的发育特点。其次探讨了前陆盆地裂缝性储集层的作用及其 Zagros 盆地的实例,构造作用同期的沉积楔状体及其西班牙 Ebro 盆地实例,欧洲 Spitsbergen 前陆盆地的体系域和沉积砂体,南美 Andes 前陆盆地的南北差异及其含油气系统。最后指出南美和中东前陆盆地对我国中西部油气勘探有重要指导意义,西加拿大前陆盆地的实例对我国非常规资源的勘探评价有参考价值。中国的非常规油气资源非常丰富,有重油、致密砂岩油、致密砂岩气、页岩气、煤层气和可燃冰等。前陆盆地前渊带深水湖盆沉积相带是重要的致密砂岩油和致密砂岩气发育区,前陆造山带和前缘隆起带是重油和油砂资源的发育带,以物性边界和岩性边界的煤层气发育区常常与煤层尖灭带有关,页岩气的勘探要重视其烃源岩即富有机质黑色页岩和炭质页岩的沉积环境分析。以鄂尔多斯前陆盆地为例,盆山耦合关系、层序地层研究、湖盆底形恢复和沉积砂体成因模式的研究成果可以提供石油地质勘探的新认识。加强前陆盆地沉积学和层序地层学的深化研究必将促进我国油气资源勘探特别是非常规油气资源勘探的新突破。

关键词:沉积学;层序地层学;体系域;油气勘探;全球前陆盆地;非常规油气资源

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

New advances in sedimentology and sequence stratigraphy of foreland basin

Wu Yinye¹, Zou Caineng¹, Hu Suyun¹, Li Qing², Zhang Tianshu¹ and Guo Bincheng¹

(1. Department of Petroleum Geology, RIPED of PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Department of International Affairs, CNPC, Beijing 100007, China)

Abstract: This article summarized some advances in petroleum sequence stratigraphy and sedimentology from an angle of oil/gas exploration in foreland basins. It introduced new theories of petroleum geology and expounded on prospects of oil/gas exploration in the foreland basins all over the world. It elaborated on the distribution of global foreland basins and fault belts and their dynamic mechanism, as well as features of drainage system development in foreland basins. It also discussed the functions of fractured reservoirs (taking the Zagros basin as an example), syntectonic depositional wedge (taking the Ebro basin in Spain as an example), system tracts and sedimentary sandbodies (taking Spitsbergen foreland basin in Europe as an example), and petroleum systems (taking the Andes foreland basin in South America as an example). Finally, it pointed out that cases from South America and Middle-east foreland basins have important significance in guiding oil and gas exploration in central and western China, while the case from western Canadian foreland basin can be used as reference for assessment of unconventional resources in China. China is abundant in unconventional oil and gas resources, such as heavy oil, tight sandstone oil and gas, shale gas, coal-bed methane, nature gas hydrate and etc. Tight oil and gas are mostly distributed in sedimentary facies belts of deep water lacustrine foredeeps in some foreland ba-

收稿日期:2011-05-15。

第一作者简介:吴因业(1964—),男,博士,教授级高级工程师,沉积学与石油地质。

基金项目:国家科技攻关项目专题研究基金(2004BA616A-04-02)。

sins. Heavy oil and oil sands are distributed in orogenic belts and frontal uplift of certain foreland basins. Coal-bed methane is related to pinch out belts of coal-beds with a physical and/or lithological boundary. Shale gas exploration in China shall focus on sedimentary environmental analysis of source rocks, such as black shale with rich organic matter and carbonated shale. A case from Erdos Basin shows that basin and mountain coupling systems, sequence stratigraphy, basin floor topography restoration and sedimentary model of sandbodies may help us to better understand petroleum geology. It is suggested that attention shall be paid to the study of sedimentology and sequence stratigraphy of foreland basins so as to achieve breakthrough in oil and gas (especially unconventional resources) exploration in China.

Key words: sedimentology, sequence stratigraphy, system tract, oil and gas exploration, global foreland basin, unconventional oil and gas resource

本文综述了全球主要前陆盆地沉积演化与石油地质学国际会议有关研究论文的摘要、口头发言及展讲内容,包括:1)全球主要前陆盆地的分布特征,2)西加拿大前陆盆地沉积演化与含油气系统事件特征,3)安第斯前陆盆地沉积演化与含油气系统事件特征,4)扎格罗斯前陆盆地沉积演化与含油气系统事件特征,5)其他前陆盆地沉积演化与含油气系统事件特征。对前陆盆地层序地层学和沉积学等方面的主要进展作一简述,并以中国中西部前陆盆地之一鄂尔多斯为例,讲述了石油地质意义和应用,特别是在中国非常规油气资源勘探中的重要启示。

1 全球前陆盆地冲断带的分布特征及其动力学机制

前陆盆地和非前陆盆地沉积演化叠加形成了前陆盆地不同的盆地组合类型;前陆盆地构造作用动力、滑脱层、岩层组合、边界条件控制了冲断构造位移量的传播和消减方式,也控制了构造变形样式。不同类型的盆地演化控制了烃源岩、储集层分布的差异性以及油气资源的富集程度。全球从前寒武纪和古生代广为发育的盆地类型克拉通,到新生代的裂谷、被动大陆边缘盆地和前陆盆地。前陆盆地油气藏都是聚集在构造或非构造圈闭上的重要油气藏。研讨会为我国进行全球石油地质研究和全球油气资源评价提供了重要的评价资料和评价方法。从盆地类型上看,美国地质调查局2007年公布的数据,前陆

盆地油气资源非常大^[1-2],石油资源量约占46%,天然气29%^①。

许多不同类型的沉积盆地都含有重要油气藏,其中包括裂谷盆地(例如苏伊士湾)、上-下叠覆的裂谷-坳陷盆地(例如西西伯利亚和北海)、被动陆缘盆地(例如墨西哥湾和西非海域)、上-下叠覆的被动陆缘——前陆盆地(例如东委内瑞拉和艾伯塔)、拉分盆地(例如苏门答腊)以及弧前盆地(例如萨克拉门托)。这些不同类型盆地的部分范围在其演化史的某一阶段都可能经受挤压或扭压构造作用,因此有可能形成一条冲断带。这种构造作用可以与盆地的持续发育密切相关。全球重要的冲断带有 Alpine-Himalayan 冲断带、环太平洋造山冲断带和北美 Cordillera - 南美 Andes 冲断带。从动力学机制上讲,前陆盆地冲断带与俯冲作用及次级转换断层密切相关,表现为造山作用楔状体的隆起与负荷驱动的沉降作用之间的动力平衡^[3-5],其沉积演化也与普通盆地有较大差异。

2 前陆盆地沉积水系的发育特点

汇聚板块边缘的前陆冲断带常形成一系列平行于造山带的逆冲断裂和褶皱。逆冲断裂经历了成核、生长、横向传播等过程。褶皱的演化与隐伏逆冲断裂的生长有着密切的关系,隐伏逆冲断裂作用形成了地表显著的褶皱样式。水系形态能够非常敏感的记录活动构造的演化过程,尤其对于褶皱横向生长的地区,常形成特征的水

① Chen Z. 加拿大前陆盆地及其相关的油气资源特征. 全球前陆盆地沉积演化和石油地质学术研讨会报告, 福建, 2010.

系形态。我国库车前陆冲断带发育平行于南天山造山带走向的褶皱带,并形成特征的水系形态。利用遥感影像、卫星照片、以及从数字高程数据中提取的地貌和水系参数,对库车前陆冲断带秋里塔格构造带水系形态进行分析研究,得出库车前陆冲断带褶皱具有横向生长的演化特征,并识别出判别褶皱生长的5个水系形态标志。这些水系形态标志包括:不对称的水域形态,水系受到阻挡发生弯曲、捕获、并流现象,背斜脊部风口的形成以及高度依次降低排列,不对称的冲积扇体,被纵向河流分隔的两侧背斜的水系形态差异。

前陆盆地的沉积体系充填可以是正常充填,也可以欠补偿充填或过补偿沉积充填。

3 前陆盆地裂缝性储集层的作用及其 Zagros 盆地的实例

中伊朗盆地形成和发展受特提斯洋张力以及阿拉伯板块和伊朗板块边缘聚力的复合控制,其演化经历了基底裂谷(Z_1)、被动边缘(Z_2-T_2)、裂谷盆地(T_3)、弧后前陆($J-N_1^1$)、陆内拗陷-挤压改造(N_1^2-Q)等不同阶段,层序充填包括1个一级层序、3个二级层序,显示明显的纵向叠加、横向复合的复式特点。作为中伊朗盆地弧后前陆演化阶段沉积产物,库姆组层序充填总体呈现碳酸盐岩、火山岩-火山碎屑岩、陆源碎屑岩“混积”的特点。Zagros 冲断带(fold-thrust belt, ZFTB)在剖面上表现为不同区带裂缝性储集层分布的差异性,在纵向上表现为地表以下3 000 m内裂缝性储层质量变好,否则石英胶结作用加强,裂缝性储集层渗透率变差,从而为勘探优质储集体提供科学依据。

我国酒泉盆地祁连山北缘西部窟窿山逆掩推覆带实例表明,中生代为断陷盆地,新生代为前陆盆地,已在窟窿山构造发现青西裂缝性油藏,其北东向撕裂断层控制着开启性裂缝带的分布,是油田的高产区块。

4 构造作用同期的沉积楔状体及其西班牙 Ebro 盆地实例

造山带与前陆盆地的盆山耦合关系,其沉积

层序关键界面主要有3种表现形式:最大洪泛面、区域性侵蚀间断面或侵蚀不整合面、区域性平行不整合面。沉积充填特征在进积期构造带的构造推覆作用不发育,山前地区和盆地边缘地区转变为沉积物剥蚀区,盆地内发育三角洲-湖泊沉积体系;退积期造山带构造推覆作用增强,山前地区和盆地边缘地区受此作用相对下沉,接受沉积,此时冲积扇-湖泊沉积体系发育,三角洲沉积环境不发育。在西班牙东北 Ebro 盆地边缘古近纪的构造和沉积作用,发育构造作用同期的沉积楔状体,指出在冲积扇砾岩层内发育一种层内(intraformational)、复合的递进型(progressive)同构造不整合。它们由旋转退覆楔状体和旋转超覆楔状体共同组成。在靠近活动的造山带前缘处发育同构造角度不整合,往盆地内部递变为整合。相反,在不活动的隆起块体,发育上攀的超覆不整合。

实验结果表明,构造作用同期的沉积楔状体(syn-tectonic sedimentary wedge)具有软弱的底层(weak basal layer),沉积厚度变化大,剪切力大,可以产生褶皱和底辟作用。

5 欧洲 Spitsbergen 前陆盆地的体系域和沉积砂体

在 Spitsbergen 前陆盆地体系中,斜积层(clinoform)进积到前渊沉积区(foredeep depozone),沉积砂体出现有规律的展布特征。细分每套沉积层序,可以发现最大洪泛面(MFS)和低位体系域、海侵体系域及高位体系域(图1),他们的发育与海平面变化密切相关。沉积砂体的分布主要在低位体系域和高位体系域,尤其是低位体系域的砂体,被海侵体系域的泥岩所覆盖,易于形成岩性地层圈闭的油气藏^[6-8]。

Spitsbergen 大陆边缘西南海域(包括陆架、陆坡和陆坡坡脚)的地质特征显示,巴伦支海大陆边缘和邻近的挪威深水海域、格陵兰盆地、Atka and Pomorsky 海槽的沉积盖层,包括下部同裂陷沉积和使陆架外延的上部后裂陷进积斜坡沉积等,都属于新生代陆相沉积。新生代最厚的沉积位于 Atka 海槽的沉积中心和 Pomorsky 海槽陆坡区,厚度达11 km;在 Homsund 断层地带和斯瓦尔巴特板块西部边缘沉积厚度达7 km。新生代沉积层中

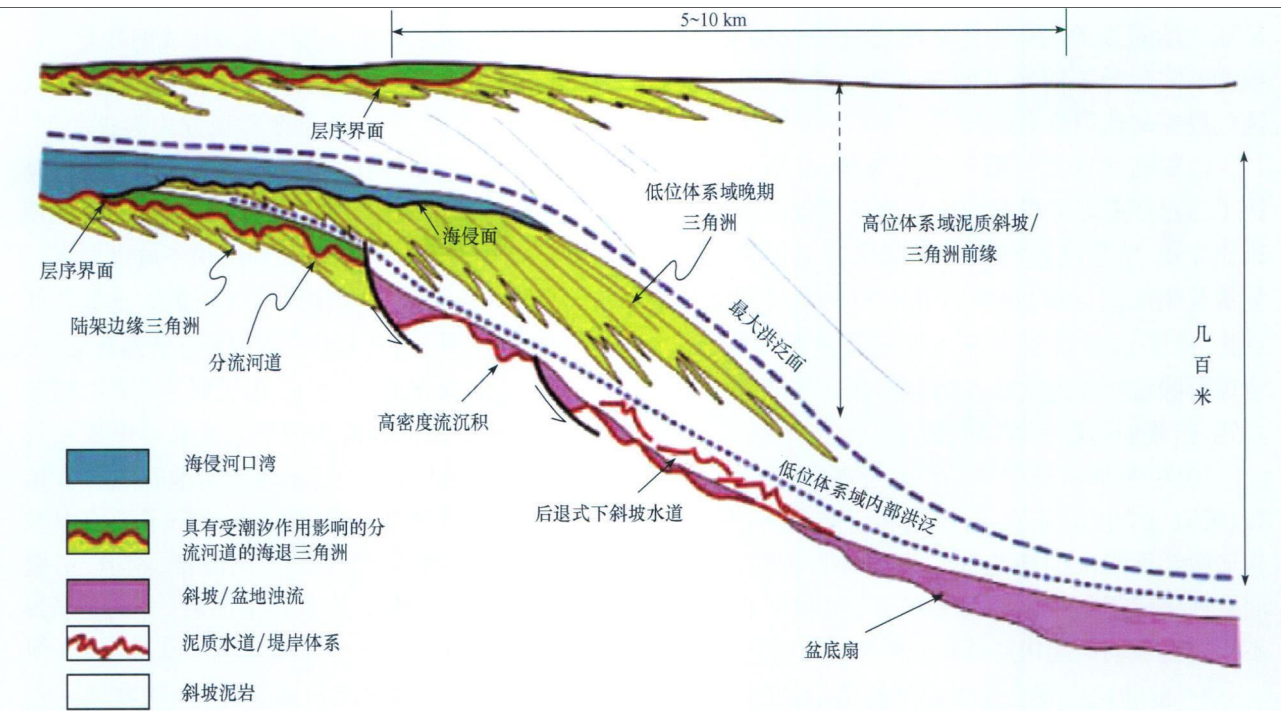


图 1 欧洲 Spitsbergen 前陆盆地的体系域和沉积砂体^①

Fig. 1 The system tracts and sedimentary sandbodies in the Spitsbergen foreland basin in Europe

发育有 5 个区域性不整合面(U3,U2,U ,Uo,Q2)。这些不整合面是大型地震层序的分界面(SS):a)渐新世至早-中中新世同裂陷沉积;b)早-中中新世;中中新世-早上新世;中-晚上新世至早-中更新世;晚更新世至全新世的后裂谷沉积。每个地震层序内部还可分出亚层序和地震相单元,这些地震相单元可显示沉积旋回、海进、海退、高能沉积等等^[9-14]。主要的油气远景目的层位于渐新世至早-中中新世地震层序中。

6 南美 Andes 前陆盆地的南北差异及其含油气系统

南美 Andes 前陆盆地北部石油地质上重要的地层剖面由自晚白垩世至现代的陆相至极浅海相(晚白垩世)碎屑岩组成。下白垩统中具有薄碳酸盐岩层,这种剖面覆于已硬化至轻度变质的古生代沉积岩和侵入岩之上。形成储层的砂岩赋存于上白垩统、始新统和渐新统单元中,区域性盖层为中新生界莱昂组页岩,而白垩纪和第三纪页岩似乎构成局部的层内盖层。生油层是拉勒纳组相当层的晚白垩世页岩和碳酸盐岩。

厄瓜多尔 Oriente 盆地是南美安第斯山前的一个前陆盆地,是厄瓜多尔的主要产油区。

通过对 Oriente 盆地 16 区块的油气地质条件的系统分析,认为 16 区块烃源条件较好、储集条件优越、生储盖组合有利,具有较大的勘探潜力。晚白垩世末古近纪时期形成的低幅(断)背斜、岩性一背斜构造是区内有利的勘探目标。

南美 Andes 前陆盆地中南部,烃源岩的地质时代较广泛,从志留系一直到白垩系,尤其是志留系和泥盆系成为主要的烃源岩,例如 Bolivia 和 South Peru 盆地的烃源岩。这与南美 Andes 前陆盆地的古生代古地理特征有关,从而形成了南美 Andes 前陆盆地从古生代到中生代的多套含油气系统。

7 对中国中西部前陆盆地常规油气勘探的指导意义

南美和欧洲、中东前陆盆地的沉积演化特征和石油地质特征表明,一些前陆盆地山前冲断带残余油藏发育,成因是油气的调整和破坏;前陆拗陷或拗陷内的冲断带天然气藏发育,成因是晚期高过成熟天然气的充注;前陆斜坡和前缘隆起凝

① Isabelle M. 挤压区的构造样式和油气勘探中的作用. 全球前陆盆地沉积演化和石油地质学术研讨会报告,福建,2010.

析油或油藏发育,成因是早期形成原油的充注。因此前陆盆地不同区带的石油地质意义不同,对油气勘探的认识也有差异^[15]。

以前陆盆地之一鄂尔多斯为例,盆地西缘经历了源自西南方特提斯构造域的从西向东的挤压碰撞作用,结果使得特提斯前陆区古老的造山带复活及拗拉槽反转,冲断活动不断向克拉通方向迁移,使鄂尔多斯盆地进入前陆盆地演化阶段。全球前陆盆地的地质勘探结合中西部前陆盆地的实践,给我们的启发可以归纳出几点:

1) 中西部前陆盆地是一个多旋回演化的过程,可以分为前前陆期、前陆期和前陆间期。前陆构造活动期形成同构造冲积扇相砾岩沉积,构造间歇期形成湖相泥岩等细粒沉积,沉积中心随着不同构造活动期同构造砂砾岩的推进发生迁移。

2) 前陆期层序受控于前陆构造活动的强弱,体系域发育不完整,以低位和高位的粗粒冲积体系域为主;前陆期储层多发育在低位和高位体系域,其分布受前陆盆地物源、坡地和水系展布的控制;储层演化程度的不同受后期构造加载、埋藏时间的早晚和异常压力等因素的影响。

3) 构造层序发育早期的逆冲作用强烈造山,在构造层序的下部沉积序列发育同逆冲构造期的冲积扇沉积;逆冲体的重力加载引起快速挠曲沉降,导致了区域性的水进。随后由于逆冲造山作用减弱,山前高差减小,缺少边缘扇砂砾岩带的发育;沉降变缓,以河流和河流三角洲沉积向盆地推进,形成了构造层序上部的水退序列。这与美国怀俄明晚白垩前陆盆地的研究结果可类比。

4) 前陆盆地强压实、压溶和胶结成岩相分布广泛,是低孔低渗储集层、致密超致密储层形成的关键因素,破裂裂缝成岩相主要沿冲断带前缘分布。

5) 构造隆升作用使陡岸的地层抬升,目的层埋藏变浅,致使压实作用相对变弱,原生孔隙和早期溶蚀孔隙得以保存,在区域上,隆起带三叠系砂岩物性好于拗陷带的砂岩物性。

6) 鄂尔多斯西缘及南缘在晚三叠世开始的冲断活动及其前渊的发育,标志着前陆盆地开始形成。前渊紧邻褶皱冲断带,具有呈狭长带状位于冲断带前缘、向东迁移、沉积厚度大且向东减薄的特点。沿着前陆盆地沉降带,可容纳空间发生

变化,导致了沉积相组合和体系域构成的变化。

7) 鄂尔多斯盆地中东部属于前缘斜坡带,以湖泊三角洲沉积为主,准层序堆积方式为进积型。湖侵体系域发育时期(三叠系长8—长7),进入湖盆发展全盛阶段,发育有黑色页岩及油页岩,三角洲发育局限,堆积方式为加积到退积。可以形成三角洲平原和前缘砂体的常规油气储集体及低孔低渗的储集层(图2),乃至非常规致密砂岩储集层。

8) 盆山耦合关系、层序地层研究、湖盆底形恢复和沉积砂体成因模式的研究成果可以提供石油地质勘探的新认识。鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组从长10段到长1段沉积期,经历了湖盆由发生到消亡的全过程,发生了3次湖侵、湖退,形成多期三角洲沉积体系及3套生油岩,分别是长9(李家畔页岩)、长7(张家滩页岩)和长4+5泥岩。除浅水区三角洲沉积体系外,前陆盆地深水区具备形成重力流的诱发机制和底形条件,可以发育滑塌沉积、砂质碎屑流沉积、扇形浊流沉积和沟道浊积砂体等多种类型的重力流沉积。

8 对中国非常规资源勘探的指导意义

西加拿大前陆盆地的分布特征及其重油等资源的评价表明^①,探索新区新领域的油气资源,可以满足国民经济可持续发展的需要。西加拿大盆地为一典型的非对称性前陆盆地,主要位于阿尔伯达省境内。以盆地中的鲍艾兰大背斜为界,又分为阿尔伯达和威利斯顿两个次一级盆地,油气绝大部分分布在阿尔伯达盆地。泥盆系含油气系统均为碳酸盐岩储层,除含有大量的常规油气资源外,还拥有巨大的待开发的重油和沥青资源。安特勒(D末)和拉腊米(K₂—E₁)两期造山运动决定了盆地的规模、形态和升降格局,其构造演化控制了盆地的碳酸盐沉积、生物礁形成和油气运移。决定和控制泥盆系含油气系统储层特征的因素主要有:前寒武纪基底构造、地层发育和成岩作用(尤其是在中-深埋藏期)。该含油气系统的许多特征,对于世界上其他地区(比如中国)的泥盆系含油气系统来说是典型的,但其中某些特征却为西加拿大盆地所独有。

① Chen Z. 加拿大前陆盆地及其相关的油气资源特征. 全球前陆盆地沉积演化和石油地质学术研讨会报告, 福建, 2010.

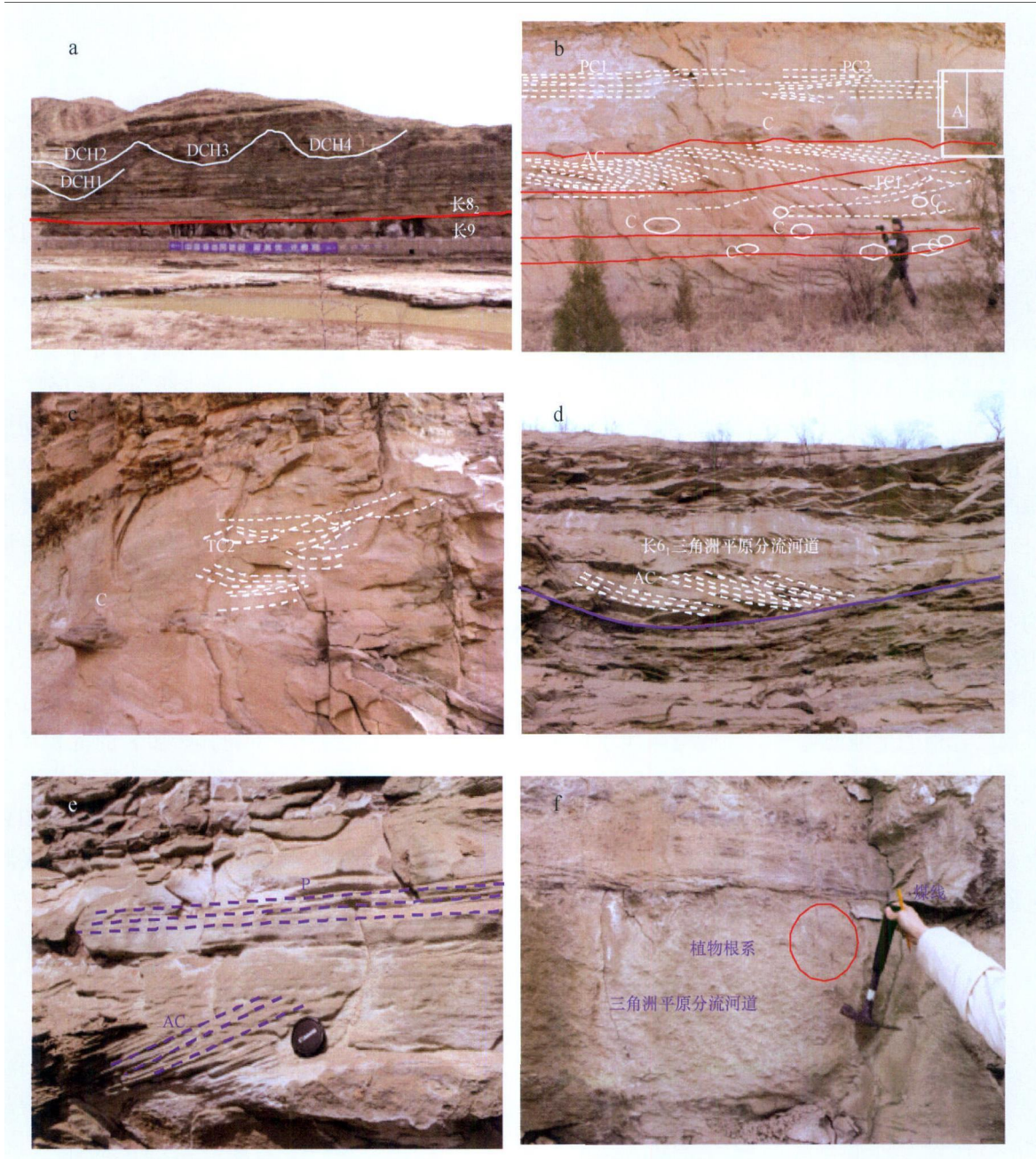


图2 鄂尔多斯前陆盆地前缘斜坡带形成的三角洲沉积砂体及低孔-低渗储集层

Fig. 2 Delta sandbodies and reservoirs with low porosity and permeability in foreslope of Erdos foreland basin

DCH. 三角洲平原分流河道;TC. 槽状交错层理;AC. 侧向加积斜层理;PC. 板状交错层理;P. 平行层理;C. 砾石

a. 鄂尔多斯盆地中东部延河剖面白家河长9和长8界线(上为长8₂三角洲平原下为长9三角洲前缘);b,c. 鄂尔多斯盆地中东部延河剖面白家河西长8₂三角洲平原分流河道,见砾石,平均直径达50 cm,从下到上至少可分为5个沉积层(红线为界线),总体上层理从下部的大型槽状交错层理(TC1)、大型侧向加积斜层理(AC)向上过渡为小型槽状交错层理(TC2)小型板状交错层理(PC1,PC2),表明水动力逐渐减弱;d. 鄂尔多斯盆地中东部延河剖面翠屏山长6₁三角洲平原分流河道,侧向加积斜层理(AC);e. 鄂尔多斯盆地中东部延河剖面瓦村长3曲流河道点砂坝大型侧向加积斜层理(AC)向上变化为平行层理(P)反映水动力变化过程;f. 鄂尔多斯盆地中东部延河剖面七里村油矿王梁沟长4+5三角洲平原分流河道顶部见植物根系

西加拿大前陆盆地拥有在盆地最浅部的重油藏、与重油伴生的生物气藏、轻质油藏、无硫气和凝析气藏、盆地深部的含硫气藏(图3;Chen Z,2010)^①。油气藏的圈闭类型以地层-成岩复合圈闭为主。无论是

① Chen Z. 加拿大前陆盆地及其相关的油气资源特征. 全球前陆盆地沉积演化和石油地质学术研讨会报告, 福建, 2010.

常规油气藏,还是非常规油气藏,对我国油气资源的勘探评价都有重要的参考价值^[16]。

中国的非常规油气资源非常丰富,有重油、致密砂岩油、致密砂岩气、页岩气、煤层气和天然气水合物(又称可燃冰,nature gas hydrate)等。鄂尔多斯盆地华庆地区中生界已经发现了大规模的致密砂岩油分布区(邹才能和陶士振等,2011)^[17-19]。就中国前陆盆地的非常规油气资源研究和勘探而言,全球前陆盆地特别是西加拿大前陆盆地给我们的启发可以归纳为以下几点。

1) 重油和油砂资源在前陆盆地的赋存与分布

前陆盆地造山带和前缘隆起带是重油和油砂资源的发育带。由于原油密度大、粘度大,流动性差,核心问题是开发开采技术。

重油沥青和焦油砂的形成和展布与中、新生代构造运动密切相关,尤其是受控于全球新生代造山褶皱带的分布。从世界范围来看,西加拿大盆地和东委内瑞拉盆地的地质资源量较多。中国西部前陆盆地的重油沥青和焦油砂分布属于阿尔卑斯富集带。

2) 致密砂岩油和致密砂岩气在前陆盆地的赋存与分布

前陆盆地前渊带深水湖盆沉积相带是重要的

致密砂岩油和致密砂岩气发育区。主要表现为烃源岩和储集层紧密相连,油气水关系复杂。

前陆盆地前缘斜坡带的三角洲砂体可以发育大规模的致密砂岩油,储集层表现为大范围分布、低孔低渗或特低孔低渗,无统一的油水界面。特别是低角度的前缘斜坡带,发育有大量三角洲前缘席状砂和河口坝沉积微相的地区,对致密砂岩油的分布更为有利。

3) 煤层气在前陆盆地的赋存与分布

煤层气的勘探以非前陆期的沉积层序为重点。前陆盆地的沉积充填可以划分为前陆期层序和非前陆期层序,前陆期层序常常表现为碎屑岩沉积为主,煤层主要在非前陆期层序发育(吴因业和陈丽华,2008;姜在兴,2010)^[20-22]。以物性边界和岩性边界的煤层气发育区常常与煤层尖灭带有关,尖灭带的岩性具有较低的渗透性,有利于煤层气的保存。

4) 页岩气在前陆盆地的赋存与分布

页岩气的勘探要重视其烃源岩的沉积环境分析,富有机质黑色页岩和炭质页岩是形成页岩气的主要岩石类型。富有机质黑色页岩的沉积环境主要有深水陆棚、深水湖泊、闭塞海湾等,炭质页岩常常与煤系伴生,以沼泽和湖泊沉积环境为主。

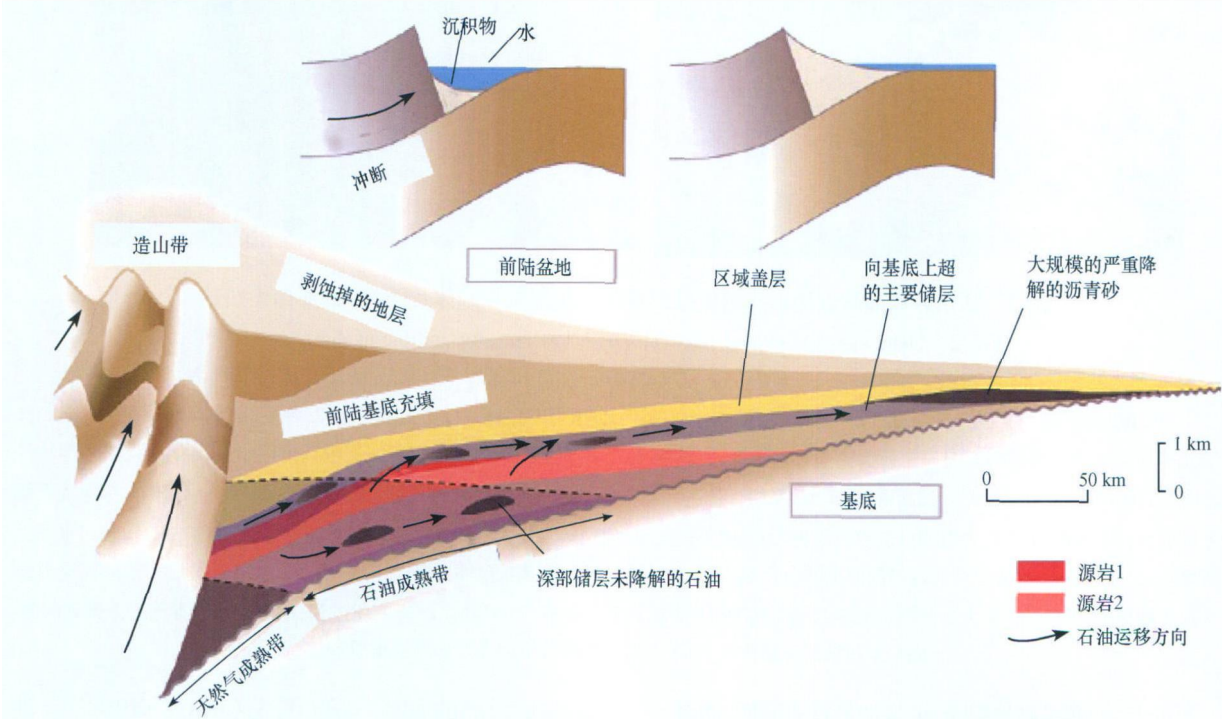


图 3 西加拿大前陆盆地的非常规油气资源分布^①

Fig. 3 The distribution of unconventional resources in western Canadian foreland basin^①

① Chen Z. 加拿大前陆盆地及其相关的油气资源特征. 全球前陆盆地沉积演化和石油地质学术研讨会报告, 福建, 2010.

9 结语

前陆盆地层序地层和沉积学研究在国际上的进展明显。与国际上相关研究领域及研究进展相比较,在陆相前陆盆地的层序地层与沉积学研究方面,中国所处的大地构造位置与沉积环境独特,研究具有一定的优势。但在其他方面还存在一定的差距,如在沉积机理、露头沉积学以及一些新技术新方法等方面的研究,中国学者尽管有不同程度的涉足,但与国际研究成果相比尚有一定的不足。国际学者重视构造与沉积层序的结合,利用沉积盆地沉积物的特征反演断裂构造的演化。此外沉积模拟是沉积学进展的重要手段,传统的物理模拟辅以数学模拟会更加精确,尤其结合盆地沉积演化的模拟更是达到了新的层次。加强前陆盆地沉积学和层序地层学的深化研究必将促进我国油气资源勘探特别是非常规油气资源勘探的新突破。

参考文献

- [1] Chen Z, Osadetz K G, Issler D, et al. Pore pressure patterns in Tertiary aquifers and hydrodynamic implications, Beaufort Sea and Mackenzie Delta Basin, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2010, 58 (1): 3-16.
- [2] Chen Z, Osadetz K G. Improving reservoir volumetric estimations in petroleum resource assessment using discovery process models[J]. Petroleum Science, 2009, 6(2): 105-118.
- [3] Martinsen O J, Helland-Hansen W. Strike variability of clastic depositional systems: does it matter for sequence-stratigraphic analysis? [J]. Geology, 1995, 23: 439-442.
- [4] Moretti I, Macris A, Lecomte J F, et al. How to better define the structures using 2D and 3D restoration tools in complex areas: case study in the Sub Andean Zone, Bolivia[Z]. Cartagena Meeting, Proceeding, 2006.
- [5] Moretti I, Delos V, Letouzey J, The use of surface restoration in foothills exploration: theory and application to the Sub Andean Zone of Bolivia, Thrustbelts and Foreland Basin, Lacombe et al[J]. Eds-Springer Memoir, 2006: 149-162.
- [6] Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits and pitfalls[J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35: 1-43.
- [7] Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [8] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy? [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92: 1-33.
- [9] Vail P R. Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy[C]//Bally A W. AAPG At-Las of Seismic Stratigraphy, 1988 AAPG Annual Convention Short Course, 1988: 217-259.
- [10] Van W J C. Sequence stratigraphy and marine to nonmarine facies architecture of foreland basin strata, book cliffs, Utah, USA[C]//sequence stratigraphy of foreland basin deposits. outcrop and subsurface examples from the Cretaceous of North America. AAPG Memoir, 1995, 64: 137-223.
- [11] 贾承造,刘德来,赵文智,等. 层序地层学研究新进展[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 1-4.
Jia Chenzao, Liu Deilai, Zhao Wenzhi, et al. Some new achievements in sequence stratigraphy research[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 1-4.
- [12] Wu Y Y, Hou Y A, Guo B C, Sequence stratigraphy of palaeogene in the HGZ area of qaidam basin[J]. Petroleum Science, 2007, 4(3): 14-21.
- [13] 吴因业,张天舒,张志杰,等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. 古地学报, 2010, 12(1): 69-81.
Wu Yinye, Zhang Tianshu, Zhang Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 69-81.
- [14] 吴因业,宋岩,贾承造,等. 柴北缘地区层序格架下的沉积特征[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 195-203.
Wu Yinye, Song Yan, Jia Chenzao, et al. Sedimentary features in a sequence stratigraphic framework in the north area of Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 195-203.
- [15] 吴因业,陈丽华. 中国中西部前陆盆地油气储层层序地层学[M]. 北京:石油工业出版社, 2008: 1-286.
Wu Yinye, Chen Lihua. The sequence stratigraphy and oil and gas reservoirs in the foreland basins of mid-western China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-286.
- [16] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chenzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [17] 邹才能,陶士振,侯连华,等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2011: 1-310.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional Petroleum Geology[M]. Beijing: Geology Press, 2011: 1-310.
- [18] 戴金星,黄士鹏,刘岩,等. 中国天然气勘探开发 60 年的重大进展[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 689-698.
Dai Jinxing, Huang Shipeng, Liu Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 689-698.

[19] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707-714.
Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone; an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.

[20] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 535-541.
Jiang Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: the present and the future [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 535-541.

[21] 陈欢庆, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 深水断陷盆地层序地层分析与岩性-地层油气藏预测——以中国南海 C 盆地深水区古近系 T 组为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 626-634.
Chen Huanqing, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, et al. Sequence stratigraphy analysis and lithologic-stratigraphic reservoir prediction in deepwater faulted basins—an example from the Paleogene T Formation of the deepwater C Basin in South China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 626-634.

[22] 王起琮. 旋回层序地层的控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 648-656.
Wang Qicong. Controlling factors of cyclic sequence stratigraphy [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 626-634.

(编辑 高 岩)

世界页岩气资源量最新评价

2011 年 4 月,美国能源信息署(EIA)发布了“世界页岩气资源初步评价报告”,根据 Advanced Resources 国际有限公司负责完成的美国以外 32 个国家的页岩气资源评价以及美国页岩气资源评价结果,全球页岩气技术可采资源总量为 $187.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。为了更好地了解全球页岩气资源潜力,EIA 委托 Advanced Resources 国际有限公司开展美国以外 32 个国家的页岩气资源评价,评价了 14 个油气区、48 个含页岩气盆地、70 个页岩气层。这次评价没有包括俄罗斯、中亚、中东东南亚和中非等地区,因为这些地区或有非常丰富的常规资源,或缺乏基础的评价资料。此次评价采用的方法是首先对所选择页岩盆地和地层进行地质和储层描述,确定主要页岩地层的分布范围、厚度和关键的储层参数,然后确定各页岩地层的潜力区,最后计算地质资源量和技术可采资源量。报告表明,世界页岩气资源丰富,技术可采资源量排名前 10 位国家是中国、美国、阿根廷、南非、墨西哥、加拿大、利比亚、阿尔及利亚、巴西和波兰。这 10 个国家技术可采资源总量占全球的 81.5%。目前天然气依赖进口但页岩气资源比较丰富的国家有法国($5.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、波兰($5.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、土耳其($0.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、乌克兰($1.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、南非($13.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、摩洛哥($0.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$)和智利($1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。目前已有较高天然气产量而且页岩气资源量亦很丰富的国家有美国($24.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、加拿大($11 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、墨西哥($19.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、中国($36 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、澳大利亚($11.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、利比亚($8.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、阿尔及利亚($6.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、阿根廷($21.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$)和巴西($6.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。这两类国家都有开发页岩气的吸引力。

(周庆凡 供稿)