

文章编号: 0253-9985(2005)05-537-16

伸展构造与裂谷盆地成藏区带

刘和甫¹, 李晓清^{1,2}, 刘立群³, 侯高文^{1,4}, 边海军^{1,5}

(1 中国地质大学, 北京 100083 2 胜利油田东胜精采石油开发集团有限公司, 山东东营 257100

3 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083 4 中国石化国际石油勘探开发公司, 北京 100083

5 中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南濮阳 457001)

摘要: 全球裂谷系广泛发育于板块构造旋回的各个阶段及各种环境中, 包括: 1) 大陆裂谷; 2) 新生洋盆; 3) 伸展大陆边缘; 4) 弧后裂谷; 5) 碰撞裂谷等。全球典型裂谷系的形成机制主要有: 1) 主动裂谷; 2) 被动裂谷; 3) 复合裂谷。成藏区带是总油气系统 (TPS) 中的基本评价单元 (AU)。裂谷盆地中广泛发育各种成藏区带, 根据正断层的卷入层次及不同构造环境中的沉积体系, 主要划分出 4 种类型: 1) 掀斜断块带; 2) 滚动构造带与三角洲体系; 3) 坡折带与礁滩层序; 4) 调节带与浊积扇体系。

关键词: 成藏区带; 总油气系统; 裂谷盆地; 伸展构造

中图分类号: TE111.1 **文献标识码:** A

Petroleum plays in rift basins and extensional structures

Liu Hefu¹, Li Xiaqing^{1,2}, Liu Liqun³, Hou Gaowen^{1,4}, Bian Haijun^{1,5}

(1 China University of Geosciences, Beijing; 2 Dongsheng Jinggong Petroleum Development Group Corporation, Shengli Oilfield Co., Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong;

3 Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing;

4 International Petroleum Exploration & Production Corporation, SINOPEC, Beijing;

5 Exploration & Production Scientific Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan)

Abstract Rift systems in the world are widely developed in various stages and various environments of plate tectonic cycle, including (1) continental rift, (2) nascent ocean, (3) extensional continental margin, (4) back-arc rift, and (5) collision rift. The forming mechanisms of typical rift systems in the world mainly include (1) active rift, (2) passive rift, and (3) complex rift. Play is the basic assessment unit (AU) of the total petroleum system (TPS). Various kinds of plays are extensively developed in rift basins. According to horizons cut by normal faults and sedimentary system in different tectonic environments, four kinds of plays can be recognized, including (1) tilted fault block belt, (2) rollover structural belt and delta system, (3) slope break belt and reefbank sequences, and (4) accommodation zone and turbidity fan system.

Key words play; total petroleum system; rift basin; extensional structures

地球岩石圈中的伸展构造体系是全球重要的构造现象, 可以发生在板块构造的所有环境, 即威尔逊旋回的所有阶段。

伸展构造体系中最常见的大陆裂谷是板块构

造最基本的作用之一。裂谷形成的力源可以来自地壳下伏的地幔, 也可以来自板块边界, 前者称为主动裂谷, 而后者称为被动裂谷, 但在不同的构造环境下常常形成复合裂谷。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49672154); 国土资源大调查项目 (DKD 2104011)

第一作者简介: 刘和甫, 男, 74 岁, 教授 (博士生导师), 石油构造

收稿日期: 2005-05-15

大陆裂谷保存了大陆裂解初始阶段的特征,同时也富集矿产资源,特别有利于油气聚集。对盆地内的区带分析将是油气新区勘探的关键。

1 裂谷系基本特征

1.1 伸展构造体系与裂谷演化

在全球引张动力系统下形成的伸展构造体系主要有:大陆裂谷系和大洋中脊及其两侧的被动大陆边缘。从构造演化来看,伸展构造体系可以发育在威尔逊旋回各阶段,由各种作用所产生:1)造槽作用(taphrogeny),可以导致各种槽地形成,即形成裂谷,如莱茵地堑;2)造盆作用(koilogeny),可以导致拗陷形成,即形成裂谷盆地,如北海盆地;3)造洋作用(thalassogeny),当伸展作用进一步发展,大陆裂解可以形成海洋及大陆边缘,如红海;4)伸展造山作用(extending orogeny),当伸展作用诱发大量岩浆上涌,构成山岭的岩基,如北美内华达山。有关伸展造山作用目前仍存在较大争议^[1-5]。

1.1.1 大陆裂谷与裂谷盆地(图1a)

大陆裂谷是指整个岩石圈受伸展断裂所产生的狭长凹地,常形成地堑或半地堑,如东非裂谷和美国盆岭省等;后期由于热沉降形成裂谷盆地,如渤海湾盆地和北海盆地。

大陆裂谷的主要特征为:1)高热流值和低密度异常;2)火山作用频繁,以碱性玄武岩流为主;3)沉积作用,发育陆源冲积扇、河湖相及三角洲体系。

1.1.2 新生洋盆(大洋初始阶段)(图1b)

当大陆裂谷进一步扩展,大陆开始裂解,洋壳沿中脊侵位,形成新生洋盆或陆间海,具较高热流值和沉积速率。如红海发育有红层-熔岩-蒸发岩-碳酸盐岩沉积组合。当红海中洋流循环受阻时,出现海底还原环境,形成腐泥型海相粘土,有利于油气生成。

1.1.3 伸展大陆边缘(图1c)

当新生大洋进一步扩张时,即大洋成熟期,在两侧形成大陆边缘,由于没有明显的火山活动或地震活动,常称为被动大陆边缘;但有些地区发育在地幔柱之上,具有明显的玄武岩喷发作用。因此可以有两种类型的伸展大陆边缘:1)幔柱型;2)柱间型。

大陆边缘为陆壳与洋壳的结合带,两类地壳

具有不同的沉积负荷:低水位期,洋壳上沉积复理石海底扇;高水位期,在大陆架上发育有海岸三角洲沉积体系(图1c)。

1.1.4 弧内裂谷与弧后裂谷(图1d)

当大洋消减时,即太平洋期,由于大洋板块俯冲,在火山弧一侧可以发育弧内裂谷或弧后裂谷。

大洋沉积中发育有红色粘土及放射虫硅质岩,如太平洋西侧的锡霍特山硅质岩(图2)及太平洋东侧的旧金山金门桥畔硅质岩^[6,7]。

1.1.5 坳拉谷与碰撞谷(图1e)

大陆裂谷常以三叉裂谷模式开始发育。其中两支在大陆裂解后形成大洋;一支从大陆边缘伸向大陆内部,衰退成为夭折谷或衰退谷,如西非贝努埃槽。而当大洋闭合或大陆碰撞时产生变形,形成坳拉谷,如俄罗斯第聂伯-顿涅茨盆地。当碰撞造山时可以在一侧形成新的裂谷,即碰撞谷,如欧洲莱茵地堑(图3)。

夭折谷与碰撞谷常与大陆边缘或碰撞造山带呈高角度相交,但沉积搬运方向不同(图1e)。从演化来看,坳拉谷常经历裂谷期、后裂谷期(夭折期)及反转期(碰撞期)。

1.2 动力学模式

大陆裂谷是伸展构造体系中最广泛和最重要的类型,更是油气勘探的最有利地域。

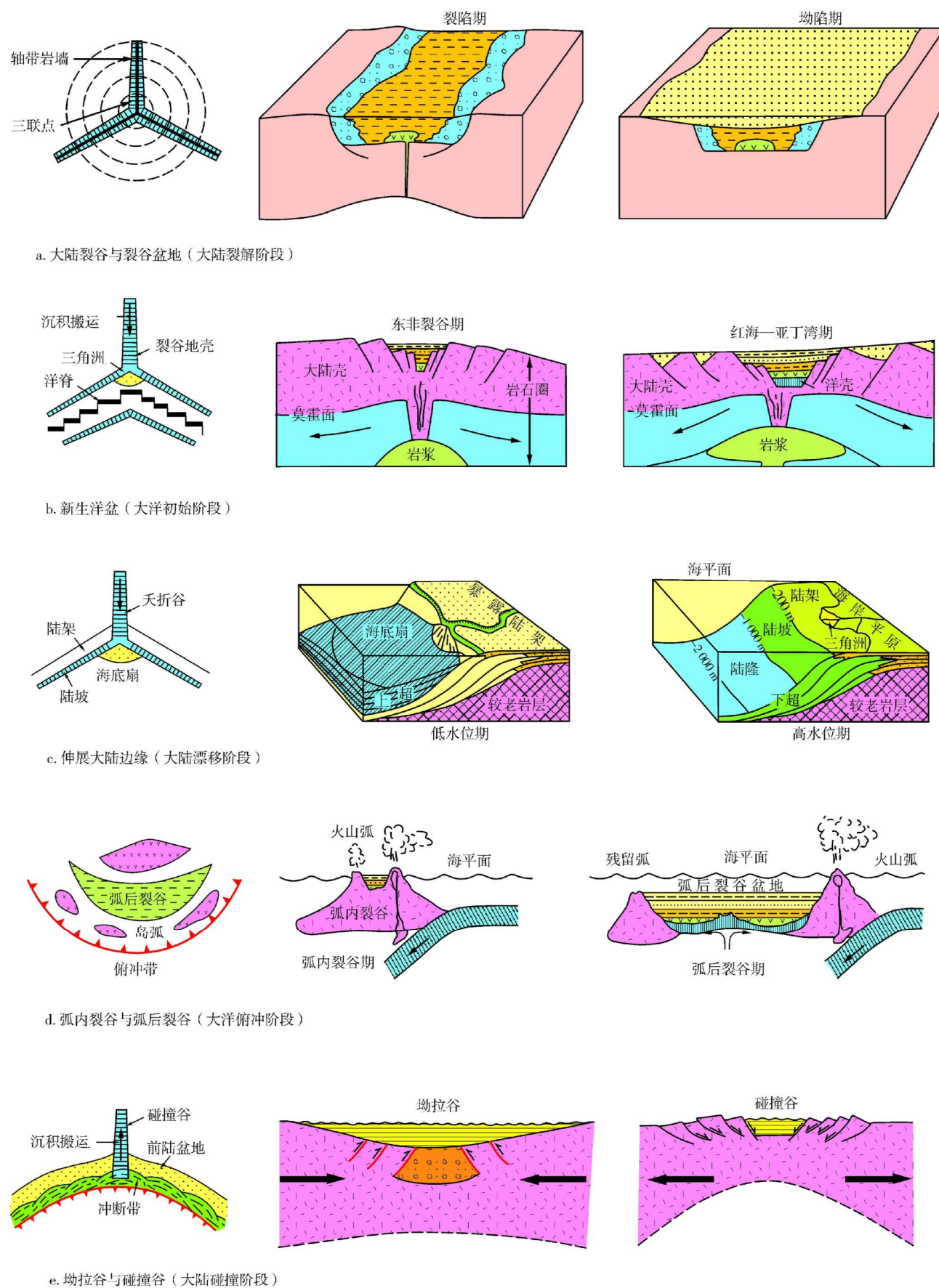
对裂谷成因主要有两个端元:主动裂谷和被动裂谷。但有些裂谷成因是多元的,可称为复合裂谷。

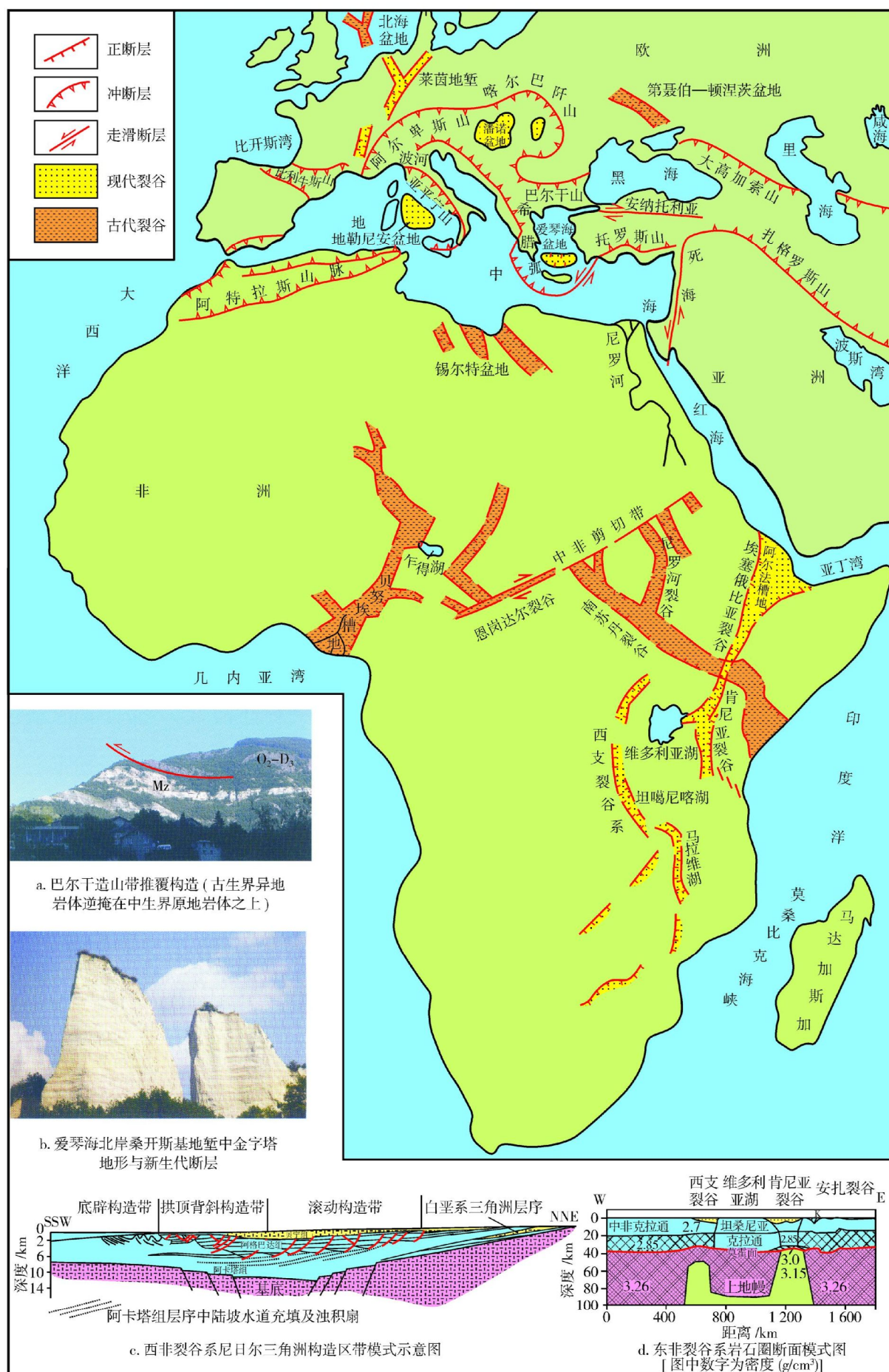
1.2.1 主动裂谷

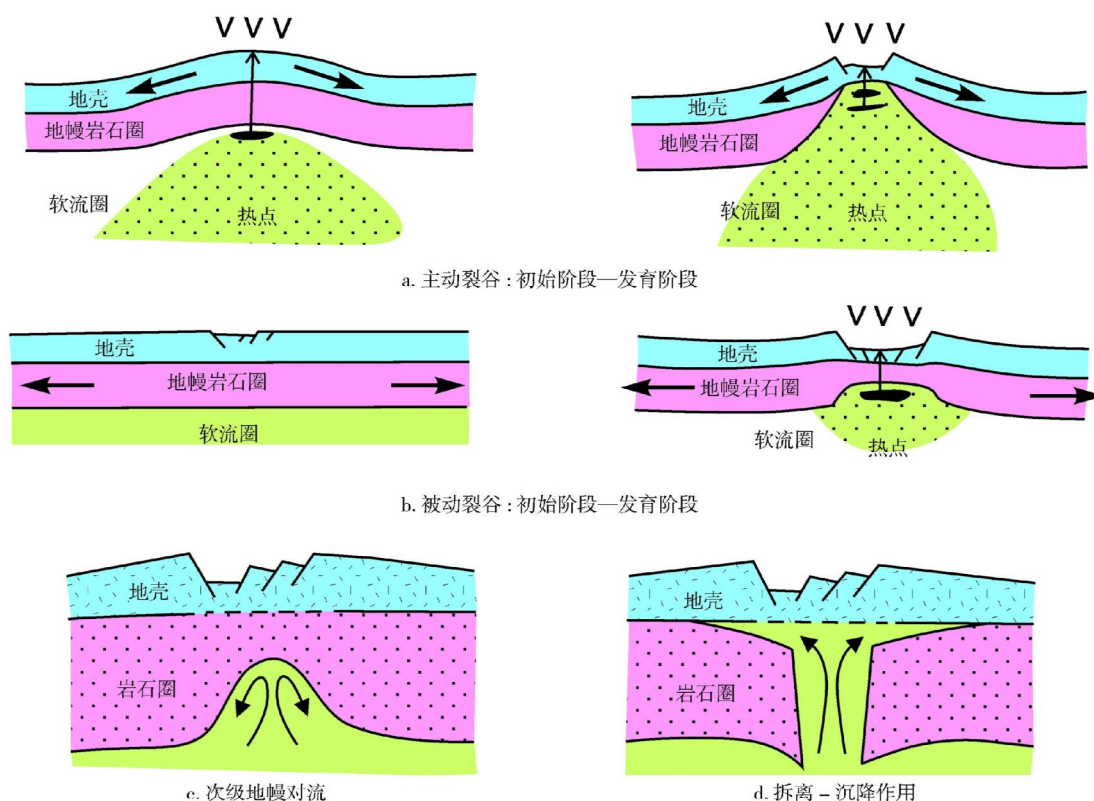
裂谷形成动力来自岩石圈板块底部,为软流圈上涌所产生的裂谷,称为主动裂谷(图4a)。如地幔柱上升而引起岩石圈变薄和破裂的大陆裂谷,早期拱曲形成区域规模穹隆,高热流并伴随广泛火山活动,为离心水系,沉积物供应不足。经典例子为Gregory研究的东非裂谷系(图3)^[8]。

1.2.2 被动裂谷

裂谷形成动力来自板块边界(plate-edge),为岩石圈伸展所产生的裂谷,称为被动裂谷(图4b)。如板块聚合时陆-陆碰撞所产生的碰撞谷,早期为伸展沉降而不是上隆,形成向心水系或轴向水系,沉积物供应充足,火山作用发生在晚期。经典例子为阿尔卑斯碰撞造山带伴生的莱茵裂谷(图3)^[8]。

图 1 裂谷类型与多阶段构造演化^[1-5]Fig. 1 Classification of rifts and multiphase tectonic evolution^[1-5]

图 3 非洲大陆与欧洲中部裂谷系及伸展盆地分布图^[2 3 8]Fig. 3 Distribution of rift systems and extensional basins in Africa and central Europe^[2 3 8]

图 4 裂谷形成动力学模式^[8]Fig. 4 Dynamic patterns of continental rifting^[8]

1.2.3 复合裂谷

主动机制和被动机制只是强调裂谷的初始期,但裂谷常发生在板块运动中,因此裂谷动力学是多元的,即为复合裂谷。次级地幔对流作用和岩石圈拆沉作用也能使岩石圈变薄和破裂(图 4c)。弧后地区由于板块俯冲可以引起地幔对流或热流上涌而形成弧后裂谷;在造山带地区由于拆沉作用可以形成坍塌裂谷。如美国的盆岭省正处于科迪勒拉造山带和弧后地区,属于复合裂谷(图 5)。

1.3 运动学机制

裂谷是通过岩石圈伸展而形成的,在力学上常采用应变椭球体来说明由球体伸展成椭球体。纯剪切在伸展时主轴方向没有发生旋转,称为非旋转应变;单剪切在伸展时主轴方向发生旋转,称为旋转应变。

因此在裂谷伸展运动学中有两种端元模型:纯剪切和单剪切。但由于岩石圈不同层次的流变性不同,实际上可以形成叠加变形,称为分层拆离模式(图 6)。

1.3.1 纯剪切

纯剪切伸展是一种对称伸展作用,伸展方向平行于最小主压应力轴,呈对称伸展,不发生岩块

旋转作用,形成共轭的地堑和地垒结构,深部下地壳及上地幔呈韧性伸展变形,浅层裂谷与深部隆起呈镜像反映(图 6a)。

纯剪切伸展最初由 McKenzie 作为均匀伸展模式提出,如莱茵地堑。但后来发现伸展系数随深度增大,且有岩墙侵位,因此可修正为非均匀伸展模式(图 6a)^[2]。

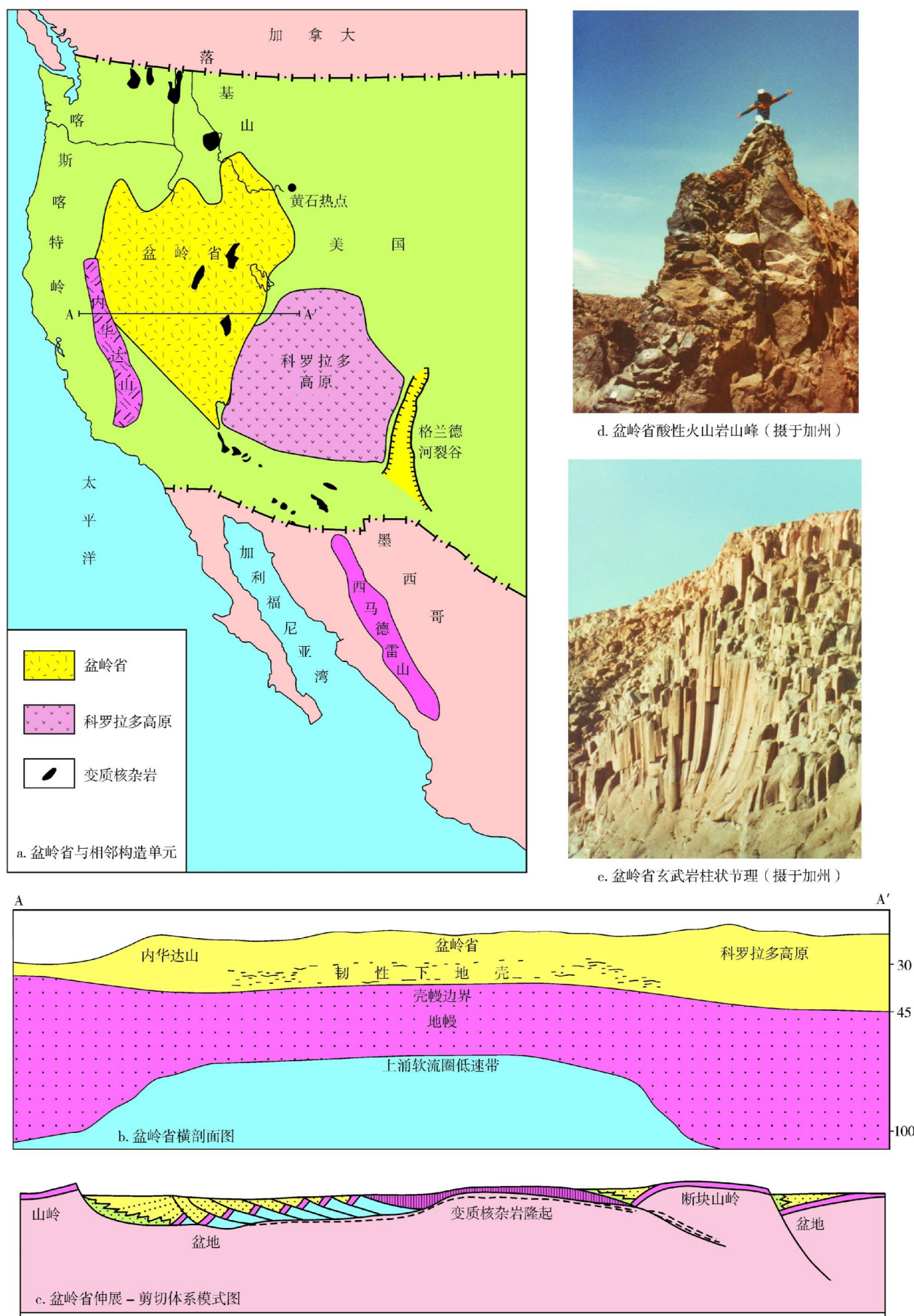
1.3.2 单剪切

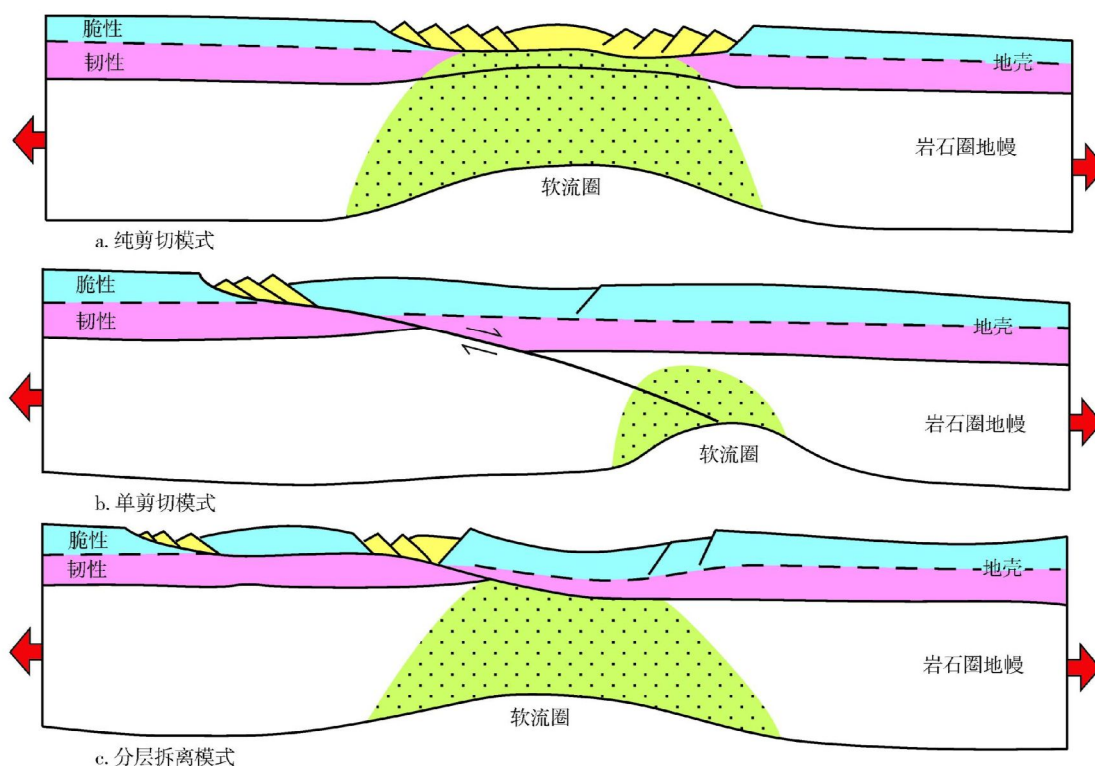
单剪切伸展是一种不对称伸展作用,岩石圈伸展主要通过低角度拆离面来完成,沿拆离面上盘发生旋转剪切变形,发育低角度铲式正断层,并使岩块发生旋转,形成多米诺骨牌式组合,下地壳为透入性韧性伸展,上地壳脆性伸展与上地幔深部隆起偏离(图 6b)。

Wernicke 在对美国盆岭省伸展构造分析后提出,单剪切模式常形成叠瓦式低角度正断层,呈铲式或板式与拆离面相交^[11]。

1.3.3 分层拆离

分层拆离伸展是由于岩石圈层次不同、流变性质各异而产生的分层伸展(图 6c): 1) 上地壳伸展由铲式正断层与掀斜断块构成; 2) 中下地壳伸展由拆离断层及透镜体状变质岩块构成,当椭圆

图 5 北美西部科迪勒拉构造域盆岭省简图^[8 11]Fig. 5 Sketch map showing basin and range province in Cordillera structural domain in western North America^[8 11]

图 6 大陆岩石圈伸展模式^[8 11]Fig. 6 Extension models of continental lithosphere^[8 11]

形变质岩随拆离断层上升至地表时即构成变质核杂岩; 3) 上地幔以韧性流动及熔浆作用为主, 熔浆构成伸展环境中的岩浆源, 形成岩墙群及火山作用^[12]。

2 典型裂谷系

全球裂谷系的发育与联合大陆的解体有关, 在显生宙主要有两期: 1) 元古代末—古生代初; 2) 古生代末—中生代。

古生代形成的裂谷系, 由于受后来的挤压或走滑影响, 裂谷特征常被掩盖; 中生代形成的裂谷系保存完整, 并且有重要的油气资源, 因此作为典型来分析。

2.1 非洲大陆裂谷系与中欧裂谷系

非洲大陆与美洲大陆在中生代的裂解, 按其发育时间可分为 3 期: 1) 二叠—三叠纪时出现初始分裂, 如中欧北海裂谷; 2) 侏罗—白垩纪时处于裂解高潮, 非洲与美洲分裂形成大西洋; 3) 新生代则是后继活动新高潮, 非洲与阿拉伯板块分裂形成红海—亚丁湾—东非裂谷系, 而当非洲与欧洲板块碰撞时形成阿尔卑斯造山带、同时又发育莱茵地堑, 前者成为典型的主动裂谷、而后者成为典型的被动裂谷^[8]。

2.1.1 西非裂谷系

非洲大陆与南美大陆的裂解是通过 RRR 三联点机制, 并延伸至大陆内部。贝努埃槽为裂谷中衰退的一支, 成为典型的夭折谷, 向东延伸至乍得盆地, 并通过中非剪切带延伸与苏丹裂谷相连, 形成西非与中非裂谷系 (图 3)^[8]。尼日尔裂谷盆地与苏丹裂谷盆地蕴藏着大量的油气资源, 成为研究裂谷作用与油气富集的典型地区。

西非裂谷系的演化主要经历 3 个阶段: 1) 前裂谷期, 区域性穹状隆起, 发育环状碱性火山岩; 2) 同裂谷期 (早白垩世 115 Ma), 发育沉积岩与火山岩互层, 并在晚白垩世 (80 Ma) 经历走滑变形; 3) 再生裂谷期, 古近纪开始, 沿喀麦隆火山岩线发育有碱性侵入岩 (66~ 30 Ma), 并进一步形成新生代拗陷盆地, 在贝努埃槽地发育三角洲盆地, 形成全球巨大的油气区之一。

尼日尔三角洲盆地位于大西洋几内亚湾内, 是非洲板块与南美板块裂解后在贝努埃槽地上发育起来的新生代三角洲盆地, 面积约 75 000 km², 沉积厚度达 12 000 m。新生界主要发育 3 个穿时沉积层序: 1) 阿卡塔组 (Akata) 为前三三角洲相, 以深海浊积砂及泥岩为主; 2) 阿格巴达组 (Agabada) 为三角洲前缘相沉积, 砂、泥岩互层; 3) 贝宁组

(Benin)为三角洲平原相,以河流及沼泽沉积为主。

根据构造样式与沉积层序,可以将尼日尔三角洲盆地进一步划分为 3 个构造区带: 1) 滚动构造带, 生长断层向海洋呈阶梯状下降, 常伴生滚动背斜构造; 2) 拱顶构造带, 由同向断层与反向断层构成, 顶部形成塌陷构造; 3) 泥岩底辟构造带, 在大陆坡折带深水区, 泥岩发育, 塑性泥丘上拱, 形成底辟构造带 (图 3c)。

2.1.2 东非裂谷系

非洲大陆与阿拉伯板块裂解, 形成红海与亚丁湾以及阿法尔槽地三叉裂谷系。前两者进一步形成新生洋盆; 后者形成夭折谷, 并向南延伸至东非裂谷系。因此东非裂谷系可以认为是非洲-阿拉伯裂谷系的一部分。

东非裂谷系根据岩浆作用、地形和断层带可以分为两支: 东支自阿法尔槽地延伸至埃塞俄比亚裂谷及肯尼亚裂谷; 西支沿坦噶尼喀-马拉维断层带形成裂谷系, 向北延伸至维多利亚湖西北侧, 向南延伸至莫桑比克海岸^[10]。

肯尼亚裂谷和西支裂谷盆地为地堑或半地堑组成的狭裂谷, 并有横向走滑断层或调节带来调节伸展幅度或极性反转。

主动裂谷演化中隆升作用是主要阶段, 早期使整个东非裂谷区发生隆升, 并因火山作用构建高原地形。如阿法尔-埃塞俄比亚高原, 地壳主要由新生代岩浆物质所组成, 因此隆升作用起源于岩浆作用, 即由于熔融物质上升, 在浅层发育火山作用, 为深部地幔柱作用所引起。

火山作用在埃塞俄比亚裂谷开始于始新世后期 (40 Ma), 至肯尼亚裂谷为 33~28 Ma 向南为 20~16 Ma 以碱性玄武岩及拉斑玄武岩系列为主。在 4 Ma 期间, 阿法尔地区广泛发育玄武岩, 而在阿法尔北部海底扩张作用强于大陆裂谷作用。

裂谷断层作用与火山作用同时发生, 开始形成半地堑。后期演化为地堑。下地壳和上地幔构造说明深部构造呈对称, 在裂谷中部地壳最薄, 在上地幔中为低速区。因此, 适用纯剪切模式来说明岩石圈的伸展机制 (图 3d)。

2.1.3 中欧裂谷系

非洲板块与欧洲板块的聚合和碰撞不仅形成阿尔卑斯山、喀尔巴阡山、巴尔干山和希腊弧等,

同时形成莱茵裂谷及爱琴海弧后裂谷盆地等, 构成推覆带与裂谷盆地共存格局^[13]。

2004 年 32 届国际地质大会提供了造山带与裂谷共存的景观 (图 3): 1) 碰撞谷, 阿尔卑斯碰撞造山带莱茵地堑; 2) 弧间裂谷, 喀尔巴阡山与潘诺盆地、希腊岛弧与爱琴海盆地; 3) 坳拉谷, 高加索山与第聂伯-顿涅茨盆地等。

莱茵地堑是典型的被动裂谷之一, 是非洲大陆与欧洲大陆碰撞时形成的碰撞谷。阿尔卑斯碰撞造山带发生在始新世中期 (48 Ma), 近南北方向上对接形成北北东-南南西莱茵河上游的莱茵地堑, 并延伸至黑森凹地。随后在中新世晚期形成以法兰克福为中心的三叉裂谷系。其中东北支和西北支向北海方向延伸, 伴有碱性火山岩、高热流和地震活动。同时在莱茵地堑发育左行走滑带, 进一步形成共轭走滑断层, 使中欧地台发生破裂^[2, 8]。

裂谷系的复杂性反映莱茵地堑是在板块碰撞压力体系下形成的, 莱茵地堑与南缘汝拉山前陆盆地及阿尔卑斯推覆带构成复杂的盆山共存格局, 是在统一应力场作用下的应变产物。

2.2 美国盆岭省

美国西部在中-新生代时由于伸展作用, 形成世界上最广阔的大陆裂谷系, 并向南延伸至墨西哥。其中以美国西部盆岭省最为典型 (图 5)。

美国盆岭省位于内华达山与落基山之间, 形成宽达 900 km 的大陆裂谷系, 其宽度大于东非裂谷系, 其伸展率为 50%~100%, 呈现盆地与山岭交替的伸展断块模式, 并且有高热流、多地震及火山活动, 说明仍处于活动伸展期, 下伏为软流圈低速带 (图 5b)。

2.2.1 演化特征

盆岭省上叠于北美科迪勒拉造山带之上, 因此具有复杂的伸展、挤压和走滑变形。其演化历史主要为^[7, 10]:

1) 晚元古代-古生代伸展裂解, 原始太平洋打开, 形成北美西部被动大陆边缘, 但在古生代后期经历弧后扩张与挤压;

2) 中生代俯冲作用形成塞维尔 (Sevier) 褶皱-冲断带及内华达山 (Sierra Nevada) 岩基, 具有深成岩浆及火山活动 (J-K₁), 在后期经拉腊米运动形成与弧有关的安山质火山岩;

3) 新生代伸展作用主要有两期, 早期 (渐新

世)变质岩核杂岩隆升形成低角度正断层。晚期形成高角度正断层及掀斜断块,岩浆作用主要为玄武岩与流纹岩双模式组合,已由弧后裂谷转化为大陆裂谷(图 5d e)。此外新近纪以后发生走滑作用形成走滑裂谷带。

2.2.2 叠加变形

盆岭省出露各种深度和不同层次的伸展构造,其变形样式随深度而变化。

1) 上地壳伸展变形——掀斜断块。盆岭省浅层次为山岭与盆地相间,断块发生旋转,呈现为多米诺骨牌式掀斜断块,底部终止于脆-韧性过渡的拆离断层带(图 5c)。

2) 中地壳伸展变形——韧性剪切与变质核杂岩。中地壳变形以韧性伸展-剪切为主,呈现为网状韧性剪切与其间的大型透镜状变质岩体,其顶部为脆-韧性拆离断层带,当中地壳变质岩体沿拆离带上升至地表附近时则呈现为变质核杂岩。

变质核杂岩为出露地表的圆形或椭圆形向上穹曲的变质岩,呈背形构造(antiformal structure),而不是深埋在沉积盆地岩层之下^[14]。它通过拆离断层由原来 10~15 km 的古深度上升到地表,因此是研究盆岭省深部地壳伸展变形的窗口。拆离断层带上可以见到断层泥-碎裂岩-糜棱岩-糜棱片麻岩。据此 Davis 说这种断层也称为变浅断层(shoaling fault),说明单剪切机制起过重要作用^[14]。

3) 下地壳伸展变形——韧性流动及熔浆作用。下地壳主要发育韧性展平作用来实现伸展,在深部地震反射中呈现为平缓起伏的反射结构,但有时有熔浆注入形成部分熔化。

从岩石圈厚度来看,盆岭省地区明显小于相邻的内华达山和科罗拉多高原,下面的软流圈上涌,说明纯剪切(pure shear)起过重要作用(图 3b)。

2.2.3 动力学机制

盆岭省的形成机制主要有 3 种假说: 1) 弧后扩张; 2) 地幔柱作用; 及 3) 走滑伸展作用^[2 8]。

1) 弧后扩张与弧后裂谷。43 Ma 时全球板块进行重组,引起太平洋板块向北美板块进行快速俯冲和俯冲角度变陡,早期弧后扩张应力导致盆岭省弧后裂谷带形成。此外,软流圈岩浆作用产生伸展造山(extensional orogeny)形成内华达山,同时熔结凝灰岩事件(ignimbrite event)形成科罗

拉多高原。

2) 地幔柱作用。北美板块在 16~17 Ma 时漂移到黄石地幔柱之上,随着玄武质火山作用爆发,形成哥伦比亚高原溢流玄武岩。地幔柱出现具有两个显著特点: 大规模火山作用和区域性隆升(上升达 1~2 km,直径为 1 000~2 000 km)。当地幔热点迁移时,由于岩浆事件后岩石圈变冷,导致地表陷落,形成斯内克河地区塌陷裂谷。

3) 走滑伸展作用。走滑伸展作用形成的盆地也称为拉分盆地,常呈长形或菱形地堑,两者主要区别在于伸展方向不同。在裂谷系中伸展轴垂直于盆地轴向;而在拉分盆地中伸展轴与盆地轴近平行。在北美盆岭省中走滑伸展作用主要发生在圣安德列斯断层附近^[15 16]。因此,美国盆岭省形成的动力学属于复合裂谷机制。

2.3 东亚裂谷系

随着超级大陆的解体,中、新生代时期亚洲大陆广泛发育裂谷系。这些裂谷系的发育主要与西太平洋俯冲带沟-弧-盆系的形成有关,同时又与阿尔卑斯-喜马拉雅碰撞造山带的远程效应有关,此外地幔柱的上隆和迁移也是裂谷系形成的重要动力。因此,亚洲东部的贝加尔-蒙古-松辽裂谷系和汾渭-华北-东海裂谷系,其形成具有多成因的动力学机制(图 2)。

2.3.1 贝加尔裂谷系

贝加尔裂谷系位于西伯利亚克拉通东南部,并延伸至阿尔泰-蒙古增生造山带北部(萨彦-贝加尔加里东褶皱带)。

贝加尔裂谷系呈北东向“S”形展布,由一系列雁列盆地组成,延伸达 1 800 km。盆地主要由半地堑组成,裂谷系中一些隆起具有调节带特征及走滑分量。最深盆地位于贝加尔湖中部,裂谷内色楞格河三角洲盆地最大沉积厚度达 8 000 m 以上^[8]。

裂谷系发育在前裂谷期的隆起带上,古侵蚀面时代为晚白垩世-古近纪(70~40 Ma)。裂谷发育可分为两期: 1) 原裂谷期(35~5 Ma),形成细粒沉积及煤系; 2) 新裂谷期(5 Ma 以来),沉积粗砂岩及砾岩。初始火山作用主要发生在 40 Ma 火山岩成分从拉斑玄武岩过渡到碱性玄武岩,在裂谷盆地沉积中发育有玄武岩席夹层。贝加尔裂谷系地壳厚 35~40 km,肩部厚度为 42~46 km。裂谷系下伏有低密度及低速度的上地幔隆起(图 2a)。

贝加尔裂谷系属于多成因机制^[2 8 9 17]: 1) 贝加尔裂谷系下伏上地幔异常, 形成区域性隆起, 随后发育火山作用和伸展断裂, 可能与包括蒙古地区有关的地幔柱上隆有关; 2) 从裂谷沉积发育来看, 似乎与印度和亚洲在 30 Ma 的碰撞有关; 3) 张应力方向主要为北西-南东向, 因此区域应力又与太平洋西北边缘的俯冲作用有关。

2.3.2 松辽裂谷盆地

松辽裂谷盆地位于阿尔泰-蒙古增生造山带之上。阿尔泰型造山带是由宽阔的增生岩浆杂岩及分散的蛇绿混杂岩带组成的, 在加里东-海西期形成阿尔泰-蒙古弧造山带。

阿尔泰-蒙古弧东部广泛发育裂谷盆地群, 如松辽盆地、二连盆地、银额盆地、海拉尔盆地及东戈壁盆地等, 为北东向及北东东向伸展断裂所控制。

松辽盆地的演化主要有 4 期^[10]: 1) 前裂谷期, 主要由古生代变质岩及岩浆岩组成弧后增生造山带, 并发育有冲断层; 2) 弧内裂谷期, 主要由晚侏罗-早白垩世火山岩及碎屑岩组成; 3) 弧后裂谷期, 主要由白垩纪早中期的湖相碎屑沉积及泥岩沉积组成, 伴有碱性玄武岩和橄榄玄武岩喷发; 4) 陆内拗陷期, 主要由晚白垩世-古近纪粗碎屑岩组成, 盆地抬升并出现反转构造。

松辽盆地的形成主要与弧后地幔的局部对流形成地幔底辟上升有关, 可以认为与太平洋板块向东北亚大陆边缘的俯冲有关, 在锡霍特山地区发育有钙碱性浆岩 (J_2-K_2) 及深水硅质岩 (图 2c)。新生代时玄武岩主要来自软流圈地幔, 已转化为陆内裂谷环境。

2.3.3 汾渭裂谷系

汾渭裂谷系位于华北板块中部, 呈北北东-北东东向“S”型展布, 延伸达 1 200 km。该裂谷系与贝加尔裂谷系有近似形态, 主要由半地堑雁列组合而成。汾渭裂谷系的发育主要有两期: 1) 初始期 ($E_{2+3}-N_1$), 主要在裂谷系南北两端开始发育, 沉降速率甚小; 2) 主发展期 (N_2-Q), 整个汾渭裂谷系快速沉降^[18]。

此外在新生代时汾渭裂谷系北部出现大同软流圈上涌与玄武岩喷发, 在第四纪时以大同为中心形成喷发高潮期, 发育拉斑玄武岩及少量碱性玄武岩。早期太平洋板块俯冲引发北北东向拉

张, 晚期印度板块碰撞导致东西向拉张, 两者导致汾渭裂谷系发育。

2.3.4 渤海湾盆地

渤海湾盆地位于华北克拉通基底之上, 周缘为燕山及太行山围绕, 西缘受太行山前伸展断裂系控制形成裂谷盆地 (冀中拗陷), 东缘受郯庐走滑断裂系控制形成走滑-裂谷盆地 (渤中拗陷)。因此对渤海湾盆地来说具有两个扩展中心, 具双裂谷系特征: 西支冀中裂谷系地壳厚度约 32 km, 向西至太行山迅速增至 43 km; 东支渤中裂谷, 地壳厚度为 28~29 km, 推测深部存在渤中地幔上隆, 具有三联点特征, 属 R-F-F 型, 自然延伸至辽东湾-辽河拗陷、渤海湾-黄骅拗陷及莱州湾-济阳拗陷^[10 19]。

渤海湾盆地的演化主要有 3 期: 1) 前裂谷期, 中生代晚期区域隆升, 并伴随冲断层; 2) 裂谷期, 周缘太行山及燕山地区发育拆离断层带及伴随核杂岩上隆, 拆离断层带之上发育有铲式正断层及掀斜断块隆起和半地堑沉降; 3) 后裂谷期 (23 Ma 以来), 主要呈现为热衰减拗陷 (图 2d)。

从渤海湾盆地的演化动力学机制来看, 中生代晚期属于弧后造山带; 新生代古近纪开始地幔上隆及火山活动, 伴有变质核杂岩上隆及裂谷发育; 新近纪热沉降, 构成典型的大陆裂谷“牛头”模型。

综上所述, 东亚裂谷系的形成既与地幔柱的上涌有关, 又与太平洋板块俯冲的次级地幔对流和印度板块碰撞的远程效应有关, 裂谷系的形成是多元的, 但裂谷系的展布总体呈北北东-北东东方向。

3 裂谷盆地与成藏区带

油气系统理论的发展是成藏区带评价的依据; 而油气系统的建立是以层序地层为基础, 进一步预测源岩、储层和盖层组合及成藏区带; 层序地层的发育则受控于原型盆地演化的地球动力学环境。这就构成了一个认识和预测油气资源的主旋律。

3.1 沉积层序

层序地层学在理论上是经典地层学发展的前沿、也是沉积学的重要组成部分, 在实践上是油气系统和成藏区带评价的基础。因此对盆地内巨层序 (mega-sequences) (相当于中国层序地层研究中的 iv 级旋回) 的正确识别和划分可以作为建立油气系统的基础^[20~22], 并为裂谷盆地层序格架分析

奠定基础。

在大陆裂谷盆地中控制层序形成的主要因素是基准面变化^[23],而在伸展大陆边缘裂谷盆地中层序形成的驱动机制是全球海平面变化^[24]。同时原型盆地层序与相关断层样式有关,因此裂谷盆地主要为正断层作用所控制(图 7a)^[25]。

裂谷盆地及伸展大陆边缘的沉积层序可以划分为 3 期: 1) 前裂谷期层序, 主要为裂谷前基岩或克拉通层序; 2) 同裂谷期层序, 主要为正断层所控制的沉积, 也称为断陷期, 属于 A iry 均衡补偿的快速沉降; 3) 后裂谷期层序, 主要为挠曲作用所控制的热沉降, 也称为拗陷期。

当后裂谷期层序向同裂谷期层序强烈上超时, 形成“牛头”模式, 显示为向上凹曲的沉降曲线。在同裂谷期层序与后裂谷期层序之间常出现不整合, 称为裂解不整合面, 当伸展作用进一步扩展时, 就可以出现伸展大陆边缘盆地。

3.2 油气系统

油气系统以源岩为中心、生烃量为准则, 以储盖及圈闭组合为主容器。评价中将有成因联系的已发现油气和未发现油气的总和称为总油气系统 (TPS), 以开拓新的油气远景^[25]。

裂谷盆地的油气系统以具有深陷的湖相或海相沉积为生烃中心。较高的热流值使烃源岩快速

成熟, 由于正断层网络发育可以形成垂向油气运移和多源混合烃, 构成旋回式生储盖组合, 同时也发育侧变式生储盖组合。当断层封闭时运移停止, 形成断块构造圈闭, 当海进或湖进层序发育时可以构成良好的封盖层或烃源岩^[26~28]。

3.3 成藏区带

成藏区带在油气资源勘探中为基本评价单元 (AU)。裂谷盆地中广泛发育各种成藏区带, 以正断层及其伴生构造及沉积体系为主。按其卷入深度及构造环境主要划分出 4 种类型: 1) 掀斜断块带; 2) 滚动构造带与三角洲体系; 3) 坡折带与礁滩层序; 4) 调节带与浊积扇体系。

3.3.1 掀斜断块带

裂谷盆地中同裂谷期正断层呈板式或铲式卷入基底。在剖面上, 正断层与区域倾向关系可以分为两类: 1) 反向断层, 主要与早期拱曲作用有关, 断层倾向中心, 构成地堑; 2) 同向断层, 岩块向同一方向旋转, 构成掀斜断块, 形成半地堑结构。在平面上断层常呈锯齿状或雁列状, 主要与水平剪切应力有关。油气聚集的有利地带主要有: 1) 断块的高点; 2) 断块上覆披盖构造; 3) 正断层与横向走滑断层交角处的活板构造 (墙角构造)。典型的伸展断块区带发育在红海、东非及北海盆地。

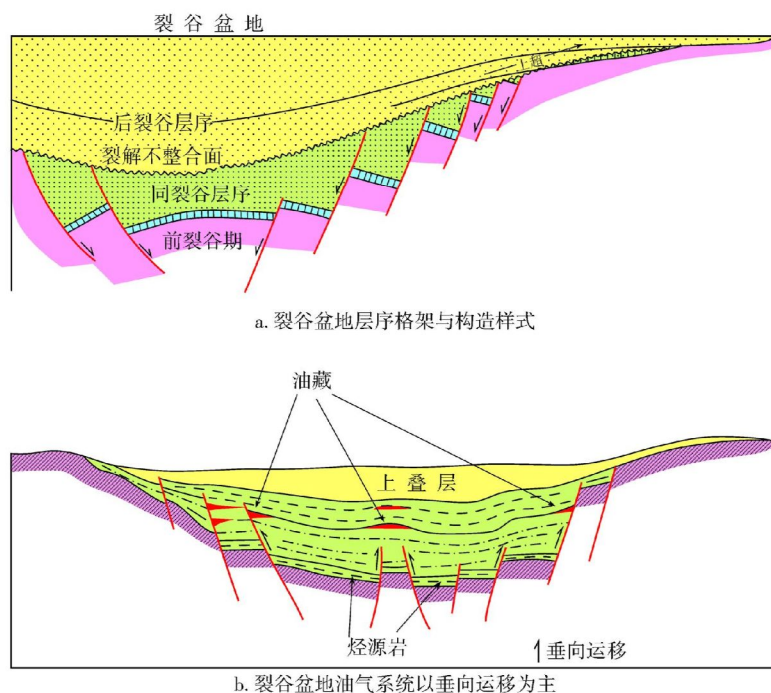


图 7 裂谷盆地沉积层序及油气系统^[25 26]

Fig. 7 Sedimentary sequences and petroleum systems in rift basin^[25 26]

北海盆地位于欧洲中部(图 8a), 由三叉裂谷系组成, 北支为维金地堑, 南支为中央地堑, 西支为马里湾地堑。北海盆地前裂谷期发育有泥盆纪红层; 晚二叠—早三叠世时裂谷开始形成; 中—晚侏罗世再次发育同裂谷期沉积, 厚约 6 km; 新生代为后裂谷期沉积, 厚约 3 km, 并向边缘上超, 总体构成“牛头”模式^[2, 3, 29]。伸展断块带常构成重要圈闭, 油气聚集在掀斜断块最高部位的储层中, 上侏罗统页岩构成源岩, 扇三角洲体系中砂岩构成储层, 其上为白垩系及第三系覆盖, 形成巨大油田, 如 Brent 油田和 Statfjord 油田; 此外发育有活板构造, 如 Heather 油田。

3.3.2 滚动构造带与三角洲体系

铲式正断层广泛发育于伸展构造的沉积盖层中, 特别发育于三角洲体系的进积层序中。三角洲体系为河流携带大量碎屑物质和有机物质入海沉积体系, 是河流作用与海洋作用相互影响的结果, 常形成世界大型油气聚集带。如科威特布尔干油田、西非尼日尔三角洲盆地、美国墨西哥湾盆地^[8, 30~32]。

三角洲河口可比拟为水动力学上的喷嘴, 根据流入水密度与蓄水体密度不同可以形成海岸三角洲、湖泊三角洲和海底三角洲(即海底扇)。

海岸三角洲即一般通称的三角洲, 河流进入海洋时发育 3 种沉积环境: 1) 三角洲平原; 2) 三角洲前缘即海岸地带; 3) 前三角洲与坡折带相邻。三角洲体系常构成有利的油气系统及地层—构造成藏区带, 往往与裂谷盆地轴向搬运有关。

由于伸展作用、重力作用或塑性岩层浮力作用, 从盆地边缘向盆地深处伴生有 3 种圈闭: 1) 滚动构造, 发育在铲式正断层下降盘一侧; 2) 拱顶构造, 当铲式正断层伴生反向断层或塑性岩层浮力作用时可以形成拱顶构造; 3) 远端构造, 发育在铲式正断层冲起坡端, 断层牵引形成背斜。典型的情况发育在墨西哥湾三角洲盆地和尼日尔三角洲盆地(图 3a、图 8b)。

3.3.3 坡折带与礁滩层序

坡折带是伸展大陆边缘有利的油气聚集带。按原来含义坡折带处于陆架与陆坡之间的地形突变带, 在波浪底面以下有利于细粒烃源岩的发育, 而在波浪底面之上有利于粗粒储集岩的沉积。坡折带正处于这两种环境的交替带, 也称为枢纽带。礁滩层序主要发育在陆架台地边缘。近年来也将坡折带概念用于裂谷盆地的陆相沉积中, 属于浅湖

与深湖两种环境的交替带, 形成有利的成藏区带。

典型的如波斯湾盆地坡折带, 位于底格里斯和幼发拉底两河流域附近, 成为伊拉克重要的成藏区带, 白垩—第三系深水放射虫页岩与泥灰岩构成烃源岩, 而浅水礁灰岩则成为重要储层, 石油最初聚集在地层—岩性圈闭中, 构造变动后再次聚集到构造圈闭中。

塔里木盆地早古生代时满加尔边缘坳陷与相邻台地之间存在类似的坡折带。南华纪为裂谷期, 在塔里木东部裂陷沉降, 伴有强烈火山作用及碎屑沉积, 满加尔与库鲁塔格类似, 在坡折带发育陆坡碎屑流—海底浊积扇沉积及双模式裂谷火山岩, 厚逾 5 000 m; 震旦纪开始为后裂谷期克拉通坳陷沉积, 下部为海相碎屑沉积, 上部为白云岩夹页岩; 寒武纪—早奥陶世时, 西部为台地相区, 沉积浅海碳酸盐岩, 东部为盆地相区, 沉积深海页岩及硅质岩, 两者之间为大陆边缘坡折带。满加尔成为塔里木盆地内的主力生油凹陷, 在半环状枢纽带边缘形成碳酸盐台地的重要储集层, 优越的配置关系构成重要的成藏区带(图 8c)^[33~35]。类似情况也出现在四川盆地的碳酸盐台地^[36]。

3.3.4 调节带与浊积扇体系

调节带 (accommodation zone) 也称为转移带或变换带 (transfer zone), 可调节裂谷系中的伸展量或冲断带中的压缩量。断层之间的位移量常不一致, 可以由横向转移断层或调节带来调节位移量, 以达到区域应变守恒和三维空间平衡。因此调节带不仅调节断层位移, 同时也调节断层下盘之间的高差。断层下盘挠曲均衡隆起是一种力学隆起, 也是同裂谷期隆起, 因此影响到同裂谷期的沉积样式。隆起或低地可以构成流入裂谷水系的障碍或通道, 在调节带与边界区断层的相互作用下形成冲积扇和浊积扇。因此调节带通常是大量碎屑进入裂谷的通道, 也是高质量储集岩的分布地带。

调节带的概念曾广泛应用于北美和东非的油气勘探。在东非根据主断裂之间的相互关系, 将调节带分为同向 (synthetic) 和反向 (antithetic) 断裂组, 反向的又进一步分为背向 (离散型) 和相向 (聚合型) 两种^[34, 37]。这样, 就有 3 类调节带: 1) 反向聚合型, 常发育在地堑构造带中; 2) 反向离散型, 常形成在地垒构造带中; 3) 同向型, 常形成于半地堑构造带。其中反向聚合型在裂谷盆地中较为常见(图 8d), 如中国银川地堑^[38]。

调节带成为有利成藏区带主要是由于: 1) 坡折带与调节带的交汇处成为沉积物输入点, 常形成扇三角洲及浊积扇; 2) 正断层与转移断层相交处可以形成活板构造或墙角构造^[16]。

致谢: 20世纪70年代, 马杏垣老师与作者等从伸展构造理论来分析我国东部中新生的油气勘探与地震活动。20世纪90年代在30届国际地质大会中, 作者与Milanovsky共同主持和总结全球裂谷系讨论: 红海伸展与波斯湾盆地压缩的共轭格局。2004年在32届国际地质大会中, 作者和与会者交流和考察了伸展断裂与造山冲断作用的并置格局。这些都为本文提供的新的思路与探索。承王庭斌教授相约和支持, 促使本文成稿, 并承北京威力创新科技发展中心董永丽、李小霞精心制图, 在此一并致以深切谢意。

参 考 文 献

- 1 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京: 地质出版社, 2004. 272~312
Ma Xingyuan. Analytic tectonics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. 272~312
- 2 Burke K. Development and distribution of rift systems[A]. In: Burke K, ed. Distinguished lecture of AAPG[C]. New York: Science Inc, 1983
- 3 Lowell J D. Structural styles in petroleum exploration[M]. Tulsa: OGCL Publications, 1987. 191~250
- 4 Sengor A M C. Sedimentation and tectonics of fossil rifts[A]. In: Busby C I, Ingersoll R V, eds. Tectonics of sedimentary basins[C]. Cambridge: Blackwell Science Inc, 1995. 53~124
- 5 刘和甫. 伸展构造及其反转作用[J]. 地学前缘, 1995, 2(1): 113~124
Liu Hefu. Extensional tectonics and its inversion[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(1): 113~124
- 6 陆克政, 王亨君. 加利福尼亚弧-盆-沟系的地质特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(6): 865~870
Lu Kezheng, Wang Hengjun. Geologic characteristics of arc-basin-trench systems in California[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(6): 865~870
- 7 刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等. 盆山耦合与前陆盆地成藏区带分析[J]. 现代地质, 2004, 18(4): 389~403
Liu Hefu, Li Xiaqing, Liu Liqun, et al. Basin-mountain coupling and foreland basin petroleum play analysis[J]. Geoscience, 2004, 18(4): 389~403
- 8 Olsen K H. Continental rifts: evolution, structure, tectonics[M]. New York: Elsevier, 1995. 1~460
- 9 Yu Zorin. The Baikal rift: an example of the intrusion of asthenospheric material into the lithosphere; the cause of disruption of lithospheric plates[J]. Tectonophysics, 1981, 73: 91~104
- 10 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等. 中国东部新生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 477~486
Liu Hefu, Liang Huishe, Li Xiaqing, et al. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 477~486
- 11 Wemick B. Low-angle normal fault in the basin and range province: nappe tectonics in an extending orogen[J]. Nature, 1981, 291: 645~648
- 12 Hamilton W. Crustal extension in the basin and range province, southwestern United States[A]. In: Hamilton W, ed. Continental extensional tectonics[C]. London: Blackwell Scientific Publications, 1987. 155~176
- 13 邓晋福, Martin F J F, 苏尚国, 等. 地中海地区明显反差的岩石圈变形与岩浆活动的共存: 陆-陆碰撞过程中地幔流的响应与表现[J]. 现代地质, 2004, 18(4): 435~442
Deng Jinfu, Martin F J F, Su Shangguo, et al. Coexisting of contrast lithospheric deformation and magmatism in the Mediterranean region: mantle flow as the response and expression to the continent-continent collision[J]. Geoscience, 2004, 18(4): 435~442
- 14 Davis G A. 伸展构造模式[J]. 地质科技情报, 1986, 5(3), 24~28
Davis G A. Extensional structural model[J]. Geological Science and Technology Information, 1986, 5(3): 24~28
- 15 Sylvester A G. Strike slip fault[J]. Bull Geol Soc Am, 1989, 100: 1666~1703
- 16 刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等. 走滑构造体系盆山耦合与区带分析[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 139~150
Liu Hefu, Li Xiaqing, Liu Liqun, et al. Petroleum play analysis and strike slip system basin-mountain coupling[J]. Geoscience, 2004, 18(2): 139~150
- 17 卢良兆, 林强, 刘招君. 成因岩石学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2004. 1~420
Lu Liangzhao, Lin Qiang, Liu Zhaojun. Genetic petrology[M]. Changchun: Jilin University Press, 2004. 1~420
- 18 邢作云, 赵斌, 涂美义, 等. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 247~262
Xing Zuoyun, Zhao Bin, Tu Meiyi, et al. The formation of the Fenwei rift valley[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 247~262

- 19 李晓清,汪泽成,程有义,等. 拉分盆地分析与含油气性——以淮北盆地为例[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2003 1~235
Li Xiaqing, Wang Zecheng, Cheng Youyi, et al. Pull-apart basin analysis and its oil potential—a case study of Weibei basin [M]. Dongying Shandong China Petroleum University Press 2003 1~235
- 20 Allen P A, Allen J R. Basin Analyses [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1990 1~451
- 21 王鸿祯. 中国层序地层问题[A]. 见: 王鸿祯, 编. 王鸿祯文集[C]. 北京: 科学出版社, 2005 1~485
Wang Hongzhen. Some problems about sequence stratigraphy of China[A]. In: Wang Hongzhen, ed. Wang Hongzhen's collected works[C]. Beijing: Science Press, 2005 1~485
- 22 王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 等. 中国层序地层研究[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000 1~457
Wang Hongzhen, Shi Xiaoying, Wang Xunlian, et al. Study on the sequence stratigraphy of China[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2000 1~457
- 23 邓宏文, 王红亮, 祝永军, 等. 高分辨率层序地层学[M]. 北京: 地质出版社, 2002 1~253
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Zhu Yongjun, et al. High-resolution sequence stratigraphy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002 1~253
- 24 Vail P R, Mitchum R M Jr, Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [J]. AAPG Mem, 1977, 26: 83~97
- 25 刘和甫, 李小军, 刘立群. 地球动力学与盆地层序及油气系统分析[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 80~86
Liu Hefu, Li Xiaojun, Liu Liqun. Integrated analysis of geodynamic scenarios, basin sequences and petroleum system [J]. Geoscience, 2003, 17(1): 80~86
- 26 Perrodon A. Petroleum systems: models and applications [J]. Journal of Petroleum Geology, 1992, 15(3): 319~326
- 27 费琪. 成油体系分析与模拟[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997 1~310
Fei Qi. Analysis and modeling of petroleum system [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997 1~310
- 28 田世澄, 毕研鹏. 论成藏动力学系统[M]. 北京: 地震出版社, 2000 1~172
Tian Shicheng, Bi Yanpeng. About pool-forming dynamic systems [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2000 1~172
- 29 Dou Lirong, Turner J D. High-resolution subsidence analysis and application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004 1~109
- 30 潘钟祥. 三角洲沉积体系特征及其和石油的关系[A]. 见: 潘钟祥, 编. 潘钟祥石油地质文选[C]. 北京: 石油工业出版社, 1988 144~184
Pan Zhongxiang. Sedimentary system characteristics of deltas and their relations to petroleum [A]. In: Pan Zhongxiang, ed. Pan Zhongxiang's selected works on petroleum geology [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998 144~184
- 31 刘和甫. 三角洲沉积体系与石油分布[J]. 国外地质, 1974 (6): 1~22
Liu Hefu. Deltaic sedimentary systems and petroleum distribution [J]. Foreign Geology, 1974 (6): 1~22
- 32 侯高文, 刘和甫, 左胜杰. 尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 374~378
Hou Gaowen, Liu Hefu, Zuo Shengjie. A study of distribution characteristics of petroleum in Niger delta basin and their controlling factors [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 374~378
- 33 汤良杰. 塔里木盆地演化和构造样式[M]. 北京: 地质出版社, 1996 41~73
Tang Liangjie. Evolution and tectonic styles of Tarim basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 41~73
- 34 Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG Bull, 1990, 74(8): 1234~1253
- 35 刘豪, 王英民. 塔里木盆地早古生代古地貌——坡折带特征及对地层岩性圈闭的控制[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 297~304
Liu Hao, Wang Yingmin. Early Paleozoic paleogeomorphology—characteristics of slope break zones and their control on stratigraphic-lithologic traps in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 297~304
- 36 刘和甫, 刘小军, 刘立群. 波斯湾油气风云与中国中西部油气开发[J]. 现代地质, 2003, 17(2): 187~193
Liu Hefu, Li Xiaojun, Liu Liqun. Analogue of petroleum exploration of Persian Gulf and the mid-western part of China [J]. Geoscience, 2003, 17(2): 187~193
- 37 陈发景, 汪新文, 陈昭年, 等. 伸展断陷盆地分析[M]. 北京: 地质出版社, 2004 1~282
Chen Fajing, Wang Xinwen, Chen Zhaonian, et al. Stretching fault basin analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004 1~282
- 38 刘和甫, 陆伟文, 王玉新. 鄂尔多斯西缘冲断—褶皱带形成与形变[A]. 见: 杨俊杰, 赵重远, 刘和甫, 编. 鄂尔多斯盆地西缘掩冲带构造与油气 [C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990 54~76
Liu Hefu, Lu Weiweng, Wang Yuxin. Formation and deformation of thrust-folded belts on the western fringe of Ordos basin [A]. In: Yang Junjie, Zhao Zhongyuan, Liu Hefu, eds. Overthrusting structures and petroleum on the western fringe of Ordos basin [C]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1990 54~76

(编辑 李 军)