

BOHAI BAY BASIN
GEODYNAMICS

渤海湾盆地地球动力学

侯贵廷 著



科学出版社

渤海湾盆地地球动力学

侯贵廷 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

渤海湾盆地是我国东部重要的含油气盆地,是目前我国油气总产量最高的盆地。本书通过大地构造、构造地质、沉积相分析、火山岩地球化学、重磁层析成像和力学数值模拟,全面系统地研究了渤海湾盆地中-新生代构造演化及其地球动力学,提出渤海湾盆地是一个中-新生代的复合型叠合盆地。中生代渤海湾地区在郯庐断裂带内发育北北东向裂谷,而在郯庐断裂带以西发育一系列雁行排列的北西向狭窄地堑;新生代渤海湾盆地发展成控盆断裂为北东东和北北东走向的拉分盆地。渤海湾盆地是在华北克拉通东部地台基础上发展起来的一个中-新生代叠合型裂谷盆地,是华北克拉通破坏的产物,也是华北克拉通破坏的重要地质事件标志。渤海湾盆地地球动力学研究对渤海湾盆地深部油气勘探和克拉通破坏研究具有重要的理论和实践意义。

本书可供地质学类科研人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

渤海湾盆地地球动力学 / 侯贵廷著. —北京: 科学出版社, 2014
ISBN 978-7-03-039922-9

I. ①渤… II. ①侯… III. ①渤海湾盆地-地球动力学 IV. ①P942
②P541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 039226 号

责任编辑: 王 钰 / 责任校对: 马英菊

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014年6月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 255 000

定价: 120.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

渤海湾盆地是中国油气资源最丰富的盆地，也是中国东部岩石圈最薄的地区，在中国东部大地构造研究中具有重要的理论意义和油气勘探意义。渤海湾盆地的深部地质及其地球动力学研究在我国东部地质研究中相对薄弱。渤海湾盆地的构造演化及成因机制研究是中国东部大地构造，尤其是华北克拉通破坏研究的重点。搞清渤海及邻区的构造演化及其动力学机制对渤海湾盆地的深层油气勘探具有重要的指导意义。

本书以渤海湾盆地的构造特征研究为基础，运用叠合盆地分析方法，如构造解析、沉积相、平衡剖面 and 应力场数值模拟等方法，研究渤海湾盆地及邻区的中—新生代构造演化。本书还利用深部地质的重磁层析成像方法，结合火山岩同位素示踪的壳幔演化分析，综合研究渤海湾盆地形成的地球动力学。

本书系统研究了渤海湾盆地的伸展构造、走滑构造和反转构造等类型。渤海湾盆地在中—新生代经历了大规模伸展和走滑运动。中生代渤海地区的构造主要为郯庐断裂带左旋走滑及其以西的北西向雁列式狭窄断陷的伸展构造。古近纪沙河街时期因郯庐断裂转为右旋走滑导致渤海湾盆地发展成为拉分盆地，盆地内部发生广泛的大规模伸展运动。古近纪东营时期和新近纪渤海湾盆地内的走滑运动再次加强，导致花状构造和反转构造比较发育。

根据构造—沉积相分析，结合生长断层的生长指数、沉积厚度变化和平衡剖面分析，认为渤海湾盆地各期控盆断裂控制了盆地的中—新生代沉积物厚度和沉积相分布，断陷强度和沉积中心具有从盆地边缘向渤中拗陷迁移的演化趋势。中生代沉积在东部基本沿郯庐断裂带分布，而在西部沿北西向渤张断裂带及在鲁西地区一些北西向小型地堑内分布，新生界部分继承或部分相干叠加在中生界盆地上，因此渤海湾盆地是一个中—新生代叠合型盆地。

根据中生代晚三叠世和晚侏罗世两个时期华北克拉通的构造格局，利用二维弹性有限元数值模拟方法，计算得到这两个时期华北克拉通的构造应力场。

模拟结果与实测应力方向十分吻合,表明华北克拉通在中生代从晚三叠世到晚侏罗世是从古亚洲洋域向太平洋域转换的重要时期,是华北克拉通破坏的关键时期。该时期郯庐断裂带对华北克拉通东部的早期破坏起重要作用。从晚三叠世到晚侏罗世,华北东部的区域最大主压应力方向从近南北向转化为北西向,也是郯庐断裂带发生左旋走滑的主要时期。新生代渤海湾盆地在沙三期和东营期两个重要的裂谷发育时期,在北东东-南西西向区域挤压作用力下先存断裂格局可以形成近东西向最大主压应力,有利于近东西向次级正断层的发育,有利于近南北向的伸展拉分。

渤海的火山岩是壳下富集型岩石圈地幔的部分熔融成因,是中-新生代华北克拉通破坏而形成的板内大陆裂谷环境火山活动的产物。渤海火山岩的岩浆源从中生代至新生代具有从典型的富集型地幔向接近原始地幔演化的趋势,这可能与新生代渤海地区大规模的岩石圈伸展减薄有关,是深部地幔物质上涌与富集型地幔混染的结果。

基于渤海中部重磁异常高的层析成像研究,我们得到渤海地区深部地质结构。研究表明,渤中重磁异常高是同一场源体引起的,很可能是一个深成基性-超基性侵入岩体,并在中浅层次形成火山岩或次火山岩构造。该基性-超基性深成岩体可能是下地壳底部板底垫托的基性-超基性岩浆沿渤中拗陷北西向和北北东向两组具走滑性质的岩石圈断裂交汇处向上运移而侵位于中下地壳的岩浆囊冷却结晶而成,其中部分较轻的基性-超基性岩浆由于上地壳伸展作用释压熔融而向上泵吸至地表喷出,形成基性火山岩或次火山岩构造,而富集Yb、Ni和Cr的石榴石和尖晶石等较高密度的物质则残留在地壳深部的基性-超基性岩浆囊中,形成重磁异常高区。结合盆地分析和深部地质学研究,本书最后提出渤海湾盆地靠近大型走滑断裂带的拆离-纯剪切地球动力学成因模式。

本书最后一章利用弹性有限元数值模拟方法,对裂谷概念模型开展了裂谷发育和演化的动力学机制及影响因素分析。有限元模拟结果表明,区域拉张作用力和岩石圈持续减薄最有利于裂谷的发育和演化,是多种因素中最重要的影响作用。铲形正断层比高角度正断层更有利于裂谷的发育和演化。

本书绪论、第一章由侯贵廷、李乐和张庆莲执笔,第二章至第八章由侯贵廷执笔,第九章由张鹏和侯贵廷执笔,结语由侯贵廷执笔,张庆莲清绘了本书全部插图。感谢张庆莲、张鹏、叶良新、杨默函、华金玉、史艳丽、王传成、王延

欣、肖芳锋、李乐、孟庆峰、舒武林、鞠玮和陈小龙参加了部分工作。

感谢中国海洋石油总公司研究院的罗毓晖教授、武文来教授和蔡东升教授等给予的大力帮助。感谢中国石油化工总公司胜利油田的刘兴才局长和地质录井公司的陈嘉树总地质师给予的支持和帮助。感谢中国石油天然气总公司辽河油田的陈振岩总地质师的大力支持和帮助。感谢北京大学地球空间学院的史谔教授和中国科学院地质地球物理研究所的刘长风研究员在地球物理方面的指导和帮助。

侯贵廷

2014年5月5日
北京大学 燕园

序

绪论	1
第一章 裂谷盆地构造研究进展	5
第一节 裂谷盆地分类的进展	6
第二节 裂谷盆地的伸展构造	13
第三节 裂谷盆地的走滑构造	16
第四节 裂谷盆地的深部地质	20
第五节 裂谷动力学机制研究历史	24
第二章 渤海湾盆地地质	29
第一节 区域地质背景	32
第二节 渤海湾盆地中生代格局	37
第三节 新生代华北克拉通破坏	41
第三章 渤海湾盆地构造地质特征	45
第一节 断裂构造分布特征	47
第二节 伸展构造系统	52
第三节 构造运动学恢复与分析	58
第四节 走滑构造系统	72
第五节 反转构造特征	79
第四章 渤海湾盆地中-新生代应力场	82
第一节 华北中生代应力场数值模拟	82
第二节 渤海湾盆地新生代应力场数值模拟	92

第五章 渤海湾盆地的构造 – 沉积体系	100
第一节 区域地层特征	100
第二节 构造 – 沉积分析	105
第六章 渤海地区火山活动	113
第一节 火山活动的时空分布	113
第二节 火山岩的地球化学	119
第七章 渤海重磁异常层析成像	126
第一节 渤海重磁异常基本特征	126
第二节 层析成像的基本方法	129
第三节 渤海中部磁位场层析成像	131
第四节 渤海中部重力位场层析成像	139
第五节 渤海中部重磁异常高的深部地质意义	148
第八章 渤海湾盆地构造演化动力学	151
第一节 渤海湾盆地中 – 新生代构造性质	151
第二节 渤海湾盆地构造演化及动力学模式	156
第九章 裂谷盆地动力学分析	163
第一节 主动裂谷发育过程的数值模拟	164
第二节 被动裂谷发育的影响因素分析	173
结语	191
主要参考文献	193

结 论

华北板块东部的渤海湾盆地是我国重要的石油工业基地。盆地陆上部分的研究和勘探开发程度较高。渤海是渤海湾盆地的海域部分。以前由于渤海油气区属于对外合作区，地质资料对外保密，海洋勘探资料较少公开，因此，渤海的地质研究相对薄弱，特别是渤海中—新生代的详细构造演化及地球动力学研究则更少。1993年以来，从渤海湾盆地南部至北部，作者先后主持了有关济阳拗陷、渤海拗陷和下辽河拗陷的构造地质课题。这些研究作为系统研究渤海湾盆地的构造演化及地球动力学机制奠定了坚实的基础。

渤海湾经济圈是我国继珠江三角洲经济圈和长江三角洲经济圈的又一个国家重点发展的地区。搞清渤海及邻区的构造演化和动力学机制与油气分布的关系，对于渤海湾盆地深层和海上的油气勘探具有重要的指导意义。20世纪80年代以来一些学者陆续对渤海的各种地质问题进行了研究，发表了一系列文章和专著。郝书俭和王春华（1982）对渤海地区居里面深度进行了研究。陈墨香等（1984）对渤海的热流场进行研究，计算出渤海的热流值和地温梯度分布。刘星利（1987）研究了渤海构造展布与油气分布的关系。1987年出版的《中国石油地质志》第16卷上册是渤海油田第一次比较系统地对外公开渤海海域的石油地质基础资料和研究成果，比较系统地总结了渤海的地理、地层、构造和生储盖石油地质基本特征。张之立和邓玉琼（1989）研究了渤海陆缘地震的力学特征和成因。孙若昧等（1993）对渤海及其邻区开展了地震层析成像研究，初步提出渤海深部构造样式。张恺（1993）和滕吉文等（1997）分别探讨了渤海的地球物理场和深部壳—幔结构及其与油气分布的关系。另外，近二十年来增加了大量渤海外围各拗陷的

研究资料和文献(漆家福等, 2008, 2010)。这些研究都为渤海及邻区的构造演化研究和地球动力学分析奠定了基础, 使深入系统地研究渤海及邻区的构造演化和动力学成为可能。

渤海是一个半封闭的现代陆表海, 为海陆交互相, 是一个第四纪陆表海盆地。海底地质构造单元划分表明渤海是中-新生代渤海湾盆地的海域部分, 因此, 渤海及邻区地球动力学研究不能孤立地只研究渤海海域, 而应该考虑研究整个渤海湾盆地, 甚至整个华北克拉通。近二十年来一些学者先后研究了渤海湾盆地的构造特征。陈发景(1983)提出渤海湾盆地是一个伸展盆地, 以伸展构造为主。进入20世纪90年代以来, 国内一些学者开始逐渐认识到走滑构造的作用(钱祥麟, 1994; 陆克政和王章俊, 1997; 侯贵廷等, 1998)。陆克政和王章俊等(1997)和王涛(1996)在中国东部中-新生代盆地研究中分别提到走滑构造也是渤海湾盆地的主要构造类型(漆家福等, 2008, 2010)。但以上仅局限在渤海湾盆地的陆上部分的研究, 对渤海海域的伸展构造和走滑构造等构造类型和构造演化的研究很少。渤海海域是渤海湾盆地岩石圈最薄的地区, 位于四大基底单元的交汇处, 郯庐断裂带也从该海域经过, 因此, 渤海海域的构造类型和构造演化研究是渤海湾盆地形成机制研究的基础和关键。

近三十年来, 对渤海湾盆地形成机制的认识有许多学者论述过, 可以归纳为三种观点。其一, 认为渤海湾盆地属于弧后盆地, 也就是说盆地形成的动力学原因是新生代太平洋板块向亚洲大陆俯冲产生的弧后扩张作用(李德生, 1979; 李德生和薛苏浩, 1983; 刘和甫, 1993; 王涛, 1996)。其二, 认为是大陆板内“主动裂谷”, 动力来源于渤海中部下方存在“地幔柱”作用(马杏垣等, 1983; Ma and Wu, 1987)。其三, 认为是大陆板内“被动裂谷”, 印度板块与欧亚大陆板块碰撞引起华北板块向东逃逸, 从而在华北东部形成新生代伸展拉张的构造环境(朱夏等, 1983; 赵重远和刘池洋, 1990; 钱祥麟, 1994)。分析以上各种观点, 假如中国东部受太平洋板块俯冲引起弧后扩张作用, 那么中国东部各盆地(松辽盆地、渤海湾盆地、南华北盆地和江汉盆地等)应该有统一的演化历史。实际上, 这些盆地的发展演化很不一样。例如, 松辽盆地在晚侏罗世火山活动强烈, 断陷发育, 早白垩世时整体拗陷, 古近纪抬升; 而渤海湾盆地晚侏罗世只有断陷, 早白垩世才发生大规模火山活动, 古近纪发生大规模的强烈断陷, 新近纪则以拗陷发育为主(刘德来, 1996; 陆克政和王章俊, 1997; 侯贵廷等, 1998)。显然, 这些平行于东亚大陆边缘呈北北东向展布的盆地并非受太平洋弧

后统一的构造环境控制,每个盆地有各自独立的动力学成因机制。假如渤海湾盆地是地幔柱成因的主动裂谷,则大地热流值很高,可是该盆地内的大地热流值低于美国盆岭省典型被动裂谷盆地的热流值,而且热流值等值线明显受盆地凸起和凹陷的构造格架控制,明显受控伸展构造格局,与“地幔柱”成因观点不一致。

另外,渤海湾盆地紧邻太平洋西岸,中-新生代明显受太平洋板块俯冲的影响,印度板块与欧亚板块新生代的碰撞作用只是对华北板块的远程效应,因此,不能只考虑华北板块向东逃逸产生的拉张环境,太平洋板块对中国东部的影响应该是最直接的,尤其是中生代晚期。郯庐断裂带从渤海湾盆地东部经过,这条北北东向的大型岩石圈断裂的中-新生代走滑构造作用对渤海湾盆地一定具有重要影响。20世纪90年代以来,学者们开始逐渐认识到要从整个东亚构造系统全面地考虑渤海湾盆地的成因机制,并从先存断裂格局来分析断裂构造演化序列(钱祥麟,1994;陆克政和王章俊,1997;侯贵廷等,1998;童亨茂等,2003)。不但要考虑太平洋板块的直接作用和印度板块的远程效应影响,还要考虑扬子板块对华北板块碰撞的持续效应和郯庐断裂带的作用(Hsiao et al., 2004; 漆家福等, 2008, 2010; Li et al., 2012a, 2012b)。

根据以上综合分析,渤海湾盆地的构造演化及其地球动力学还存在以下几个问题有待解决,成为本书的主要研究内容。

- (1) 盆地的性质、基本构造类型及其运动学研究。
- (2) 盆地的主要成盆断陷期的划分和断陷活动强度及其沉积中心的迁移问题。
- (3) 渤海火山岩成因及其源区的壳幔演化问题。
- (4) 渤海中部的重磁高异常体的性质及其深部地质意义。
- (5) 渤海湾盆地的构造应力场演化问题。
- (6) 渤海湾盆地形成的地球动力学模式。

钱祥麟(1994)和侯贵廷等(1998, 1999, 2000, 2001, 2003; Hou et al., 2010, 2014)先后多次提出要系统地东亚统一的大地构造背景分析中国东部和渤海湾盆地构造问题。首先要重视以下几点根本事实和基本认识:

- (1) 扬子板块对华北板块碰撞后晚中生代的持续推挤效应。
- (2) 晚中生代郯庐断裂的左旋走滑运动及其以西发育雁列的北西向窄小地堑系。
- (3) 42Ma太平洋板块由北北西向俯冲转为北西西向俯冲,使中国东部的

构造应力场发生改变, 郯庐断裂带由左旋走滑转为右旋走滑。

(4) 古近纪以来华北板块内发育一系列断陷盆地, 如始新世开始形成的渤海湾盆地和渐新世开始形成的汾渭地堑, 华北克拉通发生了破坏活动。

(5) 古近纪渐新世(32Ma)以来日本海的打开和朝鲜半岛的裂离以及青藏高原的急剧隆升, 两种作用在华北地区存在耦合作用。

渤海是渤海湾盆地的一部分, 只有渤中拗陷是其独有的, 其他拗陷都是陆上各拗陷延伸的海域部分。因此, 本书是以渤海海域为主并结合邻区的研究成果, 统一研究渤海湾盆地的构造演化及其成因机制。从华北板块区域地质对比分析, 渤海湾盆地与华北板块上的其他各种规模的中-新生代断陷盆地有一定的相互联系。从华北板块中-新生代所处的大地构造位置分析, 研究渤海及邻区的构造演化及地球动力学应该放到中-新生代整个东亚大地构造系统中研究。要运用板块构造学和现代大陆地质学理论, 从各板块的相互作用和内部活动、深部构造与浅部构造、各块体运动学和动力学机制来进行系统研究, 运用盆地分析的方法, 从盆地构造、沉积作用和火成活动以及应力场分析入手, 结合华北板块及东亚构造系统分析, 探讨渤海及邻区中、新生代构造演化及其地球动力学机制。

近十年来, 大量有关盆地分析、伸展构造、走滑构造和壳幔演化及深部地质等大陆地质学的新成果为深入研究渤海湾盆地的构造演化及地球动力学奠定了坚实的基础。以板块构造学和深部地质学理论为基础的地质思维和先进的数值模拟方法为我们全面系统地研究渤海湾盆地形成机制提供了有效的研究路线和手段。本书对渤海湾盆地的中-新生代构造做了详细、系统的研究, 并开展了运动学和动力学的定量分析。本书采用构造与沉积相结合的分析方法, 结合控盆断裂的生长指数和伸展率的统计分析, 提出渤海及邻区中-新生代盆地演化史, 厘定了中-新生代渤海湾盆地的三个重要裂谷发育时期和发育规律及强度; 并利用重磁层析成像技术反演深部构造, 结合火山岩的同位素地球化学分析, 提出渤海湾盆地中-新生代构造演化的地球动力学模式。

第一章

裂谷盆地构造研究进展

大地构造学自19世纪末和20世纪初槽台学说建立至60年代板块构造学说诞生以前，在地质学界固定论占主导地位，是以一维的垂直升降运动解释地壳运动。

20世纪60年代板块构造学说建立之后，对地壳运动的认识发生了重大的飞跃，人类开始以活动论观点从水平运动和垂直运动二维的角度来认识地壳运动（Sengor, 1990），包括重新认识裂谷盆地。

裂谷（rift）这个词最早用来描述东非地区那种有火山和地震活动的狭长而深陷的大型断陷湖盆，即东非大裂谷。后来，Burke 和 Sengor（1986）给出了裂谷定义，即岩石圈伸展破裂而形成的狭长断陷。

二十多年来，裂谷的理论和研究方法及其油气勘探都得到全面发展。全球30%的油气资源富集在各类大陆裂谷盆地内，可见裂谷盆地具有重要的油气勘探价值。近些年来，我国开展海外油气资源评价也促进了全球裂谷盆地研究和油气勘探实践的发展。

裂谷概念提出后，近几十年来裂谷本身的定义没有多大变化，主要研究进展是大陆裂谷类型的分类及其动力学机制研究。



第一节 裂谷盆地分类的进展

国内学者近三十年来开展了裂谷分类、裂谷构造和沉积及其油气地质的研究。李德生(1979)、朱夏等(1983)、陈发景(1983)、高明修(1983)、漆家福和陈发景(1992)、陆克政和王章俊(1997)、侯贵廷等(1998)先后对国内重点裂谷盆地(如渤海湾盆地)开展了盆地地质和油气地质的研究工作,主要集中在盆地性质讨论、盆地构造单元划分、构造样式研究、沉积地质和油气地质研究方面,而裂谷盆地形成的动力学机制方面研究一直比较薄弱。

国际上根据板块构造理论将裂谷盆地分为稳定大陆边缘裂谷系列和活动大陆边缘裂谷系列。其中,稳定大陆边缘的裂谷包括陆内裂谷、陆缘裂谷和边缘海裂谷。活动大陆边缘裂谷包括弧后裂谷和弧间裂谷等。根据裂谷形成的力学机制,国际上将裂谷分为拉张成因裂谷、挤压成因裂谷和走滑成因裂谷。从岩石圈地球动力学方面,裂谷分为三种动力学模式,即纯剪切模式(Mckenzie模式)、简单剪切模式(Wernick模式)和混合模式(Barbier模式)(Ziegler and Cloetingh, 2004)。其中,简单剪切模式又被Lister和Davis(1989)发展成为简单剪切-拆离模式,而Barbier提出的混合模式是纯剪切模式和简单剪切模式的复合模式,并未考虑中地壳的近水平拆离作用。Ziegler和Cloetingh(2004)在*Earth Science Review*上系统总结了国际上百年来裂谷理论的研究进展和现状,认为近二十年来,国际上裂谷研究的热点主要集中于主动裂谷和被动裂谷分类及其地球动力学机制研究,并针对以上三种动力学模型从岩石圈尺度利用地球物理勘探手段和数值模拟技术开展裂谷盆地动力学机制研究(侯贵廷等, 2003; Lin et al., 2005; 李乐等, 2011)。

一、裂谷的定义与分类

裂谷是地球深层作用的地表断陷构造,以高角度断层为界呈长条状的地

壳下降区。在1894年,英国人Gregory在研究东非大裂谷时,首次使用了“rift valley”(裂谷)一词,用来描述东非发育火山与地震、狭长而深陷的大型地堑(Ziegler and Cloetingh, 2004)。

裂谷是板块构造运动过程中,大陆崩裂至大洋开启的初始阶段的构造类型,也是岩石圈板块生长边界的构造类型,在陆壳区、大洋中脊上均有发育,代表威尔逊旋回的初始阶段。

大陆裂谷多为二元结构(俗称“牛头结构”):早期为断陷期,对应裂谷下部构造层—断陷,为同裂谷阶段;晚期为拗陷期,对应裂谷上部构造层—拗陷,为后裂谷阶段(图1-1)。

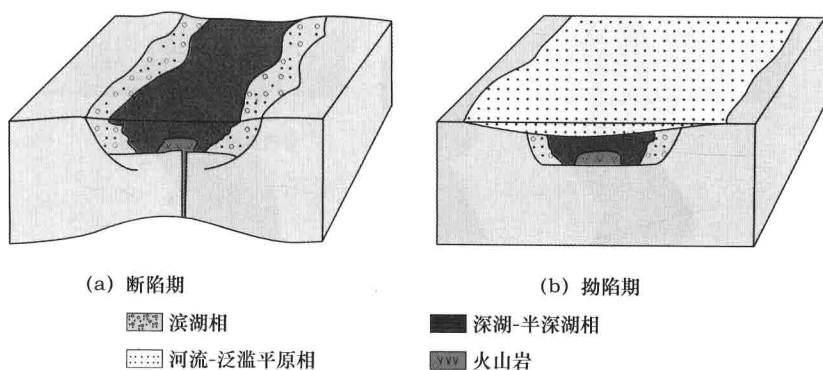


图1-1 裂谷的演化阶段及其双构造层(刘和甫等, 2005)

裂谷盆地的分类包括形态分类、构造分类和动力学分类等。

1. 大陆裂谷的形态分类

按大陆裂谷控盆断裂的平面形态划分,可以分出六种形态,如图1-2所示。

(1) 平行带状:通常由一些平行的半地堑及它们之间的横向凸起组成。

(2) 侧列状:由平行不连续的侧列叠复构造单元组成裂谷。

(3) 雁列状:在走滑断层构造中常见,近似直立断层,伴生正或负花状构造,为区域扭动作用的产物。

(4) 锯齿状:通常为两条平行的接近型边界正断层和其间相接的横向凸起及分支正断层组成。

(5) 狗腿状:除侧列并置的边界正断层,还有与之相连并呈 30° 相交的另一分支断层,组成狗腿状断层形状。

(6) 似弧状:两条不同方向的边界正断层及其控制的伸展断块常近似弧状分布。

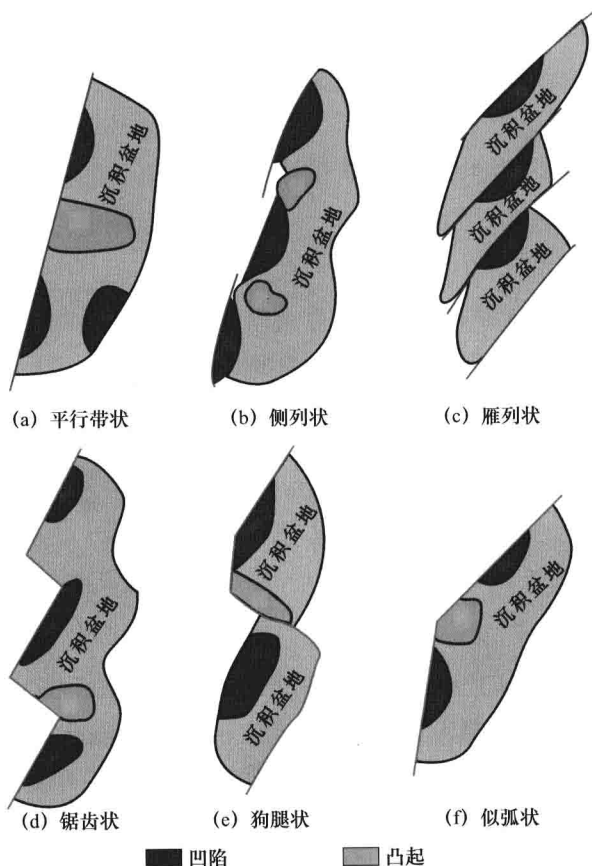


图1-2 裂谷的平面形态分类 (李思田等, 2004)

2. 大陆裂谷的构造分类

按大陆裂谷的剖面构造可以分为三类：①非旋转式正断层控制的（对称的）地堑和地垒 [图1-3（a）]；②由旋转式正断层控制的（多米诺式）掀斜半地堑 [图1-3（b）]；③由铲式正断层控制的（滚动的）半地堑 [图1-3（c）]。

两个相邻的裂谷系之间会存在过渡带，称为裂谷间的调节带。调节带的类型决定了盆地的沉积充填和沉积相，对油气成藏和有利区的分带十分重要。该调节带可以分为高地势调节带（无调节断层）和低地势调节带（发育调节断层）（图1-4）。

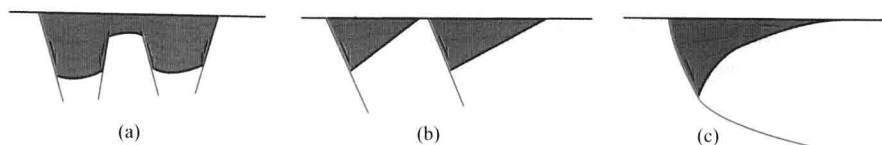
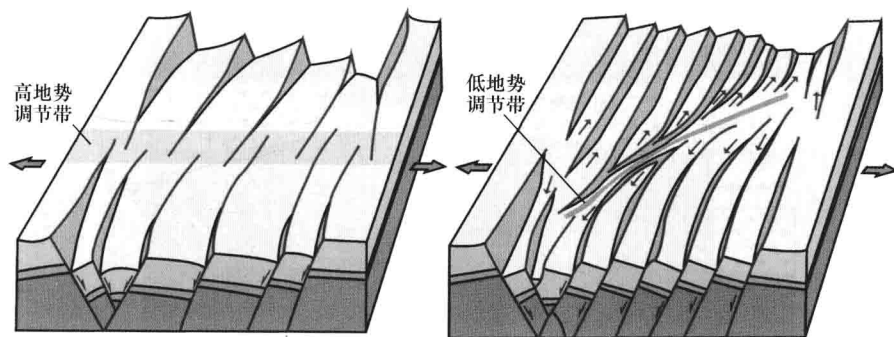


图1-3 裂谷的剖面构造形式分类 (李思田等, 2004)



(a) 高地势调节带

(b) 低地势调节带

图1-4 裂谷间的调节带类型 (Ebinger, 2001)

3. 裂谷的地球动力学分类

裂谷的地球动力学分类是以裂谷的构造地质特征、构造应力场和深部地质特征综合对比提出的反映裂谷形成机制的分类。裂谷地球动力学分类主要成果发表在20世纪80年代,代表人物包括Mckenzie、Wernicke、Barbier、Lister等人,这些学者先后提出裂谷形成的三种地球动力学模式,即纯剪切模式、简单剪切-拆离模式和复合模式。

(1) 纯剪切模式:很好地解释了对称地堑和地垒,裂谷最大沉降区域与地幔上拱最高区呈镜像对称 [图1-5(a)] (Ziegler and Cloetingh, 2004)。

(2) 简单剪切-拆离模式:纯剪切模式虽然很好地解释了镜像对称裂谷的类型,但无法解释最大沉降中心与地幔上拱区不一致的裂谷。简单剪切模式很好地解释了铲形低角度控盆断裂的形成,并解释了沉降中心与地幔上拱区不协调的动力学机制 [图1-5(b)] (Wernicke, 1981)。1989年,Lister等(作者的合作导师)根据美国盆岭省大型深反射地震剖面解释成果提出在中下地壳存在近水平的拆离面,提出了新的裂谷动力学模式“简单剪切-拆离模式” (Ziegler and Cloetingh, 2004)。