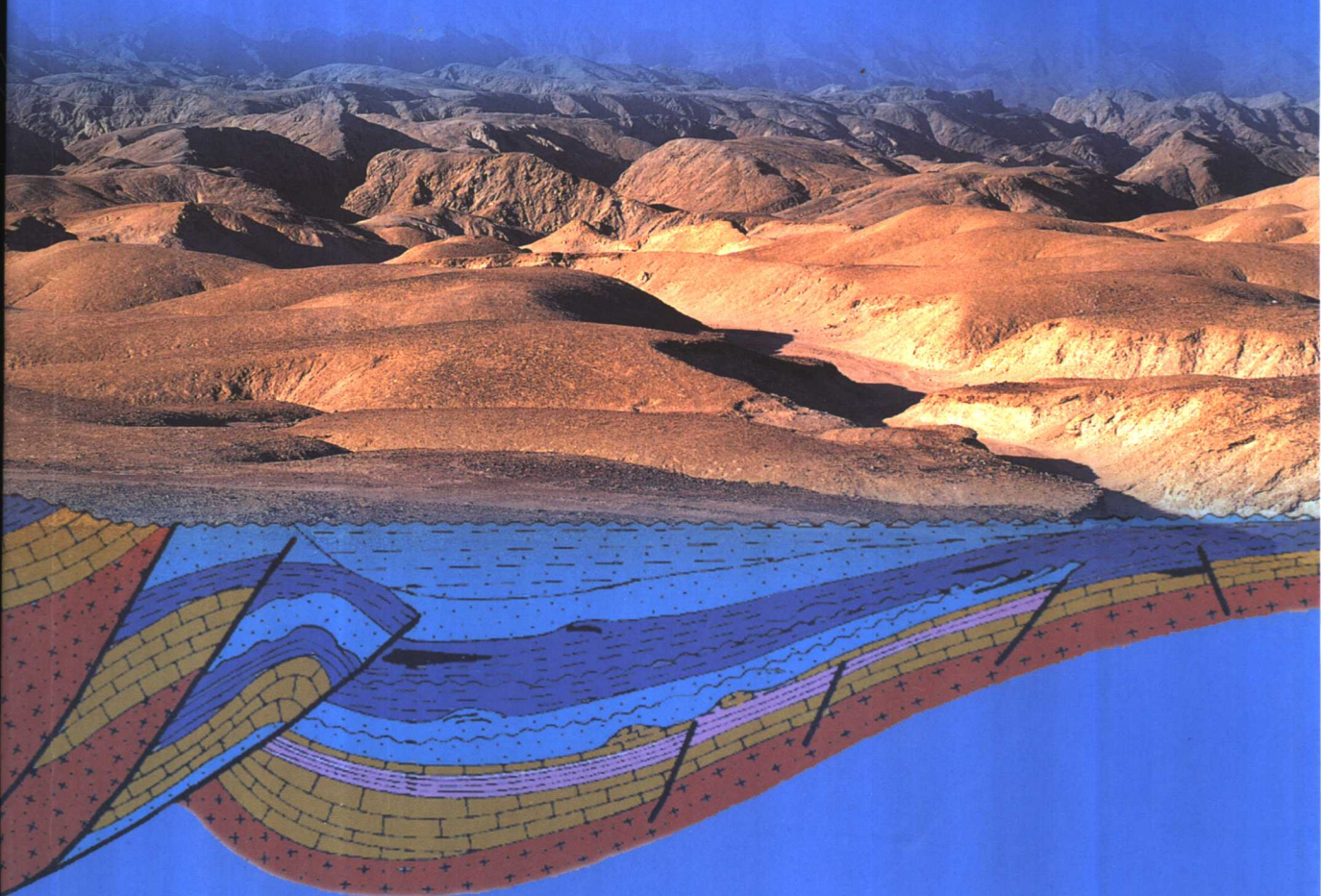


中国西部C-型前陆盆地 形成演化与油气聚集

李景明 刘树根 李本亮 罗志立 黄君权 李智武 著



石油工业出版社

谨以此书献给成都理工大学成立 50 周年

中国西部 C-型前陆盆地 形成演化与油气聚集

李景明 刘树根 李本亮 罗志立 黄君权 李智武 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在分析前陆盆地基本特征的基础上,论述了中国西部 C-型前陆盆地的大地构造背景、陆内俯冲的形成和发展,提出了中国 C-型俯冲“抬升”造山的新模式,总结了典型前陆盆地油气聚集规律。

本书可供石油地质、大地构造研究方面的技术人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西部 C-型前陆盆地形成演化与油气聚集/李景明等著.
北京:石油工业出版社,2006.9

ISBN 7-5021-5689-5

I. 中…

II. 李…

III. ①含油气盆地-石油天然气地质-研究-中国

②含油气盆地-油气藏-分布规律-研究-中国

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 101675 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.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18

字数: 460 千字 印数: 1—1000 册

定价: 50.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

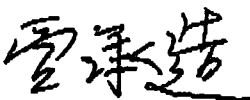
版权所有,翻印必究

序 言

前陆盆地已经成为中国油气勘探的主要领域之一。除了早期发现的独山子（1937）、老君庙（1939）、克拉玛依（1955）、冷湖（1958）、依奇克里克（1957）油气田外，进入 20 世纪 90 年代以后先后发现了探明天然气地质储量 2840 亿立方米的克拉 2 大气田，酒泉盆地窟窿山油田，截至目前已经探明天然气地质储量 8300 亿立方米，石油地质储量 26 亿吨。随着地质认识的提高和油气勘探的进展，也推动了前陆盆地构造地质学与石油地质学理论的发展。

李景明等所著的《中国西部 C-型前陆盆地形成演化与油气聚集》一书，既深化了前陆盆地油气构造地质理论，也为中国特定类型前陆盆地的油气勘探提供了新的思路。从前陆盆地这一名词的内涵与外延的产生和发展过程，系统论述了 C-型前陆盆地丰富的学术思想和大地构造意义，从世界上前陆盆地研究过程的历史深度探索了前陆盆地的科学含义，近而提出了中国特定的大地构造背景下发育的 C-型前陆盆地。这类前陆盆地是与世界上最为经典的两类前陆盆地，即由大洋俯冲（B-型俯冲）成因的弧背前陆盆地和陆缘俯冲（A-型俯冲）成因的周缘前陆盆地，相并列的第三类前陆盆地，即由陆内俯冲（C-型俯冲）成因的一类前陆盆地。陆内俯冲是继大洋俯冲、陆缘俯冲之后板块构造演化的一个新阶段，也是大洋板块构造地质学发展到大陆板块构造地质学的一个新时期。C-型前陆盆地是在中国小型克拉通在古生代的多次离散和最终在中生代聚敛成统一的大陆构造的基础上发育而成的，陆内俯冲是大陆构造的特殊形式，在研究全球陆内变形中也具有普遍意义。书中从造山运动与盆地沉降这一大陆构造演化的矛盾统一体中开展研究，结合区域构造地质特征及其地球物理、地球化学证据，提出了中国西部 C-型前陆盆地形成的大陆动力学模式，即以龙门山为代表的 L-型单侧盆山耦合模式和以天山为代表的 T-型双侧盆山耦合模式，近而总结了这两种盆山耦合模式下发育的四个典型前陆盆地（库车、淮南、川西、柴北缘）的油气地质条件及其聚集规律，评价了中国 13 个 C-型前陆盆地的含油气远景与勘探潜力。

《中国西部 C-型前陆盆地形成演化与油气聚集》一书的著作者，既有学识渊博的科技工作者、也有经历丰富地质学家；该书既承载了构造地质学已有的历史传统，也兼容了油气构造地质发展的大胆创新，兼容并储，在继承中有发展，在综合中显独见，在探索中求新意。该书对深入分析中国前陆盆地的地质基础、拓展油气勘探视野均有理论和实践意义。

中国科学院院士 

2006 年 4 月

前 言

早在 20 世纪 30 年代,旧中国在中国西部山前带找油获得成功,如祁连山前的老君庙油田(1939 年)和北天山山前带的独山子油田(1937 年),那时主要根据油气苗的显示,而不知“前陆盆地”为何物?新中国成立后的 20 世纪 50 年代初期,也以此论点在中国西部找油、找气,如在天山南、北缘的淮南、库车、塔西南、酒泉、吐哈、鄂尔多斯西缘和川西等山前带勘探油气,结果仅发现一些小油田和含油构造,勘探失利。如库车山前带的伊奇克里克油田(1958 年),鄂尔多斯西缘的马家滩、李庄子的含油构造(1958 年),塔西南和川西海棠铺构造的勘探未获成果。人们开始意识到,仅用油苗和背斜理论指导勘探的局限性,勘探技术和手段的落后性,不能面对山前带找油的复杂性。到了 20 世纪 50 年代后期,为了摆脱困境,中国油气勘探战略东移,四川盆地油气勘探也由川西山前带转向“川中地台”找油,发现了川中油田(1958 年);准噶尔盆地也从复杂的北天山山前带转向较为简单的克—乌地区,发现了克拉玛依大油田(1955 年)。这就是中国石油地质工作者在中国前陆盆地找油的第一次困难较量的历程。

到了 20 世纪 60—70 年代,加拿大和美国洛矶山冲断带发现大油田后,引起了中国石油地质工作者广泛兴趣;而准噶尔盆地西缘的克—乌断裂带,自 1979 年以来,发现了大量断裂掩覆油气藏,更引起了国内同仁的关注,把冲断带下找油气的目光转向中国的山前带。国内许多学者从板块构造理论,把中国的一些冲断带与美国洛矶山的 A 型俯冲(A. W. Bally, 1975)进行对比,期望能找到类似美国洛矶山前陆冲断带的油气田。20 世纪 90 年代,中国在实施“稳定东部、发展西部”的油气战略方针中,人们最为关注和使用最多的地质名词是“前陆盆地”,很多学者把中国许多前陆盆地与 Dickinson (1974)界定的“弧背前陆盆地”或“周缘前陆盆地”对比,期望能找到类似西加拿大、美国洛矶山和扎格罗斯等前陆盆地大油气田。与此同时,国内一些基础地质学家注意到“中国陆内造山”的特点,与石油地质学家研究的前陆盆地结合,出现中国特有的“盆—山耦合”关系研究新领域。这些认识和争论,引起了国内外学者广泛的兴趣,推动了对中国前陆盆地的认识,促进了中国油气勘探工作的发展。

经过近十多年来的勘探,在中国西部 13 个前陆盆地中,有 12 个发现油气田,取得巨大成果。在重点勘探的 7 个前陆盆地(库车、川西、淮南、塔西南、鄂尔多斯西缘、柴北缘、大巴山前缘)探明天然气储量 $5729.74 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制储量 $3230.99 \times 10^8 \text{ m}^3$, 预测储量 $5637.64 \times 10^8 \text{ m}^3$, 圈闭资源量 $15874.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 剩余资源量 $62574.69 \times 10^8 \text{ m}^3$, 探明率尚不到 10%。这些勘探成果的取得,说明广大石油工作者用板块构造理论结合中国地质实际,在理论上有所创新,认识上有所突破,勘探技术上有所进步,这些实践与认识,为编写本书提供了丰富的实际资料和科学依据。

全书共分 6 章。第一章从国内外前陆盆地的研究历史和现状着手,详细全面地论述了前陆盆地的基本特征,为后续章节的论述奠定基础。中国板块构造从古生代的离散和汇聚演变成中—新生代的中国大陆,其间经历了多次褶皱运动和 4 次地裂运动,第二章从新的思维和方法论述了中国地史演化和大陆构造的结构,以及中国西部前陆盆地形成的区域构造背

景,为以后各章认识中国地质特色提供依据。第三章叙述了 C-型俯冲(陆内俯冲)新论点的提出和争论、研究过程和依据,与同行取得的共识。陆内俯冲成为大陆构造的特殊形式,在全球大陆构造中占有特殊位置,为研究中国西部前陆盆地的形成做出了重要贡献。第四章在分析国外前陆盆地术语沿革和实例基础上,剖析了中国西部前陆盆地的特征,并与国内外前陆盆地对比之后,得出与 C-型俯冲(陆内俯冲)有关的“中国型前陆盆地”概念(Chinese foreland basin,简称 C-型前陆盆地),并希望在掌握中国地质特色的基础上,发展中国特色的石油构造学。第五章将沉积盆地和造山带作为中国大陆构造演化系统中的一对矛盾统一体进行分析,研究中国西部盆山耦合系统的特征、类型和盆山耦合关系。利用近 20 年来笔者等系统研究龙门山的地质、地球物理和地球化学等各项资料,得出龙门山造山带—川西前陆盆地耦合系统间的动力学机制。联系对天山造山带的研究,提出中国 C-型俯冲“抬升”(Lifting)造山的新模式;其中 C-型俯冲“抬升”造山模式又分为单侧(L-型)和双侧(T-型)盆山系统耦合关系动力学模式,用龙门山和天山造山带与其前陆盆地系统大量深部岩石圈结构的地球物理资料和地史演化资料予以论证。第六章回顾了中国西部前陆盆地分布、地质构造背景和油气勘探现状,汇总了中国西部 C-型前陆盆地油气成藏特征,初步总结了双侧(T-型俯冲)和单侧(L-型俯冲)4 个典型前陆盆地油气聚集规律,最后对中国西部 13 个前陆盆地的油气远景进行了评价和分类,并提出今后深入研究中存在的 6 个问题,供决策者参考。

本书利用近 20 多年来研究龙门山、天山及中国西部前陆盆地资料,也使用了中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司下属单位和原成都地质学院的许多资料,对他们的大力支持深表感谢!本书结合中国地质实际,力求创新,提出一些新论点,不妥之处,请读者批评指正!本书在编写过程中得到了孙玮博士、邓宾和秦川的协助,在此一并致谢!

李景明 2006.6

目 录

第一章 前陆盆地的基本特征	(1)
第一节 基本概念和历史回顾	(1)
一、前陆的涵义	(1)
二、前渊的涵义	(1)
三、前隆的概念	(2)
四、冲断带的概念和研究进展	(3)
五、前陆盆地的概念和基本特点	(6)
六、前陆盆地系统的概念	(8)
七、前陆盆地研究的回顾与展望	(10)
第二节 前陆盆地的主要类型及其特征	(12)
一、前陆盆地分类概述	(12)
二、前陆盆地的基本类型及其特征	(15)
三、前陆盆地的其他称谓及其特征	(23)
第三节 前陆盆地的形成和演化	(27)
一、前陆盆地发育的大地构造环境	(27)
二、前陆盆地形成的力学机制	(27)
三、前陆盆地形成和演化的一般过程	(38)
四、前陆盆地的沉降史	(39)
五、前陆盆地的充填和演化	(41)
第四节 前陆盆地结构和构造特征	(55)
一、前陆盆地充填的横剖面结构	(55)
二、前陆盆地的构造特征	(57)
第五节 前陆盆地的油气地质特征	(59)
一、烃源岩	(59)
二、储层和圈闭	(61)
三、运移和保存条件	(62)
第二章 中国西部 C-型前陆盆地形成的大地构造背景	(64)
第一节 中国大陆构造形成和演化	(64)
一、中国大陆构造的特性	(64)
二、古生代中国板块构造演化特征	(65)
三、中国大陆形成的基础	(70)
四、阿尔金洋盆	(75)
五、南华小洋盆	(77)
六、小结	(77)
第二节 晚古生代“峨眉地裂运动”	(79)

一、“峨眉地幔柱”存在的初步认识	(79)
二、二叠纪塔里木古板块和扬子古板块沿阿尔金构造带拼结的依据	(79)
三、扬子古板块二叠纪沿东昆仑—阿尼玛卿—康、勉、略深海沟 (相当南秦岭洋西段) 向东漂移的运动学特征分析	(80)
四、扬子古板块和塔里木古板块演化的意义	(81)
第三节 中生代中国大型陆相盆地形成前陆盆地发育奠定了基础	(81)
一、塔里木、准噶尔、柴达木、华北克拉通原型盆地及其前陆盆地形成	(82)
二、准噶尔至松辽在侏罗—白垩纪形成东西向裂谷盆地	(82)
三、印支期四川克拉通原型盆地形成和改造	(84)
第四节 晚中—新生代中国大陆构造演化的动力学特征	(86)
一、中国大陆盆地动力学中不同成因机制的认识	(86)
二、中国西部盆—山耦合作用和地壳加厚与特提斯洋陆关闭有关	(86)
第五节 中国大陆构造演化过程中的活动性及其影响	(88)
一、中国大陆构造处于多块体拼合、多洋盆分割状态	(88)
二、中国大陆构造在地史演化中处于两大地球动力系统复杂交汇区	(89)
三、中国大陆构造活动性及其影响	(89)
四、中国大陆构造与中国西部 C-型前陆盆地	(90)
第三章 中国陆内俯冲 (C-型俯冲) 的形成和发展	(91)
第一节 问题的提出及争议	(91)
一、陆内俯冲 (简称 C-型俯冲) 的提出及其论点	(91)
二、对 C-型俯冲论点的评论	(92)
第二节 龙门山冲断带研究的深化及 C-型俯冲模式的建立	(93)
一、多学科综合研究, 深化了龙门山冲断带的认识	(93)
二、龙门山 C-型俯冲模式的建立、验证和评述	(96)
第三节 天山造山带及其前陆盆地研究对 C-型俯冲的进一步验证	(106)
第四节 C-型俯冲模式的特征分类和中国西部陆内造山新模式的提出	(108)
一、中国中西部 C-型俯冲带特征	(108)
二、C-型俯冲带的分类及陆内俯冲造山的动力学新模式	(109)
第五节 国内学者对 C-型俯冲 (中国陆内俯冲) 提出类似或相同的观点和成果	(111)
一、对单侧向俯冲型 (L-型俯冲) 的认识	(111)
二、对双侧向俯冲型 (T-型俯冲) 的认识	(112)
第六节 结语	(116)
一、C-型俯冲在中国大陆构造中的普遍性	(116)
二、在全球大陆构造论述中 C-型俯冲具有自己的特殊性	(116)
三、C-型俯冲在中国地质构造理论、前陆盆地形成、找矿和灾害地质 等方面的重要性	(117)
第四章 中国西部 C-型前陆盆地特征及命名	(118)
第一节 国外前陆盆地名词演化变革及其特征	(119)
一、前陆盆地名词演化变革及类型	(119)

二、前陆盆地概念和前陆盆地系统·····	(119)
三、组成前陆盆地的构造单元及成因机制·····	(120)
第二节 国外前陆盆地特征分析及其与中国西部 C-型前陆盆地对比 ·····	(121)
一、国外前陆盆地特征分析·····	(121)
二、中国西部典型 C-型前陆盆地实例分析 ·····	(135)
三、中国西部 C-型前陆盆地特征 ·····	(168)
四、国内外前陆盆地特征对比·····	(169)
第三节 讨论与建议·····	(171)
一、中国西部 C-型前陆盆地定名问题 ·····	(171)
二、中国 C-型前陆盆地形成动力学机制问题 ·····	(172)
三、对发展中国石油构造学的反思·····	(173)
第五章 中国西部盆—山系统的耦合关系·····	(174)
第一节 盆—山耦合关系研究现状·····	(174)
一、盆(沉积盆地)—山(造山带)系统研究的必要性·····	(174)
二、盆—山耦合问题的提出及其研究·····	(176)
三、中国在盆—山耦合关系方面的研究现状·····	(178)
第二节 中国西部盆—山系统的基本特征·····	(182)
一、中国西部盆—山系统形成的地质构造背景·····	(182)
二、中国西部盆—山系统的基本类型·····	(184)
三、中国西部盆—山系统的基本特征·····	(184)
第三节 中国西部盆—山系统的耦合关系·····	(187)
一、龙门山造山带的隆升和川西前陆盆地沉降(隆升)的耦合关系·····	(187)
二、龙门山造山带—川西前陆盆地系统盆—山间互换的耦合关系·····	(187)
三、龙门山造山带—川西前陆盆地系统岩石圈各层圈间的相互作用·····	(188)
四、龙门山造山带—川西前陆盆地系统盆—山间物质循环和能量交换的 耦合关系·····	(190)
第四节 中国西部盆—山系统耦合关系的动力学模式·····	(191)
一、陆内造山研究的现状和趋势·····	(191)
二、C-型俯冲与中国西部造山带新模式·····	(193)
三、中国西部盆—山系统耦合关系的动力学模式·····	(193)
第五节 单侧盆地型盆—山系统耦合关系的动力学模式(L-型俯冲)·····	(195)
一、龙门山造山带—川西前陆盆地系统的岩石圈结构·····	(195)
二、龙门山造山带—川西前陆盆地系统的形成机制·····	(206)
三、龙门山造山带—川西前陆盆地系统形成演化的动力学过程·····	(211)
第六节 双侧盆地型盆—山系统耦合关系的动力学模式(T-型俯冲) ·····	(213)
一、天山造山带及两侧盆地系统的深部结构·····	(214)
二、天山造山带及两侧盆地系统的动力学机制·····	(217)
第六章 中国西部 C-型前陆盆地油气成藏与聚集特征 ·····	(223)
第一节 中国西部 C-型前陆盆地分布及勘探现状和形成的地质构造背景 ·····	(223)
一、中国中—新生代前陆盆地区域地理分布·····	(223)

二、中国前陆盆地油气勘探现状·····	(224)
三、中国西部 C-型前陆盆地形成的地质构造背景及动力学机制 ·····	(224)
第二节 中国西部前陆盆地油气成藏特征·····	(227)
一、烃源岩发育以陆相有机质为主·····	(227)
二、储盖层条件及其组合特征·····	(227)
三、C-型前陆盆地油气藏富集特征·····	(230)
四、中国西部中—新生代构造运动对前陆盆地成藏期的控制作用·····	(232)
五、中国西部 C-型前陆盆地超压异常与油气分布特征 ·····	(238)
第三节 中国西部典型 C-型前陆盆地油气聚集规律 ·····	(245)
一、库车前陆盆地油气聚集规律·····	(245)
二、准噶尔南缘前陆盆地油气成藏特征与聚集规律·····	(248)
三、川西前陆盆地天然气富集成藏规律·····	(253)
四、柴北缘前陆盆地逆冲带油气聚集规律·····	(257)
第四节 中国西部 C-型前陆盆地含气远景分类及研究中存在的问题 ·····	(263)
一、中国西部 C-型前陆盆地含气远景分类 ·····	(263)
二、中国西部 C-型前陆盆地研究中存在的问题 ·····	(265)
参考文献·····	(267)

第一章 前陆盆地的基本特征

第一节 基本概念和历史回顾

一、前陆的涵义

在构造地质学界,前陆(Foreland)首先是由奥地利地质学家 Eduard Suess (1883—1909)在其名著《地球的面貌》一书中提出的一个术语,用以表达后陆朝着前陆运动的想法。此后,Hills (1940)将前陆定义为“地槽沉积物变形时,向着它运动的稳定地块”;Horberg (1949)等人描述的前陆是“……在一系列逆掩片(Thrust sheets)前面的地区”;Stille (1936)给前陆下的定义最通俗,是指“不再受阿尔卑斯式褶皱作用的大地构造单元,至多不过发生日尔曼型的变形”。Eardley (1951)的定义,也就是板块学说问世前被普遍接受的前陆概念,即“在阿尔卑斯,大量复杂的地槽沉积物,加上侵入岩,被向北推动了许多英里,运动所向北面的稳定陆块即是前陆。”板块构造学说诞生后,Bates 和 Jackson (1987)将前陆或前渊定义为“位于造山带边缘的稳定区,且造山带岩石向着它逆冲或掩覆。通常情况下,前陆是大陆地壳的一部分,并位于克拉通或地台区的边缘”。孙肇才(1984)曾把前陆的这种特殊构造背景形象化地称为:“面朝活动带,背依稳定区”。因此,前陆总是指与造山带毗邻的稳定的克拉通部分(刘树根,1993),且造山带的岩层向它逆冲或掩覆,在该部位岩层只发生变形,一般无强烈的变质作用(贾承造等,2000)。

按照大地构造背景,前陆可分为三种类型:曾为被动大陆边缘的Ⅰ型、曾与沟—弧系有关(靠大陆一侧)的Ⅱ型和陆内造山带前方的Ⅲ型(陈书平等,2001)。

二、前渊的涵义

与前陆近似的一个概念是前渊(Foredeep),最早由 Suess 引入地质学(Dennis, 1983),一般指充满了沉积物的狭长的构造深渊或构造洼地。在板块构造学说诞生前,前渊等同于 Marshal Kay (1951)所称的外地槽(Exogeosyncline),并认为前渊的形成与造山作用从较深的优地槽移向靠近前陆的冒地槽(Miogeosyncline)有关(Aubouin, 1965; Allen 等, 1986)。板块学说问世后,Price (1973)首先引用其来描述前陆盆地。

“前渊”、“前陆”和“后陆”(Hinterland)都是前板块构造术语,由不同的学者以不同的方式应用在板块构造理论中,并在一定程度上引起了混乱。因此,Ingersoll 和 Bubsy (1995)建议仅保留这些术语的自然地理学和(或)水体深浅的涵义,也就是位于相关的挤压造山带前缘之前或之后的深渊或陆地。只有当板块构造环境已知时,才能更确切地将前陆盆地划分为周缘的(Peripheral)、弧背的(Retroarc)或压扭性的(Transpressional)(见后)。同时,他们认为“后陆”的涵义太广泛,通常指山脉本身及其之后的地区,建议废弃“后陆”术语。

一些学者把前渊和前陆当作同义语,事实上更确切的用法是前渊指前陆上水体最深的部分,并紧靠褶皱冲断带前缘;而前陆则指水体较浅的、离冲断带更远的部分(Ingersoll 和 Bubsy, 1995)。此外,许多学者使用“前渊”时,其真实涵意是指前陆盆地中沉积厚度最大的部分“Forethick”(W. R. Dickinson, 1994,转引自 Ingersoll 和 Bubsy, 1995)。巨厚

前陆沉积物可以存在于水体极浅的盆地中,因此水体较深的前渊不能与巨厚地层相混淆。而在 Decelles 和 Giles (1996) 定义的前陆盆地系统中,从造山楔前缘至前隆间的整个沉积带作为前渊沉积带。

可见,在自然地理学意义上,前渊通常是指造山带前缘水体深度最大的部分,而构造地质学中的前渊其更普遍的意义是前陆盆地中水体最深或沉积厚度最大的部分。

三、前隆的概念

前陆盆地挠曲沉降模拟表明,岩石圈在上地壳载荷作用下近似表现为一均一弹性板片(Beaumont, 1981; Jordan, 1981),地壳在载荷位置具有最大的沉降幅度,并在前陆盆地的远端(靠克拉通一侧)产生隆起,通常将这一隆起称为前隆(Forebulge,在英文中还称为 Peripheral bulge 或者 Outer peripheral high);再向外则是幅度逐渐减小的沉降和隆起带。

前隆的位置和隆起幅度取决于上地壳载荷量、岩石圈完整性以及岩石圈流变性质(如岩石圈的年龄、挠曲刚度或有效弹性厚度以及岩石圈的粘弹性或应力松弛时间)(Jordan, 1995)。典型的前隆位于离冲断带前缘数百公里处,其隆起幅度可达几十米(Miall, 1995),甚至数百米(Decelles 和 Giles, 1996)。当把前陆盆地看作是漂浮在流态地幔垫上的薄弹性板挠曲模型时(Walcott, 1970; Turcotte 和 Schubert, 1982),前隆的水平宽度(前隆脊至加载轴间的水平垂直距离)为 $\pi\alpha$ (无限大板)或 $3\pi\alpha/4$ (破裂板),这里 α 为挠曲参数,主要取决于岩石圈的挠曲刚度以及地幔与盆地充填物间的密度差。若挠曲刚度为 $1021 \sim 1024 \text{ Nm}$ 、密度差为 800 kg/m^3 , α 变化范围为 $26 \sim 150 \text{ km}$ 。这样,基本挠曲方程预示,在典型前陆盆地中,前隆至加载轴间的宽度应为 $60 \sim 470 \text{ km}$ 。与无限大板和高刚度板相比,破裂板和低刚度板具有更高、更窄的前隆(Turcotte 和 Schubert, 1982)。

前隆对挠曲负载、前陆盆地的松弛作用和卸载历史非常敏感。因此,仔细研究前隆及其附近地层的上超(退覆)、楔状作用和尖灭之间的相互关系可提供有关前陆盆地演化的大量信息(Miall, 1995)。对此,Beaumont (1981)、Tankard (1986) 及 Flemings 和 Jordan (1990) 分别利用粘弹性模型和弹性模型进行了理论和实际研究。然而,实际情况是前隆通常很难确定,尤其是对于古代前陆盆地(Decelles 和 Giles, 1996)。

前隆带通常为—地表暴露和侵蚀区(Crampton 和 Allen, 1995),但许多现代和古代的前陆盆地系统包含有被同造山期沉积物埋藏的前隆,而在某些前陆盆地系统中,可能缺乏前隆带或发育很差(Decelles 和 Giles, 1996)。不论何种情况,前隆的存在是确实无疑的;然而,即使前隆的存在从构造上和(或)地层上能够给予很好限定,但其可能缺乏地形表现或者非常平缓(Decelles 和 Giles, 1996),因为前隆的实际地形表现还要取决于侵蚀和沉积速率(Miall, 1995)以及海(湖)平面。例如,在沉积物供给速率高的前陆盆地中(过充填盆地),前隆可被沉积物埋藏而没有地形表现。在现代弧背前陆盆地(Retroarc foreland basin)中,前隆很少形成地形高,因此在地表相型中也没有表达,这意味着前隆通常被来自冲断带的沉积物所覆盖,这是过充填前陆盆地的特征;然而,在古代的前陆盆地中,相型通常平行于前隆展布,这是欠充填前陆盆地的特征(Jordan, 1995)。

对于正在活动的前陆盆地,前隆的位置可通过重力场研究来确定(Jordan, 1995);前隆表现为高重力值,反映了地壳底部的向上弯曲(Karner 和 Watts, 1983)。而对于大多数古代和现代的前陆盆地,与前渊相比非常薄的沉积、区域性不整合面、发育良好的古土壤和喀斯特、远端河成和风成以及浅海沉积(包括细粒硅质碎屑岩和碳酸盐岩)、地层上超和退覆、滨外障壁沙坝和浅滩及生物礁、区域上近平行的等时地层、水流方向的转向等,均可作

为确定前隆位置及其迁移和演化的典型特征 (Tankard, 1986; Miall, 1995; Decelles 和 Giles, 1996; Ver Straeten 和 Brett, 2002 等)。

四、冲断带的概念和研究进展

在构造上, 与前陆盆地密切相关的一个重要概念是冲断带 (Thrust belt), 前陆盆地分析的每一个环节都离不开对该构造带的解剖。在此, 对有关概念作一介绍, 包括冲断层、推覆体、冲断带等。

(一) 冲断层的概念

冲断层 (Thrust) 概念的出现源于 19 世纪后期瑞士阿尔卑斯格拉乌斯 (Glarus) 逆冲断层和苏格兰莫因 (Moine) 逆冲断层的研究 (A. Heim, 1878; C. Callaway, 1883; A. Geikie, 1884; M. Bertrand, 1884; C. Lapworth, 1885; H. Schardt, 1893; M. Lugeon, 1902; B. N. Peach 和 J. Horne 等, 1907)。1884 年, Archibald Geikie 首创 “Thrust” 一词用来描述这些位移带, 并给出冲断层的原始定义:

“By a system of reversed faults, a group of strata is made to cover a great breadth of ground and actually to overlies higher members of the same series. The most extraordinary dislocations, however, are those to which for distinction we have given the name of Thrust-planes. They are strictly reversed faults, but with so low a hade that the rocks on their up-thrown side have been, as it were, pushed horizontally forward.”

——Archibald Geikie 1884, Nature.

逆冲推覆构造的研究历史虽然久远, 但至今尚未能对冲断层给出一个确切的定义, 明显地是由于断层几何结构的多样性和推覆构造的复杂性。按照 1979 年伦敦逆冲推覆构造国际研讨会的讨论结果 (McClay 和 Price, 1981): 冲断层 (Thrust 或 Thrust fault) 或逆掩断层 (Overthrust) (二者同义), 是指水平位移距离大于 5km、在大部分延展范围内倾角都很低缓 (观察到的或推断的) 的逆断层。冲断席 (Thrust sheet) 是指位于冲断层之上的构造单元。

但这一定义明显过于严格。首先, 5km 的最小位移距离的限定除在阿尔卑斯可满足外, 对于大多数逆冲断层或推覆构造不一定能满足, 因为断层沿走向会消失, 而且位移距离的准确估计也是比较困难的。其次, 断层低缓倾斜的限定对许多断层不适合, 因为断层倾角是变化的, 特别是断层随褶皱一起弯曲的时候, 而且许多有意义的冲断层为基底卷入的高角度逆断层 (如风河山脉)。再次, 单条冲断层的规模不仅要看其总的缩短量, 还要看其冲断的剖面厚度和强度, 在薄的非能干层中的断层中, 冲断层的规模较小。此外, 冲断层往往成群出现形成断层带, 单条断层的规模可能较小, 因此通常情况下冲断层是指一个冲断层带。

由于上述原因, 一些学者将冲断层简单地定义为达到填图规模的收缩断层 (Contraction fault)。同时也出现了基底卷入冲断层 (Basement involved thrust)、高角度冲断层 (High angle thrust) 或陡倾冲断层 (Steep angled thrust)、铲形逆断层 (Listric reverse fault 或 Reverse listric fault) 等称谓。为此, 朱志澄 (1989) 将逆断层分为三类: 高角度逆断层 (High-angle reverse fault)、低角度逆断层 (Low-angle reverse fault) 和逆冲断层 (Thrust), 并强调冲断层具位移显著和角度低缓两大特点。

(二) 推覆体的概念

推覆体 (Nappe) 是指沿着近水平底板 (冲断层) 位移距离在 5km 以上且位移距离数倍于其自身厚度的基本连贯的大规模外来岩席 (McClay 和 Price, 1981)。它与冲断席

(Thrust sheet)、冲断片 (Thrust plate) 和冲断块 (Thrust block) 部分同义, 但更强调规模 and 水平位移距离。按照推覆体的形成方式可分为两种类型: ①褶皱推覆体 (Fold nappe), 外来构造岩席呈大规模的倒转层位, 可能是在大的平卧褶皱基础上, 其下翼被剪开发育成冲断层或被拉薄发育成剪切带而形成; ②冲断推覆体 (Thrust nappe), 由外来构造岩席沿冲断层面大规模位移而形成。

(三) 冲断带的概念

冲断层通常控制了碰撞造山带的结构, 大多数著名的冲断层发现于碰撞造山带 (如阿尔卑斯山和喜马拉雅山) 的外部边缘, 在此形成所谓的褶皱和冲断层带 (Fold and thrust belts)。在这些地方, 冲断层往往成群成带出现, 形成冲断系统 (Thrust system), 即在几何学上相似、运动学上相关的冲断层的组合。

冲断带 (Thrust belt) 标志着造山带的外部边缘, 是处于造山带与盆地之间的过渡部位、造山带向盆地方向大规模掩冲推覆所形成的冲断系统 (图 1-1), 其同义词是褶皱—冲断带 (Fold-thrust belt) 或褶皱和冲断层带 (Fold and thrust belt)。也有学者 (贾承造等, 2000) 将其作为一独立的构造单元。其基本特点是地壳通过沿近于平行的指向造山带外部的冲断层滑动发生缩短, 褶皱的形成与冲断层有关; 冲断层向下交汇于基底—盖层间或甚更深的近水平的区域滑脱面上; 在大多数褶皱冲断带的尾部, 基底卷入了冲断作用。前陆冲断带 (Foreland thrust belt) 或前陆褶皱—冲断带 (Foreland fold-thrust belt) 或前陆褶皱和冲断层带 (Foreland fold and thrust belt) 与冲断带基本同义, 由于冲断带平行于造山带边缘而通常将其描述为前陆冲断带 (Dickinson, 1974), 但更侧重于前陆区的变形。

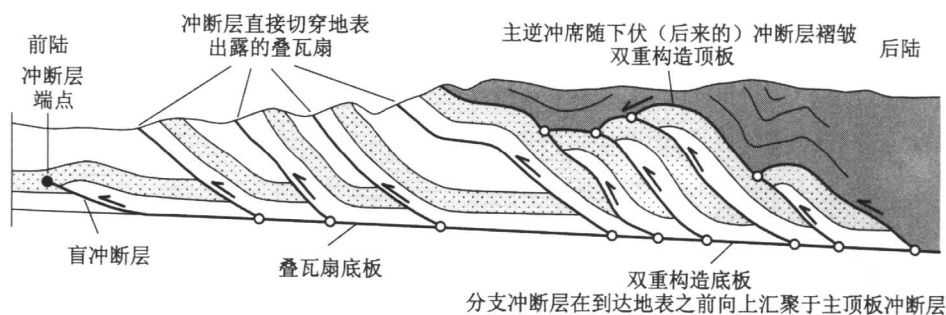


图 1-1 冲断带结构示意图

(四) 冲断构造研究进展

逆冲推覆构造的研究从 19 世纪末期推覆构造的确认 (如瑞士阿尔卑斯格拉乌斯逆冲推覆构造和苏格兰莫因冲断层带), 到 20 世纪 70 年代大规模推覆拆离构造的发现 (如北美阿巴拉契亚, COCORP), 到 20 世纪 80 年代关于岩石圈多层次滑脱拆离构造发育的普遍性的认识 (马杏垣和索书田, 1984; 许志琴, 1986), 至今已有 100 余年的历史。期间产生了许多重要理论和假说, 如形成推覆构造的侧压说 (A. Heim, 1878; M. Bertrand, 1884) 和重力说 (H. Schardt, 1893; 马杏垣和索书田, 1984)、滑脱或拆离构造假说 (O. Ampferer, 1906; B. C. Burchfiel, 1979; 许志琴, 1986; 孙岩等, 1999; COCORP; ECORS)、孔隙液压说 (Hubbert 和 Rubey, 1959)、薄皮构造 (J. Rodgers, 1963) 和岩石圈薄皮构造理论 (Seeber, 1983)、断层相关褶皱理论 (Rich, 1934; Suppe, 1983; Suppe 和 Medwedeff, 1984, 1990; Jamison, 1987; Boyer, 1986; Mitra, 1986, 1990; Medwedeff,

1989; Chester 和 Chester, 1990; Ersler, 1991; Suppe 等, 1992; Fischer 等, 1992; Mosar 和 Suppe, 1992; Wickham, 1995; Epard 和 Groshong, 1995; Hardy 和 Poblet, 1994, 1995; Homza 和 Wallace, 1997; Medwedeff 和 Suppe, 1997; Poblet 和 McClay, 1996; Poblet 等, 1997; Ford 等, 1997; Poblet 等, 1998; Allmendinger, 1998; Wallace 和 Homza, 2004; Poblet 等, 2004; Allmendinger 等, 2004; Shaw 等, 2004)、造山楔状体理论(临界库仑楔假说)(Davis 等, 1983; Dahlen, 1984, 1990; Dahlen 等, 1984; Koons, 1990; Willett 等, 1993; Johnson 和 Beaumont, 1995; Storti 等, 2000; McClay 和 Whitehouse, 2004; Brown, 2004)。同时, 也取得了许多重要研究成果, 简单归纳如下。

(1) 关于逆冲推覆构造的形成。已提出了如下三种基本机制: ①侧向挤压; ②重力滑动和重力扩展以及辅助机制; ③基底相对于盖层的缩短(Price 和 McClay, 1981)。认识到滑脱层和(或)流体超压是冲断构造形成或活动的必要条件; 并建立了褶皱推覆、逆冲推覆和滑覆三种成因模式。

(2) 关于冲断带的变形特征。临界库仑楔假说已经被广泛认为是冲断带发育的主要模型(Dahlen, 1990; Brown, 2004; McClay 和 Whitehouse, 2004)。而断层相关褶皱作用则是前陆地区岩层的主要变形机制, 并建立了多种模型(何登发等, 2002), 因此冲断层系统及其相关褶皱就是前陆褶皱冲断带的主要变形样式, 包括断层相关褶皱的基本类型: 断弯褶皱(Suppe, 1983)、断展褶皱(Suppe 和 Medwedeff, 1990)和断滑(滑脱)褶皱(Jamison, 1987); 冲断层系统(Dahlstrom, 1970; Boyer 和 Elliott, 1982; Woodward 等, 1989), 如双重构造(Mitra, 1986)、被动顶板双重构造(Banks 和 Warburton, 1986)、叠瓦冲断系(Woodward 等, 1989)、三角带或构造楔(Gordy 等, 1977; Jones, 1982, 1996; Price, 1986; Couzens 和 Wiltschko, 1996; Jamison, 1996)以及基底卷入的冲断层(Coward, 1983; Tozer 等, 2002; Butler 等, 2004)。早期, 前陆冲断带的形成常用薄皮构造(Rodgers, 1963)模型来解释, 近年来大量研究表明世界上许多著名造山带(如阿尔卑斯、亚平宁、比利牛斯、巴布亚新几内亚、安第斯、风河)都发育基底卷入的冲断层, 可见厚皮构造与薄皮构造对前陆褶皱冲断带的形成同样重要(Coward, 1983, 1994; Cooper 和 Williams, 1989; Coward 等, 1999; Butler 等, 2004), 特别是对于早期裂谷边缘和靠近造山带核部, 而且早期构造对后期构造有重要的控制作用(如裂谷边缘正断层的反转)。

(3) 冲断层按照其倾角大小可分为低角度与高角度两种, 陆内逆冲断层的倾角有 $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 和 $50^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 两个峰值, 前者对应于水平挤压时摩擦重新活动的最优化方位, 代表了断坡破裂; 后者代表了早期正断层正反转期的重新挤压活动(Sibson, 2004)。按照冲断层发育的大地构造环境可分为三类(Hatcher, 2004): ①前陆褶皱冲断带(以及增生复合体)的冲断层; ②C-型冲断层, 即结晶基底冲断席, 在陆壳或洋壳上沿韧性(塑性)—脆性过渡带发生滑脱; ③F-型冲断层, 即褶皱相关的结晶基底冲断席, 发生在韧性—脆性过渡带之下, 是背形与向形的同一翼塑性剪切形成的。

(4) 根据褶皱冲断带的构造环境和内在特点, 可将其分为以下 6 种类型(何登发和贾承造, 2005): ①传统的薄皮的加拿大落基山式前陆褶皱冲断带; ②美国西部基底卷入的拉勒米式隆起; ③俯冲相关的冲断系统, 发育在安第斯、扎格罗斯和巴布亚新几内亚等地; ④碰撞相关的冲断系统, 见于喜马拉雅山、意大利亚平宁山等地; ⑤复活造山带的前缘, 如中国中西部昆仑山、天山、祁连山的两侧或一侧; ⑥深水重力驱动的褶皱冲断带, 如西非海外或墨西哥湾所见。

(5) 冲断带演化与表面过程之间的动态作用是近年的研究热点 (Beaumont 等, 1992; Meigs 和 Burbank, 1997; Hardy 等, 1998; Beaumont 等, 2000; Burbank 和 Anderson, 2001; McClay 和 Whitehouse, 2004; Mugnier 等, 2004), 这与国内许多学者所提的盆山耦合过程 (刘树根等, 1993, 2000, 2003) 是一致的, 认识到冲断作用、隆升、剥蚀与沉积作用之间的动态反馈对冲断带的地貌形态与演化具有明显的控制和影响。

以上是关于冲断构造的相关概念以及研究简史的简单介绍, 有兴趣的读者可参阅:

McClay K R, Price N J, eds. 1981. Thrust and nappe tectonics. Blackwell Scientific Publications.

朱志澄. 1989. 逆冲推覆构造. 武汉: 中国地质大学出版社.

McClay K R. ed. 1992. Thrust tectonics. Chapman & Hall, London, United Kingdom.

McClay K R, ed. 2004. Thrust tectonics and Hydrocarbon Systems. AAPG Memoir 82.

五、前陆盆地的概念和基本特点

(一) 前陆盆地的定义

在板块学说提出之前, 前陆盆地 (Foreland basin) 被称为边缘深渊 (Marginal deep) (Umbgrove, 1947)、外地槽 (Exogeosyncline) (Kay, 1951)、边缘盆地 (Marginal basin) (Krumbein 和 Sloss, 1963) 或前渊 (Foredeep) (Aubouin, 1965)。板块构造学说诞生后, Price (1973) 首先引用前陆或前渊槽 (Foreland and foredeep trough) 来描述前陆盆地。1974 年, W. R. Dickinson 正式提出前陆盆地这一术语, 用来描述弧背和周缘盆地, 并指出两类前陆盆地的形成均与大陆岩石圈的部分俯冲有关。

Bally 和 Nelson (1980) 对前陆盆地采用了不同的术语, 把前陆盆地称作缝合带周缘盆地 (Perisutural Basin), 并且认为前陆盆地的形成与 A-型俯冲带有关, 即在大陆岩石圈之上发育与巨型缝合带有关的盆地。Jordan (1981) 将前陆盆地定义为前陆逆冲带周缘的狭长沉降槽地, 是世界范围内的造山带的伴生体。Allen 等 (1986) 在《Foreland Basins》一书的导言中指出, “可将前陆盆地简单地定义为位于一个山链前缘和相邻克拉通之间的沉积盆地”, 并认为前陆盆地与“地槽”和造山带发展“指向”的概念 (Aubouin, 1965) 有着密切的联系, 由此造山作用从较深的外部优地槽向邻接前陆较浅的内部冒地槽发展。H. G. Reading (1986) 认为前陆盆地是在褶皱冲断带与被冲断层逆掩的克拉通之间发育的大型沉积盆地。P. A. Allen 和 J. R. Allen (1990) 将前陆盆地定义为与大陆碰撞带密切相关的、长条形的或弓形的、高度不对称的盆地。T. E. Jordan (1991) 认为前陆盆地是由于板块碰撞产生的逆掩推覆体加载于大陆边缘, 并使大陆前缘隆起而形成的一种不对称盆地。1992 年出版的 AAPG Memoir 55 中, 前陆盆地被定义为沉积在与活动造山带相邻的克拉通区的沉积岩序列; 沉积物主要源自造山带并向造山带加厚; 邻近造山带的前陆盆地沉积物通常被卷入沉积期后的褶皱作用和向克拉通的掩冲作用, 导致构造缩短和先前沉积物在盆地内的自源自生沉积现象 (Leckie 和 Smith, 1992)。DeCelles 和 Giles (1996) 将前陆盆地定义为“形成于线状收缩造山带与稳定克拉通之间的长形槽, 主要是对相邻造山带中逆冲席加载所驱使的挠曲沉降的响应”。此外, 国内许多学者也对前陆盆地地下过类似的定义 (潘校华, 1995; 何登发等, 1996; 田作基等, 1996)。

因此, 一般的理解, 前陆盆地是指位于线状收缩造山带与稳定克拉通之间的长条形或弧形不对称盆地 (图 1-2), 其成因是由岩石圈响应于外加地壳载荷 (包括造山带逆冲席载

荷、沉积物和水体载荷、板内应力以及可能的下地壳载荷)所产生的挠曲沉降(区域均衡沉降)(Price 和 Mountjoy, 1971; Price, 1973; Dickinson, 1974, 1976; Beaumont, 1981; Jordan, 1981, 1995; Quinlan 和 Beaumont, 1984; Cloetingh, 1988; Flemings 和 Jordan, 1989; Miall, 1995; DeCelles 和 Giles, 1996)。其他有关前陆盆地的辅助性概念还包括:

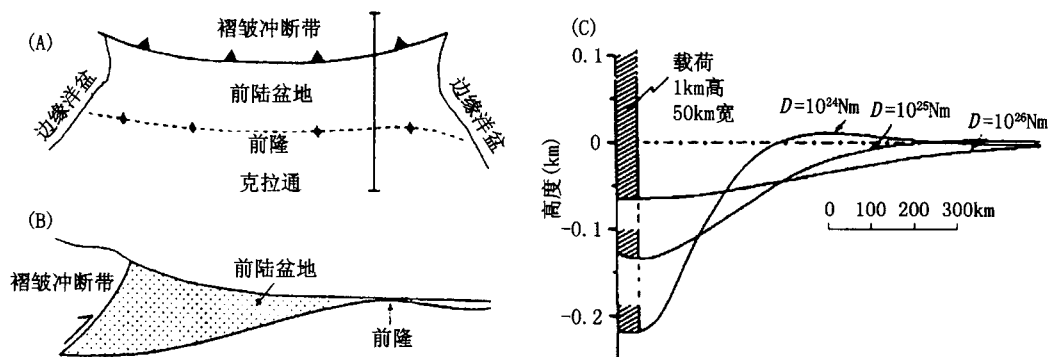


图 1-2 典型前陆盆地示意图

(A) 平面上, 典型的前陆盆地发育于线状收缩造山带与稳定克拉通之间, 向两侧消失于边缘洋盆或残余洋盆。岩石圈在逆冲席载荷下发生区域均衡补偿, 在造山带前缘形成深拗陷, 向克拉通方向发生挠曲隆起形成前隆而与克拉通分开 (DeCelles 和 Giles, 1996); (B) 在横剖面上, 前陆盆地典型地呈楔形, 沉积物厚度向克拉通方向变薄 (DeCelles 和 Giles, 1996); (C) 前陆盆地形成的力学机制示意。弹性岩石圈在高 1km、宽 50km、密度为 2400 kg/m^3 的二维载荷作用下的挠曲变形, 前渊充填相同密度的沉积物, D 为挠曲刚度, 10^{24} Nm 、 10^{25} Nm 和 10^{26} Nm 的挠曲刚度分别大致相当于 38km, 83km 和 178km 的板块厚度 (Beaumont, 1981)

(1) 在平面上, 横向上前陆盆地一侧被冲断带所限制, 另一侧是未变形的克拉通; 纵向上前陆盆地通常向两侧消失于边缘洋盆 (或残余洋盆) (DeCelles 和 Giles, 1996) 或弧后扩张盆地或被其他冲断带所限制。

(2) 在横剖面上, 前陆盆地沉积充填典型地呈楔状, 其最后部分直接与冲断带相邻或部分位于其下 (Jordan, 1995)。

(3) 前陆盆地沉积物主要源于相邻的冲断带, 少部分来源于克拉通一侧 (Dickinson 和 Suczek, 1979; Schwab, 1986; DeCelles 和 Hertel, 1989)。

(4) 挠曲隆起或前隆, 可能把前陆盆地的主要部分与克拉通分开 (Jacobi, 1981; Karner 和 Watts, 1983; Quinlan 和 Beaumont, 1984; Carptom 和 Allen, 1995)。

(二) 前陆盆地的基本特点

国内外许多学者从不同角度都曾对前陆盆地的基本特点进行过总结, 下面列举数例, 从中可对前陆盆地的总体特征获得一般性的认识。

刘树根 (1993) 总结的前陆盆地的特点有: ①前陆盆地的形态有简单型、复杂型或背驮式盆地; ②前陆盆地是一类重要的挠曲盆地, 挠曲程度决定于盆地岩石圈的刚度、构造负荷和沉积负荷的大小; ③已提出的前陆盆地挠曲模型有弹性模型、粘弹性模型和热挠曲模型; ④前陆盆地的形成演化与邻近造山带的发展密切相关; ⑤盆地地壳厚度比山脉地区薄, 比克拉通地区一般要厚, 反映岩石圈的挠曲特性; ⑥前陆盆地的沉降曲线具有缓、陡、缓特征, 早期一般较缓, 晚期较陡, 沉降速率一般比裂谷和克拉通盆地大, 沉降中心和沉积中心不一致, 沉降中心一般向克拉通方向迁移; ⑦前陆盆地一般为陆源碎屑充填的海盆或内陆盆地,