

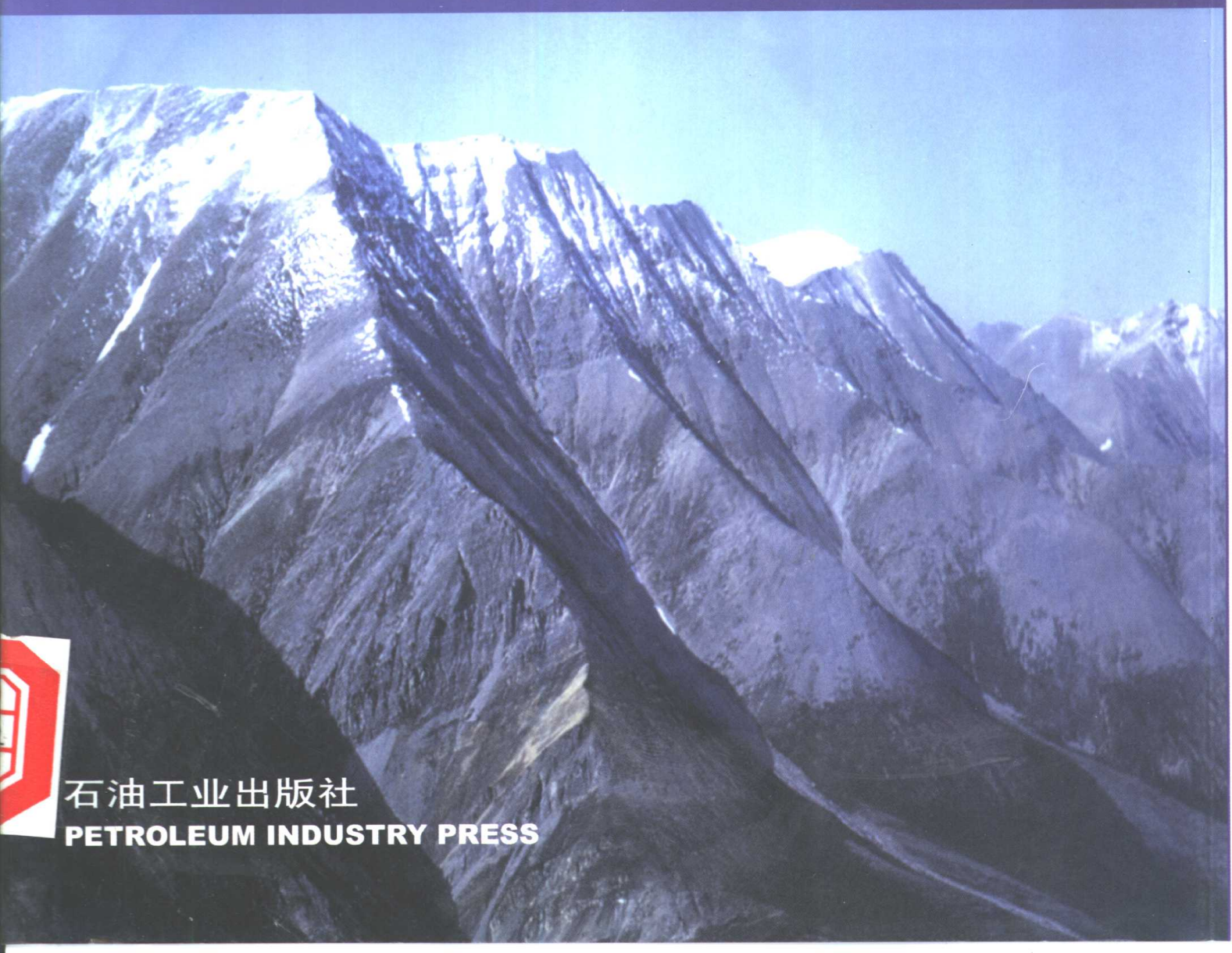
**AAPG**  
**论文集 55**

# **Foreland Basins and Fold Belts**

# **前陆盆地和褶皱带**

**Roger W. Macqueen 和 Dale A. Leckie 编**

**黄忠范 等译 梁绍全 校**



**石油工业出版社**

**PETROLEUM INDUSTRY PRESS**

AAPG 论文集 55

# 前陆盆地和褶皱带

Roger W. Macqueen 和 Dale A. Leckie 编

黄忠范 等译

梁绍全 校

石油工业出版社

版权登记号

图字：01-98-1150 号

## 内 容 提 要

本书是美国石油地质学家协会 1992 年出版的世界含油气盆地丛书之一，书中叙述了 5 个具有典型意义的前陆盆地与褶皱带的地层、构造及油气资源，涉及盆地有西加拿大盆地、扎格罗斯盆地、东委内瑞拉盆地、阿拉斯加北坡盆地、落基山盆地和沃希托盆地。书中将西加拿大前陆盆地选作重点实例，用较大篇幅对其地质背景、地层、构造型式、演化及油气系统等方面作了详细的分析与阐述。

本书论述深入、资料翔实，为石油勘探家们提供了一套有关前陆盆地和褶皱带难得的类比资料，对我国前陆盆地的进一步研究具有一定的理论指导作用。本书可供从事油气地质理论、石油地质勘探研究人员以及大中专院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

前陆盆地和褶皱带 / (加拿大) 麦奎因, (加拿大) 莱基编;  
黄忠范等译. —北京: 石油工业出版社, 2001.7

(AAPG 论文集; 55)

书名原文: Foreland Basins and Fold Belts

ISBN 7-5021-3148-5

I. 前…

II. ①麦…②莱…③黄…

III. ①大陆-构造盆地-地质勘探②大陆-构造盆地-油气勘探  
③褶皱带-地质勘探④褶皱带-油气勘探

IV. P544

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 75051 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 31.5 印张 4 插页 800 千字 印 1—1000

2001 年 7 月北京第 1 版 2001 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3148-5/TE·2396

定价: 65.00 元

## 序 言

提出编写世界含油气盆地丛书的目的是为了帮助勘探家决定在哪些盆地或者盆地的哪些部分进行投资能够获得最大的利润回报。为达到此目的，一个途径就是为勘探家提供广泛的可对比的基础数据和概念，以提高他们通过类比技术进行预测的能力。现已编写的几卷论文集侧重于论述与盆地油气生产有关的各种地质因素，以便有助于对新的勘探区进行地质风险评价。最终的排列顺序、风险评价以及业务决策一般要受诸如经济气候、地理环境和政治稳定性等非地质因素的影响，而且通常因为这些因素而被否定，这已超出本书的讨论范围。

基于这种考虑，美国石油地质学家协会（AAPG）的出版委员会早在 1983 年就决定出版一套论述世界含油气盆地的丛书，这套丛书的每一卷专门论述一种主要类型的盆地。为此目的成立了由丹佛美国地质调查所（U.S.G.S.）Anny B. Coury 领导的特设委员会（由 Kaspar Arbenz, Anny B. Coury, Michael A. Fisher, James A. Helwig, David R. Kingston, H. Douglas Klemme 等组成），负责该套丛书的全面规划，决定最合适的卷数以及对每卷进行总体组织工作；并且进一步决定，每卷（或者重要盆地类型）中要集中较多笔墨详细描述一种“类型”或者一个“模式”的勘探成熟盆地，此外安排一些概括性文章对相同类型的其他盆地或地区进行讨论。

在对新的风险勘探区进行含油气远景评价中，将新探区、新盆地或未钻探的勘探远景区与具有类似构造地层背景的相应产油气的盆地进行研究和比较，总是有着重要的作用。如果新的勘探区与类比盆地属于同一类型，正确地运用类比有助于在新探区对未知地质要素，如储层厚度和分布、圈闭大小和种类以及发育历史等进行合理的评价。就统计学而言，这种比较提高了评价的可信度，同时也可同为同类地区的评价和研究提供方案。

为了在盆地评价时准确无误地运用类比方法，地质家需要获得具广泛的并与最新地质概念紧密结合的世界范围的基础资料库，该资料库必须是应用更新的地质概念综合而成。但是，这些概念和资料库的建立费时且耗资巨大，大部分较小的组织机构难以负担。随着近几十年许多较小的石油公司和独立经营者进入国际勘探区，对容易获得的类比资料的需求量越来越大。

负责含油气盆地丛书的编委会花费了很长时间与精力来统一该套丛书的盆地分类、类比选择以及卷数的确定等问题。经过讨论一些新近发表的含油气盆地和地区的分类方案（如 Bally, 1975; Bally 和 Snelson, 1980; Kingston 等, 1983a, 1983b; Klemme, 1975, 1980, 1986），对各卷主题和主要类比盆地达成一致意见。经特设委员会建议和协会出版委员会全体委员会投票通过，决定将出版 5 卷丛书，每卷对应的分类是：

离散或被动大陆边缘盆地

内克拉通盆地

活动大陆边缘盆地

前陆盆地和褶皱带

内裂谷盆地

每卷选一名或几名编辑负责为该卷征求稿件。给每位编辑都提供了一份有关内容和所附

ABD 05/05

图表建议的一览表，以保证这套丛书的一致性，以便盆地描述更易于比较。我们真诚地希望这套丛书能够受到大家的普遍欢迎，成为具实用价值的类比文集，在未来许多年中对勘探家有所帮助。

### 参 考 文 献

- Bally, A.W., 1975, A geodynamic scenario for hydrocarbon occurrences: Proceedings of the 9th World Petroleum Congress, Tokyo, v.2: Essex, England, Applied Science Publication, p.33 - 34.
- Bally, A.W., and S.Snelson, 1980, Realms of subsidence, *in* D.A.Miall, ed., Facts and principles of world petroleum occurrences: Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 6, p.9 - 94.
- Kingston, D.R., C.P.Dishroon, and P.A.Williams, 1983a, Global basin classification system: AAPG Bulletin, v.67, p.2175 - 2193.
- Kingston, D.R., C.P.Dishroon, and P.A.Williams, 1983b, Hydrocarbon plays and global basin classification: AAPG Bulletin, v.67, p.2194 - 2198.
- Klemme, H.D., 1975, Giant oil fields related to their geologic setting—a possible guide to exploration: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v.23, p.30 - 66.
- Klemme, H.D., 1980, Petroleum basins—classifications and characteristics: Journal of Petroleum Geology, v.3, p.187 - 207.
- Klemme, H.D., 1986, Field size distribution related to basin characteristics, *in* D.D.Rice, ed., Oil and gas assessment—methods and applications: AAPG Studies in Geology 21, p.85 - 89.

# 目 录

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| 引言                                               | (1)   |
| 第一章 西加拿大前陆盆地区域背景、演化和沉积旋回                         | (10)  |
| 第二章 前陆盆地硅质碎屑岩层序发育实例：西加拿大前陆盆地                     | (52)  |
| 第三章 西加拿大前陆盆地区域地质构造和结构                            | (89)  |
| 第四章 西加拿大前陆盆地的地层与科迪勒拉区域构造活动的关系：地球动力学模型的启迪         | (119) |
| 第五章 西加拿大沉积盆地的早期地面和地下地质调查                         | (139) |
| 第六章 西加拿大前陆盆地常规油气储量                               | (176) |
| 第七章 西加拿大前陆盆地油气远景区带                               | (203) |
| 第八章 西加拿大前陆盆地中砂岩的岩性和成岩作用                          | (241) |
| 第九章 西加拿大科迪勒拉前陆盆地的热演化史回顾                          | (278) |
| 第十章 西加拿大前陆盆地含油气系统                                | (301) |
| 第十一章 扎格罗斯盆地中的石油：叠置在富含油气的古生代—中生代被动边缘陆棚外缘的晚第三纪前陆盆地 | (334) |
| 第十二章 东委内瑞拉前陆盆地石油地质                               | (370) |
| 第十三章 阿拉斯加北坡前陆盆地                                  | (394) |
| 第十四章 落基山前陆构造和地层演化及其油气分布                          | (432) |
| 第十五章 沃希托前陆盆地区域古地理及油气分布                           | (465) |
| 第十六章 总结和结论                                       | (485) |

# 引 言

Roger W. Macqueen Dale A. Leckie

## 一、基本原理和总体评论

在石油及石油工业发展进入全盛的历史时期, Yergin (1991) 认为油气是人类安全、繁荣和现代文明物质保障。因此, 石油的发展有 3 个前提: (1) 资本主义和现代商业的崛起和发展; (2) 作为商品, 石油与各国战略、全球政治以及权力之间的关系; (3) 西方社会演变为“石油社会”, 即“石油人”的群体。Yergin (1991, 第 14 页) 这样评述西方社会: “今天, 我们对石油是如此依赖, 石油与我们日常活动有着千丝万缕的联系, 我们需不停地领悟它日益扩大的重要性。石油决定了人类在何处如何生活, 如何去工作, 如何旅行——以至在何处寻找我们的合作伙伴。石油是边缘地区的生命血液。肥料是世界农业发展的基础, 而石油(天然气) 是肥料生产的必要原料; 石油使粮食完全不能自足世界各大城市运输食品成为可能。石油是塑料和化学工业的原料, 塑料和化学制品是构筑现代文明社会的砖和砂浆。一旦世界上的油井突然枯竭, 整个文明世界将马上崩溃。”

基于石油对现代社会所有领域的重要性, 美国石油地质学家协会决定出版一套论文集, 总结各类沉积盆地的最新研究成果, 因而对盆地的成因及其的油气资源提出新的观点。这套文集采用类比的方法描述盆地, 目的是回答有关这类盆地性质, 盆地之间差别, 盆地油气的组分及盆地演化史, 以及未来油气前景如何等问题。本书是这套丛书中的第五卷, 主要论述前陆盆地和褶皱带。前几卷分别为活动大陆边缘盆地 (Biddle, 1991); 内克拉通盆地 (Leighton 等, 1990); 湖相盆地勘探 (Katz, 1990) 和离散或被动大陆边缘 (Edward 和 Santogrossi, 1989)。

分布在前陆盆地和褶皱带沉积中的油气具有极其重要的经济价值。估计本书中所论述的 6 个盆地内拥有  $812 \times 10^8 \text{ m}^3$  ( $5110 \times 10^8 \text{ bbl}$ ①) 以上的石油、 $2.38 \times 10^8 \text{ m}^3$  ( $15 \times 10^8 \text{ bbl}$ ) 凝析油、 $23.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$  ( $833 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ②) 天然气、 $4810 \times 10^8 \text{ m}^3$  ( $17 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ) 煤层甲烷气, 以及  $4160 \times 10^8 \text{ m}^3$  ( $2.9 \times 10^{12} \text{ bbl}$ ) 重质原油。

## 二、前陆盆地和褶皱带: 定义和成因

Price 和 Mountjoy (1971) 首次将术语“前陆褶皱和逆冲带”应用于加拿大落基山带, 在本书中该地区属于本书定义的前陆褶皱和逆冲带。后来, Dickison (1974) 将术语“前陆盆地”正式引入描述弧后和周缘盆地, 其中的充填物沉积于陆壳或者较早的裂谷边缘沉积棱; 他也探讨前陆盆地及其板块构造背景。以后分类 (即 Bally 和 Snelson, 1980; St. John

① 1bbl =  $0.159 \text{ m}^3$ , 下同。

② 1ft<sup>3</sup> =  $0.0283 \text{ m}^3$ , 下同。

等, 1984) 根据目前及先前具体构造背景, 将前陆盆地及其有关的褶皱带进一步分为: (1) 大陆多旋回盆地, 包括克拉通边缘复合盆地和增生边缘盆地; (2) 前渊及下伏的地台; (3) 弧后盆地。板块构造命名以前, 前陆盆地属 Marshal Kay (1951) 的各种外缘地槽。Price (1973) 以加拿大西部的前陆盆地和褶皱带为例, 定性的认为 (提出) 前陆盆地的成因缘于区域均衡沉降, 这类均衡沉降是所发育的褶皱—逆冲带引起的上地壳载荷的产物。这种形式的沉降产生了前渊并成为沉积物聚集地。Beaumont (1981) 和其他学者使这一理论得以发展并更趋完善, 本书将逐一介绍他们的论述。

在本书中, 我们将看到所有的前陆盆地和褶皱带在某种程度上都与它们所处的板块构造背景, 尤其与其下伏的更早期的沉积盆地——通常是地台的或大陆边缘有关。

本书的议题中, 前陆盆地是被看作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都被卷入沉积期后的褶皱并向克拉通掩冲, 导致构造缩短和先前沉积物在盆地内自源自生沉积 (Cannibalization) 现象 (Leckie 和 Smith, 1992)。

### 三、本书宗旨

本书主要详细介绍了 6 个前陆盆地与褶皱带 (图 1) 及其油气资源。其中典型为加拿大西部的前陆盆地和褶皱带, 因而作详细介绍。之所以选择加拿大西部前陆盆地选作典型实例, 是由于该盆地成熟度适当, 具有前陆盆地和褶皱带的普遍特征, 尤其是具有大量公开的地下资料 (及其出版物)。公开可获得的数据库与众不同之处在于一百余年的油气勘探和政府的开明政策, 并且已获准进行系统汇编, 其中多数相关勘探资料 (地震反射剖面例外) 公开发表。

#### 1. 本书概要和组织方式

本书分 3 部分。第一部分描述典型实例加拿大西部前陆盆地和褶皱带。第二部分是其余 5 个前陆盆地 (图 1) 的综述: 其中北美有 3 个盆地 [落基山前陆盆地、沃希托 (Ouachita) 前陆盆地、阿拉斯加北坡前陆盆地和褶皱带]; 波斯湾地区的扎格罗斯 (Zagros) 前陆盆地; 东委内瑞拉前陆盆地。第三部分为前陆盆地和褶皱带的回顾和综述, 包括所论述盆地的对比, 探讨疑难问题, 未来油气的潜力, 以及评述与前陆盆地和褶皱带不同油气特征相对应的各种因素。

#### 2. 西加拿大前陆盆地和褶皱带

西加拿大前陆盆地和褶皱带的地质背景、地层、演化及其油气资源共分五章描述。第一章由 Dale Leckie 和 David Smith 编写, 为盆地的构造背景及地层概况, 盆地是发育在北美克拉通稳定陆内地台与落基山褶皱逆冲带之间的一长条状不对称地堑。该前陆盆地的最长 (包括美国的部分) 处自北冰洋至墨西哥湾长度超过 6000km, 宽度自安大略至不列颠哥伦比亚达 1600km。本书所论及的西加拿大前陆盆地北起加拿大的西北地域南部 ( $60^{\circ}\text{N}$ ), 南至加拿大与美国的政治边界线 ( $49^{\circ}\text{N}$ ), 在东至马尼托巴处, 后山系的影响逐渐消失。沿盆地西部边缘, 自中侏罗世至第三纪中期, 沉积地层厚度超过 6km。与大多数前陆盆地相似, 西加拿大前陆盆地与其下伏的寒武纪至中侏罗世的克拉通地台盆地有密切关系。这前陆盆地的开始通常以其西部隆起的科迪勒拉造山带碎屑的首次输入为标志, 然而在第四章中, Stockmal 等指出, 前陆盆地的真正开始时间为可认识的由构造所导致的沉降首次对地层产生影响的沉

积柱处；但这一界面的确定极其困难。Leckie 和 Smith 概要概述了西加拿大前陆盆地的地层，辨认出 5 个沉积旋回，相互之间以主要的不整合面或区域岩性变化面为界，每个韵律层由一个或多个碎屑楔组成。碎屑大多来自西部的科迪勒拉造山带。这些旋回是该区山脉构造演化与全球海平面变化之间复杂作用的结果。这一周期性结构变化较小，在后面论述盆地发育和含油气区带时还会出现。

第二章中，Macomb Jervey 开发了计算机模拟技术，目的是阐明构造和海平面变化之间的关系，尤其是它们对构成西加拿大前陆盆地硅质碎屑楔几何外形和分布的作用。构造沉降、沉积物供给以及海平面变化间的相互作用是时、空领域的四维问题，因此可以应用模拟方法更好理解这些变量是如何相互影响的。该模拟工作有很大启发性，模拟表明，海平面相对变化的速度及大小对前陆盆地充填的硅质碎屑层序界面的性质、内部岩相的分布、几何形态等起重要作用。虽然由于缺乏对岩石上时间面精确测定，以及有些例子中特定地层层序的定义尚不完全一致，目前这一方法只能基本定性，只具有理论意义，但很显然，层序地层学的预测能力必将经源岩及储集层分布有更明确的理解，进而改进前陆盆地内油气勘探的方法。Servey 随后应用西加拿大前陆盆地中的两个实例说明该模拟技术的总体可应用性。

第三章中，Peter Fermor 和 Ian Moffat 阐述了西加拿大前陆盆地和褶皱带的大地构造及构造，强调西侧山脉的发育及其对前陆盆地演化的可能影响。他们概述落基山褶皱逆冲带的构造，该带包括前陆盆地的中生界碎屑楔及其下伏的中—晚古生代冒地槽—地台型沉积层。褶皱和逆冲带延伸方向大多表现为典型薄皮构造样式。逆冲断裂作用以及伴生的褶皱作用是前陆带主要的形变机制。逆冲断裂样式及其与褶皱作用的关系受若干因素的影响，包括形变沉积层系的几何形状和组成、构造缩短量、底部滑脱的横向延伸等。例如，位于艾伯塔省卡尔加里以西的南加拿大褶皱逆冲带的构造样式与位于不列颠哥伦比亚西北部的中、北部褶皱逆冲带的构造样式有较大的差异。Fermor 和 Moffat 综述山麓带的油气分布状况，这是很主要的天然气资源。但主要的储集层并非前陆盆地的沉积，而是泥盆、密西西比系和三叠系碳酸盐岩，所有岩石原属于前陆盆地沉积下伏的冒地槽—地台型层系，但在山系构造作用和前陆盆地发育期间发生形变。储层中发现的油气可能是最大埋深时期生成的，大致与发生在晚白垩世至古新世时的最大逆冲断裂活动相当。

前陆盆地碎屑楔与其西侧正活动的加拿大科迪勒拉山脉中增生地体之间的可能关系在第四章中由 Glen Stockmal, Douglas Cant 和 Sebastian Bell 作了探讨。地球动力学模型定量说明了克拉通边缘上由于掩冲断片引起的负载产生与之相邻的前陆盆地的概念（如 Beaumont, 1981；Stockmal 和 Beaumont, 1987）。这种关系具有两个重要方面：第一，负载使岩石圈挠曲下弯，形成接纳沉积物的前渊；第二，叠置的逆掩带形成地貌的剥蚀作用，为充填前渊提供大量碎屑。因此，岩石圈将前陆盆地地层与构造载荷过程有机地联系在一起，前陆盆地的成因和演化研究必须立足于岩石圈范围才能有更完整的理解。由此产生岩石圈的力学特征和均一性问题。有关前陆盆地沉降的大地构造机制包括逆掩体的定位，外来地体的合并，岩石圈板块边界动力变化。虽然地球动力学模拟具定量特征，但由于为模型提供的地质约束具有极大的不确定性，因此，目前尚只能对所有因素的相对影响作出定性的结论。理论上，已知的前陆盆地的地层可用于推测构造负载的大小及其位置。Stockmal 等认为，Leckie 和 Smith 在第一章所描述的碎屑楔至少与该山脉的重要事件有关，尤其是与地体和超地体的增生有关。要考虑的关键问题是离地体连接部位多远这类作用会发生，以及前陆盆地碎屑楔的发育与已知地体增生史在时间上的关联程度。

第五章中, Jack Porter 回顾了西加拿大盆地的发现和勘探历程, 特别给出前陆盆地中可能的或确切地区的资料。自 18 世纪晚期至 19 世纪中期盆地发现时期, 欧洲人已注意到煤、沥青砂岩和盐泉的分布。大约在 19 世纪中期开始一些详细的地质调查, 这可追溯到在 1885 年加拿大太平洋铁路完工以后快速增加的永久定居阶段。诸事例都说明钻第一口油井, 尤其是钻探目前称之为阿萨巴斯卡 (Athabasca) 油砂矿的先驱是加拿大地质调查所的科学们。早期工作是基于沥青砂是变质的常规石油这一正确的认识, 因此工作目的是要在沥青砂以下发现当时认为大量未变质的常规油藏。虽然我们现在知道情况并非如此, 但这类工作预示着后来对含油砂岩的研究, 它开启了地下勘探的进程, 并最终导致本世纪初油气的发现, 成为加拿大西部石油工业发展的基础。

第六章中, Porter 回顾了 1989 年的油气资源勘探成果。虽然重点是常规石油、天然气及其地层和地质分布, 但顺便说明, Porter 认为该前陆盆地中巨型油砂和沥青储量可达  $1950 \times 10^8 \text{m}^3$ 。而最初估计的常规原油只有  $10 \times 10^8 \text{m}^3$ , 事实上, 油砂和沥青出露面积只占前陆盆地总面积的 6%, 且阿萨巴斯卡—沃巴斯卡 (Wabasca) 储量是全世界已知最大的油气自然分布区。在以后的章节中将探讨油砂和沥青的成因问题。在认真应用该区对公众开放资料的基础上, Porter 已经阐明大多数油气发现分布在 12 个地层层段, 这些层段与第一章中 Leckie 和 Smith 认为的沉积旋回相对应。Porter 所取得的研究成果表明, 前陆盆地所含的原油仅占西加拿大常规油的 29% 至 1985 年已产出其中的 64%, 其余的 71% 赋存于其下伏的冒地槽—地台楔状体中, 至 1985 年, 已产出其中的 73%。更重要的事实是, 彭比纳 (Pembina) 巨型油田 (储量的 97%) 占了前陆盆地常规油储量的 34%, 主要分布在上白垩统 Cardium 组。盆地中极有利的油源岩、圈闭以及盖层之间的关系尚存争议。至 1985 年, 前陆盆地天然气储量占已知储量的 50%, 已经产出了其中的 36%; 冒地槽—地台楔体含有其余的 50%, 到 1985 年已产出了其中的 41%。1985 至 1989 年间没有明显新增储量。至 1969 年, 探明石油储量的 97% 已被发现; 至 1985 年, 探明石油和凝析油的 61% 已经产出, 以及上述数据, 经证明西加拿大盆地已为油气勘探的成熟盆地。就常规储量而言, 前陆盆地明显是倾向于生气的盆地。虽然考虑到曾经有过巨大的油砂和沥青储量, 说明此类盆地并不总是倾向于生气, 也曾经生成过大量石油。将西加拿大前陆盆地和委内瑞拉前陆盆地相比, Porter 认为, 后者的常规石油储量是前者的 3 倍以上。部分原因在于委内瑞拉盆地是以正断层圈闭为主, 而西加拿大盆地则缺少这一特征。

第七章中, Jim Barclay 和 Dave Smith 探讨前陆盆地中控油气的远景区带地质定义及其分布。油气远景区带是具备同一地质特征和成因的一组油田、油气藏和 (或) 远景圈闭 (Podruski 等, 1988)。属于某一特定的远景区带的各油田通常都有共同的圈闭类型、地层层段 (位置)、沉积和构造背景、成岩历史、水动力区、盖层和源岩。Barclay 和 Smith 认为 Leckie 和 Smith 在第一章中叙述的 5 个沉积旋回或组合中的每一个都存在近源、中等和远源的沉积组合。这些韵律层或者组合的结构单元都是向上变粗的前积层序, 储集层是与滨线有关的砂岩或河流相砂岩, 以及通常分布在各韵律层上或顶部附近的砾石。其余研究者也认为, 控制这些前积韵律层性质和分布的因素是构造活动、海平面变化、气候和沉积物的供给。就油气藏规模而言, 上述诸因素通常控制了圈闭类型的变化。Barclay 和 Smith 为每一个沉积旋回或组合大致归纳出典型的圈闭和储量数字。这一方法与第六章中 Porter 所用的地层层段划分析有关, 但更具广泛性。Barclay 和 Smith 认为组合二, 即下白垩统 Mannville 组合, 是 5 个组合中分布范围最广的碎屑岩楔, 它含有 32% 的常规油和 53% 的可销售天然气。

这层段中大致已发现 1600 个天然气藏和 1200 个油藏，它也因海平面变化、多期构造活动的相互作用形成复杂地层，河流相砂岩常为储集层而著称，但是，科罗拉多组，即第三组合中发育彭比纳—加拿大前陆盆地中唯一的巨型油田（Carmalt 和 St. John, 1986；其原始储量在世界范围的 509 个油田中名列第 133）。Barclay 和 Smith 也认为其下伏冒地槽—地台型楔状体层系的区域圈闭和油气充填基本依赖于前陆盆地的发育，前陆盆地的演化控制了冒地槽—地台层序的埋藏、有机质成熟、油气的生成以及运移，该层序包括由于明显向西倾斜作用，使上倾盆地几何形状加大部分。

第八章中，Dan Potocki 和 Ian Hutcheon 对西加拿大前陆盆地内的砂岩成岩作用和岩性作了描述。正如 Barclay 和 Smith 在第七章以及其他学者认为，典型前陆盆地的储集层岩相是与滨线有关的砂岩或河流相砂岩，或砾岩。前陆盆地储层岩相是典型的岩屑砂屑岩，富含岩屑和石英，但长石成分很少。在这种碎屑楔状体中，存在不同规模的变质、火成和火山岩屑，以及来自克拉通的少量石英沉积物。由于大多数砂岩的成岩类型是由这些岩石骨架矿物成分决定的，因此依据主要成岩变化通常就可以预测储层的质量。这类基质包括高岭土和早期的碳酸盐胶结物（由海相岩石和雨水混合作用形成的），以及包括蒙脱石、伊利石和在深水环境经岩石和水相互作用而产生的绿泥石在内的一系列粘土矿物。这些深埋引起的成岩组合的后期变化包括后期的地貌驱动大气水对盆地砂岩的冲洗作用，大气水进入拉腊米造山运动所形成的第三纪隆起碎屑岩楔砂岩中。在一些储层岩相中，也存在淡水与来自下伏冒地槽—地台楔状体中盐水（Na—Ca—Cl）相互作用的迹象。这一环境似乎控制了碳酸盐胶结物的沉淀或溶解。在此隆起期，大气水的进入以及高浓度盐水与大气水溶和的程度是使前陆盆地背景的成岩作用有别于其他盆地，其内的隆起起不到重要作用。

第九章中，Kirk Osadetz, Walter Jones, Jacek Majorowicz, David Pearson 和 Laverne Stasiuk 等阐述西加拿大前陆盆地的热演化过程进行。他们认为，虽然可以用多种指示物研究前陆盆地热演化，但只有存在足够丰富的煤化资料才能确定古地热场。西加拿大前陆盆地煤化类型是根据与现今相似的地温梯度推算得出。现在的地温梯度向扰动带减小，认为这是隆升地貌区水动力补给所导致的对流热传导的结果。这种作用在中侏罗世就开始对前陆盆地的沉积起类似的控制作用，无论在哪里地貌起伏都存在。在扰动带，煤化程度的变化反映出变形前（正常埋深）的煤化作用。在艾伯塔最南部和不列颠—哥伦比亚的变动带的南部，存在异常煤化类型。对现存和潜在烃源岩相作深入成熟类型研究方面尚存在较大的余地，尤其是应用其他的熟化指示物。

第十章中，Steve Creaney 和 Jim Allan 阐述了前陆盆地的含油气系统。在综合有效的地质和地球化学数据的基础上，他们得出盆地范围内烃源岩的生油、油气运移和圈闭的过程。其成果说明仅用油气系统观点考虑前陆盆地是行不通的。其下伏的冒地槽—地台型楔状体是前陆盆地石油地质的基础。因此，油气系统研究必须立足于西加拿大沉积盆地范围内，而前陆盆地只是该盆地的上面部分。在这前陆盆地中存在两个独立的含油气层系。较新的是上白垩统 Viking—Belly River 层段，令人信服的地球化学证据表明所生成的原油全部来科罗拉多页岩。这些石油实际尚未蚀变，与前陆盆地深层的原油形成强烈对比。而下伏的 Nikanassin—Mannville 层段所含石油来自较老的各类烃源岩，这些烃源岩位于易于大规模上倾的有利位置，在某些情况下，有利于上部地层的运移。油砂和沥青巨大储量的源岩问题仍未解决，但有机地球化学证据表明这些源岩来自密西西比或更新的生油岩相：中、上泥盆统石油和生油岩相具有独特的组分，而在油砂和沥青中没有发现这种组分。

### 3. 前陆盆地的其他实例

#### 1) 波斯湾的扎格罗斯前陆盆地

Ziad Beydoun, M.W. Hughes Clarke 和 Robert Stoneley 在第十一章中论述波斯湾的扎格罗斯前陆盆地以及盆地内的超巨型油田。该前陆盆地的油气资源在全球占重要地位, 占阿拉伯陆棚东北部石油储量的四分之一, 后者分别占全世界可采石油和天然气总量的 58% 和 25%, 这些储量使全球所有其他前陆盆地 (包括本书内的盆地) 所含储量相形见绌。晚始新世时期, 阿拉伯板块的洋壳开始向西北俯冲于欧亚边缘之下, 这时产生了扎格罗斯前陆盆地和扎格罗斯山脉。扎格罗斯前陆盆地发育在扎格罗斯缝合线西南的阿拉伯陆架 (离散型或被动大陆边缘背景) 上。根据 Beydoun 等所提供的地球化学和地质证据, 扎格罗斯盆地内所有油气都来自其下伏的侏罗纪至中白垩世时期的被动边缘沉积, 这些沉积都早于扎格罗斯造山运动。已知有 12 层生油岩相, 其地质年代自晚元古代至第三纪。扎格罗斯造山运动伴生的晚第三纪挤压构造活动产生垂向运移通道, 为油气从受中生界圈闭裂缝向上运移至新形成的第三系圈闭。这些第三系圈闭是联通性好, 裂缝发育, 高幅度背斜。其上 (和相当有效的) 盖层由广泛分布的中新统蒸发岩组成。在背斜破裂处, 油气溢至地表。Beydoun 等推测, 散失的油气相当于圈闭捕获的油气。扎格罗斯前陆盆地的上覆沉积加快了其下伏被动边缘生油岩的成熟, 并加快了这些地层中的油气生成。扎格罗斯前陆盆地中的储层主要是大陆碰撞前形成的碳酸盐岩, 在碰撞期发生形变。因此, 以碳酸盐岩为主的扎格罗斯前陆盆地与本书其他盆地的区别就在于盆地充填不是硅质碎屑。扎格罗斯前陆盆地的巨型圈闭是背斜, 长度可达 190km (118mile<sup>①</sup>), 幅度可达 6~10km (3.7~6.2mile), 该大型构造与盆地中富生油岩相、有利的生油岩成熟度与构造演化史的适当配置、有效的蒸发岩盖层等结合起来, 就可以说明该前陆盆地令人难于置信的油气富集程度。这些储集层水平方向广阔延伸也是这一部位油气富集的关键因素。由于前陆盆地期前层系在生油方面的重要性, Beydoun, Clarke 和 Stoneley 在本书中将阿拉伯陆棚的全部演化历史作为讨论扎格罗斯前陆盆地的前提。

#### 2) 东委内瑞拉前陆盆地

第十二章中, Robert Erlich 和 Steve Barrett 综述了东委内瑞拉前陆盆地 (实际为两个盆地)。与在第十五章中 Meckel, Smith 和 Wells 等所探讨的沃希托前陆盆地相似, 该盆地是一个复合盆地, 是由乌里卡 (Urica) 拱曲分隔的瓜里科 (Guarico) 和马图林 (Maturin) 两个次级盆地组成。委内瑞拉盆地发育的时代有差异, 盆地西部最初于早、中始新世开始形成, 而盆地东部和特立尼达 (Trinidad) 地区则于晚渐新世和中新世中期才开始形成。板块边界作用的型式和时间是控制该前陆盆地充填的关键, 形变作用延至现今。东委内瑞拉盆地的大部分油气都集中在奥里诺科 (Orinoco) 沥青带, 它与西加拿大前陆盆地中的油砂、重油和沥青形成世界上两个重要的沥青砂矿。主要的常规油藏分布在渐新统砂岩内, 原油大多产自正断层和逆断层圈闭。少量原油产自地层、扭断层圈闭以及逆掩断裂活动形成的背斜圈闭。这一构造型式是在前陆盆地的沉积中心向东、向南迁移时期发育的。圈闭所捕集的常规原油大多源自早先存在陆棚层系内的下伏白垩系, 其运移距离达 150~325km (93~202mile)。

#### 3) 阿拉斯加的北坡前陆盆地

第十三章中, Ken Bird 和 C. Molenaar 所描述的北坡 (North Slope) 前陆盆地的充填物由底部硅质碎屑、盆地斜坡、浅海和非海相沉积物组成。该盆地发育于中侏罗世至晚第三

① 1mile = 1.609km, 下同。

纪。盆地北部为裂谷型，其南部边缘为挤压型，Bird 和 Molenaar 认为这种结构在前陆盆地中是唯一的。北坡地区大致有 3 个含油气系统，只有上部的两个分布在前陆盆地沉积内。最具经济价值的含油气系统分布在前陆盆地之下，该含油气系统中包括北美最大的常规油气田，普鲁德霍湾（Prudhoe Bay）油田。该地区的 12 个远景区带中，7 个属于北坡前陆盆地。前陆盆地的储层是深海至非海相不同沉积环境的砂岩。发育在前陆盆地沉积中的 7 个远景区带包括断背斜构造带、三角洲和浊积岩地层圈闭以及构造—地层圈闭。

#### 4) 美国落基山前陆盆地

第十四章，Robbie Gries, John Dolson 和 Robert Reynolds 对美国落基山前陆盆地（实际是一系列小盆地群）的构造、地层演化以及油气分布进行论述。这些盆地是太平洋板块与北美板块碰撞的产物。这种复合特征使美国落基山前陆盆地背景不同于西加拿大前陆盆地，早第三纪时期，落基山前陆盆地内曾发生数幕隆升活动，基岩卷入挤压块体的垂直运动把该区分隔成无数个小型次盆和高地。这期活动被认为是平伏的板块俯冲所引起的，区域作用在这些盆地的形变中起主导作用。在加拿大没有发生这类基底卷入形式。这可能是由于西加拿大前陆盆地背景不存在相应的平伏板块俯冲作用。该区未来的油气富集带包括广泛分布的始新统一渐新统火山盖层以下的火山岩油气构造。该油气带是这一部位独有的。

#### 5) 沃希托前陆盆地

第十五章中，Lawrence Meckel, David Smith 和 Leon Well 阐述了沃希托前陆盆地，该盆地与本书论述的其他前陆盆地存在很大差异，因为大部分前陆盆地被较新的中生界碎屑沉积所覆盖，为本书中时代最早的前陆盆地，发育期是宾夕法尼亚至二叠纪。沃希托前陆盆地由现今 7 个构造盆地组成，大多数位于较新地层之下。这些构造盆地在晚古生代是一个广泛分布的前陆盆地，但现在已被一系列的背斜和（或）隆起所分隔。很明显该盆地是早宾夕法尼亚世和二叠纪时期非洲—南美板块与北美板块斜向碰撞的产物。盆地内分布有冲积扇、海岸平原沉积物至深水浊积岩。由于盆地大部分被覆盖，所以至今生油岩问题尚未解决。油气主要分布在常规的构造圈闭和非常规的“深盆圈闭”。

## 四、结 语

本书所探讨的前陆盆地包括几个世界上最大的油气生产盆地或与之有关。要理解和评价这些盆地的目前油气资源以及将来的潜在储量，都必须对所有盆地所处背景及其多种控制因素进行比较和对照。要明确哪些是关键因素，哪些是次要或不主要的？换句话说，要明确为何有些前陆盆地的油气极其富集，而另外的盆地则含油很少？这些重要问题构成本书基本理论的基础。另外，在不同规模还存在其他较为普遍的问题，如 20 世纪末期全球石油生产和消费问题。

根据 Yergin (1991) 引用的资料，在 1985 年至 1990 年间，非社会主义国家的常规油气储量由  $978 \times 10^8 \text{ m}^3$  增至  $1460 \times 10^8 \text{ m}^3$ （即  $6150 \times 10^8 \sim 9170 \times 10^8 \text{ bbl}$ ），几乎所有增加的储量都集中在波斯湾和委内瑞拉 5 个主要石油生产国，至 1990 年，波斯湾的石油储量已经占非社会主义国家总储量的 70%。

使石油平衡陷入复杂的因素是燃烧矿物燃料已导致人所共知的“温室效应”——即由于大气层上部的二氧化碳和甲烷所导致的全球气温上升现象。这种因素必定会导致全社会改变对矿物燃料的消耗。但至少在近几十年很难看见这种改变。石油储量集中在远离石油高消费

国的地区以及中东地区持久的政治不稳定意味着全球性石油勘探将继续，事实上，实现石油自足对任何有可能国家都是明智的策略。因此，正如 Yergin (1991) 充满信心的预言那样，“石油人”显而易见在 20 世纪最后年代将继续为寻找石油以及这种寻找带来财富和权力而努力。同样也很清楚，即前陆盆地将是继续勘探的对象，在不远的将来，它将为提供新增石油储量作出贡献。

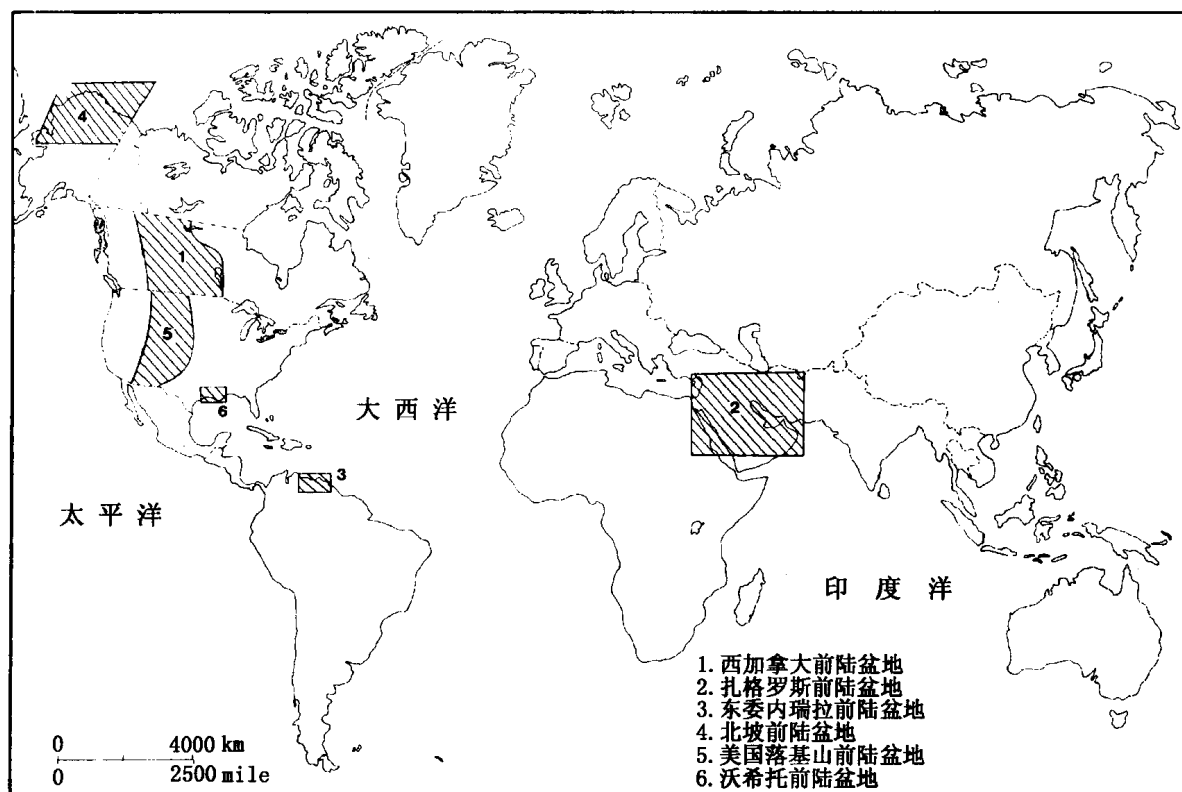


图 1 本书涉及的前陆盆地位置

### 参考文献

- Bally, A. W., and S. Snelson, 1980, Realms of subsidence, in A. D. Miall, ed., Facts and principles of world petroleum occurrence: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 6, p. 9–75.
- Barclay, J. E., and D. G. Smith, 1992, Western Canada foreland basin oil and gas plays, this volume.
- Beaumont, C., 1981, Foreland basins and foldbelts: The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, v. 65, p. 291–329.
- Beydoun, Z. R., M. W. Hughes Clarke, and R. Stoneley, 1992, Petroleum in the Zagros basin: a late Tertiary foreland basin overprinted onto the outer edge of a vast hydrocarbon – rich Paleozoic – Mesozoic passive margin shelf, this volume.
- Biddle, K. T., 1991, Active margin basins: AAPG Memoir 52, 342 p.
- Bird, K. J., and C. M. Molenaar, 1992, The North Slope foreland basin, Alaska, this volume.
- Carnall, S. W., and B. St. John, 1986, Giant oil and gas fields, in M. T. Halbouty, ed., Future petroleum provinces of the world: AAPG Memoir 40, p. 11–53.
- Creaney, S., and J. Allan, 1992, Petroleum systems in the foreland basin of Western Canada, this volume.
- Dickinson, W. R., 1974, Plate tectonics and sedimentation, in W. R. Dickinson, ed., Tectonics and sedimentation: SEPM Special Publication 22, p. 1–27.

- Edwards, J. D., and P. A. Santogrossi, 1989, Divergent/passive margins: AAPG Memoir 48, 252 p.
- Erlach, R. N., and S. F. Barrett, 1992, Petroleum geology of the Eastern Venezuela foreland basin, this volume.
- Fermor, P. R., and I. W. Moffat, 1992, Tectonics and structure of the Western Canada foreland basin, this volume.
- Gries, R., J. C. Dolson, and R. G. H. Reynolds, 1992, Structural and stratigraphic evolution and hydrocarbon distribution, Rocky Mountain foreland, this volume.
- Jervey, M., 1992, Siliciclastic sequence development in foreland basins, with examples from the Western Canada foreland basin, this volume.
- Katz, B. J., 1990, Lacustrine basin exploration: case studies and modern analogs: AAPG Memoir 50, 340 p.
- Kay, M., 1951, North American geosynclines: GSA Memoir 48, 143 p.
- Leckie, D., and D. Smith, 1992, Regional setting, evolution, and depositional cycles of the Western Canada foreland basin, this volume.
- Leighton, M. W., D. R. Kolata, D. F. Oltz, and J. J. Eidel, 1990, Interior cratonic basins: AAPG Memoir 51, 819 p.
- Meckel, L. D., D. Smith, and L. A. Wells, 1992, Ouachita foredeep basins: regional paleogeography and habitat of hydrocarbons, this volume.
- Osadetz, K. G., F. W. Jones, J. A. Majorowicz, D. E. Pearson, and L. D. Stasiuk, 1992, Thermal history of the Cordilleran foreland basin in western Canada: a review, this volume.
- Podruski, J. A., J. E. Barclay, A. P. Hamblin, P. J. Lee, K. G. Osadetz, R. M. Procter, G. C. Taylor, R. F. Conn, and J. A. Christie, 1988, Conventional oil resources of Western Canada (light and medium): Geological Survey of Canada Paper 87-26, 149 p.
- Porter, J., 1992, Conventional hydrocarbon reserves of the Western Canada foreland basin, this volume.
- Porter, J., 1992, Early surface and subsurface investigations of the Western Canada sedimentary basin, this volume.
- Potocki, D. J., and I. Hutcheon, 1992, Lithology and diagenesis of sandstones in the Western Canada foreland basin, this volume.
- Price, R. A., 1973, Large-scale gravitational flow of supracrustal rocks, southern Canadian Rockies, in K. A. De Jong and R. A. Scholten, eds., Gravity and tectonics: New York, John Wiley, p. 491-502.
- Price, R. A., and E. W. Mountjoy, 1971, Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca Rivers—a progress report, in J. O. Wheeler, ed., Structure of the Southern Canadian Cordillera: Geological Association of Canada Special Paper 6, p. 7-26.
- St. John, B., A. W. Bally, and H. D. Klemme, 1984, Sedimentary provinces of the world: hydrocarbon productive and nonproductive: AAPG, 35 p.
- Stockmal, G. S., and C. Beaumont, 1987, Geodynamic models of convergent margin tectonics: the southern Canadian Cordillera and the Swiss Alps, in C. Beaumont and A. J. Tankard, eds., Sedimentary basins and basin-forming mechanisms: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 12, and Atlantic Geoscience Society Special Publication 5, p. 393-411.
- Stockmal, G. S., D. J. Cant, and J. S. Bell, 1992, Relationship of the stratigraphy of the Western Canada foreland basin to cordilleran tectonics: insights from geodynamic models, this volume.
- Yergin, D., 1991: The prize—the epic quest for oil, money and power: New York, Simon and Schuster, 877 + xxxii p.

# 第一章 西加拿大前陆盆地背景、演化和沉积旋回

Dale A. Leckie David G. Smith

## 一、引言

早先 Dickinson (1974 年) 正式应用“前陆盆地”一词描述弧后和周缘盆地, 在这类盆地中盆地充填是沉积在陆壳或较老的裂谷型边缘沉积柱体之上。本书将前陆盆地定义为沉积在与活动造山带相邻的克拉通地区的沉积岩层系。沉积物主要来自造山带, 并向造山带增厚。邻近造山带的前陆盆地沉积通常经历了沉积期后的褶皱作用和向克拉通方向的逆掩推覆作用, 致使区域构造缩短, 并经受剥蚀成为盆地内更新沉积的母岩。

周缘前陆盆地的实例有喜马拉雅山南侧的印度——恒河盆地和台湾盆地。前者发育在印度次大陆与亚洲大陆两陆壳碰撞部位, 次大陆部分的陆壳已俯冲消亡于另一大陆边缘之下 (即 Bally 和 Snelson 所称的“B”型俯冲, 1989)。本文对周缘盆地不作深入的讨论。

如图 1 所示, 中、新生代时, 北美前陆盆地西部是一个弧后盆地。弧后盆地发育在逆冲带的克拉通一侧, 与相当数量的陆壳俯冲消亡 (即 Bally 和 Snelson 所称的“A”型俯冲, 1980) 所导致的岩浆弧相邻。南美洲亚安第斯山 (Subandean) 逆冲带以东并与该逆冲带相邻处发育的弧后前陆盆地是一现代实例。

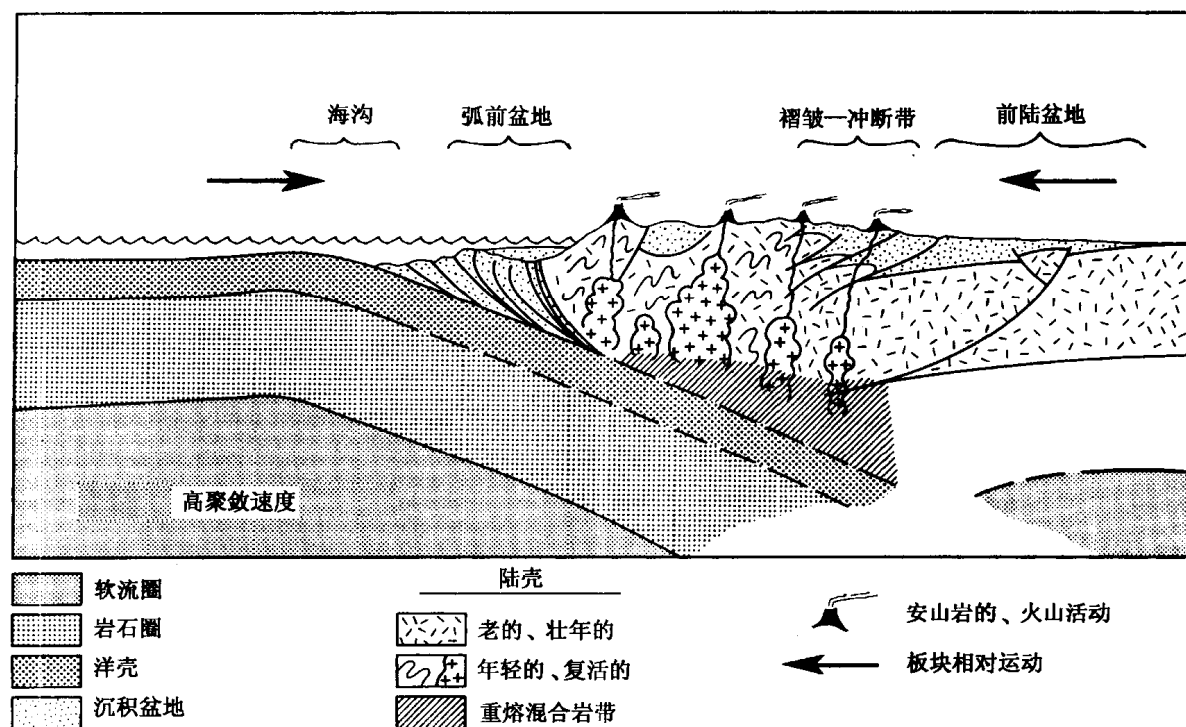


图 1 沿安第斯型大陆边缘岩浆弧的俯冲作用模式图

这一模式常用于说明西加拿大前陆盆地的形成 (据 Bally 和 Snelson, 1980 修改)

北美西部前陆盆地是发育在古落基山脉东麓与北美克拉通型稳定陆内地台之间的长条状断槽(图2)。自北冰洋至墨西哥湾,该前陆盆地最大延伸长度达6000多千米,自最西部的安大略至不列颠哥伦比亚省中部,东西宽达1600km。盆地西部边缘的沉积最厚,自中侏罗至第三纪中期的沉积厚度超过6km。

西部内陆海道(Interior Seaway)曾多次占据该前陆盆地,它是沿长条状褶皱和逆冲带的地壳载荷的直接产物而长条状褶皱带和逆冲带为北美西部隆起带(Price, 1973; Beaumont, 1981)。深成作用、火山活动以及自阿拉斯加至墨西哥范围内由板块俯冲产生的逆冲带引起的岩石圈载荷等因素联合作用是控制盆地沉积和沉降的主要因素;前陆盆地内的沉积载荷是影响沉降的次要因素(Jordan, 1981)。海平面的重大波动,其中有些波动是受全球海平面升降制约的,也对盆地的沉积有影响(Jervey, 1992)。

本章主要描述北美前陆盆地西加拿大大部分的区域构造背景、演化、地层、沉积旋回和古地理环境,为本书的其他章节提供一框架。前陆盆地层系的演化相当于Sloss(1963)所称的Zuni层序,时代从中侏罗世延续到古新世。

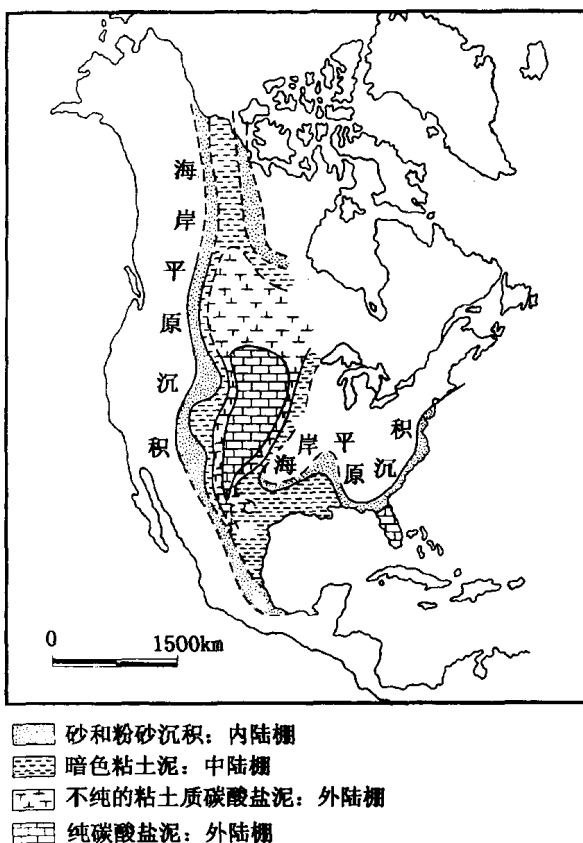


图2 土伦期北美的前陆盆地(据Kauffman, 1984; McNeil和Caldwell, 1981修改; 古纬度据Habicht, 1979)

## 二、西加拿大前陆盆地的演化

### 1. 科迪勒拉构造地层带和复合体

西加拿大前陆盆地与西加拿大科迪勒拉山脉的发育密切相关,该山脉从早至中侏罗世开始形成(Stockmal等, 1992)。自中侏罗世到早第三纪,几次重大碰撞构造事件在艾伯塔省西部和不列颠哥伦比亚地区形成了5个构造地层带(图3)。它们包括落基山脉、山间带(Intermontane)和岛屿带(Insular belts),它们由未经变质至轻微变质至浅变质的火山岩和沉积岩地层组成。这三个构造地层带相应被两个缝合复合体所分隔,即奥密尼卡(Omineca)带和海岸深成复合体,它们由深变质和深成侵入岩组成。而位于不列颠哥伦比亚、艾伯塔,萨斯喀彻温和马尼拉巴等省前陆盆地内的沉积组成了一向西增厚的未变质的碎屑岩楔。位于落基山褶皱和逆冲带的较早前陆盆地沉积已发生构造形变。Monger(1989)已对科迪勒拉造山带活动的演化作了最新的总结。

### 2. 增生和相邻前陆盆地的演化

5个增生构造地层带的分布和演化表明西加拿大科迪勒拉山脉和相邻的西加拿大盆地(包括前陆盆地)的演化可分成三个阶段(Porter等, 1982; Fermor和Moffat, 1992)。