



前陆盆地动力学研究进展与 未来发展方向

李 勇^{1,2}, 赵少泽^{1*}, 李芃宇¹, 芦凤明³, 刘逸强³, 郝越翔⁴, 李宜真⁴,
赵 亮¹, 徐 正¹, 杨 欣¹, 许艺凡¹, 徐 川^{1,2}, 宋志华^{2,5}, 解馨慧²

1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059;

3. 中国石油大港油田分公司, 天津 300280;

4. 中国石油川庆钻探工程有限公司 页岩气勘探开发项目经理部, 成都 610051;

5. 中国石油新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000

[摘要] 21 世纪以来,在造山带-前陆盆地系统中发生的一系列“强烈地震”和“页岩气革命”使得造山带-前陆盆地动力学再次成为全球研究的热点。本文以全球视野梳理了前陆盆地研究的发展历史、基础理论、研究现状和典型案例,归纳了前陆盆地动力学的新理论、新技术和新数据,提出了前陆盆地动力学的学科内涵、研究内容和发展方向。本文提出“前陆盆地动力学”是研究前陆盆地形成演化、表面过程、沉积充填、构造变形、成矿成藏和地震活动及其动力学机制的综合性学科,并对其研究范畴进行了 4 个方面的拓展。(1)将研究内容拓展为 5 个研究领域和 1 种研究方法,包括前陆盆地地表动力学、前陆盆地沉积充填动力学、前陆盆地构造动力学、前陆盆地地球动力学、前陆盆地成藏动力学和前陆盆地动力学模拟;(2)将研究的尺度从单个造山带-前陆盆地的尺度拓展到全球造山带-前陆盆地的尺度;(3)将研究的时间尺度从地质时间尺度(百万年)拓展到人类时间尺度(十几年至几百年);(4)将研究的范式从“实际资料支撑的前陆盆地动力学模型研究”拓展为“大数据支撑的前陆盆地动力学数值模型研究”,提出利用数值模拟方法获取前陆盆地的过去、现在和未来的演化过程和动态图像,提高对造山带-前陆盆地系统的地质事件和油气资源预测的准确性。本项研究成果为开展前陆盆地动力学的学科建设与发展战略研究提供科学依据。

[关键词] 地表动力学;沉积充填动力学;构造动力学;地球动力学;成藏动力学;数值模拟;前陆盆地;造山带

[分类号] P618.13; P534.6; P544.4

[文献标志码] A

收稿日期: 2025-01-08; 改回日期: 2025-08-19。 责任编辑: 魏 巍。 期刊主页: <https://xbzrxx.cdut.edu.cn/>
基金项目: 国家自然科学基金项目战略研究类项目(42342027); 2024 年四川省研究生教育教学改革项目(YJGXM24-C030)。

第一作者: 李勇(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 沉积地质学, E-mail: liy@cdut.edu.cn。

*通信作者: 赵少泽(1992—), 男, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 石油地质学, E-mail: zhaosz@cdut.edu.cn。

引用格式: 李勇, 赵少泽, 李芃宇, 等, 2026. 前陆盆地动力学研究进展与未来发展方向 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(4): 856—890.

Li Y, Zhao S Z, Li P Y, et al., 2026. Research progress and future perspectives of foreland basin dynamics [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 856—890.

Research progress and future perspectives of foreland basin dynamics

LI Yong^{1,2}, ZHAO Shaoze^{1*}, LI Pengyu¹, LU Fengming³, LIU Yiqiang³, HAO Yuexiang⁴,
LI Yizhen⁴, ZHAO Liang¹, XU Zheng¹, YANG Xin¹, XU Yifan¹, XU Chuan^{1,2},
SONG Zhihua^{2,5}, XIE Xinhui²

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China;

2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;

4. Shale Gas Exploration and Development Department, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited,
Chengdu 610051, China;

5. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China

Abstract: Since the 21st century, a series of strong earthquakes and the “shale gas revolution” occurring in orogenic belt–foreland basin systems have once again made the dynamics of orogenic belts and foreland basins a global research hotspot. This paper provides a global perspective on the historical development, fundamental theories, current research status, and typical case studies of foreland basins. It summarizes new theories, technologies, and data in the field of foreland basin dynamics, and proposes disciplinary connotation, research content, and future research directions. This paper proposes that the dynamics of foreland basins can be comprehensively studied in terms of formation and evolution, surface processes, sedimentary filling, sedimentary mineralization, hydrocarbon accumulation, tectonic deformation, seismic activity, and dynamic mechanisms. Furthermore, the research scope of foreland basin dynamics is expanded in four aspects. First, the research content is expanded into five fields and one research method, which includes sedimentary filling dynamics, tectonic dynamics, surface dynamics, geodynamics, hydrocarbon accumulation dynamics, and dynamic simulations of foreland basins. Second, the spatial scale of the study is extended from the scale of single orogenic belts and foreland basins to the scale of global orogenic belts and foreland basins. Third, the time scale of the study is extended from the human time scale (tens to hundreds of years) to geological time scales (million years and more). Fourth, the research paradigm is expanded from “research of foreland basin dynamic models supported by actual data” to “research of foreland basin dynamic numerical models supported by big data.” This expansion involves the use of numerical simulations to obtain the past, present, future evolution processes and dynamic images of foreland basins, and to improve prediction accuracy of geological events and hydrocarbon resources in orogenic belt–foreland basin systems. This research provides a scientific basis for the disciplined construction and development strategies for studying foreland basin dynamics.

Key words: surface dynamics; sedimentary filling dynamics; tectonic dynamics; geodynamics; hydrocarbon accumulation dynamics; numerical simulation; foreland basin; orogenic belt

全球中—新生代造山带—前陆盆地是在现今地球表面分布最显著的构造地貌单元之一,主要分布在汇聚型的板块边缘。21世纪以来在造山带—前陆盆地系统中发生的一系列“强烈地震”和“页岩气革命”,震撼全球,造山带—前陆盆地再次成为全球研究的热点,研究的目标不仅在于了解造山带—前陆盆地为什么形成,在哪里形成以及为什么在那个时间发生造山带的构造负载和前陆盆地的挠曲沉降,并形成前陆盆地,揭示前陆盆地动力学与地球动力学的关系,还在于评

价前陆盆地充填物及其所含流体的运移过程及其相关分布,揭示前陆盆地动力学过程与矿产、油气富集机制、地震机制的关系。

根据板块构造理论,前陆盆地是在板块挤压构造作用下形成的沉积盆地类型,在平面上呈平行于造山带的狭长带状展布,在剖面上分布于造山带和相邻克拉通之间,显示为不对称的挠曲盆地(Dickinson, 1974; Bally, 1980; Beaumont, 1981; Allen and Homewood, 1986)。人类对前陆盆地的调查和研究已有150年历史,主要体现在前陆

(foreland)、前陆盆地 (foreland basin)、前陆盆地系统 (foreland basin system)、前陆盆地动力学 (foreland basin dynamics) 等概念的提出与发展 (李勇和闫亮, 2021)。从 20 世纪到 21 世纪, 前陆盆地研究始终保持着地学热点领域地位, 其原因在于: (1) 前陆盆地沉积物是地球演化的档案库, 为重建地球动力演化历史提供了依据; (2) 在前陆盆地沉积物中蕴藏着丰富的油气资源, 为人类的能源需求做出了贡献; (3) 前陆盆地与人类生活密切相关, 它直接构建了人类生活环境的地质本底, 是人类宜居环境和全球变化的敏感区域。

在编著《前陆盆地动力学原理与方法》(李勇和闫亮, 2021) 的基础上, 作者将前陆盆地动力学研究内容概括为前陆盆地地表动力学、前陆盆地沉积充填动力学、前陆盆地构造动力学、前陆盆地地球动力学、前陆盆地成藏动力学和前陆盆地动力学模拟等 6 个领域, 并提出了未来发展方向, 为中国地质学家开展前陆盆地动力学的学科建设与发展战略研究提供科学依据。

1 前陆盆地动力学的发展现状

随着全球构造理论的发展 (槽-台学说、板块构造理论、大陆动力学、地幔动力学等), 前陆盆地的研究也经历了 4 个阶段, 包括前陆、前陆盆地、前陆盆地系统和前陆盆地动力学 (李勇和闫亮, 2021)。

1.1 前陆盆地的含义及其沿革

在 19 世纪, 前人根据槽-台学说提出了与前陆相关的地质术语 (如前陆、前渊、边缘盆地、山前凹陷、复理石、磨拉石等), 认为前陆是与造山带相毗邻的稳定地台或克拉通的边缘地区, 且造山带的岩层向它逆冲或掩覆, 以磨拉石作为前陆地区沉积物的典型代表, 并将其作为地槽关闭的沉积物标志 (Bally, 1980; Beaumont, 1981; Allen and Homewood, 1986) (图 1)。

在 20 世纪, Dickinson (1974) 根据板块构造理论提出了前陆盆地的术语, 认为前陆盆地是在 2 个板块闭合时大陆地壳与大陆地壳挤压过程中在碰撞造山带的边缘地区形成的沉积盆地, 包括 2 种类型, 分别为与陆-陆碰撞造山相关的周缘前陆盆地 (peripheral foreland basin)、与洋-陆俯冲相关的弧背前陆盆地 (retro-arc foreland basin) (图 1、图 2), 其后又增加了位于大陆板块内部的破裂前陆盆地 (broken foreland basin)。在此基础上, 许多学者提出了不同的前陆盆地分类方案和术语 (Bally, 1980; Beaumont, 1981; Allen and Homewood, 1986; Ingersoll, 2012; Allen and Allen, 2013; Horton et al., 2022)。例如中国学者提出了与陆内造山作用相关的陆内造山带-陆内前陆盆地系统 (李勇和曾允孚, 1994; 何登发等, 1996; 李勇, 1998; 孙肇才, 1998; 刘和甫等, 2000; 张明利等, 2002; 金之钧等, 2004; 刘池洋, 2005; 李勇等, 2006a, 2010; 陈发景等, 2007); Ingersoll (2012)

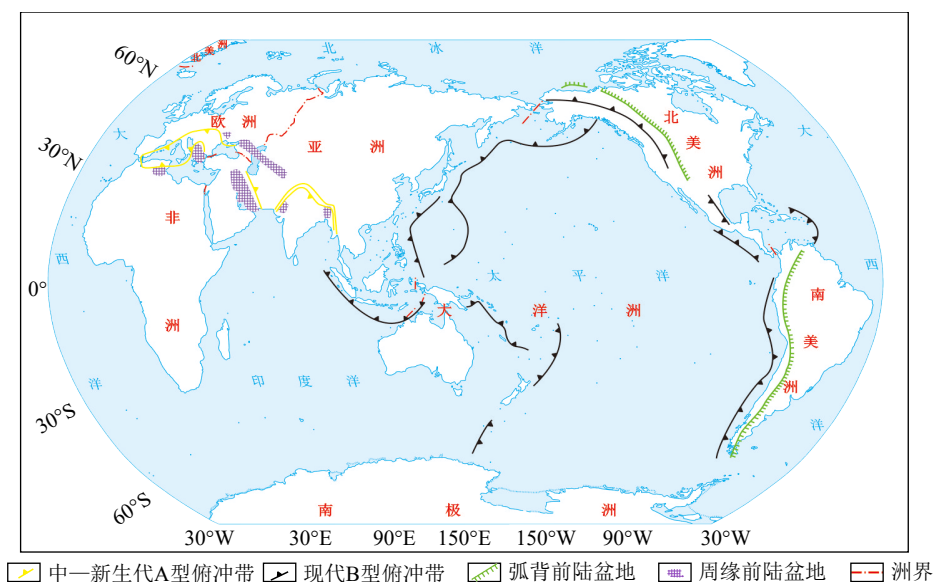


图 1 全球板块俯冲带与造山带-前陆盆地的空间分布图 (据 Bally, 1980)

Fig. 1 Spatial distribution of global plate subduction zones and orogenic belts-foreland basin systems

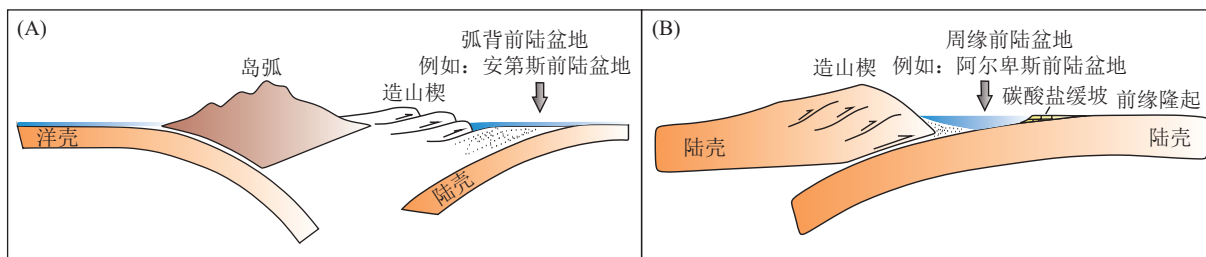


图2 周缘前陆盆地和弧背前陆盆地的构造模型图(据 Sayer, 1995)

Fig. 2 Tectonic model diagrams of a peripheral foreland basin and a retro-arc foreland basin

(A) 弧背前陆盆地,以安第斯前陆盆地为例;(B) 周缘前陆盆地,以阿尔卑斯前陆盆地为例

提出了7种前陆盆地类型,包括前侧前陆盆地(pro-foreland basin)、后侧前陆盆地(retro-foreland basin)、楔顶盆地(wedge top basin)、碰撞型破裂前陆盆地(collisional broken foreland basin)、陆内盆地(hinterland basin)、残留洋盆地(remnant ocean basin)和后继盆地(successor basin); Allen and Allen (2013)认为前陆盆地包括3种基本类型,分别为前侧前陆盆地、后侧前陆盆地和陆内前陆盆地(intracontinental foreland basin); Horton et al. (2022)认为破裂前陆盆地是由基底的缩短作用将连续的弧背前陆盆地或周缘前陆盆地分解(或破裂)为不连续的小型前陆盆地,因此不能将破裂前陆盆地与周缘前陆盆地和弧背前陆盆地并列(图3)。

1.2 造山带-前陆盆地系统的结构与构造单元

一般来说,典型的造山带-前陆盆地系统由3个构造单元组成,包括造山带(或褶皱-冲断带)、前陆盆地和前缘隆起(Allen and Homewood, 1986; Sayer, 1995; 图2)。DeCelles and Giles (1996)提出了前陆盆地系统的概念(图3),认为前陆盆地系统由造山楔(orogenic wedge)(或褶皱-冲断带, fold-thrust belt)、楔顶沉积带(wedge top)、前渊带(foredeep)、前隆带(forebulge)和隆后沉积带(back-bulge)5个构造单元组成。其后汤济广等(2006)补充了前陆斜坡沉积带。因此,一个完整的单侧型造山带-前陆盆地系统包括6个构造

单元。

1.3 前陆盆地动力学的发展现状

Dickinson (1993, 1997)提出了盆地地球动力学(basin geodynamics)和沉积盆地动力学(the dynamics of sedimentary basin)的研究方向,将沉积盆地分析拓展到盆地动力学研究,其后许多学者逐步完善了沉积盆地动力学的基本研究思路、研究内容和研究方法(王成善和李祥辉, 2003; 李忠, 2013; 李思田, 2015; 解习农等, 2017; 林畅松, 2019; 王成善和林畅松, 2021; 任建国等, 2021; 吕大伟等, 2022)。在系统梳理总结前陆盆地的研究历史、基本理论、研究方法、典型案例、最新成果和发展趋势的基础上,本文提出了前陆盆地动力学(the dynamics of foreland basin)的术语,认为前陆盆地动力学是研究前陆盆地形成演化、表面过程、沉积充填、构造变形、成矿成藏和地震活动及其动力学机制的综合性学科,是沉积盆地动力学的研究方向之一(李勇和闫亮, 2021)。

1.4 前陆盆地动力学的研究领域

自21世纪以来,前陆盆地动力学研究突破了学科界限。(1)前陆盆地动力学与系统观的融合形成了“前陆盆地系统”“盆-山系统”“前陆盆地油气系统”“物质流系统”“流体系统”“源-汇系统”等术语,以系统论把造山带和前陆盆地作为一个孪生系统进行研究;(2)前陆盆地动力学与生长观的融合形成了“前陆盆地生命周期”

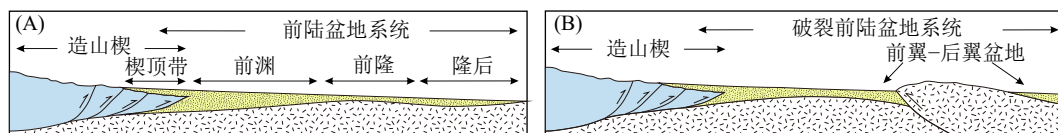


图3 连续的(未破裂的)前陆盆地系统与破裂前陆盆地系统的对比图

Fig. 3 Maps comparing a continuous (unbroken) foreland basin system and a broken foreland basin system

(A) 连续的(未破裂的)前陆盆地系统的横截面图(据 DeCelles and Giles, 1996);

(B) 破裂前陆盆地系统的横截面图(据 Horton et al., 2022)

“造山带生长”“生长地层”“生长断层”等术语,以生长观把造山带-前陆盆地作为生长系统(如形成期、发展期、衰退期和消亡期等)进行研究;(3)前陆盆地动力学与地球科学的最新发展(如地球动力学、地球圈层耦合等)融合,拓展了前陆盆地地球动力学、前陆盆地地表动力学等新的研究领域;(4)前陆盆地动力学与现代技术的融合促进了由调查资料支撑的前陆盆地动力学向数据支撑的前陆盆地动力学的转化,拓展了前陆盆地动力学数值模拟等新的研究方法。据此将前陆盆地动力学未来的研究领域归纳为 5 个研究领域和 1 种研究方法,包括以地表过程和源-汇系统分析为主的前陆盆地地表动力学(Earth surface dynamics of foreland basin, ESDFB)、以沉积学分析为主的前陆盆地沉积充填动力学(sedimentary filling dynamics of foreland basin, SDFB)、以构造地质学分析为主的前陆盆地构造动力学(tectonic dynamics of foreland basin, TDFB)、以板块构造、岩石圈和地幔动力学分析为主的前陆盆地地球动力学(geodynamics of foreland basin, GDFB)、以地层流体和油气成藏分析为主的前陆盆地成藏动力学(hydrocarbon accumulation dynamics of foreland basin, HDFB)以及以物理模拟和数值模拟为主的前陆盆地动力学模拟方法(modeling of dynamics of foreland basin, MDFB)。

2 前陆盆地动力学的研究进展与未来发展方向

本文从前陆盆地地表动力学、前陆盆地沉积充填动力学、前陆盆地构造动力学、前陆盆地地球动力学、前陆盆地成藏动力学和前陆盆地动力学模拟 6 个方面总结研究进展,并指出未来发展方向。

2.1 前陆盆地地表动力学

造山带-前陆盆地系统是现今地球大陆表面最主要的地貌单元,是地球与水圈、大气圈和生物圈相互作用的关键区域,也是研究全球变化、地震灾害和人类宜居环境的重要载体。根据 Allen(1997)提出的“地球表面过程”,本次提出了前陆盆地地表动力学,试图通过对造山带-前陆盆地系统的地表过程(或气候变化)与构造作用相互关系的研究,预测未来的地表变化速率对人类宜居环境变化(如地形、降雨、剥蚀速率、水

系演化等)的影响,包括地表物质流迁移与源-汇系统、构造-气候相互作用、隆升与剥蚀相互作用、地震作用与地震沉积学、沉积记录与全球变化等方面。

2.1.1 前陆盆地沉积记录与全球变化

前陆盆地的沉积记录是研究全球变化、地震灾害和人类宜居环境变化的载体,为恢复地质历史时期的地表过程和预测未来地表变化奠定了物质基础(Allen, 1997; Summerfield, 2000; Hodgson, et al. 2018; 李勇和闫亮, 2021)。(1)前陆盆地的沉积物记载了地质历史时期的造山带-前陆盆地系统构造作用、古气候、古海洋和古环境的变化过程。其中在第四纪以来的前陆盆地沉积记录是揭示人类宜居环境变化的关键依据(例如活动构造、古地震事件、极端气候变化、“地球关键带”变化、人类宜居环境变化等);(2)改变传统的“地质时间的思维模式”,利用前陆盆地沉积记录研究不同时间尺度,如长周期(百万年)、短周期(几十年至几百年)的造山带-前陆盆地地表过程和环境变化。

2.1.2 造山带-前陆盆地的地表物质流迁移与源-汇系统

在造山带-前陆盆地系统中,地表沉积物的迁移过程显示了由造山带(陆)到前陆盆地(海或湖)之间的剥蚀-搬运-堆积过程,属于半封闭-封闭的源-汇系统。

(1)造山带-前陆盆地的源-汇系统

源-汇系统(sediment from source to sink)是指位于剥蚀区的沉积物通过搬运并最终堆积在汇区的过程(source-to-sink, 简称为 S2S; Cloetingh et al., 2007; Allen, 2008; Sømme et al., 2013; Helland-Hansen et al., 2016; 徐长贵等, 2017; 林畅松, 2019),又被称为沉积物路径系统(sediment routing systems; Allen, 2017),其驱动机制包括重力和地形驱动、构造应力驱动、地震驱动等(李勇和闫亮, 2021)。因此,源-汇系统是连接造山带(源)与前陆盆地(汇)之间地表物质流动的纽带和沉积物路径系统(图 4、图 5; Cloetingh et al., 2007; 李勇等, 2024),是研究“盆-山系统”地表动力学的新方法,包括几何参数、组成单元、分段性、沉积物通量等要素。目前在深时的源-汇系统的重建方面仍面临着诸多困难,其原因在于深时的“汇”为残留在稳定克拉通边缘的不完整的前陆盆地沉积记录,

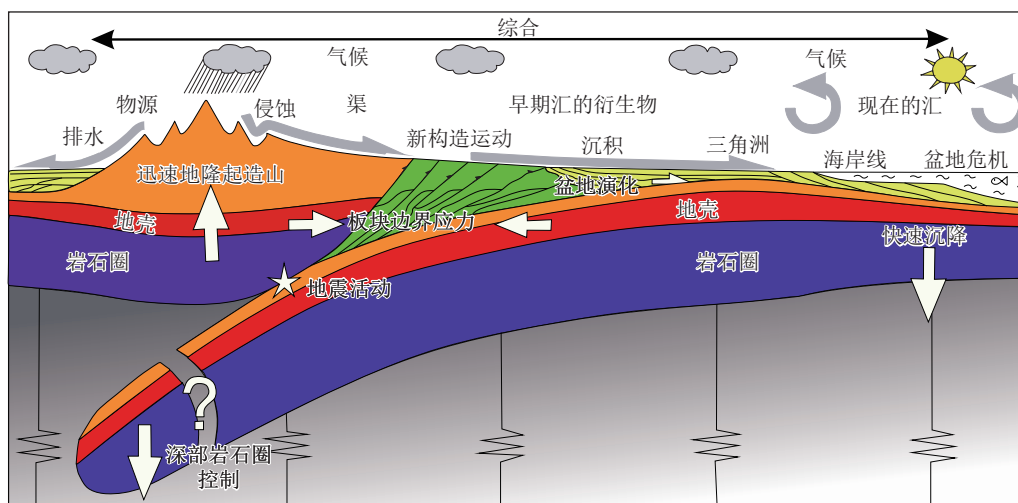


图4 造山带-前陆盆地的源-汇系统模型(据 Cloetingh et al., 2007)

Fig. 4 Source-sink system model of an orogenic belt-foreland basin system

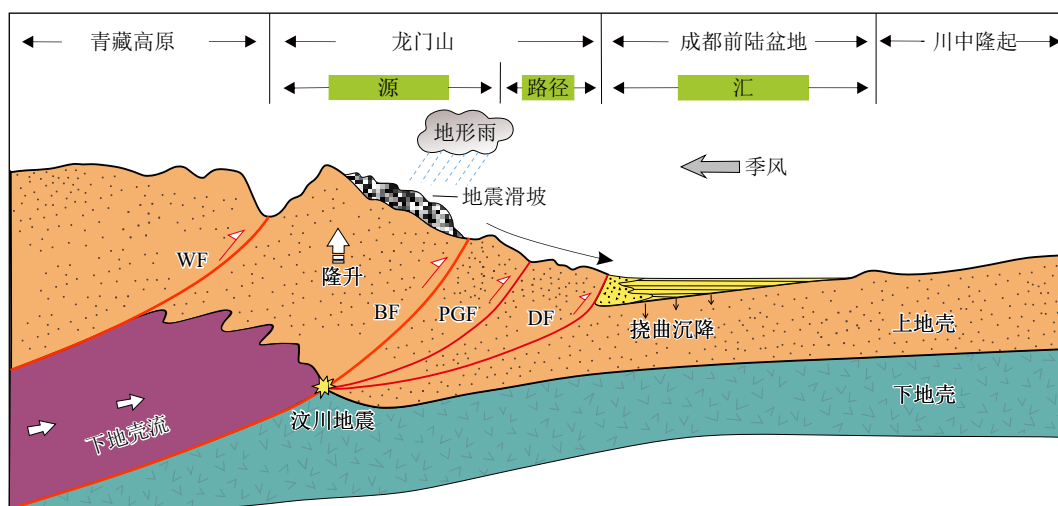


图5 强震后龙门山造山带-前陆盆地的地表过程与源-汇系统模型(据李勇等, 2024)

Fig. 5 Surface process and source-sink system model of the Longmenshan orogenic belt-foreland basin system after a strong earthquake

注: 图中显示了强震后龙门山造山带-前陆盆地系统的地震滑坡-河道沉积物-冲积扇之间的地表物质流迁移和转化过程; WF. 茂汶断裂; BF. 北川断裂; PGF. 彭灌断裂; DF. 大邑断裂。

而深时的“源”为已被强烈剥蚀、改造、重置或消失的造山带, 很难恢复其原貌。

(2) 造山带-前陆盆地系统的地表物质流与沉积通量

许多学者 (Métivier and Gaudemer, 1997; Einsele, 2000; Simoes and Avouac, 2006; Cloetingh et al., 2007; Charreau et al., 2023; 李勇等, 2024) 曾利用物质通量模型研究了天山造山带-前陆盆地、龙门山造山带-前陆盆地和台湾造山带-前陆盆地的长周期沉积通量和物质平衡关系 (图4)。就短周期而言, Li et al. (2014a) 利用地表物质流方法研究了强震后龙门山造山带-前陆盆地系统的地震滑坡-泥石流-河道沉积物-冲积扇之间的转化

过程, 并定量计算了造山带的剥蚀量 (如地震滑坡量等)、在路径系统中滞留的沉积物量 (如河道沉积物等)、在前陆盆地中堆积的沉积物量 (如冲积扇等) 等参数, 建立了强震后龙门山-前陆盆地源-汇系统的沉积物供给链 (图5; 李勇等, 2024)。

2.1.3 造山带-前陆盆地系统的构造-剥蚀(气候)相互作用

根据板块构造理论, 板块间的碰撞和构造缩短是造山带形成的主要机制, 因此构造作用是造山带生长的驱动力。造山带经构造作用形成后, 在剥蚀作用的影响下, 山脉被逐步剥蚀和夷平, 直至最终消失, 因此, 剥蚀作用是控制造山带地

形演化的因素,是导致造山带衰退或消失的作用力(Koons, 1990; 李勇, 1998; Beaumont et al., 2000)。

(1) 剥蚀作用与剥蚀速率

由于气候(温度、湿度、降雨量、风向等)是控制地表剥蚀作用的主要因素,因此剥蚀作用是连接构造作用与气候变化的“桥梁”。虽然构造缩短是造山带形成的主要机制,但是受气候控制的剥蚀作用不仅决定了造山带的地形高度和前陆盆地的沉积通量,而且还强烈影响着造山带的构造作用和生长过程(Willett et al., 1993; Wolf et al., 2022; 李勇等, 2025)。前人(Burbank and Anderson, 2012; 李勇等, 2025)总结了测量不同的时间尺度剥蚀速率的方法,包括:①利用在河流水文测量站、大坝和水库的悬浮物荷载和沉积物体积的测量值计算短周期(几十年至几百年)的地表剥蚀速率(Burbank and Anderson, 2012; Li et al., 2014a);②利用由地表高程变化产生的沉积记录(如砾石层、夷平面、阶地、古生物等)计算短周期(几千年至几十万年)的地表剥蚀速率(或河流下切速率)(Li et al., 2004; 李勇等, 2005);③利用宇宙核素年龄(如铍、铝等)测定计算短周期(几千年)的地表剥蚀速率(Burbank and Anderson, 2012; 李勇等, 2025);④利用数字高程模型计算长周期(百万年)地表剥蚀速率(或河流下切速率)(Densmore et al., 2005; 李勇等, 2005, 2025);⑤利用岩石或沉积物的低温热年代学方法测定的冷却年龄[包括(U-Th)/He 热年代测定、裂变径迹热年代测定等]推算长周期(百万年)的表层剥蚀速率(Densmore et al., 2007; Richardson et al., 2008, 2010; 李勇等, 2025);⑥超长周期(亿年)剥蚀速率的计算非常困难,目前只能利用间接的方法进行推算,例如利用前陆盆地物质通量和质量平衡原理推算地质历史时期的造山带表面剥蚀量和剥蚀速率(Métivier and Gaudemer, 1997; Einsele, 2000)。

(2) 隆升作用与隆升速率

Molnar and England(1990)提出隆升作用表现为 2 种形式,分别为地壳隆升(crust uplift)(或岩石隆升(rock uplift))和地表隆升(surface uplift)。其中地壳隆升是指以大地水准面为基准造山带的岩石被向上移动而产生位移,而地表隆升是指在造山带地壳隆升后经剥蚀作用残留的地表隆升量,因此地表隆升量等于地壳隆升量与地表剥

蚀量之间差值。显然地壳隆升和地表隆升是描述同一个隆升作用的 2 个概念,并不是 2 种独立的隆升方式。目前已提出了 3 种造山带的隆升模式(Molnar and England, 1990; Molnar, 2012; Burbank and Anderson, 2012),分别为:①与构造缩短相关的构造隆升模式;②与剥蚀作用相关的均衡隆升模式;③第一和第二种机制的结合。例如,李勇等(2006b, 2017)曾认为龙门山是与构造缩短相关的构造隆升和与剥蚀相关的均衡隆升结合的产物,构造隆升作用和剥蚀作用在相似的尺度上控制着龙门山造山带的隆升,构造隆升量的比例为 30%~40%,均衡隆升量的比例为 60%~70%(Densmore et al., 2010; Parker et al., 2011; 李勇等, 2017)。

近年来 GPS 技术、合成孔径雷达干涉(InSAR)技术成为确定短周期(几年至几十年)地表隆升量的重要方法。其中 InSAR 技术可以揭示一次构造事件(如强震)的地表变形过程和变形特征。李勇团队(Parker et al., 2011; 李勇等, 2017)曾利用 InSAR 技术测定在龙门山造山带发生的汶川地震所导致的地壳隆升量,并将其与同震的滑坡剥蚀量进行了对比,结果表明汶川地震驱动的地壳隆升量小于地震滑坡量,导致了龙门山地表高度的降低(图 6)。值得指出的是,目前长周期的造山带隆升速率的测量仍然非常困难,只能利用间接的方法进行推算,主要方法包括:①利用河流下切速率推算地壳隆升速率(Li et al., 2004; 李勇等, 2005);②利用地壳均衡模拟、弹性挠曲模拟等模拟结果推算地壳隆升速率(Li et al., 2003, 2018; 李勇等, 2025);③利用低温热年代学方法测定的冷却年龄和剥蚀速率推算地壳隆升速率(Densmore et al., 2007; Richardson et al., 2008, 2010; 李勇等, 2025)。

(3) 造山带-前陆盆地的构造-剥蚀(气候)相互作用

造山带地形被人们普遍认为是构造-气候相互作用的结果,构造作用导致地壳增厚和造山带的隆升,气候导致剥蚀和造山带的降低(如河流对基岩侵蚀等);然而,究竟是地表过程还是构造作用控制了造山带的高度、形状和寿命,目前还不确定(Koons, 1990; Willett, 1999; Beaumont et al., 2000; Wolf et al., 2022)。Koons(1990)、Beaumont et al.(2000)以新西兰南阿尔卑斯山为例研究了造

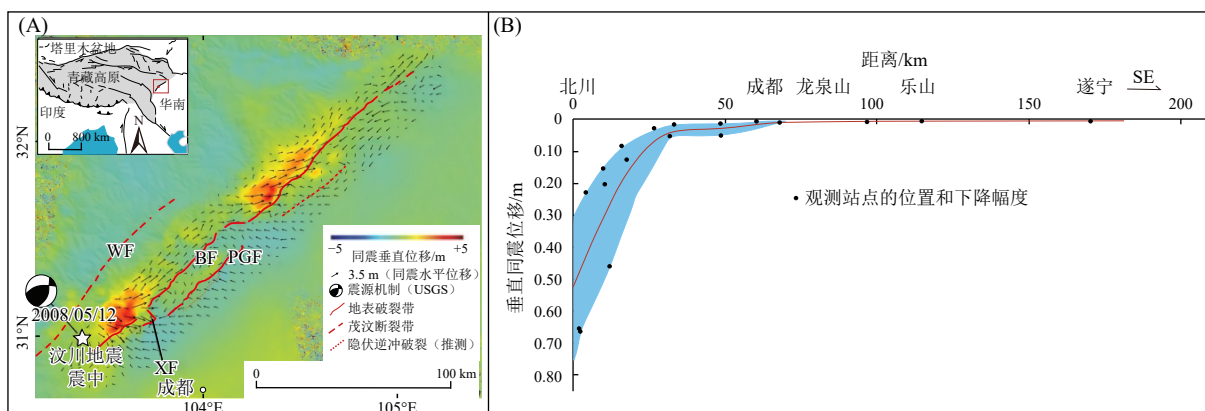


图6 汶川地震驱动的龙门山构造负载量及其导致的前陆盆地弹性挠曲沉降剖面

Fig. 6 Tectonic load of Longmenshan driven by the Wenchuan earthquake and the resulting elastic flexural subsidence profile of the foreland basin

- (A) 汶川地震导致的同震地表变形分布图, 显示了汶川地震导致的龙门山构造负载量为 $(2.6 \pm 1.2) \text{ km}^3$, 最大隆升量为 12.49 m, WF. 茂汶断裂; BF. 北川断裂; PGF. 彭灌断裂; XF. 小鱼洞断裂 (据 Michele et al., 2010; Parker et al., 2011);
- (B) 由汶川地震构造负载导致的挠曲沉降剖面, 成都前陆盆地显示为不对称性挠曲沉降, 最大沉降量为 0.675 m, 龙泉山(前缘隆起)显示为挠曲隆升, 隆升量为 0.2 m (据 Yan et al., 2016; 李勇等, 2017; Li et al., 2021)

山带构造-剥蚀(气候)相互作用及其演化过程, 提出了造山带-前陆盆地的数值模型。该模型中主要设置了2个端元, 分别为表面过程端元和构造过程单元(包括碰撞构造条件和地壳几何结构); Willett (1999)以新西兰南阿尔卑斯造山带为例建立一个双侧型碰撞造山带数值模型(图7); Wolf et al. (2022)利用数值模拟方法研究了地表过程和岩石圈强度对造山带的高度、形状和寿命的控制作用, 提出了地表过程与岩石圈强度耦合的造山带数值模型; Yuan et al. (2024)和 Li et al. (2025)利用数值模拟方法反演了构造变形、降

水和侵蚀作用对喜马拉雅造山带生长和地貌演化的控制作用, 探讨了造山带演化过程中构造变形、地形降水和侵蚀的相互作用和动态反馈机制。

以上的数值模型研究成果揭示了构造作用和剥蚀作用(降水)在造山带生长过程中的相互作用, 不仅证实了构造抬升在造山带形成中的主导作用, 同时也验证了降水导致的剥蚀作用和“削顶效应”, 加深了人们对造山带生长过程中构造作用(如隆升速率、应变速率、岩石圈强度等)与地表过程(如剥蚀速率、河流下切速率、降

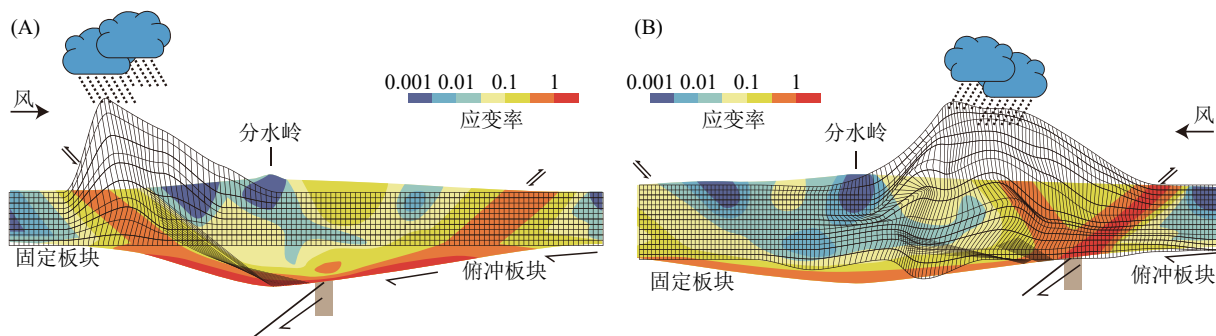


图7 新西兰南阿尔卑斯山(碰撞造山带)的地形模式与剥蚀模式对比图(横剖面)(据 Willett, 1999; 刘静等, 2018)

Fig. 7 Cross-section comparison of topography patterns and erosion patterns in the southern Alps of New Zealand (a collisional orogenic belt)

(A) 风向与俯冲方向相反; (B) 风向与俯冲方向一致

注: (1) 表面过程主要表现河流下切和边坡过程, 并用河流-能量指标 (stream-power-based incision rule) 表达河道下切作用; (2) 明确了降雨也是一种造山驱动力 (orographic forcing of the precipitation), 表明地表侵蚀速率与深部地壳的应变速率场之间存在耦合关系; (3) 在地表过程与构造作用之间存在着很强的耦合机制, 而且地表过程不仅影响到地壳负载量的变化或重组, 还影响到一定深度的变形场。

雨速率等)相互作用的理。

2.2 前陆盆地沉积充填动力学

前陆盆地沉积充填动力学包含了与水力学相关的小尺度的沉积动力学和与盆地充填过程相关的大尺度的沉积充填动力学,主要研究前陆盆地的沉积特征与沉积过程、沉积物搬运与流体力学机理、沉积充填作用与动力过程、沉积充填序列(构造-地层序列、层序地层序列)与沉积充填模式、沉积物分散体系与源-汇系统、构造作用与沉积响应、沉积记录与造山带演化历史恢复、古地理重建与原型盆地恢复等方面。

2.2.1 前陆盆地沉积充填模式

许多学者(Covey, 1986; Heller et al., 1988; Allen et al., 1991; Burbank, 1992; 李勇和曾允孚, 1994, 1995; Jordan, 1995; Johnson and Beaumont, 1995)研究了前陆盆地沉积物的沉积环境、沉积过程及其控制因素,构建了各种沉积体系或沉积相[如河流相粗粒碎屑沉积物(磨拉石)、三角洲、海底扇浊流沉积物(复理石)、黑色页岩沉积物、缓坡碳酸盐沉积物等]的组合模式和盆地沉积充填模式(或地层模式)(图 8)。其中最具有代表性的是 Heller et al.(1988)所提出的 2 个演化阶段的前陆盆地地层模式,认为在同造山期和后造山期前陆盆地具有不同的沉积充填模式(图 8)。随后又被命名为早期非补偿前陆盆地和晚期补偿前陆盆地地层充填模式(Allen et al., 1991)或早期楔状前陆盆地和晚期板状(或透镜状)前陆盆地地层充填模式(Burbank, 1992; Johnson and Beaumont, 1995; 李勇等, 1995)(图 8),其形成机制与造山带推进速率的变化有关(早期推进速率大、晚期推进速率小; Allen et al., 1991; Crampton and Allen, 1995; Sinclair, 1997a, 1997b)或与造山带隆升机制的转换有关(早期的构造缩短隆升、晚期的地壳均衡反弹隆升; Burbank, 1992; 李勇等, 1995)。此外,目前对“磨拉石”“复理石”“底部不整合面”“顶部不整合面”“欠充填的三位一体模式”(underfilled trinity model)等经典术语的含义和形成机制都有了新的理解(Sayer, 1995; Sinclair, 1997a, 1997b; Hu et al., 2024; Sun and Dong, 2024)。

2.2.2 前陆盆地沉积充填序列与层序地层学

许多学者将层序地层学的理论和方法应用于汇聚型前陆盆地分析之中,研究了前陆盆地的构造层序单元、层序地层单元和沉积旋回,建立

了前陆盆地的沉积充填序列(Posamentier and Allen, 1993; Jordan, 1995; Van Wagoner and Bertram, 1995; 李勇等, 1995; 许效松等, 1997; 杨永泰, 2011),为高精度的地层对比和油气生储盖组合预测提供了依据(图 9、图 10)。主要进展包括:①前陆盆地沉积充填序列主要是受构造作用或构造-全球海平面叠加作用的控制,其层序地层单元对应于构造地层单元[或构造旋回、构造相(tectophase; Ettensohn and Lierman, 2012)],是由造山带的加载-松弛旋回(load-relaxation cycle)驱动而形成的沉积旋回组成(Ettensohn and Lierman, 2012);②底部不整合面反映了造山带开始负载并驱动了前缘隆起的隆升和迁移,其上的黑色页岩反映了前陆盆地的最大沉降量,可以用来确定造山事件的性质、持续时间和位置(Ettensohn and Lierman, 2012);③Singh(2008)提出了利用伽马准层序(Gamma ray parasequences)研究黑色页岩层序地层的方法,将伽马曲线划分为 3 种类型(包括向上减小、向上增大、向上不变),并以海泛面为界把伽马准层序划分为下部的海进旋回和上部的海退旋回(T-R 旋回),其中的海泛面对应于伽马曲线中的最大值的位置,显示为水体最深、生物最发育、TOC 最富集的层位(图 10);④Slatt and Rodriguez(2012)提出了前陆盆地黑色页岩的层序地层模型,每个层序或旋回自下而上由底部不整合面(地层缺失)-黑色页岩段-细碎屑岩段组成(图 10),并可以利用该模型预测优质黑色页岩相出现的位置;⑤利用高精度的三维地震反射数据可以刻画前陆盆地地层结构,获取几何参数(如上超结构、地形参数和沉积地层等参数),因此,可以利用“看得见”的地层结构提高储层和烃源岩的预测精度。

2.2.3 深时盆-山系统的沉积-构造演化历史重建

目前在利用造山带物质结构标定造山作用的年龄方面仍存在很多困难,因此,只能利用前陆盆地沉积地层的时代、厚度、物质组成和变形特征来标定碰撞造山作用的时限、过程和强度,主要方法包括构造-地层序列分析、充填体形态分析、不整合面分析、砾质粗碎屑楔的迁移、碳酸盐缓坡相的迁移、沉降史分析、造山带的脱顶历史与物源分析、碰撞作用的沉积响应等(李勇和曾允孚, 1994; Dorobek and Ross, 1995; 李勇等, 1995, 2000, 2003, 2011a, 2011b, 2014; 李勇和闫亮,

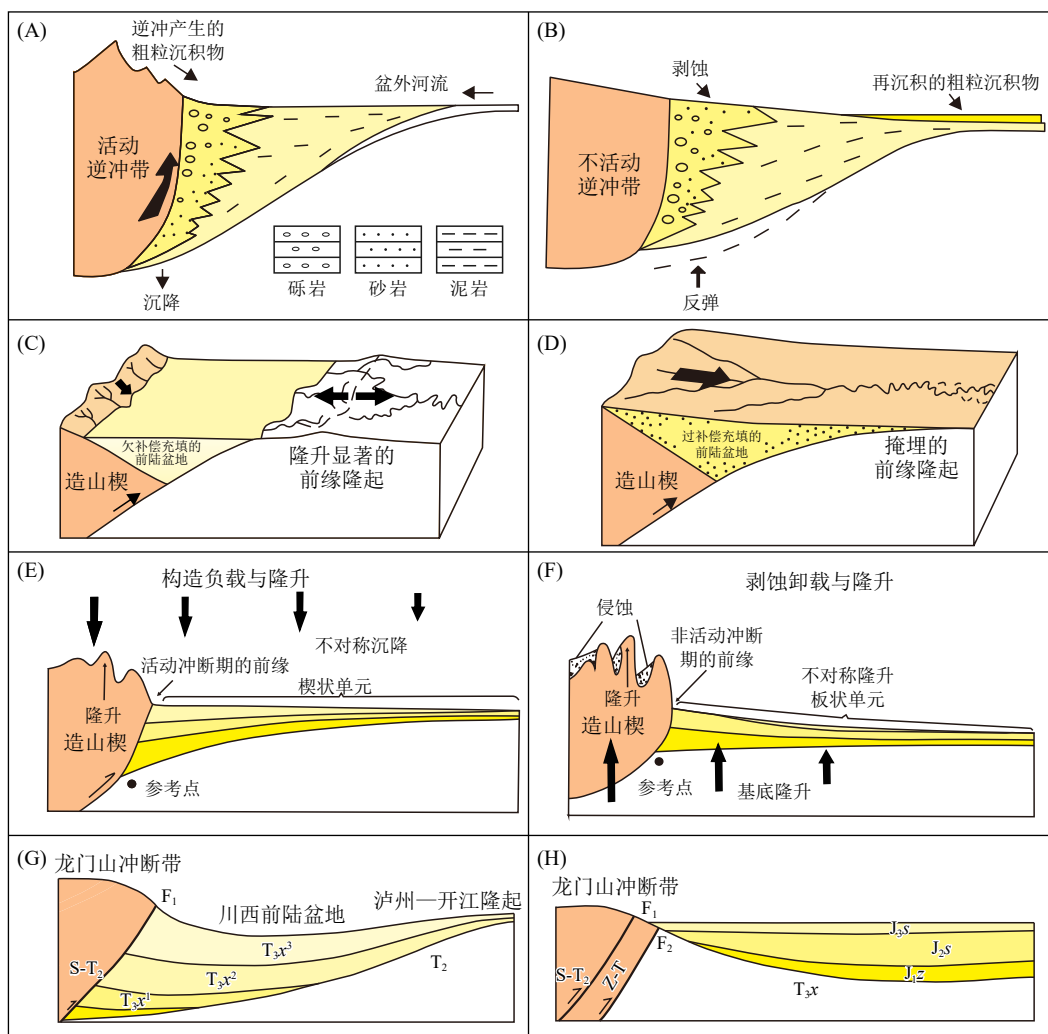


图8 前陆盆地沉积充填模式的对比图

Fig. 8 Comparison of sedimentary filling patterns in the foreland basin

(A)、(B)造山带幕式逆冲作用的地层模式(A为同造山运动期;B为后造山运动期)(据 Heller et al., 1988);(C)、(D)欠补偿和过补偿前陆盆地的地层充填模式(据 Allen et al., 1991);(E)、(F)楔状(wedge)与板状(tabular)前陆盆地的地层充填模式(据 Burbank, 1992);(G)、(H)楔状与板状前陆盆地地层充填模式(据李勇等, 1995)

2021; Sun and Dong, 2024)。

2.2.4 深时盆-山系统的构造古地理重建

在深时造山带-前陆盆地的演化过程中,改造与建造同步、改造和迁移共存,后期的强烈改造作用使其原始面貌已大为改观,所以剔除后期改造的影响并恢复盆地的原始面貌,是古老前陆盆地古地理研究不可或缺的内容(刘少峰和王成善, 2016; 李勇和闫亮, 2021)。研究内容包括古板块与古地理重建、古气候与古季风重建、造山带的复原与复位、后期构造变形与原型盆地恢复等方面(刘宝珺等, 1993; 刘少峰和王成善, 2016; 李勇和闫亮, 2021)。其研究方法包括:①利用古构造恢复方法(如古地磁、地球化学

等)重建古板块构造位置,揭示盆-山系统形成的板块构造背景(如陆-陆碰撞、洋-陆汇聚等)和地球动力学机制;②利用古环境恢复方法(沉积学、地球化学等)重建古气候、古海洋与古洋流,揭示盆-山系统的地表水文循环(季风、气流、洋流、地形雨等)和沉积物搬运过程;③利用构造负载-挠曲沉降模拟等方法重建造山带的构造隆升史和前陆盆地的挠曲沉降史,恢复盆-山系统的古地形(如高地、低地等)和古水深(如陆相盆地、浅海盆地和深海盆地等);④利用多种、多尺度方法(例如构造平衡剖面、物理模拟和数值模拟等方法)对造山带进行复原与复位,恢复原型盆地的后期改造过程,重建原型盆地。

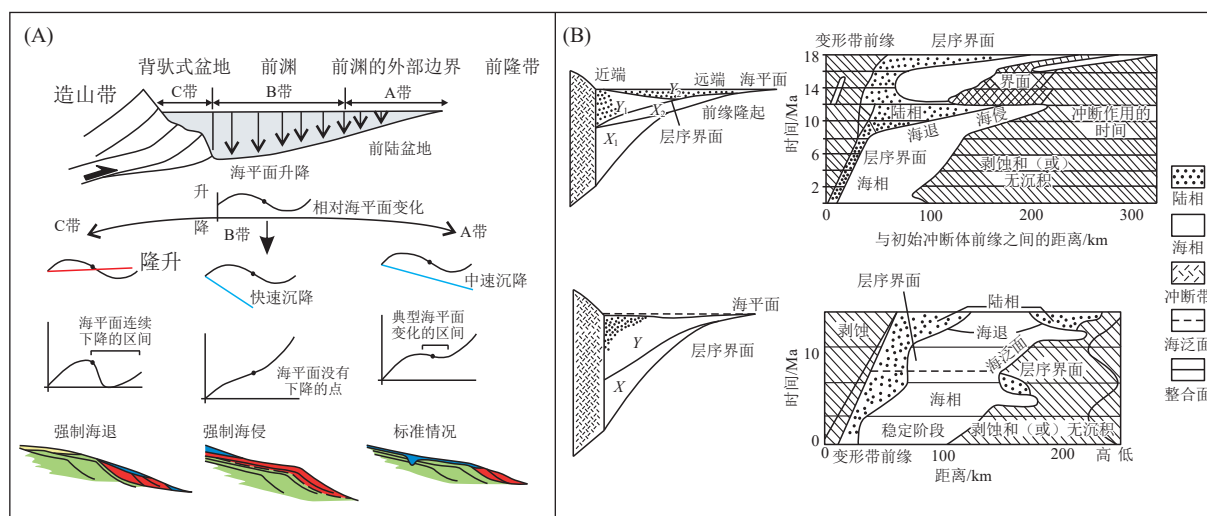


图 9 前陆盆地的沉积充填模式与构造-海平面变化

Fig. 9 Sedimentary filling patterns and tectonic-sea level changes in the foreland basin

(A)前陆盆地的沉积充填模式与构造-海平面变化控制因素,显示前陆盆地沉积充填结构在空间上的变化(据 Posamentier and Allen, 1993);(B)造山带的幕式逆冲作用与前陆盆地沉积充填结构模型,显示前陆盆地沉积充填结构在时间上的变化,可将其几何形态分为早期的楔状体和晚期的透镜体,分别对应于早期的逆冲作用发育时期和晚期的逆冲作用不发育时期(据 Jordan, 1995)

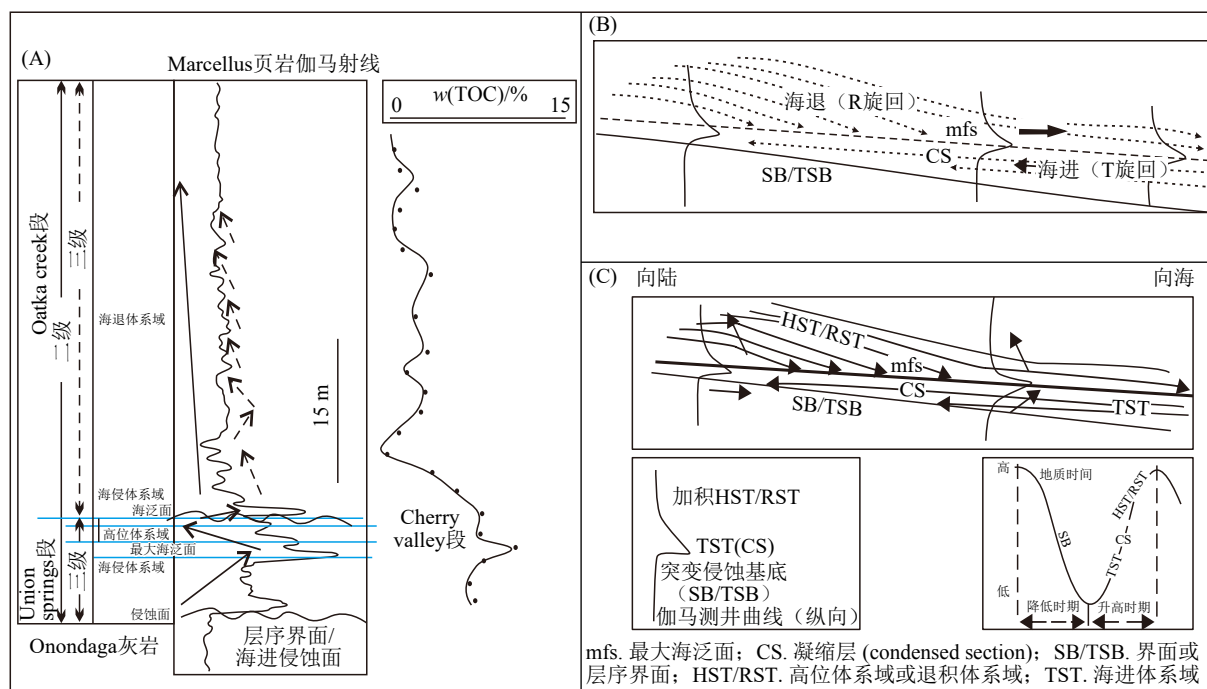


图 10 前陆盆地黑色页岩的层序地层研究方法

Fig. 10 Research methods on sequence stratigraphy of black shale in the foreland basin

(A)阿巴拉契亚前陆盆地 Marcellus 页岩的伽马射线和总有机碳剖面,在不整合面(海进侵蚀面)之上发育一套向上变细的细粒岩层段,顶部发育富有机质、高伽马值的细粒岩(据 Slatt and Rodriguez, 2012);(B)海进-海退旋回(T-R 旋回)示意图(据 Singh, 2008);(C)黑色页岩的层序界面与体系域划分方法(据 Slatt and Rodriguez, 2012)

2.2.5 前陆盆地的生命周期与多期前陆盆地的叠合

生命周期主要用于分析某生物体从出生到

成长、衰老直至死亡所经历的各个阶段和整个过程。随着这一概念的内涵逐步扩展,该理论被应用于地质学和地貌学等领域。Allen(2017)指

出沉积盆地的生命周期(地质时间尺度)与板块运动和地幔环流的周期有关,认为不同的盆地类型的出现和消失均具有典型的生命周期,其后则被抬升、侵蚀或被改造成为另外一种类型的盆地,从而结束了其存在的历史。沉积盆地存在的历史是通过特定的地层记录来识别的,其一般显示为由特定的板块构造过程或地幔环流过程(如威尔逊旋回或超大陆旋回)控制的沉积层序(Trabucho-Alexandre et al., 2012)。因此,前陆盆地存在的历史是通过特定的地层记录来识别的。前陆盆地的生命周期包括其生成、生长、演化和结束4个阶段(Waschbusch and Royden, 1992),并可将其划分为单期和多期2种演化类型。(1)单期前陆盆地是指在一个区域内的地质历史中只形成过一次的前陆盆地,其生命周期约为4~25 Myr(Allen, 2017)。典型的单期前陆盆地的地层记录一般显示为由顶、底不整合面限定的地层序列,并由下部旋回(早期复理石阶段)和上部旋回(晚期磨拉石阶段)组成。顶部不整合面往往是剥蚀-削截不整合面;底部不整合面多为超覆不整合面。(2)多期前陆盆地是指在一个区域内的地质历史中多次形成的前陆盆地,并在垂向上发生叠置,形成叠合型前陆盆地(如龙门山前陆盆地是由多期(晚三叠世、晚新生代等)前陆盆地组成的叠合型前陆盆地(李勇等, 1995)。Heller et al.(1988)曾提出了多期前陆盆地的演化模式,认为在地质时期前陆盆地可以再生和叠置,其形成条件就是近似的挤压缩短环境的再次出现。前陆盆地不会永远保持不变,只是在相当短的时期内保持其前陆盆地的性质,而且在更短

的时期内被改变为其他类型的盆地。(3)按照板块构造理论,前陆盆地的生命周期对应于威尔逊旋回最晚期的构造挤压缩短时期,其时间跨度为4~25 Myr。相对于整个威尔逊旋回的时间尺度(几亿年)而言,前陆盆地的时间跨度是短暂的(几个至几十个百万年),同时也是威尔逊旋回最终结束的标志。Allen(2017)认为板块运动的威尔逊旋回与地幔环流的周期有关,因此前陆盆地的生命周期与地幔环流的周期有关。

2.3 前陆盆地构造动力学

前陆盆地构造动力学是以前陆盆地构造地质学分析为主的研究方向,包括造山带-前陆盆地类型与板块碰撞类型、构造变形与动力学机制、构造作用与表面过程的耦合机制、单侧型与双侧型造山带-前陆盆地、造山带推进作用的沉积响应等研究内容(Stockmal et al., 1986; Busby and Ingersoll, 1995; Dorobek and Ross, 1995; Crampton and Allen, 1995; Galewsky, 1998; 李勇等, 2000; Allen et al., 2001; Li et al., 2003, 2014a, 2014b, 2014c; Busby and Azor, 2012; 李勇和闫亮, 2021; Sun and Dong, 2024; 图11)。从全球尺度来看,前陆盆地类型与造山带类型密切相关。本次将造山带-前陆盆地系统分为4种类型,包括陆-陆碰撞型造山带-前陆盆地系统(如喜马拉雅造山带-前陆盆地系统等)、弧-陆碰撞型造山带-前陆盆地系统(如台湾造山带-前陆盆地系统等)、洋-陆碰撞型造山带-弧背前陆盆地系统(如科迪勒拉造山带-前陆盆地系统等)、陆内汇聚型造山带-前陆盆地系统(如天山造山带-前陆盆地系统、龙门山造山带-前陆盆地系统等)。

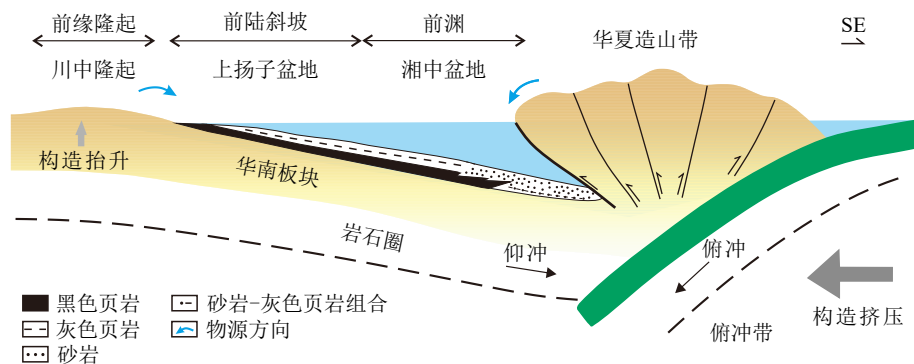


图11 华南板块华夏造山带-扬子前陆盆地-前缘隆起的动力模型图(据李勇和闫亮, 2021)

Fig. 11 Dynamics model of the Huaxia orogenic belt-Yangtze foreland basin-forebulge system in the South China Plate

注: 图中显示在华夏地块与东侧原特提斯洋汇聚和碰撞作用下形成的华夏造山带-扬子前陆盆地系统;

川中隆起为前缘隆起, 上扬子盆地为前陆斜坡, 湘中盆地为前渊。

2.3.1 造山带的临界楔模型与水平构造变形作用

Davis et al.(1983)根据物理模拟实验结果提出了造山带的临界楔模型(critical wedge model),将造山楔的形成过程类比于在利用推土机推动沙土的过程中发生挤压变形所形成的“沙土楔”过程,因此也被称为推土机模型。其特点是利用单向的推挤作用导致的挤压变形和扩展等来揭示造山楔的形成过程,认为随着临界楔角的变化造山楔也会发生力学演化,如果造山楔的楔角大于理论临界楔角,造山楔的前缘发生扩展,以前展式的逆冲作用为主;如果造山楔的楔角小于理论临界楔角,造山楔发生收缩和增厚(Dahlen, 1984, 1990; Willett et al., 1993)。该模型奠定了造山带-前陆盆地的水平构造变形作用和断层相关褶皱形成的物理模型。

2.3.2 单侧型造山楔-前陆盆地系统的动力模型

Jordan(1995)提出了单侧型造山楔-前陆盆地的动力模型,造山楔为受单方向挤压形成的楔体,并加载到前陆板块的边缘之上。他利用地壳均衡原理模拟了造山楔构造负载导致的前陆盆地挠曲沉降和地层响应。后来这种方法被应用于全球单侧型造山带-前陆盆地的定量模拟之中(Li et al., 2003; Fielding and Dan, 2012; Sinclair and Naylor, 2012; Allen and Allen, 2013)(图 12)。

2.3.3 双侧型造山楔-前陆盆地系统的动力模型

该模型以阿尔卑斯造山带及其两侧的前陆盆地为典型实例,将造山楔设定为受双向挤压形成的楔体,以楔体的中轴线为界将其划分为位于俯冲岩石圈之上的前侧楔(pro-wedge)-前侧前陆

盆地(pro-foreland basin)系统和位于上覆岩石圈之上的后侧楔(retro-wedge)-后侧前陆盆地(retro-foreland basin)系统(Koons, 1990; Willett et al., 1993; Jordan, 1995; Johnson and Beaumont, 1995; Naylor and Sinclair, 2008; 图 13)。值得注意的是, Sinclair and Naylor(2012)曾指出前侧前陆盆地和后侧前陆盆地均属于周缘前陆盆地,其与弧背前陆盆地类型无关。因此,前侧前陆盆地对应于周缘前陆盆地,而后侧前陆盆地并不对应于弧背前陆盆地。

2.3.4 “盆-山耦合”

许多学者在研究中国大陆内部造山带和前陆盆地时提出了“盆-山耦合”的概念,认为造山带和前陆盆地是大陆构造的基本单元,它们是形成于同一个逆冲构造系统的孪生体,在空间上相互依存,在物质上相互补偿,在演化上相互转化,在动力上相互转换(盆转山、山控盆、盆定山)(李勇等, 1995; 许效松等, 1997; 李勇, 1998; 孙肇才, 1998; 刘和甫等, 2000; 刘树根等, 2003; 吴根耀和马力, 2004; 刘少峰和张国伟, 2005; 邓辉等, 2014; He, 2014; Chen et al., 2020)。“盆-山耦合”的概念体现了在大陆动力学框架下开展造山带-前陆盆地耦合关系的研究思路。研究内容包括被动大陆边缘盆地(或裂谷盆地)与前陆盆地的转换、造山带的隆升与前陆盆地的沉降、造山带的楔进作用(wedging)与前陆盆地沉积物的迁移、造山带的水平挤压作用与前陆盆地的缩短变形、造山带的滑脱作用(detachment)或拆离作用(delamination)与前陆盆地的分层变形、造

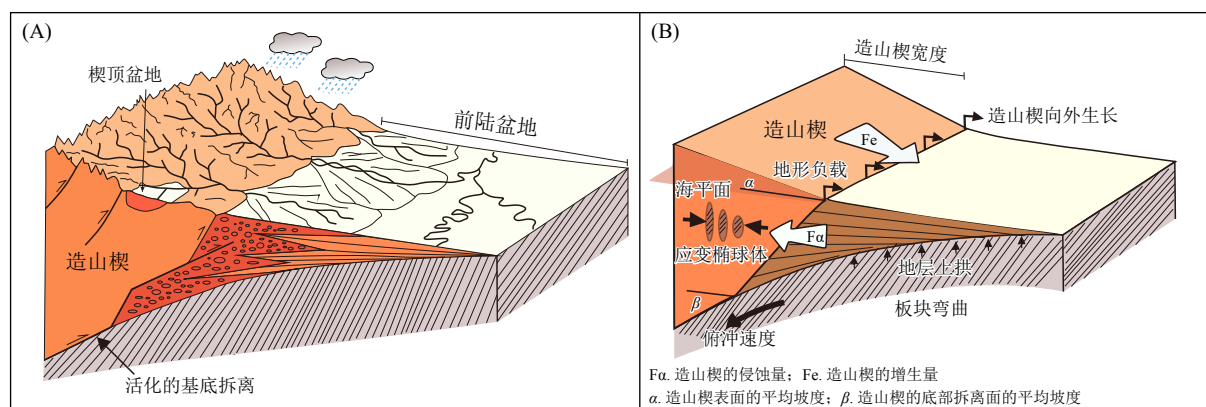


图 12 单侧型造山楔-前陆盆地系统的动力模型图(据 Sinclair, 2012; Sinclair and Naylor, 2012)

Fig. 12 Dynamic model of the unilateral orogenic wedge-foreland basin system

(A)造山楔-前陆盆地系统的地质特征,显示了在板块汇聚过程中造山楔的增生和生长过程,底部拆离面沿阶梯状的断坡-断坪延伸到前陆盆地地层之下的基底滑脱层;(B)造山楔-前陆盆地系统的量化参数

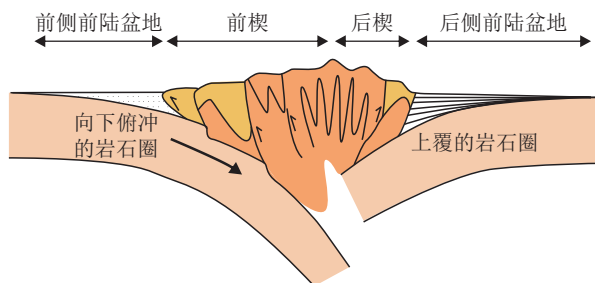


图13 双侧型造山楔-前陆盆地系统的动力模型图
(据 Naylor and Sinclair, 2008)

Fig. 13 Dynamic model of the bilateral orogenic wedge-foreland basin system

注:前侧楔-前侧前陆盆地处于俯冲岩石圈之上,
后侧楔-后侧前陆盆地处于上覆岩石圈之上。

山带的走滑作用与前陆盆地的侧向迁移、造山带的脱顶作用(deroofting)与前陆盆地的沉积充填作用、前陆盆地的地层被卷入造山带与造山带生长、下地壳物质流动与造山带生长等(李勇和闫亮, 2021)。

2.3.5 从地质时间尺度到人类时间尺度的造山带-前陆盆地构造动力学

目前许多地质学家试图建立地质时间尺度(百万年)的构造动力学与人类时间尺度(几十年至几百年)的地震动力学的关联性。Huntington et al.(2018)认为从地质时间到人类时间尺度的构造变形研究是未来的重要方向。值得指出的是,21世纪以来在全球造山带-前陆盆地系统中发生了一系列强震(如2008年龙门山造山带的汶川 M_s 8.0级地震、2015年喜马拉雅造山带的尼泊尔 M_s 8.1级地震、2024年台湾造山带的花莲 M_s 7.3级地震等; Hubbard and Shaw, 2009)和触发地震,给地质学家提供了把地质时间尺度的造山带-前陆盆地系统与人类时间尺度的构造地震活动连接起来的机会。Li et al.(2021)讨论了龙门山造山带-前陆盆地系统的活动构造和地震,认为该领域未来的发展方向是从地质时间尺度的构造动力学发展为人类时间尺度的地震动力学,包括在地质历史时期形成的地质构造对现今构造活动的控制作用、造山带地震构造负载-前陆盆地挠曲沉降作用、从地表到岩石圈的断层行为与地震机制、地表过程与构造作用的相互作用、构造动力学与地震动力学数值模拟等方面。

2.4 前陆盆地地球动力学

前陆盆地地球动力学是以板块构造、岩石圈和地幔对流与前陆盆地动力机制分析为主的研

究方向,探索造山带-前陆盆地系统的地球深部圈层是如何运转,并以怎样的地球动力学过程影响地表过程和地震活动,包括全球构造(板块构造学说、大陆动力学、地幔对流、地球圈层的相互作用等)与造山带-前陆盆地动力学之间的相互关系、造山带构造负载与前陆盆地挠曲机制、板块俯冲负载与前陆盆地挠曲机制、动力地形负载(地幔对流)与前陆盆地挠曲沉降机制等方面(Turcotte and Schubert, 2002; Catuneanu, 2004; Garcia-Castellanos and Cloetingh, 2011; Decelles, 2012; Allen and Allen, 2013; 李勇和闫亮, 2021)。

2.4.1 板块构造、大陆动力学与造山带-前陆盆地地球动力学

板块构造理论将前陆盆地与板块之间的造山作用紧密地联系起来了,并按照板块构造边界的类型对前陆盆地进行了分类,解释了中-新生代以来全球造山带-前陆盆地的形成机制,但是在古生代甚至更古老的地质时期如何应用板块构造解释造山带-前陆盆地的形成机制仍面临很多困难。其原因在于,中-新生代造山带-前陆盆地地球动力学模型很难推演到古生代或前寒武纪,因为造山带-前陆盆地系统位于板块的边缘,随着后期板块的多次汇聚或裂解,当时的造山带-前陆盆地系统已被改造、破坏、掩埋或重置。古生代-前寒武纪造山带-前陆盆地的地球动力学模型只能根据残留的前陆盆地(或造山带)的碎片来推测,例如非洲板块南缘古生代开普造山带-前陆盆地(Catuneanu, 2004)、华南板块早古生代华夏造山带-扬子前陆盆地(李勇和闫亮, 2021)等的地球动力学机制的恢复(图11)。根据大陆与大洋岩石圈不同的结构和形成演化过程提出了超越板块构造理论的大陆动力学(李晓波, 1994)。其核心是把大陆作为一个独立的动力学系统来研究,以大陆尺度研究大陆的成因与演化、大陆地幔、地震和板块边界的相互作用、大陆岩石圈的变形和活性、造山带与沉积盆地等各种基本问题(许志琴等, 2008)。造山带-前陆盆地是研究大陆动力学的突破口,可以研究发生在大陆地壳内部的动力学过程,包括陆内造山带与前陆盆地、地壳增厚与造山带叠置、岩石圈拆离作用与厚皮构造、滑脱作用与薄皮构造、斜向汇聚造山作用与逆冲-走滑作用、造山后伸展作用与塌陷作用、大陆岩石圈流变结构与变

形机制、活动断层与地震活动等(Sun and Dong, 2020; 李勇和闫亮, 2021; Ma et al., 2021; 董云鹏等, 2022)。

2.4.2 地球圈层的相互作用与造山带-前陆盆地地球动力学

在造山带-前陆盆地系统中, 地球深部过程是该系统内深部圈层和浅部圈层构造变动和物质循环的动力源。Roure et al. (2009)提出了层状流变岩石圈的变形模式, 认为现今浅层的大型沉积盆地与深部的地幔过程之间存在着镜像关系, 大型挤压盆地的位置与岩石圈尺度的变形作用具有相关性, 浅层大型沉积盆地的形成不仅与地壳活动有关, 而且与地幔活动有关; Garcia-Castellanos and Cloetingh (2011)认为前陆盆地的形成受控于地壳和地幔构造; Allen and Allen (2013)认为可以利用天然地震层析、地球化学和数值模拟等方法探索以板块构造为代表的岩石圈动力学和以地幔柱为代表的地幔-岩石圈动力学与造山带-前陆盆地地球动力机制的关系是未来研究的重要方向; 此外, 近年来一些学者(Catuneanu, 2004; Liu et al., 2011; DeCelles, 2012)在早期确定的造山带构造负载(或地壳负载、地形负载、地貌负载等)的基础上发现了俯冲负载(如陆壳俯冲到地壳或岩石圈之下形成的负载)和动力地形负载(地幔流动形成的岩石圈之下的负载)等新的负载类型, 并提出了3种前陆盆地挠曲沉降类型及相应的形成机制(图 14), 包括构造(地形)负载引起的挠曲沉降机制、俯冲负载引起的挠曲沉降机制和动力地形引起的挠曲沉降机制(Liu et al., 2011, 2014)。其中构造(地形)负载导致短波长的挠曲作用, 而俯冲负载和动力地形负载则导致长波长的挠曲作用。由于构造(地形)负载、俯冲负载和动力地形负载的挠曲响应均以不同的波长导致相应的挠曲作用, 因此在3种挠曲作用之间存在着相长或相消的叠加作用。

(1) 岩石圈挠曲作用与造山带-前陆盆地的构造负载-挠曲沉降模型

根据岩石圈均衡补偿原理, 很多学者(Beaumont, 1981; Allen and Homewood, 1986; Burbank, 1992; Watts, 1992; 李勇和曾允孚, 1994; Jordan, 1995; Toth et al., 1996; Decelles and Giles, 1996; Brown, 2001; Li et al., 2003; 刘少峰和张国伟, 2005;

Garcia-Castellanos and Cloetingh, 2011)利用岩石圈挠曲作用建立了造山带-前陆盆地的构造负载-挠曲沉降模型, 认为造山带的构造负载导致了前陆盆地岩石圈的挠曲沉降作用, 包括: ①前陆盆地的宽度和深度与造山带构造负载的规模和岩石圈挠曲刚度有关, 其下沉幅度与其距造山带的远近有关, 距离造山带越远, 下沉幅度越小, 因此前陆盆地的横剖面具有不对称性; ②造山带的逆冲构造负载力(包括造山带的初始宽度、厚度、平均密度、地表坡度、底部拆离面的倾角等)、岩石圈流变模型(包括岩石圈弹性挠曲模型、黏弹性挠曲模型和地壳有效弹性厚度等)、水平挤压作用力(包括造山带的推进速度、前陆盆地沉积相带的迁移速率等)和沉积物负载力(包括沉积物扩散方式和搬运系数等)是控制前陆盆地挠曲作用的4个基本参数(刘少峰和张国伟, 2005; Allen and Allen, 2013)。但是, 如何将造山带-前陆盆地的垂向运动模型(岩石圈挠曲模型)与水平运动模型(上地壳的水平挤压作用与构造变形)进行融合仍然十分困难。

(2) 俯冲板块负载作用及其对周缘前陆盆地挠曲作用的叠加作用

在阿尔卑斯造山带南缘的前陆盆地[如波河-亚得里亚(Po-Ariatic)前陆盆地]中, 鉴于其真实沉降幅度比由地形负载、沉积物负载挠曲模拟所预测的沉降幅度大3~4倍, 许多学者提出了俯冲负载作用也是周缘前陆盆地岩石圈挠曲沉降的驱动力的观点(DeCelles, 2012; 图 14)。俯冲负载是指由致密的(或密度大的)洋壳向下俯冲到前陆板块之下(深度为50~100 km)导致的向下剪切力和拖曳力形成的负载作用, 并引起前陆盆地发生长波长的挠曲作用。这种由俯冲负载引起的长波长挠曲作用和由地形负载引起的短波长挠曲作用的叠加作用导致了周缘前陆盆地挠曲沉降幅度的增大。由于周缘前陆盆地均位于俯冲板块之上, 因此它们的挠曲沉降幅度均会受到俯冲负载的影响。

(3) 地幔流动导致的动力地形负载及其对弧背前陆盆地挠曲作用的叠加作用

均衡地形是由岩石圈构造负载(或卸载)作用引起的地表地形的垂向变化, 而动力地形(dynamic topography)是由地幔流动引起的地表地形的垂向变化(Gurnis, 1993; 图 14)。许多学者

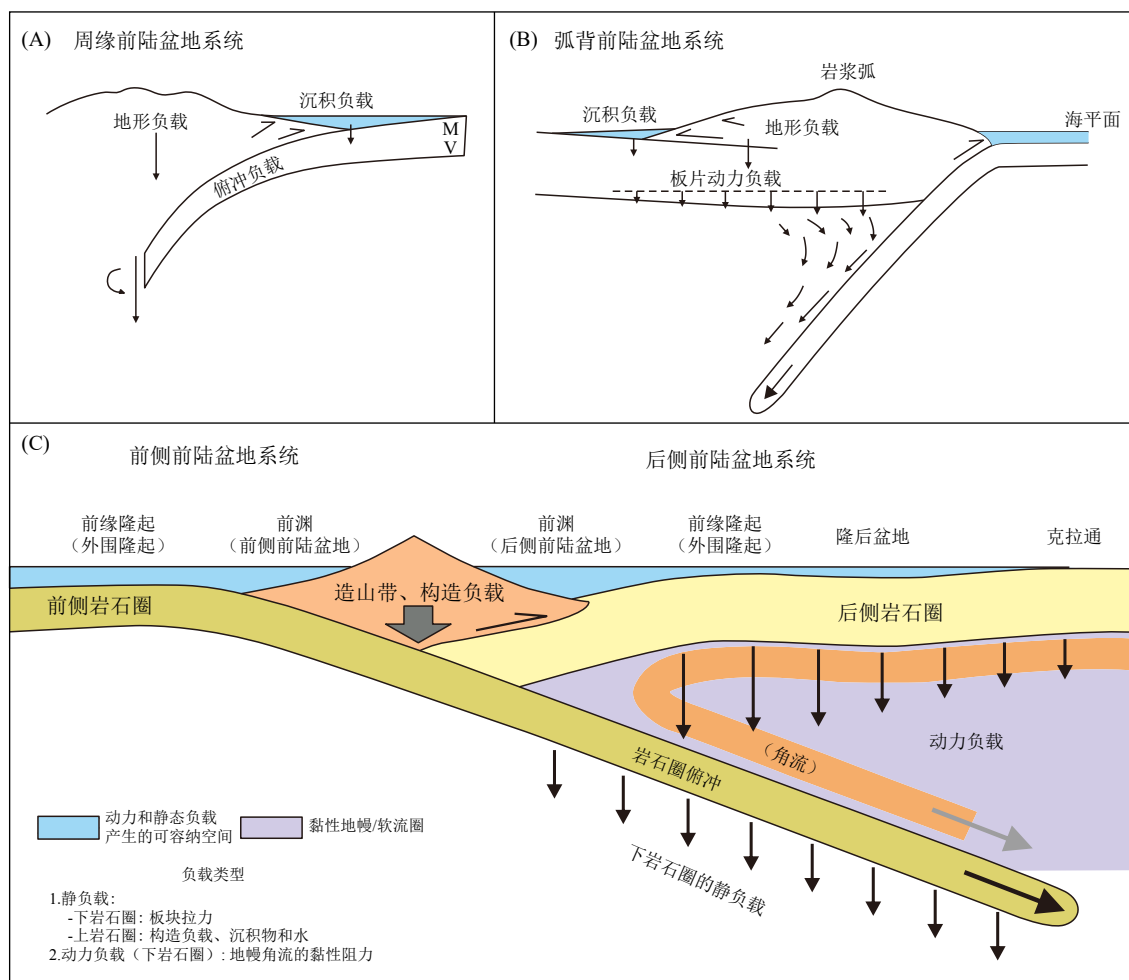


图 14 造山带-前陆盆地系统中的构造负载类型与前陆盆地挠曲沉降

Fig. 14 Types of tectonic loads in orogenic belt-foreland basin systems and the flexural subsidence of foreland basins

(A) 周缘前陆盆地系统中主要负载类型包括地形负载、沉积负载和俯冲负载 [在 50~200 km 深处由俯冲板块导致的垂直剪切力(V)和俯冲板块末端的弯曲力矩(M)造成的俯冲负载] (据 DeCelles and Giles, 1996); (B) 弧背前陆盆地系统中的主要负载类型包括地形负载、沉积负载和动力地形负载(由俯冲板块、上地幔与仰冲大陆板块底面之间的黏滞耦合作用引起的动力地形负载) (据 DeCelles and Giles, 1996); (C) 双侧前陆盆地, 由岩石圈上或岩石圈下的负载及其导致的挠曲作用而形成, 包括造山带驱动的挠曲构造(或ogen driven flexural tectonics)和俯冲驱动的动力沉降(subduction-induced dynamic subsidence) (据 Catuneanu, 2004)

(Gurnis, 1993; 刘少峰, 2008; Liu et al., 2011, 2014) 认为北美板块西部的弧背前陆盆地受到造山带的构造负载和动力地形负载的共同控制。其中均衡地形以短波长、幅度较大(最大幅度约为 4 km)、时间较长(数十个百万年)为特征; 动力地形以长波长、幅度较小(最大幅度约为 2 km)、时间较短(几个至数十个百万年)为特征。因此, 均衡地形负载和动力地形负载导致了不同波长的挠曲作用的叠加(Catuneanu, 2004; 图 14)。

(4) 下地壳流对陆内造山带-前陆盆地挠曲作用的叠加

陆内造山带-前陆盆地的岩石圈挠曲作用主

要受上地壳构造(地形)负载的控制。虽然在板块内部不存在俯冲负载或动力地形所导致的挠曲沉降作用, 但是可能存在由下地壳流流动导致的下地壳负载。Clark and Royden(2000)、Clark et al.(2004)认为青藏高原的下地壳流的流动方向为北东向和南东向, 并对边缘造山带地貌的形成和强烈地震的发生具有控制作用, 例如 2008 年在龙门山发生的汶川地震可能与青藏高原的下地壳流的流动有关(Burchfiel et al., 2008)。此外, Burov and Toussaint(2007)提出了在陆内造山带-前陆盆地中的下地壳流侧向流动的反馈机制(图 15), 认为地表物质从造山带的高地形被剥

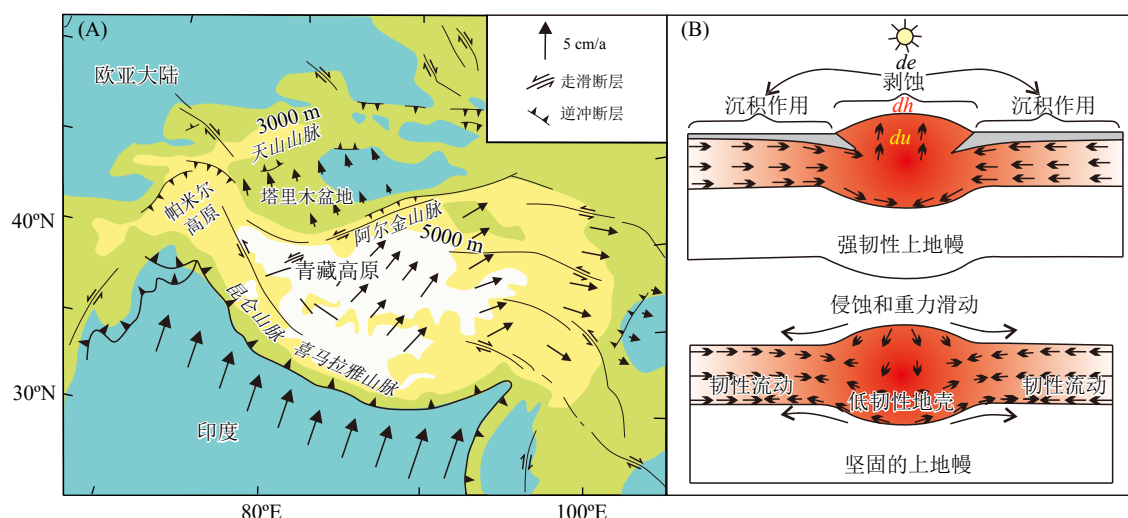


图 15 陆内造山带-前陆盆地系统下地壳流的侧向流动与地表过程的概念模型

Fig. 15 Conceptual model of lateral flow of lower crustal flow and surface processes in the intracontinental orogenic belt-foreland basin system

(A)青藏高原和陆内造山带与印度-亚洲板块碰撞作用的模式图,显示了主要构造单元(如喜马拉雅山、青藏高原、塔里木盆地、帕米尔高原、天山等)及其地表运动方向和速率;(B)陆内造山带-前陆盆地的大陆地壳岩石圈的流变剖面,显示了地表过程、重力均衡反弹、下地壳流之间的反馈作用,地表物质从高地形的造山带被剥蚀(卸载),并沉积到前陆盆地,沉积负载引起了下地壳流的水平运动,并驱使深部物质流向造山带。在造山带下地壳流可以“溢出”(从高地形的地下溢出)或者“流入”(流向高地形的根部),当流入发生时,将导致造山带的构造负载增加和地表高度抬升

(据 Burov and Toussaint, 2007)

(de 为剥蚀速率; dh 为地表高度隆升速率; du 为地壳隆升速率)

蚀卸载,沉积物被搬运到前陆盆地形成沉积负载,引起前陆盆地深部的下地壳流向造山带方向的流动。当下地壳流从低地形的前陆盆地向高地形的造山带的根部流入时,在造山带发生构造负载的加载和造山带的增长,当下地壳流从高地形的造山带的根部向前缘方向流出时,在造山带产生构造负载的卸载和造山带的衰退。因此该研究方向的未来挑战是探索下地壳流负载对陆内造山带-前陆盆地挠曲沉降的叠加作用。

2.4.3 造山带-前陆盆地深部构造作用与表面过程的相互关系

“深浅结合”是造山带-前陆盆地动力学未来研究的方向之一。(1)深部构造作用(如岩石圈挠曲作用、下地壳流的横向流动和地幔的流动等)控制了造山带-前陆盆地的地表过程和环境变化,其不仅导致了地震、海啸、滑坡等自然灾害的发生,而且对造山带-前陆盆地的地表地形、剥蚀作用、地形雨、河流连通性、沉积物再分配等过程具有控制作用(Burov and Toussaint, 2007; Garcia-Castellanos and Cloetingh, 2011);(2)地表过程(或气候)对造山带-前陆盆

地的深部构造作用也具有控制作用。许多学者(Koons, 1990; Molnar, 2012)认为地表剥蚀作用(或地形雨)也是一种造山驱动力(orographic forcing of the precipitation),以剥蚀卸载和沉积加载等方式影响深部应力状态的变化,可以导致剥蚀卸载隆升、沉积负载沉降、深部构造复活(如山前降雨带的构造复活, Burbank and Anderson, 2012)和下地壳流的流动(Beaumont et al., 2000)等。

2.5 前陆盆地成藏动力学

前陆盆地成藏动力学是以地层流体、沉积成矿和油气成藏分析为主的研究方向,经历了常规油气和非常规油气2个研究阶段。其研究目标是评价前陆盆地充填物及其所含流体和烃类的生成和运移,包括流体系统与成藏系统、油气系统与成藏动力学、页岩气富集机制等方面(李勇和闫亮, 2021)。

2.5.1 前陆盆地常规油气成藏动力学

自20世纪70年代以来,前陆盆地的常规油气勘探获得突破(如阿巴拉契亚前陆盆地、落基山前陆盆地、东委内瑞拉前陆盆地、哥伦比亚前陆盆地等; Lacombe et al., 2007),不仅证明了前陆

盆地是常规油气聚集的重要场所(MacQueen and Leckie, 1992), 而且也形成了“成山(造山带)-成盆(前陆盆地)-成藏(油气藏)”的研究思路, 包括油气系统与成藏动力学、油气分布与成藏模式、油气系统与流体系统、构造单元与油气分布、地层单元与油气分布、油气运-聚单元与油气成藏特征等方面(李勇和闫亮, 2021)。

(1) 前陆盆地常规油气分布模式

根据北美板块前陆盆地的常规油气的空间分布特点(如阿巴拉契亚造山带-前陆盆地系统、科迪勒拉造山带-前陆盆地系统), MacQueen and Leckie(1992)提出前陆盆地常规油气分布模式

(图16), 其中气藏区位于靠近造山带一侧, 油藏区位于远离造山带的前陆一侧, 认为造山带逆冲挤压作用导致了前陆盆地流体的运移和油气空间分布, 构建了前陆盆地常规油气藏分布模型, 包括近端气藏、逆冲带下伏的油气藏、远端油藏和深盆气等油气藏类型(MacQueen and Leckie, 1992; Bachu, 1999)。中国学者(何登发等, 1996; 孙肇才, 1998; 刘和甫等, 2000; 刘树根等, 2003; 金之钧等, 2004; 刘池洋, 2005; 陈发景等, 2007; 郑民等, 2010)提出了中国西部陆内前陆盆地常规油气成藏模式, 并在天山前陆冲断带、龙门山前陆冲断带获得了油气发现。

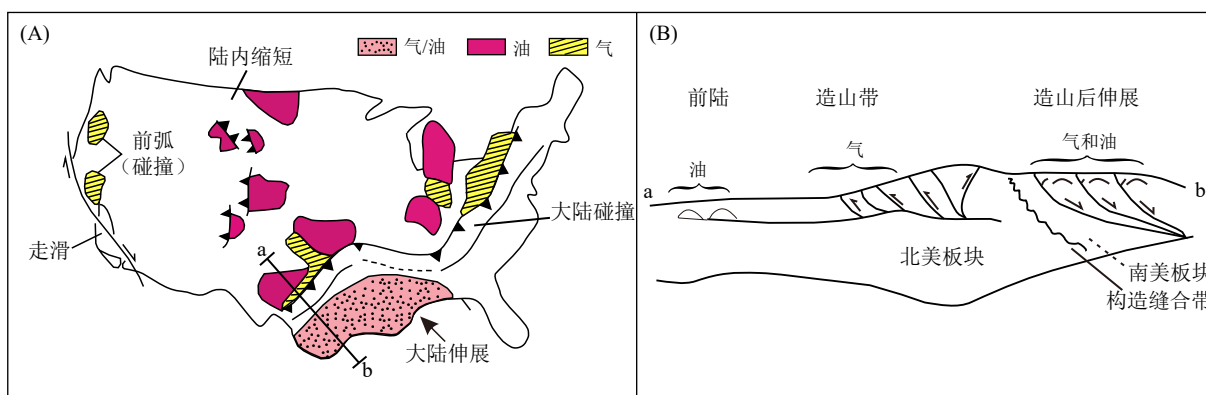


图16 北美板块前陆盆地的常规油气分布模式图(据李勇和闫亮, 2021)

Fig. 16 Distributions of conventional oil and gas in the foreland basins of the North American Plate

(A) 常规油气在前陆盆地的平面分布, 由造山带逆冲作用驱动的构造流体运移控制了前陆盆地油气的分布规律, 其中气藏区位于靠近造山带一侧, 油藏区位于远离造山带的前陆一侧; (B) 常规油气在前陆盆地剖面上的分布, 剖面位置见图16-A中a—b

(2) 前陆盆地常规油气系统与油气运-聚单元 Bachu(1999)利用油气系统(petroleum system)的概念来研究前陆盆地含油气系统和油气成藏规律, 建立了前陆盆地油气系统, 包括地质条件、油气运移过程[烃类来源、生烃、排烃、流体运移和通道(路径或输导系统)等]和油气成藏系统(油气聚集条件和位置)。在前陆盆地系统中至少可以划分出2个子油气系统(如前陆冲断带、前陆斜坡带等), 在子油气系统中至少包含3个区带或油气运-聚单元(hydrocarbon migration-accumulation units)。每个区带或油气运-聚单元具有特定的边界、逆冲断层组合、油气和流体运移方向和油气藏分布(图17)。

(3) 造山带-前陆盆地流体系统的流体运移模式

根据造山带-前陆盆地系统的热流场、应力

场等控制了前陆盆地的流体运移模式和运移方向, Swennen et al.(2004)建立了造山带-前陆盆地的流体系统: (1)在沿造山带-前陆盆地的方向上

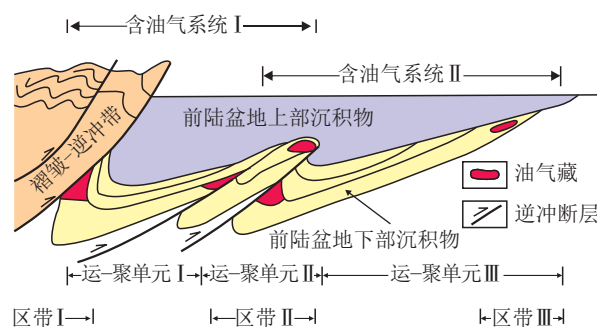


图17 前陆盆地油气系统与油气运-聚单元的分布模式图(据Bachu, 1999)

Fig. 17 The distribution of oil and gas systems, and oil and gas transport accumulation units in the foreland basin

(图中包含2个子油气系统和3个油气运-聚单元)

热流场(热梯度和温度等)具有逐渐降低的趋势,表明由造山带的构造挤压作用导致的流体运移是驱动前陆盆地油气运移和聚集的机制;(2)在造山带前缘挤压作用下,岩石孔隙中的挤出流体(含矿质、矿液、烃组分、热量的挤出流体)沿着应力薄弱带进入到前陆盆地沉积地层之中,不仅使得前陆盆地沉积地层再次加热和活化,而且流体中的碳氢化合物(烃类)停滞在岩性或构造圈闭中形成油气藏;(3)前陆盆地流体迁移模式包括上侵型热流体迁移模式(up-dip migration of hot fluids; 主要分布于前陆逆冲带)、后构造环境(post-tectonic environment)的流体迁移模式和长距离的流体迁移模式;(4)流体的驱动机制包括重力和地形驱动、压实和超压体系驱动、热驱动、构造应力驱动、地震驱动等多种类型。

2.5.2 前陆盆地非常规油气(页岩气等)富集机制

21 世纪以来在古生代前陆盆地中页岩气勘探开发获得突破,例如阿巴拉契亚前陆盆地的 Ohio 页岩气田、沃希托前陆盆地(福特沃斯盆地)的 Barnett 页岩气田、扬子前陆盆地的龙马溪组页岩气田等(邹才能等, 2020; McMahon et al., 2024)(图 18~20),证实了前陆盆地黑色页岩具有生成和保存页岩气的地质条件(龚建明等, 2012),包括前陆盆地页岩气的地质条件、黑色页岩形成的古构造-古地理-古气候条件、黑色页岩的孔隙类型与储层特征、页岩气富集机制与保存条件、页岩气评价与常规-非常规油气融合的前陆盆地全油气系统等方面(李勇和闫亮, 2021)。

(1)前陆盆地黑色页岩与页岩气形成的特殊地质条件

虽然黑色页岩可以在很多不同的盆地类型

中(如克拉通盆地、裂谷、被动大陆边缘和主动大陆边缘盆地等)形成(McMahon et al., 2024),但是前陆盆地所具有的特殊地质条件(如位于稳定大陆边缘、半封闭的盆-山系统)使得黑色页岩不仅能够形成而且能够保存,使得前陆盆地成为页岩气最富集的盆地类型(如北美板块的古生代阿巴拉契亚-沃希托前陆盆地和华南板块的古生代扬子前陆盆地等)(图 18~20)。前陆盆地所具有的形成富有机质黑色页岩的沉积环境(如盆-山系统的古地貌条件导致的封闭-半封闭的缺氧滞留环境)、挠曲沉降产生的可容纳空间、持续沉降和埋藏导致的较高的有机质成熟度使得前陆盆地不仅具备了形成页岩气藏良好的物质基础,也具备了页岩气富集和保存条件(李勇和闫亮, 2021; 李勇等, 2024)。中国页岩气勘探已有 20 年的历史,虽然已在中国很多盆地中探明了具有开采潜力的页岩气田,但是在其中的大部分盆地中仍未获得稳定的页岩气产量,现有的页岩气产量主要来自于早古生代扬子前陆盆地的五峰组-龙马溪组黑色页岩(贾承造, 2017; 聂海宽等, 2020; 邹才能等, 2020; 张金川等, 2021; 李勇和闫亮, 2021; 李勇等, 2024; 戴金星等, 2024; 图 18),因此古生代扬子前陆盆地不仅是目前中国页岩气最富集的前陆盆地,也是中国未来页岩气勘探开发的主体盆地。

(2)前陆盆地黑色页岩形成的古地形条件和古水深条件

前陆盆地黑色页岩主要分布于前陆斜坡-前渊的陆棚环境,包括浅水型黑色页岩(如阿巴拉契亚前陆盆地的黑色页岩分布于前陆斜坡上部的浅水环境,古水深为 30~40 m; Smith et al., 2019)和深水型黑色页岩(如福特沃斯前陆盆地

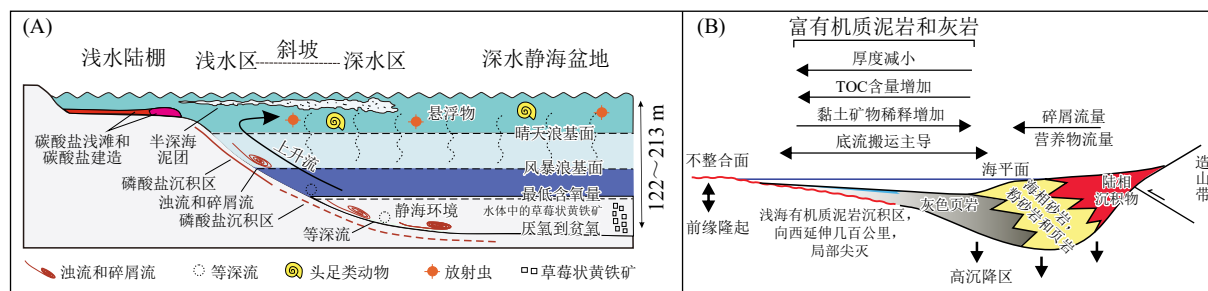


图 18 前陆盆地黑色页岩有机质富集的沉积模式

Fig. 18 Sedimentary model of organic matter enrichment in the black shale of the foreland basin

(A)前陆盆地深水型黑色页岩的沉积模式(据 Loucks and Ruppel, 2007);(B)前陆盆地浅水型黑色页岩的沉积模式

(据 Smith et al., 2019)

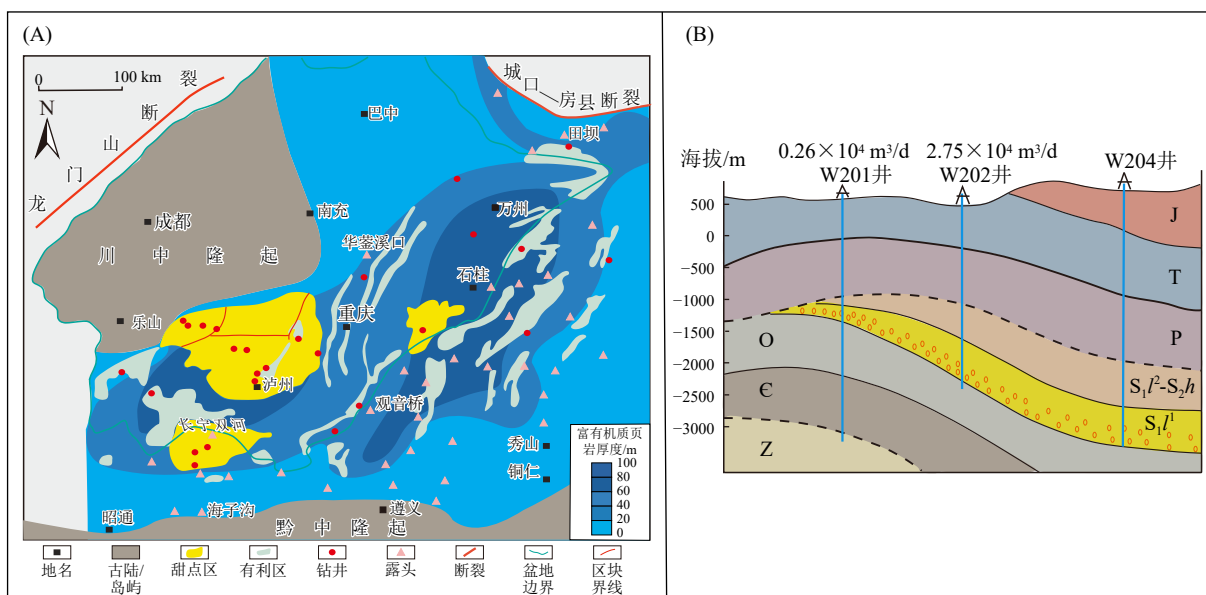


图 19 华南板块早古生代扬子前陆盆地页岩气“甜点区”分布图与页岩气保存的“前陆斜坡型模式”

Fig. 19 Distribution of the “sweet spot” of shale gas in the Early Paleozoic Era Yangtze foreland basin of the South China Plate, and the foreland slope model of shale gas preservation

(A)早古生代扬子前陆盆地(现今四川盆地及周缘地区)五峰组-龙马溪组页岩气“甜点区”的空间分布图(据邹才能等, 2020);(B)早古生代晚期扬子前陆斜坡带页岩气的保存模式图(以威远隆起东南侧的斜坡为例),以准原位、弱变形、弱改造的前陆斜坡为特点(据 2021 年内部资料)

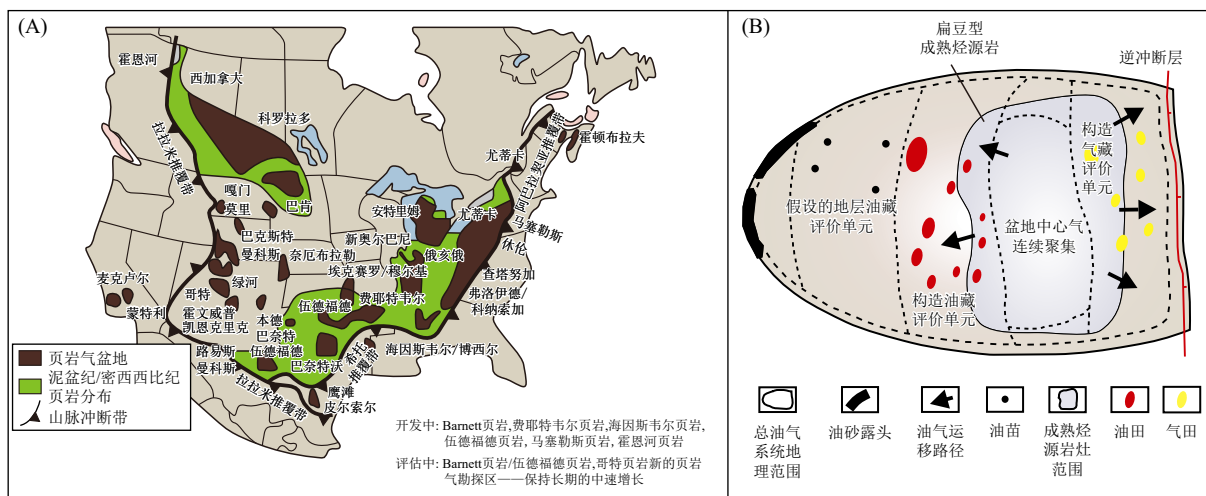


图 20 北美板块造山带-前陆盆地系统空间分布与福特沃斯前陆盆地 Barnett 页岩的总油气系统平面图

Fig. 20 The spatial distribution of the orogenic belt-foreland basin systems in the North American Plate and the total petroleum system map of the Barnett shale in the Fort Worth foreland basin

(A)北美板块边缘造山带-前陆盆地系统与页岩气盆地分布图,显示页岩气主要分布于美国东部古生代造山带-前陆盆地系统(包括阿巴拉契亚造山带-前陆盆地系统和沃希托造山带-前陆盆地系统)和西部中生代造山带-前陆盆地系统(包括拉拉米造山带-前陆盆地系统等)(据 U.S. Geological Survey National Assessment of Oil and Gas Resources Team and Biewick, 2013);(B)福特沃斯前陆盆地 Barnett 页岩的总油气系统分布的平面图,显示油田、页岩气田、成熟烃源岩灶、油气运移路径等的空间分布(据 Pollastro, 2007; 宋岩等, 2024)

的黑色页岩分布于前陆斜坡下部的深水环境, 古水深为 122~213 m; Loucks and Ruppel, 2007) (图 17)。

在华南板块的古生代扬子前陆盆地(残留于现今四川盆地及周边区域)中,五峰组-龙马溪组的黑色页岩主要分布于加里东期川中隆起的东

南斜坡,属于在前陆斜坡带上形成的浅海相黑色页岩,例如本团队曾在威远地区的五峰组黑色页岩中发现含介壳层的黑色页岩,具有风暴岩的沉积序列,为形成于浅水环境的风暴流沉积物,表明该套黑色页岩形成于风暴浪基面以上的浅水环境中(常见于 30 m 水深处)。在深水的前渊沉积带发育“灰色页岩”或“砂岩和灰色页岩互层”沉积物,其中的灰色页岩的有机质含量低,不属于烃源岩或母岩,不能形成工业性的页岩气藏。

(3)形成前陆盆地黑色页岩的古海洋和古气候条件

黑色页岩的形成机制包括缺氧机制和生产力机制(如上升洋流等)等类型(anoxia vs. productivity; Pedersen and Calvert, 1990)。前陆盆地典型的地层序列为底部不整合面(风化壳型岩溶储层)-礁滩相(礁滩相储层)-黑色页岩-碎屑岩夹碳酸盐岩。大套黑色页岩主要出现在前陆盆地充填序列的底部,属于早期海侵黑色页岩,其形成时间与造山带的主造山幕相同(Ettensohn and Lierman, 2012)。已成功开发的前陆盆地黑色页岩均形成于低纬度的热带气候带,如福特沃斯前陆盆地 Barnett 页岩、阿巴拉契亚前陆盆地 Ohio 页岩、扬子前陆盆地龙马溪组黑色页岩等,因此,我们认为前陆盆地黑色页岩的形成不仅与“盆-山系统”的半封闭-封闭的古地貌条件有关(如造山带以岛链将前陆盆地的海域与外海分隔,导致海水的流通性受限),而且与热带气候带的上升洋流具有关联性,其可能是缺氧机制和生产力机制叠加的产物。

(4)前陆盆地页岩气的保存条件

前陆盆地主要位于稳定大陆板块边缘,这为黑色页岩保存提供了稳定的地质背景条件。(1)造山带构造负载驱动的挠曲沉降导致前陆盆地具有较大的沉积物容纳空间,这便于黑色页岩的持续沉积、沉降和埋藏,并使有机质达到较高的成熟度(李勇和闫亮, 2021),黑色页岩分布的区域包括前陆斜坡带(以高有机质成熟度的热成因气为主)和隆后盆地(以低有机质成熟度的生物气为主);(2)页岩气的保存模式为由大套区域分布的致密灰岩或砂岩层作为顶、底板“封闭”的黑色页岩层;(3)页岩气富集单元的类型包括源-储分离型(如互层型或夹层型)、源-储共存

型(如混积页岩)和源-储一体型等类型(郭旭升等, 2024),具有近源(或源内)成藏和自生自储的特征。页岩气保存的局部构造类型包括斜坡型、背斜型和向斜型。

(5)前陆盆地页岩气的评价参数与潜力预测

虽然目前中国已在多地区、多层位获得了页岩气发现,但是其中大部分地区仍未实现产量突破,现有的页岩气产量主要来自于早古生代扬子前陆盆地的五峰组-龙马溪组黑色页岩,其将是中国未来页岩气勘探开发的主体(张金川等, 2021; 图 19)。郭旭升等(2024)提出了页岩气“二元富集”理论,认为沉积环境是富集高产的基础,保存条件是富集高产的关键。此外,造山带的逆冲挤压作用和前陆盆地的页岩有机质热演化程度决定了流体性质和流体运移,也对页岩气富集发挥了作用。因此,目前需要根据全球前陆盆地页岩气勘探开发成果,总结前陆盆地页岩气富集的关键参数,探索全球前陆盆地页岩气富集机理与资源潜力,包括前陆盆地黑色页岩产出状态(不整合面、上超点、地层尖灭点和削截点)、页岩气富集层(“甜点”段)的时间位置(前陆盆地的早期或晚期)、页岩气富集区(“甜点”区)的空间位置(如前陆斜坡、隆后盆地等)、生储盖组合(大套灰岩夹黑色页岩或大套砂岩夹黑色页岩)、逆冲事件驱动的热事件和流体与页岩气富集机制、稳定大陆(前陆)页岩气保存条件与资源潜力预测等。

2.5.3 前陆盆地全油气系统

Magoon and Dow(1994)提出了油气系统的概念,试图利用系统论揭示常规油气的成藏要素和动态过程(生烃、排烃、运移和聚集)。Law and Curtis(2002)提出了非常规油气系统(unconventional petroleum systems),试图揭示非常规油气的富集要素和富集机制。目前已经将常规油气系统和非常规油气系统进行融合,提出了总油气系统(total petroleum system; Pollastro, 2007)或全油气系统(whole petroleum system; 贾承造, 2017)等概念。贾承造(2017)认为全油气系统的研究内容包括烃类的生成-运移-聚集以及后期调整和改造的全过程,涵盖常规和非常规油气资源;宋岩等(2024)认为全油气系统是对传统的油气系统的拓展,增加了非常规油气系统与常规油气系统的共生或有序成藏,建立了与烃源岩相关的常

规-非常规油气资源的形成机理、分布规律及其关联性,包括“地质要素、动态演化、油气分布”3个方面(图20)。根据前陆盆地常规油气和非常规油气的共存性,李勇和闫亮(2021)认为前陆盆地全油气系统是由常规油气系统-非常规油气系统(包括致密油气子系统和页岩油气子系统)组成,提出了前陆盆地油气系统的烃类物质流分析方法,揭示烃类物质流的形成、路径和聚集过程,建立前陆盆地常规油气-致密油气-页岩油气成藏序列,包括烃类物质来源、流体运移通道、油气富集或成藏场所等,为前陆盆地常规-非常规油气整体研究和立体勘探开发提供依据。

(1)前陆盆地全油气系统具有常规、非常规油气共存的特征

前陆盆地不仅是常规油气聚集和页岩气富集的主要场所,而且具有常规油气、致密气和页岩气共存的特征(如阿巴拉契亚前陆盆地)(图20)。这些不同类型的油气通常分布在不同的储层类型、层位和构造单元。其中常规油气储存在砂岩或碳酸盐岩储层中,页岩气则储存在页岩储层中。据估计,在烃源岩中已运移的油气(常规)仅为10%~15%;未运移的或原地的油气(非常规)达85%~90%,因此,前陆盆地具有连续型分布的页岩油气、断续型分布的致密油气、非连续型分布的常规油气3种油气藏类型(戴金星等, 2024)。这些新认识不仅增加了前陆盆地油气资源量和油气供给量,延长了油气田寿命,而且为建立前陆盆地的烃类物质流与常规-非常规油气融合的资源评价奠定了物质基础。

(2)造山带-前陆盆地的挤压流体系统控制了单方向的烃类物质流动和油气运移

前陆盆地全油气系统具有单方向的“源-运-聚系统”,包括页岩油气(滞留烃)、致密油气和常规油气系统。前陆盆地的“源-运-聚”控制了单方向的油气运移,包括源(有机质富集、生烃、排烃、生油岩分布)-运[路径(输导系统)、运移方式、流体特征]-聚(储集特征、渗流特征、聚集单元、聚集机理、盖、圈)-保(保存条件)。按油气运移过程,前陆盆地全油气系统包括烃类生-排-运-聚的全过程。按油气运移距离,前陆盆地全油气系统为“长短结合的油气运移”,具有滞留烃(页岩油气)、近距离运移烃(致密油气)和长距离运移烃(常规油气)的常规-非常规油气运

移机理。造山带-前陆盆地系统的挤压流体对单方向的烃类物质流动、TOC值变化趋势、 R_o 值变化趋势具有控制作用。

(3)造山带-前陆盆地系统的构造单元控制了常规、非常规油气的空间分布和位置

前陆盆地全油气系统具有全盆地油气分布特征,常规油气与非常规油气分布于不同的空间位置和构造单元,包括近端的碎屑岩油气、中端的页岩油气和远端的碳酸盐岩油气。非常规油气分布于靠近造山带的前渊-前陆斜坡,而常规油气分布于远离造山带的前陆斜坡-前缘隆起(图20)。

(4)前陆盆地烃类物质流的生命周期与资源量评价

过去非常规油气资源(页岩油气和致密油气)对前陆盆地油气资源量的贡献很小(或完全没有),但是我们推测非常规油气资源对未来的前陆盆地油气资源量会做出相当大的贡献。鉴于前陆盆地具有全盆的油气资源,因此,本次提出了基于全生命周期理论和烃类物质流分析的全油气资源量的评价方法,统一评价常规油气资源量和非常规油气资源量,分析烃类物质流的形成、路径和聚集过程,刻画烃类物质的形成(生烃)、排烃、运移(通道)和富集(或成藏)的过程,打破常规油气地质理论与非常规油气地质理论的界限。通过对前陆盆地烃源岩的总生烃量、残留的烃量(潜在的页岩油气资源量)、已迁移的烃量(潜在的常规油气资源量)、产量(目前常规和非常规油气产量)的计算和统计,可以研究烃类物质的流量和供给链(常规油气-致密油气-页岩油气),获得潜在的油气资源量(包括常规油气、致密油气、页岩油气的资源量),为前陆盆地常规-非常规油气整体研究和整体勘探开发提供依据。

2.6 前陆盆地动力学模拟

前陆盆地动力学本质上是由一系列相关的物理、化学过程耦合而成的动力学过程。因此不仅需要根据野外地质资料和地球物理资料来建立造山带-前陆盆地动力学的理论模型,而且需要数据或模拟技术来证实和完善这些理论模型。许多学者(Sinclair et al., 1991, 1992; Garcia-Castellanos and Cloetingh, 2011; Allen and Allen, 2013)曾基于构造平衡剖面和前陆盆地挠曲沉降机制

等理论,使用手工模拟、物理模拟和数值模拟等方法对造山带-前陆盆地动力过程进行了模拟。

2.6.1 造山带-前陆盆地构造平衡剖面模拟的原理与方法

加拿大学者 Chamberlin(1910)首次利用手工的构造平衡剖面(balanced section)研究了阿巴拉契亚造山带的构造缩短作用。其后 Dahlstrom(1969)利用地震反射剖面制作的平衡的横剖面(balanced cross-sections)研究了造山带-前陆盆地的几何结构和缩短量。构造平衡剖面的基本原理为物质守恒原理,即岩层在构造变动前后其体积保持不变,遵守几何守恒原理(包括面积、长度、厚度、缩短量、位移量等守恒)。目前构造平衡剖面理论和方法已成为研究造山带-前陆盆地缩短量的基本方法,并由手工制作剖面发展为利用计算机进行模拟。近年来 Lomask(2007)提出了层拉平技术,利用地震地层学方法对三维地震覆盖区的弱变形的盆地构造进行拉平恢复。Li et al.(2017)曾采用构造平衡剖面技术计算龙门山造山带(中段)-前陆盆地的缩短量(图 21),显示了晚三叠世以来龙门山总的地壳缩短率为 68.8%,总的缩短距离为 146.9 km,主要有 2 个缩短时期,分别为晚三叠世(缩短速率为 3 mm/a)和

晚新生代(缩短速率为 2 mm/a)。

2.6.2 造山带-前陆盆地构造负载-挠曲沉降模拟的原理与方法

Jordan(1981)最初提出了造山带-前陆盆地的构造负载-挠曲沉降理论,并利用加载于黏弹性或弹性板片(岩石圈)上的构造负载来模拟前陆盆地的挠曲沉降(Jordan, 1995)。其后,这种方法被应用于全球造山带-前陆盆地研究之中(Covey, 1986; Crampton and Allen, 1995; Galewsky, 1998; Allen et al., 2001; Li et al., 2003; 刘少峰和张国伟, 2005; 温德顺, 2006; 陈发景等, 2007)。Allen and Allen(2013)总结了构造负载-挠曲沉降模拟方法,包括在连续板片上的点状负载或线状负载的挠曲变形模拟方法、在连续板片上的分散式负载的挠曲变形模拟方法、在破裂板片上的线状负载的挠曲变形模拟方法,认为造山带的逆冲构造负载和岩石圈流变特征控制了前陆盆地的沉降和沉积作用。Li et al.(2003)利用构造负载-挠曲沉降模拟方法建立了龙门山造山楔-前陆盆地-前缘隆起的弹性挠曲模型(图 22),揭示了构造负载、弹性板片的岩石圈特征、表面过程对前陆盆地挠曲沉降和前缘隆起挠曲隆升的控制作用。

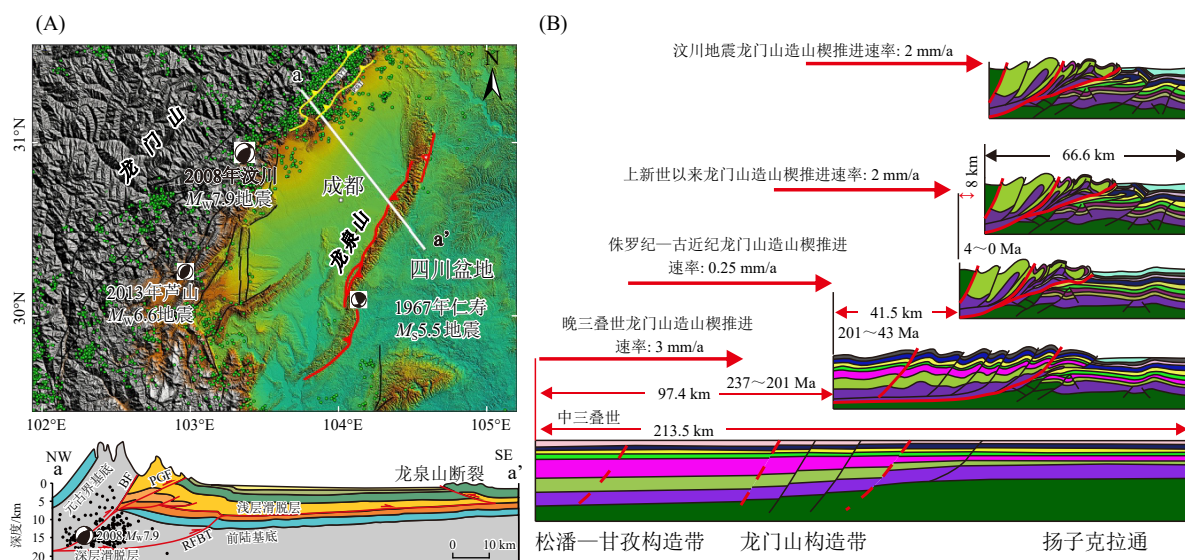


图 21 晚三叠世以来龙门山造山带-前陆盆地的构造缩短过程与缩短速率

Fig. 21 Tectonic shortening process and shortening rate of the Longmenshan orogenic belt-foreland basin system since the Late Triassic Epoch

(A) 现今龙门山造山带-前陆盆地-前缘隆起的平面分布图和剖面图(据 Wang and Lin, 2017), BF, 北川断裂; PGF, 彭灌断裂; RFBT, 山前盲冲断裂; (B) 晚三叠世以来龙门山-前陆盆地的地壳缩短过程及其缩短速率变化, 总的地壳缩短率(剖面长度 213.5 km)为 68.8%, 总的缩短距离为 146.9 km, 最大的缩短速率为 3 mm/a(T_3), 最小的缩短速率为 0.25 mm/a(J-E), 晚新生代以来的缩短速率为 2 mm/a(据 Li et al., 2017)

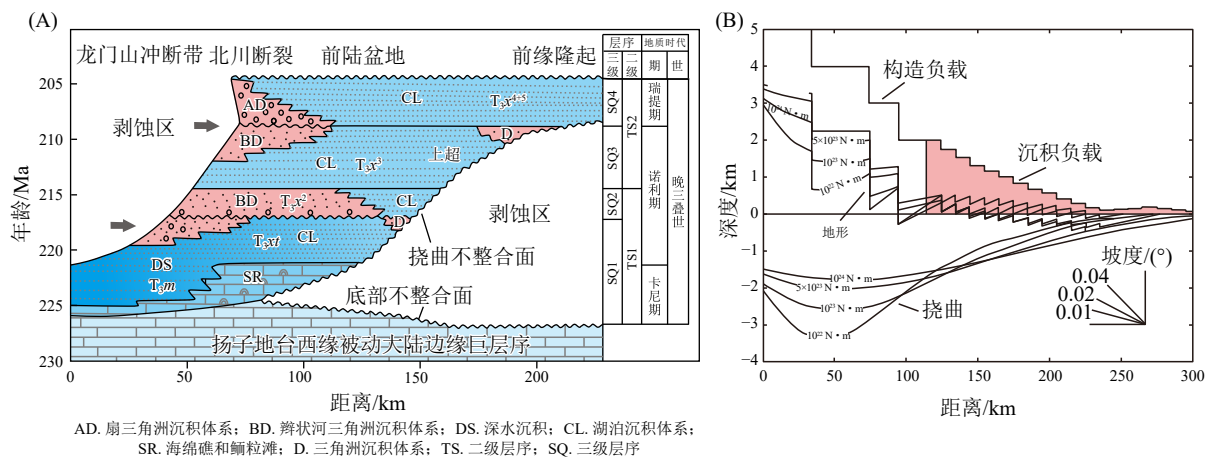


图 22 晚三叠世龙门山造山带-前陆盆地-前缘隆起的弹性挠曲模型(据 Li et al., 2003)

Fig. 22 Elastic flexure model of the Longmenshan orogenic belt-foreland basin-forebulge system during the Late Triassic Epoch

(A)晚三叠世龙门山前陆盆地的年代地层格架;(B)龙门山造山带-前陆盆地-前缘隆起的弹性挠曲模型,显示了构造负载、弹性板片的岩石圈特征、表面过程对前陆盆地挠曲沉降和前缘隆起挠曲隆升的控制作用

2.6.3 造山带-前陆盆地动力学的物理模拟原理与方法(沙箱模拟方法)

据文献记载,在 18 世纪,James Hall 首次利用水平挤压叠置的布料模拟了层状沉积岩发生褶皱的过程(Ranalli, 2001)。在 20 世纪初,Hubbert (1937)首次提出了相似比的概念,认为在物理模型和自然原型之间应遵循几何学、运动学和动力学的相似性规则,可以将自然原型的各种参数(如长度、几何形状、速度、应力和应变等)缩放到实验尺度上进行物理模拟,使物理模拟从定性的描述性工具转变为定量技术。Davis et al. (1983)利用相似性原则建立了造山带-前陆盆地物理模拟的基本方法(如沙箱模拟方法),提出了造山带的临界楔模型。Weil and Yonkee (2012)利用构造物理实验模拟了在造山带挤压作用受到前陆基

底刚性凸起(或异常体的陡坡)阻挡后的盖层构造变形特征,揭示了在前陆基底刚性凸起的上方可以形成断层-褶皱带(如在前缘形成正冲的弧形逆冲构造带,在后缘形成反冲断层)(图 23)。Shao et al. (2019)利用构造物理实验模拟了龙门山造山带-前陆盆地的构造缩短过程,并建立了龙门山造山带-前陆盆地的地震应力传递模型(图 24),为研究造山带强震驱动的地震应力传递-集中与触发地震机制提供了依据。值得指出的是,虽然前人曾采用构造物理模拟方法模拟在单向挤压条件下的造山带-前陆盆地系统的构造缩短过程,并直观地再现了造山带-前陆盆地系统的构造变形过程(如龙门山造山带-前陆盆地;图 23、图 24),但是该方法不能对模型内部应力变化进行测量,尚不能模拟造山带-前陆盆地系

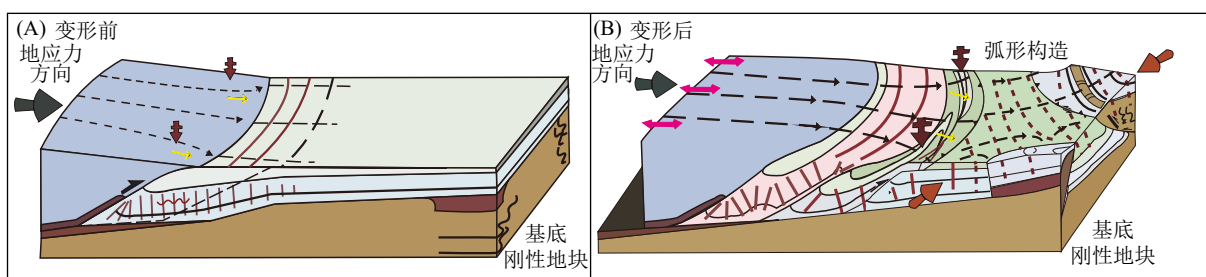


图 23 造山带驱动的应力传递与前陆盆地的构造变形机制(据 Weil and Yonkee, 2012)

Fig. 23 Stress transfer driven by the orogenic belt, and the tectonic deformation mechanism of the foreland basin

注:该构造模拟实验直观地再现了在北美西部的落基山造山带-前陆盆地系统中应力传递与前陆盆地的构造变形机制,显示了在造山带驱动的应力传递过程中前陆基底刚性地块(异常体)和陡坡对盖层变形的控制作用;在挤压过程中在受到基底刚性凸起阻挡的情况下,在基底凸起的上方形成褶皱-逆冲断层带,在其前方形成正冲的弧形构造带,在其后方形成反冲断层。

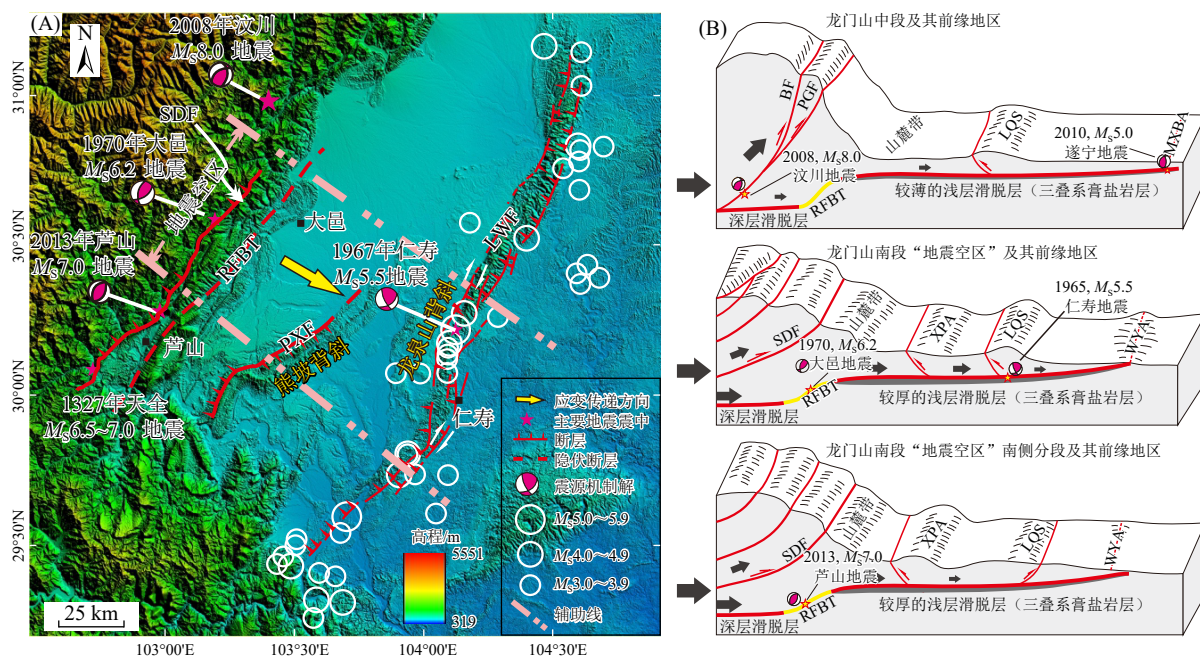


图 24 龙门山造山带—成都前陆盆地系统的地震应力传递模型图(据 Shao et al., 2019)

Fig. 24 Seismic stress transfer model of the Longmenshan orogenic belt–Chengdu foreland basin system

(A) 龙门山造山带—前陆盆地地震应力传递平面模型图; (B) 龙门山造山带—前陆盆地地震应力传递剖面模型图

注: BF, 北川断裂; LWF, 龙泉山断裂; PGF, 彭灌断裂; PXF, 蒲江—新津断裂; RFBT, 山前盲冲断裂; SDF, 双石—大川断层(彭灌断裂的南段); LQS, 龙泉山背斜; MXBA, 磨溪隐伏背斜; XPA, 熊坡背斜; WYA, 威远背斜。

统中的物理、化学和热力学条件及其变化,也不能确定应力、应变和流变等参数,仅能靠测量的数据间接地推测模型内部的应力变化。

2.6.4 造山带—前陆盆地动力学数值模拟原理与方法

在过去 30 年里,地质学家们开始用数值模型探索造山带—前陆盆地系统的动力学过程,如构造—热沉降模拟(Zhou et al., 2003; 何丽娟等, 2017)、构造作用与表面过程之间的数值模拟(Quinlan et al., 1993; Willett, 1999)、岩石圈挠曲作用与前陆盆地沉降之间的数值模拟(Garcia-Castellanos et al., 1997, 2002; Li et al., 2003)、造山带推进与前陆盆地构造变形之间的数值模拟等(图 23~25)。以观测地质记录作为边界条件,通过数值模型方法反演的前陆盆地系统动力过程,可以帮助地质学家定量地理解系统主要参数(如矢量图像、沉降速率、应力变化、垂直位移、水平位移、造山带推进速率、缩短速率、地层上超速率、沉积物分散速率、沉积相带迁移速率等)对造山带—前陆盆地动力学过程的影响,不仅帮助重建造山带—前陆盆地系统的过去,而且还可预测该系统的未来演化趋势。

(1) 造山带—前陆盆地动力学数值模拟的原理

前陆盆地动力学数值模拟以数学原理(如求解质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程中的偏微分方程等)和相似性原理(包括几何学、运动学和动力学相似规则)为基础,把前陆盆地的动力过程和主要物理参数(包括几何学、运动学和动力学要素等)定量化,将前陆盆地动力过程简化为平面应力、应变的变化过程,利用有限元或有限差分等方法构建造山带—前陆盆地动力过程的数值模型(李勇和闫亮, 2021)。数值模拟方法的优点在于:①数值模型反映了地质过程的物理法则,其模拟结果不仅验证前陆盆地动力学理论模型,而且可以揭示前陆盆地动力过程中能量传输、应力传递、油气运移机理以及预测结果定位等;②在造山带—前陆盆地系统的数值模拟中设定“情境—预案”模式,“假定”造山带“开始”发生地质事件(如构造负载、地震破裂等)的情境下,“预测”在该地质事件驱动下物理参数(如应力、应变和流变等)在时间和空间上“应该”在哪里发生变化,并将“引起”什么样的后续变化,这种假想的“情境—预案”计算模式可以帮助我们认识类似的真实情况;③在改变数值

模型的初始条件下,可以利用软件程序计算获得物理参数(如应力、应变和流变等)的变化过程、动态图像和矢量化数据,在空间上可以反演造山带-前陆盆地尺度的动力参数变化,在时间上不仅可以反演地质时间尺度(百万年)演化过程,而且可以再现人类时间尺度(几十年至几百年)的变化过程;④目前在数值模型中主要有2种不同初始条件的模拟方法:一种是在单向挤压作用下由平板状地层到造山带的变形过程的数值模拟方法[对造山带-前陆盆地形成过程(过去式)的模拟,其与物理模拟实验相似];另一种是在先存的造山带-前陆盆地构造模型的基础上,对在单向挤压作用下造山带强震驱动的地震应力传递过程(将来时)的数值模拟方法,这种方法可以模拟造山带-前陆盆地系统内在数年至数十万年不等的时间尺度上的应力演化和触发地震活性等,可以获取造山带-前陆盆地的过去、现在和未来变化的图像和参数。

例如,本团队利用有限元数值模型模拟了汶川地震后龙门山-成都前陆盆地地震应力传递-集中过程,获得了地震应力参数及其空间变化过程的动态图像和矢量图像(如主压应力、剪切应力、水平位移等),揭示了4个剪切应力的增

强区,为后续触发地震发生位置的标定提供了依据(图25)。

(2)造山带-前陆盆地动力学数值模拟的未来发展方向

虽然在过去的几十年里造山带-前陆盆地动力学的数值模型已取得了巨大的进步,但是已有的数值模型仍存在很多缺陷,如地质演化过程的非线性与不确定性、水平运动速率与垂向运动速率的耦合问题、剥蚀速率与构造缩短或地壳加厚速率耦合问题、多尺度和多场模型的耦合问题、地质模型与数值模型相似度问题、数值计算方法的差异性等。随着地球科学大数据时代的来临和大数据与高性能计算、人工智能与可视化、模拟实验技术与数字孪生技术等新的计算机技术广泛应用(National Research Council, 2012; 翟明国等, 2018; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2020; Vance, 2024),在造山带-前陆盆地动力学数值模拟与预测领域将发生深刻革命,基于大数据科学和技术的造山带-前陆盆地动力学数值模型与预测是未来发展的方向,主要表现在:①大数据科学技术驱动了前陆盆地动力学研究范式的转变,将从过去的以实验观测和理论研究为主的研究范式转变为未来

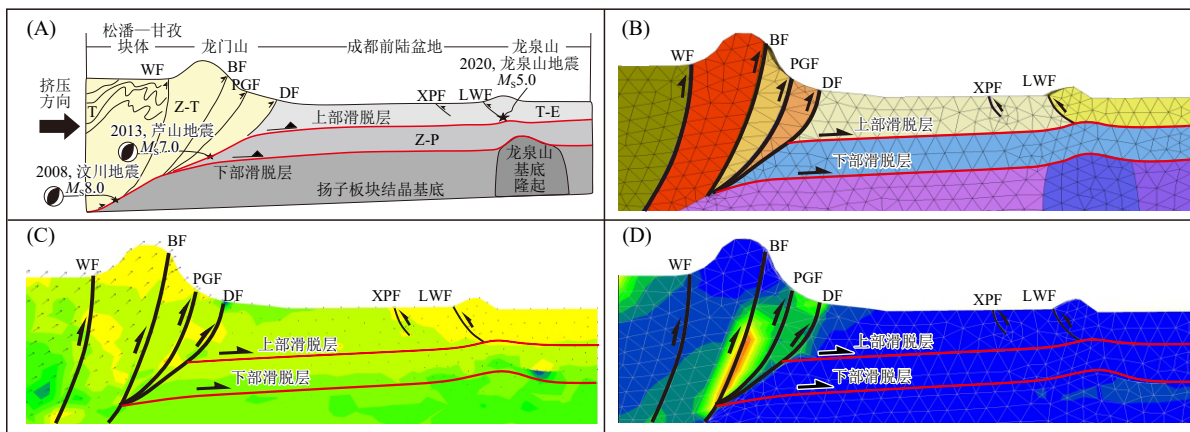


图25 龙门山造山带-成都前陆盆地地震应力传递机制的数值模拟

Fig. 25 Numerical simulation of the seismic stress transfer mechanism in the Longmenshan orogenic belt-Chengdu foreland basin system (A)地震构造模型图[其中设置了6条先存的活动断层,包括茂汶断裂(WF)、北川断裂(BF)、彭灌断裂(PGF)和大邑断裂(DF)、蒲江-新津断裂(XPF)和龙泉山断裂(LWF)],在前陆盆地中设置了双层滑脱层[包括上部滑脱层(中三叠统石膏层)和下部滑脱层(基底面)]和龙泉山基底隆起;(B)利用FLAC3D软件建立的数值模型图;(C)模拟的位移分布图,显示位移方向为北西-南东向,与逆冲方向一致;(D)模拟的剪切应力分布图,显示了4个剪切应力的增强区域,它们分别对应于2008年汶川 $M_{8.0}$ 级地震、2013年芦山 $M_{7.0}$ 级地震、2023年丹棱 $M_{4.7}$ 级地震和2020年龙泉山 $M_{5.0}$ 级地震,表明汶川地震驱动的地震应力传递作用导致了后续触发地震的发生

注:该图显示了李勇团队利用FLAC3D数值模拟方法对汶川地震后的龙门山造山带-成都前陆盆地系统的地震应力传递过程进行数值模拟的结果。

的以数值模拟与定量预测为主的研究范式,包括由“问题驱动模式”向“数据驱动模式”转变、由“经验、理论范式”向“数据密集型范式”转变、由“因果关系研究”向“相关关系研究”转变、由“已知求未知”向“未知求未知”转变(翟明国等, 2018); ②由于造山带-前陆盆地的演化具有不确定性(精确性差)、复杂性、分散性、不连续性(断裂、缺失)和多解性等特点,导致在该领域数值模型应用的困难,利用先进的数据处理与分析方法(如大数据、数据存储、数据处理、数据挖掘、分析预测、数值模拟、人工智能、机器学习等)对地质大数据进行挖掘和分析,从海量数据中提取尽可能多的有用信息,使地质数据转化为地质信息,使地质信息转化为新的科学洞察力,获得新发现和新认识,其中数值模型是进步的关键(Vance, 2024); ③利用数值模拟与人工智能、数字孪生技术相结合的方法可以提高数值模拟实验过程的可复制性、再现性和精确性,将促使过去的“实际调查资料支撑的前陆盆地动力学模型”向未来的“数据支撑的前陆盆地动力学模型”的转化。利用数值模型可以表征造山带-前陆盆地系统中各子系统(地质构造、地貌、水系、降雨、热流、重力等系统)之间的相互作用,实现多参量、多尺度、多场耦合的前陆盆地动力学数值模拟,进而未来将提出“具有预测功能的前陆盆地动力学模型”,能够揭示造山带-前陆盆地系统的过去、现在和未来的演化过程(李勇和闫亮, 2021)。因此,这些数值模型将不仅能够有效地反演造山带-前陆盆地的动力学过程(如地貌过程、剥露过程、隆升过程、沉降过程等),而且还能够建立预测造山带-前陆盆地的动力学模式(如热流模式、重力模式、挠曲变形模式、地壳变形模式等; Zhou et al., 2024),必将提高对造山带-前陆盆地系统中的矿产与油气富集、触发地震与人类宜居环境变化等预测的准确性。

3 结论与建议

21 世纪以来在造山带-前陆盆地系统中发生的一系列“强烈地震”和“页岩气革命”使得造山带-前陆盆地动力学再次成为全球研究的热点。本次以全球视野梳理了前陆盆地研究的发展历史、基础理论、研究现状和典型案例,归纳了前陆盆地动力学的新理论、新技术和新数据,

提出了前陆盆地动力学的学科内涵、研究内容和发展方向。

(1)本文提出前陆盆地动力学是研究前陆盆地形成演化、地表过程、沉积充填、构造变形、成矿成藏和地震活动性及其动力学机制的综合性学科。①将其研究内容拓展为 5 个研究领域和 1 种研究方法,包括前陆盆地地表动力学、前陆盆地沉积充填动力学、前陆盆地构造动力学、前陆盆地地球动力学、前陆盆地成藏动力学以及前陆盆地动力学模拟; ②在研究的尺度上,从单个造山带-前陆盆地的尺度[成山(造山带)-成盆(前陆盆地)-沉积(沉积物充填)-成矿(沉积矿产富集)-成藏(油气富集)]拓展到全球尺度(全球构造-全球油气资源-全球变化); ③在研究的时间尺度上,从地质时间尺度(几十万年至几百万年)拓展到人类时间尺度(十年至几百年),为认识造山带-前陆盆地的过去、现在和未来的演化过程提供科学依据。

(2)前陆盆地包括周缘前陆盆地、弧背前陆盆地和陆内前陆盆地 3 种基本类型,分别对应于陆-陆碰撞或弧-陆碰撞、洋-陆碰撞、陆内缩短 3 种成因类型,具有单侧型造山带-前陆盆地和双侧型造山带-前陆盆地(包括前侧前陆盆地和后侧前陆盆地)2 种结构类型。

(3)前陆盆地的挠曲沉降作用是由多种类型的构造负载[包括造山带构造负载(或均衡地形负载)、板块俯冲负载、下地壳流负载和地幔流动负载(或动力地形负载)等]导致的不同波长的挠曲沉降作用叠合而成的。

(4)前陆盆地全油气系统由常规油气系统和非常规油气系统(致密油气系统和页岩油气系统)组成,构造单元、沉积物、构造应力场、烃类物质运移场(烃类的生成、运移和聚集)、挤压流体运移场(挤压流体流动与化学物质运移)和热场的空间分布(挠曲沉降加热与挤压加热)等控制了常规油气和非常规油气藏的空间分布。

(5)前陆盆地动力学研究范式已经从“调查和综合的前陆盆地动力学模型研究”转化为“数据支撑的前陆盆地动力学模型研究”,可以利用多尺度、多场的数值模拟结果(矢量图像和定量参数等)揭示过去、现在和未来的演化过程,为未来人类宜居环境变化和油气资源预测提供科学依据。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 李勇负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作;郝越翔、李宜真参与资料收集;赵少泽、李芃宇、赵亮、徐正、杨欣、徐川参与数据分析和绘图;许艺凡、芦凤明、刘逸强、宋志华、解馨慧参与论文修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

致谢: 3位匿名评审专家对本论文提出了宝贵的修改意见和建议,特此感谢。

[参 考 文 献]

- 陈发景,汪新文,陈昭年,2007. 前陆盆地分析[M]. 北京:地质出版社:1—282.
- 戴金星,董大忠,倪云燕,等,2024. 致密砂岩气藏与页岩气藏展布模式[J]. 石油勘探与开发, 51(4): 667—678.
- Dai J X, Dong D Z, Ni Y Y, et al., 2024. Distribution patterns of tight sandstone gas and shale gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 667—678. (in Chinese)
- 邓辉,刘池阳,王建强,2014. 前陆盆地盆山耦合及其物质交换[J]. 西北地质, 47(2): 138—145.
- Deng H, Liu C Y, Wang J Q, 2014. Coupling and mass exchanging in foreland-thrust systems[J]. *Northwestern Geology*, 47(2): 138—145. (in Chinese)
- 董云鹏,任建国,张志飞,等,2022. 地质学科未来5~10年发展战略:趋势与对策[J]. 科学通报, 67(23): 2708—2718.
- Dong Y P, Ren J G, Zhang Z F, et al., 2022. Development strategy of geology in next 5–10 years: trends and countermeasures[J]. *Chinese Science Bulletin*, 67(23): 2708—2718. (in Chinese)
- 龚建明,王蛟,孙晶,等,2012. 前陆盆地-页岩气成藏的有利场所[J]. 海洋地质前沿, 28(12): 25—29.
- Gong J M, Wang J, Sun J, et al., 2012. Foreland basin: a favorable place for shale gas accumulation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 28(12): 25—29. (in Chinese)
- 郭旭升,胡宗全,申宝剑,等,2024. 中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义[J]. 石油学报, 45(11): 1565—1578.
- Guo X S, Hu Z Q, Shen B J, et al., 2024. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 45(11): 1565—1578. (in Chinese)
- 何登发,吕修祥,林永汉,等,1996. 前陆盆地分析[M]. 北京:石油工业出版社:1—212.
- He D F, Lü X X, Lin Y H, et al., 1996. Foreland basin analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 1—212. (in Chinese)
- 何丽娟,许鹤华,刘琼颖,2017. 前陆盆地构造-热演化:以龙门山前陆盆地为例[J]. 地学前缘, 24(3): 127—136.
- He L J, Xu H H, Liu Q Y, 2017. Tectono-thermal modeling of the foreland basins: a case study of the Longmenshan foreland basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 127—136. (in Chinese)
- 贾承造,2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 44(1): 1—11.
- Jia C Z, 2017. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 1—11. (in Chinese)
- 金之钧,汤良杰,杨明慧,等,2004. 陆缘和陆内前陆盆地主要特征及含油气性研究[J]. 石油学报, 25(1): 8—12.
- Jin Z J, Tang L J, Yang M H, et al., 2004. Geological characteristics and hydrocarbon potential between epicontinental and intracontinental foreland basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 25(1): 8—12. (in Chinese)
- 李思田,2015. 沉积盆地动力学研究的进展、发展趋向与面临的挑战[J]. 地学前缘, 22(1): 1—8.
- Li S T, 2015. Advancement, trend and new challenges in basin geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 1—8. (in Chinese)
- 李晓波,1994. 《美国大陆动力学研究的国家计划》简介[J]. 地质科技管理, 11(5): 25—28.
- 李勇,1998. 论龙门山前陆盆地与龙门山造山带的耦合关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 17(2): 77—81.
- Li Y, 1998. On coupling relationships between Longmenshan foreland basin and Longmenshan orogenic belt[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 17(2): 77—81. (in Chinese)
- 李勇,Allen P A,周荣军,等,2006a. 青藏高原东缘中新代龙门山前陆盆地动力学及其与大陆碰撞作用的耦合关系[J]. 地质学报, 80(8): 1101—1109.
- Li Y, Allen P A, Zhou R J, et al., 2006a. Mesozoic-Cenozoic dynamics of Longmenshan foreland basin along the eastern margin of the Tibetan Plateau and its coupled relationship with continent collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1101—1109. (in Chinese)
- 李勇,曹叔尤,周荣军,等,2005. 晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束[J]. 地质学报, 79(1): 28—37.
- Li Y, Cao S Y, Zhou R J, et al., 2005. Late Cenozoic Minjiang incision rate and its constraint on the uplift of the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 28—37. (in Chinese)
- 李勇,贺佩,颜照坤,等,2010. 晚三叠世龙门山前陆盆地动力学分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(4): 401—411.

- Li Y, He P, Yan Z K, et al., 2010. Dynamics of Late Triassic Longmenshan foreland basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37(4): 401—411. (in Chinese)
- 李勇, 苏德辰, 董顺利, 等, 2011a. 晚三叠世龙门山前陆盆地早期(卡尼期)碳酸盐缓坡和海绵礁的淹没过程与动力机制[J]. *岩石学报*, 27(11): 3460—3470.
- Li Y, Su D C, Dong S L, et al., 2011a. Dynamic of drowning of the carbonate ramp and sponge build-up in the early stage (Carnian) of Longmen Shan foreland basin, Late Triassic, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3460—3470. (in Chinese)
- 李勇, 苏德辰, 董顺利, 等, 2011b. 龙门山前陆盆地底部不整合面: 被动大陆边缘到前陆盆地的转换[J]. *岩石学报*, 27(8): 2413—2422.
- Li Y, Su D C, Dong S L, et al., 2011b. The recognition of the basal unconformity in the Longmenshan foreland basin: transition from passive continent margin to foreland basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2413—2422. (in Chinese)
- 李勇, 王成善, 伊海生, 2003. 西藏金沙江缝合带西段晚三叠世碰撞作用与沉积响应[J]. *沉积学报*, 21(2): 192—197.
- Li Y, Wang C S, Yi H S, 2003. The Late Triassic collision and sedimentary responses at western segment of Jinshajiang Suture, Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 192—197. (in Chinese)
- 李勇, 王成善, 曾允孚, 2000. 造山作用与沉积响应[J]. *矿物岩石*, 20(2): 49—56.
- Li Y, Wang C S, Zeng Y F, 2000. Orogeny and sedimentary response[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 20(2): 49—56. (in Chinese)
- 李勇, 闫亮, 2021. 前陆盆地动力学原理与方法[M]. 北京: 地质出版社: 1—822.
- Li Y, Yan L, 2021. Dynamics of foreland basin from principles to methods[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1—822. (in Chinese)
- 李勇, 颜照坤, 苏德辰, 等, 2014. 印支期龙门山造山楔推进作用与前陆型礁滩迁移过程研究[J]. *岩石学报*, 30(3): 641—654.
- Li Y, Yan Z K, Su D C, et al., 2014. The advance of Longmen Shan orogenic wedge and migration of the foreland reef and shoal during the Indosinian orogeny, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 641—654. (in Chinese)
- 李勇, 曾允孚, 1994. 试论龙门山逆冲推覆作用的沉积响应——以成都盆地为例[J]. *矿物岩石*, 14(1): 58—66.
- Li Y, Zeng Y F, 1994. On the sedimentary response to thrusting of Longmenshan thrust belt in Chengdu Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 14(1): 58—66. (in Chinese)
- 李勇, 曾允孚, 伊海生, 1995. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社: 1—92.
- 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等, 2024. 青藏高原东缘龙门山前陆盆地动力学[M]. 北京: 科学出版社: 1—402.
- 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等, 2006b. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京: 地质出版社: 1—148.
- 李勇, 周荣军, 闫亮, 等, 2017. 龙门山构造地貌与表面过程[M]. 北京: 科学出版社: 1—565.
- Li Y, Zhou R J, Yan L, et al., 2017. Tectonic geomorphology and surface process of Longmen Shan[M]. Beijing: Science Press: 1—565. (in Chinese)
- 李勇, 周荣军, 闫亮, 等, 2025. 构造地貌学原理与方法[M]. 北京: 地质出版社: 1—449.
- Li Y, Zhou R J, Yan L, et al., 2025. Tectonic geomorphology: from principles to analyses[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1—449. (in Chinese)
- 李忠, 2013. 中国的盆地动力学——21 世纪开初十年的主要研究进展及前沿[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32(3): 290—300.
- Li Z, 2013. Sedimentary basin geodynamics in China: advances and frontiers during the first decade of the 21st century[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(3): 290—300. (in Chinese)
- 林畅松, 2019. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 40(4): 685—700.
- Lin C S, 2019. Sedimentary dynamics of basin: status and trend[J]. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 685—700. (in Chinese)
- 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等, 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社: 1—236.
- 刘池洋, 2005. 盆地构造动力学研究的弱点、难点及重点[J]. *地学前缘*, 12(3): 113—124.
- Liu C Y, 2005. The weakness, difficulty and key point in the study of basin tectonic dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 113—124. (in Chinese)
- 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 等, 2000. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析[J]. *地学前缘*, 7(3): 55—72.
- Liu H F, Wang Z C, Xiong B X, et al., 2000. Coupling analysis of Mesozoic-Cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 55—72. (in Chinese)
- 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等, 2018. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究[J]. *科学通报*, 63(30): 3070—3088.
- Liu J, Zhang J Y, Ge Y K, et al., 2018. Tectonic geomorphology: an interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 63(30): 3070—3088. (in Chinese)
- 刘少峰, 2008. 叠加于弧后前陆盆地挠曲沉降之上的另一类沉降-动力沉降[J]. *地学前缘*, 15(3): 178—185.

- Liu S F, 2008. Dynamic subsidence, another kind of subsidence superposed on flexural subsidence of retroarc foreland basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 178—185. (in Chinese)
- 刘少峰, 王成善, 2016. 构造古地理重建与动力地形[J]. *地学前缘*, 23(6): 61—79.
- Liu S F, Wang C S, 2016. Reconstruction of tectono-paleogeography and dynamic topography[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 61—79. (in Chinese)
- 刘少峰, 张国伟, 2005. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法[J]. *地学前缘*, 12(3): 101—111.
- Liu S F, Zhang G W, 2005. Fundamental ideas, contents and methods in study of basin and mountain relationships[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 101—111. (in Chinese)
- 刘树根, 徐国盛, 李巨初, 等, 2003. 龙门山造山带-川西前陆盆地系统的成山成盆成藏动力学[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 30(6): 559—566.
- Liu S G, Xu G S, Li J C, et al., 2003. A study on the dynamics of mountain-building, basin-formation and natural gas pool formation in the system of Longmen mountains and West Sichuan foreland basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30(6): 559—566. (in Chinese)
- 吕大伟, 初航, 任建国, 2022. 沉积学和盆地动力学现状及发展动态简析——基于国家自然科学基金(1987—2020年)申报与立项数据[J]. *沉积学报*, 40(2): 281—292.
- Lü D W, Chu H, Ren J G, 2022. NSFC applications and funding-current situation and dynamic analysis for sedimentology and basin geodynamics: insight from data of the funds and proposals of National Natural Science Foundation of China (1987—2020)[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 281—292. (in Chinese)
- 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等, 2020. 中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J]. *中国矿业大学学报*, 49(1): 13—35.
- Nie H K, He Z L, Liu G X, et al., 2020. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(1): 13—35. (in Chinese)
- 任建国, 初航, 吕大伟, 2021. 国家自然科学基金地质学学科布局及展望[J]. *科学通报*, 66(2): 162—168.
- Ren J G, Chu H, Lü D W, 2021. Discipline layout and prospects of geological sciences in the National Natural Science Foundation of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 66(2): 162—168. (in Chinese)
- 宋岩, 贾承造, 姜林, 等, 2024. 全油气系统内涵与研究思路[J]. *石油勘探与开发*, 51(6): 1199—1210.
- Song Y, Jia C Z, Jiang L, et al., 2024. Connotation and research strategy of the whole petroleum system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1199—1210. (in Chinese)
- 孙肇才, 1998. 中国中西部中—新生代前陆类盆地及其含油气性——兼论准噶尔盆地内部结构单元划分[J]. *海相油气地质*, 3(4): 16—30.
- Sun Z C, 1998. Mesozoic-Cenozoic foreland basins and their hydrocarbon prospect in middle and western parts of China, as well as division of internal texture units in Gunggar Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 3(4): 16—30. (in Chinese)
- 汤济广, 梅廉夫, 沈传波, 等, 2006. 前陆盆地结构单元与油气成藏响应[J]. *新疆石油地质*, 27(2): 242—246.
- Tang J G, Mei L F, Shen C B, et al., 2006. Response of structural elements to hydrocarbon accumulation in foreland Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 27(2): 242—246. (in Chinese)
- 王成善, 李祥辉, 2003. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社: 1—378.
- Wang C S, Li X H, 2003. Sedimentary basin: from principles to analyses[M]. Beijing: Higher Education Press: 1—378. (in Chinese)
- 王成善, 林畅松, 2021. 中国沉积学近十年来的发展现状与趋势[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 40(6): 1217—1229.
- Wang C S, Lin C S, 2021. Development status and trend of sedimentology in China in recent ten years[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(6): 1217—1229. (in Chinese)
- 温德顺, 苏龙, 孙国强, 等, 2006. 前陆盆地的沉降和抬升机制研究进展[J]. *天然气地质学*, 17(3): 385—390.
- Wen D S, Su L, Sun G Q, et al., 2006. Advances in the study of the subsidence and uplift mechanism of foreland basins[J]. *Natural Gas Geoscience*, 17(3): 385—390. (in Chinese)
- 吴根耀, 马力, 2004. “盆山”耦合和脱耦: 进展、现状和努力方向[J]. *大地构造与成矿学*, 28(1): 81—97.
- Wu G Y, Ma L, 2004. Orogeny and coupled/decoupled basin development: a review[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(1): 81—97. (in Chinese)
- 解习农, 林畅松, 李忠, 等, 2017. 中国盆地动力学研究现状及展望[J]. *沉积学报*, 35(5): 877—887.
- Xie X N, Lin C S, Li Z, et al., 2017. Research reviews and prospects of sedimentary basin geodynamics in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5): 877—887. (in Chinese)
- 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等, 2017. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 38(1): 1—11.
- Xu C G, Du X F, Xu W, et al., 2017. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 1—11. (in Chinese)
- 许效松, 刘宝珺, 徐强, 等, 1997. 中国西部大型盆地分析及地球动力学[M]. 北京: 地质出版社: 1—168.

- 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 等, 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用[J]. 岩石学报, 24(7): 1433—1444.
- Xu Z Q, Li T D, Yang J S, et al., 2008. Advances and prospectives of continental dynamics: theory and application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1433—1444. (in Chinese)
- 杨永泰, 2011. 前陆盆地沉降机理和地层模型[J]. 岩石学报, 27(2): 531—544.
- Yang Y T, 2011. Subsidence mechanisms and stratigraphic models of foreland basins[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 531—544. (in Chinese)
- 翟明国, 杨树锋, 陈宁华, 等, 2018. 大数据时代: 地质学的挑战与机遇[J]. 中国科学院院刊, 33(8): 825—831.
- Zhai M G, Yang S F, Chen N H, et al., 2018. Big data epoch: challenges and opportunities for geology[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(8): 825—831. (in Chinese)
- 张金川, 史森, 王东升, 等, 2021. 中国页岩气勘探领域和发展方向[J]. 天然气工业, 41(8): 69—80.
- Zhang J C, Shi M, Wang D S, et al., 2021. Fields and directions for shale gas exploration in China[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8): 69—80. (in Chinese)
- 张明利, 金之钧, 汤良杰, 等, 2002. 前陆盆地研究的回顾与展望[J]. 地质论评, 48(2): 214—220.
- Zhang M L, Jin Z J, Tang L J, et al., 2002. The review and outlook of the study of foreland basin[J]. *Geological Review*, 48(2): 214—220. (in Chinese)
- 郑民, 贾承造, 冯志强, 等, 2010. 前陆盆地勘探领域三个潜在的油气接替区[J]. 石油学报, 31(5): 723—728.
- Zheng M, Jia C Z, Feng Z Q, et al., 2010. Potential replacement regions of hydrocarbon reserves in exploration domain of foreland basins[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 723—728. (in Chinese)
- 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等, 2020. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 41(1): 1—12.
- Zou C N, Pan S Q, Jing Z H, et al., 2020. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 41(1): 1—12. (in Chinese)
- Allen P A, 1997. *Earth surface processes*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1—404.
- Allen P A, 2008. From landscapes into geological history[J]. *Nature*, 451(7176): 274—276.
- Allen P A, 2017. Sediment routing systems—the fate of sediment from source to sink[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1—422.
- Allen P A, Allen J R, 2013. *Basin analysis: principles and application to petroleum play assessment*[M]. 3rd ed. Chichester: Wiley-Blackwell: 1—640.
- Allen P A, Burgess P M, Galewsky J, et al., 2001. Flexural-eustatic numerical model for drowning of the Eocene alpine carbonate ramp and implications for Alpine geodynamics[J]. *GSA Bulletin*, 113(8): 1052—1066.
- Allen P A, Crampton S L, Sinclair H D, 1991. The inception and early evolution of the North Alpine foreland basin, Switzerland[J]. *Basin Research*, 3(3): 143—163.
- Allen P A, Homewood P, 1986. *Foreland basins*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1—453.
- Bachu B, 1999. Flow systems in the Alberta basin: patterns, types and driving mechanisms[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 47(4): 455—474.
- Bally A W, 1980. Basins and subsidence—a summary[M]//Bally A W, Bender P L, McGetchin T R, et al. *Dynamics of plate interiors*. Washington: American Geophysical Union: 5—20.
- Beaumont C, 1981. Foreland basins[J]. *Geophysical Journal International*, 65(2): 291—329.
- Beaumont C, Koon H, Willett S, 2000. Coupled tectonic-surface process models with applications to rifted margins and collisional orogens[M]//Summerfield M A. *Geomorphology and global tectonics*. Chichester: John Wiley & Sons: 29—55.
- Brown C D, 2001. Thermal controls on flexure of underthrust continental lithosphere[J]. *Geophysical Journal International*, 146(3): 813—826.
- Burbank D W, 1992. Causes of recent Himalayan uplift deduced from deposited patterns in the Ganges basin[J]. *Nature*, 357(6380): 680—683.
- Burbank D W, Anderson R S, 2012. *Tectonic geomorphology*[M]. Chichester: Wiley-Blackwell: 1—480.
- Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al., 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. *GSA Today*, 18(7): 4—11.
- Burov E, Toussaint G, 2007. Surface processes and tectonics: forcing of continental subduction and deep processes[J]. *Global and Planetary Change*, 58(1/2/3/4): 141—164.
- Busby C, Pérez A A, 2012. *Tectonics of sedimentary basins: recent advances*[M]. Hoboken: Wiley-Blackwell: 1—672.
- Busby C J, Ingersoll R V, 1995. *Tectonics of sedimentary basins*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1—43.
- Catuneanu O, 2004. Retroarc foreland systems—evolution through time[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 38(3): 225—242.
- Chamberlin R T, 1910. The Appalachian folds of central Pennsylvania[J]. *The Journal of Geology*, 18: 228—251.
- Charreau J, Blard P H, Lavé J, et al., 2023. Unsteady topography in the eastern Tianshan due to imbalance between denudation and crustal thickening[J]. *Tectonophysics*, 848: 229702.
- Chen H L, Zhu M, Chen S Q, et al., 2020. Basin-orogen patterns and the late Triassic foreland basin conversion process in the western Yangtze Block, China[J]. *Journal of Asian Earth*

- Sciences, 194: 104311.
- Clark M K, Royden L H, 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 28(8): 703—706.
- Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al., 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. *Tectonics*, 23(1): TC1006.
- Cloetingh S A P L, Ziegler P A, Bogaard P J F, et al., 2007. TOPO-EUROPE: the geoscience of coupled deep Earth-surface processes[J]. *Global and Planetary Change*, 58(1/2/3/4): 1—118.
- Covey M, 1986. The evolution of foreland basins to steady state: evidence from the western Taiwan foreland basin[M]//Allen P A, Homewood P. *Foreland basins*. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 77—90.
- Crampton S L, Allen P A, 1995. Recognition of forebulge unconformities associated with early stage foreland basin development: example from the North Alpine foreland basin[J]. *AAPG Bulletin*, 79(10): 1495—1514.
- Dahlen F A, 1984. Noncohesive critical Coulomb wedges: an exact solution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B12): 10125—10133.
- Dahlen F A, 1990. Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 18: 55—99.
- Dahlstrom C D A, 1969. Balanced cross sections[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6(7): 743—757.
- Davis D, Suppe J, Dahlen F A, 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B2): 1153—1172.
- de Michele M, Raucoules D, de Sigoyer J, et al., 2010. Three-dimensional surface displacement of the 2008 May 12 Sichuan earthquake (China) derived from Synthetic Aperture Radar: evidence for rupture on a blind thrust[J]. *Geophysical Journal International*, 183(3): 1097—1103.
- DeCelles P G, 2012. Foreland basin systems revisited: variations in response to tectonic settings[M]//Busby C, Azor A. *Tectonics of sedimentary basins: recent advances*. Hoboken: Wiley-Blackwell: 405—426.
- DeCelles P G, Giles K A, 1996. Foreland basin systems[J]. *Basin Research*, 8(2): 105—123.
- Densmore A L, Ellis M A, Li Y, et al., 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 26(4): TC4005.
- Densmore A L, Li Y, Ellis M A, et al., 2005. Active tectonics and erosional unloading at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2(2): 146—154.
- Densmore A L, Li Y, Richardson N J, et al., 2010. The role of late Quaternary upper-crustal faults in the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2700—2712.
- Dickinson W R, 1974. *Tectonics and sedimentation*[M]. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: 1—27.
- Dickinson W R, 1993. *Basin geodynamics*[J]. *Basin Research*, 5(4): 195—196.
- Dorobek S L, Ross G M, 1995. *Stratigraphic evolution of foreland basins*[M]. Tulsa: SEPM: 1—490.
- Einsele G, 2000. *Sedimentary basins evolution, facies, and sediment budget*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer: 1—727.
- Ettensohn F R, Lierman R T, 2012. Large-scale tectonic controls on the origin of Paleozoic dark-shale source-rock basins: examples from the Appalachian foreland basin, Eastern United States[M]//Gao D. *Tectonics and sedimentation: implications for petroleum systems*. AAPG Memoir: 95—114.
- Fielding E J, McKenzie D, 2012. Lithospheric flexure in the Sichuan basin and Longmen Shan at the eastern edge of Tibet[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(9): L09311.
- Galewsky J, 1998. The dynamics of foreland basin carbonate platforms: tectonic and eustatic controls[J]. *Basin Research*, 10(4): 409—416.
- Garcia-Castellanos D, Cloetingh S, 2011. Modeling the interaction between lithospheric and surface processes in foreland basins[M]//Busby C, Azor A. *Tectonics of sedimentary basins: recent advances*. Oxford: Wiley-Blackwell: 152—184.
- Garcia-Castellanos D, Fernández M, Torne M, 1997. Numerical modeling of foreland basin formation: a program relating thrusting, flexure, sediment geometry and lithosphere rheology[J]. *Computers & Geosciences*, 23(9): 993—1003.
- Garcia-Castellanos D, Fernández M, Torne M, 2002. Modeling the evolution of the Guadalquivir foreland basin (southern Spain)[J]. *Tectonics*, 21(3): 1018.
- Gurnis M, 1993. Phanerozoic marine inundation of continents driven by dynamic topography above subducting slabs[J]. *Nature*, 364(6438): 589—593.
- He L J, 2014. Permian to Late Triassic evolution of the Longmen Shan Foreland Basin (Western Sichuan): model results from both the lithospheric extension and flexure[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 49—59.
- Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, et al., 2016. Deciphering earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 86(9): 1008—1033.
- Heller P L, Angevine C L, Winslow N S, et al., 1988. Two-phase stratigraphic model of foreland-basin sequences[J]. *Geol-*

- ogy, 16(6): 501—504.
- Hodgson D M, Bernhardt A, Clare M A, et al., 2018. Grand challenges (and great opportunities) in sedimentology, stratigraphy, and diagenesis research[J]. *Frontiers in Earth Science*, 6: 173.
- Horton B K, Capaldi T N, Mackaman-Lofland C, et al., 2022. Broken foreland basins and the influence of subduction dynamics, tectonic inheritance, and mechanical triggers[J]. *Earth-Science Reviews*, 234: 104193.
- Hu X M, Garzanti E, Li J, et al., 2024. The “underfilled trinity model” of foreland basins revisited: reality or myth?[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13(4): 675—705.
- Hubbard J, Shaw J H, 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M=7.9$) earthquake[J]. *Nature*, 458(7235): 194—197.
- Hubbert M K, 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures[J]. *GSA Bulletin*, 48(10): 1459—1520.
- Huntington K W, Klepeis K A, Allmendinger R, et al., 2018. Challenges and opportunities for research in tectonics: understanding deformation and the processes that link earth systems, from geologic time to human time[M]. Washington: University of Washington: 1—84.
- Ingersoll R V, 2012. Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature[M]//Busby C, Azor A. Tectonics of sedimentary basins: recent advances. Oxford: Wiley-Blackwell: 3—43.
- Johnson D D, Beaumont C, 1995. Preliminary results from a plan-form kinematic model of orogen evolution, surface processes and the development of clastic foreland basin stratigraphy[M]//Dorobek S L, Ross G M. Stratigraphic evolution of foreland basins. Tulsa: SEPM: 3—24.
- Jordan T E, 1981. Thrust loads and foreland basin evolution, cretaceous, western United States[J]. *AAPG Bulletin*, 65(12): 2506—2520.
- Jordan T E, 1995. Retroarc foreland and related basins[M]//Tectonic of sedimentary basins. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 150—236.
- Koons P O, 1990. Two-sided orogen: collision and erosion from the sandbox to the southern Alps, New Zealand[J]. *Geology*, 18(8): 679—682.
- Lacombe O, Lavé J, Roure F M, et al., 2007. Thrust belts and foreland basins: from fold kinematics to hydrocarbon systems[M]. Berlin: Springer: 1—491.
- Law B E, Curtis J B, 2002. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1851—1852.
- Li Y, Allen P A, Densmore A L, et al., 2003. Evolution of the Longmen Shan foreland basin (western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian orogeny[J]. *Basin Research*, 15(1): 117—138.
- Li Y, Cao S Y, Zhou R J, et al., 2004. Field studies of Late Cenozoic river incision rate and its constraint on morphology of the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, 2: 2091—2097.
- Li Y, Li H B, Zhou R J, et al., 2014a. Crustal thickening or isostatic rebound of orogenic wedge deduced from tectonostratigraphic units in Indosinian foreland basin, Longmen Shan, China[J]. *Tectonophysics*, 619/620: 1—12.
- Li Y, Yan L, Shao C J, et al., 2017. The coupling relationship between the uplift of Longmen Shan and the subsidence of foreland basin, Sichuan, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(2): 379—395.
- Li Y, Yan Z K, Liu S G, et al., 2014b. Migration of the carbonate ramp and sponge buildup driven by the orogenic wedge advance in the early stage (Carnian) of the Longmen Shan foreland basin, China[J]. *Tectonophysics*, 619/620: 179—193.
- Li Y, Yan Z K, Zhou R J, et al., 2018. Crustal uplift in the Longmen Shan mountains revealed by isostatic gravity anomalies along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(1): 56—73.
- Li Y, Zhou R J, Densmore A L, et al., 2021. Active tectonics and earthquakes in Longmenshan orogenic belt and foreland basin system[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1—210.
- Li Y, Zhou R J, Zhao G H, et al., 2014c. Tectonic uplift and landslides triggered by the Wenchuan earthquake and constraints on orogenic growth: a case study from Hongchun Gully, Longmen Mountains, Sichuan, China[J]. *Quaternary International*, 349: 142—152.
- Li Y Q, Yuan X P, Shobe C M, et al., 2025. Untangling the interplay among tectonics, climate, and erosion in the Himalayas using landscape evolution modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 658: 119305.
- Liu S F, Nummedal D, Gurnis M, 2014. Dynamic versus flexural controls of Late Cretaceous Western Interior Basin, USA[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 389: 221—229.
- Liu S F, Nummedal D, Liu L J, 2011. Migration of dynamic subsidence across the Late Cretaceous United States Western Interior Basin in response to Farallon plate subduction[J]. *Geology*, 39(6): 555—558.
- Lomask J, Guitton A, 2007. Volumetric flattening: an interpretation tool[J]. *The Leading Edge*, 26(7): 888—897.
- Loucks R G, Ruppel S C, 2007. Mississippian Barnett Shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas

- succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 91(4): 579—601.
- Ma Q L, Yang J H, Du Y S, et al., 2021. Early Triassic initial collision between the North China and South China blocks in the eastern Qinling Orogenic Belt[J]. Tectonophysics, 814: 228965.
- MacQueen R W, Leckie D A, 1992. Foreland basins and fold belts[J]. Tulsa: AAPG Memoir, 55: 1—460.
- Magoon L B, Dow W G, 1994. The petroleum system—from source to trap[J]. Tulsa: AAPG Memoir, 60: 2—24.
- McMahon T P, Larson T E, Zhang T, et al., 2024. Geologic characteristics, exploration and production progress of shale oil and gas in the United States: an overview[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(4): 925—948.
- Métivier F, Gaudemer Y, 1997. Mass transfer between eastern Tien Shan and adjacent basins (Central Asia): constraints on regional tectonics and topography[J]. Geophysical Journal International, 128(1): 1—17.
- Molnar P, 2012. Isostasy can't be ignored[J]. Nature Geoscience, 5(2): 83.
- Molnar P, England P, 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?[J]. Nature, 346(6279): 29—34.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2020. A vision for NSF Earth Sciences 2020–2030: Earth in time[M]. Washington D. C.: The National Academies Press: 1—172.
- National Research Council, 2012. New research opportunities in the earth sciences[M]. Washington D. C.: The National Academies Press: 1—132.
- Naylor M, Sinclair H D, 2008. Pro-vs-retro-foreland basins[J]. Basin Research, 20(3): 285—303.
- Panel on the Geodynamics of Sedimentary Basins, U.S. Geodynamics Committee, Board on Earth Sciences and Resources, et al., 1997. The dynamics of sedimentary basins[M]. Washington D. C.: The National Academies Press: 1—56.
- Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, et al., 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth[J]. Nature Geoscience, 4(7): 449—452.
- Pedersen T F, Calvert S E, 1990. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks?[J]. AAPG Bulletin, 74(4): 454—466.
- Pollastro R M, 2007. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 91(4): 551—578.
- Posamentier H W, Allen G P, 1993. Siliciclastic sequence stratigraphic patterns in foreland, ramp-type basins[J]. Geology, 21(5): 455—458.
- Quinlan G, Walsh J, Skogseid J, et al., 1993. Relationship between deeper lithospheric processes and near-surface tectonics of sedimentary basins[J]. Tectonophysics, 226(1/2/3/4): 217—225.
- Ranalli G, 2001. Experimental tectonics: from Sir James Hall to the present[J]. Journal of Geodynamics, 32(1/2): 65—76.
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al., 2008. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B4): B04409.
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al., 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene?[J]. Geology, 38(6): 551—554.
- Roure F, Cloetingh S, Scheck-Wenderoth M, et al., 2009. Achievements and challenges in sedimentary basin dynamics: a review[M]//Cloetingh S, Negendank J. New frontiers in integrated solid earth sciences. Dordrecht: Springer: 145—233.
- Sayer Z R, 1995. The Nummulitique: carbonate deposition in a foreland basin setting; Eocene, French alps[D]. Durham: Durham University: 1—337.
- Shao C J, Li Y, Yan Z K, et al., 2019. Differential strain transfer, Longmen Shan thrust belt, eastern Tibetan Plateau margin: implications for seismic hazards[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 169: 284—297.
- Simoes M, Avouac J P, 2006. Investigating the kinematics of mountain building in Taiwan from the spatiotemporal evolution of the foreland basin and western foothills[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B10): B10401.
- Sinclair H D, 1997a. Tectonostratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: an Alpine perspective[J]. GSA Bulletin, 109(3): 324—346.
- Sinclair H D, 1997b. Flysch to molasse transition in peripheral foreland basins: the role of the passive margin versus slab breakoff[J]. Geology, 25(12): 1123—1126.
- Sinclair H D, 2012. Thrust wedge/foreland basin systems[M]//Busby C, Azor A. Tectonics of sedimentary basins: recent advances. Hoboken: Wiley-Blackwell: 522—537.
- Sinclair H D, Allen P A, 1992. Vertical versus horizontal motions in the Alpine orogenic wedge: stratigraphic response in the foreland basin[J]. Basin Research, 4(3/4): 215—232.
- Sinclair H D, Coakley B J, Allen P A, et al., 1991. Simulation of foreland basin stratigraphy using a diffusion model of mountain belt uplift and erosion: an example from the central Alps, Switzerland[J]. Tectonics, 10(3): 599—620.

- Sinclair H D, Naylor M, 2012. Foreland basin subsidence driven by topographic growth versus plate subduction[J]. *GSA Bulletin*, 124(3/4): 368—379.
- Singh P, 2008. Lithofacies and sequence stratigraphic framework of the Barnett Shale, Northeast Texas[D]. Oklahoma: University of Oklahoma; 1—198.
- Slatt R M, Rodriguez N D, 2012. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: commonality or coincidence?[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 8: 68—84.
- Smith L B, Schieber J, Wilson R D, 2019. Shallow-water onlap model for the deposition of Devonian black shales in New York, USA[J]. *Geology*, 47(3): 279—283.
- Sømme T O, Jackson C A L, Vaksdal M, 2013. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 1-depositional setting and fan evolution[J]. *Basin Research*, 25(5): 489—511.
- Stockmal G S, Beaumont C, Boutilier R, 1986. Geodynamic models of convergent margin tectonics: transition from rifted margin to overthrust belt and consequences for foreland-basin development[J]. *AAPG Bulletin*, 70(2): 181—190.
- Summerfield M A, 2000. *Geomorphology and global tectonics*[M]. New York: Wiley Press: 1—386.
- Sun J P, Dong Y P, 2020. Ordovician tectonic shift in the western North China Craton constrained by stratigraphic and geochronological analyses[J]. *Basin Research*, 32(6): 1413—1440.
- Sun J P, Dong Y P, 2024. Foreland basin development in response to Proto-Tethyan Ocean closure, western North China Block[J]. *Geosphere*, 20(3): 799—824.
- Swennen R, Roure F, Granath J W, 2004. Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts[M]. Tulsa: AAPG Hedberg Series, 1: 51—67.
- Toth J, Kusznir N J, Flint S S, 1996. A flexural isostatic model of lithosphere shortening and foreland basin formation: application to the Eastern Cordillera and Subandean belt of NW Argentina[J]. *Tectonics*, 15(1): 213—223.
- Trabucho-Alexandre J, Hay W W, de Boer P L, 2012. Phanerozoic environments of black shale deposition and the Wilson Cycle[J]. *Solid Earth*, 3(1): 29—42.
- Turcotte D L, Schubert G, 2002. *Geodynamics*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press: 1—456.
- U. S. Geological Survey National Assessment of Oil and Gas Resources Team, Biewick L R H, 2013. Map of assessed shale gas in the United States, 2012[M]. Reston: U. S. Geological Survey.
- Van Wagoner J C, Bertram G T, 1995. Sequence stratigraphy of foreland basin deposits: outcrop and subsurface examples from the Cretaceous of North America[M]. Tulsa: AAPG Memoir, 64: 1—490.
- Vance T C, Huang T, Butler K A, 2024. Big data in Earth science: emerging practice and promise[J]. *Science*, 383(6688): eadh9607.
- Wang M M, Lin A M, 2017. Active thrusting of the Longquan fault in the central Sichuan Basin, China, and the seismotectonic behavior in the Longmen Shan fold-and-thrust belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7): 5639—5662.
- Waschbusch P J, Royden L H, 1992. Episodicity in foredeep basins[J]. *Geology*, 20(10): 915—918.
- Watts A B, 1992. The effective elastic thickness of the lithosphere and the evolution of foreland basins[J]. *Basin Research*, 4(3/4): 169—178.
- Weil A B, Yonkee W A, 2012. Layer-parallel shortening across the Sevier fold-thrust belt and Laramide foreland of Wyoming: spatial and temporal evolution of a complex geodynamic system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 357/358: 405—420.
- Willett S, Beaumont C, Fullsack P, 1993. Mechanical model for the tectonics of doubly vergent compressional orogens[J]. *Geology*, 21(4): 371—374.
- Willett S D, 1999. Orogeny and orography: the effects of erosion on the structure of mountain belts[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B12): 28957—28981.
- Wolf S G, Huismans R S, Braun J, et al., 2022. Topography of mountain belts controlled by rheology and surface processes[J]. *Nature*, 606(7914): 516—521.
- Yan Z K, Li Y, Shao C J, et al., 2016. Interpreting the coseismic uplift and subsidence of the Longmen Shan foreland basin system during the Wenchuan Earthquake by a elastic flexural model[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(2): 555—566.
- Yuan X P, Li Y Q, Brune S, et al., 2024. Coordination between deformation, precipitation, and erosion during orogenic growth[J]. *Nature Communications*, 15(1): 10362.
- Zhou D, Yu H S, Xu H H, et al., 2003. Modeling of thermorheological structure of lithosphere under the foreland basin and mountain belt of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 374(3/4): 115—134.
- Zhou Z C, Qiu L, Yan D P, et al., 2024. Topographic loading-dominated kinematics of the fold-and-thrust belts: sandbox modeling of the Longmen Shan thrust belt in eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Structural Geology*, 182: 105110.