

李心怡, 李抒予, 高原, 夏新宇. 2024. 青藏高原东部深部构造与动力学机制研究进展——来自第 9 届与第 10 届 WTGTP 研讨会的启示. 地球与行星物理论评（中英文），55(2): 205-216. doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-026](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-026).

Li X Y, Li S Y, Gao Y, Xia X Y. 2024. Advancements in deep tectonics and dynamic mechanisms beneath the eastern Tibetan Plateau—Inspirations from the 9th and 10th WTGTP Workshops. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(2): 205-216 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2023-026](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-026).

## 青藏高原东部深部构造与动力学机制研究进展

——来自第 9 届与第 10 届 WTGTP 研讨会的启示

李心怡<sup>1,2</sup>, 李抒予<sup>1</sup>, 高原<sup>1\*</sup>, 夏新宇<sup>1</sup>

1 中国地震局地震预测研究所 地震预测重点实验室, 北京 100036

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要:** 青藏高原深部构造与动力学机制一直是深部地球物理与大陆动力学的重点研究领域. 青藏高原东部地形起伏剧烈, 地震活动频繁, 金属与油气矿床丰富, 揭示出青藏高原东部极为复杂的壳幔结构与深部变形及非常强烈的深部物质运动. 近年来, 随着地球物理综合观测技术、深部结构成像方法、地球动力学模拟等研究的快速发展, 围绕青藏高原东部的深部构造、块体运动、深部动力模式、强震活动与深部蕴震机制及成矿深部构造等方面进展显著. 青藏高原东部构造与地球物理研讨会 (WTGTP) 是围绕青藏高原东部深部结构与动力学机制、资源开发、地质灾害等相关地球科学问题按年度召开的学术交流研讨会. 本文基于 2021 年和 2022 年召开的第九届和第十届 WTGTP 的会议报告, 结合近年来的相关研究成果, 围绕印度—欧亚板块碰撞、构造变形特征与动力学机制以及强震活动与深部蕴震机制等主要内容, 介绍了青藏高原东部的地球物理结构及深部构造变形与动力学机制的研究进展. 初步展望了青藏高原深部构造与地球物理研究前景, 期望能给相关科研人员提供一点有益的参考.

**关键词:** 青藏高原东部; WTGTP; 印度—欧亚板块碰撞; 动力学; 深部构造

doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-026](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-026)

中图分类号: P315

文献标识码: A

## Advancements in deep tectonics and dynamic mechanisms beneath the eastern Tibetan Plateau—Inspirations from the 9th and 10th WTGTP Workshops

Li Xinyi<sup>1,2</sup>, Li Shuyu<sup>1</sup>, Gao Yuan<sup>1\*</sup>, Xia Xinyu<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Forecasting,  
China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract:** The Tibetan Plateau, known as the "Roof of the World", is one of the most tectonically complex areas on Earth. Its deep tectonics and dynamical mechanisms have been the focus of intense research in the fields of deep geophysics and continental dynamics. The eastern Tibetan Plateau is characterized by strong topographic fluctuations, frequent seismic activities, and abundant metal deposits, which reveal the extremely complex crust–mantle structure, deep deformation, and intense deep material movement. In recent years, with the rapid development of

收稿日期: 2023-05-12; 录用日期: 2023-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (41730212); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项 (2021IEF0103)

Supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41730212), and the Fundamental Research Funds for Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration (Grant No. 2021IEF0103)

第一作者: 李心怡 (1998-), 女, 在读博士研究生, 主要从事微震识别与地震各向异性的研究. E-mail:

Lixy\_xinyi@163.com

\*通信作者: 高原 (1964-), 男, 研究员, 主要从事地震各向异性与深部构造等研究. E-mail: qzgyseis@163.com



comprehensive geophysical observation techniques, deep structure imaging methods, and geodynamic simulations, significant progress has been made in deep tectonics, block motions, deep dynamic models, strong seismic activity, deep seismic mechanisms, as well as the deep structure of metal mineralization in the eastern Tibetan Plateau. The Workshop on Tectonics and Geophysics in the east part of Tibetan Plateau (WTGTP) is an annual academic exchange symposium for the eastern part of the Tibetan Plateau. The 9th and 10th conferences were held in Xichang, China, in 2021 and online in 2022, respectively. Based on the reports of these conferences, in combination with the relevant research results in recent years, this paper focuses on the India–Eurasian plate collision, tectonic deformation and dynamic mechanisms, and strong earthquake activity and deep seismic mechanisms in the eastern Tibetan Plateau. The paper describes the research progress pertaining to the tectonic structure, deep structural deformation, and dynamic mechanisms of the eastern Tibetan Plateau. The research prospects of further delineating the deep structure and geophysics of the Tibetan Plateau are preliminarily addressed, with the goal of providing a useful reference for interested researchers. The research in this field has great significance because it enhances our understanding of the deep tectonic processes that shape the Tibetan Plateau. Such knowledge could have implications for predicting and mitigating seismic hazards in the region. Additionally, research into the metallogenic tectonics of the eastern Tibetan Plateau may provide insights into the formation of mineral deposits in other parts of the world. Overall, research into the deep tectonics and dynamical mechanisms of the Tibetan Plateau is a complex and challenging field that requires the use of advanced technology and multidisciplinary approaches. The WTGTP provides a valuable forum for researchers to share their findings and collaborate on solutions to these geologically complex problems.

**Keywords:** the eastern Tibetan Plateau; WTGTP; the India-Eurasian plate collision; dynamics; deep tectonics

## 0 引 言

自新生代以来, 印度板块向北与欧亚板块汇聚碰撞, 造成了青藏高原的不断隆升以及广泛的陆内变形 (Yin and Harrison, 2000), 印度—欧亚碰撞之后, 印度板块持续向北俯冲到欧亚大陆之下, 目前仍以约 40 mm/a 的速度向北运动 (Zhang et al., 2004). 相对于欧亚大陆, 青藏高原内部的物质大致向东移动, 然后围绕喜马拉雅东构造结向南流动 (Zhang et al., 2004), 印度板块的俯冲下插、青藏高原的垂向增厚, 以及大量高原物质的东向逃逸共同吸收了由印度—欧亚板块碰撞带来的缩短变形 (Gao et al., 2016).

青藏高原东部构造与地球物理研讨会 (Workshop on Tectonics and Geophysics in the east part of Tibetan Plateau, WTGTP), 是一个专门针对青藏高原东部的地质构造与深部地球物理问题的学术会议, 特别就地球动力学问题展开讨论, 自 2013 年起, 每年召开一次 (王琼等, 2017), 最新一次 WTGTP 于 2022 年召开 (刘同振等, 2023).

第九届 WTGTP (9-WTGTP) 以“特提斯构造域深部结构和动力学机制”为主题, 讨论与资源和地质灾害相关的地球物理科学问题, 2021 年 10 月

23—26 日在四川省西昌市举行. 第十届 WTGTP (10-WTGTP) 于 2022 年 11 月 22 日采用线上视频会议的方式召开, 以“青藏高原东部深部构造与地震活动”为主题. 在这两次研讨会上, 代表们围绕青藏高原东部深部结构及动力学机制等地质与地球物理问题做了 48 个学术报告 (表 1、表 2). 本文以第九届与第十届 WTGTP 交流报告为主线, 从印度—欧亚板块碰撞、构造变形特征与动力学机制以及强震活动与深部蕴震机制三个方面综述相关的研究进展. 由于 WTGTP 的定位, 研讨会上的学术报告通常及时反映了青藏高原深部结构、深部介质变形、深部构造、区域地震活动及大陆动力学方面的最新研究进展与方向动态 (武粤等, 2021).

在强烈的构造活动影响下, 青藏高原记录和保存了多期次的特提斯构造演化历史痕迹 (王志等, 2021), 与欧洲的阿尔卑斯山、土耳其-伊朗高原、喜马拉雅山呈现系统性的东西向分布, 是特提斯构造演化的重要组成部分. 同时, 青藏高原也是全球面积最大、平均海拔最高、最年轻的高原. 碰撞过程的持续影响使青藏高原成为高原构造演化及深部动力学问题的独一无二的天然实验场 (滕吉文等, 1980).

对于青藏高原侧向挤出模式的认识, 目前学术

表 1 2021 年第九届青藏高原东部构造与地球物理研讨会 (9-WTGTP) 学术报告列表

Table 1 List of academic reports of the 9th Workshop on Tectonics and Geophysics in the east part of Tibetan Plateau in 2021 (9-WTGTP)

报告人	职称	单位	报告题目
王绪本	教授	成都理工大学	青藏高原东部岩石圈电性结构与特提斯洋俯冲及造山过程研究
于常青	研究员	中国地质科学院地质研究所	东构造结深部结构与地震关系探讨
高原	研究员	中国地震局地震预测研究所	青藏高原东南缘S波地震各向异性的三种尺度形态
黄周传	教授	南京大学	青藏高原东南缘上地幔结构与动力学
李忠海	教授	中国科学院大学	青藏高原岩石圈增厚拆沉与侧向挤出的动力学竞争
徐义贤	教授	浙江大学	克拉通岩石圈的显生宙演化: 以NCC为例
邓阳凡	特任研究员	中国科学院广州地球化学研究所	一种通用的S波接收函数估计方法(GC_SRF)及其在西扬子的应用
余年	教授	重庆大学	红河断裂带及邻区岩石圈三维电性结构与物质流研究
叶卓	副研究员	中国地质科学院	青藏高原北缘形成演化的岩石圈尺度逆冲楔模型: 宽频地震和节点密集阵列剖面综合观测约束
蔡永恩	教授	北京大学	利用地震应力降确定断层的力学环境
冯梅	研究员	中国地质科学院	西拉木伦缝合带中段太古代克拉通核与古亚洲洋俯冲板片形迹
张会平	研究员	中国地震局地质研究所	青藏高原东缘晚新生代幕式剥露过程
白玲*	研究员	中国科学院青藏高原研究所	南迦巴瓦地区地震与滑坡活动性分析
李国辉	副研究员	中国地震局地震预测研究所	基于三重震相波形拟合的青藏高原羌塘块体地幔过渡带结构及其构造意义
何熹	博士后	中国科学院地质与地球物理研究所	2021年5月21—22日云南漾濞 $M_S6.4$ 和青海玛多 $M_S7.4$ 地震应力降研究及其构造意义
易桂喜	研究员	中国地震局成都青藏高原研究所	四川盆地地震震源机制与发震构造特征
朱守彪	研究员	应急管理部国家自然灾害防治研究院	为什么自然界中超剪切破裂地震的数量是如此之少
刘震	副研究员	成都理工大学	青藏高原南部地壳增厚模式
皇甫鹏鹏	讲师	中国科学院大学	新生代天山隆升新机制——印度与塔里木岩石圈地幔碰撞
刘真	博士研究生	中国科学院地质与地球物理研究所	斯堪的纳维亚半岛及其周边地区地壳Lg波衰减的横向变化
李顺至	博士研究生	中国科学院地质与地球物理研究所	受大印度的尺度约束的年轻印度—欧亚汇聚碰撞
王祎然	博士研究生	中国科学院地质与地球物理研究所	中国西南地区右江盆地多期次金矿床地震学模型
朱威谋	博士研究生	中国科学院地质与地球物理研究所	西地中海地区地壳Lg波衰减及其构造意义
车子强	硕士研究生	中国地震局地震预测研究所	海原断裂带及邻区背景噪声结构成像初步结果

注\*: 因新冠疫情影响, 报告人未到现场, 远程做了网上报告

界尚未达成统一. 主要的代表性模型有: “刚性块体挤出模型 (Tapponnier et al., 1982)”、“均衡缩短模型 (England and Houseman, 1986, 1988)”和“下地壳流模型 (Clark and Royden, 2000; Royden et al., 1997)”. 每个模型均有一定的地球物理观测证据, 同时也均存在很多的挑战. 通过地球物理观测, 寻找证明中下地壳流是否存在以及其分布范围的证据, 仍然是研究者们关注的重点问题.

青藏高原东部是研究高原隆升、外向扩展的关键区域 (曾融生等, 1992), 该区域 (特别是东缘地区) 地形起伏剧烈, 地壳变形强烈且极不均匀, 大地震活动频繁, 地域内分布有丰富的固体矿床与油气资源, 这些现象揭示了青藏高原东部下方有复杂的壳幔结构, 存在剧烈的深部物质运动. 由于对该区域构造演化历史及深部动力学机制与过程尚不

明晰, 壳幔结构与岩石圈变形模式依然存在很大争议, 对青藏高原东部的深部构造与动力学机制及其与资源成藏或地震灾害的关联得到研究者的关注, 但这些问题还需要深入持续的探讨.

## 1 印度—欧亚板块碰撞

### 1.1 印欧碰撞时间与碰撞模式

前人关于印度—欧亚板块初始碰撞时间的研究结果尚不统一, 从 70 Ma 到 34 Ma 不等 (许志琴等, 2022). “大印度”大小的准确判断是分析控制印度板块俯冲地球动力学和限定印度—欧亚板块的碰撞模式的关键 (van Hinsbergen et al., 2019). 使用不同的研究方法, 前人得到“大印度”大小的

表 2 2022 年第十届青藏高原东部构造与地球物理研讨会 (10-WTGTP) 学术报告列表

Table 2 List of academic reports of the 10th Workshop on Tectonics and Geophysics in the east part of Tibetan Plateau in 2022 (10-WTGTP)

报告人	职称	单位	报告题目
甘卫军	研究员	中国地震局地质研究所	青藏东部地壳顺时针流滑逃逸的起始时间——基于GPS形变观测和断裂弯转迹线的推测
郭晓玉	教授	中山大学	碰撞-地幔流动与南海的构造演化
皇甫鹏鹏	副教授	中国科学院大学	青藏东、西部变形传递差异性物理机制
栾锡武	教授	山东科技大学	西缅地体的碰撞拼贴
邓阳凡	研究员	中国科学院广州地球化学研究所	密集台阵揭示的海原断裂带蠕滑区域的花状构造特征
赵连锋	研究员	中国科学院地质与地球物理研究所	青藏高原东缘岩石圈分层 $Q$ 值与流变强度估计
梁 瑶	助理研究员	中国地质科学院地质研究所	青藏高原东南缘小江断裂带中段精细S波速度结构成像研究
李玉江	副研究员	应急管理部国家自然灾害防治研究院	青藏高原东南缘现今地壳变形及动力学
刘少林	研究员	应急管理部国家自然灾害防治研究院	青藏高原东北缘壳幔速度与各向异性结构研究
赵盼盼	副研究员	中国地震局地震预测研究所	地壳速度结构揭示青藏高原东北缘的生长及其与华北克拉通的接触变形特征
裴顺平	研究员	中国科学院青藏高原研究所	泸定地震深部结构及发震机制
易桂喜	研究员	四川省地震局, 中国地震局成都青藏高原研究所	2022年9月5日四川泸定 $M_s6.8$ 地震序列震构造分析
蔡永恩	教授	北京大学	利用震前断层应力变化探讨预报地震孕震区的可能性
张金海	研究员	中国科学院地质与地球物理研究所	无条件稳定显式有限差分地震波场模拟研究进展
王 杨	博士后	中国科学院大学	变质致密化解释大印度大陆地壳的消失之谜
崔起华	博士后	中国科学院大学	青藏高原之下印度板块撕裂成因机制:数值模拟
李江涛	研究员	武汉大学	青藏高原中南部地壳厚度和波速比分布及其启示
陈棋福	研究员	中国科学院地质与地球物理研究所	基于重复地震研究川滇主要断层的深部滑动速率
张海江	教授	中国科学技术大学	地球物理联合成像揭示云南哀牢山金矿区的深部成矿背景
孙玉军	研究员	中国地质科学院地球深部探测中心	四川大岗山水库区域地震活动性及动力学机制模拟研究
李 兵	助理研究员	应急管理部国家自然灾害防治研究院	龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性
叶秀薇	研究员	广东省地震局	粤港澳大湾区核心城区三维浅层地壳精细结构
李 倩	博士研究生	中国科学院大学	上覆岩石圈强度对大陆碰撞模式选择和俯冲迁移的影响
李抒予	硕士研究生	中国地震局地震预测研究所	利用GNSS与S波分裂资料浅析青藏高原东北部上地壳变形特征

范围约在 600~3000 km (Ali and Aitchison, 2005)。李顺至和田小波 (见表 1) 通过建立地壳物质守恒, 推算“大印度”尺度约为 600 km, 并由此得出印度—欧亚板块的汇聚碰撞过程为双阶段, “硬碰撞”阶段起始于~23 Ma (晚渐新世)。根据岩石组成、岩石年龄、岩性以及古地磁等数据, 栾锡武等 (见表 2) 认为西缅盆地与亚洲板块的碰撞时间在晚始新世至早渐新世之间, 其与印度板块的碰撞时间在中晚始新世, 印缅山脉的发展为自东向西。

利用数值模拟方法, 李倩和李忠海 (见表 2) 通过建立二维大尺度热力学模型, 来讨论上覆板块岩石圈强度对大陆碰撞过程的影响和印度汇聚量平衡的问题。结果显示, 不同上覆板块流变强度会导致不同的碰撞模式。研究获得如下认识: (1) 当上覆板块较强时, 大陆碰撞诱发俯冲起始; (2) 上覆板块较弱, 大陆碰撞会使漂浮大陆发生持续性俯

冲; (3) 上覆板块更弱时大陆碰撞会导致上盘持续性缩短和拆沉。弱的青藏板块由于内部发生了持续性缩短, 使印度—欧亚发生碰撞后约 55 Ma, 印度板块也没有发生俯冲起始。当印度—欧亚初始碰撞时间为 50 Ma 时, 大印度大陆模型的演化结果与现今观测较符; 若初始碰撞时间早于 50 Ma, 需要考虑存在洋盆俯冲的大印度洋盆或洋内岛弧模型。

### 1.2 印度板块的俯冲下插与物质不均衡

印度—欧亚板块碰撞带来的缩短变形被青藏高原岩石圈的缩短所吸收, 部分被青藏高原下印度板块的俯冲所吸收。俯冲到青藏高原南部的印度大陆板块呈横向撕裂和分段状, 沿走向俯冲角度差异较大, 整体上呈现出东陡西缓的样式 (Cui and Li, 2022)。为探究印度板块撕裂成因机制, 崔起华和李忠海 (见表 2; Cui and Li, 2022) 使用三维高分辨

率数值模拟方法,建立一系列三维模型,结果显示:

(1) 印度—欧亚板块碰撞过程中汇聚速度的横向差异是印度板片撕裂并出现差异性俯冲的必要条件,但是仅依靠实际速度差很难使印度板块撕裂;

(2) 存在速度横向差异情况下,印度板块内薄弱带的存在更利于应变集中,且能够控制撕裂的位置;

(3) 青藏板块的横向不均一性不会直接造成印度板片撕裂,但是青藏板块越弱越有助于撕裂,青藏板块越强则越不利于出现撕裂.于常青等(见表 1)利用大地电磁资料二维反演及层析成像的方法获得东构造结深部电导率和地震波速度结构,认为在东构造结以西,印度板片以较缓角度插入欧亚大陆;在东构造结区域,印度板片很可能发生了断离,断离板片以较陡角度深入上地幔软流圈;印度板片在东构造结的撕裂致使高压或超高压变质岩快速向上运移到地表,从而造成了南迦巴瓦的快速隆起.

前人关于物质均衡的研究(Ingalls et al., 2016; Yakovlev and Clark, 2014)中均发现,印度—欧亚碰撞体系中存在大约 40%~50% 的地壳质量缺失.王杨和李忠海(见表 2; Wang et al., 2022)通过计算大印度地区长英质地壳的质量赤字,同样得出约 20%~47% 的长英质地壳在碰撞过程中缺失.在大印度大陆模式下,他们通过密度演化以及岩石-热-动力学数值模拟和板片拖拽力分析,发现俯冲长英质地壳的密度要显著高于周围地幔,当大印度大陆及其长英质地壳被前面的海洋板片拉至 170 km 时,它可以在自己的负浮力下自发地俯冲,为大陆深俯冲提供驱动力,也为印度—欧亚碰撞体系存在的物质不均衡问题提供了答案.

### 1.3 青藏高原内部及周缘的深部构造运动与动态演化

王绪本等(见表 1)利用错那—聂荣及洛隆—玉树的两条大地电磁剖面,对印度大陆俯冲带、喜马拉雅造山带以及狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带的深部电性结构与属性进行研究.结果表明,拉萨地块中南部岩石圈地幔、下地壳保留了软流圈上涌导致部分熔融的高导异常,印度大陆俯冲地壳部分熔融,藏南淡色花岗岩具有与冈底斯弧相一致的岩浆活动阶段性,提出印度大陆俯冲—俯冲地壳熔融—幔源热量注入—折返的喜马拉雅造山机制.

张会平等(见表 1; 陶亚玲等, 2020)通过低温热年代学资料,从时间特征与空间特征两个方面对青藏高原的快速剥露事件进行剖析,梳理青藏高

原东缘的构造演化历史,认为青藏高原东缘幕式剥露历史从时间上表现为始新世到渐新世的斜向生长与断裂活动,中新世中期以来的下地壳流活动;空间上表现为以鲜水河断裂为界的南北隆升差异,区域性深大断裂的走滑作用调节着青藏高原东缘的缩短及差异隆升.

新生代初期印度板块与欧亚板块的挤压碰撞与印度板块的持续北东向运动,使青藏高原表现为显著的南北向缩短与东西向伸展变形(Houseman and England, 1993).使用改进后的  $H-\kappa-c$  接收函数分析技术,李江涛等(见表 2)反演得到青藏中南部的地壳厚度由南至北从 40~50 km 逐渐变深,至拉萨块体达到最深(80 km),至班公湖—怒江缝合带,地壳减薄至 60 km 左右.刘震等(见表 1)对青藏高原中部地壳增厚模式进行研究,使用 SANDWICH 项目布设的 72 个台站观测资料,采用接收函数的方法得到青藏高原中部地壳厚度与波速比,得到地壳的厚度变化范围为 56.2~81.5 km,平均厚度为 68.9 km;波速比分布范围为 1.67~1.94.报告讨论了二氧化硅含量与青藏高原中部地壳向南增厚与波速比向南降低的关系,认为地壳二氧化硅含量升高与岩浆上涌分异和拆沉引起的地壳增厚有关.

逆冲构造是地壳收缩的一种表现(王宗秀, 1995).通过密集台阵测线观测,叶卓等(见表 1)得到青藏高原北缘的接收函数成像结果,并分析认为青藏高原北缘的新生代构造在岩石圈拆离区上方形成了岩石圈尺度的逆冲楔,共轭逆冲剪切带切穿地壳和上地幔顶部,导致莫霍面发生错动.

长期的构造运动会在地面形成明显的构造地貌,相对欧亚大陆的 Global Navigation Satellite System (GNSS) 速度场清晰地展示出青藏高原物质的东向逃逸和顺时针旋转(Gan et al., 2007, 2022),青藏高原东南缘也被认为是高原物质东向逃逸的重要通道(Tapponnier et al., 1982),但是青藏高原东南缘地壳顺时针流滑逃逸这一构造地貌的形成时间仍然难以精确确定,研究者使用传统方法得到的流滑逃逸发生时间不确定性较大(Fyhn and Phach, 2015; Styron et al., 2013).针对确定构造活动起始年代这一问题,甘卫军等(见表 2; Gan et al., 2022)利用 GNSS 观测数据做了一点新的尝试,根据 GNSS 形变观测和断裂弯转迹线推测青藏东南部地壳顺时针流滑逃逸现象的起始时间.报告以龙门山以及红河断裂先于流滑现象

存在、假设断裂起先大致呈直线状和现今 GNSS 地壳形变速率基本代表长期速率为前提, 通过断裂“回退反直”策略反演变形累积的总年代, 推测青藏高原东南缘地壳顺时针流滑逃逸现象的起始时间距今约  $10.1 \pm 1.5$  Ma, 且这一运动的范围很大, 延伸至天山以及红河断裂甚至更大的构造范围. 这项研究为更好地理解青藏高原的演化历史提供重要的参考.

地震各向异性能够反映地球介质变形及深部流动特性, 越来越多地被用于流变和深部动力学特征的研究. 青藏高原东南缘上地壳与岩石圈显示出截然不同的各向异性形态, 虽然有尺度上的不同, 但清楚地揭示了青藏高原东南缘各向异性具有深度上的分层 (高原等, 2020), 这种分层各向异性特征在青藏东北缘也有报道 (Hao et al., 2021; 沈胜意等, 2022; Shi et al., 2020). 黄周传等 (见表 1; Huang and Chevrot, 2021) 通过建立青藏高原东南缘双层各向异性模型, 结合岩石圈和软流圈各向异性成像结果, 认为在软流圈中存在两条流动通道. 一条通道从青藏高原延伸至右江东部, 快波偏振方向为 NW-SE, 表明在深部沿扬子克拉通西南缘存在东南向软流圈挤压. 另一条通道由印支地块北部向东延伸至右江造山带, 快波偏振方向为 EW, 由印度板块东向俯冲驱动的地幔流形成.

针对垂向增厚和侧向挤出对吸收青藏高原东部的缩短变形哪一方贡献更大这一问题, 李忠海等 (见表 1; Cui et al., 2021) 建立了一系列三维高分辨率数值模型, 结果显示青藏高原侧向挤出的发生需要相对严格的条件, 由于其规模远小于垂向变形, 地壳增厚量比侧向挤压量高出数倍, 认为岩石圈的缩短增厚仍然占主导.

#### 1.4 印欧碰撞的远程效应

印度—欧亚板块碰撞导致亚洲内陆广泛而剧烈的远程效应, 天山 (Huangfu et al., 2021)、华北地区 (张岳桥等, 2019)、贝加尔湖地区 (Ivanenko and Gorbunova, 2021) 等区域的构造形成和新构造活动可能均与印度—欧亚大陆碰撞的远程效应有关.

为探究印欧碰撞远程效应在青藏高原东西部差异性变形传递的载体和机制以及对亚洲内陆构造演化的影响, 皇甫鹏鹏等 (见表 2) 利用多个学科 (温度、黏滞度以及应变率速度场等) 以及系统的数值模拟模型的综合约束, 揭示了南北向变形传递

机制由青藏本身壳幔结构演化所控制. 在青藏高原西部为刚性岩石圈地幔碰撞导致的“隔挡式”变形传递, 传递距离长, 变形强烈. 东部为地壳缩短的渐进式连续变形传递, 导致高原北向持续生长. 围绕印藏碰撞与新生代天山隆升之间应力传递的物理机制与深部过程, 皇甫鹏鹏等 (见表 1; Huangfu et al., 2021) 从地貌、物质场、应变场与温度场四个方面的演化, 使用数值模拟方法分析了从青藏岩石圈拆沉到天山活化隆升的过程, 认为新生代天山活化隆升受控于印度岩石圈地幔与塔里木盆地南缘的直接碰撞接触; 而印度—塔里木碰撞接触可能导致塔里木盆地的顺时针旋转.

郭晓玉等 (见表 2) 使用南海北部陆缘测线记录的地震数据, 获得了精细的南海北部陆缘及洋壳的莫霍面深度, 南海地区的地壳厚度由北向南逐渐减薄, 并由此给出了清晰的洋陆边缘. 南海地区统一北倾的全地壳结构暗示了顶部向南的地幔穿时流动拖曳作用. 放眼整个青藏高原, 携带印度大陆岩石圈北上碰撞的软流圈地幔围绕东构造结发生顺时针旋转, 牵动了其东南部区域, 导致印支半岛旋转以及南海海盆打开.

华北克拉通演化历史长达 38 亿年之久, 为全球最早的克拉通之一 (Liu et al., 1992). 它几乎记载了地球早期的全部主要构造事件, 与其他克拉通相比构造演化更为复杂. 作为克拉通活化的典型, 中生代以来华北克拉通东部块体岩石圈显著减薄, 克拉通中部、东部经历强烈的内部变形、火山活动与地震活动, 失去了稳定克拉通的典型特征 (Chen et al., 2008; Guo et al., 2016; Huang et al., 2009; Xu, 2001). 华北克拉通作为一个重要的大陆板块和岩石圈盆地系统, 在全球地质史上占有重要地位, 其形成机制、构造演化以及与欧亚碰撞带、亚洲陆块等的关系一直受到国内外学者的关注和研究.

徐义贤等 (见表 1; Xu et al., 2022) 围绕“克拉通自维持的周期性振荡行为持续到显生宙吗?”这一科学问题, 对克拉通岩石圈的显生宙演化进行了研究. 研究发现, 相较于古生代岩石圈构造, 华北克拉通东部出现了大规模减薄, 而鄂尔多斯盆地北部和渭北隆起至南太行山隆起区域则分别出现了均匀增厚和汇聚增厚, 其余区域则呈现均匀减薄的特征. 他们认为, 华北克拉通的演化是重力均衡和热耗散互反馈机制作用下的结果. 在中新生代, 岩石圈破坏仅发生在华北克拉通东部带的东部, 而华北克拉通的其余部分则显示出古老岩石圈自维持的

加热减薄-冷却增厚的周期性振荡行为. 冯梅等(见表 1) 利用 P 波接收函数研究了郯庐断裂带莫霍面错断, 并使用 S 波接收函数进行了验证. 通过 S 波接收函数的方法, 发现索伦—西拉木伦缝合带中段岩石圈界面存在错断情况, 并结合随钻地震技术得出该缝合带中段整体存在破坏“西弱东强”的态势. 综合考虑速度结构、偏振方向及各向异性强弱, 认为燕山造山带可能保存太古代克拉通根, 华北克拉通北部可能有古亚洲板片残留.

## 2 构造变形特征与动力学机制

### 2.1 地壳变形与深浅变形差异

长期的造山运动及构造演化过程使得青藏高原内发生了长期剧烈的构造变形. 由于深部结构差异与经历的动力学过程不同, 变形在不同区域、不同深度尺度表现有所差异.

青藏高原东南缘, 李玉江等(见表 2) 利用 GPS 观测资料分析了青藏高原东南缘现今的应变分布, 展现了东南缘地壳变形的整体特征: 青藏高原东南缘的最大剪应变率沿鲜水河—安宁河—小江断裂带沿线分布, 并在红河断裂处终止. 数值模拟重力拓展模型与 GPS 观测结果相符, 表明重力势能梯度可能是控制青藏高原东南缘现今地壳变形的因素. 高原等(见表 1) 介绍了青藏高原东南缘上地壳、全地壳和岩石圈三种圈层尺度的各向异性特征及其变形差异. 在上地壳尺度, S 波优势偏振方向呈现出 NNW 的趋势, 与 GPS 揭示的地壳运动方向有很好的 consistency. 加入微震识别结果后, 揭示出更加细节的变化: 以川滇地块西边界为中心, 从西到东呈现出 NNW-NS-NNE 的趋势性变化 (Gao et al., 2019). 在岩石圈尺度, 各向异性结果显示, 在 26°20'N 附近南北两侧有明显的变化 (高原等, 2020). 而在全地壳尺度下, 各向异性结果较为复杂, 凸显出分析技术进步和高质量观测数据的重要性.

青藏高原东北缘及邻区, 刘少林等(见表 2) 的研究利用区域地震走时反演和程函方程成像分别得到方位各向异性及径向各向异性. 上地壳方位各向异性方向与断裂走向密切相关, 中下地壳的径向各向异性在祁连造山带和秦岭造山带较弱, 速度结构显示低速异常. 在 170 km 深度下, 径向各向异性显示松潘—甘孜地块和祁连地块存在正的径向各向

异性, 与局部软流圈流动有关. 根据青藏高原东北部的地壳速度结构结果, 赵盼盼(见表 2) 得到上下地壳构造变形特征, 讨论了青藏高原东北缘与华北克拉通的接触变形特征. 陇西盆地上地壳被挤压推覆于鄂尔多斯之上, 而下地壳则向东侵入鄂尔多斯, 导致鄂尔多斯下地壳遭受破坏, 两个构造单元地壳呈现楔形构造特征. 李抒予和高原(见表 2) 进行了 GNSS 应变解算和 S 波分裂计算, 以比较青藏高原东北部地表与上地壳的变形差异. 最大剪切应变率高值区分布在甘孜—玉树—鲜水河断裂、昆仑断裂和海原断裂等大型断裂附近, 主压应变方向由西向东逐渐从 NNE 顺时针转为 EW 向. S 波快波偏振方向主要为与主压应力一致的 NE 向和与断裂走向大致平行的 NW 向. 地表主压应变与上地壳快波偏振的方向表示的深浅变形差异可能与构造边界的控制作用与脆性地壳上覆的软弱层有关, 相关证据需要进一步研究.

使用地震学的方法计算深浅部滑动速率差异直接揭示了不同深度尺度的变形特征. 陈棋福等(见表 2) 利用波形互相关、震源区重叠和平均重复间隔等条件, 检测出 12 组重复地震, 计算深浅部滑动速率加以比较分析, 以研究深浅部构造变形特征. 研究结果显示, 在龙门山断裂附近的映秀地区, 浅层重复地震估算的滑动速率为 3~5 mm/a, 而深部滑动速率为 6~9.6 mm/a, 深浅部滑动速率存在差异. 在整个川滇地区, 龙门山断裂带、小江断裂带和鲜水河断裂南端的深部滑动速率比较一致, 与 GPS 资料显示的龙门山断裂带滑动速率相对较低的结果有所不同. 研究人员认为, 需要关注深浅部变形显著差异区的强震危险.

### 2.2 岩石圈及上地幔流变与地球物理观测证据

岩石圈流变学强度的横向差异是影响构造变形的重要因素, 而大地震通常发生在岩石圈流变学强度剧烈变化的区域. 地震波  $Q$  值描述了地下介质的黏弹性属性, 因此可以利用地震波  $Q$  值来估计岩石圈的流变强度. 赵连锋(见表 2) 利用多种震相波形资料, 包括 Sg、Lg 和 Sn, 分别得到了上地壳、地壳和上地幔的  $Q$  值成像, 从而建立了高分辨率的青藏高原东南缘岩石圈分层  $Q$  值结构, 其分辨率达到了 0.5°. 研究表明,  $Q$  值分布与岩石圈流变强度有很好的对应关系. 此外, 青藏高原东南缘存在低  $Q$  值异常区, 可能是由于大火成岩省的存在. 而东北缘的四川盆地和辽中盆地则对地壳的东

流起到了阻挡作用。

在青藏高原东北缘,刘少林等(见表 2)利用近 1000 个宽频带地震仪数据,通过程函方程地震走时反演,得到了青藏高原东北缘的 P 波速度结构。结果显示,鄂尔多斯块体和四川盆地等稳定块体下方的岩石圈呈现高速异常,结合径向各向异性,推断青藏高原东北缘局部存在软流圈物质流动;祁连块体下方可能不存在中下地壳流,祁连块体的变形以挤压变形为主;阿拉善块体向南俯冲至青藏高原之下;青藏高原的中下地壳流未到达秦岭造山带,截止到松潘—甘孜地块。赵盼盼等(见表 2)使用布设在西秦岭地区的流动台阵和喜马拉雅二期流动台阵的观测资料,采用背景噪声成像的方法,得到了青藏高原东北缘的速度结构分布。结果显示,松潘—甘孜地块至西秦岭西部低速层内部联通,结合中地壳部分熔融百分比的估算,可能存在有限发育的地壳流;低速层从青藏高原东北缘向外突出,低速层厚度的分段性特征和 S 波速度的增加表明地壳流的空间分布主要由东北向向外扩张;陇西盆地下方,熔体含量低,低速层的速度和厚度不足以支撑通道流,可能表示滑脱层;西秦岭西部和东部存在显著差异,东部具有典型的陆壳速度结构特征,没有青藏地壳物质沿西秦岭向东挤出的构造支持。

为探讨羌塘块体地幔上升流的起源深部地幔过渡带与上地幔是否存在物质交往这一科学问题,李国辉等(见表 1)利用三重震相波形拟合的方法得出,当大陆岩石圈俯冲或拆沉到地幔过渡带时,会对地幔过渡带物质产生扰动,同时含水的物质也会上涌到地幔过渡带顶部,导致部分熔融的产生。这种熔融现象会形成一个低速层,可能富集了不相容元素,这些元素会上升至浅部,形成了富集的软流圈地幔。这些富集的软流圈地幔为浅部构造的形成提供了热的岩浆源(Li et al., 2022)。

### 2.3 典型矿藏的成矿机制

作为特提斯域地体拼贴的产物,青藏高原是全球大陆碰撞造山成矿的最大实例(Deng et al., 2022),也是中国重要的矿产资源的集结地(许志琴等, 2022),发育有“冈底斯成矿带”“雅鲁藏布江成矿带”“特提斯喜马拉雅成矿带”和“三江成矿带”四个极具找矿前景的成矿带(许志琴等, 2012)。青藏高原的成矿规模大、时代新、矿床类型多,而且保存良好,成为研究大陆碰撞造山成矿作用的天然试验场(侯增谦等, 2006)。

张海江等(见表 2)通过联合大尺度的上地幔速度成像、精细尺度的岩石圈速度成像结果和大地电磁成像结果,探讨了云南哀牢山金矿区的深部成矿背景。研究发现上涌的软流圈提供了深部热源,触发了交代岩石圈地幔的部分熔融,从而产生了基性和超基性岩浆。同时,壳幔解耦也为基性岩浆在地壳底部汇聚和脱气提供了有利的环境。此外,地壳尺度的走滑断层也为岩浆侵入和流体运移提供了通道。余年等(见表 1)采用大地电磁三维反演方法,研究了红河断裂带的电性结构。研究发现,在哀牢山地区,自 400 km 深处垂直运动的软流圈上涌流抵达岩石圈 200 km 深处后,分为三股平行涌流,沿扬子地块西缘从 24°N 向北扩展流动到 28°N。上涌体呈蘑菇状面状分布,覆盖扬子地块西缘的煌斑岩群、碱性岩—碳酸岩杂岩体和含矿斑岩群发育区。这一研究结果为哀牢山地区的成矿作用提供了重要的地球物理背景。

右江盆地位于华南的西南部。利用 P 波和 S 波接收函数方法,王祎然与滕吉文等(见表 1)研究了右江盆地的地壳结构形态与岩石圈厚度信息,并探讨了两期金矿的形成过程以及集中在该盆地的原因。结合布格重力异常结果的速度结构显示,右江盆地存在扬子块体向南俯冲的痕迹,下地壳减薄,盆地下方存在高速高密度体。两期金矿的形成原因是盆地中生代之前基底弱且破碎(裂谷作用、俯冲作用),在中生代印支汇聚中变形响应更加显著,易于造山型金矿的发育。此外,地壳岩石圈的显著增厚为第二期在古太平洋俯冲作用下发生拆沉和岩浆活动及卡林型金矿提供了基础。

## 3 强震活动与深部蕴震机制

### 3.1 地震资料揭示的断层活动特征

青藏高原是我国地震活动最为复杂和强烈的地区之一。结合震源区断层分布分析区域内地震活动性,可以揭示不同构造背景的差异,进而深入探究地震活动规律,并评估相关地质灾害的危险性(白玲等, 2019)。这对于理解青藏高原深部结构与构造背景具有重要的启示意义。

白玲等(见表 1)对雅鲁藏布江缝合带、南迦巴瓦变质体和拉萨块体的地质与地球物理背景进行了简要梳理,并利用地震活动解释了嘉黎断裂带的分段差异性,发现其形成经历了多次演化构造过

程. 现今该断裂带主要表现为右旋走滑运动, 且自西向东具有明显的分段活动差异性和横向不均匀性. 同时, 确定了易贡滑坡的动力学过程, 包括高速崩塌下滑、坡度逐渐变缓水平速度分量增加摩擦加大以及冲坡物质冲出沟口撞击对岸三个阶段. 梁瑶等(见表 2)利用短周期密集台阵数据, 采用背景噪声成像的方法, 获得了小江断裂中段精细的 S 波速度结构. 研究表明, 小江断裂带总体表现为低速异常, 近直立, 具有走滑特征. 此外, 研究区域内还存在隐伏断裂, 总体表现为较高速, 构造挤压特征明显. 嵩明盆地内部张剪切断裂被推测为嵩明大地震的发震构造. 此外, 嵩明盆地内的高速异常可能与深部地壳流上涌有关, 导致深部高速地层上涌.

蔡永恩等(见表 1、2; 谢周敏等, 2022)介绍了两种地震学孕震区研究方法: Back-slip(地震反向滑动/地震滑动亏损)地震位错模型与地震应力模型. 利用这些模型探讨了 2011 年日本东北 9 级大地震的孕震区, 并提出了以下结论: 利用地震应力模型和 GNSS 数据可以直接反演和预测大地震的孕震区; 震前断层不仅存在剪应力异常区, 还存在正应力异常区; 大地震前断层不仅存在应力的累积区, 还存在应力的释放区.

近年来, 构造相对稳定的四川盆地发生了一系列中强地震, 震级不断突破该地区历史震级上限. 易桂喜等(见表 1)对四川盆地的区域构造和历史地震进行了梳理. 研究发现, 该地区的构造表现出褶皱和伴生断层的特征, 历史地震多为中等地震, 频度低, 小震活动分区特征明显. 震源机制解、发震构造和构造应力场的研究结果显示, 四川盆地存在分区差异. 盆地内部的荣县—威远地区震源机制类型为单一的逆冲型, 而盆地边缘的长宁—兴文区域的机制类型具有多样性.

邓阳凡(见表 2)使用密集流动台阵、近震振幅响应、远震的走时延迟和围限波模拟等方法, 揭示了海原断裂带的蠕滑区(老虎山断裂)断层南北盘存在速度差异, 其中北盘速度较慢, 存在一个约 100 m 的核心损伤带. 该断层呈现出上部 150 m、下部 50 m、深度 4 km 的花状形态, 并认为海原地震可能是一次超剪切破裂, 即断层的破裂速度超过了震源区岩石介质的剪切波传播速度, 而破裂区有可能穿过蠕滑区形成更大的地震. 朱守彪(见表 1)介绍了超剪切破裂概念的同时也介绍了其发生条件: 要求初始应力场中主应力方位与断层走向的夹角以

及断层走向变化的角度必须要满足一定的数量关系. 由于其发生条件比较苛刻, 天然地震中发生超剪切地震破裂的现象并不多见.

李兵(见表 2)利用地应力测量结果、地震活动性参数  $b$  值、地壳速度和地温数据等资料, 分析了龙门山断裂带大邑地震空区的地震危险性. 研究结果显示, 最大水平主应力方向为 WNW 向, 与区域应力场一致, 与震源机制和 GPS 速度场吻合, 反映了青藏高原向东南挤压控制的背景应力状态; 两个钻孔的高  $\mu m$  值(最大剪应力与平均主应力的比值)和高应力值表明研究区处于危险状态, 大邑地震空区仍然具有发生中、强震的能力;  $b$  值表明深浅部均处于高应力状态, 18 km 以上的地壳结构为脆性层.

### 3.2 破坏性地震的震源参数研究

破坏性地震发生后, 快速计算本次地震的震源参数, 获得对破裂过程的认识, 对于震情判断、地震的发震构造以及如何进一步评估该区域未来的强震活动趋势均具有重要的意义.

北京时间 2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分, 云南大理州漾濞县发生  $M_S 6.4$  地震, 震源深度 8 km. 次日 2 时 4 分, 青海果洛州玛多县发生  $M_S 7.4$  地震, 震源深度 17 km. 何熹等(见表 1)对这两个地震的震源谱和震源参数进行了计算分析, 结果显示漾濞地震序列应力降较高, 应力释放过程较长, 而玛多地震序列应力降较低, 数值范围集中, 应力释放快. 他们认为这种差异可能反映了陆陆碰撞后方和前沿的断层强度差异, 碰撞后方构造转换导致了复杂的横弯褶皱和壳内拆离等不均匀性; 分支断层系统提升了断层强度, 使得地震发生时具有更高的应力释放; 陆陆碰撞前缘由于较高的韧性剪切形变导致的热效应降低了断层强度. 研究表明, 漾濞  $M_S 6.4$  地震发生在一个过去未知的次级断层上, 震源区的应力与变形有明显的空间变化(Tian et al., 2023).

北京时间 2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分, 四川省甘孜州泸定县发生  $M_S 6.8$  地震, 震源深度 16 km. 裴顺平等(见表 2)使用周边 50 个密集台阵和 5160 个地震事件, 获得了鲜水河断裂带南东段精细 P 波速度. Pg 波速度结构横向变化图像显示, 在磨西地区存在 20 km 左右尺度的高速异常体, 对应发生泸定  $M_S 6.8$  地震的凹凸体. 同时在康定和石棉地区也存在小尺度的凹凸体. 泸定地震地表破裂向南东方

向扩展, 意味着速度结构控制着泸定地震的发生和破裂的扩展, 破裂开始于凹凸体的高速异常区, 更容易向低速异常区扩展. 余震分布存在 3 个震群, 其中两个存在于地表破裂的两端, 与库仑破裂应力和地表破裂不充分有关; 另外一个震群远离破裂区, 并存在于高速异常和地表断裂阶跃位置, 推测该处应力较高, 在主震应力扰动下产生新的微破裂. 易桂喜等 (见表 2) 根据地震序列重定位和震源机制结果, 探讨泸定地震的发震构造特征. 结果显示: 泸定  $M_{\text{s}}6.8$  地震余震区长轴沿鲜水河断裂带南段磨西段呈 NNW 向展布, 余震大致止于石棉草科乡南侧附近. 余震分段特征明显, 密集区长约 55 km, 南、北窄, 中间宽; 序列 8 次 3.0 级以上地震的矩心深度在 2.5~7.5 km 之间, 反映本次泸定主震及其 3.0 级以上余震能量释放主要发生在上地壳浅部; 震源机制解具有分段分区特征. 南段和北段余震均为纯走滑型, 中段主震为纯走滑型, 而余震为纯正断型. 泸定地震的发震构造为主震和南、北段余震的主要发震构造为鲜水河断裂带南段 NNW 向的磨西断裂, 断层面倾向 SW; 大渡河断裂可能参与了南段的部分余震活动, 中段西侧余震发震构造为此前未知的 NNW-SSE 展布的正断层, 倾向 SW. 最近发表的研究结果 (Li et al., 2023; 李莹等, 2023), 对上面的相关研究结果给予了有力的支持, 表明大陆型大地震或强震更容易发生在凹凸体或波速变化剧烈的地壳深部.

## 4 结 语

印度板块和欧亚板块的不断碰撞导致青藏高原隆升和喜马拉雅山脉崛起, 同时也使大量高原物质向东及东南方向的侧向逃逸. 青藏高原东移的物质在东部遇到四川盆地、鄂尔多斯块体和阿拉善块体的阻挡, 导致青藏高原东部的地表运动方向发生顺时针变化 (Wang and Shen, 2020). 青藏高原东部地形起伏剧烈, 地震活动频繁, 资源矿藏丰富, 揭示出青藏东部极为复杂的壳幔结构与深部变形、非常强烈的深部物质运动.

青藏高原东部的动力学过程、深部结构、资源分布与地震活动是地球科学的重要研究内容. 我国拥有世界第三极的青藏高原, 为我国科研人员能够在青藏高原隆升、造山运动与深部物质运移等大陆动力学乃至全球变化等领域取得引领国际前沿的研究成果提供了有利的条件. 但许多科学问题仍然存

在争议, 例如印度板块与欧亚板块的俯冲模式、青藏高原深部是否存在中/下地壳流及其具体形态、一级块体边界断裂与地震及成矿的关系等. 研究者们使用多种地球物理探测方法研究不同区域的深部壳幔结构和构造演化过程, 并逐步填充以前的观测盲区. 与此同时, 提升观测和分析技术, 发展地球物理理论和分析方法, 也使获得更高精度地球物理结构及深部构造成为可能, 从而解决和厘清存在争议的科学问题, 深化和推动青藏高原深部地球物理与大陆动力学研究的发展.

本文根据 2021 年第九届和 2022 年第十届的两届 WTGTP 会议报告, 结合近年来的相关研究结果, 介绍了青藏高原东部地球物理结构与深部构造及动力学机制研究的最新研究进展. 结合近年的相关研究结果, 印度—欧亚板块碰撞过程与动态演化、深部构造变形与动力学机制、强震活动与深部蕴震机制、壳幔物质及能量交换、成矿成藏的深部构造、深地幔结构与深部动力学机制、圈层构造与分层变形等都是地球物理领域的重要研究方向, 许多科学问题超越了地球物理学的范畴, 不仅需要地质学、地球化学和流体力学等领域的联合, 更进一步需要物理学、计算数学和 AI 及大数据等研究成果的融合, 甚至需要来自行星物理研究的启发, 以帮助研究者对地球演化及宜居性有更深入的理解. 本文对青藏高原深部构造与地球物理研究前景进行的初步展望, 期望能给相关科研人员提供一点有益的参考.

## References

- Ali R, Aitchison J C. 2005. Greater India[J]. *Earth Science Reviews*, 72(3-4): 169-188.
- Bai L, Song B W, Li G H, et al. 2019. Seismic activity in the Himalayan orogenic belt and its related geohazards[J]. *Advances in Earth Science*, 34(6): 629-639 (in Chinese).
- Chen L, Tao W, Zhao L, et al. 2008. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the northeastern North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1-2): 56-68.
- 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.
- Cui Q H, Li Z H, Liu M. 2021. Crustal thickening versus lateral extrusion during India-Asia continental collision: 3-D thermo-mechanical modeling[J]. *Tectonophysics*, 818: 229081.
- Cui Q H, Li Z H. 2022. Along strike variation of convergence rate and pre-existing weakness contribute to Indian slab tearing beneath Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2022GL098019.
- Deng J, Wang Q F, Sun X, et al. 2022. Tibetan ore deposits: A conjunc-

- tion of accretionary orogeny and continental collision[J]. *Earth-Science Reviews*, 235: 104245.
- England P, Houseman G. 1986. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India-Asia collision zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B3): 3664-3676.
- England P, Houseman G. 1988. The mechanics of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 326(1589): 301-320.
- Fyhn M B W, Phach P V. 2015. Late Neogene structural inversion around the northern Gulf of Tonkin, Vietnam: Effects from right-lateral displacement across the Red River fault zone[J]. *Tectonics*, 34(2): 290-312.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8): B08416.
- Gan W J, Molnar P, Zhang P Z, et al. 2022. Initiation of clockwise rotation and eastward transport of southeastern Tibet inferred from deflected fault traces and GPS observations[J]. *GSA Bulletin*, 134(5-6): 1129-1142.
- Gao R, Lu Z W, Klempner S L, et al. 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya[J]. *Nature Geoscience*, 9(7): 555-560.
- Gao Y, Chen A G, Shi Y, et al. 2019. Preliminary analysis of crustal shear-wave splitting in Sanjiang lateral collision zone of the SE margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Geophysical Prospecting*, 67(9): 2432-2449.
- Gao Y, Shi Y T, Wang Q. 2020. Seismic anisotropy in the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its deep tectonic significances[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 802-816 (in Chinese).
- Guo Z, Afonso J C, Qashqai M T, et al. 2016. Thermochemical structure of the North China Craton from multi-observable probabilistic inversion: Extent and causes of cratonic lithosphere modification[J]. *Gondwana Research*, 37: 252-265.
- Hao S J, Huang Z C, Han C R, et al. 2021. Layered crustal azimuthal anisotropy beneath the northeastern Tibetan Plateau revealed by Rayleigh-wave Eikonal tomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 563: 116891.
- Hou Z Q, Mo X X, Yang Z M, et al. 2006. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. *Geology in China*, 33(2): 340-351 (in Chinese).
- Houseman G, England P. 1993. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian-Asian continental collision[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B7): 12233-12249.
- Huang Z C, Chevrot S. 2021. Mantle dynamics in the SE Tibetan Plateau revealed by teleseismic shear-wave splitting analysis[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 313: 106687.
- Huang Z X, Li H Y, Zheng Y J, et al. 2009. The lithosphere of North China Craton from surface wave tomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2): 164-173.
- Huangfu P P, Li Z H, Zhang K J, et al. 2021. India-Tarim lithospheric mantle collision beneath western Tibet controls the Cenozoic building of Tian Shan[J]. *Geophysical Research Letters*, 48: e2021GL-094561.
- Ingalls M, Rowley D B, Currie B, et al. 2016. Large-scale subduction of continental crust implied by India-Asia mass-balance calculation[J]. *Nature Geoscience*, 9: 848-853.
- Ivanchenko G N, Gorbunova E M. 2021. Formalized lineament analysis of geological structures in the Baikal region[J]. *Physics of the Solid Earth*, 57: 779-788.
- Li G H, Bai L, Zhang H, et al. 2022. Velocity anomalies around the mantle transition zone beneath the Qiangtang terrane, central Tibetan Plateau from triplicated P waveforms[J]. *Earth and Space Science*, 9: e2021EA002060.
- Li G H, Wang A J, Gao Y. 2023. Source rupture characteristics of the September 5, 2022 Luding  $M_{\text{s}}6.8$  earthquake at the Xianshuihe fault zone in southwest China[J]. *Earthquake Research Advances*, 3(2): 100201.
- Li Y, Tian J H, Li X Y, et al. 2023. Deep tectonic pattern of the Luding  $M_{\text{s}}6.8$  earthquake on 5th September 2022 in Sichuan Province, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(4): 1385-1396 (in Chinese).
- Liu D Y, Nutman A P W, Compston W, et al. 1992. Remnants of  $\geq 3800$  Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, 20: 339-342.
- Liu T Z, Xia X Y, Zhang H, et al. 2023. The 10-WTGTP (10th Workshop on Tectonics and Geophysics in the east part of Tibetan Plateau) was held online in 2022[J]. *Earthquake*, 43(1): 198-200 (in Chinese).
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 276: 788-790.
- Shen S Y, Gao Y, Liu T Z. 2022. Two-layer anisotropy revealed by shear wave splitting beneath the NE margin of Tibetan Plateau: From Haiyuan fault to Yinchuan Garben[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(5): 1595-1611 (in Chinese).
- Shi Y T, Gao Y, Shen X, Liu K H. 2020. Multiscale spatial distribution of crustal seismic anisotropy beneath the northeastern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications of the Haiyuan fault[J]. *Tectonophysics*, 774: 228274.
- Styron R H, Taylor M H, Sundell K E, et al. 2013. Miocene initiation and acceleration of extension in the south Lunggar rift, western Tibet: Evolution of an active detachment system from structural mapping and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Tectonics*, 32(4): 880-907.
- Tao Y L, Zhang H P, Ge Y K, et al. 2020. Cenozoic exhumation and fault activities across the eastern Tibet: Constraints from low-temperature thermochronological data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(11): 4154-4167 (in Chinese).
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611-616.
- Teng J W, Wang S Z, Yao Z X, et al. 1980. Characteristics of the geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau and its neighbouring regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 23(3): 254-268 (in Chinese).
- Tian J H, Gao Y, Luo Y. 2023. Deep seismogenic tectonics of Yangbi  $M_{\text{s}}6.4$  on 21 May 2021 in the SE margin of the Tibetan Plateau from earthquake sequence relocation, stress field and seismic an-

- isotropy[J]. *Tectonophysics*, 851: 229768.
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Li S H, et al. 2019. Reconstructing Greater India: Paleogeographic, kinematic, and geodynamic perspectives[J]. *Tectonophysics*, 760: 69-94.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- Wang Q, Li C, Yu C Q, et al. 2017. The 5th workshop on tectonics and geophysics in the east part of Tibetan Plateau (WTGTP) was held in 2017 in Linzhi, China[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 11(467): 37-38 (in Chinese).
- Wang Y, Zhang L F, Li Z H. 2022. Metamorphic densification can account for the missing felsic crust of the Greater Indian continent[J]. *Communications Earth & Environment*, 3: 166.
- Wang Z, Wang J, Fu X G. 2021. Deep structure and crustal deformation in the Tethys tectonic domain of the eastern Xizang (Tibetan) margin—Yangtze Platform[J]. *Geological Review*, 67(1): 1-13 (in Chinese).
- Wang Z X. 1995. Formation and evolution of thrust in the wedge of subduction zone: Experiment research on tectonophysics modeling[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 16(2): 165-176 (in Chinese).
- Wu Y, Li G H, Gao Y. 2021. Advancement in geophysics and continental dynamics of the Tibetan Plateau: Review of the WTGTP2020[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 51(12): 529-546 (in Chinese).
- Xie Z M, Cai Y E, Yoshioka S, et al. 2022. Exploring the location of large earthquakes using fault stress accumulation—A case study upon  $M_w$ 9.0 Tohoku-Oki earthquake in Japan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(1): 1-11 (in Chinese).
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth-Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 747-757.
- Xu Y X, Zhang Y, Yang B, et al. 2022. Phanerozoic evolution of lithospheric structures of the North China Craton[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2022GL098341.
- Xu Z Q, Yang J S, Li W C, et al. 2012. Tectonic background of important metallogenic belts in the southern and southeastern Tibetan Plateau and ore prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1857-1868 (in Chinese).
- Xu Z Q, Li G W, Zhang Z M, et al. 2022. Review ten key geological issues of the Tibetan Plateau—Commemoration of the centennial anniversary of *Acta Geologica Sinica*[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 65-94 (in Chinese).
- Yakovlev P V, Clark M K. 2014. Conservation and redistribution of crust during the Indo-Asian collision[J]. *Tectonics*, 33: 1016-1027.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- Zeng R S, Zhu J S, Zhou B, et al. 1992. 3-D seismic wave velocity structure in Tibetan Plateau and its eastern neighboring regions and the continental collision model[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 14(S1): 523-533 (in Chinese).
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 32(9): 809-812.
- Zhang Y Q, Shi W, Dong S W. 2019. Neotectonics of north China: Interplay between far-field effect of India-Eurasia collision and Pacific subduction related deep-seated mantle upwelling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(5): 971-1001 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 白玲, 宋博文, 李国辉, 等. 2019. 喜马拉雅造山带地震活动及其相关地质灾害[J]. *地球科学进展*, 34(6): 629-639.
- 高原, 石玉涛, 王琼. 2020. 青藏高原东南缘地震各向异性及其深部构造意义[J]. *地球物理学报*, 63(3): 802-816.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. *中国地质*, 33(2): 340-351.
- 李莹, 田建慧, 李心怡, 等. 2023. 2022年9月5日四川泸定  $M_s$ 6.8 地震深部构造特征[J]. *地球物理学报*, 66(4): 1385-1396.
- 刘同振, 夏新宇, 张怀, 等. 2023. 2022年第十届青藏东部构造与地球物理研讨会 (10-WTGTP) 在线上召开[J]. *地震*, 43(1): 198-200.
- 沈胜意, 高原, 刘同振. 2022. 剪切波分裂揭示的青藏高原东北缘分层各向异性形态: 从海原断裂至银川地槽[J]. *地球物理学报*, 65(5): 1595-1611.
- 陶亚玲, 张会平, 葛玉魁, 等. 2020. 青藏高原东缘新生代隆升剥露与断裂活动的低温热年代学约束[J]. *地球物理学报*, 63(11): 4154-4167.
- 滕吉文, 王绍舟, 姚振兴, 等. 1980. 青藏高原及其邻近地区的地球物理场特征与大陆板块构造[J]. *地球物理学报*, 23(3): 254-268.
- 王琼, 李翀, 于常青, 等. 2017. 2017年第5届青藏东部构造与地球物理研讨会 (WTGTP) 在林芝顺利召开[J]. *国际地震动态*, 11(467): 37-38.
- 王志, 王剑, 付修根. 2021. 青藏高原东缘—扬子特提斯构造域深部结构与地壳形变研究[J]. *地质论评*, 67(1): 1-13.
- 王宗秀. 1995. 俯冲带楔体中逆冲构造的形成及演化—构造物理模拟实验研究[J]. *地球学报*, 16(2): 165-176.
- 武粤, 李国辉, 高原. 2021. 第八届青藏高原东部构造与地球物理研讨会 (WTGTP2020) 反映的新进展[J]. *地震科学进展*, 51(12): 529-546.
- 谢周敏, 蔡永恩, 吉岡祥一, 等. 2022. 利用断层应力积累探讨大地震发生的地点——以日本 2011 年东北 9 级大地震为例[J]. *地球物理学报*, 65(1): 1-11.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等. 2012. 青藏高原南部与东南部重要成矿带的大地构造定格与找矿前景[J]. *地质学报*, 86(12): 1857-1868.
- 许志琴, 李广伟, 张泽明, 等. 2022. 再探青藏高原十大关键地学科学问题——《地质学报》百年华诞纪念[J]. *地质学报*, 96(1): 65-94.
- 曾融生, 朱介寿, 周兵, 等. 1992. 青藏高原及其东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型[J]. *地震学报*, 14(S1): 523-533.
- 张岳桥, 施炜, 董树文. 2019. 华北新构造: 印欧碰撞远场效应与太平洋俯冲地幔上涌之间的相互作用[J]. *地质学报*, 93(5): 971-1001.