

## “构造研究进展与趋势”专辑特邀主编寄语

李海兵

自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘 要:** 构造研究是地球系统科学研究中最具有交叉学科性质的领域, 是长期经久不衰的学科, 尤其涉及到解决对人类社会至关重要的问题时凸显它的重要性, 如青藏高原形成演化过程对资源能源、地表作用及其环境气候与灾害的影响, 以及地震活动对人类社会的冲击等等。地质学家们经过长期的持续研究, 在地质学、地球物理学方面, 包括岩石圈流变学、实验岩石学和青藏高原构造变形等方面取得了一系列重大成果与重要认识。《地球学报》集中在 2019 年第 1 期刊发 16 篇文章作为“构造研究进展与趋势”专辑, 专辑涵盖了四个方向的研究成果: (1)大陆岩石圈流变学; (2)青藏高原形成与构造过程; (3)断裂作用与地震活动; (4)地区构造样式与效应等。这些工作主要涉及目前大陆岩石圈流变学的发展现状与前景、青藏高原形成演化和帕米尔及喀喇昆仑断裂带等重要构造带的研究进展, 以及目前人们关注的与地震活动相关的断裂活动、岩石记录和物理化学性质变化等方面的研究, 包括 8 篇综述性文章和 8 篇研究性成果。本文将从这 4 个研究方向简要介绍收入本专辑论文的研究工作, 呈现构造研究成果与趋势, 为深入研究和认识地球系统科学提供重要的基础。

**关键词:** 大陆岩石圈; 流变学; 断裂作用; 地震活动; 青藏高原

中图分类号: P315.2; P548      文献标志码: A      doi: 10.3975/cagsb.2018.122701

## Guest Editor's Preface to the “Review and Tendency of Structural Research”

LI Hai-bing

*Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037*

**Abstract:** Structural research is the most interdisciplinary field in earth system science, and also a long-lasting science topic. In particular, it addresses the importance of the geological structure in solving the issues critical to human society, such as the impact of the evolution of the Tibetan Plateau on energy resources, surface effect, and its climate and environmental disasters, and the impact of seismic activity on the population. Based on a long-term continuous research, geologists have obtained a series of major achievements and important understandings in geology and geophysics, including lithospheric rheology, experimental petrology, and tectonic deformation of the Tibetan Plateau. The first *Acta Geoscientica Sinica* special issue contains 16 papers in the "Review and Tendency of Structural Research". This special issue covers the following four subjects: (1) continental lithospheric rheology, (2) the formation and tectonic processes of the Tibetan Plateau, (3) faulting and seismic activities, and (4) regional structural style and effect. These papers mainly discuss the current development status and prospects of the continental lithospheric rheology, the formation and evolution of the Tibetan Plateau, and the research progress of important tectonic belts such as the Pamir and Karakorum fault zones, as well as the current fault activities, rock records, changes in the physico-chemical properties related to seismic activity. This special issue includes 8 review papers and 8 research papers. This introduction aims to briefly introduce each study according to the four subjects and to present the achievements and tendency of

收稿日期: 2018-12-19; 改回日期: 2018-12-21; 网络首发日期: 2018-12-28。责任编辑: 闫立娟。

作者简介: 李海兵, 男, 1966 年生。博士, 研究员, 博士生导师。主要从事构造地质学及活动构造研究。

E-mail: lihaibing06@163.com。

structural research, in order to provide significant basic data for the further studying and understanding of the Earth system science.

**Key words:** continental lithosphere; rheology; faulting; seismic activity; Tibetan Plateau

当前正处在以“地球系统科学”为旗帜的新地学革命的时代。地球系统科学就是将地球当作一个统一的大系统,研究地球整体运动的规律及各圈层间的相互作用。构造研究是地球系统科学研究中的主线,是具有交叉学科性质的领域,不仅包含实验、观察和理论等方面,还聚焦于多时空维度中演化的地球和行星系统各个部分之间的相互作用(Huntington et al., 2018)。构造研究前景广阔,不仅使我们能够通过理解行星的深时空演化,提高我们对自然世界的认识,而且为人类社会提供关键服务。目前,构造研究面临众多的机遇和挑战,其中“岩石圈流变学”是认识“地球形成演化”的重要内容,也是构造地质学最重要的长期目标之一,重要挑战是对岩石力学性质(即岩石流变学)的量化、认识流变学如何通过变形过程控制固体地球的物理与化学演化;近 20 年来的全球地震活动给人来社会带来了灾难性的后果,直接冲击我们的社会,使人们意识到认识地震及其断裂作用已经成为构造地质学迫在眉睫的重要课题,这不仅是机遇更是挑战;青藏高原是印度板块与欧亚大陆俯冲、碰撞及其持续挤压作用下形成的世界第三极,是开展地球与生命演化、圈层相互作用、资源能源与环境效应、灾害效应及人地关系研究的最佳天然实验室,是构造地质学重大理论创新的永恒基地和机遇。本专辑论文主要涉及到上述相关内容,因此,专辑名称为:构造研究进展与趋势。

地质学家们经过长期的持续研究,在地质学、地球物理学方面,包括岩石圈流变学、实验岩石学和青藏高原构造变形等方面取得了一系列重大成果与重要认识。本期《地球学报》收集了 16 篇关于构造研究及其相关内容的学术论文,主要以综述性论文和地区性研究论文两类形式,主要内容涉及目前地质学界所研究的热点地区,如青藏高原,以及人们迫切关心的焦点,如地震活动。当前的专辑涵盖以下四个主题:(1)大陆岩石圈流变学;(2)青藏高原形成与构造过程;(3)断裂作用与地震活动;(4)地区构造样式与效应。以下将对这四方面成果做一简要综述。

## 1 大陆岩石圈流变学

大陆岩石圈复杂的流变学结构制约着大陆动力学的理论发展,因此,大陆岩石圈流变学研究是大陆动力学的核心,成为发展大陆动力、完善板块

构造理论的关键研究领域。本专辑中大陆岩石圈流变学部分包括 1 篇综述性文章,大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景(张进江等, 2019)。张进江等(2019)对大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景进行综述,认为目前中国固体地球科学家在大陆流变学领域需要深入开展研究的核心内容为大陆岩石圈三维流变学结构、大陆物质流变学性质的控制因素与机制(流变学本构关系)和大陆流变学特性对大陆变形与构造演化的影响。我国具有开展大陆流变学研究的基础和得天独厚的条件,未来研究中应该形成常态的多尺度-多手段-多学科-多部门的联合研究,缩小量子力学和岩石/矿物流变结构研究间的差距,并从全球尺度物质流动着手构建以流变学为基础的大陆动力学模型。开展大陆岩石圈流变学研究可以推进大陆动力学的发展,以及推动构造地质学学科的阶段性发展,同时大陆岩石圈流变学最为崇高的科学意义将是在不久的将来“超越板块”而对地球动力学的贡献。

## 2 青藏高原形成与构造过程

青藏高原是世界第三极,其形成与构造过程的研究对于开展地球与生命演化、圈层相互作用、资源能源与环境效应、灾害效应及人地关系研究具有重要的意义。青藏高原形成与构造过程部分共包括 7 篇文章,其中综述性文章 3 篇,研究性文章 3 篇。综述性文章包括:青藏高原形成和演化的古地磁研究进展综述(孙知明等, 2019)、帕米尔弧形构造带的构造过程与地貌特征(陈汉林等, 2019)和 Active Tectonics along the Karakorum Fault, Western Tibetan Plateau: A Review(Chevalier, 2019)。研究性文章包括:龙门山构造带晚新生代剥蚀作用与均衡隆升的地表过程研究(闫亮等, 2019)、青藏高原东南缘新生代地壳运动方式的转换(裴军令等, 2019)和龙门山构造带北段构造变形特征——来自汶川科钻四号孔的证据(张佳佳等, 2019)。

青藏高原的形成和演化是当代地球科学最前沿的研究课题,涉及到地块间的陆陆碰撞、造山带的形成与演化等重要的大地构造问题,孙知明等(2019)是以近 30 年来青藏高原古地磁研究为基础,通过系统回顾相关研究进展,试图重建中-新特提斯洋的演化过程,进一步探讨青藏高原形成的动力学背景。中外古地磁学者在青藏高原获得了一大批古地磁数据,从构造古地磁角度,确定了印度-欧亚

大陆碰撞时限,重建了拉萨块体-羌塘块体的碰撞过程及班公湖—怒江洋演化,探讨了印度-欧亚大陆碰撞后所造成的青藏高原陆内构造缩短量和青藏高原东南缘新生代侧向挤出运动模式。孙知明等(2019)认为青藏高原古地磁研究需要在空间上扩大取样区域并在时间上扩大取样地层年代,加强有精确同位素年代控制的火山岩古地磁研究,注重沉积岩中磁倾角偏低的评估和矫正,并加强岩石磁学分析和岩石矿物学研究等。

作为印度—欧亚板块碰撞变形最强烈的地区之一,帕米尔弧形构造带是研究构造过程、地貌演化以及气候变化及其相互作用的理想对象。陈汉林等(2019)在前人研究成果的基础上,系统综述了帕米尔弧形构造带的构造过程,即主要构造单元的活动起止时间、活动量和活动速率等;阐述了帕米尔弧形构造带现今的地貌特征,即水系和冰川的分布特征。陈汉林等(2019)认为关于帕米尔弧形构造带形成的动力学模型有走滑模型、径向逆冲模型、马蹄形弯曲模型、径向逆冲与右旋走滑复合模型、同造山模型和先存弧形模型 6 种,并提出了帕米尔弧形构造带晚新生代构造研究的三个重要的科学问题:精细厘定构造带内部的不同断裂带运动学特征和相互关系;深部地质过程与浅部响应相结合,探讨构造带形成的深部地质过程控制;将构造过程、气候特征与地貌演化作为一个耦合系统开展研究。

喀喇昆仑断裂(KF)位于青藏高原西缘,确定其滑移速率历史以及它随时间和/或空间的变化规律对于了解喀喇昆仑断裂现今的运动学特征及其与喜马拉雅—青藏高原陆内碰撞造山带的关系是极其重要的。Chevalier(2019)对喀喇昆仑断裂各段的分布情况进行了详细描述,阐述了获得晚第四纪以来走滑速率的方法,回顾了喀喇昆仑断裂在大地测量学、晚第四纪以及地质学等不同时间尺度的走滑速率,并重点讨论了晚第四纪以来断裂的走滑速率,确定了喀喇昆仑断裂北端的精确位置,讨论了其运动学意义和地震灾害效应等。喀喇昆仑断裂具有长期的活动历史、规模巨大、运动速率较高的特点,Chevalier(2019)认为板块模型依然可以很好的解释由于印度-亚洲板块碰撞造成的喜马拉雅北部的岩石圈变形,喀喇昆仑断裂、阿尔金断裂、昆仑断裂及龙木措—郭扎错断裂等青藏高原周缘的主要走滑断裂对青藏高原向东的挤出起着重要的调节作用。

为了更好的研究青藏高原东缘龙门山构造带的山脉隆升机制,闫亮等(2019)对青藏高原东缘龙门山区域进行条带状剖面分析、古地形面(残余面)恢复以及弹性挠曲模拟等研究,发现晚新生代以来

龙门山的地表剥蚀量介于  $0.74 \times 10^5 \sim 1.14 \times 10^5 \text{ km}^3$  之间,大量的地表剥蚀作用驱动了青藏高原东缘龙门山的地壳均衡反弹,使龙门山隆升了近 2 km。龙门山地区晚新生代以来在不同分段内具有差异化的构造地貌形态及与剥蚀-隆升相关的地表过程,其隆升是多期、多种隆升机制叠加的产物,并且具有历史性和复合性的特征。闫亮等(2019)认为均衡隆升和剥蚀作用在相似的时间尺度上和空间尺度上控制着龙门山地貌的形成,约束了青藏高原东缘龙门山的隆升机制。

目前,青藏高原东南缘保山地体东部夹于晚町断裂和南汀河断裂带之间的区域上新世地壳运动学特征的认识不足,制约了印度板块与欧亚大陆碰撞背景下青藏高原东南缘保山地体旋转变形作用的构造演化过程的研究。裴军令等(2019)在保山地体东部夹于晚町断裂带和南汀河断裂带之间的凤庆上新世营盘组玄武岩地层开展了详细的构造古地磁学研究。剖面 Fisherian 平均方向在地层校正前为  $D_g=166.2^\circ$ ,  $I_g=-19.4^\circ$ ,  $k=13.3$ ,  $a_{95}=9.3^\circ$ ,  $N=22$ (采点),地层校正后为  $D_s=166.5^\circ$ ,  $I_s=-19.3^\circ$ ,  $k=41.9$ ,  $a_{95}=5.1^\circ$ 。结合保山地体和腾冲地体内部新生代古地磁数据及地体边界构造带活动性质的综合分析,该研究指出青藏高原东南缘腾冲地块和保山地体的地壳运动方式在渐新世末期至早中新世时期,以及上新世早期分别发生了转换。而保山地体地壳的运动学方式直接控制了地体边界和内部走滑断裂的构造演化过程,如南汀河走滑断裂带上新世时期走滑性质的转变。

为了进一步理解龙门山构造带的形成过程和区域地震的发震背景,张佳佳等(2019)以位于龙门山映秀—北川断裂带北段的汶川地震断裂带科学钻探四号孔(WFSD-4)岩心作为主要研究对象,并结合地表构造变形研究,分析了 WFSD-4 的岩心变形特征和龙门山构造带北段的构造变形序列。该研究共发现了 4 个变形期: (1)D1 变形期以岩心和地表早期面理 S1 顺成份层发育为特征,多被同时期长英质脉体填充,显示伸展机制下的韧性变形,推测为轿子顶穹隆构造的形成时期,可能发生于中—晚三叠世(240—200 Ma)。(2)D2 变形期为区域主导性面理 S2 的形成时期,岩心中劈理面上可见绢云母等矿物,石香肠构造指示 NW—SE 的韧性挤压变形特征;该其构造引起了松潘—甘孜地体东缘的韧性形变和侏罗纪时期龙门山山前一系列飞来峰的就位。(3)D3 变形期以 NW—SE 向挤压冲断为主,对应于龙门山构造带北段的喜山期构造运动,褶皱强化,推覆强烈,也是唐王寨向斜的最终成型时期。(4)D4

变形期主要特征为岩心和地表均可见面理 S2 膝折的构造现象,为局部地表抬升过程中因重力垮塌作用所形成,属于脆性变形。

### 3 断裂作用与地震活动

长期以来,地震所带来的人员伤亡和财产损失是惨重的,人们越来越认识到认识地震和地震发生的机制已成为人类社会最重要的课题之一,断裂作用与地震活动的研究对于认识地震和地震发生机制具有重要的意义。本部分共有 7 篇文章,其中综述性文章 4 篇,研究性文章 3 篇。综述性文章包括:地震研究进展与趋势——全球地震科学钻探研究综述(李海兵等, 2019)、断裂带中古地震滑动的岩石记录(王焕和李海兵, 2019)、断裂带岩石磁学研究进展(张蕾等, 2019)和断层泥自生伊利石年龄分析及其在龙门山断裂带的应用(郑勇等, 2019)。研究性文章包括:汶川、芦山地震前龙门山断裂带地壳形变特征对比分析(赵静等, 2019)、龙门山逆冲带假玄武玻璃在其形成及后期抬升过程中的化学变化(王焕等, 2019)和西藏米林 6.9 级地震发震断层判定及其构造属性讨论(唐方头等, 2019)。

近年来大地震频繁发生,认识地震和地震发生机制已成为地质学家和地球物理学家共同的奋斗目标。然而,由于缺乏关于地震时地下断层力学过程的认识,人们还没有取得对地震进一步的深入认识。科学钻探是获取地下深部物质、了解深部信息的最直接、最有效、最可靠的方法,因此,科学钻探是认识和揭示地震断裂作用的最佳手段。李海兵等(2019)介绍了目前世界上主要的地震科学钻探计划,包括位于太平洋地震带的日本野岛(Nojima)断层科学钻探计划、台湾车笼埔断裂钻探计划(TCDP)、圣安德列斯断裂深部观测钻探计划(SAFOD)、新西兰深部断层钻探计划(DFDP)、日本南海海槽发震带实验钻探计划(NanTroSEIZE)、日本海沟地震快速钻探计划(JFAST)和大陆内部地震的汶川地震断裂带科学钻探计划(WFSD),概括介绍了全球地震科学钻探所取得的与地震研究相关的重要进展与贡献,探讨了未来地震研究趋势,并且展望了我国地震科学钻探发展的未来。

隐藏在地下岩石中的古地震记录可以提供特定地区地史时期古地震活动的长周期记录,可以为恢复区域构造演化过程、确定古断裂发生时间与活动历史提供依据。Cowan(1999)将断层快速滑动摩擦使得断层面岩石熔融产生的假玄武玻璃作为断层中记录地震滑动的唯一可靠的标识。王焕和李海兵(2019)等总结了近年来对假玄武玻璃的研究及其他快速滑动研究所取得的新进展,认为断层发生地震

滑动造成的多种构造产物均可记录其滑动的信息,如碳酸岩和含水硅酸岩的脱挥发份作用、微量元素迁移特征、成熟有机质、断层镜面构造、液化粒状流、碎屑-皮层集合体、同震晶体塑性变形以及非晶质物质等,有利于认识断层活动以及地震发生机制和规律。同时,与地震破裂传播有关的、在极端瞬态应力条件下形成的,如注入脉、碎粉化作用等特征也可以作为地震发生的岩石记录。综上,王焕和李海兵(2019)认为假玄武玻璃不再是地震破裂的唯一指示物,认识自然界及实验中的地震特征及其断层弱化过程中的作用,可以为研究断裂带地震发生机制和规律提供重要信息。

断裂带的岩石磁学研究可以揭示地震断裂作用的物理和化学环境,对于地震断裂作用机制具有重要作用。大量研究发现断层泥和假玄武玻璃通常具有磁化率值或剩磁强度异常特征(Hirono et al., 2006a, b; Ikehara et al., 2007; Mishima et al., 2009)。顺磁性矿物在摩擦热或流体作用下形成新的铁磁性矿物是断层泥和假玄武玻璃高磁化率值或高剩磁强度的主要原因(Nakamura et al., 2002; Fukuchi et al., 2005; Mishima et al., 2006; Ferré et al., 2012)。Zhang et al.(2018)发现地震断裂摩擦熔融作用中形成的单质铁是假玄武玻璃中高磁化率值或高剩磁强度异常的另一个原因。蠕滑断裂和出露于浅地表的断裂带中可见一些具有低磁化率值异常的断层泥,原因可能是断裂带未经历高温摩擦热或者是流体作用(Liu et al., 2014; Yang et al., 2013, 2016; 何祥丽等, 2018)。张蕾等(2019)认为断裂带的岩石磁学研究为地震断裂带的应力应变、形成温度、摩擦热效应、流体作用、形成深度和氧化还原特征等提供重要的信息,可用于分析地震断裂的孕震环境和发震环境。

同位素技术可以对断裂带的活动年龄及其相关的隆升/剥蚀速率进行直接测定和计算。郑勇等(2019)以来自于青藏高原东缘龙门山断裂带的假玄武玻璃样品及其山前飞来峰的断层泥样品的分析过程为例,介绍了自生伊利石的生成过程、定年的理论基础、样品前期化学处理流程,并通过 NEWMOD、WILDFIRE 和 Profex 三款 X 射线衍射图谱模拟软件定量研究了样品的碎屑伊利石含量,报道了龙门山飞来峰断层和假玄武玻璃的自生伊利石同位素定年的最新进展。结合断层泥中伊利石 XRD 和 K-Ar/Ar-Ar 同位素体系分析,可以准确限定近地表断层的同位素年龄。XRD 分析可以具体确定伊利石自生和碎屑组分的比例,而同位素分析可以对微米级组分进行定年。该方法的开发和利用将会极大地丰富近地表条件下地壳变形的时限资料,

从而推动地壳演化和区域构造方面的研究。此外,伊利石的 K-Ar/Ar-Ar 定年还可以给出物源区碎屑组分的冷却年龄,可以进一步为研究沉积物源及其隆升冷却历史提供参考。

汶川地震前,龙门山断裂带中北段处于强闭锁状态、断层面应力应变积累水平很高;而西南段闭锁较弱,变形速率明显高于中北段,也可以积累应力应变(赵静等, 2019)。汶川地震自初始破裂点沿龙门山断裂带向北东方向单侧破裂,而震中西南方向断层并没有发生破裂的原因之一可能是因为汶川地震震源位于闭锁相对弱的部位;汶川地震引起龙门山断裂带西南段应力应变积累速率加快、断层闭锁程度增强、闭锁面积增大,一定程度上促进了震源位于强闭锁和弱闭锁的高梯度过渡部位的芦山地震。赵静等(2019)认为芦山地震只释放了龙门山断裂带西南段有限的应变能,因此,仍需要持续关注汶川和芦山地震之间的地震空段以及芦山地震西南方向的地震空段。此外,多次 6~9 级地震前地壳变形演化特征结果也显示地震成核于闭锁高梯度带区域,并且随着震级升高闭锁断层面的长度也在增大。

地震断层摩擦滑动过程中的物理化学行为是认识地震机制和孕震环境的重要内容(Zoback et al., 2007; Okamoto et al., 2007; Brodsky et al., 2009)。王焕和李海兵(2019)认为假玄武玻璃是断层中记录地震滑动的重要标识,是认识断层带形成过程及其活动历史的重要物质组成。最新的研究表明龙门山断裂带出露的假玄武玻璃形成深度为 10~15 km(Zheng et al., 2016; 王焕等, 2018),接近震源区,因此,假玄武玻璃可以为地震断层带地震破裂提供重要的信息。王焕等(2019)对龙门山断裂带映秀—北川断裂带虹口八角庙地表和汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)岩心中发育的假玄武玻璃的化学组成进行对比研究,发现这些假玄武玻璃为地震断层快速滑动摩擦熔融的产物,熔融物形成于高温还原环境下,其化学性质以高 Fe、Ti、K 值,低 Si 值为特征,并具高磁化率值的物理性质。而地表假玄武玻璃经受表生流体作用,化学性质发生明显变化,以低 K、Ti 值和出现含 Ca 元素的新生矿物为特征。同时,该研究发现大气水和地表水已沿断层带侵入到了 585 m 以下或更深部位。王焕等(2019)认为在应用假玄武玻璃对地震断层瞬时滑动环境进行判断时需谨慎,应考虑其后期化学成分变化等造成的各种影响。

西藏米林 6.9 级地震是 1950 年察隅  $M_s$  8.6 级以来东构造结地区发生的第一个 6 级以上地震,唐方头等(2019)在区域地震构造环境分析的基础上,结合米林地震应急考察资料、林芝流动地震观测台网

记录到的余震条带状分布、震源机制解、地震烈度长轴方位、台阵观测和 GPS 等资料等,认为米林地震的发震断层为 NW 向排龙—帮辛断裂,逆冲性质,为新生 NW 向边坝—达木断裂带中段组成部分。近年来 GPS 监测资料显示发生米林地震的南迦巴瓦构造结顶端附近的嘉黎断裂和排龙—帮辛断裂均处于闭锁阶段,唐方头等(2019)认为米林地震的发生预示东构造结地区地震活动强度加强,未来该地区发生 7 级以上地震危险性不容忽视。

## 4 地区构造样式与效应

地区的地质结构、构造样式与效应对于探讨陆内构造变形机制、剖析地震活动以及油气勘探具有重要意义。本部分共有 2 篇研究性文章,分别研究了鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律(何登发等, 2019)和浙西下寒武统大陈岭组地震液化脉微量元素特征(严兆彬等, 2019)。

确定鄂尔多斯盆地西缘冲断带的地质结构与构造样式对于探讨陆内构造变形机制、剖析地震活动与开展油气勘探具有重要意义。马家滩地区及邻区主要发育伸展-聚敛旋回制约的反转构造系统、陆内造山变形制约的扩展式前陆变形系统和后陆造山后伸展变形系统等 3 种构造变形系统;前缘过渡带上部构造系统经历印支晚期、燕山期和喜马拉雅期三期变形,形成不同期次、不同方向的叠加构造(何登发等, 2019)。马家滩地区发育断层传播褶皱、双重构造、叠瓦构造、构造楔、和反冲断裂组合(冲隆构造)等构造样式,形成断背斜、断鼻及断块等油气圈闭类型,圈闭分布受断层控制呈带展布(何登发等, 2019)。马家滩地区构造圈闭发育,为西缘油气勘探的有利远景目标区。

地震液化脉是地震作用引起的软沉积变形的重要构造之一,可以为地震环境提供重要的信息。严兆彬等(2019)对开化裴岭脚剖面地震事件沉积的液化脉的脉体和围岩进行微量元素分析,发现液化脉体表现为氧化环境,含脉体围岩为偏还原环境,且脉体和围岩均具有淡水作用特点。早寒武世大陈岭期白云质灰岩沉积过程中有蚀源区陆源碎屑物的补入;地震过程中单位体积内碳酸盐沉积含量低于围岩,脉体中更富陆源物质;软沉积层属潮上带,地震液化泄水后期至成岩期,受后期陆源物的再补给及大气降水淋滤蚀变作用影响,表现为古气候和古盐度异常,为浙西大陈岭组浅水相沉积提供了地球化学的证据。

## 5 结论

本专辑发表的 16 篇文章,涉及大陆岩石圈流

变学、青藏高原形成与构造过程、断裂作用与地震活动,以及其他地区构造样式与效应等研究方向与内容,主要系统总结了目前的研究进展、研究方法和相关的研究趋势。我们希望通过本文的简要介绍有助于读者了解这批文献关于构造地质学研究的部分最新进展。总之,构造地质学研究不仅包含着众多的不同学科内容,而且是一个长期研究的过程。

**致谢:** 本专辑得到许多构造地质学家们的帮助与支持,中国地质科学院地质研究所郑勇在专辑的组织过程中付出了努力,张蕾为专辑的总结提供了宝贵数据和建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。同时,感谢本专辑编辑付出的辛勤劳动。

## 参考文献:

- 陈汉林, 陈亚光, 陈沈强, 林秀斌, 杨蓉, 程晓敢, 李康. 2019. 帕米尔弧形构造带的构造过程与地貌特征[J]. 地球学报, 40(1): 55-75.
- 何登发, 邵东波, 开百泽, 包洪平, 傅定伍, 朱昊, 马静辉. 2019. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律[J]. 地球学报, 40(1): 219-235.
- 何祥丽, 李海兵, 张蕾, 王焕, 葛成隆, 曹勇, 白明坤, 李成龙, 叶小舟. 2018. 龙门山灌县—安县断裂带断层泥低磁化率的矿物、化学响应和蠕滑作用环境[J]. 地球物理学报, 61(5): 1782-1796, doi: 10.6038/cjg2018M0165.
- 李海兵, 王焕, 李春锐, 何祥丽, 李成龙. 2019. 地震研究进展与趋势——全球地震科学钻探研究综述[J]. 地球学报, 40(1): 117-134.
- Marie-Luce CHEVALIER. 2019. 青藏高原西部喀喇崑崙山断裂活动构造研究进展综述[J]. 地球学报, 40(1): 37-54.
- 裴军令, 仝亚博, 蒲宗文, 景先庆, 蔡瑜杭, 李建锋. 2019. 青藏高原东南缘新生代地壳运动的转换[J]. 地球学报, 40(1): 106-116.
- 孙知明, 曹勇, 李海兵, 裴军令, 仝亚博, 叶小舟, 吴百灵, 曹新文, 刘晨光. 2019. 青藏高原形成和演化的古地磁研究进展综述[J]. 地球学报, 40(1): 17-36.
- 唐方头, 尤惠川, 梁小华, 宋键, 王晓楠. 2019. 西藏米林 6.9 级地震震源断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球学报, 40(1): 213-218.
- 王焕, 李海兵, 司家亮, 张蕾. 2019. 龙门山逆冲带假玄武玻璃在其形成及后期抬升过程中的化学变化[J]. 地球学报, 40(1): 199-211.
- 王焕, 李海兵, 张蕾, 孙知明, 司家亮, 裴军令. 2018. 龙门山断裂带假玄武玻璃特征及断层弱化机制的探讨[J]. 地球物理学报, 61(5): 1698-1714.
- 王焕, 李海兵. 2019. 断裂带中古地震滑动的岩石记录[J]. 地球学报, 40(1): 135-156.
- 闫亮, 李勇, 邓涛, 颜照坤, 云锐, 邵崇建, 董顺利. 2019. 龙门山构造带晚新生代剥蚀作用与均衡隆升的地表过程研究[J]. 地球学报, 40(1): 76-92.
- 严兆彬, 裴军令, 郭福生, 胡珺珺, 刘礼洁. 2019. 浙西下寒武统大陈岭组地震液化脉微量元素特征研究[J]. 地球学报, 40(1): 236-248.
- 张佳佳, 李海兵, 郑勇, 王焕, 李成龙, 张钊荣. 2019. 龙门山构造带北段构造变形特征——来自汶川科钻四号孔(WFSD-4)的证据[J]. 地球学报, 40(1): 93-105.
- 张进江, 商姗, 魏春景, 张南, 张国伟, 董云鹏, 金振民, 章军锋, 曹淑云, 刘俊来, 刘永江. 2019. 大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景[J]. 地球学报, 40(1): 9-16.
- 张蕾, 李海兵, 孙知明, 曹勇. 2019. 断裂带岩石磁学研究进展[J]. 地球学报, 40(1): 157-172.
- 赵静, 刘杰, 任金卫, 江在森, 闫伟, 岳冲. 2019. 汶川、芦山地震前龙门山断裂带地壳形变特征对比分析[J]. 地球学报, 40(1): 186-198.
- 郑勇, 李海兵, 王世广, 白明坤. 2019. 断层泥自生伊利石年龄分析及其在龙门山断裂带的应用[J]. 地球学报, 40(1): 173-185.

## References:

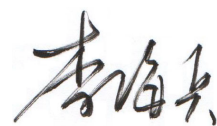
- BRODSKY E E, MA Kuo-feng, MORI J, SAFFER D M, The Participants of The ICDP/SCEC International Workshop. 2009. Rapid Response Fault Zone Drilling Past, Present, and Future[J]. Scientific Drilling, 30.
- CHEN Han-lin, CHEN Ya-guang, CHEN Shen-qiang, LIN Xiu-bin, YANG Rong, CHENG Xiao-gan, LI Kang. 2019. The Tectonic Processes and Geomorphic Characteristics of Pamir Sialient[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 55-75(in Chinese with English abstract).
- CHEVALIER M L. 2019. Active Tectonics along the Karakorum Fault, Western Tibetan Plateau: A Review[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 37-54(in Chinese with English abstract).
- COWAN D S. 1999. Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion[J]. Journal of Structural Geology, 21(8): 995-1001.
- FERRÉ E C, GEISSMAN J W, ZECHMEISTER M S. 2012. Magnetic properties of fault pseudotachylytes in granites[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 117: B01106, doi: 10.1029/2011JB008762.
- FUKUCHI T, MIZOGUCHI K, SHIMAMOTO T. 2005. Ferromagnetic resonance signal produced by frictional heating: A new indicator of paleoseismicity[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 110: B12404, doi:10.1029/2004JB003485.
- HE Deng-fa, SHAO Dong-bo, KAI Bai-ze, BAO Hong-ping, FU Ding-wu, ZHU Hao, MA Jing-hui. 2019. Structural Style and Trap Distribution in Majiatan Area on the Western Margin of Ordos Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 219-235(in Chinese with English abstract).
- HE Xiang-li, LI Hai-bing, ZHANG Lei, WANG Huan, GE Cheng-long, CAO Yong, BAI Ming-kun, LI Cheng-long, YE

- Xiao-zhou. 2018. Mineral and chemical response to low magnetic susceptibility of the fault gouge from the Guan-Anxian fault zone and fault creep setting in the Longmen Shan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(5): 1782-1796(in Chinese with English abstract).
- HIRONO T, IKEHARA M, OTSUKI K, TOSHIKI M, SAKAGUCHI M, SOH W, OMORI M, LIN W R, YEH E C, TANIKAWA W, WANG C Y. 2006a. Evidence of frictional melting from disk-shaped black material, discovered within the Taiwan Chelungpu fault system[J]. Geophysical Research Letters, 33: L19311.
- HIRONO T, LIN W R, YEH E C, SOH W, HASHIMOTO Y, SONE H, MATSUBAYASHI O, AOIKE K, ITO H, KINOSHITA M, MURAYAMA M, SONG S R, MA K F, HUNG J H, WANG C Y, TSAI Y B. 2006b. High magnetic susceptibility of fault gouge within Taiwan Chelungpu fault: Nondestructive continuous measurements of physical and chemical properties in fault rocks recovered from Hole B, TCDP[J]. Geophysical Research Letters, 33: L15303, doi:10.1029/2006GL026133.
- HUNTINGTON K W, KLEPEIS K A, 66 community contributors. 2018. Challenges and opportunities for research in tectonics: Understanding deformation and the processes that link Earth systems, from geologic time to human time[C]//A community vision document submitted to the U.S. National Science Foundation. Washington: University of Washington: 84. <https://doi.org/10.6069/H52R3PQ5>.
- IKEHARA M, HIRONO T, TADAI O, SAKAGUCHI M, KIKUTA H, FUKUCHI T, MISHIMA T, NAKAMURA N. 2007. Low total and inorganic carbon contents within the Taiwan Chelungpu fault system[J]. Geochemical Journal, 41: 391-396, doi:10.2343/geochemj.41.391.
- LI Hai-bing, WANG Huan, LI Chun-rui, HE Xiang-li, LI Cheng-long. 2019. The Progress in Earthquake Research: A review of the Global Earthquake Scientific Drilling[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 117-134(in Chinese with English abstract).
- LIU D L, LI H B, LEE T Q, CHOU Y M, SONG S R, SUN Z M, CHEVALIER M L, SI J L. 2014. Primary rock magnetism for the Wenchuan earthquake fault zone at Jiulong outcrop, Sichuan Province, China[J]. Tectonophysics, 619-620: 58-69.
- MISHIMA T, HIRONO T, NAKAMURA N, TANIKAWA W, SOH W, SONG S R. 2009. Changes to magnetic minerals caused by frictional heating during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake[J]. Earth Planets Space, 61(6): 797-801.
- MISHIMA T, HIRONO T, SOH W, SONG S R. 2006. Thermal history estimation of the Taiwan Chelungpu fault using rock-magnetic methods[J]. Geophysical Research Letters, 33: L23311, doi:10.1029/2006GL028088.
- NAKAMURA N, HIROSE T, BORRADAILE G J. 2002. Laboratory verification of submicron magnetite production in pseudotachylytes: relevance for paleointensity studies[J]. Earth and Planetary Science Letters, 201: 13-18.
- OKAMOTO S, KIMURA G, YAMAGUCHI A, YAMAGUCHI H, KUSUBA Y. 2007. Generation depth of the pseudotachylyte from an out-of-sequence thrust in Accretionary Prism- Geothermobarometric Evidence[J]. Scientific Drilling, Special Issue No.1, doi:10.2204/iodp.sd.s01.41.2007.
- PEI Jun-ling, TONG Ya-bo, PU Zong-wen, JING Xian-qing, CAI Yu-hang, LI Jian-feng. 2019. The Cenozoic Multi-stage Transform of Crustal Movement Pattern of the Southeastern Edge of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 106-116(in Chinese with English abstract).
- SUN Zhi-ming, CAO Yong, LI Hai-bing, PEI Jun-ling, TONG Ya-bo, YE Xiao-zhou, WU Bai-ling, CAO Xin-wen, LIU Chen-guang. 2019. A Review of Paleomagnetic Study of the Formation and Evolution of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 17-36(in Chinese with English abstract).
- TANG Fang-tou, YOU Hui-Chuan, LIANG Xiao-hua, SONG Jian, WANG Xiao-nan. 2019. A Discussion on Seismogenic Fault of the Milin  $M_s 6.9$  Earthquake, Tibet, and Its Tectonic Attributes[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 213-218(in Chinese with English abstract).
- WANG Huan, LI Hai-bing, SI Jia-liang, ZHANG Lei. 2019. Geochemical Variations of the Pseudotachylytes during Their Formation and Subsequent Uplift Processes, in the Longmen Shan Thrust Belt[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 199-211(in Chinese with English abstract).
- WANG Huan, LI Hai-bing, ZHANG Lei, SUN Zhi-ming, SI Jia-liang, PEI Jun-ling. 2018. Pseudotachylytes in the Longmen Shan fault zone and fault weakening mechanisms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(5): 1698-1714(in Chinese with English abstract).
- WANG Huan, LI Hai-bing. 2019. Seismic Slip Records Preserved in Fault Rocks[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 135-156(in Chinese with English abstract).
- YAN Liang, LI Yong, DENG Tao, YAN Zhao-kun, YUN Kun, SHAO Chong-Jian, DONG Shun-Li. 2019. Late Cenozoic Surface Process Caused by Denudation and Isostatic Rebound of the Longmen Shan Tectonic Belt on the Eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 76-92 (in Chinese with English abstract).
- YAN Zhao-bin, PEI Jun-ling, GUO Fu-sheng, HU Jun-jun, LIU Li-jie. 2019. Trace Element Characteristics of Seismic Liquified Veins from the Lower Cambrian Dachenling Formation in Western Zhejiang Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 236-248(in Chinese with English abstract).
- YANG T, MISHIMA T, UJIE K, CHESTER F, MORI J, EGUCHI N, TOCZKO S. 2013. Strain decoupling across the décolle-



- ment in the region of large slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake from anisotropy of magnetic susceptibility[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 381: 31-38.
- YANG T, YANG X S, DUAN Q B, CHEN J Y, DEKKERS M J. 2016. Rock magnetic expression of fluid infiltration in the Yingxiu-Beichuan fault (Longmen Shan thrust belt, China)[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(3): 1065-1085, doi 10.1002/2015GC006095.
- ZHANG Jia-jia, LI Hai-bing, ZHENG Yong, WANG Huan, LI Cheng-long, ZHANG Zhao-rong. 2019. Characteristics of Tectonic Deformation in North Longmen Shan Tectonic Belt: Evidence from No. 4 Borehole of the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling (WFSD-4)[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 93-105(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-jiang, SHANG Shan, WEI Chun-jing, ZHANG Nan, ZHANG Guo-wei, DONG Yun-peng, JIN Zhen-min, ZHANG Jun-feng, CAO Shu-yun, LIU Jun-lai, LIU Yong-jiang. 2019. Present Status and Development Prospect of Studies of Rheology of Continental Lithosphere[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 9-16(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lei, LI Hai-bing, SUN Zhi-ming, CAO Yong. 2019. A Review of Rock Magnetism for Fault Rocks[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 157-172(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lei, LI Hai-bing, SUN Zhi-ming, CHOU You-ming, CAO Yong, WANG Huan. 2018. Metallic iron formed by melting: A new mechanism for magnetic highs in pseudotachylyte[J]. *Geology*, doi:10.1130/G40153.1.
- ZHAO Jing, LIU Jie, REN Jin-wei, JIANG Zai-sen, YAN Wei, YUE Chong. 2019. A Contrastive Analysis of Crustal Deformation Characteristics along the Longmen Shan Fault Zone before the  $M_s$ 8.0 Wenchuan Earthquake and the  $M_s$ 7.0 Lushan Earthquake[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 186-198(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yong, LI Hai-bing, SUN Zhi-ming, WANG Huan, ZHANG Jia-jia, LI Cheng-long, CAO Yong. 2016. New geochronology constraints on timing and depth of the ancient earthquakes along the Longmen Shan fault belt, eastern Tibet[J]. *Tectonics*, 35(12): 2781-2806.
- ZHENG Yong, LI Hai-bing, WANG Shi-guang, BAI Ming-kun. 2019. Authigenic Illite Age Analysis for Fault Gouge and Its Application to the Longmen Shan Fault Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 173-185(in Chinese with English abstract).
- ZOBACK M D, HICKMA S, ELLSWORTH W L. 2007. The role of fault zone drilling[J]. *Treatise on Geophysics*, 4: 649-674.

中国地质科学院地质研究所研究员, 博士生导师  
 自然资源部深地动力学重点实验室主任  
 国家科技专项“汶川地震断裂带科学钻探”计划总地质师  
 《地球学报》副主编



二〇一八年十二月二十日于北京