

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.009>



大陆伸展构造综述

张进江^{1,2}, 黄天立^{1,2}

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 简述了大陆伸展构造的研究历史, 并从基本概念、构造样式、变形机制和动力背景等方面对大陆伸展构造进行了综述。伸展是大陆构造一种主要类型, 并以正断层为主形成多种构造样式, 如地堑、裂谷、拆离断层和变质核杂岩等。大陆伸展的变形机制包括纯剪切、简单剪切及分层剪切模式, 并由此产生对称与非对称构造。大陆伸展构造的地表表现形式主要为裂谷或变质核杂岩, 两者的形成主要取决于岩石圈的流变学结构。大陆伸展的动力学背景主要包括地幔柱上涌、俯冲板片反转与俯冲带后撤、增厚地壳的重力垮塌以及走滑体系的派生拉张等。

关键词: 大陆伸展构造; 正断层; 裂谷; 变质核杂岩; 地幔柱; 俯冲带; 造山带; 构造地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1705-11

收稿日期: 2018-11-29

An Overview on Continental Extensional Tectonics

Zhang Jinjiang^{1,2}, Huang Tianli^{1,2}

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: This paper makes an overview on the continental extensional tectonics from the research history, basic concept, structural pattern, deformational mechanism and dynamic tectonic backgrounds. Extension is one of the major tectonics in continent, which forms many different structural patterns with normal faults, such as, grabens, rifts, detachment faults and metamorphic core complexes (MCC). Deformational mechanism for the continental extension includes models of pure shearing, simple shearing and delaminating shearing, which results in symmetric and asymmetric extensional structures, respectively. There are mainly two kinds of surface expressions for the continental extension, i.e., rifts or MCC, which depends on the rheological structure of the continental lithosphere. The dynamic tectonic backgrounds for continental extension include the upwelling plume, slab rollback and subduction retreat, gravitational collapse of thickened crust, and the extension derived from strike-slip system.

Key words: continental extensional tectonics; normal fault; rift; metamorphic core complex; plume; subduction zone; orogeny; tectonics.

根据 Anderson 断层模式 (Anderson, 1951) 划分, 岩石所受应力状态可分为 3 种方式, 其中最大主应力 (σ_1) 为竖直方向的应力状态下产生正断层, 从而形成伸展性构造。而另一种产生走滑断层的应力状态下, 在走滑断弯及桥区也可以产生伸展构造, 故此伸展构造是最为广泛的一种构造现象, 其背后的

动力学过程也复杂多样。最早的大陆伸展构造研究应属于有关裂谷的研究 (Walter, 1896), 并随着地球科学的发展而融入大陆漂移、板块边界及大陆裂解等研究领域。值得一提的是, 随着 20 世纪 70 年代北美西部拆离断层和变质核杂岩等伸展构造的发现 (Crittenden *et al.*, 1980), 大陆伸展构造就一直

基金项目: 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项 (No. 2016YFC0600303); 国家自然科学基金项目 (No. 41730210)。

作者简介: 张进江 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事构造地质学研究。ORCID: 0000-0002-8892-1132. E-mail: zhjj@pku.edu.cn

引用格式: 张进江, 黄天立, 2019. 大陆伸展构造综述. 地球科学, 44(5): 1705-1715.

地球科学一个重要研究内容,并先后召开过多次国际伸展构造会议,同时出版了众多有关伸展构造的专辑,如:有关科迪勒拉变质核杂岩的专辑 *Cordilleran Metamorphic Core Complexes* (Crittenden *et al.*, 1980); 1985 年在英国达勒姆举行的大陆伸展构造会议文集 *Continental Extensional Tectonics* (Coward *et al.*, 1987); 1993 年在法国蒙彼利埃举行的造山带晚造山伸展会议. 另外,还有 1995 年 JGR 第 100 卷的伸展与岩浆作用关系专辑,以及 2007 年出版的有关被动陆缘和洋—陆转换的 *Geological Society Special Publications* 第 282 卷 *Imaging, Mapping and Modelling Continental Lithosphere Extension and Breakup* 专辑.

在国内,马杏垣先生是中国大陆伸展构造的奠基人,他曾十上嵩山,历经 22 载,终于在 1981 年出版了《嵩山构造变形——重力构造、构造解析》(马杏垣等, 1981)一书. 在书中,马杏垣先生等人以嵩山地质构造为典型,着重研究了构造解析和重力构造 2 个方面的内容. 其中,通过对国内外构造现象,特别是对嵩山地区的构造现象的研究分析,提出了重力在塑造地球的构造中起着巨大作用,重力作用能够诱导和转换成水平构造运动的重大认识. 随后他在其学术论文《论伸展构造》(马杏垣, 1982)中,对伸展构造的涵义、展布和意义,伸展构造的类型、形成与演化等进行了综合论述,从而开创了中国大陆伸展构造研究的新纪元,并将大陆伸展构造研究推向了新的高潮.

北京大学地质系是开展伸展构造研究较早的单位之一,从 1986 年就开始与美国学者合作,开展了云蒙山变质核杂岩的研究 (Davis *et al.*, 1994, 1996). 1980 年代后期,独立在内蒙古亚干发现典型的科迪勒拉型变质核杂岩 (郑亚东和张青, 1993). 1990 年代中期,集北京大学及国内外专家研究成果,编著了《伸展构造研究》(钱祥麟, 1994)一书.

与此同时,国内学者也开展了广泛的研究,先后在北京房山 (宋鸿林, 1996)、赤峰娄子店 (王玉芳等, 1994)、小秦岭 (张进江等, 1998)、辽西医巫闾山 (马寅生等, 1999)、内蒙大青山 (郑亚东等, 2001)、扬子西缘 (颜丹平等, 1997)、湖南衡山 (张进业, 1994) 和江西武功山 (舒良树等, 1998) 等地发现了典型的大陆伸展构造并进行了深入研究.

2007 年开始实施的国家自然科学基金委员会《华北克拉通破坏》重大研究计划,在构造方面对大陆伸展研究起到了巨大推动作用,使得人们对大陆

伸展的构造特征、动力学过程和背景的认识都有了长足进展 (Karner *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2012, 2015; Lin *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2017). 同时,青藏高原这个以碰撞造山为特征的特殊构造环境下的大陆伸展构造,也逐渐受到了人们的重视 (张进江, 2007).

1 基本概念

伸展构造的定义为地壳和岩石圈经受拉伸所形成的构造现象及与之相关的构造作用. 伸展构造发生的应力条件为最小主应力 (σ_3) 在水平方向上减小,或最大主应力 (σ_1) 在竖直方向上增大,或上述 2 种过程同时作用. 其形成的地质背景则是经历水平拉伸、垂向岩浆上涌、底辟或穹隆地区,以及造山带地壳增厚地区等. 上盘相对于下盘向下滑动的正断层造成岩石单元的水平伸展 (图 1), 是最为常见的伸展构造,而其他的伸展构造也多与正断层相关. 从规模角度,大规模的伸展构造包括大陆裂谷、被动陆缘、离散型板块边界、弧后扩展盆地等,次级规模的包括造山带重力扩散构造、松弛性断弯及拉分盆地、以及拆离断层和变质核杂岩等. 发育于大陆、经受拉伸的地壳为大陆地壳的伸展构造为大陆伸展构造.

2 大陆伸展构造的主要构造样式

大陆伸展构造在地壳层次或在地表露头上的,一般是与正断层相关的构造样式,主要的构造样式如下:

2.1 地堑—地垒、半地堑—半地垒以及盆岭构造

地堑为由 2 组走向近平行且相向倾斜的正断层

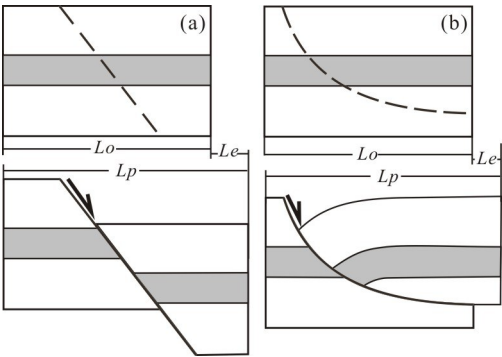


图 1 平面状 (a) 和铲式 (b) 正断层形成岩石单元的伸展
Fig.1 Extensions of a lithological unit by planar (a) and listric (b) normal faulting

Lo. 原始长度; Lp. 变形后长度; Le. 伸展量

及其所夹持的下降断块形成的构造,构造形成时导致负地形,故称地堑;地堑是由 2 组走向近平行且相背倾斜的正断层及其所夹持的抬升断块形成的构造,构造形成时导致正地形,故称地垒.半地堑由单侧正断层及其上盘掀斜断块构成,与半地堑相对应的掀斜断块则形成半地垒构造.地堑(半地堑)和地垒(半地垒)经常连续相间发育,形成走向近平行的地堑和地垒相间排列的构造,因为地堑一般形成盆地而地垒形成山岭,故称为盆岭构造,最为著名的盆岭构造见于北美西部的盆岭省.

2.2 裂谷构造

裂谷是岩石圈经受拉张伸展作用形成的大型构造,由地堑、半地堑及其他与正断层相关构造组成的区域性狭长构造带,一般表现为以断层为边界的狭长谷地.裂谷一般由地幔上涌(地幔柱)或区域性伸展形成,其进一步发展可演化成大洋盆地.根据发育位置,裂谷可分为大陆裂谷、陆间裂谷和洋中脊裂谷(图 2).对应于板块构造,大陆裂谷发生于大陆裂解的开始,裂谷发育于大陆内部,裂谷内仍主要为大陆地壳,如现今的东非裂谷带.大陆裂谷的进一步伸展,裂谷内形成初始洋盆,此时称为陆间裂谷,如现在的红海.陆间裂谷进一步伸展,形成成熟洋盆,原先的裂谷肩形成被动陆缘,原来的裂谷中心形成海底扩展的中心,因扩展速率和岩浆供给原因,扩展中心会形成裂谷,此为洋中脊裂谷,或称为中央裂谷带.初始裂谷往往以三叉裂谷系形式出现,其中 2 支向大洋盆地发育(红海—大西洋),第 3 支则夭亡而

形成坳拉谷.

2.3 断陷盆地

岩石圈伸展作用形成的以正断层为边界的构造盆地,包括了裂谷内的地堑、半地堑等.纯剪切共轴伸展作用下,会形成两侧发育同等正断层的对称性断陷盆地,如地堑;在简单剪切模式下,往往会形成只在一侧发育正断层的不对称型断陷盆地,如半地堑,一般与铲式断层和掀斜断层相关,或被称为掀斜盆地.断陷盆地为构造盆地,其内多发育生长地层.

2.4 岩墙群

岩墙是岩浆沿围岩的裂隙侵入的一般近直立的板状侵入体,其本身所占空间就代表了地壳的伸展.近平行、放射状或同心状排列的,同时代形成于同一地质事件的一组岩墙就称为岩墙群.其中,大陆上近平行排列的岩墙群一般发育于大陆裂谷或坳拉谷,如华北中部近南北向的岩墙群,以及北美的 Mackenzie 岩墙群.这些古老的岩墙群一般被认为是大陆裂解时,地幔柱上涌及其导致的岩石圈伸展联合作用的产物,一般是三叉裂谷系夭亡的一支的表现(Hou *et al.*, 2008a).这些区域上近平行的岩墙群,在古大陆重建后,会在超大陆尺度上形成巨型的放射状岩墙群(Ernst *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2008b),其放射状的中心指示地幔柱的位置.岩墙群除了古大陆重建外,早前寒武纪的岩墙群还可作为大陆固结的标志,也可作为大陆伸展及其伸展量的标志.

小规模岩墙群还包括与下部岩浆房相关的放射状和环状岩墙群,岩浆房膨胀乃至引起火山爆发,会导致地壳浅层的放射状破裂,岩浆侵入其中形成放射状岩墙群;而岩浆房萎缩或冷凝,其上地壳会因收缩、垮塌而形成同心环状断层或裂隙,残余岩浆侵位其中形成环状岩墙群.

2.5 拆离断层和变质核杂岩

拆离断层和变质核杂岩是 20 世纪 70 年代末—80 年代初,北美西部盆岭省地质研究所涌现出的大陆伸展构造的新构造样式和新的地质概念,其构造样式及其动力学过程为大陆伸展构造研究注入了新的活力.

拆离断层曾被称为剥蚀断层(denudation fault; Armstrong, 1972)、滑脱层(décollement; Coney, 1980)和低角度正断层(Wernicke, 1981),拆离断层(detachment fault)由 Davis *et al.*(1979)正式采用,并将北美西部的拆离断层定名为科迪勒拉型拆离断层(Davis and Lister, 1988).其定义是具有低初始倾角的区域规模的伸展性断层,其最主要的特征是将

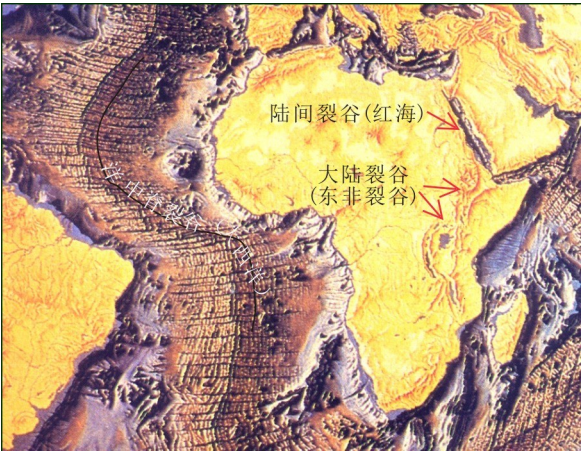


图 2 现今发育的大陆裂谷(东非裂谷)、陆间裂谷(红海)和洋中脊裂谷(大西洋)

Fig.2 Modern continental rift (East African rift), inter-continental rift (Red Sea) and mid-oceanic ridge rift (Atlantic)

作用,并由于均衡调节作用和岩浆底劈作用而形成穹窿状态(图 4c)。

3 大陆伸展构造的变形机制

Lister *et al.*(1986)在总结他人成果的基础上,提出了大陆伸展变形的 3 种变形机制模型:(1)对称的纯剪切伸展模型,即 Mckenzie 模型(图 5a;McKenzie,1978),该模型认为拆离断层代表地壳脆—韧性转换带,上盘以掀斜断块形式完全脆性伸展,下盘均匀韧性拉伸;(2)拆离断层或低角度地壳剪切带型的不对称简单剪切模式,即 Wernicke 模型(图 5b;Wernicke,1981),该模式中拆离断层切穿了整个岩石圈;(3)分层剪切模式,即 Lister 模型(图 5c),该模式认为拆离带在脆—韧性转换带之下变为水平产状,之后向下变陡,到壳幔边界再次变成水平产状,这种产状的变化导致下地壳和上地幔的部分纯剪切变形。

4 大陆伸展构造的形成机制

根据大陆伸展构造形成的地表表现及相关的构造形态,可大致分为 2 个类型:(1)总体发生沉降的裂谷,尽管裂谷肩会相对抬升;(2)总体发生抬升的变质核杂岩,虽然上叠盆地相对沉降,那么是什么因素决定大陆伸展形成裂谷还是形成变质核杂岩呢? Buck (1991)通过模拟计算提出了不同岩石圈流变结构下窄裂谷、宽裂谷和变质核杂岩的大陆伸展模式,Benes and Davy(1996)通过物理模拟完善了这一模型。

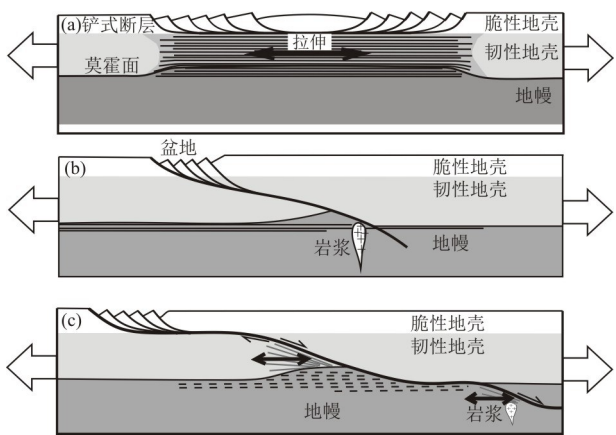


图 5 大陆伸展变形的 3 种基本变形机制
Fig.5 Three models of continental extension
据 Lister *et al.*(1986).a.纯剪切模型; b.简单剪切模型; c.分层剪切模型

窄裂谷作用:大陆伸展作用集中于一个狭窄的强烈发育正断层的变形区域,变形区与不变形区之间存在较大的地壳厚度与地形的横向变化,而岩石圈最大的减薄和地幔上涌都发生于裂谷之下的一个较窄的区域(图 6a).窄裂谷作用属稳态岩石圈伸展,即变形不向裂谷带外的不变形区迁移.该模式的核心是脆性上地壳的阻力主导变形过程,即强上地壳.窄裂谷的实例包括东非裂谷、贝加尔裂谷和莱茵地堑等。

宽裂谷作用:宽裂谷具有 2 个特征,即宽达 800 km 的宽泛的弥散伸展应变区、较小的地壳厚度与地形的横向变化(图 6b).有 2 种地质条件利于宽裂谷作用的发生:(1)强上地幔主导岩石圈流变学特征和低应变速率;(2)增厚地壳的重力势能为主导,即重力垮塌,重力势能可以阻止变形的局部化(即形成窄裂谷).这种模型具有强的上地幔和相对较薄的脆性上地壳,而下地壳可以发生韧性流动.下地壳流动可以使变形带扩展,所以宽裂谷作用属非稳态岩石圈伸展.宽裂谷的实例是北美西部的盆岭省。

变质核杂岩:形成于窄带内的高速率应变,从而导致中—下地壳高级变质岩的剥露(图 6c).变质核杂岩的起始类似于宽裂谷,随伸展的发展,变形集中于由 2 个边界正断层限制的裂谷,从而使断层不再向不变形的岩石圈迁移,即从非稳态伸展向稳态伸展转换.重力、地壳厚度的变化驱动弱的下地壳流向减薄区域,该流动导致变质核杂岩的上升,从而取代裂谷的初始沉降.该模式的核心是可流动的厚的下地壳和重力驱动.变质核杂岩形成时会因为拆离断层的几何和运动特征而形成对称与不对称的变质核杂岩(Malavieille,1993)。

总之,当强脆性上地壳主导变形时,岩石圈伸展导致窄裂谷;当重力主导变形时,并存在增厚地壳及弱(热)的下地壳时,则导致宽裂谷及变质核杂岩的早期阶段;当有异常弱(低粘度)的下地壳存在时,韧性物质流向伸展区域,从而形成变质核杂岩.而最近的数值模拟研究也揭示深部物质流动对伸展构造的贡献(Rey *et al.*,2017)。

裂谷作用除上述分类外,还可根据其岩石圈受力方式及其与地幔物质活动的关系分为主动裂谷作用与被动裂谷作用(Sengör and Burke,1978; Turcotte and Emerman,1983).主动裂谷作用产生于地幔对流或地幔柱形成的地幔物质上涌,具体过程见下文 5.1 地幔柱上涌;被动裂谷作用形成于岩石圈的直接拉伸,岩石圈可在多种环境下(如弧后)经拉伸而形成伸展,并进而造成热地幔的上隆。

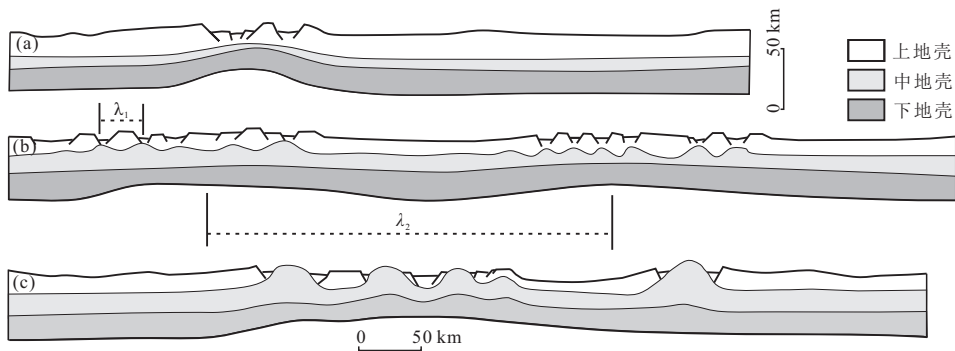


图 6 大陆伸展的窄裂谷(a)、宽裂谷(b)和变质核杂岩模型(c)

Fig.6 Continental extensional models of narrow rifting (a), wide rifting (b) and metamorphic core complex (c)
据 Benes and Davy(1996)

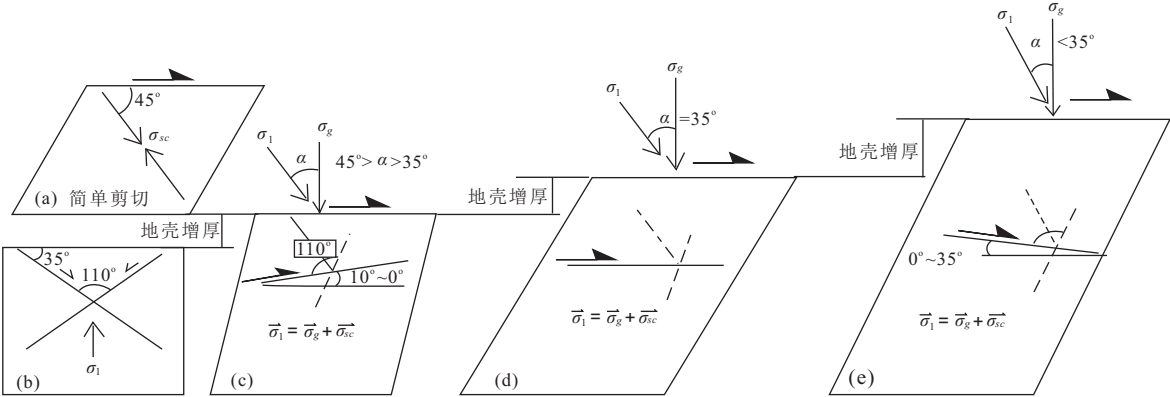


图 7 低角度正断层的最大有效力矩模型

Fig.7 A model with maximum effective moment criterion for the formation of a low-angle normal fault

在拆离断层即变质核杂岩中,都强调了低倾角正断层的问题(Wernicke,1981),自低角度正断层提出后,人们对其成因进行了很多探讨. Ramsay (1980)就曾用有限应变的旋转解释正断层的低角度; Yin(1989)提出一种地壳弹性模型,模型中底部摩擦力引起块体内应力主方向的变化,导致低角度正断层的形成;后来更多的人采用了 Bartley *et al.* (1990)提出的旋转铰链模型(rolling-hinge model). 然而,郑亚东先生提出的最大有效力矩准则(Zheng *et al.*, 2004),为低角度正断层给出了更合理的解释(郑亚东等, 2007).

根据最大有效力矩准则,强变形带可以钝角(约 110°)面对最大主应力(σ_1 ; 图 7b). 当一个造山带发生逆冲增厚时,造山带地壳同时经受 2 种作用,一个是逆冲运动产生的简单剪切,而简单剪切产生与剪切方向成 45°角的主压力(σ_{sc} ; 图 7a); 逆冲增厚产生重力负载(σ_g ; 图 7c),两者的合力形成新的最大主应力(σ_1),即 $\sigma_1 = \sigma_g + \sigma_{sc}$ (图 7c). 开始增厚后,最大主应力(σ_1)与竖直方向的夹角变得小于 45°,根据最

大有效力矩准则,形成以 σ_1 为角分线的夹角为 110°的共轭剪切带(断层),根据运动学相容性,只有一直同向运动的断层形成,它就是倾角小于 10°的逆冲断层(图 7c). 当持续的增厚使 σ_1 与竖直方向的夹角减小到 35°时,断层倾角变为 0°(图 7d); 继续增厚使 σ_1 与竖直方向的夹角小于 35°时,断层变为正断层(图 7e). 该模型下,正断层的倾角为 0°到 35°.

5 大陆伸展的动力背景

发生伸展构造的应力条件为最小主应力(σ_3)在水平方向上减小,或最大主应力(σ_1)在竖直方向上增大,或上述 2 种过程同时作用. 产生这种应力状态地质背景如下:

5.1 地幔柱上涌

目前看来,大陆裂解和地幔柱的活动密切相关(图 8; Burov *et al.*, 2007; Pirajno and Santosh, 2015),是触发大陆伸展最直接、最常见的动力学机制. 上升的地幔柱导致其上方的岩石圈受热并发生

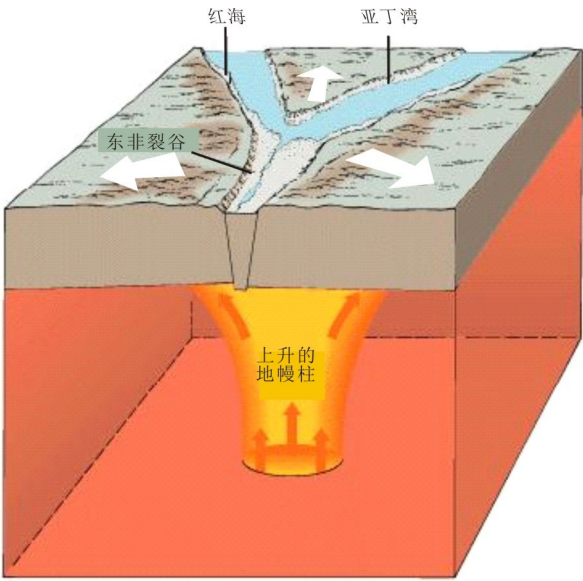


图 8 上升地幔柱与大陆裂解的关系示意
Fig.8 Schematic diagram for the upwelling plume and continental break-up

穹窿,穹窿产生的重力势能驱使地壳发生重力扩散而产生水平拉伸应力,受热的地壳和岩石圈强度降低,在水平拉伸下或产生正断层或形成岩石圈的减薄.上升的地幔柱到达岩石圈底部时,会发生放射状的水平流动,其对岩石圈的拖曳也可以增强水平拉伸应力场.

小规模岩浆底辟或是岩盐及泥岩的底辟也会产生类似的伸展,只是岩盐/泥岩底辟的拉伸更多是横弯作用产生的顺层拉伸.造山带去根或拆沉也可产生类似的拉伸应力状态,只是去根和拆沉形成的反弹,对地壳的抬升(相当于地幔柱上方的穹窿)贡献较大.

5.2 板片反转与俯冲带后撤

位于活动陆缘下盘的大洋俯冲板片的动力过程,是引起大陆边缘、特别是弧后扩展的主要动力,有时甚至会成为大陆内部伸展的主要动力之一(Wang *et al.*, 2011; 朱日祥等, 2012).俯冲板片的伸展效应主要是俯冲到地幔的板片,因密度大而使俯冲角度变陡或是整体下沉,即所谓的板片反卷作用(slab rollback; Gvirtzman and Nur, 1999; Heuret and Lallemand, 2005; Niu, 2014; Cassel *et al.*, 2018),反卷导致俯冲带及海沟的后撤(subduction or trench retreat; Faccenna *et al.*, 2001; Lallemand *et al.*, 2008).这种后撤,导致大陆边缘的伸展,产生弧后拉张盆地,拉张作用还可以传递到大陆内部,如中生代华北克拉通的伸展破坏.

地球物理资料揭示了西至中国大陆东部重力梯度带、地幔过渡带内的停滞板片(Huang and Zhao, 2006),并以此提出了中国大陆伸展的大地幔楔模型(BMW; Zhao and Ohtani, 2009; Niu, 2014).这个模型强调了停滞板片之上地幔楔的对流以及俯冲板片的脱水作用引起湿热的软流圈物质的上涌,从而导致亚洲大陆东部的伸展及裂谷作用.但该模式恰恰没有考虑板片反卷的物理作用,而这个作用可能在构造动力机制上更为重要.俯冲板片到达过渡带后发生停滞,相当于被固定;而后续的板片依然在俯冲,同时由于密度的关系而下沉;连带停滞和正在俯冲的板片一起,依次平铺在地幔过渡带内,这就自然导致俯冲板片的反卷和俯冲带后撤,从而导致亚洲大陆东部的伸展(图 9).

5.3 增厚地壳的重力垮塌

诸如造山带和高原,增厚的地壳因重力势能作用而产生水平拉伸的应力场,从而发生重力垮塌(Burchfiel and Royden, 1985; Rey *et al.*, 2001).图 10 简要地示意了增厚地壳重力驱动伸展的原理,增厚的地壳(岩石圈的一部分,图 10a)导致拉伸驱动力(图 10b),驱动力与其强度(图 10c)相较,在地壳内明显形成拉张(图 10d).重力垮塌与地壳增厚建立起的重力势能相关,当维持这一增厚导致的重力势能异常的力(比如造山的汇聚力)降低时,势能异常将发生松弛,导致重力扩散和重力垮塌.也就是说,造山运动使地壳增厚和垂向压力增大,垂向压力的增大、水平挤压应力的减小和消失以及造山带下部热物质上涌导致应力三主轴的转换,产生水平拉伸应力场.马杏垣先生提出的重力构造,就是这种重力垮塌构造(马杏垣等, 1981).

而近来在喜马拉雅的研究中,有关中下地壳流动数值模拟研究也证实了,在收缩环境下无需减少

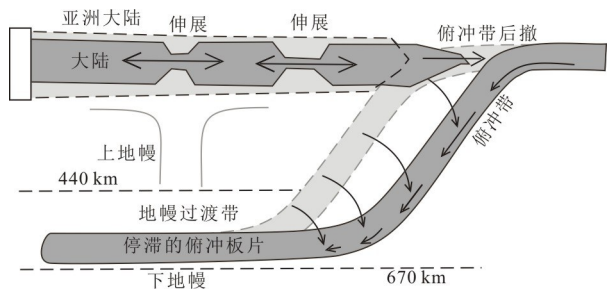


图 9 亚洲大陆东部伸展的板片反卷与俯冲带后撤模式
Fig.9 Model of continental extension of eastern Asia caused by slab rollback and subduction retreat

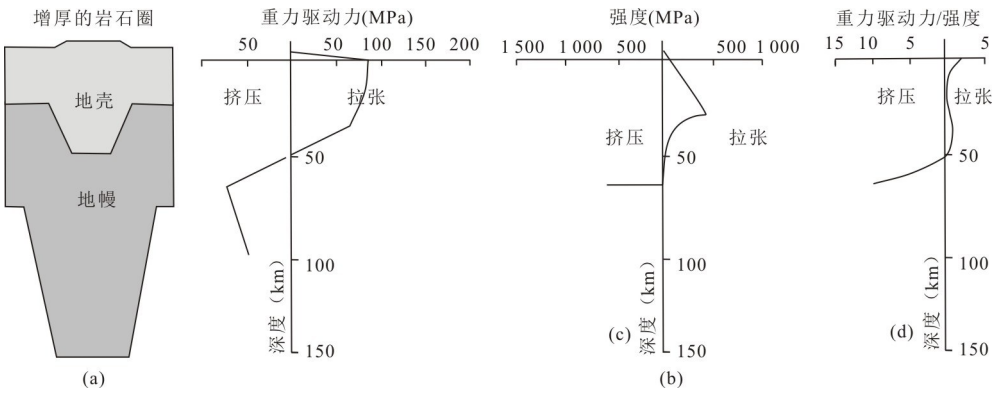


图 10 增厚地壳的重力驱动伸展的示意

Fig.10 Simplified diagram showing extension driven by gravity of thickened crust
据 Rey *et al.* (2001)

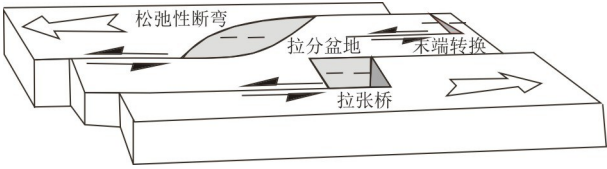


图 11 走滑断层体系中的伸展

Fig.11 Extensions in strike-slip fault system

水平挤压力,部分熔融的浮力和地形前锋的剥蚀同样可以形成伸展构造 (Beaumont *et al.*, 2001; Jamieson and Beaumont, 2013).

5.4 走滑构造带派生应力场

走滑体系是地球上最主要的一种构造类型,除圣·安德列斯断裂这样的板块边界断裂外,斜向俯冲和大陆碰撞都会导致大陆内部的走滑 (Tapponnier *et al.*, 1982; Sieh and Natawidjaja, 2000).当走滑断层产状发生变化,如走向变化产生断弯、或产生雁列叠接形成桥区时,会因为走滑性质与断弯或桥区方式的不同而形成伸展构造环境 (Cunningham and Mann, 2007),诸如松弛性断弯、拉张桥和拉伸性末端转换 (图 11).在左行走滑体系中, S 形弯曲、左阶雁列叠接区 (桥区) 以及两盘走滑方向后方的末端转换区,都是拉伸区 (图 11);而在右行走滑体系,则 Z 形断弯和右阶桥区形成拉伸.

References

Anderson, E. M., 1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Application to Britain. *The Journal of Geology*, 62(4): 417–417. <https://doi.org/10.1086/626182>
Armstrong, R. L., 1972. Low-Angle (Denudation) Faults, Hinterland of the Sevier Orogenic Belt, Eastern Nevada and Western Utah. *Geological Society of America Bul-*

letin, 83 (6): 1729–1754. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[1729:ldfhot\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[1729:ldfhot]2.0.co;2)
Bartley, J. M., Fletcher, J. M., Glazner, A. F., 1990. Tertiary Extension and Contraction of Lower-Plate Rocks in the Central Mojave Metamorphic Core Complex, Southern California. *Tectonics*, 9 (3): 521–534. <https://doi.org/10.1029/tc009i003p00521>
Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2001. Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low-Viscosity Crustal Channel Coupled to Focused Surface Denudation. *Nature*, 414(6865): 738–742. <https://doi.org/10.1038/414738a>
Benes, V., Davy, P., 1996. Modes of Continental Lithospheric Extension: Experimental Verification of Strain Localization Processes. *Tectonophysics*, 254 (1–2): 69–87. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00076-3)
Buck, W. R., 1991. Modes of Continental Lithospheric Extension. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96 (B12): 20161–20178. <https://doi.org/10.1029/91jb01485>
Burchfiel, B. C., Royden, L. H., 1985. North-South Extension within the Convergent Himalayan Region. *Geology*, 13 (10): 679–682. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<679:newtch>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<679:newtch>2.0.co;2)
Burov, E., Guillou-Frottier, L., d'Acremont, E., et al., 2007. Plume Head-Lithosphere Interactions near Intra-Continental Plate Boundaries. *Tectonophysics*, 434 (1–4): 15–38. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.01.002>
Cassel, E. J., Smith, M. E., Jicha, B. R., 2018. The Impact of Slab Rollback on Earth's Surface: Uplift and Extension in the Hinterland of the North American Cordillera. *Geophysical Research Letters*, 45 (20): 10996–11004. <https://doi.org/10.1029/2018gl079887>
Coney, P. J., 1980. Cordilleran Metamorphic Core Complexes: An

- Overview. *Memoir of the Geological Society of America*, 153:7—31. <https://doi.org/10.1130/MEM153-p7>
- Coward, M. P., Dewey, J. F., Hancock, P. L., 1987. Continental Extensional Tectonics. *Geological Society Special Publications*, 28:637.
- Crittenden, M. D. Jr., Coney, P. J., Davis, G. H., 1980. Cordilleran Metamorphic Core Complexes. *Memoir of the Geological Society of America*, 153:490.
- Cunningham, W. D., Mann, P., 2007. Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends. *Geological Society, London, Special Publications*, 290:1—12.
- Davis, G. A., Anderson, J. L., Frost, E. G., et al., 1979. Regional Miocene Detachment Faulting and Early Tertiary (?) Mylonitization, Whipple-Buckskin-Rawhide Mountains, Southeastern California and Western Arizona. In: Abbott, P. L., ed., *Geological Excursions in the Southern California Area*. State University Publications, San Diego, 74—108.
- Davis, G. A., Lister, G. S., 1988. Detachment Faulting in Continental Extension: Perspectives from Southwestern U. S. Cordillera. *Geological Society of America Special Papers*, 218:133—159.
- Davis, G. A., Qian, X. L., Zheng, Y. D., 1996. The Huairou (Shuiyu) Ductile Shear Zone, Yunmengshan Mts., Beijing. 30th International Geological Congress Field Trip Guide, Beijing.
- Davis, G. A., Yu, H., Qian, X. L., et al., 1994. A Chinese Metamorphic Core Complex: Geologic Introduction and Field Guide to the Yumengshan, Northern Beijing. In: Qian, X. L., ed., *Studies on Extensional Tectonics*. Geological Publishing House, Beijing, 154—166 (in Chinese with English abstract).
- Davis, G. H., 1977. Characteristics of Metamorphic Core Complex, Southern Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 9:944.
- Ernst, R. E., Grosfils, E. B., Mege, D., 2001. Giant Dike Swarms: Earth, Venus, and Mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29(1): 489—534. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.489>
- Faccenna, C., Becker, T. W., Lucente, F. P., et al., 2001. History of Subduction and Back-Arc Extension in the Central Mediterranean. *Geophysical Journal International*, 145(3): 809—820. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01435.x>
- Gvrtzman, Z., Nur, A., 1999. The Formation of Mount Etna as the Consequence of Slab Rollback. *Nature*, 401(6755): 782—785. <https://doi.org/10.1038/44555>
- Heuret, A., Lallemand, S., 2005. Plate Motions, Slab Dynamics and Back-Arc Deformation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 149(1—2): 31—51. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.08.022>
- Hou, G. T., Li, J. H., Yang, M. H., et al., 2008a. Geochemical Constraints on the Tectonic Environment of the Late Paleoproterozoic Mafic Dyke Swarms in the North China Craton. *Gondwana Research*, 13(1): 103—116. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.06.005>
- Hou, G. T., Santosh, M., Qian, X. L., et al., 2008b. Tectonic Constraints on 1.3—1.2 Ga Final Breakup of Columbia Supercontinent from a Giant Radiating Dyke Swarm. *Gondwana Research*, 14(3): 561—566. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.03.005>
- Huang, J. L., Zhao, D. P., 2006. High-Resolution Mantle Tomography of China and Surrounding Regions. *Journal of Geophysical Research*, 111(B9): 305. <https://doi.org/10.1029/2005jb004066>
- Jamieson, R. A., Beaumont, C., 2013. On the Origin of Orogens. *Geological Society of America Bulletin*, 125(11—12): 1671—1702. <https://doi.org/10.1130/b30855.1>
- Karner, G. D., Manatschal, G., Pinheiro, L. M., 2007. Imaging, Mapping and Modelling Continental Lithosphere Extension and Breakup: An Introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 282(1): 1—8. <https://doi.org/10.1144/sp282.1>
- Lallemand, S., Heuret, A., Faccenna, C., et al., 2008. Subduction Dynamics as Revealed by Trench Migration. *Tectonics*, 27(3): TC3014. <https://doi.org/10.1029/2007tc002212>
- Lin, W., Wang, J., Liu, F., et al., 2013. Late Mesozoic Extension Structures on the North China Craton and Adjacent Regions and Its Geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1791—1810.
- Lister, G. S., Davis, G. A., 1989. The Origin of Metamorphic Core Complexes and Detachment Faults Formed during Tertiary Continental Extension in the Northern Colorado River Region, U.S.A.. *Journal of Structural Geology*, 11(1—2): 65—94. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90036-9)
- Lister, G. S., Etheridge, M. A., Symonds, P. A., 1986. Detachment Faulting and the Evolution of Passive Continental Margins. *Geology*, 14(3): 246—250. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<246:dfateo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<246:dfateo>2.0.co;2)
- Liu, J. L., Gan, H. N., Jiang, H., et al., 2017. Rheology of the Middle Crust under Tectonic Extension: Insights from the Jinzhou Detachment Fault Zone of the Liaonan Metamorphic Core Complex, Eastern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 139:61—70. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.05.011>

doi.org/10.1016/j.jseas.2016.12.024

- Ma, X. Y., 1982. On Extensional Tectonics, *Earth Science*, 7 (3): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. Y., Suo, S. T., You, Z. D., et al., 1981. Tectonic Deformation of the Songshan Area, Henan Geological Province, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ma, Y. S., Cui, S. Q., Wu, G. G., et al., 1999. The Structural Feature of Metamorphic Core Complex in Yiwulüshan Mountains, West Liaoning. *Acta Geoscientica Sinica*, 20 (4): 385–391 (in Chinese with English abstract).
- Malavieille, J., 1993. Late Orogenic Extension in Mountain Belts: Insights from the Basin and Range and the Late Paleozoic Variscan Belt. *Tectonics*, 12 (5): 1115–1130. <https://doi.org/10.1029/93tc01129>
- McKenzie, D., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40 (1): 25–32. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(78)90071-7)
- Niu, Y. L., 2014. Geological Understanding of Plate Tectonics: Basic Concepts, Illustrations, Examples and New Perspectives. *Global Tectonics and Metallogeny*, 10 (1): 23–46. <https://doi.org/10.1127/gtm/2014/0009>
- Pirajno, F., Santosh, M., 2015. Mantle Plumes, Supercontinents, Intracontinental Rifting and Mineral Systems. *Precambrian Research*, 259: 243–261. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.016>
- Qian, X. L., 1994. Studies on Extensional Tectonics. Geological Publishing House, Beijing, 166 (in Chinese).
- Ramsay, J. G., 1980. Shear Zone Geometry: A Review. *Journal of Structural Geology*, 2 (1–2): 83–99. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(80\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(80)90038-3)
- Rey, P., Vanderhaeghe, O., Teyssier, C., 2001. Gravitational Collapse of the Continental Crust: Definition, Regimes and Modes. *Tectonophysics*, 342 (3–4): 435–449. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(01\)00174-3](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(01)00174-3)
- Rey, P. F., Mondy, L., Duclaux, G., et al., 2017. The Origin of Contractual Structures in Extensional Gneiss Domes: Reply. *Geology*, 45 (6): e416. <https://doi.org/10.1130/g39229y.1>
- Sengör, A. M. C., Burke, K., 1978. Relative Timing of Rifting and Volcanism on Earth and Its Tectonic Implications. *Geophysical Research Letters*, 5 (6): 419–421. <https://doi.org/10.1029/gl005i006p00419>
- Shu, L. S., Sun, Y., Wang, D. Z., et al., 1998. Mesozoic Doming Extensional Tectonics of Wugongshan, South China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 28 (5): 431–438 (in Chinese).
- Sieh, K., Natawidjaja, D., 2000. Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B12): 28295–28326. <https://doi.org/10.1029/2000jb900120>
- Song, H. L., 1995. An Overview of Metamorphic Core Complexes—Characteristics and Origin. *Earth Science Frontiers*, 2 (1): 103–111 (in Chinese with English abstract).
- Song, H. L., 1996. Characteristics of Fangshan Metamorphic Core Complex, Beijing and a Discussion about Its Origin. *Geoscience*, 10 (2): 149–158 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10 (12): 611–616. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10<611:petian>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10<611:petian>2.0.co;2)
- Turcotte, D. L., Emerman, S. H., 1983. Mechanisms of Active and Passive Rifting. *Tectonophysics*, 94 (1–4): 39–50. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90008-2)
- Walter, G. J., 1896. The Great Rift Valley: Being the Narrative of a Journey to Mount Kenya and Lake Baringo with Some Account of the Geology, Natural History, Anthropology and Future Prospect of British East Africa. Frank Cass Publishers, Routledge, 422.
- Wang, T., Zheng, Y. D., Zhang, J. J., et al., 2011. Pattern and Kinematic Polarity of Late Mesozoic Extension in Continental NE Asia: Perspectives from Metamorphic Core Complexes. *Tectonics*, 30 (6): TC6007. <https://doi.org/10.1029/2011tc002896>
- Wang, Y. F., Cui, W. Y., Sun, C. Z., 1994. The Louzidian-Dachengzi Detachment Fault and Its Tectonic Evolution, South of Chifeng, Inner Mongolia. In: Qian, X. L., ed., Studies on Extensional Tectonics. Geological Publishing House, Beijing, 99–108 (in Chinese).
- Wernicke, B., 1981. Low-Angle Normal Faults in the Basin and Range Province: Nappe Tectonics in an Extending Orogen. *Nature*, 291 (5817): 645–648. <https://doi.org/10.1038/291645a0>
- Whitney, D. L., Teyssier, C., Rey, P., et al., 2013. Continental and Oceanic Core Complexes. *Geological Society of America Bulletin*, 125 (3–4): 273–298. <https://doi.org/10.1130/b30754.1>
- Yan, D. P., Song, H. L., Fu, Z. R., 1997. Tectono-Stratigraphic Division for Exposed Crust Section of Jianglang Metamorphic Core Complex in Western Margin of Yangtze Craton. *Geoscience*, 11 (3): 290–297 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., 1989. Origin of Regional, Rooted Low-Angle Normal Faults: A Mechanical Model and Its Tectonic Implica-

- tions, *Tectonics*, 8 (3): 469 — 482. <https://doi.org/10.1029/tc008i003p00469>
- Zhang, J.J., 2007. A Review on the Extensional Structures in the Northern Himalaya and Southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 26 (6): 639 — 649 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.J., Zheng, Y.D., Liu, S.W., 1998. The Xiaolinling Metamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution. China Ocean Press, Beijing, 120 (in Chinese).
- Zhang, J.Y., 1994. Tectonic Feature of the Western Edge in the Metamorphic Nucleus Complex of Hengshan. *Journal of East China Geological Institute*, 17 (1): 18 — 22 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D.P., Ohtani, E., 2009. Deep Slab Subduction and Dehydration and Their Geodynamic Consequences: Evidence from Seismology and Mineral Physics. *Gondwana Research*, 16 (3—4): 401 — 413. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.01.005>
- Zheng, Y.D., Davis, G.A., Darby, B.J., 2001. Field Trip Guide to Hohhot Metamorphic Core Complex. Volume of Abstracts and Field Trip Guides of Workshop on Mesozoic Extensional Tectonics in China-Mongolia Boundary Region (in Chinese).
- Zheng, Y.D., Wang, T., Ma, M.B., et al., 2004. Maximum Effective Moment Criterion and the Origin of Low-Angle Normal Faults. *Journal of Structural Geology*, 26 (2): 271 — 285. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(03)00079-8)
- Zheng, Y.D., Wang, T., Wang, X.S., 2007. The Maximum Effective Moment Criterion (MEMC) and Related Geological Structures. *Earth Science Frontiers*, 14 (4): 49 — 60 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.D., Zhang, Q., 1993. The Yagan Metamorphic Core Complex and Extensional Detachment Fault in Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 67 (4): 301 — 309, 388 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Chen, Y., Jiang, D.Z., et al., 2015. Rapid Change from Compression to Extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan Metamorphic Core Complex. *Tectonophysics*, 656: 91 — 110. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.009>
- Zhu, G., Jiang, D.Z., Zhang, B.L., et al., 2012. Destruction of the Eastern North China Craton in a Backarc Setting: Evidence from Crustal Deformation Kinematics. *Gondwana Research*, 22 (1): 86 — 103. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.08.005>
- Zhu, R.X., Xu, Y.G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 42 (8): 1135 — 1159 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4516-y>
- Zhu, Z.C., 1994. Review on Metamorphic Core Complex and Extensional Tectonics. *Geological Science and Technology Information*, 13 (3): 1 — 9 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Davis, G.A., 于浩, 钱祥麟, 等, 1994. 中国变质核杂岩——北京云蒙山地质简介及地质旅行指南. 见: 钱祥麟, 编, 伸展构造研究. 北京: 地质出版社, 154 — 166.
- 马杏垣, 1982. 论伸展构造. *地球科学*, 7 (3): 15 — 22.
- 马杏垣, 索书田, 游振东, 等, 1981. 嵩山构造变形——重力构造、构造解析. 北京: 地质出版社.
- 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等, 1999. 医巫闾山变质核杂岩构造特征. *地球学报*, 20 (4): 385 — 391.
- 钱祥麟, 1994. 伸展构造研究. 北京: 地质出版社, 166.
- 舒良树, 孙岩, 王德滋, 等, 1998. 华南武功山中生代伸展构造. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 28 (5): 431 — 438.
- 宋鸿林, 1995. 变质核杂岩研究进展、基本特征及成因探讨. *地质前缘*, 2 (1): 103 — 111.
- 宋鸿林, 1996. 北京房山变质核杂岩的基本特征及其成因探讨. *现代地质*, 10 (2): 149 — 158.
- 王玉芳, 崔文元, 孙承志, 1994. 内蒙赤峰娄子店一大城子拆离断层及其构造演变. 见: 钱祥麟, 编, 伸展构造研究. 北京: 地质出版社, 99 — 108.
- 颜丹平, 宋鸿林, 傅昭仁, 1997. 扬子地台西缘江浪变质核杂岩的出露地壳剖面构造地层柱. *现代地质*, 11 (3): 290 — 297.
- 张进江, 2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述. *地质通报*, 26 (6): 639 — 649.
- 张进江, 郑亚东, 刘树文, 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化. 北京: 海洋出版社, 120.
- 张进业, 1994. 衡山变质核杂岩体西缘构造特征. *华东地质学院学报*, 17 (1): 18 — 22.
- 郑亚东, Davis, G.A., Darby, B.J., 2001. 呼和浩特变质核杂岩野外考察路线指南. 中蒙中生代伸展构造现场研讨会论文摘要及野外地质考察路线指南.
- 郑亚东, 王涛, 王新社, 2007. σ_g 最大有效力矩准则及相关地质构造. *地质前缘*, 14 (4): 49 — 60.
- 郑亚东, 张青, 1993. 内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层. *地质学报*, 67 (4): 301 — 309, 388.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等, 2012. 华北克拉通破坏. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 42 (8): 1135 — 1159.
- 朱志澄, 1994. 变质核杂岩和伸展构造述评. *地质科技情报*, 13 (3): 1 — 9.