

中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片麻岩穹窿(群)*

许志琴^{1,2} 马绪宣¹

XU ZhiQin^{1,2} and MA XuXuan¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037

2. 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210046

1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

2015-07-20 收稿, 2015-09-09 改回.

Xu ZQ and Ma XX. 2015. The Chinese Phanerozoic gneiss domes: Subduction-related type, collision-related type and combination type of subduction-collision. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12):3509–3523

Abstract Gneiss domes are ubiquitous domal structures in all exhumed orogens, and their formation is closely associated with the thermal-tectonic processes (magmatism and/or migmatization) in middle-lower crust. Their occurrence indicates that the middle-lower crust has been exhumed to shallow depth. In general, gneiss domes are primarily cored by granitoid plutons (with weak or no magmatic fabrics) and high-grade metamorphic rocks (e. g. migmatite) that are immediately margined by granitic gneisses showing magmatic fabrics, and mantled by high-grade schists and gneisses. Most commonly in the whole evolutionary process, the formation of gneiss domes will be subject to the contraction regime triggering by the vertical ascent of crustal flow and subsequent extension regime at the top of the intrusions. Based on the rock assemblages, fabrics, formation mechanism and geological settings of gneiss domes and their relationship with the crustal flow, we analyzed typical gneiss domes in China and classified these Chinese Phanerozoic gneiss domes and gneiss dome systems into three types, namely the subduction-related type, the collision-related type and the combination type of subduction and collision. The subduction-related type is represented by the gneiss domes in the Qinling terrane, the collision-related type is the North Himalayan gneiss domes and the Yajiang ones in the Songpan-Ganze terrane, and the combination type of subduction-collision is the Kongur gneiss domes in the northeastern Pamir and the Linzhi gneiss domes in the eastern Gangdese magmatic belt.

Key words Gneiss dome; Subduction; Collision; Exhumation; Mechanism

摘要 片麻岩穹窿(gneiss dome)是中下地壳热动力学过程产生的、与岩浆作用(或混合岩化作用)密切相关的穹窿状构造。片麻岩穹窿大部分是地壳深层次变动的产物,在世界范围内几乎出露在所有的折返造山带中,反映了所在地区地壳的大幅度抬升。片麻岩穹窿核部主要是无或弱岩浆组构的花岗岩体和高级变质岩(例如混合岩),边部是具有岩浆组构的花岗片麻岩,幔部由来自地壳深部的高级片岩和片麻岩组成。片麻岩穹窿的形成经历从垂直上升的地壳流导致的岩浆上涌的挤压收缩机制到岩浆体侵位的顶部伸展机制的转化过程。根据片麻岩穹窿的岩石组合、组构特征、成因机制和大地构造背景以及片麻岩穹窿与地壳流关系的分析,结合中国大陆典型片麻岩穹窿的研究,提出中国大陆显生宙的片麻岩穹窿和片麻岩穹窿群可以划分为与大洋岩石圈板片俯冲增生与随后的折返造山相关的“俯冲型”片麻岩穹窿(群),如秦岭片麻岩穹窿;与陆陆碰撞折返造山有关的“碰撞型”片麻岩穹窿(群),如北喜马拉雅拉轨岗日片麻岩穹窿(群)和松潘甘孜雅江片麻岩穹窿(群);与俯冲和碰撞的叠合作用有关的“复合式”片麻岩穹窿(群),如帕米尔空喀山片麻岩穹窿和东冈底斯林芝片麻岩穹窿(群)。

关键词 片麻岩穹窿; 俯冲; 碰撞; 折返; 成因机制

中图法分类号 P542

* 本文受国家自然科学基金项目(40921001、41430212、41202153、41472198)、中国地质调查局项目(1212010818094、12120115026801)和国土资源部公益性行业基金项目(201511022、201211093)联合资助。

第一作者简介: 许志琴,女,1941年生,研究员,构造地质学专业,长期从事大陆动力学研究工作,E-mail: xuzhiqin2015@126.com

1 引言

1.1 片麻岩穹窿的概念

片麻岩穹窿(gneiss dome)为 Eskola (1949)最早提出,意指中下地壳热动力学过程产生的、与岩浆作用(或混合岩化作用)密切相关的穹窿状构造。其核部通常由花岗质岩类岩石组成,周边为花岗片麻岩,幔部由变形的高级片岩、片麻岩和其他类型变质岩所环绕。片麻岩穹窿构造是地壳深层次变动的产物,它几乎出露在所有的折返造山中,反映了所在地区地壳的大幅度抬升(Vanderhaeghe, 2004; Whitney *et al.*, 2004)。很多片麻岩穹窿的形成与花岗质岩浆上涌有关,所形成的花岗岩体(或岩基)以无(或弱)组构为特征,并伴随混合岩化作用;而周边的花岗片麻岩是具有面理和线理组构的变形花岗岩;幔部的变质围岩往往强烈变形,发育层叠式褶皱(Cascading folds)(图1)(Burg *et al.*, 2004; Whitney *et al.*, 2004)。但是,也有只受断层作用而形成的片麻岩穹窿,即可以发育在拆离断层的下盘,形成变质核杂岩,也可以与逆冲断层密切相关,由于背斜堆垛而形成(Yin, 2004)。

分布范围上,片麻岩穹窿普遍出露在世界范围内的折返造山带中(Amato *et al.*, 1994);形成时间上,从太古宙到现代造山带都有形成(Schneider *et al.*, 2004; Tinkham and Marshak, 2004)。图2表示了已经发表的从前寒武纪到现代

的全球的66个典型的片麻岩穹窿,包括前寒武纪地盾和全球显生宙造山带中的大量片麻岩穹窿。

1.2 片麻岩穹窿的构造、岩石组合和组构

绝大部分片麻岩穹窿的构造组合可以分为核、边和幔三部分,核部为花岗岩和深熔混合岩,边部为花岗片麻岩,幔部以高级变质沉积岩和变质火山岩为标志的高角闪岩到麻粒岩相片麻岩(或者高温片岩)为典型特征,也被简化为核部(如,混合岩和花岗质岩体)和上覆的变质层(如,边部的片岩和片麻岩)的双层构造(Stübner *et al.*, 2013)。对于那些还没有出露地表的片麻岩穹窿,其变质的幔部之上还会覆盖有未变质的沉积地层。

片麻岩穹窿的岩石组合方面,其核部主要为中酸性花岗岩类岩石以及混合岩。核部花岗岩和混合岩可同时形成,也可能是不同期的产物(Eskola, 1949)。即使核部主要为花岗岩,也可能包含不同期次的花岗岩,代表早期形成的片麻岩穹窿的核部被后期多次岩体侵入(Yin, 2004)。片麻岩穹窿的幔部主要是变质岩,并有很好的分带性。纵然由于片麻岩形成的深度、上覆地层的岩性组合、以及变质时的温压差异等,各个片麻岩穹窿的变质组合和变质级别会有不同程度的差异性,但整体而言,片麻岩穹窿幔部的变质分带还是有一定的规律性。如中国松潘-甘孜造山带雅江地区三叠系西康群中的片麻岩穹窿其幔部的变质由内而外分别为夕线石带、十字石带、红柱石带、石榴石带、黑云母带和绢云母-绿泥石带(许志琴等, 1992)。类似地,北喜马拉雅 Mabja 片麻岩穹窿的变质分带分别为(夕线石+石榴石+十字石+黑云母)的夕线石带、矿物组合为(蓝晶石+石榴石+十字石+黑云母)的十字石带、矿物组合为(石榴石+黑云母+绿泥石)的石榴石带和矿物组合为(绿泥石+黑云母)的黑云母带(Lee *et al.*, 2004)。相似的变质分带也存在于帕米尔片麻岩穹窿带内(Schmidt *et al.*, 2011)和法国比利牛斯山 Aston 片麻岩穹窿变质的幔部(Denèle *et al.*, 2009),这些片麻岩穹窿变质分带说明中压 Barrovian 式变质分带是片麻岩穹窿幔部变质的主要特点。

组构特征方面,从片麻岩穹窿核部到边部再到围岩,面理或片麻理呈放射状向外围倾斜(Andresen *et al.*, 2010; Yin, 2004);立体剖面上看,片麻岩穹窿与围岩接触的边部组构多是陡立的,顶部组构则是近水平的,典型的例子如法国 Velay 片麻岩穹窿(Ledru *et al.*, 2001),埃及东非造山带 Meatiq 片麻岩穹窿(Andresen *et al.*, 2010),以及美国新墨西哥 Burro 山片麻岩穹窿(Amato *et al.*, 2011)。如果片麻岩穹窿的核部以混合岩或花岗质岩石为主,由于岩石的部分熔融作用产生的流动及褶皱效应,露头规模的面理产状会是变化多样,而非单一的面理产状。如果片麻岩穹窿的顶部和平面上展示的是平整的组构特征(比如水平的流动面理),穹窿的边部展示收缩型组构的可能性就比较小,除非在部分前寒武纪穹窿中(Brun, 1980; Collins *et al.*, 1998)。相比之下,由

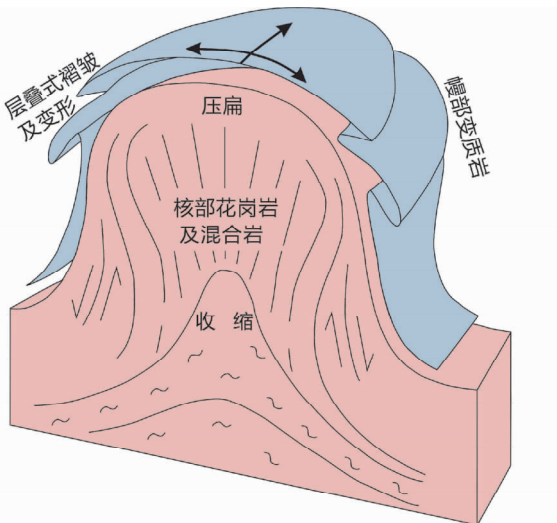


图1 与岩浆作用相关的片麻岩穹窿结构示意图(据 Whitney *et al.*, 2004)

核部为混合岩化的花岗岩,边部为花岗片麻岩,幔部为变质岩和层叠褶皱。箭头代表剪切指向

Fig. 1 The structure of magma-related gneiss dome (after Whitney *et al.*, 2004)

The gneiss dome is cored by migmatitic granites with granitic gneiss in the core's margin, and mantled by metasedimentary rocks showing cascading folds



图2 全球典型片麻岩穹窿的位置图(据 Whitney *et al.*, 2004)

Fig.2 World map showing locations of representative gneiss domes (red dots) (after Whitney *et al.*, 2004)

于片麻岩穹窿核部是熔融体在高温条件下重结晶的产物,且包含了比例较大的混合岩或花岗岩质岩石,核部露头规模的线理组构则比较难以识别(Whitney *et al.*, 2004)。有些片麻岩穹窿核外边由共轭的剪切带构成的主伸展轴与核的边呈切线相交,向核的内部放射状分布;裸露的穹窿核部位置的拉长线理也呈放射状分布;顶部水平的面理叠置在陡倾的组构之上(Gervais *et al.*, 2004)。在有些片麻岩穹窿的深部,流动面理通道以漏斗状为主,在地表则以穹窿状为主,并且多数情况下在大的片麻岩穹窿内部或边缘会有次级的片麻岩穹窿体出露,或多个片麻岩穹窿呈线状或面状成群出露(Lagarde *et al.*, 1994; Arnold *et al.*, 1995; Vanderhaeghe *et al.*, 1999; Fisher and Olsen, 2004; Gervais *et al.*, 2004; Ayarza and Martínez Catalán, 2007)。

通常情况下,片麻岩穹窿的核部和边部记录的变形组构是有区别的,核部以岩浆组构为主,边部以亚岩浆组构到塑性变形组构为特征,可归于以下的原因:1) 岩浆系统通常与围岩解耦,岩浆组构容易被重置;2) 岩浆组构形成在岩浆房建立之后,几乎不能提供岩浆上升或侵位的信息;3) 岩浆组构只记录了岩浆结晶后期的应力增量,在限定区域性构造应力上有很大的局限性(Paterson *et al.*, 1998)。相比而言,片麻岩穹窿幔部的塑性变形组构则更容易记录区域性的构造应力及叠加效应,能为区域性的变形提供有价值的信息。此外,岩体的侵位深度越深,其侵位过程中伴随的区域性的塑性变形就更容易叠加到岩浆侵位后期的结晶岩体的外边,并以最后的应力增量的形式保存下来(Paterson *et al.*, 1998; Vernon, 2000)。由于岩体侵位过程极为复杂,从早期的岩浆

流动组构到岩体结晶后期(或受区域性构造应力叠加)产生的塑性变形组构,以及介于两个端元之间的亚岩浆组构和高温塑性变形组构,所以,需要借助野外观察和室内显微变形分析等多种方式进行综合探索和厘定,进而利用变形组构对片麻岩穹窿形成过程进行很好地揭示。

对于变质压力,很多片麻岩穹窿核部比幔部变质岩记录到了更高的压力,甚至可能代表了一个变质地体或造山带中最高压力,典型的例子如北阿帕拉契山(Spear *et al.*, 2002)、希腊纳克索斯(Buick and Holland, 1989)和加拿大Thor-Odin片麻岩穹窿(Norlander *et al.*, 2002)。而温度方面,部分片麻岩穹窿从核部到幔部岩石存在普遍的差异,核部岩石记录的是从蓝晶石到夕线石-堇青石近等温的减压过程,代表快速的隆升剥露或有持续的热量输入(Fayon *et al.*, 2004),而幔部的变质岩石则经历的是高温变质过程,伴随着减压过程的降温冷却效应(Teyssier and Whitney, 2002)。

1.3 片麻岩穹窿的成因机制

关于片麻岩穹窿的形成机制一直存在争议。一种观点认为片麻岩穹窿是由底辟作用形成(Reesor and Moore, 1971; Fletcher, 1972; Soula, 1982; Chardon *et al.*, 1998; Calvert *et al.*, 1999; Teyssier and Whitney, 2002; Edwards *et al.*, 2002; Siddoway *et al.*, 2004),然而这一观点受到了部分学者的质疑,质疑的根据在于很多情况下穹窿形成于部分熔融或岩浆作用之后(Lee *et al.*, 2000; Rolland *et al.*, 2001)。其他观点诸如:1) 片麻岩穹窿形成于地壳缩短的挤

压背景(Burg *et al.*, 1984; Stipska *et al.*, 2000);2)片麻岩穹窿形成于伸展背景,与变质核杂岩的形成密切相关(Lister and Davis, 1989; Escuder Viruete *et al.*, 2000; Jolivet *et al.*, 2004; Tirel *et al.*, 2004);3)是纵弯褶皱或褶皱干涉或背斜堆垛的结果(Duncan, 1984; Brown *et al.*, 1986);4)片麻岩穹窿形成于造山垮塌环境,与控制伸展作用的部分熔融地壳的底辟上升有关(Vanderhaeghe *et al.*, 1999);5)是地壳收缩(crustal necking)的结果(Fletcher and Hallet, 2004);6)地壳伸展拆离之后的均衡回弹效应(Buck, 1991; Brun *et al.*, 1994)。也有观点认为片麻岩穹窿的形成与造山带地壳的挤出相关(Beaumont *et al.*, 2001),当然也有学者认为片麻岩穹窿的形成与下地壳挤压和上地壳伸展的共同作用相关(Lee *et al.*, 2000; Crowley *et al.*, 2001)。

片麻岩穹窿与传统意义上的岩浆底辟的区别和联系:从物质成分和结构构造上来说,片麻岩穹窿不仅包含核部的岩浆侵入体或混合岩单元,还包含上覆的变质沉积盖层,甚至还存在伴随着上覆地层在伸展或挤压背景下的运动,诸如滑覆、拆离或褶皱等,因此,片麻岩穹窿是一个复杂的,集岩浆、变质和构造作用于一体的独特的构造单元,其形成需要有必要的地质条件,因此片麻岩穹窿对区域性的构造背景具有很强的指示意义(Whitney *et al.*, 2004; Yin, 2004)。相比之下,岩浆底辟更强调存在密度差异的情况下,岩浆沿着裂隙或构造薄弱区的垂直侵位作用,其构造背景指示意义有局限性。当然,在特定的地质背景下,岩浆底辟作用是形成片麻岩穹窿的动力学机制之一,能为部分片麻岩穹窿的形成提供动力。因此,如果一定要把岩浆底辟和片麻岩穹窿联系起来,那就是部分片麻岩穹窿形成的动力学机制来源于岩浆底辟,底辟岩浆侵入体是这部分片麻岩穹窿的核部组成部分(Calvert *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2000; Rolland *et al.*, 2001)。

底辟作用是地壳中热量和物质转移的有效机制,造成地壳中热的、低密度的物质的上升和高密度的物质的下沉(下降)。底辟作用影响了造山带中热量的分配,并造成了减压之后的快速冷却。考虑到片麻岩穹窿在不同时代和不同地质背景的造山带中的普遍存在,造山带地壳物质的底辟作用不仅引发了大陆地壳的部分熔融,并且在大陆地壳物质的热量、机械运动和化学演化等方面发挥了重要作用(Ramberg, 1981)。全球多个典型的片麻岩穹窿被认为是由底辟作用形成,如加拿大格林威尔省 Aguanish 片麻岩穹窿群(Gervais *et al.*, 2004)。

由于如下原因,片麻岩穹窿和变质核杂岩之间的区别被模糊和忽视:1)有些变质核杂岩本身就是穹窿(如,美国蒙大拿 Bitterroot complex;希腊 Naxos);2)有些变质核杂岩包含片麻岩穹窿,即片麻岩穹窿是变质核杂岩内部的组成部分(如,加拿大 Shuswap complex 和美国 Albion-Raft River-Grouse Creek complex)(图3);3)变质核杂岩的研究由于主要关注拆离断层的形成机制和中地壳岩石的剥露上,而忽略了变质

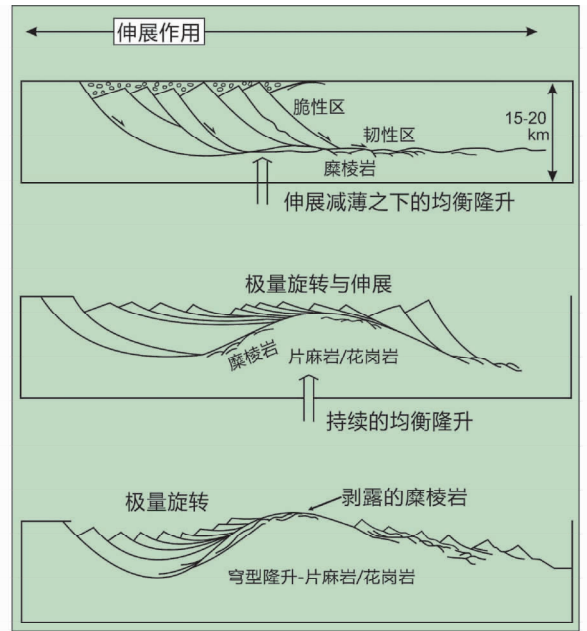


图3 核部为片麻岩穹窿的变质核杂岩构造图

Fig. 3 Model of metamorphic core complex cored by gneiss dome

核杂岩内部穹窿构造的产状和形成机制研究(Whitney *et al.*, 2004)。二者之间的联系在于,在等温减压和地壳减薄的过程中,地壳物质迅速剥离就会由片麻岩穹窿发展成变质核杂岩(Teyssier and Whitney, 2002),因此片麻岩穹窿是一个具有更广泛意义的穹窿状构造。

笔者认为,片麻岩穹窿形成过程反映了从深部的地壳流在挤压收缩背景上的上涌,侵位至地壳某一深度形成片麻岩穹窿时,穹窿顶部转化为最大的垂直挤压应力和最大的水平伸展应力,即片麻岩穹窿的形成经历了挤压到伸展背景的转换过程,典型的实例如法国比利牛斯山 Agly 片麻岩穹窿(图4)。

1.4 片麻岩穹窿形成的大地构造背景

前人研究表明,显生宙以来大量的片麻岩穹窿形成在大范围的碰撞造山带(Teyssier and Whitney, 2002),如北美科迪勒拉和阿帕拉契造山带,欧洲加里东造山带、华里西和阿尔卑斯造山带,喜马拉雅和南亚等造山带中。许多学者认为,片麻岩穹窿往往形成在碰撞造山后期折返的过程中。典型例子如与后碰撞造山的高温伸展有关的西班牙 Lugo-Castroverde 片麻岩穹窿。

位于西班牙北西的 Lugo-Castroverde 片麻岩穹窿,呈 190km 长和 50km 宽的椭圆形,是欧洲华里西碰撞造山后期形成的构造单元,为地壳折返导致的伸展作用产物。该地区的伸展构造包括大规模的伸展剪切带、后期演化的片麻岩穹窿和正断裂,这些折返构造叠置在早期由于碰撞造山收缩作用形成的 Mondonedo 大型推覆杂岩构造之上。此片麻岩穹

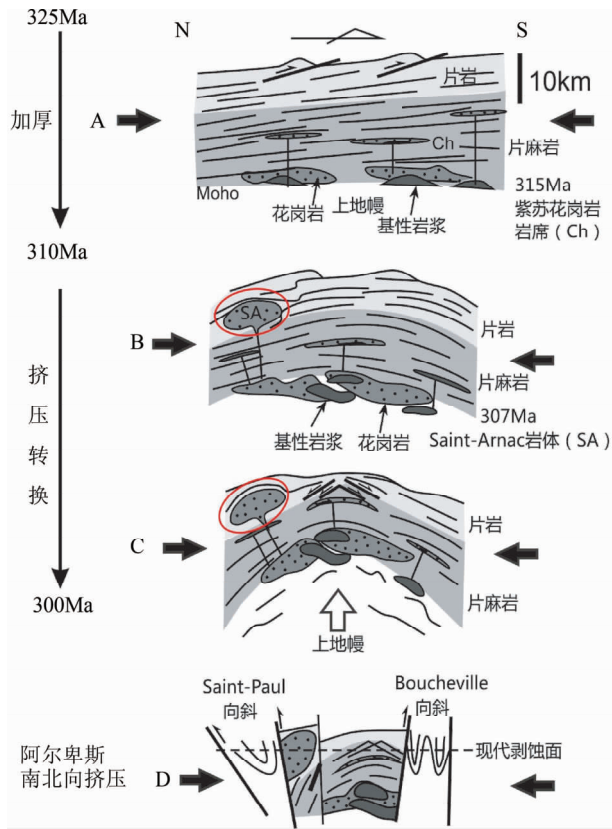


图4 法国 Agly 片麻岩穹窿在挤压转换构造背景下的形成模式(据 Olivier *et al.*, 2004)

Fig.4 Model of formation of the Agly gneiss dome in a transpressive regime (after Olivier *et al.*, 2004)

穹窿包括外来岩片和其下的原地地块,原地地块由新元古代-古生代变沉积岩组成;外来的 Mondonedo 推覆体由冈瓦纳基底、蛇绿岩和早奥陶世岛弧单元组成,它们遭受前华里西和早华里西期的俯冲作用,并且代表华里西碰撞标志——缝合带的异地地体(Arenas *et al.*, 2007; Martínez Catalán *et al.*, 2007; Sánchez Martíner *et al.*, 2007)。在华里西碰撞早期外来岩片中普遍产生推覆变形、Barrovia 变质及花岗岩侵入。在华里西碰撞后期的中-晚石炭世,造山地壳的厚度遭遇减薄和伸展的造山崩塌。整个 Mondonedo 推覆体在两条共轭伸展型剪切带之间向东运动,在石炭纪末期,两条共轭伸展型剪切带之间发育由若干混合岩化的次穹窿组成的 Lugo-Castroverde 穹窿。在 Lugo-Castroverde 穹窿的南面保留埋藏深处的幔部中-高级变质岩石,北面保留浅处的低级变质片岩和石英岩。在图 5b 中可以明显看到 Lugo-Castroverde 穹窿群切割早期形成的 Mondonedo 推覆体,与 Lugo-Castroverde 穹窿相伴生的韧性伸展型拆离剪切带叠置在 Mondonedo 推覆体的底部,在其前锋转换为出露在 Mondonedo 推覆体前锋的逆冲断裂(Mondonedo 推覆体前缘的基底逆冲断裂)。实际上,这条逆冲断裂是与晚期 Lugo-Castroverde 穹窿同时形成的(图 5)。大范围的低密度混合岩化和不均匀的花岗岩显

示了 190nT 的航磁异常幅度。

此外,还有与斜向碰撞和折返造山过程(走滑断裂)有关的片麻岩穹窿,典型例子为南喀喇昆仑 Shigar 片麻岩穹窿群。喜马拉雅西构造结的纳达克-科希斯坦岩浆弧北侧的主喀喇昆仑逆冲断裂(MKT)是喀喇昆仑地体的南界。在主喀喇昆仑逆冲断裂(MKT)北侧发育一条与 NW-SE 方向喀喇昆仑右行走滑断裂平行的 Shigar 走滑断裂。沿断裂东侧,发育包括 Mangol, Dassu, Ho Lungma, Askole-Panhma 和 Hemasil 在内的片麻岩穹窿群(Debon *et al.*, 1987; Lemanicier, 1996; Pêcher and Le Fort, 1999)(图 6),片麻岩穹窿群沿 Shigar 走滑断裂呈雁行状排列,组成以核部混合岩化、边部片麻岩为特征。穹窿群的形成与新近纪南北向缩短背景下导致的熔融中地壳的高温折返有关,受平行喀喇昆仑右行走滑断裂相关的垂直地壳流的控制,初始的底辟作用具有局限性(Mahéo *et al.*, 2004)(图 7),折返的后期是与 E-W 向褶皱的隆升与剥蚀有关,并造成中低温条件。这种南北向挤压来源于印度-亚洲板块碰撞和喀喇昆仑断裂体系的右行走滑的分量。

在图 2 中,中国大陆内部的大部分片麻岩穹窿没有标注其中,实际上,中国大陆的片麻岩穹窿(群)研究是很多的,早期研究往往没有记载在国际刊物上,以及没有统一运用“片麻岩穹窿”的概念,而被长期忽视。

根据中国大陆中生宙片麻岩穹窿(含变质核杂岩)研究成果(许志琴等,1992;张进江等,2011),我们发现,与碰撞造山折返过程有关的片麻岩穹窿有“北喜马拉雅拉轨岗日片麻岩穹窿群”(Chen *et al.*, 1990; 许志琴等,2007)、“松潘甘孜片麻岩穹窿群”(许志琴等,1992)和“桐柏-大别片麻岩穹窿群”(许志琴,1988;王国灿等,1996;崔建军等,2009)。此外,新发现一批与大洋岩石圈板片俯冲有关的俯冲-增生型片麻岩穹窿:如与始特提斯大洋板片俯冲有关的“秦岭片麻岩穹窿”,以及与俯冲和碰撞有关的“帕米尔空喀山片麻岩穹窿”和“冈底斯林芝片麻岩穹窿”等。

因此,笔者认为,在构造背景尺度上,片麻岩穹窿(群)可以发生在大陆边缘与大洋岩石圈板片俯冲相关的俯冲增生造山转变为折返造山的环境中,也可以发生在碰撞折返造山过程中,以及形成在“俯冲”和“碰撞”两者兼有的复合背景中。

1.5 片麻岩穹窿和地壳流动

形成片麻岩穹窿的地壳垂直流动是造山带和大陆演化中物质和热重新分配的一个重要因素。在世界范围内,片麻岩穹窿具有几何学、岩石学和构造学上的相似性,这种相似性已经超越了不同的构造背景和单元。在一个地区片麻岩穹窿通常不是孤立的,而是呈“穹窿群”展布。在造山带中,大多数的片麻岩穹窿,呈平行造山带的线状分布(如北美科迪勒拉和北喜马拉雅片麻岩穹窿群)。片麻岩穹窿平面上长宽比在 1:1 和 5:1 之间,以椭圆形为主。椭圆形片麻岩穹

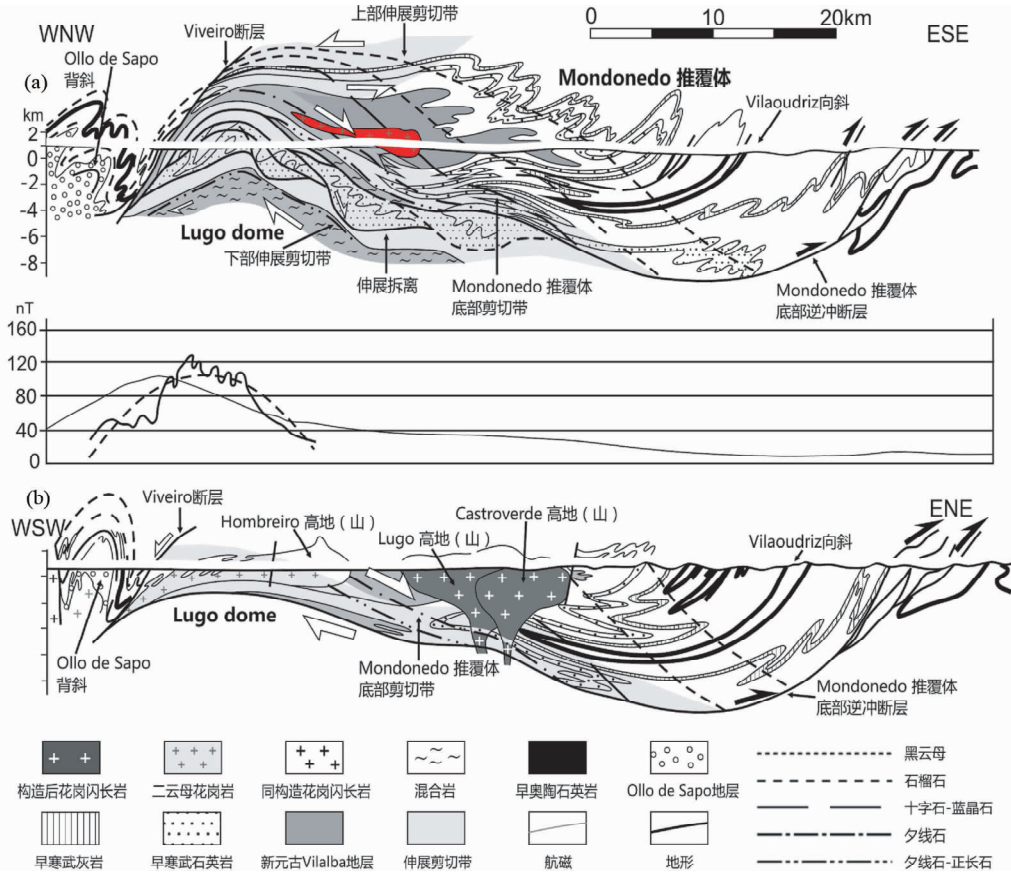


图5 西班牙 Lugo-Castroverde 穹窿的剖面(据 Ayarza *et al.*, 2007)

(a)北部剖面,显示华里西早期形成的两个单元: Mondonedo 推覆体和邻区 Ollo de Sapo 背形构造,和华里西晚期形成的 Lugo 片麻岩穹窿,伴随韧性拆离构造;(b)南部剖面,显示华里西晚期形成的埋藏深部的 Lugo 片麻岩穹窿已经抬升,以及 Lugo-Castroverde 花岗岩侵位

Fig. 5 Representative geological sections across the Lugo dome (after Ayarza *et al.*, 2007)

(a) the northern cross-section showing Mondonedo nappe, its autochthon and the Ollo de Sapo antiform, accompanied by the extensional detachment; (b) the southern cross-section, showing the exhumation of the burial Variscan Lugo gneiss dome and the intrusion of the Lugo Castroverde granite

穹窿普遍存在,说明片麻岩穹窿的形态和成因受造山过程中地壳流动力学(包括垂直与侧向流动的相对速率比)的控制(Whitney *et al.*, 2004)。

垂直地壳流动端元产生底辟构造,侧向流动端元产生区域性水平面理,而具有侧向和垂直分量的地壳流动可以造成物质的挤出(Ramsay and Huber, 1987; Beaumont *et al.*, 2001; Rey, 2001)。图8表示从垂直底辟流动到侧向的隧道流之间的不同样式,由于两者相对流动速率比值的不同而产生各种构造样式,显示了从垂直流动为主造成的底辟构造,垂直流动为主伴随侧向流动的层叠褶皱(Cascading folds)构造,侧向流动为主的攀叠褶皱(Climbing folds)构造,到侧向流动形成的“隧道流”构造。后两种构造样式已经不属于典型片麻岩穹窿的范畴。

2 中国大陆造山带中片麻岩穹窿典例

在前人研究基础上,笔者根据片麻岩穹窿所处的大地构

造背景,结合中国大陆的片麻岩穹窿研究成果,提出片麻岩穹窿形成的三类大地构造背景:(1)与大洋岩石圈板俯冲增生有关的岛弧岩浆上涌生成的片麻岩穹窿(群),典例为与始特提斯洋岩石圈板俯冲增生和折返造山有关的“秦岭地体片麻岩穹窿”;(2)与碰撞折返造山过程相关的片麻岩穹窿(群),典例为北喜马拉雅“拉轨岗日片麻岩穹窿群”和松潘-甘孜印支造山带中的“雅江片麻岩穹窿群”;(3)复合型片麻岩穹窿,即早期与大洋岩石圈板俯冲增生、后期与碰撞折返造山有关的片麻岩穹窿。如“帕米尔空喀山片麻岩穹窿”和“冈底斯林芝片麻岩穹窿”等。

2.1 俯冲型片麻岩穹窿

位于北中国陆块和南中国陆块之间的长条状秦岭地体,北侧为二郎坪早古生代缝合带,南侧为商丹早古生代缝合带,长600km,宽10~30km。片麻岩穹窿在秦岭地体的中部呈椭圆形展布,长宽之比为4:1。

秦岭地体中段是以二元结构为特征,上部为外来叠置岩

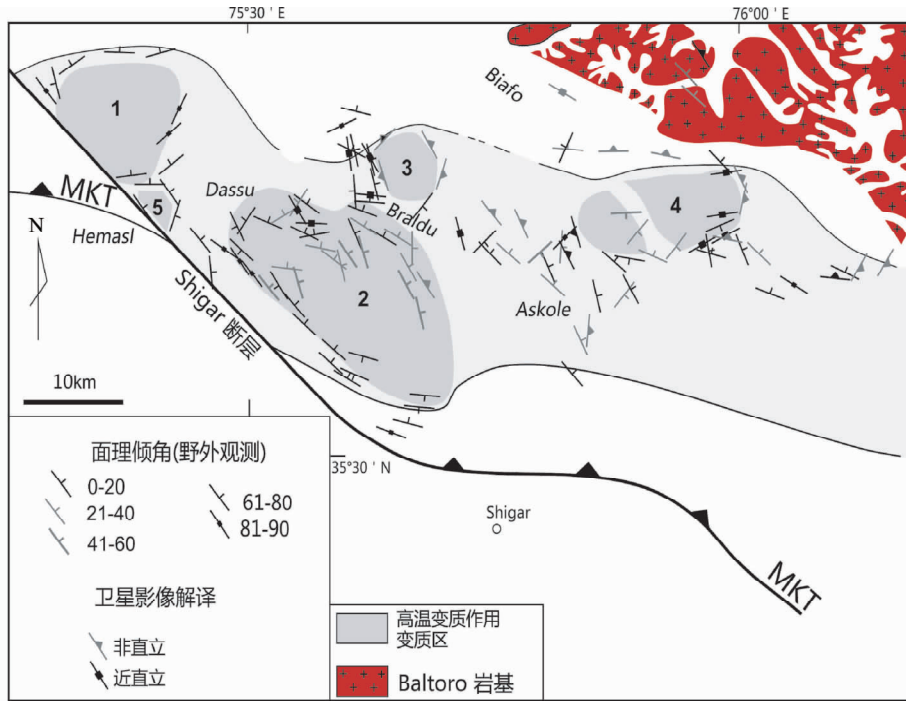


图6 与喀喇昆仑地体南部 Shigar 走滑断裂伴随的片麻岩穹窿群(据 Mahéo *et al.*, 2004)

1-Mangol 穹窿;2-Dassu 穹窿;3-Ho Lungma 穹窿;4-Askole-Panhma 穹窿;5-Hemasil 穹窿

Fig.6 The gneiss dome swarm distributed along the Shigar fault in the southern Karakorum terrane (after Mahéo *et al.*, 2004)

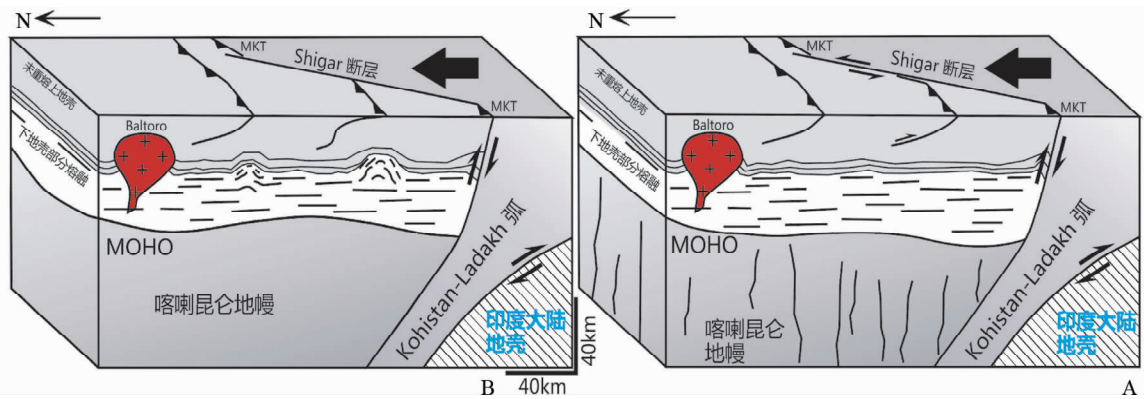


图7 南喀喇昆仑新近纪片麻岩穹窿的高温演化模式(据 Mahéo *et al.*, 2004)

(a) 由于地幔和地壳岩浆的热对流产生下地壳的热和局部熔融;(b) 局部熔融的下地壳的底辟上升

Fig.7 Model for the high-T evolution of the south Karakorum Neogene gneiss domes

(a) heating and partial melting of the lower crust, induced by heat advection from mantle and crustal magmas; (b) development of diapiric ascent of the partly melted lower crust

片,由超基性岩岩片、含超高压麻粒岩块体的角闪岩岩片和大理岩-角闪岩-片岩岩片组成,显示叠置岩片自北向南的推覆;下部为原地的秦岭群组成秦岭片麻岩穹窿。秦岭片麻岩穹窿包括三部分组成:3个大型的花岗岩体组成核部,伴随大量混合岩化(许志琴等,1988;张国伟等,1988;Xue *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2009),花岗岩年龄为499~421Ma(Wang *et al.*, 2009);花岗岩边部的花岗片麻岩,以及幔部的角闪岩-麻粒岩相的高级变质岩(You *et al.*, 1993;杨经绥等,

2002)(图9)。大量老的基底年龄(1.8~1.7Ga, 1.5~1.3Ga, 0.98~0.72Ga)记录在秦岭群中(Kröner *et al.*, 1993; You *et al.*, 1993; 张国伟等,2001; 杨经绥等,2002; Liu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011a, b; 本文)。

秦岭片麻岩穹窿中核部由无(或弱)组构的花岗岩组成,边部的花岗片麻岩具有面理和线理的变形组构;幔部高级变质岩由夕线石-石榴石-黑云母-斜长石矿物组合的巴罗型角闪岩相和 >920°C 和 8.4~10.2kbar 条件下形成的含蓝宝石

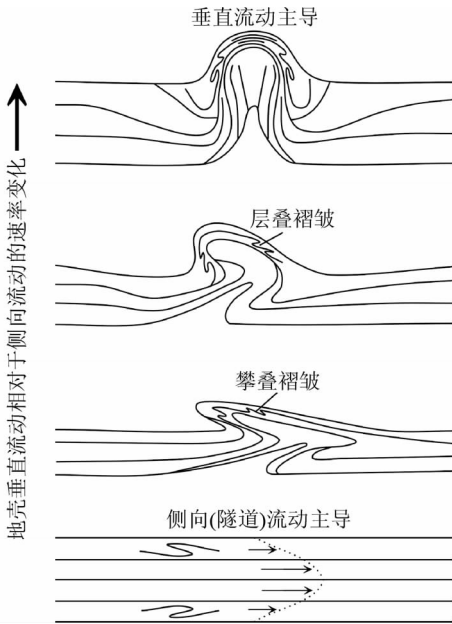


图8 地壳的垂直流动和水平流动产生的构造示意图, 根据地壳垂直和水平流动的函数比而形成的不同产出的构造样式(据 Whitney *et al.*, 2004)

Fig. 8 Schematic diagram showing a series of structures produced by vertical versus lateral crustal flow (after Whitney *et al.*, 2004)

的超高温麻粒岩相 (Xiang *et al.*, 2014) 变质岩系。变质的 U-Pb 年龄为 440 ~ 415Ma (Liu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011b; Xiang *et al.*, 2012, 2014), 代表麻粒岩相岩石的变质

作用时代。

秦岭片麻岩穹窿总体为穹型结构, 北侧面向北和南侧面向南呈中等-陡倾产出; 西侧向西和东侧向东呈缓倾的面理产状。由于若干个花岗岩岩体组成次穹窿结构, 并受到后期构造变动的影 响, 使片麻岩穹窿内部面理产状和褶皱构造十分复杂, 在片麻岩穹窿的腹部以发育轴面陡立的层叠褶皱为主。

秦岭片麻岩穹窿边部花岗片麻岩和高级变质岩中普遍发育近东西向拉伸线理, 由拉伸矽线石和角闪石矿物、析离体、长英质脉等组成, 显示物质西部向西和东部向东运动轨迹, 代表一种片麻岩穹窿形成的伸展背景。考虑到秦岭片麻岩穹窿的大量花岗岩体形成与南侧的商丹早古生代洋盆岩石圈板片向北俯冲有关, 笔者认为秦岭片麻岩穹窿的形态、结构和组构特征的形成受区域构造背景的南北向挤压和东西向伸展作用的控制。

2.2 碰撞型片麻岩穹窿群

2.2.1 松潘-甘孜造山带“雅江片麻岩穹窿群”

雅江片麻岩穹窿群是三叠纪末期昆仑地体、羌塘地体和扬子陆块碰撞的产物。在大规模印支期滑脱-逆冲收缩事件之后, 发生晚印支期至燕山期大量地壳重熔“S”型花岗岩侵位, 使冷地壳转变为热地壳, 出现以上升的深熔花岗岩体为中心的“热隆”构造(许志琴等, 1992)。实际上, 岩体边部为花岗片麻岩, 幔部为三叠纪变质的片岩, 属于片(麻)岩穹窿类型。

在松潘甘孜地体 NW-SE 向鲜水河左行走滑断裂的西南侧的雅江-道孚县之间, 发育长征、瓦多、甲基卡和容须卡等

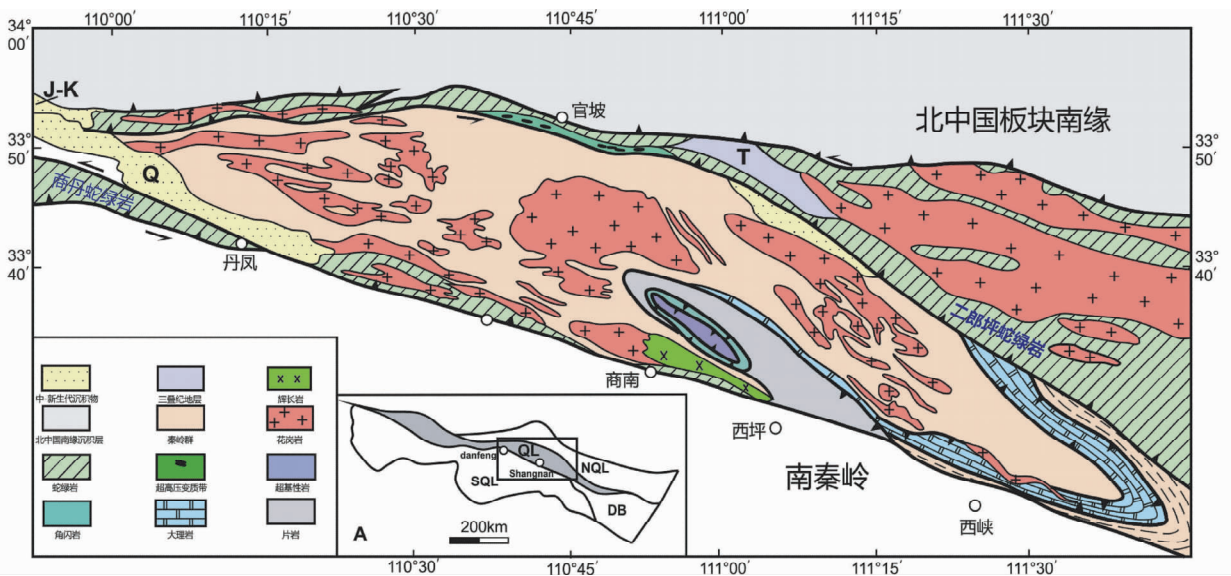


图9 秦岭早古生代造山带中秦岭中的片麻岩穹窿

Fig. 9 The gneiss domes in the Central Qinling belt of the Early Paleozoic Qinling orogen

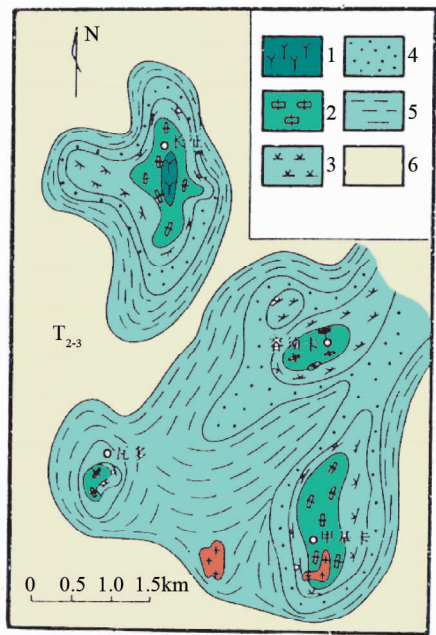


图 10 雅江地区三叠纪西康群中的片麻岩穹窿分布图
1-夕线石带;2-十字石带;3-红柱石带;4-石榴石带;5-黑云母带;
6-绢云母-绿泥石带

Fig. 10 The distribution of the gneiss domes of the Xikang Group in the Yajiang region

1-sillimanite; 2-staurolite; 3-andalusite; 4-garnet; 5-biotite; 6-sericite-chlorite

片(麻)岩穹窿群(图 10)。穹窿的几何形态是以近 N-S 向椭圆形为特征,长宽比为 2~2.5 : 1。穹窿的核部是以花岗岩类岩石为特征,发育面理组构的花岗片麻岩,幔部的围岩为区域三叠纪西康群复理石地层,其矿物组合为绿泥石 + 白(绢)云母 + 黑云母 + 石榴石 + 少量十字石,经历绿片岩相区域变质作用;在穹窿形成过程中,发生同构造软化的高温热变质作用,自里向外为夕线石变质带、十字石变质带、红柱石变质带、石榴石变质带、黑云母变质带和绢云母-绿泥石变质带。根据热温度计计算结果,估计夕线石 + 十字石-红柱石 + 石榴石 + 黑云母矿物组合形成温度为 $T = 550 \sim 650^{\circ}\text{C}$, $P = 4 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。后期由于小型花岗岩的侵入,在边部发生叠加热接触变质作用,主要形成矿物为堇青石 + 电气石 + 红柱石;最后阶段为退变质作用,为黑云母 + 白云母 + 绢云母 + 绿泥石组合,形成压力 $P = 3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和温度 $T = 450 \sim 500^{\circ}\text{C}$ (许志琴等,1992) (图 11)。

2.2.2 北喜马拉雅“拉轨岗日片麻岩穹窿群”

拉轨岗日片麻岩穹窿带(也称藏南变质核杂岩带或北喜马拉雅片麻岩穹窿带)呈东西向展布,分布于雅江蛇绿混杂带与北喜马拉雅坳陷带之间,其北部以萨迦逆冲断层与雅江蛇绿混杂岩带接触,南部以定日-岗巴逆冲断层与北喜马拉雅坳陷带接触,更南则以藏南拆离系与高喜马拉雅带分开。该片麻岩穹窿带内存在多个片麻岩穹窿,表现为由一系列核部发育花岗岩体的具有伸展构造性质的热穹窿(也叫热隆)组成的隆起带,该带自东向西分别出露也拉香波、康玛、

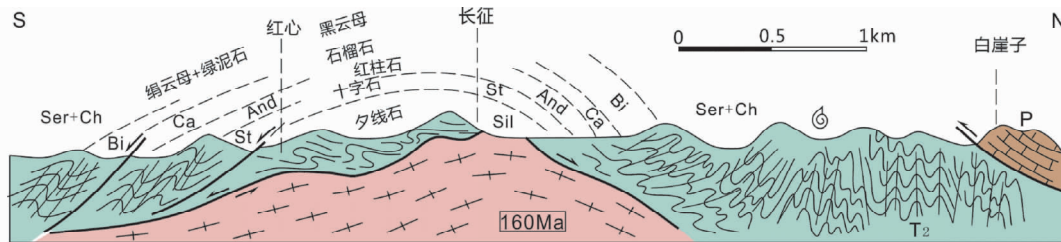


图 11 雅江地区长征片麻岩穹窿的构造剖面图

Fig. 11 The cross-section of the Changzheng gneiss dome in the Yajiang region

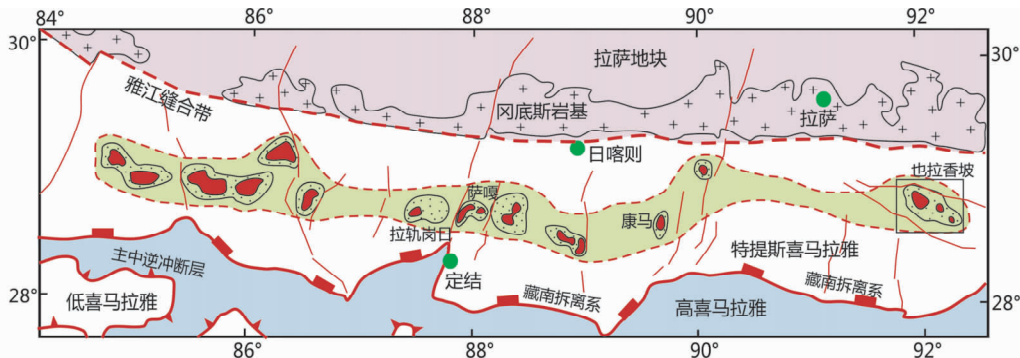


图 12 北喜马拉雅拉轨岗日片麻岩穹窿群分布图(据 Zeng *et al.*, 2011)

Fig. 12 Simplified geological map of the Himalayan orogenic belt, southern Tibet showing the Laguigangri gneiss dome swarm (after Zeng *et al.*, 2011)

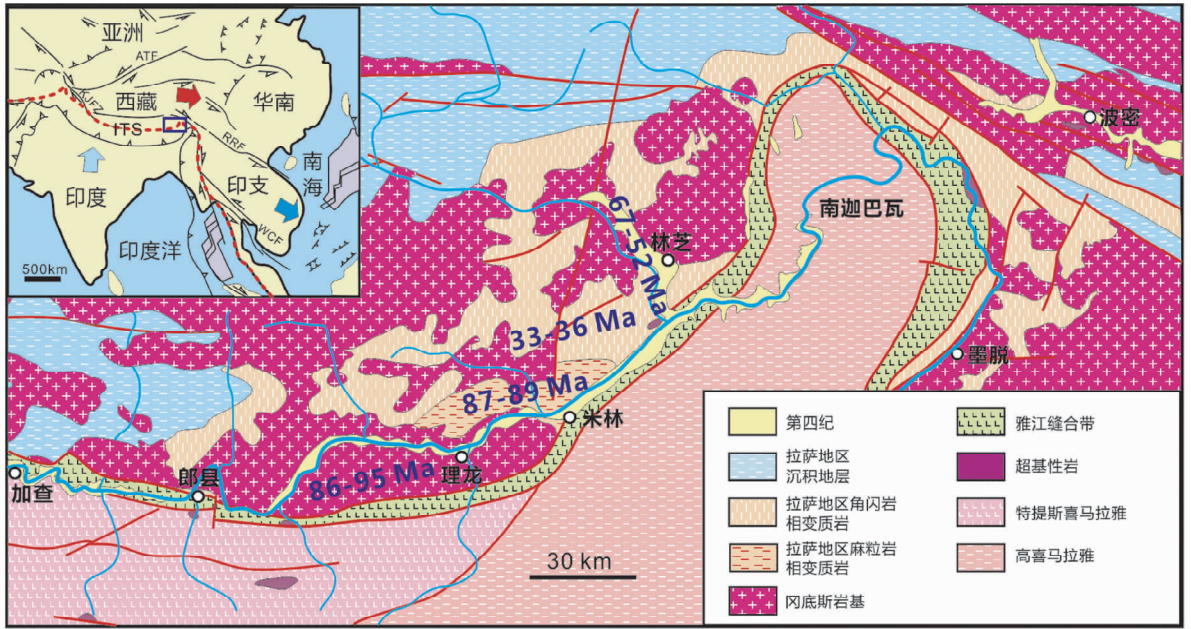


图 13 与新特提斯洋岩石圈板块俯冲和碰撞造山有关的林芝片麻岩穹窿 (据 Zhang *et al.*, 2010)

Fig. 13 Geological map of the Linzhi gneiss dome, it was formed by the combination of the subduction of the Neo-Tethys and the collisional orogeny processes (after Zhang *et al.*, 2010)

拉轨岗日、普弄抗日、阿马、马拉山等多个片麻岩穹窿 (张金阳等, 2003; Guo *et al.*, 2008; 高利娥等, 2011; 辜平阳等, 2013) (图 12)。此外, 拉轨岗日片麻岩穹窿核部多发育有淡色花岗岩体, 即为拉轨岗日淡色花岗岩带 (又称北喜马拉雅淡色花岗岩带) (张金阳等, 2003; 张进江等, 2011; Gao *et al.*, 2013)。在部分片麻岩穹窿核部出露有高 Sr/Y 比值的二云母花岗岩, 如也拉香波片麻岩穹窿 (Zeng *et al.*, 2011), 表明拉轨岗日片麻岩穹窿带穹窿核部有多期岩体侵位事件发生。

拉轨岗日片麻岩穹窿带内, 尽管各个穹窿在产出状态 and 出露规模上存在一定的差异, 但总体上显示相似的特征, 核部由高级变质岩和侵入其中的多期花岗岩组成, 边部为浅变质或未变质的特提斯沉积岩系, 核部和边部为韧性拆离断层接触 (高利娥等, 2011)。高级变质岩分布于穹窿核部, 由眼球状花岗片麻岩、石榴石黑云母花岗质片麻岩、含石榴石的泥质片麻岩、角闪岩、石榴角闪岩、石榴辉石岩、绿帘石岩, 含透辉石大理岩等组成, 新生代花岗岩侵入其中, 且普遍发育有混合岩化变质, 岩石变形强烈, 广泛发育有剪切流变褶皱 (袁晏明等, 2003; 高利娥等, 2011)。片麻岩核部花岗岩体近等轴状分布, 花岗岩体边缘片麻理发育。盖层明显地受多期岩浆侵入及其相关的热活动的影响, 发育次级拆离断层和脆性正断层, 拆离断层沿着能干性不同的岩性界面顺层发育, 以中等到低角度产出, 断层面在地表的倾角一般为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 带动核部变质杂岩上升, 导致其揭顶和剥露, 引起基底与盖层之间滑脱脱离 (辜平阳等, 2013)。盖层中变质地层之间变质程度存在明显的渐变过渡关系, 由内到外, 分别为片麻状、片状、千枚状和板状; 变质分带现象明显, 由内

到外可分为石榴子石带和绿泥石带等。变质带中石榴子石、黑云母、白云母和绿泥石中的某些元素 (如 Fe、Mg) 在剖面上呈规律性变化。拉轨岗日盖层变质带的变质温度由内而外逐渐降低 ($702 \sim 466^{\circ}\text{C}$), 表明以片麻岩和淡色花岗岩为主体的片麻岩穹窿核部可能是盖层变质岩形成的主要热源 (袁晏明等, 2003)。

少部分片麻岩穹窿的核部花岗岩 (或花岗片麻岩) 形成时代较老 ($566 \sim 507\text{Ma}$) (Lee *et al.*, 2000; Cawood *et al.*, 2007; Quigley *et al.*, 2008; 辜平阳等, 2013), 岩石地球化学显示其主要形成于碰撞造山的挤压环境向后碰撞造山的伸展背景转化阶段, 可能是泛非造山事件在北喜马拉雅的地质记录 (辜平阳等, 2013)。多数穹窿中的花岗岩为新生代花岗岩 ($44 \sim 10\text{Ma}$), 岩性以淡色花岗岩和二云母花岗岩为主 (Schärer *et al.*, 1986; Harrison *et al.*, 1997; 张金阳等, 2003; 张进江等, 2011; King *et al.*, 2011; Zeng *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2013)。 $44 \sim 43\text{Ma}$ 花岗岩的形成可能与喜马拉雅碰撞造山带的早期由于俯冲板块的回卷或断离导致的碰撞带上下盘同时发生的部分熔融有关 (高利娥等, 2011)。约 $35 \sim 15\text{Ma}$ 藏南拆离系发生伸展减薄, 引发大规模的淡色花岗岩的侵位, 继而底辟形成片麻岩穹窿, 代表了区域性的构造体制由挤压转为伸展, 此后的构造体制则由东西向的伸展所取代 (Guo *et al.*, 2008; 张进江等, 2011)。

2.3 俯冲 + 碰撞复合型片麻岩穹窿群

2.3.1 冈底斯林芝片麻岩穹窿

在东喜马拉雅构造结以西的拉萨地体一侧, 为冈底斯岩

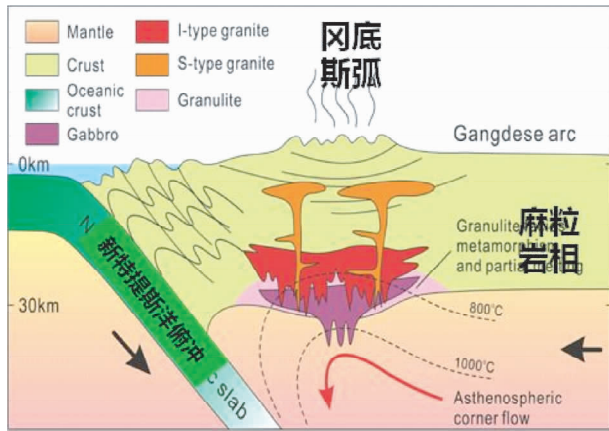


图 14 冈底斯东段与新特提斯洋俯冲有关的林芝片麻岩穹窿的形成模式(据 Zhang *et al.*, 2010)

Fig. 14 The genesis model of the Linzhi gneiss dome at the eastern segment of the Gangdese terrane related to Neo-Tethys oceanic subduction (after Zhang *et al.*, 2010)

浆带之东端的林芝地区,构成新特提斯俯冲带的上盘,下盘高喜马拉雅地体代表俯冲的印度陆块。冈底斯岩浆带由大量 120 ~ 20Ma 的花岗岩基组成,在林芝地区,核部花岗岩、边部花岗片麻岩以及周围幔部的中-高级变质岩石组成若干个次片麻岩穹窿(即片麻岩穹窿群)(图 13)。研究表明,林芝地区幔部变质岩主要经历了多期变质作用:早期的麻粒岩相事件(90Ma),中期麻粒岩相变质作用和部分熔融事件(67 ~ 52Ma),晚期的角闪岩相事件(36 ~ 33Ma)(Zhang *et al.*, 2010, 2013),可以确定前两期发生在中-下地壳的岩浆和变质作用与新特提斯雅鲁藏布大洋岩石圈板片的俯冲有关,后期变质事件是印度/亚洲碰撞折返的结果。片麻岩穹窿核部 90Ma 的紫苏花岗岩、65 ~ 56Ma 的 I 型花岗岩和 30Ma 的花岗岩构成复式岩体,表明由局部熔融造成的地壳流上升导致的花岗岩浆事件在俯冲和碰撞两个阶段有多期发生(图 14)。由此认为林芝片麻岩穹窿群为“俯冲 + 碰撞复合型”片麻岩穹窿群。

2.3.2 帕米尔空喀山片麻岩穹窿

大量片麻岩穹窿发育在喜马拉雅西构造结的帕米尔山脉,暴露在中帕米尔和南帕米尔地体中的大量的片麻岩穹窿的变质作用发生在渐新世-中新世(Schmidt *et al.*, 2011),Robinson *et al.* (2012)认为北帕米尔地体的空喀山片麻岩穹窿形成于早-中三叠世。

空喀山片麻岩穹窿位于北帕米尔地体的东北部,青藏高原甜水海-松潘甘孜地体的西部,片麻岩穹窿呈 NW-SE 向椭圆形展布,长宽之比为 4 : 1。空喀山片麻岩穹窿主要由核部的花岗闪长岩岩基、具有岩浆组构的边部花岗片麻岩和混合岩,以及幔部角闪岩-麻粒岩 Barrovian 相变质岩石组成(图 15)。空喀山片麻岩穹窿中的变质岩系经历峰期变质($P = 4.7 \sim 7.4$ kbar 和 $T = 686 \sim 730^\circ\text{C}$)和退变质作用($P = 2.6 \sim$

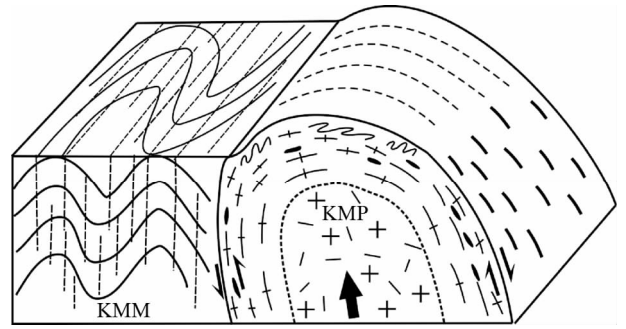


图 15 北东帕米尔空喀山片麻岩穹窿三维构造模式图

Fig. 15 3D tectonic model of the Kongur gneiss dome at the NE Pamir

5.1 kbar 和 $T = 555 \sim 631^\circ\text{C}$)过程,核部花岗闪长岩和幔部片麻岩的同位素年代学和锆石 Hf 同位素分析及 CL 图像资料表明,岩浆作用发生在 ca. 224 ~ 220 Ma,岩浆源主要来自中下地壳的再造。空喀山片麻岩穹窿经历了与古特提斯俯冲相关的岩浆作用和几乎同时的中-高级变质作用。来自空喀山西部的拆离断层上盘片岩石榴石中的独居石包体的定年为 230 ~ 200Ma,代表上盘石榴石生长和峰期变质发生的时代(Robinson *et al.*, 2004)。因此,我们提出空喀山花岗岩基与中-高级变质作用的形成具有同时性,在早三叠世时期,与金沙江洋盆岩石圈板片俯冲相关的活动陆缘的中-下地壳高温岩浆弧环境导致深层岩浆和变质事件的发生,在中下地壳形成以空喀山片麻岩穹窿为主体的古特提斯岩浆弧根;在晚三叠世-早侏罗世折返造山的伸展和减压的环境下,片麻岩穹窿弧根开始上升。

继后,在中新世 16Ma 开始,空喀山拆离系迅速启动,根据空喀山片麻岩穹窿顶部长英质片麻岩石榴石中的独居石包体的 Th-Pb 年龄为 9.3Ma, Ar-Ar 黑云母 6Ma 的冷却年龄(Robinson *et al.*, 2004);表明经历了与印度/亚洲碰撞在区域性的地壳加厚之后,位于中下地壳岩浆弧根的空喀山片麻岩穹窿快速上升,裸露地表,生成变质核杂岩构造。因此,空喀山片麻岩穹窿经历了金沙江古特提斯洋盆岩石圈板片向东(或北)俯冲产生的中下地壳岩浆弧根增生,和中新世以来印度/亚洲碰撞引起空喀山片麻岩穹窿快速上隆的变质核杂岩机制制约,是典型的“俯冲 + 碰撞”复合型片麻岩穹窿。

3 结语

片麻岩穹窿是在折返造山过程中形成的穹窿状构造,它的成因机制探索已经成为重塑各类造山过程的重要构造元素。片麻岩穹窿是以核部无(或弱)岩浆组构的花岗岩类和混合岩化岩石、边部具有岩浆组构的花岗片麻岩,幔部由来自地壳深部的高级片岩、片麻岩和其他类型变质岩为特征的“构造集合体”或“特殊构造单元”,是岩浆(含混合岩化)、变

质和变形共同作用的产物,是不同造山过程中某些阶段的重要标志。通过分析全球典型片麻岩穹窿的岩石组合、构造特征、形成机制和大地构造背景,结合对中国大陆片麻岩穹窿(群)特征的研究和归纳,发现中国大陆显生宙的片麻岩穹窿(群)从成因机制和构造背景上可以划分为“俯冲型”、“碰撞型”和“复合式”三种片麻岩穹窿(群)。“俯冲型”片麻岩穹窿(群)的形成与大洋岩石圈板片俯冲增生与继后折返造山相关,代表性例子如秦岭片麻岩穹窿;“碰撞型”片麻岩穹窿(群)的形成与碰撞折返造山有关,如北喜马拉雅拉轨岗日片麻岩穹窿(群)和松潘甘孜雅江片麻岩穹窿(群);“复合式”片麻岩穹窿(群)的形成与俯冲和碰撞的叠合作用有关,以东冈底斯林芝片麻岩穹窿(群)和帕米尔空喀山片麻岩穹窿为典型代表。东冈底斯林芝片麻岩穹窿代表来自下地壳同时发生的岩浆、变质和变形作用的记录,其最初的形成与雅鲁藏布江新特提斯大洋岩石圈板片向北俯冲到拉萨地体之下有关,并叠加了新特提斯洋关闭后陆-陆碰撞阶段的多期岩浆事件。林芝片麻岩穹窿的出露,表明该地区经历了大幅度的抬升,与新特提斯洋俯冲有关的弧岩浆的根部已经裸露。查明整个冈底斯地体中与俯冲增生和碰撞有关的片麻岩穹窿的形成背景,有利于认识冈底斯岩浆弧的形成和演化过程,并揭示不同类型、不同期次岩浆带与多金属矿集区的形成、分布、出露和保存情况的联系。

致谢 王勤教授对文稿进行认真审阅,并提出了宝贵修改意见;与张泽明研究员进行了有益的讨论;张森工程师为本文绘制部分图件;在此一并表示感谢。

References

- Amato JM, Wright JE, Gans PB and Miller EL. 1994. Magmatically induced metamorphism and deformation in the Kigluak gneiss dome, Seward Peninsula, Alaska. *Tectonics*, 13: 515–527
- Amato JM, Heizler MT, Bouillion AO, Sanders AE, Toro J, McLemore VT and Andronicos CL. 2011. Syntectonic 1.46Ga magmatism and rapid cooling of a gneiss dome in the southern Mazatzal Province: Burro Mountains, New Mexico. *GSA Bulletin*, 123: 1720–1744
- Andresen A, Augland LE, Boghdady GY, Lundmark AM, Elnady OM, Hassan MA and Abu El-Rus MA. 2010. Structural constraints on the evolution of the Meatiq Gneiss Dome (Egypt), East-African Orogen. *Journal of African Earth Sciences*, 57: 413–422
- Arenas R, Martínez Catalán JR, Sánchez Martínez S, Díaz García F, Abati J, Fernández-Suárez J, Andonagui P and Gómez-Barreiro J. 2007. Paleozoic ophiolites in the Variscan suture of Galicia (Northwest Spain): Distribution, characteristics and meaning. In: Hatcher Jr. RD, Carlson MP, McBride JH and Martínez Catalán JR (eds.). *Four-D Evolution of Continental Crust*. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 200: 425–444
- Arnold J, Sandiford M and Wetherley S. 1995. Metamorphic events in the eastern Arunta Inlier; Part 1, Metamorphic petrology. *Precambrian Research*, 71: 183–205
- Ayarza P and Martínez Catalán JR. 2007. Potential field constraints on the deep structure of the Lugo gneiss dome (NW Spain). *Tectonophysics*, 439: 67–87
- Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH and Lee B. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414: 738–742
- Buick IS and Holland TJB. 1989. The *P-T-t* path associated with crustal extension, Naxos, Cyclades, Greece. In: Daly JS, Cliff RA and Yardley BWD. (eds.). *Evolution of Metamorphic Belts*. Geological Society of London, Special Publication, 43: 365–369
- Burg JP, Guiraud M, Chen GM and Li GC. 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China). *Earth and Planetary Science Letters*, 69: 391–400
- Burg JP, Kaus BJP and Podladchikov YY. 2004. Dome structures in collision orogens: Mechanical investigation of the gravity/compression interplay. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 47–66
- Brown RL, Journeay JM, Lane LS, Murphy DC and Rees CJ. 1986. Obduction, back-folding and piggyback thrusting in the metamorphic hinterland of the southeastern Canadian Cordillera. *Journal of Structural Geology*, 8: 255–268
- Brun JP. 1980. The cluster-ridge pattern of mantled gneiss domes in eastern Finland; Evidence for large-scale gravitational instability in the Proterozoic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 47: 441–449
- Brun JP, Sokoutis D and Van Den Driessche J. 1994. Analogue modeling of detachment fault systems and core complexes. *Geology*, 22: 319–322
- Buck WR. 1991. Modes of continental lithospheric extension. *Journal of Geophysical Research*, 96: 20161–20178
- Calvert A, Gans PB and Amato JM. 1999. Diapiric ascent and cooling of a sillimanite gneiss dome revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology: The Kigluak Mountains, Seward Peninsula, Alaska. In: Ring U *et al.* (eds.). *Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow, and Erosion*. Geological Society of London, Special Publication, 154: 205–232
- Cawood PA, Johnson MRW and Nemchin AA. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 70–84
- Chardon D, Choukroune P and Jayananda M. 1998. Sinking of the Dharwar Basin (South India): Implications for Archean tectonics. *Precambrian Research*, 91: 15–39
- Chen Z, Liu Y, Hodges KV, Burchfiel BC, Royden LH and Deng C. 1990. The Kangmar dome: A metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet). *Science*, 250: 1552–1556
- Collins WJ, Van Kranendonk MJ and Teyssier C. 1998. Partial convective overturn of Archean crust in the East Pilbara Craton, western Australia: Driving mechanism and tectonic implications. *Journal of Structural Geology*, 20: 1405–1424
- Crowley JL, Brown RL and Parrish RR. 2001. Diachronous deformation and a strain gradient beneath the Selkirk Allochthon, northern Monashee complex, southeastern Canadian Cordillera. *Journal of Structural Geology*, 23: 1103–1121
- Cui JJ, Hu JM and Liu XC. 2009. Exhumation of high-pressure metamorphic terrane at the crustal levels in the Tongbai area, central China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2165–2176 (in Chinese with English abstract)
- Debon F, Le Fort P, Dautel D, Sonet J and Zimmermann JL. 1987. Granites of western Karakorum and northern Kohistan (Pakistan): A composite Mid-Cretaceous to Upper Cenozoic magmatism. *Lithos*, 20: 19–40
- Denèle Y, Olivier P, Gleizes G and Barbey P. 2009. Decoupling between the middle and upper crust during transpression-related lateral flow: Variscan evolution of the Aston gneiss dome (Pyrenees, France). *Tectonophysics*, 477: 244–261
- Duncan IJ. 1984. Structural evolution of the Thor-Odin gneiss dome. *Tectonophysics*, 101: 87–130
- Edwards MA, Kidd WSF and Schneider DA. 2002. A guide to dome improvement, Lesson 1: Is your dome built on granite or gneiss? *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 34(6): 109
- Escuder Viruete J, Indares A and Arenas R. 2000. *P-T* paths derived

- from garnet growth zoning in an extensional setting: An example from the Tormes Gneiss Dome (Iberian Massif, Spain). *Journal of Petrology*, 41: 1489 – 1515
- Eskola PE. 1949. The problem of mantled gneiss domes. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 104: 461 – 476
- Fayon AK, Whitney DL and Teyssier C. 2004. Exhumation of orogenic crust: Diapiric ascent versus low-angle normal faulting. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 129 – 139
- Fisher GW and Olsen SN. 2004. The Baltimore gneiss domes of the Maryland Piedmont. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 307 – 320
- Fletcher RC. 1972. Application of a mathematical model to the emplacement of mantled gneiss domes. *American Journal of Science*, 272: 197 – 216
- Fletcher RC and Hallet B. 2004. Initiation of gneiss domes by necking, density instability, and erosion. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 79 – 95
- Gao LE, Zeng LS and Xie KJ. 2011. Eocene high grade metamorphism and crustal anatexis in the North Himalaya Gneiss Domes, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 56: 3078 – 3090 (in Chinese)
- Gao LE, Zeng LS and Hou KJ. 2013. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan gneiss dome, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 58: 3546 – 3563
- Gervais F, Nadeau L and Malo M. 2004. Migmatitic structures and solid-state diapirism in orthogneiss domes, eastern Grenville Province, Canada. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 359 – 378
- Guo L, Zhang JJ and Zhang B. 2008. Structures, kinematics, thermochronology and tectonic evolution of the Ramba gneiss dome in the northern Himalaya. *Progress in Natural Science*, 18: 851 – 860
- Gu PY, He SP, Li RS, Wang C, Shi C, Dong ZC, Wu JL and Wang Y. 2013. Geochemical features and tectonic significance of granitic gneiss of Laguingangri metamorphic core complexes in southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (3): 756 – 768 (in Chinese with English abstract)
- Harrison TM, Oscar ML and Marty G. 1997. New insight into the origin of two contrasting Himalayan granite belts. *Geology*, 25: 899 – 902
- Jolivet L, Famin V, Mehl C, Parra T, Aubourg C, Hébert R and Philippot P. 2004. Strain localization during crustal-scale boudinage to form extensional metamorphic domes in the Aegean Sea. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 185 – 210
- King J, Harris N and Argles T. 2011. The contribution of crustal anatexis to the tectonic evolution of Indian crust beneath southern Tibet. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 123: 218 – 239
- Kröner A, Zhang GW and Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. *Tectonics*, 12(1): 245 – 255
- Lagarde JL, Dallain C, Ledru P and Courrioux G. 1994. Strain pattern within the Variscan granite dome of Velay, French Massif Central. *Journal of Structural Geology*, 16: 839 – 852
- Ledru P, Courrioux G, Dallain C, Lardeaux JM, Montel JM, Vanderhaeghe O and Vitel G. 2001. The Velay dome (French Massif Central): Melt generation and granite emplacement during orogenic evolution. *Tectonophysics*, 342: 207 – 237
- Lee J, Hacker BR, Dinklage WS, Wang Y, Gans P, Calvert A, Wan J, Chen W, Blythe AE and McLelland W. 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints. *Tectonics*, 19: 872 – 895
- Lee J, Hacker B and Wang Y. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: Structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet. *Journal of Structural Geology*, 26: 2297 – 2316
- Lemennicier Y. 1996. Le complexe métamorphique du Sud Karakorum dans le secteur de Chogo Lungma (Balistan-Nord Karakorum)-Etude structurale, métamorphique, géochimique et radiochronologique. Ph.D. Dissertation. Grenoble, Université Joseph Fourier, 1 – 171
- Lister GS and Davis GA. 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA. *Journal of Structural Geology*, 11: 65 – 94
- Liu XC, Jahn BM, Hu J, Li SZ, Liu X and Song B. 2011. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbei orogen, central China: Implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision. *Journal of Metamorphic Geology*, 29: 979 – 1002
- Mahéo G, Pêcher A, Guillot S, Rolland Y and Delacourt C. 2004. Exhumation of Neogene gneiss domes between oblique crustal boundaries in south Karakorum (northwest Himalaya, Pakistan). *Geological Society of America Special Paper*, 380: 141 – 154
- Martínez Catalán JR, Arenas R, Díaz García F, Gómez-Barreiro J, González Cuadra P, Abati J, Castiñeiras P, Fernández-Suárez J, Sánchez Martínez S, Andonaegui P, González Clavijo E, Díez Montes A, Rubio Pascual FJ and Valle Aguado B. 2007. Space and time in the tectonic evolution of the northwestern Iberian Massif: Implications for the comprehension of the Variscan belt. In: Hatcher Jr. RD, Carlson MP, McBride JH and Martínez Catalán JR (eds.). *Four-D Evolution of Continental Crust*. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 200: 403 – 423
- Norlander BN, Whitney DL, Teyssier C and Vanderhaeghe O. 2002. Partial melting and decompression of the Thor-Odin dome, Shuswap metamorphic core complex, Canadian Cordillera. *Lithos*, 61: 103 – 125
- Olivier Ph, Gleizes G and Paquette JL. 2004. Gneiss domes and granite emplacement in an obliquely convergent regime: New interpretation of the Variscan Agly Massif (Eastern Pyrenees, France). *Geological Society of America Special Paper*, 380: 1 – 14
- Paterson SR, Fowler Jr. TK, Schmidt KL, Yoshinobu AS, Yuan ES and Miller RB. 1998. Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos*, 44: 53 – 82
- Pêcher A and Le Fort P. 1999. Late Miocene tectonic evolution of the Karakoram-Nanga Parbat contact zone (northern Pakistan). In: Macfarlane A, Sorkhabi RB and Quade J (eds.). *Himalaya and Tibet: Mountain Roots to Mountain Tops*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper, 328: 145 – 158
- Quigley MC, Yu LJ and Gregory C. 2008. U-Pb SHRIMP zircon geochronology and *T-t-d* history of the Kampa Dome, southern Tibet. *Tectonophysics*, 446: 97 – 113
- Ramberg H. 1981. Gravity, Deformation, and the Earth's Crust: In Theory, Experiments, and Geological Application. New York: Academic Press, 1 – 452
- Ramsay JG and Huber MI. 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology; Volume 2: Folds and Fractures*. London: Academic Press, 1 – 462
- Reesor JE and Moore JM. 1971. Thor-Odin dome, Shuswap metamorphic complex, British Columbia. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 195: 146
- Rey P. 2001. From continental thickening and divergent collapse to active continental rifting. In: Miller JA *et al.* (eds.). *Continental Reactivation and Reworking*. Geological Society of London, Special Publication, 184: 77 – 88
- Robinson AC, Yin A, Manning CE, Harrison TM, Zhang SH and Wang XF. 2004. Tectonic evolution of the northeastern Pamir: Constraints from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, western China. *GSA Bulletin*, 116: 953 – 973
- Robinson AC, Ducea M and Lapen TJ. 2012. Detrital zircon and isotopic constraints on the crustal architecture and tectonic evolution of the northeastern Pamir. *Tectonics*, 31: TC2016
- Rolland Y, Mahéo G, Guillot S and Pêcher A. 2001. Tectono-metamorphic evolution of the Karakorum Metamorphic complex (Dassu-Askole area, NE Pakistan): Exhumation of mid-crustal HT-MP gneisses in a convergent context. *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 717 – 737
- Sánchez Martínez S, Arenas R, Díaz García F, Martínez Catalán JR, Gómez-Barreiro J and Pearce JA. 2007. The Careón Ophiolite, NW Spain: Supra-subduction zone setting for the youngest Rhoic Ocean

- floor. *Geology*, 35: 53–56
- Schärer U, Xu R and Allegre C. 1986. U-(Th)-Pb systematics and ages of Himalayan leucogranites, South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 77: 35–48
- Schmidt J, Hacker BR, Ratschbacher L, Stubner K, Stearns M, Kylander-Clark A, Cottle JM, Alexander A, Webb G, Gehrels G and Minaev V. 2011. Cenozoic deep crust in the Pamir. *Earth and Planetary Science Letters*, 312: 411–421
- Schneider DA, Holm DK, O'Boyle C, Hamilton M and Jercinovic M. 2004. Paleoproterozoic development of a gneiss dome corridor in the southern Lake Superior region, USA. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 339–357
- Siddow CS, Richard SM, Fanning CM and Luyendyk BP. 2004. Origin and emplacement of a Middle Cretaceous gneiss dome, Fosdick Mountains, West Antarctica. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 267–294
- Soula JC. 1982. Characteristics and mode of emplacement of gneiss domes and plutonic domes in central-eastern Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 4: 313–342
- Spear FS, Kohn MJ, Cheney JT and Florence F. 2002. Metamorphic, thermal, and tectonic evolution of central New England. *Journal of Petrology*, 43: 2097–2120
- Stipska P, Schulmann K and Hock V. 2000. Complex metamorphic zonation of the Thaya dome; Result of buckling and gravitational collapse of an imbricated nappe sequence. In: Cosgrove JW and Ameen MS (eds.). *Forced Folds and Fractures*. Geological Society of London, Special Publication, 169: 197–211
- Stübner K, Ratschbacher L and Weise C. 2013. The giant Shakhhdara migmatitic gneiss dome, Pamir, India-Asia collision zone: 2. Timing of dome formation. *Tectonics*, 32: 1404–1431
- Teyssier C and Whitney D. 2002. Gneiss domes and orogeny. *Geology*, 30: 1139–1142
- Tinkham DK and Marshak S. 2004. Precambrian dome-and-keel structure in the Penokean orogenic belt of northern Michigan, USA. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 321–338
- Tirel C, Brun JP and Burov E. 2004. Thermomechanical modeling of extensional gneiss domes. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 67–78
- Vanderhaeghe O, Teyssier C and Wysoczanski R. 1999. Structural and geochronological constraints on the role of partial melting during the formation of the Shuswap metamorphic core complex at the latitude of the Thor-Odin Dome, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36: 917–943
- Vanderhaeghe O. 2004. Structural development of the Naxos migmatite dome. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 211–227
- Vernon RH. 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. *Electronic Geosciences*, 5: 2
- Wang GC and Sang LK. 1996. A gigantic A-type antiform and its tectonic setting in Tongbai gneiss complex, eastern Tongbai orogeny, central China. *Earth Science*, 21(3): 291–294 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Wu YB, Gao S, Liu XC, Gong HJ, Li QL, Li XH and Yuan HL. 2011a. Eclogite origin and timing in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 29: 1019–1031
- Wang H, Wu YB, Gao S, Zhang HF, Liu XC, Gong HJ, Peng M, Wang J and Yuan HL. 2011b. Silurian granulite-facies metamorphism, and coeval metamorphism and crustal growth in Tongbai orogen, central China. *Lithos*, 125: 249–271
- Wang T, Wang XX, Tian W, Zhang CL, Li WP and Li S. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time; Implications for orogenic processes in the orogens of central China. *Science in China (Series D)*, 52: 1359–1384
- Whitney DL, Teyssier C and Vanderhaeghe OV. 2004. Gneiss domes and crustal flow. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 1–20
- Xiang H, Zhang L, Zhong ZQ, Santosh M, Zhou HW, Zhang HF, Zheng JP and Zheng S. 2012. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise *P/T* path of Paleozoic granulites from North Qinling-Tongbai orogen, central China. *Condwana Research*, 21: 559–576
- Xiang H, Zhong ZQ, Li Y, Qi M, Zhou HW, Zhang L, Zhang ZM and Santosh M. 2014. Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U-Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism. *Lithos*, 208: 446–461
- Xu ZQ. 1988. The Formation of Eastern Qinling Orogen-Deformation, Evolution and Dynamics. Beijing: China Environmental Science Press, 1–193 (in Chinese)
- Xu ZQ, Hou LW, Wang ZX *et al.* 1992. The Orogeny of the Chinese Songpan-Ganze Orogen. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Zhang JX and Wu CL. 2007. The Orogeny Tibetan Plateau: The Accretion, Collision and Exhumation of Terranes. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xue F, Kroner A, Reischmann T and Lerch F. 1996. Paleozoic pre- and post-collision calcalkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, Central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks. *Journal of the Geological Society*, 153: 409–417
- Yang JS, Xu ZQ, Pei XZ, Shi RD, Wu CL, Zhang JX, Li HB, Meng FC and Rong H. 2002. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze plates. *Acta Petrologica Sinica*, 76(4): 484–495 (in Chinese with English abstract)
- Yin A. 2004. Gneiss domes and gneiss dome systems. *Geological Society of America Special Paper*, 380: 1–14
- You ZD, Han YJ, Suo ST, Chen NS and Zhong ZQ. 1993. Metamorphic history and tectonic evolution of the Qinling Complex, eastern Qinling Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 549–560
- Yuan YM, Li DW, Zhang XH, Lu L and Li QL. 2003. Characteristics and geological meaning of metamorphic zonation of top Laguigangri metamorphic core complex, Tibet. *Earth Science*, 28(6): 690–694 (in Chinese with English abstract)
- Zeng LS, Gao LE, Xie KJ and Zeng JL. 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan gneiss domes: Melting thickened lower continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 303: 251–266
- Zhang GW *et al.* 1988. Formation and Evolution of the Qinling Mountains. Xi'an: Northwest University Press, 1–192 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang BR and Yuan XC. 2001. The Qinling Orogeny and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese)
- Zhang JJ, Yang XY, Qi GW and Wang DC. 2011. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system (STDS) and Northern Himalaya gneiss domes (NHGD). *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535–3544 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JY, Liao QA, Li DW, Zhang XH and Yuan YM. 2003. Laguigangri leucogranites and its relation with Laguigangri metamorphic core complex in Sajia, South Tibet. *Earth Sciences*, 28(6): 695–701 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Zhao GC, Santosh M, Wang JL, Dong X and Shen K. 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction? *Gondwana Research*, 17: 615–631
- Zhang ZM, Dong X, Xiang H, Liou JG and Santosh M. 2013. Building of the deep Gangdese arc, South Tibet: Paleocene plutonism and granulite-facies metamorphism. *Journal of Petrology*, 54: 2547–2580

附中文参考文献

崔建军, 胡健民, 刘晓春. 2009. 桐柏地区高压变质地体在地壳中的抬

- 升机制. 岩石学报, 25(9): 2165 - 2176
- 高利娥, 曾令森, 谢克家. 2011. 北喜马拉雅片麻岩穹窿始新世高级变质和深熔作用的厘定. 科学通报, 56: 3078 - 3090
- 辜平阳, 何世平, 李荣社等. 2013. 藏南拉轨岗日变质核杂岩核部花岗岩片麻岩的地球化学特征及构造意义. 岩石学报, 29(3): 756 - 768
- 王国灿, 桑隆康. 1996. 桐柏造山带东段结晶基底杂岩中的大型 A 型背形及其构造背景. 地球科学, 21(3): 291 - 294
- 许志琴. 1988. 东秦岭复合山链的形成——变形、演化及板块动力学. 北京: 中国环境科学出版社, 1 - 193
- 许志琴, 候立玮, 王宗秀等. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 吴才来等. 2007. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制. 北京: 地质出版社
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 史仁灯, 吴才来, 张建新, 李海兵, 孟繁聪, 戎合. 2002. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76(4): 484 - 495
- 袁晏明, 李德威, 张雄华等. 2003. 西藏拉轨岗日核杂岩盖层变质分带特征及其地质意义. 地球科学, 28: 690 - 694
- 张国伟等. 1988. 秦岭造山带形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1 - 192
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1 - 855
- 张金阳, 廖群安, 李德威等. 2003. 藏南萨迦拉轨岗日淡色花岗岩特征及与变质核杂岩的关系. 地球科学, 28: 675 - 701
- 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 王德朝. 2011. 馬拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系-北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用. 岩石学报, 27: 3535 - 3544