

引用格式: 王根厚, 李典, 梁晓, 等, 2022. 造山带双层结构的厘定及意义 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 705–727. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222814](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222814)

Citation: WANG G H, LI D, LIANG X, et al., 2022. Determination of the double-layer structure in orogenic belts and its geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 705–727. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222814](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222814)

造山带双层结构的厘定及意义

王根厚¹, 李典², 梁晓¹, 唐宇¹

WANG Genhou¹, LI Dian², LIANG Xiao¹, TANG Yu¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

Determination of the double-layer structure in orogenic belts and its geological significance

Abstract: At present, the study of accretionary orogenic belts and collisional orogenic belts has achieved numerous insights and improvements. However, continental subduction, which often occurs during the oceanic and continental transition, has not received enough attention for a long time, such as what kind of structural deformation characteristics it has and how it affects the evolution of the orogenic belt. This paper studied two Cenozoic orogenic belts (the Taiwan orogenic belt and the Yarlung Zangbo River orogenic belt) and one Mesozoic orogenic belt (the Qiangtang orogenic belt) in order to clarify the unique structural deformation characteristics of continental subduction and its interaction with orogenic processes. It is found that the subduction of continental crust often forms a double-layer structure in the orogenic belt. The upper part is a set of thrust imbricate composed of Smith strata, and the lower part is a set of subduction complexes with a “blocks in the matrix” structure. The upper and lower parts of the double-layer structure are similar, mainly slope facies–submarine fan facies rocks and little shelf facies rocks. Due to the similar deformation time, the double-layer structure should be a structural system formed in different depths by the subduction of the same passive continental margin. We suppose that the subduction of the slope–submarine fan is the main factor for the formation of the double-layer structure. The subsequent continental shelf subduction could induce the collision and thus lead to strain’s gradual propagation to the craton’s interior, resulting in the foreland fold-thrust. Also, the double-layer structure is often destroyed during the collision, so the deeply underplated continental subduction complex can be exhumed to the shallow level. Therefore, this study also emphasizes the importance of continental subduction and the exhumation of subducted crustal rocks in the evolution of orogenic belts.

Keywords: double-layer structure; orogens; continental subduction; Qiangtang orogenic belt; Yarlung Zangbo River orogenic belt; Taiwan orogenic belt

摘要: 当前, 增生型造山带和碰撞型造山带的研究均取得了丰富的成果和创新性认识。二者过渡期间常常发生陆壳俯冲。然而, 该俯冲具有什么样的构造变形特点, 并如何影响造山带演化过程, 长期未受到足够的关注。基于此, 文中选择曾发生了陆壳俯冲的两个新生代时期的造山带(中国台湾造山带和雅鲁藏布江造山带)和一个中生代时期的造山带(羌塘造山带)开展研究, 以期阐明陆壳俯冲的独特构造变形特征以及和造山过程的交互作用。研究发现, 陆壳俯冲常常在造山带形成双层结构, 上部为一套由史密斯地层组成的逆冲叠瓦扇构造体系, 下部为一套具“岩块–基质”结构特征的俯冲杂岩。双层结构的

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172259)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42172259)

第一作者简介: 王根厚(1968—), 男, 博士生导师, 教授, 从事构造地质学和区域构造地质研究。E-mail: wgh@cugb.edu.cn

收稿日期: 2022-06-25; 修回日期: 2022-08-10; 责任编辑: 范二平

上下部分物质组成相似,均以斜坡相-海底扇相沉积为主,也有陆棚相沉积。因此,由于构造变形时间相近,双层结构应是由同一套被动陆缘物质俯冲形成的深浅不同的构造体系。研究认为,在陆壳俯冲过程中,早期的斜坡-海底扇俯冲是形成双层结构的主要因素。后续陆棚俯冲则对碰撞作用的发生起到了主导作用,从而使应变逐渐向克拉通内部扩展,形成前陆褶皱-冲断带。随着碰撞作用的持续,双层结构常常遭到构造破坏,深部的俯冲杂岩因此得以剥露至浅表。因此,文章的研究强调了陆壳俯冲和深俯冲物质的折返在造山带演化中的重要意义。

关键词: 双层结构; 造山带; 陆缘俯冲; 羌塘造山带; 雅鲁藏布江造山带; 中国台湾造山带

中图分类号: P542 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 05-0705-23

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222814

0 引言

造山带可分为增生造山带和碰撞造山带两种类型 (Dewey, 1980; von Huene and Scholl, 1991; Ernst, 2010; Kusky et al., 2013)。增生造山带主要由大洋板块和大陆板块之间的汇聚作用形成。在大洋板块向大陆板块发生缓慢而复杂的俯冲过程中,部分洋板块之上物质,如海山、洋内岛弧、微陆块、大洋沉积物等将俯冲到地幔深部,剩下的则被刮削并堆积在弧前区域从而形成增生楔 (王根厚等, 2009)。碰撞造山带多形成于洋壳俯冲消减完毕后,两侧大陆或岛弧-大陆的持续汇聚作用 (Zheng et al., 2013)。汇聚导致巨大的挤压应力,可导致位于造山带核心的混杂岩发生强烈变形,并向克拉通内部扩展形成前陆褶皱-冲断带和前陆盆地 (Hessami et al., 2001)。

然而,大量地质证据也表明,在绝大部分造山带中,大陆碰撞作用之前,陆壳均曾发生俯冲,部分可达 150 km 的深度 (Chopin, 1984; Smith, 1984; Wang et al., 1989; Dewey et al., 1993)。陆壳俯冲以及深俯冲陆壳物质的折返常被认为对较多碰撞造山带的演化起到了非常重要的作用 (Chopin, 1984; Dewey et al., 1993; Matte et al., 1997)。

当陆壳进入俯冲带,会发生什么样的构造变形,并将如何影响造山过程,目前还很少被关注。理论上,陆壳俯冲发生时,两侧陆块已经相互接触,应属初始碰撞的范畴。但此时深部大洋板块仍在继续俯冲,并拖拽着陆壳加入俯冲带。因此,陆壳俯冲实际上代表着俯冲-碰撞过渡阶段,应兼具大洋俯冲和大陆碰撞的造山作用特点。此外,可以预期的是,在陆壳俯冲过程中,被动陆缘的结构对造山作用也应具有较大的影响。例如,陆缘的斜坡-海底扇部分,厚度较薄,将主要以俯冲作用为主;而

陆棚部分,也就是大陆架的部分,由于厚度较大,与深部基底耦合性较强,其俯冲将很可能阻塞俯冲通道,从而发生成熟的碰撞作用。因此,陆壳俯冲应具有复杂的构造演化过程,对其开展深入研究,有助于深入解剖造山作用过程,深化对古今造山带的理解。

综上所述,由于目前关于造山带构造变形过程的研究主要集中于大洋俯冲增生和大陆碰撞两个端元,俯冲-碰撞过渡期间的构造变形特点、演化过程以及控制因素还较少被探讨。因此,文中选择两个年轻的陆缘俯冲造山带(中国台湾造山带和雅鲁藏布江造山带)和一个较古老的陆缘俯冲造山带(羌塘造山带)来开展研究,以期洞察陆壳俯冲的构造变形过程以及与造山作用之间的相互关系。

1 造山带实例

文章目标是解析造山带中被动陆缘俯冲阶段的构造变形过程。因此,理想的研究对象是那些明确发生过被动陆缘俯冲的造山带。此外,为得到更为客观的规律性认识,所研究的造山带的形成时代最好有一定的跨度。羌塘造山带是西藏中部的晚三叠世古特斯造山带,近年来的研究表明该造山带存在陆壳俯冲的证据。雅鲁藏布江造山带和中国台湾造山带均是公认的发生过陆壳俯冲的造山带,前者发生在约 65 Ma,后者发生在约 6.5 Ma。因此,文中选择上述三个造山带开展实例研究,总结陆壳俯冲的构造过程及特点。

1.1 羌塘造山带

西藏羌塘地体,北以金沙江缝合带与昆仑地体相邻,南以班公湖-怒江缝合带与拉萨地体相接。近东西向展布的龙木错-双湖缝合带将羌塘地体分隔为北羌塘和南羌塘(图 1)。羌塘造山带主要位于

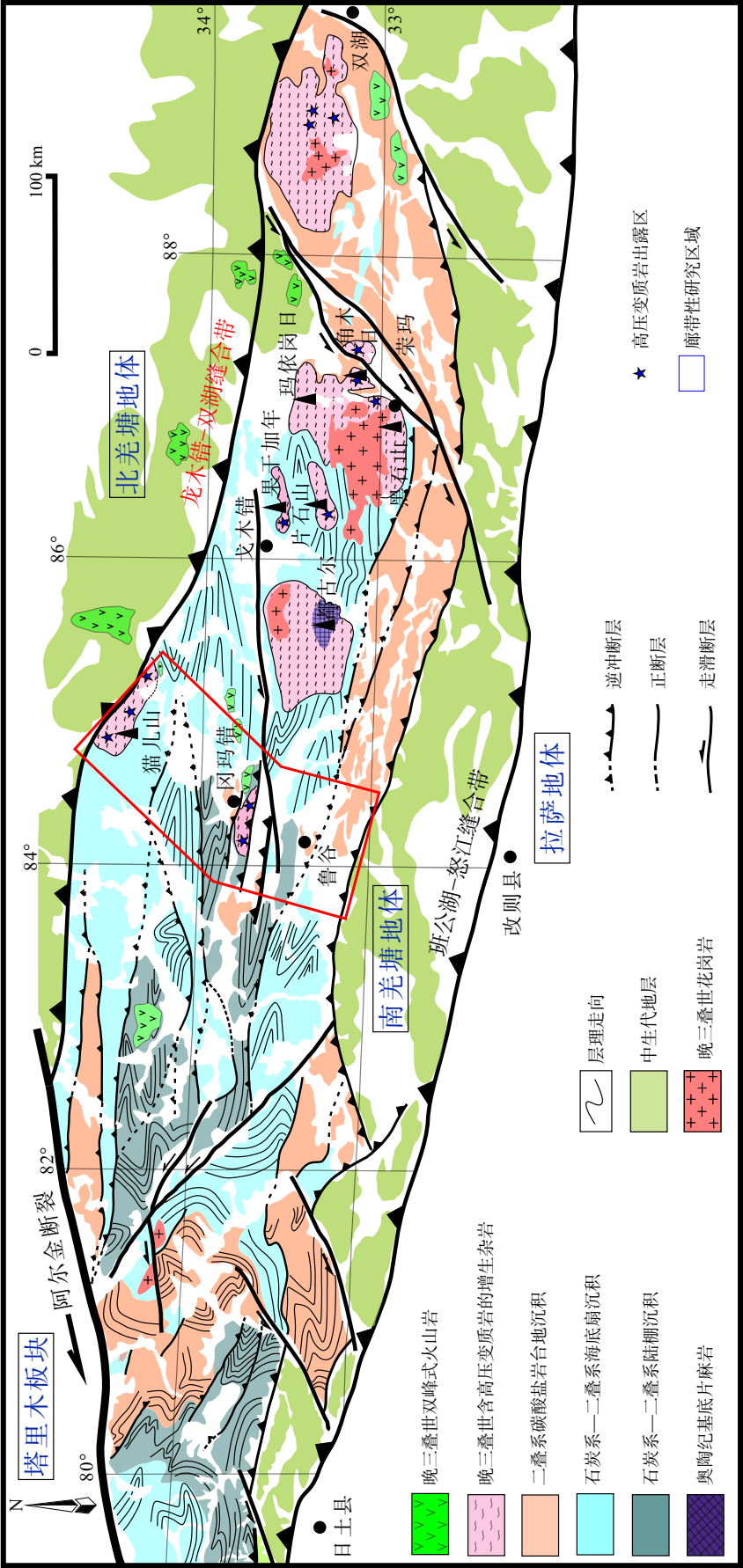


图 1 西藏羌塘造山带地质简图 (据李典等, 2021 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Qiangtang orogenic belt in Tibet(modified from Li et al., 2021)

南羌塘地体中,其北侧为龙木错-双湖缝合带,南侧则向南逆冲推覆至中生界之上。造山带主体由强变形浅变质的石炭系一二叠系组成,其内存在穹状分布的含高压变质岩的俯冲杂岩,二者呈低角度正断层接触关系(Kapp et al., 2003)。

1.1.1 俯冲杂岩的物质组成

羌塘中部俯冲杂岩具有明显的“基质-岩块”结构(Li et al., 2020)。基质主要由强烈面理化的细粒碎屑岩和基性岩组成(Kapp et al., 2000, 2003)。岩块则大小不一,类型多样,既有来自龙木错-双湖古特提斯洋板块的地层,也有来自南羌塘被动陆缘的沉积体系。

俯冲杂岩内可解体出大量洋板块地层单元(图2),包括蛇绿岩、海山和洋内弧等。蛇绿岩残块的岩石类型有橄榄岩、堆晶辉长岩、枕状玄武岩和放射虫硅质岩(Zhai et al., 2007; Wu et al., 2016)。蛇绿岩形成时代跨度很大,从早古生代到早二叠世均有发育。俯冲杂岩内的海山残块具有基性玄武岩、碎屑岩夹层和灰岩盖层的典型的海山岩石组合。基性玄武岩常具有OIB的地球化学特征(翟庆国等, 2006)。碎屑岩夹层的微量元素常与基性玄武岩一致,说明后者是前者的物源。海山的形成时代为465 Ma和238 Ma。海山残块既有俯冲到深部遭受高压变质作用,也大量以岩块形式加入俯冲杂岩中。洋内弧残块主要由日湾茶卡灰岩和望果山组火山岩组成。灰岩含有早石炭世晚期维宪期珊瑚化石(330.9~346.7 Ma; 李典等, 2021),火山岩形成时代为346~372 Ma(Dan et al., 2019),因此二者形成时代几乎一致。灰岩内碎屑岩夹层最年轻碎屑锆石峰值为325~375 Ma(李典等, 2021),物源应为其下伏的望果山组火山岩。部分蓝片岩相多硅白云母片岩也具有类似的碎屑锆石分布特征,说明部分洋内弧曾俯冲至深部遭受了高压变质作用。

从俯冲杂岩内解体出的南羌塘被动陆缘沉积体系,主要包括由早古生代地层组成的超大型岩块以及大量的晚古生代地层岩块(图2)。前者的变形和构造置换均较为微弱,沉积序列、沉积构造以及古生物化石均保存良好。该超大型岩块包含寒武系荣玛岩组、奥陶系下古拉岩组和塔石山岩组、志留系三岔沟岩组、泥盆系长蛇山岩组等地层(孙霄飞, 2016),总体为一套浅海陆棚沉积。后者则呈现大小不一的岩块,主要由石英砂岩组成,大量散布于俯冲杂岩中。该类岩块的碎屑锆石分布特征与南羌

塘晚古生代地层完全一致,都具有冈瓦纳亲缘性(Li et al., 2019),说明其应源自南羌塘被动陆缘沉积体系。多数晚古生代地层岩块均遭受了绿片岩相变质并形成了透入性面理,但也有部分几乎未遭受变形变质,仍保存着完好的原始平行层理和交错层理。

1.1.2 俯冲杂岩的变质作用

俯冲杂岩各组成部分变质作用差异较大。大面积分布的基质主要遭受低绿片岩相-绿片岩相变质作用,形成了板岩、千枚岩和片岩(Li et al., 2020)。

岩块之间的变质程度则差异较大。多数石英砂岩块体遭受了绿片岩相变质作用,形成了石英岩或云母石英片岩。基性岩大多变质程度不高,部分甚至保留着原始的火成岩结构(Zhang et al., 2006)。然而,也有部分堆晶辉长岩遭受了角闪岩相变质作用叠加,形成了斜长角闪片麻岩及绿帘角闪片岩(Zhai et al., 2016)。

俯冲杂岩内最引人注目的是蓝片岩和榴辉岩等高压变质岩块体。值得注意的是,这些高压变质岩块体也具有“基质-岩块”的混杂岩结构,其中多硅白云母作为基质包裹了蓝片岩和榴辉岩等高压变质岩。根据温度压力研究,蓝片岩相岩块中,多硅白云母的峰期变质条件为 $P=0.8\sim 1.7$ GPa、 $T=402\sim 481$ °C,蓝片岩峰期温压条件为 $P=0.8\sim 1.5$ GPa、 $T=420\sim 330$ °C;榴辉岩相岩块中,榴辉岩的峰期变质温压条件为 $P=2.0\sim 2.5$ GPa、 $T=410\sim 460$ °C,多硅白云母的峰期温压条件为 $P=1.8\sim 1.95$ GPa、 $T=480\sim 510$ °C(Li et al., 2020)。因此,杂岩内的高压变质岩块体实为经历了深俯冲并遭受高压变质作用的俯冲杂岩。

洋壳冷俯冲是这些高压变质岩的主要成因。一方面,这些高压变质岩具有明确的低温高压变质作用,特别是含有典型的低温高压变质作用指示矿物——硬柱石。例如,拉雄错-红脊山区域的蓝片岩发现有硬柱石矿物,戈木错和冈玛错一带的榴辉岩则发现有帘石+钠云母形成的硬柱石假象。此外,相平衡模拟和温压估算也显示,该区多数榴辉岩和蓝片岩都处于硬柱石稳定域。另一方面,这些高压变质岩具有洋壳物质的原岩属性。例如,多数基性高压变质岩都具有E-MORB、OIB洋岛/海山(邓希光等, 2002; 张修政等, 2010; Zhai et al., 2011a)以及洋内古岛弧地体的原岩特征。然而,同样不可忽视的是,也有部分高压变质岩可能是陆壳物质俯冲消减形成的。

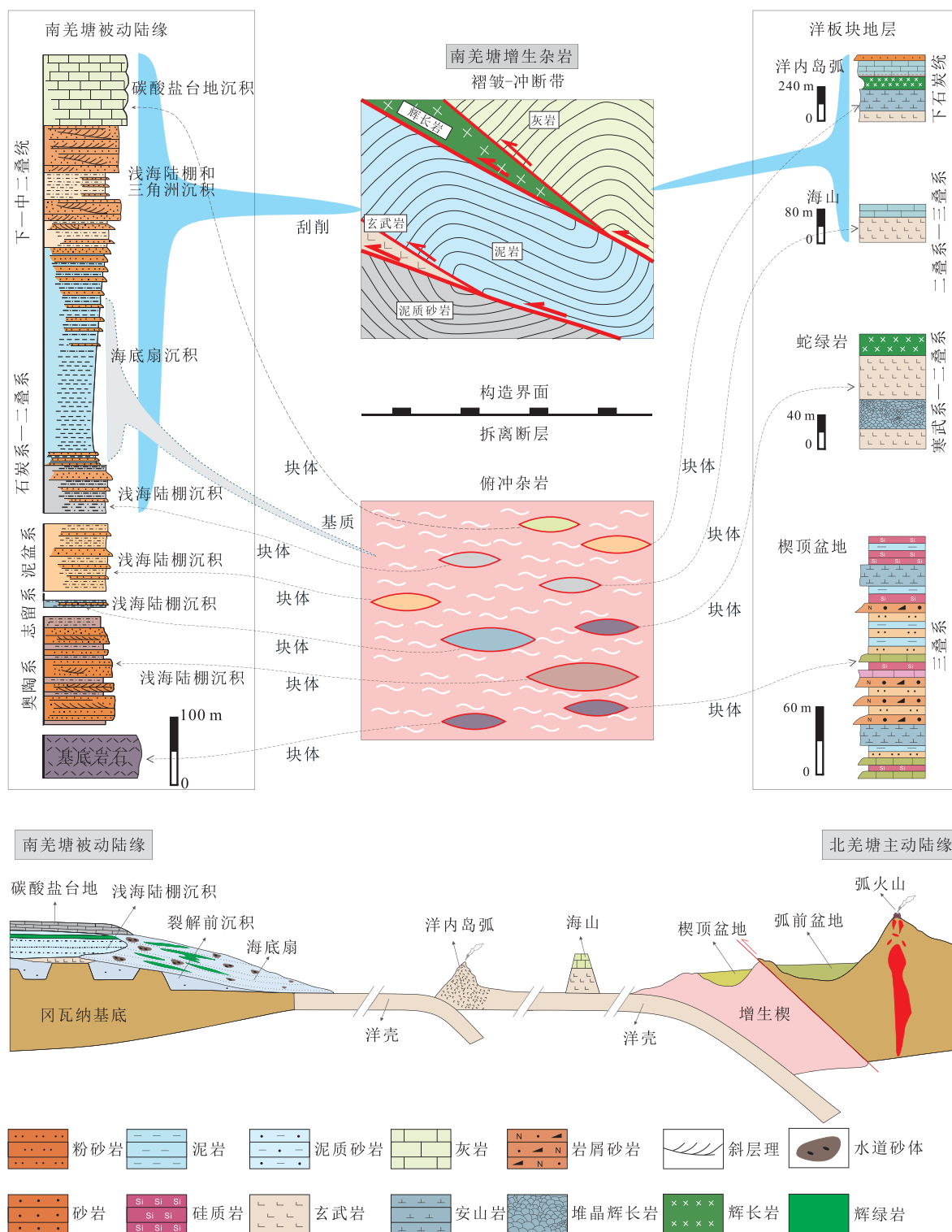


图 2 羌塘造山带物质组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the composition of the Qiangtang accretionary orogenic belt

根据目前的年代学研究, 高压变质作用的时代跨度较大, 从早二叠世到晚三叠世均有报道。高压变质岩折返时代主要集中在 230~210 Ma (李才, 1997; 邓希光等, 2000; Kapp et al., 2003; 李才等, 2006; Pullen et al., 2008; 董永胜等, 2009; 翟庆国等, 2009;

Zhang et al., 2010; Zhai et al., 2011b; Liang et al., 2012), 也有部分在约 260 Ma 即已折返。

1.1.3 逆冲叠瓦扇构造体系的物质组成

逆冲叠瓦扇构造体系主要由石炭系—二叠系组成。该构造体系变形强烈, 但层序和原始沉积构造

均保存良好,总体为有序的“史密斯”地层。该套地层属南羌塘被动陆缘沉积序列,包括上石炭统擦蒙组、上石炭统一下二叠统展金组、下一中二叠统曲地组、中一下二叠统吞龙贡巴组、中二叠统龙格组。其中,上石炭统擦蒙组和上石炭统一下二叠统展金组均以石英砂岩为主,并含一套冰海杂砾岩,与喜马拉雅和拉萨区域的同时代地层类似。下一中二叠统曲地组则主要为一套海底扇沉积,岩性组合以细粒粉砂质板岩和泥质板岩为主,偶夹砾岩、硅质岩和垮塌沉积的早二叠世灰岩。中一下二叠统吞龙贡巴组为一套浅海陆棚-河流三角洲沉积,主要岩性为细粉砂岩与泥岩互层,间夹灰岩。中二叠统龙格组为一套碳酸盐岩台地沉积(聂泽同和宋志敏, 1983; 王忠宝等, 2017)。

1.1.4 中一晚三叠世岩浆作用

伴随着杂岩内高压变质岩的折返,羌塘中部出现了强烈的岩浆活动,形成了一套晚三叠世的侵入岩和火山-沉积体系。

其中,侵入岩时代为 209~225 Ma, 主要侵入于羌塘俯冲杂岩内,也有部分侵入石炭系一二叠系中。该套侵入岩总体为弱过铝质高钾钙碱性-钙碱性二长花岗岩,具有 S 型花岗岩的特点(李静超等, 2015; 胡培远等, 2010)。目前的研究普遍认为该套侵入岩是陆陆碰撞期间板片断离所诱发的(Li et al., 2015; Wu et al., 2016; Liu et al., 2016)。

火山-沉积体系则主要在诺利期一瑞替期(201~221 Ma)形成(Zhai et al., 2007; Wang et al., 2008; Li et al., 2018), 广泛覆盖在俯冲杂岩和石炭系一二叠系之上。其上部为双峰式火山岩(Zhang et al., 2011), 底部往往为底砾岩,构成一套区域性角度不整合面。

1.1.5 构造变形体系

石炭系一二叠系内主要发育一套纵弯褶皱和逆冲断层的构造样式(图 3)。其中,纵弯褶皱不仅导致晚古生代地层重复,还在软弱的泥质岩石内形成强烈的劈理置换。基于层理产状的赤平投影,该类褶皱为圆柱形褶皱,枢纽倾角较缓,轴面北倾,翼尖角为 50°~70°。一系列北倾的逆冲断层则导致该套晚古生代地层相互构造叠置和重复,断层内的断层角砾和劈理等小构造指示着上盘向南的逆冲方向。值得注意的是,逆冲断层明显切过了褶皱的转折端和翼部,错动区域地层产状明显变陡,暗示褶皱略早于断层发生。综上所述,石炭系一二叠系具有逆冲叠瓦扇的构造特点(Li et al., 2019)。

俯冲杂岩内则总体具有四期变形历史(Li et al., 2020)。然而,杂岩的不同部分经历的构造变形完全不同。

第一期变形主要发育在绿片岩相变质的基质中,构造样式主要为顺层面理 S1、同斜紧闭褶皱或无根勾状褶皱、顺层透镜体等。S1 面理之上可观察到由石英拉长形成的拉伸线理,但其侧伏角往往变化较大。强硬的基性岩和石英岩等岩块被 S1 面理所包裹。透镜状的细粒石英砂岩和杂砂岩在宏观上呈现出类似于 S-C 组构的几何特征。基质中发育大量平行于 S1 面理的石英脉。除极少量未变形的,绝大部分变质石英砂岩岩块中, S1 面理普遍存在。在长石-石英片岩组成的岩块中,由云母域和长英质域组成 S1 面理,并常常发生递进变形形成紧闭同斜褶皱。在少量结晶灰岩块体内, S1 面理也变形为同斜紧闭褶皱。然而,基性岩块体内的变形则差异较大。部分基性岩块体形成了透入性的 S1 面理,少量存在角闪岩相片麻理。其余基性岩则只在边部发育 S1 面理,内部则几乎没有变形。在高压变质岩中,第一期变形非常罕见,仅在部分岩块中保留有紧闭同斜褶皱。镜下可观察到同构造石榴石中保存有弯曲的 S1 面理,并延伸到石榴石外的基质中。高压变质岩的基质内局部可见与第一期变形同期的 C' 剪切带残留。

无论是在基质中还是在岩块中,第二期变形都是俯冲杂岩中最明显的变形。构造样式主要体现为 S2 面理、F2 褶皱以及剪切带。该期褶皱主要表现为 S1 面理的褶皱和第一期褶皱 F1 的重褶。伴随该期褶皱作用,普遍发育 S2 褶劈理置换。显微尺度下, S2 褶劈理呈现为 S1 面理的微小褶皱,并伴随出现新生绢云母及黑云母。平行于 S2 面理的韧性剪切带也广泛发育,明显切割了 S1 面理。露头观察显示,剪切带之间的透镜体区域呈现出伸展性褶劈理的几何形态。在高压变质岩中, S2 面理是主期面理。镜下可观察到与 S1 平行的白云母发生微小褶皱,并再次生长。高压变质岩内这些白云母与石英则明显发生了构造分异,因此无论是在露头还是镜下均可观察到平行 S2 的云母域和石英域。

第三期变形表现为 S1-S2 复合面理的平卧褶皱,轴面缓倾,但枢纽倾伏向变化较大。该期变形未形成面理置换,因此其变形应处于低级变质条件,从而限制了定向矿物的生长。

第四期变形中,褶皱作用较为微弱,变形主要

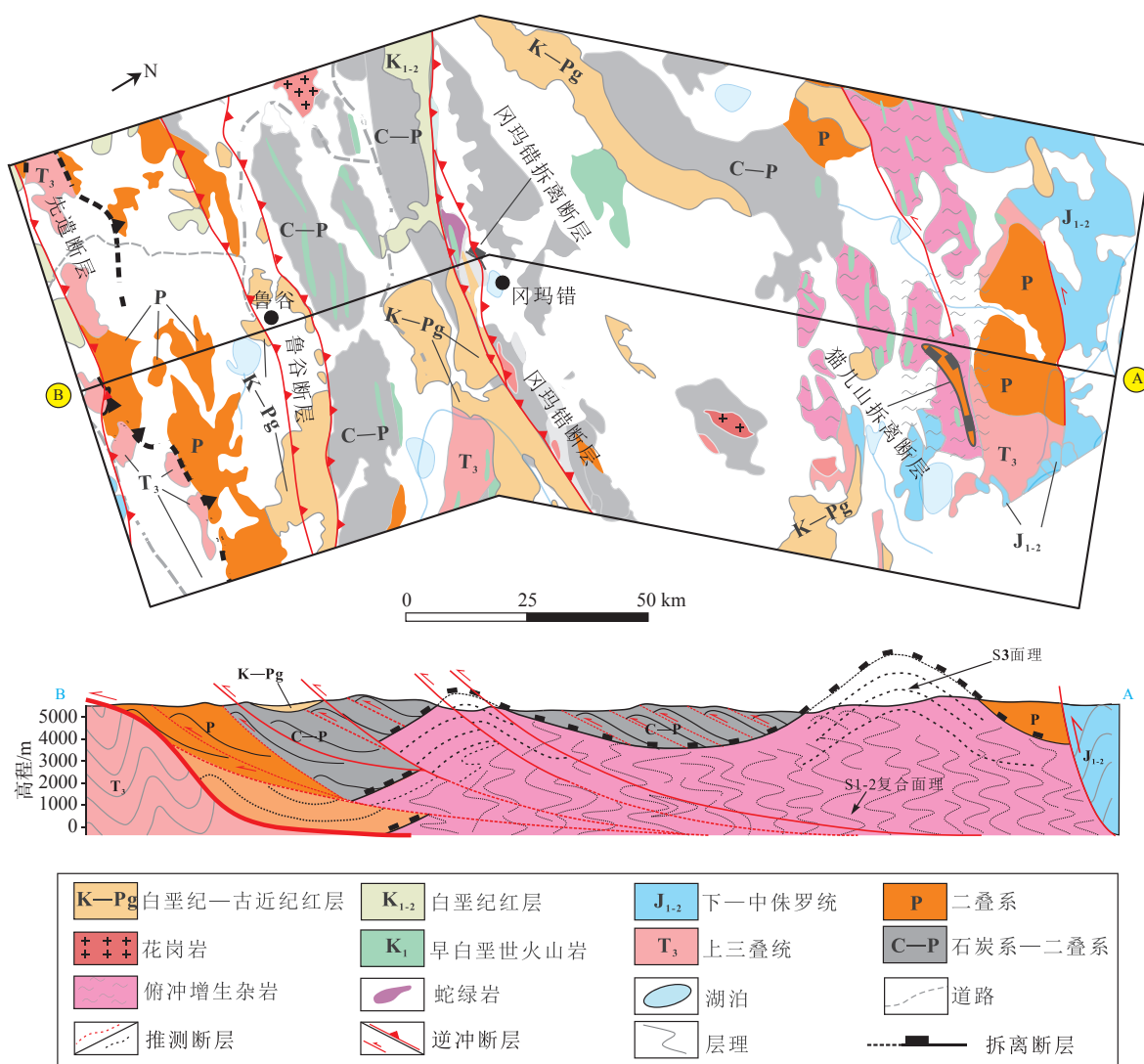


图3 羌塘造山带双层构造体系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the double-layer structure in the Qiangtang accretionary complex

表现为一系列北倾的脆性断层。断层内往往呈现为千枚岩带和含硫化物的构造角砾岩。

1.1.6 拆离断层

石炭系—二叠系组成的逆冲叠瓦扇与深部俯冲杂岩之间为低角度正断层 (Li et al., 2020)。Kapp et al. (2000, 2003) 认为其代表了羌塘中部大规模拆离断层系统。该拆离系统核部为俯冲杂岩, 糜棱岩化的俯冲杂岩之上则为绿泥石微角砾岩或断层泥。糜棱岩化带内的剪切指示标志和脆性断层均指示上盘向(东)南的运动学方向 (Kapp et al., 2000, 2003)。

1.2 雅鲁藏布江造山带

雅鲁藏布江造山带内的加查增生杂岩北部边界以南倾断裂逆冲于雅鲁藏布江蛇绿混杂岩之上, 南部以中央直立带与一套上三叠统变形而来的褶皱—冲断带构造接触 (图4; Fang et al., 2020)。

1.2.1 加查增生杂岩物质组成

加查增生杂岩具有明显的“基质—岩块”结构, 其原始沉积构造和层序已消失殆尽。杂岩的基质主要为遭受了低级变质作用的砂岩和泥岩, 岩块主要由灰岩、石英砂岩及各类基性岩组成, 分别遭受了不同程度的变质作用。按照物质组成和变形特征, 自北向南, 该杂岩可划分为桑东岩组、普姆岩组、江惹岩组、色拉岩组和邦浪岩组五个岩组 (Fang et al., 2020)。

桑东岩组位于加查增生杂岩最北侧, 与雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带呈逆冲断层接触。其基质由变质砂岩和千枚岩组成, 岩块类型主要为变质石英砂岩、大理岩和片理化基性岩 (图5)。普姆岩组基质主要由千枚岩、千糜岩和变质粉砂岩组成, 内部大量发育呈无根勾状褶皱形态的石英脉, 岩块的岩石

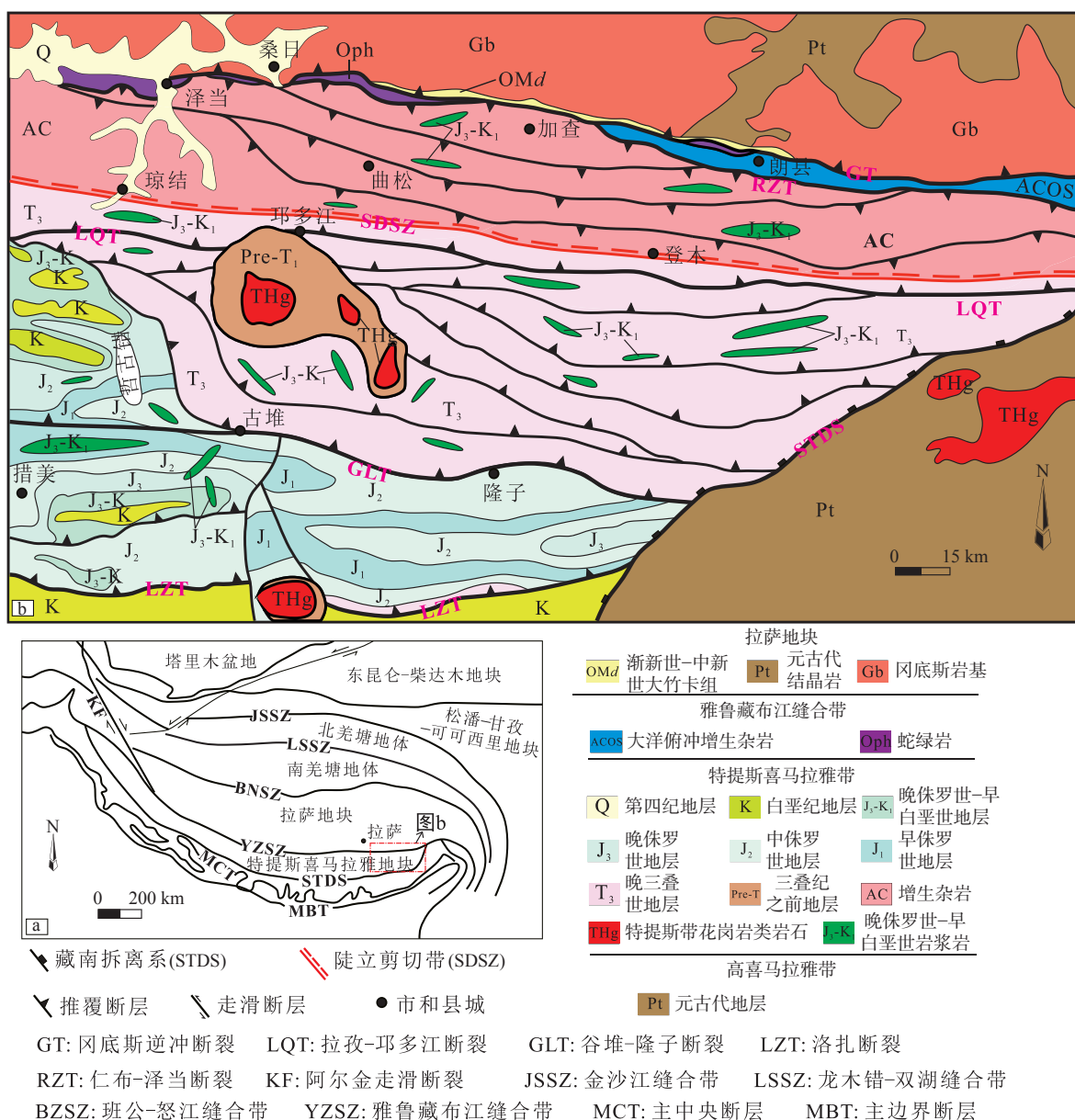


图 4 雅鲁藏布江造山带地质简图

Fig. 4 Simplified geological map of the Yarlung Zangbo River orogenic belt

类型主要为变质石英砂岩和绿片岩。江惹岩组基质主要为含石墨千枚岩和细粒变质砂岩，内部大量发育的石英脉呈连续褶皱形态，岩块类型为变质石英砂岩、大理岩、玄武质片岩和变质基性岩。色拉岩组基质也主要为千枚岩和变质砂岩，岩块则类型多样，有石榴石云母片岩、变质基性岩、绿片岩、阳起石片岩和变质石英砂岩等。其中，石榴石云母片岩内还包裹有绿帘角闪岩块体，说明其应为遭受了高级变质作用的增生杂岩。邦浪岩组基质为呈互层状产出的细粒变质砂岩和千枚岩，岩块为变质砂岩。该岩组内原生构造保存相对较多，鲍玛序列、底模和槽模构造的残留均有发现。

1.2.2 逆冲叠瓦扇物质组成

雅鲁藏布江造山带的逆冲叠瓦扇构造体系主要由上三叠统江雄组、上三叠统宋热组和上三叠统涅如组三套有序的“史密斯”地层组成 (Fang et al., 2019)。

其中，江雄组为一套海底扇沉积，岩性组合为灰色长石石英砂岩与灰黑色泥岩呈韵律性互层。该地层大量发育鲍玛序列、勾模槽模、重荷模等原生沉积标志，局部保留垮塌成因的包卷层理构造。其泥岩表面的遗迹化石也指示了半深海-深海的沉积环境。宋热组为一套斜坡相-海底扇相沉积，岩性组合主要为细粒砂岩、粉砂质泥岩及少量含泥砾砂岩，局部含水道砂体。该地层也发育有鲍玛序列

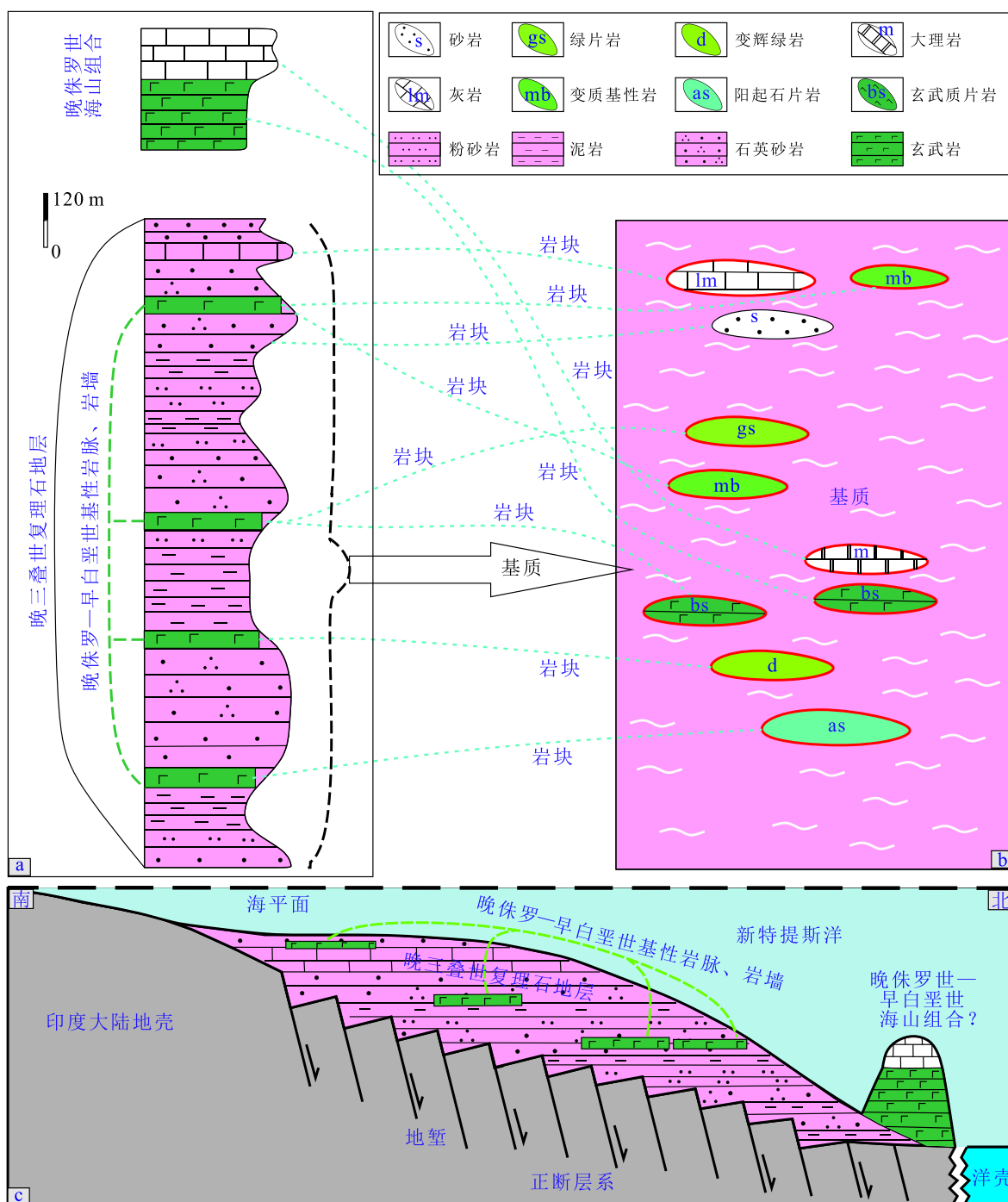


图5 加查增生杂岩物质组成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the composition of the Jiacha accretionary complex

和虫迹化石。涅如组为一套半深水斜坡相沉积, 岩性组合以变质石英砂岩为主, 夹泥岩和少量灰岩透镜体, 底模构造少见, 但顺层滑动构造较为发育。

1.2.3 加查增生杂岩的变质作用

根据X射线衍射实验分析结果, 加查增生杂岩内板岩和千枚岩的伊利石结晶度平均为 $0.24 \Delta^{\circ}2\theta$ 。基于伊利石结晶度与温度的定量关系 (Mukoyoshi et

al., 2007), 推断加查增生杂岩的基质变质温度平均值为 303°C , 处于浅变质带区域 (Ditullio et al., 1993)。

色拉岩组核心为高级变质岩, 具有“基质+岩块”的结构, 石榴石云母片岩作为基质, 包裹了石榴石绿帘斜长角闪岩等块体。

根据白云母压力计 (Massonne and Schreyer, 1987), 色拉岩组石榴石云母片岩的变质压力为

2.7~5.2 kbar, 平均值为 3.5 kbar。白云母 Si-Al 图解和 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)-w(\text{FeO})$ 变质相带投图显示, 白云母类型为 Al 白云母, 变质相带主要处于黑云母绿泥石铁铝榴石带, 并靠近十字石带, 总体属低压高温变质岩。该片岩局部可观察到石英的静态重结晶, 矿物颗粒之间呈近 120° 稳定结构接触, 也说明变形时处于高温高压条件。根据 EBSD 分析结果, 其内石英颗粒的重结晶作用包括颗粒边界迁移 (GBM) 和亚颗粒旋转 (SR) 两种方式, 表明其变形温度可能为 $480\sim 530^\circ\text{C}$ 。

根据压力 P 与角闪石 Al^{tot} 之间的指数关系 (Ridolfi et al., 2010), 石榴石绿帘斜长角闪岩形成压力为 $0.3\sim 8.7$ kbar, 平均值为 3.8 kbar。根据石榴子石-角闪石温度计, 基于共生平衡的石榴子石和角闪石之间铁-镁交换 (Graham and Powell, 1984), 色拉岩组石榴绿帘斜长角闪岩的变质温度为 $446\sim 559^\circ\text{C}$, 平均值为 517°C 。根据角闪石-斜长石温度计, 其变质温度为 $494\sim 542^\circ\text{C}$, 平均值为 512°C 。

1.2.4 逆冲叠瓦扇的变质作用

根据 X 射线衍射实验分析结果, 由上三叠统组成的逆冲叠瓦扇北部的伊利石结晶度平均为 $0.27\Delta^2\theta$ 。根据伊利石结晶度与温度的定量关系 (Mukoyoshi et al., 2007), 其变质温度为 $280\sim 312^\circ\text{C}$, 平均值为 297°C 。逆冲叠瓦扇南部伊利石结晶度为 $0.30\Delta^2\theta$, 变质温度平均值为 292°C 。因此, 加查逆冲叠瓦扇变质作用处于近变质带 (Ditullio et al., 1993)。

1.2.5 构造变形体系

(1) 加查增生杂岩

加查增生杂岩主要经历了两期透入性变形历史 (Fang et al., 2020)。

第一期变形以剪切应变为主, 在杂岩基质内普遍形成了顺层的复合面理 S_0-S_1 以及与面理近平行的韧性剪切带。基质中的薄层砂岩强烈褶皱, 形成了平行于 S_1 面理的无根钩状褶皱以及构造透镜体。沿面理发育大量石英脉, 后者常常进一步发育紧闭褶皱和无根勾状褶皱。此外, 部分基性岩和石英砂岩也常常发育 S_1 面理。在石榴石云母片岩块体内, 同构造石榴石显示出上盘向南的运动学方向, 与基质韧性剪切带内 $S-C$ 组构和 C' 构造指示的运动学方向一致。

第二期变形总体为挤压构造, 普遍形成了南倾的 S_2 面理 (褶劈理-连续劈理) 置换。然而, 该期变形在各岩组中的表现则略有不同。其中, 桑东岩

组中的 S_2 面理呈现出透入性构造置换的特征。其余各岩组中则呈现为明显的第二期褶皱变形和相应的轴面劈理 (S_2) 置换。沿着 S_2 面理, 局部可见中基性岩脉侵位。但岩脉内部也微弱地发育与 S_2 平行的面理。因此, 这些中基性岩脉应是同构造岩脉。相关岩脉的测年结果表明 S_2 面理的形成时代为 55 Ma。

(2) 逆冲叠瓦扇构造体系

上三叠统主要遭受一期南北向挤压作用, 形成了一系列向南推覆的北倾逆冲断层 (断层面产状: $350^\circ\sim 25^\circ\angle 30^\circ\sim 50^\circ$)。这些断层作为边界分隔了轴面北倾的褶皱构造, 整体组成了一套向南的逆冲叠瓦扇体系。该套构造体系内的褶皱多为斜歪倾伏的具不对称几何形态的开阔-同斜褶皱 (轴面产状: $355^\circ\sim 30^\circ\angle 35^\circ\sim 65^\circ$ 。枢纽产状: $90^\circ\sim 115^\circ\angle 15^\circ\sim 30^\circ$), 少部分为倾竖形态。其中最北端的江雄组内主要发育轴面北倾的倒转褶皱 (背斜北翼正常, 南翼倒转), 且翼尖角往往呈现尖棱褶皱的形态。向南, 褶皱卷入的地层逐渐转变为正常层序, 褶皱轴面逐渐转为直立 (轴面产状: $350^\circ\sim 20^\circ\angle 60^\circ\sim 80^\circ$), 褶皱组合形态明显呈现为复式褶皱。伴随以 S_0 为变形面的褶皱的发育, 轴面和翼部部分区域常常形成透入性的劈理 S_1 置换。

(3) 中央直立带

中央直立带 (图 6a、6b) 分隔了加查增生杂岩和逆冲叠瓦扇两套构造体系, 其宽约为 $800\sim 1000$ m。带内泥质岩石多遭受剪切作用从而被改造为千糜岩, 沉积层理则几乎完全被置换为糜棱面理。糜棱面理产状陡立 (图 6c), 倾角普遍在 $75^\circ\sim 85^\circ$ 。直立的面理之上可见拉伸线理以及后期叠加的擦痕 (图 6c—6e), 二者产状近平行, 倾伏向为 $100^\circ\sim 120^\circ$, 倾伏角为 $5^\circ\sim 15^\circ$ 。

中央直立带以北的加查增生杂岩发育向北逆冲的叠瓦状逆冲断层, 以南的三叠系内发育朝南逆冲的叠瓦状逆冲断层, 与正花状构造样式极为相似 (图 6a)。

根据以上特征, 中央直立带可能是具有向南东东 (SEE) 斜滑 (右形) 运动学特征的走滑断层体系。

1.3 中国台湾增生造山带

中国台湾造山带, 自西向东, 依次由中国台湾海峡、海岸平原 (前陆盆地)、西部麓山带 (褶皱-冲断带)、雪山山脉 (褶皱-冲断带)、中央山脉 (增生楔)、台东纵谷以及海岸山脉组成 (图 7, 图 8), 是南中国大陆地壳与吕宋岛弧发生弧-陆碰撞形成的造

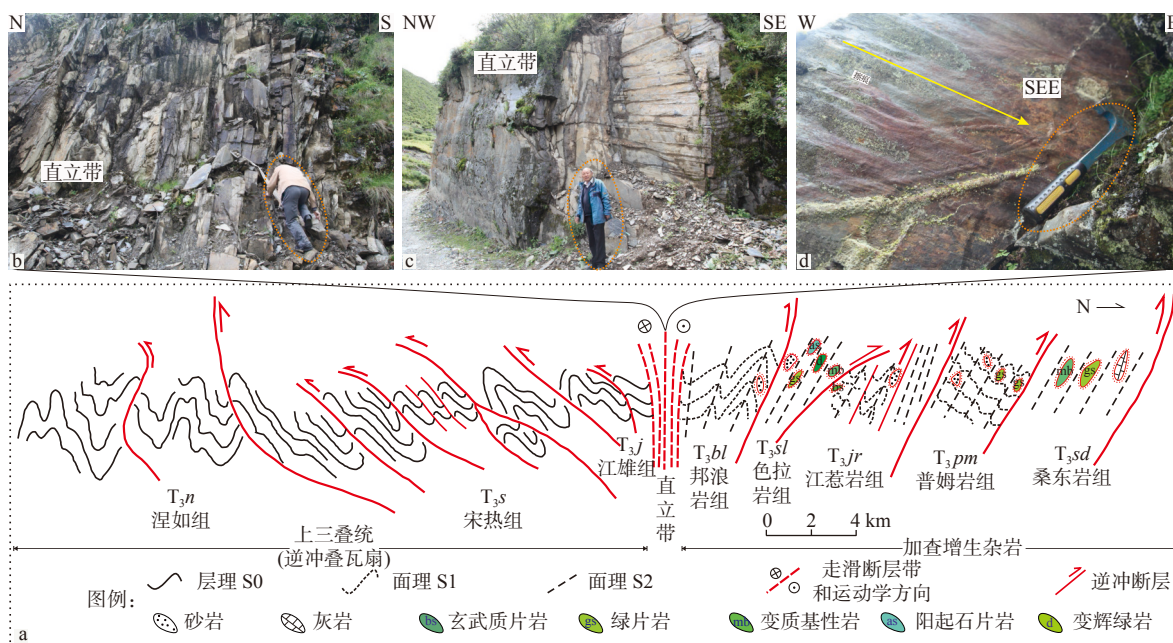


图6 雅鲁藏布江造山带双层构造体系示意图及中央直立带

Fig. 6 Schematic diagram of the double-layer structure in the Yarlung Zangbo River orogenic belt and the central steep belt

山带 (Huang et al., 2000, 2006, 2012)。以台东纵谷为界, 其西侧的中央山脉、雪山山脉和西部麓山带均具有大陆属性, 其东侧的海岸山脉则具有海洋属性 (黄奇瑜, 2017)。

南中国大陆与吕宋岛弧的弧-陆碰撞初始发生时代约为 6.5 Ma (Chi et al., 1981; Lin et al., 2003)。该碰撞持续至今, 并具有斜向碰撞的特点。该造山带从碰撞点一直向南扩展至今 (Suppe, 1984), 因此在不同部位体现出不同阶段的碰撞的特点: 目前, 其南部和中部正处于初始碰撞和完全碰撞阶段 (Shyu et al., 2005; Fuller et al., 2006); 北侧的碰撞作用则已经停止, 进入后碰撞伸展垮塌阶段 (Wu et al., 2009; Chen et al., 2014)。具体而言, $21^{\circ}20'N$ 以南, 处于南中国大陆被动陆缘的碰撞前阶段 (McIntosh et al., 2013)。 $21^{\circ}20'N$ 以北, 则以陆缘初始碰撞为主, 涉及早一中中新世的斜坡-海沟沉积和部分陆棚沉积物的俯冲 (Reed et al., 1992)。 $22^{\circ}40' \sim 24^{\circ}N$, 加入俯冲带的则主要为陆棚物质, 弧前盆地的面积也因俯冲侵蚀而大幅缩减, 因而处于完全碰撞的造山带区域 (Cheng et al., 2002)。综上所述, 中国台湾造山带是研究洋-陆转换期间陆缘俯冲过程的理想区域。

1.3.1 南中国大陆被动陆缘结构

根据高分辨率测深数据, 南中国被动陆缘 (图 7) 由缓倾的陆棚和相对较陡的大陆斜坡构成。陆棚倾向南东, 倾角小于 1° 。大陆斜坡倾向南东, 倾角

为 $3^{\circ} \sim 9^{\circ}$, 内部存在大量北西-南东向的峡谷系统, 并被浊积岩充填 (Liu et al., 2004)。南中国被动陆缘的沉积可能与中新世晚期全球海平面的显著下降有关, 彼时中国东南部海岸线转移至中国台湾海峡东部, 陆源沉积物因此得以向南东搬运至中国大陆边缘的陆架和斜坡地带 (Zhang et al., 2014)。

1.3.2 中国台湾造山带的物质组成及变形特征

中央山脉位于中国台湾梨山断裂以东, 其内分布有属中国台湾造山带的增生杂岩。自西向东, 该增生杂岩可进一步划分为: ①中新世浊积岩; ②板岩带, 主要由始新世变质砂板岩组成; ③中央山脉变质岩系 (Tananao 岩群), 主要由中生代大理岩、片岩和片麻岩组成。其中, 部分变质岩石被认为是前第三系陆缘变质岩及火成基底岩石 (Beyssac et al., 2007, 2008)。上述组成单元的原岩均具有中国大陆边缘的亲缘性 (Chai, 1972)。从构造变形角度看, 中央山脉变质岩系具有俯冲带内常见的各类韧性剪切构造和复杂褶皱变形。变质岩系内片岩组广泛发育褶皱理 S2 (图 9a), 其内先存石英脉则常遭受右行剪切变形形成石英脉透镜体 (图 9b), 体现出强烈的构造置换特点 (图 9c), 部分长英质脉体还体现出揉流褶皱特征 (图 9d)。大理岩组则呈现出强烈的韧性剪切变形特征, 广泛发育鞘褶皱 (图 10a—10c), 并在褶皱转折端发生明显的流变加厚 (图 10d)。因此, 中央山脉区域的增生杂岩总体被认为属陆壳

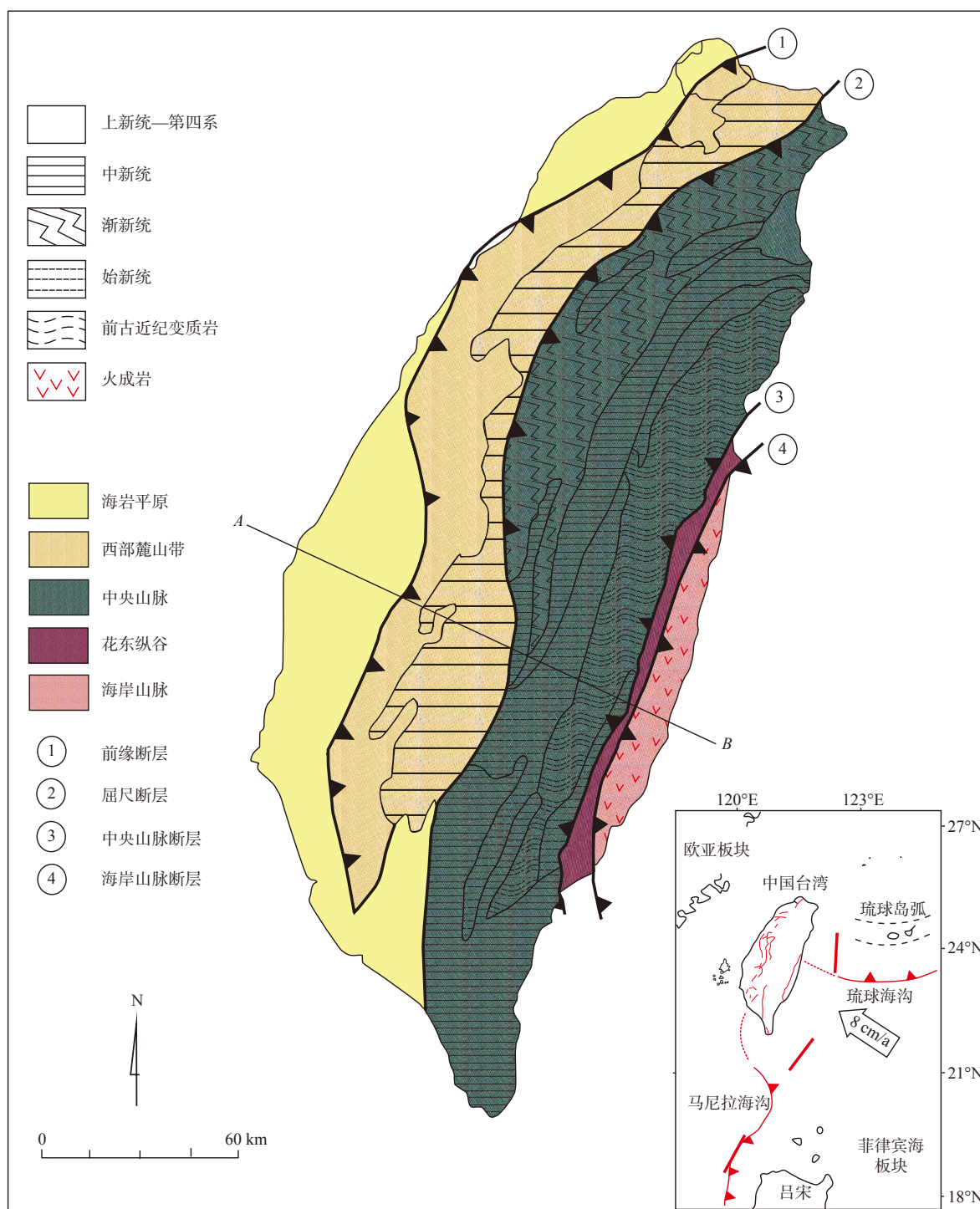


图7 中国台湾造山带地质简图 (据 Huang et al., 2000 修改)

Fig. 7 Simplified geological map of the Taiwan orogenic belt in China (modified from Huang et al., 2000)

型增生杂岩,其所含的属于欧亚大陆板块的沉积物和上地壳岩石,均被认为是陆壳俯冲过程中从陆壳上部刮削下来的物质 (Sibuet and Hsu, 2004)。

恒春半岛则位于中央山脉的南端,处于洋壳俯冲到弧-陆碰撞的转换区域,其内隆升出了最年轻的增生杂岩 (Tian et al., 2019)。恒春杂岩西部主要由

上新世—更新世浅海前陆沉积序列组成,东部主要由中新世中晚期浊积岩序列组成,二者之间的边界则分布着 Kenting 混杂岩。其中,中新世中晚期浊积岩序列称为牧田组 (Chang, 1964; Sung, 1991),主体岩性是变质的砂板岩,含有数量众多的砂岩和砾岩透镜体 (Chang et al., 2003),总体为一套斜坡相以及海

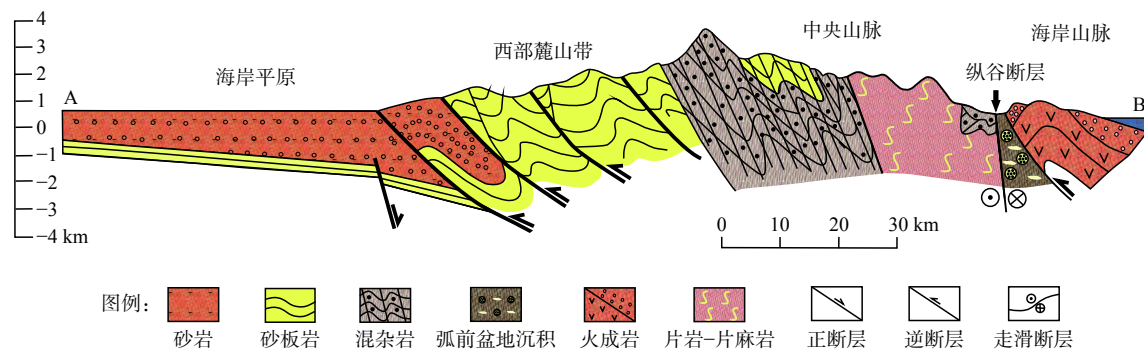
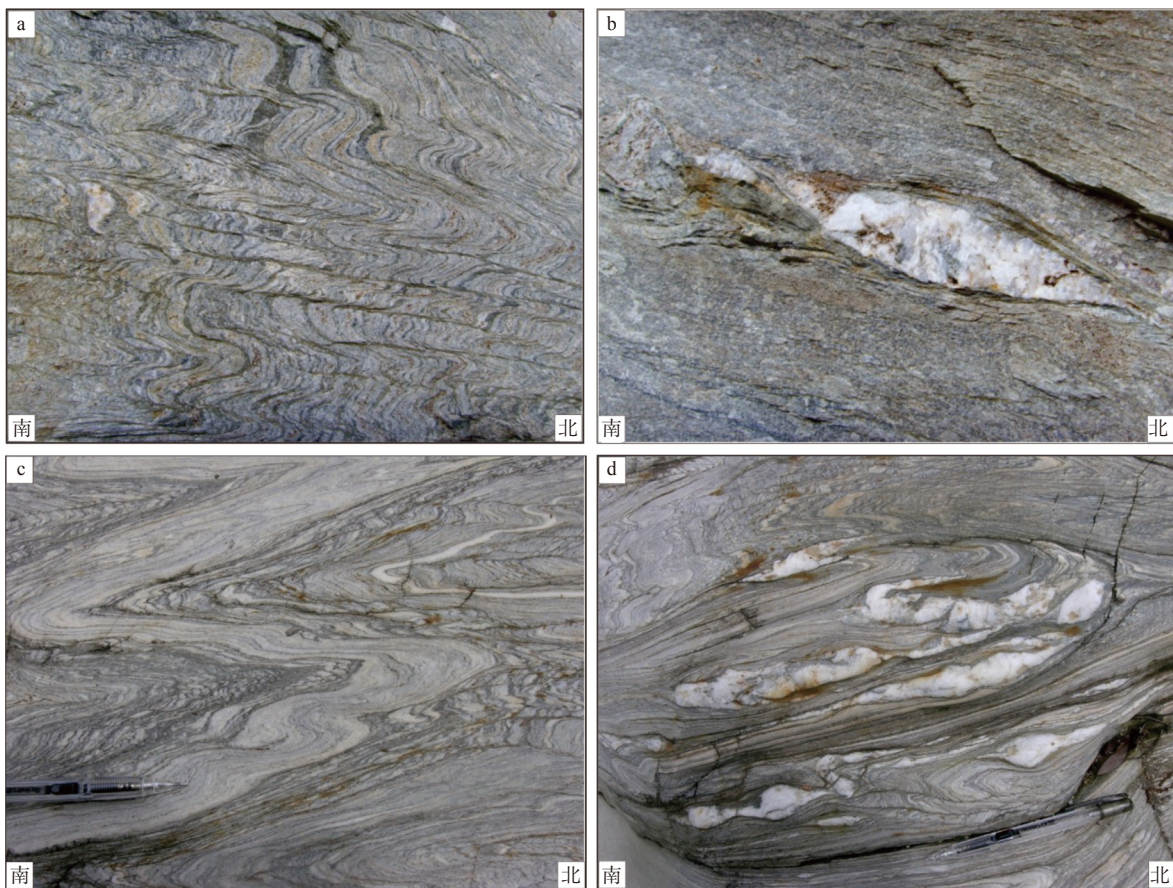


图 8 中国台湾造山带地质剖面简图（剖面 AB 位置见图 7；据 Huang et al., 2000 修改）

Fig. 8 Simplified geological profile of the Taiwan orogenic belt in China (modified from Huang et al., 2000)



a—褶劈理 S2; b—石英透镜体，具有右行剪切变形; c—构造片理被置换; d—长英质脉体揉流褶皱

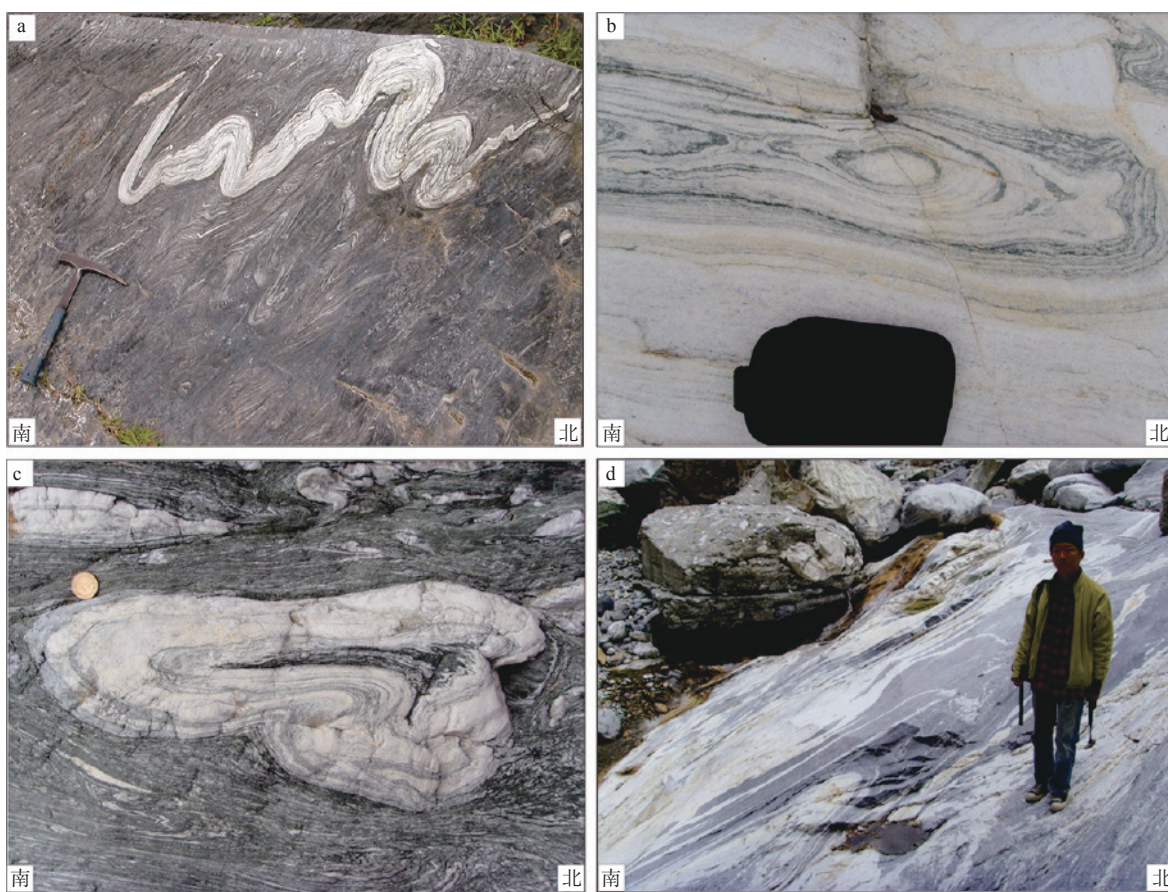
图 9 中央山脉变质岩系片岩变形特征

Fig. 9 Deformation characteristics of the schists in the Central Range complex

(a) Crenulation S2; (b) Quartz vein lens with dextral shear sense; (c) Schistose foliation was imposed; (d) Flow folds of felsic veins

底扇沉积 (Pelletier and Stephan, 1986; Sung, 1991)。其中，最年轻的浊积岩地层时代为晚中新世 8.6~5.8 Ma (Chang, 1966; Huang et al., 1997)。Kenting 混杂岩则分布在强烈变形的浊积岩区域，可当做切过牧田组的大型剪切断层带。该混杂岩具有典型的“基质-岩块”结构，成因不同的岩块混于鳞片状面理化

的泥质基质内。面理之上常常发育线理，指示着剪切方向 (Chang et al., 2003)。恒春杂岩东部的浅海沉积岩主要为一套向上变浅的前陆沉积序列，包括马鞍山组 (Ishizaki, 1942)、恒春灰岩 (Rokkaku and Makiyama, 1934)。值得注意的是，部分 Kenting 混杂岩内之上也被该套前陆盆地沉积角度不整合覆盖



a—XY面不对称褶皱；b、c—YZ面鞘褶皱；d—大理岩转折端流变加厚

图 10 中国台湾中央山脉变质岩系中大理岩变形特征

Fig. 10 Sheath folds of the marbles in the Central Range complex of Taiwan, China

(a) Asymmetric fold on the XY profile; (b) and (c) Sheath fold on the YZ profile; (d) The hinge zone of the sheath fold was thickened

(Chang et al., 2003)。

在加入增生楔之前,恒春杂岩内的中新世沉积序列应起源于南中国大陆边缘(Zhang et al., 2014)。原因如下:①根据砾石和岩屑成分分析,牧田组(Mutian Formation)复理石具有南中国大陆被动陆缘亲缘性(Page and Lan, 1983);②古流向测量统计结果为向南或东南,显示这些碎屑物质主要是从中国大陆运移过来的(Lin et al., 2003);③碎屑锆石的研究也表明,这些沉积序列与中国大陆被动陆缘密切相关(Zhang et al., 2014)。此外,恒春杂岩内还存在着时代为22~24 Ma的基性岩,也被认为是从南中国海上刮削下来的海山和洋壳(Tian et al., 2019)。

中央山脉的增生杂岩以东,雪山山脉(Ho, 1988)、西部麓山带、海岸平原等区域均主要由被动陆缘和前陆沉积层序组成,并沿着系列东倾逆冲断层顺次增生(Malavieille and Trullenque, 2009)。这些地层均属中国大陆边缘层序,包含中生代基底,古

近系同裂谷层序和晚渐新世—新近纪裂谷后地层,总体是一套浅海陆棚—斜坡环境沉积(Huang et al., 2012)。

1.3.3 增生杂岩的变质作用

位于中央山脉的增生杂岩变质程度具有较大的内部差异。从岩性类型上看,板岩、片岩和高压变质岩均有分布。

根据X射线衍射实验分析结果:在Tananao岩群中,伊利石结晶度小于 $0.25 \Delta^{\circ}2\theta$ 。但在板岩带中,伊利石结晶度为 $0.25 \sim 0.50 \Delta^{\circ}2\theta$ (Lin, 2002)。因此,板岩带和片岩带在剥露前应被埋藏在不同的深度,最终通过构造作用直接接触从而混杂在一起。

在Tananao岩群中,还存在高压变质岩石的块体。由于该类岩块与其片岩基质具有迥然不同的岩石学特征,因此呈现出外来岩块的特征(Liou, 1981)。其中,Juisui块体主要为蓝片岩、(石榴石-绿帘)角闪岩、含石榴石黑色片岩、含绿辉石基性岩

等组成 (Liou et al., 1975); Wanjung 块体则主要赋存于蛇纹石化混杂岩中的含绿辉石的变质超基性岩内 (Yui and Lo, 1989)。总体而言, 这些高压变质岩都是洋壳成因, 其原岩包含深海沉积物、玄武岩或辉长岩等岩石类型 (Beyssac et al., 2008)。根据变质岩石学研究, 这些高压变质岩石最初埋藏于 35~40 km 的深度, 并在 10~15 Ma 折返至中部地壳层次 (约 1 km)。最后阶段的折返在 4.5~10 Ma 发生, 因此应与欧亚被动陆缘的增生与碰撞有关 (Beyssac et al., 2008)。

1.3.4 增生造山带的双层构造变形体系

根据目前的深部结构研究结果, 中国台湾造山带具有明显的双层构造变形体系 (图 11): 上地壳以碰撞相关的挤压缩短变形为主, 中一下地壳 (约 750 °C, 深 25 km) 的物质主要是俯冲的欧亚板块地壳, 并发生平行于汇聚方向的剪切变形。后者主要体现为各向异性矿物的定向分布 (Huang et al., 2015)。

此外, 不同区域的地震反射数据显示, 无论是在南中国大陆的陆缘俯冲带还是陆棚碰撞带, 叠瓦状增生杂岩之下均底垫着一套深俯冲陆壳物质。

(1) 在处于陆缘俯冲带的恒春半岛南侧区域, 地震反射数据显示: 增生楔前端 (“下斜坡部位”), 进入俯冲带的南中国被动陆缘主要发育褶皱和逆冲断层, 呈现出明显的逆冲叠瓦扇的构造特点。这些叠瓦状逆断层向深部汇聚到俯冲构造界面之上。叠瓦状构造体系总体较薄, 厚约 6 km, 地震波速较快 (5.5~7.8 km/s), 总体与西部麓山带的褶皱-逆冲

带构造样式相似 (Lester et al., 2013); 在增生楔的主体部位 (“上斜坡”), 叠瓦状构造体系之下则底垫着一套地震波速极高 (46 km/s) 的地质体, 从而增厚了增生楔 (厚 10~14 km)。值得注意的是, 地震反射特征显示, 这些底垫的陆壳物质与中央山脉区域的强烈变形的陆缘和陆壳物质特征极为相似, 应均具有俯冲杂岩的特点。因此, 在弧-陆碰撞之前, 南中国大陆被动陆缘就已向东沿着马里亚纳海沟俯冲并底垫至增生楔的下部 (Lester et al., 2013)。

(2) 中央山脉主体则处于弧陆碰撞带, 其深部地震反射剖面研究也显示, 增生楔下部存在一套与恒春半岛类似的高速地质体 (McIntosh et al., 2005; Lester et al., 2013), 表明中央山脉之下底垫有较厚 (约 40 km) 的大陆地壳 (Hetland and Wu, 2001; Rau and Wu, 1995)。

2 讨论

2.1 造山带双层结构的基本特征

基于羌塘造山带、雅鲁藏布江造山带和中国台湾造山带的分析, 文章发现这些造山带均 (曾) 具有双层结构。总体而言, 该双层结构具有以下五个方面的基本特征。

(1) 双层结构的下层往往由非史密斯地层组成, 具有典型的 “基质-岩块” 结构。基质常常由一套深水-半深水的细粒碎屑岩组成, 往往属斜坡相-海底扇相沉积。岩块则类型多样, 来源极为复杂。从横

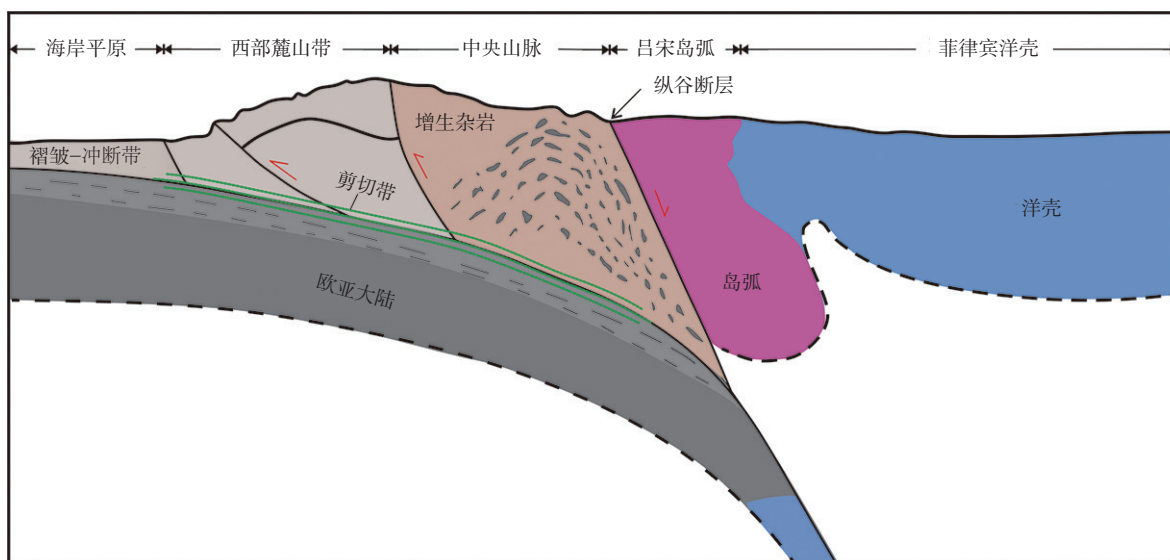


图 11 中国台湾造山带深部结构示意图 (据 Huang et al., 2015; Chen et al., 2019 修改)

Fig. 11 Schematic diagram of the deep structure of the orogenic belt in Taiwan, China (modified from Huang et al., 2015; Chen, 2019)

向上看,岩块既包含洋岛、海山、蛇绿岩等大洋层序物质,也有大量被动陆缘沉积物质。从纵向上看,经历了不同程度变质作用的岩块均有存在。与之相对,双层结构的上层则主要由史密斯地层组成,原生沉积构造保存完好,层序清楚。

(2)双层结构上下层的变形样式差异巨大,但变形时间一致。下层明显呈现由“基质-岩块”构成的强变形带和弱变形域。强变形带发育在非能干的基质内,并发生多期面理置换。其中,不同深度形成的面理和线理往往类型也不同。深部构造层次形成的面理以片理或糜棱面理为主,线理则主要呈现拉伸线理;中部构造层次的面理则主要为千枚理或板劈理,线理主要体现为皱纹线理或交面线理。弱变形域多为能干性强的地质体,如玄武岩、辉长岩等基性块体,或者石英砂岩、砾岩等沉积岩。上层虽然以史密斯地层为主,但已在强烈构造作用下转变为一套以逆冲叠瓦扇为主的构造体系。

(3)变质作用在上、下层内具有极大的区别。下层内广泛分布的基质经历了低绿片岩相-高绿片岩相变质作用,呈现为(石榴石)云母石英片岩、千枚岩等。岩块变质程度多样,以绿片岩相变质为主,也存在低温高压变质作用。但是,也还有极少量几乎未变质的砂岩块体。其中,高压变质岩也呈现出“基质-岩块”特征,是俯冲至深部的增生杂岩遭受高压变质作用的结果。高压变质岩含有特征性低温高压变质矿物如蓝闪石、青铝闪石、硬柱石和多硅白云母等,可用来进行年代学制约。上层的变质作用极为微弱,劈理面上的变质矿物主要以绢云母和绿泥石为主,伊利石结晶度也较低。

(4)下层存在大量的同构造期岩浆岩侵位。该岩浆岩的岩石类型主要为S型弱过铝质高钾钙碱性-钙碱性花岗岩。同构造岩浆岩侵位时间与高压变质岩折返时代总体近于同时。相比而言,上层则较少遭到同期岩浆岩侵位。上层内少量的岩浆作用主要呈现为地层内的火山岩夹层以及顺层和切层共存的侵入岩。

(5)双层结构的上、下层之间均为构造界面。该界面在羌塘造山带体现为伸展剥离构造,与含高压变质岩的增生杂岩的剥露过程相关。在雅鲁藏布江造山带,该界面为走滑断层性质。在中国台湾中央造山带,该界面则呈现为逆冲推覆构造。

2.2 陆缘俯冲是导致造山带双层结构的重要因素

基于地质观察,研究认为陆缘俯冲应在造山带

双层结构的形成过程中有着非常重要的作用。

从物质组成来看,双层结构的上层和下层都含有大量来自俯冲陆壳的被动陆缘物质。这些被动陆缘物质主要由斜坡相-海底扇相沉积物组成,也有部分陆棚相沉积。例如,在文中所研究的三个造山带中,上层逆冲叠瓦扇构造体系均主要由俯冲陆壳的被动陆缘变形而来,但下层俯冲杂岩也含有大量构造肢解的被动陆缘岩块。此外,上、下层不仅岩性相似,其内碎屑锆石年龄的分布型式也几乎一致。

从变形时间来看,双层结构上层逆冲叠瓦扇与下层俯冲杂岩内的透入性韧性剪切作用时代一致,且均与陆陆或弧-陆碰撞时代接近,而与大洋俯冲无关。例如,在羌塘造山带,上层逆冲叠瓦扇和下层俯冲杂岩均被晚三叠世同构造花岗岩侵位,暗示三者应都是近于同时形成。俯冲杂岩内高压变质岩的大规模晚三叠世折返与该期侵入作用同期发生。由于后者为陆陆碰撞初期板片断离或板片回卷的结果,因此该期变形应在古特提斯洋俯冲之后,也即是在碰撞期间或初期。在雅鲁藏布江增生杂岩带,位于下层加查增生杂岩内的同构造绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和同构造花岗岩脉的锆石U-Pb年龄都在约55 Ma,接近或晚于印度-亚洲陆陆碰撞。因此,位于下层的俯冲杂岩的形成时代应与印度-亚洲大陆碰撞直接相关,而与新特提斯洋的俯冲无关。

因此,基于上述特征,研究认为造山带内的双层结构主要是同一被动陆缘发生俯冲形成的深浅不同的构造体系。下层因具有“基质-岩块”的俯冲杂岩构造特点,文中称为陆缘型增生杂岩,以与传统的洋型增生杂岩区别。在羌塘造山带,陆缘型增生杂岩与洋型增生杂岩相互构造叠置,未见明确的界线。在雅鲁藏布江造山带,代表大洋俯冲阶段的大洋型增生杂岩为“朗县蛇绿岩带”“玉门蛇绿岩带”以及“隆子蛇绿岩带”等。这些大洋型增生杂岩均与文中研究的陆缘增生杂岩(加查增生杂岩)呈明显分隔,相互间为构造接触。在中国台湾造山带,台东纵谷以东的海岸山脉以大洋型增生杂岩为主,以西则为中央山脉-恒春半岛的陆缘型增生杂岩。

根据DSDP(深海钻探计划)和ODP(大洋钻探计划)的研究,“在大洋板块与大陆板块之间发生的缓慢而复杂的俯冲、碰撞的过程中,海沟逐渐后退,仰冲板块前端将发生刮削、底垫及前端构造剥蚀等构造作用”,而使得洋壳物质在海沟内壁增生形成

大洋型增生杂岩。俯冲通道内(或俯冲断层区域)则因上下板片的相对运动而发生强烈的剪切作用(王根厚等, 2009)。根据 Cloos (1993) 的研究, 俯冲带的这些构造作用(刮削、底垫及构造侵蚀等构造作用)的相对比例主要受到加入俯冲通道的物质体积这一因素控制。当体积巨大的洋内岛弧、海山等地体俯冲时, 俯冲通道将不能完全容纳, 超出部分即被刮削并拼贴至增生杂岩的浅部层次(Cloos, 1993)。

同理, 在陆缘俯冲过程中, 同样的构造过程也将发生(Zheng et al., 2016)。并且, 由于被动陆缘体积巨大, 在俯冲过程中必然大量被刮削拼贴在浅部层次, 从而形成双层结构上层的逆冲叠瓦扇构造体系。相应地, 加入俯冲通道的被动陆缘则将遭受强烈的剪切作用, 并底垫在上覆逆冲叠瓦扇底部, 从而形成双层结构的下层。

根据上述讨论, 基于羌塘造山带上层逆冲叠瓦扇出现有洋内岛弧、海山等单元与被动陆缘沉积体系直接构造接触的现象, 研究认为其双层结构是大洋和陆缘俯冲共同作用的结果。其中, 陆缘俯冲作用在上层逆冲叠瓦扇的形成中起到了主导作用。中国台湾造山带总体与羌塘造山带类似。雅鲁藏布江造山带双层结构则主要是陆缘俯冲的结果。伴随陆缘俯冲发生的构造侵蚀作用可能将先存大洋型增生杂岩带入深部, 导致藏东南 $91^{\circ}30' \sim 93^{\circ}E$ 范围内, 没有大洋型增生杂岩存在(Aikman et al., 2008)。

2.3 双层结构的厘定对理解造山带的意义

广义的碰撞造山带往往以高度变形的混杂岩带为核心, 两翼分布前陆褶皱冲断带以及前陆盆地(Hatcher and Williams, 1986; Koons, 1990; Willett et al., 1993)。一般认为, 位于造山带核心的混杂岩带主要由大洋俯冲消减形成的大洋型增生杂岩构成, 两翼的前陆褶皱冲断带和前陆盆地则是大陆碰撞过程的产物。随着大陆碰撞造山作用向克拉通内部扩展, 前陆区域的被动陆缘沉积体系常发生大规模冲断和褶皱变形, 从而形成前陆褶皱冲断带。前陆盆地则是发育在前陆褶皱冲断带之上的同构造沉积盆地。随着碰撞作用的持续, 前陆盆地的沉积中心逐渐向克拉通内部迁移, 并发生同沉积期变形(Zheng et al., 2016)。

因此, 目前在造山带的研究中, 海沟处俯冲带向大洋方向后退的增生造山作用以及大陆碰撞造山过程中向克拉通内部逐步扩展的前陆褶皱-冲断

作用均已有了较为深入的理解。然而, 在俯冲-碰撞过渡阶段, 或者说大陆碰撞初始阶段, 造山作用如何体现, 还较少被研究。这也充分体现为当前学术界在厘定代表初始碰撞的标志性地质事件方面存在的巨大争议。文章所提出的陆缘俯冲形成双层结构的过程可能为这一问题的理解提供新的视角。

从增生造山作用的角度来看, 如同洋内岛弧、海山等的俯冲增生, 双层结构形成的过程是巨大的被动陆缘俯冲增生的结果。但是, 从大陆碰撞的角度, 陆缘发生俯冲时, 无疑已经处于碰撞的初始阶段。然而, 该阶段进入俯冲带的物质应主要是被动陆缘的斜坡和海底扇部分。由于厚度相对较薄, 相应的构造行为主要以俯冲为主, 难以发生俯冲阻塞而导致碰撞的情况。因此, 这一阶段应变主要集中在陆缘俯冲界面(也就是俯冲断层位置), 将只有少部分应力传递至远离俯冲区域的被动陆缘部分, 从而不能体现出碰撞造山带的强烈挤压缩短作用。基于此, 这一阶段的构造变形以俯冲剪切为主, 文中试探性地称为“初始碰撞”阶段(图 12a)。

随着陆缘俯冲的持续进行, 具有较大厚度的陆棚也必然进入俯冲带。随着越来越多的低密度陆缘物质的俯冲, 俯冲通道必将被阻塞, 俯冲界面(俯冲断层)因此被锁住, 上下盘之间的耦合性因而得到极大的提高。然而, 由于汇聚作用仍然在持续, 挤压应力将向克拉通内部扩展, 导致前陆区域发生大规模褶皱和冲断作用, 从而形成线状的褶皱和冲断带。这一阶段应变以强烈的挤压缩短为主导, 文中试探性地称为“成熟碰撞”阶段(图 12b)。

值得注意的是, 文中位于双层结构下层的陆缘型增生杂岩与以往提出的“盖层活化”具有一定的区别。“活化盖层”指的是在造山带前陆褶皱冲断带发育过程中, 下降到变质等温线之下发生了变质作用的被动陆缘部分。“活化盖层”内常常由于应力集中而形成复杂的构造变形, 并会因较高的温度发生韧性变形, 形成千糜岩、小型揉皱和膝褶等构造(侯泉林, 2018)。一般认为, “活化盖层”内的变质矿物可指示碰撞事件的上限。而文中所述的陆缘型增生杂岩是被动陆缘俯冲发生构造肢解的产物, 具有混杂岩的构造特点。由于后者形成于碰撞的最初始阶段, 因此其内的变质矿物所揭示的时代无疑将能更准确地指示碰撞事件的上限(侯泉林, 2018)。

文中所述双层结构的上层与前陆褶皱冲断带总

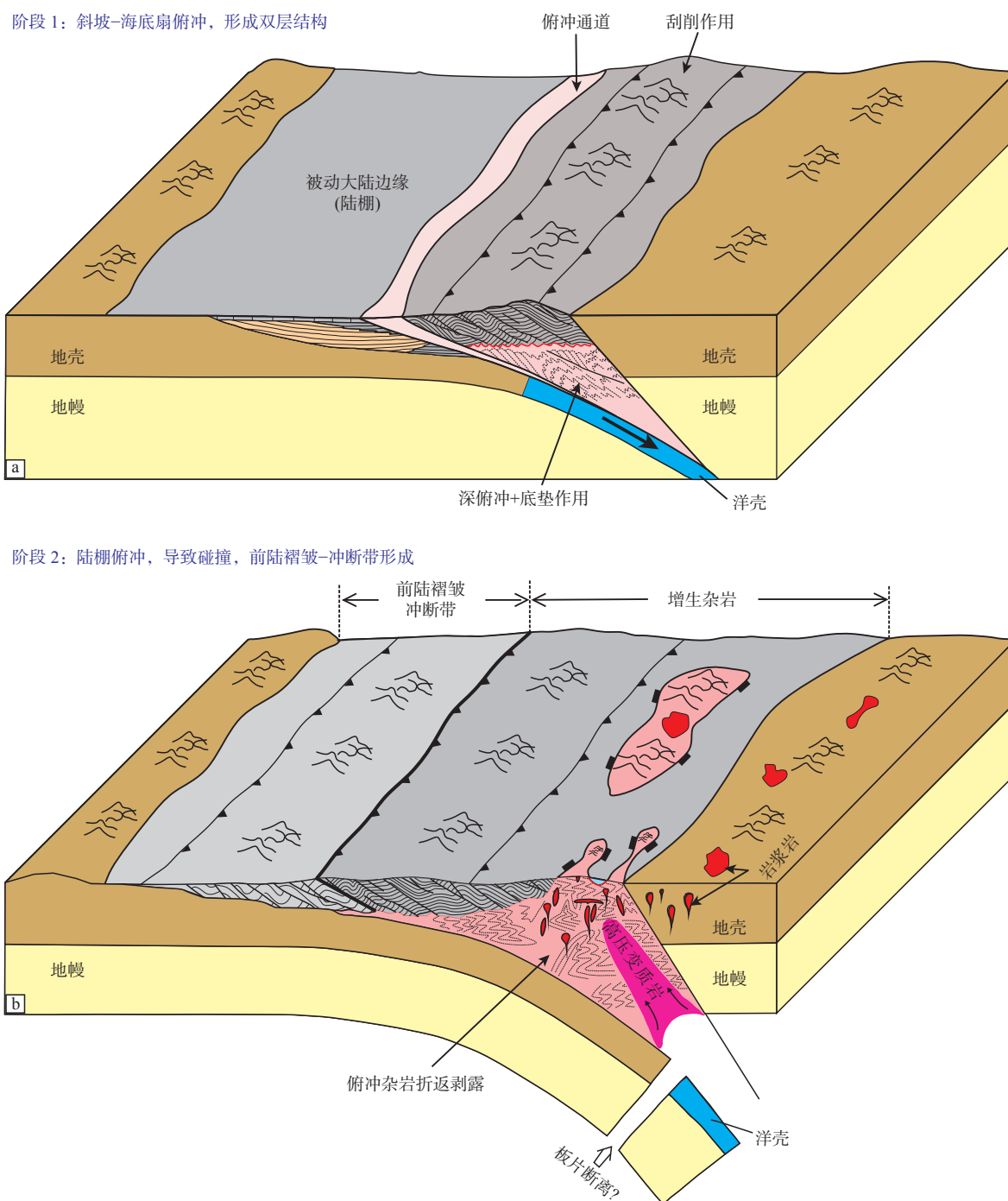


图 12 陆壳两阶段俯冲过程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the two-stage continental subduction process during the continent and ocean transformation

体较为相似: 都是被动陆缘变形而来, 变形样式也都是褶皱和逆冲断层。然而, 二者却是不同碰撞阶段的产物: 前者在“初始碰撞”(陆缘俯冲)过程中形成, 后者是“成熟碰撞”的产物。需要指出的是, 从物质组成上看, 二者也可能会略有不同: 前陆逆冲带应全部由被动陆缘物质组成, 但双层结构的上层可能会出现被动陆缘与洋岛、海山残块构造拼贴的现象。这是因为, 陆缘俯冲前, 体积巨大的洋岛、

海山等洋内块体可能会被刮削在浅部层次, 从而与陆缘俯冲阶段刮削下来的被动陆缘拼贴在一起。该现象在羌塘造山带已有报道。

2.4 俯冲杂岩的折返与双层结构的构造破坏

随着大陆碰撞过程的持续与深入, “初始碰撞”阶段形成的双层结构可能会被构造破坏, 从而导致下层的增生杂岩发生折返与剥露。因此, 上层和下层之间界面的构造性质是理清双层结构构造破坏

方式与折返剥露机制的关键。

从文中的三个案例来看,双层结构之间的构造边界可以为伸展剥离断层、走滑断层和逆冲推覆断层三种类型。①在羌塘造山带,含高压变质岩的增生杂岩向上穿过石炭系一二叠系组成的逆冲叠瓦扇呈穹状形态剥露。该剥露过程与二者之间的大规模低角度正断层的活动紧密相关(Kapp et al., 2000, 2003; Li et al., 2020)。随着该断层的活动,大量高压变质岩在210~220 Ma发生集中性地折返(李才, 1997; 邓希光等, 2000; Kapp et al., 2003; 李才等, 2006; Pullen et al., 2008; 董永胜等, 2009; 翟庆国等, 2009; Zhang et al., 2010; Zhai et al., 2011b; Liang et al., 2012),同构造花岗岩也在这一时期发生侵位(胡培远等, 2010; 李静超等, 2015)。同时,同期岩浆作用也表现为双峰式火山作用(Zhai et al., 2007; Wang et al., 2008; Li et al., 2018)。喷出的火山岩广泛地覆盖在剥露出地表的增生杂岩和上层逆冲叠瓦扇之上。因此,羌塘造山带双层结构明显是被地壳尺度的伸展构造所破坏。该伸展背景可能由陆壳俯冲晚期深部洋壳的板片断离及/或洋壳板片回卷等过程所诱发(Wu et al., 2016)。②在雅鲁藏布江造山带,深部的加查增生杂岩与上层逆冲叠瓦扇呈走滑断层接触,呈现花状构造的特征。由于斜向碰撞导致的压扭性构造作用可形成大规模走滑断层,因此雅鲁藏布江造山带的走滑断层可能与以往提出的印度陆块的斜向碰撞有关(Treloar and Izatt, 1993; 周征宇和廖宗廷, 2005)。但该压扭性构造作用可能因抬升有限而未导致深部高压变质岩的折返剥露,因此目前加查增生杂岩内还未见高压变质岩折返的报道。③在中国台湾中央造山带,深部的增生杂岩逆冲至被动陆缘形成的褶皱-冲断带之上(黄奇瑜, 2017)。

3 结论

(1)针对羌塘造山带、雅鲁藏布江造山带和中国台湾造山带的实例研究表明,造山带常常具有双层结构。上部为一套逆冲叠瓦扇构造体系,仍具史密斯地层特点。下部由具非史密斯地层特点的俯冲杂岩组成,且不同部分往往经历了不同程度的变质作用。

(2)造山带双层结构是同一套被动陆缘物质同时变形形成的、深浅不同的构造体系。被动陆缘的

俯冲对控制其形成起到了至关重要的主导作用。

(3)被动陆缘的俯冲可分为斜坡-海底扇和陆棚俯冲的两个阶段。斜坡-海底扇俯冲阶段,碰撞作用不明显,属“初始碰撞”阶段。陆棚俯冲阶段,俯冲通道被阻塞,进入完全的“成熟碰撞”阶段。

(4)随着碰撞作用的发展,双层结构往往被构造破坏,上下层之间的构造界面性质是理清构造破坏方式和折返剥露机制的关键。

References

- AIKMAN A B, HARRISON TM, LIN D, 2008. Evidence for early (> 44 Ma) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southeastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(1-2): 14-23.
- BEYSSAC O, SIMOES M, AVOUAC J P, et al., 2007. Late Cenozoic metamorphic evolution and exhumation of Taiwan[J]. *Tectonics*, 26(6): TC6001.
- BEYSSAC O, NEGRO F, SIMOES M, et al., 2008. High - pressure metamorphism in Taiwan: from oceanic subduction to arc - continent collision?[J] *Terra Nova*, 20(2): 118-125.
- CHAI B H T, 1972. Structure and tectonic evolution of Taiwan[J]. *American Journal of Science*, 272(5): 389-422.
- CHANG C P, ANGELIER J, LEE T Q, et al., 2003. From continental margin extension to collision orogen: structural development and tectonic rotation of the Hengchun peninsula, southern Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 361(1-2): 61-82.
- CHANG L S, 1964. A biostratigraphic study of the Tertiary in the Hengchun peninsula, Taiwan, based on smaller Foraminifera (I. Northern Part)[J]. *Proceedings of the Geological Society of China*(7): 48-62.
- CHANG L S, 1966. A biostratigraphic study of the Tertiary in the Hengchun Peninsula, Taiwan, based on smaller foraminifera (III: Southern part)[J]. *Proceedings of the Geological Society of China*(9): 55-63.
- CHEN, A. T., SHEN, C. C., BYRNE, T. B., et al., 2019. Mantle fluids associated with crustal-scale faulting in a continental subduction setting, Taiwan. *Scientific reports*, 9(1), 1-7.
- CHEN C T, LEE J C, CHAN Y C, et al., 2014. Elucidating the geometry of the active Shanchiao Fault in the Taipei metropolis, northern Taiwan, and the reactivation relationship with preexisting orogen structures[J]. *Tectonics*, 33(12): 2400-2418.
- CHENG W B, WANG C, SHYU C T, et al., 2002. Crustal structure of the convergent plate-boundary zone, eastern Taiwan, assessed by seismic tomography[M]//BYRNE T B, LIU C S. *Geology and geophysics of an arc-continent collision, Taiwan*. Boulder: Geological Society of America: 161-176.
- CHI W R, NAMSON J, SUPPE J, 1981. Stratigraphic record of the plate interactions of the Coastal Range of eastern Taiwan[J]. *Memoir of the Geological Society of China*, 4: 155-194.
- CHOPIN C, 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(2): 107-118.

- CLOOS M, 1993. Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts[J]. *GSA Bulletin*, 105(6): 715-737.
- DAN W, WANG Q, LI X H, et al., 2019. Low $\delta^{18}\text{O}$ magmas in the carboniferous intra-oceanic arc, central Tibet: implications for felsic magma generation and oceanic arc accretion[J]. *Lithos*, 326-327: 28-38.
- DENG X G, DING L, LIU X H, et al., 2000. Petrology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic ages of blueschists in Gangmar, central Qiangtang, northern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(5): 423-427. (in Chinese with English abstract)
- DENG X G, DING L, LIU X H, et al., 2002. Geochemical characteristics of the blueschists and its tectonic significance in the central Qiangtang area, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 517-525. (in Chinese with English abstract)
- DEWEY J F, 1980. Episodicity, sequence and style at convergent plate boundaries[M]//STRANGWAY D W. The continental crust and its mineral deposits. St. John's: Geological Association of Canada: 553-573.
- DEWEY J F, RYAN P D, ANDERSEN T B, 1993. Orogenic uplift and collapse, crustal thickness, fabrics and metamorphic phase changes: the role of eclogites[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1): 325-343.
- DITULLIO L, LAUGHLAND M M, BYRNE T, 1993. Thermal maturity and constraints on deformation from illite crystallinity and vitrinite reflectance in the shallow levels of an accretionary prism: eocene-oligocene Shimanto Belt, Southwest Japan[M]. Geological Society of America: 63-82.
- DONG Y S, ZHANG X Z, SHI J R, et al., 2009. Petrology and metamorphism of garnet-muscovite schist from high pressure metamorphic belt in central Qiangtang, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1201-1206. (in Chinese with English abstract)
- ERNST W G, 2010. Subduction-zone metamorphism, calc-alkaline magmatism, and convergent-margin crustal evolution[J]. *Gondwana Research*, 18(1): 8-16.
- FANG D R, WANG G H, HISADA K I, et al., 2019. Provenance of the Langjiexue Group to the South of the Yarlung-Tsangpo suture zone in southeastern Tibet: insights on the evolution of the Neo-Tethys Ocean in the Late Triassic[J]. *International Geology Review*, 61(3): 341-360.
- FANG D R, ZHANG J, HISADA K I, et al., 2020. Geological anatomy of the Upper Triassic sequence in southeastern Tibet: implication for tectonic evolution of the eastern Himalayan Orogen[J]. *Geological Journal*, 55(10): 6607-6624.
- FULLER C W, WILLETT S D, FISHER D, et al., 2006. A thermomechanical wedge model of Taiwan constrained by fission-track thermochronometry[J]. *Tectonophysics*, 425(1-4): 1-24.
- GRAHAM C M, POWELL R, 1984. A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2(1): 13-31.
- HATCHER JR R D, WILLIAMS R T, 1986. Mechanical model for single thrust sheets Part I: taxonomy of crystalline thrust sheets and their relationships to the mechanical behavior of orogenic belts[J]. *GSA Bulletin*, 97(8): 975-985.
- HESSAMI K, KOYI H A, TALBOT C J, et al., 2001. Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros Mountains[J]. *Journal of the Geological Society*, 158(6): 969-981.
- HETLAND E A, WU F T, 2001. Crustal structure at the intersection of the Ryukyu trench with the arc-continent collision in Taiwan: results from an offshore-onshore seismic experiment[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 12(S2): 231-248.
- HO C S, 1988. An Introduction to the Geology of Taiwan: Explanatory Text of the Geologic Map of Taiwan; Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs: Taipei City.
- HOU Q L, 2018. Advanced Structural Geology volume II: New Theories and Applications. Beijing: Science Press. (in Chinese with English abstract).
- HU P Y, LI C, YANG H T, et al., 2010. Characteristic, zircon dating and tectonic significance of Late Triassic granite in the Guogangjianshan area, central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1825-1832. (in Chinese with English abstract)
- HUANG C Y, WU W Y, CHANG C P, et al., 1997. Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 281(1-2): 31-51.
- HUANG C Y, YUAN P B, LIN C W, et al., 2000. Geodynamic processes of Taiwan arc-continent collision and comparison with analogs in Timor, Papua New Guinea, Urals and Corsica[J]. *Tectonophysics*, 325(1-2): 1-21.
- HUANG C Y, YUAN P B, TSAO S J, 2006. Temporal and spatial records of active arc-continent collision in Taiwan: a synthesis[J]. *GSA Bulletin*, 118(3-4): 274-288.
- HUANG C Y, YEN Y, ZHAO Q H, et al., 2012. Cenozoic stratigraphy of Taiwan: window into rifting, stratigraphy and paleoceanography of South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(24): 3130-3149.
- HUANG C Y, 2017. Geological ages of Taiwan stratigraphy and tectonic events[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 47(4): 394-405. (in Chinese with English abstract)
- HUANG T Y, GUNG Y, KUO B Y, et al., 2015. Layered deformation in the Taiwan orogen[J]. *Science*, 349(6249): 720-723.
- ISHIZAKI K, 1942. Geological observation in the hills region to the west of Kosyun[J]. *Taiwan Tigaku Kizi*, 13: 241-247.
- KAPP P, YIN A, MANNING C E, et al., 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 28(1): 19-22.
- KAPP P, YIN A, MANNING C E, et al., 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. *Tectonics*, 22(4): 1043.
- KOONS P O, 1990. Two-sided orogen: collision and erosion from the sandbox to the Southern Alps, New Zealand[J]. *Geology*, 18(8): 679-682.
- KUSKY T M, WINDLEY B F, SAFONOVA I, et al., 2013. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: a record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion[J]. *Gondwana Research*, 24(2): 501-547.
- LESTER R, MCINTOSH K, VAN AVENDONK H J A, et al., 2013. Crustal accretion in the Manila trench accretionary wedge at the transition from subduction to mountain-building in Taiwan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 375: 430-440.
- LI C, ZHAI Q G, DONG Y S, et al., 2006. Discovery of eclogite and its geological significance in Qiangtang area, central Tibet[J]. *Chinese Science*

- Bulletin, 51(9): 1095-1100. (in Chinese with English abstract)
- LI D, WANG G H, GAO J H, et al., 2019. The continental subduction in the evolution of central Qiangtang mélange belt and its tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 61(9): 1143-1170.
- LI D, WANG G H, BONS P D, et al., 2020. Subduction reversal in a divergent double subduction zone drives the exhumation of southern Qiangtang blueschist-bearing mélange, central Tibet[J]. *Tectonics*, 39(4): e2019TC006051.
- LI D, WANG G H, LIU Z Y, et al., 2021. Subduction of the Paleozoic intra-oceanic arc terrane as an important mechanism for the formation of the South Qiangtang accretionary complex: evidence from riwanchaka intra-oceanic arc[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 176-189. (in Chinese with English abstract)
- LI G M, LI J X, ZHAO J X, et al., 2015. Petrogenesis and tectonic setting of Triassic granitoids in the Qiangtang terrane, central Tibet: evidence from U-Pb ages, petrochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 443-455.
- LI X R, WANG J, CHENG L L, et al., 2018. New insights into the Late Triassic Nadigangri Formation of northern Qiangtang, Tibet, China: constraints from U-Pb ages and Hf isotopes of detrital and magmatic zircons[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1451-1467.
- LI J C, ZHAO Z B, ZHENG Y L, et al., 2015. The magmatite evidences in southern Qiangtang for paleo-Tethys ocean subducting collision: Gangtang-co granites in Rongma, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2078-2088. (in Chinese with English abstract)
- LIANG X, WANG G H, YUAN G L, et al., 2012. Structural sequence and geochronology of the Qomo Ri accretionary complex, central Qiangtang, Tibet: implications for the Late Triassic subduction of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 470-481.
- LIN A T, WATTS A B, HESSELBO S P, 2003. Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region[J]. *Basin Research*, 15(4): 453-478.
- LIN A T, Yang C C, Wang M H, et al., 2021. Oligocene-Miocene sequence stratigraphy in the northern margin of the South China Sea: An example from Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 213(15): 1-25.
- LIN C H, 2002. Active continental subduction and crustal exhumation: the Taiwan orogeny[J]. *Terra Nova*, 14(4): 281-287.
- LIU J G, HO C O, YEN T P, 1975. Petrology of some glaucophane schists and related rocks from Taiwan[J]. *Journal of Petrology*, 16(1): 80-109.
- LIU J G, 1981. Petrology of metamorphosed oceanic rocks in the Central Range of Taiwan[J]. *Memoir of the Geological Society of China*(4): 291-341.
- LIU C S, Deffontaines B, LU C Y, et al., 2004. Deformation patterns of an accretionary wedge in the transition zone from subduction to collision offshore southwestern Taiwan[J]. *Marine Geophysical Researches*, 25(1): 123-137.
- LIU H, WANG B D, MA L, et al., 2016. Late Triassic syn-exhumation magmatism in central Qiangtang, Tibet: evidence from the sangehu adakitic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 132: 9-24.
- MALAVIEILLE J, TRULLENQUE G, 2009. Consequences of continental subduction on forearc basin and accretionary wedge deformation in SE Taiwan: insights from analogue modeling[J]. *Tectonophysics*, 466(3-4): 377-394.
- MASSONNE H J, SCHREYER W, 1987. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96(2): 212-224.
- MATTE P, MATTAUER M, OLIVET J M, et al., 1997. Continental subductions beneath Tibet and the Himalayan orogeny: a review[J]. *Terra Nova*, 9(5-6): 264-270.
- MCINTOSH K, NAKAMURA Y, WANG T K, et al., 2005. Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine Sea[J]. *Tectonophysics*, 401(1-2): 23-54.
- MCINTOSH K, VAN AVENDONK H, LAVIER L, et al., 2013. Inversion of a hyper-extended rifted margin in the southern Central Range of Taiwan[J]. *Geology*, 41(8): 871-874.
- MUKOYOSHI H, HARA H, OHMORI-IKEHARA K, 2007. Quantitative estimation of temperature conditions for illite crystallinity: comparison to vitrinite reflectance from the Chichibu and Shimanto accretionary complexes, eastern Kyushu, Southwest Japan[J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 58(1-2): 23-31.
- NIE Z T, SONG Z M, 1983. Fusulinids of lower Permian tunlonggongba formation from rutog of Xizang (Tibet), China[J]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*(1): 43-55. (in Chinese with English abstract)
- PAGE B M, LAN C Y, 1983. The Kenting Mélange and its record of tectonic events[J]. *Memoir of the Geological Society of China*(5): 227-248.
- PELLETIER B, STEPHAN J F, 1986. Middle miocene deduction and late miocene beginning of collision registered in the hengchun peninsula: geodynamic implications for the evolution of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 125(1-3): 133-160.
- PULLEN A, KAPP P, GEHRELS G E, et al., 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Geology*, 36(5): 351-354.
- RAU R J, WU F T, 1995. Tomographic imaging of lithospheric structures under Taiwan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 133(3-4): 517-532.
- REED D L, LUNDBERG N, LIU C S, et al., 1992. Structural relations along the margins of the offshore Taiwan accretionary wedge: implications for accretion and crustal kinematics[J]. *Acta Geologica Taiwanica*(30): 105-122.
- RIDOLFI F, RENZULLI A, PUERINI M, 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45-66.
- ROKKAKU H, MAKIYAMA T, 1934. Report on the geologic survey of Hengchun oilfield, Kaoshiung Prefecture[J]. Bureau of Productive Industries, Government General of Taiwan.
- SHYU J B H, SIEH K, CHEN Y G, 2005. Tandem suturing and disarticulation of the Taiwan orogen revealed by its neotectonic elements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 167-177.
- SIBUET J C, HSU S K, 2004. How was Taiwan created?[J]. *Tectonophysics*, 379(1-4): 159-181.
- SMITH D C, 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics[J]. *Nature*, 310(5979): 641-644.
- SUN X F, 2016. Study on the middle paleozoic-devonian sedimentary facies

- and environment in Rongma, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- SUNG Q, 1991. Geological Map and the explanatory text for Hengchun peninsula, South Taiwan, on scale 1: 50, 000[J]. Central Geological Survey, MOEA: Taiwan.
- SUPPE J, 1984. Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction and back-arc spreading near Taiwan[J]. *Memoir of the Geological Society of China*(6): 21-33.
- TIAN Z X, YAN Y, HUANG C Y, 2019. Geochemistry and geochronology of the accreted mafic rocks from the Hengchun Peninsula, southern Taiwan: origin and tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 124(3): 2469-2491.
- TRELOAR P J, IZATT C N, 1993. Tectonics of the Himalayan collision between the Indian Plate and the Afghan Block: a synthesis[J]. *Geological Society London*, 74(1): 69-87.
- VON HUENE R, SCHOLL D W, 1991. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 29(3): 279-316.
- WANG G H, HAN F L, YANG Y J, et al., 2009. Discovery and geologic significance of Late Paleozoic accretionary complexes in central Qiangtang, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1181-1187. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, FU X G, CHEN W X, et al., 2008. Chronology and geochemistry of the volcanic rocks in Woruo Mountain region, northern Qiangtang depression: implications to the Late Triassic volcanic-sedimentary events[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 51(2): 194-205.
- WANG X M, LIOU J G, MAO H K, 1989. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 17(12): 1085-1088.
- WANG Z B, GAO J H, WANG G H, 2017. Non-fusuline foraminifers from the longge formation in rongma township, nyima county, Tibet and Their geological significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 41(4): 392-400. (in Chinese with English abstract)
- WILLETT S, BEAUMONT C, FULLSACK P, 1993. Mechanical model for the tectonics of doubly vergent compressional orogens[J]. *Geology*, 21(4): 371-374.
- WU F T, LIANG W T, LEE J C, et al., 2009. A model for the termination of the Ryukyu subduction zone against Taiwan: a junction of collision, subduction/separation, and subduction boundaries[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 114(B7): B07404.
- WU H, LI C, CHEN J W, et al., 2016. Late Triassic tectonic framework and evolution of central Qiangtang, Tibet, SW China[J]. *Lithosphere*, 8(2): 141-149.
- YUI T F, LO C H, 1989. High-pressure metamorphosed ophiolitic rocks from the Wanlung area, Taiwan[J]. *Proceedings of the Geological Society of China*, 32(1): 47-62.
- ZHAI Q G, LI C, HUANG X P, 2006. Geochemistry of Permian basalt in the Jiaomuri area, central Qiangtang, Tibet, China, and its tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1419-1427. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Q G, LI C, 2007. Zircon SHRIMP dating of volcanic rock from the Nadigangri Formation in Juhuashan, Qiangtang, northern Tibet and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 795-800. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Q G, CAI L, HUANG X P, 2007. The fragment of Paleo-Tethys ophiolite from central Qiangtang, Tibet: geochemical evidence of metabasites in Guoganjianan[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 50(9): 1302-1309.
- ZHAI Q G, LI C, WANG J, et al., 2009. Petrology, mineralogy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology for rongma blueschist from central Qiangtang, northern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2281-2288. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Q G, JAHN B M, ZHANG R Y, et al., 2011a. Triassic subduction of the Paleo-Tethys in northern Tibet, China: evidence from the geochemical and isotopic characteristics of eclogites and blueschists of the Qiangtang Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1356-1370.
- ZHAI Q G, ZHANG R Y, JAHN B M, et al., 2011b. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: petrology, geochronology and metamorphic $P-T$ path[J]. *Lithos*, 125(1-2): 173-189.
- ZHAI Q G, JAHN B M, WANG J, et al., 2016. Oldest Paleo-Tethyan ophiolitic mélangé in the Tibetan Plateau[J]. *GSA Bulletin*, 128(3-4): 355-373.
- ZHANG K J, CAI J X, ZHANG Y X, et al., 2006. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3-4): 722-729.
- ZHANG K J, TANG X C, WANG Y, et al., 2011. Geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of early Mesozoic bimodal volcanism in northern Tibet, western China: constraints on the exhumation of the central Qiangtang metamorphic belt[J]. *Lithos*, 121(1-4): 167-175.
- ZHANG X C, YAN Y, HUANG C Y, et al., 2014. Provenance analysis of the Miocene accretionary prism of the Hengchun Peninsula, southern Taiwan, and regional geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85: 26-39.
- ZHANG X Z, DONG Y S, LI C, et al., 2010. Identification of the eclogites with different ages and their tectonic significance in central Qiangtang, Tibetan Plateau: constraints from $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1815-1824. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z M, ZHAO G C, SANTOSH M, et al., 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction?[J]. *Gondwana Research*, 17(4): 615-631.
- ZHENG Y F, ZHAO Z F, CHEN Y X, 2013. Continental subduction channel processes: plate interface interaction during continental collision[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(35): 4371-4377.
- ZHENG Y F, CHEN Y X, 2016. Continental versus oceanic subduction zones[J]. *National Science Review*, 3(4): 495-519.
- ZHOU Z Y, LIAO Z T, 2005. The model for the subduction and collision of the Indian plate with the Eurasian plate and its implications for the tectonic evolution of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(4): 27-32. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 邓希光, 丁林, 刘小汉, 等, 2000. 青藏高原羌塘中部冈玛日地区蓝闪石片岩及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学[J]. *科学通报*, 45(21): 2322-2326.
- 邓希光, 丁林, 刘小汉, 2002. 青藏高原羌塘中部蓝片岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 18(4): 517-525.

- 董永胜,张修政,施建荣,等,2009.藏北羌塘中部高压变质带中石榴子白云母片岩的岩石学和变质特征[J].地质通报,28(9): 1201-1206.
- 侯泉林,2018.高等构造地质学(第二卷):新理论与应用[M].北京:科学出版社.
- 胡培远,李才,杨韩涛,等,2010.青藏高原羌塘中部果干加年山一带晚三叠世花岗岩的特征、锆石定年及其构造意义[J].地质通报,29(12): 1825-1832.
- 黄奇瑜,2017.台湾岛的年龄[J].中国科学:地球科学,47(4): 394-405.
- 李才,1997.西藏羌塘中部蓝片岩青铝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J].科学通报,42(4): 448.
- 李才,翟庆国,董永胜,等,2006.青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J].科学通报,51(1): 70-74.
- 李典,王根厚,刘正勇,等,2021.古岛弧地体的俯冲是南羌塘增生杂岩形成的重要机制:来自日湾茶卡洋岛的证据[J].沉积与特提斯地质,41(2): 176-189.
- 李静超,赵中宝,郑艺龙,等,2015.古特提斯洋俯冲碰撞在南羌塘的岩浆岩证据:西藏荣玛乡冈塘错花岗岩[J].岩石学报,31(7): 2078-2088.
- 聂泽同,宋志敏,1983.西藏阿里地区日土县下二叠统吞龙共巴组的[J].地球科学—武汉地质学院学报,(1): 43-55.
- 孙霄飞,2016.西藏荣玛乡中奥陶统一泥盆系沉积相及沉积环境研究[D].北京:中国地质大学(北京).
- 王根厚,韩芳林,杨运军,等,2009.藏北羌塘中部晚古生代增生杂岩的发现及其地质意义[J].地质通报,28(9): 1181-1187.
- 王忠宝,高金汉,王根厚,2017.西藏尼玛县荣玛乡二叠系龙格组小有孔虫及地质意义[J].地层学杂志,41(4): 392-400.
- 翟庆国,李才,黄小鹏,2006.西藏羌塘中部角木日地区二叠纪玄武岩的地球化学特征及其构造意义[J].地质通报,25(12): 1419-1427.
- 翟庆国,李才,王军,等,2009.藏北羌塘中部绒玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学[J].岩石学报,25(9): 2281-2288.
- 张修政,董永胜,李才,等,2010.青藏高原羌塘中部不同时代榴辉岩的识别及其意义:来自榴辉岩及其围岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学的证据[J].地质通报,29(12): 1815-1824.
- 周征宇,廖宗廷,2005.印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的新模式及其对青藏高原构造演化的影响[J].沉积与特提斯地质,25(4): 27-32.

获奖者简历:

王根厚,中国地质大学(北京)二级教授、博士生导师。2021年获得第17次李四光地质科学奖教师奖。现任教育部高等学校地质学类专业教学指导委员会副主任、教育部本科合格评估专家、中国核工业教育学会副理事长、全国区域地质调查专家委员会委员等职务。曾以学者、专家等身份,访学于德、美、英、日、俄等国家的高等学校,并与多所国外高等学校建立互派学生野外地质交流机制。首批“全国高校黄大年式教师团队”、国家级优秀教学团队、国家级大学生校外基地、教育部虚拟教研室、国家级地质学一流专业以及国家级精品课程、资源共享课程、精品视频公开课和课程思政示范课负责人。依托地质出版社出版教材5部,曾获国家级教学成果二等奖1项(R1)、北京市教学成果一等奖3项(R1、R4、R5)、二等奖4项(3R1、R2)。《地质力学学报》副主编,长期从事青藏高原基础地质、增生造山带和应用构造研究,出版专著8部;发表论文230余篇,其中SCI70余篇。荣获省部级科学技术奖一等奖4项等獎項(R1、R6、R7、R6);为国家高层次人才特殊支持计划教学名师、国家课程思政示范课教学名师,享受国务院政府特殊津贴,入选首批中国地质调查局首席填图科学家称号。

