陆内造山带特征及其动力学讨论

舒良树

南京大学内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室，大陆动力学研究院，南京，210023

内容提要：板块构造理论上陆后遇到了难解之谜。陆内宽广的造山带、频繁的陆内地震、陆内普遍发育的透入性变形构造及其巨量的过铝质花岗岩，是大陆构造的普遍现象，陆内（或板内）构造已经成为板块构造理论的重要组成部分。本文简要回顾了大陆变形与陆内造山带的研究历程，总结了陆内造山带的基本特征，包括定义、位置、规模、地质特征、地壳结构、岩浆活动、应变分布、山根、热能、动力源等，结合自己的研究，对世界上几个典型陆内造山带的地质特征进行了介绍，展示了华南早古生代陆内造山带与板缘造山带地质特性的对比，对其动力学进行了讨论，提出了现今面临的挑战及其研究展望。

关键词：大陆变形；陆内造山；地质特征；大陆动力学；讨论与展望

1 陆内构造研究进程

板块构造理论上陆后遇到了难解之迷。传统的板块俯冲-碰撞理论模式难以解决大陆内部漫长复杂的地质构造演化问题。陆内宽广的造山带、频繁的陆内地震、陆内普遍发育的透入性变形构造及其巨量的过铝质花岗岩，是大陆构造的普遍特征。20世纪70年代人们就已经注意到远离板块边缘发生的强烈构造-岩浆活动现象，认为陆内造山作用是板缘俯冲-碰撞应力和能量朝大陆内部传导而导致的大陆内部构造变形（Martin，1983）。80年代以来国际地学界诸多研究计划都与大陆造山、板内岩浆作用与构造变形密切相关。陆内造山带蕴藏着古大陆形成与演化及其动力学过程的丰富地质记录，是研究大陆内部构造的关键。板内构造变形与造山作用已经成为板块构造理论研究的新进展和重要组成部分（Tapponnier et al.，1986；Condie，1989；Li Xianhua et al.，2009；Li Zhengxiang et al.，2010；Charvet et al.，2010；Wang Yuejun et al.，2010；Xu Zhiqin et al.，2013；Zhang Guowei et al.，2013；Shu Liangshu et al.，2008）。开展大陆内部造山带成因机制、构造-岩浆作用、大地沉积环境、中-深层次韧性变形几何学、运动学、年代学的研究，有助于人们在时间和空间的纵深上深入认识陆壳形成过程中的洋陆格局与转换、岩浆的成因与侵位机制、不同深度层次物质的流变学特征和演化规律，提升对大自然奥秘的认知水平（Xu Zhiqin et al.，2010）。

Martin等通过国际地科联的国际合作项目，最早组织开展了欧洲和非洲陆内造山带的多学科研究，并出版了陆内褶皱造山带的研究专辑（Martin et al.，1983）。研究团队从野外地质学、古生物学、沉积学、岩石学、构造变形、地球化学、年代学和地球物理学等方面，对欧洲华里西期陆内造山带和非洲纳米比亚泛非期Damara陆内造山带进行了重点解剖性研究。一个显著的地质事实是，这些陆内造山带具有厚大的裂谷或海槽型复理石沉积、陆表海碳酸盐沉积以及造山期强烈褶皱、逆冲与拆沉（delamination）变形和花岗岩浆活动，但缺少蛇绿岩、岛弧火山岩-火山碎屑岩和高压低温蓝片岩（Martin，1983；Weber et al.，1983；Nex et al.，2001）。稍后，许多学者开始对新生代的天山造山带（Zhao Junmeng et al.，2003；Omuralieva et al.，2009；Steffen et al.，2011）、澳大利亚中部新元古代-古生代造山带（Hand et al.，1999；Scrimgeour et al.，2001；Buick et al.，2008；Raimondo et al.，

注：本文为国家自然科学基金项目（编号41772204，91955203）和国家重大研发计划项目（编号2016YFC0600202）资助的成果。
收稿日期：2020-08-08；改回日期：2020-08-28；网络发表日期：2020-09-21；责任编辑：黄敏。
作者简介：舒良树，男，1951年生，博士，教授，构造地质学专业。Email：lsshu@nju.edu.cn。

引用本文：舒良树. 2021. 陆内造山带特征及其动力学讨论. 地质学报，95(1)：98～106，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020287.
Shu Liangshu. 2021. Principal features of intracontinental orogenic belt and discussions on its dynamics. Acta Geologica Sinica，95(1)：98～106.

2014)、欧洲新生代的比利牛斯造山带(Debelmas et al.,2004)、华南早古生代造山带(Ren Jishun et al.,1989; Faure et al., 2009; Li Xianhua et al., 2009; Li Zhengxiang et al., 2010; Wang Yuejun et al., 2010,2012; Zhang Guowei et al., 2013; Shu Liangshu et al., 2014, 2015; Shu Liangshu et al., 2008)、秦岭中生代造山带以及华北北部晚中生代燕山造山带(Dong Yunpeng et al., 2016; Dong Yunpeng et al., 2016)等进行了多学科的综合研究,从中总结出陆内造山带的基本特征和一般规律。

2　陆内造山带的基本特征

定义:发育在大陆内部岩石圈表层、远离活动板块边界、由挤压应力作用形成的地壳加厚变形带(Debelmas et al.,2004; Raimondo et al., 2014)。

位置:远离活动板块边界的大陆块体内部(Martin, 1983)。

地质特征:①没有直接的板块和板缘相互作用的物质表现及其形迹,②可发生明显地壳缩短增厚和深部岩石的折返,③岩石圈强度明显弱化,形成宽广的变形带,④作用范围不穿越岩石圈(Debelmas et al.,2004)。

规模:与典型的板块碰撞造山带类似,可以宽数百千米,延伸数千千米。如中亚天山的新生代造山带,近 E-W 方向长 2500 km,近 S-N 方向宽 300～500 km(图 1);澳大利亚中部的 Petermann 新元古代-早古生代造山带,近 E-W 方向延伸 1500km,近 S-N 方向宽 300km。

地壳-岩石圈结构:造山带两侧地质单元具有相同的地壳-岩石圈结构和演化历史。山体为地壳增厚带,两侧被盆地所挟持,盆山之间以大型断层为界,断层及其上驼的岩块插入中地壳,形成厚皮构造,致使地壳加厚,伴随走滑剪切变形。中亚的天山和澳大利亚中部的 Alice Springs 和 Petermann 造山带均有此特征。天山的莫霍面在 45～75 km 深度,而塔里木盆地只有 40～50 km。塔里木盆地朝北、准噶尔盆地朝南往天山山体的大陆俯冲,致使陆壳加厚,山体隆升;其汇聚速率达到每年 16～20 mm,而澳大利亚中部的 Alice Springs 平均每年只有 2 mm(Raimondo et al., 2014)。

应变分布:普遍存在强应变分布区。例如,印度—欧亚两大板块的新生代碰撞,产生了巨大的地壳缩短量,而发生在中亚天山地区的陆内造山作用,就吸收了近 50%的总缩短量(Holt et al., 2000)。

变形:强烈而宽广。不具带状汇集、带状分布与演化特点。厚皮构造普遍,岩石圈物质均可卷入变形,缺少透入性的缝合带(Kennett et al.,2013)。

岩浆活动:存在造山期陆壳熔融型花岗岩浆活动,其规模可以大于数万平方千米,以及少量基性岩浆活动。

热能:地壳放射性热流值的产生和岩石圈地幔热的传输,导致异常的高热流。这构成了板内变形的重要条件。Alice Springs 造山带花岗岩的平均热生成值是该区地壳热流值的两倍。

动力源:①陆缘板块碰撞的远程效应。邻区板块碰撞产生的巨大挤压应力,既可以通过地壳-岩石圈各层次流变层的差异运动实现远程传播,扩展至大陆腹地,也可以通过碰撞应力的传播致使板内深断裂系统复活,即通过陆块的下冲(Faure et al., 2009)实现褶皱变形,形成造山带。②大陆块体深部热力学和流变学结构的变化(Raimondo et al., 2014)。其中一种是岩石圈拆沉(delamination)模型,认为地幔柱上涌将引发岩石圈地幔的下沉,致使岩石圈内部物质被加热软化而分层,产生差异流变,发生应力转换,进而驱使地壳区域隆升。目前为止,邻区板块碰撞的远程效应模式最被人们广泛接受。

3　实例介绍

3.1　天山新生代陆内造山带

巍峨的新生代天山山脉发育在晚古生代褶皱基底之上(图 1)。经历了长期洋-陆构造活动与演化(Shu Liangshu et al.,2004,2013)。新元古代,天山地区发生强烈的大洋俯冲-碰撞造山事件,伴随造山后的陆内裂谷及其岩浆活动,形成 9 亿年左右的岛弧火山岩、阿克苏高压蓝片岩和 8～6 亿年的裂谷盆地和双峰式火山岩(Zhu Wenbin et al., 2008),对应全球 Rodinia 大陆的聚合事件。新元古代成冰纪到寒武纪,天山地区是一稳定的沉积阶段。从晚寒武世开始,受泛非事件和冈瓦纳大陆聚合作用的影响,塔里木北缘的南天山和中天山地区发生大洋俯冲和陆块增生活动,形成峰期在 480～460 Ma 的中天山北缘 MORB 型蛇绿岩、475～430 Ma 的中天山弧形分布的玄武岩、安山岩和 I 型花岗岩(Ma Xuxuan et al., 2013)以及 420 Ma 左右南天山产铜-镍硫化物矿产的超镁铁岩-镁铁岩带,标志着早古生代沟弧盆活动陆缘的存在。发育在榆树沟和尾亚等地的 395 Ma 高压型麻粒岩与构造混杂岩、广泛分布的 420～390 Ma 铝过饱和花岗岩和宽阔的

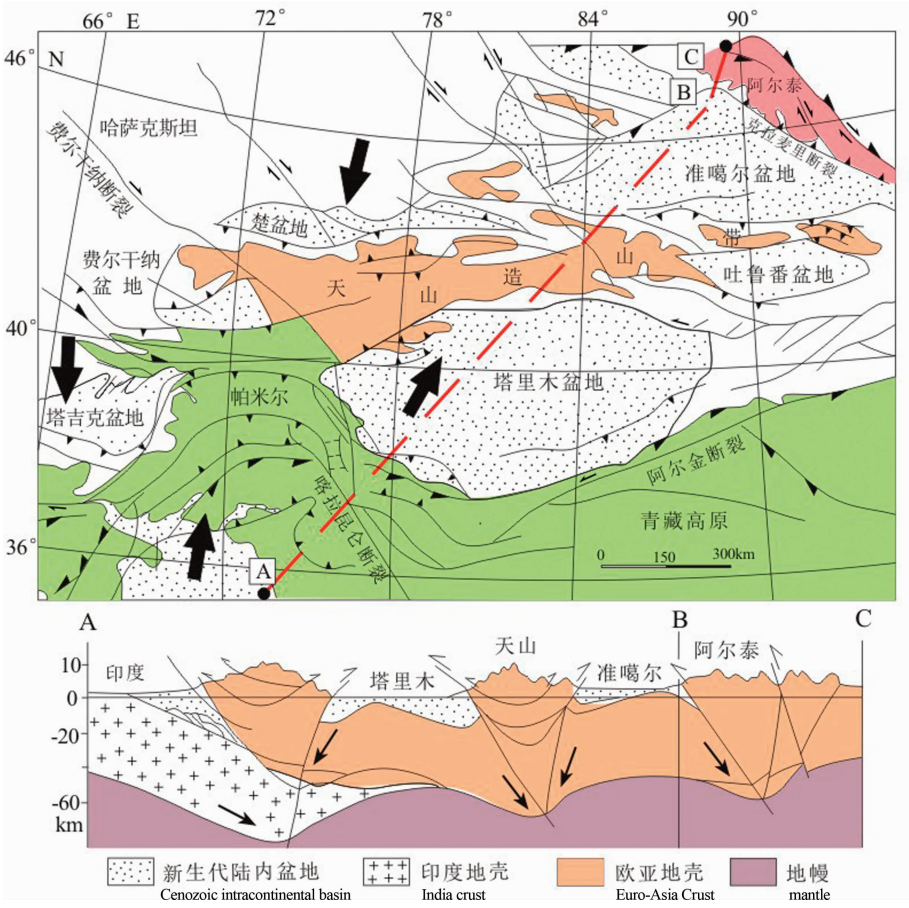

图 1 中亚天山新生代陆内造山带地质简图(据 Raimondo et al., 2014,略修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Tianshan Cenozoic intracontinental orogenic belt in the Central Asian Region (modified from Raimondo et al., 2014)

构造变形带,构成了中-南天山的早古生代俯冲-增生造山带。嗣后,是相对稳定的板内沉积期。

从中-晚泥盆世开始到二叠纪结束,在中天山北缘断裂到克拉麦里断裂之间的北天山地区发生了强烈而漫长的大洋俯冲以及陆陆碰撞造山作用,形成峰期为 380～310 Ma 的北天山火山岩带(岛弧型玄武岩、安山岩、流纹岩组合)、含晚古生代深海放射虫硅质岩与浊积岩、石炭纪花岗岩带、克拉麦里蛇绿岩缝合带和宽阔的韧性剪切带。平行造山带分布的早二叠世滑塌堆积岩、双峰式火山岩(297～288 Ma)和红色磨拉石前陆盆地证明当时造山作用非常强烈(Shu Liangshu et al.,2011)。

三叠纪,天山造山带遭受区域剥蚀夷平,盆山高差缩小,盆地规模进一步扩大。侏罗纪—古近纪发生板内伸展作用,在准平原化的天山地区形成了一系列近东西向的早—中侏罗世含煤盆地。中新世以来,受印度-欧亚陆-陆碰撞的影响,天山地区发生强烈陆内变形,以岩层褶皱和逆冲-推覆堆叠为特征,伴随大规模新生代坳陷的形成。导致盆山高差急剧增大,脆性变形构造叠加在韧性变形的古生代岩层之上,侏罗纪煤系地层被抬升到 4000 m 高处。同时,中生代拉伸盆地发生构造反转,形成新生代挤压盆地。由于盆地朝造山带的下冲作用,使古生代的岩层呈构造岩片方式逆冲推覆在盆地边缘的中新生代岩层之上,当穿越不同地质构造单元时表现出不同的运动学特征(图 1)。磷灰石裂变径迹年龄表明,昆仑山主体隆升发生在 35～30 Ma→昆仑山北缘隆升发生在 26～23 Ma,伴随塔里木盆地朝昆仑山的下冲→天山南缘隆升发生在 21～17 Ma,伴随塔里木盆地朝天山南缘的下冲→天山北缘隆升发生在 12～5 Ma,伴随准噶尔盆地朝天山北缘的下冲→远程传播效应到阿尔泰山结束(Shu Liangshu et al.,2004)。中生代沉积岩的褶皱与断裂、强烈地震与断层活动、侏罗纪煤层自燃及烧结岩的形成以及新疆独特的镶嵌状盆山格局,都是中新世以来陆内造山作用的产物。

3.2 华南早古生代陆内造山带

这里讲的华南褶皱带是指绍兴-江山-萍乡断裂

带以南、政和-大埔断裂带以北的前泥盆系变形区,占据了华南近 1/3 空间,主要由武夷、南岭、云开 3 个地体组成。该区地壳结构由 3 个物质层组成:① 19～8.5 亿年的花岗岩、角闪片岩、片麻岩、混合岩,② 8.5～4.6 亿年的泥砂质岩系,已变质成板岩、千枚岩。在一些志留纪花岗岩周缘,存在花岗片麻岩、片麻岩或片岩、千枚岩与板岩的变质分带性。远离岩体,均为浅变质岩系,③ 未变质的后泥盆纪沉积盖层。志留系区域缺失。其中,南华系-震旦系以泥沙质韵律岩层为主,夹少量碱性玄武岩和火山碎屑岩层,寒武系和奥陶系以笔石相泥砂质碎屑岩为特征,广泛出露全区,厚度大,没有火山岩和火山碎屑岩。岩层中存在长石砂岩、灰岩夹层以及波痕、泥包砂或砂包泥、斜层理等沉积构造,指示震旦纪-奥陶纪期间主要属于浅海-斜坡环境(Shu Liangshu et al., 2014,2015)。

鉴于如下地质事实:①没有早古生代蛇绿混杂岩和岛弧岩浆岩,②没有同期火山岩,③褶皱和断裂作用普遍而强烈,存在零星志留纪高温型麻粒岩相变质岩,却没有同期高压变质岩,认为华南早古生代造山带属于陆内造山带(Shu Liangshu et al.,2008, 2014, 2020; Wang Yuejun et al.,2010)。其动力源为邻区板块汇聚作用的远程效应,即北侧为秦岭地区的板块汇聚、南侧为越南中部 Khmer 陆块沿 Tam Ky-Phuoc Son 缝合带朝华南陆块的碰撞(Gardner et al., 2017; Faure et al., 2018)。

受邻区早古生代板块俯冲与碰撞的影响,该区晚奥陶世开始遭受区域挤压变形,紧闭褶皱、倒转褶皱、不对称褶皱发育,缩短率 40%～67%,岩层中拉伸线理、挤压面理和动向标志发育,运动学研究指示以逆冲推覆韧性变形为主,伴有走滑韧性变形,其 $^{40}Ar/^{39}Ar$测年值集中在 432±1Ma 和 394±5Ma 之间(Shu Liangshu et al., 2015)。志留纪铝过饱和花岗岩大面积分布,共 200 多个岩体,占据面积 20,900km^2,形成华南早古生代陆内造山带。其岩浆锆石 U-Pb 年龄为 460～390Ma,高峰期为 440～420Ma(Wang Yuejun et al.,2010; Shu Liangshu et al.,2014);花岗岩的 Hf 初始值均为负值,几无地幔物质的添加。中泥盆统粗碎屑岩层不整合覆盖在前泥盆纪岩层之上。

图 2 展示的是华南地区从新元古代以来到志留纪形成早古生代陆内造山带期间,多期构造-岩浆活动与岩石圈动力学演化过程。现将华南早古生代陆内造山带与典型板缘造山带地质特性的对比总结于表 1 中。

表 1　华南早古生代陆内造山带与典型板缘造山带地质特性对比表(据舒良树等, 2020,略修改)

Table 1　Comparison of geological features of the South China Early Paleozoic intracontinental orogen with subduction-collision-type orogenic belts (modified from Shu Liangshu et al., 2020)

	华南陆内造山带	板块俯冲-碰撞造山带
位置	远离板块俯冲带和碰撞带	板块俯冲带和碰撞带中以及附近
沉积环境	稳定的陆内沉积环境,陆缘泥砂质沉积物,很少或没有火山岩,没有深海浊积岩,盆内各沉积岩系、沉积序列和沉积相呈渐变关系	活动大陆边缘沉积环境,岩石特征多变,发育具鲍玛序列的浊积岩,沉积相和沉积序列突变
两侧地质单元特征	造山带两侧地质单元具有相同的演化历史与岩石圈结构	造山带两侧地质单元具有不同的演化历史和岩石圈结构
俯冲洋壳与岛弧岩石	无	俯冲型蛇绿岩和增生杂岩,岛弧型岩浆岩(火山岩、侵入岩)
高压-超高压变质岩	零星出露志留纪高温型麻粒岩相变质岩	高压-低温型蓝片岩、高压-超高压榴辉岩和高压麻粒岩
岩浆岩	二云母花岗岩、白云母花岗岩、含堇青石、含白云母、含电气石的铝过饱和花岗岩类	钙碱性火山岩和侵入岩、I 型花岗岩、新生地壳的岩石(玄武岩、辉长岩),也发育后碰撞期的 S 型花岗岩类
岩浆来源与演化	表壳岩石的部分熔融,很少或没有地幔物质的添加,岩浆岩弥散状分布,没有规律性的迁移演化,岩浆岩测年值高度集聚	幔源组分含量高,具有部分地壳物质的混染,岩浆岩有规律的分布和迁移。从板缘到内陆,其成分、年龄和地壳熔融程度均具有明显的极向性与分带性
变质与变形	褶皱带、逆冲推覆带和韧性剪切带发育,地壳增厚,区域规模低级-中级变质作用及其变质岩广泛	褶皱带、逆冲推覆带和韧性剪切带发育,地壳增厚,区域规模低级-高级变质作用及其变质岩发育
地球动力学	邻区板块汇聚的应力传播,导致华南陆内地壳尺度的挤压和缩短变形	板块俯冲,大陆碰撞,以及洋盆关闭后的大陆地壳俯冲

3.3　澳大利亚中部 Alice Springs 陆内造山带

澳大利亚中部有 2 个呈 E-W 方向平行排列的造山带,北面的叫 Alice Springs 造山带,南面的是 Petermann 造山带(图 3),造山带之间和造山带两侧均为裂谷-浅海盆地。新元古代期间,澳大利亚中部的裂谷盆地或海槽被泥砂质沉积物所充填;早古生代期间,裂谷盆地演化为浅海盆地,盆地中被稳定的碳酸盐物质所充填。沉积总厚度很大,达万米之巨,并有小规模基性岩和双峰式火山岩喷发(Hand et al.,1999; Scrimgeour et al.,2001; Buick et al.,

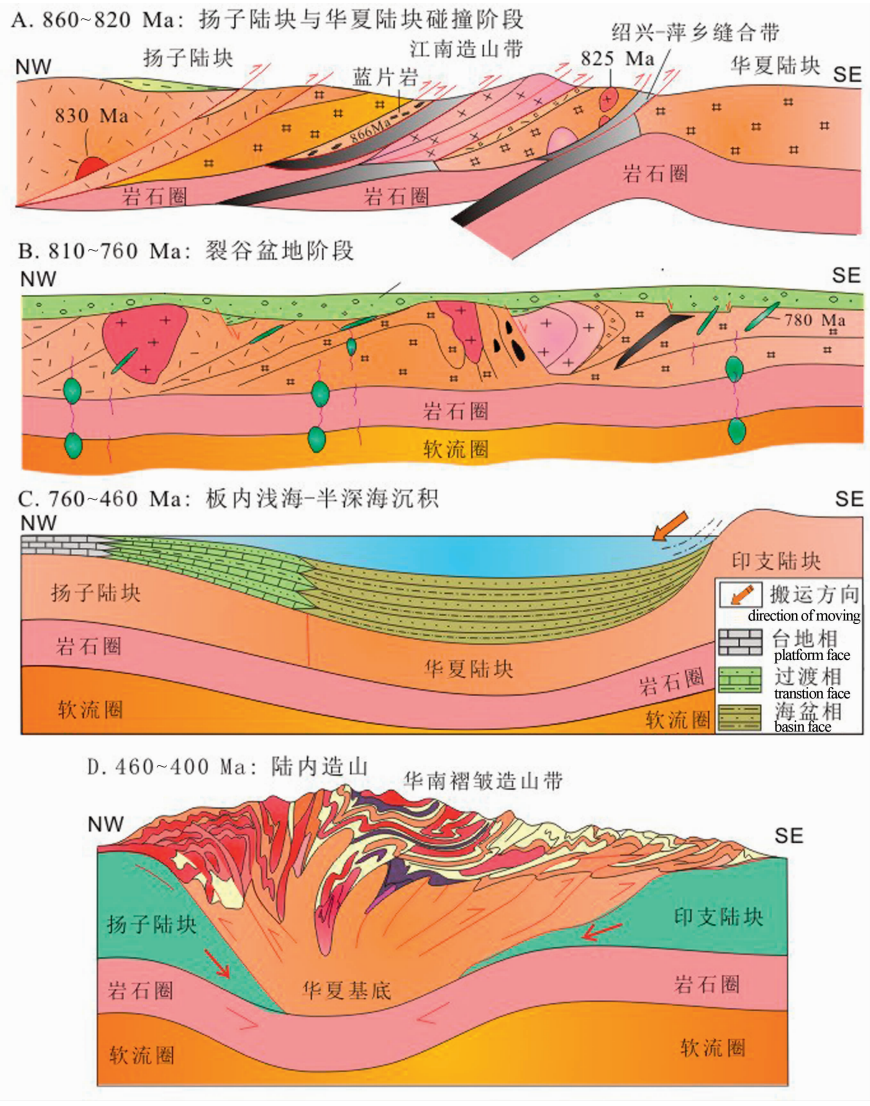

图 2 华南早古生代陆内造山带构造演化(据 Shu Liangshu et al., 2015, 略修改)

Fig. 2 Tectonic evolution of the Early Paleozoic intracontinental orogenic belt in the South China Block (modified from Shu Liangshu et al., 2015)

2008)。600～530 Ma 期间,在南面的 Petermann 沉积区发生强烈构造-岩浆事件,巨厚的沉积岩被挤压逆冲和变形,形成复式褶皱系,并有走滑断层形成,伴随基性岩浆侵入和角闪岩相变质作用,形成泛非期 Petermann 陆内造山带。在 450～300 Ma,受全球陆块聚合作用影响,北面的 Alice Springs 沉积区发生强烈构造活动,前泥盆纪岩层被强烈褶皱和逆冲推覆,伴随铁镁质岩浆的上涌侵入和高温-中压角闪岩相变质作用,形成早古生代 Alice Springs 陆内造山带(Maidment et al., 2013;Raimondo et al., 2014)。

3.4 非洲泛非期 Damara 陆内造山带

Damara 造山带的前身是新元古代裂谷海槽,其内堆积了厚达 4～5 km 的泥砂质沉积物,时代 1000～840 Ma(Martin, 1983; Weber et al., 1983;Nex et al., 2001)。随后发生了区域规模的地壳减薄和沉降,使海槽扩展成为南西大西洋地区的一个宽阔碳酸盐台地。受新元古代泛非构造事件的强烈影响,该地区地壳和岩层被挤压缩短、褶皱隆升;伴随大范围的基性岩浆底侵作用(underplating),导致地壳增温-软化-部分熔融。在地壳放射热和地幔热的联合作用下,出现峰期为 520 Ma 的大型 S 型花岗岩浆活动,形成 Damara 陆内造山带(Nex et al., 2001)。此造山带发育了全球最大规模的铀矿;全球最大规模的 Rossing 露天铀矿,就产在泛非期花岗岩浆晚期的伟晶岩和白岗岩中(Gu Dazhao et al.,2016)。

4 研究挑战和展望

经过 30 多年的不懈研究,全球地质学界对陆内

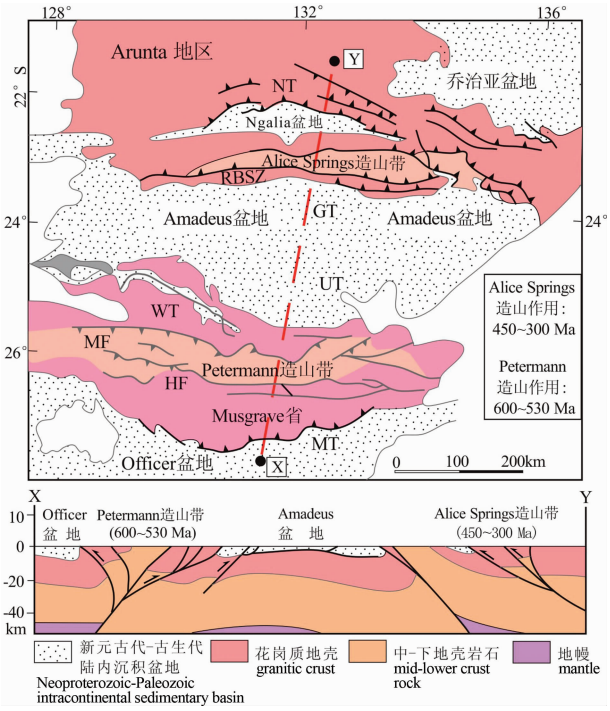

图 3　澳大利亚中部泛非期和古生代陆内造山带地质简图
(据 Raimondo et al., 2014,略修改)

Fig. 3　Simplified geological map of the central Australia, showing principal features of the Pan-African period and Paleozoic intracontinental belts
(modified from Raimondo et al., 2014)

图中缩写:GT—Gardiner 逆冲构造;HF—Hinckley 断层;MF—Mann 断层;MT—Munyarai 逆冲构造;NT—Napperby 逆冲构造;RBSZ—Redbank 剪切带;UT—Uluru 逆冲构造;WT—Woodroffe 逆冲构造

Abbreviations: GT—Gardiner Thrust; HF—Hinckley Fault; MF—Mann Fault; MT—Munyarai Thrust; NT—Napperby Thrust; RBSZ—Redbank Shear Zone; UT—Uluru Thrust; WT—Woodroffe Thrust

(板内)变形-陆内造山特征与机制等方面已经取得丰硕成果,达成了一些共性的认识。但是,许多大陆构造之谜尚未揭开,陆内造山类型及其驱动机制争议较大,遗留难题较多,重大挑战不少,为后人提供了较大的研究和创新空间。

4.1　板缘造山带与陆内造山带的对比

大洋和大陆存在显著差别。无论在形成时间上,还是刚性程度上,以及活动位置和盆山布局上乃至后期再造上,均存在很大差别。大陆岩石圈漫长而复杂的历史,远非大洋岩石圈所能比;大陆是个低密度、非均一、非刚性的拼合体,不易进入地幔,故可长期保存,并经历长期垂向生长、侧向增生演化过程;大洋盆地和洋底高原带状分布,有序排列,和大陆上形态各异的盆地形状、错综复杂的盆山耦合关系形成巨大反差。今后的发展方向,除深化几何学与物质组成的研究之外,必定强化浅部与深部、定时定量常规方法与数值模拟的紧密结合。现代新技术新方法的运用,有助于板缘与陆内造山带及其两侧地质单元各项特征的精准研究和对比,有可能成为打开大陆变形与陆内造山研究迷宫的钥匙。通过研究获取到的重力、热力、材料、流变学、同位素成分、多期再造数值模拟等定量数据,有助于精准查明板缘与陆内造山带及其两侧地质单元的物质构成、地壳成熟度、物性均一性、应力应变强度和传导效应,总结板缘与陆内造山带之重大差异,凝练其规律,推动陆内造山带成因机制的破解进程。

4.2　陆内造山动力机制

目前,国际流行的是板块汇聚远程效应模型,除此之外,还有一种大陆本身深部结构变化模型。前者认为陆内造山与构造变形是板块俯冲、碰撞产生的应力与能量朝大陆内部传导和扩展的结果,它和板缘造山同属一个动力学体系,是两个具有密切成因和时空联系的动力学过程。例如,新特提洋的关闭致使印度陆块下冲于欧亚板块之下,由此产生的巨大应力和能量可以通过地壳或岩石圈导体扩展传播到 1500 km 以远的中亚大陆天山地区,软化沿途岩石圈内诸多物质层并引发差异流变,形成宽广的构造变形区和高耸的天山造山带。但是,由板块碰撞产生的板缘应力和能量,是以何种传导方式扩展?其传导过程中会有多少应力被过滤或消耗,即,有效传导能有多远?能否在如此宽广范围产生有效的应变和热力效应?因缺少可靠证据或实验证明,至今仍无定论。

陆内深部结构变化模型的核心思想是大陆岩石圈之下因地幔柱上涌和软流圈相对于岩石圈的黏性流动,致使岩石圈和软流圈运动速度不一,导致岩石圈圈层拆离和上部陆壳的分裂并离散。由于伴随的深部岩浆底辟上升和热作用,使地壳不断弱化。高密度板片的持续下沉与岩浆热能的上升,引发构造反转,使具有高度流变性能的表层陆壳下冲,由离散转为汇聚,导致壳层物质发生褶皱变形,伴随强烈变质、混合岩化和花岗岩化,形成陆内造山带。该模型能合理解释 Alice Springs 造山带中存在的基性岩浆岩和中酸性岩浆岩,但难以解释陆内宽广的变形带。而且,大陆自身有无动力驱动机制,即,是否存在软流圈相对于岩石圈的黏性流动以及多大流动尺度?目前并不清楚。

综合考虑水平方向的板块汇聚远程效应和垂向

上的大陆深部过程，包括不同构造层的物质交换与流变作用、热力和重力等能量的调整，并加强数值模拟实验研究，或许是解决陆内造山带形成机制的有效途径。

4.3 大陆本身独立构造作用及其动力学

历经 30 多亿年壳层演化的大陆构造，形成了有别于大洋岩石圈的诸多物质层和各自物理化学特征。据此，有学者强调地球系统中地幔岩浆作用的贡献，提出陆内变形与造山是大陆本身独立构造作用的结果。显然，大陆本身独立构造体系或许是解决陆内造山动力来源的一种有益思路；作为通往破解目标的一段征程，作为弥补板块远程效应模型不足的一种途径，深入开展大陆内部独有构造及其动力学特征的研究是很有价值的。研究内容包括陆内造山带地区的物质分层、各个物质层的物理化学特征（成分、密度与热能、应力应变强度、相互作用与物质能量交换）与形成年龄、盆山关系与耦合演变、多期变形以及后期再造及置换、深部地幔岩浆作用及其对大陆构造的影响和效应等。

4.4 大陆流变学

大陆内部具有宽广的透入性变形带，大陆岩石圈是一个具有流变结构构造并受多期、多尺度、多因素控制的复杂地质体，大陆流变学被认为是解决大陆构造及其动力学问题的重要突破口（董云鹏，2017）。大陆流变学研究的重要内容应包括陆内造山带构造变形与演化特征、地壳-上地幔的重力、热能和流变学特征、各层圈岩石的应变速率、岩石的高温高压流变实验、物理模拟与数值模拟等。研究中，应充分利用实验获得的应力与应变速率、热动力条件和构造-热史等资料，合理估算天然变形岩层的整体流变学行为。通过研究，了解软流圈和地幔热能与流体对大陆物质层圈的影响，弄清造山带与盆地的流变学特征及其耦合作用，查明岩浆流体及其流变行为对大陆岩石圈强度弱化的影响，分析变质-变形过程中的流体作用与流变学规律，构建岩浆流体-变质流体-变形流体的互馈关系。倘若能够确定地壳和岩石圈地幔的可流变性质是驱动大陆岩石变形的关键因素，则陆内造山带的成因机制就有可能迎刃而解。

只要我们站在国际地学研究的前沿，密切关注国际最新进展，运用新理论、新技术、新方法开展多学科的综合研究，在广袤的中国大地上勤奋工作，勇于创新，不懈努力，就有可能在大陆变形与陆内造山方面取得重大创新成果，促进全球构造理论的发展与完善。

致谢：感谢许志琴院士对本文写作的鼓励和支持。感谢王岳军教授和李建华研究员认真审阅本文并对文字和图件提出的修改意见和建议。研究得到国家自然科学基金项目（编号 41772204，91955203）和国家重大研发计划项目（编号 2016YFC0600202）的资助，一并致谢！

References

Buick I S, Storkey A, Williams I S. 2008. Timing relationships between pegmatite emplacement, metamorphism and deformation during the intraplate Alice Springs Orogeny, Central Australia. Journal of metamorphic Geology, 26: 915～936.

Charvet J, Shu Liangshu, Faure M, Choulet F, Wang Bo, Lu Huafu, Breton N L. 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: genesis of an intracontinental orogen. Journal of Asian Earth Sciences, 39: 923～330.

Condie K C. 1989. Plate tectonics and crustal cvolution. Pergamon press, 476.

Debelmas J, Mascle G. 2004. Les grandes structures geologiques. Paris: Dunod, 312p.

Dong Yunpeng. 2017. Intracontinental tectonics and dynamics. In: National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences (eds.), Plate tectonics and continental dynamics. Beijing: Science Press, 86～95.

Dong Yunpeng, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. Gondwana Research, 29: 1～40.

Dong Yunpeng, Yang Z, Liu X M, Sun S S, Li W, Cheng B, Zhang F F, Zhang X M, He D F, Zhang G W. 2016. Mesozoic intracontinental orogeny in the Qinling Mountains, Central China. Gondwana Research, 30: 144～158.

Faure M, Shu Liangshu, Wang Bo, Charvet J, Choulet F, Monié P. 2009. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. Terre Nova, 21: 360～368.

Faure M, Nguyen V V, Thu Hoai L T, Lepvrier C. 2018. Paleozoic or Early-Middle Triassic collision between the South China and Indochina Blocks: The controversy resolved? Structural insights from the Kon Tum massif (Central Vietnam). Journal of Asian Earth Sciences, 166: 162～180.

Gardner C J, Graham I T, Belousova E, Booth G W, Greig A. 2017. Evidence for Ordovician subduction-related magmatism in the Truong Son terrane, SE Laos: implications for Gondwana evolution and porphyry Cu exploration potential in SE Asia. Gondwana Research, 44: 139～156.

Gu Dazao, Shu Liangshu, Fan Honghai, Xu Xisheng, Yao Jinlong, Zhao Kai, Chen Jinyong. 2016. Structural evolution and its restriction on Uranium mineralization in Gaudeanmus areas, Namibia. Geological Review, 62(1): 83～93. (in Chinese with English abstract)

Hand M, Sandiford M. 1999. Intraplate deformation in central Australia, the link between subsidence and reactivation. Tectonophysics, 305: 121～144.

Holt W E, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, Haines A J, Shen T B, Ren J. 2000. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations. Journal of Geophysic Research, 105 (B8): 19185～19209

Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Lo C H, Wang Jian, Ye Meifeng, Yang Yuheng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes

of the Shuangxiwu volcanic rocks. Precambrian Research, 174: 117～128.

Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wartho J A, Clark C, Li Wuxian, Zhang Chuanlin, Bao Ciming. 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, southeastern South China: New age constraints and P-T conditions. Geological Society of America Bulletin, 122: 772～793.

Kennett B L N, Iaffaldano G. 2013. Role of lithosphere in intra-continental deformation: Central Australia. Gondwana Research, 24 (3-4): 958～968.

Maidment D W, Hand M, Williams I S. 2013. High grade metamorphism of sedimentary rocks during Palaeozoic rift basin formation in central Australia. Gondwana Research, 24: 865～885.

Martin H. 1983. Alternative Geodynamic Models for the Damara Orogeny: A Critical Discussion. In: Martin and Eder (eds.), Intracontinental Fold Belts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 913～945.

Martin H, Eder W F. 1983. Intracontinental Fold Belts: Case Studies in the Variscan Belt of Europe and the Damara Belt in Namibia. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 945p.

Ma Xuxuan, Shu Liangshu, Santosh M., Li Jinyi, 2013 Petrogenesis and tectonic significance of an early Palaeozoic mafic-intermediate suite of rocks from the Central Tianshan, northwest China. International Geology Review, 55(5): 548～573.

Nex P A M, Kinnaird J A, Oliver G J H. 2001. Petrology, geochemistry and uranium mineralization of post-collisional magmatism around Goanikontes, southern Central Zone, Damara Orogen, Nambibia. Journal of African Earth Sciences, 33: 481～502.

Omuralieva A, Nakajima J, Hasegawa A. 2009. Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan: implications for large- and small-scale mountain building. Tectonophysics, 465 (1-4): 30～44.

Raimondo T, William M H, Collins J. 2014. Compressional intracontinental orogens: Ancient and modern perspectives. Earth Science Review, 130: 128～153.

Ren Jishun, Chen Tinyu. 1989. Tectonic evolution of the continental lithosphere in eastern China and adjacent areas. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 3: 17～27.

Shu Liangshu, Guo Zaojie, Charvet J, Laurent-Charvet S. 2004. Late Paleozoic post-collision tectonism and Late Cenozoic intra-continental deformation in the Tianshan belt, NW China. Geological Journal of China Universities, 10(3): 393～404. (in Chinese with English abstract)

Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, Wang Bo, Shen Weizhou, Zhang Yueqiao. 2008. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China. Geological Bulletin of China, 27(10): 1581～1593. (in Chinese with English abstract)

Shu Liangshu, Wang Bo, Zhu Wenbin, Guo Zhaojie, Charvet J, Zhang Yuan, 2011. Timing of initiation of extension in the Tianshan, based on structural, geochemical and geochronological analyses of bimodal volcanism and olistostrome in the Bogda Shan (NW China). International Journal of Earth Sciences, 100(7): 1647～1663.

Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, Wu Changzhi, Ma Dongshen, Ma Xuxuan, Ding Haifeng. 2013. Formation and evolution of ancient blocks in Xinjiang. Geology in China, 40 (1): 43～60. (in Chinese with English abstract)

Shu Liangshu, Jahn Borming, Charvet J, Santosh M, Wang Bo, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong. 2014. Early Paleozoic depositional environment and Intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia Block (South China): Evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations. American Journal of Science, 314: 154～186.

Shu Liangshu, Wang Bo, Cawood P A, Santosh M, Xu Ziqing. 2015. Early Paleozoic and Early Mesozoic intraplate tectonic and magmatic events in the Cathaysia Block, South China. Tectonics, 34: 1600～1621.

Shu Liangshu, Chen Xiangyun, Lou Fasheng. 2020. Pre-Jurassic Tectonics of the South China, Acta Geologica Sinica, 94(2): 333～360. (in Chinese with English abstract)

Steffen R, Steffen H, Jentzsch G. 2011. A three-dimensional Moho depth model for the Tien Shan from EGM2008 gravity data, Tectonics, 30 (5): 453～461.

Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. In Collision Tectonics, edited by Coward, M. P. and Ries, A. C., Geological Society, London, Special Publication, 19: 115～157.

Wang Yuejun, Zhang Feifei, Fan Weimin, Zhang Guowei, Chen S Y, Cawood P A, Zhang Aimei. 2010. Tectonic setting of the South China block in the Early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology. Tectonics, 29, TC6020, doi: 10.1029/2010TC002750.

Wang Yuejun, Wu Chunming, Zhang Aimei, Fan Weimin, Zhang Y H, Zhang Yuzhi, Peng Touping, Yin Changqin. 2012. Kwangsian and Indosinian reworking of the eastern South China Block: constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites. Lithos, 150: 227～242.

Weber K, Behr H J. 1983. Geodynamic Interpretation of the Mid-European Variscides In: Martin and Eder (eds.), Intracontinental Fold Belts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 427～472.

Xu Ziqing, Yang Jinshui, Ji Shaoceng, Zhang Zemin, Li Haibin, Liu Fulai, Zhang Jianxin, Wu Cailai, Li Zhonghai, Liang Fenghua. 2010. On the continental tectonics and dynamics of China. Acta Geological Sinica, 84(1): 1～29. (in Chinese with English abstract)

Xu Ziqing, Zhang Guowei. 2013. Tectonics and dynamics of China (East Asia). Science in China Earth Sciences, 43(10): 1527～1538.

Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa. 2013. Tectonics of South China Continent and its implications. Science in China Earth Sciences, 56(11): 1804～1828.

Zhao Junmeng, Liu G D, Lu ZX, Zhang X K, Zhao G Z. 2003. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. Tectonophysics, 376: 199～239.

Zhu Wenbin, Zhang Zhiyong, Shu Liangshu, Lu Huafu. 2008. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Neoproterozoic Korla mafic dykes in the northern Tarim Block, NW China: implications for the long-lasting breakup process of Rodinia. Journal of the Geological Society, London, 165: 887～890.

参　考　文　献

董云鹏. 2017. 陆内构造与动力学. 见国家自然科学基金委员会、中国科学院:板块构造与大陆动力学. 北京:科学出版社, 86～95.

顾大钊, 舒良树, 范洪海, 徐夕生, 姚金龙, 赵凯, 陈金勇. 2016. 纳米比亚欢乐谷地区构造演化对铀成矿的制约. 地质论评, 62(1): 83～93.

舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 卢华复, 王博. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆山演化. 高校地质学报, 10(3): 393～404.

舒良树, 于津海, 贾东, 王博, 沈渭洲, 张岳桥. 2008. 华南东段早古生代造山带研究. 地质通报, 27(10): 1581～1593.

舒良树, 朱文斌, 王博, 吴昌志, 马东升, 马绪宣, 丁海峰. 2013. 新疆古块体的形成与演化. 中国地质, 40(1): 43～60.

舒良树, 陈祥云, 楼法生. 2020. 华南前侏罗纪构造. 地质学报, 94(2): 333～360.

许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 张泽明, 李海兵, 刘福来, 张建新, 吴才来, 李忠海, 梁凤华. 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. 地质学报, 84(1): 1～29.

Principal features of intracontinental orogenic belt and discussions on its dynamics

SHU Liangshu*

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University Institute of Continental Dynamics, Nanjing, 210093

* *Corresponding author*: *Lsshu@nju.edu.cn*

Abstract

Traditional theory of plate tectonics facedpuzzling problems when it was used to interpret the genesis mechanism of the old continent. Frequent intracontinental earthquakes, wide continental orogenic belts, pervasive penetrative deformed structures and huge-scale S-type granitic provinces constitute the principal features of continental geology, and thus the intracontinental or intraplate orogeny has been an important part of modern theory of plate tectonics. This paper briefly reviewed the process of intracontinental orogeny and summarized its foundational features focusing on aspects of definition, geotectonic location, scale, distinct geological signatures, crustal tectonics, magmatism, strain distribution, mountain root, thermal energy and dynamic source. By combining with international results and author's own works in the past two-decades, several typical intracontinental orogenic belts arebriefly described including the Cenozoic Tianshan, the Neoproterozoic-Early Paleozoic Central Australia, the Early Paleozoic South China, and the Pan-African period Damara ones. From these, a comparison of geological features of the South China Early Paleozoic intracontinental orogen with subduction-collision-type orogenic belts was proposed, and several newchallenges arediscussed.

Key words: continental deformation; intracontinental orogeny; geological features; continental dynamics; discussion and expectation