

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.971>



关于大陆构造研究的一些思考与讨论

张国伟, 郭安林

西北大学大陆动力学国家重点实验室, 大陆构造协同创新中心, 地质学系, 陕西西安 710069

摘要: 指出板块构造理论在解释大陆构造中的不足之处, 从而在进一步深化板块构造理论发展的同时, 构建大陆构造理论体系; 通过长期大陆构造研究实践并利用国内外大陆造山带的6个例子提出有关大陆的基本问题, 诸如早期大陆起源、超大陆方式演化的大陆演化机制以及大洋和大陆岩石圈的本质不同和构造旋回; 说明大陆是由板块构造(包括可能的板块构造远程效应)和大陆自身机制分别形成的组分的拼合体。主张大陆有自身的机制操控它的起源、保存和演化, 在排除了来自板块边缘以及板块远程效应的作用力的前提下, 出现在陆内环境的造山作用可由大陆本身尤其可能由陆内中小块体之间的相互作用引发。需要强化大陆构造研究, 在深化板块构造理论的同时, 探索和创建大陆构造理论体系。

关键词: 大陆构造; 陆内造山作用; 陆内造山机制; 板块构造; 构造地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1464-12

收稿日期: 2019-01-06

Thoughts on Continental Tectonics

Zhang Guowei, Guo Anlin

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Cooperation Innovation Center of Continental Tectonics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: From our long-term study on continental geology, it has been realized that the theory of plate tectonics is the main guiding principle, but it has limitations in the recognition and interpretation of continental geology. This paper presents firstly six specific examples of continental tectonics typified by orogens, by which it attempts to demonstrate that a continent is the tectonic collage comprising the components formed by plate tectonics (including the far field effect from plate active boundaries) and intracontinental mechanisms, respectively. It is proposed that the orogeny occurring in the intracontinental setting can be initiated by continent itself and more likely by the interaction of different blocks within a continent when there was no involvement of plate tectonics and the distant effect derived from plate tectonics. Furthermore, the authors raise a number of questions concerning the fundamental continental issues such as the origin of early continents, the mechanism of continental evolution in the form of supercontinent and the essential differences of oceanic and continental lithospheres and their tectonic cycles. These issues are not related to plate tectonics or cannot be solved by the theory of plate tectonics. In summary, besides plate tectonics works on continents, continents have their own law governing the origin, preservation and evolution of continents. Therefore, it is suggested to further develop the continental study while deepening the theory of plate tectonics.

Key words: continental tectonics; intracontinental orogeny; intracontinental orogeny mechanism; plate tectonics; tectonics.

为纪念著名地质学家、构造地质与大地构造学前辈马杏垣院士诞辰一百周年, 作者由长期从事的大陆构造研究实践出发, 结合马先生毕生关注和研

究的大陆构造问题, 深入思考大陆构造有关的基本课题并提出我们的初步想法, 求与同行商榷。

20世纪70—80年代, 中国地学界从10年的沉

基金项目: 板块构造与大陆动力学发展战略研究项目(No.L1222034)。

作者简介: 张国伟(1939—), 男, 西北大学教授, 中国科学院院士, 研究方向为造山带地质及前寒武纪地质。E-mail: gwzhang@nwu.edu.cn

引用格式: 张国伟, 郭安林, 2019. 关于大陆构造研究的一些思考与讨论. 地球科学, 44(5): 1464-1475.

睡中苏醒过来,开始吸收和消化当时国际上创立不久的板块构造学说,并付诸于中国大陆地质构造研究的实践,同时逐渐摒弃长期占主导地位的地槽学说。那时我们即开始运用板块构造理念探索中国大陆腹部的秦岭造山带及其两侧相邻克拉通地块地质问题,主要以华北地块南缘和秦岭为基地开展前寒武纪地质和造山带地质解剖研究;其中重点对秦岭造山带的板块构造的历史演进及现今配置进行地质、地球化学、地球物理多学科相结合的、原创性的综合研究以及横穿秦岭的地球物理地震深部探测,并展开了中国大陆主要造山带和地块以及世界典型造山带和地块诸如阿帕拉契亚、科迪勒拉、喜马拉雅、天山、阿尔卑斯、东非阿拉伯、伊朗扎格罗斯等造山带和波罗地地块、南非卡普瓦尔克拉通对比研究。在此基础上,采用构造恢复重建的工作方法,以板块构造观点解读了秦岭造山带组成、结构构造、形成演化,提出了一系列新认识、新观点,认为秦岭造山带是以印支期为主期(T_{2-3})经长期多期造山作用的板块俯冲碰撞塑造而成的大陆复合造山带(Zhang *et al.*, 1989, 1995; Meng and Zhang, 1999; Dong *et al.*, 2011; Kennett and Iaffaldano, 2013; Korenaga, 2013),并建立了华北和华南以及秦岭3个板块沿商丹和勉略2条缝合带的板块俯冲碰撞造山演化模式和三维壳幔非耦合流变学分层的陆壳不对称扇形逆冲推覆叠置的造山几何学结构模型(张国伟等,2001),同时也发现了一些遗留至今令人困扰的科学问题,其中最为重要的是秦岭造山带的许多问题用板块构造观难以给予合理的科学解释,而类似的发现不仅局限于秦岭,而是普遍存在于国内外造山带和古老地块,诸如中国大陆的燕山、龙门山造山带和华南陆块以及澳洲大陆中部等。因此说明此类问题并非是区域性局部问题,而具有全球性。这不能不困扰我们并促使我们进行深入的思考。

1 大陆构造研究实例中提炼的问题

1.1 秦岭中生代中晚期陆内造山问题

在以秦岭造山带为例进行的解剖研究中发现最突出的问题如下:(1)秦岭中生代中晚期陆内(板内)造山问题,秦岭于印支期 T_{2-3} 板块碰撞造山结束后,为何于中生代中晚期发生了没有大洋参与的完全而又强烈的陆内(板内)造山作用,复合叠加改造先期板块碰撞造山带,从而最终形成现今典型的复合大陆造山带?其属性与动力学机制是什么?(2)秦岭

中生代以来大陆造山带岩石圈流变学分层的非耦合结构与状态的形和过程。秦岭造山带现今深部结构状态与中上陆壳结构构造为什么在陆内构造过程中,呈现为时空四维非耦合的流变学分层近乎正交的立交桥式结构?其动力学过程是什么?

恰逢我们研究秦岭之际,国际上正值运用板块构造观研究大陆构造并提出“大陆动力学”国际研究计划,多国先后都把它作为前沿领域优先列入国家研究计划。在这一背景下,凸显了当时在秦岭以及中央造山系及其两侧的华北、华南等更大区域内研究大陆时遇到的有关板块构造的新问题,就在这一地学发展大形势下,使我们意识到在继续利用板块构造理论从事大陆研究的同时,开展大陆与大陆构造问题的新思考和新探索的必要性。

上述秦岭造山带研究遇到的问题经多学科反复研究表明,它们既不能完全用板块构造的碰撞造山去认知,也不是其远程效应所能解释。困惑与思考的要害是:秦岭陆内造山作用的实质是什么?驱动力是什么?形成过程怎样?从根本上涉及了板块构造能否给予合理的解释。为说明问题,现将迄今的研究概要说明如下(张国伟等,2001,2006,2011;张成立等,2008),以便进一步引起学界的争鸣与探索。

(1)秦岭中生代中晚期陆内造山背景。秦岭属于印支期(240~200 Ma)以 T_{2-3} 为峰期的板块俯冲碰撞造山带。它在印支期板块主造山拼合完成之后的中生代中晚期,又发生了强烈的陆内(板内)造山作用,形成今天雄伟的、东西向横贯中国大陆中部的叠加复合造山带,急剧隆升成高峻山脉,分划中国大陆南北。显然今天的秦岭造山带已不完全起因于印支期的板块碰撞造山,而是在它的基础上,叠加复合了中生代中晚期的陆内造山作用,即相当于中国地学界统称的燕山期形成的造山带。若无后者造山复合,印支期造山带经过近2亿年的剥蚀夷平活动,早已不复存在了。可见秦岭中生代燕山期的陆内造山作用强度及其重要性。现在的问题是为何后者被称作陆内(板内)造山带以及板块构造观为什么不能给予完满的科学解释(郑亚东等,2000)。

(2)基本证据概述。①秦岭印支运动主期(T_{2-3})板块俯冲碰撞造山晚期,内部在 T_3-J_1 时期广泛发生主导沿不同东西向断裂带的伸展断陷上叠盆地,接受 T_3-J_1 陆相沉积,最厚者达千余米(图1a),证明秦岭 T_3-J_1 时期已至晚造山构造热动力衰减,进入伸展塌陷阶段,标志碰撞造山作用过程即将结束(张国伟等,2001)。②秦岭内部上述伸展塌陷盆地的陆

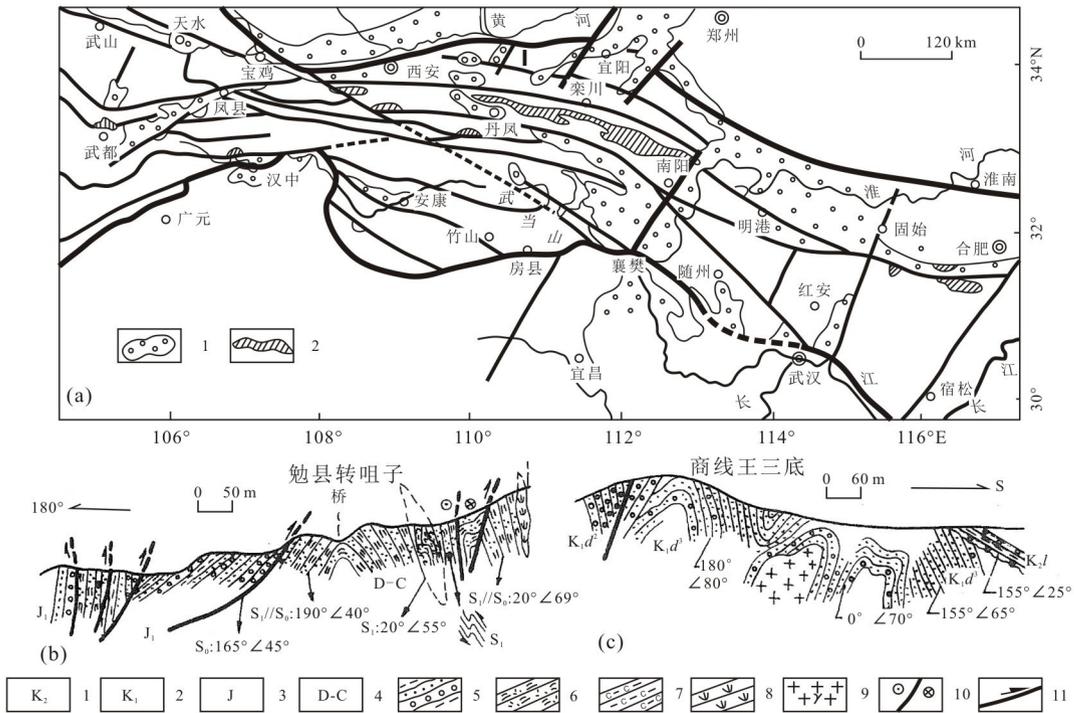


图 1 中生代晚期(J_3 - K_1)秦岭造山带陆内造山的伸展构造—断陷盆地的形成以及同时期中生代地层(J - K)卷入构造变形
Fig.1 Formation of extensional tectonics—fault basins and deformation of the Jurassic-Cretaceous strata during the Late Mesozoic (J_3 - K_1) intracontinental orogeny in the Qinling orogen

据张国伟等(2001); a, b. 勉县侏罗系地质构造剖面; c. 商县王三底白垩系地质构造剖面; 图 a 中: 1. 后造山中新世陆内伸展裂陷盆地; 2. 后造山早期的隆升伸展陷盆地; 图 b, c 中: 1. 上白垩统; 2. 下白垩统; 3. 侏罗系; 4. 石炭—泥盆系; 5. 砂砾岩; 6. 千枚岩、片岩; 7. 滑石片岩; 8. 蛇纹岩; 9. 花岗岩; 10. 走滑断层; 11. 逆冲推覆断层

相沉积岩 T_3 - J_1 后又普遍遭受强烈区域变形, 最强者发生紧闭同斜褶皱、叠瓦逆冲断裂, 并遭受区域低绿片岩相变质作用, 同时又广泛发育以花岗岩为主的岩浆活动和流体参与的成矿作用, 成为秦岭造山带的主成矿期, 而且遭受变形变质岩浆贯入的 T_3 - J_1 地层又普遍为 J_3 - K_1 及其之后的陆相沉积岩层区域性构造角度不整合覆盖(张国伟等, 2001). 与此同时, 秦岭造山带南北边缘发生 J_3 - K_1 时期的大规模向外的反向逆冲推覆运动, 使秦岭呈不对称扇形快速抬升成山, 反映华北和华南两大块相向向秦岭之下作巨大陆内俯冲, 致使秦岭—大别 UHP 变质岩石最后剥露于地表(Hacker *et al.*, 2000; 张国伟等, 2001; Liu *et al.*, 2009a, 2009b).

上述讨论说明中生代中晚期(J_3 - K_1)秦岭又发生了以地壳挤压缩短为特点的新的区域性造山作用, 不但发生构造变形、结构重组, 而且伴随强烈的变质、岩浆活动, 导致物质再造, 代表了一次典型的造山性质的构造运动(图 1b 和 1c). 但关键问题是这是一场什么性质的造山运动, 运动的驱动力是什么. 系统分析本次造山作用发生的区域构造背景表明:

中生代 J_3 - K_1 以来, 东亚和中国大陆板块构造格局是以全球板块构造体制中的三大板块动力学系统, 即太平洋板块、欧亚板块和印度—澳大利亚板块的相向汇聚总格局为主导.

其中, ①古太平洋与现代西太平洋板块处于先后从 NNW 向俯冲走滑转变为 NWW 向往东亚大陆俯冲的总体转换演化中(Engelbreton *et al.*, 1984; Maruyama *et al.*, 1997, 2007; Isozaki *et al.*, 2010). 显然, 太平洋板块构造系统的运动学和动力学特征不可能导致产生中国大陆内形成与之近乎垂直延伸分布长达千余公里展布的、陆壳挤压叠置急剧隆升的秦岭—大别陆内造山带. 因此, 将秦岭 J_3 - K_1 时期的陆内造山作用归因于同时期的区域太平洋系统的板块构造作用及其远程效应值得质疑. ②中生代中晚期(J_3 - K_1)的印度—澳大利亚板块与欧亚板块远隔新特提斯洋盆, 尚未与欧亚板块碰撞, 只是洋壳起始向北的消减运移, 而且以印度洋 90° 海岭为界, 后来的印度板块快速向欧亚大陆拼合碰撞造山, 而澳大利亚迟迟缓慢北进, 至今仍残留着与欧亚板块间的东南亚至太平洋间的弧盆系, 并未拼

合.这些表明以印度洋 90°岭脊为界,印度—澳大利亚板块东西部分间一直存在向欧亚大陆板块俯冲拼合的差异运动,其结果造成中国大陆以青藏高原东边界即贺兰—川滇 S-N 向地震构造带为界,出现了中生代以来的东、西侧构造的差异演化(朱弟成等, 2005).因此,新生代印度—澳大利亚板块与欧亚大陆的拼合与俯冲作用和喜马拉雅特提斯造山作用与青藏高原的形成,时间上都远远迟于秦岭陆内造山作用.因此也不可能提供对秦岭中生代中晚期造山作用(J_3 - K_1)的动力驱动及远程效应.③那么,同期的鄂霍茨克俯冲碰撞造山带的形成(Zorin, 1999)是否会成为秦岭 J_3 - K_1 陆内造山的动因呢?答案也是否定的.因为:A.两者相距近 3 000 km,之间相隔东北与华北地块及其间的同期燕山陆内造山带,其能量传递衰减不能导致秦岭发生如此强烈的造山作用;B.同时更有说服力的是,与之同期的华北地块内部陆壳主导构造呈现近南北向,如鄂尔多斯天环向斜和山西背斜等,与秦岭主导的东西构造近垂直相交,显然鄂霍茨克造山作用难以跨越这一构造域引发秦岭陆内造山.综合上述以及从区域板块构造格局考虑,以秦岭 J_3 - K_1 为标志的中生代中晚期的陆内造山作用既不是直接的周边板块构造所能及,也非同期区域板块构造远程效应所致.因而,用板块构造思维认知秦岭中生代的 J_3 - K_1 这场近期浩大的造山作用遇到了障碍,那又如何是好呢?由以下讨论显然可见以大陆陆内(板内)不同陆块间的相互作用可以给予较好的解释.

实际情况无独有偶,通过对中国大陆包括华南、华北陆块的构造研究,遇到了类似的现象和问题.

1.2 秦岭造山带深部结构与非耦合“立交桥”构造

通过地表地质深入系统研究和横穿秦岭多条地震探测剖面及区域性层析成像的综合研究,秦岭造山带岩石圈的结构被较为清晰地揭示出来.在空间上,其呈现时空四维壳幔上下深浅流变学分层的脱耦的垂直正交的“立交桥式”的结构构造状态(图 2; 张国伟等, 2001).其特点是:秦岭陆壳尤其中上部,以中生代燕山、印支期造山形成的东西向构造线为主体(图 2 中的 A 层),而新生代平坦的 Moho 面上下的下地壳和岩石圈地幔上部即 40~60 km 深部层次,则呈现平坦无优选方向的异常流变过渡层状态(图 2 中的 B 层).

再向下,在大于 60 km 至更深层则呈近南北向的异常结构与状态展布(图 2 中 C 层),显然岩石圈上下突出地表现为非耦合正交结构状态.这一状态

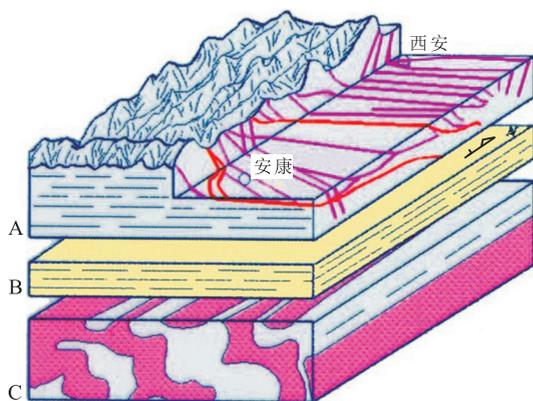


图 2 秦岭造山带岩石圈现今“立交桥”结构模型

Fig. 2 The decoupled “overpass-type” structure of the Qinling orogen

说明上部主导是东西向的、先前时代固态化的构造框架结构,而下部则是南北向新的固态塑性流变异常状态,之间则是固态水平塑性流变状态的过渡层,整体构成目前岩石圈由新老不同时代的不同层次、彼此脱耦的近乎正交过渡的统一的陆内造山带岩石圈的垂向结构配置.它是秦岭造山带岩石圈结构动态演进过程中,客观形成的现时动态结构剖面,而且它是在大陆俯冲碰撞造山期间原不同板块拼合为统一大陆后,历史进程中垂向形成的陆内构造过程的产物,其置换了原印支期碰撞造山的深部结构构造及状态,是大陆岩石圈在不同时代、不同层次、不同物理化学与热动力及物质状态条件下,由大陆这一特殊介质材料变形变位变质(物质交换)而产生的综合结果.这一结果所反映的过程代表了什么大陆的属性行为与机制以及地学构造意义如何同样令人深思.

1.3 华南大陆构造问题

华南大陆构造最突出的同时也是一个长期争议未决的问题,是华南大陆中的扬子与华夏两地块的构造关系,特别自显生宙以来,两地块间的早古生代(中国称加里东期)与晚古生代—中生代初期(印支期)2次大规模的造山运动的属性问题,即是两板块的碰撞造山及远程效应,还是两地块间的陆内(板内)造山.多年的研究表明这也是一个难以完全用板块构造及其远程效应所能回答的问题,而实际上也应当是一个大陆陆内(板内)的构造问题.关于中国华南大陆构造问题,研究成果多争论亦很多(Hsü *et al.*, 1988, 1990;任纪舜等, 1990;陈旭等, 1995; Li and Li, 2007; Charvet *et al.*, 2010;舒良树, 2012; Wang *et al.*, 2013a, 2013b).根据我们最近已发表

的研究成果(Zhang *et al.*, 2013),可以简要概括为,中国华南大陆构造自新元古代中晚期至显生宙以来,尤其新元古代早中期板块构造碰撞造山形成统一华南大陆板块之后,主要是在周缘板块构造及其远程效应作用下和在统一华南大陆板块内(陆内)扬子与华夏两陆块长期相互作用的早古生代和中生代初两次陆内造山中两大构造系统的统一复合构造,之后才是中生代西太平洋陆缘构造和青藏高原构造作用的叠加改造(图 3).最显著的问题是扬子与华夏两陆块在统一的华南大陆内部所发生的多次陆内造山依然非板块构造理论所能科学解释.我们的研究揭示,它们之间既不是大洋分割的两板块构造的碰撞拼合作用,也不是区域板块构造远程效应所致,而是扬子与华夏两陆块在统一华南大陆内(板内),在其深部地幔热—构造动力学的非平衡和上部不同陆块、地壳间的非均衡差异所导致的长期相互构造作用所引发并驱动.简言之,是陆内构造而非板块构造驱动所致,故称之为陆内造山作用,类似于前述的秦岭中生代中晚期(J_3-K_1)的陆内造山构造.

1.4 龙门山造山带的陆内造山问题

镶嵌于青藏高原东界和华南大陆西缘的龙门山造山带,形成于新生代以来喜马拉雅板块碰撞造山和青藏高原东界的构造作用.但迄今的多方面研究揭示,青藏高原形成前的先期构造主要是在原统一的华南大陆板块内(陆内)古生代攀西陆内裂谷

(Cong and Huang, 1987; 郭正吾等, 1996; 钟大赉, 1998)构造基础上,由裂谷两侧的松潘和扬子两陆块长期相互作用而成,主导的是印支期形成的陆内造山带,其内部至今尚未发现任何洋壳及其消亡记录(罗志立, 1991; 郭正吾等, 1996).因此龙门山造山带先期的印支期造山作用并不是大洋分割的 2 个板块之间的俯冲碰撞造山,而是在一个原先统一的大陆板块内不同陆块间,由于深部与上部构造热动力学与非均衡差异所引发的陆内造山作用.因此可以概括现今的龙门山造山带是一个板块构造远程效应和陆内造山叠加形成的大陆复合造山带.所以需要悉心考虑的关键问题仍然是大陆构造中,除板块构造及其远程效应构成的组分外,有无来自大陆自身动力造就的大陆构造作用与成分.

1.5 燕山造山带的性质

这也是一个长期争议的问题,其中热点之一是,它是否是一个陆内造山带? 燕山造山带现今呈东西向分布,往西连接阴山—大青山,中生代中晚期(J_1-K_{1-2})发育强烈多幕次构造变形、区域性构造角度不整合叠置和火山岩浆活动,俨然具有造山作用的性质特点.但其独特之处是迄今研究证明中生代带内无板块分划与洋盆分割界线的地质、地球化学、地球物理的事实证据,而显示的是陆内的构造过程(图 4),那么它是什么构造驱动力所引起,是周缘板块构造或其远程效应,还是陆内造山,一直有争

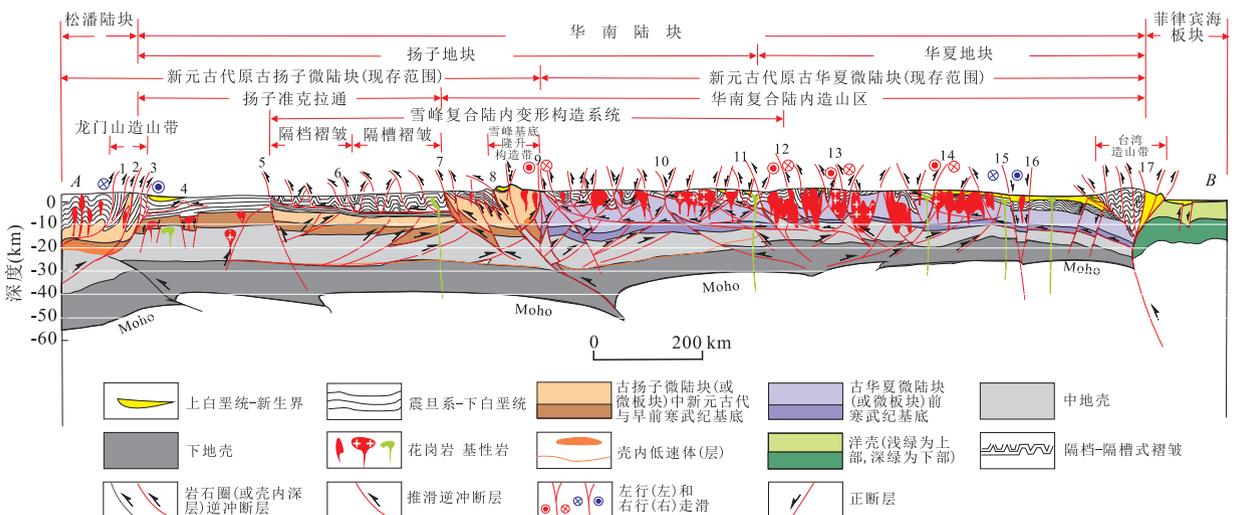


图 3 华南大陆东西向剖面

Fig.3 Cross-section in east-west direction of the South China block

据 Zhang *et al.* (2013).断裂名称:1.茂汶断裂;2.北川—映秀断裂;3.安县—灌县断裂;4.龙泉山断裂;5.华蓥山断裂;6.齐曜山断裂;7.鹤峰—来凤断裂;8.花垣—张家界断裂;9.安化—溆浦断裂;10.祁阳弧形逆冲带;11.江山—绍兴断裂;12.赣江断裂;13.吴川—四会断裂;14.政和—大埔断裂;15.邵武—河源断裂;16.长乐—南澳断裂;17.台东纵谷断裂

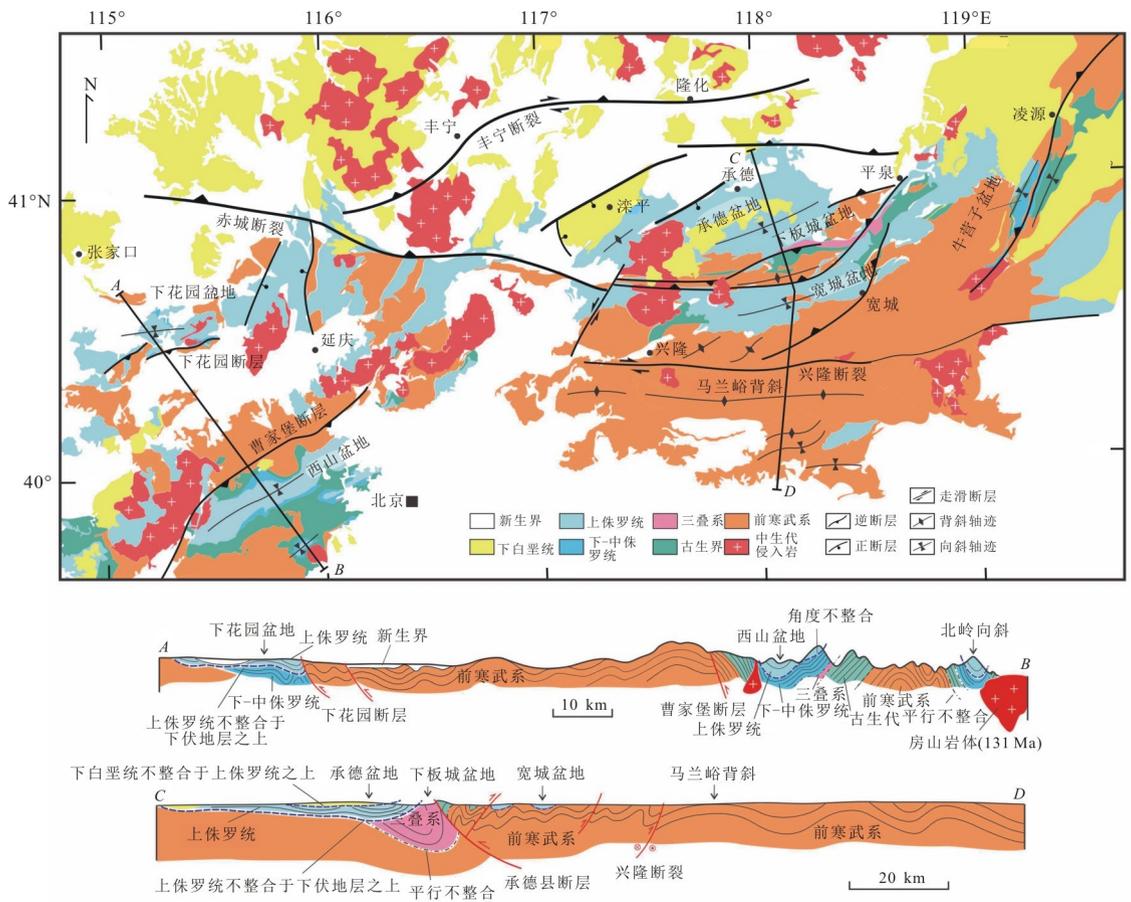


图 4 燕山构造带(a)及其剖面(b)

Fig.4 The Yanshan tectonic zone (a) and its cross-section (b)

孟庆任(2019, 未刊)

议.如果把阴山、太行山与燕山统一联系整体思考,并充分考虑同期周缘西太平洋板块俯冲和鄂霍茨克洋盆闭合造山、华北克拉通地块破坏等区域构造格局综合分析,用板块构造或远程效应,也是不能合理地给予解释的.而用陆内造山,即大陆板块内(陆内)不同陆块间的在深部与上部差异构造背景中所发生的相互作用所造成,应是不能排除的陆内造山作用的一种探索研究思路与途径(赵越,1990; Davis *et al.*, 1998; 宋鸿林, 1999; Zhang *et al.*, 2004; Liu, 2004; 赵越等,2004).

1.6 澳大利亚中部陆内造山作用

澳大利亚大陆中部由广泛的新元古宙—古生代的陆内变形域以及相应的新元古代—早古生代 Petermann(600~520 Ma)和晚古生代 Alice Springs(400~300 Ma) 2 条造山带组成(Sandiford and Hand, 1998).它们均卷入了古元古宙和中元古宙的变质基底以及 Amadeus 盆地的新元古宙—早古生代的沉积地层(图 5).在盆地南缘, Petermann 造山

作用表现为向北的逆冲作用并卷入了早寒武统地层,而在盆地北缘 Alice Springs 造山作用显示了向南的石炭纪逆冲作用(图 5).地质学家注意到所有的这些造山作用明显地发生在远离板块边缘的板内环境(Veevers, 2000; Haines *et al.*, 2001; Roberts and Houseman, 2001).这一环境属于 1 290 Ma 之前 3 个克拉通的汇聚位置,自那以后该位置变成澳大利亚大陆中部造山活动中心.Hand and Sandiford (1999)和 Roberts and Houseman(2001)认为这些克拉通块体之间的相互旋转以及断层的活化是澳大利亚大陆中部连续陆内造山作用的诱因.

上述情形一致表明大陆构造单元组分(例如陆内造山带、弥散变形带和盆地)不仅由板块构造形成或者来自板缘的远程效应引发,也完全可以是在陆内作用机制的产物.这些具有 2 个成因类型的构造组成了整个大陆构造,而对于陆内成因类型的构造来说,不同大陆构造块体之间的在不同岩石圈和地壳深度以及迥异的动力学背景下的相互作用可以是一种不可

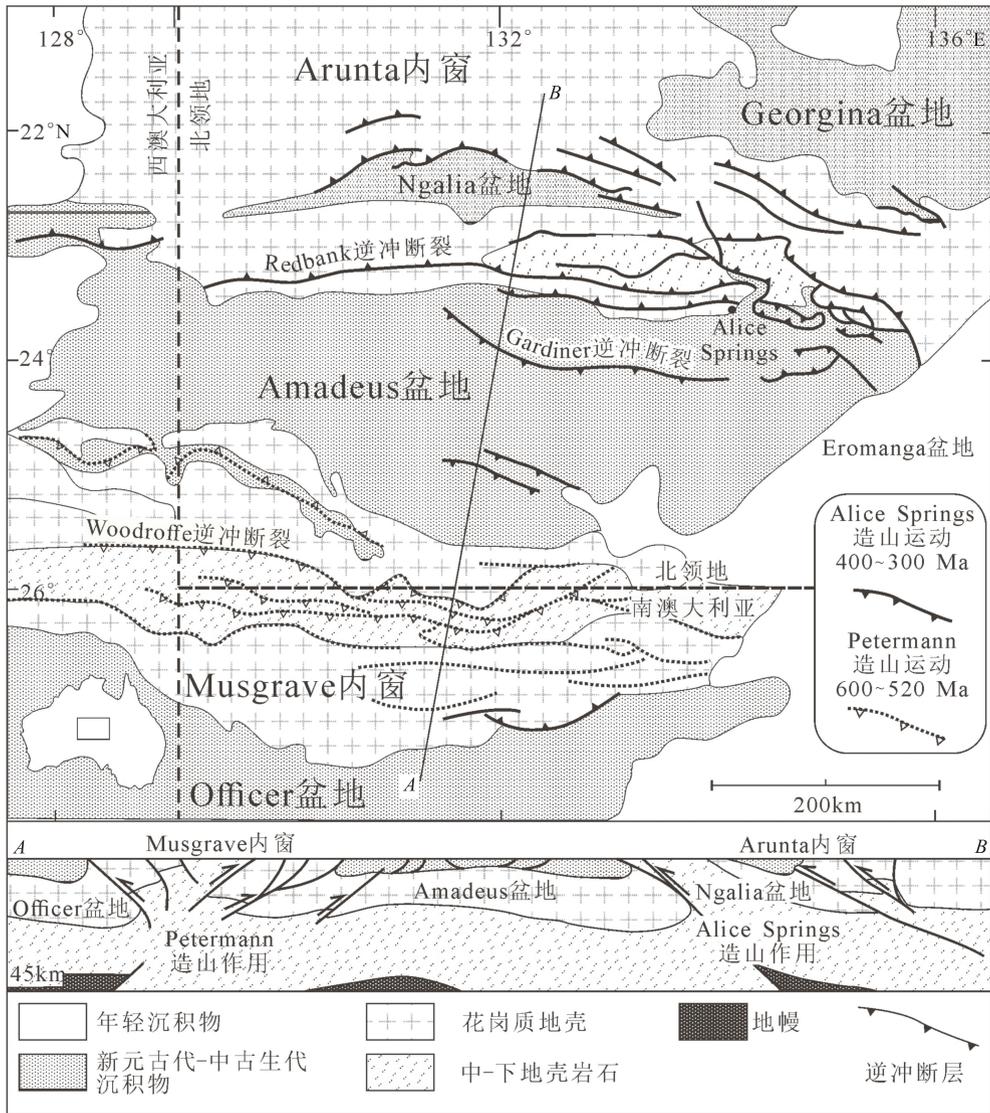


图 5 澳大利亚中部地质图

Fig.5 Geological map of the central Australian region

显示 Amadeus 盆地的古生代变形和 Musgrave 以及 Arunta 内窗构造。Amadeus 盆地内的变形以薄皮构造为特征，其与厚皮构造过程造成的 Musgrave 以及 Arunta 内窗折返裸露形成对照 (Sandiford and Hand, 1998)

忽视的机制 (Pysklywec and Beaumont, 2004)。

上述列举的国内外大陆造山带部分实例表明在大陆构造中，除部分板块构造及其远程效应所造成的构造外，我们还应考虑在大陆内不同陆块在深部和岩石圈或陆壳内的不同构造动力学背景下陆块间相互作用所造成的垂向与横向各种陆内构造，包括陆内造山、陆内构造变形、陆内盆地等，以及由板块构造与陆内构造两者复合的各类构造，这才是完整全面整体的大陆构造全貌。

总之，上述类似的问题，在国内外已有不同程度反映，美国的“大陆动力学”与“白皮书” (Pollard, 2003) 等研究咨询报告也有相关论述。显然，这类问

题已不是局部的偶然性问题，已具有全球大陆造山带的普遍性。所以从客观事实出发我们不能不予以重视和加强研究。

2 大陆构造问题的思考

上述从实际研究中遇到和发现的关于板块构造研究大陆的一些问题，确实需要认真思考与探索，但还要冷静思考上述遇到的这些大陆问题，究竟是什么问题，是仅仅由于大陆不同于大洋的物质组成属性、行为与表现形式，或由于问题的复杂，使我们用板块构造观解决尚需要一个探索过程，而非板块构

造理论本身的问题;还是真正由于板块构造本身的局限性,因而不能解释认知?或者这些问题仅是一些局部区域性特殊问题,不具普遍意义。鉴于此,这就使我们不能不除了思考上述实际研究分析遇到的问题外,也需要从大陆研究的现状与其存在的根本问题及其研究历史的回顾加以思考,以求认真思考与佐证上述问题尚未能认知的根本原因。

2.1 回顾地学对大陆的研究与启示

显然大陆始终是地球科学特别是固体地球科学研究的基本命题,从古代蒙昧时代至近代启蒙至当代一直是地质学关注和探索研究的基础性科学问题。但至今仍有漫长的路子要走。究其原因,从人类对地球表层大陆与大洋的认识与研究的历史中或许可以得到启示。这里暂不以古代为例,就以近现代在地质科学研究上具有重大影响的地台地槽说和板块构造理论对大陆的认识角度和过程而言,就有颇多有益启示。在当时历史条件下,立足于大陆观察的台槽说是以固定论为基点的,而对大洋知之甚少,多为从大陆的地质记录研究出发推断认识大洋,并推广于对全球地壳洋陆的统一解释认识。总体是以对大陆观察研究为主导依据而建立对全球认识的假说。而20世纪中叶立足于大洋调查研究与发现,验证创立板块构造学说反了过来。它是以20世纪现代人类科学技术知识为基础,探测并理性地揭示认知了大洋的消亡、运动演化,并推测了其深部的动力学机制,统一地解释了包括大陆在内的整个地球洋陆外壳的组成、结构及其运动交换规律,堪称20世纪人类在自然科学进展的三大重大成就之一和伟大的地学革命。这场地学革命的灵魂在于用活动论替代了固定论,用全球观替代了地区观。但随着20世纪70—80年代板块构造对大陆认识的过程,如前述地学界用板块构造研究解释、认知大陆遭遇困难和表现出局限性,并进一步注意到大陆与大洋,从地壳到地幔,从组成到结构具有基本差异,它们具统一相关性和相伴运动与相互转化等共性,但更有从起源、保存演化、物质循环与运动规律及其属性行为,乃至动力学与机制等方面存在有实质的差异,既具共性规律,更有各自的规律,也可能正是这一点,使完全建立在大洋基础上,没有考虑大陆问题的板块构造说如同主要立足于大陆的台槽说各自都不能完全地理认识统一而又不同的另一个,如大陆或大洋。这对我们理解上述讨论的问题具有重要的启示。历史是可以借鉴与思考的。板块构造理论从建立到应用于大陆有局限性是有根源和可理解的。

2.2 大陆现存的基本问题以及正在探索问题的启示与佐证

概括迄今依然在探索而未完全认知的一些大陆地质的基本问题如下:

(1)早期地球的形成演化状态和地球早期构造体制问题(Ernst, 2009; Griffin *et al.*, 2014; Gerya, 2014),即前板块构造体制问题,包括诸如初生大陆的起源与成因问题以及早期大陆热—构造体制与动力学机制问题;板块构造起始及其与大陆的实质关系问题(O'Neill *et al.*, 2007; Condie and Kröner, 2013);早期大陆地幔与壳幔关系和大陆地幔地球化学与动力学问题等;这些研究问题都一致表明,迄今地学界对大陆起源及其早期演化体制尚未完全认知,还处于探索积累研究争论之中。

(2)大陆与大陆构造的本质、特性和保存、演化及其动力学问题;超大陆周期聚散演化和其作为全球大陆最高一级的保存演化的体制机制问题,及其与板块构造的真正关系问题;洋陆差异与其不同的生物物质循环规律问题等也都处于探索研究之中(Condie, 2004, 2018; O'Neill *et al.*, 2009; Ernst, 2009; Nance and Murphy, 2013; Roberts, 2013)。

(3)从关于地幔与核幔深部动力学研究和模拟进展来说,包括地幔对流与地幔柱等的真实存在与过程及作用等的研究都还处于探测推断模拟猜想状态,对大陆研究的作用及其客观真实性还有很大的距离等。

(4)比较行星地质学类地行星研究对地球,尤其早期地球与大陆都有重要启示认识作用,但现还处于起始阶段(Nimmo and McKenzie, 1998; Nimmo and Tanaka, 2005; O'Neill *et al.*, 2007; Romeo and Turcotte, 2010; Lourenço *et al.*, 2016)。显然,上述提到的正在研究的大陆有关问题清楚表明地球科学迄今对大陆的起源、形成、演化等本质规律尚未获得根本性认识的突破。因此这些尚未解决的大陆问题反映了大陆的复杂性,也表明尚需要更多更长的时日去研究探索与争论。大陆何时起源?板块构造何时起始?初始洋陆关系和超大陆聚散与板块构造关系等基本问题还在探索之中,从而给予人们启迪,现今活跃于地球外壳的板块构造可能仅仅是地球形成演化特定阶段的产物,迄今也还缺少可靠证据肯定板块构造能够完全认知大陆的所有问题。上述讨论中遇到的问题,就是这方面的佐证。所以如果说建立在大洋基础上的板块构造理论可以揭示与认识大洋的话,则对大陆这个与大洋密切相关但又差

异明显的地球外壳的另一组成单元,从大陆起源、长期保存演化、生长与消亡物质循环系统及其机制,证明大陆并非与板块构造是自始至终并行不悖的,所以从上述实际研究遇到与提出的问题和从大陆迄今还未根本解决的基本问题思考,板块构造对大陆还不能完全认知,或至少说它有局限性,因此可以说地球科学距离建立一个系统的、全面的洋陆整体理论并在此基础上充分认知、保护和利用地球还任重道远,所以当代地球科学的发展,目前面临一个艰巨的历史任务是,需要从整体宇宙观和地球观深化发展板块构造,重新审视研究大陆,建立一个包括板块构造理论在内的、将地球内部到外壳洋陆统一一体的构造观。

3 建议和结语

显然,综合以上和国内外地学研究最新进展可以看出,板块构造学说从 20 世纪 70—80 年代“登陆”用以解读大陆以来,一方面大力推动了大陆地质研究,成为研究大陆的主导学术思想,使之在人类现代科学知识基础上,提高到以板块构造理性的研究认识大陆的新阶段,大陆的很多基本科学问题得到了解决,同时在实践中,也发现了许多新的问题,这些问题对于地球科学尤其是地质学中大地构造学进一步发展至关重要,其中一个主要的问题就是经过半个多世纪大陆地质研究的检验,发现建立于大洋研究基础上的板块构造理论对大陆地质还有许多基本问题尚不能完满解答,所以随着板块构造研究大陆的深化和新问题的出现,不得不促使地学界回顾和深入思考,进行新的探索研究,思考与探索可以包括以下 3 个方面。

3.1 用现代板块构造理论深化大陆与大陆构造研究

以板块构造理论的最新发展与理念,并以对大陆的新的认知和理解,再系统精细深化大陆构造的板块构造及其远程效应的深入研究与探讨,进一步揭示认识板块构造作用下的大陆行为、特点与构造作用、响应及其演化、过程与动力学,总结新发现、新认识、新规律,深化发展板块构造理论,并真正筛分确认出板块构造不能解释认知的大陆构造与问题。

3.2 重点进行大陆构造中的陆内构造及其动力学的研究

探讨研究大陆构造中来自大陆深部或不同块体(非板块)间的驱动力以及由自身不同块体间相

互作用导致的非板块构造起因的陆内构造,包括陆块构造、陆内造山、陆内构造变形、陆内盆山构造等,揭示大陆构造的全貌,以求探索解决板块构造研究大陆尚无答案或不能完满解释认知的大陆问题,深化完善发展板块构造,推动大陆构造研究,为此需思考与探索研究以下 6 个问题,供参考。

(1)大陆的起源及早期地壳构造体制和板块构造起始;(2)大陆的生长、保存、改造和超大陆聚散及其机制;(3)大陆构造与大陆流变学及其构造动力学;(4)大陆地幔与地幔动力学;(5)大陆与生命的协同演化;(6)大陆与成矿成藏及环境灾害问题。

3.3 深化大陆流变学与动力学和数理模拟研究

大陆流变学是深化大陆构造研究的重要关键问题,需要天然大陆岩石流变学、高温高压实验岩石流变学与数理模拟三位一体、互补约束共同探讨研究,为研究解决大陆与大陆构造的重要基本问题,奠定基础与途径和学术思路。

总之,大陆问题已是地球科学发展至今天,必须面对的重大科学问题,从当代地球科学的发展和板块构造研究的深化的角度出发,需要从洋陆各自的特性与规律和洋陆与地幔的统一整体研究探索认识大陆与大陆构造,从宇宙与比较行星地质学的最新研究进展中再研究认知大陆的起源与本质,从而重新认知大陆与陆下地幔的特性、本质与规律,在板块构造理论基础上,构建包括板块构造在内的大陆构造理论系统。

4 结语

(1)现代板块构造理论是当代地球科学研究大陆与大陆构造的主导学术指导思想,但它不能完全包容认知大陆全部问题,现时需要深化发展板块构造,重视认知大陆,探索构建大陆构造理论系统。

(2)大陆与大陆构造从起源到保存、演化具有自身相对独立的规律机制,大陆构造是由板块构造及其远程效应和大陆自身驱动力造成的陆内构造共同复合构成的,对此地学界尚有争议,需要重点探索研究。

致谢:本文撰写中得到以下同仁的无私帮助,在此深表谢忱:姚安平先生自始至终帮助搜集提供有关资料图件,孟庆任先生友情提供燕山图件,梁文天老师热情协助清绘澳洲中部 Alice-Springs 地质图,两位匿名评审人提出极为中肯的修改意见!

References

- Charvet, J., Shu, L. S., Faure, M., et al., 2010. Structural Development of the Lower Paleozoic Belt of South China: Genesis of an Intracontinental Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39 (4): 309–330. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.03.006>
- Chen, X., Rong, J. Y., Rowley, D. B., et al., 1995. Is the Early Paleozoic Banxi Ocean in South China Necessary?. *Geological Review*, 41(5): 389–400 (in Chinese with English abstract).
- Condie, K. C., 2004. Supercontinents and Superplume Events: Distinguishing Signals in the Geologic Record. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146 (1–2): 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.04.002>
- Condie, K. C., 2018. A Planet in Transition: The Onset of Plate Tectonics on Earth between 3 and 2 Ga?. *Geoscience Frontiers*, 9(1): 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.09.001>
- Condie, K. C., Kröner, A., 2013. The Building Blocks of Continental Crust: Evidence for a Major Change in the Tectonic Setting of Continental Growth at the End of the Archean. *Gondwana Research*, 23 (2): 394–402. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.011>
- Cong, B. L., Huang, K. N., 1987. Tectonics of the Panxi Region. *Chinese Science Bulletin*, 17: 1320–1324.
- Davis, G. A., Wang, C., Zheng, Y. D., et al., 1998. The Enigmatic Yinshan Fold-and-Thrust Belt of Northern China: New Views on Its Intraplate Contractional Styles. *Geology*, 26(1): 43–46. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0043:teyfata>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0043:teyfata>2.3.co;2)
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Neubauer, F., et al., 2011. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.03.002>
- Engelbreton, D. C., Cox, A., Gordon, R. G., 1984. Relative Motions between Oceanic Plates of the Pacific Basin. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 89(B12): 10291–10310. <https://doi.org/10.1029/jb089ib12p10291>
- Ernst, W. G., 2009. Archean Plate Tectonics, Rise of Proterozoic Supercontinentality and Onset of Regional, Episodic Stagnant-Lid Behavior. *Gondwana Research*, 15(3–4): 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.06.010>
- Gerya, T., 2014. Precambrian Geodynamics: Concepts and Models. *Gondwana Research*, 25(2): 442–463. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.008>
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., O'Neill, C., et al., 2014. The World Turns Over; Hadean-Archean Crust-Mantle Evolution. *Lithos*, 189: 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.08.018>
- Guo, Z. W., Deng, K. L., Han, Y. H., et al., 1996. Formation and Evolution of the Sichuan Basin. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 2000. Exhumation of Ultrahigh-Pressure Continental Crust in East Central China: Late Triassic-Early Jurassic Tectonic Unroofing. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 105 (B6): 13339–13364. <https://doi.org/10.1029/2000jb900039>
- Haines, P. W., Hand, M., Sandiford, M., 2001. Palaeozoic Synorogenic Sedimentation in Central and Northern Australia: A Review of Distribution and Timing with Implications for the Evolution of Intracontinental Orogens. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48 (6): 911–928. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00909.x>
- Hand, M., Sandiford, M., 1999. Intraplate Deformation in Central Australia, the Link between Subsidence and Fault Reactivation. *Tectonophysics*, 305 (1–3): 121–140. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(99\)00009-8](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(99)00009-8)
- Hsü, K. J., Li, J. L., Chen, H. H., et al., 1990. Tectonics of South China: Key to Understanding West Pacific Geology. *Tectonophysics*, 183(1–4): 9–39. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90186-c](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90186-c)
- Hsü, K. J., Sun, S., Li, J. L., et al., 1988. Mesozoic Overthrust Tectonics in South China. *Geology*, 16 (5): 418–421. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0418:motisc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0418:motisc>2.3.co;2)
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T., et al., 2010. New Insight into a Subduction-Related Orogen: A Reappraisal of the Geotectonic Framework and Evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, 18 (1): 82–105. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.02.015>
- Kennett, B. L. N., Jaffaldano, G., 2013. Role of Lithosphere in Intra-Continental Deformation: Central Australia. *Gondwana Research*, 24(3–4): 958–968. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.10.010>
- Korenaga, J., 2013. Initiation and Evolution of Plate Tectonics on Earth: Theories and Observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41 (1): 117–151. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124208>
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300-Km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179–182. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- Liu, H. F., Liang, H. S., Cai, L. G., et al., 2009a. Structural Styles of the Longmenshan Thrust Belt and Evolution of the Foreland Basin in Western Sichuan Province, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 7(4): 351–372.

- Liu, S., Zhang, G., Ritts, B. D., et al., 2009b. Tracing Exhumation of the Dabie Shan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Complex Using the Sedimentary Record in the Hefei Basin, China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1–2): 198–218. <https://doi.org/10.1130/b26524.1>
- Liu, S. F., 2004. Mesozoic Basin Evolution and Tectonic Mechanism in Yanshan, China. *Science in China (Series D; Earth Sciences)*, 47(14): 24–26. <https://doi.org/10.1360/04zd0022>
- Lourenço, D. L., Rozel, A., Tackley, P. J., 2016. Melting-Induced Crustal Production Helps Plate Tectonics on Earth-Like Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 439: 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.01.024>
- Luo, Z. L., 1991. Taphrogenesis and Oil-Gas Distribution in China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic Maps of the Japanese Islands; Plate Tectonic Synthesis from 750 Ma to the Present. *The Island Arc*, 6(1): 121–142. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x>
- Maruyama, S., Santosh, M., Zhao, D., 2007. Superplume, Supercontinent, and Post-Perovskite: Mantle Dynamics and Anti-Plate Tectonics on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 11(1–2): 7–37. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.06.003>
- Meng, Q. R., Zhang, G. W., 1999. Timing of Collision of the North and South China Blocks; Controversy and Reconciliation. *Geology*, 27(2): 123–126. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0123:tocotn>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0123:tocotn>2.3.co;2)
- Nance, R. D., Murphy, J. B., 2013. Origins of the Supercontinent Cycle. *Geoscience Frontiers*, 4(4): 439–448. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.12.007>
- Nimmo, F., McKenzie, D., 1998. Volcanism and Tectonics on Venus. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 23–51. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.23>
- Nimmo, F., Tanaka, K., 2005. Early Crustal Evolution of Mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1): 133–161. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122637>
- O'Neill, C., Jellinek, A. M., Lenardic, A., 2007. Conditions for the Onset of Plate Tectonics on Terrestrial Planets and Moons. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1–2): 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.038>
- O'Neill, C., Lenardic, A., Jellinek, A. M., et al., 2009. Influence of Supercontinents on Deep Mantle Flow. *Gondwana Research*, 15(3–4): 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.11.005>
- Pollard, D., 2003. New Departure in Structural Geology and Tectonics. <https://www.pangea.Stanford.edu/~dpollard/NSF/>
- Pysklywec, R. N., Beaumont, C., 2004. Intraplate Tectonics; Feedback between Radioactive Thermal Weakening and Crustal Deformation Driven by Mantle Lithosphere Instabilities. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1–4): 275–292. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00098-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00098-6)
- Ren, J. S., Chen, T. Y., Niu, B. G., et al., 1990. Tectonic Evolution and Mineralization of East China Lithosphere. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Roberts, E. A., Houseman, G. A., 2001. Geodynamics of Central Australia during the Intraplate Alice Springs Orogeny: Thin Viscous Sheet Models. *Geological Society, London, Special Publications*, 184(1): 139–164. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2001.184.01.08>
- Roberts, N. M. W., 2013. The Boring Billion? — Lid Tectonics, Continental Growth and Environmental Change Associated with the Columbia Supercontinent. *Geoscience Frontiers*, 4(6): 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.05.004>
- Romeo, I., Turcotte, D. L., 2010. Resurfacing on Venus. *Planetary and Space Science*, 58(10): 1374–1380. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.05.022>
- Sandiford, M., Hand, M., 1998. Controls on the Locus of Intraplate Deformation in Central Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 162(1–4): 97–110. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(98\)00159-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(98)00159-9)
- Shu, L. S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035–1053 (in Chinese with English abstract).
- Song, H. L., 1999. Characteristics of Yanshan Type Intraplate Orogenic Belts and a Discussion on Its Dynamics. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 309–316 (in Chinese with English abstract).
- Veevers, J. J., 2000. Billion-Year Earth History of Australia and Neighbours in Gondwanaland. *Geoscience Canada*, 27(4): 191–192.
- Wang, X. X., Wang, T., Zhang, C. L., 2013a. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on Orogenic Process. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129–151. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.037>
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013b. Phanerozoic Tectonics of the South China Block; Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019>
- Zhang, C. H., Wu, G. G., Xu, D. B., et al., 2004. Mesozoic Tectonic Framework and Evolution in the Central Segment of the Intraplate Yanshan Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 23(9–10): 864–872.
- Zhang, C. L., Wang, T., Wang, X. X., 2008. Origin and Tectonic

- Setting of the Early Mesozoic Granitoids in Qinling Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 14 (3): 304—316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Dong, Y. P., et al., 2011. Continental Geology, Tectonics and Dynamics. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Wang, Y. J., et al., 2013. Tectonics of South China Continent and Its Implications. *Science China Earth Sciences*, 56(11): 1804—1828. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4679-1>
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Yao, A. P., 2006. Thoughts on Studies of China Continental Geology and Tectonics. *Progress in Natural Science*, 16(10): 1210—1215 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Li, X. W., Meng, Q. R., 1995. Qinling Orogen and Intercontinental Orogenic Mechanism. *Episodes*, 18: 36—39.
- Zhang, G. W., Yu, Z. P., Sun, Y., et al., 1989. The Major Suture Zone of the Qinling Orogenic Belt. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3 (1—4): 63—76. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(89\)90010-x](https://doi.org/10.1016/0743-9547(89)90010-x)
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, Y., 1990. The Mesozoic Orogenies and Tectonic Evolution of the Yanshan Area. *Geological Review*, 36(1): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S. H., et al., 2004. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319—328 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. D., Davis, G. A., Wang, C., et al., 2000. Major Mesozoic Tectonic Events in the Yanshan Belt and the Plate Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica*, 74(4): 289—302 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. L., 1998. Paleotethyan Orogenic Belt in Western Yunnan and Sichuan. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Mo, X. X., et al., 2005. Geochemistry and Petrogenesis of the Sangxiu Formation Basalts in the Central Segment of Tethyan Himalaya. *Geochimica*, 34(1): 7—19 (in Chinese with English abstract).
- Zorin, Y. A., 1999. Geodynamics of the Western Part of the Mongolia-Okhotsk Collisional Belt, Trans-Baikal Region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33—56. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00042-6)

附中文参考文献

- 陈旭, 戎嘉余, Rowley, D. B., 等, 1995. 对华南早古生代板溪洋的质疑. *地质论评*, 41(5): 389—400.
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等, 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社.
- 罗志立, 1991. 地裂运动与中国油气分布. 北京: 石油工业出版社.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等, 1990. 中国东部大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社.
- 舒良树, 2012. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 31(7): 1035—1053.
- 宋鸿林, 1999. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨. *地质学前沿*, 6(4): 309—316.
- 张成立, 王涛, 王晓霞, 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境. *高校地质学报*, 14(3): 304—316.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等, 2011. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. *地质学前沿*, 18(3): 1—12.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平, 等, 2006. 关于中国大陆地质与大陆构造基础研究的思考. *自然科学进展*, 16(10): 1210—1215.
- 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.
- 赵越, 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. *地质论评*, 36(1): 1—13.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. *地质学前沿*, 11(3): 319—328.
- 郑亚东, Davis, G. A., 王琮, 等, 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. *地质学报*, 74(4): 289—302.
- 钟大赉, 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2005. 特提斯喜马拉雅带中段桑秀组玄武岩的地球化学和岩石成因. *地球化学*, 34(1): 7—19.