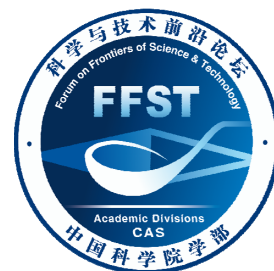




进展

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛 中国(东亚)大陆构造与动力学专题

中国(东亚)大陆构造与动力学 ——科学与技术前沿论坛“中国(东亚)大陆构造与 动力学”专题进展



许志琴^{①*}, 张国伟^②

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

② 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

* E-mail: xzq@ccsd.cn

收稿日期: 2013-01-16; 接受日期: 2013-03-28; 网络版发表日期: 2013-08-26

摘要 集结“中国(东亚)大陆构造与动力学”为主题的科学与技术前沿论坛的 11 个论题, 梳理了中国(东亚)大陆构造与动力学领域的四大关键问题: (1) 古大陆、古环境、古构造及中国(东亚)古大陆的形成; (2) 中国大陆增生与碰撞造山系的造山过程; (3) 中国大陆的盆-山体系及近海新生代盆地的形成演化; (4) 中国大陆的现代地壳活动及深部结构. 综述了中国(东亚)大陆在长期地质历史中的聚合、裂解、碰撞和造山的过程, 突显中国大陆构造体制的长期性、复杂性、叠置性、再造性和与洋-陆转换的成因联系. 中国(东亚)三大构造域的关系、地体边界的超高压变质带和深地幔作用、印度/亚洲碰撞和青藏高原的隆升、近海新生代盆地的形成, 大型断裂与地震、华南大地构造等问题已成为当前中国大陆构造及动力学领域关注的热点.

关键词

中国(东亚)大陆
古大陆
构造与动力学

大陆一直是地球科学研究的世袭领域. 虽然板块构造诠释了全球构造的许多现象, 但是对于解释大陆的基本问题仍具有局限性, 应用板块构造学说已难以阐明大陆上的大多数动力学过程. 随着大陆动力学的兴起, 一个重新审视和揭示大陆成因的时代已经到来. 中国(东亚)大陆广瀚博大、瑰丽风采, 在全球构造中占有极其重要位置. 它记录了早期的大陆演化, 古环境的变迁与生物演变, 板块裂解、洋盆扩张、俯冲和消亡以及大陆会聚、拼贴与碰撞造山; 记录了盆地的充填和海平面变化, 大范围的构造-变

质-岩浆深熔和成矿事件, 大陆变形与地震活动以及深部结构及对地壳行为的制约, 记录了 40 亿年来的大陆如何生长? 又如何构筑成今日之宏大的地质-地貌景观——我们的家园.

在中国科学院院士工作局的支持下, 以“中国(东亚)大陆构造与动力学”为主题的科学与技术前沿论坛, 汇集了中国科学家多年来对中国(东亚)大陆成因的若干重大关键问题的新的研究、探索、思考、讨论、综述和进展. 经整理, 将有关“中国(东亚)大陆构造与动力学”的专家发言要点归纳如下, 涉及的地域在图 1

中文引用格式: 许志琴, 张国伟. 中国(东亚)大陆构造与动力学——科学与技术前沿论坛“中国(东亚)大陆构造与动力学”专题进展. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1527–1538
英文引用格式: Xu Z Q, Zhang G W. Progress in tectonics and dynamics of China (East Asia)—Forum on Frontiers of Science & Technology: Tectonics and Dynamics of China (East Asia) (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 2013, 43: 1527–1538

中表示.

1 古大陆和古环境的再造

地球表层的大陆和大洋演变主要是通过大陆的聚合和裂解来完成. 地球在近 46 亿年的漫长的演化过程中, 形成了 18 亿年的 Columbia 超大陆、10 亿年的 Rodinia 超大陆和 2.5 亿年以来的 Pangea 超大陆.

赵国春教授根据大量资料和综述前人观点, 诠释了这三个超大陆的形成过程. Columbia 超大陆是由全球主要克拉通陆块在 20~18 亿年期间碰撞拼合而成 (Zhao 等, 2002). 在 18~13 亿年期间, Columbia 超大陆部分陆缘经历了向外增生作用, 在北美、格陵兰和波罗地大陆的南部形成长达 1.5 万公里长的大陆边缘增生带 (Karlstrom 等, 2001; Rogers 和 Santosh, 2002; Zhao 等, 2004). 从中元古代开始, Columbia 超大陆内

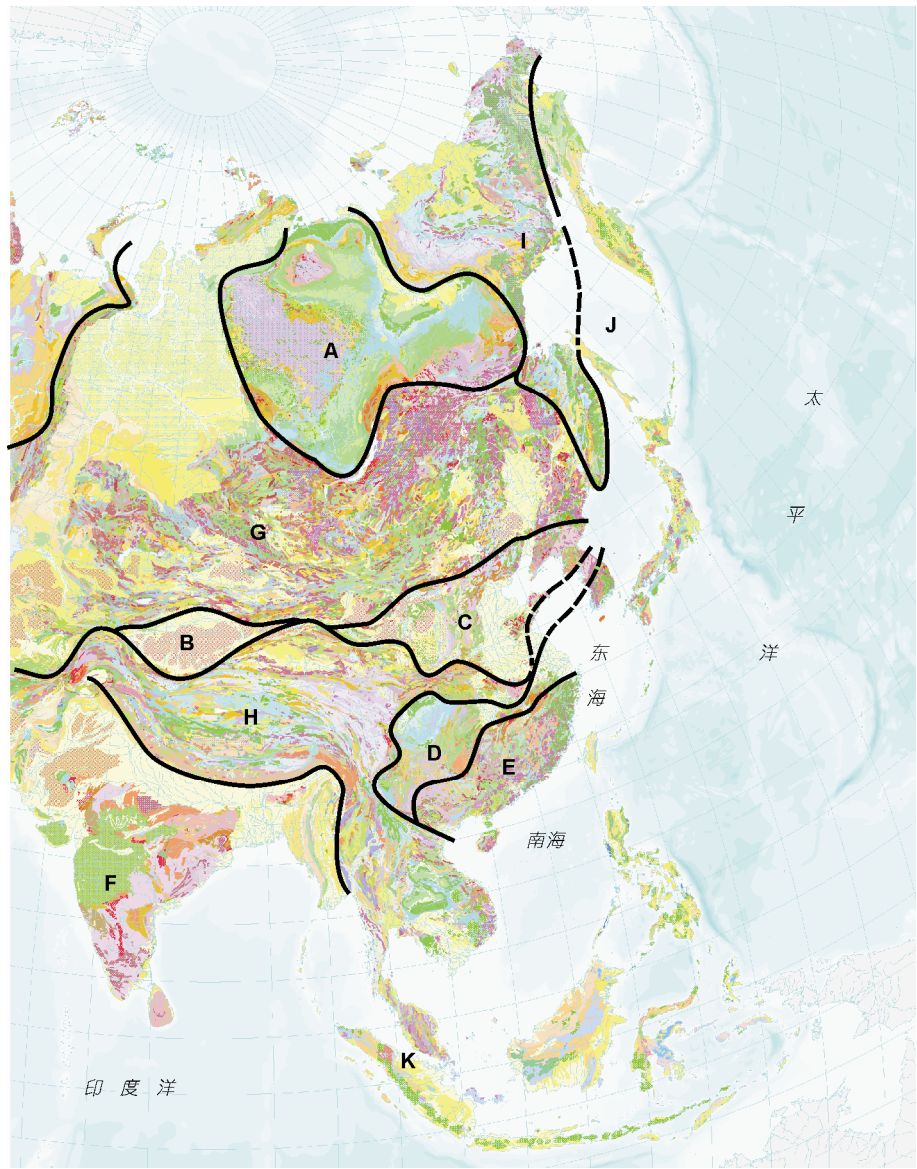


图 1 东亚大陆的大地构造图

A, 西伯利亚陆块; B, 塔里木陆块; C, 华北陆块; D, 扬子陆块; E, 华南陆块; F, 印度陆块; G, 中亚造山系; H, 特提斯造山系(含青藏高原); I, 东北亚造山带; J, 西太平洋岛弧带; K, 印度洋岛弧带. 地质底图为耿树方研究员提供, 构造界线的划定得到任纪舜院士的帮助

部已进入拉张-裂谷阶段, 形成全球规模中元古代裂谷系和非造山性岩浆岩(Condie, 2002). 直到~12.7 亿年前, 以北美 Coppermine River 大陆溢流玄武岩和 MacKenzie 基性岩墙群为代表的超级地幔柱的作用, 导致 Columbia 超大陆部分裂解(Zhao 等, 2004). 解体出来的波罗地陆块、南美陆块、西非-刚果陆块、南非陆块、印度陆块和澳大利亚陆块在 1100~900 Ma 期间又与北美劳伦(Laurentia)古陆和南极陆块拼合, 形成 Rodinia 超大陆(Evans 和 Mitchell, 2011). 在 900~750 Ma 期间, Rodinia 超大陆部分陆缘经历了洋-陆俯冲, 形成一些大陆边缘弧(Torsvik, 2003). 从晚元古代中期(~820 Ma)开始, Rodinia 超大陆进入拉张-裂谷阶段, 并在 750~650 Ma 开始裂解, 其中劳伦、波罗地和西伯利亚陆块向北漂移, 而非洲、南美、澳大利亚、印度和东南极陆块向南漂移并于 600~550 Ma 期间拼合形成冈瓦纳古陆(Hoffman, 1991), 该古陆与北半球的劳伦、波罗地和西伯利亚陆块之间被 Rheic 洋分隔(Torsvik, 2003). 在晚元古代末至早古生代期间, 冈瓦纳古陆北缘发生一系列大规模的裂解事件, 解体出诸多微陆块在 Rheic 洋内向北漂移并相继拼贴到劳伦、波罗地和西伯利亚陆块上(Torsvik, 2003). 同时, 冈瓦纳古陆主体也向北漂移, 并于 300~250 Ma 与 Laurus(包括劳伦、波罗地、西伯利亚和部分亚洲陆块)拼合成 Pangea 超大陆(Scotese, 2004). 在东亚, Rheic 洋被北漂的微陆块分隔成古亚洲洋、秦-祁-昆洋和古特提斯洋域, 其中古亚洲洋位于西伯利亚与塔里木-华北陆块之间, 洋内有哈萨克斯坦、图瓦-蒙古、阿穆尔(额尔古纳-兴安-佳木斯)等微陆块分布, 并于晚石炭世至晚二叠世闭合, 导致华北-塔里木最终与西伯利亚最终拼贴(Windley 等, 2007). 秦-祁-昆洋位于华北-塔里木与华南-羌塘陆块之间, 洋内有柴达木、中祁连、中秦岭等微陆块分布, 这些微陆块于早古生代拼贴到华北或塔里木陆块上; 古特提斯洋位于华南-羌塘与基梅里(Cimmerian)陆块群之间(Metcalfe, 2009). 在印支期, 秦-祁-昆洋和古特提斯洋几乎同时闭合, 导致中国南、北方大陆聚合和东亚大陆的最终形成, 并成为 Pangea 超大陆主体的一部分. 在 220~200 Ma 期间, Pangea 超大陆内部已进入拉张-裂谷阶段, 并在 180~170 Ma 前伴随古地中海和大西洋的打开而开始解体, 但明显的解体发生在 140 Ma 之后: 首先是北方的劳亚古陆与南方的冈瓦纳古陆重新裂开, 在二者之间形成古地中海; 然后大西洋进

一步扩张, 在其两岸形成被动陆缘(Golonka, 2004). 与此同时, 太平洋周边发生大规模的俯冲, 形成一系列沟-弧-盆体系, 逐渐演化成现今的全球大陆分布格局(Golonka, 2004; Scotese, 2004).

2 古环境和生物突变与古大陆关系

殷鸿福院士讲述古环境和生物突变与古大陆关系的故事. Rodinia 超大陆在 7.5 亿年的裂解使全球大陆边缘的面积大增, 光合作用加强; 同时 Rodinia 经历了近 90°真极移(TPW)的快速旋转, 造成各裂解块体聚合在赤道附近, 岩石风化加快; 两者均大量吸收 CO₂, 导致气温下降, 发生冰期, 形成一个被冰覆盖的“雪球地球”(Scotese, 2004). 雪球地球形成后, 由于风化作用消失及火山爆发、甲烷释放等积累 CO₂、甲烷, 使温室效应重新发挥作用, 冰期消失, 如此反复了几次. 雪球地球时期及雪球融化时期, 大气及海洋中发生了 CO₂、甲烷几次突降和几次增氧事件, 氧含量的增加允许真核生物由微生物发展为宏体生物; 雪球融化后, 海水形成了合适的盐度和温度条件. 6.35~5.30 亿年间, 才顺序出现了动物胚胎繁盛, 宏观生物繁盛, 伊迪卡拉生物繁盛及寒武纪大爆发(McFadden 等, 2008).

二叠纪末至三叠纪初期, 全球发生显生宙最大的生物灭绝事件. 它破坏了存在了 2 亿年之久的生态系统结构, 使古生代型生态系转变为中生代型生态系, 同时造成了陆地上的煤缺失和海洋中的礁缺失和硅缺失. 二叠系-三叠系界线事件序列说明急剧恶化的全球变化和生物灭绝密切相关(Xie 等, 2005; Yin 等, 2012). 多圈层耦合的剧烈全球变化是泛大陆聚合的地球表层效应, 包括出现高山深盆、风系和洋流的变化、最大的海退及继后迅速海侵、温度升高和大火成岩省(259~251 Ma)形成(Yin 等, 1992)、大陆干旱化及纬度风系、植被消亡和生物灭绝等(Erwin, 1993). 他提出核幔变动造成泛大陆聚合和大火成岩省形成, 是导致古、中生代之交生物大绝灭的地内原因(Isozaki, 2009).

3 东亚大陆构造

以任纪舜院士领衔编制的 1:500 万国际亚洲地质图(IGMA5000)已经完成, 这是在世界地质图委员

会(CGMW)旗下, 由 CGMW 南亚和东亚分会负责, 联合 CGMW 北欧亚分会、中东分会和海底图分会, 由亚欧 20 个国家 130 余名地质学家参与编制的第一份 IGMA5000; 是在中国地质调查局全力支持下第一份按国际标准, 在 ArcGIS 平台上, 既表示大陆又表示海底地质的 IGMA5000. IGMA5000 为亚洲地质、构造、资源、环境研究, 为地质教学、地质调查、矿产普查勘探和环境调查等工作提供了一个可以不断更新的“工作母机”。

任纪舜院士指出, 亚洲是由三大克拉通和三个含有一些小克拉通和众多微陆的巨型造山带组成的复合大陆. 亚洲三大造山带分属于三个全球性构造域, 即古亚洲洋动力体系作用下形成的古亚洲构造域, 特提斯-古太平洋和印度洋-太平洋两个前后相继的动力体系作用下形成的特提斯构造域和太平洋构造域. 中生代太平洋和特提斯构造域对古生代古亚洲构造域的叠加、复合, 使东亚和中亚成为全球地质结构和演化历史最复杂的一个区域(黄汲清等, 1977; 任纪舜等, 1980). 亚洲三大克拉通分属于劳亚和冈瓦纳两个巨型大陆: 印度和阿拉伯属冈瓦纳大陆, 西伯利亚则是劳亚大陆的重要成员. 包含在巨型造山带中的中朝、扬子、塔里木、中伊朗、中缅甸等小克拉通, 在古亚洲洋消失之前, 它们位于古亚洲洋之南, 属冈瓦纳大陆的北部边缘; 古亚洲洋消失, 特提斯打开之后, 它们位于特提斯之北属劳亚大陆的南部边缘(Ren 等, 1999). 通过亚洲大地构造研究, 我们将会从全球角度更深刻地认识中国大地构造的一些基本特征。

4 中国三大古老陆块的形成

中国主要的古老陆块有华北、华南和塔里木, 这些古陆在前寒武纪有各自独立的构造演化历史. 翟明国院士论述三大陆块的形成过程, 认为华北陆块目前发现的最古老的岩石年龄约 38 亿年, 巨量陆壳的生长期在 28~27 亿年(Zhai 和 Santosh, 2011). 25 亿年的太古宙末期的构造是以小陆块的拼合继而形成稳定的华北克拉通. 继后在 Columbia 超大陆形成中, 华北生成三个古元古代(约 22~19.5 亿年)由裂谷-岛弧-碰撞形成的初始活动带, 并记录了重要的大氧化事件(翟明国, 2011). 中-晚元古代的裂谷事件代表了华北克拉通的地台属性的演化史. 塔里木盆地的基底包括古老的变质岩系以及新元古代地层, 确定有四

期冰川作用造成的新元古代冰碛岩以及 C 同位素的负漂移(徐备等, 2008). 华南古陆是由扬子和华夏克拉通在新元古代拼接而成的. 扬子克拉通经历了 29~26 亿年陆壳的主要生长期、约 25 亿年陆壳重熔作用, 在相当于 Columbia 超大陆形成时期发生约 19~18 亿年的变质作用和壳熔花岗岩以及 Rodinia 超大陆形成时期发生的 10~9 亿年的四堡期和 8~6 亿年的南华期的变质与岩浆事件, 此外, 新元古代的两次冰川作用可与全球雪球事件对比(黄晶等, 2007). 华夏古陆由 18 亿年、10~9 亿年和约 8 亿年的古老花岗岩(片麻)岩以及变质岩组成, 说明广泛的古老基底存在(Xu 等, 2007). 华夏与扬子克拉通有统一的新元古代沉积盖层表明华南大陆至少形成在约 10~9 亿年后, 并构成 Rodinia 超大陆的组成部分. 中央造山带的高压-超高压变质作用研究支持了上述古陆块在三叠纪 pangea 超大陆形成时期拼合在一起, 形成中国大陆的主体(Zhai 和 Santosh, 2011).

在三大古陆块中, 具有长期多期复杂构造演化历史的华南陆块是中国大陆仍存在分歧争论的陆块(张国伟等, 2011; 许靖华等, 1987; 陈旭等, 1995; Li Z X 和 Li X H, 2007; Shu 等, 2008; Wang 等, 2013; Charvet 等, 2010; 陈旭等, 2010; 刘宝珺和许效松, 1994; 马力等, 2004; 张国伟等, 2001; Zhang 等, 2006), 张国伟院士认为华南陆块在中新元古代以来具有四大不同演化阶段的不同构造机制与属性演化: (1) 在 Rodinia 聚散构造背景下的拼合与裂解, 形成新元古代中晚期统一的古华南大陆板块和新元古代晚期陆内伸展裂陷构造(张国伟等, 2011; 刘宝珺和许效松, 1994; 马力等, 2004); (2) 显生宙以来, 扬子与华夏地块无洋盆分离, 早古生代与中生代初广西与印支两期陆内造山作用致使在统一华南大陆内, 造成陆内造山区和克拉通逐渐活化并多期迁移扩展, 而且与同期的西半部的扬子克拉通并行演化, 构成长期周缘板块构造围限下的华南大陆的陆内构造基本特征(陈旭等, 1995; Shu 等, 2008; Charvet 等, 2010; 陈旭等, 2010; 张国伟等, 2011); (3) 中生代中晚期至现今的华南大陆构造处于现代全球板块构造三大动力学体系汇聚背景的制约, 由于印度板块俯冲碰撞和青藏高原形成隆升及向东北向挤压的驱动, 同时西太平洋板块俯冲西向运动与贺兰-川滇南北构造带斜向汇聚, 以及印度-澳大利亚板块北向运动的差异, 造成中国大陆东、西形成巨大剪切力偶系并影响华南

大陆, 形成华南大陆今日复杂构造格局与面貌(张国伟等, 2011; Shu 等, 2008; Wang 等, 2013; Charvet 等, 2010; 张国伟等, 2001; Zhang 等, 2006). 综合概括现今华南大陆构造的基本组成与结构构造格局为: 具有南华纪以来的三层显生宙为主的盖层和双层前寒武纪基底, 即 Nh-S, D-T₂, 和 T₃-Q 三层盖层和 Ar-Pt₁ 与 Pt₂₋₃ 的双层基底的基本地质物质组成(张国伟等, 2011; Shu 等, 2008; Wang 等, 2013; 陈旭等, 2010; 刘宝珺和许效松, 1994; 马力等, 2004). 而华南大陆构造则主要由两大块地即扬子与华夏地块所构成, 划分为三类主要构造单元: 周缘盆山构造; 相对稳定克拉通和华南复合陆内造山区. 具体构造几何学结构由四大构造系统交织复合构成(张国伟等, 2011; 许靖华等, 1987; 陈旭等, 1995; Li Z X 和 Li X H, 2007; Shu 等, 2008; Wang 等, 2012; Charvet 等, 2010; 陈旭等, 2010; 刘宝珺和许效松, 1994; 马力等, 2004; 张国伟等, 2001; Zhang 等, 2006), 包括周缘盆山前陆构造系统; 江汉-黄金口复合联合构造系统; 雪峰陆内变形构造系统; 逆冲推覆剪切走滑旋转滑脱构造系统. 它们是在长期板块构造围限下, 从上部陆壳岩石圈构造动力学和深部地幔动力学复合演变控制中, 主要由板块构造及其远程效应和大陆内不同陆块相互作用造成的陆内构造(张国伟等, 2011; Shu 等, 2008; 陈旭等, 2010; Zhang 等, 2006), 共同塑造了现今华南大陆的基本构造面貌.

5 中国大陆的主要地体边界——蛇绿岩带与超高压变质带

以柯石英、金刚石为代表的超高压变质岩石的发现, 表明地表的岩石可以俯冲到 100 km 以下地幔的深度, 然后又折返上来(Chopin, 1984; Smith, 1984), 目前在全球大陆碰撞造山带的板块汇聚边界上已发现了 20 余条超高压变质带(Chopin, 2003), 这一壮观动力学事件受到全球地学家的瞩目. 在中国大陆的大别(Xu, 1987)、苏鲁(Yang 和 Smith, 1989)、祁连(Yang 等, 2001)、阿尔金(张建新等, 2002)、秦岭(杨经绥等, 2002)和西南天山(张立飞等, 2002; Lu 等, 2008)等造山带中, 先后发现规模可观的超高压变质带, 这些发现以及位于苏鲁超高压变质带上中国第一口科学深井(5158.8 m)的实施(Xu 等, 2009), 是中国科学家对世界超高压变质带领域研究的重要贡献.

杨经绥研究员综述了中国大陆上与始、古特提斯洋盆俯冲相关的高压-超高压变质作用, 认为中国高压/超高压变质带形成的地构造背景有洋壳(深)俯冲和陆壳(深)俯冲两大成因类型, 前者大部与始-古特提斯洋盆中微陆块之间的汇聚碰撞有关; 后者为大陆块之间剪式碰撞和撕裂式岩石圈舌形板片深俯冲的产物(杨经绥等, 2009). 研究表明, 高压/超高压变质岩石和蛇绿岩、混杂堆积、俯冲增生楔一起构成俯冲/折返杂岩带, 代表了印支造山带山根物质的大别-苏鲁高压/超高压俯冲/折返杂岩带, 呈面形推覆岩片的构造样式叠置在扬子陆块之上, 具有汇聚陆块边缘深部地幔物质折返的“斜向挤出”和“沿岩石圈板片的多层隧道的多重/分片挤出”的两种模式(许志琴等, 2003; Xu 等, 2009).

经典的板块构造理论认为, 蛇绿岩地幔橄榄岩(即大洋地幔橄榄岩)通常来自浅部地幔. 但随着大洋地幔橄榄岩和铬铁矿中陆续发现金刚石和柯石英等深部成因矿物(Xu 等, 2009; Bai 等, 1993)特别是近些年, 在雅鲁藏布江中生代蛇绿岩西部的罗布莎和普兰地幔橄榄岩体和俄罗斯极地乌拉尔 Ray-Iz 早古生代的蛇绿岩型铬铁矿中, 均发现了金刚石等深部矿物, 尤其发现了作为矿物包裹体原位产出的金刚石, 提出位于板块边界的缝合带中代表洋盆残片的蛇绿岩可能来自深部地幔成因(>300 km)的新认识(杨经绥等, 2011).

6 古亚洲造山带的增生造山作用

中亚大陆增生造山作用研究表明, 中亚大陆经历古亚洲洋从西往东逐步闭合(Zhao, 1990; Windley 等, 2007; Xiao 等, 2008), 发育洋中脊俯冲(Windley 等, 2007; Xiao 等, 2007; Geng 等, 2009; Cai 等, 2010; Jiang 等, 2010; Tang 等, 2010; Ma 等, 2012; Liu 等, 2012)以及残余洋盆汇聚(Windley 等, 2007; Liu 等, 2012; Xiao 等, 2010)等复杂的增生演化过程和壳幔相互作用, 形成具有复杂山弯构造的古亚洲洋造山系(Xiao 等, 2010).

古地磁等综合研究表明, 哈萨克斯坦山弯构造主体从晚泥盆世-石炭纪开始发育(Levashova 等, 2003; van der Voo 等, 2006), 最终形成时限为二叠纪-早三叠世(Xiao 等, 2010); 俯冲动力学研究表明, 晚志留世-泥盆纪洋脊俯冲的板片窗的影响范围发育在阿尔泰地区, 并导致复杂的壳幔相互作用(孙敏等,

2009; Cai 等, 2010; Jiang 等, 2010). 晚石炭世-早二叠世洋脊俯冲的板片窗影响范围可能在具有大型斑岩铜、金矿床的潜力的西准噶尔中部地区(Geng 等, 2009; Tang 等, 2010; Zhang 等, 2011; Ma 等, 2012).

新疆北部埃达克岩时空分布及其成矿制约研究表明, 部分熔融产生的埃达克岩有利于铜金成矿(许继峰等, 2001; Wang 等, 2007; Zhao 等, 2008; 唐功建等, 2009); 俯冲体制下埃达克岩源岩铜金丰度高, 比碰撞体制埃达克岩更有利于形成铜金矿床, 为铜金矿床勘查提供了科学依据(Xiong 等, 2006).

7 造山的高原: 地体拼合、碰撞和印度/亚洲碰撞与青藏高原的隆升

青藏高原源于新元古代(>500 Ma)至今的东特提斯体系的长期演化. 从冈瓦纳超大陆先后分离的诸多小陆块在始、古、新特提斯洋盆中不断向北飘游、汇聚和碰撞, 东特提斯体系终结于印度与亚洲板块的碰撞. 印度/亚洲碰撞是新生代地球上最为壮观的地质事件, 导致喜马拉雅造山带的崛起、青藏高原形成、周缘造山带再活化以及大量物质的侧向逃逸(Gansser, 1964; Powell 和 Conaghan, 1973; Molnar 和 Tapponnier, 1975; Tapponnier 等, 1986; Molnar 等, 1988). 许志琴院士就全球瞩目的特提斯和青藏高原问题发表了新的认识.

青藏高原的地体构架显示了多地体、多洋盆、多俯冲、多岛弧、多碰撞和多造山的总体格局, 其中东特提斯洋盆的俯冲增生造山作用已被广泛存在的始、古、新特提斯岛弧、混杂堆积、俯冲杂岩和增生楔体系所证实, 如与北祁连-北阿尔金和柴北缘-南阿尔金洋盆俯冲伴随的始特提斯高压/超高压变质杂岩带和俯冲增生造山作用(许志琴等, 1994; 许志琴等, 2004; 张建新等, 1997); 和阿尼玛卿、金沙江-哀牢山、羌中-孟连和拉萨洋盆俯冲伴随的古特提斯俯冲杂岩体(含高压变质带)和增生造山作用(许志琴等, 1996; 李才, 1997; 李才等, 2006a; 李才等, 2006b; Kapp 等, 2000; Yin 和 Harrison, 2000; 邓希光等, 2001; Zhang 等, 2006; Heppe 等, 2007; 王根厚等, 2009; 闫臻等, 2012)由于始、古与新特提斯洋盆闭合而滋生的早古生代、印支期和新生代造山系的拼贴、叠置并总体向南扩展, 形成“巨型复合碰撞造山拼贴体”, 因而认为青藏高原为世界上最特殊的“造山的高原”(许志琴等, 2007). 青

高原大型走滑断裂的研究表明, 斜向碰撞致使地体相对位移的大型走滑断裂主要发生在三个主要时期: 早古生代、印支期和新生代(闫臻等, 2012), 这些走滑断裂伴随挤压/转换型褶皱造山、挤压转换型盆-山体系、物质逃逸和地体侧向挤出的产生, 并使至今的青藏高原呈现特殊的几何形貌(许志琴等, 2010).

55 Ma 左右开始的印度/亚洲碰撞引起的青藏高原物质向南东逃逸构造, 导致喜马拉雅的“挤压域”向青藏高原南东地体群的“侧向剪切域”转换(Socquet 和 Pubellier, 2005). 在高喜马拉雅地体中, 平行造山带的新世低角度伸展性剪切带的广泛确定, 使高喜马拉雅挤出的2D模式上升至3D动力学新模式(Xu 等, 2013); 通过青藏高原南东部(滇西)侧向地体群中, 走滑剪切带和前寒武纪变质基底与盖层之间滑脱剪切带的形成时限和构造样式对比, 揭示在中新世时期碰撞造成的大量物质向南东逃逸的“滑脱-走滑”型的“抽屉式”动力学新机制.

8 环青藏高原盆-山体系构造

随着青藏高原的隆升和向北、向东的推挤, 挤压构造变形不断向外扩展, 形成现今全球最大弥散型陆内构造变形域和板内变形最为活跃的巨型盆山体系——环青藏高原盆山体系(贾承造等, 2005; 贾承造等, 2008; 李本亮等, 2007; 李本亮等, 2011).

贾承造院士将环青藏高原盆山体系看成是一个巨型的喜马拉雅期构造体系. 提出挤压冲断构造变形首先沿西天山、昆仑-阿尔金-祁连山、龙门山和哀牢山弧形带向北、向东扩展; 随着晚第三纪以来印度/亚洲的持续碰撞及挤压作用, 构造变形向外围传递到阿尔泰山、阴山、太行山和华蓥山一带(贾承造等, 2005; 李本亮等, 2011). 与此同时, 在古造山带复活控制的盆-山耦合体系内部及边缘发生强烈陆内变形和形成新的前陆盆地, 并向克拉通盆地内扩展, 构造变形强度和盆山耦合程度具有依次降低和时间依次变新的规律(贾承造, 2007; 李本亮等, 2007; 李本亮等, 2011). 在整个环青藏高原巨型盆山体系中, 整体表现为三种构造边界和成盆动力学机制: 西段构造传播边界、中段高原增生边界以及东段走滑抬升边界. 在环青藏高原盆山体系中, 古生界克拉通盆地和中生界前陆冲断带是具有重要天然气勘探价值的两个基本构造单元, 它决定了中国中-西部天然气分布

主要受古生界克拉通古隆起和中新生界前陆冲断带的控制,具有多期成烃与晚期成藏的特点(贾承造等, 2001; 贾承造, 2005; 贾承造等, 2006).

9 中国近海新生代盆地的形成和演化

中国近海海域位于欧亚板块、太平洋板块、菲律宾板块和印-澳板块的交汇地带,其演化受控于这些洋、陆板块的相互作用,是全球构造运动最为活跃的地带之一(Maruyama 等, 1997; Larson, 1991; Tapponnier 等, 1982; Tamaki 和 Honza, 1991; Yin, 2010). 中国近海海域具俯冲、碰撞、走滑等多种动力学边界,由于多期构造作用相互叠加、影响和改造,形成并发育了类型众多、演化各异的诸多沉积盆地. 其新生代盆地按类型可分为“陆内裂谷盆地”、“弧后裂谷盆地”、“边缘海被动陆缘盆地”和“走滑拉分盆地”. 中国近海新生代盆地是人们较少了解的领域,朱伟林教授级高级工程师在会上向大家揭示了其形成和演化的奥秘.

中国大陆东部自中生代晚期形成安第斯山型陆缘造山带,伴随太平洋板块俯冲及俯冲速率降低(Northrup 等, 1995),由挤压环境转变为拉张环境,开始了陆缘裂陷时期;由于中/晚始新世太平洋板块俯冲方向变化,南海的扩张和关闭(Hall 等, 1995; Briaies 等, 1993; Hutchison, 2004);澳大利亚和菲律宾海板块碰撞(Hall 等, 1995),推动菲律宾海板块顺时针旋转并楔入到太平洋和欧亚板块之间,驱使近海盆地普遍进入裂后期演化阶段;早中新世 Manila 海沟形成,使南海逐渐俯冲到菲律宾岛弧之下;5 Ma 开始菲律宾海板块运动由 N 转向 NWW,与太平洋板块一起俯冲到欧亚大陆之下;与此同时青藏高原快速隆升,驱使华南和华北地块向东-南东运动,中国东南部和海域局部受挤压应力的影响.

10 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程

中国是一个地震灾害严重的国家. 进入 21 世纪以来,地震已经夺去近 10 万人的生命. 张培震及其同事在深入研究中国大陆活动断裂和地震分布的基础上(张培震等, 2013),指出中国大陆的强震具有分布广泛、西强东弱、动静交替和分块成带的特征,形

成这种地震活动图像的原因是中国大陆的强震受控于活动地块的运动和变形(张培震等, 2003). 活动地块是被形成于晚新生代至今强烈活动的构造带所分割和围限、具有相对统一运动方式的地质单元,其内部相对稳定,主要构造变形和强震都发生在边界带上. 有历史记载以来的全部 8 级强震和 80%7 级以上强震都发生在活动地块边界带上.

中国强震主要发生在天山、青藏高原和华北活动地块. 天山的强震主要发生在山体两侧的前陆逆冲推覆带上,山体内部也发生构造变形并控制着一系列中强地震的发生(邓起东等, 2002; Molnar 和 Ghose, 2000). 华北地块由西部的鄂尔多斯和东部的华北平原所组成,二者的构造变形模式和地震活动特征截然不同. 鄂尔多斯地块内部构造活动性微弱,周边的地震活动却十分强烈,控制了有历史记载以来的 19 次 7 级以上强震的发生(国家地震局鄂尔多斯活动断裂系课题组, 1988). 华北平原的强震主要发生在平原内部的北北东走向隐伏断裂上,特别是这些北北东走向隐伏断裂与燕山南缘张家口-渤海断裂带的交汇部位是巨大地震的发生场所(徐杰等, 1998). 青藏高原的活动断裂和强震发生均与海拔高度相关:逆冲断裂和逆冲型强震主要发生在高原周边的低海拔区,高海拔的高原内部则以拉张性质的南北向正断裂和共轭走滑断裂为主,走滑断裂发育在高原的不同海拔不同部位,但北部是左旋走滑运动,南部是右旋走滑运动(Molnar 和 Lyon-Caen, 1989; 许志琴等, 1999; Zhang 等, 2004; Elliott 等, 2010). 这种分布规律反映了高原内部物质东流,在周边形成挤压缩短,在内部导致拉张伸展的深部地球动力作用.

中国大陆的现今构造变形既有刚性地块的运动又有非刚性的连续变形,单独用板块构造或连续变形的理论都不能完全解释(张培震等, 2005). 活动地块的力学性质在深度上是不同的,上地壳以脆性变形为主,上部脆性地壳的分块运动是地震的普遍方式. 下地壳和上地幔以黏塑性流变为特征,深部的流变驱动着上覆脆性地壳的运动. 在板块挤压、板内地幔对流等动力作用下,大陆活动地块发生相对运动和变形,上地壳的刚性地块运动和非刚性连续变形都是深部黏塑性流动的地表响应(张培震等, 2005). 中国大陆的现今构造变形可以用耦合的地块运动和连续变形模式来描述,活动地块的运动和变形是“陆内变形”的重要方式之一.

表 1 东亚地壳上地幔细化分层

序号	名称	原布伦号	深度(km)	力学性质分层/性质	地球探测证据
1	上地壳	A	0~15	岩石圈/刚性岩石圈板块 含韧性或黏滞性夹层	深反射地震
2	中地壳		15~25		
3	下地壳		25~40		
	Moho 面		40		
4	上地幔顶层	B	40~110	软流层/黏滞流变性 中幔过渡层/黏弹性-固体格架可压缩+ 流体活动	LVL, LRL 体波 CT
5	软流层	C	110~410		
	410 km 面		410		
6	上地幔过渡层	D'	410~670	下地幔/固体格架不可压缩+流体活动	Vp-Vs 震相 体波 CT
	670 km 面				
7	下地幔顶层		670~820		
8	下地幔	D''	820~2800		
9	核幔过渡层		2800~2900		

11 东亚大陆地壳上地幔分层及其构造意义

根据近年来东亚地区体波地震层析成像的结果, 杨文采院士研究了东亚地区地壳上地幔分层特征, 对传统的地球分层模型进行了修正, 将原先的布伦地球分层模型可进一步细化为地球的 12 层模型. 地壳上地幔细化分 9 层见表 1.

地壳上地幔分层细化对了解地内介质力学性质和物质运动至关重要. 研究指出, 新分出上地幔底层包含了东亚伊佐奈岐板块残留体, 对了解东亚地区地壳上地幔俯冲构造非常重要. 应用地面及卫片重力资料的小波变换提取出深层精细密度结构, 划分出上地幔底层伊佐奈岐板块残留的西边界, 并推算了伊佐奈岐板块滞留区岩石的年龄. 最后, 作者以 30°N 线剖面华南地区为例, 重建了伊佐奈岐板块的俯冲演化模型. 模型显示, 原先俯冲的伊佐奈岐板块沿上地幔底部过渡层的向西推进, 是形成扬子克拉通软流圈上抬、岩石圈减薄, 地壳变形和褶皱的主要原因之一.

中国科学院学部科学与技术前沿论坛“中国(东亚)

大陆构造与动力学”的召开, 是几十年来中国固体地球科学家们在“中国(东亚)大陆构造与动力学”研究领域中的一次集结、亮相和碰撞. 论坛邀请了赵国春教授、任纪舜院士、贾承造院士、殷鸿福院士、杨经绥研究员、张国伟院士、许志琴院士、张培震研究员、肖文交研究员、杨文采院士和朱伟林教授级高级工程师等专家先后发言, 就有关古大陆再造、古环境与生物演变以及中国(东亚)大陆大地构造和深部结构等问题进行了探讨, 就中国大陆古陆块、造山带、青藏高原、盆地与边缘海以及华南大地构造等问题做了专题发言, 就人们关注的超高压变质带和大陆地震机制等热点进行了碰撞. 由于中国(东亚)大陆构造的复杂性、多样性、特殊性, 以及研究程度的差异, 对于重大的关键问题尚存在认知上的欠缺和分歧. 古人云: “水本无华, 相荡乃生涟漪; 石本无华, 相击乃发灵光”, 科学的发现和知识的深化, 从来都是在相荡和相击中产生的, 只有交流、质疑、争鸣、争辩, 营造一个自由宽松的舞台, 才能推进科学的创新, 促进科学的进步. 本次论坛意味着“中国(东亚)大陆成因”的研究将作为一个新的起点, 启迪地学界的同仁们运用新的观点和思维来关注中国(东亚)大陆的重要科学问题的讨论.

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: 389–400
陈旭, 张元动, 樊隽轩, 等. 2010. 赣南奥陶纪笔石地层序列与广西运动. 中国科学: 地球科学, 40: 1621–1631
邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国大陆活动构造基本特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 32: 1020–1030
邓希光, 丁林, 刘小汉. 2001. 青藏高原羌塘冈玛日地区蓝片岩及其 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学. 科学通报, 45: 2322–2326
国家地震局鄂尔多斯活动断裂系课题组. 1988. 鄂尔多斯活动断裂系. 北京: 地震出版社
黄晶, 储雪蕾, 张启锐, 等. 2007. 新元古代冰期及其年代. 地学前缘, 14: 249–256
黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 1977. 中国大地构造基本轮廓. 地质学报, 51: 117–135

- 贾承造, 魏国齐, 李本亮. 2005. 中国小型克拉通盆地群的叠合复合性质及其含油气系统. 高校地质学报, 11: 479–492
- 贾承造, 杨树锋, 陈汉林, 等. 2001. 特提斯北缘盆地群构造地质与天然气. 北京: 石油工业出版社, 162
- 贾承造, 杨树锋, 魏国, 等. 2008. 中国环青藏高原新生代巨型盆地构造特征与含油气前景. 天然气工业, 28: 1–11
- 贾承造, 何登发, 石昕, 等. 2006. 中国油气晚期成藏特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36: 412–42
- 贾承造. 2005. 中国中西部前陆冲断带构造特征与天然气富集规律. 石油勘探与开发, 32: 9–15
- 贾承造. 2007. 中国喜马拉雅构造运动的陆内变形特征与油气矿藏富集. 地学前缘, 14: 96–104
- 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 等. 2007. 环青藏高原盆地体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律. 地质学报, 81: 1200–1207
- 李本亮, 雷永良, 陈竹新, 等. 2011. 环青藏高原盆地体系东段新构造变形特征. 岩石学报, 27: 636–644
- 李才, 翟庆国, 陈文, 等. 2006b. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年. 岩石学报, 22: 2843–2849
- 李才, 翟庆国, 董永胜. 2006a. 青藏高原羌塘中部发现榴辉岩及其意义. 科学通报, 51: 70–74
- 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. 科学通报, 42: 488
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社
- 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 2004. 中国南方大地构造和海相油气地质. 北京: 地质出版社
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社
- 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 等. 2009. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示. 中国科学: 地球科学, 39: 935–948
- 唐功建, 王强, 赵振华, 等. 2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义. 地球科学, 34: 56–74
- 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. 地质通报, 28: 1181–1187
- 徐备, 寇晓威, 宋彪, 等. 2008. 塔里木板块上元古界火山岩 SHRIMP 定年及其对新元古代冰期时代的制约. 岩石学报, 24: 2857–2862
- 徐杰, 宋长青, 楚全芝, 等. 1998. 张家口-蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨. 地震地质, 8: 156–154
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学 B 辑, 10: 1107–1115
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. 科学通报, 46: 684–687
- 许志琴, 杨经绥, 陈方远. 1996. 阿尼玛卿缝合带及“俯冲-碰撞”动力学. 见: 张旗, 主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社. 185–189
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩岩石地体及动力学. 地质学报, 69: 1–14
- 许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 等. 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. 地质学报, 84: 1–29
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起. 地学前缘, 6: 139–151
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2007. 造山的高原——青藏高原的地体拼合和碰撞动力学. 北京: 地质出版社. 1–458
- 许志琴, 曾令森, 杨经绥, 等. 2004. 走滑断裂、“挤压性盆地-山构造”与油气资源关系的探讨. 地球科学, 29: 631–643
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. 地质学报, 77: 433–451
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 2012. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程. 岩石学报, 28: 1808–1828
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 等. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石及其意义. 岩石学报, 27: 3207–3222
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 2002. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76: 484–495
- 杨经绥, 许志琴, 张建新, 等. 2009. 中国主要高压-超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨. 岩石学报, 25: 1529–1560
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学: 地球科学, 41: 1037–1046
- 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. 地学前缘, 18: 1–12
- 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. 855
- 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 1997. 北祁连中段俯冲增生杂岩/火山弧的时代探讨. 岩石矿物学杂志, 16: 112–119
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报, 47: 231–234
- 张立飞, David J E, 艾永亮, 等. 2002. 新疆西天山超高压变质榴辉岩. 岩石矿物学杂志, 21: 371–386
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆强震活动与活动地块. 中国科学 D 辑: 地球科学, 33: 12–20
- 张培震, 甘卫军, 沈正康, 等. 2005. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形的耦合模型. 地质学报, 79: 748–756
- Bai W J, Zhou M F, Robinson P T. 1993. Possibly diamond-bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Donqiao ophiolites. Tibet, 30: 1650–1659
- Briaux A, Patriat P, Tapponnier P. 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the tertiary tectonics of southeast Asia. J Geophys Res, 98: 6299–6328
- Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, et al. 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for ocean ridge subduction in the Devonian. Gondwana Res, 18: 638–652

- 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. *J Asian Earth Sci*, 39: 309–330
- Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences. *Contrib Mineral Petrol*, 86: 107–118
- Chopin C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 212: 1–14
- Condie K C. 2002. Breakup of a Paleoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res*, 5: 41–43
- Elliott J R, Walters R J, England P C, et al. 2010. Extension on the Tibetan plateau: Recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology. *Geophys J Int*, 183: 503–505
- Erwin D H. 1993. *The Great Paleozoic Crisis: Life and Death in the Permian*. New York: Columbia University Press
- Evans D, Mitchell R N. 2011. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic supercontinent Nuna. *Geology*, 39: 443–446
- Gansser A. 1964. The geology of the Himalayas. *Geology*, 13: 679–682
- Geng H Y, Sun M, Yuan C, et al. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chem Geol*, 266: 373–398
- Golonka J. 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, 381: 235–273
- Hall R, Ali J R, Anderson C D. 1995. Cenozoic motion of the Philippine Sea Plate: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia. *Tectonics*, 14: 1117–1132
- Heppe K, Helmcke D, Wemmer, K. 2007. The Lancang River zone of southwestern Yunnan, China: A questionable location for the active continental margin of Paleotethys. *J Asian Earth Sci*, 30: 706–720
- Hoffman F P. 1991. Did breakout of Laurentia turn Gondwana inside-out? *Science*, 252: 1409–1411
- Hutchison C S. 2004. Marginal basin evolution: the southern South China Sea. *Mar Pet Geol*, 21: 1129–1148
- Isozaki Y. 2009. Illawarra reversal: The fingerprint of a superplume that triggered Pangean breakup and the end-Guadalupian (Permian) mass extinction. *Gondwana Res*, 15: 421–432
- Jiang Y D, Sun M, Zhao G C, et al. 2010. The ~390 Ma high-*T* metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction. *Am J Sci*, 310: 1421–1452
- Kapp P, Yin A, Craig E, et al. 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. *Geology*, 28: 19–22
- Karlstrom K E, Harlan S S, Åhäll, et al. 2001. Long-lived (1.8–1.0 Ga) convergent orogen in southern Laurentia, its extensions to Australia and Baltica, and implications for refining Rodinia. *Precambrian Res*, 111: 5–30
- Larson R L. 1991. Geological consequences of superplumes. *Geology*, 19: 963–966
- Levashova N M, Degtyarev K E, Bazhenov M L, et al. 2003. Middle Paleozoic paleomagnetism of east Kazakhstan: Post-Middle Devonian rotations in a large-scale orocline in the central Ural-Mongolia belt. *Tectonophysics*, 377: 249–268
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179–182
- Liu W, Liu X J, Xiao W J. 2012. Massive granitoid production, but not massive continental-crust growth in the Chinese Altay (CA)—An integration of zircon U-Pb age and Hf isotope, geochemical and Nd-Sr isotopic compositions of granitoids, volcanics, and metasedimentary rock of the CA as compared with its southern and northern terrains. *Am J Sci*, 312: 629–684
- Lu Z, Zhang L, Du J, et al. 2008. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, NW China: Convincing proof of deep subduction. *Am Miner*, 93: 1845–1850
- Ma C, Xiao W J, Windley B F, et al. 2012. Tracing a subducted ridge-transform system in a late Carboniferous accretionary prism of the southern Altaids: Orthogonal sanukitoid dyke swarms in western Junggar, NW China. *Lithos*, 140–141: 152–165
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Isl Arc*, 6: 121–142
- McFadden K A, Huang J, Chu X L, et al. 2008. Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 3197–3202
- Metcalfe I. 2009. Late Palaeozoic and Mesozoic tectonic and palaeogeographical evolution of SE Asia. *Geol Soc*, 315: 7–23
- Molnar P F, Pardo-Casas F, Stock J. 1988. The Cenozoic and Late Cretaceous evolution of the India Ocean Basin: Uncertain-ties in the reconstructed positions of the Indian, African and Antarctic plates. *Basin Res*, 1: 23–40
- Molnar P, Ghose S. 2000. Seismic moment of major earthquakes and the rate of shortening across the Tien Shan. *Geophys Res Lett*, 27:

2377–2380

- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189: 419–426
- Molnar P H, Lyon-Caen H. 1989. Fault plane solution of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophys J Int*, 99: 123–153
- Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 23: 719–722
- Powell C Mc A, Conaghan P J. 1973. Plate tectonic and the Himalayas. *Earth Planet Sci Lett*, 20: 1–12
- Ren J S, Wang Z X, Chen B W, et al. 1999. *The Tectonics of China From a Global View—A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions*. Beijing: Geological Publishing House
- Rogers J J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res*, 5: 5–22
- Scotese C R. 2004. A continental drift flipbook. *J Geol*, 112: 729–741
- Shu L S, Faure M, Wang B, et al. 2008. Late Paleozoic-Early Mesozoic geological features of South China: Response to the indosinian collision events in Southeast Asia. *C R Geosci*, 340: 151–165
- Smith D C. 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, 310: 641–644
- Socquet A, Pubellier M. 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *J Asian Earth Sci*, 24: 495–515
- Tamaki K, Honza E. 1991. Global tectonics and formation of marginal basin: Role of the western Pacific. *Episodes*, 14: 224–230
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the central Asian orogenic belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China). *Chem Geol*, 277: 281–300
- Tapponnier P, Peltzer G, Dain L, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611–616
- Tapponnier P, Peltzer, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia, in *Collision Tectonics*. *Geol Soc Spec Publ Lond*, 19: 115–157
- Torsvik T H. 2003. The Rodinia jigsaw puzzle. *Science*, 300: 1379–1381
- van der Voo R, Levashova N M, Skrinnik L I, et al. 2006. Late orogenic, large-scale rotations in the Tien Shan and adjacent mobile belts in Kyrgyzstan and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 426: 335–360
- Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, et al. 2007. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the central Asia orogenic belt. *Chem Geol*, 236: 42–64
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al. 2013. Phanerozoic tectonics of the south China block: Key observations and controversies. *Gondwana Res*, 23: 1273–1305
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, et al. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic Belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of North Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia. *J Asian Earth Sci*, 32: 102–117
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, et al. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Res*, 18: 253–273
- Xie S, Pancost R D, Yin H, et al. 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434: 494–497
- Xiong X L, Xia B, Xu J F. 2006. Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle. *Chem Geol*, 229: 273–292
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes. *Precambrian Res*, 158: 51–78
- Xu Z Q, Wang Q, Pêcher A, et al. 2013. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the late Oligocene and Miocene. *Tectonics*, doi: 10.1002/tect.20021
- Xu Z Q, Wang Q, Tang Z M, et al. 2009. Fabric kinematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the main borehole of the Chinese continental scientific drilling project: Implications for continental subduction and exhumation. *Tectonophysics*, 475: 233–248
- Xu Z Q. 1987. *Etude tectonique et microtectonique de la chaîne paléozoïque et triasique des Qinling Chine*. Doctoral Dissertation. Académie: Montpellier University. 96–98
- Xu Z Q, Yang W C, Ji S C, et al. 2009. Deep root of a continent-continent collision belt: Evidence from the Chinese continental scientific drilling CCSDB deep borehole in the Sulu ultrahigh-pressure HP-UHP metamorphic terrane, China. *Tectonophysics*, 475: 204–219
- Yang J J, Smith D C. 1989. Evidence for a former sanidine-coesite-eclogite at Lanshantou, eastern China, and the recognition of the Chinese “Su-Lu Coesite-Eclogite Province”. *Third International Eclogite Conference*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 26

- Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth Planet Sci*, 333: 719–724
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211–280
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488: 293–325
- Yin H, Huang S, Zhang K, et al. 1992. The effects of volcanism on the Permo-Triassic mass extinction in South China. In: Sweet W C, Yang Z Y, Dickens J M, eds. *Permo-Triassic Events in the Eastern Tethys*. Cambridge: Cambridge University Press. 146–157
- Yin H, Xie S, Luo G, et al. 2012. Two episodes of environmental change at the Permian-Triassic boundary of the GSSP section Meishan. *Earth-Sci Rev*, 115: 163–172
- Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of North China craton: A synoptic overview. *Gondwana Res*, 20: 6–25
- Zhang G W, Guo A L, Yao A P. 2006. Thoughts on studies of China continental geology and tectonics. *Prog Nat Sci*, 16: 1022–1026
- Zhang J E, Xiao W J, Han C M, et al. 2011. Kinematics and age constraints of deformation in a Late Carboniferous accretionary complex in Western Junggar, NW China. *Gondwana Res*, 19: 958–974, doi: 10.1016/j.gr.2010.10.003
- Zhang K J, Cai J X, Zhang Y X, et al. 2006. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 245: 722–729
- Zhang P, Shen Z, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from GPS data. *Geology*, 32: 809–812
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Sci Rev*, 59: 125–162
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Sci Rev*, 67: 91–123
- Zhao X X. 1990. New paleomagnetic results from northern China: Collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 181: 43–81
- Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, et al. 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102: 374–391