

·地质遗迹·

编者按:社会公众对地球科学及其社会功能的理解正在不断地提高,这是由社会经济发展对地球科学知识财富创造日益增长的需求所决定的。从社会历史的角度看,地球科学在各种文明的产生及其演变中始终占据着重要的地位,无论工业文明、抑或石油文明、绿色文明,皆无例外。从现代思想文化的层面上看,地球科学也在以其发生着的历史性变革深刻影响着人们的思维理念和生存方式,从“只有一个地球”到“濒临失衡的地球”深切表达了对人类命运的关注、反思与全新的自然观。地球科学从来不乏激情与浪漫、神奇与美妙,只是这其中的奥秘与灵性还远未被世人充分理解与接纳,即对于这颗蓝色的星球多数人在感知上尚缺少从“视觉美感”到“认知美感”的质的飞跃,以致面对“富饶”而又“贫脊”的地球时常陷入自我陶醉却又茫然的境地。在这个意义上,帮助人们认识地球环境及其演化的自然法则,旨在激发人们对其所处生存环境的忧患意识并科学地预测未来。这正是本刊特约王义昭先生撰写这篇科普性文章的初衷。当然,我们也会企求读者从“内行看门道,外行受启发”的角度看待这篇文章,而不必刻求它的纯学术性。

神奇美丽的横断山:地壳演化塑造的奇迹

——“三江并流”世界自然遗产地形成地质背景浅析

王义昭

WANG Yi-zhao

云南省区域地质调查队,云南 玉溪 653100

Regional Geological Survey Party of Yunnan Province, Yuxi 653100, Yunnan, China

摘要:三江并流是反映地球演化主要阶段的杰出代表,区内保存着反映特提斯演化不同阶段和喜马拉雅期陆内造山阶段留下的丰富的地质遗迹,这些地质遗迹为解读三江并流地壳演化的历史提供了重要的依据。有关资料表明,三江并流是与青藏高原和横断山脉一起发育成长起来的,它们均经历了特提斯的演化,并且都是印度板块与欧亚板块强烈碰撞造山作用的产物。本文比较详细地介绍了横断山脉的形成演化过程及其与青藏高原形成演化之间的关系。

关键词:横断山;三江地区;三江并流自然遗产地;青藏高原;特提斯;喜马拉雅碰撞造山作用

中图分类号:P931

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2006)01-02-0282-13

Wang Y Z. Mystical and beautiful Hengduan Mountains: a miracle made by crustal evolution—Analysis of the geological background for “confluence of three rivers”. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2):282-294

Abstract: The “confluence of three rivers” is an outstanding representative reflecting the main stage of evolution of the Earth. Abundant geological remains reflecting different stages of Tethys evolution and Himalayan intracontinental orogenic stage are preserved in the study area. These geological remains provide an important basis for the interpretation of the history of crustal evolution marked by confluence of three rivers. Relevant data indicate that confluence of three rivers occurred together with the formation of the Qinghai-Tibet Plateau and the Hengduan Mountains. They all experienced the evolution of the Tethys and are all the product of strong collisional orogeny of the Indian plate and Eurasian plate. This paper introduces in details the formation and evolution of the Hengduan Mountains and their relation to the formation and evolution of the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Hengduan Mountains; Sanjiang region; site of natural heritage of confluence of three rivers; Qinghai-Tibet Plateau; Tethys; Himalayan collisional orogeny

收稿日期:2004-10-25;修订日期:2005-11-15

作者简介:王义昭(1937-),男,教授级高级工程师,从事区域地质调查工作。E-mail:wangxi2004y@sina.com

地球表面所有山系中,横断山是最为独特的(图1)。它的绝妙表现在于:构成青藏高原骨架的一系列沿纬向呈东西延展的山系延伸到东侧横断山区却突然转向呈南北向展布,同时空间距离也被大大压缩在一个极小(约1/5)的范围内,至藏、滇、川接壤地带甚至被挤缩在100 km的宽度内,形成3条大江和4列山脉并列而行的“三江并流”的世界自然奇观。

横断山是印度板块与欧亚板块强烈碰撞造山作用和特提斯构造域与环太平洋构造域联合作用形成的一个非常独特的地质—地理单元。由于它处在“中国地势最高台阶”世界屋脊“青藏高原与二级台阶云贵高原、滇西高原的过渡地带,地形上形成总体向南—南东倾斜的形势,其间江河纵横、支流密布,因此是中国山区河网水系最密集、地形最复杂、集中高山—深谷最多的地区。峡谷无论是规模、气势、数量、类型,抑或是长度和深度均列世界前列。区内地形起伏剧烈,相对高差极大(一般多在200~3000 m之间),冰峰众多,低纬度海洋性冰川发育,使之成为世界少有的立体气候分带最完整的地区。加之纬度跨度大($N21^{\circ}30' \sim N34^{\circ}$),气候带类型完备,一般谷岭间气候分带均可相当于中国海南岛到黑龙江漠河的自然气候带,少数甚至可达到极圈冰原带,这种独特的自然地理条件也使横断山成为中国乃至世界各种自然资源最富集的地区之一。它的水能资源、林业资源、动植物资源、矿产资源、自然景观资源、人文景观资源等都是中国最丰富的,绝大部分青藏高原有的生物这里都能找到,同时又保存着若干本区特有的生物类群,使其成为若干生物演化的中心,形成了自身的生物多样性特色,构成了一座生物资源丰富的物种基因库。其丰富的自然资源条件及地貌景观多样性、生态环境多样性、生物多样性和人文景观多样性等,形成了中国各种经济资源、旅游资源最具优势和开发潜力的地区,更是开展科学研究的一个重要基地。

早在鸦片战争以后,随着帝国主义列强势力渗入中国,横断山也成了西方人垂涎向往的地方。许多科学工作者也把它视作探索奥秘的圣地。由于地势险恶、交通不便,早期大多数考察探险者仅能涉足横断山区的边缘地带,从事动植物的标本采集和调查工作,真正深入到该区腹地进行探险考察的却为数极少。其中以英国的植物和地理学家金敦·沃德的工作最为突出,他几乎以毕生精力辗转于这片秘境进行了比较全面的地质地貌、地理气候环境、动植物、民族学等方面的考察。1911—1950年的40年间他曾8次到该区考



图1 横断山在地球表面的位置(实心三角形处)

Fig.1 Location of the Hengduan Mountains on the Earth surface

察。首次提出三江并流景观是世界一大奇观的认识。另外,美籍奥地利人约瑟夫·洛克自1922年以来长期在该区进行自然地理、地貌景观考察和动、植物标本采集,以及纳西文化的研究,向西方世界宣传报道横断山的自然、人文景观特色,做了不少有益的工作,直到1949年才离去。事实上,真正最早到达横断山区的西方人,应该是19世纪中叶来到亚洲大陆腹地传经布道的传教士们,至今在怒江和澜沧江流域仍有众多信仰基督教和天主教的善男信女,就是皈依西方教义的信众。应该说,是西方人最先向世界介绍了三江和横断山,向世人传递出了横断山充满神奇奥秘的信息,以至催生出英国作家詹姆斯·希尔顿《失落的地平线》这样扣人心弦的惊世佳作,把人们寻找“世外桃源”香格里拉的梦想紧紧地维系在这里。

现今横断山区也是中国目前地壳运动最强烈、新构造运动最发育的地区。这里发育广泛的河流袭夺现象、地质灾害遗迹,以高山、深谷为典型代表的地质地貌景观就是最好的例证,这正是区域地壳演化的延续。横断山隐藏着无数秘密和鲜为人知的故事,若要真正读懂它的自然地理和人文经济地理的内涵还必须得从解读其地质构造演化历史开始。为了让社会各界能更好地了解世界自然遗产地的价值和意义,笔者试图通过“三江并流世界自然遗产地形成区域地质背景”介绍一些相关的地球科学知识。

1 横断山与三江难以割舍的情结塑造了横断山独特的自然地理环境,也造就了地貌景观多样性、生态环境多样性、生物多样性、民族文化多样性和人文景观多样性

横断山是位于藏东、川西和滇西一带南北走向山脉的总称,因其高山、深谷相间,阻断东西往来而得名。主要由伯舒拉岭—担当力卡山、高黎贡山、他念他翁山—怒山/碧罗雪山—崇山、芒康山/宁静山—云岭、雀儿山—沙鲁里山—中甸大雪山、大雪山—折多山—锦屏山和邛崃山—大凉山组成,其南延为滇西的雪山山、老君山、雪邦山、罗坪山、点苍山、哀牢山、无量山、营盘山等,地质构造上与北部山脉一脉相承,共同组成了著名的横断山巨型复合造山系。

民间流传着各种神话故事传说,赞美神灵造就了江河山岳的美丽,表现了人们对于横断山之神圣的敬畏和热爱。如果说自然就是神灵的化身,那么,居住在横断山的本土居民早就适应了顺应自然发展的规律,因此,横断山又是人与自然和谐发展体现得最为完美的地方。从科学的角度讲,一定自然环境的形成,都是地球运动中地质构造发展演化的结果。对横断山来说,其形成演化是很有戏剧性的,并且还蕴藏着无数鲜为人知的玄机。

当提到横断山的时候,不得不提到三江(即金沙江、澜沧江和怒江)的名字。因为正是这3条大江把青藏高原、横断山脉和亚洲,特别是中华大地紧紧地联系在了一起。正是三江以它绵柔之躯塑造了气势磅礴雄伟挺拔的横断山脉,滋润哺育了中华大地。

三江,指的是源于青藏高原,流经中国西南的金沙江、澜沧江和怒江。三江地区则是指3条大江上游及其主要支流流域范围的总称,包括藏东、青南、川西和滇西的广大地区,地理位置上,基本上与横断山脉同域。青藏高原被誉为“亚洲江河之母”,她孕育了亚洲的主要大江大河,三江自然也是她所宠爱的儿女。

金沙江,是中国第一大河长江上游的主要河段。长江全长6300 km,源头在唐古拉山脉各拉丹冬雪山西麓的姜根迪如冰川;向北汇诸流后改向东流成沱沱河,此段长375 km;至沱沱河镇与汇集且曲、布曲和尕尔曲的当曲汇合后称通天河,此段至玉树巴塘河口为止,长813 km。通天河段河谷宽阔平缓,河道蜿蜒,河中浅滩遍布,河边沼泽滞洼片片,形成一条宽阔的湿地带,通行十分困难。当地留下了“走遍天下路,难过通天河”的感言。行至曲麻河附近有楚玛尔河汇入,使通天河得以壮大。通天河表现了一种河流温柔娴静、妩媚轻盈、婀娜多姿的清纯仙女般的美丽,宁静中透着动感,流动中不失端庄。曲麻莱县以下河段,也有人称其为直门达,随着地势渐渐变低,水流开始变急。过巴塘河口至四川宜宾则是长达2308 km的金沙江。金沙江故名思意,以盛产砂金而得名。由

通天河进入金沙江河段,流向取向北南,水流却一改温顺娴静的容颜,突显出激情奔放、野性张扬、阳刚气盛、不屈不挠和勇往直前的粗犷性格,一路吼叫,一路渲泻,奔突于崇山峻岭之间,经过千难万险,历尽曲折无数,仍执著地前进,行至云南石鼓,突然转向北东,突破玉龙、哈巴的拦截,顽强闯过虎跳峡的狭缝,复经转折,终于实现了东去的宿愿。金沙江河段是长江最为宏伟壮烈的一段历程,它不仅受到了横断山的磨练,同时又接纳了雅砻江、岷江和大渡河丰富的水源,充实了自己的躯体,壮大了自己的声势,终就形成了一条浩浩荡荡东流去的泱泱大江。宜宾以下的长江,下流虽经三峡曲折,终究流进中原大地,最终注入东海,走完了它壮美、波澜的一生又一生。

澜沧江,位居三江之中,全长4880 km,是一条国际河流,素有东方“多瑙河”的美誉,在中国境内长1612 km,自云南勐腊县南腊河口出境后称湄公河,流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨4国后,在越南胡志明市附近注入南中国海。澜沧江源头应有2条,东源扎曲,据称为主流,源自唐古拉山海拔5496 m的达龙赛峰南麓;西源吉曲,下游为昂曲,源头位于唐古拉山海拔5403 m的尺宰日峰的南麓。扎曲与昂曲在昌都汇合后即称澜沧江。澜沧江几乎一出世就投进了横断山脉的怀抱,它在中国的全部流程基本上都是在峡谷中穿行,即使到西双版纳形成过规模不大的宽谷平坝,终未改变狭谷地貌的容颜。所以,澜沧江是表现横断山脉岭—谷并列最为淋漓尽致的一条大江,始终未能摆脱横断山脉的约束。

怒江,也属于一条国际河流,在中国境内长1540 km,从云南龙陵县南的曼辛河口入缅甸后称萨尔温江,至缅甸毛淡棉注入安达曼海,归印度洋。源头为西藏安多附近唐古拉山吉热伯格峰的南麓,源头段流经错那湖、喀隆湖称桑曲。到那曲后归向东流,即称那曲。河床蜿蜒于高原之上,自现宽缓舒展,东流到坝附近素曲汇入后则称怒江。由此向东即迅速闯进了横断山的境地,与澜沧江并行南流,始终穿行在峡谷之中,固执不改狂野奔腾的性格,径直南去。它雄沉幽深、绿色迷人,由此而得“东方大峡谷”的美誉。

究竟是什么力量筑就了三江流域/横断山脉特殊的自然地理环境?是三江塑造了横断山脉,还是横断山脉铸成了三江?摒弃民间的故事传说,从科学的意义上讲,横断山的形成,是地球内部营力推动板块漂移汇聚所产生的造山运动使地壳受到挤压褶皱而隆起成山的。但是,真正能够塑造地球表面形态的却是外营力雕凿修饰的结果,其中尤以流水侵蚀作用最突出。从这一层面上讲,完全可以说是三江的流水塑造了横断山脉特殊的自然地理环境和丰富的地形地貌景观。对于青藏高原和横断山脉的环境,冰雪和冻融的作用占有十分重要的位置。其中许多特殊的地貌景观和雪山冰川,就是冰雪活动的杰作。三江雕塑了横断山,横断山反过来又深刻地影响着自身气候环境的变化,变化中又催生复杂多样的自然地理环境,这也许就是横断山地貌景观多样性、生态环境多样性、生物多样性产生的根本原因。这里山、水之间的相互

影响、相互依存的辩证关系得到极为充分的诠释。横断山是奇特美丽的,但是,美丽只是它外表的体现,奇特才是它真正引人入胜的内涵。笔者以为,最能反映它奇特气质的主要在2个方面:一是它的独特性;二是它的多样性。多样自然也就复杂,因此,多样性中自然也就包含了复杂性的元素。前者可以集中体现在“三江并流”和香格里拉意念中。为什么人们偏偏要把寻找香格里拉的梦想寄托在这里?它曾经获得园林之母的美誉,事实上,它更像是建造世界园林的苗圃,它所拥有的许多珍稀动、植物在世界上都是十分独特的。从多样性而言,横断山的生态环境多样性、生物多样性和地质地貌景观多样性在中国乃至世界都是罕有的。这种特殊的地域环境使它成为中国南、北民族迁徙、交融、演变最频繁的地区,因此形成了中国民族种类最多、密度最高的聚集地,在世界上恐怕也算屈指可数。由于民族多样性,自然也也就形成了民族文化多样性、人文景观多样性、民居建筑风格多样性、民风民俗多样性(这里还存在母系社会的婚姻遗存:暮聚晨散的走婚形式和一夫多妻/一妻多夫的婚姻形式)等。特别有趣的是,在诸多多样性中,横断山在融进了中国各种宗教和各民族原本宗教的同时,还容纳了西方的基督教和天主教,成为集中不同宗教最多的地域。因此,可以毫不夸张地说,横断山区给人类提供了一个自身真切体验、深刻了解形成生物多样性真谛的实验基地。

三江和横断山是大地的骄子,地球的宠儿。她所拥有的奇特美丽和魅力并非天赐神予。在地质学家的视野中是地球在发展演变中塑造了奇迹。“三江并流”之所以能够得到世界广泛的认同、摘取“世界自然遗产地”的桂冠,其中最重要的一条就是,它所拥有的丰富的地质遗迹是“反映地球演化主要阶段的杰出代表”^[1]。这正体现了它作为世界自然遗产地在地质学方面的真正价值。“三江并流”是与三江流域/横断山脉一起成长起来的,它们的形成演化均难以脱离与青藏高原的关系。有关资料显示,在青藏高原形成以前,横断山与青藏地区就曾经处于相同的地质构造环境,即使在青藏高原形成过程中,它们也属经受了相同地质事件发生变异的孪生兄弟。为了探索横断山形成的奥秘,虽然不可能刨根问底地彻底弄清它早期的“来龙”,但至少可以了解到它自晚古生代以来的“去脉”。

2 地质学家是如何应用地质科学理论和方法揭示区域地壳演化规律和认识人类生存环境的?

为了弄清一个地区地质构造演化的历史,地质学家总是像福尔摩斯探案那样广泛收集证据,用它来与现实不同的时、空环境进行分析对比,以图求证得出符合“自然规则”的认识,达到“破案”的目的。地质学家在探索地质构造奥秘的时候一般是采用现实主义方法,或叫“将今论古的比较研究方法”,这与福尔摩斯探案所采取的推理方式有着十分相似的地方。所谓“将今论古”,就是用野外观察所收集到的以岩

石为载体的各种地质证据/信息,准确鉴别其属性特征,与现在地球表面不同环境中形成的相关岩石或物质及地质现象进行对比,力图找出相互间相同和相似的特点,借以恢复其在地质历史中的原始生态环境/成岩环境,以逐步建立起对某一特定时间地壳演化环境的认识,形成一定的模式。有时为了深入了解岩浆岩、变质岩和沉积岩的形成过程,地质学家还需设定一定的环境条件,在实验室进行成岩成矿的实验/模拟实验。或借助于其他学科的知识,去理解和重建各种地质作用过程。例如,为了了解岩浆岩的形成过程,地质学家常借助冶金学方面的知识;为了了解地质构造中的一些问题,又不得不借鉴工程力学和材料力学方面的知识;有时涉及到地球起源和与天体活动有关的地质问题,地质学家还需借助天文学、生物学等方面的知识来武装自己。实际上,地质学家在观察地质现象、认识和分析地质问题时,几乎随时随地都在应用数、理、化和生物学方面的知识,其研究的领域可以小到分子、原子,甚至更为微观的世界,也可大到天体、太阳系、银河系和整个宇宙。因此对于一个好的地质学家来说,不仅要熟练掌握本专业的知识,而且还必须了解一些相关学科的知识。准确确定地质体/矿物/岩石的地质年代是十分重要的,地质学家确定地质体和岩石的地质年龄主要通过2种方法,一种是地层古生物方法,一种是放射性同位素测年方法(测定岩石中所含的某种放射性同位素与它的衰变产物含量间的比例,就可以计算出岩石的年龄)。有时遇到一些年龄较新、磁性特征保存较好的地层或岩石,也可进行磁性地层对比研究,确定其年龄。在建立对一个地区地质构造演化的认识中,查清不同地质体间的相互关系是十分必要的,如果地质体间的相互关系不清楚,就无法建立起对地质构造演化关系的正确认识。

如果你给地质学家一块石头,甚至一颗砂粒,他就会给你讲述一个美妙动听的故事。这个故事绝非耸动视听,而是借助科学的地质理论和方法编织出来的。为什么说“三江并流”是反映地球演化主要阶段的杰出代表呢?这主要是根据它现今所保存着的极其丰富的能够反映过去地史时期这里曾经存在过的一定特殊地质构造环境(例如代表洋盆深水环境的洋壳残片的蛇绿岩、代表火山岛弧形成环境的中酸性火山岩、代表盆地斜坡形成环境的浊积岩及滑塌堆积等)的地质遗迹。根据这些地质遗迹,地质学家就可应用一定的理论和方法,重塑这个地区地质历史时期的地质构造环境,即哪里是海,哪里是陆地,哪里是深海,哪里是浅海,哪里是斜坡,哪里是盆地,哪里发生过火山喷发,哪里发生过岩浆侵入,等等。有了对这些基本问题的了解,地质学家就可以根据不同的地质环境开展矿产资源的寻找和预测,以及地质灾害和环境的评估工作。之所以说“三江并流”是反映地球演化主要阶段的杰出代表,主要是指它所保存下来的丰富的地质遗迹能够揭开它在不同历史演化阶段的经历^[1]。按照地质学家们比较一致的认识,青藏高原和三江/横断山地区曾共同经历了至少自晚古生代以来不同阶段的演化过程。这里有必要提到

一个优美动听的西方女海神特提斯的名字。或许人们会以为,可能就是这位女神给我们创造了眼前如此丰富多彩、气象万千、风情万种、如诗如画的美景,殊不知这仅仅是地质学家赋予大自然伟力的一种有生命的灵性。沧桑巨变,山脉形成,大地颤动,地壳遭受挤压褶皱和断裂等,都不是神的力量,也不是上帝的旨意,而是来自地球内部构造运动力的推动所产生的地质作用。任何山脉的形成都与海洋生命的结束和消亡密切相关。这就是为什么要把青藏高原、三江/横断山脉的形成与女海神特提斯联系起来的原因。

3 希腊神话中女海神的名字“特提斯”是如何走进地质科学中来的? 板块构造理论兴起后“特提斯”也发生了衍变

3.1 特提斯在地质上最初的概念

按照中国的传统文化,凡是海洋湖潭都是龙所居住的地方,到处有龙宫,凡有水必言龙,龙可呼风唤雨,龙可倒海翻江,龙无所不具,威力无穷。在中国,人们对龙有着特殊的感情,既敬畏它,又崇拜它。久而久之,人们就自觉不自觉地把自己自然营力所造成的与流水和海洋有关的一切自然现象都与龙的活动和行为联系在一起,甚至把长江、黄河、黑龙江等大江大河看作龙的化身,进而把中国爱称为东方巨龙,足可见中国人对龙是情有独钟的。无独有偶,在欧洲,古希腊的辉煌历史也曾写下了希腊神话的壮丽诗篇。与中国龙文化十分相似的是,西方海洋均由一位叫奥辛努斯(Oceanus)的海神所掌管,相传海神有一个聪慧美丽的妻子叫特提斯,他们相亲相爱,形影相随,随着岁月的流逝,人们似乎淡忘了海神而记住了其妻特提斯的名字。

1893年奥地利地质学家爱德华·徐士(Edward. Suss)在其著名论文《大海的深度是永恒的吗?》(又译为《论海洋盆地的永久性》)中首次正式把特提斯^[2-4]的名字写进了地质文献,从此,“特提斯”一词就在地质界广为流传。徐士原意的特提斯指的是一个曾经存在于大陆之间而现在已经消失的海道(Seaway),它从东印度(现在印度尼西亚)、喜马拉雅、小亚细亚一直连接到阿尔卑斯。随着海道消失的过程,它的沉积物褶皱形成高大的山脉,耸立于喜马拉雅到欧洲的阿尔卑斯山脉就是其代表。继后徐士把南半球的大陆拼在一起,并推测曾经存在过一个冈瓦纳大陆(Gandwanaland)^[4]。

3.2 从大陆漂移到板块构造的兴起,地球科学经历了一次革命性的变革,板块构造已成为当今影响和应用最广的地球科学理论和方法

1912年年轻的德国气象学家阿尔弗雷德·魏格纳(Alfred Wegener)从世界地图上惊奇地发现大西洋两岸的非洲西海岸和南美洲东海岸海岸线的轮廓完全可以像积木拼图那样拼在一起,他在总结前人有关大陆漂移概念的基础上,提出了大陆漂移学说^[7]。他认为,古生代时地球上只有一个庞大的陆地——泛大陆(pangea),中生代时大陆开始裂解漂移,逐渐

到达现在的位置,其间形成大洋,轻的花岗质大陆是在重的硅镁质地壳上漂移的。这一理论提出后曾轰动一时,但因为与地球物理资料不符,并且有关证据尚欠充分,遭到英国著名地球物理学家杰弗里斯(H. Jeffreys)等的强烈反对与抨击,至30年代几乎销声匿迹。直到20世纪50年代以后,大洋中脊系统、海底热流异常和海底磁异常在洋中脊两侧呈对称条带状分布现象的相继发现,为海底扩张理论的提出奠定了基础,根据海底扩张学说,继而逐渐形成了板块构造的理论和研究方法。

板块构造究竟从什么时候主宰地球演化的?地质学家们还存在不同认识。但是,如果说自古生代以来,特别是中—新生代已经存在大陆漂移和板块构造,这却是绝大多数地质学家比较认同的看法。随着海底扩张学说和板块构造观点的提出,“大陆漂移”的观点又重新受到地质界的广泛重视,但对大陆漂移的机制已经摒弃了魏格纳原来的模式,而提出了镶嵌着大陆的刚性岩石圈板块和大洋岩石圈板块在部分熔融的塑性的高温软流圈上随地幔对流漂移的模式。

板块构造观点认为,地球岩石圈是由大陆和洋壳刚性块体组成的。目前比较一致认同的是,现代岩石圈已破裂成了七大板块,即欧亚板块、北美板块、南美板块、印度—澳大利亚板块、非洲板块、太平洋板块和南极板块。另外还有若干规模较小的板块,如菲律宾板块、纳兹卡板块、科科斯板块、加勒比板块和阿拉伯板块等。板块之间具有3种性质的边界:离散型边界(大洋中脊/海岭属此类型)、汇聚型边界(海沟俯冲带/汇聚造山带<古板块边界>)和转换断层类边界。每个板块都可能以上述3种或2种类型的边界组合构成特定的边界。

从板块构造观点出发,加拿大科学家图佐·威尔逊(J. Tuzo Wilson, 1973)提出大洋演化旋回的观点,即一般所称的威尔逊旋回。按照这个观点,岩石圈从在大陆上开始破裂出现裂谷,到洋盆形成,再到俯冲消亡,到最终闭合而结束海洋生命的全过程,可以划分为明显不同的6个阶段,即胚胎期(裂谷形成)、幼年期(开始出现洋脊并形成狭窄洋盆)、成年期(形成新的大型成熟洋盆,两侧为被动边缘)、衰亡期(洋脊扩张同时洋盆一侧或两侧与相邻大陆间发生俯冲消减作用,伴随出现海沟、火山—岩浆弧等)、残余期(两侧陆壳板块相互逼近,洋脊扩张作用减弱或消失,其间仅存残留海盆)、消亡期(大陆汇聚碰撞造山)。但是,在大洋在演化过程中不一定会走完整个过程,可能会在中间过程的某个阶段夭折,这样就可出现一种演化不完整的“威尔逊旋回”。以上有关大陆漂移和板块构造的观点就是依赖已有地质遗迹重建和恢复古构造及岩相古地理环境的理论基础。

3.3 关于古特提斯

关于特提斯问题,徐士最初的概念除了指特定的地域空间外,时间上主要是中生代至新生代早期,即阿尔卑斯旋回曾经存在过的海洋环境。后来研究证明,这个海洋环境开始出现的时间,在阿尔卑斯地区实际上是晚三叠世。板块构造的问世给特提斯概念造成了一定的冲击。随着地质科学的不

断发展,新的资料逐渐累积,地质学家们发现依托于“大陆漂移”而发展起来的板块构造,在演化过程中,古大陆和古大洋在不断地进行着迁移变化,分分合合,时聚时散。面对这种局面,显然原有的特提斯概念很难解释这种处在不断变化中的洋、陆分布格局,因此将特提斯的名字扩大应用到了不同的时空范围。其中比较突出的是伊朗地质学家斯托克宁(J. Stocklin)于20世纪70年代首先在伊朗高原西北部发现了前侏罗纪的蛇绿岩,认为这是古特提斯洋壳残片^[8]。他认为,在伊朗至少发育有2条由蛇绿岩和深海沉积组成的缝合带,以此为基础,将该区自北而南划分为3个区。北区为古亚洲大陆南缘,经历了华力西和印支造山过程;中区广泛出露前寒武纪基底和古生代地层,这一特点与南区十分相似,因此认为中区是中生代时期从冈瓦纳大陆分离出来的块体,其中白垩纪—古近纪的构造变形和岩浆活动十分发育;南区为冈瓦纳大陆北缘。南区和中区之间的缝合带又称为轴部缝合带,其时、空范围及所反映的海洋环境与原徐士所提出的特提斯概念相吻合。而北区和中区之间存在的蛇绿岩与一套古生代—三叠纪的深海沉积物和相关的火山岩等相伴产出,代表了晚古生代的海洋环境,将其称为古特提斯,而把轴部蛇绿岩带所代表的中生代海洋称为新特提斯^[9]。所述新特提斯基本上与徐士最初的特提斯概念一致,向东可与以雅鲁藏布江蛇绿岩为代表的缝合带连接,更东可能转折向南延入缅甸。显然这里多出来一个古特提斯,古特提斯不论地理位置还是存在的时间,均与经典的概念不完全符合。尽管如此,后来中国地质学家经过在青藏高原和川滇西部地区的大量工作,也发现有晚古生代—三叠纪蛇绿岩与火山岩、深海大洋沉积相伴产出而形成的缝合线存在,说明这里曾经出现过深海大洋环境。因此,古特提斯概念也就不知不觉地被引进到了中国西部。但是,中国地质学家并不满足于古特提斯概念的引进,而是紧紧地把握古特提斯形成演化于晚古生代这条时间主线,并结合生物地理区(系)分布的空间特点,从中国大陆地质的实际情况出发,提出了古特提斯是冈瓦纳、华夏和劳亚三大古陆块群之间的海洋的概念^[4],并分别将劳亚与华夏陆块群之间的海洋叫北古特提斯,华夏与冈瓦纳陆块群之间的海洋则称南古特提斯,并将华夏陆块群内部地块之间的洋盆亦归为古特提斯^[4]。划分三大陆块群的依据,主要根据它们之间以蛇绿岩带为代表的缝合带的时、空范围,反映古海洋规模的大小及相应板块活动的火山—岩浆岩的证据和沉积岩性岩相(尤其是代表深海沉积盆地存在)的证据等,并结合古生物地理区(系)的分布特点来确定其究竟该属那一陆块群的范围。其中最重要的证据是将安加拉植物群、华夏植物群和冈瓦纳植物群的出现分别作为判别劳亚、华夏(包括扬子地块等)和冈瓦纳三大陆块群的依据。按照这种观点,显然横断山/三江地区在古特提斯演化阶段基本上处在冈瓦纳陆块群与华夏陆块群及其间的南古特提斯的范围。但是,中国较多的地质学家则认为,尽管古特提斯覆盖了东亚、东南亚宽广的地域,但其主缝合线应在横断山区昌宁—孟连带^[9,10]。有的则明确限

定特提斯构造域主要包括昆仑—秦岭活动带以南、扬子地块以西的青藏高原地区,而将古特提斯的主缝合线置于澜沧江带(与上述昌宁—孟连带略有差别),该带以北叫北特提斯,其南称南特提斯^[11]。就特提斯构造域的走向延伸而言,一般以帕米尔构造结作为东、西特提斯构造域的分界^[12],因此,特提斯在走进中国以后,基本上归属于东特提斯构造域的范围。另外,由于20世纪80年代末至90年代初,在欧洲的阿尔卑斯造山带和喀尔巴阡造山带内相继发现有古生代洋壳残片和保存相对完好的大陆边缘沉积的存在,有的专家则主张古特提斯是一个横贯欧亚的洋^[9]。尽管如此,新、古特提斯在地域空间上仍存在差别。

4 青藏高原和横断山/三江地区古特提斯表现的特点及相应的特提斯概念的衍变

当特提斯概念进入中国后,地质学家们试图应用其来解决和认识中国的大地构造问题。青藏高原、横断山/三江地区及西部广大地区区域地质调查和科学研究工作的不断深入,大大丰富了地质学家们对特提斯构造域的想像空间,相应出现了若干概念上的衍变。有的地质学家主张按古海洋存在的时间阶段分别冠以原特提斯、古特提斯(石炭纪—二叠纪,晚古生代)、中特提斯(中生代)和新特提斯(新生代)^[9,13]。就现在一般地质学家的共识,中国西南地区于古生代在北大(欧亚超级大陆)和南大陆(古冈瓦纳大陆)间曾经形成过海洋环境,它存在的时间有人认为是从古生代以来一直存在,而把晚古生代以前就已存在的海洋称为原特提斯^[9,14~16];较多的人则认为海洋主要存在于晚古生代至三叠纪末^[10,11],而主张原特提斯观点的人认为古特提斯是继承原特提斯(残余洋盆、弧后盆地、被动边缘)发育起来的,因新特提斯打开,从冈瓦纳大陆分离出来的中间陆块向北漂移与古欧亚超级大陆汇聚碰撞而形成古特提斯造山带^[9,16]/基墨里造山带^[17]。至于所谓的中间地块(从冈瓦纳分离的地块),大家均比较认同它的存在,但各地所叫名称有所不同,滇西和东南亚一般称其为缅甸马(Sibumasu)微陆块^[17],青藏高原叫冈底斯—念青唐古拉(含羌南和拉萨地块)板块^[18],在伊朗则相当于中区位置的地块,西亚土耳其一带则相当于阿拉托利亚地块……。也有人曾经将其统称为基墨里大陆(涵盖范围更广泛)^[19]。对于古特提斯海洋的范围和性质,地质学家们却有不同的认识:有的认为它是存在于南北大陆之间的“三角形”楔形/剪刀型大洋,或更形象一点,像一个向东张开的喇叭口,西端在突尼斯消失,与大陆连在一起^[9]。也有人在同意存在楔形大洋的同时,主张它是一个多岛洋,情况就像现今东南亚台湾—菲律宾岛弧、印度尼西亚岛弧与中国大陆、印支半岛和南中国海与巽他群岛等的组合格局^[9,10,16]。虽然地质学家认识上存在一定分歧,但他们之间又有许多共同的地方。例如:他们都认同古特提斯存在的时间主要在晚古生代到三叠纪;古特提斯曾经存在过海洋环境,至于这个洋有多大规模,目前尚无确切资料可以证明,但根据地层古生物资料和为数有限的古地磁资

料,推测其东部最宽可达4000 km,但一般认为不会很宽。根据各地段已发现的由蛇绿岩和深海沉积组成的缝合线存在的事实,有的地方可能有多个深水洋盆存在,情形十分类似于南中国海、苏拉威西海、苏禄海和班达海等同时存在的格局^[9,10,16],甚至有可能存在如菲律宾海与南中国海等并存的情况。另外,地质学家们除注意海洋存在的证据外,还注意对当时岩相古地理环境的恢复,特别是对一些全球性的重大地质事件进行分析对比^[2,3,16,20,21]。这当中在古特提斯演化阶段,主要在晚石炭世—早二叠世期间,曾经一度出现过全球性的气候变冷,这次气候变冷,在当时冈瓦纳大陆上发生过广泛的大陆冰川活动,甚至在有的地方形成了范围较大的大陆冰盖。这次冰川活动不仅形成了分布广泛的与冰川活动有关的沉积物,由于气候变冷相应也影响到生物的演变,因此产生了能够适应寒冷气候条件下生存的动、植物。但是,在低纬度地带仍保持着温暖湿润的气候环境,同样生活着大量喜暖生物。由于气候条件和生存环境的不同,形成了极不相同的生物类群。例如当时在冈瓦纳大陆生活的以舌羊齿为代表的冈瓦纳植物群和生活在华夏/扬子陆块上的以大羽羊齿为代表的华夏植物群就是极好的例子。地质学家就是根据气候生态环境、沉积环境及古生物环境的不同,将不同地区划为不同的生物地理区(系),从而结合地质构造特征,恢复或重建当时的岩相古地理环境。按照相同的方法,可将青藏和川滇西部地区古特提斯演化阶段划分为冈瓦纳和特提斯2个生物地理区(系),后者显然以华夏生物区(系)的生物为特征。如果要对环境做进一步的细划,作为冈瓦纳的范围,还可以将冈瓦纳北部边缘的海域范围叫冈瓦纳特提斯,陆地部分则仍叫冈瓦纳大陆。而特提斯海域则可分别按不同海域范围冠以特提斯的名字。例如黄汲清等^[9]除提出“特提斯本部”外,还把广阔的外围海槽和盆地都叫特提斯,其范围已超越欧亚超级大陆的南翼。这里所指的川滇西部地区,实际就是现今的横断山脉地区。古特提斯域存在海洋基本已是一个无争的事实,但对这个海洋的主要位置或黄汲清等所称的“特提斯本部”究竟在哪里,却存在不同的认识。青藏地区由于陆续在双湖、冈玛日—桃行错等地发现有蓝片岩的存在,较多的人认为应在龙木错—双湖—澜沧江一带(相当于藏北羌塘“中央造山带”)^[18,22,23];有的则认为在班公湖—怒江带^[24-26];也有人认为在金沙江带,将其与滇西的昌宁—孟连带连结^[9]。但从古生物地理区(系)、沉积岩相古地理和变质变形特征等方面综合考虑,较多的人则主张澜沧江带应为古特提斯大洋曾经存在的位置。虽然多数人认同澜沧江断裂带的性质,但对澜沧江带的位置却存在不同认识。有的认为在昌宁—孟连带^[9,10],有的人认为在澜沧江河谷^[11,16],有的则认为由二者共同组成双断裂带,代表了古特提斯大洋的位置^[7]。也有人提出古特提斯是由澜沧江带与怒江带共同组成“双子座”式大洋的观点^[28]。如果按照前面已经提到的存在“三大陆块群”或“多岛洋”格局的观点,也许当时沿澜沧江带两侧的位置存在着若干小的地块和小洋盆共存的格局。川滇西部横断山区则可以

澜沧江断裂带为界,将以西地区归入缅甸马微陆块(从冈瓦纳大陆分离出来),将以东地区归属扬子板块的范围^[9]。但是,必须强调,卷入古特提斯造山带的扬子西缘地区(红河断裂带和龙门山—锦屏山—丽江断裂带以西),在古特提斯演化阶段已经表现出了与扬子地块间的较大差别。这种差别主要表现在沿金沙江—哀牢山带和沿甘孜—理塘带曾经一度出现过深水洋盆环境,表明它们曾经属于古特提斯海洋的组成部分,不妨把它叫作扬子特提斯,并分别冠以金沙江—哀牢山/阿墨江洋和甘孜—理塘洋的名字。它们也与古特提斯洋一起经历了从俯冲消亡到汇聚碰撞造山的过程,最终成为古特提斯造山带的组成部分,并为以后横断山脉的形成演化奠定了基础。金沙江带作为古特提斯造山带的组成部分,基本上已取得了共识。但是以前一直被认为属于印支造山运动产物的甘孜—理塘带和相邻的松潘—甘孜/巴颜喀拉褶皱带三角区(sengör, A.M.C, 称其为增生杂岩),虽然保留着较多印支运动的地质遗迹^[29,30],却将其归为“古特提斯造山带”的组成部分。但也有人主张松潘—甘孜造山带是古特提斯洋消亡后,中生代以来长期演化的造山带^[31]。这种认识上的差异,表明还存在若干未解之谜:①为什么表征强烈造山运动存在的磨拉石建造在区内并不发育?目前也未找到反映印支造山运动存在的沉积记录。②甘孜—理塘缝合带以西义敦岛弧岩浆岩带的存在,表明这里板块俯冲极性是向西的。但是该岛弧岩浆带为什么进入云南红山以后向南则逐渐消失?按照造山模式中盆地转换的机理推断,应在甘孜—理塘带的东侧发育形成前陆盆地。由于磨拉石建造不发育,前陆盆地表现得并不清楚。相反前陆盆地的位置却保留着古特提斯演化阶段形成的巨厚的晚古生代—三叠纪沉积,其分布范围的广泛性和沉积岩性岩相特征却更像扬子地块西缘的被动边缘,似反映出甘孜—理塘洋在消减闭合到发生两侧地块汇聚的过程中,原先的沉积盆地还有较多保留。③近几年区域地质调查工作中在甘孜—理塘带新龙—理塘附近和木里地区发现有侏罗纪海相地层存在^[25,32],至少说明三叠纪以后,区内还存在残留海相环境。④沙鲁里山、雅砻江一带、巴颜喀拉/松潘—甘孜等三叠纪地层发育地区除广泛分布着印支期中酸性岩浆岩侵入体外,在雀儿山等地还见有规模较大的燕山期的花岗岩侵入,表明碰撞造山作用在三叠纪末并未结束。⑤区内出露广泛的三叠系,均有不同程度的变质,一般变质较轻,虽普遍发生面理置换,但表现并不均匀,许多地方尚保留较好的原生沉积构造。引起广泛变质的原因很可能与深部存在剥离滑脱构造有关。变质变形已经影响到整个三叠系,发生该构造活动的时间显然应在三叠纪以后。以上情况显示该区虽经历了板块汇聚造山作用,但表现不如一般碰撞造山带强烈,似表现出造山运动“力量不足”的特点。因此,未发育完善的磨拉石沉积,沉积盆地消亡也不彻底,且海水的退出时间较长,直到侏罗纪后才完全退去,岩浆活动的时间也表现了一定的滞后延续;而变质轻微且不均匀,则可能与造山运动不彻底有关。所有这些特点很可能就是中国地质学家提出的板块汇聚碰撞过程

中“软碰撞”的表现。之所以造成这种状况,可能与以下原因有关:①原来洋盆规模不大,真正存在洋壳的部分范围小,沉积盆地的基底主要还是陆壳/过渡壳,因此在盆地消亡和闭合过程中,盆地中地壳部分不可能全部俯冲下去,致使原来沉积盆地有较多保留下来;②汇聚板块仅是微陆块/规模不大的地块,因此当其发生汇聚碰撞时力量有限,不可能发生强烈碰撞造山作用;③就“古特提斯造山带”而言,甘孜-理塘带毕竟离主造山带澜沧江带位置较远,相对受其影响较小;④甘孜-理塘缝合带代表了原来古特提斯演化阶段洋盆闭合后的残迹,从其中蛇绿岩的出露情况看,主要集中在理塘甲洼以北的地段,以南却逐渐消失,但仍然依稀可见出露超基性岩岩片及枕状熔岩等,且超基性岩主要为铁质的,并且理塘附近与蛇绿岩有关的沉积岩性岩相特征似属一种浅海环境。甘孜-理塘带的北延,见蛇绿岩常与放射虫硅质岩共生,到甘孜以后,该带转向北西,到玉树附近却与金沙江缝合带归并而难分彼此,表现出一种可能存在的“三叉洋”特点。根据前述甘孜-理塘带蛇绿岩出现的情况与西侧岛弧火山岩向南逐渐消失,基本上具有同步尖灭的特点,推测甘孜-理塘带于晚古生代—三叠纪曾经存在的深水洋盆北宽南窄,向南逐渐过渡为裂谷到坳拉槽环境而逐渐消失。其深水洋盆发育较好的部位,俯冲消减作用表现明显,岛弧火山岩浆弧发育完善;相反洋盆发育不好的南段俯冲作用逐渐减弱到消失,因此火山岩浆弧也随之逐渐尖灭。这种不同特征段间是否存在转换断层的调节目前尚不清楚,但在理塘和三江口附近均发现有蓝片岩,表明这一带均经过了汇聚挤压造山作用。综合各种资料看,其造山带提供的物质基础,主要还是古特提斯演化阶段奠定的,但是作为古特提斯的消亡,必然应该是在板块汇聚过程中发生的地质事件。由于前述可能发生“软碰撞”的条件下,不可能发育与强烈碰撞造山作用(即硬碰撞)相同的地质特征,造山过程表现也会有所不同。至于松潘-甘孜褶皱带(也有人称为巴颜喀拉板片^[10])现今所表现的强烈构造变形特征,应是喜马拉雅期陆内造山作用的产物。

对于古特提斯海洋的存在基本上已是一个不争的事实。在羌北和可可西里一带区域地质调查中又有若干新的进展(如乌兰乌拉湖附近狮头山—大横山一带高压变质带和蛇绿岩带的发现^[33,34]等),反映出在澜沧江主缝合带之北,除了存在金沙江-西金乌兰湖缝合带外,其间看来还存在另一条缝合带,不管它们之间相互关系如何,表现出古特提斯构造域的存在绝非单一大洋所能代表的。新近的地质调查结果进一步表明,古特提斯洋的消亡过程及其波及和持续影响的范围甚至已扩展到羌塘、冈底斯等地区^[35-39]。这为进一步认识古特提斯域的时空演化及其与新特提斯域的转换关系,又提供了新的资料。

涉及到青藏高原、横断山/三江地区特提斯的演化,怒江缝合带的表现却比较独特,它刚好处在古特提斯澜沧江缝合带和新特提斯雅鲁藏布江缝合带之间,其深水洋盆存在的时

间集中在中生代,主要为侏罗纪—早白垩世,因此,有人将怒江缝合带作为中特提斯的本部,将其视为中特提斯构造存在的代表^[2,3]。也有人主张它应是特提斯演化过程中划分南、北大陆的一条主要界线^[24-26]。这些认识,反映了怒江缝合带至今仍保留着较多重要地质遗迹的事实,它究竟是独立存在的主宰过区域地壳演化的一个大洋环境遗存的残迹呢?还是依附于古、新特提斯而存在的大陆边缘的组成部分呢?笔者注意到也有人将其视为澜沧江洋或雅鲁藏布江洋俯冲消减过程中形成的弧后盆地^[18]。根据雅鲁藏布江洋盆形成的时间主要在晚三叠世—早白垩世,其俯冲—消亡的时间应主要在晚白垩世—古近纪。因此,怒江深水洋盆环境的形成,不可能是新特提斯洋向北俯冲形成的弧后盆地。如果改变一下思维方式,把怒江缝合带看成古特提斯最后消亡—汇聚碰撞的部分,那么,它与澜沧江缝合带之间的时、空演化关系就能得到一种比较合理的解释。就怒江缝合带的结构构造特征看,它至少存在2~3条蛇绿混杂岩带,其间的沉积地层却表现了复杂的岩性岩相变化,有的还保存了原始“洋盆”完整的岩浆—沉积序列^[40],反映原来的沉积盆地并非单一的深水大洋,而表现出复杂多样的环境变化,也有人将其称为“多岛洋”。其岩相古地理格局与东南亚岛弧和边缘海地区的格局十分相似。一般认为一个大洋在形成发展到消亡的演化旋回中,最终海洋生命的结束阶段均必然以弧-弧碰撞、弧-陆碰撞到陆-陆碰撞造山作用为结局。怒江缝合带具有类似的特点,因此,可将其视为板块构造演化过程中洋-陆转换最后阶段的遗迹。为了对怒江缝合带在特提斯地质构造发展演化中所处位置有一个比较清楚的理解,在此不妨与西北太平洋大陆边缘的地质构造环境进行对比。一般认为西北太平洋所形成的海沟-岛弧-边缘海盆地共存的构造格局,正是太平洋正在衰亡的表现。如果这一过程继续发展下去,必然会大洋最先消失,然后留下大陆边缘弧-盆系,并依次发生弧-弧碰撞、弧-陆碰撞到陆-陆碰撞,最后结束整个大洋演化的生命旋回。按照太平洋与边缘弧-盆系间的时、空关系,如果将澜沧江带与怒江带间进行对比,二者之间刚好就是古特提斯演化不同阶段所表现出的一种时、空迁移变化格局。恰好可以说明怒江缝合带不可能是一个短时间内形成的独立的大洋体系,它正是古特提斯构造域最终消亡的部分。

按科尔曼^[41]的观点,大洋地壳形成以后,因为洋底扩张作用,洋壳经过长距离的运移,冷却比较充分,因此一般密度较大,当其进入俯冲带时,通常都会俯冲下去,很难在大陆上出现。一般在陆上所见到的蛇绿岩,大多是在大陆边缘或一些有限的洋盆中形成的。因为这种盆地范围有限,洋壳形成后,还未经过充分冷却,保持着较低的密度,当盆地消减闭合时,这种蛇绿岩就极易被推挤到陆壳之中而被保留下来。或许就是这种原因,怒江带蛇绿岩出现较多,并且表现出多条并存的情况。另外,沿班公湖-怒江缝合带为什么很难见到在龙木错-双湖-澜沧江带上出露较多的蓝闪石片岩?为什么石炭纪—二叠纪冈瓦纳相的沉积能越过怒江带到达澜沧江带的

位置?滇西昌宁-孟连带作为洋盆环境存在的可靠时间是晚古生代一中三叠世,并且这里同样出现有较多与西藏龙木错-双湖带相同的蓝闪石片岩,甚至硬玉质辉石等高压矿物,相反这里蛇绿岩却不如西藏怒江带发育。显然西藏的班公湖-怒江带并不相当于滇西的昌宁-孟连带,而应相当于西藏冈底斯-念青唐古拉板片的构造单元。由于其本身刚性的陆壳性质,却可以从林芝、察隅,沿伯舒拉岭连接到高黎贡山和腾冲地区。这一地区与冈底斯一样也发生了强烈的燕山期到喜马拉雅期的中酸性岩浆侵入活动。从有关资料看,怒江缝合带向南延到八宿、碧土以后逐渐消失,究其原因,可能是沿伯舒拉岭高黎贡山东坡的逆冲-推覆构造把怒江缝合带掩埋到了山体下面^[2,16]。出露于芒市附近三台山一带的蛇绿岩露头,可能就是怒江缝合带的残迹。只不过在云南境内沿怒江河谷延伸的怒江断裂,现在已经不再是原来缝合线的面貌,而被一条喜马拉雅期的平移韧性剪切带所代替。

5 喜马拉雅造山带和横断山造山带的形成是新特提斯消亡和印度板块与欧亚板块汇聚过程中强烈挤压造山作用的结果

让我们再回到徐士经典特提斯的概念。由于古特提斯概念的提出,原来特提斯的名字依然不变,显然容易产生混淆。为了表示其与古特提斯有所区别,地质学家根据其演化时间主要在中-新生代(相当于欧洲的阿尔卑斯旋回),将其命名为新特提斯^[4,42]。从阿尔卑斯、小亚细亚、中东、中亚、青藏高原到缅甸等的情况看,这里曾经存在海洋环境,尤其是其中深海洋盆环境存在的时间主要在三叠纪至古近纪时期。在阿尔卑斯主要从晚三叠世开始,青藏雅鲁藏布缝合带也与之类同^[43]。欧洲阿尔卑斯特提斯是在华力西期造山运动后形成的稳定地块的基础上于晚三叠世重新打开而形成的海洋,中东-中亚和青藏到滇缅地区则是冈瓦纳大陆北部分裂的陆块向北漂移而形成的新生海洋。伴随新特提斯的形成,在印度板块的北部边缘形成被动边缘型的新特提斯海洋,一般将其称为喜马拉雅特提斯。从地层古生物特征看,喜马拉雅带在整个古生代基本都保持一种浅海环境,主要表现为碳酸盐岩台地^[25,44]。石炭纪-二叠纪时同样受过寒冷气候影响,沉积了一套具有冰川-冰海相特征的沉积,并含冷水-凉水条件下生存的动、植物化石^[3,21,45]。它的浅海环境一直持续到中三叠世一晚三叠世早期。冈底斯-念青唐古拉板片/陆块古生代地层古生物特征与喜马拉雅带类同,表明它们在古生代基本上处在相同的环境,当时并未分离。喜马拉雅带二叠纪虽发生短暂的裂谷火山活动,但并未发生大范围环境的根本变化。只是到了晚三叠世才发展形成深水洋盆环境,这就是新特提斯。从目前资料看,新特提斯主带东延并未进入云南,而从雅鲁藏布江大拐弯处向南延伸到了缅北伊洛瓦底江谷

地^[25]。在西藏,洋盆扩张成长造成北侧冈底斯-念青唐古拉地块向北漂移,由于新特提斯两边地块所处构造环境的不同,两边所经历的地质作用表现出一定的差别。喜马拉雅带发展形成以被动大陆边缘为特征的台地-斜坡-盆地环境;冈底斯-念青唐古拉地块则表现出汇聚板块边缘活动的一些特点。

至于新特提斯存在的时间及消亡的原因,一般认为与印度洋的扩张引起冈瓦纳大陆的解体有关。据有关资料^①,大约在200~2500 Ma间,印度还是位于澳大利亚西海岸以外的一个大岛,与亚洲大陆之间还被一个大洋(所谓的特提斯海)所分开。大约200 Ma前联合古陆(Pangaea)解体时,印度板块开始向北缓慢漂移,由于它的这段历史与特提斯最终关闭的时间接近,科学家们重建了印度板块向北漂移的路线。大约在80 Ma前,印度大致在欧亚大陆以南6400 km的位置,并且大致以9 m/100 a的速度向北运动。大约50 Ma前印度板块撞进亚洲的时候,它向北运动的速度大约减慢了一半。碰撞作用的发生与相关的板块运动速度的减小,标志着喜马拉雅快速隆升作用的开始。至于喜马拉雅山脉形成的原因,科学家们认为,因为印度与欧亚两大陆具有大致相同的密度,因此当它们发生碰撞时,一个板块就不可能俯冲到另外一个板块之下,侵入板块的压力只能通过向上的逆冲作用、强烈碰撞造山变形和向上隆升形成高低起伏的喜马拉雅山峰而进行释放。这种挤压作用必须在正向直压的情况下才有可能形成。此时伴随向上的逆冲作用,有可能处于高喜马拉雅的逆冲岩片被强烈挤压而挤出,此种挤出作用必然产生2种不同性质的效应:岩片下方/前方产生逆冲向上的剪切运动,而后方则发生滑脱拆离。前者相当于主中央冲断带表现的情况,后者则与藏南拆离系吻合。当然也有人主张,藏南拆离系的形成是喜马拉雅造山运动后期山脉隆升阶段产生的造山后伸展效应的结果。上述汇聚挤压造山作用不仅形成了巍峨挺拔的绵延3000 km的喜马拉雅山脉,使青藏高原进一步聚合成一个整体,同时也影响到广大的青藏高原周边地区,尤其是处在东侧的三江/横断山脉地区,发生了一次强烈而广泛的陆内造山作用过程,使原来古特提斯造山带受到强烈改造复活/复合,重又展现出年轻造山带的英姿。具体剖析横断山的形成,对比喜马拉雅山脉和青藏高原形成的动力学机制,当印度板块向北强行挤入亚洲大陆的时候,其东北犄角的侵入受到亚洲板块强烈的阻抗,此处应力集中,所受阻力最大,产生变形也最为强烈,因此形成了雅鲁藏布江大转弯独特的变形弯曲现象,形成了以南迦邦瓦峰为中心的强烈变质变形“核”,这就是结扎在喜马拉雅东端的构造结。伴随构造结的形成,雅鲁藏布江缝合带延伸到此,由于特提斯的消减闭合带而被印度板块的挤入作用而扭曲。东侧亚洲大陆不能与其同步向北运动而滞后,使原来近于东西方向的亚洲大陆被强行扭曲,发生约90°的旋转,形成由一系列近南北向剪切断裂组成的剪切带。与此同时,横断山地区相应发生以南

① 美国地质调查局.动力地球学:板块构造的故事.1996.

迦邦瓦为核心的顺时针的旋扭作用,加上东面扬子地块向西挤压,即形成了“三江并流”的独特奇观。当然也有人主张,横断山是印度板块强行挤入亚洲大陆,造成东侧地块大规模向东南方向滑移而形成的,并认为这一过程也是造成印支地块向南逃逸和南中国海张开的原因^[46~48]。不管哪种观点,均不能脱离印度板块与欧亚大陆的强烈碰撞是形成青藏高原和横断山脉的主要原因。但最近研究所取得的一些成果却并不支持后者的见解。例如,与龙门山逆冲-推覆作用有关的构造的形成被认为与四川地块向山体的俯冲作用有关;藏东地区的地表变形和GPS资料表明,这里地壳在围绕喜马拉雅东端发生旋转作用的同时,表现仅有少量向前的位移^[49]。另据成都地质矿产研究所1991—1997年应用GPS测量得到的从藏东到滇西地区的现代地壳运动的速度矢量方向:藏东地区向东,滇西北转向近北向,然后又转为南西向,即现代地壳运动表现为一种涡旋式的特征。涡旋的核部是东喜马拉雅构造结。采用天然地震资料对东喜马拉雅构造及邻区的运动学和变形应力场进行分析,得出川西、藏东和云南的运动相对于华南发生右旋剪切并顺时针旋转,其旋转角度的变化为 $1.7^{\circ}/\text{Ma}$,并得出东喜马拉雅以 $(38\pm 12)\text{mm/a}$ 速率向北楔入,在构造结周围其P轴大致围绕构造结呈扇形分布^[29]。这些资料均直接地显示,造成现今“三江并流”奇观和横断山脉特殊地形地势、地质地貌景观的主要动力来源均与印度板块强行向北入侵欧亚板块有关。

另外,横断山脉又刚好处在环太平洋构造域与特提斯构造域的交接部位,如果它的形成没有环太平洋构造域构造活动的参与恐怕也是难以实现的。不论是主动也好,还是被动也好,处在环太平洋构造域西部的扬子地块对青藏高原形成演化构成了一个必不可少的边界条件。如果没有它的作用,龙门山、锦屏山一带和雅砻江-木里地区的逆冲-推覆构造带的形成未必会出现。也许正是两大构造域地球动力机制相互影响和联合作用的结果,金沙江才改道东行汇入长江。所以,横断山的形成是特定时、空条件下地壳演化塑造的奇迹。

6 横断山/三江地区核心部位的“三江并流世界自然遗产地”地质构造的魅力

见图2。横断山的以上独特经历,自然也就造成了她奇特的地质地貌景观。三江丰富的水源、源头众多的雪山冰川,更增加了她的靓丽秀美。从地理位置、自然地理条件、资源条件各方面综合考虑,横断山脉绝对是中国最具特色的地方。因为水是生命之源、万物之灵,有了水的点缀,景色生辉,有了水的流动,给大地赋予灵性。山因水而更加坚实雄沉壮丽。水的宁静又给人以温馨舒适。富集于横断山脉中各种各样的多样性,难道不也是因水应运而生的吗?是水构成了横断山的血液,是山铸成了横断山的身躯。水之丰、山之多、景物变幻之无穷、雪山冰川之众多,都决定横断山一定会是最美的。对偌大的横断山脉,其实不论从地质遗迹丰富和集中的程度,抑或是景观奇特秀美险峻幽、类型完备等诸多方面综合考

虑,“三江并流”都是最具代表性的。

“三江并流”自然遗产地地处横断山脉/三江流域的核心位置,在此地壳受到强烈挤压,形成了世界上多条山脉和数条大江间隔挤得最窄、靠得最拢的地区。这里有古生代以来比较完整的地层古生物记录,尤其是沿金沙江带出露的反映晚古生代到三叠纪不同沉积环境间变化关系的遗迹^[1,50~54],留下了古特提斯海洋环境从形成到消亡演化的证据。区内出露广泛的超基性—基性—中酸性—碱性岩浆岩,印刻了特提斯演化不同阶段和喜马拉雅期陆内碰撞造山阶段板块相互作用的记录,其中尤其沿金沙江出露的蛇绿岩、沿高黎贡山出露的大规模的燕山期中酸性岩浆岩、澜沧江以东广泛发育的二叠纪—三叠纪的岛弧岩浆岩和喜马拉雅期碱性岩浆岩等均是作为“反映地球演化主要阶段的杰出代表”的重要地质遗迹^[1,9,55~62],为重塑区域地壳演化中板块运动和陆内造山运动的时、空迁移变化规律提供了依据。“三江并流”亦可视为世界上挤得最为破碎的地壳之一,这种特点决定了区内变形变质作用存在的广泛性。区内至少存在着5条中深变质岩带,除新生代以外的地层几乎都不同程度地卷入到了造山运动引起的区域动力变质作用中。在三江的河谷地带,几乎随处可见强烈挤压褶皱现象和大规模平移韧性剪切作用留下的构造变形痕迹,代表了特提斯造山运动和喜马拉雅期陆内造山作用过程中区域地壳所经历的变形变质改造的记录^[1]。上三叠统上部与下伏地层间和上始新统一渐新统与下伏地层间的不整合关系,在区内保存极好,均是古特提斯造山运动和喜马拉雅造山运动留下的最直接的证据。

“三江并流”金沙江带保存着古特提斯演化阶段(晚古生代—三叠纪)丰富的地质遗迹,相比之下,澜沧江和怒江带则由于地处西侧强变形带,变质变形改造十分强烈,反映古特提斯演化阶段古板块活动的遗迹几乎荡然无存。对有关古特提斯演化阶段存在的澜沧江洋盆的认识,基本上是根据相邻的南、北地区的资料确定的。作为“三江并流”段现在澜沧江缝合带的位置,已被喜马拉雅期陆内造山运动形成的一条右行平移韧性剪切带所代替(即区域上所谓的北澜沧江断裂带^[64])。尽管如此,从现在保存的地层古生物遗迹中,仍然能够找到该板块缝合带可能曾经存在的证据。例如在六库附近石炭纪—二叠纪地层中保存着较好的与冈瓦纳大陆冰川活动有关的冰海相沉积,其中可以见到较好的浮冰落石现象^[29]。结合区域资料,其中尚有冷—凉水动物群和植物化石存在,说明它在石炭纪—二叠纪时与冈瓦纳大陆有着明显的亲缘关系^[63]。该类特殊环境的沉积,同时也出露于独龙江流域,只不过它们已经受到了强烈的变形变质改造。澜沧江断裂带以东的河谷地带出露的石炭纪—二叠纪地层,在维西阿独西附近含有晚二叠世华夏植物群的重要分子*Gigantonoclea* Zhang等,同时附近有关地层中保存着丰富的华夏生物地理区(系)的筴、珊瑚、腕足类等古生物化石^[1,50]。仅上述资料就可以证明“三江并流”澜沧江断裂带确实是一条控制性的边界断裂带(它就是区域上存在的澜沧江缝合带)。

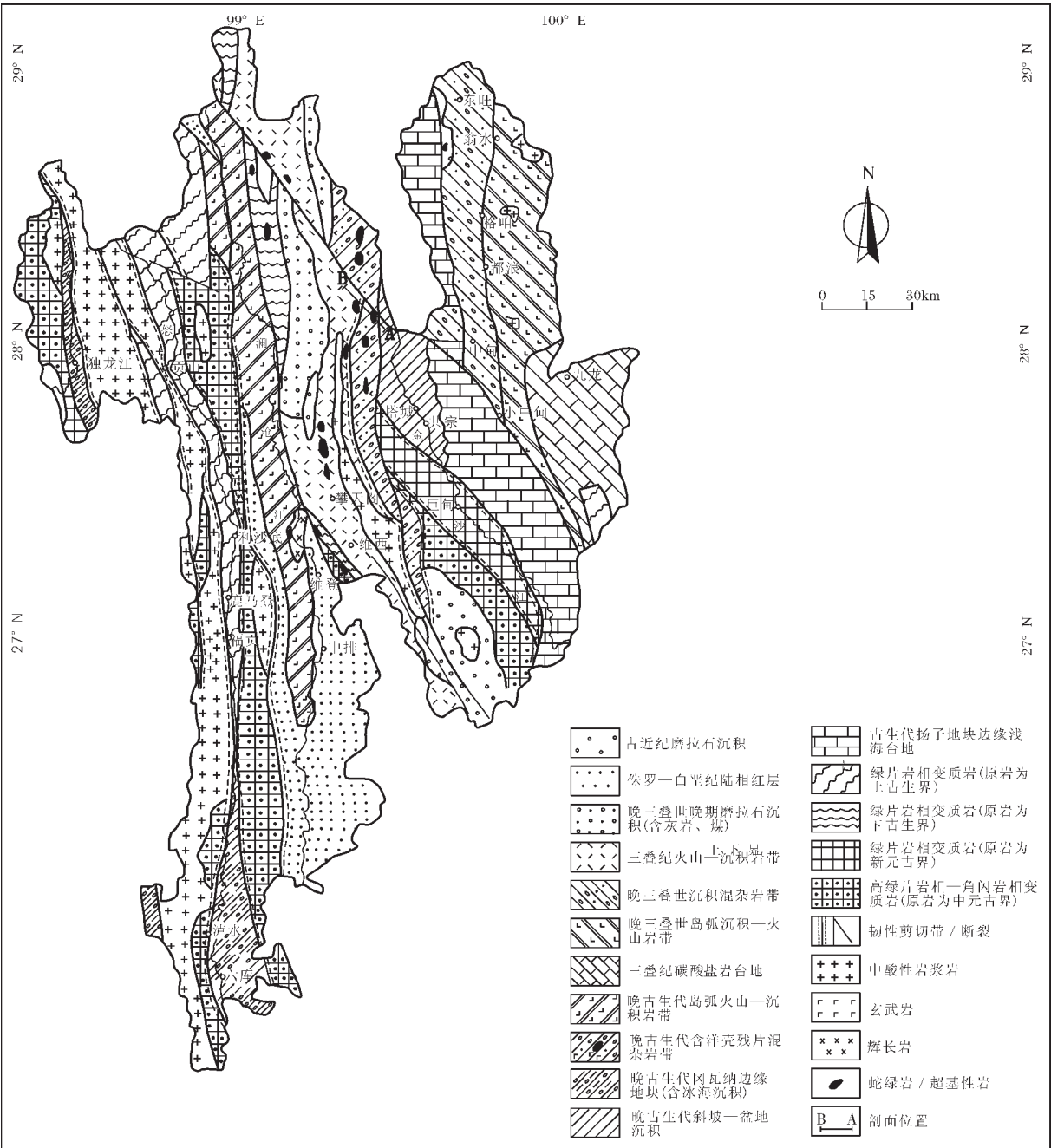


图2 滇西北区域地质构造略图

Fig.2 Tectonic sketch map of northwestern Yunnan

怒江带由于位于“三江并流”西侧强应变带,其变形变质改造异常强烈,作为青藏地区发育极好的板块缝合带的证据,这里再也无法找到。旁侧相当于冈底斯—念青唐古拉构造岩浆带的高黎贡山/腾冲地块变质岩浆带很可能作为一个巨大的逆冲推覆体将怒江缝合带压在了下面;而现今怒江带应是经历了逆冲推覆作用,后期又经历了大规模平移剪切作用而形成的右行平移韧性剪切带^[6]。韧性剪切带中糜棱岩单矿

物黑云母Rb/Sr内部等时线年龄为11.66 Ma,几个矿物和一个全岩Rb/Sr内部等时线年龄为13.7 Ma,指示与北部怒江平移韧性剪切带相当的高黎贡山主走滑断裂活动的高峰期在中中新世(13 Ma±)。该年龄与缅甸掸邦地块西侧沿什皆(Sagaing)断裂向北位移的时限(13 Ma)一致^[9]。在怒江走滑剪切带北段贡山当珠—高黎贡山一线,糜棱岩中黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄分别为16.1 Ma±0.4 Ma/13.7 Ma±0.3 Ma和12.9 Ma±

0.3 Ma^[6],与南段高黎贡山走滑剪切带糜棱岩所测年龄非常接近。这说明怒江平移韧性带基本上是中新世时喜马拉雅陆内碰撞造山作用中的产物。

“三江并流”中澜沧江带和怒江带非板块缝合带的特征,实际上正如王鸿祯^[6]所指出的“是喜马拉雅期陆内大型韧性走滑断裂及其对原有构造格局的重大改造”的结果,也许这正是“三江并流”地质构造中有别于青藏、三江流域其他地区的一大特色。“三江并流”带世界自然遗产地地质遗迹中的此类遗迹,恰好出现在三江靠得最拢、挤得最窄的地方,这就构成了它特有的科学研究价值,与其相关的地貌景观类型自然也就显得比较奇特。

上述喜马拉雅陆内大型韧性走滑断裂同样存在于澜沧江以东德钦-雪龙山变质变形带,有人认为该带在区域上就是哀牢山-红河和点苍山左行走滑韧性剪切带的北延部分^[9]。事实上,在金沙江构造带的晚期同样也发生过一定程度的左行平移剪切作用。这说明喜马拉雅期陆内造山作用所引发的大型韧性剪切/走滑断裂作用在“三江并流”地区是一种范围广泛,并对现今地质构造和地形地貌格局的形成具有决定性影响的地质事件。

7 结束语

沿着时间隧道从晚古生代走到现在,横断山/三江流域一路走来,经过无数艰难曲折和复杂的历史演变,最终才塑造了现在的横断山脉和“三江并流”世界自然奇观。追随它的足迹,我们有机会亲身体验地球运动中大陆漂移和板块运动是如何为人类塑造出这片神奇美丽的人间圣境的!是特提斯的演化,建立了青藏高原和横断山脉的根基,但青藏高原和横断山脉的形成,却是喜马拉雅期(后特提斯)印度板块和欧亚板块强烈碰撞造山作用创下的伟业。其中“三江并流”是横断山脉/三江流域中最精彩的一笔。据说“三江并流”是接受联合国一位官员的建议而申报自然遗产的,作为申报自然遗产的过程,这也许是实情。事实上,“三江并流”在地质构造/地貌景观上的奥妙,早已为科学家们所关注,英国地理学家金敦·沃德早在20世纪初就提出三江并流现象是世界一大奇观,地质学家们给予了它“三江构造结”、“三江蜂腰带”的美名。如果从外观形式上看,“蜂腰带”更能形象地反映此段三江的总体特征,金沙江与怒江之间靠得最近之处(最短直线距离仅66.3 km)也刚好处在这一位置。由此向南,三江中金沙江并未表现出一种平行并流的形式,而独自向东南方向流去。若以石鼓长江第一湾为止,“三江并流”在云南西北部的流程实际只有约170 km,澜沧江和怒江并行流程却可达400 km。为什么会形成如此的格局?根本原因还是受地质构造的控制。

“三江并流”被列为世界自然遗产名录,既是一种荣誉,更是一种责任,对我们来说,既是机遇也是挑战。如何处理好保护和开发的关系,是摆在我们面前的当务之急。从经济发展的层面上讲,可能要以突出经济效益为主;从保护的角度

上考虑,势必应突出抑制经济发展的势头。要正确处理好两者的关系,地方政府已制订了相关的法律法规和一系列规章制度。但其中一个重要的问题往往被人们所忽视,这就是如何以科学发展观为指导,对“三江并流”各学科领域加强研究,以科学研究为基础,以科研促保护,用科研指导开发和发展,让自然遗产地成为科普教育和开展科学研究的基地,为人类的文明、进步做出应有的贡献。让我们走进“三江并流”、研究“三江并流”、认识“三江并流”、保护好“三江并流”,让“三江并流”江水长流、青山常绿、鲜花盛开、雪山永存、冰川长在,人与自然永远和谐相处。

参考文献:

- [1]中华人民共和国建设部.世界遗产公约·自然遗产:中国《三江并流》世界遗产地申报文本[R].1999.
- [2]黄汲清,陈国铭,陈炳蔚.特提斯-喜马拉雅构造域初步分析[J].地质学报,1984,58(1):1-17.
- [3]黄汲清,陈炳蔚.中国及邻区特提斯海的演化[M].北京:地质出版社,1987.
- [4]陈智梁.特提斯地质一百年[J].特提斯地质,1994,18:1-22.
- [5]都城秋穗,安芸敬一,A.M.C.森格著.周云生,张儒媛译校.造山运动[M].北京:科学出版社,1986.
- [6]丁贵明.中国石油地质·青藏高原—图集[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [7]刘本培,等.地球科学导论[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [8]Stocklin J. Possible ancient continental margins in Iran[A].In: Burk C A, Drake C L eds. The geology of continental margin[C]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1974.873-888.
- [9]钟大赉,等.川滇西部大特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998.
- [10]刘本培,等.滇西南昌宁-孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J].地质科学,1993,4(5).
- [11]程裕淇.中国区域地质概论[M].北京:地质出版社,1994.
- [12]潘桂棠,陈智梁,李兴振,等.东特提斯地质构造形成演化[M].北京:地质出版社,1997.28-101.
- [13]潘桂棠.全球洋-陆转换中的特提斯演化[J].特提斯地质,1994,18:23-40.
- [14]李兴振,刘增乾.西南三江地区构造单元划分及地史演化[J].中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊,1991,13.
- [15]潘裕生.青藏高原西北部大地构造演化[A].见:中国科学院地质研究所岩石圈构造演化开放实验室1989-1999年报[C].北京:中国科学技术出版社,1991.80-84.
- [16]王义昭,李兴林,段丽兰,等.三江地区南段大地构造与成矿[M].北京:地质出版社,2000.
- [17]Metcalf I. Stratigraphy, palaeontology and palaeogeography of the carboniferous of southeast Asia[J]. Mem., Soc., Geol., Fr., N. S., 1984,147:107-118.
- [18]周祥,曹佑功.西藏板块构造建造图及说明书[M].北京:地质出版社,1989.
- [19]Senger A M C. The cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia [J]. Geological Society of America Special Paper, 1984,196:82.

- [20] Jin Xiaochi. Permo-Carboniferous of Gondwana siffinity in southwest China and their paleogeographic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20: 633-646.
- [21] 王义昭, 张西裕. 西藏、滇西地区石炭-二叠纪冈瓦纳相杂砾岩形成的若干问题[A]. 见: 中国古特提斯生物及地质变迁[C]. 北京: 北京大学出版社, 1999. 133-145.
- [22] 李才. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 1987, (2): 155-156.
- [23] 李才, 等. 西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [24] 潘桂堂, 丁俊, 王立全, 等. 青藏高原区域地质调查重要新进展[J]. 地质通报, 2002, 25(11): 787-793.
- [25] 中国地质调查局成都地质矿产研究所. 青藏高原及邻区地质图(1:1500000)及说明书[M]. 成都: 成都地图出版社, 2004. 14-76, 100-103.
- [26] 潘桂堂, 郑海翔, 许跃荣, 等. 初论班公湖-怒江结合带[A]. 见: 青藏高原地质文集(12)[C]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [27] 曲景川, 陈炳蔚, 罗君烈, 等. 澜沧江双断裂带及其与邻区的构造关系[A]. 见: 青藏高原地质文集(21)[C]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [28] 刘本培, 冯庆来, Cnonglakmanid Helmcke C. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 161-171.
- [29] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [30] 郝子文, 俞如龙. 论昆仑-巴额喀拉海与特提斯演化关系[M]. 见: 青藏高原地质文集(11)[C]. 北京: 地质出版社, 1983. 25-42.
- [31] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [32] 王明康, 龙斌, 李雁龙, 等. 四川木里海相侏罗纪地层的发现及地质意义[J]. 地质通报, 2002, 21(7): 421-427.
- [33] 李才, 杨德明, 和钟铎, 等. 青藏高原北部可可西里狮头山含硬玉岩类的基本特征及地质意义[J]. 地质通报, 2003, 22(5): 297-302.
- [34] 翟庆国, 李才, 程立人, 等. 西藏羌塘角木日地区二叠纪蛇绿岩的地质特征及意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1228-1230.
- [35] 李才, 王天武, 李惠民, 等. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗闪长岩-古冈底斯造山的存在证据[J]. 地质通报, 2003, 22(5): 364-366.
- [36] 曲永贵, 王永胜, 张树岐, 等. 西藏中扎地区晚三叠世多布日组地层剖面的启示[J]. 地质通报, 2003, 22(7): 470-473.
- [37] 郑来林, 廖宇光, 耿全如, 等. 墨脱县幅地质调查新成果及主要进展[J]. 地质通报, 2004, 23(5-6): 458-462.
- [38] 和钟华, 杨德明, 郑常青, 等. 西藏冈底斯带门巴地区印支期花岗岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2005, 24(4): 354-359.
- [39] 陈玉禄, 张宽忠, 李关清, 等. 班公湖-怒江结合带中段上三叠统确哈拉群与下伏岩系呈角度不整合接触的发现及意义[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 621-624.
- [40] 王永胜, 曲永贵, 王忠恒, 等. 藏北永珠席状岩墙群的发现——海底扩张的证据[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1150-1156.
- [41] Coleman R G. The diversity of ophiolites[J]. Geol. Mijnbouw., 63: 141-150.
- [42] Sengor A M C. The cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia[J]. Geological Society of America Special Paper, 1984.
- [43] 王成善, 夏代祥, 周祥, 等. 雅鲁藏布江缝合带-喜马拉雅地质[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [44] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [45] 尹集祥. 青藏高原及邻区冈瓦纳相地层地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [46] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. Science, 1975, 189: 419-426.
- [47] Tapponnier P, Pltzar G, Ia Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia, new insights from simple experiment with plasticine[J]. Geology, 1975, 10: 611-616.
- [48] Leloup P H, Mark Harrison T, Ryerson F J, et al. Structural, Petrological and Thermal Evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan[J]. Journal of Geophysical Research, 98(B4): 6715-6743.
- [49] Marin Kristen Clark. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet [C]. Massachsetts Institute of Technology, 2003.
- [50] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [51] 孙晓猛, 聂泽同, 梁定益. 滇西北金沙江带硅质岩沉积环境的确定及大地构造意义[J]. 地质论评, 1995, 41(2): 174-178.
- [52] 孙晓猛, 简平. 滇川西部金沙江古特提斯洋的威尔逊旋回[J]. 地质论评, 2004, 50(4): 343-350.
- [53] 李兴振, 刘文均, 王义昭, 等. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 23-140.
- [54] Feng Q L, Ge M C, Xie D F, et al. Stratigraphic sequence and tectonic evolution in passive continental margin, Jinshajiang Belt, Mortywestern Yunnan province, China[J]. Earth Science, 1999, 24(6): 553-557 (in Chinese with English abstract).
- [55] 张之孟, 金蒙. 川西南乡城-得荣地区的两种混杂岩及其构造意义[J]. 地质科学, 1979, (3): 205-214.
- [56] 张之孟, 金蒙. 金沙江板块缝合线上的消减作用[A]. 见: 国际交流地质学术论文集(1): 构造地质·地质力学[C]. 北京: 地质出版社, 1980. 181-192.
- [57] 孙晓猛, 聂泽同, 梁定益. 滇西北金沙江带蛇绿混杂岩的形成时代及大地构造环境[J]. 现代地质, 1994, 8(3): 241-245.
- [58] 孙晓猛, 张保民, 聂泽同, 等. 滇西北金沙江带蛇绿岩、蛇绿混杂岩的形成环境及时代[J]. 地质论评, 1997, 43(2): 114-120.
- [59] 张旗, 等. 山区镁铁-超基性岩[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [60] 莫宣学, 路凤香. “三江”特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [61] 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特提斯演化的同位素年代学制约[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 217-228.
- [62] 简平, 刘敦一, 张旗, 等. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 439-456.
- [63] 王义昭. 滇西腾冲保山地区石炭系含砾地层特征及其意义[A]. 见: 青藏高原地质文集(11)[C]. 北京: 地质出版社, 1983. 71-78.
- [64] 许芳瑞. 高黎贡山韧性剪切带糜棱岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果[D]. 台湾大学地质系硕士论文, 2000.
- [65] 王鸿祯. 为钟大赉等《川滇西部古特提斯造山带》所作序[M]. 1998.