

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.02008

西南三江金沙江弧盆系时空结构及构造演化

王保弟^{1,2,3}, 王立全^{2,3}, 王冬兵^{2,3}, 李奋其^{2,3}, 唐渊^{2,3}, 王启宇^{2,3},
闫国川^{2,4}, 吴喆^{2,4}

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 3. 中国地质调查局青藏高原地质研究中心, 四川 成都 610081; 4. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037)

摘要:金沙江(-哀牢山)弧盆系是西南三江多岛弧盆系的重要组成部分,恢复其时空格架及其形成演化过程对理解古特提斯多岛弧盆系的时空格局具有重要意义。根据新的地质调查资料、研究成果并结合分析数据,系统总结了金沙江弧盆系不同构造单元的物质组成及其构造属性,讨论了其构造演化过程及其对VMS型矿床的控制作用。金沙江洋壳发育时限主要为晚志留世—二叠纪,古洋壳地幔受到了早期俯冲带物质富集组分的影响,主体形成于弧后盆地的构造环境。江达-德钦-维西岩浆弧为一复杂的陆缘弧,经历了俯冲消减(300~260 Ma)、早碰撞聚合(255~250 Ma)、同碰撞伸展(249~237 Ma)和晚碰撞造山(236~212 Ma)等构造事件叠加改造,形成了不同类型、不同环境的岩浆活动及其盆地。金沙江带新发现的贡觉榴辉岩、维西退变榴辉岩等高压变质带,为恢复金沙江古特提斯洋的俯冲-碰撞造山的复杂演化过程提供了重要证据。在此基础上,结合区域地质资料,构建了金沙江弧盆系的演化历史,认为经历了晚志留世—早二叠世金沙江(-哀牢山)弧后洋盆扩张、早二叠世晚期—晚二叠世洋壳俯冲消减、早三叠世—晚三叠世弧-陆碰撞造山与盆-山转换、晚三叠世末期后碰撞陆内造山至陆内汇聚-走滑转换等阶段的演化过程,每个阶段控制着不同类型的VMS型矿床。

关键词:金沙江缝合带;古特提斯洋;多岛弧盆系;榴辉岩带;构造演化;构造地质学

中图分类号:P542; P588.1

文献标识码:A

西南三江造山带及邻区地质构造极其复杂,具有独特的巨厚地壳和岩石圈结构,是一个特提斯大洋、欧亚大陆边缘与冈瓦纳大陆边缘相互作用下,经大洋扩张、闭合,以及大陆边缘不断弧后扩张、裂离,又经小洋盆萎缩消减、弧-弧、弧-陆碰撞等地质作用形成的复杂构造域(潘桂棠等,2016,2020)。通常认为“三江地区”特提斯演化阶段存在多个陆壳地块与洋盆相间排列的多岛弧盆系统(莫宣学等,1993;刘本培等,2002;Jian et al.,2008,2009a,2009b;Wang et al.,2014;任飞等,2017;尹福光等,2017),经历了从特提斯大洋岩石圈向大陆岩石圈转换及其大陆边缘多岛弧盆系构造演化(王立全等,2008,2013;李文昌等,2010;Pan et al.,2012;

潘桂棠等,2013;Deng et al.,2014;邓军等,2016;Wang et al.,2017),形成了现今定位的甘孜-理塘、金沙江-哀牢山、澜沧江、昌宁-孟连四条最主要的弧-陆碰撞带及其间的中咱-中甸地块、昌都-思茅地块、保山-镇康地块等微陆块,呈反“S”型扭转的大地构造格局(图1)。其中金沙江-哀牢山弧盆系是三江多岛弧盆系的重要组成部分,经历了较为完整的威尔逊旋回(张旗等,1996;王立全等,1999;孙晓猛和简平,2004),通常认为其经历了裂(陷)谷盆地(D)、洋盆扩张(C₁-P₁)、洋壳俯冲消减(P₁-P₂)和弧-陆碰撞造山(T₁-T₂)4个主要演化阶段(范蔚茗等,2009;Jian et al.,2009a,2009b;Zi et al.,2012;潘桂棠等,2013;王保弟等,2018),恢

收稿日期:2021-01-05;改回日期:2021-02-07

作者简介:王保弟(1975—),男,研究员,博士,从事青藏高原地质研究工作。ORCID:0000-0002-6266-1483。E-mail:baodiwang@163.com;wbaodi@mail.cgs.gov.cn

资助项目:中国地质调查局项目(No. DD20190053)和国家自然科学基金项目(No. 41773026)资助

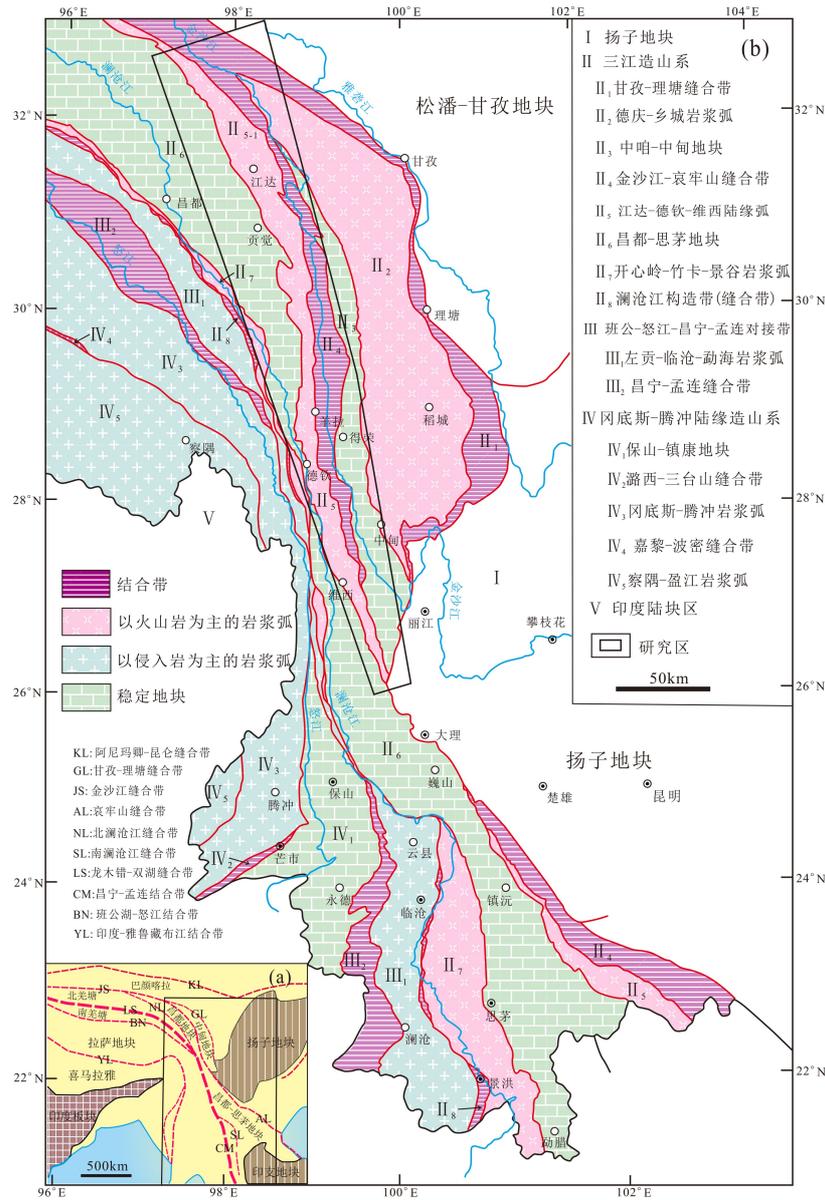


图1 青藏高原构造格架简图(a)及西南三江地区大地构造单元划分(b)(据 Wang et al.,2014 修改)

Fig.1 Tectonic framework of the Tibetan Plateau (a) and tectonic division of the Sanjiang Orogen and surrounding areas (b) (modified from Wang et al.,2014)

复其时空格架及其构造演化过程对理解古特提斯多岛弧-盆系的时空格局具有重要意义。

近年来,中国地质调查局成都地质调查中心组织实施的地质调查及一系列科学研究在金沙江弧盆系的物质组成、构造-岩浆演化序列及高压变质带等方面获得了大量新资料,取得了一系列新认识。本文在新的1:5万区域地质调查资料和相关科学研究基础上,进一步厘定了金沙江弧盆系的物质组成及时空格架,分析和讨论了金沙江弧盆系的构造演化历史,同时简要探讨了不同构造演化阶段对VMS型矿床的控制作用。

1 金沙江(-哀牢山)弧盆系及两侧陆块物质组成及其空间展布

金沙江(-哀牢山)弧盆系位于西侧昌都-思茅地块与东侧甘孜-理塘弧盆系与扬子陆块之间,自东向西由金沙江(-哀牢山)缝合带和江达-德钦-维西(-绿春)陆缘火山-岩浆弧组成,后者为金沙江(-哀牢山)洋壳向西俯冲作用形成,弧盆系东侧为中甸-中甸地块,西侧为昌都-思茅地块。

1.1 金沙江缝合带

金沙江缝合带位于邓柯以南、剑川以北,即金

沙江主断裂(盖玉-德荣断裂)以西、金沙江河谷与羊拉-鲁甸断裂以东的狭长区域展布,东邻中咱-中甸地块,西邻江达-德钦-维西陆缘火山弧,向北在邓柯一带与甘孜-理塘带相接,向南延伸与哀牢山缝合带相接(图1,2)。

西部边界断裂总体东倾,东部边界断裂沿走向弯曲变化,具有宽100~300 m不等的挤压破碎带或者片理化带,在构造层次较深的部位,常见糜棱岩化。

研究表明(王立全等,1999,2013;李兴振等,1999;李定谋等,2002;潘桂棠等,2013),在该带中段原1:20万区调称作的二叠纪嘎金雪山群和额瓦钦群、三叠纪中心绒群变质岩等,实则为含有二叠纪-三叠纪“块体”的构造混杂岩,原岩应为半深海-深海相泥灰岩、硅质条带灰岩、砂泥岩、放射虫硅质岩、洋脊型基性火山岩、凝灰岩等组合形成的火山-复理石沉积建造。该蛇绿混杂岩从东向西可分为3个亚带(王立全等,1999,2013;李兴振等,1999;潘桂棠等,2013):①嘎金雪山-贡卡-霞若-新主洋壳消减蛇绿混杂岩亚带,也即是缝合带的主带,该带主要由洋脊玄武岩、准洋脊玄武岩与蛇纹岩(原岩为方辉橄榄岩)、堆晶辉长岩、辉绿岩墙、放射虫硅质岩等组成,构成被肢解了的蛇绿岩或蛇绿混杂岩,主体由嘎金雪山岩群构成。②朱巴龙-羊拉-东竹林洋内弧增生杂岩带,位于芒康朱巴龙、西渠河桥-德钦贡卡、东竹林大寺一线,主弧期火山岩为早二叠世晚期-晚二叠世的钙碱性系列的安山岩、玄武岩、玄武安山岩、钠化英安岩等,以高 Al_2O_3 、低 TiO_2 为特征。在贡卡、东竹林大寺一带与蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩墙、放射虫硅质岩等一起构成混杂岩。该亚带主体由申洛拱组、响姑组、喀大崩组、奔子栏岩组等地质单元构成。③西渠河-雪压夹口-吉义独-工农弧后盆地增生杂岩带,以发育早二叠世晚期-晚二叠世辉长辉绿岩墙群、准洋脊型基性火山岩、少量超基性岩为特征,嘎金雪山岩群西渠河岩组构成了其混杂基质的主体(图2)。金沙江缝合带总体表现为以砂板岩为基质,夹杂大量超基性岩块、基性岩岩块、洋岛-海山组合岩块,以及一系列不同时代灰岩岩块的构造混杂岩带,结合区域构造分析,认为主要经历了金沙江古特提斯洋盆二叠纪-三叠纪时期的俯冲消减、晚三叠世陆陆碰撞以及新生代陆内汇聚阶段的构造变形的改造。

嘎金雪山岩群出露于邓柯以南、剑川以北,即沿金沙江主断裂以西、金沙江河谷与羊拉-鲁甸断裂以东的狭长区域展布,主要由蛇纹石化超镁铁岩、超镁铁堆晶岩(辉石岩-纯橄榄岩)、辉长岩-辉绿岩墙群、洋脊型玄武岩及放射虫硅质岩组成,与其它被肢解的泥盆纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪等灰岩块体及其绿片岩基质构成蛇绿混杂岩,并进一步细化为二叠纪-中三叠世西渠河岩组、岗托岩组。西渠河岩组(C-T₂)从南至北带内均有大量分布,主要由透闪片岩、阳起片岩、石英片岩、二云片岩、变质砂岩、板岩、千枚岩、结晶灰岩、蚀变基性岩夹大理岩等组成,混杂有超基性岩、辉长岩、志留纪-石炭纪碳酸盐岩和二叠纪玄武岩岩块等,产牙形刺、腕足类、双壳类、海百合等化石,其中已经确定时代的化石主要为牙形刺 *Pandeorodus* sp., *Triconodlla* sp., *Neopriodus* sp., *Lingonodus* sp., *Neogondolella* sp., *Neopriodontus* sp., 腕足类 *Cyrtospirifer* sp., *C.* aff. *nomelensis*, *C.* aff. *spicatus*, *Atrypa* sp. 等,其中 *Neogondolella* 是早三叠世及中三叠世重要属种分子,叠厚>943~3428 m,被认为主体是洋盆中的火山-沉积岩建造(莫宣学等,1993;王立全等,1999;潘桂棠等,2003)。岗托岩组(P-T₂)主要沿西渠河-雪压夹口-吉义独-工农一带展布,主要以灰绿色变质玄武岩为主夹硅质岩及板岩,上部夹少量变质砂岩,厚>3461 m,被认为是洋内弧西侧弧后盆地中的火山-沉积岩建造(莫宣学等,1993;王立全等,1999;潘桂棠等,2003);玄武岩中发育枕状构造,常见墙状辉绿岩或辉绿玢岩呈群产出;硅质岩中获得中二叠世 *Albaillella levis* Ishiga Kito and Imoto 放射虫(吴浩若鉴定),灰岩夹层中含早二叠世筳化石,还混杂有超基性岩、辉长岩、志留纪碳酸盐岩、石炭-二叠纪碳酸盐岩等;在芒康不冬龙-德钦独拉顶灰岩中产筳、珊瑚、腕足类等化石,其筳类 *Triticites* sp. 为早二叠世早期阿瑟尔期, *Ozawainella angulata* 为晚石炭世-早二叠世早期, *Fusulinella* sp. 是晚石炭世中晚期筳类带化石,珊瑚 *Caninia* sp., *Hunanoclisia* sp. 和腕足类 *Spirigerella* sp. 为石炭纪;另在雪压夹口-叶日-之用-关用一带,海山灰岩块体中发现早-中三叠世有孔虫化石 *Ammodicus semiconstrictus regularis* Waters 等(王立全等,1999)。此外,新元古界雄松岩群断续出露于巴塘一带,夹于金沙江蛇绿混杂岩中;岩性为一

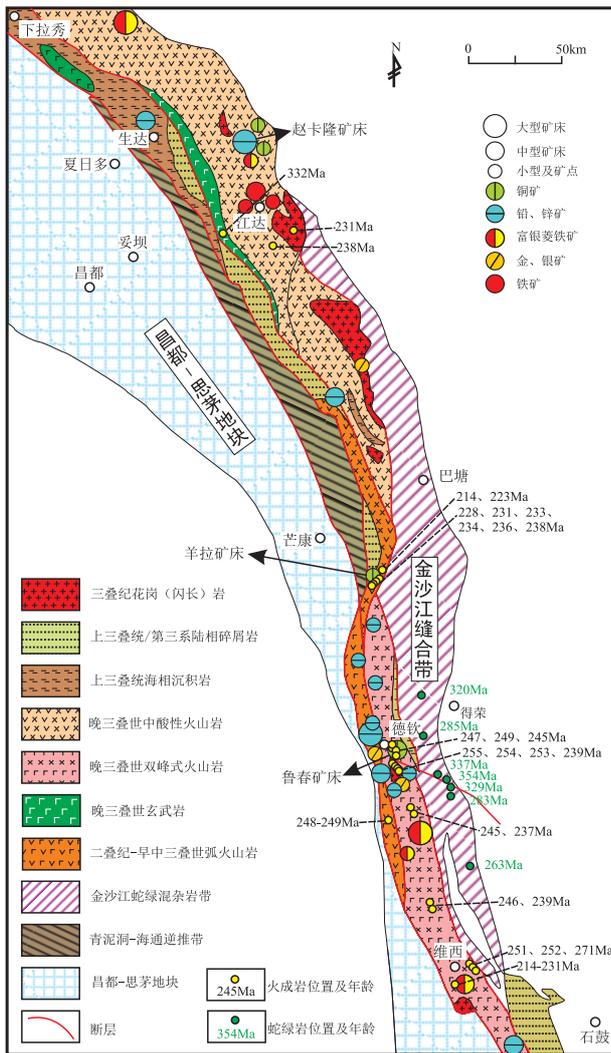


图2 金沙江缝合带及江达-维西陆缘弧带地质构造简图及前侏罗纪岩浆作用时空分布

Fig. 2 Simplified geological map of the Jinsha River arc-basin system, showing the temporal-spatial distribution of pre-Jurassic magmatic rocks

套千枚岩、板岩、片岩、变质砂岩,夹结晶灰岩、变基性火山岩组合,获得基性火山岩锆石U-Pb年龄为999 Ma和876 Ma。

申洛拱岩组(C₁)、响姑岩组(C₂)、喀大崩岩组(P_{1,2})和奔子栏岩组(P₃)主要出露于维西-德钦一带,前者下部以富钠长绿泥微晶片岩、含绿泥石英微晶片岩、绿泥黝帘阳起片岩、钠长阳起绿泥片岩为主,夹中粗晶含金云大理岩、透闪石大理岩;上部以含钙质绢云石英微晶片岩、黑云钠长绢云片岩、钙质白云片岩为主,夹薄-中厚层状细晶含金云母大理岩,含透闪石大理岩,产珊瑚 *Thysanophyllum shaoyangensis*, *Kueichouphyllum heishihkuanense* Yu, 筴

Eostaffella mosquensis Yissarinova, 以及牙形石 *Gnathodus bilineatus* (Roundy), *G. commutatus* (Branson & Mhele), *G. girtgi* Hass, *Spathognathodus compbelli* Rerroak 等。响姑岩组以白云质大理岩、细晶大理岩为主,夹灰褐色变质微粒钙质石英砂岩、绢云千枚岩、变硅质岩,残留浅灰白色块状含燧石团块粉晶灰岩→浅灰色薄-中层状燧石条带灰岩→灰色中厚层状含燧石团块粉晶灰岩组成的基本层序,产牙形刺 *Streptognathodus elongatus*, *S. gracilis*, *Gondolella* sp., *Neoprioniodus* cf. *montanaensis* (Scott), ? *Scaliognathus* sp., *Spathognathodus* sp. 等。喀大崩岩组(P_{1k})以基性火山岩为主,一岩段为浅灰白色中-厚层块状条带状结晶灰岩、大理岩为主,夹灰绿色片理化玄武岩、含钠长钙质绿帘绿泥千枚岩、绿泥绢云千枚岩;二岩段以灰绿、黄绿色(辉石)玄武岩为主,夹复岩屑砂岩、粉砂岩、灰岩,玄武岩具枕状构造,板岩中可见水云母粘土矿物纹层与钙泥质纹层呈水平韵律状产出,反映形成于较深水(盆地)环境;产筴: *Misellina* sp., ? *Schwagerina* sp., *Neomisellina* sp., *Neoschwagerina* sp., *Verbeekina* cf. *verbeekii* Geinitz, 牙形刺: *Ozakodina* cf. *oertlii* Kozur, *Neostreptognathodus* sp., *Idiognathodus* cf. *ellisoni* Clak et Behuken, *Palmatolepis* sp., *Lonchodina festiva* Bender et Stapper, *Neogondolella* cf. *bella* Stauffer et Plummer, 硅质岩放射虫: *Entactinia vulgaris* Won, *E. tortispina* Ormiston et Lane, *Astroentactinia multispinosa* Won 及 *Entactinosphaera palimbola* Foreman。奔子栏岩组为一套含火山岩夹碳酸盐岩的陆源碎屑沉积,以钙质粉砂质板岩、变质微细粒长石英杂砂岩为主,夹变硅质岩、变玄武岩、微晶灰岩及变质灰质砾岩,成分成熟度、结构成熟度较低;硅质岩产放射虫: *Latentifistula* sp., *Entactinosphaera* sp. 等。

金沙江缝合带及邻区中生界零星出露,以上三叠统为主,北部包括甲丕拉组、波里拉组和巴贡组,角度不整合于蛇绿混杂岩之上;理塘一带甲丕拉组覆于蛇绿岩之上,该组下部为紫红色块状砾岩、含砾砂岩,中部为紫红色钙质石英粉砂岩,夹灰岩、泥灰岩和粉砂岩;南部地区上三叠统以歪古村组、挖鲁八组为主,由于后期挤压作用,多与古生界为断层接触,局部地带仍可见歪古村组(T_{3w})不整合覆盖于奔子栏岩组等岩组之上。由上可见,金沙江-

哀牢山古特提斯洋在甲丕拉组、歪古村组沉积期以前就已闭合。

1.2 江达-维西陆缘火山弧

该陆缘火山弧带东以金沙江缝合带的西界断裂为界,西以车所-热涌-字嘎寺-德钦-维西-乔后逆冲断裂为界,向南延与哀牢山缝合带西侧的墨江-绿春陆缘火山弧相接。空间上,主体分布于昌都芒康县宗拉山口东侧、德钦县南仁-捕村-南佐至维西县巴迪-叶枝一带(图1)。火山弧内岩浆岩极为发育,类型多样,并具有复杂的空间配置。弧-盆的空间配置和火成岩成分的穿弧极性,表明该火山弧是由于金沙江(-哀牢山)洋盆向昌都-思茅地块之下俯冲形成。晚三叠世以前的岩层构造变形较强,表现为一系列向西倒转的褶皱和冲断,并发育一系列走滑剪切带。

江达-维西陆缘火山弧是金沙江洋盆向西俯冲作用的产物,是以昌都地块为基底发育起来,是在陆壳的基底上而发展演化。最老的基底为中-下元古界宁多岩群(P_{1-2}),仅出露于北段戈波的北东侧,为一套角闪岩相深变质岩系,系列同位素年龄2200~1111 Ma(姚宗富,1992;西藏自治区地质矿产局,1993;王成善等,2003)。晚元古代草曲群(P_3)为一套绿片岩相变质岩系,原岩为碎屑岩夹碳酸盐岩、变基性火山岩,获得基性火山岩的锆石U-Pb年龄为999 Ma和876 Ma。下古生界未见,上古生界为次稳定型被动边缘盆地-裂陷盆地中的陆棚相碎屑岩-碳酸盐岩夹中基性火山岩建造。早二叠世晚期,由于金沙江洋盆向西俯冲消减于昌都-思茅地块之下,在早期被动边缘的基础上转化为活动边缘,进入陆缘弧发育阶段,其陆缘弧西侧发育以陆壳为基底的昌都弧后盆地。

陆缘火山弧上的火山-沉积岩系在空间上岩相多变、沉积类型多样,岛弧地势起伏很大,有出露水面发育陆生植物和柱状节理的陆地,亦有潜伏于水下的碳酸盐岩台地及深水谷地,可以出现从陆相-海陆过渡相-浅海相-台地斜坡-深水盆地等各种不同沉积相和沉积类型的沉积物,为一岛链体分布的构造-古地理格局。弧火山岩从早到晚发育拉斑玄武岩系列→钙碱性系列→钾玄岩系列火山岩,火山岩性质标志着岛弧产生-发展-成熟的完整过程(莫宣学等,1993)。二叠纪吉东龙组(P_1)为一套陆相-浅海相-深水盆地中的碎屑岩、碳酸盐岩、放射虫硅质岩和中基性-中酸性系列火

山岩,维西县巴迪-叶枝一带具不完全鲍马序列的砂板岩(李兴振等,1999,2002)。弧火山活动一直持续到晚二叠世,包括禹功组(P_2)和沙木组(P_3)为一套海陆交互相-浅海相碎屑岩、碳酸盐岩和中基性-中酸性系列火山岩,这些沉积记录及岩浆活动反映了金沙江弧盆系的演化过程。

晚二叠纪末期-早三叠世早期进入弧-陆碰撞阶段,在昌都地块东缘江达-戈波-徐中一带,形成二叠纪末期-早三叠世碰撞型火山岩浆作用,叠加于二叠纪俯冲型陆缘火山弧之上,发育具弧火山岩性质的玄武安山岩-安山岩系列火山岩及火山源浊积岩。下三叠统普水桥组安山岩-流纹岩系列的火山岩组合,始于晚二叠纪末期山麓相紫红色砾岩之后,自下而上、自西向东具有冲洪积相→滨浅海相→边缘斜坡相→盆地相的相序组合,并不整合在下伏地层和海西期中酸性侵入岩之上,标志着弧-陆碰撞作用的开始。碰撞作用一直持续至晚三叠世,马拉松多组(T_{1-2})、上兰组和色容寺组(T_2)为一套海陆交互相-浅海相碎屑岩、碳酸盐岩及中酸性火山岩建造。另外张万平等(2011)获得白芒雪山地区花岗闪长岩及其MME微粒包体LA-ICPMS 锆石U-Pb年龄为255~253 Ma,很可能是早碰撞阶段侵入岩浆活动的具体表现。

早三叠世晚期-中三叠世,主体在德钦-维西一带发育同碰撞伸展环境下的伸展盆地,其形成机制可能是由于俯冲板片的断离作用导致的局部伸展环境。从空间上看,既有陆相-浅水相的火山活动,又有发育深水盆地中火山-沉积复理石,从而形成“堑、垒”相间的构造-古地理格局,从北向南大致可鉴别出徐中-鲁春-红坡火山沉积盆地和热水塘-催依比-上兰火山沉积盆地(王立全等,1999);时间上形成于同碰撞伸展阶段,空间上主体叠置于德钦-维西陆缘火山弧之上(王立全等,2002b)。德钦-维西伸展盆地已成为VMS矿床的重要赋矿盆地(王立全等,1999,2002a)。盆地内发育一套具“双峰式”火山岩系特征的拉斑玄武岩和碱性流纹岩组合以及伸展背景下的大量辉长-辉绿岩墙/岩脉群,并相伴产出硅灰泥复理石。鲁春矿区玄武岩Rb-Sr等时线年龄为236 Ma,流纹岩等时线年龄为238~224 Ma(王立全等,2002a),维西攀天阁一带流纹岩Rb-Sr等时线年龄为235 Ma(牟传龙和王立全,2000)。本研究认为,这套双峰式的火山岩LA-ICPMS 锆石U-Pb年龄为249~245 Ma

(王保弟等, 2011; Wang et al., 2013), 近来, Zi et al. (2012)也在维西一带攀天阁组、催依比组双峰式火山岩中获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 247 ~ 237 Ma, 认为此时期也是处于伸展的构造背景。本研究的数据与此相似, 表明江达-德钦-维西陆缘弧双峰式火山岩的发育时限很可能是早三叠世晚期—中三叠世, 而不是晚三叠世, 本研究故此称作早—中三叠世伸展盆地。早—中三叠世伸展盆地在时间上变化很大, 伸展盆地的早中期拉张、裂隙程度大, 火山活动喷发于较深的水体中, 并发育伸展构造背景下的辉长-辉绿岩墙/岩脉群, 以及次火山岩相的辉长辉绿玢岩; 伸展盆地的晚期拉张、裂隙程度小, 以酸性火山活动结束, 火山岩形成于较浅的水体中, 甚至出现陆相喷发, 发育柱状节理。

晚三叠世由伸展转变成挤压环境, 发生强烈的晚碰撞造山与盆-山转换, 以中性-中酸性火山岩的出现为标志, 并发育大量的滨浅海相碳酸盐岩及碎屑岩及菱铁矿和膏盐沉积, 构成了 VMS 型矿床的重要赋矿岩系。在相对应的晚碰撞型花岗岩类侵入体中, 获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 239 ± 6 Ma、全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 212 ± 43 Ma、 214 ± 6 Ma (简平等, 2003)。

1.3 昌都-思茅地块

昌都-思茅地块位于西侧开心岭-竹卡-景谷火山-岩浆弧与东侧江达-维西-绿春火山-岩浆弧之间的狭长区域, 早古生代属于扬子陆块西部被动边缘的一部分, 晚古生代随着金沙江-哀牢山弧后洋盆的扩张, 使得昌都-思茅地块从扬子陆块西缘裂离, 形成游离于西侧澜沧江和东侧金沙江-哀牢山弧后洋盆之间的独立块体。依据昌都-思茅地块的空间展布特征, 可以细化为北部囊谦-昌都地块、南部兰坪-普洱地块两个次级构造单元, 南北两地块的地质特征具有一致性。

古—中元古界变质岩系出露于囊谦-昌都地块东缘的小苏莽地区和兰坪-普洱地块东缘的雪山山一带, 分别称作宁多岩群和雪山山岩群 (Pt_{1-2}), 岩性主要为一套高绿片岩相-角闪岩相变质岩, 获得宁多岩群钠长阳起片岩 U-Pb 锆石年龄为 1111 Ma、斜长片麻岩年龄为 2200 Ma (王国芝和王成善, 2001)、副变质片麻岩年龄为 1870 Ma (姚宗富, 1992), 以及侵入其中的花岗岩体锆石 U-Pb 年龄为 1680 Ma、1780 Ma (西藏自治区地质矿产局, 1993); 何世平等 (2011) 除在宁多岩群二云石英片岩中获

得碎屑锆石 U-Pb 年龄为 3981 ± 9 Ma 的冥古宙古老地壳物质信息外, 还获得斜长片麻岩、片麻状黑云花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 1044 ± 30 Ma、 990.5 ± 3.7 Ma (何世平等, 2012), 10 亿年左右的构造-热事件可与扬子陆块变质基底固化时限相当, 应属扬子陆块的基底。晚元古界变质岩系分布于囊谦-昌都地块东缘的小苏莽地区, 草曲群 (Pt_3) 主要为一套绿片岩相变质的碎屑岩夹基性火山岩组合, 可与中咱-中甸地块的陇巴岩组、塔城岩组 (Pt_3) 和扬子陆块区的南华系火山岩相对比。震旦系-寒武系未见, 囊谦-昌都地块东缘的奥陶系-志留系和兰坪-普洱地块西缘的无量山群 (Pz_1), 岩性主要为一套陆缘浅海相碎屑岩夹碳酸盐岩→深水陆棚-斜坡相巨厚碎屑岩夹中基性火山岩组合, 尤其以志留纪深水笔石页岩最为特征, 总体上显示陆缘裂陷盆地中的沉积体系。

晚古生代泥盆纪—石炭纪昌都-思茅地块内部与东西两侧边缘沉积环境出现明显的差异, 前者发育一套以滨浅海相碳酸盐岩及碎屑岩为主的稳定台型沉积序列, 后者形成于陆缘裂陷盆地环境, 发育台缘斜坡相碳酸盐岩滑塌堆积→深水陆棚相碎屑岩→陆缘斜坡相浊积岩, 以及伸展型基性-中基性火山岩组合。近年来区域地质调查与研究揭示, 兰坪-普洱地块西缘景洪南光一带泥盆系南光组碎屑岩中见有中基性火山岩 (俞赛赢, 内部交流)、龙洞河一带石炭系龙洞河组硅质岩中鉴定出晚泥盆世—早石炭世深水放射虫 (冯庆来等, 2002), 兰坪-普洱地块东缘泥盆系—石炭系亦分布有中基性火山岩; 与此相对应, 囊谦-昌都地块东缘泥盆系森扎组 (D_2)、冬拉组 (D_3) 和石炭系菁雀组 (C_1)、汪果组 (C_2) 碳酸盐岩-碎屑岩中见有中基性火山岩分布, 囊谦-昌都地块西缘石炭系杂多群 (C_1) 碎屑岩中亦偶夹火山岩。上述昌都-思茅地块东西两侧泥盆纪—石炭纪陆缘裂陷盆地中的火山-沉积岩序列的发育, 不仅分别与西侧澜沧江和东侧金沙江弧后盆地裂离→洋盆扩张时的拉张环境有关, 产生了昌都-思茅地块东西两侧边缘火山-岩浆弧带中前陆缘弧期的伸展型碱性系列中基性火山岩, 而且构成了地块东西两侧边缘对称发育陆缘火山弧的基座。

二叠纪—三叠纪昌都-思茅地块承接了泥盆纪—石炭纪内部稳定、东西两侧边缘活动的构造古地理格局, 但构造动力学背景与盆地性质发生了两

次重大转变,表现出地块内部与东西两侧边缘地层序列、岩石组合及沉积环境的重大差异。早二叠世晚期受到西侧澜沧江弧后洋盆向东和东侧金沙江弧后洋盆向西的相向俯冲作用制约,昌都-思茅地块东西两侧陆缘裂陷盆地转化为活动边缘盆地(莫宣学等,1993;李定谋等,2002;潘桂棠等,2003;李文昌等,2010),对称发育具有陆缘火山弧性质的中基性-中酸性系列火山岩及碎屑岩-碳酸盐岩组合序列;地块内部则于弧后盆地中形成一套浅海相碳酸盐岩-碎屑岩→海陆交互相碎屑岩夹碳酸盐岩及煤线沉积序列。二叠纪末—三叠纪,受西侧澜沧江和东侧金沙江弧后洋盆俯冲消亡、弧-陆碰撞岛弧造山的强烈作用,昌都-思茅地块内部普遍缺失下—中三叠统,中三叠统黄竹林组、臭水组(T_2)仅见于普洱西侧的小黑江—大平掌—大中河一带,岩性主要为中基性-中酸性系列火山岩及碎屑岩组合(云南省地质矿产局,1990);上三叠统广泛不整合于下伏地层之上,发育滨浅海相含煤线的碎屑岩及碳酸盐岩组合,明显具有(弧后)前陆盆地的性质。晚三叠世末期以后前陆盆地向西迁移,早—中侏罗世除昌都-思茅地块西部发育海陆交互相含薄煤层碎屑岩系以外,中东部广大区域侏罗系—白垩系为强烈陆内拗陷盆地中堆积的巨厚陆相磨拉石建造。

昌都-思茅地块上的古生代盖层大多被断裂肢解为断片,中生界以发育宽缓、简单褶皱为主,新生代陆内汇聚-走滑过程中具有明显的表层脆性变形特征。表现为昌都-思茅地块中部为宽缓的褶皱及轴向断裂,向东西两侧则发育一系列紧密线状褶皱和冲断-走滑断裂,飞来峰构造也较发育,总体构成以盆地中轴为对称的两侧对冲构造格局。

1.4 中咱-中甸地块

中咱-中甸地块西以金沙江结合带为界,东邻德格-义敦-乡城火山-岩浆弧。早古生代属于扬子陆块西部被动边缘的一部分,晚古生代随着甘孜-理塘弧后洋盆的扩张,使得中咱-中甸地块从扬子陆块西缘裂离,形成游离于西侧金沙江和东侧甘孜-理塘弧后洋盆之间的独立块体,造成了该地块与扬子陆块主体沉积特征既有区别又有联系的特点。

中咱-中甸地块呈南北向狭长梭状展布,具有典型的基底与盖层的二元结构,变质结晶基底主要发育一套中—新元古界高绿片岩相-角闪岩相变质岩,Sm-Nd模式年龄为1370~1344 Ma, Rb-Sr等时线年龄为 996 ± 34 Ma(王立全等,2013),与扬子

陆块基底类似。新元古代为一套绿片岩相碎屑岩夹变基性火山岩组合,早期具有复理石建造特征,在太平桥一带显示浊流沉积,属于早古生代被动边缘沉积;晚期出现有硅质岩和变基性火山岩及薄层灰岩夹层。地块的稳定盖层由古生界碎屑岩及碳酸盐岩组合构成,早古生代属于扬子陆块西部被动边缘的一部分,晚古生代中晚期由于甘孜-理塘洋盆的打开,盖层从扬子陆块中裂离出来,形成独立的微陆块(李文昌等,2010)。

晚古生代中咱-中甸地块内部与东西两侧边缘沉积环境出现明显的差异,前者发育一套以滨浅海相碳酸盐岩及碎屑岩为主的稳定台型沉积序列,后者形成于陆缘裂陷盆地环境,发育台缘斜坡相碳酸盐岩滑塌堆积→深水陆棚相碎屑岩→陆缘斜坡相浊积岩,以及伸展型基性-中基性火山岩组合,尤其以晚石炭世—二叠纪火山活动最为强烈,火山岩及砂岩的岩石地球化学特征表现为大陆边缘性质(莫宣学等,1993;梁定益等,1994)。泥盆纪—晚二叠世地块东西两侧边缘盆地中发育的中基性火山活动,可能分别与西侧金沙江弧后盆地扩张→洋壳向西俯冲和东侧甘孜-理塘弧后盆地裂离→洋盆扩张时的拉张环境有关。三叠纪中咱-中甸地块的盆地性质发生了重大转变,显示出东西部地层序列、岩石组合及沉积环境的重大差异。地块西部下三叠统布伦组(T_1)不整合于下伏地层之上,不整合面之上的下—中三叠统为滨浅海相碎屑岩夹碳酸盐岩组合,显示出(早期)前陆盆地的性质,不整合构造事件的发育可能与二叠纪末—早三叠世西侧金沙江弧后洋盆俯冲消亡、弧-陆碰撞聚合作用密切相关;地块东部下—中三叠统与下伏地层连续沉积,岩性主要为陆缘滨浅海相碎屑岩-碳酸盐岩→斜坡相巨厚的复理石细碎屑岩,以及局部夹中基性火山岩、凝灰岩组合,显示陆缘裂陷盆地性质,其形成与东侧甘孜-理塘弧后洋盆扩张时的拉张环境有关。晚三叠世主体受金沙江弧后残留海盆地消亡、弧-陆碰撞造山作用的强烈影响,形成上三叠统滨浅海相含煤线的碎屑岩夹碳酸盐岩组合,并不整合于下伏地层之上,明显具有(晚期)前陆盆地的性质。

中咱-中甸地块的构造变形样式从地块中轴向西部,从无劈理、宽缓的等厚褶皱到同斜倒转、紧密的劈理褶皱,显示由弱到强的变化,呈现一种反极性的造山作用(潘桂棠等,2003;李文昌等,

2010)。这种反极性造山作用使中咱-中甸地块向西逆冲推覆,构成中咱-中甸地块西缘一条重要的区域性规模的逆冲推覆构造带,自晚三叠世之后未见或未接受沉积。

1.5 高压变质带

造山带中的高压-超高压变质岩是古俯冲带及古板块结合带的重要标志,记录了地壳(洋壳或陆壳)物质俯冲、折返的构造演化过程,发现和研究高压-超高压变质岩成为甄别(超)高压变质作用和认识岩石圈深俯冲作用的关键环节(Zhang et al., 2006; Gou et al., 2021; Fu et al., 2021)。近两年来,中国地质调查局成都地质调查中心在云南维西、西藏贡觉地区开展1:5万地质填图时发现多处(退变)榴辉岩出露地,为深入理解金沙江古特提斯演化提供了关键性材料,并为进一步研究(超)高压变质岩和岩石圈深俯冲作用提供了重要线索。

滇西鲁甸地区的(退变)榴辉岩主要呈透镜体状产于石榴云母石英片岩中(图3a),石榴子石及基质中的白云母为多硅白云母($Si = 3.27 \sim 3.53$),指示岩石经历了高压变质作用过程,石榴子石发育进变质生长成分环带(图3b)。岩相学及矿物化学特征显示,退变榴辉岩大致经历了进变质角闪岩相、峰期榴辉岩相、早期退变质以及晚期强退变这4个世代矿物组合,各阶段典型的矿物组合依次为Grt + AmpI + Qtz、Grt + Omp + Rt + Qtz + Phe、Pl + Di + AmpII + Ilm + Spn + Qtz、AmpIII + Pl + Czo + Ilm + Qtz(王启宇等,2020)。退变榴辉岩的地球化学及Sr-Nd-Pb同位素数据显示其原岩为N-MORB型的基性岩类,代表洋壳的物质组成,可能指示金沙江洋壳发生了深俯冲作用。另外,获得相对一致的退变榴辉岩变质作用时代,分别为210.5 Ma(SIMS)、219.8 Ma(LA-ICP-MS)、 226.8 ± 2.4 Ma(Ar-Ar)(本研究未发表数据),精确限定了金沙江洋盆弧-陆

碰撞造山或者是折返的时代为上三叠统诺利期,与区域上昌宁-孟连特提斯洋的俯冲折返时代基本一致,具可比性。

西藏贡觉地区新发现的榴辉岩,以透镜体形式零星分布于金沙江西岸的三岩六乡一线,规模较小,大小约几米至几十米不等,仅在雄松乡西附近出露的规模相对较大(长约30 m,高约10 m)。榴辉岩的主要矿物为石榴石(45~50%)、单斜辉石(约25%)、角闪石(5~10%),次要矿物为黑云母、石英、金红石及白云母(图3c)。电子探针数据揭示单斜辉石具有较高 Na_2O 含量(5.6~6%),相应的硬玉分子数 $Jd = 37 \sim 40\%$,属于绿辉石(Tang et al., 2020)。初步获得峰期变质作用的温度压力条件约为 $P \approx 2.2 \sim 2.34$ GPa, $T \approx 622 \sim 688^\circ C$ 。两件榴辉岩中锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值分别为 240 ± 3 Ma、 244 ± 1 Ma;锆石具有极低的Th/U比值(< 0.01)、Nb、Ta和HREE含量及不显示Eu的负异常,应为榴辉岩相变质成因锆石,表明240~244 Ma应是榴辉岩相变质作用的年龄,可能代表了位于中咱-中甸地块和昌都-思茅地块之间的金沙江古特提斯洋盆向西俯冲-闭合消亡的主峰时间(T_2)(Tang et al., 2020)。金沙江洋盆的闭合时间与昌宁-孟连结合带发现的榴辉岩确定的俯冲消亡时间基本一致(王保弟等,2018;Wang et al., 2020)。

2 金沙江弧盆系发育时代及性质

金沙江弧盆系所有岩浆岩是金沙江洋壳所代表的古特提斯洋俯冲消减、洋盆闭合碰撞等不同构造阶段的产物和记录,我们把本研究及前人已经发表的金沙江弧盆系年龄数据进行统计分析(表1,图4),从中可以看出:金沙江洋盆主体形成于泥盆纪-晚石炭世,二叠纪(300~260 Ma),金沙江洋壳向西俯冲于昌都-思茅地块之下,沿江达-德钦-维

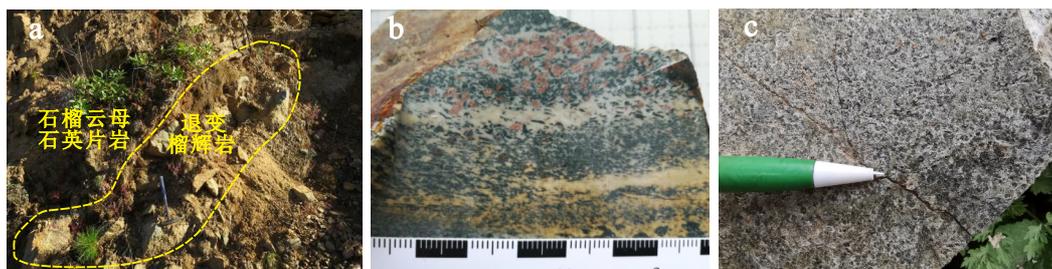


图3 云南鲁甸地区退变榴辉岩(a, b)、西藏贡觉地区榴辉岩(c)野外地质特征

Fig. 3 Field geological feature of retrograde eclogite (a, b) in Ludian, Yunnan and eclogite (c) in Gongjue, Tibet

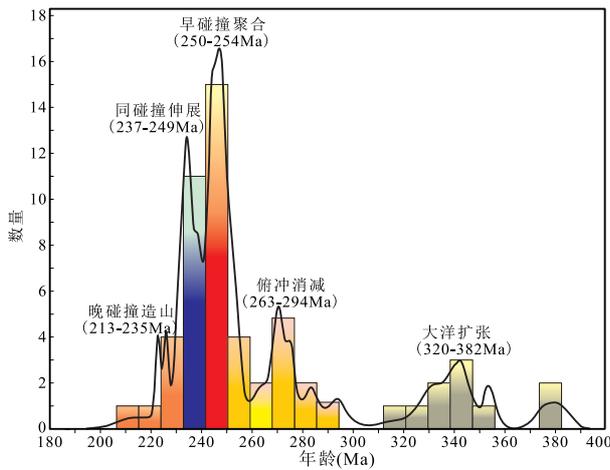


图4 金沙江弧盆系构造-岩浆演化序列直方图

Fig. 4 Histogram of tectono-magmatic evolution sequence of Jinshajiang arc basin system

西一带,形成一套以中基性为主的俯冲型弧火山岩组合;晚二叠世末期—早三叠世(255~240 Ma)进入早碰撞聚合阶段,金沙江洋盆转化为残留海,俯冲的古特提斯洋岩石圈发生回转,引起昌都-思茅陆下软流圈地幔发生扰动上涌,作用于上覆昌都-思茅地块交代富集地幔,以发育一套具类似弧火山岩性质的中酸性火山岩为主;早三叠世早期—中三叠世(249~237 Ma),金沙江俯冲洋壳岩石圈由于俯冲角度的变陡进而板片开始断离,板片断离导致上覆岩石圈板块形成短暂的伸展背景,导致沿江达-德钦-维西一带形成大规模的伸展型“双峰式”火山岩系;晚三叠世(236~212 Ma),由于中甸-中甸地块与昌都-思茅地块持续汇聚和东西向挤压背景之下,金沙江残留海消亡,带内及其后缘的边缘前陆盆地中堆积形成碎屑磨拉石含煤建造,

表1 金沙江弧盆系构造-岩浆演化年龄统计表

Table 1 Age data about tectono-magmatic evolution of Jinshajiang arc basin system

地点	样品编号	岩石名称	测试方法	年龄(Ma)	误差(Ma)	来源
东竹林	DZL02-1	辉长岩	LA-ICPMS	353.9	2.2	王冬兵等, 2012
		辉长岩	SHRIMP	338	6	
金沙江蛇绿岩	011-6	正长岩	SHRIMP	329	7	
	010-1	辉长岩	SHRIMP	320	10	
娘九丁	007-4	奥长闪长岩	SHRIMP	285	6	Jian et al, 2008
吉义独		花岗闪长岩	SHRIMP	268	6	
金沙江蛇绿岩		辉长岩	SHRIMP	264	4	
吉义独	002-1	花岗闪长岩	SHRIMP	263	6	
Soshan 蛇绿岩	SG04	辉绿岩	SHRIMP	382.3	3.9	Jian et al., 2009b
	SG02	花岗岩	SHRIMP	375.9	4.2	
金沙江蛇绿岩	SS03	堆晶辉长岩	SHRIMP	343.5	2.7	
东竹林	SJ-151	奥长闪长岩	SHRIMP	347	7	Zi et al., 2012
吉义独	SJ-101	英云闪长岩	SHRIMP	283	3	
几家顶	JJD03-1	流纹岩	SHRIMP	244.6	2.6	
	JJD03-1	流纹岩	LA-ICPMS	246.7	3.1	
鲁春	JJD02-1	玄武岩	LA-ICPMS	246.1	2	Wang et al., 2014
	LCTK01-1	流纹岩	SHRIMP	245.6	2.4	
叶枝乡	YZ01-1	流纹岩	LA-ICPMS	247.7	1.7	
	YZ01-12	流纹岩	LA-ICPMS	248.5	2.3	
几家顶	JJD03-1	流纹岩	LA-ICPMS	247.4	2.1	王保弟等, 2011
	JJD03-11	流纹岩	LA-ICPMS	249.1	1.6	
阿德电站	AD01-1	流纹岩	LA-ICPMS	275.6	1.5	
风水崖	FSY01-7	流纹岩	LA-ICPMS	270.1	1.6	
		GIN-1	流纹岩	LA-ICPMS	244.4	2.3
德钦	PM11(12)	流纹岩	LA-ICPMS	247.5	1.9	
	PM022A41	流纹岩	LA-ICPMS	234.6	2.1	

续表 1

地点	样品编号	岩石名称	测试方法	年龄(Ma)	误差(Ma)	来源
攀天阁	SJ22	流纹岩	SHRIMP	247	3	Zi et al., 2012
	SJ33	流纹岩	SHRIMP	246	3	
	10SJ28	玄武岩	SHRIMP	245	4	
催依比	SJ82	玄武岩	SHRIMP	237	3	
	SJ4	流纹岩	SHRIMP	242	3	
	SJ44	英安岩	SHRIMP	239	3	
德钦	PM10(16)	流纹岩	LA-ICPMS	272.3	2.4	本研究未发表数据
白茫雪山	DQ01-1a	花岗闪长岩	LA-ICPMS	254.6	1.8	张万平等, 2011
	DQ01-1b	闪长岩	LA-ICPMS	253.5	1.6	
羊拉	TC201-N-4	花岗闪长岩	LA-ICPMS	238.1	5.3	王彦斌等, 2010
	PD3250-2-1	花岗闪长岩	LA-ICPMS	239	5.7	
	JPD1101-2	花岗闪长岩	LA-ICPMS	227.9	5.1	
	BW-11	花岗闪长岩	LA-ICPMS	213.6	6.9	
	YL20	花岗闪长岩	LA-ICPMS	234.1	1.2	杨喜安等, 2011
	YL27	花岗闪长岩	LA-ICPMS	235.6	1.2	
	LiN-1	花岗闪长岩	SIMS	233.1	1.4	Zhu et al., 2011
	LuN-1	花岗闪长岩	SIMS	231	1.6	
	BW-1	花岗闪长岩	SIMS	233.9	1.4	
	11YL-3	花岗斑岩	LA-ICPMS	222.8	1	
书松	SA9738	花岗岩	SHRIMP	340	3	Wang et al., 2000
雪堆	SA9722	花岗岩	SHRIMP	294	3	
贡觉	D0004	石英二长岩	LA-ICPMS	231	1	巩小栋等, 2020
贡觉	D1004-2	安山质熔结凝灰岩	LA-ICPMS	238.3	1.3	段瑶瑶等, 2020
贡觉	D0521-1	榴辉岩	LA-ICPMS	244	1	Tang et al., 2020
	D1537-1	榴辉岩	LA-ICPMS	240	3	
	D1537-2	二长花岗岩	LA-ICPMS	226	1	
车所	15JD-04	安山岩	LA-ICPMS	332	3.3	闫国川等, 2018
	D2660	二长岩	LA-ICPMS	250.6	1.8	He et al., 2020
鲁甸	D2665	二长花岗岩	LA-ICPMS	252.1	1.3	
	D2666	花岗闪长岩	LA-ICPMS	271	2.8	

并不整合在金沙江蛇绿混杂岩之上,形成区域上广泛的角度不整合及酸性岩浆岩。

2.1 金沙江洋盆形成时代与蛇绿岩性质

2.1.1 金沙江洋盆形成时代

金沙江蛇绿岩受强烈的构造肢解作用,没有完整的蛇绿岩层序,但蛇绿岩套的各组成单元(如超基性岩、堆晶辉长岩、均质基性岩、斜长岩及枕状玄武岩等)均以肢解的残块赋存于混杂岩带内。石炭纪—早二叠世早期是金沙江弧后洋盆扩张的重要时期,混杂岩中发现晚泥盆世—早二叠世、早二叠世—晚二叠世放射虫组合。近年来,在金沙江混杂岩带中与洋脊型玄武岩相伴的硅质岩内发现了晚泥盆世—早二叠世放射虫。早石炭世放射虫

Albaillella paradoxa defladree, *Astroentactinia multispinisa* Won; 早二叠世放射虫 *Albaillella* sp., *Pseudoalbailla* sp. 等; 晚泥盆世—早石炭世放射虫 *Entactinia* sp., *Entactinosphera* sp., *Entactinia parva* Won, *E. tortispina* Ormiston et Lane, *Entactinosphera foremanae* Ormiston et Lane, *En. cometes* Foreman, *En. deqinensis* Feng, *Belowea varibilis* (Ormiston et Lane), *Astroentactinia multispinosa* (Won)等。

金沙江混杂岩带洋脊—准洋脊型玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 361.6 ± 8.5 Ma, 吉义独堆晶岩 Rb-Sr 等时线年龄为 264 ± 18 Ma (莫宣学等, 1993)、移山湖辉绿岩墙角闪石 Ar-Ar 坪年龄为 345.7 ± 0.9 Ma 和等时线年龄为 349.1 ± 4.4 Ma; 表明金沙江弧后洋

盆形成时代确定为早石炭世,晚石炭世—早二叠世早期是金沙江弧后洋盆扩展的鼎盛时期,洋盆宽度约为 1800 km(莫宣学等, 1993)。简平等(1999)利用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法获得德钦县书松斜长岩年龄为 340 Ma、德荣县雪堆斜长花岗岩年龄为 294 Ma,认为它们代表金沙江洋盆不同阶段扩张的时代;但在随后的研究中,简平等(2003)发现雪堆斜长花岗岩内含有一组约 300 Ma 和 800 ~ 600 Ma 的继承锆石,从而认为雪堆斜长花岗岩代表得是洋壳消减的事件而不是洋壳扩张事件。路远发等(2000)利用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法获得嘎金雪山岩群中两件玄武岩样品的年龄,两个下交点年龄分别为 362 ± 8 Ma 和 396 ± 7 Ma,两个上交点年龄分别为 2525 ± 12 Ma 和 1387 ± 59 Ma,并认为前者代表金沙江洋盆扩张的年龄,后者代表下伏基底年龄。Jian et al. (2008)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年技术,获得之用角闪辉长岩(010-1)、书松斜长岩(011-6)、白马雪山辉长岩(006-1)年龄分别为 320 ± 10 Ma、 329 ± 7 Ma 和 285 Ma,认为它们反映的是洋盆扩张不同阶段的时代。再后来,Jian et al. (2009b)报道了书松堆晶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 343.5 ± 2.7 Ma,认为其近似代表了金沙江古特提斯洋早期形成的时间。王冬兵等(2012)获得东竹林层状辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 354 ± 3 Ma,代表了洋盆扩张的时代。以上所有资料表明金沙江古特提斯洋在早石炭世已扩张且形成洋壳,暗示其裂解阶段应为更早的泥盆纪。

2.1.2 金沙江蛇绿岩性质

金沙江蛇绿岩一个典型的特征是蛇绿岩普遍具有弱—中等富集轻稀土的地球化学性质,莫宣学等(1993)定义为准洋中脊型蛇绿岩,而 Xu and Castillo (2004)和 Jian et al. (2009a)直接称其为 E-MORB 型蛇绿岩。这种富集特征部分可能是由地壳混染所致,如那些含有较老年龄的捕获锆石的岩石(Jian et al., 2009b),也有可能是继承源区的性质。王冬兵等(2012)在东竹林层状辉长岩获得锆石原位 Hf 同位素均一、校正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+10.3 \sim +12.6$),反映了锆石母岩浆的幔源属性,也指示岩浆源区受富集组分影响。因此表明金沙江蛇绿岩岩浆源区是一个受到了富集组分影响的地幔。另外,不同于蛇绿岩套内的 N-MORB 型基性岩浆,东竹林层状辉长岩的高场强元素 Nb、Ta、Zr 及 Hf 具有明显的负异常,显示出俯冲带岩浆岩的特征。昌都

—思茅地块西缘新发现约 420 Ma 晚志留纪岛弧型火山岩(毛晓长等, 2012)表明金沙江古特提斯弧盆系演化之前原特提斯域内俯冲和岛弧岩浆作用地存在。因而,金沙江古洋壳地幔富集组分很可能源自早期俯冲带物质。

2.2 江达—维西陆缘弧发育时代与岩浆岩性质

2.2.1 俯冲型火山岩形成时代及性质

早二叠世晚期,由于金沙江洋盆向西俯冲消减于昌都—思茅地块之下,在早期被动边缘的基础上转化为活动边缘,进入陆缘弧发育阶段,致使俯冲型火山岩从早到晚发育拉斑玄武岩系列→钙碱性系列→钾玄武岩系列火山岩,标志着岛弧产生—发展—成熟的完整过程(莫宣学等, 1993)。二叠系吉东龙组(P_1)为一套陆相—浅海相—深水盆地中的碎屑岩、碳酸盐岩、放射虫硅质岩和中基性—中酸性系列火山岩,维西县巴迪—叶枝一带具不完全鲍马序列的砂板岩(李兴振等, 1999)。弧火山活动一直持续到晚二叠世,包括禹功组(P_2)和沙木组(P_3)为一套海陆交互相—浅海相碎屑岩、碳酸盐岩和中基性—中酸性系列火山岩。这些沉积记录及岩浆活动反映了古特提斯洋碰撞前的演化过程。

2.2.2 早碰撞聚合火山岩形成时代

早碰撞聚合阶段表示中咱—中甸地块和昌都—思茅地块的已经碰撞对接,金沙江洋盆消亡转化为残留海盆地,俯冲的古特提斯洋岩石圈发生回转,引起昌都—兰坪陆下软流圈地幔发生扰动上涌,作用于上覆昌都—思茅地块交代富集地幔,以发育具有岛弧性质的钙碱性火山岩为特征(图 4)。

区域地质资料显示,江达—德钦—维西陆缘弧双峰式火山岩的下部,发育下三叠统普水桥组、马拉松多组不整合在下伏地层之上。普水桥组(T_1)主要分布于江达—德钦—维西陆缘弧的北部,为一套陆相碎屑岩和大量中酸性弧火山岩建造,底部为紫红色砾岩、砂砾岩,向上为粉砂岩、泥岩及安山岩、英安岩、流纹岩、火山碎屑岩等;产丰富早三叠世双壳类化石 *Umorphotis* cf. *multiformis*, *E. reticulata*, *Pleuromya musculoides*, *Palaeonucula* cf. *strigilata*, *Myophoria (Neoschizodus) laevigata*。马拉松多组($T_{1,2}$)分布在察雅县—贡觉县—芒康县—昌都市一带,岩性为流纹岩、流纹质凝灰岩、砂岩、页岩、板岩、砾岩等;在马拉松地区发育早三叠世双壳类 *Claraia* 化石。这些火山岩具有弧火山岩的地球化学性质(Pan et al., 2012; 王立全等, 2013),目前尚

缺少精确的年代学数据约束,这些火山沉积地层很可能是早碰撞聚合的火山-沉积地质记录,代表了古特提斯洋闭合后弧-陆碰撞作用的开始。另外白芒雪山地区花岗闪长岩及其MME微粒包体LA-ICPMS 锆石U-Pb年龄为255~253 Ma(张万平等,2011),很可能是弧-陆碰撞作用早期侵入岩浆活动的表现。这些沉积记录及岩浆事件很可能是金沙江古特提斯洋闭合后碰撞造山过程早期阶段的响应,本研究把这个阶段称为早碰撞聚合作用阶段。

2.2.3 同碰撞伸展火山岩形成时代及构造背景

同碰撞伸展是造山带中的普遍现象,俯冲大洋岩石圈在碰撞后的回旋和断离,热的软流圈随着俯冲板片的回旋而侵入,在仰冲板块发生伸展作用,使俯冲板块的下界面的热状态发生重大的改变。在中咱-中甸地块与江达-德钦陆缘弧碰撞过程的早期随着古特提斯洋壳的断离,在江达-德钦陆缘弧出现了短暂的平行造山带的伸展过程,产生了“双峰式”火山岩组合,并同时造成幔源岩浆的底侵(图4)。

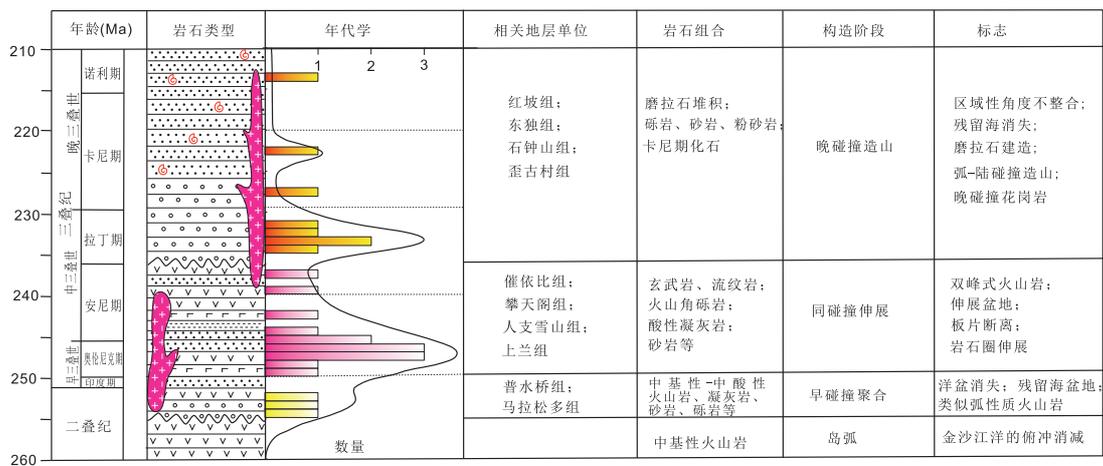


图5 江达-德钦-维西陆缘弧三叠纪沉积-火山地层柱及构造背景图(据 Wang et al., 2014 修改)

Fig. 5 Triassic sedimentary-volcanic stratigraphic column and tectonic background map of Jiangda-Deqin-Weixi continental marginal arc (modified from Wang et al., 2014)

野外地质关系、同位素年代学和地球化学数据表明,江达-德钦-维西岩浆弧早三叠世火山岩以变流纹为主,并有少量变玄武岩,二者比例为10:1,变火山岩SiO₂含量表现出不连续性,集中于基性和酸性两个端元,具有双峰式火山岩的特征,主要形成与板块俯冲过程有关的板内伸展环境(Wang et al., 2014)。结合区域地质资料、三叠纪火山岩的地球化学特征、火山岩的围岩(砂板岩)以及上述的讨论,三叠纪双峰式火山岩发育于扬子陆块内部与金沙江洋壳岩石圈西向俯冲有关板片断离导致的大陆内部岩石圈伸展背景,而不是大陆裂谷、弧后盆地或洋岛等构造环境。

鲁春、几家顶、叶枝乡地区流纹岩锆石U-Pb年龄为249~245 Ma(Wang et al., 2014),代表了江达-德钦-维西岩浆弧火山岩的岩浆结晶地质年代,比前人依据地层的相互关系以及全岩Rb-Sr等时线年龄(236 Ma和235~224 Ma)确认的中-晚三叠世(Wang et al., 2000;王立全等,2002b;李定谋等,2002)认识的要早。王保弟等(2011)在德钦县人支

雪山组流纹岩中获得LA-ICPMS 锆石U-Pb年龄为249~247 Ma,而白芒雪山地区花岗岩SHRIMP年龄为239±6 Ma(简平等,2003),这些岩石被上三叠统石钟山组、甲丕拉组以及歪古村组底砾岩、碎屑岩所覆盖。这些信息均支持江达-德钦-维西陆缘弧三叠纪火山岩的活动时代主体应该是早三叠世晚期-中三叠世早期,并非是以往所认为的中-晚三叠世。Zi et al. (2012, 2013)同样在维西一带攀天阁组、催依比组双峰式火山岩中获得SHRIMP 锆石U-Pb年龄为247~237 Ma,认为此时期也是处于伸展的构造背景。由此表明江达-德钦-维西陆缘弧双峰式火山岩的发育时限为249~237 Ma。

一直以来人们认为,金沙江缝合带区域上大致与哀牢山缝合带同处于一个弧后洋盆消减带,主要依据是同处于昌都-思茅地块的东侧,但哀牢山东侧直接邻接于扬子大陆西南大陆边缘,金沙江带东邻源于扬子大陆分裂的中咱-中甸地块(李文昌等,2010;Pan et al., 2012)。已有资料表明,三叠纪的岩浆作用也同样广泛分布在哀牢山缝合带西

侧的墨江-绿春岩浆弧,在绿春高山寨和柯坪一带分别发育一套中酸性火山岩,与三江地区碰撞型火山岩(莫宣学等,1993)相似,获得大龙凯岩体 SHRIMP 锆石U-Pb年龄为247~244 Ma(Jian et al., 2009b)。

综上所述,已有年代学数据资料表明江达-德钦-维西陆缘弧在早一中三叠世经历了大规模的双峰式岩浆活动,即从北部的江达、中部的德钦县至维西县的叶枝,一直延伸到墨江、绿春一带,均发育早三叠世-中三叠世岩浆事件,并且随着时间的演化,越来越表现为碰撞构造背景下的产物。

2.2.4 晚碰撞造山火山岩形成时代

晚碰撞造山作用发生于中咱-中甸地块与昌都-思茅地块持续汇聚和东西向挤压背景之下的强烈挤压阶段(236~212 Ma),以残留海消失,广泛发育区域性角度不整合及大面积的酸性岩浆岩为特征。区域地质资料显示,江达-德钦-维西陆缘弧双峰式火山岩上部的地层系统更为复杂多变,广泛角度不整合在下伏不同时代的地层之上。昌都地区上三叠统甲丕拉组具有前陆盆地性质的磨拉石堆积特征,主要岩性为紫红色砂岩、泥岩、粉砂岩等,局部产有晚三叠世卡尼期化石 *Schafhaeutlia* sp.。北段的江达地区上三叠统东独组主体为一套滨浅海相-浅海相碎屑岩、碳酸盐岩及大量中酸性火山岩组合,产晚三叠世双壳类化石 *Daonellia* sp., *Unionites* cf. *lettica*, *Bakevellia* ex gr. *albertii*, *Pteria* ex gr. *bituberculum*, *Elegantarca* cf. *subareata*, *Myophoria* (*Neoschizodus*) *Laevigata*, *M.* (*Leviconcha*) cf. *orbicularis*, *Myophoria* (*Costatoria*) sp.。维西一带称作石钟山组,为一套陆相磨拉石建造,泥质灰岩夹层中含丰富晚三叠世卡尼期 *Myophoria minor*, *Costatoria* cf. *minor*, *C. radiata*, *C.* cf. *submultistriata* 等双壳类化石。南部兰坪一带称作歪古村组,主要为一套海陆交互相-滨浅海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积,岩石组合为灰紫色细砂岩、板岩夹细砂岩,底部为黄-紫红色含砾板岩、砂岩,产双壳及芦木化石 *Palaeocardita* sp., *Costatoria* sp., *Cassianella* sp., 最后以含煤线或煤层的碎屑岩结束其海盆演化历史。上三叠统区域不整合可作为晚碰撞造山过程的地质记录与标志。

另外,研究区北侧羊拉地区花岗岩体 SIMS 锆石U-Pb定年表明其侵位时代为234~231 Ma,也被认为是晚碰撞或碰撞后环境下的产物(Zhu et al., 2011),也是同时期构造事件的产物。同时在南部绿春一带发育晚碰撞造山阶段的酸性侵入岩岩基,

主要为黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩,少数为二云母花岗岩,K-Ar 同位素年龄为230~211 Ma。由此,也反映中咱-中甸地块与昌都-思茅地块在晚三叠世时同样发生了强烈碰撞作用。

3 金沙江(-哀牢山)弧盆系构造演化

金沙江(-哀牢山)弧盆系的生成、发展和演化,大体经历了如下几个阶段。

3.1 弧盆系基底属性

从区域上看,金沙江带东侧中咱-中甸地块,石鼓地区原石鼓群羊坡组为一套高绿片岩相-角闪岩相的变质岩,其中斜长角闪岩的Nd模式年龄为1369.9~1343.9 Ma,其变质Rb-Sr等时线年龄为 996.1 ± 33.7 Ma(翟明国等,1990),与扬子陆块变质基底固化时限900~800 Ma(晋宁期)相当,应属扬子陆块的基底,其上古生代保持比较稳定的台型沉积。金沙江带西侧昌都-思茅地块,青海玉树长青可地区宁多群片麻岩内单矿物锆石年龄值为1870 Ma(姚宗富,1992),可与川西恰斯群、滇西哀牢山群相对比,侵入其中的两个花岗岩年龄值分别为1780 Ma和1680 Ma,其上草曲群上部有冰碛砾岩,下部夹玄武岩,二者是南方震旦纪和扬子陆块台型沉积延伸入“三江”地区的两个重要特征。因此,昌都-思茅地块也应属扬子陆块的基底,即震旦纪时,金沙江带两侧的昌都-思茅地块和中咱-中甸地块是连在一起的统一的陆块——“泛扬子陆块”。

早古生代时期,川西、滇西、藏东地区“具有震旦纪及其以后的沉积盖层”(刘增乾,1983)。早古生代加里东期沿金沙江一线及其两侧形成裂陷槽,其代表性沉积物是以原石鼓群陇巴组云母质千枚岩、云母石英千枚岩夹大理岩与角闪片岩,原岩为次深海相硅泥质、砂泥质复理石建造(李兴振等,2002)和中一下奥陶统青尼洞群次深海相复理石碎屑岩建造。金沙江裂陷槽两侧的昌都-思茅地块和中咱-中甸地块保持比较稳定的台型沉积环境。藏东盐井和芒康一带早一中奥陶世为浅海相碳酸盐岩和碎屑岩沉积,缺失上奥陶统,志留系为浅海相砂泥质沉积。中咱-香格里拉地区除见有寒武纪三叶虫的碎屑岩和碳酸盐岩沉积外,尚有奥陶系-志留系的连续生物碳酸盐岩沉积,化石以浅海相的珊瑚、苔藓虫和层孔虫等造礁生物为其特征。下古生界“无论是生物面貌、还是沉积特征,均可与扬子陆块相比较”。

3.2 晚志留世-早二叠世金沙江(-哀牢山)弧后

洋盆扩张

晚志留世—早泥盆世,受特提斯大洋向东俯冲作用的制约,发育吉塘—崇山—澜沧火山弧(亦称为前锋弧),前锋弧东侧即是包括金沙江—哀牢山缝合带在内的藏东—三江多个弧后盆地扩张(图6a),从而拉开了藏东—三江多岛弧盆系演化的序幕(毛晓长等,2012)。

中泥盆世海侵区域扩大,在早泥盆世弧后盆地背景上出现拉张、裂隙,在羊拉—奔子栏—霞若—塔城一带,于裂隙盆地中形成浅海相—次深海相碳酸盐岩、硅泥质—砂泥质复理石建造,并有中基性火山岩喷发。到晚泥盆世时,盆地的拉张、裂隙程度加大,于羊拉—东竹林—石鼓一带为中轴的伸展盆地中,发育以放射虫硅质岩—厚层灰岩—砂岩—泥岩组合为代表的半深海沉积,并伴随拉张型的大陆拉斑玄武岩、中基性火山岩喷发,显示伸展、裂隙作用使裂隙盆地海水变深,火山活动发育,标志着陆壳减薄开裂形成的伸展盆地阶段(图6b)。金沙江(—哀牢山)盆地两侧稳定地块区(西侧昌都—思茅地块,东侧中咱—中甸地块)为陆表浅海盆地中的台型碳酸盐岩—碎屑岩建造。

石炭纪—早二叠世早期,是金沙江弧后洋盆扩张的重要时期(图6b),在晚泥盆世初始洋盆的基础上,石炭纪—早二叠世早期进一步扩张形成弧后洋盆,昌都—思茅地块亦随着石炭纪—早二叠世早期金沙江大洋盆地的形成,而从“泛扬子陆块”裂离出来形成独立的地块或微陆块,形成了以角闪辉长岩、书松堆晶辉长岩、东竹林层状辉长岩、强蛇纹石化橄榄岩等为代表的基性—超基性岩。盆地中沉积以放射虫硅质岩—厚层状灰岩—黑色泥岩—凝灰岩组合为代表的火山源、内源与陆源低密度浊积岩系,以及洋脊型—洋岛型玄武岩喷发,为次深海—深海相碳酸盐岩、火山岩、砂泥质—硅泥质复理石建造。哀牢山缝合带中的龙脖子 Cu 矿床就形成于二叠纪洋岛构造环境。

3.3 早二叠世晚期—晚二叠世洋壳俯冲消减

早二叠世晚期—晚二叠世时期,金沙江(—哀牢山)带的构造背景发生了重大变化。金沙江盆地在早期扩张为大洋盆地的基础上,于早二叠世晚期发生了向西的大规模俯冲消减,其标志是岛弧火山岩和弧后盆地的形成、金沙江(—哀牢山)弧盆系格局发育(图6c)。

在金沙江洋盆中轴地带,由于洋内俯冲消减,分别形成早二叠世晚期—晚二叠世朱巴龙—羊拉

—东竹林洋内火山弧及其洋内弧西侧的西渠河—雪压夹口—东竹林—吉义独—工农弧后盆地(洋壳基底)。朱巴龙—羊拉—东竹林洋内弧环境中沉积形成浅海相碳酸盐岩—碎屑岩,以及次深海相的砂泥质—硅泥质复理石建造,火山弧从早到晚发育石英拉斑玄武岩—玄武安山岩—安山岩—英安岩等火山岩系。洋内火山弧西侧为西渠河—雪压夹口—东竹林—吉义独—工农弧后盆地(洋壳基底),在弧后扩张盆地中形成次深海—深海相的硅泥质—砂泥质复理石建造,相伴发育弧后扩张环境下的辉绿岩席状岩墙群及其之上的拉斑玄武岩、玄武质凝灰岩组合。

在金沙江(—哀牢山)洋盆的西侧,洋壳向西俯冲消减于昌都—思茅地块之下,于早二叠世晚期至晚二叠世,分别形成江达—维西—绿春二叠纪陆缘火山弧及其陆缘弧西侧的昌都—兰坪—普洱弧后盆地(陆壳基底)。陆缘火山弧上的火山—沉积岩系在空间上岩相多变、沉积类型多样,岛弧地势起伏很大,有出露水面发育陆生植物和柱状节理的陆地,亦有潜伏于水下的碳酸盐岩台地及深水谷地,可以出现从陆相—海陆过渡相—浅海相—台地斜坡—深水盆地各种不同沉积相和沉积类型的沉积物,为一岛链体分布的构造古地理格局。弧火山岩从早到晚发育拉斑玄武岩系列→钙碱性系列→钾玄武岩系列火山岩,火山岩性质标志着岛弧产生—发展—成熟的完整过程(莫宣学等,1993)。江达—维西—绿春陆缘火山弧的西侧为昌都—兰坪—普洱盆地(陆壳基底),盆地中沉积形成次稳定型海陆交互相复陆屑含煤碎屑岩、火山岩建造,滨海相复陆屑碎屑岩、火山岩建造以及浅海相碳酸盐岩、碎屑岩、火山岩建造。在金沙江洋盆东侧的中咱—中甸地块区主体保持浅海台地相的碳酸盐岩沉积,中咱—中甸地块西部边缘相对于昌都地块东部活动边缘弧盆系而言,二叠纪则为被动大陆边缘裂陷盆地的演化发展时期,于之用—伏龙桥—尼西—拖顶一带的被动大陆边缘裂陷盆地中,发育陆棚边缘斜坡相的碳酸盐岩滑塌堆积、海底浊积扇沉积和次深海盆地相的砂泥质—硅泥质复理石,以及张裂型基性、中基性火山岩,火山岩及砂岩的岩石地球化学特征表现为被动大陆边缘环境(莫宣学等,1993;李兴振等,2002)。中咱—中甸地块西部边缘裂陷盆地的形成与昌都陆块东缘江达—德钦—维西二叠纪活动边缘弧盆系的发育是相互对应的。

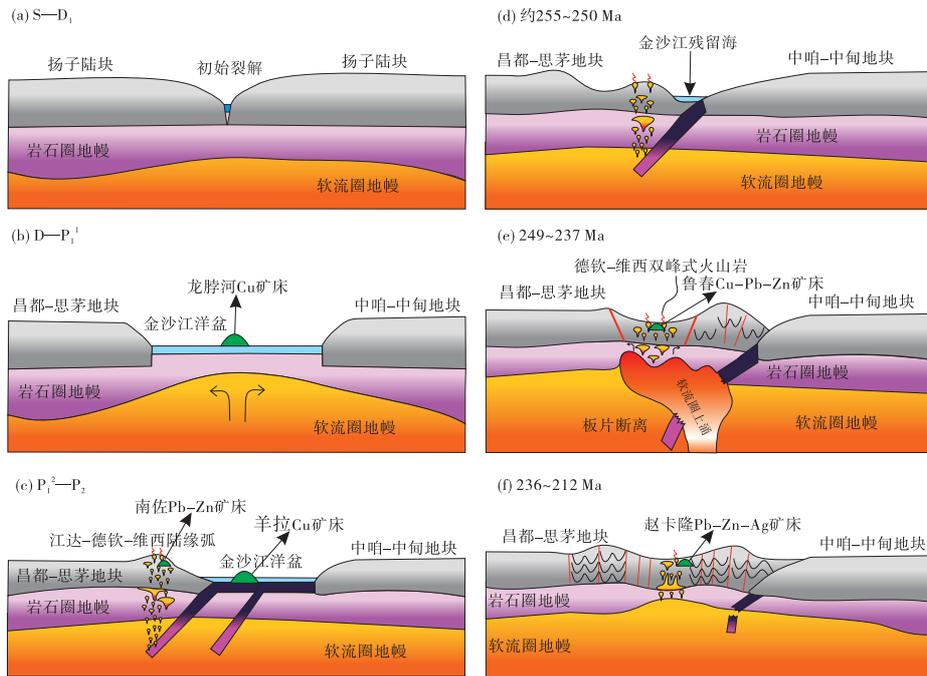


图6 金沙江弧盆系构造演化模式图(据 Wang et al., 2014 修改)

Fig. 6 Model showing the tectonic evolution of Jinshajiang arc-basin system (modified from Wang et al., 2014)

早二叠世晚期—晚二叠世时期,由于金沙江洋壳的向西俯冲消减作用,形成洋内火山弧—弧后盆地和陆缘火山弧—弧后盆地的金沙江多岛弧盆系的空间配置结构。该过程不仅是弧后洋壳扩张向俯冲消减的构造体制转换,同时也是VMS型成矿作用过程。洋内俯冲作用形成的洋内弧环境,形成了以羊拉Cu矿床为代表的VMS型成矿;洋陆俯冲作用发育的陆缘火山弧环境,形成了以南佐Pb—Zn矿床为代表的初始富集或矿化体,其成矿特征类似于拜马(Baimak)型VMS矿床(图6c)。

3.4 早三叠世—晚三叠世弧—陆碰撞造山与盆—山转换

晚二叠世末期—早三叠世早期,金沙江(—哀牢山)弧盆系及东西两侧地块的构造沉积环境发生了剧变,晚二叠世末期金沙江洋盆消减闭合,洋壳消亡,转入弧—陆碰撞演化过程,其标志是江达—维西—绿春碰撞型陆缘弧的发育和昌都—思茅弧后前陆盆地以及金沙江(—哀牢山)残留海盆地的形成。总体说来晚二叠世末期—晚三叠世,金沙江(—哀牢山)弧盆系经历了早碰撞聚合、同碰撞伸展以及晚碰撞造山三阶段的碰撞演化历史,本研究新获得的数据并结合区域地质资料,厘定出如下弧—陆碰撞造山过程的演化模型(图6d-f)。

早碰撞聚合阶段(约255~250 Ma)(图6d):该阶段表示中咱—中甸地块和江达—德钦—维西陆

缘弧之间的初始(或早期)碰撞,金沙江洋盆闭合、消亡转化为残留海,金沙江俯冲洋壳发生回转,引起昌都—思茅地块深部软流圈地幔发生扰动上涌,作用于上覆昌都—思茅地块交代富集地幔,以发育具有弧性质的钙碱性系列火山岩为特征。早三叠世江达—德钦—维西碰撞型陆缘弧和昌都弧后前陆盆地的发育,以及金沙江残留海盆地的形成,可作为早碰撞聚合阶段的地质记录及标志。金沙江残留海盆地东侧的中咱—中甸地块主体为隆升剥蚀区,缺失下三叠统沉积;金沙江残留海盆地西侧,于昌都地块东部边缘江达—戈波一带,由于早期弧—陆碰撞作用形成早三叠世碰撞型陆缘火山弧(如普水桥组、马拉松多组),叠加于二叠纪俯冲型陆缘火山弧之上,发育岛弧性质的玄武安山岩—安山岩—英安岩—流纹岩系列的火山岩组合(李文昌等, 2010),弧火山岩始于早三叠世山麓相紫红色砾岩之后。在德钦一带伴随有255~253 Ma的白芒雪山花岗闪长岩的侵位(张万平等, 2011)。陆缘火山弧西侧的昌都—思茅地块则由二叠纪的弧后盆地转变为弧后前陆盆地,大部分地区因弧—陆碰撞作用而主体隆升,缺失早—中三叠世地层,早三叠世早期只在陆块东部近岛弧一侧的芒康一带,于弧后前陆盆地边缘带中形成河流相、滨海相的碎屑岩与中酸性火山岩建造,不整合于下伏地层之上。

同碰撞伸展阶段(约249~237 Ma)(图6e):同

碰撞伸展是造山带中的普遍现象,俯冲洋壳在碰撞过程中的回旋和断离,热的软流圈随着俯冲板片回旋而侵入,在仰冲板块发生伸展作用,使俯冲板块的下界面的热状态发生重大的改变。在中咱-中甸地块与江达-德钦陆缘弧碰撞过程中随着金沙江已俯冲的洋壳断离,在江达-德钦陆缘弧带出现了短暂的平行造山带的伸展过程,产生了“双峰式”火山岩组合,并同时造成幔源岩浆的底侵。早三叠世晚期-中三叠世早期,金沙江俯冲洋壳由于俯冲角度的变陡进而板片开始断离(Bird, 1978)(图6e),板片断离将导致上覆岩石圈板块形成短暂的伸展背景(Davies et al., 1995; Duretz et al., 2011),致使江达-德钦-维西陆缘弧带由挤压转变为拉张,在原火山弧及其边缘带拉张、裂离形成伸展盆地。由于俯冲板片的断离,岩石圈失重而抬升,软流圈上涌致上覆受俯冲沉积物改造的岩石圈地幔发生减压熔融,形成江达-德钦-维西陆缘弧早三叠世晚期中钾钙碱性玄武质熔体母岩浆基性岩石;同时部分幔源岩浆底侵至下地壳底部,底侵岩浆贡献的热能致使古老地壳物质的重熔而形成该区广泛分布的早三叠世晚期-中三叠世早期酸性火山岩,并伴随有巨大花岗质岩浆侵入,同时发育伸展背景下的辉长辉绿岩脉。金沙江弧盆系贡觉及维西地区的榴辉岩是三叠纪金沙江古特提斯洋闭合后弧-陆碰撞而迅速折返的产物。

该阶段是江达-德钦-维西陆缘弧带中一次重要的VMS型成矿事件,在同碰撞伸展作用导致的岛弧上叠裂谷盆地“双峰式”火山岩系中,形成了以鲁春Cu-Pb-Zn多金属矿床为代表的乌拉尔(Urals)型VMS矿床,具有重要的区域成矿地质背景指向意义。

晚碰撞造山阶段(236~212 Ma)(图6f):中三叠世晚期-晚三叠世(主体为晚三叠世),以洋壳并拖曳地块或陆块持续的后续低角度俯冲为动力,在中咱-中甸地块与江达-德钦-维西陆缘弧的持续汇聚和东西向挤压背景之下,弧-陆(晚期)强烈碰撞并导致下地壳缩短加厚与地壳深熔作用,形成似岛弧(arc-like)型高钾钙碱性-碱性系列中基性-中酸性系列火山岩,构筑了(弧内)火山盆地中拜马(Baimak)型矿床形成的重要VMS成矿环境,并伴随有236~212 Ma的晚碰撞型花岗岩侵入(如羊拉花岗岩体、鲁甸花岗岩体等)。全面而又强烈的晚碰撞造山作用使得残留海盆地主体消亡转化为磨拉石盆地,区域上三叠统广泛的不整合(如石钟山组、歪古村组、甲丕拉组等)可作为晚碰撞造山过

程及其盆-山转换的地质记录及标志。

该阶段是江达-德钦-维西陆缘弧带中又一次重要的VMS型成矿和VMS型叠加成矿事件,一方面,在晚碰撞造山作用形成的中基性-中酸性系列火山岩系,形成了以赵卡隆铁铅锌银多金属矿床为代表的拜马(Baimak)型矿床;另一方面,在强烈碰撞造山过程中伴随发生的中酸性岩浆岩及其斑岩的侵位,在先成VMS型矿体之上,叠加发育岩浆-热液流体作用的矽卡岩-斑岩型矿化,使得矿化元素进一步富集、矿床规模增大以及成矿元素的多元化(如羊拉Cu矿床),形成了以鲁春Cu-Pb-Zn多金属矿床为代表的乌拉尔(Urals)型VMS矿床,具有重要的区域成矿地质背景指向意义。晚碰撞造山环境中拜马(Baimak)型VMS矿床的识别,以及岩浆-热液叠加成矿作用的确定,开阔了三江特提斯造山带区域成矿地质背景研究与矿产资源调查的新思路。

3.5 晚三叠世末期后碰撞陆内造山至陆内汇聚-走滑转换

晚三叠世晚期开始,金沙江带进入全面的后碰撞陆内碰撞造山阶段。在金沙江造山带内及其后缘的边缘前陆盆地中堆积形成碎屑磨拉石和含煤建造,并不整合超覆在金沙江蛇绿构造混杂岩之上。金沙江缝合带西侧的昌都-思茅地块区,晚三叠世晚期早阶段于弧后前陆盆地中形成河湖相-滨海相碎屑磨拉石建造,并不整合盖在下伏不同时代地层之上;晚三叠世晚期晚阶段继续其弧后前陆盆地的发展、演化,形成浅海相碳酸盐岩至海陆交互相含煤碎屑岩建造;至晚白垩世,前陆盆地逐渐萎缩消亡。

新生代是三江造山带乃至整个青藏高原的形成与隆升时期,最后的造山作用形成大规模的冲断推覆、大规模的走滑剪切和由冲断推覆及拉伸作用形成的地表及岩石圈规模的分层拆离和滑脱。一方面形成一些断陷、走滑和拉伸、拉分盆地;另一方面又对早期形成的山系叠加、改造和地壳的强烈增厚,并伴随着强烈的岩浆活动、变质作用、构造作用和有色金属、贵金属矿产的成矿作用。金沙江(-哀牢山)弧盆系演化各个阶段形成的VMS矿床皆定形于陆内汇聚-走滑转换过程中,并不同程度地受到构造作用、岩浆活动的叠加、改造,显现出一矿多矿种、矿床类型复杂多样的特点。

4 结论

(1)金沙江弧盆系是西南三江多岛弧盆系之

一,主要构造单元由金沙江-哀牢山缝合带和江达-德钦-维西陆缘弧构成,整体受控于昌宁-孟连原特提斯洋东向俯冲消减的制约。

(2)金沙江缝合带主要由嘎金雪山-贡卡-霞若-新主洋壳消减蛇绿混杂岩亚带、朱巴龙-羊拉-东竹林洋内弧增生杂岩带、西渠河-雪压夹口-吉义独-工农弧后盆地增生杂岩带构成,洋盆发育时限主要为晚志留世-二叠纪,古洋壳地幔受到了早期俯冲带物质富集组分的影响,形成于弧后盆地的构造环境。

(3)江达-德钦-维西陆缘弧组成复杂,先后经历了俯冲消减、早碰撞聚合、同碰撞伸展和晚碰撞造山等构造事件叠加改造。俯冲消减期(300~260 Ma)主要形成了一套岛弧型岩浆作用,早碰撞聚合期(255~250 Ma)以发育具有岛弧性质的钙碱性火山岩为特征,碰撞伸展期(249~237 Ma)以“双峰式”火山岩组合为特征,晚碰撞造山期(236~212 Ma)以广泛发育区域性角度不整合及大面积的酸性岩浆岩为特征。

(4)金沙江弧盆系经历了晚志留世-早二叠世金沙江(-哀牢山)弧后洋盆扩张、早二叠世晚期-晚二叠世洋壳俯冲消减、早三叠世-晚三叠世弧-陆碰撞造山与盆-山转换、晚三叠世末期后碰撞陆内造山至陆内汇聚-走滑转换等阶段的演化过程,每个阶段控制着不同类型的VMS型矿床。

致谢:2位审稿专家及编辑部提出了许多建设性的意见和建议,在此致谢。

潘桂棠研究员是国内外著名的区域地质与构造学家,对我国地质事业的发展做出了重要贡献。他在青藏高原形成演化、多岛弧盆系、区域成矿、青藏高原新生代构造与全国成矿地质背景等领域取得了一系列有重要影响的原创性认识和理论成果。2003年以来,我有幸开始认识潘老师,在他的学术思想指引和对青藏高原执着、川藏铁路痴迷等精神的感召下,使我也在不停地前进,不断地去攀登科学高峰。潘桂棠研究员是我非常敬重和爱戴的老师,他的高尚品德和深厚学术造诣是我学习的榜样,在潘桂棠研究员八十华诞之际,谨以此文表达我对潘老师的敬意和深情感谢。祝潘老师健康长寿。

参考文献(References):

Davies J H, von Blanckenburg F, 1995. Slab breakoff: a model of

lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 129(1-4): 85-102.

Deng J, Wang Q F, Li G J, et al., 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 138: 268-299.

Duretz T, Gerya T V, May D A, 2011. Numerical modelling of spontaneous slab breakoff and subsequent topographic response[J]. *Tectonophysics*, 502(1-2): 244-256.

Fu Y Z, Peng Z M, Wang B D, et al., 2021. Petrology and metamorphism of glaucophane eclogites in Changning-Menglian suture zone, Bangbing area, southeast Tibetan Plateau: A evidence for Paleo-Tethyan subduction, *China Geology*, 4: 111-126. doi: 10.31035/cg2021017.

Gou Z B, Wang B D, Wang D B, et al., 2021. High pressure garnet amphibolites in ophiolitic mélangé from the Changning-Menglian suture zone, southeast Tibetan Plateau: P-T-t path and tectonic implication, *China Geology*, 4: 95-110. doi: 10.31035/cg2021010.

He J, Wang B D, Wang Q Y, 2020. Subduction and collision of the Jinsha river Paleo-Tethys: constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry of the Ludian batholith in the Jiangda-Deqen-Weixi continental margin arc [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4): 972-987.

Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al., 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks[J]. *Lithos*, 113(3-4): 748-766.

Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al., 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. *Lithos*, 113(3-4): 767-784.

Jian P, Liu D Y, Sun X M, 2008. SHRIMP dating of the Permian-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5-6): 371-384.

Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al., 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3-14.

Tang Y, Qin Y D, Gong X D, et al., 2020. Discovery of eclogites in Jinsha River suture zone, Gonjo County, eastern Tibet and its restriction on Paleo-Tethyan evolution[J]. *China Geology*, 3(1): 83-103.

Wang B D, Wang L Q, Chen J L, et al., 2014. Triassic three-stage collision in the Paleo-Tethys: Constraints from magmatism in the Jiangda-Deqen-Weixi continental margin arc, SW China [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 475-491.

Wang B D, Wang L Q, Chen J L, et al., 2017. Petrogenesis of Late Devonian-Early Carboniferous volcanic rocks in northern Tibet: new constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the Tethyan Ocean [J]. *Gondwana Research*, 41: 142-156.

Wang B D, Wang L Q, Pan G T, et al., 2013. U-Pb zircon dating of Early Paleozoic gabbro from the Nantinghe ophiolite in the

- Changning-Menglian suture zone and its geological implication[J]. Chinese Science Bulletin, 58(8): 920-930.
- Wang H N, Liu F L, Santosh M, et al., 2020. Subduction erosion associated with Paleo-Tethys closure: deep subduction of sediments and high pressure metamorphism in the SE Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 82: 171-192.
- Wang X F, Metcalfe I, Jian P, et al., 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18(6): 675-690.
- Xu J F, Castillo P R, 2004. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain[J]. Tectonophysics, 393(1-4): 9-27.
- Zhang K J, Cai J X, Zhang YX, et al., 2006. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 245(3-4): 722-729.
- Zhu J J, Hu R Z, Bi X W, et al., 2011. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean[J]. Lithos, 126(3-4): 248-264.
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al., 2012. Triassic collision in the Paleo-Tethys Ocean constrained by volcanic activity in SW China[J]. Lithos, 144-145: 145-160.
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al., 2013. Late Permian-Triassic magmatic evolution in the Jinshajiang orogenic belt, SW China and implications for orogenic processes following closure of the Paleo-Tethys[J]. American Journal of Science, 313(2): 81-112.
- 邓军, 王庆飞, 李龚健, 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析[J]. 岩石学报, 32(8): 2225-2247.
- 段瑶瑶, 唐渊, 秦雅东, 等, 2020. 三江北段贡觉三叠纪火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学, 45(8): 2920-2931.
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军, 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录[J]. 地学前缘, 16(6): 291-302.
- 冯庆来, 沈上越, 刘本培, 等, 2002. 滇西南澜沧江构造带大新山组放射虫、硅质岩和玄武岩研究[J]. 中国科学(D辑), 32(3): 220-226.
- 巩小栋, 唐渊, 秦雅东, 等, 2020. 晚三叠世金沙江结合带碰撞作用: 贡觉石英二长岩年代学、地球化学及 Hf 同位素证据[J]. 地球科学, 45(8): 2905-2919.
- 何世平, 李荣社, 王超, 等, 2011. 青藏高原北羌塘昌都地块发现 ~4.0Ga 碎屑锆石[J]. 科学通报, 56(8): 573-582.
- 何世平, 李荣社, 于浦生, 等, 2012. 青藏高原北羌塘他念他翁山吉塘岩群西西岩组时代的确定[J]. 地质学报, 86(6): 985-993.
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛, 2003. 滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 24(4): 337-342.
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 等, 1999. 金沙江蛇绿岩中斜长岩和斜长花岗岩的 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 15(4): 590-593.
- 李定谋, 王立全, 须同瑞, 等, 2002. 金沙江构造带铜金矿成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-251.
- 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等, 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 1-107.
- 李兴振, 江新胜, 孙志明, 等, 2002. 西南三江地区碰撞造山过程[M]. 北京: 地质出版社.
- 李兴振, 刘文均, 王义昭, 等, 1999. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 1994. 早二叠世冈瓦纳北缘构造古地理环境与杂砾岩成因剖析[J]. 特提斯地质(18): 61-73.
- 刘本培, 冯庆来, CHONGLAKMANI C, 等, 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. 地学前缘, 9(3): 161-171.
- 刘增乾, 1983. 从地质新资料试论冈瓦纳北界及青藏高原地区特提斯的演变[C]//青藏高原地质文集. 北京: 中国地质学会. 11-24.
- 路远发, 战明国, 陈开旭, 2000. 金沙江构造带嘎金雪山岩群玄武岩铀-铅同位素年龄[J]. 中国区域地质, 19(2): 155-158.
- 毛晓长, 王立全, 李冰, 等, 2012. 云县-景谷火山弧带大中河晚志留世火山岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(5): 1517-1528.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等, 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-205.
- 牟传龙, 王立全, 2000. 云南德钦及邻区晚三叠世火山沉积盆地演化[J]. 矿物岩石, 20(3): 23-28.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等, 2016. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. 地学前缘, 23(6): 1-23.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020. 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. 沉积与特提斯地质, 40(3): 1-19.
- 潘桂棠, 王立全, 张万平, 等, 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书 1:1500000[M]. 北京: 地质出版社.
- 潘桂棠, 许强, 侯增谦, 等, 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 任飞, 潘桂棠, 尹福光, 等, 2017. 西南三江地区洋板块地层特征及构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 37(4): 9-16.
- 孙晓猛, 简平, 2004. 滇川西部金沙江古特提斯洋的威尔逊旋回[J]. 地质论评, 50(4): 343-350.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2011. 三江上叠裂谷盆地人支雪山组火山岩锆石 U-Pb 定年与地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 25-33.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2018. 三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造演化[J]. 地球科学, 43(8): 2527-2550.
- 王成善, 李祥辉, 胡修棉, 2003. 再论印度-亚洲大陆碰撞的启动时间[J]. 地质学报, 77(1): 16-24.
- 王冬兵, 王立全, 尹福光, 等, 2012. 滇西北金沙江古特提斯洋早期演化时限及其性质: 东竹林层状辉长岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 28(5): 1542-1550.
- 王国芝, 王成善, 2001. 西藏羌塘基底变质岩系的解体和时代厘定[J]. 中国科学(D辑), 31(S1): 77-82.
- 王立全, 侯增谦, 莫宣学, 等, 2002a. 金沙江造山带碰撞后地壳伸展背景——火山成因块状硫化物矿床的重要成矿环境[J]. 地质学报, 76(4): 541-556.
- 王立全, 李定谋, 管士平, 等, 2002b. 云南德钦鲁春-红坡牛场上叠裂谷盆地“双峰式”火山岩的 Rb-Sr 年龄值[J]. 沉积与特提斯地质, 22(1): 65-71.
- 王立全, 潘桂棠, 丁俊, 等, 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书 1:1500000[M]. 北京: 地质出版社.

- 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等, 1999. 金沙江弧—盆地时空结构及地史演化[J]. 地质学报, 73(3): 206-218. 王立全, 潘桂棠, 李才, 等, 2008. 藏北羌塘中部果干加山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——兼论原-古特提斯洋的演化[J]. 地质通报, 27(12): 2045-2056.
- 王启宇, 牟传龙, 王保弟, 等, 2020. 滇西鲁甸金沙江结合带新发现退变榴辉岩[J]. 地球科学, 45(8): 2978-2988.
- 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 等, 2010. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1833-1844.
- 西藏自治区地质矿产局, 1993. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 闫国川, 王保弟, 刘函, 等, 2018. 藏东江达中石炭世弧火山岩的厘定及其构造意义[J]. 地球科学, 43(8): 2715-2726.
- 杨喜安, 刘家军, 韩思宇, 等, 2011. 云南羊拉铜矿床里农花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄、矿体辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(9): 2567-2576.
- 姚宗富, 1992. 青海玉树县长青可地区元古界地层特征[J]. 西藏地质(1): 1-6.
- 尹福光, 王冬兵, 王保弟, 等, 2017. 西南三江造山带地层区划[J]. 沉积与特提斯地质, 37(4): 1-8.
- 云南省地质矿产局, 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 翟明国, 从柏林, 乔广生, 等, 1990. 中国滇西南造山带变质岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年代学[J]. 岩石学报(4): 1-11.
- 张旗, 周德进, 赵大升, 等, 1996. 滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回: 岩浆活动记录和深部过程讨论[J]. 岩石学报, 12(1): 17-28.
- 张万平, 王立全, 王保弟, 等, 2011. 江达-维西火山岩浆弧中段德钦岩体年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石学报, 27(9): 2577-2590.

The temporal and spatial framework and its tectonic evolution of the Jinsha River arc-basin system, Southwest China

WANG Baodi^{1,2,3}, WANG Liquan^{2,3}, WANG Dongbing^{2,3}, LI Fenqi^{2,3}, TANG Yuan^{2,3}, WANG Qiyu^{2,3}, YAN Guochuan^{3,4}, WU Zhe^{3,4}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 3. Research Center for Tibetan Plateau Geology, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 4. Graduate school of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: As the important part of the Sanjiang archipelagic arc-basin systems in southwest China, the tectonic evolution of the Jinsha River arc-basin system is of great significance to understanding the spatial-temporal pattern of Paleo-Tethys archipelagic arc-basin systems. In the light of the new geological survey data, research results and analysis data, this paper systematically summarizes the material composition and tectonic characteristics of different tectonic units of Jinsha River arc-basin system, and discuss the tectonic evolution process and its effect on controlling volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits. Jinsha River Ocean mainly developed during the Late Silurian to Permian, and the ancient oceanic mantle was affected by the early subduction zone which is enriched in material formed in back-arc basin environment. As a complex epicontinental arc, Jomda-Deqen-Weixi continental margin arc has experienced four evolutionary stages, including subduction stage (300-260 Ma), the early collision convergence stage (255-250Ma), syn-collision extension stage (249-237Ma) and late collision orogenesis stage (236-212Ma), resulting in the formation of various types of magmatic activities and basins. High-pressure metamorphic belts such as Gonjo eclogite and Weixi retrograde eclogite have been recently recognized in Jinsha River suture zone, and provided key evidence for restoring the complex evolution of subduction-collision orogeny of Jinsha River Tethys. The new findings combined with the regional geological data, the evolutionary processes of the Jinsha River arc-basin system are constructed, mainly including the Late Silurian to Early Permian back-arc ocean basin expansion stage, the Late Early Permian to the Late Permian oceanic crust subduction stage, the Early Triassic to the Late Triassic arc-continental collision orogeny and basin-mountain conversion stage and the late Late Triassic post-collision intra-continental orogeny to intra-continental convergence-strike-slip transition stage. Each stage has controlled different types of VMS deposits.

Key words: Jinsha River suture zone; paleo-Tethys; archipelagic arc-basin systems; eclogite belt; tectonic evolution; tectonic geology