

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03002

三江北段晚三叠世构造—岩浆作用和几个相关的科学问题

朱弟成, 王 青, 詹琼崙, 谢锦程

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室; 中国地质大学(北京) 科学研究院, 北京 100083)

摘要:中国西南三江北段的松潘—甘孜褶皱带和义敦地体以强烈的晚三叠世构造—岩浆活动为特征。松潘—甘孜褶皱带的岩浆活动主要发生在228~190 Ma(峰期时代为约210 Ma), 略晚于义敦地体的岩浆活动(236~200 Ma, 峰期时代为约216 Ma)。金沙江洋可能经历了西向和东向的双向俯冲, 于晚二叠世末—早三叠世初闭合, 甘孜—理塘洋可能是金沙江洋东向俯冲背景下形成的弧后盆地, 在217 Ma以前已经闭合。松潘—甘孜褶皱带和义敦地体晚三叠世岩浆岩均属于碰撞后岩浆作用的产物, 可能分别与岩石圈拆沉和东向俯冲的金沙江洋俯冲板片的断离有关。这些晚三叠世碰撞后岩浆活动记录了地幔物质的贡献, 幔源镁铁质岩浆的结晶分异作用在中酸性岩浆岩的形成过程中起到了重要作用, 反映了地壳的净生长。三叠纪不同地体之间的碰撞导致了明显造山作用, 造成了具有空间差异性的地壳增厚和山脉隆升。

关键词:松潘—甘孜褶皱带; 义敦地体; 甘孜—理塘洋; 金沙江洋; 晚三叠世岩浆作用

中图分类号:P542; P588.1

文献标识码:A

青藏高原东部的义敦地体和松潘—甘孜褶皱带(图1)(本文称之为三江北段)是西南三江特提斯构造域重要的构造—岩浆岩带和多金属成矿带(莫宣学等, 1993; 侯增谦等, 2003; 潘桂棠, 2003; Deng et al., 2014; 许志琴等, 2018)。三叠纪是义敦地体和松潘—甘孜褶皱带形成和演化的重要阶段, 表现为巨厚复理石地层的发育(四川省地质矿产局, 1991; Nie et al., 1994; Weislogel et al., 2010), 复理石地层强烈的褶皱变形(许志琴等, 1992; Dirks et al., 1994; Harrowfield and Wilson, 2005; Reid et al., 2005), 角度不整合的形成(四川省地质矿产局, 1991; Meng et al., 2005; Burchfiel and Chen, 2012; 邓宾等, 2013), 大规模晚三叠世岩浆作用(Zhan et al., 2018, 2020, 2021)和有关的多金属成矿作用(莫宣学等, 1993; 侯增谦等, 2003; 付小方等, 2017; 许志琴等, 2018; Xu et al., 2020)。尽管目前关于义敦地体和松潘—甘孜褶皱带的沉积岩、岩浆岩和构造地质研究已经积累了大

量资料, 但由于该地区复杂的地质特征, 夹持在多个微板块之间, 并且与两个古特提斯洋盆(金沙江洋和甘孜—理塘洋)的演化密切相关, 因而在义敦地体和松潘—甘孜褶皱带晚三叠世岩浆岩成因、形成的构造背景、深部动力学过程等方面, 还一直存在争议或未能得到很好的限定。

本文第一作者所在的研究小组, 在潘桂棠先生的亲自指导下, 于2014年9月开展了第一次三江北段的野外地质考察, 从此开始了针对三江特提斯构造域的构造—岩浆演化研究。本文的目的是, 在综合分析相关的大量文献基础上, 展示本研究小组对三江北段(松潘—甘孜褶皱带和义敦地体)与晚三叠世构造—岩浆作用相关的一些科学问题的思考, 以求抛砖引玉, 促进三江地区晚三叠世构造—岩浆演化的深入讨论。

1 三江北段区域地质简况

我国青海省南部、四川省西部、云南省西部、西

投稿日期:2021-01-23; 改回日期:2021-03-03

作者简介:朱弟成(1972—), 男, 教授, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩浆作用与青藏高原形成研究。
E-mail: dchengzhu@163.com

资助项目: 本文受国家重点基础研究发展计划(973计划)课题“碰撞造山斑岩—矽卡岩型复合成矿系统与深部过程”(2015CB452604)资助

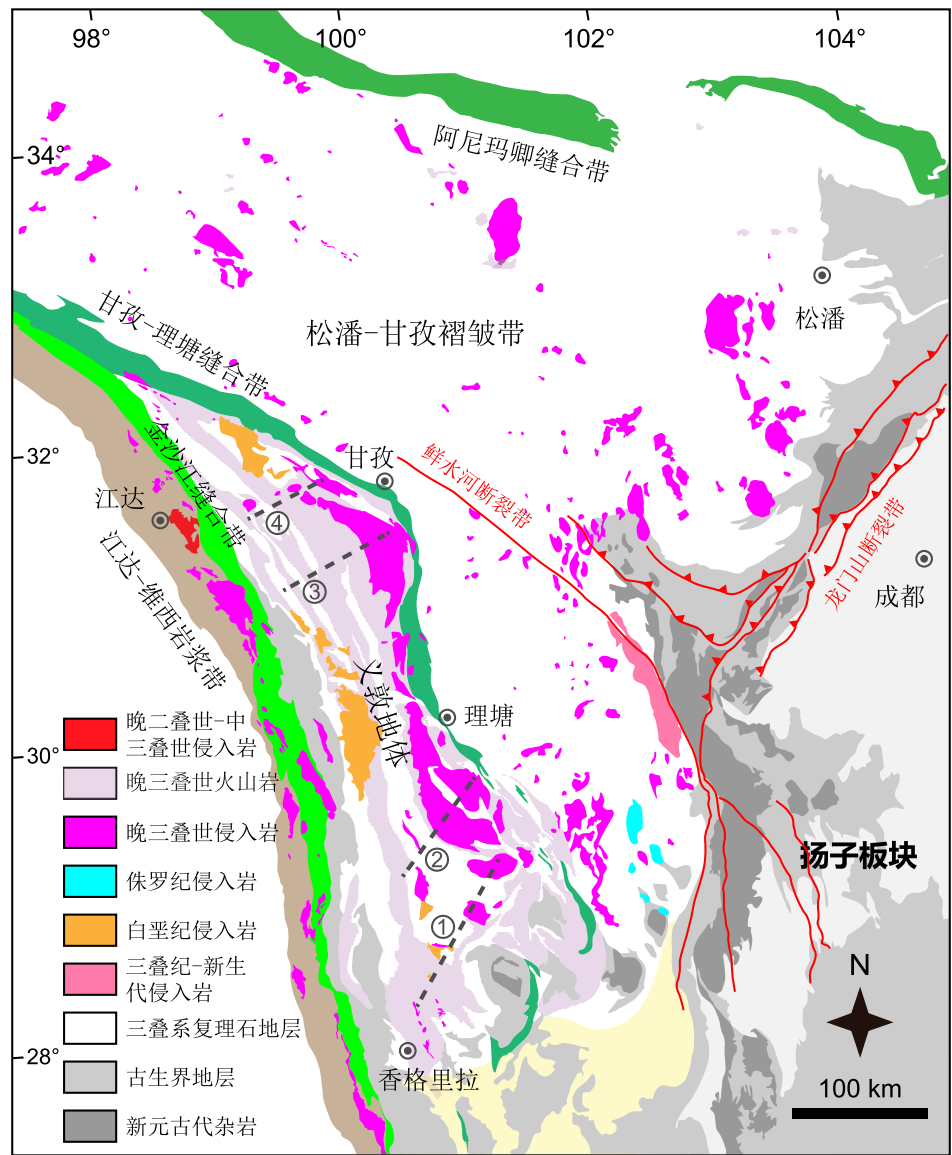


图1 青藏高原东部义敦地体和松潘-甘孜褶皱带地质简图(改自王立全等, 2013)
图中数字编号为四条横跨义敦地体的晚三叠世岩浆岩大剖面

Fig. 1 Simplified geological map of Yidun Terrane and Songpan-Garze fold belt in eastern Tibetan Plateau (modified from Wang et al., 2013)

藏自治区东部之间的横断山脉地区三江并流,自西向东依次发育怒江、澜沧江、金沙江,被称为西南三江地区。在构造上,该区域属于特提斯构造域东段,因而被称为三江特提斯构造域(莫宣学等, 1993)。本文关注的松潘-甘孜褶皱带和义敦地体位于三江特提斯构造域北段,二者以甘孜-理塘缝合带为界(图1)。义敦地体向西以金沙江缝合带为界与北美塘地体相连,松潘-甘孜褶皱带向北以阿尼玛卿缝合带为界与东昆仑造山带相连,向东以龙门山断裂带为界与扬子板块相接(潘桂棠等, 2009, 2016; Pan et al., 2012)。

松潘-甘孜褶皱带(Roger and Calassou, 1997),也称松潘-甘孜造山带(许志琴等, 1992)、可可西里-松潘前陆盆地(Pan et al., 2012)、松潘甘孜增生造山楔(de Sigoyer et al., 2014)或松潘-甘孜地体(夏磊等, 2017),自东向西横亘于青藏高原北部。其显著的特征是广泛出露三叠系复理石地层,最厚达10~15 km(Nie et al., 1994)。这套复理石地层遭受了强烈地褶皱变形(许志琴等, 1992; Dirks et al., 1994; Harrowfield and Wilson, 2005),卷入变形的最年轻地层为上三叠统雅江组,其上被更年轻且弱变形并且夹煤层的八宝山组火山岩地

层角度不整合覆盖(四川省地质矿产局, 1991; Meng et al., 2005; 邓宾等, 2013)。

义敦地体大致呈南北向位于松潘-甘孜褶皱带西侧(图1), 通常称为义敦岛弧(莫宣学等, 1993; 侯增谦等, 2003)。但因其整体并不是洋壳型基底而是陆壳型基底(侯增谦等, 2003), 所以称之为义敦地体或义敦岩浆弧可能更为合适。根据地层差异, 义敦地体可以划分为东、西两部分。西部出露变质的古生界碳酸岩、碎屑岩和夹在其中的镁铁质火山岩(四川省地质矿产局, 1991), 被称为中咱地体。东部主体出露的是三叠系夹火山岩的复理石地层, 在其最南端的穹隆中还出露有古生界地层和新元古代杂岩。东部三叠系地层的中、下统为不含火山岩的页岩和砂岩夹一些灰岩, 往上被上三叠统地层角度不整合覆盖(Burchfiel and Chen, 2012)。上三叠统底部以一套玄武质火山岩开始, 往上岩性组合依次变化为灰岩夹玄武质火山岩, 砂岩和页岩, 中、酸性火山岩与砂岩和页岩互层夹少量灰岩, 最上部过渡为非海相的含煤地层。

甘孜-理塘缝合带和金沙江缝合带均被认为是代表了闭合的古特提斯洋分支洋盆(莫宣学等, 1993; Deng et al., 2014)。甘孜-理塘缝合带呈弧形弯曲状位于义敦地体东侧, 向北在玉树一带汇入金沙江缝合带, 向南延伸至木里一带。金沙江缝合带位于义敦地体西侧, 呈近南北走向, 往北逐渐呈东西走向跨越了整个青藏高原北部, 向南与哀牢山缝合带相连(Pan et al., 2012)。两条缝合带均出露由超镁铁质和镁铁质岩浆岩以及相伴的灰岩和放射虫硅质岩等海相沉积岩组成的蛇绿混杂岩(刘宝田等, 1983; 莫宣学等, 1993; 孙晓猛等, 1997)。

2 三江北段晚三叠世岩浆作用

2.1 松潘-甘孜褶皱带

松潘-甘孜褶皱带广泛发育晚三叠世侵入岩。与火山岩零星出露, 并且分布于该带东北部不同, 侵入岩广泛出露, 但主要分布于松潘-甘孜褶皱带的东部, 往西岩体数量变少, 规模变小。这些中生代岩体多呈岩株形式产出, 部分岩体出露面积大于100平方千米, 呈岩基形式产出, 如松潘-甘孜褶皱带东北部的羊拱岩基和年宝玉则岩基(Zhang et al., 2006, 2007)和松潘-甘孜褶皱带东南部九龙地区的日鲁库岩基(Zhan et al., 2020)。侵入岩以中、酸性花岗岩类为主, 少量为基性的侵入岩, 火山岩主

要为安山岩和英安岩类。目前报道的锆石 U-Pb 年代学显示, 这些岩浆岩的年龄从约 228 Ma 变化到 190 Ma, 主要发生在约 210 Ma(图2)(Zhan et al., 2018), 其中火山岩的锆石 U-Pb 年龄为大约 227 ~ 205 Ma。

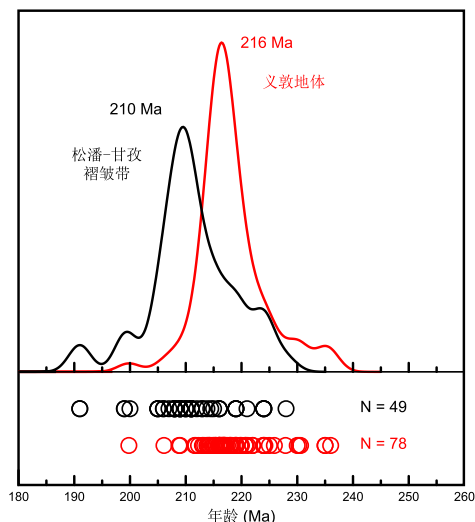


图2 义敦地体和松潘-甘孜褶皱带晚三叠世岩浆岩锆石 U-Pb 年龄核密度图(年龄数据 Zhan et al., 2018, 2021)

Fig. 2 Kernel density estimates of zircon U-Pb ages of Late Triassic magmatic rocks in the Yidun Terrane and Songpan-Garze fold belt(Age data from Zhan et al., 2018, 2021)

这些晚三叠世岩浆岩主体属于钙碱性系列, 部分岩体呈现出碱性或碱性到亚碱性过渡特征(图3a, b)。其中, 钙碱性系列主要为高钾钙碱性系列, 少量为中钾钙碱性系列(图3c)。碱性系列和碱性到亚碱性系列过渡的代表性岩体为桑日麻正长岩(Cai et al., 2009)以及牛心沟正长岩(Yuan et al., 2010)。钙碱性系列的岩浆岩大多数为含有角闪石的I型花岗岩类(Roger et al., 2004; Zhang et al., 2006; Xiao et al., 2007; 赵永久, 2007; Cai et al., 2009; Yuan et al., 2010; 袁静等, 2011; 鄢圣武等, 2015; Chen et al., 2017b; Deschamps et al., 2017; Zhan et al., 2020), 是松潘-甘孜褶皱带岩浆岩的主体类型, 普遍发育镁铁质包体。部分钙碱性岩体不含角闪石, 如可尔因二云母花岗岩, 具有过铝质特征(图3d), 被认为是S型花岗岩类(时章亮等, 2009; Deschamps et al., 2017)。此外, 松潘-甘孜褶皱带北部的年宝玉则岩体被认为是A型花岗岩(Zhang et al., 2007)。晚三叠世的岩浆活动伴随发育伟晶岩型锂矿床, 如甲基卡伟晶岩型锂矿床(付小

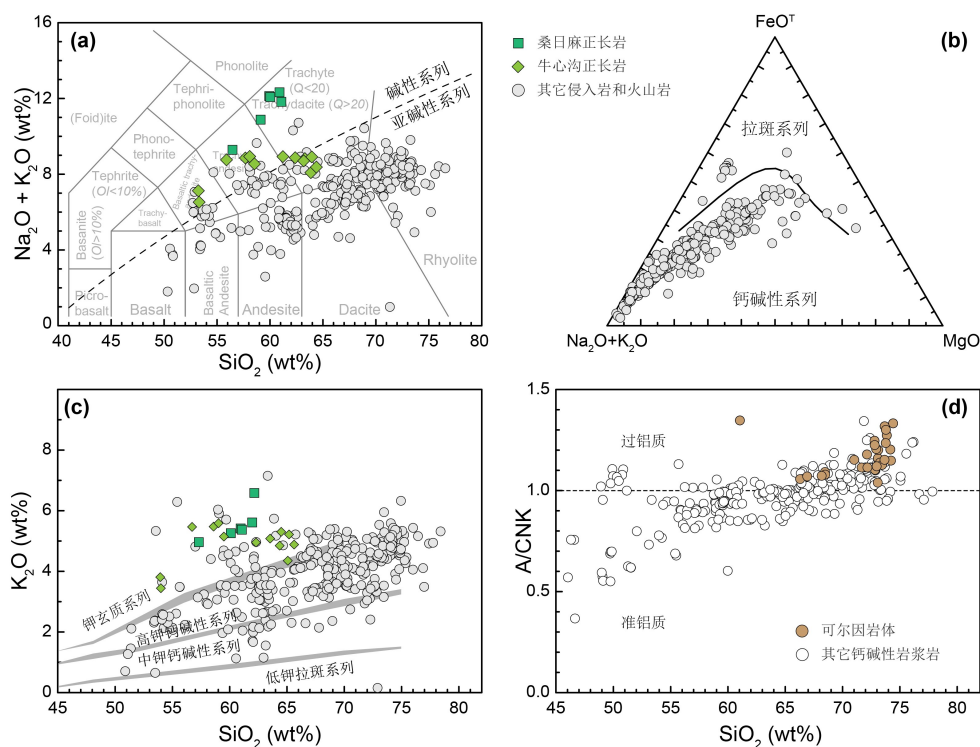


图3 松潘-甘孜褶皱带晚三叠世岩浆岩地球化学特征

Fig. 3 Geochemical plots of Late Triassic magmatic rocks in the Songpan-Garze fold belt

方等, 2017; 许志琴等, 2018; Xu et al., 2020)。

2.2 义敦地体

义敦地体最显著的特征是发育两期中生代岩浆作用(侯增谦等, 2003)。一期为晚三叠世(大约 236 ~ 200 Ma, Liu et al., 2006; Reid et al., 2007; Wang et al., 2011, 2013, Leng et al., 2012, 2014; He et al., 2013; Peng et al., 2014; Wu et al., 2016, 2017; Zhan et al., 2021), 一期为晚白垩世(大约 106 ~ 75 Ma, Reid et al., 2007; 吴涛等, 2014; Wang et al., 2014; Fei et al., 2015; Cao et al., 2016; Yang et al., 2016; 王楠等, 2017; Gong et al., 2017), 另有极少量晚侏罗世(约 152 Ma)岩浆岩出露(Wu et al., 2014)。晚三叠世岩浆作用在义敦地体最为强烈, 包括火山岩和侵入岩。其中火山岩产于复理石地层中, 广泛分布于整个义敦地体, 而侵入岩主要集中于义敦地体东部, 并且主体呈大型岩基出露, 如沙鲁里-东措岩基和省母岩基(图 1)。火山岩包括玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩(莫宣学等, 1993; 侯增谦等, 2003; Wang et al., 2011, 2013; Leng et al., 2014; Chen et al., 2017a)。侵入岩主要为花岗岩类, 少量为中性和镁铁质岩浆岩(侯增谦等, 2003; Liu et al., 2006; Wu et al., 2016;

Zhan et al., 2021)。报道的锆石 U-Pb 年龄显示晚三叠世岩浆岩的年龄从约 236 Ma 变化到约 200 Ma (Zhan et al., 2021), 主要发生在约 216 Ma(图 2), 其中火山活动的年龄为 230 ~ 216 Ma。

在义敦地体晚三叠世岩浆岩中, 北部的呷村玄武岩(Wang et al., 2013)和南部的下小柳玄武岩(Chen et al., 2017a)为拉斑系列, 最南端的甬哥正长岩(曹殿华等, 2007; 姜丽莉等, 2015)属于碱性系列, 其它侵入岩和火山岩均属于钙碱性系列(图 4a, b)。钙碱性系列多数为中钾和高钾钙碱性岩石(图 4d)。大多数侵入岩为含有角闪石的 I 型花岗岩类, 而义敦北部阿吉森多二云母花岗岩具有强烈过铝质特征(图 4d), 被认为是 S 型花岗岩(Wu et al., 2017)。此外, 呷村地区的流纹岩(Wang et al., 2013)同样具有强烈过铝质特征(图 4d), 但这可能与其高分异性质(分异指数为 93 ~ 94)有关。I 型花岗岩类中多发育大量的镁铁质包体或者在岩体中局部见到镁铁质岩浆岩与酸性岩浆岩机械混杂的现象。伴随着该期岩浆作用, 义敦地体还发育诸多矿床, 如义敦北部的呷村块状硫化物矿床和义敦南部的普朗斑岩型矿床(侯增谦等, 2003; 2004; 潘桂棠, 2003; Li et al., 2014; Cao et al., 2019)。

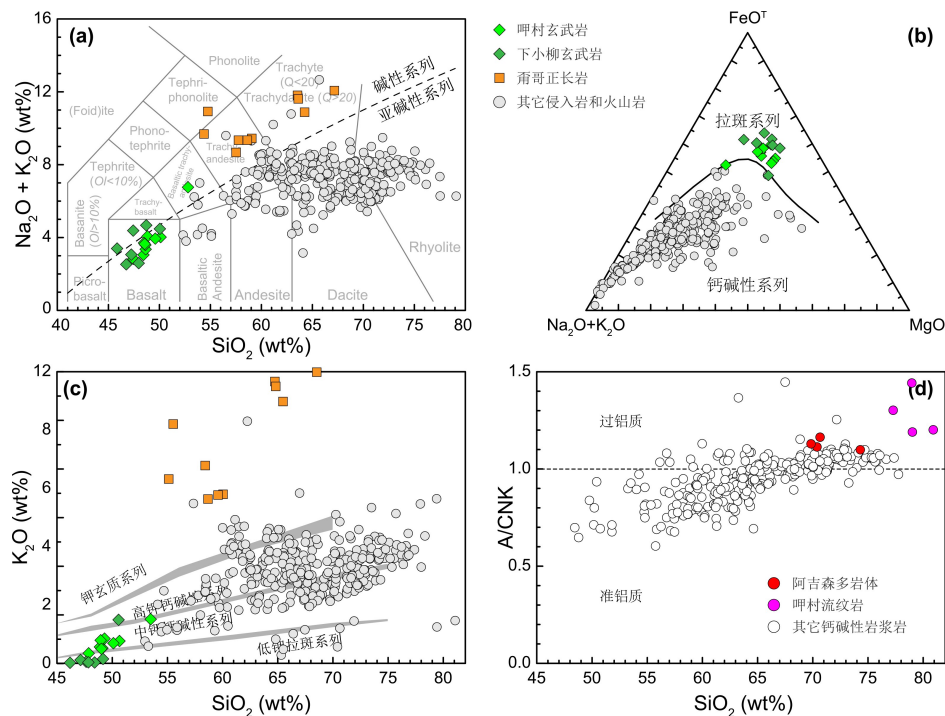


图4 义敦地体晚三叠世岩浆岩地球化学特征

Fig. 4 Geochemical plots of Late Triassic magmatic rocks in the Yidun Terrane

3 三江北段晚三叠世岩浆成因和构造背景的不同观点

目前对于松潘-甘孜褶皱带和义敦地体的晚三叠世岩浆成因和构造背景,还存在不同认识。例如,对松潘-甘孜褶皱带晚三叠世岩浆岩形成的构造背景,就有俯冲环境和碰撞-碰撞后环境两种端元模型解释。在碰撞-碰撞后模型中, Roger et al. (2004) 认为这些岩浆岩形成于松潘-甘孜褶皱带增厚的沉积盖层和扬子型基底的部分熔融。后续的研究发现部分岩浆岩具有埃达克质岩的高 Sr/Y 特征,结合同期 A 型花岗岩的发育,提出了增厚下地壳拆沉作用模型。这种模型认为埃达克质岩起源于(拆沉)增厚基性下地壳的部分熔融(Zhang et al., 2006, 2007; Xiao et al., 2007),得到了后续研究的广泛引用(Cai et al., 2009; 时章亮等, 2009; Cai et al., 2010; 万传辉等, 2011; 袁静等, 2011)。Yuan et al. (2010) 基于牛心沟和太阳河岩体高 Ba、Sr 特征以及猛古岩体的埃达克质岩特征,提出的成因解释为:在岩石圈挠曲过程中,增厚下地壳和岩石圈地幔发生部分熔融,并伴随有软流圈物质的贡献。在俯冲背景模型中, Pullen et al. (2008) 和 Zhang et al. (2014) 认为埃达克质岩起源于沿着昆仑造山带南边北向俯冲的古特提斯洋壳在后撤过

程中的部分熔融,其它 I 型花岗岩类起源于裂解的弧基底的部分熔融,松潘-甘孜地区类似于弧后盆地。de Sigoyer et al. (2014) 认为松潘-甘孜褶皱带为洋壳基底,发育南北双向俯冲,认为岩浆形成于洋盆闭合晚期阶段的板片回转,伴随着俯冲板片在与扬子板块连接处的撕裂。同时认为钙碱性 I 型花岗岩类起源于富集岩石圈地幔和扬子型基底混合源区的部分熔融和后续演化;碱性岩石起源于软流圈地幔与富集岩石圈地幔混合源区的部分熔融;S 型花岗岩类起源于松潘-甘孜褶皱带沉积物的部分熔融。Deschamps et al. (2017) 认为松潘-甘孜褶皱带南缘存在(甘孜-理塘或金沙江)古特提斯的北向俯冲作用。在这种构造背景下,高 Ba、Sr 的岩浆岩(太阳河岩体)起源于富集地幔楔的部分熔融,并发生了结晶分异作用,发育堆晶成因的角闪辉长岩,而 S 型花岗岩(可尔因岩体)起源于松潘-甘孜褶皱带沉积物的部分熔融。

尽管义敦地体晚三叠世岩浆活动的主体通常被认为与甘孜-理塘洋西向俯冲有关(侯增谦和莫宣学, 1991; 莫宣学等, 1993; Mo et al., 1994; 侯增谦等, 2003; Wang et al., 2011, 2013; Leng et al., 2012, 2014; Wu et al., 2016, 2017),但也有一些研究认为是晚三叠世碰撞-碰撞后岩浆岩。例如,侯增谦等(2001, 2003)根据早期的 K-Ar、Ar-Ar 和

Rb-Sr 等同位素年龄,将义敦地体晚三叠世岩浆作用以大约 208 ~ 206 Ma 为界划分为俯冲阶段和同碰撞阶段。Liu et al. (2006) 根据马熊沟岩体和东措岩基的地球化学特征,认为二者起源于地壳岩石的部分熔融,属于同碰撞-碰撞后岩浆岩。随着大量锆石 U-Pb 定年数据的积累,Wu et al. (2016) 认为 216 Ma 的岩浆峰期与俯冲板片的断离有关,由此提出俯冲作用结束于 216 Ma 之前。Peng et al. (2014) 基于甘孜-理塘缝合带东侧的松潘-甘孜褶皱带发育与义敦地体近同期的晚三叠世岩浆岩,其中还包括 A 型花岗岩 (Zhang et al., 2007),认为义敦地体晚三叠世岩浆活动与俯冲无关,而是形成于造山后垮塌背景。由于义敦地体晚三叠世花岗岩类多具有富集的全岩 Sr、Nd 同位素组成和锆石 Hf 同位素组成,主流观点认为这些岩浆岩起源于古老地壳物质的部分熔融,地幔物质贡献很少 (Liu et al., 2006; Reid et al., 2007; He et al., 2013; Peng et al., 2014; Wu et al., 2017),也有观点认为起源于地幔岩浆与地壳岩浆之间的大规模混合 (侯增谦等, 2001)。

4 几个相关科学问题的讨论

4.1 甘孜-理塘洋的属性和闭合时间

迄今对甘孜-理塘洋的属性还存在不同认识。一种观点认为甘孜-理塘洋是由扬子陆块的陆缘裂谷扩张形成 (刘宝田等, 1983; 莫宣学等, 1993), 洋盆宽度大约为 450 km (莫宣学等, 1993)。另一种观点认为甘孜-理塘洋是西侧金沙江洋东向俯冲背景下形成的弧后盆地 (侯立玮等, 1983; Roger et al., 2010; 潘桂棠等, 2020)。本文收集了前人报道的甘孜-理塘缝合带内蛇绿混杂岩中超镁铁质-镁铁质岩浆岩成分数据,发现几乎所有的玄武质岩石都位于洋壳岩石成分范围之外,而与俯冲环境的岩石成分范围类似 (图 5a)。需要指出的是,甘孜附近出露的蛇绿岩中约 292 Ma 的基性岩被认为具有 N-MORB 的特征,并且被认为产于扩张的洋中脊 (闫全人等, 2005),但这些基性岩和伴随的超基性岩均具有一定程度的 Nb、Ta 负异常 (图 5b),这指示这些蛇绿混杂岩中的岩浆岩更可能形成于俯冲环境。所以甘孜-理塘洋可能是一个弧后盆地,这些蛇绿混杂岩可能属于 SSZ 型蛇绿岩 (潘桂棠等, 2020)。

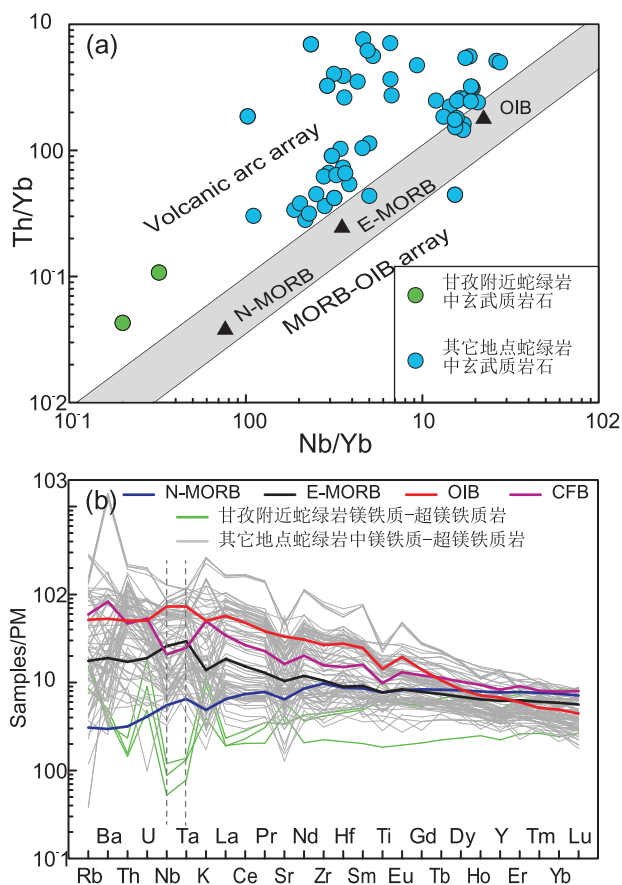


图 5 甘孜-理塘蛇绿混杂岩中镁铁质-超镁铁质岩石地球化学特征

Fig. 5 Geochemical plots of mafic and ultramafic rocks in the Garze-Litang ophiolitic complex

甘孜-理塘洋的闭合时限同样存在争议,早期的构造演化模型均认为其闭合于晚三叠世 (侯立玮等, 1983; 莫宣学等, 1993)。对于具体的闭合时间,如果义敦地体大于 208 ~ 206 Ma 和小于 208 ~ 206 Ma 的岩浆活动分别形成于俯冲阶段和同碰撞阶段 (侯增谦等, 2001, 2003),那么意味着甘孜-理塘洋盆闭合于 208 ~ 206 Ma。如果西向俯冲的甘孜-理塘洋板片在大约 216 Ma 发生断离,那么意味着甘孜-理塘洋闭合于 216 Ma 之前 (Wu et al., 2016)。另外一种观点认为,义敦地体晚三叠世岩浆活动与俯冲无关,而是形成于造山后垮塌背景,认为甘孜-理塘洋于中三叠世前闭合 (Peng et al., 2014)。这一观点得了碎屑锆石研究结果的支持。一些研究根据义敦地体中、上三叠统复理石和松潘-甘孜褶皱带东南部的中、上三叠统地层具有一致的碎屑锆石年龄频谱,认为二者在接受沉积时,已经拼合在一起,从而提出甘孜-理塘洋在中三叠世

之前已经闭合(Jian et al., 2019)。笔者所在研究小组在呈岩株侵位于甘孜-理塘缝合带内部的花岗岩中,获得了最老大约 217 Ma 的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄(朱弟成等,未发表数据)。所以笔者也倾向于认为,甘孜-理塘洋至少在义敦地体峰期岩浆活动之前已经闭合,义敦地体晚三叠世岩浆活动主要形成于碰撞后背景。

4.2 金沙江洋的属性和闭合时间

虽然对金沙江洋是由裂谷扩张形成还是作为弧后盆地打开以及洋盆规模均存在争议(莫宣学等, 1993; 孙晓猛等, 1997; 王冬兵等, 2012; 王保弟等, 2021),但学术界的基本共识是金沙江洋经历了洋脊扩张、大洋俯冲和洋盆关闭等较为完整的威尔逊旋回过程(莫宣学等, 1993; 孙晓猛等, 1997; 王冬兵等, 2012)。这是因为金沙江缝合带蛇绿混

杂岩中发育具亏损同位素组成但却不具有 Nb、Ta 负异常的 E-MORB 型玄武岩(Xu and Castillo, 2004)和中三叠世(244 ~ 240 Ma)榴辉岩(Tang et al., 2020)。金沙江洋闭合的时限基本不存在争议,早期的研究大致限定在二叠纪末期—三叠纪早期(莫宣学等, 1993),最晚不晚于中三叠世末期(孙晓猛等, 1997)。后来的研究根据对金沙江缝合带内和缝合带西侧江达-维西岩浆弧同碰撞和碰撞后岩浆岩的定年结果,将金沙江洋闭合的时限限定在大约 247 ~ 240 Ma(Reid et al., 2007; Zi et al., 2013)。最近报道的金沙江缝合带内榴辉岩的年龄为 244 ~ 240 Ma,部分呈捕虏体产于 226 Ma 的二长花岗岩内(Tang et al., 2020),同样表明金沙江洋的闭合时间不晚于中三叠世早期。

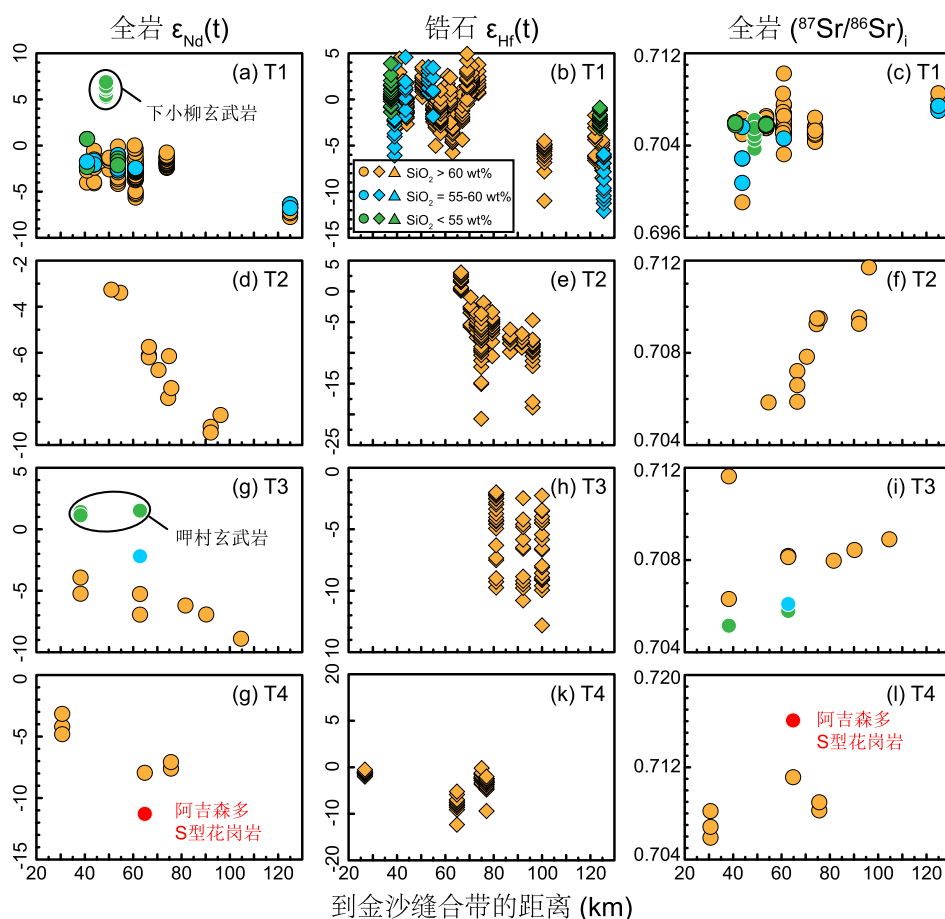


图6 横跨义敦地体四条晚三叠世岩浆岩剖面(T1-T4)的同位素组成与到金沙江缝合带距离的变化关系(Zhan et al., 2021)
a—全岩Nd同位素;b—锆石Hf同位素;c—全岩Sr同位素。四条横跨义敦地体的岩浆岩剖面位置见图1中虚线:1—香格里拉-省母剖面;2—乡城-东措剖面;3—呷村-沙鲁里剖面;4—肃错玛-加多措剖面。

Fig. 6 Whole-rock Nd and Sr isotopes, and in situ zircon Hf isotopes of Late Triassic igneous rocks along four transects (T1 to T4) across the Yidun Terrane plotted against distance to the Jinshajiang suture zone

4.3 同位素空间变化趋势与金沙江洋的东向俯冲

学术界对金沙江洋的俯冲极性还存在不同看法。多数观点用金沙江洋西向俯冲来解释其西侧江达-维西岩浆弧的形成(莫宣学等, 1993; 潘桂棠等, 2001; 孙晓猛和简平, 2004; 高睿等, 2010; 闫国川等, 2018)。但是也有部分学者认为金沙江洋存在东向俯冲。例如, 早期一些研究者描述了金沙江东侧得荣附近的两种混杂岩, 发现靠近金沙江一侧为蛇绿混杂岩, 远离金沙江一侧为泥砾混杂岩, 结合世界上其它地区出露的两类混杂岩, 认为该地区的蛇绿混杂岩位于俯冲板块一侧, 而泥砾混杂岩位于仰冲板块一侧, 因此金沙江洋发生了向东俯冲(张之孟和金蒙, 1979)。随后对金沙江东侧得荣-乡城一带的火山岩研究表明, 西侧以拉斑系列为主, 东侧以钙碱性系列为主, 结合火山岩的其它地球化学特征(如平均 K_2O 含量自西侧向东侧增加), 认为西侧为俯冲板块, 而东侧为仰冲板块, 意即金沙江洋发生了向东俯冲(张之孟等, 1981)。再后来, 横跨义敦地体的构造剖面研究发现, 义敦地体西部发育向东倾斜的早三叠世变形, 可能反映了金沙江洋的东向俯冲(Reid et al., 2005)。

笔者所在研究小组通过横切义敦地体的四条晚三叠世岩浆岩剖面发现, 这些晚三叠世岩浆岩的全岩 Sr、Nd 同位素和锆石 Hf 同位素显示由西向东逐渐变富集的特征(图 6)(Zhan et al., 2021)。详细的地球化学分析表明, 这种同位素空间变化趋势很可能受控于东西向地幔源区的差异, 即源区由不同比例的亏损的软流圈地幔物质与富集的岩石圈地幔物质组成, 西部亏损的软流圈地幔贡献多, 而向东富集的岩石圈地幔贡献更多。因此, 这种同位素空间变化趋势刻画了一个西薄东厚的楔形岩石圈地幔结构(图 7)。这种独特的同位素空间变化趋势在地球上其它造山带同样存在, 而且都表现出全岩 Sr、Nd 同位素和锆石 Hf 同位素自俯冲带一侧向远离俯冲带一侧越来越富集的特征(Zhu et al., 2011; Chapman et al., 2017)。这种对比表明, 义敦地体晚三叠世楔形的岩石圈地幔结构可能受控于其西侧金沙江洋曾经发生过的东向俯冲作用。需要指出的是, 这些跨越义敦地体的岩浆岩剖面, 无法限定金沙江洋是否存在西向俯冲作用。如果金沙江洋西向和东向俯冲作用均存在, 则表明金沙江洋可能发育双向俯冲作用(Roger et al., 2010)。

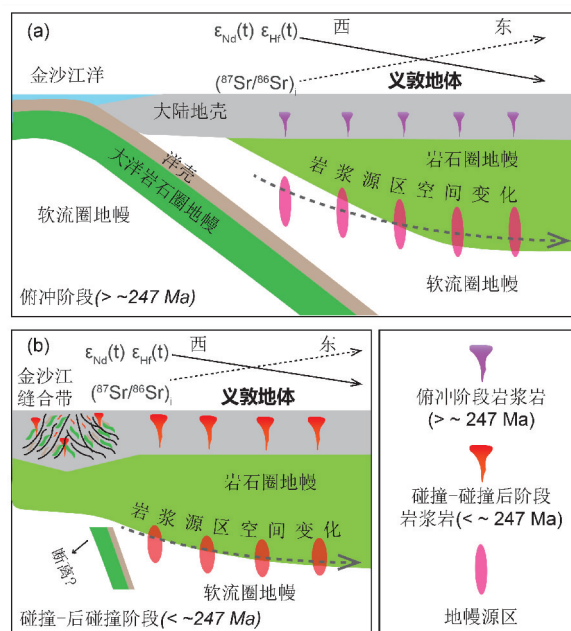


图 7 义敦地体三叠纪深部岩石圈结构和动力学背景示意图(Zhan et al., 2021)

(a) 金沙江洋的东向俯冲导致义敦地体楔形岩石圈地幔的形成, 并发育俯冲有关的岩浆作用; (b) 金沙江洋闭合形成金沙江缝合带, 义敦地体楔形的岩石圈地幔结构大致保留并且成为碰撞-后碰撞岩浆岩的主要源区。地幔源区中岩石圈地幔和软流圈地幔不同的贡献, 形成了特征的岩浆岩同位素成分的空间变化趋势(带箭头的虚线和实线)

Fig. 7 Schematic diagram showing the lithospheric architecture and geodynamic background of Yidun Terrane during the Triassic (after Zhan et al., 2021)

4.4 碰撞后岩浆作用与地壳生长

目前已有证据表明, 甘孜-理塘洋可能闭合于松潘-甘孜褶皱带和义敦地体内晚三叠世岩浆活动之前。同时, 可能发育东向俯冲的金沙江洋也在晚三叠世之前已经闭合。因此, 松潘-甘孜褶皱带和义敦地体的晚三叠世岩浆活动, 均属于碰撞后阶段的岩浆活动。考虑到义敦地体部分 217~215 Ma 岩浆岩中存在一定数量的 253~248 Ma 锆石(Peng et al., 2014), 笔者倾向性地认为形成于金沙江洋东向俯冲阶段的岩浆岩, 既可能被剥蚀了, 也可能隐藏于义敦地体深部(Zhan et al., 2021)。另外, 部分俯冲有关的岩浆岩还有可能残留在金沙江缝合带内, 例如白马雪山地区 283 Ma 的辉长岩、玄武质和安山质熔岩被认为是残留的弧岩浆岩, 虽然这些岩浆岩被解释为金沙江洋西向俯冲的产物(Hu et al., 2019)。实际上, 义敦地体的这种地质情况, 与英国加里东造山带十分相似。英国加里东造山带广泛

发育碰撞-后碰撞阶段岩浆岩,俯冲阶段岩浆岩出露很少(Miles et al., 2016),零星保存于缝合带中或隐伏于地壳深部(Cooper et al., 2011; Badenszki et al., 2019)。

另一个值得关注的问题是,义敦地体和松潘-甘孜褶皱带大规模晚三叠世花岗岩类是否存在幔源物质的贡献,从而反映地壳净生长。这是因为义敦地体晚三叠世花岗岩类多数具有富集的同位素特征,通常被解释为代表了古老地壳物质的部分熔融,而幔源物质贡献很少,地壳净生长有限。但是,这些已有研究忽视了这些花岗岩体(基)中发育的镁铁质包体或者在岩体中见到镁铁质岩浆岩与酸性岩浆岩机械混杂的现象。尽管部分研究认为包体的发育反映了岩浆混合(Wu et al., 2020),但是并未明确是否是起源于幔源和壳源两种截然不同源

区的岩浆之间的混合,还是同源岩浆不同演化程度的产物之间的混合。笔者最近通过系统收集前人报道的义敦地体晚三叠世岩浆岩数据,并结合自己新的数据,发现主要岩体或岩基的花岗岩类与时空上紧密相关的镁铁质岩浆岩具有相似的同位素组成,并且在全岩成分上具有演化的关系,特别是全岩 Zr 和 P_2O_5 含量随着 SiO_2 变化呈现出折线的趋势(图 8),这些都表明幔源镁铁质岩浆的结晶分异在花岗岩类形成过程中发挥了重要作用(Zhan et al., 2021)。因此,义敦地体大规模晚三叠世花岗岩类的发育对地壳净生长具有贡献。

与义敦地体类似,松潘-甘孜褶皱带晚三叠世的花岗岩类多具有富集的同位素特征,传统观点也认为是由地壳岩石部分熔融而来。但大量镁铁质包体的发育或在岩体中出现的镁铁质岩浆岩与酸性岩浆岩机械混杂的现象同样表明,幔源岩浆的贡献不能忽略。但由于目前缺乏单个岩基或岩体基性到酸性成分连续的数据,难以限定幔源岩浆结晶分异的影响。不过部分研究识别出了堆晶的角闪辉长岩,表明幔源岩浆的结晶分异对花岗岩类的形成发挥了重要作用(Deschamps et al., 2017)。

4.5 晚三叠世碰撞造山与地壳增厚

三叠纪时期,三江北段发生了一系列重要地质事件,包括金沙江洋在晚二叠世和早三叠世闭合,甘孜-理塘洋在中三叠世前闭合,导致羌塘地体、义敦地体、松潘-甘孜之间以及松潘-甘孜褶皱带与北部东昆仑造山带的碰撞和松潘-甘孜褶皱带向扬子板块的逆冲等,这些不同地体之间的碰撞构成了规模宏大的印支碰撞造山作用的一部分(许志琴等, 2012)。这些碰撞导致地壳褶皱变形与缩短(许志琴等, 1992; Harrowfield and Wilson, 2005; Yan et al., 2011),引起地壳增厚。已有大量的构造、变质和岩浆作用研究结果均支持晚三叠世时这些地区发生了明显的地壳增厚(许志琴等, 1992; Chen et al., 1995; Zhang et al., 2007; Weller et al., 2013; Li et al., 2014)。

笔者研究小组收集了松潘-甘孜褶皱带已有晚三叠世中酸性岩浆岩数据(包括 49 件锆石 U-Pb 年龄以及 335 件全岩主量元素和微量元素数据),定量重建了该时期的地壳厚度。结果显示松潘-甘孜褶皱带东侧靠近现今龙门山一带在 220 ~ 190 Ma 之间的平均地壳厚度约为 55 km,往北西地壳厚度变薄,为 36 ~ 45 km(图 9)(Zhan et al., 2018)。

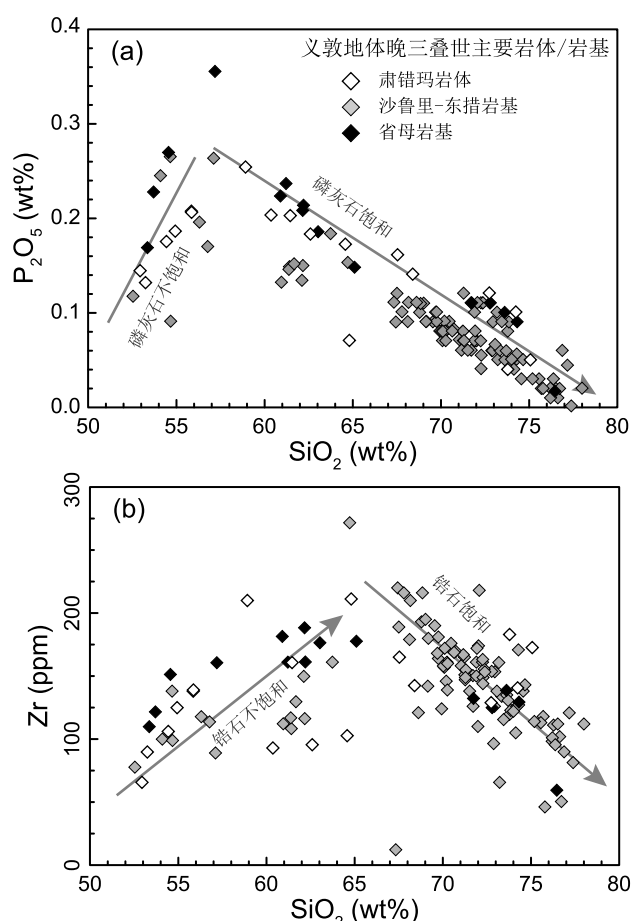


图 8 义敦地体主要岩体和岩基全岩 P_2O_5 和 Zr vs. SiO_2 散点图(Zhan et al., 2021)

Fig. 8 Whole-rock P_2O_5 and Zr versus SiO_2 contents of main plutons and batholiths in Yidun Terrane (after Zhan et al., 2021)

在此基础上,根据地壳均衡理论估算了当时的古海拔,结果显示晚三叠世松潘-甘孜褶皱带东部边界(即靠近现今龙门山一带)平均海拔大约为 2600 m,往西海拔较低,不足 1000 m,部分处于海平面之下。

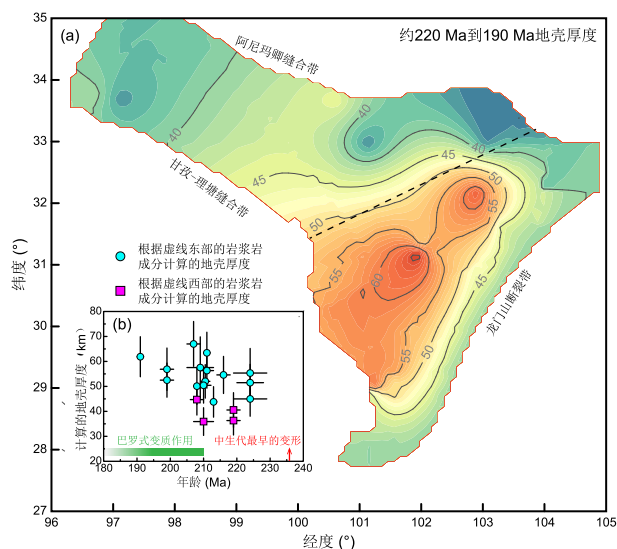


图9 青藏高原东部松潘-甘孜褶皱带晚三叠世—早侏罗世地壳厚度计算结果和地壳厚度等值线图 (Zhan et al., 2018)

Fig. 9 Crustal thickness of the eastern Tibetan Plateau during the Late Triassic to Early Jurassic

4 主要认识

(1)金沙江洋的形成和演化经历了完整的威尔逊旋回,可能经历了向西和向东的双向俯冲,闭合时间为晚二叠世末—早三叠世初,甘孜-理塘洋可能是金沙江洋东向俯冲背景下形成的弧后盆地,在中三叠世就已经闭合。

(2)松潘-甘孜褶皱带和义敦地体晚三叠世岩浆岩均为碰撞后阶段的岩浆作用产物,可能分别与岩石圈拆沉和东向俯冲的金沙江洋的俯冲板片断离有关。这些晚三叠世岩浆岩记录了地幔物质的贡献,其中的中酸性岩石可能主要通过幔源镁铁质岩浆的结晶分异作用形成,代表了地壳的净生长。

(3)晚三叠世洋盆闭合后,不同地体之间的碰撞导致了明显的造山作用,表现为具有空间差异性的地壳增厚和山脉隆升。

本文完成之时,适逢恩师潘桂棠先生八十寿辰。潘先生是本文第一作者的博士生导师。2000年,笔者有幸加入潘老师门下,成为潘老师弟子并

攻读构造地质学专业博士学位,从此开启了笔者二十余年的青藏高原岩浆作用与特提斯演化研究之路。二十多年来,从青藏高原南部的特提斯喜马拉雅到拉萨地体,再到青藏高原中部的羌塘地体,最后到青藏高原东部三江地区,一步步艰辛,一步步探索,每一步都留下了潘老师对笔者和笔者的学生毫无保留的传授与一笔一划的指导(附图)!这些弥足珍贵的经历,不但深深地影响着笔者,也深深地影响着笔者的学生,成为我们一生的财富!潘老师让我们学会了“情系高原”——时时刻刻都心心念念高原地质事业,为地质后辈树立了热爱所学专业的光辉典范;潘老师让我们更快地“认识高原”——五十多年投身于高原地质研究实践,主导编制的青藏高原地质系列图件影响了一代又一代的高原地质工作者;潘老师帮我们更深刻地“理解高原”——基于长期野外实践和理论思考提出的“多岛弧盆系洋陆转换构造观”丰富和发展了板块构造理论。在庆贺潘老师八十华诞之际,衷心感谢潘老师在为人、处事、治学等方面给笔者和笔者的学生树立的崇高榜样!感恩于心,言未能尽!祝愿潘老师健康长寿!



附图 2014年9月潘桂棠先生指导笔者和笔者学生在三江北段考察

参考文献 (References):

- Badenszki E, Daly J S, Whitehouse M J, et al., 2019. Age and origin of deep crustal meta-igneous xenoliths from the Scottish Midland Valley: vestiges of an early Palaeozoic arc and 'Newer Granite' magmatism[J]. *Journal of Petrology*, 60(8): 1543–1574.
- Burchfiel B C, Chen Z L, 2012. Tectonics of the Southeastern Tibetan

- Plateau and its Adjacent Foreland[M]. Boulder, CO: Geological Society of America.
- Cai H M, Zhang H F, Xu W C, 2009. U-Pb zircon ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granitoids in western Songpan-Garze fold belt: petrogenesis and implication for tectonic evolution[J]. *Journal of Earth Science*, 20(4): 681–698.
- Cai H M, Zhang H F, Xu W C, et al., 2010. Petrogenesis of Indosinian volcanic rocks in Songpan-Garze fold belt of the northeastern Tibetan Plateau: new evidence for lithospheric delamination[J]. *Science China Earth Sciences*, 53(9): 1316–1328.
- Cao K, Xu J-F, Chen J-L, et al., 2016. Double-layer structure of the crust beneath the Zhongdian arc, SW China: U-Pb geochronology and Hf isotope evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 455–467.
- Cao K, Yang Z-M, Mavrogenes J, et al., 2019. Geology and genesis of the giant pulang porphyry Cu-Au District, Yunnan, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 114(2): 275–301.
- Chapman J B, Ducea M N, Kapp P, et al., 2017. Spatial and temporal radiogenic isotopic trends of magmatism in Cordilleran orogens[J]. *Gondwana Research*, 48:189–204.
- Chen Q, Sun M, Zhao G C, et al., 2017a. Origin of the mafic microgranular enclaves (MMEs) and their host granitoids from the Tagong pluton in Songpan-Ganze terrane: an igneous response to the closure of the Paleo-Tethys ocean[J]. *Lithos*, 290–291: 1–17.
- Chen S F, Wilson, C J L, Worley B A, 1995. Tectonic transition from the Songpan-Garze Fold Belt to the Sichuan Basin, south-western China[J]. *Basin Research*, 7(3): 235–253.
- Chen J L, Xu J F, Ren J B, et al., 2017b. Late Triassic E-MORB-like basalts associated with porphyry Cu-deposits in the southern Yidun continental arc, eastern Tibet: evidence of slab-tear during subduction? [J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 1054–1062.
- Cooper M R, Crowley Q G, Hollis S P, et al., 2011. Age constraints and geochemistry of the Ordovician Tyrone Igneous Complex, Northern Ireland: implications for the Grampian orogeny[J]. *Journal of the Geological Society*, 168(4): 837–850.
- de Sigoyer J, Vanderhaeghe O, Duchêne S, et al., 2014. Generation and emplacement of Triassic granitoids within the Songpan Ganze accretionary-orogenic wedge in a context of slab retreat accommodated by tear faulting, Eastern Tibetan plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 192–216.
- Deng J, Wang Q F, Li G J, et al., 2014. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26(2): 419–437.
- Deschamps F, Duchêne S, de Sigoyer J, et al., 2017. Coeval mantle-derived and crust-derived magmas forming two neighbouring plutons in the Songpan Ganze accretionary orogenic wedge (SW China) [J]. *Journal of Petrology*, 58(11): 2221–2256.
- Dirks P H G M, Wilson C J L, Chen S, et al., 1994. Tectonic evolution of the NE margin of the Tibetan Plateau: evidence from the central Longmen Mountains, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(1–2): 181–192.
- Fei G C, Li Y G, Chen J, et al., 2015. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of copper-bearing monzogranite in the Rexiang hydrothermal Cu deposit in the central Yidun Island Arc, northeastern Tibet[J]. *Geochemical Journal*, 49(2): 195–205.
- Gong X J, Yang Z S, Meng X J, et al., 2017. Late paleozoic to mesozoic intrusions distribution in the North Sanjiang Orogenic Belt, southwest China: evidence from zircon U-Pb dating and geochemistry [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(3): 898–946.
- Harrowfield M J, Wilson C J L, 2005. Indosinian deformation of the Songpan Garze Fold Belt, northeast Tibetan Plateau[J]. *Journal of Structural Geology*, 27(1): 101–117.
- He D-F, Zhu W-G, Zhong H, et al., 2013. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of the Daocheng granitic pluton from the Yidun Arc, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 67–68: 1–17.
- Hu W-J, Zhong H, Zhu W-G, et al., 2019. Rift-and subduction-related crustal sequences in the Jinshajiang ophiolitic mélange, SW China: insights into the eastern Paleo-Tethys [J]. *Lithosphere*, 11(6): 821–833.
- Jian X, Weislogel A, Pullen A, 2019. Triassic sedimentary filling and closure of the eastern Paleo-Tethys Ocean: new insights from detrital zircon geochronology of Songpan-Ganzi, Yidun, and west Qinling flysch in eastern Tibet[J]. *Tectonics*, 38(2): 767–787.
- Leng C-B, Huang Q-Y, Zhang X-C, et al., 2014. Petrogenesis of the Late Triassic volcanic rocks in the Southern Yidun arc, SW China: constraints from the geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Lithos*, 190–191: 363–382.
- Leng C-B, Zhang X-C, Hu R-Z, et al., 2012. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the genesis of the Xuejiping porphyry copper deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 31–48.
- Li Y, Li H B, Zhou R J, et al., 2014. Crustal thickening or isostatic rebound of orogenic wedge deduced from tectonostratigraphic units in Indosinian foreland basin, Longmen Shan, China [J]. *Tectonophysics*, 619–620: 1–12.
- Liu S W, Wang Z Q, Yan Q R, et al., 2006. Indosinian tectonic setting of the southern Yidun arc: constraints from SHRIMP zircon chronology and geochemistry of dioritic porphyries and granites[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 80(3): 387–399.
- Meng Q-R, Wang E, Hu J-M, 2005. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: implication for continued clockwise rotation of the South China block[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(3–4): 396–410.
- Miles A J, Woodcock N H, Hawkesworth C J, 2016. Tectonic controls on post-subduction granite genesis and emplacement: the late Caledonian suite of Britain and Ireland[J]. *Gondwana Research*, 39: 250–260.
- Mo X X, Deng J F, Lu F X, 1994. Volcanism and the evolution of Tethys in Sanjiang area, southwestern China [J]. *Journal of*

- Southeast Asian Earth Sciences, 9(4): 325–333.
- Nie S Y, Yin A, Rowley D B, et al., 1994. Exhumation of the Dabie Shan ultra-high-pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysch sequence, central China[J]. *Geology*, 22(11): 999–1002.
- 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.
- Peng T P, Zhao G C, Fan W M, et al., 2014. Zircon geochronology and Hf isotopes of Mesozoic intrusive rocks from the Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: petrogenesis and their bearings with Cu mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 18–33.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al., 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Geology*, 36(5): 351–354.
- Reid A J, Wilson C J L, Liu S, 2005. Structural evidence for the Permian-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Structural Geology*, 27(1): 119–137.
- Reid A, Wilson C J L, Shun L, et al., 2007. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 88–106.
- Roger F, Calassou S, 1997. U-Pb geochronology on zircon and isotope geochemistry (Pb, Sr and Nd) of the basement in the Songpan-Garze fold belt (China) [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 324(10): 819–826.
- Roger F, Jolivet M, Malavieille J, 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garze (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: a synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254–269.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, et al., 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garze Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465–481.
- 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 X-S, Bi X-W, Leng C-B, et al., 2014. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous igneous intrusions and Mo-Cu-(W) mineralization in the southern Yidun Arc, SW China: implications for metallogenesis and geodynamic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 73–95.
- Wang B-Q, Zhou M-F, Chen W T, et al., 2013. Petrogenesis and tectonic implications of the Triassic volcanic rocks in the northern Yidun Terrane, Eastern Tibet[J]. *Lithos*, 175–176: 285–301.
- Wang B-Q, Zhou M-F, Li J-W, et al., 2011. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: adakitic magmatism and porphyry copper mineralization[J]. *Lithos*, 127(1–2): 24–38.
- Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, et al., 2010. Detrital zircon provenance from three turbidite depocenters of the Middle-Upper Triassic Songpan-Ganzi complex, central China: record of collisional tectonics, erosional exhumation, and sediment production [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(11–12): 2041–2062.
- Weller O M, St-Onge M R, Waters D J, et al., 2013. Quantifying Barrovian metamorphism in the Danba Structural Culmination of eastern Tibet[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(9): 909–935.
- Wu T, Xiao L, Ma C Q, et al., 2014. A mafic intrusion of “arc affinity” in a post-orogenic extensional setting: a case study from Ganluogou gabbro in the northern Yidun Arc Belt, eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 139–156.
- Wu T, Xiao L, Wilde S A, et al., 2016. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Ganluogou dioritic complex in the northern Triassic Yidun arc belt, Eastern Tibetan Plateau: implications for the closure of the Garzê-Litang Ocean[J]. *Lithos*, 248–251: 94–108.
- Wu T, Xiao L, Wilde S A, et al., 2017. A mixed source for the Late Triassic Garzê-Daocheng granitic belt and its implications for the tectonic evolution of the Yidun arc belt, eastern Tibetan Plateau [J]. *Lithos*, 288–289: 214–230.
- Wu T, Zhang W, Wilde S A, 2020. The origin of mafic microgranular enclaves in granitoids: insights from in situ Sr isotope of plagioclases and Zr-Hf isotopes of zircons[J]. *Chemical Geology*, 551: 119776.
- Xiao L, Zhang H F, Clemens J D, et al., 2007. Late Triassic granitoids of the eastern margin of the Tibetan Plateau: geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution[J]. *Lithos*, 96(3–4): 436–452.
- 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.
- Xu Z Q, Fu X F, Wang R C, et al., 2020. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet[J]. *Lithos*, 354–355: 105281.
- Yan D-P, Zhou M-F, Li S-B, et al., 2011. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Longmen Shan thrust belt, eastern Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 30(6): TC6005.
- Yang L-Q, Deng J, Dilek Y, et al., 2016. Melt source and evolution of I-type granitoids in the SE Tibetan Plateau: late Cretaceous magmatism and mineralization driven by collision-induced transtensional tectonics[J]. *Lithos*, 245: 258–273.
- Yuan C, Zhou M-F, Sun M, et al., 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan Ganzi Fold Belt, SW China: magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(3–4): 481–492.
- Zhan Q-Y, Zhu D-C, Wang Q, et al., 2018. Constructing the eastern margin of the Tibetan Plateau during the Late Triassic[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12): 10449–10459.

- Zhan Q-Y, Zhu D-C, Wang Q, et al., 2020. Source and pressure effects in the genesis of the Late Triassic high Sr/Y granites from the Songpan-Ganzi Fold Belt, eastern Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 368–369: 105584.
- Zhan Q-Y, Zhu D-C, Wang Q, et al., 2021. Imaging the Late Triassic lithospheric architecture of the Yidun Terrane, eastern Tibetan Plateau: observations and interpretations[J]. *Geological Society of America Bulletin*.
- Zhang L-Y, Ding L, Pullen A, et al., 2014. Age and geochemistry of western Hoh-Xil-Songpan-Ganzi granitoids, northern Tibet: implications for the Mesozoic closure of the Paleo-Tethys ocean[J]. *Lithos*, 190–191: 328–348.
- Zhang H-F, Parrish R, Zhang L, et al., 2007. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: implication for lithospheric delamination [J]. *Lithos*, 97(3–4): 323–335.
- Zhang H-F, Zhang L, Harris N, et al., 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze Fold Belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 75–88.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241–255.
- 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.
- 曹殿华, 王安建, 修群业, 等, 2007. 中甸地区甬哥正长岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 81(7): 995–1003.
- 邓宾, 刘树根, 刘顺, 等, 2013. 川西若尔盖地区中—新生代构造—热事件及其年代学框架[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 38(2): 317–328.
- 付小方, 侯立玮, 梁斌, 2017. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M]. 北京: 科学出版社.
- 高睿, 肖龙, 何琦, 等, 2010. 滇西维西—德钦—带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 35(2): 186–200.
- 侯立玮, 付德明, 戴丙春, 等, 1983. 藏东川西地区岩浆活动的主要特征及其与板块构造、内生矿产的关系[J]. *青藏高原地质文集* (2): 69–105.
- 侯增谦, 莫宣学, 1991. “三江”地区义敦岛弧的构造—岩浆演化特征[J]. *青藏高原地质文集*, 21: 153–165.
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等, 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. *地质学报*, 75(4): 484–497.
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. *地质学报*, 78(4): 109–120.
- 侯增谦, 杨岳清, 王海平, 等, 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统[M]. 北京: 地质出版社.
- 姜丽莉, 薛传东, 侯增谦, 等, 2015. 滇西北甬哥正长岩体成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 31(11): 3234–3246.
- 刘宝田, 江耀明, 曲景川, 1983. 四川理塘—甘孜一带古洋壳的发现及其对板块构造的意义[J]. *青藏高原地质文集* (4): 119–127.
- 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.
- 潘桂棠, 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.
- 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]. *地质前缘*, 23(6): 1–23.
- 潘桂棠, 任飞, 尹福光, 等, 2020. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. *地球科学*, 45(7): 2293–2304.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 等, 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. *沉积与特提斯地质*, 21(3): 1–26.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1–28.
- 时章亮, 张宏飞, 蔡宏明, 2009. 松潘造山带马尔康强过铝质花岗岩的成因及其构造意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 34(4): 569–584.
- 四川省地质矿产局, 1991. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 孙晓猛, 张保民, 聂泽同, 等, 1997. 滇西北金沙江带蛇绿岩、蛇绿混杂岩形成环境及时代[J]. *地质论评*, 43(2): 113–120.
- 万传辉, 袁静, 李芬香, 等, 2011. 松潘—甘孜造山带南段晚三叠世兰尼巴和羊房沟花岗岩岩石学、地球化学特征及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(2): 185–198.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2021. 西南三江金沙江弧盆系时空结构及构造演化[J/OL]. *沉积与特提斯地质*. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.02008>.
- 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.
- 王楠, 吴才来, 秦海鹏, 2017. 川西义敦岛弧中生代典型花岗岩体矿物学、地球化学特征及岩浆来源探讨[J]. *地质论评*, 63(4): 981–1000.
- 吴涛, 肖龙, 高睿, 等, 2014. 藏东雀儿山复式花岗岩体成因及构造背景: 年代学、地球化学与锆石 Lu–Hf 同位素制约[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(8): 1791–1806.
- 夏磊, 闫全人, 向忠金, 等, 2017. 松潘—甘孜地体中部晚三叠世安山质增生弧的确定及其意义[J]. *岩石学报*, 33(2): 579–604.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. *地质学报*, 92(6): 1091–1106.
- 许志琴, 杨经绥, 李化启, 等, 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. *岩石学报*, 28(6): 1697–1709.

- 闫全人, 王宗起, 刘树文, 等, 2005. 西南三江特提斯洋扩张与晚古生代东冈瓦纳裂解: 来自甘孜蛇绿岩辉长岩的 SHRIMP 年代学证据[J]. 科学通报, 50(2): 158–166.
- 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.
- 鄢圣武, 朱兵, 伍文湘, 等, 2015. 松潘 – 甘孜造山带万里城花岗岩及其岩浆包体的成因与地球动力学意义[J]. 地质通报, 34(2–3): 292–305.
- 袁静, 肖龙, 万传辉, 等, 2011. 松潘 – 甘孜南部放马坪 – 三岩龙花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地质学报, 85(2): 195–206.
- 张之孟, 金蒙, 1979. 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(3): 205–214.
- 张之孟, 王忠实, 郑裕民, 1981. 川西南乡城 – 得荣地区细碧 – 角斑岩的岩石学特征和构造意义[J]. 地质学报, 55(3): 179–194.
- 赵永久, 袁超, 周美夫, 等, 2007. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘 – 甘孜地体基底性质的制约[J]. 岩石学报, 23(5): 995–1006.

Late Triassic tectono-magmatism of northern Sanjiang and associated several scientific problems

ZHU Di-Cheng, WANG Qing, ZHAN Qiong-Yao, XIE Jin-Cheng

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences; Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Songpan-Ganzi fold belt and Yidun Terrane in northern Sanjiang, Southwest China are characterized by intensive Late Triassic tectono-magmatism. The magmatism in Songpan-Ganzi fold belt occurred mainly at 228 – 190 Ma (peaking at 210 Ma), slightly younger than the magmatism in the Yidun Terrane (236 – 200 Ma, peaking at 216 Ma). The Jinshajiang Ocean may have experienced divergent subduction to the west and east and closed at the end of Late Permian to the beginning of Early Triassic. The Ganzi-Litang Ocean might be a back-arc basin associated with the eastward subduction of the Jinshajiang Ocean and closed before ca. 217 Ma. The Late Triassic magmatism in the Songpan-Garze fold belt and Yidun Terrane is assigned to post-collisional magmatism and most likely related to lithospheric delamination and the slab break-off of the Jinshajiang Ocean, respectively. Mantle components have contributed to the Late Triassic post-collisional magmatism. Fractional crystallization of mantle-derived mafic magmas played an important role in the formation of Late Triassic intermediate to felsic magmas, suggesting net crustal growth. The Triassic collisional events occurred among terranes resulted in orogenesis, and spatially varied crustal thickening and mountain uplift.

Key words: Songpan-Garze Fold Belt; Yidun Terrane; Garze-Litang Ocean; Jinshajiang Ocean; late Triassic magmatism