

义敦地块中-晚三叠世中酸性侵入岩起源 及其地质意义探讨

方小玉^{1,2}, 彭头平^{1,3*}, 范蔚茗^{3,4}, 高剑峰⁵,
刘兵兵^{1,2}, 张靖祎^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要:地处青藏高原东部的义敦地块不仅发育特征显著的中生代构造-岩浆活动, 而且也是重要的多金属成矿区。然而, 对于区域上的构造-岩浆-成矿的时空格架及其深部动力学机制目前还未得到很好的约束。综合分析了近年来发表的该区中-晚三叠世中酸性侵入岩的研究资料和数据, 进一步探讨了它们的起源、成因和构造意义。高精度的年代学结果显示, 区内闪长斑岩和花岗岩的形成年龄为 225~215 Ma, 其峰值为~216 Ma。其中出露于义敦南部的闪长质岩石具有高的 $Mg^{\#}$ 值、Cr、Ni、Sr 含量和 Sr/Y 比值, 低 Y、Yb 含量及极弱的负 Eu 异常和正 Sr 异常等特征, 显示出埃达克质岩的地球化学特征。结合其高 K_2O/Na_2O 比值和壳源型的 Sr-Nd-Hf 同位素组成特征, 以及与缝合带东侧九龙地区同时代相同特征的钾质埃达克质花岗岩的对比, 认为这些闪长质岩石并非人认为的起源于俯冲洋壳板片或者交代富集的岩石圈地幔楔, 而是下地壳部分熔融的产物。而巨大规模出露于该区中北部地区的花岗岩则比闪长质岩石具有更高的 SiO_2 (67.33%~78.01%) 和 K_2O (2.38%~6.41%) 含量, 以及明显的 Eu 和 Sr 负异常, 略微弱的轻重稀土元素分馏以及更富集的全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素组成的特征, 表明这些花岗岩岩石并非来自闪长质岩石的分离结晶作用, 而是来源于更浅的中上地壳的部分熔融, 为中上地壳不均一的中元古代地壳物质重熔的产物。结合甘孜-理塘缝合带两侧岩浆-沉积作用的特征, 认为义敦地块中-晚三叠世岩浆作用形成于后碰撞的构造环境, 是造山作用晚期岩石圈地幔拆沉作用的结果。因此, 区域上中-晚三叠世中酸性侵入岩的综合分析表明, 弧/陆-陆碰撞(义敦地块和松潘-甘孜地块), 即甘孜-理塘洋盆的闭合在中-晚三叠世已经完成; 义敦南部与铜多金属矿床密切相关的闪长质斑岩的源区并不具有成矿所需的高氧逸度和高水分的特征。

关键词: 中-晚三叠世; 中酸性侵入岩; 起源和成因; 构造背景; 义敦地块

中图分类号: P59; P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2017)05-0413-22

Origin of the Middle-Late Triassic intermediate-acid intrusive rocks in the Yidun terrane and its geological significance

FANG Xiao-yu^{1,2}, PENG Tou-ping^{1,3*}, FAN Wei-ming^{3,4}, GAO Jian-feng⁵,
LIU Bing-bing^{1,2} and ZHANG Jing-yi^{1,2}

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;
4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
5. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: The Yidun terrane, located in the eastern part of the Tibetan Plateau, is not only a characteristic intrusive

收稿日期(Received): 2016-12-07; 改回日期(Revised): 2017-03-17; 接受日期(Accepted): 2017-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB440901)

作者简介: 方小玉(1991-), 女, 硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: fangxiaoyu@gig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): PENG Tou-ping, E-mail: tppeng@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290227

magmatic tectonic belt, but also a very important poly-metallic metallogenic belt. In this paper, we have integrated all published geochronological, element geochemical, Sr-Nd-Hf isotope data for the Middle to Late Triassic intermediate-felsic intrusive rocks in the Yidun terrane, along with the reported data from the Songpan-Ganzi terrane, in order to further decipher their origin, petrogenesis and rock-forming tectonic setting. All precisely dating results of zircons from the Middle to Late Triassic dioritic and granitic rocks in the Yidun terrane show that the magmatism developed during 225–215 Ma, with a peak age of ~216 Ma. Dioritic porphyries from southern Yidun terrane characterized by high $Mg^{\#}$, Cr, Ni and Sr contents and Sr/Y ratios, but low Y and Yb contents, together with weak Eu anomalies and positive Sr anomalies, are geochemically similar to adakities. In consideration of their high K_2O/Na_2O ratios, and crustal-type Sr-Nd-Hf isotopic compositions, and in comparison of the chemical compositions of coeval potassic adakitic rocks in the Jiulong area (on the eastern side of the suture zone), it is clearly seen that these dioritic intrusive rocks were derived from remelting of the thickened lower crust rather than from the subducting of oceanic slab or sub-arc metasomatized lithospheric mantle as suggested before. Different from the coeval dioritic rocks, the granites show higher SiO_2 (67.33%–78.01%) and K_2O (2.38%–6.41%) contents, and strongly negative Sr-Eu anomalies, along with their more enriched whole-rock Sr-Nd and zircon Hf isotopic compositions, indicating the granites are not a product of crystallization differentiation of dioritic magma. In combination with the unpublished data for the basalts in this region, we propose that these granites should be derived from partial melting of the mid-Proterozoic rocks at a middle to upper crustal level. In comparison with the elemental and geochemical natures coupled with the pace-time patterns of coeval magmatism in the Songpan-Ganzi terrane to the east of the Ganzi-Litang suture zone, a most feasible explanation for the coeval magmatism is that they were generated in a common post-collisional extensional setting associated with the partial lithospheric delamination. Therefore, the occurrence of the Late Triassic post-collisional magmatism clearly indicates that the arc/continent-continent collision (between the Yidun and Songpan-Ganzi terranes) or the final closure of the Ganzi-Litang ocean had been completed at least by the Middle-Late Triassic. The source region of the dioritic porphyries related to the copper polymetallic deposits from southern Yidun terrane may not have the characteristics of high oxygen fugacity and rich fluid.

Key words: Middle-Late Triassic; intermediate-acid intrusive rock; origin and petrogenesis; tectonic setting; Yidun terrane

0 引言

义敦地块位于青藏高原的东南缘,属于三江特提斯构造域的一部分,矿产资源丰富,矿床类型、成矿时代多样。该区经历了印度-欧亚板块碰撞和高原隆升的强烈改造,区域上地质构造复杂,由于其所处特殊的构造位置及特殊的演化过程,义敦地块岩浆岩的研究可以为造山带岩浆产生机制、大陆碰撞过程、壳-幔相互作用方式、地壳加厚隆升及造山带伸展垮塌等地学领域关键问题提供重要启示。因此,义敦地区是近年来地学界关注的热点研究区域之一。作为我国重要的Cu、Pb、Zn和Mo多金属成矿带,该构造单元晚三叠世和晚白垩世花岗(斑)岩及其相关成矿系统发育,而侏罗纪和新生代岩浆活动

及相关矿化仅零星出露^[1-5]。其中,晚三叠世呷村银多金属块状硫化物矿床和普朗斑岩型铜多金属矿床等的发现,使该区成为我国最重要的晚三叠世斑岩型矿区之一^[6-10]。

近年来,对该区印支期矿床及相关花岗(斑)岩开展了大量研究,积累了丰富的资料^[11-32]。但这些研究更多集中于与成矿有关斑岩的研究,对贫矿的斑岩的关注较少。而且,由于中-晚三叠世斑岩型大型-超大型铜多金属矿床主要集中出现于该区的南部,而对于整个义敦地块中-晚三叠世岩浆作用的精细的时空格架和详细的深部动力学背景没有引起足够的关注,因而基于局部区段岩浆-成矿作用的机制和动力学背景的解释存在很大的争议。比如在岩浆起源和成因解释方面,相同的课题组^[19,27,31,32]或者研究人员^[24,26]的研究都存在不同的认识,包括弧下

富集地幔、下地壳或俯冲的洋壳的起源; 在构造背景的解释方面, 同样存在分歧, 包括与古特提斯洋盆西向俯冲的岛弧岩浆作用有关^[11,21], 或是造山阶段同碰撞环境下壳-幔相互作用下的产物^[25], 或是碰撞后下地壳拆沉^[28]和板片断离的动力学机制引发的^[21,30]。因此, 更全面系统分析义敦地块中-晚三叠世岩浆作用的特征, 不仅能更详细了解岩浆的真实起源和成因, 也能更精确约束古特提斯演化从俯冲-碰撞-碰撞后伸展构造体制转换的时空格架问题, 还能为区域内岩浆-成矿作用机理提供有效解释。

此外, 义敦地块上已探明的斑岩矿床与中-晚三叠世侵入岩在空间上具有密切联系^[21,24,33-35], 而且, 该区多数与含矿有关的侵入岩为具有埃达克质特征的斑岩^[21,24]。但是, 近期的研究^[21,28]显示一些埃达克质的斑岩并无铜多金属的矿化特征, 将其定义为贫矿的斑岩。为什么同一地区相似时代的埃达克质岩会出现一部分具有富矿特征而一部分却具有贫矿特征这一现象呢? 可见, 弄清岩浆作用及矿化作用的关系至关重要, 特别是斑岩型铜多金属矿化作用及其埃达克质斑岩的起源。值得一提的是, 在义敦地块东部出露一些大型的与含矿斑岩侵位年龄相近的花岗岩类岩体^[25,36-39], 但是至今尚未在这些花岗质岩中发现金属矿化作用。可见, 了解富矿与贫矿闪长斑岩在时间、空间、岩石成因及起源等方面的联系以及寄主岩石的矿化作用, 将有利于解决岩浆-成矿的机理, 也有助于约束古特提斯构造域俯冲-碰撞-碰撞后到伸展转换机制。

不同于前人仅集中于独立的岩浆作用(矿化明显的闪长斑岩或无矿化的花岗岩)的研究, 本文将在区域地质调查资料的基础上, 重点归纳前人已有的数据和资料, 综合对比研究中-晚三叠世富矿闪长斑岩、贫矿(远离断裂矿化区且手标本无明显矿化)闪长斑岩和花岗岩的岩浆特征, 探讨义敦地块中-晚三叠世中酸性侵入岩的起源和岩石成因及其构造背景, 深入揭示义敦地块中-晚三叠世岩浆-成矿的深部动力学机制, 更好地理解区域上成岩-成矿机理。

1 区域地质背景

义敦地块位于三江特提斯构造域北段, 夹持于松潘-甘孜地块与羌塘地块之间, 呈近南北向延伸, 宽约 50~100 km, 长达 500 km 以上。义敦地块东西两侧各有一条规模较大的蛇绿混杂岩带, 代表的是

古特提斯缝合带, 即东侧的甘孜-理塘缝合带与西侧的金沙江缝合带(图 1)。前人基于甘孜-乡城断裂两侧地层出露的差异, 将义敦地块划分为东义敦地块与西义敦地块^[38-39](图 1b), 东义敦地块相对于西义敦地块的地质情况更为复杂。金沙江缝合带主要沿着金沙江展布, 是东亚古特提斯洋的重要分支。对于金沙江古特提斯洋演化的岩浆记录, 一般认为由于洋盆的向西俯冲和最终闭合, 在江达-德钦-维西地区产生大量的二叠纪-三叠纪岩浆活动^[40-41]。Reid *et al.*^[38]根据义敦地块西侧(以及金沙江缝合带的 *mélange*)的古生代变质沉积岩的两期变形构造, 以及侵入其中的同构造变形花岗岩(~239 Ma)年龄数据, 认为是在早-中三叠世末期金沙江洋东向俯冲碰撞造成该区古生代变质沉积岩的挤压变形, 表明此时金沙江洋已经闭合。金沙江古特提斯洋演化的岩浆记录仍然有争议, 主要原因可能是金沙江缝合带所代表的大洋规模和性质尚不明确, 但是前人得出的大洋闭合时间以及俯冲相关岩浆活动时间都集中在二叠纪-早三叠世之前^[38,41-43]。甘孜-理塘蛇绿岩混杂带为一条向北东方向凸出的弧形构造带, 前人普遍认为中-晚三叠世时期, 伴随着甘孜-理塘古特提斯洋盆向西南俯冲消减和最终闭合, 其主要的证据是基于义敦地块东部发育的大量的中-晚三叠世弧岩浆型地球化学特征的岩浆岩, 其时代主要分布在 225~215 Ma 之间^[21,27,39,44]。相对于金沙江洋, 前人对甘孜-理塘洋构造演化的系统研究还是比较薄弱, 洋盆俯冲过程、洋盆的最终闭合以及与金沙江缝合带北段的衔接等一系列科学问题尚缺乏详细研究。

西义敦地块(中咱地块)由古生代碳酸盐台地和镁铁质熔岩组成, 于早三叠世羌塘地块和义敦地块沿金沙江缝合带碰撞时发生变形和变质^[38]。基于该区地层学和岩相学特征与扬子地块相似, 部分研究者认为是晚二叠世甘孜-理塘洋打开时从扬子陆块漂移过来的微陆块^[45]。东义敦地块主要由三叠纪复理石沉积和晚三叠世钙碱性火山-次火山岩组成^[11]。

该区断裂构造十分发育, 区域断裂构造线总体呈北西-南东向展布, 与甘孜-理塘构造带北西向分布的部分基本平行, 为区内的岩浆活动和成矿物质提供良好的通道和储运空间。

区内岩浆活动频繁, 自晚古生代以来, 特别是在中生代花岗岩岩浆作用强烈。该区出露最早的花岗岩是华力西期(石炭-二叠纪)花岗岩, 次为印支早-中期(早-中三叠世)花岗岩, 印支晚期(晚三叠世)与

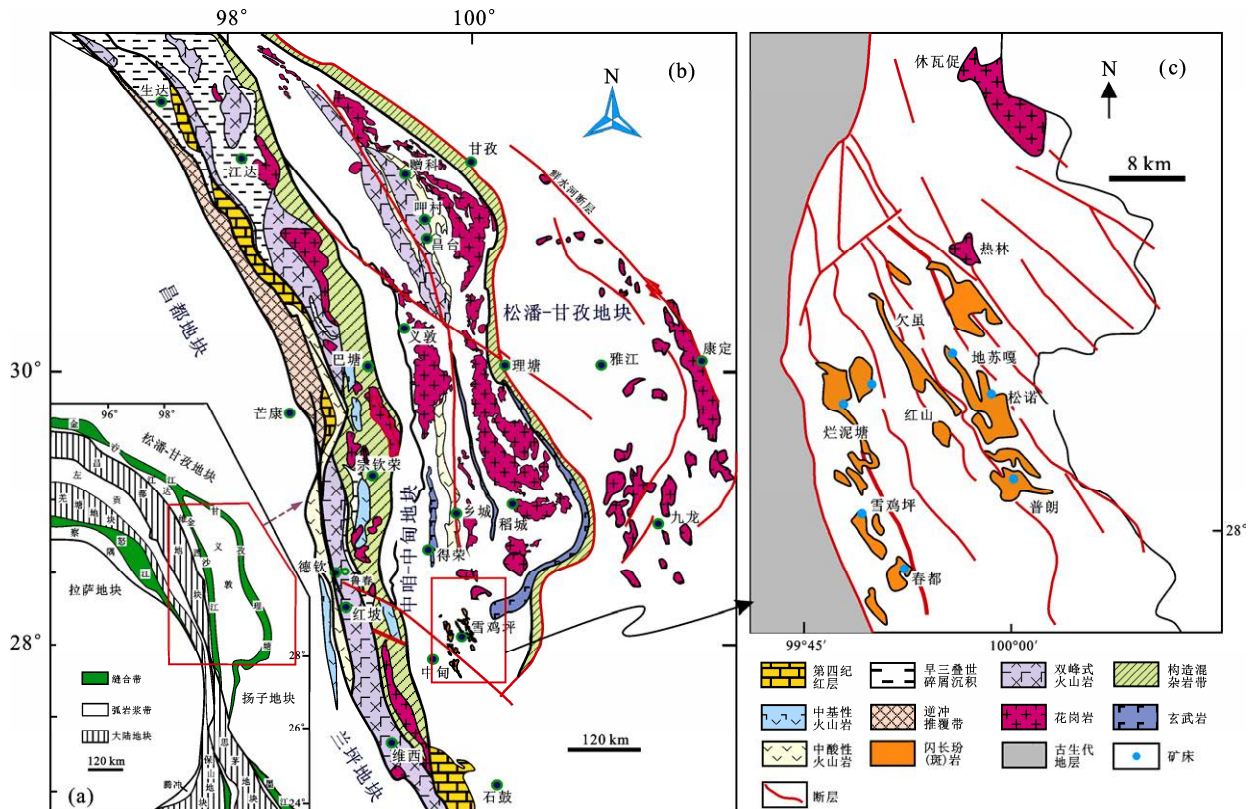


图 1 义敦地块地质简图(a)(b)和中甸地区地质简图(c)

Fig.1 Geological sketch maps (a)(b) of the Yidun terrane (revised after Hou *et al.*^[35] and Reid *et al.*^[39]), and simplified geological map (c) of the Zhongdian area (revised after Leng *et al.*^[24] and Chen *et al.*^[27])

图 1a 和图 1b 据 Hou *et al.*^[35]和 Reid *et al.*^[39], 图 1c 据 Leng *et al.*^[24]和 Chen *et al.*^[27]

燕山期(早侏罗世和晚白垩世)为区内两个花岗岩浆活动高峰期, 随后的喜马拉雅期花岗岩浆活动规模较小^[46]。

东义敦地块可进一步划分为北义敦地块(包括昌台地区与乡城地区)和南义敦地块(包括中甸地区)^[21,24]。北义敦地块, 尤其昌台地区, 广泛分布有晚三叠世双峰式火山岩套和含硫化物矿产的火山岩, 并发育一些重要的硫化物矿床, 如呷村银多金属 VMS 矿产^[37]。不同于北段, 南段的中甸地区, 火山岩并未出现“双峰式”特征, 而是发育基性玄武岩-钙碱性安山岩-英安质火山岩, 并发育大规模含矿的闪长质斑岩^[11,19]。

近年来, 中甸地区具埃达克质特征的安山质-英安质火山岩和与之相关的斑杂岩体吸引了较多研究者关注^[11,21,24,28,37]。尽管这些斑杂岩体的出露面积较东义敦地块的花岗岩侵入体小很多, 但是却发现大量具有经济价值的大型-超大型斑岩型或夕卡岩型铜多金属矿床, 如普朗、浪都、烂泥塘、雪鸡坪、春都、地苏嘎和欧塞拉等浅成斑岩体^[11-24,27-32]。其中, 成矿斑岩通常经历不同程度的热液交代作用^[28]。除了

成矿斑岩外, 少量的贫矿/未成矿斑岩(无明显矿化)侵入体也陆续被发现, 普遍侵入到晚三叠世图姆沟组地层中^[21,24,28]。

2 年代学格架

针对该区中-晚三叠世火成岩的形成时代, 前人早期开展了一系列的研究, 但这些研究主要是采用全岩 Rb-Sr 法、矿物 K-Ar 和 Ar-Ar 法、锆石 U-Pb 法等多种方法对不同对象进行定年研究, 结果显示区域上岩浆岩形成年龄变化较大(237~75 Ma)^[38,47]。由于全岩 Rb-Sr 法、矿物 K-Ar 法和 Ar-Ar 法容易受到后期热事件的影响而导致其年龄结果记录的是热事件的时间, 而非岩浆作用的年龄, 这就制约了对中-晚三叠世义敦地块岩浆活动时空分布以及其深部动力学过程的深入了解。近年来, 随着新的高精度定年技术的发展与应用, 获得了一大批高精度的义敦地块中-晚三叠世花岗岩和斑岩锆石 U-Pb 年代学数据, 为进一步制约义敦地块的演化过程提供了可能。这些年龄结果表明, 义敦地块中生代花岗岩

主要侵位于 225~215 Ma 和~95 Ma 两个时间段^[25,28]。本研究全面收集了新近发表的花岗岩和闪长斑岩的高精度的锆石 U-Pb 年龄(表 1), 统计结果表明义敦地块中-晚三叠世花岗岩的年代学数据存在两个明显的年龄峰值: ~225 Ma 和~216 Ma^[25,28,39,44,48,30](图 2a)。进一步对区域上闪长斑岩的年代学结果统计分析, 其年龄变化于 206~230 Ma 之间(表 1), 存在 3 个岩浆作用峰期: ~206 Ma、~216 Ma 和 224~230 Ma, 而~216 Ma 为最主要峰期(图 2)^[14,16,19,21,23,24,27,28,30,31,48-51]。对比

可见, 该区富矿斑岩与花岗岩的岩浆作用活动期基本一致(图 2)。综上所述, 高精度的年代学数据显示义敦地块于~216 Ma 时发生最大规模的岩浆事件, 而在 224~230 Ma 和~206 Ma 期间亦有少量岩浆活动发生。

此外, 对比富矿斑岩和贫矿斑岩的成岩时代可发现, 富矿闪长斑岩的年龄变化于 206~230 Ma 之间, 而贫矿闪长斑岩的年龄介于 203~221 Ma 之间(表 1), 它们的侵位时代在误差范围内是一致的。

表 1 义敦地块中-晚三叠世花岗岩与闪长斑岩形成年龄

Table 1 Formation ages of the Middle to Late Triassic granites and dioritic porphyries in the Yidun terrane

地区/矿区	岩石	测试方法	年龄(Ma)	含矿性	资料来源
闪长斑岩					
普朗	石英二长岩	SHRIMP	228.0 ± 3.0	富矿	[16]
	石英二长岩	SHRIMP	226.3 ± 2.8	富矿	[16]
	石英二长岩	SHRIMP	226.0 ± 3.0	富矿	[16]
	石英闪长岩	TIMS	221.0 ± 1.0	贫矿	[18]
	石英二长岩	TIMS	211.8 ± 0.5	富矿	[18]
	花岗闪长岩	TIMS	206.3 ± 0.7	贫矿	[18]
	石英二长岩	LA-ICPMS	224.2 ± 1.7	富矿	[21]
	石英二长岩	LA-ICPMS	217.9 ± 1.8	富矿	[21]
	石英闪长岩	LA-ICPMS	217.2 ± 1.4	富矿	[27]
	石英闪长岩	LA-ICPMS	215.3 ± 1.4	富矿	[27]
	闪长玢岩	LA-ICPMS	211.8 ± 1.9	富矿	[27]
	石英闪长岩	LA-ICP-MS	215.5 ± 1.6	富矿	[31]
	石英二长岩	LA-ICPMS	215.8 ± 1.3	富矿	[31]
	花岗闪长岩	LA-ICPMS	216.1 ± 1.5	富矿	[31]
雪鸡坪	石英二长岩	SHRIMP	215.3 ± 2.3	贫矿	[14]
	石英二长岩	SHRIMP	215.2 ± 1.9	富矿	[50]
	二长斑岩	LA-ICPMS	213.4 ± 1.5	富矿	[19]
	闪长斑岩	LA-ICPMS	217.1 ± 1.5	富矿	[19]
	二长斑岩	SIMS	218.3 ± 1.6	富矿	[24]
	安山岩	SIMS	218.5 ± 1.6	富矿	[24]
	闪长斑岩	LA-ICPMS	216.9 ± 1.4	富矿	[28]
	闪长斑岩	LA-ICPMS	214.7 ± 2.5	富矿	[28]
	闪长斑岩	LA-ICPMS	216.3 ± 3.4	贫矿	[28]
	闪长斑岩	LA-ICPMS	216.8 ± 0.9	贫矿	[28]
	石英二长岩	LA-ICPMS	215.9 ± 1.4	富矿	[27]
石英二长岩	LA-ICPMS	213.4 ± 1.5	富矿	[31]	
屏东	石英闪长岩	LA-ICPMS	230.3 ± 1.7	富矿	[21]
	石英闪长岩	LA-ICPMS	219.8 ± 3.0	富矿	[21]
地苏嘎	安山岩	LA-ICPMS	220.7 ± 2.0	富矿	[21]
	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	203.03 ± 0.54	贫矿	[29]
	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	217.25 ± 0.89	富矿	[29]
烂泥塘	安山岩	LA-ICPMS	208.5 ± 1.0	富矿	[29]
烂泥塘	安山岩	LA-ICPMS	216.7 ± 1.2	贫矿	[27]

(续表 1)

地区/矿区	岩石	测试方法	年龄(Ma)	含矿性	资料来源
闪长斑岩					
春都	石英二长岩	SIMS	219.7 ± 1.8	富矿	[51]
	石英二长岩	LA-ICPMS	212.0 ± 3.0	富矿	[22]
	石英二长岩	LA-ICPMS	217.0 ± 2.0	富矿	[22]
	石英二长岩	LA-ICPMS	218.0 ± 2.0	富矿	[22]
	石英二长岩	LA-ICPMS	215.3 ± 2.7	富矿	[27]
	石英二长岩	LA-ICPMS	213.1 ± 1.5	富矿	[27]
松诺	石英二长岩	SHRIMP	220.9 ± 3.5	富矿	[49]
红山	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	216.1 ± 3.2	富矿	[23]
花岗岩					
乡城	闪长斑岩	SHRIMP	222 ± 3	无矿化	[48]
稻城	花岗岩	SIMS	215.7 ± 1.5	无矿化	[25]
	花岗岩	SIMS	216 ± 2.2	无矿化	[25]
	花岗岩	LA-ICPMS	216 ± 0.7	无矿化	[25]
马熊沟	二长花岗岩	LA-ICPMS	222 ± 2	无矿化	[30]
	花岗闪长岩	LA-ICPMS	216.0 ± 1.1	无矿化	[28]
	花岗闪长岩	LA-ICPMS	225 ± 2	无矿化	[30]
神木	二长花岗岩	LA-ICPMS	218.3 ± 3.1	无矿化	[28]
	花岗闪长岩	LA-ICPMS	216.1 ± 2.5	无矿化	[28]
冬措	花岗岩	LA-ICPMS	214.7 ± 2.6	无矿化	[28]
	花岗岩	LA-ICPMS	216.9 ± 0.8	无矿化	[28]
	花岗岩	LA-ICPMS	216.6 ± 0.8	无矿化	[28]
	花岗岩	LA-ICPMS	223.9 ± 3.9	无矿化	[28]
	花岗岩	SHRIMP	224 ± 3	无矿化	[48]
昌台区	花岗岩	LA-ICPMS	218 ± 3	无矿化	[39]
	花岗岩	LA-ICPMS	215 ± 2	无矿化	[44]
	花岗岩	LA-ICPMS	225 ± 2	无矿化	[44]
	二长花岗岩	LA-ICPMS	218 ± 1	无矿化	[30]
	二长花岗岩	LA-ICPMS	224 ± 2	无矿化	[30]
	花岗闪长岩	LA-ICPMS	235 ± 2	无矿化	[30]
	二长花岗岩	LA-ICPMS	219 ± 1	无矿化	[30]

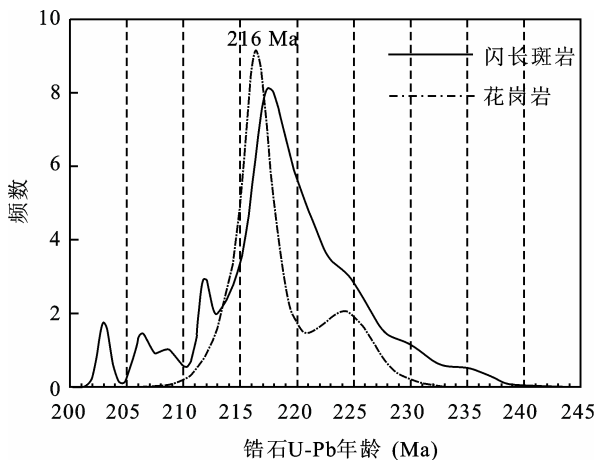


图2 闪长斑岩与花岗岩锆石 U-Pb 年龄统计分布图(数据来源于表 1 所引文献)

Fig.2 Probability plots of zircon U-Pb ages for the dioritic porphyries and granites (Data sources are from Table 1)

3 地球化学特征

3.1 主元素和微量元素

表 2 汇总了义敦地块中-晚三叠世中酸性侵入岩主元素特征值。在主元素 Harker 图解中(图 3), 贫矿斑岩具有类似于富矿斑岩的 SiO_2 和 MgO 含量(图 3a), 其他主元素, 如 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 P_2O_5 也是如此(图 3b, 图 3c, 图 3e, 图 3h)。所有闪长质斑岩与该区同时代的花岗岩相比, 尽管闪长斑岩与花岗岩均落在高钾钙碱性系列范围内(图 3g), 但闪长斑岩与花岗岩的主元素构成还是存在明显的区别。首先, A/CNK 指数略有差异, 闪长斑岩的铝饱和指数为 0.67~1.37(表 2), 而花岗岩铝饱和指数为

表 2 义敦地块中-晚三叠世闪长斑岩与花岗岩的主元素特征

Table 2 Summary of the major element data for the Middle-Late Triassic dioritic porphyries and granites in the Yidun terrane

岩性	主元素	含量(%)	资料来源
富矿斑岩 (38 个样品)	SiO ₂	56.06~69.45	[18]、[19]、[21]、[27]、[31]、[48]、 [50]及课题组未发表数据
	TiO ₂	0.40~1.24	
	Al ₂ O ₃	12.74~18.68	
	Fe ₂ O ₃	2.66~11.96	
	MgO	1.67~4.60	
	CaO	0.78~7.34	
	Na ₂ O	1.53~5.81	
	K ₂ O	1.55~8.18	
	P ₂ O ₅	0.13~0.52	
	K ₂ O/Na ₂ O	0.29~5.33	
	Mg [#]	35.90~70.65 (AVG=53.72)	
A/CNK	0.69~1.37		
贫矿斑岩 (17 个样品)	SiO ₂	50.87~67.78	[18]、[21]、[29]及课题组 未发表数据
	TiO ₂	0.52~1.72	
	Al ₂ O ₃	14.08~18.49	
	Fe ₂ O ₃	3.55~11.95	
	MgO	2.26~5.89	
	CaO	1.60~6.74	
	Na ₂ O	3.43~5.84	
	K ₂ O	1.64~5.32	
	P ₂ O ₅	0.25~0.75	
	K ₂ O/Na ₂ O	0.41~1.55	
	Mg [#]	34.58~57.40 (AVG=48.92)	
A/CNK	0.67~1.12		
花岗岩 (66 个样品)	SiO ₂	67.33~78.01	[25]、[48]及课题组未发表数据
	TiO ₂	0.06~0.60	
	Al ₂ O ₃	12.15~16.08	
	Fe ₂ O ₃	0.22~4.74	
	MgO	0.09~1.56	
	CaO	0.46~3.95	
	Na ₂ O	2.95~3.92	
	K ₂ O	2.38~6.41	
	P ₂ O ₅	0.005~0.112	
	K ₂ O/Na ₂ O	0.61~2.09	
	Mg [#]	9.88~60.47 (AVG=34.64)	
A/CNK	1.15~1.45		

1.15~1.45(表 2), 花岗岩主要属于弱过铝质岩石; 其次, 花岗岩的硅明显高于闪长斑岩, 而 P、Fe、Mg 和 Ti 等元素的含量则比闪长斑岩低(图 3)。总之, 义敦地块中-晚三叠世富矿闪长斑岩与贫矿闪长斑岩主元素特征相似, 而与花岗岩的主元素特征有差异。

富矿和贫矿斑岩具有相似的稀土元素及微量元

素分布模式(图 4), 其中富矿斑岩比贫矿斑岩具有略微分异的轻重稀土元素特征以及更弱的 Eu 异常(图 4a)和更强的 Nb、Ta 负异常(图 4b); 与闪长斑岩不同, 花岗岩在稀土元素图解上具有更弱的轻重稀土元素分异以及更强的 Eu 负异常(图 4a), 在微量元素特征上, 显示出更明显的 Ba、Sr、Nb、P 和 Ti 的亏损(图 4b)。

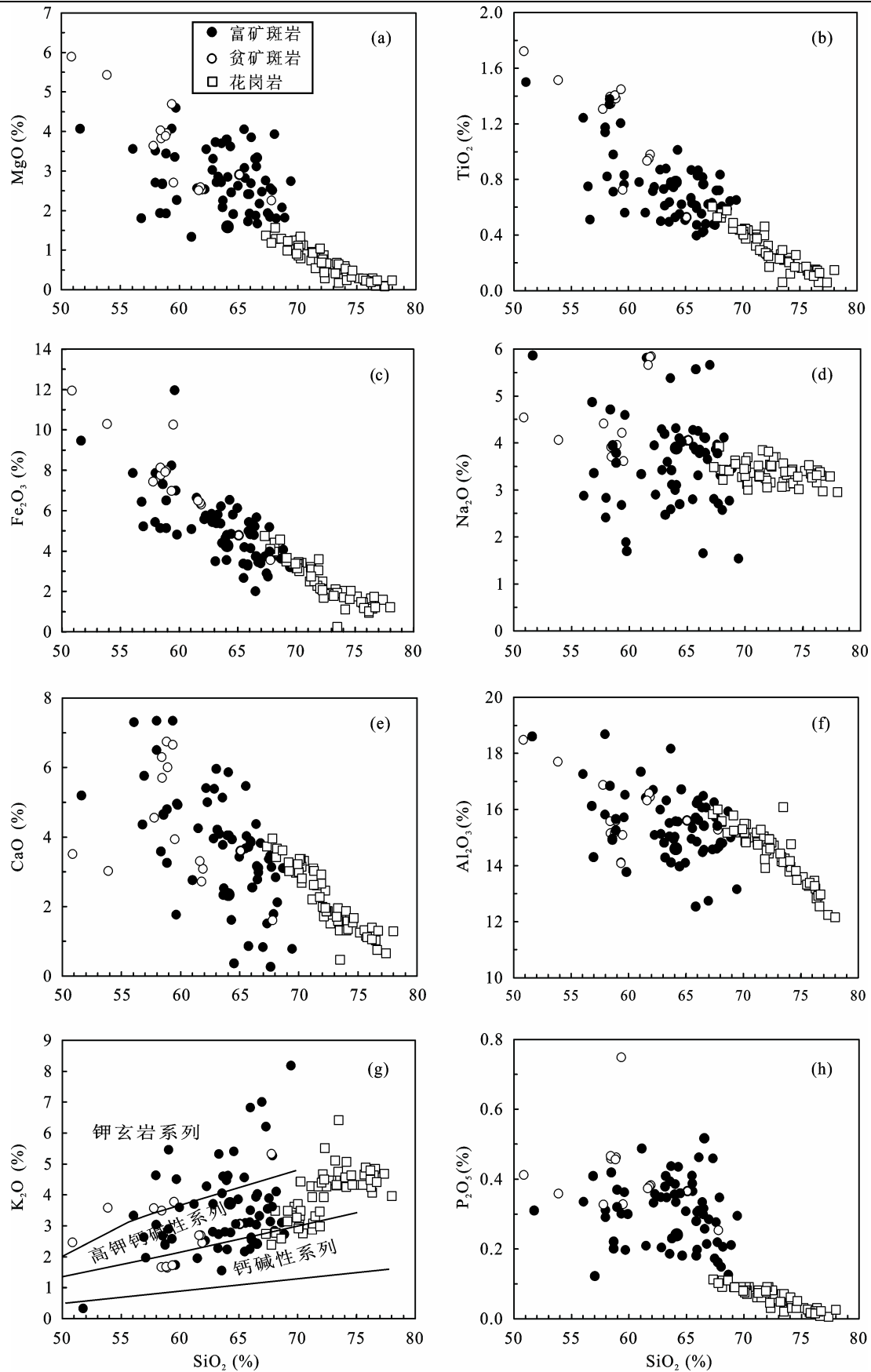


图3 义敦地块闪长斑岩和花岗岩主元素 Harker 图解(数据来源于表2 所引文献)

Fig.3 Harker diagrams of major oxides for the Middle-Late Triassic dioritic porphyries and granites in the Yidun terrane (Data sources are from Table 2)

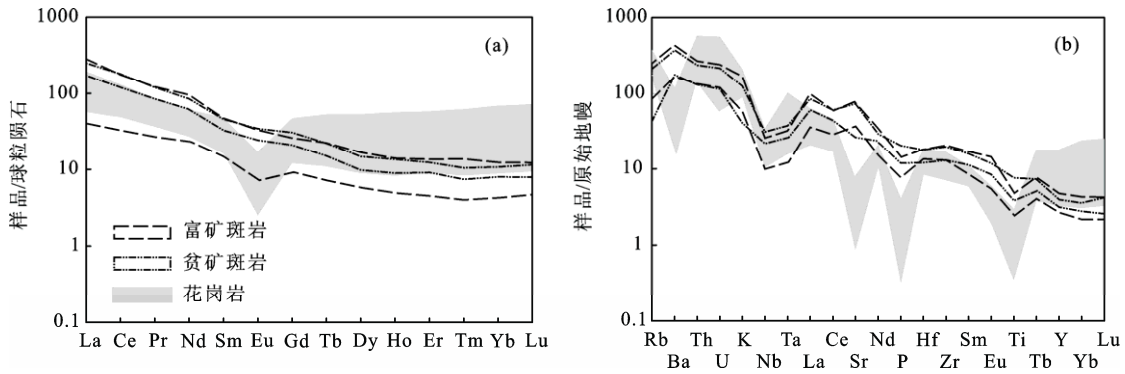


图 4 义敦地块闪长斑岩和花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the dioritic porphyries and granites in the Yidun terrane

标准化值据 Sun *et al.*^[52]。数据来源: 任江波等^[19]、Wang *et al.*^[21]、Chen *et al.*^[27]、Cao *et al.*^[31]、Liu *et al.*^[48]、曹殿华等^[50]及课题组未发表数据
Normalized values after Sun *et al.*^[52]. Data from Ren *et al.*^[19], Wang *et al.*^[21], Chen *et al.*^[27], Cao *et al.*^[31], Liu *et al.*^[48], Cao *et al.*^[50] and our unpublished data

3.2 全岩 Sr-Nd 和锆石 Lu-Hf 同位素组成

义敦地块中-晚三叠世闪长质斑岩(25 个富矿闪长斑岩与 6 个贫矿闪长斑岩)与花岗岩(25 个样品)的 Sr-Nd 同位素数据统计列于表 3。总体上, 富矿与贫矿闪长质岩石具有相似的 Sr-Nd 同位素组成, 而花岗岩则具有更富集的 Sr-Nd 同位素组成(表 3 和图 5)。其中所有闪长质斑岩 I_{Sr} 介于 0.70461~0.70770 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 -4.9 ~ -1.5 之间, 表明岩浆源区同位素组成不均一, 对应的 Nd 模式年龄为 0.98~1.30 Ga; 而花岗岩 I_{Sr} 介于 0.70588~0.72970 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 -8.8 ~ -5.2 之间, 略低于闪长斑岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 具有更老的二阶段 Nd 模式年龄($T_{DM}=1.41\sim 1.71$ Ga)。其中义敦地块中-晚三叠世闪长斑岩与甘孜-理塘缝合带东侧邻近区相同时代钾质埃达克质花岗岩和滇西角闪岩 Sr-Nd 同位素组成相同, 也具有该区新生代钾质埃达克质花岗岩一致的 Nd 同位素组成^[57]; 相似地, 花岗岩也与甘孜-理塘缝合带东部的松潘-甘孜地块相同时代 I-型花岗岩 Sr-Nd 同位素组成相似(图 5), 暗示它们的岩浆源区可能与松潘-甘孜地块中-晚三叠世侵入岩相似。

义敦地块中-晚三叠世闪长斑岩与花岗岩的锆石 Lu-Hf 同位素数据统计列于表 4。相似于全岩的 Sr-Nd 同位素组成, 富矿和贫矿闪长质斑岩具有相

同的锆石 Hf 同位素组成, 其初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282530~0.282781 之间, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -3.98~6.10, 二阶段模式年龄为 0.77~1.50 Ga, 峰值约为 1.20 Ga(图略); 花岗岩初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.281950~

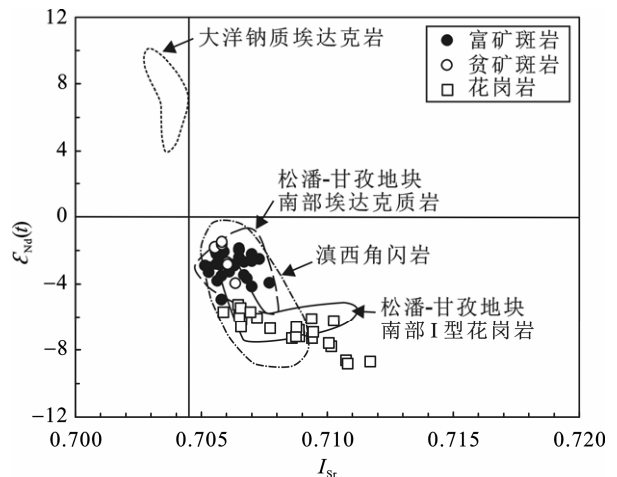


图 5 $\epsilon_{Nd}(t)$ - I_{Sr} 图解

Fig.5 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} diagram

斑岩与花岗岩数据来源于表 3 所引文献; 松潘-甘孜地块南部埃达克质岩和 I 型花岗岩区域数据来源于 Xiao *et al.*^[53]; 滇西角闪岩区域数据来源于邓万明等^[54]和赵欣等^[55]; 大洋钠质埃达克岩区域数据来源于 Wang *et al.*^[56]

Data sources are from Table 3; fields of adakitic and type-I granitoids in the southeast of the Songpan-Garze belt are after Xiao *et al.*^[53]; and their initial Hf ratios were calculated at $t = 216$ Ma; the field for western Yunnan amphibolite is from Deng *et al.*^[54] and Zhao *et al.*^[55]; the field for oceanic sodic adakite attributed to melting of subducting oceanic crust is after Wang *et al.*^[56]

表 3 义敦地块中-晚三叠世闪长斑岩与花岗岩的 Sr-Nd 同位素特征

Table 3 Summary of the whole-rock Sr-Nd isotope data for the Middle-Late Triassic dioritic porphyries and granites in the Yidun terrane

岩性	I_{Sr}	$\epsilon_{Nd}(t)$	T_{DM}, T_{2DM}	资料来源
富矿斑岩	0.70461~0.70770	-4.9 ~ -1.9	T_{DM} (Ga)=0.98~1.30	[19]、[21]、[24]、[27]
贫矿斑岩	0.70556~0.70635	-4.0 ~ -1.5	T_{DM} (Ga)=1.02~1.09	课题组未发表数据
花岗岩	0.70588~0.72970	-8.8 ~ -5.2	T_{2DM} (Ga)=1.41~1.71	[25]及课题组未发表数据

表4 义敦地块中-晚三叠世闪长斑岩与花岗岩的 Hf 同位素特征

岩性	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{2\text{DM}}$ (Ga)	资料来源
富矿斑岩	0.282530~0.282776	-3.98~6.10	0.77~1.50	[24]、[28]、[31]
贫矿斑岩	0.282578~0.282781	-2.25~5.02	0.93~1.35	[28]
花岗岩	0.281950~0.282745	-22.7~3.40	1.04~2.70	[25]、[28]

0.282745 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -22.7~3.40, 二阶段模式年龄为 1.04~2.70 Ga, 峰值约为 1.60 Ga(图略)。

4 讨论

4.1 岩石成因

虽然不同的研究者针对不同地区中酸性侵入岩的岩石成因进行过探讨, 但是, 对于同时代产于相同地区的岩浆岩的成因的解释, 目前依然存在分歧^[19,21,23-25,27,28,30-32]。因此, 有必要基于现有资料进一步全面系统地对整个区域相同时代中酸性侵入岩的成因进行综合分析和讨论。

4.1.1 闪长质斑岩

上文提到, 由于义敦地块南部部分中-晚三叠世闪长质斑岩赋存有大型-超大型的铜多金属矿床, 关于这些含矿斑岩的岩石成因, 已经开展了大量的研究^[19-21,23,24,27,28,30-32]。虽然前人研究^[21,23,24,27,28,30-31]认为这些闪长质斑岩具有埃达克质岩的特征(图 6a), 但是, 对于这些闪长质斑岩的起源和成因, 不同的研究者的解释存在差别。如基于对义敦南部含矿闪长斑岩在地球化学上显示具有埃达克质岩特征的高

Sr、Sr/Y 和 (La/Yb)_N 比值以及低的 Y 和 Yb_N 值(包括了高硅埃达克质岩和低硅埃达克质岩两类), 同时它们具有高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的特征, Wang *et al.*^[21]认为这些闪长质岩石起源于俯冲环境下玄武质洋壳和上覆海洋沉积物的部分熔融。相似的俯冲洋壳板片起源也被略早期的研究^[19]和 Leng *et al.*^[26]基于该区中酸性火山岩的研究所建议。相反, Peng *et al.*^[28]则基于这些闪长质岩石富钾而不同于洋壳板片起源岩浆富钠的特征, 认为这些岩石可能是加厚下地壳的部分熔融的产物。然而, 随着研究的深入, 最近 Kong *et al.*^[32]基于这些中酸性岩石的锆石 O 同位素的研究结果, 提出一个受到俯冲交代富集岩石圈地幔起源的解释; 事实上, Cao *et al.*^[31]又提出另一个下地壳起源的解释。此外, Leng *et al.*^[26]的研究也与其早期的认识^[24]有所不同, 提出这些中酸性的岩石是俯冲交代的富集岩石圈地幔部分熔融的结果, 并有少量大陆地壳物质的贡献。

综合目前的数据资料可发现, 无论是富集岩石圈地幔起源^[24,27,32]或是俯冲的洋壳板片来源^[19,21]都不能有效解释该区中酸性闪长质岩石的地球化学和同位素组成特征。如闪长质岩石富钾的特征

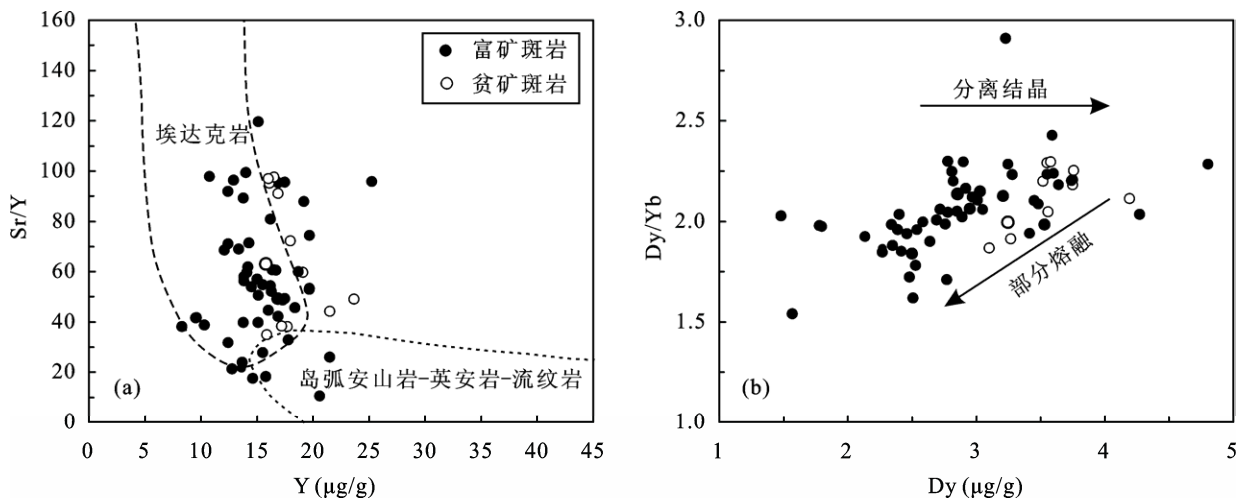


图6 义敦地区闪长斑岩 Sr/Y-Y 图解(a)和 Dy/Yb-Dy 图解(b)

Fig.6 Sr/Y-Y diagram (a) (after Defant *et al.*^[58-59]) and Dy/Yb-Dy diagram (b) of dioritic porphyries
图6a底图据 Defant *et al.*^[58-59]。数据来源: 任江波等^[19]、Wang *et al.*^[21]、Chen *et al.*^[27]、Cao *et al.*^[31]、Liu *et al.*^[48]、曹殿华等^[50]及课题组未发表数据
Data from Ren *et al.*^[19]、Wang *et al.*^[21]、Chen *et al.*^[27]、Cao *et al.*^[31]、Liu *et al.*^[48]、Cao *et al.*^[50] and our unpublished data

($K_2O/Na_2O > 0.5$, 表 2; Peng *et al.*^[28]及相关参考文献)明显不一致于俯冲洋壳板片来源的熔体具有富钠($K_2O/Na_2O < 0.5$)^[60-62]特征, 图 5 也显示了该区埃达克质岩的 Nd 同位素组成明显与大洋钠质埃达克质岩的 Nd 同位素组成不同。尽管其变化较大的锆石 O 同位素($\delta^{18}O = -5.8\% \sim -6.9\%$)^[32]特征, 可能与来自于俯冲板上覆沉积物(具有明显高的 O 同位素组成; $8\% \sim 10\%$)^[63]以及板片下部辉长岩(具有低 $\delta^{18}O$ 值特征: $3\% \sim 5\%$)^[64]有关, 但是由于地幔高温的特征, 其 O 同位素很容易被地幔均一化, 形成典型的地幔型 O 同位素组成($5.3 \pm 0.6\%$)^[65]。更为重要的是, 义敦南部这些中-晚三叠世的闪长质岩石, 无论从地球化学上, 还是同位素组成上, 都与甘孜-理塘缝合带对称的九龙地区同时代的埃达克质花岗岩^[53]相同, 也与该区同时代的碱性正长岩^[66]和新生代地壳来源的埃达克质花岗岩^[57]相同, 暗示它们具有共同的下地壳起源。这也与它们具有与滇西角闪岩相同的 Sr-Nd 同位素组成特征相一致(图 5)。因此, 这些中-晚三叠世的闪长质岩石的最合理的起源是下地壳的部分熔融, 且据全岩 Nd 和锆石的 Hf 模式年龄, 该下地壳应该是中新元古代的。

此外, 考虑到贫矿与富矿闪长质岩石展示相同的全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素组成的特征, 表明富

矿和贫矿闪长质岩石是同源岩浆的产物。贫矿闪长质岩石具有比富矿闪长质岩石更高的 MgO 和更低的 SiO_2 , 以及更弱 P 和 Ti 的负异常, 暗示从贫矿到富矿闪长质岩石的演化存在一定的矿物的分离结晶作用(图 3), 如磷灰石和钛铁矿等。而在稀土元素分布模式图和微量元素蛛网图中(图 4)并未表现出 Eu 和 Sr 的异常的差异, 暗示其岩浆的演化发生在地壳的深部, 非斜长石稳定区。而在 Dy/Yb-Dy 图解中(图 6b), 该闪长斑岩表现出部分熔融作用的趋势, 暗示它们的地球化学特征主要反映的是部分熔融的结果。此外, 富矿斑岩和贫矿斑岩具有相同的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(图 5)和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(图 7), 以及它们老的二阶段模式年龄(T_{2DM})峰值约为 $0.77 \sim 1.50$ Ga, 表明该区所有闪长质岩石都共同起源于中-晚元古代新生地壳的部分熔融(图 7)。因此, 下地壳起源能最有效地解释义敦地块南部中-晚三叠世闪长质斑岩源区特征^[28]。

4.1.2 花岗岩

与闪长质岩石相比, 义敦地区中-晚三叠世花岗岩具有更高的 SiO_2 和更低的 MgO 含量(图 3a), 以及稀土元素图解上具有非常显著的负 Eu 异常(图 4), 微量元素原始地幔标准化图解上有明显的负 Sr 异常(图 4), 可能暗示这些与闪长岩形成时代相同的花岗岩是闪长质岩浆分离结晶的产物。但是, 这些花岗

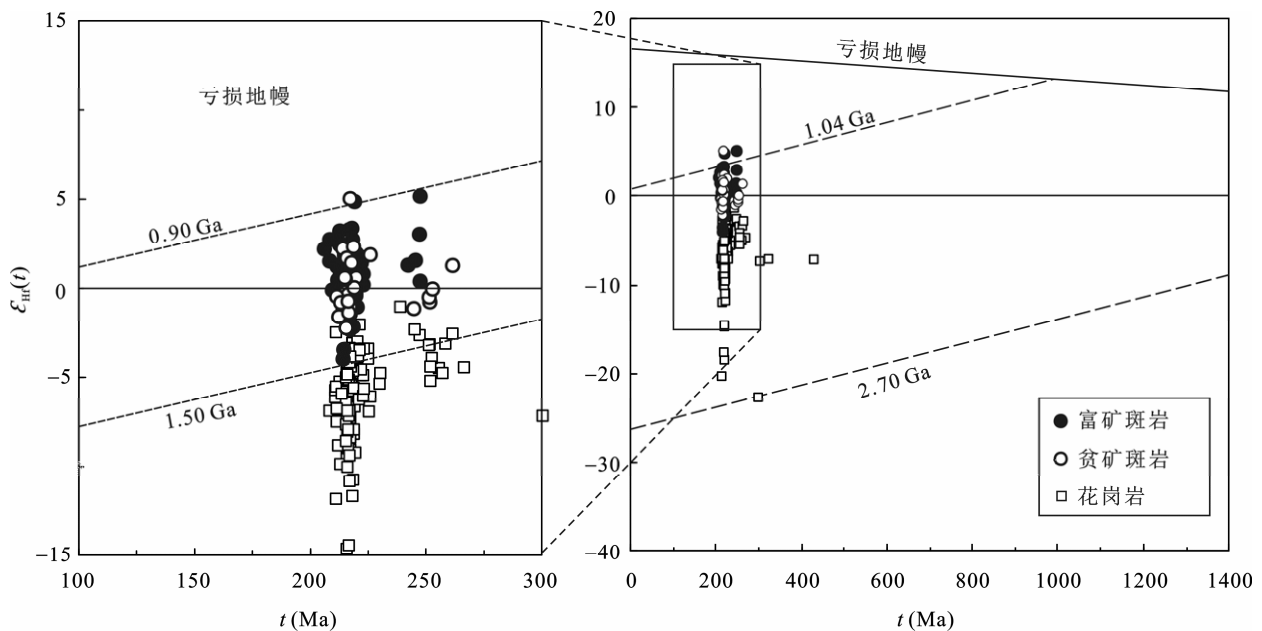


图 7 义敦地块中-晚三叠世侵入岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 与锆石 U-Pb 年龄关系图解

Fig. 7 Zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. U-Pb age plots for the Middle-Late Triassic intrusive rocks in the Yidun terrane 斑岩数据据 Leng *et al.*^[24], Peng *et al.*^[28]和 Cao *et al.*^[31]; 花岗岩数据据 He *et al.*^[25]和 Peng *et al.*^[28]; 球粒陨石及亏损地幔的 Hf 同位素组成数据据 Blichert-Toft *et al.*^[67]和 Vervoort *et al.*^[68]

Data sources for the porphyries are from Leng *et al.*^[24], Peng *et al.*^[28] and Cao *et al.*^[31]. Data sources for the granites are from He *et al.*^[25] and Peng *et al.*^[28]. Hf isotopic compositions of chondrite and depleted mantle are from Blichert-Toft *et al.*^[67] and Vervoort *et al.*^[68]

岩比闪长质岩石明显高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.70588~0.72970)及低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-8.8~-5.2)和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(表3),明显不支持这些花岗岩是闪长质岩浆分离结晶作用的产物或者经历过地壳的混染的结果。此外,从花岗岩和闪长质岩石在该区剥露体积考虑,如此巨大规模的花岗岩的产出,需要更大规模的闪长质岩浆的出露,而仅局限出露于花岗岩南部的闪长质岩石很显然不支持其起源于闪长质岩浆的分异。相反,如此的特征更可能说明这些花岗岩来源于更古老的中上地壳的部分熔融。

结合其老的二阶段Nd模式年龄(1.41~1.71 Ga)和Hf模式年龄(~1.60 Ga),表明这些中-晚三叠世花岗岩主要起源于中元古代基底物质的部分熔融^[28, 39]。但是,也有研究者基于简单的两端元混合计算,将这些花岗岩归因于除了来源于古老基底的熔融外,还有地幔物质的参与,其混入亏损地幔的物质质量可能达到了近20%^[25]。重要的是,我们最近的研究显示,分布于义敦地块中-晚三叠世的花岗岩基两侧的玄武岩具有比He *et al.*^[25]用来混合计算更富集的Nd同位素组成($\epsilon_{\text{Nd}}(t) < 2$; 课题组未发表的数据),在这种情况下,Sr-Nd同位素的混合计算将需要更多的地幔物质的加入,将可能超过50%。很显然,如此大量的高温地幔物质的混合与花岗岩具有低的锆石饱和温度不一致(594~800 °C, avg=757 °C; 课题组未发表的数据)。因此,综合起来考虑,义敦地块这些中-晚三叠世花岗岩主要起源于不均一的中上地壳中元古代基底的部分熔融,地幔物质仅仅提供了中上地壳熔融需要的热。

4.2 构造背景

长期以来,义敦地块被认为是扬子板块的一部分,是在古特提斯洋演化过程中沿着甘孜-理塘缝合带从扬子板块裂解出去的^[34]。而且基于全岩Nd和锆石Hf同位素的研究显示,义敦地块应该与松潘-甘孜地块类似具有与扬子西部变质基底康定杂岩相同的基底物质组成,如义敦地块和松潘-甘孜地块中-晚三叠世地壳来源的花岗质岩石的全岩Nd和锆石Hf同位素组成均显示与扬子西部康定杂岩部分熔融的熔体相同的同位素组成特征^[25, 28, 53, 69, 70]。尽管对于甘孜-理塘洋盆的性质是古特提斯分支洋盆还是弧后洋盆目前还缺乏足够证据区分,而对义敦地块在甘孜-理塘洋盆演化过程中具有陆弧的性质应该不存在争议。但是对于义敦地块中-晚三叠世所处的

大地构造背景,目前存在很大的争议。

比如,大部分研究者基于义敦南部中-晚三叠世闪长质斑岩伴生有大型-超大型铜矿,认为斑岩型铜矿的形成与环太平洋俯冲带的斑岩型铜矿的产出构造背景类似,形成于洋壳板片的俯冲背景^[19, 21, 24, 33, 71]。另一部分研究者基于对甘孜-理塘缝合带东部松潘-甘孜地块中相似时代花岗质岩石的研究,认为甘孜-理塘洋盆在中-晚三叠世时期即已经闭合,这些花岗质岩浆作用是碰撞后造山带垮塌^[57, 69]或者板片断离的产物^[70]。对于甘孜-理塘缝合带两侧相同时代岩浆作用的构造背景的不同解释,主要在于前人并未更全面从甘孜-理塘洋盆的演化作为一个统一系统来考虑。在前人的研究资料基础上我们进一步综合分析发现,与义敦南部中甸地区闪长质斑岩相似,缝合带东侧的松潘-甘孜的西南部也出露了一套富钾特征的埃达克质岩石^[57, 69, 72],特别是紧邻缝合带东侧与中甸地区^[19, 21, 24]对称的川西九龙地区^[53]同时出现这套富钾的埃达克质岩石,这套埃达克质岩石为花岗岩,具有与中甸地区埃达克质斑岩相似的地球化学特征和相同的Sr-Nd同位素组成(图5),这种下地壳来源的埃达克质岩石同时出现在缝合带两侧,很显然用甘孜-理塘洋壳的西向俯冲无法从时空上解释这套岩石的出现。事实上,综合对比缝合带两侧中-晚三叠世的沉积特征也可发现,缝合带两侧包括西侧东义敦地块(如昌台、义敦、理塘、波密、得荣、稻城、乡城和古学1:20万地质图)和东侧松潘-甘孜西南缘地区沉积相似厚度(>10000 m; 如新龙、禾尼、贡嘎和九龙1:20万地质图)、相同类型的类复理石沉积,而且其沉积厚度在东义敦地块的西缘-远离缝合带(如昌台、义敦、波密、得荣和古学1:20万地质图)保持相同的沉积特征和厚度,缝合带两侧地区如此相同的沉积特征和沉积厚度,反映它们处于相同的沉积构造环境和背景。尤为重要的是,Wang *et al.*^[73]和课题组未发表的中-晚三叠世沉积碎屑锆石显示,义敦地区中南部中-晚三叠世碎屑锆石具有与松潘-甘孜地区中-晚三叠世碎屑锆石相同年龄频谱特征,而且,两者都未记录有最年轻的所谓中-晚三叠世弧岩浆作用的年龄信息。也就是说,如果中-晚三叠世义敦地块处于岩浆弧的构造背景,其中-晚三叠世的沉积应该记录有中-晚三叠世弧岩浆作用的年代学信息,而且东义敦地块作为中-晚三叠世的岛弧,其西部边缘地区的沉积特征和厚度由于其本身的地形高差应该与缝合带东侧代表弧前沉

积的特征和厚度上有所不同。因此, 从缝合带两侧的岩浆和沉积特征来看(图 8), 甘孜-理塘洋盆在中-晚三叠世时期应该已经闭合, 其构造背景应该处于碰撞后的伸展环境^[28, 53, 69, 70, 72]。实际上, 最近侯增谦课题组对中甸地区的晚三叠世伸展有关的碱性岩的研究进一步提出, 晚三叠世时期该区已经进入到碰撞后的演化阶段^[66]。同样地, 缝合带东侧松潘-甘孜地区也证实了晚三叠世伸展有关的 A 型花岗岩的出现^[72]。也就是甘孜-理塘洋盆至少在中三叠世已经

闭合, 中晚三叠世演化进入碰撞后的阶段。

考虑到三江地区存在两个重要的古特提斯洋盆的演化, 如龙木措-双湖-昌宁-孟连和金沙江-哀牢山洋盆^[34, 74], 义敦地块内的早中生代岩浆岩也可能为其西部龙木措-双湖-昌宁-孟连或金沙江-哀牢山洋盆俯冲阶段的岛弧岩浆作用的产物。然而, 基于两个构造带变质-岩浆-沉积作用的研究显示, 义敦地块西部的两个古特提斯洋盆在中三叠世早期已经闭合。如变质岩的研究上, 龙木措-双湖构造带昌都巴

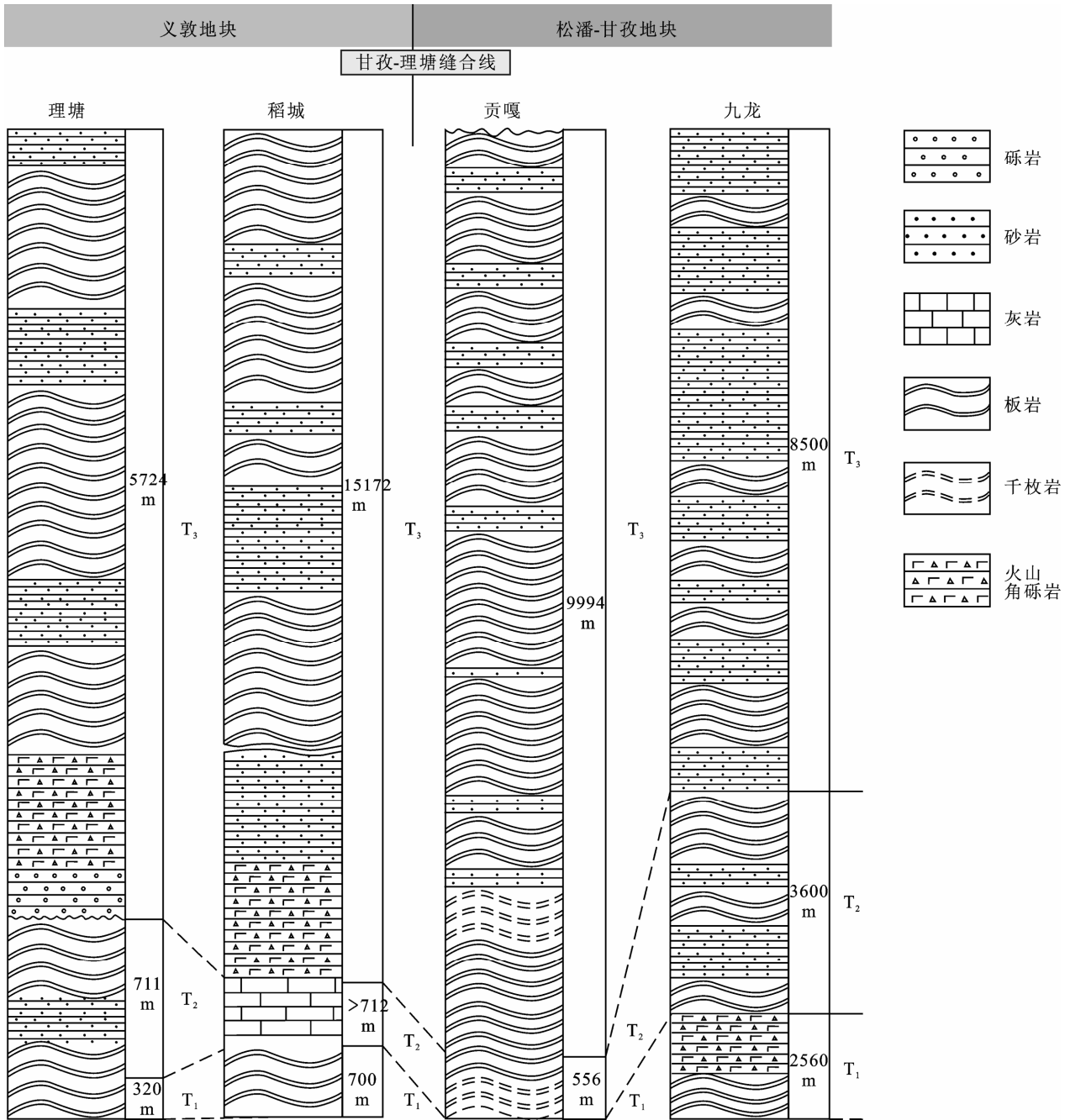


图 8 甘孜-理塘缝合带邻区地层柱状图(据四川区域地质图^[36]修改)

Fig.8 The stratigraphic columnplots on the two sides of the Ganzi-Litang suture zone (after Sichuan Geological Map^[36])

青地区蓝片岩中的多硅白云母给出了~230 Ma 的 Ar-Ar 年龄^[75], 羌塘尼玛地区的榴辉岩中的多硅白云母的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年结果为~220 Ma^[76], 澜沧江构造带澜沧地区蓝片岩中的多硅白云母给出了~238 Ma 的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 的年龄^[77]; 这些高压变质岩中的多硅白云母 Ar-Ar 年龄应该代表了高压变质岩的快速折返至地表的过程中冷却至 Ar-Ar 封闭的时间, 高压超高压变质岩的快速折返也得到了高压变质岩的蓝闪石 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学的支持, 如澜沧江高压蓝片岩中高压蓝闪石的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 242 Ma^[78], 而这种高压变质岩的折返通常与洋壳俯冲结束进入大陆俯冲或碰撞后的转变有关, 代表了洋壳俯冲结束的时间^[79]; 岩浆作用的特征上, 澜沧江带中晚三叠世碰撞后伸展型岩石组合的出现^[80-81]以及金沙江-哀牢山构造带晚二叠世同碰撞型岩浆岩的识别和证实^[82-83], 也指示该区古特提斯洋盆在中三叠世早期已经闭合; 而区域沉积特征上, 整个三江地区普遍缺失早三叠世地层的特征^[84](图 9), 表明整个区域在早三叠世处于抬升剥蚀阶段, 与洋壳板片的俯冲背景不符, 暗示了区域上在早三叠世的碰撞造山作用的存在。尽管, 冯庆来的研究组在甘孜-理塘构造带发现少量的中-晚三叠世的放射虫^[85], 而并未识别出早三叠世的放

射虫的特征, 一种可能的解释是, 这些放射虫形成于中-晚三叠世陆表海或内陆海的环境^[86], 与碰撞后岩石圈垮塌、快速伸展导致陆壳裂解有关, 这与整个松潘甘孜和义敦地块具有扬子地块相同的陆壳基底相吻合。

综合区域的和整个三江古特提斯构造域的演化特征, 以及相关的岩浆作用主要集中于各自古特提斯构造带展布, 而未发现跨越构造带之间的块体的特征^[34, 74], 我们趋向于认为义敦地区中-晚三叠世的岩浆作用主要是其构造带(甘孜-理塘特提斯洋盆)演化的产物, 且这些岩浆作用的产生应该对应于碰撞后的构造背景。

4.3 动力学机制

关于碰撞后岩浆作用的动力学机制, 可能与俯冲板片断离(slab breakoff)^[87]、岩石圈底部对流减薄(convective thinning of lithosphere)^[88]、造山带伸展垮塌(extension and collapse of orogenic belt)^[89]或岩石圈拆沉(lithospheric detachment or delamination)^[90-91]等有关。

虽然板片断离是碰撞后岩浆作用和伸展的有效的、重要的机制, 且 Cao *et al.*^[31]也引用这个模型来

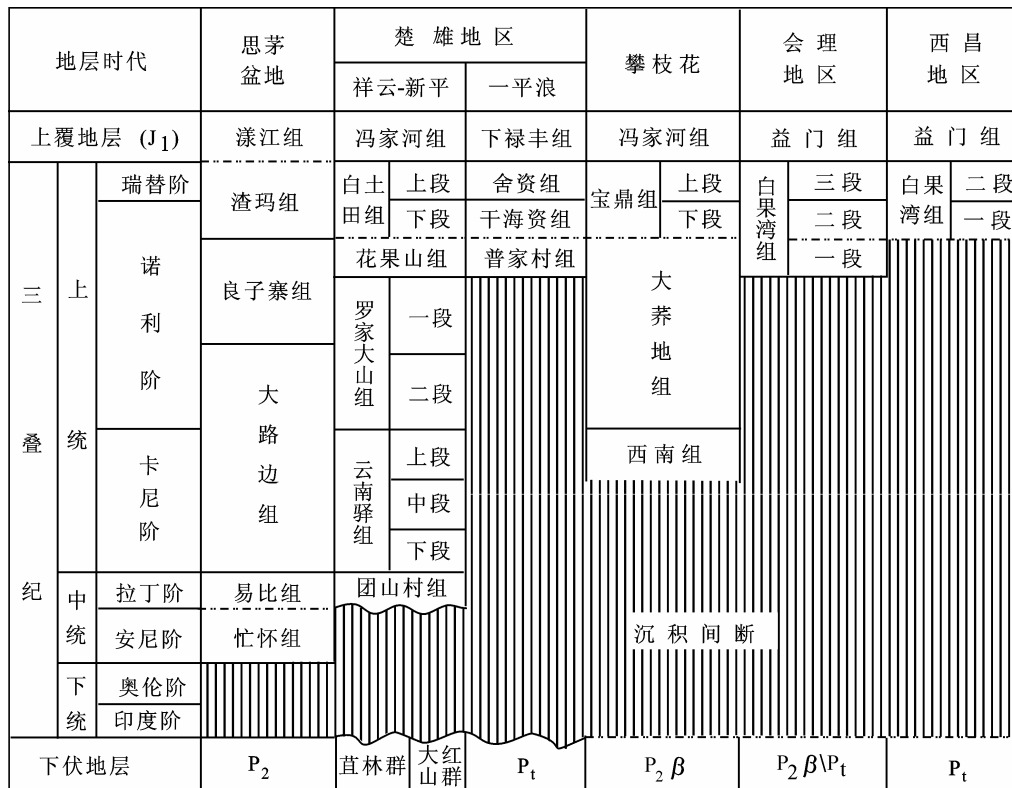


图 9 中国西南三江地区三叠纪地层对比图(据许效松等^[84])

Fig.9 Comparison of the Triassic strata in the Sanjiang area, SW China (after Xu *et al.*^[84])

解释义敦南部晚三叠世含矿闪长质斑岩的成因, 而 Yuan *et al.*^[70] 基于松潘-甘孜地体内中-晚三叠世的花岗岩的研究提出板片断离机制来解释松潘-甘孜中-晚三叠世的岩浆-沉积作用。已有的研究表明, 板片断离(slab breakoff)的岩浆作用在空间上呈带状展布^[92], 且通常伴随着高压-超高压变质岩的出露^[93-94]。从中-晚三叠世岩浆作用的展布特征可见, 中-晚三叠世的岩浆作用不仅沿着甘孜-理塘缝合带两侧分布, 且向松潘-甘孜内部延伸展布, 并不具有明显的带状分布的特征; 如此的岩浆作用的时空方式看起来类似岩石圈对流减薄作用的产物, 但是考虑到岩石圈对流减薄的前提条件是需要足够的热扩散进入到冷的岩石圈内部才能发生逐步的热侵蚀作用, 而这个热的扩散至少需要近 200 Ma 的时间^[95], 这明显与从碰撞造山的峰期抬升到碰撞后的伸展通常发生在很短的时间内(~10 Ma)不符。

此外, 造山带垮塌也被认为是碰撞后伸展及其岩浆作用的重要的机制^[89]。事实上, 造山带垮塌通常会致导致岩石圈的拆沉^[96]。但是岩石圈拆沉存在两种不同方式, 一种是岩石圈加上部分加厚下地壳的整体拆沉^[91], 另一种方式是仅加厚的岩石圈下部被拆离(部分岩石圈被拆沉掉)^[97-98]。对于甘孜-理塘缝合带的演化, 前人基于松潘-甘孜中-晚三叠世花岗质岩石, 特别是钾质埃达克质和 A 型花岗岩的共同出现^[53,69,72], 调用了岩石圈拆沉(岩石圈包括加厚下地壳的整体拆沉)模型来解释这些岩浆作用时空特征。然而进一步综合区域的资料分析可发现, 该区一直到新生代依然存在一个受到俯冲交代的富集岩石圈地幔, 如义敦南部新生代交代富集地幔来源的碱性岩的证实^[57], 考虑到该区晚中生代以来并未发生过板块俯冲事件, 因此, 新生代富集岩石圈地幔在该区的存在, 暗示该区在中-晚三叠世的岩石圈地幔拆沉过程中不可能全部被拆沉掉。更为重要的是, 如果岩石圈地幔加上部分下地壳被整体拆沉, 则岩浆作用的一个重要的特征是, 该区会出露更多的软流圈来源的碱性玄武岩(OIB 型)。课题组近年的研究显示(课题组未发表的数据), 该区出露最多的是晚三叠世具有俯冲交代的富集岩石圈地幔来源的玄武岩, 而且有极少量的具有 OIB 特征。综合以上, 造山带下部加厚岩石圈地幔根(部分)拆沉不仅能更好地解释甘孜-理塘缝合带两边中-晚三叠世的岩浆作用, 也能更好地解释该区新生代碱性岩浆的富集地幔的起源问题。

也就是说, 甘孜-理塘洋盆中三叠世早期在该区的完全闭合, 导致了义敦地块和松潘-甘孜地块的碰撞, 并使该区深部岩石圈和下地壳加厚, 加厚的岩石圈地幔由于重力不稳最终导致部分下部加厚岩石圈地幔拆沉掉入软流圈地幔^[96], 并导致软流圈地幔的上涌, 更热的软流圈引发上覆富集岩石圈地幔的部分熔融, 形成的岩浆小部分喷出地表, 大部分由于厚的地壳而底侵于下地壳, 导致区域上加厚的下地壳熔融, 形成了缝合带两侧相似类型的埃达克质岩石^[19,21,24,27,28,53,72]。同样, 部分基性岩浆侵位到上地壳, 引发大规模的熔融形成区域上大面积的花岗质岩浆。与此同时, 软流圈上涌会发生减压熔融形成 OIB 型的岩浆, 但是由于上覆岩石圈和地壳的厚度阻碍, 仅仅少量的软流圈来源的岩浆喷出地表(课题组未发表的数据)。

4.4 成矿条件讨论

在我国, 有研究报道一些与 Cu-Au 成矿有关的岩石通常具有埃达克质岩的地球化学特征^[99-105]。义敦地区多金属矿床不仅在空间上与中酸性闪长斑岩侵入体具有密切的联系, 而且其高精度成岩成矿年代学研究表明, 斑岩型矿床的成岩和成矿在时间上一致, 均形成于中-晚三叠世^[19, 21, 24, 27, 28, 30]。因此可知, 中-晚三叠世闪长斑岩对义敦地区斑岩型多金属矿床的形成至关重要。

岩浆作用与成矿是一个复杂的过程, 最终的成矿作用受到岩浆、侵位地层、热液运移、热液蚀变作用和构造空间的控制作用的影响^[106], 如义敦南部含矿斑岩的侵位深度的不同, 造成普朗、雪鸡坪与春都斑岩铜矿床规模不一^[107]; 不同来源的流体在不同阶段的参与也会导致成矿属性和规模的差别, 雪鸡坪铜矿床流体包裹体的研究就揭示, 雪鸡坪矿床不同阶段成矿流体存在差异, 雪鸡坪铜矿床可能为不同来源、不同地球化学性质热液叠加作用的结果^[108]。即便如此, 岩浆的高氧逸度和高水分含量是促成铜多金属矿化的两个至关重要的关键性因素^[109-111], 当岩浆呈现高氧逸度时, Cu、Au 等成矿元素更容易随硫化物的氧化而富集到岩浆熔体中, 并在之后的岩浆上侵过程中将 Cu、Au 等成矿物质在合适的条件下从熔体中释放进而成矿^[109,112]。由于前人的研究普遍将该区闪长质斑岩作为成矿的母岩浆, 认为斑岩的源区本身具有高氧逸度和高水分的特征, 满足铜多金属成矿的前提条件^[19,24,26,27,31,32]。但是, 正如

前面讨论, 义敦南部的闪长质斑岩主要起源于略老的中元古代下地壳的部分熔融。虽然最近的研究揭示, 弧下的下地壳的部分熔融可以满足斑岩成矿的高氧逸度和高水分含量的特征, 如受到流体交代的弧下堆晶辉长岩在加厚下地壳变质成石榴石角闪岩再部分熔融, 其形成的熔体满足斑岩铜多金属成矿的高氧逸度和高水分的条件^[113-115]。考虑到义敦南部闪长质岩石与其缝合带东侧的松潘-甘孜地块花岗岩岩石以及扬子西缘的中酸性岩石都具有相似的埃达克质特征, 且显示相同的下地壳起源的属性(图 5 和图 7), 而后两者目前并未发现任何铜多金属矿化的现象, 这可能暗示这些相同起源的埃达克质岩石的源区可能并不具有成矿所需的高氧逸度和高水分的特征。事实上, 前人基于 S 和 Pb 同位素测试数据, 分析了该区斑岩铜矿床的 S 来源于地幔^[24, 116], 且 Leng *et al.*^[24] 基于辉钼矿的 Re 的含量的研究也揭示出 Cu 地幔起源的特征。由此可见, 义敦南部斑岩铜矿成矿所需的高氧逸度和高水分的条件可能与缝合带西

侧受到古特提斯俯冲释放的流体交代的富集岩石圈地幔有关, 如此的富集岩石圈地幔满足以上两个关键的因素, 区域上与闪长质斑岩相伴生的同时代的基性玄武岩的岩浆源区是否代表如此的地幔源区, 需要进一步详细的研究。除此之外, 斑岩母岩浆与成矿流体之间的关系以及成矿的末端效应是如何控制成矿规模和成矿类型, 如何造成区域上相同的斑岩成矿规模和特征存在差异(图 10), 需要更详细和系统的研究。

5 结 论

- (1) 义敦地块中-晚三叠世的岩浆作用开始于~237 Ma, 其峰期时间为~216 Ma。
- (2) 义敦地体中-晚三叠世闪长斑岩是下地壳部分熔融的产物。
- (3) 义敦地体中-晚三叠世花岗岩是中上地壳部分熔融的结果, 地幔物质仅仅提供了熔融需要的热。

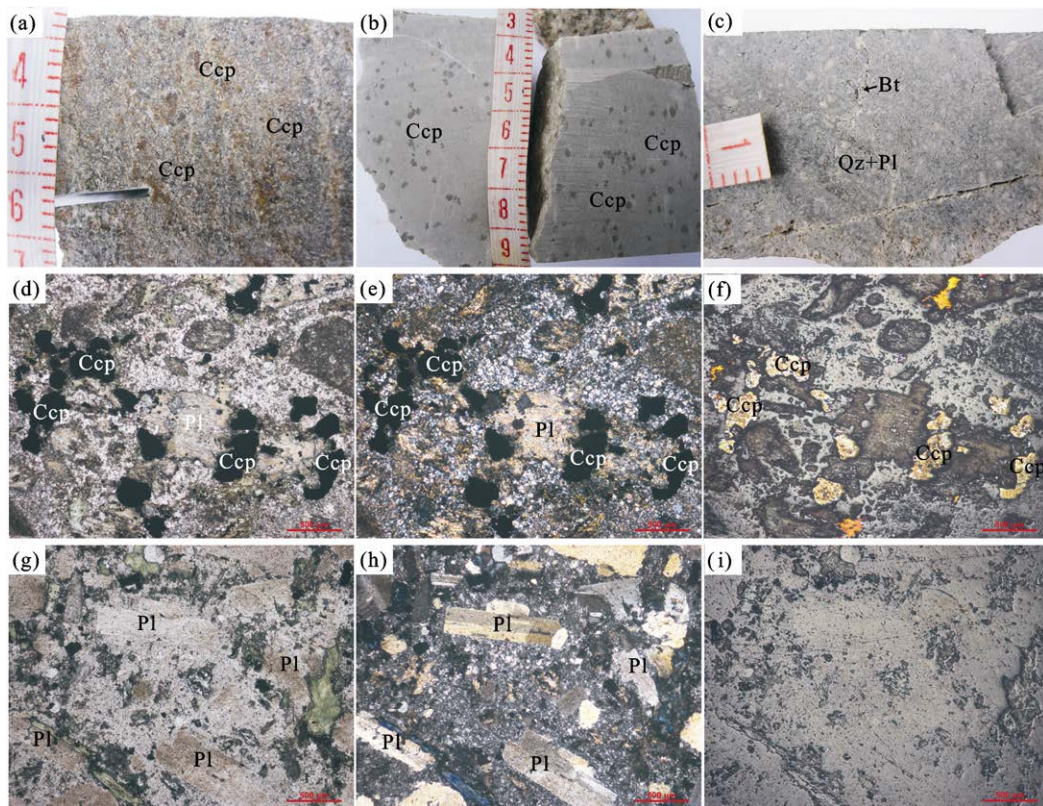


图 10 富矿与贫矿闪长质岩石手标本及其镜下显微特征

Fig.10 Rock specimens and microscopic characteristics of the ore-bearing and ore-barren dioritic rocks
富矿闪长质岩: (a)、(b)手标本; (d)单偏光下; (e)正交偏光; (f)反射光下。贫矿闪长质岩: (c)手标本; (g)单偏光下; (h)正交偏光; (i)反射光下
Ore-bearing dioritic rocks: (a),(b) rock specimens; (d) under transmitted plane-polarized light; (e) under transmitted orthogonal-polarized light; (f) underreflected light
Ore-barren dioritic rocks: (c) rock specimens; (g) under transmitted plane-polarized light; (h) under transmitted orthogonal-polarized light; (i) underreflected light

(4) 甘孜-理塘洋盆至少在中三叠世早期已经闭合, 缝合带两侧中-晚三叠世的岩浆作用发生于碰撞后的构造背景, 与碰撞后的岩石圈地幔折沉有关。

(5) 形成斑岩的源区-下地壳可能并不具有斑岩铜多金属成矿所需的高氧逸度和高水分的特征。

感谢审稿人和编辑部老师的建设性意见和建议。本研究得到了中国科学院地球化学研究所高剑峰百人计划项目的资助, 在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 37-42.
Deng Jun, Hou Zeng-qian, Mo Xuan-xue, Yang Li-qiang, Wang Qing-fei, Wang Chang-ming. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 37-42 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邓军, 杨立强, 葛良胜, 袁士松, 王庆飞, 张静, 龚庆杰, 王长明. 滇西富碱斑岩型金成矿系统特征与变化保存[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1633-1645.
Deng Jun, Yang Li-qiang, Ge Liang-sheng, Yuan Shi-song, Wang Qing-fei, Zhang Jing, Gong Qing-jie, Wang Chang-ming. Character and post-ore changes, modifications and preservation of Cenozoic alkali-rich porphyry gold metallogenic system in western Yunnan, China[J]. Acta Petrol Sinica, 2010, 26(6): 1633-1645 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邓军, 葛良胜, 杨立强. 构造动力体制与复合造山作用-兼论三江复合造山带时空演化[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1099-1114.
Deng Jun, Ge Liang-sheng, Yang Li-qiang. Tectonic dynamic system and compound orogeny: Additionally discussing the temporal spatial evolution of Sanjiang orogeny, Southwest China[J]. Acta Petrol Sinica, 2013, 29(4): 1099-1114 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘江涛, 杨立强, 吕亮. 中甸普朗还原性斑岩型铜矿床: 矿物组合与流体组成约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 3914-3924.
Liu Jiang-tao, Yang Li-qiang, Lü Liang. Pulang reduced porphyry copper deposit in the Zhongdian area, Southwest China: Constrains by the mineral assemblages and the ore-forming fluid compositions[J]. Acta Petrol Sinica, 2013, 29(11): 3914-3924 (in Chinese with English abstract).
- [5] Deng J, Wang Q F, Li G J, Santosh M. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. Earth Sci Rev, 2014, 138: 268-299.
- [6] Li W C, Zeng P S, Hou Z Q, White N C. The Pulang porphyry copper deposit and associated felsic intrusions in Yunnan province, Southwest China[J]. Econ Geol, 2011, 106(1): 79-92.
- [7] 邓军, 杨立强, 王长明. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2501-2509.
Deng Jun, Yang Li-qiang, Wang Chang-ming. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys[J]. Acta Petrol Sinica, 2011, 27(9): 2501-2509 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邓军, 王长明, 李龚健. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1349-1361.
Deng Jun, Wang Chang-ming, Li Gong-jian. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys[J]. Acta Petrol Sinica, 2012, 28(5): 1349-1361 (in Chinese with English abstract).
- [9] Deng J, Wang Q F, Li G J, Li C S, Wang C M. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 419-437.
- [10] Deng J, Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. Gondwana Research, 2015, 62: 219-274.
- [11] 侯增谦, 杨岳清, 王海平, 曲晓明, 吕庆田, 黄典豪. 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, 2003: 1-345.
Hou Zeng-qian, Yang Yue-qing, Wang Hai-ping, Qu Xiao-ming, Lü Qing-tian, Huang Dian-hao. Collision-Orogenic Progress and Mineralization System of Yidun Arc[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-345 (in Chinese).
- [12] 曾普胜, 莫宣学, 喻学忠, 侯增谦, 徐启东, 王海平, 李红, 杨朝志. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 393-400.
Zeng Pu-sheng, Mo Xuan-xue, Yu Xue-zhong, Hou Zeng-qian, Xu Qi-dong, Wang Hai-ping, Li Hong, Yang Chao-zhi. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, Northwestern Yunnan[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 393-400 (in Chinese with English abstract).
- [13] 曾普胜, 李文昌, 王海平, 李红. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 989-1000.
Zeng Pu-sheng, Li Wen-chang, Wang Hai-ping, Li Hong. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: Petrology and chronology[J]. Acta Petrol Sinica, 2006, 22(4): 989-1000 (in Chinese with English abstract).
- [14] 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 2006, 25(1): 133-137.
Lin Qing-cha, Xia Bin, Zhang Yu-quan. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the syn-collision Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications[J]. Geol Bull China, 2006, 25(1): 133-137 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李文昌, 曾普胜. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(4): 436-446.
Li Wen-chang, Zeng Pu-sheng. Characteristics and metallogenic model of the Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China[J]. J Chengdu Univ Technol, 2007, 34(4): 436-446 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 秦朝建, 马德云, 王外全. 滇西北普朗斑岩铜矿锆石离子探针 U-Pb 年龄: 成矿时限及地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2313-2321.
Wang Shou-xu, Zhang Xing-chun, Leng Cheng-biao, Qin Chao-jian, Ma De-yun, Wang Wai-quan. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Pulang porphyry copper deposit, northern Yunnan, China: The ore-forming time limitation and geological significance[J]. Acta Petrol Sinica, 2008, 24(10): 2313-2321 (in Chinese with English abstract).

- [17] 李文昌, 尹光侯, 卢映祥, 刘学龙, 许东, 张世权, 张娜. 中甸普朗复式斑岩体演化及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1421–1429.
Li Wen-chang, Yin Guang-hou, Lu Ying-xiang, Liu Xue-long, Xu Dong, Zhang Shi-quan, Zhang Na. The evolution and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic evidence of the Pulang complex in Zhongdian[J]. Acta Geol Sinica, 2009, 83(10): 1421–1429 (in Chinese with English abstract).
- [18] 庞振山, 杜杨松, 王功文, 郭欣, 曹毅, 李青. 云南普朗复式岩体锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 159–165.
Pang Zhen-shan, Du Yang-song, Wang Gong-wen, Guo Xin, Cao Yi, Li Qing. Single-grain zircon U-Pb isotopic ages, geochemistry and its implication of the Pulang complex in Yunnan Province, China[J]. Acta Petrol Sinica, 2009, 25(1): 159–165 (in Chinese with English abstract).
- [19] 任江波, 许继峰, 陈建林. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2591–2599.
Ren Jiang-bo, Xu Ji-feng, Chen Jian-lin. Zircon geochronology and geological implications of ore-bearing porphyries from Zhongdian arc[J]. Acta Petrol Sinica, 2011, 27(9): 2591–2599 (in Chinese with English abstract).
- [20] 陈建林, 许继峰, 任江波, 王保弟, 余红霞. 俯冲型和碰撞型含矿斑岩地球化学组成的差异[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2733–2742.
Chen Jian-lin, Xu Ji-feng, Ren Jiang-bo, Wang Bao-di, Yu Hong-xia. Geochemical differences between the subduction and collisional type ore-bearing porphyric rocks[J]. Acta Petrol Sinica, 2011, 27(9): 2733–2742 (in Chinese with English abstract).
- [21] Wang B Q, Zhou M F, Li J W, Yan D P. 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, 2011, 127: 24–38.
- [22] 杨帆, 邹国富, 吴京, 李峰, 姜永果, 赵向东. 中甸春都铜矿区岩体成岩时代及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 307–314.
Yang Fan, Zou Guo-fu, Wu Jing, Li Feng, Jiang Yong-guo, Zhao Xiang-dong. Ages and geological significance of the porphyries in the Chundu copper mining area in Zhongdian, Yunnan Province[J]. Geotecton Metallogen, 2011, 35(2): 307–314 (in Chinese with English abstract).
- [23] 黄肖潇, 许继峰, 陈建林, 任江波. 中甸岛弧红山地区两期中酸性侵入岩的年代学、地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1493–1506.
Huang Xiao-xiao, Xu Ji-feng, Chen Jian-lin, Ren Jiang-bo. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of two periods of intermediate-acid intrusive rocks from Hongshan area in Zhongdian arc[J]. Acta Petrol Sinica, 2012, 28(5): 1493–1506 (in Chinese with English abstract).
- [24] Leng C B, Zhang X C, Hu R Z, Wang S X, Zhong H, Wang W Q, Bi X W. 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]. J Asian Earth Sci, 2012, 60(22): 31–48.
- [25] He D F, Zhu W G, Zhong H, Ren T, Bai Z J, Fan H P. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of the Daocheng granitic pluton from the Yidun Arc, SW China[J]. J Asian Earth Sci, 2013, 67(1): 1–17.
- [26] Leng C B, Huang Q Y, Zhang X C, Wang S X, Zhang H, Hu R Z, Bi X W, Zhu J J, Wang X S. 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, 2014, 190(2): 363–382.
- [27] Chen J L, Xu J F, Ren J B, Huang X X, Wang B D. Geochronology and geochemical characteristics of Late Triassic porphyritic rocks from the Zhongdian arc, eastern Tibet, and their tectonic and metallogenic implications[J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 492–504.
- [28] Peng T P, Zhao G C, Fan W M, Peng B X, Mao Y S. Zircon geochronology and Hf isotopes of Mesozoic intrusive rocks from the Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Petrogenesis and their bearings with Cu mineralization[J]. J Asian Earth Sci, 2014, 80(2): 18–33.
- [29] 刘学龙, 李文昌, 张娜, 尹光侯, 邓明国. 云南格咱岛弧地苏嘎成矿岩体 I 型花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质评论, 2014, 60(1): 103–114.
Liu Xue-long, Li Wen-chang, Zhang Na, Yin Guang-hou, Deng Ming-guo. Geochronological, geochemical characteristics of Disuga ore-forming I-type granitic porphyries in the Geza arc, Yunnan Province, and their geological significance[J]. Geol Rev, 2014, 60(1): 103–114 (in Chinese with English abstract).
- [30] 吴涛. 藏东义敦岛弧带早中生代岩浆活动与构造演化过程[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015: 1–153.
Wu Tao. Early Mesozoic magmatism and tectonic evolution of Yidun Arc Belt, Eastern Tibet Plateau[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2015: 1–153 (in Chinese with English abstract).
- [31] Cao K, Xu J F, Chen J L, Huang X X, Ren J B, Zhao X D, Liu Z X. Double-layer structure of the crust beneath the Zhongdian arc, SW China: U-Pb geochronology and Hf isotope evidence[J]. J Asian Earth Sci, 2016, 115: 455–467.
- [32] Kong D X, Xu J F, Chen J L. Oxygen isotope and trace element geochemistry of zircons from porphyry copper system: Implications for Late Triassic metallogenesis within the Yidun Terrane, southeastern Tibetan Plateau[J]. Chem Geol, 2016, 441: 148–161.
- [33] 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 杨岳清, 黄典豪, 吕庆田, 唐绍华, 余金杰, 王海平, 赵金花. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. 地质学报, 2001, 75(4): 484–497.
Hou Zeng-qian, Qu Xiao-ming, Zhou Ji-rong, Yang Yue-qing, Huang Dian-hao, Lü Qing-tian, Tang Shao-hua, Yu Jin-jie, Wang Hai-ping, Zhao Jin-hua. Collision-orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: Record of granites[J]. Acta Geol Sinica, 2001, 75(4): 484–497 (in Chinese with English abstract).
- [34] 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 王立全, 杜德勋, 莫宣学, 李定谋, 汪名杰, 李兴振, 江新胜, 胡云中. 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, 2003: 278–420.
Pan Gui-tang, Xu Qiang, Hou Zeng-qian, Wang Li-quan, Du De-xun, Mo Xuan-xue, Li Ding-mou, Wang Ming-jie, Li Xing-zhen, Jiang Xin-sheng, Hu Yun-zhong. Archipelagic Orogenesis, Metallogenic Systems and Assessment of the Mineral Resources along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang

- Area in Southwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 278–420 (in Chinese).
- [35] Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, Mo X X, Xu Q, Hu Y Z, Li X Z. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 31(1–4): 48–87.
- [36] 四川省地质矿产局. 四川地质地图系列: 义敦幅(H-47-XVI), 昌台幅(H-47-X), 甘孜幅(H-47-IV), 理塘幅(H-47-XXIII), 稻城幅(H-47-XXIX), 波密幅(H-47-XXII), 禾尼幅(H-47-XVII)和得荣幅(H-47-XXVIII), 1981.
- SCBGMR (Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province): 1 : 200000 Sichuan Geological Map Series, including: Yidun Sheet (H-47-XVI), Changtai (H-47-X), Ganzi (H-47-IV), Litang Sheet (H-47-XXIII), Daocheng (H-47-XXIX), Bomi (H-47-XXII), Heni (H-47-XVII) and Derong (H-47-XXVIII), 1981.
- [37] 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 黄典豪, 吕庆田, 王海平, 余金杰, 唐绍华. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 109–120.
- Hou Zeng-qian, Yang Yue-qing, Qu Xiao-ming, Huang Dian-hao, Lü Qing-tian, Wang Hai-ping, Yu Jin-jie, Tang Shao-hua. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China[J]. *Acta Geol Sinica*, 2004, 78(1): 109–120 (in Chinese with English abstract).
- [38] Reid A J, Wilson C J L, Liu S. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibetan Plateau[J]. *J Struct Geol*, 2005, 27(1): 119–137.
- [39] Reid A J, Wilson C J L, Shun L, Pearson N, Belousova E. Mesozoic plutons of the Yidun arc, SW China: U-Pb geochronology and Hf isotopic signature[J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 31(1–4): 88–106.
- [40] Zhu J J, Hu R Z, Bi X W, Zhong H, Chen H. 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*, 2011, 126(3/4): 248–264.
- [41] Zi J W, Cawood P A, Fan W M, Tohver E, Wang Y J, Mccuaig T C, Peng T P. Late Permian-Triassic magmatic evolution in the Jinshajiang orogenic belt, SW China and implications for orogenic processes following closure of the Paleo-Tethys[J]. *Am J Sci*, 2013, 313(2): 81–112.
- [42] Burchfiel B C, Chen Z L. Tectonics of the southeastern Tibetan Plateau and its adjacent foreland [J]. *Geol Soc Am*, 2013, 210: 1–164.
- [43] Yang T N, Ding Y, Zhang H R, Fan J W, Liang M J, Wang X H. Two-phase subduction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the southeastern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, southwest China[J]. *Geol Soc Am Bull*, 2014, 126(11/12): 1654–1682.
- [44] Weislogel A L. Tectonostratigraphic and geochronologic constraints on evolution of the northeast Paleotethys from the Songpan-Ganzi complex, central China[J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1): 331–345.
- [45] 侯增谦, 侯立纬, 叶庆同, 刘福祿, 唐国光. 三江义敦岛弧构造岩浆演化与火山成因块状硫化物矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1995: 1–218.
- Hou Zeng-qian, Hou Li-wei, Ye Qing-tong, Liu Fu-lu, Tang Guo-guang. Tectono-magmatic Evolution and Volcanogenic Massive Sulphide Deposits in the Yidun Island-arc, Sanjiang Region, China[M]. Beijing: Seismological Press, 1995: 1–218 (in Chinese).
- [46] 王全伟, 王康明, 阚泽忠, 付小方. 川西地区花岗岩及其成矿系列[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–305.
- Wang Quan-wei, Wang Kang-ming, Kan Ze-zhong, Fu Xiao-fang. The Western Sichuan Region Granite and the Metallogenic Series[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–305 (in Chinese).
- [47] 吕伯西, 王增, 张能德, 段建中, 高子英, 沈敢富, 潘长云, 姚鹏. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1–328.
- Lü Bo-xi, Wang Zeng, Zhang Neng-de, Duan Jian-zhong, Gao Zi-ying, Shen Gan-fu, Pan Chang-yun, Yao Peng. Granitoid in the Sanjiang Region (Nuijiang-Lancangjiang-Jinsha Jiang Region) and Their Metallogenic Specialization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1–328 (in Chinese).
- [48] Liu S W, Wang Z Q, Yan Q R, Li Q G, Zhang D H, Wang J G, Yang B, Gu L B, Zhao F S. Indosinian tectonic setting of the Southern Yidun Arc: Constraints from SHRIMP zircon chronology and geochemistry of dioritic porphyries and granites[J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(3): 387–399.
- [49] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 苟体忠, 王外全. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(1): 124–130.
- Leng Cheng-biao, Zhang Xing-chun, Wang Shou-xu, Qin Chao-jian, Gou Ti-zhong, Wang Wai-quan. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Songnuo ore-hosted porphyry, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication[J]. *Geotecton Metallogen*, 2008, 32(1): 124–130 (in Chinese with English abstract).
- [50] 曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 张维, 侯可军, 李瑞萍, 李以科. 中甸雪鸟坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成[J]. *地质学报*, 2009, 83(10): 1430–1435.
- Cao Dian-hua, Wang An-jian, Huang Yu-feng, Zhang Wei, Hou Ke-jun, Li Rui-ping, Li Yi-ke. SHRIMP geochronology and Hf isotope composition of zircons from Xuejiping porphyry copper deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Geol Sinica*, 2009, 83(10): 1430–1435 (in Chinese with English abstract).
- [51] 张兴春, 冷成彪, 杨朝志, 王外全, 秦朝建. 滇西北中甸春都斑岩铜矿含矿斑岩的锆石 SIMS U-Pb 年龄及地质意义[J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 359–360.
- Zhang Xing-chun, Leng Cheng-biao, Yang Chao-zhi, Wang Wai-quan, Qin Chao-jian. The SIMS U-Pb Zircon age and its geological significance of porphyry copper ore-bearing porphyry of Chundu area in Northwest Yunnan, China[J]. *Acta Mineral Sinica*, 2009, 29(S1): 359–360 (in Chinese with English abstract).
- [52] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42(1): 313–345.
- [53] Xiao L, Zhang H F, Clemens J D, Wang Q W, Kan Z Z, Wang K M, Ni P Z, Liu X M. Late Triassic granitoids of the Eastern margin of the Tibetan plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution[J]. *Lithos*, 2007,

- 96(3/4): 436–452.
- [54] 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因[J]. 地质科学, 1998, 33(4): 412–425.
Deng Wan-ming, Huang Xuan, Zhong Da-lai. Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyry in West Yunnan, China[J]. *Sci Geol Sinica*, 1998, 33(4): 412–425 (in Chinese with English abstract).
- [55] 赵欣, 喻学惠, 莫宣学, 张瑾, 吕伯西. 滇西新生代富碱斑岩及其深源包体的岩石学和地球化学特征[J]. 现代地质, 2004, 8(2): 217–228.
Zhao Xin, Yu Xue-hui, Mo Xuan-xue, Zhang Jin, Lü Bo-xi. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic alkali-rich porphyries and xenoliths hosted in Western Yunnan Province[J]. *Geoscience*, 2004, 8(2): 217–228 (in Chinese with English abstract).
- [56] Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L, Ma J L. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *J Petrol*, 2006, 47(1): 119–144.
- [57] Lu Y J, Kerrich R, Mccuaig T C, Li Z X, Hart C J R, Cawood P A, Hou Z Q, Bagas L, Cliff J, Belousova E A, Tang S H. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and zircon Hf-O isotopic compositions of Eocene-Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *J Petrol*, 2013, 54(7): 1309–1348.
- [58] Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, De Boer J Z, Bellon H, Feigenson MD, Maury R C, Stewart R H. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview[J]. *J Geol Soc*, 1992, 149(4): 569–579.
- [59] Defant M J, Xu JF, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q, Xiao L. Adakites: Some variations on a theme[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18(2): 129–142.
- [60] Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79(1/2): 1–24.
- [61] Moyen J F. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the “adakitic signature”[J]. *Lithos*, 2009, 112(3): 556–574.
- [62] Danyushevsky L V, Falloon T J, Crawford A J, Tetroeva S A, Leslie R L, Verbeeten A. High-Mg adakites from Kadavu Island Group, Fiji, southwest Pacific: Evidence for the mantle origin of adakite parental melts[J]. *Geology*, 2008, 36(6): 499–502.
- [63] Gregory R T, Taylor H P. An oxygen isotope profile in a section of Cretaceous oceanic crust, Samail Ophiolite, Oman: Evidence for $\delta^{18}\text{O}$ buffering of the oceans by deep (>5 km) seawater-hydrothermal circulation at mid-ocean ridges[J]. *J Geophys Res*, 1981, 86(B4): 2737–2755.
- [64] Hart S R, Blusztajn J, Dick H J B, Meyer P S, Muehlenbachs K. The fingerprint of seawater circulation in a 500-meter section of ocean crust gabbros[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(23/24): 4059–4080.
- [65] Cavosie A J, Kita N T, Valley J W. Primitive oxygen-isotope ratio recorded in magmatic zircon from the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Am Mineral*, 2009, 94(7): 926–934.
- [66] 姜丽莉, 薛传东, 侯增谦, 向坤. 滇西北甯哥正长岩体成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学证据[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3234–3246.
Jiang Li-li, Xue Chuan-dong, Hou Zeng-qian, Xiang Kun. Petrogenesis of the Bengge syenites, northwestern Yunnan: Geochemistry, geochronology and Hf isotopes evidence[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2015, 31(11): 3234–3246 (in Chinese with English abstract).
- [67] Blichert-Toft J, Albaredo F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [68] Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(3/4): 533–556.
- [69] Zhang H F, Parrish R, Zhang L, Xu W C, Yuan H L, Gao S, Crowley Q G. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Ganzi fold belt, eastern Tibetan Plateau: Implication for lithospheric delamination[J]. *Lithos*, 2007, 97(3/4): 323–335.
- [70] Yuan C, Zhou M F, Sun M, Zhao Y J, Wilde A S, Long X P, Yan D P. Triassic granitoids in the eastern Songpan Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 290(3/4): 481–492.
- [71] Hou Z Q. Tectono-magmatic evolution of the Yidun island-arc and geodynamic setting of kuroko-type sulfide deposits in Sanjiang region[J]. *Resour Geol*, 1993, 17: 336–350.
- [72] Zhang H F, Zhang L, Harris N, Jin L L, Yuan H L. 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]. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 152(1): 75–88.
- [73] Wang B Q, Wang W, Chen W T, Gao J F, Zhao X F, Yan D P, Zhou M F. Constraints of detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes on the provenance of the Triassic Yidun Group and tectonic evolution of the Yidun Terrane, Eastern Tibet[J]. *Sediment Geol*, 2013, 289(1): 74–98.
- [74] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1–231.
Zhong Da-lai. The Paleotethys Orogenic Belt in West of Sichuan and Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1–231 (in Chinese).
- [75] 王根厚, 贾建称, 万永平, 张维杰, 周志广, 李秋实, 杨国东. 藏东巴青县以北西西岩组构造片理形成及构造意义[J]. 地质前缘, 2006, 13(4): 180–187.
Wang Gen-hou, Jia Jian-cheng, Wan Yong-ping, Zhang Wei-jie, Zhou Zhi-guang, Li Qiu-shi, Yang Guo-dong. Forming and tectonic significance of the Youxi tectono schistose for mation north Baqen county, eastern Tibet[J]. *Earth Sci Front*, 2006, 13(4): 180–187 (in Chinese with English abstract).
- [76] 李才, 翟庆国, 陈文, 于介江, 黄小鹏, 张彦. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2843–2849.
Li Cai, Zhai Qing-guo, Chen Wen, Yu Jie-jiang, Huang Xiao-peng, Zhang-yan. Ar-Ar chronometry of the eclogite from central Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(12): 2843–2849 (in Chinese with English abstract).
- [77] 赵靖, 钟大赉, 王毅. 滇西“澜沧群”的解体及其大地构造意

- 义[M]//北京大学地质系、地理系博士后. 北京大学博士后地质文集(一). 北京: 地震出版社, 1992: 12-24.
- Zhao Jing, Zhong Da-lai, Wang Yi. Dismembering of "Lancang group" and its tectonic implications, western Yunnan[M]//Post-doctoral from the Peking University of geology and geography. The Peking University postdoctoral study corpus (one). Beijing: Seismological Press, 1992: 12-24 (in Chinese with English abstract).
- [78] Fan W M, Wang Y J, Zhang Y H, Zhang Y Z, Jourdan F, Zi J W, Liu H C. Paleotethyan subduction process revealed from Triassic blueschists in the Lancang tectonic belt of Southwest China[J]. *Tectonophysics*, 2015, 662: 95-108.
- [79] Fornash K F, Cosca M A, Whitney D L. Tracking the timing of subduction and exhumation using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phengite ages in blueschist- and eclogite-facies rocks (Sivrihisar, Turkey)[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2016, 171(7): 1-37.
- [80] Peng T P, Wilde S A, Fan W M, Peng B X. Neoproterozoic siliceous high-Mg basalt (SHMB) from the Taishan granite-greenstone terrane, Eastern North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precamb Res*, 2013, 228: 233-249.
- [81] Peng T P, Zhao G C, Fan W M, Peng B X, Mao Y S. Late Triassic granitic magmatism in the Eastern Qiangtang, Eastern Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for the tectonic evolution of the Paleo-Tethys[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(4): 1494-1508.
- [82] 赵德军, 陈洪德, 邓江红, 王道永. 哀牢山造山带南段仰宗岩体地球化学特征及其构造环境[J]. *矿物岩石*, 2013, 33(1): 60-68.
- Zhao De-jun, Chen Hong-de, Deng Jiang-hong, Wang Dao-yong. Geochemical features and tectonic setting of the Yangzhong rock mass in the south part of Ailao mountains orogen[J]. *J Mineral Petrol*, 2013, 33(1): 60-68 (in Chinese with English abstract).
- [83] 孙崇波, 李忠权, 王道永, 许远平, 李友余. 哀牢山构造带南段扭扭二长花岗斑岩地球化学特征及其锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *中国地质*, 2016 (1): 111-119.
- Sun Chong-bo, Li Zhong-qun, Wang Dao-yong, Xu Yuan-ping, Li You-yu. Petrogeochemistry and zircon U-Pb chronology of the Niuzhi monzonitic porphyry in southern segment of Ailao Mountain tectonic belt[J]. *Geol China*, 2016 (1): 111-119 (in Chinese with English abstract).
- [84] 许效松, 刘宝珊, 徐强, 潘桂棠, 颜仰基, 吴应林, 陈志梁, 蒲心纯, 尹福光, 丘东洲, 王龙璋. 中国西部大型盆地分析及地球动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-168.
- Xu Xiao-song, Liu Bao-jun, Xu Qiang, Pan Gui-tang, Yan Yang-ji, Wu Ying-lin, Chen Zhi-liang, Pu Xin-chun, Yin Fu-guang, Qiu Dong-zhou, Wang Long-zhang. Analysis of Large Basin in Western China and Its Geodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-168 (in Chinese).
- [85] 冯庆来, 张世涛, 葛孟春, 严城民, 余华, 段国玺, 包俊跃. 滇西北中甸地区哈工组放射虫及其构造古地理意义[J]. *地质科学*, 2002, 37(1): 70-78.
- Feng Qing-lai, Zhang Shi-tao, Ge Meng-chun, Yan Cheng-min, Yu Hua, Duan Guo-xi, Bao Jun-yue. Radiolarians from Hagon formation in Zhongdian, NW Yunnan, and its tectono-paleogeographic implications[J]. *Chinese J Geol*, 2002, 37(1): 70-78 (in Chinese with English abstract).
- [86] Woodard S C, Thomas D J, Grossman E L, Olszewski T D, Yancey T E, Miller B V, Raymond A. Radiogenic isotope composition of Carboniferous seawater from North American epicontinental seas[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2013, 370(2): 51-63.
- [87] Davies J H, Blanckenburg F V. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129(1/4): 85-102.
- [88] England P C, Houseman G A. The mechanics of the Tibetan plateau[J]. *Phil Trans Roy Soc Lond Math Phys Sci*, 1988, 326(1589): 301-320.
- [89] Dewey J F, Lamb S H. Active tectonics of the Andes[J]. *Tectonophysics*, 1992, 205(1-3): 79-95.
- [90] Bird P. Initiation of intracontinental subduction in the Himalaya[J]. *J Geophys Res*, 1978, 83(B10): 4975-4987.
- [91] Bird P. Continental delamination and Colorado Plateau[J]. *J Geophys Res*, 1979, 84(B13): 7561-7571.
- [92] Dvairs J H, Blnackenburg F V. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129(1/4): 84-102.
- [93] Coulon C, Megartsi M, Fourcade S, Maury R C, Bellon H, Louni-Hacini A, Cotton J, Coutelle A, Hermitte D. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline volcanism during the Neogene in Oranie (Algeria): Magmatic expression of slab breakoff[J]. *Lithos*, 2002, 62(3/4): 87-110.
- [94] Whalen J B, McNicoll V J, Staal C R V, Lissenberg C J, Longstaffe F J, Jenner G A, Breeman O V. Spatial, temporal and geochemical characteristics of Silurian collision-zone magmatism, Newfoundland Appalachians: An example of a rapidly evolving magmatic system related to slab break-off[J]. *Lithos*, 2006, 89(3/4): 377-404.
- [95] Schott B, Schmeling H. Delamination and detachment of a lithospheric root[J]. *Tectonophysics*, 1998, 296(3/4): 225-247.
- [96] Marotta A M, Fernández M, Sabadini R. Mantle unrooting in collisional settings[J]. *Tectonophysics*, 1998, 296(1): 31-46.
- [97] Houseman G A, McKenzie D P, Molnar P. Convective instability of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continental convergent belts[J]. *J Geophys Res*, 1981, 86(B7): 6115-6132.
- [98] Houseman G A, Molnar P. Gravitational (Rayleigh-Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere[J]. *Geophys J Int*, 1997, 128(1): 125-150.
- [99] 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236-244.
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jin-hui, Wang Yuan-long, Zhao Tai-ping, Guo Guang-jun. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2001, 17(2): 236-244 (in Chinese with English abstract).
- [100] 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 248-255.
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Er-qi, Wang Yan, Zhao Tai-ping,

- Hao Jie, Guo Guang-hui. An east China plateau in Mid-Late Yanshannian period implication from adakites[J]. Chinese J Geol, 2001, 36(2): 248-255 (in Chinese with English abstract).
- [101] 张旗, 王元龙, 张福勤, 王强, 王焰. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. 华南地质与矿产, 2002 (3): 85-90.
Zhang Qi, Wang Yuan-long, Zhang Fu-qin, Wang Qiang, Wang Yan. Adakite and porphyry copper deposit[J]. Geol Mineral Res South China, 2002 (3): 85-90 (in Chinese with English abstract).
- [102] 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 195-204.
Zhang Qi, Qin Ke-zhang, Wang Yuan-long, Zhang Fu-qin, Liu Hong-tao, Wang Yan. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China[J]. Acta Petrol Sinica, 2004, 20(2): 195-204 (in Chinese with English abstract).
- [103] 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 353-362.
Wang Qiang, Zhao Zhen-hua, Xiong Xiao-lin, Xu Ji-feng. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China[J]. Geochimica, 2001, 30(4): 353-362 (in Chinese with English abstract).
- [104] 王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 扬子地块东部燕山期埃达克质岩(adakite-like)与成矿[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 32(S2): 127-136.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, Li Xianhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Liu Yimao. Petrology and metallogenesis of Yanshannian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block[J]. Sci China (D), 2003, 32(S2): 127-136 (in Chinese).
- [105] 王强, 许继峰, 赵振华. 强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu-Au 成矿[J]. 地质前缘, 2003, 10(4): 561-572.
Wang Qiang, Xu Ji-feng, Zhao Zhen-hua. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth element (or adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis[J]. Earth Sci Front, 2003, 10(4): 561-572 (in Chinese with English abstract).
- [106] 李文昌, 刘学龙, 曾普胜, 尹光侯. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 403-414.
Li Wen-chang, Liu Xue-long, Zeng Pu-sheng, Yin Guang-hou. The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province[J]. Geol China, 2011, 38(2): 403-414 (in Chinese with English abstract).
- [107] 曹康, 许继峰, 陈建林, 黄肖潇, 任江波. 云南普朗超大型斑岩铜矿床含矿斑岩成因及其成矿意义[J]. 矿床地质, 2014, 33(2): 307-322.
Cao Kang, Xu Ji-feng, Chen Jian-lin, Huang Xiao-xiao, Ren Jiang-bo. Origin of porphyry intrusions hosting superlarge Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province: Implication for metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(2): 307-322 (in Chinese with English abstract).
- [108] 王承洋, 李文昌, 王可勇, 周向斌, 尹光侯, 余海军, 薛顺荣. 滇西北雪鸡坪铜矿床流体包裹体特征研究及矿床成因讨论[J]. 岩石学报, 2015, 31(4): 967-978.
Wang Cheng-yang, Li Wen-chang, Wang Ke-yong, Zhou Xiang-bin, Yin Guang-hou, Yu Hai-jun, Xue Shun-rong. Characteristics of fluid inclusions and genesis of Xuejiping copper in northwestern Yunnan Province[J]. Acta Petrol Sinica, 2015, 31(4): 967-978 (in Chinese with English abstract).
- [109] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. Geology, 2002, 30(10): 915-918.
- [110] Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, Binns R A. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization[J]. Nature, 2004, 431(7011): 975-978.
- [111] Sun W D, Ding X, Hu Y H, Li X H. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. Earth Planet Sci Lett, 2007, 262(3/4): 533-542.
- [112] Sun W D, Liang H Y, Ling M X, Zhang M Z, Ding X, Zhang H, Yang X Y, Li Y L, Ireland T R, Wei Q R. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2013, 103: 263-275.
- [113] Hou Z Q, Yang Z M, Lu Y J, Kemp A, Zheng Y C, Li Q Y, Tang J X, Yang Z S, Duan L F. A genetic linkage between subduction- and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. Geology, 2015, 43: 247-250.
- [114] Chiaradia M. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness[J]. Nat Geosci, 2014, 7(1): 43-46.
- [115] Lee C T A, Luffi P, Chin E J, Romain Bouchet, Dajdecepta, Douglas M M. Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation[J]. Science, 2012, 336(6077): 64-68.
- [116] 刘江涛. 滇西北晚三叠世斑岩环境中 Cu 成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学, 2014: 1-177.
Liu Jiang-tao. Late-Transic Cu mineralization in porphyry environment, Northwest Yunnan[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2014: 1-177 (in Chinese with English abstract).