

北羌塘北缘多彩三叠纪高硅花岗岩的成因及其构造意义

徐雨¹, 刘彬¹, 马昌前^{2, 3}, 孙洋¹, 赵少卿¹, 黄坚³, 严溶¹, 董欢¹

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100; 2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 高硅花岗质岩浆作用不仅是衡量大陆地壳成熟度的重要指标之一, 而且能为示踪陆壳生长过程和稀有金属成矿提供非常关键的信息。然而, 目前国内外学者对于这一特殊花岗质岩浆的起源、演化及其相关地球动力学背景还存在较大的分歧。本文选择青藏高原中部多彩高硅花岗岩为研究对象, 开展岩石学、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素等综合研究, 为深入理解高硅花岗岩的形成机制和青藏高原中部晚三叠世的构造演化提供新线索。研究结果显示, 多彩高硅花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 219 ± 2 Ma, 表明其为晚三叠世岩浆活动的产物。岩石样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(I_{Sr})为 0.708 4, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-8.12 \sim -7.36$, 两阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$)为 $1.65 \sim 1.59$ Ga, 总体上与可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜(HBSG)地体三叠纪浊积岩成分特征类似。结合岩石地球化学的研究结果可进一步确定, 多彩高硅花岗岩的形成应该与变杂砂岩的部分熔融有关, 并且经历了较高分离结晶。综合区域上多学科研究成果, 可以判断北羌塘北缘晚三叠世中酸性岩浆岩(包括高硅花岗岩)的产生很可能与甘孜-理塘古特提斯洋的板片回撤作用密切相关。

关键词: 高硅花岗岩; 浊积岩; 三叠纪; 北羌塘; 青藏高原中部

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1061-19

Petrogenesis and tectonic implications of the Duocai Triassic high-silica granites from the northern part of North Qiangtang terrane

XU Yu¹, LIU Bin¹, MA Chang-qian^{2, 3}, SUN Yang¹, ZHAO Shao-qing¹, HUANG Jian³, YAN Rong¹ and DONG Huan¹

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: High-silica granitic magmatism is not only considered as one of the key indexes to measure the maturity of continental crust, but also can provide essential information for understanding the growth of continental crust and the rare-metal mineralization. However, the origin, evolution, and geodynamic environment of the high-silica granitic magmatism remains highly controversial. This paper presents a comprehensive study of zircon U-Pb ages, bulk-rock geochemistry, and Sr-Nd isotopes for the Duocai high-silica granites in the central Tibetan Plateau. Zircon U-Pb dating of the studied rocks yields ages of 219 ± 2 Ma, indicating those rocks represent the products of the Late Triassic magmatism. The Duocai granites have I_{Sr} ratios of 0.708 4, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values from $-8.12 \sim -7.36$, and

收稿日期: 2022-01-18; 接受日期: 2022-09-01; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130309, 41502050); 油气资源与探测国家重点实验室开放课题基金(PPR/open-1908); 中国地质调查局项目(DD20160022); 地质资源与地质工程一流学科开放基金(2019KFJJ0818017)

作者简介: 徐雨(1998-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 202071363@yangtzeu.edu.cn; 通讯作者: 刘彬(1987-), 男, 博士, 副教授, 从事火成岩岩石学和地球化学等研究, E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn。

t_{2DM} ages of 1.65 ~ 1.59 Ga, similar to the Triassic turbidites in the Hohxil-Bayan Har-Songpan-Garzê (HBSG) terrane. Geochemical and isotopic signatures indicate that the Duocai high-silica granites might be derived from partial melting of meta-greywackes, and they had experienced a relatively high degree of fractional crystallization. Combining with the other regional studies, the Late Triassic magmatism in the north margin of the North Qiangtang (NQ) terrane was induced by slab rollback of the Garzê-Litang Palaeo-Tethyan ocean.

Key words: high-silica granites; turbidites; Triassic; North Qiangtang; the central Tibetan Plateau

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42130309, 41502050); Open Fund of the State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing (PRP/open-1908); Project of China Geological Survey (DD20160022); Open Fund of the First-rate Discipline for Geological Resources and Geological Engineering (2019KFJJ0818017)

高硅花岗岩(SiO_2 质量分数 $\geq 70\%$)一直以来是国内外研究的热点,不仅可以作为判断大陆地壳成分成熟度的有效指标,并且能够为示踪大陆地壳形成与生长过程提供重要线索(Hildreth, 1979; Glazner *et al.*, 2008; Lee and Morton, 2015; Wu *et al.*, 2017)。近年来国内外大量研究发现,高硅花岗岩由于富集不相容元素而与稀有金属矿化(如Li、Be、Nb、Ta、W和Sn等)紧密相关,因此也能为揭示稀有金属元素富集成矿机制提供非常关键的信息(Lee and Morton, 2015; Liu C *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021; Shuai *et al.*, 2021)。高硅花岗岩往往与发生深熔作用的地壳物质相关联,其成分的多样性受控于多种因素,包括不同的源区成分、变化的熔融环境(温度、压力/深度、水和氧逸度等)、部分熔融和分离结晶过程、围岩混染、岩浆混合、残余不混溶和转熔矿物挟带(peritectic assemblage entrainment)等(DePaolo, 1981; Chappell *et al.*, 1987; Patiño, 1999; Clemens and Stevens, 2012; Lee and Morton, 2015; Luo *et al.*, 2015)。由于地壳组分具有显著的异质性,垂向成分变化较大,尤其俯冲带中大量地表沉积物和上地壳物质被输送到中下地壳,这对准确识别与示踪高硅花岗质岩浆的源区组成带来了极大的挑战。此外,高硅花岗岩的形成过程也经历了相当复杂的演化历史。Garcia-Arias 和 Stevens (2017)将其岩浆演化机制归纳为两大类:其中一类是由岩浆源区直接控制,包括残余不混溶和转熔矿物挟带;另一类是由岩浆源区之后的演化过程控制,包括岩浆混合、围岩混染和分离结晶过程。不难看出,这些成因机制贯穿岩浆从源区形成到最终就位的全过程,究竟是哪一个(或几个)因素对塑造高硅花岗岩的成分变化特征起到决定性作用仍值得开展深入的研究。

青藏高原中部地区出露了大量三叠纪中酸性岩浆活动(包括高硅花岗质岩浆),但是对于这些岩浆的起源、演化机制及其地球动力学背景仍缺乏深入的认识。例如,三叠纪花岗质岩浆活动究竟是起源于北羌塘前寒武纪变质基底物质熔融,还是与可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜(HBSG)三叠纪浊积岩的部分熔融有关(de Sigoyer *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2014; Tao *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2021)? 针对这一问题,本次选择北羌塘北缘多彩高硅花岗岩为研究对象,通过开展岩石学、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素等综合研究,深入剖析高硅花岗岩的源区组成、成因机制及其构造背景等,进而为理解高硅花岗岩的形成机制和青藏高原中部晚三叠世板块构造演化提供新线索。

1 区域地质背景与岩相学特征

北羌塘地体和可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜(HBSG)地体是青藏高原中部的重要组成部分,二者的分界线是甘孜-理塘缝合带(图1)。HBSG地体呈倒三角状,北边以阿尼玛卿-昆仑缝合带为界,南边以金沙江缝合带西段为界,东南边以甘孜-理塘缝合带为界,东边为龙门山断裂带(She *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2021)。前人研究认为,HBSG地体并非单一构造成因的地质体,主要由松潘-甘孜古特提斯洋在三叠纪时期快速收缩形成的巨厚复理石沉积组成(de Sigoyer *et al.*, 2014),其沉积物源主要来自羌塘地体、大别-秦岭造山带和昆仑造山带(Zhang *et al.*, 2012)。此外,该地体中广泛发育晚三叠世-早侏罗世岩浆活动。前人研究发现 HBSG 地体存在具有华南亲缘性的陆壳基底(Huang *et al.*, 2003),但目前尚未有直接证据揭示残余洋壳的存

在(de Sigoyer *et al.*, 2014; 夏磊等, 2017)。北羌塘地体的北部以金沙江缝合带西段、甘孜-理塘缝合带为界与 HBSG 地体相连, 东部以金沙江缝合带南段为界与义敦岛弧相连, 南部则以龙木错-双湖缝合带为界与南羌塘地体相连。该地体主要由古生代-中生代碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩夹层和前寒武纪变质基底(1 044~991 Ma)组成(Yang *et al.*, 2012; 何世平等, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。过去的研究在北羌塘地体中识别出两套与俯冲相关的岩浆活动。

其中, 晚泥盆世-早三叠世弧岩浆岩(380~248 Ma)主要分布于北羌塘中南部杂多、囊谦一带, 主要由安山岩、英安岩、流纹岩和花岗质岩组成, 其形成很可能与龙木错-双湖古特提斯洋北向俯冲有关(Yang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2016); 而晚三叠世弧岩浆岩(230~208 Ma)出露于北羌塘北缘治多到玉树一带, 岩石类型包括石英闪长岩、安山岩和流纹岩, 其形成则主要与甘孜-理塘古特提斯洋南向俯冲有关(Yang *et al.*, 2012; 张洪瑞等, 2013)。

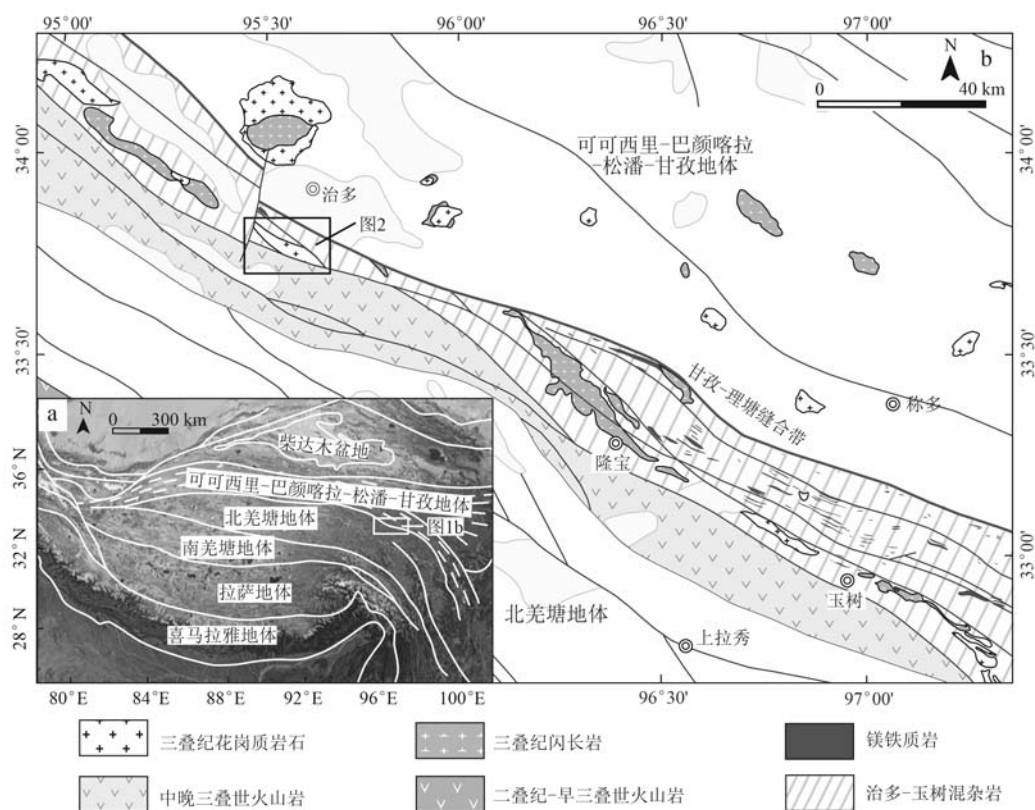


图1 青藏高原大地构造简图(a)和青藏高原中部研究区主要地层及三叠纪岩浆岩分布简图(b)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Tibetan Plateau (a) and simplified geological map of the study area in the central Tibetan Plateau, showing the main strata and Triassic igneous rocks (b)

本文研究的多彩花岗岩位于北羌塘北缘的治多-玉树混杂带内, 出露面积约为 30 km², 该岩体侵入到治多-玉树混杂岩和三叠纪花岗闪长岩中(图2), 岩性主要为黑云母花岗岩, 局部为含石榴子石花岗岩。样品地理坐标为东经 95°37.120', 北纬 33°42.514'。黑云母花岗岩(r-2)具有细粒花岗结构, 块状构造(图3a)。岩石样品的主要矿物为碱性长石(35%~40%, 体积分数)、石英(~35%)、斜长石(10%~15%)和黑云母(~10%), 副矿物为锆石、磷灰石等。斜长石呈自形-半自形板柱状, 粒径为 0.4~1 mm, 发育聚片双晶和卡-钠复合双晶。石英为他形粒状, 部分颗

粒内部可见波状消光。碱性长石为微斜长石, 呈他形-半自形板柱状, 粒径约为 0.5~1 mm(图3b)。黑云母呈棕色自形-半自形片状, 少量绿泥石化(图3b)。局部出现的含石榴子石花岗岩(Gtr-4)具有中细粒花岗结构, 块状构造。该花岗岩样品主要矿物为石榴子石(5%~10%)、碱性长石(30%~40%)、斜长石(15%~25%)和石英(~30%), 副矿物为不透明金属矿物、锆石、磷灰石等。野外露头显示该花岗岩中石榴子石分布不均匀, 呈棕红或褐色, 局部聚集成石榴子石团块(图3c)。显微镜下观察, 石榴子石呈椭圆不规则状, 粒径为 1~2 mm, 内含石英和不透

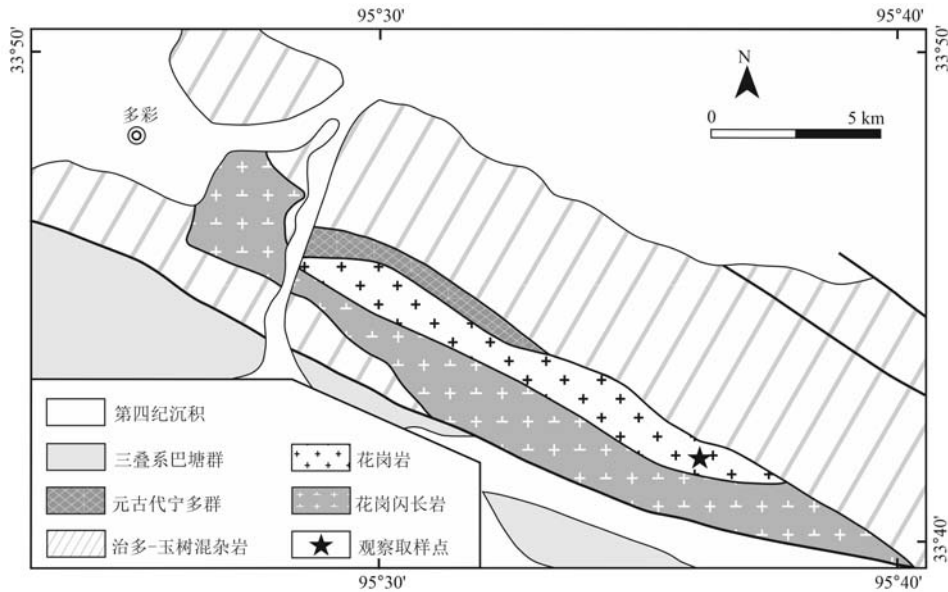


图 2 多彩花岗岩地质简图(青海省地质调查院, 2006)^①

Fig. 2 Geological map of the Duocai granites (Geological Survey of Qinghai Province, 2006)^①

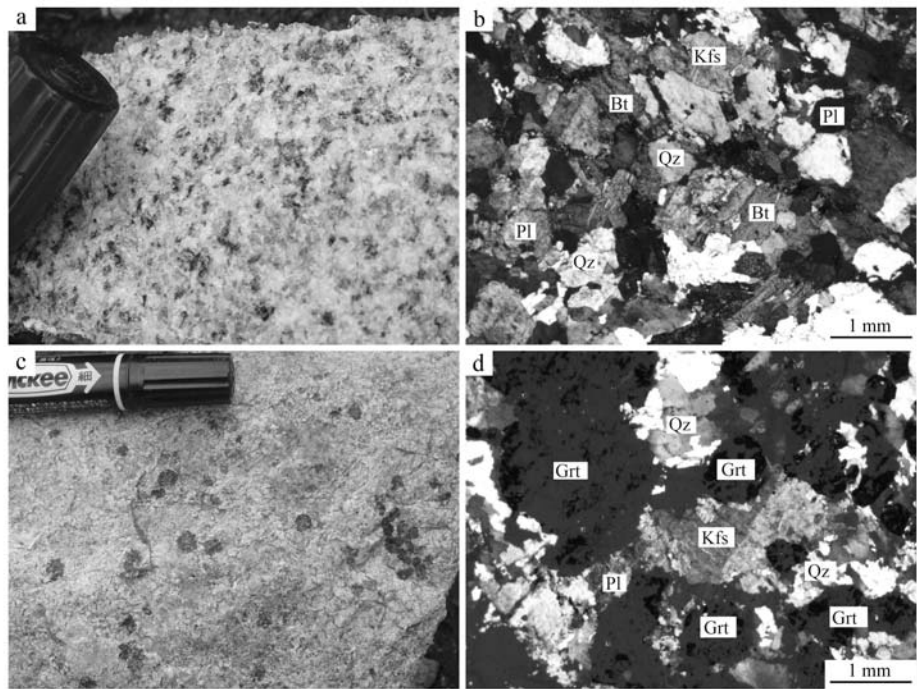


图 3 多彩花岗岩的野外和显微镜下照片

Fig. 3 Field and microscope photographs of the Duocai granites

a—黑云母花岗岩野外照片; b—黑云母花岗岩主要由碱性长石、石英、斜长石和黑云母组成, 少量黑云母绿泥石化(正交偏光); c—含石榴子石花岗岩野外照片; d—含石榴子石花岗岩主要由碱性长石、斜长石、石英和石榴子石组成, 少量石英被碱性长石包裹(正交偏光);

Bt—黑云母; Czo—黝帘石; Grt—石榴子石; Kfs—碱性长石; Ms—白云母; Pl—斜长石; Qz—石英

a—field photograph of biotite granite; b—the biotite granite is mainly composed of K-feldspar, quartz, plagioclase, and biotite, with the biotite undergone local chlorite alteration (cross-polarized light); c—field photograph of garnet-bearing granite; d—the garnet-bearing granite is mainly composed of K-feldspar, plagioclase, quartz, and garnet, with some quartz inclusions in the crystal of K-feldspar (cross-polarized light); Bt—biotite;

Czo—clinozoisite; Grt—garnet; Kfs—K-feldspar; Ms—muscovite; Pl—plagioclase; Qz—quartz

① 青海省地质调查院. 2006. 1:25 万治多县幅(I46C003004)区域地质调查报告.

明金属矿物(图 3d)。碱性长石呈他形-半自形板柱状, 粒径为 1~3 mm, 具有卡氏双晶和嵌晶结构, 其内部包裹斜长石、石英等矿物。碱性长石主要为条纹长石, 其中钠长石出溶条纹较为细小(图 3d)。斜长石为半自形-他形, 粒径为 0.5~1 mm, 发育聚片双晶和卡纳复合双晶, 部分斜长石局部绢云母化。石英以他形粒状为主, 少量石英被碱性长石包裹。

2 测试方法

在岩相学分析基础上, 对多彩花岗岩岩体中新鲜的黑云母花岗岩和含石榴子石花岗岩进行全岩碎样, 挑选典型岩石样品(r-4)进行锆石 U-Pb 同位素定年。锆石先用常规的重液和磁选方法进行分选, 最后在双目镜下挑纯制靶。锆石 U-Pb 分析是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室使用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法见文献(Liu *et al.*, 2008, 2010)。普通铅的校正使用 Andersen(2002)编写的软件完成, 锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄主要采用 Ludwig(2000)编写的 ISOPLOT 程序(Ver3.23)完成。

全岩主量元素分析是在湖北省地质实验研究所武汉综合岩矿测试中心完成, 氧化物测定采用 X 射线荧光光谱法, FeO 用氢氟酸、硫酸溶样和重铬酸钾法滴定容量法测定, H_2O 的测定采用重量法, CO_2 的测定采用非水滴定法, 分析精度均为 1% (H_2O 除外)。全岩稀土和微量元素分析是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成。详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同 Liu 等(2008)。全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。先称取 Sr-Nd 同位素测试的样品 50 mg, 装入溶样弹, 并加入 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 混合酸, 密封放入烘箱溶解(190℃, 48 h)。溶好的样液进行二次分离和纯化 Sr、Nd。将制备好的二次 Sr 和 Nd 样品用电离同位素质谱仪(TIMS, Triton T1)进行 Sr 和 Nd 同位素测定。详细的样品前处理和仪器测试流程详见文献 Gao 等(2004)。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

多彩黑云母花岗岩代表性样品(r-4)中锆石 U-Pb 同位素和锆石微量元素测试结果分别见表 1 和表 2。锆石阴极发光图像中大部分锆石呈半自形短柱状, 长约 40~130 μm , 长宽比为 1:1~3:1, 可见明显的韵律震荡环带(图 4b)。锆石稀土元素总量为 $1.495 \times 10^{-6} \sim 8.155 \times 10^{-6}$, 具有明显的 Ce 正异常($\delta\text{Ce} = 1.3 \sim 82.6$)和 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.06 \sim 0.23$)。其稀土元素球粒陨石标准化配分模式呈现出明显左倾, HREE 相对富集(图 4c)。这些锆石的微量元素组成和 REE 分布型式均符合岩浆锆石的特征。测定结果显示, 其中的 13 个测点具有相对高的 Th/U 值(0.15~0.56), 并且给出了相对一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(221~215 Ma; 图 4a)。加权平均年龄为 219 ± 2 Ma(MSWD=0.28), 代表了多彩花岗岩的结晶年龄。其余 4 个测点具有较老的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(263~259 Ma), 很可能为岩浆上升侵位捕获的古老继承锆石的年龄。

3.2 元素地球化学特征

多彩花岗岩样品的全岩主量、微量元素测试结果和相关计算参数列于表 3。样品的烧失量(LOI)相对较低(<2%), 表明后期蚀变和风化作用对样品的影响可以忽略不计。两种不同岩性的多彩花岗岩样品主量元素组成相近, 都具有较高的 SiO_2 含量(72.08%~74.66%)和全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量(6.44%~8.69%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.80~1.59。在 TAS 图解和硅碱图中(图 5a、5b), 样品落入花岗岩区域且均位于亚碱性区域(SA), 为钙碱性-高钾钙碱性系列。样品 MgO 含量较低(0.04%~0.21%), $\text{Mg}^\#$ 值为 6~16, 显示铁质花岗岩成分特征(图 5c)。岩石样品相对富铝, Al_2O_3 含量为 13.58%~15.30%, 铝饱和指数(A/CNK)为 1.05~1.17, 总体上显示弱过铝质-强过铝质的特征(图 5d)。

多彩含石榴子石花岗岩和黑云母花岗岩样品在稀土和微量元素组成上有所差异。含石榴子石花岗岩样品的稀土元素总量较高($267.3 \times 10^{-6} \sim 331.7 \times 10^{-6}$), 明显富集重稀土元素(LREE/HREE=0.58~1.86), 并且具有显著的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.09 \sim 0.11$)。

表 1 青藏高原中部多彩花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Duocai granites in central Tibetan Plateau

测点号	$w_B/10^{-6}$				同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
1	51	194	535	0.36	0.054 4	0.003 3	0.290 7	0.018 9	0.386	112	259	244
2	143	725	1 351	0.54	0.055 2	0.002 9	0.263 5	0.014 7	420	97	237	215
3	122	612	1 215	0.50	0.053 2	0.002 9	0.259 6	0.014 3	337	97	234	221
4	54.8	230	642	0.36	0.050 2	0.003 2	0.240 3	0.015 1	206	110	219	220
5	174	810	2 404	0.34	0.049 0	0.002 1	0.237 2	0.009 9	145	74	216	220
6	81	393	741	0.53	0.052 9	0.003 2	0.248 8	0.014 6	324	102	226	219
7	76	388	693	0.56	0.053 9	0.003 4	0.253 8	0.016 0	365	109	230	219
8	358	1 423	6 422	0.22	0.048 1	0.001 5	0.230 0	0.007 5	102	53	210	218
9	298	1 319	4 421	0.30	0.050 0	0.001 7	0.241 6	0.008 6	195	61	220	220
10	38.1	145	538	0.27	0.054 6	0.003 6	0.255 0	0.016 4	396	111	231	219
11	237	814	3 051	0.27	0.050 7	0.001 9	0.292 5	0.010 5	227	62	261	264
12	455	2 347	5 839	0.40	0.052 2	0.001 6	0.250 7	0.007 8	292	49	227	220
13	64.4	185	861	0.21	0.053 2	0.003 2	0.295 8	0.016 4	337	99	263	260
14	40.7	223	576	0.39	0.053 1	0.003 4	0.246 9	0.016 1	332	114	224	216
15	496	2 172	7 721	0.28	0.051 1	0.001 6	0.241 5	0.007 6	243	50	220	217
16	76.4	314	769	0.41	0.056 7	0.003 1	0.294 9	0.015 4	480	86	262	242
17	145	467	3 104	0.15	0.051 8	0.001 8	0.246 9	0.008 4	275	55	224	218

表 2 青藏高原中部多彩花岗岩锆石微量元素含量
Table 2 Trace elements of zircons for the Duocai granites in central Tibetan Plateau

测点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
1	14.2	1 962	2.4	-	8.9	0.1	1.6	2.7	0.6	23.7	8.3	124	54	300	66.5	796	153.8	27 652	1.09	194	535
2	12.7	3 500	3.6	12.8	53.2	5.8	36.9	21.5	1.7	62.7	19.2	245	93.4	507	115.2	1 391	261.9	30 658	4.63	725	1 351
3	10.5	6 375	6.1	1.7	14.8	0.7	7.5	16.5	1.7	110.1	37.5	511	191.8	958	190.8	2 080	354.4	26 331	2.16	612	1 215
4	7.5	2 009	2.8	0.3	12.6	0.2	1.8	2.9	0.5	23.1	8.6	128	53.0	312	71.7	854	169.7	29 084	1.45	230	642
5	3.2	8 502	10.4	0.8	14.5	0.7	8.5	18.1	1.7	136.8	49.6	690	258.7	1 306	255.1	2 673	439.6	34 572	4.37	810	2 404
6	88.9	2 572	1.7	1.0	12.1	0.6	6.3	7.5	1.2	39.0	14.1	176	70.3	378	83.9	1 003	181.6	27 376	0.73	393	741
7	13.0	4 704	3.9	0.2	9.1	0.4	6.5	13.2	1.2	80.4	29.2	389	143.3	702	135.5	1 441	243.8	24 424	1.30	388	693
8	4.4	9 528	56.9	0.2	11.2	0.1	2.3	8.5	0.9	96.4	44.1	681	277.9	1 465	297.3	3 228	539.4	39 268	17.71	1 423	6 422
9	3.8	7 301	34.2	0.6	11.2	0.4	4.2	9.8	0.6	77.8	34.6	543	216.2	1 130	224.9	2 504	418.3	41 714	13.25	1 319	4 421
10	7.1	2 564	4.1	-	3.5	0.0	1.3	3.4	0.4	31.2	11.7	181	74.9	411	87.4	1 043	189.5	28 404	1.88	145	538
11	10.4	6 785	33.3	1.8	11.8	1.0	8.1	10.7	1.0	84.1	34.5	501	203.1	1 042	213.2	2 303	378.5	32 096	8.42	814	3 051
12	12.3	10 578	51.2	12.1	47.3	6.7	39.8	39.3	4.1	164.3	58.0	818	312.3	1 556	307.9	3 319	538.2	36 605	15.36	2 347	5 839
13	6.3	2 704	8.7	0.3	4.4	0.1	1.0	3.9	0.3	26.6	12.7	194	79.6	433	91.9	1 049	180.9	29 758	3.21	185	861
14	20.0	2 585	3.0	0.0	11.2	0.0	2.3	5.0	0.7	34.8	12.5	181	74.3	393	81.4	938	168.9	29 088	1.71	223	576
15	4.1	11 662	56.6	3.1	20.8	1.4	9.4	17.2	1.3	134.3	56.9	869	346.6	1 777	358.6	3 917	642.5	42 725	21.30	2 172	7 721
16	9.1	1 722	1.9	25.9	67.8	6.5	28.0	7.9	0.8	24.2	7.9	112	47.1	255	57.1	720	136.0	27 318	1.37	314	769
17	1.5	6 606	30.6	0.0	5.5	0.0	0.5	4.8	0.4	53.4	26.3	440	190.1	1 047	219.5	2 505	428.5	41 592	11.32	467	3 104

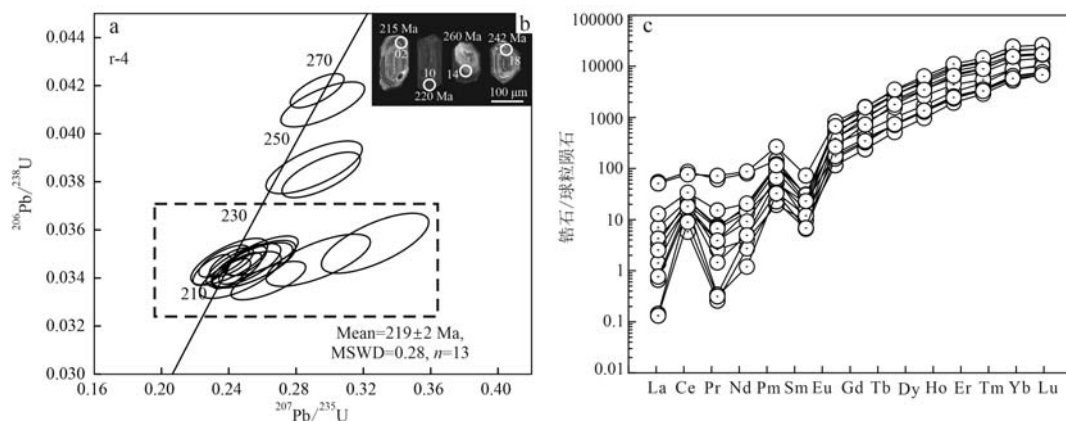


图 4 多彩花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)、阴极发光图像(b)和锆石稀土元素球粒陨石标准化分布图(c, 球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams (a), zircon cathode luminescence image (b), and chondrite-normalized REE patterns of zircon (c, normalizing values of chondrite are from Sun and McDonough, 1989)

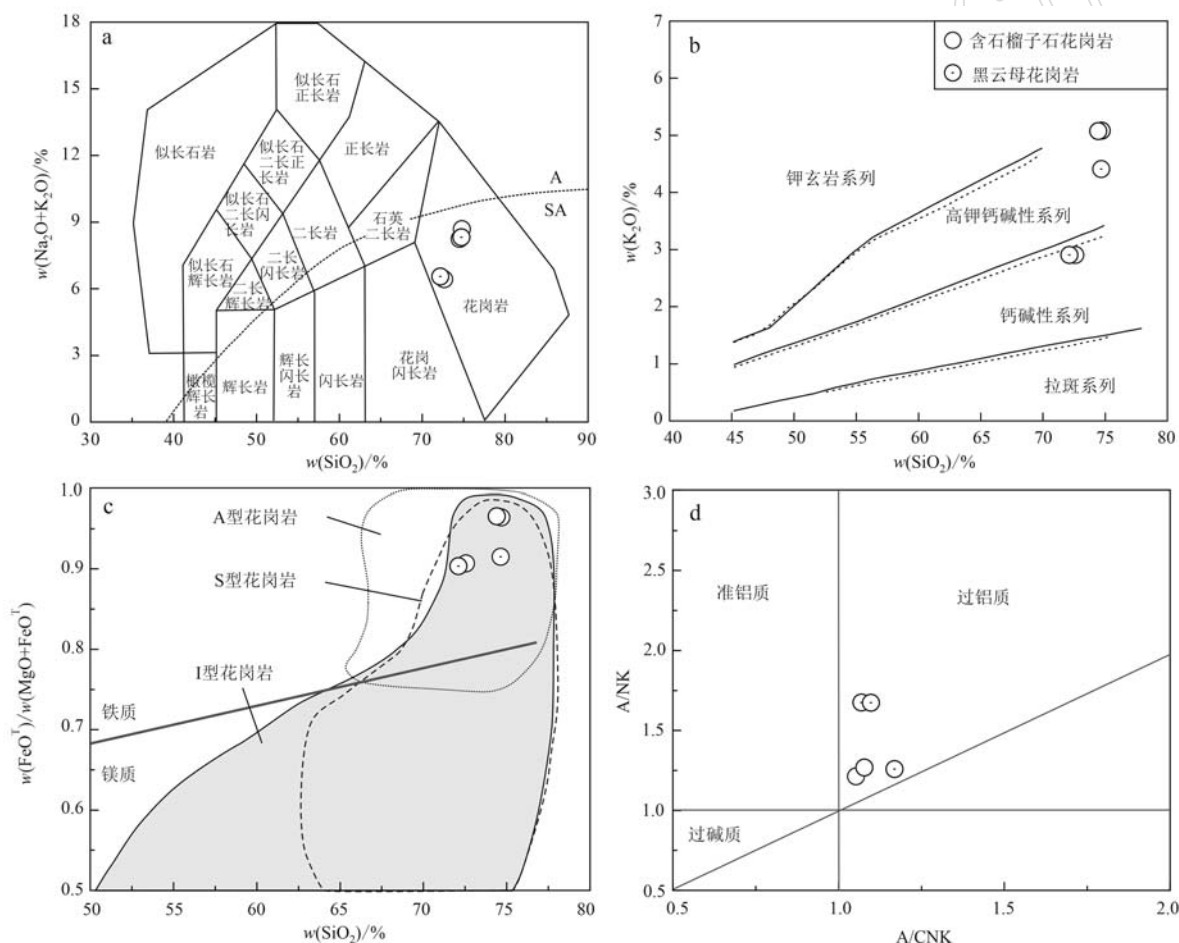


图 5 多彩花岗岩样品判别图解

Fig. 5 Classification diagrams for the Duocai granites

a—(Na₂O+K₂O) vs. SiO₂ 图解 (Middlemost, 1994), 碱性区域(A)和亚碱性区域(SA)的划分根据 Irvine and Baragar (1971); b—K₂O vs. SiO₂ 图解 (Peccerillo and Taylor, 1976); c—FeO^T/(FeO^T+MgO) vs. SiO₂ 图解 (Frost *et al.*, 2001); d—A/NK vs. A/CNK 图解 (Maniar and Piccoli, 1989)

a—(Na₂O+K₂O) vs. SiO₂ diagram (Middlemost, 1994), alkaline field (A) and sub-alkaline field (SA) after Irvine and Baragar (1971);
b—K₂O vs. SiO₂ diagram (Peccerillo and Taylor, 1976); c—FeO^T/(FeO^T+MgO) vs. SiO₂ diagram (Frost *et al.*, 2001); d—A/NK vs.
A/CNK diagram (Maniar and Piccoli, 1989)

表3 多彩花岗岩全岩主量($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)组成Table 3 Bulk-rock major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements data for the Duocai granites

岩石类型 样品号	含石榴子石花岗岩		黑云母花岗岩		
	Gtr-2	Gtr-4	11DC24-1	r-2	r-3
SiO ₂	74.66	74.38	72.54	72.08	74.62
TiO ₂	0.01	0.01	0.12	0.13	0.05
Al ₂ O ₃	13.86	13.58	14.98	15.30	14.08
Fe ₂ O ₃	0.07	0.26	0.27	0.51	0.32
FeO	1.00	1.70	1.60	1.50	1.00
FeO ^T	1.06	1.93	1.84	1.96	1.29
MnO	0.12	0.25	0.05	0.03	0.03
MgO	0.04	0.07	0.19	0.21	0.12
CaO	0.97	1.05	2.80	2.65	0.48
Na ₂ O	3.61	3.18	3.53	3.65	3.91
K ₂ O	5.08	5.07	2.91	2.91	4.41
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.04	0.03	0.02
CO ₂	0.05	0.02	0.06	0.09	0.05
H ₂ O ⁺	0.16	0.32	0.74	0.63	0.69
LOI	0.48	0.10	0.80	0.61	0.77
Mg [#]	6	6	16	16	14
A/CNK	1.05	1.08	1.07	1.10	1.17
刚玉分子	0.81	1.01	1.13	1.57	2.14
DI	92	90	81	82	93
<i>t</i> _{Zr} /°C	758	764	769	747	759
Total	99.65	99.90	99.83	99.72	99.78
Li	12.6	10.8	45.5	48.6	12.7
Be	1.54	1.56	1.85	3.13	2.61
Sc	4.57	6.70	4.79	4.93	4.58
V	1.10	0.87	6.54	5.99	2.92
Cr	0.96	0.92	0.95	1.42	1.06
Co	93	137	43	114	92
Ni	10.89	3.01	1.97	2.79	2.95
Cu	1.16	1.40	1.68	1.15	1.67
Zn	4.7	4.1	46.2	25.2	19.9
Ga	16.6	15.6	18.3	20.8	17.8
Rb	189	188	126	150	202
Sr	36	34	139	133	136
Y	99.8	184.0	65.8	23.7	54.9
Zr	111	115	128	95	100
Nb	4.5	0.9	10.0	11.6	10.9
Mo	0.04	0.23	0.21	0.07	0.04
Sn	0.99	0.91	2.05	1.59	1.49
Cs	2.00	2.13	2.79	4.47	2.16
Ba	184	158	465	511	472
La	21.9	11.6	21.4	24.7	13.9
Ce	48.4	22.8	42.1	51.6	29.6
Pr	5.93	2.91	4.81	5.71	3.75
Nd	25.12	12.62	18.31	21.69	15.88
Sm	7.40	4.13	4.54	4.96	5.69
Eu	0.24	0.23	0.97	0.90	0.52
Gd	8.17	9.23	5.86	4.55	7.59
Tb	1.65	2.79	1.22	0.75	1.38
Dy	13.41	25.21	9.19	4.24	8.64
Ho	3.48	5.95	2.09	0.71	1.65
Er	12.62	20.48	6.33	1.98	4.99
Tm	2.14	3.34	0.94	0.30	0.72
Yb	14.84	23.05	6.10	1.92	4.22
Lu	2.22	3.34	0.83	0.29	0.62
Hf	5.14	5.71	3.90	3.05	3.77
Ta	0.55	0.40	0.82	1.58	1.42
Tl	0.72	0.68	0.66	0.66	0.79
Pb	47.2	44.7	23.2	24.2	38.6
Th	14.7	13.0	10.6	9.5	11.7
U	1.71	2.59	2.04	1.49	2.65
ΣREE	267.3	331.7	190.6	148.0	154.0
δEu	0.09	0.11	0.57	0.57	0.24
(La/Yb) _N	1.00	0.34	2.38	8.72	2.22

注: *t*_{Zr}/°C计算公式据 Watson 和 Harrison (1983)。

而黑云母花岗岩样品的稀土元素总量相对较低($148.0 \times 10^{-6} \sim 190.6 \times 10^{-6}$), 显著富集轻稀土元素、亏损重稀土元素(LREE/HREE=2.32~7.42), 并且有明显 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.24 \sim 0.57$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b), 多彩花岗岩样品富集大离子亲石元素(例如 Rb、U 和 K), 但亏损高场强元素(例如 Nb、Ta、Ti 和 P)。含石榴子石花岗岩相对于黑云母花岗岩更加亏损 Ba、Nb、Ta、Ti 和 P, 而 Y、Yb 和 Lu 则更加富集。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素

岩石 Sr-Nd 同位素样品测试结果及相关计算参数列于表 4。测试样品及引用数据的 Sr、Nd 同位素初始比值以 215 Ma 为基准来进行计算。岩石样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(I_{Sr})为 0.708 4, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-8.12 \sim -7.36$, 两阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$)为 1.65~1.59 Ga, 明显低于北羌塘前寒武纪变质基底中元古代片麻岩和晚三叠世 S 型花岗岩的 $t_{2\text{DM}}$ 年龄(2.3~1.87 Ga; Tao *et al.*, 2014)。 $\varepsilon\text{Nd}(t)-I_{\text{Sr}}$ 和 $\varepsilon\text{Nd}(t)-t_{2\text{DM}}$ 投图结果显示(图 7), 样品均落入 HBSG 地体三叠纪浊积岩区域(She *et al.*, 2006; Zhang K J *et al.*, 2007; de Sigoyer *et al.*, 2014), 而与北羌塘前寒武纪变质基底中元古代片麻岩和晚三叠世 S 型花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成明显不同(Tao *et al.*, 2014)。

4 讨论

4.1 岩石成因

花岗岩成因分类中最具影响力的是 MISA 分类方案(Chappell and White, 1974, 2001)。其中, M 型花岗岩很罕见, 主要是形成于洋中脊新生洋壳之中的斜长花岗岩, 它具有极低的 K_2O ($<1.9\%$) 和 Rb ($<48 \times 10^{-6}$) 含量, 并且几乎不含钾长石(Coleman and Peterman, 1975; Saito *et al.*, 2004)。多彩高硅花岗岩具有较高的 K_2O (2.91%~5.08%) 和 Rb ($126.3 \times 10^{-6} \sim 201.8 \times 10^{-6}$) 含量, 并且具有相对富集的 Sr-Nd 同位素组成 [$\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-8.12 \sim -7.36$] 和古老的 $t_{2\text{DM}}$ 模式年龄(1.65~1.59 Ga), 这些特征明显不同于 M 型花岗岩。A 型花岗岩通常包含碱性暗色矿物, 并且具有较高的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值 (>2.6) 和 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量 ($>350 \times 10^{-6}$; Whalen *et al.*, 1987)。多彩花岗岩样品的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值 (2.17~2.57; 平均值为 2.34) 和 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量

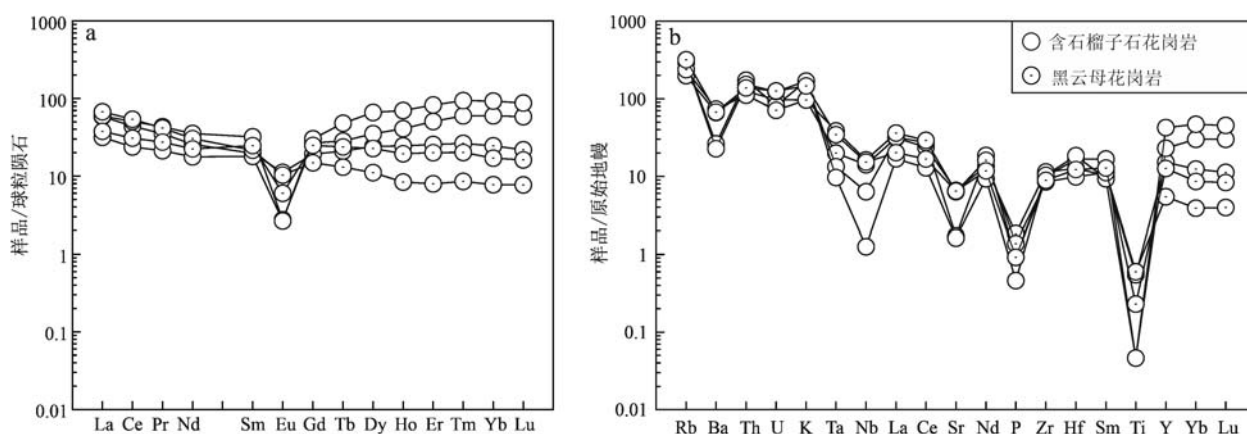


图6 多彩花岗岩样品的稀土元素球粒陨石标准化分布图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) [球粒陨石和原始地幔标准化值分别据 Taylor and McLennan (1985) 和 Sun and McDonough (1989)]

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) of the Duocai granites [normalizing values of chondrite and primitive mantle are from Taylor and McLennan (1985) and Sun and McDonough (1989), respectively]

表4 青藏高原中部多彩花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Bulk-rock Sr-Nd isotopic compositions of the typical samples for the Duocai granites in central Tibetan Plateau

样品号	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	t/Ma	I_{Sr}	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$
11DC24-1	126	139	2.635 8	0.717 06	4.5	18.3	0.149 8	0.512 16	215	0.708 4	-8.12	1.65
Gtr-2	189	36	-	-	7.4	25.1	0.178 2	0.512 24	215	-	-7.36	1.59
Gtr-4	188	34	-	-	4.1	12.6	0.198 0	0.512 25	215	-	-7.67	1.62

注: $\varepsilon\text{Nd}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}}(t) / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) - 1] \times 10\,000$; $t_{2\text{DM}} = (1/\lambda) \times \ln | 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} + (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{C}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{C}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] |$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513\,151$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.213\,6$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512\,638$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196\,7$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{C}} = 0.118$; $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$; $t = 215 \text{ Ma}$; S=样品。

($182 \times 10^{-6} \sim 323 \times 10^{-6}$; 平均值为 242×10^{-6}) 均低于典型 A 型花岗岩, 同时也不含碱性暗色矿物。因此, 研究区样品也不符合 A 型花岗岩的特征。多彩高硅花岗岩显示弱过铝质-强过铝质特征 ($A/\text{CNK} = 1.05 \sim 1.17$)、较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 ($0.8 \sim 1.59$) 和相对富集的 Sr-Nd 同位素组成 (图 7), CIPW 标准矿物中刚玉分子含量为 $0.81 \sim 2.14$ (除样品 Gtr-2 外, 其余均大于 1), 并且包含黑云母和石榴子石等富铝矿物, 这些特征都与 S 型花岗岩类似 (Chappell and White, 1974, 2001; Sylvester, 1998)。此外, 样品在 Zr-SiO₂ 图解和 ACF 图解中均落入 S 型花岗岩区域内 (图 8; Watson and Harrison, 1983; Chappell and White, 1992), 进一步表明多彩高硅花岗岩很可能具有与 S 型花岗岩类似的成分演化趋势。

高硅花岗岩通常认为是由纯地壳物质发生深熔作用 (部分熔融) 的结果, 与地壳演化过程紧密相关 (Clemens and Stevens, 2012; 王孝磊, 2017)。多彩

花岗岩样品具有相对高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 ($0.12 \sim 0.79$; 平均值为 0.45), 与单纯由变泥质岩熔融形成的花岗质熔体成分 ($\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$; Sylvester, 1998) 存在较大差别。在基于实验岩石学资料构筑的判别图解中, 样品主要落入变杂砂岩和/或变安山岩熔体成分范围内 (图 9)。

近年来的研究揭示, 北羌塘三叠纪中酸性岩浆的源区存在两个潜在的地壳端员, 即北羌塘前寒武纪变质基底和 HBSG 地体中三叠纪浊积岩 (Liu *et al.*, 2021)。北羌塘变质基底具有冈瓦纳亲缘性, 其南缘的晚三叠世岩浆活动与龙木错-双湖古特提斯洋盆演化的后碰撞阶段相关, 具有较老的 Nd 模式年龄和较低的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 (Peng *et al.*, 2014; Tao *et al.*, 2014)。而北羌塘北缘晚三叠世岩浆活动则与甘孜-理塘洋向南俯冲有关, HBSG 地体三叠纪浊积岩被俯冲带输送到北羌塘之下发生部分熔融, 产生的熔体 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值跨度较大且 Nd 模式年龄相对

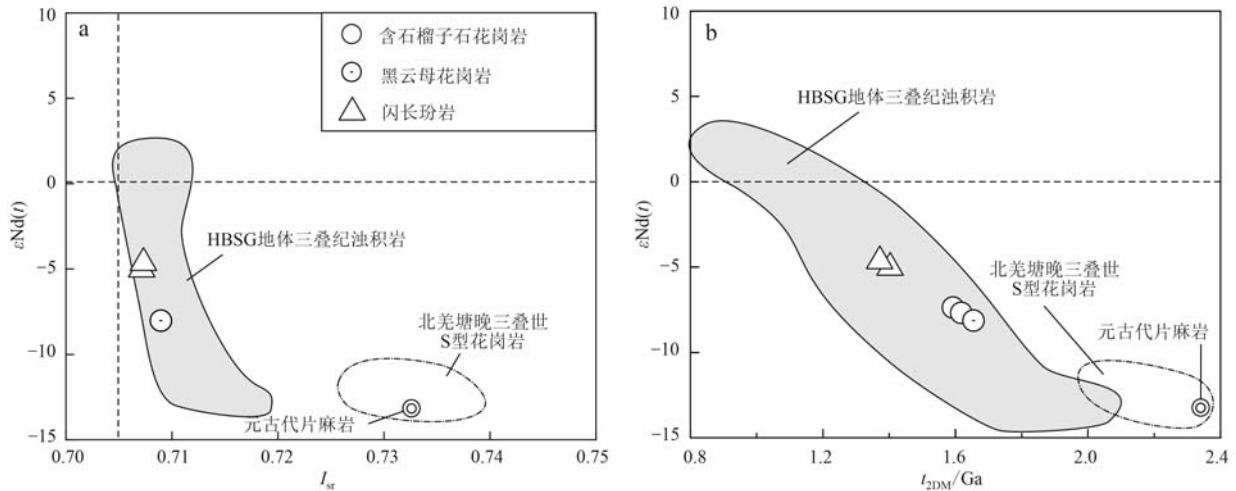


图7 多彩花岗岩样品的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} 图解(a)和 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ vs. $t_{2\text{DM}}$ 图解(b)

Fig. 7 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} diagram (a) and $\varepsilon\text{Nd}(t)$ vs. $t_{2\text{DM}}$ diagram (b) for Duocai granites

HBSG 地体三叠纪浊积岩数据来源于 She *et al.* (2006), Zhang K J *et al.* (2007) 和 de Sigoyer *et al.* (2014); 北羌塘晚三叠世 S 型花岗岩和元古代片麻岩数据来源 Tao *et al.* (2014); 北羌塘三叠纪闪长玢岩数据杨凯等 (2020)

data of the Triassic turbidites in the HBSG terrane are from She *et al.* (2006), Zhang K J *et al.* (2007) and de Sigoyer *et al.* (2014); data of the Late Triassic S-type granitoids and Proterozoic gneiss in the NQ terrane are from Tao *et al.* (2014); data of the Triassic diorite porphyrite in the North Qiantang is from Yang Kai *et al.* (2020)

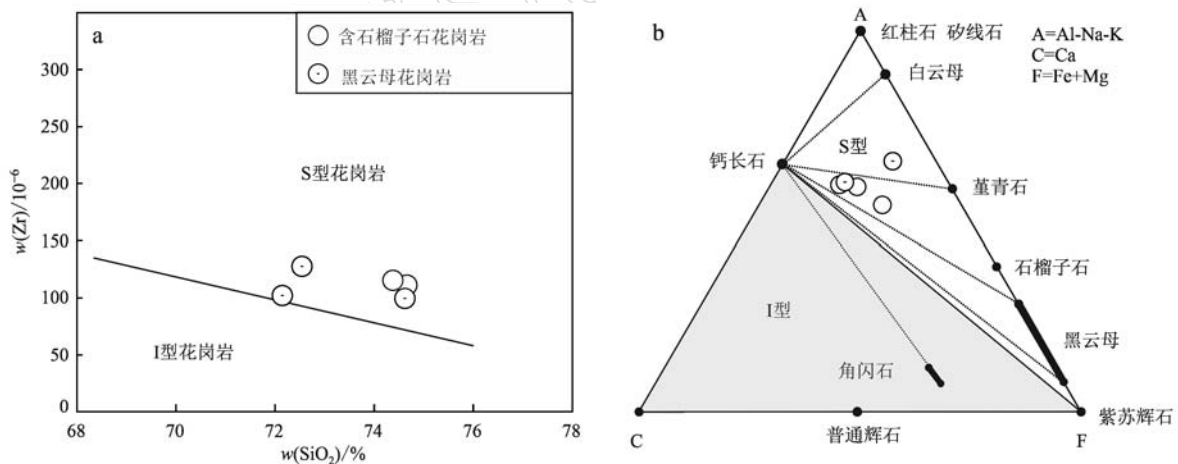


图8 多彩花岗岩样品的 Zr vs. SiO_2 图解(a, Watson and Harrison, 1983)和 ACF 图解(b, Chappell and White, 1992)

Fig. 8 Zr vs. SiO_2 diagram (a, Watson and Harrison, 1983) and ACF diagram (b, Chappell and White, 1992) for the Duocai granites

较年轻 (She *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2012; de Sigoyer *et al.*, 2014)。多彩高硅花岗岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值和 $t_{2\text{DM}}$ 明显不同于北羌塘前寒武纪变质基底中元古代片麻岩和晚三叠世 S 型花岗岩, 而与 HBSG 地体三叠纪浊积岩相当 (图 7)。此外, 其 Sr-Nd 同位素组成也与北羌塘北缘三叠纪中性岩 (227 ± 2 Ma) 成分存在一定区别 (杨凯等, 2020), 进一步判断多彩花岗岩更符合变杂砂岩源区部分熔融的结果。

目前对于高硅花岗岩的形成机制主要包括以下两种模型: ① 由成熟度较高的中、下地壳岩石直接部分熔融, 不经历明显的分异过程 (Searle *et al.*, 2009; Glazner, 2014); ② 经过多次岩浆-晶体分离过程从深部岩浆房抽取到浅部地壳中形成 (Annen *et al.*, 2006; Bachmann and Bergantz, 2008; Lee and Morton, 2015)。前人研究认为, 全岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值可视作花岗质岩浆结晶分异程度的标志

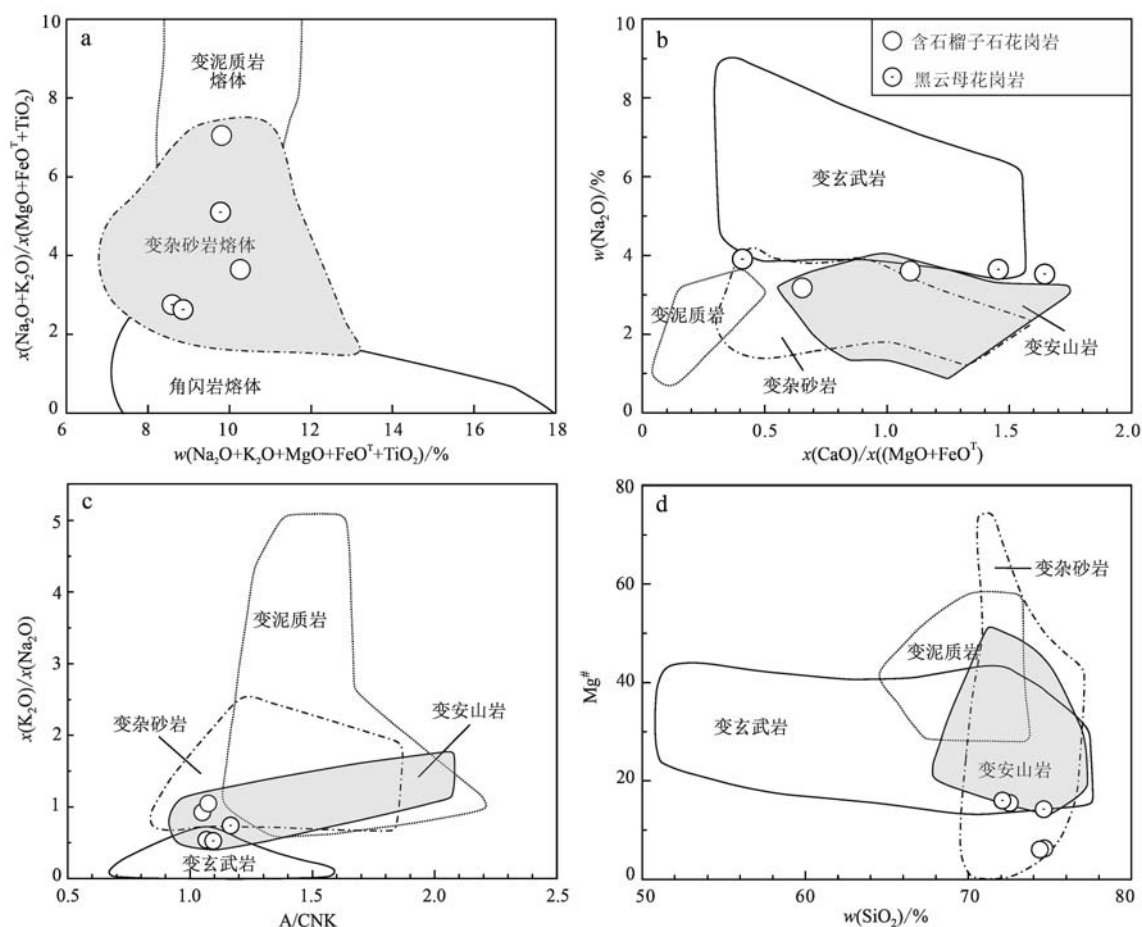


图9 多彩花岗岩样品成分与各类源岩部分熔融实验结果对比(据 Altherr and Siebel, 2002 修改)

Fig. 9 Comparison between the composition of Duocai granites and the compositional fields of experimental melts derived from various bulk compositions (modified after Altherr and Siebel, 2002)

(Ballouard *et al.*, 2016; 吴福元等, 2017)。多彩高硅花岗岩具有较低的 Nb/Ta 值(4~6.6)和 Zr/Hf 值(17~23.5), 可与华南佛冈高分异花岗岩(Nb/Ta=3.6~15.3, Zr/Hf=17.3~38.9; 陈璟元等, 2015)和喜马拉雅淡色花岗岩(Nb/Ta=2.0~5.6, Zr/Hf=19.1~23.9; 刘志超等, 2020)等的成分进行类比。此外, 多彩花岗岩显示较高的分异指数($DI=81\sim93$), 进一步指示其可能经历了较高分异作用。研究表明, 锆石的微量元素变化可以用来指示分离结晶作用的影响, 随着岩浆结晶分异程度的增加, 锆石的 Hf 含量会逐渐升高(Barth and Wooden, 2010; Claiborne *et al.*, 2010)。多彩花岗岩中的岩浆锆石的 Hf 含量相对较高, 其 Ti/Th/U 和 δEu 随 Hf 含量的升高而降低, $(\text{Yb}/\text{Gd})_\text{N}$ 随 Hf 含量的升高而升高(图 10), 这些变化规律均符合分离结晶的趋势。通常来说, 经历了高度分异演化的花岗岩的碱

性长石多为微斜长石或富 Rb 钾长石, 斜长石的含量相对较低并且其成分上相对富钠(吴福元等, 2017)。多彩花岗岩暗色矿物含量很低, 可与典型淡色花岗岩特征类比, 岩相学研究表明其中的碱性长石主要为微斜长石和条纹长石, 斜长石相对较少并且相对富钠, 暗示着其经历了较高分异的结晶分异作用(吴福元等, 2017)。多彩花岗岩样品具有较低的 CaO、MgO、 FeO^T 和 TiO_2 含量, 其岩浆锆石的 Ti、 δEu 与 Hf 含量之间呈正相关趋势(图 10), 表明其形成过程中可能经历了斜长石、黑云母和 Fe-Ti 氧化物等矿物的分离结晶。

4.2 深部地球动力学背景分析

青藏高原中部的可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜(HBSG)地体呈倒三角形, 由于其具有复杂的演化历史和动力学机制, 素有“中国地质百慕大”之称(许志琴等, 1991)。研究区处于 HBSG 地体南部与北

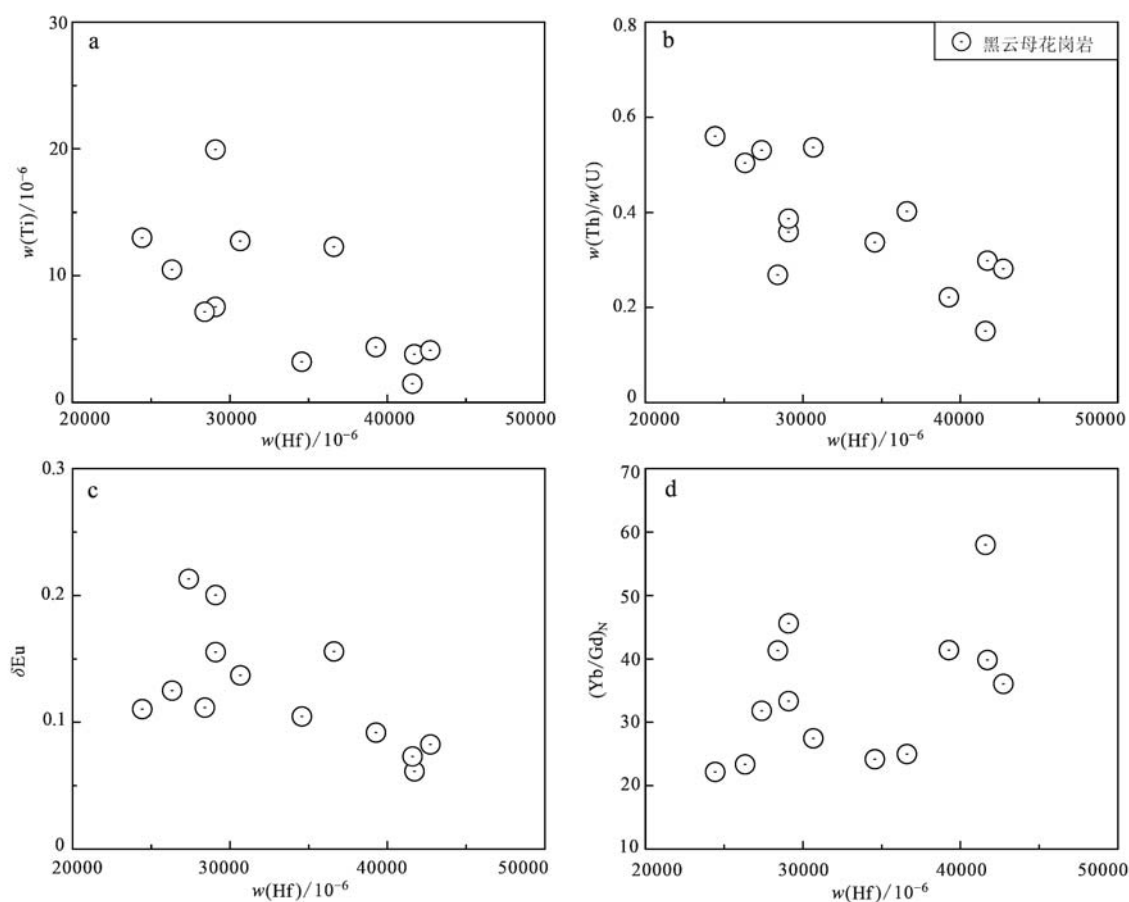


图 10 多彩花岗岩岩浆锆石的 Hf 含量与微量元素组成变化图解

Fig. 10 Plots of Hf concentration versus trace element concentrations in magmatic zircons for the Duocai granites

羌塘地体北缘的过渡位置, 通过对该区三叠纪岩浆事件的深入解剖, 能为揭示青藏高原中部板块构造演化历史及成矿作用提供关键证据。本文系统统计了目前已报道的北羌塘北缘和 HBSG 地体中三叠纪岩浆活动的记录(图 11; 表 5), 可以发现北羌塘北缘的岩浆活动的时代主要集中于 240~198 Ma, 峰值大约在 216 Ma, 岩性分布从镁铁质岩到长英质岩均有涉及。而 HBSG 地体中岩性主要为中酸性岩类, 镁铁质岩极少, 这些岩浆岩的年龄分布于 230~188 Ma, 峰值年龄大约为 210 Ma(图 11)。北羌塘北缘玉树地区中三叠世蛇绿岩中镁铁质岩石的年龄为 239~232 Ma, 表明该时期甘孜-理塘洋盆仍处于扩张阶段(Liu *et al.*, 2016)。目前已经在沱沱河地区识别出了一套埃达克质岩-高镁安山岩-富 Nb 玄武岩, 指示至少在 229 Ma 甘孜-理塘洋向南俯冲至北羌塘地体之下(Wang *et al.*, 2008)。古地磁证据显示洋盆最终关闭可能发生在 213~204 Ma(Song *et al.*, 2015)。Yang 等(2012)对研究区及周缘已发生

明显变形的中酸性岩体中的变质矿物开展 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学分析, 进一步限定碰撞事件的时间约为 201~193 Ma。因此, 可以确定本文研究的多彩高硅花岗岩(219±2 Ma)形成一个以俯冲作用为主导的构造环境中。最近, Liu 等(2021)的研究揭示青藏高原中部三叠纪高镁安山质岩呈幕式分布的特点, 并且识别出 229~219 Ma、218~217 Ma 和 215~209 Ma 三幕岩浆作用。其中, 第一幕(229~219 Ma)主要为埃达克质高镁闪长岩, 与年轻的洋壳俯冲板片熔融有关(Wang *et al.*, 2008); 而后两幕(218~217 Ma 和 215~209 Ma)主要为赞岐质高镁闪长岩, 是由板片回撤导致软流圈上涌而形成(Liu *et al.*, 2021)。另外根据区域已有年代学数据对比结果可以确定, 研究区晚三叠世中酸性岩浆岩(包括多彩高硅花岗岩)的结晶年龄与后两幕岩浆作用的分布时间存在明显的重合(图 11)。因此, 俯冲板片回撤背景下幔源岩浆底侵供热很可能是造成这一时期变杂砂岩发生高温熔融进而形成多彩高硅花岗岩的关键因素。

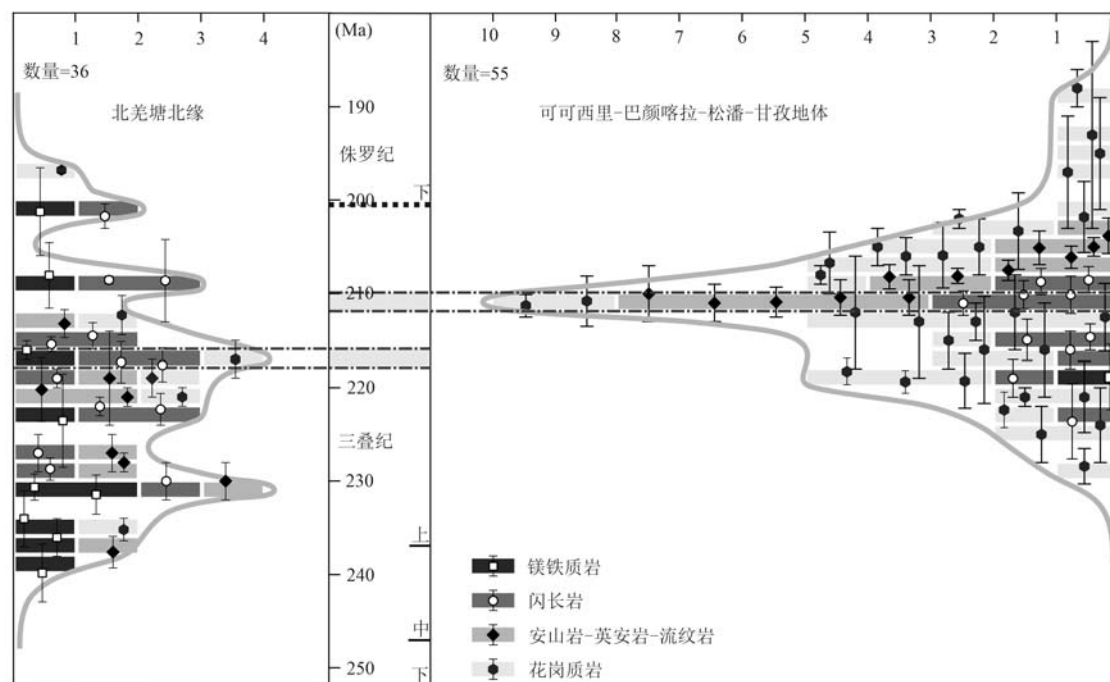


图 11 北羌塘北缘和可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜地体三叠纪岩浆岩锆石 U-Pb 年龄分布图(年龄数据见表 5)

Fig. 11 Zircon U-Pb ages of the Triassic magmatic rocks in the north margin of the NQ terrane and HBSG terrane (age data from Table 5)

表 5 北羌塘北缘和可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜地体三叠纪岩浆岩锆石 U-Pb 年龄数据

Table 5 Zircon U-Pb ages of the Triassic magmatic rocks from the northern part of the NQ terrane and HBSG terrane

样品号	岩性	年龄/Ma	年龄误差 ($\pm 2\sigma$)	测年方法	数据来源
北羌塘北缘 ($n=36$)					
LB12-1	英安岩	230	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	刘彬等 (2016)
SC6	石英闪长岩	219	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Tan 等 (2020)
GS2	花岗闪长岩	217	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Tan 等 (2020)
B6067-1	花岗闪长岩	221	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Tan 等 (2020)
B6067-2	镁铁质包体	222	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Tan 等 (2020)
02TT-20	埃达克岩	220.2	3.4	K-Ar 测年	Wang 等 (2008)
02TT-19	高镁安山岩	219	5	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年	Wang 等 (2008)
CY	闪长岩	230	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	王键等 (2018)
DC36-2	玄武岩	234	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2016)
XW06-3	辉长岩	236	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2016)
-	闪长玢岩	227	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	杨凯等 (2020)
D7001	辉长岩	223.5	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	唐华 (2016)
Q3-13	石英闪长岩	208.54	0.43	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	张洪瑞等 (2013)
Q3-13	石英闪长岩	201.7	1.3	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年	张洪瑞等 (2013)
-	石英闪长岩	222.3	1.7	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年	李洁等 (2012)
Sj-1	石英闪长岩	183	-	-	李莉等 (2009)
-	辉长岩	239.8	3.1	SHRIMP 锆石 U-Pb 测年	段其发等 (2009)
J0404	玄武岩	201.2	4.7	SHRIMP 锆石 U-Pb 测年	金贵善 (2006)
J0408	辉长岩	208	3.5	SHRIMP 锆石 U-Pb 测年	金贵善 (2006)
J0412	石英闪长岩	208.6	4.4	SHRIMP 锆石 U-Pb 测年	金贵善 (2006)
-	二长花岗岩	212.3	2.1	单颗粒锆石 U-Pb 法	王秉璋等 (2008)
-	花岗闪长岩	196.8	0.3	单颗粒锆石 U-Pb 法	王秉璋等 (2008)
-	石英闪长岩	215.4	0.8	单颗粒锆石 U-Pb 法	王秉璋等 (2008)
-	流纹斑岩	237.6	1.7	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	刘银等 (2010)
GS3	英安岩	221	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Zhao 等 (2014)
LM12	流纹英安岩	227	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019a)
DR2	流纹英安岩	228	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019a)
TB7802A	黑云母花岗闪长岩	235.2	1.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	王召林 (2009)
TB7814	黑云母石英闪长岩	228.7	1.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	王召林 (2009)
BSBDB	辉长岩	216	1	-	Qian 等 (2014)

续表 5
Continued Table 5

样品号	岩性	年龄/Ma	年龄误差 ($\pm 2\sigma$)	测年方法	数据来源
JL02-1	高镁闪长岩	217.3	2.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2021)
YS04-1	闪长岩	217.6	1.8	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2021)
GQ04	辉长岩	230.6	1.4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu B 等 (2020)
YS41	辉绿岩	231.4	2.1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu B 等 (2020)
TB039-5	石英闪长岩	214.5	1.4	SHRIMP 锆石 U-Pb 测年	Yang 等 (2012)
TB054-1	英安岩	213.2	1.5	SHRIMP 锆石 U-Pb 测年	Yang 等 (2012)
可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜地体 ($n=55$)					
-	花岗岩	201.8	3.8	SHRIMP	刘荣等 (2006)
-	花岗岩	203.3	4.1	SHRIMP	刘荣等 (2006)
2007K361	花岗闪长岩	213	6	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2007K249	花岗岩 (斑状)	212	6	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2007K419	花岗岩	221	1	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2006K016	花岗闪长岩	202	1	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2007K351	花岗岩	193	10	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2006K006	花岗岩 (斑状)	212	4	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2006K096	花岗岩 (斑状)	213	2	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
2006K201	花岗岩 (斑状)	225	3	SHRIMP	Zhang 等 (2014)
04RZ-W1229-4	花岗斑岩	212.5	3.6	SHRIMP U-Pb 测年	吕金刚等 (2006)
2406a	英安岩	211	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Wang 等 (2011)
2406b	英安岩	210.9	1.6	全岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年	Wang 等 (2011)
2121-6	安山岩	210.4	1.9	全岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年	Wang 等 (2011)
2114-1	安山岩	210.4	1.9	全岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年	Wang 等 (2011)
10QB05-1	闪长岩	214.6	1.4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Wang 等 (2018)
B4989-6	英安质凝灰熔岩	208.1	0.8	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	夏蒙蒙等 (2019)
B4989-3	英安岩	206.1	1.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	夏蒙蒙等 (2019)
B4983-1	英安岩	208.2	1.3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	夏蒙蒙等 (2019)
B4978-1	石英粗安岩	207.5	1.1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	夏蒙蒙等 (2019)
B4965-1	流纹岩	203.8	1.9	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	夏蒙蒙等 (2019)
B4959-2	英安岩	205.1	1.8	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	夏蒙蒙等 (2019)
DC26-1	高镁闪长岩	208.5	1.4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2021)
RQ07-1	高镁闪长岩	208.7	1.4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2021)
JK06-1	高镁闪长岩	210.1	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2021)
ZD02-1	高镁闪长岩	210.1	1.5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2021)
0826-1	花岗闪长岩	205.9	3.5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019b)
0826-2	花岗闪长岩	206.7	3.3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019b)
0904-1	花岗闪长岩	210.8	2.7	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019b)
RQ-1	石英闪长岩	214.9	2.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019b)
JK-1	石英闪长岩	211	1.3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Liu 等 (2019b)
0676	安山岩	210	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Cai 等 (2010)
0651	安山岩	205	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Cai 等 (2010)
WQ-354	A-型花岗岩	211.3	1.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Zhang H F 等 (2007)
Y-4	花岗质岩	221	3.8	SHRIMP	Zhang 等 (2006)
M-2	花岗岩	216	5.7	SHRIMP	Zhang 等 (2006)
CDU26	花岗岩	195	6	锆石 U/Pb	Roger 等 (2004)
CDU114	淡色花岗岩	188	2	独居石 U/Pb	Roger 等 (2004)
DB35	角闪石花岗岩	197	6	锆石 U/Pb	Roger 等 (2004)
-	花岗闪长岩	224	4	SHRIMP	Yuan 等 (2010)
-	粗玄质正长岩	215	3	SHRIMP	Yuan 等 (2010)
-	二长岩	205	3	SHRIMP	Yuan 等 (2010)
TA4	黑云母石英闪长岩	223.6	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Xiao 等 (2007)
JL2	石英二长岩	228.4	1.9	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Xiao 等 (2007)
JL1	黑云母二长花岗岩	219.3	2.9	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	Xiao 等 (2007)
0601	石英闪长岩	219	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	蔡宏明 (2010)
0618	花岗闪长岩	216	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	蔡宏明 (2010)
0746	正长岩	208	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	蔡宏明 (2010)
0742	二长岩	205	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	蔡宏明 (2010)
0732	花岗闪长岩	206	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	蔡宏明 (2010)
YS26-1	闪长岩	216	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	马骥等 (2020)
YL-2	辉长岩	218.9	3.5	SIMS 锆石 U-Pb 测年	卢雨潇等 (2022)
YD-1	花岗闪长岩	222.4	1.9	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	卢雨潇等 (2022)
YD-2	花岗闪长岩	218.3	1.4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	卢雨潇等 (2022)
YL-1	二长岩	219.4	1.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年	卢雨潇等 (2022)

此外,综合区域上最新的多学科研究成果,可以判断青藏高原中部北羌塘北缘在三叠纪时期经历了如下的构造-岩浆演化过程。239~232 Ma 处于甘孜-理塘古特提斯洋盆扩张时期,形成了查涌-歇武具有 MORB/OIB 亲缘性的蛇绿混杂岩(Liu *et al.*, 2016);至少从 229 Ma 开始,甘孜-理塘洋向南俯冲,形成埃达克质岩、赞岐质高镁安山岩、富 Nb 玄武岩以及具有正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的英安岩(Wang *et al.*, 2008; 刘彬等, 2016; Liu *et al.*, 2021);约 219 Ma,伴随着板块俯冲的持续进行,洋壳发生大量榴辉岩化,进而导致板片回撤。在这一地球动力学背景下产生赞岐质高镁闪长岩、高硅花岗岩(本文)和其他中酸性岩浆岩(Tan *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021);201~193 Ma,北羌塘北缘及其周缘处于一个与碰撞有关的背景中,研究区及周缘中酸性岩发生不同程度的变质或者变形作用,例如玉树糜棱岩化石英闪长岩(张洪瑞等, 2013)。

5 结论

(1) 多彩高硅花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 219 ± 2 Ma (MSWD=0.28),表明其为晚三叠世岩浆活动的产物。

(2) 多彩高硅花岗岩的形成应该与 HBSG 地体三叠纪浊积岩(变杂砂岩)的部分熔融有关,并且经历了较高分离结晶。

(3) 北羌塘北缘及其周缘晚三叠世中酸性岩浆岩(包括高硅花岗岩)的产生很可能与甘孜-理塘古特提斯洋的板片回撤作用密切相关。

致谢 研究工作得到了许志琴院士、杨经绥院士和李海兵研究员的关心与指导;野外地质考察和室内工作得到郭盼、张鑫、洛桑塔青和索朗欧珠等的帮助;样品处理与实验测试得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜、胡兆初、陈海红和周炼等老师的热情帮助与耐心指导。在此特表感谢。

References

Altherr R and Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (4): 397~415.

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.

Annen C, Blundy J D and Sparks R S. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones [J]. *Journal of Petrology*, 47 (3): 505~539.

Bachmann O and Bergantz G W. 2008. Rhyolites and their source mushes across tectonic settings [J]. *Journal of Petrology*, 49 (12): 2 277~2 285.

Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, *et al.* 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition [J]. *Geology*, 44: 231~234.

Barth A and Wooden J. 2010. Coupled elemental and isotopic analyses of polygenetic zircons from granitic rocks by ion microprobe, with implications for melt evolution and the sources of granitic magmas [J]. *Chemical Geology*, 277: 149~159.

Cai Hongming. 2010. Petrogenesis of Indosinian Granitoids and Volcanic Rocks in Songpan-Ganze Fold belt: Constrains for Deep Geological Process [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).

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): 1 316~1 328.

Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173~174.

Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1~26.

Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489~499.

Chappell B W, White A J R and Wyborn D. 1987. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 28: 1 111~1 138.

Chen Jingyuan and Yang Jinhui. 2015. Petrogenesis of the Fogang highly fractionated I-type granitoids: Constraints from Nb, Ta, Zr and Hf [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (3): 846~854 (in Chinese with English abstract).

Chen S C, Yu J J and Bi M F. 2021. Extraction of fractionated interstitial melt from a crystal mush system generating the Late Jurassic high-silica granites from the Qitianling composite pluton, South China: Implications for greisen-type tin mineralization [J]. *Lithos*, 382~383.

Claiborne L L, Miller C F and Wooden J L. 2010. Trace element composition of igneous zircon: A thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain,

- Nevada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(4): 511~531.
- Clemens J D and Stevens G. 2012. What controls chemical variation in granitic magmas? [J]. *Lithos*, 134-135: 317~329.
- Coleman R G and Peterman Z E. 1975. Oceanic plagiogranite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 80: 1 099~1 108.
- de Sigoyer J, Vanderhaeghe O, Duchêne S, *et al.* 2014. Generation and emplacement of Triassic granitoids within the Songpan Garze 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.
- DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 53: 189~202.
- Duan Qifa, Wang Jianxiong, Bai Yunshan, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of gabbro in ophiolite from southern Qinghai [J]. *Geology in China*, 36(2): 291~299 (in Chinese).
- Frost B, Barnes C, Collins W, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2 033~2 048.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. *Nature*, 432: 892~897.
- Garcia-Arias M and Stevens G. 2017. Phase equilibrium modelling of granite magma petrogenesis: B. An evaluation of the magma compositions that result from fractional crystallization[J]. *Lithos*, 277: 109~130.
- Glazner A F. 2014. Magmatic life at low Reynolds number[J]. *Geology*, 42: 935~938.
- Glazner A F, Coleman D S and Bartley J M. 2008. The tenuous connection between high-silica rhyolites and granodiorite plutons[J]. *Geology*, 36.
- He Shiping, Li Rongshe, Wang Chao, *et al.* 2013. Research on the formation age of Ningduo Rock Group in Changdu Block: Evidence for the existence of basement in the North Qiangtang[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 15~24 (in Chinese with English abstract).
- Hildreth E W. 1979. The Bishop Tuff: Evidence for the origin of compositional zonation in silicic magma chambers[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 180: 43~75.
- Huang M, Buick I and Hou L. 2003. Tectonometamorphic evolution of the Eastern Tibet Plateau: Evidence from the Central Songpan-Garze Orogenic Belt, Western China[J]. *Journal of Petrology*, 44: 255~278.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523~548.
- Jin Guishan. 2006. *Geochronology and Geochemistry Characters on Some Magmatic Rocks in the West of Xijir Ulan-Jinshajiang Suture Zone* [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Lee C T A and Morton D M. 2015. High silica granites: Terminal porosity and crystal settling in shallow magma chambers[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 409: 23~31.
- Li Jie, Chen Wen, Yong Yong, *et al.* 2012. Emplacement age, geochemical characteristics and tectonic significance of Zhaxike quartz diorite in Yushu Area, Qinghai Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(5): 773~786 (in Chinese with English abstract).
- Li Li, Bai Yunshan, Niu Zhijun, *et al.* 2009. Characteristics and tectonic significance of the Gakaucharui-Xiqiaosaisuo diorite in the eastern Qiangtang, Tibet Plateau [J]. *Geology and Resources*, 18(4): 250~255 (in Chinese).
- Liu B, Ma C Q, Guo Y H, *et al.* 2016. Petrogenesis and tectonic implications of Triassic mafic complexes with MORB/OIB affinities from the western Garze-Litang ophiolitic mélange, central Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 26: 253~267.
- Liu Bin, Ma Changqian, Huang Jian, *et al.* 2016. Petrogenetic mechanism and tectonic significance of Triassic Yushu volcanic rocks in the northern part of the North Qiangtang Terrane[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Liu B, Ma C Q, Tang Y J, *et al.* 2021. Triassic high-Mg andesitic magmatism induced by sediment melt-peridotite interactions in the central Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 106266: 398~399.
- Liu B, Xu Y, Li Q, *et al.* 2020. Origin of Triassic mafic magmatism in the North Qiangtang terrane, central Tibetan Plateau: Implications for the development of a continental back-arc basin[J]. *Journal of the Geological Society*, 177: jgs2019-130.
- Liu C, Wang R C, Wu F Y, *et al.* 2020. Spodumene pegmatites from the Pusila pluton in the higher Himalaya, South Tibet: Lithium mineralization in a highly fractionated leucogranite batholith [J]. *Lithos*, 105421: 358~359.
- Liu Rong, Fang Qingxin and Ma Yuzhou. 2006. Age, petrology, geochemistry and tectonic setting of Yunwuling granite in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 24(3): 223~228 (in Chinese).
- Liu Yin, Li Rongshe, Ji Wenhua, *et al.* 2010. The define and geological significance of Permian-Triassic magmatic arc at Dangjiangrong, south of Duocai ophiolite mélange zone in the Zhiduo area, Qinhai, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1 840~1 850 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Tan J, Wei J H, *et al.* 2019a. Sources and petrogenesis of Late

- Triassic Zhiduo volcanics in the northeast Tibet: Implications for tectonic evolution of the western Jinsha Paleo-Tethys Ocean[J]. *Lithos*, 336~337: 169~182.
- Liu Y, Xiao W J, Windley B F, *et al.* 2019b. Late Triassic ridge subduction of Paleotethys: Insights from high-Mg granitoids in the Songpan-Ganzi area of northern Tibet[J]. *Lithos*, 334~335: 254~272.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Liu Zhichao, Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, *et al.* 2020. The mechanisms of fractional crystallization for the Himalaya leucogranites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3 551~3 571 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuxiao, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, *et al.* 2022. Possible northward subduction in Ganzi-Litang ocean: Evidence from Dawu-Luhuo magmatic rocks in Songpan-Ganzi orogen[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2 380~2 402 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. 2000. Users manual for Isoplot/Ex: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 53.
- Luo B J, Zhang H F, Xu W C, *et al.* 2015. The Middle Triassic Meiwu batholith, West Qinling, central China: Implications for the evolution of compositional diversity in a composite batholith[J]. *Journal of Petrology*, 56: 1 139~1 172.
- Lü Jingang, Wang Juchuan, Chu Chunhua, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Wolonggang monzogranite porphyry in the western segment of the Hoh Xil belt, Qinghai-Tibet Plateau and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 721~724 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ji, Liu Bin and Sun Yang. 2020. Geochemistry, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic Chenduo high-Mg diorites in the central Bayan Har Terrane[J]. *Mineralogy and Petrology*, 40(2): 36~47 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoid [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37: 215~224.
- Patiño Douce A E. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 168: 55~75.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Peng T P, Zhao G C, Fan W M, *et al.* 2014. 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*, 27: 1 494~1 508.
- Qian Ye, Sun Fengyue, Li Bile, *et al.* 2014. Early Permian-Late Triassic Magmatism in the Tuotuohe Region of the Qinghai-Tibet Plateau: Constraints on the Tectonic evolution of the Western Segment of the Jinshajiang Suture[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(2): 498~516.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, *et al.* 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garzê Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465~481.
- Saito S, Arima M, Nakajima T, *et al.* 2004. Petrogenesis of Ashigawa and Tonogi granitic intrusions, southern part of the Miocene Kofu Granitic Complex, central Japan: M-type granite in the Izu arc collision zone[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 99: 104~117.
- Searle M P, Cottle J M, Streule M J, *et al.* 2009. Crustal melt granites and migmatites along the Himalaya: Melt source, segregation, transport and granite emplacement mechanisms[J]. *Geological Society of America*, 100: 219~233.
- She Z B, Ma C Q, Mason R, *et al.* 2006. Provenance of the Triassic Songpan-Ganzi flysch, west China[J]. *Chemical Geology*, 231: 159~175.
- Shuai X, Li S M, Zhu D C, *et al.* 2021. Tetrad effect of rare earth elements caused by fractional crystallization in high-silica granites: An example from central Tibet[J]. *Lithos*, 105968: 384~385.
- Song Peiping, Ding Lin, Li Zhenyu, *et al.* 2015. Late Triassic paleolatitude of the Qiangtang block: Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 69~83.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29~44.
- Tan J, Wei J H, Zhao S Q, *et al.* 2020. Petrogenesis of Late Triassic high-Mg diorites and associated granitoids with implications for Paleotethys evolution in the northeast Tibetan Plateau[J]. *GSA Bulletin*, 132: 955~976.

- Tang Hua. 2016. Geochemical Characteristics and Tectonic Environment of the Chayong Phiplite in Zhiduo County, Qinghai Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Bi X W, Li C S, *et al.* 2014. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of the Jitang granitic pluton in eastern Tibet, SW China [J]. *Lithos*, 184~187: 314~323.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 328.
- Wang Bingzhang, Luo Zhaohua, Zeng Xiaoping, *et al.* 2008. Genesis and zircon U-Pb dating of Indosinian granites in Zhiduo area, North Sanjiang section, Qinghai Province [J]. *Geology in China*, 35(2): 196~206 (in Chinese).
- Wang J, Gou G N, Wang Q, *et al.* 2018. Petrogenesis of the Late Triassic diorites in the Hoh Xil area, northern Tibet: Insights into the origin of the high-Mg[#] andesitic signature of continental crust [J]. *Lithos*, 300~301: 348~360.
- Wang Jian, Sun Fengyue, Jiang Hefang, *et al.* 2018. Age, petrogenesis and tectonic implications of high-Mg diorite in Chayong Region, Yushu, Qinghai [J]. *Earth Science*, 43(3): 733~752 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Li Z X, Chung S L, *et al.* 2011. Late Triassic high-Mg andesite/dacite suites from northern Hohxil, North Tibet: Geochronology, geochemical characteristics, petrogenetic processes and tectonic implications [J]. *Lithos*, 126(1-2): 54~67.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): Evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 473~490.
- Wang Xiaolei. 2017. Some new research progresses and main scientific problems of granitic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1445~1458 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaolin. 2009. Study on Multiple Orogeny and Metallogenesis in Yushu area, Northern Segment of Sanjiang [D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China Earth Sciences*, 60: 1201~1219.
- Wu F Y, Liu X C, Liu Z C, *et al.* 2020. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization [J]. *Lithos*, 105319: 352~353.
- Xia Lei, Yan Quanren, Xiang Zhongjin, *et al.* 2017. Late Triassic andesitic accretionary arc in the central Songpan-Ganzi terrane and its tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 579~604 (in Chinese with English abstract).
- 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 Zhiqin, Hou Liwei and Wang Zongxiu. 1991. New progress in structural research of Songpan-Ganze orogenic belt [J]. *Geology in China*, 14~16 (in Chinese).
- Yang Kai, Liu Bin, Ma Changqian, *et al.* 2020. Petrogenesis and geodynamic setting of Triassic diorite-porphyrite from the North Qiangtang Terrane: Geochronology, mineral petrogeochemistry and Sr-Nd-Hf isotope constraints [J]. *Earth Science*, 45(5): 1490~1502 (in Chinese with English abstract).
- Yang T N, Hou Z Q, Wang Y, *et al.* 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: Evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garze-Litang suture [J]. *Tectonics*, 31: TC4044: 1~20.
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, *et al.* 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry [J]. *Chemical Geology*, 284: 270~282.
- 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.
- Zhang H F, Parrish R, Zhang Li, *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.
- Zhang Hongrui, Yang Tiannan, Hou Zengqian, *et al.* 2013. Chronology and geochemistry of mylonitic quartz diorites in the Yushu melange,

- central Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 871~3 882(in Chinese with English abstract).
- Zhang H R, Yang T N, Hou Z Q, *et al.* 2013. Petrogenesis and tectonics of late Permian felsic volcanic rocks, eastern Qiangtang block, north-central Tibet: Sr and Nd isotopic evidence[J]. *International Geology Review*, 55(8): 1 017~1 028.
- Zhang H R, Yang T N, Hou Z Q, *et al.* 2016. Devonian Nb-enriched basalts and andesites of north-central Tibet: Evidence for the early subduction of the Paleo-Tethyan oceanic crust beneath the North Qiangtang Block[J]. *Tectonophysics*, 682: 96~107.
- Zhang K J, Li B and Wei Q G. 2012. Diversified provenance of the Songpan-Ganzi Triassic turbidites, central China: Constraints from geochemistry and Nd isotopes[J]. *The Journal of Geology*, 120: 69~82.
- Zhang K J, Zhang Y X, Li B, *et al.* 2007. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet, western China: Constraints on provenance and pre-Cenozoic tectonic evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256: 604~616.
- 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.
- Zhao S Q, Tan J, Wei J H, *et al.* 2014. Late Triassic Batang Group arc volcanic rocks in the northeastern margin of Qiangtang terrane, northern Tibet: Partial melting of juvenile crust and implications for Paleo-Tethys ocean subduction[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 104(2): 369~387.
- 蔡宏明. 2010. 松潘-甘孜褶皱带印支期花岗岩类和火山岩类成因及深部作用[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 陈璟元, 杨金辉. 2015. 佛冈高分异I型花岗岩的成因: 来自 Nb-Ta-Zr-Hf 等元素的制约[J]. *岩石学报*, 31(3): 846~854.
- 段其发, 王建雄, 白云山, 等. 2009. 青海南部蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. *中国地质*, 36(2): 291~299.
- 何世平, 李荣社, 王超, 等. 2013. 昌都地块宁多岩群形成时代研究: 北美塘基底存在的证据[J]. *地质前缘*, 20(5): 15~24.
- 金贵善. 2006. 西金乌兰-金沙江缝合带西段部分岩浆岩地质年代学及地球化学特征[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 李洁, 陈文, 雍 拥, 等. 2012. 青海玉树地区扎喜科岩体形成时代、地球化学特征及构造意义研究[J]. *地球学报*, 33(5): 773~786.
- 李莉, 白云山, 牛志军, 等. 2009. 青藏高原羌塘东部杂岩查尔顿-西恰索闪长岩体特征及构造意义[J]. *地质与资源*, 18(4): 250~255.
- 刘彬, 马昌前, 黄坚, 等. 2016. 北美塘北缘玉树三叠纪火山岩的成因机制及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(1): 1~15.
- 刘荣, 方庆新, 马玉周. 2006. 新疆云雾岭花岗岩形成时代、岩石学、地球化学与构造背景[J]. *新疆地质*, 24(3): 223~228.
- 刘银, 李荣社, 计文化, 等. 2010. 青海治多地区多彩蛇绿混杂岩带南侧当江荣二叠纪-三叠纪岩浆弧的确定[J]. *地质通报*, 29(12): 1 840~1 850.
- 刘志超, 吴福元, 刘小驰, 等. 2020. 喜马拉雅淡色花岗岩结晶分异机制概述[J]. *岩石学报*, 36(12): 3 551~3 571.
- 卢雨潇, 杨经绥, 许志琴, 等. 2022. 甘孜-理塘洋可能存在北向俯冲: 来自松潘-甘孜道孚-炉霍岩浆岩的证据[J]. *地质学报*, 96(7): 2 380~2 402.
- 吕金刚, 王炬川, 褚春华, 等. 2006. 青藏高原可可西里带西段卧龙岗二长花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 25(6): 721~724.
- 马骥, 刘彬, 孙洋. 2020. 巴颜喀拉中部三叠纪称多高镁闪长岩的地球化学特征、岩石成因及其构造意义[J]. *矿物岩石*, 40(2): 36~47.
- 唐华. 2016. 青海省治多县查涌蛇绿岩地球化学特征及构造环境[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王键, 孙丰月, 姜和芳, 等. 2018. 青海玉树查涌地区高镁闪长岩年龄、岩石成因及构造背景[J]. *地球科学*, 43(3): 733~752.
- 王秉璋, 罗照华, 曾小平, 等. 2008. 青海三江北段治多地区印支期花岗岩的成因及锆石 U-Pb 定年[J]. *中国地质*, 35(2): 196~206.
- 王孝磊. 2017. 花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题[J]. *岩石学报*, 33(5): 1 445~1 458.
- 王召林. 2009. 三江北段玉树地区复合造山与成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745~765.
- 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.
- 夏蒙蒙, 高万里, 胡道功, 等. 2019. 青藏高原北部巴颜喀拉山群火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *现代地质*, 33(5): 957~969.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 1991. 松潘-甘孜造山带构造研究新进展[J]. *中国地质*, 39(12): 14~16.
- 杨凯, 刘彬, 马昌前, 等. 2020. 北美塘三叠纪辉石闪长玢岩的成因及其地球动力学背景[J]. *地球科学*, 45(5): 1 490~1 502.
- 张洪瑞, 杨天南, 侯增谦, 等. 2013. 青藏高原玉树混杂带糜棱岩化石英闪长岩年代学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 29(11): 3 871~3 882.