

松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦地区 晚三叠世花岗岩体年代学、岩石成因 及其构造意义

张新远^{1,2)}, 李五福^{1,2)}, 王秉璋^{1,2)}, 刘建栋^{1,2)}, 李善平^{1,2)},
王春涛^{1,2)}, 李积清^{1,2)}, 曹锦山^{1,2)}

1) 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 西宁, 810012;
2) 青海省地质调查院, 西宁, 810012



内容提要:本文以松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦岩体和珍秦岩体为研究对象,开展了岩石学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Lu—Hf 同位素研究,探讨了岩石成因和构造意义。结果表明:香卡日瓦岩体和珍秦岩体岩性分别为黑云母花岗闪长岩和黑云母花岗闪长斑岩,岩石 SiO₂ 含量为 65.45%~70.04%、Al₂O₃ 含量为 15.30%~16.69%、K₂O/Na₂O 为 1.10~1.56, 属高钾钙碱性系列岩石;铝饱和指数 A/CNK 介于 1.04~1.11 之间,显示弱过铝质特征。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上表现出相似的曲线特征,总体表现为轻稀土富集、重稀土亏损、Eu 负异常的“V”型右倾特征。岩石明显富集 Cs、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。两个岩体的锆石 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄在 217.9~216.3 Ma 之间,指示为晚三叠世岩浆作用的产物;锆石 Hf 同位素初始值 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 为 0.282453~0.282543, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.84~-3.50, 相应的二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 1.48~1.69 Ga, 喻示源区可能为古老地壳。综合岩体地球化学特征及区域相关研究,认为香卡日瓦岩体和珍秦岩体形成于晚三叠世后碰撞构造环境。

关键词:松潘—甘孜造山带; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 晚三叠世

横贯青藏高原北部的松潘—甘孜造山带是一条典型的巨型古特提斯造山带,自西向东,从北东帕米尔、喀喇昆仑—甜水海,越过阿尔金山,经巴颜喀拉、甘孜、松潘到龙门山,全长约 2800km(许志琴等, 2020)。区别于世界上大多数线型(弧形)造山带,松潘—甘孜造山带具有独特的倒三角形造山几何学特征,北以东昆仑—阿尼玛卿古特提斯缝合带为界与东昆仑—柴达木—祁连造山带相隔,西南缘以金沙江古特提斯缝合带为界与羌塘地块相连,东缘以龙门山断裂带为界与扬子地块相望,是一条具有多块体和多向聚敛碰撞特征的造山带(图 1)。该造山带是一条长寿性造山带,先后经历了新元古代弧—陆增生造山(Zhou Meifu et al., 2002; Druschke et al., 2006)、印支期陆—陆碰撞造山(许志琴, 1992)、白垩纪初始高原(Roger et al., 2004)和新生

代隆升的复杂过程(Xu Zhiqin et al., 2008; 许志琴等, 2020)。

松潘—甘孜造山带内广泛出露中酸性花岗岩类侵入体,侵位于三叠纪及下伏地层中(许志琴等, 2020)。鉴于花岗岩是大陆地壳的主要组成部分和构造运动的直接产物,其地球化学特征不仅可以反应源区性质,而且是构造事件重要的岩浆记录(Brown, 1994; Solar et al., 1998; Barbarin, 1999)。显然,这些花岗岩不仅是研究松潘—甘孜造山带基底属性的物质基础(刘亮等, 2021),更是探讨该地区构造—岩浆演化的重要研究对象。近年来关于松潘—甘孜造山带花岗岩的研究表明,花岗岩主要形成于晚三叠世,但岩浆活动可延续到早侏罗世(胡健民等, 2005; Zhang Hongfei et al., 2006; Xiao Long et al., 2007)。花岗岩主要类型包括高 Ba—Sr

注:本文为青海省地质矿产勘查开发局科研项目“青藏高原北部昆仑山口—称多地区稀有稀土矿成矿环境研究(编号:青地矿科[2021]59号)”和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号:2019QZKK0702)的成果。

收稿日期:2022-03-24; 改回日期:2022-08-13; 网络首发:2022-09-20; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.125

作者简介: 张新远,男,1988年生,硕士,高级工程师,主要从事基础地质调查研究工作; Email: qhddyzyx@qq.com。通讯作者: 李五福,男,1982年生,硕士,教授级高级工程师,主要从事基础地质调查研究工作; Email: 15422504@qq.com。

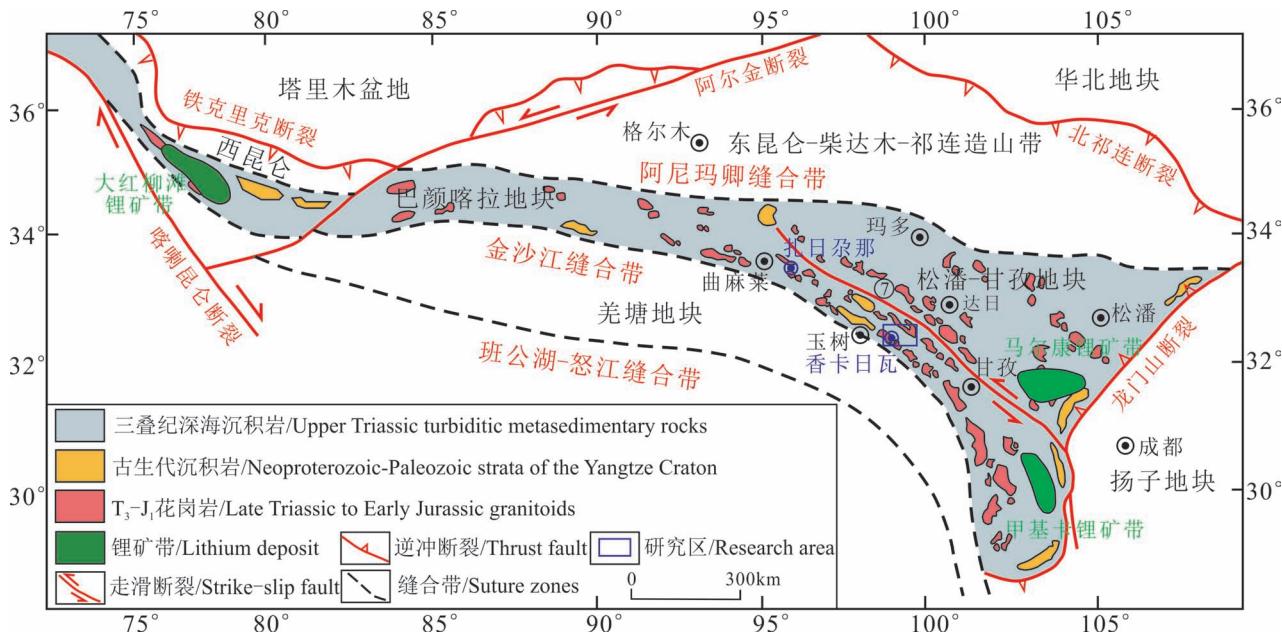


图 1 松潘—甘孜造山带地质构造简图(据许志琴等, 2020 修改)

Fig. 1 Tectonic map of the Songpan—Garze Orogenic Belt(modified from Xu Zhiqin et al., 2020&)

花岗岩、I型花岗岩、高锶低钇质(adakitic)花岗岩、A型花岗岩及过铝质S型花岗岩等(Roger et al., 2004; 胡健民等, 2005; Zhang Hongfei et al., 2006, 2007; Xiao Long et al., 2007; 赵永久等, 2007; 朱毓等, 2017; 李兴杰等, 2018; 周家云等, 2014)。对于这些花岗岩的成因, 代表性观点有:①造山过程中的大型滑脱构造剪切生热造成源区物质部分熔融(Roger et al., 2004);②构造剪切热与地幔热源共同作用(胡健民等, 2005);③岩石圈的拆沉作用(Cai Hongming et al., 2009; 时章亮等, 2009)。

位于松潘—甘孜西部的巴颜喀拉地区称多县附近, 广泛分布印支期花岗岩类侵入体, 以数量多、体积小为特征, 多呈小岩株状产出(图2)。蔡宏明(2010)通过对该地区扎朵、扎牙、巴颜喀拉、珍秦及岗音巴拉(本文称香卡日瓦)花岗质侵入体的研究, 认为松潘—甘孜西部巴颜喀拉地区的岩浆作用可能集中在216~219 Ma之间, 花岗岩形成于后碰撞构造背景下角闪石脱水熔融诱发镁铁质下地壳部分熔融, 并推断松潘带西部具有未出露的大陆基底。该项研究虽填补了松潘带西部巴颜喀拉地区花岗岩类研究的空白, 但针对这些花岗岩的野外地质特征、岩石类型、系统的地球化学和同位素年代学研究仍显不足。鉴于此, 本文选取香卡日瓦和珍秦花岗岩体为主要研究对象, 通过系统的岩石学、岩相学、岩石地球化学、锆石U-Pb年代学及Lu—Hf同位素研

究, 探讨岩石成因及成岩构造背景, 为松潘—甘孜造山带中生代岩浆活动、区域构造演化研究提供新的依据。

1 区域地质概况

研究区出露地层为中元古界长城系宁多岩群(Pt₂¹N)、中三叠统甘德组(T₂gd)、上三叠统清水河组(T₃q)及第四系(Q), 其中宁多岩群以“构造窗”形式产于甘德组和清水河组分布范围内, 主要岩性为黑云斜长片麻岩、二云石英片岩、斜长角闪片岩; 甘德组和清水河组岩性较为单一, 主要由砂岩和板岩组成。区内中酸性花岗岩呈5个独立的小岩株分布于香卡日瓦、珍秦、扎朵、扎牙及草陇地区, 平面上呈北西向展布, 与区域构造线方向基本一致(图2)。花岗岩体与围岩呈侵入接触关系, 局部被断层改造, 其中香卡日瓦和珍秦花岗岩岩性分别为黑云母花岗闪长岩(图3a)和黑云母花岗闪长斑岩(图3c), 主要岩性特征如下:

黑云母花岗闪长岩: 岩石为灰白色, 半自形粒状结构, 块状构造。主要由斜长石(54%±)、石英(31%±)、钾长石(8%±)、黑云母(7%±)组成。斜长石呈半自形粒状, 粒径在0.5~2.1 mm之间, 发育钠长石聚片双晶, 具轻微灰色黏土化蚀变, 显环带结构; 石英呈他形粒状, 粒径在0.4~2.5 mm之间, 常形成集合体充填于其他矿物间; 钾长石呈他形粒状,

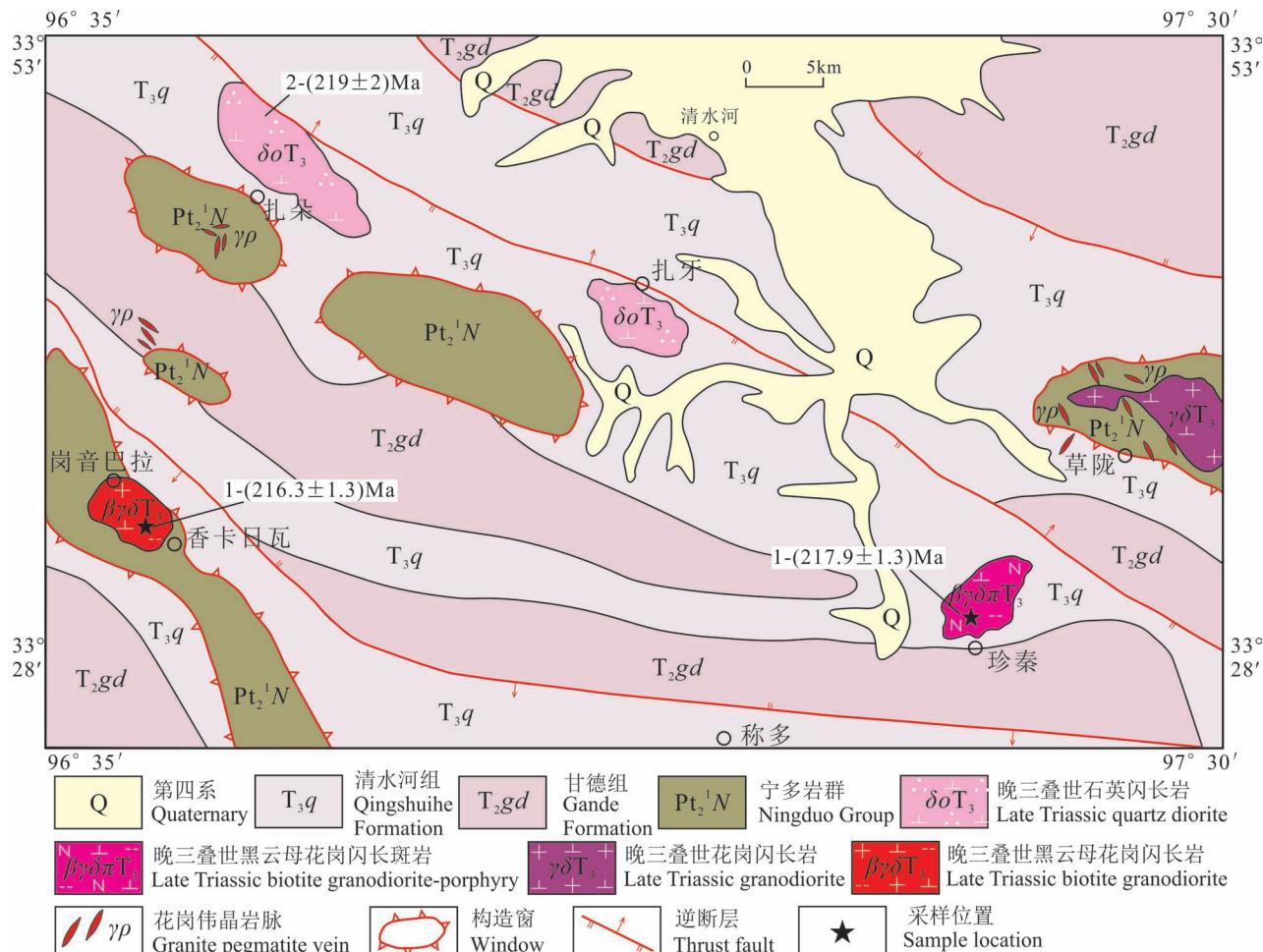


图 2 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦—珍秦地区地质简图(据李五福等, 2021 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Xiangkariwa—Zhenqin area, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt
(modified from Li Wufu et al., 2021&)

图中年龄数据来源: 1—本文数据; 2—蔡宏明, 2010

Sources of age data in this figure are: 1—this work; 2—Cai Hongming, 2010&

粒径在 0.4~1.1 mm 之间, 显两组解理, 具轻微黏土化蚀变(图 3b)。黑云母呈片状, 片径在 0.4~1.7 mm 之间, 具绿泥石化蚀变。

黑云母花岗闪长斑岩:灰白色, 斑状结构, 基质具半自形粒状结构, 块状构造。斑晶约占 44%, 由斜长石(21%±)、石英(18%±)、黑云母(5%±)组成, 斜长石呈半自形板状、粒状, 粒径在 0.8~3.4 mm 之间, 发育环带构造, 具钠长石聚片双晶; 石英呈自形粒状, 粒径在 0.6~2.8 mm 之间, 具熔蚀现象; 黑云母呈片状, 片径在 0.3~1.1 mm 之间。基质约占 56%, 由斜长石(42%±)、石英(13%±)、黑云母(1%±)组成, 斜长石呈半自形粒状, 粒径在 0.1~0.2 mm 之间, 显钠长石聚片双晶, 具环带结构(图 3d); 石英呈他形粒状, 粒径在 0.1~0.2 mm 之间, 充填于其他

矿物间; 黑云母呈片状, 片径在 0.3~0.7 mm 之间。

2 样品采集和测试方法

2.1 样品采集

在野外地质调查的基础上, 针对香卡日瓦黑云母花岗闪长岩和珍秦黑云母花岗闪长斑岩系统采集样品。为保证样品测试数据的可靠性和真实性, 所有样品均采自无变形、无或弱蚀变且没有后期岩脉穿插的新鲜基岩露头。在对所有样品进行显微岩相学观察的基础上, 共筛选 13 件样品进行主、微量元素测试(香卡日瓦黑云母花岗闪长岩 9 件、珍秦黑云母花岗闪长斑岩 4 件), 并在黑云母花岗闪长岩和黑云母花岗闪长斑岩中各选 1 件样品进行锆石 U-Pb 测年和 Lu—Hf 同位素分析, 样品编号分别为

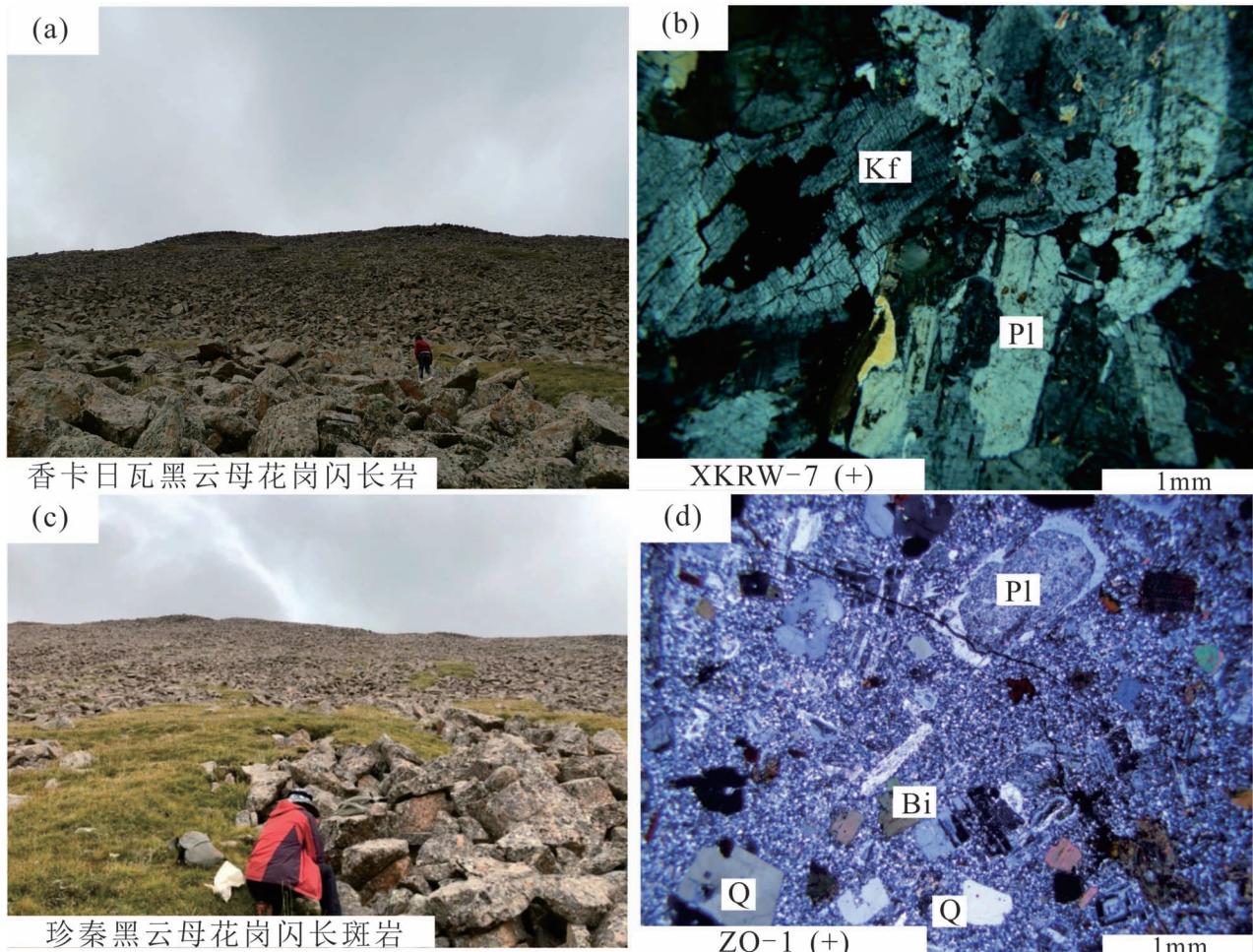


图 3 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic photographs of the Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

(a) 黑云母花岗闪长岩野外露头; (b) 黑云母花岗闪长岩镜下特征; (c) 黑云母花岗闪长斑岩野外露头;
 (d) 黑云母花岗闪长斑岩镜下特征。Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bi—黑云母; Q—石英

(a) Outcrop of biotite granodiorite; (b) microscopic characteristic of biotite granodiorite; (c) Outcrop of biotite granodiorite-porphyry;
 (d) microscopic characteristic of biotite granodiorite-porphyry. Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Bi—biotite; Q—quartz

XKRW-7 和 ZQ-1, 采样点地理坐标为 $33^{\circ}34'51''N/96^{\circ}37'36''E$ 和 $33^{\circ}90'03''N/97^{\circ}19'33''E$, 采样位置见图 2。

2.2 主、微量元素测试

样品主、微量元素测试由武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 主量元素采用波长色散 X 射线荧光光谱仪 (ZSX Primus II), 数据校正采用理论 α 系数法, 测试相对标准偏差 (RSD) $< 2\%$, FeO 采用化学滴定法, 检出限为 0.5%; 微量元素采用电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent 7700e) 完成, 分析相对误差 $< 10\%$ 。

2.3 锆石 U-Pb 测年和 Lu—Hf 同位素分析

本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和锆石原位 Lu—Hf 同位素分析均由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。U-Pb 同位素测年中激光剥蚀系统为 Geolas HD, 等离子质谱仪为 Agilent 7900, 激光能量 80mJ, 频率 5Hz, 激光束斑直径 32 μm , 微量元素校正标准样品为 NIST 610, 同位素比值校正标准样品为 91500, 同位素比值监控标准样品为 GJ-1。测试数据处理软件利用 ICPMS Data CAL 10.8 程序, 年龄计算和图绘制利用 Isoplot 程序完成。详细的仪器参数和分析流程见文献 Zong Keqing et al. (2017), Hu Zhaochu et al. (2015), Liu Yongsheng

et al. (2008, 2010), Ludwig(2003)。

锆石 Lu—Hf 同位素分析点选择在 LA-ICP-MS 年龄测试点上或附近(图 4),由美国热电 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)与 GeoLas HD 相干 193nm 准分子激光剥蚀系统测试完成。详细仪器操作条件和分析方法见文献 Hu Zhaochu et al. (2012),激光束斑直径为 44 μm ,能量强度为 8mJ/cm²,剥蚀使用频率为 8Hz,激光剥蚀时间约 70s,每次分析包含 20s 背景采集和 50s 激光剥蚀。为确保分析数据的可靠性,Plešovice、91500 和 GJ-1 三个国际锆石标准与实际样品同时分析,Plešovice 用于进行外标校正以进一步优化分析测试结果,91500 和 GJ-1 作为第二标样监控数据校正质量。Plešovice、91500 和 GJ-1 的外部精密度(2SD)优于 0.000020。测试值与推荐值确保在误差范围内一致。同时为了监控高 Yb/Hf 值锆石的测试数据,采用国际常用的高 Yb/Hf 比值标样 Temora 2 监控高 Yb/Hf 值锆石的测试数据,以上标样推荐值参考 Zhang Wen et al. (2020)。数据处理采用软件 ICPMS Data Cal(Liu Yongsheng et al. , 2010)完

成。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 测年结果

阴极发光图像(图 4)显示,本次在黑云母花岗闪长岩、黑云母花岗闪长斑岩中的测年锆石基本呈无色透明状,锆石形态普遍较完整且自形程度高,多数锆石为短柱状,少数锆石为长柱状。锆石粒径一般为 80~150 μm ,个别达 240 μm ,长宽比介于 1.5:1~1.2:1 之间,个别锆石长宽比达 3:1。所有锆石均显示出清晰的振荡环带结构,反应岩浆锆石成因的特点。

锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1。本次在香卡日瓦黑云母花岗闪长岩(XKRW-7)和珍秦黑云母花岗闪长斑岩(ZQ-1)中均获得有效测试点 24 个,且所有测点集中分布在谐和线上(图 5a,b),显示出良好的谐和性,表明锆石在形成后其 U-Pb 体系一直保持在封闭状态,基本没有 Pb 的丢失。其中,香卡日瓦黑云母花岗闪长岩²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄值介于 212±2 Ma~222±2 Ma 之间,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均



图 4 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦黑云母花岗闪长岩(XKRW-7)和珍秦黑云母花岗闪长斑岩(ZQ-1)锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL images of the zircons from the Xiangkariwa biotite granodiorite (XKRW-7) and Zhenqin biotite granodiorite porphyry (ZQ-1), southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

表 1 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦黑云母花岗闪长斑岩(XKRW-7)和珍秦黑云母花岗闪长斑岩(ZQ-1)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS Zircon U-Pb analysis data from the Xiangkariwa biotite granodiorite (XKRW-7) and Zhenqin biotite granodiorite porphyry (ZQ-1), southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)							
	Pb	Th	U	Th/U			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
				测值	1σ	测值	测值	1σ	测值	测值	1σ	测值	1σ	测值			
XKRW-7-01	90	387	2421	0.16	0.0508	0.0013	0.2382	0.0060	0.0338	0.0003	227.8	59.3	217.0	4.9	214.1	1.8	98
XKRW-7-02	55	180	1517	0.12	0.0493	0.0013	0.2300	0.0058	0.0336	0.0003	161.2	61.1	210.2	4.8	213.3	1.8	98
XKRW-7-03	158	688	4190	0.16	0.0520	0.0011	0.2526	0.0051	0.0350	0.0003	283.4	48.1	228.7	4.2	221.8	2.0	96
XKRW-7-04	134	499	3775	0.13	0.0497	0.0011	0.2307	0.0049	0.0335	0.0003	189.0	50.0	210.8	4.0	212.1	1.8	99
XKRW-7-05	108	569	3002	0.19	0.0497	0.0011	0.2320	0.0050	0.0336	0.0002	183.4	50.0	211.8	4.1	212.8	1.5	99
XKRW-7-06	224	612	6494	0.09	0.0498	0.0011	0.2410	0.0068	0.0348	0.0007	183.4	51.8	219.3	5.6	220.8	4.1	99
XKRW-7-07	140	426	3892	0.11	0.0499	0.0013	0.2416	0.0063	0.0348	0.0003	190.8	59.2	219.7	5.2	220.6	2.1	99
XKRW-7-08	50	140	1408	0.10	0.0504	0.0013	0.2398	0.0061	0.0343	0.0003	213.0	91.7	218.2	5.0	217.3	2.0	99
XKRW-7-09	127	373	3588	0.10	0.0504	0.0011	0.2394	0.0054	0.0342	0.0003	213.0	49.1	218.0	4.4	216.9	1.7	99
XKRW-7-11	119	345	3316	0.10	0.0503	0.0011	0.2405	0.0051	0.0344	0.0002	205.6	45.4	218.8	4.2	218.3	1.4	99
XKRW-7-12	82	243	2302	0.11	0.0510	0.0012	0.2428	0.0056	0.0343	0.0003	242.7	53.7	220.7	4.6	217.3	1.7	98
XKRW-7-13	369	1643	10321	0.16	0.0501	0.0011	0.2387	0.0055	0.0343	0.0004	198.2	51.8	217.4	4.5	217.5	2.4	99
XKRW-7-14	129	464	3611	0.13	0.0498	0.0013	0.2364	0.0064	0.0342	0.0003	183.4	67.6	215.5	5.2	216.5	1.9	99
XKRW-7-15	85	462	2336	0.20	0.0519	0.0014	0.2427	0.0065	0.0337	0.0003	279.7	61.1	220.6	5.3	213.5	2.0	96
XKRW-7-16	98	324	2760	0.12	0.0520	0.0013	0.2457	0.0059	0.0340	0.0003	287.1	55.6	223.1	4.8	215.8	1.9	96
XKRW-7-17	133	536	3609	0.15	0.0508	0.0011	0.2466	0.0053	0.0350	0.0003	231.6	45.4	223.8	4.3	221.5	1.8	98
XKRW-7-18	105	479	2857	0.17	0.0495	0.0011	0.2384	0.0053	0.0347	0.0004	172.3	50.0	217.1	4.4	220.1	2.3	98
XKRW-7-19	116	559	3130	0.18	0.0505	0.0010	0.2434	0.0048	0.0348	0.0003	216.7	46.3	221.2	4.0	220.3	1.7	99
XKRW-7-20	111	346	3107	0.11	0.0495	0.0010	0.2343	0.0044	0.0342	0.0002	172.3	46.3	213.7	3.7	216.6	1.5	98
XKRW-7-21	106	313	3032	0.10	0.0492	0.0010	0.2296	0.0049	0.0337	0.0003	166.8	48.1	209.9	4.0	213.5	1.7	98
XKRW-7-22	107	433	299	0.14	0.0491	0.0011	0.2291	0.0052	0.0337	0.0003	150.1	58.3	209.5	4.3	213.8	1.8	97
XKRW-7-23	103	469	2913	0.16	0.0502	0.0011	0.2341	0.0052	0.0337	0.0003	211.2	51.8	213.6	4.3	213.5	1.8	99
ZQ-1-01	52	199	1386	0.14	0.0505	0.0013	0.2404	0.0057	0.0345	0.0003	216.7	61.1	218.8	4.7	218.8	1.7	99
ZQ-1-02	71	107	2053	0.05	0.0499	0.0012	0.2341	0.0055	0.0338	0.0002	190.8	27.8	213.6	4.6	214.2	1.6	99
ZQ-1-03	26	78	726	0.11	0.0517	0.0014	0.2512	0.0068	0.0351	0.0004	272.3	67.6	227.6	5.5	222.4	2.3	97
ZQ-1-04	57	141	1569	0.09	0.0533	0.0014	0.2586	0.0070	0.0349	0.0003	338.9	59.3	233.5	5.7	221.2	1.9	94
ZQ-1-05	35	74	982	0.08	0.0507	0.0014	0.2424	0.0067	0.0345	0.0003	233.4	66.7	220.4	5.5	218.4	1.8	99
ZQ-1-06	62	237	1723	0.14	0.0515	0.0013	0.2462	0.0062	0.0344	0.0003	261.2	54.6	223.5	5.0	218.1	1.9	97

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)												
	Pb	Th	U	Th/U	n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)	n(^{207}Pb)/n(^{235}U)	n(^{206}Pb)/n(^{238}U)	测值	1 σ	测值	1 σ	n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)	n(^{207}Pb)/n(^{235}U)	n(^{206}Pb)/n(^{238}U)	测值	1 σ	测值	1 σ	n(^{206}Pb)/n(^{238}U)	谐和度(%)		
ZQ-1-07	51	313	1328	0.24	0.0482	0.0019	0.2274	0.0096	0.0338	0.0003	109.4	94.4	208.0	7.9	214.5	1.9	96					
ZQ-1-08	60	196	1677	0.12	0.0514	0.0015	0.2421	0.0069	0.0339	0.0003	257.5	68.5	220.1	5.6	214.9	1.8	97					
ZQ-1-09	19	126	492	0.26	0.0537	0.0021	0.2561	0.0095	0.0344	0.0003	366.7	54.6	231.5	7.7	218.2	2.1	94					
ZQ-1-10	40	242	1094	0.22	0.0517	0.0015	0.2435	0.0070	0.0338	0.0003	272.3	63.9	221.3	5.7	214.5	2.0	96					
ZQ-1-11	109	465	2731	0.17	0.0542	0.0021	0.2591	0.0109	0.0339	0.0003	388.9	82.4	233.9	8.8	215.2	1.8	91					
ZQ-1-12	37	126	1041	0.12	0.0525	0.0015	0.2506	0.0070	0.0343	0.0003	305.6	63.0	227.0	5.7	217.5	2.1	95					
ZQ-1-13	133	124	3805	0.03	0.0520	0.0012	0.2533	0.0060	0.0351	0.0004	283.4	56.5	229.2	4.9	222.1	2.6	96					
ZQ-1-14	137	125	3889	0.03	0.0542	0.0013	0.2557	0.0066	0.0339	0.0003	388.9	55.6	231.2	5.4	214.6	2.0	92					
ZQ-1-15	59	324	1589	0.20	0.0544	0.0019	0.2582	0.0071	0.0342	0.0003	387.1	77.8	233.2	5.8	216.7	2.1	92					
ZQ-1-16	53	250	1308	0.19	0.0512	0.0021	0.2424	0.0103	0.0339	0.0004	250.1	92.6	220.4	8.4	214.7	2.7	97					
ZQ-1-18	38	56	1073	0.05	0.0518	0.0019	0.2542	0.0101	0.0353	0.0006	276.0	89.8	230.0	8.2	223.4	3.8	97					
ZQ-1-19	44	120	1201	0.10	0.0511	0.0017	0.2452	0.0081	0.0346	0.0004	242.7	77.8	222.7	6.6	219.5	2.5	98					
ZQ-1-20	132	653	3249	0.20	0.0516	0.0017	0.2453	0.0077	0.0344	0.0004	333.4	75.9	222.8	6.3	218.3	2.6	97					
ZQ-1-21	95	97	2669	0.04	0.0549	0.0017	0.2685	0.0078	0.0355	0.0006	405.6	66.7	241.5	6.2	225.1	3.6	93					
ZQ-1-22	152	479	3935	0.12	0.0523	0.0016	0.2504	0.0071	0.0348	0.0004	298.2	65.7	226.9	5.8	220.3	2.6	97					
ZQ-1-23	60	200	1611	0.12	0.0530	0.0015	0.2547	0.0070	0.0346	0.0003	331.5	63.0	230.4	5.7	219.5	2.0	95					
ZQ-1-24	52	88	1442	0.06	0.0529	0.0020	0.2593	0.0077	0.0351	0.0004	324.1	85.2	234.1	6.2	222.6	2.5	94					
ZQ-1-25	48	66	1312	0.05	0.0535	0.0020	0.2636	0.0082	0.0354	0.0004	350.1	83.3	237.6	6.6	224.0	2.6	94					

年龄值为 216.3 ± 1.3 Ma (MSWD=2.7);珍秦黑云母花岗闪长斑岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值介于 214 ± 2 Ma ~ 225 ± 4 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 217.9 ± 1.3 Ma (MSWD=2.1),二者基本一致,均代表岩浆结晶年龄,由此判断香卡日瓦和珍秦花岗岩侵位时代为晚三叠世。

3.2 主、微量元素特征

香卡日瓦和珍秦花岗岩样品主、微量元素分析结果列于表2。

香卡日瓦黑云母花岗闪长岩9件样品 SiO_2 含量为 65.45% ~ 68.12%, 全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 为 6.20% ~ 7.08%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 0.64 ~ 0.89。在 TAS 图解中(图6a), 样品落入花岗闪长岩区域; 在 AFM 图解中(图6b), 样品落入钙碱性系列区域; 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图6c), 样品落入高钾钙碱性系列范围。 TiO_2 含量为 0.38% ~ 0.49%, Al_2O_3 含量为 15.30% ~ 16.69%, 平均为 16.03%; A/CNK 为 1.04 ~ 1.11, 平均值为 1.07, 在 A/CNK—A/NK 图解上(图6d), 所有样品落入弱过铝质区域, 显示 I型花岗岩特征。岩石稀土元素总量为 89.78×10^{-6} ~ 185.98×10^{-6} , 平均为 121.61×10^{-6} , LREE/HREE 为 5.54 ~ 15.77, (La/Sm)_N 为 2.93 ~ 4.87, (Gd/Yb)_N 为 1.40 ~ 2.45, δEu 为 0.54 ~ 0.78。在球粒陨石标准化稀土元素配分图上(图7a), 所有样品均表现出相似的曲线特征, 表现为轻稀土富集、重稀土亏损, Eu 弱负异常的右倾“V”型曲线。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图7b), 样品显示富集 Cs、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素以及亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。

珍秦黑云母花岗闪长斑岩4件样品 SiO_2 含量为 69.42% ~ 70.04%, 全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量为 6.28% ~ 6.32%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 0.89 ~ 0.91。在 TAS 图解中(图6a), 样品落入花岗闪长岩区域; 在 AFM 图解中(图6b), 样品落入钙碱性系列区域; 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图6c), 样品落入高钾钙碱性系列范围。 TiO_2 含量为 0.30% ~ 0.31%, Al_2O_3 含量为 15.72% ~ 15.81%, 平均为 15.75%; A/CNK 为 1.05 ~ 1.09, 平均值为

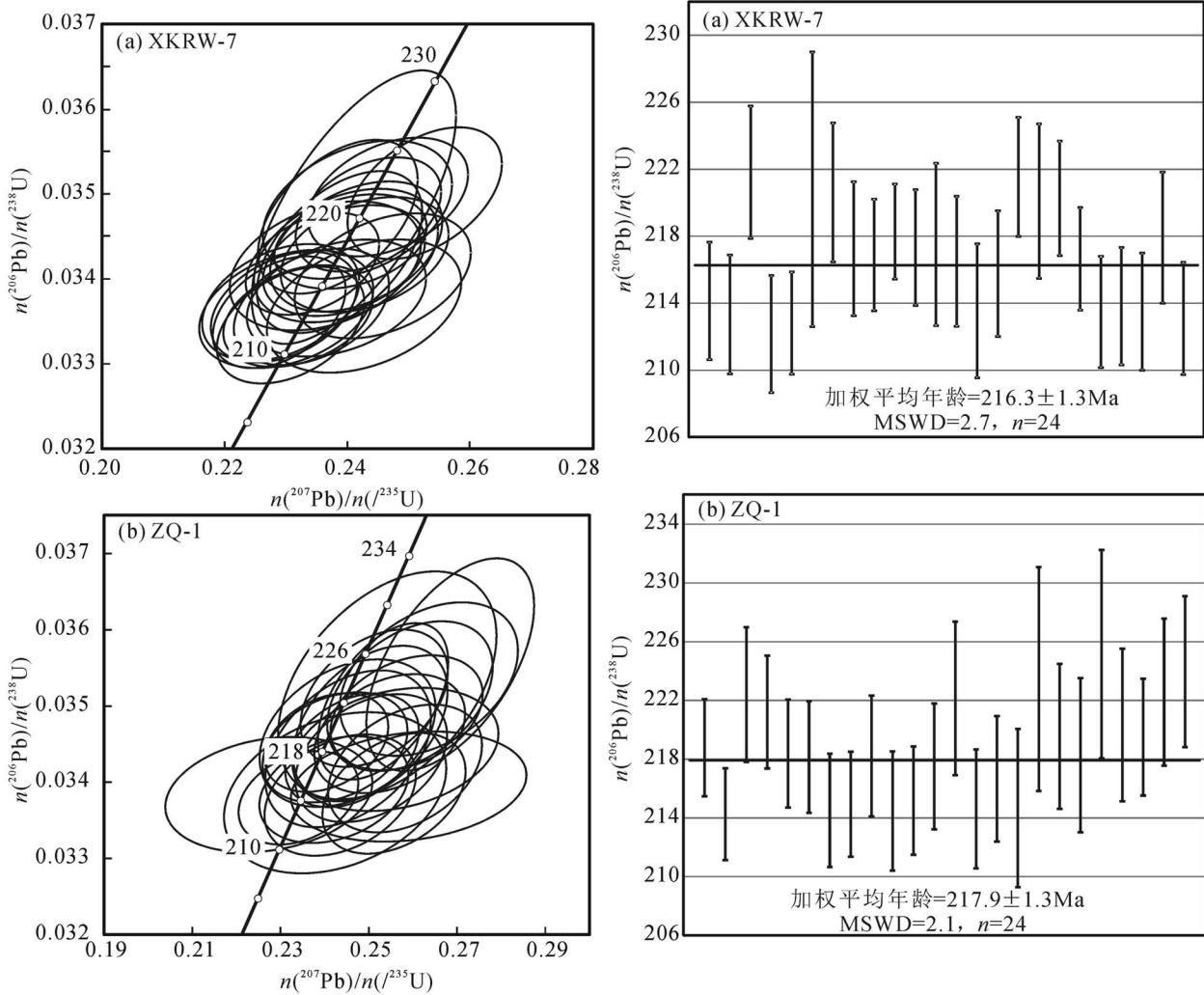


图 5 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦黑云母花岗闪长岩(XKRW-7)和珍秦黑云母花岗闪长斑岩(ZQ-1)锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted ages from the Xiangkariwa biotite granodiorite (XKRW-7) and Zhenqin biotite granodiorite porphyry (ZQ-1), southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

1.07, 在 A/CNK—A/NK 图解上(图 6d), 样品落入弱过铝质区域, 同样显示 I 型花岗岩特征。岩石稀土元素总量为 $101.06 \times 10^{-6} \sim 107.07 \times 10^{-6}$, 平均为 103.50×10^{-6} , LREE/HREE 为 $12.55 \sim 13.43$, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 $4.40 \sim 4.63$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 $2.02 \sim 2.15$, δEu 为 $0.84 \sim 0.97$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解上(图 7a), 所有样品表现出轻稀土富集、重稀土亏损, 略微负 Eu 异常特征。在原始地幔标准化微量元素蛛网图解上(图 7b), 样品同样显示 Cs、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素的富集和 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的亏损。整体上, 香卡日瓦和珍秦花岗岩样品表现出相似的岩石地球化学特征, 可能具

有相同的岩石成因。

3.3 锆石 Lu—Hf 同位素

本次在香卡日瓦黑云母花岗闪长岩(XKRW-7)和珍秦黑云母花岗闪长斑岩(ZQ-1)中, 各选择 10 颗典型岩浆锆石进行 Lu—Hf 同位素测试, 测点位置与 U-Pb 定年点位于同一位置或同一岩浆振荡环带(图 4), 具体结果列于表 3。

由表可知, 香卡日瓦黑云母花岗闪长岩锆石的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值为 $0.282488 \sim 0.282543$, 平均值为 0.282512 , 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 介于 $-5.38 \sim -3.50$ 之间, 平均值为 -4.62 , Hf 同位素一阶段模式年龄(T_{DM1})分布范围为 $1.00 \sim 1.09$ Ga, 平均值为

表 2 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果表
Table 2 Major(%) and trace elements($\times 10^{-6}$) analysis result of Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

样品号	香卡日瓦黑云母花岗闪长岩(XKRW)									珍秦黑云母花岗闪长斑岩(ZQ)			
	7	10	11	13	14	15	16	17	18	1	2	4	10
SiO ₂	66.14	66.78	66.82	67.66	67.20	67.23	67.53	65.45	68.12	70.04	69.49	69.42	69.85
TiO ₂	0.42	0.44	0.43	0.38	0.41	0.41	0.39	0.49	0.43	0.30	0.31	0.31	0.30
Al ₂ O ₃	16.61	16.17	16.37	15.92	15.82	15.69	15.73	16.69	15.30	15.73	15.81	15.72	15.74
TFe ₂ O ₃	3.27	3.42	3.26	2.91	3.16	3.19	3.00	3.81	3.37	2.53	2.62	2.58	2.52
MnO	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.08	0.07	0.04	0.04	0.04	0.03
MgO	1.45	1.55	1.48	1.35	1.44	1.45	1.32	1.72	1.56	0.72	0.74	0.73	0.74
CaO	3.82	3.55	3.08	3.41	3.06	3.14	3.09	3.72	3.37	3.44	3.59	3.53	3.27
Na ₂ O	3.14	2.90	2.74	2.88	2.80	2.93	2.86	2.91	2.77	2.96	3.00	2.99	2.95
K ₂ O	3.51	3.56	4.28	3.81	4.06	3.61	4.22	3.52	3.43	3.32	3.31	3.30	3.33
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.15	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10
烧失	1.21	1.10	1.04	1.19	1.68	1.74	1.14	0.98	1.05	0.91	0.99	0.99	0.61
总和	99.77	99.69	99.70	99.69	99.82	99.57	99.45	99.51	99.61	100.10	100.00	99.71	99.44
A/NK	1.85	1.87	1.79	1.80	1.76	1.80	1.70	1.94	1.85	1.86	1.85	1.85	1.86
A/CNK	1.04	1.07	1.11	1.06	1.09	1.09	1.06	1.09	1.06	1.07	1.05	1.05	1.09
Mg [#]	44.07	44.70	44.68	45.17	44.84	44.71	43.89	44.63	45.11	33.64	33.33	33.64	34.30
Cs	12.03	8.59	10.24	8.17	12.42	10.62	11.88	13.42	10.68	5.67	5.66	5.65	4.48
Rb	165.2	158.4	178.8	155.5	182.4	176.5	185.7	185.3	159.9	137.6	138.8	135.8	123.9
Ba	576.7	509.2	690.9	587.9	661.3	524.2	447.0	474.8	465.7	595.9	601.6	596.9	636.5
Th	19.57	10.88	12.32	11.28	15.49	11.31	9.95	14.22	11.43	12.97	12.17	12.19	12.03
U	3.05	2.51	2.29	2.22	2.23	2.28	2.77	3.40	2.39	2.54	2.41	2.48	3.38
Nb	11.90	11.77	11.62	10.24	11.18	11.62	12.58	14.93	11.83	9.04	9.06	8.89	9.10
Ta	1.20	1.12	1.19	0.91	0.98	1.28	1.61	1.58	1.30	0.93	0.89	0.88	0.88
Sr	273.5	256.4	244.4	261.6	267.3	248.5	211.5	257.6	221.0	292.4	298.1	294.1	311.3
Hf	3.84	3.94	3.38	3.33	3.38	2.98	3.84	4.25	3.41	3.67	3.59	3.47	3.48
Zr	133.2	130.1	123.9	119.9	118.2	102.7	118.4	141.8	118.8	126.1	131.1	126.8	120.7
La	44.70	21.77	22.40	25.68	40.23	22.60	17.53	28.63	22.37	24.43	23.06	24.51	23.11
Ce	83.83	43.57	44.33	48.85	74.79	45.47	35.65	53.80	44.79	47.25	45.22	45.64	44.35
Pr	8.87	4.73	4.87	5.25	7.73	4.86	3.88	5.81	4.80	5.12	4.74	4.91	4.83
Nd	30.52	17.14	17.66	18.76	27.03	17.11	14.51	21.00	17.80	18.25	17.02	17.57	17.27
Sm	6.05	3.77	3.77	4.02	5.19	3.79	3.77	4.73	3.74	3.50	3.30	3.33	3.21
Eu	0.92	0.86	0.88	0.89	0.85	0.77	0.72	0.91	0.83	0.87	0.93	0.91	0.92
Gd	4.02	2.89	2.97	3.09	3.56	3.29	3.66	4.07	3.27	2.64	2.53	2.46	2.44
Tb	0.53	0.46	0.48	0.45	0.50	0.50	0.64	0.63	0.51	0.37	0.39	0.36	0.36
Dy	2.78	2.53	2.45	2.41	2.60	2.61	3.73	3.22	2.64	1.93	1.90	1.89	1.95
Ho	0.51	0.46	0.44	0.45	0.50	0.48	0.78	0.62	0.48	0.35	0.36	0.34	0.37
Er	1.46	1.33	1.36	1.24	1.34	1.48	2.21	1.64	1.32	1.08	1.07	0.94	0.98
Tm	0.21	0.18	0.19	0.18	0.20	0.19	0.32	0.25	0.20	0.15	0.16	0.14	0.15
Yb	1.37	1.24	1.19	1.15	1.17	1.33	2.11	1.54	1.29	0.99	0.96	0.94	0.97
Lu	0.20	0.18	0.18	0.16	0.17	0.18	0.29	0.22	0.17	0.15	0.15	0.14	0.15
Y	15.00	13.50	13.35	13.39	14.28	14.82	23.70	17.93	13.90	11.23	11.39	10.92	10.88
LREE	174.90	91.83	93.92	103.44	155.83	94.60	76.05	114.89	94.35	99.41	94.27	96.87	93.70
HREE	11.09	9.26	9.26	9.15	10.04	10.07	13.74	12.19	9.87	7.66	7.51	7.21	7.36
Σ REE	185.98	101.09	103.18	112.58	165.87	104.67	89.78	127.07	104.22	107.07	101.78	104.08	101.06
σ Eu	0.54	0.76	0.78	0.74	0.57	0.65	0.58	0.62	0.71	0.84	0.95	0.93	0.97
σ Ce	0.96	0.99	0.98	0.96	0.96	1.00	1.00	0.95	0.99	0.97	0.99	0.95	0.96

1.06 Ga,二阶段模式年龄(T_{DM2})分布范围为1.48~1.60 Ga,平均值为1.55 Ga。珍秦黑云母花岗闪长斑岩锆石的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值为0.282453~

0.282525,平均值为0.282489,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,介于-6.84~-4.08之间,平均值为-5.46,Hf同位素一阶段模式年龄(T_{DM1})分布范围为1.01~1.16

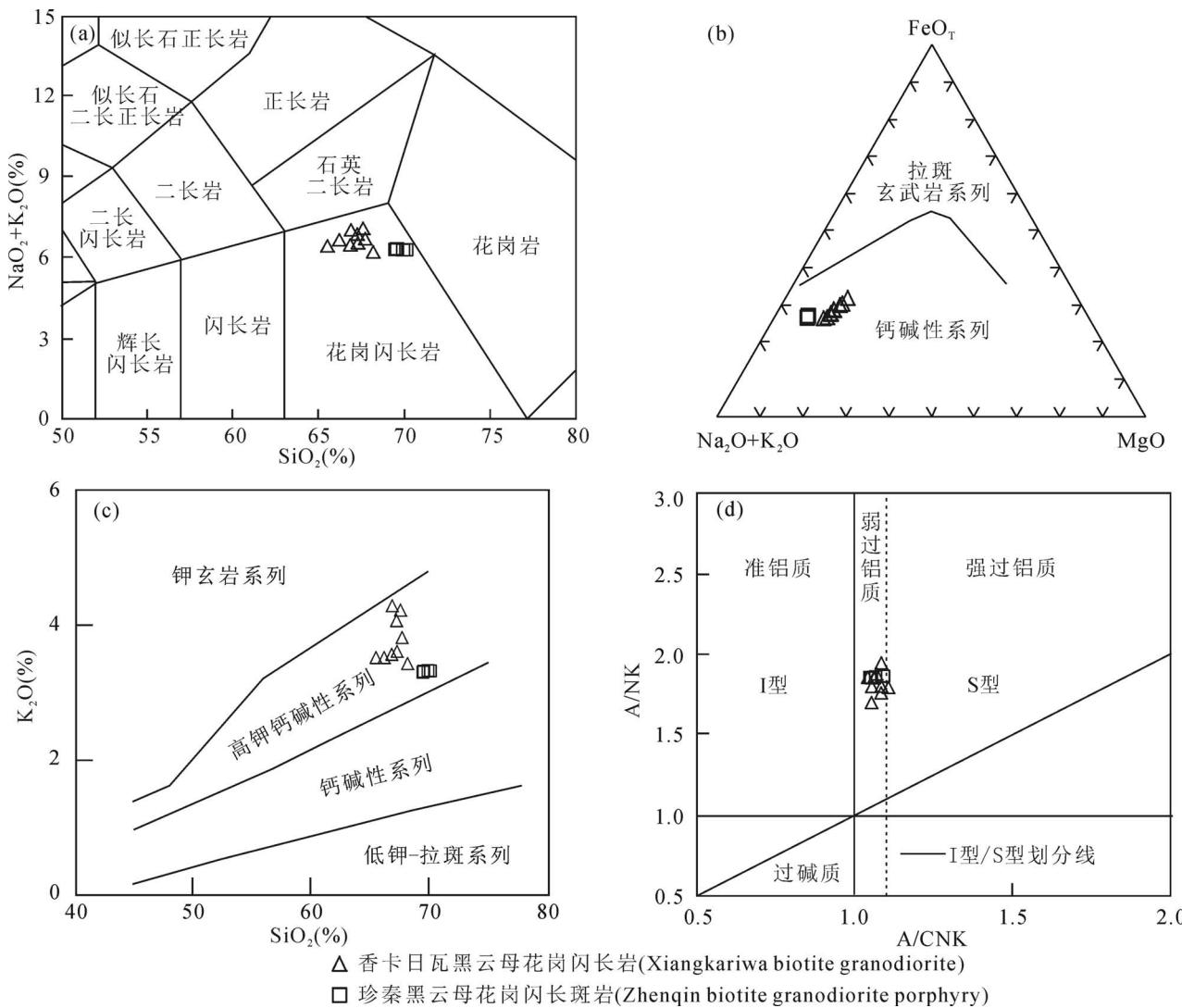


图 6 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩 TAS 图解(a) (底图据 Middlemost, 1994); AFM 图解(b) (底图据 Irvine et al. , 1971); SiO₂—K₂O 图解(c) (底图据 Peccerillo et al. , 1976); A/CNK—A/NK 图解(d) (底图据 Maniar et al. , 1989)

Fig. 6 The TAS diagram (a) (after Middlemost, 1994), AFM diagram (b) (after Irvine et al. , 1971), SiO₂—K₂O diagram (c) (after Peccerillo et al. , 1976), A/CNK—A/NK diagram (d) (after Maniar et al. , 1989) of the Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

Ga, 平均值为 1.09 Ga, 二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 分布范围为 1.51~1.69 Ga, 平均值为 1.60 Ga。

整体来看, 香卡日瓦黑云母花岗闪长岩和珍秦黑云母花岗闪长斑岩 Hf 同位素组成相似, 均具有低且负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。

4 讨论

4.1 岩石成因类型

关于花岗岩的岩石类型划分方案, 目前普遍使用的是根据花岗岩的地球化学组成与成岩构造背景

将其划分为 I、S、M、A 型 (Chappell et al. , 1974; Whalen et al. , 1987)。M 型花岗岩类岩石组合上多为辉长岩和闪长岩系列, 来自俯冲洋壳或者地幔楔熔融, 经广泛的分离结晶作用, 并且具有低含量的 Rb、Zr、REE 等地球化学特征 (Clemens, 2003)。香卡日瓦和珍秦花岗岩中均未见与之共生的中基性岩类, 且岩石具有较高含量的 Rb、Zr、REE, 排除 M 型花岗岩的可能。A 型花岗岩形成具有较高的温度, 多由无水相矿物组成, 如碱性矿物霓石、钠铁闪石, 香卡日瓦和珍秦花岗岩中均未发现碱性矿物, 同时

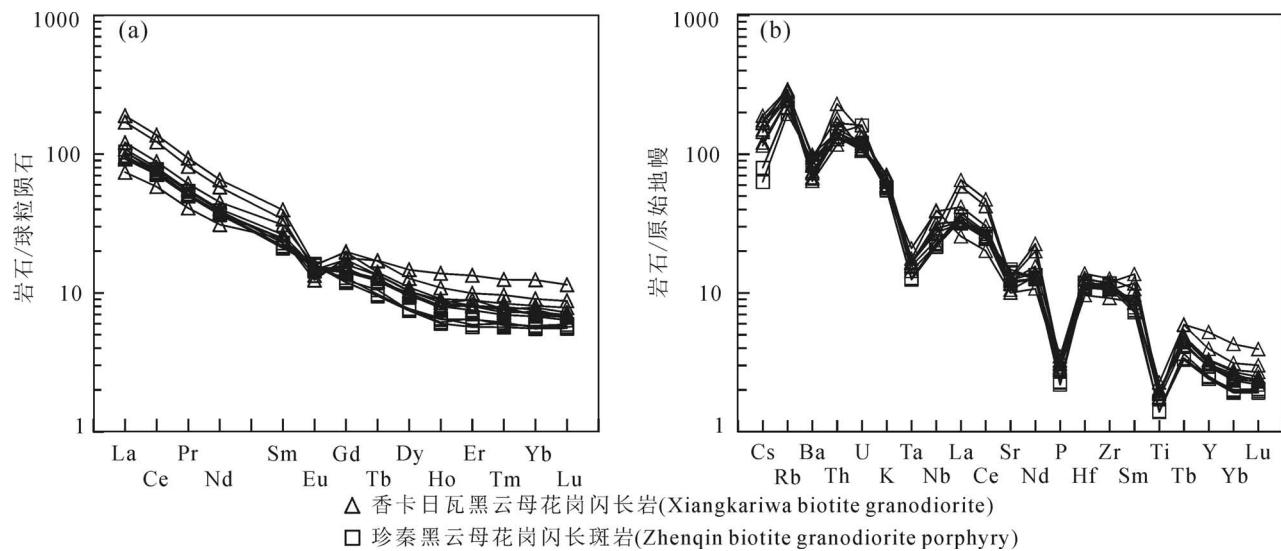


图 7 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩稀土元素配分图(a) (标准化值据 Boynton, 1984) 及微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) (normalized after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) (normalized after Sun et al. , 1989) of the Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

TFeO/MgO 值介于 2.16~3.56 之间, 不显示 A 型花岗岩的富铁特征 ($TFeO/MgO > 10$) (Miller, 1985), 进一步排除 A 型花岗岩的可能性。铝饱和指数 A/CNK 被认为是划分 I 型和 S 型花岗岩的常用指标 (Chappell et al. , 1992), S 型花岗岩 A/CNK 值一般大于 1.1, 而 I 型花岗岩 A/CNK 值小于 1.1。香卡

日瓦和珍秦花岗岩样品 A/CNK 值介于 1.04~1.11 之间, 绝大多数落入 I 型花岗岩范围(图 3d)。研究表明:磷灰石在 I 型和 S 型花岗岩中的不同行为会导致 I 型花岗岩中 P_2O_5 含量与 SiO_2 含量呈负相关关系, 在 S 型花岗岩中则反之;此外, 富 Y 矿物在两类花岗岩的差异行为会导致 I 型花岗岩的 Y 含量

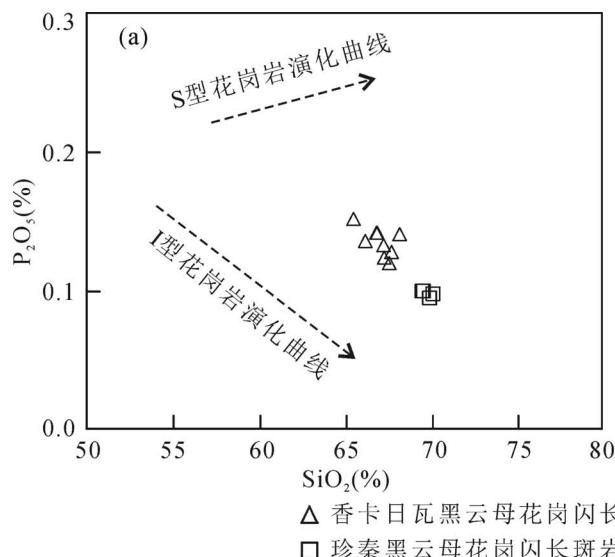


图 8 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩 SiO_2 — P_2O_5 图解(a) 及 Rb —Y 图解(b) (底图据雷传扬等, 2022)

Fig. 8 SiO_2 — P_2O_5 diagram (a) and Rb —Y diagram (b) (after Lei Chuanyang et al. , 2022&) of Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

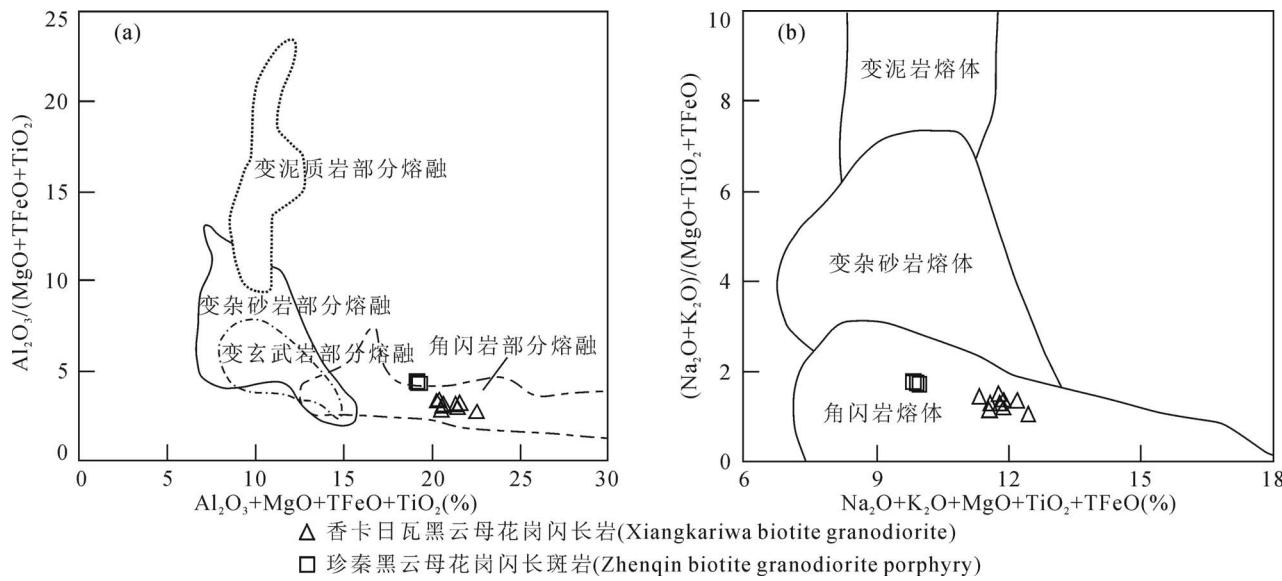


图 9 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩源区判别图解(底图据 Altherr et al. , 2002)

Fig. 9 Source diagram of the Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt (after Altherr et al. , 2002)

高,并与 Rb 含量呈正相关关系 (Chappell, 1999)。在 P_2O_5 — SiO_2 图解中(图 8a), P_2O_5 与 SiO_2 呈负相关关系,在 Rb—Y 图解中(图 8b), Y 与 Rb 呈正相关关系,与 I 型花岗岩的特征一致。综上所述,香卡日瓦和珍秦花岗岩属 I 型花岗岩。

4.2 源区性质

香卡日瓦和珍秦花岗岩铝饱和指数 A/CNK 值介于 1.04~1.11 之间,显示为弱过铝质岩石和 I 型花岗岩特征。岩石 Sr 含量为 211.52×10^{-6} ~ 311.27×10^{-6} , Y 含量为 10.88×10^{-6} ~ 23.70×10^{-6} , Nb/Ta 比值为 7.81~11.40, 平均为 9.89, 与大陆地壳平均值 10~14 (Sun et al. , 1989) 基本一致。I 型花岗岩多是由中基性火成岩、变质岩部分熔融形成 (Chappell, 1999; Wu Fuyuan et al. , 2007), 或者在地壳重融过程中,幔源物质增加较多而形成 (国显正等, 2019)。实验岩石学证明基性岩浆的部分熔融可以产生偏基性的准铝质花岗岩类,斜长角闪岩的脱水熔融可能产生长英质溶体中的钙碱性岩石组合 (Rushmer, 1991; Rapp et al. , 1995), 如花岗闪长岩和闪长岩。在 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2)$ 图解上(图 9a), 香卡日瓦和珍秦花岗岩所有样品点均落入角闪岩部分熔融区域, 在 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2)$ 图解上(图 9b), 所有样品点均落入角闪岩熔体区域中, 结合较为平坦的重

稀土元素分布模式,表明香卡日瓦和珍秦花岗岩岩浆岩源区可能为下地壳基性岩石部分熔融形成。

锆石 Lu—Hf 同位素体系具有较高的封闭温度, 锆石的 $n(^{176}\text{Hf}) / n(^{177}\text{Hf})$ 值受年代不确定性的影响较小。因此, 锆石原位 Hf 同位素分析能有效地揭示岩浆演化过程和源区性质 (Griffin et al. , 2000; 吴福元等, 2007)。一般而言,具有较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和相应较年轻的模式年龄,表明花岗岩可能来源于大陆地壳中地幔物质的混入或新生地壳的再循环;而具有较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和相应较老的模式年龄,则表明花岗岩可能来源于古老地壳的深熔或重融 (Ben-Bassat et al. , 1980)。香卡日瓦和珍秦花岗岩样品的锆石 Hf 同位素组成较均一, Hf 初始值 $n(^{176}\text{Hf}) / n(^{177}\text{Hf})$ 为 0.282453~0.282543, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值介于 -6.84~ -3.50 之间, 对应的二阶段模式年龄(T_{DM2})变化范围为 1.48~1.69 Ga 之间。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t (Ma) 图解上(图 10),所有样品点均分布于球粒陨石演化线之下,反应其岩浆可能起源于中元古代地壳物质的部分熔融。

花岗岩在大陆地壳生长和再造的方式主要有两种:一是以幔源岩浆为载体的地幔物质,通过岩浆混合作用而形成;另一种则是软流圈上涌发生部分熔融形成幔源玄武质岩浆,由于底侵作用提供大量热源,促使下地壳发生部分熔融,形成花岗岩 (Kroner, 2006; Mo Xuanxue et al. , 2007)。香卡日瓦和珍秦

表 3 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩锆石 Lu—Hf 同位素分析结果表

Table 3 Lu—Hf isotopic data of zircons for Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

点号	年龄 (Ma)	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$		$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$		$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$		$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_i$	T_{DMI} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ					
样品 XKRW-7												
01	214.1	0.033998	0.000653	0.001199	0.000016	0.282505	0.000014	-4.92	0.282500	1063	1563	-0.96
02	213.3	0.027832	0.000775	0.000992	0.000024	0.282508	0.000013	-4.79	0.282504	1053	1554	-0.97
03	221.8	0.039931	0.000633	0.001295	0.000016	0.282488	0.000015	-5.38	0.282482	1090	1598	-0.96
04	212.1	0.043704	0.000394	0.001501	0.000007	0.282507	0.000013	-4.92	0.282501	1068	1562	-0.95
06	220.8	0.041403	0.001229	0.001393	0.000032	0.282516	0.000014	-4.43	0.282510	1054	1538	-0.96
09	217.3	0.038780	0.001058	0.001375	0.000040	0.282518	0.000013	-4.42	0.282512	1050	1534	-0.96
10	216.9	0.030195	0.000312	0.001108	0.000013	0.282543	0.000014	-3.50	0.282539	1007	1476	-0.97
11	218.3	0.046233	0.000838	0.001558	0.000020	0.282497	0.000014	-5.16	0.282491	1085	1582	-0.95
12	217.3	0.039743	0.000933	0.001349	0.000024	0.282528	0.000014	-4.07	0.282522	1035	1512	-0.96
14	216.5	0.039470	0.000396	0.001363	0.000014	0.282511	0.000014	-4.67	0.282506	1059	1549	-0.96
样品 ZQ-1												
02	214.2	0.030020	0.000720	0.001109	0.000016	0.282525	0.000015	-4.20	0.282520	1033	1518	-0.97
04	221.2	0.023644	0.000390	0.000817	0.000015	0.282482	0.000015	-5.54	0.282478	1085	1608	-0.98
05	218.4	0.019256	0.000465	0.000741	0.000013	0.282499	0.000014	-4.98	0.282496	1059	1570	-0.98
07	214.5	0.052343	0.001042	0.001678	0.000029	0.282469	0.000015	-6.26	0.282462	1129	1648	-0.95
08	214.9	0.040237	0.000675	0.001481	0.000015	0.282496	0.000013	-5.24	0.282491	1083	1584	-0.96
09	218.2	0.012757	0.000201	0.000531	0.000006	0.282523	0.000013	-4.08	0.282521	1019	1513	-0.98
10	214.5	0.055338	0.002127	0.001798	0.000070	0.282453	0.000017	-6.84	0.282446	1155	1685	-0.95
11	215.2	0.085724	0.000915	0.002796	0.000025	0.282477	0.000019	-6.12	0.282466	1152	1640	-0.92
13	222.1	0.040411	0.000821	0.001367	0.000022	0.282466	0.000014	-6.14	0.282461	1123	1647	-0.96
14	214.6	0.040774	0.000248	0.001603	0.000016	0.282497	0.000016	-5.24	0.282491	1086	1584	-0.95

注: 表中各参数的计算公式和参数同王嘉玮等(2021)。

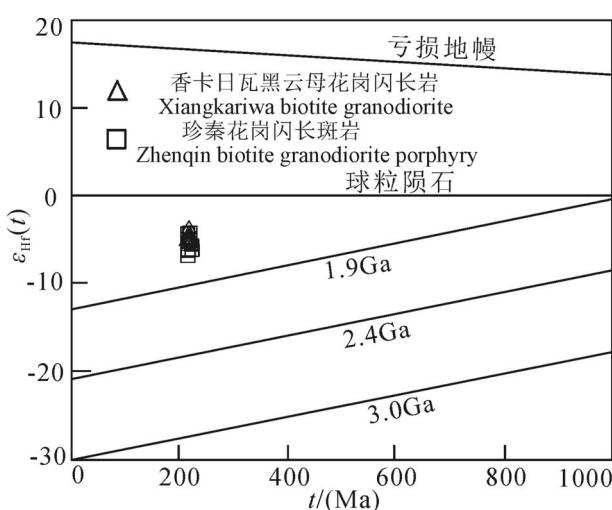


图 10 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t (Ma) 图解

Fig. 10 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t (Ma) diagram of Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

花岗岩地球化学特征及 Hf 同位素表明岩浆源区主要为软流圈地幔上涌加热下地壳岩石而引发的部分熔融。

4.3 构造环境

三叠纪晚期南古特提斯洋盆关闭, 劳亚板块(昆仑地体)、昌都—羌塘微板块和扬子板块发生汇聚碰撞, 引发大规模的陆—陆碰撞作用, 并导致松潘—甘孜造山带发生双向收缩作用, 使区内的地壳挤压增厚(许志琴等, 1992), 在区域上引发广泛的岩浆事件, 形成一系列与俯冲碰撞作用相关的中酸性侵入岩类(梁斌等, 2016)。野外地质特征表明, 香卡日瓦和珍秦花岗岩体明显侵位于发生强烈变形的三叠纪复理石沉积中, 而岩体内部未发生明显的构造变形或变质, 说明岩体未受到大规模构造事件的影响, 属碰撞后花岗岩(刘亮等, 2021; 蔡宏明, 2010)。花岗岩类的形成和大地构造环境具有密切的关系(Barbarin, 1999), 岩石的地球化学特征在判别构造环境和地球动力学演化方面提供有用的信息。在(Y+Nb)—Rb 图解上(图 11a), 香卡日瓦和

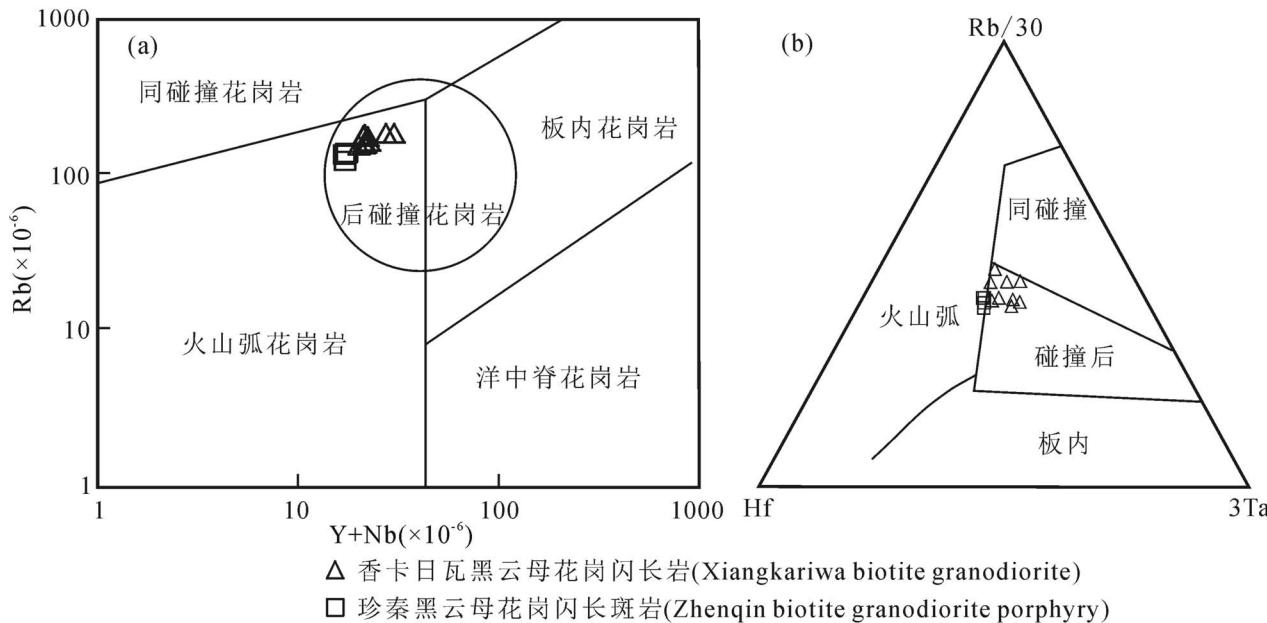


图 11 松潘—甘孜造山带东南段香卡日瓦和珍秦花岗岩 ($\text{Y} + \text{Nb}$)— Rb 图解(a) (底图据 Pearce et al. , 1984) 及 $\text{Rb}/30$ — Hf — 3Ta 图解(b) (底图据 Harris. , 1986)

Fig. 11 ($\text{Y} + \text{Nb}$)— Rb diagram(a) (after Pearce et al. , 1984) and $\text{Rb}/30$ — Hf — 3Ta diagram(b) (after Harris et al. , 1986) of Xiangkariwa and Zhenqin granites, southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

珍秦花岗岩样品点均落入后碰撞花岗岩类区域;在 $\text{Rb}/30$ — Hf — 3Ta 图解上(图 11b),大多数样品点落入碰撞后区域,个别珍秦花岗岩落入碰撞后与火山弧花岗岩过渡区域。此外,梁斌等(2016)推测 220 Ma 左右是松潘—甘孜造山带同碰撞作用结束、后碰撞伸展作用开始的时期。当造山作用持续到 214 Ma 时,该造山带处于后碰撞环境(胡健民等, 2005; 万传辉等, 2011;)。根据本文锆石 U-Pb 同位素测年结果,香卡日瓦和珍秦花岗岩分别形成于 216.3 ± 1.3 Ma 和 217.9 ± 1.3 Ma,由此进一步说明香卡日瓦和珍秦花岗岩形成于松潘—甘孜造山带印支期末后碰撞构造背景。

4.4 地质意义

松潘—甘孜造山带的形成是发生在古特提斯洋消亡之后(许志琴, 1992),造山带内岩浆岩的产出与陆陆碰撞之后的地壳增厚有着密切的联系(朱毓等, 2017)。Zhang Hongfei et al. (2007)提出松潘—甘孜造山带内印支期岩浆组合起因于岩石圈的拆沉作用,地幔软流圈物质上涌加热上部岩石圈部分,诱使中一下地壳发生部分熔融。后碰撞阶段岩石圈的拆沉作用和软流圈的上涌,使来自深部的地幔岩浆携带高热注入到中一下地壳,由此引起的地壳岩石熔融不但规模较大,而且因涉及多种地壳源

岩,使得与此过程相关的岩浆活动具有多样性,如普通钙碱性和高钾钙碱性花岗岩、高锶花岗岩、碱质 A 型花岗岩,甚至钾玄质岩石都常与该机制有关(袁静等, 2011)。松潘—甘孜造山带出露的多种类型的印支期花岗岩类,可以运用岩石圈拆沉模式得到很好的解释:广泛分布的高锶低钇质(adakitic)花岗岩($221 \sim 216$ Ma)代表了松潘—甘孜造山带印支期的地壳增厚作用(Zhang Hongfei et al. , 2006);因增厚导致下地壳密度增大产生岩石圈重力的不稳定性,从而引发岩石圈拆沉并伴随地幔软流圈物质上涌,携带的热量和物质加入到中一下地壳,下地壳受其热量烘烤镁铁质物质发生部分熔融形成了钙碱性—高钾钙碱性 I 型花岗岩(Xiao Long et al. , 2007);下地壳熔融物质与幔源岩浆混合形成了 A 型花岗岩(年保玉则岩体)(Zhang Hongfei et al. , 2007)和高 Ba—Sr 花岗岩(牛心沟岩体、马奈岩体、太阳河岩体)(赵永久, 2007),代表松潘—甘孜造山带由挤压背景向构造伸展转换;随着岩石圈伸展达到最大程度,软流圈上涌达到最大高度,软流圈物质携带的热量甚至诱发了中地壳物质的部分熔融,形成了马尔康强过铝质花岗岩($208 \sim 200$ Ma)(时章亮等, 2009)。由此可见,后碰撞岩石圈拆沉、软流圈上涌这一深部过程的影响是非常巨大的,已影

响到了地壳的不同层位,本文研究的香卡日瓦地区晚三叠世花岗岩体就是该机制在下地壳的响应。

5 结论

(1) 香卡日瓦黑云母花岗闪长岩和珍秦黑云母花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 同位素年龄分别为 216.3 ± 1.3 Ma (MSWD = 2.7) 和 217.9 ± 1.3 Ma (MSWD = 2.1), 二者接近一致, 代表花岗岩侵位时代为晚三叠世。

(2) 香卡日瓦和珍秦花岗岩地球化学特征相似, 为高钾钙碱性系列, 弱过铝质 I 型花岗岩, 轻稀土元素富集、重稀土元素亏损, Eu 弱负异常; 微量元素富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、Th、U, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 等。

(3) 香卡日瓦和珍秦花岗岩锆石 Hf 同位素组成较均一, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-6.84 \sim -3.50$ 之间, 对应的二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 $1.48 \sim 1.69$ Ga 之间, 说明花岗岩来源于中元古代地壳物质的部分熔融, 其形成于后碰撞构造环境。

致谢:长安大学李佐臣教授审阅全文并提出了许多宝贵的意见和建议, 笔者等在此致以衷心的感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

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. 导师: 张宏飞. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~84.

国显正, 贾群子, 李金超, 孔会磊, 姚学钢, 贾亚芝. 2019. 东昆仑扎玛秀玛正长花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 93(4): 830~842.

胡健民, 孟庆任, 石玉若, 渠洪杰. 2005. 松潘—甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 21(3): 867~880.

雷传扬, 唐菊兴, 尹显科, 宋扬, 李威, 袁华云. 2022. 狮泉河—纳木错特提斯洋盆的俯冲极性: 岛弧岩浆岩年代学和岩石地球化学证据. 地质学报, 96(3): 918~941.

李五福, 李善平, 王秉璋, 王春涛, 刘金恒, 张新远, 曹锦山, 许传兵, 刘建栋, 金婷婷[J][OL]. 2021. 青海三江北段草陇(绿柱石—锂辉石花岗伟晶岩的发现及其 Li—Be 找矿意义. 大地构造与成矿学; Doi: 10. 16539/j. ddgzyckx. 2021. 05. 021; (2021-12-06) <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1595.P.20211203.1654.001.html>

李兴杰, 李健康, 刘永超, 熊昌利. 2018. 川西扎乌龙花岗伟晶岩型稀有金属矿床白云母花岗岩岩石地球化学特征. 地质论评, 64(4): 1005~1016.

梁斌, 付小芳, 唐屹, 潘蒙, 袁蔺平, 郝雪峰. 2016. 川西甲基卡稀有金属矿区花岗岩岩石地球化学特征. 桂林理工大学学报, 36

(1): 42~49.

刘亮, 戴元, 吕丰强, 江辉, 岳继宗, 杨宇东, 付春鑫. 2021. 松潘—甘孜造山带晚三叠世新山沟 A 型花岗岩年代学和地球化学研究. 矿物岩石地球化学通报, 40(3): 677~689.

时章亮, 张宏飞, 蔡宏明. 2009. 松潘造山带马尔康强过铝质花岗岩的成因及其构造意义. 地球科学: 中国地质大学学报, 34(4): 569~584.

万传辉, 袁静, 李芬香, 鄢圣武. 2011. 松潘—甘孜造山带南段晚三叠世兰尼巴和羊房沟花岗岩岩石学、地球化学特征及成因. 岩石矿物学杂志, 30(2): 185~198.

王嘉玮, 王刚, 王宗起, 武昱东, 王东升, 王坤明. 2021. 南秦岭武当山十堰地区中生代镁铁质岩石成因与构造意义——岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 地质论评, 67(4): 869~885.

韦龙猛, 杨一增, 张贺, 贺剑锋, 陈福坤. 2016. 南秦岭胭脂坝花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr—Nd—Pb 同位素的制约. 地球科学与环境学报, 2016, 38(4): 527~546.

吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.

许志琴, 付小方, 马绪宣, 咸学祥, 吴婵, 侯立伟, 赵中宝. 2016. 青藏高原片麻岩穹窿与找矿前景. 地质学报, 90(11): 2971~2981.

许志琴, 侯立伟, 王宗秀, 付小芳, 黄明华. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社: 1~190.

许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景. 地质学报, 92(6): 1091~1106.

许志琴, 王汝成, 朱文斌, 秦宇龙, 付小芳, 李广伟. 2020. 川西花岗—伟晶岩型锂矿科学钻探: 科学问题和科学意义. 地质学报, 94(8): 2177~2189.

袁静, 肖龙, 万传辉, 高睿. 2011. 松潘—甘孜南部放马坪—三岩龙花岗岩的成因及其构造意义. 地质学报, 85(2): 195~206.

赵永久, 袁超, 周美夫, 颜丹平, 龙小平, 李继亮. 2007. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘—甘孜地体基底性质的制约. 岩石学报, 23(5): 995~1006.

赵永久. 2007. 松潘—甘孜东部中生代中酸性侵入体的地球化学特征、岩石成因及构造意义. 导师: 周美夫, 袁超. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文: 1~78.

周家云, 谭洪旗, 龚大兴, 朱志敏, 罗丽萍. 2014. 乌拉溪铝质 A 型花岗岩: 松潘—甘孜造山带早燕山期热隆伸展的岩石记录. 地质论评, 60(2): 348~362.

朱毓, 赖绍聪, 秦江锋. 2017. 松潘造山带金川地区观音桥晚三叠世二云母花岗岩的成因及其地质意义. 地质论评, 63(6): 1465~1478.

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

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46: 605~626.

Ben-Bassat M, Carlson R W, Puri V K, Davenport M D, Schrivers J A, Latif M, Smith R, Portigal L D, Lipnick E H, Weil M H. 1980. Pattern-based interactive diagnosis of multiple disorders: The MEDAS system. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2(2): 148~160.

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu—Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle—crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148(1~2): 243~258.

- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the RareEarth Elements: Meteoric Studies. *Rare Earth Element Geochemistry*, 2: 63~114.
- Brown M. 1994. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: the migmatite-to-crustally-derived granite connection in the thickened orogens. *Earth Science Reviews*, 36: 83~130.
- Cai Hongming, Zhang Hongfei, Xu Wangchun. 2009. U-Pb Zircon ages, geochemical and Sr—Nd—Hf isotopic compositions of granitoids in western Songpan—Garze fold belt: Petrogenesis and implication for tectonic evolution. *Journal of Earth Science*, 20(4): 681~698.
- Cai Hongming. 2010&. Petrogenesis of Indosinian granitoids and volcanic rocks in Songpan—Garze fold belt: constrains for deep geologic processes. Dissertation Supervisor: Zhang Hongfei. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Doctoral Degree; 1~84.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8(2): 173~174.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1~2): 1~26.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S- type granites and the characterization of fractionated haplogranite. *Lithos*, 46 (3): 535~551.
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas — petrogenetic issues, models and evidence. *Earth-Science Reviews*, 61(1): 1~18.
- Druschke P, Hanson A D, Yan Q, Wang Z, Wang T. 2006. Stratigraphic and U-Pb SHRIMP detrital zircon evidence for a Neoproterozoic continental arc, central China: Rodinia implications. *The Journal of Geology*, 114(5): 627~636.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Achterbergh E VAN, O’ Reilly Suzanne Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircons megacrysts in kimberlites—Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Achterbergh E, O’ Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 64: 133~147.
- Guo Xianzheng, Jia Qunzi, LiJinchao, Kong Huilei, Yao Xuegang, Jia Yazhi. 2019&. Geochronology and geochemical characteristics of syenogranite from the Zhamaxiuma area in east Kunlun and their tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 830~842.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geological Society of London Special Publications*, 19: 67~81.
- Hu Jiangmin, Men Qingren, Shi Yuruo, Liang Hongjie. 2005&. SHIRMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan—Ganzi terrane and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 867~880.
- HuZhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Wengui, Zhang Wen, Tong Xirun, Lin Lin, Zong Keqing, Li Ming, Chen Haihong, Zhou Lian, Yang Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27, 1391~1399.
- HuZhaochu, Zhang Wen , Liu Yongsheng, Gao Shan, Li Ming, Zong
- Keqing, Chen Haihong, Hu Shenghong. 2015. “Wave” signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: application to lead isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152~1157.
- Irvine T N, Baragra W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.
- Kroner A. 2006. Evolution of the Archean Continental Crust. *Nature*, 443(7113): 811~817.
- Lei Chuanyang, Tang Juxing, Yin Xianke, Song Yang, Li Wei, Yuan Huayun. 2022&. Subduction polarity of Shiquanhe—Namco Tethys ocean basin: evidence from geochronology and geochemistry of island arc magmatic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 96(3): 918~941.
- Li Wufu, Li Shanping, Wang Bingzhang, Wang Chuntao, Liu Jinheng, Zhang Xinyuan, Cao Jinshan, Xu Chuanbing, Liu Jiandong, Jin Tingting. 2021&. Discovery of the (Beryl-bearing) Spodumene Pegmatite in the Caolong Area in the Sanjiang Northern Section of the Qinghai: Implications for Li—Be Mineralization [J] [OL]. *Geotectonica et Metallogenesis*; Dol: 10. 16539/j. ddgzyckx. 2021. 05. 021; (2021-12-06) <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1595.P.20211203.1654.001.html>
- Li Xingjie, Li Jiangkang, Liu Yongchao, Xiong Changli. 2018&. Geochemical Features of Muscovite Granite in the Zhawulong Granitic Pegmatite Type Rare Metal Deposit, Western Sichuan. *Geological Review*, 63(6): 1005~1016.
- Liang Bin, Fu Xiaofang, Tang Yi, Pan Meng, Yuan Liping, Hao Xuefeng. 2016&. Granite geochemical characteristics in Jiajika rare metal deposit, western Sichuan. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 42~49.
- Liu Liang, Dai Yuan, Lü Fengqiang, Jiang Hui, Yue Jizong, Yang Yudong, Fu Chunxin. 2021&. The Geochronology and Geochemistry of the Late Triassic Xinshangou A-Type Granite in the Songpan—Ganzi Orogenic Belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(3): 677~689.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 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 of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- LiuYongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther Detlef, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39 pp.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3): 215~224.
- Miller C F. 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *Journal of Geology*, 93 (6): 673 ~ 689.
- Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Niu Yaoling, Dong Guochen, Qu Xiaoming, Zhao Zhidan, Yang Zhiming. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96 (1): 225~242.

- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58(1): 63~81.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8~32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust—Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, Calassou S, Xu Z. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan—Garzé fold belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications. *Journal of Asian Earth Science*, 22(5): 465~481.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, Calassou S, Xu Zhenbo. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan—Garzé Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465~481.
- Rushmer T. 1991. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 107(1): 41~59.
- Shi Zhangliang, Zhang Hongfei, Cai Hongming. 2009&. Petrogenesis of strongly peraluminous granites in Markan Area, Songpan fold belt and its tectonic implication. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(4): 569~584.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu—Hf and U-Pb isotope systematic of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3~4): 311~324.
- Solar G S, Pressley R A, Brown M, Tucker R D. 1998. Granite ascent in convergent orogenic belts: Testing a model. *Geology*, 26: 711~714.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Wan Chuanhui, Yuan Jing, Li Fenxiang, Yan Shengwu. 2011&. Late Triassic granitoids in the southern part of the Songpan—Garzé fold belt: Petrology, geochemical composition and petrogenesis. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 30(2): 185~198.
- Wang Jiawei, Wang Gang, Wang Zongqi, Wu Yudong, Wang Dongsheng, Wang Kunming. 2021&. Genesis and tectonic significance of Mesozoic mafic rocks in the Wudang Mountain—Shiyan Belt, South Qinling Orogen: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb, Hf isotopes. *Geological Review*, 67(4): 869~885.
- Wei Longmeng, Yang Yizeng, Zhang He, He Jiangfeng, Chen Fukun. 2016&. Petrogenesis of Yanzhiba Granite in South Qinling: Constraints from Zircon U-Pb Ages, Geochemistry and Sr—Nd—Pb Isotope. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(04): 527~546.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 95: 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zhen Yongfei, Gao Shan. 2007&. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220.
- Xiao Long, Zhang Huangxiang, Clemens J D, Wang Q W, Kan Z Z, Wang K M, Ni Pingze, Liu Xiaoming. 2007. Late Triassic granitoids of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution. *Lithos*, 96(3~4): 436~452.
- Xu Zhiqin, Fu Xiaofang, Ma Xuxuan, Qi Xuexiang, Wu Chan, Hou Liwei, Zhao Zhongbao. 2016&. The Gneiss Domes in Tibetan Plateau and Their Potential for Prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 2971~2981.
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, Fu Xiaofang, Huang Minghua. 1992&. The Mountain Building Process of Songpan—Ganzi Orogen, China. Beijing: Geological Publishing House, 1~190.
- Xu Zhiqin, Ji Shaocheng, Li Haibing, Hou Liwei, Fu Xiaofang, Cai Zhihui. 2008. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake. *Episodes*, 31(3): 291~301.
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, Fu Xiaofang. 2018&. On the Structural Backgrounds of the Large-scale “Hard-rock Type” Lithium Ore Belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091~1106.
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhu Wenbin, Qin Yulong, Fu Xiaofang, Li Guangwei. 2020&. Scientific drilling project of granite—pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan: scientific problems and significance. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2177~2189.
- Yuan Jing, Xiao Long, Wan Chuanhui, Gao Rui. 2011&. Petrogenesis of Fangmaping—Sanyanlong Granites in Southern Songpan—Garzé Fold Belt and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 195~206.
- Zhang Hongfei, Parrish R, Zhang Li, Xu Wangchun, Yuan Honglin, Gao Shan, Crowley Q. 2007. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan—Ganzi fold belt, eastern Tibetan Plateau: Implication for lithospheric delamination. *Lithos*, 97(3~4): 323~335.
- Zhang Hongfei, Zhang Li, Harris N, Jin Lanlan, Yuan Hong Lin. 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids Songpan—Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 75~88.
- Zhang Wen, Hu Zhaochu, Spectroscopy Atominc. 2020. Estimation of Isotopic Reference Values for Pure Materials and Geological Reference Materials. *Atomic Spectroscopy*, 41(3): 93~102.
- Zhao Yongjiu, Yuan Chao, Zhou Meifu, Yan Danping, Long Xiaoping, Li Jiliang. 2007&. Geochemistry and petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou granites in wertern Sichuan, China: constraints on the nature of Songpan—Ganzi basement. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 995~1006.
- Zhao Yongjiu. 2007&. Mesozoic granitoids in eastern Songpan—Garze: Geochemistry, Petrogenesis and tectonic implications. Tutor: Zhou Meifu, Yuan Chao. Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Institute of Geochemistry: 1~78.
- Zhou Jiayun, Tan Hongqi, Gong Daxing, Zhu Zhimin, Luo Liping. 2014&. Wulaxi Aluminous A-type Granite in Western Sichuan, China: Recording Early Yanshanian Lithospheric Thermo-upwelling Extension of Songpan—Garze Orogenic Belt. *Geological Review*, 60(2): 348~362.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy Allen K, Li Yunqian, Ding Jun. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1): 51~56.
- Zhu Yu, Lai Shaocong, Qin Jiangfeng. 2017&. Petrogenesis of Late

Triassic Two-mica Granite in Guanyinqiao, Jinchuan Ares, Songpan Orogenic Belt, and Its Geological Significance. Geological Review, 63(6): 1465~1478.

Zong Keqing, Klemd Reiner, Yuan Yu, He Zhenyu, Guo Jingliang, Shi Xiaoli, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zhang Zeming. 2017. The

assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Precambrian Research, 290: 32~48.

Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Late Triassic granites from Xiangkariwa area in the southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt

ZHANG Xinyuan^{1,2)}, LI Wufu^{1,2)}, WANG Bingzhang^{1,2)}, LIU Jiandong^{1,2)}, LI Shanping^{1,2)},
WANG Chuntao^{1,2)}, LI Jiqing^{1,2)}, Cao Jinshan^{1,2)}

- 1) Qinghai Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Qinghai—Tibetan Plateau, Xi'ning, 810012;
- 2) Qinghai Geological Survey Institute, Xi'ning, 810012

Abstract: Taking the Xiangkariwa and Zhenqin granites in the southeastern section of the Songpan—Garze Orogenic Belt as the objects, this paper studies petrology, petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Lu—Hf isotope, and discusses the genesis and tectonic significance of the rocks. Based on the results, the Xiangkariwa and Zhenqin granites are biotite granodiorite and biotite granodiorite-porphyry, respectively. The content of SiO₂ in the granite is 65.45%~70.04%, Al₂O₃ is 15.30%~16.69%, K₂O/Na₂O is 1.10~1.56, which belongs to the high potassium calc alkaline series rocks; The aluminum saturation index A/CNK is between 1.04 and 1.11, which is weaker than that of aluminum. In the standardized distribution map for rare earth chondrites, similar curve characteristics are shown, which is: light rare earth enrichment, heavy rare earth losses and "V" type right dipping characteristics negative Eu anomaly. The rocks are rich in Cs, Rb, Ba, Th, U, etc., and less in Nb, Ta, Ti, P, etc. The zircon $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ weighted average age of the rock mass is 217.9~216.3 Ma, which shows that it is the product of Late Triassic magmatism; the initial value of zircon Hf isotope $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ is 0.282453~0.282543, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value is -6.84~-3.50, with its age (T_{DM2}) 1.48~1.69 Ga in the second stage, suggesting that it may be an ancient crust. According to the geochemical characteristics of rock mass and regional studies, it is believed that the Xiangkariwa and Zhenqin granites were formed in the post Triassic collision tectonic environment.

Keywords: Songpan—Garze Orogenic Belt; geochemistry; zircon U-Pb age; Hf isotope; Late Triassic

Acknowledgements: This paper was supported by Scientific Research Project of Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province “Research on mineralization environment of rare earth minerals in Kunlun Mountain—Chengduo area in the northern part of Qinghai—Xizang(Tibet) Plateau(No. [2021] 59)” and the second comprehensive scientific investigation and research project on the Qinghai—Xizang(Tibet) Plateau(No. 2019QZKK0702)

First Author: ZHANG Xinyuan, male, born in 1988, master, senior engineer, mainly engaged in basic geological survey and research; Email: qhddyzxy@qq.com

Corresponding author: LI Wufu, male, born in 1982, master, professor engineer, mainly engaged in basic geological survey and research; Email: 15422504@qq.com

Manuscript received on: 2022-03-24; **Accepted on:** 2022-08-13; **Network published on:** 2022-09-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.125

Edited by: ZHANG Yuxu

