

· 专题研究 ·

松潘-甘孜地体下仓界地区晚三叠世基性岩的发现及其地质意义

陈敏¹, 王雁鹤², 谷强², 马庆³

(1. 青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2. 中国地质调查局 西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000; 3. 中国地质调查局 西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 笔者在松潘-甘孜地体下仓界地区发现了晚三叠世基性岩, 对其开展了岩相学、地球化学、斜锆石 U-Pb 年代学等研究。该基性岩由玄武岩和辉绿岩组成, 均为钙碱性系列, 蚀变较强, 形成时代为 208.0 ± 7.0 Ma。岩石 La/Nb 值为 $1.13 \sim 1.95$, La/Ta 值为 $7.96 \sim 25.79$, TiO_2 含量为 $1.51\% \sim 2.22\%$, Zr/Nb 值为 $11.35 \sim 16.33$, 指示岩浆源自岩石圈地幔与软流圈地幔的混合源区。根据 $(\text{Yb}/\text{Sm})_p - (\text{Tb}/\text{Yb})_p$ 模型计算结果, 推测下仓界基性岩可能源于软流圈物质诱发岩石圈地幔尖晶石-石榴子石过渡相(石榴子石约占 $0 \sim 25\%$) 发生约 5% 的部分熔融。岩石中发现捕获的古老斜锆石, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, Nb、Ta 和 Ti 元素弱亏损。结合区域地质资料, 认为松潘-甘孜地体应具有陆壳基底, 其晚三叠世(<211 Ma) 的构造环境为碰撞后的板内伸展环境。

关键词: 晚三叠世基性岩; 斜锆石 U-Pb 年代学; 下仓界地区; 松潘-甘孜地体

中图分类号: P588.14⁺5; P588.12⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)01-0001-12

Discovery of Late Triassic basic rocks in the Xiacangjie area of Songpan-Ganzi terrane and its geological significance

CHEN Min¹, WANG Yan-he², GU Qiang² and MA Qing³

(1. Geological Engineering Department of Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Xining Natural Resources Investigation Center, China Geological Survey, Xining 810000, China; 3. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, China)

Abstract: Late Triassic basic rocks were discovered in the Xiacangjie area of Songpan-Ganzi terrane, and their petrography, geochemistry and baddeleyite U-Pb chronology were studied. The basic rocks are composed of basalt and diabase, both of which belong to calc-alkaline series with strong alteration, and the formation age of diabase is 208.0 ± 7.0 Ma. La/Nb value is $1.13 \sim 1.95$, La/Ta value is $7.96 \sim 25.79$, TiO_2 content is $1.51\% \sim 2.22\%$, and Zr/Nb value is $11.35 \sim 16.33$, indicating that the magma of the basic rocks originated from the mixed source region of the lithospheric mantle and the asthenosphere mantle. According to the calculation results of the $(\text{Yb}/\text{Sm})_p - (\text{Tb}/\text{Yb})_p$ model, it is speculated that the basic rocks in the Xiacangjie area may be derived from the partial melting of about 5% of the spinel and garnet transition phase (garnet accounts for about $0 \sim 25\%$) in the lithospheric mantle induced by the asthenospheric materials. Ancient baddeleyites captured in the rocks are found. Light rare earth elements are enriched in the rocks, heavy rare earth elements are depleted, and Nb, Ta and Ti elements are weakly depleted. Combined with the regional geological data, it is considered that Songpan-Ganzi terrane should have

收稿日期: 2022-04-01; 接受日期: 2022-10-09; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114009001)

作者简介: 陈敏(1986-), 女, 讲师, 主要从事矿物学与矿床学的教学与研究工作, E-mail: chenmin_cn@163.com; 通讯作者: 王雁鹤(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作。

网络首发时间: 2022-11-24; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20221123.1135.002.html>

a continental crust basement, and its tectonic environment in the Late Triassic (<211 Ma) was the post-collisional intraplate extension environment.

Key words: Late Triassic basic rocks; baddeleyite U-Pb geochronology; Xiacangjie area; Songpan-Ganzi terrane

Fund support: Project of China Geological Survey (12120114009001)

松潘-甘孜地体位于青藏高原东北部,全区几乎都被巨厚(5~15 km)的三叠纪浊积岩覆盖,掩盖了许多重要的地质信息,留下了许多未解之惑,被称为“中国地质百慕大”(许志琴等, 1992; Pan *et al.*, 2001),其中松潘-甘孜的基底性质和晚三叠世时期的构造环境是其中争议的两个热点问题。松潘-甘孜地体内发育大量侵入于三叠纪浊积岩和少量印支期中酸性火山岩类中的印支期花岗岩类,对这些印支期岩浆岩的研究对于约束松潘-甘孜地体三叠纪的基底性质和构造环境具有重要意义。前人通过对带内印支期岩浆岩的研究,关于其基底性质和晚三叠世的构造环境形成了以下几种观点:①晚三叠世松潘-甘孜地体是一个古特提斯洋的残留洋盆(Pullen *et al.*, 2008);②基底既有洋壳残片又有陆壳物质,晚三叠世是一个古特提斯洋闭合过程中形成的增生造山楔(Roger *et al.*, 2010; De Sigoyer *et al.*, 2014)或者处于由古特提斯洋快速收缩形成的增生造山楔和由西秦岭弧地体与扬子地块北部被动陆缘碰撞的周缘前陆盆地构成的两种环境(夏磊等, 2017);③基底性质为陆壳,晚三叠世为弧-陆碰撞后形成的前陆盆地(Yuan *et al.*, 2010)或者由于古特提斯洋在俯冲过程中回卷、弧后伸展作用而从昆仑大陆弧裂离形成的大陆弧碎片(Wang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014)。然而区内还出露少量基性岩,前人对其研究十分有限。基性岩源于地幔,是地球深部过程的真实记录,可作为揭示构造单元构造性质的“岩石探测器”。笔者在参加青海省北巴彦喀拉山地区1:5万下仓界(I47E010014)、侧不地(I47E011014)幅区域地质矿产调查项目过程中,在松潘-甘孜地体中部下仓界地区发现了晚三叠世基性岩,对其进行了岩相学、地球化学、锆石U-Pb法测年等分析,该结果对深入探讨松潘-甘孜地体地区晚三叠世基底性质和构造环境可提供重要依据。

1 地质背景与岩石学特征

松潘-甘孜地体以阿尼玛卿缝合带为界,与昆仑-秦岭造山带相邻;以龙门山断裂带为界,与扬子地

块相邻;以金沙江-甘孜-理塘缝合带为界,与义敦岛弧和羌塘地块相邻。松潘-甘孜地体呈倒三角形,阿尼玛卿缝合带和金沙江-甘孜-理塘缝合带被认为代表古特提斯洋的关闭位置(图1a, Yin and Harrison, 2000; Wu *et al.*, 2019)。

松潘-甘孜地体东缘沿龙门山逆冲断层出露与扬子地块相似的新元古代基底(Zhou *et al.*, 2002, 2008; Yan *et al.*, 2003),盖层主要为巨量的三叠系复理石沉积物(许志琴等, 1992)。根据张雪亭等(2010),三叠系复理石自下而上被划分为昌马河组(T_{1-2c})、甘德组(T_{2gd})和清水河组(T_{3q})3个岩石地层单位,下仓界地区主要出露下-中三叠统昌马河组和上三叠统清水河组。昌马河组大面积分布于甘德断裂带以北地区,与上部清水河组呈断层接触,其岩石组合为一套砂岩与板岩互层或板岩夹砂岩,夹较多滑塌灰岩块。清水河组分布面积较小,总体呈北西-南东向展布,分布于甘德断裂带南侧部位,被第四系覆盖严重,局部还有新近系覆盖其上(图1b),其岩石组合为一套灰色-灰绿色砂岩夹板岩,局部砂板岩互层,偶夹中基性火山岩和泥晶灰岩透镜体。

松潘-甘孜地体还广泛分布有印支期的花岗岩类侵入于三叠系中,该花岗岩类($228\pm 2\sim 204\pm 7$ Ma)与三叠系褶皱变形大致同期(许志琴等, 1992; 胡建民等, 2005; Xiao *et al.*, 2007)。前人在三叠系复理石中发现少量火山岩夹层,这些火山岩主要为安山岩-英安岩系列,喷发时代为 $227\pm 2\sim 205\pm 1$ Ma(Cai *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; 夏磊等, 2017),与花岗岩类时代相近。

本次发现的基性岩出露于下仓界南约2 km处,出露面积约为1 km²,呈面向展布,多被第四系掩盖(图1b)。根据剖面PM003观察,火山岩整体与上三叠统清水河组呈断层接触,岩石组合包括玄武岩、安山岩和安山质晶屑凝灰岩,安山岩呈薄层夹于砂岩中,安山质晶屑凝灰岩位于玄武岩底部,厚约2 m。与火山岩相伴产出的还有闪长玢岩与辉绿岩,闪长玢岩与火山岩呈断层接触(图1c),辉绿岩侵入于玄武岩中(图2a)。

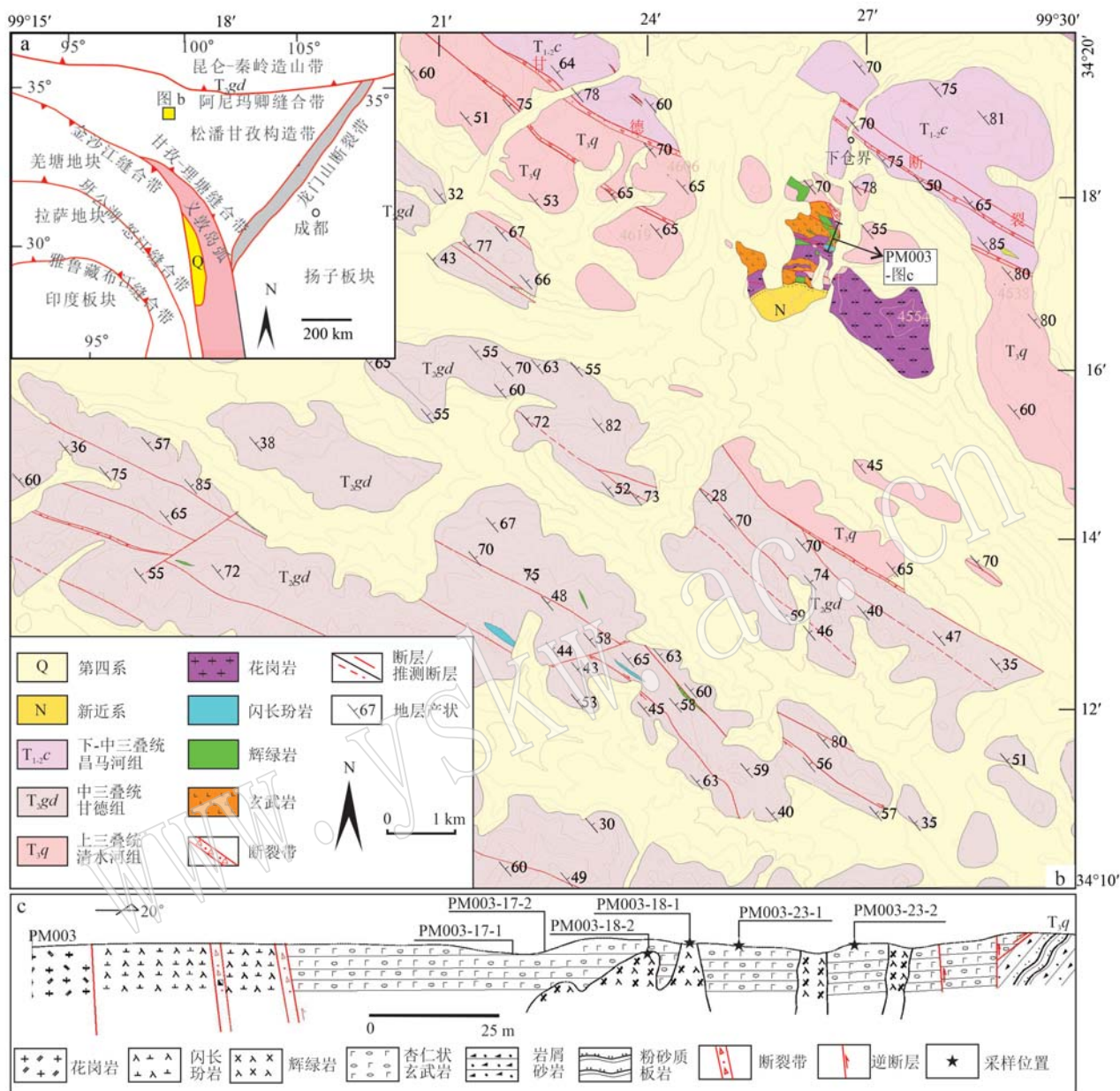


图1 松潘-甘孜地体及邻区大地构造简图(a, 据 Yin 和 Harrison, 2000)、下仓界地区地质简图(b)和 PM003 剖面信手素描图(c)
Fig. 1 Tectonic units of the Songpan-Ganzi and its adjacent area (a, after Yin and Harrison, 2000), simplified geological map of the Xiacangjie area (b) and profile of section PM003 (c)

2 样品采集与特征

本次在下仓界地区采集了 4 件玄武岩样品 (PM003-17-1、PM003-17-2、PM003-23-1、PM003-23-2) (图 1c) 和两件辉绿岩样品 (PM003-18-1、PM003-18-2) 用于全岩化学分析。另外采集了玄武岩 (PM003-23) 和辉绿岩 (PM003-18) 两件年代学样品, 样品均约 10 kg, 其中辉绿岩中分选出较多斜锆石, 而玄武岩中

分选出的锆石少且小。

玄武岩风化面呈黄褐色, 新鲜面呈灰色, 斑状结构, 基质具有间隐结构, 杏仁状构造, 岩石主要由斑晶 (15%)、基质 (80%)、杏仁体 (5%) 组成 (图 2b、2c)。斑晶主要为斜长石和单斜辉石, 斜长石呈长柱状, 可见聚片双晶, 次生绢云母化, 碳酸盐化较强, 辉石呈半自形柱状、他形粒状, 次生绢云母化、碳酸盐化较强, 基本上由蚀变矿物替代, 具其假像结构, 有暗化边, 杂乱分布。基质具有间隐结构, 在小板条状



图 2 下仓界地区基性岩野外及显微照片

Fig. 2 Field photographs and micrographs of the basic rocks in the Xiaocangjie area

a—下仓界基性岩野外露头,辉绿岩侵入玄武岩中;b—玄武岩具杏仁构造;c—玄武岩的正交偏光照片,见斑状结构,斜长石和辉石为斑晶;d—辉绿岩手标本;e—辉绿岩的正交偏光照片,具典型辉绿结构;Pl—斜长石;Cpx—单斜辉石(矿物缩写符号据沈其韩,2009)
a—outcrop of the Xiaocangjie basic rocks, diabase intrudes into basalt; b—basalt with almond structure; c—microphotograph of basalt with porphyritic structure under orthogonal polarizer, plagioclase and pyroxene are phenocrysts; d—hand specimen of diabase; e—microphotograph of diabase with typical ophitic texture under orthogonal polarizer; Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene(mineral symbols from Shen Qihan, 2009)

的微晶斜长石组成的不规则空隙格架中充填有隐晶质-玻璃质(已脱玻化),杏仁体多数为石英及碳酸盐矿物,边部多为碳酸盐矿物,中心多为石英。

辉绿岩呈灰黑色,具辉绿结构,块状构造,岩石主要由斜长石(68%)、辉石(30%)、铁质(2%)组成(图2d、2e)。斜长石呈半自形-自形板条状、长板状,具聚片双晶,个别晶体具环带,解理与裂隙发育,表面较干净,次生绢云母化、泥化较弱,绢云母充填在裂隙之中。辉石呈他形-半自形短柱状,次生绿泥

石化、绿帘石化、碳酸盐化较强,析出铁质,充填于斜长石晶体搭成的近三角形空隙中。铁质呈他形粒状、针柱状,杂乱分布。

3 分析方法

3.1 斜锆石 U-Pb 同位素定年

斜锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重

点实验室完成。激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 为 Agilent 7700x。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 10 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 Glitter 4.4 (Van Achterbergh *et al.*, 2001) 完成,详细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015)。

U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正。斜锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver 3 (Ludwig, 2003) 完成。斜锆石微量元素含量利用参考标样 NIST610 玻璃作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算, NIST610 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库 (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。

3.2 全岩化学元素分析

PM003-17-1、PM003-17-2、PM003-18-1 与 PM003-18-2 样品的全岩元素分析在自然资源部武汉矿产资源监督检测中心(武汉综合岩矿测试中心)完成, PM003-23-1 与 PM003-23-2 样品的全岩元素分析在自然资源部西北矿产资源监督检测中心(西安地质调查中心实验测试中心)完成。

粉碎样品前,首先用金刚石刀锯切除样品表面风化和半风化皮,若发现其中存在其他穿插脉体,同时切除脉体以排除对岩石成分的干扰。然后,用蒸馏水洗涤样品数次,烘干,再用超声波净化样品。最后将样品粉碎至 200 目备用。

全岩主量元素分析利用帕纳科 AxiosMAX XRF 分析完成。用于 XRF 分析的样品处理流程如下:将 200 目样品置于 120℃ 烘箱中烘干 8 h 后称取 0.5~1.0 g 于恒重陶瓷坩埚中,于马弗炉中 1 000℃ 灼烧 200 min,冷却至 400℃ 左右时转移至干燥皿中,待冷却至室温再进行称量,计算烧失量;分别称取 6.000 0 g(误差±0.3 mg) 0.5% 的 LiBr 助熔剂(49.75 Li₂B₄O₇:49.75 LiBO₂) (加拿大 Claisse) 与 0.600 0g(误差±0.3 mg) 上述烘干的样品于陶瓷坩埚中,用石英棒搅拌使样品与熔剂混匀,将混合样品倒入 XRF 专用铂金坩埚中,置于熔样炉中 1 100℃ 熔融,熔样程序运行结束后钳取出坩埚,摇晃坩埚将熔

体中的气泡赶出并使熔体充满坩埚底,再转移到耐火砖上冷却,然后将玻璃片取出,贴上标签,以备 XRF 测试。样品分析的精密度和准确度满足 GB/T14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16 个主次成分测定》的要求。

全岩微量元素组成利用 Elan DRC-e ICP-MS 分析完成,具体流程如下:将 200 目样品置于 105℃ 烘箱中烘干 12 h;准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;先后依次缓慢加入 1.5 mL 高纯 HNO₃、1.5 mL 高纯 HF 和 0.1 mL 高纯 HClO₄(结核结壳加入 3 mL 高纯 HNO₃ 和 1 mL 高纯盐酸);将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 48 h;待溶样弹冷却,开盖后置于 140℃ 电热板上蒸干,然后加入 3 mL HNO₃ 并蒸干;加入 3 mL 体积分数为 50% 的高纯 HNO₃,加盖及钢套密闭,在 190℃ 的烘箱中保持 12 h;冷却后,将提取液转移至 100 mL 干净的 PET(聚酯)瓶中,加入 1 mL 的(Rh+Re)双内标溶液(浓度 1 mg/L),用 Milli-Q 稀释至 100.00 g,使得 Rh 和 Re 在溶液中的浓度为 10 ng/mL,待上机测定。样品分析的精密度和准确度同 Liu 等(2010)。

4 分析结果

4.1 斜锆石 U-Pb 年代学

辉绿岩中的斜锆石多为自形-半自形板状,颗粒大小不一,具弱的岩浆环带或无分带,可见少量呈浑圆状斜锆石, Th/U 值变化较大(0.13~1.03)(图 3)。本次对辉绿岩样品的 24 粒斜锆石进行了 U-Pb 同位素分析,其中 10 个测点谱和度差,未列入表 1 中,其余 14 个测点中,8 个测点具有较为一致的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄(211~203 Ma)(图 3、表 1),加权平均年龄为 208.0±7.0 Ma(MSWD=0.68, n=8),代表辉绿岩的侵入年龄。剩余 6 个测点的斜锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄可分为两组:一组年龄为奥陶纪(470~461 Ma,测点 20 和 24);另一组年龄为前寒武纪(1 791~1 331 Ma,测点 4、5、12、22),这组斜锆石为浑圆状,可能是从围岩中捕获的碎屑斜锆石。

4.2 全岩元素组成

下仓界基性岩主、微量元素含量见表 2。本次所测样品烧失量偏高(4.01%~17.20%),主量元素分析均使用扣除烧失量后归一化值。基性岩样品在 Zr/TiO₂-Nb/Y 抗蚀变图解中均投在亚碱性玄武岩区域内(图 4a, Winchester and Floyd, 1977),与野外

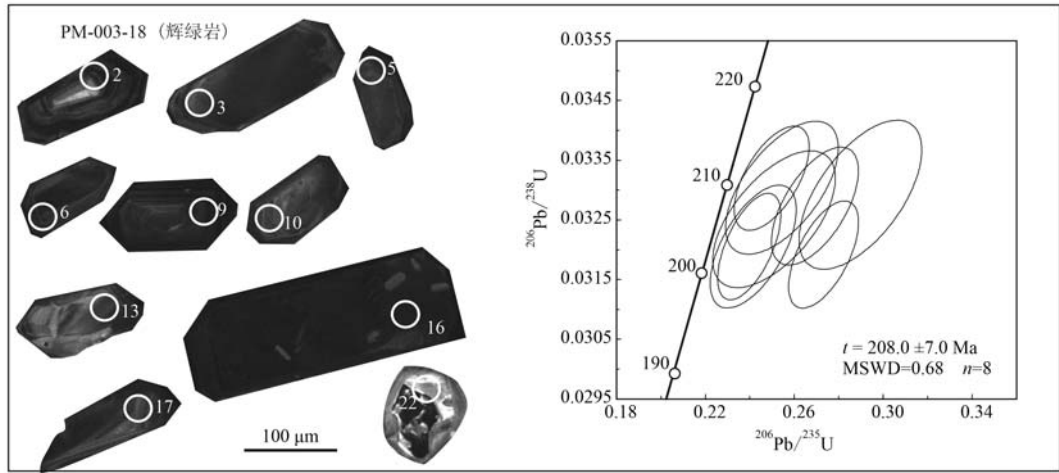


图 3 下仓界地区辉绿岩中代表性斜锆石阴极发光图像与 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative baddeleyite grains and baddeleyite U-Pb concordia of the diabase in the Xiachangjie area

表 1 下仓界地区辉绿岩中斜锆石 LA-ICM-MS U-Pb 年龄

Table 1 LA-ICM-MS baddeleyite U-Pb ages of diabase in the Xiachangjie area

测点	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma	
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
2	31.03	299	813	0.37	0.054 12	0.002 34	0.249 85	0.011 12	0.033 20	0.000 58	211	
3	19.78	269	514	0.52	0.054 52	0.002 75	0.241 52	0.012 78	0.032 05	0.000 68	203	
4	59.49	54.4	411	0.13	0.074 78	0.002 31	1.410 43	0.047 02	0.135 37	0.002 49	818	
5	60.03	129	165	0.79	0.116 18	0.003 24	4.669 05	0.143 56	0.287 34	0.005 05	1 628	
9	46.01	611	1 168	0.52	0.058 88	0.002 77	0.269 31	0.012 91	0.032 73	0.000 65	208	
10	11.77	155	295	0.53	0.064 13	0.004 17	0.289 75	0.018 21	0.032 92	0.000 82	209	
12	168.8	187	446	0.42	0.113 57	0.002 87	5.113 16	0.131 75	0.320 23	0.004 83	1 791	
13	18.63	403	479	0.84	0.055 72	0.004 01	0.250 91	0.018 20	0.032 51	0.000 76	206	
15	39.68	413	1 097	0.38	0.061 11	0.002 44	0.273 17	0.010 37	0.031 92	0.000 59	203	
16	51.22	597	1 389	0.43	0.053 10	0.002 14	0.239 74	0.009 36	0.032 05	0.000 59	203	
17	12.85	210	321	0.66	0.054 85	0.003 65	0.254 50	0.016 72	0.033 04	0.000 74	210	
20	12.13	101	130	0.78	0.062 20	0.003 59	0.648 40	0.036 93	0.074 12	0.001 36	461	
22	29.09	44.2	155	0.28	0.094 49	0.003 58	3.141 50	0.185 34	0.229 29	0.009 35	1 331	
24	21.15	200	223	0.90	0.062 16	0.003 00	0.659 20	0.031 44	0.075 68	0.001 21	470	

及薄片镜下鉴定结果基本一致,在 Zr-Y 图解中均投在钙碱性玄武岩系列区域(图 4b, Ross and Bédard, 2009)。

玄武岩样品 SiO_2 含量为 41.24%~51.52%, MgO 含量为 2.14%~4.46%, TFeO 含量为 8.17%~14.11%, TiO_2 含量较高为 1.51%~2.22%, $\text{Mg}^\#$ 值为 27.54~44.98, 低于原生岩浆的 $\text{Mg}^\#$ (68~75, Wilson, 1989), 烧失量高为 13.30%~17.20%, 可能是因为岩石发育杏仁构造且发生了绿泥石化及部分长石被碳酸盐交代所致。

辉绿岩样品 SiO_2 含量为 48.96%~49.55%,

MgO 含量为 4.21%~4.26%, TFeO 含量为 9.92%~10.01%, TiO_2 含量为 1.70%, $\text{Mg}^\#$ 值为 44.51~44.71, 烧失量为 4.01%~4.72%。

玄武岩和辉绿岩具有相似的稀土元素配分曲线, 均呈明显的右倾配分模式(图 4c), 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损。玄武岩稀土元素总量为 124.0×10^{-6} ~ 182.0×10^{-6} , 辉绿岩稀土元素总量为 135.6×10^{-6} ~ 137.1×10^{-6} , 均介于洋岛玄武岩 (198.96×10^{-6}) 和富集型洋中脊玄武岩 (49.1×10^{-6}) 之间 (McDonough and Sun, 1995)。玄武岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 3.98~5.17, 有弱的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} =$

表 2 下仓界地区基性岩的主量 ($w_B/\%$) 和微量 ($w_B/10^{-6}$) 元素组成Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of basic rocks from the Xiacangjie area

样号	玄武岩				辉绿岩	
	PM003-17-YH1	PM003-17-YH2	PM003-23-YH1	PM003-23-YH2	PM003-18-YH1	PM003-18-YH2
SiO ₂	50.56	51.52	43.79	41.24	49.55	48.96
TiO ₂	2.01	1.82	1.51	2.22	1.70	1.70
Al ₂ O ₃	14.64	13.42	15.31	13.94	17.23	17.12
MnO	0.20	0.18	0.17	0.17	0.15	0.16
MgO	2.14	2.73	4.20	4.46	4.26	4.21
CaO	4.68	5.98	6.64	6.87	8.15	8.56
Na ₂ O	0.03	0.06	0.15	0.07	2.86	2.74
K ₂ O	0.80	0.75	1.16	1.15	1.05	1.04
P ₂ O ₅	0.28	0.27	0.23	0.33	0.26	0.23
TFeO	10.13	8.17	11.12	14.11	10.01	9.92
Mg [#]	27.54	37.53	44.98	40.69	44.51	44.71
LOI	13.30	14.10	16.80	17.20	4.01	4.72
Sr	124	116	119	120	413	405
Rb	26.9	22.5	38.6	55.6	44.3	44.2
Ba	175	153	140	231	268	243
Nb	13.3	13.0	21.5	14.2	11.9	12.1
Ce	51.0	48.4	56.9	37.8	40.0	39.4
Zr	214	212	244	168	174	177
Hf	5.15	4.91	6.43	4.26	3.98	4.23
Sm	6.88	6.46	7.21	4.90	5.17	5.20
Cr	73.0	59.3	26.4	53.0	34.9	40.1
U	2.69	2.59	1.31	1.53	0.95	0.94
Th	3.86	4.39	6.10	4.47	4.08	3.91
Ni	26.2	24.1	16.5	25.8	23.8	16.5
Co	36.3	37.7	36.8	49.4	36.8	33.1
V	104	94.6	88.9	115	77.8	87.4
Ta	1.10	0.98	1.60	2.01	0.89	0.82
La	25.6	25.4	24.6	16.0	19.6	19.2
Ce	51.0	48.4	56.9	37.8	40.0	39.4
Pr	7.13	6.92	6.99	4.76	5.47	5.42
Nd	29.8	28.5	29.0	18.8	22.5	22.8
Eu	1.81	1.85	1.94	1.41	1.60	1.57
Gd	6.28	6.06	7.22	5.12	4.76	4.95
Tb	1.14	1.13	1.18	0.84	0.90	0.94
Dy	6.49	6.64	7.01	5.03	5.39	5.61
Ho	1.32	1.34	1.43	1.05	1.10	1.15
Er	3.61	3.68	4.02	2.85	3.06	3.29
Tm	0.56	0.56	0.60	0.44	0.48	0.51
Yb	3.59	3.52	4.00	2.88	3.03	3.26
Lu	0.47	0.45	0.56	0.42	0.40	0.43
Y	34.0	35.6	36.5	26.6	27.3	28.6
ΣREE	172.8	170.1	182.0	124.0	135.6	137.1
(La/Yb) _N	5.11	5.17	4.41	3.98	4.62	4.22
δEu	0.84	0.90	0.82	0.86	0.99	0.94

0.82~0.90)。辉绿岩 (La/Yb)_N 值为 4.22~4.62, 岩具有相似的原始地幔标准化微量元素配分曲线 (图 4d), Nb、Ta 和 Ti 元素显示弱亏损。无明显 Eu 异常 (δEu=0.94~0.99)。玄武岩和辉绿

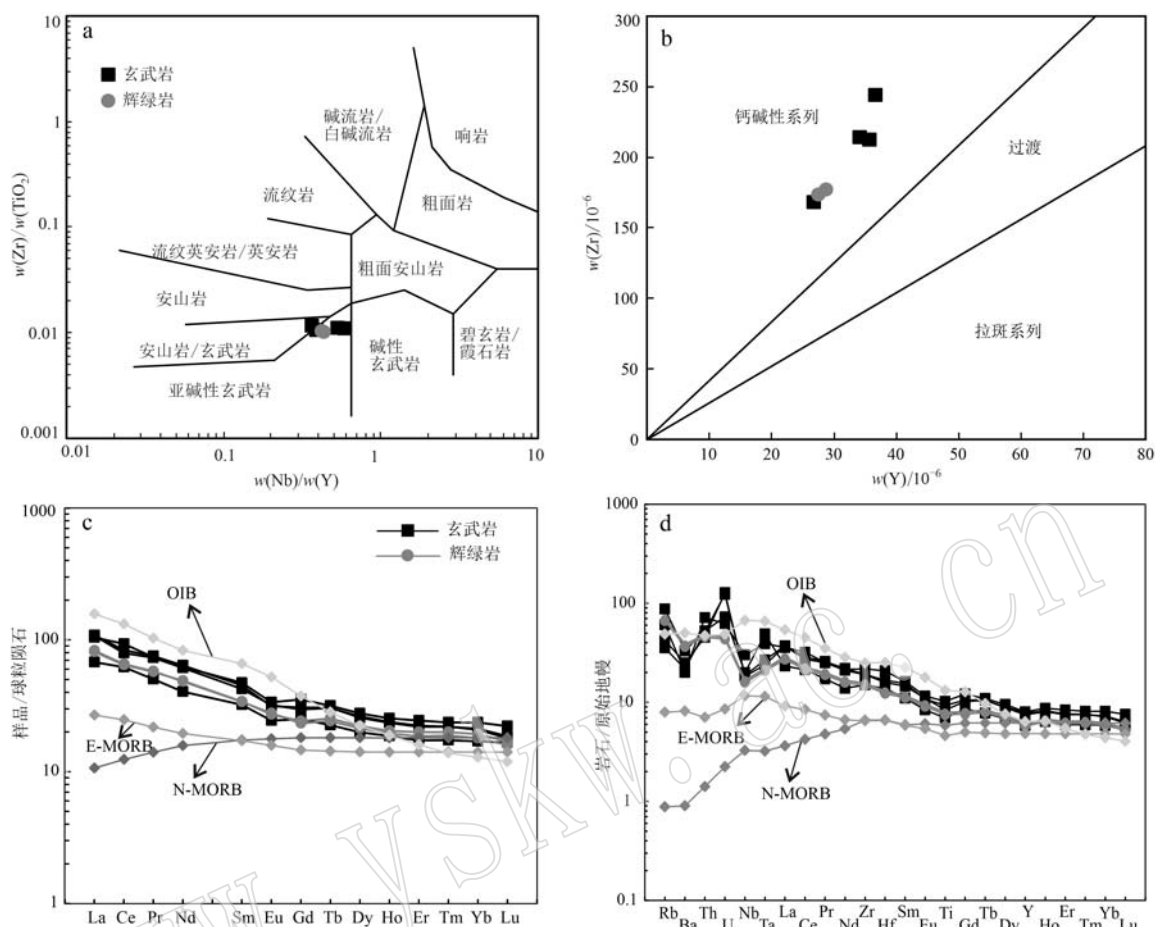


图4 下仓界基性岩地球化学图解

Fig. 4 Geochemical diagrams of basic rocks from the Xiancangjie area

a—Zr/TiO₂-Nb/Y 图解 (Winchester and Floyd, 1977); b—Zr-Y 图解 (Ross and Bédard, 2009); c—球粒陨石标准化稀土元素配分模式图;
d—原始地幔标准化微量元素蛛网图 (标准化值、OIB、E-MORB 和 N-MORB 据 McDonough and Sun, 1995)
a—Zr/TiO₂-Nb/Y diagram (Winchester and Floyd, 1977); b—Zr-Y diagram (Ross and Bédard, 2009); c—chondrite-normalized REE patterns;
d—primitive mantle-normalized trace element patterns (normalization values OIB, E-MORB and N-MORB after McDonough and Sun, 1995)

5 讨论

5.1 岩浆源区

下仓界基性岩的岩相学特征表明,岩石具有较强的碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化等蚀变,全岩的烧失量较高(4.01%~17.20%),也表明岩石的蚀变强烈。蚀变作用可能导致基性岩的 Na₂O、K₂O、MgO 等主量元素和 Rb、Ba、Sr、U 等部分微量元素浓度发生变化。为了降低蚀变作用对分析结果的影响,本文用基性岩化学成分中不活泼元素、相容元素等特征进行分析。

基性岩浆在储存和上升过程中易受陆壳物质混

染,下仓界基性岩样品中发现捕获的古老斜锆石指示地壳物质混染的存在。如果经历了较大程度的地壳混染,Nb、Ti、Ta 元素会显著亏损,但本文样品微量元素配分曲线具有 Nb、Ta 和 Ti 元素弱亏损的特征,因此可以认为基性岩浆可能经历了轻微的地壳物质混染,对微量元素示踪岩浆源区的影响不大。

源于软流圈地幔的基性岩 La/Nb<1.5 且 La/Ta<22,而源于岩石圈地幔的基性岩与之相反(Thompson and Morrison, 1988; Fitton *et al.*, 1988)。源于软流圈地幔的基性岩 TiO₂ 含量相对高(OIB 的 TiO₂ 含量平均为 2.86%),源于富集地幔的基性岩 TiO₂ 含量则相对较低(李印等, 2010; 陈进全等, 2012)。下仓界基性岩样品的 La/Nb 值为 1.13~1.95, La/Ta

值为 7.96~25.79, TiO_2 含量为 1.51%~2.22%, Zr/Nb 值为 11.35~16.33, 均小于 18, 反映其源岩由岩石圈地幔向亏损地幔过渡的特征(李昌年, 1997), 在 $\text{Zr}/\text{Nb}-\text{Zr}/\text{Y}-\text{Y}/\text{Nb}$ 图上, 样品均落入过渡地幔范围(图 5a)。以上地球化学元素特征表明下仓界基性岩不可能直接来源于软流圈地幔, 而是可能起源于岩石圈地幔与软流圈地幔的混合源区(Asimow *et al.*, 2001)。

轻重稀土元素的分馏、含量及比值(如 Sm/Yb 、 Dy/Yb 和 Tb/Yb)可以用来估算部分熔融程度并限定幔源岩浆的起源(Aldanmaz *et al.*, 2000, Helle-

brand *et al.*, 2002)。下仓界基性岩样品的 Dy/Yb 值(1.72~1.89)较低, 说明岩浆起源于地幔较浅部尖晶石橄榄岩含量较多的部位。在用来定量估算地幔源的性质和部分熔融程度的 $(\text{Yb}/\text{Sm})_p - (\text{Tb}/\text{Yb})_p$ 图中, 下仓界基性岩更靠近尖晶石橄榄岩的熔解路径, 根据模型计算的假设, 下仓界基性岩岩浆源区中尖晶石橄榄岩远多于石榴子石橄榄岩(0~25%), 部分熔融程度约为 5%(图 5b)。综上所述, 下仓界基性岩的岩浆源区为软流圈物质诱发岩石圈地幔尖晶石-石榴子石橄榄岩过渡相(石榴子石约占为 0~25%)发生约 5%的部分熔融。

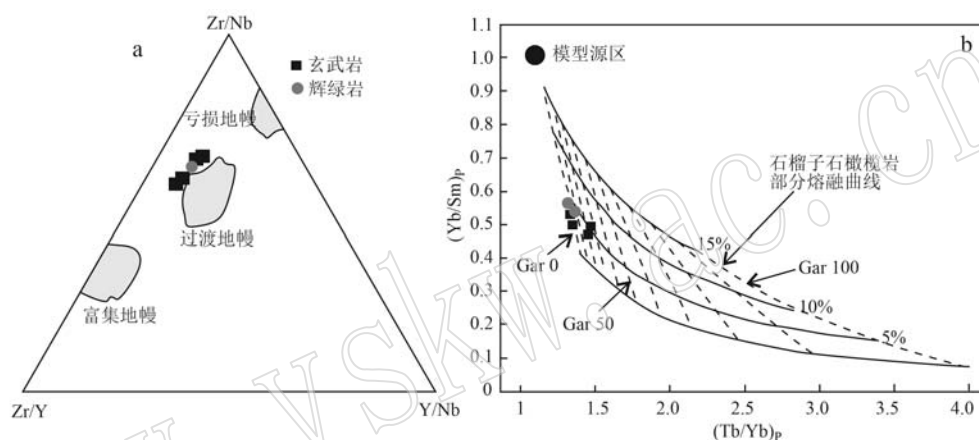


图 5 下仓界基性岩的 $\text{Zr}/\text{Nb}-\text{Zr}/\text{Y}-\text{Y}/\text{Nb}$ (a, 底图据 Fodor 和 Vetter, 1984) 及 $(\text{Yb}/\text{Sm})_p - (\text{Tb}/\text{Yb})_p$ 图解(b, 底图据 Zhang *et al.*, 2006b)

Fig. 5 $\text{Zr}/\text{Nb}-\text{Zr}/\text{Y}-\text{Y}/\text{Nb}$ (a, after Fodor and Vetter, 1984) and $(\text{Yb}/\text{Sm})_p - (\text{Tb}/\text{Yb})_p$ (b, after Zhang *et al.*, 2006b) diagrams for the basic rocks from the Xiaocangjie area

5.2 构造背景

松潘-甘孜地体除其东缘出露少量与扬子地块相似的新元古代基底外(Zhou *et al.*, 2002, 2008; Yan *et al.*, 2003), 其余地区均被巨厚的三叠纪复理石沉积物覆盖, 此前未见有基底岩石的报告, 因此其基底性质一直是学者们争议的热点问题之一。早期学者认为松潘-甘孜基底为洋壳, 是古特提斯洋壳的残留(Zhou and Graham, 1993, 1996; Nie *et al.*, 1994; Yin and Harrison, 2000)。近年来, 越来越多的学者认为松潘-甘孜地体的三叠纪复理石沉积物之下存在元古界基底, 并与扬子地块存在亲缘关系(Zhang *et al.*, 2006a, 2007; Xiao *et al.*, 2007; Cai *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2010; De Sigoyer *et al.*, 2014)。本文下仓界辉绿岩的斜锆石 U-Pb 测年结果显示, 除谐和线上晚三叠世的年龄外, 还存在奥陶纪和元古宙年龄, 具元古宙年龄的斜锆石为浑圆状, 可

能是岩浆在侵位过程中捕获围岩中的斜锆石。元古宙碎屑斜锆石的存在, 指示松潘-甘孜地体具有元古宙陆壳基底。

Nb、Ta、Th、Yb、V、Zr、Y 等微量元素和 TiO_2 在蚀变及低级变质过程中较为稳定(张贵山等, 2008), 因此, 这些微量元素可以用于蚀变及低级变质作用样品的构造环境判别(Pearce, 2008; Li *et al.*, 2015)。下仓界基性岩为钙碱性系列, 在 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ 图上, 落入或接近于大陆弧玄武岩区域(图 6a)。如前文所述, 下仓界基性岩浆经历了轻微的地壳物质混染, 夏林圻等(2007)认为地壳混染会导致 Ti、Nb、Ta 等元素的含量降低, 在利用这些元素判断玄武岩形成的构造环境时, 投点位置会发生迁移, 而 Zr 和 Y 元素不会因为地壳混染而改变含量, 因此, $\text{Zr}/\text{Y}-\text{Zr}$ 判别图不会受到影响。在 $\text{Zr}/\text{Y}-\text{Zr}$ 图上, 下仓界基性岩样品均落入板内玄武岩范围内(图 6b)。

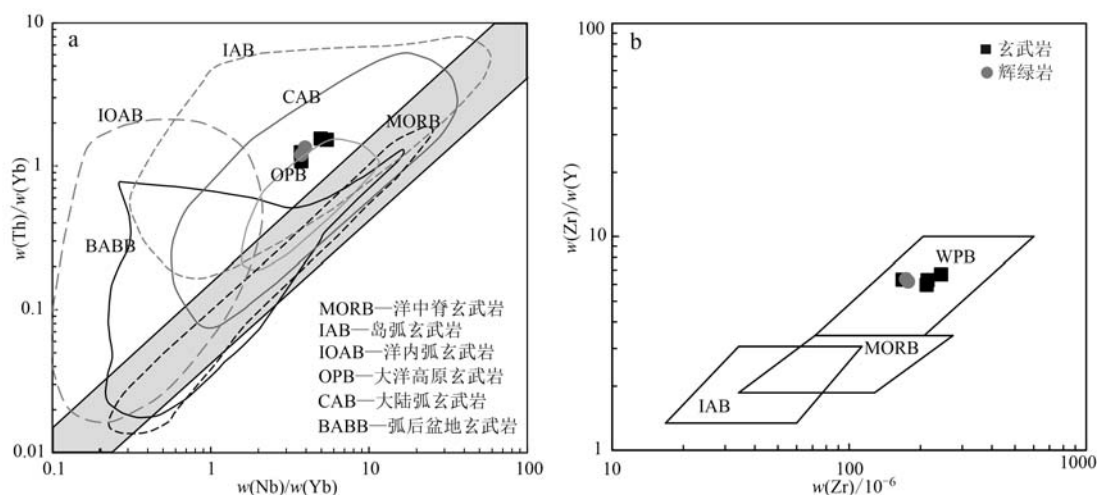


图 6 下仓界玄武岩的 Th/Yb-Nb/Yb(a, Pearce, 2008; Li *et al.*, 2015) 和 Zr/Y-Zr(b, Pearce and Norry, 1979) 构造环境判别图

Fig. 6 Th/Yb-Nb/Yb(a, Pearce, 2008; Li *et al.*, 2015) and Zr/Y-Zr(b, Pearce and Norry, 1979) construct environment discrimination diagrams for the basic rocks from the Xiacangjie area

下仓界基性岩形成于晚三叠世(208 Ma), 区域上已有报道形成于碰撞后伸展环境的桑日麻 A 型花岗岩(208 Ma, Cai *et al.*, 2010) 和年宝玉则 A 型花岗岩(211 Ma, Zhang *et al.*, 2007) 形成于同时期, 因此, 本文认为晚三叠世(<211 Ma) 松潘-甘孜地体的构造环境为碰撞后板内伸展环境。

6 结论

(1) 松潘-甘孜地体下仓界地区新发现由具杏仁构造的玄武岩和辉绿岩组成的钙碱性系列基性岩, 辉绿岩中斜锆石 U-Pb 年龄为 208 ± 1.0 Ma, 表明该岩石形成于晚三叠世。

(2) 下仓界基性岩岩浆可能源于软流圈物质诱发岩石圈地幔尖晶石-石榴子石橄榄岩过渡相(石榴子石约占 0~25%) 发生约 5% 的部分熔融。

(3) 结合区域地质资料, 松潘-甘孜地体具有陆壳基底, 晚三叠世(<211 Ma) 松潘-甘孜地体的构造环境为碰撞后板内伸展环境。

References

Aldanmaz E, Pearce J A, Thirlwall M F, *et al.* 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102

(1~2): 67~95.

Asimow P D, Hirschmann M M, Stolper E M. 2001. Calculation of peridotite partial melting from thermodynamic models of minerals and melts, IV. Adiabatic decompression and the composition and mean properties of mid-ocean ridge basalts [J]. *J. Petrol.*, 42: 963~998.

Cai H M, Zhang H F, Xu W C, *et al.* 2010. Petrogenesis of indosinian volcanic rocks in Songpan-Garze fold belt of the northeastern Tibetan Plateau: New evidence for lithospheric delamination [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 53 (9): 1316~1328.

Chen Jinquan, Xu Zhaowen, Bai Kangchen, *et al.* 2012. The Petrochemistry of the diabase from the Hardat Tolgoi Pb-Zn minefield, Inner Mongolia [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36 (1): 118~126 (in Chinese with English abstract).

De Sigoyer J, Vanderhaeghe O, Duchêne S, *et al.* 2014. Generation and emplacement of Triassic granitoids within the Songpan-Ganze accretionary-orogenic wedge in a context of slab retreat accommodated by tear faulting, Eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 192~216.

Fitton J G, James D, Kempton P D, *et al.* 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States [J]. *J. Petrol.*, 8: 331~349.

Fordor R V and Vetter S K. 1984. Rift zone magmatism petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88: 307~321.

- Hellebrand E, Snow J E, Hoppe P, *et al.* 2002. Garnet-field melting and late-stage refertilization in 'residual' abyssal peridotites from the Central Indian Ridge[J]. *J. Petrol.*, 43(12): 2 305~2 338.
- Hu Jianmin, Meng Qingren, Shi Yurao, *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 867~880 (in Chinese with English abstract).
- Li Changnian. 1997. *Petrology of Trace Elements in Igneous Rocks*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Li C S, Arndt N T, Tang Q Y, *et al.* 2015. Trace element indiscriminate diagrams[J]. *Lithos*, 232: 76~83.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, *et al.* 2015. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and application [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2 400~2 418 (in Chinese with English abstract).
- Li Yin, Han Feng, Ling Mingxing, *et al.* 2010. Geochronology, geochemical characteristics and geodynamic significance of the Jongshan and Tushan granites in the Bengbu uplift[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(1): 114~124 (in Chinese with English abstract).
- Liu S A, Li S G, He Y S, *et al.* 2010. Geochemical contrasts between Early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China: Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24): 7 160~7 178.
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[M]. California: Berkeley Geochronology Center.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- Nie S Y, Yin A, Rowley D B, *et al.* 1994. Exhumation of the Dabie Shan ultra-high-pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysch sequence, central China [J]. *Geology*, 22(11): 999~1 002.
- Pan G T, Xu Q and Jiang X S. 2001. Songpan-Garze belt: Fore-arc accretion or back-arc collapsing? [C]//Briegel U and Xiao W J. *Paradoxes in Geology*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 55~64.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 100(1~4): 14~48.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69: 33~47.
- Pullen A P, Kapp G E, Gehrels J D, *et al.* 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Geology*, 36: 5 351~5 354.
- Roger F, Jolivet M and Malavieille J. 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garze (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to present: A synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 254~269.
- Ross P S and Bédard J H. 2009. Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46(11): 823~839.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Thompson R N and Morrison M A. 1988. Asthenospheric and lower-lithospheric mantle contributions to continental extensional magmatism: An example from the British Tertiary province [J]. *Chemical Geology*, 68: 1~15.
- Van Acherbergh E, Ryan C G, Jackson S E, *et al.* 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS [C]//Sylvester P. *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences: Principles and Applications*. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 239~243.
- 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.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1~466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20(4): 325~343.
- Wu C, Zuza A V, Chen X H, *et al.* 2019. Tectonics of the eastern Kunlun Range: Cenozoic reactivation of a Paleozoic-Early Mesozoic Orogen [J]. *Tectonics*, 38: 1 609~1 650.
- 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).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77~89 (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. 1992. The Orogenic Process of Songpan Belt, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 190 (in Chinese).
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, *et al.* 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (Yangtze Block) [J]. *Tectonophysics*, 361: 239~254.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan orogeny [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211~280.
- 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, Zhang L, Harris N, *et al.* 2006a. 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 H F, Parrish R, Zhang L, *et al.* 2007. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Implication for lithospheric delamination [J]. *Lithos*, 97 (3~4): 323~335.
- Zhang Guishan, Wen Hanjie, Hu Ruizhong, *et al.* 2008. Rare earth element geochemistry characteristic of Late Mesozoic mafic dikes in western Fujian Province [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 26 (4): 503~509 (in Chinese with English abstract).
- 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: 328~348.
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, *et al.* 2006b. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China [J]. *J. Petrol.*, 47: 1997~2019.
- Zhang Xueting, Yang Shengde, Yang Zhanjun. 2007. The Regional Geology of Qinghai Province—A Guide to the Geological Map of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 7~162 (in Chinese with English abstract).
- Zhou D and Graham S A. 1993. Songpan-Ganzi Triassic flysch complex as a remnant ocean basin along diachronous Qinling collisional orogen, central China [J]. *Geological Society of America-Abstracts with Programs*, 25 (6): 118.
- Zhou D and Graham S A. 1996. Songpan-Ganzi Triassic flysch complex of the West Qinling Shan as a remnant ocean basin [C]//Yin A and Harrison M. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 281~299.
- Zhou M F, Yan D, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196 (1~2): 51~67.
- Zhou M F, Yan D P, Vasconcelos P M, *et al.* 2008. Structural and geochronological constraints on the tectono-thermal evolution of the Danba domal terrane, eastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 414~427.

附中文参考文献

- 陈进全, 徐兆文, 白元辰, 等. 2012. 内蒙古哈达特陶勒盖铅锌矿区辉绿岩岩石化学研究 [J]. *大地构造与成矿学*, 36 (1): 118~126.
- 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 等. 2005. 松潘-甘孜构造带内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 21 (3): 867~880.
- 李昌年. 1997. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用 [J]. *地质学报*, 89 (12): 2400~2418.
- 李 印, 韩 峰, 凌明星, 等. 2010. 蚌埠荆山和涂山岩体的年代学、地球化学特征及其动力学意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 34 (1): 114~124.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表 [J]. *岩石矿物学杂志*, 28 (5): 495~500.
- 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.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [J]. *岩石矿物学杂志*, 26 (1): 77~89.
- 许志琴, 侯立伟, 王宗秀. 1992. 中国松潘带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社, 190.
- 张贵山, 温汉捷, 胡瑞忠, 等. 2008. 闽西晚中生代基性脉岩稀土元素地球化学特征 [J]. *中国稀土学报*, 26 (4): 503~509.
- 张雪亭, 杨生德, 杨站军. 2010. 青海省区域地质概论——1:100 万青海省地质图说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 7~162.