

拉萨地块西北部早白垩世岩浆岩地球化学特征及其对高原南部早期地壳生长的指示

黄思华^{1,2}, 陈建林^{1*}, 曾云川^{1,2}, 谈荣钰^{1,2},
黄童童^{1,2}, 刘希军³

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 桂林理工大学 地球科学学院 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 青藏高原巨厚的地壳被认为是印度与欧亚大陆碰撞挤压和幔源镁铁质物质底侵共同作用的结果。青藏高原南部不仅广泛发育新生代侵入岩, 同时也发育大量的中生代花岗质岩浆岩, 特别是早白垩世时期岩浆作用最为发育。本次研究对拉萨地块西北部日松地区早白垩世花岗闪长岩及其细粒闪长质包体进行了岩石学、地球化学和年代学研究, 结果表明, 花岗闪长岩及其细粒闪长质包体具有相同的形成年龄(约 106–105 Ma), 它们可能为壳幔岩浆混合作用的产物。在上述研究的基础上, 结合前人对拉萨地块西北部大量白垩纪中酸性岩浆岩的研究结果, 运用简单的全岩微量元素比值(如(La/Yb)_N)推算地壳厚度, 显示拉萨地块西北部从白垩纪早期到晚期地壳厚度有不断增加的趋势, 并且指示在早白垩世很可能已经发生了明显增厚。结合区域构造演化特征, 初步认为拉萨地块西北部在早白垩世时期地壳增厚方式以岩浆底侵为主, 暗示青藏高原南部可能在早白垩世地壳已经开始生长, 而晚白垩世地壳加厚则很可能是拉萨与羌塘地块陆-陆碰撞构造挤压的结果。

关键词: 早白垩世; 岩浆作用; 地球化学; 地壳厚度; 拉萨地块

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2020)01-0021-15
DOI: 10.19700/j.0379-1726.2020.01.002

Geochemical characteristics of Early Cretaceous magmatic rocks in the northwestern part of the Lhasa Block and indications of early crustal growth of the southern plateau

HUANG Si-hua^{1,2}, CHEN Jian-lin^{1*}, ZENG Yun-chuan^{1,2}, TAN Rong-yu^{1,2},
HUANG Tong-tong^{1,2} and LIU Xi-jun³

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: It is generally believed that the double-thick crust of Tibet resulted from collision of the Indian and Eurasian continents and underplating of mafic magma from the mantle. Mesozoic and Cenozoic igneous rocks (especially from the early Cretaceous), are widely distributed in the southern part of the Tibetan Plateau. The geochemical characteristics of the Early Cretaceous (106–105 Ma) Risum granodiorites and related diorite enclaves, indicate that they resulted from mixing of the crust-mantle magma in the northwestern (NW) Lhasa terrane. The above results, combined with those from previous research on the Cretaceous intermediate-acid magmatic rocks in the NW Lhasa terrane, indicate that the crustal thickness in the studied region increased from the early to late Cretaceous (based on the whole-rock trace element ratio, for example, of (La/Yb)_N). In particular,

收稿日期(Received): 2018-12-09; 改回日期(Revised): 2019-01-31; 接受日期(Accepted): 2019-02-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600305); 国家自然科学基金(41573024, 41873037); 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室开放基金(17-140-27-K01)

作者简介: 黄思华(1993–), 男, 硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: 805298687@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Jian-lin, E-mail: lzdxcchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290753

this shows that there was an obviously thickened crust in the study area during the early Cretaceous. Combined with the characteristics of regional tectonic evolution, the thickened crust of the NW Lhasa terrane was related to underplating by mafic magmas in the early Cretaceous and then collision of the Qiangtang and Lhasa terranes in the late Cretaceous.

Key words: Early Cretaceous; magmatism; geochemistry; crustal thickness; Lhasa block

0 引言

青藏高原南部巨厚的地壳(现今厚度 80~60 km)形成过程中伴随大量的中-新生代花岗质岩浆侵入,其中以早白垩世时期花岗质岩浆最为发育。青藏高原巨厚地壳的形成机制一直是国内外地学研究重点关注的科学问题,已有的研究表明,除了新生代印度与欧亚大陆碰撞导致地壳构造挤压加厚以外,幔源镁铁质熔体的侵入对于青藏高原南部地壳增厚也有重要贡献^[1-2];同时也显示青藏高原南部地壳抬升在晚白垩世时期就已经开始^[1-4]。大陆地壳生长是指地幔物质通过各种岩浆作用进入地壳,大量的幔源岩浆注入或底侵至下地壳底部形成新生地壳,导致地壳体积增大和厚度增加。幔源岩浆上升和侵位是大陆地壳生长的基本过程^[5]。花岗质岩石是大陆地壳的重要组成部分,大陆地壳的形成演化与花岗质岩浆作用存在密切的联系,花岗质岩浆主要通过两种方式指示大陆地壳发生增生:(1)幔源镁铁质岩浆底侵导致大陆地壳增生并使其发生重熔形成花岗岩类;(2)幔源与壳源熔体发生相互作用形成花岗岩类^[6-7]。那么在早白垩世时期广泛发育的花岗岩类是否指示该时期也存在地壳生长?以及该时期大量的岩浆侵入作用是否导致地壳厚度增加?目前尚不清楚。青藏高原南部广泛发育的早白垩世岩浆作用(120~110 Ma)^[8](图 1a),不仅为人们研究青藏高原南部早期的构造演化提供了良好的载体,也为探讨该区域早期地壳生长和厚度提供了基础。本次研究将在拉萨地块西部日松地区早白垩世花岗闪长岩及其闪长质包体年代学、岩石学和地球化学特征研究的基础上,结合前人的研究结果,拟探讨拉萨地块西北部在早白垩世时期镁铁质岩浆的底侵作用是否对研究区地壳增厚有所贡献。

1 地质背景

青藏高原是由早古生代以来源于冈瓦纳大陆的

几个微陆块先后拼贴在欧亚大陆南缘形成。以金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带为界,自北向南可分为松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块^[9,11-12](图 1b)。拉萨地块是指夹持于雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间的近 EW 向、中间宽两边窄的巨型构造-岩浆岩带^[13]。目前的研究认为,拉萨地块北部早白垩世岩浆作用很可能是新特提斯洋北向俯冲或班公湖-怒江洋南向俯冲的产物^[9,12,14-17]。同时,Zhu *et al.*^[9]根据拉萨地块基底属性的不同,将其分为南、中和北拉萨地块(图 1b)。

日土地区位于北拉萨地块西部,其北部为班公湖-怒江缝合带,南部为狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带,该区域中生代构造岩浆活动频繁,广泛发育中生代中酸性侵入岩,断裂和褶皱等构造活动强烈,地质构造演化复杂^[10,18-20]。研究区位于日土县日松乡以东约 10 km 处的花岗闪长岩体,如图 1(c)所示,岩体的围岩地层是形成于陆棚边缘海-浅海陆棚相的以复理石-类复理石碎屑岩为主的上侏罗统接奴群(J_{3j}),接奴群(J_{3j})由下部的多仁组(J_{3d})和上部的日松组(J_{3r})组成。其中多仁组(J_{3d})为一套条纹带状微细粒石英砂岩组合,发育平行层理和水平层理并整合接触于中下侏罗统拉贡塘组(J_{1-2l})之上;而日松组(J_{3r})总体为一套细碎屑岩夹透镜状灰岩组合,岩性以灰黑色砂岩、泥质粉砂岩及黑灰色板岩等为主。围岩地层被岩体侵入并发生角岩化,岩体与围岩接触界线明显,接触面不规则,侵入岩体与围岩接触部位有各种形态的岩脉或岩枝穿插于围岩中,由于受到岩体侵入作用的挤压力,围岩比较破碎。区域上多仁组(J_{3d})和日松组(J_{3r})被下白垩统多尼组(K_{1d})不整合覆盖^[10,19-21]。日松乡岩体以花岗闪长岩和石英闪长岩为主,并含有大量的闪长质包体。花岗闪长岩呈灰白色,细-中粒粒状结构,主要由斜长石(50%)、钾长石(10%)、石英(15%)、黑云母(15%)和角闪石(10%)组成(图 2a~2d);闪长质包体为灰黑色、细粒结构,手标本肉眼可见少量颗粒较大的斜长石斑晶(多数为 1~3 mm,最大达 5 mm),主要矿物组成

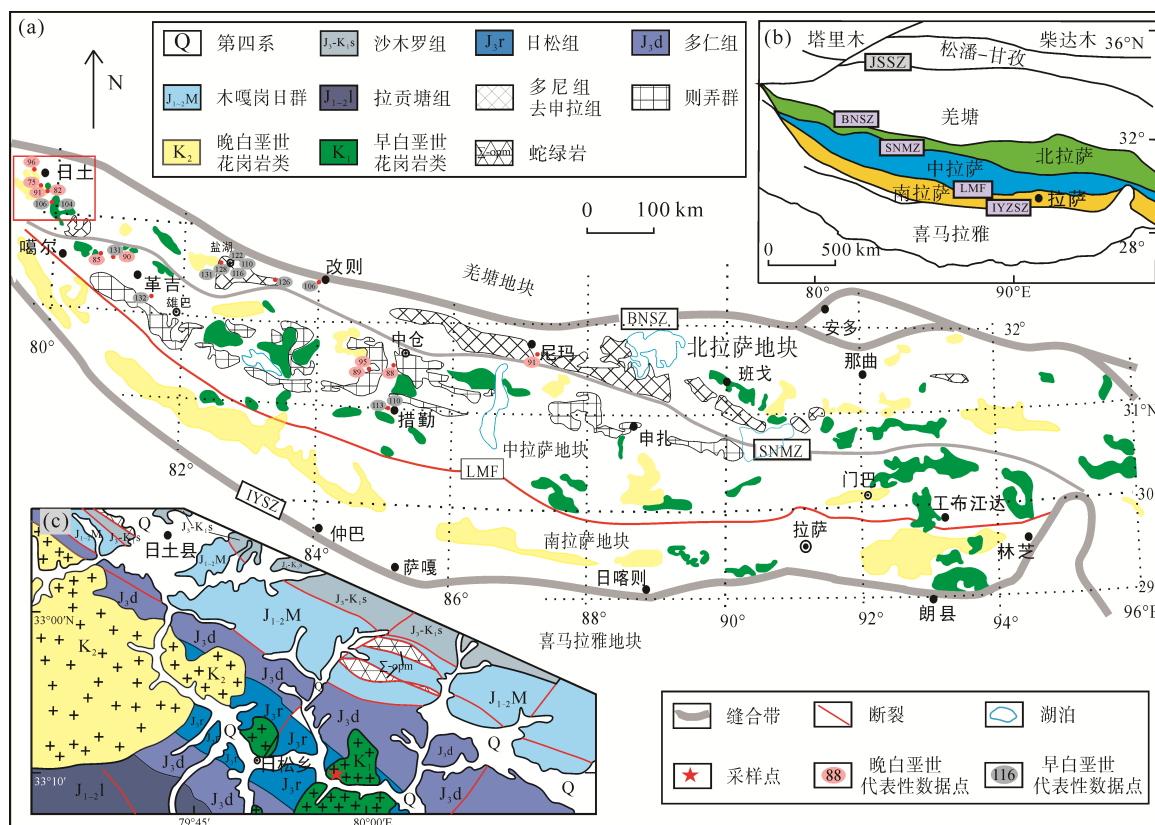


图 1 拉萨地块地质图

Fig. 1 Geological map of the Lhasa Block

(a) 拉萨地块白垩纪岩浆岩分布图(据文献[8]修改); (b) 青藏高原构造格局图(据文献[9]); (c) 日松地区地质简图(据文献[10]修改)。JSSZ—金沙江缝合带; BNSZ—班公-怒江缝合带; SNMZ—狮泉河-纳木错混杂带; LMF—洛巴堆-米拉山断层; IYSZ—印度河-雅鲁藏布江缝合带

(a) Simplified geological map showing the time-space distributions of the Cretaceous magmatic rocks in the Lhasa block (after reference [8]); (b) schematic geological map showing the tectonic framework of the Tibetan Plateau (after references [9]); (c) geological map of Risum (after references [10]). JSSZ—Jinsha suture zone; BNSZ—Bangong-Nujiang suture zone; SNMZ—Shiquan River-Nam Tso Mélange zone; LMF—Luobadui-Milashan Fault; IYSZ—Indus-Yarlung Tsangpo suture zone

与寄主花岗闪长岩一致,但其暗色矿物比例更高,主要由斜长石(45%)、钾长石(10%)、黑云母(20%)、角闪石(20%)和石英(5%)组成(图 2e~图 2h),野外观察可见闪长质包体在花岗闪长岩中分布明显。两者显微镜下均具有典型岩浆结构,如半自形粒状结构、斜长石斑晶可见环带结构(图 2a,图 2g)和矿物间交代结构发育(图 2c,图 2e,图 2h),并且均发育有针状磷灰石等副矿物(图 2b,图 2d,图 2e,图 2g)。

2 分析方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

锆石分选在河北廊坊诚信地质服务有限公司完成,将岩石样品粉碎至合适大小,经过淘洗、重力和电磁分选富集出锆石,再在双目镜下手工挑选出包裹体和裂隙较少的、透明度较高的锆石颗粒,然后把锆石粘在环氧树脂上进行抛光至暴露出锆石的中

心部位后制成样品靶,再拍摄锆石靶透射光和反射光图像以及阴极发光(CL)图像,阴极发光(CL)图像在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。通过仔细对比锆石的透射光、反射光和阴极发光照片,选择晶型完整、内部结构清晰且震荡环带发育、内部无裂隙和包裹体的长柱状锆石,在中国科学院广州地球化学研究所矿物与成矿学重点实验室通过激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)进行锆石 U-Pb 年龄测定,用激光在锆石表面干净、颜色和内部结构均一的部位打点测试,测试所用激光剥蚀系统为 RESolution M-50 的 193 nm ArF 准分子激光器,具体的分析流程和参数可参考 Li *et al.* [22]。

2.2 全岩主元素和微量元素地球化学

样品分析前处理方法是选择成分均一和没有发生明显蚀变的新鲜样品,去除风化面,在河北廊坊诚信地质服务有限公司将其进行无污染粉碎研磨至

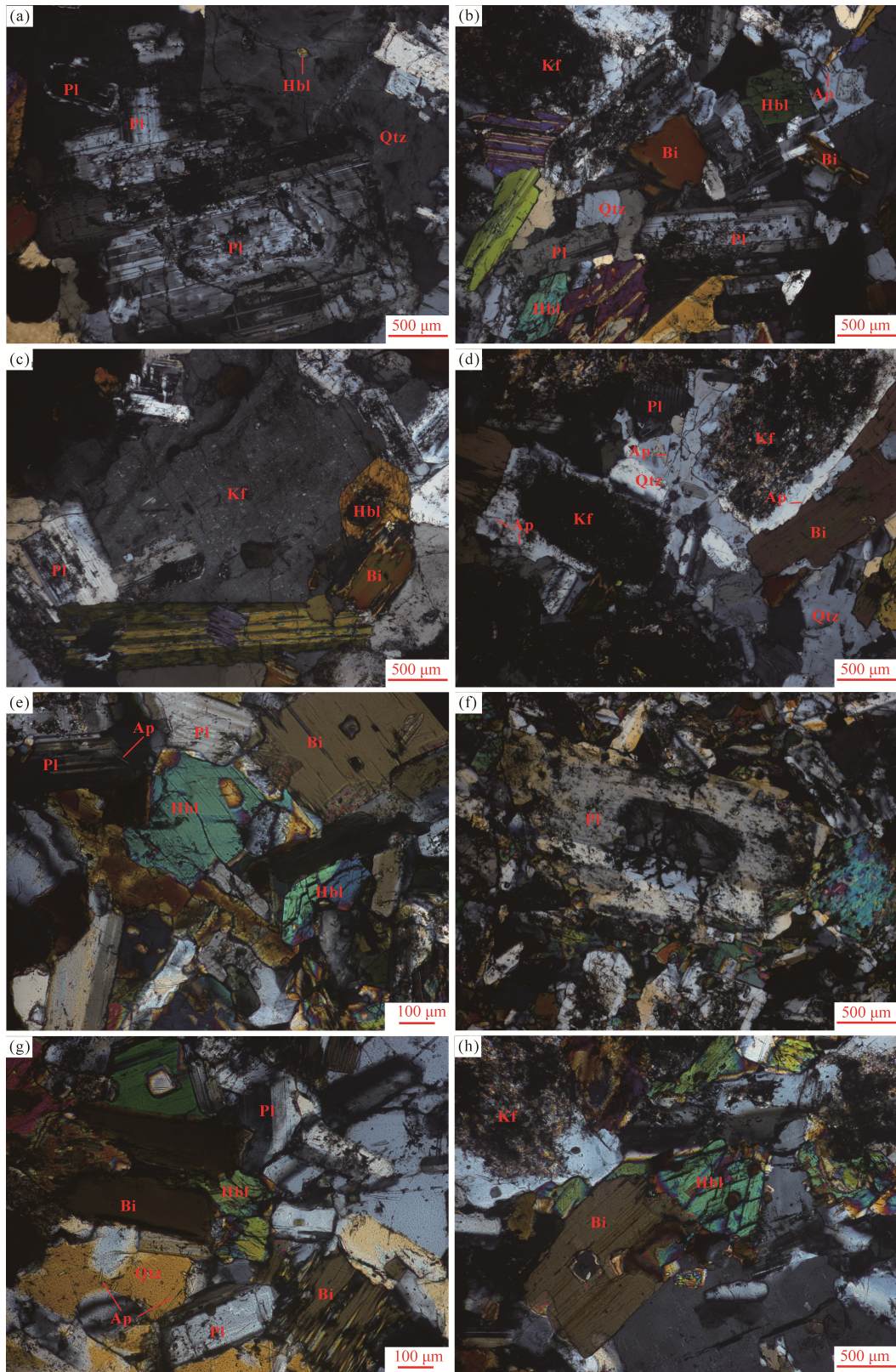


图2 日松早白垩世花岗闪长岩及其闪长质包体正交偏光镜下照片

Fig.2 Representative photographs in polarizing microscope of Early Cretaceous granodiorites and related dioritic enclaves in Risum (a)-(d)为花岗闪长岩, (e)-(h)为闪长质包体; (a)、(b)和(g)可见半自形粒状结构和斜长石环带结构; (c)、(e)和(h)为矿物间交代结构; (d)、(e)和(g)为针状磷灰石。Qtz—石英; Kf—钾长石; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Hbl—角闪石; Ap—磷灰石
(a)-(d) are granodiorites, (e)-(h) are dioritic enclaves; (a), (b) and (g) are subhedral granular texture and zoned texture of plagioclase; (c), (e) and (h) are metasomatic texture; (d), (e) and (g) are acicular apatite. Qtz—quartz, Kf—K-feldspar, Pl—plagioclase, Bi—biotite, Hbl—hornblende, Ap—apatite

200 目(约 74 μm)的粉末, 主元素测试在桂林理工大学广西壮族自治区隐伏金属矿产勘查重点实验室完成, 烧失量(LOI)通过粉末样品 1000 °C 恒温加热 1 h 前后的质量差获取, 然后再通过碱熔玻璃片法在 X 射线荧光光谱仪上测试, XRF 仪器型号为 ZSX Primus II 型, 分析精度优于 5%, 主元素详细分析流程见参考文献[23]; 微量和稀土元素测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成, 采用酸溶法在高温高压下消减后, 通过 Perkin- Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 分析精度为 5%~10%, 具体分析步骤可见参考文献[24-25]。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

日松花岗闪长岩的锆石颗粒大小约 100~200 μm, 长短轴比约 3 : 1~2 : 1, 均为自形粒状结构, 并在阴极发光(CL)图像上具有明显的振荡环带, 所分析的

锆石 Th、U 含量分别为 66~309 μg/g 和 148~603 μg/g, Th/U 比值介于 0.37~0.54 之间, 属于典型的岩浆锆石^[26]。分别对日松花岗闪长岩两个样品(17RS-5 和 17RS-6)中的锆石进行了 25 个测点的同位素测定, 17RS-5 锆石样品中 17 个测试点锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 105.8~103.4 Ma 之间, 其加权平均值为(104.6±0.7) Ma (MSWD=0.22, N=17); 17RS-6 锆石样品中 20 个测试点锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 107.0~105.2Ma 之间, 其加权平均值为(106.2±0.6) Ma (MSWD=0.12, N=20); 去除 ²⁰⁷Pb/²³⁵U 和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄明显不谐和的数据点以及 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄明显偏离加权平均值的数据点, 然后利用 Isoplot 4.15 程序进行了谐和曲线投图和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄计算及投图(如图 3), 样品 17RS-5 和 17RS-6 中锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄值(106.2~104.6 Ma)可以代表日松花岗闪长岩的结晶年龄, 日松花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 1。结合前人对研究区花岗闪长岩及其包体的研究结果^[20,27], 初步认为研究区的日松花岗闪长岩及其包体形成于 108~104 Ma 期间。

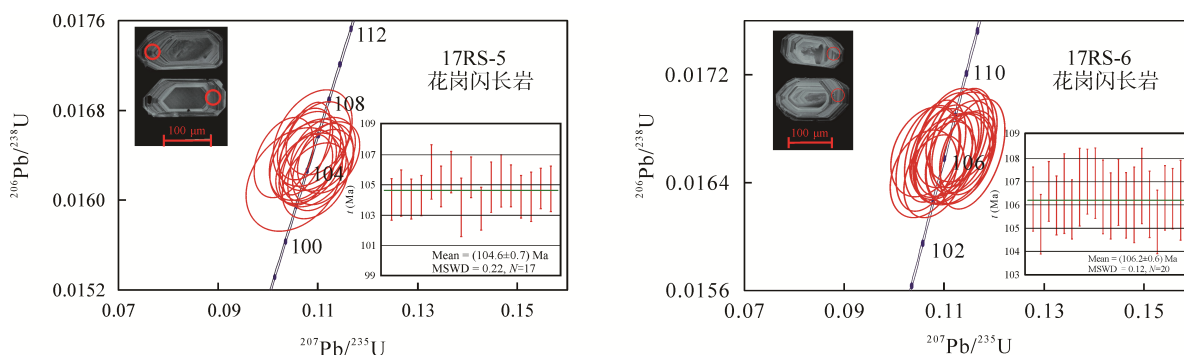


图 3 日松花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年谐和图及代表性 CL 图片

Fig.3 U-Pb concordia diagrams and representative cathodoluminescence images of analyzed zircon from Risum granodiorites

表 1 日松花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analysis data of zircons from the Risum granodiorites

测点	元素含量 (μg/g)			Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)				谐和度
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
17RS5-1	9.40	142	381	0.37	0.10864	0.00466	0.01627	0.00022	104.7	4.3	104.0	1.4	99%
17RS5-2	3.37	66	148	0.45	0.10522	0.00636	0.01619	0.00030	101.6	5.8	103.5	1.9	98%
17RS5-3	7.32	165	412	0.40	0.10195	0.00440	0.01497	0.00027	98.6	4.1	95.8	1.7	97%
17RS5-4	16.2	309	603	0.51	0.14780	0.00699	0.01633	0.00024	140.0	6.2	104.4	1.5	70%
17RS5-5	5.94	120	316	0.38	0.10892	0.00520	0.01655	0.00028	105.0	4.8	105.8	1.8	99%
17RS5-6	8.17	167	429	0.39	0.10742	0.00366	0.01650	0.00021	103.6	3.4	105.5	1.3	98%
17RS5-7	7.83	161	394	0.41	0.10892	0.00443	0.01640	0.00021	105.0	4.1	104.9	1.3	99%
17RS5-8	10.4	241	490	0.49	0.11008	0.00425	0.01655	0.00022	106.0	3.9	105.8	1.4	99%
17RS5-9	11.0	207	446	0.46	0.11107	0.00404	0.01630	0.00022	106.9	3.7	104.2	1.4	97%
17RS5-10	9.13	193	439	0.44	0.10427	0.00436	0.01528	0.00032	100.7	4.0	97.8	2.0	97%
17RS5-11	5.91	109	262	0.41	0.10773	0.00486	0.01633	0.00024	103.9	4.5	104.5	1.5	99%

(续表 1)

测点	元素含量 ($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)				谐和度
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
17RS5-12	11.01	187	425	0.44	0.13944	0.00636	0.01701	0.00022	132.5	5.7	108.8	1.4	80%
17RS5-13	13.1	250	489	0.51	0.10756	0.00356	0.01627	0.00021	103.7	3.3	104.1	1.3	99%
17RS5-14	8.69	158	376	0.42	0.10830	0.00358	0.01631	0.00021	104.4	3.3	104.3	1.3	99%
17RS5-15	5.02	101	250	0.40	0.12433	0.00701	0.01739	0.00045	119.0	6.3	111.1	2.9	93%
17RS5-16	7.17	181	356	0.51	0.10945	0.00436	0.01617	0.00022	105.5	4.0	103.4	1.4	98%
17RS5-17	5.74	113	289	0.39	0.12393	0.00474	0.01635	0.00029	118.6	4.3	104.5	1.9	87%
17RS5-18	5.23	121	263	0.46	0.10744	0.00471	0.01640	0.00026	103.6	4.3	104.8	1.7	98%
17RS5-19	8.69	195	429	0.45	0.11049	0.00410	0.01690	0.00026	106.4	3.7	108.0	1.6	98%
17RS5-20	7.53	170	386	0.44	0.11052	0.00434	0.01630	0.00026	106.4	4.0	104.2	1.6	97%
17RS5-21	8.44	185	423	0.44	0.10737	0.00339	0.01646	0.00027	103.6	3.1	105.3	1.7	98%
17RS5-22	9.39	226	467	0.48	0.11213	0.00413	0.01638	0.00021	107.9	3.8	104.8	1.3	97%
17RS5-23	7.11	129	343	0.38	0.12301	0.00570	0.01756	0.00024	117.8	5.2	112.2	1.5	95%
17RS5-24	6.71	138	354	0.39	0.11102	0.00430	0.01641	0.00022	106.9	3.9	104.9	1.4	98%
17RS5-25	6.07	123	333	0.37	0.10321	0.00392	0.01638	0.00024	99.7	3.6	104.7	1.5	95%
17RS6-01	6.39	140	328	0.43	0.11345	0.00468	0.01674	0.00022	109.1	4.3	107.0	1.4	98%
17RS6-02	5.85	131	297	0.44	0.10627	0.00460	0.01663	0.00022	102.5	4.2	106.3	1.4	96%
17RS6-03	8.47	203	425	0.48	0.10943	0.00420	0.01662	0.00022	105.4	3.8	106.3	1.4	99%
17RS6-04	8.56	199	375	0.53	0.12546	0.00507	0.01825	0.00027	120.0	4.6	116.6	1.7	97%
17RS6-05	8.20	151	398	0.38	0.12114	0.00380	0.01783	0.00021	116.1	3.4	113.9	1.3	98%
17RS6-06	6.96	152	363	0.42	0.11391	0.00419	0.01667	0.00022	109.5	3.8	106.5	1.4	97%
17RS6-07	7.80	178	401	0.44	0.10801	0.00401	0.01645	0.00020	104.1	3.7	105.2	1.3	99%
17RS6-08	6.42	124	312	0.40	0.11351	0.00531	0.01748	0.00025	109.2	4.8	111.7	1.6	97%
17RS6-09	6.35	133	331	0.40	0.11300	0.00443	0.01658	0.00022	108.7	4.0	106.0	1.4	97%
17RS6-10	6.80	153	346	0.44	0.10668	0.00417	0.01658	0.00026	102.9	3.8	106.0	1.6	97%
17RS6-11	6.74	146	348	0.42	0.11296	0.00387	0.01673	0.00024	108.7	3.5	106.9	1.5	98%
17RS6-12	6.98	162	353	0.46	0.11062	0.00419	0.01667	0.00020	106.5	3.8	106.6	1.3	99%
17RS6-13	6.07	126	320	0.39	0.10948	0.00404	0.01658	0.00020	105.5	3.7	106.0	1.3	99%
17RS6-14	7.88	201	378	0.53	0.11567	0.00427	0.01661	0.00027	111.1	3.9	106.2	1.7	95%
17RS6-15	6.80	151	353	0.43	0.11338	0.00422	0.01671	0.00026	109.1	3.8	106.8	1.6	97%
17RS6-16	6.31	136	339	0.40	0.10819	0.00401	0.01663	0.00025	104.3	3.7	106.3	1.6	98%
17RS6-17	6.01	130	309	0.42	0.11063	0.00451	0.01666	0.00027	106.5	4.1	106.5	1.7	99%
17RS6-18	7.13	150	357	0.42	0.11314	0.00445	0.01658	0.00022	108.8	4.1	106.0	1.4	97%
17RS6-19	7.01	151	364	0.41	0.11024	0.00396	0.01655	0.00020	106.2	3.6	105.8	1.3	99%
17RS6-20	10.3	277	509	0.54	0.11467	0.00371	0.01662	0.00021	110.2	3.4	106.3	1.3	96%
17RS6-21	6.31	133	333	0.40	0.10593	0.00445	0.01646	0.00022	102.2	4.1	105.3	1.4	97%
17RS6-22	8.59	183	430	0.43	0.12898	0.00539	0.01700	0.00027	123.2	4.8	108.6	1.7	87%
17RS6-23	7.62	156	371	0.42	0.12081	0.00466	0.01730	0.00024	115.8	4.2	110.6	1.5	95%
17RS6-24	6.37	139	342	0.41	0.11108	0.00453	0.01670	0.00026	107.0	4.1	106.8	1.7	99%
17RS6-25	6.61	139	335	0.42	0.11158	0.00500	0.01657	0.00026	107.0	4.6	106.8	1.4	98%

3.2 地球化学

表 2 统计出日松地区早白垩世中酸性花岗岩及其包体主元素变化范围, 本次研究的日松花岗闪长岩及其包体主元素和微量数据分析结果见表 3。同寄生花岗岩相比, 闪长质包体更富 CaO 、 MgO 、 TFe_2O_3 和 TiO_2 ,

说明包体中更富含镁铁质成分^[28]。哈克图解和氧化物共分母图解(图 4)显示日松花岗岩类和闪长质包体之间具有较好的线性演化关系。 R_2 - R_1 岩性分类图解见图 5, 并且在 A/NK - A/CNK 图解中显示研究区样品大多属于准铝质岩石系列(见图 5)。

表 2 日松花岗岩类及其包体主元素含量(%)变化范围及比值

Table 2 Variation in range and ratio of major elements content (%) of the intermediate-acid magmatic rocks and related dioritic enclaves in Risum

岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Mg [#]	K ₂ O/ Na ₂ O	A/CNK	A/NK
花岗岩类	59.33~ 66.84	14.95~ 16.20	3.88~ 7.26	2.88~ 6.17	2.23~ 3.64	2.32~ 3.25	2.05~ 5.77	0.04~ 0.10	0.05~ 0.19	0.54~ 0.87	51.9~ 64.9	0.86~ 1.29	0.76~ 1.01	1.75~ 2.43
包体	55.89~ 58.05	16.89~ 17.26	5.77~ 7.78	6.36~ 6.78	1.77~ 2.60	3.30~ 3.79	3.63~ 4.61	0.10~ 0.16	0.09~ 0.18	0.81~ 1.00	52.5~ 57.8	0.47~ 0.79	0.76~ 0.89	1.94~ 2.24

注: 数据来源本次研究及关俊雷等^[20]和马蓁^[27]

表 3 日松早白垩世岩浆岩主元素(%)和微量元素(μg/g)组成

Table 3 Major (%) and trace elements (μg/g) concentrations for the intermediate-acid magmatic rocks and related dioritic enclaves in Risum

样号	17RS-1	17RS-3	17RS-4	17RS-5	17RS-6	17RSX-2	17RSX-3
岩性	花岗闪长岩					闪长质包体	
SiO ₂	65.86	64.65	65.20	65.88	63.45	57.42	57.30
Al ₂ O ₃	15.45	15.79	16.12	15.45	15.94	17.26	16.89
CaO	3.95	4.55	4.59	3.88	4.51	5.77	6.32
TFe ₂ O ₃	3.96	4.35	2.88	3.80	4.77	6.50	6.63
K ₂ O	3.42	2.69	3.57	3.55	3.13	2.52	2.60
Na ₂ O	2.73	2.95	3.06	2.78	2.56	3.77	3.30
MgO	2.16	2.38	2.21	2.07	2.74	3.63	3.91
MnO	0.06	0.07	0.04	0.06	0.08	0.10	0.10
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.11	0.10	0.13	0.17	0.15
TiO ₂	0.56	0.63	0.57	0.54	0.63	0.96	1.00
LOI	1.17	1.06	0.78	0.88	1.16	0.97	0.85
Total	99.43	99.15	99.13	99.00	99.10	99.07	99.05
Mg [#]	52.0	52.0	60.3	51.9	53.3	52.5	53.9
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg ²⁺)	0.48	0.48	0.40	0.48	0.47	0.47	0.46
Cr	40.3	50.0	43.8	41.5	64.9	34.9	50.6
Ni	18.1	20.8	20.3	17.8	28.0	25.4	23.3
Rb	159	145	124	161	160	171	183
Sr	196	208	269	192	218	173	198
Y	20.0	24.0	19.6	19.2	20.5	20.7	27.3
Zr	149	125	142	154	132	177	118
Nb	11.1	12.7	10.8	10.7	12.0	18.2	16.5
Ba	316	245	480	332	327	229	246
La	24.5	24.3	29.1	39.0	29.9	27.9	21.6
Ce	48.3	49.9	57.8	71.2	58.7	54.6	45.4
Pr	5.44	5.88	6.35	7.45	6.58	5.96	5.69
Nd	20.5	22.4	22.7	25.5	24.1	22.1	23.2
Sm	3.95	4.50	4.17	4.30	4.47	4.29	5.29
Eu	0.80	0.87	0.93	0.80	0.95	0.73	0.79
Gd	3.67	4.17	3.74	3.86	3.98	4.00	5.01
Tb	0.56	0.66	0.56	0.55	0.60	0.62	0.82
Dy	3.36	3.94	3.31	3.27	3.55	3.60	4.88
Ho	0.69	0.81	0.66	0.66	0.72	0.73	0.97
Er	1.96	2.34	1.94	1.90	2.08	2.07	2.71
Tm	0.30	0.36	0.29	0.28	0.32	0.31	0.40
Yb	1.94	2.34	1.86	1.83	2.11	2.10	2.48
Lu	0.30	0.35	0.28	0.28	0.32	0.33	0.38
Hf	4.32	3.73	4.00	4.38	3.94	4.85	3.47
Ta	0.90	1.26	0.82	0.82	1.04	1.34	1.20
Th	13.6	9.19	12.7	16.8	10.9	12.6	10.4

(续表 2)

样号	17RS-1	17RS-3	17RS-4	17RS-5	17RS-6	17RSX-2	17RSX-3
岩性	花岗闪长岩				闪长质包体		
U	1.97	1.28	1.98	1.77	2.21	2.70	1.44
(La/Yb) _N	9.07	7.45	11.2	15.3	10.2	9.55	6.25
δEu	0.63	0.60	0.70	0.59	0.67	0.53	0.46
Rb/Sr	0.81	0.70	0.46	0.84	0.73	0.99	0.92
Rb/Ba	0.50	0.59	0.26	0.48	0.49	0.75	0.74
Th/U	6.87	7.17	6.42	9.46	4.93	4.67	7.24
La/Ce	0.51	0.49	0.50	0.55	0.51	0.51	0.48
Nb/Ta	12.3	10.1	13.2	13.1	11.6	13.6	13.7

注: $Mg^{\#}=100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + TFe^{2+})$ (物质的量比值), $\omega(TFeO) = \omega(TFe_2O_3) \times 0.8998$, $\omega(TFeO) = \omega(FeO) + 0.8998 \times \omega(Fe_2O_3)$; A/CNK (铝饱和指数) = $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ (分子数之比); $\delta Eu = 2 \times [Eu]_N / ([Sm]_N + [Gd]_N)$

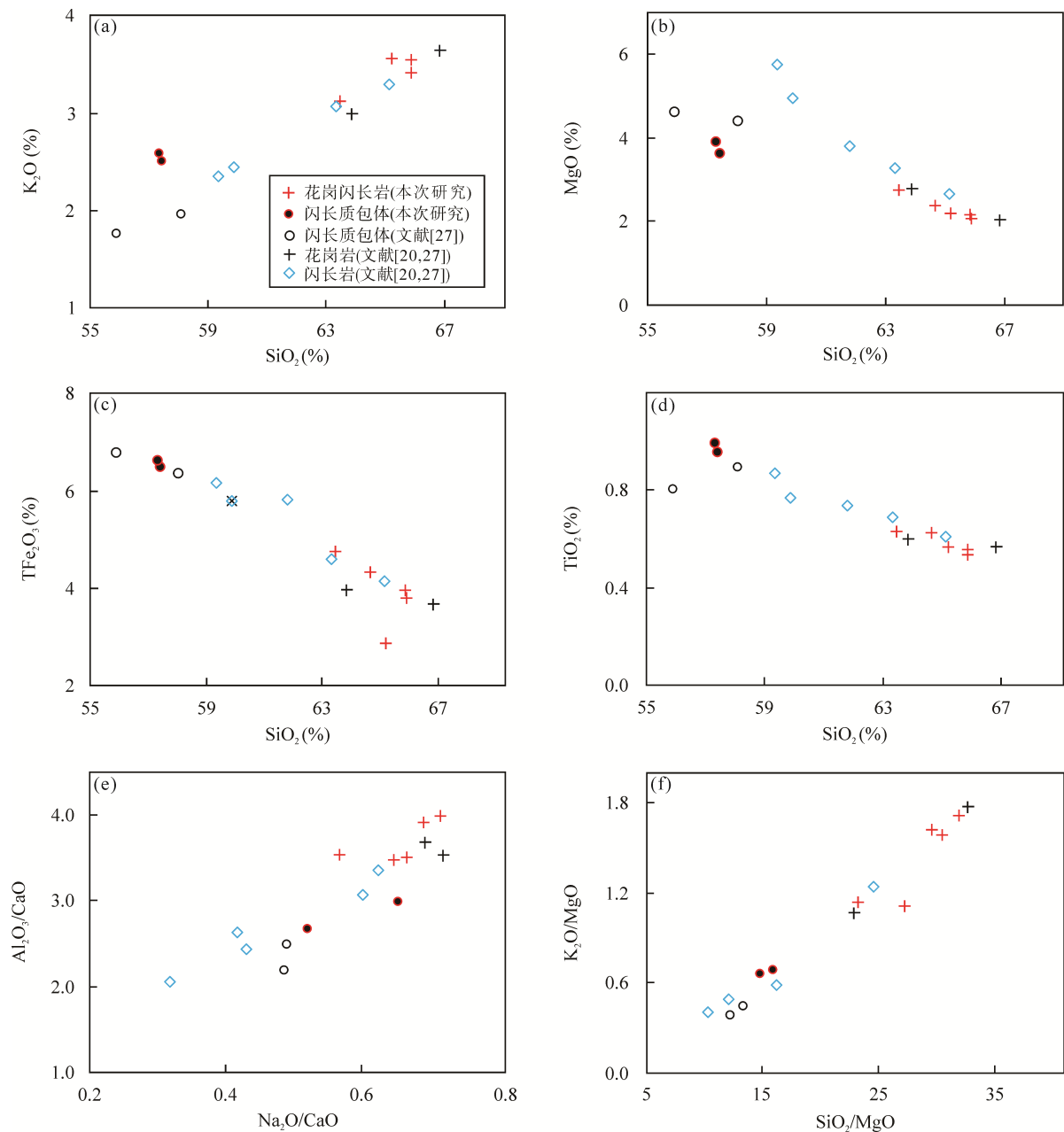


图 4 哈克图解和氧化物共分母图解

Fig.4 Harker diagrams of the intermediate-acid magmatic rocks and related dioritic enclaves in Risum

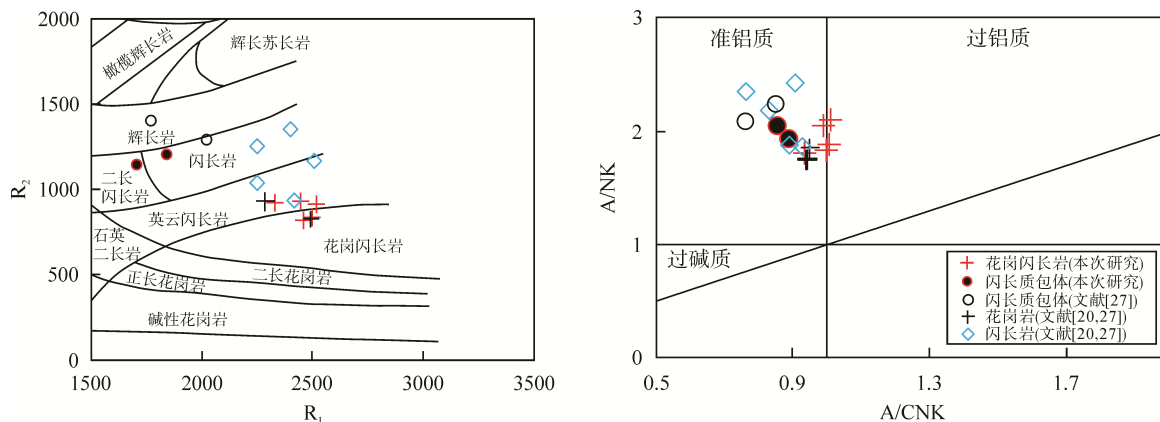


图 5 R_2 - R_1 图解和 A/NK-A/CNK 图解

Fig.5 Rock type and A/NK vs. A/CNK diagram of the intermediate-acid magmatic rocks and related dioritic enclaves in Risum
 岩石类型 R_2 - R_1 划分图解据文献[29]; $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$, $R_2=6Ca+2Mg+Al$
 Division diagram of rock type (after reference[29]);

在稀土元素分布模式图和微量元素蛛网图中, 日松花岗闪长岩及其闪长质包体两者具有相似分布特征(图 6), 如在微量元素蛛网图中, 两者均显示大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti, 重稀土元素(HREE)相对亏损, 大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Th、U 明显富集, Zr 和 Hf 显示轻微的亏损; 在稀土元素分布模式图中, 两者轻、重稀土元素分异明显($(La/Yb)_N=3.09\sim 15.30$), 并具有明显的 Eu 负异常, 但花岗闪长岩的轻、重稀土元素分异比闪长质包体更加明显, 而闪长质包体具更低的 δEu 值(表 3)。

4 讨论

4.1 岩石成因

4.1.1 花岗闪长岩

目前的研究认为, 花岗闪长岩可以通过下列机制形成: (1) 幔源物质分异^[31]; (2) 基性地壳的部分

熔融^[32-34]; (3) 壳-幔熔体的混合^[28,31,35-36]。前人的研究表明, 镁铁质岩浆分离结晶或镁铁质岩部分熔融产生的花岗闪长岩很少, 作为母岩浆或源岩的镁铁质物质在体积上应当比花岗质岩浆大 10 倍, 但在露头上却很少发现有对应比例的镁铁质岩石产出, 所以目前认为镁铁质物质难以分异出规模宏大的花岗质岩浆^[31]。日松地区发育大规模早白垩世晚期的中酸性岩岩, 但缺乏与之对应的镁铁质岩石。另外, 岩石学实验显示, 玄武质或镁铁质岩部分熔融产生的中酸性熔体的 MgO、Cr 和 Ni 含量及 $Mg^\#$ 值(一般小于 45)普遍较低; 如果中酸性熔体产生过程有幔源物质加入其 MgO 含量和 $Mg^\#$ 值会明显升高^[37-38], 日松花岗闪长岩 MgO 含量在 2.07%~2.74% 之间, $Mg^\#$ 值大多数介于 52~60 之间, 结合其具有介于大陆地壳和原始地幔之间的 Nb/Ta 比值(10.1~13.9)^[39-40], 以及野外观察到日松花岗闪长岩中出现大量暗色细粒闪长质包体现象和岩石薄片显微镜下特征, 初步认为日松花岗闪长岩为壳幔熔体相互作用的产物^[28]。

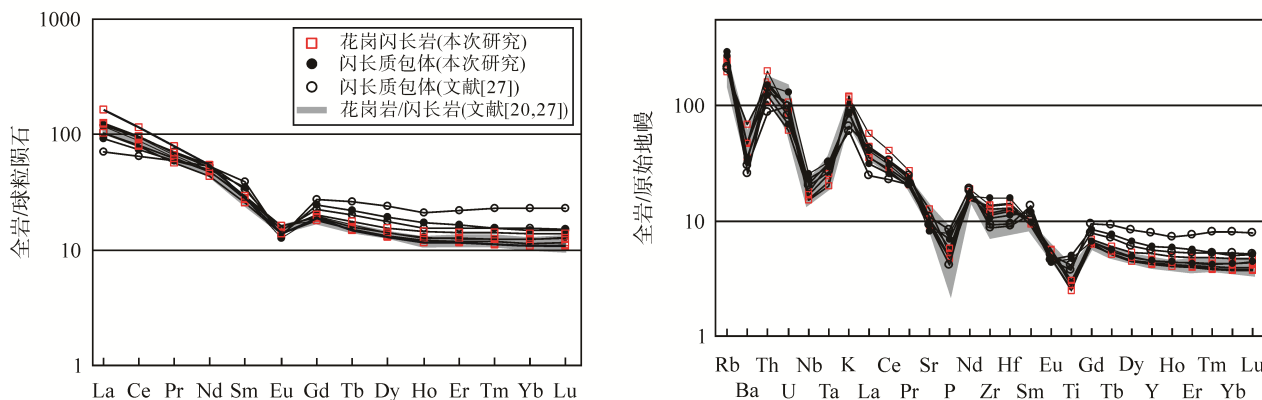


图 6 日松早白垩世花岗岩及其闪长质包体稀土元素分布模式和微量元素蛛网图(球粒陨石值和原始地幔值据文献[30])
 Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element diagrams for the intermediate-acid magmatic rocks and related dioritic enclaves in Risum (chondrite and primitive mantle values are from reference [30])

4.1.2 闪长质包体

中酸性岩浆岩中暗色包体可能的成因有: (1) 源区残留体或围岩捕虏体^[41-43]; (2) 岩浆早期结晶分异的产物^[44-45]; (3) 岩浆液态熔离^[46]; (4) 岩浆混合^[47-53]。

包体中缺乏典型的富铝矿物(如石榴子石、堇青石和红柱石等), 其 Rb、Sr 和 Ba 等大离子亲石元素含量及 Rb/Sr、Rb/Ba 和 Th/U 比值均较高, 表明它们并非是岩浆源区的难熔残留物^[36]; 而研究区闪长质包体与其寄主花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄相近, 指示研究区闪长质包体不可能是岩浆源区残留体或是岩浆在侵位过程中捕获的围岩捕虏体, 同时也排除了闪长质包体为花岗岩浆侵位固结后侵入的可能。主元素哈克图解、氧化物共分母图解(图 4)都具有良好的线性趋势, 表明闪长质包体有着与寄主岩石类似的混合作用演化关系, 以及微量元素蛛网图和稀土元素分布模式有着相似的特征, 因此也可以排除这些包体为岩浆早期结晶分异的可能^[36,54-55]。镜下观察发现闪长质包体具有典型岩浆结构, 主要为细粒半自形粒状结构, 不发育变晶结构, 可见斜长石斑晶发育环带结构, 矿物间交代结构发育, 其矿物组成种类与寄主花岗闪长岩相似, 但暗色矿物(角闪石和黑云母)的含量更高, 并发育针状磷灰石。上述包体中矿物的组成、单矿物特征以及它们较高的 Mg[#] 值和 Nb/Ta 比值, 指示日松闪长质包体很可能也为壳幔熔体相互混合的产物。

4.1.3 花岗闪长岩与闪长质包体的关系

前人研究发现, 如果包体与其寄主岩石的 Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺) 比值相似, 说明包体岩浆与寄主岩浆密切相关, 两者在很大程度上同源^[56]。日松早白垩世花岗闪长岩和闪长质包体的 Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺) 比值很接近(表 3); 同时两者具有相似的微量元素和稀土元素分布模式(图 5)、相似的 Nb/Ta 和 La/Ce 比值(表 3), 以及均发育针状磷灰石, 这指示它们具有相近的源区物质组成和形成过程^[57-58]。

4.2 拉萨地块西北部早白垩世时期的岩浆作用对区域地壳生长的贡献

目前的研究认为, 青藏高原南部地壳两倍于正常地壳的厚度主要是印度与欧亚大陆相互碰撞和大量幔源镁铁质岩浆侵入的结果^[1-2]。最近的研究结果显示, 青藏高原南部地壳的加厚和抬升在晚白垩世就已经开始^[1-2,4,59], 而青藏高原南部发育大量的中生代花岗质岩浆岩, 特别是早白垩世时期最为发育, 那

么广泛发育的早白垩世花岗岩类是否指示也存在大量的幔源岩浆侵入, 从而导致在该时期地壳生长和加厚? 在岩浆形成过程中, 由于在高压条件下重稀土元素优先进入石榴子石中, 所以石榴子石通常富集重稀土元素, 因此中-酸性钙碱性岩石中具有高的 (La/Yb)_N 比值可以指示其源区存在石榴子石残留相^[2,60]。目前 Profeta *et al.*^[61] 对全球范围内俯冲带岩浆弧内岩浆岩 (La/Yb)_N 比值的平均值与地壳厚度进行相关性研究, 认为与俯冲作用相关的岩浆岩 (La/Yb)_N 比值与地壳厚度呈正相关关系, 并得出相应的经验公式:

$$(La/Yb)_N = 0.98e^{0.047d_m} \quad (1)$$

$$\text{或 } d_m = 21.277 \ln(1.0204(La/Yb)_N) \quad (2)$$

式中: (La/Yb)_N 为球粒陨石标准化之后的全岩平均含量比值, d_m 为地壳厚度或莫霍面深度。

此外, Hu *et al.*^[62] 对大陆碰撞造山带内中酸性岩浆岩的 (La/Yb)_N 比值与地壳厚度进行相关性研究也得出类似的经验公式, 并且也合理地解释了秦岭造山带增厚演化过程。

我们在收集研究区及拉萨地块西北部白垩纪钙碱性中性岩浆岩数据的基础上, 尝试选取 SiO₂ 为 55%~68%、MgO 为 1%~6% 的数据, 根据上述经验公式计算全岩的 (La/Yb)_N 比值并以此推算对应地壳厚度。从图 7 可以看出 Profeta *et al.*^[61] 推算的结果显示, 在早白垩世地壳厚度已经开始增厚, 并在早白垩世中期(约 125 Ma)和晚期(约 105 Ma)分别存在一个地壳厚度突然明显增厚的趋势, 他们很可能为大量的镁铁质熔体底侵作用的结果, 即在该时期的地壳增厚是以地壳生长为主; 其主要原因如下, 前人的研究表明, 在早白垩世时期拉萨和羌塘地块并没有发生碰撞, 而在 140~120 Ma 期间, 因向南俯冲的班公湖-怒江洋壳岩石圈发生脱水诱发上覆地幔楔发生部分熔融产生大量的玄武质岩浆并底侵到下地壳底部^[78], 并诱发中、北拉萨地块同期大量岩浆作用^[63,79]; 随后在 110 Ma 左右班公湖-怒江洋壳板片发生断裂, 热的软流圈地幔物质通过板片窗上涌使上覆地幔楔发生部分熔融从而导致大量的玄武质岩浆产生, 这些大量的玄武质岩浆底侵使下地壳发生明显增厚^[11,78]; 而在 120~110 Ma 期间, 地壳厚度变小可能是因为班公湖-怒江洋壳板片发生回转导致岩石圈伸展减薄。此外, 从图 7 中还可以看出, 在晚白垩世期间(100~70 Ma)地壳同样发生明显增厚, 拉萨地块西北部地壳总体上保持较大的厚度, 考虑到拉萨地块和

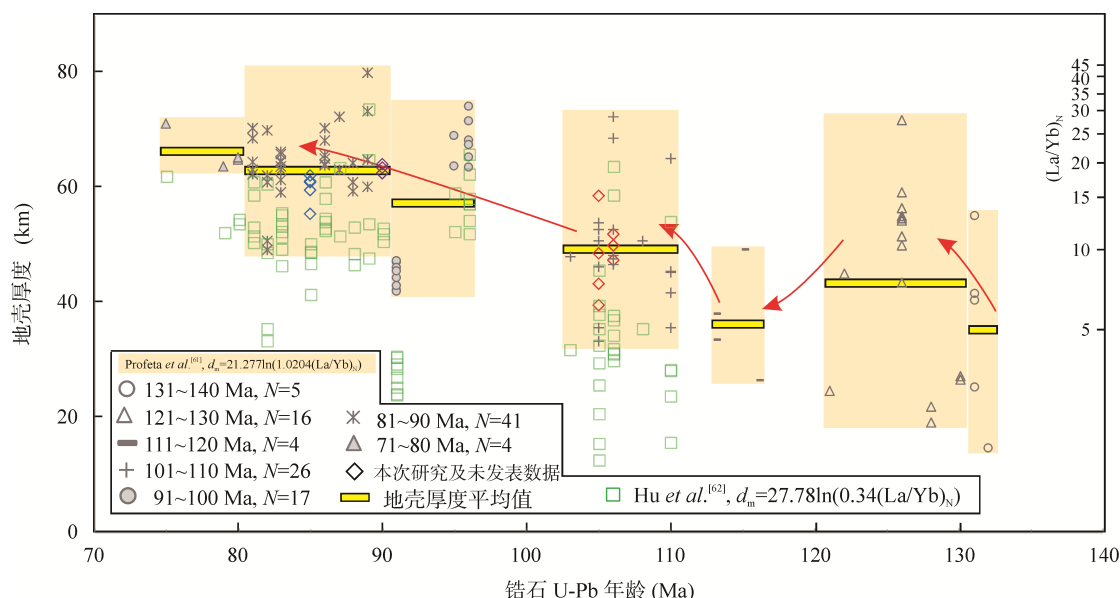


图 7 拉萨地块西北部白垩纪地壳厚度变化趋势图(数据来源于文献[3, 10, 20, 27, 62-77])

Fig.7 Plot of changes in crustal thickness during Cretaceous for the northwestern part of the Lhasa Block (data from references [3, 10, 20, 27, 62-77])

南羌塘地块晚白垩世已经发生碰撞^[3-4], 所以晚白垩世期间的地壳加厚很可能是因为拉萨地块与羌塘地块发生陆-陆碰撞作用的结果。另外, 由于 Hu *et al.*^[62] 的方法适用于碰撞造山带中-酸性岩浆岩来推算地壳厚度, 所以我们尝试只选取约 110 Ma 以后的岩浆岩样品进行投图(如图 7)。图 7 统计结果显示, 利用 Hu *et al.*^[62] 的经验公式推算出的地壳厚度变化值与 Profeta *et al.*^[61] 的经验公式推算出的结果具有相同的变化趋势。

综上所述, 拉萨地块西北部地壳厚度在早白垩世已经发生明显增厚, 主要原因可能是大量的镁铁质岩浆底侵导致地壳生长, 而晚白垩世则以拉萨地块与羌塘地块碰撞构造挤压导致地壳增厚为主。

5 结 论

(1) 日松花岗闪长岩及其闪长质包体为早白垩世晚期同一构造岩浆作用事件(108~104 Ma)的产物。

(2) 日松花岗闪长岩及其闪长质包体地球化学组成显示, 它们为壳幔物质相互作用的产物; 另外, 两者有着相似的地球化学组成, 暗示他们为同一物质源区不同程度演化的产物。

(3) 结合区域构造演化特征, 初步认为拉萨地块西北部在早白垩世时期地壳增厚方式以岩浆底侵为主, 而晚白垩世地壳增厚很可能是由于拉萨与羌塘地块陆-陆碰撞导致。

中国科学院广州地球化学研究所涂湘林老师、孙胜玲老师和吴丹老师, 桂林理工大学地球科学学院余红霞老师和袁永海老师在样品全岩主元素、微量元素和锆石 U-Pb 年龄测试实验中给予了大量的帮助; 匿名审稿专家提供了宝贵的意见和建议, 笔者在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, Dong G C, Qu X M, Zhao Z D, Yang Z M. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 225-242.
- [2] Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, Zhao Z D, Mo X X. Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet[J]. *J Geophys Res*, 2017, 122(1): 214-223.
- [3] Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Liu S A, Chung S L, Li S M, Liu D, Dai J G, Wang L Q, Mo X X. Origin of the ca. 90 Ma magnesia-rich volcanic rocks in SE Nyima, central Tibet: Products of lithospheric delamination beneath the Lhasa-Qiangtang collision zone[J]. *Lithos*, 2014, 198/199: 24-37.
- [4] Chen J L, Xu J F, Yu H X, Wang B D, Wu J B, Feng Y X. Late Cretaceous high-Mg[#] granitoids in southern Tibet: Implications for the early crustal thickening and tectonic evolution of the Tibetan Plateau?[J]. *Lithos*, 2015, 232(1): 12-22.
- [5] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 莫宜学, 洪大卫, 卢欣详, 王涛, 吴福元, 谢才富. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. *中国地质*, 2005, 32(3): 343-352.
Xiao Qing-hui, Qiu Rui-zhao, Deng Jin-fu, Li Ting-dong, Mo Xuan-xue, Hong Da-wei, Lu Xin-xiang, Wang Tao, Wu Fu-yuan, Xie Cai-fu. Granitoids and continental crustal growth modes in China[J]. *Geol China*, 2005, 32(3): 343-352 (in Chinese with English abstract).
- [6] 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 伍光英, 童劲松. 当代花岗岩研究

- 的几个重要前沿[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 221-229.
- Xiao Qing-hui, Xing Zuo-yun, Zhang Yu, Wu Guang-ying, Tong Jin-song. The major frontiers of the recent studies of granites[J]. Earth Sci Front, 2003, 10(3): 221-229 (in Chinese with English abstract).
- [7] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403-414.
- Mo Xuan-xue, Luo Zhao-hua, Deng Jin-fu, Yu Xue-hui, Liu Cheng-dong, Chen Hong-wei, Yuan Wan-ming, Liu Yun-hua. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt[J]. Geol J China Univ, 2007, 13(3): 403-414 (in Chinese with English abstract).
- [8] 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1535-1536.
- Zhu Di-cheng, Pan Gui-tang, Wang Li-quan, Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Zhou Chang-yong, Liao Zhong-li, Dong Guo-chen, Yuan Si-hua. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, with a discussion of geodynamic setting-related issues[J]. Geol Bull China, 2008, 27(9): 1535-1536 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. Earth Planet Sci Lett, 2011, 301(1/2): 241-255.
- [10] 关俊雷, 耿全如, 王国芝, 彭智敏, 张璋, 寇福德, 丛峰, 李娜. 北冈底斯带日土县-拉梅拉山口花岗岩体的岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1666-1684.
- Guan Jun-lei, Geng Quan-ru, Wang Guo-zhi, Peng Zhi-min, Zhang Zhang, Kou Fu-de, Cong Feng, Li Na. Geological, zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions studies of the granite in Ritu County-Lameila Pass area, North Gangdise, Tibet[J]. Acta Petrol Sinica, 2014, 30(6): 1666-1684 (in Chinese with English abstract).
- [11] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 2003, 28(28): 211-280.
- [12] 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 370-382.
- Pan Gui-tang, Zhu Di-Cheng, Wang Li-quan, Liao Zhong-li, Geng Quan-ru, Jiang Xin-sheng. Bangong Lake-Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics[J]. Earth Sci Front, 2004, 11(4): 370-382 (in Chinese with English abstract).
- [13] 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 281-290.
- Mo Xuan-xue, Dong Guo-cheng, Zhao Zhi-dan, Zhou Su, Wang Liang-liang, Qiu Rui-zhao, Zhang Feng-qin. Spatial and temperature distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. Geol J China Univ, 2005, 11(3): 281-290 (in Chinese with English abstract).
- [14] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. Earth Planet Sci Lett, 1986, 79(3/4): 281-302.
- [15] Kapp P, Murphy M A, Yin A, Mark Harrison T, Ding L, Guo J H. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4): 1029.
- [16] Ding L, Kapp P, Zhong D L, Deng W M. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. J Petrol, 2003, 44(10): 1833-1865.
- [17] 丁林, 来庆洲. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约[J]. 科学通报, 2003, 48(8): 836-842.
- Ding Lin, Lai Qinzhou. Geological evidence of thickening and uplift of Gangdise crust before collision: Constraints of island arc collage on uplift and expansion history of Tibetan Plateau[J]. Chinese Sci Bull, 2003, 48(8): 836-842 (in Chinese).
- [18] 郭铁鹰. 西藏阿里地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 1-464.
- Guo Tie-ying. The Geology of Ali Area in Tibet[M]. Wu Han: China University of Geosciences Press, 1991: 1-464 (in Chinese).
- [19] 谢国刚, 莫宣学, 赵志丹, 董国臣. 西藏班公湖地区侏罗纪-白垩纪沉积及古海洋盆地的演化[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 31-39.
- Xie Guo-gang, Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Dong Guo-chen. Jurassic-Cretaceous sedimentation and evolution of ancient oceanic basin in Bangong Lake Area, Tibet[J]. Earth Sci Front, 2009, 16(4): 31-39 (in Chinese with English abstract).
- [20] 关俊雷, 耿全如, 王国芝, 彭智敏, 张璋, 丛峰, 李娜. 北冈底斯带日松花岗岩体的锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素组成[J]. 地质学报, 2014, 88(1): 36-52.
- Guan Jun-lei, Geng Quan-ru, Wang Guo-zhi, Peng Zhi-min, Zhang Zhang, Cong Feng, Li Na. Zircon U-Pb dating, Hf isotope compositions studies of Risong granite, North Gangdese, Tibet[J]. Acta Geol Sinica, 2014, 88(1): 36-52 (in Chinese with English abstract).
- [21] 欧阳克贵, 谢国刚, 肖志坚, 邓世权, 徐平, 冯晔. 西藏西部日松地区多仁组、日松组的建立及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 642-647.
- Ouyang Ke-gui, Xie Guo-gang, Xiao Zhi-jian, Deng Shi-quan, Xu Ping, Feng Ye. Establishment of the Duoren and Risum formations in the Risum area, western Tibet[J]. Geol Bull China, 2005, 24(7): 642-647 (in Chinese with English abstract).
- [22] Li C Y, Zhang H, Wang F Y, Liu J Q, Sun Y L, Hao X L, Li Y L. The formation of the Dabaoshan porphyry molybdenum deposit induced by slab rollback[J]. Lithos, 2012, 150(5): 101-110.
- [23] Atsushi G, Yoshiyuki T. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer (II)[J]. Rigaku J, 1996, 13(2): 20-38.
- [24] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552-558.

- Liu Ying, Liu Hai-chen, Li Xian-hua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 289-294.
Li Xian-hua, Liu Ying, Tu Xiang-lin, Hu Guang-qian, Zeng wen. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and dissolution[J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 289-294 (in Chinese with English abstract).
- [26] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its restriction on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(16): 1589 (in Chinese).
- [27] 马蓁. 西藏北拉萨地块日土花岗岩的岩石学、年代学和地球化学[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Ma Zhen. Petrology, geochronology and geochemistry of granitic rock in Rutog at northern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013 (in Chinese with English abstract).
- [28] 周长勇, 朱弟成, 赵志丹, 许继峰, 王立全, 陈海红, 谢烈文, 董国臣, 周肃. 西藏冈底斯带西部达雄岩体的岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 248-258.
Zhou Chang-yong, Zhu Di-cheng, Zhao Zhi-dan, Xu Ji-feng, Wang Li-quan, Chen Hai-hong, Xie Lie-wen, Dong Guo-chen, Zhou Su. Petrogenesis of Daxiong pluton in western Gangdese, Tibet: Zircon U-Pb dating and Hf isotopic constraints[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24(2): 248-258 (in Chinese with English abstract).
- [29] De la Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses-Its relationships with current nomenclature[J]. *Chem Geol*, 1980, 29(1-4): 183-210.
- [30] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc London Spec Public*, 1989, 42: 313-345.
- [31] 桑隆康, 马昌前. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
Sang Long-kang, Ma Chang-qian. Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012 (in Chinese).
- [32] 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 翟明国. 胶东地区郭家岭花岗岩闪长岩的地球化学特征及成因[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 692-700.
Yang Jin-hui, Zhu Mei-fei, Liu Wei, Zhai Ming-guo. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2003, 19(4): 692-700 (in Chinese with English abstract).
- [33] 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗岩闪长岩体成因研究及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 157-170.
Qin Jiang-feng, Lai Shao-cong, Li Yong-fei. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, northern margin of Yangtze Plateau[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2005, 21(3): 157-170 (in Chinese with English abstract).
- [34] 齐玥, 徐鸿博, 张竞雄, 罗金海. 临汾断陷盆地孤峰山花岗岩闪长岩的地球化学和年代学及其地质意义[J]. *地质论评*, 2011, 57(4): 565-573.
Qi Yue, Xu Hong-bo, Zhang Jing-xiong, Luo Jin-hai. Geochemistry, geochronology and geological significance of Gufengshan granodiorite in Linfen Grabben Basin[J]. *Geol Rev*, 2011, 57(4): 565-573 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 李惠民, 梁新权. 湘东南中生代花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 法定年及其成因指示[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(9): 745-751.
Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, Li Huimin, Liang Xinquan. Zircon U-Pb dating of Mesozoic granodiorite and its indication of petrogenesis in Southeastern Hunan Province, South China[J]. *Sci China (D)*, 2001, 31(9): 745-751 (in Chinese).
- [36] 邱检生, 胡建, McInnes B I A, 蒋少涌, 徐夕生, Allen C M. 广东龙窝花岗岩闪长质岩体的年代学、地球化学及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2004, 20(6): 1363-1374.
Qiu Jian-sheng, Hu Jian, McInnes B I A, Jiang Shao-yong, Xu Xi-sheng, Allen C M. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Longwo granodioritic pluton in Guangdong Province[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2004, 20(6): 1363-1374 (in Chinese with English abstract).
- [37] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *J Petrol*, 1995, 36(4): 891-931.
- [38] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chem Geol*, 1999, 160(4): 335-356.
- [39] 赵振华, 熊小林, 王强, 乔玉楼. 铌与钽的某些地球化学问题[J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 304-320.
Zhao Zhen-hua, Xiong Xiao-lin, Wang Qiang, Qiao Yu-lou. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta[J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 304-320 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈伟, 熊小林. Nb-Ta 在金红石与超临界流体中的分配行为: 对俯冲带 Nb/Ta 分异的意义[C]//刘耘, 唐红峰, 熊小林. 成矿作用的理论和实验模拟摘要文集. 南昌: 全国成矿理论与找矿方法学术讨论会, 2017: 529-530.
Chen Wei, Xiong Xiao-lin. Distribution behavior of Nb-Ta in rutile and supercritical fluids: Significance of Nb/Ta differentiation in subduction zone[C]//Liu Yun, Tang Hong-feng, Xiong Xiao-lin. Theoretical and Experimental Simulation of Mineralization (Abstract Volume). Nanchang: National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods, 2017: 529-530 (in Chinese).
- [41] Chappell B W, White A J R, Wyborn D. The importance of residual Source material (restite) in granite petrogenesis[J]. *J Petrol*, 1987, 28(6): 1111-1138.
- [42] Chappell B W. Magma mixing and the production of compositional variation within granite suites: Evidence from the granites of Southeastern Australia[J]. *J Petrol*, 1996, 37(3):

- 449–470.
- [43] Chen Y D, Price R C, White A J R. Inclusions in three S-type granites from southeastern Australia[J]. *J Petrol*, 1989, 30(5): 1181–1218.
- [44] Clemens J D, Wall V J. Controls on the mineralogy of S-type volcanic and plutonic rocks[J]. *Lithos*, 1988, 21(1): 53–66.
- [45] Dodge F C W, Kistler R W. Some additional observations on inclusions in the granitic rocks of the Sierra Nevada[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 1990, 95(B11): 17841–17848.
- [46] Watson E B. Two-liquid partition coefficients: Experimental data and geochemical implications[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1976, 56(1): 119–134.
- [47] Kaygusuz A, Aydinçakir E. Mineralogy, whole-rock and Sr–Nd isotope geochemistry of mafic microgranular enclaves in Cretaceous Dagbasi granitoids, eastern Pontides, NE Turkey: Evidence of magma mixing, mingling and chemical equilibration[J]. *Geochemistry*, 2009, 69(3): 247–277.
- [48] Xu X S, Fan Q C, O'Reilly S Y, Jiang S Y, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S. U–Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication[J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(19): 2073–2082.
- [49] Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(21): 4469–4483.
- [50] Zhao K D, Jiang S Y, Zhu J C, Li L, Dai B Z, Jiang Y H, Ling H F. Hf isotopic composition of zircons from the Huashan-Guposhan intrusive complex and their mafic enclaves in northeastern Guangxi: Implication for petrogenesis[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(6): 509–519.
- [51] Zhao K D, Jiang S Y, Yang S Y, Dai B Z, Lu J J. Mineral chemistry, trace elements and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China[J]. *Gondw Res*, 2012, 22(1): 310–324.
- [52] 张俊杰, 王光杰, 杨晓勇, 孙卫东, 戴圣潜. 皖南旌德花岗岩闪长岩与暗色包体的成因: 地球化学、锆石 U–Pb 年代学与 Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(12): 4047–4063.
Zhang Jun-jie, Wang Guang-jie, Yang Xiao-yong, Sun Wei-Dong, Dai Sheng-qian. The petrogenesis of the Jingde granodiorite and its MMEs: Constraints from geochemistry, zircon U–Pb dating and Hf isotopic compositions[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2012, 28(12): 4047–4063 (in Chinese with English abstract).
- [53] 周珣若. 花岗岩混合作用[J]. *地学前缘*, 1994, 1(1/2): 87–97.
Zhou Xun-ruo. Mixing of granitic magma[J]. *Earth Sci Front*, 1994, 1(1/2): 87–97 (in Chinese with English abstract).
- [54] 马昌前, 王人镜. 花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志: 包体——以北京周口店岩体为例[J]. *地质论评*, 1992, 38(2): 109–119.
Ma Chang-qian, Wang Ren-jing. Enclaves as indicator of the origin of granitoid magma and repeater magma mingling: An example from the Zhouhoudian intrusion, Beijing[J]. *Geol Rev*, 1992, 38(2): 109–119 (in Chinese with English abstract).
- [55] 秦拯纬, 马昌前, 付建明, 卢友月, 史洪峰, 熊富浩. 东昆仑香加花岗质岩体中镁铁质包体成因: 岩相学及矿物化学的证据[J]. *地球科学*, 2018, 43(7): 2420–2437.
Qin Zheng-wei, Ma Chang-qian, Fu Jian-ming, Lu You-yue, Shi Hong-feng, Xiong Fu-hao. The origin of mafic enclaves in Xiangjia granitic rock of East Kunlun orogenic belt: Evidence from petrography and mineral chemistry[J]. *Earth Sci*, 2018, 43(7): 2420–2437 (in Chinese with English abstract).
- [56] Didier J, Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1991: 1–625.
- [57] 江万, 莫宣学, 赵崇贺, 郭铁鹰, 张双全. 青藏高原冈底斯带中段花岗岩类及其中铁镁质微粒包体地球化学特征[J]. *岩石学报*, 1999, 15(1): 89–97.
Jiang Wan, Mo Xuan-xue, Zhao Chong-he, Guo Tie-ying, Zhang Shuang-quan. Geochemistry of granitoid and its mafic microgranular enclave in Gangdise belt, Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Petrol Sinica*, 1999, 15(1): 89–97 (in Chinese with English abstract).
- [58] 舒楚天, 龙晓平, 王强, 袁超. 藏南早侏罗世新特提斯洋俯冲过程中的壳幔混合作用: 来自日喀则东嘎闪长质岩体的证据[J]. *地球化学*, 2018, 47(5): 478–490.
Shu Chu-tian, Long Xiao-ping, Wang Qiang, Yuan Chao. Early Jurassic crustal and mantle-derived magma mixing induced by subduction of the Neo-Tethyan ocean: Evidence from the Dongga dioritic pluton, South Tibet[J]. *Geochimica*, 2018, 47(5): 478–490 (in Chinese with English abstract).
- [59] Chen J L, Yin A, Xu J F, Dong Y H, Kang Z Q. Late Cenozoic magmatic inflation, crustal thickening, and >2 km of surface uplift in central Tibet[J]. *Geology*, 2018, 46(1): 19–22.
- [60] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [61] Profeta L, Ducea M N, Chapman J B, Paterson S R, Henriquez Gonzales S M, Kirsch M, Petrescu L, DeCelles P G. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 17786.
- [62] Hu F Y, Ducea M N, Liu S W, Chapman J B. Quantifying crustal thickness in continental collisional belts: Global perspective and a geologic application[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 7058.
- [63] 康志强, 许继峰, 王保弟, 陈建林. 拉萨地块北部去申拉组火山岩: 班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 3106–3116.
Kang Zhi-qiang, Xu Ji-feng, Wang Bao-di, Chen Jian-lin. Qushenla Formation volcanic rocks in northern Lhasa Block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethy's southward subduction[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(10): 3106–3116 (in Chinese with English abstract).
- [64] Zhao T P, Zhou M F, Zhao J H, Zhang K J, Chen W. Geochronology and geochemistry of the c. 80 Ma Rutog granitic pluton, northwestern Tibet: Implications for the tectonic evolution of the Lhasa Terrane[J]. *Geol Mag*, 2008, 145(6): 845–857.

- [65] 何利, 马润则, 宋春彦. 西藏措勤晚白垩世侵入岩地球化学特征及构造环境[J]. 地质科技情报, 2009, 28(5): 31–39.
He Li, Ma Run-ze, Song Chun-yan. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Late Cretaceous intrusive rocks in Cuoqin, Tibet[J]. Geol Sci Technol Inf, 2009, 28(5): 31–39 (in Chinese with English abstract).
- [66] 马国林, 岳雅慧. 西藏拉萨地块北部白垩纪火山岩及其对冈底斯岛弧构造演化的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(5): 525–538.
Ma Guo-lin, Yue Ya-hui. Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block: Constraints on the tectonic evolution of the Gangdise Arc[J]. Acta Petrol Mineral, 2010, 29(5): 525–538 (in Chinese with English abstract).
- [67] 刘伟, 李奋其, 袁四化, 张万平, 卓皆文, 王保弟, 唐文清. 西藏措勤地区则弄群火山岩源区——地球化学及 Sr-Nd 同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(4): 367–376.
Liu Wei, Li Fen-qi, Yuan Si-hua, Zhang Wan-ping, Zhou Jie-wen, Wang Bao-di, Tang Wen-qing. Volcanic rock provenance of Zenong Group in Coqin area of Tibet: Geochemistry and Sr-Nd isotopic constraint[J]. Acta Petrol Mineral, 2010, 29(4): 367–376 (in Chinese with English abstract).
- [68] 张向飞. 班公湖蛇绿混杂岩带酸性侵入岩特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
Zhang Xiang-fei. Characteristics and origin of the acid intrusive rocks in the Bangong ophiolitic melange zone in Ritu[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [69] 余红霞, 陈建林, 许继峰, 王保弟, 邬建斌, 梁华英. 拉萨地块中北部晚白垩世(约 90 Ma)拔拉扎含矿斑岩地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2011–2022.
Yu Hong-xia, Chen Jian-lin, Xu Ji-feng, Wang Bao-di, Wu Jian-bin, Liang Hua-ying. Geochemistry and origin of Late Cretaceous (~90 Ma) ore-bearing porphyry of Balazha in mid-northern Lhasa terrane, Tibet[J]. Acta Petrol Sinica, 2011, 27(7): 2011–2022 (in Chinese with English abstract).
- [70] 李伟. 西藏改则地区去申拉组火山岩地球化学特征及锆石年代学制约[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Li Wei. Geochemistry and zircon U-Pb chronology of Qushenla Group volcanic rocks in Gerze, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012 (in Chinese with English abstract).
- [71] 吕立娜, 崔玉斌, 宋亮, 赵元艺, 曲晓明, 王江朋. 西藏嘎拉勒夕卡岩型金(铜)矿床地球化学特征与锆石的 LA-ICP-MS 定年及意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 224–242.
Lü Li-na, Cui Yu-bin, Song Liang, Zhao Yuan-yi, Qu Xiao-ming, Wang Jiang-peng. Geochemistry characteristics and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Galale skarn gold (copper) deposit, Tibet and its significance[J]. Earth Scie Front, 2011, 18(5): 224–242 (in Chinese with English abstract).
- [72] 李华亮, 杨绍, 李德威, 张硕, 吕志伟, 陈桂凡. 冈底斯西北缘晚白垩世石英二长岩的年代学、地球化学、构造环境及成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 694–705.
Li Hua-liang, Yang Shao, Li De-wei, Zhang Shuo, Lü Zhi-wei, Chen Gui-fan. Geochronology, geochemistry, tectonic setting and metallogenetic significance of the Late Cretaceous quartz monzonite in the northwestern Gangdise Terrane[J]. Geotecton Metallog, 2014, 38(3): 694–705 (in Chinese with English abstract).
- [73] 张硕, 史洪峰, 郝海健, 李德威, 吝岩, 冯旻讓. 青藏高原班公湖地区晚白垩世埃达克岩年代学、地球化学及构造意义[J]. 地球科学, 2014, 39(5): 509–524.
Zhang Shuo, Shi Hong-feng, Hao Hai-jian, Li De-wei, Lin Yan, Feng Min-xuan. Geochronology, geochemistry, tectonic significance of Late Cretaceous adakites in Bangong Lake, Tibet[J]. Earth Sci, 2014, 39(5): 509–524 (in Chinese with English abstract).
- [74] 隋清霖. 西藏拉萨地块盐湖地区早白垩世岩浆岩年代学、岩石成因及构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Sui Qing-lin. Chronology, petrogenesis, and tectonic implication of magmatic rocks from Yanhu in northern Lhasa Terrane, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014 (in Chinese with English abstract).
- [75] 董瀚, 苟国宁, 齐玥, 段凯, 张志平, 吴勇, 焦世文, 郝露露, 陈福坤, 王强. 拉萨地块北缘早白垩世晚期地壳生长: 来自改则亚多~106 Ma 侵入岩的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1226–1238.
Dong Han, Gou Guo-ning, Qi Yue, Duan Kai, Zhang Zhi-ping, Wu Yong, Jiao Shi-wen, Hao Lu-lu, Chen Fu-kun, Wang Qiang. Late Early Cretaceous crustal growth in northern Lhasa Block: Evidence from ca.106 Ma intrusive rocks in the Yaduo Area, Gerze County[J]. Geotecton Metallog, 2016, 40(6): 1226–1238 (in Chinese with English abstract).
- [76] 高家昊, 曾令森, 高利娥, 侯可军, 郭春丽. 西藏拉萨地体西北部革吉地区两期早白垩世岩浆作用-锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征[J]. 地质通报, 2016, 35(1): 55–70.
Gao Jia-hao, Zeng Ling-sen, Gao Li-e, Hou Ke-jun, Guo Chun-li. Two episodes of Early Cretaceous magmatism in Geji area of the Lhasa Block, Tibet[J]. Geol Bull China, 2016, 35(1): 55–70 (in Chinese with English abstract).
- [77] 刘函, 王保弟, 陈莉, 李小波, 王立全. 拉萨地块西北日土花岗岩基锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(6): 1141–1155.
Liu Han, Wang Bao-di, Chen Li, Li Xiao-bo, Wang Li-quan. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and its tectonic significance of the Rutog granitic batholith in the northwestern Lhasa Terrane[J]. Geotecton Metallog, 2015, 39(6): 1141–1155 (in Chinese with English abstract).
- [78] Sui Q L, Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Chen Y, Santosh M, Hu Z C, Yuan H L, Mo X X. Compositional diversity of ca. 110 Ma magmatism in the northern Lhasa Terrane, Tibet: Implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent-continent collision zone[J]. Lithos, 2013, 168(3): 144–159.
- [79] 康志强, 许继峰, 王保弟, 董彦辉, 王树庆, 陈建林. 拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学: 形成的构造环境[J]. 地球科学, 2009, 34(1): 93–108.
Kang Zhi-qiang, Xu Ji-feng, Wang Bao-di, Dong Yan-hui, Wang Shu-qing, Chen Jian-lin. Geochemistry of Cretaceous volcanic rocks of Duoni Formation in northern Lhasa Block: Discussion of tectonic setting[J]. Earth Sci, 2009, 34(1): 93–108 (in Chinese with English abstract).