

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.904>



青海玉树查涌地区高镁闪长岩年龄、岩石成因及构造背景

王 键¹, 孙丰月², 姜和芳², 禹 禄², 王 飞², 宁传奇², 张万辉³

1. 黑龙江科技大学矿业工程学院, 黑龙江哈尔滨 150022

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

3. 青海省有色地质矿产勘查局地质矿产勘查院, 青海西宁 810000

摘要:为了查明青海玉树查涌地区闪长岩岩石成因及形成的地球动力学背景, 对其进行了岩相学、矿物电子探针分析、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学分析。闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 230 ± 2 Ma, 属于晚三叠世。电子探针分析结果显示, 闪长岩中的斜长石具有正环带结构, 核部斜长石属于倍长石或钙长石, 边部属于中长石或拉长石; 黑云母矿物成分为镁质黑云母, 结晶温度介于 $647 \sim 688$ °C, 侵位深度约为 14.2~15.5 km; 角闪石属于钙质角闪石, 显示壳幔混合成因的特点。岩石地球化学分析结果显示闪长岩具有富硅、富镁、高的 $Mg^\#$ 值及较高含量的 Cr 和 Ni, 富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE, 铕异常不明显, 与高镁闪长岩中的赞岐岩相似。闪长岩中锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 $-10.4 \sim -10.3$ 和 $-6.4 \sim -4.0$, 锆石 Hf 单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 为 $1\,021 \sim 1\,311$ Ma。分析研究表明闪长岩形成于俯冲带之上的地幔楔环境, 为地幔橄榄岩与俯冲的洋壳板片部分熔融的富硅质熔体平衡反应形成的。结合区域地质演化认为晚三叠世古特提斯洋仍处于俯冲消减状态, 查涌高镁闪长岩为金沙江洋向西俯冲消减过程中的产物。

关键词: 高镁闪长岩; U-Pb 年代学; 地球化学; 晶体化学; 青海; 玉树。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)03-0733-20

收稿日期: 2017-12-13

Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of High-Mg Diorite in Chayong Region, Yushu, Qinghai

Wang Jian¹, Sun Fengyue², Jiang Hefang², Yu Lu², Wang Fei², Ning Chuanqi², Zhang Wanhui³

1. Institute of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Qinghai Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau, Xining 810000, China

Abstract: This paper presents petrography, electron microprobe results, zircon U-Pb dating and geochemistry of diorites at Chayong, Yushu, Qinghai Province, with the aim of constraining its petrogenesis and geodynamic significance. The dating results indicate that the diorite formed in the Late Triassic (230 ± 2 Ma). Electronic Probe analysis results show that plagioclase has a band structure with bytownite and calcicase in the centre, andesine and labradorite on the edge. Biotite belongs to magnesian biotite, which crystallized at temperature of $647 \sim 688$ °C, at depth of 14.2–15.5 km. Hornblende belongs to calcic amphibole and has the characteristics of crust-mantle mixing origin of the magma. The diorites contain high SiO_2 , MgO , $Mg^\#$ values, Cr and Ni, enriched in large ion lithophile elements (LILEs) and light rare earth elements (LREEs), depleted in the high field strength elements (HFSE), which is similar with high-Mg diorite. The $\epsilon_{Hf}(t)$ values of zircons from the diorites vary from -10.4 to -10.3 and from -6.4 to -4.0 , and their Hf one-stage model ages vary from 1 021 to 1 311 Ma. They are likely formed from mantle peridotites by reacting with Si-rich melts released from subducted oceanic slab. Combined with regional tectonic evolution, it is suggested that the diorites might have been resulted from the

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272093); 中国地质调查局项目(No.12120113098300)。

作者简介: 王键(1987—), 男, 讲师, 主要从事矿床地质学方向研究。E-mail: wjian118@hotmail.com

引用格式: 王键, 孙丰月, 姜和芳, 等, 2018. 青海玉树查涌地区高镁闪长岩年龄、岩石成因及构造背景, 地球科学, 43(3): 733–752.

subduction of Jinshajiang Ocean in the Late Triassic.

Key words: high-Mg diorite; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; crystal chemistry; Qinghai; Yushu.

青藏高原由松潘—甘孜、北羌塘、南羌塘、拉萨等地块及地块之间的缝合带组成(Dewey *et al.*, 1988; Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠, 2001; Zhu *et al.*, 2013).古特提斯时期具有“多洋盆、多地体、多岛弧、多碰撞”的特征(Pan *et al.*, 2012; 许志琴等, 2013).在过去几十年的时间里,由于地理气候条件等因素的限制,国内外学者对古特提斯构造—岩浆演化的研究主要集中在东南“三江”地区,而对于西北段的研究一直非常薄弱.对该区岩浆作用的时空框架与成因机理、地球动力学背景演化等缺乏深入认识,例如二叠纪—三叠纪时期该区是否经历了与其东南部“三江”地区相同的构造演化历史(李善平等, 2007; Roger *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012, 2014; 许志琴等, 2013).近年的研究表明:在北羌塘地块西部双湖、沱沱河等地区存在大量三叠纪岩浆活动(Fu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014),对这些岩浆岩开展详细的研究能够为反演该区三叠纪构造—岩浆演化提供非常重要的年代学与岩石学证据.然而,对于这些三叠纪岩浆岩的岩石成因、构造背景的认识还存在很大的争议,主要

的观点有:(1)金沙江洋盆的向南俯冲(Pullen *et al.*, 2008; 王键等, 2017);(2)甘孜—理塘古特提斯洋盆的向南俯冲(赵少卿等, 2015);(3)龙木错—双湖洋盆的向北俯冲以及陆内裂谷等多种演化模型(Fu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Zhai *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2015).作为北羌塘和松潘甘孜地块缝合带的一部分,玉树地区存在大量古特提斯演化的信息,可以为古特提斯的演化提供直接的证据.因此本文选取玉树查涌地区高镁闪长岩为具体研究对象,开展岩相学,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学,主要矿物电子探针分析以及全岩主微量地球化学研究工作,以探讨该岩体侵位时代,成因及其地球动力学背景,为古特提斯洋在该区内的地球动力学演化提供科学依据.

1 研究区地质特征及样品描述

1.1 区域地质特征

研究区位于三江成矿带北段青海玉树地区,处

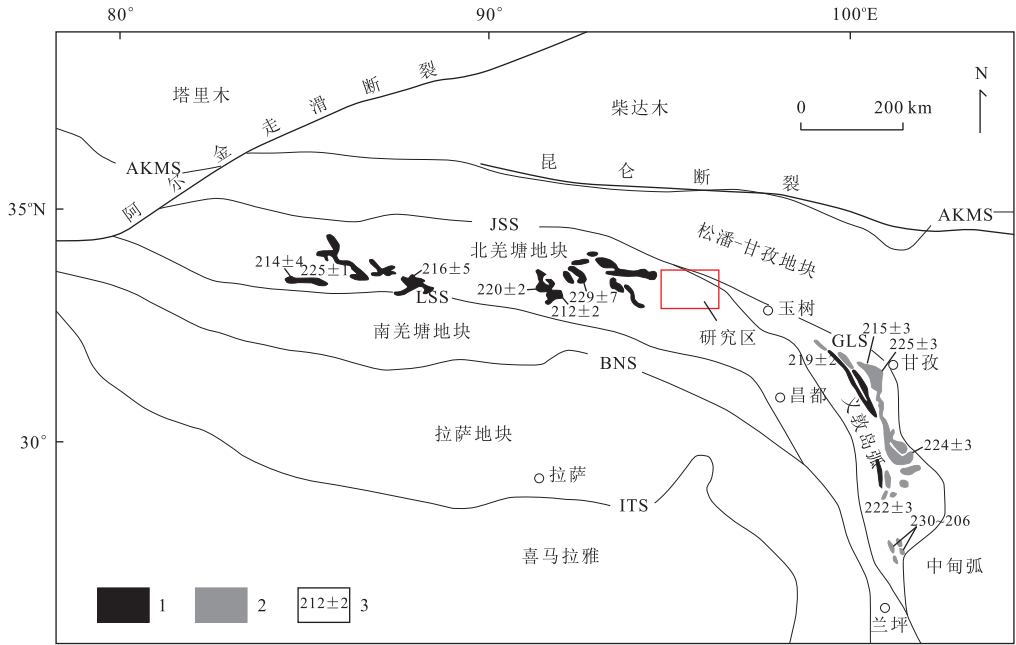


图 1 中国三江成矿带构造简图

Fig.1 Simplified geological map of the Chinese Sanjiang metallogenic belt showing major structures

1.三叠纪火山岩;2.三叠纪侵入岩;3.锆石 U-Pb 年龄(Ma);AKMS-A'nyemaqun suture,阿尼玛卿缝合带;JSS-Jinsha suture,金沙江缝合带;LSS-Longmucuo-Shuanghu suture,龙木错—双湖缝合带;BNS-Bangong-Nujiang suture,班公湖—怒江缝合带;ITS-Indus Tsangpo suture,雅鲁藏布江缝合带;GLS-Ganzi-Litang suture,甘孜—理塘缝合带;据 Yin and Harrison(2000);Spurlin *et al.*(2005)修改;年龄数据据赵少卿等(2015)

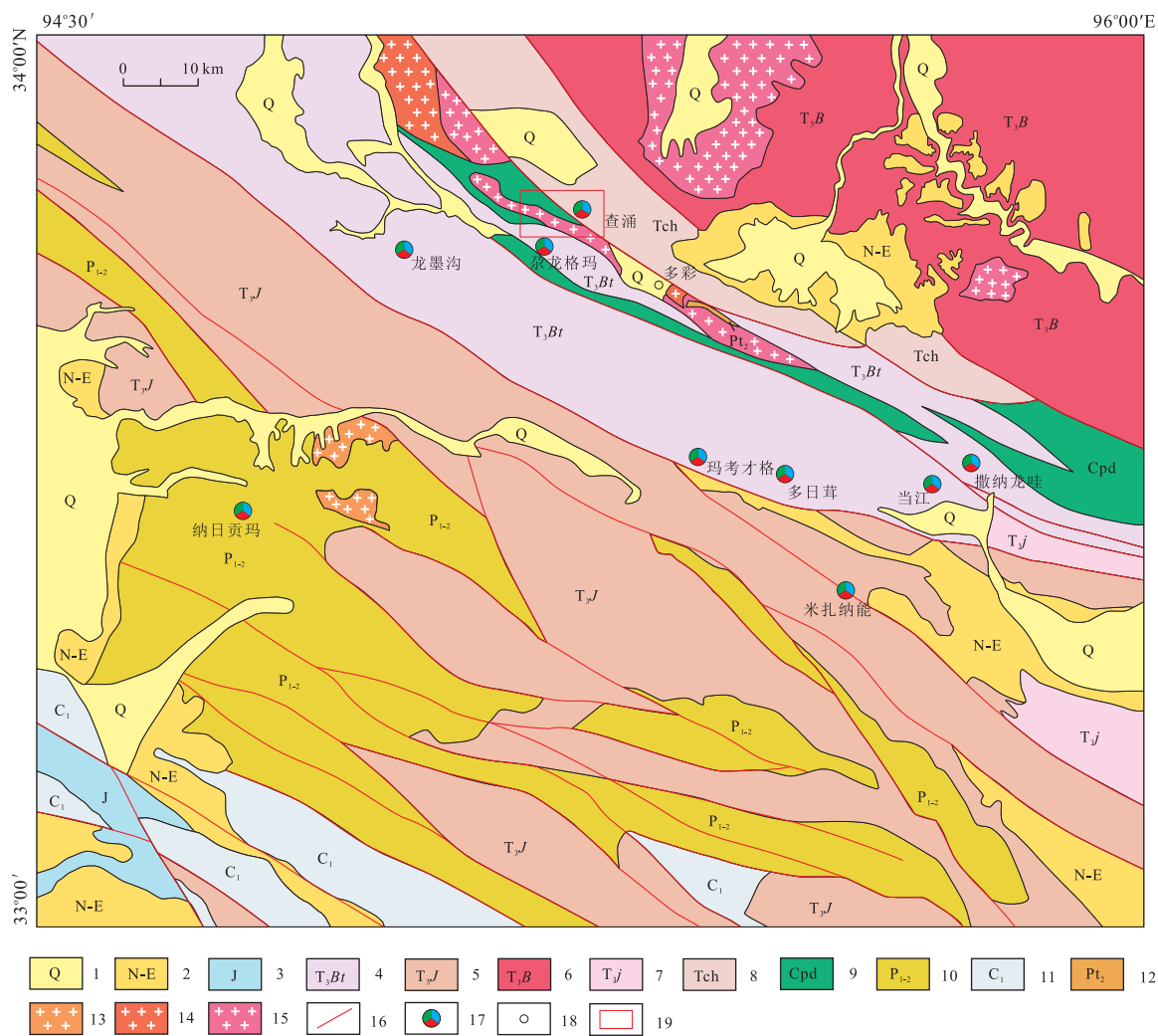


图 2 查涌地区区域地质图

Fig.2 Regional geological map of Chayong region

1.第四系;2.始新统一中新统;3.侏罗系;4.上三叠统巴塘群;5.上三叠统结扎群;6.中上三叠统巴颜喀拉山群;7.中三叠统结隆组;8.查涌蛇绿混杂岩;9.多彩蛇绿混杂岩;10.中下二叠统开心岭群;11.下石炭统杂多群;12.中元古界宁多群;13.古近纪花岗岩;14.晚侏罗世花岗岩;15.晚三叠世花岗岩;16.断层;17.多金属矿床;18.乡镇;19.研究区位置;据王键等(2017)修改

于青藏高原碰撞造山带东北部,大地构造上夹持于金沙江缝合带与龙木错双湖缝合带之间,北羌塘地体北缘,南侧为南羌塘地体,北东侧为松潘甘孜地体(图 1).区内出露地层主要为古生界和中生界,其次为新生界.古生界主要包括下石炭统杂多群和下二叠统开心岭群,主要出露于区域西南侧,出露面积较小,呈北西向断块产出.中生界包括查涌蛇绿混杂岩、中三叠统结隆组、中上三叠统巴颜喀拉山山群,上三叠统巴塘群和上三叠统结扎群、侏罗系地层,在区内广泛发育,为中生代盆地内发育的碎屑岩—碳酸盐建造(图 2).新生界为陆相沉积盆地沉积的古近系沱沱河组、新近系雅西错组和曲果组及第四系冰川堆积.区内褶皱构造和断裂构造发育,巴塘群的

褶皱是较为典型的线性褶皱,向南逐渐变得较为开阔,在复背、向斜上的次一级褶皱也十分发育,它们与复背、向斜轴向一致,但形态则较为开阔(赵少卿等,2015).区内断裂构造可分为北西向、北东向和近东西向 3 组断裂,北西向断裂为区内主断裂,延伸都较长对区内地层、岩浆活动、后期的变质改造具有明显的控制作用,北东向和东西向断裂延伸都较短,错断地层和早期构造,形成时代较晚,为喜山期产物.区内侵入岩出露面积不大,岩浆侵入期次主要有:晚三叠世、晚侏罗世、晚白垩世和古近纪.以印支期侵入次数多(Zhang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012),岩石类型复杂,从基性岩到酸性岩均有出露,以中酸性岩为主.侵入岩呈北东向展布,于晚三叠世巴塘群

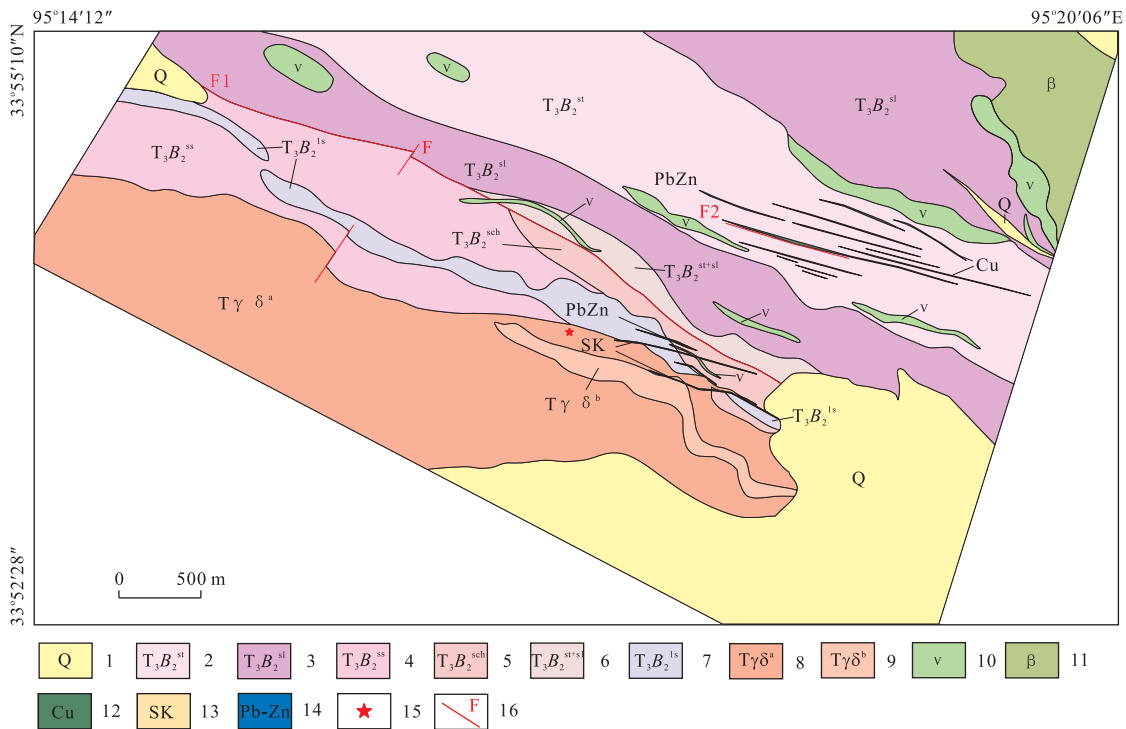


图 3 查涌地区地质图

Fig.3 Regional geological map of Chayong

1.第四系;2.变余粉砂岩;3.泥质板岩;4.石英砂岩;5.泥质片岩;6.凝灰质板岩;7.灰岩;8.闪长岩;9.石英闪长岩;10.辉长岩;11.玄武岩;12.铜矿体;13.蚀变带;14.铅锌矿体;15.取样位置;16.断裂;据青海有色矿产勘察院资料修改

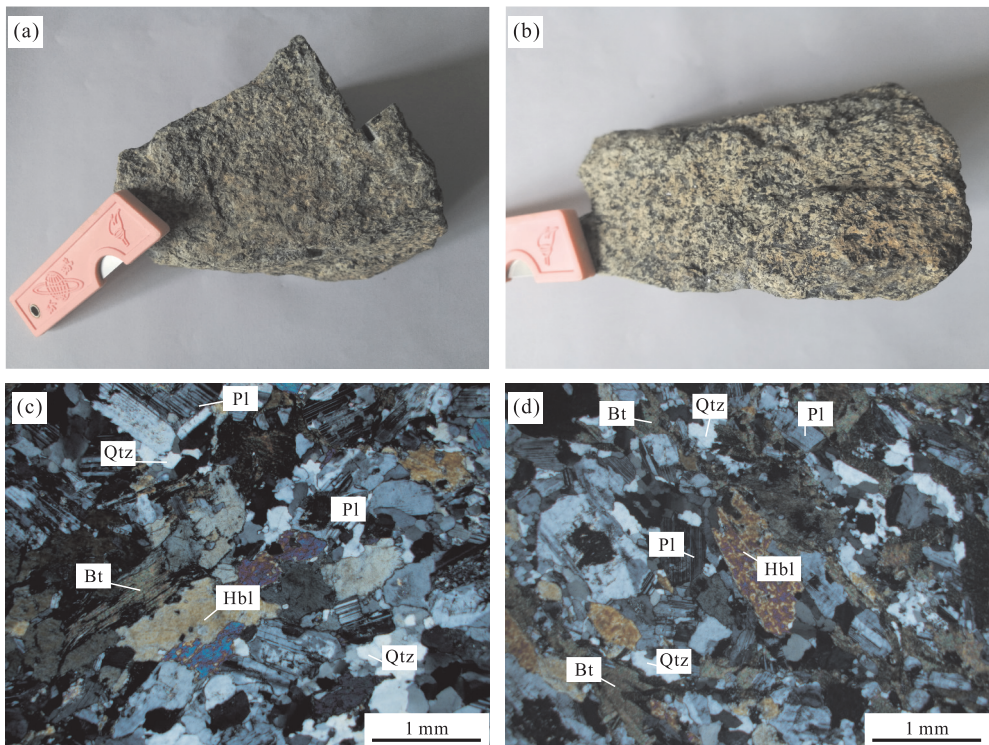


图 4 查涌地区闪长岩标本照片及显微照片

Fig.4 Microphotographs of diorite in Chayong

a, b.查涌地区闪长岩手标本照片; c, d.正交偏光; Qtz.石英; Pl.斜长石; Hbl.角闪石; Bt.黑云母

和巴颜克拉山群均呈侵入接触关系。作者获得查涌地区闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 230 ± 2 Ma, 属于晚三叠世。新生代侵入体主要呈岩珠状、脉状, 分布范围较小, 2015 年作者获得查涌地区北部辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 33 Ma, 为新生代产物。火山岩主要集中于晚三叠世, 为海相裂隙喷发岩, 呈层状, 主要为酸性—中性—基性熔岩与火山碎屑岩, 岩性为安山岩、凝灰岩、玄武岩、安山玄武岩、火山角砾岩、流纹岩等。尕龙格玛和撒纳龙哇赋矿围岩火山凝灰岩年代学研究, 显示其形成于 232~238 Ma 之间, 均形成于晚三叠世。

1.2 研究区地质特征

研究区出露地层为三叠系巴塘群第二岩组 (T_3B_2) (图 3), 呈北西向展布, 总体岩层北倾, 倾角为 $50^\circ \sim 80^\circ$, 岩性主要以灰岩、变余粉砂岩、粉砂质板岩、泥碳质板岩、石英砂岩为主, 局部夹有凝灰质板岩及岩屑晶屑凝灰岩的透镜体。变余粉砂岩是主要含矿围岩。区内以断裂构造为主, 主体为北西向断裂, 其次为北东向断裂。北西向断裂构造与成矿及脉岩活动密切相关, 控制了大部分矿体和岩脉的分布。侵入岩主要分布在研究区南部, 以印支期闪长岩为主, 分布面积大, 呈北西向展布, 岩体呈灰白色, 较为新鲜, 受后期风化蚀变程度较低, 与晚三叠世巴塘群呈侵入接触关系。火山岩在研究区东北部出露, 岩性为黑绿色枕状玄武岩, 此外研究区中部三叠世巴塘群第二岩组 (T_3B_2) 片岩中, 局部夹有岩屑晶屑凝灰岩。区内出露脉岩为辉长岩, 主要分布于 F1 断裂以北地区, 呈脉状侵入, 可能与北部铜矿化有一定联系。查涌铜矿位于 F1 断裂北侧, 产于变余粉砂岩之中, 受 NE 向断裂构造作用, 目前已经达到大型规模。钻探结果显示矿体深部未发现中酸性侵入体, 而发现矿化蚀变辉长岩脉, 表明查涌铜矿化与辉长岩脉关系较为密切, 而与南部闪长岩体关系不大。

1.3 闪长岩岩相学特征

本次所测样品取样位置位于 $33^\circ 53' 34''N$, $95^\circ 17' 36''E$, 岩石表面呈灰白色, 细粒结构, 块状构造, 岩石较为新鲜, 未发生蚀变和风化作用 (图 4a, 4b)。显微镜下观察表明, 岩石的主要矿物成分为斜长石 ($60\% \sim 70\%$), 角闪石 ($10\% \sim 20\%$)、黑云母 ($10\% \sim 20\%$) 和少量石英 ($\sim 5\%$), 斜长石主要呈半自形粒状结构, 呈板状, 粒度为 $0.5 \sim 1.0$ mm, 聚片双晶发育; 角闪石主要呈长柱状、粒度为 $0.5 \sim 1.0$ mm, 单片光下呈浅绿色; 黑云母主要呈它形粒状结构, 片状, 粒度为 $0.2 \sim 1.0$ mm, 单片光下呈棕

褐色; 石英呈它形粒状, 粒度为 $0.1 \sim 0.5$ mm, 充填于斜长石与黑云母颗粒之间 (图 4)。副矿物主要为锆石、磁铁矿等。

2 测试方法

2.1 电子探针测试分析

电子探针测试研究在吉林大学测试中心完成, 使用仪器为日本导津 EMX-SM7 型电子探针显微分析仪。工作电压为 15 kV, 工作电流为 20 nA, 分析束斑为 $2 \mu m$ (较小矿物为 $1 \mu m$ 左右), 峰值积分时间为 10 s, 背景积分时间为 5 s, 标准样品均选用美国 SPI 矿物, 标样测试条件与未知样品一致, 计数率稳定可靠。

2.2 锆石 LA-ICP-MS 分析方法

锆石的挑选在河北省廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司利用标准重矿物分离技术分选完成。经过双目镜下的仔细挑选, 将不同特征的锆石粘在双面胶上, 并用无色透明的环氧树脂固定, 待其固化之后, 将其表面抛光至锆石中心。在原位分析前, 通过反射光和 CL 图像仔细研究锆石晶体的形态与内部结构特征, 以选择最佳分析点。锆石制靶、反射光、阴极发光以及锆石 U-Pb 年龄测定吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为 $30 \mu m$, 激光剥蚀样品的深度为 $20 \sim 40 \mu m$ 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标, 元素含量采用 NIST 610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素, 锆石中 SiO_2 含量为 32.8%, 分析方法见文献 Yuan *et al.* (2004)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICPMSDataCal 程序 (Liu *et al.*, 2008, 2009), 年龄计算及谐和图的绘制采用 Ludwig 编写的 Isoplot 程序 (Ludwig, 2003)。

2.3 锆石 Lu-Hf 同位素测试

LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Coherent GeoLas Pro 型 UP193 紫外激光剥蚀系统和 ThermoFinnigan Neptune 型多接收等离子质谱上进行的, 实验过程中采用 He 气作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 剥蚀直径采用 $44 \mu m$ 或 $60 \mu m$, 测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质, 所选分析点与 U-Pb 定年分析点位置相近或相同。Neptune 质谱运行条件及详细

分析流程见侯可军等(2007).分析过程中锆石标准 GJ1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282 011±24(MSWD, *n* = 13), 与文献报道值(Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内一致.

2.4 岩石地球化学测试

全岩主量元素和微量元素分析在吉林大学分析测试中心完成.其中主量元素分析采用 X-荧光光谱法(XRF),微量元素分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS).对国际标样 BCR-2(玄武岩)、BH-VO-1(玄武岩)和 AGV-1(安山岩)的分析结果表明,主量元素分析精度和准确度优于 5%,微量元素的分析精度和准确度一般优于 10%.

3 测试结果

3.1 电子探针测试结果

本次共测得斜长石化学成分点共 9 个,分析结果见表 1.由表 1 可以看出,斜长石核部和边部化学成分具有明显的差异,斜长石核部 Na₂O 质量百分数为 1.84%~2.49%,平均值为 2.22%,CaO 质量百分数为 15.92%~17.04%,平均值为 16.48%;斜长石边部 Na₂O 质量分数为 5.23%~6.02%,平均值为 5.56%,CaO 质量分数为 10.27%~11.92%,平均值为 11.12%.核部斜长石明显比边部斜长石偏基性,核部斜长石成分变化于 An₈₈和 An₉₁之间,属于倍长石或钙长石,边部斜长石变化于 An₆₅和 An₇₂之间,属于中长石或拉长石.斜长石核部富含 An 分子,而边部贫 An 分子富 Ab 为正常环带,一般是由

于岩浆迅速冷却的情况下,先晶出的基性斜长石未来得及残余岩浆完全反应而被保存下来.

本次共获得角闪石化学成分点 11 个,分析结果见表 2.由表 2 可知闪长岩中角闪石的成分变化不大,显示同一岩浆演化结晶作用的结果.角闪石具有较高的 TFeO(11.81%~12.71%)、MgO(13.98%~15.25%)、CaO (10. 21% ~ 11. 57%) 和 SiO₂ (48.35%~50. 38%) 含量,较低的 Al (4. 98% ~ 7.55%)、Na₂O(0.48%~0.75%)和 K₂O(0.15%~0.35%)含量,另外角闪石中 TiO₂ 含量为 0.36%~1.54%,并含有少量的 Cr₂O₃(0.05%~0.27%).

角闪石的一般晶体化学式为 A₀₋₁B₂C₅T₈O₂₂(OH)₂.由于 H₂O 和卤素的含量不确定,故对于角闪石电子探针数据,我们采用分子式 23(O)及假设 2(OH,F,Cl)为基础计算角闪石的阳离子系数、晶体化学式及有关特征参数,由于电子探针测试数据无法获得 Fe³⁺和 Fe²⁺值,我们采用以 13 个阳离子为基准的计算方法进行统一计算(IMA-CN M MN 角闪石专业委员会全体成员, 2001).计算结果显示(表 2),角闪石的化学成分变化不大,在晶体化学式中(Na+Ca)_B>1.5,且 Na_B<0.5,属于钙角闪石组,(Na+K)_A>0.5,Ti<0.5,Si 介于 6.5 和 8.0 之间,Mg/(Mg+Fe²⁺)介于 0.5 和 1.0 之间,按照 Leake (1997)分类中,属于浅闪石(图 5).

对闪长岩中黑云母的成分测试一共获得 8 个分析点,分析结果见表 3.黑云母的矿物结构式是以 23 个氧原子为单位计算获得黑云母的阳离子数及相关参数.由表 3 可以看出,闪长岩中黑云母

表 1 查涌闪长岩斜长石电子探针测试结果 (%)

Table 1 Electron microprobe analysis (%) of the plagioclase from diorite in Chayong

测点号	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9
位置	核部	核部	核部	核部	边部	边部	边部	边部	边部
SiO ₂	47.17	46.49	47.26	47.64	53.92	55.45	53.96	52.86	53.72
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	33.79	34.15	33.39	33.48	28.84	28.31	29.35	29.57	29.69
FeO	0.04	0.01	0.06	0.00	0.01	0.07	0.06	0.22	0.04
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03
MgO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.08	0.03	0.05	0.00	0.02	0.00	0.03
CaO	16.54	17.04	15.92	16.41	10.71	10.27	11.23	11.92	11.48
Na ₂ O	2.17	1.84	2.37	2.49	5.93	6.02	5.39	5.23	5.24
K ₂ O	0.01	0.04	0.01	0.06	0.11	0.05	0.05	0.03	0.05
Total	99.74	99.57	99.10	100.11	99.58	100.17	100.13	99.84	100.32
An	89	91	88	88	66	65	70	72	71
Ab	11	9	12	12	33	35	30	28	29

表 2 查涌闪长岩中角闪石电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analysis of hornblende from diorite in Chayong

测点号	SC10	SC11	SC12	SC13	SC14	SC15	SC16	SC17	SC18	SC19	SC20	SC21	SC22	SC23
SiO ₂	48.61	49.90	50.35	49.53	50.16	50.68	50.08	48.35	50.00	50.62	49.38	48.85	49.86	49.15
TiO ₂	1.52	0.78	1.13	1.06	0.88	0.39	0.45	0.84	1.54	0.49	1.08	1.32	0.36	0.39
Al ₂ O ₃	6.86	6.22	6.14	6.57	5.75	5.11	7.21	7.55	5.79	4.98	6.90	6.40	6.93	6.54
TFeO	12.56	12.16	12.05	12.47	12.00	12.06	12.31	12.71	11.86	12.25	12.14	11.90	12.19	11.81
Cr ₂ O ₃	0.15	0.20	0.27	0.13	0.15	0.10	0.08	0.05	0.10	0.09	0.21	0.27	0.11	0.07
MnO	0.28	0.33	0.29	0.30	0.29	0.33	0.32	0.40	0.32	0.31	0.30	0.27	0.30	0.31
MgO	13.98	14.73	14.81	14.77	14.69	15.25	14.47	14.35	15.08	15.15	14.01	14.24	14.19	14.66
CaO	11.26	11.10	11.42	11.20	11.31	11.19	11.39	10.21	11.33	11.24	11.43	11.57	11.33	11.36
K ₂ O	0.35	0.22	0.25	0.28	0.27	0.15	0.18	0.25	0.30	0.19	0.28	0.35	0.15	0.16
Na ₂ O	0.66	0.60	0.55	0.75	0.59	0.56	0.68	0.58	0.65	0.48	0.65	0.61	0.66	0.69
Total	96.21	96.24	97.25	97.07	96.08	95.82	97.16	95.29	96.97	95.79	96.38	95.77	96.07	95.15
T	Si	7.16	7.29	7.21	7.35	7.43	7.25	7.16	7.27	7.43	7.23	7.21	7.30	7.27
	Al ^{IV}	0.84	0.70	0.71	0.65	0.57	0.75	0.84	0.73	0.57	0.77	0.79	0.70	0.73
C	Al ^{VI}	0.35	0.37	0.34	0.34	0.31	0.48	0.48	0.26	0.30	0.42	0.32	0.49	0.41
	Ti	0.15	0.08	0.11	0.10	0.09	0.04	0.08	0.15	0.05	0.11	0.13	0.04	0.04
	Cr	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01
	Fe ²⁺	1.54	1.48	1.45	1.51	1.46	1.49	1.57	1.44	1.50	1.48	1.46	1.49	1.46
	Mn	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
	Mg	3.09	3.23	3.22	3.23	3.23	3.14	3.19	3.29	3.34	3.08	3.15	3.12	3.25
B	Ca	1.78	1.74	1.77	1.75	1.78	1.77	1.62	1.77	1.77	1.79	1.83	1.78	1.80
	Na	0.19	0.17	0.15	0.21	0.17	0.19	0.17	0.18	0.14	0.19	0.17	0.19	0.20
A	K	0.07	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.03	0.05	0.07	0.03	0.03
	Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.67	0.69	0.69	0.68	0.69	0.68	0.67	0.70	0.69	0.68	0.68	0.68	0.69
	Si/(Si+Ti+Al)	0.843	0.864	0.863	0.854	0.872	0.851	0.837	0.864	0.891	0.848	0.853	0.856	0.861
	Ca/(Ca+Mg+Fe ²⁺)	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.28	0.25	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28

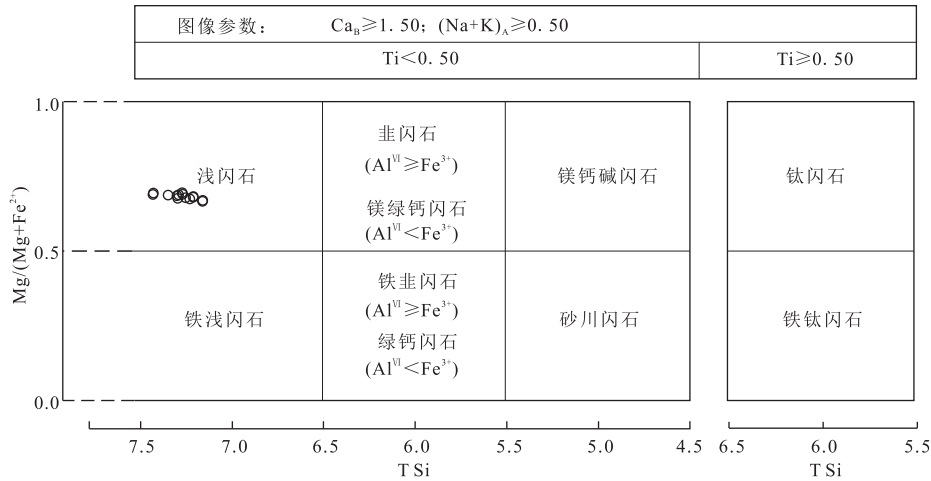


图 5 角闪石的成分变化与定名图

Fig.5 Diagrams showing classification of hornblendes

Ca_B .B 位置 Ca 原子数; $(Na+K)_A$.A 位置 Na 与 K 原子数之和; $T\ Si$.T 位置 Si 原子数; Al^{VI} .C 位置 Al^{VI} 的原子数; Fe^{3+} .C 位置 Fe^{3+} 的原子数;据 Leake(1997)

表 3 查涌闪长岩中黑云母电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analysis of biobitie from diorite in Chayong

测点号	SC24	SC25	SC26	SC27	SC28	SC29	SC30	SC31
SiO ₂	36.76	35.06	36.91	36.27	36.52	37.22	36.94	36.46
TiO ₂	2.18	2.10	2.11	1.93	2.14	2.39	2.48	2.55
Al ₂ O ₃	16.35	16.19	16.39	16.56	16.23	16.60	16.23	16.21
FeO ^T	14.45	14.81	14.70	14.93	14.75	14.49	14.76	14.90
MnO	0.14	0.14	0.12	0.13	0.13	0.11	0.05	0.08
MgO	13.46	12.97	13.21	13.31	13.17	13.33	13.23	13.06
Cr ₂ O ₃	0.26	0.30	0.21	0.22	0.23	0.18	0.17	0.17
CaO	0.01	0.10	0.00	0.02	0.05	0.05	0.04	0.01
Na ₂ O	0.17	0.29	0.13	0.13	0.13	0.22	0.22	0.15
K ₂ O	9.50	8.90	9.75	9.26	9.56	9.62	9.49	10.02
Total	93.28	90.86	93.51	92.77	92.90	94.20	93.60	93.62
Si	6.60	6.51	6.62	6.57	6.60	6.61	6.61	6.56
Ti	0.26	0.26	0.25	0.23	0.26	0.28	0.30	0.31
Al ^{IV}	1.40	1.49	1.38	1.43	1.40	1.39	1.39	1.44
Al ^{VI}	2.05	2.04	2.08	2.10	2.05	2.09	2.02	1.99
Fe	2.16	2.29	2.20	2.25	2.22	2.15	2.20	2.23
Fe ²⁺	1.29	1.49	1.33	1.34	1.35	1.21	1.22	1.50
Fe ³⁺	0.97	0.93	0.98	1.03	0.99	1.03	1.08	0.86
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Mg	3.62	3.61	3.55	3.62	3.57	3.55	3.55	3.52
Cr	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
Ca	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Na	0.06	0.11	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05
K	2.18	2.11	2.23	2.14	2.21	2.18	2.17	2.30
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg)	0.26	0.29	0.27	0.27	0.27	0.25	0.26	0.30
Mg/(Mg+Fe ²⁺ +Mn)	0.73	0.70	0.73	0.73	0.72	0.74	0.74	0.70
Al ^{VI} +Fe ³⁺ +Ti	3.29	3.23	3.31	3.36	3.29	3.40	3.40	3.16
Fe ²⁺ +Mn	1.31	1.51	1.34	1.36	1.37	1.23	1.23	1.51
X _{Mg}	0.62	0.60	0.61	0.60	0.60	0.61	0.61	0.60
Ti 温度(℃)	669	663	660	647	663	681	686	688
P(MPa)	390	411	391	415	389	398	383	376
H(m)	1 472	1 552	1 479	1 569	1 469	1 505	1 448	1 422

注:FeO^T 为电子探针测试 FeO 质量百分数,X_{Mg}=Mg/(Mg+Fe).

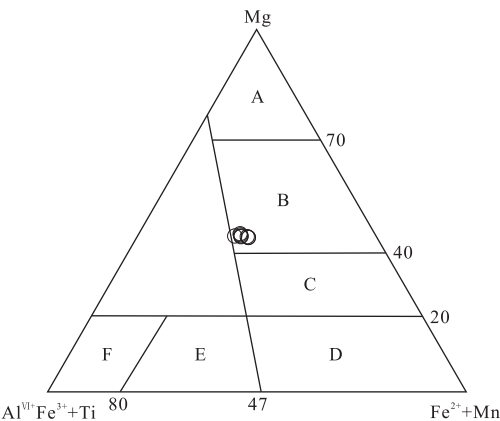


图 6 黑云母 $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe}^{3+}+\text{Ti})-(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ 分类图
Fig.6 $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe}^{3+}+\text{Ti})-(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ diagram of biotites
A.金云母;B.镁质黑云母;C.铁质黑云母;D.铁叶云母;E.铁白云母;F.白云母;据 Foster(1960) 修改

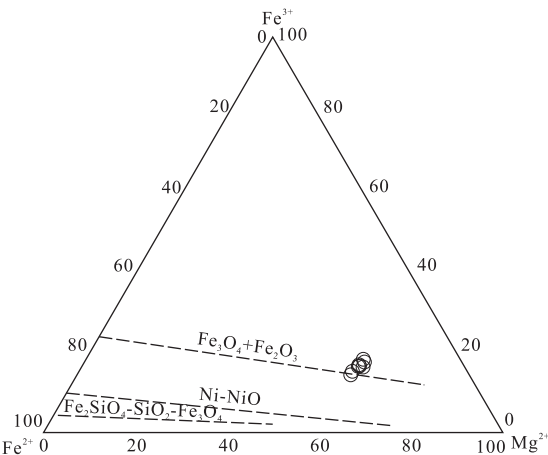


图 7 黑云母的 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$ 图解
Fig.7 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$ diagram of biotites
据 Wones and Eugster(1965)

MgO 含量较高,在 12.97%~13.46%,平均值为 13.22%;FeT 为 14.45%~14.93%,平均值为 14.72%。 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 比值为 0.25~0.30,平均值为 0.27,标准差为 0.01,比值均一,表明测试的黑云母未遭受后期的流体改造(Stone,2000)。岩体中黑云母 CaO 的质量分数较低,部分低于检测限,显示出无钙或贫钙特征,表明其不受或很少受大气流体循环或岩浆期后初生变质引起的绿泥石化和碳酸盐化影响(Kumar and Pathak,2010),表明测试黑云母均为原生岩浆成因的黑云母。将黑云母的成分在 $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe}^{3+}+\text{Ti})-(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ 图解中进行投图(图 6),主要落入 B 区,属于镁质黑云母。在黑云母的 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$ 图解中,该岩体中黑云母数据投点主要落在 $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Fe}_3\text{O}_4$ 缓冲剂线之上,

表明其结晶于高氧逸度环境中(图 7)。

3.2 锆石 LA-ICP-MS 年代学

本次所挑选的闪长岩中锆石阴极发光图像显示如图 8,锆石中自形程度较好,主要为长柱状和粒状,少数呈断头晶,锆石长径为 80~120 μm ,可见岩浆韵律环带结构,显示其岩浆成因,21 个测试点结果表明(表 4): $\text{U}(385\times10^{-6}\sim2\,862\times10^{-6})$ 和 $\text{Th}(264\times10^{-6}\sim1\,929\times10^{-6})$ 含量较高, Th/U 比值为 0.40~0.92,均值为 0.60。在锆石 U-Pb 谐和图(图 9a)中,所有数据点均落在谐和线及其附近,21 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据的加权平均年龄为 $230\pm2\text{ Ma}$, $\text{MSWD}=0.17$ (图 9b)。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

对于查涌闪长岩测年样品锆石进行了 Lu-Hf 同位素测试,测试点尽量选取与 U-Pb 年龄位置相同或相近,分析结果见表 5。锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 259~0.001 744, $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值为 -0.99~-0.95,远低于上地壳($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.009\,3$, $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}=-0.72$)的值(Vervoort and Patchett,1996)。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 342~0.282 518,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -10.4~-10.3 和 -6.4~-4.0,锆石 Hf 单阶段模式年龄(t_{DM1})为 1 021~1 311 Ma。

3.4 岩石地球化学

3.4.1 主量元素 查涌闪长岩主微量元素分析结果位于表 6,从表中可以看出查涌闪长岩具有较高的 SiO_2 含量为 56.31%~57.09%,较高的 MgO 含量 6.52%~8.98%, FeO_t 含量为 6.22%~6.88%,较高的 $\text{Mg}^\#$ 值为 62.8~70.3,较高的 A_2O_3 含量 13.98%~15.38%, A/CNK 值为 0.75~0.82,CaO 含量为 7.38%~8.48%, Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 1.74%~2.02%,0.90%~1.29%,样品 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.44~2.04,相对富钠, TiO_2 和 MnO 含量较低分别为 0.40%~0.61%、0.17%~0.20%。在 TAS 图解中位于辉石闪长岩与闪长岩分界线区域(图 10),在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中所有样品落入钙碱性系列范围中。通常认为, SiO_2 含量在 53%~60%,MgO 含量大于 4%, $\text{Mg}^\#$ 值大于 45 的闪长岩为高 Mg 闪长岩(张旗等,2005),查涌闪长岩岩石地球化学结果均符合以上特征,因此可以确定查涌闪长岩为高镁闪长岩。

3.4.2 微量元素 查涌闪长岩稀土元素总量较低, $\text{REE}=55.39\times10^{-6}\sim65.15\times10^{-6}$,稀土元素球粒陨石配分曲线(图 11a)显示为微弱右倾,富集轻稀土,相对亏损重稀土, $\text{LREE}/\text{HREE}=5.07\sim5.67$,

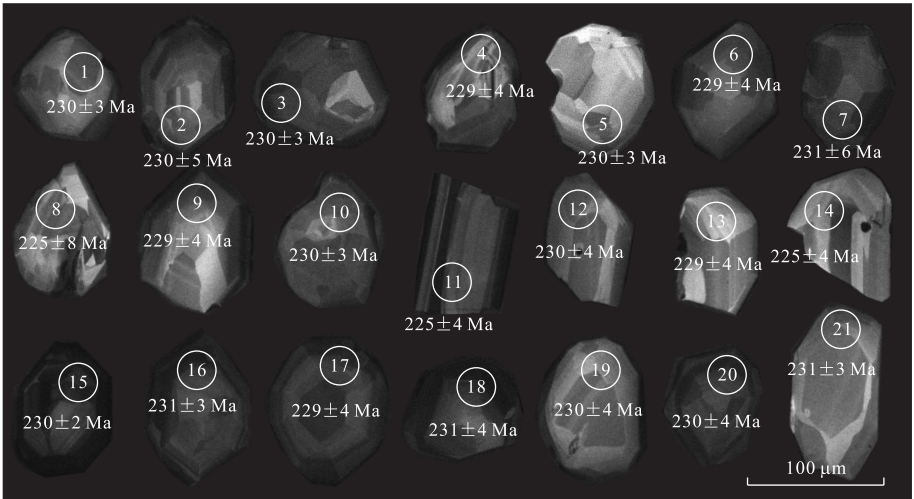


图 8 查涌闪长岩锆石阴极发光图像

Fig.8 Cathodoluminescence images of analyzed zircons from diorite in Chayong

表 4 查涌闪长岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 同位素定年结果

Table 4 Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of diorite in Chayong

测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ
CY-01	271	463	0.59	0.050 7	0.002 6	0.253 9	0.012 7	0.036 3	0.000 5	230	3
CY-02	397	765	0.52	0.052 7	0.002 1	0.262 2	0.010 1	0.036 4	0.000 8	230	5
CY-03	338	715	0.47	0.053 1	0.001 9	0.265 8	0.009 7	0.036 3	0.000 4	230	3
CY-04	553	733	0.75	0.052 4	0.003 1	0.260 6	0.015 4	0.036 2	0.000 6	229	4
CY-05	271	441	0.61	0.052 8	0.002 6	0.263 3	0.012 8	0.036 3	0.000 6	230	3
CY-06	264	444	0.59	0.050 8	0.002 3	0.251 4	0.010 8	0.036 2	0.000 6	229	4
CY-07	311	682	0.46	0.055 7	0.004 1	0.282 5	0.022 8	0.036 4	0.000 9	231	6
CY-08	640	696	0.92	0.057 8	0.008 4	0.283 0	0.043 6	0.035 5	0.001 3	225	8
CY-09	319	789	0.40	0.053 3	0.003 6	0.265 0	0.018 1	0.036 1	0.000 7	229	4
CY-10	507	641	0.79	0.048 1	0.002 2	0.239 7	0.010 7	0.036 3	0.000 5	230	3
CY-11	1 929	2 862	0.67	0.056 8	0.004 5	0.266 0	0.016 9	0.035 5	0.000 7	225	4
CY-12	289	385	0.75	0.054 4	0.002 6	0.271 4	0.012 8	0.036 3	0.000 6	230	4
CY-13	396	800	0.50	0.050 9	0.002 4	0.252 4	0.010 3	0.036 2	0.000 6	229	4
CY-14	291	623	0.47	0.052 6	0.003 1	0.259 1	0.014 5	0.035 5	0.000 7	225	4
CY-15	1 218	2 053	0.59	0.050 0	0.001 2	0.251 1	0.006 1	0.036 3	0.000 4	230	2
CY-16	481	895	0.54	0.049 8	0.001 8	0.250 8	0.009 4	0.036 4	0.000 4	231	3
CY-17	379	681	0.56	0.052 2	0.003 2	0.260 0	0.015 8	0.036 2	0.000 7	229	4
CY-18	319	618	0.52	0.051 3	0.002 9	0.255 1	0.014 1	0.036 4	0.000 6	231	4
CY-19	338	484	0.70	0.055 2	0.003 5	0.277 7	0.018 3	0.036 3	0.000 6	230	4
CY-20	362	871	0.42	0.055 7	0.001 9	0.277 9	0.009 6	0.036 4	0.000 6	230	4
CY-21	389	452	0.86	0.053 9	0.002 8	0.270 0	0.013 9	0.036 4	0.000 5	231	3

(La/Yb)_N=4.33~5.02,轻重稀土分馏不明显,重稀土平坦分布,样品 Eu 异常不明显,单个样品显示出微弱的正 Eu 异常,Eu/Eu^{*}=0.99~1.24.

在微量元素原始地幔配分曲线中(图 11b),显示富集大离子亲石元素元素 Rb、Ba、K 以及 Th,亏损高场强元素 Nb、P、Ti 同时亏损 U,配分曲线右倾.另外岩石的

Cr、Ni 含量较高,分别为 218.9×10⁻⁶~415.9×10⁻⁶和 57.86×10⁻⁶~127.6×10⁻⁶,同时具有较高含量的 Cu (32.88×10⁻⁶~157.20×10⁻⁶)和 Co(24.58×10⁻⁶~33.72×10⁻⁶),样品具有较低的 Sr 含量(129.9×10⁻⁶~164.1×10⁻⁶),较高的 Y 含量(14.45×10⁻⁶~16.57×10⁻⁶),低 Sr/Y 值(8.99~10.73).

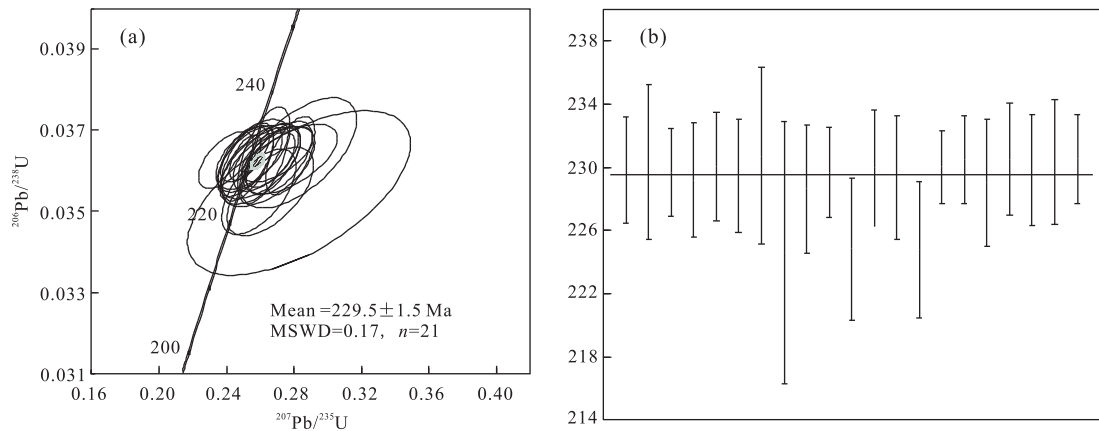


图 9 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a);锆石年龄加权图(b)

Fig.9 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average ages diagram (b) for diorite

表 5 查涌闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of diorite in Chayong

点号	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} (Ma)	f _{Lu/Hf}
CY-1	229	0.007 231	0.000 371	0.282 518	0.000 016	0.282 517	−9.0	−4.0	1 021	−0.99
CY-2	229	0.009 170	0.000 458	0.282 506	0.000 015	0.282 504	−9.4	−4.4	1 040	−0.99
CY-3	229	0.012 179	0.000 544	0.282 518	0.000 015	0.282 516	−9.0	−4.0	1 026	−0.98
CY-4	229	0.025 173	0.001 028	0.282 485	0.000 017	0.282 480	−10.2	−5.3	1 086	−0.97
CY-5	229	0.030 632	0.001 238	0.282 482	0.000 017	0.282 477	−10.3	−5.4	1 096	−0.96
CY-6	229	0.009 168	0.000 430	0.282 498	0.000 015	0.282 496	−9.7	−4.7	1 051	−0.99
CY-7	229	0.005 738	0.000 299	0.282 507	0.000 019	0.282 506	−9.4	−4.4	1 035	−0.99
CY-8	229	0.005 037	0.000 259	0.282 474	0.000 019	0.282 473	−10.5	−5.5	1 078	−0.99
CY-9	229	0.020 573	0.000 857	0.282 451	0.000 022	0.282 448	−11.3	−6.4	1 127	−0.97
CY-10	229	0.037 301	0.001 680	0.282 347	0.000 019	0.282 339	−15.0	−10.3	1 302	−0.95
CY-11	229	0.006 323	0.000 324	0.282 499	0.000 015	0.282 498	−9.7	−4.7	1 046	−0.99
CY-12	229	0.013 544	0.000 595	0.282 457	0.000 017	0.282 455	−11.1	−6.2	1 112	−0.98
CY-13	229	0.005 417	0.000 286	0.282 458	0.000 017	0.282 457	−11.1	−6.1	1 102	−0.99
CY-14	229	0.006 753	0.000 355	0.282 455	0.000 019	0.282 453	−11.2	−6.2	1 108	−0.99
CY-15	229	0.037 040	0.001 744	0.282 342	0.000 022	0.282 335	−15.2	−10.4	1 311	−0.95

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(0) = [({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}}/({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10\,000$; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = \{[({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10\,000$; $T_{\text{Hf1}} = 1/\lambda \times [1 + \{({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}\} / \{({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}\}]$; $T_{\text{Hf2}} = T_{\text{Hf1}} - (T_{\text{Hf1}} - t) \{ (f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}) \}$; $f_{\text{Lu/Hf}} = ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},1}$; 其中, $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测定值, $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.032\,2$, $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$; $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$; f_{CC} 、 f_{S} 、 f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$, t 为样品形成时间, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$.

4 讨论

4.1 黑云母及角闪石形成的物理化学条件

Henry *et al.* (2005) 提出了黑云母 Ti 温度计计算公式:

$$T = \{ [\ln(\text{Ti}) - a - c(X_{\text{Mg}})^3] / b \}^{0.333},$$

其中: T 的单位为 $^{\circ}\text{C}$; Ti 为以 22 个氧原子为基础计算出的黑云母中 Ti 的阳离子数; $X_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$; $a = -2.359\,4$; $b = 4.648\,2 \times 10^{-9}$; $c = -1.728\,3$; 且 $X_{\text{Mg}} = 0.275 \sim 1.000$; $\text{Ti} = 0.040 \sim 0.600$; $T = 400 \sim 800\,^{\circ}\text{C}$ 为准确的校正范围. 计算获

得闪长岩中黑云母的结晶温度介于 $647 \sim 688\,^{\circ}\text{C}$, 平均为 $670\,^{\circ}\text{C}$ (图 12).

Uchida *et al.* (2007) 研究表明, 黑云母中的全铝含量同花岗岩的固结压力具有很好的正相关特性, 其关系式如下:

$$P(\times 100\,\text{MPa}) = 3.03 \times {}^{\text{T}}\text{Al} - 6.53 (\pm 0.33),$$

其中: ${}^{\text{T}}\text{Al}$ 是指在以 22 个氧原子为基础计算出的黑云母中铝阳离子总数. 利用此压力计估算的该闪长岩中黑云母结晶的压力为 $376 \sim 415\,\text{MPa}$. 侵位深度采用 $P = \rho \cdot g \cdot H$ 进行换算, 其中: $\rho = 2\,700\,\text{kg}/\text{m}^3$; $g = 9.8\,\text{m}/\text{s}^2$, 相当于 $14 \sim 16\,\text{km}$, 平均深度为 $15\,\text{km}$.

表 6 查涌闪长岩岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})和稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 6 Major elements, trace elements and rare elements analyses of diorite in Chayong

样品	SCY1	SCY2	SCY3	SCY4	样品	SCY1	SCY2	SCY3	SCY4
SiO ₂	56.92	56.64	57.09	56.31	Y	16.57	14.5	14.45	14.73
Al ₂ O ₃	15.38	13.98	14.60	15.23	Zr	63.5	38.79	54.59	58.77
Fe ₂ O ₃	1.87	1.21	0.60	0.88	Nb	6.36	5.78	4.99	5.54
FeO	5.19	5.61	5.68	5.57	Cd	1.41	1.19	1.39	1.45
CaO	7.77	7.38	8.48	8.43	Ba	191.0	2796.0	130.2	158.8
MgO	6.52	8.89	7.82	7.35	La	11.61	10.49	9.67	10.03
K ₂ O	1.16	0.97	0.90	1.29	Ce	24.76	23.68	20.97	21.57
Na ₂ O	2.02	1.74	1.83	1.85	Pr	3.06	3.10	2.64	2.73
TiO ₂	0.61	0.54	0.40	0.48	Nd	11.63	11.75	9.91	10.07
P ₂ O ₅	0.07	0.09	0.06	0.06	Sm	2.65	2.69	2.30	2.28
MnO	0.20	0.18	0.17	0.18	Eu	0.89	1.10	0.78	0.81
LOI	2.02	2.52	2.07	1.96	Tb	0.47	0.44	0.41	0.41
Total	99.74	99.75	99.70	99.58	Dy	2.84	2.48	2.42	2.50
FeO _t	6.88	6.70	6.22	6.36	Ho	0.57	0.49	0.49	0.51
M#	63	70	69	67	Er	1.68	1.41	1.46	1.45
Na/K	1.74	1.79	2.04	1.44	Tm	0.24	0.19	0.20	0.21
ANK	3.35	3.58	3.65	3.43	Yb	1.69	1.41	1.51	1.49
P	310.39	391.98	262.87	280.06	Lu	0.28	0.22	0.24	0.23
Sc	30.82	31.41	31.32	31.38	Hf	1.86	1.30	1.67	1.70
V	171.6	174.1	153.7	164.7	Ta	0.66	0.64	0.71	0.70
Cr	218.9	415.9	296.1	284.8	Pb	8.65	90.56	6.29	7.98
Mn	1 402	1 206	1 187	1 230	Th	3.32	1.53	1.63	1.27
Co	24.58	33.72	27.43	26.63	U	0.81	0.06	0.10	0.10
Ni	57.86	127.6	82.87	69.06	Sr/Y	9.90	10.73	8.99	9.64
Cu	34.37	157.20	32.88	38.25	LREE	54.59	52.81	46.27	47.50
Zn	83.09	132.8	76.29	75.25	HREE	7.76	6.63	6.72	6.80
Ga	14.89	12.37	13.19	14.02	REE	62.35	59.44	52.99	54.30
As	6.30	4.48	4.50	5.08	LREE/HREE	7.03	7.97	6.89	6.98
Se	7.65	5.39	6.75	9.40	(La/Yb) _N	4.64	5.02	4.33	4.54
Rb	39.92	41.09	34.83	55.06	Eu/Eu*	0.99	1.24	1.00	1.04
Sr	164.1	155.6	129.9	142					

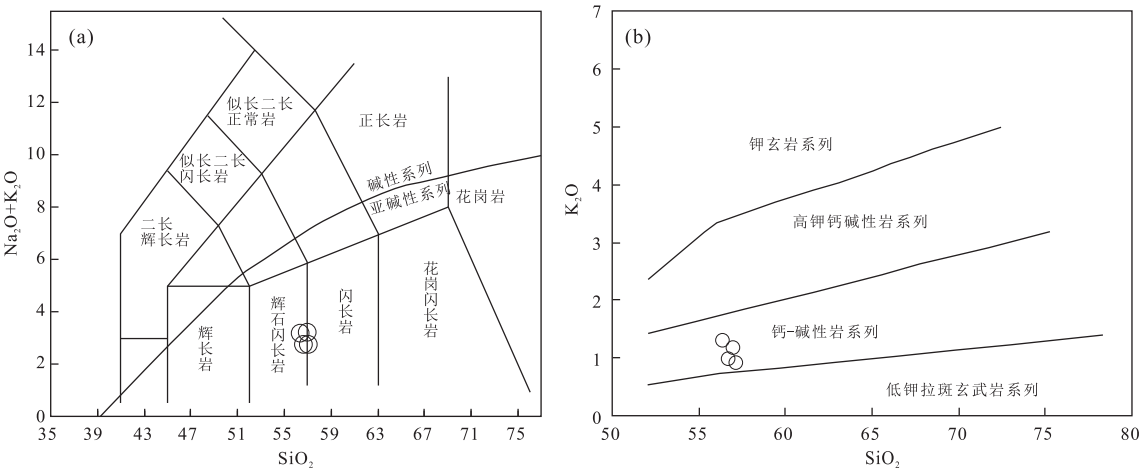


图 10 查涌闪长岩 TAS 图解(a)和 SiO₂-K₂O 图解(b)

Fig.10 TAS (a) and SiO₂-K₂O (b) diagrams for diorite in Chayong

4.2 岩浆成因

电子探针分析结果显示,闪长岩中角闪石具有

较高的 MgO 含量 13.98%~15.25%和镁质率[Mg/(Mg+Fe²⁺)] = 0.67~0.70,表明其寄主岩石应来

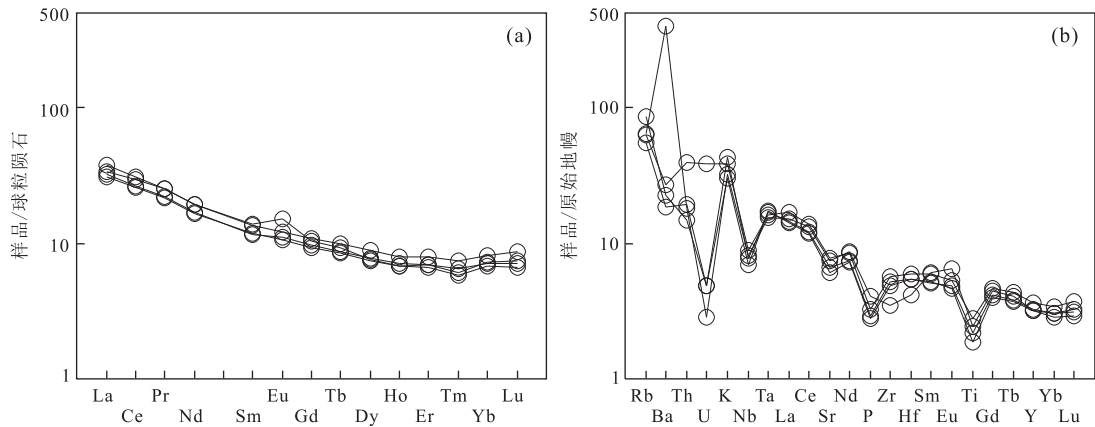


图 11 查涌闪长岩稀土元素球粒陨石标准化稀土元素(标准化数值据 Boynton,1984)和原始地幔标准化微量元素配分曲线(标准化数据据 Sun and McDonough,1989)

Fig.11 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for diorite in Chayong

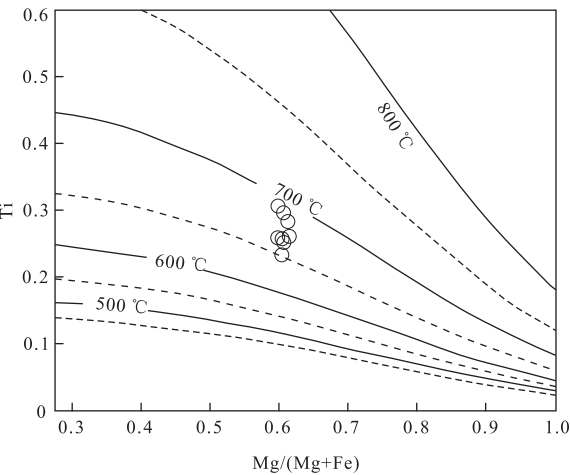


图 12 黑云母结晶 Ti vs.Mg/(Mg+Fe)图解

Fig. 12 Temperature isotherms (°C) calculated from the surface-fit equation on Ti vs. Mg/(Mg+Fe) diagram

据 Henry *et al.* (2005)

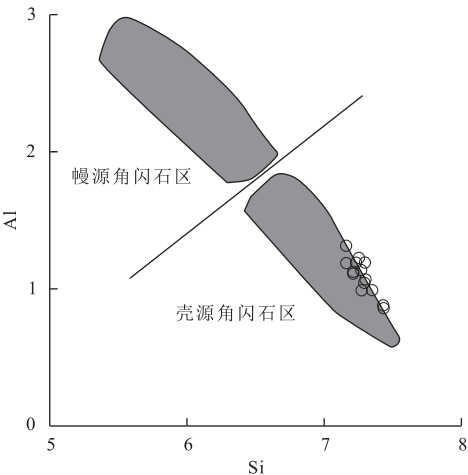


图 13 角闪石 Al-Si 图解

Fig.13 Al-Si Diagram of crystal-chemical genesis of hornblende

姜常义和安三元(1984);Al,S为角闪石结构式中离子数

源于地幔.姜常义和安三元(1984)曾讨论过火成岩中钙质角闪石的化学组成及其意义,研究表明随着岩浆结晶温度与压力的升高,钙质角闪石的SiO₂含量降低,Al、Ti和K₂O+Na₂O的含量增加;壳源Al₂O₃的含量一般不超过10%,而幔源一般不低于10%;幔源角闪石的结构式中Si/(Si+Ti+Al)比值不超过0.765,而壳源不低于0.775;Ca在角闪石中的含量稳定,与岩浆的温度、压力及全岩的化学组成无明显联系,一般Ca/(Ca+Mg+Fe)比值为0.26~0.31.查涌闪长岩中角闪石的SiO₂含量较高,Al、Ti和K₂O+K₂O的含量较低,显示经历了较低的结晶温度与压力,Al₂O₃含量为4.98%~7.55%,均低于

10%,显示其具有壳源的特点,Si/(Si+Ti+Al)比值介于0.837~0.891,均大于0.775,同样显示其具有壳源的特点.在角闪石Al-Si成因判别图解(图13)中样品均落入壳源角闪石区,表明角闪石具有地壳岩石成因的特点.以上电子探针结果表明查涌闪长岩中角闪石即具有幔源的特点同时具有壳源的特点,形成该类角闪石的可能原因为幔源岩浆遭受到了壳源物质的混合作用.电子探针分析结果显示,闪长岩中斜长石核部斜长石明显比边部斜长石偏基性,核部斜长石属于倍长石或钙长石,边部斜长石属于中长石或拉长石.正长环带斜长石是由于温度的下降,后来晶出的Ab含量高的斜长石包裹在早结晶的斜长石表面,从而边缘酸性强于核部,表明岩浆

房受到外界的扰动,同样显示其遭受了壳源物质的混合作用.

主微量分析结果表明查涌闪长岩富硅(56.31%~57.09%)、富镁(6.52%~8.98%)、高的 $Mg^\#$ 值(62.8~70.3), Na_2O/K_2O 值为 1.44~2.04, 具有较高含量的 Cr($218.9 \times 10^{-6} \sim 415.9 \times 10^{-6}$)和 Ni($57.86 \times 10^{-6} \sim 127.6 \times 10^{-6}$), 富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE, 铕异常不明显, 具有类似高镁闪长岩的特征, 与高镁安山岩相对应. Kamei *et al.* (2004) 将高镁安山岩划分为 4 种类型: adakitic HMA、boninitic HMA、bajaitic HMA 和 sanukitic HMA. 埃达克岩石俯冲板片部分熔融形成的, 与地幔有少量的物质交换, 具有较高含量的 Sr($>400 \times 10^{-6}$), 较低的 Y 值($<18 \times 10^{-6}$), 高的 Sr/Y 值(>40)和 $(La/Yb)_N$ 值(>40) (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Stern and Kilian, 1996); Bajaites HMA 是一类极为少见的岩石, 具有非常高的 Sr 值($>1\,000 \times 10^{-6}$), Ba 值($>1\,000 \times 10^{-6}$) 和高的 K/Rb 值($>1\,000$), Saunders *et al.* (1987) 认为是地幔橄榄岩与来自俯冲板片部分熔融的富 Si 熔体不平衡反应形成的, 并与 adakitic HMA 的微量元素特征相近(图 4.13a, b) 且有相似的成因(Rogers *et al.*, 1985; Defant and Drummond, 1990; Yogodzinski *et al.*, 1994), Boninitic HMA(玻安岩)是俯冲带之上亏损的残留地幔含水熔融形成的, 具有非常低的 TiO_2 、LREE、LILE 和 HFSE, sanukitic HMA(赞岐岩)通常出现于太古宙, 具有富集 LREE 和 LILE, HREE 含量较低, 同时富 MgO、Ni 和 Cr, 是地幔橄榄岩与俯冲的洋壳板片或沉积物部分熔融的

富硅质熔体平衡反应形成的(Yogodzinski *et al.*, 1994; Shimoda *et al.*, 1998; Kamei *et al.*, 2004).

与高镁安山岩相比,主要地球化学特征与其相似的高镁闪长岩的研究很少. 由于高镁闪长岩是深成岩, 因而许多由非高镁安山岩质岩浆形成的堆晶岩, 并非由高镁安山质岩浆固结形成的. 所以, 在确定高镁安山岩成因时, 需判断其由何种岩浆形成, 一般运用矿物(例如: 单斜辉石)和岩石地球化学综合判断(Kamei *et al.*, 2004). 查涌高镁闪长岩中不存在单斜辉石, 并且也不具有堆晶结构, 同时未发现在垂向上具有岩相的分带性, 所以该高镁闪长岩不是堆晶岩, 是由岩浆直接结晶而成. 该高镁闪长岩与 Kamei *et al.* (2004) 所划分的高镁埃达克岩相比, Sr 含量较低, Sr/Y 值和 $(La/Yb)_N$ 值较低; 与玻安岩相比, 具有较高的 TiO_2 、LREE、LILE 含量; 与 Bajaites 相比, 其 Sr 和 Ba 含量明显偏低, 因而不属于这 3 类岩石. 查涌高镁闪长岩富集 LREE 和 LILE, HREE 含量较低, 同时富 MgO、Ni 和 Cr, 在 Kamei *et al.* (2004) 的 sanukite、adakite、boninite 和 bajaite 判别图解(图 14)中, 查涌闪长岩均落入到赞岐岩区域内, 表明该高镁闪长岩的形成可能与赞岐岩有相似的岩浆过程, 应属于赞岐质高镁闪长岩.

赞岐岩通常认为是地幔橄榄岩与俯冲的洋壳板片或沉积物部分熔融的富硅质熔体平衡反应形成的(Yogodzinski *et al.*, 1994; Shimoda *et al.*, 1998; Kamei *et al.*, 2004). 查涌闪长岩具有较高 $Mg^\#$ 值为 62.8~70.3, 远高于由深部陆壳物质熔融的 $Mg^\#$ 值($Mg^\# < 42$) (Rapp and Watson, 1995), 表明其由地幔演化而来, 高镁闪长岩中含有大量黑云母和角闪

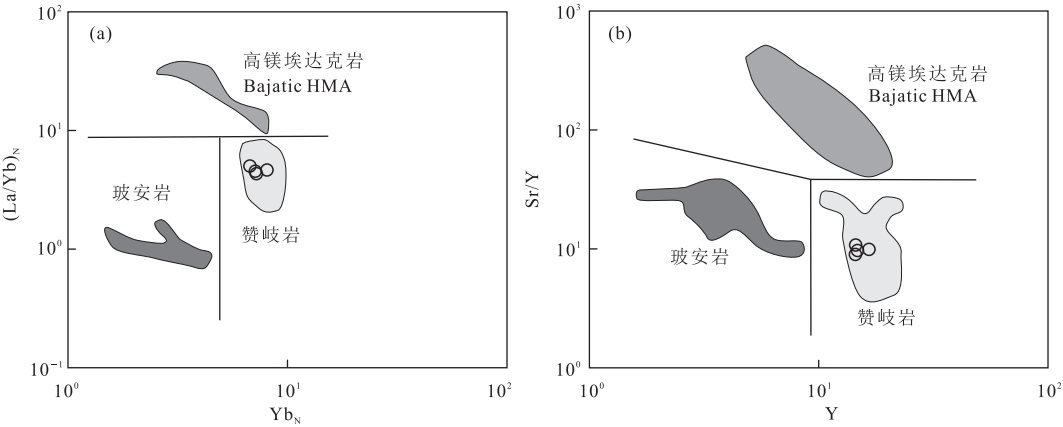


图 14 查涌闪长岩 sanukite、adakite、boninite 和 bajaite 判别图解

Fig.14 Discrimination diagrams for sanukite, adakite, boninite and bajaite

据 Kamei *et al.* (2004)

石,表明岩浆源区确实具有较高的水逸度,富集 LREE 和 LILE,亏损高场强元素 Nb、P、Ti 同样显示经过了流体交代过程.另外微量元素比值(Th/Yb、Nb/Yb、Ba/Th、Th/Nb、Nb/Zr 和 Th/Zr)可以有效的识别含水流体和俯冲带沉积物,本次测试样品具有较高的 Th/Yb 值(0.85~1.97),在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中,投点明显偏离 MORB-OIB 演化线(图 15a),表明其源区受到了俯冲组分的影响(Pearce,2008);样品具有相对稳定的 Th/Nb 值(0.23~0.52),而变化范围较大的 Ba/Th 值(57.48~1 828.65),Ba/Th-Th/Nb 图解(图 15b)中,显示有含水流体加入的趋势(Hanyu *et al.*,2006);样品在 Nb/Zr-Th/Zr 图解(图 15c)中,显示了以熔体俯冲交代为主,以上特征指示有大量的含水流体加入了地幔源区(Woodhead *et al.*,2004).

查涌闪长岩中中锆石的¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 比值为 0.282 342~0.282 518,对应的 ε_{Hf}(*t*)值主要集中于-6.4~-4.0,另有两个点分别为-10.4 和-10.3,ε_{Hf}(*t*)值(-6.4~-4.0)显示出弱富集的特征(图 16),表明其源区主要来源于弱富集的地幔.而ε_{Hf}(*t*)值(-10.4 和-10.3)显示出强富集的特征,表明其可能来源于强富集的地壳源区或该点打到了核部的继承锆石.锆石 Hf 单阶段模式年龄(*t*_{DM1})为1 021~1 311 Ma,以及强富集的特征表明有下地壳物质的混入(Wu *et al.*,2007).综上所述,查涌高镁闪长岩的源区可能是由地幔橄榄岩与俯冲的洋壳板片部分熔融的富硅质熔体平衡反应形成的.

4.3 构造环境

金沙江缝合带是三江地区一条重要的板块缝合带(潘桂棠等,2001),位于松潘-甘孜地块与北羌塘地块之间.该缝合带西段蛇绿岩带主要分布于玉树直达门、治多的当江-多彩及查涌、金乌兰胡地区(金贵善,2006).前人研究认为金沙江古特提斯洋的演化主

要发生在二叠纪,在早中二叠世为古特提斯洋的形成时期(孙晓猛等,1994).其证据主要来自于在当江以北获得了早一中二叠世纺锤形假阿尔拜虫和假阿尔拜虫的放射虫化石组合,为此提供了古生物化石方面的证据;金贵善(2006)获得治多聂恰蛇绿岩中辉长岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 268±11 Ma,由此可以推断早中二叠世可能为洋壳的发展时期.

区内地层主体以三叠系为主,以滨浅海、浅海、半深海相碎屑沉积、盐类化学沉积、海相火山沉积为主,发育海相碎屑岩-火山岩-碳酸盐沉积建造,代表了活动大陆边缘沟-弧-一盆体系的沉积环境.区内岩浆岩以三叠纪时期为主,呈北东向带状展布,对于尕龙格玛和撒纳龙哇地区凝灰岩研究表明,其均形成于与俯冲相关的构造背景之下(孙丰月,未发表数据).区域内侵入岩取得了大量研究成果.在金沙江缝合带西段西金乌兰地区发育洋壳熔融形成的埃达克岩,其锆石 U-Pb 年龄为 257±4 Ma(朱迎堂等,2004a),在玉树杂多纪能发现了洋壳俯冲相关的的基性-超基性岩体,其中辉长岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 252±2 Ma(金贵善,2006),表明晚二叠世该区已经由被动大陆边缘转换为活动大陆边缘.本次所研究的查涌高镁闪长岩与赞岐岩有相似的岩浆过程,通常认为赞岐岩的形成与年轻的热的板片俯冲相联系(Yogodzinski *et al.*,1994; Kamei *et al.*,2004),形成于俯冲板片之上的地幔楔(Smithies and Champion,1999,2003).查涌高镁闪长岩岩石地球化学结果显示,富集 LREE 和 LILE,亏损 HFSE,具有火山弧岩浆岩的特点,同样说明其形成环境与板片俯冲相关.本次获得查涌高镁闪长岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 230±2 Ma,属于晚三叠世,代表了其侵位结晶年龄.前人在金沙江缝合带西段附近已经获得了一些该时期的年代学数据,李勇等(2003)

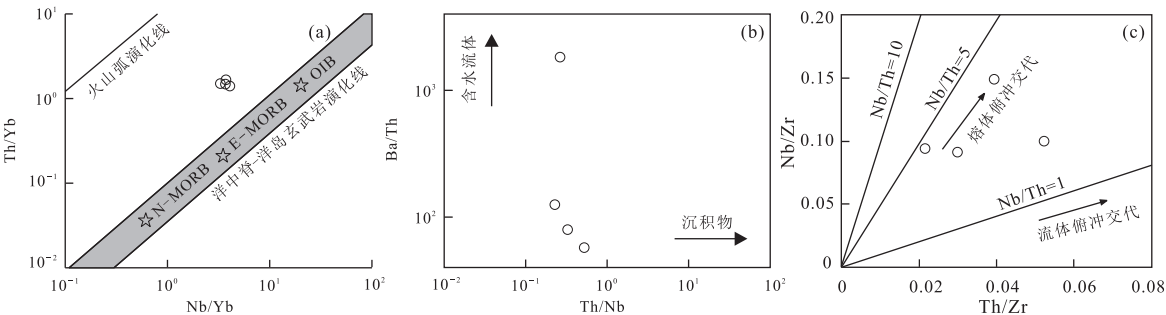


图 15 查涌闪长岩 Th/Yb-Nb/Yb(a)、Ba/Th-Th/Nb(b)和 Nb/Zr-Th/Zr 图解
Fig.15 Th/Yb-Nb/Yb,Ba/Th-Th/Nb and Nb/Zr-Th/Zr diagrams of diorite in Chayong
a.据 Pearce(2008);b.据 Hanyu *et al.*(2006);c.据 Woodhead *et al.*(2004)

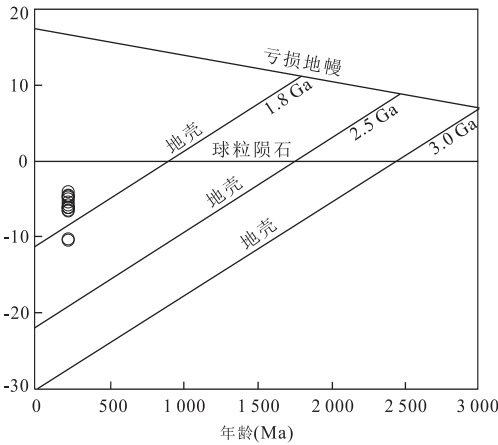


图 16 查涌闪长岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解
Fig.16 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t diagram of diorite in Chayong
据 Yang *et al.* (2006)

获得西金乌兰—金沙江缝合带西段蛇绿岩的年龄为 246 ± 5 Ma;金贵善(2006)获得玉树治多查涌蛇绿岩中辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 90~230 Ma;段其发等(2009)获得青海南部托河地区蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 239 ± 3 Ma;张能等(2012)获得弯岛弧蛇绿混杂带中变辉长岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 232 ± 11 Ma;朱迎堂等(2004b)在可可西里湖的巴颜喀拉山群中获得中—晚三叠世诺利期双壳化石;唐专红等(2007)在二岔沟蛇绿岩上覆硅泥质岩片中发现三叠统晚期限拉丁晚期至晚三叠世卡宁早期的放射虫化石.吕金刚等(2006)获得可可西里卧龙岗同碰撞二长花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 212 ± 3 Ma;金贵善(2006)获得玉树治多花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 208~216 Ma;Zhai *et al.* (2013)获得北羌塘变质带中酸性侵入岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 223~205 Ma;赵少卿等(2015)获得治多地区巴塘群火山岩锆石 U-Pb 年龄为 221 ± 1 Ma;刘彬等(2017)获得北羌塘地块玉树龙宝地区火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 230 ± 2 Ma.以上同位素年代学和古生物年代学研究表明金沙江缝合带在三叠世早期持续的俯冲作用并于三叠世晚期闭合.因而本文认为,查涌高镁闪长岩形成与古特提斯洋向羌塘地块俯冲有关,形成于俯冲板片之上的地幔楔环境.

5 结论

(1)玉树查涌高镁闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 230 ± 2 Ma,岩体侵位于晚三叠世.

(2)闪长岩中的斜长石具有正环带结构,核部斜长石属于倍长石或钙长石,边部属于中长石或拉长石;黑云母矿物成分为镁质黑云母,结晶温度介于 $647 \sim 688$ °C,侵位深度约为 14.2~15.5 km;角闪石属于钙质角闪石,显示壳幔混合成因的特点.

(3)查涌高镁闪长岩具有富硅、富镁、高的 $\text{Mg}^\#$ 值,较高含量的 Cr 和 Ni 的特征,岩石地球化学特征与赞岐岩类似,形成于俯冲带之上的地幔楔环境,岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\,342 \sim 0.282\,518$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-10.4 \sim -10.3$ 和 $-6.4 \sim -4.0$,锆石 Hf 单阶段模式年龄(t_{DMI})为 $1\,021 \sim 1\,311$ Ma.研究认为地幔橄榄岩与俯冲的洋壳板片部分熔融的富硅质熔体平衡反应形成的.

(4)查涌高镁闪长岩具有弧岩浆岩地球化学特征,表明金沙江洋在晚三叠世时期仍向西南发生俯冲消减作用.

致谢:感谢吉林大学李碧乐教授在论文撰写过程中给予的帮助,感谢吉林大学国土资源部东北亚矿产资源评价重点实验室和吉林大学测试中心在样品测试分析方面给予的便利,本项研究获得了国家自然科学基金项目(No.41272093)和中国地质调查局项目(No.12120113098300)的支持.

References

All Members of the IMA-CNMMN Amphibole Professional Committee, 2001. Amphibole Nomenclature-International Association of Mineralogy New Mineral and Mineral Named Committee Hornblende Professional Committee's Report, *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(1): 84-100 (in Chinese).

Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Elements Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63-144.

Chen, J. L., Xu, J. F., Ren, J. B., et al., 2014. Geochronology and Geochemical Characteristics of Late Triassic Porphyritic Rocks from the Zhongdian Arc, Eastern Tibet, and Their Tectonic and Metallogenic Implications. *Gondwana Research*, 26(2): 492-504. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.022>

Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>

Dewey, J. F., Shackleton, R. M., Chengfa, C., et al., 1988. The Tectonic Evolution of the Tibetan Plateau. *Philosophi-*

- cal Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 327 (1594): 379—413. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0135>
- Duan, Q. F., Wang, J. X., Bai, Y. S., et al., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Lithogeochemistry of Gabbro from the Ophiolite in Southern Qinghai Province. *Geology in China*, 36(2): 291—299 (in Chinese with English abstract).
- Elhlou, S., Belousova, E., Griffin, W. L., et al., 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ-Red Zircon Standard by Laser Ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1383>
- Foster, M. D., 1960. Interpretation of the Composition of Trioctahedral Micas. *Geol. Surv. Prof.*, Washington, 11—49.
- Fu, X. G., Wang, J., Tan, F. W., et al., 2010. The Late Triassic Rift-Related Volcanic Rocks from Eastern Qiangtang, Northern Tibet (China): Age and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 17(1): 135—144. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.04.010>
- Hanyu, T., Tatsumi, Y., Nakai, S., et al., 2006. Contribution of Slab Melting and Slab Dehydration to Magmatism in the NE Japan Arc for the Last 25 Myr: Constraints from Geochemistry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(8): 1—29. <https://doi.org/10.1029/2005gc001220>
- Henry, D. J., Guidotti, C. V., Thomson, J. A., 2005. The Ti-Saturation Surface for Low-to-Medium Pressure Metapelitic Biotites: Implications for Geothermometry and Ti-Substitution Mechanisms. *American Mineralogist*, 90(2/3): 316—328. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1498>
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595—2604 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. Y., An, S. Y., 1984. On Chemical Characteristics of Calcic Amphiboles from Igneous Rocks and Their Petrogenesis Significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 4(3): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Jin, G. S., 2006. Geochronology and Geochemistry Characters on Some Magmatic Rocks in the West of Xijir Ula-Jinshajiang Suture Zone. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1—85 (in Chinese with English abstract).
- Kamei, A., Owada, M., Nagao, T., et al., 2004. High-Mg Diorites Derived from Sanukitic HMA Magmas, Kyushu Island, Southwest Japan Arc: Evidence from Clinopyroxene and Whole Rock Compositions. *Lithos*, 75(3/4): 359—371. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.006>
- Kay, R. W., 1978. Aleutian Magnesian Andesites: Melts from Subducted Pacific Ocean Crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1/2): 117—132. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90032-x](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90032-x)
- Kumar, S., Pathak, M., 2010. Mineralogy and Geochemistry of Biotites from Proterozoic Granitoids of Western Arunachal Himalaya: Evidence of Bimodal Granitogeny and Tectonic Affinity. *Journal of the Geological Society of India*, 75(5): 715—730. <https://doi.org/10.1007/s12594-010-0058-0>
- Leake, B. E., 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61(405): 295—321. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>
- Li, S. P., Wang, Y. Z., Shen, C. S., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Late Permian-Early Triassic Continental Volcanic Rocks in the Zaduo Area, Northern Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 675—681 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Wang, C. S., Yi, H. S., 2003. The Late Triassic Collision and Sedimentary Responses at Western Segment of Jinshajiang Suture, Tibet. *Acta Sedimentologica Sinica*, 191—197 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2009. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Lu, J. G., Wang, J. C., Chu, C. H., et al., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Wolonggangmonzo-Granite Porphyry in the Western Segment of the Hoh Xil Belt, Qinghai-Tibet Plateau and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 721—724 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 70.
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R. S., et al., 2012. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3—14. <https://doi.org/10.1016/j.j>

jseas.2011.12.018

- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, X. Z., et al., 2001. The Tectonic Framework and Spatial Allocation of the Archipelagic Arc-Basin Systems on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 1–26 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100(1/2/3/4): 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Peng, T. P., Zhao, G. C., Fan, W. M., et al., 2015. Late Triassic Granitic Magmatism in the Eastern Qiangtang, Eastern Tibetan Plateau: Geochronology, Petrogenesis and Implications for the Tectonic Evolution of the Paleo-Tethys. *Gondwana Research*, 27(4): 1494–1508. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Pullen, A., Kapp, P., Gehrels, G. E., et al., 2008. Triassic Continental Subduction in Central Tibet and Mediterranean-Style Closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Geology*, 36(5): 351. <https://doi.org/10.1130/g24435a.1>
- 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. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Roger, F., Jolivet, M., Malavieille, J., 2010. The Tectonic Evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and Adjacent Areas from Proterozoic to Present: A Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254–269. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.03.008>
- Rogers, G., Saunders, A. D., Terrell, D. J., et al., 1985. Geochemistry of Holocene Volcanic Rocks Associated with Ridge Subduction in Baja California, Mexico. *Nature*, 315(6018): 389–392. <https://doi.org/10.1038/315389a0>
- Saunders, A. D., Rogers, G., Marriner, G. F., et al., 1987. Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks, Baja California, Mexico: Implications for the Petrogenesis of Post-Subduction Magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 32(1/2/3): 223–245. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90046-1)
- Shimoda, G., Tatsumi, Y., Nohda, S., et al., 1998. Setouchi High-Mg Andesites Revisited: Geochemical Evidence for Melting of Subducting Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(3/4): 479–492. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(98\)00105-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(98)00105-8)
- Smithies, R. H., Chiampion, D. C., 1999. Archean High-Mg Diorite (Sanukitoid) Suite, Pilbara Craton, Western Australia. In: Barbarin, B., ed., *The Origin of Granites and Related Rocks: Fourth Hutton Symposium Abstracts*. Clermont-Ferrand, France, 190.
- Smithies, R. H., Chiampion, D. C., 2003. Adakite, TTG and Archean Crustal Evolution. *European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts*, 5: 1630.
- Spurlin, M. S., Yin, A., Horton, B. K., et al., 2005. Structural Evolution of the Yushu-Nangqian Region and Its Relationship to Syncollisional Igneous Activity, East-Central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9): 1293. <https://doi.org/10.1130/b25572.1>
- Stern, C. R., Kilian, R., 1996. Role of the Subducted Slab, Mantle Wedge and Continental Crust in the Generation of Adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263–281. <https://doi.org/10.1007/s004100050155>
- Stone, D., 2000. Temperature and Pressure Variations in Suites of Archean Felsic Plutonic Rocks, Berens River Area, Northwest Superior Province, Ontario, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 38(2): 455–470. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.2.455>
- 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. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, X. M., Nie, Z. T., Liang, D. Y., 1994. On the Time and Tectonic Significance of Ophiolitic Mélange in Jinsha River Belt, Northwest Yunnan. *Geoscience*, 8(3): 241–246 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. H., Lu, J. P., Li, Y. K., et al., 2007. Discovery of Middle Triassic Radiolarian Fossils in Cherts in the Vicinity of the Tubei Lake, Northern Nyima, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 73–76 (in Chinese with English abstract).
- Uchida, E., Endo, S., Makino, M., 2007. Relationship between Solidification Depth of Granitic Rocks and Formation of Hydrothermal Ore Deposits. *Resource Geology*, 57(1): 47–56. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2006.00004.x>
- Vervoort, J. D., Patchett, P., 1996. Behavior of Hafnium and Neodymium Isotopes in the Crust: Constraints from Precambrian Crustally Derived Granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717–3733. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00201-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00201-3)
- Wang, B. Q., Zhou, M. F., Chen, W. T., et al., 2013. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Triassic Volcanic Rocks in the Northern Yidun Terrane, Eastern Tibet.

- Lithos*, 175—176, 285—301. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Wang, J., Sun, F. Y., Yu, L., 2017. Fluid inclusions and H-O-S-Pb Isotope Systematics of the Galonggema Cu Deposit in Yushu, Qinghai Province, China. *Earth Science*, 42(6): 941—956 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.074>
- Wones, D. R., Eugster, H. P., 1965. Stability of Biotite; Experiment, Theory, and Application. *Mineralogical Society of America, American Mineralogist*, 50: 1228—1272.
- Woodhead, J., Hergt, J., Shelley, M., et al., 2004. Zircon Hf Isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation. *Chemical Geology*, 209(1/2): 121—135. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.04.026>
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Lo, C. H., et al., 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic Accretionary Complex in the Jiamusi Massif at the Western Pacific Margin of Northeastern China. *Island Arc*, 16(1): 156—172. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2007.00564.x>
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, W. C., et al., 2013. Paleo-Tethys System and Accretionary Orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847—1860 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Wu, F., Shao, J., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3/4): 336—352. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.029>
- Yang, T. N., Ding, Y., Zhang, H. R., et al., 2014. Two-Phase Subduction and Subsequent Collision Defines the Paleotethyan Tectonics of the Southeastern Tibetan Plateau: Evidence from Zircon U-Pb Dating, Geochemistry, and Structural Geology of the Sanjiang Orogenic Belt, Southwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 126(11/12): 1654—1682. <https://doi.org/10.1130/b30921.1>
- Yang, T. N., Hou, Z. Q., Wang, Y., et al., 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic Tectonic Evolution of Northeast Tibet: Evidence from the Triassic Composite Western Jinsha-Garzê-Litang Suture. *Tectonics*, 31(4): TC4004. <https://doi.org/10.1029/2011tc003044>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yogodzinski, G. M., Volynets, O. N., Koloskov, A. V., et al., 1994. Magnesian Andesites and the Subduction Component in a Strongly Calc-Alkaline Series at Piip Volcano, far Western Aleutians. *Journal of Petrology*, 35(1): 163—204. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.1.163>
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Su, L., et al., 2013. Triassic Arc Magmatism in the Qiangtang Area, Northern Tibet: Zircon U-Pb Ages, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics, and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 162—178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.08.025>
- Zhang, K. J., Tang, X. C., Wang, Y., et al., 2011. Geochronology, Geochemistry, and Nd Isotopes of Early Mesozoic Bimodal Volcanism in Northern Tibet, Western China: Constraints on the Exhumation of the Central Qiangtang Metamorphic Belt. *Lithos*, 121(1/2/3/4): 167—175. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.10.015>
- Zhang, N., Li, J. B., Yang, Y. S., et al., 2012. Petrogeochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Wandaohu Ophiolite Mélange, Jinshajiang Suture, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1291—1304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Di, M. G., et al., 2005. Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications of Sanukite. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 24(2): 117—125 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. Q., Fu, L. B., Wei, J. H., et al., 2015. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Quartz Diorite in Zhiduo Area, Qinghai Province. *Earth Science*, 40(1): 61—76 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. Q., Tan, J., Wei, J. H., et al., 2014. Late Triassic Batang Group Arc Volcanic Rocks in the Northeastern Margin of Qiangtang Terrane, Northern Tibet: Partial Melting of Juvenile Crust and Implications for Paleotethys Ocean Subduction. *International Journal of Earth Sciences*, 104(2): 369—387. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1080-z>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2013. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429—1454. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Zhu, Y. T., Guo, T. Z., Peng, W., et al., 2004a. New Result and Major Progress in Regional Geological Survey of the Hol-Xil Lake Sheet. *Geological Bulletin of China*, 23(5—6): 543—548 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. T., Yi, H. S., Wang, Q., et al., 2004b. The Discovery

and Significance of the Middle Permian Adakites along the Huangdong River North of the Xijir Ulan Lake, Qinghai. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(2):30–34 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

IMA-CNMMN 角闪石专业委员会全体成员, 2001. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告. *岩石矿物学杂志*, 20(1): 84–100.

段其发, 王建雄, 白云山, 等, 2009. 青海南部蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征. *中国地质*, 36(2):291–299.

侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604.

姜常义, 安三元, 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义. *矿物岩石*, 4(3):1–9.

金贵善, 2006. 西金乌兰—金沙江缝合带西段部分岩浆岩地质年代学及地球化学特征. 北京: 中国地质科学院, 1–85.

刘彬, 马昌前, 黄坚, 等, 2017. 北羌塘北缘玉树三叠纪火山岩的成因机制及其构造意义. *岩石矿物学杂志*, 35(1): 1–15.

李善平, 王毅智, 沈存祥, 等, 2007. 青藏高原北羌塘盆地杂多地区晚二叠世—早三叠世陆相火山岩的地球化学特征及其意义. *地质通报*, 26(6):675–681.

李勇, 王成善, 伊海生, 2003. 西藏金沙江缝合带西段晚三叠世碰撞作用与沉积响应. *沉积学报*, 21(2):191–197.

吕金刚, 王炬川, 褚春华, 等, 2006. 青藏高原可可西里带西段

卧龙岗二长花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 25(6):721–724.

潘桂堂, 王立全, 李兴振, 等, 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置. *沉积与特提斯地质*, 21(3): 1–26.

孙晓猛, 聂泽同, 梁定益, 1994. 滇西北金沙江带蛇绿混杂岩的形成时代及大地构造意义. *现代地质*, 8(3): 241–246.

唐专红, 陆济璞, 李玉坤, 等, 2007. 西藏尼玛北部图北湖一带硅质岩中发现中三叠世放射虫化石. *地质通报*, 26(1): 73–76.

王键, 孙丰月, 禹禄, 等, 2017. 青海玉树杂龙格玛 VMS 型矿床流体包裹体及 H-O-S-Pb 同位素特征. *地球科学*, 42(6):941–956.

许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等, 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. *岩石学报*, 29(6):1847–1860.

张能, 李剑波, 杨云松, 等, 2012. 金沙江缝合带弯岛湖蛇绿混杂岩带的岩石地球化学特征及其构造背景. *岩石学报*, 28(4):1291–1304.

张旗, 钱青, 翟明国, 等, 2005. Sanukite(赞岐岩)的地球化学特征、成因及其地球动力学意义. *岩石矿物学杂志*, 24(2):117–125.

赵少卿, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2015. 青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景. *地球科学*, 40(1):61–76.

朱迎堂, 郭通珍, 彭伟, 等, 2004a. 可可西里湖幅地质调查新成果及主要进展. *地质通报*, 23(5–6):543–548.

朱迎堂, 伊海生, 王强, 等, 2004b. 青海西金乌兰还东河中二叠世埃达克岩的发现及其意义. *沉积与特提斯地质*, 24(2):30–34.