

内蒙古狼山地区早石炭世角闪辉长岩、花岗闪长岩的 岩石成因及构造意义

田 健, 滕学建, 刘 洋, 滕 飞, 何 鹏, 郭 硕, 王文龙

(中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 内蒙古狼山山脉西侧分布有大面积的晚古生代岩浆岩, 时代集中在早石炭世—晚二叠世, 早石炭世角闪辉长岩、花岗闪长岩体出露于潮格温都尔镇西侧。角闪辉长岩体呈岩滴状产出, 被花岗闪长岩体侵入, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄显示, 角闪辉长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 329.0 ± 2.3 Ma, 花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 331.1 ± 0.9 Ma ~ 330.0 ± 4.2 Ma。花岗闪长岩暗色矿物以角闪石为主, 富钠 ($\text{Na}_2\text{O} = 3.48\% \sim 4.46\%$), 高钠钾比值 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.03 \sim 2.39$), 钙碱性系列, $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ 之间存在较好的负相关性, 岩石地球化学特征具 I 型花岗岩的特点。Hf 同位素及元素地球化学特征指示了角闪辉长岩及花岗闪长岩均来自于受地壳混染的亏损地幔, 为同源岩浆演化的产物。角闪辉长岩及花岗闪长岩稀土元素配分型式一致, 均为轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 具弱的负 Eu 异常; 角闪辉长岩富集 Ba、Sr, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf; 花岗闪长岩富集大离子亲石元素 Rb、K、Pb、Sr, 不同程度地亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti, 总体反映了岩浆弧的地球化学特征。结合区域地质背景, 早石炭世狼山地区侵入岩岩石组合为角闪辉长岩(闪长岩) + 石英闪长岩 + 花岗闪长岩, 认为狼山地区早石炭世处于大陆边缘弧构造背景。

关键词: 内蒙古; 狼山地区; 早石炭世; 角闪辉长岩; 花岗闪长岩; 大陆边缘弧

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0754-17

Petrogenesis and tectonic significance of the Early Carboniferous hornblende-gabbro and granodiorite in Langshan area, Inner Mongolia

TIAN Jian, TENG Xue-jian, LIU Yang, TENG Fei, HE Peng, GUO Shuo and WANG Wen-long

(Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170)

Abstract: Large quantities of Early Carboniferous-Early Permian magmatic rocks are exposed on the western side of the Langshan Mountain, Inner Mongolia. The Early Carboniferous rocks mainly consist of hornblende gabbro and granodiorite outcropped on the west side of Chaogewenduer Town. The hornblende gabbros assume the form of individual guttate bodies and were cut by the granodiorite. LA-ICP-MS U-Pb dating of hornblende gabbro yielded weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 329.0 ± 2.3 Ma, while dating of two granodiorite samples yielded 331.1 ± 0.9 Ma and 330.0 ± 4.2 Ma respectively. The mafic mineral in granodiorite is dominated by hornblende. Whole rock geochemical data reveal that the granodiorite is calc-alkaline nature characterized by enrichment of Na_2O ($3.48\% \sim 4.46\%$), high $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratios ($1.03 \sim 2.39$) and shows good negative correlation between P_2O_5 and SiO_2 . The similar Hf isotopic signature between the hornblende gabbro and the granodiorite and their behavior in elemen-

收稿日期: 2017-11-08; 接受日期: 2018-07-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160039)

作者简介: 田 健(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查及岩浆岩岩石学的研究, E-mail: 243293305@qq.com; 通讯作者: 滕学建(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质调查及岩浆岩岩石学的研究, E-mail: 451405400@qq.com。

tal geochemical characteristics together indicate their co-magmatic origin derived from depleted mantle which suffered from crustal contamination. The two types of rocks show similar patterns on the chondrite-normalized REE patterns, and display relatively high concentration of light rare earth elements but low content of heavy rare earth elements with minor negative Eu anomalies. The overall chemical similarities of these rocks on the primitive mantle-normalized variation diagrams suggest affinity to arc signature. In combination with the authors' work and the large scale regional exposure of hornblende gabbro + quartz diorite + granodiorite rock assemblage, the authors hold that the Langshan area was under the tectonic setting of continental margin arc during Early Carboniferous.

Key words: Inner Mongolia; Langshan area; Early Carboniferous; hornblende gabbro; granodiorite; continental margin arc

Fund support: Project of China Geological Survey(DD20160039)

作为世界上最大的显生宙造山带, 中亚造山带夹持在西伯利亚克拉通与塔里木-华北克拉通之间(图1a), 其复杂的构造演化过程被认为与古亚洲洋的演化密切相关(Windley *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2009, 2012)。古亚洲洋盆的形成、演化以及增生造山与地体拼贴过程造就了现有的构造格架(图1a)(Coleman, 1989; Windley *et al.*, 1990, 2007; Allen *et al.*,

1992, 1995; Sengor *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 1998; Jahn *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2004, 2008; 李建锋等, 2010)。

华北地块北缘位于中亚造山带与华北地块的结合部位, 区内发育大面积的岩浆岩, 尤以晚古生代岩体最为广泛(Zhang *et al.*, 2007, 2009a, 2009b, 2011a, 2011b; Feng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015)。近年来, 在华北地块北缘中部, 陆续报道了

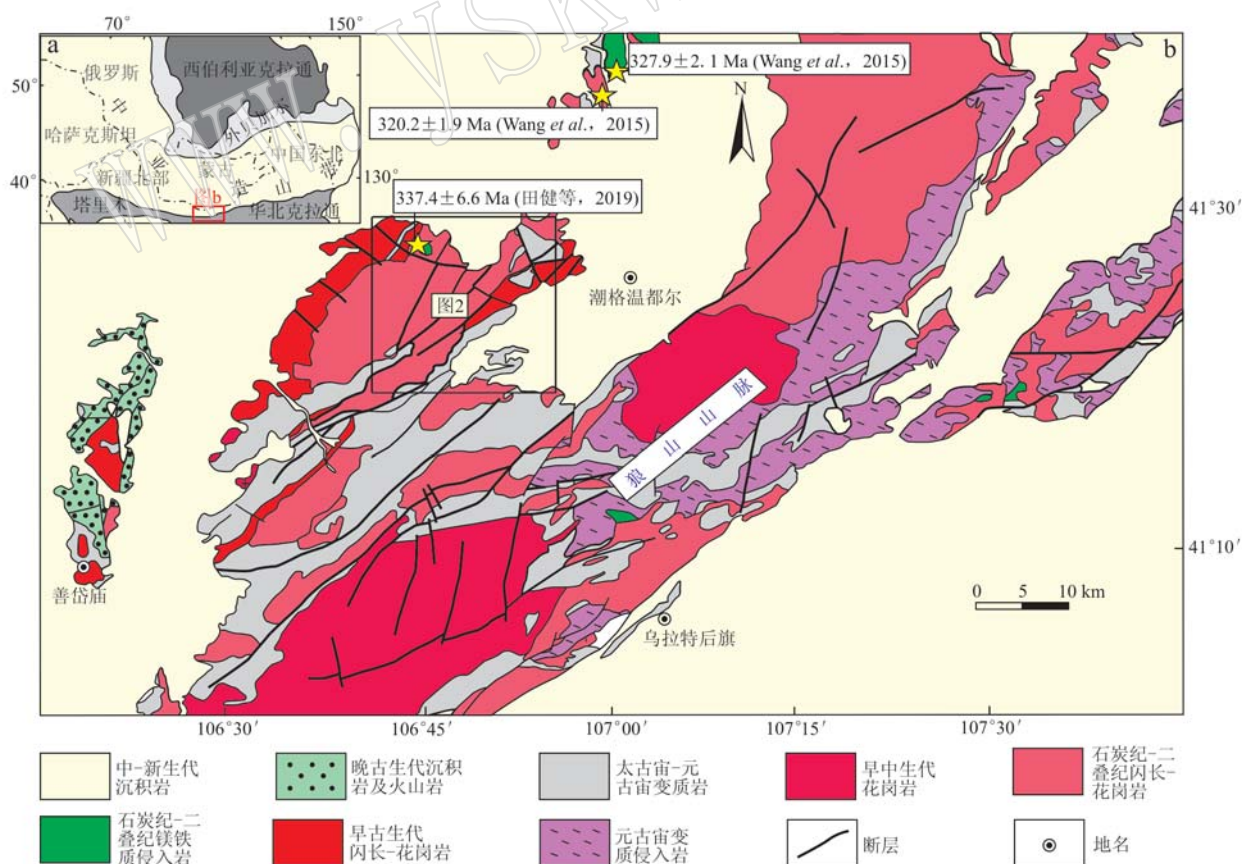


图1 研究区大地构造位置(a)和地质简图(b)[据 Wang 等(2015)修改]

Fig. 1 The tectonic location (a) and simplified geological map (b) of the survey area (modified after Wang *et al.*, 2015)

早石炭世岩浆岩分布在商都-隆化、四子王旗及固阳地区(张拴宏等, 2010)。多数学者认为, 该岩浆岩的形成与古亚洲洋的向南俯冲有关(张拴宏等, 2010; 吴亚飞等, 2013; 刘超等, 2015)。狼山地区位于华北地块北缘西部, 随着研究的深入, 区内也积累了零星的早石炭世岩浆岩资料(Wang *et al.*, 2015; 田健等, 2019)。然而, 前人的工作集中于单个岩体, 对于早石炭世岩浆作用及构造背景缺少详细的研究, 从而制约了对于狼山地区晚古生代构造演化过程的认识。

本文在狼山地区查干呼舒庙等6幅1:5万区域地质调查报告的基础上, 对新识别出的角闪辉长岩及花岗闪长岩进行了岩石学、锆石年代学、地球化学及Hf同位素等特征的深入研究, 探讨了该期侵入岩的构造背景, 进而为认识狼山地区早石炭世的构造属性提供有力的证据。

1 岩体地质概况及岩相学特征

早石炭世岩体位于潮格温都尔镇西侧(图1b), 中心地理坐标约为东经106°47'40", 北纬41°25'。该

岩体东西两侧侵入到晚志留世二长花岗岩体或者宝音图岩群之中, 西南侧被中二叠世花岗闪长岩侵入其中, 北侧被中生代地层角度不整合覆盖(图2)。

角闪辉长岩体呈岩滴状产出, 被灰白色中细粒花岗闪长岩穿插, 面积共计3 km²。岩石抗风化能力强、突出于地表(图3a)。花岗闪长岩体侵入于古元古代宝音图岩群之中, 出露面积约30 km², 岩石整体出露较好, 包体发育。包体呈椭圆状、浑圆状(图3c), 形态较规则, 大小在5~20 cm之间(图3c), 包体与寄主花岗闪长岩之间的界线截然。

角闪辉长岩新鲜面呈灰黑色或灰绿色, 中细粒结构, 块状构造, 由斜长石(50%~60%)、角闪石(30%~35%)、单斜辉石(1%~5%)组成(图3b)。斜长石呈半自形板状, 粒径一般0.2~1.6 mm, 杂乱分布, 有时可见环带结构, 聚片双晶发育, 用 $\perp(010)$ 晶带最大消光角法测得斜长石种属为拉长石, 具轻度高岭土化、绢云母化、碳酸盐化。角闪石呈半自形板状, 大小一般为0.2~4 mm不等, 多色性较明显, $N_{g'}$ = 黄棕色, $N_{p'}$ = 淡黄色, 部分见核部残留辉石假像, 具绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化。单斜辉石呈自形板状, 斜消光, 常包嵌于角闪石粒内, 大小一般

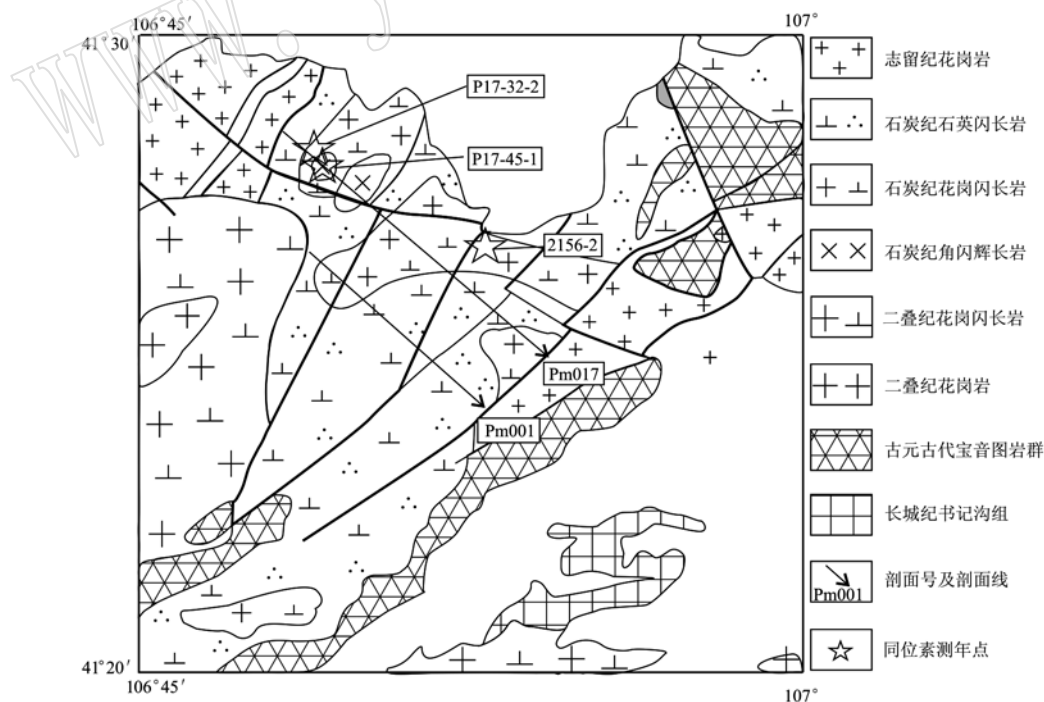


图2 早石炭世岩体地质图(据滕学建等, 2016)^①

Fig. 2 Geological map of the Early Carboniferous pluton(after Teng Xuejian *et al.*, 2016)^①

① 滕学建, 刘洋, 滕飞, 等. 2016. 区域地质矿产调查报告(查干呼舒庙等6幅).

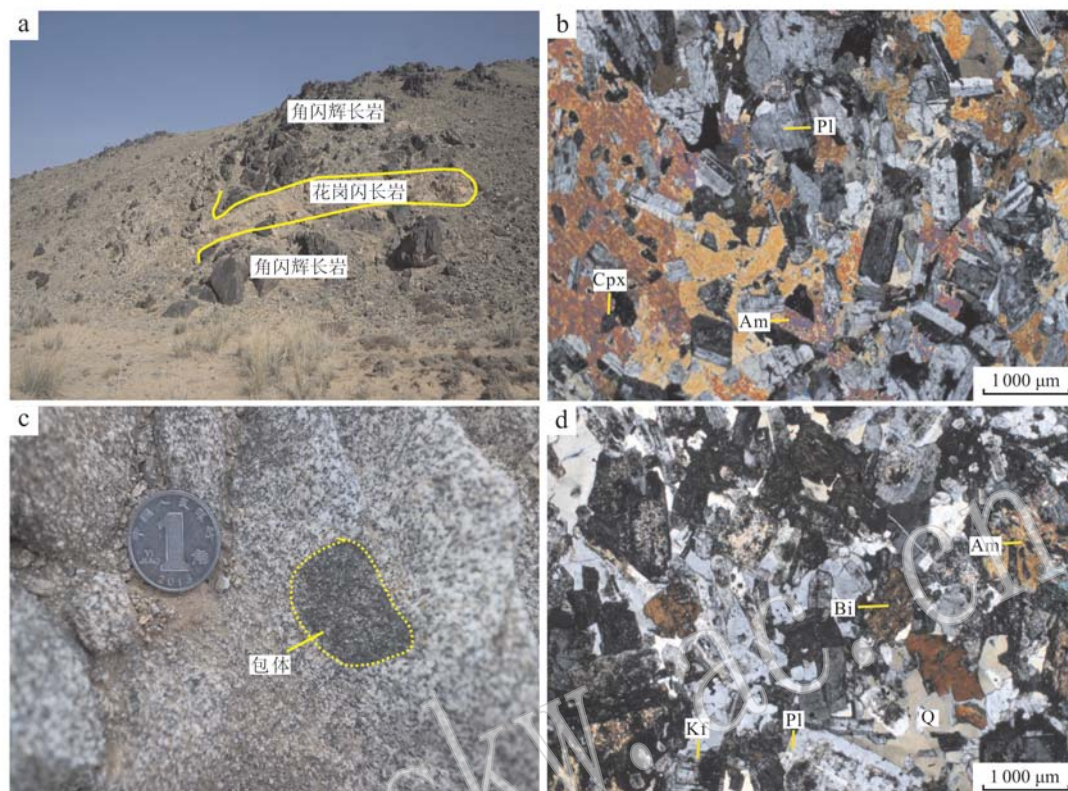


图3 野外露头照片及岩相学特征

Fig. 3 Outcrop photos and photomicrographs of hornblende gabbro and granodiorite, showing the typical textures
 a—花岗闪长岩侵入角闪辉长岩; b—角闪辉长岩矿物镜下特征(+); c—花岗闪长岩中包体特征; d—花岗闪长岩矿物镜下特征(+);
 Cpx—单斜辉石; Am—角闪石; Bi—黑云母; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Q—石英
 a—hornblende gabbro interspersed by granodiorite; b—mineral characteristics of hornblende gabbro(+); c—characteristics of enclave from
 granodiorite(+); d—mineral characteristics of granodiorite(+); Cpx—clinopyroxene; Am—amphibole; Bi—biotite; Pl—plagioclase;
 Kf—K-feldspar; Q—quartz

<0.3 mm, 局部次闪石化、绿泥石化、碳酸盐化等。副矿物为锆石、磁铁矿及榍石等。

花岗闪长岩新鲜面以灰白色为主, 少见浅灰色, 中细粒结构, 岩石由斜长石(50% ~ 60%)、石英(20% ±)、钾长石(5% ~ 10%)、角闪石(5% ~ 10%)、黑云母(1% ~ 5%)组成(图3d)。斜长石呈半自形板状, 可见环带结构, 杂乱分布, 粒径大小一般0.2 ~ 2 mm, 2 ~ 2.8 mm 的较少, 具高岭土化、绢云母化、碳酸盐化等。石英呈它形粒状, 见波状消光, 零散或填隙状分布, 大小一般0.1 ~ 2.8 mm。钾长石主要为微斜条纹长石, 条纹呈细条带状, 可见格子双晶发育, 呈它形粒状, 填隙状分布, 粒径大小一般0.2 ~ 2 mm, 部分粒内包嵌少量斜长石, 具轻高岭土化等。角闪石呈半自形板状, 多色性较明显, Ng' = 黄褐色, Np' = 淡黄色, 粒径一般为0.1 ~ 2.2 mm 不等, 局部绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等。黑云母呈鳞片-叶片状, 多色性较明显, Ng' = 红褐色, Np'

= 淡黄褐色, 粒径一般为0.1 ~ 2.3 mm 不等, 可见绿泥石化。副矿物为锆石、磁铁矿及榍石等。

2 分析方法

2.1 锆石挑选、LA-ICP-MS 年龄测定及锆石原位 Hf 同位素分析

样品无污染碎样和锆石的挑选工作由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成, 并由北京锆年领航科技有限公司制靶。锆石粘贴制成环氧树脂样品靶, 经过打磨抛光使锆石露出中心后进行透射光、反射光和阴极发光(CL)显微照相。

锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室的 193 nm 激光剥蚀系统(New Wave)和多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS, Neptune)上完成。U-Pb 年代学测试方法见李怀坤等(2009)。采用 GJ-1 作

为外部标准校正锆石的 U、Th 和 Pb 同位素分馏,采用 NIST610 玻璃作为标样计算锆石中 U、Th 和 Pb 含量,利用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010)和 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)进行数据处理。Lu-Hf 同位素实验过程中,91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 测定结果分别为 $0.282\,303 \pm 37$ (2σ , $n = 35$) 和 $0.000\,30$, 亏损地幔模式年龄(t_{DM})计算采用 Griffin 等(2002)的推荐值,等离子体质谱实验室方法和同位素分馏校正参考文献 Wu 等(2006)。

2.2 全岩分析

主量、微量和稀土元素分析在中国地质调查局天津地质调查中心元素分析实验室完成。将样品熔制成玻璃饼,然后采用 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 进行主元素测定,分析精度优于 1%。称取 40 mg 样品于 Tenon 罐中,加入 HNO_3 和 HF 充分溶解后,用 1% 的 HNO_3 稀释后,在 Finigan MAT 公司生产的双聚焦电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)ELEMENT 上测定微量和稀土元素,分析精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 形成时代

本次工作对角闪辉长岩(P17-45-2)、花岗闪长岩(P17-32-2 和 2156-2)进行了锆石 U-Pb 年龄测试,测试结果见表 1。角闪辉长岩样品所取锆石多呈半自形柱状,锆石环带不发育,长 $100 \sim 300 \mu\text{m}$,长宽比为 $1:1 \sim 3:1$,阴极发光图像可见生长环带(图 4a),未见次生加大边, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值在 $0.25 \sim 0.59$ 之间(>0.1),具岩浆锆石特征,24 个锆石点具一致的谐和年龄,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $329.0 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (图 4d)。花岗闪长岩锆石环带发育,阴极发光图像多见清晰生长环带(图 4b、4c),P17-32-2 样品中 27 个点(1~6、11~12、14~17、20~21、23、25~27、29~30、32~33、35~38、40)在谐和线及其附近, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值在 $0.19 \sim 0.88$ 之间(>0.1),具岩浆锆石特征,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $330.0 \pm 4.2 \text{ Ma}$ (图 4e)(偏离谐和线的数据未参与计算);可见零星的捕获锆石年龄信息,其中 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 在 $1\,870 \sim 1\,680 \text{ Ma}$ 的 2 个锆石点数据在谐和线附近。2156-2 样品中 18 个点(1、2、4~6、8、10~13、15、17~19、21、24、26~27)在谐和线及其附近, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值在 $0.17 \sim$

0.73 之间(>0.1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $331.1 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (图 4f)(偏离谐和线的数据未参与计算); $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 $1\,549 \sim 1\,536 \text{ Ma}$ 的 2 个锆石点数据在谐和线附近。

3.2 岩石地球化学

3.2.1 主量元素

角闪辉长岩和花岗闪长岩的主微量元素分析结果见表 2。角闪辉长岩 SiO_2 含量在 $47.56\% \sim 50.32\%$ 之间, FeO^{T} 含量在 $5.62\% \sim 9.04\%$ 之间, MgO 含量在 $4.79\% \sim 7.36\%$ 之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值在 $5.65 \sim 12.56$ 之间(平均值为 8.77),显示富铁、富镁、高钠钾比值的特点,岩石中 $\text{Mg}^{\#}$ 为 $41 \sim 55$ 。QAP 图解(图 5a)显示岩石类型为闪长岩类,结合薄片暗色矿物以角闪石为主,辉石次之, SiO_2 含量小于 53% ,综合定名为角闪辉长岩。AFM 图中(图 5b)岩石投点位于钙碱性系列范围内。

花岗闪长岩 SiO_2 含量为 $66.94\% \sim 73.37\%$,全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)为 $6.20\% \sim 7.23\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值在 $1.03 \sim 2.39$ 之间(平均值为 1.60),低镁(MgO 含量为 $0.61\% \sim 1.43\%$)、低钛(TiO_2 含量为 $0.21\% \sim 0.57\%$),铝饱和指数 A/CNK 在 $0.97 \sim 1.13$ 之间,为准铝质-过铝质。QAP 图解(图 5a)所有投点位于花岗闪长岩类的范围内。AFM 图中(图 5b)岩石投点位于钙碱性系列范围内。

3.2.2 微量元素及稀土元素

微量元素蛛网图中(图 6a),角闪辉长岩具有富集 Ba、Sr,亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 的特点,相比 E-MORB,角闪辉长岩明显富集大离子亲石元素;花岗闪长岩具有富集大离子亲石元素 Rb、K、Pb、Sr,不同程度的亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti,这些特点均与弧岩浆岩的特点类似。

稀土元素配分图中(图 6b),所有样品显示出一致的曲线,轻稀土元素略富集,重稀土元素亏损,无明显 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 1.64$),显示了与弧岩浆岩类似的特征。相比 E-MORB,角闪辉长岩具有富集轻稀土元素的特点, $\Sigma\text{REE} = 77.18 \times 10^{-6} \sim 194.70 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.38 \sim 2.67$,轻稀土元素分馏不明显; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.70 \sim 7.59$,轻、重稀土元素分馏中等。花岗闪长岩 $\Sigma\text{REE} = 57.63 \times 10^{-6} \sim 141.20 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.01 \sim 6.74$,轻稀土元素分馏弱; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.98 \sim 23.05$,轻、重稀土元素分馏中等-强。

表 1 角闪辉长岩及花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年数据
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for granodiorite and hornblende gabbro

样品号	$w_B/10^{-6}$				同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1 σ	err%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	err%	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
P17-45-2												
1	10	195	0.351 3	0.000 80	0.22	0.053 0	0.000 5	0.99	0.394 3	0.009 1	333	3
2	11	207	0.371 7	0.000 30	0.08	0.053 8	0.000 6	1.05	0.400 6	0.009 5	338	4
3	7	139	0.303 7	0.001 20	0.39	0.052 2	0.000 5	1.05	0.384 5	0.012 0	328	3
4	14	268	0.329 0	0.000 50	0.16	0.052 7	0.000 6	1.05	0.394 9	0.007 9	331	3
5	11	208	0.501 5	0.000 70	0.14	0.051 1	0.000 6	1.09	0.379 3	0.009 2	321	3
6	9	166	0.357 4	0.000 80	0.21	0.052 3	0.000 5	1.04	0.380 7	0.010 5	329	3
7	8	145	0.379 2	0.000 50	0.13	0.051 8	0.000 5	1.04	0.383 3	0.012 6	326	3
8	19	359	0.426 7	0.000 40	0.10	0.052 0	0.000 5	1.03	0.388 5	0.006 7	327	3
9	19	347	0.500 1	0.000 90	0.19	0.051 5	0.000 6	1.08	0.377 9	0.006 9	324	4
10	12	226	0.293 5	0.001 00	0.34	0.051 5	0.000 5	1.02	0.385 9	0.008 5	323	3
11	8	159	0.466 0	0.000 50	0.11	0.051 4	0.000 6	1.07	0.376 6	0.010 2	323	3
12	20	374	0.501 2	0.000 70	0.13	0.052 3	0.000 5	1.04	0.386 8	0.006 7	329	3
13	13	244	0.531 6	0.000 60	0.11	0.051 8	0.000 5	1.00	0.376 1	0.008 2	326	3
14	10	195	0.346 3	0.000 80	0.22	0.052 6	0.000 6	1.05	0.383 5	0.009 6	330	3
15	13	245	0.471 5	0.001 90	0.41	0.051 2	0.000 5	0.99	0.377 3	0.007 8	322	3
16	20	362	0.585 4	0.000 90	0.15	0.052 9	0.000 6	1.09	0.377 5	0.006 9	333	4
17	10	191	0.375 4	0.000 70	0.19	0.052 5	0.000 5	1.02	0.383 0	0.010 1	330	3
18	8	151	0.405 5	0.000 50	0.13	0.052 5	0.000 5	1.02	0.389 6	0.011 6	330	3
19	31	585	0.474 7	0.000 70	0.14	0.051 5	0.000 5	1.02	0.389 9	0.005 7	324	3
20	23	428	0.301 6	0.002 40	0.79	0.054 0	0.000 6	1.06	0.394 1	0.006 4	339	4
21	17	318	0.254 9	0.000 50	0.18	0.054 7	0.000 6	1.03	0.400 5	0.007 0	343	4
22	14	261	0.333 5	0.000 50	0.16	0.052 3	0.000 5	1.03	0.381 8	0.007 8	329	3
23	10	179	0.430 6	0.000 70	0.16	0.053 2	0.000 5	1.02	0.386 2	0.010 0	334	3
24	8	147	0.390 2	0.000 80	0.20	0.052 6	0.000 6	1.06	0.390 7	0.011 2	331	4
P17-32-2												
1	27	534	0.223 9	0.000 5	0.23	0.051 3	0.000 6	1.12	0.376 1	0.006 0	322	4
2	32	587	0.191 6	0.000 3	0.18	0.056 2	0.000 6	1.08	0.413 9	0.006 1	352	4

续表 1-1
Continued Table 1-1

样品号	$w_B/10^{-6}$		同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1 σ	err%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	err%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
3	36	655	0.506 2	0.003 6	0.71	0.052 1	0.000 5	0.98	0.381 7	0.005 6
4	25	454	0.534 3	0.002 4	0.45	0.051 8	0.000 5	1.05	0.391 6	0.008 2
5	87	1 655	0.334 6	0.006 5	1.94	0.052 7	0.000 5	1.02	0.393 9	0.005 2
6	168	3 283	0.419 2	0.003 4	0.80	0.050 8	0.000 6	1.11	0.373 1	0.005 4
7	89	327	1.101 0	0.006 4	0.58	0.213 6	0.003 2	1.52	3.304 0	0.063 8
8	49	151	0.924 5	0.004 2	0.45	0.283 1	0.002 8	1.00	4.228 4	0.059 2
9	232	3 698	0.055 5	0.000 1	0.24	0.065 5	0.000 8	1.20	0.591 9	0.009 7
10	55	980	0.232 7	0.005 5	2.38	0.058 8	0.000 8	1.33	0.446 7	0.007 0
11	36	655	0.567 2	0.017 0	3.00	0.053 4	0.000 6	1.08	0.391 9	0.006 6
12	62	1 184	0.486 3	0.004 1	0.85	0.050 9	0.000 6	1.09	0.386 0	0.005 6
13	382	1 104	0.549 4	0.004 0	0.72	0.321 3	0.003 5	1.09	4.984 5	0.069 4
14	27	497	0.260 5	0.003 0	1.15	0.055 1	0.000 5	0.97	0.414 4	0.007 0
15	19	369	0.322 2	0.000 3	0.09	0.052 8	0.000 5	1.00	0.396 6	0.006 6
16	32	564	0.652 1	0.002 7	0.42	0.052 6	0.000 5	1.02	0.388 3	0.010 2
17	48	901	0.261 3	0.000 6	0.23	0.054 2	0.000 7	1.21	0.402 0	0.006 2
18	152	1 108	0.044 1	0.000 2	0.37	0.143 6	0.001 5	1.01	1.688 2	0.022 9
19	169	1 607	2.024 0	0.009 4	0.46	0.081 7	0.000 8	1.02	1.323 6	0.018 9
20	22	363	0.749 8	0.017 0	2.25	0.054 9	0.000 7	1.19	0.406 7	0.007 7
21	42	733	0.618 9	0.007 6	1.22	0.053 7	0.000 6	1.15	0.395 4	0.007 1
22	88	285	0.749 8	0.003 8	0.50	0.257 8	0.002 9	1.11	4.308 8	0.064 5
23	14	283	0.290 0	0.001 2	0.43	0.050 6	0.000 5	1.09	0.379 4	0.009 4
24	116	1 389	0.168 2	0.000 9	0.56	0.072 4	0.001 1	1.58	1.164 1	0.028 1
25	33	565	0.713 4	0.001 8	0.25	0.053 9	0.000 7	1.21	0.395 6	0.007 1
26	31	564	0.704 4	0.002 5	0.35	0.051 3	0.000 5	1.04	0.369 1	0.005 8
27	50	999	0.236 1	0.001 7	0.73	0.052 4	0.000 6	1.17	0.387 0	0.013 2
28	70	948	0.825 9	0.001 6	0.19	0.051 9	0.000 5	1.00	1.166 2	0.026 2
29	8	166	0.372 4	0.006 5	1.74	0.050 5	0.000 5	1.08	0.382 4	0.006 0
30	50	966	0.236 2	0.001 0	0.42	0.053 6	0.000 6	1.13	0.385 8	0.005 6
31	168	2 104	0.833 6	0.003 0	0.36	0.057 4	0.000 6	1.07	1.386 0	0.019 1
32	95	1 896	0.352 2	0.003 1	0.88	0.050 7	0.000 5	1.08	0.394 7	0.005 6
33	22	453	0.256 4	0.000 6	0.23	0.050 6	0.000 6	1.09	0.377 6	0.006 8
34	63	1 060	0.604 0	0.003 7	0.61	0.052 0	0.000 6	1.09	0.742 0	0.019 6
35	37	747	0.529 3	0.011 0	2.06	0.050 3	0.000 5	1.09	0.370 9	0.009 0
36	60	1 066	0.663 7	0.011 0	1.66	0.054 6	0.000 7	1.22	0.397 3	0.007 8

续表 1-2

样品号	$w_B/10^{-6}$				同位素比值						年龄/Ma										
	Pb		U		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	enr%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	enr%	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	enr%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ				
37	16	283	0.469	9	0.004	4	0.94	0.055	9	0.000	6	1.06	0.410	2	0.007	2	1.75	351	4	349	6
38	56	968	0.880	8	0.011	0	1.14	0.053	0	0.000	6	1.07	0.397	5	0.007	8	1.97	333	4	340	7
39	114	1756	0.563	4	0.008	6	1.53	0.055	2	0.000	7	1.30	0.863	8	0.038	2	4.42	347	4	632	28
40	37	735	0.270	0	0.002	9	1.06	0.051	9	0.000	6	1.10	0.380	5	0.006	6	1.74	326	4	327	6
2156-2																					
1	28	495	0.421	8	0.003	2	0.76	0.053	1	0.000	3	0.58	0.386	4	0.009	3	2.41	334	2	332	8
2	23	428	0.312	0	0.004	4	1.40	0.052	6	0.000	3	0.54	0.385	6	0.003	0	0.79	331	2	331	3
3	149	1979	0.223	1	0.002	1	0.92	0.057	6	0.000	3	0.60	1.533	8	0.018	3	1.20	361	2	944	11
4	33	609	0.403	7	0.001	8	0.44	0.052	8	0.000	3	0.53	0.387	4	0.002	7	0.71	331	2	332	2
5	12	238	0.192	4	0.000	6	0.29	0.052	8	0.000	3	0.53	0.385	9	0.005	1	1.33	331	2	331	4
6	32	586	0.328	3	0.002	8	0.85	0.052	2	0.000	3	0.60	0.383	6	0.005	8	1.51	328	2	330	5
7	251	1978	1.039	0	0.003	0	0.29	0.069	3	0.000	3	0.50	3.246	8	0.031	2	0.96	432	2	1468	14
8	33	607	0.520	5	0.006	5	1.25	0.052	9	0.000	3	0.57	0.387	3	0.002	7	0.71	332	2	332	2
11	140	1089	0.766	5	0.011	0	1.40	0.071	5	0.000	4	0.55	3.509	2	0.027	8	0.79	445	2	1529	12
12	40	731	0.308	5	0.001	1	0.36	0.052	4	0.000	3	0.54	0.384	6	0.007	9	2.06	329	2	330	7
13	37	667	0.422	1	0.007	2	1.72	0.052	3	0.000	3	0.64	0.385	1	0.007	0	1.81	328	2	331	6
14	16	284	0.570	6	0.002	1	0.36	0.052	7	0.000	3	0.56	0.385	0	0.004	6	1.21	331	2	331	4
15	20	373	0.491	3	0.000	7	0.13	0.052	3	0.000	3	0.52	0.383	7	0.007	8	2.03	329	2	330	7
16	144	968	0.962	6	0.027	7	2.88	0.074	5	0.000	6	0.81	4.689	0	0.063	1	1.35	463	4	1765	24
17	35	679	0.239	0	0.000	6	0.24	0.053	1	0.000	3	0.58	0.387	2	0.002	9	0.75	333	2	332	2
18	104	415	0.162	4	0.000	4	0.27	0.253	6	0.001	3	0.51	3.538	4	0.017	0	0.48	1457	7	1536	7
21	49	903	0.414	5	0.002	1	0.52	0.053	1	0.000	3	0.56	0.387	8	0.007	0	1.79	334	2	333	6
22	79	1442	0.535	0	0.000	8	0.15	0.052	6	0.000	3	0.51	0.383	6	0.004	3	1.13	330	2	330	4
23	16	295	0.396	9	0.003	2	0.80	0.052	8	0.000	3	0.52	0.385	4	0.004	3	1.11	332	2	331	4
24	114	1442	0.875	8	0.002	0	0.23	0.056	7	0.000	3	0.52	1.424	7	0.011	0	0.77	355	2	899	7
25	35	601	0.729	1	0.009	1	1.25	0.052	6	0.000	3	0.52	0.385	3	0.005	2	1.36	331	2	331	4
26	27	89	0.707	5	0.007	4	1.05	0.272	9	0.001	5	0.56	3.597	2	0.024	0	0.67	1555	9	1549	10
27	30	444	0.178	5	0.001	1	0.60	0.056	1	0.000	5	0.82	1.171	6	0.012	1	1.03	352	3	787	8

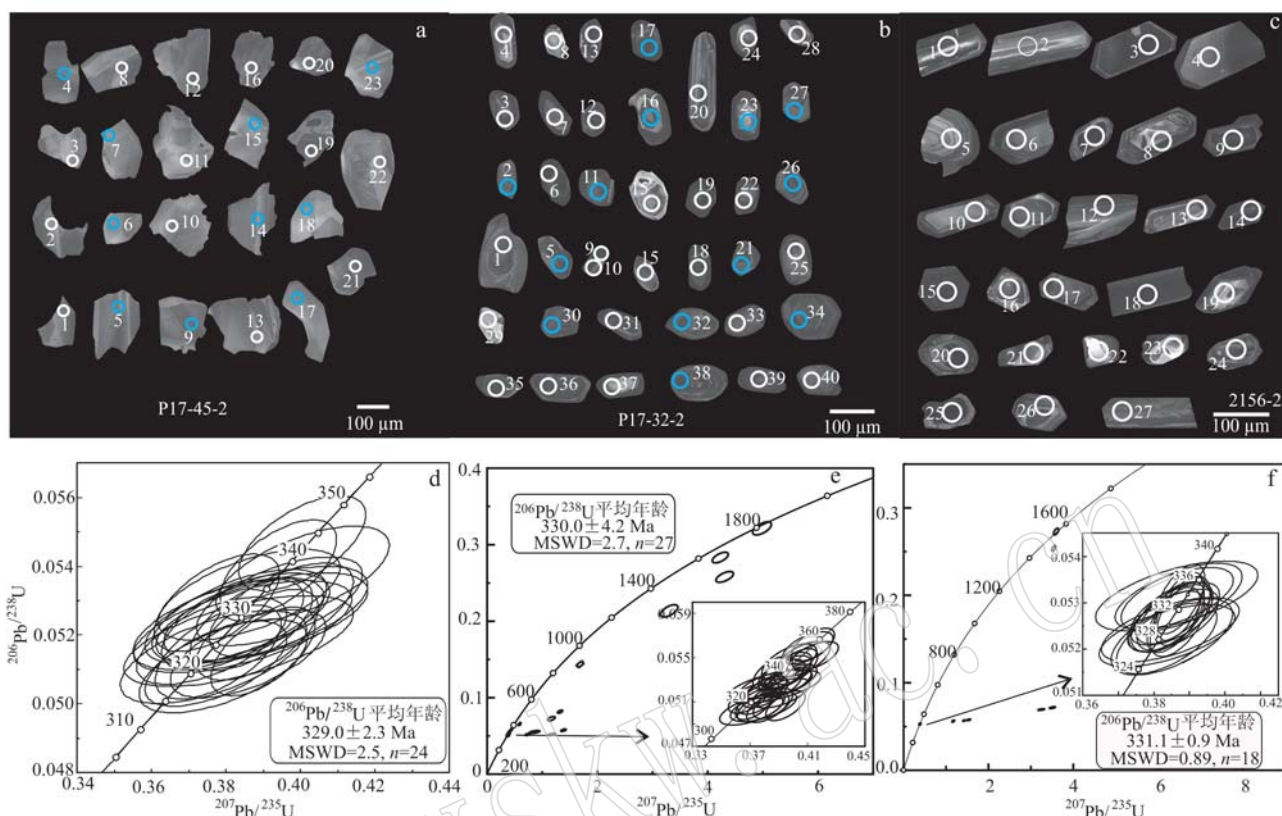


图4 角闪辉长岩(P17-45-2)及花岗闪长岩(P17-32-2、2156-2)的CL图像、锆石谐和图及加权平均年龄

Fig. 4 CL imaging of zircons, concordia plots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ average age of zircons from hornblende gabbro and granodiorite

蓝色圆圈表示同时进行了锆石 U-Pb 及 Hf 同位素测试, 白色圆圈表示仅仅进行了锆石 U-Pb 同位素测试

The blue circles in the CL imaging for zircons tested by U-Pb age and Hf isotope; the white circles only tested by U-Pb isotopic age

3.3 Hf 同位素

岩石 Hf 同位素分析结果见表3。角闪辉长岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-3.4 \sim +2.0$, t_{DM2} 为 $1553 \sim 1205$ Ma; 花岗闪长岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-1.4 \sim +2.9$ (平均值为 $+1.1$), t_{DM2} 为 $1424 \sim 1150$ Ma。

4 讨论

4.1 年代学特征及岩石成因

锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄显示, 角闪辉长岩的结晶年龄为 329.0 ± 2.3 Ma, 花岗闪长岩的结晶年龄为 331.1 ± 0.9 Ma $\sim 330.0 \pm 4.2$ Ma, 角闪辉长岩、花岗闪长岩体的侵位时代为早石炭世, 反映了早石炭世的岩浆活动。

角闪辉长岩暗色矿物以角闪石为主, 有少量辉石, $\text{Mg}^\#$ 值为 $41 \sim 55$, 低于原生玄武质岩浆成分 ($\text{Mg}^\# = 65$), 反映了幔源岩浆的结晶分异; 轻稀土元素略富集、重稀土元素亏损及较大的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值 (3.70

~ 7.59) 反映了源区可能有地壳物质的参与 (徐夕生等, 2010); $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-3.4 \sim +2.0$, 表明该岩石并非亏损地幔直接熔融形成的, 若为亏损地幔直接熔融, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值应为较大的正值 (图7a); 此外, 其 Nb/U 值 ($12.39 \sim 38.44$) 较 MORB/OIB (47 ± 7 ; Hofmann *et al.*, 1986) 明显偏低, 具有陆壳的特点 (图7b), 因此, 该岩浆源区物质组成中可能混有数量不等的地壳物质。花岗闪长岩中发育闪长质包体, 暗色矿物以角闪石为主, 黑云母次之, 富钠 ($\text{Na}_2\text{O} = 3.48\% \sim 4.46\%$), 高钠钾比值 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.03 \sim 2.39$), 钙碱性系列, 准铝质-过铝质 ($A/\text{CNK} = 0.97 \sim 1.13$), $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ 具较好的负相关性 (图7c), CIPW 标准矿物计算中 C 分子 < 1 , 显示出 I 型花岗岩的特点 (Chappell, 1974, 1999)。在岩石成因划分图解 ($(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$) 中, 样品落在 S/I 造山花岗岩的范围内 (图7d), 所以, 花岗岩成因类型为 I 型花岗岩。本文研究的花岗闪长岩具有高 $\text{Mg}^\#$ ($41 \sim 55$) 和低 Rb/Sr 值 ($0.13 \sim$

表 2 角闪辉长岩及花岗闪长岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)数据

Table 2 Whole-rock major elements (w _B /%) and trace elements (w _B /10 ⁻⁶) of granodiorite and hornblende gabbro																		
岩性	角闪辉长岩									花岗闪长岩								
	P17-35-1	P17-45-2	P17-51-1	P17-61-1	P17-56-1	P17-56-2	2156-2	P01-26-1	P01-30-1	P17-32-1	P17-59-1	P17-66-1	P17-67-1	P17-73-1	P17-81-1	P17-115-1	P17-136-1	
样品号	P17-35-1	P17-45-2	P17-51-1	P17-61-1	P17-56-1	P17-56-2	2156-2	P01-26-1	P01-30-1	P17-32-1	P17-59-1	P17-66-1	P17-67-1	P17-73-1	P17-81-1	P17-115-1	P17-136-1	
SiO ₂	49.84	48.58	49.23	50.32	47.56	48.69	69.00	70.07	70.12	70.23	69.7	66.94	69.7	70.15	68.62	73.37	69.95	
TiO ₂	0.81	1.40	0.91	1.70	3.30	2.00	0.28	0.33	0.26	0.31	0.35	0.57	0.35	0.34	0.42	0.21	0.32	
Al ₂ O ₃	20.29	21.18	20.91	18.6	18.89	18.28	15.18	14.65	14.92	15.72	15.84	15.96	15.54	15.44	16.19	14.34	15.53	
Fe ₂ O ₃	0.31	0.84	0.39	0.42	0.75	0.35	0.72	0.96	1.18	0.28	0.33	0.20	0.24	0.54	0.36	0.27	0.41	
FeO	5.34	5.26	6.13	7.24	8.37	8.38	2.04	1.77	1.44	1.92	2.10	3.48	2.23	1.77	2.46	1.56	1.88	
MnO	0.09	0.11	0.11	0.14	0.18	0.150	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	
MgO	7.36	6.92	6.35	6.58	4.79	6.55	1.06	1.20	0.73	0.91	0.95	1.43	1.13	1.05	1.36	0.61	1.12	
CaO	11.42	11.46	11.07	8.91	9.82	10.37	3.19	2.79	2.99	2.51	2.88	3.62	3.01	2.41	3.04	1.92	2.76	
Na ₂ O	2.09	1.99	2.52	3.69	3.14	2.89	4.23	4.08	3.66	3.75	3.48	4.18	3.8	4.17	4.14	4.13	4.46	
K ₂ O	0.37	0.34	0.33	0.31	0.25	0.32	2.56	2.55	3.57	3.15	3.03	2.02	2.53	2.89	2.32	2.23	1.87	
P ₂ O ₅	0.09	0.30	0.20	0.30	1.00	0.30	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.07	0.08	
H ₂ O ⁺	1.10	0.96	0.94	0.84	0.91	0.59	0.90	0.71	0.54	0.65	0.73	0.84	0.94	0.69	0.62	0.88	1.21	
CO ₂	0.13	0.06	0.12	0.03	0.02	0.08	0.31	0.51	0.25	0.08	0.10	0.05	0.05	0.10	0.09	0.09	0.14	
烧失量	1.40	1.10	1.20	0.98	1.10	0.83	1.40	1.30	0.83	0.87	0.96	1.00	1.10	0.92	0.86	1.10	1.40	
总和	99.41	99.41	99.32	99.24	99.07	99.07	99.78	99.80	99.85	99.78	99.78	99.61	99.76	99.82	99.72	99.84	99.80	
FeO ^T	5.62	6.02	6.48	7.62	9.04	8.69	2.69	2.63	2.50	2.17	2.40	3.66	2.42	2.26	2.78	1.80	2.24	
Fe ₂ O ₃ ^T	5.11	5.57	5.91	6.93	8.28	7.89	2.56	2.55	2.48	2.01	2.22	3.33	2.22	2.13	2.57	1.67	2.09	
Cs	4.23	3.55	0.92	0.78	1.87	1.48	2.92	2.49	8.16	8.63	3.11	4.41	2.39	3.27	3.22	2.3	2.11	
Rb	12.10	12.70	9.50	8.40	11.80	9.60	81.00	85.00	140.00	159.00	111.00	92.80	93.60	99.60	88.10	79.80	60.70	
Sr	549	634	621	618	597	523	455	486	287	276	341	302	391	320	360	382	465	
Ba	177	120	132	245	326	151	555	885	758	509	561	362	453	530	498	613	556	
Ga	18.70	20.40	18.30	20.00	17.60	17.70	14.10	15.20	17.50	17.40	17.10	16.60	16.60	16.60	17.50	15.80	14.80	
Nb	4.09	6.98	4.87	12.30	16.30	6.34	4.59	6.38	10.00	9.12	7.97	7.93	7.50	6.81	6.95	5.31	5.37	
Ta	0.26	0.42	0.29	0.69	1.10	0.42	0.45	0.63	1.00	1.00	0.82	0.70	0.79	0.73	0.50	0.48	0.53	
Zr	34.30	42.60	34.00	83.70	26.80	42.10	108.00	168.00	121.00	124.00	103.00	132.00	115.00	130.00	168.00	100.00	124.00	
Hf	1.20	1.48	1.39	2.75	0.90	1.76	3.14	4.95	3.54	3.82	3.31	4.01	3.56	3.91	4.98	3.32	3.81	
Th	1.01	1.11	0.66	0.66	1.19	0.35	3.87	15.10	10.30	10.90	9.05	8.58	11.90	7.51	9.37	6.01	4.79	

续表 2
Continued Table 2

岩性 样品号	角闪辉长岩										花岗岩长岩									
	P17-35-1	P17-45-2	P17-51-1	P17-61-1	P17-56-1	P17-56-2	2156-2	P01-26-1	P01-30-1	P17-32-1	P17-59-1	P17-66-1	P17-67-1	P17-73-1	P17-81-1	P17-115-1	P17-136-1			
V	263.00	200.00	192.00	176.00	151.00	260.00	26.60	28.80	19.70	20.90	31.70	57.40	33.20	34.00	44.90	12.80	30.60			
Cr	86.50	102.00	33.00	305.00	21.50	48.20	12.70	27.30	9.10	15.20	12.20	16.90	16.30	19.20	27.40	7.99	16.90			
Co	23.50	25.10	24.20	25.60	25.60	32.40	5.07	5.37	3.94	5.34	5.85	8.60	6.14	5.93	7.58	3.78	5.85			
Ni	6.68	11.80	7.72	22.40	10.70	11.10	7.60	22.00	6.03	8.52	5.53	7.39	7.90	8.53	13.40	3.40	8.94			
Li	11.80	9.03	11.10	7.12	12.40	7.10	1.91	6.68	23.80	16.70	15.30	20.10	21.00	24.90	24.20	15.80	3.84			
Sc	31.00	26.90	27.50	29.80	28.30	35.90	4.84	6.22	6.79	7.52	8.63	12.00	9.03	9.11	9.63	9.03	8.66			
U	0.33	0.42	0.22	0.32	0.64	0.22	0.94	5.40	2.00	2.40	2.20	1.80	2.10	1.60	1.40	0.98	1.70			
Pb	6.33	5.78	4.28	6.32	6.10	3.83	16.50	19.30	34.30	30.20	25.50	10.60	17.50	21.70	17.40	18.10	15.30			
La	9.90	17.50	11.00	23.30	20.10	11.80	10.10	33.10	25.80	20.80	20.10	16.00	20.90	17.80	25.20	15.60	12.60			
Ce	28.70	45.00	36.70	71.40	66.60	40.00	20.80	61.70	47.40	47.70	50.80	40.00	49.80	39.10	57.80	35.90	28.90			
Pr	2.86	4.77	3.72	7.64	6.78	4.46	2.45	6.14	5.63	4.34	4.33	3.86	4.53	3.79	5.31	3.49	2.73			
Nd	11.40	19.90	15.80	32.40	29.30	20.00	9.23	21.10	20.60	14.80	15.00	14.00	15.90	13.30	19.00	12.90	10.30			
Sm	2.78	4.23	4.10	7.38	7.13	5.53	1.84	3.17	3.76	3.23	3.18	3.43	3.41	2.74	3.81	2.65	2.17			
Eu	1.44	1.82	1.60	2.02	2.05	1.74	0.66	1.02	1.11	0.81	0.91	0.95	0.85	0.79	0.96	0.57	0.60			
Gd	2.59	4.01	3.96	6.86	6.93	5.62	1.65	2.72	3.23	3.07	3.27	3.60	3.34	2.77	3.48	2.33	2.08			
Tb	0.45	0.63	0.66	1.08	1.04	0.94	0.26	0.33	0.52	0.48	0.50	0.59	0.51	0.42	0.50	0.36	0.34			
Dy	2.51	3.64	3.73	6.21	5.41	5.48	1.43	1.62	2.84	2.52	2.76	3.61	2.73	2.27	2.72	2.06	2.00			
Ho	0.49	0.72	0.73	1.20	1.10	1.10	0.28	0.29	0.55	0.50	0.54	0.73	0.52	0.44	0.53	0.42	0.40			
Er	1.29	1.92	1.92	3.18	2.48	2.80	0.75	0.88	1.45	1.31	1.47	2.01	1.39	1.20	1.44	1.14	1.09			
Tm	0.19	0.27	0.27	0.44	0.32	0.38	0.12	0.13	0.21	0.20	0.22	0.30	0.21	0.17	0.22	0.18	0.16			
Yb	1.20	1.68	1.63	2.74	1.90	2.29	0.81	1.03	1.46	1.25	1.47	1.92	1.30	1.15	1.40	1.18	1.14			
Lu	0.18	0.24	0.24	0.38	0.28	0.33	0.13	0.17	0.24	0.19	0.23	0.30	0.20	0.18	0.21	0.17	0.16			
Y	11.20	16.60	16.70	28.40	23.10	23.80	7.12	7.83	13.80	12.60	13.70	18.10	13.00	11.20	13.00	11.10	10.50			
ΣREE	77.18	122.90	102.70	194.70	174.40	126.30	57.63	141.20	128.60	113.80	118.50	109.40	118.60	97.30	135.60	90.05	75.17			
LREE	57.08	93.22	72.82	144.14	131.96	83.53	45.08	126.23	104.30	91.68	94.32	78.24	95.39	77.52	112.08	71.11	57.30			
HREE	20.10	29.71	29.84	50.51	42.48	42.74	12.55	15.00	24.30	22.12	24.16	31.16	23.20	19.80	23.50	18.94	17.87			
LREE/HREE	2.84	3.14	2.44	2.85	3.11	1.95	3.59	8.42	4.29	4.14	3.90	2.51	4.11	3.92	4.77	3.75	3.21			

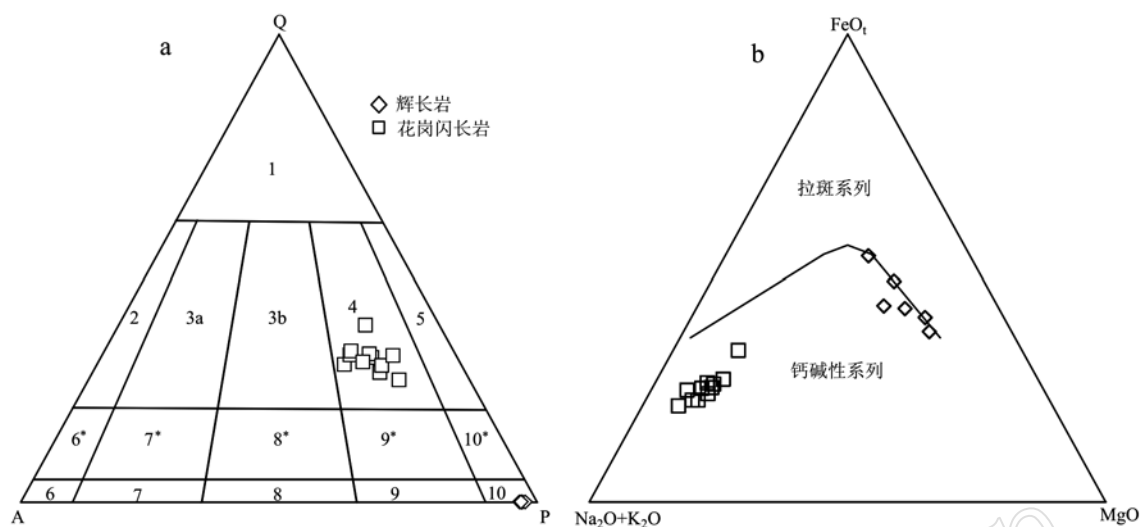


图5 侵入岩的QAP图解(a, 据 Streckeisen 和 LeMaitre, 1979)和 AFM 图解(b, 据 Kuno, 1968)

Fig. 5 QAP (a, after Streckeisen and LeMaitre, 1979) and AFM (b, after Kuno, 1968) diagram of intrusive rocks

1—富石英花岗岩; 2—碱长花岗岩; 3a—花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩、斜长花岗岩; 6*—碱长石英正长岩; 7*—石英正长岩; 8*—石英二长岩; 9*—石英二长闪长岩; 10*—石英闪长岩; 6—碱长正长岩; 7—正长岩; 8—二长岩; 9—二长闪长岩; 10—闪长岩

1—quartz-rich granite; 2—alkali feldspar granite; 3a—granite; 3b—monzogranite; 4—granodiorite; 5—tonalite, plagioclase granite; 6*—alkali-feldspar quartz-syenite; 7*—quartz-syenite; 8*—quartz monzonite; 9*—quartz monzodiorite; 10*—quartz diorite; 6—alkali-feldspar syenite; 7—syenite; 8—monzonite; 9—monzodiorite; 10—diorite

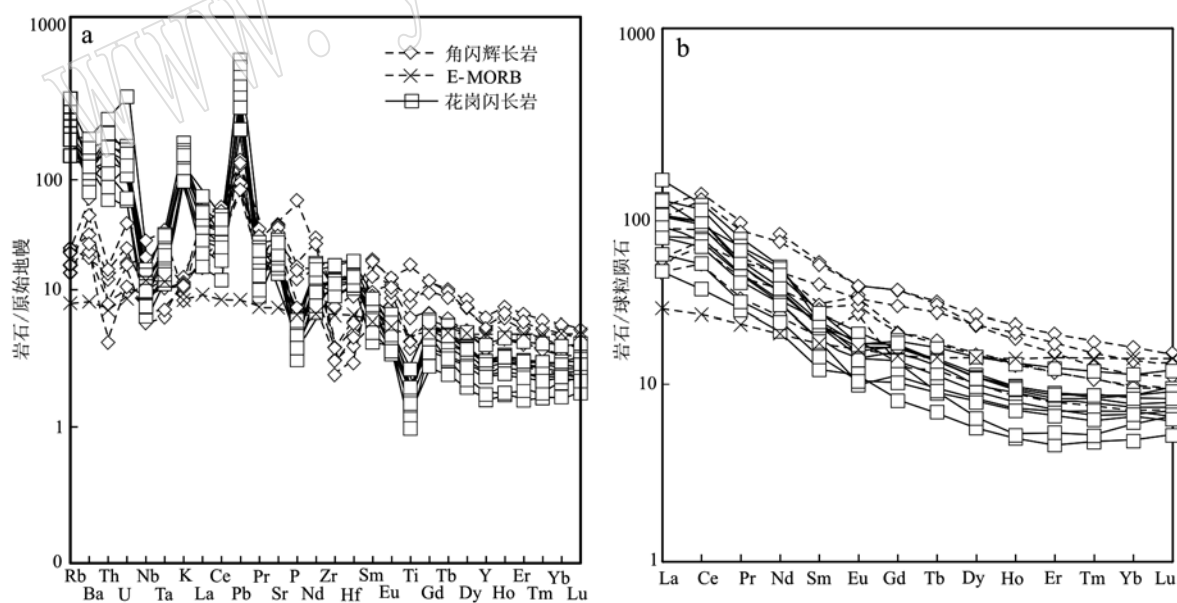


图6 微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分曲线(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams(a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for granodiorite and hornblende gabbro (after Sun and McDonough, 1989)

0.58)特征,指示源区有幔源岩浆的加入(Chen *et al.*, 2008); $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-1.4 \sim +2.9$ (平均值为

$+1.1$),正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也暗示了源区有幔源属性。

对比角闪辉长岩与花岗闪长岩,两者AFM图显

表 3 角闪辉长岩及花岗闪长岩锆石 Hf 同位素数据
Table 3 Zircon Hf isotopic composition of granodiorite and hornblende gabbro

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	$2s$	t_{DM1}/Ma	$2s$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	t_{DM2}/Ma
P17-45-2Hf. 1	329	0.018 8	0.000 5	0.282 629	0.000 039	(5.1)	2.0	1.4	873	109	-0.98	1 205
P17-45-2Hf. 2	329	0.016 4	0.000 5	0.282 502	0.000 022	(9.6)	-2.4	0.8	1 048	61	-0.99	1 489
P17-45-2Hf. 3	329	0.012 0	0.000 4	0.282 506	0.000 015	(9.4)	-2.2	0.5	1 038	43	-0.99	1 477
P17-45-2Hf. 4	329	0.038 6	0.001 1	0.282 567	0.000 022	(7.3)	-0.3	0.8	972	62	-0.97	1 351
P17-45-2Hf. 5	329	0.023 7	0.000 7	0.282 519	0.000 017	(9.0)	-1.9	0.6	1 031	49	-0.98	1 454
P17-45-2Hf. 6	329	0.030 1	0.000 9	0.282 535	0.000 018	(8.4)	-1.4	0.6	1 013	50	-0.97	1 421
P17-45-2Hf. 7	329	0.014 5	0.000 5	0.282 499	0.000 016	(9.6)	-2.5	0.5	1 051	43	-0.99	1 494
P17-45-2Hf. 8	329	0.010 4	0.000 3	0.282 506	0.000 016	(9.4)	-2.2	0.6	1 037	44	-0.99	1 477
P17-45-2Hf. 9	329	0.013 0	0.000 4	0.282 542	0.000 021	(8.1)	-1.0	0.7	989	57	-0.99	1 396
P17-45-2Hf. 10	329	0.016 4	0.000 5	0.282 473	0.000 020	(10.6)	-3.4	0.7	1 088	56	-0.98	1 553
P17-32-2Hf. 1	330	0.020 2	0.000 7	0.282 576	0.000 016	(6.9)	0.2	0.6	949	46	-0.98	1 324
P17-32-2Hf. 2	330	0.039 6	0.001 2	0.282 627	0.000 017	(5.1)	1.9	0.6	890	49	-0.96	1 218
P17-32-2Hf. 3	330	0.049 0	0.001 5	0.282 572	0.000 022	(7.1)	-0.1	0.8	976	63	-0.96	1 345
P17-32-2Hf. 4	330	0.055 6	0.001 6	0.282 649	0.000 018	(4.3)	2.6	0.6	868	53	-0.95	1 173
P17-32-2Hf. 5	330	0.068 7	0.002 1	0.282 662	0.000 020	(3.9)	2.9	0.7	861	58	-0.94	1 150
P17-32-2Hf. 6	330	0.051 6	0.001 5	0.282 537	0.000 015	(8.3)	-1.4	0.5	1 027	42	-0.95	1 424
P17-32-2Hf. 7	330	0.058 9	0.001 7	0.282 657	0.000 020	(4.1)	2.8	0.7	860	57	-0.95	1 157
P17-32-2Hf. 8	330	0.036 4	0.001 1	0.282 628	0.000 015	(5.1)	1.9	0.5	887	43	-0.97	1 214
P17-32-2Hf. 9	330	0.035 3	0.000 9	0.282 593	0.000 019	(6.3)	0.7	0.7	933	54	-0.97	1 291
P17-32-2Hf. 10	330	0.056 6	0.001 7	0.282 631	0.000 018	(5.0)	1.9	0.6	897	52	-0.95	1 216
P17-32-2Hf. 11	330	0.039 1	0.001 2	0.282 577	0.000 021	(6.9)	0.1	0.8	961	60	-0.96	1 329
P17-32-2Hf. 12	330	0.043 1	0.001 2	0.282 592	0.000 020	(6.4)	0.6	0.7	941	55	-0.96	1 297
P17-32-2Hf. 13	330	0.037 1	0.001 1	0.282 576	0.000 020	(6.9)	0.1	0.7	960	57	-0.97	1 331

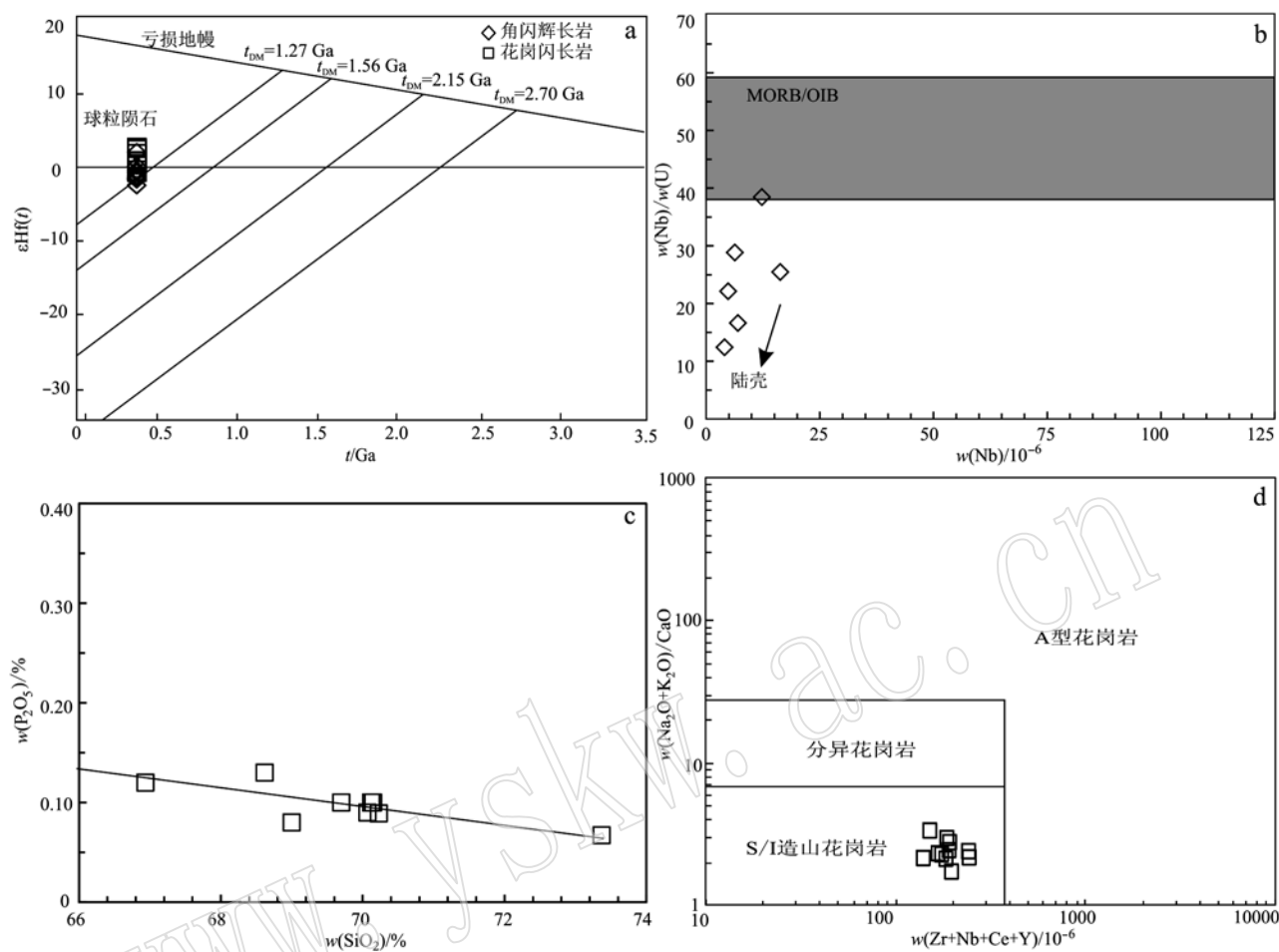


图7 角闪辉长岩及花岗闪长岩成因判别图(a 据 Yang *et al.*, 2006; b 据 Hofmann *et al.*, 1986; d 据 Whalen *et al.*, 1987)
Fig. 7 Discrimination diagrams for granodiorite and hornblende gabbro (a after Yang *et al.*, 2006; b after Hofmann *et al.*, 1986; d after Whalen *et al.*, 1987)

示了较好的同源岩浆演化趋势(图5b), 稀土元素配分曲线显示了较好的一致性(图6b), 而且 Hf 同位素特征十分相似, 因此, 两者应为同源岩浆演化的产物, 均来源于受到地壳物质污染的亏损地幔。

4.2 构造背景

本文研究的角闪辉长岩及花岗闪长岩均具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损及弱的 Eu 异常的稀土元素配分型式; 角闪辉长岩富集 Ba、Sr, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf; 花岗闪长岩富集大离子亲石元素 Rb、K、Pb, 不同程度地亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 的特点, 总体反映了岩浆弧的地球化学特征; Hf 同位素特征及 Nb/U - Nb 图解表明, 角闪辉长岩与花岗闪长岩的源区具有壳幔混合的属性, 因此, 该侵入体的形成可能与俯冲作用有关。从时空分布来看, Wang 等(2015)报道了宝音图地区的早石炭世闪长岩及辉长

岩锆石年龄分别为 320.5 ± 2.9 Ma 和 327.9 ± 2.1 Ma, 田健等(2019)报道的潮格温都尔镇西侧的早石炭世石英闪长岩锆石年龄为 337.4 ± 6.6 Ma, 狼山地区早石炭世侵入岩总体呈北东或北北东向带状展布, 显示了弧岩浆岩的展布特征; 从岩石组合上来看, 测区出露的早石炭世侵入岩岩石组合为角闪辉长岩(闪长岩) + 石英闪长岩 + 花岗闪长岩, 与陆缘弧岩浆岩的岩石组合类似; 此外, 早石炭世侵入体的围岩地层为具有古老陆块属性的宝音图岩群(图2), 这些都表明狼山地区早石炭世处于大陆边缘弧的构造背景。

有意义的是, 在华北地块北缘中部, 也陆续报道了零星的早石炭世岩体, 这些岩浆岩的形成均被认为与俯冲作用有关(Zhang *et al.*, 2007; 周志广等, 2009; 张拴宏等, 2010; 刘超等, 2015)。Zhang 等

(2007)在华北地块北缘的商都—隆化附近发现了早石炭世石英闪长岩,锆石年龄为 324 ± 6 Ma;周志广等(2009)在四子王旗地区报道了早石炭世的闪长岩,锆石年龄为 331 ± 5 Ma;刘超等(2015)在固阳地区发现的花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩3个岩体的SHRIMP 锆石 U-Pb 的锆石年龄分别为 330.8、324.7 和 329.2 Ma。由此可见,华北地块北缘中部早石炭世岩石组合为闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩,反映了陆缘弧的岩浆岩岩石组合特征。

综上所述,早石炭世华北地块北缘中部的岩石组合与狼山地区具有相似性,可能反映了它们具有相同的构造背景,即大陆边缘弧背景。

5 结论

(1) 狼山地区早石炭世角闪辉长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 329.0 ± 2.3 Ma,花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 331.1 ± 0.9 Ma ~ 330.0 ± 4.2 Ma,花岗岩成因类型为 I 型花岗岩,Hf 同位素及元素地球化学特征表明角闪辉长岩及花岗闪长岩均来自于受地壳混染的亏损地幔。

(2) 狼山地区早石炭世的岩石组合为角闪辉长岩(闪长岩)+石英闪长岩+花岗闪长岩,狼山地区早石炭世处于大陆边缘弧构造背景。

致谢 本文在写作过程中与赵风清研究员、辛后田教授级高级工程师进行了深入的讨论,使作者受益匪浅。感谢审稿人及编辑提出的宝贵意见及建议。

References

- Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220(1~4): 89~115.
- Allen M B, Engor A M C and Natalin B A. 1995. Junggar, Turfan and Alakol basins as Late Permian to Early Triassic extensional structures in a sinistral shear zone in the Altaid orogenic collage, Central Asia [J]. *Journal of the Geological Society (London)*, 152(2): 332~338.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46: 535~551.
- Chen B, Tian W, Jahn B M, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: Evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components[J]. *Lithos*, 102(1~2): 118~137.
- Coleman R G. 1989. Continental growth of Northwest China[J]. *Tectonics*, 8(3): 621~635.
- Feng J Y, Xiao W J, Windley B F, *et al.* 2013. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Alxa, China: implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids[J]. *Asian Earth Sci.*, 78: 114~142.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287(1~4): 213~231.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- Han B F, He G Q, Wang X C, *et al.* 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. *Earth-Sci. Rev.*, 109: 74~93.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, *et al.* 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1~2): 33~45.
- Jahn B M, Griffin W L and Windley B F. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 328(1): 157~182.
- Kuno H. 1968. Differentiation of basaltic magmas[A]. Hess H and Poldervaart A. *Interscience*[C]. New York, 623~688.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, *et al.* 2009. Study on the using LA-MC-ICPMS to date the U-Pb isotopic age of zircons[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(Suppl.): 77 (in Chinese).
- Li Jianfeng, Zhang Zhicheng and Han Baofu. 2010. Ar-Ar and zircon SHRIMP geochronology of hornblende and diorite in northern Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 732~740 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chao, Sun Beilei, Wu Jing, *et al.* 2015. Discovery of the Early Carboniferous granite in Guyang, Inner Mongolia: Evidence from zircon

- SHRIMP U-Pb dating[J]. Geological Journal of China Universities, 21(3): 519 ~ 528 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S and Hu Z C. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51: 537 ~ 571.
- Ludwig K R. 2003. Users Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California, 1 ~ 39.
- Sengor A M C, Natalin B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in the Eurasia[J]. Nature, 364: 299 ~ 304.
- Streekeisen A and LeMaitre R W. 1979. A chemical approximation to the model QAPF classification of igneous rocks[J]. Neues Jahrb. Mineral. Abh., 136: 169 ~ 206.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 ~ 345.
- Tian Jian, Teng Xuejian, Liu Yang, *et al.* 2019. The petrology, chronology, geochemistry and tectonic significance of quartz diorite in Early Carboniferous from Langshan area of Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin(in Chinese with English abstract)(in press).
- Wang Z Z, Han B F, Feng L X, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry and origins of the Paleozoic-Triassic plutons in the Langshan area, western Inner Mongolia, China[J]. Asian Earth Sci., 97: 337 ~ 351.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 95: 407 ~ 419.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, *et al.* 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tian Shan range, Central Asia [J]. Geology, 18(2): 128 ~ 131.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonics models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. J. Geol. Soc., Lond., 164: 31 ~ 47.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chem. Geol., 234: 105 ~ 126.
- Wu Yafei, Zeng Jiannian, Cao Jianjin, *et al.* 2013. Zircon U-Pb ages and Hf Isotopes of Hercynian intrusion in Dongshengmiao, Inner Mongolia[J]. Geological Science and Technology Information, 32(6): 23 ~ 30 (in Chinese).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (CHINA): Implications for the continental growth of Central Asia[J]. American Journal of Science, 304(4): 370 ~ 395.
- Xiao W J, Han C, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2 ~ 4): 102 ~ 117.
- Xu Xisheng and Qiu Jiansheng. 2010. Igneous Petrology[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Xu Z, Han B F, Ren R, *et al.* 2012. Ultramafic-mafic mélange, island arc and post-collisional intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic intraoceanic subduction-accretion process[J]. Lithos, 132: 141 ~ 161.
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, *et al.* 2006. Constrains on the timing of the Yanshan fold and thrust belt, North China[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 246: 336 ~ 352.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Paleozoic active continental margin[J]. J. Geol. Soc., Lond., 164: 451 ~ 463.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2009a. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 121: 181 ~ 200.
- Zhang S H, Zhao Y, Kroner A, *et al.* 2009b. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt[J]. Int. J. Earth Sci., 98: 1 441 ~ 1 467.
- Zhang Shuanghong, Zhao Yue, Liu Jianmin, *et al.* 2010. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic -Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 824 ~ 842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X H, Wilde S, Zhang H F, *et al.* 2011a. Early Permian high-K calc-alkaline volcanic rocks from NW Inner Mongolia, North China: Geochemistry, origin and tectonic implications[J]. J. Geol. Soc. Lond., 168: 525 ~ 543.
- Zhang X H, Mao Q, Zhang H F, *et al.* 2011b. Mafic and felsic magma interaction during the construction of high-K calc-alkaline plutons within a metacratonic passive margin: The Early Permian Guyang batholith from the northern Northern China Craton[J]. Lithos, 125: 569 ~ 591.

- Zhang X H, Gao Y L, Wang Z J, *et al.* 2012. Carboniferous appinitic intrusions from the northern North China craton: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implications[J]. *J. Geol. Soc., Lond.*, 169: 337 ~ 351.
- Zhang Z C, Zhou G, Kusky T M, *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang, northwestern China, Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 16 (2): 201 ~ 215.
- Zhou Zhiguang, Zhang Huafeng, Liu Huanlin, *et al.* 2009. Zircon U-Pb dating of basic intrusions in Siziwangqi area of middle Inner Mongolia, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 519 ~ 1 528 (in Chinese with English abstract).
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 2009. 用激光烧灼多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 28(增刊): 77.
- 李建峰, 张志诚, 韩宝福. 2010. 内蒙古达茂旗北部闪长岩锆石 SHRIMP-U-Pb/角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 732 ~ 740.
- 刘超, 孙蓓蕾, 吴婧, 等. 2015. 内蒙古固阳地区早石炭世花岗岩的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 高校地质学报, 21(3): 519 ~ 528.
- 田健, 滕学建, 刘洋, 等. 2019. 内蒙古狼山地区早石炭世石英闪长岩的岩石学、年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报(待刊).
- 吴亚飞, 曾键年, 曹建劲, 等. 2013. 内蒙古东升庙海西期岩体锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质科技情报, 32(6): 23 ~ 30.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824 ~ 842.
- 周志广, 张华峰, 刘还林, 等. 2009. 内蒙中部四子王旗地区基性侵入岩锆石定年及其意义[J]. 岩石学报, 25(6): 1 519 ~ 1 528.

附中文参考文献