

doi: 10.12097/gbc.2022.09.019

小兴安岭南段翠峦杂岩体成因及构造环境：来自地球化学及锆石 Hf 同位素的证据

杨元江¹, 张立东¹, 杨文鹏¹, 李成禄¹, 郭凤磊², 赵寒冬¹, 邓昌州³, 沈龙¹, 申亮^{4*}
YANG Yuanjiang¹, ZHANG Lidong¹, YANG Wenpeng¹, LI Chenglu¹, GUO Fenglei²,
ZHAO Handong¹, DENG Changzhou³, SHEN Long¹, SHEN Liang^{4*}

1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 黑龙江省第一地质勘查院, 黑龙江 牡丹江 157011;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081;

4. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

1. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin 150036, Heilongjiang, China;

2. The First Institute of Geological Exploration of Heilongjiang Province, Mudanjiang 157011, Heilongjiang, China;

3. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China;

4. Development and Research Center, China Geology Survey, Beijing 100037, China

摘要: 通过对黑龙江省小兴安岭南段中奥陶世翠峦杂岩体的年代学、岩石地球化学、锆石 Hf 同位素特征的研究, 探讨岩体的形成时代、成因、物质来源和构造背景。采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得花岗闪长岩和二长花岗岩样品的年龄分别为 463 ± 2 Ma 和 462 ± 2 Ma, 时代为中奥陶世。全岩地球化学研究表明, 岩石均具有高 Si、高 K 富碱, 贫 Ti、Mg、Fe、P 等特征。大离子亲石元素 K、Rb 富集, 高场强元素 Ti、Nb、Ta、P 和 HREE 亏损, 具有显著的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.38\sim0.64$), 以上都显示岩浆的壳源特征。花岗闪长岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=2.4\sim3.4$, 数值集中且均分布于球粒陨石线之上, 暗示岩浆源区为新生陆壳物质的部分熔融; 地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{c}}=1070\sim1128$ Ma, 证实该地区存在中元古代地壳增生事件。本次研究认为, 翠峦杂岩体形成于洋陆板块俯冲的构造环境。

关键词: 杂岩体; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 岩石成因; 小兴安岭南段

中图分类号: P591^{+.1}; P58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0416-13

Yang Y J, Zhang L D, Yang W P, Li C L, Guo F L, Zhao H D, Deng C Z, Shen L, Shen L. Genesis and tectonic setting of Cuiluan plutonic complex in the south section of the Xiaoxing'an Mountains: Evidences of geochemical and zircon Hf isotope. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 416-428

Abstract: This paper studies the chronology, rock geochemistry and zircon Hf isotopic characteristics of the Middle Ordovician Cuiluan plutonic complex in the south section of the Xiaoxing'an Mountains in Heilongjiang Province, focusing on the formation age, petrogenesis, magmatic material source and tectonic background of the rock mass. Using laser ablation plasma mass spectrometer (LA-ICP-MS) zircon U-Pb dating method, the ages of granodiorite and granite porphyry samples are dated to be 463 ± 2 Ma and 462 ± 2 Ma, i.e., Middle Ordovician. The study of rock geochemistry shows that both samples are characterized by high Si and K, rich alkali,

收稿日期: 2022-09-21; 修订日期: 2023-02-27

资助项目: 黑龙江省地质矿产局项目《黑龙江省多宝山矿集区银金矿床成矿规律研究与找矿预测》(编号: HKY202301)、中国地质调查局项目《黑龙江矿产地质志续编与产品服务》(编号: DD20221695-8)、黑龙江省国土资源公益项目《黑龙江省 1:5 万矿调成果综合研究及找矿靶区优选》(编号: GY-2018003)

作者简介: 杨元江(1982-), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查方面的研究。E-mail: geolj@qq.com

* 通信作者: 申亮(1983-), 女, 博士, 工程师, 从事区域地质调查方面的研究。E-mail: 2547163401@qq.com

and poor Ti, Mg, Fe, P, etc. It is enriched in LILE (e.g., Rb, K), depleted in HFSE (e.g., Ti, Nb, Ta, P and HREE) with significant negative Eu anomalies ($\delta \text{Eu} = 0.38 \sim 0.64$), which show the crust source characteristics of magma. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.4 \sim 3.4$, the values are concentrated and distributed above the chondrite line, indicating that the magma source area is the partial melting of the new continental crust material. $T_{\text{DM}}^{\circ} = 1128 \sim 1070 \text{ Ma}$, confirming the existence of Mesoproterozoic crustal accretion events in this area. This study suggests that the Cuiluan complex was formed in the tectonic environment of subduction of oceanic and continental plates.

Key words: plutonic complex; zircon U–Pb ages; zircon Hf isotope; petrogenesis; South of Xiaoxing'an Mountains

花岗岩的形成及演化在解决区域地质演化、大地构造环境、成矿作用等方面具有重要意义(周若, 1994; 肖庆辉, 2005; 杨元江等, 2020, 2021)。花岗岩中的锆石 Hf 同位素可以用来判别岩石成因、示踪源区、探讨板块增生及演化。中国东北地区显生宙花岗岩广泛发育, 各个时期均有出露, 小兴安岭花岗岩的形成时代主要划分为加里东期(韩振新等, 1995; 吴福元等, 1999)、印支期(张海驹等, 1991)和燕山期(谭红艳等, 2012)。伊春地处小兴安岭南段, 该地区花岗岩的研究对于讨论中国东北地区的构造演化具有十分重要的意义。前人研究结果显示, 伊春地区花岗岩的形成主要受古亚洲洋构造域(许文良等, 2012)或太平洋构造域(张兴洲等, 2015)的控制, 目前存在争议; 花岗岩的形成与松嫩地块和佳木斯地块之间的洋壳俯冲有关, 关于洋壳是向东俯冲(李伟民等, 2020)、向西俯冲(Wang et al., 2012)或是双向俯冲(Dong et al., 2017), 目前也存在争议; 关于松嫩地块与佳木斯地块拼合的时间, 目前主要有早古生代(颜强等, 2008; 赵寒冬, 2009)和早中生代(吴福元等, 1999; Deng et al., 2018)2 种认识。需要说明的是, 该地区加里东期花岗岩体的形成时间集中在 508~425 Ma 之间, 主要类型有二长花岗岩、花岗闪长岩和碱长花岗岩(王枫, 2010; Wu et al., 2011)。综上, 前人对伊春地区花岗岩形成的大地构造背景及相关研究仍然存在诸多不同认识, 需要进一步研究解决。翠峦杂岩体位于小兴安岭南段伊春地区, 大地构造位置属于松嫩地块西缘, 主要由中奥陶世花岗闪长岩、二长花岗岩组成。目前有关该杂岩体的成因及时代鲜有报道, 本文通过锆石 U–Pb 测年、Hf 同位素及全岩地球化学研究, 对杂岩体的时代、成因、物质来源及构造环境进行了探讨, 可为进一步解决小兴安岭南段早古生代大地构造演化等问题和矿产勘查部署提供较翔实的数据支撑。

1 地质背景

中亚造山带(Central Asian Orogenic Belt)是西伯

利亚板块与华北、塔里木板块之间的古亚洲洋消减形成的巨型造山带(Windley et al., 1990; Jahn et al., 2000; Xiao et al., 2003), 在中国境内的部分被称为兴蒙造山带(许文良等, 2019)。近年来, 从板块构造理论的角度, 国内外地质学者对兴蒙造山带的构造格局和地质演化历史开展了一系列研究, 认为兴蒙造山带经历了古亚洲洋构造域、蒙古–鄂霍茨克洋构造域及古太平洋构造域的多重演化阶段及板块之间若干微陆块的复杂拼贴过程(葛文春等, 2005; Xu et al., 2009; Tang et al., 2016), 自西向东由额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块、兴凯地块及分割其间的新林–头道桥断裂、黑河–贺根山断裂、嘉荫–牡丹江断裂、敦化–密山断裂组成(图 1-a)。区域上已知的最古老地层为中—新元古界东风山岩群, 岩浆活动主要有新元古代、早古生代、晚古生代及中生代, 其中早古生代共识别出 5 个世代的岩浆作用: 约 516 Ma(寒武纪第二世)、505~490 Ma(寒武纪苗岭世—芙蓉世)、482~461 Ma(早—中奥陶世)、460~450 Ma(中—晚奥陶世)及 432~420 Ma(志留纪温洛克世—普里道利世)(董玉, 2018)。年龄早于 500 Ma 的火成岩普遍具有片麻状构造, 空间上与古老变质岩系密切伴生, 发育透入性片麻理, 显示挤压的构造环境; 晚于 500 Ma 的火成岩为块状构造, 指示拉张环境(刘建峰等, 2008)。研究区地层由前中生代铅山组(ϵ_1q)灰岩、大理岩, 土门岭组(P_2t)板岩、砂砾岩, 五道岭组(P_3w)流纹岩、火山碎屑岩, 以及中生代宁远村组(K_1n)流纹岩、火山碎屑岩及嫩江组(K_2n)细碎屑砂岩、泥岩等组成。侵入岩有中奥陶世花岗闪长岩($\gamma\delta O_2$)、二长花岗岩($\eta\gamma O_2$), 以及早侏罗世碱长花岗岩($\chi\rho\gamma J_1$)等(图 1-b)。

2 岩相学特征

测试样品采集于钻孔中的新鲜岩石, 编号分别为 CL1 和 CL2(图 1-b)。样品 CL1 为中细粒花岗闪长岩, 岩石呈灰白色, 块状构造(图 2-a), 主要由碱性长石(20%~30%)、斜长石(45%~55%)、石英(20%~25%)及少量黑云母组成。碱性长石为半自

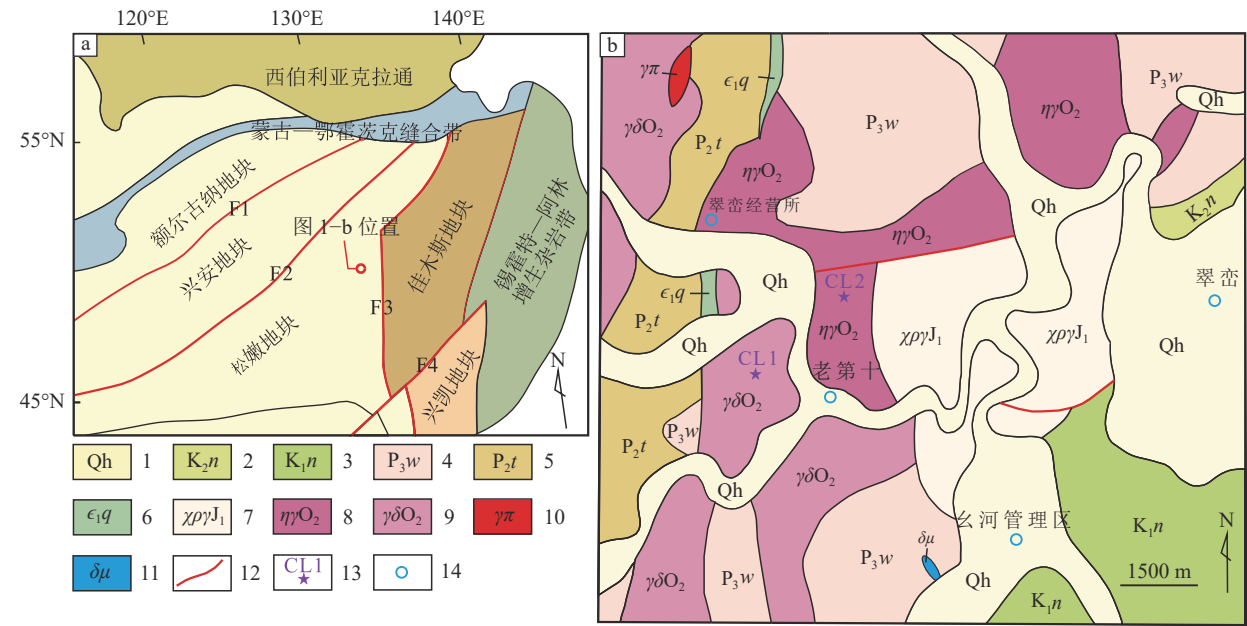


图 1 兴蒙造山带构造简图 (a, 底图据董玉, 2018) 和研究区地质图 (b)

Fig. 1 Structural sketch of Xingmeng orogenic belt (a) and geological map of the study area (b)

F1—新林—头道桥断裂; F2—黑河—贺根山断裂; F3—嘉荫—牡丹江断裂; F4—敦化—密山断裂; 1—第四系; 2—上白垩统嫩江组; 3—下白垩统宁远村组; 4—上二叠统五道岭组; 5—中二叠统土门岭组; 6—下寒武统铅山组; 7—早侏罗世碱长花岗岩; 8—中奥陶世花岗闪长岩; 9—中奥陶世二长花岗岩; 10—花岗斑岩脉; 11—闪长玢岩脉; 12—断裂构造; 13—U-Pb 同位素采样位置; 14—城镇

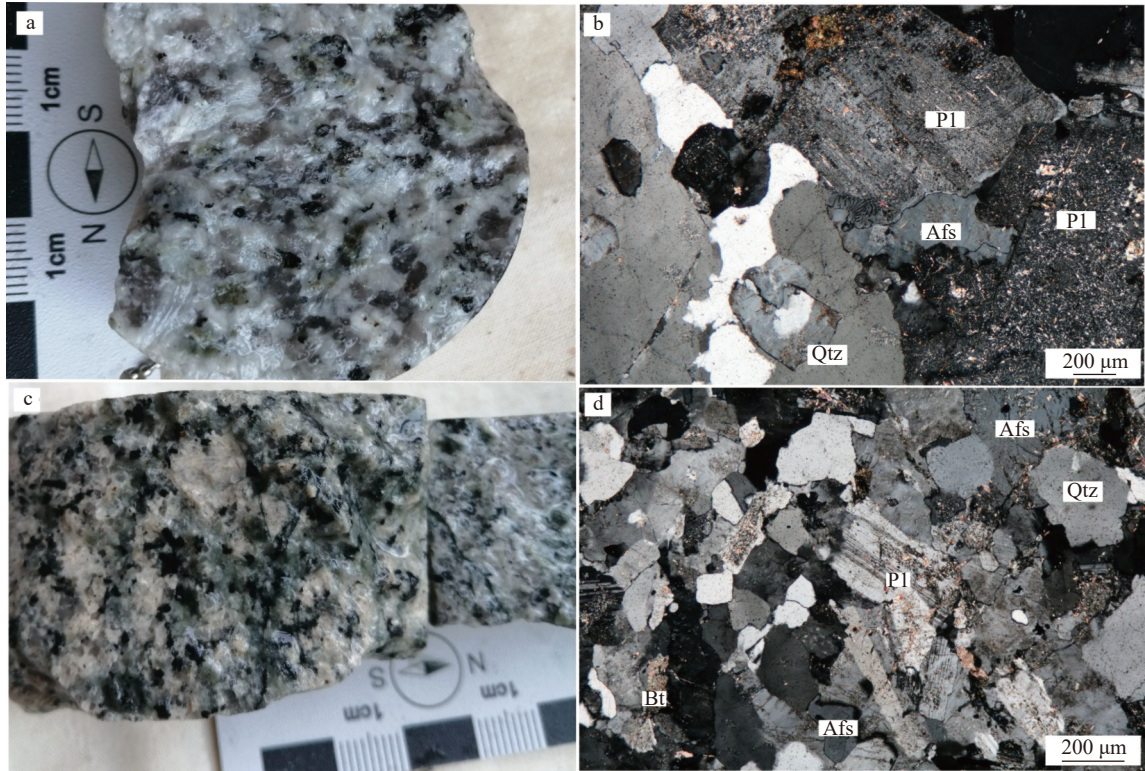


图 2 杂岩体中不同岩石照片和镜下图像

Fig. 2 Photographs and microscopic images of different rocks in the plutonic complex

a—花岗闪长岩手标本照片; b—花岗闪长岩显微照片; c—二长花岗岩手标本照片; d—二长花岗岩显微照片。Qtz—石英; Afs—碱性长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母

形粒状, 可见条纹长石和微斜长石, 粒径 $0.2\sim 4.0$ mm。斜长石呈半自形板状, 粒径 $0.1\sim 2.5$ mm, 晶面微粒状高岭土化使表面略显浑浊。石英为他形粒状, 粒径 $0.15\sim 1.6$ mm。黑云母为绿色片状, 常沿解理见铁质分布, 粒径 $0.05\sim 0.3$ mm(图 2-b), 结合野外定名为中细粒花岗闪长岩。样品 CL2 为中细粒二长花岗岩, 岩石呈浅红灰色, 块状构造(图 2-c), 岩石由碱性长石($35\%\sim 40\%$)、斜长石(约 35%)、石英($25\%\sim 30\%$)和少量黑云母组成, 副矿物可见磷灰石。镜下矿物粒径大小不均, 集中在 $0.5\sim 1.5$ mm 之间, 个别粒度较大, 达 $3.5\sim 4.0$ mm(图 2-d)。

3 测试方法

锆石 U-Pb 测年的样品采集位置见图 1-b, 锆石的挑选在河北区域地质调查所实验室完成, 流程为: 先进行常规粉碎、磁选和重选, 然后在双目镜下挑选晶形完好的锆石颗粒。制靶和 U-Pb 同位素分析由

武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 主检设备为安捷伦电感耦合等离子体质谱仪 Agilent 7900LA-ICP-MS, 相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统 (GeoLasPro HD)。激光能量 80 mJ, 频率 5 Hz, 激光束斑直径 32 μm (图 3-a, b), 测试流程见参考文献(Liu et al., 2008)。锆石微区原位 Lu-Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 本次对部分环带清晰且已获得年龄数据的锆石进行了微区原位激光 Hf 同位素测试, 束斑直径为 50 μm (图 3-a, b), 时间 30 s, 分析方法详见参考文献(徐平等, 2004; Zhou et al., 2018; 崔玉荣等, 2022)。

用于全岩主量和微量测试的样品选取新鲜的岩心, 采自岩体不同部位, 共 11 件样品, 其中花岗闪长岩样品 6 件, 二长花岗岩样品 5 件, 每件重量均大于 2 kg。岩石先破碎成 $5\sim 10$ mm 的颗粒, 再选取 50 g 样品用振动式碎样机碎至 200 目。全岩主量和微量元素测试由武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 主量元素分析采用波长色散 X 射线荧光光谱仪

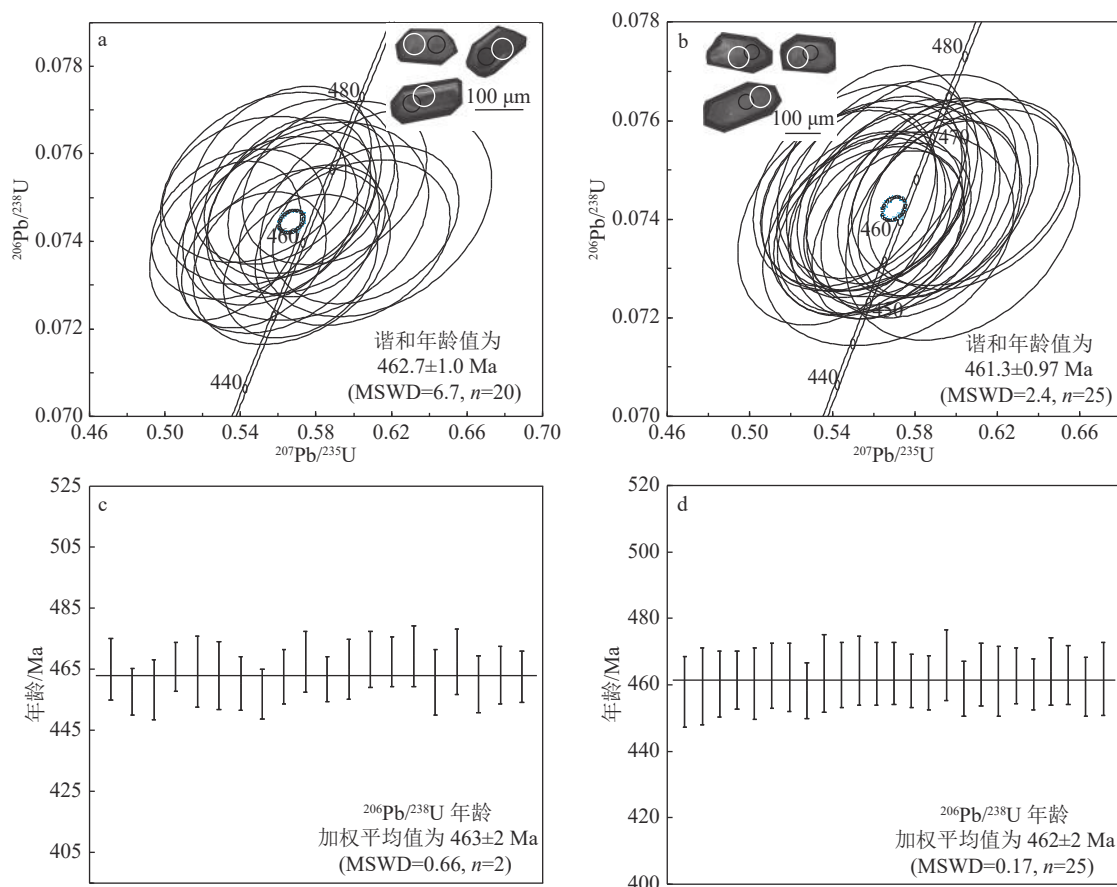


图 3 锆石 U-Pb 谐和图(a, b)和年龄加权平均值分布图(c, d)

(图 a, b 典型锆石图像中黑色圈为 U-Pb 同位素测试点, 白色圈为 Hf 同位素测试点)

Fig. 3 U-Pb concordant diagrams (a, b) and weighted average age distribution diagrams (c, d) of zircons

表 1 杂岩体锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 The analytical results of zircon U-Th-Pb of plutonic complex

测点	含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	U/Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
CL1-01	19.21	78.5	233	2.97	0.0545	0.0017	0.5656	0.0177	0.0748	0.0008	394.5	68.5125	455.2	11.4977	464.9	5.0470
CL1-02	34.7	240	392	1.63	0.0537	0.0016	0.5472	0.0156	0.0736	0.0006	366.7	66.66	443.2	10.2604	457.7	3.8125
CL1-03	12.40	66.7	147	2.20	0.0557	0.0021	0.5671	0.0214	0.0737	0.0008	442.6	85.175	456.1	13.8393	458.2	4.9447
CL1-04	23.41	99.1	280	2.83	0.0553	0.0016	0.5726	0.0160	0.0749	0.0007	433.4	60.18	459.7	10.3474	465.6	4.0008
CL1-05	10.57	54.8	124	2.26	0.0592	0.0024	0.6117	0.0251	0.0747	0.0010	576.0	87.0225	484.6	15.7941	464.1	5.8237
CL1-06	11.55	40.7	140	3.44	0.0562	0.0026	0.5774	0.0254	0.0745	0.0009	461.2	99.99	462.8	16.3439	463.0	5.5438
CL1-07	26.14	155	306	1.97	0.0517	0.0015	0.5319	0.0164	0.0740	0.0007	272.3	63.88	433.1	10.8476	460.3	4.4513
CL1-08	28.09	146	337	2.31	0.0561	0.0016	0.5719	0.0167	0.0734	0.0007	457.5	64.81	459.2	10.7864	456.8	4.0313
CL1-09	18.12	85.5	216	2.53	0.0589	0.0020	0.6064	0.0201	0.0744	0.0007	561.1	74.06	481.3	12.7286	462.5	4.4341
CL1-10	13.25	60.5	159	2.63	0.0549	0.0020	0.5713	0.0206	0.0752	0.0008	405.6	83.325	458.9	13.3121	467.4	5.0048
CL1-11	35.33	212	412	1.94	0.0561	0.0016	0.5778	0.0159	0.0742	0.0006	453.8	62.9575	463.0	10.2182	461.7	3.7063
CL1-12	18.24	103	214	2.08	0.0553	0.0020	0.5731	0.0206	0.0748	0.0008	433.4	79.62	460.0	13.2942	465.0	4.8813
CL1-13	16.83	101	197	1.95	0.0565	0.0019	0.5898	0.0199	0.0753	0.0008	472.3	75.9175	470.7	12.7399	468.2	4.5770
CL1-14	16.47	72.7	197	2.71	0.0527	0.0020	0.5473	0.0199	0.0752	0.0007	322.3	82.4	443.3	13.0300	467.3	4.0956
CL1-15	18.80	80.0	228	2.85	0.0537	0.0018	0.5614	0.0196	0.0755	0.0008	366.7	77.77	452.4	12.7281	469.3	4.9822
CL1-16	16.99	96.0	201	2.09	0.0546	0.0021	0.5598	0.0220	0.0741	0.0009	398.2	87.0275	451.4	14.3187	460.6	5.3230
CL1-17	12.66	75.3	148	1.97	0.0535	0.0023	0.5561	0.0239	0.0752	0.0009	350.1	102.7675	449.0	15.5963	467.4	5.3792
CL1-18	16.88	90.2	201	2.23	0.0586	0.0021	0.5994	0.0211	0.0740	0.0008	550.0	77.765	476.8	13.3955	460.0	4.6355
CL1-19	18.98	110	223	2.03	0.0542	0.0018	0.5557	0.0189	0.0745	0.0008	388.9	75.92	448.7	12.3357	463.0	4.7197
CL1-20	20.85	114	246	2.16	0.0524	0.0019	0.5389	0.0188	0.0744	0.0007	305.6	83.325	437.7	12.3794	462.6	4.2110
CL2-01	10.25	40.8	126	3.09	0.0563	0.0025	0.5672	0.0249	0.0736	0.0009	464.9	98.1375	456.2	16.1197	457.8	5.3235
CL2-02	13.07	65.9	157	2.38	0.0590	0.0027	0.6033	0.0232	0.0739	0.0010	564.9	101.8375	479.3	14.7065	459.5	5.7479
CL2-03	18.23	112	215	1.92	0.0571	0.0019	0.5832	0.0199	0.0740	0.0008	494.5	72.215	466.5	12.7604	460.3	4.9522
CL2-04	29.79	163	357	2.19	0.0576	0.0015	0.5919	0.0160	0.0742	0.0007	516.7	57.4025	472.0	10.2177	461.4	4.3967
CL2-05	12.57	65.2	151	2.32	0.0532	0.0020	0.5425	0.0198	0.0740	0.0009	344.5	83.325	440.1	13.0404	460.4	5.3452
CL2-06	20.02	87.3	244	2.79	0.0574	0.0019	0.5895	0.0191	0.0744	0.0008	509.3	76.8425	470.5	12.2101	462.6	4.9141
CL2-07	16.72	70.1	206	2.94	0.0558	0.0018	0.5734	0.0187	0.0743	0.0009	442.6	74.0675	460.2	12.0887	462.3	5.1241
CL2-08	31.04	165	374	2.27	0.0556	0.0015	0.5669	0.0150	0.0737	0.0007	435.2	62.03	456.0	9.7473	458.3	4.2007
CL2-09	11.38	54.1	138	2.55	0.0564	0.0023	0.5815	0.0238	0.0745	0.0010	477.8	97.2125	465.4	15.2988	463.5	5.8663
CL2-10	28.22	104	349	3.36	0.0572	0.0017	0.5885	0.0166	0.0745	0.0008	498.2	64.8075	469.9	10.6400	462.9	4.9271
CL2-11	19.03	93.3	226	2.42	0.0548	0.0020	0.5642	0.0190	0.0747	0.0009	405.6	81.4725	454.2	12.3174	464.2	5.1986
CL2-12	14.76	86.8	170	1.96	0.0590	0.0021	0.6071	0.0204	0.0745	0.0008	568.6	84.245	481.7	12.8993	463.3	4.7370
CL2-13	14.31	62.8	173	2.75	0.0587	0.0022	0.6020	0.0215	0.0745	0.0008	553.7	81.4675	478.5	13.6302	463.5	4.6505
CL2-14	17.89	63.5	221	3.48	0.0545	0.0018	0.5581	0.0184	0.0742	0.0007	390.8	71.29	450.3	11.9930	461.2	3.9768
CL2-15	32.91	135	403	2.99	0.0543	0.0015	0.5567	0.0156	0.0741	0.0007	383.4	67.585	449.4	10.1893	460.7	4.0958
CL2-16	19.03	82.6	233	2.82	0.0541	0.0018	0.5595	0.0188	0.0750	0.0009	376.0	75.9175	451.2	12.2655	466.0	5.2893
CL2-17	18.92	115	222	1.93	0.0550	0.0019	0.5588	0.0186	0.0738	0.0007	413.0	77.77	450.8	12.0937	458.9	4.1504
CL2-18	14.47	63.8	174	2.73	0.0541	0.0021	0.5560	0.0207	0.0745	0.0008	376.0	85.175	448.9	13.5335	463.0	4.7550
CL2-19	15.76	105	179	1.70	0.0556	0.0020	0.5705	0.0207	0.0741	0.0009	435.2	77.77	458.3	13.3956	461.0	5.2748
CL2-20	27.55	103	337	3.27	0.0550	0.0015	0.5661	0.0159	0.0744	0.0007	413.0	62.9575	455.5	10.3178	462.7	4.2279
CL2-21	24.90	122	296	2.43	0.0554	0.0016	0.5668	0.0166	0.0740	0.0006	427.8	69.4375	455.9	10.7389	460.1	3.8453
CL2-22	10.82	60.7	125	2.06	0.0539	0.0021	0.5522	0.0207	0.0746	0.0009	364.9	87.0275	446.4	13.5304	464.0	5.1212
CL2-23	25.66	149	302	2.03	0.0533	0.0017	0.5480	0.0173	0.0745	0.0007	338.9	37.96	443.7	11.3307	462.9	4.4696
CL2-24	22.33	137	256	1.87	0.0542	0.0017	0.5547	0.0176	0.0739	0.0007	388.9	73.14	448.0	11.5039	459.4	4.4011
CL2-25	11.49	65.2	135	2.07	0.0548	0.0021	0.5610	0.0211	0.0743	0.0009	405.6	85.1775	452.1	13.7599	461.8	5.4721

(ZSXPrimus II), 具体流程参考文献(中国国家标准化管理委员会, 2010a); 稀土和微量元素测试利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成, 测试流程参考相关文献(中国国家标准化管理委员会, 2010b)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测点阴极发光典型图像见图 3-a, b, U-Th-Pb 同位素分析结果见表 1。

花岗闪长岩(CL1 采集坐标: 东经 128°32'34"、北纬 47°42'19")的典型阴极发光(CL)图像显示锆石晶形较好, 呈自形—半自形, 粒径 100~200 μm , 发育宽缓的生长环带和明显的岩浆振荡环带(图 3-a), 具岩浆锆石的特征。锆石 U/Th 值为 1.63~3.44, 均大于 0.1, 也显示岩浆成因锆石的特征。本次分析了 20 个锆石, 获得 20 个有效数据点, 根据谐和图, 数据点基本落在谐和线附近, 谐和年龄值变化范围为 469.3 $\pm$ 5.0~456.8 $\pm$ 4.0 Ma(图 3-a), 年龄加权平均值为 463 $\pm$ 2 Ma(MSWD = 0.66, n = 20)(图 3-c), 显示成岩时代为中奥陶世。

二长花岗岩(CL2 采集坐标: 东经 128°33'54"、北纬 47°43'40")的典型 CL 图像显示, 锆石呈自形—半自形, 粒径 100~200 μm , 发育宽缓的生长环带和明显的岩浆振荡环带(图 3-b), 具岩浆锆石特征。锆石 U/Th 值为 1.70~3.48, 均大于 0.1, 也显示岩浆成因锆石的特征。本次分析了 25 个锆石, 获得 25 个有效数据点, 根据谐和图, 数据点基本落在谐和线上或附近, 谐和年龄值变化范围为 466.0 $\pm$ 5.3~457.8 $\pm$ 5.3 Ma(图 3-b), 年龄加权平均值为 462 $\pm$ 2 Ma(MSWD = 0.17, n = 25)(图 3-d), 显示成岩时代为中奥陶世。

4.2 元素地球化学特征

4.2.1 主量元素

花岗闪长岩和二长花岗岩样品具有相似的元素地球化学特征: 高硅(SiO_2 = 66.79%~72.97%), 贫钠(Na_2O = 1.42%~3.47%)、富钾(K_2O = 4.97%~5.80%、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ = 1.43~3.62), 总碱含量较高($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ = 6.58%~8.89%)(表 2), 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 4-a)中, 投点落入钾玄岩系列区域。翠峦杂岩样品的铝含量较高(Al_2O_3 = 13.92%~16.85%), 铝指数 A/NK = 1.25~2.13, 铝饱和指数 A/CNK = 0.96~1.24, 样品 CL1-25 和 CL2-30 的 A/NK 值和 A/CNK 值偏高, 应

该是岩体局部受后期热液影响, 斜长石和碱性长石发生高岭土化等蚀变作用, 铝含量增加所致, 在 A/CNK-A/NK 关系图中样品大多投点于准铝质区域(图 4-b), 显示 I 型花岗岩。样品贫铁(Fe_2O_3 = 1.91%~4.05%)、贫镁(MgO = 0.46%~0.92%, $\text{Mg}^\#$ = 15.38~22.93)、贫钛(TiO_2 = 0.30%~0.41%)。

4.2.2 微量和稀土元素

花岗闪长岩稀土元素总量较高($\sum\text{REE}$ = 206.22 $\times 10^{-6}$ ~264.29 $\times 10^{-6}$), 轻、重稀土元素分馏明显(LREE/HREE = 9.82~13.29, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ = 11.65~14.17), δEu = 0.38~0.64。二长花岗岩 $\sum\text{REE}$ = 247.82 $\times 10^{-6}$ ~294.65 $\times 10^{-6}$, LREE/HREE = 10.24~12.08, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ = 11.04~14.18, δEu = 0.38~0.48(表 2)。在稀土元素球粒陨石标准化配分图解(图 5-a)中, 所有样品呈现典型的“V”字形和轻稀土元素较重稀土元素富集的右倾型, 负 Eu 异常明显。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)显示, 富集大离子亲石元素 K 和 Rb, 亏损高场强元素 Ti、Nb、Ta、P、HREE 等。

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素特征

为进一步示踪岩浆源区性质, 在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的基础上, 对花岗闪长岩锆石进行微区 Hf 同位素测定, 共分析了 10 个测点, 结果见表 3。样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ = 2.4~3.4, 数值集中分布于球粒陨石线之上, 显示源区包含大量低 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的地壳物质, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在 0.28256~0.28259 之间, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 的值为 -0.99~-0.96, 对应的一阶段亏损地幔模式年龄 T_{DM1} = 978~932 Ma, 地壳模式年龄 T_{DM^c} = 1128~1070 Ma。

5 讨论

5.1 岩石成因

花岗闪长岩和二长花岗岩中未出现 S 型花岗岩的典型矿物, CIPW 标准矿物出现刚玉分子, 但大部分的分子体积比小于 1%。大多数样品 A/CNK < 1.1 (样品 CL1-25 和 CL2-30 的 A/CNK 值分别为 1.24 和 1.23, 大于 1.1), 与典型 S 型花岗岩特点不同。岩石中未见到 A 型花岗岩的特征矿物, 如碱性暗色矿物等, 可见 I 型花岗岩的特征矿物绿帘石、辉石等。在 SiO_2 - P_2O_5 关系图解(图 6-a)中, P_2O_5 与 SiO_2 含量呈现显著的负相关, 与 I、A 型花岗岩演化趋势相同(Chappell et al., 1999; Li et al., 2007; 许赛华等, 2019)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)

表 2 杂岩体主量、微量和稀土元素分析结果及特征参数

Table 2 Major, trace and rare earth element compositions and key parameters of plutonic complex

元素	花岗闪长岩						二长花岗岩				
	CL1-25	CL1-31	CL1-32	CL1-33	CL1-34	CL1-35	CL2-26	CL2-27	CL2-28	CL2-29	CL2-30
SiO ₂	67.14	70.66	71.88	66.79	70.62	68.16	70.63	72.97	70.19	71.97	67.12
TiO ₂	0.37	0.33	0.35	0.38	0.31	0.41	0.35	0.30	0.37	0.35	0.37
Al ₂ O ₃	16.85	14.53	14.02	13.92	14.47	14.95	13.99	14.07	14.10	13.99	16.81
Fe ₂ O ₃	3.72	2.73	2.52	4.05	2.53	3.37	2.55	1.91	3.35	2.44	3.72
MnO	0.14	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.04	0.04	0.06	0.05	0.14
MgO	0.75	0.69	0.76	0.75	0.52	0.73	0.61	0.46	0.92	0.59	0.77
CaO	3.11	1.64	1.33	1.27	1.89	2.46	1.96	0.86	2.42	1.67	3.12
Na ₂ O	1.42	3.04	2.92	3.47	3.41	3.18	2.81	2.72	2.47	2.80	1.45
K ₂ O	5.16	5.61	5.22	4.97	5.49	5.43	5.51	5.79	5.31	5.59	5.19
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.10	0.07	0.05	0.08	0.07	0.08
烧失量	1.00	0.66	1.11	3.19	0.77	0.67	0.74	1.09	1.11	0.90	0.95
FeO	3.35	2.46	2.27	3.76	2.28	3.03	2.29	1.72	3.01	2.20	3.35
Mg [#]	16.65	19.98	22.93	15.38	17.04	17.72	19.10	19.11	21.44	19.37	16.92
Na ₂ O+K ₂ O	6.58	8.65	8.14	8.44	8.89	8.61	8.32	8.51	7.78	8.39	6.64
AKI	0.47	0.76	0.75	0.80	0.80	0.74	0.76	0.76	0.70	0.76	0.48
Be	3.05	3.31	3.25	3.33	3.11	3.86	2.74	2.14	2.56	3.00	4.86
Sc	4.42	3.89	3.83	4.06	3.49	5.93	4.76	3.28	4.43	4.75	6.28
V	19.54	17.69	20.16	20.19	16.28	23.89	22.29	14.65	25.23	20.16	13.46
Cr	4.75	2.43	6.21	2.96	2.70	4.21	6.00	2.57	7.01	4.94	1.64
Co	3.18	3.02	3.54	8.12	2.93	4.36	3.69	1.98	3.87	3.15	3.25
Ni	1.74	1.65	2.86	1.80	1.38	1.90	2.21	1.82	2.74	1.89	1.43
Ga	17.25	17.52	16.92	17.32	17.51	19.45	17.90	16.16	17.95	17.03	20.96
Rb	285.77	240.80	238.58	233.44	207.26	226.27	255.72	306.49	271.04	286.85	256.85
Sr	190.91	246.70	195.60	131.20	293.40	362.45	244.11	155.77	244.90	193.47	207.81
Y	37.31	28.33	27.63	30.63	23.19	34.47	34.12	33.71	30.90	37.51	40.49
Zr	256.68	260.48	256.30	286.19	220.27	285.96	275.02	252.92	260.26	248.28	402.82
Nb	12.65	11.61	12.57	13.59	10.34	13.93	12.68	12.67	11.99	12.85	17.61
Sn	4.77	3.94	3.64	7.82	2.79	4.21	4.16	4.01	4.40	4.88	3.18
Cs	7.44	7.86	7.49	3.57	4.36	6.66	7.70	9.26	9.60	7.32	21.42
Ba	585.36	631.88	703.97	586.99	586.69	832.00	629.51	564.99	666.58	593.30	670.11
La	58.60	54.32	49.21	59.22	49.42	57.70	55.06	57.28	58.87	59.89	65.79
Ce	116.39	104.62	94.48	112.94	92.96	113.05	109.77	114.39	115.05	118.61	129.41
Pr	12.51	11.15	9.90	11.71	9.76	12.24	11.88	12.19	12.04	12.74	13.87
Nd	43.58	38.08	33.73	40.20	33.01	42.71	41.14	42.28	42.48	44.89	49.71
Sm	8.20	6.37	5.67	6.70	5.59	7.91	7.19	7.33	7.02	8.29	8.80
Eu	0.96	0.96	1.01	1.07	1.04	1.26	0.94	0.88	1.04	0.97	1.24
Gd	7.11	4.83	4.71	5.27	4.04	6.18	6.19	5.87	5.84	6.81	7.45
Tb	1.09	0.77	0.74	0.79	0.64	0.96	1.00	0.93	0.87	1.11	1.13
Dy	6.67	4.69	4.56	5.05	3.84	5.87	5.99	5.70	5.29	6.84	7.10
Ho	1.27	0.92	0.89	0.98	0.73	1.12	1.09	1.09	1.02	1.26	1.36
Er	3.83	2.67	2.53	2.96	2.18	3.26	3.24	3.22	2.89	3.58	3.91

续表 2

元素	花岗闪长岩						二长花岗岩				
	CL1-25	CL1-31	CL1-32	CL1-33	CL1-34	CL1-35	CL2-26	CL2-27	CL2-28	CL2-29	CL2-30
Tm	0.55	0.43	0.42	0.47	0.32	0.50	0.48	0.51	0.43	0.53	0.63
Yb	3.39	2.72	2.58	3.01	2.35	3.23	3.12	3.30	2.80	3.30	4.02
Lu	0.52	0.43	0.40	0.47	0.33	0.51	0.48	0.50	0.43	0.49	0.61
Hf	7.67	7.13	6.96	7.77	5.82	7.56	7.84	7.50	7.22	7.22	10.35
Ta	1.31	1.16	1.16	1.04	0.93	1.10	1.15	1.24	1.03	1.28	1.45
Tl	2.25	1.60	2.18	2.23	1.40	1.67	1.76	2.58	2.09	2.49	1.89
Pb	23.22	27.80	21.49	20.63	38.26	37.54	26.23	20.73	22.37	22.73	16.77
Th	39.02	24.00	32.57	33.01	28.70	29.77	35.99	40.74	31.66	37.90	30.44
U	15.18	9.29	10.45	13.56	9.27	9.71	12.61	14.42	11.24	13.22	15.49
A/NK	2.13	1.31	1.34	1.26	1.25	1.35	1.32	1.31	1.44	1.31	2.10
A/CNK	1.24	1.03	1.09	1.04	0.97	0.96	0.99	1.14	0.99	1.02	1.23
ΣREE	264.29	233.29	210.81	250.87	206.22	256.40	247.82	255.13	256.03	269.68	294.65
ΣLREE	239.86	215.83	193.98	231.87	191.79	234.77	226.23	234.01	236.46	245.76	268.44
ΣHREE	24.43	17.46	16.83	19.00	14.43	21.63	21.59	21.12	19.57	23.92	26.21
LREE/HREE	9.82	12.36	11.53	12.20	13.29	10.85	10.48	11.08	12.08	10.27	10.24
δEu	0.38	0.51	0.58	0.53	0.64	0.53	0.42	0.40	0.48	0.38	0.46
Eu*	34.75	25.66	23.63	27.35	22.13	32.21	30.39	30.13	29.27	34.40	36.95
(La/Sm) _N	4.50	5.36	5.46	5.56	5.56	4.59	4.82	4.92	5.28	4.55	4.70
(La/Yb) _N	11.65	13.46	12.86	13.26	14.17	12.04	11.91	11.71	14.18	12.24	11.04
(Sm/Nd) _N	0.58	0.51	0.52	0.51	0.52	0.57	0.54	0.53	0.51	0.57	0.54
(Gd/Yb) _N	1.69	1.43	1.47	1.41	1.39	1.54	1.60	1.44	1.68	1.67	1.50

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

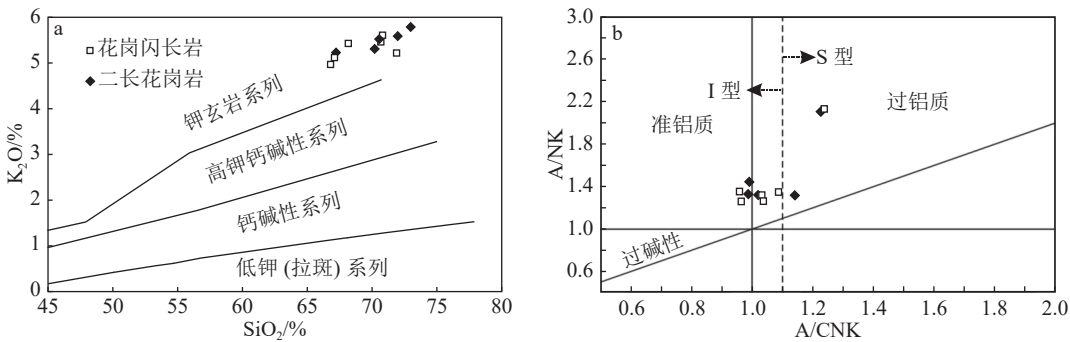


图 4 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解 (a, 底图据 Peccerillo et al., 1976) 和 A/CNK-A/NK 图解 (b, 底图据 Rickwood, 1989)

Fig. 4 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram(a) and A/CNK-A/NK diagram(b)

中, 表现为 Th 元素富集的特征。Th 与 Rb 呈正相关关系, 显示分异型 I 型花岗岩的特征 (Chappell et al., 1999; 李响等, 2021) (图 6-b)。一般认为, A 型花岗岩的 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值大于 2.6 (Whalen et al., 1987), 花岗闪长岩和二长花岗岩的 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值为 1.93~2.46, 不同于 A 型花岗岩, 而且既有 S 型花岗岩特征也有 I 型号花岗岩特征。按照 Boehnke et

al. (2013) 提出的锆石饱和温度计算方法, 花岗闪长岩锆石饱和温度平均值为 765°C , 二长花岗岩为 782°C , 低于刘昌实等 (2003) 统计计算的 A 型花岗岩温度 833°C 。另外, A 型花岗岩具有较平坦的稀土元素配分曲线, Zr 含量一般大于 250×10^{-6} , 样品 Zr 平均含量为 220.27×10^{-6} , 低于 A 型花岗岩的含量。样品 AKI 值平均为 0.71, 明显小于 A 型花岗岩的平均

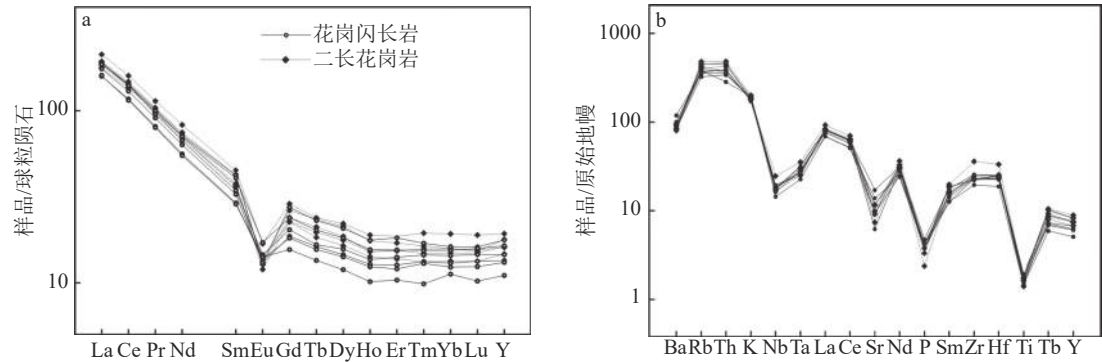


图 5 稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a, 标准化值据 Boynton, 1984) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b, 标准化值据 McDonough et al., 1992)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b)

表 3 花岗闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotope analysis table of the granodiorite

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1 σ	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	f_{LwHf}
CL1-01	458	0.028200	0.000009	0.000772	0.000016	0.282590	0.000512	-6.43	3.4	18.13	932	1070	-0.976739
CL1-02	460	0.028547	0.000009	0.000776	0.000022	0.282580	0.000796	-6.79	3.1	28.20	946	1088	-0.976613
CL1-03	460	0.034437	0.000009	0.000917	0.000019	0.282583	0.000798	-6.69	3.2	28.24	946	1085	-0.972376
CL1-04	461	0.036062	0.000008	0.000957	0.000012	0.282564	0.000602	-7.36	2.5	21.32	973	1120	-0.971162
CL1-05	460	0.024758	0.000008	0.000657	0.000013	0.282566	0.000670	-7.30	2.6	23.70	964	1112	-0.980219
CL1-06	463	0.015717	0.000008	0.000436	0.000002	0.282577	0.000184	-6.89	3.2	6.50	942	1088	-0.986864
CL1-07	462	0.044822	0.000008	0.001247	0.000046	0.282567	0.001554	-7.24	2.6	55.03	976	1118	-0.962447
CL1-08	458	0.033730	0.000008	0.000913	0.000021	0.282563	0.000945	-7.38	2.4	33.46	973	1121	-0.972496
CL1-09	463	0.027405	0.000009	0.000745	0.000011	0.282557	0.000462	-7.61	2.4	16.35	978	1128	-0.977573
CL1-10	463	0.027997	0.000009	0.000778	0.000003	0.282563	0.000200	-7.40	2.6	7.08	971	1119	-0.976552

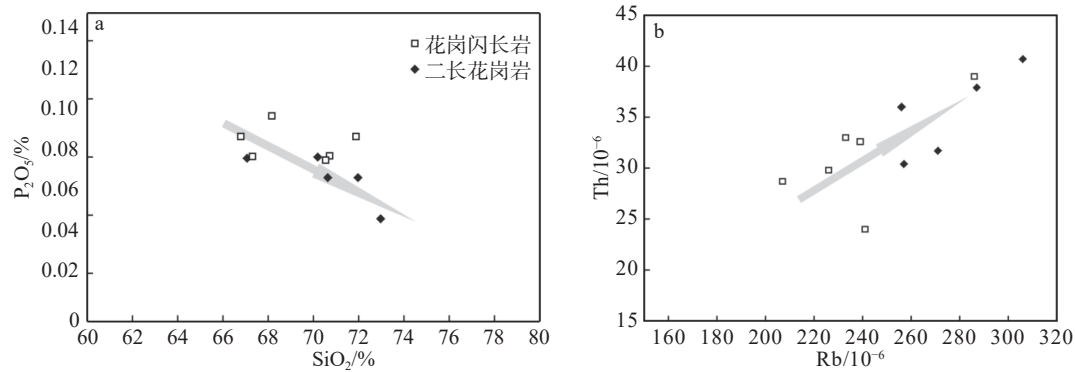


图 6 SiO₂-P₂O₅ 图解 (a) 和 Rb-Th 图解 (b)(a,b 底图据 Chappell et al., 1999)

Fig. 6 Diagrams of SiO₂-P₂O₅ (a) and Rb-Th (b)

值 0.95(Whalen et al., 1987)。综上特征,反映杂岩体属 I 型花岗岩。

在 La-La/Sm 和 La-La/Zr 判别图解(图 7-a, b)中,斜线分布指示部分熔融作用,水平直线分布指示分离结晶作用(Allegre et al., 1978; 董磊等, 2018; 任

飞等, 2022)。花岗闪长岩和二长花岗岩样品均呈水平直线分布,指示岩浆以分离结晶演化作用为主。相对于主要矿物,副矿物的结晶分异对稀土元素含量变化影响较大,微量元素蛛网图显示,花岗闪长岩显著亏损 Sr、Ba、Nb、Eu、P、Ti 等元素,这种元素亏

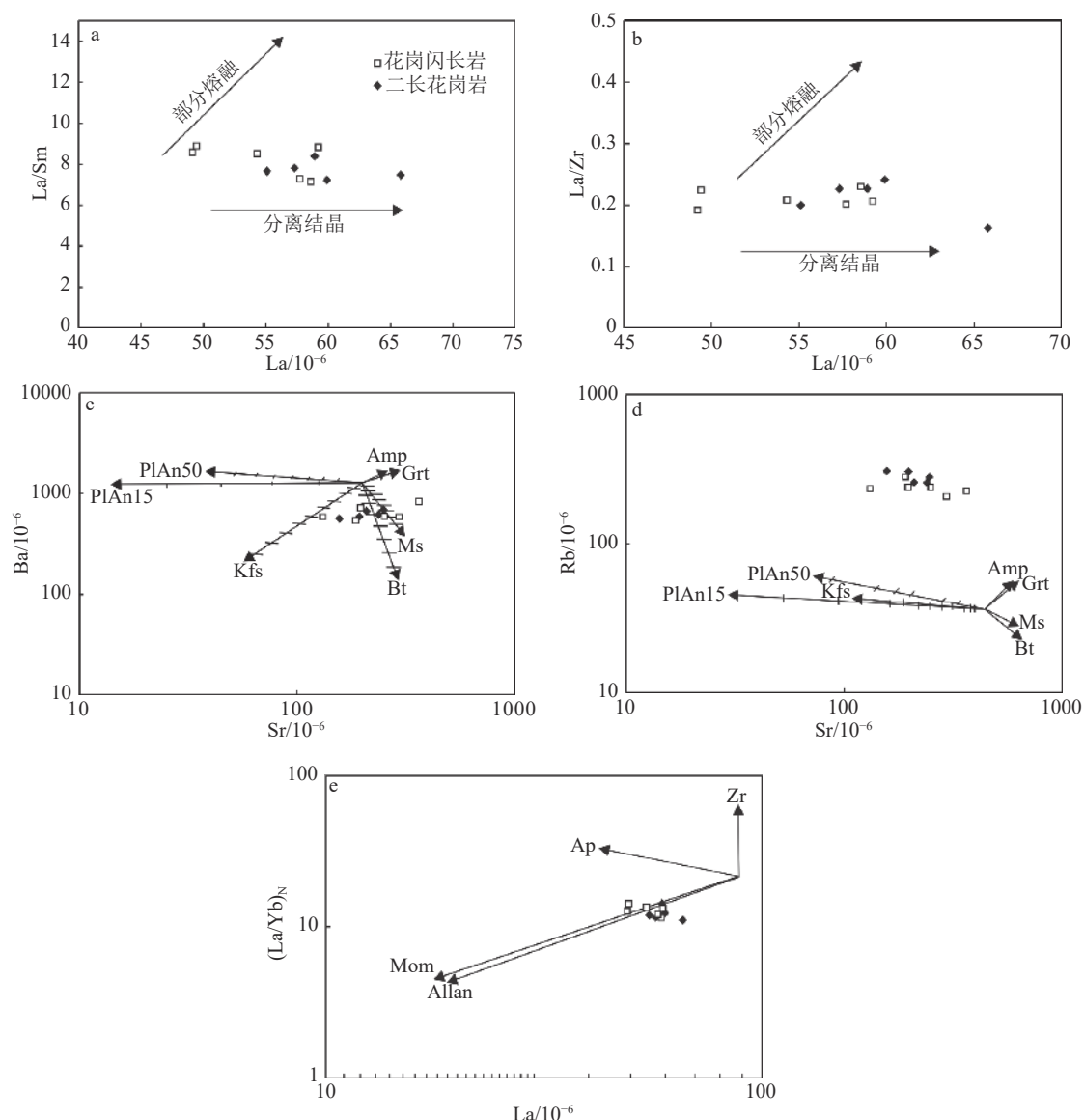


图 7 矿物结晶分异作用过程判别图解

Fig. 7 Discrimination diagrams of mineral crystallization differentiation process

a—La-La/Sm 图解(底图据董磊等, 2018); b—La-La/Zr 图解(底图据任飞等, 2022); c—Sr-Ba 图解; d—Sr-Rb 图解; e—La-(La/Yb)_N 图解(c, d, e 底图据 Janousek et al., 2004)。Allan—褐帘石; Mon—独居石; Ap—磷灰石; Zr—锆石; PlAn50—斜长石 (An = 50); PlAn15—斜长石 (An = 15); Kfs—钾长石; Bi—黑云母; Ms—白云母; Grt—石榴子石; Amp—角闪石

损可能是由富集某元素的矿物结晶分异造成的。Nb、Ti 亏损和榍石、金红石、角闪石、钛铁矿等结晶分异有关 (Wu et al., 2003; 魏庆国等, 2010)。从 Sr-Ba、Sr-Rb 图解(图 7-c, d)看, 岩体形成过程中主要经历了钾长石、斜长石、黑云母等矿物的分异。稀土元素总量随 SiO₂ 含量增加而减少, 被认为是成岩过程中分配系数较高的磷灰石、褐帘石、独居石、锆石等矿物分异所致。从 La-(La/Yb)_N 图解(图 7-e)中二长花岗岩和花岗闪长岩样品的投点位置看, 磷

灰石的分异也是控制成岩过程中稀土元素含量变化的主要因素(王志伟, 2017)。

5.2 岩浆源区

花岗闪长岩富集轻稀土元素 (LREE/HREE=9.82~13.29, (La/Yb)_N=11.65~14.17), 二长花岗岩同样富集轻稀土元素 (LREE/HREE=10.24~12.08, (La/Yb)_N=11.04~14.18), 表明岩浆源区存在石榴子石相。花岗闪长岩和二长花岗岩样品的 Rb/Sr 值为 0.62~1.97, Nb/Ta 值为 9.64~13.05, 符合壳源岩浆

特征(分别为大于 0.50 和 11 左右)(Gibbs et al., 1986; McDonough et al., 1995)。花岗闪长岩和二长花岗岩 Eu 显示负异常(δEu 分别为 0.38~0.64 和 0.38~0.48), 为壳型特征, 表明岩浆在向上侵位过程中斜长石因分离结晶而离开岩浆。前人熔融实验结果表明, 镁铁质下地壳在没有地幔物质参与的情况下, 其部分熔融产生的熔体的 $\text{Mg}^\#$ 值小于 40(Rapp et al., 1995; 马鹏飞等, 2021)。本文岩体的 $\text{Mg}^\#$ 值为 15.38~22.93, 明显小于 40, 显示杂岩体岩浆源自铁镁质下地壳的熔融。为研究杂岩体岩浆物源的性质, 笔者在锆石 U-Pb 测年的基础上, 对花岗闪长岩样品进行了原位锆石 Lu-Hf 同位素测试。结果显

示, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 2.4~3.4, 数值集中, 说明源区物质不具有多源的特征。在锆石 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图 8)中, 样品点均落在球粒陨石演化线之上, 暗示岩浆来自新增生的陆壳物质的部分熔融(Amelin et al., 2000; Belousova et al., 2006)。对应的地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^c = 1128 \sim 1070 \text{ Ma}$, 说明该地区存在中元古代地壳增生事件。

5.3 构造环境

关于伊春地区奥陶纪花岗岩产出的大地构造环境, 刘建峰等(2008)、Deng et al. (2018)认为, 该地区早奥陶世处于板块碰撞后伸展环境, Wang et al. (2012)认为, 晚奥陶世处于俯冲造山环境, 也有学者认为奥陶纪整体处于挤压造山环境(颧颧强等, 2008; 赵寒冬, 2009; 许文良等, 2012, 2019)。由此可以看出, 有关奥陶纪该地区大地构造背景的认识目前还存在争议, 但与洋陆转换关系密切已形成共识(颧颧强等, 2008; 刘建峰等, 2008; 赵寒冬, 2009; 许文良等, 2012, 2019; Wang et al., 2016; Deng et al., 2018), 即总体处于洋陆俯冲碰撞或伸展构造背景。在 $(\text{Yb}+\text{Ta})-\text{Rb}$ 图解(图 9-a)和 $\text{Y}-\text{Nb}$ 图解(图 9-b)中, 翠峦杂岩体样品点都投于同碰撞和火山弧花岗岩区域, 反映研究区在中奥陶世处于活动陆缘俯冲带环境。花岗闪长岩锆石 Hf 同位素地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^c = 1128 \sim 1070 \text{ Ma}$, 指示在中元古代发生了地壳生长事件。中奥陶世, 古亚洲洋向松嫩地块发生俯冲, 诱发了起源于亏损地幔的中元古代地壳物质的熔融, 后经岩浆侵位形成翠峦杂岩体。

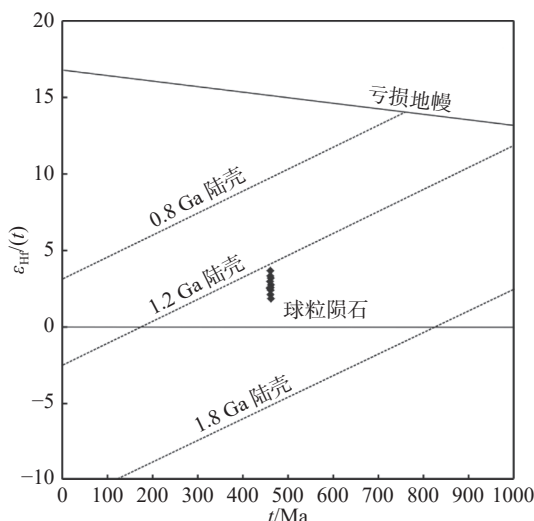


图 8 花岗闪长岩锆石 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(底图据陶刚等, 2017)

Fig. 8 Zircon $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of the granodiorite

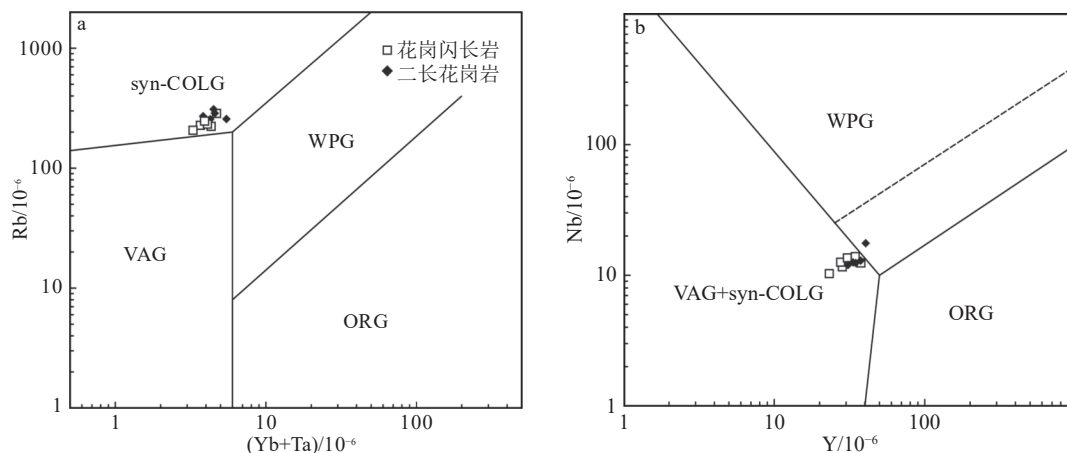


图 9 杂岩体 $(\text{Yb}+\text{Ta})-\text{Rb}$ 图解(a)和 $\text{Y}-\text{Nb}$ (b)图解(a, b 底图据 Pearce, 1984)

Fig. 9 $(\text{Yb}+\text{Ta})-\text{Rb}$ diagram(a) and $\text{Y}-\text{Nb}$ diagram(b) of the plutonic complex

VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩

6 结 论

(1) 小兴安岭南段翠峦杂岩体由中细粒花岗闪长岩及二长花岗岩构成, 其年龄加权平均值分别为 463 ± 2 Ma 和 462 ± 2 Ma, 显示成岩时代为中奥陶世。

(2) 岩石地球化学特征表明, 杂岩体类型为 I 型花岗岩, 显示俯冲带岩浆岩特征, 岩浆以壳源为主; 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.4 \sim 3.4$, 暗示岩浆源区为新增生的陆壳物质的部分熔融; 锆石 Hf 同位素地壳模式年龄 T_{DM}^c 为 1070 ~ 1128 Ma, 指示该地区存在中元古代地壳增生事件。

(3) 中奥陶世古亚洲洋向松嫩地块发生俯冲, 诱发了起源于亏损地幔的中元古代地壳物质的熔融, 岩浆侵位形成翠峦杂岩体。

参考文献

- Allegre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1–25.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. 2000. Early–middle archaean crustal evolution deduced from Lu–Hf and U–Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205–4225.
- Belousova E A, Griffin W L, O’Reilly S Y. 2006. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from eastern Australian granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 47(2): 329–353.
- Boehnke P, Watson E B, Trail D, et al. 2013. Zircon saturation Re–revisited[J]. *Chemical Geology*, 351: 324–334.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]//Developments in Geochemistry, 63–114.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I and S–type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535–551.
- Deng C Z, Sun D Y, Sun G Y, et al. 2018. Age and geochemistry of Early Ordovician A–type granites in the Northeastern Songnen Block, NE China[J]. *Acta Geochim.*, 37(6): 805–819.
- Dong Y, Ge W C, Yang H, et al. 2017. Permian tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean: evidence from zircon U–Pb–Hf isotopes and geochemistry of a NS trending granitoid belt in the Jiamusi Massif, NE China[J]. *Gondwana Research*, 49(9): 147–163.
- Gibbs A K. 1986. The continental crust: its composition and evolution[J]. *Journal of Geology*, 94(4): 632–633.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B, et al. 2000. Granitoids of the central asian orogenic belt and continental growth in the phanerozoic[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 91(1/2): 181–193.
- Janousek V, Finger F, Roberts M, et al. 2004. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole–rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian zone of the Bohemian Massif[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1/2): 141–159.
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300 km–wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat–slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179–182.
- 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[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43.
- McDonough W F, Sun S S, Ringswood A E, et al. 1992. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001–1012.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3/4): 223–253.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust–mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Tang J, Xu W L, Wang F, et al. 2016. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol–Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China[J]. *Gondwana Research*, 31: 218–240.
- Wang F, Xu W L, Meng E, et al. 2012. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen–Zhangguangcai range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the central asian orogenic belt: geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 234–248.
- Wang Z W, Xu W L, Pei F P, et al. 2016. Geochronology and geochemistry of early Paleozoic igneous rocks of the Lesser Xing’ an Range, NE China: implications for the tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 261: 144–163.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A–type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, et al. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia[J]. *Geology*, 18(2): 128–131.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A, et al. 2003. Highly fractionated I–type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66(3/4): 241–273.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Asian Earth Sciences*,

- 41: 1–30.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1069–1084.
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392–402.
- Zhou L M, Wang R, Hou Z Q, et al. 2018. Hot Paleocene–Eocene gangdese arc: Growth of continental crust in southern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 62: 178–197.
- 崔玉荣, 肖志斌, 涂家润, 等. 2022. 氧化物型含铀矿物微区原位 Hf 同位素分析技术研究进展[J]. *岩矿测试*, 41(5): 691–703.
- 董磊, 李光明, 黄勇, 等. 2018. 藏南雅鲁藏布江结合带东段琼杂岩早白垩世变辉绿岩地球化学特征及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 38(4): 1–12.
- 董玉. 2018. 佳木斯地块与松嫩-张广才岭地块拼合历史: 年代学与地球化学证据[D]. 吉林大学博士学位论文: 5–78.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约[J]. *科学通报*, 50(12): 1239–1247.
- 韩振新, 郝正平, 侯敏. 1995. 小兴安岭地区与加里东期花岗岩类有关的矿床成矿系列[J]. *矿床地质*, 14(4): 293–302.
- 颜炳强, 张福勤, 苗来成, 等. 2008. 东北牡丹江地区“黑龙江群”中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U–Pb 定年及其地质学意义[J]. *岩石学报*, 24(6): 1237–1250.
- 李伟民, 刘永江, 赵英利, 等. 2020. 佳木斯地块构造演化[J]. *岩石学报*, 36(3): 665–684.
- 李响, 王令占, 涂兵, 等. 2021. 粤西北印支期太保岩体的锆石 U–Pb 年代学、地球化学及岩石成因[J]. *地球科学*, 46(4): 1199–1216.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. *高校地质学报*, 9(4): 573–591.
- 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 等. 2008. 小兴安岭东部早古生代花岗岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 27(4): 534–544.
- 马鹏飞, 夏小平, 徐健, 等. 2021. 腾冲早白垩世花岗岩的高分异成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 37(4): 1177–1195.
- 任飞, 尹福光, 彭智敏, 等. 2022. 班公湖-怒江俯冲增生杂岩带东段晚古生代辉绿岩锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及其构造意义[J]. *地质前缘*, 29(2): 164–179.
- 谭红艳, 舒广龙, 吕骏超, 等. 2012. 小兴安岭鹿鸣大型钼矿 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 和辉钼矿 Re–Os 年龄及其地质意义[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 42(6): 1757–1770.
- 陶刚, 朱利东, 李智武, 等. 2017. 祁连地块西段硫磺矿北花岗闪长岩的岩石成因及其地质意义: 年代学、地球化学及 Hf 同位素证据[J]. *地球科学*, 42(12): 2258–2275.
- 王枫. 2010. 黑龙江省东部张广才岭群新兴组: 岩石组合、时代及其构造意义[D]. 吉林大学硕士学位论文: 1–90.
- 王志伟. 2017. 小兴安岭-张广才岭早古生代火成岩的岩石学与地球化学: 对块体拼合历史和地壳属性的制约[D]. 吉林大学博士学位论文: 1–30.
- 魏庆国, 高昕宇, 赵太平, 等. 2010. 大别北麓汤家坪花岗斑岩锆石 LA–ICP–MS U–Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约[J]. *岩石学报*, 26(5): 1550–1562.
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 15(2): 22–30.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 2005. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. *中国地质*, 24(3): 343–352.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. 2004. U–Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. *科学通报*, 49(14): 1403–1410.
- 许赛华, 任涛, 吕昶良, 等. 2019. 滇东南白垩纪高分异 S 型花岗岩研究进展[J]. *矿物学报*, 39(2): 149–165.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J]. *地球科学*, 44(5): 1620–1646.
- 许文良, 王枫, 孟恩, 等. 2012. 黑龙江省东部古生代—早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U–Pb 年代学证据[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 42(5): 1378–1389.
- 杨元江, 邓昌州, 李成禄, 等. 2021. 大兴安岭大洋山钼矿区侵入岩年代学、岩石地球化学及岩石成因[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 51(4): 1065–1081.
- 杨元江, 李成禄, 邓昌州, 等. 2020. 大兴安岭大洋山钼矿成矿岩体地球化学、锆石 U–Pb 年龄及构造背景[J]. *现代地质*, 34(5): 1092–1102.
- 张海骅, 栾慧敏, 陈乐国. 1991. 黑龙江省印支期花岗岩的确定及其意义[J]. *黑龙江地质*, 1(1): 25–27.
- 张兴洲, 曾振, 高锐, 等. 2015. 佳木斯地块与松嫩地块俯冲碰撞的深反射地震剖面证据[J]. *地球物理学报*, 58(12): 4415–4424.
- 赵寒冬. 2009. 东北地区小兴安岭南段-张广才岭北段古生代火成岩组合与构造演化[D]. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文: 1–55.
- 中国国家标准化管理委员会. 2010a. 硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分: 16 个主次成分量测定: GB/T 14506.28—2010[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–7.
- 中国国家标准化管理委员会. 2010b. 硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506.30—2010[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–8.
- 周若. 1994. 花岗岩混合作用[J]. *地质前缘*, 1(1/2): 87–97.