

文章编号: 1004—5589 (2021) 03—0547—13

佳木斯地块林口地区早古生代花岗质岩石的成因及构造背景

井佳浩¹, 杨浩¹, 高妍², 兰丽雪¹, 吴浩然¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;

2. 吉林大学 东北亚国际地学研究教学中心, 长春 130026

摘要: 对佳木斯地块林口县大二龙村地区花岗质岩石进行岩相学、年代学及全岩地球化学研究, 探讨其形成时代、岩石成因及构造背景。该地区岩石类型为花岗闪长岩与碱长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示其形成时代为早古生代, 年龄分别为 531 Ma 和 501 Ma。地球化学分析结果显示其具有高硅、富碱, 贫钙、铁、镁的特点, 富集 Rb、K 等大离子亲石元素, Th、U 等高场强元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素及 P 元素。花岗闪长岩与碱长花岗岩分别为中高钾钙碱性 I 型花岗岩和碱性系列高分异 I 型花岗岩。两者均起源于下地壳物质的部分熔融, 在岩浆演化过程中经历了不同程度的分离结晶。综合本文数据以及区域研究成果, 认为佳木斯地块早古生代岩浆活动形成于麻粒岩相峰期变质作用之后, 由加厚地壳垮塌造成的伸展构造背景。

关键词: 佳木斯地块; 早古生代; 花岗质岩石; 地球化学; 岩石成因

中图分类号: P595; P597 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2021.03.006

Petrogenesis and tectonic setting of Early Paleozoic granitoids in Linkou area, Jiamusi Block

JING Jia-hao¹, YANG Hao¹, GAO Yan², LAN Li-xue¹, WU Hao-ran¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. International Centre for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: The petrographical, geochronological and whole-rock geochemical data for the granitoids in the Daerlongcun area of the Jiamusi Block have been presented, with the aim of evaluating their formation age, petrogenesis and tectonic setting. The studied granitoids are composed mainly of granodiorite and alkali-feldspar granite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the granodiorite and alkali-feldspar granite formed during the Early Paleozoic, with ages of 531 Ma and 501 Ma, respectively. Geochemically, they are characterized by high concentrations of SiO₂, Na₂O + K₂O, but low concentrations of total Fe₂O₃, CaO and MgO. They are enriched in large-ion lithophile elements (LILEs; e. g., Rb, K) and high-field-strength elements (HFSEs; e. g., Th, U), but depleted in HFSEs (e. g., Nb, Ta, Ti) and P. The granodiorite and alkali-feldspar granite belong to the middle-high-K calc-alkaline I-type and highly fractionated I-type granites, respectively. Both of them were derived from the partial melting of a lower crust and subsequently underwent some degrees of fractional crystallization processes. Along with

收稿日期: 2021-05-28; 改回日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41802049)

通讯作者: 杨浩 (1990—), 男, 副教授, 主要从事岩石学方面研究。E-mail: yanghao@jlu.edu.cn

the regional geological data, the authors propose that the Early Paleozoic magmatic rocks in the Jiamusi Massif were emplaced in a post-collisional extensional setting, which was closely related to the collapse of the thickened crust after the peak granulite facies metamorphism.

Keywords: Jiamusi Block; Early Paleozoic; granitoid; geochemistry; petrogenesis

0 引言

作为全球最大的显生宙增生造山带与陆壳生长区, 中亚造山带 (CAOB) 经历了复杂的大陆增生和陆内改造过程, 系统保存了欧亚大陆形成及演化的信息, 是研究大陆动力学问题的关键地区^[1-3]。中国东北地区处于中亚造山带最东段, 夹持于西伯利亚克拉通、华北克拉通以及太平洋板块之间, 由多个构造属性不同的微陆块组成, 自西北向东南分别为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块、兴凯地块以及那丹哈达地体^[4-5]。特殊的构造位置, 使其经受多个构造体系叠加演化, 从而成为探索东亚大陆边缘演化的重要窗口。佳木斯地块位于黑龙江省东部, 是中国东北东部重要的大地构造单元。显生宙期间, 该地块经历多次复杂的构造演化: 在古生代期间, 受古亚洲洋构造域影响; 中生代以来, 又受到环太平洋构造体系的影响, 形成了大规模的花岗质岩石^[2, 6-7]。同时, 花岗岩作为地壳与地幔间物质与能量交换的产物, 蕴含着地壳演化的重要信息。然而, 关于佳木斯地块花岗岩的形成时代、成因及动力学背景一直存在争议^[5]。目前佳木斯地块主要识别出两期岩浆活动: 早古生代 (530~484 Ma) 与二叠纪 (270~254 Ma)。前人对二叠纪岩浆岩进行了较为系统的岩石学、年代学及地球化学研究, 认为二叠纪岩浆岩多具有活动大陆边缘环境特征, 被认为与古太平洋板块西向俯冲作用有关^[6-10]。而佳木斯地块目前发现的早古生代岩浆岩多为花岗质岩石, 缺乏相应的基性岩及火山岩的报道。关于早古生代花岗岩的成因及构造背景也存在争议: 其是形成于活动大陆边缘环境, 与佳木斯地块和松嫩地块之间的洋壳的北西向俯冲有关^[11], 还是形成于佳木斯地块麻粒岩相峰期变质作用后的后碰撞伸展环境, 与加厚地壳的垮塌有关^[12-14]? 为解决上述问题, 笔者以佳木斯地块西部林口县大二龙村地区 6 个代表性的花岗质岩石样品为研究对象, 在野外地质调查研究基础上, 对其进行岩相学、锆石 U-Pb 年代学以及全岩地球化学

研究, 探讨其形成时代、岩石成因类型及岩浆源区。同时, 结合已有区域地质资料, 进一步限制佳木斯地块早古生代岩浆岩形成的动力学背景。

1 地质背景与岩石学特征

本文研究区在构造位置上属于佳木斯地块西部。佳木斯地块是中国东北地区著名的高级变质微陆块, 呈南北向带状分布, 西以黑龙江杂岩为界与松嫩地块相接, 东以跃进山增生杂岩带为界与那丹哈达地体毗邻, 向北跨过黑龙江延伸至俄罗斯境内的布列亚地体, 向南以敦化-密山断裂为界限与兴凯地块相连 (图 1a)。近年来研究认为这三个地块具有类似的构造属性, 统称为布列亚-佳木斯-兴凯地块, 并在后期受到断裂改造^[15]。佳木斯地块具有典型的基底-盖层双层结构, 主要由麻山杂岩 (原“麻山群”)、黑龙江杂岩 (原“黑龙江群”)、古生代-中生代沉积地层以及广泛分布的显生宙岩浆岩组成^[3, 16-17]。“麻山群”和“黑龙江群”最初被认为是佳木斯地块最古老的地层单位, 时代为太古代-元古代^[18]。然而最新的研究表明, “黑龙江群”是佳木斯地块与松嫩地块碰撞拼合过程中形成的由不同时代和类型岩石组成的构造混杂岩系, 定名为黑龙江杂岩^[19]。“麻山群”由具有孔兹岩系特征的表壳岩以及变质变形深成侵入体组成, 具有杂岩特征, 被定名为麻山杂岩。年代学研究发现, 麻山杂岩遭受了晚泛非期高级变质作用, 被认为是佳木斯地块的变质基底^[20-22]。佳木斯地块经历多期强烈的构造岩浆活动, 形成大面积岩浆岩, 主要分为早古生代与二叠纪两期^[6-10, 23-27]。此外, 白垩纪岩浆岩零星分布于整个地块, 岩性多为火山岩与火山碎屑岩^[28], 另有少量新生代大陆溢流玄武岩沿敦密断裂与依舒断裂分布。古生代-中生代沉积地层为佳木斯地块的沉积盖层, 主要分布在地块东缘。

本文样品采自黑龙江省东部林口县大二龙村地区, 主要岩石类型包括花岗闪长岩与碱长花岗岩 (图 1b)。花岗闪长岩 (17GW170) 为中细粒花岗

结构, 块状构造, 主要矿物组合为石英 (25% ~ 30%)、斜长石 (40% ~ 45%)、碱性长石 (15% ~ 20%)、黑云母 (7% ~ 10%) 和角闪石 (3% ~ 5%)。石英为他形粒状, 多具有波状消光; 斜长石为半自形-自形板柱状, 具有聚片双晶; 碱性长石; 黑云母为片状, 一组极完全解理, 平行消光; 普通角闪石单偏光镜下表现出浅绿色-绿色多色性 (图 2a)。碱长花岗岩 (17GW182) 为中细粒花岗

结构, 块状构造, 主要矿物组合为石英 (20% ~ 25%)、碱性长石 (60% ~ 65%)、斜长石 (8% ~ 10%) 及少量的黑云母 (5% ~ 7%) 和角闪石 (3% ~ 5%)。石英他形粒状, 具有波状消光; 碱性长石多为条纹长石, 表面遭受高岭土化, 单偏光镜下为土褐色; 斜长石具有聚片双晶, 同样遭受高岭土化; 黑云母为鳞片状, 发育一组解理, 平行消光 (图 2b)。

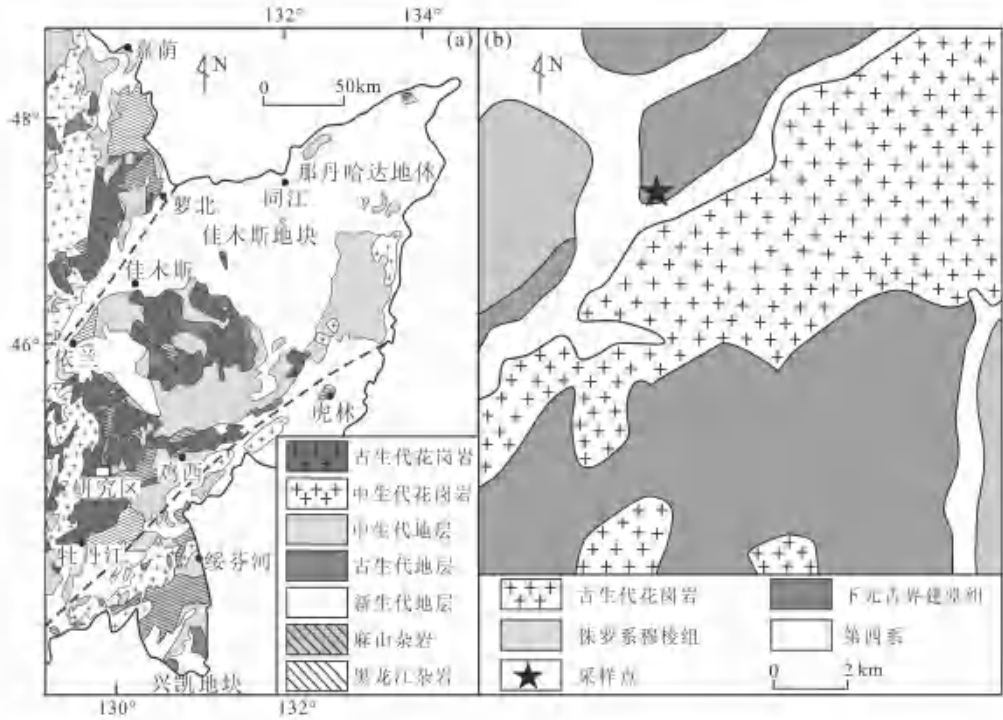
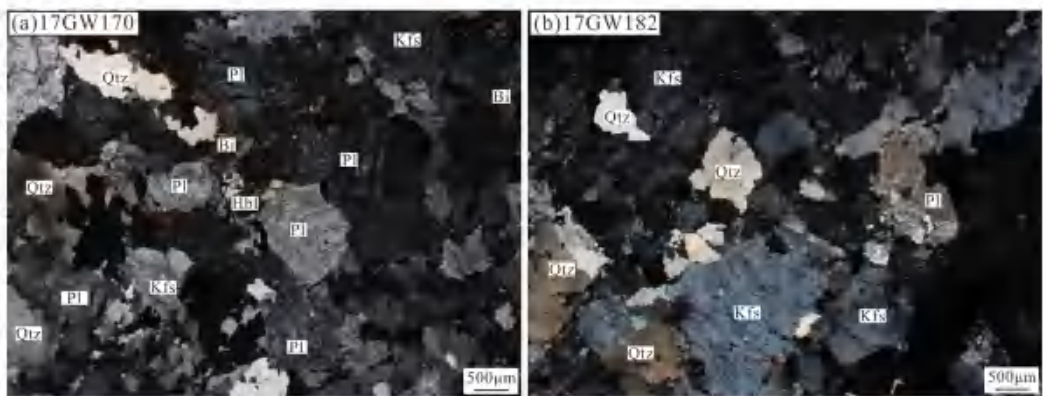


图 1 中国东北东部构造简图 (a) 和大二龙村地区地质简图 (b)

Fig. 1 Tectonic sketch map of eastern Northeast China (a) and simplified geological map of Daerlongcun area (b)



Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Hbl. 角闪石; Bi. 黑云母。

图 2 大二龙村地区花岗闪长岩 (a) 和碱长花岗岩 (b) 的镜下显微照片

Fig. 2 Microphotographs of granodiorite (a) and alkali-feldspar granite (b) in Daerlongcun area

2 分析方法

测试样品的分选由河北省廊坊宇能矿物分选技术服务有限公司完成。分选出锆石单矿物后,选择透明高、晶形较好、无明显裂纹和包裹体的锆石进行制靶。锆石靶在北京凯德正科技有限公司制备,并由其完成锆石阴极发光 CL 图像采集工作。锆石 U-Pb 同位素测试分析在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心元素地球化学实验室完成。实验所用激光剥蚀系统为 193 nm ArF 准分子激光剥蚀器(束斑直径为 36 μm),与激光器联用的是 Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICPMS)。实验采用高纯度 He 作为剥蚀物质的载气,用标准玻璃 NIST610 进行仪器最佳化。以国际标准锆石 91500 作为外部校正进行锆石 U-Pb 同位素分析,锆石元素含量以 NIST610 为外标, ^{29}Si 为内标进行校正。数据处理过程中,先用 Glitter 软件计算锆石 U-Pb 同位素比值及相应的元素含量,然后采用 Andersen (2002)^[29] 给出的程序进行普通铅校正,最后用国际标准程序 Isoplot (ver. 3.0) 完成 U-Pb 年龄的计算以及谐和图的绘制。其中,单点分析的同位素比值及年龄误差为 1σ ,平均年龄误差为 95% 置信度。

本文样品的全岩主微量测试是在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心元素地球化学实验室完成。主量和微量元素测试分析采用的仪器分别为美国利曼公司 (LEEMAN LABS. INC) 的 Prodigy

型等离子发射光谱仪 (ICP-OES) 和 Agilent 7500a 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS)。以国际标准物质 AGV-2、GSR-1、GSR-5 为检测标样,得到测试样品主量和微量元素分析精度和准确度分别优于 5% 和 10%。

3 分析结果

3.1 年代学结果

为了限定黑龙江东部大二龙村地区花岗岩的形成时代,选取代表性的花岗闪长岩 (17GW170) 和碱长花岗岩 (17GW182) 样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试。锆石阴极发光图像 (CL 图像) 显示,绝大多数锆石呈自形-半自形棱柱状,发育有明显的震荡生长环带。结合其较高的 Th/U 比值 (0.03 ~ 1.25),指示其为岩浆成因锆石 (图 3)。测试分析数据结果见表 1 与图 3。

花岗闪长岩样品 (17GW170) 16 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 529 ~ 531 Ma 之间,加权平均年龄为 (531 ± 2) Ma ($n = 16$, MSWD = 0.08),代表岩浆侵位结晶年龄。对碱长花岗岩样品 (17GW182) 的 25 个锆石颗粒进行测年,其中 4 个测试点因为高度不谐和被排除,剩余 21 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 495 ~ 511 Ma 之间,加权平均年龄为 (501 ± 3) Ma ($n = 21$, MSWD = 0.64),代表岩浆侵位结晶年龄。综合两个样品的岩浆侵位结晶年龄,表明大二龙村地区花岗岩形成时代为早古生代 (501 ~ 531 Ma)。

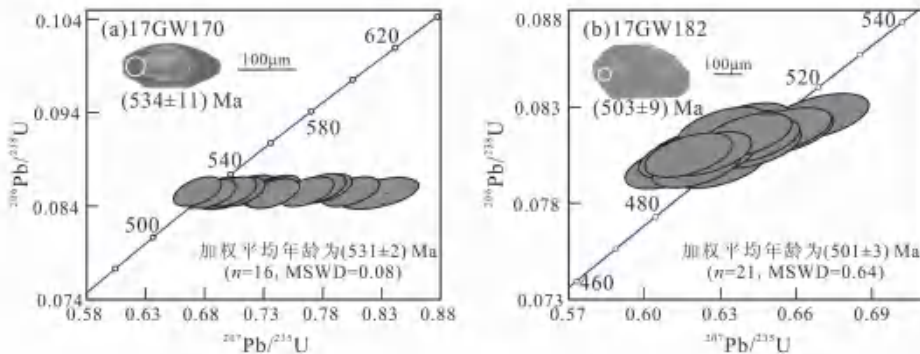


图3 大二龙村地区花岗闪长岩 (a) 和碱长花岗岩 (b) U-Pb 年龄谐和图及阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams and CL images of granodiorite (a) and alkali-feldspar granite (b) in Daerlongcun area

表1 大二龙村地区花岗闪长岩和碱长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for granodiorite and alkali-feldspar granite in Daerlongcun area

样品编号	含量/ 10^{-6}		同位素比值								年龄/Ma				
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	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
花岗闪长岩															
17GW170-01	382	1 182	0.32	0.062 25	0.001 46	0.735 69	0.018 30	0.085 66	0.001 35	683	28	560	11	530	8
17GW170-02	672	791	0.85	0.067 92	0.001 61	0.804 02	0.020 10	0.085 79	0.001 36	866	27	599	11	531	8
17GW170-03	431	668	0.65	0.062 26	0.001 54	0.738 23	0.019 13	0.085 93	0.001 36	683	30	561	11	531	8
17GW170-04	84	1 294	0.07	0.064 79	0.001 52	0.766 98	0.018 94	0.085 79	0.001 35	768	27	578	11	531	8
17GW170-05	782	1 916	0.41	0.065 38	0.001 55	0.776 77	0.019 38	0.086 09	0.001 35	787	28	584	11	532	8
17GW170-06	63	1 870	0.03	0.056 95	0.001 33	0.674 30	0.016 59	0.085 80	0.001 34	490	28	523	10	531	8
17GW170-07	133	1 326	0.10	0.059 37	0.001 41	0.703 06	0.017 47	0.085 81	0.001 34	581	28	541	10	531	8
17GW170-08	686	1 738	0.39	0.059 65	0.001 44	0.705 44	0.017 76	0.085 69	0.001 34	591	29	542	11	530	8
17GW170-09	277	1 555	0.18	0.060 01	0.001 43	0.710 28	0.017 69	0.085 76	0.001 34	604	28	545	11	530	8
17GW170-10	440	2 134	0.21	0.062 50	0.001 49	0.738 29	0.018 36	0.085 58	0.001 33	691	28	561	11	529	8
17GW170-11	903	1 356	0.67	0.070 14	0.002 32	0.828 55	0.027 51	0.085 59	0.001 44	932	41	613	15	529	9
17GW170-12	85	1 317	0.06	0.058 46	0.001 44	0.691 92	0.017 65	0.085 76	0.001 34	547	30	534	11	530	8
17GW170-13	445	1 299	0.34	0.065 72	0.001 61	0.781 31	0.019 79	0.086 13	0.001 34	797	28	586	11	533	8
17GW170-14	519	1 393	0.37	0.060 48	0.001 66	0.717 44	0.020 05	0.085 94	0.001 37	621	34	549	12	531	8
17GW170-15	263	1 127	0.23	0.059 21	0.001 89	0.699 22	0.022 42	0.085 55	0.001 41	575	42	538	13	529	8
17GW170-16	92	1 379	0.07	0.058 08	0.001 41	0.685 91	0.017 15	0.085 55	0.001 32	533	29	530	10	529	8
碱长花岗岩															
17GW182-01	117	1 212	0.10	0.056 13	0.001 74	0.622 83	0.015 68	0.080 46	0.000 98	458	34	492	10	499	6
17GW182-02	66	1 401	0.05	0.055 49	0.001 69	0.611 15	0.015 01	0.079 87	0.000 96	432	34	484	9	495	6
17GW182-03	144	968	0.15	0.055 56	0.001 66	0.615 70	0.014 63	0.080 37	0.000 96	435	32	487	9	498	6
17GW182-04	156	1 036	0.15	0.057 15	0.001 74	0.629 55	0.015 32	0.079 90	0.000 96	497	33	496	10	496	6
17GW182-05	160	2 421	0.07	0.058 83	0.001 82	0.668 71	0.016 62	0.082 44	0.000 99	561	33	520	10	511	6
17GW182-06	86	1 381	0.06	0.056 30	0.001 66	0.624 98	0.014 27	0.080 51	0.000 94	464	30	493	9	499	6
17GW182-07	97	1 353	0.07	0.057 46	0.001 71	0.643 31	0.014 92	0.081 21	0.000 95	509	31	504	9	503	6
17GW182-08	123	1 002	0.12	0.056 37	0.001 69	0.620 83	0.014 45	0.079 89	0.000 94	467	31	490	9	495	6
17GW182-09	123	1 368	0.09	0.055 69	0.001 66	0.617 53	0.014 16	0.080 44	0.000 94	440	31	488	9	499	6
17GW182-10	152	879	0.17	0.056 14	0.001 71	0.622 13	0.014 67	0.080 39	0.000 95	458	32	491	9	498	6
17GW182-11	98	1 976	0.05	0.058 15	0.001 78	0.655 14	0.015 51	0.081 74	0.000 96	535	32	512	10	507	6
17GW182-12	55	614	0.09	0.056 54	0.001 76	0.638 85	0.015 55	0.081 97	0.000 97	474	33	502	10	508	6
17GW182-13	80	1 593	0.05	0.055 51	0.001 75	0.610 80	0.015 08	0.079 84	0.000 95	433	34	484	10	495	6
17GW182-14	109	2 485	0.04	0.057 05	0.001 72	0.640 62	0.014 67	0.081 48	0.000 94	493	30	503	9	505	6
17GW182-15	98	1 804	0.05	0.055 99	0.001 71	0.630 97	0.014 65	0.081 78	0.000 95	452	31	497	9	507	6
17GW182-16	94	1 213	0.08	0.058 21	0.001 89	0.654 67	0.016 66	0.081 62	0.000 97	538	35	511	10	506	6
17GW182-17	185	971	0.19	0.056 55	0.001 77	0.626 06	0.014 92	0.080 34	0.000 94	474	32	494	9	498	6
17GW182-18	91	1 614	0.06	0.057 73	0.001 80	0.643 54	0.015 24	0.080 91	0.000 94	520	32	504	9	502	6
17GW182-19	137	957	0.14	0.056 77	0.001 81	0.638 15	0.015 56	0.081 58	0.000 96	483	33	501	10	506	6
17GW182-20	126	1 295	0.10	0.056 11	0.001 76	0.623 32	0.014 74	0.080 63	0.000 94	457	32	492	9	500	6
17GW182-21	100	898	0.11	0.055 71	0.001 78	0.619 01	0.015 00	0.080 65	0.000 94	441	33	489	9	500	6

3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主要元素特征

测试样品的主量和微量元素分析结果列于表2。根据岩石学与地球化学特征,本文样品可分为两组:

花岗闪长岩 具有高硅、富碱,贫钙、铁、镁的特点, $\text{SiO}_2 = 69.67\% \sim 70.50\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 5.80\% \sim 7.20\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.74\% \sim 14.27\%$ 、 $\text{CaO} = 2.33\% \sim 2.79\%$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 2.77\% \sim 3.90\%$ 、 $\text{MgO} = 0.95\% \sim 1.37\%$ ($\text{Mg}^\# = 44.5 \sim 46.4$)。此外,该组样品 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 $0.89 \sim 1.47$, A/CNK [$\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] 值介于 $0.96 \sim 1.02$ 之间。在 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解中(图4a),表现出准铝质-弱过铝质特征;在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ (TAS) 图解中(图4b),均落在花岗闪长岩区域;在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中(图4c),属于中高钾钙碱性系列岩石。

碱长花岗岩 具有比 I 组花岗闪长岩更高的 SiO_2 和全碱含量,以及相对更低的钙、铁、镁含量。 $\text{SiO}_2 = 70.07\% \sim 71.17\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 11.30\% \sim 12.70\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.70\% \sim 15.66\%$ 、 $\text{CaO} = 0.18\% \sim 0.28\%$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 0.16\% \sim 0.68\%$ 、 $\text{MgO} = 0.04\% \sim 0.19\%$ ($\text{Mg}^\# = 35.8 \sim 39.0$)。该组样品 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.25 \sim 0.28$, A/CNK 值范围为 $1.01 \sim 1.07$ 。在 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解中(图4a),表现出弱过铝质特征;在 TAS 图解中(图4b),均落在花岗岩区域,属于碱性系列岩石。

3.2.2 微量元素特征

花岗闪长岩稀土元素总量 $\sum \text{REE} = 153.38 \times 10^{-6} \sim 163.23 \times 10^{-6}$, 平均值为 158.12×10^{-6} 。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图5a),花岗闪长岩样品表现出右倾型,具有轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)亏损的特点, $\text{LREE}/\text{HREE} = 10.37 \sim 11.74$, 轻重元素分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 $17.31 \sim 20.47$ 之间,轻重稀土元素分馏较弱。此外,该组样品具有弱的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 0.88$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图5b),花岗闪长岩样品表现为富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素(LILEs), Th、U 等高场强元素(HFSE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素、Ba、Sr 等大离子亲石元素以及 P 元素。

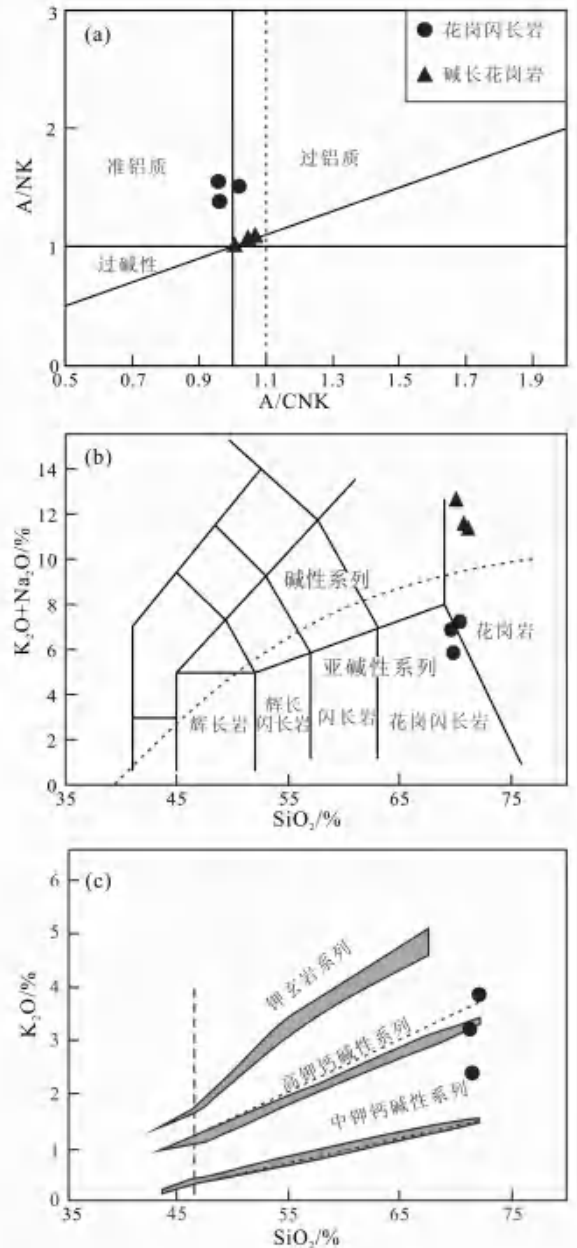


图4 大二龙村地区花岗闪长岩和碱长花岗岩 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解 (a)、TAS 图解 (b) 和 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解 (c)

Fig. 4 A/NK versus A/CNK (a), TAS (b) and K_2O versus SiO_2 (c) diagrams for granodiorite and alkali-feldspar granite from Daerlongcun area

碱长花岗岩稀土元素总量变化范围大,介于 $49.62 \times 10^{-6} \sim 361.20 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 155.94×10^{-6} 。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图5a),花岗岩样品表现出右倾的稀土元素分配模式,富集轻稀土、亏损重稀土, $\text{LREE}/$

表2 大二龙村地区花岗闪长岩和碱长花岗岩主量元素 (10^{-2}) 和微量元素 (10^{-6}) 分析结果Table 2 Major (10^{-2}) and trace (10^{-6}) element data for granodiorite and alkali-feldspar granite from Daerlongcun area

样品号	17GW170	17GW171	17GW172	17GW182	17GW184	17GW183
岩石类型	花岗闪长岩			碱长花岗岩		
SiO ₂	69.90	69.67	70.50	70.07	70.80	71.17
TiO ₂	0.50	0.36	0.33	0.03	0.08	0.10
Al ₂ O ₃	12.74	14.27	13.41	15.66	15.45	14.70
TFe ₂ O ₃	3.90	2.97	2.77	0.16	0.44	0.68
MnO	0.05	0.04	0.04	<0.005	<0.005	0.010
MgO	1.37	1.10	0.95	0.04	0.11	0.19
CaO	2.79	2.49	2.33	0.18	0.28	0.26
Na ₂ O	3.45	3.65	3.40	2.71	2.56	2.27
K ₂ O	2.35	3.17	3.80	9.94	9.00	9.07
P ₂ O ₅	0.13	0.12	0.11	0.05	0.07	0.05
LOI	1.66	1.34	1.28	0.59	0.52	0.61
Total	97.18	97.85	97.63	98.84	98.79	98.50
A/CNK	0.96	1.02	0.96	1.01	1.07	1.05
A/NK	1.55	1.51	1.38	1.03	1.11	1.08
Na ₂ O + K ₂ O	5.80	6.83	7.20	12.66	11.56	11.35
Sc	6.94	5.61	5.10	0.17	0.66	0.95
V	46.52	33.16	30.72	1.06	2.33	2.76
Cr	35.28	19.40	17.89	0.41	0.43	3.79
Co	9.01	6.47	6.07	0.21	0.59	1.12
Ni	17.20	7.06	7.36	0.51	0.75	3.34
Cu	1.19	1.70	1.03	0.26	0.45	0.64
Zn	100.62	89.86	91.04	31.32	126.58	59.72
Ga	26.40	23.44	24.26	18.64	20.08	18.57
Rb	79.99	88.62	103.95	255.23	249.26	243.08
Sr	240.87	270.69	285.18	165.92	174.36	158.82
Y	19.01	18.76	16.59	3.22	11.26	4.58
Zr	158.04	136.52	136.80	24.90	72.88	58.20
Nb	14.79	8.45	7.70	0.91	3.21	4.22
Cs	0.84	0.84	0.76	1.06	1.03	1.12
Ba	334.32	442.26	548.10	481.53	483.84	455.28
La	33.33	32.29	34.13	14.84	90.84	17.39
Ce	73.88	68.03	71.55	22.28	174.62	25.37
Pr	8.21	7.65	7.77	2.13	18.45	2.42
Nd	28.64	26.77	26.89	6.35	57.74	7.09
Sm	5.43	5.14	5.02	0.98	8.29	1.10
Eu	1.15	1.27	1.30	0.99	1.06	0.96
Gd	4.55	4.31	4.09	0.78	5.36	0.89
Tb	0.59	0.58	0.52	0.10	0.56	0.12
Dy	3.33	3.30	2.91	0.56	2.54	0.70
Ho	0.61	0.62	0.53	0.10	0.37	0.13
Er	1.71	1.70	1.47	0.26	0.82	0.39
Tm	0.23	0.23	0.20	0.04	0.08	0.06
Yb	1.38	1.30	1.20	0.19	0.40	0.33
Lu	0.20	0.18	0.17	0.02	0.05	0.05
Hf	3.68	3.26	3.25	0.60	1.84	1.40
Ta	0.93	0.47	0.45	0.05	0.20	0.22
Pb	29.25	39.68	37.85	59.63	57.23	57.60
Th	14.03	12.26	11.26	2.75	30.38	2.49
U	1.40	1.23	1.13	0.26	1.53	0.45
Di	76.94	79.73	82.23	98.74	96.76	96.56
Rb/Sr	0.33	0.33	0.36	1.54	1.43	1.53
Ti/Zr	17.98	15.06	14.28	6.29	6.90	10.96
Nd/Th	2.04	2.18	2.39	2.31	1.90	2.84
(La/Yb) _N	17.31	17.77	20.47	57.11	37.68	164.01
δEu	0.71	0.83	0.88	3.47	0.49	2.95
T _{Zr} /°C	774.91	767.51	763.07	639.30	721.45	703.71

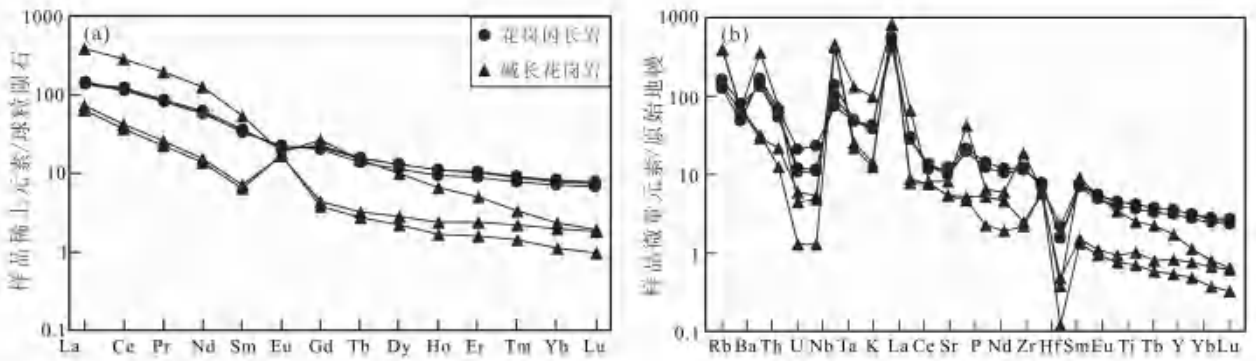


图5 大二龙村地区花岗闪长岩和碱长花岗岩稀土元素配分图 (a) 和微量元素蛛网图 (b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) for granodiorites and alkali-feldspar granites from Daerlongcun area

HREE = 9.91 ~ 23.03, $(La/Yb)_N = 37.68 \sim 164.01$, 轻重稀土元素分馏明显。除 17GW184 具有 Eu 负异常外 ($\delta Eu = 0.49$), 其余样品均表现出显著的 Eu 正异常 ($\delta Eu = 2.95 \sim 3.47$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中 (图 5b), 该组样品具有富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素及 Nd 等高场强元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和 P 元素的特点。

4 讨论

4.1 形成时代

前人在区调工作中, 基于黑云母 K-Ar 测年和 Rb-Sr 全岩等时线测年法将佳木斯地块大面积花岗质岩认为是元古代岩浆活动的产物, 但是缺乏高精度地质年代学数据的支持^[18]。为此, 笔者对黑龙江东部大二龙村地区的花岗岩样品进行了锆石 U-Pb 同位素测年。本文测试样品的锆石颗粒自形程度较好, 呈自形-半自形晶, 发育有清晰的震荡生长环带, 并具有较高的 Th/U 比值, 指示岩浆成因锆石特征。因此, 得到的最年轻锆石的加权平均年龄 (501 ~ 531 Ma) 代表了研究区花岗岩形成时代, 即早古生代, 而非之前认为的元古代。近年来, 随着 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术的发展, 众多研究者在佳木斯地块识别出了早古生代和二叠纪两期主要的岩浆活动^[30]。例如, Bi et al.^[12-13] 在腰屯、七星泡、宝石河和小城子一岚峰等地区均识别出了早古生代花岗岩 (484 ~ 530 Ma); 华永成等^[27] 在宝清地区的七一林场和干涸沟口识别出早古生代岩浆活动。此外, 任留东

等^[23-24]、颀颀强等^[25] 和黄映聪等^[26] 在麻山杂岩中也识别出了早古生代花岗岩质岩。综上所述, 笔者认为早古生代期间佳木斯地块存在一期强烈的岩浆活动。

4.2 岩石成因

4.2.1 成因类型

花岗岩包含着大陆地壳演化的重要信息, 其具有复杂的岩浆源区以及岩浆演化过程, 一直是地质学研究的热点问题。根据岩浆源区与构造背景, 花岗岩一般被分为 I 型、S 型、M 型和 A 型四种类型^[31-32]。因而, 确定花岗岩的岩石成因类型是花岗岩研究工作的首要问题。M 型花岗岩一般由幔源岩浆结晶分异而形成^[33]。但是本文的花岗岩表现出高硅、富碱, 贫钙、铁、镁的特点, 并富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 指示壳源岩浆源区的特征。同时, 研究区内缺乏同时期的镁铁质岩石, 进一步排除了 M 型花岗岩的可能性。S 型花岗岩普遍富铝, 一般属于强过铝质岩石系列^[34]。然而, 本文花岗岩样品具有准铝质-弱过铝质特征 ($A/CNK = 0.96 \sim 1.07$)。此外, 岩相学观察也未发现石榴石、白云母和堇青石等富铝矿物, 而是普遍发育角闪石、黑云母等 I 型花岗岩特征矿物。结合本文样品表现出的 P_2O_5 和 SiO_2 的负相关, 表明其不属于 S 型花岗岩, 而是 I 型或 A 型花岗岩^[32]。

如上所述, 本文样品分为花岗闪长岩和碱长花岗岩两组。花岗闪长岩发育角闪石、黑云母等暗色矿物以及楣石副矿物, 同时具有准铝质-弱过铝质

地球化学属性, 属于中高钾钙碱性系列岩石。此外, 该类样品的主量、微量元素特征均表现出壳源源区的亲缘性。结合其较低的锆饱和温度 ($763^{\circ}\text{C} \sim 775^{\circ}\text{C}$), 认为花岗闪长岩属于中高钾钙碱性 I 型花岗岩。

碱长花岗岩暗色矿物含量较少, 出现少量角闪石和黑云母, 暗示其可能经历了强烈的分离结晶作用。该组岩石相比花岗闪长岩 SiO_2 与全碱含量更高, 钙、铁、镁含量以及 TiO_2 、 P_2O_5 含量更低, 具有较高的 Rb/Sr 、 Rb/Ba 比值, 富集 Rb 等大离子亲石元素和 Th、U 等高场强元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素以及 Ba、Sr 等大离子亲石元素, 表现出 A 型花岗岩的地球化学特征^[31, 35-37]。然而, 高分异 I 型花岗岩通常具有与 A 型花岗岩相似的矿物学与地球化学特征, 难以将两者区分。Whalen et al.^[31] 提出以 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值为标准区

分 A 型花岗岩 (>2.6) 与 I 型花岗岩 (<2.6)。该组花岗岩样品具有较低的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值, 介于 $2.24 \sim 2.46$ 之间 (<2.6), 指示高分异 I 型花岗岩特征。值得注意的是, A 型花岗岩通常具有更高的不相容元素含量 ($\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \times 10^{-6}$), 并且不受分异程度的影响^[31, 38]。该组花岗岩 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} = 51.3 \sim 262 < 350 \times 10^{-6}$, 同样支持其属于高分异 I 型花岗岩, 并得到了 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ (图 6a) 和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 图解 (图 6b) 的支持。此外, 该组岩石具有较低的锆饱和温度 ($639^{\circ}\text{C} \sim 721^{\circ}\text{C}$), 指示 I 型花岗岩特征; 并有较高的分异指数 ($DI = 96.56 \sim 98.74$), 指示高分异特征。综合上述证据, 笔者认为本文碱长花岗岩岩石类型为高分异 I 型花岗岩。

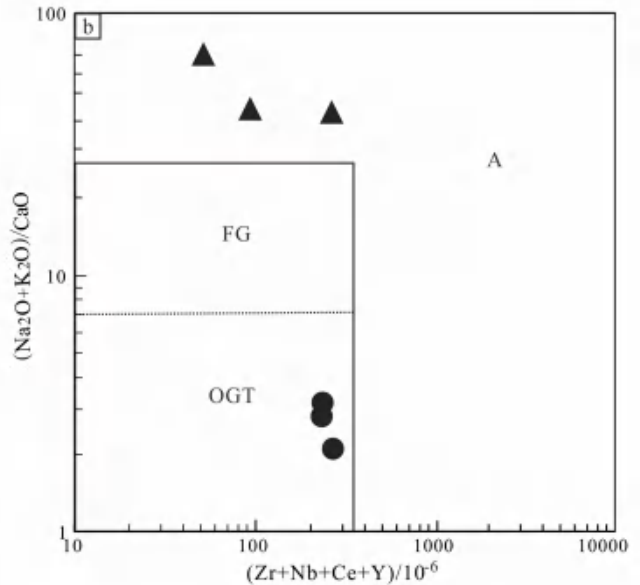
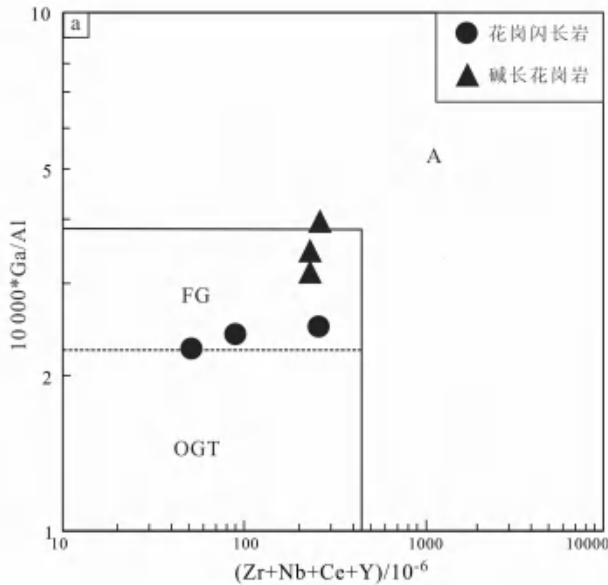


图 6 大二龙村地区花岗闪长岩和碱长花岗岩成因类型判别图解

Fig. 6 Discrimination diagrams of genetic types for granodiorite and alkali-feldspar granite from Daerlongcun area

4.2.2 岩浆源区与分离结晶

花岗岩通常被认为起源于幔源玄武质岩浆结晶分异或是地壳物质的部分熔融^[39-40]。关于黑龙江东部大二龙村地区花岗岩的岩石成因, 笔者认为其起源于地壳物质的部分熔融。首先, 研究区内发育有大量的花岗质岩石但是缺乏同时期中基性岩浆活动, 结合其高硅和贫钙、铁、镁以及过渡金属元素 (Cr、Co、Ni) 含量低的特点, 基本排除其是幔源

岩浆分离结晶作用产物的可能性。此外, 本文岩石中普遍发育角闪石, 地球化学方面表现出准铝质-弱过铝质特征, 属于中高钾钙碱性和碱性系列岩石, 并富集大离子亲石元素、亏损高场强元素, 暗示其应该是壳源成因的岩石^[41]。这同样也得到了不相容元素比值的支持, 如 Rb/Sr 介于 $0.33 \sim 1.54$ (平均值为 0.92), Ti/Zr 介于 $3.29 \sim 17.98$ (平均值为 11.91), Nd/Th 介于 $1.90 \sim 2.84$, 均位

于壳源岩浆范围 ($Rb/Sr > 0.5$ 、 $Ti/Zr < 20$ 、 $Nd/Th = 3$)^[42]。大多数花岗岩样品具有明显的 Eu 负异常 ($0.49 \sim 0.88$) 以及相对较高的 Yb ($0.40 \times 10^{-6} \sim 1.38 \times 10^{-6}$) 和 Y ($11.26 \times 10^{-6} \sim 19.01 \times 10^{-6}$) 含量, 排除了源区存在石榴子石残留相的可能性, 暗示其起源于正常厚度的下地壳物质的部分熔融。有两个花岗岩样品表现出强烈的 Eu 正异常 ($2.95 \sim 3.47$) 以及较低的 Yb ($0.19 \times 10^{-6} \sim 0.33 \times 10^{-6}$) 和 Y ($3.22 \times 10^{-6} \sim 4.58 \times 10^{-6}$) 含量, 指示其岩浆源区可能来自地壳更深部, 即石榴子石作为残留相存在于岩浆源区。

本文样品的哈克图解显示出明显的线性关系, 并且其不相容元素比值 (Zr/Hf 、 La/Ce) 基本保持一致, 指示岩浆在演化过程中经历了一定程度的分离结晶作用^[40]。随着分异指数 (DI) 的上升, CaO 含量的下降, 指示斜长石和/或磷灰石发生分离结晶^[42]。 SiO_2 与 Al_2O_3 呈负相关, 结合其 Eu 负异常以及 Sr 亏损的特征, 说明斜长石发生了分离结晶^[43]。角闪石的分离结晶得到了 Dy 与 Er 之间线性正相关的支持。此外, 本文样品亏损 Nb、Ta、Ti、P, 暗示含钛矿物 (钛铁矿、榍石等) 和磷灰石发生了分离结晶。

4.3 构造背景

随着大量高精度年代学数据的获得, 众多学者普遍认为佳木斯地块存在一期早古生代构造岩浆活动, 形成大规模的早古生代岩浆岩。但是关于该期岩浆岩形成的地球动力学机制一直存在争议: ①王志伟^[11]认为佳木斯地块早古生代岩石形成于活动大陆边缘环境, 与佳木斯地块和松嫩地块之间的洋壳的北西向俯冲有关; ②Bi et al.^[12]、毕君辉^[13]、Yang et al.^[44]以及杨浩^[14]则认为其形成于佳木斯地块麻粒岩相峰期变质作用后的后碰撞伸展环境, 可能与加厚地壳的垮塌有关。本文更加支持第二种观点, 主要证据如下: 本文的花岗质岩石显示从 I 型花岗岩向高分异 I 型花岗岩过渡的特点, 属于中高钾钙碱性-碱性系列岩石, 部分样品具有与 A 型花岗岩相似的地化特征, 指示其形成于后造山或后碰撞的伸展背景, 而与大洋俯冲无关^[45-46]。本文样品在 $Rb-(Y+Nb)$ 构造判别图解中 (图 7), 大多数落在了后碰撞花岗岩区域, 进一步支持了碰撞后的伸展环境这一观点^[47]。此外, Yang et al.^[44]发现密山地区 (连珠山岩体与瑶营岩体) 约 ~ 515

Ma 的石英正长岩中发育钠铁闪石碱性暗色矿物, 具有后造山碱性岩的地化特征, 指示其形成于后造山构造背景。同样, Yang et al.^[44]在密山-鸡东地区识别出年龄为 ~ 500 Ma 的辉长岩与二长花岗岩组合, 缺失中间组分, 构成典型的双峰式岩石组合, 指示了伸展的构造背景。综上所述, 佳木斯地块早古生代岩浆活动形成于伸展的构造环境。而这种伸展的背景, 可能由麻粒岩相峰期变质作用之后加厚地壳垮塌造成, 主要依据为: 姜继圣^[48]研究发现佳木斯地块经历了麻粒岩相变质作用, 并具有近等温降压的顺时针 $P-T-t$ 轨迹, 反映了碰撞造山过程中, 加厚地壳快速折返至浅部地壳、重力不均造成造山带垮塌的动力学过程。另外, Yang et al.^[9]对林口-勃利地区和密山地区正、副片麻岩进行了详细的年代学研究, 得到了 ~ 561 Ma 的峰期变质年龄以及 $546 \sim 475$ Ma 的退变质阶段年龄。综合本文及前人研究成果可以发现, 佳木斯地块早古生代岩浆活动的时代为 $530 \sim 484$ Ma, 比峰期变质作用时间晚了至少 20 Ma。综上所述, 笔者认为佳木斯地块早古生代岩浆岩形成于麻粒岩相峰期变质作用之后, 加厚地壳垮塌造成的伸展的构造背景。

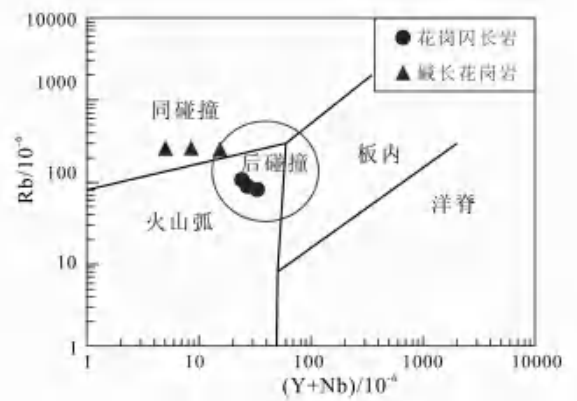


图 7 大二龙村地区花岗闪长岩和碱长花岗岩构造环境判别图解

Fig. 7 Tectonic discrimination diagram for granodiorite and alkali-feldspar granite from Daerlongcun area

5 结论

(1) 黑龙江东部大二龙村花岗闪长岩与碱长花岗岩为早古生代岩浆活动的产物, 年龄分别为

531 Ma 和 501 Ma。

(2) 研究区花岗闪长岩与碱长花岗岩分别为高钾钙碱性 I 型花岗岩与高分异 I 型花岗岩, 起源于下地壳物质的部分熔融, 在岩浆演化过程中经历了角闪石、斜长石和磷灰石等矿物的分离结晶。

(3) 佳木斯地块早古生代岩浆岩形成于麻粒岩相峰期变质作用之后, 由加厚地壳垮塌导致的伸展的构造背景。

参考文献:

- [1] Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299–307.
- [2] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26 (3/4): 207–224.
- [3] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the central Asian orogenic belt [J]. *Journal of the Geological Society London*, 2007, 164 (1): 31–47.
- [4] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Granitoids of the central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh (Earth Sciences)*, 2000, 91: 181–193.
- [5] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41 (1): 1–30.
- [6] 于介江, 侯雪刚, 葛文春, 等. 佳木斯地块东北缘早二叠世六连岩体的岩浆混合成因: 岩相学、年代学和地球化学证据 [J]. *岩石学报*, 2013, 29 (9): 2971–2986.
- YU Jie-jiang, HOU Xue-gang, GE Wen-chun, et al. Magma mixing genesis of the Early Permian Liulian pluton at the northeastern margin of the Jiamusi massif in NE China: evidences from petrography, geochronology and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29 (9): 2971–2986.
- [7] Bi J H, Ge W C, Yang H, et al. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2015 (234/235): 27–46.
- [8] Bi J H, Ge W C, Yang H, et al. Geochronology and geochemistry of Late Carboniferous–Middle Permian I- and A-type granites and gabbro-diorites in the eastern Jiamusi Massif, NE China: implications for petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 2016 (266/267): 213–232.
- [9] Yang H, Ge W C, Zhao G C, et al. Early Permian–Late Triassic granitic magmatism in the Jiamusi–Khanka Massif, eastern segment of the central Asian Orogenic Belt and its implications [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27 (4): 1509–1533.
- [10] Yang H, Ge W C, Dong Y, et al. Record of Permian–Early Triassic continental arc magmatism in the western margin of the Jiamusi Block, NE China: petrogenesis and implications for Paleo-Pacific subduction [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106: 1919–1942.
- [11] 王志伟. 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: 博士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- WANG Zhi-wei. Petrology and geochemistry of Early Paleozoic igneous rocks in the Lesser Xing'an–Zhangguangcai Ranges: constrains on the amalgamation history and crustal nature of the massifs: doctor's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [12] Bi J H, Ge W C, Yang H, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Paleozoic granitic magmatism in the Jiamusi Massif, NE China: geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 308–331.
- [13] 毕君辉. 佳木斯地块东部早古生代花岗岩的成因及其构造意义: 硕士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- BI Jun-hui. Petrogenesis and tectonic implications of Early Paleozoic granites in the eastern Jiamusi Massif: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [14] 杨浩. 佳木斯地块新元古代—早古生代构造-岩浆事件研究: 博士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- YANG Hao. Research on the Neoproterozoic–Early Paleozoic tectono-magmatic events in the Jiamusi Block: doctor's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [15] Wu F Y, Yang J H, Lo C H, et al. The Heilongjiang Group: a Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China [J]. *The Island Arc*, 2007, 16 (1): 156–172.
- [16] 许文良, 王枫, 孟恩, 等. 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), 2012, 42 (5): 1378-1389.
- XU Wen-liang, WANG Feng, MENG En, et al. Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the eastern Heilongjiang Province, NE China: evidence from igneous rock association and U-Pb geochronology of detrital zircons [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42 (5): 1378-1389.
- [17] 曹熹, 党增欣, 张兴洲, 等. 佳木斯复合地体 [M]. 长春: 吉林科技出版社, 1992: 1-224.
- CAO Xi, DANG Zeng-xin, ZHANG Xing-zhou, et al. Jiamusi complex terrane [M]. Changchun: Jilin Science & Technology Publishing House, 1992: 1-224.
- [18] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 15-59.
- Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 15-59.
- [19] 周建波, 蒲先刚, 侯贺晟, 等. 东北中生代增生杂岩及对古太平洋向欧亚大陆俯冲历史的制约 [J]. 岩石学报, 2018, 34 (10): 2845-2856.
- ZHOU Jian-bo, PU Xian-gang, HOU He-sheng, et al. The Mesozoic accretionary complex in NE China and its tectonic implications for the subduction of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34 (10): 2845-2856.
- [20] 党延松, 李德荣. 关于佳木斯地块前寒武纪同位素地质年代学问题的讨论 [J]. 长春地质学院学报, 1993, 23 (3): 312-318.
- DANG Yan-song, LI De-rong. Discussion on isotopic geochronology of Precambrian Jiamusi block [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1993, 23 (3): 312-318.
- [21] Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. The onset of Pacific margin accretion in NE China: evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt [J]. *Tectonophysics*, 2009, 478 (3/4): 230-246.
- [22] Wilde S A, Wu F Y, Zhang X Z. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence for igneous ages from the Mashan Complex [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122 (1/4): 311-327.
- [23] 任留东, 王彦斌, 杨崇辉, 等. 麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗质岩浆活动 [J]. 岩石学报, 2010, 26 (7): 2005-2014.
- REN Liu-dong, WANG Yan-bin, YANG Chong-hui, et al. Metamorphism, magmatization and granites of the Mashan Complex in Heilongjiang Province, Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (7): 2005-2014.
- [24] 任留东, 王彦斌, 杨崇辉, 等. 麻山杂岩的两种变质作用及其与花岗岩的关系 [J]. 岩石学报, 2012, 28 (9): 2855-2865.
- REN Liu-dong, WANG Yan-bin, YANG Chong-hui, et al. Two types of metamorphism and their relationships with granites in the Mashan Complex [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (9): 2855-2865.
- [25] 颜颜强, 苗来成, 陈福坤, 等. 黑龙江东南部穆棱地区“麻山群”的特征及花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年: 对佳木斯地块最南缘地壳演化的制约 [J]. 地质通报, 2008, 27 (12): 2127-2137.
- XIE Hang-qiang, MIAI Lai-cheng, CHEN Fu-kun, et al. Characteristics of the “Mashan Group” and zircon SHRIMP U-Pb dating of granite in Muling area, southeastern Heilongjiang Province, China: constraint on crustal evolution of the southernmost of Jiamusi Massif [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (12): 2127-2137.
- [26] 黄映聪, 张兴洲, 张宏宾, 等. 黑龙江东部马家街群的岩石地球化学特征及其沉积时代 [J]. 地质学报, 2009, 83 (2): 295-303.
- HUANG Ying-cong, ZHANG Xing-zhou, ZHANG Hong-bin, et al. Geochemical characteristics and sedimentation age of the Majiajie Group in eastern Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (2): 295-303.
- [27] 华永成, 张素梅, 张韶斐, 等. 黑龙江宝清地区早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征 [J]. 地质通报, 2019, 38 (7): 1228-1239.
- HUA Yong-cheng, ZHANG Su-mei, ZHANG Shao-fei, et al. U-Pb zircon age and geochemical characteristics of Early Paleozoic granites in the Baoqing area, Heilongjiang Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38 (7): 1228-1239.
- [28] 孙明道. 中国东北佳木斯地块及邻区晚中生代岩浆作用和构造意义: 博士学位论文 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- SUN Ming-dao. Late Mesozoic magmatism and its tectonic implication for the Jiamusi Block and adjacent areas of NE China: doctor's degree thesis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

- [29] Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192 (1/2): 59–79.
- [30] Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. Pan–African metamorphic and magmatic rocks of the Khanka Massif, NE China: further evidence regarding their affinity [J]. *Geological Magazine*, 2010, 147 (5): 737–749.
- [31] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95 (4): 407–419.
- [32] Chappell B W, White A J R. I-and S-type granites in the Lachlan fold belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth and Environmental Science*, 1992, 83 (1/2): 1–26.
- [33] Pitcher W S. Granite type and tectonic environment [M] // Hsu K, ed. *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 1983: 19–40.
- [34] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 1974, 8: 173–174.
- [35] King P L, White A J R, Chappell B W. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38 (3): 371–391.
- [36] Eby G N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 1990, 26 (1/2): 115–134.
- [37] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20 (7): 641–644.
- [38] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138 (3/4): 135–159.
- [39] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes*, 2000, 23 (2): 82–92.
- [40] Dong Y, Ge W C, Zhao G C, et al. Petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic Xing'an complex in the northern Great Xing'an Range, NE China: constraints from geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 228–246.
- [41] Tischendorf G, Paelchen W. On the classification of granitoids [J]. *Zeitschrift Fuer Geologische Wissenschaften*, 1985, 13 (5): 615–627.
- [42] 刘志超, 刘小驰, 余良军, 等. 喜马拉雅康巴淡色花岗岩的高分异成因及岩浆–热液演化特征 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 2020, 56 (6): 800–814.
- LIU Zhi-chao, LIU Xiao-chi, YU Liang-jun, et al. Highly fractionated origin and magmatic-hydrothermal evolution of the Kampa leucogranites in the Tethyan Himalaya [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2020, 56 (6): 800–814.
- [43] Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Sethna S F. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap: Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95 (1): 44–54.
- [44] Yang H, Ge W C, Zhao G C, et al. Geochronology and geochemistry of Late Pan–African intrusive rocks in the Jiamusi–Khanka Block, NE China: petrogenesis and geodynamic implications [J]. *Lithos*, 2014 (208/209): 220–236.
- [45] Bonin B, Azzouni–Sekkak A, Bussy F, et al. Alkali-calcic and alkaline postorogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings [J]. *Lithos*, 1998, 45 (1/4): 45–70.
- [46] Nedelec A, Stephens W E, Fallick A E. The Panafrican stratoid granites of Madagascar: alkaline magmatism in a post-collisional extensional setting [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36 (5): 1367–1391.
- [47] Pearce J A. Source and setting of granitic rocks [J]. *Episodes*, 1996, 19 (4): 120–125.
- [48] 姜继圣. 麻山群孔兹岩系主期区域变质作用及演化 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1992, 11 (2): 97–110.
- JIANG Ji-sheng. Regional metamorphism and evolution of masha Khondalite series [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1992, 11 (2): 97–110.