



辽东刘家河地区古元古代花岗闪长岩年代学、地球化学及地质意义

吴文彬^{1,5}, 张德军^{1,2,6}, 张楠⁷, 李巍巍³, 王玉平³, 王晓亮³, 李海洋³

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国地质调查局 东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032; 4. 中国地质调查局 东部大陆边缘地质研究中心, 辽宁 沈阳 110034; 5. 自然资源部辽西中生代地层系统野外科学观测研究站, 辽宁 朝阳 122100; 6. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 7. 辽宁中纬勘测有限公司, 辽宁 沈阳 10032

摘 要: 大量出露于辽东地区的花岗质岩体是探讨胶-辽-吉古元古代造山带构造演化历史的重要载体。通过对辽东刘家河地区古元古代花岗闪长岩岩石学、年代学和地球化学进行研究, 确定其成因, 并进一步探讨胶-辽-吉古元古代造山带构造属性。研究表明, 花岗闪长岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测试 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2180.7 ± 9.0 Ma, 形成时代为古元古代。SiO₂ 含量为 66.39%~71.65%, 平均值 69.11%; Al₂O₃ 为 11.35%~15.58%, 平均值 12.67%; K₂O+Na₂O 为 7.22%~9.05%, 平均值 7.89%; K₂O/Na₂O 为 0.53~0.59, 平均值 0.55; CaO 为 0.65%~4.12%, 平均值 2.44%, 含量较高; MgO 为 0.16%~0.86%, 平均值 0.51%。样品为钙碱性-高钾(钙碱性)系列, 其 A/CNK 和 A/NK 分别为 0.63~1.10 和 1.06~1.20, 属于偏铝质-过铝质。样品 REE 含量较低, 相对亏损 Nb、Ta、Ti、Ba 等高场强元素, 显示 I 型花岗岩的特征。地球化学特征表明花岗闪长岩是源于低压条件下长英质地壳部分熔融的 I 型花岗岩, 具有明显的岛弧岩浆特征。在构造判别图解中所有样品落入火山弧花岗岩区域, 代表了辽吉造山带在古元古代早期(2.2~2.1 Ga)存在俯冲作用导致的弧岩浆活动。

关键词: 花岗闪长岩; 古元古代; 地球化学; 地质年代学; 弧陆碰撞; 辽宁省

Geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic granodiorite in Liujiahe area, eastern Liaoning Province: Geological implication

WU Wen-bin^{1,5}, ZHANG De-jun^{1,2,6}, ZHANG Nan⁷, LI Wei-wei³, WANG Yu-ping³, WANG Xiao-liang³, LI Hai-yang³

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Northeast China Geological Science and Technology Innovation Center, CGS, Shenyang 110034, China; 3. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Shenyang 110032, China; 4. The Eastern Continental Margin Research Center, CGS, Shenyang 110034, China; 5. Mesozoic Stratigraphy Field Scientific Observation and Research Station in Western Liaoning, MNR, Chaoyang 122100, Liaoning Province, China; 6. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 7. Liaoning Zhongwei Survey Co., Ltd., Shenyang 110032, China

收稿日期: 2023-11-20; **修回日期:** 2024-02-19. **编辑:** 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“内蒙古 1:5 万朝阳沟幅(L50E023017)、老房身幅(L50E024017)区域地质调查”(DD20242884)、“东北地区地层古生物地质调查”(DD20230220); 辽宁省科学技术计划项目“西拉木伦河北岸半拉山杂岩成因对华北板块北缘晚古生代早期构造演化的启示”(2024-BS-302); 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目“内蒙古巴林右旗南部晚石炭—早二叠世岩浆作用及其地质意义”(QCJJ2023-25).

作者简介: 吴文彬(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事构造地质学研究和区域地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 31 号, E-mail//476031501@qq.com

通信作者: 张德军(1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事古生物学和地层学研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//532413639@qq.com

引用格式: 吴文彬, 张德军, 张楠, 李巍巍, 王玉平, 王晓亮, 李海洋. 辽东刘家河地区古元古代花岗闪长岩年代学、地球化学及地质意义[J]. 地质与资源, 2025, 34(2): 137-147.

Wu W B, Zhang D J, Zhang N, Li W W, Wang Y P, Wang X L, Li H Y. Geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic granodiorite in Liujiahe area, eastern Liaoning Province: Geological implication [J]. *Geology and Resources*, 2025, 34(2): 137-147.

Abstract: A large number of granitic rock mass exposed in eastern Liaoning Province serves as a critical medium for investigating the tectonic evolution history of Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic belt. Through the study of petrology, chronology, and geochemistry of the Paleoproterozoic granodiorites in Liujiahe area of eastern Liaoning Province, this paper determines the genesis and further explore the tectonic attributes of Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic belt. The study shows that the zircon U-Pb dating of granodiorite yields a weighted mean age of 2180.7 ± 9.0 Ma, indicating its Paleoproterozoic formation. The SiO_2 content is 66.39%–71.65% (averagely 69.11%), Al_2O_3 11.35%–15.58% (averagely 12.67%), $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 7.22%–9.05% (averagely 7.89%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 0.53–0.59 (averagely 0.55), with high content of CaO (0.65%–4.12%, averagely 2.44%) and MgO (0.16%–0.86%, averagely 0.51%). The sample is of calc-alkaline to high-K (calc-alkaline) series, with A/CNK of 0.63–1.10 and A/NK of 1.06–1.20, belonging to metaluminous-peraluminous rocks, characterized by low REE content, and relatively depletion of HFSEs (Nb, Ta, Ti, Ba), showing the characteristics of I-type granites. The geochemical characteristics indicate that the granodiorite is originated from the partial melting of felsic crust under low-pressure conditions, with distinct island arc magmatic features. In the tectonic discrimination diagram, all samples plot within the volcanic arc granite field, indicating the subduction-induced arc magmatism in Liao-Ji orogeny during early Paleoproterozoic (2.2–2.1 Ga).

Key words: granodiorite; Paleoproterozoic; geochemistry; geochronology; arc-continent collision; Liaoning Province

0 引言

胶-辽-吉造山带隶属于华北克拉通东部地块^[1-3], 是一条重要的古元古代造山/活动带^[4], 发育有巨量古元古代变沉积岩和岩浆岩, 为研究早期地壳演化提供了重要依据^[1, 5-6]. 众多学者的研究对于胶-辽-吉造山带物质组成方面认识一致, 但其形成的构造背景与演化模式一直存在争论, 一种是陆内裂谷闭合模式^[7-9], 另一种是陆-弧-陆碰撞模式^[10-11]. 陆内裂谷闭合模式的依据有双峰式火山岩建造的存在^[12-13]、变沉积岩的低压逆时针 P-T 演化特征^[14]以及条痕状花岗岩的 A 型属性^[15-16]. 但近些年有学者发现了同时存在的高压泥质麻粒岩^[17]、弧岩浆特征的变玄武岩和花岗岩^[9]以及中压顺时针 P-T 演化的特征^[18], 这些均为陆-弧-陆碰撞模式的特征. 花岗闪长岩代表了俯冲作用导致的弧岩浆活动^[19], 同时辽东青城子一带约 2170 Ma 奥长花岗岩的报道^[20], 说明该地区可能存在古元古代中期 TTG, 反映了早期的洋壳俯冲过程, 是弧-陆转换的直接标志. 因此, 对花岗闪长岩深入研究可为确定胶-辽-吉造山带弧-陆转换时间及过程提供重要证据.

通常认为, 花岗岩与大地构造环境之间存在着关联^[16], 因此对胶-辽-吉造山带内发育的古元古代花岗岩进行研究, 有助于揭露古元古代构造演化过程. 鉴于此, 本研究选取刘家河地区的花岗闪长岩, 进行详细的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学研究, 对其源区、成因进行探讨, 以期对胶-辽-吉造山带在古元古

代的构造演化研究提供新的资料.

1 区域地质背景

研究区位于胶-辽-吉造山带的东部, 由太古宙古陆发展而来, 隶属于华北克拉通东缘(图 1a). 该造山带北部为太古宙龙岗地块^[22-23], 形成于 2.8~2.5 Ga^[6], 由 TTG 岩系、变沉积岩和变火山沉积岩系组成; 南部为狼林地块, 由 1.8~1.9 Ga 古元古代岩石和少量太古宙岩石组成^[24]. 胶-辽-吉造山带与北部龙岗地块和南部狼林地块均呈构造接触^[4], 出露有古元古代变质岩系辽河岩群、古元古代花岗质岩浆岩、变质基性侵入岩及花岗伟晶岩. 年代学资料显示, 片麻状二长花岗岩和条痕状二长花岗岩侵位时代集中在 2.2~2.1 Ga, 部分二长花岗岩和花岗闪长岩侵位时代集中在 2.1~2.0 Ga^[19], 以富铝为特征的斑状花岗岩侵位时代集中在 1.95~1.86 Ga, 碱性花岗岩侵位时代集中在 1.86~1.84 Ga^[25-28].

本次研究的花岗闪长岩位于辽宁省东部丹东凤城市刘家河地区. 区域内主要分布古元古代辽河群的变质沉积岩和变质火山岩地层、古元古代花岗质岩浆岩、古元古代变质基性岩, 总体上经历了低绿片岩相到低角闪岩相的变质作用. 花岗质岩石由条痕状或片麻状花岗岩、中细粒黑云二长花岗岩、花岗闪长岩和似斑状黑云母二长花岗岩组成^[9, 15-16, 29]. 中生代频繁岩浆活动破坏了华北克拉通东部地块^[6], 使得本区构造复杂, 在研究区南部发育有中生代岩浆岩(图 1b), 晚三叠世

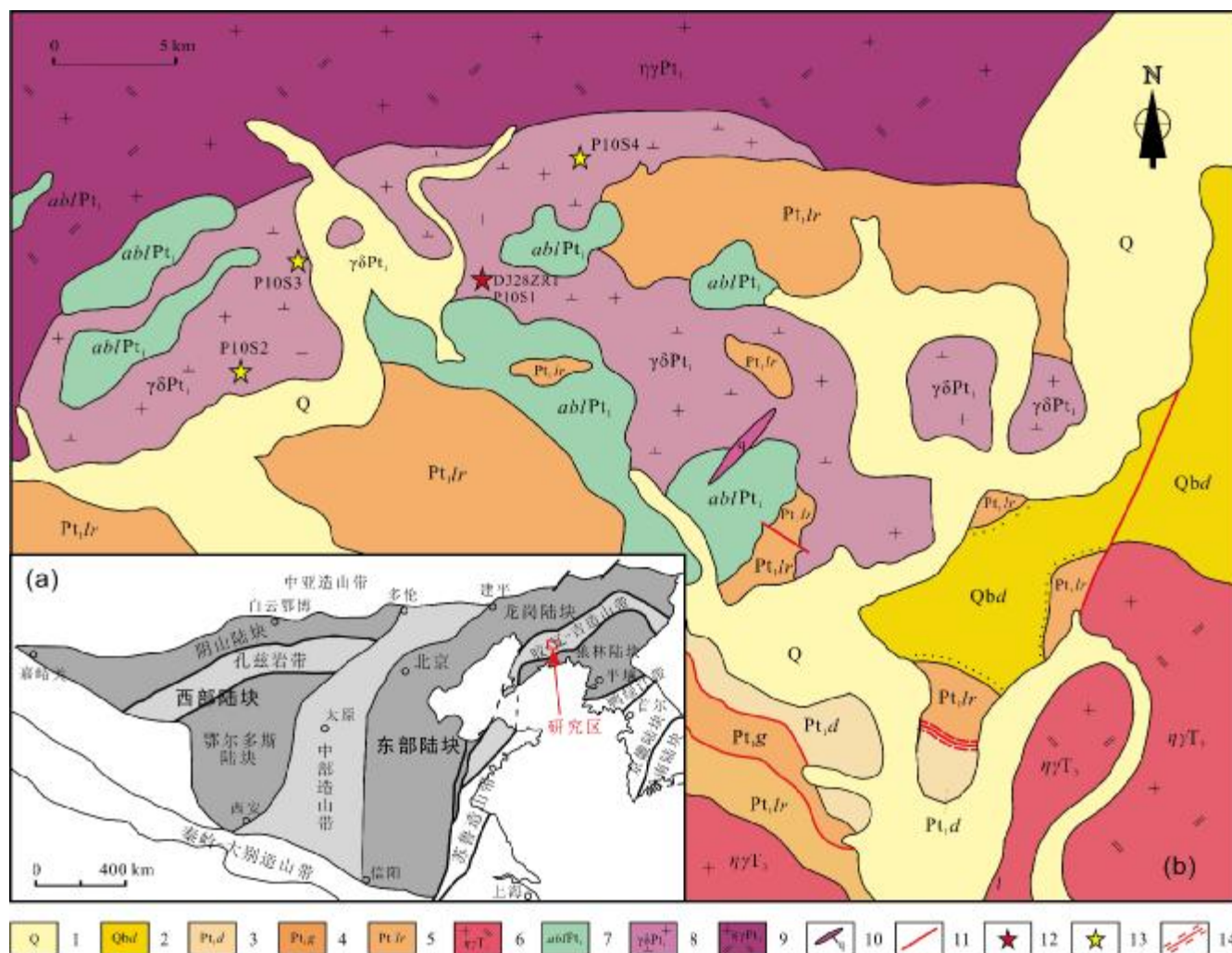


图1 研究区构造地质图

Fig. 1 Tectonic geological map of the study area

a—华北克拉通构造划分图(据文献[21])(tectonic map of North China Craton, from Reference [21]); b—刘家河地区区域地质简图(regional geological sketch map of Liujiahe area); 1—第四系(Quaternary); 2—青白口系钓鱼台组(Diaoyutai fm. of Qingbaikou sys.); 3—古元古代辽河岩群大石桥组(Dashiqiao fm. of Liaohe rock gr., Paleoproterozoic); 4—辽河岩群高家峪组(Gaojiayu fm. of Liaohe rock gr.); 5—辽河岩群里尔峪组(Li'eryu fm. of Liaohe rock gr.); 6—晚三叠世二长花岗岩(Late Triassic monzogranite); 7—古元古代变质基性岩(Paleoproterozoic metabasite); 8—古元古代花岗闪长岩(Paleoproterozoic granodiorite); 9—古元古代二长花岗岩(Paleoproterozoic monzogranite); 10—石英脉(quartz vein); 11—性质不明断层(unidentified fault); 12—测年及地球化学采样点(dating and geochemical sampling site); 13—地球化学采样点(geochemical sampling site); 14—韧性剪切带(ductile shear zone)

岩浆岩应与扬子板块碰撞相关^[30],早白垩世岩浆岩应与古太平洋板片俯冲相关^[31]。

2 样品描述

样品采自刘家河镇的荒地乡西侧,采样位置如图1b所示,花岗闪长岩以岩基的形式产出(图1b),面积为14.32 km²。空间上与其围岩辽河岩群呈构造接触关系,被古元古代变质基性岩、晚三叠世似斑状二长花岗岩和闪长岩所侵。花岗闪长岩风化面多呈土黄色、灰

褐色,新鲜面呈浅肉红色,细粒半自形结构,块状构造(图2a)。岩石主要由斜长石(63%)、石英(20%)、条纹长石(10%)、黑云母(5%)及角闪石(2%)组成(图2b)。

其矿物特征如下。斜长石:半自形晶,板状,单偏光下无色透明,发育有聚片双晶,具黝帘石化,粒径为0.5~2 mm。石英:他形粒状,具波状消光,单偏光下无色透明,正低突起,正交偏光下一级黄白干涉色,一轴晶正光性,粒径为0.5~2 mm。条纹长石:半自形晶,板状,单偏光下无色透明,正交偏光下一级灰白干涉色,

发育有条纹双晶,粒径为 0.5~2 mm。黑云母:具强烈绿泥石化,片径为 0.5~1 mm。角闪石:柱状,多色性较强,正中突起,正交偏光下二级中干涉色,粒径 0.5 mm 左右。副矿物包括锆石、磷灰石、绿帘石、方铅矿、电气石等。

3 测试方法与测试结果

3.1 测试方法

3.1.1 年代学测试方法

锆石的挑选在河北省廊坊区域地质调查研究所完成。锆石制靶和阴极发光(CL)图像采集在北京锆年领航科技有限公司完成。LA-ICP-MS 测试在自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 为 Agilent 7500, 激光剥蚀直径为 30 μm 。测年数据利用 ICPMSDataCal 程序对样品的同位素比值和元素含量进行计算(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比和年龄计算)。采用标准锆石 GJ-1std(607 Ma)、Plesovice(337 Ma)和 NIST SRM 610 进行元素分馏校正^[32]。分析结果见表 1。

3.1.2 地球化学测试方法

在刘家河地区采集 4 件较新鲜的花岗闪长岩用于主、微量元素分析。在自然资源部沈阳矿产资源检测中心完成主量、微量元素分析。主量元素分析采用 Axios Max X 射线荧光光谱仪。其中 FeO 采用 50 mL 滴定管滴定,样品先按照 1:5 的比例放入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 溶液中,在 1 050~1 250 $^{\circ}\text{C}$ 温度下熔化,然后将熔化样品制

成玻璃薄片进行分析,分析误差低于 1%(SiO_2)和 2%(其他氧化物)。采用高压密封消解 ICP-MS 法,在美国热电公司 XSeries II 等离子体质谱仪上,对样品进行微量元素和稀土元素分析。准确称取 0.1 g 样品于消解罐中,加入 1 mL 浓硝酸、1 mL 氢氟酸,将消解罐置于烘箱中加热,升温至 180 $^{\circ}\text{C}$ 保持 10~12 h,取出消解罐敞开置于电热板上 120 $^{\circ}\text{C}$ 加热,当消解液剩下约 2~3 mL 时升温至 240 $^{\circ}\text{C}$,复溶后用 0.5% 的稀硝酸定容至刻度待测。对样品处理全流程空白进行 12 次测定,利用 3 倍标准偏差计算各元素的方法检出限,精密度均小于 5%。

3.2 测试结果

3.2.1 年代学测试结果

花岗闪长岩(D328Zr1)挑选 22 粒锆石进行测试分析,测试数据如表 1 所示。它们在透射光下呈无色,以粒状为主,粒径主要为 70~130 μm ,长宽比为 1.1~2.2,自形程度较好,大部分呈长柱状,少量呈扇形和其他形粒状(图 3)。根据锆石阴极发光(CL)图像特征显示,该样品大部分都具有明显的震荡环带,部分发育有较窄的变质增生边,具有酸性岩浆成因的特征;少部分锆石内部结构均匀,具有变质锆石成因的特征。

花岗闪长岩 22 个测点的 U、Th 含量分别为 267.49×10^{-6} ~ $1 005.19 \times 10^{-6}$ 、 94.49×10^{-6} ~ 457.25×10^{-6} , Th/U 值集中在 0.28~0.71 之间,大多数大于 0.4,反映其为岩浆成因锆石。锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄测试值为 2 120~2 206 Ma,数据大都落在谐和曲线上,22 个点构成的线与协和线上交点年龄为 $2 181 \pm 12 \text{ Ma}$ ($n=22$, MSWD=

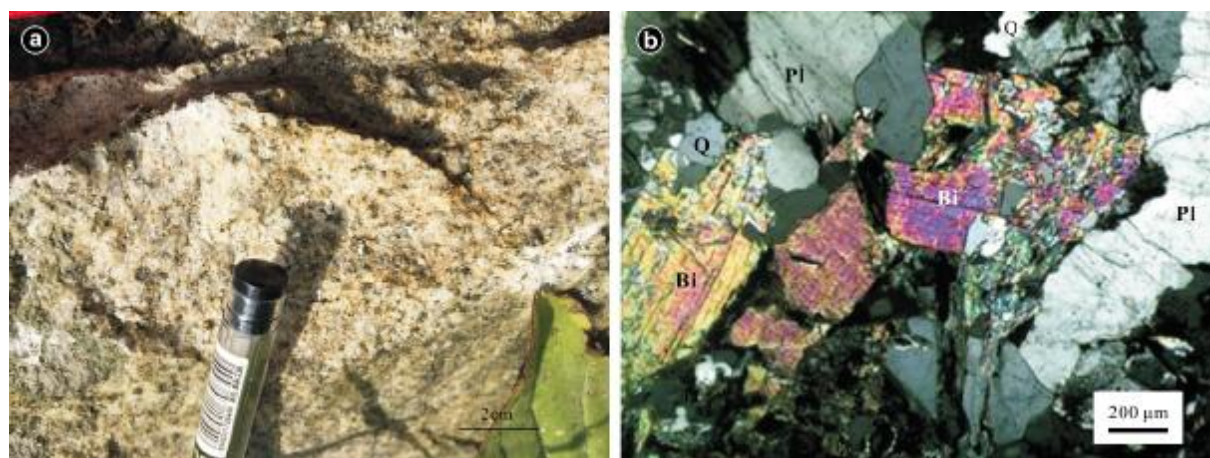


图 2 花岗闪长岩野外照片与显微照片

Fig. 2 Field and microscopic photographs of granodiorite
Q—石英(quartz); Pl—斜长石(plagioclase); Bi—黑云母(biotite)

表 1 刘家河地区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of granodiorite in Liujiahe area

测点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ
D378ZR1-1	110	225	0.49	0.1315	0.0018	7.1903	0.1109	0.3960	0.0040	2120	24	2135	14	2151	18
D378ZR1-2	345	616	0.56	0.1353	0.0016	7.7874	0.1009	0.4167	0.0037	2168	20	2207	12	2246	17
D378ZR1-3	299	853	0.35	0.1347	0.0015	7.5614	0.1046	0.4060	0.0040	2161	18	2180	12	2197	18
D378ZR1-4	109	196	0.55	0.1356	0.0017	7.6961	0.1159	0.4110	0.0044	2172	21	2196	14	2220	20
D378ZR1-5	211	386	0.55	0.1347	0.0015	7.6918	0.1225	0.4135	0.0053	2161	20	2196	14	2231	24
D378ZR1-6	247	475	0.52	0.1336	0.0015	7.6136	0.1115	0.4120	0.0044	2146	19	2186	13	2224	20
D378ZR1-7	127	228	0.56	0.1376	0.0017	7.7186	0.1311	0.4053	0.0049	2198	21	2199	15	2193	23
D378ZR1-8	253	777	0.32	0.1364	0.0014	7.7767	0.0950	0.4125	0.0039	2183	23	2206	11	2226	18
D378ZR1-9	288	551	0.52	0.1356	0.0017	7.6978	0.1051	0.4114	0.0048	2172	22	2196	12	2221	22
D378ZR1-10	287	520	0.55	0.1371	0.0016	7.8131	0.1312	0.4122	0.0059	2191	19	2210	15	2225	27
D378ZR1-11	101	359	0.28	0.1362	0.0019	7.7634	0.1677	0.4132	0.0087	2179	24	2204	19	2230	40
D378ZR1-12	163	267	0.61	0.1364	0.0021	7.7114	0.1242	0.4087	0.0038	2183	27	2198	14	2209	17
D378ZR1-13	177	271	0.65	0.1370	0.0018	7.7370	0.1023	0.4084	0.0036	2190	22	2201	12	2208	16
D378ZR1-14	94	183	0.52	0.1376	0.0019	7.7251	0.1282	0.4057	0.0040	2198	24	2200	15	2195	18
D378ZR1-15	118	252	0.47	0.1377	0.0019	7.7007	0.1424	0.4044	0.0062	2198	23	2197	17	2189	28
D378ZR1-16	256	463	0.55	0.1360	0.0016	7.7411	0.1178	0.4118	0.0050	2177	16	2201	14	2223	23
D378ZR1-17	103	225	0.46	0.1367	0.0018	7.7241	0.1260	0.4093	0.0054	2187	23	2199	15	2212	25
D378ZR1-18	209	321	0.65	0.1383	0.0016	7.6825	0.1116	0.4016	0.0042	2206	20	2195	13	2176	19
D378ZR1-19	130	229	0.57	0.1369	0.0018	7.5976	0.1135	0.4020	0.0046	2188	23	2185	13	2178	21
D378ZR1-20	314	723	0.43	0.1375	0.0015	7.6239	0.0993	0.4009	0.0035	2196	20	2188	12	2173	16
D378ZR1-21	457	1005	0.45	0.1367	0.0016	7.6085	0.1187	0.4029	0.0051	2185	21	2186	14	2182	23
D378ZR1-22	252	357	0.71	0.1362	0.0019	7.7116	0.1186	0.4094	0.0037	2179	24	2198	14	2212	17

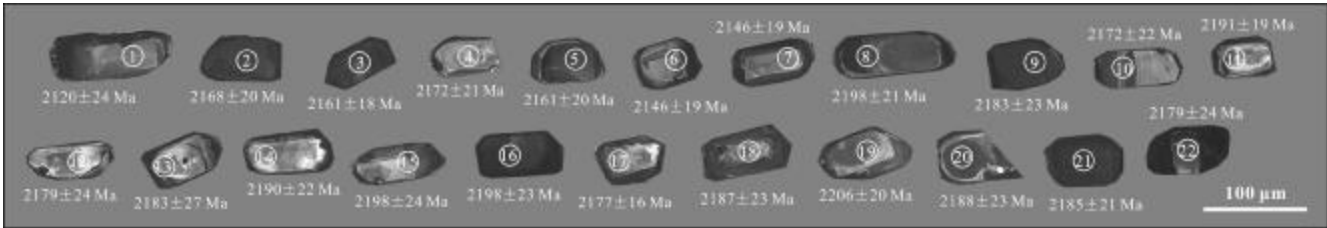


图 3 刘家河地区花岗闪长岩锆石阴极发光图像和分析位置图

Fig. 3 CL images of selected zircons from granodiorite in Liujiahe area

1.09, 图 4a), 这些点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2180.7 \pm 9.0 \text{ Ma}$ ($n=21$, $\text{MSWD}=0.55$, 图 4b), 在误差范围内一致, 代表了花岗闪长岩的结晶年龄, 表明其形成成为古元古代。

3.2.2 地球化学测试结果

花岗闪长岩的主量、微量、稀土元素含量及特征值列于表 2。样品的 SiO_2 含量为 66.39%~71.65%, 平均值 69.11%; Al_2O_3 为 11.35%~15.58%, 平均值 12.67%; $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 7.22%~9.05%, 平均值 7.89; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.53~0.59, 平均值 0.55; CaO 含量为 0.65%~4.12%, 平均值 2.44, 含量较高; MgO 为 0.16%~0.86%, 平均值 0.51; A/CNK 和 A/NK 分别为 0.63~1.10 和 1.06~1.20, 属于偏铝质-过铝质 (图 5a)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解

(图 5b)上, 样品多数落入钙碱性系列, 暗示花岗闪长岩为钙碱性铝质岩浆。

花岗闪长岩总稀土含量较高 ($\Sigma\text{REE}=119.52 \times 10^{-6} \sim 228.51 \times 10^{-6}$, 平均值 152.10×10^{-6}), 富集轻稀土 ($\Sigma\text{LREE}=100.52 \times 10^{-6} \sim 206.77 \times 10^{-6}$, 平均值 130.27×10^{-6}), $(\text{La}/\text{Yb})_N=1.65 \sim 9.82$, $(\text{La}/\text{Sm})_N=1.98 \sim 3.93$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.53 \sim 1.59$, 轻、重稀土分馏 ($\text{LREEs}/\text{HREEs}=4.37 \sim 9.51$) 明显, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (图 6) 上表现为向右缓倾型。花岗闪长岩具有明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.53 \sim 0.67$, 平均值 0.61), Ce 正异常 ($\delta\text{Ce}=1.02 \sim 3.00$, 平均值 1.79) 明显。地球化学特征显示, 花岗闪长岩样品 REE 含量较低, 并相对亏损 Nb、Ta、Ba 等高场强元素, 还存在 P、Ti 的负异常 (图 7)。

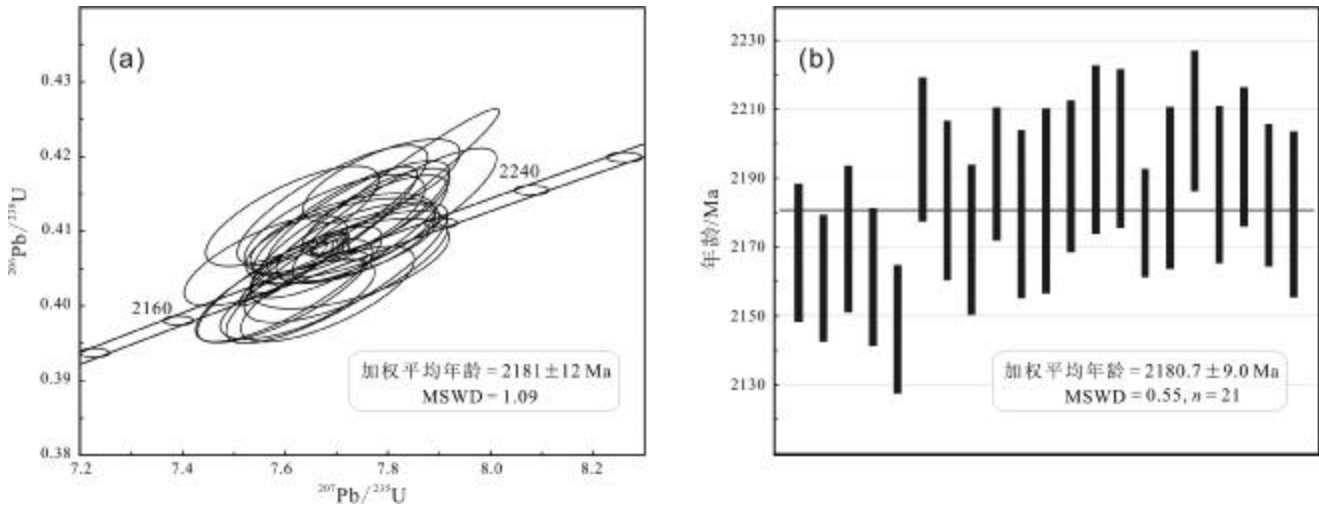


图 4 刘家河地区花岗闪长岩锆石谐和曲线和加权平均年龄图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia curves and weighted mean age diagram of granodiorite in Liujiahe area

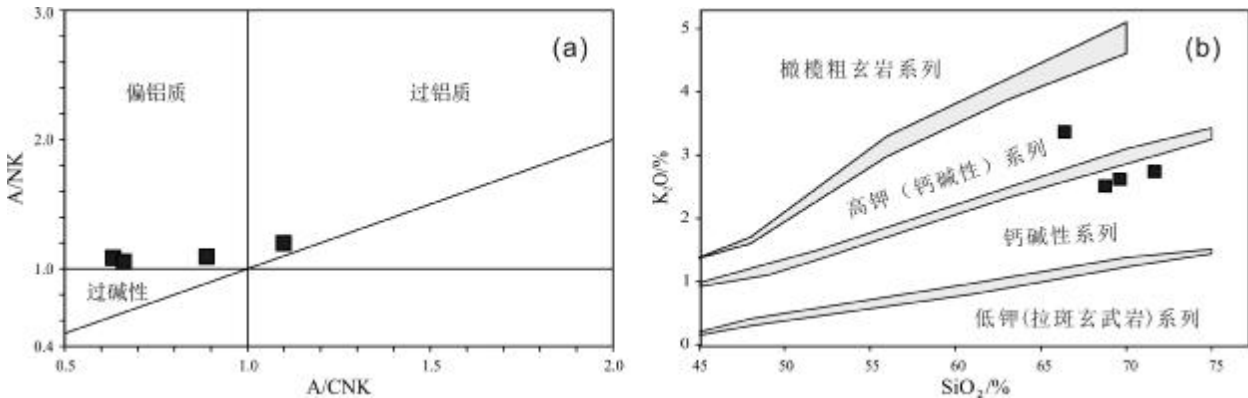


图 5 刘家河地区花岗闪长岩 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解

Fig. 5 The $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagrams for granodiorite in Liujiahe area

表 2 刘家河地区花岗闪长岩主量和微量元素组成
Table 2 Contents of major and trace elements in
granodiorite of Liujahe area

样品编号	P10S1	P10S2	P10S3	P10S4
SiO ₂	71.65	68.76	69.62	66.39
Al ₂ O ₃	12.20	11.35	11.55	15.58
Fe ₂ O ₃	2.31	2.19	2.15	5.05
FeO	0.94	0.77	0.84	0.34
FeO ^T	3.25	2.96	2.99	5.39
CaO	1.42	4.12	3.58	0.65
MgO	0.86	0.16	0.21	0.79
K ₂ O	2.74	2.51	2.62	3.37
Na ₂ O	4.98	4.71	4.93	5.68
MnO	0.0060	0.0050	0.0040	0.0090
P ₂ O ₅	0.041	0.039	0.037	0.057
TiO ₂	0.28	0.25	0.26	0.76
LOI	2.22	4.50	3.55	1.14
Zr	392.00	5.79	299.00	314.00
Ba	363.00	99.30	349.00	443.00
Hf	11.40	0.64	8.16	8.53
Ta	1.26	0.16	1.18	0.67
Th	6.92	0.62	44.10	10.20
U	0.69	0.55	1.43	0.40
Be	1.12	0.72	1.50	1.96
Cr	14.40	18.40	18.90	57.30
Co	1.84	1.60	2.04	5.07
Ni	3.10	2.54	2.55	17.70
Rb	50.50	11.50	44.00	64.30
Sr	33.50	14.50	42.10	138.00
Nb	13.40	2.32	14.10	6.18
Li	5.05	2.85	3.31	6.37
V	20.40	5.92	22.20	42.40
La	21.40	10.20	13.90	46.60
Ce	52.70	71.90	68.10	99.40
Pr	5.06	3.22	5.04	11.00
Nd	18.30	12.10	19.40	41.10
Sm	3.80	2.52	4.42	7.45
Eu	0.81	0.58	0.85	1.22
Gd	3.75	2.77	4.18	6.29
Tb	0.84	0.61	0.88	0.97
Dy	6.89	5.14	6.54	5.97
Ho	1.45	1.17	1.43	1.11
Er	4.32	3.86	4.33	3.23
Tm	0.76	0.65	0.70	0.56
Yb	4.75	4.18	4.51	3.20
Lu	0.61	0.62	0.64	0.41
Y	37.80	31.00	36.20	32.10

含量单位:10⁻⁶(质量分数).

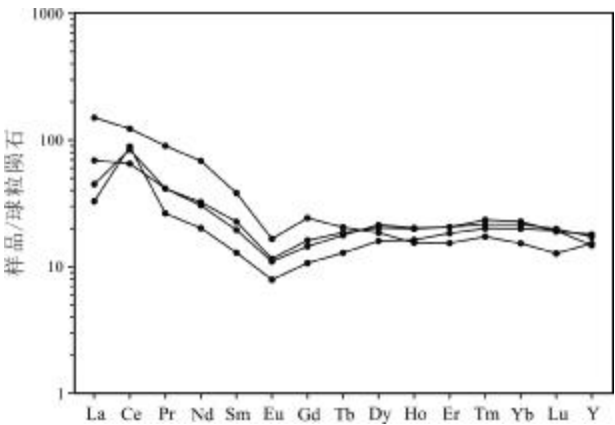


图 6 花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图
(标准化数值据文献[33])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of granodiorite
(Normalized data from Reference [33])

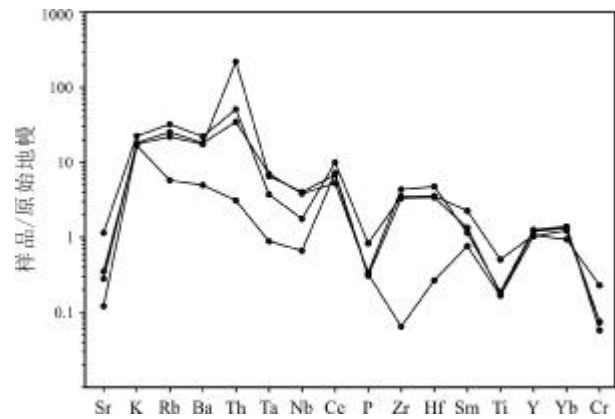


图 7 花岗闪长岩微量元素原始地幔标准化蛛网图
(标准化数值据文献[34])

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spidergram
of granodiorite
(Normalized data from Reference [34])

4 讨论

4.1 花岗闪长岩的形成时代

本研究采集的花岗闪长岩锆石样品具有岩浆锆石特征, LA-ICP-MS 测试结果显示 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄 2 180.7±9.0 Ma,能够代表刘家河地区古元古代花岗闪长岩的侵位时代. 前人对胶-辽-吉造山带内辽河群中分布的花岗闪长岩已经进行了大量的报道^[15, 19, 25], 将胶辽吉造山带内的古元古代花岗质岩浆事件分为 3 个主要时期,分别是: 2.2~2.1 Ga 的钾长花岗岩和二长花岗岩^[19]、1.95~1.86 Ga 以富铝为特征的斑状花岗岩^[25, 28]、1.86~1.84 Ga 以矿洞沟岩体为代表的碱性花

岗岩^[35]。本次研究的花岗闪长岩属于早期的花岗质岩浆事件。

4.2 岩石地球化学特征与成因

刘家河地区花岗闪长岩样品 REE 含量较低,并相对亏损 Nb、Ta、Ti、Hf、Ba 等高场强元素(HFSE),显示出 I 型花岗岩的特征。A/CNK 值多数小于 1, 极低的 K_2O/Na_2O 值、 K_2O 含量 $5.79\times10^{-6}\sim392\times10^{-6}$ 、Nb 含量 $2.32\times10^{-6}\sim14.1\times10^{-6}$ 、Ce 含量 $52.7\times10^{-6}\sim99.4\times10^{-6}$ 、Y 含量 $31.0\times10^{-6}\sim37.8\times10^{-6}$, 与典型的辽吉 A 型条痕状花岗岩明显不同^[15-16]。本文样品以较高的 Na_2O (4.71%~5.68%)和较低的 P_2O_5 含量(0.037%~0.057%)区别于高分异的 S 型花岗岩 (Na_2O 均值 2.81%, P_2O_5 均值 0.02)。在 A/CNK-A/NK 判别图解中样品多数落入偏铝质-过铝质区域(图 5a),是典型的铝质 I 型花岗岩。这与岫岩、兰花岭地区^[19,36]的古元古代花岗闪长岩相同,均为 I 型花岗岩。

本文样品的 Yb ($3.20\times10^{-6}\sim4.75\times10^{-6}$)、Y ($31.00\times10^{-6}\sim37.80\times10^{-6}$)含量较高,低的 $(La/Yb)_N$ 和相对平坦的重稀土分布模式(图 6),反映其熔融源区无石榴石残留相^[16]。并且本文样品具有较高的 SiO_2 (66.39%~71.65%)和极低的 $Mg^\#$ 值(0.09~0.34),说明岩浆主要源于中下地壳物质的部分熔融。综上,花岗闪长岩应源于低压条件下长英质地壳的部分熔融^[36]。赵岩等对辽东四门子地区古元古代花岗闪长岩研究,认为其具有 I 型花岗岩特征,可能来自俯冲带的弧岩浆产物^[19],

宋运红等对四门子岩体的锆石 Hf 同位素研究,认为演示具有地幔端元成分特征^[37]。顾玉超等对辽东兰花岭地区 I 型花岗闪长岩研究,认为其岩石成因与典型条痕状辽吉 A 型花岗岩岩浆源区和成因不同,岩浆源区较典型辽吉花岗岩可能有少量软流圈地幔物质的贡献,虽与条痕状辽吉 A 型花岗岩为同时代岩浆作用产物,但形成环境不同,可能是碰撞过程中弧后盆地扩张的产物^[38]。

4.3 构造环境

本研究在辽东刘家河地区采集的花岗闪长岩为 I 型花岗岩类,具有偏铝质-过铝质、低钾钙碱性特征,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE),其形成与俯冲带流体或熔体交代的地幔部分熔融有关,明显具备岛弧或活动大陆边缘的地球化学亲缘属性。在 Rb-(Yb+Ta)图解和 Rb-(Y+Nb)图解中花岗闪长岩落入火山弧花岗岩区域(图 8a、b),在 Rb-SiO₂ 图解中花岗闪长岩落入火山弧花岗岩区域(图 8c),反映了来自弧-陆碰撞的俯冲环境。同时,赵岩等研究表明,在辽东岫岩地区的古元古代花岗岩均产出在弧后拉张的构造背景下^[19];陆内裂谷环境不能产生富硼岩浆和硼矿而古元古代胶-辽-吉造山带富硼岩浆和硼矿发育说明其形成于俯冲带环境,而非裂谷环境^[39]。毕君辉等通过研究河栏镇 2 150 Ma 变质火山岩认为其具有弧岩浆特征,形成于活动大陆边缘环境^[40]。综上所述,作者认为辽东刘家河地区古元古代花岗闪长岩产于弧岩浆背

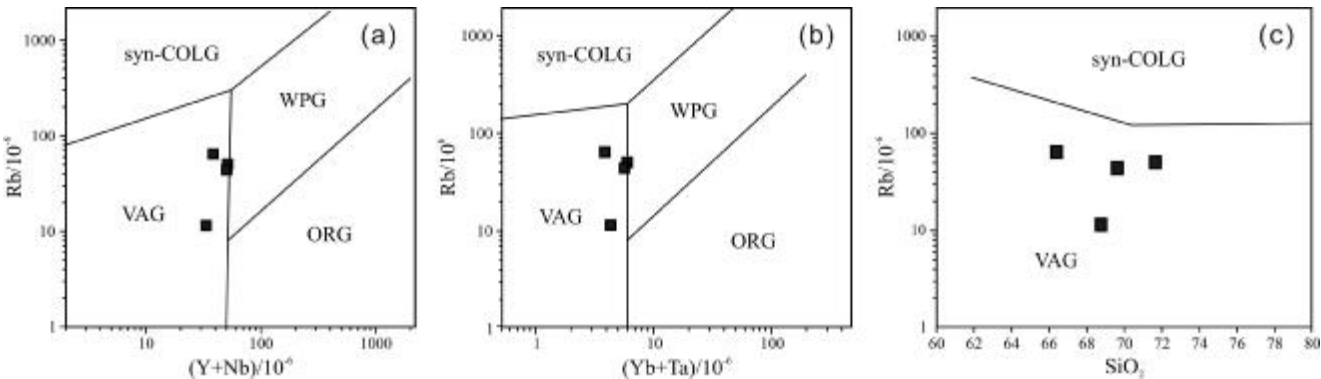


图 8 刘家河地区花岗闪长岩构造环境判别图解
(底图据文献[41])

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for granodiorite in Liujiahe area
(After Reference [41])

VAG—火山弧花岗岩(volcanic arc granite); WPG—板内花岗岩(within-plate granite); ORG—洋脊花岗岩(ocean ridge granite); Syn-COLG—同碰撞花岗岩(syn-collisional granite)

景下,代表了辽吉造山带在古元古代早期(2.2~2.1 Ga)存在俯冲作用导致的弧岩浆活动。

5 结论

(1)刘家河地区花岗闪长岩的结晶年龄为 2180.7 ± 9.0 Ma,与前人报道的辽东地区片麻状花岗岩、花岗闪长岩年龄一致。

(2)刘家河地区花岗闪长岩为I型花岗岩,REE含量较低,并相对亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE),极低的 K_2O/Na_2O 值、 K_2O 含量,形成于低压条件下中下地壳物质减薄的部分熔融,并有少量软流圈地幔物质的贡献。

(3)刘家河地区花岗闪长岩产于弧岩浆背景下,代表了辽吉造山带在古元古代早期(2.2~2.1 Ga)存在俯冲作用导致的弧岩浆活动。

致谢:衷心感谢吉林大学刘正宏教授在野外工作中的悉心指导,以及中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室在LA-ICP-MS锆石U-Pb分析中给予的支持,感谢审稿专家提出的建设性意见和建议。

参考文献(References):

- [1] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2001, 107(1/2): 45-73.
- [2] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1999, 310(1/4): 37-53.
- [3] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China craton and its bearing on tectonic setting[J]. *International Geology Review*, 1998, 40(8): 706-721.
- [4] 刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 2015, 31(10): 2816-2846.
Liu F L, Liu P H, Wang F, et al. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(10): 2816-2846.
- [5] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2000, 103(1/2): 55-88.
- [6] Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 2005, 221(1/2): 127-156.
- [7] 张秋生, 李守义. 辽吉岩套——早元古宙的一种特殊优地槽相杂岩[J]. *长春地质学院学报*, 1985, 28(1): 1-12.
Zhang Q S, Li S Y. The Liaojiangite suite: A special eugeosyncline facies of the Early Proterozoic[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, 1985, 28(1): 1-12.
- [8] 贺高品, 叶慧文. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1998, 14(2): 152-162.
He G P, Ye H W. Two types of Early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(2): 152-162.
- [9] 路孝平, 吴福元, 林景仟, 等. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 123-138.
Lu X P, Wu F Y, Lin J Q, et al. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong Peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 123-138.
- [10] Li Z, Chen B, Wei C J. Is the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt (North China Craton) a rift? [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(1): 355-375.
- [11] Faure M, Lin W, Monié P, et al. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (North-East China) [J]. *Terra Nova*, 2004, 16(2): 75-80.
- [12] 陈井胜, 邢德和, 刘森, 等. 辽宁辽阳地区辽河群酸性火山岩锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2792-2810.
Chen J S, Xing D H, Liu M, et al. Zircon U-Pb chronology and geological significance of felsic volcanic rocks in the Liaohu Group from the Liaoyang area, Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2792-2810.
- [13] 陈井胜, 田德欣, 邢德和, 等. 辽宁宽甸地区辽河群里尔峪组基性火山岩锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(9): 3282-3294.
Chen J S, Tian D X, Xing D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and its geological significance of the basic volcanic rocks from the Li'eryu Formation, Liaohu Group in Kuandian area, Liaoning Province[J]. *Earth Science*, 2020, 45(9): 3282-3294.
- [14] Lu X P, Wu F Y, Guo J H, et al. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the eastern block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2006, 146(3/4): 138-164.
- [15] Li S Z, Zhao G C, Sun M, et al. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohu assemblage in the eastern block of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 55-88.

- 659–674.
- [16] Li S Z, Zhao G C. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt in the eastern block of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2007, 158(1/2): 1–16.
- [17] Zhou X W, Zhao G C, Wei C J, et al. Metamorphic evolution and Th-U-Pb zircon and monazite geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton [J]. *American Journal of Science*, 2008, 308: 328–350.
- [18] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2683–2698.
- Zhang Q, Pan G Q, Li C D, et al. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2683–2698.
- [19] 赵岩, 张朋, 毕中伟, 等. 辽东岫岩地区两类元古代花岗岩年代学、地球化学及地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(11): 4072–4090.
- Zhao Y, Zhang P, Bi Z W, et al. Geochronology and geochemistry of two types of Paleoproterozoic granites and their geological implications in the Xiuyan area, Liaodong Peninsula [J]. *Earth Science*, 2020, 45(11): 4072–4090.
- [20] 宋剑飞. 关于辽东青城子地区元古代奥长花岗岩的新认识[J]. *吉林地质*, 2018, 37(3): 16–25.
- Song J F. A new understanding of Palaeoproterozoic trondhjemite in Qingchengzi area of Liaodong [J]. *Jilin Geology*, 2018, 37(3): 16–25.
- [21] 李超, 陈斌, 李壮, 等. 辽东岫岩-宽甸地区元古代条痕状花岗岩的岩石地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(3): 963–977.
- Li C, Chen B, Li Z, et al. Petrologic and geochemical characteristics of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses from Xiuyan-Kuandian area in Liaodong Peninsula and their tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(3): 963–977.
- [22] 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 等. 鞍山山东风景区 3.8~2.5 Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学[J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 363–370.
- Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. Geochronology and geochemistry of 3.8–2.5 Ga ancient rock belt in the Dongshan Scenic Park, Anshan area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 363–370.
- [23] 万渝生, 宋彪, 杨淳, 等. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *地质学报*, 2005, 79(1): 78–87.
- Wan Y S, Song B, Yang C, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(1): 78–87.
- [24] 吴福元, 李秋立, 杨正赫, 等. 朝鲜北部狼林地块构造归属与地壳形成时代[J]. *岩石学报*, 2016, 32(10): 2933–2947.
- Wu F Y, Li Q L, Yang Z H, et al. Crustal growth and evolution of the Rangnim Massif, northern Korean Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(10): 2933–2947.
- [25] 郝德峰, 李三忠, 赵国春, 等. 辽吉地区元古代花岗岩成因及对构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2004, 20(6): 1409–1416.
- Hao D F, Li S Z, Zhao G C, et al. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin Province, North China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1409–1416.
- [26] 任云伟, 王惠初, 康健丽, 等. 辽宁营口虎皮峪地区元古代岩浆事件及地质意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(11): 2456–2472.
- Ren Y W, Wang H C, Kang J L, et al. Paleoproterozoic magmatic events in the Hupiyu area in Yingkou, Liaoning Province and their geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(11): 2456–2472.
- [27] Wang X P, Peng P, Wang C, et al. Nature of three episodes of Paleoproterozoic magmatism (2180 Ma, 2115 Ma and 1890 Ma) in the Liaoji Belt, North China with implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2017, 298: 252–267.
- [28] Li Z, Chen B, Yan X L. The Liaohu Group: An insight into the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2019, 326: 174–195.
- [29] 陈木森, 董永胜, 王鹏森, 等. 辽东黄花甸地区元古代变辉绿岩的特征及成因[J]. *世界地质*, 2020, 39(2): 306–321.
- Chen M S, Dong Y S, Wang P S, et al. Characteristics and genesis of Paleoproterozoic metamorphic diabase in Huanghuadian area, eastern Liaoning Province [J]. *Global Geology*, 2020, 39(2): 306–321.
- [30] 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 等. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 379–414.
- Zheng Y F, Xu Z, Zhao Z F, et al. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(4): 353–385.
- [31] 刘俊来, 纪沫, 申亮, 等. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(5): 618–637.
- Liu J L, Ji M, Shen L, et al. Early Cretaceous extensional structures in the Liaodong Peninsula: Structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(6): 823–842.
- [32] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481–492.
- Hou K J, Li Y H, Tian Y R. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28

- (4): 481–492.
- [33] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [M]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42 (1): 313–345.
- [35] 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U–Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 263–276.
- Yang J H, Wu F Y, Xie L W, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, East North China Craton: Constraints from in-situ zircon U–Pb ages and Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (2): 263–276.
- [36] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371–391.
- [37] 宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 等. 辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP U–Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义[J]. 地质学报, 2016, 90 (10): 2620–2636.
- Song Y H, Yang F C, Yan G L, et al. SHRIMP U–Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2620–2636.
- [38] 顾玉超, 鞠楠, 陈仁义, 等. 辽东兰花岭地区古元古代 I 型花岗岩类与辽吉 A 型花岗岩对比研究[J]. 地质通报, 2024, 43(2/3): 317–339.
- Gu Y C, Ju N, Chen R Y, et al. Comparative study of the Lanhualing Paleoproterozoic I-type granitoids and the Liaoji A-type granitoids in eastern Liaoning[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(2/3): 317–339.
- [39] 杨明春, 陈斌, 闫聪. 华北克拉通胶–辽–吉带古元古代条痕状花岗岩成因及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(5): 31–51.
- Yang M C, Chen B, Yan C. Petrogenesis of Paleoproterozoic gneissic granites from Jiao-Liao-Ji Belt of North China Craton and their tectonic implications [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(5): 31–51.
- [40] 毕君辉, 邢德和, 葛文春, 等. 辽东地区北辽河群变酸性火山岩形成的时代及构造背景: 古元古代陆内裂谷, 还是活动大陆边缘? [J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 295–308.
- Bi J H, Xing D H, Ge W C, et al. Age and tectonic setting of meta-acid volcanic rocks from the North Liaohe Group in the Liaodong area: Paleoproterozoic intracontinental rift or active continental margin? [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(3): 295–308.
- [41] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology, 2012, 40(10): 875–878.

(上接第 167 页/Continued from Page 167)

- [28] 田茂军, 李帝铨, 李斌, 等. 辽宁南芬变质核杂岩核部花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44(10): 3551–3564.
- Tian M J, Li D Q, Li B, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of granite from Nanfen metamorphic core complexes in Liaoning[J]. Earth Science, 2019, 44(10): 3551–3564.
- [29] 单学东, 李显东, 战丽华, 等. 辽东永宁组(群)沉积特征[J]. 辽宁地质, 1999, 16(1): 29–34.
- Shan X D, Li X D, Zhan L H, et al. Sedimentary characteristics of Yongning Formation (Group)[J]. Liaoning Geology, 1999, 16(1): 29–34.
- [30] 杨玉伟, 余超, 苏特, 等. 辽东黑沟地区辽河群成因及其对辽吉造山带构造演化的制约[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1397–1412.
- Yang Y W, Yu C, Su T, et al. Petrogenesis of the Liaohe Group from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: Constraints on tectonic evolution of the Liao Ji orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(5): 1397–1412.
- [31] 陈衍景, 郭光军, 李欣. 华北克拉通花岗绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(1): 35–40.
- Chen Y J, Guo G J, Li X. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite-greenstone terrains of North China Craton[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1998, 41 (2): 113–120.