

黑龙江新立金矿床片麻状花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义

张 琳, 杨言辰, 韩世炯, 薄军委, 王凤博, 聂世嘉

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要:黑龙江新立金矿床位于兴蒙造山带东段佳木斯地块中部, 矿体赋存于柳毛组云母石英片岩的层间破碎带中。通过对矿区片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及全岩主量元素、微量元素地球化学特征的研究, 探讨了其成因类型、形成时代和构造背景。岩石地球化学显示, 片麻状花岗岩具有准铝质—过铝质的钙碱性系列岩石特征, 富集大离子亲石元素(Rb、K、Ba), 不同程度地亏损高场强元素(U、Ta、Nb、Zr、Ti、Hf), 轻、重稀土元素分馏明显, 亏损重稀土元素, 呈弱 Eu 负异常。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得片麻状花岗岩的成岩时代为 (266.0 ± 4.7) Ma, 成矿流体为花岗质岩浆演化晚期的产物, 因此, 推测新立金矿床的成矿时代为晚二叠世。矿区片麻状花岗岩的成因类型为 I 型花岗岩, 形成于晚古生代古亚洲洋板块俯冲消减的构造环境。

关键词:片麻状花岗岩; I 型花岗岩; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 成矿时代; 新立金矿床; 黑龙江中图分类号: P595; P597. +3 文献标志码: A

Zircon U-Pb Dating and Geological Significance of Gneissic Granite in Xinli Gold Deposit of Heilongjiang

ZHANG Lin, YANG Yan-chen, HAN Shi-jiong, BO Jun-wei, WANG Feng-bo, NIE Shi-jia
(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract: Xinli gold deposit in Heilongjiang is located in the center of Jiamusi massif, which belongs to the eastern section of Xing-Meng orogenic belt. The ore bodies are hosted in interstratified fracture belt of Liunao Formation mica-quartzose schist. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gneissic granite was analyzed, and the geochemistry characteristics of whole rock major and trace elements were reported, and the petrogenesis, formation age and tectonic setting were discussed. The petrogeochemistry shows that gneissic granite is characterized by calc-alkaline and metaluminous-peraluminous rocks, and is enriched in large ion lithophile elements(Rb, K and Ba), and is depleted with different degrees in high field strength elements(U, Ta, Nb, Zr, Ti and Hf); the fractionation of light and heavy rare earth elements is obvious, and heavy rare earth element is depleted, and negative Eu anomaly is weak. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of gneissic granite is (266.0 ± 4.7) Ma. The ore-forming fluids are produced in late period during granitic magma evolution, so that the metallogenic age of Xinli gold deposit maybe Late Permian. The gneissic granite belongs to I-type granite, and is formed by the subduction of Paleo-Asian Ocean Plate in Late Paleozoic.

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(12120113098300)

作者简介: 张 琳(1993-), 男, 河南浚县人, 理学硕士研究生, E-mail: cmxj@foxmail.com。

通讯作者: 杨言辰(1965-), 男, 河南伊川人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: yyc@jlu.edu.cn。

Key words: gneissic granite; I-type granite; petrogeochemistry; zircon U-Pb age; metallogenic age; Xinli gold deposit; Heilongjiang

0 引言

中国东北地区位于西伯利亚克拉通和华北克拉通之间的中亚造山带东段^[1-3],大地构造格局自西向东依次为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块^[4-9]。自古生代以来,由于微陆块的拼合和古亚洲洋的闭合,该区发生了多期次大规模的岩浆活动^[10-13],并随之伴生了大量的内生金属矿床^[14]。佳木斯地块作为黑龙江省重要的金矿产区之一^[15-16],区内大多数金矿床的形成都与晚古生代花岗质岩石关系密切^[17-19]。位于佳木斯地块中部的新立金矿床是一个成矿作用与花岗质岩石有关的矿床,是佳木斯地块重要的金矿产区之一。唐海涛等对该矿床的基本地质特征进行了研究^[20],但是缺乏关于岩石地球化学、成岩时代方面的研究。本文通过对新立金矿床片麻状花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地球化学特征进行研究,探讨其成因类型、形成时代及地球动力学背景。

1 区域地质概况

新立金矿床地处黑龙江省桦南县驼腰子镇,大地构造位置上位于佳木斯地块中部[图 1(a)]。矿区出露地层主要为中下元古界麻山群柳毛组中—低级变质岩系,岩性以云母石英片岩、大理岩为主,柳毛组地层呈残留体 NE 向展布于片麻状花岗岩中,岩层以中等或较陡倾角倾向 NW。区内以断裂构造为主,早期断裂主要有 NNE、NNW 向以及和岩层走向一致的层间破碎带。早期断裂为控矿构造,多被花岗岩脉和石英脉所充填;晚期断裂可分为 NW、NE 和近 EW 向 3 组,晚期断裂为成矿后构造,常破坏矿体,使地层、岩脉和含矿石英脉发生微小错断。区内侵入岩为晚古生代花岗岩类,其中以片麻状花岗岩为主,还发育少量闪长岩[图 1(b)]。片麻状花岗岩呈浅肉红色,以中—细粒粒状结构为主,具片麻状构造,主要矿物为斜长石、钾长石和石英,斜长石和钾长石的自形程度较高。

新立金矿床的矿体主要为含矿石英脉,少量矿石为含金碎裂黑云母花岗岩。石英脉呈近 NE 向分布于柳毛组地层的层间破碎带中,石英脉为花岗岩岩浆演化晚期的产物[图 1(c)]。矿石矿物为黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿等,具他形粒状结构、胶状结构

等,呈浸染状构造、网脉状-脉状构造等。围岩蚀变类型为硅化、黄铁矿化、磁黄铁矿化、绢云母化等,其中硅化与成矿关系密切。

2 分析方法

选取新立金矿床蚀变较弱的片麻状花岗岩和石英脉矿石样品用于地球化学测试分析。

2.1 主量元素、微量元素分析

主量元素、微量元素测试分析工作是在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成的。其中,主量元素使用玻璃熔片大型 X 射线荧光光谱(XRF)测试分析,分析误差小于 5%;微量元素是在采用酸溶法制得样品后,使用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成测试的,测试分析精度小于 10%。

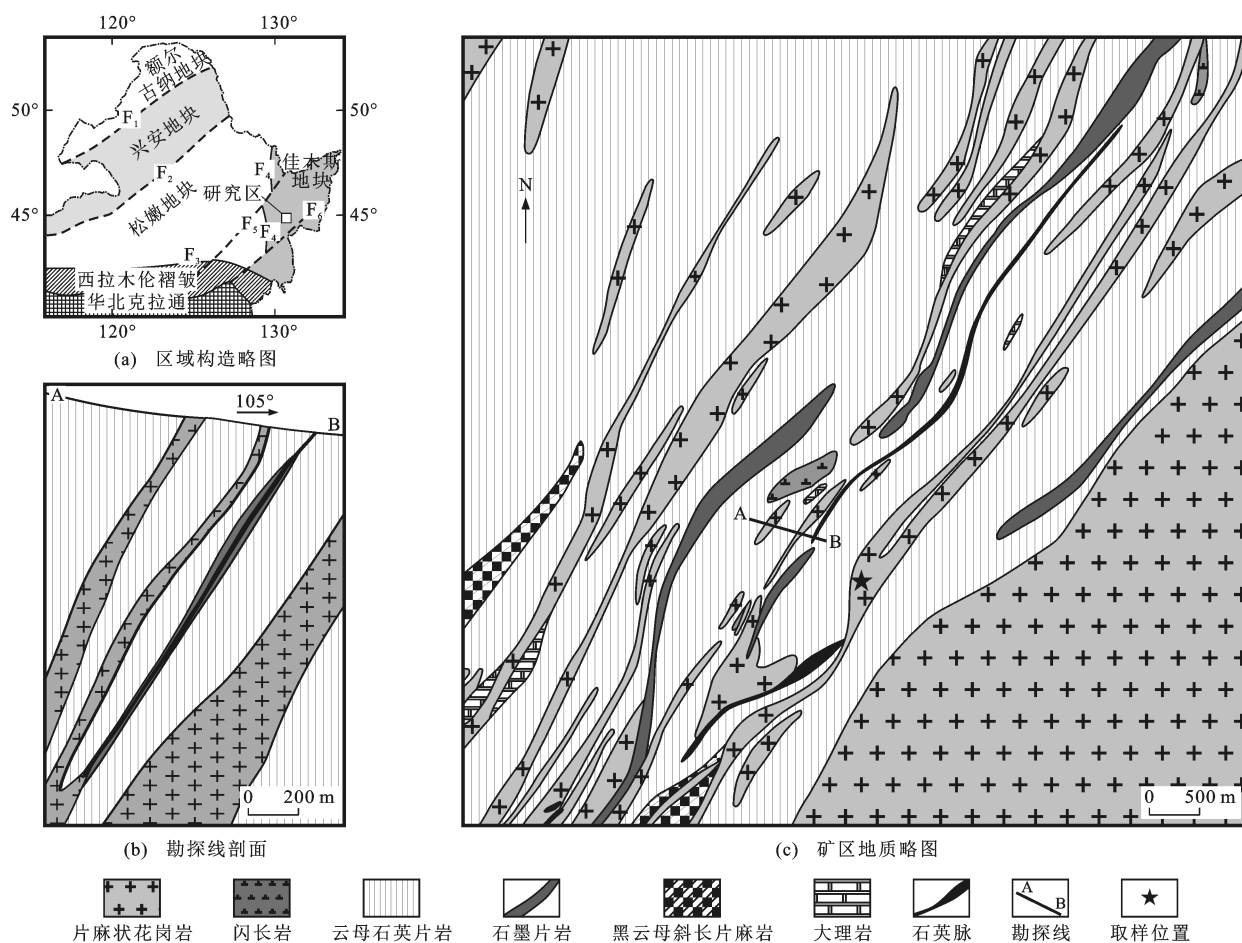
2.2 锆石 U-Pb 定年

选取取自天然露头及采石场的新鲜样品用于锆石 U-Pb 定年。碎样和锆石的分选在河北省地质测绘院实验室完成。锆石的阴极发光照相及 LA-ICP-MS 分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石经过分选后进行挑选,并将锆石样品和 91500 标准锆石(年龄为 $(1\ 062.2 \pm 3.3)\text{Ma}$)置于环氧树脂上,然后磨制成靶,进行阴极发光照相。对采集的阴极发光图像进行观察,圈出分析点位置。在对阴极发光图像进行圈点的基础上,通过 LA-ICP-MS 仪对锆石进行 U-Pb 定年,详细方法和步骤参见文献[21]。锆石阴极发光(CL)图像利用扫描电镜+Gatan 阴极发光 MonoCL3 获得,锆石测定分析中采用的是激光剥蚀孔径为 $25 \sim 30\ \mu\text{m}$,激光脉冲为 10 Hz,能量为 $32 \sim 36\ \text{mJ}$ 的离子束。锆石测试过程中,通过 91500 标准锆石进行锆石原位 U-Pb 分馏校正分析,之后对 LA-ICP-MS 法测试得到的锆石年龄数据进行处理,利用 ISOPLLOT3.0 程序完成谐和曲线的绘制及加权年龄的计算。

3 结果分析

3.1 主量元素

新立金矿床片麻状花岗岩样品主量元素分析结果见表 1。片麻状花岗岩 SiO_2 含量(质量分数,下同)为 67.44%和 66.22%,属于酸性岩类; Al_2O_3 含量为 15.92%和 17.35%, CaO 含量为 3.11%和 3.23%, Na_2O 含量为 2.27%和 3.41%, K_2O 含量



F_1 为塔源—喜桂图断裂带; F_2 为贺根山—黑河断裂带; F_3 为西拉木伦断裂带; F_4 为牡丹江断裂带; F_5 为依舒断裂带; F_6 为敦密断裂带

图 1 黑龙江新立金矿床区域构造与地质略图

Fig. 1 Regional Tectonic and Geological Sketch Maps of Xinli Gold Deposit in Heilongjiang

表 1 片麻状花岗岩主量元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major Elements of Gneissic Granite

样品 编号	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{TiO}_2)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{FeO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	$w(\text{MnO})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	烧失量/ %	$w_{\text{total}}/\%$	$(w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}))/\%$	A/CNK 值
XL-2-1	66.22	0.60	17.35	0.61	2.57	1.24	3.23	3.41	1.80	0.03	0.03	2.73	99.81	5.21	1.29
XL-2-3	67.44	0.26	15.92	0.32	1.45	0.57	3.11	2.27	6.64	0.03	0.05	1.71	99.79	8.90	0.96

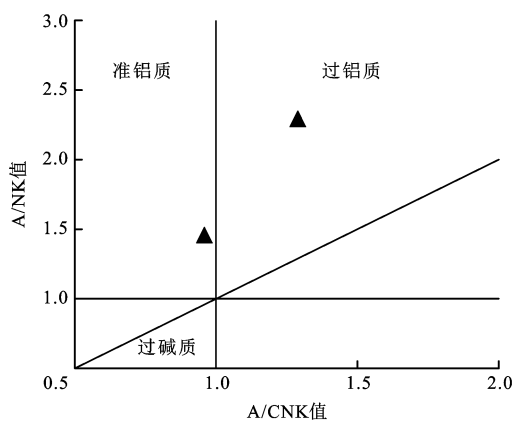
注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; w_{total} 为主量元素总含量。

为 6.64% 和 1.80%, A/CNK 值为 0.96 和 1.29。在 A/CNK-A/NK 图解中, 两件样品整体呈偏铝—过铝质岩石特征, 里特曼指数为 2.09 (< 3.30), 属于钙碱性系列(图 2)。

3.2 微量元素

新立金矿床片麻状花岗岩及石英脉矿体微量元素分析结果见表 2。片麻状花岗岩的稀土元素含量变化不大, 配分模式近平行[图 3(a)], 稀土元素总含量较高 $((496.15 \sim 575.84) \times 10^{-6})$, 均值为 535.99×10^{-6} , 轻稀土元素总含量为 $(475.98 \sim 558.49) \times 10^{-6}$, 重稀土元素总含量为 $(17.35 \sim 20.17) \times 10^{-6}$,

轻、重稀土元素含量比值 ($w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$) 为 23.60 ~ 32.19, 均值为 27.90, 显示其轻、重稀土元素分异程度很高, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损。样品 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 143.79 ~ 154.47, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式明显右倾, 强烈富集轻稀土元素; Eu 异常为 0.72 ~ 0.82, 具有弱 Eu 负异常, 可能与花岗岩岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用有关。原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 3(b)]显示, 片麻状花岗岩富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 而相对亏损 U、Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等高场强元素。其中, Nb、Ta、Ti 元素的亏损可能是在流体交代地幔



图件引自文献[22]

图 2 片麻状花岗岩 A/CNK-A/NK 图解

Fig. 2 Diagram of A/CNK-A/NK for Gneissic Granite

楔而发生部分熔融作用的过程中,这些元素保留在残留相金红石等副矿物中导致的,表明该样品在微量元素组成上与岛弧岩浆岩具有亲缘性^[23]。样品 Y 含量为 $(13.45 \sim 14.58) \times 10^{-6}$, $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值为 $26.90 \sim 29.82$,在 Y-Sr/Y 图解上,样品落在岛弧火山岩区(图 4)。

含矿石英脉的稀土元素总含量为 $(144.35 \sim 198.62) \times 10^{-6}$,均值为 173.18×10^{-6} , $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $11.19 \sim 11.64$,球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 3(a)]右倾,轻稀土元素富集;Eu 异常为 $0.54 \sim 0.85$,具有弱 Eu 负异常;稀土元素配分模式表现为轻稀土元素富集(总含量为 $(131.77 \sim 182.73) \times 10^{-6}$)、重稀土元素亏损(总含量为 $(12.58 \sim 15.89) \times 10^{-6}$)的右倾模式,轻、重稀土元素分馏明显。含矿石英脉的稀土元素配分模式变化趋势与矿区侵入岩片麻状花岗岩总体一致,暗示两者可能具有同源性。与矿区侵入岩片麻状花岗岩相比,含矿石英脉的稀土元素总含量较低($(144.35 \sim 198.62) \times 10^{-6}$),且稀土元素配分模式为明显 Eu 负异常($0.54 \sim 0.85$),这可能是由于含矿石英脉为岩浆演化晚期分异出的流体,在上升过程中由于水岩反应降低了流体的稀土元素总含量,且斜长石的分离结晶作用导致 Eu 负异常。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示[图 3(b)],含矿石英脉曲线总体趋势与片麻状花岗岩基本一致,即富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K 等),而相对亏损高场强元素(U、Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等)。

3.3 锆石 U-Pb 定年

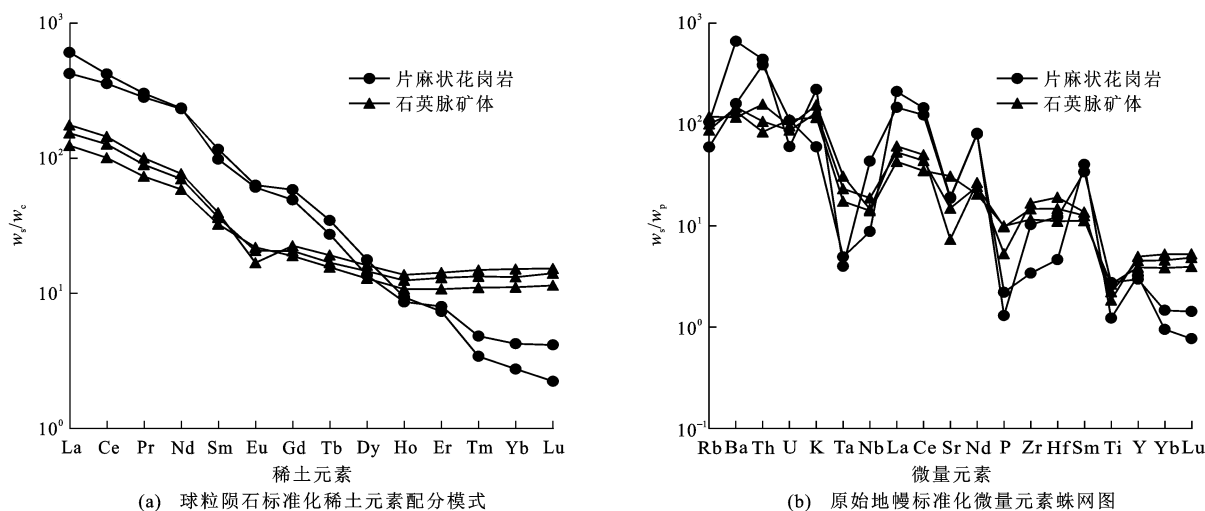
从新立金矿床花岗岩样品 XL-2-N 中分选出来的锆石多呈半自形长柱状、短柱状,为透明一半透明晶体,锆石颗粒直径为 $150 \sim 300 \mu\text{m}$ (图 5)。锆石

表 2 片麻状花岗岩及石英脉矿体微量元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Trace Elements of Gneissic Granite and Quartz Vein

样品编号	XL-2-1	XL-2-3	XL-03	XL-05	XL-11
岩性	片麻状花岗岩	片麻状花岗岩	石英脉矿体	石英脉矿体	石英脉矿体
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	37.8	66.7	55.4	75.4	63.7
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	1 113.6	4 589.9	1 028.0	815.9	933.2
$w(\text{Th})/10^{-6}$	32.59	37.14	9.05	13.37	7.12
$w(\text{U})/10^{-6}$	2.30	1.26	1.83	2.02	2.33
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.20	0.16	0.95	1.26	0.71
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	6.23	30.80	13.33	10.30	9.98
$w(\text{La})/10^{-6}$	144.13	100.57	36.38	41.72	29.41
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	257.25	218.72	77.72	88.60	61.70
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	401.0	392.2	312.9	154.0	649.2
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	109.83	108.36	32.81	35.87	27.47
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	114.6	38.0	163.4	186.8	128.8
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	3.77	1.43	4.53	5.86	3.41
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	15.05	17.83	5.57	6.04	4.96
$w(\text{Y})/10^{-6}$	13.45	14.58	20.51	22.51	17.64
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	0.72	0.47	2.24	2.57	1.89
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.11	0.06	0.36	0.39	0.29
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	28.71	26.84	8.52	9.53	6.96
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	109.83	108.36	32.81	35.87	27.47
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	15.05	17.83	5.57	6.04	4.96
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	3.53	3.67	1.20	0.98	1.27
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	10.11	12.02	4.23	4.62	3.88
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	1.02	1.30	0.63	0.72	0.58
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	3.46	4.50	3.71	4.09	3.27
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.49	0.53	0.71	0.78	0.61
$w(\text{Er})/10^{-6}$	1.32	1.21	2.15	2.35	1.78
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.12	0.09	0.34	0.38	0.28
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	575.84	496.15	176.56	198.62	144.35
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	558.49	475.98	162.20	182.73	131.77
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	17.35	20.17	14.36	15.89	12.58
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	32.19	23.60	11.29	11.50	10.47
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	143.79	154.47	11.64	11.63	11.19
Eu 异常	0.82	0.72	0.73	0.54	0.85
Ce 异常	0.92	1.01	1.04	1.05	1.02

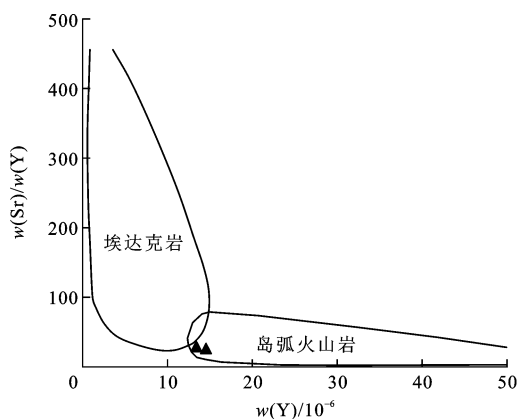
注: w_{REE} 为稀土元素总含量; w_{LREE} 为轻稀土元素总含量; w_{HREE} 为重稀土元素总含量; $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值。



w_p 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; w_p 为原始地幔含量; 图件引自文献[24]; 同一图中相同线条对应同一岩体的不同样品

图 3 片麻状花岗岩及石英脉矿体球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram of Gneissic Granite and Quartz Vein



图件引自文献[25]和[26]

图 4 片麻状花岗岩 Y-Sr/Y 图解

Fig. 4 Diagram of Y-Sr/Y for Gneissic Granite

阴极发光图像显示所测锆石具有明显的韵律环带, 具有岩浆结晶产物的特征。样品 XL-2-N 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析结果见表 3。片麻状花岗岩中所测锆石的 U、Th 含量分别为 $(142 \sim 443) \times 10^{-6}$ 和 $(362 \sim 1\,592) \times 10^{-6}$, 所测锆石的 $w(Th)/w(U)$ 值为 $0.18 \sim 0.49$, 平均为 0.31 , 均大于 0.1 。Belousova 等研究表明, 岩浆锆石 $w(Th)/w(U)$ 值大于 0.1 [27]。因此, 片麻状花岗岩中所测锆石为岩浆型锆石。在年龄谱和曲线 [图 6(a)] 上, 样品 XL-2-N 的 19 个分析点均集中落于谐和曲线上或曲线附近。19 个锆石分析点的 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 年龄加权平均值为 (266.4 ± 4.7) Ma, 平均标准权重偏差为 0.07 (样本量为 19 个),

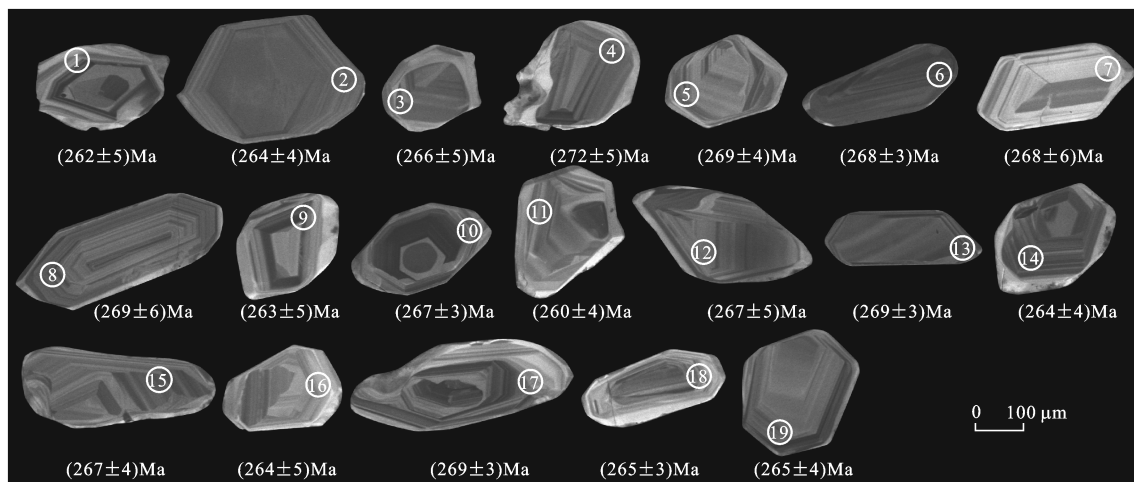


图 5 片麻状花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL Image of Zircons from Gneissic Granite

表 3 片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Tab.3 Analysis Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Gneissic Granite

分析点	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/ w(\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/ n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/ n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/ n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/ n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
XL-2-N-01	392	870	0.45	$0.310\,79\pm0.018\,95$	$0.041\,50\pm0.000\,83$	275 ± 15	262 ± 5
XL-2-N-02	228	707	0.32	$0.296\,20\pm0.017\,59$	$0.041\,86\pm0.000\,61$	263 ± 14	264 ± 4
XL-2-N-03	165	574	0.29	$0.333\,71\pm0.019\,13$	$0.042\,15\pm0.000\,77$	292 ± 15	266 ± 5
XL-2-N-04	142	638	0.22	$0.323\,85\pm0.026\,76$	$0.043\,12\pm0.000\,83$	285 ± 21	272 ± 5
XL-2-N-05	172	488	0.35	$0.310\,54\pm0.024\,18$	$0.042\,64\pm0.000\,71$	275 ± 19	269 ± 4
XL-2-N-06	412	1 067	0.39	$0.305\,89\pm0.014\,52$	$0.042\,52\pm0.000\,50$	271 ± 11	268 ± 3
XL-2-N-07	177	362	0.49	$0.316\,95\pm0.034\,03$	$0.042\,49\pm0.000\,97$	280 ± 26	268 ± 6
XL-2-N-08	167	694	0.24	$0.324\,86\pm0.024\,80$	$0.042\,62\pm0.000\,93$	286 ± 19	269 ± 6
XL-2-N-09	158	628	0.25	$0.275\,19\pm0.016\,34$	$0.041\,70\pm0.000\,79$	247 ± 13	263 ± 5
XL-2-N-10	443	1 592	0.28	$0.302\,73\pm0.011\,11$	$0.042\,27\pm0.000\,55$	269 ± 9	267 ± 3
XL-2-N-11	249	827	0.30	$0.277\,07\pm0.016\,64$	$0.041\,15\pm0.000\,72$	248 ± 13	260 ± 4
XL-2-N-12	230	656	0.35	$0.288\,28\pm0.021\,17$	$0.042\,24\pm0.000\,79$	257 ± 17	267 ± 5
XL-2-N-13	242	1 094	0.22	$0.305\,87\pm0.013\,75$	$0.042\,61\pm0.000\,56$	271 ± 11	269 ± 3
XL-2-N-14	167	894	0.19	$0.301\,81\pm0.014\,89$	$0.041\,76\pm0.000\,57$	268 ± 12	264 ± 4
XL-2-N-15	165	695	0.24	$0.305\,88\pm0.016\,93$	$0.042\,28\pm0.000\,65$	271 ± 13	267 ± 4
XL-2-N-16	175	404	0.43	$0.309\,03\pm0.023\,41$	$0.041\,76\pm0.000\,81$	273 ± 18	264 ± 5
XL-2-N-17	191	843	0.23	$0.297\,22\pm0.014\,49$	$0.042\,62\pm0.000\,55$	264 ± 11	269 ± 3
XL-2-N-18	204	1 136	0.18	$0.285\,75\pm0.011\,52$	$0.042\,02\pm0.000\,55$	255 ± 9	265 ± 3
XL-2-N-19	207	607	0.34	$0.292\,21\pm0.016\,75$	$0.041\,91\pm0.000\,68$	260 ± 13	265 ± 4

注:误差类型为 1σ ; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量。

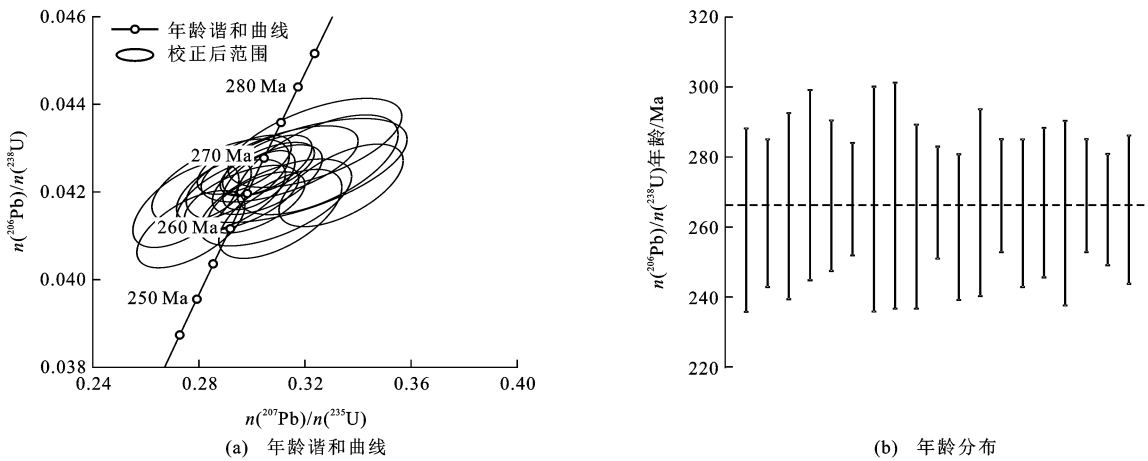


图 6 片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和曲线和年龄分布

Fig. 6 LA-ICP-MS Zircon U-Pb Concordia Diagram of Gneissic Granite and Distribution of Ages

代表了片麻状花岗岩的结晶年龄。

4 讨 论

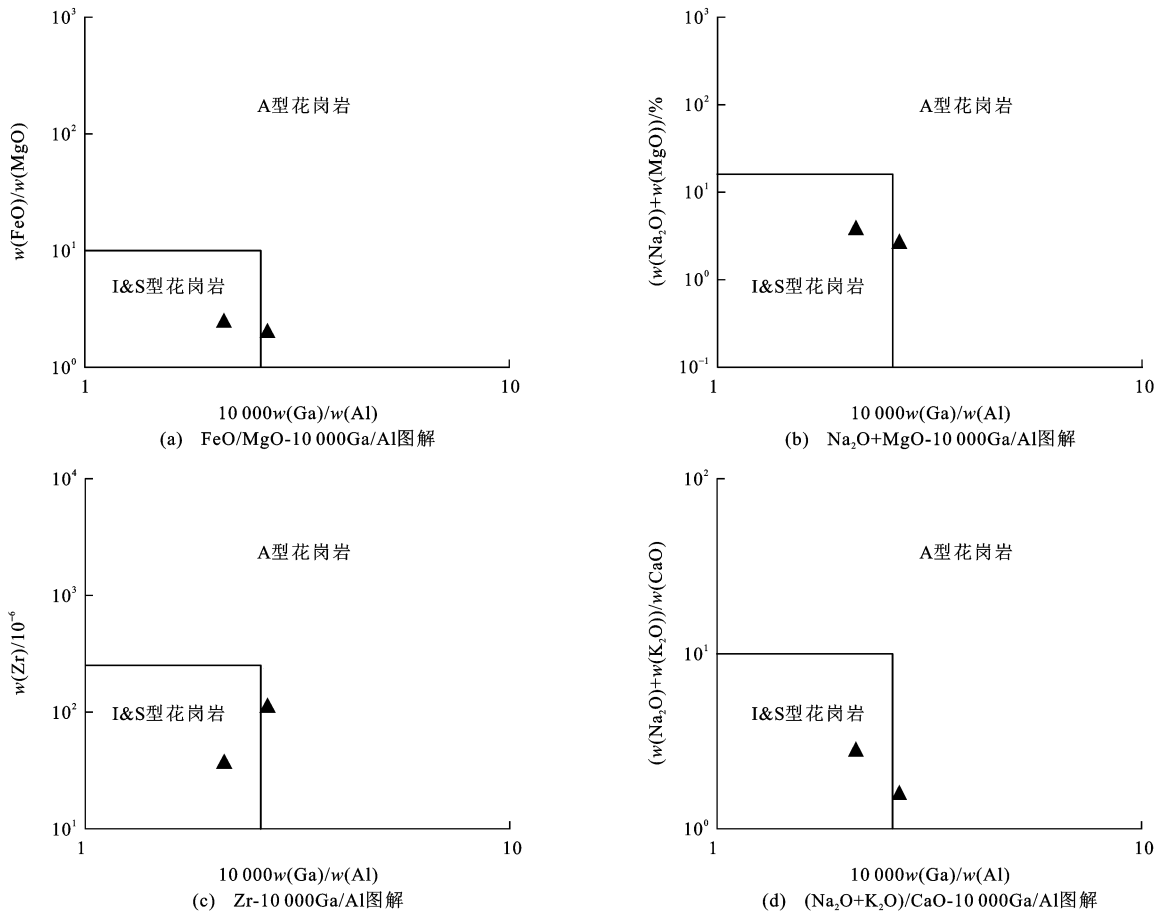
4.1 岩浆成因类型

新立金矿床花岗岩的岩性以片麻状花岗岩为主,主要矿物组成为斜长石、钾长石、石英、黑云母等。新

立金矿床花岗岩 SiO_2 含量为 66.22% 和 67.44%, Al_2O_3 含量为 15.92% 和 17.35%, A/CNK 值为 0.96 和 1.29,碱性指数为 0.44 和 0.69,里特曼指数为 2.09(<3.30),表明其是具有富 Al、偏铝质特征的钙碱性系列岩石。微量元素分析结果显示,岩体高场强元素(U、Ta、Nb、Zr、Ti、Hf)有不同程度的亏损,而大

离子亲石元素(Rb、K、Ba)富集,显示了受流体交代作用的特征^[28]。稀土元素表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的配分模式,并有弱 Eu 负异常。这些特征均表现出 I 型花岗岩的地球化学特征^[29],显示岩石具有火山弧花岗岩的特点^[13,30]。

在片麻状花岗岩成因类型判别图解(图 7)上,其中一个样品受蚀变作用的影响,落在 I&S 型花岗岩区域的边界上,另一个样品落在 I&S 型花岗岩区域内部。根据岩石的矿物组成和化学成分判断,矿区侵入岩片麻状花岗岩属于 I 型花岗岩。



图件引自文献^[31]

图 7 片麻状花岗岩成因类型判别图解

Fig. 7 Discrimination Diagrams of Genetic Types for Gneissic Granite

4.2 成岩成矿时代

新立金矿床的矿体赋存于与花岗岩体接触的柳毛组片岩层间破碎带中,且稀土元素、微量元素特征显示石英脉与花岗岩具有同源性,含 Au 石英脉可能为花岗质岩浆演化后期的产物。因此,对矿区片麻状花岗岩成岩时代的研究有助于成矿时代的限定。

唐海涛等研究认为,新立金矿床内与金矿形成密切相关的片麻状花岗岩形成时代为元古代^[20]。而近年来的研究显示,佳木斯地块自古生代以来有两期花岗质岩浆作用,分别为早古生代早期(515~530 Ma)和晚古生代晚期(254~270 Ma)^[12-13,32-34]。本文对新立金矿床片麻状花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,其加权平均年龄为(266.0±

4.7)Ma,而研究区内发育的老柞山金矿和平顶山金矿与成矿相关的花岗岩成岩时代分别为(262.0±3.9)Ma^[18]和(271.0±2.3)Ma^[17],说明区内这 3 个金矿床与成矿相关岩体成岩时代为晚古生代,表明佳木斯地块在晚古生代存在一期重要岩浆-热液成矿事件。

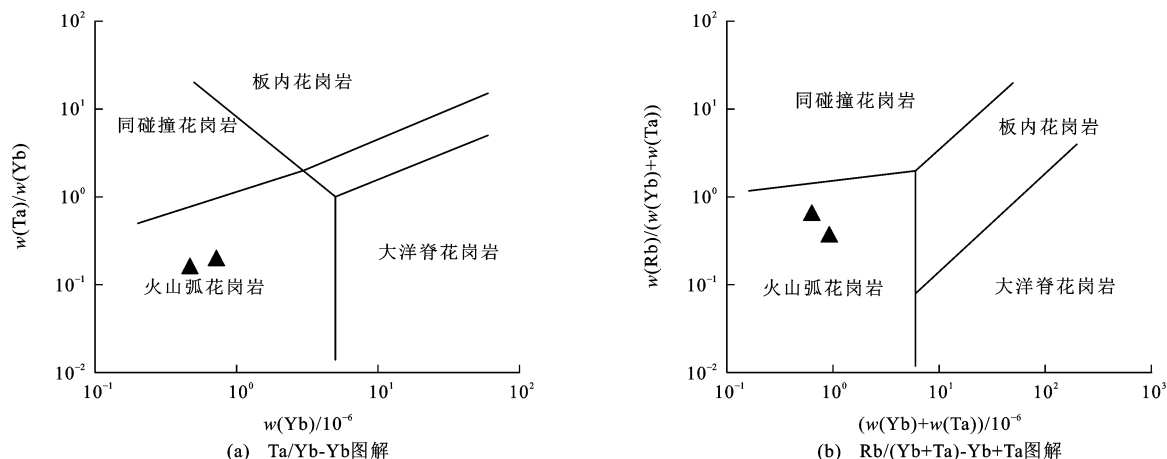
根据矿区地质资料,矿体在深部与花岗岩体相连,是花岗岩体在柳毛组片岩地层中的条带状分枝,在地表呈与条带状花岗岩体相一致的产状分布。地球化学特征表明,矿体与矿区片麻状花岗岩的起源具有一定的相似性,但稀土元素总含量较矿区侵入岩片麻状花岗岩低, Eu 负异常明显,这可能是由于含矿石英脉为岩浆演化晚期分异出的流体,在上升过程中的水岩反应降低了流体的稀土元素总含量。

因此,含石英脉矿体为花岗质岩浆演化到晚期阶段的产物,由此推断新立金矿床的成矿时代可能为晚二叠世。

4.3 成岩成矿地球动力学背景

新立金矿床片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 定年显示其成岩时代(266 Ma)为中二叠世晚期;微量元素地球化学特征表明其富集大离子亲石元素(如 Rb、

K、Ba),不同程度地亏损高场强元素(如 U、Ta、Nb、Zr、Ti、Hf),轻、重稀土元素分馏明显,亏损重稀土元素,呈弱 Eu 负异常,具有火山弧花岗岩的特点^[13,30]。同时,在 Ta/Yb-Yb 和 Rb/(Yb+Ta)-Yb+Ta 微量元素构造环境判别图解中,花岗岩样品落于火山弧花岗岩区(图 8),显示出样品具有活动大陆边缘或岛弧的特征。



图件引自文献^[35]

图 8 片麻状花岗岩微量元素构造环境判别图解

Fig. 8 Discrimination Diagrams of Trace Element Tectonic Setting for Gneissic Granite

新立金矿床位于兴蒙造山带东段的佳木斯地块中部。晚古生代,佳木斯地块作为西伯利亚克拉通的东南缘,在古亚洲洋板块的俯冲作用下最终与华北克拉通北缘的兴凯地块拼合^[5,36],在俯冲和拼合过程中产生了一系列岩浆活动。佳木斯地块广泛发育二叠纪花岗岩,其中吴福元等对青山(年龄为 (270 ± 4) Ma)、楚山((256 ± 5) Ma)、柴河((254 ± 5) Ma)等岩体的研究成果表明其具有活动大陆边缘特征^[13]。近年来,众多学者分别对佳木斯地块美作(年龄为 (259 ± 3.6) Ma)^[37]、纪方山(278 Ma)^[38]、六连(284 Ma)^[39]、锦山(260~278 Ma)^[40]等岩体的成岩时代及地质意义做了精细研究。研究结果显示,这些岩体具有比较一致的岛弧花岗岩特征及洋陆俯冲削减的构造环境,表明早二叠世古亚洲洋板块已经向佳木斯地块俯冲。同时,孙德有等对吉林大玉山花岗岩体的成岩时代构造意义进行研究,发现大玉山岩体是具有同碰撞性质的花岗岩体(年龄为 (248 ± 4) Ma),表明晚二叠世古亚洲洋发生闭合^[41]。从区域上看,与古亚洲洋板块俯冲作用有关的岩浆作用与成矿关系密切^[14]。综上所述,研究区古亚洲洋的俯冲始于早二叠世,闭合于晚二叠世,区内成矿作用与古亚洲洋的俯冲作用有着密切关系。晚古生代,古亚洲洋板块的俯冲引起的岩浆作用导

致黑龙江老柞山金矿、平顶山金矿等一批矿床的产生,表明佳木斯地块晚古生代古亚洲洋板块的俯冲作用是一期重要岩浆-热液成矿事件。因此,新立金矿床晚古生代的花岗质岩浆作用形成于活动大陆边缘环境,其成岩成矿地球动力学背景与晚古生代古亚洲洋板块的俯冲消减有关。

5 结 语

(1)黑龙江新立金矿床花岗岩以片麻状花岗岩为主,是具有富 Al、偏铝质特征的钙碱性系列岩石。微量元素地球化学特征显示其亏损 U、Ta、Nb、Zr、Ti、Hf 等高场强元素,富集 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素。稀土元素配分模式为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾模式,轻、重稀土元素分馏明显,有弱 Eu 负异常,岩石成因类型属于 I 型花岗岩。

(2)新立金矿床片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (266.0 ± 4.7) Ma,成矿流体为花岗质岩浆演化到晚期阶段的产物,由此推测新立金矿床的成矿时代可能为晚二叠世。

(3)新立金矿床片麻状花岗岩形成于活动大陆边缘环境,其成岩成矿地球动力学背景与晚古生代古亚洲洋板块的俯冲消减有关。

参考文献:

References:

- [1] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Massive Granitoid Generation in Central Asia: Nd Isotope Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes*, 2000, 23(2): 82-92.
- [2] WU F Y, JAHN B M, WILDE S, et al. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 89-113.
- [3] WU F Y, ZHAO G C, SUN D Y, et al. The Hulan Group: Its Role in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 30(3/4): 542-556.
- [4] 周建波, 曾维顺, 曹嘉麟, 等. 中国东北地区的构造格局与演化: 从 500 Ma 到 180 Ma [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(5): 1298-1316.
ZHOU Jian-bo, ZENG Wei-shun, CAO Jia-lin, et al. The Tectonic Framework and Evolution of the NE China: from ~500 Ma to ~180 Ma [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(5): 1298-1316.
- [5] 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.
- [6] 张兴洲, 马玉霞, 迟效国, 等. 东北及内蒙古东部地区显生宙构造演化的有关问题 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(5): 1269-1285.
ZHANG Xing-zhou, MA Yu-xia, CHI Xiao-guo, et al. Discussion on Phanerozoic Tectonic Evolution in Northeastern China [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(5): 1269-1285.
- [7] 郝爱华, 马艳军, 葛玉辉, 等. 内蒙古赤峰市大营子花岗岩体多期次侵入的证据及其地质意义 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2015, 45(3): 791-803.
XI Ai-hua, MA Yan-jun, GE Yu-hui, et al. Multi-stage Intrusive Evidences and Geological Significance of Dayingzi Granite in Chifeng, Eastern Inner Mongolia [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45(3): 791-803.
- [8] 刘珏, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 内蒙古赤峰地区蒙古营子花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及成因 [J]. *地质通报*, 2015, 34(2/3): 437-446.
LIU Jue, XI Ai-hua, GE Yu-hui, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Petrogenesis of Granodiorite in Mengguyingzi, Chifeng, Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(2/3): 437-446.
- [9] 施璐, 郑常青, 姚文贵, 等. 大兴安岭中段五岔沟地区蛤蟆沟林场 A 型花岗岩年代学、岩石地球化学及构造背景研究 [J]. *地质学报*, 2013, 87(9): 1264-1276.
SHI Lu, ZHENG Chang-qing, YAO Wen-gui, et al. Geochronology, Petro-geochemistry and Tectonic Setting of the Hamagou Forest Farm A-type Granites in the Wuchagou Region, Central Great Xing'an Range [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(9): 1264-1276.
- [10] 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 等. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用 [J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 1997, 27(5): 390-394.
SHAO Ji-an, MOU Bao-lei, HE Guo-qi, et al. Geological Processes of the Process of Structural Overlapping Between Paleo-Asian Domain and Paleo-Pacific Domain in Northern Part of North China [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1997, 27(5): 390-394.
- [11] 赵春荆. 吉黑东部构造格架及地壳演化 [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996.
ZHAO Chun-jing. Tectonic Framework and Crust Evolution of Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1996.
- [12] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 181-189.
WU Fu-yuan, SUN De-you, LIN Qiang. Petrogenesis of the Phanerozoic Granites and Crustal Growth in Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2): 181-189.
- [13] 吴福元, WILDE S, 孙德有. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 443-452.
WU Fu-yuan, WILDE S, SUN De-you. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of Gneissic Granites in Jiamusi Massif, Northeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 443-452.
- [14] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2695-2726.
CHEN Yan-jing, ZHAI Ming-guo, JIANG Shao-yong. Significant Achievements and Open Issues in Study of Orogenesis and Metallogenesis Surrounding the North China Continent [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25

- (11):2695-2726.
- [15] 靳是琴. 佳木斯地块金矿找矿矿物学[M]. 北京:地质出版社,1994.
JIN Shi-qin. Prospecting Mineralogy of Gold Deposit in Jiamusi Massif[M]. Beijing: Geological Publishing House,1994.
- [16] 毕君辉,葛文春,张彦龙,等. 佳木斯地块东部二叠纪锦山花岗杂岩体的成因及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报,2014,36(4):16-31.
BI Jun-hui, GE Wen-chun, ZHANG Yan-long, et al. Petrogenesis of Permian Jinshan Granitic Complex in the Eastern Jiamusi Massif and Its Geological Implication[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2014,36(4):16-31.
- [17] 包真艳,王 建,杨言辰,等. 黑龙江平顶山金矿赋矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其构造意义[J]. 地质学报,2014,88(3):407-420.
BAO Zhen-yan, WANG Jian, YANG Yan-chen, et al. U-Pb Dating and Hf Isotopic Composition of Ore-hosting Granites from the Pingdingshan Gold Deposit, Heilongjiang Province, and Its Geological Implications[J]. Acta Geologica Sinica,2014,88(3):407-420.
- [18] 李怡欣. 黑龙江省老柞山金矿床的成因与成矿地质模式[D]. 长春:吉林大学,2012.
LI Yi-xin. The Study on Ore Genesis and Metallogenic Geological Model of Laozuoshan Gold Deposit in Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University,2012.
- [19] 赵羽军,崔培龙,王清海,等. 黑龙江宁安英城子热液金矿床流体包裹体的氩同位素激光探针定年与成矿时代讨论[J]. 世界地质,2010,29(2):203-210.
ZHAO Yu-jun, CUI Pei-long, WANG Qing-hai, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Laser Probe Dating of Fluid Inclusions and Discussion on Metallogenic Epoch of Yingchengzi Epithermal Au Deposit in Ning'an Area of Heilongjiang[J]. Global Geology,2010,29(2):203-210.
- [20] 唐海涛,臧恩光,王雪松,等. 黑龙江省桦南县新立金矿成矿地质条件及找矿方向[J]. 黑龙江科技信息,2011(19):39.
TANG Hai-tao, ZANG En-guang, WANG Xue-song, et al. Metallogenic Geological Conditions and Prospecting Direction of Xinli Gold Deposit in Huanan County, Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2011(19):39.
- [21] YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-inductivity Coupled Plasma-mass Spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research,2004,28(3):353-370.
- [22] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic Discrimination of Granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin,1989,101(5):635-643.
- [19] RINGWOOD A E. Slab-mantle Interactions:3. Petrogenesis of Intraplate Magmas and Structure of the Upper Mantle[J]. Chemical Geology,1990,82(3/4):187-207.
- [24] 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,1989,42:313-345.
- [25] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere[J]. Nature,1990,347:662-665.
- [26] DRUMMOND M S, DEFANT M J. A Model for Trondhjemite-tonalite-dacite Genesis and Crustal Growth via Slab Melting: Archean to Modern Comparisons[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,1990,95(B13):21503-21521.
- [27] BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,2002,143(5):602-622.
- [28] 张宏飞,高 山. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,2012.
ZHANG Hong-fei, GAO Shan. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House,2012.
- [29] CHAPPELL B W. Aluminium Saturation in I- and S-type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites[J]. Lithos,1999,46(3):535-551.
- [30] WILSON B M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach[M]. London: Unwin Hyman,1989.
- [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] WILDE S A, ZHANG X, WU F. Extension of a Newly Identified 500 Ma Metamorphic Terrane in North East China: Further U-Pb SHRIMP Dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China[J]. Tectonophysics,2000,328(1/2):115-130.
- [33] 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.
- [34] 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[D]. 长春:吉林大学,2015.
BI Jun-hui. Petrogenesis and Tectonic Implications of

- Early Paleozoic Granites in the Eastern Jiamusi Massif[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [35] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [36] 孟 恩, 许文良, 杨德彬, 等. 佳木斯地块东缘及东南缘二叠纪火山作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. *科学通报*, 2008, 53(8): 956-965.
MENG En, XU Wen-liang, YANG De-bin, et al. Permian Volcanisms in Eastern and Southeastern Margins of the Jiamusi Massif, Northeastern China: Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Its Tectonic Implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(8): 956-965.
- [37] 黄映聪, 任东辉, 张兴洲, 等. 黑龙江省东部桦南隆起美作花岗岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 38(4): 631-638.
HUANG Ying-cong, REN Dong-hui, ZHANG Xing-zhou, et al. Zircon U-Pb Dating of the Meizuo Granite and Geological Significance in the Huanan Uplift, East Heilongjiang Province[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(4): 631-638.
- [38] 蒲建彬, 张兴洲, 郭 冶, 等. 佳木斯地块东部二叠纪方山花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *世界地质*, 2015, 34(4): 903-913.
PU Jian-bin, ZHANG Xing-zhou, GUO Ye, et al. Geological Implications of Permian Fangshan Granitic Rocks in Eastern Jiamusi Massif: Evidences from U-Pb Chronology and Geochemistry [J]. *Global Geology*, 2015, 34(4): 903-913.
- [39] 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.
- [40] 毕君辉, 葛文春, 张彦龙, 等. 佳木斯地块东部二叠纪锦山花岗杂岩体的成因及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(4): 16-31.
BI Jun-hui, GE Wen-chun, ZHANG Yan-long, et al. Petrogenesis of Permian Jinshan Granitic Complex in the Eastern Jiamusi Massif and Its Geological Implications [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(4): 16-31.
- [41] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间: 来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2004, 34(2): 174-181.
SUN De-you, WU Fu-yuan, ZHANG Yan-bin, et al. The Final Closing Time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji Plate Suture Zone: Evidence from the Dayushan Granitic Pluton, Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(2): 174-181.

《地球科学与环境学报》2017 年度约稿函

尊敬的各位专家学者:

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家的支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括:1. 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源;2. 特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬;3. 发表周期短;4. 对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表;5. 刊登综述类论文;6. 可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址:西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码:710064

电 话:029-82334686

E-mail: dkyhxb@chd.edu.cn; jesechd@163.com

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部