

## 辽宁排山楼金矿床黑云母花岗岩 成岩时代及地质意义

聂世嘉, 杨言辰, 韩世炯, 张琳, 王凤博

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:**排山楼金矿床是华北克拉通北缘东段赤峰—朝阳—阜新金矿成矿带中的韧性剪切带型金矿, 矿体主要赋存于 EW 向韧性剪切带的太古宙变质岩中。选择控矿韧性剪切带北部的黑云母花岗岩为研究对象, 对其进行了全岩主量、微量元素地球化学特征分析及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究, 探讨其成因类型、形成时代和构造背景。地球化学特征表明, 岩石属于 I 型高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质花岗岩, 富集轻稀土元素及大离子亲石元素, 呈弱的负 Eu 异常, 亏损高场强元素, 具有活动大陆边缘岩浆岩的地球化学亲缘性。锆石 U-Pb 定年结果显示, 黑云母花岗岩侵入时代为早白垩世燕山期 ( $121.8 \pm 1.1$ ) Ma。通过野外观察黑云母花岗岩与控矿韧性剪切带之间的接触关系, 对比岩矿间微量元素、同位素特征, 结合华北克拉通区域构造演化, 认为排山楼金矿床形成于岩石圈伸展的构造背景之下, 成矿时代为早白垩世晚期, 是韧性剪切作用导致矿源层成矿元素发生活化、迁移、富集的产物。

**关键词:**黑云母花岗岩; I 型花岗岩; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 成矿时代; 金矿; 华北克拉通  
**中图分类号:** P588.121; P618.51 **文献标志码:** A

## Formation Age and Geological Significance of Biotite Granite in Paishanlou Au Deposit of Liaoning, China

NIE Shi-jia, YANG Yan-chen, HAN Shi-jiong, ZHANG Lin, WANG Feng-bo

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

**Abstract:** Paishanlou Au deposit, which is located in Chifeng-Chaoyang-Fuxin gold metallogenic belt, the eastern segment of northern periphery of North China Craton, is ductile shear belt-hosted. The ore body is mainly hosted in Archean metamorphic rocks of EW-trending ductile shear belt. The biotite granite outcropped in the north of ore-controlling ductile shear belt was taken as the research object; the geochemical characteristics of whole-rock major and trace elements were analyzed; LA-ICP-MS zircon U-Pb age was measured; and the petrogenesis, formation age and tectonic setting were discussed. The biotite granite belongs to I-type granite with high-K calc-alkaline and quasi-aluminous-weak peraluminous, showing the characteristics of minor negative Eu anomaly, enrichment of light rare earth elements and large ion lithophile elements, and loss of high field strength elements; thus, the rocks have geochemical affinity of active continental margin magmatic rock. LA-ICP-MS zircon U-Pb age is  $(121.8 \pm 1.1)$  Ma, so that the biotite granite is emplaced during Early Cretaceous Yanshanian. Based on the observation of contact relationship between biotite granite and ore-controlling

收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120115066001)

作者简介: 聂世嘉 (1995-), 男, 山东德州人, 理学硕士研究生, E-mail: nieshijia@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。

ductile shear belt, the relationship of trace element and isotope characteristics between biotite granite and gold ore was contrasted. Combined with the tectonic evolution in North China Craton, it is indicated that Paishanlou Au deposit is formed in Early Cretaceous by the background of the regional extensional tectonism and lithosphere thinning process, and the mineralogenetic epoch is late Early Cretaceous. In general, Paishanlou Au deposit is the product of the activation, migration and enrichment of source bed by ductile shearing.

**Key words:** biotite granite; I-type granite; petrogeochemistry; zircon U-Pb age; ore-forming age; Au deposit; North China Craton

## 0 引言

华北克拉通北缘是中国第三大金成矿省,是滨西太平洋构造域的重要组成部分。华北克拉通在中生代经历了从陆壳加厚到岩石圈破坏事件<sup>[1]</sup>,其北缘广泛发育燕山期构造岩浆活动,该期岩浆活动为赤峰—阜新一带金成矿提供了有利的地质条件。到目前为止,区内发现红花沟、安家营子、烧锅营子、金厂沟梁、小塔子沟、东五家子等超过 10 处大—中型岩浆-热液型金矿床<sup>[2-8]</sup>。排山楼金矿床位于辽宁省阜新市,产于太古宙变质岩区,矿体赋存于近 EW 向排山楼—侯其营子韧性剪切带内,是中国典型的韧性剪切带型金矿床<sup>[9-11]</sup>。曲亚军等对该矿床的矿质来源、成矿年代、矿床成因等进行了研究<sup>[12-15]</sup>。关于该矿床成矿的研究观点可分为两类:一部分学者认为成矿与 EW 向韧性剪切带有关<sup>[9,16]</sup>,并通过对金矿石中石英脉进行<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年<sup>[17]</sup>,认为金矿化发生在 2 100 Ma 左右的吕梁期;而另一部分学者认为成矿与中生代华北克拉通构造活动有关,基于对矿化糜棱岩中的黑云母进行<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年<sup>[16]</sup>及对控矿韧性剪切带中的脉岩进行锆石 U-Pb 测年<sup>[18]</sup>,认为金矿化主要发生在 124 Ma 左右的燕山期。本文基于野外地质观察和样品测试数据,对排山楼矿区北部分布的燕山期黑云母花岗岩株开展较系统的岩石地球化学和精细的锆石年代学研究,讨论岩石的构造背景及其与金矿化的关系,进一步完善对排山楼金矿床形成机制的认识。

## 1 区域成矿背景与地质特征

### 1.1 区域成矿背景

排山楼金矿床位于辽宁西部,地处华北克拉通北缘的燕山构造带东段、赤峰—阜新金成矿带东部。而赤峰—阜新金成矿带北部以赤峰—开源断裂为界,与兴蒙造山带相接,东部与郯城—庐江断裂接壤(图 1)。本区先后经历了前寒武纪克拉通基底形成、

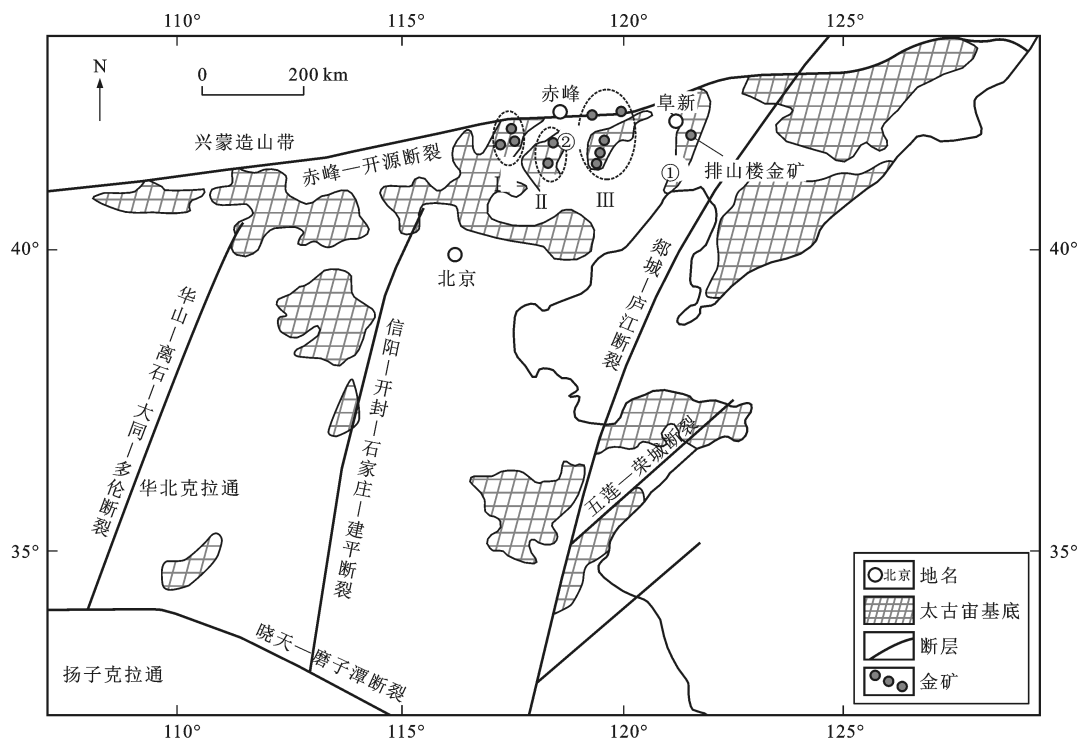
古生代古亚洲洋与华北克拉通碰撞、中生代华北克拉通的破坏与重建等时期。地层主要为太古代建平群及侏罗系—白垩系火山-沉积岩系。区域岩浆活动较为强烈,发育有古太古代以及燕山期两个期次,尤以燕山期岩浆活动普遍强烈<sup>[19]</sup>。古太古代侵入岩广泛出露于研究区东南侧,主要岩性为二长花岗岩及糜棱岩化二长花岗岩;燕山期侵入岩岩石类型主要有二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 $(128 \pm 1.3)$ Ma<sup>[14]</sup>)和花岗闪长岩。区内金矿多发育于太古宙基底之上,与白垩世燕山期侵入岩关系密切<sup>[20]</sup>。

区域构造以晚古生代—早中生代板块碰撞形成的 EW 向深大断裂及晚中生代区域岩石圈伸展拆离背景下产生的 NE 向变质核杂岩为主。韧性剪切构造发育,区域性大巴—后三角山韧性剪切带从区内通过,排山楼金矿床即位于大巴—后三角山韧性剪切带与 EW 向排山楼—侯其营子韧性剪切带的交汇部位<sup>[21-22]</sup>,南部紧邻医巫闾山变质核杂岩。

### 1.2 矿区地质特征

排山楼矿区出露地层为太古代建平群大营子组和中元古界长城系。大营子组为变质岩,在整个矿区广泛分布,主要岩性有黑云斜长片麻岩、斜长片麻岩以及白云质大理岩夹层,在矿区东部受韧性剪切带影响发育带状糜棱岩化,金矿亦赋存于此层。长城系地层主要出露于矿区西北部及东南部,为一套陆源原岩和内源碳酸盐建造,主要岩性为石英砂岩和白云岩;因受 NE 向韧性剪切作用的改造,长城系碳酸盐地层发育不同程度的糜棱岩化。从区域上看,大营子组变质岩地层中 Au 丰度最高,推测其为区内金矿的矿源层<sup>[12]</sup>。

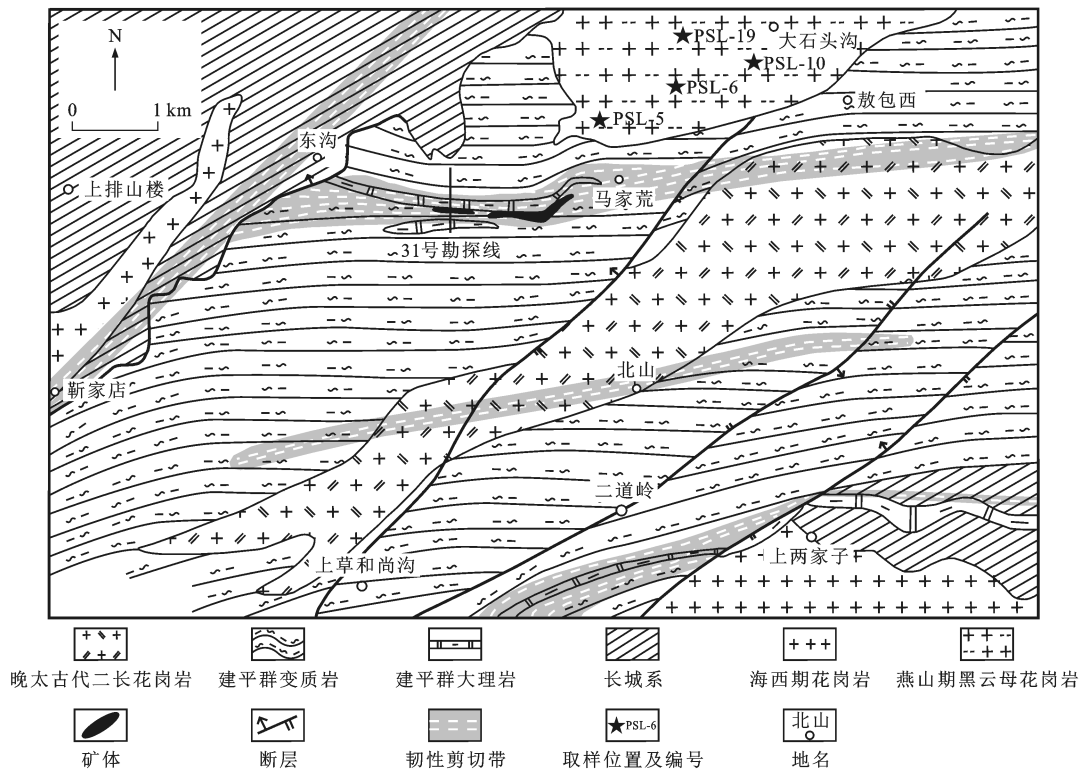
矿区内发育有近 EW 向和 NE 向两组韧性剪切带:前者分布于矿区中部和南部,分别为东沟—马家荒韧性剪切带、北山韧性剪切带、上两家子韧性剪切带;后者分布于矿区西部,为靳家店—排山楼韧性剪切带。排山楼金矿床即赋存于近 EW 向东沟—马家荒韧性剪切带中(图 2)。根据野外观察,近 EW 向韧



I 为红花沟金矿集区; II 为安家营子金矿集区; III 为金厂沟梁金矿集区; ①为医巫闾山变质核杂岩; ②为喀喇沁变质核杂岩;  
图件引自文献[23]

图 1 辽宁排山楼金矿床大地构造位置

Fig. 1 Tectonic Location Map of Paishanlou Au Deposit in Liaoning



图件引自文献[24]

图 2 排山楼金矿床地质图

Fig. 2 Geological Sketch Map of Paishanlou Au Deposit

性剪切带形成时间应早于 NE 向韧性剪切带。

矿区内侵入岩主要分为 3 个期次,分别为中部向东延伸的晚太古代二长花岗岩、西部的海西期花岗岩及北部的燕山期黑云母花岗岩和二长花岗岩。其中,年龄为 128 Ma 的二长花岗岩本身发育了金矿化(Au 品位为  $1.5 \times 10^{-6}$ )<sup>[14]</sup>,本次研究的岩体为排山楼黑云母花岗岩,其出露于矿区北侧,呈 NE 向舌状展布,在地表与矿体未见接触,但于深部切穿矿体所在的糜棱岩带(图 3)。

### 1.3 矿床地质特征

排山楼金矿床产于近 EW 向东沟—马家荒韧性剪切带中,韧性剪切带即为其控矿构造。矿体产在向西北侧伏的矿化带相对厚大部位内,但在矿化带内不连续。矿体围岩为白云质糜棱岩和斜长质糜棱岩。围岩蚀变带以矿体为中心向外依次为黄铁-绢英岩化带、碳酸盐化带和绿泥石化带。与成矿关系密切的蚀变带为黄铁-绢英岩化带和碳酸盐化带,矿体与蚀变带之间没有明显的边界。

该矿床目前已控制矿体 38 条;矿体均产于同一韧性剪切带内。矿石按自然类型分为氧化矿石和原生矿石两类。氧化矿石分布在近地表 10 m 左右;原生矿石分为蚀变长英质糜棱岩型和蚀变黑云斜长

糜棱岩型两种。矿物主要为黄铁矿、自然金,次有黄铜矿、磁黄铁矿、钛铁矿、磁铁矿等。其中,黄铁矿占金属硫化物总量的 95% 左右。在矿石化学组分上,Au 品位一般为  $(1 \sim 3) \times 10^{-6}$ ,平均为  $1.59 \times 10^{-6}$ ,矿石金矿物以自然金为主,另有少量金以碲化物方式产出,如碲金矿。

## 2 样品采集与分析方法

本次研究岩石样品 PSL-5、PSL-6、PSL-10、PSL-19 采自排山楼金矿床北部黑云母花岗岩,样品 PSL-9、PSL-16 采自井下。用于进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的黑云母花岗岩样品编号为 PSL-5。该样品呈灰白色不等粒花岗结构、块状构造,主要矿物成分为石英(体积分数为 30%)、钾长石(正长石、条纹长石)(35%)、斜长石(25%)和黑云母(5%~10%)等(图 4)。

排山楼金矿床黑云母花岗岩样品的主量、微量元素及稀土元素分析测试由澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素含量采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,分析误差小于 1%;稀土、微量元素含量采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定,分析误差小于 5%。

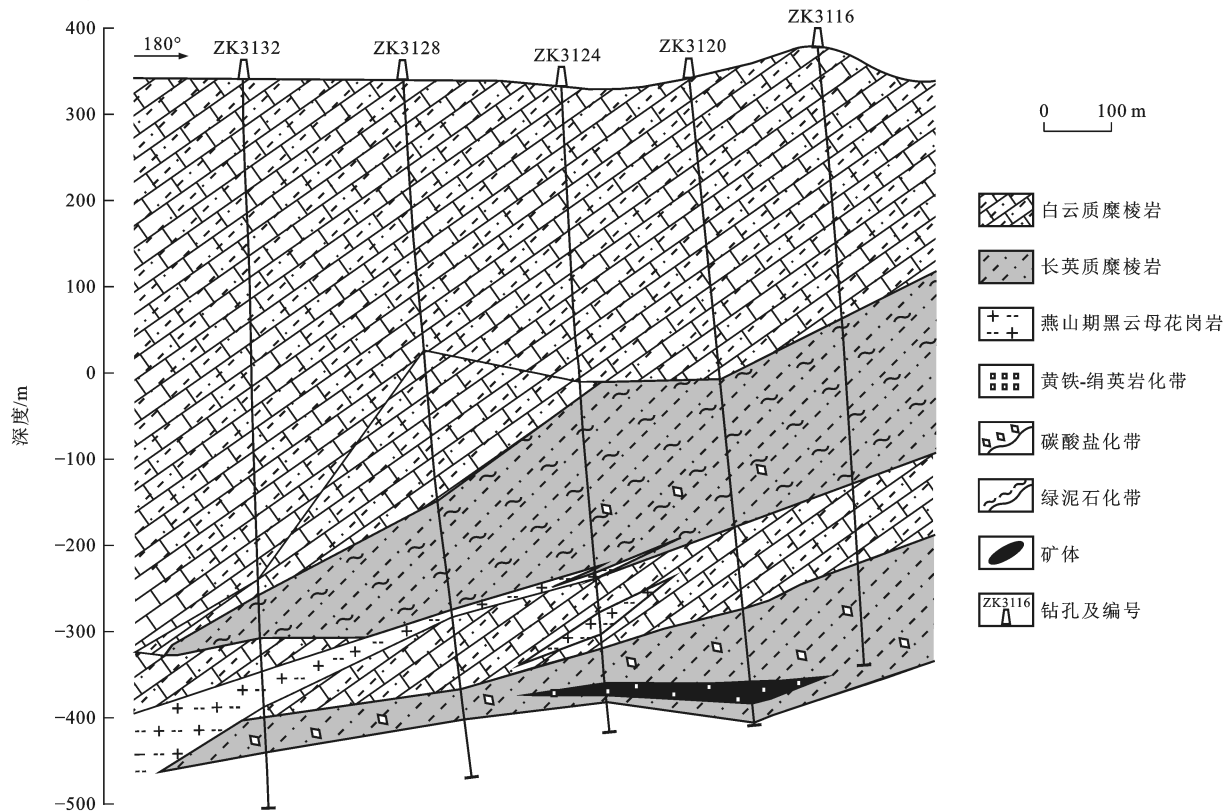


图 3 排山楼金矿床 31 号勘探线剖面

Fig. 3 Section Map of No. 31 Exploration Line in Paishanlou Au Deposit



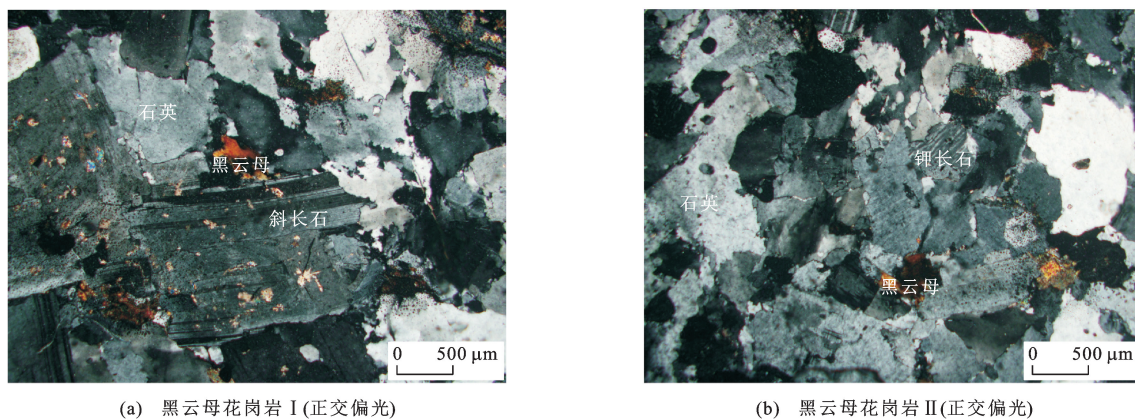


图4 黑云母花岗岩显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of Biotite Granite

进行定年的岩石样品粉碎及锆石挑选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室进行。锆石样靶的制作,对样靶中的锆石进行透射、反射、阴极发光图像采集以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年均在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成。利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀取样,激光束直径为 50  $\mu\text{m}$ ,信号采集时间为 60 s(有 20 s 为空白的测定)。激光剥蚀物质用氦气为载气送入 Neptune 型等离子质谱仪(LA-ICP-MS)进行锆石 U-Pb 定年。锆石 U-Pb 年龄计算采用国际标准锆石 TEMORA(年龄为 416.8 Ma)作为外标,采用 ICP-MS DataCal 程序和 ISOPLOT 程序进行数据处理。

### 3 结果分析

#### 3.1 主量元素特征

排山楼金矿床黑云母花岗岩富 Si,  $\text{SiO}_2$  含量(质量分数,下同)为 66.1%~74.3%(表 1)。在侵入岩 TAS 图解上,除 1 个样品落入石英二长岩区外,其余均落入花岗岩区域内[图 5(a)];结合镜下钾长石和斜长石的相对含量及暗色矿物含量,将其定名为黑云母二长花岗岩。 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量较高,均大于 4%, $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})$  值为 0.923~1.030,里特曼指数为 2.44~3.25,低于 3.30,岩石为钙碱性系列。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解上,样品亦落入高钾钙碱性岩石系列[图 5(b)]。样品贫铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.40%~15.35%), $A/\text{CNK}$  值为 0.953~1.030,介于准铝质和过铝质之间,属准铝质—弱过铝质岩石系列[图 5(c)]。在  $\text{SiO}_2$ -Zr 图解上,样品落入 I 型花岗岩区域[图 5(d)]。此外, $\text{Na}_2\text{O}$  含量高于 3.2%, $A/\text{CNK}$  值低于 1.1 以及  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2$  含

量之间的负相关性均体现了黑云母花岗岩具有 I 型花岗岩的成因特点。

#### 3.2 稀土、微量元素特征

排山楼金矿床黑云母花岗岩稀土元素总含量( $(23.81\sim255.16)\times10^{-6}$ ,平均为  $121.6\times10^{-6}$ )较低,轻稀土元素相对富集,重稀土元素亏损严重且分异不明显( $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$  值为 14.36~35.50),中稀土元素(Dy、Ho、Er)相对亏损,轻、重稀土元素分馏强烈( $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值为 10.68~69.96),表现出弱的负 Eu 异常(0.76~0.86)(表 1)。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式上,样品表现为轻稀土元素右倾较陡,重稀土元素右倾较缓,中稀土元素部分有明显下凹[图 6(a)]。一般认为 Eu 倾向于进入结晶的斜长石中,因此, Eu 亏损表明在岩浆演化过程中发生过斜长石的结晶分离或在部分熔融过程中有斜长石残留在源区。重稀土元素亏损则暗示源区可能有石榴石存在。

从图 6(a)可以看出,黑云母花岗岩重稀土元素含量和配分模式与金矿石较吻合,而轻稀土元素含量则发生明显分化。样品 PSL-10、PSL-19 轻稀土元素与金矿石含量基本相近,较样品 PSL-5、PSL-6 轻稀土元素含量有明显增加,不排除其与金矿石的形成或有部分联系。

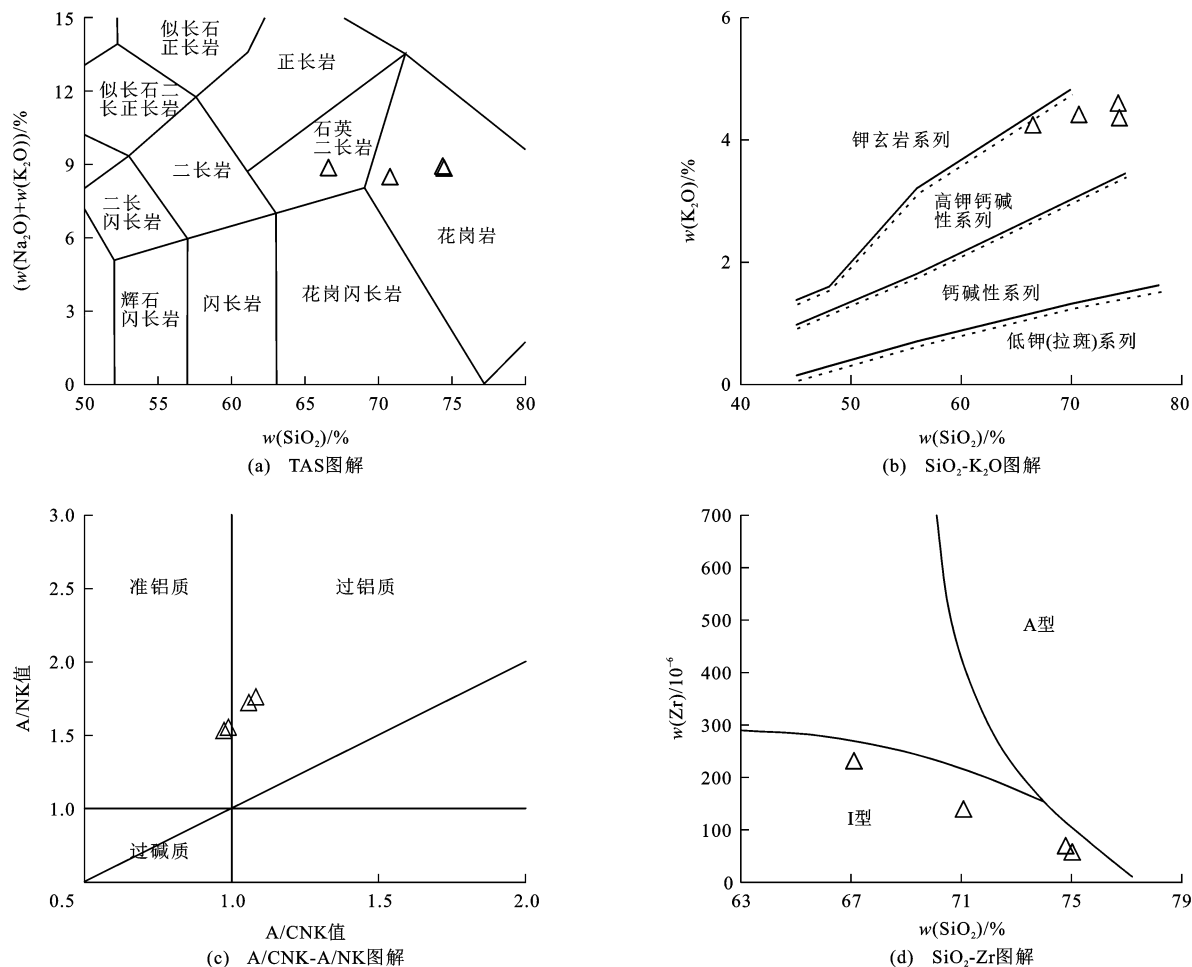
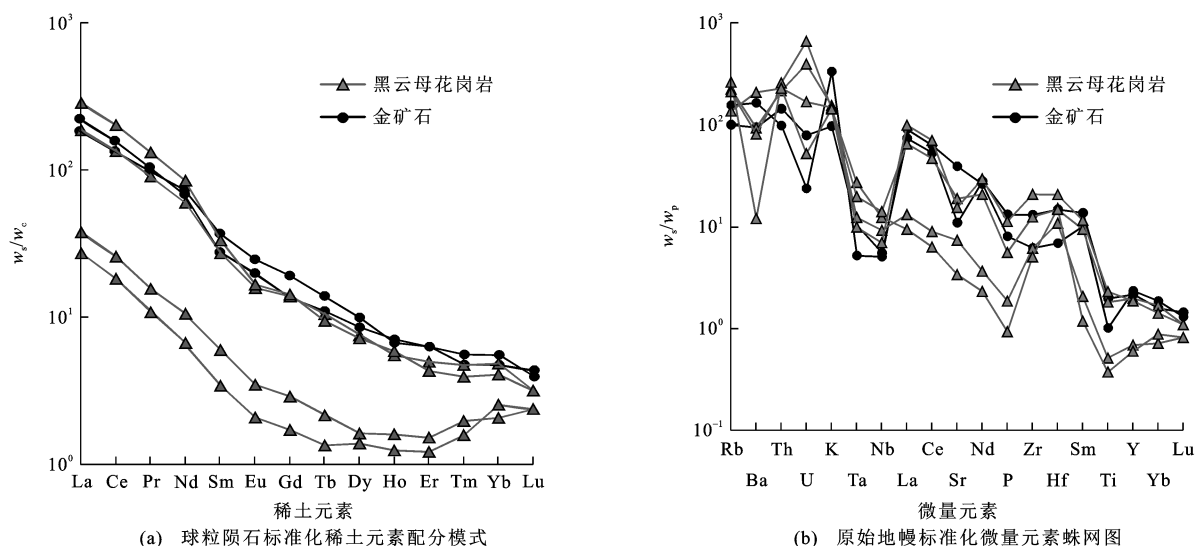
从图 6(b)可以看出,黑云母花岗岩富集大离子亲石元素(Rb、K)和部分元素化学性质活泼的高场强元素(Th、U),相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P、Sr、Yb 含量较低,这表明黑云母花岗岩在微量元素地球化学特征上与活动大陆边缘岩浆岩具有亲缘性。样品中 K、Rb、Th 富集的特点说明岩浆在上升过程中受地壳物质混染,而 Nb、Ta、Ti 亏损说明岩浆受到地壳物质混染或岩浆源区残留金红石和钛铁

表 1 黑云母花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major, Trace and Rare Earth Elements of Biotite Granite

岩(矿)石类型	黑云母花岗岩				矿化斜长糜棱岩(金矿石)	
样品编号	PSL-5	PSL-6	PSL-10	PSL-19	PSL-9	PSL-16
$w(\text{SiO}_2)/\%$	74.2	74.3	70.8	66.1	64.7	55.0
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	13.75	13.40	14.55	15.35	14.75	12.70
$w(\text{CaO})/\%$	1.07	1.14	1.72	1.60	2.51	5.34
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	0.91	1.07	2.54	4.27	3.58	6.55
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	4.59	4.31	4.40	4.20	2.77	9.34
$w(\text{MgO})/\%$	0.27	0.24	0.99	1.69	2.71	2.80
$w(\text{MnO})/\%$	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04	0.09
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	4.27	4.45	4.06	4.53	6.09	0.99
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.04	0.02	0.12	0.24	0.27	0.16
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.11	0.08	0.39	0.49	0.40	0.20
烧失量/%	0.54	0.74	0.41	0.74	2.34	4.41
$w_{\text{total}}/\%$	99.76	99.77	100.02	99.25	100.16	97.58
A/CNK 值	0.986	0.953	0.999	1.030	0.839	0.592
里特曼指数	2.51	2.44	2.57	3.25	3.54	7.62
$w(\text{Au})/10^{-6}$	0.003	0.016	0.014	0.006	1.155	3.150
$w(\text{La})/10^{-6}$	8.9	6.4	44.1	67.3	47.9	58.7
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	15.7	11.1	81.9	123.0	89.0	105.5
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	1.47	1.02	8.55	12.45	9.83	10.60
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	4.9	3.1	27.8	39.4	35.8	33.4
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	0.91	0.52	4.14	5.06	5.72	4.22
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.20	0.12	0.91	0.96	1.42	1.13
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	0.59	0.35	2.83	2.92	3.84	2.67
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.08	0.05	0.39	0.35	0.50	0.39
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	0.41	0.35	1.90	1.81	2.38	2.03
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.09	0.07	0.31	0.33	0.35	0.37
$w(\text{Er})/10^{-6}$	0.25	0.20	0.82	0.71	0.96	0.96
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.05	0.04	0.12	0.10	0.11	0.13
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	0.35	0.43	0.82	0.69	0.73	0.86
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.06	0.06	0.08	0.08	0.10	0.09
$w(\text{Y})/10^{-6}$	3.1	2.7	8.9	8.4	9.2	10.0
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	140.5	164.5	132.5	85.4	60.2	94.0
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	643.0	83.1	561.0	1 435.0	625.0	1 090.0
$w(\text{Th})/10^{-6}$	18.05	21.60	19.20	19.15	11.60	7.91
$w(\text{U})/10^{-6}$	8.16	13.65	3.48	1.08	1.57	0.47
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.5	1.1	0.8	0.4	0.4	0.2
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	6.5	8.7	9.9	4.9	3.7	3.4
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	15.7	11.1	81.9	123.0	89.0	105.5
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	153.5	70.7	394.0	322.0	217.0	780.0
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	4.9	3.1	27.8	39.4	35.8	33.4
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	68	56	138	230	138	65
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	3.3	4.6	4.5	6.3	4.3	2.0
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	0.91	0.52	4.14	5.06	5.72	4.22
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	33.96	23.81	174.67	255.16	198.64	221.05
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	32.08	22.26	167.40	248.17	189.67	213.55
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	1.88	1.55	7.27	6.99	8.97	7.50
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	17.06	14.36	23.03	35.50	21.14	28.47
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	18.24	10.68	38.58	69.96	47.07	48.96
Eu 异常	0.83	0.86	0.81	0.76	0.87	0.96
Ce 异常	1.06	1.07	1.03	1.04	0.95	0.96

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; $w_{\text{total}}$ 为主量元素总含量; $w_{\text{REE}}$ 为稀土元素总含量; $w_{\text{LREE}}$ 为轻稀土元素总含量; $w_{\text{HREE}}$ 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。

图5 黑云母花岗岩 TAS 图解、 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解、A/CNK-A/NK 图解和  $\text{SiO}_2\text{-Zr}$  图解Fig. 5 Diagrams of TAS,  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ , A/CNK-A/NK and  $\text{SiO}_2\text{-Zr}$  of Biotite Granite

$w_s$  为样品含量;  $w_c$  为球粒陨石含量;  $w_p$  为原始地幔含量; 球粒陨石标准化和原始地幔标准化数据引自文献[25];

同一图中相同线条对应不同样品

图6 黑云母花岗岩和金矿石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

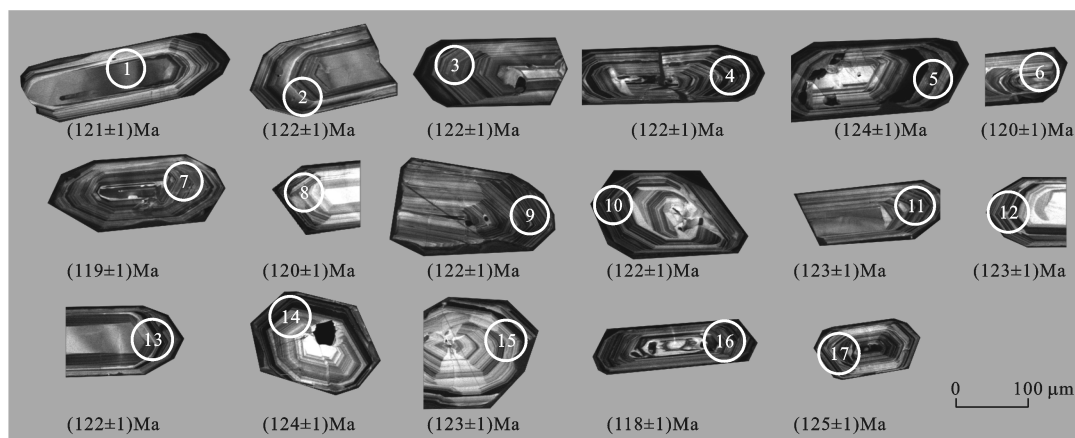
Fig. 6 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram of Biotite Granite and Gold Ore

矿等富 Nb、Ta、Ti 的矿物。以上微量元素特征均暗示了地壳物质在排山楼金矿床黑云母花岗岩成岩过程中起到不可忽视的作用。

### 3.3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

排山楼金矿床黑云母花岗岩中锆石粒度为 100~300  $\mu\text{m}$ , 绝大多数为半自形长柱状或粒状, 可见清晰的岩浆震荡生长环带, 其锆石阴极发光图像见图 7。17 个分析点 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据有较

好的谐和性(表 2)。样品  $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$  表面年龄为 118~125 Ma,  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值为 0.481 9~1.021 1, 大于 0.4, 锆石为典型岩浆成因<sup>[26-28]</sup>。黑云母花岗岩 17 个分析点落入谐和曲线及其附近[图 8(a)]; 锆石  $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$  加权平均年龄为  $(121.8 \pm 1.1)$  Ma, 平均标准权重偏差(MSWD)为 3.1[图 8(b)], 该年龄代表黑云母花岗岩的冷却结晶年龄, 属早白垩世燕山晚期。



锆石来自样品 PSL-5

图 7 黑云母花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 7 CL Images of Zircons of Biotite Granite

表 2 黑云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Tab. 2 Analysis Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Biotite Granite

分析点	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
PSL. 5. 1	0.634 2	$0.137 5 \pm 0.004 0$	$0.019 0 \pm 0.000 2$	$131 \pm 4$	$121 \pm 1$
PSL. 5. 2	0.532 6	$0.138 5 \pm 0.006 9$	$0.019 1 \pm 0.000 2$	$132 \pm 7$	$122 \pm 1$
PSL. 5. 3	0.673 1	$0.137 1 \pm 0.007 9$	$0.019 0 \pm 0.000 2$	$130 \pm 8$	$122 \pm 1$
PSL. 5. 4	0.662 0	$0.128 2 \pm 0.004 0$	$0.019 1 \pm 0.000 2$	$122 \pm 4$	$122 \pm 1$
PSL. 5. 5	0.716 9	$0.136 2 \pm 0.004 8$	$0.019 4 \pm 0.000 2$	$130 \pm 5$	$124 \pm 1$
PSL. 5. 6	0.500 1	$0.123 9 \pm 0.006 6$	$0.018 7 \pm 0.000 2$	$119 \pm 6$	$120 \pm 1$
PSL. 5. 7	0.734 1	$0.135 0 \pm 0.005 7$	$0.018 7 \pm 0.000 2$	$129 \pm 5$	$119 \pm 1$
PSL. 5. 8	0.612 7	$0.128 2 \pm 0.006 6$	$0.018 8 \pm 0.000 2$	$122 \pm 6$	$120 \pm 1$
PSL. 5. 9	1.021 1	$0.127 6 \pm 0.005 2$	$0.019 1 \pm 0.000 2$	$122 \pm 5$	$122 \pm 1$
PSL. 5. 10	0.656 9	$0.128 5 \pm 0.007 1$	$0.019 1 \pm 0.000 2$	$123 \pm 7$	$122 \pm 1$
PSL. 5. 11	0.584 3	$0.134 9 \pm 0.012 7$	$0.019 2 \pm 0.000 2$	$129 \pm 12$	$123 \pm 1$
PSL. 5. 12	0.554 2	$0.138 7 \pm 0.005 4$	$0.019 3 \pm 0.000 2$	$132 \pm 5$	$123 \pm 1$
PSL. 5. 13	0.481 9	$0.138 3 \pm 0.005 8$	$0.019 1 \pm 0.000 2$	$132 \pm 5$	$122 \pm 1$
PSL. 5. 14	0.597 9	$0.137 2 \pm 0.006 4$	$0.019 5 \pm 0.000 2$	$131 \pm 6$	$124 \pm 1$
PSL. 5. 15	0.585 0	$0.132 2 \pm 0.003 4$	$0.019 3 \pm 0.000 2$	$126 \pm 3$	$123 \pm 1$
PSL. 5. 16	0.586 2	$0.135 9 \pm 0.003 0$	$0.018 5 \pm 0.000 1$	$129 \pm 3$	$118 \pm 1$
PSL. 5. 17	0.562 0	$0.132 7 \pm 0.004 6$	$0.019 6 \pm 0.000 2$	$127 \pm 4$	$125 \pm 1$

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

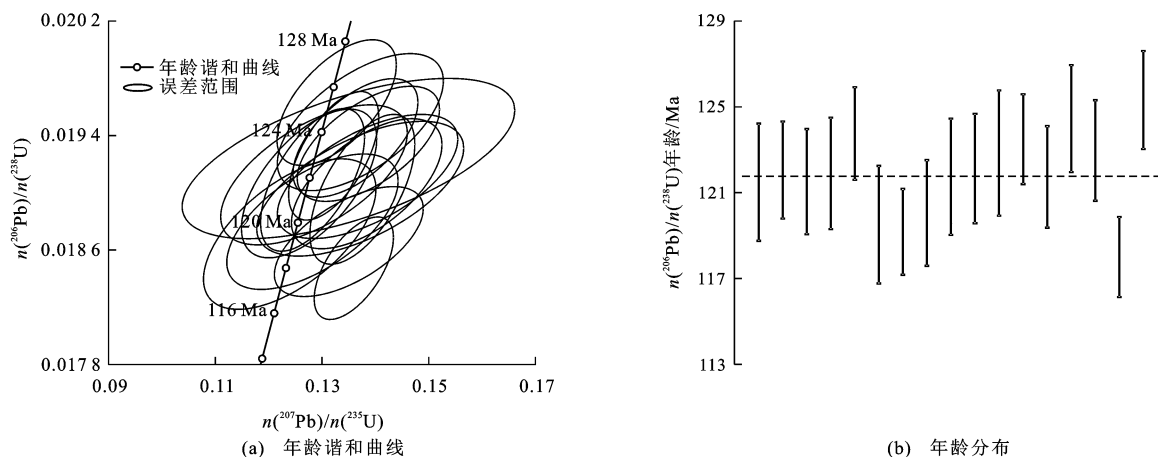
## 4 讨 论

### 4.1 岩石成因

排山楼金矿床黑云母花岗岩高 K( $\text{K}_2\text{O}$  含量为

4.20%~4.59%)、高碱( $w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O})$  值为 8.46~8.88)、贫 Al(A/CNK 值低于 1.1), 具有高钾钙碱性岩石和 I 型花岗岩的地球化学特征; 稀土元素总含量较高, 相对富集轻稀土元素, 亏损中、重





锆石来自样品 PSL-5

图8 黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和曲线及年龄分布

Fig. 8 Zircon U-Pb Concordia Diagram and Distribution of Ages of Biotite Granite

稀土元素; $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值为7.9~13.0(平均为11.3),接近大陆地壳平均值(11)<sup>[29]</sup>,低于地幔平均值(17.5)<sup>[28]</sup>;K、Rb、Th、U等富集,Nb、Sr、P等亏损。以上特征均暗示其与地壳物质的联系。

刘红涛等认为,华北克拉通北缘的中生代花岗岩类可划分为钙碱性和高钾钙碱性花岗岩、强过铝质淡色花岗岩、高锆花岗岩、碱质A型花岗岩和碱性花岗岩5个类型<sup>[30]</sup>。分布于冀东—辽西地区的高钾钙碱性花岗岩岩石侵位时间从印支期延续至燕山晚期;主要岩石类型为碱长和二长花岗岩;岩石地球化学特征表现为富K、贫Na、低Al;岩石轻、重稀土元素分馏强烈,中稀土元素相对亏损,大离子亲石元素富集,高场强元素亏损。排山楼金矿床黑云母花岗岩在分布位置、侵入时代、岩性特征等方面均与高钾钙碱性花岗岩特征相吻合;在岩石地球化学属性方面,除 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量稍高于高钾钙碱性花岗岩之外,其余属性均与其有可比性,因而可归于该类型花岗岩。王季亮等对高钾钙碱性花岗岩初始Sr同位素比值和氧同位素组成进行研究,认为下地壳物质是华北克拉通中生代高钾钙碱性花岗岩成岩的主要来源,同时有明显的地幔物质参与该类型花岗岩的形成<sup>[31]</sup>。综上所述,排山楼金矿床黑云母花岗岩成因应属于俯冲的地壳物质部分熔融,并有地幔物质参与。

#### 4.2 成岩成矿时代

对于排山楼金矿床北部花岗岩体的成岩年龄,孙守恪等对其中二长花岗岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,得到形成年龄为 $(128.3 \pm 1.3) \text{ Ma}$ <sup>[14]</sup>。本次对黑云母花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,获得 $(121.8 \pm 1.1) \text{ Ma}$ 的成岩年龄,其略晚于二长

花岗岩年龄,可看作处于同一时代岩浆活动的产物。

排山楼金矿床黑云母花岗岩岩体北临控矿韧性剪切带,岩体边部的岩枝侵入到赋矿糜棱岩带中(图3)。孙守恪等在矿井内直接观测到二长花岗岩边部岩枝与矿体相互切穿,且二长花岗岩本身发育热液蚀变及金矿化(Au含量为 $1.29 \times 10^{-6}$ )<sup>[14]</sup>。Zhang等测得金矿石黄铁矿Pb同位素组成分别为 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 16.40 \sim 17.00$ ,  $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 15.21 \sim 15.37$ ,  $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 36.69 \sim 37.38$ <sup>[10,32]</sup>。这一结果与斜长质围岩(15.15~15.62、15.11~15.27和35.61~38.45)、白云质围岩(17.73~18.20、15.39~15.47和37.76~38.42)<sup>[10,32]</sup>及二长花岗岩(16.67~16.76、15.27~15.29和36.77~36.84)的Pb同位素组成<sup>[14]</sup>基本一致,暗示成矿物质与围岩、早白垩世花岗岩在物源上的亲缘性,即金矿化与围岩、早白垩世花岗岩均有一定联系。

排山楼金矿床的矿化构造系统受韧性剪切带密切控制,但对于成矿时代,主要分为两个观点:古元古代和白垩纪。对于古元古代成矿的观点,李俊建等认为金矿成因与EW向韧性剪切带相关,对EW向韧性剪切带中的石英测得 $(2105.2 \pm 10.4) \text{ Ma}$ 的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄,其成矿时代应在古元古代<sup>[17]</sup>,曲亚军等赞同此观点<sup>[9,12,16]</sup>;对于白垩纪成矿的观点,罗镇宽等对成矿前后的岩脉进行SHRIMP锆石U-Pb定年,得到其成矿时间为124~126 Ma<sup>[13]</sup>;王荣湖等对矿化阶段形成的钾长石进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年,得出年龄为116~126 Ma,矿床形成时间不早于 $(126.70 \pm 2.03) \text{ Ma}$ <sup>[18]</sup>;Zhang等对含有与金矿成矿温度相同的流体包裹体NE向韧性剪切带中的黑云母进行

$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年, 得出年龄为  $(126.6 \pm 1.1)\text{Ma}$ , 并认为金矿成矿与此年龄联系密切<sup>[10]</sup>; 倪金龙等将排山楼金矿床韧性剪切带演化过程分为约 219、约 160、120~130 Ma 等 3 期, NE 向韧性剪切带形成时期为 120~130 Ma, 并认为 NE 向韧性剪切与拆离伸展运动可能直接导致排山楼金矿床的形成<sup>[24]</sup>; 除此之外, 孙守恪等认为金矿化主体形成于白垩纪 (120 Ma 左右), 但可能有更早期次金矿化发生<sup>[14]</sup>。

张晓晖等对 EW 向韧性剪切带中糜棱岩的含钾矿物进行测试, 获得韧性剪切带的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为  $(219 \pm 4)\text{Ma}$ <sup>[22]</sup>。由于不确定李俊建等所取石英与 EW 向韧性剪切带形成的先后关系<sup>[17]</sup>, 所以这一年龄的准确性值得商榷。张晓晖等所取样品的年龄谱特征基本无扰动<sup>[22]</sup>, 是一次构造事件的年龄, 因此, 219 Ma 更适合代表 EW 向韧性剪切带的形成年龄<sup>[24]</sup>。基于此, 笔者认为古元古代成矿的观点仍需商榷。支持燕山期成矿的学者所获得的年龄均接近黑云母花岗岩的形成时间 (121.8 Ma), 而这一时期正与研究区所在的中国东部大规模构造热事件和华北克拉通北缘的一系列金矿成矿时间相符<sup>[3-5, 23, 33-35]</sup>, 岩石圈地壳的伸展减薄、区域韧性剪切构造的形成及深部岩浆上侵在这一时期尤为强烈。

综上所述, 本文更倾向于燕山期成矿的观点。在宏观关系上, 控矿韧性剪切带的形成应早于黑云母花岗岩, 但由于几乎同时代的二长花岗岩发育金矿化, 暗示着在这一时期仍存在金矿化, 所以笔者推测金矿化主要发生在早白垩世晚期 (约 125 Ma), 但控矿韧性剪切带在更早时期已经形成, 并且不排除有更早期金的富集及矿化作用。这一点亦与韧性剪切带型金矿成矿经历深部韧性变形  $\rightarrow$  Au 活化  $\rightarrow$  沿

韧性剪切带运移  $\rightarrow$  成矿而产生滞后性<sup>[36-37]</sup> 的客观地质过程相吻合。

#### 4.3 成岩成矿构造环境

排山楼金矿床黑云母花岗岩主量、微量元素地球化学特征均显示其符合活动大陆边缘花岗岩的地球化学属性。在 Yb+Ta-Rb 和 Y+Nb-Rb 构造环境判别图解上, 样品落入火山弧花岗岩构造环境区域 (图 9)。

在花岗岩研究中, Sr、Yb 含量是两个非常有意义的地球化学指标。张旗等按照 Sr、Yb 含量 (Sr 为  $400 \times 10^{-6}$ , Yb 为  $2 \times 10^{-6}$ ) 将花岗岩划分为 4 类: 高 Sr 低 Yb 型、低 Sr 低 Yb 型、高 Sr 高 Yb 型、低 Sr 高 Yb 型<sup>[38]</sup>。其中, 低 Sr 低 Yb 型花岗岩 (Sr 含量低于  $400 \times 10^{-6}$ , Yb 低于  $2 \times 10^{-6}$ ) 地球化学特征与排山楼金矿床黑云母花岗岩地球化学特征相吻合, 主要表现在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.40%~15.35%,  $\text{K}_2\text{O}$  高于 4.2%, Sr 低于  $400 \times 10^{-6}$ , Yb 低于  $2 \times 10^{-6}$ , Y 低于  $17 \times 10^{-6}$ , 呈弱的负 Eu 异常, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 中稀土元素亏损强于重稀土元素, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式呈中间下凹式。一般来说, 花岗岩 Sr、Yb 含量主要受花岗岩熔融源区温压条件的控制, 因而由 Sr、Yb 含量可反推花岗岩源区条件。Xiong 等研究表明, 低 Sr 低 Yb 型岩浆在 0.8~1.3 GPa 和 700 °C~800 °C 的温压条件下形成<sup>[39]</sup>, 相对应的形成深度在 40 km 左右<sup>[40]</sup>。

排山楼金矿床北部与黑云母花岗岩临近的二长花岗岩因富 Sr (含量为  $(484 \sim 551) \times 10^{-6}$ , 平均为  $512 \times 10^{-6}$ )、高  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  值 (66~77), 被认为是加厚地壳 (厚度大于 50 km) 的产物<sup>[14]</sup>。因此, 排山楼金矿床的地壳厚度在 121~128 Ma 从大于

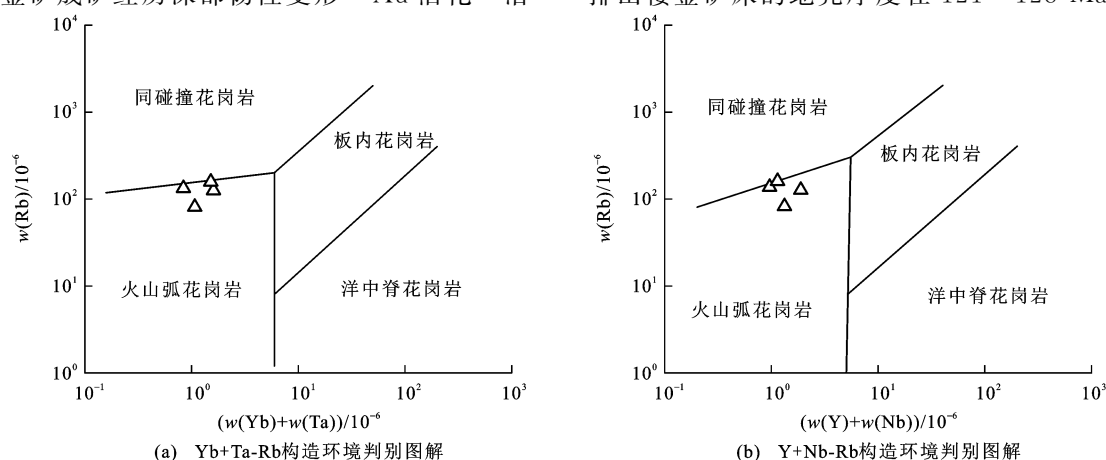


图 9 黑云母花岗岩 Yb+Ta-Rb 和 Y+Nb-Rb 构造环境判别图解

Fig. 9 Tectonic Environment Discrimination Diagrams of Yb+Ta-Rb and Y+Nb-Rb of Biotite Granite

50 km减薄至40 km左右,而这与该时期华北克拉通北部处于从挤压到伸展的地壳减薄过程<sup>[41-46]</sup>的观点相符。

排山楼金矿床位于华北克拉通北缘。晚三叠世—晚侏罗世期间,古亚洲洋闭合后华北克拉通北缘受到强烈的挤压变形,岩石圈也因板块间的俯冲碰撞而增厚<sup>[47-48]</sup>。早白垩世期间(100~130 Ma),华北克拉通经历了由挤压到伸展的巨大转折<sup>[49-50]</sup>,导致加厚岩石圈拆沉减薄。岩石圈拆沉引发软流圈物质上涌,与下地壳岩石发生混合作用形成大量岩浆,产生广泛的岩浆活动;岩石圈伸展的高峰期,大量深部地壳的变质岩或侵入岩上升出露形成变质核杂岩,区域伸展作用也为深部岩浆形成与侵位提供了必要的通道与构造条件。排山楼金矿床黑云母花岗岩及其他早白垩世酸性侵入岩可看作岩石圈拆沉减薄过程中的产物;EW向韧性剪切带、医巫闾山变质核杂岩的就位可看作岩石圈伸展过程中的产物<sup>[51-55]</sup>。

综上所述,排山楼金矿床的成矿机制与华北岩石圈的减薄及华北克拉通的破坏存在直接关系。在区域伸展的地球动力学背景下,加厚岩石圈减薄,华北克拉通发生破坏,导致强烈的构造地质作用和岩浆活动。在此特殊背景下,韧性剪切作用导致太古代建平群中的成矿元素发生活化、迁移和富集,从而形成排山楼金矿床。

## 5 结 语

(1)辽宁排山楼金矿床黑云母花岗岩地球化学特征属于I型高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质花岗岩。其微量、稀土元素特征表明其有壳源特征,同位素分析指示成岩有地幔物质参与,为地壳减薄背景下壳幔混合熔融产物。

(2)与金矿成矿关系密切的黑云母花岗岩形成时代为早白垩世( $121.8 \pm 1.1$  Ma),与金矿成矿为同一地球动力学背景下的不同表现,由此推测排山楼金矿床的成矿时代大致为早白垩世晚期。

(3)排山楼金矿床形成于华北克拉通区域伸展的构造背景下,板块拼贴造成的加厚地壳发生剧烈减薄作用,引发了大量构造-热事件。其导致的韧性剪切作用活化了矿源层Au元素,形成了韧性剪切带型矿床。

## 参考文献:

## References:

[1] 许文良,王清海,王冬艳,等. 华北克拉通东部中生代

岩石圈减薄的过程与机制:中生代火成岩和深源捕虏体证据[J]. 地学前缘,2004,11(3):309-317.

XU Wen-liang, WANG Qing-hai, WANG Dong-yan, et al. Processes and Mechanism of Mesozoic Lithospheric Thinning in Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic Igneous Rocks and Deep-seated Xenoliths[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 309-317.

[2] 王建平,刘永山,董法宪,等. 内蒙古金厂沟梁金矿构造控矿分析[M]. 北京:地质出版社,1992.

WANG Jian-ping, LIU Yong-shan, DONG Fa-xian, et al. Study on Ore-controlling Tectonics of Jinchanggouliang Gold Deposit in Inner Mongolia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.

[3] 庞奖励. 二道沟矿床绢云母的<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar年龄及其地质意义[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,1999,27(1):103-107.

PANG Jiang-li. <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar Age of Sericite in Erdaogou Deposit and Its Geological Significance[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 1999, 27(1): 103-107.

[4] 李永刚,翟明国,杨进辉,等. 内蒙古赤峰安家营子金矿成矿时代以及对华北中生代爆发成矿的意义[J]. 中国科学:D辑,地球科学,2003,33(10):960-966.

LI Yong-gang, ZHAI Ming-guo, YANG Jin-hui, et al. Gold Mineralization Age of the Anjiayingzi Gold Deposit in Chifeng County, Inner Mongolia, and Implications for Mesozoic Metallogenic Explosion in North China[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2003, 33(10): 960-966.

[5] 苗来成,范蔚茗,翟明国,等. 金厂沟梁—二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针U-Pb年代学及意义[J]. 岩石学报,2003,19(1):71-80.

MIAO Lai-cheng, FAN Wei-ming, ZHAI Ming-guo, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of the Granitoid Intrusions from Jinchanggouliang-Erdaogou Gold Orefield and Its Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(1): 71-80.

[6] FU L B, WEI J H, CHEN H Y, et al. The Relationship Between Gold Mineralization, Exhumation of Metamorphic Core Complex and Magma Cooling: Formation of the Anjiayingzi Au Deposit, Northern North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73(2): 222-240.

[7] 陈井胜,彭艳东,刘 森,等. 辽西建平烧锅营子金矿花岗岩的锆石U-Pb年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质,2016,43(1):395-409.

CHEN Jing-sheng, PENG Yan-dong, LIU Miao, et al.

- Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Pluton in the Shaoguoyingzi Gold Ore Deposit in Jianping, Western Liaoning[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 395-409.
- [8] 杨仲杰. 华北板块北缘中段新太古界小塔子沟岩组恢复及其地质意义[J]. *世界地质*, 2016, 35(1): 133-141.
- YANG Zhong-jie. Recovery of New Archean Xiaotazigou Rock Group in Middle Sector of Northern Margin of North China Plate and Its Geological Implications[J]. *Global Geology*, 2016, 35(1): 133-141.
- [9] 曲亚军, 高殿生, 贾云伟, 等. 排山楼金矿床的蚀变特征[J]. *辽宁地质*, 1992(1): 45-52.
- QU Ya-jun, GAO Dian-sheng, JIA Yun-wei, et al. Alteration Characteristics of Paishanlou Gold Deposit, West Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, 1992(1): 45-52.
- [10] ZHANG X H, LIU Q, MA Y J, et al. Geology, Fluid Inclusions, Isotope Geochemistry, and Geochronology of the Paishanlou Shear Zone-hosted Gold Deposit, North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2005, 26(3/4): 325-348.
- [11] 陈冲, 魏俊浩, 付乐兵. 韧性剪切带型金矿床地质特征研究: 以辽宁排山楼金矿床与广东河台金矿床为例[J]. *黄金*, 2013, 34(10): 12-16.
- CHEN Chong, WEI Jun-hao, FU Le-bing. Geological Characteristics Study of the Ductile Shear Zone Type of Gold Deposits: With Paishanlou Gold Deposit and the Hetai Gold Deposit as Examples[J]. *Gold*, 2013, 34(10): 12-16.
- [12] 曲亚军, 高殿生. 排山楼金矿床地质特征及金质来源[J]. *辽宁地质*, 1990(4): 304-313.
- QU Ya-jun, GAO Dian-sheng. Genesis and Geological Characteristics of Gold Deposits at Paishanlou in West Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, 1990(4): 304-313.
- [13] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. *地球化学*, 2001, 30(5): 483-490.
- LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, GUAN Kang, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Age of Magmatic Rock in Paishanlou Gold Mine District, Fuxin, Liaoning Province, China[J]. *Geochimica*, 2001, 30(5): 483-490.
- [14] 孙守恪, 刘红涛, 褚少雄. 辽宁省排山楼矿区二长花岗岩成因及其与金矿化的关系[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 607-618.
- SUN Shou-ke, LIU Hong-tao, CHU Shao-xiong. Origin of the Paishanlou Monzogranite in Liaoning Province and Its Genetic Connection with Gold Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 607-618.
- [15] 贾三石, 王恩德, 付建飞, 等. 辽西排山楼金矿床微量元素地球化学特征及深部找矿预测研究[J]. *地球化学*, 2011, 40(3): 266-279.
- JIA San-shi, WANG En-de, FU Jian-fei, et al. Geochemical Characteristics of Trace Elements and Deep Prediction of the Paishanlou Gold Deposit, Fuxin, Western Liaoning[J]. *Geochimica*, 2011, 40(3): 266-279.
- [16] 骆辉, 赵运起. 辽宁阜新排山楼金矿地质和成矿作用[J]. *前寒武纪研究进展*, 1997, 20(4): 13-24.
- LUO Hui, ZHAO Yun-qi. Geology and Mineralization of Paishanlou Gold Deposit in Fuxin, Liaoning Province[J]. *Progress in Precambrian Research*, 1997, 20(4): 13-24.
- [17] 李俊建, 沈保丰, 骆辉, 等. 辽宁阜新排山楼金矿的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  成矿年龄[J]. *地质科学*, 2001, 36(1): 107-111.
- LI Jun-jian, SHEN Bao-feng, LUO Hui, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Metallogenic Age of Paishanlou Gold Deposit in Fuxin, Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(1): 107-111.
- [18] 王荣湖, 金成洙, 李景春. 排山楼金矿床  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(10): 1482-1485.
- WANG Rong-hu, JIN Cheng-shu, LI Jing-chun.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  Isotopic Dating for Paishanlou Gold Deposit and Its Geological Implication[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2008, 29(10): 1482-1485.
- [19] 李达, 韩雪梅. 排山楼金矿地质特征及成矿模式初探[J]. *贵金属地质*, 1995, 4(2): 109-117.
- LI Da, HAN Xue-mei. Geological Characteristics and Metallogenic Model of Gold Deposits at Paishanlou[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 1995, 4(2): 109-117.
- [20] 付乐兵. 华北克拉通北缘赤峰-朝阳地区中生代构造岩浆演化与金成矿[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- FU Le-bing. The Mesozoic Tectonic-magmatic Evolution Process and Gold Metallogenesis in Chifeng-Chaoyang Region, Northern North China Craton[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [21] 王汉霞, 李世涛. 辽宁西部两条大型韧性剪切带及其地质意义[J]. *辽宁地质*, 1988(3): 235-244.
- WANG Han-xia, LI Shi-tao. Two Large-scale Ductile Shear Zone in Western Liaoning and Their Geological Significance[J]. *Liaoning Geology*, 1988(3): 235-244.
- [22] 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 辽西医巫闾山两条韧性剪切



- 带的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄:中生代构造热事件的年代学约束[J]. 科学通报, 2002, 47(9): 697-701.
- ZHANG Xiao-hui, LI Tie-sheng, PU Zhi-ping.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Thermochronology of Two Ductile Shear Zones from Yiwulushan, West Liaoning Region: Age Constraints on the Mesozoic Tectonic Events[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(9): 697-701.
- [23] YANG J H, WU F Y, WILDE S A. A Review of The Geodynamic Setting of Large-scale Late Mesozoic Gold Mineralization in the North China Craton: An Association with Lithospheric Thinning[J]. Ore Geology Reviews, 2003, 23(3/4): 125-152.
- [24] 倪金龙, 刘俊来, 唐小玲, 等. 排山楼金矿韧性剪切带演化过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1374-1387.
- NI Jin-long, LIU Jun-lai, TANG Xiao-ling, et al. Evolution of the Ductile Shear Zone of the Paishanlou Gold Deposits, Western Liaoning, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(7): 1374-1387.
- [25] 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.
- [26] CORFU F, HANCHAR J M, HOSKIN P W O, et al. Atlas of Zircon Textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 469-500.
- [27] BOWRING S A, SCHMITZ M D. High-precision U-Pb Zircon Geochronology and the Stratigraphic Record[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 305-326.
- [28] 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学[J]. 质谱学报, 2002, 23(1): 58-62.
- SONG Biao, ZHANG Yu-hai, LIU Dun-yi. Introduction to the Naissance of SHRIMP and Its Contribution to Isotope Geology[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2002, 23(1): 58-62.
- [29] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [30] 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 等. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 433-448.
- LIU Hong-tao, ZHAI Ming-guo, LIU Jian-ming, et al. The Mesozoic Granitoids in the Northern Marginal Region of North China Craton: Evolution from Post-collisional to Anorogenic Settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(4): 433-448.
- [31] 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- WANG Ji-liang, LI Bing-ze, ZHOU De-xing, et al. Geology of Intermediate-acidic Intrusions of Hebei Province and Its Relation to Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [32] 王安建, 李树勋, 曲亚军. 脉状金矿地质与成因[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1996.
- WANG An-jian, LI Shu-xun, QU Ya-jun. The Geology and Genesis of the Lobe Gold Deposits[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1996.
- [33] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 24-36.
- ZHAI Ming-guo. Tectonic Evolution and Metallogenesis of North China Craton [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 24-36.
- [34] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169-188.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, ZHANG Zuo-heng, et al. Mesozoic Large-scale Metallogenic Pulses in North China and Corresponding Geodynamic Settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188.
- [35] MAO J W, LI X F, WHITE N C, et al. Types, Characteristics, and Geodynamic Settings of Mesozoic Epithermal Gold Deposits in Eastern China[J]. Resource Geology, 2007, 57(4): 435-454.
- [36] BONNEMAISON M, MARCOUX E. Auriferous Mineralization in Some Shear-zones: A Three-stage Model of Metallogenesis[J]. Mineralium Deposita, 1990, 25(2): 96-104.
- [37] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 韧性剪切带型金矿成矿模式[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 186-192.
- CHEN Bo-lin, DONG Fa-xian, LI Zhong-jian. Ore-forming Model of Ductile Shear Zone Type Gold Deposits[J]. Geological Review, 1999, 45(2): 186-192.
- [38] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2249-2269.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LI Cheng-dong, et al. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [39] XIONG X L, ADAM J, GREEN T H. Rutile Stability and Rutile/Melt HFSE Partitioning During Partial Melting of Hydrous Basalt: Implications for TTG Genesis[J]. Chemical Geology, 2005, 218(3/4): 339-359.
- [40] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 再论花岗岩按照 Sr-Yb

- 的分类:标志[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 985-1015.
- ZHANG Qi, JIN Wei-jun, LI Cheng-dong, et al. Re-visiting the New Classification of Granitic Rocks Based on Whole-rock Sr and Yb Contents: Index[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 985-1015.
- [41] 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 华北克拉通北缘中生代高锆花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 257-274.
- LIU Hong-tao, SUN Shi-hua, LIU Jian-ming, et al. The Mesozoic High-Sr Granitoids in the Northern Marginal Region of North China Craton: Geochemistry and Source Region[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 257-274.
- [42] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, et al. Discussions on the Petrogenesis of Granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [43] 翟明国. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2185-2204.
- ZHAI Ming-guo. Lower Crust and Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton Before the Mesozoic Lithospheric Disruption[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2185-2204.
- [44] 翟明国. 大陆动力学的物质演化研究方向与思路[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(4): 1-14.
- ZHAI Ming-guo. New Research Interests and Concept of Material Evolution for Continental Dynamics[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(4): 1-14.
- [45] 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 克拉通岩石圈减薄与破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(11): 2358-2372.
- WU Fu-yuan, XU Yi-gang, ZHU Ri-xiang, et al. Thinning and Destruction of the Cratonic Lithosphere: A Global Perspective[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(11): 2358-2372.
- [46] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 583-592.
- ZHU Ri-xiang, CHEN Ling, WU Fu-yuan, et al. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(5): 583-592.
- [47] DAVIS G A, WANG C, ZHENG Y D, et al. The Enigmatic Yinshan Fold-and-thrust Belt of Northern China: New Views on Its Intraplate Contractional Styles[J]. Geology, 1998, 26(1): 43-46.
- [48] 赵越, 陈斌, 张拴宏, 等. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 900-915.
- ZHAO Yue, CHEN Bin, ZHANG Shuan-hong, et al. Pre-Yanshanian Geological Events in the Northern Margin of the North China Craton and Its Adjacent Areas[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 900-915.
- [49] KUSKY T M, WINDLEY B F, ZHAI M G. Lithospheric Thinning in Eastern Asia: Constraints, Evolution, and Tests of Models[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2007, 280: 331-343.
- [50] 张岳桥, 董树文. 郯庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1371-1390.
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen. Mesozoic Tectonic Evolution History of the Tan-Lu Fault Zone, China: Advances and New Understanding[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(9): 1371-1390.
- [51] MENZIES M A, FAN W M, ZHANG M. Palaeozoic and Cenozoic Lithoprobes and the Loss of >120 km of Archaean Lithosphere, Sino-Korean Craton, China[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1993, 76: 71-81.
- [52] FAN W M, ZHANG H F, BAKER J, et al. On and off the North China Craton: Where Is the Archaean Keel? [J]. Journal of Petrology, 2000, 41(7): 933-950.
- [53] 张宏福, 杨岳衡. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 285-294.
- ZHANG Hong-fu, YANG Yue-heng. Emplacement Age and Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics of Diamondiferous Kimberlites from the Eastern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 285-294.
- [54] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 51-60.
- WU Fu-yuan, GE Wen-chun, SUN De-you, et al. Discussions on the Lithospheric Thinning in Eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 51-60.
- [55] 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1145-1174.
- WU Fu-yuan, XU Yi-gang, GAO Shan, et al. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1145-1174.