

# 冀东金矿带中生代岩浆作用 及其成矿意义

——来自锆石矿物学证据

张岱岳<sup>1)</sup>, 王树志<sup>1)</sup>, 曹冲<sup>1)</sup>, 王涛<sup>2)</sup>, 郭志华<sup>1)</sup>

1) 华北理工大学, 河北唐山, 063210; 2) 中国地质科学院, 北京, 100037

**内容提要:**冀东金厂峪金矿被认为与青山口花岗岩体侵入有关, 而同样距离矿区较近的腰岭子花岗闪长岩体则研究较少, 由于两岩体在岩性、构造背景等方面有很大的相似性, 因此有必要探讨两成矿条件和成矿潜力差异的可能原因。本文对腰岭子和青山口岩体中的锆石进行透射光和阴极发光 (CL) 图像分析、晶体形态学以及统计学分析, 结果显示两岩体的形成温度相差不大, 分别为 650~800°C 和 650~850°C。较高的岩浆热水含量和富碱环境可能是青山口岩体成矿的必要条件。应用 LA-ICP-MS 方法对腰岭子花岗闪长岩中的锆石进行 U-Pb 年代学测试, 其结晶年龄为 161.5±0.9 Ma, 与峪耳崖金矿区内的闪长岩脉年龄相近, 且两者在含矿岩体特征方面有很大的相似性, 因此认为腰岭子岩体的成矿潜力较大。两岩体稀土元素地球化学特征显示轻稀土相对亏损而重稀土相对富集。同时, 有明显的 Ce 正异常和微弱的 Eu 负异常, 结合野外地质观察, 认为两岩体可能经历了壳幔混合作用。结合前人对青山口岩体年龄的测试结果及大地构造背景认为两岩体可能为来自同一岩浆房不同阶段侵位的产物。

**关键词:** 锆石形态; 岩浆演化; 锆石 U-Pb 年龄; 成矿潜力; 冀东地区

马兰峪复式背斜是一条形成于中生代的 E—W 向构造, 位于燕山板内造山带南端。其核部发育有一系列的中生代闪长岩类和花岗岩类的中酸性侵入岩体, 包括了如都山、青山口、肖营子、孤山子和腰岭子等数十个侵入体以及分布于其间的数个小岩体 (杨付领等, 2015)。从前人研究来看, 研究者更多关注金矿与花岗岩的关系 (刘家远, 1989; 李承东等, 2004; 常秋玲等, 2006; 郭少丰等, 2009; 刘跃等, 2014), 且已有研究表明金厂峪金矿井下产出的花岗岩与青山口岩体具有同源关系 (张丽茜, 2013) 且为成矿地质体 (罗镇宽等, 2001), 而金矿与闪长岩类的关系却并未受到重视 (孙长亮和杨贵宝, 2015), 目前还未有腰岭子花岗闪长岩体为成矿地质体的报道, 其与成矿的关系和岩体的成矿潜力研究仍然较为薄弱。

锆石为岛状硅酸盐矿物, 玻璃至金刚光泽, 断口为油脂光泽, 透明至半透明, 硬度为 7.5~8.0 (李胜荣等, 2008)。锆石作为一种常见的副矿物普遍存在于沉积岩、岩浆岩和变质岩中。岩浆锆石晶体常

为四方柱与四方双锥、复四方双锥的聚形 (李长民, 2009), 一般自形程度较高, 晶棱清晰, 粒径 20~250 μm (Hoskin and Schaltegger, 2003)。锆石形态的定性研究中, 最常用的方法是锆石群形态分类法 (Pupin, 1980), 通过锆石的形态标型和成分标型来反演成岩成矿的物理化学条件 (廖忠礼等, 2006), 有助于反演岩浆演化趋势及成矿过程, 探讨岩体及矿床成因, 进而为深入研究提供更多的信息。

笔者等在综合前人研究的基础上, 利用透射光和阴极发光 (CL) 图像对腰岭子和青山口岩体样品中的锆石进行分类统计和计算, 反演了两岩体的岩浆演化过程及物理化学条件。利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱 (LA-ICP-MS) 得到两岩体的稀土元素配分模式图, 并对马兰峪地区腰岭子花岗闪长岩中的锆石 (含部分巨晶锆石) 进行年代学测试。在地质年代学基础上, 通过分析腰岭子岩体和青山口岩体的锆石形态及矿物地球化学特征, 对比分析了两岩体的成矿条件, 旨在为冀东金矿带岩浆作用及岩体的成矿潜力研究提供新的证据。

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 42002098) 和河北省自然科学基金资助项目 (编号: 2019209531, D2020209017) 的成果。

收稿日期: 2022-03-05; 改回日期: 2022-05-30; 网络首发: 2022-06-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.131

作者简介: 张岱岳, 女, 2001年生, 学生, 本科, 矿床学专业; Email: 2403130182@qq.com。通讯作者: 王树志, 男, 1987年生, 博士, 讲师, 主要从事区域构造和区域成矿规律研究工作; Email: wangszh@ncst.edu.cn。



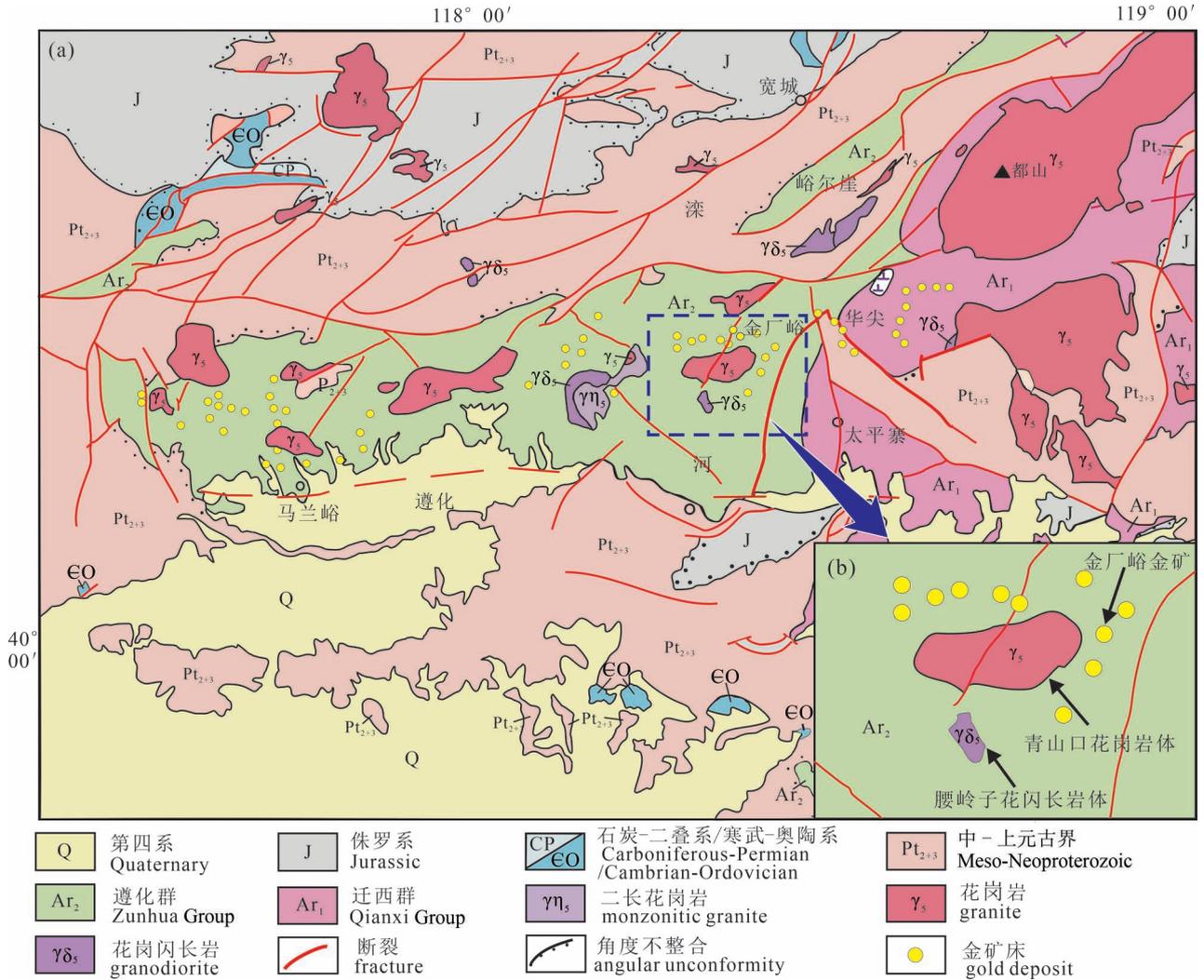


图 1 冀东地区地质图(据梅燕雄,1997;宋扬,2011 修改)

Fig. 1 Geological map of eastern Hebei gold belt (modified after Mei Yanxiong, 1997& ; Song Yang, 2015& )

## 1 地质概况

马兰峪复背斜处于承德复式向斜的南部,西起平谷、东至秦皇岛,整体为 E—W 走向,长约 110 km,核部宽 25~30 km。背斜核部主要由太古界变质结晶基底构成,背斜两翼主要由中、新元古代至古生代地层组成。马兰峪复背斜于印支期开始形成,燕山期结束,期间伴随着大量的岩浆活动(杨付领等,2015)。主要为中生代中酸性岩浆岩侵入,且多为复式岩体,构成了一条规模宏大的呈 E—W 向展布的岩浆岩—金成矿带(图 1a),也是冀东地区主要的金矿集区(梅燕雄,1997)。区域成岩和成矿作用一直是冀东地区的研究热点(董建乐等,2002;雷玮琰,2013;牛树银等,2013)。

腰岭子和青山口岩体位于冀东马兰峪复背斜东

部(图 1b),腰岭子岩体距离金厂峪金矿 3~4 km,出露面积仅 2 km<sup>2</sup> 左右。青山口岩体呈近 E—W 向椭圆状展布,位于金厂峪金矿以西 3 km 处,长约 9 km,宽约 7 km,地表出露面积为 28 km<sup>2</sup>。

## 2 样品采集及分析方法

腰岭子岩体为一复式岩体,以花岗闪长岩为主。腰岭子岩体样品为花岗闪长岩(YLZ-1),具体采样位置为 N40°15'24.8332",E118°20'4.3548",H300.8±1.19 m。二长花岗岩为青山口复式岩体的主要组成部分(宋扬,2011)。青山口岩体样品为二长花岗岩(QSK-1),具体采样位置为 N40°18'55",E118°20'40",H282.0±1.10 m。

本次研究的腰岭子岩体锆石 U-Pb 年龄及两岩体锆石微量元素测试工作在北京铂年领航科技有限

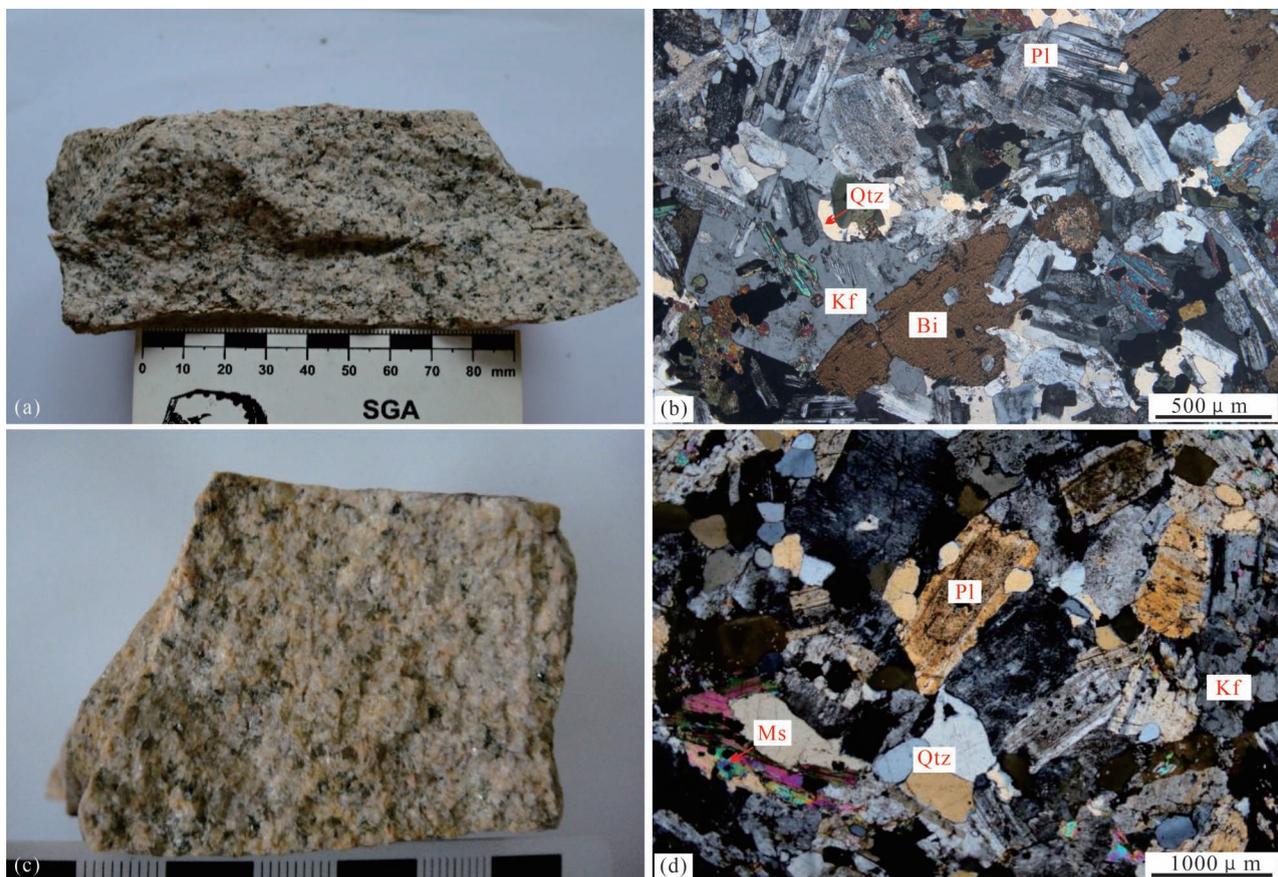


图2 冀东腰岭子和青山口岩体野外岩石学及镜下特征

Fig. 2 Field and microscopic photographs of the Yaolingzi intrusive and Qingshankou intrusive

(a) 腰岭子中细粒花岗岩闪长岩手标本; (b) 腰岭子中细粒花岗岩闪长岩镜下照片; (c) 青山口中细粒二长花岗岩手标本; (d) 青山口中细粒二长花岗岩镜下照片

(a) Hand specimen of fine-grained granodiorite of Yaolingzi intrusive; (b) microscopic images of the medium-fine grained granodiorite of Yaolingzi intrusive; (c) handspecimen of fine grained monzogranite of Qingshankou intrusive; (d) microscopic photograph of fine grained monzogranite of Qingshan intrusive

Qtz—石英; Kf—钾长石; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Ms—白云母

Qtz—Quartz; Kf—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Ms—muscovite

公司实验室进行。利用重液和电磁法将岩石样品粉碎至 300  $\mu\text{m}$  左右,然后在双目镜下选择代表性锆石颗粒(大于 200 颗),将所选锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,打磨抛光至锆石出露中心部位。在此基础上选择适合的锆石颗粒进行 U-Pb 年龄测定,选取原则为避开包裹体和裂纹。年龄及微量元素数据处理及做图采用 ICPMSDataCal 和 Isoplot 3.0 程序(Ludwig, 2003)。具体实验流程详见(董学等, 2020)。

### 3 岩相学特征

腰岭子岩石样品为中细粒花岗闪长岩(YLZ-1, 图 2a),具块状构造、半自形粒状结构,主要矿物由

斜长石、钾长石、石英和黑云母组成(图 2b)。其中长石(以斜长石为主、钾长石次之)约占 65%,石英约占 25%~30%,黑云母约占 5%~10%。斜长石呈半自形板状,有时可见聚片双晶,主要为 0.4~2 mm 的细粒,少部分为 2~3 mm 的中粒。钾长石呈它形粒状,少数被细小白云母沿解理、裂隙和边缘交代,主要为 0.5~2 mm 的细粒。石英呈它形粒状或不规则状,大小一般 0.2~2 mm,少数<0.2 mm。

青山口岩石样品为中细粒二长花岗岩 QSK-1(图 2c),具块状构造、中细粒花岗结构,主要矿物由斜长石、钾长石、石英、黑云母、白云母组成,大小一般为 0.1~2.0 mm,较少部分为 2~3 mm(图 2d)。其中斜长石约为 40%,钾长石约为 35%,石英约为

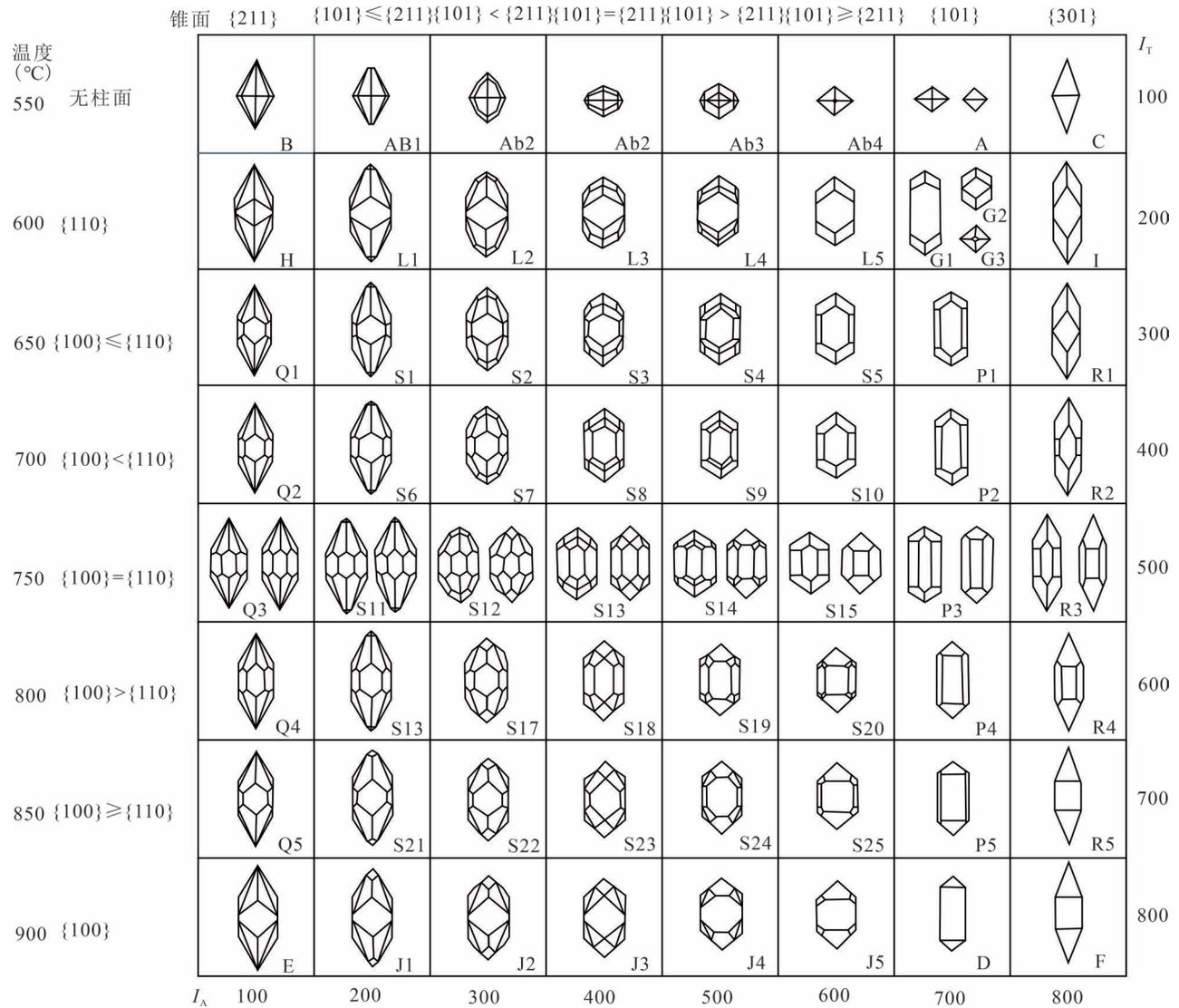


图3 锆石群形态温度指数—碱度指数图解(据 Pupin, 1980)

Fig. 3 Diagram of temperature index and basicity index of zircon groups(after Pupin, 1980)

20%~25%,黑云母少量。斜长石半自形板状为主,具绢云母化、高岭土化等,少见正边结构(斜长石具钾长石镶边)。钾长石近它形粒状,杂乱及填隙状分布,具高岭土化。石英呈它形粒状,零散填隙状分布。黑云母、白云母呈叶片状,零散或填隙状分布。

#### 4 锆石形态特征及物理化学条件

锆石物理化学性质非常稳定,在经历风化、剥蚀、搬运等地质过程中不易发生蚀变,因此能够较好地记录原岩信息(Spetsius et al., 2002; Siebel et al., 2009)。有学者认为锆石形态特征能灵敏地反映结晶环境的物理化学条件(Pupin, 1980),据此提出了锆石群形态温度指数—碱度指数图解(图3),并将

锆石形态分为16种主型和66种亚型,主型是由0、1或2个柱面( $\{100\}$ 、 $\{110\}$ )与3个锥面( $\{101\}$ 、 $\{211\}$ 和 $\{301\}$ 中的一个或 $\{101\} + \{211\}$ )结合。横坐标为碱度指数( $I_A$ ),纵坐标为温度指数( $I_T$ ),碱度指数逐渐变大表明结晶环境由富铝向富碱变化,温度指数逐渐变大表明结晶环境由低温向高温变化。

笔者等分别随机观察各100颗来自腰岭子岩体的样品YLZ-1和青山口岩体的样品QSK-1中的锆石单矿物,并按Pupin图解进行锆石形态的分类和统计,将锆石类型统计结果标在Pupin锆石群形态分布图上(图4)。各个亚型区里的每个小点代表100粒锆石中该类型出现一次。

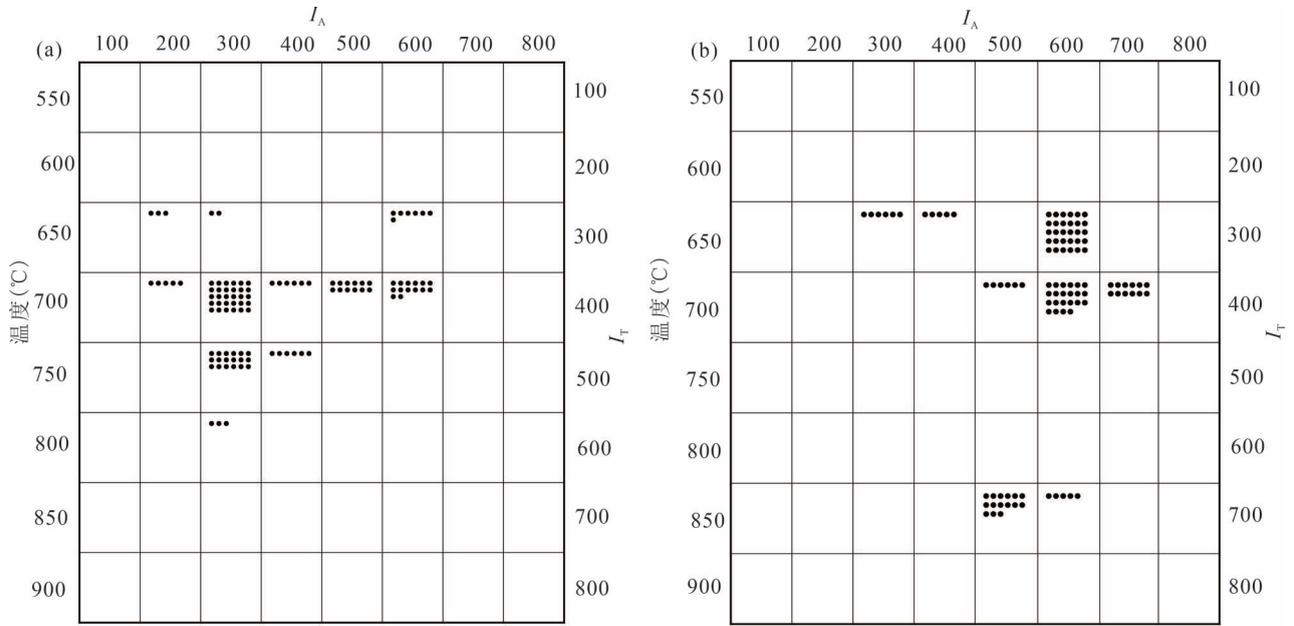


图4 冀东腰岭子花岗闪长岩(a)和青山口二长花岗岩(b)锆石群形态分布统计图

Fig. 4 Morphological distribution of zircons from granodiorite in Yaolingzi intrusive (a) and monzogranite in Qingshankou intrusive (b)

#### 4.1 锆石晶型特征:

两岩体样品中的锆石形态均显示出岩浆锆石的特征:颜色总体偏淡,多呈无色透明,在CL图像上多呈现密集的岩浆振荡环带。在腰岭子岩体样品(YLZ-1)中,锆石颗粒大小和形状相似,多数颗粒在150  $\mu\text{m}$ 左右,多呈短柱状,且长宽比大多集中在2:1~3:1。其晶体类型主要为S型,亚型主要为 $S_{1-2}$ 、 $S_5$ 、 $S_{6-10}$ 、 $S_{12-13}$ 、 $S_{17}$ , (图5)。锆石的柱面 $\{110\}$ 面相对发育,锥面 $\{211\}$ 较 $\{101\}$ 更发育。在青山口岩体样品(QSK-1)中,锆石颗粒大小和形状也相似,多数颗粒在150  $\mu\text{m}$ 左右,多呈短柱状,长宽比大多集中在1:1~3:1。其晶体类型主要为S、P型,亚型主要为 $S_{2-3}$ 、 $S_5$ 、 $S_{9-10}$ 、 $P_2$ 、 $S_{24-25}$ , (图5)。锆石的柱

面 $\{110\}$ 面相对发育,锥面 $\{101\}$ 较 $\{211\}$ 更发育。

#### 4.2 平均温度指数和碱度指数

锆石群的平均温度指数( $I_T$ 和平均碱度指数( $I_A$ )既能反映锆石群的整体温度及碱度的变化特征(Pupin, 1980),又能确定岩浆的物质组成和演化(陈光远等, 1993; 陈琿等, 2010; 董亚林等, 2016)。平均温度指数和平均碱度指数计算公式为:

$$I_T = \sum I_T \times n_T \quad (1)$$

$$I_A = \sum I_A \times n_{IA} \quad (2)$$

式中: $n_T$ 和 $n_{IA}$ 为每一个温度指数和碱度指数各自出现的频率, $\sum n_T = \sum n_{IA} = 1$ 。

在锆石群形态分布统计图(图4)的基础上,经式(1)、(2)计算,腰岭子花岗闪长岩(YLZ-1)的 $I_T =$

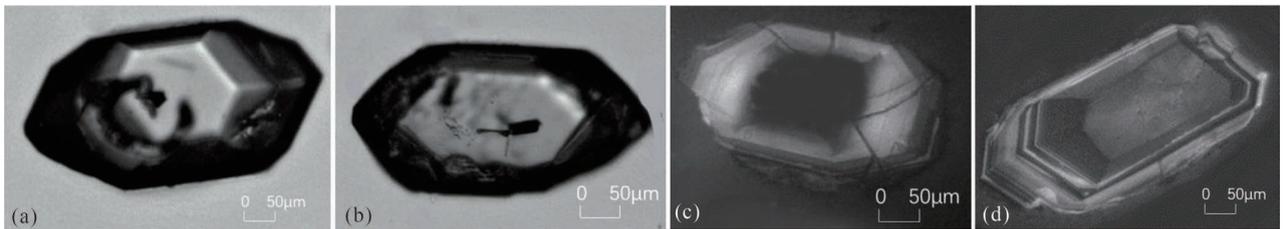


图5 锆石透射光图像和阴极发光图像

Fig. 5 Transmitted light and cathodeluminescence images of zircon

- (a)  $S_7$  型锆石透射光图像; (b)  $S_{10}$  型锆石透射光图像; (c)  $S_{12}$  型锆石阴极发光图像; (d)  $S_5$  型锆石阴极发光图像  
 (a)  $S_7$  zircon transmission light image; (b)  $S_{10}$  zircon transmission light image; (c)  $S_{12}$  zircon cathodeluminescence image; (d)  $S_5$  zircon cathode luminescence image

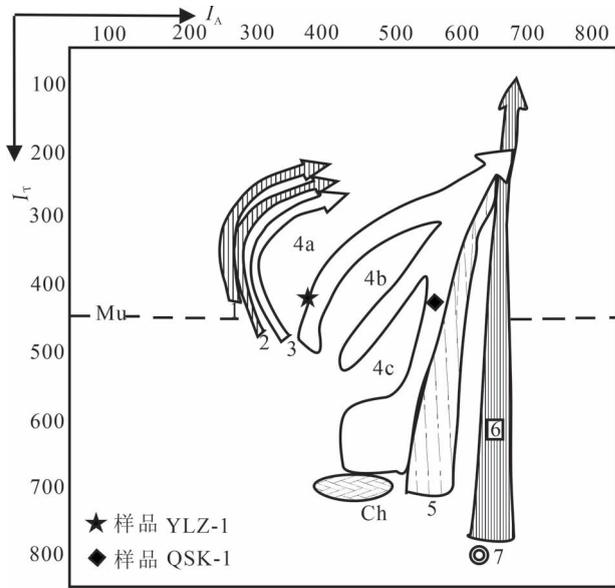


图6 锆石平均点和不同成因类型岩石的演化趋势

Fig. 6 Zircon mean points and evolution trends of rocks of different genetic types

壳源或以壳源为主的花岗岩: 1—铝质浅色花岗岩; 2—原地二长花岗岩和花岗闪长岩; 3—侵入的铝质二长花岗岩和花岗闪长岩; 4—混合源花岗岩; 4a, 4b, 4c—混合源钙碱性系列花岗岩; 5—亚碱性系列花岗岩, 以幔源或幔源为主的花岗岩; 6—幔源碱性系列花岗岩; 7—拉斑玄武岩系列花岗岩。Mu—白云母; Mu虚线为白云母花岗岩线 ( $I_T < 450$ ); Ch—超变质重熔成因的紫苏花岗岩。图件引自 Pupin, 1980

Crust-derived or crust-derived granites: 1—aluminum light coloured granite; 2—autochthonous monzogranite and granodiorite; 3—intrusive aluminous monzogranite and granodiorite; 4—mixed source granites; 4a, 4b and 4c—mixed source calc-alkaline series granites; 5—subalkaline series granite, mainly mantle-derived or mantle-derived granite; 6—mantle-derived alkaline series granite; 7—tholeiite granite series— Mu is Muscovite; Mu dotted line is muscovite granite line ( $I_T < 450$ ); Ch is the Perilla granite of super-metamorphic remelting origin. Illustrations are from Pupin, 1980

418,  $I_A = 391$ ; 青山口二长花岗岩 (QSK-1) 的  $I_T = 420$ ,  $I_A = 563$ 。本文将两者中的锆石群平均点 ( $I_T$ 、 $I_A$ ) 分别投影 (图 6), 结果均属于混合源钙碱性系列花岗岩。

#### 4.3 结晶环境

平均温度指数结果表明, 腰岭子岩体样品 (YLZ-1) 的锆石结晶温度大约在  $709^\circ\text{C}$ , 温度区间为  $650\sim 800^\circ\text{C}$ 。青山口岩体样品 (QSK-1) 的锆石结晶温度大约在  $710^\circ\text{C}$ 。两岩体整体结晶温度相近, 都表现为  $\{110\}$  柱面较  $\{100\}$  发育, 但是青山口岩体中锆石的结晶温度跨度较大, 分布在  $650\sim 850^\circ\text{C}$  的范围内。

平均碱度指数结果表明, 腰岭子岩体样品锆石

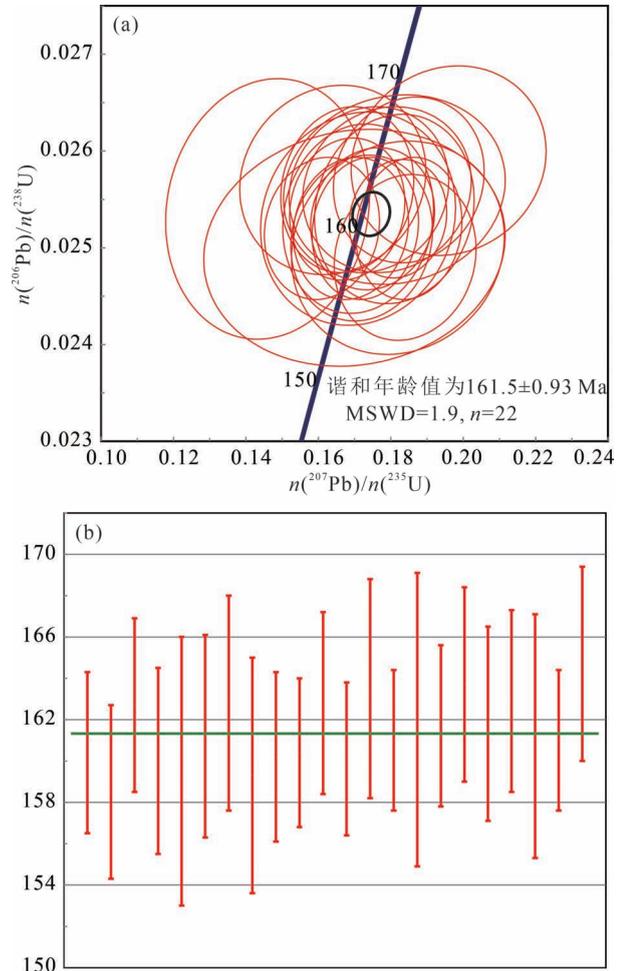


图7 冀东腰岭子花岗闪长岩 (YLZ-1) 锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图 (a) 及加权平均年龄图谱 (b)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagrams (a) and the weighted mean  $n(^{206}\text{Pb}) / n(^{238}\text{U})$  ages (b) for the Yaolingzi granodiorite (YLZ-1)

的  $\{211\}$  锥面较  $\{101\}$  锥面更发育; 青山口岩体样品锆石的  $\{101\}$  锥面较  $\{211\}$  锥面更发育, 表明青山口岩体较腰岭子岩体更富碱。

## 5 锆石定年

采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对 YLZ-1 进行 24 个点的年代学分析 (表 1)。结果显示, 铀 (U) 含量为  $(34.0 \sim 137.1) \times 10^{-6}$ , 钍 (Th) 含量为  $(23.7 \sim 154.5) \times 10^{-6}$ , Th/U 值范围为  $0.48 \sim 1.13$ , 显示了典型的岩浆锆石特征 (Siebel et al., 2009)。  $n(^{206}\text{Pb}) / n(^{238}\text{U})$  的谐和年龄为  $161.5 \pm 0.9 \text{ Ma}$  (MSWD = 1.9), 个别分析点由于 U 含量或普通 Pb 含量较高, 未能获得理想年龄, 在计算时剔除 (图 7)。

表 1 冀东腰岭子花岗岩长岩的锆石 LA-ICP-MS 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotopic analyses results of zircons for the Yaolingzi granodiorite

测点号	元素含量 ( $\times 10^{-6}$ )		同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)		
	Pb	Th	Th/U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			
				测值	2 $\sigma$	测值	2 $\sigma$	测值	2 $\sigma$	测值	2 $\sigma$	测值	2 $\sigma$				
YLZ-1-1	3.5	112.5	99.5	1.13	0.0480	0.0038	0.1690	0.0130	0.0252	0.0006	50.0	150.0	156.0	11.0	160.4	3.9	97
YLZ-1-2	2.5	70.8	73.7	0.96	0.0534	0.0046	0.1840	0.0160	0.0249	0.0007	210.0	170.0	169.0	13.0	158.5	4.2	94
YLZ-1-3	3.5	96.3	108.4	0.89	0.0477	0.0041	0.1680	0.0150	0.0256	0.0007	60.0	180.0	156.0	13.0	162.7	4.2	96
YLZ-1-4	2.1	57.5	62.7	0.92	0.0499	0.0048	0.1720	0.0160	0.0251	0.0007	40.0	180.0	159.0	14.0	160.0	4.5	99
YLZ-1-5	2.5	61.6	71.5	0.86	0.0530	0.0100	0.1700	0.0340	0.0250	0.0010	70.0	370.0	155.0	29.0	159.5	6.5	97
YLZ-1-6	4.1	122.8	124.2	0.99	0.0496	0.0047	0.1710	0.0170	0.0253	0.0008	110.0	190.0	159.0	15.0	161.2	4.9	99
YLZ-1-7	2.5	58.8	78.1	0.75	0.0519	0.0072	0.1810	0.0250	0.0256	0.0008	130.0	260.0	166.0	21.0	162.8	5.2	98
YLZ-1-8	2.3	53.1	75.0	0.71	0.0546	0.0076	0.1820	0.0240	0.0250	0.0009	220.0	270.0	167.0	20.0	159.3	5.7	95
YLZ-1-9	2.8	77.8	85.7	0.91	0.0480	0.0040	0.1610	0.0130	0.0252	0.0006	-10.0	150.0	151.0	12.0	160.2	4.1	94
YLZ-1-10	3.1	75.9	96.2	0.79	0.0503	0.0035	0.1730	0.0120	0.0252	0.0006	110.0	140.0	160.0	10.0	160.4	3.6	100
YLZ-1-11	1.6	33.0	50.7	0.65	0.0485	0.0051	0.1740	0.0180	0.0256	0.0007	0.0	190.0	158.0	16.0	162.8	4.4	97
YLZ-1-12	3.6	113.4	103.4	1.10	0.0533	0.0037	0.1850	0.0120	0.0252	0.0006	210.0	140.0	170.0	10.0	160.1	3.7	94
YLZ-1-13	3.9	106.1	107.9	0.98	0.0463	0.0065	0.1640	0.0210	0.0257	0.0008	-80.0	250.0	152.0	18.0	163.5	5.3	93
YLZ-1-14	2.3	58.3	73.5	0.79	0.0517	0.0032	0.1820	0.0110	0.0253	0.0005	170.0	120.0	167.8	9.6	161.0	3.4	96
YLZ-1-15	1.8	40.3	57.5	0.70	0.0423	0.0071	0.1460	0.0230	0.0254	0.0011	-210.0	270.0	135.0	20.0	162.0	7.1	82
YLZ-1-16	2.7	76.9	80.2	0.96	0.0473	0.0037	0.1680	0.0130	0.0254	0.0006	-10.0	150.0	156.0	12.0	161.7	3.9	96
YLZ-1-17	2.1	47.2	71.0	0.66	0.0532	0.0052	0.1850	0.0170	0.0257	0.0007	220.0	200.0	170.0	15.0	163.7	4.7	96
YLZ-1-18	1.7	26.3	55.3	0.48	0.0523	0.0054	0.1810	0.0180	0.0254	0.0008	60.0	190.0	166.0	15.0	161.8	4.7	97
YLZ-1-19	5.1	154.5	137.1	1.13	0.0495	0.0050	0.1790	0.0190	0.0256	0.0007	100.0	200.0	165.0	16.0	162.9	4.4	99
YLZ-1-20	2.0	47.7	66.0	0.72	0.0497	0.0069	0.1710	0.0220	0.0253	0.0009	50.0	260.0	158.0	19.0	161.2	5.9	98
YLZ-1-21	4.1	115.6	118.2	0.98	0.0498	0.0041	0.1750	0.0140	0.0253	0.0006	70.0	150.0	163.0	12.0	161.0	3.4	99
YLZ-1-22	1.3	31.3	37.6	0.83	0.0555	0.0062	0.1960	0.0220	0.0259	0.0008	160.0	210.0	178.0	19.0	164.7	4.7	92

表 2 冀东腰岭子花岗岩长岩体 (YLZ-1) 中锆石稀土元素含量 ( $\times 10^{-6}$ ) 与特征值Table 2 Zircon rare earth element contents and characteristic values ( $\times 10^{-6}$ ) of Yaolingzi granodiorite

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REE}$	$\Sigma\text{HREE}$	$\Sigma\text{LREE}$	$\delta\text{Eu}$	$\delta\text{Ce}$
YLZ-1-1	0.91	27.70	0.58	6.29	7.80	3.21	33.90	9.81	112.10	39.53	187.00	39.91	378.00	77.60	924.34	877.85	46.49	0.54	8.79
YLZ-1-2	0.22	20.57	0.20	3.04	4.59	1.64	20.00	5.86	70.30	26.00	127.20	27.62	267.90	57.10	632.25	601.98	30.27	0.47	21.14
YLZ-1-3	0.00	29.31	0.14	2.73	4.60	1.94	21.60	7.08	87.80	32.90	167.00	37.40	358.80	76.90	828.20	789.48	38.72	0.52	63.86
YLZ-1-4	0.00	12.16	0.06	1.03	2.09	0.93	9.67	3.15	39.80	15.59	80.60	18.87	190.20	43.01	417.16	400.89	16.27	0.56	60.05
YLZ-1-5	0.02	18.45	0.16	2.15	3.79	1.52	18.10	5.46	68.80	27.20	137.10	30.00	291.30	66.20	670.24	644.16	26.08	0.49	33.37
YLZ-1-6	0.00	33.10	0.16	2.48	4.85	2.20	26.00	8.34	105.20	38.90	198.40	43.40	417.00	87.60	967.63	924.84	42.79	0.51	62.87
YLZ-1-7	0.08	19.22	0.06	1.40	2.19	1.12	13.60	4.90	61.70	23.80	121.90	28.00	276.00	59.70	613.68	589.60	24.08	0.51	59.72

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	δEu	δCe
YLZ-1-8	0.00	17.00	0.07	1.18	2.83	1.19	14.50	4.66	57.50	22.44	115.80	26.20	256.00	57.90	577.27	22.27	555.00	0.04	0.49	68.07
YLZ-1-9	0.05	11.80	0.29	3.91	4.72	1.79	17.30	5.05	57.00	19.25	96.40	21.10	208.70	43.40	490.76	22.56	468.20	0.05	0.57	11.41
YLZ-1-10	0.01	23.21	0.11	1.84	3.13	1.60	18.42	5.93	76.80	29.56	151.20	33.63	328.10	72.20	745.74	29.90	715.84	0.04	0.53	59.47
YLZ-1-11	0.00	24.54	0.07	1.17	2.65	1.20	14.42	4.98	65.10	25.69	134.20	30.22	298.40	65.25	667.89	29.63	638.26	0.05	0.50	106.93
YLZ-1-12	0.00	11.80	0.07	1.05	1.96	0.79	9.17	3.16	38.20	14.68	75.90	17.26	179.60	39.18	392.82	15.67	377.15	0.04	0.50	52.18
YLZ-1-13	0.04	26.59	0.37	5.14	7.45	3.01	32.60	9.56	109.40	38.13	180.40	38.88	356.50	74.10	882.17	42.60	839.57	0.05	0.53	20.64
YLZ-1-14	0.13	28.80	0.24	2.83	4.20	2.55	22.70	8.19	94.10	36.80	187.80	40.20	384.00	83.80	896.34	38.75	857.59	0.05	0.67	29.05
YLZ-1-15	0.00	17.10	0.10	1.27	3.13	1.38	16.10	4.66	62.40	23.60	119.40	26.70	269.70	57.00	602.54	22.98	579.56	0.04	0.51	51.62
YLZ-1-16	0.00	14.57	0.05	1.11	2.00	0.81	10.80	3.65	45.60	17.20	90.80	20.90	210.00	47.00	464.49	18.54	445.95	0.04	0.45	84.65
YLZ-1-17	0.02	19.01	0.14	2.37	3.59	1.86	19.03	6.21	78.10	29.81	152.00	33.67	321.60	70.20	737.61	26.99	710.62	0.04	0.58	38.11
YLZ-1-18	0.01	15.37	0.19	3.44	5.44	1.84	22.70	6.88	73.90	25.27	117.00	23.93	216.00	42.60	554.57	26.29	528.28	0.05	0.46	23.54
YLZ-1-19	0.00	12.70	0.05	0.93	2.52	0.84	11.02	3.31	39.80	14.38	71.50	15.84	150.30	31.80	354.99	17.04	337.95	0.05	0.44	72.36
YLZ-1-20	0.00	37.80	0.21	3.23	5.80	2.46	30.00	9.65	113.40	42.30	213.20	46.00	441.00	95.00	1040.05	49.50	990.55	0.05	0.49	52.83
YLZ-1-21	0.01	16.56	0.05	1.20	2.78	1.21	13.30	4.69	58.40	21.72	114.30	26.20	262.40	56.10	578.91	21.80	557.11	0.04	0.53	101.54
YLZ-1-22	0.00	27.73	0.09	1.44	3.14	1.41	16.20	5.58	70.80	28.41	145.00	31.50	304.30	64.80	700.40	33.81	666.59	0.05	0.52	93.20
YLZ-1-23	0.03	8.95	0.10	1.76	3.35	1.32	12.86	3.55	39.60	14.06	68.80	15.03	147.40	32.40	349.21	15.51	333.70	0.05	0.57	24.61
YLZ-1-24	0.02	9.06	0.08	1.13	1.87	0.85	8.40	2.48	31.50	11.15	58.20	13.85	142.10	31.50	312.18	13.00	299.18	0.04	0.58	32.36

表3 冀东青山口二长花岗岩体(QSK-1)中锆石稀土元素( $\times 10^{-6}$ )含量与特征值  
Table 3 Zircon rare earth element contents and characteristic values ( $\times 10^{-6}$ ) of the Qingshankou monzogranite

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	δEu	δCe
QSK-1-1	8.61	173.37	9.23	51.62	40.99	9.02	87.87	33.47	395.71	149.89	785.19	205.87	2200.04	537.94	4688.82	292.84	4395.98	0.07	0.47	4.09
QSK-1-2	3.06	110.83	1.41	7.67	5.94	1.52	21.14	8.83	131.54	61.50	362.10	109.26	1408.89	289.64	2523.32	130.42	2392.90	0.05	0.39	12.66
QSK-1-3	1.20	256.67	0.49	4.17	7.27	1.21	43.54	21.94	340.93	150.33	786.05	209.49	2399.53	444.83	4667.66	271.01	4396.64	0.06	0.17	79.61
QSK-1-4	2.64	142.38	1.28	7.65	9.11	2.10	38.82	15.27	201.83	86.07	440.39	119.89	1459.83	289.10	2816.36	165.16	2651.20	0.06	0.31	18.34
QSK-1-5	0.76	97.58	0.39	2.53	3.40	0.93	20.29	9.69	156.06	75.42	433.44	130.58	1683.67	339.82	2954.57	105.59	2848.97	0.04	0.28	42.31
QSK-1-6	0.83	570.85	0.55	8.85	25.14	3.66	124.97	47.26	572.71	201.37	821.11	182.77	1848.92	312.59	4721.58	609.88	4111.70	0.15	0.17	193.67
QSK-1-7	10.36	158.90	5.45	26.21	19.14	4.43	50.79	18.99	238.31	95.39	496.27	137.78	1676.65	338.53	3277.20	224.49	3052.71	0.07	0.43	4.98
QSK-1-8	0.04	67.72	0.06	1.34	3.64	0.80	19.16	7.88	107.90	43.93	223.55	60.53	759.87	159.46	1455.86	73.59	1382.28	0.05	0.25	280.70
QSK-1-9	126.49	407.76	43.34	195.17	54.43	9.17	113.75	35.35	362.62	108.31	411.88	89.62	933.51	175.55	3066.95	836.36	2230.59	0.37	0.37	1.31
QSK-1-10	0.07	49.81	0.08	1.09	2.50	0.71	13.16	5.48	75.23	31.23	160.46	44.45	557.63	116.09	1057.98	54.25	1003.73	0.05	0.32	143.69
QSK-1-11	7.30	104.76	2.39	12.65	6.01	1.21	23.27	9.33	126.20	51.14	257.24	68.00	807.37	160.63	1637.50	134.32	1503.18	0.09	0.29	5.95
QSK-1-12	0.29	102.08	0.26	2.98	8.75	3.10	50.67	22.17	268.28	98.00	463.57	123.34	1461.27	316.61	2921.37	117.46	2803.91	0.04	0.37	80.91
QSK-1-13	113.96	323.71	64.39	337.58	121.87	47.40	327.02	101.11	931.33	263.57	1095.34	272.09	2975.86	554.02	7620.25	1099.91	6520.34	0.17	0.58	0.88
QSK-1-14	6.25	130.47	1.43	6.36	5.23	1.36	27.59	12.04	184.66	88.62	516.62	147.93	1723.18	447.98	3299.71	151.09	3148.62	0.05	0.29	10.05
QSK-1-15	0.31	101.32	0.16	2.19	5.41	1.53	30.20	12.13	161.92	66.93	340.82	93.22	1116.87	245.60	2178.61	110.92	2067.69	0.05	0.31	107.43

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	w( $\Sigma$ REE)	w( $\Sigma$ LREE)	w( $\Sigma$ HREE)	w( $\Sigma$ LREE)/w( $\Sigma$ HREE)	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce
QSK-1-16	1.22	99.00	0.86	5.54	6.99	1.88	26.74	10.17	139.77	59.53	311.66	88.42	1121.00	234.47	2107.24	115.48	1991.76	0.06	0.39	22.08
QSK-1-17	1.29	86.28	0.34	2.22	3.77	1.09	21.81	9.61	138.34	61.10	328.12	93.63	1196.87	253.95	2198.42	94.99	2103.43	0.05	0.30	30.60
QSK-1-18	0.04	25.47	0.06	0.87	2.04	0.83	10.12	3.89	56.87	27.28	154.97	46.03	605.50	130.66	1064.63	29.31	1035.32	0.03	0.48	98.95
QSK-1-19	2.34	100.96	0.83	4.29	3.86	1.02	16.72	7.09	105.50	46.98	262.46	78.59	1026.31	217.47	1874.43	113.31	1761.12	0.06	0.35	17.20
QSK-1-20	3.81	151.07	1.71	10.57	11.65	3.04	45.26	18.43	247.82	99.97	524.54	145.22	1802.04	364.07	3429.20	181.85	3247.35	0.06	0.37	14.06
QSK-1-21	31.20	1118.12	11.71	57.55	37.72	10.20	108.07	40.39	431.64	136.08	577.03	143.48	1642.35	325.68	4671.22	1266.50	3404.72	0.37	0.48	13.93
QSK-1-22	0.11	45.69	0.10	1.12	2.05	0.66	12.88	5.90	89.49	40.04	215.42	60.09	757.83	161.41	1392.79	49.72	1343.06	0.04	0.31	97.42
QSK-1-23	0.10	435.11	0.26	3.67	10.22	1.58	60.05	27.93	389.54	158.32	730.35	178.26	1860.50	336.84	4192.72	450.93	3741.79	0.12	0.16	435.88
QSK-1-24	0.82	747.12	0.72	10.54	25.11	2.93	127.85	52.37	677.50	256.61	1146.02	265.61	2713.49	479.69	6506.39	787.25	5719.14	0.14	0.14	212.66

## 6 锆石稀土元素特征

岩浆锆石记录了岩浆的演化过程,通过锆石的稀土元素组成,可以反映晶出锆石的岩浆环境及组成(雷玮琰,2013)。笔者等在腰岭子岩体(YLZ-1)和青山口(QSK-1)岩体的锆石样品中各选取24个点进行LA-ICP-MS原位稀土元素成分分析,具体数据如表2和表3,其稀土元素球粒陨石标准化分布图如下(图8)。

腰岭子岩体(YLZ-1)中锆石稀土总量介于 $312.18 \times 10^{-6} \sim 1040.05 \times 10^{-6}$ , $\delta$ Ce值介于8.79~106.93之间, $\delta$ Eu值介于0.44~0.67。青山口岩体(QSK-1)中锆石稀土总量介于 $1057.98 \times 10^{-6} \sim 6506.39 \times 10^{-6}$ , $\delta$ Ce值介于1.31~435.88, $\delta$ Eu值介于0.14~0.48。两岩体所有样品均具有基本一致的锆石稀土元素球粒陨石配分模式(图8):整体显示为左倾型特征,表现为轻稀土相对亏损而重稀土相对富集。同时,有明显的Ce正异常和微弱的Eu负异常。

## 7 成矿条件和成矿潜力分析

### 7.1 岩浆混合与壳幔相互作用

以锆石晶形为基础将花岗岩分为3种成因类型(Pupin,1980):①地壳成因或主要为地壳成因的花岗岩(S型);②壳幔混合成因的花岗岩、混染花岗岩(I型);③地幔成因或主要是地幔成因的花岗岩(M型)。岩浆暗色微粒包体为岩浆混合作用的直接的证据之一(Hibbard,1991;张旗等,2007;王德滋和谢磊,2008),也往往存在于I型花岗岩中(Qin Jiangfeng et al.,2009;关义立等,2013,2016)。相比之下,S型花岗岩中暗色微粒包体则比较少见。野外观察发现,腰岭子和青山口两岩体均有很多暗色微粒包体(图9)。这可能是由于高温低粘度的铁镁质岩浆和长英质岩浆中主量元素尚未达到均一化程度(徐夕生等,1993;王德滋和谢磊,2008)。

对腰岭子和青山口岩体锆石群的平均温度指数和平均碱度指数计算,发现两者均落于混合源钙碱性系列花岗岩区。Pupin(1980)指出这一成因系列的花岗岩常有含量不等的暗色微粒包体,这与野外观察到的现象一致,而且两岩体锆石具有相似的稀土配分曲线,都为弱负Eu异常、正Ce异常、HREE相对平缓的左倾锆石配分曲线,暗示锆石的形成可能与起源于富集地幔源区的岩浆作用有关。

### 7.2 岩浆演化过程与物理化学条件

岩浆期的锆石可分为早、中、晚3个阶段。早阶段形成的锆石多被熔蚀成椭圆状;中阶段形成的锆石一般呈自形晶,主要被包裹于暗色矿物中或成独立的连生体;晚阶段锆石有时具环带结构,但不成连生体形态产出(陈光远等,1993)。腰岭子岩体中的锆石少数颗粒边部被熔蚀成椭圆状,呈半自形—自形,应为早—中阶段形成;而青山口岩体中的锆石多呈自形,偶有连生体,也有少量锆石被熔蚀,由此判断其结晶行为可能贯穿了整个岩浆期。已有研究表明,水对岩浆中锆石的结晶温度有较大影响,在贫水的岩浆中,锆石只在岩浆早期阶段结晶;而在富水的岩浆中,锆石的结晶作用从岩浆早期开始,可以一直持续到岩浆后期形成富集U、Th、Y等微量元素的锆石才结束(Pupin,1980)。因此认为,在岩浆

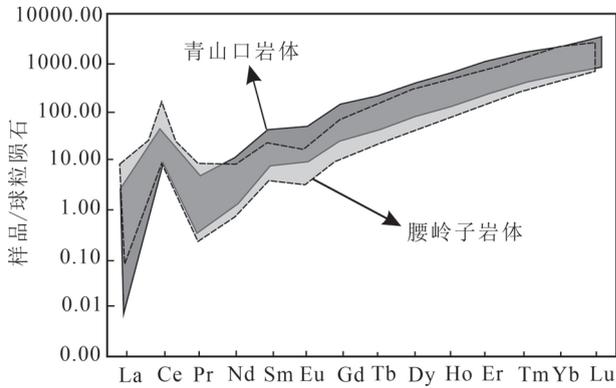


图8 冀东腰岭子和青山口岩体锆石REE球粒陨石标准化分配模式

Fig. 8 Diagrams of zircon rare earth elements of Yaolingzi and Qingshankou intrusives

演化过程中青山口岩体可能比腰岭子岩体更富水。

笔者等研究显示,腰岭子岩体中的锆石{211}锥面较{101}锥面更发育,而青山口岩体中的锆石{101}锥面较{211}锥面更发育。这指示锆石的结晶环境是从富铝向富碱变化。且已有研究表明,青山口岩体碱含量较高, $K_2O$ 介于2.68%~7.47%,平均4.86%; $Na_2O$ 介于0.40%~6.00%,平均3.68%; $K_2O+Na_2O$ 值普遍大于8%(宋扬,2011)。因此认为,在岩浆演化过程中青山口岩体比腰岭子岩体可能更富碱。

### 7.3 成矿条件及成金潜力分析

有学者通过氢氧同位素测试分析,认为金厂峪金矿成矿中晚期热液具“ $^{18}O$ 漂移”的大气降水的特征(张丽茜,2013),表明晚期的热液混入了大量的降水。这说明随着成矿流体的演化以及大气降水的加入,流体来源变得复杂,而这种复杂的变化可能导

致了金的沉淀。有学者指出产于太古宙变质岩系中的金矿床可能是热液作用成矿的结果(彭齐鸣,1994),金在区域变质及混合岩化作用阶段只是初步富集,矿床的最终形成与中生代岩浆活动有关,是中生代岩浆热液叠加矿化的结果(宋扬,2011)。结合本次研究显示的青山口岩体在岩浆演化过程中较腰岭子岩体更富水的结论,因此认为,青山口岩体在岩浆演化过程中可能经历了多期的热液叠加作用。

据测算,冀东地区金矿床石英流体包裹体的PH值为3.8~6.8(梅燕雄,1997),说明金矿沉淀时流体处于碱性—近中性条件。有学者计算出岩体总平均金含量值约为 $4.76 \times 10^{-9}$ ,是地壳平均丰度的近1.4倍(张丽茜,2013),为中国地区花岗岩金平均含量( $0.38 \times 10^{-9}$ )的12倍(史长义等,2005)。这些研究结果也都佐证了青山口岩体的形成环境较腰岭子岩体更富碱的结论。因此可以认为,富碱环境可能也是青山口岩体成矿的一个必要条件。

腰岭子和青山口锆石稀土配分模式图形态高度一致,都为弱负Eu异常、正Ce异常和HREE相对平缓的左倾锆石配分曲线,这暗示腰岭子岩体可能经历了与青山口岩体相似的岩浆演化过程,表明腰岭子岩体可能也具有较大的成矿潜力。且通过对比发现,峪耳崖式金矿在含矿岩体特征以及形成方面与腰岭子花岗闪长岩具有很大的相似性(刘政国等,2020)。峪耳崖金矿位于马兰峪复式背斜的北侧,在大地构造上属于华北克拉通北缘中段,是冀东金矿床的典型代表之一。峪耳崖金矿的赋矿岩体是以二长花岗岩为主的复式岩体,由于早—中侏罗世时期古太平洋板块开始自SE向NW方向的欧亚大陆俯冲,之后中国东部开始进入滨太平洋演化阶段,



图9 冀东腰岭子花岗闪长岩岩体(a)和青山口二长花岗岩岩体(b)中暗色包体野外地质特征

Fig. 9 Field geological features of mafic microgranular enclaves from Yaolingzi intrusives and (a) and Qingshankou intrusives (b)

花岗岩被闪长岩脉侵入(唐杰等,2018),部分闪长岩脉有金矿化,显示其与金成矿具有一定的关系。前人对冀东峪耳崖金矿区闪长岩脉的锆石 U-Pb 年龄测定结果显示,矿区内的闪长岩脉形成于 163 ~ 155 Ma 的晚侏罗世,其成矿期岩浆在上侵过程中受华北板块古老地壳物质混染有限(杨爱雪,2017)。这与本文中腰岭子花岗闪长岩 U-Pb 锆石定年、野外微粒包体等得出的结论一致,故本文认为腰岭子花岗闪长岩体可能同样具有较大的成矿潜力。

#### 7.4 两岩体的年代学特征与动力学背景

华北克拉通侏罗纪早中期(200~160 Ma)出现了几次重要的成矿事件,中—晚侏罗世为冀东地区岩浆活动最为繁盛的时期,区内发育大规模中酸性侵入体和金矿床。可能与峪耳崖金矿有成因关系的腰岭子花岗闪长岩体的结晶年龄为  $161.5 \pm 0.9$  Ma,与金厂峪金矿有关的青山口二长花岗岩体的结晶年龄为  $199.7 \pm 1.5$  Ma(宋扬,2011)。由此可见,腰岭子岩体形成于燕山期造山阶段,为中侏罗世岩浆活动的产物;青山口岩体形成于印支末—燕山早期造山阶段,为晚三叠世—早侏罗世岩浆活动的产物。自三叠纪晚期到侏罗纪中期(203~145 Ma),华北克拉通在一定程度上仍然处于碰撞造山阶段在碰撞造山过程中的松弛阶段(毛景文等,2003),大量花岗岩浆经过同熔或重熔作用生成并上侵定位,青山口岩体和腰岭子岩体就形成于这一时期。两岩体都为混合源钙碱性系列花岗岩,且稀土元素配分曲线总体呈现向左陡倾的特点,曲线形态高度相似,表明两岩体岩浆可能为同源岩浆演化。且金厂峪金矿和峪耳崖金矿的矿物组合基本一致(贾斌等,1989),故本文认为腰岭子岩体和青山口岩体可能是来自同一岩浆房的不同阶段侵位的产物。

## 8 结论

(1)腰岭子和青山口岩体中暗色微粒包体的出现及其锆石群平均温度指数和平均碱度指数的分布特征,指示两个岩体均为混合源钙碱性花岗岩,岩体形成过程中有幔源成分的加入。

(2)青山口岩体在岩浆演过程中,流体来源复杂,天水的加入与成矿流体演化导致叠加矿化,因此认为多期的热液叠加作用和富碱环境可能是青山口岩体金成矿的必要条件。

(3)腰岭子闪长岩体与峪耳崖金矿区内的闪长岩体从岩性特征、成岩年龄等都具有相似性,且两者均经历了幔源物质的混染,因此认为腰岭子岩体同

样具有较大的成矿潜力。

(4)腰岭子岩体与青山口岩体均形成于华北克拉通碰撞造山过程中的松弛阶段,稀土元素配分曲线形态高度相似,且都具有弱 Eu 负异常、Ce 正异常和 HREE 相对平缓的特征,因此认为两岩体可能来自同一岩浆房不同阶段侵位的产物。

**致谢:**样品处理得到北京铀年领航科技有限公司实验室章双荣的帮助与指导,审稿专家和责任编辑在审阅文稿时也提出了许多宝贵的建议,在此一并致以衷心的感谢!

## 参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 常秋玲,卢欣祥,宋锋. 2006. 豫西南内乡地区金矿成矿与花岗岩、构造的关系. 地质通报, 25(8): 997~1004.
- 陈光远,孙岱生,周珣等. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 陈晖,李峰,坚润堂,罗思亮,姚巍. 2010. 云南澜沧老厂花岗斑岩中锆石标型特征及地质意义. 岩石矿物学杂志, 29(1): 41~49.
- 董建乐,崔彬,王科强,刘荫春,武玉海. 2002. 冀东“长城式”金矿地质地球化学特征及成因. 地质论评, 48(S1): 230~235.
- 董学,李大鹏,赵睿,王欣然,王庆飞. 2020. 胶东泽头岩体锆石 U-Pb 年代学和岩石成因: 对区域早白垩世晚期成岩成矿作用的指示. 岩石学报, 36(5): 1501~1514.
- 董亚林,张聚全,赵文霞,李胜荣,武海. 2016. 山西省繁峙县后峪铜钼金矿锆石形态标型特征. 矿物学报, 36(1): 54~60.
- 关义立,袁超,龙晓平,王毓婧,张运迎,黄宗莹. 2013. 华南地块东部早古生代的陆内造山作用: 来自 I-型花岗岩的启示. 大地构造与成矿学, 37(4): 698~720.
- 关义立,袁超,龙晓平,张运迎,王鑫玉,黄宗莹,陈蓓,曲少东. 2016. 华南早古生代花岗岩中暗色包体的成因: 岩石学,地球化学和锆石年代学证据. 大地构造与成矿学, 40(1): 109~124.
- 郭少丰,汤中立,罗照华,赵文浩. 2009. 冀东唐杖子、牛心山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 地质通报, 28(10): 1458~1464.
- 贾斌,余昌涛,江雄新. 1989. 冀东金厂峪和峪耳崖金矿床黄铁矿及自然金标型特征. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集, 11(19): 111~121.
- 雷玮琰. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究—以缅甸硬玉岩、山西金红石矿等中锆石为例. 导师: 施光海. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~109.
- 李承东,张旗,苗来成,孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 20(2): 269~284.
- 李胜荣,许虹,申俊峰,李国武. 2008. 结晶学与矿物学. 北京: 地质出版社.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究, 32(3): 161~174.
- 廖忠礼,莫宣学,潘桂荣,朱弟成,王立全,赵志丹. 2006. 西藏过铝花岗岩锆石群型的成因信息. 大地构造与成矿学, 30(1): 63

- ~71.
- 刘家远. 1989. 花岗岩类有关金矿的找矿和研究不容忽视. 地质与勘探, 33(9): 18~19.
- 刘跃, 邓军, 王中亮, 张良, 张潮, 刘向东, 郑小礼, 王旭东. 2014. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成. 岩石学报, 30(9): 2559~2573.
- 刘政国, 王树志, 郑旭阳, 孙万里, 乔嘉曦. 2020. 冀东马兰峪地区花岗岩长岩中巨晶锆石成因分析. 地质找矿论丛, 35(4): 433~440.
- 罗镇宽, 关康, 裘有守, 苗来成, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义. 地质找矿丛, 16(4): 226~231.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学—背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(4): 289~299.
- 梅燕雄. 1997. 冀东金矿成矿特征及成矿演化. 导师: 裴荣富. 中国地质科学院硕士学位论文: 1~139.
- 牛树银, 陈华山, 孙爱群, 王强, 刘仓平, 王宝德. 2013. 冀东金厂峪金矿深部与外围找矿预测. 地质学报, 87(S1): 139~141.
- 彭齐鸣. 1994. 前寒武纪成矿作用研究中的一些进展. 地学前缘, 1(4): 157~163+94.
- 史长义, 鄢明才, 刘崇民, 迟清华, 胡树起, 顾铁新, 卜维, 鄢卫东. 2005. 中国花岗岩类化学元素丰度及特征. 地球化学, 33(5): 470~482.
- 宋扬. 2011. 冀东典型金矿床构造岩浆作用及流体成矿过程研究. 导师: 王瑞江. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~148.
- 孙长亮, 杨贵宝. 2015. 闪长岩类与金矿的关系—固阳县长胜渠矿区金矿为例. 科技展望, 25(5): 234.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 葛文春. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代—古近纪岩浆记录. 中国科学: 地球科学, 48(5): 549~583.
- 王德滋, 谢磊. 2008. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据. 高校地质学报, 14(1): 16~21.
- 徐夕生, 周新民, 王德滋. 1993. 中酸性岩浆岩中岩石包体研究的新进展. 地球科学进展, 8(4): 54~58.
- 杨爱雪. 2017. 冀东峪耳崖金矿区闪长岩脉: 时代与成因研究. 导师: 孙德有. 吉林大学硕士学位论文: 1~73.
- 杨付领, 牛宝贵, 任纪舜, 李舫. 2015. 马兰峪背斜核部中生代侵入岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. 地球学报, 36(4): 455~465.
- 张丽茜. 2013. 河北金厂峪金矿地球化学特征及成矿物质来源探讨. 导师: 胡建中. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~65.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示—关于花岗岩研究的思考之一. 岩石学报, 23(5): 1141~1152.
- Chang Qiuling, Lu Xinxinag, Song Feng. 2006&. Analysis of the relation of granite and faults to gold deposits in the Neixiang area, southwestern Henan. Geological Bulletin of China, 25(8): 997~1004.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhou Ruoxun. 1993 #. Genetic mineralogy and gold mineralization of the Guojialing granodiorite in Jiaodong. Wuhan: China University of Geosciences Press.
- Chen Hui, Li Feng, Jian Runtang, Luo Siliang, Yao Wei. 2010&. Typomorphic characteristics and geological significance of the zircon from the Laochang granite porphyry in Lancang, Yunnan province. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(1): 41~49.
- Dong Jianyue, Cui Bin, Wang Keqiang, Liu Yinchun, Wu Yuhai. 2002&. Geological characteristics and genesis of the “Great Wall-Type” gold deposits, east Hebei. Geological Review, 48(S1): 230~235.
- Dong Xue, Li Dapeng, Zhao Rui, Wang Xinran, Wang Qingfei. 2020&. Zircon U-Pb chronology and petrogenesis of Zetou pluton in the Jiaodong peninsula: Implications for regional petrogenesis and mineralization in the Aptian to Albian. Acta Petrologica Sinica, 36(5): 1501~1514.
- Dong Yalin, Zhang Juquan, Zhao Wenxia, Li Shengrong, Wu Hai. 2016&. Crystal form typomorphic characteristics of zircon from Houyu Cu—Mo—Au deposit in Shanxi province, China. Acta Mineralogica Sinica, 36(1): 54~60.
- Guan Yili, Yuan Chao, Long Xiaoping, Zhang Yunying, Wang Xinyu, Huang Zongying, Chen Bei, Qu Shaodong. 2016&. Genesis of mafic enclaves from early Paleozoic granites in the south China block: evidence from petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology. Geotectonica et Metallogenia, 40(1): 109~124.
- Guan Yili, Yuanchao, Long Xiaoping, Wang Yujing, Zhang Yunying, Huang Zongying. 2013&. Early Paleozoic intracontinental orogeny of the eastern south China block: evidence from I-type granitic plutons in the SE Yangtze block. Geotectonica et Metallogenia, 37(4): 698~720.
- Guo Shaofeng, Tang Zhongli, Luo Zhaohua, Zhao Wenhao. 2009&. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological significance from granite bodies in Tangzhangzi and Niuxinshan, eastern Hebei province. Geological Bulletin of China, 28(10): 1458~1464.
- Hibbard M J. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitic systems. In: Didier J and Barbarin B. eds. Enclaves and Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier, 13: 431~444.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27~62.
- Jia Bin, Yu Changtao, Jiang Xiongxin. 1989&. Typomorphic features of pyrite and native gold from Jinchangyu and Yuerya gold deposits of eastern Hebei. Bulletin Shenyang institute geological mineral resources. Chinese Academy of Geological Sciences, 11(19): 111~121.
- Lei Weiyan. 2013&. Trace element composition of zircon from Myanmar jadeite, the Daixian rutile deposit and the Huangbaikeng rhyolite porphyry. Supervisor: Shi Guanghai. Beijing: Master thesis of China University of Geosciences (Beijing): 1~109.
- Li Changmin. 2009&. A Review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons. Geological Survey and Research, 32(3): 161~174.
- Li Chengdong, Zhang Qi, Miao Laicheng, Meng Xianfeng. 2004&. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei province: geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 269~284.
- Li Shengrong, Xu Hong, Shen Junfeng, Li Guowu. 2008 #. Crystallography and mineralogy. Beijing: Geological Publishing House.
- Liao Zhongli, Mo Xuanxue, Pan Guitang, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Zhao Zhidan. 2006&. Characteristics and implication of the topology of zircons from the peraluminous granites in Tibet. Geotectonics and Metallogeny, 30(1): 63~71.
- Liu Jiayuan. 1989#. The prospecting and research of granitoids related

- gold deposits should not be ignored. *Geology and Exploration*, 33(9): 18~19.
- Liu Yue, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Zhang Chao, Liu Xiangdong, Zheng Xiaoli, Wang Xudong. 2014#. Zircon U-Pb age, Lu-Hf isotopes and petrogeochemistry of the monzogranites from Xincheng gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2559~2573.
- Liu Zhengguo, Wang Shuzhi, Zheng Xuyang, Sun Wanli, Qiao Jiayi. 2020#. Genesis study on the megacrystal zircons of the granodiorite in the Malanyu area, eastern Hebei province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 35(4): 433~440.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 4(2): 1~70.
- Luo Zhenkuan, Guan Kang, Qiu Youshou, Miao Laicheng, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001#. Zircon SHRIMP U-Pb dating of albite dike in Jinchangyu Gold mine, Jidong area, Hebei, China. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(4): 226~231.
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, Wang Yitian, Niu Baogui. 2003#. Geodynamics of Mesozoic large-scale mineralization in North China and its adjacent areas: implications from precise dating of metal deposits. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 33(4): 289~299.
- Mei Yanxiang. 1997#. The metallogenic characteristics and evolution of gold deposits in Jidong region, Hebei province, China. Supervisor: Pei Rongfu. Beijing: Doctoral thesis of Chinese Academy of Geological Sciences; 1~139.
- Niu Shuyin, Chen Huashan, Sun Aiqun, Wang Qiang, Liu Cangping, Wang Baode. 2013#. Deep and peripheral prospecting prediction of Jinchangyu gold deposit in eastern Hebei province. *Acta Geologica Sinica*, 87(S1): 139~141.
- Peng Qiming. 1994#. Some advances in Precambrian metallogeny research. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 1(4): 157~163+94.
- Pupin J P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 207~220.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Grapes R, Diwu Chunrong, Ju Yinjuan, Li Yongfei. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China). *Lithos*, 112(3~4): 259~276.
- Shi Changyi, Yan Mingcai, Liu Chongmin, Chi Qinghua, Hu Shuqi, Gu Tiexin, Bu Wei, Yan Weidong. 2005#. Abundance of chemical elements in granitoids of China and their characteristics. *Geochimica*, 33(5): 470~482.
- Siebel W, Schmitt A K, Danišák Martin, Chen Fukun, Meier S, Weiß S, Ero lu S. 2009. Prolonged mantle residence of zircon xenocrysts from the western Eger rift. *Nature Geoscience*, 2(12): 886~890.
- Song Yang. 2011#. Study for the tectono—magmatic fuction and fluid metallogenic process of typical gold deposits in Jidong region, Hebei province. Supervisor: Wang Ruijiang. Beijing: Doctoral thesis of China University of Geosciences (Beijing); 1~148.
- Spetsius Z V, Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2002. Archean sulfide inclusions in Paleozoic zircon megacrysts from the Mir kimberlite, Yakutia: implications for the dating of diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1): 111~126.
- Sun Changliang, Yang Guibao. 2015#. Relationship between diorites and gold deposits: a case study of changshengqu gold deposit, Guyang city. *Science and Technology*, 25(5): 234.
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, Ge Wenchun. 2018#. Subduction history of the Paleo-Pacific plate under Eurasia: Mesozoic and Paleogene magmatic records in northeast Asia continental margin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 48(5): 549~583.
- Wang Dezi, Xie Lei. 2008#. Magmatic mixing: evidence from enclaves. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 16~21.
- Xu Xisheng, Zhou Xinmin, Wang Dezi. 1993#. Advances of research on enclaves in intermediate—acidic magmatic rocks. *Advance in Earth Sciences*, 8(4): 54~58.
- Yang Aixue. 2017#. The diorite from Yu'erya gold deposit area in eastern Hebei province, China: geochronology and petrogenesis. Supervisor: Sun Deyou. Changchun: Master thesis of Jilin University; 1~73.
- Yang Fuling, Niu Baogui, Ren Jishun, Li Dan. 2015#. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Mesozoic intrusive bodies along the core of malanyu Anticline and their tectonic significances. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(4): 455~465.
- Zhang Liqian. 2013#. Discussion on the geochemical characteristics and mineral sources for mineralization in Jinchangyu gold deposit of Hebei province. Supervisor: Hu Jianzhong. Beijing: Master thesis of China University of Geosciences (Beijing); 1~65.
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2007#. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process; some crucial questions on granite study (1). *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1141~1152.

## Mesozoic magmatism and metallogenic significance in eastern Hebei gold belt: Evidence from zircon mineralogy

ZHANG Daiyue<sup>1)</sup>, WANG Shuzhi<sup>1)</sup>, CAO Chong<sup>1)</sup>, WANG Tao<sup>2)</sup>, GUO Zhihua<sup>1)</sup>

1) School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, 063210;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

**Objectives:** The Jinchangyu gold deposit in eastern Hebei Province is considered to be related to the Qingshankou granodiorite intrusive. However, the Yaolingzi granodiorite intrusive is less studied in spite of closing to the mining area. Due to the great similarity between the two intrusives in lithology and tectonic setting, it is

necessary to discuss the possible reasons for the difference in metallogenic conditions and metallogenic potential.

**Methods:** Based on detailed field observations of Yaolingzi and Qingshankou intrusives, the methods of transmitted light, cathodoluminescence (CL) image, crystal morphology and statistical analysis were used for granodiorite and monzogranite so as to explain conditions of magmatism. The U-Pb isotopic dating by LA-ICP-MS was conducted for the granodiorite in order to determine the igneous intrusion age. Moreover, rare earth element (REEs) geochemistry of zircons was conducted for granodiorite and monzogranite for discussing magmatism, mineralization and tectonic background in the region.

**Results:** The results show that the formation temperature of the two zircons are 650~800°C and 650~850°C, respectively. The crystallization age of granodiorite from Yaolingzi is 161.5±0.9 Ma. Obvious mafic microgranular enclaves are found in the two intrusives in the field. The REEs geochemical features of the two intrusives show that LREE is relatively depleted while HREE is relatively enriched with obvious positive Ce anomaly and negative Eu anomaly at the same time.

**Conclusions:** Large amount of magmatic water and alkaline-riched environment may be the necessary conditions for the Qingshankou intrusive mineralization. The ore-forming features of granodiorite as well as crystallization age in Yaolingzi area are similar to the diorite in Yuerya gold deposit area. Therefore, we consider that granodiorite intrusive in Yaolingzi have great gold-forming potential. Field geological observations and REEs geochemical analysis indicate that the two intrusions may have experienced crust—mantle mixing. Combined with the results of Qingshankou intrusive age and tectonic background, it is suggested that the two intrusives may come from the same magmatic chamber in different stages.

**Keywords:** zircon morphology; magmatic evolution; zircon U-Pb age; metallogenic potential; eastern Hebei province

**Acknowledgements:** This study is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42002098) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (Nos. D2019209531, D2020209017)

**First author:** ZHANG Daiyue, female, born in 2001, student, bachelor degree, major in resource exploration engineering; Email: 2403130182@qq.com

**Corresponding author:** WANG Shuzhi, male, born in 1987, Ph. D of structural geology, mainly engaged in regional structure and regional metallogenic regularity research work; Email: wangszh@ncst.edu.cn

**Manuscript** received on: 2022-03-05; Accepted on: 2022-05-30; Network published on: 2022-06-20

**Doi:** 10. 16509/j. georeview. 2022. 06. 131

**Edited by:** LIU Zhiqiang

