

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2020.04.008

冀东马兰峪地区花岗闪长岩中 巨晶锆石成因分析

刘政国,王树志,郑旭阳,孙万里,乔嘉曦

(华北理工大学,河北唐山063210)

摘要: 巨晶锆石由于稳定性强,能够很好地保存其形成时的标型和化学特征而成为最重要的矿物地球化学探针之一。本文在通过对冀东马兰峪腰岭子花岗闪长岩中锆石矿物进行阴极射线致发光(CL)图像分析、晶体形态学统计学分析的基础上,结合等离子质谱(LA-ICP-MS)测试工作,解析了马兰峪金矿花岗闪长岩中巨晶锆石的微量元素组成特征,并依据 Pupin 等(1980)提出的锆石类型分类的主型和亚型及其地质温度表,研究结果表明:巨晶锆石的形成温度 650~850℃,巨晶锆石的 LA-ICP-MS 分析显示 Ce 正异常和不明显 Eu 的负异常,并且富集重稀土元素;巨晶锆石可能与区内峪耳崖式金矿存在成因联系。

关键词: 腰岭子花岗闪长岩;巨晶锆石;形成温度;微量元素;成矿作用;马兰峪地区;冀东

中图分类号: P571 **文献标识码:** A

0 引言

锆石分布广泛,具有明显成因标型,且能很好地赋存一定含量的微量元素,因此其蕴藏了大量的、容易被捕获的地质信息。将锆石形态学与微量元素地球化学相结合^[1-5]进行综合研究,可以获得最全面、系统的成因矿物学信息。近些年来,随着微区分析技术的发展,巨晶锆石因其晶体稳定性高、结晶粒度大及晶面结构清晰等优势,在其形态学(标型特征)和地球化学的研究上越来越受到地质学界的青睐^[6-7]。当前,国内外对巨晶锆石的研究往往与岩浆作用相联系,通过结合其形态学和地球化学的特征来反演岩浆-成矿作用,并取得了卓越成果。而由于巨晶锆石一般出现于碱性玄武岩^[8]和高压金伯利岩中^[9],主要由基性-超基性岩浆在地幔作用下结晶

形成^[10-11];少量出现于橄榄岩脉中,其形成很可能与热液流体有关^[12];产于中酸性岩体的巨晶锆石却罕有报道。

本文基于河北省自然科学基金项目“冀东马兰峪地区腰岭子花岗闪长岩巨晶锆石成因研究”等工作,利用阴极发光(CL)和激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)对发现于马兰峪地区腰岭子花岗闪长岩(酸性侵入岩)中的巨晶锆石进行形态学与微量元素地球化学特征研究,以期获得巨晶锆石形成时的岩浆作用环境参数,以便探讨研究区内与之相关的成矿作用。

1 地质概况

冀东马兰峪复背斜地处华北燕山板内造山带东段,西起平谷、东至秦皇岛,整体倾向近 EW 向,长

收稿日期: 2020-04-07; **改回日期:** 2020-07-09; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 河北省自然科学基金项目“冀东马兰峪地区腰岭子花岗闪长岩巨晶锆石成因研究”(编号:D2019209531)、华北理工大学大学生创新创业训练计划项目(编号:X2019212)联合资助。

作者简介: 刘政国(1997—),男,学生,本科,从事矿床学方面的研究工作。通信地址:河北省唐山市曹妃甸新城渤海大道21号,华北理工大学矿业工程学院;邮政编码:063210;E-mail:liuzhg100@163.com

通信作者: 王树志(1987—),男,讲师,博士,主要从事区域构造和区域成矿规律研究工作。通信地址:河北省唐山市曹妃甸新城渤海大道21号,华北理工大学矿业工程学院;邮政编码:063210;E-mail:wangszh@ncst.edu.cn

约 110 km,核部宽 25~30 km,区内受各方向构造的复合控制。沿背斜核部产出有 EW 向和 NNE 向线状分布的大量中生代中酸性花岗岩及闪长岩类岩浆岩,包括都山、青山口、肖营子、孤山子和腰岭子等数十个侵入体^[13]。同时在马兰峪(复背斜)地区存在整体呈 EW 向展布的金矿床(点)百余处(图 1a),形成了冀东地区主要的金矿集区^[14]。本文研究的主体为马兰峪地区中生代侵入体之一的腰岭子花岗闪长岩。

腰岭子花岗闪长岩岩体(图 1b)位于冀东马兰峪复背斜东部,地处金厂峪金矿与峪耳崖金矿之间,其北东距离金厂峪金矿 3~4 km,出露面积仅 2 km² 左右。腰岭子花岗闪长岩(图 2)岩性特征为褐黄色,中粒状、花岗结构(图 2b),主要由长石、石英、黑云母和角闪石组成,其中长石含量(体积分数)约占 60%,石英 20%,黑云母约 10%,角闪石约 5%。

2 锆石形态学特征

将腰岭子花岗闪长岩中的锆石分离出来制成薄

片。在光学显微镜下观察锆石薄片,可以看到锆石整体为淡黄色,一些区域发黑;锆石的自形度较高,多呈自形晶体,且锥面与柱面的自形度基本一致。

对锆石样品进行阴极发光照相(图 3)。本次研究共采集了 240 粒锆石的 CL 图像样本,在 CL 图像下可明显看出锆石晶形均比较大,绝大部分晶体大小超过了 700 μm ,相当一部分晶体达到巨晶大小($\geq 1\text{ mm}$),最大可达 2 mm。锆石可见清晰的震荡环带结构,部分锆石能见到核部和边部有熔蚀现象,锆石核部发育有大量的包裹体,其表明锆石形成的地质环境相对复杂。

利用 Pupin 等(1980)提出的一种以锆石形态学的详细研究为基础的花岗岩岩石成因分类方法,以锆石($\{100\}-\{110\}$)、锥面($\{101\}-\{201\}$)的相对发育程度可将锆石样品分为 64 种晶型,并根据分类可判断锆石结晶时的物理化学条件^[16]。图 4a 为腰岭子花岗闪长岩 240 粒锆石样品的类型分布图,可以明显看出锆石的主要类型为 S_5 、 Q_5 、 S_{22} 和 S_{24} (分别见图 3 中 a、b、c、d),同时含其它类型各有少量。尽管锆石类型多样,但其所反映的形成温度几乎都集

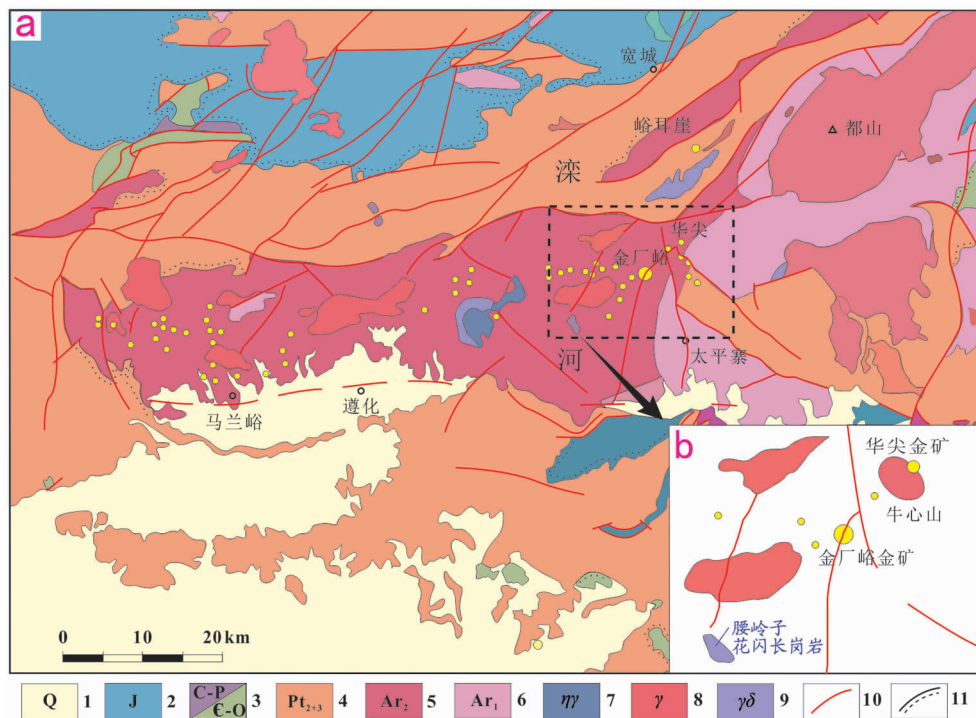


图 1 研究区地质图(据文献[14-15],修编)

Fig. 1 Geological map of the study area

a. 马兰峪地区地质简图; b. 腰岭子花岗闪长岩岩体及周围岩体与金矿; 黄色圆圈表示金矿点

1. 第四系; 2. 侏罗系; 3. 石炭-二叠系/寒武-奥陶系;

4. 中下元古界(长城系+蓟县系+青白口系); 5. 遵化群; 6. 迁西群;

7. 二长花岗岩; 8. 花岗岩; 9. 花岗闪长岩; 10. 断裂; 11. 角度不整合

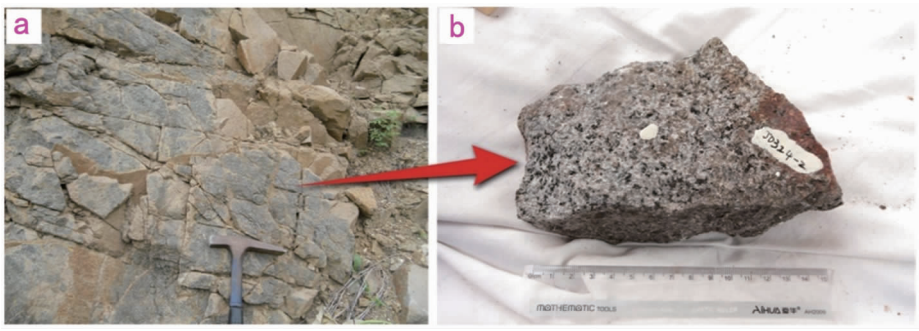


图 2 腰岭子花岗闪长岩野外露头及手标本

Fig. 2 Field and hand specimens of Yaolingzi granodiorite

a. 花岗闪长岩野外露头照片; b. 花岗闪长岩手标本照片

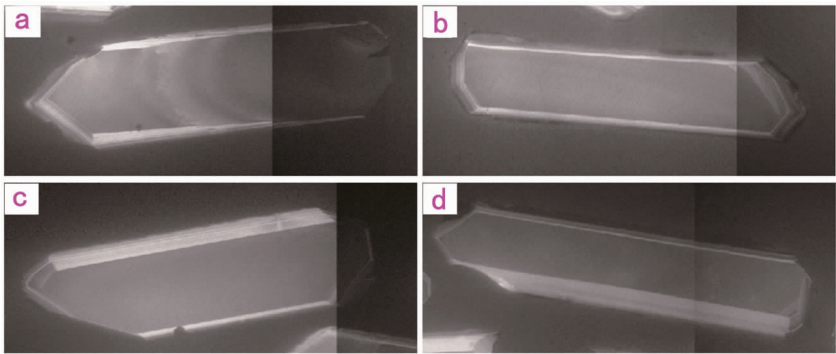


图 3 腰岭子花岗闪长岩中巨晶锆石主要类型阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of main types of megacrystal zircon in Yaolingzi granodiorite

a. S₅ 型锆石阴极发光图像; b. Q₅ 型锆石阴极发光图像;
c. S₂₂ 型锆石阴极发光图像; d. S₂₄ 型锆石阴极发光图像

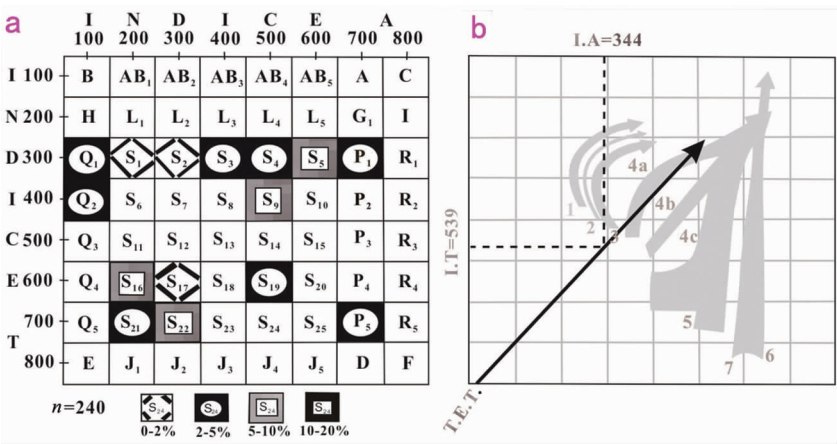


图 4 腰岭子花岗闪长岩中巨晶锆石总体表示方法

Fig. 4 A general representation of megacrystal zircon in Yaolingzi granodiorite

a. 观察到的亚型及总体的类型频率分布;
b. 总体(I. A, I. T)图上的平均点(I. A, I. T)及计算的“类型趋势演化线”

中在 650~850℃ 范围内,这可能表明锆石的结晶作用在岩浆的早期阶段便已经开始,并一直持续到岩浆期末;同时显示锆石的晶出温度主要集中在 850℃ 和 650℃ 两个温度值附近。图 4b 为锆石类型

总体的平均点和平均类型演化趋势线的分布,可以明显看出腰岭子花岗闪长岩中巨晶锆石的平均类型演化趋势与代表钙-碱系列花岗岩的 4b 型演化类型相符。

林正雄等(1991)也提出了一套新的晶体形态记录方法^[17],这种方法适用于所有类型的锆石。为依

据此方法进行锆石晶形描述,我们挑选腰岭子花岗闪长岩样品中非常完整的 14 粒锆石,按照林正雄等总结的四个公式^[17]计算出了样品锆石的柱面指数、锥面指数、伸长指数以及扁平指数,并绘制“柱面-锥面-伸长-扁平图”(PPEF 图)。由图 5 可看出,腰岭子花岗闪长岩锆石主要为高温的 100 型和中间过渡型,夹少量 110 型($PR=0.59\pm0.21$),锥面发育总体为中高型锥面夹少量低的锥面($PY=0.40\pm0.13$),呈柱状-长柱状($EI=0.59\pm0.16$),其厚度具有从薄到中厚再到厚的宽大范围,扁平指数 FI 最小为 0.24,最大可达 0.88。

3 锆石微量元素地球化学特征

3.1 微量元素蛛网图

对腰岭子花岗闪长岩的锆石样品选取 26 个点进行了 LA-ICP-MS 原位微量元素成分分析,其分析结果如表 1 所述,球粒陨石标准化蛛网图如图 6 所示。

图 5 腰岭子花岗闪长岩中巨晶锆石 PPEF 图解

Fig. 5 PPEF diagram of megacrystal zircon in Yaolingzi granodiorite

表 1 腰岭子花岗闪长岩体中锆石稀土元素含量与特征值

Table 1 REE content of zircon in Yaolingzi granodiorite

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
J242-01	0.03	15.76	0.34	6.39	11.43	3.18	44.12	14.30	164.31	56.79	238.19	56.76
J242-02	0.01	14.99	0.22	4.73	9.35	2.44	35.62	12.05	138.80	47.59	201.35	47.89
J242-03	0.04	19.69	0.44	7.82	12.92	3.32	49.28	16.95	199.73	69.47	296.65	71.22
J242-04	0.03	15.75	0.27	4.73	8.38	2.17	33.33	11.83	141.06	50.93	222.49	54.09
J242-05	0.05	21.11	0.07	1.45	3.64	0.92	18.43	7.05	94.11	37.49	181.54	49.18
J242-06	0.02	20.53	0.14	2.92	6.04	1.46	25.76	9.41	118.78	45.13	209.23	54.13
J242-07	0.01	40.26	0.15	2.86	6.33	1.58	29.96	11.83	154.43	59.72	283.12	74.44
J242-08	0.28	59.89	0.60	8.93	15.45	5.23	70.82	23.50	275.32	96.14	407.58	96.81
J242-09	0.02	13.28	0.08	1.55	3.62	1.12	16.42	6.09	80.27	31.78	147.03	38.57
J242-10	0.02	12.61	0.07	1.34	3.02	0.83	14.67	5.18	66.95	26.05	126.63	32.15
J242-11	0.07	23.64	0.62	10.03	18.07	5.98	75.95	24.30	269.66	88.93	367.66	84.08
J242-12	0.02	9.18	0.06	1.14	2.93	0.81	12.95	4.75	59.89	22.15	100.83	25.66
J242-13	0.07	10.45	0.09	1.90	3.88	1.39	17.21	5.94	68.12	23.58	103.78	25.58
J242-14	0.06	20.95	0.56	9.20	15.36	4.69	63.78	21.36	237.60	81.07	339.71	79.81
J242-15	0.02	20.11	0.28	5.61	9.98	2.47	41.97	14.57	168.95	59.07	257.07	62.51
J242-16	2.57	23.47	0.68	4.54	4.30	1.14	19.56	7.17	91.95	36.68	177.13	46.94
J242-17	0.02	15.96	0.15	3.28	6.29	1.46	25.93	9.16	111.15	40.41	182.91	45.90
J242-18	0.02	16.56	0.18	4.17	8.85	2.27	36.92	12.08	138.62	48.62	206.29	49.41
J242-19	0.04	15.22	0.35	6.17	10.41	3.20	42.23	13.80	156.86	53.74	230.26	54.39
J242-20	0.03	18.14	0.34	6.50	11.09	2.70	43.55	14.44	168.16	59.10	254.41	60.48
J242-21	0.04	15.56	0.32	5.20	9.07	2.83	41.94	14.21	168.04	57.82	246.90	58.42
J242-22	0.09	25.74	0.62	10.41	18.82	6.23	85.41	27.41	304.43	104.61	431.04	100.17
J242-23	0.02	17.94	0.27	4.87	8.40	2.27	33.18	11.48	137.68	50.27	219.01	54.44
J242-24	0.02	14.51	0.27	4.75	8.97	2.72	34.57	11.19	130.31	46.10	194.36	47.84
J242-25	0.02	19.66	0.17	3.69	8.68	2.01	34.74	11.86	141.16	49.16	214.94	52.24
J242-26	0.03	18.82	0.43	7.78	12.30	3.13	48.01	16.39	192.44	68.09	297.48	69.03

(转下页)

(续表 1)

样号	Yb	Lu	Y	$w(\Sigma\text{REE})$	$w(\text{LREE})$	$w(\text{HREE})$	$w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$	δEu	δCe	$w(\text{Lu})/w(\text{Gd})$	$w(\text{Yb})/w(\text{Sm})$
J242-01	620.83	120.03	1498.24	1352.47	37.13	1315.33	0.03	0.43	36.43	2.72	54.32
J242-02	528.85	101.53	1277.97	1145.42	31.74	1113.68	0.03	0.41	65.45	2.85	56.56
J242-03	788.06	150.99	1837.03	1686.57	44.22	1642.35	0.03	0.40	38.80	3.06	61.00
J242-04	616.86	118.35	1354.94	1280.26	31.32	1248.94	0.03	0.40	46.08	3.55	73.61
J242-05	603.29	124.99	1084.19	1143.32	27.24	1116.08	0.02	0.34	89.60	6.78	165.74
J242-06	633.12	126.43	1274.57	1253.10	31.12	1221.99	0.03	0.36	87.46	4.91	104.82
J242-07	891.98	173.94	1653.96	1730.62	51.19	1679.42	0.03	0.35	210.23	5.81	140.91
J242-08	1042.79	202.77	2572.77	2306.11	90.38	2215.73	0.04	0.48	35.73	2.86	67.49
J242-09	448.95	92.31	868.32	881.08	19.66	861.42	0.02	0.44	94.38	5.62	124.02
J242-10	388.50	81.36	741.33	759.38	17.89	741.49	0.02	0.38	77.01	5.55	128.64
J242-11	932.58	174.97	2373.37	2076.54	58.41	2018.13	0.03	0.49	27.44	2.30	51.61
J242-12	306.51	62.61	621.69	609.49	14.14	595.35	0.02	0.40	63.60	4.83	104.61
J242-13	292.77	55.09	666.30	609.85	17.78	592.07	0.03	0.52	32.61	3.20	75.46
J242-14	868.56	163.24	2158.87	1905.95	50.82	1855.13	0.03	0.46	28.26	2.56	56.55
J242-15	702.70	134.92	1627.73	1480.23	38.47	1441.76	0.03	0.37	75.29	3.21	70.41
J242-16	561.14	117.38	1060.16	1094.64	36.70	1057.95	0.03	0.38	4.35	6.00	130.50
J242-17	533.91	106.97	1116.09	1083.49	27.16	1056.34	0.03	0.35	71.62	4.13	84.88
J242-18	547.70	104.84	1293.09	1176.52	32.05	1144.48	0.03	0.38	72.36	2.84	61.89
J242-19	609.02	117.17	1442.92	1312.86	35.38	1277.47	0.03	0.47	33.77	2.77	58.50
J242-20	676.91	129.82	1588.64	1445.67	38.80	1406.87	0.03	0.38	47.72	2.98	61.04
J242-21	645.42	126.93	1568.14	1392.70	33.01	1359.68	0.02	0.44	35.90	3.03	71.16
J242-22	1081.28	204.58	2779.09	2400.84	61.91	2338.93	0.03	0.48	27.15	2.40	57.45
J242-23	610.59	122.50	1404.00	1272.92	33.77	1239.15	0.03	0.42	54.65	3.69	72.69
J242-24	528.80	104.11	1205.12	1128.53	31.25	1097.28	0.03	0.47	44.72	3.01	58.95
J242-25	590.11	115.22	1353.82	1243.66	34.23	1209.43	0.03	0.35	79.00	3.32	67.99
J242-26	758.23	145.83	1871.83	1637.99	42.49	1595.50	0.03	0.39	38.43	3.04	61.64

量单位: $w_B/10^{-6}$ 。

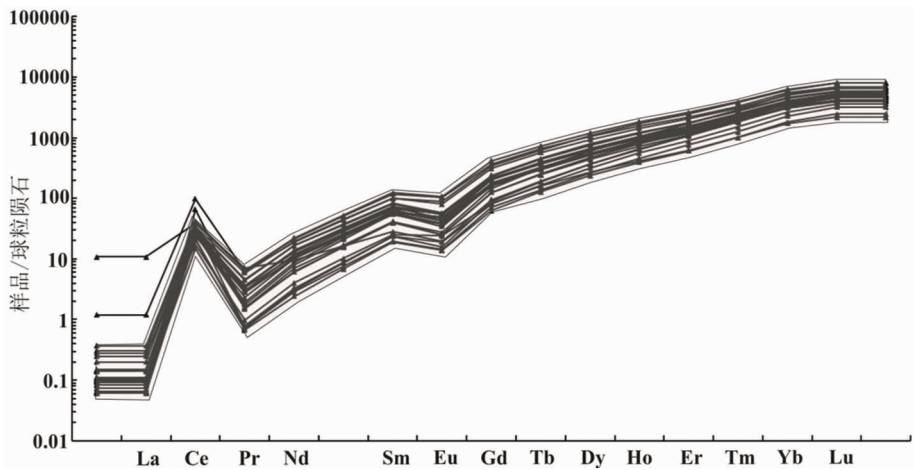


图 6 腰岭子花岗闪长岩巨晶锆石 REE 球粒陨石标准化分配模式

Fig. 6 Chondrite normalized REE pattern of megacrystal zircon in Yaolingzi granodiorite

从表 1 不难看出,腰岭子花岗闪长岩体中锆石稀土总量 $w(\Sigma\text{REE})$ 值均 $>609.49 \times 10^{-6}$, 平均 1361.93×10^{-6} , 最高达 2400.84×10^{-6} 。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 6):整体为左倾,轻稀土相对亏损,重稀土富集。同时,有明显的 Ce 正异常和微弱的 Eu 负异常;

$w(\text{Lu})/w(\text{Gd})$ 值范围在 $2.30 \sim 6.78$; $w(\text{Yb})/w(\text{Sm})$ 值范围 $51.61 \sim 165.73$, 大部分集中在 $50 \sim 70$ 之间,比值均很大,重稀土部分较陡,属于典型的壳源岩浆岩锆石。

3.2 锆石 Ti 温度 (T_{zircon})

锆石是一种能够较好地反应岩浆形成时温度的

矿物,其中微量元素 Ti 是对岩浆形成温度的灵敏指示元素,能在地质活跃期间普遍保持封闭性^[18]。

本次研究测量出部分腰岭子花岗闪长岩体锆石样品中 Ti 的含量分布范围 $w(\text{Ti}) = 3.11 \times 10^{-6} \sim 11.54 \times 10^{-6}$ 。根据锆石的 Ti 含量,利用 Watson 等^[18]提出的温度计算公式 ($T_{\text{zircon}} = (5080 \pm 30) / [(6.01 \pm 0.03) - \log(\text{Ti})] - 273$) 测算出锆石的结晶温度范围在 653~759℃ 之间(表 2)。

4 成因分析

Pupin 等^[16]在对各类花岗岩中锆石类型演化趋势线资料对比的基础上提出:地壳与地幔来源的花岗岩可分为 4a、4b、4c 三大分支,其中 4b 分支的岩石组合为“黑云母花岗闪长岩与角闪石花岗闪长岩”。这与本文研究中所鉴定的腰岭子花岗闪长岩矿物组合相一致,由此可佐证锆石类型演化趋势线所获得的结论:腰岭子花岗闪长岩体是地壳与地幔来源的混合花岗岩体。而据锆石微量元素地球化学特征了解到,花岗闪长岩中的锆石来源于壳源型岩浆。由此可知,腰岭子花岗闪长岩的形成是多来源的,但是形成巨晶锆石的壳源性岩浆与形成花岗闪长岩的壳幔混合型岩浆是否有关系,他们的时空演

化是怎样的,还需要进一步去考证。

金矿与闪长岩类共同产出作为一种重要的现象,已越来越引起人们的重视。岩浆演化与相互作用的方式决定了成矿作用的类型与特征,梅燕雄^[14]将冀东中酸性岩浆岩分为幔-壳过渡型深熔系列、壳-幔过渡型同熔系列以及壳型重熔系列,而壳型重熔系列与金矿成矿较为密切。根据含金石英脉的产出特征及成因,将石英脉型金矿划分为金厂峪式、倒流水式、峪耳崖式等三种矿床类型(表 3)。

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多的相似性。峪耳崖式金矿位于马兰峪复式背斜核部,地处遵化太古宙变质地体的边缘断陷带,与腰岭子花岗闪长岩位于同一构造区域。梅燕雄^[14]认为峪耳崖式金矿含金岩体主要是燕山早期浅成、超浅成花岗岩类小侵入体(出露面积一般小于 1.0 km²),多为灰白色花岗岩与肉红色花岗岩组成的复式岩体^[14];含金复式岩体属于同源不同阶段侵位的产物,两者为迅速过渡的关系,侵入时间间隔很短^[14]。这与本文进行巨晶锆石研究的腰岭子花岗闪长岩应是同时同地形成的产物、形成过程经历了多个岩浆阶段相符。而在时空关联上,贾斌等^[24]得出峪耳崖花岗岩的成岩时间为 169 Ma,本文所研究的花岗闪长岩与其具有相符的成岩时间。而封文学在对峪耳崖金矿

表 2 锆石结晶温度计算结果

Table 2 Calculation of zircon crystallization temperature

样号	$w(\text{Ti})/10^{-6}$	$T_{\text{zircon}}/^\circ\text{C}$	样号	$w(\text{Ti})/10^{-6}$	$T_{\text{zircon}}/^\circ\text{C}$	样号	$w(\text{Ti})/10^{-6}$	$T_{\text{zircon}}/^\circ\text{C}$	样号	$w(\text{Ti})/10^{-6}$	$T_{\text{zircon}}/^\circ\text{C}$
J242-01	6.61	720.90	J242-08	9.97	700.55	J242-15	4.12	696.82	J242-22	8.41	718.73
J242-02	5.14	674.16	J242-09	6.72	731.88	J242-16	5.48	700.48	J242-23	6.69	694.30
J242-03	5.38	696.42	J242-10	4.98	712.62	J242-17	4.47	700.63	J242-24	11.54	735.54
J242-04	5.39	680.41	J242-11	8.19	759.78	J242-18	4.79	686.48	J242-25	3.11	691.21
J242-05	4.51	685.78	J242-12	4.79	653.19	J242-19	6.75	689.55	J242-26	6.41	712.17
J242-06	4.69	713.35	J242-13	6.21	709.10	J242-20	5.01	691.21			
J242-07	4.79	689.31	J242-14	7.39	717.35	J242-21	5.77	752.84			

表 3 石英脉型金矿矿床类型及特征

Table 3 Types and characteristics of quartz vein type gold deposits

矿床类型	石英脉型			
	金厂峪式	倒流水式	峪耳崖式	
矿床形式	金厂峪	倒流水、偏道沟	峪耳崖	牛心山
典型矿床	金厂峪	倒流水、偏道沟	峪耳崖	牛心山
与金矿相关的主要岩石类型	钠长石脉、钠长石石英脉、石英脉	花岗斑岩、石英脉	花岗岩、闪长岩脉	似斑状花岗岩、中细粒花岗岩
岩石成因类型是否为壳源重融型	是	未知	是	是
岩浆条件	多期形成	多阶段性	多期次侵入	两期侵入
资料来源	根据文献[19-20]	根据文献[14]	根据文献[21-22]	根据文献[19-20,23]

床的成因研究中通过对矿石中铅同位素的测定得出其成矿物质来源于下地壳^[25],这与本文通过锆石稀土元素球粒陨石配分模式图及相关微量元素比值得出的花岗闪长岩中锆石的岩浆来源相符合。胡少华等已将峪耳崖金矿与其矿区的闪长岩脉岩联系起来,并将下一步找矿前景定于闪长岩上^[26]。因此,今后在峪耳崖地区的金矿勘查工作要重视、开展对花岗岩体外围的勘查研究。

5 结论

(1)本文计算出了腰岭子花岗闪长岩($\gamma\delta$)中巨晶锆石的各项指数,并与屋久岛花岗岩锆石、紫尾山花岗岩和市房山花岗岩的锆石的晶形指数进行对照,发现腰岭子花岗闪长岩中的锆石生成温度范围较大。

(2)腰岭子花岗闪长岩中巨晶锆石结晶温度在650~850℃,锆石的结晶作用在岩浆的早期阶段便已经开始,并一直持续到岩浆期末,且岩浆作用具有多阶段性。

(3)腰岭子花岗闪长岩属地壳与地幔混合来源的花岗岩;通过腰岭子花岗闪长岩中锆石微量元素地球化学数据分析得出,花岗闪长岩中的锆石来源于壳源岩浆。

(4)腰岭子花岗闪长岩体可能与峪耳崖式金矿在成因上密切相关,今后在峪耳崖地区的金矿勘查要重视岩体外围的工作。

参考文献:

- [1] Belousova E. Zircon Crystal Morphology, Trace Element Signatures and Hf Isotope Composition as a Tool for Petrogenetic Modelling: Examples From Eastern Australian Granitoids [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 47(2): 329–353.
- [2] 周剑雄, 陈振宇. 电子探针下锆石等矿物的阴极发光研究[J]. *中国地质*, 2001, 28(12): 37–38.
- [3] 周剑雄, 陈振宇. 锆石等测年矿物的电子探针及阴极射线致发光综合研究新方法[J]. *地质论评*, 2002(s1): 31–35.
- [4] 周剑雄, 陈振宇. 电子探针下锆石阴极发光的研究[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007: 1–104.
- [5] Nallusamy B. Morphology, Trace, and Rare Earth Elements of Detrital Zircon of Kayamkulam, Thottappally Placers, South West India—Implications for Provenance [J]. *Marine Geotechnology*, 2015, 33(5): 437–446.
- [6] Fowler A, Prokoph A, Stern R, Dupuis C. Organization of oscillatory zoning in zircon: Analysis, scaling, geochemistry, and model of a zircon from Kipawa, Quebec, Canada [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002(66): 311–328.
- [7] 艾昊, 陈涛, 张丽娟, 等. 黑龙江穆棱地区宝石级锆石成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 313–324.
- [8] A J Irving, F A Frey, 邱家骥. 巨晶及它们的寄主玄武岩中痕量元素丰度: 对分配系数及巨晶成因的控制[J]. *基础地质译丛*, 1984(1): 35–47.
- [9] Kamenetsky V S, Belousova E A, Giuliani A, et al. Chemical abrasion of zircon and ilmenite megacrysts in the Monastery kimberlite: Implications for the composition of kimberlite melts [J]. *Chemical Geology*, 2014, 383: 76–85.
- [10] Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, et al. Zircon megacrysts from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 133: 1–11.
- [11] Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. Trace element composition and cathodoluminescence properties of kimberlitic zircons from southern Africa [J]. *Mineral Mag*, 1998, 62: 355–366.
- [12] 孟繁聪, 张建新. 柴北缘纯橄岩脉中巨晶锆石的成因[J]. *科学通报*, 2009, 54(16): 2329–2336.
- [13] 杨付领, 牛宝贵, 任纪舜, 李舫. 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[J]. *地球学报*, 2015, 36(4): 455–465.
- [14] 梅燕雄. 冀东金矿成矿特征及成矿演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 1997.
- [15] 宋扬. 冀东典型金矿床构造岩浆作用及流体成矿过程研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [16] Pupin J P. Zircon and granite petrology [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, 73(3): 207–220.
- [17] 林正雄, 李绍儒. 锆石的晶体形态及其在地球科学中的应用[J]. *地质地球化学*, 1991(4): 33–37.
- [18] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(4): 413–433.
- [19] 贾三石, 王恩德, 付建飞, 等. 冀东金厂峪金矿床成矿地质特征、矿床地球化学及其成因机制[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2012(10): 127–130.
- [20] 张永哲, 屈海浪, 张超, 等. 冀东金厂峪金矿床矿体侧伏规律及其对找矿预测的意义[J]. *地球*, 2015(7): 100–102.
- [21] 肖振, 魏峰, 刘铁侠, 等. 河北峪耳崖金矿成矿预测及找矿方向[J]. *地质找矿论丛*, 2010, 25(3): 217–222.
- [22] 宋扬, 刘扬, 李景行, 等. 冀东地区典型金矿床构造背景研究[J]. *矿床地质*, 2010, 29(S1): 991–992.
- [23] 张连昌, 白阳, 朱明田, 等. 华北克拉通金矿床区域成矿差异性分析[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(4): 363–380.
- [24] 贾斌, 余昌涛, 江雄新. 冀东金厂峪和峪耳崖金矿床黄铁矿及自然金标型特征[C]//中国地质学会. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集(19), 1989: 111–121.
- [25] 封文学. 冀东峪耳崖金矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [26] 胡少华, 王志来. 河北峪耳崖金矿控矿因素研究及成矿分析[J]. *世界有色金属*, 2019(21): 259–261.

Genesis study on the megacrystal zircons of the granodiorite in the Malanyu area, eastern Hebei province

LIU Zhengguo, WANG Shuzhi, ZHENG Xuyang, SUN Wanli, QIAO Jiaxi

(North China University of Science and Technology in Hebei Province, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Megacrystal zircon is one of the most important geochemical probes for mineral genetic study because of its high stability as well as the ability to preserve the forming typomorphic and chemical characteristics. The megacrystal zircons of the Yaolingzi granodiorite in the Malanyu area in eastern Hebei province were analyzed by cathodoluminescence image, statistical crystal morphology and LA-ICP-MS. The results and the geothermometer of research of Pupin(1980) indicate that the megacrystal zircon was formed at 650°C-850°C. LA-ICP-MS analysis shows positive Ce anomaly, little negative Eu anomaly and enrichment heavy REE of the zircon. It may be genetically related to Yu'erya gold deposit in the study area.

Key Words: Yaolingzi granodiorite; megacrystal zircon; formation temperature; trace element; mineralization; Malanyu area; eastern Hebei province