



栖霞西陡崖矿区侵入岩体锆石 U-Pb 年龄和氧同位素特征

蔡娜, 李大鹏, 张超, 刘强*, 耿科, 尉鹏飞, 张岩, 卞霄, 李鑫, 徐珺

(山东省地质科学研究所, 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013)

摘要:西陡崖矿区是胶东栖霞金成矿带内重要的金矿区。本文在详细的野外地质调查工作基础之上, 系统采集了矿区范围内与金成矿空间关系密切的中酸性—酸性侵入岩样品, 并开展锆石 U-Pb 定年和 SHRIMP 氧同位素分析。结果显示, 石英闪长玢岩成岩年龄为 155.2~153.9 Ma, 黑云母二长花岗岩成岩年龄为 159.7~155.7 Ma, 均属于玲珑期花岗岩序列; 两类侵入岩中锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较小, 介于 3.72‰~9.85‰ 之间 (总体平均值为 7.11‰, 显示出高 $\delta^{18}\text{O}$ 特征。石英闪长玢岩和黑云母二长花岗岩具有相似的成岩时代和锆石 O 同位素组成, 表明其构成同源岩浆演化关系。栖霞西陡崖矿区中酸性—酸性侵入岩锆石的氧同位素显示出明显的壳源特征, 反映多种地质过程的叠加, 包括地壳混染、俯冲带流体作用、沉积物再循环、克拉通地幔富集以及区域变质作用等。

关键词:金成矿岩体; 锆石 U-Pb 年龄; SHRIMP 氧同位素; 栖霞西陡崖矿区

中图分类号: P597

文献标识码: A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.06.003

0 引言

胶东地区具有丰富的黄金矿产资源, 已累计探明金资源量达 5 000 余吨, 成矿强度世界罕见。作为我国最大的金成矿区, 也是全球第三大金矿集区, 胶东地区无疑是深化金成矿理论研究和开展找矿勘查实践的理想研究区和重要基地^[1-6]。已有研究表明, 胶东地区金成矿作用与中生代花岗质侵入体具有密切的时空和成因联系。前人针对中生代花岗岩的成岩年龄和岩石成因进行了大量研究工作, 主要划分为三叠纪同造山花岗岩 (227~201 Ma), 侏罗纪壳源重熔型花岗岩-玲珑花岗岩 (160~150 Ma)、白垩纪壳幔混熔型花岗岩-郭家岭花岗岩 (130~125 Ma)、白垩纪壳幔同熔型花岗岩-伟德山花岗岩 (117~102 Ma)、白垩纪拉张 A 型花岗岩-崂山花岗岩 (115~90 Ma)^[7-15]。据统计, 绝大部分金矿赋存

于玲珑花岗岩中, 超过 90% 的金矿床集中分布于玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩及其边界断裂中。

尽管栖霞-蓬莱-福山 (栖霞福) 与胶西北、牟乳并列胶东地区三大成矿小区, 但其类比后两者研究程度明显较浅。栖霞西陡崖金矿区域构造以 EW 向基底断裂为主导, 台前-陡崖断裂作为控矿主构造, 其强烈的动力变质及岩浆热液活动为金成矿提供了迁移通道和富集空间。前人研究表明, 该区侵入岩体主要与燕山期岩浆活动相关, 但对其锆石 U-Pb 年龄及氧同位素特征的系统研究仍较为薄弱。侵入岩体的年代学框架尚未建立, 岩浆侵位期次与成矿作用的时空联系仍需进一步厘清。因此, 本文选取西陡崖金矿区为研究对象, 深入开展锆石 U-Pb 定年、SHRIMP 氧同位素研究, 为厘定与金成矿空间关系密切的侵入体的成岩年龄、限定其岩浆来源以及金成矿作用提供一定的指示作用, 对于丰富

收稿日期: 2025-04-01; 修订日期: 2025-04-25; 编辑: 曹丽丽

基金项目: 国家自然科学基金项目: (4217021236); 国家重点研发计划: (2023YFC2906905); 山东省重点研发计划项目: (2023CXGC011001)、(2022CXPT047); 山东省地质勘查项目: 鲁勘字[2022]9 号、鲁勘字[2023]8 号、鲁勘字[2024]14 号联合资助

作者简介: 蔡娜 (1984—), 女, 山东德州人, 高级工程师, 主要从事矿产普查与勘探、资源评价工作; E-mail: 549827331@qq.com

* 通信作者: 刘强 (1983—), 男, 山东安丘人, 高级工程师, 主要从事矿床学与矿产勘查工作; E-mail: lqiang715@163.com

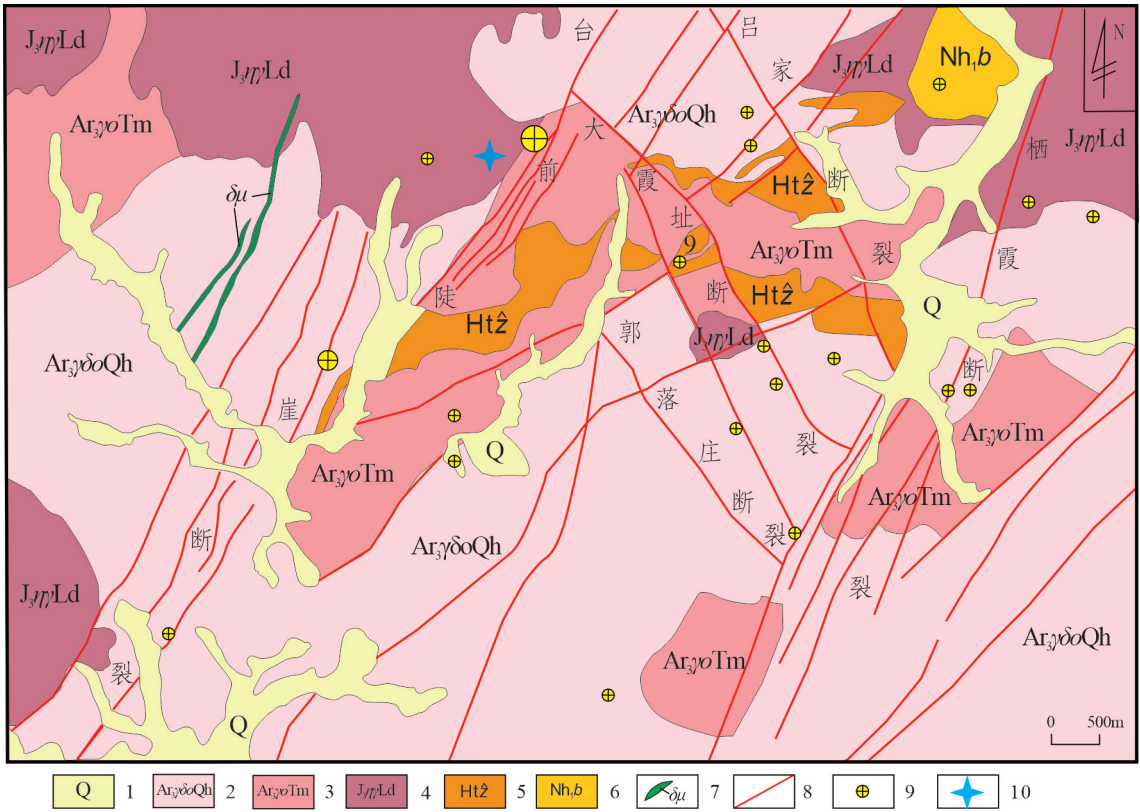
胶东金成矿机理和指导区域未来找矿勘查具有重要的理论和实践意义。

1 地质概况

栖霞地区金矿位于胶东半岛的中部,区内有西陡崖金矿、台前金矿、笏山金矿、马家窑金矿等多处金矿,成矿条件十分优越,是栖霞-蓬莱地区重要的金成矿区。研究区位于台前-陡崖断裂带上(图 1),大地构造位置隶属华北板块的胶辽隆起区(Ⅱ₁)、胶北隆起(Ⅱ_{1a})及胶莱盆地北东部胶北断隆(Ⅲ_{a1})、回里-养马岛断隆(Ⅲ_{a2})及莱阳断陷(Ⅲ_{b4})^[16]。

研究区主要有早前寒武纪变质基底、中生代—新生代盖层及中生代侵入岩体。出露地层以古元古界荆山群变质岩系为主,局部见中生代莱阳群陆相

碎屑沉积。区域构造以向断裂为主体,控制了中生代岩浆岩的分布格局。燕山期构造-岩浆活动强烈,形成了大规模花岗岩基与脉岩群,构成胶东重要的金成矿带。前寒武纪变质基底主要包括中—新太古代 TTG 岩系、新太古代胶东岩群、新元古代粉子山群等。岩浆侵入活动频繁,以新太古代 TTG、中生代燕山期侵入岩最为发育,多数为花岗岩,伴随部分中基性岩脉。依据岩石谱系单位填图方法,大庄子单元归属玲珑超单元,与周围的九曲单元、望儿山单元构成同期岩浆演化序列。各单元间呈脉动侵入关系,显示岩浆分异演化特征。大庄子单元代表燕山早期第一阶段侵入活动,对应华北克拉通与扬子板块碰撞后的伸展环境。



1—第四系;2—新太古代早期栖霞序列回龙乔单元英云闪长质片麻岩;3—新太古代晚期谭格庄序列牟家单元片麻状细粒奥长花岗岩;4—中生代侏罗纪燕山早期玲珑序列大庄子单元含斑中粗粒二长花岗岩;5—古元古界粉子山群祝家乔组黑云变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩;6—南华系蓬莱群豹山口组绢云绿泥板岩、泥质板岩夹钙质板岩;7—闪长玢岩脉;8—断裂;9—已发现的金矿床(点);10—采样位置。

图 1 栖霞西陡崖地区区域地质简图(据廖小明等^[17]修改)

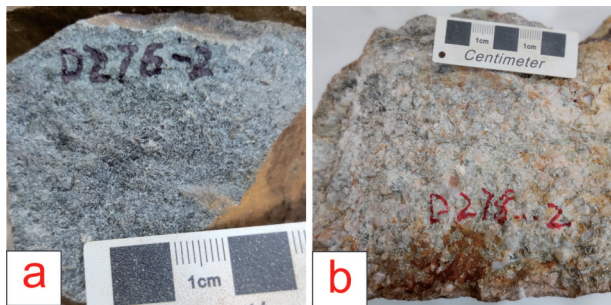
2 样品采集及分析方法

2.1 样品特征

基于近年胶东地区中生代岩浆活动多期次性研

究,通过系统采集石英闪长玢岩(D276 系列)与黑云母二长花岗岩(D278 系列),验证区域侵入岩单元划分的合理性,明确不同岩性单元的空间展布与侵位时序关系。沿 NNE 向断裂带(控制金矿化带)布置采样点,D276 系列位于断裂上盘次级裂隙发育区,D278 系列分布于主断裂旁侧花岗岩体核部,形成构造-岩性-矿化的三维空间采样网络。优先采集新鲜未风化露头(如 D276-1、D278-2),确保矿物组成与结构构造原始性。石英闪长玢岩选择含保存完好辉石斑晶的样品(图 2a),黑云母二长花岗岩选取具典型等粒结构的样品(图 2b)。

样品 D276-1 和 D276-2 采样点位于西陡崖矿区南山顶处,为一灰黑色的石英闪长玢岩。地表露头较新鲜,主要矿物为斜长石、黑云母、角闪石等,次要矿物为石英。斑状结构,斑晶为斜长石、石英,也可见少量蚀变的辉石斑晶,斑状结构,块状构造(图 2a)。样品 D278-2、D278-3 取自西陡崖金矿部剥露的基岩,为黑云母二长花岗岩。地表风化呈浅灰一灰白色,主要矿物为斜长石、钾长石、黑云母,次要矿物为石英,等粒结构,块状构造(图 2b)。



a—石英闪长玢岩(D276-2);b—黑云母二长花岗岩(D278-2)。

图 2 样品手标本照片

2.2 分析方法

锆石单矿物挑选工作在廊坊市峰泽源岩矿检测技术有限公司完成。为了确定锆石颗粒的晶体形态、内部结构,标定测年分析点位,进行了透反射及阴极发光(CL)照相。锆石制靶、透反射和阴极发光拍照及测试分析均在北京铅年领航科技有限公司完成^[18]。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在山东省地质科学研究院自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室完成^[19-21]。样品的同位素比值计算采用 ICP-MS DataCal 程序^[22],由于²⁰⁴Pb 的计数接近背景值,未对普通铅进行校正,单个测试点的同位素

比值误差均为 1σ ,利用 ISOPLLOT 软件,计算锆石样品的 U-Pb 加权平均年龄,绘制对应年龄谐和图^[23]。

微区原位锆石氧同位素分析测试用山东离子探针中心最新装备的 SHRIMP V 仪器完成。该仪器具备高灵敏、高分辨率、高精度和微量及原位微区分析的特点,不必经过复杂的化学分离过程,保持了测定对象原有的性质^[24-25]。锆石样品靶经过抛光、清洗、照相,最后在表面镀金。多数在锆石 U-Pb 定年分析同一位置开展测试^[26]。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

对样品 D278-2 进行 9 个锆石点的 LA-ICP-MS U-Pb 测试分析,如图 3 所示,U 含量为 $(85.39 \sim 803.72) \times 10^{-6}$,Th 含量为 $50.02 \sim 320.64) \times 10^{-6}$,Th/U 值为 $0.23 \sim 1.78$,具有较为一致的 U-Pb 年龄。其中,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围为 $153.48 \sim 159.33$ Ma,加权平均年龄为 (155.7 ± 2.2) Ma (2σ ; MSWD=0.40)(表 1,图 4)。

对样品 D278-3 进行 12 个点的 LA-ICP-MS U-Pb 分析,显示 U 含量为 $(63.58 \sim 1775.43) \times 10^{-6}$,Th 含量为 $(21.52 \sim 640.57) \times 10^{-6}$,Th/U 值为 $0.20 \sim 1.15$,具有较为一致的 U-Pb 年龄。其中,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围为 $157.05 \sim 169.90$ Ma,加权平均年龄为 (159.7 ± 1.8) Ma (2σ ; MSWD=0.29)(表 1,图 5)。

此外,对石英闪长玢岩样品(D276-1 和 D276-2)中的锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测试分析,位置如图 6 所示。D276-1 样品测点 17 个,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值分布大致为 155.2 Ma ($2,15,16,19,22,24$ 共 6 个点)和 2492 Ma ($3,4,7,8,10,11,13,18,10,21,23$ 共 11 个点)。所测锆石 U 和 Th 含量分别为 $(23.22 \sim 1373.86) \times 10^{-6}$ 和 $(13.25 \sim 863.15) \times 10^{-6}$,含量变化较大;Th/U 值同样具有较大的分布范围 ($0.05 \sim 1.96$)。6 个单点对应的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄单点值 $152.1 \sim 158.5$ Ma,年龄加权平均值为 (155.2 ± 2.5) Ma (2σ ; MSWD=0.86),谐和年龄为 (155.7 ± 1.2) Ma (2σ ; MSWD=6.7)(图 7a)。11 个单点对应的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄单点值 $2458.9 \sim 2520.7$ Ma,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值

为 $(2\,492\pm13)\text{Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD}=1.9$)。D276-2 样品 6 个锆石单点 (2, 7, 9, 11, 17, 20) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(153.9\pm2.9)\text{Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD}=0.83$)，谐和年龄为 $(153.5\pm1.2)\text{Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD}=0.27$) (图 7b)。6 个锆石单点 (6, 8, 15, 16, 18, 19) 的

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $(2\,470\pm27)\text{Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD}=16$)。本文对年龄大于 $1\,200\text{ Ma}$ 的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 数据,对年龄小于 $1\,200\text{ Ma}$ 的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据。

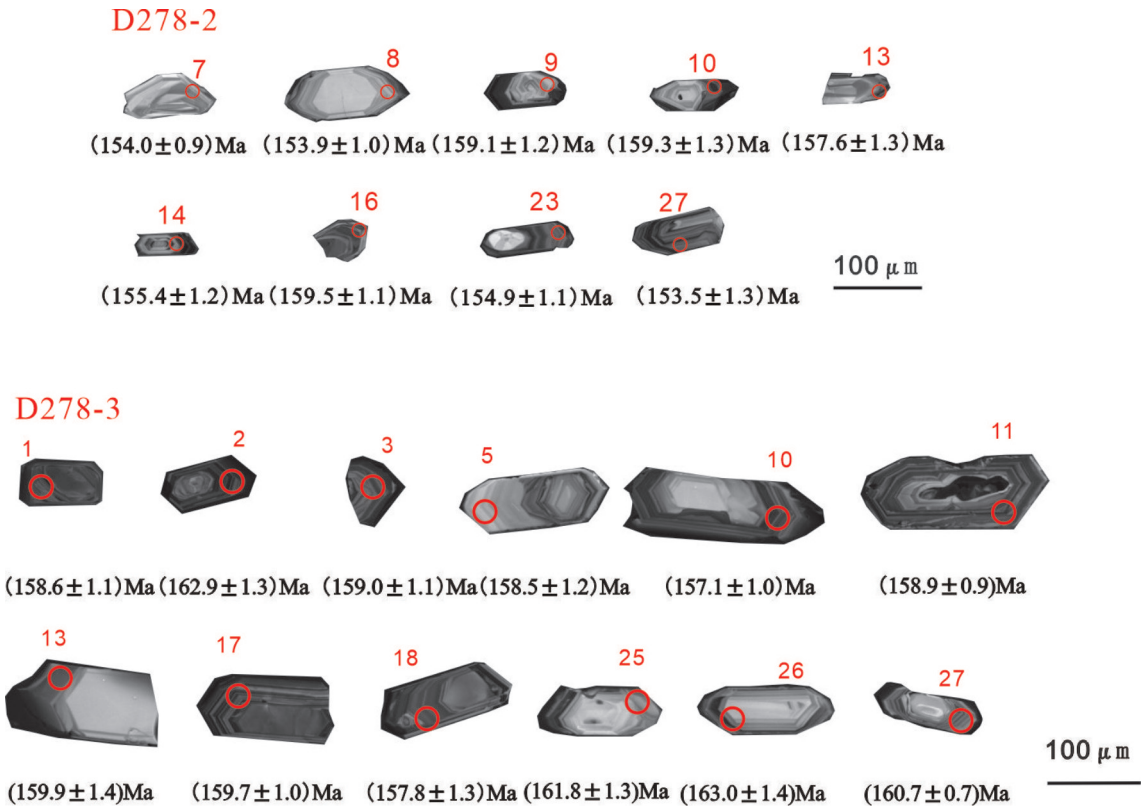


图 3 黑云母二长花岗岩(D278-2 和 D278-3)锆石阴极发光图像

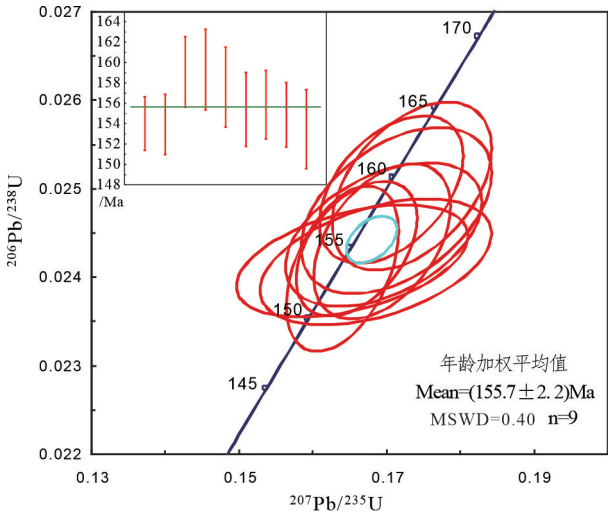


图 4 D278-2 样品锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和图

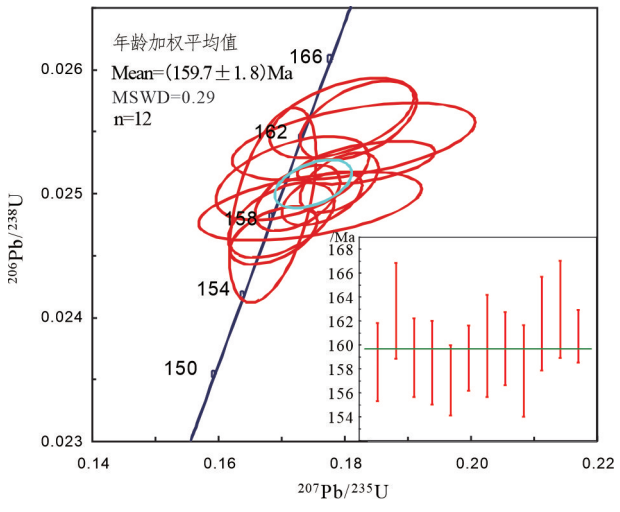


图 5 D278-3 样品锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和图

表 1 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

测点编号	元素含量/ 10^{-6}			$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	同位素比值						年龄/Ma						谐和度
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		
					1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
D276-1-2	28.35	127.89	135.85	0.94	0.05	0.0006	0.16	0.0022	0.02	0.0001	166.8	27.8	152.3	1.9	152.1	0.8	99%
D276-1-3	178.42	37.39	98.09	0.38	0.17	0.0005	10.66	0.1087	0.46	0.0047	2520.7	5.6	2493.8	9.6	2461.3	20.6	98%
D276-1-4	816.53	222.33	190.46	1.17	0.17	0.0005	10.18	0.0629	0.45	0.0026	2509.6	4.5	2451.5	6.0	2382.3	11.7	97%
D276-1-7	109.86	25.44	65.03	0.39	0.16	0.0006	9.22	0.1716	0.40	0.0071	2507.1	5.7	2359.7	17.1	2191.4	32.4	92%
D276-1-8	702.75	195.76	180.51	1.08	0.16	0.0006	9.30	0.0825	0.42	0.0029	2458.9	6.0	2368.1	8.3	2262.6	13.3	95%
D276-1-10	840.52	195.58	311.47	0.63	0.16	0.0005	9.85	0.1381	0.44	0.0060	2475.9	5.2	2421.3	13.0	2357.6	27.1	97%
D276-1-11	1072.46	313.55	237.56	1.32	0.16	0.0005	9.62	0.0514	0.42	0.0020	2502.2	4.5	2399.1	5.2	2279.1	9.2	94%
D276-1-13	751.59	209.97	202.13	1.04	0.16	0.0005	9.67	0.0702	0.43	0.0030	2497.2	5.6	2403.7	6.9	2294.2	13.7	95%
D276-1-15	177.61	863.15	439.39	1.96	0.05	0.0005	0.17	0.0019	0.02	0.0002	235.3	22.2	159.0	1.7	154.0	1.3	96%
D276-1-16	56.68	259.51	233.60	1.11	0.05	0.0006	0.18	0.0025	0.02	0.0002	376.0	58.3	169.3	2.1	154.8	1.2	91%
D276-1-18	975.98	253.30	531.51	0.48	0.16	0.0006	9.24	0.0648	0.42	0.0024	2465.7	6.8	2362.5	6.6	2244.7	11.1	94%
D276-1-19	4.76	13.37	105.14	0.13	0.05	0.0012	0.17	0.0047	0.02	0.0002	253.8	53.7	161.8	4.1	155.4	1.2	96%
D276-1-20	709.06	179.48	309.84	0.58	0.16	0.0006	10.35	0.1211	0.46	0.0049	2494.4	6.2	2466.4	11.0	2432.6	21.7	98%
D276-1-21	1116.24	292.97	350.80	0.84	0.16	0.0006	10.30	0.0815	0.45	0.0032	2501.9	5.9	2462.5	7.5	2416.8	14.3	98%
D276-1-22	71.58	259.78	1373.86	0.19	0.05	0.0002	0.17	0.0012	0.02	0.0002	161.2	11.1	158.7	1.1	158.5	1.1	99%
D276-1-23	508.81	142.95	137.74	1.04	0.16	0.0006	9.79	0.0757	0.43	0.0030	2498.2	6.2	2414.8	7.3	2317.8	13.4	95%
D276-1-24	67.65	298.89	304.28	0.98	0.05	0.0007	0.18	0.0021	0.02	0.0001	322.3	29.6	168.4	1.8	158.3	0.9	93%
D276-2-2	26.79	57.46	1208.83	0.05	0.05	0.0003	0.17	0.0016	0.02	0.0002	150.1	13.0	156.9	1.4	157.3	1.4	99%
D276-2-6	506.65	114.86	390.63	0.29	0.16	0.0005	9.15	0.0585	0.42	0.0027	2441.7	5.6	2353.0	6.1	2251.2	12.1	95%
D276-2-7	18.60	79.49	93.64	0.85	0.05	0.0009	0.17	0.0032	0.02	0.0002	166.8	47.2	158.3	2.7	158.1	1.0	99%
D276-2-8	397.61	71.22	506.85	0.14	0.16	0.0006	8.83	0.0936	0.40	0.0041	2446.0	6.9	2320.2	9.8	2179.1	19.1	93%
D276-2-9	40.79	190.60	234.51	0.81	0.05	0.0005	0.16	0.0019	0.02	0.0002	164.9	24.1	153.0	1.6	152.1	1.1	99%
D276-2-11	3.17	13.25	23.22	0.57	0.05	0.0025	0.17	0.0087	0.02	0.0003	257.5	109.2	160.2	7.5	153.4	2.1	95%
D276-2-15	561.42	146.21	325.53	0.45	0.16	0.0005	8.99	0.0614	0.41	0.0024	2462.0	10.2	2336.9	6.4	2196.8	11.3	93%
D276-2-16	317.28	73.07	203.41	0.36	0.16	0.0005	9.79	0.0789	0.44	0.0032	2482.4	5.3	2414.7	7.6	2335.5	14.4	96%
D276-2-17	70.68	334.21	241.32	1.38	0.05	0.0006	0.16	0.0021	0.02	0.0002	142.7	23.1	150.0	1.9	150.7	1.0	99%
D276-2-18	606.03	163.55	167.75	0.97	0.16	0.0006	9.85	0.0807	0.43	0.0028	2505.6	6.2	2420.5	7.7	2322.0	12.6	95%
D276-2-19	259.32	63.57	98.76	0.64	0.16	0.0007	10.07	0.0901	0.45	0.0031	2479.3	7.6	2441.4	8.4	2396.8	13.9	98%
D276-2-20	31.93	137.14	148.51	0.92	0.05	0.0009	0.18	0.0036	0.02	0.0002	344.5	38.9	164.4	3.1	152.6	1.2	92%
D278-1-4	15.75	70.42	88.52	0.80	0.05	0.0010	0.17	0.0034	0.03	0.0002	131.6	52.8	157.7	2.9	159.5	1.2	98%
D278-1-6	25.59	127.86	83.74	1.53	0.05	0.0009	0.17	0.0031	0.02	0.0002	276.0	43.5	160.0	2.7	152.2	1.0	95%
D278-1-9	28.83	109.62	392.72	0.28	0.05	0.0005	0.17	0.0019	0.02	0.0002	309.3	22.2	163.4	1.7	153.5	1.2	93%
D278-1-10	253.30	1185.31	2266.85	0.52	0.05	0.0004	0.17	0.0016	0.02	0.0001	242.7	13.9	158.2	1.4	152.5	0.6	96%
D278-1-12	21.40	90.01	151.77	0.59	0.05	0.0007	0.17	0.0022	0.03	0.0002	205.6	31.5	162.5	1.9	159.5	1.0	98%
D278-1-13	95.99	433.99	891.65	0.49	0.05	0.0004	0.17	0.0018	0.02	0.0002	211.2	18.5	161.9	1.6	159.0	1.2	98%
D278-1-19	36.54	140.55	314.50	0.45	0.05	0.0006	0.17	0.0027	0.02	0.0002	239.0	27.8	163.6	2.3	158.5	1.4	96%
D278-1-24	22.62	61.40	392.35	0.16	0.05	0.0006	0.17	0.0024	0.02	0.0001	209.3	23.1	160.8	2.1	157.5	0.8	97%
D278-1-25	109.29	482.41	841.54	0.57	0.05	0.0004	0.17	0.0017	0.02	0.0001	231.6	19.4	158.4	1.5	153.4	0.8	96%
D278-1-26	57.24	238.23	323.06	0.74	0.05	0.0007	0.17	0.0027	0.02	0.0001	276.0	25.0	163.2	2.4	155.2	0.7	95%
D278-2-7	37.85	191.76	108.02	1.78	0.05	0.0009	0.17	0.0035	0.02	0.0001	176.0	46.3	155.4	3.0	154.0	0.9	99%
D278-2-8	16.41	77.70	85.39	0.91	0.05	0.0011	0.17	0.0035	0.02	0.0002	233.4	48.1	158.1	3.0	153.9	1.0	97%
D278-2-9	30.44	145.61	209.98	0.69	0.05	0.0006	0.17	0.0021	0.02	0.0002	176.0	32.4	160.0	1.9	159.1	1.2	99%
D278-2-10	28.23	125.51	220.81	0.57	0.05	0.0007	0.17	0.0024	0.03	0.0002	209.3	25.0	162.5	2.1	159.3	1.3	98%
D278-2-13	64.64	320.64	181.41	1.77	0.05	0.0008	0.17	0.0029	0.02	0.0002	205.6	37.0	160.6	2.5	157.6	1.3	98%
D278-2-14	62.00	278.95	543.39	0.51	0.05	0.0004	0.17	0.0020	0.02	0.0002	209.3	20.4	158.9	1.8	155.4	1.2	97%
D278-2-16	12.04	50.02	114.24	0.44	0.05	0.0009	0.17	0.0029	0.02	0.0002	209.3	40.7	159.1	2.5	155.9	1.1	97%
D278-2-23	46.40	184.95	803.72	0.23	0.05	0.0005	0.17	0.0018	0.02	0.0002	172.3	22.2	155.9	1.6	154.9	1.1	99%
D278-2-27	48.82	222.08	525.91	0.42	0.05	0.0003	0.16	0.0017	0.02	0.0002	164.9	16.7	154.3	1.5	153.5	1.3	99%

3.2 锆石 O 同位素

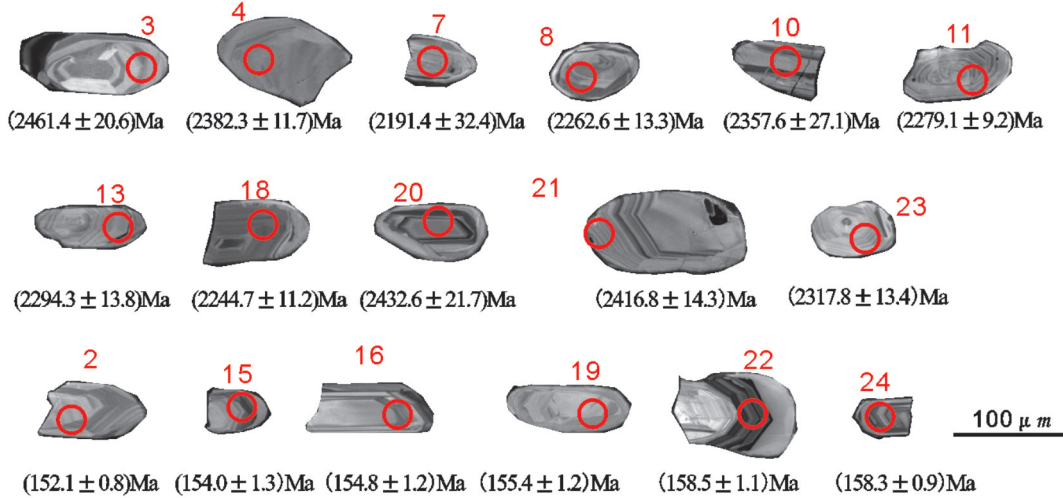
使用 SHRIMP V 对锆石开展氧同位素分析,共
计测得 83 个锆石氧同位素数据,不包括不和谐度
>10%的数据点和一次流束斑部分打在树脂上的数
据点,具体结果见表 2。其中,石英闪长玢岩样品
D276-1 中,20 颗岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为

5.72‰~8.5‰, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $(7.51\pm0.32)\text{‰}$
(2σ)(图 8a、图 9a)。D276-2 中,20 颗岩浆锆石
 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 4.64‰~8.55‰, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值
为 $(6.83\pm0.58)\text{‰}$ (2σ)(图 8b、图 9b)。黑云母二长
花岗岩样品 D278-2 中,18 颗岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变
化范围为 3.72‰~9.01‰, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $(6.90\pm$

0.77)‰(2σ)(图 8c、图 9c)。D278-3 中,25 颗岩浆锆石 δ¹⁸O 值变化范围为 4.28‰~9.85‰,δ¹⁸O 平

均值为(7.70±0.34)‰(2σ)(图 8d、图 9d)。

D276-1



D276-2

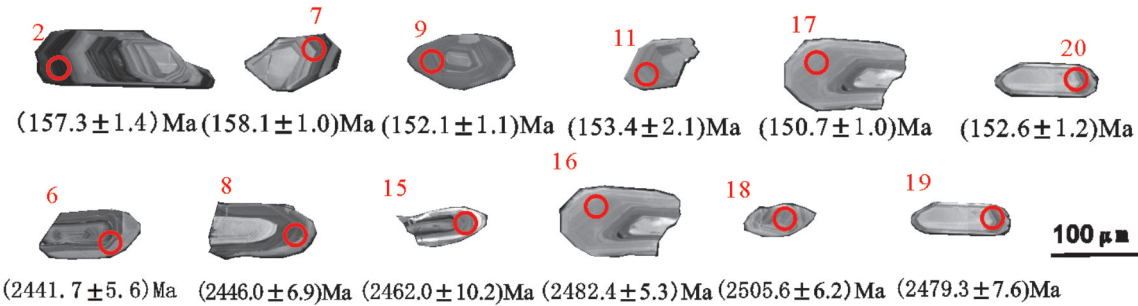


图 6 石英闪长玢岩(D276-1 和 D276-2)锆石阴极发光图像

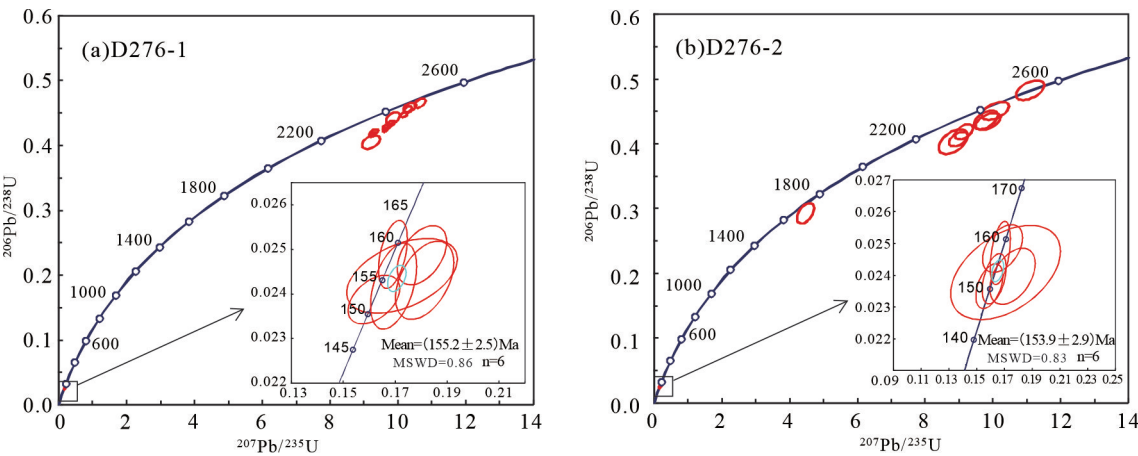


图 7 D276-1、D276-2 中锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄谐和图

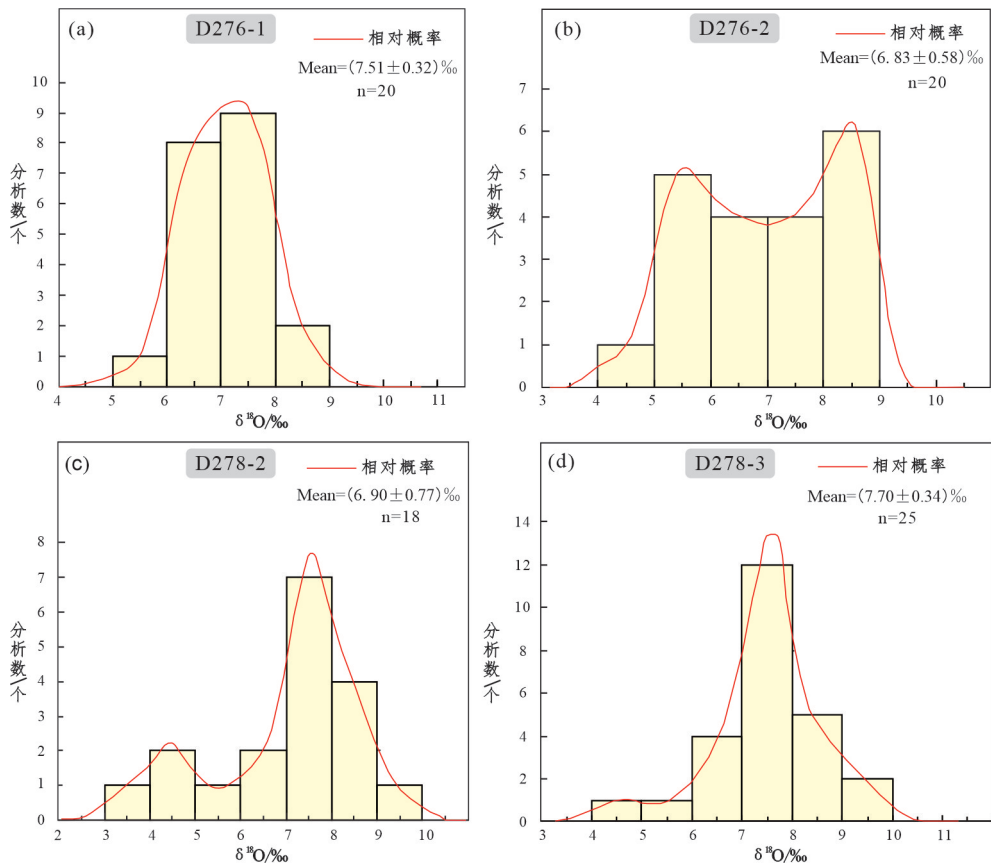


图 8 钻石氧同位素组成分布频率直方图

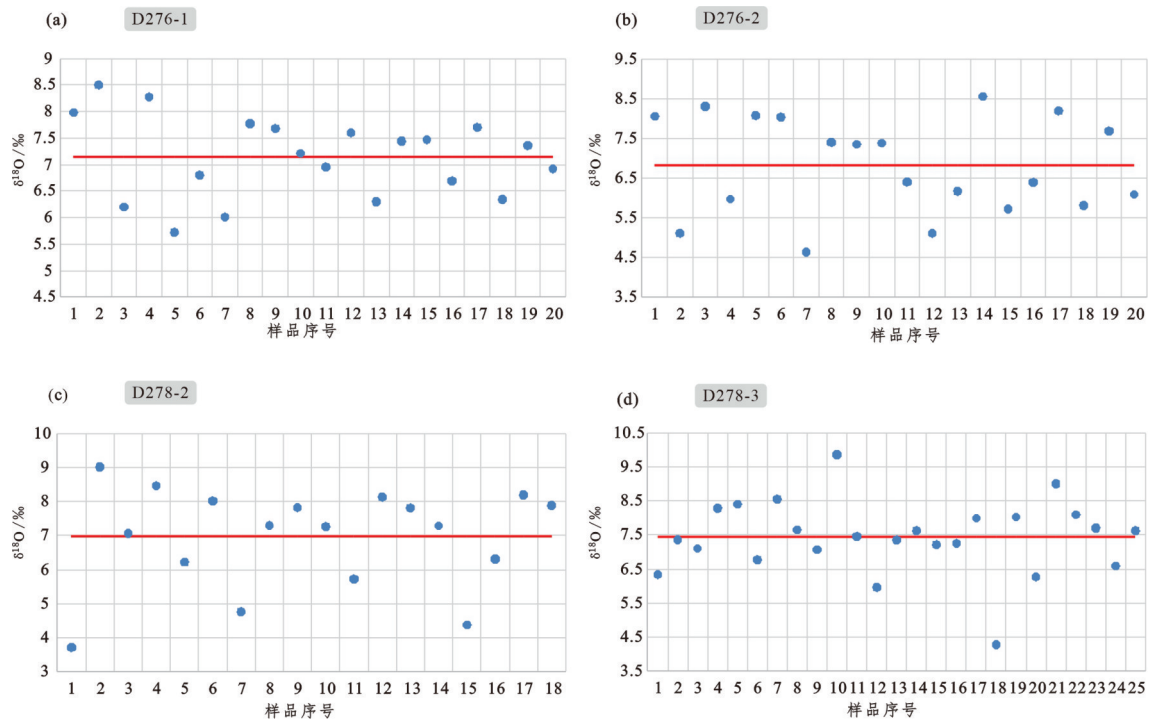


图 9 研究区测试样品钻石同位素样品分析结果图
(红线位置为该样品 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值)

表 2 锆石氧同位素分析结果

序号	测点号	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	误差/ ‰
D278-2			
1	-2.1	3.72	0.09
2	-3.1	9.01	0.14
3	-6.1	7.06	0.10
4	-8.1	8.46	0.12
5	-9.1	6.22	0.28
6	-11.1	8.01	0.20
7	-15.1	4.76	0.24
8	-18.1	7.29	0.11
9	-19.1	7.82	0.17
10	-21.1	7.26	0.07
11	-23.1	5.72	0.63
12	-25.1	8.13	0.12
13	-27.1	7.81	0.20
14	-30.1	7.28	0.09
15	-31.1	4.38	0.12
16	-31.2	6.31	0.15
17	-31.3	8.19	0.16
18	-31.4	7.88	0.19
D276-1			
1	-1.1	7.98	0.09
2	-2.1	8.5	0.14
3	-4.1	6.2	0.07
4	-5.1	8.27	0.05
5	-7.1	5.72	0.29
6	-10.1	6.8	0.17
7	-12.1	6.01	0.24
8	-15.1	7.77	0.16
9	-16.1	7.68	0.12
10	-17.1	7.21	0.13
11	-18.1	6.95	0.28
12	-19.1	7.6	0.11
13	-20.1	6.3	0.21
14	-21.1	7.44	0.18
15	-22.1	7.47	0.17
16	-23.1	6.69	0.19
17	-24.1	7.7	0.09
18	-25.1	6.34	0.26
19	-25.2	7.36	0.05
20	-25.3	6.92	0.16
D276-2			
1	-3.1	8.05	0.13
2	-4.1	5.11	0.15
3	-7.1	8.3	0.24
4	-8.1	5.97	0.25
5	-9.1	8.07	0.10
6	-10.1	8.03	0.32
7	-11.1	4.64	0.13
8	-12.1	7.4	0.18
9	-13.1	7.35	0.23
10	-14.1	7.38	0.11
11	-16.1	6.4	0.23
12	-18.1	5.11	0.26

表 2 锆石氧同位素分析结果(续表)

序号	测点号	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	误差/ ‰
D276-2			
13	-19.1	6.17	0.19
14	-20.1	8.55	0.17
15	-21.1	5.72	0.16
16	-22.1	6.39	0.28
17	-23.1	8.19	0.17
18	-23.2	5.81	0.09
19	-23.3	7.68	0.13
20	-23.4	6.09	0.28
D278-3			
1	-2.1	6.34	0.50
2	-3.1	7.36	0.04
3	-4.1	7.1	0.17
4	-5.1	8.28	0.20
5	-6.1	8.4	0.13
6	-8.1	6.77	0.16
7	-9.1	8.55	0.13
8	-10.1	7.65	0.20
9	-11.1	7.07	0.18
10	-12.1	9.85	0.17
11	-13.1	7.45	0.31
12	-14.1	5.96	0.16
13	-15.1	7.35	0.14
14	-17.1	7.62	0.21
15	-18.1	7.21	0.18
16	-19.1	7.25	0.23
17	-20.1	7.99	0.17
18	-21.1	4.28	0.31
19	-22.1	8.02	0.12
20	-23.1	6.27	0.15
21	-24.1	9	0.06
22	-25.1	8.09	0.20
23	-26.1	7.7	0.19
24	-27.1	6.59	0.18
25	-28.1	7.62	0.40
平均		7.11	

注:数据规范化到一个平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值 9.8‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})=[(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\text{ Sample})/(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\text{vsmow})-1]\times 1\,000$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\text{vsmow}=0.0020052^{[33]}$ 。

4 讨论

4.1 栖霞西陡崖金矿区酸性、中酸性侵入岩锆石年龄及指示意义

受热液蚀变作用影响的锆石为半自形—他形,无分带、弱分带或海绵状分带,常常具有溶蚀结构或骨架状结构^[27]。对受热液蚀变作用影响较为彻底的锆石微区颗粒进行 U-Pb 定年,可以得到热液蚀变作用发生的准确时代,对其中没有受热液蚀变作用的锆石区域进行 U-Pb 定年,可以得到这些岩石

的形成年龄^[28-29]。对栖霞西陡崖金矿区与成矿关系密切的酸性、中酸性侵入岩样品锆石形态和 U-Pb 年龄进行了综合分析,以揭示栖霞地区岩浆演化过程与金矿成因机制。

D278-2 样品锆石颗粒多呈无色或浅灰色,透明,多数为自形一半自形,呈长柱状、短柱状,少数具碎裂现象或发育包裹体。多数颗粒长 60~100 μm ,个别达到 120 μm ,宽 50~80 μm ,长宽比 1:1~2:1,阴极发光照片显示如图 3。锆石颗粒较大,内部结构清晰,绝大多数锆石环带规整,部分锆石样品中可见继承锆石残余核,属于岩浆结晶期锆石。大多数锆石都具有核幔结构,反映出继承性生长的特点。其 Th/U 值变化不大(0.23~1.78),且均大于 0.1,符合岩浆锆石的特征。因此,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均值年龄(155.7 $\pm$ 2.2)Ma(MSWD=0.40),代表玲珑期花岗岩的锆石年龄(表 1,图 4)。

D278-3 样品中锆石颗粒无色或浅灰色,多数锆石颗粒为自形一半自形,呈柱状、短柱状、不规则板状,少数锆石具碎裂现象或发育包裹体。多数锆石晶体颗粒长介于 70~120 μm ,个别达到 150 μm ,宽 50~80 μm 。锆石颗粒相较于 D278-2 来说总体较大,阴极发光照片显示如图 4,内部结构清晰,环带规整,表现出岩浆结晶产物特征。这些锆石的 U 含量分布于(63.58~1 775.43) $\times 10^{-6}$,Th 含量分布于(21.52~640.57) $\times 10^{-6}$,Th/U 值同样变化不大(0.20~1.15),且均大于 0.1,也符合岩浆锆石的特征。因此,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(159.7 $\pm$ 1.8)Ma(MSWD=0.29),代表黑云母二长花岗岩结晶年龄。

石英闪长玢岩样品(D276-1 和 D276-2)锆石颗粒无色,大多数半透明,多数锆石颗粒为自形一半自形,呈不规则板状,个别呈柱状,少数锆石具碎裂现象或发育包裹体。锆石颗粒大小不一,长宽比差别较大。锆石晶体颗粒长 40~120 μm ,个别达到 150 μm ,宽 30~80 μm 。阴极发光照片图 6 显示,部分可见熔蚀凹坑,边部有清晰的震荡环带,显示岩浆锆石的特征。核部岩浆生长环带发育,边部发育变质增生边,个别锆石具有重结晶现象,可能指示了岩浆对先期锆石的改造。这些锆石的 Th/U 值 0.05~1.96,变化范围大,Th/U 值均大于 0.1,符合岩浆成因锆石的特征。其中,D276-1 样品²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄有两类,一类²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均值

为(155.2 $\pm$ 2.5)Ma(MSWD=0.86),谐和年龄为(155.7 $\pm$ 1.2)Ma(MSWD=6.7)(图 7a)。在区域上与玲珑期花岗岩 166~146 Ma 的时代相一致,指示这一年龄组应为捕获玲珑期花岗岩的锆石年龄;另一类²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄单点值 2 458.9~2 520.7Ma,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为(2 492 $\pm$ 13)Ma(MSWD=1.9),与万渝生等^[30]划分的 3 期 TTG 年龄一致,代表了捕获岩浆源区的锆石年龄,可以反映岩浆来源成因。如图 7b 所示,闪长脉岩 D276-2 样品的锆石具有与 D276-1 锆石类似的两组年龄分布。

西陡崖矿区石英闪长玢岩形成于晚侏罗世的 155.5~153.9 Ma,与黑云母二长花岗岩同属于玲珑期花岗岩。155 Ma 左右的岩浆锆石与石英闪长玢岩(155.2~153.9 Ma)及黑云母二长花岗岩(159.7~155.7 Ma)的侵位时代重叠,结合其 Th/U 值(0.05~1.96)及阴极发光震荡环带特征,指示该年龄组为岩浆结晶成因。值得注意的是,D276-1 的(155.2 $\pm$ 2.5)Ma 加权平均年龄与玲珑序列(166~146 Ma)的晚期阶段一致,暗示该期闪长质岩浆可能与晚期花岗岩存在成因联系,或为同一岩浆系统不同演化阶段的产物。

2 492 Ma 和 2 470 Ma 这两个年龄数据与胶东太古宙末期-古元古代早期岩浆岩时代相一致,结合区域粉子山群、荆山群变质基底中普遍存在 2 500~2 400 Ma 的年龄峰值,说明研究区存在多阶段岩浆-变质热事件。该年龄组与华北克拉通基底 TTG 岩系(2.5~2.6 Ga)的形成时代吻合,表明岩浆源区包含古老地壳物质。锆石核部发育变质增生边及重结晶现象,反映岩浆上升过程中对先期锆石的捕获与改造,揭示壳源物质在岩浆形成中的重要贡献。

4.2 栖霞西陡崖金矿区中酸性—酸性侵入岩岩浆源区特征

锆石对氧同位素组成有很好的保存性,幔源岩浆结晶出来的锆石有非常一致的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(5.3 $\pm$ 0.6) ‰ ^[31-32],而且这个比值受岩浆分异的影响很小,由岩浆分异造成的全岩 O 值增高会被锆石/熔体之间的 $\delta^{18}\text{O}$ 分馏增加所补偿,即 $\Delta^{18}\text{O}(\text{Zrc-WR}) = \delta^{18}\text{O}(\text{Zrc}) - \delta^{18}\text{O}(\text{WR}) \approx -0.0612(\text{wt.}\% \text{SiO}_2) + 2.5$ ^[32]。

结合区域地质背景,研究区岩浆活动可划分为两阶段:

早侏罗世晚期(160~155 Ma):黑云母二长花岗岩(159.7~155.7 Ma)代表初始壳源岩浆侵位,对应华北克拉通与扬子板块碰撞后的地壳加厚阶段。

中侏罗世早期(155~153 Ma):石英闪长玢岩(155.2~153.9 Ma)和石英闪长玢岩(155.2±2.5)Ma 的形成,标志幔源物质上涌与壳幔混合作用的增强。D276 系列锆石中捕获的古老 TTG 锆石,暗示幔源岩浆上升过程中同化了华北克拉通基底物质,形成具壳幔混合特征的闪长质岩浆。

D276-1、D278-2、D278-3 样品锆石氧同位素均呈高斯正态分布(图 8a、图 8c、图 8d),表明样品的岩浆体系在形成过程中经历了较为均一化的氧同位素分馏过程。这种均一化可能与岩浆房内的均质化有关。在岩浆房中,通过长期的混合、结晶分异或其他均质化作用,会导致锆石氧同位素值趋于一致。D276-2 样品锆石氧同位素具有两个峰值((6.82±2.43)‰、(6.96±2.97)‰)(图 8b),表明岩浆经历了多个阶段的演化。早期阶段以地幔源区为主,后期受到地壳物质混染或热液流体的影响。图 10 显示 4 个样品锆石对应氧同位素变化范围较小,总体平均值为 7.11‰,高于典型地幔值,反映岩浆在上升过程中与富含高 $\delta^{18}\text{O}$ 地壳物质的混染。而较小的变化范围则表明这些样品具有相似的岩浆来源或经历类似的成岩过程。

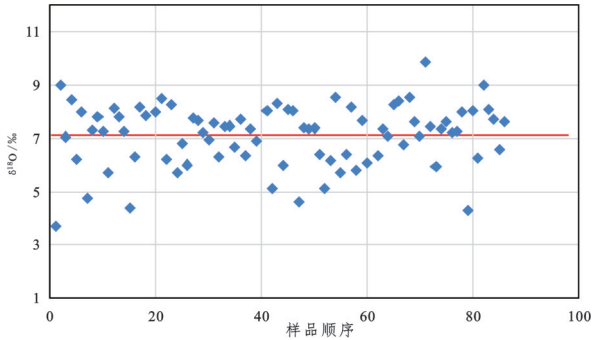


图 10 研究区测试样品锆石同位素样品综合分析结果图
(红线位置为 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值)

新生代以来,华北克拉通东南缘经历了克拉通破坏,伴随软流圈上涌和地幔柱活动。这些深部过程都会导致地幔与地壳的强烈相互作用,从而影响岩浆的氧同位素组成。受太平洋板块俯冲作用的影响,沉积物被带入地幔并在高温高压条件下部分熔融,形成高 $\delta^{18}\text{O}$ 的熔体,这种熔体参与岩浆的形成。

俯冲带流体和沉积物再循环对岩浆氧同位素特征也产生重要贡献。研究区广泛发育变质岩和热液矿床,反映了区域变质作用或热液交代对岩浆的影响。

综上所述,栖霞西陡崖矿区的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于典型地幔氧同位素值,具有非地幔特征,推测岩浆来源与成因机制为:①地壳混染:岩浆可能起源于地幔,但受到地壳物质的混染,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高。地壳混染的程度因样品而异,这就解释了 D276-2 样品的双峰分布现象;②俯冲带流体交代作用:受太平洋板块俯冲作用的影响,俯冲带流体交代地幔楔,形成了高 $\delta^{18}\text{O}$ 的熔体;③克拉通地幔富集:华北克拉通东南缘存在长期受地壳流体交代的克拉通地幔,这种地幔为岩浆提供了高 $\delta^{18}\text{O}$ 的源区。

5 结语

(1)黑云母二长花岗岩岩浆锆石年龄为 159.7~155.7 Ma,石英闪长玢岩岩浆锆石年龄为 155.2~153.9 Ma,代表了研究区两大侵入岩体形成时代为中生代晚侏罗世。锆石中记录了~2.5 Ga 的年龄数据,说明其经历了古元古代初期构造热事件。

(2)栖霞西陡崖矿区的中性—酸性侵入岩体来源于同一岩浆房的不同演化阶段,岩浆活动过程中存在一定程度的古老地壳混染,显示出明显的壳源特征。

(3)锆石氧同位素值显示出高 $\delta^{18}\text{O}$ 值特征,可以反映多种地质过程的叠加,包括地壳混染、俯冲带流体作用、沉积物再循环、克拉通地幔富集以及区域变质作用等,具体成因机制需要结合更多地球化学数据进一步研究。

参考文献:

[1] 宋明春,宋英昕,丁正江,等.胶东金矿床:基本特征和主要争议[J].黄金科学技术,2018,26(4):406-422.

[2] 侯明兰,蒋少涌,姜耀辉,等.胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究[J].岩石学报,2006(22):2525-2533.

[3] 侯明兰,蒋少涌,沈昆,等.胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究[J].岩石学报,2007(23):2241-2256.

[4] 田瑞聪.蓬莱-栖霞金矿带成矿作用地球化学[D].北京:中国地质大学(北京),2022.

[5] 田杰鹏.胶东栖霞福矿集区中生代金多金属矿区域成矿作用[D].北京:中国地质大学(北京),2020.

[6] 单伟,迟乃杰,熊玉新,等. 山东省蓬莱-栖霞金成矿带地壳结构对金成矿的约束[J]. 山东国土资源,2023,39(3):5-13.

[7] LI X C, FAN H R, SANTOSH M, et al. An evolving magma chamber within extending lithosphere: An integrated geochemical, isotopic and zircon U - Pbgeochronological study of the Gushan granite, eastern North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2012(50): 27 - 43.

[8] 丁正江,孙丰月,刘福来,等. 胶东伟德山地区铜钼多金属矿锆石 U - Pb 法测年及其地质意义[J]. 岩石学报,2013,29(2): 607 - 618.

[9] 丁正江,孙丰月,李国华,等. 胶东邢家山地区燕山早期钼钨成矿母岩锆石 U - Pb 年龄及其意义[J]. 中国地质,2015,42(2): 556 - 569.

[10] 李洪奎,李大鹏,耿科,等. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境:来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录[J]. 地质学报,2017,91(1):163 - 179.

[11] 余汉茂. 胶东西北部地区岩石同位素地质年代学研究[J]. 山东地质,1987,3(1):75 - 86.

[12] 李增达,于晓飞,王全明,等. 胶东三佛山花岗岩的成因:成岩物理化学条件、锆石 U - Pb 年代学及 Sr - Nd 同位素约束[J]. 岩石学报,2018,34(2):447 - 468.

[13] 杨立强,邓军,王中亮,等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报,2014,30(9):2447 - 2467.

[14] 宋英昕,宋明春,孙伟清,等. 胶东金成矿时代及区域地壳演化-基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报,2018,37(5):908 - 919.

[15] 宋英昕,宋明春,李世勇,等. 胶东晚中生代三期成矿岩体和 3.5Ga 锆石发现及成矿动力学背景[J]. 地质学报,2019,93(2):440 - 458.

[16] 刘强,张岩,蔡娜,等. 山东栖霞笏山-西陡崖金矿地质特征及资源潜力分析[J]. 山东国土资源,2024,40(3):33 - 41.

[17] 廖小明,史宏江,孙晓东,等. 山东省栖霞台前地区控矿构造与找矿预测[J]. 黄金,2020,41(6):7 - 13.

[18] 宋彪,张玉海,万渝生,等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评,2002,48(S1):26 - 30.

[19] 李增胜,张晨西,迟乃杰,等. 胶西北大泽山岩体地球化学、锆石 U - Pb 年代学及 Lu - Hf 同位素特征[J]. 地质科学,2024,59(1):21 - 37.

[20] 李增胜,张晨西,舒磊,等. 单颗粒锆石 LA - MC - ICP - MS 原位微区 U - Pb 定年[J]. 山东国土资源,2022,38(5):71 - 81.

[21] HU Z C, LIU Y S, GAO S, et al. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP - MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2012, 27(9): 1391 - 1399.

[22] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA - ICP - MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008,257(1):34 - 43.

[23] Ludwig K R. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [Z]. Berkley:Berkley Geochronological Center Special Publication, 2012, Isoplot/Ex,version 3.75 - 4.15.

[24] 耿科,李大鹏,尉鹏飞,等. ASISHRIMP 和 CAMECA IMS:大型二次离子磁质谱发展简史[J]. 山东国土资源,2023,39(11):10 - 19.

[25] 李俊建,罗镇宽,刘晓阳,等. 玲珑金矿区成矿后花岗岩岩脉的锆石 SHRIMP U - Pb 年龄对胶北地体演化的制约[J]. 地学前缘,2005,12(2):317 - 323.

[26] 尉鹏飞,耿科,刘建辉,等. 第五代 SHRIMP 锆石微区原位氧同位素分析测试方法[J]. 岩矿测试,2024,43(5):723 - 733.

[27] 吴元报,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U - Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报,2004,49(16):1589 - 1604.

[28] TOMASCHEK F, KENNEDY A K, VILLA I M, et al. Zircons from Syros, Cyclades, Greece - recrystallization and mobilization of zircon during high - pressure metamorphism [J]. Jour of Petrology,2003,44(11):1977 - 2002.

[29] LIATI A, GEBAUER D, WYSOCZANSKI R. U - Pb SHRIMP - dating of zircon domains from UHP garnet - rich mafic rocks and late peg - matoids in the Rhodope zone (N Greece): Evidence for Early Cretaceous crystallization and Late Cretaceous metamorphism [J]. Chem Geology, 2002(184):281 - 299.

[30] 万渝生,宋志勇,王来明,等. 华北克拉通太古宙典型地区栖霞县幅 1:5 万地质图修编-野外地质调查和 SHRIMP 锆石 U - Pb 定年[J]. 地质通报,2017,36(11):41 - 55.

[31] 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.

[32] VALLEY J W, LACKEY JS, CAVOSIE A J, et al. 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon[J]. Contrib Mineral Petrol, 2005(150):561 - 580.

[33] BAERTSCHI P. Absolute ¹⁸O content of standard mean ocean water[J]. Earth and Planetary Science Letters,1976, 31(3): 341 - 344.

Zircon U – Pb Ages and Oxygen Isotope Characteristics of Intrusive Rock Mass in Qixia – Xidouya Mining Area

CAI Na, LI Dapeng, ZHANG Chao, LIU Qiang, GENG Ke, WEI Pengfei, ZHANG Yan, BIAN Xiao, LI Xin, XU Jun

(Shandong Institute of Geological Sciences, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization of the Ministry of Land and Resources, Shandong Provincial Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resource Utilization, Shandong Jīnan 250013, China)

Abstract: Qixia – Xidouya mining area is an important gold mining area within Qixia gold metallogenic belt in eastern Shandong province. Based on geological investigations, samples of intermediate – acidic to acidic intrusive rocks that are spatially closely related to gold mineralization within the mining area have been collected systematically, and zircon U – Pb dating and SHRIMP oxygen isotope analysis have been conducted. It is indicated that quartz diorite porphyry has a diagenetic age ranging from 155.2Ma to 153.9Ma, while the biotite monzogranite has a diagenetic age ranging from 159.7Ma to 155.7Ma. They both belong to Linglong granite sequence. The zircon $\delta^{18}\text{O}$ values in the two types of intrusive rocks show a relatively small range, varying between 3.72‰ and 9.85‰ (with an overall average of 7.11‰), and exhibiting the characteristics of high $\delta^{18}\text{O}$. The quartz diorite porphyry and biotite monzogranite have similar diagenetic ages and zircon oxygen isotope compositions. It is indicated that they represent a homologous magmatic evolution relationship. The oxygen isotopes of zircons from neutral acidic intrusive rocks in Xidouya mining area of Qixia city show obvious crustal characteristics, it reflects the superposition of multiple geological processes, including crustal contamination, subduction zone fluid interaction, sediment recycling, cratonic mantle enrichment and regional metamorphism.

Key words: Gold – bearing ore – forming rock mass; zircon U – Pb age; SHRIMP oxygen isotope; Qixia – Xidouya mining area