

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.012

胶莱盆地东北缘西涝口金矿煌斑岩脉岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及其对构造岩浆事件的记录

周晓萍^{1,2}, 胡秉谦^{1*}, 周明岭^{1*}, 康恺¹, 胡亮¹, 姜帆¹, 张娜¹ZHOU Xiaoping^{1,2}, HU Bingqian^{1*}, ZHOU Mingling^{1*}, KANG Kai¹, HU Liang¹, JIANG Fan¹, ZHANG Na¹

1.山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209;

2.山东省地质矿产勘查开发局第三地质大队, 山东 烟台 264000

1.No.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China;

2.No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264000, Shandong, China

摘要:西涝口金矿是胶莱盆地东北缘成矿区近年在深部勘查找矿工作中取得突破性进展的大型金矿床,金矿体主要赋存于古元古代牧牛山二长花岗岩与中生代鹊山糜棱岩化花岗岩之间的构造破碎带中。区内煌斑岩脉广泛分布并与金矿存在密切的时空关系。为探究其形成时代及成因机制,进行了岩相学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年龄研究。地球化学结果显示,煌斑岩具有富碱、高钾、低钛、富集大离子亲石元素和轻稀土元素,相对亏损高场强元素和重稀土元素的特征,Nb/Ta 及 Zr/Hf 值与原始地幔十分接近,且远高于大陆地壳值,证明煌斑岩岩浆源区以幔源为主,受地壳混染作用不强烈。锆石 U-Pb 年龄显示,成矿期脉岩形成时间为 118.6 ± 1.5 Ma,成矿前脉岩形成时间为 $157 \pm 4 \sim 150.2 \pm 2.8$ Ma,除以上年轻锆石外,其余为捕获老锆石,老锆石的同位素年龄分别记录了新太古代、古元古代、新元古代及三叠纪的岩浆事件和变质时间,与区内古元古代岩浆侵入、中元古代地壳伸展与变质、三叠纪板块碰撞等事件记录吻合。经钻孔取样分析发现,西涝口金矿煌斑岩脉虽与金矿脉共用同一构造通道,且 Au 含量普遍不高,但其“褪色”作用为金矿形成提供了部分成矿物质。已有研究证实,煌斑岩原始岩浆含金量低,携金能力差,但在成矿作用过程中仍起到了重要的“化学屏障”的作用。

关键词:胶莱盆地东北缘;西涝口金矿;煌斑岩脉;地球化学;锆石 U-Pb 年龄

中图分类号:P618.51;P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)09-1634-14

Zhou X P, Hu B Q, Zhou M L, Kang K, Hu L, Jiang F, Zhang N. Geological characteristics, zircon U-Pb age and its records for tectonomagmatic events of lamprophyres in Xilaokou gold deposit, northeast margin of Jiaolai Basin. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1634-1647

Abstract: Xilaokou gold deposit is a large-scale gold deposit in the northeast margin of Jiaolai Basin, which has made breakthrough in deep prospecting in recent years. The gold orebodies mainly occurred in the structural fracture zone between the Paleoproterozoic Muniushan monzogranite and the Mesozoic Queshan mylonitized granite. Lamprophyres in the area are closely related to gold deposits in time and space. In order to explore the formation age and genetic mechanism, we carried out petrography, geochemistry and zircon U-Pb age research. The geochemical results show that lamprophyres are enriched in alkali, potassium, large ion lithophile elements and

收稿日期:2021-09-23;修订日期:2021-12-10

资助项目:山东地矿六院基金项目《焦家式金矿》(编号:LYKY2020-01)和山东省地矿局科研项目《鲁东中生代盆地构造岩浆演化及盆缘金属矿床成矿机制》(编号:202004)

作者简介:周晓萍(1989-),女,硕士,工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:sddkzxp@126.com

* 通信作者:胡秉谦(1987-),男,工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:bingqianhu@hotmail.com;

周明岭(1968-),男,教授级高级工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:gsj1969@163.com

light rare earth elements, but depleted in titanium, high field strength elements and heavy rare earth elements. The Nb/Ta and Zr/Hf ratios are far higher than the value of continental crust, and close with the primitive mantle, which proves that the magma source is mainly mantle and is not strongly contaminated by the crust. Zircon U-Pb chronology shows that the formation age of intramineral dykes is 118.6 ± 1.5 Ma, and the formation age of premineral dykes is $157 \pm 4 \sim 150.2 \pm 2.8$ Ma. Except for the above young zircons, the rest are captured old zircons. The isotopic age of old zircons recorded the magmatic and metamorphic events of Neoproterozoic, Paleoproterozoic, Neoproterozoic and Triassic, which is consistent with the records of Paleoproterozoic magmatic intrusion, Mesoproterozoic crustal extension and metamorphism and Triassic plate collision events. The results of drills sampling show that the lamprophyres and the gold veins share the same structural channel. Although the gold content is generally not high, its "fading" effect really provides some ore-forming materials. It has been confirmed that the lamprophyre original magma has low gold content and poor gold carrying capacity, but it still plays an important role of "chemical barrier" in the process of mineralization.

Key words: northeast margin of Jiaolai Basin; Xilaokou gold deposit; lamprophyres; geochemical; zircon U-Pb age

西涝口金矿是胶莱盆地东北缘成矿区近年发现的大型金矿床^[1],前人对区内金矿展开了大量研究,且主要集中在金矿成矿特征及成矿规律方面^[2-3],研究成果为金矿勘查与开发提供了重要依据。但是,区内煌斑岩脉发育,常与矿化蚀变带相伴出现,与成矿关系密切,且研究程度相对薄弱。因此,煌斑岩究竟是否为金矿形成提供了“金源”或“热液”,有待进一步研究。另外,基性脉岩是探讨岩石圈深部演化的重要“探针”和“窗口”,是区域性岩石圈引张环境下的产物,对大陆动力学研究具有重要的指示意义,其与金矿床密切伴生的时空关系也一直是地学界研究的重要课题^[4]。因此,本次以

西涝口金矿的煌斑岩脉为重点研究对象,采用岩相学、岩石地球化学及年代学方法,深入探讨煌斑岩岩石成因、源区性质及其与金矿化的关系,为胶东金成矿理论及找矿勘探工作提供指导。

1 区域地质概况

研究区位于胶东金矿集中区东部,西北为胶北地体,西南临胶莱盆地,东南为著名的苏鲁超高压变质带,处于不同地质构造单元交汇部位,构造位置特殊(图 1-a)。区内出露地层主要有古元古代荆山群,中生代莱阳群、青山群、王氏群;出露构造主要为 NE-SW 向断裂构造,自西向东有桃村断裂、

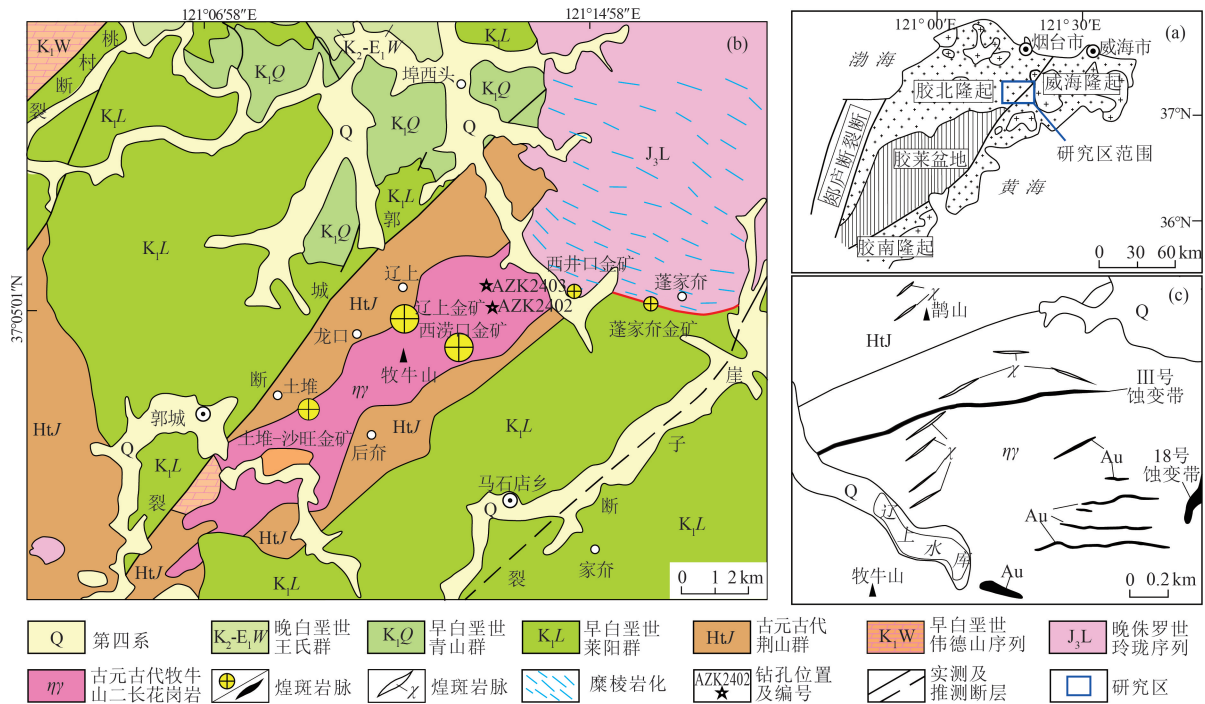


图 1 研究区大地构造位置(a)、区域地质简图(b)及矿区平面地质图(c)

Fig. 1 Tectonic location map(a), regional geological map(b) and geological map(c) of study area

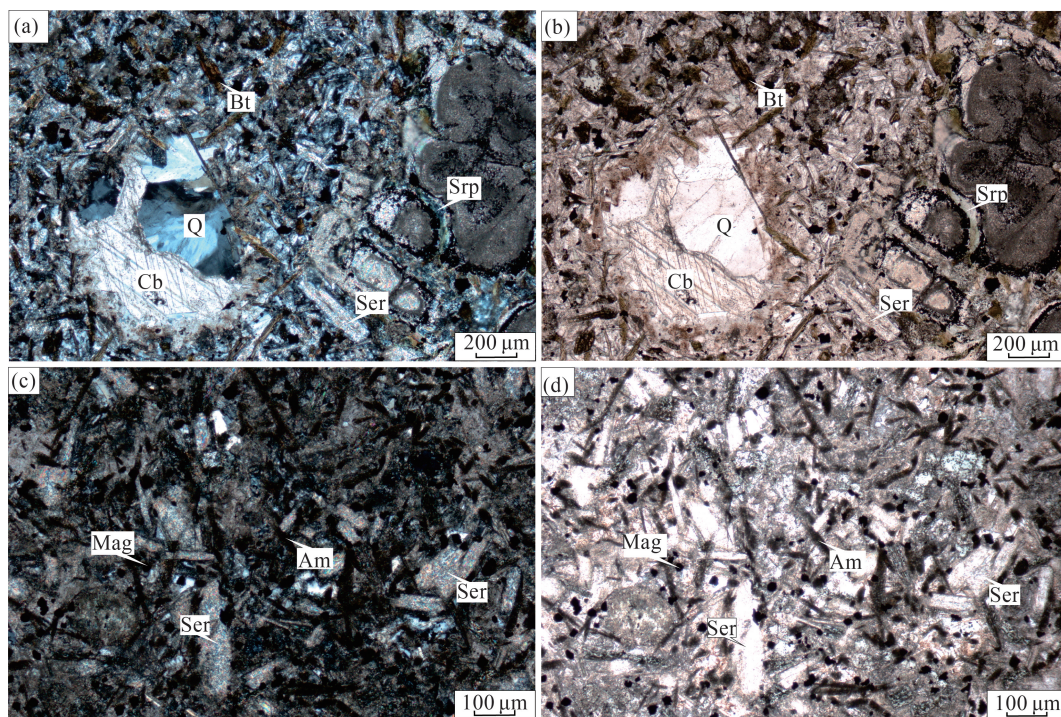


图 3 西涝口金矿煌斑岩显微照片

Fig. 3 Microphotographs of lamprophyre in Xilaokou gold deposit

Q—石英;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Srp—蛇纹石;Ser—绢云母;Am—角闪石;Cb—碳酸盐矿物;Mag—磁铁矿

表明挥发分含量较高且存在差异性。烧失量校正后,岩石 SiO_2 含量为 45.85%~53.95%;全碱含量为 1.22%~6.88% (平均 5.20%); MgO 含量为 7.39%~10.33% (平均 8.66%); Al_2O_3 含量为 11.10%~16.34%; TiO_2 含量为 0.65%~1.01%; $\text{Mg}^\#$ 值为 65~70 (平均 67)。根据煌斑岩 TAS 岩石分类图解 (图 4-a) 和 $\text{K}/(\text{K}+\text{Na})$ - $\text{K}/\text{Al}^{[6]}$ 图解 (图 4-b), 西涝口金矿煌斑岩属于钙碱性、超钾质煌斑岩类。

煌斑岩稀土元素含量较高 ($181.31 \times 10^{-6} \sim 322.03 \times 10^{-6}$), LREE/HREE 值为 12.47~18.06, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 17.26 \sim 33.35$ (平均 23.12), 轻、重稀土元素分异明显; δCe 值为 0.95~0.98, δEu 值为 0.92~1.52。从球粒陨石标准化稀土元素配分图 (图 5-a) 可以看出, 样品轻稀土元素 (LREE) 富集, 重稀土元素 (HREE) 亏损, 配分曲线呈右倾特征。原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 5-b) 显示, 岩石整体富集 Ba、Th、U 等

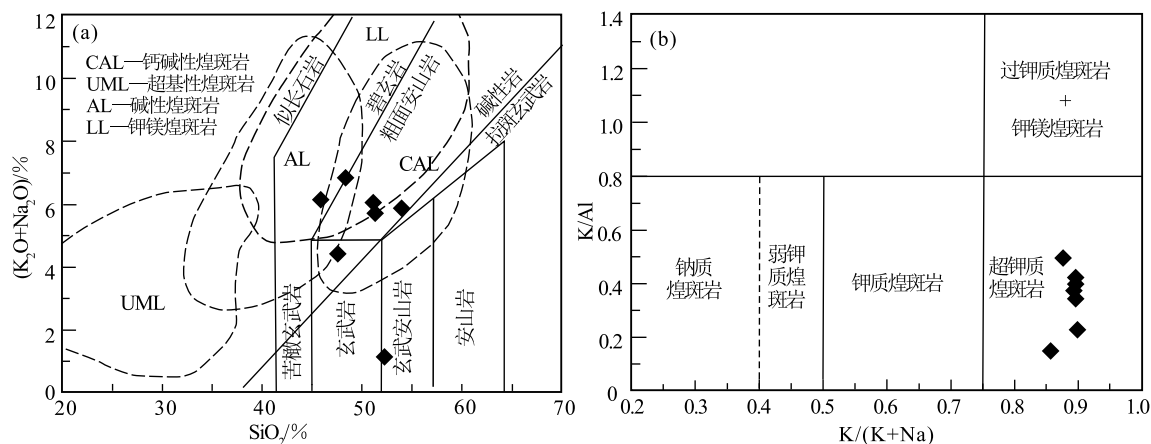
图 4 煌斑岩 TAS 岩石分类图解 (a) 和 $\text{K}/(\text{K}+\text{Na})$ - K/Al 图解 (b)Fig. 4 TAS classification diagram (a) and $\text{K}/(\text{K}+\text{Na})$ - K/Al diagram (b) of lamprophyre samples

表 1 煌斑岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace elements and REE analysis result of lamprophyre samples

样品编号	20XLK-1(1)	20XLK-1(2)	20XLK-2(1)	20XLK-2(2)	20XLK-3(1)	20XLK-3(2)	20XLK-23
TFe ₂ O ₃	8.64	8.89	9.02	7.65	7.56	8.73	8.85
K ₂ O	3.44	4.07	3.69	4.24	2.34	1.04	4.19
MgO	8.57	8.72	8.54	8.34	7.39	10.33	8.70
Na ₂ O	2.60	2.81	2.06	1.90	3.58	0.18	0.29
Al ₂ O ₃	15.86	16.28	15.61	15.96	16.34	11.10	13.39
CaO	8.07	9.08	8.20	14.41	7.28	15.22	15.35
SiO ₂	51.13	48.43	51.27	45.85	53.95	52.19	47.66
MnO	0.13	0.14	0.13	0.16	0.12	0.19	0.37
P ₂ O ₅	0.60	0.58	0.55	0.48	0.47	0.36	0.31
TiO ₂	0.97	0.98	0.93	1.01	0.97	0.65	0.89
烧失量	8.92	16.44	12.32	18.86	9.68	14.92	19.83
Na ₂ O+K ₂ O	6.03	6.88	5.75	6.14	5.92	1.22	4.48
Mg [#]	66	66	65	68	66	70	66
La	68.3	65.5	66.4	64.4	63.8	75.2	40.7
Ce	133	130	130	129	120	143	78.4
Pr	14.7	14.2	14.2	14.3	12.9	15.5	8.72
Nd	55.6	54.1	54.7	54.8	48	58.3	32.6
Sm	8.85	8.68	8.79	9.28	7.61	8.83	5.49
Eu	3.17	2.5	2.78	2.99	2.53	4.3	1.94
Gd	7.87	7.59	7.79	8.13	6.91	8.17	5.07
Tb	0.96	0.97	0.96	1.03	0.92	0.87	0.69
Dy	4.27	4.27	4.21	4.65	4.16	3.52	3.31
Ho	0.79	0.79	0.78	0.85	0.8	0.64	0.63
Er	2.18	2.13	2.14	2.34	2.16	1.74	1.71
Tm	0.3	0.29	0.29	0.31	0.31	0.23	0.24
Yb	2.01	1.92	1.92	2.11	2.01	1.52	1.59
Lu	0.29	0.28	0.28	0.3	0.29	0.21	0.22
Rb	80.9	146	127	144	80.1	39.4	137
Ba	2855	613	1420	2121	1251	6636	1382
Th	8.01	7.53	7.76	7.66	8.98	11.1	5.06
U	1.39	1.81	1.36	3.58	1.62	1.82	0.97
Nb	9.69	11.6	8.56	29.5	9.79	5.37	7.00
Ta	0.70	0.64	0.62	0.76	0.66	0.60	0.56
Pb	23.4	14.4	12.1	18.1	5.04	2.65	12.7
Sr	1146	1588	1256	2216	1083	906	902
Zr	156	148	146	139	159	93.2	105
Ti	5032	4393	4421	4352	5091	2990	4367
Y	20.3	19.4	19.8	20.2	20.0	16.6	17.2
ΣREE	302.29	293.22	295.24	294.49	272.4	322.03	181.31
LREE	283.62	274.98	276.87	274.77	254.84	305.13	167.85
HREE	18.67	18.24	18.37	19.72	17.56	16.9	13.46
LREE/HREE	15.19	15.08	15.07	13.93	14.51	18.06	12.47
δEu	1.14	0.92	1.01	1.03	1.05	1.52	1.11
δCe	0.97	0.98	0.97	0.98	0.95	0.96	0.96
(La/Yb) _N	22.91	23	23.32	20.58	21.4	33.35	17.26
(La/Sm) _N	4.85	4.75	4.75	4.37	5.27	5.36	4.66
(Gd/Yb) _N	3.16	3.19	3.27	3.11	2.77	4.34	2.57
Nb/Ta	14	18	14	39	15	9	13

注: $Mg^{\#} = [100Mg / (Mg + TFe)]$; $A/NK = [Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)] (mol)$; $A/CNK = [Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)] (mol)$; 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

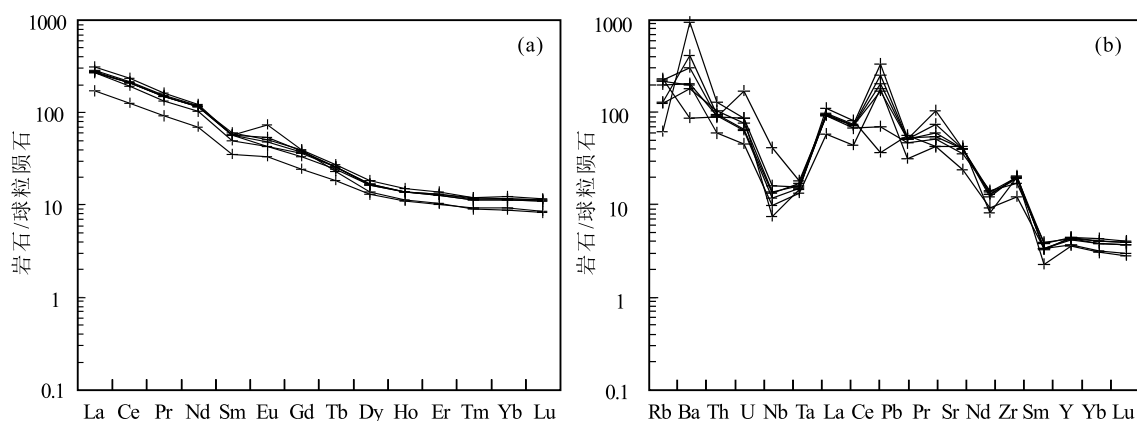


图 5 煌斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 The chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams (b) for lamprophyre samples

大离子亲石元素(LILE), 亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素(HSFE), 指示岩浆活动受地壳影响。

4.2 锆石年龄特征

煌斑岩锆石 U-Pb 测年分析结果见表 2, 锆石微量元素分析结果见表 3。

4.2.1 锆石形态及阴极发光结构

锆石阴极发光(CL)图像显示(图 6), 样品锆石以短柱状、近等粒状和长柱状为主, 粒度为 40~100 μm , 大部分具有岩浆成因振荡环带结构, 少数具有简单内部结构, 没有明显成分韵律分带, 个别锆石具有

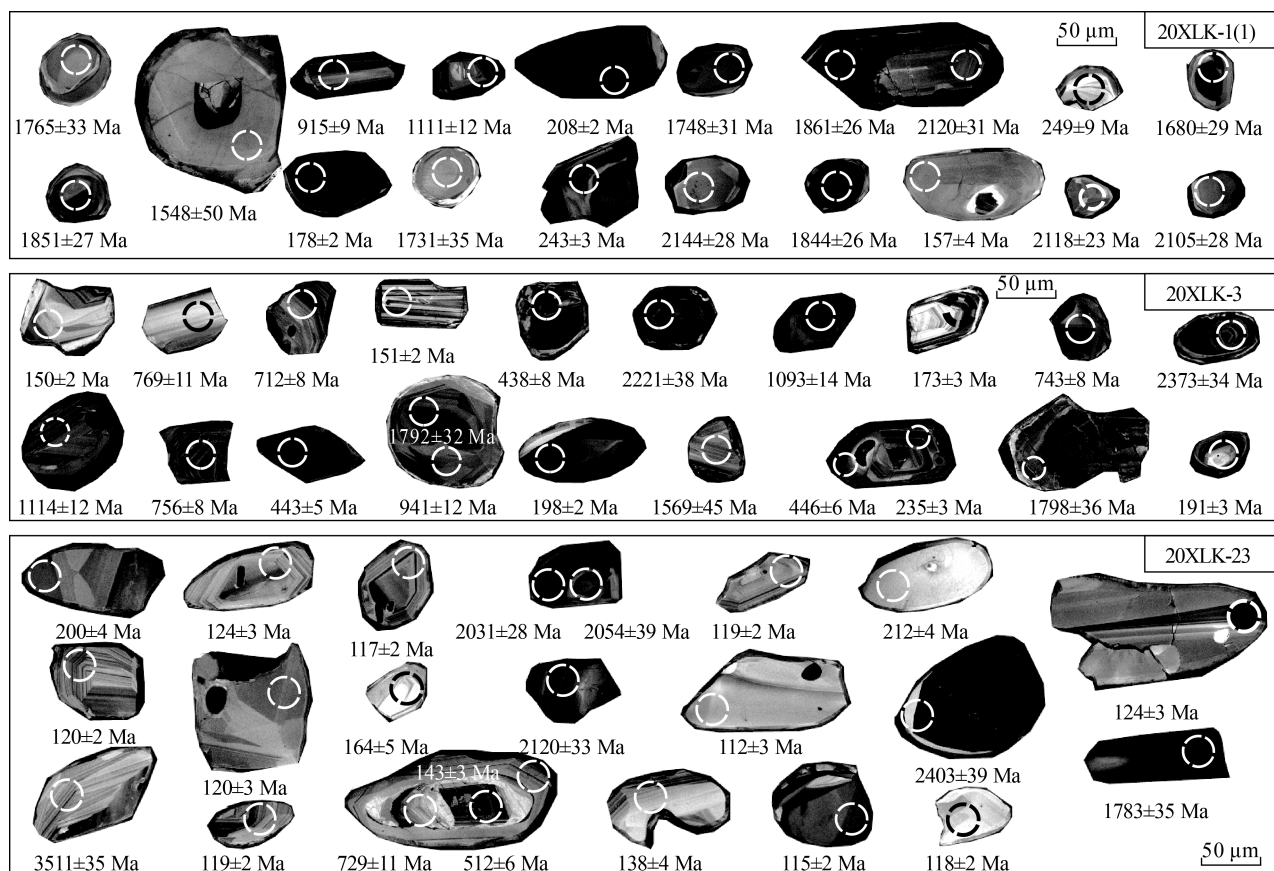


图 6 锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 6 CL images of zircons

表 2 煌斑岩锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 2 Zircon U-Th-Pb analysis result of lamprophyre samples

测试点 编号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
20XLK-1(1)-002	1	53	0.0589	0.0079	0.3103	0.0373	0.0393	0.0014	565	296	274	29	249	9
20XLK-1(1)-003	176	154	0.0960	0.0040	2.7932	0.0713	0.2089	0.0036	1548	50	1354	19	1223	19
20XLK-1(1)-005	72	926	0.0495	0.0011	0.2251	0.0047	0.0328	0.0003	169	52	206	4	208	2
20XLK-1(1)-006	334	430	0.1305	0.0021	6.4214	0.1005	0.3533	0.0033	2105	28	2035	14	1950	16
20XLK-1(1)-007	34	373	0.1031	0.0020	3.1798	0.0614	0.2214	0.0024	1680	29	1452	15	1289	13
20XLK-1(1)-008	303	371	0.1069	0.0020	3.8019	0.0693	0.2553	0.0028	1748	31	1593	15	1466	14
20XLK-1(1)-009	27	129	0.0508	0.0036	0.1694	0.0109	0.0247	0.0006	232	165	159	9	157	4
20XLK-1(1)-010	19	236	0.1059	0.0023	3.0970	0.0638	0.2110	0.0031	1731	35	1432	16	1234	16
20XLK-1(1)-011	396	448	0.1315	0.0020	6.4448	0.1004	0.3519	0.0032	2118	23	2038	14	1944	15
20XLK-1(1)-012	6	1276	0.0510	0.0013	0.1981	0.0047	0.0280	0.0003	243	55	184	4	178	2
20XLK-1(1)-013	92	274	0.0743	0.0015	1.5747	0.0305	0.1526	0.0015	1050	45	960	12	915	9
20XLK-1(1)-014	246	500	0.1132	0.0017	4.5991	0.0720	0.2922	0.0028	1851	27	1749	13	1652	14
20XLK-1(1)-015	69	129	0.0780	0.0019	2.0287	0.0489	0.1881	0.0022	1146	49	1125	16	1111	12
20XLK-1(1)-016	65	1670	0.1138	0.0016	4.2008	0.0621	0.2658	0.0026	1861	26	1674	12	1519	13
20XLK-1(1)-016-1	308	435	0.1316	0.0024	6.0807	0.1042	0.3311	0.0033	2120	31	1987	15	1844	16
20XLK-1(1)-017	225	298	0.1334	0.0022	7.0099	0.1115	0.3790	0.0038	2144	28	2113	14	2072	18
20XLK-1(1)-018	151	985	0.1127	0.0016	4.8705	0.0765	0.3110	0.0030	1844	26	1797	13	1745	15
20XLK-1(1)-019	91	313	0.1079	0.0020	3.8223	0.0823	0.2555	0.0039	1765	33	1597	17	1467	20
20XLK-1(1)-020	813	620	0.0532	0.0018	0.2813	0.0090	0.0384	0.0005	345	76	252	7	243	3
20XLK-3-001	216	745	0.0492	0.0018	0.2023	0.0066	0.0300	0.0004	167	81	187	6	191	3
20XLK-3-003	484	770	0.0637	0.0013	1.0804	0.0222	0.1222	0.0013	733	44	744	11	743	8
20XLK-3-005	150	344	0.0642	0.0020	1.0641	0.0284	0.1167	0.0013	750	65	736	14	712	8
20XLK-3-006	111	181	0.0971	0.0024	3.6120	0.0927	0.2679	0.0036	1569	45	1552	20	1530	19
20XLK-3-007	276	654	0.0494	0.0022	0.1657	0.0069	0.0236	0.0004	165	138	156	6	151	2
20XLK-3-008	253	526	0.1395	0.0034	6.7552	0.1952	0.3498	0.0080	2221	38	2080	26	1934	38
20XLK-3-009	169	351	0.0836	0.0024	2.1365	0.0624	0.1848	0.0026	1284	56	1161	20	1093	14
20XLK-3-010	246	501	0.0485	0.0021	0.1826	0.0079	0.0273	0.0005	124	100	170	7	173	3
20XLK-3-011	191	314	0.1524	0.0035	8.7701	0.2005	0.4153	0.0050	2373	34	2314	21	2239	23
20XLK-3-013	295	1123	0.0515	0.0014	0.1675	0.0045	0.0235	0.0003	265	65	157	4	150	2
20XLK-3-014	114	139	0.0693	0.0018	1.2098	0.0338	0.1267	0.0019	906	56	805	16	769	11
20XLK-3-015	360	462	0.0765	0.0015	2.0016	0.0414	0.1886	0.0021	1109	39	1116	14	1114	12
20XLK-3-017	395	550	0.0632	0.0024	1.0940	0.0272	0.1245	0.0015	717	80	750	13	756	8
20XLK-3-018	324	494	0.0571	0.0016	0.5610	0.0150	0.0712	0.0008	494	68	452	10	443	5
20XLK-3-019	125	476	0.0762	0.0069	1.6875	0.0405	0.1571	0.0022	1102	181	1004	15	941	12
20XLK-3-019-1	291	1063	0.1096	0.0020	3.7403	0.0751	0.2445	0.0036	1792	32	1580	16	1410	19
20XLK-3-020	261	1858	0.0509	0.0012	0.2203	0.0053	0.0312	0.0004	235	56	202	4	198	2
20XLK-3-021-1	801	1453	0.0628	0.0014	0.6179	0.0179	0.0703	0.0014	702	48	489	11	438	8

续表 2

测试点 编号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
20XLK-3-022-1	49	760	0.0487	0.0014	0.2513	0.0074	0.0371	0.0005	132	69	228	6	235	3
20XLK-3-022-2	219	459	0.0611	0.0026	0.6069	0.0177	0.0716	0.0010	643	91	482	11	446	6
20XLK-3-021-2	152	1163	0.1099	0.0024	4.3714	0.0852	0.2787	0.0037	1798	36	1707	16	1585	19
20XLK-23-001	136	193	0.0461	0.0030	0.1961	0.0114	0.0315	0.0007	400	-246	182	10	200	4
20XLK-23-002	157	187	0.0558	0.0036	0.1437	0.0086	0.0195	0.0005	456	142	136	8	124	3
20XLK-23-004	84	97	0.0545	0.0052	0.1861	0.0157	0.0257	0.0008	391	212	173	13	164	5
20XLK-23-005	618	927	0.1251	0.0020	6.6042	0.1081	0.3809	0.0035	2031	28	2060	15	2081	16
20XLK-23-005-1	610	1068	0.1267	0.0028	6.7050	0.1251	0.3716	0.0042	2054	39	2073	17	2037	20
20XLK-23-006	168	234	0.0491	0.0036	0.1216	0.0076	0.0186	0.0004	150	167	116	7	119	2
20XLK-23-007	562	375	0.0498	0.0030	0.1177	0.0067	0.0176	0.0004	187	141	113	6	112	3
20XLK-23-008	474	356	0.0605	0.0063	0.1601	0.0123	0.0217	0.0007	387	102	131	6	118	2
20XLK-23-009	207	222	0.0543	0.0025	0.1374	0.0063	0.0185	0.0004	132	178	115	7	119	2
20XLK-23-010	214	257	0.0488	0.0027	0.2185	0.0107	0.0334	0.0006	254	131	120	6	115	2
20XLK-23-011	3078	1474	0.0487	0.0039	0.1196	0.0081	0.0186	0.0004	198	69	124	3	120	2
20XLK-23-012	658	264	0.1089	0.0021	4.7748	0.0917	0.3165	0.0037	error	113	7	120	3	
20XLK-23-013	154	217	0.0513	0.0030	0.1251	0.0066	0.0180	0.0003	350	150	129	8	117	2
20XLK-23-014	54	93	0.0492	0.0042	0.1273	0.0094	0.0195	0.0005	620	221	151	11	138	4
20XLK-23-015	29	184	0.1552	0.0035	8.5128	0.1875	0.3964	0.0051	139	128	201	9	212	4
20XLK-23-016	295	208	0.0501	0.0015	0.1296	0.0037	0.0187	0.0003	1783	35	1780	16	1773	18
20XLK-23-017	120	141	0.0453	0.0038	0.1177	0.0079	0.0189	0.0004	167	176	122	8	124	3
20XLK-23-018	62	110	0.3080	0.0072	29.8554	0.6010	0.6822	0.0071	2403	39	2287	20	2152	24
20XLK-23-019	446	951	0.0535	0.0036	0.1357	0.0086	0.0184	0.0004	3511	35	3482	20	3353	27
20XLK-23-020	379	454	0.1315	0.0025	6.7585	0.1267	0.3703	0.0037	2120	33	2080	17	2031	17
20XLK-23-021-1	85	189	0.0540	0.0030	0.1655	0.0089	0.0225	0.0005	369	131	156	8	143	3
20XLK-23-021-2	598	659	0.0645	0.0021	0.7424	0.0208	0.0826	0.0010	767	73	564	12	512	6
20XLK-23-021-3	157	140	0.0611	0.0019	1.0131	0.0307	0.1196	0.0020	643	65	710	16	729	11

不规则的继承核。除具振荡环带结构的锆石为年轻锆石外,其余年龄较老锆石的晶体长度较短,磨圆度较高,环带不明显,内部裂隙较发育,说明这些老锆石为残留锆石或围岩捕获锆石。

4.2.2 锆石微量元素

锆石球粒陨石标准化稀土元素配分曲线显示(图 7),3 件样品中大部分元素配分曲线呈亏损 LREE(轻稀土元素),富集 HREE(重稀土元素),同时具明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常,与 Hoskin^[7]研究总结的 Boggry Plain 岩浆和热液锆石配分曲线特征相似。另外,样品 20XLK-1(1)中部分锆石样品呈现 HREE 含量稍低的特点,可能与变质作用有

关;样品 20XLK-3 中个别锆石样品及 20XLK-23 部分锆石样品具异常高的 ΣREE 、LREE、U、Th 含量,同时无明显的 Ce 异常但具负 Eu 异常,配分曲线斜度比岩浆锆石陡,与热液锆石配分曲线吻合,推测其为热液作用蚀变交代形成。

此外,大部分锆石微量元素显示强烈的正 Ce 异常和负 Eu 异常,具壳源特点;而少量锆石微量元素含量低,显示弱的负 Eu 异常或没有异常,具幔源特征^[8]。进一步证明研究区存在壳幔混合作用。

4.2.3 锆石年龄

本次对 3 件煌斑岩样品(20XLK-1(1)、20XLK-3、20XLK-23)共计 57 粒锆石的 63 个点进行了分析。锆石

表 3 煌斑岩锆石微量元素分析结果
Table 3 Trace element composition of zircons from lamprophyre samples

测试点编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	δEu	δCe
20XLK-1(1)-002	0.04	0.13	0.00	0.00	0.05	0.03	0.24	0.24	4.98	2.65	16.43	4.77	58.12	13.76	101.4	0.2	101.2	0.61	2.67
20XLK-1(1)-003	0.10	3.10	0.19	3.12	5.51	0.11	18.13	4.42	38.52	9.62	31.97	5.32	40.37	6.52	167.0	12.1	154.9	0.03	4.12
20XLK-1(1)-005	0.00	1.98	0.05	0.71	4.26	0.39	35.40	12.18	109.41	28.31	91.99	15.51	118.98	20.45	439.6	7.4	432.2	0.07	12.94
20XLK-1(1)-006	26.64	111.51	9.74	50.39	20.90	1.14	67.08	20.71	229.43	83.24	343.06	66.12	573.34	105.60	1708.9	220.3	1488.6	0.09	1.66
20XLK-1(1)-007	0.10	1.77	0.08	1.20	3.83	0.26	15.73	2.64	11.71	1.73	3.51	0.55	4.24	0.74	48.1	7.2	40.9	0.09	4.63
20XLK-1(1)-008	0.36	4.39	0.35	5.70	7.64	0.13	13.27	2.68	16.22	3.16	8.98	1.25	9.14	1.51	74.8	18.6	56.2	0.04	2.68
20XLK-1(1)-009	0.00	4.52	0.04	1.03	4.34	0.78	17.76	3.47	15.70	2.38	4.78	0.61	3.63	0.52	59.6	10.7	48.9	0.23	31.86
20XLK-1(1)-010	0.02	4.05	0.05	0.76	3.33	0.80	15.82	3.55	20.47	3.86	9.71	1.36	10.71	1.88	76.4	9.0	67.3	0.28	22.04
20XLK-1(1)-011	0.05	43.64	0.41	7.23	14.26	1.22	77.88	25.52	292.36	108.87	454.16	85.65	723.60	132.46	1967.3	66.8	1900.5	0.09	30.34
20XLK-1(1)-012	0.00	5.71	0.00	0.14	0.39	0.22	3.06	1.34	17.81	8.00	41.02	9.69	98.26	20.61	206.3	6.5	199.8	0.44	296.13
20XLK-1(1)-013	0.10	2.43	0.36	4.77	11.02	0.63	60.27	21.67	254.83	92.90	388.28	74.84	648.70	123.69	1684.5	19.3	1665.2	0.06	1.84
20XLK-1(1)-014	0.01	7.21	0.20	3.70	8.18	0.97	30.99	7.75	68.87	21.11	76.76	14.01	111.65	20.06	371.5	20.3	351.2	0.16	10.80
20XLK-1(1)-015	0.53	3.57	0.35	3.23	5.54	0.60	35.53	12.64	160.29	63.38	282.45	57.12	516.52	103.75	1245.5	13.8	1231.7	0.10	1.95
20XLK-1(1)-016	0.03	4.57	0.04	0.73	2.44	0.39	18.38	6.44	71.90	23.05	95.25	19.85	175.97	33.57	452.6	8.2	444.4	0.13	24.82
20XLK-1(1)-016-1	0.02	28.46	0.12	2.78	5.51	1.18	26.21	7.44	82.79	29.68	130.28	27.36	265.56	55.20	662.6	38.1	624.5	0.25	64.69
20XLK-1(1)-017	0.04	22.82	0.36	6.64	12.80	0.99	62.82	20.47	235.79	86.38	357.43	66.73	575.46	105.90	1554.6	43.6	1511.0	0.09	18.48
20XLK-1(1)-018	0.00	3.10	0.04	0.54	0.83	0.27	6.11	1.87	22.34	8.37	38.30	7.99	75.13	15.41	180.3	4.8	175.5	0.26	22.35
20XLK-1(1)-019	0.04	3.57	0.19	2.77	3.66	0.31	15.02	3.97	23.46	4.26	12.01	2.57	25.78	5.76	103.4	10.6	92.8	0.11	5.14
20XLK-1(1)-020	0.34	108.19	2.49	33.25	42.12	20.39	117.28	26.09	209.89	53.09	169.40	27.25	205.39	33.60	1048.8	206.8	842.0	0.83	12.46
20XLK-3-001	0.01	2.99	0.02	0.20	0.69	0.40	4.26	1.79	25.89	11.50	64.12	16.59	192.40	48.98	369.8	4.3	365.5	0.55	48.47
20XLK-3-003	0.10	31.63	0.82	8.23	11.37	2.24	54.01	17.58	204.26	74.53	322.41	62.92	553.10	103.51	1446.7	54.4	1392.3	0.23	11.08
20XLK-3-005	0.05	7.20	0.19	2.03	3.59	1.07	19.70	6.78	79.61	31.35	145.56	32.21	310.35	64.67	704.4	14.1	690.2	0.31	10.23
20XLK-3-006	0.00	26.39	0.06	0.83	1.62	0.36	11.61	4.44	60.34	26.13	128.12	29.66	287.08	59.89	636.5	29.3	607.3	0.19	140.35
20XLK-3-007	0.30	21.73	0.36	5.78	12.14	3.96	61.80	19.76	230.22	84.00	363.19	71.94	642.57	124.10	1641.8	44.3	1597.6	0.36	13.76
20XLK-3-008	0.38	25.01	0.35	4.31	4.17	0.83	17.02	4.80	54.82	20.80	98.28	22.56	223.23	49.00	525.6	35.0	490.5	0.26	15.29
20XLK-3-009	0.46	23.56	1.54	14.23	16.28	0.97	61.77	18.72	201.78	69.21	278.11	52.52	436.60	78.82	1254.6	57.0	1197.5	0.08	4.14
20XLK-3-010	0.02	27.08	0.11	1.76	5.22	1.69	32.54	11.60	147.96	57.53	257.93	54.63	509.55	102.06	1209.7	35.9	1173.8	0.30	71.20
20XLK-3-011	0.31	24.76	0.23	2.84	4.36	1.10	17.07	5.46	58.91	22.98	106.77	23.45	237.71	51.39	557.3	33.6	523.8	0.34	21.36
20XLK-3-013	0.01	14.60	0.05	0.82	3.18	1.15	33.60	14.39	194.76	76.21	345.54	70.45	633.60	119.41	1507.8	19.8	1488.0	0.21	92.34
20XLK-3-014	0.10	17.84	1.08	16.29	22.50	0.54	79.07	21.08	213.78	70.40	278.17	52.97	471.56	91.98	1337.4	58.3	1279.0	0.03	4.83
20XLK-3-015	0.08	15.07	0.52	8.23	13.11	1.96	62.84	19.92	217.85	78.11	324.08	62.23	536.81	102.90	1443.7	39.0	1404.8	0.17	8.30

续表 3

测试点编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	δEu	δCe
20XLK-3-017	197.01	476.77	54.37	240.33	51.78	5.06	70.16	15.27	148.50	50.87	221.32	47.02	447.65	90.68	2116.8	1025.3	1091.5	0.26	1.09
20XLK-3-018	2.49	22.31	0.94	8.02	9.52	0.74	48.36	15.59	188.64	69.23	298.93	58.02	510.12	99.17	1332.1	44.0	1288.1	0.08	3.50
20XLK-3-019	0.18	3.50	0.15	1.72	4.23	0.29	19.96	4.77	36.56	10.28	37.80	6.86	56.43	11.23	194.0	10.1	183.9	0.08	4.82
20XLK-3-019-1	0.03	4.28	0.13	2.88	8.56	0.37	38.45	8.89	67.70	18.17	60.97	10.47	82.31	14.72	318.0	16.3	301.7	0.05	8.91
20XLK-3-020	0.03	21.48	0.10	1.22	2.60	0.86	12.47	4.00	50.70	20.76	105.23	26.00	287.28	67.27	600.0	26.3	573.7	0.38	58.86
20XLK-3-021-1	0.14	58.71	0.07	1.29	3.53	0.33	25.27	11.34	160.06	69.09	351.07	79.29	770.17	161.46	1691.8	64.1	1627.7	0.08	139.38
20XLK-3-022-1	0.06	6.45	0.04	0.47	1.19	0.43	6.92	2.48	32.31	13.62	68.61	16.47	166.68	38.12	353.8	8.6	345.2	0.35	30.44
20XLK-3-022-2	1.33	31.48	1.89	14.06	13.93	3.76	42.29	14.65	171.71	63.77	276.64	57.33	527.56	99.83	1320.2	66.5	1253.8	0.44	3.93
20XLK-3-021-2	0.40	4.01	0.23	1.89	3.66	0.90	18.68	7.75	100.62	36.52	158.42	32.34	292.73	56.63	714.8	11.1	703.7	0.27	3.11
20XLK-23-001	0.01	32.41	0.07	1.88	3.59	0.55	14.95	4.47	47.49	17.19	70.90	14.67	135.42	27.21	370.8	38.5	332.3	0.20	142.35
20XLK-23-002	95.28	215.88	18.99	68.87	11.41	1.55	15.42	3.87	43.52	17.14	84.14	19.40	202.65	46.08	844.2	412.0	432.2	0.36	1.15
20XLK-23-004	0.04	16.77	0.16	2.81	5.42	1.73	18.59	5.44	58.60	21.03	90.17	18.23	159.33	32.37	430.7	26.9	403.8	0.47	29.17
20XLK-23-005	0.09	45.07	0.27	4.66	10.44	0.49	69.71	24.29	294.63	108.74	450.27	85.28	707.40	125.47	1926.8	61.0	1865.8	0.04	44.93
20XLK-23-005-1	0.06	46.38	0.36	5.91	12.73	0.58	82.77	30.19	357.66	132.41	545.88	103.35	863.91	153.65	2335.9	66.0	2269.8	0.04	36.33
20XLK-23-006	27.33	89.01	5.70	22.80	4.81	1.07	12.65	3.53	42.32	17.50	88.67	20.95	224.52	49.64	610.5	150.7	459.8	0.40	1.63
20XLK-23-007	0.24	105.89	0.72	11.07	14.83	3.34	61.29	18.34	200.02	70.63	311.65	66.07	611.72	123.87	1599.7	136.1	1463.6	0.29	39.23
20XLK-23-008	0.00	7.20	0.08	2.11	4.85	2.17	21.67	6.63	66.27	23.24	95.12	18.36	160.18	31.93	439.8	16.4	423.4	0.54	28.84
20XLK-23-009	106.96	228.45	13.65	45.99	9.60	1.80	25.49	7.53	85.16	33.94	162.49	36.38	364.76	80.25	1202.5	406.5	796.0	0.33	1.24
20XLK-23-010	0.00	6.29	0.00	0.10	0.22	0.16	1.02	0.28	2.35	0.60	2.10	0.38	3.11	0.59	17.2	6.8	10.4	0.87	1032.83
20XLK-23-011	0.09	45.10	0.11	1.22	2.05	0.77	11.16	3.32	42.48	17.50	85.68	20.43	212.96	47.63	490.5	49.3	441.2	0.39	93.39
20XLK-23-012	0.02	26.84	0.26	4.63	6.76	1.04	22.15	6.10	63.17	23.50	105.41	22.46	208.73	41.39	532.5	39.6	492.9	0.24	30.34
20XLK-23-013	35.83	115.92	7.19	27.76	5.70	0.97	11.96	3.58	40.87	16.80	85.31	20.69	222.40	50.15	645.1	193.4	451.8	0.35	1.64
20XLK-23-014	14.89	58.35	2.98	12.74	3.47	0.81	10.87	3.23	38.68	15.38	75.16	17.82	184.80	41.96	481.1	93.2	387.9	0.37	1.99
20XLK-23-015	0.02	10.41	0.04	0.36	1.22	0.16	6.16	2.09	26.48	10.24	47.84	10.34	98.84	19.70	233.9	12.2	221.7	0.14	64.22
20XLK-23-016	0.72	336.37	5.33	66.41	64.52	26.29	187.71	49.60	495.31	165.71	681.80	138.14	1271.57	242.89	3732.4	499.7	3232.7	0.68	18.11
20XLK-23-017	92.45	236.12	15.23	71.72	36.49	14.64	114.14	28.95	288.42	97.34	411.67	83.64	779.11	157.19	2427.1	466.7	1960.5	0.63	1.38
20XLK-23-018	0.02	18.57	0.07	1.42	3.47	0.16	26.36	10.70	139.71	56.09	260.38	54.47	499.00	94.76	1165.2	23.7	1141.5	0.04	70.77
20XLK-23-019	0.55	37.16	0.22	1.62	2.48	0.80	11.83	3.88	48.54	19.41	99.25	23.34	246.12	55.92	551.1	42.8	508.3	0.37	25.38
20XLK-23-020	0.09	21.96	0.56	8.75	17.80	1.64	107.08	34.60	392.91	139.70	570.81	105.52	888.21	155.64	2445.3	50.8	2394.5	0.09	11.09
20XLK-23-021-1	0.08	18.58	0.03	0.63	1.10	0.60	7.81	2.82	34.94	14.70	72.94	17.31	185.35	39.75	396.7	21.0	375.6	0.45	82.89
20XLK-23-021-2	1.23	83.21	0.27	1.72	2.96	0.43	20.60	8.88	122.06	53.71	268.13	60.89	589.34	119.06	1332.5	89.8	1242.7	0.12	33.24
20XLK-23-021-3	2.12	57.14	0.44	2.58	2.85	0.63	14.61	5.13	64.23	26.14	125.81	29.17	286.98	61.43	679.3	65.8	613.5	0.24	13.53

注: $\delta\text{Eu} = 2(\text{Eu}_{\text{样}}/\text{Eu}_{\text{球}})/(\text{Sm}_{\text{样}}/\text{Sm}_{\text{球}} + \text{Gd}_{\text{样}}/\text{Gd}_{\text{球}})$; $\delta\text{Ce} = 2(\text{Ce}_{\text{样}}/\text{Ce}_{\text{球}})/(\text{La}_{\text{样}}/\text{La}_{\text{球}} + \text{Pr}_{\text{样}}/\text{Pr}_{\text{球}})$; 球粒陨石标准值据参考文献[17]; 检测下限为 0.001×10^{-6}

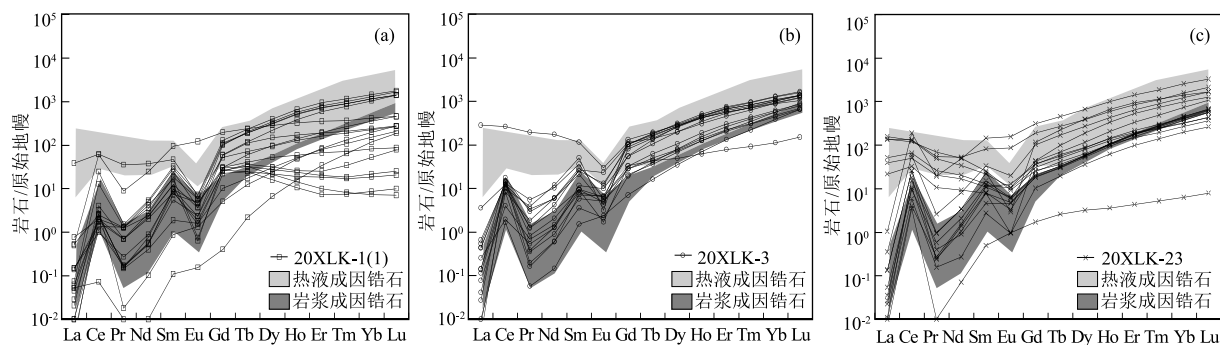


图7 煌斑岩锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from lamprophyre samples

年龄谐和图显示(图8),数据点较分散,年龄值跨度很大,证明锆石来源和成因较复杂。结合样品特点,本次对年龄大于1200 Ma的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 数据,小于1200 Ma的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据。

20XLK-1(1)样品共测试18粒锆石。锆石年龄谐和图及频率分布图(图8-a、b)显示,数据点沿不一致曲线分布且具多组年龄,可能与构造热事件引发的铅丢失有关。年龄数据最小值为 157 ± 4 Ma,可以限定该煌斑岩脉的侵位年龄最晚为 157 ± 4 Ma。捕获老锆石年龄范围主要在 $2144\pm 28\sim 1844\pm 26$ Ma之间,呈浑圆状、晶棱圆滑、环带不明显、具变质增生边,Th/U值为0.04~0.88(平均0.52),Nb/Ta值

为0.60~2.99(平均2.35),虽然稀土元素配分曲线类似岩浆锆石特点,但HREE含量稍低,综合判断为变质锆石。

20XLK-3样品共测定19粒锆石。最年轻的2个岩浆锆石年龄为 150 ± 2 Ma和 151 ± 2 Ma,其加权平均值为 150.2 ± 2.8 Ma,可以代表煌斑岩脉的侵位年龄。锆石年龄谐和图及频率分布图(图8-c、d)显示,大部分数据谐和度较好,个别点略有偏离,可能与构造热事件引发的铅丢失有关。锆石7号点和13号点岩浆振荡环带明显,Th/U值为0.26~0.42(个别锆石略低于岩浆锆石0.4,可能与铅丢失有关),Nb/Ta值为4.30~5.67,略高于岩浆锆石Nb/Ta值

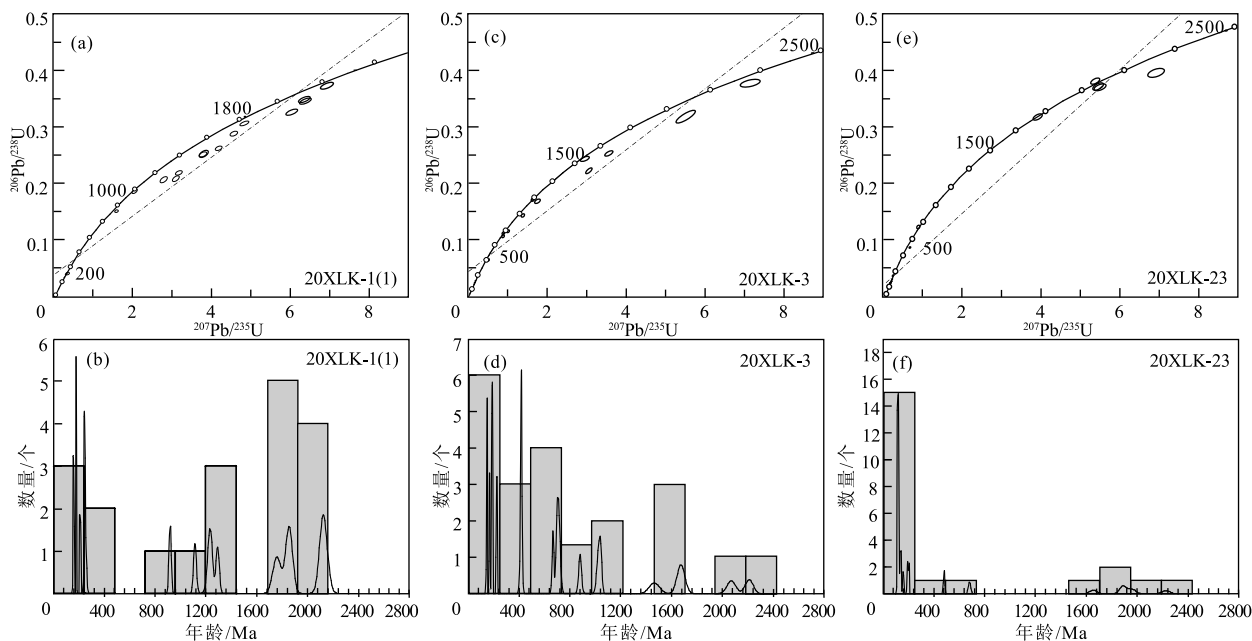


图8 煌斑岩锆石U-Pb年龄谐和图(a、c、e)和频率分布图(b、d、f)

Fig. 8 U-Pb concordia diagrams(a,c,e) and frequency distribution curves(b,d,f) of zircons from lamprophyre

(1.0~4.6)^[9], 稀土元素配分曲线亏损 LREE, 富集 HREE, 均显示岩浆锆石特点。

20XLK-23 样品共测定 20 粒锆石, 主要分为 110~120 Ma 和 1800~2100 Ma 两个年龄区间(图 8-e、f)。年轻锆石多呈半自形—他形, 晶棱圆滑, 无振荡环带结构或分带不明显, 稀土元素总体含量及 LREE 含量比岩浆锆石高, 具热液锆石特点; 10 个年龄的加权平均值为 118.6±1.5 Ma, 该年龄与孙兴丽^[2]报道的西涝口金成矿年龄(绢云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 同位素年龄为 116.62±0.75 Ma)相近, 可以限定成矿热液流体作用时间为 118.6±1.5 Ma。年龄较老的锆石呈浑圆状, 边部磨圆, 结构分带不明显, 局部保留岩浆振荡环带结构, 属于岩浆热液作用捕获的原岩锆石。

综上, 3 件煌斑岩样品获得的年龄分别为 157±4 Ma、150.2±2.8 Ma、118.6±1.5 Ma。结合西涝口成矿年龄 116.62±0.75 Ma 判断, 2 件样品为成矿前脉岩, 1 件为成矿期脉岩, 证明研究区晚侏罗世—早白垩世存在广泛的基性岩浆活动。

5 讨 论

5.1 锆石年龄揭示的区域地质事件

根据锆石 U-Pb 测年结果, 研究区煌斑岩年龄主要分为以下几个阶段: 120~110 Ma、160~140 Ma、240~190 Ma、1100~700 Ma、1800~1600 Ma、2400~2100 Ma。其中, 120~110 Ma 的锆石年龄为样品最年轻的年龄, 代表煌斑岩的侵位年龄, 与早白垩世胶东金矿床大规模成矿时间吻合; 160~140 Ma 的锆石年龄记录了晚侏罗世玲珑岩体侵位的时间; 240~190 Ma 的锆石年龄记录了三叠纪的板块碰撞事件; 1100~700 Ma 和 1800~1600 Ma 的锆石年龄分别记录了新元古代和中元古代的构造热事件; 2100 Ma 锆石年龄与围岩牧牛山岩体侵位时间一致; 2400~2200 Ma 的锆石年龄与新太古代岩浆活动及变质作用相关。作为高熔点矿物, 锆石在岩浆过程中一般可以保持不熔^[10], 且在不同岩浆事件中继续生长, 记录不同的岩浆活动, 如本文中的单颗锆石同时保留了 3 个世代年龄(143 Ma、512 Ma、729 Ma), 可视为研究区岩浆演化的缩影, 是了解岩浆演化过程的有利证据。

总之, 西涝口金矿中的煌斑岩脉为结晶程度较低的浅成脉岩, 含有多来源、多阶段形成的锆石, 其

中少量年轻锆石代表了煌斑岩脉侵位结晶年龄, 较多的老锆石则为残留锆石或捕获的围岩锆石, 可以推测周围地质体的演化历史^[11]。锆石测年结果证明: 基性脉岩在由深部上升侵位的过程中, 穿越了新太古代、古元古代、新元古代及三叠纪地质体并“裹挟”部分锆石至地壳浅部。

5.2 煌斑岩的 Au 含量及其在金成矿中的作用

将西涝口金矿煌斑岩脉按赋存状态分为: ①在花岗质围岩中; ②在矿化蚀变带中; ③在蚀变带底板(图 2)。本次统计了 3 个钻孔中煌斑岩的含金量, 结果见表 4。

研究区虽然发育大量煌斑岩脉, 但测试结果表明其中 Au 含量不高, Au 品位为 0.05×10⁻⁶~0.60×10⁻⁶。其中, 赋存于矿化蚀变带内的煌斑岩整体 Au 品位最高, 其次是花岗质围岩中的脉岩, 蚀变带底板煌斑岩中 Au 品位最低。煌斑岩本是深源暗色斑状脉岩, 但矿化蚀变带中的脉岩颜色呈土黄色, 颜色较浅, 且 Au 品位稍高, 暗示煌斑岩的褪色及岩石中橄榄石的蛇纹石化、滑石化可能与成矿流体相关, 褪色部分成矿元素富集后侵位上升, 在适当位置将 Au 元素卸载成矿。前人试验研究证明, 煌斑岩携金能力差, 含金量过低, 不具有提供大量金源的能力^[12-14], 但不可否认的是, 煌斑岩在金成矿作用过程中确实起到了积极作用, 煌斑岩形成阶段的去气作用^[15]及与花岗质围岩氧化还原能力的差异, 使二者之间的接触面产生“界面效应”, 有利于含金热液迁移到界面时产生金的还原沉淀, 起到“化学屏障”的作用^[16-17]。

5.3 岩浆源区特征及构造环境

岩石地球化学方面, 研究区煌斑岩富碱、高钾、低钛, 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 相对亏损高场强元素和重稀土元素, 暗示岩浆在上升过程中遭受了地壳物质混染。岩相学方面, 煌斑岩中偶见橄榄石斑晶假象, 证明原始岩浆应该是基性岩浆, 但其中还含有花岗岩质围岩岩块、石英捕虏晶

表 4 煌斑岩脉中的 Au 含量			
Table 4 Gold content in lamprophyre vein			
赋存类型	样品数/个	Au 品位范围/10 ⁻⁶	Au 品位平均值/10 ⁻⁶
花岗质围岩	8	0.05~0.25	0.08
矿化蚀变带	25	0.05~0.60	0.11
蚀变带底板	9	0.05~0.08	0.05

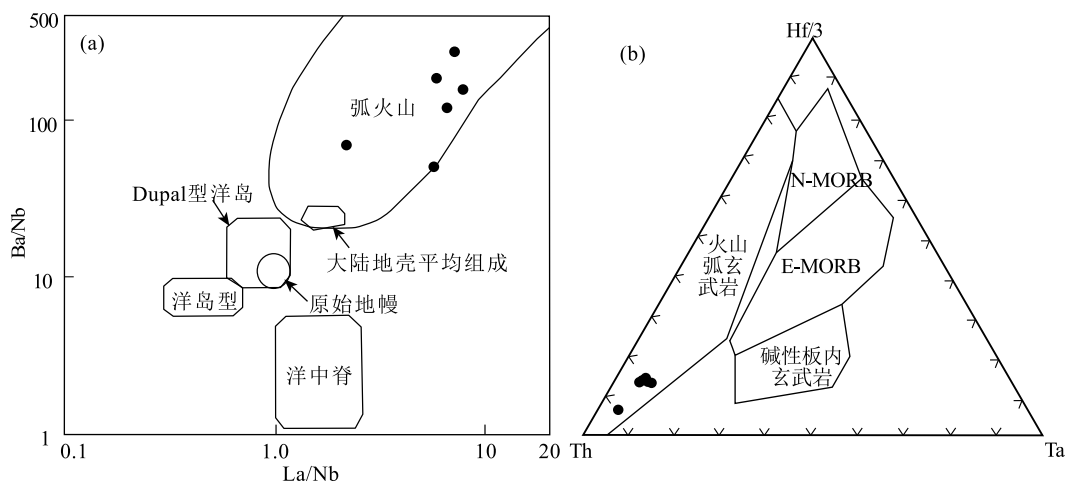


图9 煌斑岩构造环境判别图

Fig. 9 Discrimination diagrams of tectonic environment for lamprophyre

a—La/Nb-Ba/Nb 图解; b—Th-Hf/3-Ta 图解。N-MORB—正常洋中脊玄武岩; E-MORB—富集洋中脊玄武岩

及碳酸盐矿物捕虏晶,进一步证明基性岩浆在上升运移途中捕获了浅层的地壳物质。另外,高场强元素的 Nb/Ta 值为 9~39,平均值为 17; Zr/Hf 值为 35.46~42.00,平均值为 37.52,二者均与原始地幔相近 (Nb/Ta=17.5; Zr/Hf=36.3),且远高于大陆地壳值 (Nb/Ta=12~13; Zr/Hf=11)^[18],表明煌斑岩岩浆源区以幔源为主,在岩浆上升过程中受到地壳混染作用不强烈。

由 La/Nb-Ba/Nb 图解^[19] (图 9-a) 和 Th-Hf-Ta 图解^[20] (图 9-b) 可以看出,所有数据点落于火山弧玄武岩区域,代表研究区煌斑岩的形成可能与太平洋板块俯冲有关。

6 结 论

(1) 岩相学方面,西涝口金矿煌斑岩脉中含有花岗岩质围岩岩块、石英及碳酸盐矿物捕虏晶,推测基性岩浆上升运移途中捕获了壳源物质,存在岩浆混合作用。岩石地球化学方面,研究区煌斑岩具有富碱、高钾、低钛、富集大离子亲石元素和轻稀土元素,相对亏损高场强元素的特征,进一步表明岩浆在上升过程中遭受了地壳物质混染。另外,高场强元素 Nb/Ta 和 Zr/Hf 值与原始地幔十分接近,且远高于大陆地壳值,证明煌斑岩岩浆源区以幔源为主,受到地壳混染作用不强烈。

(2) 根据锆石形态、结构特点、微量元素组成等指标综合判断,西涝口金矿煌斑岩样品锆石有岩浆锆石、变质锆石和热液锆石 3 种类型。煌斑岩脉年

龄时间跨度很大,年轻锆石显示成矿期脉岩形成于早白垩世 (118.6 ± 1.5 Ma),成矿前脉岩形成于晚侏罗世 ($157 \pm 4 \sim 150.2 \pm 2.8$ Ma);老锆石的同位素年龄分别记录了新太古代、古元古代、新元古代及三叠纪的岩浆事件和变质时间,与区内古元古代岩浆侵入、中元古代地壳伸展与变质、三叠纪板块碰撞等事件记录吻合,记录了区内岩浆演化的全部过程。

(3) 经钻孔取样分析发现,西涝口金矿煌斑岩脉形成时间与成矿时间吻合,且与矿脉共用相同构造通道,虽其含金量普遍不高,但“褪色”作用为金矿形成提供了部分成矿物质。虽有研究证实煌斑岩原始岩浆含金量低,携金能力差,不具提供大量金源的能力,但其在成矿作用过程中仍起到了重要的“化学屏障”作用。

致谢:感谢审稿专家们的宝贵修改意见,感谢项目团队其他成员在野外工作提供的支持和帮助,锆石测年工作得到了冶金地质总局山东局测试中心王继林老师的指导,在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 周晓萍,吕军阳,胡秉谦,等.胶北地体西涝口地区牧牛山二长花岗岩锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素研究——指示华北克拉通古元古代岩浆作用及地壳演化[J].地质论评,2022,68(3): 891-906.
- [2] 孙兴丽.山东胶莱盆地西涝口金矿床的特征和成因[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2013: 1-159.
- [3] Cheng S B, Liu Z J, Wang Q F, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and Hf isotope analyses of the Muniushan monzogranite, Guocheng, Jiaobei terrane, China: implications for the tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji

- Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2017, 301: 36-48.
- [4] 谭俊. 山东郭城断裂带脉岩岩浆演化过程: 对岩石圈演化及金成矿的制约[D]. 中国地质大学(武汉) 博士学位论文, 2009: 1-124.
- [5] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 2003, 4: 1-70.
- [6] 路凤香, 舒小辛, 赵崇贺. 有关煌斑岩分类的建议[J]. *地质科技情报*, 1991, 10(增刊): 57-64.
- [7] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, 69(3): 637-648.
- [8] 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. *地质前缘*, 2013, 20(4): 273-284.
- [9] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 2009, 33(3): 161-173.
- [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): 163-178.
- [11] 宋英听, 宋明春, 孙伟清, 等. 胶东金矿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.
- [12] 黄智龙, 朱成明, 肖化云, 等. 煌斑岩-硫化物熔体液态不混溶作用的高温高压实验研究[J]. *地质评论*, 1999, 45(增刊): 113-117.
- [13] 黄智龙, 朱成明, 肖化云, 等. 煌斑岩岩浆能携带金吗? ——高温超高压实验的证据[J]. *科学通报*, 1999, (12): 1331-1334.
- [14] 王登红, 应汉龙, 梁华英, 等. 西南三江地区新生代大陆动力学过程与大规模成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-208.
- [15] 倪师军, 李朝阳, 张诚, 等. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献——以小秦岭金矿区为例[J]. *成都工学院学报*, 1994, 21(3): 70-78.
- [16] 季海章, 赵懿英, 卢冰, 等. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[J]. *地质与勘探*, 1992, 28(2): 15-18.
- [17] 瓦西拉里, 李红中, 梁锦, 等. 煌斑岩的种类、成因及其与成矿作用的关系[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学、医学版)*, 2011, 32(4): 1-13.
- [18] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publication*, 1989, 42(1): 313-345.
- [19] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究系[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 947-958.
- [20] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth Planet*, 1980, 50: 11-30.