

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.139>



青藏高原北部全吉地块白垩纪煌斑岩脉群的发现及意义

王秉璋,陈 静,张金明,李积清,白建海

青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室,青海省地质调查院,青海西宁 810012

摘要:除陆相沉积盆地外,青藏高原北部白垩纪建造记录稀少,岩浆活动的研究极少,幔源岩浆活动十分罕见,在青藏高原北部全吉地块首次发现了白垩纪煌斑岩脉群,深入研究可深化认识高原北部中生代晚期地质过程。对分布在全吉地块东部沙柳泉地区的煌斑岩进行了大比例尺填图,主微量元素、Sr-Nd-Pb同位素测定、锆石SHRIMP和LA-ICP-MS U-Pb年代学研究。煌斑岩中获得锆石U-Pb年龄分别为 135.2 ± 1.8 Ma和 132.9 ± 1.3 Ma。岩石具高钾($K_2O=4.53\% \sim 5.25\%$)、镁($MgO=7.23\% \sim 12.27\%$)和低钛($0.85\% \sim 1.29\%$)的特点,为钾质钙碱性煌斑岩,Rb、Ba、Th、U和Pb等大离子亲石元素(LILE)富集,Nb、Ta和Ti等高场元素(HFSE)亏损, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 介于 $0.718\ 0 \sim 0.718\ 6$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -14.2 \sim -14.4$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 $38.414 \sim 39.334$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 在 $15.632 \sim 15.681$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于 $18.568 \sim 19.203$,显示岩浆源于与洋陆俯冲作用影响有关的EM II型地幔源,形成于南北拉张背景下沿深大断裂引起的岩石圈地幔局部部分熔融。岩石具有较高Au(平均值为 6.8×10^{-9})和F(平均值 2.450×10^{-6})浓度,对全吉地块东部金矿成矿作用十分有利。

关键词:青藏高原;全吉地块;白垩纪;煌斑岩;EM II型地幔源;岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)04-1136-15

收稿日期: 2019-06-09

Discovery and Significance of Cretaceous Lamprophyre Dike Group in Quanji Block of Northern Tibetan Plateau

Wang Bingzhang, Chen Jing, Zhang Jinming, Li Jiqing, Bai Jianhai

Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China

Abstract: Cretaceous formation records are rare in the northern part of the Tibetan plateau, except for terrestrial sedimentary basins, with only few magmatic activities reported, let alone mantle-derived magmatic activities. The lamprophyres exposed in the Shaliuquan area, the eastern part of the Quanji block, were firstly discovered by field work, which were subjected to a large scale mapping, major and trace element analyses, precise zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb dating and Sr-Nd-Pb isotopic measurements, aiming to deepen the understanding of the Late Mesozoic geological process in the northern plateau. The results yield the average zircon U-Pb ages of 135.2 ± 1.8 Ma and 132.9 ± 1.3 Ma. The rocks are rich in potassium ($K_2O=4.53\% \sim 5.25\%$), magnesium ($MgO=7.23\% \sim 12.27\%$) and poor in titanium ($0.85\% \sim 1.29\%$), showing potassium calc-alkaline. They are also enriched in large ion LILE elements (Rb, Ba, Th, U and Pb) and deficient in high field elements (Nb, Ta and Ti). $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value is $0.718\ 0 \sim 0.718\ 6$. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value is $-14.2 \sim -14.4$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is $38.414 \sim 39.334$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is $15.632 \sim$

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(STEP)项目(No.2019QZKK0702);国家自然科学基金项目(No.41762006);青海省重大科技专项(No.2016-SF-A3)。

作者简介:王秉璋(1969—),男,正高级工程师,博士,从事区域地质矿产调查工作。ORCID:0000-0002-0796-2769. E-mail:wbz6901@126.com

引用格式:王秉璋,陈静,张金明,等,2020.青藏高原北部全吉地块白垩纪煌斑岩脉群的发现及意义.地球科学,45(4):1136—1150.

15.681, and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is 18.568—19.203. These data indicate the magma originated from the oceanic subduction-related EM II mantle source and formed from local partial melting of the lithospheric mantle along the deep fracture. The high contents of Au (the mean of 6.8×10^{-9}) and F (the mean of 2450×10^{-6}) of the lamprophyres are very favorable for gold mineralization in the eastern part of the Quanji block.

Key words: Tibetan plateau; Quanji block; Cretaceous; lamprophyre; EM II mantle source; petrology.

0 引言

中生代中晚期青藏高原北部为中国西北盆山构造区,中侏罗世—白垩纪以大型断陷、走滑及压陷盆地发育为特征,整体为挤压—走滑构造背景(骆满生等,2014),除陆相沉积盆地外,其他类型沉积建造记录十分稀少,盆地形成的地质过程仍不清晰。全吉地块位于青藏高原东北部,是夹持在柴北缘结合带和中南祁连弧盆系之间一个具有克拉通基底性质的古陆块残片(图1)(王勤燕等,2008),是青藏高原北部秦祁昆造山系内一个稳定的地块,笔者在全吉地块东部乌兰县沙柳泉地区发现了白垩纪煌斑岩脉群,可对青藏高原北部中生代晚期的构造演化提供新的证据。

1 区域地质概况与样品

沙柳泉地区出露地层主要为古元古代达肯大坂岩群片麻岩组和大理岩组(图2),片麻岩组岩石类型为灰色条纹条带状矽线石黑云斜长片麻岩、斜长变粒岩、含石榴黑云二长片麻岩夹暗绿色斜长角闪岩和大理岩,形成时代为古元古代(2.32~1.96 Ga)(王勤燕等,2008; Gong *et al.*, 2012; 李猛等,2018);白垩纪地层缺失;侏罗纪大煤沟组为陆相沉

积含煤碎屑岩建造,少量分布于研究区西南部;古近纪—新近纪干柴沟组与油砂山组为陆相碎屑岩建造,分布在研究区东北部和西南部。侵入岩分布在研究区中北部,侵入于元古代达肯大坂岩群中,岩石类型有闪长岩、二长花岗岩和石英正长岩;闪长岩仅见一小型岩株,无可靠年代学等研究资料(青海省地质调查院,2009,青海省1:250 000阳康幅构造图)通过概略的区域对比推断其形成于二叠纪;二长花岗岩和石英正长岩分布相对广泛,形成时代推断为晚三叠世(青海省地质调查院,2009,青海省1:250 000阳康幅构造图)。除煌斑岩脉外,研究区内脉岩十分发育,岩石类型有闪长玢岩、辉绿岩和伟晶岩,这些脉岩目前尚无可靠的年代学资料。

煌斑岩脉群集中分布于全吉地块东部沙柳泉地区(图2a),煌斑岩呈脉状产出,脉宽一般在0.5~2.0 m,最宽可达5 m,长一般在20~100 m,最长可达200 m;煌斑岩长轴方向以北西向为主,与区域构造线方向一致,少量为北东向,个别为近南北向,倾角较陡,一般大于60°,部分近于直立,倾向无优势方位。煌斑岩侵入于达肯大坂岩群片麻岩和大理岩中(图3a,3b),图3b中煌斑岩脉斜切大理岩层,并逐渐尖灭;研究区北部1:10 000大比例尺地质填图显示(图2b),煌斑岩密集成群分布,露头中可见煌斑岩

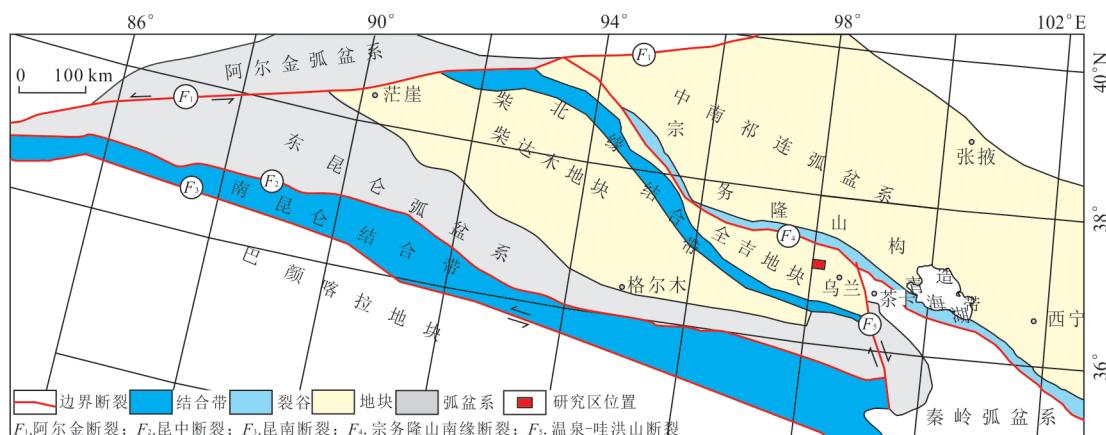


图1 全吉地块及邻区区域构造分区略图

Fig.1 Outline of regional tectonic zoning of the Quanji block and adjacent areas

据潘桂棠等(2009)修改

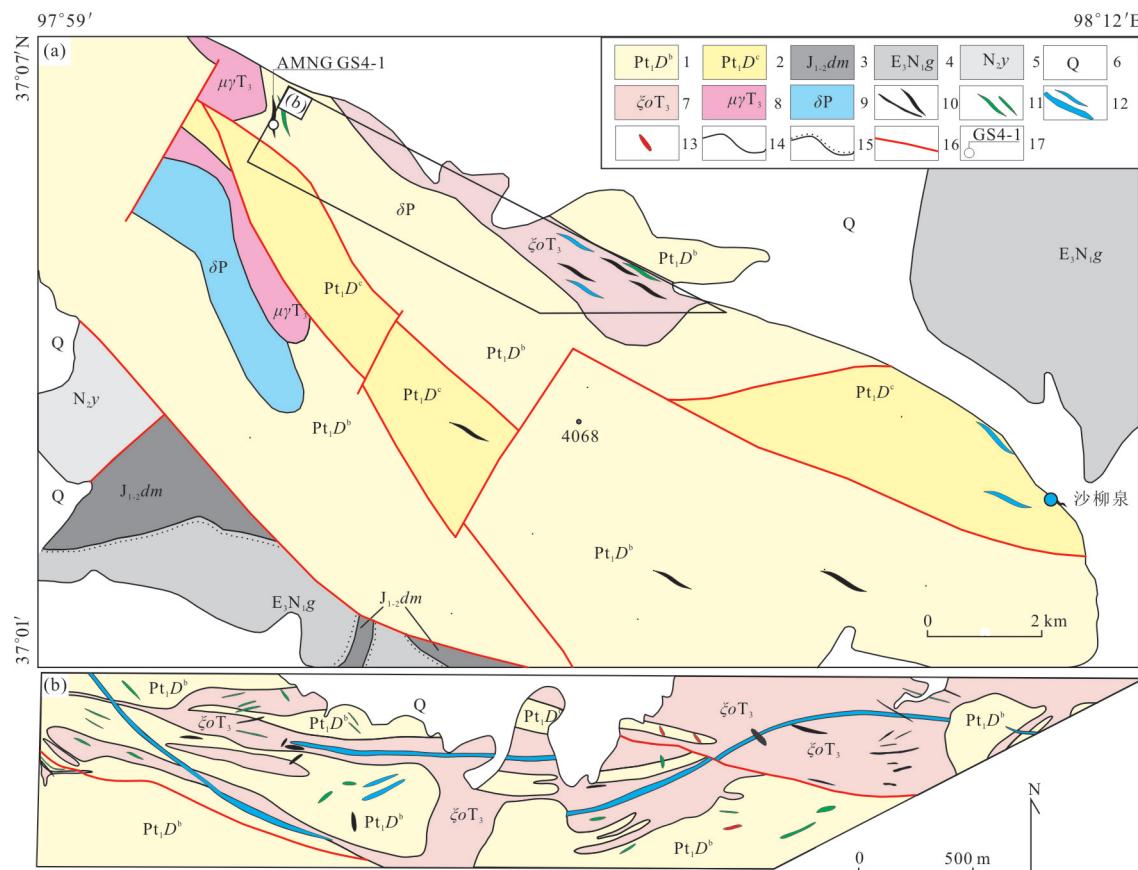


图 2 沙柳泉地区地质简图

Fig.2 Geological sketch of Shaliuquan area

1. 达肯大坂岩群片麻岩组; 2. 达肯大坂岩群大理岩组; 3. 大煤沟组; 4. 干柴沟组; 5. 油砂山组; 6. 第四系; 7. 晚三叠世石英正长岩; 8. 晚三叠世二长花岗岩; 9. 二叠纪闪长岩; 10. 烟斑岩脉; 11. 辉绿岩脉; 12. 伟晶岩脉; 13. 地质界线; 14. 角度不整合界线; 16. 断层; 17. 采样点及编号

脉呈树枝状穿插在石英正长岩中(图 3c), 局部地段内接触带可见厘米级冷凝边或角闪石富集带, 略具定向排列(图 3d). 烟斑岩岩石类型有斜闪煌斑岩、云煌斑岩、云母角闪煌斑岩和球颗状云母角闪煌斑岩.

斜闪煌斑岩为块状构造, 斑状结构, 基质具煌绿结构. 斑晶成分为角闪石(36%), 呈柱粒状晶, 粒径在 1.0~2.1 mm, 单偏光下黄绿色, 为普通角闪石. 基质成分为角闪石(31%)、斜长石(28%)和不透明矿物(5%); 角闪石呈柱状和粒状, 单偏光下为黄绿色, 粒径在 0.3~0.5 mm; 斜长石呈半自形粒状、板状, 粒径在 0.2~0.6 mm; 不透明矿物为黄铁矿、磁铁矿和赤铁矿.

云母角闪煌斑岩(图 3e)为块状构造, 烟斑结构. 斑晶为角闪石(19%)和黑云母(12%); 角闪石呈柱粒状, 粒径在 0.5~1.1 mm; 黑云母片径在 0.6~2.3 mm. 基质矿物成分为角闪石(10%)、黑云母(6%)、钾长石(35%)和斜长石(17%); 角闪石呈粒状、圆粒状, 粒径在 0.1~0.2 mm, 部分包裹在黑云母

中; 黑云母片径在 0.2~0.5 mm.

球颗状云母角闪煌斑岩(图 3f)为块状构造, 斑状结构. 基质具煌斑结构, 斑晶成分为角闪石(29%~31%)、黑云母(6%~8%)和少量辉石(4%); 角闪石呈柱状、粒状, 粒径在 0.5~1.3 mm, 常见集合体产出, 形成球颗构造; 黑云母片径在 0.3~0.4 mm. 基质成分为角闪石(24%~27%)、黑云母(8%)、钾长石(21%)、斜长石(0~25%)和石英(2%~5%). 辉石斑晶少量产出, 为普通辉石, 具有明显的普通角闪石的反应边(图 3g), 暗示普通辉石为外来晶, 具有循环晶(antecrust)(Jerram and Martin, 2008)的性质, 这种特征说明沙柳泉地区煌斑岩浆系统极为复杂.

2 样品分析方法

主、微量元素测试在武汉综合岩矿测试中心完成. 主量元素分析测试采用 X 荧光光谱法(XRF)完

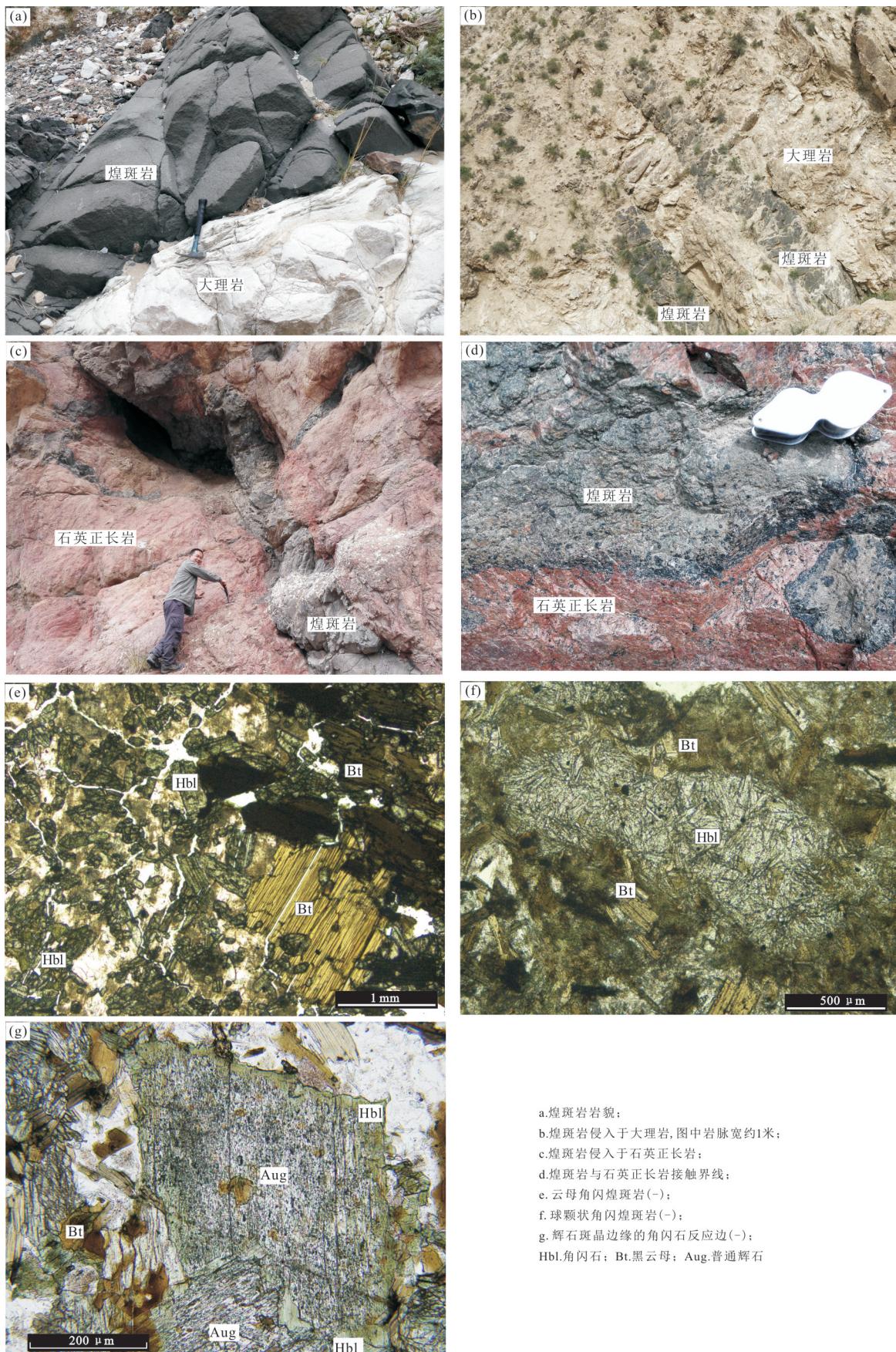


图3 沙柳泉煌斑岩野外露头(a~d)和镜下特征(e~g)

Fig. 3 Outcrop (a-d) and microscopic characteristics (e-g) of the Shaliuquan lamprophyre

成,分析仪器为菲利普 PW2440型波长色散 X-射线荧光光谱仪,分析误差<0.9%;稀土元素采用阳离子交换分离—电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),分析误差<4.8%;微量元素采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),测试仪器采用美国热电公司X7电感耦合等离子质谱仪,分析误差<7.8%.

煌斑岩锆石的分选工作由河北省廊坊区域地质调查研究所地质实验室利用常规单矿物分选技术完成,使用环氧树脂凝固成靶,在北京离子探针中心扫描电镜实验室完成锆石的阴极发光(CL)显微照相.SHRIMP 锆石 U-Pb 定年实验在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成,测试原理、流程和方法等参考 Williams(1998)和 Compston *et al.* (1992). LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 测年在 SHRIMP 测年同一个靶上进行,由北京燕都中实测试技术有限公司完成,U-Pb 同位素定年中激光剥蚀系统为 New Wave UP213,ICP-MS 为布鲁克 M90,锆石标准采用 91500 和 Plesovice 作为外标进行同位素分馏校正,剥蚀光斑直径 25 μm ;普通铅计算按 Andersen(2002)的 3D 坐标法进行校正,样品的同位素比值和元素含量计算采用 Skits 和 ICPLMSData-Cal 软件处理,锆石的谐和曲线和加权平均年龄的计算采用 Isoplot3.2 等程序完成.

全岩 Sr-Nd-Pb 同位素化学前处理与质谱测定在南京聚谱检测科技有限公司完成. 岩石粉末经高

压密闭溶样弹消解后,同位素溶液经 Cetac Aridus II 膜去溶系统引入,在 Nu Plasma II MC-ICP-MS 上测定同位素比值.Sr 同位素比值测定过程中,采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119$ 4 校正仪器质量分馏,Sr 同位素国际标准物质 NIST SRM987 作为外标,校正仪器漂移.Nd 同位素比值测定过程中,采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721$ 9 校正仪器质量分馏,Nd 同位素国际标准物质 JNd-1 作为外标,校正仪器漂移.Pb 同位素比值测定过程中,采用 $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}=2.388$ 5 校正仪器质量分馏,Pb 同位素国际标准物质 NIST SRM 981 作为外标,校正仪器漂移. 美国地质调查局 USGS 地球化学标准岩石粉末(玄武岩 BCR-2、玄武岩 BHVO-2、安山岩 AGV-2 和流纹岩 RGM-2)作为质控盲样.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

用于锆石 U-Pb 定年的样品采自研究区西北部(图 2a),岩性为云煌斑岩(样品编号:AMNG GS4-1),样品围岩为达肯大坂岩群片麻岩组, GPS 坐标为 N37° 06'31"、E98°01'45". 对该样品同一个靶分别采用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,除部分锆石外,多数锆石两种方法测试的结果十分接近(图 4). 锆石晶群较为复杂,锆石形态多样,见晶形自形完整的长、短柱状晶体,也存在一些残片状、磨圆状外形锆石;CL 图(图 4)中显示晶形完整的锆石通常具

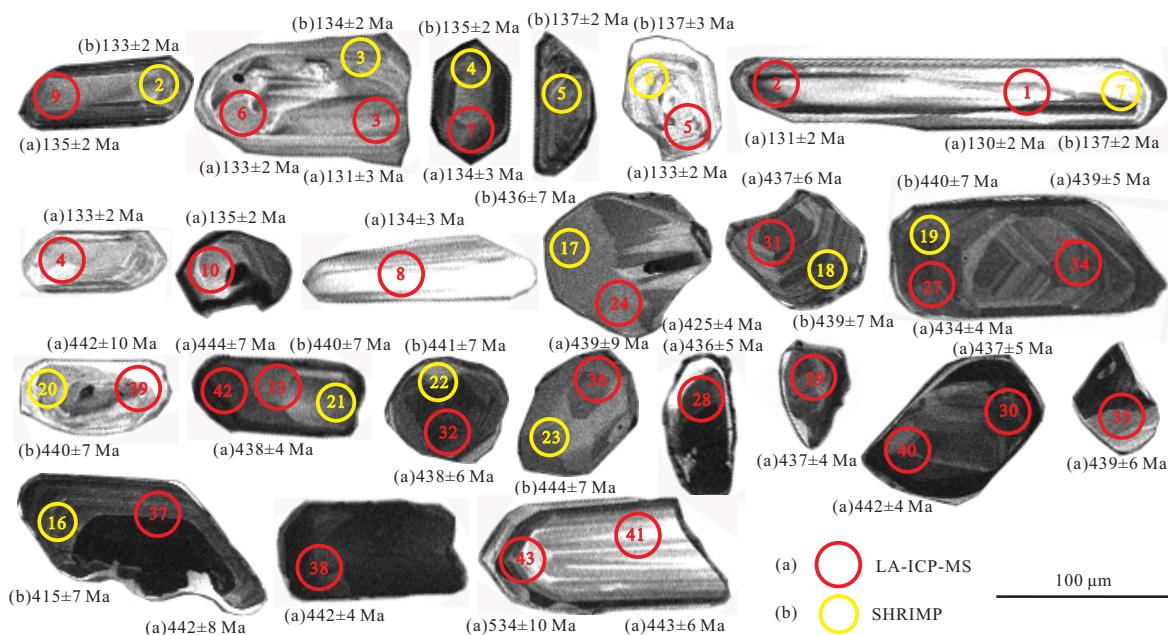


图 4 沙柳泉煌斑岩的锆石 CL 图像

Fig.4 Zircon CL images of the Shaliuquan lamprophyre

有浅色核部和暗色的边部,且振荡环带并不明显,而破片状或是磨圆的锆石的CL图特征多样。图4中列出了参与年龄计算的两组锆石的CL图像,一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在137~130 Ma,锆石以柱状、长柱状为主,锆石颗粒长度在50~240 μm ,晶形相对完整,较自形,振荡环带不明显;第2组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在534~419 Ma,锆石以短柱状为主,锆石颗粒长度在50~200 μm ,形态多不完整,部分锆石可见环带构造。

SHRIMP锆石U-Pb分析结果见附表1。测点2~7号代表的6颗锆石组成了样品最年轻的锆石晶群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在137~133 Ma, Th/U变化范围大,在0.07~1.34,多数测点数据小于0.4,岩浆锆石中Th/U比值一般大于0.4(Hoskin and Schaltegger, 2003),但也有些岩浆锆石具有异常低的Th/U,可以小于0.1(Rayner *et al.*, 2005),这组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为135±2 Ma(图5a, 5b)。17~23号锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在444~436 Ma,除20号测点外, Th/U在0.75~1.04,这组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为440±5 Ma(图5a, 5c)。31和32号测点为样品中最古老的年龄,

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为2.41 Ga和2.48 Ga。

LA-ICP-MS锆石U-Pb分析结果见表1。测点1~10号代表的8颗锆石组成了样品最年轻的锆石晶群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在135~130 Ma, Th/U变化范围大,在0.11~1.32,多数测点数据小于0.4,与SHRIMP测试结果一致,这组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为133±1 Ma(图5d, 5e)。27~42号16个测点代表的14颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在444~434 Ma, Th/U主要集中在0.65~1.48,这组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为439±3 Ma(图5d, 5f)。53~56号测点为样品最古老的年龄, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在2.47~2.42 Ga,与SHRIMP锆石U-Pb年龄中最古老的年龄值是一致的。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素 本文测试了10件岩石样品,其地球化学分析结果见表2。岩石烧失量较大,在3.41%~8.6%,从野外露头域以及镜下观察发现,岩石有一定的蚀变,主要为碳酸盐岩化、绿泥石化和粘土化,但从微量元素看也显示出高挥发分的特征(F在 1737×10^{-6} ~ 4134×10^{-6}),因此较大的烧失量与岩石蚀变和高挥发分元素含量高相关。

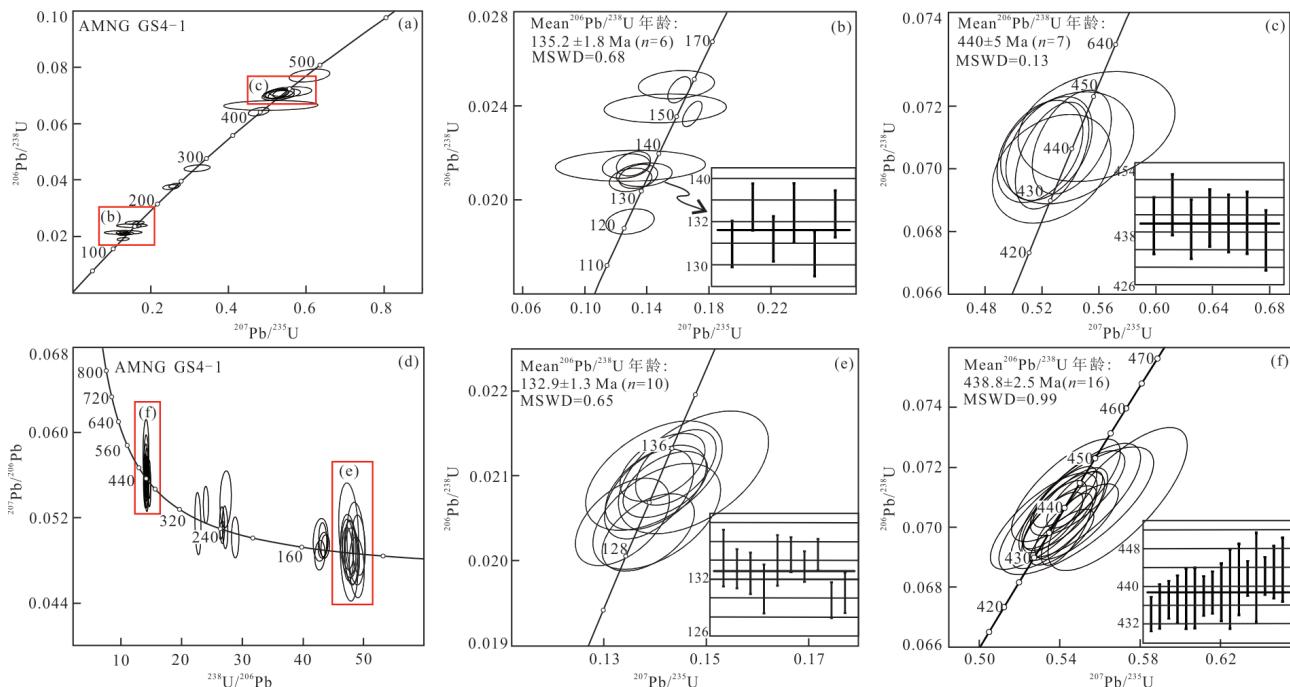


图5 沙柳泉煌斑岩锆石U-Pb年龄谱和图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Shaliuquan lamprophyre

图5a~5c为SHRIMP测年结果;图5d~5f为LA-ICP-MS测年结果

表 1 沙柳泉煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotopic compositions of zircons for the lamprophyre from Shaliuquan area

Spot No.	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	(10 ⁻⁶)	U	207Pb/ 206Pb	1σ	207Pb/ 235U	1σ	206Pb/ 238U	1σ	207Pb/ 206Pb	1σ	207Pb/ 235U	1σ	206Pb/ 238U	1σ	
1	441	333	1.32	0.049 6	0.002 3	0.138 7	0.005 9	0.020 3	0.000 3	177.6	106.0	131.8	5.3	129.8	1.9
2	497	388	1.28	0.048 1	0.002 4	0.133 6	0.006 1	0.020 5	0.000 3	103.8	116.5	127.3	5.4	130.6	2.1
3	60	318	0.19	0.049 8	0.003 0	0.140 3	0.008 2	0.020 5	0.000 4	183.4	138.2	133.3	7.3	131.0	2.6
4	56	278	0.20	0.049 0	0.002 0	0.138 8	0.005 7	0.020 8	0.000 3	147.7	97.3	132.0	5.1	132.6	2.2
5	46	291	0.16	0.049 1	0.002 4	0.140 1	0.006 5	0.020 9	0.000 3	153.6	114.6	133.2	5.8	133.1	2.1
6	287	381	0.75	0.049 6	0.001 9	0.142 0	0.005 4	0.020 9	0.000 3	174.6	91.4	134.8	4.8	133.3	1.6
7	65	573	0.11	0.048 1	0.002 9	0.139 8	0.008 8	0.021 0	0.000 4	104.7	143.7	132.8	7.8	134.0	2.7
8	46	255	0.18	0.051 2	0.003 3	0.147 5	0.009 7	0.021 0	0.000 5	252.0	149.9	139.7	8.6	134.2	3.0
9	85	2 289	0.04	0.049 5	0.001 7	0.144 0	0.005 2	0.021 1	0.000 3	171.6	79.9	136.6	4.6	134.6	1.8
10	300	381	0.79	0.048 8	0.001 9	0.141 4	0.005 5	0.021 1	0.000 3	140.3	89.5	134.3	4.9	134.6	1.7
11	495	1 123	0.44	0.049 7	0.000 8	0.155 7	0.002 6	0.022 9	0.000 2	178.9	37.9	147.0	2.3	146.0	1.5
12	545	1 238	0.44	0.049 3	0.001 1	0.157 3	0.002 9	0.023 1	0.000 3	162.2	50.1	148.3	2.5	147.1	1.8
13	180	657	0.27	0.050 1	0.001 2	0.159 2	0.003 9	0.023 1	0.000 2	198.6	57.5	150.0	3.4	147.3	1.5
14	643	1 063	0.60	0.049 9	0.001 3	0.160 5	0.004 9	0.023 3	0.000 4	191.0	61.2	151.2	4.3	148.5	2.8
15	308	989	0.31	0.048 3	0.001 0	0.156 3	0.003 4	0.023 4	0.000 3	113.0	50.7	147.4	3.0	148.9	1.9
16	172	932	0.18	0.050 3	0.001 5	0.239 9	0.007 0	0.034 7	0.000 5	210.8	70.8	218.4	5.7	219.8	3.0
17	116	829	0.14	0.053 6	0.001 6	0.272 0	0.010 2	0.036 7	0.000 8	356.1	69.3	244.3	8.1	232.4	5.2
18	1 256	899	1.40	0.051 1	0.001 4	0.259 6	0.007 7	0.036 8	0.000 4	243.2	63.0	234.4	6.2	233.2	2.5
19	449	388	1.16	0.051 5	0.001 4	0.265 4	0.006 8	0.037 5	0.000 4	261.1	61.5	239.0	5.4	237.3	2.3
20	0	5 655	0.00	0.050 9	0.000 5	0.264 0	0.003 1	0.037 7	0.000 4	237.5	21.2	237.9	2.5	238.3	2.4
21	2 150	1 586	1.36	0.055 4	0.000 8	0.290 6	0.004 9	0.038 2	0.000 4	426.6	30.6	259.0	3.8	241.7	2.5
22	568	528	1.08	0.053 3	0.001 3	0.305 9	0.007 6	0.041 7	0.000 5	341.4	56.0	271.0	5.9	263.3	3.0
23	63	158	0.40	0.052 0	0.002 4	0.312 9	0.013 3	0.044 1	0.000 6	287.2	104.3	276.4	10.3	278.2	4.0
24	137	149	0.92	0.055 0	0.001 3	0.514 8	0.012 4	0.068 2	0.000 7	410.4	54.5	421.7	8.3	425.1	4.1
25	394	331	1.19	0.055 4	0.001 2	0.521 0	0.010 8	0.068 3	0.000 7	426.9	48.9	425.8	7.2	425.8	4.5
26	2 597	1872	1.39	0.056 2	0.000 4	0.532 8	0.007 0	0.068 5	0.000 6	460.4	17.5	433.7	4.7	427.2	3.8
27	360	465	0.77	0.056 4	0.001 1	0.541 2	0.010 5	0.069 7	0.000 6	466.8	44.8	439.2	6.9	434.1	3.7
28	602	913	0.66	0.056 3	0.000 8	0.543 6	0.008 4	0.069 9	0.000 8	464.8	30.2	440.8	5.5	435.7	4.8
29	258	339	0.76	0.055 4	0.001 1	0.536 7	0.009 8	0.070 2	0.000 7	430.3	43.1	436.2	6.5	437.1	4.0
30	526	577	0.91	0.056 6	0.001 4	0.548 4	0.013 7	0.070 2	0.000 8	476.0	54.0	444.0	9.0	437.3	5.0
31	448	399	1.12	0.054 8	0.001 7	0.532 1	0.017 5	0.070 2	0.001 1	405.7	67.7	433.2	11.6	437.3	6.4
32	320	386	0.83	0.055 8	0.001 3	0.539 0	0.015 4	0.070 2	0.001 1	442.4	53.5	437.8	10.2	437.5	6.4
33	258	282	0.91	0.055 8	0.001 3	0.540 2	0.012 0	0.070 3	0.000 7	445.9	50.1	438.5	7.9	438.0	4.3
34	337	406	0.83	0.055 2	0.001 0	0.537 3	0.010 6	0.070 4	0.000 8	419.6	40.4	436.6	7.0	438.7	4.5
35	1 204	963	1.25	0.055 9	0.001 4	0.542 5	0.014 1	0.070 4	0.001 0	450.0	56.4	440.1	9.3	438.8	6.2
36	178	157	1.14	0.056 6	0.002 5	0.548 3	0.025 4	0.070 5	0.001 4	475.4	96.7	443.9	16.7	439.4	8.5
37	498	630	0.79	0.055 9	0.001 4	0.550 0	0.020 0	0.070 9	0.001 3	448.5	55.8	445.0	13.1	441.5	7.6
38	486	650	0.75	0.055 9	0.000 9	0.547 5	0.009 2	0.070 9	0.000 6	446.5	36.2	443.3	6.0	441.7	3.8
39	21	955	0.02	0.058 0	0.001 6	0.568 8	0.022 9	0.070 9	0.001 6	530.7	58.9	457.3	14.8	441.8	9.5
40	305	470	0.65	0.055 3	0.000 9	0.542 7	0.010 4	0.071 0	0.000 7	424.5	36.9	440.2	6.9	442.2	4.0
41	137	93	1.48	0.056 6	0.001 7	0.548 9	0.015 5	0.071 1	0.000 9	477.6	66.7	444.3	10.2	443.0	5.6
42	292	351	0.83	0.055 1	0.001 5	0.543 1	0.017 9	0.071 2	0.001 1	416.9	60.9	440.5	11.7	443.6	6.8
43	94	207	0.46	0.058 5	0.002 3	0.698 3	0.030 1	0.086 4	0.001 6	550.2	86.7	537.8	18.0	534.4	9.8
44	251	348	0.72	0.069 5	0.000 8	1.442 3	0.017 9	0.150 3	0.001 2	913.6	24.4	906.7	7.4	902.5	6.9
45	41	296	0.14	0.070 4	0.001 1	1.527 5	0.021 6	0.157 0	0.001 6	939.9	30.7	941.5	8.7	940.2	8.8

续表1

Spot No.	Th (10 ⁻⁶)	U U	Th/ ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	同位素比值			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	年龄 (Ma)				
				²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
46	85	519	0.16	0.0702	0.0016	1.5303	0.0392	0.1575	0.0019	933.2	47.4	942.6	15.7
47	93	555	0.17	0.0808	0.0013	2.3294	0.0361	0.2087	0.0019	1216.9	31.6	1221.3	11.0
48	90	444	0.20	0.0807	0.0014	2.3686	0.0499	0.2125	0.0030	1213.7	34.4	1233.2	15.0
49	203	494	0.41	0.0822	0.0011	2.4212	0.0583	0.2126	0.0031	1251.1	26.1	1248.9	17.3
50	366	393	0.93	0.0877	0.0008	2.8472	0.0266	0.2353	0.0023	1375.6	17.4	1368.1	7.0
51	39	545	0.07	0.1132	0.0011	5.3272	0.0566	0.3405	0.0030	1851.8	17.7	1873.2	9.1
52	132	266	0.50	0.1139	0.0018	5.3704	0.0988	0.3408	0.0035	1861.9	29.3	1880.1	15.8
53	65	138	0.47	0.1573	0.0016	9.6687	0.1377	0.4458	0.0050	2426.5	17.3	2403.7	13.1
54	337	730	0.46	0.1570	0.0020	9.7439	0.1666	0.4474	0.0061	2423.2	21.1	2410.9	15.7
55	297	144	2.06	0.1586	0.0014	10.2039	0.1381	0.4668	0.0051	2441.2	15.3	2453.4	12.5
56	96	171	0.56	0.1615	0.0013	10.4696	0.0967	0.4694	0.0031	2471.8	13.4	2477.2	8.6

表2 沙柳泉煌斑岩主量元素(%)、微量元素和稀土元素(10^{-6})化学成分分析结果Table 2 Major (%) and trace and REE element (10^{-6}) abundances of the Shaliuquan lamprophyre

送样号	AMNG	AMNG	AMNG	AMNG	AMNG	AMNG	SLQ	SLQ	SLQ	SLQ
	GS2-1	GS2-2	GS2-3	GS4-1	GS4-2	GS4-3	GS1-1	GS1-2	GS1-3	GS1-4
SiO ₂	51.22	51.65	52.10	51.54	46.73	52.18	48.53	48.83	48.71	48.77
TiO ₂	0.90	0.96	1.02	0.93	1.29	0.89	0.87	0.90	0.85	0.90
Al ₂ O ₃	10.37	11.05	11.48	10.68	11.80	10.33	11.36	11.54	11.29	11.40
Fe ₂ O ₃	1.51	1.62	1.24	1.61	2.07	1.55	1.86	2.03	1.97	2.38
FeO	5.00	5.05	5.00	5.30	6.00	5.20	5.40	5.20	5.20	5.00
MnO	0.11	0.10	0.10	0.11	0.27	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13
MgO	11.39	11.50	10.79	12.27	7.23	11.82	9.82	9.02	9.64	9.52
CaO	7.49	6.36	6.41	6.42	8.53	6.76	7.37	7.35	7.48	7.27
Na ₂ O	1.17	1.33	1.50	1.13	1.04	1.08	2.11	2.27	2.17	2.15
K ₂ O	4.64	5.01	5.25	4.78	4.53	4.72	4.96	5.08	4.91	5.02
P ₂ O ₅	0.55	0.57	0.65	0.57	0.78	0.53	0.57	0.58	0.55	0.57
H ₂ O ⁺	2.67	2.78	2.33	2.96	3.84	2.80	1.99	2.06	1.99	1.98
CO ₂	2.36	1.39	0.87	1.03	3.29	1.39	2.98	2.47	2.98	4.32
LOST	4.94	3.76	3.41	3.70	8.60	4.19	5.74	5.79	5.87	5.85
H ₂ O ⁻	0.92	0.86	0.76	0.89	0.79	0.95	0.51	0.47	0.45	0.47
Sc	19.57	20.08	19.68	19.74	26.84	19.53	20.92	22.54	21.95	22.74
Li	48.90	45.90	41.68	50.83	52.29	49.63	13.41	11.96	12.11	12.58
Be	6.49	6.78	6.84	6.59	5.46	6.63	5.86	8.24	5.66	6.24
Co	34.74	35.27	34.55	37.22	32.84	37.04	34.46	31.70	32.95	33.76
Rb	177.0	208.7	257.4	138.5	207.2	179.5	128.2	214.5	108.7	160.8
Zr	354.0	382.5	378.1	369.3	444.9	354.3	350.1	341.7	341.1	348.2
Nb	11.14	21.66	20.99	10.29	7.01	7.64	13.45	9.80	6.69	10.62
Hf	8.0	8.4	8.5	8.2	9.6	7.9	7.5	7.3	7.3	7.5
Ta	0.80	1.87	1.62	0.74	0.55	0.65	0.82	0.65	0.36	0.66
Th	65.03	86.81	85.68	77.65	86.82	78.12	80.05	63.17	51.73	61.87
U	12.62	12.97	13.77	12.83	19.32	13.70	15.81	15.66	15.13	14.45
Ba	1 469	1 484	1 634	1 421	1 280	1 449	3 287	3 447	3 078	3 417
Cr	554.3	593.4	513.7	686.3	377.7	644.6	425.9	424.5	447.3	408.1
Ni	186.3	186.1	169.9	208.6	78.96	197.4	193.9	161.9	188.3	182.7

续表2

送样号	AMNG GS2-1	AMNG GS2-2	AMNG GS2-3	AMNG GS4-1	AMNG GS4-2	AMNG GS4-3	SLQ GS1-1	SLQ GS1-2	SLQ GS1-3	SLQ GS1-4
Sr	366.6	395.8	448.0	352.5	560.0	347.7	834.7	897.2	833.8	844.4
V	99.10	103.5	111.0	104.5	146.9	98.69	143.1	144.1	138.2	140.9
F	2542	2629	2476	2735	4134	2855	1737	1847	1761	1789
Sn	6.94	7.79	10.77	5.72	6.36	5.46	4.81	4.93	4.83	7.19
Au	12.5	17.2	13.8	9.4	2.2	5.6	2.2	2.7	1.4	1.3
La	64.40	64.16	64.43	62.17	76.06	62.44	104.9	113.2	110.9	117.1
Ce	151.0	139.9	105.1	146.9	81.15	135.8	223.9	246.2	234.7	250.5
Pr	21.29	21.33	22.92	20.76	26.23	20.56	28.08	31.24	29.75	31.68
Nd	91.05	93.22	101.4	88.94	118.3	88.86	109.8	119.7	115.1	122.4
Sm	18.03	18.69	20.32	17.63	23.19	17.66	17.20	18.88	18.14	19.04
Eu	3.07	3.27	3.72	2.91	3.81	2.90	3.29	3.60	3.47	3.67
Gd	10.99	11.46	11.93	10.68	13.34	10.48	10.96	12.01	11.46	12.22
Tb	1.37	1.37	1.50	1.32	1.66	1.30	1.39	1.52	1.45	1.54
Dy	6.15	6.35	6.68	6.12	7.72	5.95	6.51	7.13	6.78	7.21
Ho	0.98	1.02	1.08	0.98	1.29	0.97	1.10	1.21	1.14	1.21
Er	2.32	2.37	2.50	2.30	3.15	2.26	2.61	2.91	2.72	2.90
Tm	0.33	0.34	0.36	0.33	0.44	0.32	0.38	0.41	0.39	0.42
Yb	2.03	2.04	2.08	2.01	2.77	1.94	2.35	2.60	2.52	2.63
Lu	0.30	0.30	0.32	0.30	0.43	0.29	0.38	0.41	0.39	0.42
Y	27.37	27.72	29.31	26.73	34.89	26.23	29.05	32.00	30.40	32.19
Σ REE	373.3	365.8	344.4	363.3	359.6	351.7	512.9	561.0	538.9	572.95
(La/Yb)n	21.44	21.18	20.86	20.84	18.50	21.74	30.11	29.39	29.66	30.01
δ Eu	0.62	0.63	0.67	0.60	0.61	0.60	0.69	0.68	0.69	0.69
Mg#	76.3	76.1	76.0	76.6	62.3	76.3	71.4	69.8	71.3	70.6

注:样品AMNG GS2-1、2、3岩性为斜闪煌斑岩; AMNG GS4-1、2、3为云煌斑岩; SLQ GS1-1、2、3、4为球颗粒状云母角闪斑岩.

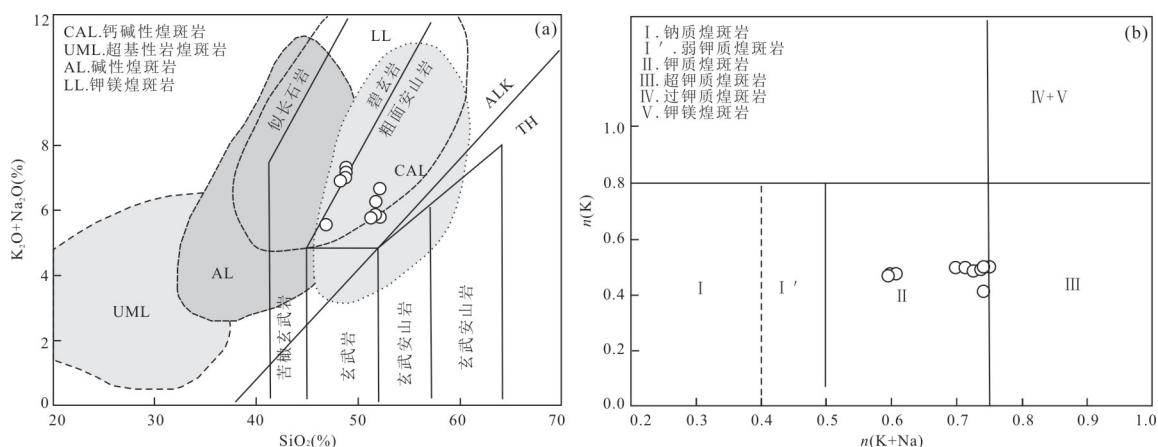


图6 沙柳泉煌斑岩的TAS图解(a)和n(K)-n(K+Na)图解(b)

Fig.6 TAS(a) and $n(K)$ vs. $n(K+Na)$ diagrams(b) of the Shaliuquan lamprophyre

图a据Rock(1987), Middlemost(1994);图b据路凤香等(1991)

SiO_2 含量变化范围较小,为46.73%~52.18%,属基性岩类范畴,其 TiO_2 含量在0.85%~1.29%,为低钛煌斑岩,岩石具有较高的 MgO 含量(7.23%~12.27%)和 $\text{Mg}^{\#}$ (62.3~76.6), Al_2O_3 含量

在10.33%~11.8%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 在5.8%~7.35%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 在2.3~4.4.在Rock(1987)的TAS煌斑岩分类图解中(图6a)为钙碱性煌斑岩,在路凤香(1991)提出的 $n(K)$ - $n(K+Na)$ 分类图解中(图6b)

表3 沙柳泉煌斑岩全岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Table 3 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Shaliuquan lamprophyre

样品号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$
样品号	$t(\text{Ma})$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	
SLQ GS1-1	0.444 8	0.719 31	0.000 004	0.718 5	0.094 62	0.511 81	0.000 002	0.511 73
SLQ GS1-2	0.692 4	0.719 33	0.000 003	0.718 0	0.095 34	0.511 82	0.000 002	0.511 74
SLQ GS1-3	0.377 6	0.719 36	0.000 003	0.718 6	0.095 23	0.511 82	0.000 002	0.511 74
SLQ GS1-4	0.551 5	0.719 58	0.000 003	0.718 5	0.093 97	0.511 82	0.000 003	0.511 74
SLQ GS1-1	133	-14.4	1 716	2 101	19.203	15.670	39.215	
SLQ GS1-2	133	-14.2	1 709	2 079	18.568	15.632	38.414	
SLQ GS1-3	133	-14.2	1 709	2 082	19.193	15.672	39.217	
SLQ GS1-4	133	-14.2	1 690	2 079	19.312	15.681	39.334	

为钾质煌斑岩.

3.2.2 微量及稀土元素 表2列出了测试样品微量元素及稀土元素分析结果. 样品稀土总量为 $344 \times 10^{-6} \sim 573 \times 10^{-6}$, 平均为 434×10^{-6} , 在球粒陨石标准化配分图解中具有右倾的配分特征(图7a), $(\text{La/Yb})_N$ 为18.5~30.1, 具有较弱的Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.7 \sim 0.8$). 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图7b), 显示Rb、Ba、Th、U和Pb等大离子亲石元素(LILE)富集, Nb、Ta和Ti等高场元素(HFSE)亏损的特征.

样品具有较高的Cr($377.7 \times 10^{-6} \sim 686.3 \times 10^{-6}$)和Ni($79.0 \times 10^{-6} \sim 208.6 \times 10^{-6}$)含量, 与高Mg[#]的特征一致, 显示幔源岩浆性质. 岩石具有较高的Au(平均值为 6.8×10^{-9})和F(平均值 $2 450 \times 10^{-6}$), 对本区Au成矿十分有利.

3.3 Sr-Nd-Pb同位素

本文测试了4件全岩Sr、Nd、Pb同位素样品, 分析结果见表3. 煌斑岩样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 为0.444 8~0.692 4, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.719 3~0.719 6, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为0.093 97~0.095 34, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为0.511 81~0.511 82; 以前文锆石U-Pb加权平均年龄 $t=133 \text{ Ma}$ 计算, 沙柳泉煌斑岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 介于0.718 0~0.718 6, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-14.2 \sim -14.4$. 煌斑岩的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于38.414~39.334, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分布于15.632~15.681, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于18.568~19.203.

4 讨论

4.1 岩浆活动的时代

煌斑岩锆石CL图及U-Pb定年数据显示煌斑岩的锆石组成复杂. 总体看来, 白垩纪(134 Ma左右)年龄的锆石呈长、短柱状晶形, 晶形完整, CL图显示振荡环带并不明显, 但均显示有核部浅色而边

部暗色的特征(图4), 显示了此类锆石早期结晶温度较高的特征(Crofu *et al.*, 2003), 考虑到该组锆石的晶体形态特征及CL图特征, 可以判定该组锆石为原生锆石. 其他年龄组的锆石CL图能见明显的破碎、磨圆及晶形不完整特征, 推测为捕获锆石.

煌斑岩原生锆石SHRIMP测年 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $135 \pm 2 \text{ Ma}$, LA-ICP-MS测年 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $133 \pm 1 \text{ Ma}$, 两种方法的测试结果接近, 在误差范围内, 代表了煌斑岩的形成年龄. 白垩纪幔源岩浆活动在青藏高原北部十分罕见, 在柴达木地块、全吉地块属首次发现. 青藏高原东北部较可信的白垩纪基性岩浆岩是西秦岭的晚白垩世多福屯组钠质基性火山岩(96 Ma, 胡晓佳等, 2012)和阿尔金断裂带东段红柳峡地区的偏碱性基性火山岩(120~82 Ma, 李海兵和杨经绥, 2004), 如果它们的时代依据可靠, 暗示沙柳泉地区煌斑岩是青藏高原北部晚中生代幔源岩浆活动的最早记录, 属首次发现.

除了白垩纪年龄外, 捕获锆石还有第2组集中的年龄, 这一组锆石2种测年方法 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄在440~439 Ma之间, 这一年龄与全吉地块和柴达木地块之间柴北缘结合带内与碰撞造山作用相关的花岗岩时限大体相当, 例如: 全吉地块西北侧柴达木山岩体时代在446~437 Ma(朱小辉等, 2016), 塔塔楞河环斑花岗岩的时代为440 Ma(卢欣祥等, 2007), 这些岩体的形成均与碰撞造山作用相关. 柴北缘超高压变质带代表大陆深俯冲榴辉岩的时代为435~420 Ma(Song *et al.*, 2009), 东昆仑高压变质带时代为440~420 Ma(国显正等, 2018), 这些资料从另一个方面证明该时段柴北缘造山带、东昆仑造山带及柴达木地块、全吉地块处于碰撞造山过程. 因此, 捕获锆石第2组年龄(440~439 Ma)来源于碰撞造山阶段形成的“S”型花岗岩.

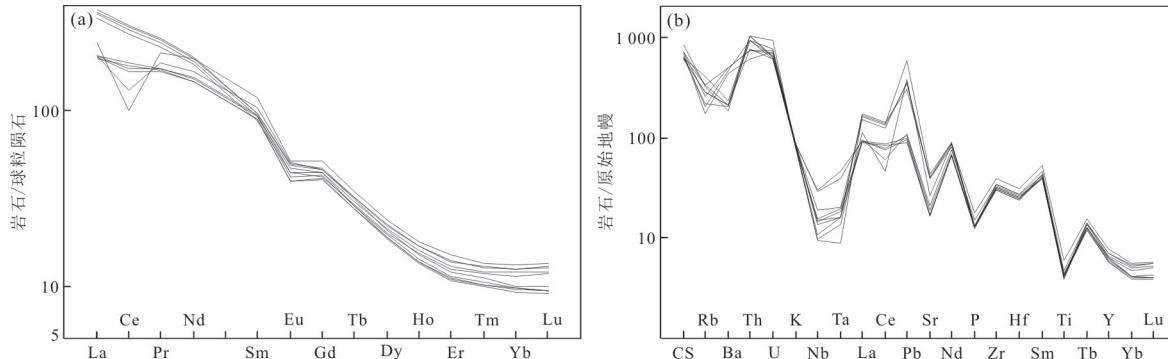


图 7 沙柳泉煌斑岩球粒陨石标准化REE模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized spidergrams of the Shaliuquan lamprophyre (b)

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

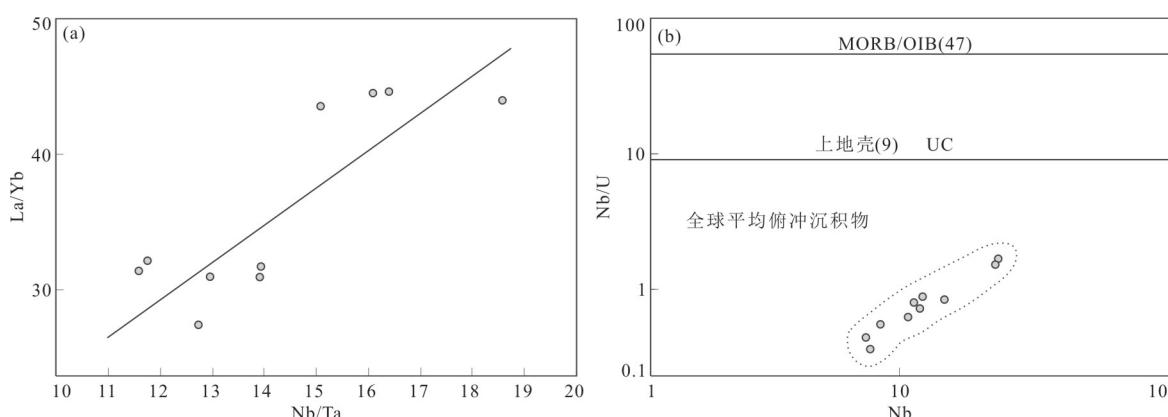


图 8 沙柳泉煌斑岩 La/Yb-Nb/Ta 图解(a)和 Nb/U-Nb 图解(b)

Fig.8 La /Yb vs. Nb/Ta (a)and Nb/U vs. Nb diagrams of the Shaliuquan lamprophyre (b)

图 b 据姜耀辉等(2006)

样品中捕获的最古老锆石时代为 2.48~2.41 Ga, 全吉地块变质基底的主要组成之一德令哈杂岩(原文为达肯大坂岩群)形成于 2.47~2.43 Ga(王勤燕等, 2008), 柴北缘乌兰地区莫河片麻状花岗闪长岩形成于 2.47 Ga(李晓彦等, 2007), 全吉地块盖层全吉群皱节山组碎屑锆石中也存在 2.5~2.4 Ga 碎屑锆石晶群(李猛等, 2018), 显然这个年龄代表了全吉地块最古老的变质基底(德令哈杂岩)的年龄信息。

4.2 源区性质

沙柳泉煌斑岩高钾(K_2O 在 4.53%~5.25%, $K_2O/Na_2O=2.3\sim4.4$)、富碱(ALK 在 5.8%~7.35%), 钾高于大陆地壳平均值 1.1% (Taylor and McLennan, 1985), K_2O 与 SiO_2 线性相关性不明显, K_2O 含量不随 SiO_2 变化而改变; 富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Th、U)和轻稀土元素, 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)和 Sr(图 7), 高($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i、低 $\epsilon_{Nd}(t)$,

镁铁质岩石的这些特征一般与俯冲作用改造的岩石圈地幔或与岩浆上侵过程中地壳的混染有关。有地壳混染的岩石 Nb/Ta 与 La/Yb 具有负相关关系 (Münker, 1998), 沙柳泉煌斑岩 Nb/Ta 与 La/Yb 具有正相关关系(图 8a), 可以排除地壳同化混染的存在; Nb/U 比值为 0.4~1.7, 平均值为 0.8, 接近俯冲带释放流体的 Nb/U 比值 ($Nb/U \approx 0.22$, Ayers, 1998)(图 9b), 说明洋陆俯冲过程中释放的流体对地幔的交代作用是地幔源区成分变化的重要原因; K_2O 含量不随 SiO_2 变化而改变的特点也排除了 K 来自地壳混染的可能性。这些特点暗示煌斑岩起源于俯冲作用改造的岩石圈地幔。在 $^{87}Sr/^{86}Sr-\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $^{207}Pb/^{204}Pb-^{206}Pb/^{204}Pb$ 图中(图 9), 样品投影点集中位于 EM II 内, 进一步说明沙柳泉煌斑岩起源于 EM II 型富集地幔。

全吉地块是夹持于秦祁昆造山系内相对稳定的地块, 早古生代时期与南祁连陆块为同一陆块,

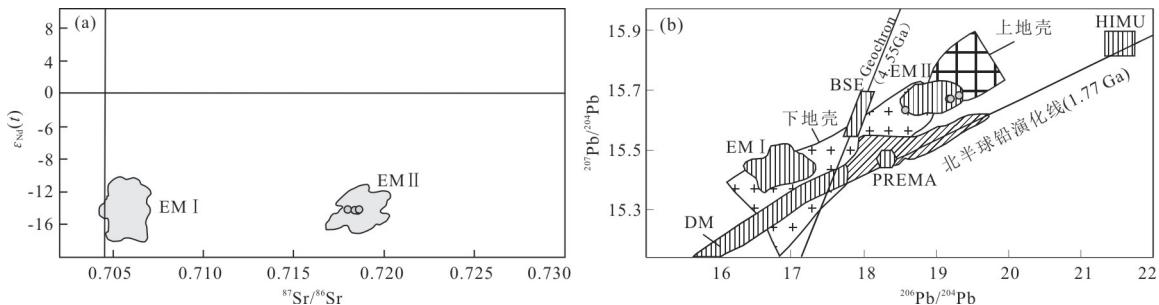


图9 沙柳泉煌斑岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 相关图解(a)和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相关图解(b)

Fig.9 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ (a) and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for the lamprophyres (b)

图a地幔分区据 Zindler and Hart (1986); 图b据 Rollison (2000)

南侧以柴北缘结合带与柴达木地块相隔(图1),原特提斯洋在寒武纪—奥陶纪向北发生俯冲(Song *et al.*, 2009; 张建新等, 2015; 蔡鹏捷等, 2018),形成了柴北缘结合带或柴北缘增生造山带;另外,全吉地

4.3 构造环境

青藏高原北部白垩纪幔源岩浆活动十分零星,较可信的白垩纪基性岩浆岩是西秦岭的晚白垩世多福屯组钠质基性火山岩和阿尔金断裂带东段红柳峡地区的偏碱性基性火山岩。多福屯组钠质基性火山岩属于似OIB性质的板内碱性—偏碱性玄武岩,火山活动时间为96 Ma,为南北复合构造带在西秦岭西段发生构造扰动,诱发具有DMM和EM II混合特点软流圈地幔部分熔融的产物(胡晓佳等, 2012);阿尔金断裂带东段红柳峡地区白垩纪偏碱性基性火山岩火山活动有两期,分别为120~100 Ma左右的粗玄质熔岩喷发和82 Ma左右的粗面质岩脉和熔岩的活动,两期岩浆活动与阿尔金断裂带的活动存在空间上和时间上的相关性(李海兵和杨经绥, 2004)。因此,沙柳泉煌斑岩与红柳峡地区的碱性—偏碱性玄武岩和多福屯组钠质基性火山岩在活动时间和地质特征上均没有多少可比性。

已有的研究表明,煌斑岩一般形成于岩石圈伸展构造背景下,岩石圈的减薄是煌斑岩形成的最合理的机制(罗照华等, 2006),例如青藏高原东缘金沙江—哀牢山构造带长达2 000 km的新生代富碱岩浆岩带内的鲁甸煌斑岩(贺娟等, 2018)和北衡煌斑岩(和文言等, 2014)等,就是形成于岩石圈发生的拉张减薄、软流圈物质上涌而引发的富集岩石圈地幔的部分熔融,沙柳泉煌斑岩与它们在岩石地球化学方面有很大的相似性。

全吉地块北侧宗务隆造山带在晚三叠世进入

块北缘宗务隆构造带在晚二叠世—中三叠世也可能存在向南的洋陆俯冲过程(郭安林等, 2009)。因此,本区EM II型富集地幔形成与原特提斯洋向北俯冲或宗务隆洋向南俯冲作用相关。

造山后伸展阶段(郭安林等, 2009),侏罗纪时期,柴达木地块构造环境为南北向伸展(冯乔等, 2019),因此,沙柳泉煌斑岩的发现可能说明,高原北部在侏罗纪的拉张过程可能延续到了早白垩世早期,煌斑岩脉群沿地块边缘北西西向的整体展布特征也暗示了南北向的拉张,这个拉张过程可能沿深大断裂(例如宗务隆山南缘断裂,图1中的F₄)引起了岩石圈地幔局部部分熔融,引发了基性岩浆的侵入。

4.4 找矿意义

很多煌斑岩与一些大型—超大型金矿床有着密切的时空关系(Rock *et al.*, 1991; 罗照华等, 2008),例如北衡地区是青藏高原东缘金沙江—哀牢山构造带上一个最重要的超大型金多金属矿集区,也是一个新生代富碱斑岩与煌斑岩发育的地区(和文言等, 2014)。沙柳泉地区煌斑岩出露广泛,有较高的Au(平均值为 6.8×10^{-9})和F(平均值 2.450×10^{-6})丰度,对本区Au成矿十分有利,笔者已经在沙柳泉地区发现了较好的Au元素地球化学异常和小规模的金矿体,沙柳泉煌斑岩脉群的发现暗示该地区有较好的Au矿成矿潜力。

5 结论

(1)首次在全吉地块东部发现早白垩世煌斑岩脉群,煌斑岩密集成群分布在沙柳泉地区,岩石类型有斜闪煌斑岩、云煌斑岩、云母角闪煌斑岩和球颗状云母角闪煌斑岩;煌斑岩锆石U-Pb同位素年龄为135~133 Ma,确定了青藏高原北部全吉地块早白垩世幔源岩浆活动的存在。

(2) 岩石为高钾、镁和低钛的钾质钙碱性煌斑岩, 岩浆来源于与洋壳俯冲作用相关的 EM II 型地幔, 幕源岩浆活动的发生可能与青藏高原北部南北向拉张背景下沿深大断裂发生的岩石圈地幔局部部分熔融相关。

(3) 沙柳泉煌斑岩脉群的发现暗示全吉地块东部可能是一个潜在的金矿成矿区。

致谢: 武汉综合岩矿测试中心帮助完成了主、微量元素的测试, 北京离子探针中心帮助完成了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年, 张晗博士帮助完成了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年并在锆石成因与年龄解释方面给予了指导, 李亮博士帮助完成了全岩 Sr、Nd、Pb 同位素分析, 3 位审稿人提出了建设性的修改意见, 让作者受益良多, 编辑部老师为本文最后定稿提供了帮助, 在此一并致以衷心的感谢。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U - Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Ayers, J., 1998. Trace Element Modeling of Aqueous Fluid - Peridotite Interaction in the Mantle Wedge of Subduction Zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(4): 390–404. <https://doi.org/10.1007/s004100050431>
- Cai, P.J., Xu, R.K., Zheng, Y.Y., et al., 2018. From Oceanic Subduction to Continental Collision in North Qaidam: Evidence from Kaipinggou Orogenic M-Type Peridotite. *Earth Science*, 43(8): 2875–2892(in Chinese with English abstract).
- Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., et al., 1992. Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time-Scale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171–184. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.2.0171>
- Croft, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53:469–495.
- Feng, Q., Fu, S.T., Zhang, X.L., et al., 2019. Jurassic Prototype Basin Restoration and Hydrocarbon Exploration Prospect in the Qaidam Basin and Its Adjacent Area. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 44–58(in Chinese with English abstract).
- Gong, S. L., Chen, N. S., Wang, Q. Y., et al., 2012. Early Paleoproterozoic Magmatism in the Quanji Massif, Northeastern Margin of the Qinghai - Tibet Plateau and Its Tectonic Significance: LA - ICPMS U - Pb Zircon Geochronology and Geochemistry. *Gondwana Research*, 21(1): 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.011>
- Guo, A. L., Zhang, G. W., Qiang, J., et al., 2009. Indosinian Zongwulong Orogenic Belt on the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1):1–12(in Chinese with English abstract).
- Guo, X.Z., Jia, Q.Z., Li, J.C., et al., 2018. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry and Their Geological Significances of Eclogites from East Kunlun High-Pressure Metamorphic Belt. *Earth Science*, 43(12):4300–4318(in Chinese with English abstract).
- He, J., Wang, Q.Y., Yan, G.C., et al., 2018. Genesis and Geodynamic Settings of the Eocene Lamprophyres from Jinshajiang-Red River Tectonic Belt, Ludian, Western Yunnan Province. *Earth Science*, 43(8): 2586–2599(in Chinese with English abstract).
- He, W.Y., Mo, X.X., Yu, X.H., et al., 2014. Genesis and Geodynamic Settings of Lamprophyres from Beiya, Western Yunnan: Constraints from Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11):3287–3300 (in Chinese with English abstract).
- 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. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Hu, X.J., Guo, A.L., Zong, C.L., et al., 2012. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Isotopic Dating, Geochemistry and Their Tectonic Implications of Duofutun Na-Rich Mafic Volcanic Rocks, the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 42(3):443–452(in Chinese with English abstract).
- Jerram, D. A., Martin, V. M., 2008. Understanding Crystal Populations and their Significance through the Magma Plumbing System. *Geological Society, London, Special Publications*, 304(1): 133–148. <https://doi.org/10.1144/sp304.7>
- Jiang, Y.H., Jiang, S.Y., Ling, H.F., et al., 2006. Petrogenesis of Cu - Bearing Porphyry Associated with Continent - Continent Collisional Setting: Evidence from the Yulong Porphyry Cu Ore-Belt, East Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 697–706(in Chinese with English abstract).
- Li, H.B., Yang, J.S., 2004. Evidence for Cretaceous Uplift of the Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 345–359(in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Li, M., Wang, C., Li, R.S., et al., 2018. Detrital Zircon Geochronology and Geological Significance of Zhoujieshan Formation, Quanji Group in North Margin of Qaidam Basin. *Earth Science*, 43(12): 4390—4398(in Chinese with English abstract).
- Li, X.Y., Chen, N.S., Xia, X.P., et al., 2007. Constraints on Timing of the Early-Paleoproterozoic Magmatism and Crustal Evolution of the Oulongbuluke Microcontinent: U-Pb and Lu-Hf Isotope Systematics of Zircons from Mohe Granitic Pluton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 513—522(in Chinese with English abstract).
- Lu, F.X., Shu, X.X., Zhao, C.H., et al., 1991. A Suggestion on Classification of Lamprophyres. *Geological Science and Technology Information*, 10(S1): 55—62(in Chinese with English abstract).
- Lu, X.X., Sun, Y.G., Zhang, X.T., et al., 2007. The SHRIMP Age of Tatalin Rapakivi Granite at the North Margin of Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 626—634 (in Chinese with English abstract).
- Luo, M.S., Lu, L.Q., Jia, J., et al., 2014. Evolution of Sedimentary Basins in China during Mesozoic. *Earth Science*, 39(8): 954—976(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.H., Lu, X.X., Wang, B.Z., et al., 2008. Post-Orogenic Dike Complexes and Implications for Metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 1—12(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.H., Wei, Y., Xin, H.T., et al., 2006. Petrogenesis of the Post-Orogenic Dike Complex Constraints to Lithosphere Delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1672—1684(in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth - Science Reviews*, 37(3—4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Münker, C., 1998. Nb/Ta Fractionation in a Cambrian Arc/back Arc System, New Zealand: Source Constraints and Application of Refined ICPMS Techniques. *Chemical Geology*, 144(1—2): 23—45. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00105-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00105-8)
- Pan, G.T., Xiao, Q.H., Lu, S.N., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36(1): 1—16, 255, 17—28(in Chinese with English abstract).
- Rayner, N., Stern, R. A., Carr, S. D., 2005. Grain-Scale Variations in Trace Element Composition of Fluid-Altered Zircon, Acasta Gneiss Complex, Northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(6): 721—734. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0633-8>
- Rock, N.M.S., 1987. The Nature and Origin of Lamprophyres: An Overview. *Geological Society, London, Special Publications*, 30(1): 191—226. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1987.030.01.09>
- Rock, N. M. S., Bowes, D. R., Wright, A. E., 1991. Lamprophyres. Blackie, Glasgow, 285.
- Rollison, H.R., 2000. Petro-Geochemistry(Yang, X.M., Yang, X.Y., Chen, S.X., Translated). Press of University of Science and Technology of China, Hefei, 186—187(in Chinese).
- Song, S. G., Su, L., Niu, Y. L., et al., 2009. Two Types of Peridotite in North Qaidam UHPM Belt and Their Tectonic Implications for Oceanic and Continental Subduction: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3—4): 285—297. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.11.009>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Wang, Q.Y., Chen, N.S., Li, X.Y., et al., 2008. LA-ICPMS U-Pb Dating for the Basement Dakendaban Group and Thermal Event in Quanji Block. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 1693—1701(in Chinese).
- Williams, I.S., 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: Mickelberry, M.A., Shanks III, W.C., Ridley, W. I., eds., Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1—35.
- Zhang, J.X., Yu, S.Y., Li, Y.S., et al., 2015. Subduction, Accretion and Closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic Accretion/Collision Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Orogenic System. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3531—3554(in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.H., Wang, H.L., Yang, M., et al., 2016. Zircon U-Pb Age of the Monzogranite from the Middle Segment of the Qaidam Mountain Composite Granite on the South Margin of the Qilian Mountain. *Geology in China*, 43(3): 751—767(in Chinese with English abstract).
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493—571. <https://doi.org/10.1146/annurev ea.14.050186.002425>

附中文参考文献

- 蔡鹏捷,许荣科,郑有业,等,2018.柴北缘从大洋俯冲到陆陆碰撞:来自开屏构造山带M型橄榄岩的证据.地球科学,43(8):2875—2892.
- 冯乔,付锁堂,张小莉,等,2019.柴达木盆地及邻区侏罗纪原型盆地恢复及油气勘探前景.地学前缘,26(1):44—58.
- 郭安林,张国伟,强娟,等,2009.青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带.岩石学报,25(1):1—12.
- 国显正,贾群子,李金超,等,2018.东昆仑高压变质带榴辉岩年代学、地球化学及其地质意义.地球科学,43(12):4300—4318.
- 和文言,莫宣学,喻学惠,等,2014.滇西北衡煌斑岩的岩石成因及动力学背景:年代学、地球化学及Sr-Nd-Pb-Hf同位素约束.岩石学报,30(11):3287—3300.
- 贺娟,王启宇,闫国川,等,2018.滇西金沙江—红河构造带鲁甸始新世煌斑岩成因及动力学背景.地球科学,43(8):2586—2599.
- 胡晓佳,郭安林,宗春蕾,等,2012.青藏高原东北缘多福屯陆内基性火山岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素定年和地球化学特征及其构造启示.西北大学学报(自然科学版),42(3):443—452.
- 姜耀辉,蒋少涌,凌洪飞,等,2006.陆—陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例.岩石学报,22(3):697—706.
- 李海兵,杨经绥,2004.青藏高原北部白垩纪隆升的证据.地学前缘,11(4):345—359.
- 李猛,王超,李荣社,等,2018.柴达木盆地北缘全吉群皱节山组碎屑锆石年代学特征及其地质意义.地球科学,43(12):4390—4398.
- 李晓彦,陈能松,夏小平,等,2007.莫河花岗岩的锆石U-Pb和Lu-Hf同位素研究:柴北欧龙布鲁克微陆块始古元古代岩浆作用年龄和地壳演化约束.岩石学报,23(2):513—522.
- 卢欣祥,孙延贵,张雪亭,等,2007.柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的SHRIMP年龄.地质学报,81(5):626—634.
- 路凤香,舒小辛,赵崇贺,等,1991.有关煌斑岩分类的建议.地质科技情报,10(S1):55—62.
- 骆满生,卢隆桥,贾建,等,2014.中国中生代沉积盆地演化.地球科学,39(8):954—976.
- 罗照华,卢欣祥,王秉璋,等,2008.造山后脉岩组合与内生成矿作用.地学前缘,15(4):1—12.
- 罗照华,魏阳,辛后田,等,2006.造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束.岩石学报,22(6):1672—1684.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009.中国大地构造单元划分.中国地质,36(1):1—16,255,17—28.
- 王勤燕,陈能松,李晓彦,等,2008.全吉地块基底达肯大坂岩群和热事件的LA-ICPMS锆石U-Pb定年.科学通报,53(14):1693—1701.
- 张建新,于胜尧,李云帅,等,2015.原特提斯洋的俯冲、增生及闭合:阿尔金—祁连—柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用.岩石学报,31(12):3531—3554.
- 朱小辉,王洪亮,杨猛,等,2016.祁连南缘柴达木山复式花岗岩体中部二长花岗岩锆石U-Pb定年及其地质意义.中国地质,43(3):751—767.