

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.04.007

南秦岭太平沟铜(金)矿相关花岗岩体锆石 U-Pb 年代学及岩石成因

张凯¹, 王居里², 汪佩佩¹, 刘文建¹, 王飞¹, 张望², 胡洋², 陈亚伟¹, 周兴龙¹, 臧斐¹

(1. 西安地质矿产勘查开发院有限公司, 陕西 西安 710100; 2. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘 要: 太平沟铜(金)矿床位于秦岭造山带南秦岭印支期褶皱带与老牛山-胭脂坝燕山期北东向构造岩浆岩带交汇的构造结合部位, 与矿化相关的蚀变岩体呈似椭圆状, 地表出露面积为 0.12 km²; 蚀变岩体以石英闪长岩、细粒花岗岩为主, 局部可见有斑状花岗岩, 其中石英闪长岩、细粒花岗岩与铜(金)矿化具有密切的成因关系。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究表明, 太平沟矿化石英闪长岩成岩年龄为 (223.2±2.9) Ma, 表明其侵位于晚三叠世, 指示本地区铜(金)矿化成矿时代为印支晚期。岩石地球化学分析表明, 石英闪长岩具有富钾 (Na₂O/K₂O=1.21~1.75) 和富碱 (Na₂O+K₂O=7.31%~9.67%) 的特点, 属高钾钙碱性系列准铝质岩石; 岩石的稀土元素总量较高, 具明显负 Eu 异常, 稀土配分模式呈明显右倾型; 微量元素以 Ba、U、K 等大离子亲石元素富集, Nb、P、Ti 等高场强元素亏损为特点, 属于 I 型花岗岩。综合分析认为, 太平沟铜(金)矿床为印支晚期岩浆活动的产物, 暗示南秦岭宁陕—镇安地区存在重要的印支晚期岩浆成矿事件。

关键词: 花岗岩; 铜(金)矿; 年代学; 岩石成因; 太平沟; 南秦岭

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)04-0073-13

Zircon U-Pb Geochronology and Petrogenesis of Taipinggou Copper (Gold) -related Granites, South Qinling

ZHANG Kai¹, WANG Juli², WANG Peipei¹, LIU Wenjian¹, WANG Fei¹, ZHANG Wang²,
HU Yang², CHEN Yawei¹, ZHOU Xinglong¹, ZANG Fei¹

(1. Xi'an Institute of Geological and Mineral Exploration Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Taipinggou copper (gold) deposit is located in Qinling orogenic belt, at the junction of the Indosinian fold belt of south Qinling and the northeastern structural magmatic belt of the Laoniushan-Yanzhiba period. The altered rock mass relating to mineralization appears to be an ellipse, with a exposed surface area of 0.12 km². The altered rock mass is mainly composed of quartz diorite and fine-grained granite, which were closely related to copper (gold) mineralization, with porphyry granite

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-06-21

基金项目: 陕西地矿集团有限公司地质科研专项“东秦岭(陕西)印支期—燕山期构造体制转换过程中岩浆活动与成矿作用综合研究”项目(KY201806), 陕西省地勘基金“陕西省镇安县银洞湾—张子坪铅锌多金属矿预查”项目(61201405268)

作者简介: 张凯(1982-), 男, 北京市人, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查与矿产勘查工作。E-mail: zhangkai1663@163.com

scattered. The LA-ICP-MS zircon U-Pb shows that the age of Taipinggou quartz diorite mineralization is 223.2 ± 2.9 ma, indicating that it was emplaced in late Triassic of the late Indosinian. The geochemical analysis shows that the quartz diorite is potassium-rich ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.21 - 1.75$) and alkali-rich ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.31\% - 9.67\%$) and belongs to high-potassium calc-alkaline series of quasi aluminous rocks. The total amount of rare earth elements in the rocks is high, with obvious negative Eu anomaly, and the REE distribution pattern is obviously right dipping. The trace elements are characterized by the enrichment of big ion lithophile elements such as Ba, U, K, and the depletion of high field strength elements of Nb, P, Ti, belonging to type-I granite. Based on the comprehensive analysis, the authors hold that Taipinggou copper (gold) deposit is the magmatic activity of late Indosinian, suggesting some important magmatic mineralization events in late Indosinian in Ningshan-Zhen'an area of South Qinling.

Keywords: granite; copper (gold) ore; chronology; petrogenesis; Taipinggou; south Qinling

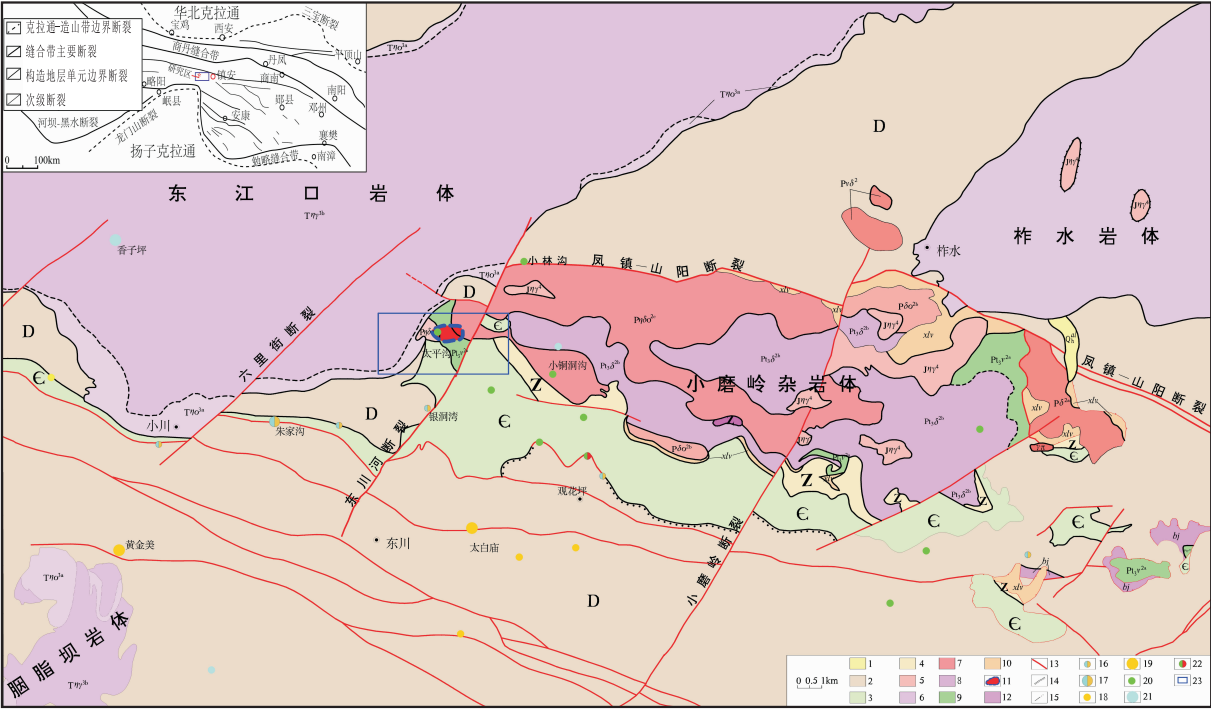
秦岭造山带是中国大陆地质的重要组成部分,经历了漫长的演化历史,并在不同地质演化阶段以不同构造体制叠加复合而最终形成的复合型造山带,其构造格局总体表现为“三块两缝”的特征(张国伟等,1997,2001)。南秦岭位处商丹主缝合带以南,勉略缝合带以北,是秦岭印支期造山带的主体部分(王清晨等,1989;杨志华等,1999;张国伟等2004)。笔者讨论的太平沟铜(金)矿床位于秦岭造山带南秦岭印支期褶皱带与老牛山-胭脂坝燕山期北东向构造岩带岩带交汇的构造结部位(王靖华等,2002;赵东宏等,2019),该地区长久以来仅有小铜洞沟铜矿、小林沟铜(金)矿、观花坪铜(银)矿、椿木湾铜矿、银洞湾铅锌多金属矿等10余个矿点被查明,且均为热液石英脉型铜多金属矿,形成了“只见星星、不见月亮”的状况。本地区众多铜多金属矿点源在哪里?追源寻根,笔者于2017年通过野外工作首次发现了太平沟地区存在斑岩型铜(金)矿床(张凯等,2018,2019)。通过对矿床地质、岩体地质并结合岩石地球化学、锆石U-Pb年代学研究认为,太平沟铜(金)矿具斑岩型铜(金)矿成矿特征,其形成与南秦岭中生代印支晚期岩浆热事件关系密切。

1 矿区地质

太平沟铜(金)矿床所处成矿地质背景独特,产于近东西向凤镇-山阳深大断裂与北东向东川河深大断裂交汇部位,东与小磨岭复式岩体群毗邻,西与

印支期东江口岩体群相接,南侧出露晋宁期辉长岩。沉积盖层为寒武-奥陶系石瓮子组白云质大理岩及少量下寒武统水沟口组碳质板岩、粉砂岩(图1)。太平沟一带新填绘出的蚀变岩体地表出露面积为 0.12 km^2 ,岩体自身发生不同程度的矿化蚀变,围岩与岩体接触带交代变质作用及热接触变质作用强烈。在蚀变岩体内外接触带初步圈定铜(金)矿带3条。其中,以2号矿带规模最大,近东西向延伸长 1.72 km ,宽 $50.55 \sim 265.32 \text{ m}$,带内初步圈定铜(金)矿体13条,Cu品位为 $0.22\% \sim 0.37\%$,伴生Au品位为 $0.44 \times 10^{-6} \sim 0.66 \times 10^{-6}$ 。含矿岩石类型主要有3种,分别为含黄铜矿细粒花岗岩、含黄铜矿石英闪长岩、含黄铜矿石榴石透辉石矽卡岩等;矿石具半自形晶粒状结构,细粒浸染状构造、稠密细脉浸染状构造;金属矿物主要有磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、孔雀石等;脉石矿物主要为细粒花岗岩、石英闪长岩及石榴子石透辉石矽卡岩中的造岩矿物。

矿床围岩蚀变环绕岩体接触带分布,蚀变规模大,分带性明显,具中心式面型蚀变特征(图2),由蚀变岩体向外围依次分带:中心带为强硅化、钾化、黄铁矿化细粒花岗岩;内带为强硅化、黄铁矿化细粒花岗岩、石英闪长岩;接触带为硅化、黄铁矿化石榴石透辉石矽卡岩;外带为黄铁矿化黑云母长英质角闪岩、蛇纹石化大理岩;正常岩类为大理岩。各分带普遍发育铜(金)矿化,整体显示出斑岩型铜(金)矿成矿特征(刘文建等,2020)。



1. 第四系;2. 泥盆系;3. 寒武系;4. 震旦系;5. 燕山期花岗岩;6. 印支期二长花岗岩;7. 华力西期石英闪长岩;8. 晋宁期中粒闪长岩;9. 晋宁期辉长岩;10. 火山岩;11. 太平沟蚀变岩体;12. 隐爆角砾岩;13. 断裂;14. 不整合界线;15. 侵入界线;16. 铅锌矿床(中型);17. 铅锌矿床(大型);18. 金矿床(中型);19. 金矿床(大型);20. 铜矿点;21. 钼矿床(中型);22. 铜银矿床(中型);23. 工作区位置

图 1 (a)陕西镇安地区大地构造位置图(据张国伟等,2004)及(b)区域地质矿产略图(张凯等,2019)

Fig. 1 (a) Geotectonic map of Zhen'an area, Shaanxi (According to ZHANG Guowei, et al. ,2004) and (b)Regional geological and mineral map(ZHANG Kai, et al. ,2019)

2 岩体地质

太平沟地区岩浆活动强烈,而与铜(金)矿化关系密切的蚀变岩体为中酸性复式小岩体,平面形态似椭圆状(图 2),地表出露面积为 0.12 km²,总体呈北西西向侧伏下插,空间上与东江口二长花岗岩、花岗闪长岩、小磨岭复式岩体群及围岩地层呈侵入接触关系。蚀变岩体以石英闪长岩、细粒花岗岩为主,局部可见有斑状花岗岩,均为同期岩浆活动产物。其中石英闪长岩、细粒花岗岩与铜(金)矿化具有密切的成生关系。

细粒花岗岩呈灰白色-浅黄色(图 3a),岩石具细粒花岗结构,粒度一般为 0.2~0.5 mm,块状构造。主要造岩矿物钾长石多呈他形粒状,少量呈格子状双晶或厚板状,以正长石与微斜长石为主,约占 45%;石英呈不规则他形粒状或团粒状,约占 30%;

斜长石呈半自形条状或短柱状,约占 15%;暗色矿物主要为黑云母,呈半自形片状,约占 5%(图 3c);副矿物有磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、透辉石、透闪石、绿帘石、锆石、磷灰石等。

石英闪长岩呈灰白色-灰色(图 3b),岩石具细粒半自形粒状结构,粒度一般为 0.15~0.3 mm,块状构造。主要造岩矿物斜长石呈半自形板状或条状,约占 50%;钾长石多呈他形粒状,少量呈厚板状或格子状双晶,以正长石与微斜长石为主,约占 10%;石英多呈他形粒状或团粒状,约占 15%;暗色矿物主要为角闪石,呈他形柱状,约占 20%(图 3d);副矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、锆石、绿帘石、磷灰石等。

3 样品采集及处理分析

本次在太平沟铜(金)矿区蚀变细粒石英闪长岩

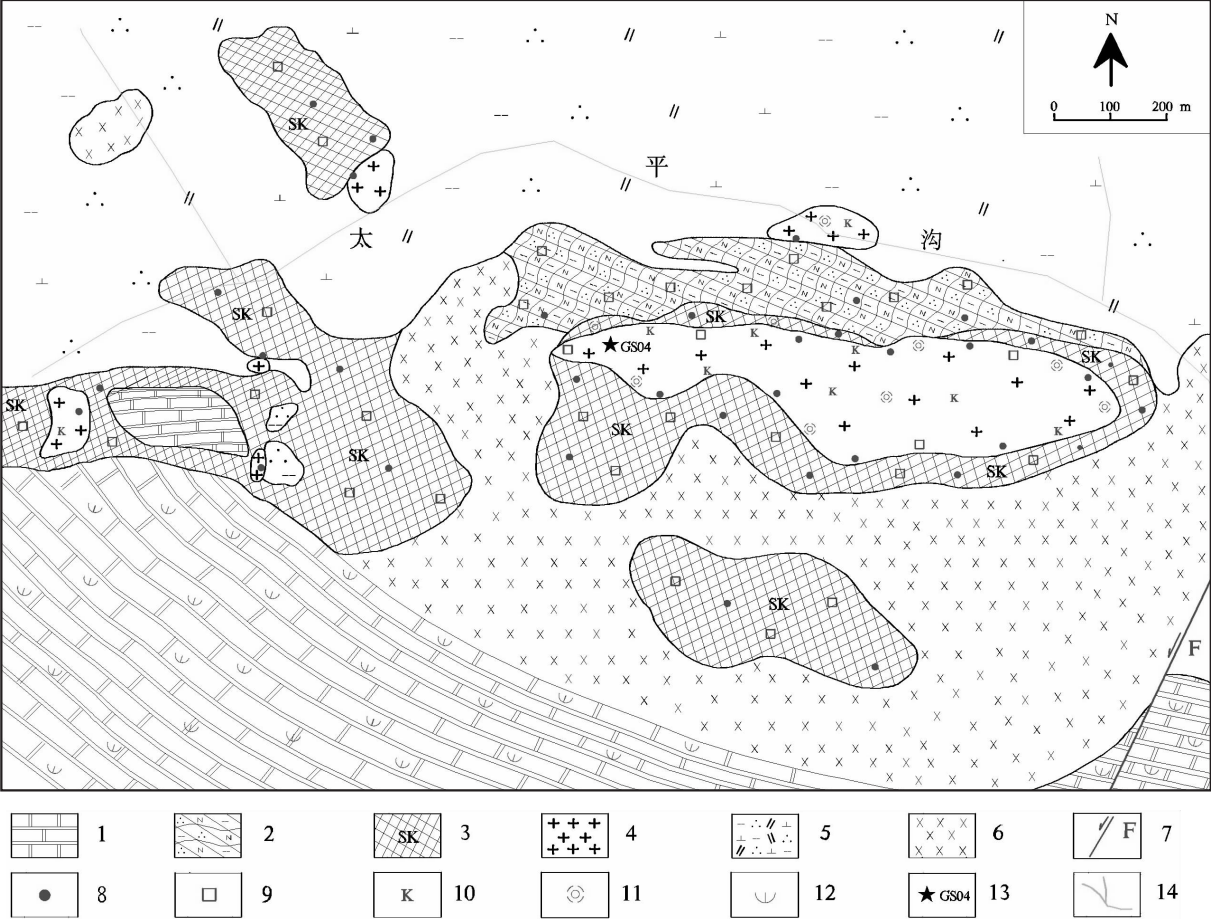


图 2 太平沟铜(金)矿区地质略图(张凯等,2018)

Fig. 2 Geological sketch map of Taipinggou copper (gold) mining area (ZHANG Kai et al. ,2018)

中共采得测年样品 1 件(编号 GS04,取样点位置: N33°37'50",E108°52'59"),岩石地球化学样品 7 件。

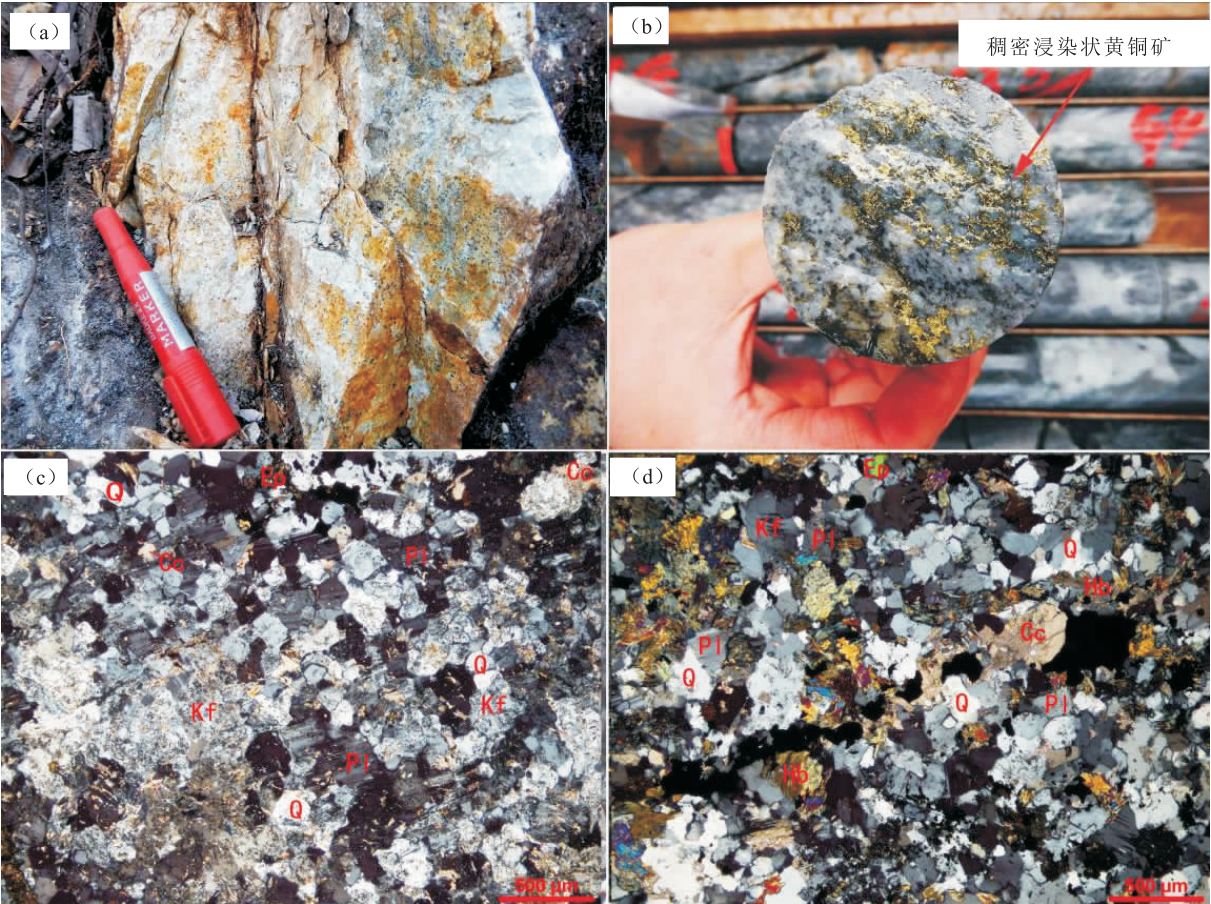
3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

锆石的分选由廊坊市诚信地质服务有限公司完成。将分选出单颗粒锆石在双目镜下根据形态、颜色、自形程度等特征,优选出具代表性的锆石颗粒;用环氧树脂固定,待其充分固化后抛光。然后对锆石样品进行镜下反射光与透射光照相,用阴极发光扫描电镜进行锆石的 CL 显微图像分析;选择形态较好,具振荡型生长环带,内部无裂隙及包裹体的锆石进行 LA-ICP-MS 测试,以期获得可靠的年龄信息。年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用德国 Microlas 公司的 Geolas200M 激光剥蚀系统 Agilent 7500a ICP-MS 联机进行测

定,激光束直径为 24 μm,频率为 10 Hz,剥蚀深度为 20~40 μm;年龄测定采用国际标准锆石 91500 作外标,元素含量采用 NIST610 为外标,²⁹Si 为内标;年龄计算及谐和图采用 Isoplot (ver. 3) 程序完成。

3.2 岩石地球化学全分析

岩石地球化学全分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。鉴于石英闪长岩遭受不同程度的矿化蚀变,用于分析测试的样品均经过野外初选和室内镜下观察,选择岩石新鲜、矿化蚀变较弱的样品进行主量、微量及稀土元素分析,其中主量元素采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)测试完成;微量和稀土元素采用等离子体质谱仪(ICP-MS)测试完成,误差小于 5%。



a. 含铜矿化蚀变细粒花岗岩露头;b. 铜矿化石英闪长岩岩心;c. 蚀变细粒斑状花岗岩显微照片(正交偏光);d. 蚀变矿化石英闪长岩显微照片(正交偏光);Pl. 斜长石;Kf. 钾长石;Hb. 角闪石;Cc. 方解石;Q. 石英;Ep. 绿帘石

图 3 太平沟铜(金)矿含矿岩体特征图

Fig. 3 Characteristics of ore-bearing rock in Taipinggou copper(gold) deposit

4 测试结果

4.1 锆石 U - Pb 年龄测试结果

用于测年的锆石为无色,部分略带浅黄色,呈短柱状,单体颗粒长 70~150 μm,宽 60~100 μm,形态多呈次棱角状,捕获锆石可见被熔蚀现象。从石英闪长岩锆石 CL 图像(图 4)可以看出,锆石发育清晰的振荡型生长环带;图像中锆石明暗程度差异,反映其 Th 和 U 含量有所不同。LA - ICP - MS 锆石年龄样品测试数据见表 1,26 个测点中锆石的 Th/U 值全部大于 0.4,与典型岩浆成因锆石特征一致(HOSKIN et al. ,2000)。

剔除不谐和年龄数据后,年龄数据点均位于一致曲线上或其附近,并且明显集中成 2 组分布(图 5)。

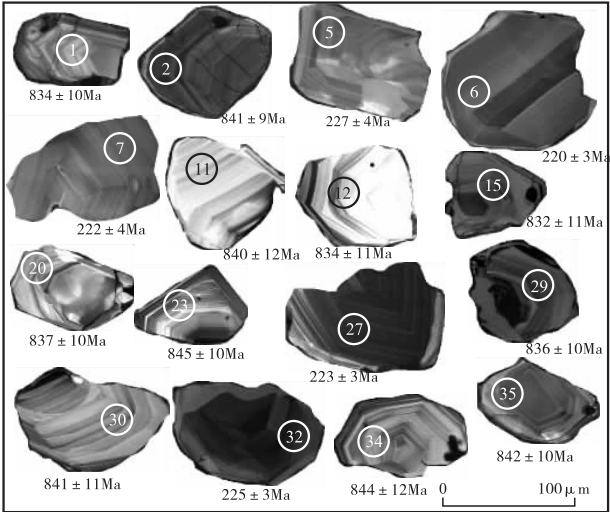


图 4 太平沟矿化石英闪长岩锆石 CL 图像、分析点及年龄图
Fig. 4 Zircon CL image, analysis point and age map of Taipinggou mineralized quartz diorite

表 1 太平沟矿化石英闪长岩锆石 LA - ICP - MS U - Pb 锆石年龄测试结果表
Tab. 1 Zircon LA - ICP - MS U - Pb zircon age test results of Taipinggou mineralized quartz diorite

测点号	元素含量(10^{-6})			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	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		
GS04-1	25.4	139	66.1	0.47	0.067 9	0.001 9	1.293 5	0.029 6	0.138 1	0.001 7	866	58	843	13	834	10
GS04-2	21.4	117	74.7	0.64	0.067 1	0.001 5	1.288 2	0.019 6	0.139 3	0.001 6	840	47	841	9	841	9
GS04-3	96.1	536	437	0.82	0.067 0	0.001 6	1.108 4	0.018 7	0.119 9	0.001 4	839	49	757	9	730	8
GS04-4	148	780	881	1.13	0.067 6	0.002 8	1.289 5	0.048 9	0.138 4	0.002 2	856	85	841	22	836	12
GS04-5	77.3	377	339	0.90	0.052 4	0.003 2	0.259 0	0.015 0	0.035 8	0.000 6	305	134	234	12	227	4
GS04-6	29.1	161	107	0.67	0.051 9	0.002 2	0.247 9	0.009 5	0.034 7	0.000 5	281	94	225	8	220	3
GS04-7	87.5	376	290	0.77	0.052 7	0.002 9	0.255 1	0.012 9	0.035 1	0.000 6	317	119	231	10	222	4
GS04-9	52.9	283	279	0.99	0.068 8	0.002 5	1.320 7	0.041 4	0.139 2	0.002 0	893	72	855	18	840	11
GS04-10	46.9	273	244	0.89	0.068 5	0.001 8	1.374 4	0.028 1	0.145 5	0.001 8	884	54	878	12	876	10
GS04-11	25.9	140	83.2	0.59	0.070 6	0.002 7	1.354 7	0.045 9	0.139 2	0.002 1	945	76	870	20	840	12
GS04-12	36.5	196	144	0.74	0.069 1	0.002 3	1.316 4	0.037 4	0.138 2	0.001 9	902	67	853	16	834	11
GS04-15	51.6	292	248	0.85	0.068 9	0.002 5	1.310 3	0.041 6	0.137 8	0.002 0	897	73	850	18	832	11
GS04-19	131	707	1073	1.52	0.071 1	0.002 6	1.178 3	0.037 6	0.120 1	0.001 7	961	73	791	18	731	10
GS04-20	45.7	252	132	0.52	0.069 3	0.001 9	1.324 5	0.028 4	0.138 6	0.001 7	907	55	857	12	837	10
GS04-23	45.1	237	170	0.72	0.072 0	0.001 9	1.391 7	0.027 4	0.140 1	0.001 7	987	52	885	12	845	10
GS04-24	68.6	392	321	0.82	0.065 9	0.002 4	0.861 3	0.027 1	0.094 7	0.001 3	805	74	631	15	583	8
GS04-25	23.0	115	76.2	0.66	0.065 1	0.001 9	1.200 3	0.029	0.133 6	0.001 7	779	61	801	13	808	10
GS04-26	128	669	832	1.24	0.065 3	0.002 2	0.768 2	0.021 4	0.085 2	0.001 1	785	68	579	12	527	7
GS04-27	23.6	116	75.4	0.65	0.052 3	0.001 8	0.253 4	0.007 6	0.035 1	0.000 5	298	77	229	6	223	3
GS04-28	40.5	210	156	0.74	0.070 5	0.001 7	1.236 8	0.021 8	0.127 2	0.001 5	942	49	817	10	772	9
GS04-29	60.5	319	222	0.70	0.066 5	0.001 9	1.269 3	0.028 6	0.138 4	0.001 8	821	58	832	13	836	10
GS04-30	81.4	407	359	0.88	0.066 8	0.002 3	1.283 7	0.038 4	0.139 4	0.002 0	830	70	839	17	841	11
GS04-31	31.5	154	112	0.73	0.064 4	0.002 5	1.035 9	0.035 1	0.116 5	0.001 7	756	79	722	18	711	10
GS04-32	51.1	243	239	0.98	0.052 0	0.002 1	0.254 9	0.009 2	0.035 5	0.000 5	286	90	231	7	225	3
GS04-34	17.2	75.7	51.5	0.68	0.066 8	0.002 8	1.289 2	0.048 3	0.139 9	0.002 2	831	84	841	21	844	12
GS04-35	60.1	317	292	0.92	0.066 9	0.002 0	1.289 1	0.031 1	0.139 5	0.001 8	837	60	841	14	842	10

注:测试单位:西北大学大陆动力学国家重点实验室,2019 年。

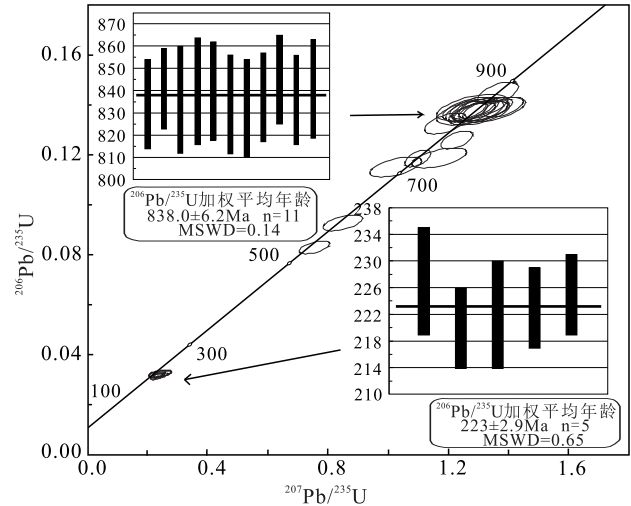


图 5 太平沟矿化石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordance map of Taipinggou mineralized quartz diorite

第一组²⁰⁶Pb/²³⁸U 表观年龄变化范围在(832±11)~(844±12)Ma,加权平均年龄为(837.7±6.2)Ma (n=11,MSWD=0.10)。依据锆石 CL 图像特征,并结合区域地质背景分析,认为这些锆石应为捕获锆石。第二组²⁰⁶Pb/²³⁸U 表观年龄变化范围在(220±3)~(227±4)Ma,加权平均年龄为(223.2±2.9)Ma(n=5,MSWD=0.62),该年龄代表太平沟矿化

石英闪长岩形成年龄。其余测点年龄数据比较分散,有 4 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 表观年龄为(711±10)~(772±9)Ma,为捕获的晚元古代锆石。因此,太平沟矿化石英闪长岩的成岩时代判断为晚三叠世,是印支晚期岩浆活动的产物,铜(金)矿化与该期岩浆活动关系密切。

4.2 岩石地球化学测试结果

4.2.1 主量元素特征

太平沟石英闪长岩 SiO₂ 含量为 60.7%~62.06%,TiO₂ 含量为 0.47%~0.61%,CaO 含量为 4.79%~7.54%,Na₂O 含量为 4.55%~5.29%,K₂O 含量为 2.66%~4.38%,显示富碱(Na₂O+K₂O=7.31%~9.67%)特征。TF_{e2}O₃ 含量为 2.15%~3.17%,Al₂O₃ 含量为 15.93%~17.05%,铝饱和指数 A/CNK 值为 0.65~0.77,属准铝质岩石。MgO 含量为 1.26%~2.23%,镁指数 Mg[#] 值为 56.55~62.94,里特曼指数 σ 为 2.90~4.91(表 2),属于钙碱性-碱性岩类。在 K₂O-SiO₂ 图解(图 6a)中,样品主要落入高钾钙碱性系列;在 A/CNK-A/NK 判别图解(图 6b)中,样品全部落入准铝质岩石区域内。综上所述,太平沟石英闪长岩主量元素显示为高硅、富钾和富碱的特点,属高钾钙碱性系列准铝质岩石,显示具有 I 型花岗岩特征。

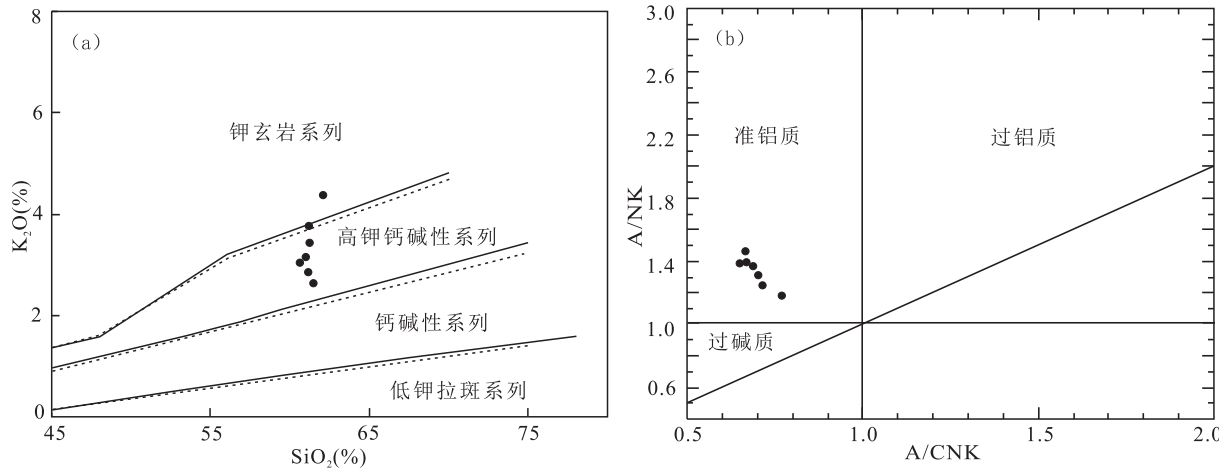


图 6 (a)太平沟石英闪长岩 SiO₂-K₂O 图解(实线据 PECCERILLO,1976;虚线据 MIDDLEMOST,1985)及 (b)A/CNK-A/NK 图解(底图据 MANIAR et al. ,1989)

Fig. 6 (a)SiO₂-K₂O diagram and (b)A/CNK-A/NK diagram of Taipinggou quartz diorite

4.2.2 稀土元素、微量元素特征

太平沟石英闪长岩稀土元素总量较高,ΣREE

=241.17×10⁻⁶~356.04×10⁻⁶;岩石的(La/Yb)_N=6.28~8.09,LREE/HREE=6.97~8.67,(La/

原始地幔标准化微量元素蛛网图显示,石英闪长岩具有高场强元素 Nb、P 和 Ti 等较强烈亏损、大离子亲石元素 Ba、U、K 等和 LREE (Ce、Nd) 富集的特点。

$(Sm)_N = 1.96 \sim 2.43, (Gd/Yb)_N = 1.72 \sim 2.20$ (表 2),表明岩石轻重稀土分馏较明显;岩石具明显负 Eu 异常($\delta Eu = 0.31 \sim 0.38$,平均为 0.34)。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上,呈明显右倾型。

表 2 太平沟石英闪长岩的主量(%)、微量及稀土元素(10^{-6})测试结果表

Tab. 2 Table of test results of main content (%), trace and rare earth elements (10^{-6}) of Taipinggou quartz diorite

样号	GS01	GS02	GS03	GS04	GS05	GS06	GS07
岩性	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩
SiO ₂	62.1	61.4	60.9	61.1	61.2	60.7	61.2
TiO ₂	0.47	0.57	0.54	0.48	0.54	0.61	0.54
Al ₂ O ₃	17.1	16.2	15.9	16.8	16.1	16.7	16.4
TFe ₂ O ₃	2.15	2.91	3.06	2.68	3.17	2.85	2.85
MnO	0.07	0.12	0.12	0.09	0.12	0.10	0.10
MgO	1.26	1.76	2.23	1.57	1.77	1.65	1.73
CaO	4.79	7.54	7.08	5.96	7.47	7.14	6.41
Na ₂ O	5.29	4.65	4.55	5.18	4.80	5.00	4.86
K ₂ O	4.38	2.66	3.16	3.78	2.88	3.07	3.45
P ₂ O ₅	0.10	0.13	0.16	0.12	0.18	0.19	0.14
LOI	1.37	1.32	1.63	1.34	1.22	1.14	1.64
Total	98.9	99.3	99.3	99.1	99.4	99.2	99.3
Mg [#]	57.7	58.5	62.9	57.7	56.6	57.4	58.6
Na ₂ O+K ₂ O	9.67	7.31	7.71	8.96	7.68	8.07	8.31
Na ₂ O/K ₂ O	1.21	1.75	1.44	1.37	1.67	1.63	1.41
σ	4.91	2.90	3.33	4.44	3.25	3.68	3.80
A/CNK	0.77	0.67	0.67	0.72	0.65	0.68	0.70
A/NK	1.27	1.54	1.46	1.33	1.46	1.45	1.40
Na ₂ O/(Na ₂ O+CaO)	0.52	0.38	0.39	0.46	0.39	0.41	0.43
MgO/(MgO+TFeO)	0.37	0.38	0.42	0.37	0.36	0.37	0.38
Li	1.83	2.77	4.09	2.46	2.96	3.03	2.82
Be	0.80	1.12	1.28	1.22	1.44	1.29	1.14
Sc	5.70	11.8	10.9	9.01	13.8	13.6	9.92
V	36.3	117	106	125	192	159	133
Cr	8.67	24.2	43.4	20.1	30.5	35.6	25.0
Co	49.9	58.9	47.6	53.6	57.0	54.5	60.9
Ni	13.5	25.6	30.5	24.4	23.9	31.6	21.9
Cu	6 946	5 575	5 384	6 636	5 429	4 415	5 679
Zn	37.2	39.6	43.4	42.8	38.3	35.4	42.0

续表 2

样号	GS01	GS02	GS03	GS04	GS05	GS06	GS07
岩性	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩
Ga	20. 4	21. 1	20. 4	21. 9	21. 6	22. 0	21. 1
Ge	1. 45	1. 70	1. 61	1. 40	1. 79	1. 77	1. 52
Rb	30. 6	19. 8	23. 4	26. 4	20. 6	22. 9	24. 3
Sr	205	372	293	250	330	335	281
Y	33. 2	44. 5	44. 4	36. 1	41. 9	46. 9	44. 5
Zr	94. 4	114	139	166	173	151	147
Nb	19. 5	24. 5	20. 5	21. 1	21. 5	25. 4	22. 4
Cs	0. 47	0. 85	0. 67	0. 55	0. 68	0. 74	0. 67
Ba	1 117	1 115	1 086	1 039	1 014	1 134	1 179
Hf	2. 75	3. 41	3. 77	4. 17	4. 37	4. 08	3. 89
Ta	1. 47	1. 69	1. 47	1. 45	1. 44	1. 82	1. 58
Pb	42. 9	62. 9	37. 7	46. 1	43. 0	53. 3	30. 9
Th	2. 91	3. 47	4. 41	3. 65	4. 15	4. 15	3. 70
U	1. 05	1. 62	1. 73	1. 90	2. 32	1. 79	1. 97
La	38. 5	51. 4	44. 3	41. 6	40. 7	47. 2	41. 7
Ce	97. 3	140	109	103	98. 9	115	104
Pr	12. 9	19. 9	14. 4	13. 6	13. 1	15. 1	13. 9
Nd	55. 5	89. 4	61. 8	58. 0	56. 5	65. 2	60. 5
Sm	10. 2	16. 5	11. 8	10. 8	10. 9	12. 6	11. 6
Eu	1. 06	1. 49	1. 37	1. 04	1. 13	1. 32	1. 25
Gd	8. 53	13. 0	10. 3	9. 02	9. 76	11. 2	10. 4
Tb	1. 21	1. 73	1. 52	1. 29	1. 43	1. 63	1. 53
Dy	6. 66	9. 29	8. 75	7. 30	8. 27	9. 35	8. 84
Ho	1. 25	1. 71	1. 67	1. 37	1. 59	1. 78	1. 69
Er	3. 51	4. 84	4. 76	3. 91	4. 57	5. 02	4. 81
Tm	0. 53	0. 73	0. 72	0. 59	0. 69	0. 74	0. 73
Yb	3. 41	4. 76	4. 65	3. 87	4. 57	4. 80	4. 76
Lu	0. 54	0. 77	0. 74	0. 63	0. 74	0. 75	0. 74
ΣREE	241. 17	356. 04	275. 94	255. 42	252. 78	291. 42	266. 63
LREE/HREE	8. 41	8. 67	7. 34	8. 13	6. 99	7. 27	6. 97
La _N /Yb _N	8. 09	7. 74	6. 84	7. 71	6. 39	7. 06	6. 28
La _N /Sm _N	2. 38	1. 96	2. 36	2. 43	2. 35	2. 36	2. 25
Gd _N /Yb _N	2. 02	2. 20	1. 79	1. 88	1. 72	1. 88	1. 75
δEu	0. 35	0. 31	0. 38	0. 32	0. 33	0. 34	0. 35
δCe	1. 07	1. 07	1. 06	1. 06	1. 05	1. 05	1. 06

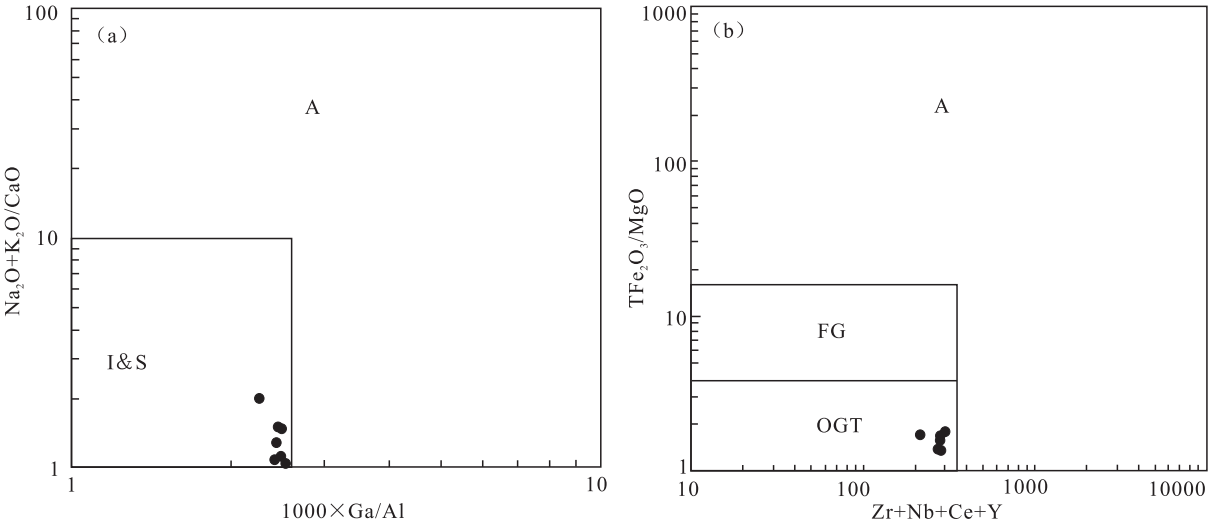
注：A/CNK(摩尔比)=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)；A/NK(摩尔比)=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)；δEu=[Eu_N/(Sm+Gd)_N]^{1/2}；测试单位：西
北大学大陆动力学国家重点实验室，2019 年。

5 讨论

5.1 岩石成因

太平沟石英闪长岩主要造岩矿物由斜长石、钾长石、角闪石、石英等组成,具有高硅(SiO_2 60.7%~62.06%)、富钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.21\sim1.75$)和富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.31\%\sim9.67\%$)的特点,属高钾钙碱性系列准铝质岩

石,显示具有 I 型花岗岩地球化学特征;在岩石成因类型判别图解(图 7a、图 7b)中,样品全部落入到 I 型和 S 型花岗岩区域,判断非 A 型花岗岩,且具有未分异(OGT)特点。此外,太平沟石英闪长岩样品中 P_2O_5 含量较低(0.10%~0.19%),其与 SiO_2 含量表现出一定的负相关性,与 S 型花岗岩变化趋势不一致,暗示其为 I 型花岗岩的可能性较大。综合分析判断,太平沟石英闪长岩属 I 型花岗岩。



a. ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 图解;b. $\text{Y}+\text{Ce}+\text{Nb}+\text{Zr}-\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 图解;S. S 型花岗岩;I. I 型花岗岩;A. A 型花岗岩;FG. 分异型 I、S 或 M 型花岗岩;OGT. 未分异的 I 型、S 型或 M 型花岗岩

图 7 太平沟石英闪长岩成因类型判别图解(a、b 底图据 WHALEN, et al., 1987)

Fig. 7 Graphical illustration of the genesis of Taipinggou quartz diorite

太平沟石英闪长岩与区内西侧东江口岩体群相比较,除了在规模、岩性、岩石结构等方面具有明显的差别外,地球化学特征也具有明显的差异,表现为太平沟石英闪长岩的稀土总量($\Sigma\text{REE}=241.17\times10^{-6}\sim356.04\times10^{-6}$)明显高于东江口岩体群($\Sigma\text{REE}=87\times10^{-6}\sim139\times10^{-6}$);轻重稀土分异程度较低于东江口岩体群($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=11.69\sim21.76$)。此外,球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 8)显示,太平沟石英闪长岩具明显负 Eu 异常,而东江口岩体群具微弱负 Eu 异常,暗示二者在岩石成因上存在差异。

在原始地幔标准化蛛网图(图 9)上,太平沟石英闪长岩与东江口岩体群表现出具有相似的微量元素配分模式,二者 Nb/Ta 值分别为 13.28~14.96 和 8.72~15.97,均稍低于原始地幔 Nb/Ta 值

(17.5 ± 2),而与上地壳的 Nb/Ta 值接近(TALYOR, et al. 1995)。太平沟石英闪长岩 Yb 平均值(4.3×10^{-6})、Y 平均值(41×10^{-6})明显高于东江口岩体群的 Yb 平均值(1.3×10^{-6})和 Y 平均值(15×10^{-6});将太平沟石英闪长岩、东江口岩体群的 Yb、Y 含量与大陆下地壳 Yb 平均值(2.5×10^{-6})、Y 平均值(27.2×10^{-6})和原始地幔 Yb 平均值(0.49×10^{-6})(SUN, et al. 1989)、Y 平均值(4.55×10^{-6} , TALYOR, et al. 1985)对比,暗示太平沟石英闪长岩可能是壳源来源,而东江口岩体可能为壳源并混有地幔物质。

5.2 形成构造环境

太平沟石英闪长岩样品在 R1 - R2 图解(图 10a)上,主要投在了板块碰撞前消减地区花岗岩-板块碰撞后隆起花岗岩区域,还显示具有晚造山花岗

岩的性质,推测可能反映其源区保留了部分俯冲消减时期的物质成分特征;在 Rb - Y + Nb 图解(图 10b)上,太平沟石英闪长岩样品全部落在了板内花岗岩(WPG)区域内。前人研究表明,南秦岭大面积

分布的印支晚期花岗岩类(225~200 Ma)形成于后碰撞环境(张成立等,2008;张国伟等,2011)。因此判断,太平沟石英闪长岩形成于印支晚期后碰撞环境。

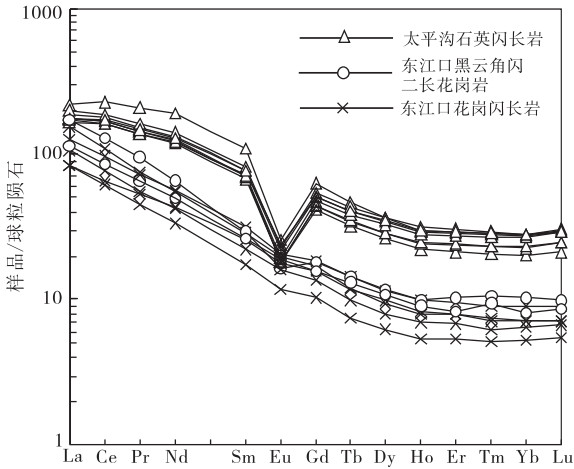


图 8 太平沟岩体及东江口岩体稀土球粒陨石标准化配分图(东江口岩体数据据李雷等,2012;刘春花等,2014;球粒陨石数据据 SUN et al., 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns for the Taipinggou and Dongjiangkou pluton

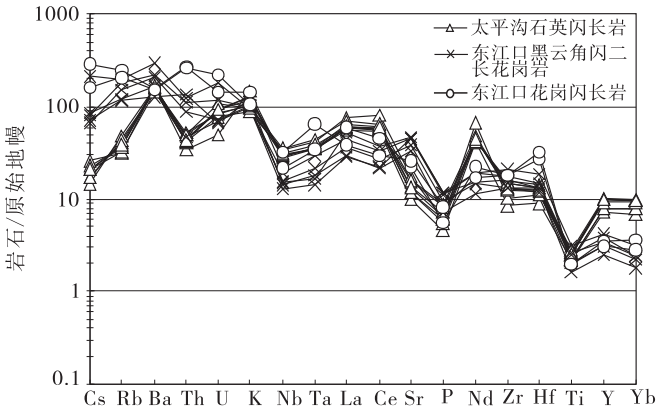
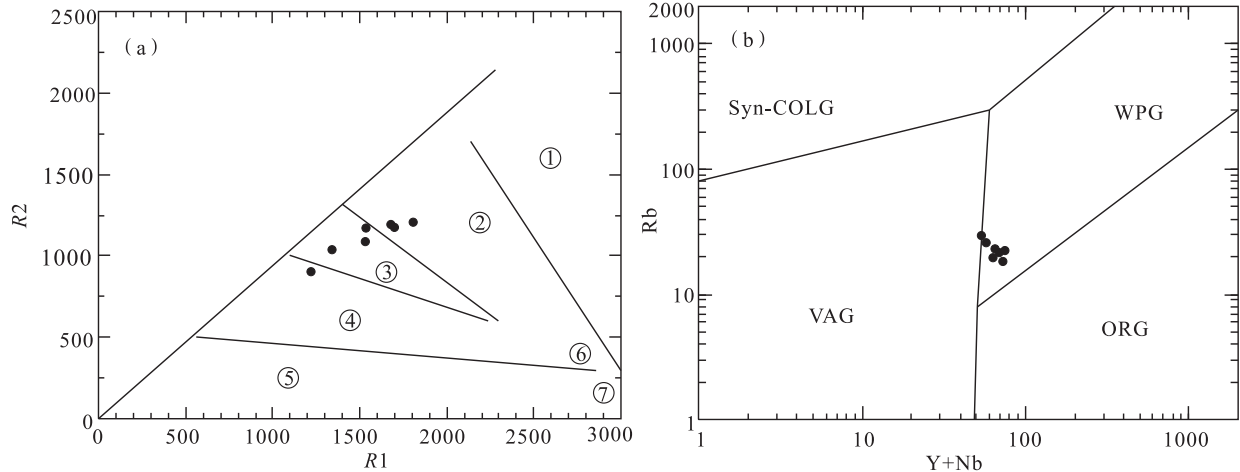


图 9 太平沟岩体及东江口岩体微量元素的原始地幔标准化蛛网图(东江口岩体数据据李雷等,2012;刘春花等,2014;原始地幔数据据 SUN et al., 1989)

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element patterns for the Taipinggou and Dongjiangkou pluton



①. 幔源花岗岩;②. 板块碰撞前消减地区花岗岩;③. 板块碰撞后隆起花岗岩;④. 晚造山期花岗岩;⑤. 非造山区花岗岩;⑥. 同造山期花岗岩;⑦. 造山后 A 型花岗岩; $R1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$, $R2=6Ca+2Mg+Al$; VAG. 火山弧花岗岩; Syn - COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩

图 10 太平沟小岩体构造环境判别图(底图据 BATCHLOR et al., 1985)(a)R1 - R2 阳离子图解(b)Rb - Y + Nb 图解(底图据 PEARCE, 1984)

Fig. 10 Tectonic discrimination plots for granite of the Taipinggou minor pluton
(a) R1-R2 cation diagram and (b) Rb-Y+Nb diagram

5.3 岩浆作用与成矿

太平沟铜(金)矿化及围岩蚀变与蚀变岩体在空

间上具有密切的成因关系,指示太平沟蚀变小岩体为成矿岩体。近年来研究,认为秦岭造山带中生代

印支期是构造岩浆热事件强烈活动期,并在 225~200 Ma 最为集中,该时期花岗岩多与板块构造体制的板内碰撞造山作用有关,形成于增厚地壳背景下的后碰撞环境,尤其是碰撞后期拉张伸展阶段的岩浆活动和成矿作用更为强烈(卢欣祥等,2008;张成立等,2008;赵东宏等,2019)。但令人疑惑不解的是,作为秦岭造山带主体部分的南秦岭地区印支期岩浆成矿作用鲜有报道,笔者针对南秦岭太平沟蚀变小岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究表明,其成岩年龄为(223.2±2.9) Ma,限定了其成矿作用为印支晚期岩浆活动的产物,暗示南秦岭宁陕-镇安地区存在一次重要的印支晚期岩浆成矿事件。这一发现不仅丰富了该地区与小岩体有关的铜(金)成矿事实,同时为南秦岭印支晚期岩浆活动与成矿作用研究提供了新的证据,对今后区域寻找同类型矿床具有重要的启示和指导意义。

6 结论

(1)太平沟矿化石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(223.2±2.9) Ma,表明其侵位于晚三叠世,为印支晚期岩浆活动的产物,铜(金)矿化与该次岩浆活动关系密切,指示本地区铜(金)矿化成矿时代为印支晚期。

(2)对岩石地球化学分析表明,太平沟石英闪长岩具有高硅(SiO_2 60.7%~62.06%)、富钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.21\sim1.75$)和富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.31\%\sim9.67\%$)的特点,属高钾钙碱性系列准铝质岩石;岩石以 Ba、U、K 等大离子亲石元素富集, Nb、P、Ti 等高场强元素亏损为特点,属 I 型花岗岩。

(3)通过对矿化石英闪长岩精确成岩时代的限定,暗示南秦岭宁陕-镇安地区存在重要的印支晚期岩浆成矿事件。

致谢:在野外工作期间得到陕西地矿集团有限公司王根宝教授、李方周教授技术指导,本文编写过程中陕西地矿集团有限公司魏东教授级高工、中国地质调查局西安地质调查中心赵东宏研究员及西北地质编辑部的审稿专家提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

李雷,张成立,周莹,等. 秦岭早中生代壳幔岩浆混合作用—

来自东江口花岗岩体闪长质包体的地球化学证据[J]. 高校地质学报,2012,18(2):291-306.

LI Lei, ZHANG Chengli, ZHOU Ying, et al. Early Mesozoic crust mantle magma mixing in Qinling Mountains: geochemical evidence from diorite inclusions of Dongjiangkou granite [J]. Journal of University Geology, 2012,18 (2): 291-306.

刘春花,吴才来,郜源红,等. 南秦岭东江口、柞水和梨园堂花岗岩类锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学与锆石 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报,2014,30(8):2402-2420.

LIU Chunhua, WU Cailai, GAO Yuanhong, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology and Lu Hf isotopic composition of zircons from Dongjiangkou, Zhashui and liyuantang granites in the South Qinling Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014,30 (8): 2402-2420.

刘文建,张凯,王居里,等. 南秦岭宁陕-镇安地区发现斑岩型铜(金)矿[J]. 矿产与地质,2020,34(3):401-404.

LIU Wenjian, ZHANG Kai, WANG Juli, et al. Discovery of porphyry copper (gold) deposits in Ningshan Zhen's area, southern Qinling [J]. Mineral and Geology, 2020,34 (3): 401-404.

卢欣祥,李明立,王卫,等. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质,2008,27(6):762-769.

LU Xinxiang, LI Mingli, WANG Wei, et al. Indosinian movement and Indosinian mineralization in Qinling orogenic belt [J]. Deposit Geology, 2008, 27 (6): 762-769.

王靖华,张复新,于在平,等. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质,2002,29(2):192-194.

WANG Jinghua, ZHANG Fuxin, YU Zaiping, et al. Metallogenic series of Qinling metal deposits and tectonic dynamic background of continental orogenic belt [J]. Chinese Geology, 2002,29 (2): 192-194.

王清晨,孙枢,李继亮,等. 秦岭的大地构造演化[J]. 地质科学,1989,(2):129-141.

WANG Qingchen, SUN Shu, LI Jiliang, et al. The Tectonic evolution of Qinling Mountains [J]. Scientia Geologica Sinica, 1989,(2):129-141.

杨志华,姜常义,赵太平,等. 论秦岭造山带的成矿作用[J]. 西安工程学院学报,1999,21(4):36-38.

YANG Zhihua, JING Changyi, Zhao Taiping, et al. On mineralization of Qinling orogenic belt [J]. Journal of Xi'an Institute of Engineering, 1999,21 (4): 36-38.

张成立,王涛,王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及

- 其构造环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 304-316.
- ZHANG Chengli, WANG Tao, WANG Xiaoxia. Genesis and tectonic environment of early Mesozoic granites in Qinling orogenic belt [J]. Journal of University Geology, 2008, 14 (3): 304-316.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识-兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 846-853.
- ZHANG Guowei, CHENG Shunyou, GUO Anlin, et al. Re recognition of Mian Lue ancient suture zone in the southern margin of Qinling Mountains Dabie central orogeny. Also on the Chinese mainland's main [J]. Geological Bulletin, 2004, 23 (9-10): 846-853.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. 陕西地质, 1997, 15(2): 2-12.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, YAO Anping. Basic composition, structure and tectonic evolution of Qinling orogenic belt [J]. Geology of Shaanxi, 1997, 15 (2): 2-12.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. 地学前缘[J], 2011, 18(3): 1-12.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. Continental geology and continental tectonics and continental dynamics [J]. Geoscience frontiers, 2011, 18 (3): 1-12.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- 张凯, 刘文建, 陈亚伟, 等. 南秦岭观花坪铜银矿床地质特征及找矿标志[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(01): 15-20.
- ZHANG Kai, LIU Wenjian, CHEN Yawei, et al. Geological characteristics and prospecting criteria of guanhuaping copper silver deposit in South Qinling [J]. Geological Prospecting Cluster, 2019, 34 (01): 15-20.
- 张凯, 刘文建, 陈亚伟, 等. 陕西省镇安县银洞湾-张子坪一带铅锌多金属矿预查总结报告[R]. 陕西: 西安地质矿产勘查开发院有限公司, 2018.
- 赵东宏, 杨忠堂, 李宗会, 等. 秦岭成矿带成矿地质背景及优势矿产成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- ZHAO Donghong, YANG Zhongtang, LI Zonghui, et al. Metallogenic geological background and metallogenic law of dominant minerals in Qinling metallogenic belt [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- BATCHELOR R A and BOWDEN P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chemical Geology, 1985, (48): 43-55.
- DE LA ROCHE H, LETERRIER J, GRANDCLAUDEP, et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses-Its relationships with current nomenclature [J]. Chemical Geology, 1980, 29: 183-210.
- HOSKIN P W O, BLACK L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. J Metamorphic Geol, 2000, 18: 423-439.
- MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- MIDDLEMOST E A K. Magmas and Magmatic Rocks [M]. London: Longman, 1985, 1-266.
- PEARCE J A, HARRIS N B W and TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- PECCERILLO R, TAYLOR S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. Contrib. Mineral Petrol, 1976, 58: 63-81.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for the mantle composition and processes [J]. In: Magmatism in the Ocean Basins, Saunders, A. D., Norry, M. J. (eds.). Geological Society of London Special Publication; London. 1989, 42(1): 313-345.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. Review in Geophysics, 1995, 33: 241-265.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: It's Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publishers, 1985: 1-132.
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.