

塔里木板块东南缘多坝沟金矿区花岗岩类年代学、地球化学特征及找矿意义

王玉玺^{1,2}, 第鹏飞^{1,3}, 陈万峰¹, 王金荣¹, 张渊², 沙鑫¹, 王怀涛^{1,2}

(1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃省西部矿产资源重点实验室(兰州大学), 甘肃 兰州 730000;
2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省矿产资源储量评审中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 多坝沟金矿是近年来塔里木盆地东南缘新发现的一处具有一定规模的金矿床, 矿区内出露的英云闪长岩侵入闪长岩中, 金矿体主要赋存在英云闪长岩体内部的构造蚀变带中。笔者对矿区闪长岩、英云闪长岩和金矿石进行了岩石学和地球化学研究, 闪长岩具有埃达克型花岗岩特征, 英云闪长岩具有喜马拉雅型花岗岩特征, 全岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}\text{‰}$ 为 11.0‰~13.4‰。通过金矿石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得具有多期峰值的变质年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 422~1 284 Ma, 这组年龄显示出闪长岩形成年龄为 $(497\pm 13)\text{Ma}$, 英云闪长岩的形成年龄为 $(435.9\pm 6.6)\text{Ma}$, 伴随构造热液活动的年龄, 成矿年龄稍晚于英云闪长岩的年龄, 矿区的 2 期岩浆活动与塔里木东南缘—阿尔金北缘早古生代 2 期主要成矿阶段一致, 多坝沟金矿成矿阶段主要集中在第二阶段, 表明在塔里木盆地东南缘寻找与早古生代形成的埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关金铜矿床具有一定的潜力。

关键词: 多坝沟金矿; 花岗岩; 地球化学; 找矿意义; 塔里木盆地东南缘

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2017)01-0134-17

Geochemical Characteristics and Prospecting Significance of the Granites from the Duobagou Gold Deposit in the Southeast Tarim Basin

WANG Yuxi^{1,2}, DI Pengfei^{1,3}, CHEN Wanfeng¹, WANG Jinrong¹, ZHANG Yuan², SHA Xin¹, WANG Huaitao^{1,2}

(1. School of Earth Sciences of Lanzhou University, Key Laboratory of Mineral Resources in Western China, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Gansu Assessment Center of Mineral Resources Reserves, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Duobagou gold deposit has been newly discovered in the southeastern margin of Tarim Basin with a certain scale, and the gold orebodies were mainly occurred in the tectonic alteration zone of tonalite that intrude into the diorite. In this paper, the petrological and geochemical features of diorite, tonalite and gold ore have been studied. The results show that the diorite has the properties of adakitic rocks, while the tonalite has the characteristics of the Himalayan type granite, and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ values of whole rocks range from 11.0‰ to 13.4‰. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for gold ore has revealed multiphase peak metamorphism age, the obtained

收稿日期: 2016-11-12; **修回日期:** 2016-11-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)”(DD2016036), 甘肃省省级基础地质调查项目“甘肃省多坝沟地区 1:5 万矿产远景调查”(20151616), 甘肃省地质勘查基金项目“甘肃省阿克塞县多坝沟多金属矿普查”(20151306)

作者简介: 王玉玺(1985-), 男, 博士生, 工程师, 从事岩石成因与成矿作用研究。E-mail: earth1985@yeah.net

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages vary from 422 Ma to 1284 Ma, suggesting that the diorite and tonalite were formed at (497 ± 13) Ma and (435.9 ± 6.6) Ma, respectively. Followed the age of the tectonic hydrothermal activity, the metallogenetic age is later than the formation age of tonalite. The ages of two-phases magma activities in this mining area are consistent with two main metallogenic stages of Southeast Tarim-North Alty in Early Paleozoic. The formation of Duobagou gold deposit had correlation with the second metallogenetic stages, indicating that there is certainly potential to discover Au-Cu deposits related adakitic and Himalayan-type granites in Southeast Tarim Basin.

Keywords: Duobagou gold deposit; granite; geochemistry; prospecting significance; Southeast-Tarim basin

塔里木板块的北缘为天山造山带,南缘为西昆仑造山带,东南缘为阿尔金造山带(图 1)。近年来,对塔里木板块南部与早古生代大洋俯冲、闭合碰撞相关的花岗岩类研究取得了重要的研究成果(崔军文等,1999;陈宣华,2003;毛德宝等,2003;陈正乐等,2004;杨屹等,2004;戚学祥等,2005;刘永顺等,2008;吴才来等,2005,2006,2014;董洪凯等,2014;刘鑫等,2015),在这一区域已经发现一批与早古生

代各类花岗岩相关的矿床(李厚民等,2001;陈柏林等,2002,2005;李学智等,2002;毛德宝等,2003;杨屹等,2004;李月臣等,2007)。随着埃达克岩与金铜成矿关系理论的深入研究(芮宗瑶等,2006;温志亮等,2008;戴雪灵等,2011;王金荣等,2013;张旗,2013;范堡程等,2014;杜亚龙等,2016;李晶等,2016),野外地质找矿一线更加重视这一类型花岗岩的找矿指示意义。

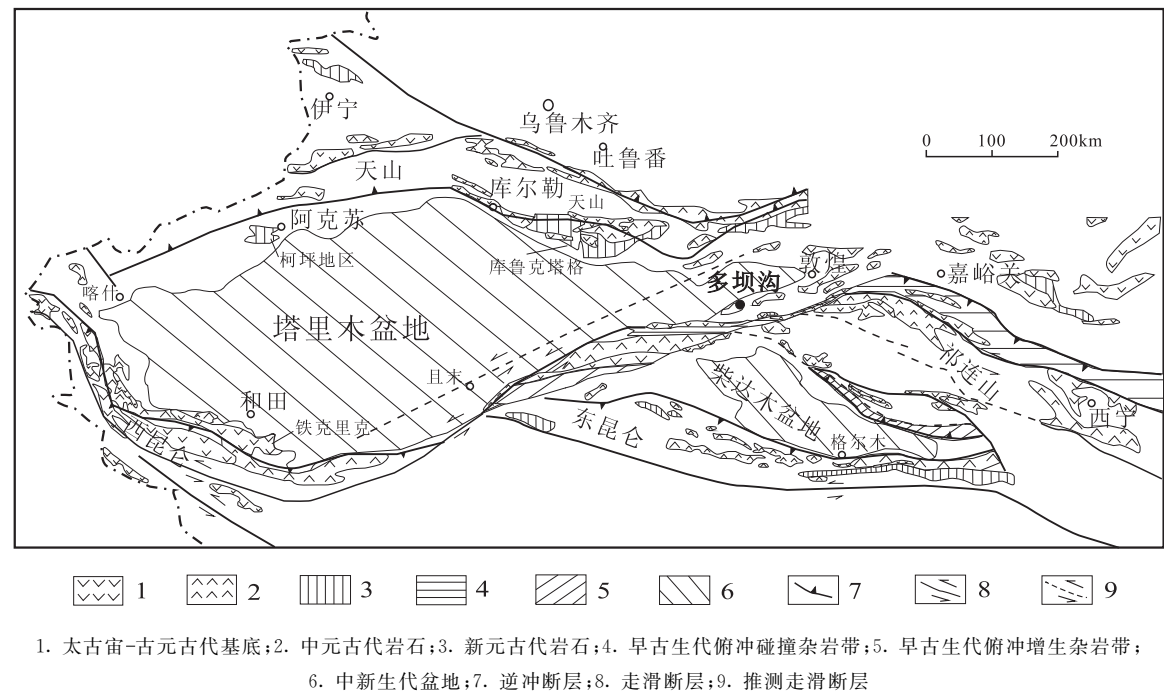


图 1 塔里木盆地东南缘区域构造地质简图(据张建新等,2011)
Fig. 1 Regional tectonic and geological map in southeastern Tarim Plate
(After ZHANG Jianxin et al. ,2011)

笔者在塔里木盆地东南缘多坝沟地区矿产远景调查项目和矿产普查的基础上,新发现了多坝沟金矿床,通过详尽的野外地质调查和岩石学、地球化学

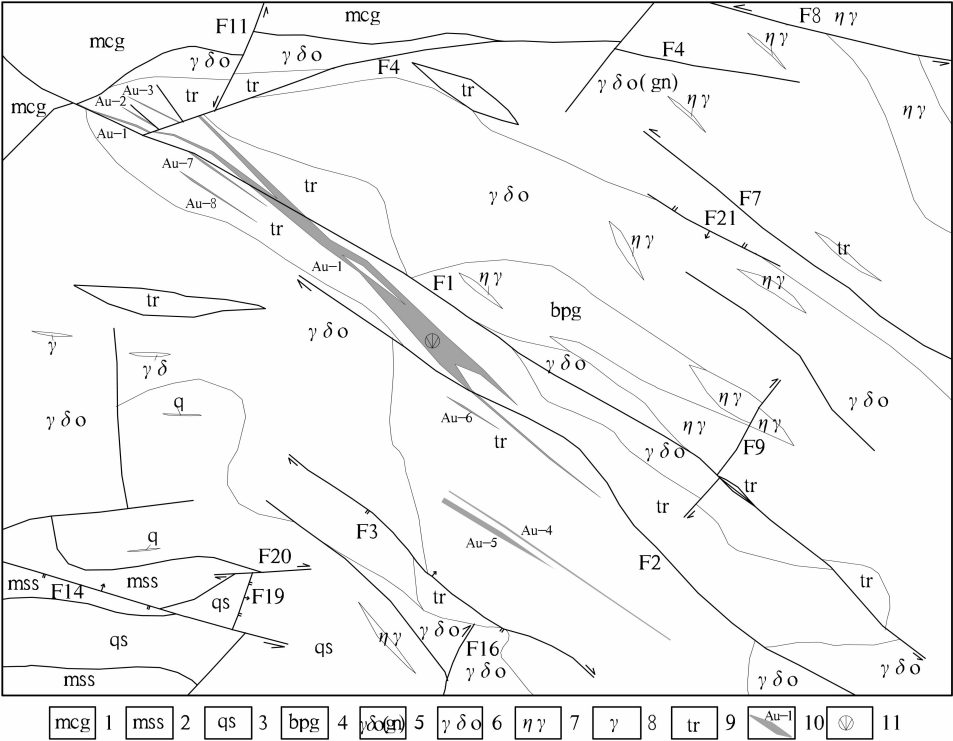
特征分析,并对金矿石进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,为塔里木盆地东南缘金铜找矿工作提供新的资料。

1 地质背景及岩体特征

塔里木盆地东南缘的多坝沟地区位于敦煌地块(陆松年等, 2003; 刘东晓等, 2016; 王玉玺等, 待刊), 敦煌地块的基底为太古宙—古元古代敦煌岩群(或米兰岩群), 主要由二云母片岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、麻粒岩等组成, 变质相可见绿片岩相—角闪岩相—麻粒岩相。南部以阿尔金巨型左行走滑断裂与红柳沟—拉配泉加里东期构造混杂岩带、中阿尔金地块、欧龙布鲁克微陆块相邻。多坝沟南侧近东西向红柳沟—拉配泉加里东期蛇绿混杂岩带的厘定, 反映出区域上加里东期存在洋壳闭合和碰撞造山运动, 是多坝沟地区花岗岩变形作用的主要原因之一。

多坝沟金矿区见 2 个岩体, 北侧英云闪长岩呈脉状分布, 长轴方向为北东向, 与八龙沟—崔木土断褶带构造线一致, 被后期北西向右行断裂错断, 岩性为英云闪长岩, 岩石变质变形相对较弱, 其内见后期二长花岗岩脉侵入, 局部受北东向断褶带影响, 裂隙发育,

裂隙面褐铁矿化较强, 为后期热液活动产物。南侧岩体为一杂岩体(图 2), 地表呈椭圆形分布出露, 主要受北西向断裂控制, 其内岩石碎裂岩化强烈, 后期多期次热液活动显著, 形成多期石英脉, 以单脉、网脉状分布。岩体内部见二长花岗岩脉体侵入, 脉体走向以北西向为主, 二长花岗岩脉与东侧区外二叠纪末期侵入的花岗岩为同期岩浆活动的产物, 受早期北西向断裂控制。2 个岩体可能为同期岩浆活动的产物, 且在南侧花岗杂岩体中发现金矿体, 重点对南侧英云闪长杂岩体进行分析和研究。杂岩体中可见岩性以英云闪长岩为主, 小规模闪长岩和辉长岩体受构造作用无规律分布于岩体中, 接触关系均为渐变接触。围岩为敦煌岩群第三、四岩组, 岩性为变质砾岩、变质砂岩、绿泥绿帘片岩、二云母片岩、黑云角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩等。岩体北部发育一条脆韧性剪切带, 剪切带内的岩石面理和线理构造非常发育, 面理走向呈北东东向, 面理产状 $345^{\circ}\sim 355^{\circ}/55^{\circ}\sim 65^{\circ}$, 线理以向北西西侧伏角 25° , 侧伏角 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 反映出左行逆冲的变形特点。



1. 变质砾岩; 2. 变质含砾砂岩; 3. 片岩; 4. 黑云斜长片麻岩; 5. 英云闪长质片麻岩; 6. 英云闪长岩; 7. 二长花岗岩; 8. 花岗岩; 9. 碎裂岩; 10. 金矿体及编号; 11. 年龄样采样点

图 2 多坝沟金矿区岩体地质简图

Fig. 2 The geological map of granites from Duobagou gold field

2 岩石学特征

2.1 英云闪长岩

岩体内部受构造和热液活动改造,形成了一套含金的蚀变英云闪长岩。下面对英云闪长岩和强蚀变英云闪长岩分别描述,通过岩石学和矿物学特征分析,判别两者之间的差别和关系。

英云闪长岩:这一类岩石受构造改造较强烈,呈褐灰色,变余细粒花岗结构,块状构造。岩石中斜长石含量为55%~65%,石英含量为20%~30%,暗色矿物假像10%±,少量钾长石。长石:主为斜长石、钾长石少,多呈压扁、拉长的近半自形板状,粒度多为1.5~2.0 mm,2.0~2.5 mm少,具塑性变形特征,具波状消光、变形纹等,定向分布。其中钾长石可见钠长石呈补片状分布于钾长石晶内,具不均匀高岭土化。斜长石具聚片双晶,长石多被绢云母交代呈假像。石英:多为集合体,多具压扁、拉长,波状、带状消光,粒间不规则镶嵌状接触,为石英糜棱物经重结晶的产物,粒度变为0.2~0.5 mm,集合体定向分布于长石间。暗色矿物:多变为白云母呈假像,片径0.1~0.3 mm,白云母片多呈弯曲状,析出铁质呈假像,多呈断续、弯曲线纹状聚集,显绕晶分布。不透明矿物:为褐铁矿,部分呈黄铁矿假像,粒度为0.1~0.3 mm,零散交代岩石,沿裂隙分布或交代透明矿物。

岩内可见方解石及少量磁铁矿构成的细脉侵入及被黏土质等充填的裂隙。岩石次生矿物以绢云母和方解石为主(图3)。



Q. 石英; Pl. 斜长石; Ep. 绿帘石; Mc. 白云母; Py. 黄铁矿

图3 花岗岩类岩石标本及显微镜下照片

Fig. 3 Specimen photographs and photomicrographs of the Duobagou granites

强蚀变英云闪长岩:这一类型岩石由于脆性构造改造强烈,碎裂结构常见,亦可见细粒半自形粒状结构,块状-脉状构造,岩石风化面呈浅黄褐色,岩石主要由暗色矿物、斜长石、石英等组成,斜长石含量为55%~65%,石英含量为20%~25%,钾长石含量为10%~15%,暗色矿物假像5%。岩石遭受较强应力作用普遍破裂、破碎,破碎区矿物破裂、边缘碎粒化,往往这部分的蚀变矿物也相对发育和集中,且裂隙区石英不规则镶嵌,有破碎重结晶及断续细脉状分布现象(怀疑原来石英闪长岩破裂破碎有热液石英呈断续脉状分布而石英含量增加,暂定的英云闪长岩。斜长石:宽板状、个别板状,可见聚片双晶,部分隐约可见或残缺,一般都有破裂,强烈者边缘碎粒化、碎斑状等,已无法测其排号,成分以更长石为主,部分由于破碎、蚀变等边缘偏向钠更长石产出,破碎弱者一般有少量细小次生物绢云母、隐晶状帘石、微量碳酸盐、黏土等不均匀分布,破碎强者有大量细小次生物绢云母、黏土等分布或覆盖。正长石:他形,仅有微量高岭土等次生物,局部可见分布于斜长石空隙中,少量不均匀分布,粒度大多为0.2~±0.5 mm。石英:他形粒状,透明洁净,零星或破碎区聚集状分布,普遍具波状消光,碎裂明显,粒度变化相对长石明显。黑云母:似片状,一般零星分布于斜长石等空隙间,粒度约为0.1~±0.2 mm,被绿泥石、微量磁铁矿等取代,随岩石破裂、破碎变形,多沿破裂裂隙区和斜长石的蚀变碎粒物混杂分布。

晚期微裂隙中较多胶状集合体赤、褐铁矿填充。矿物含量:暗色矿物(黑云母)3%,斜长石60%,石英32%,赤、褐铁矿等≤5%;副矿物:磷灰石、锆石等少一微量。

2.2 闪长岩

多坝沟金矿区闪长岩体规模较小,主要以围岩分布在英云闪长岩体外围及深部,地表闪长岩呈现浅成-超浅成侵入岩特征,变形较弱,深部钻孔中见到的闪长岩以糜棱岩化为主,显示出韧性剪切构造改造特征。

岩石以浅灰绿色-灰绿色为主,变余细粒半自形结构,定向构造。由斜长石假像、石英、暗色矿物假像(角闪石和黑云母)组成。斜长石假像,60%~65%,少量石英,角闪石约为20%,黑云母约为20%。斜长石:主呈近半自形板状-他形粒状,直径一般<0.4 mm,定向明显,绢云母化明显呈假像,个体边界已模糊,单偏光下隐约可见有的长石细粒化

显线纹状等,有的粒内见机械双晶、波状消光等变形现象,定向分布。石英:呈他形粒状,大小 0.1~0.3 mm,零星分布,集合体呈线纹状、线痕状分布于长石粒间,为糜棱物经恢复重结晶的产物。角闪石:近半自形柱状,大小 0.05~0.3 mm,绿色,被黑云母交代。常见角闪石与黑云母呈混杂状定向明显,少量粒径细小的黑云母、角闪石呈糜棱物状充填于斜长石粒间。黑云母:叶片状,大小 0.3~0.15 mm,棕色,分布状况同角闪石,局部绿泥石化。岩内见由石英、黝帘石、白云母、少量石榴石等构成的细脉通过。见少量黄铁矿、黄铜矿呈零散状交代岩石,具碳酸盐化、绢云母化、白云母化和绿泥石化等。

3 样品采集与分析测试

样品采自矿区不同岩性,金矿石采样 4 件,英云闪长岩采样 5 件,闪长岩采样 4 件。主量元素和微量元素委托河北区域地质研究所分析测试。样品测试前清除其表面杂质,并将其破碎成岩屑,然后放置在稀盐酸中浸泡 1 h,去除次生的碳酸盐岩矿物,再使用去离子水在超声波中清洗样品,重复 2 次以上,烘干经磨样机磨至 200 目供分析。主量元素采用 X 荧光

光谱仪(XRF-1800)分析,分析精度优于 3%。微量及稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于 5%。分析数据见表 1、表 2。

锆石 U-Pb 年代学测试的强碎裂状花岗岩(样号 DTW04)经过破碎,经浮选和电磁选等方法后,挑选出单颗粒锆石。将锆石颗粒用环氧树脂固定于样品靶上。样品靶表面经研磨抛光,直至磨至锆石晶体近中心截面。对靶上锆石进行阴极发光(CL)分析,根据阴极发光照射结果选择锆石进行 U-Pb 测年分析。锆石 U-Pb 年龄测定工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用 LA-ICP-MS 完成,ICP-MS 型号为 Agilent7500a 型,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统。测试过程中激光束斑的剥蚀孔径为 25 μm,剥蚀时间为 60 s,背景扫描时间 40 s,激光脉冲重复频率 5 Hz。实验原理和详细的测试方法见文献(JACKSON et al.,2004)。ICP-MS 的分析数据通过及时分析软件 Glitter (VAN et al.,2001)计算获得同位素质量分数比值、年龄和误差(表 3)。普通铅校正采用 ANDERSEN(2002)的方法进行校正,分析误差±1σ。结果用 Isoplot 程序(V.3.23)完成年龄计算和谐图的绘制(LUDWIG,2003)。

表 1 多坝沟金矿区花岗岩类主量元素分析数据(%)
Tab.1 Geochemical composition of major elements of granites from Duobagou gold field(%)

样品号	DJYQ1	DJYQ3	DJYQ9	DYQ18	DJYQ2	DYQ17	DYQ19	DYQ20	DJYQ4	DJYQ5	DJYQ6	DJYQ7	DJYQ8
SiO ₂	77.23	89.96	94.58	59.33	68.35	71.19	76.00	60.15	60.73	49.79	50.50	48.78	48.67
Al ₂ O ₃	9.35	2.06	2.23	5.60	15.21	13.75	12.66	16.50	16.22	19.95	20.88	18.74	19.28
TiO ₂	0.40	0.06	0.08	0.25	0.71	0.70	0.33	0.72	0.74	1.00	0.94	0.82	0.91
Fe ₂ O ₃	2.83	0.96	0.44	4.54	3.72	3.75	2.42	2.27	2.88	3.13	1.83	1.74	1.79
FeO	0.35	0.32	0.52	0.26	0.85	0.41	0.31	2.85	1.93	6.47	7.25	7.08	7.28
CaO	1.63	2.66	0.11	13.44	0.39	0.32	0.37	4.51	3.50	4.57	3.84	8.58	8.93
MgO	0.31	0.24	0.12	1.14	0.70	0.67	0.34	1.69	1.27	2.62	2.69	3.70	3.50
K ₂ O	2.57	0.81	0.65	1.66	3.98	5.15	2.43	2.65	3.67	2.88	3.34	1.43	1.59
Na ₂ O	2.69	0.09	0.43	0.59	3.87	1.87	3.54	3.73	3.45	2.38	2.13	2.94	2.96
MnO	0.070	0.058	0.02	0.15	0.039	0.028	0.033	0.073	0.063	0.15	0.15	0.16	0.17
P ₂ O ₅	0.12	0.055	0.033	0.073	0.20	0.18	0.062	0.17	0.19	0.26	0.24	0.20	0.25
H ₂ O ⁺	1.16	0.63	0.31	1.76	1.49	1.69	1.18	2.32	2.01	3.87	3.91	2.57	2.19
H ₂ O ⁻	0.15	0.13	0.09	0.26	0.20	0.20	0.23	0.25	0.22	0.32	0.28	0.19	0.11
灼失量	2.33	2.71	0.58	12.87	1.85	1.88	1.43	4.58	5.27	6.62	6.07	5.69	4.52
总和	99.89	99.97	99.79	99.92	99.88	99.89	99.95	99.87	99.91	99.83	99.85	99.87	99.86
Na ₂ O+K ₂ O	5.260	0.90	1.080	2.25	7.840	7.01	5.980	6.37	7.120	5.26	5.460	4.37	4.550
A/CNK	0.92	0.35	1.38	0.21	1.34	1.49	1.38	0.96	1.01	1.30	1.48	0.85	0.84
A/NK	1.30	2.00	1.57	2.02	1.43	1.59	1.50	1.83	1.68	2.83	2.93	2.93	2.92
TFEo	2.900	1.18	0.910	4.35	4.200	3.79	2.490	4.89	4.520	9.29	8.890	8.65	8.900
Mg#	16.26	26.44	19.32	32.11	23.14	24.03	19.79	38.29	33.52	33.70	35.26	43.52	41.42

注: A/CNK=Al₂O₃/Na₂O+K₂O+CaO; A/NK=Al₂O₃/Na₂O+K₂O; 分子比; 样品由河北区域地质研究所测试。

表 2 多坝沟金矿区花岗岩类稀土元素(10^{-6})和微量元素(10^{-6})数据表

Tab. 2 Geochemical composition of trace elements (10^{-6}) and rara-earth elements (10^{-6}) of granites from Duobagou gold field

样品号	DJYQ1	DJYQ3	DJYQ9	DYQ18	DJYQ2	DYQ17	DYQ19	DYQ20	DJYQ4	DJYQ5	DJYQ6	DJYQ7	DJYQ8
La	10.8	3.85	2.13	11.1	24.8	10.9	6.95	15.2	23.8	11.2	15.7	16.6	16.8
Ce	21.4	6.61	4.55	19.9	49.3	26.0	14.6	33.6	48.4	24.5	33.2	30.9	33.1
Pr	2.87	0.84	0.69	2.60	6.26	3.78	1.80	4.36	6.23	3.40	4.56	4.11	4.47
Nd	10.9	3.23	2.86	10.8	22.6	16.7	6.90	17.8	23.0	13.4	17.4	15.8	17.7
Sm	2.36	0.72	0.80	2.35	4.33	3.78	1.15	3.63	4.38	3.10	3.93	3.45	3.86
Eu	0.65	0.25	0.34	0.81	1.35	0.96	0.37	1.00	1.16	0.97	1.30	1.18	1.27
Gd	1.87	0.65	0.59	2.14	3.56	2.81	1.07	2.97	3.58	2.74	3.68	3.17	3.57
Tb	0.29	0.11	0.10	0.33	0.52	0.46	0.13	0.48	0.51	0.52	0.68	0.60	0.65
Dy	1.26	0.49	0.45	1.48	2.32	2.18	0.55	2.25	2.11	3.05	4.03	3.43	3.86
Ho	0.20	0.08	0.07	0.23	0.34	0.35	0.090	0.37	0.32	0.57	0.77	0.69	0.74
Er	0.49	0.18	0.16	0.51	0.85	0.86	0.26	0.92	0.76	1.63	2.16	1.93	2.09
Tm	0.07	0.03	0.02	0.07	0.12	0.13	0.04	0.14	0.11	0.28	0.37	0.32	0.34
Yb	0.47	0.18	0.15	0.42	0.77	0.72	0.25	0.78	0.72	2.02	2.60	2.33	2.41
Lu	0.08	0.02	0.02	0.072	0.13	0.13	0.072	0.16	0.12	0.25	0.31	0.29	0.29
Y	5.46	2.66	1.74	7.26	9.35	9.16	2.72	9.85	8.45	14.9	20.3	17.7	20.2
ΣREE	53.73	17.24	12.93	52.77	117.30	69.75	34.24	83.64	115.24	67.63	90.76	84.86	91.07
LREE	49.00	15.50	11.38	47.52	108.68	62.08	31.78	75.58	107.01	56.57	76.17	72.11	77.11
HREE	4.74	1.74	1.56	5.24	8.61	7.67	2.46	8.06	8.23	11.05	14.59	12.75	13.96
LREE/HREE	10.34	8.91	7.31	9.06	12.62	8.09	12.91	9.38	13.00	5.12	5.22	5.66	5.52
(La/Yb) _N	16.49	15.12	10.21	18.73	22.95	10.79	20.29	13.98	23.80	3.97	4.34	5.13	4.99
δEu	0.91	1.11	1.45	1.09	1.02	0.86	1.01	0.90	0.87	1.00	1.03	1.07	1.03
δCe	0.93	0.86	0.91	0.88	0.95	0.99	0.99	1.00	0.95	0.96	0.95	0.89	0.92
Li	6.00	3.53	2.58	4.34	14.8	15.1	4.68	26.4	10.9	38.3	35.2	32.6	31.4
Sc	3.92	0.17	0.83	3.79	4.59	6.03	3.32	8.67	6.23	32.5	41.6	36.2	37.7
V	25.1	21.8	23.7	30.2	74.5	59.5	38.7	116	90.8	212	231	216	215
Cr	4.74	3.91	20.1	13.0	7.48	9.72	7.82	22.6	9.45	13.3	24.3	22.4	12.1
Co	17.0	20.5	57.2	7.46	19.0	9.92	4.53	12.5	13.9	28.6	27.1	30.4	30.3
Ni	2.24	1.72	1.89	6.70	2.82	3.71	1.71	6.58	4.17	13.0	11.0	13.4	11.5
Cu	5.47	3.68	4.39	4.79	37.2	18.4	7.27	8.17	11.5	87.1	26.8	76.1	75.4
Zn	177	68.2	108	141	126	86.6	59.1	89.2	92.8	105	113	104	118
Ga	14.6	3.33	4.35	7.8	19.9	21.1	14.6	25.0	22.2	19.8	21.5	20.3	21.7
Rb	60.3	26.5	20.0	54.9	114	161	85.2	95.4	142	128	182	83.7	99.6
Sr	80.2	30.0	21.0	184	137	77.9	89.8	359	237	309	371	559	679
Zr	66.9	9.4	13.9	63.9	136	128	71.3	134	143	97.6	78.3	65.0	81.8
Nb	2.46	0.28	0.26	1.20	4.66	4.40	4.02	8.85	9.90	7.39	7.43	6.67	10.5
Mo	39.3	22.5	741	145	12.5	6.18	2.23	1.49	0.96	0.91	1.95	4.84	0.60
In	0.043	0.017	0.093	0.020	0.048	0.050	0.022	0.058	0.056	0.067	0.082	0.064	0.067
Cs	1.54	0.90	0.60	1.62	16.5	4.59	3.11	8.46	7.90	13.9	19.3	5.13	7.63
Ba	341	100	87.3	274	680	649	311	522	468	751	802	494	511
Hf	2.45	0.24	0.51	1.78	4.11	4.14	2.48	4.11	6.21	5.62	4.82	3.68	4.69
Ta	0.23	0.008	0.007	0.19	0.26	0.96	0.52	0.82	0.87	0.40	0.54	0.40	0.73
W	240	279	1405	7.02	235	50.6	13.2	2.47	119	21.4	18.8	39.6	24.7
Tl	0.39	0.15	0.15	0.38	0.68	1.03	0.33	0.72	0.76	0.82	1.14	0.55	0.69
Pb	146	141	2742	46.7	42.2	37.9	13.4	29.7	15.7	15.1	24.7	28.8	15.1
Bi	0.51	0.78	9.92	1.08	0.14	0.22	0.20	0.22	0.094	0.46	1.09	0.31	0.36
Th	3.21	0.52	0.59	3.46	5.60	7.41	4.31	9.40	8.92	4.29	4.17	4.30	4.11
U	1.42	1.36	1.64	4.07	2.70	3.69	1.69	3.15	2.07	1.61	1.29	1.49	2.05
F	757	623	467	424	1226	880	451	757	1003	1192	1101	873	904
Au	5 680	850	71 600	810	1 120	1 940	70.0	5.16	12.0	6.32	7.33	2.88	3.64

注: Au 含量为 10^{-9} , 样品由河北区域地质研究所测试。

表 3 多坝沟金矿区花岗杂岩 LA-ICP-MS 锆石分析结果
Tab. 3 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from Duobagou granites

测点	元素含量 (10 ⁻⁶)				Th/U				同位素比值				表面年龄 (Ma)			
	Pb	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
dlw04-01	8	43	105	0.41	0.054 5	0.000 7	0.513 3	0.007 2	0.068 6	0.000 8	392	14	421	5	428	5
dlw04-02	6	63	180	0.35	0.058 2	0.000 7	0.515 2	0.007 1	0.069 9	0.000 9	539	13	422	5	435	5
dlw04-03	10	66	150	0.44	0.057 9	0.000 7	0.560 8	0.007 6	0.071 2	0.000 9	525	13	452	5	443	5
dlw04-04	11	38	84	0.45	0.056 3	0.000 7	0.567 6	0.007 7	0.069 5	0.000 9	463	14	456	5	433	5
dlw04-05	10	46	112	0.41	0.055 1	0.000 7	0.538 9	0.007 5	0.067 6	0.000 8	414	14	438	5	422	5
dlw04-06	7	57	119	0.48	0.062 3	0.000 8	0.595 8	0.008 1	0.069 4	0.000 8	684	13	475	5	432	5
dlw04-07	9	55	145	0.38	0.056 4	0.000 8	0.542 9	0.008 0	0.069 8	0.000 9	469	15	440	5	435	5
dlw04-08	20	62	122	0.51	0.059 0	0.000 8	0.589 7	0.008 7	0.072 6	0.000 9	566	15	471	6	452	5
dlw04-09	13	39	103	0.38	0.055 1	0.000 7	0.540 7	0.007 9	0.071 1	0.000 9	417	15	439	5	443	5
dlw04-10	16	38	109	0.35	0.058 4	0.000 8	0.553 1	0.008 1	0.068 7	0.000 8	545	14	447	5	428	5
dlw04-11	5	55	125	0.44	0.054 4	0.000 7	0.510 6	0.007 5	0.068 1	0.000 8	387	15	419	5	425	5
dlw04-12	8	48	91	0.53	0.057 8	0.000 8	0.550 3	0.008 0	0.069 1	0.000 9	522	14	445	5	431	5
dlw04-13	10	41	69	0.59	0.056 2	0.000 7	0.572 5	0.008 0	0.073 9	0.000 9	461	14	460	5	460	5
dlw04-14	15	32	76	0.42	0.062 6	0.000 7	0.669 6	0.009 0	0.077 7	0.001 0	693	13	520	5	482	6
dlw04-15	25	114	211	0.54	0.063 3	0.000 7	0.717 6	0.009 6	0.082 3	0.001 0	717	13	549	6	510	6
dlw04-16	6	93	152	0.61	0.061 7	0.000 7	0.671 4	0.009 0	0.078 9	0.001 0	665	13	522	5	490	6
dlw04-17	8	78	205	0.38	0.055 6	0.000 6	0.637 9	0.008 5	0.083 3	0.001 0	435	13	501	5	516	6
dlw04-18	6	59	134	0.44	0.056 9	0.000 8	0.600 3	0.008 7	0.076 5	0.000 9	488	14	477	6	475	6
dlw04-19	11	51	106	0.48	0.055 4	0.000 8	0.606 8	0.009 0	0.079 5	0.001 0	428	15	482	6	493	6
dlw04-20	18	48	96	0.5	0.056 0	0.000 7	0.616 0	0.008 9	0.079 8	0.001 0	452	14	487	6	495	6
dlw04-21	14	94	171	0.55	0.064 2	0.000 7	0.876 5	0.011 6	0.099 0	0.001 2	750	13	639	6	609	7
dlw04-22	20	73	155	0.47	0.061 7	0.000 7	0.768 2	0.010 2	0.090 4	0.001 1	663	13	579	6	558	7
dlw04-23	9	60	122	0.49	0.059 0	0.000 7	0.787 7	0.010 5	0.096 9	0.001 2	567	13	590	6	596	7
dlw04-24	8	43	105	0.41	0.082 7	0.001 0	2.511 2	0.035 3	0.220 4	0.002 8	1 262	12	1 275	10	1 284	15

4 岩石地球化学特征

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

多坝沟金矿区的年龄样采自金矿体上(DTW04, 岩性为强硅化褐铁矿化英云闪长质碎裂岩), 挑选出的锆石颗粒较大($70\sim 250\ \mu\text{m}$), 晶形较好, 为短柱状和不规则形状, 柱状晶体长宽比为 $1:1\sim 3:1$; 锆石成分单一, 具有较好的生长环带和韵律结构(图 4), 锆石核部与增生边的接触边界较规则, 说明锆石增生边主要是在原锆石基础上增生的结果。增生后的锆石呈明显的自形晶, 其完整颗粒的长边一般大于 $150\ \mu\text{m}$, 锆石的增生边为热液产物(HOSKIN et al., 2003; 王金荣等, 2006; 朱永峰等, 2006)。

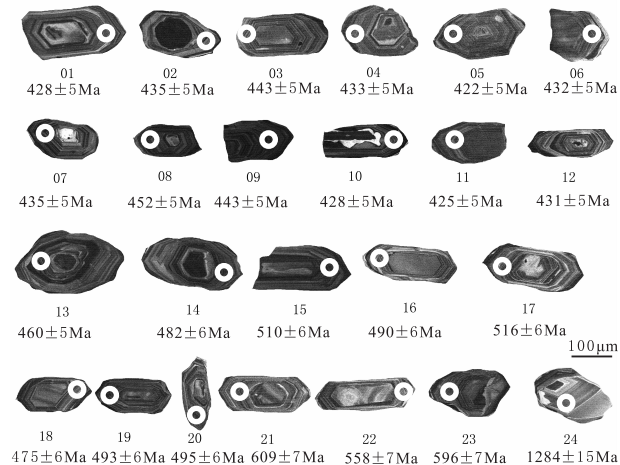


图 4 多坝沟金矿石锆石 CL 图像

Fig. 4 CL imaging of zircons from Duobagou gold ore

DTW04 样品共测试 24 个锆石点(表 3、图 4)。锆石点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 $422\sim 1\ 284\ \text{Ma}$, 锆石在后期变质作用和热液活动中增生, 下交点为 $(441\pm 28)\ \text{Ma}$, 上交点为 $(1\ 224\pm 83)\ \text{Ma}$ 。由于 DTW04 样品锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值跨度较大, 主要对较为集中的数据点进行加权平均计算, 其中 4 个点(24、21、22、23)偏老, 最老年龄值为 $1\ 284\ \text{Ma}$, 其余 3 个点(21、22、23)年龄值在 $558\sim 609\ \text{Ma}$, 可能为继承锆石或俘获锆石的年龄; 7 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 $475\sim 516\ \text{Ma}$, 加权平均值为 $(497\pm 13)\ \text{Ma}$ (MSWD=6.5), 代表早期岩浆活动; 其余 13 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄值在 $422\sim$

$460\ \text{Ma}$, 加权平均值为 $(435.9\pm 6.6)\ \text{Ma}$ (MSWD=4.8), 可能是英云闪长岩的形成年龄, 伴随成矿热液活动形成, 与成矿年龄相近(图 5)。

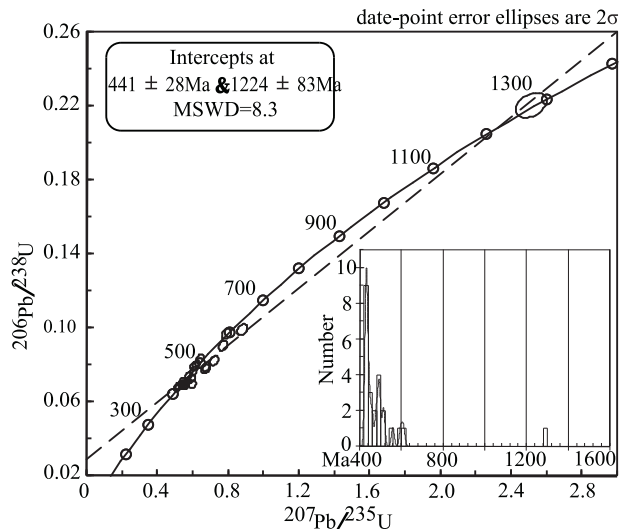


图 5 含金蚀变岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia diagram of zircons U-Pb dating age and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age diagram of the granites from Duobagou

4.2 元素地球化学特征

据多坝沟金矿区岩体主量元素分析结果(表 1), 含金碎裂岩和蚀变岩原岩均为英云闪长岩, 岩石硅化较强, SiO_2 含量与金品位呈正相关, 全碱含量变化大 ($\text{K}_2\text{O} = 0.65\% \sim 5.15\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0.09\% \sim 3.87\%$), TFeO 和 $\text{Mg}^\#$ 均低于原岩, 主要与岩石受热液蚀变有关。弱蚀变英云闪长岩硅含量变化大 ($\text{SiO}_2 = 60.15\% \sim 76\%$), 具富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.98\% \sim 7.84\%$)、铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.66\% \sim 16.22\%$)、全铁 (TFeO = $2.49\% \sim 4.89\%$), 岩石中 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 MnO 、 P_2O_5 、均与 SiO_2 呈负相关性。在岩石 R1-R2 分类图解(图 6)中, 英云闪长岩样品主要落在英云闪长岩和正长花岗岩区域, A/NK 为 $1.43\% \sim 1.83\%$, A/CNK 为 $0.96\% \sim 1.49\%$, 准铝质和过铝质均可见(图 7), 以准铝质为主, 过铝质样品可能与后期岩石蚀变有关。在岩浆岩系列 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上(图 8), 主要落入高钾钙碱性系列。

闪长岩的 SiO_2 为 $48.67\% \sim 50.50\%$, 高 Al_2O_3 ($18.74\% \sim 20.88\%$)、全铁 (TFeO = $8.65\% \sim 9.29\%$)、 MgO ($2.62\% \sim 3.7\%$)、 CaO ($3.84\% \sim$

8.93%)。闪长岩样品在 R1-R2 分类图解(图 6)主要落在二长闪长岩和辉长岩区域,主要与后期构造及蚀变有关。

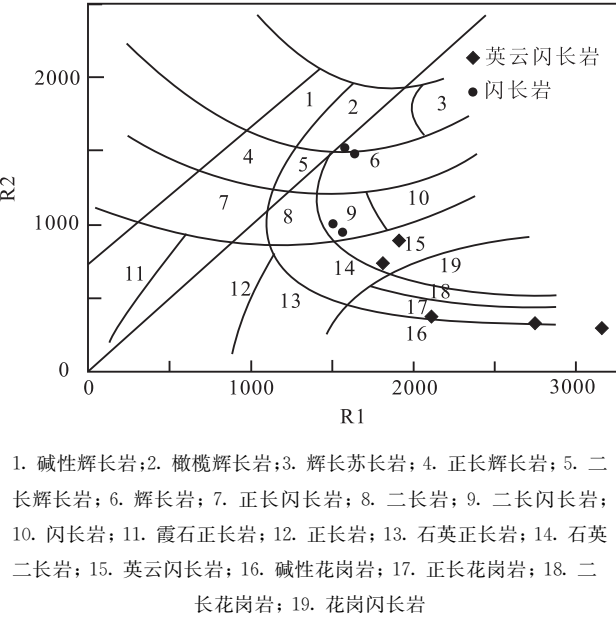


图 6 多坝沟金矿区花岗杂岩体 R1-R2 分类图
(据 DE LA Roche et al. ,1980)

Fig. 6 The R1-R2 classification diagram of granites from Duobangou gold field (After DE LA Roche et al. , 1980)

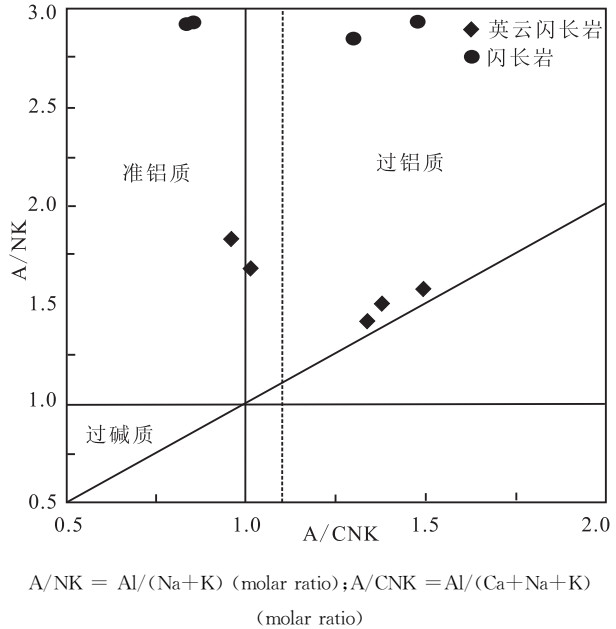
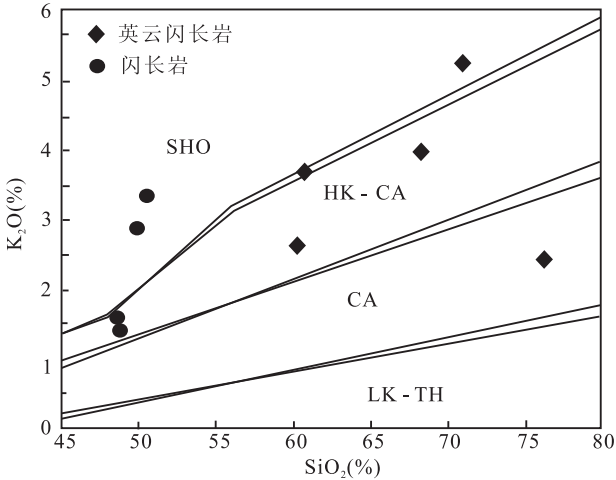


图 7 多坝沟花岗杂岩 A/NK-A/CNK 图解
(据 MANIAR et al. ,1989)

Fig. 7 A/NK-A/CNK discrimination diagrams of Duobangou granite(After MANIAR et al. , 1989)



SHO. 钾玄岩系列;HK-CA. 高钾钙碱性系列;CA. 钙碱性系列;LK-TH. 低钾(拉斑)系列

图 8 多坝沟花岗杂岩系列判别图解(据 COLLINS et al. ,1982)
Fig. 8 Discrimination diagrams of Duobangou granite series
(After COLLINS et al. , 1982)

稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈右倾样式(图 9),表明含金蚀变岩、弱蚀变英云闪长岩和闪长岩可能为同源岩浆,但因侵入时代和热液交代程度的差异而显示出稀土元素特征的差异性。弱蚀变英云闪长岩与闪长岩 ΣREE 均较低($34.78 \times 10^{-6} \sim 117.30 \times 10^{-6}$),英云闪长岩具有高的轻重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE} = 8.09 \sim 13.00$,平均值为 11.20), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 10.79 $\sim$ 23.80,极度富集轻稀土;而闪长岩具有相对较低的轻重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE} = 5.12 \sim 5.66$,平均值为 5.38), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 3.97 $\sim$ 5.13,富集轻稀土。其中英云闪长岩显示 Eu 弱负异常($\delta\text{Eu} = 0.86 \sim 1.02$); $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 1.86 $\sim$ 3.91, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 3.14 $\sim$ 4.13,轻重稀土元素分馏明显,显示出重稀土比轻稀土分馏更显著。闪长岩显示出 Eu 无和弱正异常($\delta\text{Eu} = 1.00 \sim 1.07$); $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 2.33 $\sim$ 3.11, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.12 $\sim$ 1.23,轻重稀土元素分馏明显,但显示出轻稀土比重稀土分馏更显著。成矿流体在演化过程中与围岩反应不影响流体本身的稀土元素特征(GU et al. , 2007),赋矿岩石在后期热液流体作用下,交代蚀变,但基本保持原岩的元素变化特征和规律,含金蚀变岩 ΣREE 较低($12.93 \times 10^{-6} \sim 53.73 \times 10^{-6}$),具有高的轻重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE} = 7.31 \sim 10.34$,平均值为 8.91,

(La/ Yb)_N为 10.21~ 18.73,极度富集轻稀土,显示 Eu 正异常($\delta\text{Eu}=0.91 \sim 1.45$);(La/ Sm)_N为 1.72~ 3.45,(Gd/ Yb)_N为 2.94~ 4.17,轻重稀土

元素分馏明显,显示出重稀土比轻稀土分馏更显著。含金蚀变岩原岩以英云闪长岩为主,轻重稀土元素分馏特征进一步表明金矿石与英云闪长岩的密切关系。

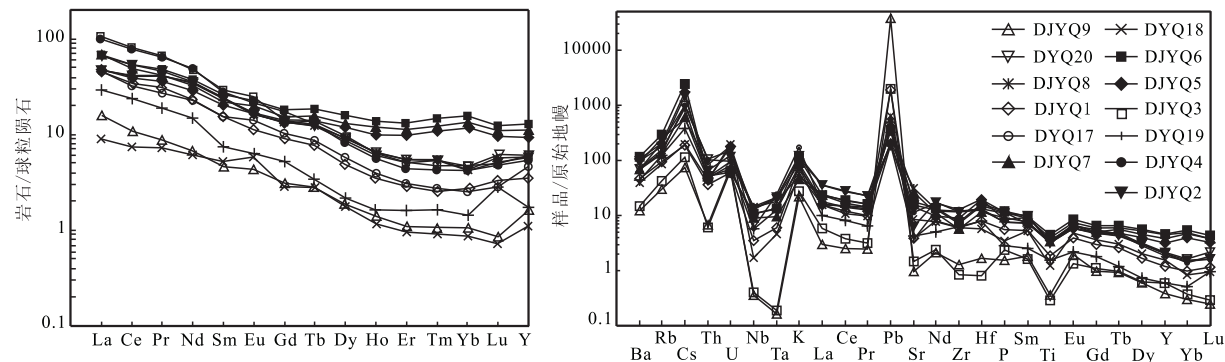


图9 多坝沟金矿区花岗岩类稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图(标准化值据 SUN et al. ,1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the Duobagou granite(Standardized values after SUN et al. , 1989)

弱蚀变英云闪长岩的微量元素显示出高 Pb、Zn、F 和较高的 Sr、Ba、W、Ga 含量,低 Y、Yb、Nb、Ta 含量。闪长岩的微量元素显示出高 Sr、Zn、Li、Sc、F 和较高的 Pb、Ba、W、Ga 含量,较低 Y、Yb、Ta 含量。各类岩石在微量元素原始地幔标准化蛛网图均呈现略微右倾的锯齿状,明显富集 Rb、Cs、K、Ba、Pb 等大离子亲石元素和高场强元素 U,相对亏损 Nb、Ta、Ti、Sr,其中含金蚀变岩强烈富集 Pb,强烈亏损 Nb、Ta 和 Ti 等(图 9)。

4.3 O 同位素特征

火成岩中 O 同位素组成总的变化范围为 $\delta^{18}\text{O}=5\text{‰}\sim 13\text{‰}$,且具有从基性岩到酸性岩, $\delta^{18}\text{O}$ 值依次增大。控制火成岩氧同位素组成的变化因素很多(郑永飞等,2003;魏春生等,1999),主要有:不同岩浆源区岩石的同位素组成;不同 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆的混合;岩浆结晶时的封闭效应;岩浆结晶时的开放效应;矿物之间的不平衡同位素分馏;岩浆上升期间的去挥发分作用等。一般认为花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 能够反映源区物质来源或后期叠加的地质作用等,同一岩浆源区,温度越高,同位素分馏越弱, $\delta^{18}\text{O}$ 就越低。多坝沟金矿区金矿石和闪长岩的全岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}\text{‰}$ 为 $11.0\text{‰}\sim 13.4\text{‰}$ (表 4),反映源区物质以较高成熟度地壳为主。多坝沟金矿区花岗杂岩中闪长岩与英云闪长岩为同源岩浆演化产物,但闪长岩早于英云闪长岩侵入,闪长岩的全岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}\text{‰}$ 为

11.0‰ ,推测英云闪长岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}\text{‰}>11.0\text{‰}$,金矿石的高的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 可能与天水的参与有关。

含金蚀变岩的矿化蚀变强度与 Au 品位具有正相关性,且金品位越高,Sr 含量越低,与斜长石蚀变,部分元素迁移有关;Au 品位越高,全岩 O 同位素含量高,表明成矿流体活动强烈,同时伴随天水的参与。

表 4 多坝沟金矿区岩石 O 同位素数据表
Tab. 4 Oxygen isotope data of granites
from Duobagou gold field

序号	样品号	岩性	Sr(10 ⁻⁶)	Au(10 ⁻⁶)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}\text{‰}$
1	DJYQ1	强黄铁绢英岩化强 碎裂状花岗岩	80.2	5.68	12.3
2	DJYQ5	蚀变糜棱岩化细粒 闪长岩	309	0.006	11.0
3	DJYQ9	角砾状硅质蚀变岩	21	71.6	13.4
4	DJYQ17	强硅化英云闪长岩	77.9	1.94	12.7

5 讨论

5.1 岩石成因

多坝沟金矿区花岗杂岩体为新填绘的地质体,前人未开展过研究工作,通过 LA-CIP-MS 锆石 U-Pb 测得闪长岩的成岩年龄为 $(497\pm 13)\text{Ma}$ (MSWD=6.5),为寒武纪晚期。英云闪长岩成岩年龄为 $(435.9\pm 6.6)\text{Ma}$ (MSWD=4.8),为志留纪

早期。区域上这一时期的中酸性岩体主要出露在工作区西侧,大平沟地区出露的花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄(485 ± 10)Ma(陈柏林等,2005);贝克滩以北恰什坎萨依花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为(481.5 ± 5.3)Ma(戚学祥等,2005);苏吾什杰花岗闪长岩岩体 Rb-Sr 等时线年龄为(491.3 ± 4.6)Ma(崔军文等,1999);阿尔金北缘克孜勒乌增细粒闪长岩体锆石 U-Pb(TIMS 法)年龄为(472 ± 0.8)Ma,苦水河南岸的片麻状花岗闪长岩的锆石 SHRIMP 法测定,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面加权平均值为(470 ± 14)Ma,均为奥陶纪,显示出岛弧构造环境的特征(刘永顺等,2009)。南阿尔金茫崖镇北石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(466 ± 5)Ma,阿卡龙山花岗岩为(469 ± 6)Ma,岩石均具有岛弧火成岩的地球化学属性,形成可能与洋壳的俯冲作用有关(吴才来等,2014)。这些岩体的常量元素、微量和稀土元素特征均显示了较为典型的岛弧型花岗岩的性质,证实区域上 500~466 Ma 存在岛弧岩浆活动的记录。拉配泉地区阔实布拉克似斑状二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(443 ± 5)Ma(陈宣华等,2003);毛德宝等(2003)在克孜勒塔斯似斑状二长花岗岩中获得单颗粒锆石 U-Pb TIMS 测年结果为(437.9 ± 0.8)Ma;吴才来等(2005,2006)在斯米尔布拉克花岗岩中获得(434.6 ± 1.61)Ma,巴什考供盆地南缘花岗岩体中获得(434.5 ± 3.8)Ma 和(431.1 ± 3.0)Ma,这些花岗岩主要形成于造山带晚期。

多坝沟金矿区的花岗杂岩体中闪长岩作为英云闪长岩体的围岩,存在侵位时差,但微量元素和稀土元素显示出同源岩浆的特征,明显富集 Rb、Cs、K、Ba、Pb 等大离子亲石元素和高场强元素 U,相对亏损 Nb、Ta、Ti、Sr,含金蚀变岩亏损更为强烈,均指示地壳物质对岩浆的作用。多坝沟金矿区花岗岩类 Nb/La 值较低(0.07~0.66),尤其含金蚀变岩更低(0.07~0.23),表明岩体源区有部分陆壳物质的参与。岩体的 Nb/Ta 值为 4.60~18.53,平均为 12.86,明显低于幔源岩石(17.5 ± 2)(HOFMANN,1988; GREEN,1995),而较为接近陆壳岩石(11 左右)(TAYLOR et al.,1985; GREEN,1995);Zr/Hf 值为 16.24~39.15,平均为 26.67,仅有含金蚀变岩中一个样大于 36,低于幔源岩石(36.27 ± 2)(HOFMANN,1988; GREEN,1995),而接近壳源岩石

(33 左右)(TAYLOR et al.,1985; GREEN,1995)。以上特征均表明该杂岩体可能主要为地壳物质部分熔融形成。在 Sr-Yb 图解(图 10)中,含金蚀变岩均落入喜马拉雅型花岗岩区,英云闪长岩基本落入喜马拉雅型花岗岩区内,仅有一个样在埃达克型与喜马拉雅型重叠区,闪长岩基本落入埃达克型和广西型花岗岩重叠区,表明多坝沟金矿区花岗岩类具有埃达克型和喜马拉雅型花岗岩特征,其中闪长岩显示出高 Sr 低 Yb,产于加厚地壳,由于位于埃达克型与广西型重叠区,指示源区成岩温度属偏高温系列;英云闪长岩显示低 Sr 低 Yb,产于较厚地壳,成岩温度属低温系列。通过 TiO_2 - SiO_2 图解和 P_2O_5 - SiO_2 图解(图 11)判断,英云闪长岩的成岩温度在 700~900℃,与张旗(2014)确定的喜马拉雅型花岗岩的温度范围相近,形成的压力范围约 1~1.5GPa;由于闪长岩样糜棱岩化及蚀变作用影响, SiO_2 含量位于基性岩范围,在图解中无法表达出真实成岩温度,但结合张旗(2014)对不同类型花岗岩形成的温压条件分析,闪长岩的成岩温度在 900~1100℃,其压力范围高于英云闪长岩的范围。由于闪长岩与英云闪长岩在地球化学特征上显示出同源岩浆的特征,却在源区温度和压力上具有较大差异,说明自 497 Ma 至 435.9 Ma 之间发生了较为连续的构造环境的演化过程。

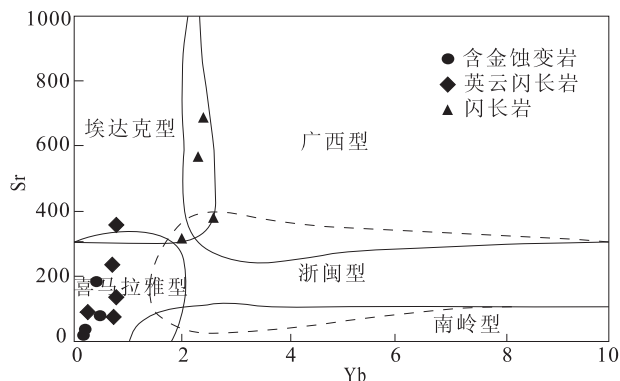


图 10 多坝沟金矿区花岗岩类 Sr-Yb 图解(据张旗,2014)

Fig. 10 Sr-Yb diagram of Duobagou granites

(After ZHANG Qi, 2014)

多坝沟地区位于塔里木盆地南缘,红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带的北侧,侵入作用受构造控制。在区域构造演化上,塔里木地区在太古宙形成古陆核,古元古代超大陆汇聚,初始陆壳开始形成,古元古代

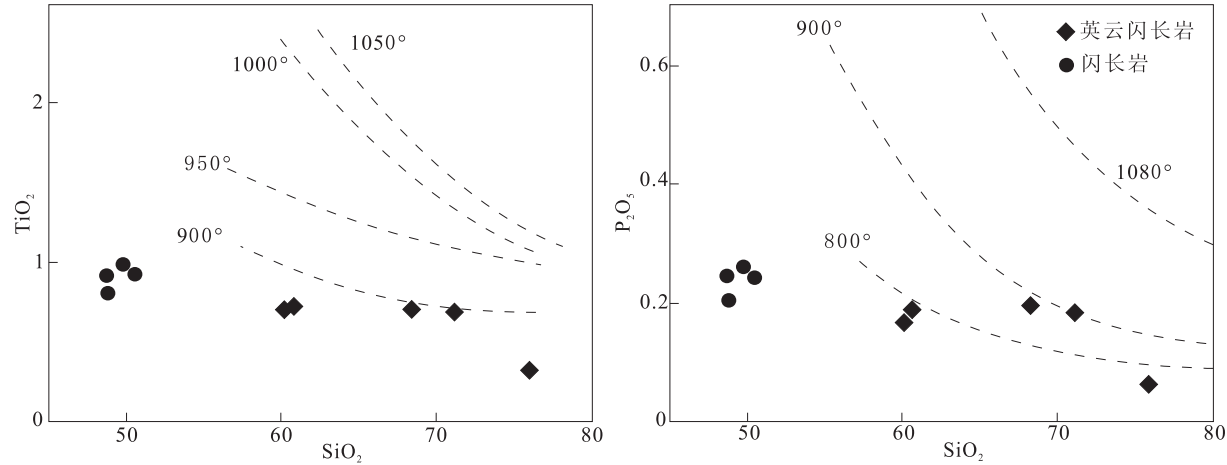


图 11 花岗岩类 TiO₂-SiO₂ 图解 (GREEN et al. , 1986) 和 P₂O₅-SiO₂ 图解 (HARRISON et al. , 1984)

Fig. 11 TiO₂- SiO₂ diagram (GREEN et al. , 1986) and P₂O₅-SiO₂ diagram (HARRISON et al. , 1984)for Duobagou granites

晚期至中元古代,伴随超大陆裂解,塔里木盆地南缘形成一系列火成岩。随后,新元古代构造热事件,在阿尔金北缘和塔里木盆地南缘经历了 Rodinia 超大陆的汇聚和裂解,形成的岩石受后期构造作用变形较强,如阿尔金南缘断裂北侧的野马滩北呈透镜体状的片麻状二长花岗岩²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为(831±82)Ma,属板块碰撞后伸展环境下形成(刘永顺等,2009)。早古生代早期发生了大规模的俯冲碰撞作用,多坝沟金矿区花岗杂岩在 Ta-Yb, Nb-Y, Rb-(Yb+Ta) 和 Rb-(Y+Nb) 判别图解(图 12)中均位于火山岛弧花岗岩区,为这一时期岩浆活动的产物,由于拉配泉地区这一时期的俯冲碰撞,塔里木地块与柴达木地块发生斜向碰撞,产生大规模的走滑作用,虽然 450~400 Ma 间大规模俯冲碰撞事件的结束(刘永顺等,2009),但深部软流圈相对于岩石圈继续运动,促使岩石圈内部发生大规模的拆离,早期俯冲深部的地壳岩石在达到麻粒岩相-角闪岩相的温压条件下,发生部分熔融,形成具有火山岛弧型闪长质-石英闪长质-英云闪长质岩浆,多坝沟金矿区英云闪长岩为这一时期形成。

总之,区域上早古生代中酸性岩浆活动主要集中在 2 个阶段,第一阶段:500~466 Ma,显示出火山岛弧火成岩的地球化学特征,可能与阿尔金俯冲带有关,俯冲碰撞事件进入强烈的活动期。第二阶段:443~431 Ma,是大规模碰撞造山活动相对减弱,斜向俯冲引发构造应力的转换阶段,依然具岛弧火成岩地球化学特征,这一时期花岗岩形成的压力

由于碰撞事件减弱和大规模走滑作用的补充而保持较高压力状态,但成岩温度较低。多坝沟韧-脆性变形带发生于英云闪长岩侵位之后,在早古生代板块碰撞的大地构造背景条件下,反映了板块俯冲碰撞过程中基底岩块的变形特点。

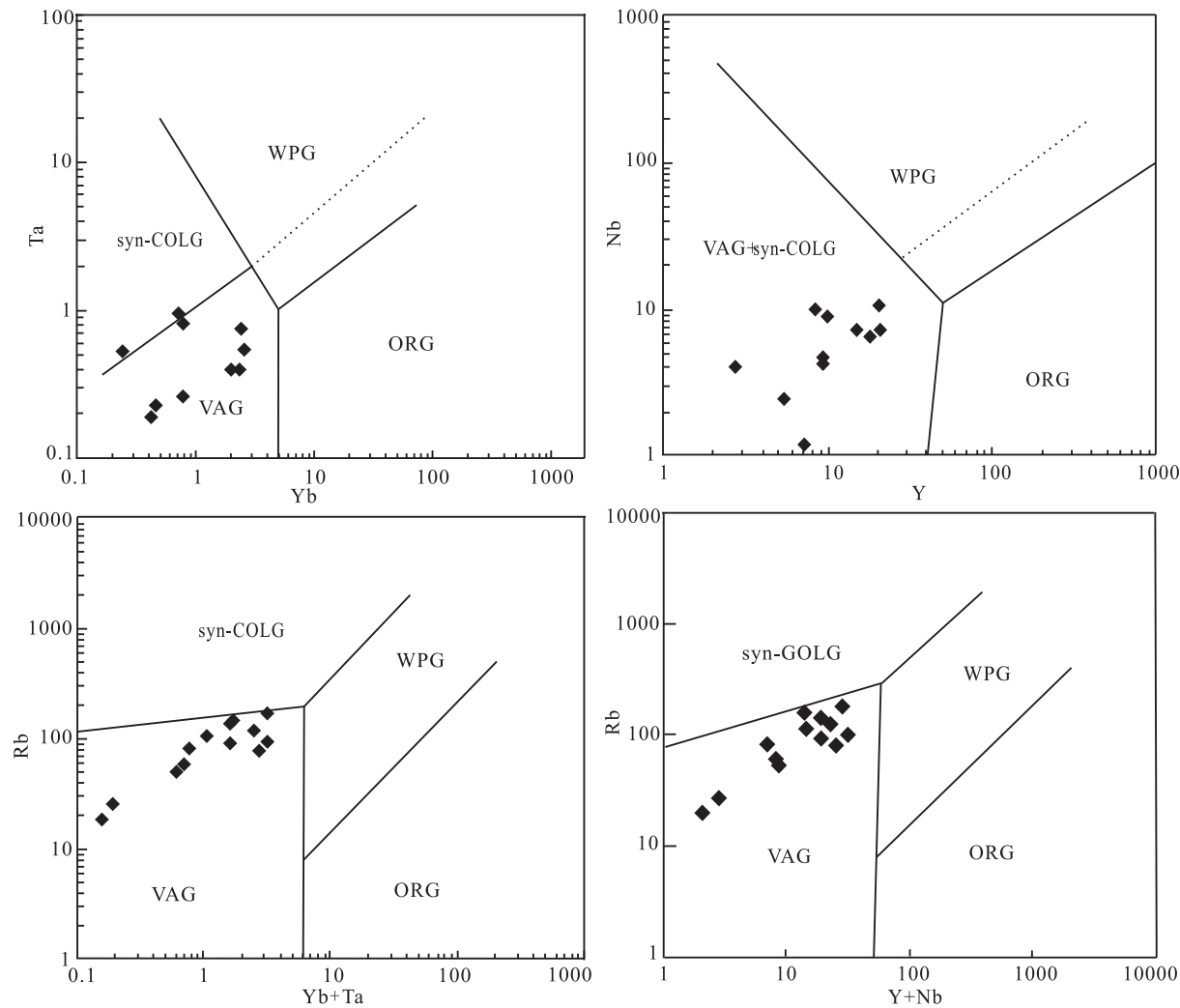
5.2 找矿意义

多坝沟金矿是塔里木盆地东南缘新发现的一处具有一定规模的矿床,矿区出露地层为敦煌岩群第三、四岩组,二云石英片岩、变质砾岩及长石石英变粒岩等,闪长岩和英云闪长岩侵位于其中,发育北西向断层,矿体发育在英云闪长岩体与闪长岩体的接触带中,受北西向断层控制。花岗杂岩体中蚀变英云闪长岩是金矿主要含矿地质体,受后期构造热液改造形成含金蚀变岩。

含金蚀变岩原岩以英云闪长岩为主,但也发现蚀变较强的闪长岩中含金品位较高。金矿石呈碎裂结构,网脉状、星点状和浸染状构造。矿石矿化蚀变主要有黄铁矿化、硅化、绢云母化,局部可见黄铜矿化等,矿石中伴生银,局部矿体共生钨钼矿体。主要金属矿物有黄铁矿、针铁矿及纤铁矿,其次为褐铁矿等;脉石矿物为石英、长石、绢云母、方解石等。部分矿化地段可见方铅矿、辉钼矿、白钨矿等,表明矿床形成于中高温热液活动阶段。金矿区构造导矿、控矿作用显著,对成矿有利或破坏作用的构造至少有 4 期,并伴随热液活动,其中有两期断裂作用对金成矿贡献较大,在钻孔中发现岩石浅部以碎裂岩化为主,深部存在糜棱岩化现象,矿体在走向和延深方向

均呈现膨胀收缩或尖灭再现,显示成矿与区域性构造作用有关。通过矿区脉体含矿性研究发现该金矿含矿主岩体与后期脉体相关性差,后期热液活动中

并未携带高于主体的含金流体,而是将含矿主岩体中的金活化后,携金迁移,早期的热液活动相对较强,但含金性不及中晚期热液活动。



ORG. 洋脊花岗岩;WPG. 板内花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;syn-COLG. 同碰撞花岗岩

图 12 多坝沟金矿区花岗岩类构造环境判别图解(据 PEARCE et al. ,1984)

Fig. 12 Discrimination diagrams of tectonic setting for Duobagou granites(After PEARCE et al. ,1984)

早古生代,塔里木东南缘和阿尔金北缘在区域构造演化过程中经历了板块构造离散后的俯冲碰撞以及伴随的大规模走滑作用等,分布有一定规模的早古生代中酸性岩体,尤其以埃达克型和喜马拉雅型花岗岩类与金铜等多金属矿成矿关系最为密切,阿尔金北缘大平沟金矿床是一处中温动力变质热液矿床,石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为(487±21)Ma(陈柏林等,2005),与第一阶段中酸性岩浆活动时间相近,这一时期还有红柳沟铜金矿床(李月臣

等,2007)。多坝沟金矿石与英云闪长岩的稀土和微量元素特征指示矿床形成与英云闪长岩成岩时代相近或稍晚,属第二阶段中酸性岩浆活动的产物,阿尔金北缘祥云金矿床、拉配泉铜矿床和索尔库里北山铜银矿床等均形成于这一时期(李月臣等,2007)。根据成矿热液成因差异和成矿时代,划分 2 个成矿阶段,第一阶段为 500~466 Ma,大平沟金矿床和红柳沟铜金矿床为代表的韧性剪切带型矿床,其热液以动力变质热液为主;第二阶段为 443~431 Ma,多

坝沟金矿床和祥云金矿床为代表的构造蚀变岩型矿床,其热液以动力变质热液为主,以及以索尔库里北山铜矿床和拉配泉铜矿床为代表的岩浆热液型矿床。

6 结论

(1)塔里木盆地东南缘多坝沟金矿区出露两期中酸性岩浆岩,均具有岛弧火山岩特征;闪长岩形成时代为 (497 ± 13) ,英云闪长岩形成时代为 (435.9 ± 6.6) Ma,其中闪长岩具有埃达克质岩性质,成岩温度在 $900 \sim 1100^{\circ}\text{C}$;英云闪长岩具有喜马拉雅型花岗岩特征,成岩温度在 $700 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 。多坝沟金矿金矿石岩性为英云闪长质碎裂岩,矿体赋存于英云闪长岩体内部构造蚀变带中,金矿成矿与英云闪长岩更为密切,成矿时代晚于英云闪长岩成岩时代。

(2)早古生代,塔里木盆地东南缘—阿尔金北缘发生2个主要成岩成矿阶段,第一阶段为 $500 \sim 466$ Ma,以动力变质热液为主要成矿特征;第二阶段为 $443 \sim 431$ Ma,以岩浆热液和动力变质热液为主要成矿特征。

(3)结合区域构造演化特征,围绕早古生代两期主要成岩成矿阶段形成的具有埃达克型和喜马拉雅型的花岗岩,开展以金铜矿为主的找矿工作有望取得新的突破。

参考文献(References):

崔军文,唐哲民,邓晋福,等. 阿尔金断裂系[M]. 北京:地质出版社,1999:39-66.

CIU Junwen, TANG Zhemin, DENG Jinfu, et al. Altyn Tagh Fault System[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999:39-66.

陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 等. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 294-298.

CHEN Xuanhua, GEHRELLS G, WANG Xiaofeng, et al. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb geochronology and tectonic setting[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(4): 294-298.

毛德宝, 王克卓, 钟长汀, 等. 阿尔金成矿带主要成矿系列及其地质特征[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 1-5.

MAO Debao, WANG Kezhao, ZHONG Changting, et al. Metallogenic series and geological characteristics in the Altun metallogenic belt[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 1-5.

陈正乐, 万景林, 王小凤, 等. 阿尔金断裂带 8Ma 左右的快速走滑及其地质意义[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 295-300.

CHEN Zhengle, WAN Jinglin, WANG Xiaofeng, et al. Rapid strike-slip of Altyn Tagh Fault an 8 Ma and its geological implications[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 295-300.

杨屹, 陈宣华, George Gehrels, 等. 阿尔金山早古生代岩浆活动与金成矿作用[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 464-472.

YANG Yi, CHEN Xuanhua, GEHRELLS G, et al. Early Paleozoic magmatism and gold metallogenesis in Altun Mountains, Northwest China[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(4): 464-472.

戚学祥, 吴才来, 李海兵. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 859-866.

QI Xuexiang, WU Cailai, LI Haibing. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the Northern Altyn Tagh mountains and its significations[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 859-866.

刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 2009, 28(10): 1430-1438.

LIU Yongshun, YU Haifeng, XIN Houtian, et al. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(10): 1430-1438.

吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等. 北阿尔金巴什供烘盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 846-858.

WU Cailai, YANG Jingsui, YAO Shangzhi, et al. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 846-858.

吴才来, 姚尚志, 杨经绥, 等. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1197-1208.

WU Cailai, YAO Shangzhi, YANG Jingsui, et al. Double subduction of the Early Paleozoic North Qilian oceanic plate: Evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China[J]. Geology in China, 2006,

33(6):1197-1208.

吴才来, 鄯源红, 雷敏, 等. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2297-2323.

WU Cailai, HAO Yuanhong, LEI Min, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu-Hf isotopic characteristics and Petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2297-2323.

董洪凯, 郭金城, 陈海燕, 等. 新疆阿尔金地区长沙沟一带奥陶纪侵入岩及其演化特征[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 73-87.

DONG Hongkai, GUO Jincheng, CHEN Haiyan, et al. Evolution characteristics of Ordovician intrusive rock in Changshagou of Altun region[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 73-87.

刘鑫, 朱志新, 朱彦菲, 等. 新疆铁克里克西段都维吐卫岩体年代学, 岩石地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 128-140.

LIU Xin, ZHU Zhixin, ZHU Yanfei, et al. Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Duweituiwei Granite in Western Tieklike of Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 128-140.

李厚民, 沈远超, 胡正国, 等. 青海东昆仑五龙沟金矿床成矿条件及成矿机理[J]. 地质与勘探, 2001, 37(1): 65-69.

LI Houmin, SHEN Yuanchao, HU Zhengguo, et al. Mineralogical mechanism and condition of Wulonggou Gold deposit in Kun Lun Mountains, Qinghai province[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(1): 65-69.

陈柏林, 陈宣华, 王小凤, 等. 阿尔金北缘地区韧性剪切带型金矿床构造控矿解析[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 235-243.

CHEN Bailin, CHEN Xuanhua, WANG Xiaofeng, et al. Analysis of ore-controlling structure of ductile shear zone type gold deposits in the Northern Altun Area, Northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 235-243.

陈柏林, 杨屹, 王小凤, 等. 阿尔金北缘大平沟金矿床成因[J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 168-178.

CHEN Bailin, YANG Yi, WANG Xiaofeng, et al. Origin of Dapinggou gold deposit in Northern Altun area, Northwestern China[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(2): 168-178.

李学智, 陈柏林, 陈宣华, 等. 大平沟金矿床矿石特征与金的赋存状态[J]. 地质与勘探, 2002, 38(5): 49-53.

LI Xuezhi, CHEN Bailin, CHEN Xuanhua, et al. Ore features and gold occurrence of the Dapinggou gold deposit, Xinjiang, northwest China[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(5): 49-53.

李月臣, 陈柏林, 陈正乐, 等. 阿尔金北缘红柳沟-拉配泉一带铜金矿床硫同位素特征及其意义[J]. 地质力学学报, 2007, 13(2): 131-140.

LI Yuechen, CHEN Bailin, CHEN Zhengle, et al. Sulfur isotope features of Cu-Au polymetallic deposits in the Hongliugou-Lapeiquan area on the northern margin of the Altyn Tagh mountains and their relation to the tectonic evolution[J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13(2): 131-140.

芮宗瑶, 张洪涛, 陈仁义, 等. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 491-500.

RUI Zongyao, ZHANG Hongtao, CHEN Renyi, et al. An approach to some problems of porphyry copper deposits[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 491-500.

温志亮, 吴金刚, 郭周平, 等. 天水地区北秦岭造山带花岗岩地球化学及构造环境探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(6): 505-518.

WEN Zhiliang, WU Jingang, GUO Zhouping, et al. Granite geochemistry and tectonic environments of Tianshui area in north Qinling orogenic belt[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, 27(6): 505-518.

戴雪灵, 邓湘伟, 彭省临, 等. 玲珑花岗岩在大尹格庄金矿成矿系统中的作用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3): 370-379.

DAI Xueling, DENG Xiangwei, PENG Shenglin, et al. Significance of the Linglong granite in the metallogenicsystem of the Dayingezhuang gold deposit in Eastern Shandong province[J]. Geology and Prospecting, 2011, 47(3): 370-379.

王金荣, 贾志磊, 李泰德, 等. 新疆西准噶尔发现早泥盆世埃达克岩: 大地构造及成矿意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 840-852.

WANG Jinrong, JIA Zhilei, LI Taide, et al. Discovery of early Devonian adakite in west Junggar, Xinjiang: Implications for geotectonics and Cu mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 840-852.

张旗. A型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对“A型花岗岩的实质是什么”的质疑[J]. 岩石矿物学, 2013, 32(2): 267-274.

ZHANG Qi. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for “A-type granite: what

- is the essence?"[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2013, 32(2): 267-274.
- 范堡程,李宝强,计文化,等. 吉尔吉斯马克马尔金矿床地质特征及其意义[J]. *西北地质*, 2014, 47(1): 165-170.
- FAN Baocheng, LI Baoqiang, JI Wenhua, et al. Geological characteristics and significance of Makmal gold deposit, Kyrgyzstan[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(1): 165-170.
- 杜亚龙,李智明,姜寒冰,等. 新疆卡特巴阿苏金铜矿床地质特征及构造环境[J]. *地质与勘探*, 2016, 52(1): 98-107.
- DU Yalong, LI Zhiming, JIANG Hanbing, et al. Geological characteristics and tectonic setting of the Katbasu Au-Cu deposit in Xinjiang[J]. *Geology and Prospecting*, 2016, 52(1): 98-107.
- 李晶,许英霞,申萍,等. 哈图金矿带成矿流体组分、硫同位素分析及矿床成因[J]. *地质与勘探*, 2016, 52(2): 199-208.
- LI Jing, XU Yingxia, SHEN Ping, et al. Ore-forming fluid composition, sulfur isotope analysis and genesis of the Hatu gold metallogenic belt in Xinjiang[J]. *Geology and Prospecting*, 2016, 52(2): 199-208.
- 张建新,李怀坤,孟繁聪,等. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件:锆石 U-Pb 年代学的制约[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 23-46.
- ZHANG Jianxin, LI Huaikun, MEN Fancong, et al. Poly-phase tectonothermal events recorded in “metamorphic basement” from the Altyn Tagh, the southeastern margin of the Tarim basin, western China: Constraint from U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 23-46.
- 陆松年,袁桂邦. 阿尔金山克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(1): 61-68.
- LU Songnian, YUAN Guibang. Geochronology of early Precambrian magmatic activities in Aketashitage, east Altyn Tagh[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 61-68.
- 刘东晓,王玉玺,王金荣,等. 塔里木盆地东南缘早二叠世角闪岩的发现及大地构造意义[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2016, 52(2): 167-178.
- LIU Dongxiao, WANG Yuxi, WANG Jinrong, et al. Discovery and tectonic significance of early Permian hornblende in the southeastern margin of the Tarim Plateau[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2016, 52(2): 167-178.
- 王玉玺,王金荣,周小玲,等. Columbia 超大陆裂解:来自塔里木克拉通东南缘大红山 A 型花岗岩的证据[J]. *地质学报*(待刊).
- WANG Yuxi, WANG Jinrong, ZHOU Xiaoling, et al. The cracking of Columbia supercontinent from the evidence of the Dahongshan A-type granites in the southeastern Tarim craton[J]. *Acta Geologica Sinica* (Accepted).
- 王金荣,吴春俊,蔡郑红,等. 北祁连山带东段银洞梁早古生代高镁埃达克岩:地球动力学及成矿意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(11): 2655-2664.
- WANG Jinrong, WU Chunjun, CAI Zhenghong, et al. Early Paleozoic high-Mg adakite from Yindongliang in the eastern section of the North Qilian: Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(11): 2655-2664.
- 朱永峰,宋彪. 新疆塔格尔德岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究:兼论花岗岩中热液锆石边的定年[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 135-144.
- ZHU Yongfeng, SONG Biao. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon rim in granite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 135-144.
- 郑永飞,龚冰,赵子福,等. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质:锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(2): 110-119.
- ZHENG Yongfei, GONG Bin, ZHAO Zifu, et al. Protolith characteristics of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 110-119.
- 魏春生,郑永飞,赵子福. 苏州 A 型花岗岩氢氧同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 224-236.
- WEI Chunsheng, ZHENG Yongfei, ZHAO Zifu. The hydrogen and oxygen isotope geochemistry of the Suzhou A-type granite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2): 224-236.
- 张旗. 大陆花岗岩的地球动力学意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(4): 785-798.
- ZHANG Qi. Geodynamic implications of continental granites[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2014, 33(4): 785-798.
- ZHANG Jianxin, MATTINSON C G, YU Shengyao, et al. Combined rutile-zircon thermometry and U-Pb geochronology: New constraints on Early Paleozoic HP/UHT granulite in the South Altyn Tagh, north Tibet, China[J]. *Lithos*, 2014, 200-201(1): 241-257.
- HE Zhenyu, ZHANG Zeming, ZONG Keqing, et al. Metamorphic P-T-t evolution of mafic HP granulites in the northeastern segment of the Tarim Craton (Dunhuang

- block): Evidence for early Paleozoic continental subduction[J]. *Lithos*, 2014, 196(5):1-13.
- JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1): 47-69.
- VAN A E, RYAN C G, JACKSON S E, et al. Data reduction software for LA-ICP-MS in the Earth Sciences[J]. *Mineralogical Association of Canada*, 2001, 29: 239-243.
- ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1):59-79.
- LUDWIG K R. Mathematical-statistical treatment of data and errors for $^{230}\text{Th}/\text{U}$ geochronology[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 52(1): 631-656.
- HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- DE LA R H, LETERRIER J, GRANDE C P et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses-its relationship and current nomenclature[J]. *Chemical Geology*, 1980, 29, 183-210
- MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- COLLINS W J, BEAMSS D, WHITE A J K, et al. Nature and origin of a type granites with articular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 1982, 80:189-200.
- GU X, SCHULZ O, VAVTAR F, et al. Rare earth element geochemistry of the Woxi W-Sb-Au deposit, Hunan Province, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1):319-336.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1):313-345.
- HOFMANN A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1988, 90(3):297-314.
- GREEN T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4):347-359.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. *Blackwell Scientific Pub. Palo Alto, CA (United States)*, 1985.
- GREEN T H, PEARSON N J. Ti-rich accessory phase saturation in hydrous mafic-felsic compositions at high P, T [J]. *Chemical Geology*, 1986, 54(3-4): 185-201.
- HARRISON T M, WATSON E B. The behavior of apatite during crustal anatexis: equilibrium and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1467-1477.
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.