

南祁连裕龙沟岩体 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

张照伟^{1,2}, 李文渊¹, 高永宝^{1,2}, 张江伟¹, 郭周平¹, 李 侃¹

ZHANG Zhao-wei^{1,2}, LI Wen-yuan¹, GAO Yong-bao^{1,2},

ZHANG Jiang-wei¹, GUO Zhou-ping¹, LI Kan¹

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学资源学院, 陕西 西安 710054

1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. College of Earth Science and Resources, Chang'an University Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:日月山—化隆地区的基性—超基性岩带发育有多个与铜镍矿化有关的岩体, 岩石类型主要有角闪辉长岩、辉长岩、苏长岩、辉石岩、辉橄岩、橄榄岩等。通过对裕龙沟岩体的实地调查和研究, 利用 ID-TIMS(同位素稀释热电离质谱法)对岩体进行锆石 U-Pb 同位素定年, 获得成岩年龄 $442.7\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$, 为加里东期。岩石地球化学特征分析和区域对比研究表明, 裕龙沟岩体为一铁质系列的基性—超基性岩类型的杂岩体, 岩体分异好, 有用元素 Ni、Cu、Co 丰度高, 为有利成矿的岩体; 440Ma 左右整个祁连地区正处于由俯冲造山向碰撞造山过渡的转换时期, 随着拉脊山小洋盆的闭合, 进入陆内造山阶段, 在后碰撞伸展环境中形成裕龙沟等基性—超基性侵入岩体。结合其它岩体信息认为, 该岩带中的岩体可能形成于同一时期, 有其特殊的动力学机制和演化过程。这期伸展裂解事件与成矿关系非常密切, 因此对其研究具有非常重要的现实意义。

关键词: ID-TIMS 定年; 成矿岩体; 铜镍矿; 裕龙沟; 南祁连

中图分类号: P597+.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)02/03-0455-08

Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, Zhang J W, Guo Z P, Li K. ID-TIMS zircon U-Pb age of Yulonggou intrusive rocks in southern Qilian Mountain and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3):455-462

Abstract: The Riyueshan-Hualong basic-ultrabasic rock belt has a number of well-developed intrusive bodies composed mainly of amphibole gabbro, gabbro, norite, pyroxenite, augite peridotite and peridotite, which are related to copper-nickel mineralization. This paper reports some achievements made in evaluation of magmatic type copper-nickel ore resources potential in Hualong County, Qinghai Province, on the basis of field survey and investigation of Yulonggou intrusive body. ID-TIMS U-Pb dating of zircon from the Yulonggou intrusive body yielded an age of $442.7\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$. Petrologic and geochemical characteristics and regional comparative investigation show that Yulonggou intrusive body is a ferruginous series ultrabasic-basic complex characterized by good magmatic differentiation and high abundance of useful elements such as Ni, Cu and Co, therefore favorable for mineralization. 440 Ma was in the period when subduction orogeny was converted into collision orogeny in the whole Qilian Mountain and then into the orogenic stage with the closure of Laji Mountain small ocean basin, thus forming Yulonggou basic-ultrabasic intrusive body in a post-collision extensional environment. A comparison of information with other intrusive rocks in Riyueshan-Hualong basic-ultrabasic rock belt reveals that all the intrusive rocks might have been formed in the same period, characterized by specific dynamic mechanism and evolution process. This extensional rifting event had a very close relationship with mineralization, so the research has very important practical significance.

Key words: ID-TIMS dating; ore rock; Ni-Cu deposit; Yulonggou; southern Qilian Mountain

收稿日期: 2011-10-24; 修订日期: 2012-02-02

资助项目: 国家科技支撑重点项目课题《西部优势矿产资源潜力评价体系及集成示范研究》(编号: 2006BAB01A01)、国家自然科学基金基金项目《祁连-龙首山元古宙大火成岩省和巨量铜镍聚集》(批准号: 40772062)和中国地质调查局项目《祁连-龙首山大火成岩省与金川型镍矿关系研究》(编号: 1212010911032)、《青海省化隆县甘都地区铜镍矿调查评价》(编号: 1212010918024)

作者简介: 张照伟(1976-), 男, 在读博士, 助理研究员, 从事岩浆作用矿床和区域成矿研究。E-mail: zhaoweiz@126.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

青海省有 8 条基性—超基性岩带,且多数岩体与成矿关系密切。日月山—化隆基性—超基性岩带,又称化隆微陆块,不仅是青海省 8 条基性—超基性岩带之一,更重要的是多数基性—超基性岩体与铜镍成矿关系密切。20 世纪 60—70 年代,除发现和评价了拉水峡小型铜镍矿床外,还有沙加、关藏沟、乙什春等多处铜镍矿点,青海湖旁的裕龙沟岩体和铜镍矿化点也是其中之一。但由于受以往地质和评价工作手段所限,加之地表大面积被中—新生代地层覆盖,该区的铜镍矿资源潜力问题一直没有搞得很清楚。

位于祁连造山带南东端的日月山—化隆基性—超基性岩带,地层以元古宙化隆群为主。在漫长的地质发展过程中,自元古宙褶皱隆起之后,一直处于稳定的剥蚀区。所以从相对意义上讲,日月山—化隆隆起带具有台型构造的特征。到中新世,该区才接受了古近纪—新近纪沉积,使老的基底构造层覆盖了一层新的红色岩系。化隆岩群一般被划归为新太古代—古元古代或古元古代^[1-5]。但近年来,对其形成时代存在很大争议,有新元古代、中元古代等新的认识^[6-9]。对此,本项目选择了 2 件样品对化隆群黑云斜长片麻岩中的碎屑锆石利用 LA-ICP-MS 方法进行了 U-Pb 同位素测年研究,获得了 900Ma 左右的年龄信息(另文报道)。同样,对于侵入到化隆群中的日月山—化隆基性—超基性岩带的侵入时代也备受争议,有晋宁期和加里东期之说,但都没有精确的年龄数据,多是根据地层穿插和岩体侵入先后顺序推测的。该岩带形成于什么样的构造背景,与哪期构造运动有关,是一个什么样的地球动力学背景?为此本文选择日月山—化隆基性—超基性岩带中典型的裕龙沟岩体为精确定年的对象,通过 ID-TIMS(同位素稀释热电离质谱法)精确定年,旨在阐明岩体的形成时代和侵位的构造背景,解释其地质意义。

1 区域地质背景

研究区在大地构造位置上属祁连褶皱系与松潘—甘孜褶皱系之间的日月山新元古代隆起带西延部分,大板山—团保山复向斜中段。区内广泛出露前震旦系黑云斜长片麻岩、片岩、大理岩、混合岩等一套区域变质岩。岩浆活动频繁,侵入岩广泛分布,构造运动强烈,矿化现象不甚普遍。构造岩带主要地层是元古宙化隆群,其次是少量的中、新生界。化隆群

分布于整个岩带中,北西端起自青海湖北的刚察县,经日月山、拉脊山以南至贵德县的阿什贡,到尖扎、循化黄河沿岸以北的地带,是化隆岩带基性—超基性岩的主要围岩。该群岩性为中深度变质的片岩、片麻岩夹大理岩及石英岩,混合岩化强烈。

裕龙沟岩体出露于南祁连造山带东部的化隆微地块内。北以拉脊山南缘断裂为界,南为青海湖—天水断裂(图 1)。化隆地块由化隆群构成结晶基底,上为古近系和第四系不整合覆盖^[10-11]。元古宙化隆群自下而上分智尔昂、关藏沟和鲁满山 3 个岩组。智尔昂岩组以石英岩为主夹少量钾长石英岩;关藏沟岩组可分为上、中、下 3 个岩性段,主要岩性为薄层石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩与条纹状长英质黑云混合岩,局部夹斜长角闪片岩、混合岩化黑云斜长片麻岩、均质混合岩;鲁满山岩组分为上、下 2 个岩性段,分别为条纹状混合岩、斑纹状混合片麻岩。总体上元古宙化隆群原岩为一套碎屑岩夹火山岩的沉积建造。

构造上,化隆群基底岩系大致经历了 2 期主要的褶皱变质事件。第 1 期为大型平卧褶皱并伴随有中低级区域变质作用;第 2 期为歪型变形褶皱伴随 917Ma±17Ma 的碰撞型花岗岩带侵位^[12-15]。2 期前寒武纪变形空间方位为现今的南北向,与显生宙北西向构造线的方位呈大角度相交^[11],且同区域重力和航磁异常所反映的南北向基底断裂构造的方位基本一致。前人认为“该区铜镍矿同北面金川、南面会理一带的岩浆型铜镍矿大体都处在东经 102°南北一线,可能与中国中部的东经 98~104°存在的南北向构造有极密切的关系”^[16]。即化隆微陆块的基底构造主体可能是一种南北向的褶皱断裂构造格局。

2 岩体特征

裕龙沟岩体处于化隆隆起的西延部分,围岩主要为前震旦系混合岩化黑云母斜长片麻岩。

岩体受一组 NWW 向断裂的控制,由几个岩体组成。其中最大的一个岩体出露长 1300m,东段宽 40~78m,中段宽 10~15m,西段宽 68m,向两端尖灭,已控制最大延深 430m。岩体呈 340°延伸,倾向北北东,倾角 40~60°,为一上陡下缓的单斜岩体(图 2)。岩石类型有角闪辉石岩(图 3-A)、黑云斜长角闪岩(图 3-B)、黑云母化角闪岩(图 3-C)、黑云辉石角闪岩和辉石岩。岩体可分为 3 个岩相带,岩体东段深

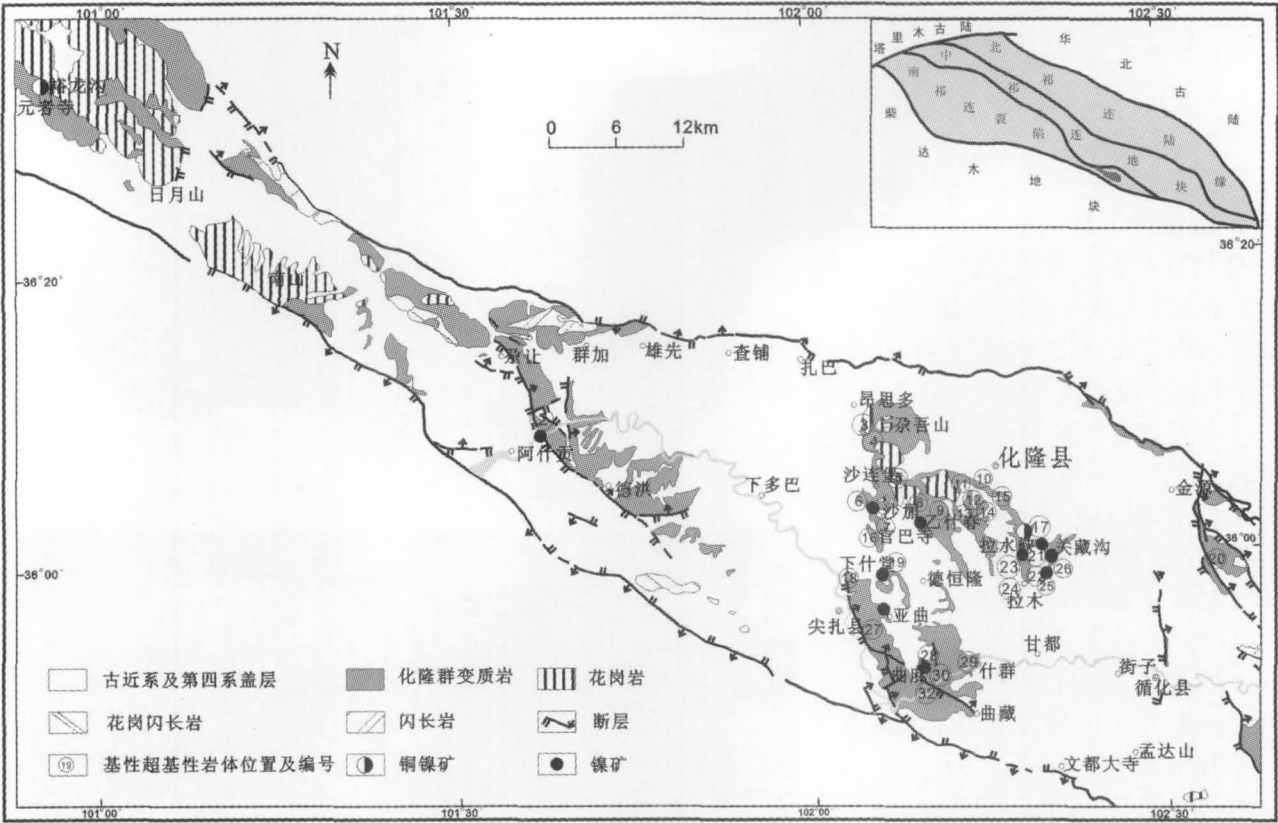


图 1 青海省化隆一带区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Hualong County, Qinghai Province

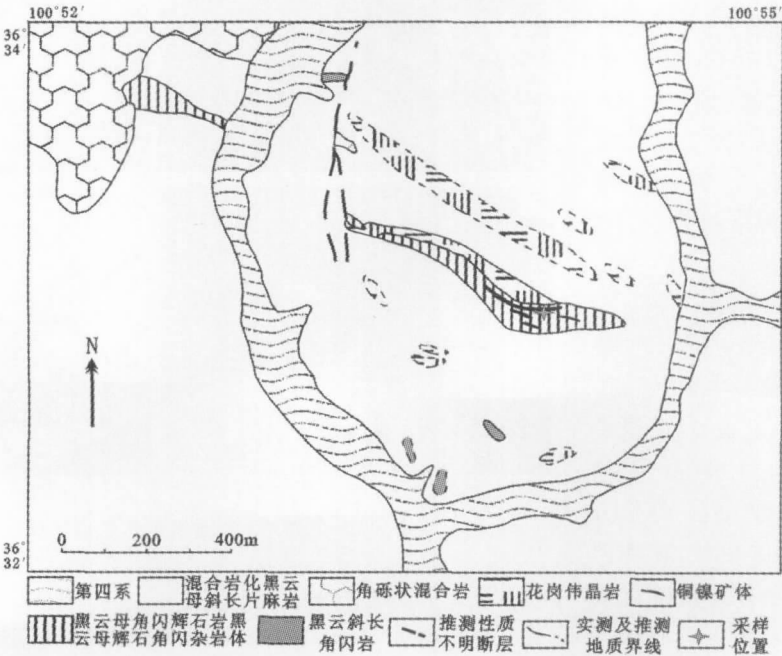


图 2 裕龙沟岩体地质简图

Fig. 2 Generalized geological map of Yulonggou intrusive body

部为单一的黑云角闪岩,中段为斜长角闪岩,其余地段为黑云角闪岩—黑云母角闪辉石岩的杂岩。黑云母角闪辉石岩中的辉石多数为斜方辉石,仅在岩体边部出现少量单斜辉石。辉石在岩体中含量不均,产出部位也不稳定,但大致偏岩体中下部。各岩相带均呈过渡关系,前2个岩相带具矿化。岩石蚀变较普遍,以硅化为主,其次有绿泥石化、滑石化、绢云母化、碳酸盐化及少量次闪石化等。

岩石地球化学样品在西安地质矿产研究所实验中心测试。从测试结果来看,岩石 SiO_2 含量主要介于 45%~54% 之间,属基性岩范围, TiO_2 含量为 0.32%~0.83%; 在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图(图 4)上,样品点均投影在亚碱性系列区。在 AFM 图解(图 5)上,样品点均投影于拉斑系列区。裕龙沟岩体 m/f 为 0.8~4.5, 平均 3.0, 属于铁质系列。

稀土元素均具轻稀土富集型特征,显示明显的负 δEu 异常,说明岩浆演化过程中发生了大量斜长石等的分离结晶作用(图 6)。微量元素总体上显示出相容元素(如 Ni、Cr、Co、V)含量高、不相容元素(如 Rb、Ba、Th、U 等)含量低的特点(图 7)。微量元素蛛网图中具有 Nb、Ta 负异常,可能与热液蚀变和地壳混染有关。

3 矿体特征

岩体内已发现 10 个矿体,主要分布于岩体东段,形成一牛轭状含矿带(图 2)。最大的矿体呈扁豆状,沿走向长 130m,侧伏方向长 360m,平均厚度为 10.4m,走向 285° 左右,侧伏方向 345° 左右,侧伏角 40° 左右。矿体严格受岩相的控制,角闪岩相矿化最好,黑云角闪岩—黑云角闪辉石杂岩相次之,黑云斜长角闪岩相基本无矿化。矿石构造以稀疏—中等浸染状构



样品 09YL-01 黑云母角闪辉石岩照片

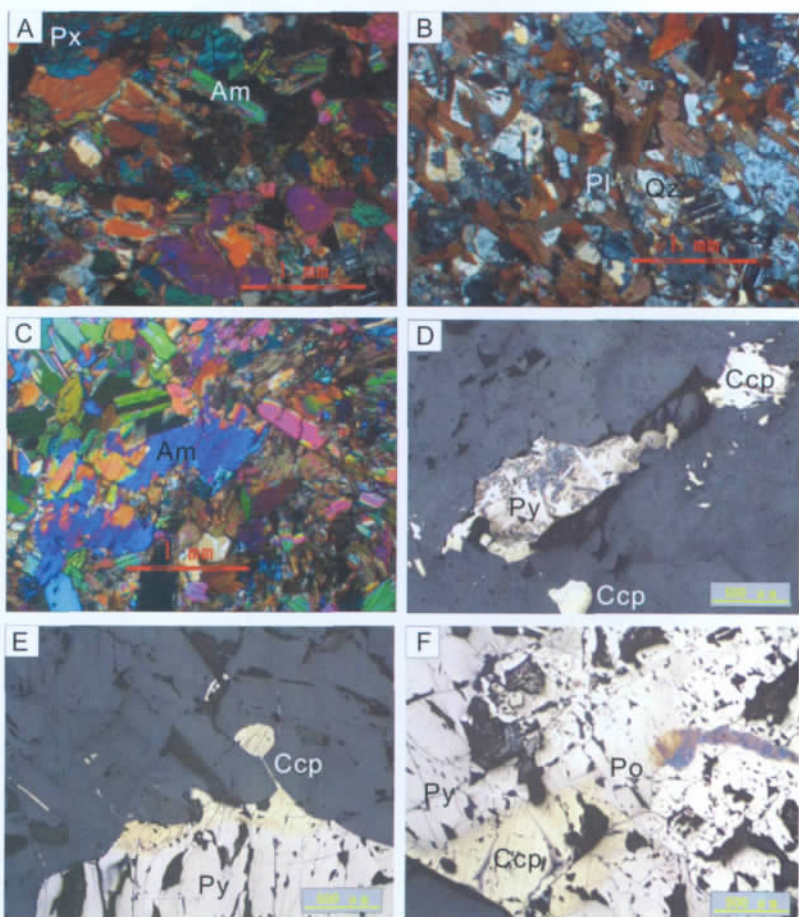


图 3 裕龙沟岩体岩相学照片

Fig. 3 Petrographic characteristics of rocks from Yulonggou intrusive body

A—角闪辉石岩(薄片,正交偏光);B—黑云斜长角闪岩(薄片,正交偏光);C—黑云母化角闪岩(薄片,正交偏光);D—与黄铁矿(Py)共生的黄铜矿(Ccp)呈粒状或似脉状充填脉石矿物裂隙(光片,单偏光);E—黄铜矿(Ccp)充填黄铁矿(Py)裂隙(光片,单偏光);F—共生的黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)、磁黄铁矿(Po)(光片,单偏光)

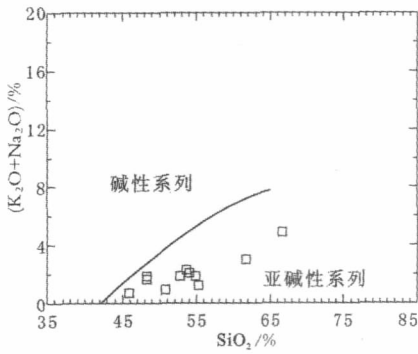


图 4 裕龙沟岩体 TAS 图解
Fig. 4 Total alkali versus silica diagram of Yulonggou intrusive body

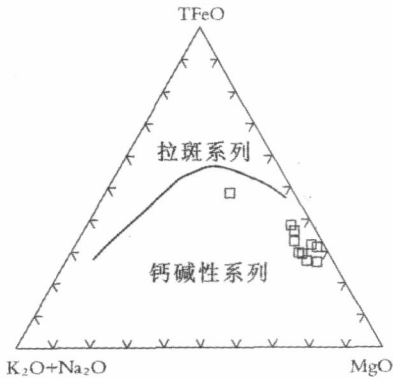


图 5 裕龙沟岩体 AFM 图解
Fig. 5 AFM diagram of Yulonggou intrusive body

造为主,局部呈稠密浸染状构造,以硫化物为主组成的矿石结构具有典型的填间结构(图 3-D),局部有似海绵陨铁结构。矿石的主要矿物成分有紫硫镍铁矿、黄铜矿,其它有磁黄铁矿、镍黄铁矿、磁铁矿、砷铂矿、碲铋矿。矿石中的有益组分主要有 Cu、Ni、Pt、Pd, 其中 Ni 含量为 $1600\times10^{-6}\sim17100\times10^{-6}$, Cu $900\times10^{-6}\sim7700\times10^{-6}$, Co $13\times10^{-6}\sim100\times10^{-6}$, 其次有 Co、Se、Te、Ag、Au 及微量的 Ru、Os、Ir 等,次要组分中除 Au、Ag、Te 有一定价值外,其它元素可综合利用。角闪岩相的矿化具有岩浆晚期矿床的基本特征(图 3-E),残余岩浆的叠加使这个岩相的矿化进一步富集。杂岩岩相的矿化具有岩浆晚期熔离矿床的某些基本特征。

矿体严格赋存于黑云角闪岩型超基性杂岩体中。岩体围岩为前震旦系深变质岩系。岩体受一组 NWW 向构造裂隙的控制。这类杂岩包括 3 个岩相:黑云角闪岩-角闪辉石岩系列的杂岩、黑云斜长

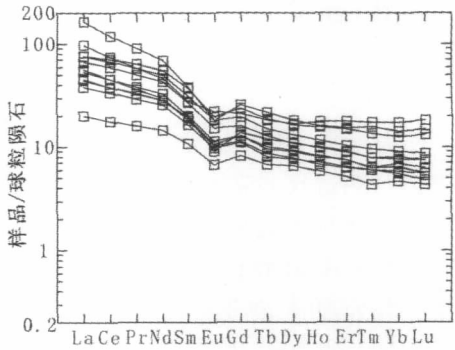


图 6 裕龙沟岩体稀土元素配分图
(球粒陨石标准化值据参考文献[17])
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of Yulonggou intrusive body

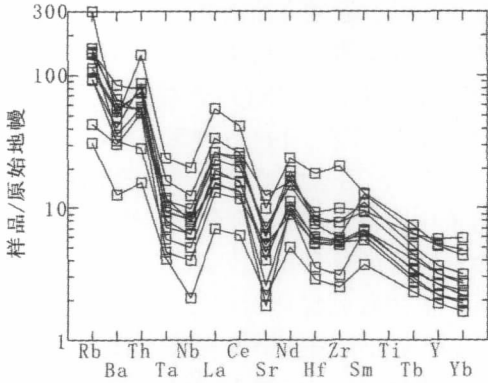


图 7 裕龙沟岩体微量元素蛛网图
(标准地幔数据据参考文献[18])
Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element patterns of Yulonggou intrusive body

角闪岩和黑云角闪岩,属就地分异作用的结果,但分异不完全,各岩相未形成固定的层位。单独产出的角闪岩相矿化较好,杂岩相次之,斜长角闪岩相基本无矿化。杂岩矿化具标准的岩浆期后熔离矿床的某些基本特征。角闪岩相矿化则有岩浆晚期矿床的基本特征,残余岩浆的叠加作用对该岩相矿化的进一步富集起到重要的作用。成矿作用的过程看来拉得较长,残余岩浆是岩浆晚期的产物。成矿作用强烈的部分位于岩体东侧边缘,矿体基本上集中于该地段。

4 分析方法

在岩体中采集样品 15kg, 采样位置如图 2 所示。样品岩性为黑云母角闪辉石岩相,锆石分选工作在河北省区域地质调查研究院实验室进行,常规碎

样 120 目后手工淘洗,挑选出锆石进行年龄测定。在加拿大多伦多大学杰克萨特利(Jack Satterly)年代学实验室采用同位素稀释热电离质谱法(isotope dilution thermal ionization mass spectrometry) (ID-TIMS)进行锆石 U-Pb 同位素分析。分析之前,锆石晶体颗粒经热退火并在 HF 酸中部分溶解,以此彻底消除 Pb 丢失的蚀变区域,同时提高一致性和谐度^[19-20]。这些区域与在蚀变前遭受辐射破坏的高 U 区域相关。前处理时,首先将锆石颗粒置于 1000℃ 马弗炉中加热大约 60h,以修复辐射破伤和退火晶格,接下来就是单步部分溶解过程,用 50% 的 HF 酸 0.10mL 和 7mol/L 的 HNO₃ 酸 0.02mL,在聚四氟乙烯溶解皿中于 195℃ 的温度下溶解 6~12h。通过硝酸和丙酮清洗,对每个锆石晶体颗粒的尺寸和重量进行测量和称重,通过样品装载,²⁰⁶Pb-²³³U-²³⁵U 示踪剂溶液被加到马弗炉器皿中。利用浓的 HF 0.10mL 和 0.02mL 的 7mol/L HNO₃ 于 195℃ 的温度下溶解 3~5 天,锆石被溶解,并再溶解于 0.15mL 的 3mol/L 的 HCl 中^[21]。使用盐酸通过离子交换色谱,使 U 和 Pb 从溶液中分离出来,并将分离出来的样品沉积在已经涂有硅胶的铱灯丝上^[22],在 VG354 质谱仪上进行分析,应用戴利探测器的脉冲计数模式计算 Pb 和 U,或者运用多法拉第富集模式收集 Pb,并且用静态模式收集 U。Pb 和 U 测量系统测量时间为 21.5ns。戴利探测器修正偏差为一常数,每原子质量单位 0.05%。利用 SRM982 标准 Pb 对放大器和戴利特性进行监控。每原子质量单位热分馏校正 0.10% 恰对应于 Pb 的 0.06% 误差(2σ),同时 U 分馏出来。假设最初岩浆中 Th/U 比值为 4.2,利用锆石中的 ²³⁰Th 不平衡进行 ²⁰⁶Pb-²³⁸U 对 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 的年龄校正。锆石中普通铅全部被分配到铅空白处,U 空白估计为 0.01pg。U/Pb 比值的标定误差为 0.04% (2σ)。谐和图中给出 95% 置信区间的误差椭圆,使用 ISOPLOT 程序 3.00 进行绘图和年龄计算^[23]。

5 分析结果与讨论

裕龙沟黑云母角闪辉石岩样品(09YL-01)中的锆石绝大多数为烟灰色、浅烟灰色、浅黄色半自形柱状晶体,少数为浅玫瑰红色浑圆状,粒径多在(80×60)~(120×90)μm 之间。锆石 CL 图像(图 8)显示,呈浅灰—深灰色,少数具有内核(图 8-B),多数发育环带结构(图 8-A、C~F),Th/U 比值一般在

0.39~0.78 之间(表 1),具岩浆结晶锆石的特征。

裕龙沟岩体黑云母角闪辉石岩样品(09YL-01) ID-TIMS 锆石 U-Pb 同位素分析和年龄计算结果(表 1,图 9)显示,年龄为 $442.4\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD = 0.59),即形成于晚奥陶世,为加里东期的岩体。

利用 ID-TIMS 方法首次获得了裕龙沟岩体(样品 09YL-01) 锆石 U-Pb 年龄 $442.4\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD=0.59),也是在南祁连日月山—化隆基性—超基性岩带中获得的首个基性—超基性侵入岩的精确年龄数据。与中祁连地块基性—超基性岩体的年龄相近,秦祁造山带结合处陇山岩群中的基性岩年龄为 $(442.8 \pm 1.1) \sim (440 \pm 1.7)\text{Ma}$ ^[24],中祁连马衔山岩群基性岩年龄为 $441.1\text{Ma} \pm 1.4\text{Ma}$ ^[25]。

祁连山造山带是秦祁昆巨型造山带的组成部分,属中国中央造山带。新元古代—早古生代秦—祁—昆大洋具有复杂的结构形式,洋中有块、块中有裂陷是其主要特征之一^[26-27]。大陆裂解形成一系列大小不等的海洋盆地,汇聚使盆地关闭,造山作用使堆积物发生变质变形。板块的裂解与关闭实际上是构造旋回一个开合过程的具体体现^[28]。这种开合可以是原地开合,也可以是异地开合,最终使这些原来相关或不相关的一系列陆块聚合在一起,形成新的大陆块。祁连山地体是经加里东末期板块碰撞而形成的典型的加里东造山带^[29-30],祁连山南东段是祁连山造山带的尾端,该造山带有着复杂的物质组合和漫长的构造演化历史。中祁连地块是秦—祁—昆洋内陆块群中的一个,由新元古代以前的古老变质岩系组成,其上发育有裂陷槽,南祁连、拉脊山就是地块进一步裂解形成的 2 个盆地(或小洋盆),它们是在加里东期闭合形成的造山带。

裕龙沟岩体所代表的基性—超基性岩带恰处于祁连造山带的南东段,该岩带的所有基性—超基性岩体都无一例外地侵入于元古宇化隆群中。化隆群为一套中深变质岩系,形成于新元古代。基性岩墙群代表地质历史时期的伸展裂解事件,其形成时代可以代表裂解的初始时限,可为造山前期的地质作用过程提供研究基础。其变质变形包含有造山过程中区域构造作用叠加改造的信息,又约束了对造山过程的动力学研究,因而在大陆再造研究过程中越来越受到重视。440Ma 左右的年龄,与加里东中晚期祁连造山带火山弧或弧后盆地裂解的时代接近,可以代表加里东运动俯冲碰撞后火山弧的裂解拉张

表 1 青海省裕龙沟岩体 ID-TIMS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1 ID-TIMS U-Th-Pb isotopic data of zircon from Yulonggou intrusive body in Qinghai Province

测点 编号	样重 /mg	U /10 ⁻⁶	Th /U	Pb _{Com} /10 ⁻¹²	²⁰⁶ Pb / ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb _c /%	²⁰⁷ Pb _c /%	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	相关 系数	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄/Ma	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	2σ	谐和率
sk30p5	0.015	307	0.5	1.1	19913	0.09	1.43	0.07117	0.0001	0.5473	0.0015	0.694	443.08	0.62	443.19	0.97	443.3	4.4	0
sk30p6	0.012	368	0.39	1.2	17130	0.11	1.67	0.07124	0.00009	0.5475	0.0013	0.754	443.64	0.56	443.34	0.85	441.8	3.6	-0.4
sk30p7	0.015	292	0.43	0.8	24215	0.08	1.18	0.07056	0.0002	0.5427	0.0017	0.926	439.56	1.21	440.18	1.11	443.4	2.6	0.9
sk30p8	0.012	434	0.78	1.1	21018	0.09	1.36	0.07101	0.00045	0.5455	0.0035	0.979	442.24	2.71	442.03	2.31	441.0	2.9	-0.3

注: Pb_{Com} 为普通铅的总量; ²⁰⁶Pb_c 为普通铅中的 ²⁰⁶Pb 占全铅 ²⁰⁶Pb 的百分数; ²⁰⁷Pb_c 为普通铅的 ²⁰⁷Pb 占全铅 ²⁰⁷Pb 的百分数

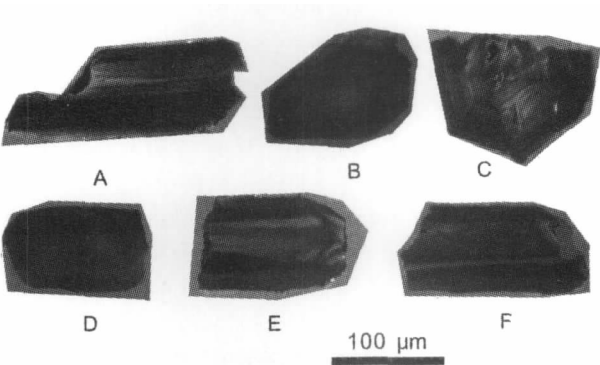


图 8 裕龙沟岩体黑云母角闪辉石岩锆石 CL 图像

Fig. 8 CL images of zircon from biotite-hornblende pyroxenite of Yulonggou intrusive body

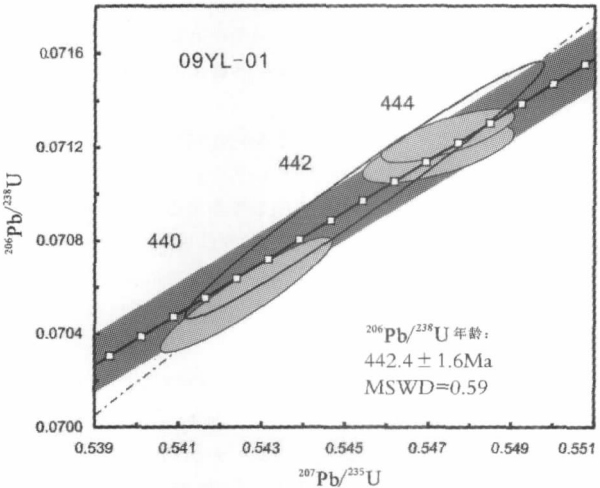


图 9 裕龙沟岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 9 Concordia diagram showing U-Pb analyses of zircons from Yulonggou intrusive body

的形成时限,因而对于加里东中晚期祁连地区构造运动的表现形式、造山作用过程的细节及其时限是一种很好的约束。岩体的岩石地球化学特征说明,岩体母岩浆遭受了陆壳物质混染作用。岩体的岩石地

球化学特征反映出与俯冲相关的地球化学特征,如 Nb、Ta、Ti 的亏损,所有岩石均属于钙碱性系列等,且轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)相对富集,适度亏损高场强元素,应属于后碰撞伸展环境中的岩浆系统。这一时期整个祁连地区正处于由俯冲造山向碰撞造山的转换时期,随着拉脊山小洋盆的闭合,进入陆内造山阶段,在后碰撞伸展环境中形成裕龙沟等基性—超基性岩侵入体。设想在复杂的地质作用过程中,地壳深处岩浆物质沿着地层构造的层间裂隙间歇性地压滤侵位,形成了一些规模极小的点滴状、扁豆状排列无规律的基性—超基性岩体。

对日月山—化隆基性—超基性岩带的亚曲岩体也进行了精确年龄测定,测定结果与裕龙沟岩体为同一时期的。由此推测,该岩带中的岩体形成于同一时期,有其特殊的动力学机制和演化过程。这期伸展裂解事件与成矿关系非常密切,因此对其研究具有重要的现实意义。

6 结 论

(1)裕龙沟岩体为一铁质系列的基性—超基性岩类型的杂岩体,岩体分异好,有用元素 Ni、Cu、Co 丰度高,为有利成矿的岩体。

(2)利用 ID-TIMS 方法首次获得了裕龙沟岩体的精确年龄 442.4Ma±1.6Ma,亦是日月山—化隆基性—超基性岩带上获得的首例基性岩体的精确年龄。发育在化隆古老微陆块中的裕龙沟等铜镍矿化岩体形成于志留纪,可能是加里东期构造热事件的岩浆和成矿在南祁连造山带的反映。

致谢:西安地质矿产研究所宋忠宝研究员对本文提出了建设性的修改意见,数据测试中得到美国印第安纳大学李楚思教授的帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1]李文渊.中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M].西安:地图出版社,1996:1-223.
- [2]李文渊.祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J].地球学报, 2004,25(3):313-320.
- [3]汤中立,闫海卿,焦建刚,等.中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J].矿床地质, 2006,25(1):1-9.
- [4]汤中立,李文渊.金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M].北京:地质出版社, 1995:1-321.
- [5]姜春发.科技创新贵在坚持——对我国大地构造中某些创新观点的回顾与反思[J].地质学报,2009,83(11):1772-1778.
- [6]Peng P,Zhai M G,Guo J H,et al.Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dikes in the central North China craton[J].Gondwana Research, 2007,12:29-46.
- [7]Lu S N,Zhao G C,Wang H C,et al.Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton[J].Precambrian Research,2008,160:77-93.
- [8]西安地质矿产研究所.西北地区矿产资源找矿潜力[M].北京:地质出版社,2006:36-330.
- [9]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.
- [10]宋谢炎,胡瑞忠,陈列锰.铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J].地学前缘, 2009, 16(4): 287-305.
- [11]郭进京,张国伟,陆松年,等.中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆[J].高校地质学报,1999,5(2):148-156.
- [12]LI C, Edward M R, Thomas O, et al. Textural, mineralogical and stable isotope studies of hydrothermal alteration in the main sulfide zone of the Great Dyke, Zimbabwe and the precious metals zone of the Sonju Lake Intrusion, Minnesota, USA[J].Miner Deposita, 2008, 43: 97-110.
- [13]Wang C Y, Zhou M F, Reid R K. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion,SW China[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2006, 152: 309-321.
- [14]Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit,Yunnan,SW China[J]. Miner Deposita, 2006, 41: 771-783.
- [15]李怀坤,陆松年,李惠民,等.侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约[J].地质通报,2009,28(10):1396-1404.
- [16]计文化,陈守建,李荣社,等.西昆仑盖山北坡铜矿化点的地质特征及其找矿意义[J].地质通报,2009,28(10):1361-1367.
- [17]Boynnton W V. Geochemistry of the rare earth elements : meteorite studies[C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [18]Sun S S,McDonough W F. Chemical and isotope systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ. 42, 1989: 313-345.
- [19]Gerstenberger H,Haase G. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations[J]. Chemical Geology, 1997,136: 309-312.
- [20]Mattinson J M. Zircon U-Pb chemical abrasion ("CA-TIMS") method: combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages[J]. Chemical Geology, 2005, 220: 47-66.
- [21]Jaffey A H, Flynn K F,Glendenin L E, et al. Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U [J]. Physical Review, 1971, 4: 1889-1906.
- [22]Krogh T E. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973,37: 485-494.
- [23]Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, (4):71.
- [24]陈隽璐,何世平,王洪亮,等.秦岭-祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].岩石矿物学杂志, 2006,25(6):455-462.
- [25]何世平,王洪亮,陈隽璐,等.中祁连马街山岩群内基性岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义[J].地球科学, 2008,33 (1):35-45.
- [26]汤中立,闫海卿,焦建刚,等.中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J].矿床地质, 2006,25(1):1-9.
- [27]王金荣,吴继承,贾志磊.北祁连山东段苏家山高 Mg 埃达克岩地球动力学意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(3):16-23.
- [28]孙晓明,王生伟,石贵勇,等.云南白马寨 Cu-Ni 硫化物矿微量和铂族元素地球化学和矿床成因意义[J].矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(3): 239-246.
- [29]徐旺春,张宏飞,柳小明.锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义[J].科学通报, 2007, 52(10):1174-1180.
- [30]Song S G, Zhang L F, Niu Y L,et al.Evolution from Oceanic Subduction to Continental Collision:a Case Study from the Northern Tibetan Plateau Based on Geochemical and Geochronological Data [J]. Journal of Petrology, 2006, 47(3):435-455.