甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性—超基性杂岩体SHRIMP锆石U-Pb定年及其地质意义

杨建国[1],王　磊[1],王小红[1],谢　燮[1],齐正广[2]
YANG Jian-guo[1], WANG Lei[1], WANG Xiao-hong[1], XIE Xie[1], QI Zheng-guang[2]

1. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054;
2. 甘肃金川集团矿山工程公司, 甘肃 金川 737100
1. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
2. *The Engineering Branch Company of Jinchuan Group LTD., Jinchuan 737100, Gansu, China*

摘要:黑山铜镍矿床位于塔里木板块东北部的北山裂谷带内,庙庙井-双鹰山深大断裂南侧,含矿基性—超基性复式杂岩体侵位于青白口系大豁落山组和寒武系双鹰山组中。矿化主要赋存于杂岩体内的橄榄岩和角闪辉长岩内。采用锆石离子探针微区原位(SHRIMP)法获得矿化角闪辉长岩中锆石的 U-Pb 年龄为 374.6Ma±5.2Ma,表明该含矿杂岩体的侵位及矿化作用均发生于晚泥盆世。这一年龄数据的获得不仅对重新认识北山地区的地质构造演化具有重要意义,而且为北山地区开展铜镍矿找矿提出了新方向。

关键词:黑山铜镍矿床;基性—超基性岩体;SHRIMP 锆石 U-Pb 定年;晚泥盆世;甘肃北山地区
中图分类号:P597$^+$.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-2552(2012)02/03-0448-07

Yang J G, Wang L, Wang X H, Xie X, Qi Z G. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Heishan mafic-ultramafic complex in the Beishan area of Gansu Province and its geological significance. *Geological Bulletin of China,* 2012, 31(2/3):448-454

Abstract: The Heishan copper-nickel deposit is located in the rift zone of the Beishan Mountain northeast of the Tarim plate, on the southern side of Miaomiaojing -Shuangyingshan fault. The ore-bearing mafic-ultramafic complex intruded into Dahuoluoshan Formation of Qingbaikou System and Cambrian Shuangyingshan Formation. Mineralization mainly occurred in peridotite and hornblende-gabbro complex. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the ore-bearing hornblende-gabbro body yieldes an age of 374.6 Ma±5.2Ma, which suggests that the intrusion of the ore-bearing complex and the mineralization both occurred in Late Devonian. The obtaining of this age has important significance in understanding geological evolution of Beishan Mountain area and also in indicating targets for copper-nickel ore prospecting in Beishan Mountain area.

Key words: Heishan copper-nickel deposit; mafic-ultramafic body; zircon SHRIMP U-Pb dating; Late Devonian; Beishan Mountain area in Gansu Province

北山地区位于中亚造山带中部南缘, 总体属塔里木板块东北边缘。该区不仅是研究中亚造山带和古亚洲洋最终闭合的关键地区之一, 亦是东天山铜镍成矿带向东寻求找矿突破的重点地带。长期以来吸引了众多地质学家的关注和研究, 并取得了较丰富的研究成果[1-4]。但是由于受阿尔金断裂构造系的叠加破坏, 北山地区诸多基础地质问题和地质演化至今未取得统一认识, 如对北山地区数条基性—超基性岩带的成岩背景、时代和古亚洲洋最终闭合带位置等的认识, 尤其是对古亚洲洋最终闭合时间的

收稿日期:2011-06-01;**修订日期**:2012-01-29
资助项目:中国地质调查局地质矿产调查专项《甘肃北山营毛沱-玉石山地区铁铜多金属矿产调查》(编号:1212011085090)
作者简介:杨建国(1962-),男,研究员,从事地质矿产研究。E-mail:yjg62126@126.com

认识存在重大分歧[1,3,5]。这些问题都关系到北山地区岩浆矿床的资源潜力和找矿方向。

北山地区自北而南发育着红石山-黑鹰山-咸水井、沙泉子-芨芨台-红柳丘井-路井、红柳河-牛圈子-月牙山-洗肠井、玉石山-黑山-小红山-老洞沟、头吊泉-花牛山-将军台、古堡泉-红柳井-俞井子 6 条规模较大的基性—超基性岩带，除玉石山-黑山-小红山-老洞沟和头吊泉-花牛山-将军台 2 条基性—超基性岩带多被认为属早古生代被动陆缘裂谷裂陷环境外，前人对其余 4 条基性—超基性岩带的成因和形成环境的认识仍存在较大差异，如有蛇绿岩型[1,5~8]、弧后扩张盆地[9]、造山后伸展[9~16]等多种观点。近年来，随着地质矿产调查工作的深入开展,在上述各岩带中相继发现了铜镍矿(化)点和钒钛磁铁矿点,如怪石山铜镍矿点、拾金滩铜镍矿点、小红山中型钒钛磁铁矿床和梭梭井、咸水井钒钛磁铁矿点等，发现愈来愈多的铜镍和钒钛磁铁矿成矿事实与所处的大地构造背景不协调，从大地构造成矿专属性方面明显地制约了北山地区岩浆矿床的找矿方向。

黑山铜镍矿床作为北山地区大型铜镍矿床的典型代表,对其成矿时代的研究甚少,汤中立等[17]测得黑山基性—超基性杂岩体 Sm-Nd 模式年龄为 1026~1212Ma,属中元古代。近几年的深部勘查结果表明，该含矿基性—超基性杂岩体侵入的最新地层为中上寒武统西双鹰山组,显然,成岩成矿的时代应属早古生代及其以后。为了准确地厘定黑山含矿岩体的成岩时代，笔者挑选了黑山基性—超基性杂岩体角闪辉长岩中的锆石进行了 SHRIMP 年代学研究。

1　地质背景

黑山铜镍矿床位于甘肃省瓜州县柳园镇北东东 60km 处，地处塔里木古大陆边缘向陆一方(后方)的裂谷带中段[12,18~19],庙庙井-双鹰山断裂带南侧。以新太古代—古元古代敦煌群中深变质岩系(片岩、片麻岩、大理岩夹石英岩和斜长角闪岩)为基底,其上广泛发育蓟县纪—奥陶纪裂谷裂陷环境浅—深水盆地相碎屑岩-碳酸盐岩夹中基性火山岩建造。其中,蓟县系为中—薄层大理岩、千枚岩、千枚岩化粉砂岩、砂板岩夹中基性火山岩和硅质岩,是区域上重要的铁、铅锌含矿层位;青白口系为中厚层块状白云质灰岩、硅质灰岩和中薄层状微晶灰岩、纹层状微晶灰岩;震旦系为杂色泥板岩、页岩、粉砂质页岩、冰碛砾岩、紫色页岩、粉砂岩夹薄层硅质岩、锰矿层及厚层白云质灰岩透镜体;寒武系为黑色岩系,岩性有薄层硅质岩、炭质板岩、千枚岩、粉砂质板岩夹结晶灰岩,是区域上重要的钒、磷含矿层位;奥陶系主要为杂砂岩、石英砂岩夹硅质岩。在上述不同时代的地层中广泛发育了元古宙、古生代侵入岩和中生代花岗质侵入岩类[4]。

黑山铜镍矿床北距庙庙井-双鹰山大断裂带仅 2km,该断裂带被认为是花牛山-黑山裂谷带的北缘深断裂[7,18],与其次级断裂控制了黑山岩体的侵位。矿区出露地层主要为新元古代青白口系大豁落山组(Qb*d*)和中上寒武统西双鹰山组($\in xs$),它们均是基性—超基性杂岩体的直接围岩。其中,前者分布于矿区南部和北部高山区，岩性为角砾状白云质大理岩和硅质条带白云质大理岩，多呈构造推覆体超覆于震旦系—奥陶系之上;后者分布于矿区中、北部洼地内基性—超基性杂岩体的周围,岩性为硅质板岩、泥质板岩和变砂岩，含少量薄层大理岩夹硅质板岩及重晶石岩。除上述地层外,在矿区东部可见零星的震旦系露头,沟谷中广泛分布有第四系冲、洪积和坡积砂、砾石层。矿区侵入岩除黑山基性—超基性岩体外,其它侵入岩不发育,仅有少量闪长玢岩脉、辉长岩脉、煌斑岩脉、重晶石脉和石英脉,分布于矿区西部及北部。

2　岩体和矿化特征

黑山含铜镍基性—超基性岩体平面上形似鸭梨状,横剖面呈上(顶)缓下(底)陡的倒漏斗状,总体产状为向南西倾斜并向西倾伏的岩株状单斜岩体。岩体出露面积 0.25km^2，主体沿 310°方向展布,长 625m,宽 470m。岩枝呈南北向,长 190m,宽 6~30m,倾向西。岩体分 2 次侵入,分异较好,以角闪辉长岩、角闪橄榄岩为主,有少量橄榄角闪辉长岩、辉石岩和辉长岩。其中角闪橄榄岩构成黑山岩体的主体,约占岩体总面积的 94%。

岩体与围岩具明显的侵入接触关系，热接触变质作用明显，外接触带中上寒武统泥质板岩发生热变质,形成斑点状堇青石黑云母角岩、硅线石黑云母角岩和长英质角岩，岩体南侧青白口系白云质大理岩发生蛇纹石化,岩体具滑石化、次闪石化和绿泥石

化等。

铜镍硫化物矿体主要赋存于角闪橄榄岩相中，矿体呈似层状、透镜状和不规则枝叉状。矿体规模大小不等，长数十米到百米，宽 1~100m，产状与岩相带产状基本一致。矿体有 2 个产出部位，其一是角闪橄榄岩下部的悬浮状矿体；其二是角闪橄榄岩底部接触带上的矿体。矿石金属硫化物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿，其次为黄铁矿、紫硫镍矿等；金属氧化物有磁铁矿、钛铁矿、铬尖晶石等；脉石矿物有橄榄石、普通角闪石、斜长石、单斜辉石、斜方辉石、黑云母、蛇纹石、次闪石、纤闪石、绿泥石，其次有石榴子石、葡萄石、绿帘石、方解石、菱镁矿、滑石、绢云母、伊丁石、榍石等[20]；表生矿物有孔雀石、褐铁矿、黄钾铁矾、镍华。矿石中硫化物以星点浸染状、细脉浸染状构造为主，局部发育海绵陨铁状结构；矿石结构呈半自形—它形粒状结构，少量呈块状构造。矿石自然类型主要为浸染状铜镍含长角闪橄榄岩矿石。矿体中镍的平均品位为 0.3%，最高达 0.68%，铜平均品位为 0.1%，最高 0.33%。见有少量镍品位大于 1% 的脉状富矿体。经 20 世纪 90 年代的初步勘查，求得 (D+E) 级镍金属储量 6.2×10^4t，铜金属储量 2.2×10^4t，达中型规模。近几年，经金川公司详查评价，估算镍金属资源量 13.48×10^4t，铜 6.5×10^4t，达大型规模[21]。

3 样品采集与处理

3.1 样品采集与描述

锆石同位素测年样品采自黑山基性—超基性杂岩体西南边缘赋存有小规模铜镍矿 (化) 体的角闪辉长岩修路开凿挖出的基岩露头上 (图 1)，锆石样品选自重达 30kg 的未矿化角闪辉长岩，岩石新鲜、干净，具半自形中—细粒结构和辉长结构，镜下可见辉石有程度不等的次闪石化 (阳起石、透闪石)、方解石化、绿泥石化和黑云母化。

3.2 样品处理

样品中锆石的分选在廊坊河北省区域地质调查研究院进行。将原岩样品破碎至 150μm 左右，先用磁法和重液分选，然后在双目显微镜下手工挑选。从辉长岩样品中分离出 200 余颗锆石，然后在双目显微镜下挑选晶形完好、无包裹体、具有代表性的锆石晶体 150 余颗，将其固定在双面胶上，与标准锆石 (TEM) 样品排列在指定位置上，随后用模具注入环氧树脂，抽真空，烘干，树脂固化后对其进行打磨，使锆石内部暴露，然后抛光，使靶表面光滑。对靶上的标准锆石和待测锆石进行透射光和反射光照相，确定锆石样品的具体位置和观察其内部结构。然后，将显微镜照相后的靶进行超声波清洗，在靶的检测光面上镀上金膜，随后放在扫描电子显微镜下进行阴极发光 (CL) 照相，以确定锆石颗粒内部同位素的分布情况，根据研究目的并结合显微镜照片确定锆石的具体测定点位。锆石的图片分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心扫描电镜和阴极发光实验室 HITACHI S3000-N 型扫描电子显微镜和 GATAN 公司 Chroma 阴极发光探头仪器上完成。

4 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析

4.1 分析方法

锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析在北京离子探针中心完成。分析条件和流程见 Compston 等[22] 和宋彪等[23]的文献。测定的 $^{206}Pb/^{238}U$ 比值用澳大利亚的 TEMORA (417Ma，$^{206}Pb^*/^{238}U=0.06683$) 进行校正。在测试过程中，每测定 1 个标准样品点后，测定 3 个未知样品点，单次测量的数据点绝对误差为 1σ，普通 Pb 校正采用 ^{204}Pb 校正 (假设 $^{206}Pb/^{238}U-^{208}Pb/^{232}Th$ 年龄一致)。年龄加权平均值计算使用 ISOPLOT 软件[24]，加权平均值置信度为 95%。在整个数据处理过程中，年龄计算使用的衰变常数依据 Steiger 等[25]的文献。

4.2 锆石的特征

由黑山角闪辉长岩中锆石的阴极发光图像可以看出，该岩石锆石颗粒较小，成分单一，呈不规则—半自形短柱状和近等轴状，或长柱状较好的晶形。柱状锆石长短轴比值介于 1.5~3 之间。锆石的 U、Th 含量较高，Th/U 比值较大 (一般大于 0.9)，锆石韵律环带不清晰，有较宽的结晶环带，各锆石的内部结构相似，无明显的核幔结构 (图 2)，具有典型的基性岩浆成因锆石的特征。少数锆石边缘出现亮白色的增生边，可能为后期变质作用形成的增生锆石边。

4.3 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果

黑山角闪辉长岩 12 颗锆石的测试数据见表 1。由于辉长岩中的锆石一般为环带不甚发育、成分相对均匀的自形晶岩浆锆石，通过一定量的测试，均可以得到一组变化范围较小的年龄。因而可以采用年龄加权平均值代表样品的年龄。根据经验，对于小

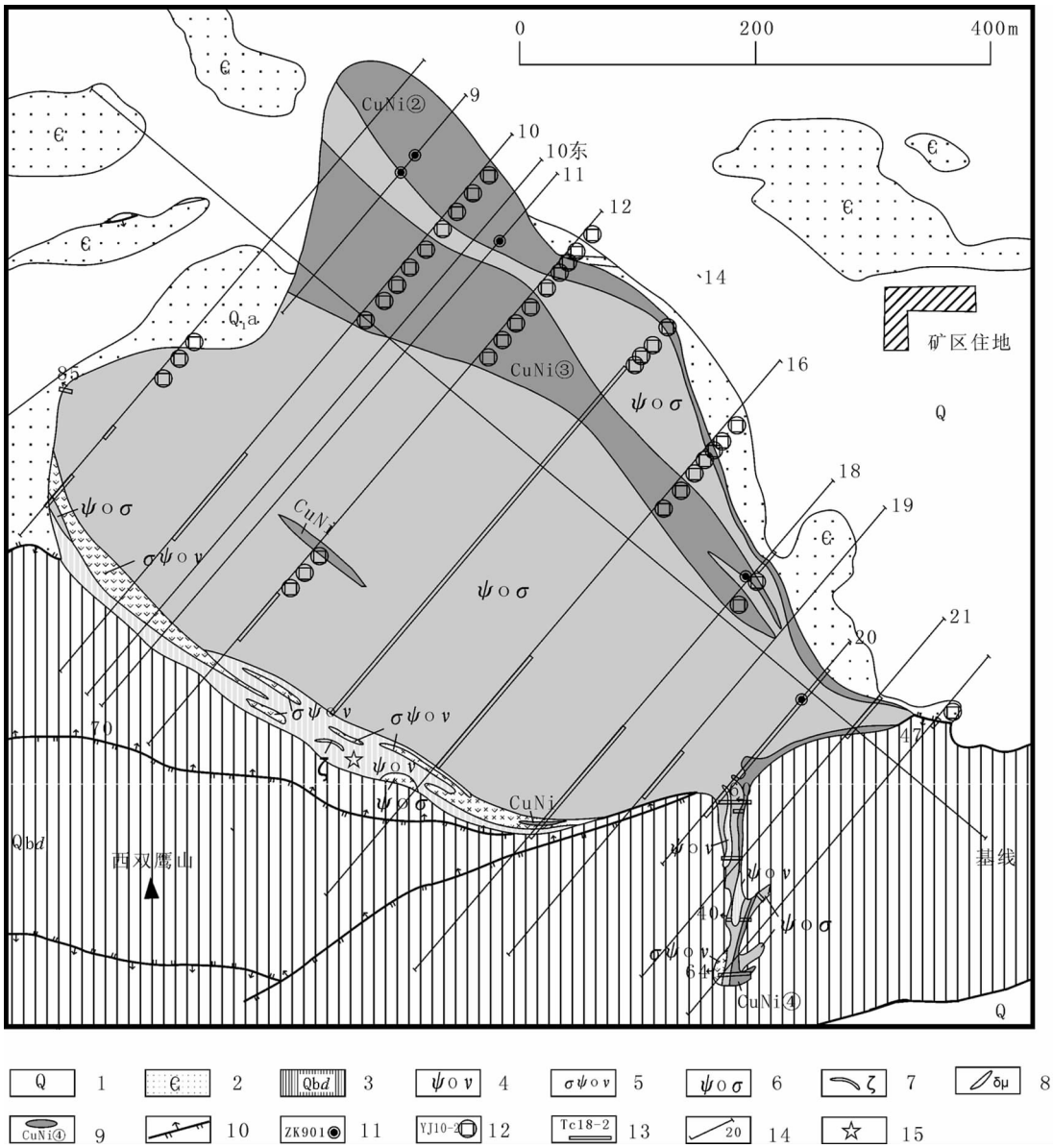


图 1　甘肃省肃北蒙古族自治县黑山铜镍矿岩体地质图

Fig. 1　Geological sketch map of Heishan copper-nickel rock body in Mongolian Autonomous County of Subei, Gansu Province

1—第四系;2—寒武系硅质板岩;3—青白口系厚层硅质白云质大理岩;4—角闪辉长岩;5—橄榄角闪辉长岩;6—角闪橄榄岩;7—石英正长岩;8—闪长玢岩;9—铜镍矿体;10—实测断层;11—钻孔;12—小园井;13—探槽;14—勘探线;15—同位素测年采样位置

于 8 亿年的样品通常采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄[26]。应用 Ludwig 软件处理数据时一般将离群值删除,使 MSWD 降至 2 以下[27]。据表 1 中的测试数据,利用 ISOPLOT 程序进行年龄计算和谐和图的绘制(图 3)。

角闪辉长岩 12 颗锆石的年龄值在(358.4±5.9)~(399.3±6.2)Ma 之间(表 1),处理数据时,剔除 1 个离群值,剩余 11 个数据点在谐和线附近比较集中,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 374.6Ma±5.2Ma(图 4)。

5　结论与讨论

北山地区目前发现的与铜镍硫化物矿床(化)有

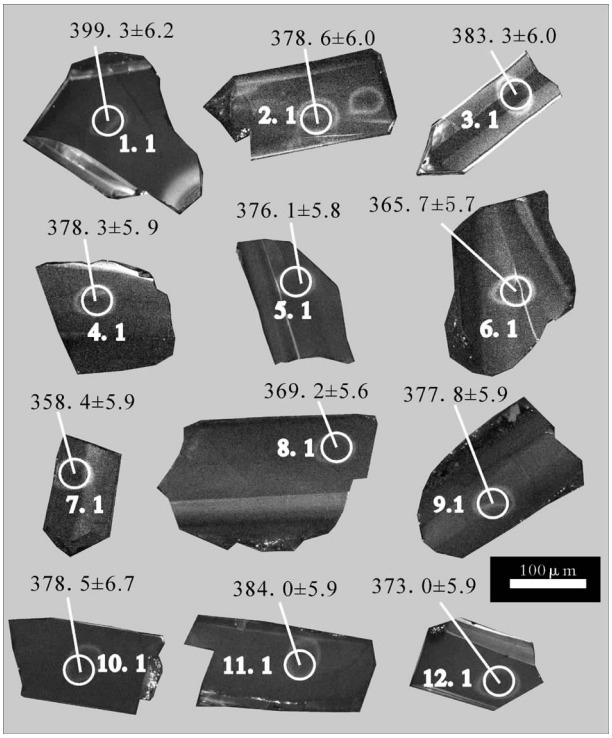


图 2 黑山角闪辉长岩锆石阴极发光(CL)图像、测定点位和 $^{206}Pb/^{208}U$ 年龄(Ma)

Fig. 2 CL images, locations of SHRIMP measurement points and $^{206}Pb/^{208}U$ ages of zircon from amphibole-gabbro body of Heishan

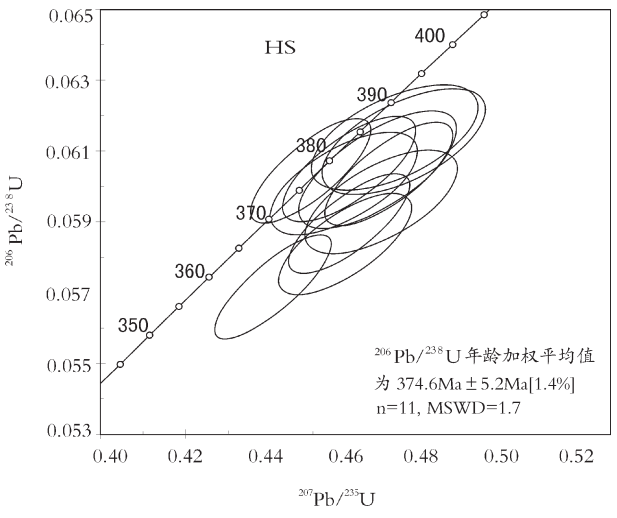


图 3 黑山铜镍矿角闪辉长岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircon from amphibole-gabbro body of the Heishan copper-nickel deposit

关的基性—超基性杂岩带主要集中于北山中、南带的玉石山-黑山-小红山-老洞沟和笔架山-古堡泉

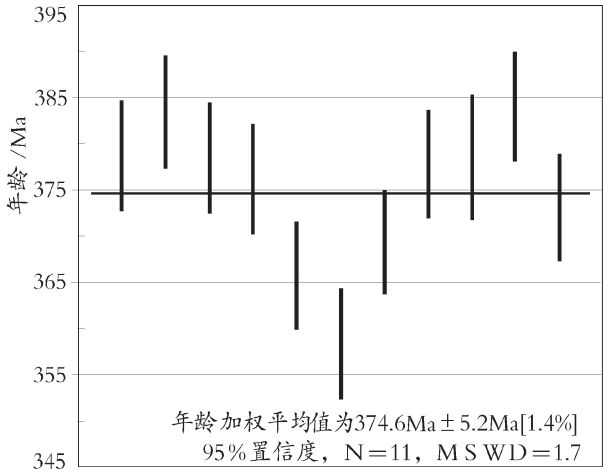


图 4 黑山铜镍矿角闪辉长岩锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权图

Fig. 4 Weighted average $^{206}Pb/^{238}U$ age of zircon from amphibole-gabbro body of Heishan

-俞井子 2 个基性—超基性岩带中。前者中产有黑山大型铜镍矿床，近年新发现有怪石山和梧桐井铜镍矿点，含矿岩体侵位于蓟县系—南华系大理岩、千枚岩、变质基性火山-沉积碎屑岩和寒武系黑色岩系中；后者中产有坡 1 和坡 10 中—大型铜镍矿床和红石山、磁海南铜镍矿点。其中坡 1 和坡 10 铜镍矿床含矿岩体侵位于长城系古硐井群黑云母石英片岩、黑云母片岩、二云母石英片岩夹绿泥阳起片岩、黑云母二长变粒岩等副变质岩中[28]，其它各矿点含矿岩体侵位于下石炭统红柳园组中—基性火山-沉积岩中，含矿岩体的成岩成矿时代为 278~289Ma[29-30]。

前已述及，关于黑山铜镍矿床的成岩成矿时代，汤中立[17]测得黑山基性—超基性杂岩体的 Sm-Nd 模式年龄为 1026~1212Ma。鉴于岩体侵位于青白口纪—寒武纪地层中，北侧出露有元古宙中深变质岩系，该年龄明显老于岩体所侵入的中—上寒武统西双鹰山组的时代，与宏观的地质证据相悖，故推测其可能反映元古宙结晶基底的年龄。

本次研究获得的黑山铜镍矿化角闪辉长岩 11 个锆石样品的年龄数据较集中，其年龄加权平均值为 374.6Ma±5.2Ma(95%可信度)，属晚泥盆世。这一年龄与近年在黑山铜镍矿外围新发现的怪石山铜镍矿点含矿岩体的成岩时代(355~409Ma)相近(本项目，另文发表)，可能代表了岩体形成的时间。

表 1　黑山铜镍矿区角闪辉长岩锆石 SHRIMP U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1　SHRIMP U-Th-Pb compositions of zircon from amphibole-gabbro body of the Heishan copper-nickel deposit

测点	$^{206}Pb_c$ /%	U /10^{-6}	Th /10^{-6}	^{232}Th /^{238}U	$^{206}Pb^*$ /10^{-6}	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄/Ma	不和谐性/%	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$ /±%	$^{207}Pb^*/^{235}U$	$^{206}Pb^*/^{238}U$	误差相关系数
1.1*	0.26	751	676	0.93	41.3	399.3±6.2	412±40	3	0.05499±1.8	0.484±2.4	0.0639±1.6	0.664
2.1	0.18	971	1084	1.15	50.6	378.6±6.0	411±35	8	0.05496±1.6	0.458±2.2	0.06049±1.6	0.722
3.1	0.17	933	965	1.07	49.2	383.3±6.0	444±48	14	0.0558±2.1	0.471±2.7	0.06127±1.6	0.600
4.1	0.06	1436	1622	1.17	74.6	378.3±5.9	368±29	-3	0.05393±1.3	0.4494±2.1	0.06044±1.6	0.778
5.1	0.06	1538	1958	1.32	79.4	376.1±5.8	420±43	10	0.0552±1.9	0.457±2.5	0.06009±1.6	0.634
6.1	0.12	871	920	1.09	43.7	365.7±5.7	485±35	25	0.05684±1.6	0.457±2.3	0.05837±1.6	0.717
7.1	0.06	2138	2103	1.02	105	358.4±5.9	448±26	20	0.05589±1.2	0.4405±2.1	0.05717±1.7	0.826
8.1	0.05	1619	1934	1.23	82.0	369.2±5.6	468±29	21	0.05640±1.3	0.4584±2.0	0.05895±1.6	0.769
9.1	0.14	1113	992	0.92	57.8	377.8±5.9	461±31	18	0.05622±1.4	0.4678±2.1	0.06035±1.6	0.753
10.1	0.03	1484	2654	1.85	77.1	378.5±6.7	444±42	15	0.0558±1.9	0.465±2.6	0.0605±1.8	0.689
11.1	0.15	998	1082	1.12	52.7	384.0±5.9	430±50	11	0.0554±2.2	0.469±2.8	0.06137±1.6	0.578
12.1	0.00	941	939	1.03	48.2	373.0±5.9	481±43	22	0.0567±1.9	0.466±2.5	0.05936±1.6	0.639

注:Pb_c 和 Pb^* 分别代表普通铅和放射成因铅;应用实测 ^{204}Pb 进行普通铅校正;点号中标 * 号者不参与 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值计算

黑山铜镍矿含矿岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果与新疆阿勒泰南缘和东天山—北山地区的含矿岩体(喀拉通克、黄山、黄山东、白石泉、坡北 10 号、坡北 1 号、海豹滩、哈特卡尔等)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(285~274Ma)明显不同[14-15,28-32],说明在北山地区除存在坡 1、坡 10 等与喀拉通克、黄山时代相近的铜镍矿化岩体外(石炭纪末—二叠纪),还存在着华力西早期的铜镍硫化物成矿作用。这一时期的铜镍硫化物矿床以前还没有被注意到,值得今后给予关注。

6　地质意义

研究表明,铜镍矿床通常产于古大陆边缘裂谷、大陆裂谷和造山伸展三大构造环境[19,28]。本次通过锆石同位素定年研究,将黑山铜镍矿床含矿岩体的成岩时代厘定为晚泥盆世,结合坡 1 和坡 10 含矿岩体的年代学资料,以及近年来在北山 6 条基性—超基性岩带中陆续发现的铜镍矿化、钒钛磁铁矿床(点),认为北山地区晚古生代一直处于较强烈的拉张环境。泥盆纪含铜镍基性—超基性岩的厘定不仅为重新认识北山地区的地质构造演化提供了基础资料,而且为今后在北山地区开展铜镍矿找矿工作开阔了视野。

致谢:野外工作期间得到金川公司黑山矿区齐正广同志的支持和帮助,SHRIMP 锆石 U-Pb 测年过程中北京离子探针中心朱明帅博士给予支持和指导,两位审稿人提出了许多建设性的意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1]左国朝, 李茂松, 等. 甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成和演化[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1996.

[2]汤中立,李文渊.中国与基性—超基性岩有关的 Cu-Ni(Pt)矿床成矿系列类型[J].甘肃地质学报, 1996,5(1):50-64.

[3]汤中立,白云来.亚欧大陆桥北山-天山接合部构造格局[J].甘肃地质学报,1997,6(增刊):13-20.

[4]聂凤军,江思宏,刘妍,等.甘肃花牛山东钾长花岗岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素年龄及其地质意义[J].地质科学,2002,37(4):415-422.

[5]马瑞士,王赐银,叶尚夫,等.东天山构造格架及地壳演化[M].南京:南京大学出版社,1993:6-36.

[6]何世平,任秉琛,姚文光,等.甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J].西北地质,2002,35(4):30-40.

[7]杨合群.北山成矿构造背景概论[J].西北地质,2008,41(1):22-27.

[8]白云来.新疆哈密黄山-镜儿泉镍铜成矿系统的地质构造背景[J].

甘肃地质学报,2000,9(2):1-7.

[9]何国琦,李茂松,刘德权,等.中国新疆古生代地壳演化及成矿[M].香港:香港文化教育出版社,乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994:166-187.

[10]秦克章,方同辉,王书来,等.东天山板块构造分区、演化与成矿背景研究[J].新疆地质, 2002,20(4) :302-312.

[11]毛景文,杨近民,屈文俊,等.新疆黄山东铜镍矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. 矿床地质, 2002,21(4):323-330.

[12]白云来,张汉成,李卫红,等.论甘肃北山中部镍铜成矿系统的构造背景[J].甘肃地质学报, 2002,11(2):29-44.

[13]Zhou M F , Lesher C M , Yang Z X , et al. Geo-chemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district , eastern Xinjiang , north-west China : Implications for the tectonic evolution of the central Asian orogenic belt [J]. Chem. Geol., 2004,209: 233-257.

[14]韩宝福, 季建清, 宋彪, 等.新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁—超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2324-2328.

[15]吴华,李华芹,莫新华,等. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性—超基性岩体形成时代及其地质意义[J]. 地质学报,2005,79(4):498-502.

[16]孙赫,秦克章,李金祥,等.东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景[J].中国地质,2006,33(2):606-617.

[17]汤中立,白云来.华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J].地学前缘,1999,6(2):271-283.

[18]白云来,陈启林,汤中立, 等.塔里木板块东北边缘弧后裂谷系统基性、超基性岩特征[J].中国地质, 2004,31(3):254-261.

[19]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.

[20]汤中立.超大型 Ni-Cu(Pt)岩浆矿床的划分与找矿[J].地质与勘探,2002,38(3):1-7.

[21]马鞍山矿山研究院.信息平台:金川集团外围镍矿资源勘探开发步伐加快[J].现代矿业, 2009,479(3):99.

[22]ComPston W,Williams,Rschvink J L,et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. Journal of Geological Society, london, 1992,149:171-184.

[23]宋彪,张玉海,万渝生,等.锆石 SHRIMP 样品制靶制作\年龄测定及有关现象讨论[J].地质评论, 2002,48(增刊):26-30.

[24]Ludwig K. Isoplot/Ex 2.49: A geochronological toolkit for microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. la, 2001.

[25]Steiger R H, Jäger E. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1977,36: 359-362.

[26]Ireland T R, Gibson G M. SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand[J]. J. Metamorphic Geol., 1998, 16:149-167.

[27]简平,张旗,刘敦一,等.内蒙古固阳晚太古代赞岐岩(sanukite)-角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义[J].岩石学报,2005,21(1):151-157.

[28]姜常义, 程松林, 叶书锋, 等.新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 2006,22(1): 115-126.

[29]李华芹,陈富文,梅玉萍,等.新疆坡北基性—超基性岩带Ⅰ号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J].矿床地质, 2006,25(4):463-469.

[30]李华芹,梅玉萍,屈文俊,等.新疆坡北基性—超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J].矿床地质, 2009,28(5):633-642.

[31]李锦轶, 宋彪, 王克卓, 等.天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向生长的地质记录[J]. 地球学报, 2006,27(5): 424-446.

[32]毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等.新疆东天山白石泉铜镍矿床基性—超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J].岩石学报, 2006,22(1): 153-162.