第 56 卷 第 6 期 2023 年 (总 232 期)

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 6 2023(Sum232)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023150

地质物化探综合方法在甘肃北山红柳沟铜镍矿的应用

王小红,杨建国,王磊,谢燮,姜寒冰*

(中国地质调查局西安地质调查中心,自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,陕西西安 710119)

摘 要: 红柳沟基性-超基性岩体是笔者开展1:5万矿产地质调查期间新发现和厘定的含铜镍矿化岩体,它位于塔里木板块北缘北山裂谷带,夹持于大山头-岗流脑子和方山口-庙庙井-双鹰山断裂带之间,北西距黑山大型铜镍矿床约30km,是一个非常重要的铜镍成矿区。运用地物化遥等综合找矿技术方法,在充分系统研究地质背景的前提下,利用1:5万水系沉积物和磁法测量对空白区进行扫面,圈定异常,进而开展大比例尺地质测量和激电中梯及激电剖面测量工作,进一步圈定出成矿区内若干有利的成矿地段,择优开展槽探和钻探工程验证,新发现红柳沟Ⅲ、Ⅳ号铜镍矿点,取得了较好的找矿效果,说明综合运用物化探找矿方法是可行、有效的,对进一步指导该区及区域上的铜镍找矿工作具有借鉴意义。

关键词:基性-超基性岩;铜镍矿;靶区圈定;综合方法;北山红柳沟

中图分类号: P618.2; P631; P632 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2023)06-0254-08

The Application Effect of Geological Geophysical and Geochemical Exploration Comprehensive Method in Hongliugou Copper–Nickel Deposit, Beishan, Gansu Province

WANG Xiaohong, YANG Jianguo, WANG Lei, XIE Xie, JIANG Hanbing*

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shannxi, China)

Abstract: Hongliugou basic-ultrabasic rock mass is a copper-nickel mineralized rock mass newly discovered and determined during the author's 1 : 50 000 mineral geological survey. It is located in the Beishan Rift zone on the northern margin of Tarim Plate, sandwiched Dashantou-Gangliuxin and Fangshankou-Miaomiaojing-Shuangyingshan fault zone, and is about 30 km to the northwest from Heishan large copper-nickel deposit. Under the premise of fully and systematically studying the geological background, comprehensive prospecting techniques such as geological, physical, chemical and remote prospecting are used to sweep the blank area with 1 : 50 000 drainage sediment and magnetic survey to delineate anomalies, and then large-scale geological survey and exciting elevator profile survey are carried out to further delineate some favorable ore-forming areas in the metallogenic area. The channel exploration and drilling engineering verification are carried out in an optimal manner, and the Cu-Ni ore spots No. III and IV in Hongliugou are newly discovered, and better prospecting results have been obtained, which indicates that the comprehensive application of physicochemical prospecting method is feasible and effective, and has reference significance for further guiding the Cu-Ni prospecting work in this area and the region.

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2023-04-05; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目:中国地质调查局项目"西北地区昆仑-秦岭等成矿区带重点调查区锂镍等战略性矿产调查评价"(DD20230048)。 作者简介:王小红(1978-)女,硕士,工程师,从事矿产地质调查工作,E-mail:29187125@qq.com。

^{*}通讯作者:姜寒冰(1979-),女,高级工程师,从事西北地区区域成矿规律研究。E-mail: jianghanbing 1980@126.com。

Keywords: mafic-ultramafic rock; copper and nickel ore; target area delineation; comprehensive prospecting method; Hongliugou

20世纪90年代,在汤中立院士岩浆硫化物矿床 成矿理论指导下,甘肃省地质矿产局地质队伍在北山 南部地区普查发现了黑山铜镍矿床,拉开了该区寻找 铜镍矿的序幕。中国地质调查局西安地质调查中心 自2003年进行"北山成矿带找矿重大疑难问题研究" 开始,连续承担甘蒙北山地区多个科研--勘查项目。 在黑山铜镍矿床外围相继发现了怪石山、红柳沟、三 个井等多处铜镍矿点及十余个矿化基性--超基性岩体 (王立社等,2008;谢燮等,2013a,2013b)。笔者论述地 质物化探综合方法在甘肃北山红柳沟铜镍矿靶区圈 定中的应用,供进一步找矿参考。

1 成矿地质背景

白云来等(2002,2004)讨论甘肃北山镍铜成矿系统的构造背景为裂谷系统基性-超基性岩。杨合群等(2006,2008,2012)将北山地区的基性-超基性岩类分为两大类,即板内环境下侵入的与铜镍矿化有关的基

性-超基性岩和洋壳环境下形成的与铬铁矿化有关的基性-超基性岩;明确了北山铜镍成矿构造背景为晚古生代裂谷带。杨建国(2012a, 2012b)对黑山铜镍矿床中黑山角闪辉长岩 11颗锆石的年龄值为(358.4±5.9)~(399.3±6.2)Ma,加权平均值为(374.6±5.2)Ma(95%可信度),属于晚泥盆世;怪石山铜镍矿床中辉长岩加权平均值为(358.6±3.9)Ma,属早石炭世早期;大山头岩体中辉长岩加权平均值(359.3±5.7)Ma,属早石炭世早期;这些年龄信息证实该区镍铜成矿环境为北山晚古生代裂谷。

甘肃北山岩浆铜镍矿产地主要分布于北山裂谷 带北缘方山口-庙庙井-双鹰山断裂带两侧,赋存于分 异强烈的基性-超基性杂岩中,主要矿床为黑山铜镍 矿。近几年,陆续发现的多处铜镍矿点(怪石山、大山 头、三个井、红柳沟、铭扬等)与黑山铜镍矿处于同一 成矿带上,位于黑山与怪石山铜镍矿床的西延部分 (图1)。因此,研究区具有形成铜镍矿的有利构造地 质背景。





2 含矿岩体特征及浅部矿化

2.1 基性-超基性岩特征

红柳沟基性-超基性岩体出露面积为 5~20 km²,

以辉长岩为主。其中分异出 0.1~0.3 km² 具铜镍矿化 的基性-超基性岩体,岩相组合为橄榄辉长岩、橄榄辉 石岩+辉石岩+二辉橄榄岩+橄榄苏长辉长岩,岩体 m/f平均值为 2.38~3.35。铜镍矿化主要发育于橄榄 二辉岩、二辉橄榄岩、橄榄紫苏辉长岩中(图 2)。



1.第四系; 2.云母石英片岩; 3.花岗岩脉; 4.辉长岩; 5.橄榄辉长岩; 6.基性-超基性岩

图 2 红柳沟基性-超基性岩体地质略图

Fig. 2 Geological sketch map of the Hongliugou mafic-ultramafic complex

辉长岩主要分为2期,早期暗色辉长岩和晚期浅 色辉长岩,早期辉长岩辉石含量大多超过60%,晚期 辉长岩辉石含量为30%~40%,两期辉长岩为侵入接 触关系。根据矿物粒度将早期辉长岩划分为伟晶状 辉长岩、中粒辉长岩和中细粒辉长岩3个相带,基性--超基性岩体周围多发育伟晶状辉长岩。超基性岩以 橄榄角闪苏长岩、橄榄辉长苏长岩、辉石岩为主,大 多呈小岩株和岩脉产出,岩体岩相分异明显,且多处 于断裂带及相对低洼处,岩石蚀变破碎较强,呈碎裂 状、蜂窝状等。根据野外观察及岩石组合特征,岩体 最早侵入的为浅色辉长岩相,其与敦煌群云母石英片 岩,黑云花岗片麻岩呈明显的侵入接触,其次为橄榄 二辉辉长岩、橄榄岩、辉橄榄岩、辉石岩、伟晶状辉长 岩和纯橄岩等岩相,其应为深部分异,分期侵入到浅 色辉长岩之中。

2.2 地表浅部矿化线索

通过在磁异常区进一步开展1:1万地质填图和 异常查证工作,圈定出红柳沟Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ号含矿基 性-超基性杂岩体和3个铜镍矿点,经对地表槽探工 程揭露,岩体内圈定出数十条铜镍矿体(矿化体)。矿 (化)体多呈NW向分布,一般长50~300m,宽为1~9m 不等,Cu、Ni平均品位分别为0.007%~0.670%、 0.201%~1.280%。矿石以晶粒状结构、碎裂结构为主, 构造以斑点状、浸染状、网脉状构造为主。硫化物呈 稀疏浸染状、斑块状、细脉状产出(图 3)。

3 地球化学勘查

3.1 水系沉积物测量

水系沉积物调查通过异常检查、追索矿化源地进 一步圈地远景区,是以找矿为主要目的的地球化学勘 查手段(王瑞廷等,2023;孔祥超等,2023)。本次开展 的大泉-荒草滩幅1:5万水系沉积物测量,在红柳沟 圈定的Cu-Ni-Co异常面积达30km²以上,组合异常 套合较好,且分带明显,在前期工作中,已经证实此异 常为矿致异常。

3.2 综合地球化学异常特征

为了研究区域上不同元素在空间上的地球化学 分布特征及分布规律,寻找有意义的矿产资源靶区, 通过对元素数据的相关性分析和R型聚类分析,在大 泉-荒草滩幅一带圈定20个综合异常,甲类5个(HS-3、HS-15、HS-16、HS-18、HS-19),其中Hs-3为红柳沟 地区综合异常,该异常呈EW向带状分布,面积为 55.89 km²,主要元素组合为Cu、Ni、Co、V、Zn和Mn, Cu、Ni与Co3种元素异常套合较好(图4),具有三级 浓度分带,与红柳沟地区基性--超基性杂岩体地表出 露范围一致,异常特征见表1。





斑状铜镍矿化橄榄苏长辉长岩(氧化)

氧化铜镍矿石



矿石硫化物组合(Po-磁黄铁矿; Pn-镍黄铁矿; Cp-黄铜矿)





1.第四系; 2.第三系; 3.新近系; 4.奥陶系; 5.蓟县系; 6.长城系勒巴泉群; 7.敦煌群; 8.辉长岩; 9.花岗闪长岩; 10.断裂; 11.混合岩化带; 12.产状; 13.Ni 异常线; 14.Cu 异常线; 15.Co 异常线; 16.异常极大值; 17.铜镍矿点

图 4 甘肃北山红柳沟地区(HS-3)综合异常区(HS-3)Cu-Ni-Co组合异常剖析图 Fig. 4 Anomaly resolution map of No. HS-3 in Hongliugou area, Beishan Mountain, Gansu Province

Tab. 1 The Synthetic Characteristic of anomanes for the stream sediment in Honghugou Cu–Ni prospective area									
异常编号	异常点数	异常面积(km ²)	极大值	平均值	标准离差	衬度值	规模	浓度分带	
Cu6	4	1.01	34.10	31.48	1.80	1.09	2.50	1	
Cu5	147	30.50	135.00	41.53	15.69	1.43	382.25	3	
Cu8	6	1.67	38.70	33.35	3.85	1.15	7.28	1	
Cu7	1	0.12	29.90	29.90	0.00	1.03	0.10	1	
Ni5	135	27.97	387.00	68.91	48.21	1.97	948.38	3	
Au11	1	0.57	2.30	2.30	0.00	1.21	0.23	1	
Au6	7	2.84	38.90	10.53	13.26	5.54	24.54	3	
Au10	3	0.85	3.40	2.60	0.76	1.37	0.60	1	
Au8	8	2.28	2.90	2.30	0.37	1.21	0.91	1	
Mn5	154	36.55	2 820.00	1 092.92	237.86	1.32	9 610.32	2	
Zn7	251	50.08	132.00	76.67	11.80	1.32	935.19	2	
Co5	178	36.59	63.20	21.48	7.11	1.55	277.25	3	
Hg7	9	1.49	24.00	17.17	3.74	1.32	6.21	1	
Ag17	14	3.88	296.00	137.82	59.79	1.97	263.16	3	
Zn5	3	1.03	94.80	79.60	13.60	1.37	22.19	1	
V4	104	18.31	236.00	140.44	32.50	1.40	740.51	2	
Hg9	7	2.99	26.00	16.86	4.41	1.30	11.53	2	
V6	20	3.95	148.00	120.60	12.69	1.21	81.33	1	
As10	7	2.36	22.38	17.07	3.13	1.55	14.32	2	

表1 红柳沟铜镍成矿远景区化探综合异常特征表

Tab. 1 The Synthetic Characteristic of anomalies for the stream sediment in Hongliugou Cu-Ni prospective area

4 地球物理勘查

大比例尺磁电测量是地质勘查工作中最常见及 较有效的地球物理方法之一,尤其对寻找隐伏矿体有 重要应用(何鹏等,2018;耿涛等,2023)。本次主要针 对化探异常所圈定的铜镍钴等成矿元素异常和1:5 万高精度磁法测量磁异常重叠地段布设1:1万高精 度磁法剖面测量、激电中梯短导线测量等大比例尺磁 电测量工作。

4.1 岩矿石物性特征

由红柳沟地区岩矿石物性参数统计表(表 2)可以 看出,矿化岩石具中低阻(100~800 Ω·m)、高极化率 (5%~13%)电性特征。橄榄辉石岩属于高磁化率、高 磁化强度,中阻高激化岩石,与其他岩石具有明显区 别;而辉长岩属于低磁化率、低磁化强度,高阻-超高 阻中等激化率的岩石;花岗岩属于低磁化率、低磁化 强度高阻中等激化率的岩石,在电性上与其他岩石上 存在区别;辉石岩属于中-高阻低磁低激化岩石,从而 可以很好分辨各种岩石;围岩相比矿石物性差异比较 明显,由此看来电法在本研究区内找矿方法是有效可 行的。

4.2 1:5万磁法测量成果

1:5万高精度磁法测量,以150 nT为下限,在区 内圈定长约为2000 m,宽约为600 m的磁异常,具3 个高值中心,异常极大值约为300 nT,异常等值线北 密南疏,梯度不大,幅值不高。通过磁法测量发现了 4个铜镍矿化岩体。

4.3 1:1万磁法测量成果

针对 1:5 万地面高精度磁法测量圈定的磁异常 (4个近等轴状中低等强度磁异常,异常强度最大值为 -80~+180 nT)和踏勘发现的铜镍矿化岩体开展了 1:1万地面高精度磁法测量,异常重现性好,但异常 形态及细节更加清晰。以 3 号岩体对应 C3 异常为例, 1:1万磁异常为正、负相伴的近等轴状异常(北负南 正)(图 5a),最大值为+470 nT,最小值为-100 nT,磁异 常范围与矿化岩体基本一致。在正、负磁异常交替部 位橄榄辉长岩和二辉橄榄岩中可见原生斑点状磁黄 铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿集合体。依据该地段发育 1:5万 Cu-Ni-Co-As 化探综合异常、磁异常强度与 特征、分异较好的基性--超基性岩,以及岩体中见有磁 黄铁矿+黄铜矿+镍黄铁矿原生金属硫化物组合这些

表 2 岩矿石物性测量结果

Tab. 2 Statistics of ores and rocks physical properties

岩石类型	标本 块数	电阻率(Ω·M)		极化率(%)		$\mathrm{K}(\ 10^{-3}4\pi\mathrm{SI})$			Jr(10 ⁻³ A/M)		
		电阻率值	平均值	极化率值	平均值	K(最小)	K(最大)	K(平均)	J(最小)	J(最大)	J(平均)
橄榄辉石岩	28	305~876	611	25.75~41.82	33.24	2 422	5 010	3 548	344	2 565	1 108
花岗岩	26	$2388\!\sim\!16611$	4 742	$0.96\!\sim\!1.86$	1.42	53	102	78	9	17	14
辉长岩	29	$3655{\sim}16176$	9 808	$0.79 \! \sim \! 1.44$	1.22	24	139	79	11	31	17
辉石岩	26	$890 \sim 2357$	1 210	0.68~1.41	0.78	56	134	81	6	15	9

综合指标,断定4个岩体应为含矿岩体。随后,经开展矿产评价,在圈定的4个磁异常区内发现了4处铜镍矿点,其中红柳沟3号杂岩体地表圈定出2条长为50~180m、宽约为10m的贯入型富铜镍矿体,Cu品位为0.1%~0.67%,Ni品位为0.42%~1.28%。

4.4 激电中梯测量

笔者重点针对3号基性-超基性杂岩体开展了 1:1万激电中梯测量,并对地表见矿较好部位的异常 采用激电测深剖面进行了解剖。结果表明,该3号矿 化杂岩体出露区极化率均较高,ηs=7.5%~12.5%;电 阻率变化很大,ρs=300~2100Ω·m。以ηs≥9%和ρs≤ 600Ω·m为异常下限,圈定出一个面积约0.3km²的中 低阻、高极化率异常,与地表矿化基性-超基性岩体空 间完全耦合(图5b)。激电测深剖面揭示,在地表以 下50~400m发育一个具中-低阻、高极化率电性特 征、向南缓倾的厚板状异常体,该板状异常体有2个



a.磁异常等值线; b.激电异常等值线; c.视电阻率反演断面图; d.极化率反演断面图

图 5 基性--超基性岩体磁电异常套合图

Fig. 5 Magnetoelectric anomaly pattern of basic-ultrabasic rock mass

小分枝通达地表,与探槽揭露的2个贯入式铜镍矿体 空间位置完全耦合(图5c),推断深部异常体是由硫化 矿体引起,表明电法在该区开展该类型矿深部找矿效 果良好(王文财等,2020)。

5 多元信息综合预测靶区

根据铜镍矿化基性--超基性岩体具有正负相伴、 中等强度的磁异常,且异常形态多为近等轴状或椭圆 状这一磁性特点,经开展大比例尺地面高精度磁法测 量,能够快速锁定目标地质体(尤其是大辉长岩基中, 利用磁法寻找较高基性岩相及超基性岩相可以起到 事半功倍的效果)。结合化探异常、激电异常及遥感 蚀变异常等其他相关叠加信息,磁异常中心地段地表 可直接发现含铜镍超基性岩体小露头。

红柳沟含矿基性-超基性杂岩体是检查大山头辉 长岩基中的1:5万磁异常时发现的。该辉长岩体出 露面积达40km²,前期预研究成矿信息显示,其上套 合有面积达 60 km² 的 1:20 万 Cu-Ni-Co-Cr 组合化 探异常。但化探异常和岩体面积大且无超基性岩出 露信息,找矿目标难以确定。1:5万矿产地质调查期 间开展的地面高精度磁法测量,于该岩体上圈定出4 个面积均为1km²的近等轴状磁异常,缩小了找矿目 标范围。经对4个磁异常中心进行踏勘,均发现了出 露面积 n×(10~100)m²的超基性岩露头及较大范围 的球状风化橄榄辉长岩露头,并在橄榄辉长岩球形风 化体中普遍见到了星点状和聚斑状磁黄铁矿和黄铜 矿集合体,快速确定了该岩体为含矿岩体。利用工程 手段对成矿有利地段圈定的靶位进行验证,在红柳沟 铜镍矿点圈定出多条铜镍矿(化)体,实现了该区铜镍 找矿新发现。红柳沟岩体与黑山铜镍矿床处于同一 构造带上,具有与其相同的成矿地质背景。综合地、 物、化、遥信息显示,岩体整体剥蚀较浅,深部推测有 较好的找矿潜力。

6 结论

(1)水系沉积物测量对于进一步圈定找矿靶区和 成矿有利地段有重要的作用,通过研究前人1:20万 化探资料及开展的1:5万水系沉积物测量工作,优 选出一批具有重要找矿线索的成矿元素异常,为物探 工作打下良好的基础。 (2)在化探工作的基础上,利用大比例尺物探工 作手段(激电中梯测量、激电测深)等方法进一步缩小 找矿靶区,圈定矿体的空间分布形态,确定高极化、中 高阻的典型物探特征作为地球物理找矿标志,为地质 找矿勘探工程布设提供了直接依据。

(3)根据地-物-化相结合的综合找矿方法在甘肃 北山营毛沱地区内圈定了多处找矿潜力较大的靶位 (铭扬铜镍矿点、红柳沟铜镍矿点、三个井铜镍矿床 和拾金滩铜镍矿点等),经工程验证见矿效果较好。 实践表明,综合找矿方法的应用是找矿勘探的有效手 段,在甘肃北山地区开展的找矿工作中得到了显著效 果,这为今后在该区域内实施找矿工作提供了指导思 想和理论依据。

参考文献(References):

- 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.
- BAI Yunlai, CHEN Qilin, TANG Zhongli, et al. The characteristics of basic- ultrabasic rocks in the back- arc rift system on the northeastern margin of the Tarim plate[J]. Geology in China, 2004, 31(3): 254–261.
- 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.
- BAI Yunlai, ZHANG Hancheng, LI Weihong, et al. On the geotectonic background of the nickel- copper metallogenic system of the central Beishan mountains in Gansu, China [J]. Acta Geologica Gansu, 2002, 11(2): 29–44.
- 耿涛,郭培虹,冯治汉,等.北秦岭华阳川地区复杂地形条件下 隐伏硬岩型铀矿的地球物理勘查方法[J].西北地质,2023, 56(2):225-244.
- GENG Tao, GUO Peihong, FENG Zhihan, et al. Geophysical Exploration Eethod of Concealed Hard Rock Type Uranium Deposit with Complex Topographic Conditions in Huayangchuan Area, North Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 225–244.
- 何鹏,张跃龙,苏航,等.综合找矿方法在内蒙古昌图锡力锰银 铅锌矿 勘查中的应用[J]. 地质与勘探,2018,54(3):501-511.
- HE Peng, ZHANG Yuelong, SU Hang, et al. Application of the integrated ore-prospecting method in the Changtuxili Mn-Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(3): 501–511.
- 孔祥超,万鹏,卢文姬,等.新疆东昆仑大沙沟地区水系沉积物 测量地球化学特征及找矿方向研究[J].西北地质,2023,

56(4): 116-127.

- KONG Xiangchao, WAN Peng, LU Wenji, et al. Geochemical Characteristics and Ore–prospecting of Dashagou Area in East Kunlun, Xinjiang: Based on Stream Sediment Survey[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 116–127.
- 王立社,杨建国,谢春林,等.甘肃怪石山铜镍矿化基性超基性 岩成矿潜力研究[J].大地构造与成矿学,2008,32(3): 392-399.
- WANG Lishe, YANG Jianguo, XIE Chunlin, et al. Metallogenic potentiallty of Guaishishan Cu-Ni mineralized basic-ultrabasic rock in Beishan area, Gansu Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(3): 392–399.
- 王瑞廷,秦西社,李青锋,等.西秦岭凤太铅锌矿集区成矿特征、 找矿预测及勘查方法技术组合[J].西北地质,2023,56(5): 85-97.
- WANG Ruiting, QIN Xishe, LI Qingfeng, et al. Metallogenic Characteristics, Prospecting Prediction and Exploration Methods Combination of Fengtai Pb–Zn Orefield, West Qinling[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 85–97.
- 王文财.激电中梯测量在辽宁矿洞沟铅锌矿床勘查中的应用[J].中国钼业, 2020, 44(4): 35-37.
- WANG Wencai. Application of polarization intermediate gradient survey in Kuangdonggou lead-zinc deposit in Liaoning Provinc[J]. China Molybdenum Industry, 2020, 44(4): 35–37.
- 谢燮,杨建国,王小红,等.甘肃北山红柳沟含铜镍基性超基性 岩体成矿特征及其找矿潜力分析[J].西北地质,2013a, 46(S):163-166.
- XIE Xie, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. The metallogenic characteristics and prospecting potential analysis of Hongliugou Cu-Ni minerallzed mafic-ultramafic rocks in Beishan area, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2013a, 46(S): 163–166.
- 谢燮,杨建国,王小红,等.甘肃北山大山头一带铜镍矿化基性-超基性岩地质/地球化学特征及成矿潜力[J].新疆地质, 2013b, 31(4): 353.
- XIE Xie, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. The geology,

Geochemical characteristics and metallogenic potential of Dashantou Cu- Ni minerallzed mafic- ultramafic rocks in Beishan, Gansu Province[J]. Xinjiang Geology, 2013b, 31(4): 353.

- 杨合群,姜寒冰,赵国斌,等.觉罗塔格-黑鹰山成矿带晚古生代 地质建造有关成矿系列族[J].西北地质,2012,45(Sl): 13-16.
- YANG Hequn, JIANG Hanbing, ZHAO Guobin, et al. The Late Paleozoic geological formation in the Jueluotage-Heiyingshan metallogenic belt is related to the metallogenic families[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(SI): 13–16.
- 杨合群,李英,李文明,等.北山成矿构造背景概论[J].西北地 质,2008,41(1):22-27.
- YANG Hequn, LI Ying, LI Wenming, et al. General discussion on metallogenitictectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(1): 22–27.
- 杨合群,李英,杨建国,等.北山造山带的基本成矿特征[J].西 北地质,2006,39(2):78-95.
- YANG Hequn, LI Ying, YANG Jianguo, et al. Main metallogenic characteristics in the Beishan orogen [J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 78–95.
- 杨建国, 王磊, 王小红, 等. 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[J]. 地 质通报, 2012a, 31(2-3): 448-454.
- YANG Jianguo, WANG Lei, WANG Xiaohong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Heishan mafic- ultramafic complex in the Beishan area of Gansu Province and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012a, 31(2 –3): 448–454.
- 杨建国,谢春林,王小红,等.甘肃北山地区基本构造格局和成 矿系列特征[J].地质通报,2012b,31(2-3):422-438.
- YANG Jianguo, XIE Chunlin, WANG Xiaohong, et al. Basic tectonic framework and features of metallogenic series in Beishan area, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012b, 31(2–3): 422–438.