

金川铜镍矿床中断裂系统的形成演化及对矿体的控制

曾认宇^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 毛先成^{1,2}, 陶斤金^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 金川铜镍硫化物矿床位于华北板块西南缘的龙首山隆起带内, 断裂系统是其主要的控矿因素, 在多次构造运动中, 形成了纵横交错的断裂, 其运动也有多期性, 根据目前断裂性质, 分为4组, 分别为: 北西向压性断裂, 北西向容纳金川岩体的断裂, 北东东向扭性断裂和北东向张性断裂。其中前两组在岩体侵入前已经存在, 为金川岩体提供了成矿通道和成矿空间, 而后期被改造; 后两组为成矿后断裂, 改造了矿床的原始形态。通过微量元素和前人年代学研究, 认为其主要形成于中元古代大陆拉张环境下的龙首山裂谷张开初期。成矿前区域处于古陆核边缘的挤压环境, 成矿期为被动大陆边缘的拉张裂谷环境, 成矿后变为活动大陆边缘的挤压环境。通过恢复其原始产状发现容矿断裂成右列式的雁列形态展布, 根据后期改造的特点, 推测在III矿区与F₁断层间、IV矿区的东南部的第四系覆盖层下, 是找矿的有利靶区。

关键词: 金川铜镍硫化物矿床; 矿体原始形态; 断裂系统; 矿体改造; 成矿预测

中图分类号: P613

文献标志码: A

Evolution of fault system and its controlling on Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit

ZENG Ren-yu^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2}, MAO Xian-cheng^{1,2}, TAO Jin-jin^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit is located in the Longshou Mountain, southwestern margin of North China plate. The fault system is the main ore-controlling factor. During numbers of periodic tectonic movements, the criss-cross faults formed. According to the fault properties, these faults can be divided into four categories as: Northwestern compression fault, Northwestern fault which accommodates the Jinchuan intrusion, Northeastern shear fault, and Northeastern tension fault. The former two groups formed before intrusive bodies are emplaced. These faults provide Jinchuan intrusion with metallogenic conduction and space, which were transformed at the later stage. The latter two groups belong to post-metallogenic faults, and transform the original form of deposit. Through the study of trace elements and geochronology, it could be found out that the deposit formed in the primer period of Longshou Valley's fissuration at an atmosphere of Mesoproterozoic continental tentional zone. This area has experienced various kinds of environment, which are as follows: the crushing environment of craton in pre-ore stage, the extensional rift environment of passive continental margin in ore stage, and the crushing environment of active continental margin in post-ore stage. By restoring the original form, it shows that the ore-controlling faults crack into en-echelon. According to the properties of the late-reformation, it is estimated that there exist several favorable areas for ore-prospecting, including the region between mining area III and F₁, and the district under the Quaternary strata, which is in SE of IV mining area.

Key words: Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit; orebody original form; fault system; orebody transformation; metallogenic prognosis

金川矿床是世界上正在开采的第三大铜镍硫化物矿,发现于1958年,呈不规则岩墙体产出的岩体面积仅为1.34 km²,但是47.8%的岩体由矿体组成,具有极高的矿化率,已勘镍金属量>550万t,铜金属量>350万t,其伴生的铂族金属储量占全国总储量的53%,均达到超大型规模^[1-2]。

金川矿体最主要的控制因素是构造,特别是断裂,它不仅控制了成矿作用,为矿体形成提供了场所,还对已形成的岩体、矿体进行了改造。研究表明,现今金川矿区所表现出来的脆性破裂剪切构造、叠瓦式逆冲断层和逆-平移断层的切错是成矿后构造运动的结果^[1]。金川岩体侵位时与如今的构造特点有很大的区别。金川矿区原始形态的恢复,对更深入地研究矿床的成矿模型,有很重要的作用。本文作者通过成矿期、成矿中和成矿后矿区大地构造位置、应力变化和构造变化研究,来分析金川岩体侵入时环境和后期变化特点,恢复其原始形态,并提出找矿的有利靶区。

1 成矿地质背景

1.1 区域地质特征

金川镁铁-超镁铁质侵入体大地构造位置位于华

北地台西南边部阿拉善地块西南缘龙首山隆起带内,阿拉善地块属华北陆块的西端与塔里木地台相接,北依准格尔晚古生代褶皱系,南邻祁连早古生代褶皱系的北祁连褶皱带,东接华北地台,西连塔里木地台^[1]。

龙首山隆起带的平面形态为长条状,呈北西-南东方向展布(见图1),其构造的变形特征可以划分为下部、中部和上部三个层次:下部构造层为古元古代龙首山群构成的基底,出露于龙首山的北侧,呈一倾向南西的单斜产出,为成岩成矿前构造;中部构造层为盖层,中-新元古代和早古生代寒武纪沉积,由墩子沟群与韩母山群组成,角度不整合于龙首山岩群之上,两者呈不整合接触,以韧性剪切变形为主,属脆-韧性变形相,呈一复式背斜,为成岩成矿期构造;上部构造层由古生代及中新世代的断陷盆地或山间盆地沉积组成,为成岩成矿后构造,构造特点以脆性断裂及宽缓褶皱变形为主^[1-3]。

1.2 矿区地层及岩浆岩

矿区主要地层为前长城系龙首山群白家嘴子组(AnZb)和第四系(Q),白家嘴子组为金川矿床的直接围岩,呈北西-南东向带状展布,与区域构造方向一致。白家嘴子组经受了多次变质作用和多期岩浆侵入,形成一套以混合岩、片麻岩、大理岩为主的岩系,依据

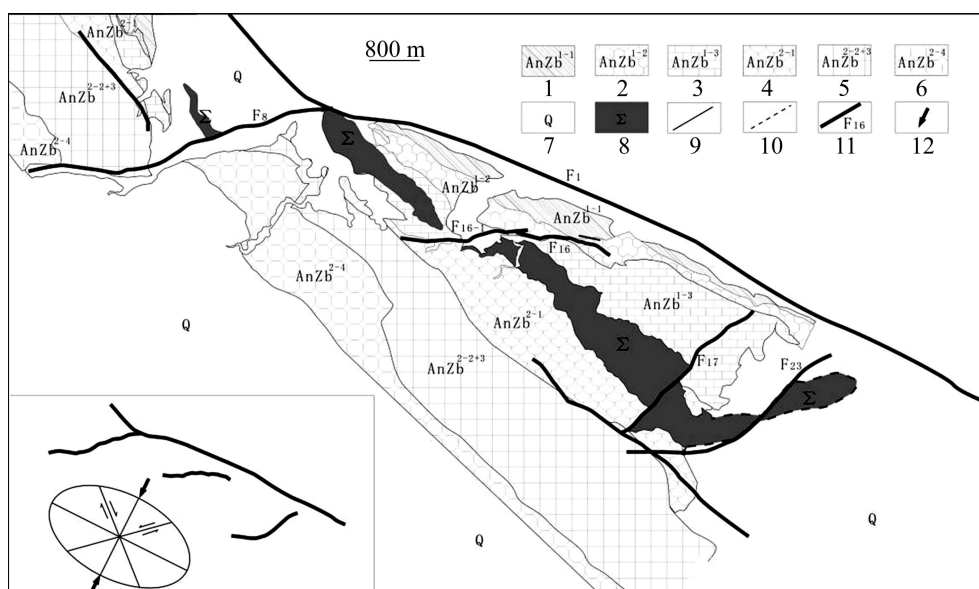


图1 金川铜镍矿床地质简图及成矿后应力分析: 1—角砾状混合岩-均质混合岩; 2—黑云斜长片麻岩; 3—蛇纹大理岩; 4—条带-均质混合岩; 5—绿泥石英片岩+含榴二云片麻岩; 6—蛇纹石大理岩中部分叉夹条带状混合岩; 7—第四系; 8—超基性岩; 9—地质界线; 10—推测地质界线; 11—断层及隐伏断层; 12—主应力方向

Fig. 1 Simplified geological map and paleostress analysis of Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit: 1—Agmatite-homogenic migmatite; 2—Plagioclase biotite gneiss; 3—Serpentinized marble; 4—Banded migmatites-homogenic migmatite; 5—Chlorite schist and Garnet bearing bi-mica gneisses; 6—Serpentinized marble interlarded with streaky migmatite; 7—Quaternary; 8—Ultrabasic rock; 9—Measured geological boundary; 10—Inferred geological boundary; 11—Measured and inferred fault contact; 12—Principal stress orientation

其沉积及变质特点,在矿区分为以下3段(见图1)。

第一段($AnZb^1$):角砾状混合岩-均质混合岩、黑云斜长片麻岩、蛇纹大理岩;

第二段($AnZb^2$):条带-均质混合岩、绿泥石英片岩、含榴二云母片麻岩及蛇纹大理岩;

第三段($AnZb^3$):含榴二云母片麻岩、含蛇纹石大理岩、条带-均质混合岩、蛇纹大理岩。

矿区岩浆岩极为发育,从酸性至超基性,从深成岩体至次火山岩均有产出,其中以超基性岩最为发育,其规模不等,呈岩墙、透镜体、岩脉产出;酸性岩次之,呈岩株、岩脉产出;中-基性岩较少,规模不大,多呈岩脉产出。另外,矿区石英脉具有多期活动的特征。

1.3 矿区构造特征

矿区总的构造特点是褶皱形态简单,断裂构造发育,性质复杂。矿区为一南西倾斜的单斜构造,含矿超基性岩体为侵入该单斜构造中的同向岩墙。单斜构造由白家嘴子组混合岩、大理岩地层组成。地层经历多次构造运动,层间和较大逆断层的上盘附近,常发育紧闭的小褶皱。矿区较大的背、向斜构造仅见于矿区南部。断裂主要是平行于构造线方向的逆断层,以龙首山山前两侧发育的深断裂为代表,两断裂相向产出,倾角 $60^\circ\sim 70^\circ$,其间次级断裂发育,主要为北东向平移断层。

2 主要断裂及其特征

矿区经历了多次构造运动,断裂纵横交错,其运动也具有多期性,使岩体及围岩受到强烈的地质构造侵蚀和应力作用,部分矿物的晶体结构甚至被拉伸成纤维状或粘土状^[4]。在不同应力场条件下表现出不同的性质,按照现在断裂的特征,主要可以分为以下4组。

2.1 北西向压性断裂

该组断裂倾向南西,倾角 60° 以上,以区域大断层 F_1 、 F_2 为代表,在矿区最为发育。

F_1 断层被定义为阿拉善地台南部边缘的龙首山隆起带与其北的中新生代潮水盆地的分界断层。东自红崖山水库南,经西山口、茆岭、尖山、石井口等延出区外,长约200 km。 F_1 断层不是一个简单的线状构造,

是在长期的构造演化中由若干个断裂连接贯通发展而成。金川铜镍矿矿区的北侧一段,走向为北西西,倾向南西,倾角 60° ,上陡下缓。该断层经过长期孕育形成,对以往构造有继承性,其上盘岩层不但逆掩于下盘侏罗系-第三系之上,而且逆冲到中、下更新统砂粒层上面,具长期活动的特点,目前在活动方式上以沿断层面的水平扭动为主。

F_2 断层系位于龙首山南侧,以 F_2 断层为主体,由一系列束状的分枝次级断裂组成。构成了龙首山隆起带与走廊过渡带的分界。其南主要分布寒武系以后地层,其北主要分布震旦系及前震旦系地层,沿断裂带多有岩浆侵入充填,构成花岗岩带。

2.2 北西向张扭性断裂

北西向张扭性断裂产状与第一组北西向压性断裂基本相同,含镍超基性岩体充填位置可作代表。超基性岩有如下特点:①大致以 10° 交角不整合侵位于前长城系白家嘴子组中,岩体直接与片麻岩、大理岩、条带状混合岩接触,大致呈北西向似墙状、透镜状分布;②岩体边部部分钻孔中发现侵入前断层角砾岩;③岩体在空间上延伸不一、形态多变,且岩体边界在平面上呈锯齿状,呈现追踪性质。以上三点,反映了容纳岩体的断裂具有张性断裂的特点^[1]。而根据岩墙的岩相带在岩体下盘发育较薄甚至缺失边缘岩相,可知岩墙侵入时,该断裂倾角较缓。

2.3 北东向扭性断裂

该组断裂倾向南东,倾角 70° 以上,为左行平移断层,以 F_8 、 F_{16-1} 和 F_{23} 为代表,规模较大,主要活动期为成矿后,为改造矿体形态的主要断裂。

F_8 断层位于I矿区和III矿区之间,走向北东东,倾向东南,倾角 $70^\circ\sim 80^\circ$,断层切割大理岩、混合岩,也切割第四系砂砾岩层,表明断层在第四系仍有活动。该断层具多次活动的特点,早期为张性断裂(断层中有张性角砾岩),晚期为一逆平移断层^[5]。

F_{16-1} 断层位于I矿区和II矿区之间,走向北东东,倾向南,倾角 70° 左右,长700 m。断层破碎带宽2~3 m,由大理岩、混合岩、碎屑岩组成,在穿过岩体部分时由超基性岩碎块组成。断层上盘为老变质岩系,下盘为含矿超基性岩。从水平断面分析(见图2),可知南岩体(III、I矿区)原本在北岩体(II、IV矿区)的南边,是断层活动使其近似在一条直线上。在井下,可见断

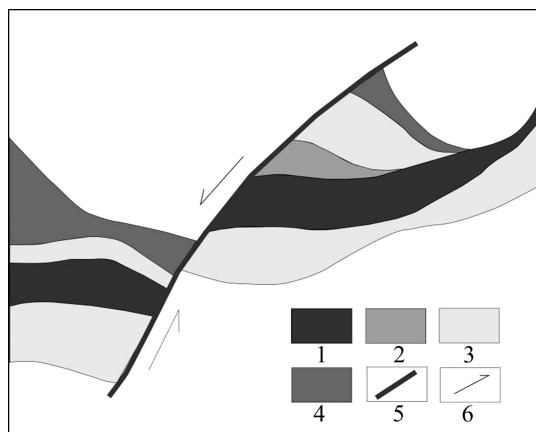


图2 I矿区1160 m中段平面图:1—矿体;2—花岗岩;3—二辉橄榄岩;4—斜长角闪岩;5— F_{16-1} 断层;6—本盘运动方向

Fig. 2 Geological plan of 1160m mining level of mine area I: 1—Ore body; 2—Granite; 3—Lherzolite; 4—Amphibolite; 5— F_{16-1} fault; 6—Direction of motion

层带中岩(矿)石被碾磨成黑色粉末状,取样铸胶制成光片,可见粉末中有细脉浸染状黄铁矿,表明断层在超基性岩侵位后形成,之后又有矿液活动^[5]。

F_{23} 断层位于56行附近,为II矿区南部边界,破坏岩体但无大的位移。

2.4 北东向张性断裂

断裂倾向南东,倾角 70° 左右,为正-平移,右行断层,以 F_{17} 为代表。该组断裂常错断岩(矿)体,并控制了后期岩脉岩的分布。 F_{17} 断层位于II矿区38行附近,走向长1000 m左右,倾向 130° ,倾角 73° 左右。断层由破碎带组成,破碎带宽2~6 m,带内充填物与断层带所切割的岩层有关。断层上盘羽状裂隙发育,下盘超基性岩由绿黑色变为褐红色,变色宽度达十余m,矿体水平断距达130~260 m,垂直断距90~150 m。常见辉绿岩沿断裂分布。值得注意的是,在 F_{17} 断层附近分布大量的特富矿,其羽状裂隙和一组与其平行的横断裂是特富矿的控矿构造^[6]。

总之,北西向压性断裂和北西向张扭性断裂应该在岩体侵入前已经存在,而在实际的勘探工作中, F_1 断层对矿体的控制作用明显,为金川岩体的控矿断层^[7];以 F_8 、 F_{16-1} 和 F_{23} 为代表的北东东向扭性断裂对矿体有明显的改造作用,其活动应该主要在成矿后; F_{17} 断层控制特富矿的分布,而后期又改造了矿体,说

明其在成矿中和成矿后均有活动。

3 成矿构造背景分析

3.1 矿床地球化学特征

Th、Ta、Hf、Nb、Zr 是一组高场强元素,由于地球化学性质的相似性,其相互之间的比值关系能将深部作用的地球化学过程较好地恢复出来,可用来判别玄武岩类形成的大地构造环境^[8-9]。

本区超基性岩体及矿石的 Th、Ta、Hf、Nb、Zr 分析数据见表1, Th/Nb 的值集中在2.2~3.0间, Nb/Zr 的集中在0.045~0.055间。据孙书勤^[8]研究表明,大陆板内玄武岩的 Th/Nb >0.11 , Nb/Zr >0.04 , 其中拉斑玄武岩的 Nb/Zr 为0.04~0.15, 碱性玄武岩的 Nb/Zr >0.15 ; 典型裂谷玄武岩的 Th/Nb 为0.11~0.27, 陆内拉张带或初始裂谷玄武岩的 Th/Nb >0.27 (一般0.27~0.67)。将表中的相关元素数据(见表1)投影到构造环境判别图解中(见图3), 数据集中在大陆板内裂谷环境和裂谷初期的拉张环境的重合部位。

3.2 成矿年代探讨

前人已对金川矿床进行了大量年代学研究, 结果有较大差别(见表2), 经统计, 大部分数据集中在1400~1600 Ma 和 800~1000 Ma 中。虽然时间有较大差别, 但距今1400~1600 Ma 和 800~1000 Ma 年, 研究区所处的大地构造背景基本相同, 分别对应了华北陆块早期的两期构造裂解事件, 前者与 Columbia 超大陆在1.5 Ga 开始裂解的时间相吻合^[10], 可能是华北大陆总体趋向裂解(1.8~1.6 Ga)的末期^[11]; 后者为 Rodinia 超大陆裂解的响应^[12]。虽然成矿年龄问题依然争论不休, 但是不影响确定矿床的成矿背景。

3.3 成矿背景分析

由数据的分析及龙首山隆起在成矿期所处的环境研究表明, 金川成矿超基性岩体为拉斑玄武岩, 形成于华北陆块构造裂解事件中的大陆板内裂谷形成过程中。大陆岩石圈伸展和减薄会引发上地幔的大规模部分熔融, 是岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物成矿的有利地质背景^[13-14]。由于 Th/Nb 大部分集中在0.27~0.67中, 少量在0.11~0.27间, 故裂谷形成的初期是成岩成矿的主要时期, 而随着拉张程度的增大, 不断有超基性岩

表 1 金川镍矿岩体的微量元素质量分数

Table 1 Trace element contents for rocks from Jinchuan nickel deposit

编号	岩性	$w/10^{-6}$						
		Hf	Ta	Th	Nb	Zr	Th/Nb	Nb/Zr
JJK-01	网状矿石	0.80	0.20	0.48	1.60	30.00	0.300	0.053
JJK-04	星点状矿石	1.70	0.20	1.03	2.90	60.00	0.355	0.048
JC-14	网状矿石	0.70	0.20	0.35	1.30	29.00	0.270	0.045
JC-16	星点状矿石	0.90	0.20	0.46	1.90	35.00	0.242	0.054
JC-18	角闪辉长岩	1.70	0.30	0.94	3.60	65.00	0.261	0.055
SJC-1	二辉橄榄岩	3.06	0.29	0.91	3.27	69.07	0.280	0.047
SJC-9	二辉橄榄岩	1.86	0.20	0.74	2.34	49.92	0.318	0.047
SJC-4	二辉橄榄岩	1.61	0.17	0.60	1.99	40.31	0.301	0.049
SJC-5	星点状贫矿石	0.78	0.10	0.35	1.40	23.16	0.249	0.060
SJC-6	局部海绵陨铁状矿石	0.96	0.14	0.34	1.52	28.33	0.222	0.054
SJC-13	半块状矿石	2.32	0.11	1.91	1.36	80.07	1.404	0.017
SJC-2	海绵陨铁状矿石	0.22	0.02	0.05	0.34	6.06	0.147	0.056
SN-A1	稠密侵染状矿石	0.10	0.01	0.04	0.15	2.26	0.267	0.066

注：样品开头为 JJK-及 JC-的数据是本次分析结果由澳洲矿物实验室测得。其余为刘民武^[15]整理

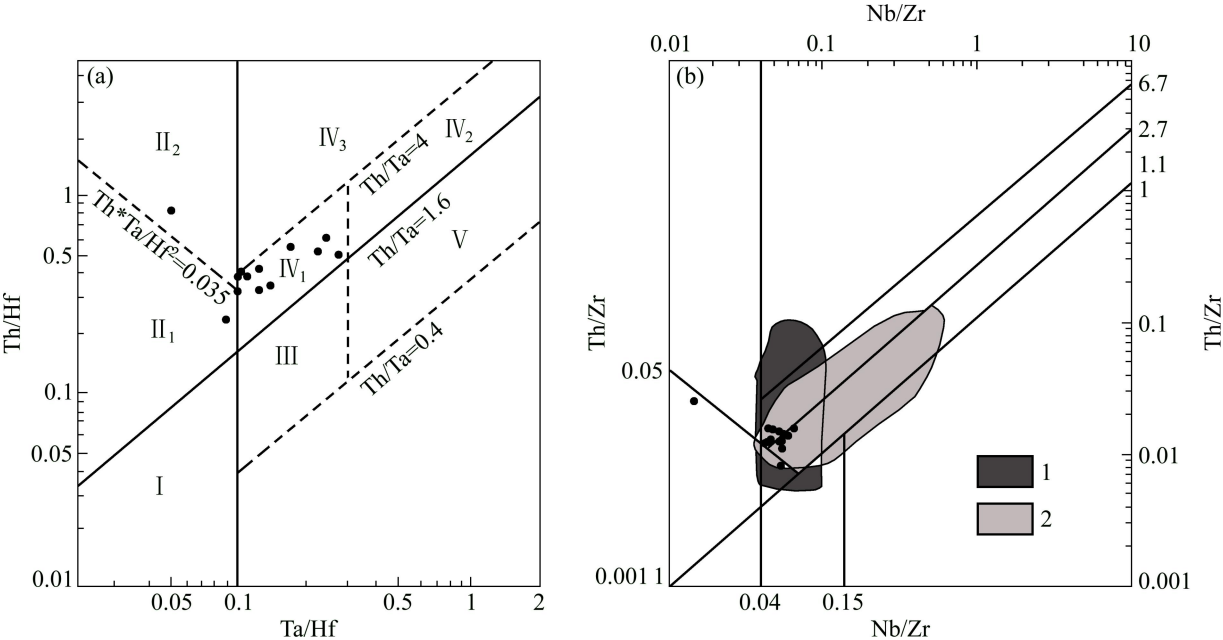


图 3 玄武岩类大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf、Nb/Zr-Th/Zr 判别图^[8-9]：(a) I—板块发散边缘 N-MORB 区；II—板块汇聚边缘 (II₁—大洋岛弧玄武岩区；II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区)；III—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区；IV—大陆板内 (IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区；IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩区；IV₃—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区)；V—地幔热柱玄武岩区；(b) 1—裂谷区；2—拉张区(裂谷初期)

Fig. 3 Th/Hf-Ta/Hf and Nb/Zr-Th/Zr identification diagram of tectonic setting of basalts^[8-9]: (a) I—N-MORB Margin of divergent oceanic plate; II—Margin of convergent plate (II₁—Island are of continental margin; II₂—Volcanic are of continental margin); III—Oceanic intra plate (the oceanic island and seamount, T-MORB, E-MORB); IV—Continental intraplate (IV₁—Continental rift; IV₂—Alkaline basalt zone; IV₃—Tensional zone); V—Mantle plume; (b) 1—Continental rift; 2—Continental tentional zone

表 2 金川超镁铁质岩体同位素年龄数据

Table 2 Dating results of Jinchuan ultramafic intrusion

采集位置	样品	方法	年龄/Ma	参考文献
I 矿区、露天采场、II 矿区 1 400 中段坑道和地表 36 行采集的样品	纯橄岩、二辉橄榄岩、辉石岩等	Sm-Nd	1 508±31	汤中立 ^[1]
II 矿区地表 18 行和 I 矿区 1 100~1 200 m	海绵陨铁矿石、块状矿石	Re-Os	1 043±28	张宗清 ^[16]
II 矿区 36 行 1 400 m 中段	浸染状矿石	锆石 U-Pb	827±8	李献华 ^[17]
II 矿区底部 F ₁₇ 断层附近	致密块状矿石	Re-Os	833±35	杨刚 ^[18]
II 矿区 36 行地表	超基性岩	锆石 U-Pb	807	田毓龙 ^[19]
	海绵状富矿石	Re-Os	1 408±140(成矿年龄) 897±66(改造年龄)	KEAYS ^[20]

侵入,形成了部分具典型裂谷环境玄武岩特征的岩体,这可能暗示了金川超基性岩体是在一段较长的时间内形成的。

4 矿区构造演化

4.1 成矿前挤压

华北板块西南边缘前长城纪为古陆核边缘活动性沉积,中太古代-古元古代区域上出露的地层为龙首山岩群,为古老变质体,其遭受了多旋回多期变质与变形,属非史密斯地层。通过研究地层产状和岩性特征,汤中立等^[3]认为龙首山岩群原岩建造反映了一个“开”、“合”旋回,中太古代末发生早期伸展运动,在新太古代末,总的构造体制由伸展变为收缩,古元古代末发生大量花岗岩脉活动,使龙首山群进一步焊接、固化。陈向阳等^[21]对古元古代的龙首山岩群中的黑云斜长角闪岩的地球化学特征进行研究,认为该岩性是在板内(陆内)拉张裂谷环境形成的。故在太古宙-元古宙,该区域经历了一个板内的从拉伸到挤压的旋回。

在矿区出露的龙首山群白家嘴子组是金川岩体的直接围岩。

4.2 成矿期伸展

中元古代华北板块西南边缘为被动陆缘,处于伸展体制条件下^[22],这个阶段区域上出露的地层为毛草泉北部的墩子沟群,面积较小,墩子沟群与龙首山群呈角度不整合接触,与上元古韩母山群呈断层接触。墩子沟群分为下岩组和上岩组,下岩组由灰白色石英砂岩、砂砾岩、变质砾岩组成,砾石成分为龙首山岩群岩石,属裂谷磨拉石建造;上岩组为浅灰色硅质条带灰岩、下部局部变为薄层灰岩,上部夹少许透镜状

碳质千枚岩,属于浅海陆相环境,这一岩石序列,反映了龙首山裂谷张开的过程。

张性拉伸环境中,产生了以 F₁ 断层、容纳金川岩体的断裂等组成的正断层系统,通过研究北东东向和北东向断裂的成矿后运动性质,可知这个系统原始呈右列式的雁列排列,具有中继构造模式, F₁ 为剥离断层,产状上陡下缓,在深部收敛,系统中的次级断裂相互连接,倾角较缓,深部延伸都终止于剥离断层面上(见图 4(a))。

根据上节研究表明,金川超基性岩浆正是在裂谷初期的板内拉张环境下开始形成,与地幔分离而底辟上升,成矿岩浆进入 F₁ 断层,并沿着断裂向上进入次级断裂并成矿。由于正断层的应力特点,使侵入正断层的岩体上侵位置较高,岩体宽度较大,向下尖灭快,横向呈漏斗或楔形,分异完善,熔离矿体发育,故最有利于形成并保存矿体。

4.3 成矿后挤压

加里东早、中期华北板块西南边缘由被动陆缘转化为活动陆缘,加里东末期到华力西早期与柴达木板块碰撞造山,进入板内运动阶段。正是从加里东开始,本区进入挤压环境^[22]。

通过横剖面次生形态研究表明,成矿后,矿体受到由南西向北东的非共轴逆冲韧性剪切变形^[23],整个龙首山山体发育成叠瓦式岩片,早期的断裂也发生了改造。F₁ 断层被改造成逆断层,而其上盘岩层不但逆掩于下盘侏罗系-第三系之上,且逆冲到中、下更新统砂粒层上面,反映了龙首山地区加里东期后,在中-新生代同大部分华北地台一样又再次转入地台活化阶段,形成挤压环境。随着 F₁ 断层的逆冲推覆运动,岩体也随着老地层抬升,使岩体露出地表,并遭受剥蚀;含矿岩体在这一系列的运动中,倾角变陡^[24]。而在最

大剪应力的方向上(见图 1 小图), 发育了以 F_8 、 F_{16-1} 和 F_{23} 为代表的北东向左行平移断层, 这一组断层使矿区原始形态发生了显著变化: F_{16-1} 断层使本来呈雁列状排列的岩体错动到一条直线上造成一条岩墙的假象; F_{23} 断层切断了南岩体, 使其变为 II IV 两个矿区; 而 F_8 断层不仅切断了北岩体, 亦穿过了 F_1 断层, 使其错位, 走向也发生了变化, 这就造成了 F_1 断层和北岩体相交, 而不是原始相互平行的产状, 而矿体各部分也发生了差异性升降(见图 4(b))。

后期构造运动不仅使矿体形态发生了改变, 其造成的剪切变形-热液蚀变作用, 使部分成矿元素特别是 Cu、Pd、Pt 在有利部位富集成矿^[25]。

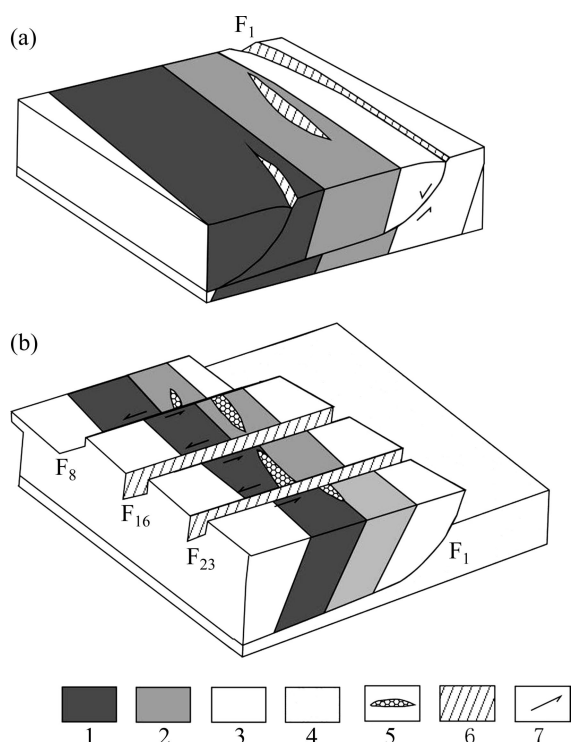


图 4 金川矿区构造演化模式图: (a) 成矿期; (b) 成矿后; 1—白家嘴子组第 AnZb1-1、AnZb1-2; 2—白家嘴子组 AnZb1-3; 3—白家嘴子组 AnZb2-1; 4—第四系(潮水盆地); 5—超基性岩; 6—断层面; 7—本盘运动方向

Fig. 4 Tectonic Evolution Modes Of Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit: (a) Metallogenic epoch; (b) Post-metallogenic; 1—AnZb¹⁻¹+AnZb¹⁻²; 2—AnZb¹⁻³; 3—AnZb²⁻¹; 4—Quaternary (Chaoshui basin); 5—Ultrabasic rock; 6—Fault-plane; 7—Direction of motion

5 找矿意义

镁铁质超镁铁质岩浆成矿是分多次贯入的, 一般

会形成数个岩体, 但是成矿的岩体通常只有一个^[26]。金川矿床“小岩体成大矿”的特征, 决定了来自深源地幔的镁铁质超镁铁质岩浆在中途岩浆房中熔离后是分多次侵入的。成矿时龙首山隆起带处于早期大陆裂谷环境, 构造运动活跃, 故不同期次的岩体沿着不同的构造侵位, 大量成矿元素亏损的岩体在早期侵位, 在金川外围或上部形成了多处不含矿或含矿性较弱的超基性岩体; 而富含成矿物质的岩体是沿着 F_1 断裂系统侵入的, 并在其次生的雁列式断裂中成矿, 这个断裂系统是成矿构造, 应该重点研究。

F_1 断层上盘的老地层是从远处推移过来的, 因此在 F_1 断层下盘没有找矿意义, 故在已知矿体深边部找矿, 范围应该限制在 F_1 断层的上盘所在区域。

在矿区边部: 由于成矿岩体是侵入于一组以 F_1 断层为剥离断层的正断层系统中, 断层系统呈右列式的雁列形态展布, 这一组断层系统均很有可能容纳成矿岩体, 因此北岩体与 F_1 断层间、南岩体东南部应该是找矿的有利地段; 从图 4 可以看出, 在北岩体的北部和南岩体东南部由于成矿后期断层活动造成的差异性升降, 均被第四系覆盖, 所以矿体可能就像 IV 矿区一样就埋在这层覆盖物下面。

在深部: 成矿期, 原始的 F_1 断层很可能就是金川矿床的岩浆通道, 但是后期挤压环境下, F_1 断层被改造成了逆冲推覆断层, F_1 断层上的这条含矿的通道很可能已被拉断, 成矿岩体进入 F_1 断层的通道随着 F_1 断层后期的运动, 相对位置发生位移, 很难被发现; 而南、北岩体与 F_1 断层相连接的岩浆通道上, 找到新矿体的可能性较大。

近些年, 在已知矿区深边部开展了大量的靶区预测工作, 通过在北岩体与 F_1 断层中间, III 矿区的北西部, 由地面高精度磁测发现一个呈北西向带状产出的磁异常 DC6(见图 5, 图中 DC3 与 III 矿区对应), 该异常在侧区内揭露较为完整, 强而有较大规模和明显形

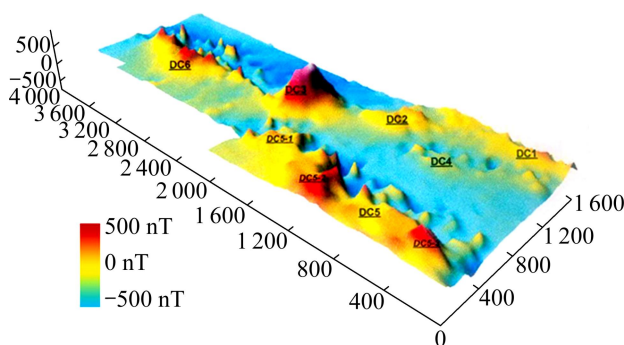


图 5 磁异常三维影像图(侧视)^[27]

Fig. 5 3D imaging of magnetic anomaly(lateral view)^[27]

态^[27],这个异常走向和所处位置可能是这个成矿的 F_1 雁列断层系统中的一条断裂,具有较高的成矿前景;通过综合 TEM 和高精度磁测,推测出 I 号矿区与 F_1 断裂之间存在一隐伏的超基性岩体^[28],而根据岩体的侵位序列及相互关系可以推测,在 2 号矿体下部应存在铜铂钨富集体^[29]、24 号矿体深部有块状矿石^[30],证明在深部存在连接主矿体与 F_1 断层的岩浆通道,并且该岩浆通道上的特定部位具有良好的找矿前景。

6 结论

1) 构造是金川矿床最主要的控矿因素,特别是断裂系统,值得注意的是,这些断裂形成后随着应力的改变,运动形式也随着变化。据研究,这些断裂可以分为 4 组,分别是:①北西向以 F_1 、 F_2 为主的压性断裂;②北西向容纳金川岩体的断裂;③以 F_{16-1} 、 F_8 为代表的北东东向扭性断裂;④北东向张性断裂,以 F_{17} 为代表。其中,第一组和第二组为成矿期已经存在的, F_1 断层为基性岩体的上侵提供了通道,而第二组断裂为成矿提供了空间;在成矿后的挤压环境中,第三、四组断裂切断了矿区早期的地层、断层和矿体,并把 F_1 被改造成了逆冲推覆断层,使前寒武的老地层推覆到了潮水盆地的新地层上,在这个过程中,金川矿体也被抬升到近地表,便于开采。

2) 矿区处于华北板块西南缘的龙首山隆起带,在太古宙-古元古代,该区域经历了一个板内的从拉伸到挤压的旋回,并形成了金川岩体的直接围岩龙首山群;在元古宙该区域为被动板块边缘,经历了裂谷的开合,形成了以 F_1 为拆离断层,具有中继构造性质的正断层系统,为其后的成矿提供了通道和成矿空间;裂谷发育早期的拉伸环境中,基性岩浆与地幔分离而底辟上升,形成了龙首山隆起带的一系列超基性岩体;在加里东早期,华北板块西南缘转变为主动板块边缘,祁连山向华北板块下俯冲,此时,龙首山隆起带变为挤压环境,不仅形成了大量的叠瓦状逆断层,也改造了早期形成的断层,而在最大剪应力方向,则形成了一组北东向的逆-平移断层,使矿区形态发生很大改变。

3) F_1 断层系统上的这组雁列构造是这个成矿岩体的控矿系统,在已知矿体边部,南岩体东南方向和北岩体与 F_1 断层间是找矿的有利靶区;而在深部,顺着岩体追溯,直到 F_1 断层,都是成矿的有利部位。

致谢: 野外工作期间得到金川集团股份有限公司王玉山、岳斌、艾启兴、李德贤、陈兴义等同志的大力支持,赵莹、鞠培姣、刘羽等同学参加了部分工作,在此谨向上述单位及个人表示诚挚的谢意!

REFERENCES

- [1] 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.
TANG Zhong-li, LI Wen-yuan. Mineralization model and geology of the Jinchuan PGE-bearing deposit[M]. Beijing: Geological publishing House, 1995.
- [2] 汤中立,钱壮志,姜常义,等. 中国铜镍铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京:地质出版社,2006.
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, et al. Chinese nickel-copper(PGE) sulfide deposits mineral geology and mineral prediction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [3] 汤中立,白云来. 华北板块西南边缘大型、超大型矿床的地质构造背景[J]. 甘肃地质学报,2000,9(1): 1-15.
TANG Zhong-li, BAI Yun-lai. The geotectonic setting of the large and superlarge mineral deposits in the southwest margin of North China Paleoplate[J]. Gansu Geology, 2000, 9(1): 1-15.
- [4] 余伟健,高谦,张周平,靳学奇,邓代强. 构造带围岩特性实验及流变规律分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(4): 1086-1091.
YU Wei-jian, GAO Qian, ZHANG Zhou-ping, JIN Xue-qi, DENG Dai-qiang. Characteristics experimental of surrounding rock mass in tectonic zone and its rheological law analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(4): 1086-1091.
- [5] 李佐. 甘肃金川铜镍硫化物矿床控矿构造研究[D]. 长沙:中南大学,2009: 1-67.
LI Zuo. Analysis on the ore-controlling tectonic in Jinchuan copper-nickel sulphide deposit, Gansu Province[D]. Changsha: Central South University, 2009: 1-67.
- [6] 白智山. 金川镍矿 II 矿区特富矿成矿机理[J]. 采矿技术,2005,5(2): 77-79.
BAI Zhi-shan. Metallogenic mechanism of No.2 orebody extremely rich ore in Jinchuan copper-nickel-sulfide deposit[J]. Mining Technology, 2005, 5(2): 77-79.
- [7] 江荣伏. 金川矿区深部找矿方向探讨[J]. 地质与勘探,2003,39(5): 35-38.
JIANG Rong-fu. Discussion on exploration orientation in the depth of Jinchuan mining area[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 35-38.
- [8] 孙书勤,汪云亮,张成江. 玄武岩类岩石大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别[J]. 地质评论,2003,49(1): 40-47.
SUN Shu-qin, WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang.

- Discrimination of the tectonic settings of basalts by Th, Nb and Zr[J]. *Geological Review*, 2003, 49(1): 40–47.
- [9] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413–421.
- WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, XIU Shu-zhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413–421.
- [10] ROGERS J J W, SANTOSH M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2002, 5(1): 5–22.
- [11] LU S N, YANG C L, LI H K, LI H M. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2002, 5(1): 123–131.
- [12] HOFFMAN P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out[J]. *Science*, 1991, 252: 409–412.
- [13] 宋谢炎, 陈列猛. “小岩体成大矿”的核心—岩浆通道系统成矿原理、特征及找矿标志[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 117–127.
- SONG Xie-yan, CHEN Lie-meng. The core issue of the large-scale mineralization in small intrusion: mineralization in magmatic plumbing system principles, key features and exploration marks[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 117–127.
- [14] 宋谢炎, 肖家飞, 朱 丹, 朱维光, 陈列猛. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 153–163.
- SONG Xie-yan, XIAO Jia-fei, ZHU Dan, ZHU Wei-guang, CHEN Lie-meng. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 153–163.
- [15] 刘民武. 中国几个镍矿床的地球化学比较研究[D]. 西安: 西北大学, 2003: 1–145.
- LIU Min-wu. Geochemical comparison of several nickel deposits in China[D]. Xi'an: Northwest University, 2003: 1–145.
- [16] 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 卢纪仁, 王进辉, 杨 刚. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征[J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 359–365.
- ZHANG Zong-qing, DU An-dao, TANG Suo-han, LU Ji-ren, WANG Jin-hui, YANG Gang. Age of the Jinchuan copper-nickel deposit and isotopic geochemical feature of its source[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 359–365.
- [17] 李献华, 苏 犁, 宋 彪, 刘敦一. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(4): 401–402.
- LI Xian-hua, SU Li, SONG Biao, LIU Dun-yi. SHRIMP zircon U-Pb dating and geological significance of the Jinchuan ultramafic rocks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 401–402.
- [18] 杨 刚, 杜安道, 卢纪仁, 屈文俊, 陈江峰. 金川镍—铜—铂矿床块状硫化物矿石的 Re-Os(ICP-MS)定年[J]. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(3): 241–245.
- YANG Gang, DU An-dao, LU Ji-ren, QU Wen-jun, CHEN Jiang-feng. Re-Os(ICP-MS) “ages” of the extremely rich ore in Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit[J]. *Science China D*, 2005, 35(3): 241–245.
- [19] 田毓龙, 武栓军, 孟蓉, 王玉山, 林慈奎, 肖立忠. 金川超镁铁质岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *矿物学报*, 2007, 27(2): 211–217.
- TIAN Yu-long, WU Shuan-jun, MENG Rong, WANG Yu-shan, LIN Ci-luan, XIAO Li-zhong. LA-ICPMS zircon U-Pb age of the Jinchuan ultramafic intrusion[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(2): 211–217.
- [20] KEAYS R R, IHLENFELD C, MCLNNES B I A, ZHOU M F, LAMBERT D D. Re-Os isotope dating of the Jinchuan Ni-Cu-PGE sulfide deposit, China[C]//SHELLNUTT J G, ZHOU M F, PANG K N. Recent Advances in Magmatic Ore Systems in Mafic-ultramafic Rocks(Proceedings of the IGCP 479 Hong Kong Workshop). Hong Kong: The University of Hong Kong, 2004: 41–42.
- [21] 陈向阳, 陈 博, 焦建刚. 甘肃省龙首山地区元古宙铜镍矿床成岩成矿地质背景探讨[J]. *甘肃地质*, 2008, 17(4): 11–16.
- CHEN Xiang-yang, CHEN Bo, JIAO Jian-Gang. Discussion on geologic background of Longshoushan area of Gansu in Proterozoic Eon[J]. *Gansu Geology*, 2008, 17(4): 11–16.
- [22] 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.
- TANG Zhong-li, BAI Yun-lai. Geotectonic framework and metallogenic system in the southwest margin of North China paleocontinent[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(2): 271–283.
- [23] 汪劲草, 汤静如. 金川超基性岩体形态演变对矿区构造的制约[J]. *地质学报*, 2011, 85(3): 323–329.
- WANG Jin-cai, TANG Jing-ru. Morphological evolution of the ultrabasic rocks in Jinchuan mine area and its constraints on the tectonic process[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(3): 323–329.
- [24] 高亚林, 汤中立, 宋谢炎, 田毓龙, 孟远志. 金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因研究及其深部找矿意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3379–3395.
- GAO Ya-lin, TANG Zhong-li, SONG Xie-yan, TIAN Yu-long, MENG Yuan-zhi. Study on genesis of the concealed Cu-rich ore body in the Jinchuan Cu-Ni deposit and its prospecting in depth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3379–3395.
- [25] 王沪文, 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 徐 刚, 邱根雷. 金川铜镍硫化物矿床 1 号矿体矿石成因研究[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 334–345.
- WANG Lu-wen, TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, XU Gang, QIU Gen-lei. Ore genesis of ore body #1 of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 334–345.
- [26] 汤中立. 中国镁铁、超镁铁岩浆矿床成矿系列的聚集与演化[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 113–119.

- TANG Zhong-li. The accumulation and evolution of metallogenic series of the mafic-ultramafic magmatic deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 113–119.
- [27] 黄满湘. 甘肃金川铜镍矿区地面高精度磁测成果小结[R]. 湖南, 中南大学, 2004.
- HUANG Man-xiang. A summary of ground superprecision magnetic in Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit[R]. Hunan, Central South University, 2004.
- [28] 李天虎, 罗先熔, 彭桥梁, 王 伟, 罗小平, 宋忠宝, 文雪琴. 甘肃金川铜镍矿床 I 矿区深部边部地质-地电化学-地球物理多元信息成矿预测[J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1192–1200.
- LI Tian-hu, LUO Xian-rong, PENG Qiao-liang, WANG Wei, LUO Xiao-ping, SONG Zhong-bao, WEN Xue-qin. Geological-geochemical-geophysical multifactor information ore prognosis in the depth and on the edge of No. I mining area of the Jinchuan copper-nickel sulfide ore deposit, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1192–1200.
- [29] 苏尚国, 汤中立, 周 岱. 金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 118–126.
- SU Shang-guo, TANG Zhong-li, ZHOU Dai. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 118–126.
- [30] 王泸文, 汤中立. 甘肃省金川超大型铜镍硫化物矿床富铂钯矿石成因研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(4): 388–403.
- WANG Lu-wen, TANG Zhong-li. Pt-Pd rich ores genesis research of Jinchuan giant Ni-Cu sulfide deposit, in Gansu province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(4): 388–403.

(编辑 何学锋)