

金川铜镍硫化物(含铂)矿床 成矿模式及地质对比

汤中立 等著

地质出版社

金川铜镍硫化物(含铂)矿床 成矿模式及地质对比

汤中立 李文渊 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 085 号

ISBN 7-116-01888-3



9 787116 018884 >

内 容 简 介

本书是阐述金川铜镍硫化物(含铂)矿床的一本专著。该专著是在区域地质背景、矿床地质、矿物化学、岩石化学、地球化学、同位素地质学、矿物物理化学条件等方面一系列新的科研成果的基础上编写而成的。作者通过深入地分析研究,着重阐述了金川矿床的成矿类型和成矿模式。书中广泛利用了国内外同类矿床的资料,进行了全面的地质成矿对比,首次提出该类矿床的组合成矿模式和超大型岩浆硫化物矿床的划分标准和五种超大型矿床类型。

本书可供从事岩石学、岩浆矿床、地球化学、地球物理的勘查、科研和教学人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比/汤中立等著. —北京:地质出版社,1995.9

ISBN 7-116-01888-3

I. 金… I. 汤… II. ①铂-铜镍-硫化物矿床-矿床成因论②铜镍-硫化物矿床-矿体-分析
N. ①P618.530.2②P618.410

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 05255 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:唐静轩 谭惠静

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:14.125 字数:322000

1995 年 9 月北京第一版·1995 年 9 月北京第一次印刷

印数:1—400 册 定价:20.00

ISBN7-116-01888-3

P·1476

序

《金川^①铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比》是地矿部“八五”重要基础项目的研究成果之一,成果的找矿模式内容已另册出版。

这项研究成果内容全面、资料丰富;对岩浆深部熔离-复式贯入成矿模式作了系统阐述。其主要进展如下:

(1) 根据本次取得的 Sm-Nd 年龄、大地电磁测深和区域地质资料,提出金川岩体是在北祁连裂谷发展前期的拉张环境中侵位的,后随龙首山推覆构造转移到现今位置。 F_1 不是岩浆通道,而是逆掩断裂。

(2) 在岩石学方面,重新计算了 82 组岩石化学数据;系统地测定了各类岩石的微量元素和稀土元素含量;系统测定了主要造岩矿物和金属氧化物的化学成分。据此推断金川原始岩浆是一种苦橄质拉斑玄武岩浆,大致为上地幔 20%—30% 部分熔融产物。

(3) 在矿床地质-地球化学方面,进一步研究了矿山开采揭露的块状特富矿体的产出特征;详细研究了 Cu、Ni、Pt 族元素和稀土元素的地球化学特征,揭示了它们在不同类型矿体中的分布规律;指出 Pt、Pd 的富集主要发生在后期热液叠加成矿阶段。

(4) 采用矿物成分计算、岩石熔融实验、矿物包裹体研究、硫同位素地质温度计等多种方法研究了成岩、成矿温度和其它物理化学参数,确定硫化物初始熔离温度为 1400—1500℃,橄榄石初晶温度为 1400℃,岩浆就位深度约为 10—15km。

(5) 首次获得金川岩体的 Sm-Nd 内部等时年龄为 $1508 \pm 31\text{Ma}$,计算了初始铈值,并综合了硫同位素资料,认为 $\Sigma_{\text{Nd}}(t)$ 负值是地壳物质混染所致。

(6) 系统阐述了深部岩浆熔离-复式贯入成矿模式。该模式以金川矿床为重点,还包括国内的一些主要铜镍硫化物矿床。这是迄今对这一成因观点最详细和完整的论述。作者再次强调,这是小岩体成大矿的主要机制;深熔-贯入矿床是我国最主要的铜镍矿床类型,也是世界上主要铜镍矿床类型之一。作者提出了大型、超大型铜镍矿床的划分标准,并与世界上若干主要同类型矿床进行了对比。

总之,本书内容充实,观点明确,是近年来此类矿床研究中最有代表性的重要论著。它已达到国内同类矿床研究的领先水平;母岩浆深部熔离-多次贯入成矿历程的构想和观点,已达到国际先进水平。

著者汤中立是金川矿床的主要发现者和勘探者之一,长期不懈地从事矿产勘查和科研工作,成绩卓著。本书是他和有关参加者的又一重要成果。

宋叔和

1994 年 3 月 30 日

① 即白家嘴子。

前言

镍、铂族元素和铁、钴同属元素周期表中第Ⅷ副族过渡金属。由于这些元素具有相似的地球化学性质，故它们在地质作用过程中，趋向于共同富集在一起。对于镍和六种铂族元素而言，它们从地幔运移到地壳中达到富集，主要有以下四种方式：剥露地表的地幔橄榄岩，经风化淋滤形成富镍红土矿；基性-超基性岩浆熔离作用形成硫化镍矿；洋底热泉作用形成铁锰小结核和锰壳，这种结核或锰壳中，镍、钴、铜、铂等都可富集；蛇绿岩型超镁铁质岩中与铬铁矿共生和独立浸染于岩石中的铂族自然元素或金属互化物，由于风化、剥蚀、搬运、沉积形成砂矿。前3种是镍矿富集方式，后3种是铂族元素富集方式，故只有第一、二两种，才是镍和铂族元素共生的富集方式。

第一种方式形成的镍资源占世界镍资源的55%；第二种镍资源约占28%；第三种镍资源约占17%。按生产量统计：红土镍矿占33%；硫化镍矿占67%。铁锰结核尚未实际开发利用（A. J. Naldrett, 1989）。这种状况至今没有大的变化。

由上可见，现在世界镍产量仍以硫化镍矿占据优势。主要原因是这类资源选冶流程成熟且成本相对低廉，红土矿和硅酸镍矿提炼镍通常耗能是硫化矿的2—5倍（Dasher, 1976）；其次硫化镍矿分布比较广泛，不像红土矿多局限于热带或赤道地区。

目前世界以及中国的铂族资源主要还是分布于与铜镍硫化物矿化有关的矿床中。

世界上已知的硫化镍矿床约数百个，其中储量大（镍采前储量>50万吨）、矿石品位较富（ $\text{Ni}>1\%$ ；或 $\text{Ni}<1\%$ ，但矿石中共生元素铜、铂族元素PGE较富）而具较大经济开采价值的矿床有加拿大萨德伯里（Sudbury）、汤普逊区（Thompson），中国金川，南非布什维尔（Bushveld），澳大利亚阿格纽（Agnew）、康巴尔达（Kambalda），俄罗斯诺里尔斯克（Noril'sk）、十月（Oktyabr'skiy）、塔尔纳赫（Talnakh）、太梅尔（Taimyr）等。这些矿床是从上一世纪到本世纪70年代中期陆续发现并被开采利用的。目前世界镍、铂族矿业经济结构就是由这些矿床所提供的资源决定的。

最近20年来，这种大型硫化镍（铂族）矿床再未被发现过。找矿勘查的沉闷局面，促使许多地质学家、地球物理学家、地球化学家加强了对这类矿床，尤其是对这类大型矿床的地质背景、成矿模式、成矿系列以及它们之间的对比研究，以期在加深认识、总结规律的基础上，在全球范围内，获得找矿勘查的新突破。

中国硫化镍（铂族）矿床的研究和勘查，主要是从新中国建立之后才开始进行的。随着金川矿床的发现（1958）和勘探而分为以下两个阶段。

金川矿床发现以前阶段：我国曾注意对超基性岩风化壳红土型硅酸镍矿的研究和勘查。以云南墨江镍矿为代表，当时曾投入较多的研究和勘查工作，由于选冶技术没有过关，因而未能解决我国的镍矿资源紧缺问题。在硫化镍矿方面，当时主要的实践经验和理论认识来自四川马河矿床的工作，这是有开创性、先行性的实践和认识。但是当时还没有挣脱国外找大型基性岩盆中那种“就地熔离”型镍矿的束缚，甚至认为马河本身就是“就地熔离”型矿床。按照这种思路在全国进行勘查，结果也不理想。

金川矿床发现以后阶段：金川矿床的容矿岩体很小，面积仅 1.34km^2 ，其中却含有世界级超大型镍（铜）矿，矿体占岩体体积的 43.7%。事实表明金川矿床是经地壳深部岩浆房中熔离后，分期多次贯入现存空间而形成的。这种“深部熔离-复式贯入”型矿床，给地质工作者以新的启发，随后陆续发现并探明了云南白马寨、青海拉水峡、吉林赤柏松和红旗七、新疆喀拉通克等一系列类似的矿床。这类矿床的特征是岩体小、矿石富、工业意义大等。但储量相差十分悬殊，一般镍储量为几万吨至 20 多万吨。像金川这样的超大型矿床，中国还只有一处。

这类矿床无论从储量和矿石质量来说，都是中国最主要的镍矿类型，具有广泛的成矿前景。因此加强对金川矿床和这类矿床地质背景、成矿模式和成矿系列的研究，以期在国内乃至在全球范围内类似背景条件下，寻找金川式这种类型的矿床，已经成为国内外矿床地质界所关注的问题之一。

金川矿床从 1958 年发现至今已有 35 年。前 15 年成功地完成了矿床勘探工作，为建立中国的镍工业提供了可靠的资源保证。但是，由于当时处于一种封闭的条件等原因，只有极少的论著在内部刊物上发表。80 年代以来，由于改革开放，带来了科学的春天，有关金川矿床的科学论著亦相继公开问世（师占义，1980；汤中立等，1982、1987、1989、1990、1992；甘肃省地矿局第六地质队，1984；贾恩环，1986；杨轩柱，1991；杨合群，1991；Gang Chai, 1992 等）。这些论著较好地阐明了金川矿床的基本地质特征。但是在区域成矿背景方面，多依据地质勘探时期的老资料；在成因机制方面，都还未能提出一个在地史上和三维空间上延续发生和发展的成矿模式。

本书是作者承担并完成地矿部“八五”重要基础性项目“金川铜镍硫化物（含铂）矿床成矿模式及找矿模式”之后，编写的科研报告之一。现将本书所反映的科研新成果和新进展简略概述如下。

成矿区域地质背景方面

依据沉积建造、矿区和外围岩体的 Sm-Nd 同位素年龄、大地电磁测深剖面等基础资料，通过区域地质、构造分析，首次系统提出了金川矿床区域成矿地质背景的新观点和新认识。这一观点的要点为：

- 1) 大陆裂谷发生前期，地壳处于拉伸、变薄、上拱环境，地幔局部熔融的超基性岩浆大致在 $1508 \pm 37\text{Ma}$ 时，侵位于地壳上部约 10—15km 的深处成岩、成矿；
- 2) 大陆拉折、裂谷发生，形成大陆边缘北祁连海盆，出现洋壳，金川含矿岩体留存在裂谷的大陆一侧边缘；
- 3) 中祁连应是大陆裂谷另一侧的微陆块；
- 4) 北祁连狭窄海盆经过新元古代、早古生代的扩张和俯冲消减多旋回演化，最终于加里东晚期形成大陆增生褶皱带；
- 5) 在增生褶皱带与北部大陆之间，形成北西西走向大陆碰撞构造，造成自南向北的龙首山构造推覆，位于地下 10—15km 左右的金川容矿岩体被推覆上升，经剥蚀出露地表；
- 6) 前人论述的矿区北侧 F_1 深断裂，应是推覆构造逆掩断裂的出露部分，不是深断裂也并非控制岩浆的通道。

矿床地质方面

较详细地研究了矿山开采剥露的晚期贯入矿体，对产于不同地点的这类矿体的矿物化

学成分、镍黄铁矿反射率进行了测试,对磁黄铁矿作了X射线衍射分析等,并对它们进行了对比,认为产于不同地点的这类块状矿体皆是同期但非一次贯入形成。这类矿体主要产于深熔-贯入的海绵陨铁状矿体与其它类型矿体或围岩的接触部位或海绵陨铁状矿体的原生构造裂隙发育部位。从而为矿山开采中发现这种价值很大的特富矿体提供了新的依据。

矿物学、矿物化学方面

系统测定并论述了容矿岩体各类岩石中的造岩矿物、金属氧化物的化学成分和金属硫化物的标型特征。

1) 重新确定容矿岩体橄榄石 Fo 的范围为 78.50%—86.19%,较之科马提岩岩体的 Fo (>90%) 要低。

2) 在单斜辉石的 $Ti-Ca+Na$ 和 Al^V 与 Al^IV 关系图解上,金川岩体多落点于拉斑玄武岩区,提供了物源信息。

3) 角闪石和橄榄石 (Fo) 中的 X_{Mg} [$Mg/(Mg+Fe)$] 的比值呈线性关系,表明角闪石中的韭闪石与橄榄石是在岩浆平衡状态中结晶形成的。

4) 岩体中尖晶石可分为铬尖晶石、富镁铝尖晶石、铁铬铁矿和铬磁铁矿四种。其中第一类铬尖晶石在各类岩石中普遍存在,其 X_{Mg} 值与橄榄石 Fo 含量呈相关关系,为岩浆结晶产物。

5) 对 Fe-S、Ni-Fe-S、Cu-Fe-S 系列矿物之矿物形态、晶体结构、化学成分和特征微量元素的种类、丰度等进行了系统的测定,从成因矿物学角度为判断矿床成矿过程中的物理化学条件及演化提供了重要信息。

岩石化学方面

对 82 组岩石化学数据进行了 FeO 、 Fe_2O_3 校正和剔除硫化物校正,用校正后的数据进行岩浆系列判别图解,发现金川岩体的原始岩浆既非标准的拉斑玄武岩系列,也非科马提岩系列,结合其它信息分析认为,原始岩浆可能为一种苦橄质拉斑玄武质岩浆。岩石化学特征为贫钙、低铝、弱碱质, NiO 与 Cr_2O_3 呈反消长关系, TiO_2 含量较低并随岩石基性程度的降低而增加。

矿床地球化学方面

1) 不同矿体矿石 100% 硫化物的 $Cu/(Cu+Ni)$ 、 $Pt/(Pt+Pd)$ 、 $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$ 比值按块状矿石→海绵状矿石→星点状矿石→浸染(稠密浸染)状矿石→变海绵状矿石的顺序呈现由小到大的有规律的演化关系。前三种矿石的比值反映了岩浆上侵过程中,硫化物熔离聚集的早晚关系;后两种矿石比值反映了容矿岩浆就位现存空间之后,发生接触交代成矿到热液叠加成矿的演化关系。这些比值,与科马提岩浆矿床有很大差别,与拉斑玄武岩浆矿床差别较小。

2) 对铂族元素地球化学分配特点进行了较系统的研究,进一步证明铂族元素的聚集与硫化物的深部熔离密切相关,但 Pt、Pd 的工业富集主要与后期热液叠加作用有关。

3) 稀土元素研究表明,金川岩体属轻稀土 (LREE) 富集型,具有微弱的负铕异常,不同期次岩石分馏程度不同。据 $La/Sm-La$ 图解,岩体为上地幔部分熔融岩浆的产物,通过 La 、 Sm 部分熔融计算,上地幔部分熔融程度可能为 20%—30%。块状矿石稀土球粒陨石标准化曲线较平坦,与其它各类矿石相异,表明这类矿石的硫化物熔离环境和其它类型矿石不同,可能反映了岩浆还处在地幔环境下,这种硫化物就已经熔离的特点。

同位素地质学方面

首次利用 Sm-Nd 等时线法定年,金川岩体为 $1508 \pm 31\text{Ma}$ 。前人曾利用 K-Ar 法、Rb-Sr 法多次测定过岩体年龄,各种数据从华里西期到太古宇相差很大。本次定年与以前 K-Ar 法中的一组年龄相近,可以视为金川岩体的代表性年龄。

岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 较高,为 $0.702547-0.711761$,有的投点落在大陆壳演化线上,说明岩浆可能有地壳锶污染。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 $0.511800 \pm 10-0.512064 \pm 12$,接近或大于地球粒陨石,进一步证明岩浆源区发生过局部熔融。

成矿物理化学条件方面

通过造岩矿物理论估算、造岩矿物熔融试验、熔融包裹体等方法确定:橄榄石液相线温度约为 1400°C ,固相线温度为 1200°C ;辉石、斜长石约在 1100°C 左右开始晶出;岩浆就位深度约为 $10-15\text{km}$;地壳最深岩浆房推测在 30km 以下;硫化物初始熔离温度约为 $1400-1500^\circ\text{C}$; 1000°C 时,硫化物呈单硫化物固熔体晶出,到 600°C 以下发生固熔体分解,热液叠加作用发生在 $414-488^\circ\text{C}$ 左右。在水热体系条件下的矿物熔融试验表明,各种造岩矿物的熔融温度均随压力的增大而显著降低。

矿床成矿模式

提出了金川矿床成矿模式。这一成矿模式包含岩浆源区分析、岩浆上侵动力学、岩浆上侵方式、深部熔离机制和岩浆分层(岩浆—含矿岩浆—富矿岩浆—矿浆)、上侵就位、含矿岩浆上侵就位后的就地熔离和聚集,以及后期的气化热液、热液叠加成矿作用和矿床的后期改造等。这是迄今最完整的一个地史上延续发生、发展的三维的金川矿床成矿模式。

成矿模式的地质对比

通过岩浆深部熔离-贯入矿床的地质对比,系统阐述了这类矿床的基本地质特征和一系列新观点和新认识:

1) 这类矿床是中国最主要的硫化镍矿床类型,也是世界主要的硫化镍矿床类型之一。这类矿床在我国仍有很大的、潜在的勘查远景。

2) 这类矿床主要是通过深部熔离-复式贯入这一机制就位到现存空间成岩成矿的,一般都具有岩体小、矿石富、储量大或较大的特点。

3) 这类矿床既可形成于大陆地块区,亦可形成于大陆增生褶皱带中。在大陆地块区主要于大陆裂谷发育前期的张裂应力环境,随着地壳上拱变薄含矿岩浆侵位于地壳中成岩成矿。大陆地壳裂开后,容矿岩体就留在大陆边缘区或陆壳碎块中。褶皱带中的矿床多发育于洋壳俯冲消减、褶皱增生的后期阶段,一般多与深断裂的发育有关。

4) 进一步阐述、完善了以金川、红旗七、喀拉通克和铜洞子四个矿床为代表的组合成矿模式(汤中立、李文渊,1991)。这一组合成矿模式较之一个典型矿床成矿模式更能反应此类矿床的本质特征,具有更大的指导勘查的作用。

通过与世界岩浆硫化物矿床对比,首次提出大型、超大型矿床的划分标准: $\text{Ni} \geq 200$ 万吨, $\text{Ni} \geq 1\%$;若 $\text{Ni} < 1\%$,但共生元素 Cu 或铂族元素达到工业利用标准者为超大型矿床的下限。 $\text{Ni} \geq 50$ 万吨, $\text{Ni} \geq 1\%$;若 $\text{Ni} < 1\%$,但共生元素达到工业利用标准者为大型矿床的下限。按上述标准,全球有 5 个超大型矿床,5 个大型矿床。超大型、大型矿床按照成矿时代、构造岩石组合划分为 5 种类型。金川是这 5 类矿床中的一个独立的矿床类型。通过地质对比,阐明了超大型矿床产出的地质背景和成矿特征,为勘查这种超大型矿床提供了依

据。

参加本项目Ⅱ级课题和Ⅲ级专题的研究人员有汤中立、侯鸿启、刘宝庄、李文渊、徐东、杨杰东、陶仙聪、徐士进、季生宝、宋学信、苟国朝、黄民智、李瑛、周茂、黄承熊、石应骏、陈光清、王志恒、李增明、李俊伟等。他（她）们完成的课题和专题研究报告，是本书部分章节编写的依据和重要参考资料。

本书由汤中立负责编写。汤中立确定编书大纲和编写思路，李文渊编写一、五、六、七章初稿，全书由汤中立统一编写并修改定稿。

在项目工作过程中，得到地矿部科技司、甘肃省地矿局、金川有色金属公司、地矿部矿床地质研究所、南京大学现代分析中心以及成都理工学院的领导和有关部门的大力支持和帮助。

本书承蒙宋叔和、郭文魁、涂光炽院士和陈鑫、翟裕生、王惠章、卢纪仁研究员（教授、教授级高工）审阅。

还应指出，殷先明、金铭良、田永绥、张卫焜、赵生贵、任丰寿、徐家乐、李清海、任端进、廖大容、王志珩、葛丽君、张挺瑞、彭德启、郑文林、杨栋才、蔡体良、唐宁秀等同志，对本书的写作出版都给予了极大的关心和支持。

作者藉此机会，仅向上述各单位和个人表示最诚挚的谢意。

作 者

目 录

第一章 区域地质背景	(1)
一、沉积建造	(2)
(一) 前长城纪沉积建造	(2)
(二) 中、新元古代沉积建造	(7)
(三) 晚古生代沉积建造	(13)
(四) 中、新生代沉积建造	(14)
二、岩浆演化	(14)
(一) 岩浆作用阶段及时空分布特征	(14)
(二) 镁铁质-超镁铁质岩时空分布与演化	(16)
三、成岩成矿构造背景	(21)
(一) 成岩成矿前构造	(21)
(二) 成岩成矿期构造	(21)
(三) 成岩成矿后构造	(23)
(四) 构造演化	(26)
四、大地电磁测深剖面	(26)
(一) 观测方法技术	(27)
(二) 保证质量的措施及评价	(28)
(三) 曲线的初步分析与处理	(29)
(四) 曲线的反演解释	(33)
(五) MT 成果的地质解释	(35)
第二章 矿床地质概况	(38)
一、岩体规模、形态与产状	(38)
二、岩体侵入期次及侵入相	(40)
(一) 超镁铁质岩石分类与命名	(40)
(二) 侵入期次及侵入相	(41)
三、矿床类型与矿体划分	(43)
(一) 岩浆就地熔离矿体	(44)
(二) 岩浆深部熔离-贯入矿体	(44)
(三) 晚期贯入矿体	(44)
(四) 接触交代矿体	(45)
(五) 热液叠加矿体	(47)
四、矿石类型及特征	(47)
(一) 矿石类型划分	(47)
(二) 矿石矿物成分	(47)
(三) 矿石组构特征	(49)
五、块状硫化物矿体	(51)
(一) 探采对比及分布特征	(51)

(二) 矿物标型及矿体对比	(55)
(三) 成因探讨	(58)
第三章 矿物学、矿物化学	(61)
一、造岩矿物化学特征	(61)
(一) 橄榄石	(61)
(二) 辉石	(64)
(三) 斜长石	(68)
(四) 角闪石	(70)
二、氧化物矿物化学特征	(72)
(一) 尖晶石	(72)
(二) 磁铁矿	(76)
(三) 钛铁矿	(77)
三、主要金属硫化物矿物及其标型特征	(78)
(一) Fe-S 系列矿物	(78)
(二) Ni-Fe-S 系列矿物	(84)
(三) Cu-Fe-S 系列矿物	(88)
第四章 岩石化学	(91)
一、金川超镁铁质岩体的岩石化学数据	(91)
(一) 数据来源	(91)
(二) 数据的利用	(91)
二、岩浆系列及岩石化学特征	(108)
(一) 岩浆系列	(108)
(二) 岩石化学特征	(109)
第五章 矿床地球化学	(113)
一、主成矿元素地球化学	(113)
(一) 矿石中主成矿元素分布特点	(113)
(二) 与国外同类矿床对比	(114)
二、铂族元素地球化学	(117)
(一) 铂族元素分布特点	(117)
(二) 矿石中铂族元素地球化学分配及讨论	(121)
(三) 与国外同类矿床对比分析	(124)
三、微量元素地球化学	(125)
(一) 地球化学分配	(126)
(二) 微量元素间的相关分析	(135)
(三) 分配特点讨论	(138)
(四) 微量元素的地球化学演化	(142)
四、稀土元素地球化学	(143)
(一) 稀土元素特征	(143)
(二) 稀土元素地球化学讨论	(151)
(三) 部分熔融程度估算	(152)
第六章 同位素地质学	(154)
一、超镁铁质岩同位素 Sm-Nd 法定年	(154)
(一) 样品处理和实验方法	(154)

(二) Sm-Nd 同位素测定结果及讨论	(155)
二、稳定同位素特征	(157)
(一) Sr、Nd 同位素	(157)
(二) S 同位素	(160)
第七章 矿床成矿物理化学条件研究	(163)
一、成岩成矿物理化学条件	(163)
(一) 造岩矿物形成温度	(163)
(二) 硫化物形成温度	(166)
(三) 成岩总压力估算	(167)
(四) 成岩的氧逸度条件	(168)
二、高温高压熔融实验	(169)
(一) 实验样品	(169)
(二) 实验方法	(169)
(三) 实验结果及讨论	(170)
(四) 地质意义	(172)
三、熔融包裹体研究	(175)
(一) 熔融包裹体的基本特征	(175)
(二) 熔融包裹体的组分	(176)
(三) 熔融包裹体均一温度	(177)
(四) 熔融包裹体所反映信息的解释	(177)
第八章 成矿模式讨论	(180)
一、含矿岩浆的形成与演化	(180)
(一) 岩浆源分析	(180)
(二) 岩浆的形成与演化	(180)
(三) 岩浆上侵	(181)
二、铜镍硫化物富集机理	(182)
(一) 深部熔离成矿作用	(182)
(二) 岩体、矿体就位机制	(184)
(三) 气化热液与热液叠加成矿作用	(184)
(四) 成矿后的构造变动	(185)
第九章 成矿模式的地质对比	(186)
一、岩浆深部熔离-贯入矿床的地质对比	(186)
(一) 矿床特征与矿床类型	(186)
(二) 矿床地质特征对比	(187)
二、超大型、大型岩浆硫化物矿床的地质对比	(195)
(一) 关于超大型矿床的概念和研究现状	(195)
(二) 超大型、大型岩浆硫化物矿床的划分	(197)
(三) 超大型岩浆硫化物矿床的分类	(199)
(四) 超大型、大型岩浆硫化物矿床的地质对比	(200)
结论	(204)
主要参考文献	(206)
图版及图版说明	(209)

第一章 区域地质背景

现代地质研究认为，洋壳地质背景不利于形成岩浆硫化铜镍矿床，它一般只形成于大陆地壳及其与洋壳的过渡环境。这类矿床与来源于上地幔的镁铁质-超镁铁质岩有关。造成幔源镁铁质-超镁铁质岩向地壳浅部的上侵，需有拉张的地壳环境，陆壳上最主要的拉张环境是大陆裂谷，并认为裂谷是陆壳向洋壳转换的桥梁（许志琴，1978）。金川铜镍硫化物（含铂）矿床赋存于铁质超镁铁质岩之中，该岩体是上地幔部分熔融上侵到地壳浅部的侵入岩体，它形成时的地质背景亦应该是地幔上拱、地壳变薄的拉张环境。金川含矿岩体现处于华北地台阿拉善地块西南缘的龙首山隆起中，是典型的中生代以来的水平挤压隆起构造背景，或称侏罗纪进入地洼区（陈国达，1987）。可见金川岩体所处的大地构造环境在地质历史中有过重大变动。

金川岩体 Sm-Nd 同位素等时线法定年为 $1508 \pm 31\text{Ma}$ （汤中立等，1992），时代为中元古代长城纪晚期。龙首山隆起所在的阿拉善地块位于塔里木地台与华北地台相接的部位（图 1-1），南邻祁连早古生代褶皱系的北祁连褶皱带，北依准噶尔晚古生代褶皱系。在漫长的地质历史中，阿拉善地块大地构造位置的演化与相邻的大地构造单元有着密切的关系，特别是龙首山隆起与祁连褶皱系的发生、发展有着不可分割的联系。

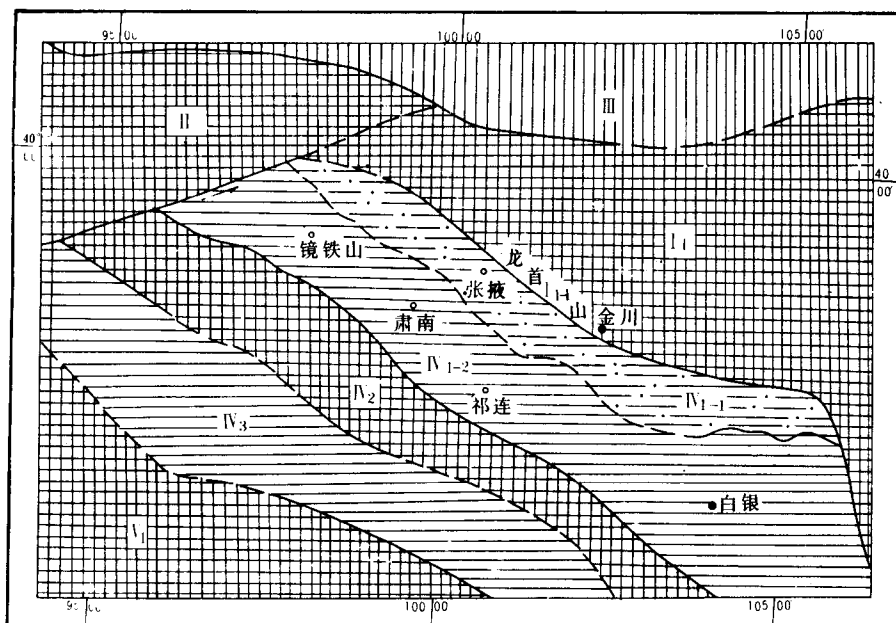


图 1-1 金川铜镍硫化物（含铂）矿床的大地构造位置示意图

I—华北地台；I₁—阿拉善地块；I₁₋₁—龙首山隆起；I₁₋₂—塔里木地台；I₁₋₃—准噶尔晚古生代褶皱系；I₁₋₄—河西走廊沉降；II—祁连早古生代褶皱系；IV₁—北祁连褶皱带；IV₁₋₁—河西走廊沉降；IV₁₋₂—北祁连优地槽；IV₂—中祁连中间地块；IV₃—南祁连褶皱带；V—东昆仑晚古生代褶皱系；V₁—柴达木中间地块

因此,研究金川矿床的地质背景及其演化,需与祁连褶皱系联系起来。

一、沉积建造

金川矿床所处的龙首山地区,其沉积建造自下而上可分为^①:前长城纪变质碳酸盐-火山岩建造;中、新元古代富镁质碳酸盐-火山碎屑岩建造;晚古生代磨拉石-浅海相碳酸盐岩建造;中、新生代陆相碎屑岩建造。前长城纪沉积建造为金川含矿超镁铁质岩的成岩前建造,中、新元古代沉积建造为成岩期建造,晚古生代和中、新生代的沉积建造反映金川岩体被改造时期的构造环境。这里重点阐述成岩时期的沉积建造。

(一) 前长城纪沉积建造

龙首山地区前长城系为龙首山群,近年来它与阿拉善地块上的阿拉善群、桑干群同被厘定为太古宙绿岩(潘杨杨,1986)。岩石一般属绿片岩相至角闪岩相,但变质极不均匀(董申葆等,1986)。原岩相当于钙碱性火山岩和沉积岩,组成巨厚的海相火山-沉积系列,构成了阿拉善地块的基底构造层。

龙首山群按岩石组合和原岩建造特征,可划分为:下部以基性火山岩为特征的白家嘴子组;上部以沉积碎屑岩、碳酸盐岩为主的塔马子沟组^②。金川超镁铁质岩侵位于白家嘴子组中。

龙首山群呈条块状天窗露头广泛分布于龙首山地区(图1-2),区域上岩性有一定变化,只能大致对比。

根据近年1:5万区调资料^{③④},龙首山群东部出露的白家嘴子组可与中、西部麒麟沟组相对比,塔马子沟组与马莲井组及南部东大山组相对比(图1-3、表1-1)。整个龙首山群的沉积建造可与中祁连的构造基底北大河群和野马南山群对比,这在大地构造演化上是可能的。

金川岩体的直接围岩龙首山群白家嘴子组以具混合岩化为特征,其上塔马子沟组主要为片岩、片麻岩和石墨大理岩。剖面岩层变化如下:

金昌市白石泉沟剖面

上覆地层:长城系变质复成分砾岩

~~~~~不整合~~~~~

#### 前长城系龙首山群塔马子沟组

|                      |      |
|----------------------|------|
| 11. 灰黑色黑云母石英片麻岩      | 323m |
| 10. 灰黄色含石墨大理岩        | 161m |
| 9. 灰色中厚层黑云石英片岩夹石墨大理岩 | 117m |
| 8. 灰黄、灰白色含石墨大理岩      | 60m  |
| 7. 灰绿色绿泥石英片岩         | 23m  |
| 6. 灰黄、灰白色厚层含石墨大理岩    | 117m |
| 5. 灰黄色黑云片麻岩          | 28m  |

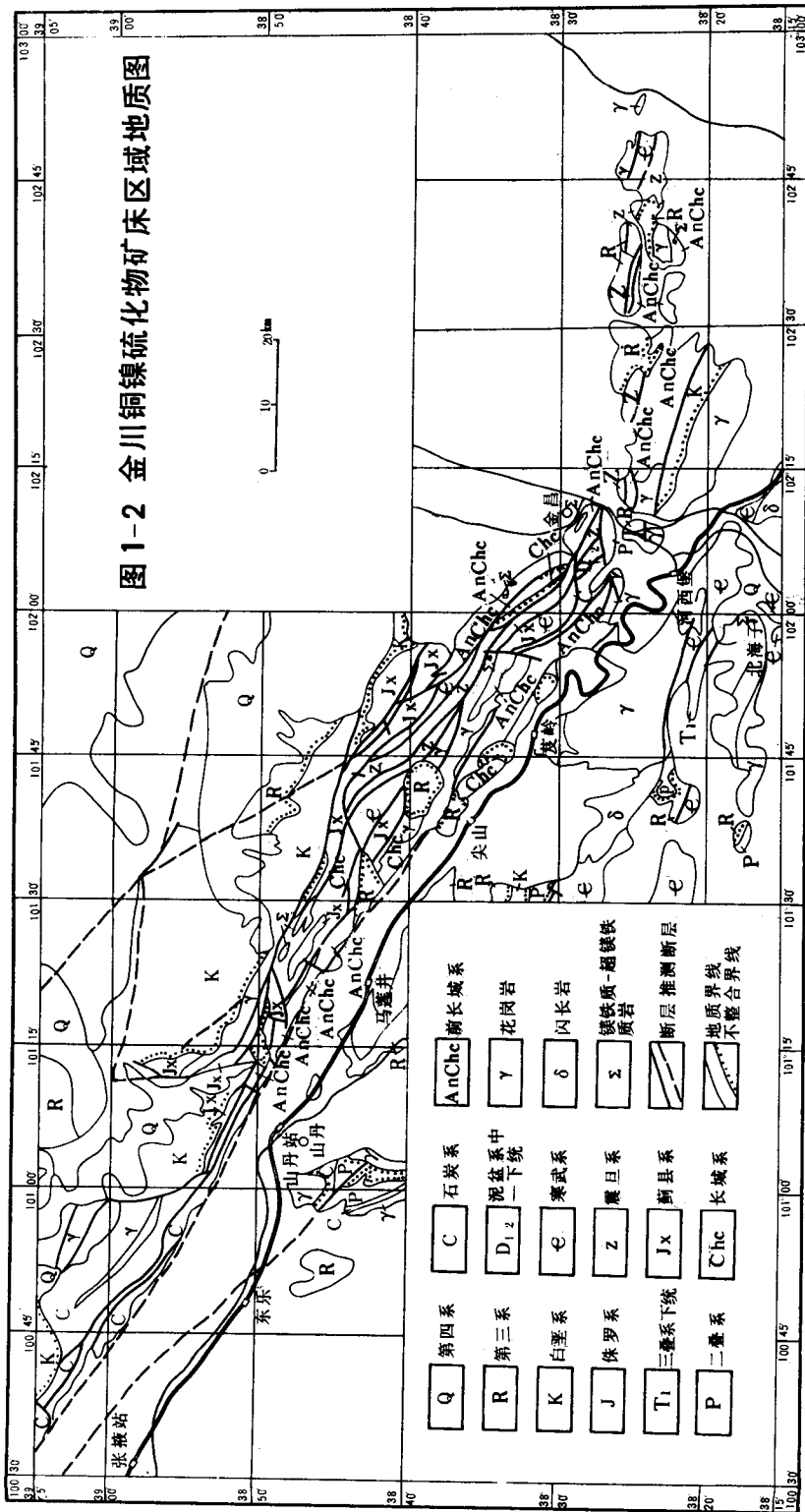
① 西北区区域地层表编写组(甘肃),西北区区域地层表(甘肃省分册),1976,193—240。

② 甘肃区测一队,1:20万河西堡幅地质图及说明书,1971。

③ 甘肃省地质六队,1:5万红洼井、旋毛头井幅地质图及地质报告,1989。

④ 甘肃省地矿局地研所,1:5万山丹等三幅地质图及地质报告,1991。

图1-2 金川铜镍硫化物矿床区域地质图



- |                   |      |
|-------------------|------|
| 4. 灰黄色含石墨绿泥绢云钙质片岩 | 64m  |
| 3. 灰黑色二云石英片岩      | 49m  |
| 2. 灰色黑云石英片岩夹不纯大理岩 | 66m  |
| 1. 灰黑色二云石英片岩      | 599m |

~~~~~不整合~~~~~

白家嘴子组

- | | |
|--------------------|------|
| 21. 灰白、白色厚层粗粒大理岩 | 42m |
| 20. 深红色阴影（云雾）混合岩 | 198m |
| 19. 灰白、白色厚层大理岩 | 252m |
| 18. 灰绿色黑云片麻岩夹顺层混合岩 | 33m |
| 17. 蛇纹石大理岩 | 26m |
| 16. 灰绿、暗红色顺层混合岩 | 174m |
| 15. 灰白色硅质大理岩 | 579m |
| 14. 白色厚层大理岩 | 348m |

表 1-1 龙首山地区沉积建造演化简表

| 地层时代及名称 | | 沉 积 建 造 及 厚 度 | | |
|---------|--------------|--|-------------------------|--|
| 新生界 | 第四系 | 松散堆积及砂砾岩，厚>75 m | | |
| | 第三系 | 陆相河湖相碎屑岩建造，厚>240 m | | |
| 中生界 | 白垩系 | 山麓、河湖相碎屑岩建造，厚>960 m | | |
| | 侏罗系 | 山麓、河湖相碎屑岩建造，厚>31 m | | |
| | 三叠系下统 | 山麓、河流相碎屑岩建造，厚>329 m | | |
| 上古生界 | 二叠系 | 海陆交互相碎屑岩夹火山碎屑岩建造，厚 455 m | | |
| | 石炭系 | 海陆交互相碳酸盐岩-碎屑岩建造，厚>864 m | | |
| | 泥盆系 | 陆相碎屑岩（磨拉石）、火山岩建造，厚 576 m | | |
| 下古生界 | 寒武系（？） | 浅海相碳酸盐岩-细碎屑岩建造，厚 1191 m | | |
| | 韩母山群 | | | |
| 新元古界 | 震旦系
烧火筒群 | 第三岩组 细碎屑岩夹碳酸盐岩建造，厚 142 m | | |
| | | 第二岩组 冰碛砾岩，厚 69 m | | |
| | | 第一岩组 碳酸盐质碎屑流沉积及碳酸盐岩-顺层玄武岩建造，厚 96 m | | |
| 中元古界 | 蓟县系
墩子沟群 | 上亚群 海相藻礁碳酸盐岩建造，厚 1085 m | | |
| | | 下亚群 碎屑岩、硅质岩夹碳酸盐岩建造，厚 265 m | | |
| | 长城系 | 石井口组 基性火山碎屑岩-碎屑岩建造，厚 648m | | |
| | | 黑石头沟组碎屑岩-基性火山碎屑岩建造，厚>265m | | |
| | | 复成分粗碎屑岩建造（底砾岩），厚 64m | | |
| | 前长城系
龙首山群 | 塔马子沟组 碳酸盐岩-碎屑岩建造，厚 1607m
白家嘴子组 碎屑岩-碳酸盐岩-火山岩建造，厚 3745m | 东大山组 碎屑岩-碳酸盐岩建造，厚 2164m | 马莲井组 碎屑岩-碳酸盐岩建造，厚>820m
麒麟沟组 碎屑岩-火山岩建造，厚 1238m |

- | | |
|----------------------|------|
| 13. 灰白色蛇纹石大理岩 | 103m |
| 12. 深红色块状阴影混合岩 | 105m |
| 11. 灰白色蛇纹石大理岩 | 241m |
| 10. 灰绿色混合岩化黑云二长片麻岩 | 78m |
| 9. 白色硅质大理岩 | 129m |
| 8. 灰白、白色大理岩 | 40m |
| 7. 灰绿色黑云顺层混合岩 | 189m |
| 6. 灰白色大理岩夹透镜状二云石英片岩 | 245m |
| 5. 灰绿、浅灰色含石榴二云片麻岩 | 285m |
| 4. 灰绿色角闪质顺层混合岩 | 20m |
| 3. 灰绿色顺层混合岩 | 266m |
| 2. 灰白色蛇纹石大理岩 | 67m |
| 1. 斜长角闪质阴影混合岩夹透镜状大理岩 | 139m |

未见底

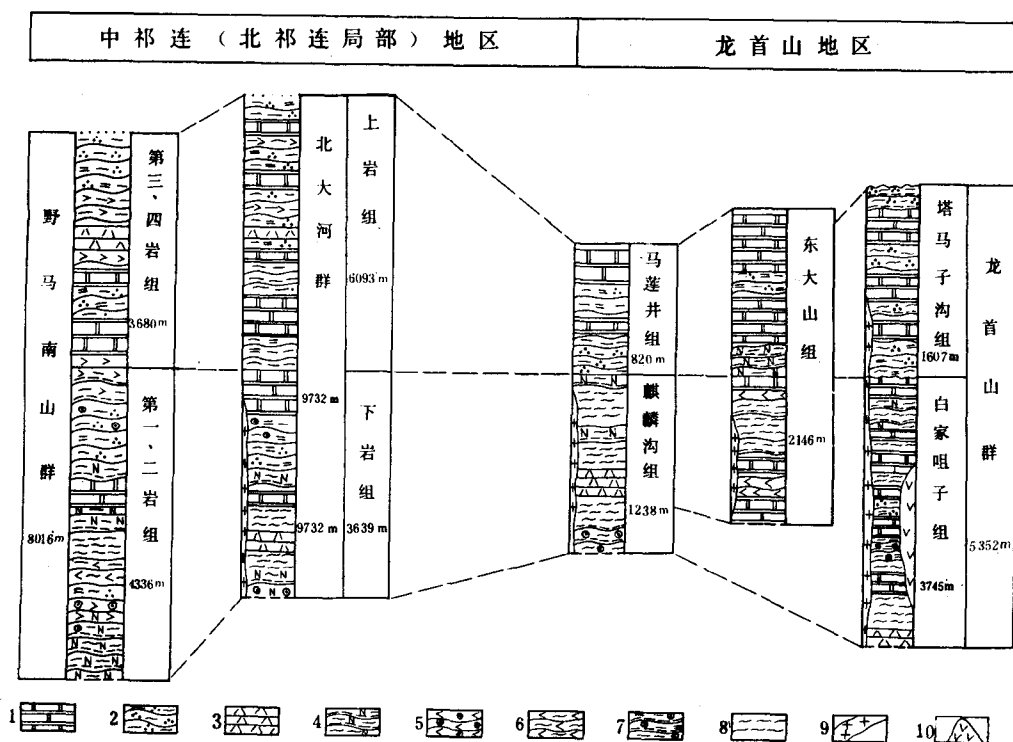


图 1-3 龙首山、中祁连地区前长城纪沉积建造对比图

1—大理岩、碳酸盐岩；2—二云母、黑云母、白云母石英片岩；3—斜长角闪岩、角闪片岩；4—黑云斜长片麻岩、变粒岩；5—含石榴子石角闪片岩；6—黑云角闪片岩；7—石榴二云片麻岩；8—混合岩；9—花岗岩脉；10—镁铁质-超镁铁质岩体

龙首山群的形成时代从表 1-2 同位素测试数据来看，隶属前长城纪，不会存在问题。但属于古元古代还是太古宙尚未定论。与之相对比的中祁连北大河群，在北大河中游狼尾山