分类号：P54　　10710－22051

长安大学
硕士学位论文

新疆冰达坂地区韧性剪切带型金矿床成矿作用研究

舒建生

指导教师姓名　杨兴科 教授　张连昌 副研究员

申请学位级别　硕士　学科名称　构造地质学

论文提交日期　2005年5月　论文答辩日期　2005年6月

学位授予单位　长安大学

答辩委员会主席：徐学义 研究员

学位论文评阅人：钱壮志 教授

王居里 副教授

二OO五年六月

摘 要

冰达坂韧性剪切带是中天山北缘大型韧性剪切带的重要部分，同时也是极其重要的金铜成矿地带，典型金矿如望峰金矿和萨日达拉金矿。本研究在大量搜集和整理前人资料及测试的基础上，依托 1∶5 区域与地质矿产调查最新成果，查明了不同尺度冰达坂韧性剪切带的分布和变形特征。通过区域和典型金矿床的系统研究，分析探讨韧性剪切带控矿机制。并通过对典型金矿床 C、H、O、S、Pb 稳定同位素、微量稀土元素和流体包裹体地球化学特征分析金矿可能成矿物质来源、成矿流体性质，进一步探讨该带韧性剪切带型金矿成矿模式。主要有以下一些认识和成果：

首先确定了冰达坂韧性剪切带的空间分布与规模，系统总结了其构造变形特征。带内变形以局部应变集中与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征。变形组构多样，其中 S—C 面理、拨丝构造、旋转碎斑系和紧闭同斜褶皱等变形形迹广泛发育。根据各类变形组构的穿插、交切、复合叠加及其运动学和动力学特征进行综合对比分析，划分了剪切带变形期次，即早期挤压剪切变形、中期走滑脆-韧性剪切变形和后期脆性变形作用。

冰达坂韧性剪切带是区内重要的一级控矿构造带，萨日达拉和望峰金矿床具有极其相似的地质构造特征，二者都是该剪切带长期演化的结果。剪切带内金矿床的时空分布规律严格受脆-韧形变形转换控制。总结有以下规律：（1）脆-韧性变形转换型式有强弱应变转换型和原位异相转换型；（2）在横向、纵向和垂深上强弱应变相间及变形转换的特征控制了矿床、矿体的分布，初步提出该区脆-韧性变形转换带空间和金矿（床）点分布结构模式；（3）脆-韧性变形转换强烈部位有利于成矿，且在显微裂隙发育部位易形成富矿；（4）金成矿作用滞后于韧性变形，主成矿期发生在中浅层次脆-韧性变形阶段或稍晚。

总结前人对萨日达拉金矿床和望峰金矿床碳、氢、氧、硫、铅稳定同位素研究和微量稀土元素对比研究及其围岩含金性分析表明：这两个典型金矿在以上方面均具有相近性。冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿流体为变质热液和大气降水热液的混合热液为主。成矿物质主要来源于长城系星星峡群变质岩和加里东晚期 S 型花岗闪长岩，部分物质可能来源于深部下地壳或地幔，具有多源特点，

通过对望峰金矿温压测试分析其成矿均一温度介于 151.2~434.5℃，主成矿温度在 331.2~228.2℃，其次 221.0~151.2℃成矿。与萨日达拉金矿爆裂成矿温度（170~410℃，主成矿温度在 270~300℃，其次为 335~360℃；王居里，1995）对比，说明带内成矿作用应主要发生在中低温阶段，具多阶段复合叠加的特点。本次研究估算了望峰金矿成矿压力集中于 22.13~40.83Mpa 和 47.56~60.87Mpa 两个数值区间内，结合前人研究成果综合分析认为区内主成矿期开始的深度不应超过 5.6km，地壳被抬升至 2.00km 左右深度时矿化最为强烈，抬升至 1.00km 以上深度

时矿化基本结束。前人对萨日达拉金矿床和望峰金矿床研究表明区内成矿流体成分主要以 H_2O 和 CO_2 为主，含有少量 CO、CH_4、H_2 和 H_2S 等成分。本次通过对望峰金矿床水溶液包裹体测温估算成矿流体 H_2O-NaCl 体系的盐度值为 1.57%~8.00%，平均值为 3.786%，为一低盐度体系。体系流体密度为 0.772~0.914g/cm^3，平均值为 0.847g/cm^3。

望峰金矿赋矿围岩眼球状糜棱岩化花岗闪长岩单颗粒锆石（SHRIMP）测年，年龄为 432±5.6Ma，加里东晚期岩浆活动对该区金的富集具有一定的贡献，通过地质和同位素年龄综合分析认为韧性变形结束年龄比 302±6.2Ma 稍早，在晚石炭世之前。金成矿发生在韧性变形之后的脆-韧性变形阶段，属华力西晚期。最后概括总结了冰达坂韧性剪切带型金矿床成矿模式。

关键词：冰达坂韧性剪切带；金矿床；脆-韧形变形转换；成矿作用；成矿模式

MINERALIZATION OF DUCTILE SHEAR BELT GOLD DEPOSIT OF BINDABAN IN XINJIANG

Abstract

Bindaban ductile shear zone is the main part of north edge of Middle Tianshan, at the same time it is the dominant metallogenic belt of Au and Cu. The classic gold deposits include Wangfeng gold deposit and Saridala gold deposit. Based on the former information and the new result of 1∶50000 regional survey, the distribution and deformation feature of Bindaban ductile shear zone are found out in different scales. According to systematic research of the classic gold deposits' geology, structural geology and the geochemical characteristics (stable isotopic ratio of C、H、O、S、Pb、REE and fluid inclusion), it discussed the ore-controlling mechanism ,the source of ore-forming materials and the feature of ore-forming fluid. Further more, summerized the metallogenic model of gold deposit in. Bindaban ductile shear zone

It ascertains the distribution and scale of Bindaban ductile shear zone firstly, and summarizes the structure deformation characteristics systematically. The deformation inside the belt is characterized by strain concentration alternating with weak strain belt and strain transformation, The deformation fabrics are various, such as S-C、the tight homoclincal folding etc. Based on its deformation fabrics, kinematics and dynamic feature, the shear deformation can be divided into three phases: the shear deformation phase in early stage, the brittle –ductile shear deformation phase in mid-term and brittle deformation in later period.

Bindaban ductile shear zone is the first class ore-controlling structure belt in this area, The gold deposits of Wangfeng and Saridala are rather similar, they are all the results of the evolution of Bindaban ductile shear zone. The brittle–ductile deformation transition controls the distribution of gold deposits strictly. To abtain following rules: (1) the brittle–ductile deformation transition can divided into strong-weak alternating type and original place transformation type, (2) the feature of strong-weak strain alternating and deformation transition in crosswise, longitudinal and vertical depth controls the distribution of deposits, it brings up the construction model of the brittle–ductile deformation transition space and gold deposit' distribution, (3) the brittle–ductile deformation transition belts are the collection belt of gold deposits, (4) gold mineralization lags ductile deformation, the main mineralization period is in brittle–ductile deformation stage.

Suming up the reserach and comparison of C, H, O, S, Pb stable isotopic ratio and the REE in Wangfeng gold deposi and Saridala gold deposit, it manifests that the metallogenenic fluid of gold deposits is mainly metamorphic fluid, and sneaked into precipitate water later. The source of metallogenenic materials are metamorphic rocks of Changcheng system Xingxingxia group and S-type granite invaded during late Jialidong period. Some materials may came from deep crust or mantle.So metallogenenic materials has the multi-source feature.

Depended on the testing of the temperature and pressure of Wangfeng gold deposit, its metallogenization homogeneous temperature is 151.2~434.5℃, and the primary metallogenization temperature is 331.2~228.2℃, secondary is 221.0~151.2℃. Contrasting with the decrepitation metallogenization temperature of Saridala gold deposit (170~410℃,the main is 270~300℃,and the secondary is 335~360℃;Wang Juli,1995), these show that the mineralization mainly occur on the stage of the medium-low temperature, and have the feature of the superimposed metallogenization.The research estimates the metallogenic pressure of Wangfeng gold deposit

focuses on 22.13~40.83Mpa and 47.56~60.87Mpa, combining the achivement of the forefather's reseach synthetic, it reckons that the depth of the main mineralization period should not upward of 5.6km, when the crust was lifted up to about 2.0km, the mineralization is the most intense, the mineralization is basicly end when lifted up to about 1.0km. The research of Saridala gold deposit and Wangfeng gold deposit done by the forefather shows that component of the ore-forming fluid mainly consist of H_2O and CO_2, and less CO, CH_4, H_2, H_2S. Depended on the temperature of the aqueous sotution inclusions of Wangfeng gold deposit, it estimate that the salinity of the H_2O-NaCl system is 1.57~8.00%, the average is 3.786%, it is low salinity system. The fluid density of this system is 0.772~0.914g/cm^3,the average is 0.847g/cm^3.

The single-grain Ziron age（SHRIMP） of the late-Caledonian mylonitization gramodiorite which is the wallrock of Wangfeng gold deposit is 432±5.6Ma. The magmatism certainly contributes the concentration of gold in late-Caledonian. The Geology and Rediometric data manifests that the terminating age of the ductile deformation should be before 302±6.2Ma, it is also before late-Carboniferous. The gold mineralization formed in the stage of the brittle-ductile deformation following the ductile deformation, belongs to late-Variiscan. At last, it summarized the metallogenic model of gold deposit. In the Bindaban ductile shear belt.

Key words: Bindaban ductile shear belt, gold deposit, brittle-ductile deformation transition, minaralization, metallogenic model

第一章　绪论

第一节　研究的意义、内容及研究思路和方法

一、选题目的和意义

Sibson(1977)和 IRamsay(1980)最早发表了韧性剪切带和糜棱岩的经典论著，Boyle(1979)提出韧性剪切带型金矿之后，在理论、应用和剪切带型金矿床的研究均取得了很大的进展(Lister et al.1984；郑亚东等，1985；Phillips，1986；Boulter e tal，1987；Roberts et al.，1987；Kerrich，1988；Sibson et al.1988；Bonnemaison et al，1990；曲亚军等，1991；吕古贤等，1993；Boullier et al.，1992；董法先等，1993；季俊峰等，1994；等)，并依据剪切带理论找到了一批剪切带型金矿床。与此同时，对韧性剪切带控矿机制及韧性剪切变形作用对成矿元素迁移和富集关系研究等多方面都取得了进展(Bonnemaisonetal.，1990；Kerrich，1988；凌井生，1992；曲亚军等，1991：Boulliereta1.，1992：Robertetal.，1986，1987；周崇智等，1988；刘劲鸿，1991；杨开渠，1990；何绍勋等，1992；杨兴科等，1999；陈柏林，1999，2000；贾国志等，2000；NSF，2002；郭安林等，2003)。主要研究成果可以概括为以下几个方面：金元素沉淀的构造部位；含金成矿流体的构造成因问题；成矿流体的运移机制；时空统一的韧性剪切带型金矿成矿模式等。但是，对于韧性剪切带型金矿床的成矿作用和成矿过程仍存在很大的争议和不健全。例如对于金矿成矿与构造变形关系的认识；石英脉的形成深度；成矿流体的构造成因等问题。因此对韧性剪切带型金矿床进行系统的研究应该具有十分重要的理论意义。

西天山冰达坂地区地处天山造山带西段，位于北天山（准噶尔）板块与中天山（伊犁）聚合部位。地层岩石有两个构造层组成：(1)北天山构造带地层，包括前石炭系博霍特组（暂称）、上石炭统奇尔古斯套组、后峡组、下二叠统阿尔巴萨依组构成的下古生界中-浅变质岩系和中上三叠统小泉沟群、下侏罗统八道湾组、三工河组、中侏罗统西山窑组及头屯河组组成的中生界地层。(2)中天山构造带地层，主要地层包括长城系星星峡群和蓟县系卡瓦布拉克群的中元古界深变质岩系。区域构造以近东西向展布为特色，主要构造式样有两类：(1)韧性-脆韧性变形构造层，发育于中元古界长城系星星峡群和蓟县系卡瓦布拉克群深变质岩系中。(2)中浅层脆韧性变形构造层：发育于下古生界中-浅变质岩系，地层发育紧闭褶皱。

冰达坂韧性剪切带非常发育，其属于中天山北缘韧性剪切带的一部分。研究区韧性剪切带主体宽度已达 3~10km，影响超出此数值。韧性剪切带主要发育在元古界地层中，元古代岩浆岩体、加里东晚期眼球状花岗闪长岩、华力西期粗粒花岗闪长岩体均受其影响。韧性剪切带由各类糜棱岩组成。韧性剪切带中剪切面理方向主体呈北西 300°展布，局部面理和断层同步弯转，面理地表以北倾为主，倾角在 70°~80°间变化。带内变形组构多样，显示多期叠加现象。

90年代初以来，在冰达坂地区金矿床的找矿工作也取得了突破，发现并勘查了与韧性剪切带有关的望峰中型金矿床、萨日达拉中型-大型金矿床等。所以选择冰达坂地区，以研究韧性剪切带构造与金矿为主题的硕士论文研究工作，对查清该地区韧性剪切带的变形特征及其对金矿床的控矿机制，对于金矿床的进一步勘察找矿也具有重要的指导意义。

所以，在冰达坂地区开展韧性剪切带构造与金矿成矿关系研究具有相应的研究基础，可望取得有意义的成果。

二、拟解决的科学问题和研究内容

本研究项目拟解决的关键科学问题是：在前人工作基础上，通过区域和典型金矿床的系统研究，查明从区域到矿区不同尺度韧性剪切带的变形特征，探索韧性剪切带对金矿床的控矿机制，探讨韧性剪切带金矿成矿模式。

在前人地质工作的基础上，拟定的主要研究内容如下：

1、通过详细野外工作，并在充分收集和应用区内已有地质科研成果的基础上，查明冰达坂地区韧性剪切带的构造变形特征，划分剪切带变形演化期次。并查明本区韧性剪切带对金矿床(点)的控矿特点，探讨冰达坂韧性剪切带构造控矿规律。

2、结合前人资料，在1∶5区域与地质矿产调查最新成果基础上，详细对比研究区内典型金矿床萨日达拉金矿床和望峰金矿床等，对其地质特征进行重点剖析，并进行对比分析。

3、详细观察记录典型矿床矿石中的包裹体特征，并进行均一温度和盐度的测定，再总结前人资料，探讨成矿流体性质和成矿过程中的物理化学性质。

4、充分利用和二次开发前人已有的典型矿床地球化学资料，依托最新1∶5区域与地质矿产调查成果，重新综合评述和研究矿石中石英的包裹体H、O同位素和矿物中的S、Pb、C同位素组成，探讨成矿流体和成矿物质的可能来源。

5、分析探讨冰达坂韧性剪切带变形时代及金矿床成矿时代，并结合金矿床的构造背景，概括总结区内金矿床成矿模式。

三、研究思路与研究方法

根据本研究拟解决的科学问题和主要研究内容，主要研究思路是：

在前人对韧性剪切带型金矿床和本区研究工作的基础上，突出前人研究工作中较为薄弱或存在争议的问题，如韧性剪切带成矿控矿机制、韧性剪切带的韧性变形与金矿化的时序关系，通过资料二次开发和野外实地调研，重点剖析冰达坂地区韧性剪切带构造控矿规律、韧性剪切带构造演化与金成矿作用的关系，结合国内外韧性剪切带型金矿床的研究成果，建立韧性剪切带型金矿床成矿模式。

本研究工作以当代先进构造地质学理论为指导，结合矿床学、矿田构造学、矿床地球化学、同位素地质学等学科专业知识开展综合研究，

具体研究方法是：在收集前人研究成果的基础上，开展野外实地观测研究，有选择地进行重点解剖和室内测试分析，在研究中还注重引进新理论、新技术、新方法，拓宽思路，使各项研究更具有针对性，取得尽可能贴近地质实际的资料、数据和认识。主要有以下手段：

1、开展野外实地观测研究，查明冰达坂地区韧性剪切带的变形特征，及其对金矿床(点)控矿规律。

2、通过详细野外工作，重点对比剖析研究区内萨日达拉金矿床，望峰金矿床等典型金矿床的地质特征。

3、进行构造变形重点区段典型金矿床的流体包裹体和地球化学特征研究，包括详细观察记录典型金矿望峰金矿床矿石中的包裹体特征，并进行均一温度和冰点（盐度）的测定，结合前人资料，探讨成矿流体性质和成矿过程中的物理化学条件。并利用测试和大量收集前人典型矿床 C、H、O、S、Pb 稳定同位素地球化学和稀土微量元素资料，依托最新 1∶5 万区域与地质矿产调查成果和测试数据，探讨成矿流体和成矿物质的可能来源。

4、使用先进同位素测年技术（SHRIMP），精确测定矿区及其周边岩体侵位时间，从中提取与成矿有关的构造活动改造期次的时间，并结合地质分析，探讨剪切带变形和成矿的时代。

四、完成的实物工作量

表 1-1　实物工作量一览表

野外收集	地质剖面测制	10 条，约 70 公里
	地质路线	150 多千米
	地质制图	地质总图 1 张
	野外实地照片	120 多张
	地质素描	30 多幅
	定向薄片	52 件
室内整理	薄片（光片）	150 片以上
	矿床光、薄片鉴定	14 片
	显微组构分析	13 组
	显微照片	200 余张
	包裹体测温	56 个
	稀土微量元素分析	20 件，
	单颗粒锆石测年	8 组
	地质剖面图	3 条
	计算机成图	40 余张
	查阅相关文献	100 余篇

笔者同项目组老师及新疆地矿局第一地质大队合作人员一起，历时三年，两

度野外考察，所做工作量见表 1-1，在详细的野外地质考察中，对冰达坂韧性剪切带的产出规模、变形特征及其控矿规律和典型金矿床的地质特征进行了重点剖析。在前面研究基础上，在室内通过岩矿石的光薄片鉴定，观察各种岩矿石的显微组构特征及其各类变形组构的穿插、交切、复合叠加及其运动学和动力学特征，得出剪切带变形期次及其变形组构与金矿化的关系。详细观察望峰金矿矿石中石英的流体包裹体特征，并进行均一温度度、盐度的测定，探讨区内成矿温度和成矿流体物理化学性质。此外利用稀土微量元素测试和大量收集前人典型矿床 C、H、O、S、Pb 稳定同位素地球化学资料，依托最新 1∶5 万区域与地质矿产调查和测试成果，探讨成矿流体和成矿物质的可能来源。使用先进同位素测年技术（SHRIMP），探讨剪切带变形和成矿的时代，并结合金矿床的地质构造背景，概括总结区内金矿床成矿模式。

第二节　研究区自然地理概况

研究区位于天山山脉依连哈比尔尕山主脊东段冰达坂一带，地理坐标：东经 86°30'~87°15'；北纬 43°00'~43°10'，与 1∶5 万国际分幅 K45E006011、K45E006012、K45E006013 相一致，总面积 1119km^2。海拔高程平均在 3km 以上，最高海拔高程 4414m，山势陡峻，属深切割程度的高寒山区。研究区为当地牧民的夏季牧场，属大陆性温带半干旱气候，冬长夏短，年平均气温 0℃左右，年最高气温 20℃，最低气温-40℃，无霜期约 100 天；山脊上多为冰雪覆盖，常年不化，冰碛砾石沿山坡堆积。气候变化无常，经常遇到雨、雪、冰雹天气，雪崩现象时有发生，太阳紫外线照射强烈，多数人会有不同程度的高山缺氧反映。每年的 6-8 月为最佳野外工作时间。区内水系发育，为乌鲁木齐河（大西沟）、乌拉斯台河（乌拉斯台郭勒）等河流的上游源地；夏季冰雪融化，河水汹涌，难以涉渡。区内野生动植

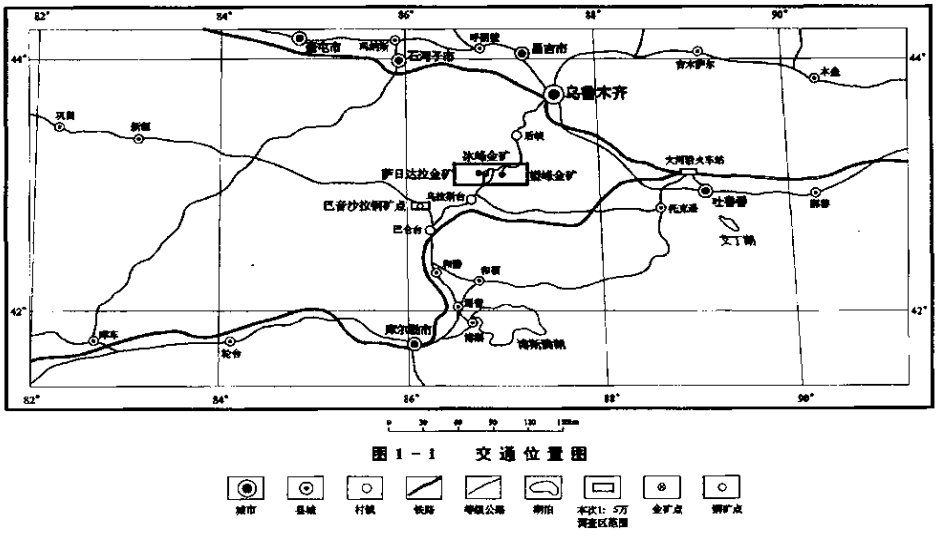


图 1－1　交通位置图

物种类繁多，有狼、黄羊、旱獭、雪鸡等。区内生产以牧业为主，民族以哈萨克族、蒙古族为主，区内无常住居民；通讯联络为无线电台或卫星电话。

研究区南距和静县城 80km、乌拉斯台约 2km、北距乌鲁木齐市约 90km，区内通行条件困难，仅有一条 216 国道从东部呈北东-南西向斜穿调查区，交通工具以牛、马为主。行政区分属昌吉回族自治州昌吉市、乌鲁木齐市、巴音郭楞蒙古自治州和静县管辖（图 1-1）。

第三节　研究区的研究历史和研究现状

解放以前，研究区除前苏联地质学者对后峡南部部分地段进行过路线地质调查工作外，基本上为地质工作空白区。涉及调查区系统的地质工作始于 1958 年。40 余年来，先后有众多单位相继投入工作，使本区的地质研究程度逐步提高。其中，60 年代的区域地质矿产调查工作，80 年代的区域物化探扫面工作，90 年代以寻找金铜为主要目的而开展的区划、化探普查、矿产普查、异常检查及科研工作都具有划时代意义。详述如下：

1958 年，新疆地质局库巴大队在天山南坡哈布其哈-阿拉沟一带进行了 1：100 万地质测量，包含了本次调查区西边两幅的大部分地区。对区内地层进行了初步厘定，为随后开展的 1：20 万区域地质矿产调查工作奠定了基础。

1960-1971 年，新疆地质局第一区调大队在巴仑台幅（K-45-Ⅸ）进行了 1：20 万区域地质矿产调查工作，其将研究区划分为北天山地向斜褶皱带（Ⅱ级）博罗霍洛复背斜（Ⅲ级），横贯全区的冰达坂正断裂为泥盆系和志留系的分界，地层厘定为志留系阿河布拉克组、上泥盆统天格尔组。侵入岩划分出了华力西早期黑云母花岗岩、花岗闪长岩，华力西中期花岗闪长岩、石英闪长岩，华力西晚期黑云母花岗岩、红色花岗岩。此外还发现和初步评价了铁、铜、铅、黄铁矿、多金属、白云岩矿点共 14 处。

1960-1972 年新疆地质局第二区调大队在后峡幅（K-45-Ⅹ）进行了 1：20 万区域地质矿产调查工作，其以夏尔嘎大断裂为界将研究区划分为北部华力西期构造区北西向构造带、南部加里东构造区，地层厘定为志留系阿河布拉克组、上泥盆统天格尔组、下石炭统雅满苏组、上三叠统小泉沟组、下侏罗统八道湾组、三工河组和中侏罗统西山窑组、头屯河组。侵入岩划分出了华力西早期石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩。发现和初步评价了铜、铅、铁、黄铁矿点共 15 处。

1982 年，新疆地矿局物化探大队对全疆进行了 1：200 万布格重力测量，研究区位于乌鲁木齐-库米什-且末“之”字型扭曲梯度带以西后峡重力低异常区，布格重力值-250×10^{-5}m/s^2 左右。

1983 年，地矿部航测大队完成了全疆 1：100 万航磁测量。研究区位于正磁异常向负磁异常过渡的梯度带上，反映了调查区处于深大断裂带上。

1986-1990 年，青海物探队承担国家 305 项目在焉耆幅（K-45-A）开展了 1：50

万化探扫面工作，在冰达坂一带圈定了三个甲 1 类 Au 异常，还发现金矿（化）点多处。

1988-1990 年，四川物探队承担国家 305 项目在后峡幅（K-45-X）开展了 1：20 万化探扫面工作，以冰达坂断裂为界进一步划分为南北两个成矿带。并圈定出了 15 个以金为主的综合异常。

1988-1998 年，新疆武警黄金十五支队在本次调查区内冰达坂至查汗诺尔及喀腊嘎依特一带 300km^2 范围内开展了 1：10 万化探，在进行异常普查评价时发现了望峰金矿床，探明 D+E 级矿石量 590358 吨，金金属量 3183kg，矿床平均品位 5.39×10^{-6}g/t，成因类型为受韧性剪切带控制的中-高温浅成变质热液型金矿，矿床规模为中型。

2000 年，新疆地调院第四地质调查所针对 1：20 万冰达坂金异常开展了天格尔达坂一带 1：5 万化探工作，将冰达坂地区划分为 A 类金成矿远景预测区。是寻找韧性剪切带型金矿的有利地段，并发现了巴尔尕依金矿化点。

1998-2000 年，新疆地矿局第一地质大队针对萨日达拉金矿点进行了预查评价工作，探求 L1 矿体（333+3341）金资源量 36159kg，其中（333）金资源量 8066kg，矿床规模达大型，矿床类型为蚀变岩型金矿床，含矿岩石为黄铁矿化糜棱岩化钠长石岩。

2002 年，新疆地矿局第一地质大队在萨日达拉金矿进行了普查工作，不仅使萨日达拉 L_1 矿体长度由原来的 440m 增加至 633m，而且在本次调查区内发现萨日达拉 L_2 金矿体和冰峰金矿，L_2 矿体长 250m，平均厚 3.24m，金平均品位 1.49×10^{-6}，含矿岩石为硅化大理岩脉。冰峰金矿体长 300m，平均厚 22.92m，一般品位 3.35~9.17×10^{-6}，平均品位 3.92×10^{-6}，估算 3341 金资源量：矿石量 1269548t，金属量 4977kg 规模达中型，矿床成因类型为剪切热液蚀变岩型金矿床。

综观前人的地质工作（王润三等，1992；刘养杰，1994；王居里等，1992、1993、1994、1995、2001；吴锡丹等，1999；李华芹等，1998；陈华勇，2000；陈衍景，1998、2001；等），一方面基础地质研究极其薄弱，仅局限于上世纪六七十年代的研究水平。另一方面尽管世纪末地质矿产普查，科研投入相对较多，但由于基础地质研究滞后，对一些典型矿床的研究也多限于单个矿床的研究，而没有从区域范围内进行对比分析的系统研究。所以有必要对冰达坂地区韧性剪切带的变形特征及其对金矿床的控矿规律、成矿机制和成矿作用作进一步系统探讨。总之，从冰达坂地区的地质矿产研究现状角度，对冰达坂韧性剪切带型金矿床开展系统的构造与成矿关系的研究也是非常必要的。

第二章　成矿地质背景

第一节　大地构造格局

研究区位于天山造山带的西段，是中亚成矿域天山-兴蒙成矿省天山大型-超大型成矿带重要地段。在大地构造划分上存在一定的分歧，根据实地观察研究，综合分析了本区及邻区地质资料，从构造岩石组合及其构造变形分析入手，依据地球物理资料和深部壳幔结构构造特征，以冰达坂断裂带为界进行了二级构造单元划分（图 2-1）。研究区横跨北天山（准噶尔）板块和中天山（伊犁）板块，其南为中天山（伊犁）板块，其北为北天山（准噶尔）板块，其中研究区二级构造单元划分如下：

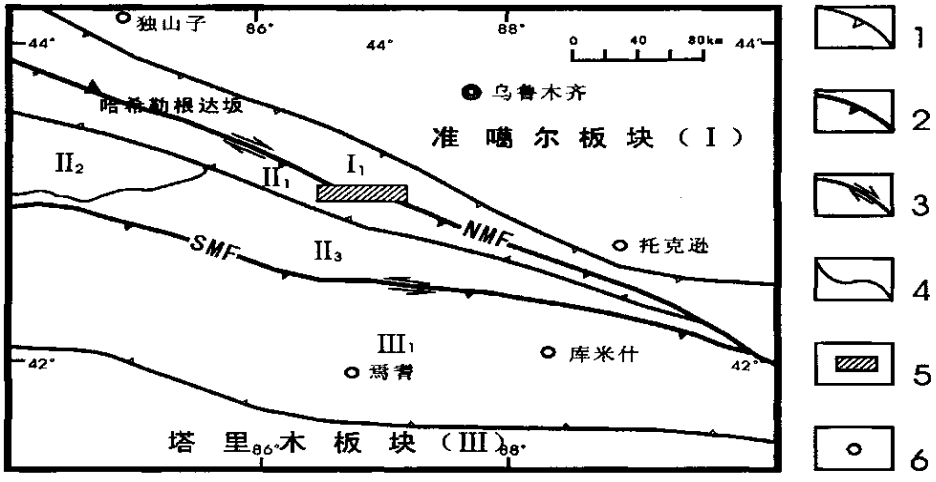


图 2-1　西天山构造单元划分略图（据高俊等，1997）

I_1—北天山（准噶尔）华力西陆缘增生活动带；II_1—中天山加里东陆缘增生活动带；II_2—伊犁地块；II_3—伊犁中天山南缘逆冲带；III_1—南天山南坡晚古生代洋壳—火山弧—复理石复合推覆席；NMF—中天山北缘断裂带；SMF—中天山南缘断裂带；1—古生代韧性逆冲断层；2—中新生代脆性逆冲断层；3—中新生代走滑断层；4—构造单元分界线；5—研究区范围；6—城市

I 级 北天山（准噶尔）板块

II 级 北天山（准噶尔）华力西陆缘增生活动带

III级 伊连哈比尔尕晚古生代弧盆带

IV_1 前石炭纪增生-剪切构造带

IV_2 红五月桥晚古生代晚期褶皱-断陷构造带

V_{2-1} 阿特达腊中生代上叠断陷盆地带

V_{2-2} 跃进桥晚古生代晚期线性复式褶皱带

I 级 中天山（伊犁）板块

II 级 中天山加里东陆缘增生活动带

III级 博罗霍洛早古生代岛弧带

IV级 萨日达拉陆缘褶皱-弧花岗岩带

其中北部伊连哈比尔尕晚古生代弧盆带Ⅲ级构造单元依据研究区具体地质特征，划分出两个Ⅳ级单元。以红五月桥断裂为界，其南划为前石炭纪增生-剪切构造带（$Ⅳ_1$），大地构造环境应属于岛弧；其北为红五月桥晚古生代晚期褶皱-断陷构造带（$Ⅳ_2$），大地构造环境应属于弧后盆地。晚古生代晚期褶皱-断陷构造带又可进一步分解为阿特达腊中生代上叠断陷盆地带（V_{2-1}）、北部跃进桥晚古生代晚期线性复式褶皱带（V_{2-2}）。

第二节　区域地层

研究区岩石地层单元以冰达坂断裂为界可划分为两个地层单元区（表 2-1），北部属于北天山构造带依连哈比尔尕地层区，南部属于中天山构造带博罗科努地层区。出露的地层主要是以石炭系为主体的上古生界，其次还有中元古界、中生界和新生界，其它时代地层在区内分布比较局限或缺失。

界和新生界，其它时代地层在区内分布比较局限或缺失。

表 2-1　研究区地层对比简表

地层区划 / 年代地层			本次研究地层划分方案	
			伊连哈比尔尕地层小区	博罗霍洛地层小区
新生界	第四系	全新统	沼泽沉积	沼泽沉积
			冲积沉积	冲积沉积
			冰碛堆积	冰碛堆积
		更新统	冰水沉积	冰水沉积
中生界	侏罗系	中侏罗统	头屯河组	
			西山窑组	
		下侏罗统	三工河组	
			八道湾组	
	三叠系	上中三叠统	小泉沟群	
古生界	二叠系	下二叠统	阿尔巴萨依组	
	石炭系	上石炭统	后峡组	
			奇尔古斯套组	
		下石炭统		阿克沙克组
	前石炭系		博霍特组	
中元古界	蓟县系			卡瓦布拉克组
	长城系			星星峡群

一、中元古界

地层区域划分属博罗霍洛地层区，地层主要有长城系星星峡群、蓟县系卡瓦布拉克群。

1、长城系星星峡群　区域分布于冰达坂断裂以南，沿蒙库萨拉、萨尔萨依、冰达坂、萨日达拉、阿苏克达坂一线。岩性组合为灰色、灰绿色黑云石英片岩、石英钠长片岩、绿泥石英片岩、绿泥钠长片岩及绿泥片岩。局部叠加热接触变质，使变质程度加深，有变粒岩、片麻岩产生。未见底。

2、蓟县系卡瓦布拉克群　分布于冰达坂断裂以南，主要分布于布热古斯坦萨拉沟的两侧，乌苏托沟的北支沟的两侧山脊和阿苏克达板、乔愣格尔达坂之间。主要岩性为变质碳酸盐岩-细碎屑岩组合，可划分为二个岩组。

一岩组　主要岩性为灰色黑云石英片岩、黑云钠长片岩、钙质片岩与薄层灰色大理岩组合。

二岩组　以厚层状、块状大理岩、白云大理岩、砾屑大理岩、豆粒大理岩为主要组合，夹少量钙质片岩、黑云片岩。厚层状白云大理岩含叠层石化石，未见顶。仅在布热古斯坦萨拉见下石炭统阿克沙克组不整合在其之上。

二、古生界

区内缺失上古生界，下古生界分布较广，约占全区二分之一，主要出露在冰达坂断裂以北地区，不同地段岩性、岩相差异较大。其中前石炭系博霍特组分布于冰达坂断裂以北，二级断裂红五月桥断裂以南，石炭系和二叠系沿红五月桥断裂以北分布，地层分布产状基本与区域构造线是一致的。只有博罗霍洛地层区下石炭统阿克沙克组在冰达坂断裂以南布热古斯坦萨拉沟的西侧山脊上出露很小面积。

1、前石炭系博霍特组

主要沿冰达坂断裂以北，红五月桥断裂以南分布，沿夏热嘎沟上游、博霍特沟、乌鲁特达坂一线分布，顶底不全。总体构成脆韧性-脆性剪切变形带。可划分为两个岩段。

一岩段　主要岩性为糜棱岩化灰色变粉砂岩、变硅泥质粉砂岩、灰绿色变凝灰质粉砂岩、变凝灰岩夹变杏仁安山岩及酸性火山岩，局部地段见砾岩透镜体。其中火山岩主要分布在萨日达拉以西地区。

二岩段　主要岩性为糜棱岩化浅灰色变细砂岩、粉砂岩夹硅泥质粉砂岩，偶见变凝灰岩。

2、下石炭统阿克沙克组

仅在布热古斯坦萨拉沟的西侧山脊上出露，面积不足 1 平方公里。主要岩性为紫红色、浅紫红色砾岩、含砾砂岩、砂岩及细砂岩，未见顶，与下伏蓟县系卡瓦布拉克群为不整合接触。

3、上石炭统奇尔古斯套组

主要沿阿尔喀尔阿特坎、喀拉萨依、萨尔托斯一线分布。主要岩性为深灰色、灰黑色硅质粉砂岩、细砂岩、硅泥质粉砂岩为主。夹少量泥质岩、含炭泥质岩，未见底，其上与后峡组为不整合接触。岩性组合稳定，反映一套深水海相复理石沉积。

4、上石炭统后峡组

主要沿查库尔图、波钦夏仁、后峡采石场、萨尔托斯一线分布。岩性为碳酸盐岩夹钙质泥岩和泥灰岩、泥岩。下部细碎屑岩较多。岩性组合具有浅水碳酸盐岩台地相沉积特征。与上覆下二叠统阿尔巴萨依组呈不整合接触。

5、下二叠统阿尔巴萨依组

沿查库尔图、萨尔托斯一线分布。主要岩性为紫红、灰绿色火山碎屑岩、火山岩为主，夹紫红色砾岩、粗砂岩、细砂岩及泥岩，顶底较全。与上覆中-上三叠统小泉沟群为不整合接触。为一套陆相火山岩建造，具有造山后陆相磨拉石建造特征。可划分为三个岩性段。

一岩段　底部为砾岩，砾石主要成分为石灰岩，细砂质钙质胶结。上部为火山集块岩、角砾岩及凝灰质角砾岩，角砾成分复杂。

二岩段　为紫红色砾岩、粗砂岩、砂岩夹少量泥岩，为喷发间歇期产物。

三岩段　为紫红、灰绿色角砾熔岩、少量火山角砾岩。

三、中生界

中生代地层出露较好，广泛分布于造山带内部的一些断陷盆地，主要是一套陆相碎屑沉积或含煤陆相碎屑沉积。中生代地层岩石组合差异明显，易于划分。

1、中-上三叠统小泉沟群

分布于查库尔图、红五月桥以北及萨尔托斯，主要为一套陆相灰黄色砂岩、细砂岩、泥岩、少量含砾砂岩和细砾岩组合。其与下伏下二叠统阿尔巴萨依组、上覆下侏罗统八道弯组均呈不整合接触。

2、下侏罗统八道湾组

分布在色尔芒达坂、阿特达腊一带，两组之间为整合接触。由黑色页岩、细纱岩、泥岩组成，含煤层。与下伏中-上三叠统小泉沟群为不整合接触。

3、下侏罗统三工河组

分布在色尔芒达坂、阿特达腊一带。主要为灰绿色砾岩、砂岩组成，少量细砂岩泥岩。与下伏八道湾组整合接触，上覆中侏罗统西山窑组为整合接触。

4、中侏罗统西山窑组

分布于阿入哈尔萨拉、阿特达腊一线。岩性为灰色砂岩、砾岩夹黑色炭质泥岩薄煤层。与下伏下侏罗统三工河组整合接触，上覆头屯河组为整合接触。

5、中侏罗统头屯河组

分布于阿入哈尔萨拉、阿特达腊一线。岩性为灰色、灰黄色砾岩、粗砂岩为主。与下伏西山窑组整合接触，未见顶。

四、新生界

新生代以后，区内地层具有统一性。可划分出四种成因类型，地质时代分别属全新统和上更新统。

上更新统冰水沉积：主要物质成分为巨砾、砾，砂泥质充填，呈层状产出，产状呈水平，构成阶地状地貌，分布于河谷两侧。岩层固结程度尚好。

全新统冰碛堆积：由松散的冰川漂砾、巨砾组成，冰川地貌明显，前碛、侧碛地貌形态特征清楚。多分布在冰斗及上游河床中。

全新统沼泽沉积：基本由两层组成，上部层位由棕色、暗棕色淤泥构成，积水洼地发育，牧草植被覆盖。下部层位由冰水沉积构成基底。

全新统冲洪积：由河床砾、砂、泥组成呈松散状。

第三节　区域岩浆岩

一、侵入岩类

区内岩浆活动强烈，具有显著多期活动特点，以加里东期、华力西期中酸性岩浆侵入活动最为活跃，出露有晚元古代一晚加里东期一华力西期各时期的基性一中酸性侵入岩体。另外有前石炭系中基-中酸性火山岩和早二叠统陆相火山岩建造，反映了该时期区内较显著的构造-热事件活动特点。在金属矿床形成过程中，这些侵入岩体和火山喷发等构造-岩浆活动热事件可能为富集成矿提供了有利的热源和热液。

晚元古代为中酸性侵入体，沿南部乌拉苏坦乌图艾肯、阿尤图艾肯、来仁夏热一带呈近东西走向的长条形分布。岩性主要有片麻状英云闪长岩和条带状英云闪长岩，条带状岩体多分布在岩体边部。矿物成分主要为斜长石、黑云母和少量石英，片麻状构造。多见长城系星星峡群捕虏体。单颗粒锆石（SHRIMP）年龄为 923Ma，属晚元古代产物。

加里东晚期为中酸性侵入体，岩体长轴方向与地层展布方向一致，呈近东西向展布于巴布尕萨依、萨日达拉、冰达坂、萨尔萨依和察汗诺尔，东西长 40km，南北宽 4km。岩石类型有花岗闪长岩、斜长花岗岩、英云闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩。主要矿物组分斜长石，钾长石，石英，黑云母，少量磷灰石和磁铁矿。糜棱岩化花岗结构，眼球状构造，糜棱面理发育，面理多呈平行状。与长城系星星峡群地层相伴产出，多见穿插接触，岩体之中多残留星星峡群地层，并且接触部位普遍发生绢云母化、硅化、黄铁矿化。岩石化学成分特征反映造山带钙碱性花岗岩和 S 型花岗岩的特征。已有单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄 435±10Ma 年龄数据(李华芹，1998)，单颗粒锆石（SHRIMP）年龄为 432±5.6Ma，属加里

东晚期产物。

华力西期是岩浆活动最强烈时期，影响极广泛。包含有多个岩浆序列，主要岩性有中基性杂岩、闪长岩、花岗岩和钾长花岗岩等，其次为基性－超基性岩和一些浅成岩脉。其中早华力西期乌苏滕敦德艾肯粗粒花岗闪长岩和黑熊沟道班细粒花岗闪长岩分布于冰达坂断裂以南，主体走向为北西，长轴方向与区域构造线一致。岩体靠近冰达坂断裂附近见有糜棱岩化现象。岩体与元古界地层、晚元古代侵入体呈侵入接触，单颗粒锆石（SHRIMP）同位素年龄数值为 374±6.3Ma；中华力西早期红五月桥闪长岩、察汗诺尔花岗闪长岩和奎克达坂花岗岩沿红五月桥断裂两侧呈北西向长条形分布，岩体发生脆-韧性剪切变形。其中察汗诺尔花岗闪长岩单颗粒锆石（SHRIMP）年龄 310±4.2Ma；中华力西中晚期有乌鲁特中基性杂岩、海热克闪长岩、阿入哈尔萨拉花岗岩、阿尤秋尔克花岗岩、纳楞夏尔萨拉钾长花岗岩及石英闪长岩等多个岩体，岩体紧靠冰达坂断裂北侧呈长条形北西向展布，长轴方向与区域构造线一致。未受韧性剪切变形改造。其中海热克沟岩体单颗粒锆石（SHRIMP）年龄为 302±6.2Ma；晚华力西期主要是基性-超基性侵入体，沿冰达坂断裂以南阿尤图艾肯、来仁夏热及古热布斯坦萨拉等地出露，多以小型岩株和岩脉穿插于上述岩体和地层中，未见有韧性剪切变形特征，因此其最早为晚华力西期产物。此外在北天山构造带中分布有闪长岩脉、石英钠长斑岩脉等众多浅成岩脉。

二、火山岩类

主要沿冰达坂断裂以北分布，以前石炭系火山岩最发育，测区内主体活动时代可能为早石炭世，其次为二叠纪陆相火山岩。早石炭世中基-中酸性火山岩分布不均匀，东部以凝灰质岩石为主，在乌库公路和萨尔萨依一带发育较好，冰达坂以西中基性到中酸性火山岩发育；下二叠统陆相火山岩下部以火山质集块岩和火山角砾岩为主，少量熔岩。中部为间歇期沉积，由砾岩、砂岩组成，少量泥质岩石。上部以火山质角砾熔岩为主，含有少量火山角砾岩。岩石中碎屑、角砾组合复杂，砾石磨圆度较好。火山岩岩性以安山质英安质为主，酸性火山岩少见。

第四节　区域构造

研究区内断裂构造发育，为近东西向展布，其次北西向和北东向为主。从北到南依次为红五月桥断裂、冰达坂断裂两断裂，其中沿冰达坂断裂两侧发育韧性剪切变形。此外，沿着主干断裂两侧发育多个次一级的断裂。

冰达坂断裂带是一条长期活动，以不同深度层次、不同变形行为和不同运动方向为特征的复合型断裂带，属博罗科努断裂带的组成部分。冰达坂断裂带在研究区内西起巴布尕依萨依、萨日达拉、冰达坂、萨尔萨依、察汗诺尔向东延伸，区内延伸长 52km。地表总体向北倾，倾角为 75°~80°以上，但地震资料显示断裂

向下延伸一定深度倾向变为南倾，倾角为 75°以上，断裂切割深度已达中下地壳，断距达 3~4km。沿断裂有基性岩体、超铁镁质岩体产出，反映断裂切割较深。断裂性质地表反映为正断层效应，深部反映为向北推覆逆断层性质。断裂南侧分布元古界变质岩系和晚元古代-华力西期中酸性岩体。北侧为晚古生代、中生代地层和华力西中、晚期中基-中酸性岩体。两侧发育宽度较大的韧性剪切变形带，面理和断裂走向基本平行，显示韧性剪切面理的生成和断裂有密切关系。区域地质资料分析断裂于加里东早期孕育，晚期南北两大块体碰撞生成，华力西期获得加强，印支-燕山期断裂由长期的俯冲碰撞机制转为伸展断陷-走滑机制，沿断裂带生成中生界断陷盆地，后期的由南向北的推覆和东西向右行走滑使断裂性质多样化，近代活化在东部表现明显。可见断裂分割两大地层单元，断裂深度大，延伸长，活动期次多，性质复杂，反映为多期活动的复合区域深大断裂。

红五月桥断裂也是一条具有多期活动、多种性质的区域性断裂，其经热勒德哈腊哈依特达坂、萨尔托斯、红五月桥向阿入哈尔萨拉展布，延伸约 30km。断裂总体走向 310°，倾向南，倾角为 60°~70°，局部变缓。断裂在走向上有分叉现象，由两条破裂面构成断裂带。断层碎裂带较宽，多为 100 米左右，最大宽度可达 500 米。构造碎裂岩、面理带发育，早期发育脆韧性剪切变形，晚期以脆性变形为主。断裂南盘发育前石炭系博霍特组浅变质岩，达绿片岩相，总体以中浅层次脆-韧性剪切变形为主。北盘地层为上石炭统、下二叠统和三叠-侏罗系地层。沿断裂南盘发育基性-中性杂岩体，显示出断裂的延伸较深。

北西向断裂规模较大的有萨尔托斯-胡萨尔图断层、奎克达坂-海热克断层、乌鲁特达坂断层、萨尔萨依-琼萨尔萨依断层、分水岭北断层及分水岭南断层。前两者分布在冰达坂断裂以北，其余分布在以南。断层走向与主体构造线一致，北倾。

东西向断裂规模较大的有乌苏腾敦德艾肯-阿热希公金断层、热勒德哈拉阿依特达坂北断层及蒙库萨拉断层，断层以北倾为主。

北东向断裂规模较小，生成较晚，错断以上各方向的断层，多以平移为主。

冰达坂韧性剪切带属于中天山北缘韧性剪切带的一部分。区内延伸 52km，宽 3~10km。韧性剪切带主要发育在元古代地层中，晚元古代岩浆岩体、晚加里东期眼球状花岗闪长岩、华力西早期花岗闪长岩体均受其影响。带内变形以局部应变集中与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征，而不是均一的韧性剪切变形特征。空间上由糜棱岩、千糜岩构成强应变带和由糜棱岩化岩石、构造透镜体、弱片理化带构成弱应变域相间分布，交替出现，具交织网状特征。在平面上构成强应变带分隔弱应变域的平面条带结构。主体构造变形以中深层次脆-韧性转换变形为主体。韧性剪切带中剪切面理方向性明显，主体呈北西 300°展布，局部面理和冰达坂断裂同步弯转，面理以北倾为主，倾角在 70°~80°之间。带内变形组构多样，不同尺度变形标志均较明显，显示有多期叠加现象。其构造变形特征见下章详述

第五节　地质构造演化史

区域地质、岩浆岩、构造特征及前人资料综合研究表明，西天山地区经历了复杂的地质演化过程。显生宙初，天山地区基本上都是一个统一的稳定的古陆，在早古生代期间，统一的大陆开始发生裂解（肖序常等，1992），形成了拉张环境下的多岛洋盆，多陆块格局。其中在中寒武世开始沿中天山北缘断裂（研究区内称冰达坂断裂）发生拉张解体作用，形成了早古生代"古准噶尔洋"（郭召杰等，1994）把西天山地区分解为北天山（准噶尔）板块和中天山（伊犁）板块两大块。

中奥陶世—晚志留世："古准噶尔洋"洋盆向南俯冲，该洋向中天山（伊犁）板块北缘下俯冲，形成了博罗科努早古生代岛弧带。与此同时致使中天山（伊犁）板块南缘地壳发生裂解，并于中晚志留世出现了具有一定规模的早古生代南天山洋（肖序常等，1992），与此同时"古准噶尔洋"闭合，中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块对接碰撞，期间发生了强烈的变形、变质作用，并在早古生代陆缘弧北侧海沟带内发生了部分与碰撞有关的岩浆侵位，其中研究区内以加里东晚期眼球状花岗闪长岩的出现为代表，其侵位时代为 432±5.6Ma。陆缘弧主体部分亦随后发生了相近类型的中酸性岩浆活动。所以从中晚志留世开始北天山（准噶尔）板块和中天山（伊犁）板块北部就以开始进入拼合，形成了早古生代碰撞造山带和活动陆缘。

中晚泥盆世—早中石炭世：沿中天山北缘断裂（研究区内称冰达坂断裂）于中晚泥盆世发生新一轮的地壳拉张解体作用，晚泥盆世—早石炭世出现了北天山裂陷槽型有限洋盆（高俊等，1995），研究区博霍特岩组可能就是这期间产物。随后不久该洋盆可能以洋壳板块向南俯冲为主，并引起中天山广泛的酸性岩浆侵入（引自王居里专题报告，1992）。在中天山内发生了 374~332Ma 间的多期花岗闪长类岩浆侵入活动，形成了区内黑熊沟花岗闪长岩-斜长花岗岩序列

中石炭世—早二叠世：中石炭世晚期北天山裂陷槽型有限洋盆闭合，中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块再次对接碰撞造山，随后进入了造山后拉张阶段（早二叠世—中三叠世）。在造山及造山后拉张过程中，发生了较大规模的基性—超基性、花岗闪长质岩浆及钾长花岗岩侵入活动，部分地段还发生了火山喷发作用，形成了中基性火山岩的喷溢。碰撞对接及随后的伸展拉张中发生了明显的褶皱、断裂及其韧性剪切构造活动和成矿作用。其中冰达坂韧性剪切带形成与中石炭世晚期北天山裂陷槽型有限洋盆闭合及其碰撞造山密切相关。

中三叠世以后，西天山地区整体被逐渐抬升，遭受多期剥蚀，在局部出现断陷盆地。分布于研究区东部的断陷盆地主要发育的是一套陆相碎屑沉积或含煤陆相碎屑沉积，包括中-上三叠统小泉沟群、下侏罗统八道湾组和三工河组、中侏罗统西山窑组和头屯河组。区内岩浆活动较弱。第三纪以后区内以差异性抬升、剥蚀为主。

第六节　区域矿产分布规律

由于研究区处于中天山（伊犁）板块和北天山（准噶尔）板块结合部位，形成了冰达坂具缝合性质的大型复合断裂。一般认为大型断裂系统深部分散的网络式的韧性剪切系统，既提供了部分变质流体，而且在还原条件下和构造泵吸作用下，还起着从围岩中萃取金属元素的作用；在中部的脆韧性转换系统及上部开放的脆性裂隙系统组成了热液对流的通道和沉积场所（翟裕生等，1999）。其次其经历复杂的地质演化过程中伴随发生有强烈构造-热事件活动，也为富集成矿提供了有利的热源和热液等条件。研究区内沿冰达坂断裂两侧集中分布了区内绝大多数金铜等金属矿（化）点（图 2-2）。尤其冰达坂断裂南侧发育的韧性剪切带构成区内主要控矿带，该区典型萨日达拉金矿床和望峰金矿床分布于该带。再者区域内金异常分布较广，呈近东西向展布，与区域构造线展布方向基本一致，异常浓度较高、浓集分带明显，在异常带上指示元素组合较好，且金与之相关元素化探异常较为发育。现已知有矿床（点）共计 59 处（见附表），其中大中型金矿床 3 处，金矿点 2 处，黄铁矿化点 9 处，铜矿点 16 处，多金属矿点 3 处，铅锌矿点 2 处。另外有铁矿化点 15 处，小型菱铁矿床 4 处，大型石灰岩矿 2 处，中型煤矿床 1 处，石墨矿 1 处。

冰达坂地区已成为了西天山以金为主的多金属矿化区之一。近年北部发现有与黑色岩系有关的萨尔托斯金矿化体、豹子沟多金属矿床，南部已发现与韧性剪切带蚀变岩有关的萨日达拉、望峰等大中型金矿床。还存在有许多金矿化点和金异常区，具点多面广特点。根据已有矿产的分布规律、地质、地球化学背景、成矿条件及控矿因素等分析，可初步划分出南、中、北三个成矿带（图 2-2）。对成矿带基本特征剖析如下。

1、南带（冰达坂韧性剪切带-构造蚀变岩型 Au、Cu 成矿带）

在区域上属于博罗科努山铜、钼、铅、锌、金多金属Ⅲ级成矿带，空间上金矿体产在韧性剪切带中，矿床的形成与韧性剪切带有直接关系。研究区内金矿（床）点绝大多数分布于南带（图 2-2），受冰达坂韧性剪切带控制。西部已发现有望峰中型、萨日达拉中大型和冰峰中型金矿床。除上述的金矿床以外，在已发现的金属矿（化）点中，南带控制了几乎全部的黄铁矿化点和铅锌矿点，大部分的铜矿点和多金属矿点。研究区内南带主体表现为受韧性剪切带控制的以金为主的多金属成矿带，具有很好的成矿潜力。本论文以望峰和萨日达拉金矿床两典型韧性剪切带型矿床为研究对象，目的就是试图揭示冰达坂韧性剪切带对金矿床的控制作用及其成矿作用。

2、中带（察汗诺尔-阿拉沟构造蚀变岩型 Au、Cu、Fe 成矿带）

区域上属依连哈比尔尕金、铜、铬、镍多金属（Ⅲ）成矿带，发现察汗诺尔等多金属矿化点，含矿地层为前石炭系博霍特组。矿化体多产于断裂带中，地表

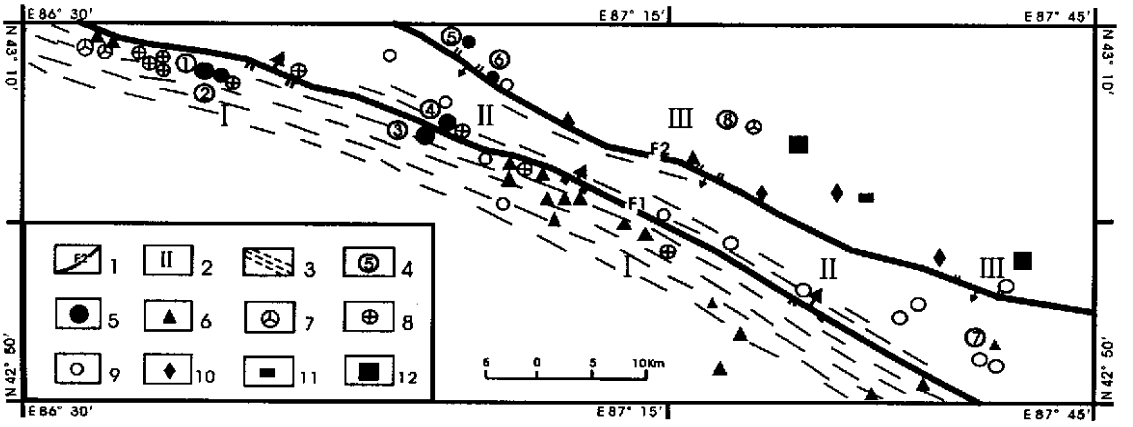


图 2-2 冰达坂地区成矿带、矿（化）点分布图

1-主要断裂及编号：（F_1 冰达坂断裂；F_2 红五月桥断裂）；2-成矿带单元代号：（Ⅰ冰达坂-夏热嘎韧性剪切带-构造蚀变岩型 Au、Cu 成矿带； Ⅱ 察汗诺尔-阿拉沟构造蚀变岩型 Au、Cu、Fe 成矿带；Ⅲ 萨尔托斯-豹子沟黑色岩系 Au、Cu 成矿区）；3-冰达坂韧性剪切带；4-重要矿（床）点编号；5-金矿（床）点：（① 萨日达拉金矿；② 冰峰金矿；③ 望峰金矿；④ 察汗诺尔金矿点；⑤萨尔托斯金矿点；⑥ 红五月桥砂金矿点）；6-铜矿点：（⑦ 阿拉沟大桥铜矿点）；7-多金属矿（床）点：（⑧ 豹子沟多金属矿床）；8-黄铁矿化点；9-磁铁矿化点；10-菱铁矿化点；11-中型煤矿床；12-大型石灰岩矿床

发育强烈的黄铁化、硅化、绢云母化等蚀变。另外该带还分布有少部分多金属矿点，大部分的铁矿化点和菱铁矿化点。

3、北带（萨尔托斯-豹子沟具有黑色岩系特征的 Au、Cu 成矿带）

该带区域上亦属依连哈比尔尕金、铜、铬、镍多金属（Ⅲ）成矿带。近年来仅在西部萨尔托斯地区在上石炭统奇尔古斯套组中找金取得许多有意义的新认识，初步研究认为这套岩系具有金成矿的远景。矿化岩石一般有碳酸盐脉和石英细脉网脉密集穿插，矿化岩石比重较大，发育黄铁矿化、碳酸盐化、硅化和褐铁矿化等蚀变。区内与其相伴发育的浅成闪长玢岩、石英钠长斑岩脉可能为成矿提供了热源。黄铁矿化普遍是与成矿有关的重要因素之一，是寻找可能与黑色岩系金矿有关的有利地区。

综上所述，本文选择对冰达坂韧性剪切带型金矿进行较深层次研究，除对韧性剪切带控矿理论具有重要意义外，对南带在勘查寻找金铜等矿产具有很现实的指导意义。

第三章　冰达坂韧性剪切带构造控矿作用解析

第一节　韧性剪切带型金矿床研究综述

Sibson(1977)和 IRamsay(1980)最早发表了韧性剪切带和糜棱岩的经典论著，并建立了断层自地表至地壳深处的双层结构模式。Boyle(1979)最早提出了与韧性剪切带有关的金矿床。随后对与韧性剪切带有关的蚀变糜棱岩型和构造蚀变岩型（包括一部分石英脉型）金矿床开展了比较详细的研究，其中 20 世纪 80 年代末之前的研究侧重韧性剪切带与金矿床金矿脉的空间关系；20 世纪 80 年代后期至 90 年代初主要是对韧性剪切带的控矿机制开展深入研究；90 年代以来，对韧性剪切带型金矿床的研究注重综合时空演化特点和成矿机制。初步总结韧性剪切带金矿床的研究进展可以概括为以下 4 个方面。

1、金元素沉淀的构造部位

A. CColvine(1988)、王鹤年等(1992)、杨开渠(1990)等研究认为构造变形越强、构造差应力越大，金矿化越好；R. G. Roberts(1987)等认为矿脉分布受韧性剪切带中的压剪裂隙(P)、主剪切裂隙(D)、张裂隙(T)、低角剪切裂隙(R)、高角剪切裂隙(R′)等的控制。S. FCox(1990)和 V. J. Ojala(1993)则更强调主要构造带表面的弯曲、凹凸不平和围岩的不均一性能够在断裂带不连续的部分集中流体的迁移，并成为金沉淀的有利场所。王玉明(1998)研究认为韧性剪切过程中石英普遍产生压电效应，使石英颗粒一侧表面及其附近出现局部负电荷集中的强还原环境，并在相邻石英颗粒之间诱生电子发射从而能有效地促使热液中金络合物的还原分解，释放出的金将就近附着在石英颗粒间和颗粒表面上。解释了为什么韧性剪切带中动态重结晶的微砂糖状石英是金的重要载体。

但是，近年对剪切带构造-流体-成矿系统以及构造应力场转换与界面成矿理论等的研究，都表明了脆-韧性变形转换的动力过程对金成矿作用重大，是动力成矿过程中的必要条件之一，而其独特的时空域则成为运输-反应耦合成矿的有利场所(Fredrich 等，1989；Scott 等，1991；Hadizadch 等，1983，1992；Fredrich 等，1989；Scholz，1998；王全伟，2002；张连昌，1999；杨兴科等，1997、1998、1999、2000；陈强，2001)。脆-韧性变形转换过程中周期性的应力应变转化影响着成矿反应体系的要素，它控制了矿质反应的速率和富集程度，也控制了能量交换的进程，脆-韧性变形转换促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，使大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换（杨兴科、陈强，1998）。流体扩散、渗透、充填、弥散等都集中在韧性剪切带与脆-韧性转换带内，成为流体活动最为活跃的场所。而张性动力作用下发生形变响应形成的扩容空间尤其是扩张裂隙，在脆-韧性演化晚期则可能成为流体沉淀与矿质富集成矿的场所。再者 当流体进入上部脆韧性变形转换部位，常常为出现构造引张区，来自中深部的高温高压含

矿流体因减压而发生沸腾，或与自上而下的低温低压不同化学性质(以大气水为主)的流体混合，引起含矿流体的温度压力、pH 和 Eh 的突变，使金成矿元素化学位能降低、金络合物稳定性下降而沉淀成矿（张连昌，1996；张文淮等，1996；杨兴科等，1999；王全伟，2002；等）。

2、含金成矿流体的构造成因问题

金矿床的成矿热液是多种来源和多种成因的，岩浆热液、变质热液是主要来源也是肯定的。但是随着构造地球化学研究、深层次韧性剪切带的变形机制研究、矿田构造与控矿构造研究、以及高温高压成岩成矿实验研究等方面一系列成果的取得，人们在构造对成矿的贡献作用研究由构造控矿逐渐上升到构造成岩成矿(杨开庆，1982，1986；董法先等，1993b；杨巍然等，1996；吴淦国等，1997)。杨巍然(1996)提出了构造流体的概念，认为在构造应力作用下，岩石矿物将发生各种物理变化和化学变化，产生压实、压溶、剪切、交代、重结晶等作用，致使岩石矿物释放出结晶时封存的流体或释放出矿物岩石的结晶水、晶间水、裂隙水，形成构造动力变质热流体。而有关韧性剪切带的矿物成分和化学成分变化规律的研究（王嘉荫，1978；Brodie，1980；董法先等，1993；陈柏林，2003)表明深部高温压和强变形使 Au 元素的化学位升高而被活化，并将脱离原来的矿物或岩石中的赋存部位，必然进入由深层次变形－构造分异作用引发的富含 SiO_2、K、Na 的动力变质热流体中，并与其一起迁移。这样通过构造变形引发的构造动力分异作用就形成了含金热流体。同时 G. Mitra 等人(1986)、周济元等(1995)等在构造变形与元素活化迁移的能量转换方面和戴他根(1990)、岳石等(1990)、陈柏林等(1998a)、肖化云等(2000)在相关的模拟实验中也基本证实了构造变形能够引起元素的活化和迁移。

3、成矿流体的运移机制

断层阀模式（Sibson，1988，1990；Boullier，1992)已是解释成矿机制的经典模型。是迄今为止解释构造与成矿流体关系最圆满的一个模型。断层阀模型的基础是超静水流体压力梯度的存在，这种压力梯度的发育要求具有区域性或一定范围展布的分隔静水压力区和超静水压力区的不渗透阻隔层的存在，或低渗透性隔水层的存在，如侧向分布的页岩、蒸发岩层、结晶岩组合或其他成因的封闭构造层。超静水流体压力可能发育于这种隔水层之下，起因于水热压力、变形变质过程的脱挥发份，或通过连通的通道与深部高压力流体源区相贯通，构成一个广泛的流体库。韦昌山和翟裕生(1996)认为该层位往往处于变形转换带上，可能是因为变形转换带属变质相系、物化参数等梯变地段，因此物质易于在此沉淀形成不渗透层。而且认为产生“断层-阀门”机制必须满足的四个条件：①存在近水平的不渗透层：②存在区域性水平挤压应力，使超临界流体压力仅沿水平方向产生张裂而不致撕裂不渗透层；⑧陡倾断层带内存在陡变的流体压力梯度，迫使流体能迅速向下充填；④岩石破裂后有大量流体涌入，充填于破裂网络中。在地幔富 C-H-O、

浅一表部地壳富硫、中一下部地壳富硅（张忠实、邓军，1998）三大流体循环系统中，一般流体只在各层次内作对流、循环，物质和能量的交换，流体要突破层次性的限制进行大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换显然是不容易的，而板块的俯冲剪切和碰撞造山活动引发的构造动力与成矿流体的多级多方式的耦合等作用造成了不同圈层自身相对封闭体系的破坏，尤其脆-韧性变形的强烈转换，促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，形成了跨层次的流体输运体系，因沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，从而使大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换成为可能。“断层-阀门”式机制下的循环流体从地幔至地表构成一个完整的大循环体，是宏观上多层次循环流体对多类型围岩的萃取、沟通、混合乃至金矿化富集的重要机制。

脆-韧性变形的强烈转换在微观领域则表现为形变相应在压性与张性响应之间反复。张性动力响应的扩容作用抽吸流体和矿质进入变形体系，而压性响应的紧缩作用又挤压流体和矿质迁出变形体系，张、压动力响应构成了一个有机统一的动力作用过程。这种“心脏脉动式抽吸-挤出”机制（杨兴科等，1998；陈强等，2001）在脆-韧性变形转换过程的微观领域内普遍存在，是动力成矿的一种重要机制，该机制正是流体运动、迁移、沉淀乃至富集的诱因，它加速了流体在岩石、矿物体系内的循环，促进了水岩反应和物质及能量的交换。

4．时空相统一的韧性剪切带型金矿床成矿模式

陈柏林(1999，2000)将断裂构造在不同深度层次的变形特点与成矿控矿作用作为一个系统来考虑；从造山带的演化(隆升和剥蚀)与韧性剪切带的持续变形的时间与空间相统一的角度探讨其成矿机制，提出了“时空统一的韧性剪切带型金矿成矿模式”（图 3-1）。其基本认识如下：(1)从不同变形域的角度看，深部韧性剪切变形域是元素分异迁出区，深部高温压和强变形使金元素的化学位升高而被活化，并将脱离原来的矿物或岩石中的赋存部位，必然进入由深层次变形构造分异作用引发的富含 SiO_2、K、Na 的热流体中；中浅层次变形域是金元素聚集区，矿化发生于韧性剪切带糜棱岩抬升至较浅部位叠加了脆-韧性变形阶段，构造变形越强的糜棱岩，越易叠加矿化，金元素丰度越高。(2)与韧性剪切带有关的金矿化类型主要有蚀变糜棱岩型、构造蚀变岩型和石英脉型。从不同金矿化类型受不同的控矿构造类型控制角度分析，蚀变糜棱岩型金矿化受韧性变形带控制，构造蚀变岩型金矿化受脆性碎裂岩控制，石英脉型金矿化则受浅部裂隙带控制。(3)从构造变形和构造差应力作用的角度看，强变形或者大构造差应力不仅促使 Au 元素活化分异形成含金热液，而且驱使含矿热液运移，更是为金矿成矿创造赋矿空间的构造动力学条件。(4)在时空关系上，一方面矿化与韧性变形的时序关系是金矿化蚀变发生时期要晚于或稍晚于韧性变形发生时期；另一方面不同类型金矿化的时序关系是同一成矿期内石英脉型金矿化稍晚于构造蚀变岩型和蚀变糜棱岩型金矿化，且石英脉型往往穿切蚀变糜棱岩型和构造蚀变岩型。(5)在成矿物化条件方面，石

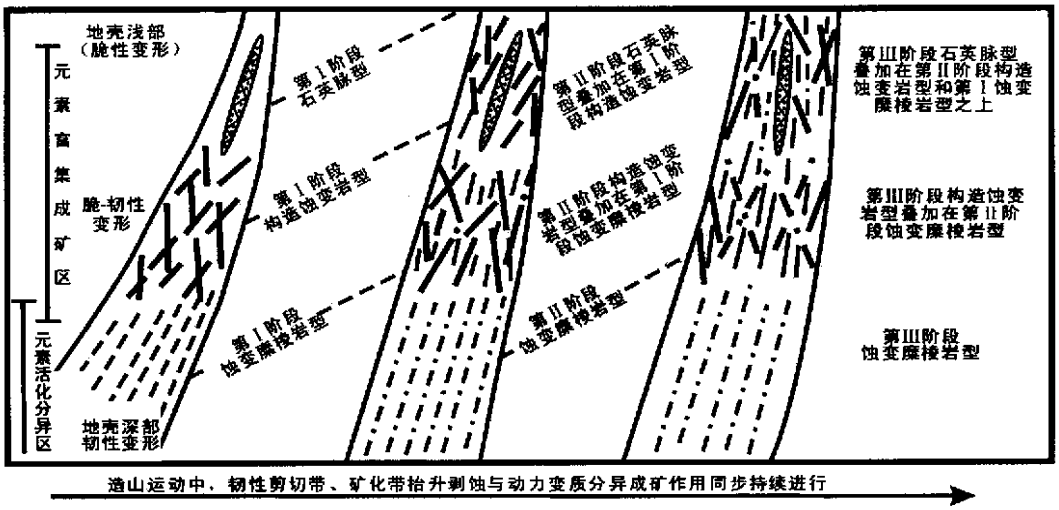


图 3-1 构造演化与金矿化类型叠加复合关系模式图（据陈伯林，2003）

英脉型比构造蚀变岩型和蚀变糜棱岩型成矿温度低、压力小、成矿深度浅。(6)蚀变糜棱岩型金矿床还具有成矿较韧性变形滞后、成矿深度较韧性变形浅、矿化仅发育于较小规模的韧-脆性剪切带中、金元素来源于围岩和深部等特点。(7)从构造带生成演化时空统一的角度分析，长期演化的韧性剪切带是剪切带型金矿床形成并导致多种金矿化类型叠加，形成大型金矿床的有利条件，也是寻找大型剪切带型金矿床的有利地区(陈柏林等，1998，1999，2000，2001，2002，2003)。

第二节　冰达坂韧性剪切带的构造变形特征

一、概述

冰达坂韧性剪切带是我国西部中天山北缘大型韧性剪切带的一部分，最早是在 1992 年王润三称为中天山北缘胜利达坂韧性剪切带，于 2001 年崔可锐对西天山地区通过三条地质实测剖面的测定确定了中天山北缘大型韧性剪切带的存在，近年来 1：5 万区域地质矿产调查最终系统地准确的确定了研究区内冰达坂韧性剪切带，其是中天山北缘大型韧性剪切带的主要成矿地段，现今西天山主要的金矿床如萨日达拉金矿和望峰金矿均产于该带。目前在 1：5 万区域地质矿产调查取得地质资料和前人专题研究综合分析都证明：（1）冰达坂韧性剪切带不仅是西天山醒目的构造变形带之一，而且也是西天山带内极其重要的金铜成矿地带；（2）冰达坂韧性剪切带北缘的冰达坂断裂是中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块对接碰撞的缝合断裂。

冰达坂韧性剪切带位于东经 86°30'~87°45'，研究区内西起巴布尕依萨依、萨日达拉、冰达坂、萨尔萨依、察汗诺尔向南东方向延伸，经专题调研和 1：5 万区域地质矿产调查已基本查明其近东西延长逾 52km，宽 3~10km，并且其宽度在各地有一定变化，最窄仅仅数 km，最宽可达 10km 以上，其主要与研究区内成矿南

带即冰达坂韧性剪切带－构造蚀变岩型金铜成矿带相伴生，其控制了研究区内绝大多数金铜矿床（点）。

韧性剪切带主要发育在冰达坂断裂以南元古界长城系星星峡群和蓟县系卡瓦布拉克群老地层、晚元古代片麻状花岗闪长岩和加里东晚期眼球状花岗闪长岩，华力西早期粗粒花岗闪长岩体也受其影响。同时该韧性剪切带还波及到了冰达坂断裂以北古生界前石炭系博霍特组。韧性剪切带由糜棱岩和糜棱岩化岩石组成，主体构造变形以中深层次脆-韧性转换变形为主体。韧性剪切带中剪切面理方向性明显，主体呈北西 300°展布，局部面理和断层同步弯转，面理地表以向北倾为主，倾角在 70°~80°之间。带内变形组构多样，不同尺度变形标志均较明显，显示有多期叠加现象。其构造变形特征见下详述。

可见冰达坂韧性剪切带是冰达坂地区冰达坂复合断裂带的主体构造带，其形成与演化不仅真实的记录了北天山与中天山的俯冲碰撞及碰撞后的造山演化过程，更重要的是它的发育与演化与区内金的成矿作用密切相关。

二、变形特征

冰达坂韧性剪切带特殊的构造背景，形成了复杂的变形特征。总体上在区域韧性剪切带两侧变形强度由近到远在背离韧性剪切带的方向上逐渐弱化到纯脆性变形为止。带内变形的岩石以局部应变集中与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征，这与韧性剪切带较为均一的变形特征是不同的。在冰达坂断裂以北的前石炭系博霍特组火山碎屑岩-火山岩组合主要以脆性变形和韧-脆性变形为主。相反断裂以南变形较强，总体以脆-韧剪切变形和韧性变形为特点。带内常见由糜棱岩、千糜岩构成强应变带，和由糜棱岩化岩石、构造透镜体、弱片理化带构成弱应变域，空间上强应变带和弱应变域相间分布，交替出现，构成强应变带分隔弱应变域的平面条带结构（图 3-3）。这一变形构成主要是由于岩性差异而表现的，并且岩性差异越大，这种特征越显著（表 3-1）。而导致平面上冰达坂韧性剪切带在横向和走向上都呈现分带性的特征。

冰达坂断裂北侧的总体构造变形相对较弱，变形地层主要是前石炭系博霍特组火山碎屑岩-火山岩组合。地层面理和层理基本一致，倾向南，倾角 70° 左右，以发育褶皱和规模不大的脆韧性-脆性变形为特点，褶皱以线性紧闭型，前石炭系博霍特组一岩段火山岩和二岩段火山碎屑岩地层构成轴向约北西 290° 展布的线性紧闭同斜褶皱（向斜），褶皱形态较完整，南北翼部分别受冰达坂断裂和红五月桥断裂影响出露不全，从褶皱地层出露形态特征分析，枢纽呈近水平产出。露头次级褶皱显示褶皱也多呈顶厚和紧闭同斜形态（图版Ⅰ-3），局部转折端见有呈尖棱状。由于岩性的差异，强弱岩层相间情况下发生强烈的差异变形而形成了无根勾状褶皱（图版Ⅰ-4）。其中在强应变带内常见有走滑剪切作用形成的“Z”型剪切褶皱（图版Ⅰ-5）出现。褶皱地层岩石均遭受脆韧性剪切变形叠加作用，博霍

特组岩石多具糜棱结构特征，由各类糜棱岩化岩石组成脆-韧性剪切带，但由于北部韧性变形强度很低，部分地段前石炭系博霍特组的中基性火山岩仅发生了褶皱，基本无韧性剪切变形（图 3-2）。可见北部变形变质层次明显低于南部元古界地层，达低绿片岩相。说明该区在走滑剪切带变形之前曾受过近南北向挤压应力的作用，发生褶皱和逆冲推覆剪切。

冰达坂断裂以南宏观上主要由一系列糜棱岩化岩石组成，变形岩石主要为加里东晚期花岗闪长岩，中上元古界长城系星星峡群变质岩系和蓟县系卡尔布拉克群碳酸盐岩-细碎屑岩组合。不具均一的韧性剪切变形特征，靠近冰达坂断裂附近岩石变形强烈，总体以脆-韧剪切变形和韧性变形为特点。带内变形岩石以强应变集中带与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征，这一变形构成主要是由于岩性差异和剪切带的多期次叠加而表现的，并且岩性差异越大，这种特征越显著（图 3-2、图 3-3）。其中长城系星星峡群其突出特征是极为明显的的近东西向韧性剪切变形组构发育。从区域中型尺度到显微尺度均可观察到具明显定向组构的韧性剪切变形标志。带内构造置换作用强烈，尚难见到原生产状，原始层理 So 绝大部分已被透入性轴面面理所置换，现多见岩层以构造岩片形式产出。有时也可见面理发生变形形成顺片剪切褶皱，表明其具有多期次变形特点和演化过程。其以平行密集的各种面理，线理的广泛发育为特点，并偶见枢纽近东西向的紧闭同斜褶皱，总体构成由糜棱岩、千糜岩组成的强应变带；相反相对刚性的加里东晚期花岗闪长岩仅在靠近冰达坂断裂发育强韧性剪切变形，形成花岗闪长质糜棱岩。一般均发生糜棱岩化和弱片理化，构成了带内较宽的弱应变域。空间上上述强应变带和弱应变域相间分布，交替出现，呈菱形块状结构，具交织网状特征。两者的脆-韧性变形（强弱应变）转换部位是矿体或矿化（点）的产出部位，同时野外发现在长城系星星峡群与加里东晚期花岗闪长岩的接触部位均发育强烈的矿化蚀变现象。总之，由于岩性差异导致冰达坂韧性剪切带在平面上横向和走向上都呈现分带性的特征。

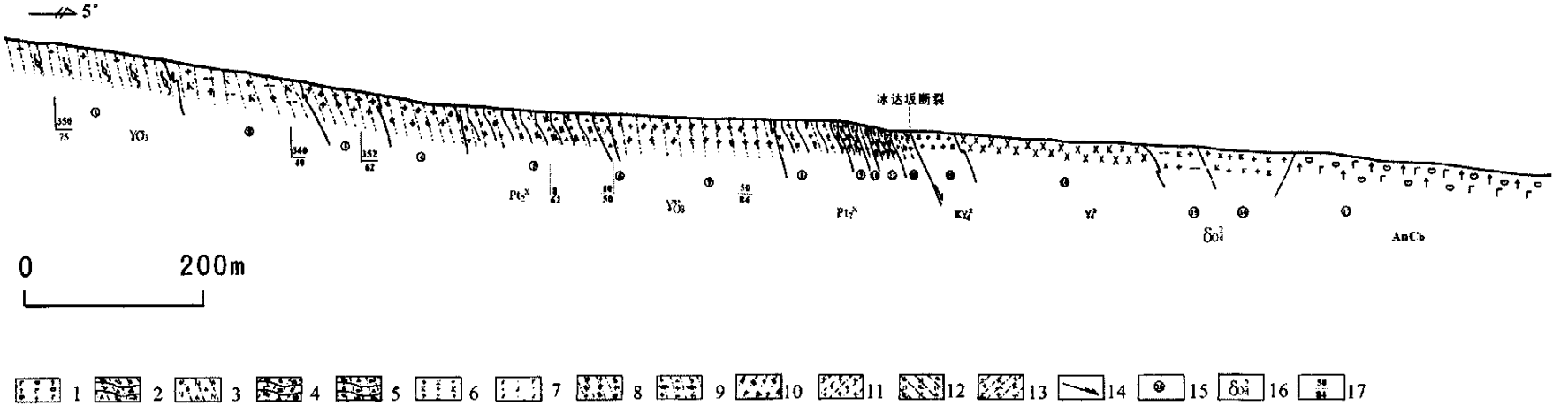


图 3-2　冰达坂地区纳楞夏尔萨拉剖面图

1 杏仁状玻基玄武岩；2 糜棱岩化绢云绿泥石英片岩；3 石英岩；4 白云母石英糜棱片岩；5 糜棱岩化绢云石英片岩；6 钾长花岗岩；7 辉长辉绿岩；8 糜棱岩化二长花岗岩；9 眼球状糜棱岩化花岗闪长岩；10 二长花岗质糜棱岩；11 花岗质糜棱岩；12 长英质绢云千糜岩；13 糜棱岩化黑云钾长花岗岩；14 冰达坂断裂；15 地层及岩性分层代号；16 岩体代号；17 地层及糜棱面理产状

表 3-1　冰达坂韧性剪切带不同地层、岩性变形强度对比表

主要地层	产出分布	岩石组合	变形组构	变形特征	构造层次	变质作用	变形强度
博霍特组	冰达坂断裂以北	岩石组合主要为糜棱岩化变粉砂岩、变硅泥质粉砂岩、糜棱岩化变凝灰质粉砂岩、仅在萨日达拉矿区冰达坂断裂以北出露有一套变凝灰岩夹变杏仁安山岩及中基性-中酸性火山岩。	发育糜棱面理、劈理，顶厚紧闭同斜褶皱、“Z”型剪切褶皱断裂、膝折、水平拉伸线理、断裂和张剪性节理	强弱变形复合叠加，表现为早期韧性变形叠加后期脆性变形，经历了整个冰达坂韧性剪切带的演化，保留了各个时期的构造变形遗迹。	中浅	低绿片岩相	弱
长城系星星峡群	冰达坂断裂以南	主要岩性组合为强烈糜棱岩化的黑云石英片岩、糜棱岩化绢云绿泥石英片岩、白云母石英糜棱片岩、糜棱岩化绢云石英片岩、长英质绢云千糜岩、绿泥钠长片岩及绿泥片岩等。	透入性轴面面理、强直片理、顺片剪切褶皱、紧闭同斜褶皱和变质分异条带，并且分异条带受到后期剪切作用发生褶皱	原始层理So绝大部分已被透入性轴面面理所置换，现多见岩层以构造岩片形式产出，变形面密集连续，发育变质分异条带。也可见面理发生变形，表明其具有多期次变形特点和演化过程	中深	绿片岩相	强
加里东晚期花岗闪长岩	冰达坂断裂以南	岩石类型为糜棱岩化花岗闪长岩、斜长花岗岩、英云闪长岩、二长花岗岩和糜棱岩化黑云钾长花岗岩。与长城系星星峡群地层相伴产出，多见呈穿插接触，岩体中残留有星星峡群地层。靠近冰达坂断裂韧性剪切变形较强，强应变部位多达花岗闪长质糜棱岩、花岗质糜棱岩、二长花岗质糜棱岩	发育糜棱面理、直立拉伸线理、旋转碎斑系、断裂和张剪性节理	同时发育韧性变形和脆性错位两类变形，主体以脆-韧性剪切变形为主，岩石普遍发生糜棱岩化，仅在靠近冰达坂断裂附近发生强糜棱岩化，为花岗闪长质糜棱岩	中浅		中弱

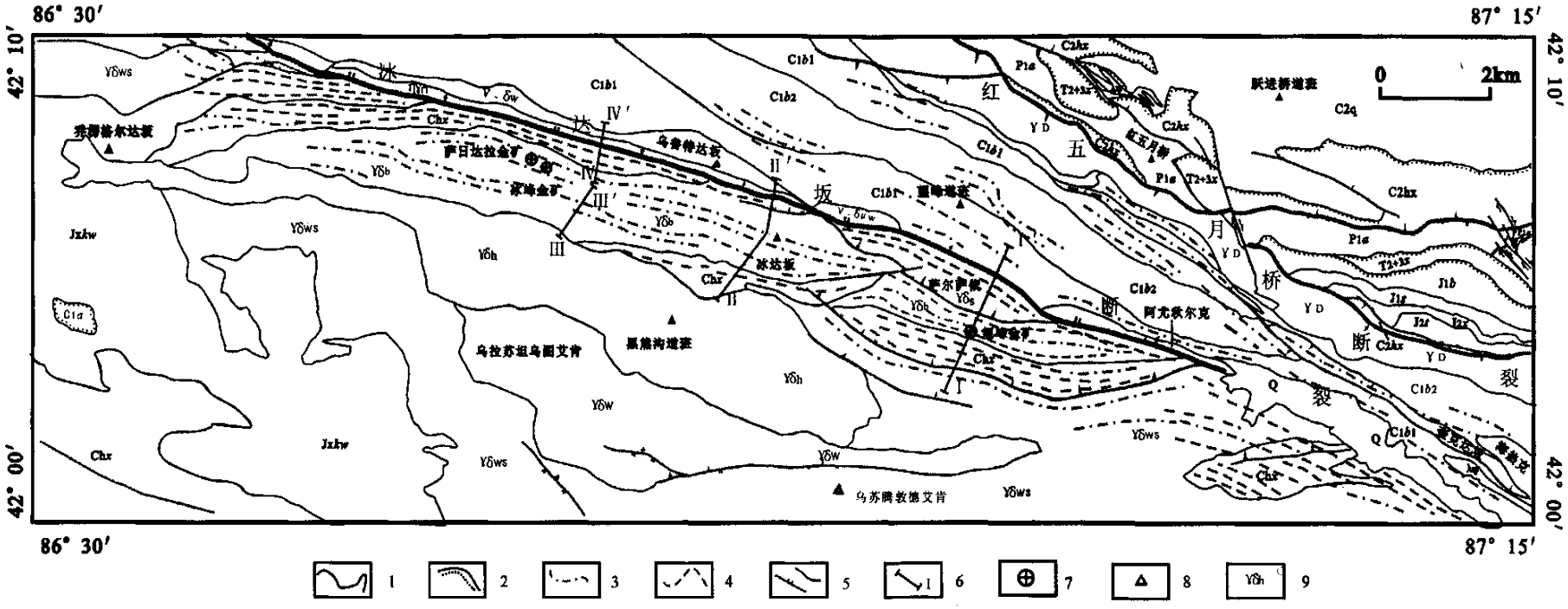


图 3-3　研　究　区　地　质　图

1 地层及岩体界线；2 不整合界线；3 中一弱变形糜棱岩带；4 强变形糜棱岩带；5 断层；6 实测剖面及编号；7 金矿床；8 主要地名；9 地层及岩体代号：(1)Q-第四系松散沉积物；(2)J2*t*-中侏罗统头屯河组；(3)J2*x*-中侏罗统西山窑组；(4)J1*s*-下侏罗统三工河组；(5)J1*b*-下侏罗统八道湾组；(6)T2+3*x*-中一上三叠统小泉沟群；(7)P1*a*-下二叠统阿尔巴萨依组；(8)C2*hx*-上石炭统后峡组；(9)C2*q*-上石炭统奇尔古斯套组；(10)AnC*b*1-2-前石炭系博霍特组一、二岩段；(11)C1*a*，下石炭统阿克沙克组；(12)J*xkw*，蓟县系卡瓦布拉克群；(13)Ch*x*，长城系星星峡群；① ν-δw-纳楞夏尔萨拉辉长辉绿岩；② ηγn-纳楞夏尔萨拉钾长花岗岩；③ ν-δw-乌鲁特中基性杂岩体；④ γD-红五月桥闪长岩、查汉诺尔花岗闪长岩、奎克达坂花岗岩；⑤ γδs、γδb-冰达坂、萨尔萨依花岗闪长岩；⑥ γδh-黑熊沟细粒花岗闪长岩；⑦ γδw-乌拉苏坦乌图艾肯英云闪长岩；⑧ γδws-乌苏腾敦德艾肯粗粒花岗闪长岩；⑨ λψ-石英钠长斑

三、变形标志

1、宏观构造标志

前已述及，冰达坂韧性剪切带变形岩石主要有中上元古界长城系星星峡群、蓟县系卡尔布拉克群、前石炭系博霍特组和加里东中晚期花岗闪长岩。带内变形以局部应变集中与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征，变形组构多样，不同尺度变形标志均较明显。其中糜棱面理、S-C 面理、拉伸线理、分异条带、旋转碎斑系、书斜构造、脉体剪切变形和形态多变的紧闭同斜褶皱等变形迹广泛发育。按重结晶程度及变形强度可分出：糜棱岩化岩石、初糜棱岩、糜棱岩、千糜岩(或超糜棱岩)等。

S-C 面理是韧性剪切带的标志性组构之一，S 面理是统计性的贯穿面理，受应变椭球体主轴的控制，在变形岩石表现为重结晶颗粒的定向排列，C 面理为非连续性剪切应变面理，由一系列平行于剪切带边界的剪切应变带间隔排列而成，表现为层状矿物的定向排列。通常 S 面理和 C 面理之间存在一定的夹角，随着应变的增大二者逐渐趋于平行，冰达坂剪切带总体由南向北变形增强，也就是越靠近冰达坂断裂变形越强，S 面理与 C 面理总体趋于平行。S 面理与 C 面理夹角约 0-40° 之间。典型的 S-C 组构发育在剪切带中的强应变带内，S 面理产状在剪切带内不断变化，总体呈 S 或反 S 形。S 面理的中央多趋近于与主剪切面平行，边缘则与主剪切带呈近 45° 斜交。C 面理平行于剪切带的边界，代表韧性剪切带的主剪切面。在剪切带内 C 面理将剪切带分割成许多小的剪切带。

带内矿物的拉长现象普遍，其中长石呈眼球状或长透镜状，长城系星星峡群中的石英被强烈拉长呈拔丝构造（图版Ⅰ-7），博霍特组岩石中云母、绿泥石等矿物受到剪切作用发生定向排列构成明显的矿物拉伸线理（图版Ⅰ-1），为近水平状东西向延伸，向东或向西倾伏，倾伏角一般不超过 15°。在韧性剪切带强应变带中，可以见到早期长英质脉体经强烈的塑性变形而呈肠状和不规则状。还见有一些早期的脉体、地层中的强干层、变质岩中的分异层等被压扁拉长，甚至拉断呈石香肠状构造，反映了塑性变形成因的特征。

旋转碎斑系在该剪切带内也较常见，主要发育在眼球状花岗闪长质糜棱岩中，主要由长英质矿物构成斑晶，而由石英、长石、绢云母、绿泥石等被拉伸或细粒化之后围绕，形成眼球（图版Ⅰ-2）。另外在韧性剪切带内糜棱岩中，可见由长英质组成的碎斑系受区域上剪切作用发生了倾斜形成书斜构造（图版Ⅰ-8），并指示剪切方向。

在走滑剪切间段也常常有“Z”型剪切褶皱（图版Ⅰ-5）出现，一般形成于剪切带内的强应变带内。另外剪切带强应变带内岩石中发育有紧闭同斜的片内褶皱（图版Ⅰ-3），多为倒转褶皱，其轴面倾向 356°~25°，倾角 70°~88°；轴向产状与

片理近于平行。发育强烈者则成为片内无根褶皱（图版Ⅰ-4）。野外关系表明，这些片内褶皱应是走滑剪切带变形之前构造变形的产物，其现今产状受到走滑剪切变形改造所致。说明在走滑剪切带变形之前区内曾遭受过近南北向挤压应力的作用，发生褶皱和逆冲推覆剪切。

2、显微构造特征

在冰达坂韧性剪切带内，岩石矿物颗粒在韧性剪切变形过程中，形成了各种典型的显微构造。通过光学显微镜下对糜棱岩的显微组构观察研究表明：微观上以脆性位错、破碎和塑性滑移的共存为特征，构造变形组构多样，多见石英拨丝构造、旋转碎斑系、云母鱼、膝折、多米勒骨牌、压力影、核幔构造、波状、带状消光、显微裂隙等。但是不同矿物因其物理化学性质的差异而表现出不同的变形特征。

石英主要表现出塑性变形特征，但在剪切带内不同强度应变带中表现出不同的变形特征．随着变形程度的增高，从糜棱岩化岩石－初糜棱岩－糜棱岩－超糜棱岩。强烈波状消光；明显压扁拉长呈透镜状；沿晶体滑移面充填溶液而导致形成吕德尔线；强烈拉长呈缎带状，长宽比可达12∶1，部分或全部动态重结晶，强烈塑性变形的石英沿长石残碎斑晶边缘环绕，并且有长石碎斑嵌入强烈塑性变形的石英基质之中。

长石表观出脆性变形和韧性变形双重特征。长石主要以碎斑、残斑形式存在。在剪切变形过程中普遍发生显微破裂、碎粒化。张剪切性裂隙呈垂直破裂面的微裂开，并可有充填物,一般被碳酸盐矿物充填；剪切裂隙则以一般较为平直、紧闭，有的则沿剪裂面发生滑移，形成书斜构造，用其可判断剪切方向（图版Ⅰ-8）。除显微破裂外，还发育机械双晶，出观晶体弯曲、扭折等，强烈波状消光。长石常构成岩石中的不对称碎斑（图版Ⅱ-1），也可用于判断剪切指向。

云母类主要表现为脆-韧性变形。黑云母波状消光，白云母随着变形的增强可出现波状消光，晶体弯曲、扭折和云母鱼等。其中大的云母片在变形过程中沿解理裂开或破碎成几个小颗粒，在变形过程中形成σ型拖尾像鱼状。云母鱼的尾部和头部一般平行剪切方向，依据云母鱼的不对称性（图3-4，图版Ⅰ-6），可以判断剪切方向。

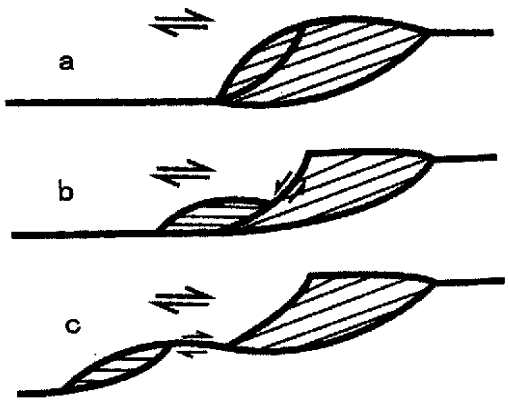


图3-4 剪切力作用下形成的云母鱼特征
（据 Lister，1984）

方解石主要表现塑性变形。多见变形双晶(又称机械双晶)，变形双晶一般在应变的部位发育，其双晶纹较密集、微

细，且厚度基本一致，双晶纹常在晶体内部或边缘有规律的尖灭，可呈弯曲状或分叉状，尖灭部位常常呈契形。变形双晶是晶内塑性变形的产物，是双晶位错在双晶面上的传播而形成的，多在较低温及较快速应变环境下形成。在钙质糜棱岩中多呈细小的拉长状重结晶颗粒，残斑方解石也被压扁、拉长呈透镜状、布丁状，并发生动态重结晶形成核幔构造。

剪切带中黄铁矿主要表现为脆-韧性同构造期变形产物，多见压力影构造现象，其核晶多为黄铁矿等能干性较强的矿物及岩石碎屑、晶屑等。阴影成分较复杂，主要为长石、石英、绿泥石、绢云母等细小颗粒构成。由于多期变形，则发育压力影的叠加现象，形成复合压力影。此外早期形成的黄铁矿在晚期剪切变形中普遍发生破裂、水平滑移，指示期后剪切带的剪切方向；中晚期形成的黄铁矿多沿糜棱面理或以小角度斜切糜棱面理分布、也有呈鱼状沿旋转碎斑周边分布、或沿旋转碎斑中的微裂隙且不超出旋转碎斑分布，表明同剪切期或稍晚形成；晚期形成的黄铁矿基本是沿晚期裂隙充填，局部与上两期黄铁矿叠加，但是黄铁矿晶形较好。

四、韧性剪切带演化期次划分

综合野外观察与室内分析研究基础上，结合丰富的基础地质资料，根据各类变形组构的穿插、交切、叠加复合关系以及其运动学和动力学特征，进行了综合对比分析认为该韧性剪切带构造变形大致可划分为三个变形期次：

第一期变形：早期挤压韧性剪切变形

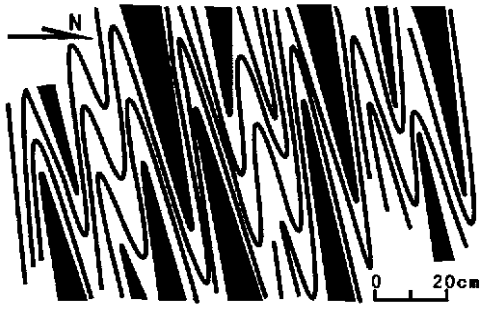


图 3-5 博霍特组中残留的紧闭同斜型褶皱



3-6 博霍特组残留的无根褶皱

该期变形与区域性挤压剪切有关，出现的构造类型有以透入性轴面劈理为主的面理、线理、一系列枢纽近东西向的紧闭同斜褶皱（图 3-5，图版Ⅰ-3），拉伸线理近直立、褶皱枢纽呈东西向延伸等都是在近南北向的挤压力系作用下的构造变形形迹。由于后期构造叠加和改造，所见这类褶皱均不完整，部分地段较难识别和恢复。其变形特征显著，在空间上形成了近东西向延伸的大型线状构造带，地形，地貌上山脊与沟谷的走向在一定程度上也反映了这一特征。在部分地段可见由于岩性的差异，强弱岩层相间情况下发生强烈的差异变形而形成了无根褶皱（图 3-6，图版Ⅰ-4）。强变形带内常发育糜棱岩和千糜岩，形成了类似于韧性剪

切带内的强变形组构。但在岩性相对较强的花岗岩类中一般为弱糜棱岩化，而通常仅发育断续的片理、劈理等，其展布方向与韧性流变组构一致，初步形成了强弱应变相间分布的格局。此外，形成于不均匀挤压与剪切共同作用的动力学环境中的不对称或不协调褶皱在韧性剪切带内也可见到，同时宽缓的糜棱面理褶皱也有发现，其轴线方向与主体构造线一致，显示有多期叠加现象。也说明动力环境由韧性向脆-韧性转换变形形成了褶皱由紧闭同斜向不协调乃至疏缓褶皱的逐渐过渡，动力环境由强烈挤压向剪切－挤压、挤压－剪切变化。变形时期为中石炭世-晚石炭世。

第二期变形：中期中浅部构造层的走滑脆-韧性剪切变形

由于南北向的俯冲碰撞之后动力学环境转变为区域性的走滑剪切，这期变形以发育北西向和近东西向右行走滑的脆-韧性剪切带为特征。变形广泛，全区均可见到。所见构造类型有劈理、线理、节理、裂隙、“Z”字型剪切褶皱、S-C 面理、旋转碎斑系、雁行状变形石英脉组合等。

典型的 S-C 组构发育在剪切带中的强应变部位(图 3-7)，是在简单剪切作用下，矿物发生旋转、重新定向排列、新生矿物定向或重结晶矿物定向生长作用等形成。一般来说，S 面理与 C 面理不是同时发育的，生成时间是先出现 S 面理，到一定的时间再出现 C 面理。S 面理产状在剪切带内不断变化，总体呈 S 或反 S 形。S 面理的中央多趋近于与主剪切面平行，边缘则与主剪切带呈近 45° 斜交。C 面理平行于剪切带的边界，一般可以代表韧性剪切带的主剪切面。由于沿 C 面理发生过剪切滑动，所以 C 面理表现为分划性的不连续面，其上常有与剪切方向一致的滑动线理。在剪切带内，C 面理将剪切带分割成许多小的剪切带。

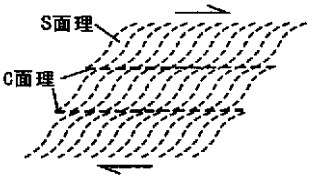


图 3-7 剪切带中的 S-C 组构

前期变形产生的不同成分条带发生右行剪切变形，形成一系列与此相对应的构造组合，例如发育于博霍特组中的“Z”型剪切褶皱（图 3-8，图版Ⅰ-5），形成于强应变带内，褶皱包络面与剪切带走向一致，但该类褶皱多为倾伏褶皱，与俯冲碰撞时的强烈挤压剪切作用下的褶皱显著不同，褶皱波长大、波幅小，褶皱轴面向剪切方向反向倾斜，在波长方向上单个褶皱重叠小，甚至没有重叠。与本期变形相伴的矿物拉伸线理（图版Ⅰ-1）产状为近东西向水平产出，表明其具平移走滑特点。

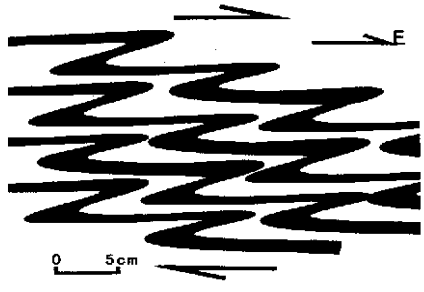


图 3-8 剪切带中的剪切褶皱

旋转碎斑系的变形特征，在一定程度上也反映了不同变形带应力环境的差异。韧性剪切带强应变部位内，变形碎斑细小、密集，旋度大，具强烈挤压研磨的特

征。多由硬度大的粗粒状矿物发生旋转拖曳而形成“σ”型碎斑。而与星星峡群地层接触的糜棱岩化花岗闪长岩叠加了明显的右行走滑剪切变形，变形碎斑(图 3-9a、a′，图版Ⅰ-2)粗大、疏散，旋度小，一般这也常发生于强弱相间的岩性段内，受岩性制约明显，是在强烈剪切力偶作用下的构造变形。在剪切作用较强时，受围岩“槽具”效应的限制，矿物往往被切割而形成类似多米诺骨牌的变形（图 3-9b、b′，图版Ⅰ-8），或称书斜构造变形。切割面与包络面的锐夹角，指示了走滑剪切的运动方向，因此具有重要的运动学意义。

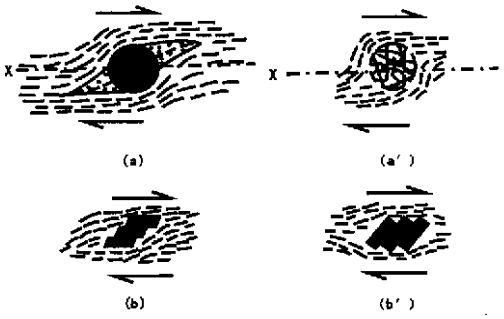


图 3-9 发育于加里东期糜棱岩化花岗闪长岩体中的旋转碎斑和书斜构造特征素描

变形的几何学、运动学及动力学分析表明，本期变形和第一期韧性变形是韧性剪切带变形演化的主体。随着构造层次由中深部向中部、中浅部逐渐转化，其构造变形也发生着由韧性－脆-韧性－韧-脆性剪切变形的连续演化，构成了本区韧性剪切带变形系统较完整的形变组合。但本期变形又有其独特的构造样式，以广泛发育的右行剪切变形组构为主要特征，与前期变形形成极为明显的差异，是整个变形带内及变形演化过程中特征最清晰、最直观的变形。变形时期为晚石炭世晚期－早二叠世，该期变形与板块俯冲碰撞之后过程中的区域性走滑作用有关，因而具有一定的区域构造意义。

第三期变形：后期脆性变形作用

是发生于近地表条件下的在南北向持续挤压力系作用下的张性断裂、裂隙、膝折、共轭节理等发育为特征的构造变形。其中野外所见的膝折大部分为不对称的单膝折（图版Ⅱ-2）。张性断裂或裂隙走向近南北，垂直或斜交于早期构造线，多为石英脉、碳酸盐脉所充填。

第三节　冰达坂韧性剪切带宏观控矿特征

含金剪切带型金矿床与韧性剪切带的空间关系已早为人们所认识。韧性剪切带型金矿床经常成群分布，集中出现，在空间上常形成金矿化集中区或称金矿成矿带。国外、国内已有不少好的实例，如加拿大安大略省的阿比提比金矿带、西澳的卡尔古里－康巴尔金矿带等都是世界级金矿带的著名实例。国内的广东河台金矿、山东招远金矿带、吉林夹皮沟金矿带、小秦岭金矿带以及海南抱板金矿带、新疆康古尔塔格金矿带和冰达坂-夏热嘎韧性剪切带型金铜成矿带等都具有类似的规律，大型韧性剪切带往往是大的成矿带的一级控矿构造。所以含金剪切带本身可以是大的金矿成矿带，成矿带内矿床分布严格受韧性剪切带控制。现在人们对剪切带的控矿机理的认识不再认为剪切带仅仅是被动的提供成矿热液运移的通

道和矿质沉淀的场所，而是成矿动力学过程的一个有机组成部分，剪切带的产生、发展、演化与成矿流体的来源、迁移及矿质沉淀有着密切关系。

冰达坂韧性剪切带是冰达坂地区内冰达坂复合断裂带的主体构造带，其形成与演化和区内金的成矿作用密切相关，是该区金矿床产出的第一控制因素，其重要性高于岩浆侵入作用、变质作用等因素，其对该区金矿床及其金铜多金属矿床（点）分布的控制是十分显著的。表现以下两个特点：

（1）区内所有金矿床及其金铜矿床（点）均产于区域性主剪切带上，通过对该地区已有 60 个金矿（化）点及其 Au、Cu、Pb、Zn 等多金属矿床及矿化点（见附表Ⅰ）统计表明：冰达坂韧性剪切带控制该区 77%以上的金矿（化）点和 Au、Cu、Pb、Zn 等多金属矿床及矿化点，现具有规模的望峰金矿、萨日达拉金矿、冰峰金矿均产于该韧性剪切带。

（2）金矿床及其金铜矿床（点）的产出并不是均匀分布于剪切带内部，而是倾向于聚集于其中的部分地段，金矿床的分布规律受脆-韧形变形转换带的控制（第四节详述）。这些均说明冰达坂韧性剪切带是该区重要的宏观一级控矿构造带，且该带具有较好的成矿远景。

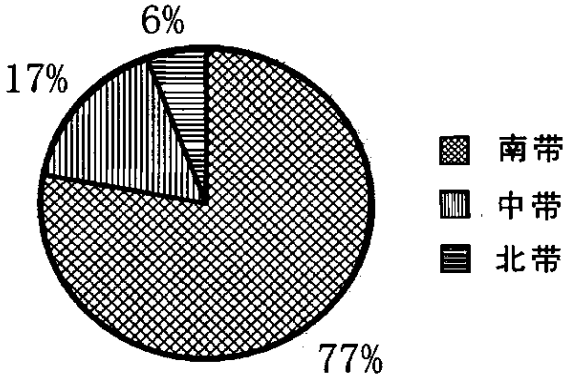


图 3-10　冰达坂地区金及其多金属矿（化）点分配图

第四节　脆-韧性转换带控矿作用分析探讨

前已述及，冰达坂韧性剪切带的构造变形具有以下两个基本特点：（1）在宏观上由于岩性差异性和剪切带的多期次的变形作用，冰达坂韧性剪切带内变形的岩石以强应变集中带与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征，与韧性剪切带较为均一的变形特征不同。空间上由糜棱岩、千糜岩（发育于长城系星星峡群）构成强应变带和由糜棱岩化岩石、构造透镜体、弱片理化带（发育于加里东期花岗闪长岩）构成弱应变域相间分布，交替出现，呈菱形块状结构，具交织网状特征。在平面上构成强应变带分隔弱应变域的平面条带结构。（2）微观组构表现为脆性位错、破碎和塑性滑移共存的特征。可见其具备了脆-韧性变形转换的基本特点（杨兴科，1999），所以说冰达坂地区的构造变形以脆-韧性转换变形为主体，再者脆-韧性变形转换与韧性剪切带的演化、发展是紧密相关，脆-韧性变形转换带是剪切带演化发展过程中特定时空域内的产物。

对冰达坂地区金矿床（点）分布产出研究调查发现，尽管受控于区域韧性剪切带，但其产出并不是均匀分布于剪切带内部，无论金矿规模大小，在空间其都分布于强应变带和弱应变域的变形转换过渡部位的扩容空间。再者冰达坂韧性剪

切带经历了早期挤压剪切变形、中期中浅部构造层的走滑脆-韧性剪切变形和后期脆性叠加变形多期次活动作用，对金矿床（点）、矿脉、金矿（化）体及其矿化现象的分布产出与剪切组构的关系观察研究发现，从宏观到微观金矿化现象主要发生在走滑脆-韧性剪切变形阶段或稍晚，产于脆-韧性变形转换带过程中形成的各类张性、张剪性裂隙中。所以冰达坂地区金矿床的时空分布规律受到了脆-韧形变形转换控制。杨兴科等（1999）等对东天山康古尔韧性剪切带研究中发现脆-韧性变形转换的过程实质是动力成矿的过程，矿液的迁移、富集、充填、沉淀乃至成矿都与脆-韧性变形转换的动力活动紧密相关。事实上对冰达坂地区调查研究发现金矿床(点)的控矿构造以及矿化等都与脆-韧性变形转换有关，因为金矿体或金矿（化）点产出的部位往往是脆-韧性变形转换过程中形成的各类张性、张剪性裂隙或强弱变形过渡地带的扩容空间，下文就此进行了详细剖析。

一、脆－韧性转换带涵义

1、涵义

脆-韧性变形转换是指岩石在整体脆性变形和完全晶体塑性变形之间的转换（Scholz，1998），主要包括岩石变形行为及其力学状态发生转换的条件、机制和过程。而不是先韧性后脆性或先脆性后韧性两次变形的简单叠加。岩石变形理论和自然变形现象分析表明：脆-韧性变形转换是双向转化的动力学过程，包括了由脆性向韧性转换(正向)和由韧性向脆性转换(反向)两个序列，前者属进变形，后者属退变形(Handy，1989)。由于动力演化过程的阶段性，动力体系内的构造变形也存在着多期的复合和叠加，在每一期次的复合、叠加过程中又必然有脆-韧性变形的转换和同一变形在时空方面表现出多重变形递进演化的特征。所以脆-韧性变形转换域兼具两端元变形域的特征，体现在同一矿物相、不同矿物相或不同尺度内具有脆性位错和韧性滑移的双重变形行为共存上。

近年从“含金剪切带”的提出到剪切带构造-流体-成矿系统以及构造应力场转换与界面成矿理论等的研究，都表明了脆-韧性变形转换对动力成矿和矿质富集作用意义重大(Fredrich 等，1989；Carter 等，1987；Schmid 等，1987；Scott 等，1991；Hadizadch 等，1983，1992；Boland 等，1986；Fredrich 等，1989；杨兴科等，1999；NSF，2002；郭安林等，2003)，也赋予了脆-韧性变形转换更深层次的涵义和研究意义。

脆-韧性变形转换与前人提出的脆韧性剪切带无实质的区别，在这里更突出韧性剪切带的动力演化与成矿作用特征，因为脆-韧性变形转换与韧性剪切带的演化、发展紧密相关，脆-韧性变形转换带是剪切带演化发展过程中特定时空域内的产物，它们是在统一的动力学背景和应力系作用下形成的形变时空域。韧性剪切带在遭受挤压剪切的同时，随着地壳甚至上地幔物质由深部向地表浅处推进，高

温高压下的粘、塑性物质逐渐向常温、常压下的脆、弹性物质转变，构造变形也由韧性变形向脆性变形过渡，从而在中上地壳部位形成脆-韧性变形转换带。在相同的构造层次内(尤其是地壳浅部的构造层次内)，强烈的持续挤压剪切作用，也造成了高压条件下脆性岩石、矿物的塑性流变，强应变的韧性变形以剪切带为中心向外扩展，同样可以形成构造变形的转换。因此，脆-韧性剪切带在平面上伴生于主剪切带的两侧，而在剖面上则发育于韧性剪切带的中上部，但是脆-韧性变形转换的动力作用贯穿整个韧性剪切带的发展、演化过程。在中深部主要是由韧性向脆性的转换，而在浅表部则主要是由脆性向韧性的转换。

脆-韧性变形转换带与韧性剪切带在时空上的耦合、统一必然造成在研究过程中对二者的相互结合、相互联系。因此本章从冰达坂韧性剪切带历史发展的角度，时空动力演化的角度全面的对冰达坂脆-韧性变形转换构造变形与成矿的关系进行分析探讨。

2、发生条件

导致脆-韧性变形转换的因素是多元的，除了矿物成分、温度、压力等基本条件外，应变速率、孔隙度、孔隙压力、流体量、应力作用方式和构造部位等都是重要的影响因素。结合研究区地质特征和构造变形特点，认为岩性差异、动力演化过程中多阶段构造应力场转换和流体对该区脆-韧性变形转换起着决定性作用。

（1）岩性条件

岩性是影响变形的重要因素。一般认为对动力成矿且以绿片岩相动力变质最为适宜。在相同的动力学环境下，由于岩性的差异，变形在很大程度上不同，而易在它们的接触部位表现为强应变到弱应变的过渡部位，形成脆-韧性变形转换域。并且当整体变形不强烈时，脆-韧性变形转换域就会向表现相对韧性变形强的方向迁移，反之，则向相对脆性方向迁移。

（2）动力学条件

动力学条件是岩石、矿物变形的关键。不同的动力学环境下应力作用的方式不一致，因此其变形机制也有差异。在脆-韧性变形转换主要受多阶段构造应力场转换控制，并通过不同层次和不同级别的强弱应变相互交织、穿插、复合、叠加组成的镶嵌构造图案而体现出来（杨兴科，1999）。同一阶段内某一应力应变的有序递进演化及不同阶段应力应变的有序叠加演化，也可形成脆-韧性变形转换带。

（3）流体

流体也是促成变形转换的主要因素（王全伟，2002；NSF，2002；郭安林等，2003），它既具有力学效应（导致有效应力下降、应力损失），又具有化学表面效应（产生水解弱化、岩石脆化及腐蚀断面和裂隙尖端等），流体的存在与活动在很大程度上促进了脆-韧性变形的转换。当流体进入上部构造应力转换部位，常常出现的构造张引区是成矿的最佳构造部位。

另外影响岩石脆-韧性变形转换还有温压条件，研究认为石英在绿片岩相温压条件下容易发生脆-韧性转换，这也是绝大多数金矿，尤其是韧性剪切带型金矿主要形成于绿片岩相环境的重要原因之一。实质上与此温压条件下石英等载金矿物和岩石的脆-韧性变形转换有关，此时有较为适宜的动力成矿的温压条件。

3、划分类型

目前，关于脆性、韧性及其过渡性态的概念和区别标志主要是依据变形岩石的宏观、微观组构和变形机制来划分的，而不是完全依据其应力-应变曲线来划分(Scott 等，1991)。这是岩石变形实验从岩石力学实验为主体转变为解释自然变形现象、变形机制和过程为主体内容的实质性进展，它为地球科学研究提供了良好的理论基础，已引起广大地质工作者的重视。近年来，在对大陆地壳多震层成因研究中，提出了一个新的地壳结构模型划分方案(刘俊来、岛田充彦，2000)，该模型将地壳岩石圈划分为 3 个主要域（图 3-11）：上部脆性域、中部脆-韧性转变域和下部完全韧性域。在中部脆-韧性转换域内，依据岩石变形的力学特点与微观变形机制又详细划分出 3 个不同的亚域：半脆性域、半韧性域和韧性域。变形的力学性能和机制的试验认定脆-韧性机制的复杂组合可以作用在很宽的条件范围内（NSF，2002；郭安林等，2003）。而各个域的埋深深度和厚度与不同地区的大地构造环境等因素，尤其是局部地热增温率的变化具有直接关系。

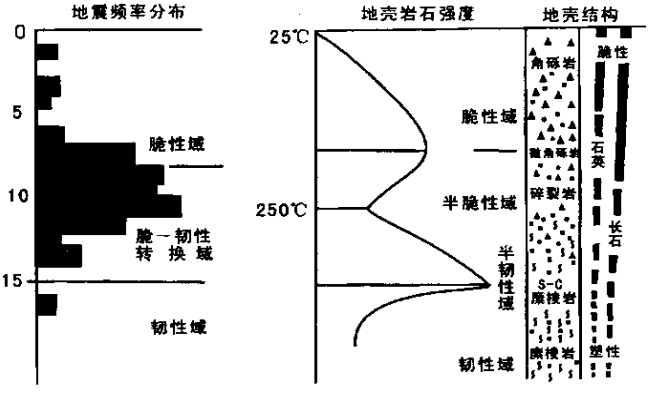


图 3-11 中上地壳岩石强度与地壳结构模型
（据刘俊来等，2000）

二、脆-韧性转换类型

区内脆-韧性变形转换随着研究尺度和领域的不同，变形转换的型式也各不相同。杨兴科等（1999）通过对东天山康古尔韧性剪切带研究认为脆-韧性转换型式有对称有序转换、强弱应变转换和原位异相转换三种型式。结合冰达坂韧性剪切带变形特征和变形组构的时空特征及组合方式具有以下两类脆-韧性转换型式：

（1）强弱应变转换型

该转换型式特点是空间上强应变带和弱应变域相间分布，交替出现，构成强应变带分隔弱应变域的网格状结构，岩性差异越大，这种特征越显著。总体上冰达坂断裂两侧变形强度由近到远在背离韧性剪切带的方向上逐渐弱化到纯脆性变形为止，越靠近冰达坂断裂韧性变形越强烈。北侧博霍特组的总体构造变形相对较弱，以发育褶皱和规模不大的脆性和韧-脆性变形为特征；南侧总体以后期脆-

韧剪切变形和韧性变形为特点，带内变形岩石以局部应变集中与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征，不是均一的韧性变形。这一变形构成认为主要是由于岩性差异和剪切带的多期次叠加形成的，并且岩性差异越大，这种变形特征越显著。冰达坂断裂南侧最典型，以韧性变形占优势的中上元古界长城系星星峡群和蓟县系卡瓦布拉克群往往构成带内窄的强应变带，其强烈发育平行密集的各种面理，呈线状、带状展布；而与前者伴生的相对刚性的加里东期花岗闪长岩一般发生糜棱岩化和弱片理化，组成了较宽的弱应变域，多呈菱形块状结构。这两者多相间分布、交替出现，具交织网状特征。这一特点在萨日达拉金矿和望峰金矿一带最具代表性，矿床多产于强应变带和弱应变域的过渡地带。并且野外多发现在长城系星星峡群与加里东晚期花岗闪长岩的接触部位均发育强烈的矿化蚀变现象，金矿点多产于强弱应变过渡地带，这种强弱应变转换域是该带内最主要的赋矿部位。同时由于空间上强应变带和弱应变域相间分布，交替出现，在平面上使脆-韧性转换带在横向和走向上都呈现分带性的特征。

（2）原位异相转换型

这需要从时空组合和演化角度分析，产于原位异相转换域的矿体和矿化体宏观主要表现是沿着韧性剪切带的面理方向、或呈很小角度分布产出，它是在韧性剪切带长期演化过程中形成的一类转换类型，在强韧性剪切变形域内由于多期变形作用，可形成韧性剪切带上叠加有脆-韧性变形组构的复合型变形带，发生从韧性-脆性的演化叠加。而同一变形域随着变形转换的不断深入，也可由弱变形向强变形发展，其变形程度逐渐加深，发生从脆性-韧性的演化叠加。这两类叠加为原地不同阶段的构造变形随动力学环境的变化而发生的有序叠加，就在这种强变形向弱变形或弱变形向强变形转换的同时成矿流体渗入、沉淀成矿。这也是最繁杂的转换类型，同时也最能说明该区动力演化的复杂性和多期性。

综上所述，冰达坂脆-韧性变形转换具有上述两种转换类型的双重特点。前者是脆-韧性转换的最广泛表现，也是最主要的最直观的转换类型，后者只是冰达坂韧性剪切带演化的结果，其可能发生多期次的矿化叠加，导致富集成矿。萨日达拉金矿床和望峰金矿床主要受控于这两类脆-韧性转换变形。事实上，变形转换的演化序列所呈现的形式受时间和空间的制约，它是时空的复杂函数，用来研究的时间尺度不同，空间范围不同，所得到的结果也不一致，可能是由脆性-韧性-脆性，也可能是由韧性-脆性-韧性的反复演化。

三、脆-韧性转换带构造变形控矿规律探讨

1、脆-韧性转换带对矿（化）体控制作用

脆-韧性变形转换宏观上以强应变集中带和弱应变域相间交织格局为特征；微观上以脆性位错、破碎和塑性滑移的共存为特征。脆-韧性变形转换明显控制着该

区矿床、矿体的分布，主要表现在韧性剪切带在横向、纵向和垂深上均具有强弱应变相间及变形转换的特征控制着带内矿床、矿体的分布（图 3-12）。

（1）纵向分带性

按变形均匀性韧性剪切带在纵向可分出不同的变形区段（图 3-12，Y）。不同区段常出现强弱应变带分布不稳定特征，强弱应变尖灭再现、波状起伏或弧形变化等造成了脆-韧性变形呈现镶嵌互换格局。这也造成矿化在含金剪切带内纵向上具有分段富集规律。宏观直接表现为沿韧性剪切带走向上也不是到处都有矿床分布，例如望峰金矿床、萨日达拉金矿床的产出，而东、西两侧仅发现多处黄铁矿化点，更多表现为成矿流体的蚀变遗迹。微观领域同样表现为沿糜棱面理方向上不都发生矿化，而多沿构造透镜体的微剪切裂隙或包络线发生贯入矿化现象。另外剪切带内构造变形的差异性在遥感解译标志也表现不同，其中强韧性剪切变形带标志为密集分布的弯曲的线性条纹带，条纹形态较模糊，呈断续分布特点；相反脆-韧性剪切变形域解译标志表现为条纹形态清晰、线性明晰、平直为特点。两者相间分布、交替出现，反映出冰达坂韧性剪切带强弱应变带分布不稳定特征，在平面呈分带特点。再者带内多个金地球化学异常受剪切带及其强弱应变带分布不稳定特征的控制而沿剪切带呈串珠状北西向分布，其中在中西部的萨尔萨依金异常内发现有望峰金矿，在萨日达拉金异常内发现有萨日达拉金矿和冰峰金矿。在东部地区还分布多个同类金化探异常，但由于受到地形地势和气候等多种因素影响，该区段未能取得成果，应有很好的成矿远景。

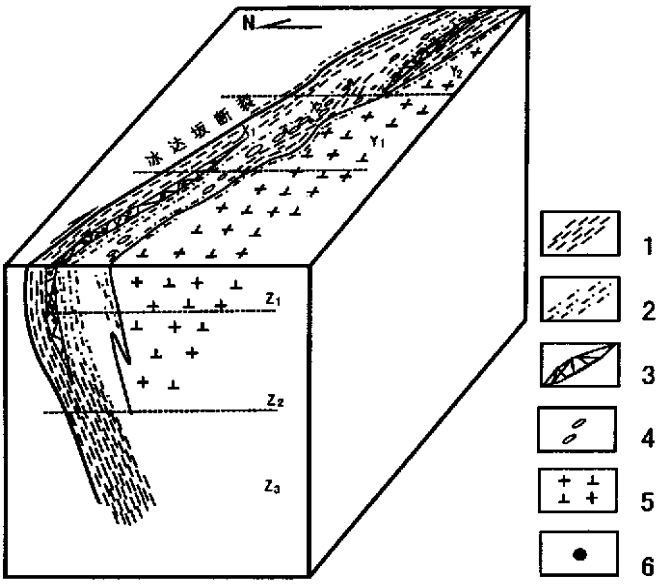


图 3-12 冰达坂韧性剪切带脆-韧性变形转换和金矿（化）点空间分布结构模式

1 强糜棱岩；2 糜棱岩化、碎裂岩；3 剪切网块及脆性裂隙；4 地层透镜体；5 粗粒花岗闪长岩侵入体；6 金矿（化）点

（2）横向分带性

由于岩性和变形程度的差异性，韧性剪切带内部横向上表现为强应变带与弱应变域的组合特点，可分出强应变带、弱应变域及二者的过渡带（图 3-12，X）。总体强应变带由强韧性剪切变形的中上元古界长城系星星峡群构成，弱应变域由糜棱岩化的加里东晚期花岗闪长岩及其一些构造透镜体、碎裂岩等组成。而强应变带和弱应变域的脆-韧性转换过渡带就是金沉淀成矿的最有利场所。所以在大尺度上萨日达拉金矿床和望峰金矿床矿体及其带内金矿（化）点多沿长城系星星峡

群与加里东期花岗闪长岩接触带这一强应变向弱应变的过渡部位产出，而不是发育于靠近冰达坂断裂的强韧性变形带内；中尺度上矿化蚀变带和矿脉多呈条带状、似层状和透镜体状沿脆-韧性转换域（带）展布，例如望峰金矿的31号脉就是沿脆-韧性转换域（带）形成的一个大的矿化蚀变带，并且其内形成了多群组的次级破裂或构造透镜体，成矿流体多沿着这些破裂或构造透镜体的包络线贯入和矿化（图 3-13），从而导致形成很多矿化透镜体，并且局部膨大，在平面上沿走向组成一条看似完整的矿体的错觉，所以这一认识对矿床的有效评价和开采具有重要意义。同时微观与宏观表现具有极其相似的特征，镜下观察多见石英脉是由串状、不连续，破碎的构造透镜体组成，其与细粒化的、连续的石英（黑云母）化带相间分布，矿化多沿脉中显微裂隙及其石英透镜体的包络线贯入发生，呈“胶结”石英脉产出，而发生强应变连续分布的石英（黑云母）化带中很少发生矿化现象，仅偶见零星黄铁矿分布。可见成矿流体在微观上多是沿着强弱应变转换部位的微剪切裂隙扩张空间或碎斑的包络面或碎斑的微裂隙沉淀富集的，而在强变形带尽管有矿化的现象，但更多表现出组分的迁出特点。

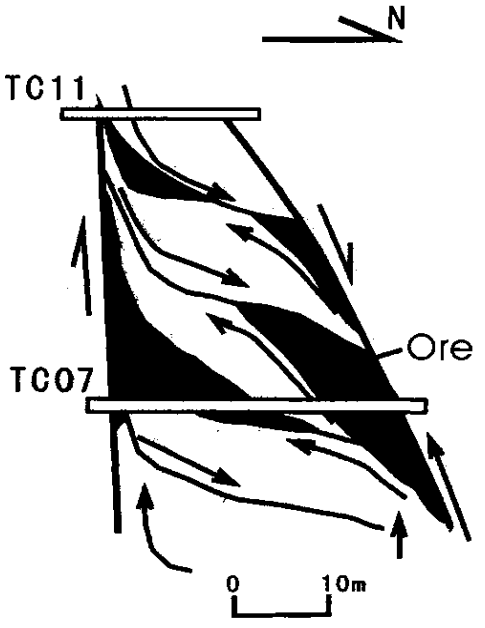


图 3-13 望峰金矿 31 号矿带含矿构造与矿体分布（据陈衍景专题报告，2001）

Ore：矿体；TC07：探槽工程；箭头代表成矿流体运移方向

（3）垂向分层性

同样按变形均匀性在剪切带垂深上可分出不同变形区段（图 3-12，Z）。按 Sibson 剪切带分层模式，大陆地壳断层带具有双层或三层的特点，剪切带内韧性变形愈强烈，其应变强度越高。所以垂向上由地表到地下深处剪切带内应变强度越来越高。由于深部温度高、压力大，岩石呈塑性状态，受韧性剪切带变形的影响，岩石中金的化学位升高，且变形越强，化学位越高，元素就越不稳定，越易被从母岩中活化迁出，与其它成矿元素以及 Si、Na、K、H_2O、CO_2 等被活化的元素或组分共同构成含金热液（或称动力变质热液）。因此深层次韧性剪切带变形区是金等成矿元素的活化迁出区。在地壳中浅部位，由于温度、压力较低，岩石表现为脆-韧性甚至脆性变形，可使元素化学位降低，加上其他物理化学条件（如流体压力、温度、Eh 值、pH 值等）的突然改变而易使金成矿元素化学位能降低、金络合物稳定性下降而沉淀成矿（张连昌，1996；张文淮等，1996；王全伟，2002；杨兴科等，1999；等）而成为最佳成矿场所。

这也导致韧性剪切带型金矿床矿化类型同样具有垂直分带性（Colvine et al，1998；陈柏林，2003）。在以脆性变形为主的韧性剪切带上部矿化类型以细石英脉状矿化为主，在韧性剪切带构造变形以韧性变形为主的深层次，矿化类型以浸染状蚀变糜棱岩型矿化为主，而位于中间构造层次的脆-韧性变形转换带，矿化类型以大脉状构造蚀变岩型矿化为主，再者由于中间构造层次强烈的构造变形转换易产生多种显微剪切裂隙，即里德尔剪切裂隙（包括有 D 型、P 型、R 型、R'型和 T 型），所以剪切带不仅控制矿化带和矿床的分布，也控制了矿体的产状，与剪切带面理产状基本一致。对望峰金矿、萨日达拉金矿、冰峰金矿区的主要矿脉、矿化体以及细脉状黄铁矿和细小石英脉与糜棱面理产状关系统计表明矿体、矿化体以及细脉状黄铁矿和细小石英脉多沿糜棱面理分布或以小角度斜切糜棱面理，相当于中间构造层次的脆-韧性变形转换带形成的 D、P 型剪切带裂隙分布，其次沿早期 R 型分布产出。

如前所述，正由于其这种强弱应变相间及强烈的脆-韧性转换变形的特征，导致空间上金矿体或金矿（化）点产出不均匀分布，分布于脆-韧性变形转换过程中形成的各类张性、张剪性裂隙或强应变带和弱应变域的变形转换过渡部位的扩容空间，严格受脆-韧形变形转换控制。一方面是由于在强应变域与弱应变域之间存在着较大的温度、压力和浓度梯度,另一方面由于强应变域与弱应变域之间具连通性，保证有丰富的成矿溶液的运移。而在强弱应变域的过渡部位，也就是脆-韧性转化域中因物理化学条件的变化，含金络合物易分解而沉淀成矿。

2、矿化与剪切带组构关系探讨

通过对萨日达拉金矿和望峰金矿详细的野外观察和显微镜下分析研究表明，冰达坂地区金矿床严格受脆-韧性变形转换带控制，按金的赋存产出状态，矿化类型可以分为两大类：一类为细脉-浸染状金硫化物矿体，另一类为含金黄铁矿石英脉矿体。这两类矿化类型与剪切带的性质及其温度、压力和围岩性质等条件密切相关。脆性变形程度较高的剪切带易于形成脉状矿体，而韧性变形程度较高的易于形成浸染状矿体。在相对低的温度压力条件下有利于形成脉状矿体，而在温度压力相对较高的条件下有利于形成浸染状矿化。此外矿化类型与岩石的岩性密切相关，例如浸染状矿化体多产出于与加里东期花岗闪长岩接触的长城系星星峡群地层中，多见于萨日达拉金矿床；相反脉状矿体多产出糜棱岩化花岗闪长岩中，望峰金矿床中多以脉状矿体产出。

同时脉状矿化与浸染状矿化在空间上有一定关系。它们在空间上既可以独立构成金矿体，也可以相互交叉在一起共同构成金矿体。在水平方向上，大多数脉状矿体两侧发育从脉壁往两侧由强变弱的蚀变带，蚀变带里常发生有浸染状矿化，二者矿化的时间表现大致相同，即属于同一成矿热液体系在不同构造条件下的不同矿化表现；在垂直方向上，脉状矿体一般发育在剪切带的上部，而浸染状矿化

发育于剪切带的下部。由于剪切带大多发育于造山带内，在造山带演化过程中，剪切带的演化表现为不断抬升剥蚀，相对于先期剪切变形而言，构造变形层次在不断下移，其结果是稍早的深层次韧性变形糜棱岩被抬升，当上升超过脆-韧性转换带时，则在其上叠加脆韧性和脆性剪切变形。剪切带由深向浅的脆-韧性变形转换动力作用的持续进行，导致了构造变形在时空上的叠加复合，也造成了矿化类型的叠加复合，于是出现了在脆-韧性变形域甚至是脆性变形域内的脉状矿化与深层次的浸染状矿化的叠加。因此区内大多数金矿的矿化类型显然不是单一机制下的矿化类型。因此，随着韧性剪切带发展演化，造成了两种不同类型金矿化的叠加。并且剪切带脆-韧性变形转换是持续多阶段的，金矿化和富集成矿过程也将发生多阶段叠加、并构成复杂的矿化类型叠加组合型式。

细脉-浸染状金硫化物矿体呈透镜状、似层状产出。其中细脉状含金黄铁矿和由脆-韧性剪切作用形成的构造之间有密切的空间关系（图 3-14、图版Ⅱ）。矿化体常常平行强置换条带分布，或位于韧性剪切带中的小褶皱的核部（图 3-14a，图版Ⅱ-3），但这两类黄铁矿的金矿化很低，应该是早期韧性变形成矿阶段的产物，具体就是在强烈韧性剪切变形间歇期的转换阶段成矿的残余。显微观察多见矿化发育于剪切透镜体的微剪切裂隙扩张空间或沿碎斑的包络面分布，或呈托尾状产出（图 3-14b、图版Ⅱ-4，Ⅱ-5），此时常见有石英脉相伴，但这类黄铁矿的金矿化很高，是中晚期脆-韧性变形成矿阶段或稍晚的产物。而且也见到矿化体沿糜棱岩的面理分布（图 3-14c、图版Ⅱ-6），但金矿化较弱。以上这些密切的空间关系说明了该区韧性剪切变形期就发生金的矿化蚀变，但金矿主成矿期发生时间应晚于韧性变形期。

统计表明，望峰金矿和萨日达拉金矿含金黄铁矿石英脉矿体产状多在(345°~20°)∠(52°~80°)，向南陡倾，多沿糜棱面理分布或以小角度斜切糜棱面理分布，相当于沿脆-韧性剪切变形中晚期形成的 D、P 型剪切裂隙和二者复合裂隙分布（图 3-14d、e、f），其中 P 型剪切矿脉往往不止一条，而是多条，并彼此呈雁形排列。重要的是由于剪切裂隙是一

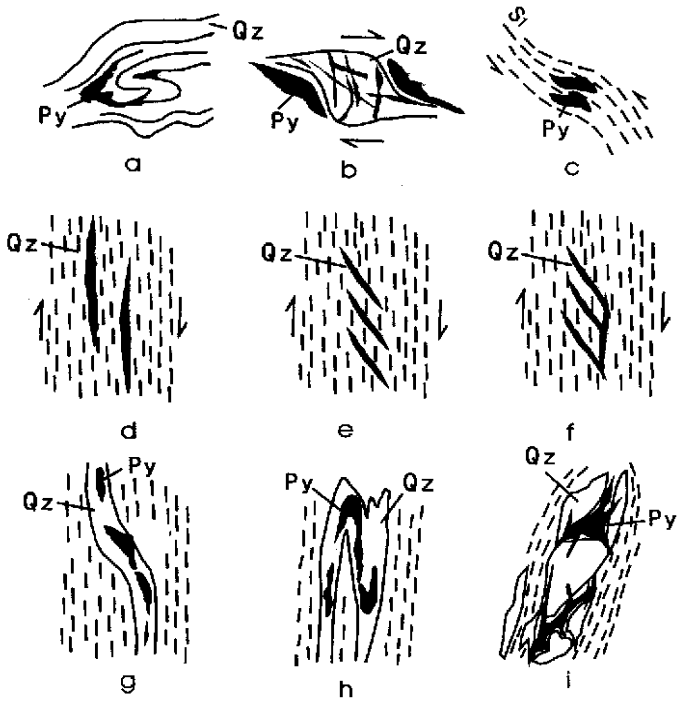


图 3-14 矿化与剪切组构关系（据刘喜山图编. 1991）
Qz：矿化石英脉；Py：黄铁矿

个起伏不平的面，当剪切面两盘发生错动将产生隐蔽扩张空间，这些透镜状的扩张空间就被矿脉充填，这个过程多次进行，就不断在透镜体之间产生新的扩张空间，就会发生多期矿脉充填形成连续的大的矿脉，微观领域将这一矿脉产生机制更直观表现出来了（图版Ⅱ-7）。含金石英脉形态多样，金矿化多产在石英的微裂隙中，有时其局部和片理有较小交角(图 3-14g)，有时石英脉的形态呈较复杂的褶曲状(图 3-14h)，有时石英脉成串状、不连续，整体宽度不大，但石英脉附近的石英（黑云母）化带常较连续。显微观察发现石英脉中黄铁矿多沿显微裂隙贯入，呈“胶结”石英产出(图 3-14i、图版Ⅱ-8)。石英脉中石英和黄铁矿呈共结关系，即黄铁矿和石英呈平行整合接触，未见交代现象，反映二者是同一阶段的产物。在镜下石英有波状消光，消光带等变形特征。该地区矿石多表现这种类型，是脆-韧性变形转换时期或稍晚期由热液交代生成的。并且该类含金石英脉一般金品位比较高，易形成富矿。

一般金矿化与剪切组构的空间相关性也反映了金矿化与构造变形演化的时间关系，通过对以上该区典型金矿床矿化与剪切变形组构综合分析表明该区金的矿化发生时期晚于韧性变形发生时期，金矿化主要发生在中期中浅部构造层的走滑脆-韧性剪切变形阶段或稍晚，因为该阶段是冰达坂剪切带演化过程中脆-韧性变形转换最强烈时期，伴随强烈的脆-韧性转换变形易形成的各类张性、张剪性裂隙是流体沉淀和矿质富集的有利场所，野外和镜下观察也多发现矿化透镜体在平面上沿走向看似一个完整的矿体其实是由多组次级破裂或构造透镜体组成，成矿流体多沿这些显微破裂或构造透镜体的包络线贯入矿化的。此外韧性变形期也发生了极少部分矿化蚀变。

3、脆-韧性转换变形强度与金富集规律探讨

通过上述对该区典型金矿望峰金矿和萨日达拉金矿及其矿石与剪切带构造变形的关系综合分析表明：冰达坂地区金矿床的时空分布规律受到脆-韧形变形转换带控制。同时对矿石的观察研究表明脆-韧性变形强烈部位有利于成矿，且在显微裂隙发育部位最易形成富金矿。

金矿化与变形强度具有非线性关系。剪切带中的脆-韧性剪切带内的矿化现象虽然比较普遍，前人通过大量野外和镜下观察、成岩成矿模拟实验，以及地球化学的热动力学规律的研究（王全伟，2002；王居里等，1995；陈柏林等，1998、1999、2000；杨兴科等，1999）均表明所有呈液态、气态或进入溶液中的物质，都是从受压力较强，温度较高的地方向压力和温度降低的地方迁移。Au 的化学位受韧性剪切变形的影响而升高，且变形越强烈，动力变质分异作用就越明显，化学位越高，元素就越不稳定，有利于在剪切变形过程中被活化迁移，将脱离原来的矿物或岩石的赋存部位，与 Si、K、Na、H_2O 等组分一起被活化分异形成含金热液，并向动、热力梯度场降低的方向迁移，从深部向浅部，由韧(塑)性变形带向

脆性剪切变形带迁移，含金热液最终迁移至剪切带中浅脆-韧性转换带部位沉淀成矿。由于脆-韧性变形转换部位，正是构造上的脆弱带，易受构造影响而沿糜棱面理出现微张裂隙，由于脆韧性剪切差应力具有周期性积累和释放的动力学特征，易形成"泵吸"成矿作用机制，有利于含矿热液运移，在微裂隙发育地带充填交代富集成矿。如前所论述，冰达坂地区韧性剪切带型金矿矿体与矿化体主要集中分布于脆-韧性变形转换部位，在宏观和微观上皆有很好的显示。这一结论与王居里等（1995）认为萨日达拉金矿金的富集成矿主要发生于剪切带低应变一中等应变部位以及不同强度应变带的过渡部位是基本一致的。但我们这里更突出脆-韧性变形转换动力成矿作用和时空概念。

综合以上分析冰达坂地区金矿体或金矿（化）点产出于脆-韧性变形转换过程中形成的各类张性、张剪性裂隙或强应变带和弱应变域的变形转换过渡部位的扩容空间，严格受脆-韧形变形转换控制。金矿化与变形强度具有非线性关系，脆-韧性变形转换强烈部位有利于成矿，且在显微裂隙发育部位最易形成富金矿。另一方面金的矿化发生时期晚于韧性变形发生时期，金矿化主要发生在中期中浅部构造层的走滑脆-韧性剪切变形阶段或稍晚。

第四章　典型韧性剪切带型金矿地质特征

冰达坂地区现已发现的金矿主要沿冰达坂断裂以南剪切带分布，主要有望峰金矿、萨日达拉金矿和冰峰金矿三个中大型金矿床，其次就是剪切带内部分布有较多的金矿化点，其共同构成了一条近东西向成矿带，迄今为止对冰达坂地区金矿床分类未有统一的分类，但现今具有规模的望峰金矿床和萨日达拉金矿床都被一致认为是韧性剪切带蚀变岩型金矿。以下就这两典型金矿作以详述。

第一节　萨日达拉金矿

萨日达拉金矿区位于乌鲁木齐市南约 150km。现有一条简易公路与矿区南缘 216 国道相连，并直通矿区，中心地理坐标为东经 86°42'53"，北纬 43°07'50"。行政区划属昌吉市管辖。矿区属高寒山区，山势陡峻，地形切割较深，矿区最高点绝对高程为 4562m，相对高差 1300m 左右。水系发育，沿水系为草地覆盖，是哈萨克牧民赖以放牧的夏季牧场。山脊上多被冰雪覆盖，常年积雪不化，冰碛砾石沿山坡堆积。

一、矿区地质特征

1、地层

矿区范围内除部分地段被第四系覆盖以外，出露地层主要为长城系星星峡群和蓟县系卡瓦布拉克群，其次是前石炭系博霍特组第一岩性段。后者为一套中基性到中酸性火山岩组合，分布于矿区北部，主要岩性为变凝灰岩夹变杏仁安山岩及酸性火山岩，残留的杏仁体清晰可见，杏仁体以长石质为主，少量方解石，与其伴生的有浅色流纹质岩石，岩石基本无韧性剪切变形。局部地段见糜棱岩化变粉砂岩、变硅泥质粉砂岩和灰绿色变凝灰质粉砂岩。变质程度达低绿片岩相，变余结构明显，总体构成脆韧性-脆性变形带。

长城系星星峡是萨日达拉金矿的最主要赋矿围岩，主要岩性组合为灰色、灰绿色黑云石英片岩、石英钠长片岩、绿泥石英片岩、绿泥钠长片岩及绿泥片岩。局部叠加热接触变质，使变质程度加深，有变粒岩、片麻岩产生。矿区该地层本身金丰度值高于克拉克值，平均值为 10.16×10^{-9}，是区内重要的矿源层。受韧性剪切作用影响，地层均发生强烈的糜棱岩化，形成了糜棱岩和千糜岩。所以总体为韧性变形，后又叠加了脆-韧性剪切变形。

蓟县系卡瓦布拉克群分布于矿区西北部，岩性为灰色黑云石英片岩、钙质片岩与薄层灰色大理岩和厚层状大理岩组合，为一套变质碳酸盐岩-细碎屑岩建造。

2、构造

矿区构造以韧性剪切带为主，褶皱、断裂均不发育，如第三章所述成矿作用

与脆-韧性剪切变形作用密切相关。总体为一向北倾斜的单斜构造，倾向 5°~15°，倾角 75°~82°。

断裂主要是冰达坂断裂，区域内延伸 52km。总体向北倾，倾角为 75°-80°以上，地震资料显示断裂向下延伸一定深度倾向变为南倾，倾角为 75°以上。断裂性质地表反映为正断层效应，深部反映为向北推覆逆断层性质。断层南盘地层为元古界长城系和蓟县系变质岩系，岩浆岩为元古代-华力西期中酸性岩体。北盘为前石炭系第一岩段和华力西中基-中酸性岩浆岩。断裂总体深度大，延伸长，为多期活动的复合区域深断裂。

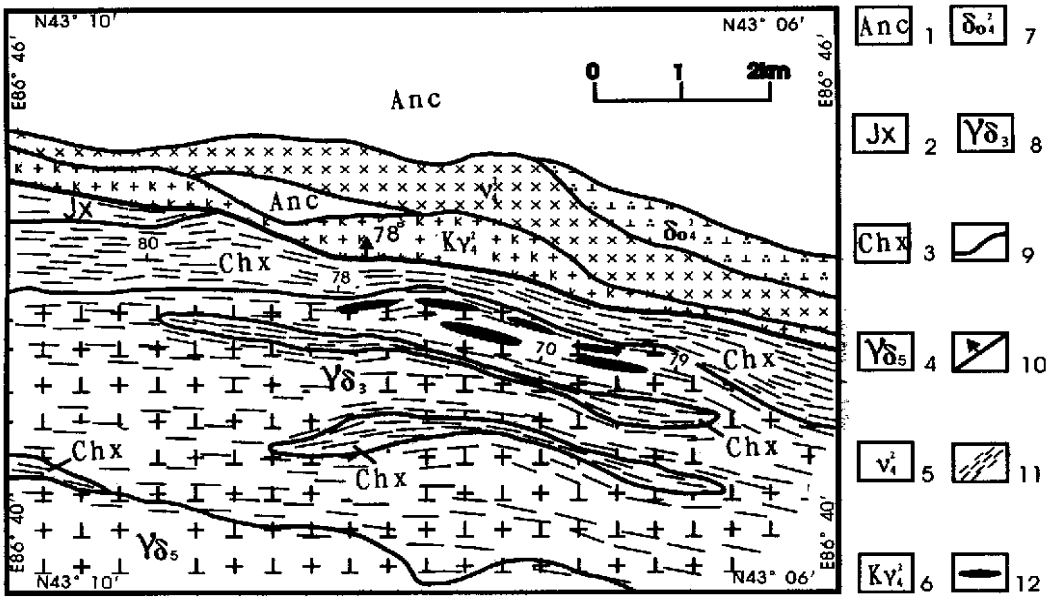


图 4-1　萨日达拉金矿区地质略图

（据新疆地矿局第一地质大队、长安大学萨日达拉 1∶5 万区调资料改编，2003）

1-博霍特组；2-蓟县系卡瓦布拉克群；3-长城系星星峡群；4-华力西期中细粒花岗闪长岩；5-辉长辉绿岩；6-钾长花岗岩；7-石英闪长岩；8-加里东期糜棱岩化花岗闪长岩；9-地质界线；10-冰达坂断裂；11-冰达坂韧性剪切带；12-金矿（化）体

此外沿萨日达拉沟发育一条近南北向的断层（推测），沟内第四系覆盖严重，未见基岩露头，但沟（断裂）的东西两侧岩性不同，有错断迹象，推测该断裂为一右行走滑断裂。

3、岩浆活动

矿区出露的岩浆岩主要为加里东晚期糜棱岩化花岗闪长岩和华力西期钾长花岗岩、辉长辉绿岩和一些穿插于加里东晚期糜棱岩化花岗闪长岩内部，并可延伸到地层中的小规模辉绿岩脉。辉绿岩脉呈灰绿色，宽 2~3m。走向近东西，发生黄铁矿化蚀变。辉长辉绿岩和钾长花岗岩位于矿区北部，沿冰达坂断裂北侧一线分布，为海西晚期侵入体，无明显金矿化。

加里东晚期糜棱岩化花岗闪长岩体规模最大，是萨日达拉金矿的主要赋矿围

岩。该岩体横跨矿区中南部，呈近东西向分布，其长轴方向与地层展布方向一致。岩石类型为花岗闪长岩、斜长花岗岩、英云闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩。岩石呈灰色，风化后表面呈浅肉红色，主要矿物组分为斜长石、钾长石、石英、黑云母、绢云母、少量磷灰石。具眼球状构造，糜棱面理发育。与长城系星星峡群相伴产出，多见穿插接触，局部呈过渡关系，岩体之中残留体以星星峡群为主，并且接触部位普遍发生绢云母化、硅化、黄铁矿化。显微观察发现岩石中动力变质作用较明显，其石英大多呈动态重结晶颗粒，新生矿物绢云母均呈定向排列，斜长石碎裂化，钾长石碎粒化，黑云母为短片状集合体。蚀变矿物有绿帘石、绢云母、榍石、绿泥石。石英呈亚颗粒状集合体，同序列的萨尔萨依岩体的单颗粒锆石（SHRIMP）年龄为 432±5.6Ma，属加里东晚期产物。相关专题研究表明岩体岩石化学成分反映属造山带钙碱性 S 型花岗岩。

4、变质作用

变质作用主要表现为以低温动力变质作用为主，变质矿物有绿泥石、绢云母、黑云母、白云母等，整体划归绿片岩相，属低温绿片岩相变质。

二、矿体及矿化体特征

萨日达拉金矿床产出于长城系星星峡群和加里东晚期花岗闪长岩的接触部位，严格受脆-韧形变形转换带控制，现已圈定出了多个金矿体。

L_1 号矿体：是萨日达拉金矿床的主矿体，地表呈近东西向，透镜状产出。出露长度 633m，厚度一般在 1.00~29.85m，平均 9.00m，最厚处 36.52m。厚度变化系数 111%，矿体产状一般在（5°~20°）∠（75°~82°）之间。矿体品位在 1.51~7.77×10^{-6} 之间，平均品位 3.90×10^{-6}，单样最高品位 20.60×10^{-6}，品位变化系数为 89%。已圈出工业矿体长 233m，厚度一般在 2.38~19.47m，最大厚度 24.15m，平均厚度 12.05m。品位在 3.66~7.77×10^{-6}，平均品位 5.78×10^{-6}。

L_{1-1} 号矿体：位于 L_1 号矿体南部约 40m，地表出露长度 80m，厚度一般在 1.17-2.38m，平均 1.78m。产状在（5°~20°）∠（75°~82°）之间。矿体品位在 1.62~1.71×10^{-6} 之间，平均品位 1.65×10^{-6}。

L_{1-2} 号矿体：分布于 L_{1-1} 号矿体的南侧约 35m 处，呈近东西向分布，地表出露长度 40m，平均厚度 2.38m，矿体平均品位 1.90×10^{-6}。

L_2 号矿体：矿体长 250m，厚度为 1.15~4.38m，平均厚度 3.24m。金品位 1.04~3.10×10^{-6}，平均品位 1.49×10^{-6}。

三、矿石特征

1、矿物组分

矿石中主要金属矿物为自然金、黄铁矿、磁黄铁矿及黄铜矿。其次有闪锌矿、

方铅矿、镍黄铁矿、黄钾铁钒、辉铜矿和褐铁矿等。黄铁矿是矿石中主要金属矿物，并与金关系密切。脉石矿物有钠长石、钾长石、斜长石和石英。次生蚀变矿物有黑云母、方解石、绢云母、绿泥石、绿帘石等。

（1）自然金

自然金呈金黄色，以他形粒状为主，丝状和不规则状少量。自然金的粒度一般以微粒金为主，其次为细粒金。以粒间金、裂隙金和包体金形式赋存。并以粒间金最为常见，金的成色较高。

（2）黄铁矿

广泛见于矿石中，与金矿化关系密切，他形-半自形粒状，分布不均匀，主要见于长石矿物间隙、裂隙或破碎处。常见浸染状产出，其次为细网脉状和团块状。黄铁矿含量较高，是一种重要找矿标志。

（3）磁黄铁矿

矿石中常见他形粒状，部分为不规则粒状，呈浸染状产于矿石中，偶尔与黄铜矿连生。

2、矿石类型

萨日达拉金矿床矿石类型简单，属构造蚀变岩型金矿床。若根据其变形强度划分，则以初糜棱岩型和糜棱岩化型为主，糜棱岩型较少。

3、矿石结构构造

矿石结构类型主要有（王居里等，2001）：(1)包含结构，表现为自然金呈包体矿物被包于黄铁矿之中，或者早期阶段黄铁矿被晚期阶段黄铁矿包裹；(2)填隙结构，自然金以充填方式沉淀于早期阶段黄铁矿的裂隙之中；(3)团窝状结构，表现为自然金呈不规则粒状集中成团呈窝状分布于脉石矿物之间；(4)连生结构，表现为产于脉石矿物中的自然金与黄铁矿平衡连生；(5)交代结构，区内矿石中交代结构非常发育，成矿期后交代作用主要表现为地表矿体、矿化体中的黄铁矿和磁黄铁矿等的褐铁矿化，形成交代网状、交代残留和交代假象等结构。强烈的褐铁矿化往往使金发生流失，导致地表矿贫化。

矿石构造主要为浸染状构造，根据其特征又可分为细脉浸染状构造和稀疏浸染状构造。细脉浸染状构造表现为金属矿物(黄铁矿等)呈细小脉状沿糜棱面理或以小角度斜切糜棱面理分布，矿化强烈时脉体变宽可构成浸染条带状构造；稀疏浸染状构造则表现为金属矿物(黄铁矿等)在矿石中沿糜棱面理呈星散状分布。

四、围岩蚀变

矿区内与金成矿有关的近矿围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、钠长石化、碳酸盐化、绢云母化和绿泥石化等，共同构成了金矿体特征的围岩蚀变带。其中黄

铁矿化、钠长石化、硅化与金矿化关系密切。

黄铁矿化最为普遍，在矿石和矿化岩石中均有发育，但强度差别很大，其体积分数从不足 1%到 30%。黄铁矿主要呈半自形-他形不规则状分布于强弱应变转换过渡部位，平行糜棱面理排列。其特征反映成矿具有多阶段性。

硅化现象普遍而独特，表现为在韧性剪切带内的局部地段中发生了强烈的去硅作用(SiO_2强烈减少)，而另一些地段则发生强烈的聚硅作用(SiO_2强烈增加)，两者互补。在 SiO_2 富集的部位出现似"硅质岩"带，岩石致密坚硬，但镜下观察薄片中保留有较多的细小长石残斑，表明剪切变形过程中岩石内的 SiO_2 发生了强烈的动力分异、迁移和再聚集（王居里等，2001）。硅化与金成矿的关系很特殊，表现为金与 SiO_2 主体呈负相关关系。SiO_2 强烈减少的部位是金成矿的最有利部位，多形成富矿体；而 SiO_2 强烈聚集的地段一般不利于的金矿化，仅在局部形成达工业品位的小矿体。

钠长石化形成碱交代岩石，钠长石化过程中皆伴有强烈的黄铁矿化，表现为较细小的他形黄铁矿分布于钠长石与被交代矿物及周围矿物之间。

五、成矿期次

根据区内矿物共生组合、矿石组构及各种矿化之间的关系等特征，王居里等（2001）可将区内成矿作用过程划分为两期：构造-热液成矿期和表生期。构造-热液成矿期是区内的主成矿期，该成矿期进一步划分出了 4 个成矿阶段：

（1）磁黄铁矿－黄铁矿阶段：磁黄铁矿呈半自形-他形；黄铁矿多为立方体或五角十二面体，有的晶体被晚期黄铁矿包裹，主要沿糜棱面理分布，有的在后续剪切变形过程中发生碎裂。金的矿化富集强度较低，成矿温度较高。

（2）黄铁矿－自然金－黄铜矿阶段：黄铁矿为主体，大致沿糜棱面理分布，有的黄铁矿中包裹自然金和第一阶段的黄铁矿。金的矿化富集程度较高，有金的独立矿物形成。

(3)自然金－多金属硫化物阶段：为区内最重要的成矿阶段，矿物组合较复杂，除自然金外，金属硫化物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿等，但主体为黄铁矿。呈他形沿糜棱面理分布，有的黄铁矿中包裹自然金，有的与自然金连生。闪锌矿、方铅矿矿化弱，含量少，呈细粒他形晶或集合体分布于脉石矿物中，有的被晚期结晶的黄铁矿包裹。金的矿化富集程度高，形成大量自然金，其呈不规则状产于黄铁矿内和黄铁矿裂隙中，或呈不规则状分散或集中成窝产于脉石矿物中。

(4)黄铁矿－银阶段：黄铁矿主要呈自形-半自形立方体，沿糜棱面理定向分布。有些黄铁矿含较多的脉石矿物包体。金的矿化很弱，仅在热液活动强烈处发生一些金矿化，不形成金的独立矿物，局部发生银矿化。是韧性剪切变形末期的产物。

表生期主要是地表矿体、矿化体中的金属硫化物黄铁矿、磁黄铁矿等的褐铁矿化，使金流失，造成地表矿贫化。

第二节　望峰金矿

矿区位于乌鲁木齐市南约 110km，中心地理坐标为东经 86°57'42"，北纬 43°03'43"，216 国道从矿区北缘通过，现有一条简易公路直通矿区。属高寒山区，山势陡峻，地形切割较深，海拔 2700~4100m，相对高差 700~1400m 左右，沟谷发育，植被稀少，遍布冰碛物或坡积岩块。

一、矿区地质特征

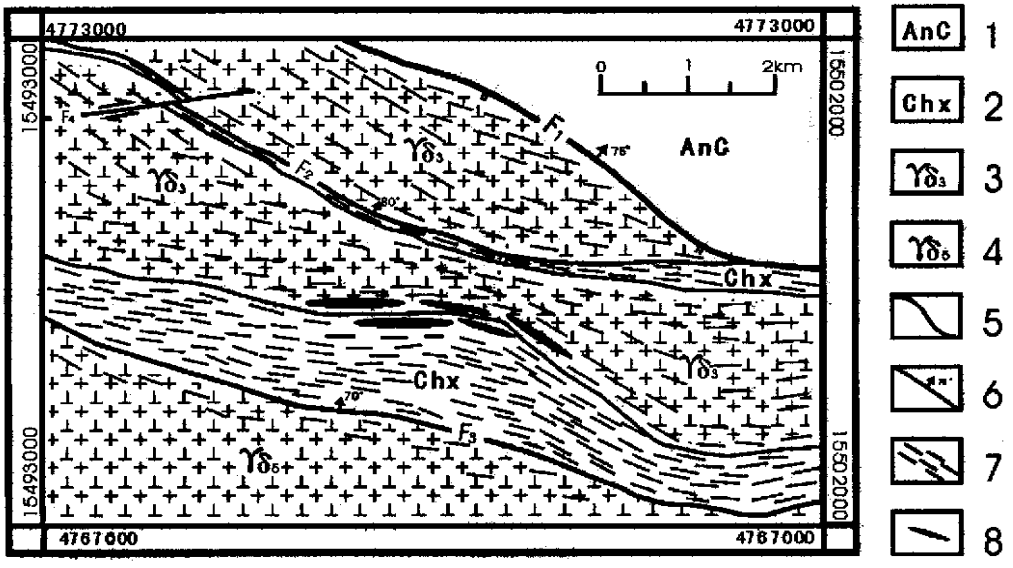


图 4-2　望峰金矿区地质略图

（据新疆第一地质大队、长安大学萨日达拉 1：5 万区调资料改编，2003）

1-博霍特组；2-长城系星星峡群；3-加里东期糜棱岩化花岗闪长岩；4-华力西期中细粒花岗闪长岩；5-地质界线；6-断裂；7-冰达坂韧性剪切带；8-金矿（化）体；F1-冰达坂断裂；F2-矿区次级断裂；F3-矿区南缘断裂

1、地层

矿区范围内除部分地段被第四系覆盖以外，出露地层主要为长城系星星峡群和蓟县系卡瓦布拉克群，其次是前石炭系博霍特组第一岩性段，分布于矿区北部。与萨日达拉矿区中酸性火山岩不同，岩性主要为糜棱岩化灰色变粉砂岩、变硅泥质粉砂岩、灰绿色变凝灰质粉砂岩、变长石石英细砂岩和阳起绿泥片岩。总体变形相对前者较强，构成脆韧性变形带。

长城系星星峡是望峰金矿的主要赋矿围岩，主要岩性组合为灰色、灰绿色黑云石英片岩、石英钠长片岩、绿泥石英片岩、绿泥钠长片岩及绿泥片岩。局部叠加热接触变质。受韧性剪切作用影响，地层均发生强烈的糜棱岩化，形成了糜棱岩和千糜岩。

2、构造

同萨日达拉金矿区构造相似，以冰达坂韧性剪切带为主，褶皱、断裂均不发

育，成矿作用与脆-韧性剪切变形作用密切相关。断裂主要有 F1 冰达坂断裂、F2、F3 断裂。

F2 断裂呈北西向展布，延伸约 10km，断裂带宽 10-50m。走向 90~130°，倾向北，倾角 80°，为正断层。

F3 断裂位于矿区南部，断裂以南为华力西期粗粒花岗闪长岩，以北为长城系星星峡群，呈北西向展布，走向 85~110°，倾向北，倾角 65°，为逆断层，断裂带未发现矿化现象。

3、岩浆活动

矿区出露的岩浆岩主要为加里东晚期糜棱岩化花岗闪长岩、其次为辉长辉绿岩脉。辉绿岩脉规模小，主要产于加里东晚期糜棱岩化花岗闪长岩内部，并且常与矿体相伴产出。

眼球状糜棱岩化花岗闪长岩体规模最大，其是望峰金矿的主要赋矿围岩。该岩体横跨矿区，呈近东西向分布，其长轴方向与地层展布方向一致。根据岩体分布特征分为南部岩体和北部岩体，南部岩体均发生韧性剪切变形，岩石多成为花岗闪长质初糜棱岩、糜棱岩，斜长石碎斑粗大，剪切糜棱面理发育。局部见有顺面理褶皱，碎斑指向构造不明显。北部岩体变形较弱，与南部岩体没有直接接触，中间加有 100 多米宽的星星峡群地层，地层和南部岩体为侵入接触，和北部岩体为断层接触，虽然两者变形层次有差异，变质程度不同，但从岩石特征和矿物组合上，两者区别不大，岩性基本一致。岩石类型为花岗闪长岩、斜长花岗岩和英云闪长岩。岩石呈灰色，风化后表面呈浅肉红色，主要矿物组分为斜长石，钾长石，石英，黑云母，绢云母，少量磷灰石和磁铁矿。眼球状构造，糜棱面理发育。多呈平行状。南部岩体的单颗粒锆石（SHRIMP）年龄为 432±5.6Ma（杨兴科，2004），岩体的单颗粒锆石蒸发法年龄为 435±10Ma（李华芹，1998），属加里东晚期产物。

二、矿体特征

矿带内已发现金矿脉 10 余条（表 4-1），矿脉走向及分布方向与区域构造线方向一致。矿脉长 100~3000m，单脉一般长 20~150m，宽 1~7m，走向近东西，倾向北，倾角 65°~85°，由数条平行的凸镜状、扁豆状单脉雁行排列组成。

三、矿石特征

1、矿物组分

金属矿物主要有自然金、黄铁矿，其次为磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、磁铁矿、闪锌矿，次生矿物为赤铁矿、褐铁矿、辉钼矿等；脉石矿物主要有石英、长石、绢云母，其次为绿泥石、石榴子石等。

表 4-1　望峰金矿矿脉特征表

序号	脉 号	规模、形态、产状	矿 石 类 型	蚀 变 类 型	品　位
1	9	长 150m，宽 1－2m，产状 10°∠55－65°	构造蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	1.4-1.5×10^{-6}
2	13	长 183m，宽 0.87－0.36m，单脉型，走向 86°，南倾，倾角 78°	构造蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	2.65-3.48×10^{-6}，平均 3.24×10^{-6}
3	14	追索长 1800m，宽 1－5m，产状 10°∠75°	构造蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、碳酸盐化	最高 17.5×10^{-6}
4	15	控制长 1000m，宽 1－3m，呈脉状产出，产状 200°∠51－70°	构造蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、碳酸盐化	0.3×10^{-6}
5	17	控制长 1000m，脉状，平均厚 3m，产状 8－10°∠55－86°	蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	最高 6.92×10^{-6}
6	41	控制长 80m，脉状，平均厚约 3m，产状 15°∠80－85°	蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	最高 3.0×10^{-6}
7	42	控制长 120m，脉状，宽 1－3m，产状 10°∠75－80°	蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	最高 19.0×10^{-6}
8	43	控制长 50m，脉状，厚 2.79-4.27m，产状 15°∠85°	石英脉、蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	最高 51.8×10^{-6}
9	51	控制长 200m，脉状，厚 1－3m，产状 355°∠75－80°	蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	0.12-0.89×10^{-6}
10	8	控制长 420m，脉状，厚 0.95-5.48m，产状 356°∠67°	石英脉、蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	5.72-8.76×10^{-6}
11	18	控制长 280m，脉状，厚 0.87-4.60m，产状 155°∠77°	蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	1.86-5.10×10^{-6}
12	31	控制长 300m，脉状，厚 0.78-7.75m，产状 345°∠60－80°	石英脉、蚀变岩型	黄铁矿化、硅化、绢云母化	7.59-29.08×10^{-6}

据陈衍景（2001）《天格尔－巴伦台成矿带金铜矿床成矿规律与找矿评价专题报告》

（1）自然金：金黄色，粒状、球粒状及不规则状，粒度数微米至数十微米，属微粒金。自然金一般与黄铁矿和石英等矿物共生，主要分布在黄铁矿附近的脉石英中，除此之外还零星分布在黄铁矿附近，少部分呈黄铁矿的包体及连生体。在硫化物氧化较为强烈的地带，自然金有明显的次生富集加大现象。

（2）黄铁矿：是发育最广的金属矿物，多呈微粒状他形晶体出现，少部分呈自形、半自形立方体状。黄铁矿多呈星散状或条带状沿石英裂隙分布或平行片麻理分布，局部见团块状。粗粒黄铁矿发生破裂、滑移、韧性等变形。

（3）磁黄铁矿：多产于次生石英脉中，含量较少，且普遍褐铁矿化。

（4）石英：呈烟灰色、乳白色，一种石英呈粗粒残斑，具旋转、拖尾构造；一种石英呈微粒状集合体或者为糖粒状，条带状构造。

2、矿石类型

主要有两种：石英脉型矿石为主，次之为构造蚀变岩型矿石。

3、矿石结构构造

矿石交代结构为主，其次为充填结构、粒状结构、包含结构等。矿石构造为条带状、浸染状、块状、角砾状构造，条带状构造是望峰金矿矿石的一种主要构造形式，黄铁矿呈细粒条带分布于矿石中。

四、围岩蚀变

望峰金矿以硅化、黄铁矿化、绢云母化与金矿化关系最密切，这些蚀变越强烈，金矿化也越强烈。分述如下：

硅化在矿区最强烈，绝大多数金矿体为黄铁矿化、绢云母化的硅化体。硅化形成的石英脉与多种蚀变矿物显示了互相交代的关系，因而其发生贯穿于整个矿化过程，从成矿早期至晚期都有发生。

黄铁矿化最为普遍，在矿石和矿化岩石中均有发育。黄铁矿主要呈半自形-他形不规则状分布于强弱应变带的过渡部位，平行糜棱面理排列。自然金常分布在黄铁矿矿物的粒间、裂隙中，与黄铁矿属于共沉淀关系。

绢云母化发生普遍，绢云母为细小片状，呈细脉状分布在岩石或岩石的裂隙中。由于黄铁矿化和绢云母化常与硅化伴生，所以它们基本上属同一个阶段产物。

此外矿区还发育黑云母化、碳酸盐化和绿泥石化等与金矿化密切相关蚀变。表现上述蚀变越强烈，金矿化也越强烈。

五、成矿期次

根据矿物共生组合、矿石组构、各种矿化之间的关系等特征，可将区内成矿作用过程划分为热液成矿期和表生期。热液成矿期可分为三个阶段。

黄铁矿一石英阶段：造成了石英-黄铁矿化，伴随的硫化物种类较少，黄铁矿沿糜棱面理分布，少量自然金以晶隙金和裂隙金形式与黄铁矿伴生。

自然金一多金属硫化物阶段：为区内最重要的成矿阶段，矿物组合较复杂，除自然金外，金属硫化物有黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等，但主体为黄铁矿。黄铁矿主要呈他形，沿糜棱面理分布，该阶段黄铁矿或包裹自然金，或与自然金连生。金的矿化富集程度高，形成大量自然金。自然金呈各种不规则状产于黄铁矿内和黄铁矿裂隙中，或产于脉石矿物中，金的浓集程度较高，相伴的蚀变主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化。

黄铁矿一碳酸盐化阶段：多见硅化、碳酸盐化，一般不形成金的独立矿物。可在矿化糜棱岩中形成含少量黄铁矿的细小石英脉，是韧性剪切变形末期的产物。

表生期：即褐铁矿阶段，主要是地表矿体、矿化体中的金属硫化物黄铁矿、磁黄铁矿等的褐铁矿化使部分金流失，总体造成地表矿贫化。

讨论

根据上述对该带典型金矿床萨日达拉金矿和望峰金矿地质构造特征进行了对比分析（表4-2）。

表4-2 冰达坂地区典型金矿地质构造特征对比表

地质特征			望峰金矿	萨日达拉金矿
矿区特征	构造		以韧性剪切带为主，褶皱断裂不发育，矿区中部和南缘发育两近东西向断层	以韧性剪切带为主，褶皱断裂极不发育
	地层		长城系星星峡群、蓟县系卡瓦不拉克群、前石炭博霍特组中酸性火山岩	长城系星星峡群，蓟县系卡瓦不拉克群，前石炭系博霍特组火山碎屑岩
	岩浆岩		加里东期糜棱岩化花岗闪长岩、华力西期花岗闪长岩和辉长辉绿岩脉	加里东期糜棱岩化花岗闪长岩、华力西期钾长花岗岩、辉长辉绿岩和辉长辉绿岩脉，
	变质作用		低温动力变质作用	低温动力变质作用
矿体产出特征			走向近东西、倾向北、倾角65°~85°矿体多呈数条平行的透镜状、扁豆状单脉雁形排列	走向95°~110°，倾向北，倾角75°~82°
矿石特征	矿物组分	金属矿物	主要有自然金、黄铁矿，其次为磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、磁铁矿、闪锌矿等	自然金、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、褐铁矿等
		脉石矿物	石英、长石、绢云母、绿泥石、榍石、石榴石等	钠长石、钾长石、斜长石、石英、黑云母、绢云母、绿泥石、绿帘石、白云母、锆石、金红石、电气石等
	矿石类型		石英脉型和构造蚀变岩型	浸染状蚀变岩型金矿
	矿石结构		交代结构、充填结构、粒状结构、包含结构等	包含结构、填隙结构、团窝结构、连生结构、交代结构
	矿石构造		条带状、浸染状、块状、角砾状等	细脉浸染状构造和稀疏侵染状构造
围岩蚀变			强硅化、强黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐岩化、黑云母化、碳酸盐化	强黄铁矿化、硅化、强钠长石化、碳酸盐岩化、绢云母化
成期矿次	热液成矿期		黄铁矿-石英成矿阶段，自然金-多金属硫化物成矿阶段，黄铁矿-碳酸盐化成矿阶段	磁黄铁矿-黄铁矿高温成矿阶段，黄铁矿-自然金-黄铜矿中温阶段，自然金-多金属硫化物中低温阶段，黄铁矿-银低温成矿阶段
	表生期		褐铁矿化阶段	褐铁矿化阶段，造成矿贫化

从下表中可知，在构造背景、含矿地层、岩浆活动、变质作用、矿体产出特征、矿物组合、围岩蚀变、矿石类型及结构构造、成矿期次划分等方面，萨日达拉金矿床与望峰金矿具有相同或极其相似的控矿因素和成矿条件。所以二者都应是冰达坂韧性剪切带长期演化的结果，金矿床（体）的时空分布规律严格受到脆-韧形变形转换控制。

第五章　金矿床成矿作用地球化学

第一节　稳定同位素地球化学

稳定同位素地球化学在解决诸如成矿物质来源、成矿流体来源、成矿物理化学条件和成矿过程等矿床学研究的重要问题方面起到了及其重要的作用。本次研究工作主要是在搜集、整理前人对该区两典型金矿床望峰金矿和萨日达拉金矿相对有限的稳定同位素数据，结合新的 1∶5 万区域地质调查成果对其作了重新评述。现分述如下：

一、氧、氢同位素

表 5-1　望峰金矿区氢氧同位素组成

序号	期次	样号	产地	岩性	石英 $\delta^{18}O$‰	均一温度（℃）	包裹体水 $\delta^{18}O$‰	$\delta^{18}D_{SMOW}$ ‰
1	中	T96	31 号脉	黄铁化石英	10.7	283	2.5	
2	晚	T33	12 号脉	含金石英脉	13.2	206	1.15	
3	中	T71	31 号脉	矿体	10.1	279	1.74	
4		T80	31 号脉	含金石英脉	10.4	296	2.70	
5		T38	12 号脉	黄铁化石英	13.1			-79
6		T91	31 号脉	矿体	9.9			
7		T28	钦达望 8 号脉	黄铁化石英	9.4			
8		T52	13 号脉	黄铁化石英	11.7			
9		B-34-2	31 号脉	石英脉	8.6			-95
10		B-012	12 号脉	石英脉	12.6			-72
11	中	B-037	31 号脉	矿体	9.5	318	2.57	-94
12	早	B-010	12 号脉	石英脉	12.2	大于 535	大于 10.4	-79
13	晚	B-038	31 号脉	石英脉	8.8	160	-6.58	-85
14	早	W01	12 号脉	石英脉	12.1	423	7.90	-84
15	早	W02	12 号脉	石英脉	12.4	307	5.09	-96
16	早	W03	12 号脉	石英脉	13.6	373	8.26	-87
17	早	W04	12 号脉	石英脉	13.2	403	8.58	-78
18	早	W06	12 号脉	石英脉	11.9	348	5.89	-94
19	中	W10	12 号脉	石英脉	13.5	283	5.30	-92
20		W11	12 号脉	石英脉	12.8			-81
21	中	W12	12 号脉	石英脉	12.6	294	4.8	-100
22	晚	W17	31 号脉	石英脉	8.9	220	-2.31	-96
23		W18	31 号脉	石英脉	9.5			-78
24	晚	W19	31 号脉	石英脉	9.3	253	-0.2	-85
25	早	W20	31 号脉	石英脉	8.0	358	2.27	-104

据陈衍景（2001）《天格尔－巴伦台成矿带金铜矿床成矿规律与找矿评价专题报告》；为国土资源部矿床研究所测定；质谱仪型号是 MAT251EM，精密度为±2‰。

本次研究中氧、氢同位素数据仅搜集到望峰金矿（陈衍景报告，2001）的研究数据。对来自矿体的 25 件石英样品进行了氢氧同位素组成分析(表 5-1)，得到

17 个包裹体中平衡水（代表成矿流体）的氧同位素数据，18 件氢同位素数据。

由表可知石英包裹体中平衡水的 $\delta^{18}O$ 值变化于-6.58‰~10.4‰，极差 16.98‰，平均值为 3.10‰。变化区间也比较大，总体上 $\delta^{18}O$ 明显分为 7.90‰~10.4‰、1.15‰~5.89‰和-6.58‰~-0.2‰三个区间。其中 7.90‰~10.4‰的样品其均一温度在大于 535~373℃之间，其对应的石英的 $\delta^{18}O$ 的值一般大于 13.0‰，代表了成矿早期高温阶段流体；而-6.58‰~-0.2‰的样品其均一温度小于 260℃，对应的石英的 $\delta^{18}O$ 的值小于 9.5‰，代表了成矿晚期低温阶段流体；1.15‰~5.89‰的样品均一温度大部分在 270~350℃之间，其对应的石英的 $\delta^{18}O$ 一般在 12.4‰~10.1‰之间，代表了成矿中期中温阶段流体。相反石英矿物的 δD_{SMOW} 值为-72‰~-104‰，极差 32‰，平均值为-90.44‰，变化区间较窄，并且早期流体与中后期没有明显差异，δD 值基本稳定，可见望峰金矿的氢氧同位素的组成符合中国金矿的氢氧同位素组成，即氧同位素随温度降低，氢同位素变化较小（于津生，1997；刘英俊，1991）。

由氢氧同位素组成图（图 5-1）研究表明（陈华勇等，2000），早期高温成矿热液 $\delta^{18}O$ 为 2.27‰~10.4‰，平均 6.91‰，δD 为-104‰~78‰，平均-88.9‰，具有变质热液性质，或部分岩浆水特征；晚期低温成矿热液 $\delta^{18}O$ 为-6.58‰~-0.2‰，平均-3.03‰，δD 为-96‰~-85‰，平均-88.7‰，显示大气降水热液特征；中期中温成矿热液 $\delta^{18}O$ 为 2.57‰~5.3‰，平均 4.22‰，δD 为-100‰~-92‰，平均-95.2‰，介于早期变质热液与晚期大气降水热液之间，可见由于早期和晚期都是相对单一流体；中期由两种以上流体混合所致，所以矿物组合复杂。

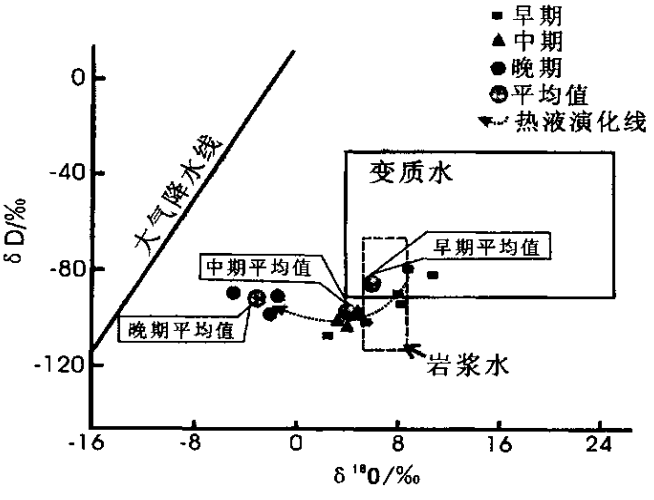


图 5-1 望峰金矿 $\delta^{18}O$ 和 δD 组成
（引据陈衍景专题报告，2001）

综上所述，望峰金矿成矿流体可能来源于变质热液或岩浆水，大气降水在中期就参与了流体的成矿作用，晚期以大气降水为主。成矿流体从早期到晚期经历了变质热液或岩浆水向大气降水热液的演化，其中金矿碳同位素组成（陈华勇等，2000）特点否定了成矿流体来自岩浆水的可能（如下）。所以成矿主期成矿流体主要以变质热液为主，并伴有大气降水热液的混入。

二、碳同位素

对望峰金矿矿体的石英样品进行了碳同位素组成分析研究（陈华勇，2000；陈衍景等，2001）表明石英矿物中的流体包裹体的 $\delta^{13}C_{CO2}$ 值变化于-2.5‰~26.2‰，离散度为 28.7‰，平均值为 7.2‰，总体特征是正值高和范围变化大。表明流体和成矿物质不可能来自岩浆作用和有机质，可能来自于海相碳酸盐建造，因为海相碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 可高达 18‰以上（Schidlowski，1988），其变质产生的 $\delta^{13}C_{CO2}$ 应更高（Hoefs，1997；Schidlowski，1998）。并且早期矿化样品显示碳同位素主要来自海相碳酸盐的变质分泌，而中晚期多有大气降水的加人。

结合最新地质研究成果推测碳同位素可能是金矿围岩星星峡群上覆蓟县系卡瓦布拉克群碳酸盐岩-细碎屑岩密切相关。

三、硫同位素

本次研究共搜集整理了前人关于萨日达拉金矿、望峰金矿及其外围矿化点的硫同位素的研究已取得的数据。结果分别见表 5-2、表 5-3 以及图 5-2。

1、萨日达拉金矿

表 5-2　萨日达拉金矿区硫同位素组成

序号	样号	样品名称	$\delta^{34}S_{CDT}$‰	采样地点	序号	样号	样品名称	$\delta^{34}S_{CDT}$‰	采样地点
1	98T-5	黄铁矿	-4.8	萨日达拉	12	Th-13	黄铁矿	5.28	巴巴戈萨依
2	98T-12	黄铁矿	-4.5	萨日达拉	13	Th-31	黄铁矿	11.93	巴巴戈萨依
3	98TⅠ-3	黄铁矿	16.1	萨日达拉	14	Th-46	黄铁矿	5.27	巴巴戈萨依
4	98T-37	黄铁矿	15.5	萨日达拉	15	Th-46	磁黄铁矿	2.88	巴巴戈萨依
5	98TⅠ-4	黄铁矿	16.4	萨日达拉	16	BO49-4	黄铁矿	6.02	巴巴戈萨依
6	98T-56	黄铁矿	17.3	萨日达拉	17	BO51-2	黄铁矿	6.82	巴巴戈萨依
7	98T-76	黄铁矿	16.5	萨日达拉	18	ⅣTC1-9	黄铁矿	14.57	巴巴戈萨依
8	98T-81	黄铁矿	12	萨日达拉	19	ⅣTC3-2	黄铁矿	7.12	巴巴戈萨依
9	SV-3	黄铁矿	5.58	萨日达拉	20	NⅠ-23	黄铁矿	7.41	纳楞夏尔萨依
10	SV-4	黄铁矿	0.29	萨日达拉	21	NⅡ-4	黄铁矿	0.26	纳楞夏尔萨依
11	BT-10	黄铁矿	7.4	巴巴戈萨依	22	SIV-12	黄铁矿	-0.38	萨日达拉

注：1～10 为萨日达拉金矿矿石，11～22 为非矿石
1～8 据王居里（2000）《新疆天格尔峰南坡金矿床富集规律和找矿评价研究专题报告》；
11～19 据车自成，韩天儒等（1990）《新疆天格尔金矿床成矿带地物化综合研究及找矿靶区优选专题报告》；
9～10，20～22 据炎金才，刘养杰等（1995）《新疆乌鲁木齐胜利（冰）达坂金矿及外围靶区评价研究报告》。

由表 5-2 和图 5-2A 可知，萨日达拉金矿金属硫化物中的硫同位素组成变化范围较大，而且硫同位素均一化程度较低，$\delta^{34}S$ 值为-4.8‰~17.3‰，离散度为 22.1‰，平均值为 9.04‰，总体上多数样品的 $\delta^{34}S$ 具有较高的正值，其组成反映出非单一成因硫的特点。另外非矿石中的黄铁矿、磁铁矿的 $\delta^{34}S$ 值为-0.38‰~14.57‰，离散度为 14.59‰，平均值为 6.22‰，可见矿石中黄铁矿的硫同位素的组成与非矿石中的黄铁矿、磁铁矿中的硫同位素组成比较接近，说明萨日达拉金矿区金矿体

与黄铁矿化体具有相同的硫来源。

总体上 $\delta^{34}S$ 明显分为-4.8‰~5.58‰及 12.0‰~17.3‰两个区间。前者与基性岩 $\delta^{34}S$ 值（-5.7‰~7.6‰；魏菊英等）相当，具深源硫特征；后者属过渡型硫，其数值相对分散较大，均一化程度很低，显示地壳浅部硫的混染。这与冰达坂韧性剪切带的长期活动和强烈脆-韧性变形转换密切相关，前述碳、氢、氧同位素特征显示成矿流体以变质热液为主，并伴有大气降水的混入，说明在剪切变形、变质过程中，伴随着构造和流体作用，深部地壳和地幔中的金等成矿元素和其它组分活化，迁移，不断向剪切带内聚集形成含矿流体，从强韧性应变区向弱应变区方向迁移，期间伴随着强烈脆-韧性变形转，所以流体经历了反复运移，并在循环运移过程中萃取了所流经地层和岩石中的金等成矿元素和硫等组分，尤其成矿流体后期阶段受浅部大气降水带入地壳浅部硫的混染作用影响，因此显示出硫同位素组成具过渡型硫的特征。上述推测碳同位素可能与蓟县系卡瓦布拉克群碳酸盐岩-细碎屑岩密切相关，所以其也可能是硫的源区之一。

以上说明成矿和矿化过程中硫的来源比较复杂，具多源性特征，既有深源硫的参与，也有地壳浅部硫的混入，这也从侧面也反映了萨日达拉金矿其成矿物质的多源性和成矿流体的复杂性特点。

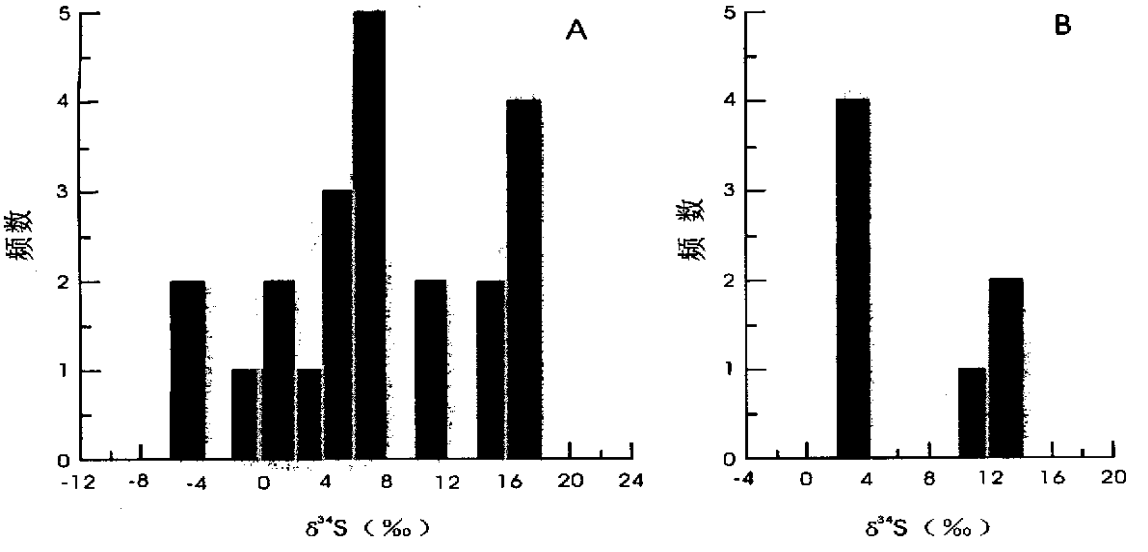


图 5-2 冰达坂地区韧性剪切带型金矿床硫同位素组成直方图

A—萨日达拉金矿；B—望峰金矿

2、望峰金矿

望峰金矿中黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值变化于 2.7‰~13.4‰，极差 10.7‰，平均 7.2‰，其组成反映出非单一成因硫的特点。同萨日达拉金矿床相似，总体上 $\delta^{34}S$ 明显分为 2.7‰~3.7‰及 11.4‰~13.4‰两个区间，前者具深源硫特征；后者属过渡型硫。所以望峰金矿同萨日达拉金矿应该具有相同的硫来源，具多源性特征，既有深源

硫的参与，也有地壳浅部硫的混入，也从侧面反映了望峰金矿成矿物质的多源性和成矿流体的复杂性特点。

表 5-3　望峰金矿硫同位素组成

序号	样号	样品名称	$\delta^{34}S_{CDT}$‰	采样地点
1	T34	黄铁矿	13.4	望峰萨尔萨依 12 号脉
2	B034-1	黄铁矿	2.7	望峰萨尔萨依 31 号脉
3	B016	黄铁矿	12.2	望峰萨尔萨依 12 号脉
4	T91	黄铁矿	2.9	望峰萨尔萨依 31 号脉
5	B036	黄铁矿	2.8	望峰萨尔萨依 31 号脉
6	T33	黄铁矿	11.4	望峰萨尔萨依 12 号脉
7	T96	黄铁矿	3.7	望峰萨尔萨依 31 号脉

据陈衍景（2001）《天格尔－巴伦台成矿带金铜矿床成矿规律与找矿评价专题报告》；为国土资源部矿床研究所测定；质谱仪型号是 MAT230C，精密度为±0.2‰。

再者如表 5-3 可见 $\delta^{34}S$ 分段性恰好分别对应于矿区 31 号矿脉及 12 号矿脉。这也可能反应了它们分别代表不同的流体演化阶段，12 号脉至少经历了流体演化中晚期，而 31 号脉应主要形成于早中期阶段。由碳、氢、氧同位素特征（陈华勇等，2000）可知成矿流体早期、中期、晚期经历了由变质流体向大气降水以大气降水为主的流体的演化，所以 12 号矿脉更多受到后期受浅部大气降水流体影响而带入了地壳浅部硫的混入，而导致晚期成矿 $\delta^{34}S$ 值高于早期成矿。

格里年科（1980）认为对于 $\delta^{34}S$ 值变化于 4.00‰~10.00‰之间的金属硫化物，其硫源既可能和硫酸盐与岩浆硫的混合作用有关，也可能是从地壳中吸取了各种成因硫，根据本区地质背景分析，认为是流体在循环运移过程中萃取所流经地层和岩石中的硫，且是多期成矿流体经历了较长时间的反复运移，因此显示出硫同位素组成具过渡型硫的特征。尤其受浅部大气降水流体的影响。

四、铅同位素

铅同位素常被用作物质来源的示踪剂。本次研究搜集了前人关于萨日达拉金矿、望峰金矿的铅同位素的研究已取得的数据 14 组，并进行系统整理分析。结果分别见表 5-4、表 5-5。

1、萨日达拉金矿

萨日达拉金矿的 7 个黄铁矿样品的铅同位素组成(表 5-5)非常一致，在 Cannon 等(1961)的三角图（图 5-3）上，投点非常集中，均落入正常铅范围内，说明铅同位素组成稳定，矿床中铅的来源相对单一。在 Zartman 等(1981)的铅同位素演化模式图上（图 5-4-A），投点

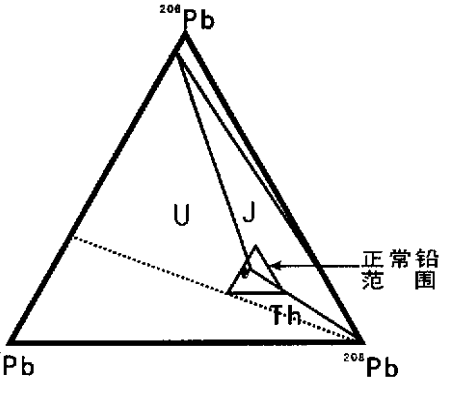


图 5-3 萨日达拉金矿床铅同位素 Cannon 图(1961)

集中分布于造山带曲线下方附近，说明矿石铅主要来源于造山带，成矿与造山作用演化密切相关（王居里，1995）。

表 5-4　萨日达拉金矿区铅同位素组成

序号	样号	采样地点	样品名称	206Pb/204Pb	206Pb/204Pb	206Pb/204Pb
1	98TⅡ-3	萨日达拉	黄铁矿	18.6062	15.5781	38.3550
2	98TⅡ-4	萨日达拉	黄铁矿	18.5559	15.5780	38.3297
3	98TⅡ-5	萨日达拉	黄铁矿	18.4098	15.5771	38.3476
4	98T-12	萨日达拉	黄铁矿	18.4356	15.5685	38.2875
5	98T-37	萨日达拉	黄铁矿	18.5479	15.5743	38.4475
6	98T-76	萨日达拉	黄铁矿	18.7388	15.5926	38.4265
7	98T-81	萨日达拉	黄铁矿	18.6873	15.5913	38.4259

以上数据据王居里（2000）《新疆天格尔峰南坡金矿床富集规律和找矿评价研究专题报告》；为原矿产部地质研究所测定；误差均为 2σ。

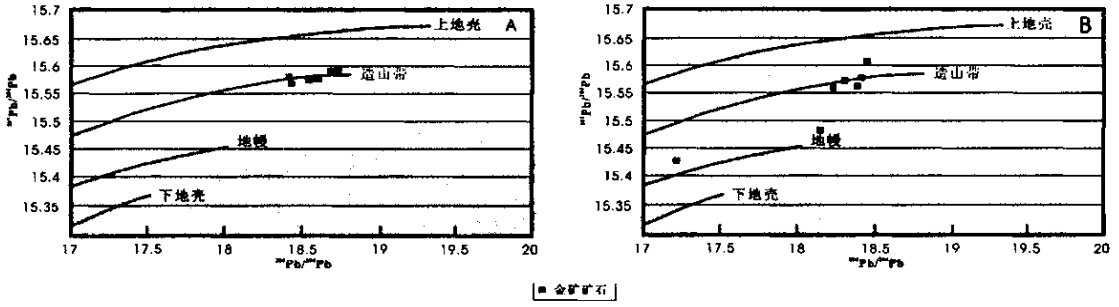


图 5-4 冰达坂地区韧性剪切带型金矿床铅同位素 Zartman（1981）演化模式图
A—萨日达拉金矿；B—望峰金矿

2、望峰金矿

表 5-5　望峰金矿铅同位素组成

序号	样号	采样地点	样品名称	206Pb/204Pb	206Pb/204Pb	206Pb/204Pb
1	T34	望峰萨尔萨依 12 号脉	黄铁矿	18.229	15.560	38.021
2	B034-1	望峰萨尔萨依 31 号脉	黄铁矿	18.408	15.579	38.237
3	B016	望峰萨尔萨依 12 号脉	黄铁矿	18.147	15.483	37.882
4	T91	望峰萨尔萨依 31 号脉	黄铁矿	18.445	15.608	38.287
5	B036	望峰萨尔萨依 31 号脉	黄铁矿	18.387	15.563	38.156
6	T33	望峰萨尔萨依 12 号脉	黄铁矿	17.220	15.427	37.177
7	T96	望峰萨尔萨依 31 号脉	黄铁矿	18.302	15.573	38.167

据陈衍景（2001）《天格尔－巴伦台成矿带金铜矿床成矿规律与找矿评价专题报告》；为国土资源部矿床研究所测定；质谱仪型号是 MAT230C，精密度为±0.2‰；铅同位素分析精度为 2σ。

望峰金矿矿石的 7 个黄铁矿样品的铅同位素组成(表 5-5)不近一致，但在 Cannon 等(1961)的三角图上投点均落入正常铅范围内，说明铅同位素组成稳定。在 Zartman 等(1981)的铅同位素演化模式图上（图 5-4-B），投点大多数相对集中分

布于造山带曲线上下，但有两组数据落于地幔曲线稍偏上方。说明该区成矿作用与造山作用密切相关，但铅来源复杂，既有深源铅的参与，也有地壳浅部铅的混入，也反映了成矿物质的多源特点。

可见萨日达拉金矿和望峰金矿铅同位素同样具有相似性，矿石铅主要来源于造山带，且来源复杂，既有深源铅的参与，也有地壳浅部铅的混入，成矿与造山作用的演化密切相关。与硫同位素相似，铅同位素从侧面也反映了成矿物质的多源性和成矿流体的复杂性。

五、讨论与结论

根据上述对带内典型金矿床的碳、氢、氧、硫、铅稳定同位素组成详细分析论述证明萨日达拉金矿和望峰金矿除在地质构造特征具一致性外，二者在稳定同位素组成上同样具有相近或相似性。反映了二者都是同一次大的构造事件的产物，即都应是冰达坂韧性剪切带长期演化的结果，

通过以上碳、氢、氧、硫、铅稳定同位素研究分析表明，区内金成矿与造山作用的演化密切相关，金成矿流体主要有两种来源，动力变质热液来源和大气降水来源（陈华勇等，2000），早中期成矿流体以变质热液为主，大气降水在中期就参与了流体的成矿作用，晚期以大气降水热液为主。所以成矿流体经历了从早期变质热液，经变质热液与大气降水热液的混合热液，向晚期大气降水热液演化。所以主成矿期流体主要以变质热液为主，并伴有大气降水热液的混入，是变质热液和大气降水热液的混合热液。

与此同时，稳定同位素组成特点也反映出冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿物质来源具有多源特点。因为硫、铅同位素组成表明既有深源物质的参与，也有地壳浅部物质的混入。分析认为在剪切变形、变质过程中，伴随着构造和流体作用，深部地壳和地幔中的金等成矿元素和其它组分活化，迁移，不断向剪切带内聚集形成含矿流体，并从强韧性应变区向弱应变区方向迁移，期间伴随有强烈脆-韧性变形的强烈转换，一方面促使流体经历了反复运移，并在循环运移过程中萃取了所流经地层和岩石中的金等成矿元素和硫等组分，另一方面促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，从而使物质和能量能够进行大规模跨层次、跨体系的交换和对流循环。致使成矿热液发生大规模跨层次流动，一方面从地壳深部带入一部分成矿物质，另一重要方面是不断从流经地层和岩石中摄去成矿物质。

第二节　稀土元素地球化学

通过对冰达坂地区萨日达拉金矿矿石、望峰金矿矿石、含矿地层长城系星星峡群、含矿岩体眼球状糜棱岩化花岗闪长岩及矿带其它地层和岩体的稀土元素组成（表 5-6、表 5-7）和稀土元素配分模式（图 5-5）对比分析如下。

1、萨日达拉金矿

萨日达拉金矿矿石的稀土总量（表 5-6、表 5-7；图 5-5a）变化较明显，∑REE 为 94.74~350.42。稀土分异较强烈，（La/Yb）$_N$ 为 4.42~10.79，分配曲线右倾，轻稀土富集型；δ_{Eu} 为 0.37~0.77，具有中等的负铕异常，铈异常不明显或具有微弱正铈异常，δ_{Ce} 为 0.93~1.18。

表 5-6　萨日达拉金矿矿石与围岩稀土参数表

序号	样品编号	岩性	∑REE	（La/Yb）$_N$	（La/Sm）$_N$	（Tb/Yb）$_N$	δ Eu	δ Ce
1	97-141	矿石	173.60	6.23	3.36	1.18	0.37	1.18
3	97-145	矿石	126.72	4.42	3.06	1.28	0.69	1.14
4	97-149	矿石	272.28	10.79	3.48	1.71	0.59	1.15
5	97-152	矿石	119.03	8.01	3.86	0.96	0.47	0.93
6	97-154	矿石	94.74	4.57	2.60	1.25	0.77	0.99
7	98H-47	矿石	350.42	6.98	3.05	1.41	0.66	1.10
8	98H-53	矿石	267.27	8.62	3.60	1.16	0.63	1.12
9	98H-56	矿石	264.97	7.93	3.83	1.06	0.64	1.14
10	98H-59	矿石	234.87	5.16	3.47	1.10	0.54	1.09
11	98H-44	围岩	234.74	10.37	3.58	1.39	0.60	1.08
12	98H-45	围岩	226.03	9.42	3.49	1.44	0.61	1.07
13	98H-63	围岩	220.42	4.19	2.72	1.15	0.38	1.17

以上数据据王居里（2000）《新疆天格尔峰南坡金矿床富集规律和找矿评价研究专题报告》

由稀土元素组成表 5-6、表 5-7、稀土元素配分模式图 5-5 可见，矿石与围岩及其含矿岩石长城系星星峡群、糜棱岩化花岗闪长岩具有相同或相近的稀土元素特征。其中围岩稀土总量（表 5-7）集中，∑REE 为 220.42~234.74，（La/Yb）$_N$ 为 4.19~10.37，稀土分配型式为右倾轻稀土富集型，δ_{Eu} 为 0.38~0.61，具有中等的负铕异常。长城系星星峡群稀土总量（表 5-7；图 5-5c）变化不明显，表现相对集中，∑REE 为 246.01~277.45，（La/Yb）$_N$ 为 5.728~9.660，稀土分配曲线是右倾，轻稀土富集型，δ_{Eu} 为 0.51~0.64，具有中等负铕异常。同样加里东晚期眼球状花岗闪长岩稀土总量（表 5-7；图 5-5e）变化也不明显，相对集中，∑REE 为 229.29~2287.02。（La/Yb）$_N$ 为 8.151~18.746，稀土分配型式为右倾轻稀土富集型，δ_{Eu} 为 0.43~0.66，具有中等的负铕异常。与此同时该岩体的化学成分特征表明属于钙碱性系列；（Na_2O=4.38~4.48%，K_2O=1.70~2.66%）和铝过饱和类型（AI=1.61~1.81）。同时（Sm/Nd）$_N$=0.17~0.21<0.3，（La/Yb）$_N$=15.20~34.95 远大于 1，反映了造山带钙碱性花岗岩的特征（Herderson，1984）。岩石化学 CAF 图解（B.W.Chappell，A.J.R.White，1974）表明岩体为 S 型花岗岩，说明其物质来源于上地壳，是经过地表风化作用的变沉积岩重熔形成。所以认为加里东期眼球状花岗闪长岩可能是长城系星星峡群重熔形成。

相反金矿矿石与其它非赋矿岩石具有明显不同的稀土元素特征（表 5-7；图 5-5d、f、g、h），说明在遭受剪切变形的过程中，矿石与围岩遭受了相同的或类似的构造一流体作用过程，所以在整个脆-韧性转换变形动力成矿过程中，矿石对原岩的稀土元素特征具有明显的继承性。成矿过程实质上就是某些岩石经历一系列

复杂的地质作用过程，使其中有用元素富集的过程，也是岩石变成矿石的过程（王居里，2000）。同时统计表明长城系星星峡群和加里东晚期花岗闪长岩都具有较高金丰度（高于地壳克拉克值），以上均反映了二者可能是成矿物质的主要来源之一。

2、望峰金矿

由稀土元素组成表 5-7、稀土元素配分模式图 5-5b 可见，望峰金矿矿石稀土∑REE 总量为 125.2×10^{-6}~165.8×10^{-6}；$(La/Yb)_N$ 为 4.746~8.061，稀土分配曲线为右倾，轻稀土富集型，δ_{Eu} 为 0.52~0.73，具中等一强烈的铕负异常。与萨日达拉金矿矿石相比，两者具有相似性，但望峰金矿的稀土∑REE 值相对较低，δ_{Eu} 值偏高，反映出相对较强烈的铕负异常信息。

由稀土元素组成表 5-7、稀土元素配分模式图 5-5 可见，同萨日达拉金矿一样，望峰金矿矿石与围岩及其长城系星星峡群、加里东晚期花岗闪长岩具有相同或相近的稀土元素特征，其中矿石围岩稀土总量（表 5-7）变化不明显，∑REE 为 145.58~210.963，$(La/Yb)_N$ 为 8.710~9.413，分配型式为右倾轻稀土富集型，δ_{Eu} 为 0.51~0.62，具有中等的负铕异常。而与区内其它地层和岩体具有明显不同的稀土元素特征，同样说明在矿石形成过程中继承了地层的稀土元素组成，即地层的稀土元素随热液进入矿体时并未发生明显分馏。

综上所述，萨日达拉金矿和望峰金矿的矿石与围岩和长城系星星峡群、加里东晚期花岗闪长岩稀土总量和特征参数及配分曲线的一致性，说明成矿物质来源与两者极其密切，在遭受剪切变形的过程中，矿石与围岩遭受了相同的或类似的构造-流体作用过程，所以在整个脆-韧性转换变形动力成矿过程中，矿石对原岩的稀土元素特征具有明显的继承性，长城系星星峡群和加里东期眼球状花岗闪长岩是成矿物质的重要来源。尽管矿石明显继承了围岩的稀土元素组成特点。但是本区两金矿床的矿石都具稀土总量较高，轻稀土富集，$(La/Yb)_N$ 和$(La/Sm)_N$ 比值较高，富含碱土金属等亲基性岩的特点从侧面反映成矿物质来源于上地幔或下地壳深处的可能。所以区内金矿成矿物质来源，除考虑赋矿岩石本身的同时，还有深部来源物质的可能参与。

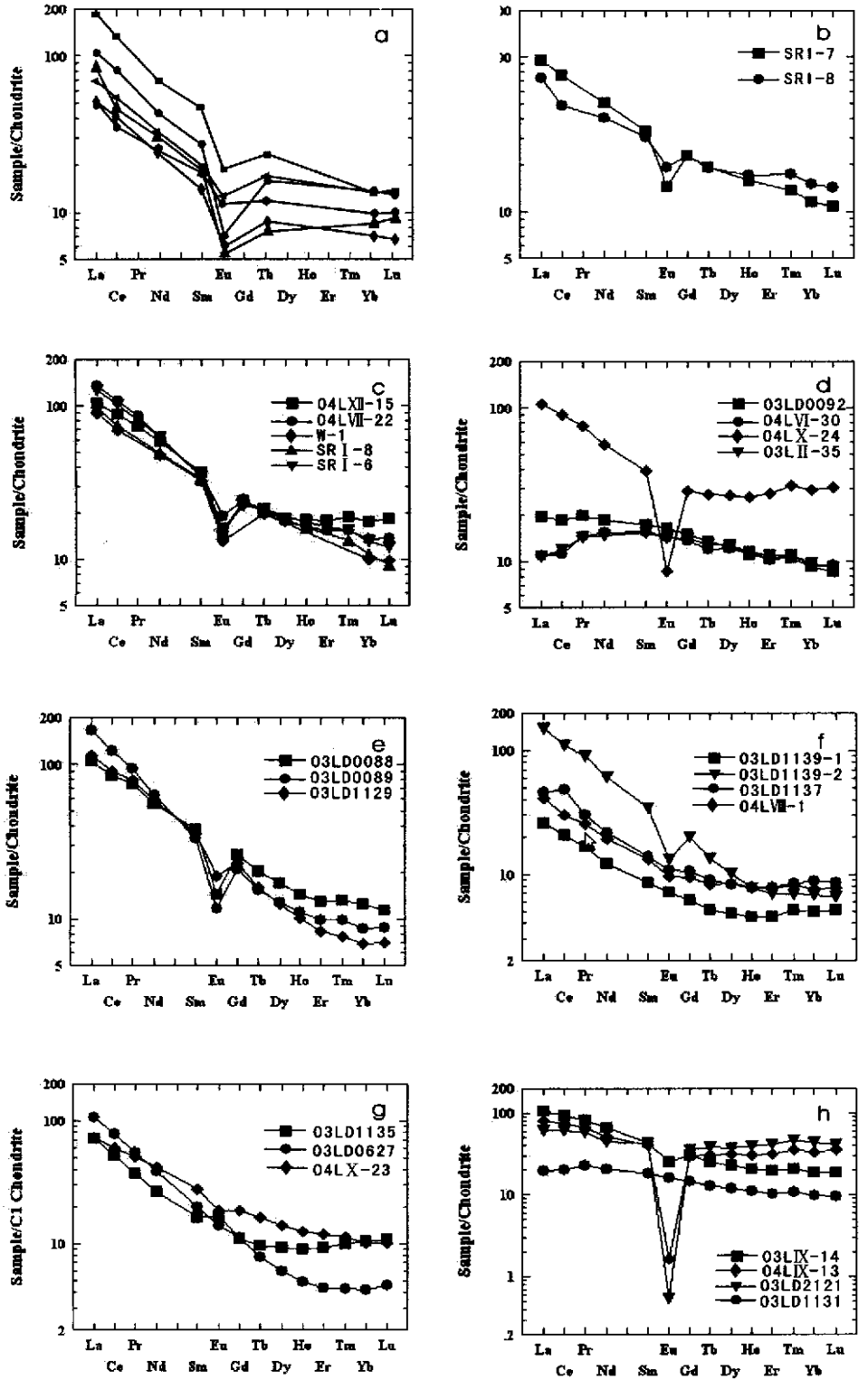


图 5-5 冰达坂韧性剪切带金矿床矿石、围岩及其矿带其它地层和岩体的稀土分配模式

a-萨日达拉金矿矿石（引自干居里报告，2000）；b-望峰金矿矿石；c-长城系星星峡群；d-前石炭博霍特组；e-加里东期花岗闪长岩；f-中上元古片麻状花岗闪长岩；g-华力西期细粒花岗闪长岩（其包括03LD0627为粗粒花岗闪长岩）；h-华力西晚期乌鲁特达坂岩体（其中03LD1131和04LIX-14为辉长辉绿岩，03LD2121和04LIX-13为钾长花岗岩）

表 5-7　萨日达拉金矿和望峰金矿区稀土元素分析数据表

序号	样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	dEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$
1	SRⅠ-7	望峰金矿矿石	26.8	46.6		28.7	6.95	1.67	7.05	1.1		1.45		0.619	3.72	0.541		125.2	0.73	4.746	2.346
2	SRⅠ-8	望峰金矿矿石	35	72.5		36.1	7.7	1.26	7.03	1.12		1.34		0.486	2.86	0.411		165.81	0.52	8.061	2.766
3	LⅦ-22	长城系星星峡（斜长片麻岩）	49.155	103.353	11.737	44.106	8.174	1.658	7.516	1.146	6.66	1.384	3.823	0.551	3.352	0.522	34.308	277.45	0.64	9.660	3.659
4	LXⅡ-15	长城系星星峡（绢云绿泥石英片岩）	37.713	83.813	10.042	41.37	8.491	1.331	7.278	1.219	7.007	1.544	4.428	0.668	4.337	0.693	36.073	246.01	0.51	5.728	2.703
5	W-1	望峰金矿围岩（片麻岩）	32.9	66.1		34	7.43	1.15		1.15					2.47	0.376		145.58	0.82	8.774	2.694
6	SRⅠ-6	望峰金矿围岩（片麻岩）	46.3	96.9		44.6	8	1.37	6.86	1.22		1.47		0.547	3.24	0.456		210.963	0.56	9.413	3.521
7	SRⅠ-8	望峰金矿围岩（片麻岩）	35.3	71		35.1	7.66	1.25	7.39	1.2		1.36		0.477	2.67	0.352		163.76	0.51	8.710	2.806
8	04LVI-30	前石炭博霍特组（阳起绿泥片岩）	4.029	10.802	1.990	10.951	3.602	1.26	4.208	0.695	4.613	0.980	2.547	0.393	2.327	0.360	22.857	71.61	0.99	1.141	0.681
9	04LIX_24	前石炭博霍特组（硅质岩）	38.635	86.710	10.403	41.032	8.957	0.75	8.723	1.572	10.258	2.227	6.823	1.110	7.210	1.153	60.724	286.29	0.26	3.530	2.625
10	03LII-35	前石炭博霍特组（凝灰质粉砂岩）	3.935	11.399	1.974	10.571	3.575	1.24	4.322	0.757	4.854	0.986	2.714	0.39	2.406	0.347	23.23	72.70	0.97	1.078	0.670
11	03LD0092	前石炭博霍特组（凝灰质粉砂岩）	7.197	17.809	2.715	13.158	3.990	1.429	4.591	0.78	4.688	0.941	2.570	0.373	2.292	0.324	24.336	87.19	1.03	2.068	1.098
12	03LD0088	加里东晚期花岗闪长岩	38.199	81.225	10.237	39.610	8.758	1.247	7.878	1.181	6.51	1.234	3.239	0.467	3.087	0.432	31.118	234.42	0.45	8.151	2.654
13	03LD0089	加里东晚期花岗闪长岩	42.248	87.105	10.820	41.590	8.229	1.655	7.014	0.935	4.762	0.857	2.069	0.273	1.714	0.264	19.754	229.29	0.66	16.237	3.124
14	03LD1129	加里东晚期花岗闪长岩	60.957	116.732	12.973	44.719	7.700	1.022	6.498	0.898	4.874	0.948	2.438	0.352	2.142	0.334	24.439	287.02	0.43	18.746	4.817
15	LD1139-1	中上元古片麻状花岗岩	9.497	19.531	2.266	8.549	1.973	0.625	1.895	0.296	1.833	0.385	1.128	0.182	1.233	0.197	10.126	59.72	0.98	5.075	2.929
16	LD1139-2	中上元古片麻状花岗岩	55.171	106.134	12.352	43.567	7.848	1.153	6.083	0.776	3.846	0.662	1.713	0.244	1.687	0.251	16.661	258.15	0.50	21.543	4.277

表 5-7　萨日达拉金矿和望峰金矿区稀土元素分析数据续表

序号	样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	dEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$
17	03LD1137	中上元古片麻状花岗岩	16.833	46.152	4.087	15.372	3.204	0.938	3.229	0.522	3.165	0.662	1.973	0.299	2.182	0.327	18.323	117.267	0.89	5.082	3.197
18	04LVⅢ-1	中上元古片麻状花岗岩	14.938	28.887	3.509	13.752	3.058	0.841	2.904	0.483	3.183	0.675	1.917	0.291	1.896	0.294	16.940	93.5666	0.86	5.19	2.972
19	03LD2121	钾长花岗岩	22.271	58.500	7.967	31.547	9.786	0.047	10.738	2.215	14.272	3.352	10.152	1.641	10.798	1.57	83.813	268.669	0.01	1.359	1.385
20	04LIX-13	钾长花岗岩	29.244	71.625	8.990	36.001	9.215	0.142	8.981	1.766	11.804	2.588	7.758	1.248	8.205	1.344	71.194	270.105	0.05	2.348	1.931
21	04LIX-14	辉长辉绿岩	38.852	89.451	11.255	46.859	10.036	2.158	9.274	1.460	8.559	1.764	4.9	0.737	4.559	0.715	44.730	275.309	0.68	5.614	2.356
22	03LD1131	辉长辉绿岩	7.248	19.341	3.087	14.486	4.192	1.405	4.492	0.743	4.528	0.929	2.533	0.38	2.410	0.36	23.81	89.9435	0.99	1.982	1.052
23	04LX-23	华力西期细粒花岗岩	17.341	36.421	4.809	19.582	4.236	1.071	3.823	0.613	3.589	0.712	1.965	0.291	1.724	0.258	17.627	114.06	0.81	6.627	2.491
24	03LD1135	华力西期细粒花岗岩	16.919	31.758	3.505	12.331	2.476	0.982	2.250	0.359	2.347	0.507	1.528	0.254	1.762	0.273	13.972	91.2226	1.26	6.325	4.157
25	03LD0627	华力西期细粒花岗岩	25.138	47.976	5.235	17.798	3.041	0.815	2.277	0.29	1.514	0.276	0.725	0.11	0.722	0.116	7.328	113.36	0.92	22.94	5.03

注：1～2，5～7 数据引白吴锡丹等（1999）；

3～4，8～26 均为新疆萨日达拉 1：5 万区域地质矿产调查测试，测试单位：中国科学院地质与地球物理研究所测试中心，仪器为高分辨等离子质谱 ICP-MS；

其中 12～14 为加里东期冰达坂岩浆序列；20～23 属于华力西中晚期乌鲁特达坂岩浆序列；24～26 为华力西早中期黑熊沟岩浆序列

第三节　流体包裹体地球化学

流体包裹体的研究，是了解成矿流体的直接手段。本研究总结了前人对萨日达拉金矿相关研究的流体包裹体地球化学特征，同时对望峰金矿床矿石中石英所赋存的流体包裹体岩相学特征进行了详细的显微镜观察，并用均一法测定了矿石中石英所赋存的流体包裹体的均一温度和冰点温度（含盐度）。使用的仪器是LinkamTHMS600 型冷/热台，测温范围是-196~+600℃，降温速度可控制在0.01~130℃。误差在0~500℃范围内为±0.1℃，在-56.6~0℃范围内为±0.2℃。

一、萨日达拉金矿床

1、流体包裹体特征和类型

前人对萨日达拉金矿矿石石英中的流体包裹体显微观察（王居里等，1995；刘养杰，1994）总结如下特点：区内包裹体发育不是很好，常呈条带状分布于石英颗粒边缘及硫化物附近，分布不均且直径很小，主要为气液两相包裹体和少部分液相单相包裹体，包裹体形态多为椭圆形或近似椭圆形，少部分为圆形或近似圆形和不规则状，长径为1~2μm，多数为2~5μm，>10μm的包裹体很少。单液相包裹体的直径相对较大，气液两相包裹体直径很小（<3μm），局部密集分布。气液包裹体的气液比一般为5~10%。包裹体多无色透明，或带淡淡的褐色，或棕褐色色调，认为是包裹体中有机气体含量不均一造成。两相包裹体中气液相界线清晰。

2、成矿温度和压力

王居里等（1995）对萨日达拉金矿区及其周边的黄铁矿的爆裂测温结果（表5-11）表明，黄铁矿的成矿温度范围在170~410℃，并划分出四个温度区间：170~240℃；270~300℃；335~360℃；405~410℃，其中270~300℃和335~360℃是区内最重要的成矿阶段。反映了成矿的多阶段性和叠加复合的特点。王居里（2001）根据成矿温度及其各种矿化之间的关系、矿物共生组合、矿石组构等特征，将萨日达拉金矿主成矿期划分为了四个成矿阶段（第四章所述）。

表5-11　萨日达拉金矿矿物爆裂温度表

序号	样号	矿物	爆裂温度（℃）	序号	样号	矿物	爆裂温度（℃）
1	NⅠ-23	黄铁矿	230	6	SⅣ-12	黄铁矿	270
2	NⅠ-24	黄铁矿	240	7	SⅤ-4	黄铁矿	175
3	NⅢ-4	黄铁矿	300	8	SⅤ-7	黄铁矿	170，340
4	SⅠ-28	黄铁矿	360，405	9	BⅡ10	黄铁矿	410
5	SⅡ-15	黄铁矿	360				

注：以上数据据王居里（2000）《新疆天格尔峰南坡金矿床富集规律和找矿评价研究专题报告》

刘养杰等（1994）估算萨日达拉金矿成矿压力在29.7~30.7MPa之间，根据地

壳岩层负荷压力与流体压力相等的假设，按岩层平均密度计算，压力随着岩层深度约以 25MPa/km 的速率增加，计算其成矿深度约 1~1.5km 左右，属中浅深度成矿环境。

3、成矿流体成分

据刘养杰等（1994）对萨日达拉金矿成矿流体气体成分主要由 H_2O、CO_2 和 CO，其次为 H_2、N_2 和 CH_4。其按照李秉论（1982）定义的还原参数公式 $(CH_4+H_2+CO)/CO_2$ 得出还原参数为 0.0635，示意成矿是弱还原环境，而还原参数远远小于 1，说明成矿热液为弱还原的变质热液（何知礼，1981）。CO_2/H_2O 比值为 0.119，其是反映成矿深度的一个指数，认为（何知礼，1981）该比值大于 1，反映成矿环境为深成或超深成的；比值小于 1 为中浅深度成矿环境，综上所述萨日达拉金矿成矿于中浅深度，这与上温度、压力得出的结论一致。

二、望峰金矿床

1、流体包裹体特征和类型

本次研究首先用光学显微镜对望峰金矿流体包裹体形貌等(图版III)特征进行了观察研究，结果如表 5-12。矿区包裹体发育不是很好，分布极不均匀，多沿石英颗粒及硫化物附近呈群密集分布或随机分布。包裹体多为淡黄色或黄色，少数无色透明或棕黄色色调，两相包裹体中气液相界线清晰。包裹体形状主要为近似椭圆形、近似圆形、三角形及不规则状，包体普遍直径很小，长径一般为 1~5μm，多数为 2~5μm，见有约 10μm 的包裹体，其个体较小，所以对冰点温度的测定带来很大难度。包裹体绝大部分为气液包裹体，少数为单相包裹体，个别样品存在含 CO_2 的三相包裹体。气/液比值变化范围大，最小为 1%，最大可达 50%，但主要分布于 5~15%之间。其中包裹体类型有以下两类：

(1)向液相均一的气液包裹体，这种包裹体最多，有 50 个，占 89.3%。其分布于各个成矿阶段。

(2)向气相均一的气液包裹体，这种包裹体有 6 个，占 10.7%，且其相对集中于高温成矿阶段。其从侧面反映成矿早期阶段来自中深部的高温高压含矿流体进入上部脆韧性变形转换部位，因减压而发生过强烈沸腾，从而引起含矿流体的温度压力、pH 和 Eh 的突变，使金成矿元素化学位能降低、金络合物稳定性下降而沉淀成矿。

2、流体包裹体显微测温

对望峰金矿 7 组矿石石英包裹体测温共获得 56 件包裹体均一温度值，由包裹体均一温度的直方图（图 5-6）可见，成矿温度明显集中在 3 个区间：即 434.5~342.1℃，331.2~228.2℃和 221.0~151.2℃，分别代表高温、中温和低温 3 个

成矿阶段。在 3 个温度区间中，342.1℃以上的数据较少，仅有 8 组，占 14%，而 342.1℃以下的数据又多分别集中在 331.2~228.2℃的范围，有 31 组，占 56%，和 221.0~151.2℃的范围有 17 组，占 30%，故成矿作用应主要发生在中低温阶段(一般认为高温热液矿床的成矿温度大于 360℃。这一温度范围和分布特点与陈衍景等（1998）对望峰金矿石英流体包裹体的均一温度范围(120~520℃）和分布特点(120~240℃； 240~320℃；360~520℃）基本是一致的。以上均说明了望峰金矿成矿的多阶段复合叠加的特点。

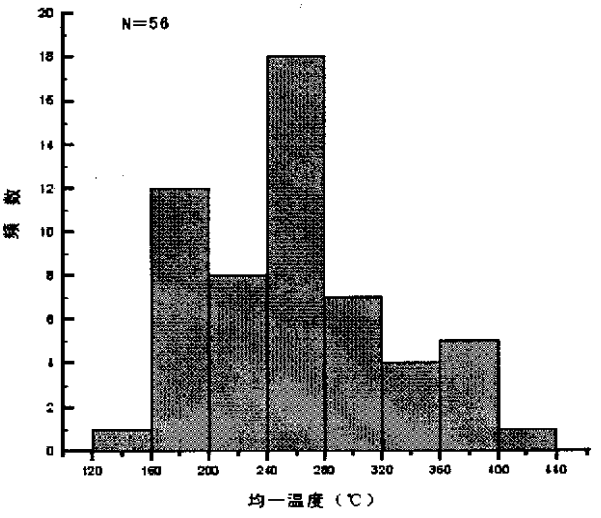


图 5-6 望峰金矿石英包裹体均一温度直方图

望峰金矿石英包裹体均一温度分布特点与根据矿物共生组合、矿石组构、各种矿化之间的关系及含金性等特征划分的热液成矿期是近一致的。在原划分基础上，依据成矿温度把望峰金矿热液成矿期也可归纳为高、中、低温成矿阶段。

高温热液成矿阶段(434.5~342.1℃)：（黄铁矿一石英阶段）硫化物种类较少，黄铁矿沿糜棱面理分布，有少量自然金以晶隙金和裂隙金形式与黄铁矿伴生，金富集程度低。

中温热液成矿阶段(331.2~228.2℃)：（自然金一多金属硫化物阶段）为区内最重要的成矿阶段，矿物组合较复杂，除自然金外，金属硫化物有黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等，但主体为黄铁矿。该期金的矿化富集程度高，形成的大量自然金呈粒状、各种不规则状产于黄铁矿内和黄铁矿裂隙中，或呈不规则状分散或集中产于石英矿物显微裂隙中。蚀变主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化。

低温热液成矿阶段(221.0~151.2℃)：（黄铁矿一碳酸盐化阶段）形成含少量黄铁矿的细小石英脉，是韧性剪切变形末期的产物。多见碳酸盐化、硅化。

表 5-12　　望峰金矿包裹体特征表

序号	样号	产地	分布	包裹体大小（μm）	颜色	形状	类型	气液比（%）	均一温度/℃	冰点	备　注
1	YD2-BT1	2 号矿脉	随机分布	个体较小，5~2	多数为淡黄色，少数无色	近似椭圆形、不规则状	气　液包裹体	分布于 5~15，以 8~15 为主	178.0~221.0（5）	-0.9~-1.2（2）	均是加热到液相均一
2	YD2-BT2	2 号矿脉边部	随机分布	个体变化不大，1~4	为淡黄色和黄色，	近似圆形、三角形及不规则状	气　液包裹体	绝大多数都约为 5，极少数可达 10	179.2~200.2（8）	-1.4~-2.0（2）	均是加热到液相均一
3	YD4-BT1	4 号矿脉	随机分布	个体变化较小，1~4	多数为淡黄色，少数黄色	近似椭圆形、三角形及不规则状	气　液包裹体	分布于 2~10 之间。绝大多数 2~5	198.7~254.2（11）	-0.7~-5.1（10）	均是加热到液相均一
4	YD5-BT1	5 号矿脉	随机分布	个体变化不大，2~4	多数为淡黄色，少数棕黄色	近似椭圆形、圆状或不规则状	气　液包裹体	比值较大，8~15，多分布于 10~15 之间	342.1~434.5（5）		仅在 3 个包裹体中的测定冰点。其中 2 个向气相均一
5	YD5-BT2	5 号矿脉边部	随机分布	个体变化不大，2~4	多数为淡黄色，少数棕黄色	近似椭圆形、圆状或三角状	气　液包裹体	分布于 4~12，但以 5~8 为主体	151.2~331.2（7）	-1.4（1）	其中 2 个向气相均一
6	YD6-BT1	6 号矿脉	随机分布	个体变化较小，1~4	为淡黄色和棕黄色	近似椭圆形、圆状、三角形及不规则状	气　液包裹体	分布范围较大，主体在 5~10，最大可达 50	258.4~386.0（11）	-1.4~-4.1（4）	其中 2 个向气相均一，其温度为 342.1 和 330
7	YD6-BT2	6 号矿脉	随机分布	个体变化不大，2~4	为黄色和淡黄色	近似椭圆形、圆状、三角形及不规则状	气　液包裹体	分布于 2~10 之间。绝大多数为 5 左右	268.3~290.2（9）	-1.3（1）	均是加热到液相均一

注：1、括号中的数字代表单个样品的测试点数

2、以上数据均为新疆萨日达拉 1∶5 万区域地质矿产调查测试矿石中石英所赋存的流体包裹体的均一温度和冰点。测试单位：西安长安大学动力开放实验室包裹体室测定，仪器是 LinkamTHMS600 型冷/热台，误差在 0~500℃范围内为±0.1℃，在-56.6~0℃范围内为±0.2℃。

3、流体包裹体的冰点及其对应的盐度的计算

在测温过程中，为了确定成矿流体的盐度，我们测定了 H_2O-NaCl 体系包裹体的冰点，并根据所获得的冰点数据在 Bondnar（1993）有关 H_2O-NaCl 体系盐度与冰点(Tm_{ice})的对应参数表中查出对应的盐度(W_{NaCl}/wt%)值。

本次研究依据上面提到的估算盐度的方法，得到了望峰金矿的盐度(W_{NaCl}/wt%)绘成了直方图（图 5-7），受到包裹体的大小和气液相比例的限制，有许多包裹体在测温过程中，并未观测到冰点，仅得到望峰金矿成矿流体 20 组水溶液包裹体的冰点(Tm_{ice})（见表 5-12），冰点(Tm_{ice})测温结果分布于-0.7~-5.1℃，平均值为-2.22℃。相应的盐度(W_{NaCl}/wt%)值为 1.57%~8.00%，平均值为 3.786%。由图 5-7 可见望峰金矿盐度总体以 2.0%~3.0%为峰值，表现为一低盐度体系。

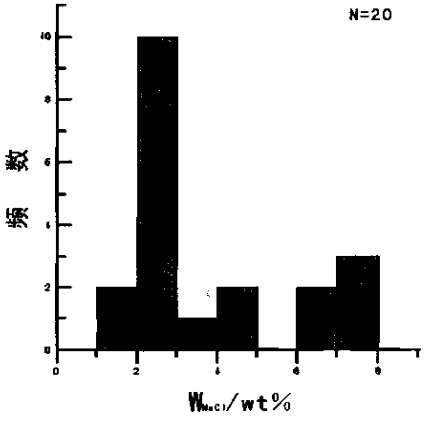


图 5-7 望峰金矿成矿流体盐度直方图

4、成矿流体密度及其压力估算与探讨

成矿流体的密度、压力的估算可依据原始均一温度和盐度数据结果，即一般通过 H_2O-NaCl 体系的温度－盐度－密度－压力相图（Bischoff et al，1991；Bodnar，1983）中投点求得 H_2O-NaCl 体系的流体密度和压力。但考虑到投点的误差较大，这里采用了我国学者刘斌等（1999）根据实验数据，利用数学模拟拟合得到的不同盐度密度和压力计算公式：

$$\rho_1 = A + B\cdot t + C\cdot t^2$$

$$A = A_0 + A_1\cdot w + A_2\cdot w^2$$

$$B = B_0 + B_1\cdot w + B_2\cdot w^2$$

$$C = C_0 + C_1\cdot w + C_2\cdot w^2$$

$$P = a + b\cdot t + c\cdot t^2$$

其中：ρ_1 为盐水溶液密度（g/cm^3）；t 为均一温度（℃）；w 为盐度（wt%）；P 为形成压力（1×10^5Pa）；A、B、C、a、b、c、A_0、A_1、A_2、B_0、B_1、B_2、C_0、C_1、C_2 均为无纲量常数，可通过相关表中查的（刘斌等，1999）

求得望峰金矿 H_2O-NaCl 体系的流体密度为 0.772~0.914g/cm^3，平均值为 0.847g/cm^3。相对应的压力在 22.13~60.87Mpa 之间，但主要范围集中分配于两个数值区间，即 22.13~40.83Mpa；47.56~60.87Mpa。若按 25MPa/km 的岩石静压力计算，据此推算它们形成深度分别为 0.88~1.63km 和 1.90~2.43km。

5、成矿流体成分

表 5-13　望峰金矿石英矿物中流体包裹体气体成分一览表

样号	岩性	期次	产出	N_2	CH_4	CO	CO_2	H_2O	R	CO_2/H_2O
T28	矿石		8 矿脉	0.0	0.120	0.067	1.330	7.483	0.140602	0.177736
T33	石英脉	晚期	12 矿脉	0.031	0.414	0.118	0.957	6.350	0.555904	0.150709
T38	石英脉		12 矿脉	0.037	0.011	0.048	1.119	10.025	0.052726	0.111621
T52	石英脉		13 矿脉	0.063	0.103	0.086	5.726	3.379	0.033007	1.694584
T71	矿石	中期	31 矿脉	0.00	0.016	0.039	0.185	4.184	0.297297	0.044216
T81	硅化片麻岩		31 矿脉	0.00	0.052	0.034	0.295	9.045	0.291525	0.032615
T91	矿石		31 矿脉	0.00	0.039	0.051	0.172	4.209	0.523256	0.040865
T96	石英脉	中期	31 矿脉	0.00	0.026	0.075	0.099	3.007	1.020202	0.032923
B-010	石英脉	早期	12 矿脉	0.000	0.051	0.014	7.253	27.346	0.008962	0.265231
B-012	石英脉	中期	12 矿脉	0.055	0.006	0.078	1.674	21.524	0.050179	0.077774
B-038	石英脉	晚期	31 矿脉	0.034	0.016	0.037	0.929	26.972	0.057051	0.034443
W01	石英脉	早期	12 矿脉	0.000	1.172	0.272	0.625	30.418	2.3104	0.020547
W02	石英脉	早期	12 矿脉	0.000	0.231	0.196	0.725	2.861	0.588966	0.253408
W03	石英脉	早期	12 矿脉	0.000	0.121	0.082	0.736	2.958	0.275815	0.248817
W04	石英脉	早期	12 矿脉	0.000	0.137	0.120	0.926	3.212	0.277538	0.288294
W06	石英脉	早期	12 矿脉	0.028	0.483	0.059	1.197	3.081	0.452799	0.38851
W10	石英脉	中期	12 矿脉	0.000	0.066	0.059	0.742	3.082	0.168464	0.240753
W11	石英脉	中期	12 矿脉	0.073	0.249	0.080	0.947	9.991	0.347413	0.094785
W12	石英脉	中期	12 矿脉	0.070	0.119	0.097	0.503	7.507	0.429423	0.067004
W17	石英脉	晚期	31 矿脉	0.042	0.181	0.058	0.795	5.947	0.300629	0.133681
W18	石英脉	早期	31 矿脉	0.000	0.078	0.045	0.483	3.006	0.254658	0.160679
W19	石英脉	晚期	31 矿脉	0.000	0.099	0.032	1.062	30.631	0.123352	0.034671
W20	石英脉	早期	31 矿脉	0.152	0.071	0.091	0.363	9.092	0.446281	0.039925

表中数据单位是 1×10^{-6}mol/g；$R=(CH_4+H_2+CO)/CO_2$

据陈衍景（2001）《天格尔－巴伦台成矿带金铜矿床成矿规律与找矿评价专题报告》

据陈衍景等（1998）测定望峰金矿床包裹体气体成分（见表 2）研究表明：气相成分中 H_2O 占气体组成的绝大部分；CO_2 的含量变化范围较大，在气体组成中次之；CH_4 含量变化较大，CO 和 N_2 含量普遍较低。成矿流体气体成分主要为 H_2O、CO_2、其次为 CH_4、CO 和 N_2。此外 CO_2/H_2O 比值是反映成矿深度的参数，何知礼（1981）认为该比值大于 1，反映成矿环境为深成或超深成的；比值小于 1 为中浅深度成矿环境，计算望峰金矿的 CO_2/H_2O 比值主要分布范围在 0.02~0.39 之间，总体反映成矿深度中浅环境。还原参数 $R=(CH_4+H_2+CO)/CO_2$ 的范围也比较大 0.0089~2.31，R 参数早期普遍高，最高可达 2.31；晚期较低，一般低于 0.2；中期平均值为 0.32，这表明成矿流体自早期至晚期的演化过程还原性降低，氧化性增强。

三、讨论与结论

1、成矿的温压条件

冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿温度的总体范围变化不大，并具有明显的相对集中分布特点，其中萨日达拉金矿爆裂成矿温度范围在 170~410℃之间，主成矿温度在 270~300℃，其次为 335～360℃成矿（王居里，1995），而望峰金矿测定的均一温度介于 151.2~434.5℃，主成矿温度在 331.2～228.2℃，其次 221.0～

151.2℃成矿。以上均说明了该区金矿成矿作用的多阶段复合叠加的特点。但成矿作用应主要发生在中低温阶段(一般认为高温热液矿床的成矿温度大于360℃)，所以该区成矿主要发生于地壳的中浅部环境。这也是冰达坂韧性剪切带经过长期演化的结果，同时也最能说明该区动力演化的多期性特点。

据刘养杰等(1994)计算了萨日达拉金矿成矿压力在29.7~30.7MPa之间，根据地壳岩层负荷压力与流体压力相等的假设，按岩层平均密度计算，压力随着岩层深度约以25MPa/km的速率增加，计算出其成矿深度约1~1.5km左右，属中浅深度成矿环境；我们依据原始均一温度和盐度数据结果，采用我国学者刘斌等(1999)根据实验数据，利用数学模拟拟合得到的不同盐度、密度和压力计算公式估算出了望峰金矿H_2O-NaCl体系的包裹体形成压力分布于22.13~60.87Mpa之间，但主要范围集中分配于两个数值区间，即22.13~40.83Mpa；47.56~60.87Mpa。若按25MPa/km的岩石静压力推算它们形成深度分别为0.88~1.63km和1.90~2.43km。

另李华芹等(1995)对望峰金矿含CO_2多相包裹体也进行了压力估算，获得了两组数据，一组为130~140Mpa，另一组为50MPa左右，其认为前者代表封闭条件下的岩石静压力，相当于深度5.2~5.6km；后者表示松弛期开放条件下成矿流体的静水压力，相当于1.9km深度，代表矿体就位的应力松弛伸展阶段。

综合所述，冰达坂地区韧性剪切带型金矿成矿作用应主要发生在中低温阶段，成矿环境属中浅深度成矿环境，金矿成矿作用具多阶段复合叠加特点。结合前人资料及本次对望峰金矿温压研究认为该区区韧性剪切带型金矿成矿主期开始的深度不应超过5.6km，随着地壳被抬升，在2.00km左右深度时矿化最强烈，在矿区抬升至1.00km之上深度时，韧性剪切变形已属末期，矿化基本结束。冰达坂地区成矿与韧性剪切带发展演化密切伴生，主成矿期应比韧性剪切变形滞后。

2、成矿流体的组成

前人对流体包裹体的成分分析结果都表明：本区成矿成矿流体成分主要为H_2O和CO_2，含有少量CO、CH_4、H_2、H_2S、N_2、O_2和SO_2等成分。本次通过对望峰金矿床和萨日达拉金矿床计算相关参数对比研究表明，冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿深度参数CO_2/H_2O比值均小于1，说明成矿作用主要发生于中浅深度弱还原环境（何知礼，1981，其认为该比值小于1为中浅深度成矿环境，比值大于1，反映成矿环境为深成或超深成的）。可见这与温度、压力得出的结论一致；两金矿床的还原参数R＝（CH_4+H_2+CO）/CO_2（李秉论，1982）总体也同样示意了成矿是弱还原环境，并且通过望峰金矿床不同期次石英脉的还原参数R对比，R参数早期向晚期较低，呈递降规律，这表明成矿流体自早期至晚期的演化过程还原性降低，氧化性增强。

3、成矿流体性质

如上所述本区成矿成矿流体成分以 H_2O 和 CO_2 为主，含有少量 CO、CH_4、H_2、H_2S、N_2、O_2 和 SO_2 等成分。本次研究通过对望峰金矿床 H_2O-NaCl 体系包裹体的均一温度和冰点温度测定，根据所获得的冰点数据在 Bondnar（1993）有关 H_2O-NaCl 体系盐度与冰点(Tm_{ice})的对应参数表中查出对应的盐度(W_{NaCl}/wt%)值，确定成矿流体的盐度。望峰金矿成矿流体的盐度(W_{NaCl}/wt%)值为 1.57%~8.00%，平均值为 3.786%，盐度总体以 2.0%~3.0%为峰值，为一低盐度体系。并依据原始均一温度和盐度数据结果求得望峰金矿 H_2O-NaCl 体系的流体密度为 0.772~0.914g/cm^3，平均值为 0.847g/cm^3。

总之，包裹体成分研究表明冰达坂地区韧性剪切带型金矿的成矿流体成分主要为 H_2O 和 CO_2，含有少量 CO、CH_4、H_2、H_2S、N_2、O_2 和 SO_2 等成分。成矿作用主要发生于中浅深度弱还原环境，成矿流体经历了早期到晚期还原性降低、氧化性增强的演化过程。这与上述碳、氢、氧等稳定同位素得出的结论是一致的，也与温度、压力变化是相对应的。

第六章　成矿作用、成矿机制和矿床模式探讨

第一节　成矿作用分析

前已述及，冰达坂地区金矿床的成矿作用从矿田、矿床、到矿体主要受到不同级别的脆-韧性转换变形控制（第三章已作了详述），具有如下特点：1）区域性韧性剪切带控制了矿带或矿田的分布；2）脆-韧性变形转换控制了金矿床、矿体甚至矿脉的分布与产出；3）多期变形控矿，金矿床经历了长期构造演化和多阶段复合叠加成矿。剪切断裂切割较深，有利于构成地壳深部物质或地幔物质上升的良好通道，所以剪切带型金矿床具有壳幔混源、多次富集成带、分段集中等动力成矿特征（翟裕生等，1999；卢纪英等，2001）。

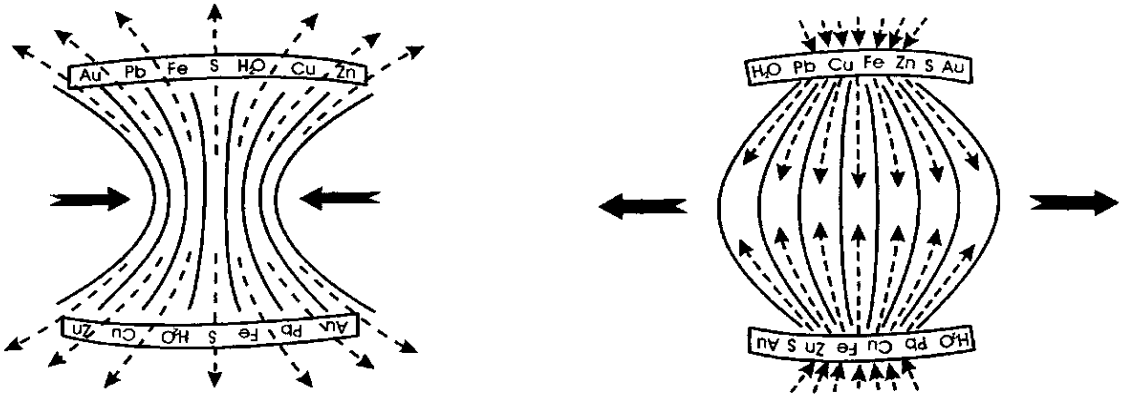
脆-韧性变形转换在该区成矿演化中起着至关重要的作用，其实质上脆-韧性变形转换作用表现为金成矿的诱因、控因和成因(杨兴科，1997，1999；张连昌，1998)。变形转换过程中的剪切、压扁、拉伸、扭曲、旋转等动力学行为是热液活动的驱动力，也为成矿热液周期性多期次反复迁移、分异、蚀变、沉淀和充填富集提供了系统的动力学条件，并在脆-韧性演化晚期形成适合于流体沉淀与矿质富集成矿的扩容空间等条件。可见脆韧性变形转换也是一个动力成矿过程，成矿控矿机制主要表现在以下两方面。

一、成矿机制

脆-韧性变形转换实质上是一个动力学过程，既是物理、化学条件的转换，同时也是应力场和能量的转换，这一过程从开始到结束自始至终都伴随着物质和能量的迁移、分散、集中和交换。其过程是一种周期性的有序演化过程，多期次的构造变形正是这种转换的外在表现，它为矿液周期性多期次反复活化、迁移、分异、蚀变、沉淀和富集提供了系统的动力学条件。脆-韧性变形转换的动力演化过程中，普遍存在着两种重要的动力成矿机制(杨兴科，1999)，在微观与宏观两个领域内影响含金矿液的迁移、充填、沉淀乃至最终的富集成矿。

断层阀模式（Sibson，1988、1990；Boullier，1992）是解释成矿机制的经典模型。其关键是宏观上地壳中分隔静水压力区和超静水压力区的不渗透阻隔层的存在。韦昌山和翟裕生(1996)认为该层位往往处于变形转换带上，可能是因为变形转换带属变质相系、物化参数等梯变地段，因此物质易于在此沉淀形成不渗透层。而且认为产生“断层-阀门”机制必须满足的四个条件：①存在近水平的不渗透层；②存在区域性水平挤压应力，使超临界流体压力仅沿水平方向产生张裂而不致撕裂不渗透层；③陡倾断层带内存在陡变的流体压力梯度，迫使流体能迅速向下充填；④岩石破裂后有大量流体涌入，充填于破裂网络中。在地幔富 C-H-O、浅一表部地壳富硫、中一下部地壳富硅（张忠实、邓军，1998）三大流体循环系统中，一般流体只在各层次内作对流、循环、物质和能量的交换。流体要突破层次性的

限制进行大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换显然是不容易的，而板块的俯冲剪切和碰撞造山活动引发的构造动力与成矿流体的多级多方式的耦合等作用造成了不同层圈自身相对封闭体系的破坏，尤其脆-韧性变形的强烈转换，促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，形成了跨层次的流体输运体系，因沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，从而使大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换成为可能（杨兴科、陈强，1998）。“断层-阀门”式机制下的循环流体从地幔至地表构成一个完整的大循环体，是宏观上多层次循环流体对多类型围岩的萃取、沟通、混合乃至金矿化富集的重要机制。



（a）　　（b）

（a）压性动力环境下流体被挤出　　（b）张性动力环境下的流体被吸入

图 6-1 “心脏脉动式”抽吸—挤出机制下流体运移示意图（据陈强、杨兴科等，2001）

脆-韧性变形的强烈转换在微观领域则表现为形变相应在压性与张性响应之间反复。张性动力响应的扩容作用抽吸流体和矿质进入变形体系，而压性响应的紧缩作用又挤压流体和矿质迁出变形体系，张、压动力响应构成了一个有机统一的动力作用过程。杨兴科等（1998）将这种动力过程形象比作为人体心脏脉动输血功能，这种“心脏脉动式抽吸-挤出”机制（杨兴科等，1998）在脆-韧性变形转换过程的微观领域内普遍存在，是流体运动、迁移、沉淀乃至富集的根本，它加速了流体在岩石、矿物体系内的循环，促进了水岩反应和物质及能量的交换。

综上所述，脆-韧性变形的强烈转换过程实质是一个动力成矿的过程。

二、控矿作用

脆-韧性变形转换控制了矿质反应的速率和富集程度，也控制了能量交换的进程，构成了良好的动态转换体系(张连昌，1996)。脆-韧性变形转换促进了由深部向地表浅部发育大规模的破裂网络，形成了跨层次的流体输运体系（杨兴科、陈强，1998）。从而流体扩散、渗透、充填、弥散等都集中在韧性剪切带与脆-韧性转换带内，成为流体活动最活跃的场所。而张性动力作用下发生形变响应形成的

扩容空间尤其是扩张裂隙，在脆-韧性演化晚期则可能成为流体沉淀与矿质富集成矿的场所。

再者当流体进入上部脆韧性变形转换部位，常常会出现构造引张区，来自中深部的高温高压含矿流体因减压而发生沸腾，或与自上而下的低温低压不同化学性质(以大气水为主)的流体混合，引起含矿流体的温度、压力、pH 和 Eh 的突变，使金成矿元素化学位能降低、金络合物稳定性下降而沉淀成矿。

上述分析表明，脆韧性变形转换部位是剪切带型金矿成矿的最佳构造部位。

第二节　成矿物质来源和流体成矿作用

一、成矿物质来源

1、围岩含矿性

表 6-1　萨日达拉金矿区金背景参数统计表

参数 / 岩性	样品个数	平均值	最大值	最小值	标准方差	变异系数
加里东期花岗闪长质糜棱岩	78	9.75	100.00	1.60	14.67	1.50
长城系星星峡群	34	10.16	120.00	1.60	24.93	2.45
基性岩脉	7	133.6	200	6.00	79.34	0.59

注：Au 单位为 1×10^{-9}

在冰达坂地区，韧性剪切带型金矿床主要的含矿围岩为强变形的加里东期花岗闪长岩体和长城系星星峡群。含矿围岩本身的金丰度总体高于上地壳中金的丰度值 4×10^{-9}（黎彤，1976）。对萨日达拉金矿区长城系星星峡群地层和加里东晚期花岗闪长等不同岩石共计 124 件代表性样品 Au 元素含量进行了统计（表 6-1）。由表可见 Au 在加里东晚期花岗闪长岩和长城系星星峡群中的平均值相近，分别为 10.16×10^{-9} 和 9.75×10^{-9}，是金在地壳中丰度值的近 2 倍多；基性岩脉 7 个样品平均 4.21×10^{-9}，基本与金在地壳中的丰度值持平。综合碳、氢、氧、硫、铅稳定同位素的研究认为这二者都为成矿提供了重要物质来源。

2、稳定同位素证据

前述（第五章）带内典型金矿床除在地质构造特征具一致性外，二者稳定同位素组成上同样具有相近或相似性。碳、氢、氧、硫、铅稳定同位素分析研究表明，金成矿作用与造山作用的演化密切相关，冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿物质来源具有多源特点，既有深源物质的参与，也有地壳浅部物质的混入。分析认为在剪切变形、变质过程中，伴随着构造和流体作用，深部地壳和地幔中的金等成矿元素和其它组分活化，迁移，不断向剪切带内聚集形成含矿流体，并从强韧性应变区向弱应变区方向迁移，期间伴随有强烈脆-韧性变形的强烈转换，一方面促使流体经历了反复运移，并在循环运移过程中萃取了所流经地层和岩石中的金等

成矿元素和硫等组分，另一方面促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，从而使物质和能量能够进行大规模跨层次、跨体系的交换和对流循环。致使成矿热液发生大规模跨层次流动，一方面从地壳深部带入一部分成矿物质，另一重要方面是不断从流经地层和岩石中摄去成矿物质。

3、稀土元素特征

研究表明（第五章）萨日达拉金矿床和望峰金矿床矿石、围岩和长城系星星峡群、加里东晚期花岗闪长岩具有相同或相近的稀土元素特征。相反与区内其它地层和岩体具有明显不同的稀土元素特征。说明成矿物质来源与含矿地层长城系星星峡群、赋矿岩体加里东晚晚期花岗闪长岩极其密切，在遭受剪切变形的过程中，矿石与围岩遭受了相同的或类似的构造-流体作用过程，所以在整个脆-韧性转换变形动力成矿过程中，矿石对原岩的稀土元素特征具有明显的继承性。尽管矿石明显继承了围岩的稀土元素组成特点。但是两典型金矿床的矿石都具稀土总量较高，轻稀土富集，$(La/Yb)_N$ 和$(La/Sm)_N$ 比值较高，富含碱土金属等亲基性岩的特点从侧面反映成矿物质来源于上地幔或下地壳深处的可能。所以区内金矿成矿物质来源，除考虑赋矿岩石本身的同时，还有深部来源物质的可能参与。

据王居里等（2001）对萨日达拉金矿 19 粒自然金的电子探针分析研究表明：其中有一半以上含有一定量的铂和钯，w_{Pt}=0.04%~0.24%，w_{Pd}=0.02%~0.26%，可见铂和钯在自然金中的含量大大超过它们在地壳中的丰度($wPt=0.05\times10^{-6}$，$wPd=0.01\times10^{-6}$；黎彤，1976)。另据炎金才（1991）对望峰金矿矿石研究发现，自然金、银金矿中 Pt 可达 0.77%~1.13%。铂族元素在地壳、上地幔、下地幔及地核中的含量依次增高(黎彤，976)，在地幔物质分异过程中，铂族元素富集在难熔的残余体中，因而由地幔分异出来的地壳中铂族元素的丰度最低(刘英俊等，1987)。所以由此推断区内成矿物质有来源于地壳深部或上地幔的可能，具有幔源成因的特点。

4、讨论

通过以上围岩含矿性、稳定同位素分析研究和稀土元素对比分析及其电子探针分析表明，带内典型金矿床萨日达拉金矿床和望峰金矿在地质构造特征、稳定同位素组成和稀土元素特征具有一致的相近或相似性。冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿物质来源具有多源特点，成矿物质主要来源于长城系星星峡群和加里东晚期眼球状花岗闪长岩，同时还有深部来源物质的参与。

二、成矿流体来源、运移和沉淀

1、流体来源

前已述及（第五章），金成矿流体主要有两种来源，动力变质热液来源和大气降水来源（陈华勇等，2000），早中期成矿流体以变质热液为主，大气降水在中期就参与了流体的成矿作用，晚期以大气降水热液为主。成矿流体经历了从早期变质热液，经变质热液与大气降水热液的混合热液，向晚期大气降水热液演化。所以主成矿期流体主要以变质热液为主，并伴有大气降水热液的混入，是变质热液和大气降水热液的混合热液。

分析认为在剪切变形、变质过程中，伴随着构造和流体作用，首先是深部地壳或地幔中的金等成矿元素和其它组分活化，迁移，不断向剪切带内聚集形成含矿流体，并从强韧性应变区向弱应变区方向迁移，期间伴随有强烈脆-韧性变形的强烈转换，一方面促使流体经历了反复运移，并在循环运移过程中萃取了所流经地层和岩石中的金等成矿元素和硫等组分，另一方面促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，从而使物质和能量能够进行大规模跨层次、跨体系的交换和对流循环。致使成矿热液发生大规模跨层次流动。成矿中晚期也有自上而下的低温低压不同化学性质以大气水热液的加入，其在上部脆-韧变形转换部位与自中深部的高温高压含矿热液混合而导致金成矿元素稳定性下降而沉淀成矿。

2、流体性质

上一章已论述了冰达坂地区韧性剪切带型金矿成矿作用应主要发生在中低温阶段，成矿环境属中浅深度成矿环境，金矿成矿作用具多阶段复合叠加特点。结合前人资料及本文对望峰金矿温压研究认为该区区韧性剪切带型金矿成矿主期开始的深度不应超过 5.6km，随着地壳被抬升，在 2.00km 左右深度时矿化最强烈，在矿区抬升至 1.00km 之上深度时，韧性剪切变形已属末期，矿化基本结束。冰达坂地区成矿与韧性剪切带发展演化密切伴生，主成矿期应比韧性剪切变形滞后。

本区成矿成矿流体成分以 H_2O 和 CO_2 为主，含有少量 CO、CH_4、H_2、H_2S、N_2、O_2 和 SO_2 等成分。对望峰金矿床 H_2O-NaCl 体系包裹体测温估算本区成矿流体的盐度(W_{NaCl}/wt%)为 1.57%~8.00%，平均值为 3.786%，盐度总体以 2.0%~3.0%为峰值，为一低盐度体系。H_2O-NaCl 体系的流体密度为 0.772~0.914g/cm^3，平均值为 0.847g/cm^3。成矿作用主要发生于中浅深度弱还原环境，成矿流体经历了早期到晚期还原性降低，氧化性增强的演化过程。这与上述碳、氢、氧等稳定同位素得出的结论是一致的，也与温度、压力变化是相对应的。

3、流体的传质作用

王全伟等（2002）研究表明剪切带内流体渗透作用构造应力条件是其重要的控制因素，另外还受到岩石变形状态的影响，裂隙和劈理的存在也将大大地增加其渗透距离。

中浅层次的脆-韧性变形转换部位围压减小，岩石孔隙度及裂隙随之增加，尤其是脆-韧性变形的强烈转换，促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，使地表和地下流体可以连通而成为开放体系，形成了跨层次的流体输运体系，因沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，从而使大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换成为可能。因此脆-韧性变形转换部位内既有自下而上从地壳深部或地幔上升的含有大量成矿物质的流体；又有从上而下的大气降水，当后者进入下部被加热时，在热驱动作用下，流体将产生对流循环运动，广泛地从围岩中淋滤出部分成矿物质形成成矿热液。这种对流中伴随着热和矿质的扩散作用和双扩散对流作用，它的传质速率较前述扩散和渗透方式要快。在剪切带内由于脆-韧性动力演化过程的复杂性，各种动力作用既相互竞争又相互依存，因此其形变相应也在压性与张性响应之间反复。这种构造应力周期性积累与释放，张、压响应产生的空间开合的动力过程是一个动态循环过程，从而一方面构成来自中深部的高温高压含矿流体在脆韧性变形转换部位因减压而发生沸腾导致沉淀成矿，另一方面其与自上而下的低温低压不同化学性质的以大气水为主的流体混合，引起含矿流体的温度、压力、pH 和 Eh 的突变，使金成矿元素化学位能降低、金络合物稳定性下降而在有利部位沉淀成矿。同时如此周期性的含矿流体运移、积聚，最后形成区内广泛的蚀变与矿化，

总之，这一过程中流体大规模跨层次、跨体系的对流循环，同时对金矿成矿元素活化，迁移，乃至最后的富集沉淀成矿起到了极其重要的媒体传输作用，即传质作用。

4、矿质富集机制

金在热液中主要迁移形式受介质的温度、氧化还原条件、酸碱度、氯和硫的浓度等因素影响，其中尤以氧化还原条件的影响最为显著。在氧化环境中金主要呈氯化物络合物、羟络合物、氯一羟络合物及胶体状态迁移形式。包裹体研究表明韧性剪切带型金矿床的成矿流体总体反映出中低温、低盐度和弱酸性、弱还原的性质，有助于 SO_4^{2-}和 S^{2-}的转化，所以成矿元素主要以硫氢络合物形式迁移，从深部向浅部，由韧(塑)性变形带向脆性剪切变形带迁移富集成矿。王全伟等（2002）研究认为当成矿流体处于剪切带的不同部位时，受环境的温压和所在空间制约，H_2O、CO_2 和 H_2S 等挥发相在流体中的溶解量直接影响流体的酸碱度和配位体(如 HS^-、Cl^-)等的浓度，决定了成矿反应的进行。所以挥发相在气-液相之

间的平衡是成矿反应进行的决定性因素。

研究发现冰达坂地区硅化、黄铁矿化、绢云母化、黑云母化、绿泥石化等蚀变与金矿化密切伴随，总体蚀变与金矿化基本呈正相关关系。这样在成矿热液与围岩之间必然存在有下列化学反应式：

$$[Au(HS)_2]^- + Fe^{2+} = Au\downarrow + FeS_2 + 2H^+ \quad (1)$$

$$[Au(HS)_2]^- + \frac{1}{2}H_2O = Au\downarrow + \frac{1}{4}O_2 + 2HS^- + H^+ \quad (2)$$

$$[Me(HS)_3]^- = MeS_2 + 2HS^- + H^+ \quad (3)$$

$$Pl + K^+ + H^+ \rightarrow Ser\downarrow + SiO_2\downarrow + Ca^{2+} + Na^+ \quad (4)$$

$$Kf + H^+ \rightarrow Ser\downarrow + 2SiO_2\downarrow + K^+ \quad (5)$$

$$Bi + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow Chl\downarrow + SiO_2\downarrow + K^+ + H_2O \quad (6)$$

式中：Me 为 Pb、Zn 等；Pl 为斜长石；Kf 为钾长石；Ser 为绢云母；Bi 为黑云母；Chl 为绿泥石

在深层次剪切带内，由于处于高温、高压条件下，流体中 H_2O、CO_2 和 H_2S 处于溶解状态，CO_2 和 H_2S 大量溶解，使流体的酸度大大提高，在反应(1)和(2)中，金属元素配位体的溶解度保持较高的水平，这样有利于成矿流体萃取流经围岩中的成矿元素，同时还极有利于成矿元素的迁移。在中浅层次剪切带内，流体处于开放体系，温压降低，流体沸腾使 H_2O、H_2S、CO_2 和 SiO_2 出溶，(4)、(5)、(6)类反应向右进行，围岩发生强烈蚀变，如硅化、绿泥石化、绢云母化。此时(1)、(2)、(3)反应均向右进行，极有利于金沉淀成矿。这些反应形成了大量的黄铁矿等金属硫化物。热液中由于黄铁矿等金属硫化物的沉淀析出，降低了硫离子的浓度，破坏了金硫络合物的稳定性，从而造成金硫络合物的离解，进一步促进金离子以自然金的形式沉淀，形成了自然金与黄铁矿等金属硫化物、石英密切共生，并伴有强烈的围岩蚀变现象。

综合以上分析，可以看出冰达坂地区韧性剪切带型金矿的成矿物质来源具有多样性，壳源和幔源均存在。成矿流体以变质热液（具深源特征）和大气降水热液的混合热液特征为主。成矿元素很可能主要来自赋矿围岩，成矿流体对矿质的活化、迁移和富集成矿起到了重要的作用。

第三节　金矿床年代学探讨

一、地质分析

从区域地质角度考虑，长城系星星峡群、蓟县系卡瓦布拉克群和前石炭系博霍特组均发生了剪切变形，只是它们的剪切变形程度表现不同。其中前石炭系博霍特组被未变形的上石炭统奇尔古斯套组覆盖。

综上分析，冰达坂韧性剪切变形应在晚石炭世之前。本文研究表明冰达坂地

区金矿床主要受冰达坂韧性剪切带中的脆-韧性变形转换控制，金矿床成矿主要发生在华力西晚期。

二、同位素地质年龄测定

李华芹（1998）对望峰金矿进行了成矿年代学研究，用单颗粒锆石表面蒸发法测定了赋矿围岩糜棱岩化花岗闪长岩的侵位年龄为 437±24Ma（(207Pb/206Pb)r 平均表面年龄）和 435±10Ma（直方图年龄），说明该岩体形成于加里东中晚期，我们在萨日达拉 1：5 万区调项目中对该岩体进行了单颗粒锆石（SHRIMP）测年，年龄为 432±5.6Ma 进一步肯定了该岩体的侵位时代。说明加里东晚期的岩浆活动对该区金发生过一次预富集作用，对金的进一步富集成矿具有一定的贡献。

我们在萨日达拉 1：5 万区调项目中对分布于剪切带东部的海热克沟岩体单颗粒锆石（SHRIMP）年龄为 302±6.2Ma，并且该岩体未遭受剪切变形。而沿博霍特组侵入的察汗诺尔糜棱岩化花岗闪长岩单颗粒锆石（SHRIMP）年龄 310±4.2Ma，说明 310±4.2Ma 时韧性剪切变形已经开始进行了。所以可以认为冰达坂地区韧性剪切变形结束年龄应比 302±6.2Ma 稍早，这与上述地质分析基本一致。遗憾的是没能对韧性剪切变形起动时间进行相关准确的测试研究。

另外李华芹（1998）对望峰金矿的金一黄铁矿一微粒石英脉中石英矿物的全岩 Rb-Sr 等时线年龄确定为 285.4±4Ma，认为望峰金矿含金石英脉形成时间可能在 270~290Ma 之间。前述冰达坂韧性剪切变形结束年龄比 302±6.2Ma 稍早。本文研究认为该区韧性剪切带型金矿作用发生滞后于韧性变形期，主要形成在中晚期脆-韧变形阶段，所以二者是基本一致的。所以金矿床成矿应发生在华力西晚期。

综上所述，冰达坂韧性剪切带韧性剪切变形结束年龄应比 302±6.2Ma 稍早，在晚石炭世之前。金成矿期主要发生在继韧性变形之后的脆-韧性变形阶段，成矿主期可能在 270~290Ma 之间，属华力西晚期。

第四节　金矿床成因模式

中晚古生代时期天山地质作用最为活跃，其中在中天山北缘断裂（区内表现为冰达坂断裂）发生了地壳的拉张解体作用形成了北天山有限洋（高俊，1995），随后不久北天山有限洋就收缩闭合，中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块再次发生了碰撞造山作用，期间伴随强烈的构造活动。冰达坂韧性剪切带形成就与北天山有限大洋盆的闭合及其碰撞造山密切相关，所以其经历长期的构造演化，在垂向上形成由深向浅由塑性流变向脆-韧破裂过渡的构造变形，在平面上形成变形强弱相间的格局特征。这一漫长的地质演化过程中，伴随着脆-韧性变形转换动力作用的有序进行，在剪切带的脆韧性转换部位发生了矿液的多期充填沉淀和矿化叠加，从而形成了不同规模的金矿床(点)。

通过前文综合分析表明，冰达坂地区金矿受到冰达坂韧性剪切带及脆-韧性变

形转换控制，金矿体主要产于脆-韧性变形转换过程中形成的各种张性、张剪性裂隙或强弱变形过渡地段的扩容空间，流体在成矿过程中起到了重要的传质作用。金矿床形成时间比韧性剪切变形滞后，金矿床及其矿化主要应在脆-韧性变形转换的同时就已开始，最终定位大致在华力西晚期。

所以说冰达坂地区金矿床的形成是该韧性剪切带演化的产物，是多种成矿有利因素在同一空间的多次叠加、改造的结果。因此有必要以演化观点概括该区金矿床四维空间成矿模式：

（1）矿源准备阶段（中晚远古代-早石炭世）

该区金矿床的直接围岩是中上元古界长城系星星峡群和加里东晚期 S 型花岗闪长岩。其本身具有较高的金背景值，构成了金的主要矿源层。志留世晚期，随着"古准噶尔洋"的闭合，造成了中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块的对接碰撞造山作用，期间发生了强烈的变形、变质作用，并伴随有与碰撞造山有关的岩浆侵入活动，这些构造-岩浆活动热事件使老地层中的金等成矿元素重新分配、调整、富集，这也为后期成矿奠定了基础。此后又整体经历了低绿片岩相区域变质。所以该区矿源层从形成到预富集经历了长时间的复杂的地质演化过程。

（2）第一成矿阶段（中石炭世-晚石炭世）

中石炭世末期北天山有限洋关闭，中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块在中天山北缘断裂（研究区内称冰达坂断裂）再次对接碰撞造山，中天山北缘发生逆冲推覆剪切；继逆冲推覆剪切期末（晚石炭世）主要在地壳深部发生强烈的韧性挤压剪切变形变质作用，即韧性剪切带早期碰撞挤压剪切演化阶段，来自地幔及其地壳深部的金、硫、铅等在地幔脱碳去水作用下形成了以 H_2O 和 CO_2 为主体的热液中，并以金硫络合物的形式沿剪切带向上迁移，由于处于高温、高压条件下，流体中 H_2O、CO_2 和 H_2S 处于溶解状态，CO_2 和 H_2S 大量溶解，使流体的酸度大大提高，金属元素配位体的溶解度保持较高的水平（王全伟等，2002）。所以有利于成矿流体的迁移及迁移过程中同时溶解（活化）受剪切带及其附近岩石中的成矿元素和其他组分（如 Au、Fe、Cu、S、Pb、As、Si、Na、K 等）。伴随着强烈的挤压变形，不断有新的 H_2O、CO_2 等流体加入，使含矿流体的总量增大，在剪切带中的活动性增强，局部地段含流体中矿质的浓度不断增加。含矿流体向上运移及与围岩发生相互作用的过程中伴随温度、压力的降低，但含矿热液的温度压力仍然偏高，而且由于有关蚀变作用尚未大规模进行，流体中矿质浓度总体偏低，因此不利于金的成矿，只有少部分金呈分散状与硫化物在强韧性变形带局部沉淀成矿。表现为矿化体沿着韧性剪切带主剪切面理分布，并发生强变形特点。

（3）第二成矿阶段（晚石炭世晚期-早二叠世）

随着碰撞作用的进行，地壳厚度增大并逐渐抬升，动力环境由强烈韧性挤压剪切变形向后期走滑脆-韧剪切变化转换，表现为中浅部构造层走滑脆-韧性剪切变

形演化阶段。期间由于脆-韧性变形的强烈转换，促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，沟通了不同圈层内的流体，引发了成矿流体在垂向上的充填、运移，发生大规模跨层次、跨体系的对流循环乃至物质和能量的交换。既有自下而上从地壳深部或地幔上升的含有大量成矿物质的成矿流体，又有从上而下的大气降水，当后者进入下部被加热时，在热驱动作用下，流体将产生对流循环运动，广泛地从围岩中淋滤出部分成矿物质形成成矿热液。当上述两种含矿流体进入上部脆-韧变形转换部位，一方面由于应力、应变梯度、流体压力梯度以及温度梯度的明显变化，表现为来自中深部的高温高压含矿热液因减压而发生沸腾作用，含矿流体在该区与围岩发生相互作用，导致较长时间、多种类型、大规模的热液蚀变如硅化、绢云母化、钠长石化、绿泥石化及碳酸盐化等，使含金矿流体中金硫等矿质的相对浓度急增，极有利于其沉淀成矿。所以金在有利部位沉淀成矿；另一方面来自中深部的高温高压含矿热液与自上而下的低温低压不同化学性质以大气水为主的流体混合，引起含矿流体的温度、压力、pH 和 Eh 的突变，使金成矿元素化学位能降低、金络合物稳定性下降而沉淀成矿。由于含矿热液的复杂性，金的沉淀伴随有其它较多形式的硫化物。其中自然金主要赋存于黄铁矿内部和黄铁矿裂隙中以及石英颗粒中。矿质多是沿着矿脉中的构造透镜体及其次级显微破裂的包络线贯入的，这是冰达坂地区金矿的主成矿期。同时由于该阶段大规模含矿流体运移、积聚，最后在冰达坂地区形成广泛的蚀变与矿化。

（4）第三成矿阶段（早二叠世晚期-早三叠世）

在华力西末到印支初期，随着碰撞作用结束，进入了造山后拉张阶段，主要表现为脆性变形的叠加改造作用。构造变形及其热液活动都在较浅层次进行，其强度明显减弱，加之含矿热液由于早期金的沉淀及其后期大量大气降水的混合而浓度大为降低，伴随硅化和碳酸盐化，大致沿脆性破裂形成一些含少量黄铁矿的细的石英网脉或石英碳酸盐脉，不利于金的成矿，仅在局限地段或在热液活动较强处发生一些金矿化。

结 论

在充分搜集和整理前人资料及测试的基础上，依托1：5万区域与地质矿产调查最新成果，查明了不同尺度冰达坂韧性剪切带的分布和变形特征。从冰达坂地区典型韧性剪切带型金矿床的地质特征入手，通过区域和典型金矿床的系统研究，分析探讨了冰达坂韧性剪切带对金矿床的控矿机制。并通过对典型金矿床C、H、O、S、Pb稳定同位素、矿床及带内地层、岩体稀土元素特征及流体包裹体地球化学特征分析了冰达坂韧性剪切带型金矿床的成矿物质来源、成矿流体性质和来源，探讨了冰达坂韧性剪切带金矿床成矿模式。主要有以下一些认识和成果：

1、确定了冰达坂韧性剪切带的空间分布与规模，系统总结了其构造变形特征，划分了该剪切带变形期次。

（1）区域韧性剪切带总体上两侧变形强度由近到远在背离韧性剪切带的方向上逐渐弱化到脆性变形，带内变形的岩石以局部应变集中与弱应变域相间交织格局和应变转换为特征。在冰达坂断裂以北的前石炭系博霍特组火山碎屑岩-火山岩组合主要以脆性变形和韧-脆性变形为主。相反断裂以南变形较强，总体以脆-韧剪切变形和韧性变形为特点。空间上强应变带和弱应变域相间分布，交替出现。这一变形构成主要是由于岩性差异和剪切带的多期次叠加而表现的。

（2）变形组构多样，不同尺度变形标志均较明显。其中S—C面理、拉伸线理、拨丝构造、旋转碎斑系、云母鱼、膝折、波状消光、书斜构造、显微裂隙、脉体剪切变形和形态多变的紧闭同斜褶皱等变形迹广泛发育。

（3）根据以上各类变形组构的穿插、交切、叠加复合关系以及其运动学和动力学特征进行综合对比分析，划分了该剪切带构造变形期次，即挤压剪切变形、中期走滑脆-韧性剪切变形和后期脆性变形作用。

2、研究确认冰达坂韧性剪切带是区内最重要的一级控矿构造带，并且剪切带内金矿（化）点、矿床、矿体的时空分布严格受脆-韧形变形转换控制。

（1）冰达坂韧性剪切带是区内重要的宏观一级控矿构造带，是金矿床产出的第一控制因素。统计表明冰达坂地区77%以上的金矿（化）点和Au、Cu多金属矿矿（化）点受其控制，现有规模的望峰、萨日达拉、冰峰金矿均受剪切带控制。

（2）但是剪切带内金矿床及其金铜矿床（点）的产出不是均匀分布，而是聚集于局部地段，金矿床的时空分布规律严格受脆-韧形变形转换带控制。总结有以下规律：①脆-韧性变形转换型式有强弱应变转换型和原位异相转换型；②在横向、纵向和垂深上强弱应变相间及变形转换的特征（即分带性）控制了矿床、矿体的分布，初步提出该区脆-韧性变形转换和金矿（床）点分布空间结构模式；③脆-韧性变形转换强烈部位有利于成矿，且在显微裂隙发育部位最易形成富金矿；④通过对典型金矿床的矿化与剪切变形组构关系研究表明：金成矿作用发生滞后于韧

性变形时期。金矿化主要发生在中期脆-韧性剪切变形阶段或稍晚。

3、通过对剪切带内萨日达拉和望峰典型金矿床的地质特征、稳定同位素地球化学特征（C、O、H、S、Pb）已有资料及其稀土微量元素总结对比分析，发现这两个金矿在以上方面具有相似性，认为两者都是冰达坂韧性剪切带长期演化的结果。同时分析探讨了区内金矿床成矿流体和成矿物质来源。

（1）总结了萨日达拉和望峰金矿床的地质特征，通过对比发现二者具有极其相似的地质构造特征。

（2）对比分析表明萨日达拉和望峰金矿床的硫、铅同位素组成特征相似。其中硫同位素组成变化范围较大，均一化程度较低，反映多源特征，既有深源硫的参与，也有地壳浅部硫的混入；铅同位素反映成矿与造山作用的演化密切相关，铅来源复杂，既有深源铅的参与，也有地壳浅部铅的混入。

（3）通过对比分析发现萨日达拉金矿和望峰金矿的矿石、围岩和长城系星星峡群、加里东晚期花岗闪长岩稀土配分曲线具一致性，而与区内其它地层、岩体具有明显不同的稀土元素特征。说明成矿物质来源与前两者极其密切。在整个脆-韧性转换变形动力成矿过程中，矿石对原岩的稀土元素特征具有明显的继承性。但矿石稀土总量都较高，轻稀土富集，$(La/Yb)_N$ 和$(La/Sm)_N$ 比值较高，富含碱土金属等亲基性特点和自然金、银离子探针分析表明其含有一定量铂族元素（王居里等，2001；炎金才，1991），这些都从侧面反映成矿物质来源于上地幔或下地壳深处的可能。所以成矿物质除来自赋矿岩石本身外，还有深部来源物质的可能参与。

（4）通过总结前人对萨日达拉金矿床和望峰金矿床碳、氢、氧、硫、铅稳定同位素研究和微量稀土元素对比研究及其围岩含金性分析表明，这两个典型金矿在以上方面均具有相近性。冰达坂地区韧性剪切带型金矿床的成矿主期成矿流体为变质热液和大气降水热液的混合热液为主。成矿物质主要来源于长城系星星峡群变质岩和加里东晚期 S 型花岗闪长岩，部分物质可能来源于深部下地壳或地幔，具有多源特点。

4、对典型金矿床进行了流体包裹体地球化学特征研究，详细观察记录了望峰金矿床矿石中的包裹体特征，并进行了均一温度和冰点测定，估算了成矿流体 H_2O-NaCl 体系的盐度和密度，通过与前人资料对比分析，探讨总结了带内成矿复合叠加的特点及其成矿压力和成矿深度。

（1）带内金成矿流体成分以 H_2O 和 CO_2 为主，含有少量 CO、CH_4、H_2 和 H_2S 等成分。通过对望峰金矿床水溶液包裹体测温估算成矿流体 H_2O-NaCl 体系的盐度值为 1.57%~8.00%，平均值为 3.786%，为一低盐度体系。体系流体密度为 0.772~0.914g/cm^3，平均值为 0.847g/cm^3。

（2）对望峰金矿温压测试分析其成矿均一温度介于 151.2~434.5℃，主成矿温度在 331.2~228.2℃，其次 221.0~151.2℃成矿。与萨日达拉金矿爆裂成矿温度对

比（170~410℃，主成矿温度在 270~300℃，其次为 335～360℃；王居里，1995）。说明带内成矿作用应主要发生在中低温阶段，具多阶段复合叠加的特点。同时估算了望峰金矿成矿压力在 22.13~60.87Mpa 之间，并集中分配于 22.13~40.83Mpa 和 47.56~60.87Mpa 数值区间，并结合前人（李华芹，1995；刘养杰，1994）研究成果进行综合分析认为区内主成矿期开始的深度不应超过 5.6km，地壳被抬升至 2.00km 深度左右时矿化最为强烈，在矿区抬升至 1.00km 以上深度时矿化基本结束。

5、探讨了该韧性剪切带变形时代和成矿时代，并结合金矿床的地质构造背景，概括总结了区内金矿床成矿模式。

（1）对望峰金矿赋矿围岩眼球状糜棱岩化花岗闪长岩进行了单颗粒锆石（SHRIMP）测年，年龄为 432±5.6Ma，说明在加里东晚期岩浆侵入作用对该区金的富集具有一定的贡献。通过地质和带内相关岩体同位素年龄分析认为冰达坂韧性剪切带韧性剪切变形结束年龄比 302±6.2Ma 稍早，应在晚石炭世之前。金成矿期滞后于韧性变形时期，主要发生在继韧性变形之后的脆-韧性变形阶段，主成矿期可能在 270~290Ma（李华芹，1998）之间，属华力西晚期。

（2）概括总结了带内金矿床成矿模式：中上元古界长城系星星峡群构成了区内金的初始矿源层。加里东晚期与中天山（伊犁）板块和北天山（准噶尔）板块的对接碰撞造山作用伴生的构造-岩浆活动热事件使老地层中的金等成矿元素重新分配、调整、富集，也为后期成矿奠定了基础；中石炭世末期中天山（伊犁）板块与北天山（准噶尔）板块再次对接碰撞造山，中天山北缘发生强烈的韧性挤压剪切变形变质作用，来自地幔及其地壳深部含矿热液沿剪切带向上迁移，但由于其温度偏高不利于金的成矿，只有少部分金呈分散状与硫化物在局部沉淀成矿；随着碰撞作用的进行，动力环境由强烈韧性挤压剪切变形向走滑脆-韧剪切变化转换，期间由于脆-韧性变形的强烈转换，促进了由深部向地表浅部破裂网络的大规模发育，一方面中深部的高温高压含矿热液进入脆-韧性变形域，由于减压发生沸腾作用导致金沉淀成矿；另一方面来自中深部的高温高压含矿热液与自上而下的低温低压不同化学性质以大气降水为主的流体混合使金稳定性下降而沉淀成矿，这是该区金矿的主成矿期；在华力西末以后为脆性变形的叠加改造作用，构造变形及其热液活动都在较浅层次进行，仅沿脆性破裂形成一些含少量黄铁矿的细的石英网脉或石英碳酸盐脉，不利于金的成矿。

由于本文所涉及的研究范围较大，论述中可能有不少疏漏的地方。再者研究内容涉及面较广，对这些问题所作的探讨只是初步和肤浅的，还有待于进行更深入地综合研究。主要存在有以下几个问题：

1、受多种因素影响，矿床稳定同位素地球化学研究方面缺少测试数据，本次只能在前人对该区的相关测试数据基础上，依托 1：5 万区域与地质矿产调查新成果进行综合分析。

2、由于包裹体个体大小和实验条件的限制，许多典型包裹体未能获得测试数据，并未能对矿床包裹体进行系统的测试。

3、缺少对韧性剪切带和金矿成矿年龄系统的分析数据。

主要参考文献

【1】陈柏林.构造形变类型与金矿化类型.世界地质.2000, 19(3):217~223

【2】陈柏林.糜棱岩型金矿金元素丰度与构造变形的关系.矿床地质.2000, 19(1):17~25.

【3】陈柏林,董法先,李中坚.韧性剪切带型金矿成矿模式.地质论评. 1999,45(2):186~191

【4】陈柏林,董法先,李中坚.韧性剪切带型金矿床成矿模式.地质论评,1999, 45(2):186~192.

【5】陈强,杨兴科,张连昌等.东天山脆-韧性变形转换与金矿带.新疆地质, 2001:19(2):115~118.

【6】陈衍景,李欣,靖军等.新疆望峰金矿成矿流体研究及其成因意义.地球学报, 1998, 19(2):195~203.

【7】陈华勇,鲍景新,张增杰等.新疆望峰金矿成矿物质和流体来源同位素示踪-碰撞造山成矿作用研究.中国科学（D 辑）, 2000,30(增刊):45~53.

【8】陈锦石,陈文正.碳同位素地质学概论.北京:地质出版社 1983.

【9】程裕淇.中国地质图（1∶500 万）.北京:地质出版社 1992

【10】程玉明,谢贵明,中国前寒武纪金矿的成矿找矿模式.矿产与地质, 1991, (2):73~80.

【11】车自成,刘洪福,刘良等.中天山造山带的形成与演化.北京:地质出版社 1994.

【12】车自成,刘良,罗金海.中国及其邻区区域大地构造学.北京:科学出版社 2002.

【13】邓军,杨立强,张忠实等.构造体制转换与流体多层循环成矿动力学.地球科学, 2000,25（4）: 397~403

【14】邓军,翟裕生,杨立强等.论剪切带构造成矿系统.现代地质, 1998,12(4):493~500

【15】邓军,翟裕生,杨立强等.剪切带构造-流体-成矿系统动力学模拟.地学前缘,1999,6(1):115~127

【16】董法先,陈柏林,李秀珍等.安徽界岭金矿及其外围成矿控矿构造与找矿方向.北京:地质出版社 1993.

【17】弓小平,杨兴科,陈强等.东天山觉罗塔格金矿带构造变形与成矿预测.地球科学与环境报,2004,26(1):6~10.

【18】高俊,何国琦,李茂松.西天山造山带的构造变形特征研究.地球学报, 1997,18(1):1~9

【19】高俊,何国琦,李茂松.西天山造山带的古生代造山过程.地球科学, 1997,20(1):27~32

【20】何知礼.包体矿物学.北京:地质出版社 1982.

【21】何绍勋,段嘉瑞,刘继顺等.韧性剪切带与成矿.北京:地质出版社 1996.

【22】胡道琴,王中刚,涂光炽等.新疆北部地质演化及其成岩成矿特征.北京:科学出版社.1997.

【23】韩吟文,马振东.地球化学.北京:地质出版社.2003.

【24】季克俭,吴学汉,张国柄.热液矿床的矿源、水源、和热源及矿床分布的规律.北京科学技术出版社.1989.

【25】李华芹,谢才富,常海亮等.新疆北部主要有色贵金属矿床成矿作用年代学.北京:地质出版社.1998,

【26】李向东.新疆北天山晚古生代洋盆演化与推覆构造.新疆地质, 1993,11(3):207~214

【27】李昌年.微量元素及其在岩石学中的应用.武汉地质学院岩石教研室（校内教材）

【28】李秉论等.气体包裹体气相色谱分析及其地质意义.地质科学, 1982, (2):220~225

【29】黎彤.化学元素的地球丰度.地球化学, 1976,(3):167~174.

【30】卢焕章,池国祥,王中刚.典型金属矿床的成因及其构造环境.北京:地质出版社 1995.

【31】卢焕章,范宏瑞,倪培等.流体包裹体.北京:科学出版社 2004.

【32】刘继顺.韧性剪切带中金成矿研究的若干问题.地质论评, 1996,42(2):123~128

【33】刘俊来,岛田充彦.大陆地壳多震层成因与一个新的地壳断层带模式.科学通报, 2000,45(8):1085~1091

【34】刘喜山,李树勋,刘俊来.变形变质作用及成矿.中国科学技术出版社 1992.

【35】刘忠民.剪切流体与蚀变和金矿成矿作用.地学前缘, 2001,8(4):271~275

【36】刘英俊,曹励明主编.元素地球化学导论.北京:地质出版社. 1987.

【37】刘本立.地球化学基础.北京大学出版社.1994.

【38】刘劲鸿.论太古宙含金剪切带的成矿机制.长春地质学院院报, 1991,21(2):157~166

【39】韩润生,宋焕斌,金世昌等.金在热液中活化迁移和沉积富集机理之新认识.黄金科技动态, 1990, (3):15~18

【40】廖启林,戴塔根,邓吉牛等,新疆北部主要金矿床的成矿地球化学特征.矿床地质, 2000,19(4):297~306

【41】马宗晋,杨主恩,吴正义.构造地质学一岩石圈动力学研究进展.地震出版社 1999.

【42】曲亚军.韧性剪切带内金矿床类型及找矿标志.辽宁地质, 1991 ,(2):139~147.

【43】任纪舜,姜春发,张正坤等.中国大地构造及其演化.北京:科学出版社.1980.

【44】任纪舜.中国及邻区大地构造图(1∶500 万).北京:地质出版社. 1997.

【45】舒建生,王小红,余吉远等.西天山萨尔托斯矿区地质特征及成矿潜力探讨.兰州大学学报(自然科学版), 2004,40 (专辑):737~740

【46】舒良树,夏飞雅克,马瑞士.中天山北缘大型右旋走滑韧剪带研究.新疆地质.1998,16(4):326~336

【47】孙忠实,邓军,翟裕生等.金、硅和硫化物迁移富集层次性模拟试验与构造机制研究，现代地质, 1999,13(3):329~333

【48】孙忠实,邓军,翟裕生等.大型金矿构造一成矿体系及幔一壳多层循环体成因模式.地质科学, 2000,35(3):267~276

【49】孙忠实,李德伦,冯亚民.含金流体层次性循环系统探讨一以吉林和山东地区金矿为例.世界地质, 1998,17(4):11~16

【50】吴世敏,卢华复,马瑞士等.西天山一带大地构造相划分及其构造演化特征.中国区域地质, 1995,(2):149~156

【51】吴美德,芮仲清.含金剪切带型金矿床.北京:地质矿产部情报研究所.1989.

【52】吴锡丹,陈光进.望峰金矿带地质特征及成矿规律.新疆地质, 1999,17(1):20~26

【53】王居里,刘养杰,周鼎武等.新疆萨日达拉金矿地质特征及成因探讨.矿床地质, 2001,20(4):385~392

【54】王居里,王润三,刘养杰.疆胜利达坂金矿区金矿化特征.新疆地质, 1993,11(2):115~122

【55】王居里,刘养杰,王润三.新疆胜利达坂金矿区金的成矿作用.西北大学学报(自然科学版), 1993,25(2):141~146

【56】王居里,王润三,刘养杰.新疆胜利达坂金矿区金矿化特征.新疆地质, 1993,11(2):115～122

【57】王居里,刘养杰,王润三.新疆胜利达坂金矿区韧性剪切带与金矿关系.西北地质科学, 1994,15(2):20~26

【58】王居里,炎金才,王润三等.新疆胜利达坂地区花岗岩类的地球化学及成岩环境.西北地质科学, 1995,16(2):29～35

【59】王居里,刘养杰,王润三.新疆胜利达坂金矿区金的成矿作用.西北大学学报(自然科学版), 1995,25(2):141~146

【60】王润三,王居里.新疆中天山北缘胜利达坂韧性剪切带.新疆地质, 1992,10(3):204~211.

【61】王全伟,驼耀南.剪切带型金矿床成矿机理研究综述.四川地质学报, 2002,22(1):10~14

【62】王鹤年,张守韵,俞受均等.华夏地块韧性剪切带型金矿地质.北京:科学出版社.1992.

【63】韦昌山,翟裕生.脆韧性变形时空转换区段的岩石构造破碎、流体流动和矿质聚集机制综述.世界地质, 1996,15(3):1~6

【64】魏菊英,王关玉.同位素地球化学.北京:地质出版社 1988

【65】肖常序,汤耀庆,李锦轶等.试论新疆北部大地构造演化.北京:地质出版社 1990

【66】新疆维吾尔族自治区地质矿产局.新疆维吾尔族自治区区域地质志.北京地质出版社.1993.

【67】杨兴科,陈强,张连昌等.脆-韧性变形转换与动力成矿过程分析.地球学报, 1999,20(增):26~31

【68】杨兴科,陈强,姬金生等.康古尔塔含金剪切带德厘定及其地质找矿意义.西安工程学院报, 2000,22(3):1~4

【69】杨兴科,程宏宾,姬金生等.东天山碰撞造山与金矿成矿系统分析.大地构造与成矿学，1999,23(4):315~322

【70】杨兴科,宫同伦.论动力作用与动力成矿.地学工程进展, 1999,15(2):1~4

【71】杨兴科,姬金生,张连昌等.东天山大型韧性剪切带基本特征与金矿预测，大地构造与成矿学, 1998,22(3):209~218

【72】杨兴科.脆-韧性变形转换与动力成金.地质构造学刊, 1997,7(1):30~34

【73】杨兴科,张连昌,姬金生等.东天山秋格明塔什黄山韧性剪切带变形特征分析.西安工程学院学报, 1998,20(3):11~18

【74】杨兴科,姬金生,陈强等.东天山区域韧性剪切带特征.新疆地质, 1999,17(1):55~64

【75】宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室编.铅同位素地质研究的基本问题.北京:地质出版社 1979.

【76】张理刚.成岩成矿理论与找矿.北京工业大学出版社 1989.

【77】张理刚.稳定同位素在地质科学中的应用.陕西科学出版社 1985.

【78】张文淮,陈紫英.流体包裹体地质学.中国地质大学出版社 1993.

【79】郑永飞,陈江峰.稳定同位素地球化学.科技出版社 2000.

【80】张连昌,姬金生,曾章仁等.韧性剪切带及其控矿作用－以新疆康古尔金矿为例.贵金属地质. 1999,8(1):1~6

【81】郑亚东,常志忠.岩石有限应变测量及韧性剪切带.北京:地质出版社.1985

【82】赵振华.微量元素地球化学原理.北京:科技出版社.1997

【83】周济元,崔炳芳,陆彦等.论构造动力成矿作用.地质力学文集（10）.北京:地质出版社.1995

【84】周济元,余祖成,毛玉彦等.动力驱动矿液运移的若干问题与成矿预测.地质力学文集（9）.北京:地质出版社.1989

【85】（苏）B.A.格里年科等著,赵瑞译.硫同位素地球化学.北京:科学出版社,1980

【86】（美）G.福尔著,潘曙兰等译.同位素地质学原理.北京:科学出版社,1986

【87】（英）Hugh R.Rollison 著,杨学明等译.岩石地球化学.合肥:中国科学技术大学出版社.2000

【88】Cameron E M. Derivation of gold by oxidative meta morphism of a deep ductile shear zone:Part 1.Conceptual model.Journal of Geoche mical Exploration, 1989.31:135~147

【89】Bonnemaison M,Marcoux E. Auriferious mineralization in some shear-zones:A three stage model of metallogenesis.Mineralium Depositia, 1990,25(2):96~104

【90】Lister G S.Snoke A W. S-C mylonites.Journal of Structural Geology, 1984. (6):617~638

【91】Kerrich R. The formation of gold deposits with particular reference to Archean greenstone belts and Yellowknife Contrib.Geol.. NW Tevritories (Canada), 1988. (3):37~62

【92】Ramsayy JG,Graham R H. Strain bvariation in shear belt.Can J Earth Sci, 1970.7:789~801

【93】Ramsay J G. Shear zone geometry:Arcview.Stmct Geol, 1980.2:83~99

【94】Ramsay J G and Huber M J. The technique of modern Structural geology,(2):folds and fractures.Academic Press,Inc,(London)1td1987.

【95】Scholz C H. The brittle-plastic transtion and the depth of scismic faulting.Geol.Rdsch, 1988.77(1):319~328

【96】Scholz C H. The mechanics of earthquakes and faulting.Cambridge University Press, 1990.439

【97】Sibson R H. Fault rocks and fault mechanism. Geol Soc London, 1977.133(3):19l~213

【98】王居里等.《新疆天格尔峰南坡金矿床富集规律和找矿评价研究专题报告》.2000

【99】陈衍景等.《天格尔－巴伦台成矿带金铜矿床成矿规律与找矿评价专题报告》.2001

图版说明

图版 I　剪切变形组构

I -1　韧性剪切带博霍特组中的矿物水平拉伸线理

I -2　脆一韧性变形转换带内的疏散、粗大的旋转碎斑（糜棱岩化花岗闪长岩）

I -3　韧性剪切带内博霍特组中的同斜紧闭褶皱

I -4　韧性剪切带内博霍特组中的无根褶皱

I -5　韧性剪切带内博霍特组中“Z”型走滑剪切褶皱

I -6　发育于长城系星星峡群中的云母鱼代表的 S-C 组构(正交偏光，4×10)

I -7　发育于长城系星星峡群中的石英拔丝构造(正交偏光，4×10)

I -8　长城系星星峡群的书斜构造（或称多米勒骨牌构造）(正交偏光，4×10)

图版 II　变形组构与矿化

II -1　脆-韧性变形转换带长城系的不对称旋转碎斑(正交偏光，4×10)

II -2　博霍特组中不对称膝折(正交偏光，4×10)

II -3　发育于脆一韧性变形转换带内强应变区的小褶皱核部的矿化现象

II -4　沿构造透镜体的显微裂隙及其包络面产出的矿化现象(单偏光，4×10)

II -5　沿构造透镜体包络面呈托尾状产出的矿化现象(单偏光，4×10)

II -6　沿糜棱面理分布的黄铁矿化体(单偏光，4×10)

II -7　沿剪切裂隙多期次充填发生的叠加矿化现象(单偏光，4×10)

II -8　沿石英脉显微裂隙贯入呈“胶结”石英产出的黄铁矿矿化体(单偏光，4×10)

图版III　流体包裹体

III-1　望峰金矿浑圆状气液两相包裹体(单偏光，10×10)

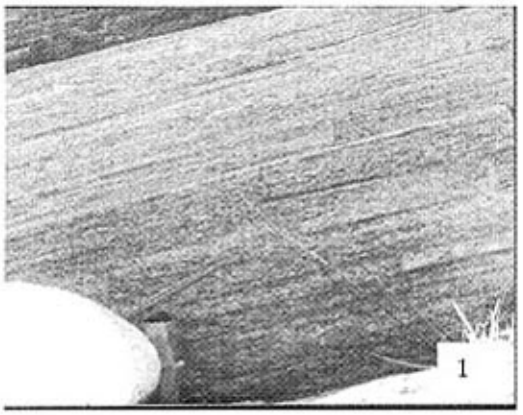
III-2　似椭圆状气液两相包裹体(单偏光，10×10)

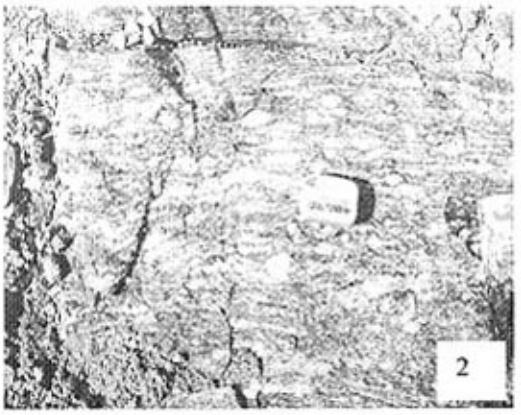
III-3　次生包裹体(单偏光，10×10)

III-4　随即分布的气液两相包裹体群(单偏光，10×10)

III-5　规则状密集分布的气液两相包裹体群(单偏光，10×10)

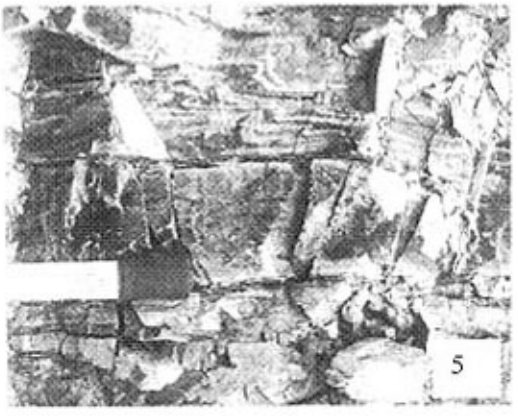
III-6　呈平行条带状分布的包裹体群(单偏光，10×10)

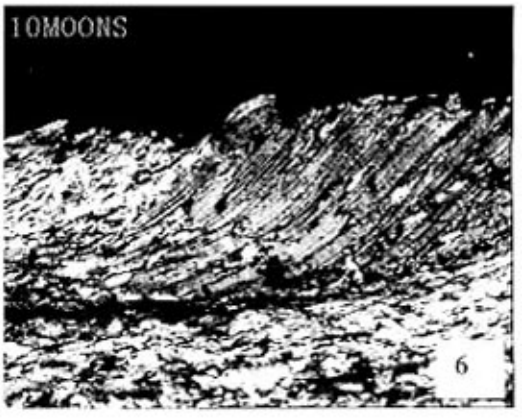

1


2


3

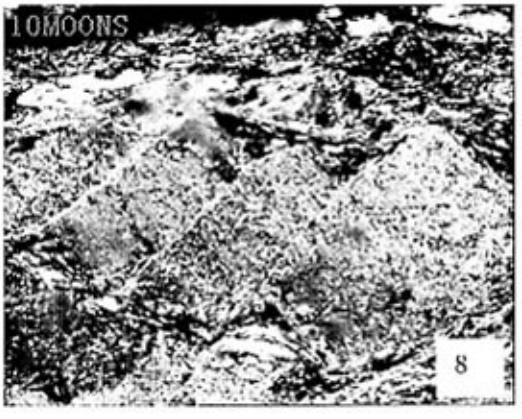

4


5

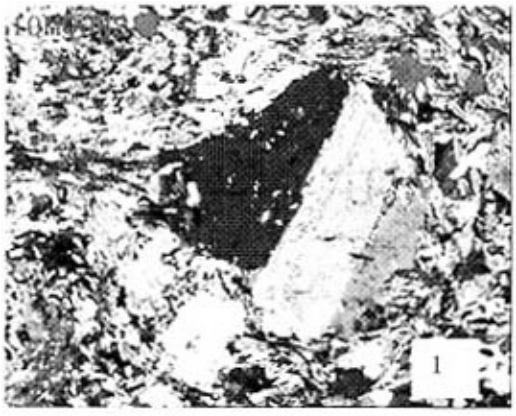


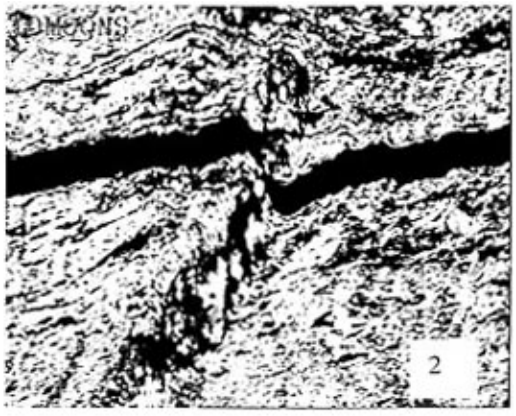
6

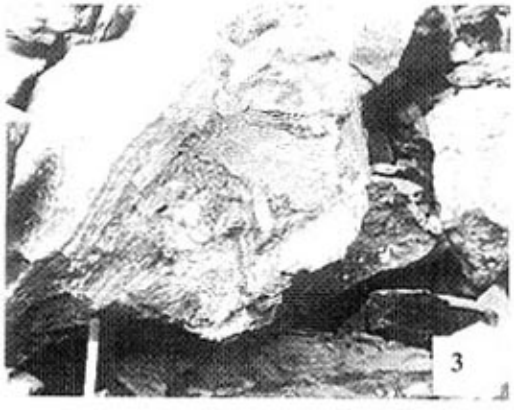

7

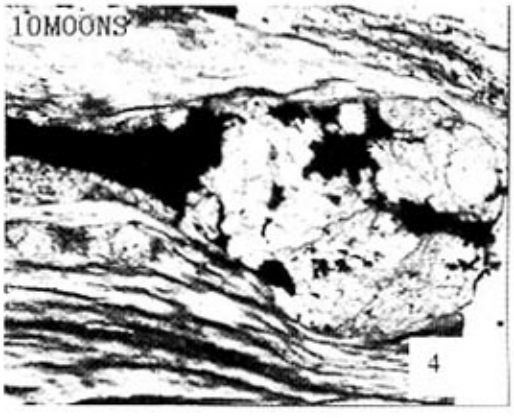


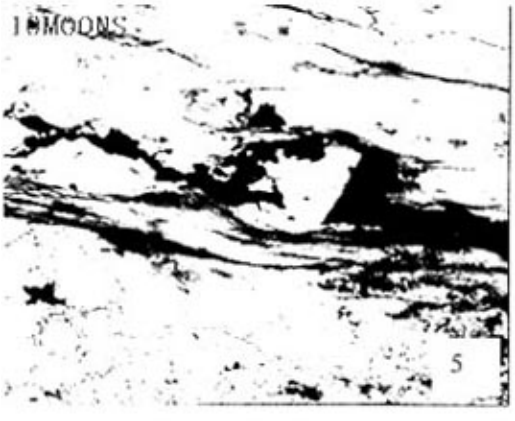
8

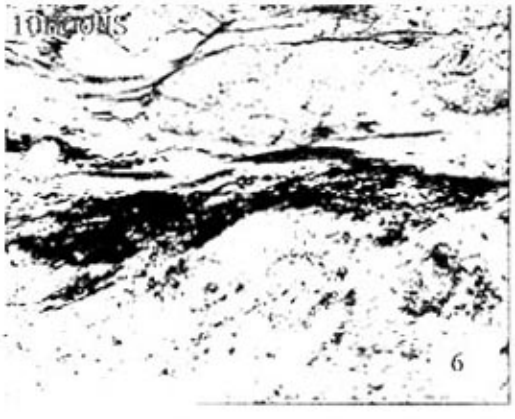

1

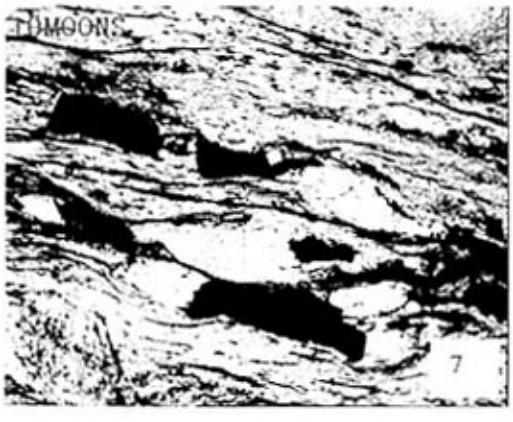

2

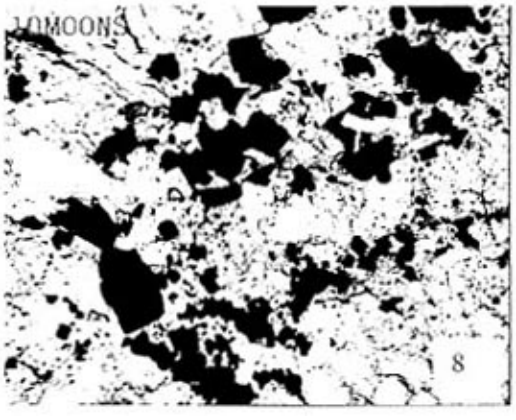

3

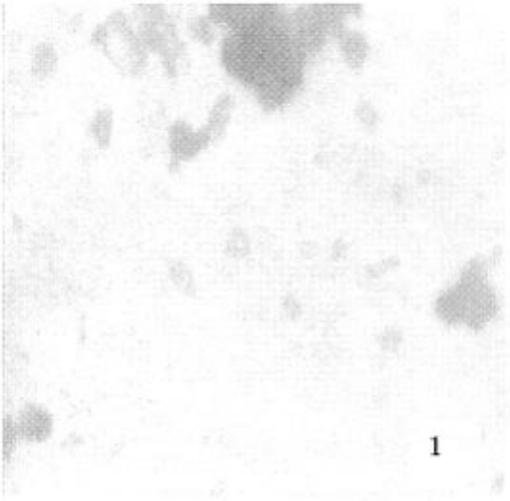

10MOONS
4


10MOONS
5

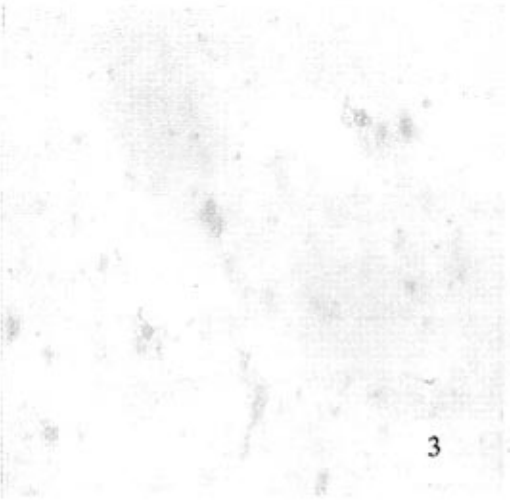

6

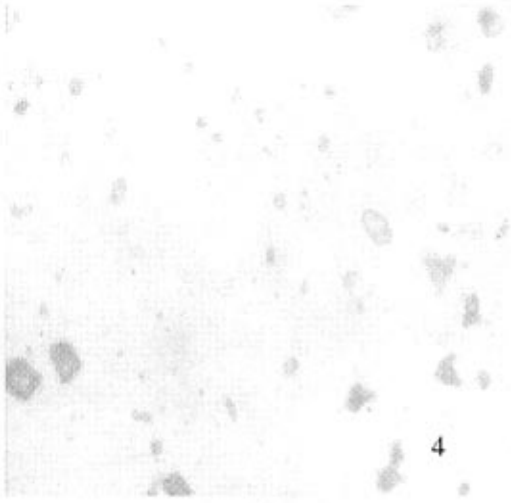

7

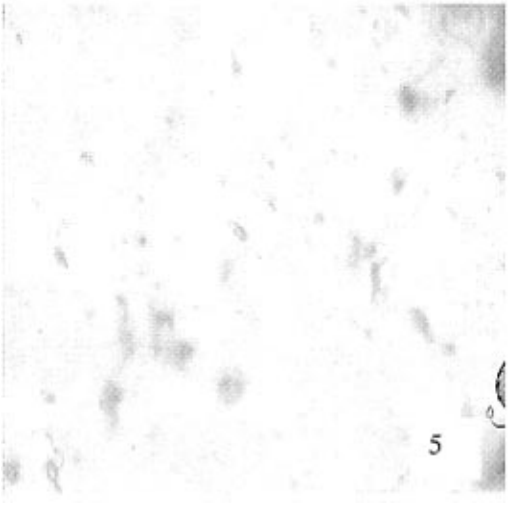

8

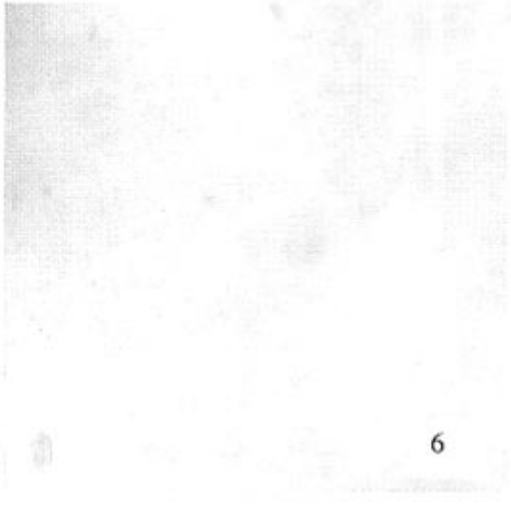

1


2


3


4


5


6

致 谢

在长安大学三年的研究生求学阶段，是一个不断丰富自我，完善自我，提高自我的循序渐进的学习过程，我能顺利地完成学业，要由衷的感谢我的老师、同学及家人的关心和支持。首先，衷心的感谢授业恩师杨兴科教授和张连昌研究员，感谢近年来对我在学习、生活和工作中的物质上和精神上的大力支持，恩师学习中与时俱进的精神，工作中的严谨、实事求是的态度，生活中的简朴永远是我学习的榜样。在完成论文期间，幸得杨老师的悉心指导和思路点拨，从野外采集样品到室内整理乃至后期实验室工作，可以说是手把手的教导我。我要感谢两位导师给我提供接触先进精密科学仪器，拓宽自己知识面的机会。还要感谢最终修改论文等方面给予我耐心的帮助和引导，使我从中得到很大的启发和提高。

感谢刘继庆老师、苏春乾老师、阎海卿老师、王崇礼老师、孙继东老师、许安东老师、郭俊锋老师在野外调研过程中的教导及学习、生活中的关心与支持，感谢白开寅老师在显微构造和光片薄片鉴定方面的指导，刘志武老师和李继宏同学在包裹体测温过程中的大力帮助，感谢李强师兄和李注苍工程师在完成论文期间给我的意见和建议，感谢野外工作中新疆第一地质大队王磊总工、胡长安主任、李新峰高工、许孝万工程师、李鹏和中国科学院地质与地球物理所靳新娣老师等人的大力支持与帮助，在此深表感谢。

感谢师兄弟及师妹马立成、余吉远、晁会霞在野外及室内工作的支持和帮助，感谢姚卫华在计算机成图方面给我的帮助，感谢师弟陈虹、师妹曹洁在成图方面给我的帮助，感谢同门李国填、杨永恒、王建辉、赵亮、季力丹及陈文龙同学、崔建军同学、叶书锋同学、辛红刚同学、夏明哲同学、学弟朱亚军同学、饶天利同学等在野外工作和论文写作中的关心和帮助。

感谢研究生部和资源学院老师在三年学习期间的关心和帮助。在此一并献上最真挚的感谢！

最后感谢我的家人及未提及的朋友，感谢他们的支持和鼓励。再次感谢在求学生涯中所有的良师益友及曾经帮助过我的所有人。