

中国地质科学院

天津地质矿产研究所所刊

第 22 号

地质出版社

中 国 地 质 科 学 院

天津地质矿产研究所所刊

第 22 号

张宣地区太古代 变质岩中脉金的成矿作用

GOLD MINERALIZATION IN ARCHEAN METAMORPHIC
ROCKS, ZHANGJIAKOU-XUANHUA AREA,
HEBEI PROVINCE

胡小蝶 赵嘉农 李双保

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本文从研究张宣地区金矿床的区域地质背景出发,论述了层控地层的性质及其年代学,金矿床的地质构造环境及其与主要地质事件、地质作用的关系;论述了主要金矿床的稳定同位素(S、H、O、Pb)地球化学、稀土元素地球化学、成因矿物学以及元素地球化学等特征;利用近代研究手段和理论系统,论述了金的物质来源、含金成矿溶液性质、金的活化迁移和富集的物化条件和地质因素,以及金的成矿模式等。研究资料深化了对张宣地区金的成矿机制和成矿作用的认识。

张宣地区金矿处在地台边缘构造活动带,金矿化主要与太古宙和早元古宙的四次重大地质事件有关;变质作用(退变质作用)、混合岩化作用和岩浆作用,是金活化迁移的主要地质营力。海西运动和燕山运动两次重大地质事件,促进了金的进一步活化和富集。

本区金矿虽具多种成因的特点,但仍以变质热液成因为主。

中国地质科学院
天津地质矿产研究所所刊
第22号

责任编辑:汪玉麟

地质出版社出版发行
(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)
新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张 7.5; 铜版; 6 页 字数: 191 000

1990年2月北京第一版·1990年2月北京第一次印刷

印数: 1—1800 册。国内定价: 4.10 元

ISBN 7-116-00577-3/P.489

目 录

一、前言	(1)
二、区域地质概况	(2)
(一) 地层	(2)
(二) 构造	(4)
(三) 岩浆岩	(6)
(四) 混合岩	(6)
三、区域变质岩及变质作用	(8)
(一) 区域变质岩类型及其特征	(8)
(二) 变质矿物及其结晶温压条件	(10)
(三) 变质相划分和退变质作用	(16)
四、变质岩的原岩恢复	(20)
五、混合岩和花岗岩	(23)
(一) 混合岩	(23)
(二) 显生宙花岗岩	(28)
六、稀土元素地球化学	(29)
(一) 概述	(29)
(二) 分析方法及稀土元素地球化学概述	(29)
(三) 各岩类稀土元素地球化学分述	(32)
七、含金石英脉的地质特征	(43)
(一) 含金石英脉的分布	(43)
(二) 含金石英脉的形态和产状	(43)
(三) 含金石英脉的化学成分	(43)
(四) 含金石英脉的矿物组合、结构构造、自然类型及其演化阶段	(47)
(五) 围岩蚀变	(50)
八、含金石英脉的矿物标型特征	(51)
(一) 黄铁矿的标型特征	(51)
(二) 方铅矿的标型特征	(57)
(三) 黄铜矿的标型特征	(59)
(四) 石英的标型特征	(60)
(五) 碱性长石的标型特征	(64)
(六) 自然金的标型特征	(65)

九、稳定同位素地球化学特征	(68)
(一) 硫同位素特征	(68)
(二) 氢、氧同位素特征	(71)
(三) 铅同位素地质特征	(75)
十、矿物包裹体研究	(78)
(一) 矿物中包裹体特征	(78)
(二) 温度和压力的测定	(81)
(三) 包裹体盐度的测定	(82)
(四) 包裹体成分的测定	(82)
十一、金的成矿作用	(83)
(一) 金的层控性质和围岩的时代问题	(84)
(二) 金的物质来源	(85)
(三) 金的成矿时代	(87)
(四) 成矿溶液的性质	(89)
(五) 金的活化、迁移、富集的物理化学条件和地质因素	(90)
(六) 金的成矿作用和成矿模式	(92)
(七) 找矿标志	(94)
参考文献	(96)
英文摘要	(98)
图版说明及图版	(114)

一、前 言

河北张家口—宣化地区（以下简称张宣地区）太古代桑干群变质岩系中，在800km²的范围内，已发现含金石英脉数百条，是较有潜力的金矿远景区，也是我国北东部金矿带的一个组成部分。自60年代以来，已在小营盘、张全庄、韩家沟、水晶屯及响水沟等地进行了找矿工作。

对张宣地区含金石英脉型金矿的成矿作用和形成机理，有一个逐步认识的过程。

60年代至70年代，受艾孟斯等关于内生金矿是岩浆期后热液成因的理论影响，认为矿化受构造控制，近矿围岩受成矿热液蚀变，矿脉与燕山期花岗岩侵入体有关，主张围绕小侵入体找矿。

70年代以来，自从发现矿床的层控性质后，加强了对含金丰度的研究，运用稳定同位素地质学和微量元素地球化学等方法，说明成矿物质可能来源于变质地层，将矿床的形成联系到太古界演变史，提出了变质热液成矿的观点。

80年代以来，对含金石英脉中的长石作了钾—氩同位素年龄分析，获得较新的年龄值。由此认为，金的成矿与海西期混合岩化有关，含金石英脉是晚期（海西期、燕山期）混合岩化热液矿床。这与王秀璋等对我国北东部金矿认为是变质及混合岩化后的更晚期形成的改造型金矿床的观点^[3]颇为一致。

本次研究工作应用成因矿物学、包裹体地球化学、稳定同位素地球化学及稀土元素地球化学等近代研究方法，进一步探讨金矿的成矿作用，研究矿床成因和成矿模式，总结成矿规律和找矿方向。

太古代桑干群为本区最古老的矿源层，是金的主要物质来源，时代为2700Ma左右。从太古代地壳演化规律，肯定了太古代和元古代主要地质事件的作用。如区内多次变质作用、混合岩化作用和岩浆作用，使金等有用元素活化、迁移，在构造有利部位富集成矿。金矿是与混合岩化作用有关的变质热液矿床，海西、燕山后期运动对含金石英脉进行叠加改造。

研究工作从1981年起至1985年。本报告是集体劳动的成果，执笔人有胡小蝶、李双保和赵嘉农。

工作中得到河北省地质矿产局地质三队（以下简称河北地质三队）、北京大学地质系等单位的大力协助，提供了较多的原始分析数据。各种测试数据和分析资料，主要由下列单位承担：化学分析，天津地质矿产研究所（以下简称天津地矿所）化验室；部分岩石化学分析，中国地质科学院（以下简称地科院）测试研究所；包裹体成分分析，地科院矿床所；中子活化分析，中国科学院（以下简称中科院）高能物理所；K-Ar同位素年龄和Pb同位素测定，地科院矿床所同位素室；X光、红外、pH和Eh值测定，天津地矿所实验室；图件清绘和光薄片照相，分别由天津地矿所绘图室和照相室承担。在此一并致谢。

二、区域地质概况

(一) 地 层

区内变质岩系分布广泛。以尚义—崇礼—赤城东西向大断裂为界，其北属上太古宙红旗营子群，为中级区域变质岩系。主要为片麻岩、黑云斜长变粒岩、浅粒岩、石英绢云片岩夹不纯大理岩。大断裂以南为太古宙桑干群，是一套遭受强烈混合岩化的角闪岩相—麻粒岩相的中、高级变质岩系。南缘分布中元古宙长城系，东西两侧分别为上侏罗统中酸性火山熔岩及火山碎屑岩，不整合在桑干群之上（图1）。

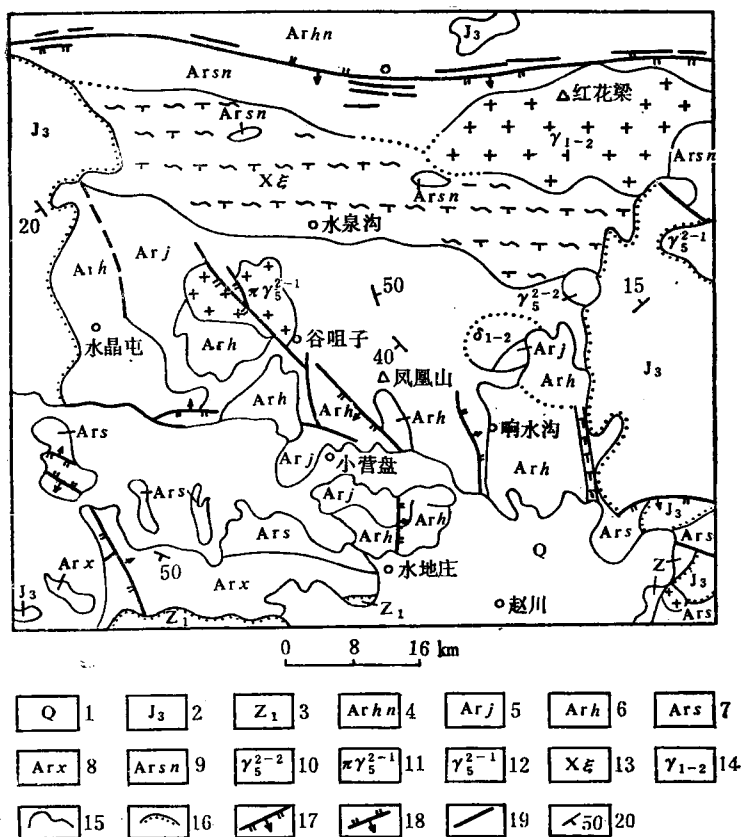


图 1 小营盘金矿区域地质图

(据河北地质三队)

Fig. 1 Regional geological sketch map of Xiaoyingpan goldfields

1—残坡积、冲洪积物；2—流纹岩、安山岩等；3—砂岩，页岩，赤铁矿；4—黑云斜长片麻岩；5—含榴斜长透辉变粒岩；6—含榴斜长麻粒岩；7—黑云角闪斜长片麻岩；8—石榴二辉麻粒岩；9—桑干群未分；10—燕山期花岗岩；11—巨斑状花岗岩；12—钾长花岗岩；13—碱性混合岩；14—元古—太古代花岗岩；15—地质界线；16—不整合；17—正断层；18—逆断层；19—性质不明断层；20—地层、片麻理产状

桑干群以往统称为桑干群谷咀子组。1984年河北地质三队将其划分为四个组^①，构成一个火山沉积旋回。这是一套由中基性火山岩、基性侵入岩、次火山岩、中酸性火山岩、火山碎屑岩、陆源碎屑和化学沉积岩，经中—深级区域变质而成的高级地体。自下而上岩性简述如下。

西葛峪组 (Arx)

为一套暗色麻粒岩、斜长片麻岩及混合岩化岩石。下部以黑褐色石榴（角闪）二辉麻粒岩为主，夹有褐灰色混合岩化黑云角闪变粒岩（片麻岩）等。上部为黑云（角闪）斜长片麻岩夹石榴（角闪）二辉麻粒岩。混合岩化强烈，多为砖红、肉红色花岗质混合岩。厚2736m。

水地庄组 (Ars)

主要为片麻岩类岩石，有褐灰色混合岩化黑云角闪斜长片麻岩，含紫苏黑云斜长片麻岩，角闪二辉斜长麻粒岩，褐灰色石榴（角闪）二辉麻粒岩，角闪透辉变粒岩，黑云角闪变粒岩（片麻岩）。上部夹有薄层磁铁石英岩数层。混合岩化普遍，多为条带状、条痕状及似层状混合岩。厚2202m。

花家营组 (Arh)

为一套以浅色麻粒岩为主的岩石。中下部以褐灰色、黄褐色含榴辉斜长麻粒岩、二辉斜长麻粒岩、紫苏斜长麻粒岩为主，夹有石榴角闪二辉麻粒岩、角闪透辉变粒岩、黑云斜长变粒岩等。顶部有含橄榄石的石榴角闪二辉石岩等超基性岩，可作为标志层。在小营盘矿区西部、北部有磁铁石英岩小凸镜体。混合岩化普遍，厚2500m。

涧沟河组 (Arj)

为一套暗色变粒岩。计有灰绿—黑绿色（石榴）角闪透辉变粒岩，角闪透辉斜长变粒岩，斜长角闪岩，夹层状混合岩。下部偶夹薄层麻粒岩。厚度大于1145m。

综合桑干群的特点，首先是变质程度深，达到角闪岩相—麻粒岩相。主要岩石类型有麻粒岩，变粒岩，混合岩，片麻岩和浅粒岩。典型矿物组合为紫苏辉石+透辉石+中（拉）长石+石英（石榴石），中长石+透辉石，普通角闪石+石榴石（石英）。变质地层中，混合岩及混合岩化岩石约占80%。其次是区域变质作用普遍而强烈，部分角闪岩相岩石是由麻粒岩退变质形成的。

花家营组中的基性麻粒岩全岩Rb-Sr等时线年龄为 2790 ± 155 Ma，是本区迄今测得的最老年龄^[19]。

桑干群的四个岩性组中，下两个组含金仅1.1ppb，低于地壳平均含金丰度值（3.5ppb），而上两个组金、银含量高于地壳平均丰度的1—3倍。在各矿区中，混合岩平均含金最高，变粒岩、片麻岩含金次之，麻粒岩含金最低。数百条含金石英脉，约有95%分布在桑干群中，全部工业矿床均赋存于桑干群花家营组和涧沟河组接合部位的上下层位中。

① 河北地质三队一分队，1:50 000常峪口幅、赵川幅区域地质调查报告，1984。

(二) 构造

本区位于中朝准地台二级构造单元燕山沉降带与内蒙台背斜的交界部位(华北陆台北缘中段),二者之间隔有尚义—崇礼—赤城东西向深大断裂带(图2)。

区内构造活动强烈,变形复杂,尤其在古老变质地层中,褶皱、断裂都很发育,显示多期性和复合性(图3)。

1. 褶皱变动

大规模的褶皱变动主要发生在中元古代以前,可分三期:

第一期褶皱使桑干群形成一巨大复式倒转向斜,轴向近东西,轴面南倾,地层由南向北倒转^①,组成本区总体构造格架。

第二期是一组呈北北西—北西西向展布的复式倒转背向斜(形)构造,轴面北东倾,甚至平卧。

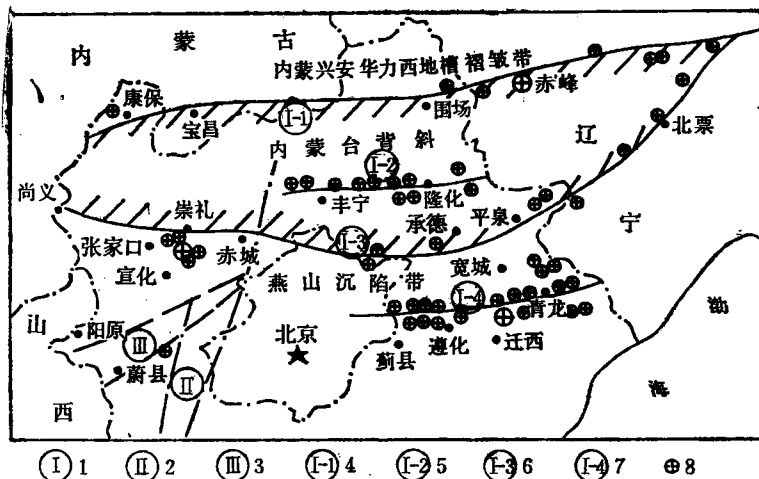


图2 小营盘一带金矿与区域构造关系略图
(据河北地质三队)

Fig. 2 Sketch map of relationship between gold ore deposits and regional structures in Xiaoyingpan region

1—纬向构造带; 2—新华夏构造带; 3—祁吕系反射弧; 4—康保—围场—赤峰构造带; 5—丰宁—隆化构造带;
6—尚义—赤城—平泉—北票构造带; 7—遵化—青龙构造带; 8—金矿点

第三期褶皱为广泛的波状褶皱束,轴向北西—北西西,作平行或雁行排列。韩家沟背斜规模最大,延长达14km。

2. 断裂活动

(1) 东西向断裂带以尚义—崇礼—赤城深大断裂带为代表,长200km余,宽1—5km,由密集排列的高角度逆断层、挤压破碎带组成。断裂面大致南倾,两侧分布有一系列时代不同大小不一的基性、超基性岩体。重力场测定推算该断裂已深切莫霍面以下。自太古代

① 河北省地矿局, 1:50 000区调报告, K-50-111C (常峪口幅), K-50-111D (赵川幅), 1984。

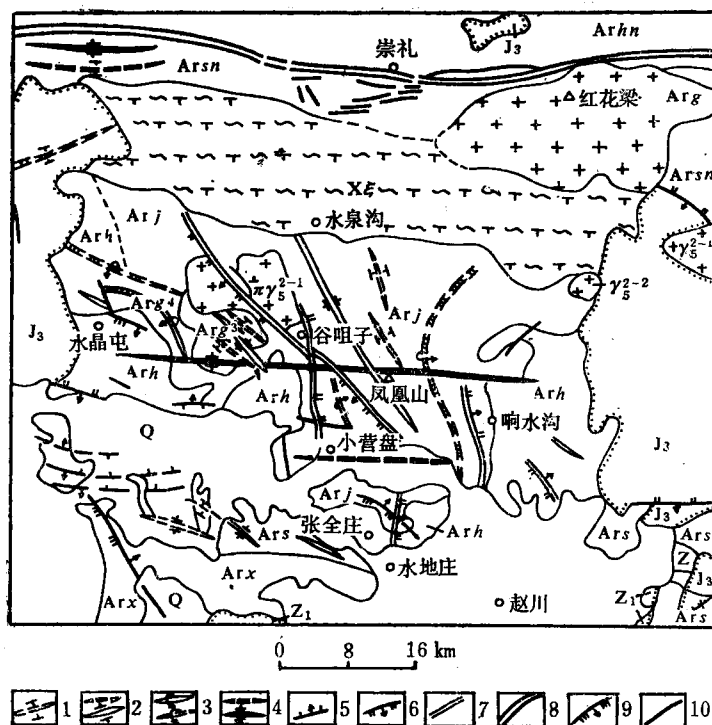


图 3 小营盘金矿区域构造纲要图

(据河北地质三队)

Fig. 3 Regional structural sketch of Xiaoyingpan goldfields

1—燕山期向斜构造；2—太古代第三期背向形构造；3—太古代第二期倒转背向形构造；4—太古代第一期背向斜（形）构造；5—喜马拉雅期断裂构造；6—燕山期断裂构造；7—太古代—燕山期复活断裂构造；8—太古代以来深大断裂带；9—太古代断裂构造；10—性质不明断层（其他同图1）

至喜马拉雅期均有活动。

（2）北西向断裂带是分布最广、规模较大、活动频繁的一组断裂。按产状可分两组。一组走向北西，倾向北东，倾角 50° — 80° ；主要分布在张全庄—响水沟一带，有大量含金石英脉及各种岩脉充填其中。另一组走向北西西，倾向南，倾角 60° — 70° ，大多与地层产状一致；断裂中充填有含金石英脉，脉岩很少，主要分布在水晶屯—四台沟一带。

（3）南北向断裂按形成时代和特征可分两类。一类是多期活动性断裂，规模较大，有的延长3—7km，破碎带较宽（最宽50m），倾角较陡（ 50° — 70° ），充填有含金石英脉和岩脉。另一类属燕山期活动的产物，切割早期各类地质体和矿体。

此外，构成良好容矿空间的某些缓倾斜构造，可能是地层褶皱过程中产生的层间滑动带，大多数与围岩产状一致或略有斜交，倾角较小（一般小于 30° ）。如小营盘的主矿脉带，张全庄的 q_1 — q_3 脉，响水沟的 q_1 脉等控矿构造。

综上所述，从大地构造范围来看，尚义—崇礼—赤城东西向深大断裂带及河北省境内几条大规模的东西向构造带，都分别控制着一些金矿点的分布（沿大断裂两侧分布）。自太古代以来活动频繁，为大规模多期次的岩浆活动、变质作用、混合岩化作用、金矿化提供了条件。

北西向构造带,大部分含金石英脉充填其中,是金矿的控矿构造骨架。

(三) 岩 浆 岩

区内岩浆活动比较强烈,有元古—太古代、海西期、燕山期三个构造岩浆旋回。岩体分布受构造控制,主要岩体均分布于尚义—崇礼—赤城大断裂带南侧附近。南部广大地段主要是各类岩脉沿构造裂隙充填。

元古—太古代有红花梁黑云母花岗岩,呈岩株状产于桑干群中。1:200 000区调工作^①认为,此系花岗岩化的产物,但无年龄资料佐证。何阳沟、四台咀一带有少量角闪透辉岩及变闪长岩小岩体,也属同期产物。

北部毗邻区海西期岩浆岩非常发育,有崇礼海流图花岗岩和赤城马营花岗岩等。在东西向大断裂两侧还有基性、超基性小岩体群分布。小张山口辉石岩同位素年龄为266Ma,是海西晚期的岩浆岩。

水泉沟构造—岩浆混合岩体,是一碱性正长岩体,东西长33km,南北宽约7km,钾氩同位素年龄266Ma(北京大学邵济安),也为海西期产物。但有不同看法,有的认为是燕山期产物,有的则认为是桑干群上部浅粒岩套受太古代混合岩化作用产生的非岩浆型花岗岩。

燕山期岩浆活动期次多、规模小。早期有谷咀子巨斑状花岗岩(K-Ar年龄177Ma),响水沟巨斑状花岗岩(K-Ar年龄171Ma),均呈椭圆状岩株、小岩枝产出,面积分别为26km²和0.75km²。岩体与围岩界线清楚,但分相不明显,长石斑晶长3—5cm不等。

燕山晚期侵入的花岗岩类,分布在东部,成分有黑云母花岗岩、花斑岩、钾长花岗岩等,均为小岩株或岩枝。区内岩脉较发育,规模大小不等,种类繁多,大多沿构造裂隙充填。生成顺序为,辉绿岩脉→混合质伟晶岩→闪长玢岩→长石石英斑岩→煌斑岩。

(四) 混 合 岩

本区混合岩化作用强烈,但不均匀,无明显的混合中心,形成不同程度的混合岩化变质岩和混合岩。据资料^[1],混合岩化岩石约占80%左右,小营盘地区占72%左右。河北地质三队1:50 000区调资料(1982),将混合岩划分为三个带。

1. 部分混合岩化带(弱混合岩化带)

分布范围大致与涧沟河组相同,形成各类混合岩化变粒岩,基本保留了变质岩成分和结构的特征。

2. 混合岩带(中等混合岩化带)

分布范围大致与水地庄组相吻合。混合岩化作用较为强烈,常见条痕、条带状混合岩。脉体较多,连续性差,多呈凸镜状或钩状体。

^① 河北地矿局二区队,1:200 000龙关幅地质图和矿产图说明书,1970。

3. 强混合岩化带

分布范围大致与西葛峪组 and 花家营组相吻合, 形成均质混合岩。混合岩化作用由主期以重熔为主发展到后期以混合热液交代为主, 与金矿成因关系密切。

总之, 本区混合岩化作用强烈, 说明在升温升压的区域变质作用发展到一定阶段, 重熔或深熔作用和其后的重熔混合交代作用是非常明显的。

各金矿点地质概况见表1。

表 1 各金矿点的地质概况

Table 1 General geological features of various goldfields

矿点 特征	小 营 盘 ^①	张 全 庄	韩 家 沟	水 晶 屯	响 水 沟
围 岩	花家营组混合岩化(透辉)斜长变粒岩	水地庄组和花家营组麻粒岩、变粒岩、混合岩	花家营组和涧沟河组麻粒岩、变粒岩、混合岩	涧沟河组麻粒岩、变粒岩、混合岩	燕山期巨斑状花岗岩, 花家营组和涧沟河组变粒岩、片麻岩、麻粒岩、混合岩
构 造	主脉位于缓倾斜构造中, 构造产状 N46°E/SE, $\angle 40^\circ$ 左右	复式背向形, 断裂分四组: NW, NWW, SN, NE向	背形轴部含矿构造为NEE向NNE向	NW—NWW 向复式背向形, 含矿构造为NW和近SN向	含矿构造为 NE 和 NW 向
含金石英脉的产状	单脉, 产状 N43°E/SE, $\angle 4^\circ$, 长和延伸	含金石英脉沿片麻理产出的规模小, 沿断裂产出的规模大。NW 向含矿断裂带倾角 58° — 72°	主要含金石英脉产状 N5°—35°W/SW, $\angle 20^\circ$ — 30°	含金石英脉产状 N4°—10°W 和 N50°—60°W/NE, $\angle 60^\circ$ — 75°	含金石英脉, 一主脉产于变质岩中, 一部分脉产于花岗岩中。产状 N10°—40°E 和 N50°—60°E/NW, $\angle 5^\circ$ — 55°
矿脉的矿物成分	矿石中金属硫化物含量3%, 主要有褐铁矿、黄铁矿、方铅矿、自然金、黄铜矿、钼铅矿、镜铁矿 少量赤铁矿、铜蓝、孔雀石、白铅矿、碲金矿、银金矿等。脉石矿物有石英、长石, 次为铁白云石、绢云母、绿泥石、方解石、绿帘石等	黄铁矿, 方铅矿, 黄铜矿, 钛铁矿, 彩钼铅矿, 银金矿, 自然金, 石英, 方解石	黄铁矿, 方铅矿, 黄铜矿, 自然金, 碲金矿, 石英, 钾长石, 方解石	黄铁矿, 方铅矿, 黄铜矿, 自然金, 碲金矿, 石英, 钾长石, 萤石, 方解石	黄铁矿, 方铅矿, 黄铜矿, 孔雀石, 自然金, 石英, 长石, 萤石, 方解石

① 河北地质三队1986年资料

三、区域变质岩及变质作用

(一) 区域变质岩类型及其特征

区域变质岩类型及其矿物共生组合(表2)简述如下。

1. 辉石岩、辉石麻粒岩类

可分成三个亚类: 辉石岩亚类, 斜长辉石麻粒岩亚类, 辉石斜长麻粒岩亚类。以层

表 2 张宣地区区域变质岩类型

Table 2 The rock types of regional metamorphics in
Zhangjiakou-Xuanhua region

岩类	亚 类	结 构 构 造	矿物成分及含量 (%)	岩 石 名 称
辉石岩、 辉石麻粒岩类	辉 石 岩	粒状镶嵌变晶结构, 块状构造	暗色矿物>90, 辉石>角闪石	角闪二辉石岩, 透辉石岩
	斜长辉石 麻粒岩 ^①	中一粗粒镶嵌变晶结构, 块状及定向构造	暗色矿物50—90, 长石<50	斜长二辉麻粒岩, 石榴角闪斜长二辉麻粒岩, 角闪斜长二辉麻粒岩, 斜长透辉麻粒岩, 石榴角闪斜长透辉麻粒岩
	辉石斜长 麻粒岩	粒状镶嵌变晶结构, 块状及定向构造	暗色矿物40—50, 长石>50	石榴紫苏斜长麻粒岩, 角闪二辉斜长麻粒岩
长角闪岩、 角闪岩类斜	角闪石岩	中一粗粒镶嵌变晶结构, 块状构造	暗色矿物>90, 角闪石>辉石	角闪石岩
	斜 长 角 闪 岩	中一粗粒镶嵌变晶结构, 块状及定向构造	暗色矿物50—90, 长石<50	斜长角闪岩, 石榴透辉斜长角闪岩, 透辉斜长角闪岩
变 粒 岩 类	角闪斜长 变粒岩	中粒镶嵌变晶结构, 块状及定向构造	暗色矿物10—40, (角闪石>辉石)	角闪斜长变粒岩, 黑云角闪斜长变粒岩, 石榴角闪斜长变粒岩
	辉石斜长 变粒岩 ^②	粒状变晶结构, 块状及定向构造	暗色矿物10—40, (辉石>角闪石)	紫苏斜长变粒岩, 石榴紫苏斜长变粒岩
	角闪、透 辉斜长变 粒岩	中粒(鳞片)状镶嵌变晶结构, 条带状构造	暗色矿物10—40	角闪透辉斜长变粒岩, 黑云角闪透辉斜长变粒岩
石英 岩类	磁 铁 石 英 岩	中一粗粒镶嵌变晶结构, 条带状或片麻状构造	磁铁矿10—25, 石英75—90	磁铁矿石岩, 辉石磁铁矿石岩

① 有人称为暗色麻粒岩或基性麻粒岩

② 有人称为辉石斜长麻粒岩或中性、酸性麻粒岩, 或中色、浅色麻粒岩

状、凸镜状产出, 主要分布在花家营组和涧沟河组中。

(1) 辉石岩类, 包括角闪二辉石(紫苏辉石和次透辉石)岩和透辉石岩。矿物共生组合: ①紫苏辉石+透辉石+角闪石, ②透辉石+角闪石。粒状变晶结构和柱状变晶结构。

(2) 斜长辉石麻粒岩类, 主要包括斜长二辉麻粒岩、石榴角闪斜长二辉麻粒岩(图版1-4)、角闪斜长二辉麻粒岩和(角闪)斜长透辉麻粒岩等。矿物共生组合: ①紫苏辉石+透辉石+斜长石, ②铁铝榴石+紫苏辉石+透辉石, ③紫苏辉石+透辉石+角闪石+斜长石, ④铁铝榴石+紫苏辉石+透辉石+角闪石+斜长石, ⑤透辉石+斜长石, ⑥铁铝榴石+透辉石+角闪石+斜长石($An=30-35$)。中—粗粒镶嵌变晶结构, 块状及定向构造。

(3) 辉石斜长麻粒岩类, 包括角闪二辉斜长麻粒岩、石榴紫苏斜长麻粒岩等。矿物共生组合基本与斜长辉石麻粒岩类相同, 差别在于斜长石含量大于50%, 暗色矿物相应减少。

辉石岩、辉石麻粒岩类, 往往经受了退变作用和混合岩化作用, 出现辉石退变为角闪石和黑云母, 斜长石被钾交代形成条纹长石和反条纹长石现象。本岩类是含金石英脉的赋存围岩之一, 含金背景值可达数个ppb。

2. 角闪石岩、斜长角闪岩类

(1) 角闪石岩类, 主要产于花家营组和涧沟河组中, 在张全庄、韩家沟和响水沟等地均有出露。矿物共生组合: 角闪石±斜长石。角闪石为钙镁绿钙角闪石, 中—粗粒镶嵌变晶结构。

(2) 斜长角闪岩类, 包括斜长角闪岩(图版1-2)、石榴斜长角闪岩、石榴透辉斜长角闪岩和透辉斜长角闪岩类和二辉斜长角闪岩等。矿物共生组合: ①角闪石+斜长石±石英, ②角闪石+斜长石+石榴石+透辉石, ③角闪石+斜长石+透辉石, ④角闪石+斜长石+透辉石+紫苏辉石。斜长角闪岩在各金矿区均有分布。中—粗粒镶嵌变晶结构。

角闪石呈褐绿色, 经电子探针分析为普通角闪石。角闪石可退变为阳起石、黑云母和绿泥石。斜长石受混合岩化影响可被钾交代, 形成条纹长石和反条纹长石。

石榴透辉斜长角闪岩和透辉斜长角闪岩, 在小营盘、韩家沟、张全庄等地有零星出露。石榴石变斑晶发育, 时有黑云母和绿泥石呈网脉状充填交代石榴石。黑云母还可包围石榴石, 组成镶边结构。透辉石可退变为角闪石或阳起石。

3. 变粒岩类

变粒岩有辉石斜长变粒岩、角闪斜长变粒岩、角闪透辉斜长变粒岩等。

(1) 辉石斜长变粒岩类, 包括紫苏斜长变粒岩, 石榴紫苏斜长变粒岩(图版1-3), 石榴透辉斜长变粒岩, 透辉斜长变粒岩。矿物共生组合: ①紫苏辉石+斜长石+石英, ②铁铝榴石+紫苏辉石+斜长石+石英, ③透辉石+斜长石+石英。

(2) 角闪斜长变粒岩类, 包括角闪斜长变粒岩, 黑云角闪斜长变粒岩, 石榴角闪斜长变粒岩等。矿物共生组合: ①角闪石+斜长石+石英, ②角闪石+斜长石+石英+黑云母, ③角闪石+斜长石+石英+石榴石。中粒镶嵌变晶结构, 块状及定向构造。

角闪石一般他形, 长柱状, 浅绿色, 为浅闪石。斜长石 An ($\Pi 10-2$)=23。

(3) 角闪透辉斜长变粒岩类, 包括黑云角闪透辉斜长变粒岩, 角闪透辉斜长变粒岩。矿物共生组合: ①透辉石+角闪石+斜长石+石英, ②透辉石+角闪石+斜长石+石英+黑云母。

以上各类变粒岩分布极为广泛, 多为层状、似层状和厚层状。金的背景值为最高达 5.6ppb (中子活化分析)。

4. 磁铁石英岩类

在小营盘和张全庄矿区均有出露, 但主要分布在花家营组下部, 呈薄层状或似层状, 常与斜长角闪岩伴生。矿物共生组合: ①磁铁矿+角闪石+石英, ②磁铁矿+石英+斜长石, ③磁铁矿+石英+紫苏辉石+次透辉石。中—粗粒镶嵌变晶结构, 条带状或片麻状构造。

(二) 变质矿物及其结晶温压条件

对变质矿物成分的研究, 可提供岩石的成因信息。本文着重研究了辉石、角闪石、石榴石和黑云母。

1. 辉石

辉石在高级变质区是一种常见的造岩矿物, 主要产于辉石岩, 斜长辉石麻粒岩和辉石斜长麻粒岩, 辉石斜长变粒岩, 辉石斜长角闪岩等岩类中。最常见的是紫苏辉石和透辉石, 两者常紧密共生。辉石的化学成分见表 3。

(1) 紫苏辉石 紫苏辉石是辉石岩和辉石麻粒岩类的麻粒岩相标志矿物, 呈他形和半自形粒状分布, 粒度为 0.3—0.7mm, 具多色性, N_p = 淡红色, N_x = 淡绿色, N_m = 淡蓝色。紫苏辉石采自张全庄矿区, 其含镁度 $[100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn})]$ 较高, 达到 54.99—76.22, 紫苏辉石在 $\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 变异图上 (图 4), 均落在变质成因区, 说明是区域变质作用的产物。

(2) 透辉石 透辉石呈自形和半自形粒状结构, 浅绿至深绿色, 无或微弱多色性, N_p = 绿色, N_m = 浅绿色, N_x = 绿色, 粒度 0.3—0.7mm。透辉石的端元组份 $\text{CaSiO}_3 = 45.98 - 47.80\%$, $\text{FeSiO}_3 = 10.02 - 20.51$, $\text{MgSiO}_3 = 33.51 - 42.18\%$, 在 N·Morimoto 的辉石命名法图上属透辉石 (图 5)。另据含镁度计算 (61.62—80.39) 和透辉石系列划分法, 也属于透辉石。

(3) 二辉石温度计 二辉石 (紫苏辉石和透辉石) 对的母岩为石榴角闪斜长二辉麻粒岩, 两种辉石为共生矿物, 采用伍德和板野 (1973) 方法计算, 二辉石结晶平衡温度为 808℃ (表 4)。

2. 角闪石

角闪石分布在各类区域变质岩中, 按照角闪石的分类方案^[36], 它们均属于钙质闪石类, 特点是富镁和钙, 受母岩的化学成分制约。根据角闪石的化学成分分析和利克 (B. E. Leak) 的分类表, 还可将其进一步分成各亚类 (表 5)。按矿物共生特点, 角闪石和辉石的关系, 各类普通角闪石应是高级闪石相的产物, 而阳起石是退变质作用的产物。

关于钙质闪石形成的温压条件, 利用彼尔丘克 (L. L. Perchuk, 1966, 1967) 相图

表 3 辉石的化学成分
Table 3 Chemical compositions of pyroxenes

组 份 序 号 样 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	张82041	张82050	张82040	韩8202	张82041	A33-C	张一10	g-1	张82042
SiO ₂	50.96	51.05	50.18	49.80	49.62	52.02	50.81	51.08	49.80
Al ₂ O ₃	2.00	3.86	4.07	3.47	3.70	3.84	5.08	5.24	3.47
TiO ₂	0.08	0.02	0.12	0.20	0.15	0.29	0.56	0.54	0.20
Fe ₂ O ₃	2.02	1.95	1.43	1.11	1.82	2.82	4.70	3.11	1.11
Cr ₂ O ₃	0.033	未	0.029	0.012	0.013	0.38	0.080	0.085	0.012
FeO	25.12	14.48	10.31	11.83	9.98	6.70	5.32	7.44	11.83
MnO	0.390	0.03	0.18	0.20	0.19	0.28	0.15	0.16	0.20
MgO	17.49	26.70	11.64	10.84	11.50	12.36	12.58	12.06	10.84
CaO	0.64	0.60	21.14	20.70	21.10	20.01	19.83	19.62	20.70
K ₂ O	0.03	0.74	0.02	0.06	0.02	0.04	0.04	0.02	0.06
Na ₂ O	0.02	1.32	0.65	0.73	0.67	0.97	0.75	0.75	0.73
(H ₂ PO ₄)			0.00	0.01	0.00	0.06	0.06	0.06	0.01
H ₂ O	0.54	0.25	0.70	1.01	0.14	0.30	0.32	0.38	1.03
CoO	0.019	未							
NiO	0.022	未							
	99.37	100.00	100.47	99.97	98.88	100.07	100.28	100.55	99.974
Si	2.2849	1.8496	1.8670	1.8670	1.8499	1.9187	1.8639	1.8763	1.8670
Al ^{IV}		0.1504	0.1330	0.1330	0.1501	0.0813	0.1361	0.1237	0.1330
Al ^{VI}	0.1056	0.0106	0.0454	0.0206	0.0125	0.0858	0.0834	0.0792	0.0206
Ti	0.0027	0.0007	0.0034	0.0056	0.0043	0.0079	0.0155	0.015	0.0056
Fe ³⁺	0.0681	0.0531	0.0398	0.0311	0.0511	0.0780	0.1296	0.0861	0.0311
Cr	0.0011		0.0064	0.005	0.0004	0.0111	0.0022	0.0026	0.0005
Fe ²⁺	0.9419	0.4387	0.3208	0.3708	0.3112	0.2066	0.1631	0.2284	0.3708
Mn	0.0148	0.0009	0.0056	0.0063	0.0060	0.0086	0.0046	0.0051	0.0063
Mg	1.1688	1.4146	0.6454	0.6055	0.6389	0.6793	0.6877	0.6601	0.6055
Ca	0.0307	0.0232	0.8426	0.8315	0.8428	0.7908	0.7794	0.7723	0.8315
Na	0.0162		0.0469	0.0532	0.0484	0.0696	0.0534	0.0534	0.0532
K	0.0162	0.0344	0.0009	0.0027	0.0009	0.0018	0.0176	0.0008	0.0027
Ni			0.0119	0.0047	0.0071				0.0047
Co			0.0071	0.0079	0.0063				0.0079
V			0.0071	0.0426	0.0398				0.0426
Cr			0.0509	0.0082	0.0088				0.0082
CaSiO ₃			46.60	46.45	46.41	47.15	47.80	46.49	45.98
FeSiO ₃			17.73	17.95	17.55	12.33	10.02	13.77	20.51
MgSiO ₃			35.67	35.60	36.04	40.52	42.18	39.74	33.51
Mg	52.94	73.44	34.	34.59	34.59	38.42	39.20	37.71	32.98
ΣFe	45.94	25.52	19.89	20.54	20	16.95	16.48	18.29	22.16
Ca	1.36	1.04	45.16	44.87	45.41	44.63	44.63	44	44.86
含镁度	54.99	76.22	66.41	61.62	66.82	75.94	80.39	73.87	61.62

注：矿物名称及其母岩（数字为序号，下同）

1. 紫苏辉石，石榴角闪斜长二辉麻粒岩；2. 紫苏辉石，石榴角闪斜长二辉麻粒岩；3. 透辉石，石榴角闪斜长二辉麻粒岩；4. 透辉石，角闪紫苏透辉石岩；5. 透辉石，石榴角闪斜长二辉麻粒岩；6. 透辉石，黑云母透辉斜长角闪岩；7. 透辉石，石榴角闪斜长二辉麻粒岩；8. 透辉石，石榴斜长二辉麻粒岩；9. 透辉石，石榴角闪斜长二辉麻粒岩

样品产地：1—3，5，7，9. 张全庄；4. 韩家沟；6，8. 小营盘
分析单位：1. 湖北地矿局实验室；2—9. 天津地矿所化验室

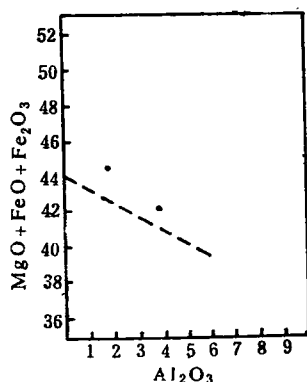


图 4 火成的和变质的斜方辉石区域
(据巴塔彻亚, 1971, 斜线以上为变质的,
以下为火成的)

Fig. 4 Fields of igneous and metamorphic (After C. Bhattacharyya, 1971)

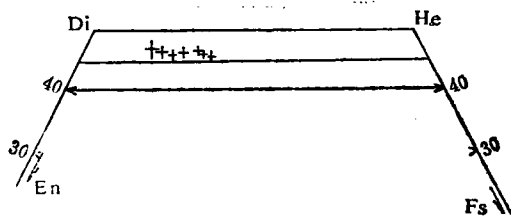


图 5 单斜辉石在莫赖莫托三角图上的分布
Fig. 5 Distribution of clino-pyroxenes in
Wo-En-Fs diagram of N. Morimoto

表 4 二辉石的结晶平衡温度

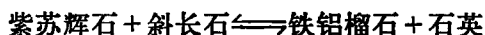
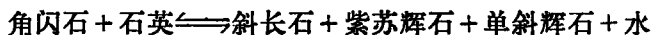
Table 4 Equilibration temperatures of hy and dio crystallizing

编 号	矿 物	$x_{Mg}^{M_2}$	$x_{Mg}^{M_1}$	a_{MgSiO_3}	x_{Pe}^{hy}	$t(^{\circ}C)$
张82041 ¹	紫苏辉石	0.6188	0.5499	0.2524	0.4463	808
张82041	透辉石	0.0093	0.6297	0.0054		808

估测, 石榴透辉斜长角闪岩中石榴石-角闪石矿物对平衡温度为730—680℃, 角闪斜长变粒岩中的角闪石-斜长石矿物对平衡温度为550℃, 石榴角闪斜长二辉麻粒岩中角闪石-斜长石矿物对平衡温度为450—700℃, 温度略偏低, 原因是此角闪石实为阳起石, 可能代表麻粒岩退变的温度(表6, 7)。P. Rasse认为, 角闪石 Al^{IV}/Al^{VI} 的比值(0.2540—4.0115), 是代表生成压力的标志之一。一般比值为2时, 生成压力相当于0.6GPa左右, 比值愈大代表生成压力愈小。本区角闪石的 Al^{IV}/Al^{VI} 比值大部分均大于2, 说明生成压力均小于0.6GPa。唯浅闪石形成压力略高。如利用P. Rasse的 Al^{VI} -Si图解投点(图6), 也显示了角闪石绝大部分投在低于0.5GPa压力的低压区的特点。

3. 石榴石

石榴石产于石榴角闪斜长二辉麻粒岩和石榴透辉斜长角闪岩等区域变质岩石中, 属铁铝-镁铝榴石系列, 含有不同的钙铁-钙铝端元组份, 是过渡系列的类质同象。铁铝-镁铝榴石的成分(表8)与母岩的富铝、富铁有关, 是在区域变质过程中形成的。形成过程大致如下列反应式:



根据石榴透辉斜长角闪岩(s-119)中的石榴石-角闪石矿物对, 采用彼尔丘克(1969)的相图估测其平衡温度为730℃(表9), 采用P. Rasse(1974)和Fleet(1978)资料, 推测角闪石的形成压力小于0.5GPa。