

## 辽西杨家杖子钼矿田的交代系列

林文蔚

(中国地质科学院矿床地质研究所)

### 一、地质概况

杨家杖子钼矿田位于华北地台北缘燕山台褶带内。区内以青龙—锦西—阜新大断裂为界，其南为山海关—北镇隆起，北西部为辽西凹陷。在隆起、凹陷的过渡带内，伴随中生代岩浆活动，形成了著名的杨家杖子—八家子钼—多金属矿带（图1）。

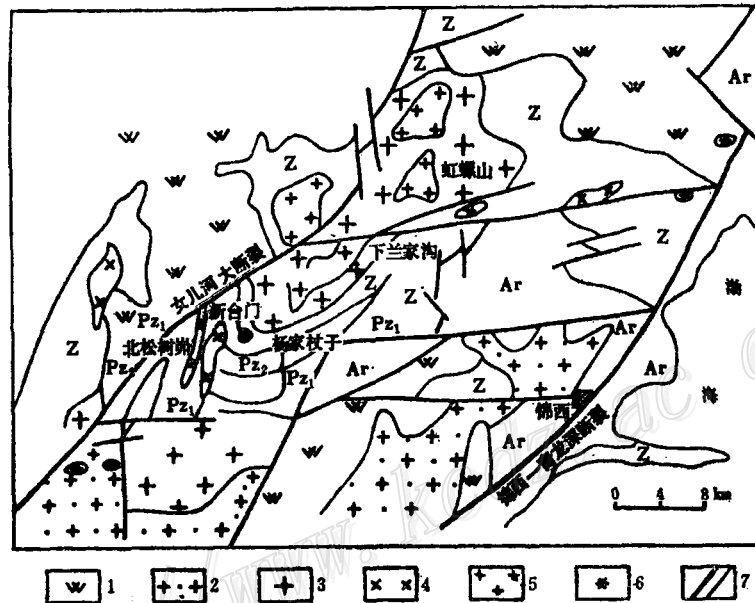


图1 八家子—杨家杖子成矿带北东段地质略图  
(据105地质队)

1—中生界安山岩、碎屑岩；2—黑云母花岗岩—花岗闪长岩；3—粗粒似斑状花岗岩；4—花岗闪长岩；5—细粒似斑状花岗岩；6—花岗岩斑岩；7—深大断裂和断裂；Ar—太古界混合岩、混合花岗岩、片麻岩；Z—震旦系灰岩、砂岩；Pz<sub>1</sub>—下古生界砂岩、灰岩、页岩；Pz<sub>2</sub>—上古生界砂砾岩、页岩

Fig. 1. Schematic geological map of the northeast sector of the Bajiazi-Yangjiazhangzi metallogenic belt.

1—Mesozoic andesite and clastic rocks; 2—Biotite granite-granodiorite; 3—Coarse-grained porphyritoid granite; 4—Granodiorite; 5—Fine-grained porphyritoid granite; 6—Granite porphyry; 7—Deep-seated fault and fault; Ar—Archeozoic migmatite, migmatitic granite and gneiss; Z—Sinian limestone and sandstone; Pz<sub>1</sub>—Lower Paleozoic sandstone, limestone and shale; Pz<sub>2</sub>—Upper Paleozoic sandy conglomerate and shale.

中生代岩浆岩主要沿青龙—阜新大断裂及其西北部的女儿河断裂展布，属同熔—混染—分异型岩浆系列。岩浆岩的各种地质、地球化学特征清楚地显示出由花岗闪长岩—粗粒似斑状花岗岩（188—219Ma）—细粒斑状花岗岩（154Ma）—花岗岩斑岩（131—108Ma）的演化关系。金属元素在岩浆活动的晚期显著富集。岩石

具富硅、碱(钾)、挥发性组分(特别是氟),而贫于铁、镁、钙的特点,属于于弱压性环境的偏碱性的钙碱质岩浆系列。

区内太古界混合岩、混合花岗岩、片麻岩构成本区结晶基底,上覆有震旦系一二叠系以碳酸盐岩、碎屑岩为主的沉积盖层。太古界混合花岗岩具有较高的钼丰度(6—14ppm),为本区花岗岩的富钼属性提供了一定的区域地球化学背景。寒武—奥陶系碳酸盐岩是矽卡岩矿床形成的良好介质条件。

## 二、交代系列

杨家杖子钼矿田包括杨家杖子、北松树崴、新台门、钢屯、兰家沟等矿区。钼矿产出的地质条件、成矿特征、含矿建造等虽不尽相同,但却有着极密切的成因联系,表现出成岩成矿地质、地球化学条件的演替关系,构成与酸性中、浅成岩浆侵入活动有关的矽卡岩—斑岩钼—多金属成矿系列,伴随有相应的交代建造。

赵一鸣等人<sup>[1]</sup>在研究各类交代矿床的基础上提出了交代系列的概念,指出:“交代系列是由两个或多个交代建造组成,它们存在于一定的交代矿床、矿田或成矿区内,并伴有相应的矿化组合或矿床类型。在空间、生成时间和成因上相互间有着十分密切的内在联系”。本文主要以杨家杖子、兰家沟矿床为例,来阐述各类交代建造特征、交代相及其间的成因联系。这些交代建造构成杨家杖子钼矿田与酸性中、浅成岩浆活动有关的统一的含矿交代系列,它包括镁矽卡岩建造、钙矽卡岩建造、石英—碱性长石交代岩建造及与岩浆期后酸性淋滤阶段所伴随的各种交代建造。

(一) 镁矽卡岩建造 镁矽卡岩交代建造仅见于杨家杖子矿区,产于粗粒似斑状花岗岩与震旦系白云岩、白云质大理岩接触带。镁矽卡岩主要矿物为透辉石、粒(斜)硅镁石、斜硅镁石、金云母、镁绿泥石、滑石、蛇纹石、水镁石,金属矿物为磁铁矿,少量黄铁矿。此种建造只与磁铁矿化有关(伴随少量锌)。

镁矽卡岩建造的交代剖面为,

- (00) 粗粒似斑状花岗岩,钾长石( $Or_{58.29}Ab_{41.71}-Or_{56}Ab_{44}$ )、斜长石( $An_{13-19}$ )、石英、镁质黑云母( $Mg' = 0.657-0.604$ ,  $Mg' = Mg/(Mg + Fe + Mn + Ti)$ )、少量锆石、绿泥石、水白云母
- (1) 文象细粒似斑状花岗岩,钾长石、斜长石( $An_{17}$ )、黑云母(蚀变为绿泥石)、水白云母、长石、石英(呈典型文象交生)
- (2) 深绿色粗粒透辉石带,透辉石含铁相对较高( $Di_{85.6-86.69}$ ,  $Hed_{10.28-11.89}$ ,  $Joh_{2.51-3.02}$ )<sup>①</sup>
- (3) 透辉石—金云母—粒(斜)硅镁石—磁铁矿交代带,透辉石( $Di_{96.52-97.48}$ ,  $Hed_{2.08-3.01}$ ,  $Joh_{0.45-0.47}$ )、粒(斜)硅镁石、金云母( $Mg' = 0.95-0.96$ ,  $Si/Al_{3.1-3.4}$ , 含铁率  $0.036-0.043$ , 铝度  $0.131-0.144$ )、磁铁矿及后期矿物蛇纹石
- (4) 浅绿色长柱状透辉石带( $Di_{96.5-96.7}$ ,  $Hed_{2.66-2.96}$ ,  $Joh_{0.59-0.63}$ ),此带中有粒硅镁石—磁铁矿细脉分布
- (5) 镁绿泥石、蛇纹石带,含少量透辉石、滑石
- (6) 镁绿泥石、水镁石带,水镁石含量大于80%,镁绿泥石呈斑团状
- (0) 白云质大理岩、白云岩( $MgO_{23.52}$ ,  $CaO_{35.97}$ )

镁矽卡岩各交代带形成过程中组分的带入、带出量计算结果载于表1,交代剖面岩石及矿物化学成分具有规律变化:①由接触带至白云质大理岩, $MgO$ 、 $CaO$ 含量趋于增高, $SiO_2$ 逐渐减少,外接接触带贫 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 。与此相应,矿物成分发生相应变化,辉石中  $Hed$ 由12%降至2%;在白云质大理岩一侧广泛出现镁绿

①  $Di$ ——透辉石;  $Hed$ ——钙铁辉石;  $Joh$ ——锰钙辉石

表1 镁砂卡岩各交代带组分带人带出计算结果  
Table 1. Calculation results showing the gain or loss of components  
in various metasomatic zones of magnesian skarn

岩石 名称	粗粒花岗岩		细粒文象花岗岩		深绿色透辉 石砂卡岩		金云母-粒 硅镁石-磁 铁矿交代岩		浅绿色透辉 石砂卡岩		绿泥石-水 镁石交代岩		白云质 大理岩	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
SiO <sub>2</sub>	77.03	0	77.25	42.243	51.33	167.267	10.82	5.618	55.01	171.38	1.30	-2.017	2.04	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.66	0	12.55	6.515	1.27	4.063	1.0	0.796	0.28	0.727	0.06	-0.057	0.08	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.66	0	0.67	0.386	1.69	5.244	50.18	49.746	0.68	1.749	3.35	7.774	0.17	0
FeO	0.20	0	0.08	-0.244	3.29	10.85	19.46	19.256	0.72	2.107	0.55	1.144	0.08	0
MnO	0.03	0	0.01	-0.043	0.92	2.989	0.84	0.738	0.23	0.636	0.11	0.168	0.04	0
MgO	0.18	0	0.12	-0.078	15.70	-7.224	15.30	-44.676	18.16	-1.682	67.13	104.469	23.52	0
CaO	0.39	0	0.30	-0.053	24.0	-11.084	0.35	-91.374	25.52	-9.805	0.17	-91.307	35.97	0
Na <sub>2</sub> O	4.06	0	3.81	1.46	0.37	1.243	0.14	0.14	0.28	0.899	0	0	0	0
K <sub>2</sub> O	4.58	0	4.86	3.294	0.05	0.158	0.31	0.30	0.01	0.031	0	-0.01	0.004	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0	0.01	0.005	0.06	0.049	0	-0.153	0.02	-0.089	0.07	0.019	0.006	0
H <sub>2</sub> O	0.08	0	0.23	0.483	1.04	3.494	0.04	0.04	0.10	0.321	27.7	67.865	9.48	0
F	0.015	0	0.017	0.014	0.16	0.495	1.08	1.037	0.013	0	0.18	0.398	0.017	0
CO <sub>2</sub>	0.18	0	0	-0.43	0.09	-72.781	0.30	-72.783	0.09	-72.794	0.13	-72.764	28.66	0
体重	2.39		2.93		3.36		4.08		3.21		2.45		2.55	
	内带				外带									

I—岩石化学分析结果；II—组分带人(+)和带出(-)计算结果(g/100cm<sup>3</sup>)，内带与粗粒花岗岩比较，外带与白云质大理岩比较

泥石、蛇纹石、水镁石等富镁富水矿物，它们是低温阶段水化作用的产物。②金云母-透辉石-粒硅镁石-磁铁矿交代带中，贫铁的金云母(Mg'0.954—0.963)、辉石与磁铁矿共存，反映出高氧逸度的成岩条件。此种建造中的金云母分两个世代，与磁铁矿、粒硅镁石共生者相对富镁富碱，晚期脉状不含矿金云母相对富铁(Mg'0.913—0.931)。③由花岗岩与白云质大理岩接触形成的这一套镁质砂卡岩组合，需从溶液和火成岩中带来大量的SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MnO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>O、F。无论是本区的火成岩或是白云质大理岩均不能满足形成金云母、粒硅镁石、磁铁矿组合所需的铁质，这些铁质、水分、氟只能来源于热液。在交代过程中释放出大量CO<sub>2</sub>，可在很大程度上改变体系的性质。

依据各带矿物组合、形成阶段和温度等标志划分出了透辉石相、金云母-粒(斜)硅镁石-磁铁矿相、镁绿泥石-(滑石)-蛇纹石相、水镁石相。

(二) 钙砂卡岩交代建造 钙砂卡岩建造不仅出现在杨家杖子矿区，也分布于北松树岭矿区。北松树岭矿区的成矿作用与浅成花岗斑岩相伴生，其蚀变矿化特征介于杨家杖子砂卡岩矿床与兰家沟斑岩矿床之间。杨家杖子钙砂卡岩建造分布于粗粒似斑状花岗岩、细粒似斑状花岗岩体之南西部外缘、矿区中部花岗斑岩小岩株的周围。该岩株遭受强烈的硅化作用形成石英核，岩株边部有环形硅质岩、长石-石英条纹岩带(图2)。钙砂卡岩发育于角岩、大理岩互层带及大理岩中，产状基本与围岩一致。矿区内由北向南，自震旦系磁石大理岩、白云质大理岩至矿体顶板方向构成砂卡岩如下分带：镁砂卡岩—透辉石砂卡岩—石榴石透辉石砂卡岩—石榴石砂卡岩—大理岩。钙砂卡岩中主要矿物为透辉石、石榴石、符山石、黝帘石、绿帘石、透闪-阳起石、硅灰石等。叠加热液期的矿物有电气石、金云母、萤石、绿泥石、蛇纹石、低温钾长石、石膏、方解石。在蚀变花岗斑岩中有水白云母、铁锰碳酸盐矿物。

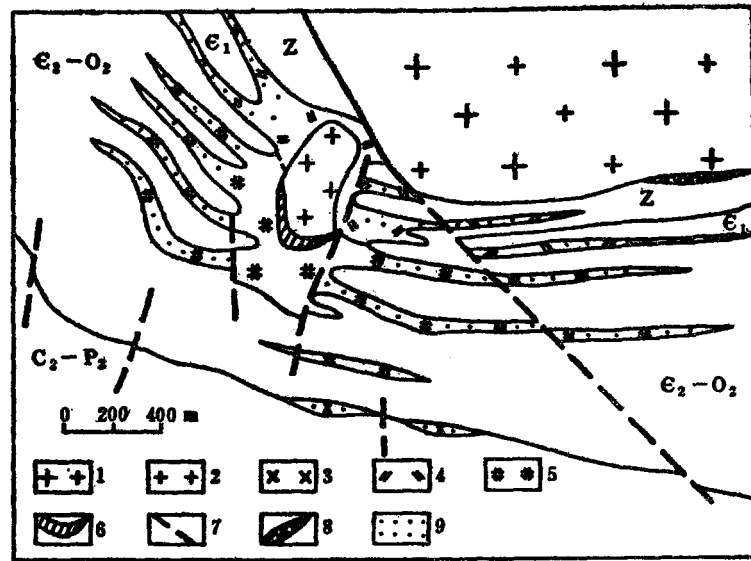


图2 杨家杖子钼矿区地质略图  
(据105地质队)

1—粗粒似斑状花岗岩, 2—细粒似斑状花岗岩-花岗斑岩, 3—花岗斑岩, 4—以透辉石为主的矽卡岩, 5—以石榴石为主的矽卡岩, 6—硅质带, 7—断层, 8—磁铁矿矽卡岩, 9—钼矿化; Z—震旦系硅质灰岩、石英岩; ε₁—上寒武统页岩; ε₂—O₂—中寒武—中奥陶统灰岩; C₂—P₂—中石炭—上二叠统砾岩、砂岩、页岩

Fig. 2. Schematic geological map of the Yangjiazhangzi molybdenum ore district.  
1—Coarse-grained porphyritoid granite; 2—Fine-grained porphyritoid granite—granite porphyry; 3—Granite porphyry; 4—Skarn dominated by diopside; 5—Skarn dominated by garnet; 6—Siliceous zone; 7—Fault; 8—Magnetite skarn; 9—Molybdenum mineralization; Z—Sinian siliceous limestone and quartzite; ε₁—Upper Cambrian shale; ε₂—O₂—Middle Cambrian—Middle Ordovician limestone; C₂—P₂—Middle Carboniferous—Upper Permian Conglomerate, sandstone and shale.



图3 杨家杖子矿区辉石成分三角图

1—钙矽卡岩中的辉石; 2—镁矽卡岩中的辉石

Fig. 3. Triangular diagram showing composition of augite from the Yangjiazhangzi ore district.

1—Augite from calcic skarn; 2—Augite from magnesian skarn.

本区的辉石基本属透辉石-钙铁辉石系列。含锰钙辉石分子0.47—9.58%,多数在1—3%之间,钙铁辉石分子6—41%,大部为10—20%,属透辉石,个别样品为次透辉石及低次透辉石(图3)。钙铁辉石、锰钙辉石分子由镁矽卡岩至钙矽卡岩逐渐增加。在含水矽卡岩中,钙铁辉石、锰钙辉石分子大幅度增加。在透闪石、石榴石、透辉石矽卡岩中钙铁辉石分子增至34—41%,锰钙辉石分子3.8—5.14%。辉石中锰钙辉

石、钙铁辉石分子呈正向相关变化;  $Joh = 0.31 + 0.25Hed$ 。辉石成分的变化, 说明晚期 Fe、Mn 化学势增强。金属元素转变为惰性, 顺序为 Mg—Fe—Mn。辉石是多世代产物, 早期辉石与硅灰石共生, 晚期的辉石与石榴石共有。

石榴石在本区普遍存在, 由矿层底板向顶板含量增加。石榴石中(Fe、Mg、Mn)石榴石分子介于 0.92—6.32%, 多数为 1—3.3%, 钙铝榴石分子为 32—83%, 钙铁榴石分子为 10—60%, 多数为 10—40%。可见本区石榴石以钙铝榴石为主。交代角岩之石榴石, 其钙铝榴石分子较高, 而交代大理岩生成之石榴石含较多钙铁榴石分子。石榴石中辉钼矿化显著。

黝帘石、斜黝帘石呈粗粒放射状, 其富铝端元 (CaAlAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>OH) 介于 75—94%, 其富铁端元 (CaFeAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>OH) 多为 13—24%, 多系交代角岩产物。含铁较高的绿帘石大部分是交代大理岩而成的。辉钼矿多交代黝帘石、斜黝帘石, 沿其解理、裂隙发育, 形成片径较大的自形晶体。含铁较高的黝帘石易受 Cu、Mo 矿化, 而产于大理岩中的放射状绿帘石几乎无 Cu、Mo 矿化。

符山石产出有两种形式: 一种交代大理岩或角岩, 另一种呈脉状产出, 脉状符山石形成较晚, 与脉状黝帘石相近。本区符山石含 MgO 2.02—3.02%, TiO<sub>2</sub> 0.42—3.87%, 绝大部分为 1.35—3.87%, 显示出富镁、富钛的特征, 这可能与下伏震旦系白云质大理岩的深部淋滤有关。

硅灰石系早期高温矿物, 与透辉石共生, 被晚期石榴石交代, 其成分(%): SiO<sub>2</sub> 51.96, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.01, FeO 0.42, MnO 0.33, MgO 0.01, CaO 45.78, Na<sub>2</sub>O 0.06 (电子探针分析)。

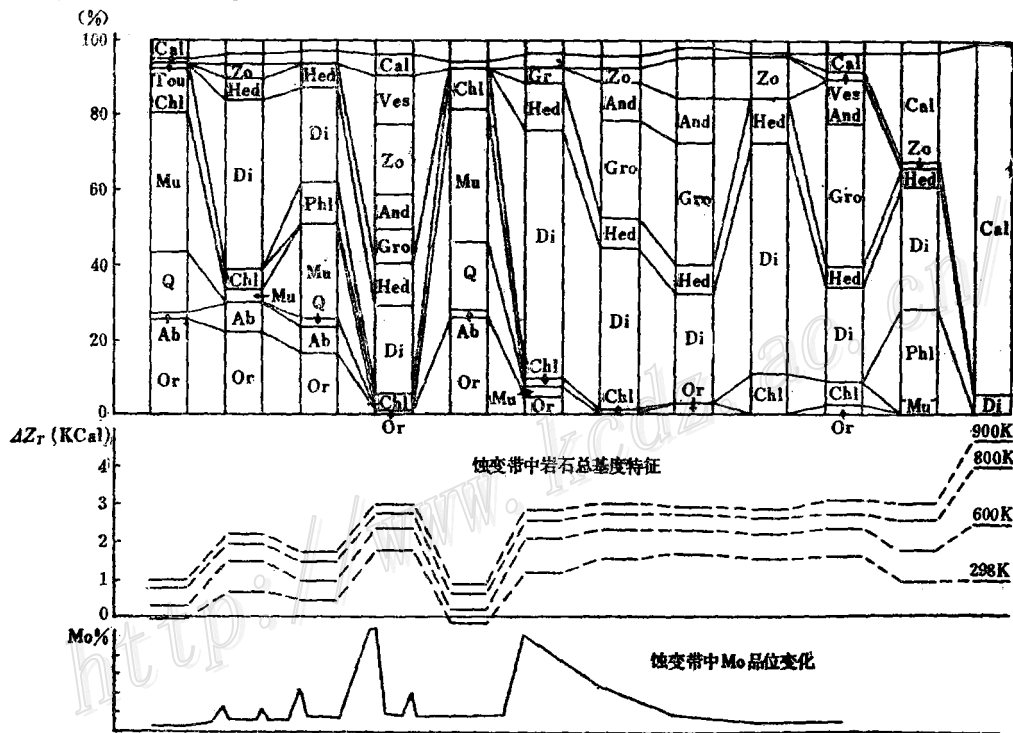


图 4 杨家杖子矿床 - 241m 中段五采电耙道剖面

Cal—方解石; Tou—电气石; Mu—白云母、水白云母、绢云母, Q—石英, Ab—钠长石, Or—钾长石, Chl—绿泥石、镁绿泥石; Zo—黝帘石、绿帘石; Di—透辉石; Hed—钙铁辉石; Gro—钙铝榴石; And—钙铁榴石; Gr—石榴石; Ves—符山石; Phl—金云母(图中纵坐标 KCal 应为 kcal)

Fig. 4. Section along a working at - 241m level of the Yangjiazhangzi deposit.

Cal—Calcite; Tou—Tourmaline; Mu—Muscovite, hydromuscovite and sericite; Q—Quartz; Ab—Albite; Or—Potash feldspar; chl—Chlorite and Magnesian chlorite; Zo—Zoisite and epidote; Di—Diopside; Hed—Hedenbergite; Gro—Grossularite; And—Andradite; Gr—Garnet; Ves—Vesuvianite; Phl—Phlogopite,

晚期含水矿物蓝绿色角闪石、电气石、绢云母、水白云母、镁绿泥石，多系交代角岩而成。透闪-阳起石多分布于大理岩的蚀变产物中。矿区中普遍出现萤石及富氟的含水矿物，反映出本区富氟的地球化学背景。

矽卡岩大部顺层产出，主要由渗滤溶液交代大理岩、角岩而成，辅以角岩、大理岩间的双交代作用，如杨家杖子-241m五采电靶剖面所示（图4）。为较准确确定各带矿物含量，我们采用真实矿物含量及矿物化学成分线性规划拟合方法（另文专述），并佐以电子探针分析、光学统计法以精确厘定各带矿物组成。图4中左半部以角岩为主，角岩夹大理岩，右半部大理岩所占的比例增加，渐变为中厚层状纯质大理岩，由图可以看出：

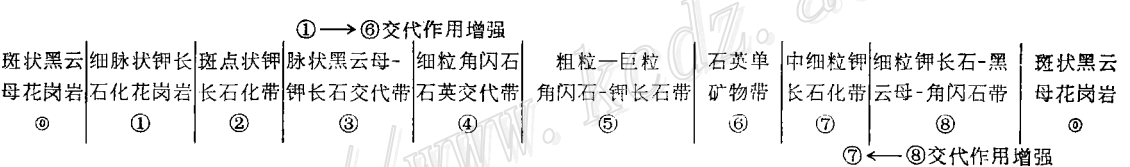
1. 由角岩蚀变的矽卡岩，除矽卡岩矿物外尚有较多的钾长石、绢云母、水白云母、金云母，同时叠加上有电气石、蓝绿角闪石，而在大理岩一侧，辉石、石榴石含量增加，并出现硅灰石、透闪-阳起石。

2. 由角岩蚀变而成的矽卡岩，辉石为透辉石、次透辉石，极少的低铁次透辉石，石榴石相对富铝，帘石族矿物为黝帘石、斜黝帘石，榍石呈细粒分散状；而由大理岩形成的矽卡岩，辉石主要为透辉石，石榴石相对富铁，帘石族矿物以绿帘石为主，榍石晶体粗大，自形程度高。

3. 由角岩蚀变的矽卡岩矿物成分复杂，岩石结构、构造变化大，晚期绿泥石脉发育，普遍见到低温钾长石（Or 95.36 Ab 4.64—Or97.21 Ab2.79），金云母呈浸染状分布；由大理岩蚀变成的矽卡岩矿物组成相对简单，矿物自形程度较高。

4. 蚀变剖面岩石总基度  $\Delta Z_r$ （后详）呈阶跃式变化，特别是剖面左部，由此反映出原岩特征对矽卡岩的强烈控制作用。矽卡岩的矿物组合对角岩来说是一种基性（碱性）的交代作用，而对于大理岩则是一种酸性的交代作用，在不同岩性接触处造成很大的岩石基度梯度。这在矽卡岩晚期矿质沉淀中起着重要作用（图4下部）。

**（三）石英-碱性长石交代建造** 杨家杖子钼矿田的各种花岗岩中广泛发育有石英-碱性长石交代建造，碱性长石以钾长石为主（Or87.52 Ab12.48—Or88.84 Ab11.16）。此种交代建造多发生于岩浆期后阶段的早期，是本区酸性淋滤作用的先导，依其矿物共生组合、交代带的演替关系，可分为石英-钾长石相、石英-钾长石-角闪石（透闪石质普通角闪石、浅闪石）相、石英-钾长石-黑云母相。本区此种交代建造最显著的特点是形成一套富钾、贫钙的岩石组合。该种交代建造的典型剖面见于杨家杖子张家沟的花岗岩中，其分带剖面如下：

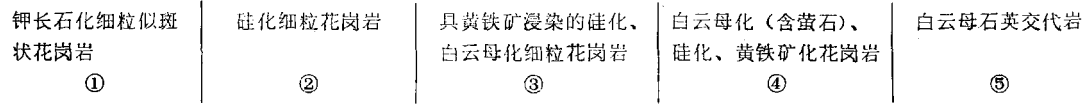


上述剖面，随交代作用由弱至强，新生矿物依下列次序排布：钾长石—黑云母—角闪石—长石、石英单矿物带，反映出Ca—Fe—Mg—K—Al的组分活动序列，Ca、Fe、Mg等碱土组分较碱金属有更大的活动性。岩石中新生矿物由脉状—斑点、团块状—稠密浸染状，最终导致于石英单矿物带的形成。此时Al已变为活动组分。石英-碱性长石建造于兰家沟矿区也很发育，主要为石英-钾长石相、石英-黑云母相。浅部碱性长石中钠长石分子较多，深部钠长石分子减少。

本区此种交代建造虽仅有稀疏钼染，但它往往是其它矿建造的先导，同时碱质的活动对酸性金属的运移起着重要作用，因此，它仍不失为一种重要的找矿标志。随温度的降低，溶液酸度的增强可过渡为云英岩建造。

**（四）与岩浆期后酸性淋滤阶段所伴随的交代建造** 岩浆期后酸性淋滤阶段的交代建造广泛发育于兰家沟矿区，它包括云英岩建造、黄铁-长英岩建造、泥化岩建造。酸性淋滤阶段所形成的交代建造的共同特点是由于酸性溶液的作用致使基性组分顺序带出，使剖面向着最大酸度的石英单矿物带方向演化。

云英岩建造, 发育于矿区南东部粗粒似斑状花岗岩与细粒似斑状花岗岩接触带附近, 此区云英岩化强度不大, 其蚀变剖面为:



随着交代作用的进行, 斜长石被钾长石交代, 斜长石消失, 钾长石被石英、白云母交代, 并有金红石、锆石生成, 最后形成石英白云母交代岩。在第五带中, 石英、白云母开始分异富集(石英可达63%), 但尚未形成石英、白云母单矿物带。云英岩建造中相对富F(0.05—0.251%), 白云母中F为0.63%。上述剖面反映出随交代作用的进行Fe、Ca、Na等组分减少, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、F的含量增加, 其组分活动序列为Fe—Mg—Na。此种建造深部渐变为黄铁绢英岩, 出现较多的黄铁矿及碳酸盐矿物。这两个建造包括石英—钾长石—白云母相、石英—白云母相、石英—绢云母—铁镁碳酸盐—黄铁矿相。云英岩建造在一定程度上与Mo、Pb、Zn、W、Sn矿化有关, 但尚未构成工业矿床。

酸性淋滤阶段的各种交代建造可在同一剖面上相互叠加, 各种建造强烈发育地段也往往是最优矿化地

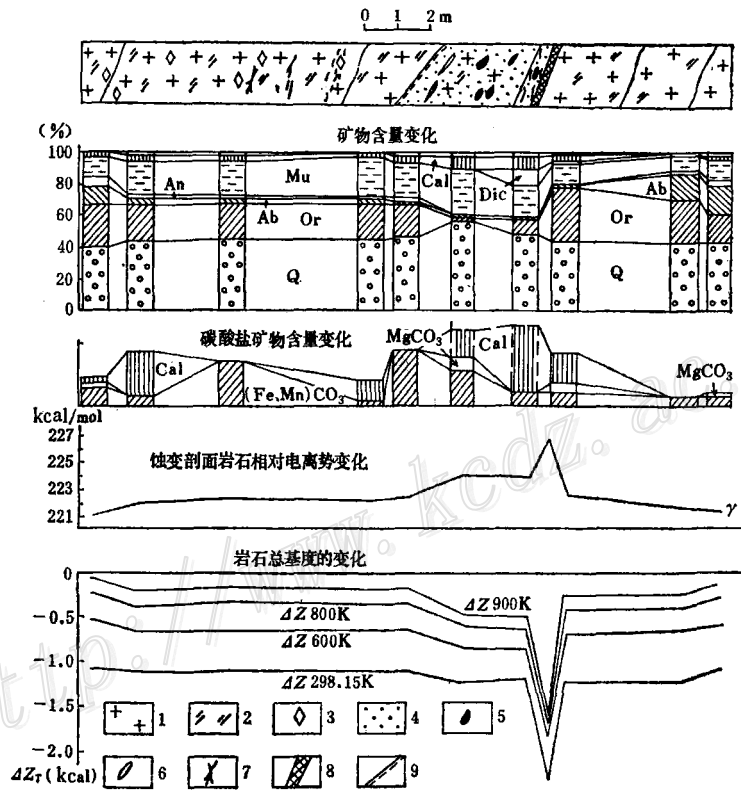


图5 兰家沟矿区II-20矿体综合剖面图

1—花岗岩; 2—伊利石-水白云母; 3—碳酸盐化; 4—强硅化; 5—团块状、细脉状石英; 6—方解石脉; 7—辉钼矿细脉; 8—矿体(石英脉); 9—破碎带; Dic—粘土矿物; 其余同图4

Fig. 5. Comprehensive section of II-20 orebody of the Lanjiagou ore district.

1—Granite; 2—Illite-hydromuscovite; 3—Carbonatization; 4—Intense silicification; 5—Massive or veinlet quartz; 6—Calcite veins; 7—Molybdenite veinlet; 8—Orebody (quartz vein); 9—Fracture zone; Dic—Dickite (clay minerals). Other symbols as for Fig. 4.

段。兰家沟矿区石英-碱性长石交代建造、石英-绢云母建造、泥化岩建造往往共同产出，在剖面中相依出现，最后形成富硅、富铝的矿物组合（图5）。图5所示：①以矿体为界蚀变剖面有近似的对称分布，但以上盘更为发育；②随交代作用的增强斜长石、钾长石依次减少并被石英、白云母（水白云母）取代，形成石英单矿物带；③碳酸盐矿物有两种产出形式，方解石多呈脉状，系晚期产物，铁锰碳酸盐（菱锰矿、铁白云石）多呈微细小脉或浸染状分布，常伴有Mn、Zn矿化，且有近矿体增多的趋势，是一种重要的近矿蚀变；④岩石相对电离势向矿体方向增加，至矿体达到峰值；⑤岩石基度向矿体方向有规律降低，随交代作用增强，蚀变矿物组合酸度增加，表现出酸性淋滤的特征；⑥随交代作用的增强白云母中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量增高（33.12—34.10）。强烈交代地带，K开始活化转移，形成富铝的粘土矿物。上述各带矿物成分的变化说明蚀变剖面组分活动顺序为Fe—Mg—K—Al—Si。随交代作用的进展酸性大离子团的作用增强。

酸性淋滤阶段的交代建造是本区最重要的交代建造，是钼矿化最重要标志。

伊利石-水白云母、铁锰碳酸盐是本区普遍存在的矿物（兰家沟、杨家杖子、北松树岭），反映出这些矿区间蚀变、矿化的成生联系。本区二八面体云母主要是属水云母，其八面体层中R<sup>3+</sup>介于3.2—3.8，四面体中R<sup>3+</sup>为1.2—1.8，另一部分八面体中R<sup>3+</sup>为2.8—3.2，四面体R<sup>3+</sup>为0.8—1.2的伊利石。

### 三、本区交代建造研究中的几个问题

（一）交代建造的形成时代 对本区主要交代建造进行了K-Ar法年龄测定，其结果如下（表2）。杨家杖子矿田一些主要交代建造形成于燕山早期，联系本区花岗岩也被矿化的事实，说明杨家杖子矿田的蚀变、矿化经历了漫长的历史，在此地质历史中，岩浆不断演化，多阶段侵入，长期分异促使矿质不断集中，矿化规模也愈来愈大。

表2 主要交代建造 K-Ar 法年龄测定结果

Table 2. K-Ar ages of major metasomatic formations

样品号	采样地点	所属建造	测定矿物	K (%)	<sup>40</sup> Ar/ <sup>40</sup> K	年龄值 (Ma)
Yb-52	张家沟	镁砂卡岩	金云母	8.05	0.01142386	186.61
Yb-14	张家沟	石英-碱性长石交代岩	角闪石	0.722	0.01224549	199.336
241-40	杨家杖子	钙砂卡岩	金云母 (脉)	7.28	0.01300983	211.06
L-114	兰家沟	云英岩	白云母	8.63	0.0115619	188.75

（中国地质科学院地质所测定）

（二）钙砂卡岩的温度相、酸度相 温、压条件对共生辉石-石榴石矿物对成分的影响已宿有研究，S. K. Saxena<sup>[3]</sup>基于实验资料导出共生辉石-石榴石矿物对成分与温、压条件的关系式（公式省略）。依此公式对本区钙砂卡岩形成温度进行估测（表3）。计算中压力取10<sup>8</sup>Pa。

B. A. Харников等人<sup>[5,6]</sup>基于Fe、Mg、Al等组分在共生辉石-石榴石间的分配得出随酸度的增高将引起辉石含铁性的增高，石榴石含铁性降低，碱度的增高导致相反的结果的结论，并做了相应的实验研究。

笔者基于反应方程  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \frac{1}{2}\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{Al}^{3+} + (\text{OH})^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CaFeSi}_2\text{O}_6 + \frac{1}{2}\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{Mg}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ ，导出共生辉石-石榴石矿物对的成分与溶液酸度的近似表达式：

$$\text{pH} = -0.43429 \left\{ \frac{\Delta G_{0T}}{2RT} + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{Cpx}}}{1 - X_{\text{Fe}}^{\text{Cpx}}} / \left( \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{Grt}}}{1 - X_{\text{Fe}}^{\text{Grt}}} \right)^{1/2} \right] \right\} - 0.2171 \ln \frac{X_{\text{Mg}}}{X_{\text{Al}}}$$

式中R为摩尔气体常数，X<sub>Fe</sub><sup>Cpx</sup>、X<sub>Fe</sub><sup>Grt</sup>分别为单斜辉石中钙铁辉石摩尔分数及石榴石中钙铁石榴石摩尔分数，X<sub>Mg</sub>、X<sub>Al</sub>为溶液中Mg、Al离子摩尔分数。在较精确计算时，上述各量应用相应组分活度替代，组分的活度



系数可借助于多元混合热力学模型求出。以此式对本区主要类型的矽卡岩形成酸度进行估算(表3)。应该说明 S. K. Saxena 算式中未考虑到三价铁、铝之间的交换反应,可能给计算带来一定的误差。在我们的算式中附有  $0.2171 \ln(X_{Mg}/X_{Al})$  项,目前尚无简单办法确定溶液中 Mg, Al 活度比,但对于交代作用中  $\alpha_{Mg}$  与  $\alpha_{Al}$  相差不大的地段,不考虑  $X_{Mg}/X_{Al}$  的影响,用上式可做近似估算。由表3我们可以看出,硅灰石透辉石矽卡岩形成温度最高,石榴石透辉石矽卡岩次之,黝帘石、石榴石、透辉石矽卡岩为 470—530℃,而以透辉石石榴石矽卡岩温度相对较低,尤其是以濒临大理岩以石榴石为主的透辉石石榴石矽卡岩温度最低,仅 450℃。

表3 共生辉石-石榴石矿物对成分及形成温度、酸度的计算结果  
Table 3. Composition, formation temperatures and acidities of the paragenous augite-garnet pair

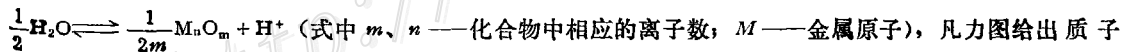
样品编号	岩性	辉石			石榴石			T (°C)	$Ph + 0.2171 \ln \frac{X_{Mg}}{X_{Al}}$
		Di	Hed	Joh	Gro	And	Gra		
YM-8-1	硅灰石透辉石矽卡岩	60.39	34.46	5.14	77.09	20.12	2.78	715	6.97
241-45-2	石榴石透辉石矽卡岩	79.71	16.71	3.58	64.16	32.27	3.58	562	6.55
241-392-1	黝帘石石榴石透辉石矽卡岩	81.47	16.84	1.69	58.85	38.46	2.69	503	6.31
241-392-2	黝帘石石榴石透辉石矽卡岩	83.47	13.91	2.62	55.51	41.33	3.16	493	6.36
241-45-1	黝帘石石榴石透辉石矽卡岩	90.09	9.15	0.76	69.52	27.8	2.68	474	6.32
241-54-2	黝帘石石榴石透辉石矽卡岩	84.91	12.55	2.54	55.96	41.15	2.89	469	6.29
241-34-1	透辉石石榴石矽卡岩	85.60	11.75	2.65	55.11	42.09	2.80	486	6.39
241-34-2	透辉石石榴石矽卡岩	85.40	11.71	2.89	58.06	39.20	2.73	481	6.0
241-14-3	透辉石石榴石矽卡岩	93.33	6.07	0.60	64.35	32.35	3.30	453	5.90

Di—CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; Hed—CaFeSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; Joh—CaMnSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; Gro—Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>; And—Ca<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>; Gra—(Fe, Mn, Mg)<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>

本区各类矽卡岩形成的pH值约为6.0—7.0之间(未考虑Mg、Al活度比影响),说明本区的矽卡岩形成于中性—弱碱性环境。

(三) 交代岩岩石总基度(碱度)研究的地质意义 在对火成岩的研究中,传统的方法分别以 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 做为岩石酸碱性的标度。然而天然岩石、矿物的生成,是在一定物理化学条件下各种元素综合作用的结果。对于岩石化学的进一步研究必须考虑到所有造岩元素的习性和成岩物理化学条件,为此马拉

库谢夫等人<sup>[1,8,9]</sup>基于质子反应理论,提出岩石总基度概念及计算方法,如有下述反应  $\frac{n}{2m} M^{\frac{n+2m}{2}}$



者属于酸,凡物质与质子强烈结合倾向者称为碱。即上述反应自由能  $\Delta Z_r$  为较大的正值是碱金属的属性,  $\Delta Z_r$  近于 0 是两性金属,  $\Delta Z_r$  为负值时为酸性组分。笔者将这一原理引入到交代作用的研究中,离子基本热力学数据采用马拉库谢夫的数据,矿物生成自由能以 Robie (1978) 手册为基础,对缺乏热力学数据的矿物以 Chen Chao-hsia<sup>[4]</sup> 的方法进行估算。图4及图5分别为杨家杖子矿区钙矽卡岩剖面及兰家沟矿区酸性淋滤蚀变剖面,由这两个剖面可以看出:①两种不同岩性接触带岩石总基度发生突变,产生很大的岩石基度梯度;②杨家杖子钙矽卡岩剖面明显有别于兰家沟酸性淋滤剖面,它是基性矿物组合,其岩石基度远高于兰家沟矿区。兰家沟矿区蚀变剖面是酸性、强酸性矿物组合;杨家杖子矿区蚀变剖面岩石基度发生大幅度阶跃变化。兰家沟矿区岩石基度变化较小,曲线平缓;杨家杖子矿区矽卡岩的生成对岩角来说使岩石基度增高,对大理岩则是一种酸度增加的反应。而兰家沟矿区  $\Delta Z_r$  的变化指示出它是一种酸性淋滤反应,随

交代作用的进行,岩石基度降低。岩石基度的研究有助于揭示交代作用的实质和体系的物理化学性质。③矿化都集中在岩石总基度最大梯度带(图4下部)。角岩与大理岩互层蚀变易于形成这种基度梯度,在兰家沟矿区含矿石英脉与花岗岩接触处是岩石基度最大梯度带。富矿体均集中于此带。④两种差异较大的岩石接触带,两侧岩石基度不同,当含矿溶液作用于岩石时极易改变溶液性质,促使金属沉淀。酸碱反应伴随电化学现象,从而使不同酸度的组分分异沉积。同理,基度相差较大的不均一岩石必然易于矿化。⑤碳酸盐岩在高温情况下基性程度很强,易与相邻的岩石产生很大的基度梯度,在低温条件下碳酸盐岩的基度迭降。交代作用中产生的CO<sub>2</sub>可迅速改变溶液的性质、酸度、氧化还原状态,同时相应络合物的形成是携带某些金属的因素之一。因此,碳酸盐岩作为成矿有利岩石,决非单纯是对其物理性质有利,而且蕴含着重要的物理化学机理。⑥厚大的单矿物岩带,基性度相似的矿物构成的岩石以及均质结构的岩石,当无适当构造配合时对成矿不利。

纵观杨家杖子钼矿田各类交代建造种种特征及其内在联系,它们构成了杨家杖子钼矿田统一的交代成矿系列,各矿区之间的差异是由成岩成矿的深度、围岩介质条件、岩浆演化阶段及具体的物理、化学条件所决定的。

笔者在野外工作期间曾得到付同生、阎树魁等人的大力帮助,谨致谢意。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵一鸣等 1985 中国矽卡岩矿床的几个重要交代系列 国际地质交流学术论文集(4) 地质出版社
- [2] 裴喜璠 1981 杨家杖子钼矿区域地质特征及其找矿标志 辽宁地质学报 第1期
- [3] Saxena, S. K., 1979, Garnet-clinopyroxene geothermometer. Contribution to Mineralogy and Petrology, Vol. 70, No. 3, pp.229—235.
- [4] Chao-hsia Chen, 1975, A Method of estimation of standard free energies of formation of silicate minerals at 298.15K. American Journal of Science, Vol. 275, pp.801—817.
- [5] Жариков В. А., 1968, Скарновые месторождения. В кн: "Генезис эндогенных рудных месторождений", М., Издат. "Недра".
- [6] Жариков В. А., Аксюк А. М. и Коржинский М. А., 1979, Влияния кислотности раствора на распределение железа между пироксеном и гранатом. В кн: "Проблемы Физико-химической петрологии" М., "Наука".
- [7] Маракушев А. А., 1973, Кислотно-щелочные свойства минералов и петрохимические расчеты. Ж. Вестн. М., Ун-та, Сер.Геология, №. 5.
- [8] Маракушев А. А., 1976, Метод термодинамического расчета показателей основности горных пород и минералов. Бюллетень М., О-ва ИСП, природы, Отдел Геологии, Т. II (1).
- [9] Маракушев А. А., 1978, Основность минералов горных пород и минеральных равновесий-Изв. АН СССР. Сер, Геол., №. 8.
- [10] Граменицкий Е. Н. и Зиновьева Н. Г., 1984, Минеральные фацции Формации кварц-полевошпатовых метасоматитов. В кн: "Метасоматизм и Рудообразование". М., "Наука".

## THE METASOMATIC SERIES OF THE YANGJIAZHANGZI MOLYBDENUM ORE FIELD

Lin Wenwei

*(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)*

### Abstract

The Yangjiazhangzi molybdenum field is located in Yaanshan fold-belt on the northern margin of the North China platform. The well-known Bajiazi-Yangjiazhanzi molybdenum-polymetal minerogenic belt was formed as a result of activities and gradual evolution of Mesozoic magmas.

Due to different emplacement depths of magmas, diverse host rock media and varying rock-forming and ore-forming physicochemical conditions, a suite of metasomatic formations was developed which were different from but genetically closely related to each other, thus forming a unified metasomatic series in the Yangjiazhangzi ore field. The main metasomatic formations are described as follows:

Metasomatic formation in the Yangjiazhangzi ore district: (1) metasomatic formation of medium-coarse grained granite, fine-grained porphyritoid and granite porphyry; (2) quartz-alkali feldspar metasomatic formation; quartz-potash feldspar phase, quartz-potash feldspar-hornblende phase and quartz-potash feldspar-biotite phase; (3) pyritic felsite formation; quartz-sericite-pyrite phase; (4) magnesioskarn formation at the contact of igneous rocks and dolomitic marble; diopside phase, chondrodite-clinohumite-phlogopite-magnetite phase, amesite-lizardite (talc) phase and brucite phase; (5) calciskarn formation; wollastonite-diopside phase, diopside-garnet phase, vesuvianite phase, zoisite, clinozoisite and epidote phase and tremolite-actinolite phase; (6) quartz-tourmaline formation in metamorphic hornstone.

Alteration formation in the Lanjiagou ore district: (1) quartz-alkali-feldspar metasomatic formation; quartz-alkali feldspar phase, quartz-potash feldspar-biotite phase and quartz-potash feldspar-muscovite (hydromuscovite) phase; (2) greisen formation; quartz-potash feldspar-muscovite phase and quartz-muscovite phase; (3) pyritic felsite formation; quartz-sericite-amesite carbonate-pyrite phase; (4) quartz-sericite formation, chlorite formation, etc.

The formation age of the main metasomatic series has been determined to be 1866—211 Ma, and the related mineralizations and alterations proceeded until Late Yanshanian. The formation temperature and acidity of calciskarn have been studied through examining paragenetic minerals. Calciskarn seems to have occurred at 370—560°C and in intermediate-weakly alkaline environment. Based on the distribution proportion of Fe, Mg, Al and other components in the association of pyroxene-garnet, the approximately estimated equation of the solution acidity has been obtained, and an investigation into the total basicity has been performed for the main altered zones, indicating that metals were precipitated in the largest gradient zone of basicity.

Every metasomatic formation has its own geological environments, and each metasomatic phase is characterized by its specific mineral assemblage, rock-forming physicochemical conditions and activity of components. On the whole, the Yangjiazhangzi ore field underwent high temperature alkali metasomatic stage, calcimagnesium metasomatic stage and acid leaching stage with ore minerals mainly formed in acid leaching stage and later. Each metasomatic formation is accompanied by a specific minerogenic phase.

## 消息报道

### 第七届国际矿床成因协会科学讨论会

#### Symposium of the Seventh Session of the International Association on Genesis of Ore Deposits

国际矿床成因协会(International Association on Genesis of Ore Deposits) 1964年建立于新德里,同时成为国际地科联下属的矿床专业学术组织,每四年举行一次学术讨论会。1986年第七届讨论会由瑞典、芬兰和挪威地质调查所以及瑞典 Luleå 大学共同主办, Nordic 地球研究院、矿山工业部和 Nordic 部长委员会赞助。讨论会于8月17日至22日在瑞典 Luleå 大学召开,会前(8月12日至16日)和会后(8月23日至29日)分别组织了十条路线的地质考察。十条路线是:①奥斯陆古裂谷与成矿;②斯堪的纳维亚加里东造山带中部层控硫化物矿化;③芬兰西南部和瑞典 Bergslagen 成矿省的矿床;④瑞典 Skellefte 区块状硫化物矿床;⑤芬兰中部元古代矿床;⑥斯堪的纳维亚最北部的前寒武纪矿床;⑦瑞典与花岗岩类有关的元古代矿化;⑧芬兰、挪威和瑞典北部太古代和元古代地质;⑨—⑩瑞典 Enåsen 金矿和 Alnö 碱性杂岩。出席会议的代表约430人,来自43个国家,会议规模比较庞大。

本届会议共宣读论文176篇。其中开幕式论文4篇,闭幕式1篇, Nordkalott 项目(瑞典、芬兰和挪威三国北纬66°以北综合填图项目)9篇,大地构造与成矿18篇,矿床共生组合13篇,成矿流体包裹体13篇,萤石、重晶石矿床9篇,矽卡岩矿床13篇,锰矿床7篇,锡和钨矿床17篇,前寒武纪地盾区金矿22篇,块

(下转44页)