



内蒙古地区锑矿床特征及成矿规律

包德军¹, 李瑞瑞¹, 谢园宏¹, 陈方溥¹, 崔龙生²

1. 辽宁省化工地质勘查院有限责任公司, 辽宁 锦州 121007;
2. 内蒙古盛旺矿业有限公司, 内蒙古 东乌珠穆沁旗 026300

摘 要: 通过对内蒙古地区锑矿床地质特征的总结及典型锑矿床地质特征的详细研究, 对比中国典型锑矿床控矿因素, 从成矿大地构造背景、含矿岩系、控矿构造等方面对该地区锑矿的成矿规律进行初步探讨, 认为内蒙古地区锑矿的成因类型可以划分为碎屑岩地层中热液型、火山热液型两种类型; 各矿床中含矿岩系多为晚古生代泥盆系至二叠系之间, 具有近东西向线性分布的特征; 矿(化)体主要受控于近东西向断裂构造带, 成矿作用可能与板块碰撞过程中的俯冲增生造山作用有关; 滨海相、浅海相、半深海相或海陆交互相沉积环境下的还原条件下形成的暗色细碎屑岩系是赋矿的有利层位; 锑矿热液的形成可能与深部幔源-幔源的构造岩浆活动有关。

关键词: 锑矿; 典型矿床; 成因类型; 成矿规律; 内蒙古

CHARACTERISTICS AND METALLOGENIC REGULARITY OF ANTIMONY DEPOSITS IN INNER MONGOLIA

BAO De-jun¹, LI Rui-rui¹, XIE Yuan-hong¹, CHEN Fang-pu¹, CUI Long-sheng²
1. Liaoning Chemical Geological Exploration Institute Co., Ltd., Jinzhou 121007, Liaoning Province, China;
2. Inner Mongolia Shengwang Mining Co., Ltd., East Ujimqin Qi 026300, Inner Mongolia, China

Abstract: Based on the study of geological characteristics of antimony deposits in Inner Mongolia and typical antimony deposits, with comparison of the ore-controlling factors between typical antimony deposits in China, the paper discusses the metallogenic regularity of antimony deposits in Inner Mongolia from the aspects of metallogenic tectonic background, ore-bearing rock series and ore-controlling structure. It is considered that the antimony deposits in Inner Mongolia can be classified into hydrothermal type in clastic strata and volcanic hydrothermal type. The ore-bearing rock series in these deposits were mostly formed in Late Paleozoic Devonian-Permian, with the characteristics of nearly E-W linear distribution. The ore/mineralized bodies are mainly controlled by the nearly E-W-trending fault belt, and the mineralization may be related to the subduction-accretion orogeny during plate collision. The dark fine clastic rock series formed in the reduction conditions of littoral facies, neritic facies, bathyal facies or interactive marine-terrestrial sedimentary environment are the favorable horizon for ore-hosting rocks. The formation of antimony hydrothermal solution may be related to the deep mantle-mantle source tectonic magmatic activity.

Key words: antimony deposit; typical deposit; genetic type; metallogenic regularity; Inner Mongolia

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-03-04. 编辑: 李兰英.

基金项目: 赤峰市政府项目“赤峰矿业(集团)有限责任公司矿业权(林区片区)合作勘查开发”(B1504000001000014002).

作者简介: 包德军(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事矿产资源勘查与评价和区域地质调查, 通信地址 辽宁省锦州市经济技术开发区贺兰山路三段 6 号, E-mail//275590291@qq.com

0 引言

锑是现代工业中应用极其广泛的金属矿产,主要应用于阻燃剂、合金及抗腐蚀材料,甚至在早先被应用于医疗药品,治疗血吸虫病。地壳中锑的平均丰度约为 0.2×10^{-6} ,属于较稀少的金属元素^[1]。中国是世界上锑矿资源最丰富的国家之一,储量、产量居世界首位^[2]。据统计大中小型锑矿床已经超过170处^[3],以湖南、广西、西藏、贵州和云南等地较为发育。内蒙古地处中亚造山带,是我国矿产资源种类、矿床类型较为齐全的省区,其能源综合实力居全国首位^[4]。据统计全区现已发现各类矿床4000余处,种类达120余种。其中以稀土矿、铬铁矿、有色金属矿、芒硝矿等为全国乃至世界闻名。关于内蒙古自治区锑矿资源的相关研究、总结报道则尤为稀少。因此,本文根据收集的大量相关文献、专著等对区内锑矿矿产资源分布、典型锑矿床特征及其成矿规律作初步探讨,以期为本区锑矿的找矿勘查及相关的科学研究工作奠定基础。

1 内蒙古锑矿资源概况

1.1 矿产地与分布

内蒙古地域辽阔,地质构造错综复杂。其中新元古代—古生代大地构造位置地处西伯利亚板块、华北板块及塔里木板块三大板块交汇处,其二级构造单元由华北地块、华北地块北部陆缘增生带、西伯利亚板块东南陆缘增生带、哈萨克斯坦板块、塔里木板块5个部分组成^[5],为天山—兴蒙造山系的重要组成部分。中生代以来东西分异,东部受燕山期环太平洋构造域的影响,体现为大兴安岭构造—岩浆活动带,西部则进入东天山—北山复合造山带。截至2021年,内蒙古自治区境内已发现锑矿床、矿点6处(见图1),其中包括中型矿床1处,小型矿床3处,矿点2处(表1)。

表1 内蒙古自治区锑矿资源概况

Table 1 Summary of antimony resources in Inner Mongolia

矿床(点)名称	地理位置	矿床规模
阿木乌苏锑矿	额济纳旗	小型
鹿咀子锑矿	额济纳旗	小型
红石山南锑矿	额济纳旗	小型
阿德格色格格东锑矿	阿拉善左旗	矿点
呼布敦陶勒盖锑矿	东乌珠穆沁旗	中型
前地锑矿	林西县	矿点

1.2 矿床成因类型

陈毓川等^[7]将我国锑矿床划分为4种类型:岩浆热液型、碳酸盐地层中热液型、碎屑岩地层中热液型和火山岩地层中热液型。根据内蒙古地区各矿床(点)中矿体的产出形态、矿石结构构造及其矿物共生组合、围岩蚀变特征等初步判断,本区矿床成因类型应为受断裂构造控制的中低温热液充填—脉状锑多金属矿床。按上述分类方案,全区锑矿床成因类型大体可以划分为以下两种类型。

(1)火山岩地层中的热液型矿床:目前仅发现1处,即位于额济纳旗赛汗桃来苏木的阿木乌苏小型锑矿床。其含矿岩系为中二叠统金塔组,由一套火山岩、火山碎屑岩夹少量正常碎屑沉积岩组成,安山岩是区内锑矿的主要赋矿层位,有50%以上的锑矿脉产于金塔组的安山岩断裂带中^[6]。有分析显示,此类岩石是区内锑成矿的主要物质来源^[6]。

(2)碎屑岩地层中的热液型锑矿床:包括额济纳旗北山鹿咀子小型锑矿床,含矿岩系为下石炭统红柳园组,由浅海相碎屑岩及中酸性火山岩及熔结凝灰岩夹少量凝灰质砂岩及玄武岩组成;额济纳旗红石山南小型锑矿床,含矿岩系为长城系古铜井岩群,由一套变质程度较低的滨海相细碎屑岩组成^[8];阿拉善左旗阿德格色格格东锑矿点,含矿岩系为上二叠统哈尔苏海组,由一套海陆交互碎屑岩组成;呼布敦陶勒盖中型锑矿床,含矿岩系为上泥盆统安格尔音乌拉组,由一套浅海—半深海浅变质的陆源细碎屑岩夹内源碎屑岩组成;林西县前地锑矿点,含矿岩系为上二叠统林西组,由一套海相—海陆交互碎屑沉积岩组成^[9]。

2 矿床地质特征

内蒙古自治区境内锑矿床地质特征概况见表2。典型矿床地质特征如下。

2.1 呼布敦陶勒盖锑矿

该矿隶属于锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗萨麦苏木管辖,属低山丘陵—草原区,地处二连—贺根山板块缝合带西北。古生代大地构造位置处于天山—兴蒙造山带之西伯利亚板块东南缘陆缘弧增生带中,中生代以后大地构造位置属于中国东部燕山期环太平洋火山深成岩带的一部分,处于大兴安岭构造岩浆带的西部,即处于天山—兴蒙造山系(I)大兴安岭弧盆系(I-1)扎兰屯—多

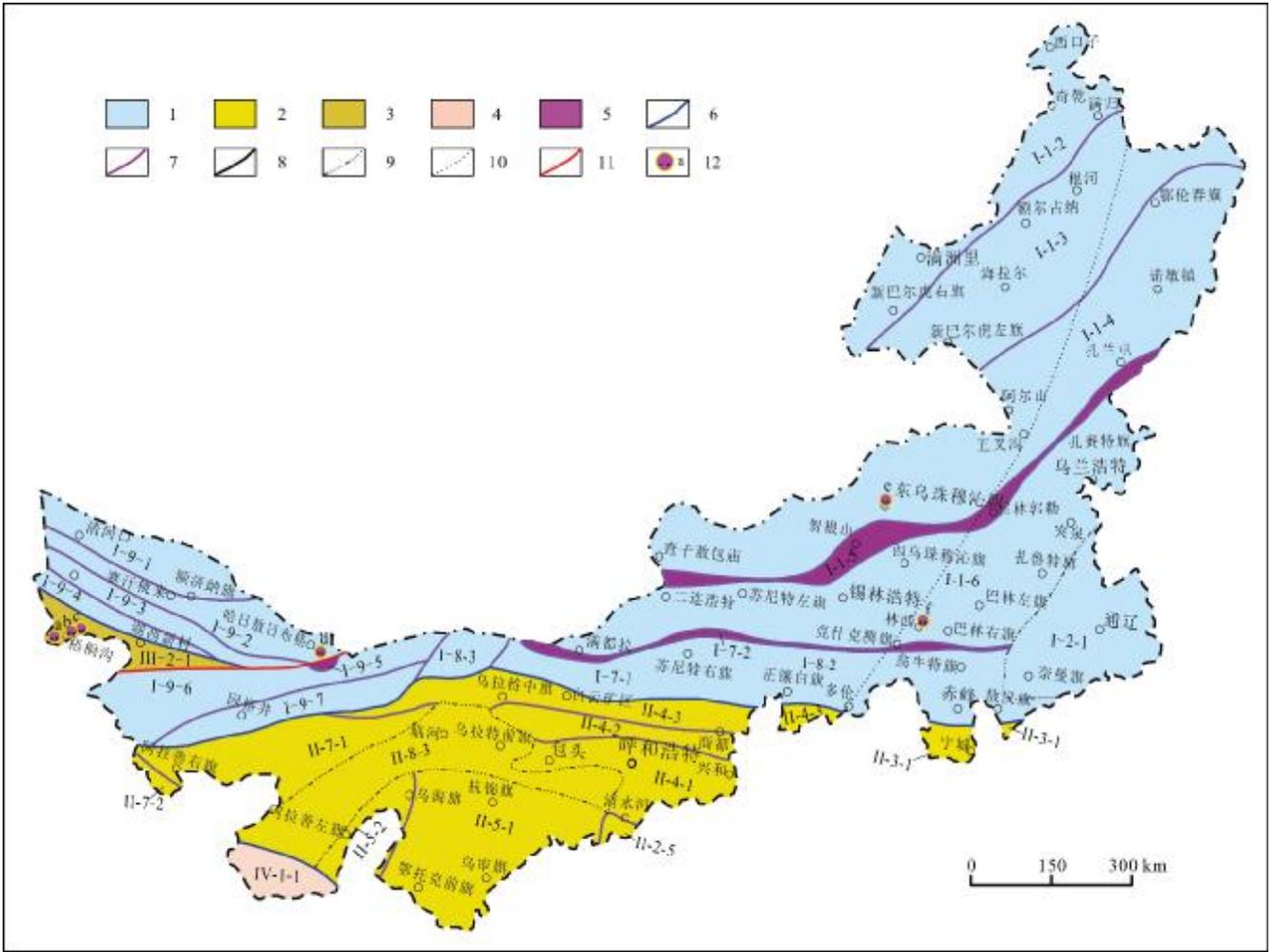


图1 内蒙古自治区锑矿资源分布图
(据文献[6]修改)

Fig. 1 Distribution map of antimony resources in Inner Mongolia
(Modified from Reference [6])

a—鹿咀子锑矿(Luzuzi Sb deposit); b—阿木乌苏锑矿(Amuwusu Sb deposit); c—红石山南锑矿(south Hongshishan Sb deposit); d—阿德格格格东锑矿点(east Adegesege Sb ore occurrence); e—呼布敦陶勒盖锑矿(Hubudun Tuolergai Sb deposit); f—前地锑矿点(Qiandi Sb ore occurrence); 1—天山-兴蒙造山系(I)(Tianshan-Xingmeng orogenic system); 2—华北陆块区(II)(North China landmass); 3—塔里木陆块区(III)(Tarim landmass); 4—秦祁昆造山系(IV)(Qinling-Qilianshan-Kunlun orogenic system); 5—蛇绿混杂岩带(ophiolitic melange belt); 6—一级构造分区界线(first-order tectonic boundary); 7—二级构造分区界线(second-order tectonic boundary); 8—三级构造分区界线(third-order tectonic boundary); 9—中生代盆地界线(Meso-Cenozoic basin boundary); 10—大兴安岭主脊中轴线(axis of Daxinganling major ridge); 11—走滑断层(strike-slip fault); 12—锑矿床(点)及编号(Sb deposit/occurrence and number); I-1—大兴安岭弧盆系(Daxinganling arc-basin system); I-1-2—额尔古纳岛弧(P₂)(Erguna arc); I-1-3—海拉尔-呼玛后盆地(P₂)(Hailar-Huma back-arc basin); I-1-4—扎兰屯-多宝山岛弧(P₂)(Zhalantun-Duobaoshan island arc); I-1-5—二连-贺根山蛇绿混杂岩带(P₂)(Erlian-Hegenshan ophiolitic melange belt); I-1-6—锡林浩特岩浆弧(P₂)(Xilinhot magmatic arc); I-2—松辽地块(断陷盆地, J-K)(Songliao massif); I-2-1—松辽断陷盆地(J-K)(Songliao fault basin); I-7—索伦山-西拉木伦结合带(Suolunshan-Xilamulun junction zone); I-7-1—索伦山蛇绿混杂岩带(P₂)(Suolunshan ophiolitic melange belt); I-7-2—图林凯蛇绿混杂岩带(蓝片岩带)(Tulinkai ophiolitic melange belt); I-8—包尔汉图-温都尔庙弧盆系(P₂)(Borhantu-Wendurmiao arc-basin system); I-8-2—温都尔庙俯冲增生杂岩带(Wendurmiao subduction accretionary complex belt); I-8-3—宝音图岩浆弧(P₂)(Baoyintu magmatic arc); I-9—额济纳旗-北山弧盆系(Ejin Qi-Beishan arc-basin system); I-9-1—圆包山(中蒙边界)岩浆弧(O-D)(Yuanbaoshan magmatic arc); I-9-2—红石山裂谷(C)(Hongshishan rift); I-9-3—明水岩浆弧(C)(Mingshui magmatic arc); I-9-4—公婆泉岛弧(O-S)(Gongpoquan island arc); I-9-5—恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带(C)(Engel Wusu ophiolitic melange belt); I-9-6—哈特布其岩浆弧(C-P)(Hartbuch magmatic arc); I-9-7—巴音戈壁后盆地(C)(Bayingebi back-arc basin); II-2—晋冀陆块(Shanxi-Hebei landmass); II-2-5—吕梁碳酸

盐岩台地(P_{z1})(Lyuliang carbonate rock platform); II-3—大青山-冀北古弧盆系(P_{t1})(Daqingshan-Northern Hebei ancient arc-basin system); II-3-1—恒山-承德-建平古岩浆弧 (P_{t1})(Hengshan-Chengde-Jianping paleomagmatic arc); II-4—狼山-阴山陆块 (大陆边缘岩浆弧, P_{z2})(Langshan-Yinshan landmass); II-4-1—固阳-兴和陆核 (Ar)(Guyang-Xinghe continental nucleus); II-4-2—色尔腾山-太仆寺旗古岩浆弧 (Ar₃)(Mount Serten-Taibus Qi paleomagmatic arc); II-4-3—狼山-白云鄂博裂谷(P_{t2})(Langshan-Baiyunebo rift); II-5—鄂尔多斯陆块(Ordos landmass); II-5-1—鄂尔多斯陆核(鄂尔多斯盆地, M_z)(Ordos continental nucleus); II-5-2—贺兰山被动陆缘盆地 (P_{z1})(Helanshan passive epicontinental basin); II-7—阿拉善陆块(Alxa landmass); II-7-1—迭布斯格-阿拉善右旗陆缘岩浆弧(P_{z2})(Diabosger-Alxa Youqi epicontinental magmatic arc); II-7-2—龙首山基底杂岩带(Ar₃-P_{t1})(Longshoushan basement complex belt); II-8—叠加裂陷盆地系(superimposed rift basin system); II-8-3—吉兰泰-包头断陷盆地(C)(Jilantai-Baotou rift basin); III-2—敦煌陆块(Dunhuang landmass); III-2-1—柳园裂谷(C-P)(Liuyuan rift); IV-1—北祁连弧盆系(North Qilian arc-basin system); IV-1-1—走廊弧后盆地(O-S)(Corridor back-arc basin)

表 2 内蒙古锑矿床(点)地质特征简表

Table 2 Geological characteristics of Sb deposits/occurrences in Inner Mongolia

序号	矿床(点)名称	成矿区带位置	大地构造背景	控矿因素			主矿体特征			成矿时代
				含矿岩系	控矿构造	岩浆岩	规模	产状	平均品位	
1	鹿咀子锑矿	阿木乌苏-老硐沟金、钨、锑 IV 级成矿带	III-2-1 柳园裂谷(C-P)	下石炭统红柳园组	北东向断裂构造	二叠纪辉长岩	长 127 m, 厚度 1.16 m	130°∠53°	16.80%	276.6 Ma
2	阿木乌苏锑矿	阿木乌苏-老硐沟金、钨、锑 IV 级成矿带	III-2-1 柳园裂谷(C-P)	中二叠统金塔组	北西—北西西向断裂构造	二叠纪辉长岩、石英闪长岩	延长 160 m, 延深 130 m, 厚度 0.6 m	170°∠75°	6.06%	
3	红石山南锑矿	阿木乌苏-老硐沟金、钨、锑 IV 级成矿带	III-2-1 柳园裂谷(C-P)	长城系古铜井岩群	北东东向韧性剪切带构造	二叠纪辉长岩、石英脉	延长 260 m, 延深约 90 m, 厚度 0.1~0.4	(160~170°)∠(60~70°)	1.0%~6.78%	272.4 Ma
4	阿德格色格东锑矿	石板井-呼伦西白金、铜、铅、锌、锑 IV 级成矿带	I-9-2 红石山裂谷(C)	下二叠统双堡塘组	北东向断裂构造	石英脉	延长 200 m, 延深 80 m, 真厚度 2.5 m	310°∠35°	1.97%	
5	呼布敦陶勒盖锑矿	博克图-朝不楞钨、铁、锌、铅多金属 IV 级成矿带	I-1-4 扎兰屯-多宝山岛弧	上泥盆统安格尔音乌拉组	近东西向层间断裂构造	闪长岩脉	长 1900 m, 延深 500 m, 厚度 3.96 m	(163~192°)∠(37~80°)	1.23%	
6	前地锑矿	莲花山-大井子铜、银、铅、锌四级成矿带	I-1-6 锡林浩特岩浆弧(P _{z2})	上二叠统林西组	近东西向断裂构造	斑状石英闪长岩脉	控制延长 90 m, 延深 120 m, 厚度 2.41 m	(180~200°)∠(80~84°)	1.42%	

宝山岛弧(I-1-4)中. 成矿区带位于大兴安岭中段华力西期及燕山期铁、锌、钨、金、铅、铬成矿带(III₄)博克图-朝不楞钨、铁、锌、铅多金属成矿带(IV₄³)朝不楞-查干敖包铁、锌、铅成矿带(V₄^{3,3})及沙麦钨成矿带(V₄^{3,4})内.

(1) 矿区地质

矿区出露地层除新生界第四系(Q)外, 主要由上泥盆统安格尔音乌拉组 (D_{3a})、上石炭统宝力高庙组 (C_{2b1})组成, 局部地区发育有少量的下白垩统大磨拐河组(K_{1d})(图 2). 安格尔音乌拉组主要为一套浅变质的陆缘细碎屑岩夹内源碎屑岩(硅质岩)组合, 属浅海-半深海碎屑岩建造, 是本区锑矿的主要含矿层位;

宝力高庙组主要分布在矿区东北部, 为一套酸性火山岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩及陆源碎屑岩的岩石组合; 大磨拐河组区域上不整合覆盖于安格尔音乌拉组之上, 为一套复成分砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩、细砂岩夹红色泥岩, 属内陆湖泊边缘相沉积建造.

矿区位于呼布敦陶勒盖背斜的南东翼, 区域上属安格尔音乌拉复式向斜的一部分. 褶皱轴线位于矿区北部苏布拉格-安格尔音乌拉-敖恩特一带, 轴向约 55°, 贯穿全区, 是区内最大的褶皱构造. 其内层间褶曲和层面扭动构造十分发育, 与之相应派生出一系列北东东-近东西向的层间断裂构造破碎带, 是本区主要



图2 呼布敦陶勒盖锑矿区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of Hubudun Tuolergai Sb deposit
 1—第四系(Quaternary); 2—大磨拐河组(Damoguaihe fm.); 3—晚石炭世宝力高庙组(Late Carboniferous Baoligaomiao fm.); 4—上泥盆统安格爾音乌拉组二段(2nd mem. of Angeryinwula fm., Upper Devonian); 5—安格爾音乌拉组一段(1st mem. of Angeryinwula fm.); 6—中侏罗世黑云母二长花岗岩(Middle Jurassic biotite monzogranite); 7—中侏罗世似斑状黑云母二长花岗岩(Middle Jurassic porphyritic biotite monzogranite); 8—晚石炭世花岗岩斑岩(Late Carboniferous granite porphyry); 9—石英脉(quartz vein); 10—含锑构造蚀变带(Sb-bearing tectonic alteration belt); 11—正断层(normal fault); 12—推测盆地边缘断裂(inferred basin margin fault); 13—地层产状(stratigraphic attitude); 14—面理产状(foliation attitude)

的控矿、容矿构造。

矿区岩浆活动频繁,与成矿关系不大。主要见有两个时代,一为晚石炭世花岗岩斑岩($\gamma\pi C_2$),呈小岩株状产出;二为中侏罗世二长花岗岩,包括中细粒似斑状黑云母二长花岗岩($\pi\eta\gamma\beta J_2$)、细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma\beta J_2$)。

(2)含矿岩系

矿床含矿岩系为上泥盆统安格爾因乌拉组。岩石碎屑物粒度细,分选较差,是泥质、凝灰质成分较高的碎屑岩层,多发育小型交错层理、透镜状层理等。岩层变形强烈,局部形成一系列短轴紧闭的背、向斜构造。地层总体走向北东东,倾向 $165\sim 185^\circ$,倾角 $53\sim 70^\circ$,产状较陡,局部近直立。矿区南部位于哈沙图向斜的北西翼,地层倾向 330° ,倾角 $50\sim 55^\circ$ 。大体可分出上下两

个岩性段。上部安格爾音乌拉组二段(D_3a^2),主要分布于矿区北部,主要由绢云母粉砂质板岩、粉砂质泥质板岩、含炭泥质板岩组成,呈薄层状产出;下部安格爾音乌拉组一段(D_3a^1),主要分布于矿区中南部,由黄绿色变质粉砂岩夹炭质板岩、细砂岩组成,且近岩体接触带处,热接触变质作用强烈,岩石普遍具有角岩化,常形成斑点板岩、角岩等热接触变质岩。下部的变质粉砂岩夹炭质板岩段是矿区主要含矿层位,矿体主要呈脉状充填于该段近东西向的构造裂隙中。

(3)控矿构造

受区域构造运动的影响,由安格爾音乌拉复式向斜在区内派生的一系列次级走向北东—近东西向的层间挤压构造破碎带是本区的主要控矿、容矿构造。矿脉的产出形态、规模严格受构造裂隙的控制,具有平行斜列集中分布的特点,宽度由几厘米至数十米,沿走向、倾向具有尖灭再现断续分布的特征。如区内规模最大的含矿构造破碎带,即为走向近东西向的次级挤压构造破碎带,其中发育有3号、5号等主要矿体在内的多条工业矿体。该含矿构造蚀变带地表出露长约630 m,宽3~30 m,东部出露西部隐伏。据槽探、钻探工程揭露构造破碎带长度2 800 m,倾向 $163\sim 192^\circ$,倾角 $55\sim 80^\circ$ 。破碎带切穿变质粉砂岩、细砂岩、砂质炭质板岩等岩层,岩石破碎为不同原岩碎裂岩,局部可见构造角砾岩。地表岩石面可见明显的断层擦痕,蚀变较强,碳酸盐化、硅化、绢云母化较为发育,褐铁矿化呈薄膜状或细脉状断续分布于破碎角砾岩中。

(4)矿体地质特征

目前区内共圈定锑多金属矿体80余条,均严格受构造裂隙所控制。矿体总体走向近东西向,倾向 $163\sim 192^\circ$,倾角 $55\sim 80^\circ$ 。多数为隐伏矿体,产状由西向东有逐渐变缓的趋势,延长数十至上千米(图3),延深数十至数百米,矿化体具平行斜列集中分布,数量较多,延长、延深较大的特征。据统计,49%的矿体倾向延深大于走向延长。赋存标高在1 000~380 m之间,厚度0.23~14.78 m,平均厚度0.78~7.44 m。平均品位Sb 1.04%~3.90%。以3号矿体规模最大,走向控制长度约1 900 m,倾向延深控制长度约500 m,平均厚度3.96 m。主要矿体特征如下。

3号锑多金属矿体:为隐伏矿体,产于切穿变质粉砂岩、细砂岩、泥砂质炭质板岩的构造裂隙带中,呈大

脉状产出, 走向近东西, 倾向 163~192°, 倾角 37°~80°。沿走向、倾向连续性较好, 均具有尖灭再现的特征, 沿走向由南西向北东逐渐由薄变厚再变薄。赋矿标高为 1 016~397 m, 埋深 65~692 m, 控制最大垂深 670 m。单工程矿体厚度在 0.36~14.78 m, 平均厚度 3.96 m。矿体品位变化较均匀, 平均品位 Sb 1.23%, 单工程 Sb 平

均品位最高 3.95%。典型剖面特征如图 4。

5 号锑多金属矿体: 产于变质粉砂岩、含炭粉砂岩、碳质板岩的构造裂隙带中。为隐伏矿体, 呈大脉状产出。赋矿标高为 866~515 m, 矿体埋深 198~565 m, 控制矿体长度 400 m, 斜深 100~367 m, 控制最大垂深 537 m。矿体倾向 164~180°, 倾角 41°~67°, 有向南西侧

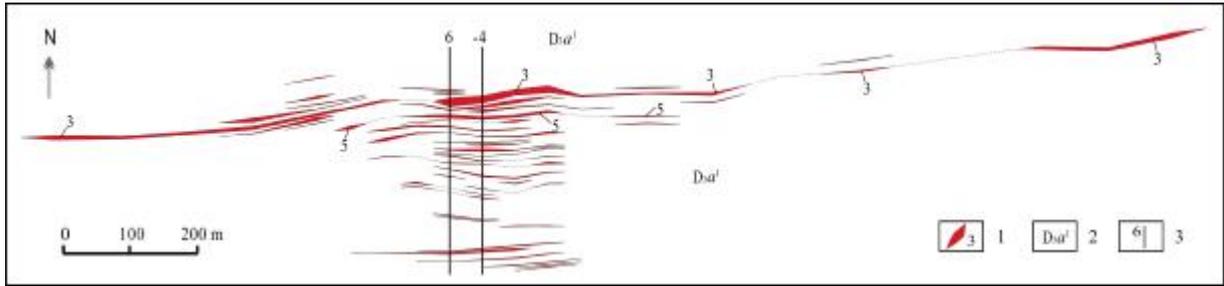


图 3 呼布敦陶勒盖锑矿 750 m 标高矿体走向水平断面示意图

Fig. 3 Planar section of orebodies at 750 m elevation in Hubudun Tuolergai Sb deposit

1—矿体位置及编号(orebody and number); 2—上泥盆统安格尔夫音乌拉组一段(1st mem. of Angeryinwula fm., Upper Devonian); 3—勘查线剖面位置及编号(survey line profile and number)

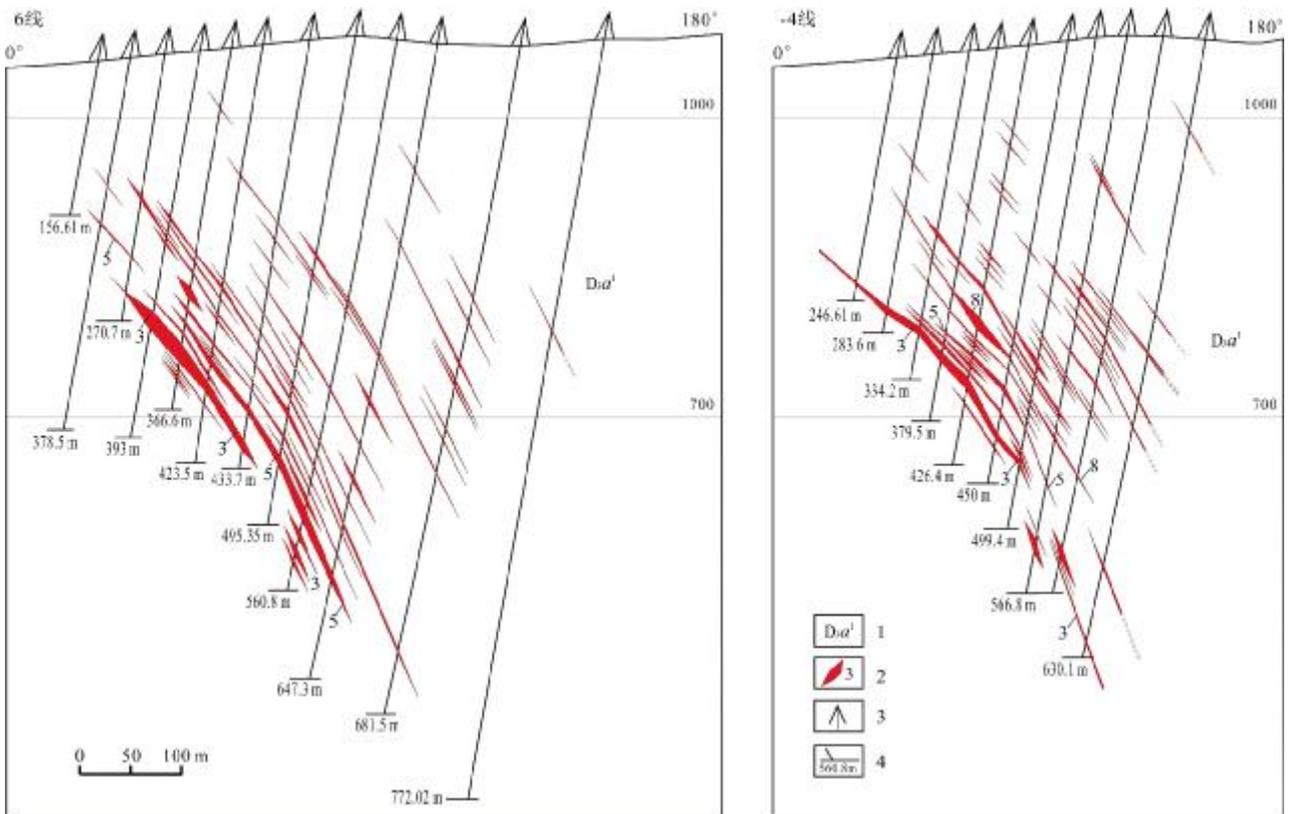


图 4 典型剖面特征示意图

Fig. 4 Typical profile features

1—上泥盆统安格尔夫音乌拉组一段(1st mem. of Angeryinwula fm., Upper Devonian); 2—主要矿体位置及编号(main orebody and number); 3—钻孔位置(borehole location); 4—钻孔孔深(borehole depth)

伏的趋势,连续性较好.单工程控制矿体厚度在0.49~7.59 m之间,平均厚度3.04 m.矿体品位变化不均匀,平均品位Sb 1.53%,单工程Sb平均品位最高3.81%.典型剖面特征如图4.

(5)围岩蚀变

矿(化)体产于近东西向构造裂隙带中,砂板岩既是矿体的围岩也是含矿母岩.围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、绢云母化,其中硅化、黄铁矿化与成矿关系最为密切.

硅化:呈灰白—烟灰色,细脉状产出,厚度较小.灰白色石英脉多与碳酸盐脉充填于碎裂岩的裂隙;烟灰色石英脉常发育在矿化体或顶底板围岩中,且有星散或细脉状黄铁矿产于其中或脉体边部,与矿化关系密切.

黄铁矿化:黄铁矿呈半自形—自形晶浸染状、细脉状分布于矿层及顶底板,与石英细脉相伴产出,粒径多在0.1~3 mm之间,与成矿关系密切.

碳酸盐化:多发育于构造裂隙带或矿层及其顶底板围岩中,呈脉状或薄膜状充填于砂板岩裂隙中,脉宽由几毫米至数十毫米,分布没有规律,多具后期硅化现象.

绢云母化:多发育在地表破碎带中,与高岭土化同时出现,常见于粉砂岩或泥板岩中,蚀变较强.

(6)矿石类型

按其赋存状态、结构构造等特征可划分为以下3种矿石类型.

变质粉砂岩型锑多金属矿石:分布于矿区的中北部,浅灰绿色,变余粉砂状结构,块状构造.矿石矿物闪锌矿、方铅矿、脆硫锑铅矿等金属矿物呈他形粒状集合体以脉状充填于脉石矿物的裂隙中,分布无规律.矿物粒径在0.01~0.60 mm之间.含量约占全岩的8%~10%.脉石矿物成分主要有粉砂屑、泥屑、绢云母、碳酸盐、碳质及后期矿物.矿物粒径小于0.15 mm,含量80%~90%.

碳质板岩型锑多金属矿石:分布于矿区中部,厚度一般不大.浅灰—深黑色,变余泥状结构,板状构造.矿石矿物闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿、脆硫锑铅矿等金属矿物呈他形粒状集合体以脉状、团块状充填于脉石矿物的裂隙中,分布无规律.矿物粒径在0.01~0.60 mm之间.含量占全岩的8%~15%.脉石矿物主要为泥屑

和碳质质点组成,次棱角—次圆不规则状半定向分布,粒径0.02~0.06 mm,含量75%~92%.

构造角砾岩型锑多金属矿石:灰绿色,角砾状结构,块状构造.矿石矿物闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿、脆硫锑铅矿等金属矿物呈他形粒状集合体以角砾状、团块状充填于脉石矿物的裂隙中,分布无规律.角砾粒径在3~10 mm之间,含量占全岩的5%~10%.脉石矿物由角砾、碎屑、胶结物组成,角砾原岩为粉砂质板岩或炭质板岩,具棱角状,砾径一般在4~30 mm之间,由后期碳酸盐或硅钙质胶结.含量占80%~90%.

(7)矿石组构

矿石矿物主要有方铅矿、脆硫锑铅矿、硫锑铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、毒砂、辉砷钴矿、方锑矿、锡石、菱铁矿、菱锰矿等;脉石矿物有石英、云母、长石、高岭石、绿泥石、铁白云石、白云石、方解石等.矿石以他形粒状结构为主,其次有包裹结构(图5a)、交代结构(图5b)、充填结构(图5c)、他形粒状结构(图5d)、乳滴状结构等.

他形粒状结构:矿石中各种金属矿物晶粒大小相差悬殊,多在0.01~0.60 mm之间.粗粒闪锌矿中包裹毒砂、黄铁矿与脉石矿物共生.

包裹结构:粗粒闪锌矿包裹微细粒脆硫锑铅矿,或中粗粒脆硫锑铅矿包裹微细粒闪锌矿、黄铜矿等.

交代结构:生成较晚的脆硫锑铅矿呈不规则状交代闪锌矿和黄铁矿.

充填结构:脆硫锑铅矿呈不规则状充填在黄铁矿的裂隙中.

乳滴结构:粗粒闪锌矿中黄铜矿呈乳滴状分布.

中粗粒结构:金属矿物粒度在0.3~0.6 mm之间,共生、交生杂乱分布.

矿石构造主要为脉状构造,其次为条带状构造、致密块状构造、角砾状构造、浸染状构造等.脉状构造表现为晚期生成的金属矿物的集合体穿插贯入早期矿物裂隙呈脉状产出;条带状构造表现为脆硫锑铅矿、闪锌矿集合体呈条带状分布于脉石矿物中;致密块状构造表现为金属矿物磁黄铁矿、脆硫锑铅矿、闪锌矿、黄铁矿富集成团块(图5e);角砾状构造表现为脆硫锑铅矿、闪锌矿、黄铁矿等以他形粒状集合体呈角砾状产出(图5f);浸染状构造表现为金属矿物集合体呈星散状分布于脉石中.

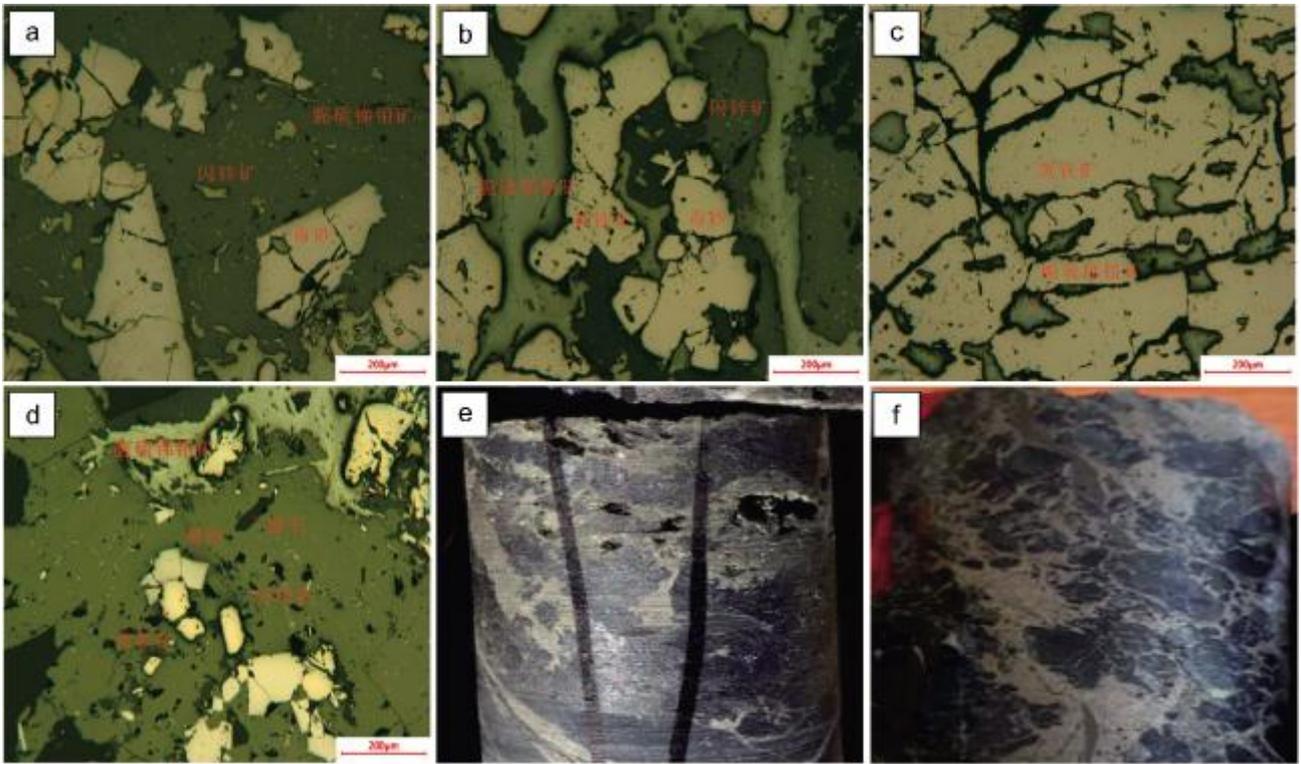


图5 呼布敦陶勒盖锑多金属矿典型矿石结构构造

Fig. 5 Typical textures and structures of ores from Hubudun Tuolergai Sb polymetallic deposit

(8) 矿床成因类型

根据矿体的产出形态、矿石结构构造及其矿物共生组合、围岩蚀变等特征判断,矿床成因类型应为受断裂构造控制的中低温热液充填-脉状锑多金属矿床。

2.2 阿木乌苏锑矿

阿木乌苏锑矿位于内蒙古自治区额济纳旗赛汗桃来苏木,距阿木乌苏井南约2 km。地处红柳河-牛圈子-洗肠井早古生代板块缝合带南侧。其大地构造位置处于塔里木陆块区(Ⅲ)敦煌陆块(Ⅲ-2)柳园裂谷(Ⅲ-2-1)(C-P)之上。成矿区带位于塔里木成矿省(Ⅱ-4)磁海-公婆泉铁、铜、金、铅、锌、钨、锡、铷、钒、铀、磷成矿带(Ⅲ-2)阿木乌苏-老洞沟金、钨、锑成矿亚带(Ⅲ-2-②)阿木乌苏-鹰嘴红山钨、锑矿集区。

(1) 矿区地质

区内出露的地层主要有志留系公婆泉组(S_2g),为一套变质中基性火山岩、火山碎屑岩组合,岩石受后期构造-岩浆活动的影响,变形变质作用强烈,绿泥石化、绿帘石化、片理化发育;二叠系双堡塘组(P_2sh),为一套浅海-滨海相碎屑岩及灰岩;二叠系金

塔组(P_j),为一套火山岩、火山碎屑岩夹少量正常碎屑沉积岩组合;白垩系赤金堡组(K_1ch),为一套陆相碎屑砂、砾岩组合(图6)^①。

区内构造发育,属马鬃山复背斜的一部分^①。褶皱构造形态简单,表现为一轴向北西西向的宽阔向斜,主要发育于金塔组中。东部表现为一系列小的背斜和向斜构造,两翼产状为 $50\sim 80^\circ$,西部褶皱构造表现不明显。断裂构造较发育,应属于阿木乌苏-沙红山近东西向挤压断裂带的一部分,表现为一系列北西-北西西向压性断裂,总体倾向南西,倾角 $60\sim 80^\circ$,对矿体的发育具有显明的控制作用。区内已知锑矿体均富集于此类断裂所派生的次一级张性羽状裂隙中。

区内侵入岩亦较为发育,自二叠纪、三叠纪到白垩纪均有不同程度的表现。二叠纪侵入岩主要出露辉长岩(νP)、石英闪长岩(δoP_2),多呈岩株状产出;三叠纪侵入岩以中酸性石英闪长岩(δoT)为主,局部可过渡为闪长岩、黑云母石英闪长岩等;白垩纪侵入岩以二长花岗岩($\eta\gamma K_1$)为主,呈岩株状产出。此外仍有部分岩脉发育,以石英脉、辉绿(玢)岩脉为主,规模均较小。

①甘肃省地质局地质力学学区队,1:20万五道明幅区域地质调查报告,1977。

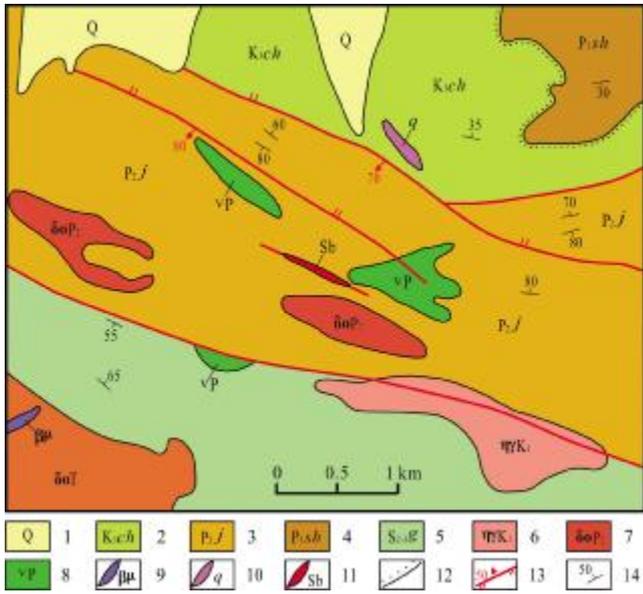


图6 阿木乌苏锑矿地质简图^①

Fig. 6 Geological sketch map of Amuwusu Sb deposit

1—第四系 (Quaternary); 2—白垩系赤金堡组 (Cretaceous Chijinbao fm.); 3—二叠系金塔组 (Permian Jinta fm.); 4—二叠系双堡塘组 (Permian Shuangbaotang fm.); 5—志留系公婆泉组 (Silurian Gongpoquan fm.); 6—早白垩世二长花岗岩 (Early Cretaceous monzogranite); 7—二叠纪石英闪长岩 (Permian quartz diorite); 8—二叠纪辉长岩 (Permian gabbro); 9—辉绿玢岩脉 (diabase porphyrite dike); 10—石英脉 (quartz vein); 11—锑矿体 (Sb orebody); 12—角度不整合界线 (angular unconformity); 13—压性断裂 (compressive fault); 14—地层产状 (stratigraphic occurrence)

其中与成矿关系密切的主要为中二叠世石英闪长岩 (δoP_2)及早白垩世二长花岗岩 ($\eta\gamma K_1$)。中二叠世石英闪长岩其主要成矿元素 Sb 平均含量为 300×10^{-6} , 约为地壳丰度值的 600 倍^[6], 为重要的矿源岩之一; 早白垩世二长花岗岩主要沿北西—北西西向断裂侵入中二叠统金塔组安山岩中。在距该期花岗岩体外接触带的一定范围内, 部分矿(化)体呈现规律性的分布, 说明该期岩浆活动在本区锑矿的成矿过程中可能提供了热源条件。

(2)含矿岩系

矿区内中二叠统金塔组为本区锑矿的主要赋矿层位。其上部由流纹质凝灰熔岩、流纹质凝灰岩、流纹斑岩组成, 受区域构造—岩浆活动的影响, 地层总体片理化强烈; 中部由细砂岩、含砾粗砂岩夹薄层硅质灰岩组成; 下部以基性玄武岩、玄武质安山岩、杏仁状安山岩

为主, 夹少量泥质粉砂岩及数层安山质凝灰岩透镜体。根据区内锑矿脉的空间分布及各类岩石的含矿性统计表明, 安山岩是本区锑矿的主要赋矿层位。区内 50% 以上的锑矿脉产于该旋回的安山岩断裂带中^[6]。有分析显示, 该类岩石是提供成矿元素 Sb 的主要矿源岩石^[6]。

(3)矿体地质特征

含矿构造蚀变带围岩为蚀变安山岩及石英闪长岩体(图7)。矿体以含锑石英脉形式出现, 断续充填于北西—北西西向压扭性断裂构造带中, 具有扁豆状、尖灭再现的特征。总体走向 $260 \sim 340^\circ$, 倾向南西, 倾角约 55° , 个别矿体趋近于直立, 倾角可达 80° 以上。延长 $20 \sim 160$ m, 最大延深约 130 m, 厚度多小于 1 m, 个别可达 4 m 左右, 品位 Sb $0.4\% \sim 30.1\%$ 。主要由密集的含锑石英细脉产出, 脉宽 $5 \sim 30$ cm。

区内共计圈定大小锑矿(化)体 30 个, 其中以 2 号矿体规模较大, 质量较好。矿体延长约 160 m, 延深约 130 m, 平均厚约 0.6 m, 平均品位 Sb 6.06%, 沿走向和倾向均变薄, 矿体顶、底围岩均为蚀变安山岩。

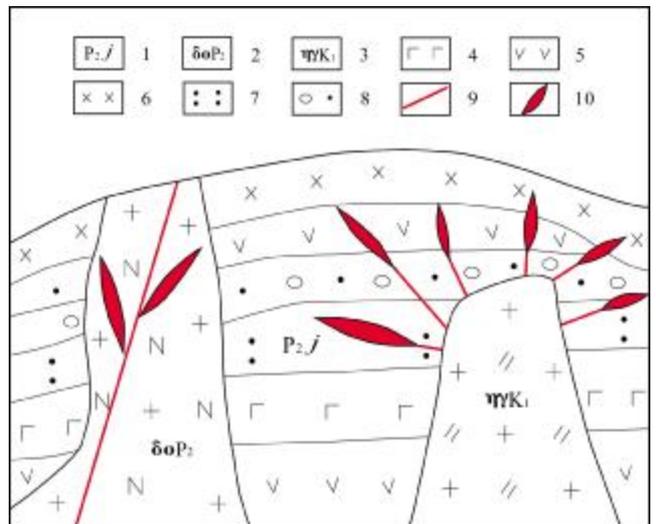


图7 阿木乌苏锑矿成矿模式图

(据文献^[6]修改)

Fig. 7 Metallogenic model of Amuwusu Sb deposit

(Modified from Reference [6])

1—中二叠统金塔组 (Middle Permian Jinta fm.); 2—中二叠世英云闪长岩 (Middle Permian tonalite); 3—早白垩世二长花岗岩 (Early Cretaceous monzogranite); 4—玄武岩 (basalt); 5—安山岩 (andesite); 6—流纹岩 (rhyolite); 7—凝灰岩 (tuff); 8—砂砾岩 (glutenite); 9—断层 (fault); 10—锑矿脉 (Sb vein)

①甘肃省地质局地质力学区测队. 1:20 万五道明幅区域地质调查报告. 1977.

矿石矿物主要为辉铋矿,局部可见少量黝铜矿。脉石矿物主要为石英及少量的碳酸盐。

矿石按其结构、构造、铋矿物赋存状态及含量等可分为星散状、细脉浸染状及致密块状矿石3种类型。致密块状矿石多富集于石英脉上盘,由辉铋矿团块组成;星散状、细脉浸染状者多分布于石英脉体内。

近矿围岩蚀变主要为硅化、高岭土化,近地表处主要表现为褐铁矿化,可见铋华等次生含铋矿物。围岩安山岩中以绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化、绢云母化发育较为广泛。

矿床成因应属于低温热液-裂隙充填型,与花岗岩岩浆期后热液活动有关^[6]。

3 成矿规律

3.1 成矿大地构造背景

从我国各大典型铋矿床的空间分布上看,这些矿床在一定程度上受控于区域性深大断裂,多集中分布于各大板块缝合带,如包括索伦-林西、昌宁-孟连等在内的诸多板块缝合带。据现阶段掌握的资料,内蒙古地区铋矿的含矿层位主要为长城系、泥盆系、石炭系、二叠系,以晚古生代地层为主。在空间上总体分布于乌兰套海-温都尔庙-西拉木伦河超岩石圈断裂以北的板块拼接带地区,且具有呈近东西向线性分布的特征,与天山-兴蒙造山带的总体走向保持一致。如阿木乌苏铋矿、红石山南铋矿、北山鹿咀子铋矿总体分布于红柳河-牛圈子-洗肠井早古生代板块缝合带沿线附近^[10];阿德格色格格东铋矿点位于恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带附近^[11];前地铋矿点位于西拉木伦河板块缝合带以北,总体受控于近东西向断裂构造^①;呼布敦陶勒盖铋矿位于二连-贺根山板块缝合带以北。这一事实说明内蒙古地区的铋矿在大地构造空间分布上与我国其他地区的各大典型铋矿床的空间分布有相似的大地构造背景环境,即均赋存于与板块碰撞过程有关的各大造山带或活动陆缘增生楔中,如湖南锡矿山超大型铋矿床处于扬子微板块与华夏微板块之间的挤压碰撞带上等^[12]。本区内矿体、矿化体多受控于近东西向(北东东向、北西西向)断裂构造带,与区域构造线的总体方向基本一致,特别是主断裂旁侧的次级羽状断裂是成矿的主要富集场所。说明成矿作用过程与二叠

纪末西伯利亚板块与华北板块的南北碰撞、俯冲、增生造山的演化过程应是密不可分的。因此从含矿岩系的时间界限及各矿床(点)所处的大地构造位置上看,成矿过程可能与晚古生代二叠纪末古亚洲洋的闭合过程中陆陆碰撞、弧陆碰撞期间的俯冲、增生造山作用有关^[13]。

3.2 含矿岩系的时限性

有研究资料表明^[14],我国铋矿的赋存层位有前寒武系、泥盆系、二叠系、三叠系及白垩系。如湖南锡矿山超大型铋矿床的主要含矿层位为上泥盆统余田桥组^[12];贵州晴隆超大型铋矿床的主要含矿层位为下二叠统茅口组和下二叠统峨眉山玄武岩中间的“大厂房”^[15];云南木利大型铋矿床的主要赋矿层位为下泥盆统坡脚组^[16];贵州半坡大型铋矿床的赋存层位为下泥盆统丹林组^[17];陕西公馆汞铋矿床的主要赋矿层位为中泥盆统庙沟组^[18];甘肃崖湾铋矿床的主要含矿岩系为三叠系三渡水组^[3];内蒙古额济纳旗阿木乌苏小型铋矿床主要赋矿层位为中二叠统金塔组^[6];内蒙古额济纳旗红石山南小型铋矿床主要赋存层位为长城系古硎井岩群^[19-20];内蒙古额济纳旗北山鹿咀子小型铋矿床的主要赋矿层位为下石炭统红柳园组^[21];内蒙古阿拉善左旗北山阿德格色格格东铋矿点的主要赋矿层位为上二叠统哈尔苏海组^[22];内蒙古林西县前地铋矿点主要赋矿层位为上二叠统林西组^①。矿床成因类型虽不尽一致,但无论何种成因类型的铋矿床,其含矿岩系多集中于晚古生代泥盆纪至二叠纪,说明该时期可能为我国铋矿的成矿“爆发期”。

3.3 沉积环境

铋在地壳中平均含量为 0.5×10^{-6} 或 0.2×10^{-6} (泰勒,1964)或 0.62×10^{-6} (黎彤,1976)。由元素地球化学性质可知,Sb属于强不相容元素,对造岩矿物没有特殊的选择性,在岩石中的赋存状态是分散的^[23]。但在不同成因类型的岩石中却有着不同的元素丰度,如铋在岩浆岩中总体的平均含量低于克拉克值,只是在酸性岩中接近克拉克值。在沉积岩中铋明显地聚集于泥质岩石中,如黑色页岩中平均含量为 300×10^{-6} ,煤中平均含量为 30×10^{-6} ,煤灰中含量为 200×10^{-6} 。从内蒙古全区来看,各矿床(点)的含矿岩系无论时代归属,除阿木乌苏铋矿床含矿岩系为火山岩、火山碎屑岩外,其他

① 辽宁省化工地质勘查院有限责任公司. 内蒙古自治区林西县前地铅锌多金属矿普查报告. 2020.

各矿床、矿点的含矿岩系总体为灰-深灰-灰黑色的碎屑岩建造,多数含炭质,如呼布敦陶勒盖锑矿围岩为变质粉砂岩夹炭质板岩、含炭泥质板岩等组成;红石山南锑矿围岩为灰、灰黑色变质粉砂岩;前地锑矿点围岩为灰-灰黑色变质粉砂岩、粉砂质板岩夹炭质板岩;阿德格色格东锑矿点围岩为浅灰-灰色变质粉砂岩、泥质粉砂岩等。总体产出暗色细碎屑岩建造,说明锑矿的形成过程可能与一定程度的还原环境有关,与华南锑成矿带中显示出黑色页岩为主要矿源层的成矿规律有极大的相似性^[24]。内蒙古地区除阿木乌苏锑矿外,其他矿床(点)中各含矿岩系沉积环境均以滨海相、浅海相、半深海相或海陆交互沉积环境为主。再如我国典型的锡矿山锑矿床,其含矿岩系为泥盆系上统余田桥组,为一套浅海相碎屑沉积岩;云南木利锑矿床含矿岩系为下泥盆统坡脚组,为浅海陆棚沉积环境等^[16]。此外亦有研究显示海水中锑的平均含量为 0.3×10^{-9} ^[25],相比地下水中的Sb含量 $0.05 \sim 0.08 \times 10^{-9}$ 要高出许多^[25]。因此大量的客观事实及研究成果显示滨海相、浅海相、半深海相或海陆交互沉积环境下的还原环境中对锑的成矿作用过程应是十分有利的,同样也印证了 Sb^{3+} 与 Sb^{5+} 在热液作用体系中氧化还原条件下的稳定性问题。

3.4 岩浆活动

内蒙古地区各矿床(点)中,虽未见有相当规模的岩浆侵入活动,但总体上仍表现出一定程度的岩浆活动迹象,多数矿区内均可见到不同程度发育的中基性岩脉。如阿木乌苏锑矿中见有辉长岩脉、石英闪长岩脉;红石山南锑矿中见有辉绿岩脉、辉长岩脉;林西县前地锑矿点中见有石英闪长岩脉、闪长岩脉、闪长玢岩脉;北山鹿咀子锑矿中见有辉长岩脉;呼布敦陶勒盖锑矿中发育一定程度的闪长岩脉等。且此类岩脉多数与成矿空间关系密切或直接构成矿(化)体的围岩,这一事实与对中国锑矿主要矿集区的总结基本是一致的^[14],亦表明本区的锑矿热液的形成可能与深部构造岩浆活动或者更确切地说与偏幔源-幔源的构造岩浆活动有关。

3.5 地球化学异常条件

据统计,区内各矿床(点)的区域地球化学异常特

征中,各含矿岩系或与成矿关系密切的岩石中单元素地球化学丰度多为区域背景值的3~20倍,北山鹿咀子锑矿源岩(安山岩、玄武岩)中Sb含量甚至可达区域背景值的7.67~156.4倍^[21]。红石山南锑矿床含矿岩系中Sb元素浓度是北山地区平均值的2~3倍^[20];阿德格色格东锑矿点含矿岩系中Sb异常强度高,浓度分带明显^[22];呼布敦陶勒盖锑矿床含矿岩系中Sb异常强度高,浓度分带明显^①,矿床中地球化学异常组合为As、Bi、Sb、Mo、W、Zn、Au、Pb、Cd九种元素且为3级浓度带;林西县前地锑矿点含矿岩系中Sb元素异常强度大,为背景值的2.7~16.2倍^②;阿木乌苏锑矿床中地球化学异常组合为Sb、Au、As、Mo、Sn、Pb、Ag七种元素,Sb、As异常最为明显,含量为区域背景值的3.8~6.2倍^[6]。各矿床(点)内以As-Sb、Sb-Au元素组合异常最为明显,且各单元素As、Sb等多数具有3级浓度分带的特征。这一现象说明区域地球化学异常中的As-Sb异常组合及其高浓度分带的特征亦可作为本区锑矿的间接找矿标志之一。

4 结论

(1)内蒙古锑矿床成因类型大体可以划分为火山岩地层中热液型及碎屑岩地层中热液型2种类型,以碎屑岩地层中热液型锑矿床为主,锑矿热液的形成可能与深部的构造岩浆活动有关。

(2)在空间上总体分布于乌兰套海-温都尔庙-西拉木伦河超岩石圈断裂以北的板块拼接带地区,且具有呈近东西向线性分布的特征,赋存于各大与板块碰撞过程有关的造山带或活动陆缘增生楔中,成矿过程可能与晚古生代二叠纪末古鄂霍次克洋闭合过程中陆陆碰撞、弧陆碰撞期间的俯冲、增生造山作用有关。

(3)全区锑矿的含矿岩系时限性主要为长城纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪,以晚古生代为主。在滨海相、浅海相、半深海相或海陆交互沉积环境下的还原条件下形成的暗色细碎屑岩系是赋矿的有利层位。

(4)区域地球化学异常中的As-Sb异常组合及其高浓度分带的特征亦可作为本区锑矿的间接找矿标志之一。

①东乌珠穆沁旗盛旺矿业有限公司. 内蒙古自治区东乌珠穆沁旗呼布敦陶勒盖矿区锌多金属矿勘探报告. 2019.

②辽宁省化工地质勘察院有限责任公司. 内蒙古自治区林西县前地铅锌多金属矿普查报告. 2020.

参考文献(References):

- [1] 赵天从. 锑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 1-736.
Zhao T C. Antimony[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987: 1-736. (in Chinese)
- [2] 王岩, 王登红, 王永磊, 等. 基于地质大数据的中国锑矿空间分布规律定量研究[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 52-67.
Wang Y, Wang D H, Wang Y L, et al. Quantitative research on spatial distribution of antimony deposits in China based on geological big data[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 52-67.
- [3] 周业泽. 甘肃崖湾锑矿床地质地球化学特征及成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学, 2020: 1-46.
Zhou Y Z. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Yawan antimony deposit in Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020: 1-46.
- [4] 雷国伟, 杨旭生, 汪正涌, 等. 内蒙古有色金属重要矿床——成矿特征、多源地质信息找矿模式及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-378.
Lei G W, Yang X S, Wang Z Y, et al. Important nonferrous metal deposits in Inner Mongolia: Metallogenic characteristics, multi-source geological information prospecting model and application [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-378. (in Chinese)
- [5] 邵积东, 王惠, 张梅, 等. 内蒙古大地构造单元划分及其地质特征[J]. 西部资源, 2011(2): 51-56.
Shao J D, Wang H, Zhang M, et al. Division of geotectonic units and their geological characteristics in Inner Mongolia[J]. *Western Resources*, 2011(2): 51-56. (in Chinese)
- [6] 陈志勇, 张永清, 孙月君, 等. 内蒙古自治区铝土矿、锑矿、菱镁矿、重晶石资源潜力评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018: 1-116.
Chen Z Y, Zhang Y Q, Sun Y J, et al. Potential evaluation of bauxite, antimony, magnesite and barite resources in Inner Mongolia [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018: 1-116. (in Chinese)
- [7] 陈毓川, 王登红, 李厚民, 等. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-222.
Chen Y C, Wang D H, Li H M, et al. Classification scheme of important mineral prediction types[M]. Beijing: Geology Press, 2010: 1-222. (in Chinese)
- [8] 夏天, 陈晔. 复杂褶皱构造对新疆北山地区清白山铅锌矿床的影响[J]. 新疆地质, 2017, 35(4): 470-473.
Xia T, Chen Y. Influence of complex fold tectonic on Qinbaishan lead-zinc deposit in Beishan area, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 2017, 35(4): 470-473.
- [9] 梁天意, 刘敬党, 李猛猛, 等. 大兴安岭中段上二叠统林西组核形石的发现及其地质意义[J]. 地质论评, 2021, 67(3): 593-611.
Liang T Y, Liu J D, Li M M, et al. Discovery of oncolitic in the Upper Permian Linxi Formation in central Great Xing'an Mountains and its geological significances[J]. *Geological Review*, 2021, 67(3): 593-611.
- [10] 杨合群, 李英, 李文明, 等. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 2008, 41(1): 22-28.
Yang H Q, Li Y, Li W M, et al. General discussion on metallogenic tectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China [J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(1): 22-28.
- [11] 王金荣, 宋春晖, 高军平, 等. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩的形成机制[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1995, 31(2): 140-147.
Wang J R, Song C H, Gao J P, et al. The original mechanism of the Engger Us ophiolitic melange, North Alaxa [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1995, 31(2): 140-147.
- [12] 胡雄伟. 湖南锡矿山超大型锑矿床成矿地质背景及矿床成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 1995: 1-173.
Hu X W. The geological setting and Genesis of Xikuangshan super-giant antimony deposits, Hunan, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1995: 1-173.
- [13] 李朋武, 高锐, 管焯, 等. 古亚洲洋和古特提斯洋的闭合时代——论二叠纪末生物灭绝事件的构造起因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(3): 521-527.
Li P W, Gao R, Guan Y, et al. The closure time of the Paleo-Asian Ocean and the Paleo-Tethys Ocean: Implication for the tectonic cause of the end-Permian mass extinction [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(3): 521-527.
- [14] 王永磊, 陈毓川, 王登红, 等. 中国锑矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1366-1378.
Wang Y L, Chen Y C, Wang D H, et al. The principal antimony concentration areas in China and their resource potentials[J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1366-1378.
- [15] 朱俊宾, 方维萱, 刘家军, 等. 贵州晴隆锑矿稀土元素特征与成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(2): 118-123.
Zhu J B, Fang W X, Liu J J, et al. The REE characteristics and genetic study of Qinglong antimony deposit, Guizhou [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2010, 25(2): 118-123.
- [16] 韩江. 云南省广南县木利锑矿成因及控矿因素探讨[J]. 甘肃冶金, 2020, 42(1): 69-71.
Han J. Discussion on the origin of Muliantin deposit in Guangnan County, Yunnan Province [J]. *Gansu Metallurgy*, 2020, 42(1): 69-71.
- [17] 肖宪国. 贵州半坡锑矿床年代学、地球化学及成因[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 1-138.
Xiao X G. Geochronology, Ore geochemistry and genesis of the Banpo antimony deposit, Guizhou Province, China [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014: 1-138.
- [18] 马武鸿. 陕西公馆汞锑矿床地球化学特征[J]. 西安地质学院学报, 1997, 19(1): 21-27.
Ma W H. Geochemical characteristics of the mercury and stibium

- deposit under Shan'xi residence [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1997, 19(1): 21-27.
- [19] 彭海练, 高峰, 菅坤坤, 等. 内蒙古红石山南辉长岩体锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(9): 1705-1712.
- Peng H L, Gao F, Jian K K, et al. Zircon U-Pb age and its geological significance of gabbro in the south Hongshi Mountain, Ejinna, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(9): 1705-1712.
- [20] 彭海练, 杨克俭, 李宁, 等. 内蒙古红石山南金矿地质特征及找矿方向[J]. *西北地质*, 2011, 44(4): 44-49.
- Peng H L, Yang K J, Li N, et al. Geological characteristics and prospecting direction of gold deposit in southern belt of Hongshishan, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(4): 44-49.
- [21] 高峰, 菅坤坤, 何元方, 等. 内蒙古北山鹿咀子锑矿矿床成因及成矿时代[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(9): 1664-1674.
- Gao F, Jian K K, He Y F, et al. Genesis and metallogenic Epoch constraints of Luzuizi antimony deposit of Beishan, Inner Mongolia [J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(9): 1664-1674.
- [22] 祁翼, 王军, 李高歌. 内蒙古北山阿德格色格东锑矿发现及找矿意义[J]. *新疆有色金属*, 2020, 43(4): 10-14.
- Qi Y, Wang J, Li G G. Discovery of the Segedong antimony deposit in Adeg, Beishan, Inner Mongolia, and its prospecting significance [J]. *Non-ferrous metal*, 2020, 43(4): 10-14. (in Chinese)
- [23] 孟郁苗, 胡瑞忠, 高剑峰, 等. 锑的地球化学行为以及锑同位素研究进展[J]. *岩矿测试*, 2016, 35(4): 339-348.
- Meng Y M, Hu R Z, Gao J F, et al. Research progress on Sb geochemistry and Sb isotopes[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(4): 339-348.
- [24] 张天羽, 李聪颖, 孙赛军, 等. 锑的地球化学性质与华南锑矿带成因初探[J]. *岩石学报*, 2020, 36(1): 44-54.
- Zhang T Y, Li C Y, Sun S J, et al. Geochemical characteristics of antimony and genesis of antimony deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(1): 44-54.
- [25] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-548.
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al. *Elemental geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-548. (in Chinese)

(上接第 260 页/Continued from Page 260)

- [46] 朱茂炎. 云南澄江化石群埋藏学[D]. 南京: 中国科学院南京地质古生物研究所, 1992: 1-111.
- Zhu M Y. Taphonomy of the Chengjiang Lagerstätte of Yunnan, China[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, 1992: 1-111.
- [47] 张兴亮, 舒德干. 试论动物非矿化组织的保存[J]. *沉积学报*, 2001, 19(1): 13-19.
- Zhang X L, Shu D G. Preservation mechanisms of non-mineralized animal tissues[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 13-19.
- [48] Zhu M Y, Babcock L E, Steiner M. Fossilization modes in the Chengjiang Lagerstätte (Cambrian of China): Testing the roles of organic preservation and diagenetic alteration in exceptional preservation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 220(1/2): 31-46.
- [49] Butterfield N J. Organic preservation of non-mineralizing organisms and the taphonomy of the Burgess shale[J]. *Paleobiology*, 1990, 16(3): 272-286.
- [50] Martin D, Briggs D E G, Parkes R J. Experimental mineralization of invertebrate eggs and the preservation of Neoproterozoic embryos [J]. *Geology*, 2003, 31(1): 39-42.
- [51] 陈蕾, 张洪霞, 李莹, 等. 微生物在地球化学铁循环过程中的作用[J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(9): 1069-1078.
- Chen L, Zhang H X, Li Y, et al. The role of microorganisms in the geochemical iron cycle [J]. *Science China Vitae*, 2016, 46(9): 1069-1078.
- [52] 邵丽鸥. 小小洞天——微生物世界[M]. 长春: 吉林美术出版社, 2014: 48-49.
- Shao L O. *Microbial world* [M]. Changchun: Jilin Fine Arts Publishing House, 2014: 48-49. (in Chinese)