

doi: 10.12029/gc20180302

杨兵. 2018. 陆相红层型铜铅锌矿床与红层盆地热卤水成矿作用[J]. 中国地质, 45(3): 441–455.

Yang Bing. 2018. Red bed Cu–Pb–Zn deposits and mineralization of hot brine in continental red bed basin [J]. Geology in China, 45(3): 441–455 (in Chinese with English abstract).

陆相红层型铜铅锌矿床与红层盆地热卤水成矿作用

杨兵

(有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

摘要:新疆乌恰县乌拉根超大型铅锌矿是中国发现的首个产于陆相红层盆地中的红层型铅锌矿床,对其成矿作用及成因有多种不同认识,但都将其归入现有的一些矿床类型,如喷流沉积型、砂岩型等,却均不能反映其独特的成矿环境与成矿作用。为此,在广泛收集和研 究全国陆相红层盆地及其矿产的地质资料基础上,通过区域地质构造背景、含矿建造、矿床特征、控矿因素、成矿物质来源、成矿流体等方面对比分析,认为乌拉根铅锌矿与中国大量产于陆相盆地内红色建造中的红层铜矿,在矿床特征、控矿条件、矿床成因等方面具有高度的一致性,均为陆相红层盆地热卤水作用的结果,是同一类型的矿床。红层型矿床是地洼区的特有矿产,是地球地质演化到地洼阶段才出现的新的矿床类型,陆相红层盆地热卤水作用是一个完全独立的成矿系统,因此将其作为一个单独的矿床类型——红层型矿床是合理的,既具有重要理论意义,也具有 重要的实践意义,为铅锌矿找矿开辟了新的方向和领域。

关键词:陆相盆地;红层;热卤水;铜铅锌矿床;中生代

中图分类号:P618.41~43 文献标志码:A 文章编号:1000–3657(2018)03–0441–15

Red bed Cu–Pb–Zn deposits and mineralization of hot brine in continental red bed basin

YANG Bing

(China Nonferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

Abstract: The Wulagen superlarge lead–zinc deposit in Xinjiang is a red bed lead–zinc deposit discovered for the first in continental basin in China. There exists controversy concerning its mineralization and genesis, and different researchers have classified it as different existing types of deposits, such as SEDEX type and sandstone type. Nevertheless, these classifications can not reflect its specific metallogenic environment and mineralization. Therefore, based on collected and studied the geological data of the continental red bed basin and its mineralization through comparison and analysis of regional geological structure background, ore–forming material sources, characteristics of ore–controlling factors, ore–forming fluid and some other phenomena, the author holds that the Wulagen lead–zinc deposit is very similar to many red bed copper deposits in China’s continental basins in such aspects as the deposit characteristics, ore–controlling conditions and deposit genesis, and hence they are the same type of deposits.

收稿日期:2018–05–06;改回日期:2018–05–21

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160001)资助。

作者简介:杨兵,男,1957年生,教授级高级工程师,长期从事矿产勘查管理评价和矿床学研究工作;E-mail:yb8372@126.com。

The red bed deposit is a specific mineral resource in diwa (geodepression) region and a new type deposit in diwa epoch, and red bed basin's hot brine action is a fully independent metallogenic system. The red bed deposit is a unique deposit type which has important theoretical significance and practical significance. A new direction and field are therefore opened for the prospecting of lead-zinc deposits.

Key words: continental basin; red bed; hot brine; copper-lead-zinc deposit; Mesozoic-Cenozoic

About the author: YANG Bing, male, born in 1957, master, professor, majors in economic geology; E-mail: yb8372@126.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project(No. DD20160001).

1 引 言

中国中生代陆相红层盆地分布广泛,约占陆地面积的30%,其中蕴藏有丰富矿产资源,如煤炭、油气、铀等能源矿产,石盐、石膏等非金属矿产,还产出有有色金属矿产,如产于陆相红层盆地内红色建造中的铜矿床,分布也十分广泛,如云南的楚雄盆地的六苴、郝家河,湖南的衡阳盆地的车江、沅麻盆地的麻阳,四川会理盆地的大铜厂,新疆喀什盆地的萨热克,库车盆地的滴水等,是中国较为重要的一种铜矿类型,并且在滇西、滇中、塔里木西缘等地区构成了相当规模的成矿带。而陆相盆地中的红层型铅锌矿则鲜有发现(兰坪金顶铅锌矿不属此类,见后)。21世纪初,有色金属矿产地质调查中心在新疆乌恰县发现了中国首个红层型铅锌矿——乌拉根超大型铅锌矿,打破了这一局面,开辟了陆相红层盆地寻找铅锌矿的新领域,也为深化认识陆相红层盆地的成矿作用及有色金属找矿潜力提供了契机。近年有色金属矿床地质调查中心又在乌拉根矿床的西部喀什炼铁厂地区发现了与乌拉根矿床同层位的红层铜铅锌矿,延长大于1000 m。铅锌矿在上部层位,厚4.3 m,品位2.7%,铜矿在下部层位,厚4.15 m,品位1.15%。两者垂向上相距几十米。这些新发现说明在陆相红层盆地的红色建造中既产出铜矿,也产出铅锌矿。

陆相红层盆地是地洼区的标志性特征之一。根据陈国达先生的地洼学说,大陆型地壳的演化进程是:前地槽阶段→地槽阶段→地台阶段→地洼阶段。在中国区域内,从中生代中期开始才有相关地区进入地洼演化阶段。所以中国的陆相红层盆地均是中新生的产物。与陆相红层盆地中热卤水作用有关的红层型铜铅锌矿产,是地洼区独有的矿产形式之一,是地球地质演化到地洼阶段才出现的新的

矿床类型,也是具有中国地质特色的重要矿产之一。

以往对于产于陆相红层盆地中的有色金属矿床(主要是铜矿、铅锌矿)有很多研究,相关的论文也不少。但多将其归入已有的矿床类型,最普遍的是称其为砂岩型矿床,如叶天竺(2014)将其归为沉积地质作用之非岩浆热液作用亚类的砂岩型矿床;早期则多将其称为沉积型矿床,如袁见齐(1979)将其归入与生物化学沉积作用有关的沉积型矿床。但都没有反映这类矿床产出的特殊地质背景与地质时代属性,以及独特的成矿地质作用与成矿系统,因而有必要进行进一步的厘清。为此,本文在乌拉根铅锌矿及萨热克铜矿勘查实践及理论研究的基础上,结合全国其他红层铜矿的调研与资料分析研究,提出了红层型矿床类型这一新的矿床类型,旨在抛砖引玉,以期引起大家对这一问题的兴趣与重视。

2 陆相红层型铜铅锌矿床

2.1 乌拉根红层型铅锌矿床

乌拉根铅锌矿是有色金属矿产地质调查中心在21世纪初发现的,在中国地质调查局的项目支持下,地质找矿取得了重大突破,到2016年,仅紫金矿业控制的资源储量,矿石量即达1.99亿t,铅锌金属量达590万t,并已建成中国最大的单体铅锌矿山,年处理矿石量500多万t,创造利税3亿多元。整个矿区范围内资源潜力在1000万t以上,成为国家地质大调查专项新发现的十大资源基地之一。

乌拉根次级红层盆地位于塔里木盆地西段塔西南坳陷西部的喀什凹陷的北缘,乌拉根隆起北边。乌拉根铅锌矿床位于乌拉根次级红层盆地中的乌拉根向斜东端,向斜轴近东西向,向东翘起。盆地基底为元古宇长城系。盆地中发育侏罗系、白垩系、古近系、新近系等沉积地层。其中,下白垩统

克孜勒苏群第五岩性段(K_1kz^5)灰白色砂砾岩为铅锌矿的赋矿层位(图1)。

乌拉根铅锌矿规模巨大,铅锌矿体分布于整个向斜及扬起端,从南北两翼露头到向斜核部矿体基本连续分布,东西长2600 m,南北宽约2700 m,标高范围1260~2469 m(地表)。矿体具有明显的层控特征,呈层状、似层状产于下白垩统克孜勒苏群第五岩性段(K_1kz^5)灰白色砂砾岩中,与地层同步褶皱,膨缩、尖灭再现、分枝复合特征明显(图1,图2)。铅锌矿体顶板为古新统阿尔塔什组(E_1a)底部的具块状、层纹构造的天青石岩及石膏层、白云质灰岩(角砾状灰

岩或白云岩),溶蚀及塌陷现象明显,并局部含矿。

矿区共圈定4个矿体,按照矿体的产出部位由上至下依次编号为I、II、III、IV,矿体具有规模巨大、形态较简单、品位低、矿化均匀、矿石类型简单的特征(表1)。

有用组分为Zn、Pb,矿床Zn平均品位2.74%,Pb平均品位0.45%。原生矿石中金属矿物主要以闪锌矿、方铅矿为主,其次有黄铁矿、毒砂、少量磁黄铁矿、黄铜矿等。非金属矿物主要为石英、长石、碳酸盐矿物,其次有岩屑、石膏、云母等。

硫化矿以半自形粒状结构、填隙结构为主,可见

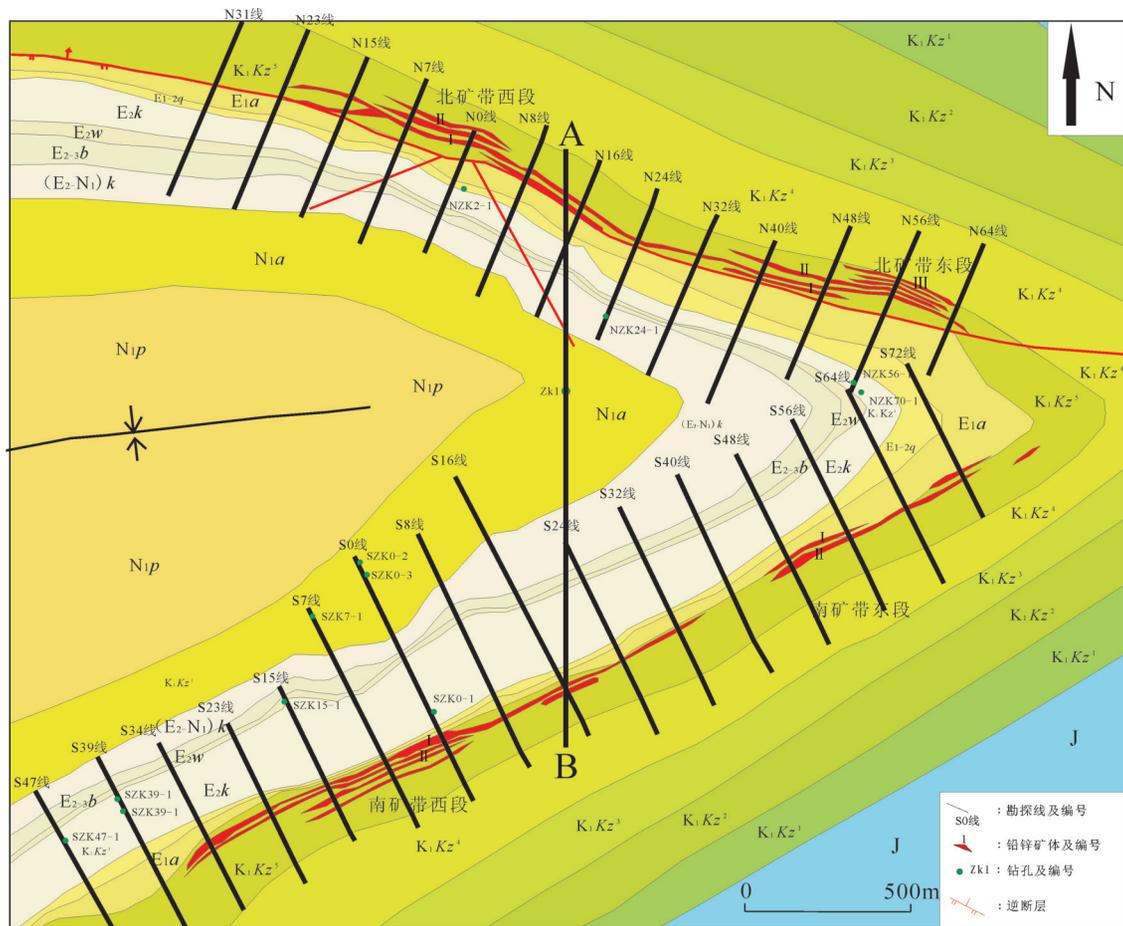


图1 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿矿床地质图(刘增仁,2011)

N_{1p} —帕卡拉拉克组; N_{1a} —安居安组; $(E_3-N_1)k$ —克孜洛依组; E_{2-3b} —巴什布拉克组; E_{2w} —乌拉根组; E_2k^2 —卡拉塔尔组上段; E_2k^1 —卡拉塔尔组下段; E_{1-2q} —齐姆根组; E_1a —阿尔塔什组; K_1kz^5 —克孜勒苏群第五岩性段; K_1kz^4 —克孜勒苏群第四岩性段; K_1kz^3 —克孜勒苏群第三岩性段; K_1kz^2 —克孜勒苏群第二岩性段; K_1kz^1 —克孜勒苏群第一岩性段

Fig.1 Geological map of the Wulagen Pb-Zn deposit in Wuqia County, Xinjiang(After Liu zengren, 2011)

N_{1p} —Pakabulake Formation; N_{1a} —Anjuan Formation; $(E_3-N_1)k$ —Keziruoyi Formation; E_{2-3b} —Bashenbulake Formation; E_{2w} —Uralgan Formation; E_2k^2 —Upper member of Kalataer Formation; E_2k^1 —Lower member of Kalataer Formation; E_{1-2q} —Qimugen Formation; E_1a —Aertashen Formation; K_1kz^5 —The fifth lithologic member of Kezilesu Group; K_1kz^4 —The fourth lithologic member of Kezilesu Group; K_1kz^3 —The third lithologic member of Kezilesu Group; K_1kz^2 —The second lithologic member of Kezilesu Group; K_1kz^1 —The first lithologic member of Kezilesu Group

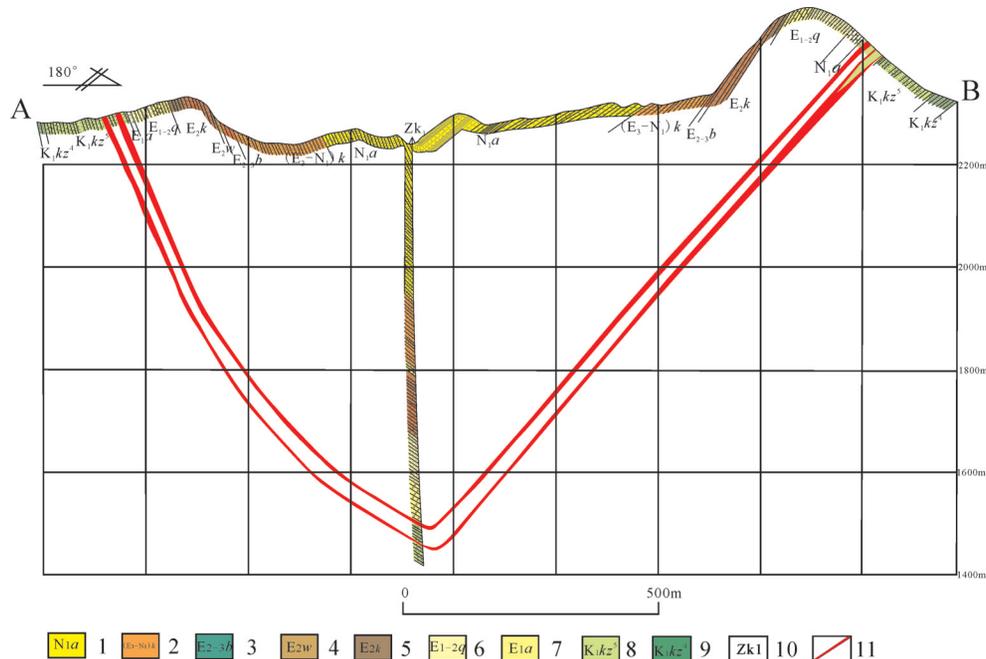


图2 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿床ZK1号钻孔勘探线剖面示意图

1—安居安组;2—克孜洛依组;3—巴什布拉克组;4—乌拉根组;5—卡拉塔尔组;6—齐姆根组;7—阿尔塔什组;8—克孜勒苏群第五岩性段;
9—克孜勒苏群第四岩性段;10—钻孔;11—铅锌矿体

Fig.2 Geological section along ZK1 hole of the Wulagen Pb-Zn deposit in Wuqia County, Xinjiang

1—Anjuan Formation;2—Keziruoyi Formation;3—Bashenbulake Formation;4—Uralgan Formation;
6—Qimugen Formation;7—Aertashen Formation;8—The fifth lithologic member of Kezilesu Group;9—The fourth lithologic member of Kezilesu Group;10—Drill hole;11—Orebody

他形粒状结构、自形结构、包含结构。硫化矿构造以浸染状构造为主,次为脉状构造、角砾状构造,偶见团块状、块状构造。主要为后生充填作用而形成。

矿床的形成与盆地热卤水作用密切相关。祝新友(2010)提出克孜勒苏群紫色砂砾岩顶部的浅色层是区域性盆地热卤水作用造成的退色蚀变的产物,并认为乌拉根铅锌矿的形成与此有关。退色蚀变带西起中吉边界,东到塔里木盆地边缘覆盖区,长140 km。蚀变带厚一般100~300 m。含矿地层下白垩统克孜勒苏群顶部第五岩性段(K₁kz⁵),其岩性主要为泥质岩、粉砂岩及砂砾岩,原岩应是一套红色建造(图3)。含矿地层常见沥青、油气包裹体等,反映了生物有机质及油田热卤水的作用。微细粒的泥质及粉砂质岩石与中粗粒的砂砾岩基本上以互层形式产出,比例大约为1:5。微细粒的泥质及粉砂质岩石均为褐红色、暗红色,中粗粒的砂砾岩均为灰色、灰白色。一般而言,红色反映干旱氧化环境;灰白色反映潮湿还原环境。显然,气候及地理环境不可能有如此快速反复的变化。粗粒

沉积物一般代表浅表层氧化沉积环境,微细粒沉积物则一般代表中深层还原沉积环境,不可能微细粒沉积物是红色的,而中粗粒沉积物是灰白色的。其实,沉积岩中由粗到细的粒序韵律层,特别是重复出现的多个粒序韵律层,主要是浊流(泥石流)沉积作用的产物,是一种快速沉积物,其韵律变化并不反映沉积环境及物源的改变。合理的解释是,粗粒沉积物孔隙度大,有利于盆地热卤水的渗透活动而产生了褪色作用。微细粒沉积物密闭性好,不利于热卤水的渗透活动,因而没受其影响,保持了原有的状态。在露采场可明显观察到含矿的砂砾岩中有部分泥质夹层及泥质团块还保留有部分没退色的红色原岩,也说明了蚀变褪色作用的存在。

乌拉根矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-27.9‰~14.6‰,指示相邻层位中石膏、天青石等硫酸盐提供硫,同时有机物的热分解也可能作为硫的来源,硫的还原可能包括生物还原与有机质热化学还原两种模式。硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为18.528~18.633、15.611~15.669、38.616~38.839,极

表1 矿体特征一览
Table 1 A list of orebody features

矿体编号	矿体形态	矿体长度/m	平均真厚度/m	最大延伸/m	赋矿标高/m	Zn 平均品位/%	Pb 平均品位/%	含矿岩石
I	似层状、层状	2870	15.06	2480	1290~2469	2.47	0.43	砂砾岩、含砾砂岩, 次为砂岩
II	似层状、层状	2400	11.26	2000	1260~2395	2.14	0.32	砂岩、含砾砂岩, 次为砂砾岩
III	似层状、层状	2200	10.98	2040	1320~2374	2.07	0.47	砂砾岩、含砾砂岩, 次为砂岩
IV	似层状、层状	700	5.31	560	1500~2368	1.8	0.21	砂岩、次为含砾砂岩, 砂砾岩

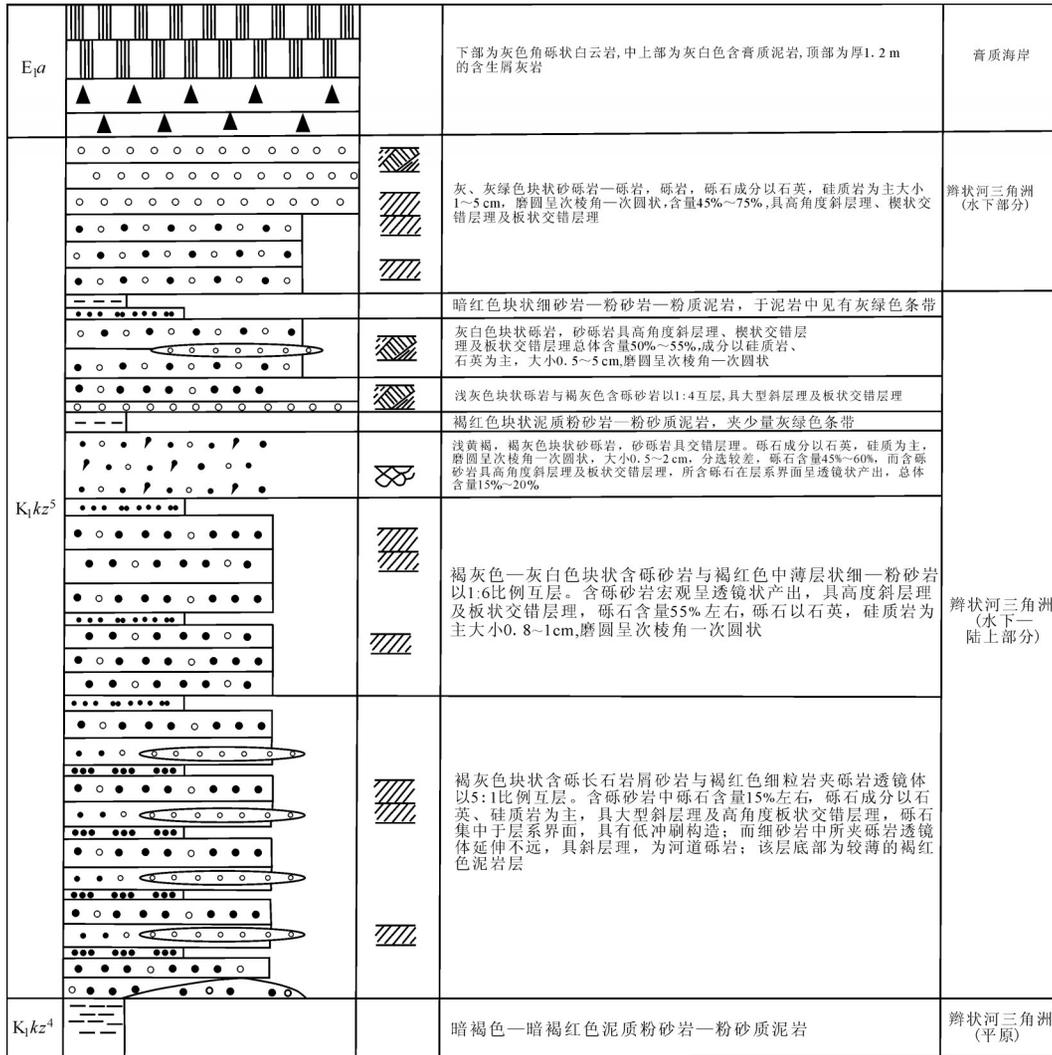


图3 克孜勒苏群第五岩段岩性柱状图

Fig.3 The fifth lithologic member of Kezileusu Group lithological column

为均一,指示上地壳和造山带剥蚀区是成矿金属的来源(李志丹等,2013)。

气液包裹体特征,矿区共采集10个样品,由中南大学刘继顺教授委托桂林矿产地质研究院进行测试,方铅矿的生成温度在90℃~130℃,平均温度

为110℃±,闪锌矿的生成温度在110~155℃,平均为130℃±,由此说明成矿温度是属低温的;气液包裹体成份属Na-Ca氯化物型,含盐度一般在15%~20%,由此说明金属物质系由低温热卤水携带运移(高珍权,2002)。

2.2 萨热克红层型铜矿

2005年,有色金属矿床地质调查中心依托地质大调查项目发现了萨热克大型铜矿,目前已提交备案的铜矿石量3228万t,金属量31.4万t,伴生银400t,铜品位为0.97%,银品位12.39 g/t,南北矿带铜远景资源量在50万t以上。

大地构造上,萨热克铜矿床位于塔里木地块与南天山造山带的过渡部位的萨热克巴依中生代断陷盆地(图4)。矿床赋存于陆相盆地的红色碎屑岩建造中,是典型的红层型铜矿。

盆地基底为长城系变质岩系。盆地内发育侏罗系、白垩系及第四系(图5)。侏罗系发育比较完整,为一套陆相湖盆建造。下侏罗统,莎里塔什组(J_1s)为一套快速堆积的冲积扇相的砾岩夹砂岩透镜体;康苏组(J_1k)为一套湖泊-沼泽相的煤系地层。中

侏罗统,杨叶组(J_2y)为一套灰绿色滨浅湖相砂岩和泥岩类,在河湖相石英砂岩中含有两层煤,康苏组和杨叶组煤层均具有工业开采价值;塔尔尕组(J_2t)为一套浅-半深湖相杂色泥岩、石英砂岩夹泥灰岩。上侏罗统库孜贡苏组(J_3k)为一套厚层砾岩沉积,分两段:下段(J_3k_1)为暗红色、棕红色砾岩、砂岩及粉砂岩互层,上段(J_3k_2)为灰绿色砾岩夹砂岩透镜体,是萨热克铜矿的主要赋矿层位。下白垩统克孜勒苏群(K_1kz)与库孜贡苏组(J_3k)为整合接触,出露2段:第一段(K_1kz^1)为褐红色泥岩夹砂岩;第二段(K_1kz^2)为紫灰色、暗褐红色砂岩与泥岩互层。矿层顶板(K_1kz^1)紫红色泥质粉砂岩是萨热克铜矿良好的屏蔽盖层。

含矿地层发生了大规模的热卤水退色蚀变作用。微细粒的泥质及粉砂质岩石保持了褐红色、暗

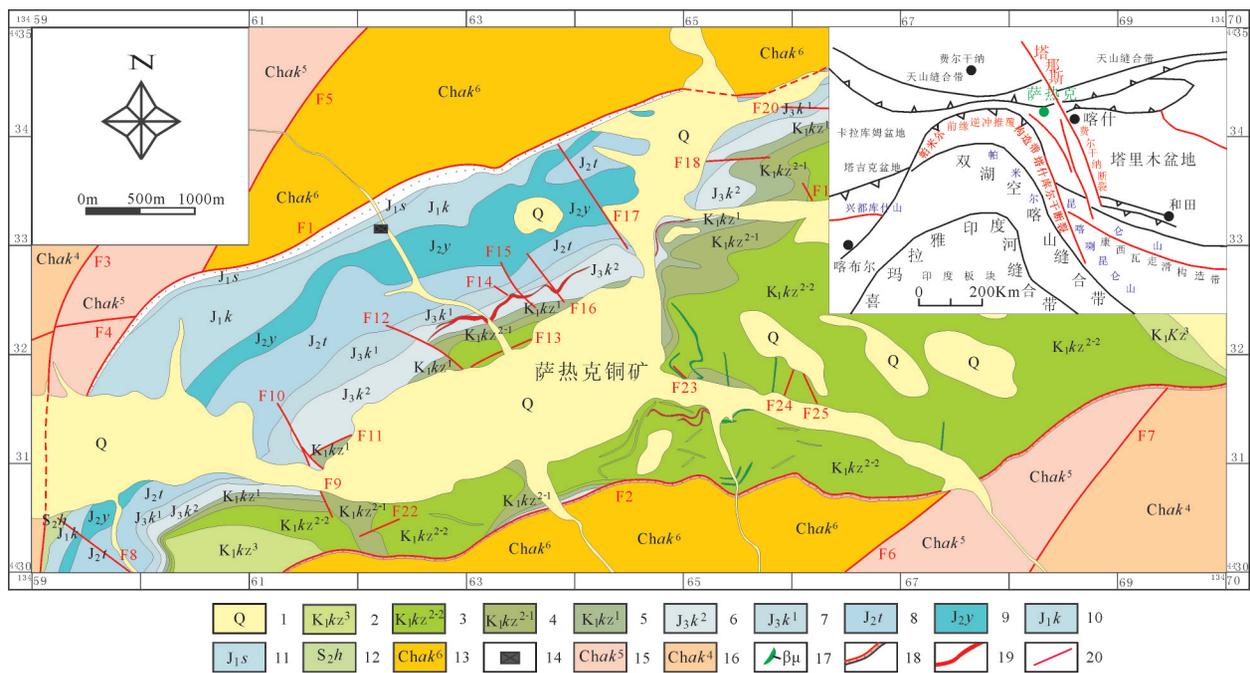


图4 新疆萨热克铜矿床地质图(贾润幸, 2017)

- 1—第四系沉积物; 2—克孜勒苏群上段; 3—克孜勒苏群中段上部; 4—克孜勒苏群中段下部; 5—克孜勒苏群下段; 6—库孜贡苏组第二岩性段;
- 7—库孜贡苏组第一岩性段; 8—塔尔尕组; 9—杨叶组; 10—康苏组; 11—莎里塔什组; 12—合同沙拉群千枚岩、硅质板岩、大理岩化灰岩;
- 13—长城系阿克苏群第六岩性段云英片岩、大理岩; 14—煤矿点; 15—长城系阿克苏群第五岩性段; 16—长城系阿克苏群第四岩性段;
- 17—辉绿岩脉; 18—破碎带; 19—铜矿体; 20—断层及编号

Fig.4 The geological map of Sareke copper deposit(After Jia Runxing, 2017)

- 1—Quaternary sediment ; 2—The upper part of Kezilesu Group; 3—The upper part of middle Kezilesu Group; 4—The lower part of middle Kezilesu Group; 5—The lower part of Kezilesu Group; 6—The second lithologic member of Kezilesu Group; 7—The first lithologic member of Kezilesu Group;
- 8—Taerga Formation; 9—Yangye Formation; 10—Kansu Formation; 11—Shalitashi Formation; 12—The phillite,siliceous slate, marble lithified limestone of Hetongshala Group; 13—The greisen schist and marble of the sixth lithologic member of Aksu Group of Changcheng System;
- 14—Coal mine; 15—The fifth lithologic member of Aksu Group of Changcheng System; 16—The fourth lithologic member of Aksu Group of Changcheng System; 17—Dolerite dyke; 18—Shatter zone; 19—Copper orebody; 20—Fault and its serial number

床地质及地球化学研究,判断萨热克铜矿的形成与盆地流体活动相关(李志丹,2011)。

萨热克铜矿矿物包裹体特征显示(贾润幸,2017),矿物包裹体中:①方解石中76个含烃盐水包裹体大小为 $2\ \mu\text{m}\times 4\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$;气液比 $\leq 5\%\sim 8\%$,均一温度 $81\sim 181^\circ\text{C}$,平均温度为 127.9°C ;盐度为 $2.07\%\sim 23.18\%\ \text{NaCl}_{\text{eq}}$,平均为 $19.29\%\ \text{NaCl}_{\text{eq}}$;②白云石中3个含烃盐水包裹体大小为 $17\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}\times 45\ \mu\text{m}$;气液比 $\leq 5\%$,均一温度 $124\sim 137^\circ\text{C}$,平均温度为 131.3°C ,盐度为 $6.3\%\sim 23.05\%\ \text{NaCl}_{\text{eq}}$,平均为 $17.47\%\ \text{NaCl}_{\text{eq}}$;③次生石英中21个含烃盐水包裹体大小为 $2\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}\sim 40\ \mu\text{m}\times 70\ \mu\text{m}$,气液比 $\leq 5\%$,均一温度 $99\sim 207^\circ\text{C}$,平均温度为 140.33°C ,盐度为 $3.06\%\sim 16.71\%\ \text{NaCl}_{\text{eq}}$,平均为 $7.6\%\ \text{NaCl}_{\text{eq}}$ 。从上述包裹体的分析数据看,萨热克盆地的成矿流体属于中—低温、低—中盐度的富烃类还原性盆地热卤水。

2.3 红层型铜铅锌矿的主要特征

综上所述,红层型铜矿及红层型铅锌矿具有高

度的相似性,主要特征如下:

(1)红层型铜铅锌矿均产于陆相红层盆地内的红色建造中。其下伏地层常有含煤建造,而上覆地层常有蒸发沉积建造,如白云岩、石盐、石膏等。反映了盆地从温暖潮湿 \rightarrow 炎热干旱 \rightarrow 蒸发干枯封闭的发展过程。

(2)盆地内的红色岩层发生过大规模的热卤水蚀变退色作用。蚀变退色作用主要发生在中粗粒碎屑岩中(砂岩、砾岩),而微细粒沉积岩(泥质岩、粉砂岩)中基本没有退色。因而呈现出“浅紫”互层的特征。

(3)铜铅锌矿层赋存在浅色的中粗粒碎屑岩中。矿体多为层状、似层状,完全与地层整合产出,层控特征明显。矿层顶板为屏蔽层,如泥岩、粉砂岩、白云岩、石膏层等。顶板为蒸发岩者,常见溶蚀塌陷角砾岩,含矿性良好。虽然矿层主要顺层产出,受层位控制,但断裂构造在成矿中也起着重要作用,主要是沟通各层热卤水,并汇集到有利沉淀部位成矿。

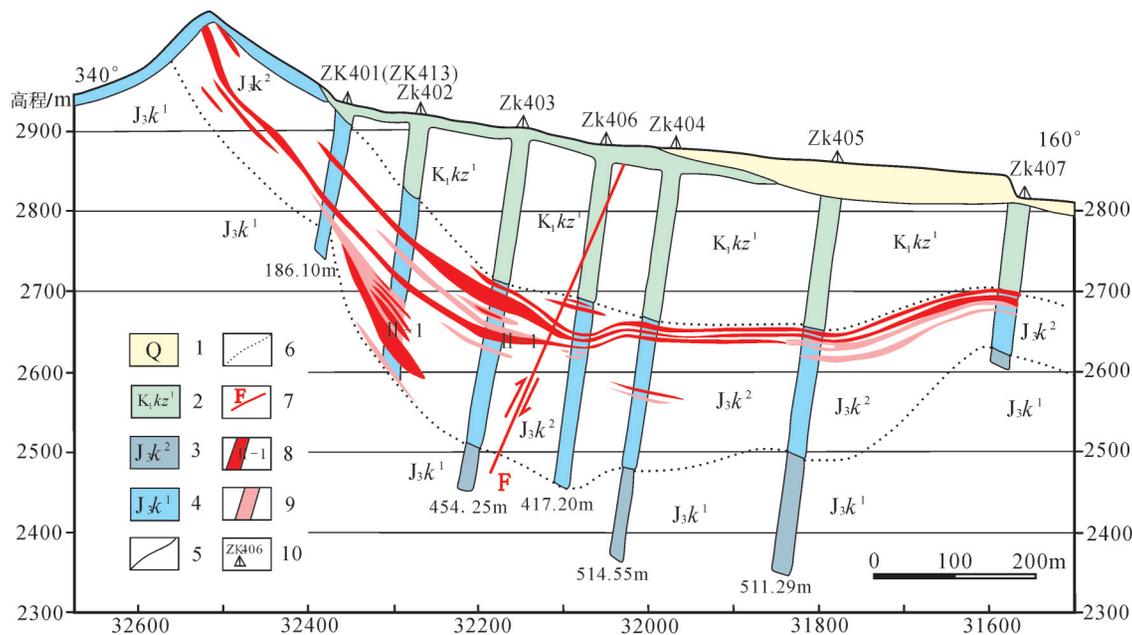


图6 新疆萨热克铜矿北矿带4号勘探线剖面图(贾润幸,2017)

1—第四系;2—下白垩统克孜勒苏群第一段;3—上侏罗统库孜苏组第二岩性段;4—上侏罗统库孜苏组第一岩性段;5—地质界线;
6—推测地质界线;7—断层;8—矿体及编号;9—矿化体;10—钻孔位置及编号

Fig.6 Geological section along No. 4 exploration line of the north ore zone of the Sareke copper deposit, Xinjiang
(After Jia Runxing, 2017)

1—Quaternary sediments; 2—The first part of Kezilesu Group of Lower Cretaceous; 3—The second lithologic member of Kuzikusu Group of upper Jurassic; 4—The first lithologic section of Kuzikusu Group of Upper Jurassic; 5—Geological boundary; 6—Inferred geological boundary; 7—Fault; 8—Orebody and its serial number; 9—Mineralization body; 10—Borehole location and serial number

(4)一般具有多层位成矿的特征,如滇中楚雄盆地(图7),从早侏罗世的冯家河组一直到晚白垩世江底河组,共有16个含矿层,产出工业矿床的主要含矿层也有4个:早白垩世高峰寺组的凹地苴段,晚白垩世马头山组郝家河上段和下段,晚白垩世江底河组大村段。在塔里木西缘,从侏罗系到新近系,至少有4个含工业矿床的层位:晚侏罗世库孜苏组(萨热克铜矿),早白垩世克孜勒苏组(乌拉根铅锌矿),古近系(伽师铜矿),中新统康村组(滴水铜矿)。就全国范围而言,主要成矿层位是白垩系,其次是侏罗系、古近—新近系。

(5)矿床主要赋存在盆地边缘的向斜扬起端或背斜倾覆端,其顶板为渗透性差的隔水层。因为向斜扬起端或背斜倾覆端对含矿热卤水起阻挡和圈闭作用,使矿质在此汇聚。

(6)后生成矿特点明显。矿石矿物多为浸染状,系交代粒间胶结物而成。在裂隙或破碎发育地段,可见脉状、细脉状及块状等充填作用形成的矿

石。铜矿物以辉铜矿为主,闪锌矿含量大大高于方铅矿。矿石一般为少硫化物型。

(7)含矿地层常见沥青、油气包裹体等,反映了生物有机质的作用。包裹体研究表明,成矿流体为NaCl型,NaCl含量10%~30%。热液碳酸盐矿物的C、H、O同位素指示,成矿流体为盆地中的地下水。矿石铅同位素研究表明,铅主要来自上地壳及造山带,也即成矿物质来自盆地沉积物。硫同位素,δ³⁴S分布宽泛,以负值为主,硫源主要是由硫酸盐的生物还原和有机质热化学还原而得到;其次为有机质中硫的热降解机制。

(8)盆地外围,有时会出现一些MVT型铅锌矿。由于盆地封闭抬升后,热卤水的运动迁移并不会局限在盆地内,有可能向盆地外围扩散,当进入到有利的碳酸盐岩,有可能形成MVT型铅锌矿。在塔里木盆地南缘的泥盆、石炭系碳酸盐岩中即产出一系列MVT型铅锌矿,如塔木、卡兰古等铅锌矿。

(9)盆地内及周边一定范围内,一般没有岩浆

地层	层序	图示	主要岩性	矿化	建造
中生界	白垩系	赵家店组	红色砂岩、泥岩		含膏盐建造
	白垩系	江底河组	红色砂岩、粉砂岩、灰绿色泥岩(油页岩)	一平浪盐矿 罗苴美油页岩 大村、团山铜矿	
	白垩系	马头山组	紫色砂岩、砂砾岩	郝家河铜矿 六苴铜矿	含铜建造
	白垩系	普昌河组	紫红色泥质砂岩、泥岩	铜矿化	
	白垩系	高峰寺组	灰色砂岩、泥质砂岩	凹地苴铜矿	
	侏罗系		灰色泥岩、紫色、灰绿色砂岩	铜矿化	
	三叠系	一平浪组		灰黑色粉砂岩、泥岩夹煤层	祥云煤矿—平浪煤矿、宝顶煤矿
云南驿组			黄绿色页岩、灰岩		
古生界			灰岩		

图7 楚雄盆地含煤、含铜、含膏盐建造组合

Fig.7 The assemblage of coal-bearing, red cupriferous and red evaporate formations in Chuxiong Basin

岩及岩浆活动的迹象。

2.4 乌拉根铅锌矿与金顶铅锌矿的差异

中国产于中生代陆相盆地红色建造中的铅锌矿床尚不多见,目前来看,主要是乌拉根铅锌矿和金顶铅锌矿,而且均为超大型矿床。兰坪金顶铅锌矿是中国最大的硫化物型铅锌矿,累计控制铅锌储量为1500多万t,铅1.2%,锌6.08%,产于滇西兰坪中生代陆相红层盆地中,有学者也将其视为砂岩型铅锌矿(康亚龙,2009),认为乌拉根铅锌矿与其相似,属于同一类型矿床。其实,两者在含矿围岩、控矿因素、矿质来源、矿床成因等诸多重要方面存在巨大差异,实为两种不同类型的矿床。

金顶铅锌矿体分布在飞来峰前缘推覆构造带、次级断裂内和旁侧的构造-溶蚀角砾岩带内(图8),古新统云龙组和下白垩统景星组之间由 F_2 断层(推覆构造面)所分隔。景星组为上含矿层位,以砂岩型矿石为主;云龙组为下含矿层位,以角砾岩型矿石为主。金顶铅锌矿床赋存于云龙组和景星组地层中,跨越不同的盆地演化阶段。景星组形成于弧后前陆盆地,而云龙组形成于走滑拉分盆地背景。两者通过后期的推覆作用而叠置在一起。大推覆发生的时限应在云龙组形成之后,代表了一次重要的构造事件,对金顶铅锌矿床的形成起到了决定性的作用。大部分含矿的灰岩角砾岩为后期推覆构造作用的产物。

前人(赵兴元,1989;周维全等,1992;叶庆同等,1992;张乾,1993;罗君烈等,1994)已经积累了金顶矿床的大量硫化物的Pb、S同位素数据。通过对96件Pb同位素数据统一求算模式年龄和源区特征值,发现有85%的样品反映幔源Pb特征(模式年龄主频位于42 Ma, μ 值主频在8.87),其余15%显示壳幔混合铅特征(模式年龄主频位于102 Ma, μ 值主频在9.05)。对文献中88件硫化物矿物样品S同位素数据的统计表明, $\delta^{34}\text{S}$ 出现3个峰值:4.5‰(黄铁矿样品占78.9%)、-13.5‰(闪锌矿样品占81%)和-19.0‰(方铅矿样品占87.1%),存在 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿的趋势,说明成矿流体中硫化物之间相互平衡,总体上富轻硫的特征反映了还原硫与地层中大量硫酸盐的还原作用有关。

综上所述,乌拉根铅锌矿与金顶铅锌矿有如下显著的不同。

首先,金顶铅锌矿的赋矿岩石是时代完全不同的两类岩石,下白垩统景新组砂岩和古新统云龙组灰岩角砾岩。而乌拉根铅锌矿则赋存在下白垩统克孜勒苏群第五岩性段灰白色砂砾岩的同一层位中。

其次,由于推覆作用,景新组超覆在云龙组之上,两者之间为推覆构造面,矿体主要沿推覆构造及次级断裂旁侧的构造-溶蚀角砾带分布,是构造控矿而非地层控矿。而乌拉根铅锌矿则完全是地层控矿,矿体与地层产状一致,相互整合。

第三,金顶铅锌矿含矿地层下白垩统景新组和古近系云龙组之间隔了中、上白垩统,跨越不同的盆地演化阶段,成矿作用发生在盆地已遭到破坏的造山阶段。而乌拉根盆地至今还保存完好,乌拉根铅锌矿是盆地内热卤水成矿。

第四,铅同位素表明,金顶铅锌矿的铅来自上地幔。而乌拉根铅锌矿的铅则是来自盆地内。

综上所述,金顶铅锌矿既不能归入与沉积作用有关的非岩浆热液的砂岩型铅锌矿,也不属红层型铅锌矿,而是与深部岩浆作用有关的多因复成矿床。

3 红层型铜铅锌矿的成因讨论

3.1 成矿地质体

成矿地质体为地洼型陆相盆地中的红色沉积建造。红层型铜铅锌矿均产于地洼型陆相盆地中,是盆地演化过程中特定地质作用条件下的产物。地洼型陆相盆地是红层型铜铅锌矿的成矿基础。

从全球地质发展史看,从中生代中期开始,大陆地壳开始进入了第四个发展阶段——地洼阶段,即地台活化、解体而发展成地洼区,其中尤以东亚地区最为典型。乌拉根及萨热克矿床即处在塔里木地洼区。该地洼区,侏罗纪开始地壳活动性明显增大,强烈的断块运动破坏了地台的平坦地形,形成了塔里木盆地及其一系列次级盆地。在地洼区的早期(初动期)地洼开始出现,多形成含煤建造(早、中侏罗世)。到地洼阶段中期(剧烈期),地洼范围和规模进一步扩大,并发育山间盆地(地洼),气候变得炎热并出现周期性干旱气候,形成了以碎屑岩为主的红色建造(上侏罗统及白垩系)。到新生代,地洼进一步发展,沉积了巨厚的古近一新近系红色建造,并出现了局部的基性岩浆活动(玄武岩)。在相对封闭的陆相盆地,在气候由温暖潮湿

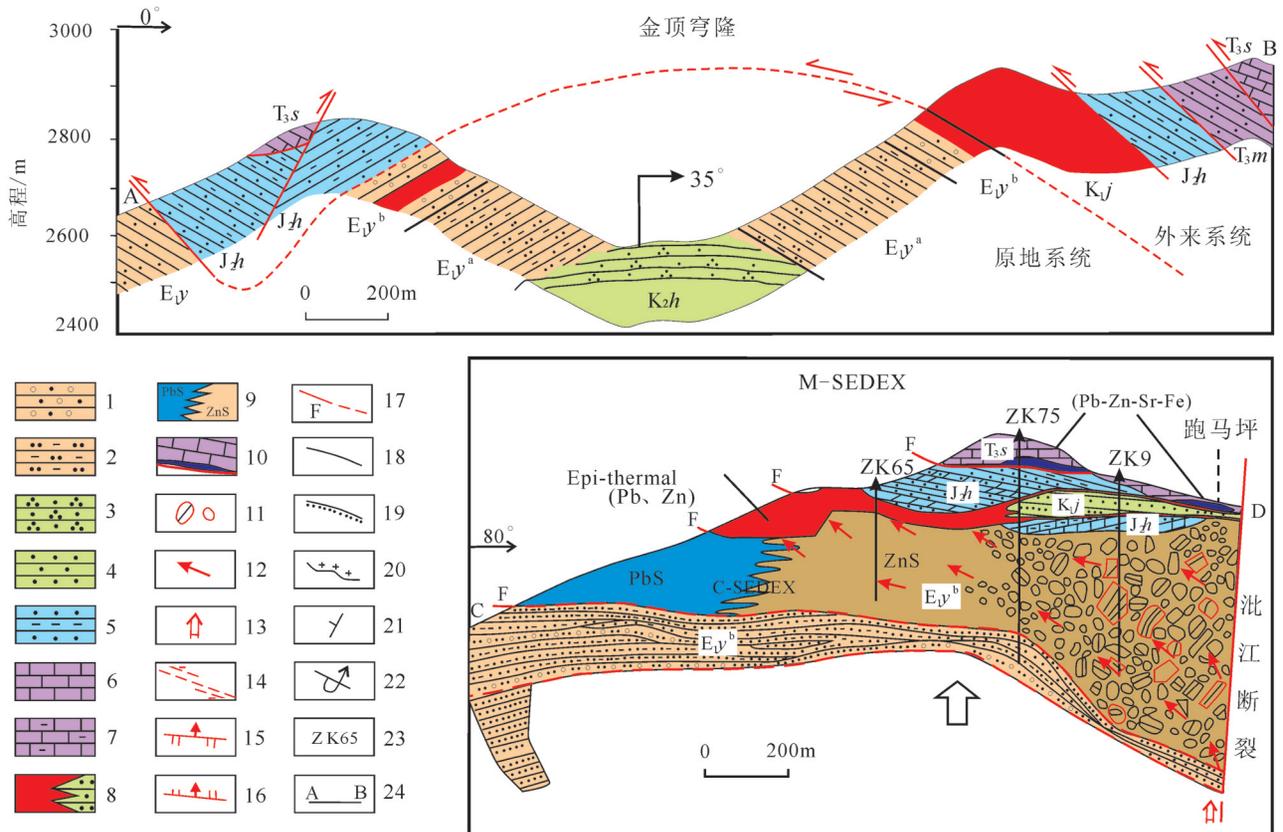


图8 云南兰坪县金顶铅锌矿床剖面示意图(曾普胜,2016)

E_{2g} —始新统果郎组岩屑石英砂岩; E_{1y} —古新统云龙组; E_{1y}^b —云龙组上段角砾岩和砂岩; E_{1y}^a —云龙组下段粉砂泥岩; K_2h —中白垩统虎头寺组石英砂岩及粉砂岩; K_1j —下白垩统景星组粗砂岩和岩屑石英砂岩; J_2h —中侏罗统花开左组粉砂岩和泥岩; T_3m —上三叠统麦初箐组含膏盐粉砂—细砂岩; T_3w —上三叠统挖鲁扒组泥岩和粉砂岩; T_3s —上三叠统三合洞组灰岩夹白云岩;1—角砾岩和砂岩;2—粉砂泥岩;3—石英砂岩及粉砂岩;4—粉砂岩和细砂岩;5—粉砂岩和泥岩;6—灰岩;7—泥质灰岩;8—新近纪砂岩容矿中低温热液充填型(Epithermal type)矿床;9—晚白垩世—古近纪时期含石膏化灰岩角砾的陆相湖泊热水沉积型(C-SEDEX)矿床(靠近同生断裂的北东侧为闪锌矿为主的矿层,西南侧为方铅矿为主的矿层);10—三叠纪三合洞组时期的海相热水沉积型(M-SEDEX)矿床(层控铅锌矿—天青石—菱铁矿矿床组);11—新近纪时期被石膏交代的碳酸盐岩角砾;12—新近纪时期成矿流体运移方向;13—沿同生断裂上升的主通道成矿流体运移方向;14—金顶穹隆区的外来系统的逆冲推覆界面;15—逆冲推覆断裂;16—正断层;17—性质不明断层;18—地屡界线;19—不整合面;20—底砾岩;21—正常岩层产状;22—倒转岩层产状;23—钻孔编号;24—剖面位置及编号

Fig.8 Geological section of the Jinding Pb-Zn deposit, Yunnan

E_{2g} —Debris quartz sandstone of Eocene Guolang Formation; E_{1y} —Paleocene Yunlong Formation; E_{1y}^b —Upper member of Yunlong Formation: breccia and sandstone; E_{1y}^a —Lower Member of Yunlong Formation: siltstone and mudstone; K_2h —Middle Cretaceous Hutousi Formation: quartz sandstone and siltstone; K_1j —Lower Cretaceous Jingxing Formation: mega-grained sandstone and debris quartz sandstone; J_2h —Middle Jurassic Huakaizuo Formation: silt stone and mudstone; T_3m —Upper Triassic Maichuqing Formation: salt-bearing silt stone and Line sandstone; T_3w —Upper Triassic Waluba Formation: mudstone and siltstone; T_3s —Upper Triassic Sanhedong Formation: limestone with dolomite; 1—Breccia and sandstone; 2—Siltstone with mudstone; 3—Quartz sandstone and siltstone; 4—siltstone and finestone; 5—Siltstone and mudstone; 6—Limestone; 7—Mud-limestone; 8—Neogene epithermal type deposits in sandstone; 9—The late Cretaceous—Paleogene Continental—SEDEX with gypsum metasomiated carbonate breccias (Northeast of the contemporaneous faults is the sphalerite seam, southwest of it is the galena seam); 10—Triassic Sanhedong Formation Marine—SEDEX deposit (stratabound lead-zinc mine with celestite and siderite); 11—Neogene gypsum metasomatism carbonate breccias; 12—Neogene moving direction of ore-forming fluid; 13—The direction of ore-forming moving along the contemporaneous fault; 14—The thrust nappe interface of the exotics system in Jinding dome zone; 15—The thrusting napped fault; 16—Normal fault; 17—Undetermined fault; 18—Geological boundary; 19—Unconformity surface; 20—Basal conglomerate; 21—Attitude of normal stratum; 22—Attitude of reversed stratum; 23—The boring number; 24—The section position and its serial number

向炎热干旱的演化过程中,相继沉积了富有机质的含煤建造、红色碎屑岩建造及蒸发岩建造等,并汇聚了铜铅锌硫等成矿物质。随着盆地中的水不断蒸发浓缩,形成含盐度较高的卤水。盆地干枯封闭后,随着沉积物的埋深与压实,卤水的浓度和温度不断提高,有利于成矿金属的萃取。随着温度的升高,有机质转变为烃类,烃类与硫酸盐的作用,形成含H₂S的流体。在压力和构造挤压力及地热力等的作用下,热卤水(包括天水的加入)大规模的运动并淬取沉积物中的成矿物质,以络合物的形式,在孔隙度高、通透性好的中粗粒碎屑岩中迁移,并使其发生蚀变退色。在屏蔽层及有利的构造圈闭环境中,含矿热卤水与含H₂S的流体通过透水层及断裂构造在此汇聚,沉淀成矿。因此,红层型铜铅锌矿是地洼区特有地质作用的产物,是地球地质演化进入地洼期以后出现的新的矿床类型。

3.2 成矿物质来源

根据大量的红层型矿床的同位素特征及物源示踪研究,成矿物质主要来自盆地内。Pb同位素指示,主要是上地壳、造山带的混合铅,也即表明成矿元素铅(锌、铜)来自盆地内造山带的碎屑沉积物。盆地中硫有四种存在形式,蒸发演化卤水中的硫酸盐、生物有机质降解生成的H₂S、流动性烃类及油气藏中含的H₂S、先前存在的硫化物(沉积期)。红层型矿床中,硫同位素主要分布在 $\delta^{34}\text{S}=-5.0\text{‰}\sim-30.0\text{‰}$,极宽的分布范围指示其还原硫主要来自硫酸盐的细菌还原作用,生物有机质形成的还原硫也应有所贡献。氧同位素样品主要落在雨水线和高岭石风化线之间,属混合的地层建造水。包裹体研究表明,成矿流体的温度在100~200℃,含盐度一般为10%~20%,属中低温热卤水。盆地在发育过程中,接受了巨量的造山带陆源碎屑物,其中富含成矿金属,同时形成了大量的有机质及硫酸盐、碳酸盐、岩盐等,为矿床形成提供了物质基础。

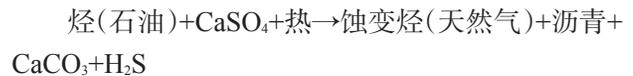
3.3 成矿机制

3.3.1 成矿元素的萃取与迁移

根据谭凯旋(1998)铜的溶解与迁移试验模拟结果,在Na-Ca-Cl-SO₄型流体体系中,盐度的增高,铜的溶解度显著增加,并能形成稳定的[CuCl]⁰、[CuCl₂]⁻、[CuCl₃]²⁻络合物。成矿过程中,热卤水沿渗透性强的砂砾岩层扩张运移,萃取沉积物中的成

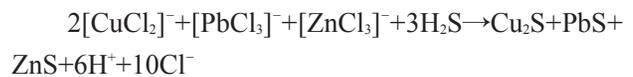
矿金属,以[CuCl₂]⁻、[CuCl₃]²⁻(包括Pb、Zn)等络合物形式迁移。

热卤水作用溶解早期的碳酸盐胶结物和铁质胶结物,造成砂砾岩层的退色蚀变。随着温度的升高,有机质转化为烃类,烃类与硫酸盐作用,形成S²⁻:



3.3.2 成矿元素的沉淀与富集

当含矿(Cu、Pb、Zn的氯络合物)的碱性氧化流体遇到含H₂S酸性还原性流体而发生混合,因此氧逸度降低,硫逸度升高,其物化界面,是发生络合物的失稳与成矿元素沉淀的主要机制和场所:



矿体一般赋存在盆地边缘的向斜扬起端或背斜倾覆端,其顶板为渗透性差的隔水层。成矿流体迁移到盆地边缘时,其动能及温度都会有明显的衰减,在向斜扬起端或背斜倾覆端的圈闭构造及屏蔽层的阻挡下,成矿流体在此汇聚,成矿物质发生沉淀,形成矿床(图9)。

3.4 成矿动力学过程

中国的中新生代陆相盆地,一般都经历了漫长(侏罗纪—新近纪)而复杂的发展演变过程,如喀什凹陷就是一个叠加复合盆地,中生代断陷盆地叠加在古生代凹陷基础之上,而新生代凹陷盆地又叠加在中生代盆地之上,经历了凹陷—断陷—凹陷的复杂发展过程。乌拉根铅锌矿的含矿地层为下白垩统,而其盖层为古新统的海相膏盐及白云岩层,膏盐及白云岩在成矿过程中遭到溶蚀、坍塌,并局部含矿,说明成矿是在古新世以后。古新统的海相膏盐及白云岩层的覆盖,标志着中生代陆相红层盆地的封闭。新生代盆地再次下陷,形成了巨厚的古近系和新近系以红色建造为主的沉积物(8943~9733 m)。乌拉根铅锌矿就是在新生代剧烈的地质构造运动过程中形成的。

在盆地的发展演化进程中,其接受的巨厚沉积物可达几千至上万米。一般而言,盆地中心的沉积物厚度要大于盆地边缘,在差异压实作用及地温梯度(深度可达上十千米)以及构造挤压力(如褶皱作用)等的作用下,都可以驱使流体大规模的运动。盆地沉积物以中、粗粒的碎屑岩为主,具有良好的

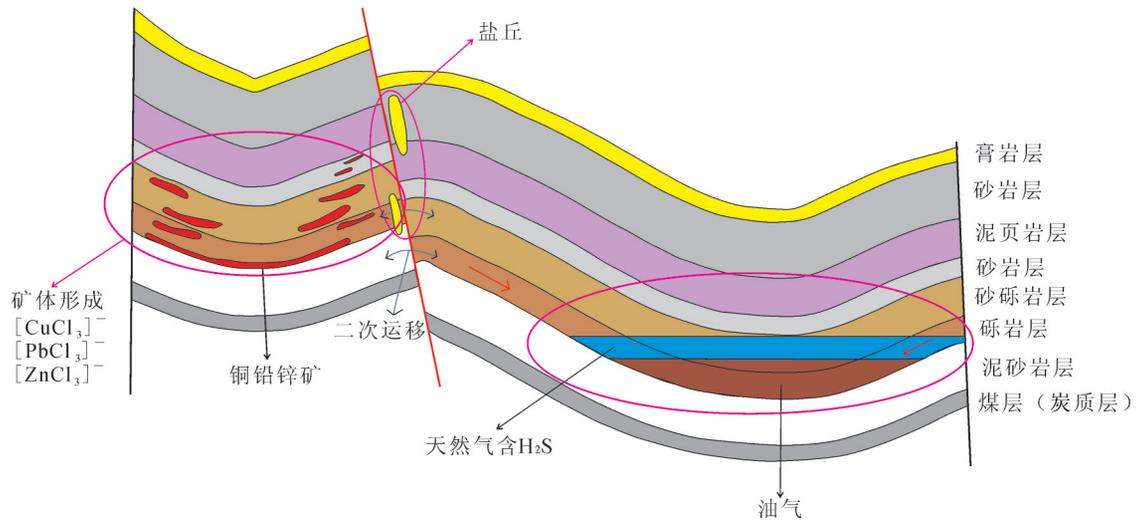


图9 热卤水成矿作用模式图
Fig.9 Hot brine metallogenic model

渗透性,同生及后生断裂的发生,都为流体的运动提供了条件。盆地的封闭性,可形成封闭循环的水文构造,使成矿物质得到保存而不致外泄,在成矿过程中也起到重要作用。随着埋深的增加,流体被不断加热。地壳的近似平均地热梯度是 $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$,按埋深10 km估算,温度可达 250°C ,已高于成矿温度,为热卤水的形成及其对成矿物质的萃取与运移提供了条件。温度的升高也为有机质转化为烃类、烃类与硫酸盐作用形成 H_2S 提供了可能。含矿的热卤水与含 H_2S 的流体,在上述动力的驱动下向上向外迁移,在适宜的条件耦合下汇集、沉淀成矿。

4 矿床学分类与红层型铜铅锌矿的矿床成因类型

矿床学家们对矿床成因类型的划分纷繁复杂,各有其特点和针对性。但自从1941年德国地质学家施奈德洪将矿床划分为岩浆、沉积、变质三大类以来,矿床学界大多以岩浆作用、沉积作用、变质作用三大基本地质作用为矿床分类基础。例如,作为中国地质调查百年的百项理论成果之一的“勘查区找矿预测理论”(叶天竺,2014),首先按成矿地质作用分为:沉积地质作用类、火山地质作用类、侵入岩浆地质作用类(此两者实为岩浆作用一类)、区域变质作用类、大型变形地质作用类(此两者可归入变质作用一类)5大类(实为3类)。在此基础上再按成矿作用亚类,分为15类矿床,如沉积地质作用之下

又分为表生作用类、沉积成岩作用类、热水沉积作用类、非岩浆热液作用类,而将陆相砂岩型铜矿(即红层铜矿)和铀矿归入非岩浆热液矿床类。

随着矿床勘查实践的发展以及科技手段的提高,三大成矿地质作用认识的局限性已显露无遗。上述将陆相砂岩铜矿及铀矿归入沉积地质作用类就十分牵强,反映了传统矿床分类的局限性。翟裕生(2004)将地质流体成矿作用与岩浆作用、沉积作用、变质作用并列为基本成矿作用之一。广义的地质流体包括了岩浆热液、变质热液以及热卤水、地热水等。前两者一般都归入岩浆作用、变质作用范畴,因此一般所称的地质流体是指狭义的地质流体,即与岩浆作用、变质作用无关的热卤水、地热水(含地下水)、油气等,以示与岩浆及变质热液的区别。大量的地质现象与研究表明,这种地质流体作用明显与岩浆作用、沉积作用、变质作用无直接关系,而是与重力场(埋深作用)、地温场(地热增温)、构造应力场、氧化还原作用、酸碱作用等相关联,明显有别于沉积地质作用,其来源主要是大气降水及地表水,而与岩浆热液及变质热液明显不同。地质流体作用是一种独立的基本地质成矿作用,大量矿产的形成与此有关,除红层型矿床及陆相砂岩型铀矿外,卡林型金矿、MVT型铅锌矿、锡矿山式锑矿、万山式汞矿等内生矿床都是这种地质流体作用所形成。由此可见,地质流体作用是重要的成矿地质作用之一,完全可以将其作为与岩浆地质作用、沉

积地质作用、变质地质作用并列的第四种基本成矿地质作用,与其相关的矿床也应作为单独的一大矿床类型。

无论过去和现在,一般多将产于陆相红层盆地红色建造中的铜矿及铅锌矿与产于海相地层中的铜矿及铅锌矿混为一谈,统称为砂岩型铜矿及铅锌矿(叶天竺2014,翟裕生2004),忽视了它们之间的明显差异。国际上,砂岩铜矿通常是指产于元古宙和古生代地台区海相砂岩(也有少数产于页岩、碳酸盐岩中)中的铜矿,如中非铜矿带、俄罗斯的乌多坎等,中国的东川铜矿、易门铜矿也属这一类。一般规模巨大,储量动辄几百上千万吨,品位高,常在3%~5%,多伴生钴。对这类矿床成因的认识还不十分清楚,分歧较大,有待深化。而产于陆相红层盆地内红色建造中的铜矿床,则多见于中国中、新生代广泛发育的地洼区,国外报道不多,规模以中小型为主,极少数可达大型,品位中等,1%左右,一般伴生银。这类矿床的成因以往有多种不同看法,如同生沉积说、沉积成岩说、后生热液成因说等,随着同位素、包裹体等测试技术及成岩成矿实验研究的进步,对其成因认识已趋于一致,即盆地热卤水成因。陆相红层盆地热卤水成矿作用是个完全独立的成矿系统,不但产出已广为人知的红层型铜矿,在21世纪初还发现了超大型的乌拉根红层型铅锌矿,其独特的成矿地质背景(地洼区)、鲜明的地质时代属性(中国中、新生代-地洼期)、突出的地质特点(红色沉积建造)、独立的成矿体系(盆地热卤水-地质流体),自成一体,明显区别于海相砂岩铜矿。因此,应将红层型矿床(包括但不限于铜铅锌)划为地质流体成矿作用类之下的红层型矿床类型。将红层型矿床作为一个单独的矿床类型与成矿系统进行研究和阐述,是完全符合矿床学分类原则的,并且具有重要的实践意义和理论意义。

5 结 论

(1)乌拉根铅锌矿与中国广泛分布的红层铜矿具有相同的成矿条件和成因,是同一类型的矿床,因此它是国内首次发现的红层型铅锌矿床。

(2)红层型铜铅锌矿类是陆相红层盆地演化过程中特定地质作用的产物。

(3)地质、同位素地球化学及包裹体等研究证

明,红层型铜铅锌矿床为盆地热卤水成矿作用的产物,其成矿物源也主要来自盆地内部。

(4)陆相红层型铜铅锌矿类是地洼区特有的矿床形式之一,是地洼期才出现的新的矿床类型,是四种基本成矿地质作用之一,即地质流体成矿作用形成的矿床,因此将其作为一个单独的矿床类型既是合理的也是必要的。

(5)乌拉根铅锌矿的发现,使中国广泛分布的陆相红层盆地成为寻找铅锌矿的新领域,为铅锌矿的找矿开辟了新的方向。

致谢: 新疆乌恰地区红层型铜铅锌矿的找矿突破,是在中国地质调查局的项目支持下取得的。原国土资源部部长徐绍史、中国地质调查局局长钟自然及原局长叶天竺曾亲临现场指导工作,中国地质调查局王瑞江、陈仁义、薛迎喜、龙宝林、王全明等给予项目工作极大的支持、帮助和指导;有色金属矿产地质调查中心袁继明、李顺庭对本文的写作给予了很多帮助,在此表示衷心的感谢!

References

- Chen Guoda. 2008. The Complete Works of Chen Guoda, Volum VI Diwa Theory Outline on Activated Tectonics and Metallogeny Theoretic System[M]. Central South University Press(in Chinese with English abstract).
- Gao Zhenquan, Liu Jishun, Shu Guanglong. 2002. Geological conditions and genesis of Wuqia Lead-zinc deposit, Xinjiang[J]. Journal of Central-South Industry University, 32 (2):116-121(in Chinese with English abstract).
- Jia Runxing, Fang Weixuan, Wang Lei, Guo Yuqian, Li Tiancheng. 2017. Hydrocarbon-rich reducing basin fluid with in Sareke Glutenite Type Copper deposit, Wuqia, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 41(4): 721-733(in Chinese with English abstract).
- Kan Yalong, Ouyang Yufei, Fang Junchang, Liu Wenyu. 2009. An approach to genesis of the Wulagen Lead-zinc deposit in Wuqia, Xinjiang [J]. Acta Geologica Sichuan, 29(4):400-405(in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Fu Weimin. 2000. Geology of Red-Bed Copper Deposit in West Yunnan [M]. Kunming: Yunnan University Press, 1-118 (in Chinese).
- Li Zhidan, Xue Chunji, Dong Xinfeng, Liu Zengren, Zhong Tianzhi, Qi Shuji. 2013. Ore geology S and Pb-isotopic composition of the Wulagen Zn-Pb deposit, Wuqia County, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 20(1):40-54(in Chinese with English abstract).
- Li Zhidan, Xue Chunji, Xin Jiang, ang Sicheng, Jia Zhiye, Shi Haigang, Dong Xinfeng, Shao Xinglai. 2011. Geological characteristics and

- S, Pb-isotope geochemistry of sareke copper deposit in Wuqia County, Xinjiang [J]. *Geoscience* 25 (4):720-729(in Chinese with English abstract).
- Liu Zengren, Tian Peiren, Zhu Xinyou, Chen Zhengle, Chen Bolin, Qi Shuji, Ye Lei, Yu Zichang, Ren Jingwu. 2011. Ore-forming geological characteristics and metallogenic model on Wulagen lead-zinc deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Exploration*, 2(6):669-679 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changhui, Liu Cunlin, Jiang Sufang. 1977. *Sand Copper Ore Geology*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1-244(in Chinese).
- Tan Kaixuan. 1998. *Geochemistry and Dynamics of Sand Copper Deposit*[M]. Beijing: Seismological Press, 1-163(in Chinese)
- Xue Chunji, Chi Guoxiang, Chen Yuchuan, Zeng Rong, Gao Yongbao Qing Hairuo. 2007. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping Basin, Yunnan, SW-China: Evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5):147-157(in Chinese with English abstract).
- Yang Sennan, Yang Weiran. 1985. *China Regional Geotectology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 97-105(in Chinese).
- Ye Tianzhu, Wei Changshan, Wang Yunwang, Zhu Xinyou, Pang Zhenshan. 2017. *Prospection Theory and Method of Exploration Area (Total)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 349-353 (in Chinese).
- Ye Tianzhu, Wei Changshan, Wang Yunwang, Zhu Xinyou, Pang Zhenshan. 2017. *Prospection Theory and Method of Exploration Area (Part)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-27(in Chinese).
- Yuan Jianqi, Zhu Shangqing, Zhai Yunsheng. 1979. *Deposit Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 265-302 (in Chinese).
- Zeng Pusheng. 2016. Asian largest Lead-zinc deposit: the Jinding Pd-Zn deposit by three stages superimposed mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9):2384-2397(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yunsheng, Peng Runmin, Xiang Yunchuan. 2004. *Regional Metallogenic Research Methods*[M]. Beijing: China Land Press, 31-53 (in Chinese).
- Zhao Xingyuan. 1989. Stable isotope geochemistry of the Jinding Lead-Zinc ore deposit [J]. *Yunnan Earth Science*, 14(5):495-502 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Liu Zengren, Fang Tonghui. 2010. Geologic characteristics and the genesis of the Wulagen Lead-zinc deposit, Xinjian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(5):694-702(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yujie, Liu Zengren, Fang Tonghui, Wang Yanli. 2011. The geologic characteristics of sareke copper deposit, Xinjiang, China—Ore genesis related to basin brines[J]. *Mineral Exploration*, 2(1):28-35(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈国达. 2008. 陈国达全集, 第六卷, 地洼学说——活化构造及成矿理论体系概论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 368-369.
- 高珍权, 刘继顺, 舒广龙. 2002. 新疆乌恰铅锌矿床成矿的地质条件及成因[J]. *中南工业大学学报*, 33(2): 116-121.
- 贾润幸, 方维莹, 王磊, 郭玉乾, 李天成. 2017. 新疆萨热克砂岩型铜矿富烃类还原性盆地流体特征[J]. *大地构造与成矿学*, 41(4): 721-733.
- 康亚龙, 欧阳玉飞, 樊俊昌, 刘文玉. 2009. 新疆乌恰地区乌拉根铅锌矿床热卤水成因探讨[J]. *四川地质学报*, 29(4): 400-405.
- 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 刘增仁, 钟天智, 漆树基. 2013. 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿床地质特征和S-Pb同位素组成[J]. *地学前缘*, 20(1): 40-54.
- 李志丹, 薛春纪, 辛江, 王思程, 贾志业, 石海岗, 董新丰, 邵行来. 2011. 新疆乌恰县萨热克铜矿床地质特征及硫、铅同位素地球化学[J]. *现代地质*, 25(4): 720-729.
- 刘增仁, 田培仁, 祝新友, 陈正乐, 陈柏林, 漆树基, 叶雷, 余子昌, 任经武. 2011. 新疆乌拉根铅锌矿成矿地质特征及成矿模式[J]. *矿产勘查*, 2(6):669-679.
- 刘昌辉, 刘存林, 蒋淑芳. 1977. *砂岩铜矿地质——滇中砂岩铜矿床的实践与认识* [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1-278.
- 谭凯旋. 1998. *砂岩型铜矿地球化学和动力学*[M]. 北京: 地震出版社, 1-163.
- 薛春纪, Chi Guoxiang, 陈毓川, 曾荣, 高永宝, Qing Hairuo. 2007. 西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程——流体包裹体和盆地流体模拟证据[J]. *地学前缘*, 14(15):147-157.
- 杨森楠, 杨巍然. 1985. *中国区域大地构造学*[M]. 北京: 地质出版社, 97-105.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 祝新友, 庞振山. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法(个论)[M]. 北京: 地质出版社, 1-27.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 祝新友, 庞振山. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 394-353.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 1979. *矿床学*[M]. 北京: 地质出版社, 265-302.
- 曾普胜. 2016. 亚洲最大铅锌矿——三阶段叠加成矿的金顶巨型铅锌矿床[J]. *地质学报*, 90(9): 2384-2397.
- 翟裕生, 彭润民, 向运川. 2004. *区域成矿研究法*[M]. 北京: 中国大地出版社, 31-53.
- 赵兴元. 1989. 云南金顶铅锌矿床稳定同位素地球化学研究[J]. *地球科学*, 14(5):495-502.
- 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 方同辉. 2010. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. *地质学报*, 84(5):694-702.
- 祝新友, 王京彬, 王玉杰, 刘增仁, 方同辉, 王艳莉. 2011. 新疆萨热克铜矿——与盆地卤水作用有关的大型矿床[J]. *矿产勘查*, 2(1): 28-35.