

## 塔西地区富烃类还原性盆地流体与 砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制

方维萱, 贾润幸, 郭玉乾, 李天成, 王磊, 黄转盈

(有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

**摘要:**塔西地区萨热克大型砂砾岩型铜矿床和乌拉根铅锌矿床进入矿山开发期, 今后找矿潜力大但成矿机制不明, 制约了成矿与找矿预测。基于构造岩相学和地球化学岩相学, 以西南天山造山带为核心, 塔西地区前陆盆地、山间盆地和后陆盆地对于砂砾岩型铜矿床、铅锌矿床和铀矿床有不同控制作用: ①在西南天山造山带北侧的托云中—新生代后陆盆地系统中, 其次级盆地(萨热克巴依中生代山间拉分断陷盆地)上侏罗统库孜贡苏组上段为萨热克式砂砾岩型铜矿赋存层位; ②在西南天山造山带南侧的前陆盆地系统中, 乌拉根砂砾岩型铅锌矿赋存在下白垩统克孜勒苏群顶部与古近系底部, 巴什布拉克大型砂岩型铀矿床赋存在伽师前陆盆地克孜勒苏群中; ③在前陆盆地系统中, 古近系顶部和新近系渐新统—中新统为砂岩型铜矿床赋存层位。富烃类还原性盆地流体识别构造岩相学标志为沥青化蚀变相、沥青化—褪色化蚀变带、碎裂岩化相和沥青化蚀变相多重耦合结构; 地球化学岩相学标志包括富含有机碳, 矿物包裹体中含有含烃盐水、气态烃-液态烃-气液态烃、轻质油和沥青等有机质类包裹体, 低盐度和中盐度成矿流体, Cu-Ag-Mo 同体共生矿体, 氧化相铜、硫化相铜和钼硫化物等。砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制主要包括: ①同生断裂带由走滑拉分断陷发生构造反转后, 转变为挤压收缩体制, 即烃源岩大规模生烃-排烃机制; ②反转构造带、区域性不整合面、滑脱构造带、高孔隙度和渗透率砾岩等构造岩相带为富烃类还原性盆地流体大规模运移构造通道; ③高孔隙度和渗透率砾岩类下部低渗透率泥质粉砂岩和上部含膏泥岩为岩相岩性圈闭构造岩相学标志; ④大规模富烃类还原性盆地流体与含铜紫红色铁质杂砾岩(氧化相铜)有多相流体多重耦合结构, 可能是砂砾岩型铜矿床大规模富集成矿机制, 低温卤水沉积叠加富烃类还原性盆地流体成矿可能是形成砂砾岩型铅锌矿床机制, 富烃类还原性盆地流体多期次混合与氧化相铀被还原可能是砂岩型铀矿富集成矿机制。

**关键词:**沉积岩型铜矿床; 铜铅锌-铀矿床; 成矿机制; 前陆盆地; 后陆盆地; 山间拉分断陷盆地; 构造岩相学方法; 富烃类还原性盆地流体

**中图分类号:** P595; P618.4; P619.14 **文献标志码:** A

## Hydrocarbon-rich Basin Fluid with Reductibility and Metallogenic Mechanism for Glutenite-type Cu-Pb-Zn-U Deposits in the Western of Tarim Basin

FANG Wei-xuan, JIA Run-xing, GUO Yu-qian, LI Tian-cheng, WANG Lei, HUANG Zhuan-ying  
(China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The important Mesozoic-Cenozoic glutenite-type Cu-Pb-Zn-U metallogenic belts are located at

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201511016-1); 中国地质调查局地质大调查项目(12120114081501)

作者简介: 方维萱(1961-), 男, 陕西蓝田人, 研究员, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: 569026971@qq.com.

the western of Tarim Basin. The large-size Sareke glutenite-type Cu deposit and Wulagen Pb-Zn deposit are in the development period. They still have high-potential exploration; however, the metallogenic mechanism is not clear, so that it is difficult for metallogenic prediction and prospecting. The tectonic and geochemical lithofacies show that the basin system including foreland, intermountain and hinterland basins around Southwest Tianshan orogenic belt, has different controls on glutenite-type Cu, Pb-Zn and U deposits. Firstly, the Mesozoic intermontane pull-apart graben basin in Sarekebayi, which is a secondary basin attached to Tuoyun Mesozoic-Cenozoic hinterland basin, is located at the northern of Southwest Tianshan orogenic belt. The Sareke glutenite-type Cu deposit is hosted by amaranthine irony conglomerate in the upper part of the Upper Jurassic Kuzigongsu Formation in this basin. Secondly, Wulagen glutenite-type Pb-Zn deposit is hosted between the upper part of the Lower Cretaceous Kezilesu Group and the bottom of Palaeogene located at the foreland basin of the southern part of Southwest Tianshan orogenic belt. However, Bashibulake large-size glutenite-type U deposit is hosted in the Cretaceous Kezilesu Group of Jiashi foreland basin. Finally, the glutenite-type Cu deposit is hosted in the Oligocene-Miocene and the top of the Palaeogene in the foreland basin system. Tectonic petrography features identifying the hydrocarbon-rich basin fluid include bituminization alteration, bituminization-discolorous alteration, and multiple coupling patterns between cataclastic lithification and bituminization alteration. Nevertheless, the geochemical petrography features include the rich total organic carbon (TOC), and the hydrocarbon-bearing salt-water, gas-liquid-gas/liquid hydrocarbon, light oil and asphalt from organic matter inclusions in the mineral inclusions, and the ore-forming fluids with low and middle salinities, and the orebody of Cu-Ag-Mo intergrowth, and the oxidized facies Cu, sulfured facies Cu and Mo sulfides. Therefore, the metallogenic mechanism of glutenite-type Cu-Pb-Zn-U deposits is clear. Firstly, the hydrocarbon source rocks have given off the hydrocarbon feeders by the sny-faults after tectonic inversion from the strike-slip sag to compressional deformation. Secondly, the tectonic lithofacies zones, including tectonic inversion zones, regional unconformity, detachment tectonic belts, conglomerates with high porosity and permeability, are the tectonic tunnels for the large-scale migration of hydrocarbon-rich basin fluid. Thirdly, the argillaceous siltstones and gypsum-bearing mudstones from the conglomerates with high porosity and permeability are the signs of tectonic petrography for lithostratigraphic traps. Finally, large-scale hydrocarbon-rich basin fluid and Cu-bearing amaranthine irony conglomerate (oxidized Cu) have multiple-phase fluids and multiple-coupling structure, and maybe the mechanism for the large-scale enrichment mineralization of glutenite-type Cu deposit; the mineralization of brine with lower temperature superimposed by hydrocarbon-rich basin fluid maybe the mechanism for the enrichment mineralization of glutenite-type Pb-Zn deposit; the multiple mixing of hydrocarbon-rich basin fluid and the reduction of oxidized U maybe the mechanism for the enrichment mineralization of glutenite-type U deposit.

**Key words:** sediment-host stratiform Cu deposit; Cu-Pb-Zn-U deposit; metallogenic mechanism; foreland basin; hinterland basin; intermontane faulting-basin; tectonic lithofacies method; hydrocarbon-rich basin fluid with reductibility

## 0 引 言

沉积岩型铜矿床(砂砾岩型、砂岩型、页岩型和白云岩型等)是全球主要铜矿床类型,约占全球铜矿床总含量的 30%,仅次于斑岩型铜矿床,深受地学界和矿业界高度关注。从赋矿层位来看,大型—超

大型沉积岩型铜矿床为元古宙、石炭系、二叠系—三叠系、白垩系、古近系和新近系等,如赞比亚铜矿省—扎伊尔的中—新元古界沉积岩型铜钴矿带、俄罗斯乌多坎砂岩型铜矿床、哈萨克斯坦杰兹卡兹甘石炭系砂岩型铜矿床、中国云南楚雄白垩系砂页岩型铜矿床、波兰卢宾铜矿床、德国曼斯菲尔德二叠系

铜矿床和格陵兰—欧洲的二叠系—三叠系中砂砾岩型-砂岩型-页岩型铜矿床<sup>[1-3]</sup>。在安第斯造山带中的智利、玻利维亚、阿根廷和墨西哥砂砾岩型铜矿床赋存层位为白垩系和古近系—新近系。

塔里木盆地周缘古近系和新近系发育砂岩型铜矿床,而萨热克大型砂砾岩型铜矿床赋矿层位为上侏罗统<sup>[4-6]</sup>,它们与造山带-沉积盆地耦合转换构造系统有密切关系,以大陆挤压体系为特点,在全球十分特殊。沉积岩型铜矿床分布在云南和新疆,如塔里木盆地周缘古近系—新近系和侏罗系砂砾岩型铜矿床、云南滥泥坪震旦系砂砾岩-白云岩型铜矿床、康滇元古宙隆起周缘中生界含铜砂页岩型铜矿床、湖南麻阳白垩系和古近系中砂岩型铜矿床、六盘山—贺兰山泥盆系中砂页岩型和白垩系砂砾岩型铜矿床、玉门—肃南志留系砂岩型铜矿床。但从单个铜矿床规模来看,萨热克砂砾岩型铜矿床规模最大,其外围仍具有巨大的找矿潜力,但其成矿机制尚不明确,制约了深部和外围进一步找矿预测和勘查。

砂砾岩型铅锌矿床是全球主要铅锌矿床类型之一,从赋矿层位来看,大型砂砾岩型铅锌矿床主要产于元古界(如加拿大乔治湖铅锌矿床)、寒武系(如瑞典拉伊斯瓦尔铅锌矿床,铅锌资源储量为 $392 \times 10^4$  t)、石炭系(如加拿大亚瓦铅锌矿床,铅锌资源储量为 $142.4 \times 10^4$  t)、三叠系(如德国 Mechernich 铅锌矿床(储量为 $405 \times 10^4$  t)和 Maubach 铅锌矿床(储量为 $249.6 \times 10^4$  t))、侏罗系(如摩洛哥泽迪铅锌矿床)、古近系(如中国云南兰坪砂砾岩型铅锌矿床,铅锌资源储量为 $1\,500 \times 10^4$  t)。在乌拉根中—新生代前陆盆地中,下白垩统顶部—古近系底部产出乌拉根超大型砂砾岩型铅锌矿床,其铅锌资源量远高达 $1\,000 \times 10^4$  t,与花园—杨叶砂岩型铜矿带在空间上同盆共存。

目前,萨热克砂砾岩型铜矿床和乌拉根砂砾岩型铅锌矿床在成因上存在不同观点,形成机制尚存在较大争论,但油田卤水和有机质参与成矿作用的机理受到关注<sup>[7-11]</sup>。然而,对成矿流体运移构造通道、盆地流体圈闭类型和圈闭构造、盆地流体混合成矿机制等问题仍需要深入研究,尤其是塔里木盆地西部地区(简称“塔西地区”)砂砾岩型铜矿床、铅锌矿床和铀矿床的成矿地质背景是否有差异等科学问题研究很少。由于对塔西地区砂砾岩型铜铅锌-铀矿床形成构造地质背景和成矿机制等一系列问题认识不够深入,严重制约了区域成矿预测、矿区深部和外围找矿预测。本文进一步研究解剖富烃类还原性

盆地流体<sup>[6]</sup>形成机制、运移通道、流体混合机制、野外可识别的构造岩相学标志和沉积盆地系统内在关系,从地球化学岩相学角度探索塔西地区砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制等问题,有助于提升对该成矿系统内部结构和成矿机制的认识,预期提高其区域成矿预测、矿区深部和外围找矿预测,降低矿产勘查的技术风险。

## 1 砂砾岩型铜铅锌矿床分布规律

在前陆盆地-山间拉分断陷盆地(造山带内部)-后陆盆地中,塔里木盆地西缘以西南天山造山带为核心部位,已成为具有世界级规模的砂砾岩型铜铅锌区域成矿带(图1、2)。塔西地区分布有4个砂砾岩型铜铅锌-铀成矿带、4个砂砾岩型铜铅锌-铀矿赋矿层位和一批砂砾岩型铜铅锌矿床(点)(图1~3)。主要4个赋矿层位为上侏罗统库孜贡苏组(萨热克式砾岩型铜矿床)、下白垩统克孜勒苏群(乌拉根式砂砾岩型铅锌矿床和巴什布拉克砂岩型铀矿床)、始新统(玛依喀克砂岩型铜矿)、中新统安居安组(花园式砂岩型铜矿)等,揭示塔西地区中—新生代沉积盆地系统中,砂砾岩型铜铅锌-铀成矿带以西南天山造山带为核心,其沉积盆地类型和含矿性仍有区域性特征。

### 1.1 托云中—新生代后陆盆地系统和萨热克式砂砾岩型铜成矿带

北部萨热克式砂砾岩型铜矿带主要赋存于萨热克巴依中生代山间拉分断陷盆地中,该盆地属托云中—新生代后陆盆地的次级盆地,现今残留面积近 $100\text{ km}^2$ 。萨热克式砂砾岩型铜矿带赋存于上侏罗统库孜贡苏组上段紫红色铁质砂砾岩中(图1、2)。2012年,新疆汇祥永金矿业有限公司完成了新疆乌恰县萨热克铜矿床北矿段地质勘探工作,探获资源储量(331+332+333)为:铜矿石量 $1\,335.21 \times 10^4$  t,铜金属量 $166\,804$  t,伴生银金属量 $152\,263$  kg,铜平均品位 $1.25\%$ 。该矿床现已建成大型矿山的生产能力为每天 $3\,500$  t,进入规模化生产,铜资源量达大型规模以上。

在造山带-沉积盆地-构造高原耦合转换构造域中<sup>[12]</sup>,后陆盆地系统对于形成沉积岩型铜矿床<sup>[13]</sup>和“油-气-煤-铀”多种能源矿产<sup>[14]</sup>同盆共存,具有十分优越的成矿地质条件。①西南天山造山带是在塔里木盆地泥盆纪—石炭纪被动陆缘系统<sup>[15]</sup>基础上形成的华里西期—印支期造山带,在二叠纪末期,西伯利亚古板块持续向南漂移,并与塔里木板块发生陆-



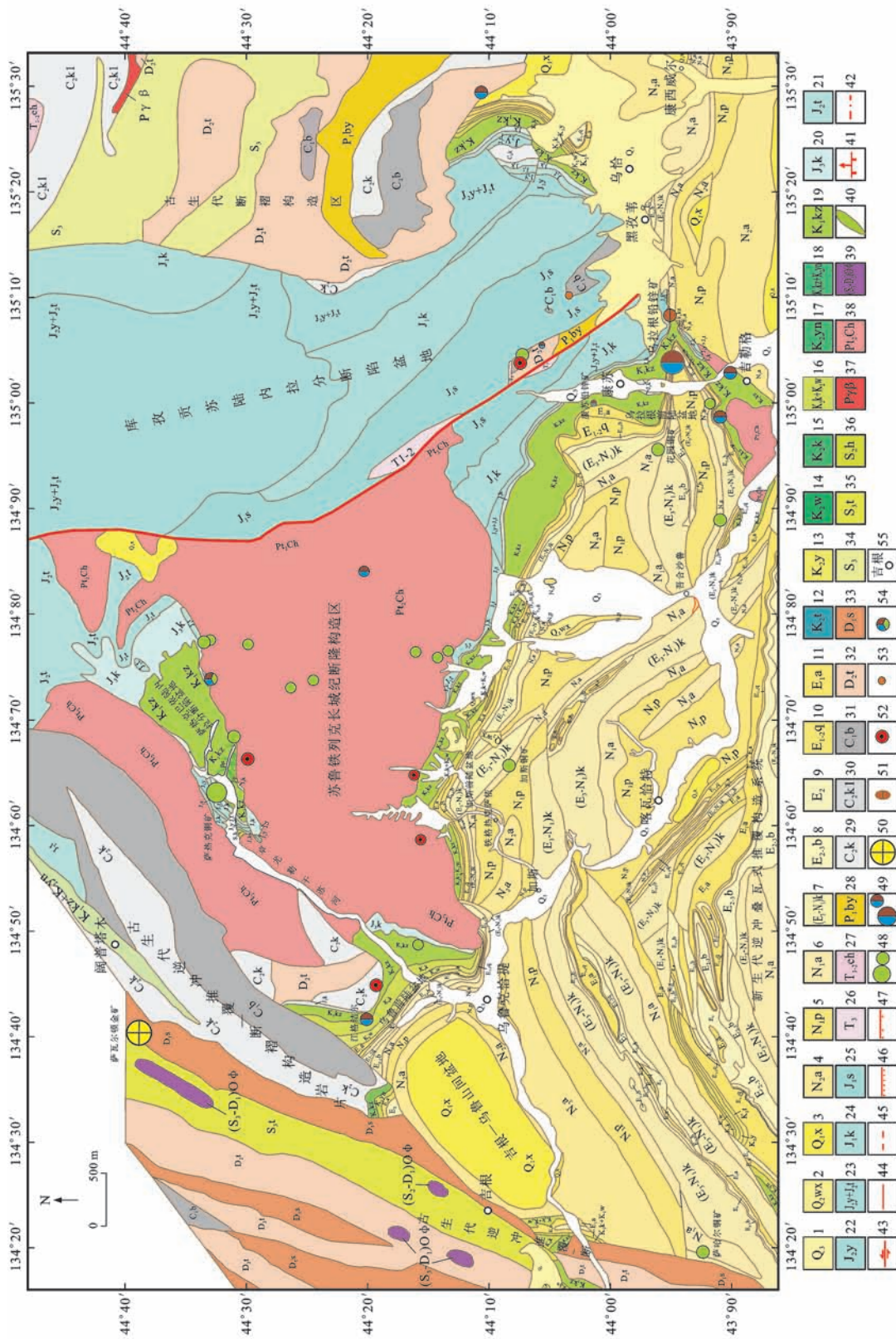


图1 塔西地区构造-矿产地质简图

Fig.1 Map of Tectonic Geology and Distribution of Ore Deposits in the Western of Tarim Basin

1为上更新统+全新统;2为中更新统;3为下更新统;4为上新统;5为中新统;6为渐新统;7为新统;8为始新统;9为始新统;10为始新统;11为始新统;12为始新统;13为始新统;14为始新统;15为始新统;16为始新统;17为始新统;18为始新统;19为始新统;20为始新统;21为始新统;22为始新统;23为始新统;24为始新统;25为始新统;26为始新统;27为始新统;28为始新统;29为始新统;30为始新统;31为始新统;32为始新统;33为始新统;34为始新统;35为始新统;36为始新统;37为始新统;38为始新统;39为始新统;40为始新统;41为始新统;42为始新统;43为始新统;44为始新统;45为始新统;46为始新统;47为始新统;48为始新统;49为始新统;50为始新统;51为始新统;52为始新统;53为始新统;54为始新统;55为始新统。

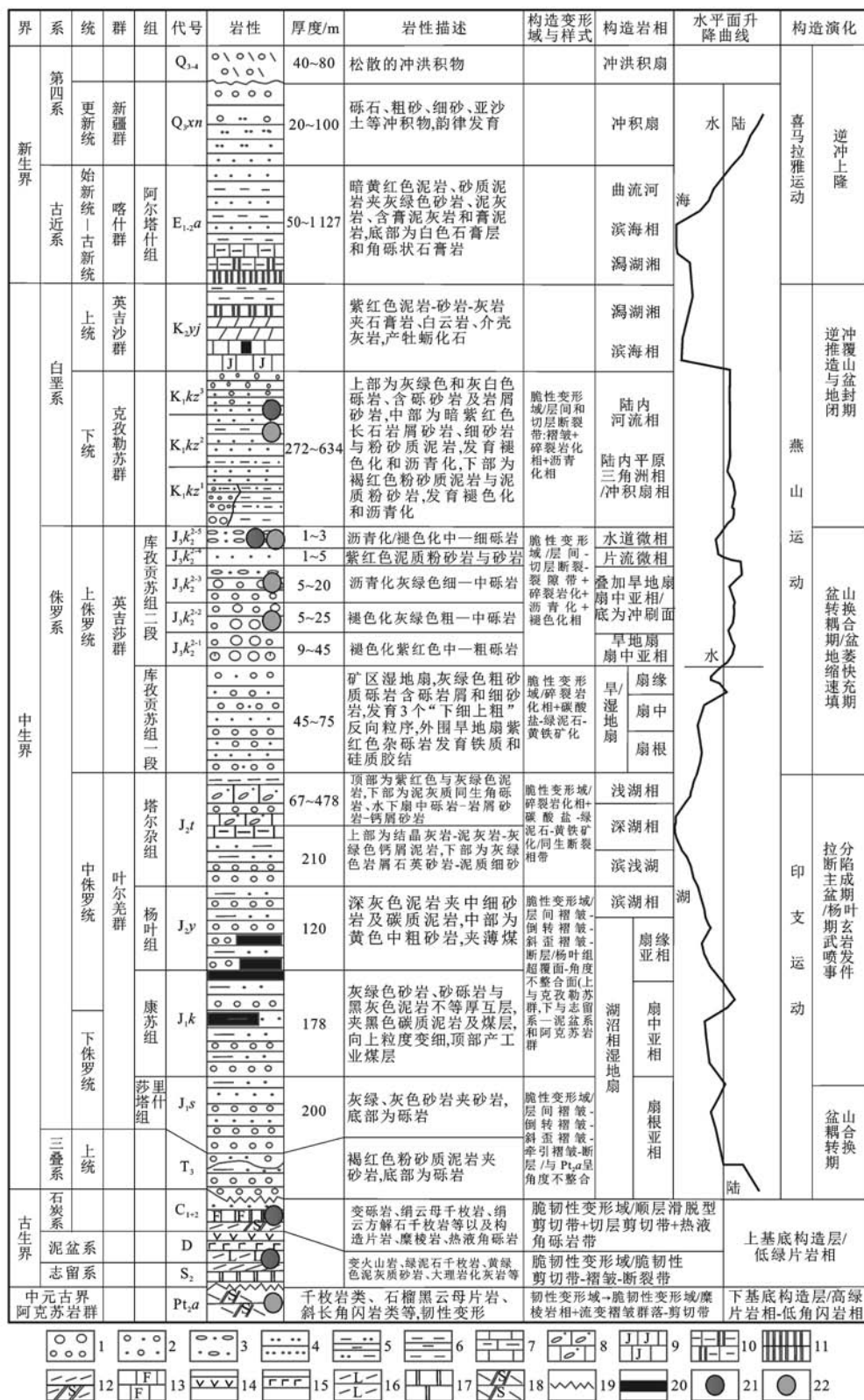
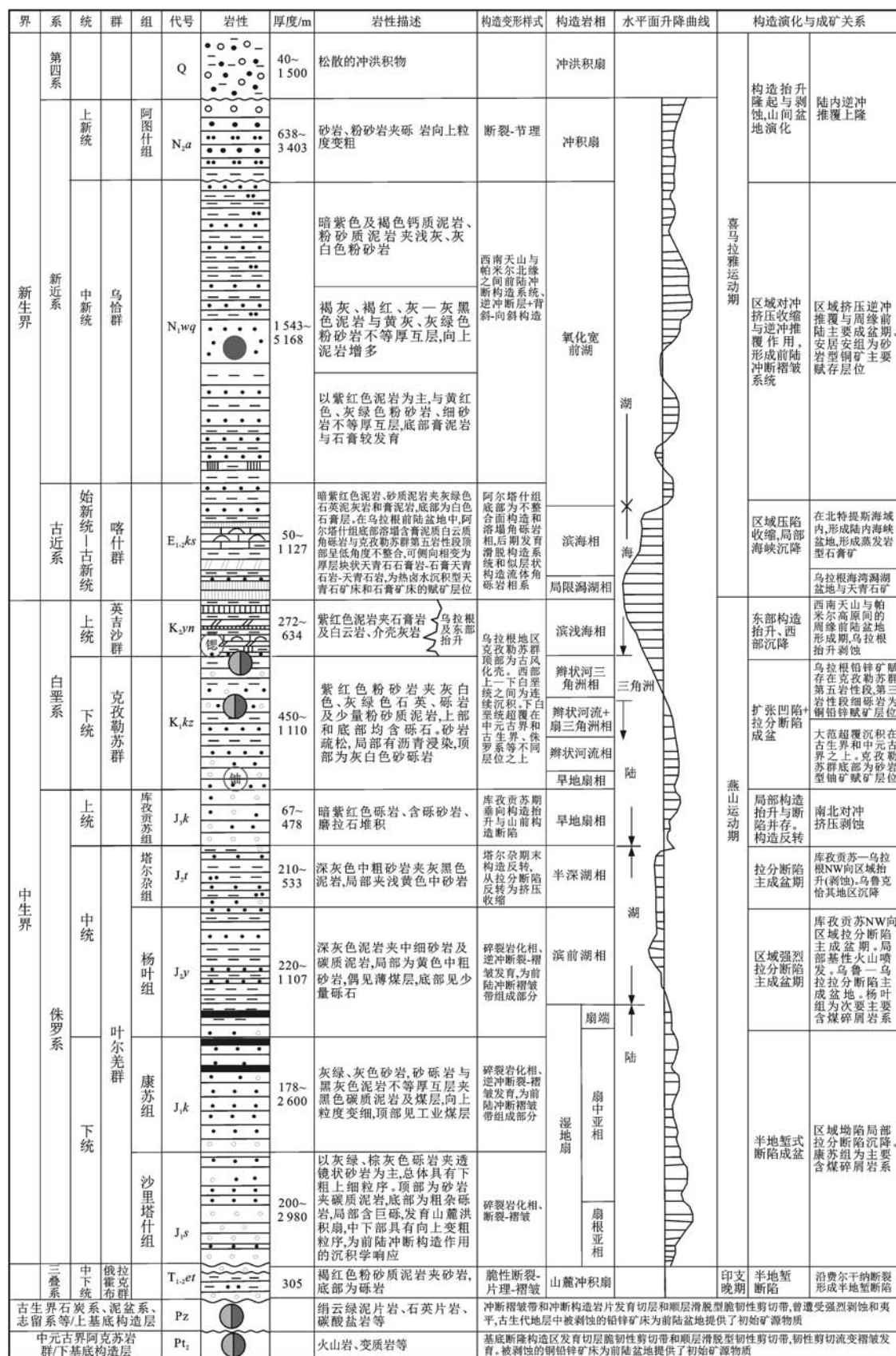


图2 萨热克巴依地区及邻区后陆盆地构造岩相学柱状图

Fig. 2 Tectonic Lithofacies Column of Hinterland Basin in Sarekebayi Area and Its Adjacent Region





图例同图2

图3 乌鲁—乌拉前陆盆地构造-沉积相柱状图

Fig. 3 Tectonic-sedimentary Facies Column of Wulu-Wula Foreland Basin

陆碰撞造山,形成了北部中天山阔克沙勒岭岛弧造山带。在北部中天山岛弧造山带和西南天山被动陆缘造山带之间,形成了位于吐尔尕特山之南托云山间拗陷沉降带;在这种同造山期的陆内山间盆地中,接受了下三叠统磨拉石相→细碎屑岩相。下三叠统俄霍布拉克组为一套浅灰红和灰绿色粗砾岩、中细砾岩、砂岩夹黏土岩,局部含有煤线,厚 2 223.0 m,与上石炭统高角度不整合接触<sup>[16]</sup>,其上被莎里塔什组呈角度不整合覆盖。俄霍布拉克组发育后期断裂带,侵入有辉绿辉长岩脉群,并形成了断层角砾岩化相带,揭示在托云后陆盆地早三叠世就进入陆内山间拗陷盆地的初始成盆期,其构造古地理与早三叠世印支运动陆-陆碰撞造山事件密切相关,因中一晚三叠世末处于持续造山隆升过程,而缺少中一晚三叠统沉积。②在西南天山造山带的南侧相邻塔北库车前陆盆地中,三叠系继承了晚二叠世前陆盆地构造古地理格局,下三叠统由两套灰绿色细碎屑岩及一套浅灰红色、紫红色中粗碎屑岩组成,厚 118.0~541.0 m。中三叠统克拉玛依组下部为紫红色泥岩,上部为灰色泥岩、灰绿色中厚层细砾岩与灰色泥岩互层,厚 200.0~885.0 m。上三叠统黄山街组为厚层块状泥岩、中厚层砂岩互层,底部为中厚层块状含砾砂岩夹砾岩透镜体,厚 30.0~559.0 m;上三叠统塔里奇克组下部为中厚层砾岩、粗砂岩夹煤层,上部为砂岩、泥岩和砾岩夹煤层,厚 26.0~497.0 m<sup>[16]</sup>。③新疆乌恰县托云中—新生代后陆盆地现今残留面积约 10 000 km<sup>2</sup>,其 NW—SE 向和 SW—NE 向为 2 个盆地长轴方向,明显受塔拉斯—费尔干纳 NW 向走滑断裂带<sup>[17-19]</sup>和次级 NE 向断裂带控制。与西南天山造山带南侧的乌鲁—乌拉前陆盆地系统存在巨大差别,托云后陆盆地构造古地理位置为中天山阔克沙勒岭岛弧造山带与西南天山被动陆缘造山带之间,萨热克巴依和库孜贡苏两个山间拉分断陷次级盆地均以斜切西南天山造山带方式形成了盆山耦合与转换构造带。④托云后陆盆地系统发育早侏罗世—古近纪幔源玄武岩喷发事件,形成了相应的异常高古地温场结构,受 NW 向和 NE 向次级超岩石圈同生断裂带控制显著。⑤晚三叠世—早侏罗世初(137~159 Ma)西南天山造山带发生了伸展垮塌,形成区域差异性构造抬升和构造断陷,NW 向塔拉斯—费尔干纳断裂带 NW 向走滑作用强烈<sup>[17-19]</sup>,以托云地区为中心地带发生了构造断陷成盆,经构造抬升的周缘山体发生了剥蚀去顶作用,在托云后陆盆地系统中形成了中—下侏罗统河湖沼泽相沉积,

与下伏下三叠统呈平行不整合接触,气候湿润且植被繁茂,从而形成了侏罗纪河湖-沼泽相含煤系地层。该后陆盆地系统后期受喜马拉雅构造挤压作用,使盆地中部隆起,将盆地分成东、西两部分。其构造-沉积演化过程可划分为托云后陆盆地系统形成期(P<sub>2</sub>—T<sub>3</sub>)、后陆拉分断陷盆地主成盆期与玄武岩喷发事件(J<sub>1</sub>—J<sub>2</sub>)、拉分断陷盆地萎缩期与幔源玄武岩喷发事件(J<sub>3</sub>—K<sub>2</sub>)、山间拉分断陷盆地叠加成盆期(E<sub>1</sub>)、山间断陷-压陷叠加盆地转换期(E<sub>2</sub>—N<sub>2</sub>)、开流山间盆地地貌景观定型期(Q)等 6 个演化期次。⑥在托云中—新生代后陆盆地系统中,萨热克巴依 NE 向山间拉分断陷盆地和库孜贡苏 NW 向山间拉分断陷盆地以斜切西南天山造山带方式构成了沉积盆地-造山带耦合与转换构造格局,构造古地理和盆地动力学属于山间拉分断陷盆地,具有寻找萨热克式砂砾岩型铜矿床的良好成矿地质条件。库孜贡苏 NW 向山间拉分断陷盆地已发现了较多煤矿和化探异常,具有较好的寻找砂砾岩型铜铅锌-铀矿床的找矿前景。

## 1.2 乌鲁—乌拉前陆盆地与砂砾岩型铜铅锌成矿带

中部乌拉根式砂砾岩型铅锌矿—巴什布拉克砂砾岩型铀成矿带赋存于乌鲁克恰其一乌拉根前陆盆地(简称“乌鲁—乌拉前陆盆地”)中(图 1、3)。①乌拉根式砂砾岩型铅锌矿带区域断续延伸达 350 km,康西铅锌矿床具有中型规模,其乌拉根北矿带—达克铅锌矿、江格结尔铅锌矿、加斯铅锌矿、硝若布拉克铅锌矿、吉勒格铅锌矿、托帕铅锌矿等具有较大潜力。乌拉根超大型层控砂砾岩型铅锌矿床赋矿层位为下白垩统克孜勒苏群第五岩性段和上覆的古近系古新统阿尔塔什组坍塌角砾岩等。低温围岩蚀变主要为天青石化、黄铁矿化、石膏化、沥青化、褪色化、黄钾铁矾化等。紫金矿业集团股份有限公司于 2013 年最终提交了(111b+331+332+333)总矿石量为 22 230.61×10<sup>4</sup> t,锌金属量为 5 058 262 t,铅金属量为 880 089 t,Zn 平均品位为 2.53%,Pb 平均品位为 0.36%。乌拉根铅锌矿床建设开发规模为每天 5 000 t 原生矿采选系统和每天 3 000 t 氧化矿采选系统,采选规模达到每天 8 000 t,规划建设了一个年产 10×10<sup>4</sup> t 锌冶炼系统,形成采-选-冶生产系统闭合大循环。②以巴什布拉克大型砂岩型铀矿床为核心,与同一赋矿层位相邻 4 个铀矿点等组成了砂岩型铀成矿带,赋存于克孜勒苏群下段褪色化蚀变砾岩和蚀变含砾粗砂岩中。③南部花园式砂岩型铜矿带位于古近系—新近系中(图 1、3)。乌恰—



温宿—拜城—轮台地区的古近系—新近系砂岩型铜矿床(滴水式含铜膏盐岩-砂岩-灰岩)和矿化带东西方向长 800 km,宽约 40 km。这些砂砾岩型铜铅锌矿床和矿化带在区域上稳定产出,分布有系列中小型矿床(杨叶、花园、吉勒格、伽师铜矿等)、矿点和化探异常,具有世界级砂砾岩型铜铅锌成矿带规模,显示出巨大的找矿前景。

### 1.3 帕米尔高原前陆盆地系统与砂岩型铜成矿带

南部边缘玛依喀克砂岩型铜成矿带位于乌帕尔断裂带南侧古近系喀什群顶部(图 1)和新近系渐新统一中新统褪色化蚀变砂岩中,主要有萨哈尔、玛依喀克、休木喀尔和乔克玛克等砂岩型铜矿床等。该砂岩型铜成矿带长度近 500 km,主要形成于帕米尔构造高原北侧弧形前陆冲断褶皱带;古近系—新近系为典型陆内前陆盆地系统,新近纪末期—第四纪,在喜马拉雅期形成的显著陆内造山作用下,形成了自南向北的叠瓦式逆冲推覆构造带和冲断褶皱带,西部走向为 NE 向,中部近 EW 向呈弧形展布,东部呈 NW 向并以伽师—喀瓦恰特为弧顶区域。砂岩型铜成矿带主要产于冲断褶皱构造带中。

### 1.4 区域赋矿层位与盆地构造岩相学特征

刘增仁等厘定了塔西地区砂砾岩型铜铅锌矿床 3 个赋存层位<sup>[4]</sup>。从构造高原-造山带-沉积盆地耦合转换角度来看,中—新生代沉积盆地的盆地基底构造层和原有的矿床类型、沉积盆地构造古地理位置、盆地构造-沉积演化史对于塔西地区砂砾岩型铜铅锌矿床具有一定控制作用。

(1)塔西地区盆地下基底构造层以元古宙为主,现今以残留的构造岩块和断隆岩块形式出露,组成了西南天山造山带核部带,具有低麻粒岩相-角闪岩相-高绿片岩相等中—高级变质地体特征,中—新生代到现今仍分割了托云后陆盆地系统和乌鲁—乌拉前陆盆地系统(图 1)。其中,脆韧性剪切带中发育多期构造变形变质,早期(格林威尔期)为顺层滑脱型韧性剪切带,晚期(晋宁期)为切层脆韧性剪切带,形成了造山型金铜矿床(点),它们为相邻沉积盆地可提供原始成矿物质来源。

(2)塔西地区盆地上基底构造以古生界为主,现今以构造岩片形式出露在西南天山造山带外带中,为华里西期—印支期形成的、以古生界为主组成的冲断褶皱带和逆冲推覆构造系统,它们是西南天山造山带外带构造地层系统(图 1、2)。在古生代碳酸盐岩和大理岩中,发育 MVT 型铅锌矿床,如霍什布拉克和萨里塔什铅锌矿床等。乌鲁—乌拉前陆盆地

均经历了侏罗纪—早白垩世陆内拉分断陷成盆→晚白垩世区域构造抬升→古近纪海湾盆地→新近纪前陆盆地演化历史,它们以古生代地层为主要蚀源岩区,盆地上基底构造层中铅锌矿床能够提供铅锌原始成矿物质来源。

(3)萨热克大型砂砾岩型铜矿床赋存在上侏罗统库孜苏组上段紫红色铁质砂砾岩类,沉积相为旱地扇中亚相;受托云中—新生代后陆盆地系统中次级盆地控制,萨热克巴依中生代次级盆地为 NE 向陆内拉分断陷盆地,构造古地理位置为斜切西南天山造山带。萨热克南和萨热克北 NE 向两个盆地边界同生断裂带走滑拉分断陷成盆为主控因素,在晚侏罗世初期,两个 NE 向盆地边界同生断裂带发生了构造反转作用,最终在对冲厚皮式逆冲推覆构造系统作用下,形成了萨热克裙边式复式向斜构造系统,后期叠加了幔源碱性辉绿辉长岩脉群上涌侵位和区域褪色化蚀变热事件。

(4)乌拉根超大型层控砂砾岩型铅锌矿床赋存在下白垩统克孜勒苏群第五岩性段和上覆的古近系古新统阿尔塔什组坍塌角砾岩相层等,乌拉根超大型层控砂砾岩型铅锌矿床和康西铅锌矿床受乌拉根中—新生代前陆盆地控制。东部托帕砂砾岩型铜铅锌矿床受托帕前陆盆地控制,而西部江格结尔砂砾岩型铜铅锌矿床受乌鲁克恰其前陆盆地控制;共同特征是以盆地上基底构造层为主要蚀源岩区,以盆地下基底构造层为次要蚀源岩区。而乌鲁克恰其前陆盆地东部和伽师前陆盆地以盆地下基底构造层为主要蚀源岩区,以盆地上基底构造层为次要蚀源岩区,但在泥盆系中含铜赤铁矿床中发育含铜菱铁矿体,因此,在下白垩统顶部形成了砂砾岩型铜矿带和砂岩型铀矿带,与前述以砂砾岩型铅锌矿床为主的 3 个前陆盆地在矿种上有过渡关系和差异性。

在西南天山造山带南侧的前陆盆地系统中分布有古近系和新近系砂岩型成矿带,主要赋存层位是乌恰—温宿—拜城—轮台地区前陆盆地古近系和新近系。在新近系渐新统一中新统克孜洛依组和中新统安居安组中,赋矿岩系为含铜膏盐岩-砂岩-灰岩系,如杨叶、花园、吉勒格、伽师铜矿等。

西南天山造山带南侧的前陆盆地系统因近 EW 向山前同生断裂带-盆地基底构造层-后期构造变形样式和构造差异,其构造-沉积演化历史差异(图 1、2)和构造-流体耦合-成矿作用也具有类似性和差异性,在近似的前陆盆地演化过程中仍然具有一些差异,其构造演化历史和矿种差异较为明显,从西到东



区域构造-成矿分带明显。①乌鲁克恰其前陆盆地在库孜贡苏运动期因西南天山造山带不断抬升,晚侏罗世山前同生断裂带南侧断陷沉降,形成了半地堑式成盆作用,经历了  $J_3-K_1$  半地堑式断陷成盆、 $K_2-N_1$  压陷成盆、 $N_2-Q_1$  压陷盆地萎缩期,烃源岩发育,但含煤碎屑岩系不发育。其西侧为 NE 向古生代逆冲推覆-断褶构造岩片,在下白垩统克孜勒苏群顶部产出江格结尔砂砾岩型铜铅锌矿床。其前陆盆地北侧和东北侧以盆地基底构造层为主,局部残留盆地上基底构造层,在炼铁厂含铜赤铁矿床产于泥盆系中,变粗面质凝灰岩发育,在前陆盆地东北侧下白垩统克孜勒苏群顶部河湖三角洲相含砾粗砂岩-砂岩中形成了砂砾岩型铜矿床,在古近系中形成了石膏岩和含膏泥岩,为海湾潟湖蒸发岩相。北侧山前同生断裂带后期发生构造反转,形成了由长城系组成的冲断褶皱带,并逆冲推覆到该前陆盆地北侧上侏罗统和下白垩统之上。②伽师前陆盆地在中侏罗世开始形成半地堑式断陷成盆,受西南天山造山带山前同生断裂带控制显著;晚侏罗世库孜贡苏运动期间,曾经历了短暂抬升,东部残留有厚度不大的上侏罗统,向西逐渐减薄消失,暗示其西部构造抬升较为强烈。中侏罗统为砂岩型铀矿赋存层位,但尚未发现砂砾岩型铜铅锌矿床。其显著特征是在伽师中生代前陆盆地中形成了中生代砂砾岩型铀成矿带,巴什布拉克铀矿床赋存在下白垩统克孜勒苏群下段冲积扇相砾岩中。在伽师中—新生代前陆盆地中,新近系安居安组形成了砂岩型铜成矿带,以伽师和杨叶砂岩型铜矿床为代表。该前陆盆地南部受帕米尔高原山前向北叠瓦式逆冲推覆构造系统和冲断褶皱带影响较大,为弧形构造系统向北突出的弧顶部位。北侧为西南天山造山带南侧高角度逆冲推覆构造系统。③乌拉根前陆盆地在在前陆盆地系统中最为特殊,其南侧为乌拉根元古宙隆起带(盆地基底构造层长城系阿克苏岩群),北侧为大部分已经遭受剥蚀而消失的古生代断褶带,现今残留古生代断褶带保存了 NW 向趋势。赋存在下白垩统克孜勒苏群顶部的砂砾岩型铅锌成矿带大致呈半环形分布,继承了侏罗纪—下白垩世海湾盆地的特征,晚白垩世经历了区域性构造抬升并缺失上白垩统,在克孜勒苏群顶部形成了古风化壳和岩溶角砾岩,古近纪初期形成了大规模海侵,古近系阿尔塔什组底部坍塌角砾岩和石膏岩-石膏天青石岩-天青石岩。它们为  $CaSO_4-SrSO_4$  式硫酸盐型盆地卤水同生沉积作用形成的蒸发岩相,也是乌拉根铅锌矿-天青石矿赋

矿岩相重要的物质组成,古近纪逐渐发展为浅—滨海相和潟湖相,形成了含膏泥岩和石膏矿床。乌拉根砂砾岩型铅锌矿床分布于乌拉根向斜南、北两翼。铅锌矿体底板围岩(克孜勒苏群第四岩性段紫红色粉砂质泥岩和泥质粉砂岩)和上盘围岩(阿尔塔什组底部角砾状白云质灰岩、坍塌岩溶白云质角砾岩、含石膏天青石岩和石膏岩)组成了富烃类还原性盆地流体的岩性岩相封闭层<sup>[4,7]</sup>。乌拉根铅锌矿体呈似层状和层状产于克孜勒苏群第五岩性段灰白色块状砂砾岩(辫状河三角洲相),为塔西地区乌拉根式砂砾岩型铅锌矿床主要赋矿层位,低温围岩蚀变为石膏化、方解石化、白云石化、天青石化、黄铁矿化、沥青化和褪色化(漂白化蚀变)等,具油田低温热卤水大规模运移和有机质参予成矿特征<sup>[4,7-10]</sup>。

(5)萨哈尔铜矿床位于帕米尔构造高原北侧弧形构造结西北侧的 NE 向冲断褶皱带中。新近系帕卡布拉克组以砾岩、泥岩和石英砂岩为主;萨哈尔铜矿床以泥岩、粉砂岩和石英砂岩为主;灰白色褪色化蚀变砂岩为主要赋矿层位,含铜岩相为含膏泥岩和砂岩,形成于前陆盆地中。原生硫化矿以辉铜矿和自然铜为主,氧化矿以蓝铜矿、孔雀石、自然铜和少量硫化铜为主。盆地上基底构造层由志留系—泥盆系组成,其志留系塔尔特库里组上部以石英砂岩、硅质板岩和千枚岩类为主,下部以灰岩和玄武岩为主。萨哈尔断褶构造带为萨哈尔依南和依北两条断裂所夹持,不对称向斜造成其两翼翘起,受吉根断裂影响造成南翼缓而北翼陡,北翼局部倒转并发育次级褶皱;两翼侏罗系向核部为白垩系,发育穿盆断裂并控制了铜化分布和层间断裂,次级裂隙-节理发育。矿区南部发育辉长岩和辉绿岩脉群,岩脉两侧伴有褪色化蚀变砂岩,含石英辉铜矿化脉。

(6)新疆乌恰县东南玛依喀克山砂岩型铜矿床位于帕米尔构造结的弧顶突刺部位冲断褶皱带,总体地形呈现西南高耸而东北渐低趋势,中部近 EW 向呈弧形展布,砂岩型铜成矿带主要产于冲断褶皱构造带中。该区域发育盆地基底构造层和上基底构造层,且均发育铜铅锌成矿带,能够提供原始成矿物质。中—新生代前陆盆地以古近系巴什布拉克组和新近系克孜洛依组、安居安组、帕卡布拉克组为主,古近系巴什布拉克组紫色与灰绿色砂岩和粉砂岩等为砂岩型铜矿床主要赋存层位,新近系克孜洛依组灰色和褐灰色岩屑砂岩次之,砂岩型铜矿床受褪色化蚀变砂岩层位和冲断褶皱带复合控制。Cu、Zn、Pb、Au 等化探异常和多处矿化线索圈出了铜、

铅、锌矿(化)体,限于地形和交通条件,其勘查程度不高。

## 2 富烃类还原性盆地流体与构造岩相

### 2.1 烃源岩层位与沉积岩岩相学特征(源)

在萨热克铜多金属-金铜-铅锌-铁-煤矿田内共有22处矿床(点)。<sup>①</sup>萨热克大型砂砾岩型铜矿床划分为北矿带和南矿带,深部钻孔证实其为一个整体矿床,受萨热克裙边式复式向斜构造系统控制。<sup>③</sup>乌恰沙里拜、疏勒和铁热苏克等3处小型煤矿,赋存在侏罗系含煤碎屑岩系中,现今出露或隐伏在萨热克巴依中生代盆地边缘。<sup>③</sup>中元古界阿克苏岩群为盆地下基底构造层,其中分布有泽木丹金铜矿点等8处造山型金矿和金铜矿,主要受脆韧性剪切带控制。盆地上基底构造层为古生界,其石炭系中铅锌矿化点和金矿点受冲断褶皱带和脆韧性剪切带控制。

(1)早—中侏罗世含煤粗碎屑岩系为主要烃源岩系。<sup>①</sup>下侏罗统莎里塔什组为冲积扇相粗碎屑岩系,向上为康苏组扇三角洲相由薄层细砾岩-石英砂岩-岩屑砂岩-泥质细砂岩等组成的含煤碎屑岩系,最终演化为湖沼相黑色碳质泥岩-灰黑色粉砂岩-煤层。康苏组扇三角洲相为含煤碎屑岩系。康苏期古气候为温暖潮湿环境,有利于植物生长和有机质聚集,早侏罗世盆地边界同生断裂带控制的山前湿地扇相-扇三角洲相-湖沼相体为在康苏组中形成含煤岩系提供了良好的构造古地理条件。<sup>②</sup>杨叶组下部含煤粗碎屑岩中含2、3个煤层,单煤层厚度最大可达2 m。杨叶组上部以紫红色泥岩与灰绿色泥岩为特征。采用校正硼含量恢复古盐度为14.94‰~23.73‰,杨叶组形成于半咸水湖泊环境。古气候为温暖潮湿环境,有利于植物生长和有机质聚集,形成了沉积物粒度向上变细的含煤粗碎屑岩系。总之,康苏组、杨叶组含煤岩系和富含有机质泥岩组成了烃源岩。

(2)萨热克巴依盆地侏罗系煤岩烃源岩生烃能力强。在康苏组和杨叶组中,含煤碎屑岩系和煤层,以乌恰煤矿、疏勒煤矿、铁热苏克煤矿、巴依基底隆起带南侧隐伏煤矿层和含煤碎屑岩系为代表。乌恰沙里拜煤矿位于萨热克砂砾岩型铜矿区以北1.0 km处,萨热克巴依依次级盆地为良好的中生代成煤盆地,其构造古地理特征为盆地的南、北、西侧三面环山,西北端与托云中—新生代后陆盆地连通。该煤矿赋存于下侏罗统康苏组中,与康苏煤矿、乌恰煤矿和反

修煤矿赋矿层位相同。康苏组煤层和含煤碎屑岩系属湖泊-沼泽相砂泥质碎屑岩夹煤层沉积。康苏组岩性为浅灰、灰色薄—中层状石英砂岩、细粒岩屑石英砂岩、泥质细砂岩、灰黑色粉砂岩、黑色炭质泥岩、煤层和煤线,下部见有较多灰色薄层砾岩,煤层主要分布在该组中上部。杨叶组岩性为灰绿色薄—中层状岩屑砂岩、泥质细砂岩、粉砂岩夹煤线,为疏勒煤矿和铁热苏克煤矿含煤层位。乌恰沙里拜煤矿床共有煤层和煤线6层,其中可采煤层有4层;可采煤层呈层状或似层状产出,断续延伸长度4 300~7 700 m,可采厚度0.81~3.23 m。煤质均属亮煤型,凝胶化物质含量为94%,属高硫、高灰分、低磷炼焦煤,变质程度属瓦斯-焦肥煤阶段,成因类型属湖泊-沼泽相沉积型煤矿。

萨热克砂砾岩铜矿区康苏组煤岩能够提供大量烃源物质,富烃类还原性盆地流体来源丰富。<sup>①</sup>镜质体反射率( $R_o$ )是温度、时间的函数,有效记录了沉积地层经历的最高古地温<sup>[20-23]</sup>,本文选取康苏组煤岩进行煤岩镜质体反射率测试(表1),恢复该沉积盆地演化史。本文煤岩的最小镜质体反射率( $R_{min}$ )<sup>[24]</sup>在0.817%~1.201%之间,与塔里木盆地镜质体反射率<sup>[24]</sup>对比,推测该煤岩埋藏深度在3 500 m左右,古地温为100℃~120℃。<sup>②</sup>与不同母质类型烃源岩排气效率<sup>[25]</sup>相比, $R_o$ 在0.817%~1.201%之间,排烃效率为75%~80%。<sup>③</sup>一般来说, $R_o$ 为0.5%~0.7%时,对应生油门限,而 $R_o$ 为0.7%~1.3%时一般对应主要生油区,本区煤岩 $R_{min}$ 在0.817%~0.953%之间,最大镜质体反射率( $R_{max}$ )<sup>[24]</sup>在0.897%~1.201%之间,均已超过了生油门限,进入主要生油区范围,这些煤岩能够提供富烃类还原性盆地流体(油气类流体)。<sup>④</sup>萨热克砂砾岩型铜矿床石英、方解石和白云石中矿物包裹体发育相吻合的含烃盐水、气态烃-液态烃-气液态烃、轻质油等3类相态的矿物包裹体,因此,推测本区煤岩可以形成以油相、水溶相和气溶相为主的富烃类还原性盆地流体。<sup>⑤</sup>从煤热解试验结果来看,塔里木盆地煤炭样品 $R_o$ 为0.65%,当 $R_o$ 为0.8%时,轻烃开始生成,当 $R_o$ 达到1.1%时,轻烃进入大量生成阶段<sup>[26]</sup>。本文4件煤炭样品 $R_o$ 为0.817%~1.201%,平均值为0.976%,与塔里木盆地侏罗系煤炭样品基本相似,进入轻烃开始生成到大量生成阶段,具有良好的烃类初次运移基础<sup>[24-27]</sup>。<sup>⑥</sup>从有机组分的碳同位素来看,塔里木盆地三叠系—侏罗系陆相腐殖型烃源岩可溶有机组分的碳同位素组成( $\delta^{13}C$ 值)一般



大于 $-28\text{‰}$ <sup>[27]</sup>,萨热克铜矿石中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-20.79\text{‰}\sim-19.65\text{‰}$ <sup>[6]</sup>,两者也基本相似。上述结果表明,萨热克盆地流体中的有机质可能与下伏康苏组、杨叶组煤层的热解有关。⑦总之,本区煤岩可能经历了埋藏深度3 500 m左右和古地温 $100\text{℃}\sim 120\text{℃}$ ,已经进入轻烃开始生成到大量生成阶段,能够形成排烃事件和高效的排烃,具有形成富烃类还原性盆地流体的烃源岩基础和排烃动力学基础。

表1 萨热克巴依地区康苏组煤岩镜质体反射率

Tab.1 Vitrinite Reflectances of Coal Rocks from Kangsu Formation in Sarekebayi Area

样品编号	层位	岩性	$R_{\min}/\%$	$R_{\max}/\%$	$R_o/\%$
MY-1	下侏罗统 康苏组	煤岩	0.913	1.150	1.034
MY-2		煤岩	0.842	1.017	0.945
MY-3		煤岩	0.953	1.201	1.068
MY-4		煤岩	0.817	0.897	0.856

注:测试单位为中国石油大学(北京);样品测点为30个。

## 2.2 富烃类还原性盆地流体与地球化学岩相学记录标志

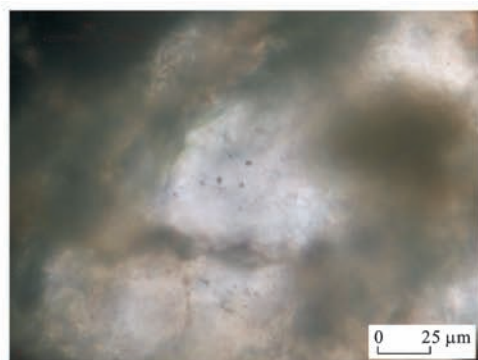
富烃类还原性盆地流体在萨热克砂砾岩型铜矿床形成过程中具有十分重要的作用,也形成了相应的地球化学岩相学记录和标志。其总沥青化和沥青化-褪色化蚀变,总有机碳(TOC),含烃盐水、气液态烃、轻质油和沥青类烃类矿物包裹体等(图4)直接记录了富烃类还原性盆地流体活动历史和地球化学岩相学标志。

(1)在萨热克砂砾岩型铜矿床的矿石中,总有机碳越高,铜矿石品位越高,揭示总有机碳与铜富集成矿有十分密切的关系。如在萨热克北矿带深部坑道中,赋存在切层断裂带的含沥青断层泥中,经XRF测试,属于富铜矿石(Cu品位高于 $1.5\%$ )。这种富铜矿石呈切层产出,属萨热克巴依次级盆地在后期改造过程中形成的富铜矿石,叠加在含铜砂砾岩层之中呈现切层产出的特征。经采样分析总有机碳为 $3.28\%\sim 4.78\%$ ,铜矿石Cu品位为 $1.50\%\sim 5.89\%$ 。

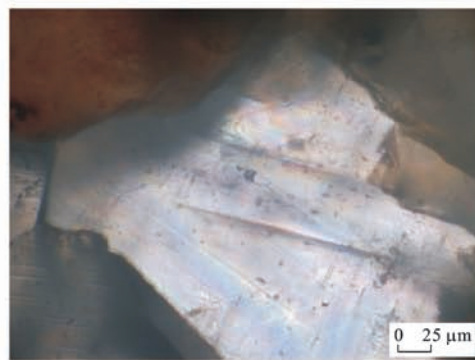
(2)在黑色强沥青化蚀变带中,沥青化蚀变岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-20.79\text{‰}\sim-19.65\text{‰}$ ,Cu品位超过 $2.0\%$ ,属于有机质成因的碳质。甲烷的产生由两部分所组成,即重碳甲烷( $^{13}\text{CH}_4$ )和正常甲烷( $^{12}\text{CH}_4$ ),甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-20\text{‰}\sim-18\text{‰}$ 和 $-25\text{‰}\sim-20\text{‰}$ <sup>[28]</sup>。本研究区东侧库车前陆盆地中,主要烃源岩为三叠系—侏罗系暗色泥岩及煤系泥岩、煤岩,

库车前陆盆地中克拉苏构造带的天然气可能与煤系烃源岩有关,煤成气的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-27.3\text{‰}\sim-18.5\text{‰}$ <sup>[29]</sup>。本区与库车前陆盆地侏罗系烃源岩特征相同, $\delta^{13}\text{C}$ 值也与库车前陆盆地中克拉苏构造带的天然气(煤成气)碳同位素组成相吻合,因此,这些富铜高有机质的铜矿石是在萨热克巴依次级盆地后期改造过程中,下伏侏罗系含煤泥岩系中形成了大量煤成气沿断裂带和裂隙带上升,将含铜紫红色砂砾岩中氧化相铜大量还原为铜硫化物相的结果。

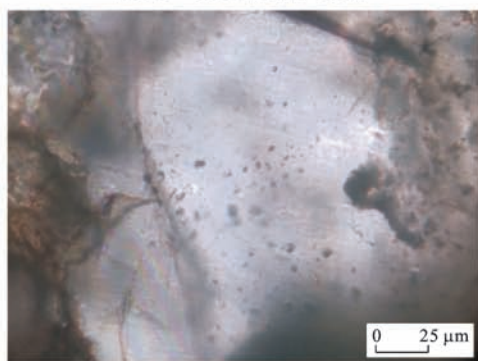
(3)矿物流体包裹体研究证明富烃类还原性盆地流体成分具有明显的演化趋势。早期以含烃盐水、气态烃-液态烃-气液态烃为主;中期以烃类-轻质油为主;晚期以轻质油并出现沥青化为主(图4~6)。①萨热克砂砾岩型铜矿区第一期石英、方解石和白云石等矿物包裹体以含烃盐水包裹体为主。对含烃盐水盆地流体以盐度划分为两类:一类为在方解石和白云石矿物包裹体中的含烃盐水,平均盐度为 $17.47\%\sim 23.12\%$ (NaCl当量),为中盐度;另一类为石英-方解石矿物包裹体中的含烃盐水,盐度为 $3.20\%\sim 12.28\%$ (NaCl当量),为低盐度。这两类流体揭示了盆地流体混合成矿作用的存在。②第二期矿物包裹体也存在两类盐度的含烃盐水,方解石中含烃盐水包裹体盐度为 $22.38\%$ (NaCl当量),石英中含烃盐水包裹体盐度为 $2.8\%$ (NaCl当量)。突出特征是方解石和石英中存在轻质油包裹体,揭示存在两类不同盐度的含烃盐水和轻质油,推测其曾存在两类含烃盐水盆地和轻质油等多相流体混合作用。③在高成熟天然气藏储层中,一般缺乏气液两相石油包裹体,而含烃盐水包裹体在天然气藏储层中普遍存在<sup>[30]</sup>。萨热克砂砾岩型铜矿床的石英等矿物中气液两相包裹体发育(图4、5),以 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 为主,含有少量 $\text{N}_2$ 。在萨热克砂砾岩型铜多金属矿区,早期含烃盐水中气态烃、液态烃和气液态烃等三相态的存在(图4)揭示早期富烃类还原性盆地流体以含烃盐水型盆地流体运移为主,以气态烃-液态烃-气液态烃为主要运移方式,类似于天然气藏中烃类运移。本区矿物包裹体中烃类成分与滇黔交界区玄武岩型铜矿床矿物包裹体具有相似性<sup>[31]</sup>。④中期在含烃盐水存在三相态烃类,而且轻质油仅在晚期石英-方解石矿物包裹体中发育(图5),揭示富烃类还原性盆地流体从三相态烃类已经演进到轻质油类,即“天然气-石油”烃类流体转变和混合相区。⑤晚期以黑色沥青化蚀变相充填在层间断裂和切层断裂带中,形成了黑色强沥青化蚀变相→灰黑



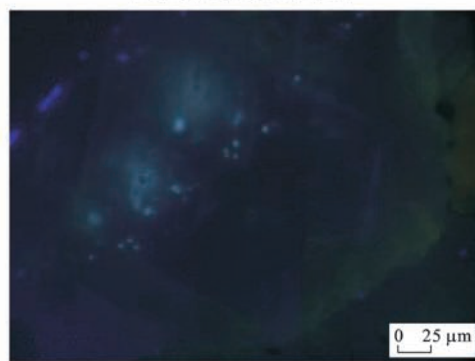
(a) 样品A-2685-3(2)(单偏光),石英胶结物中成群分布,呈无色—灰色含烃盐水包裹体



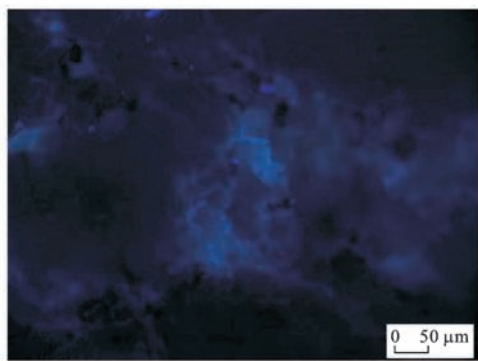
(b) 样品B-2685-4(2)-03(单偏光),方解石胶结物中成群分布,呈深灰色含烃盐水包裹体



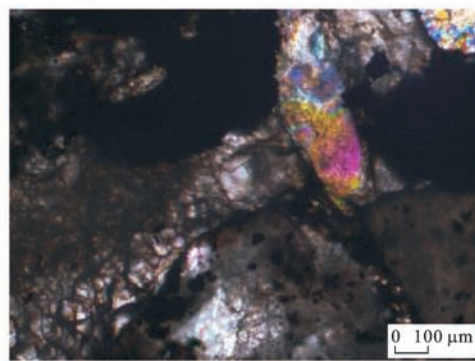
(c) 样品C-2685-3(2)-13(单偏光),方解石胶结物内成群分布,呈无色—灰色含烃盐水包裹体和深灰色气烃包裹体



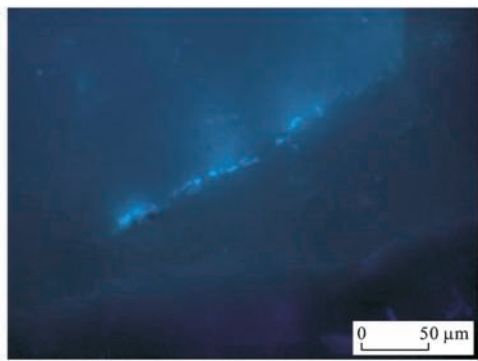
(d) 样品D-2685-09(UV激发荧光),沿白云石胶结物内的微裂隙成带状分布,呈淡黄色—灰色气液烃包裹体,显示浅蓝色荧光



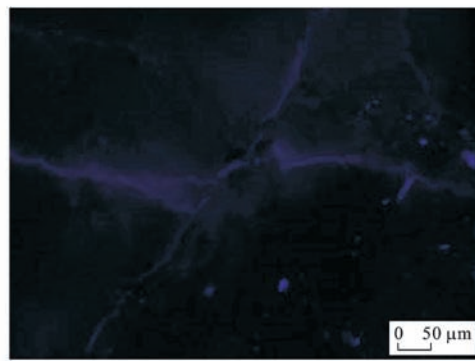
(e) 样品E-2685-5-01(UV激发荧光),砾岩中白云石胶结物内和晶间微裂隙中含轻质油,显示浅蓝色荧光



(f) 样品F-2685-4(2)-02(单偏光),砾岩晶间孔隙被方解石胶结,其微裂隙中含黑褐色沥青



(g) 样品G-2730-5在UV荧光下的轻质油照片(浅蓝色荧光)



(h) 样品H-2790-5在UV荧光下的轻质油照片(浅蓝色荧光)

图4 萨热克铜矿床矿物包裹体中含烃盐水、气态烃-液态烃-气液态烃、轻质油和沥青镜下照片

Fig. 4 Microphotographs of Hydrocarbon-bearing Salt-water, Gas-liquid-gas/liquid Hydrocarbon, Light Oil and Asphalt from Mineral Inclusions in Sareke Cu Deposit



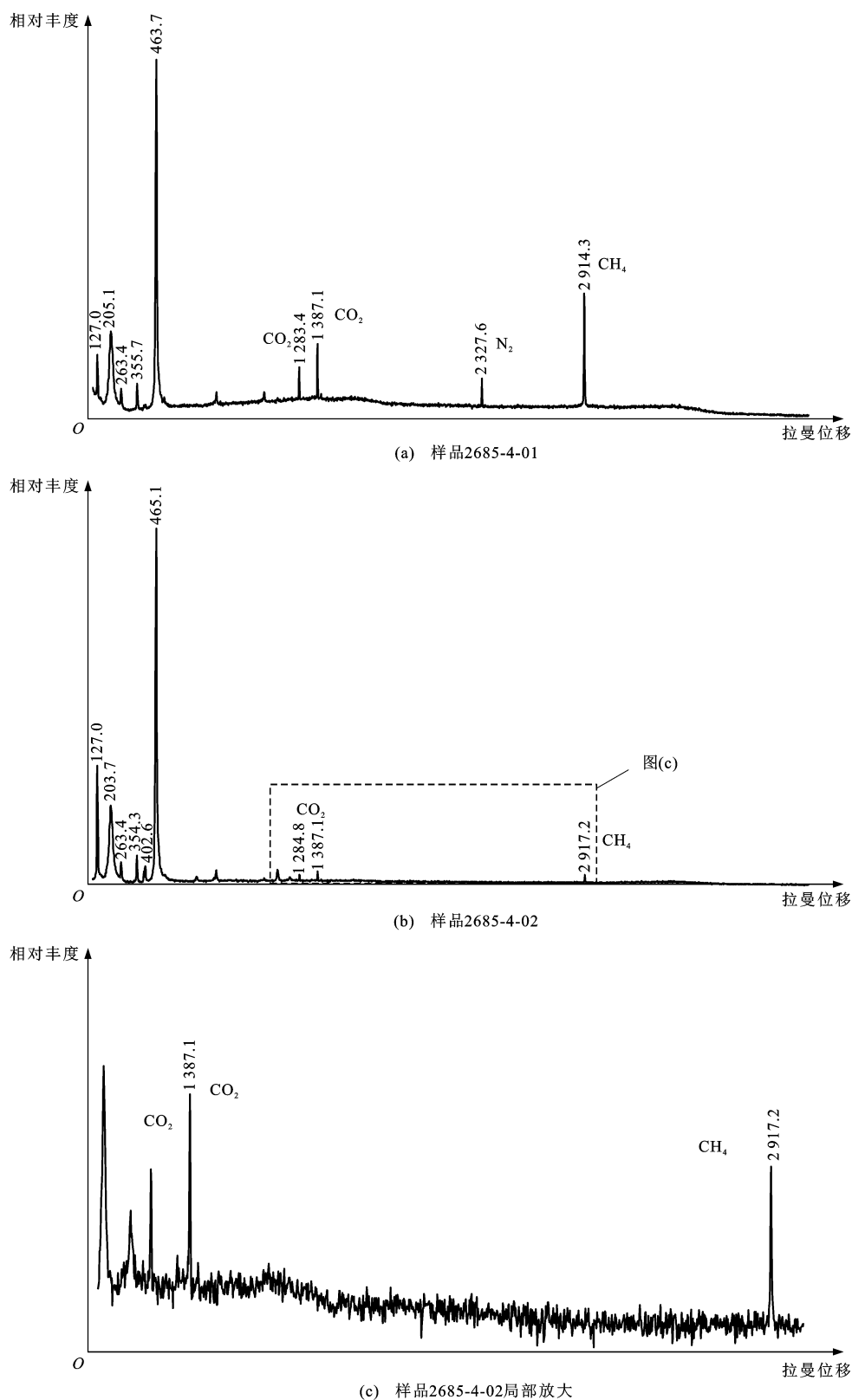


图5 萨热克砂砾岩型铜矿床石英中气液两相包裹体气相成分

Fig. 5 Gas Compositions for Gas-liquid Inclusions from Quartz in Sareke Glutenite-type Cu Deposit

色中沥青化蚀变相→灰色沥青化-褪色化蚀变相。

### 2.3 矿物地球化学岩相学特征与盆地流体混合机制

富烃类还原性盆地流体与含铜紫红色铁质杂砾

岩(氧化相铜)因两类盆地流体(或流体-岩石)相互作用,富烃类强还原性盆地流体将含铜紫红色铁质杂砾岩中初始富集作用形成的氧化相铜大量还原,

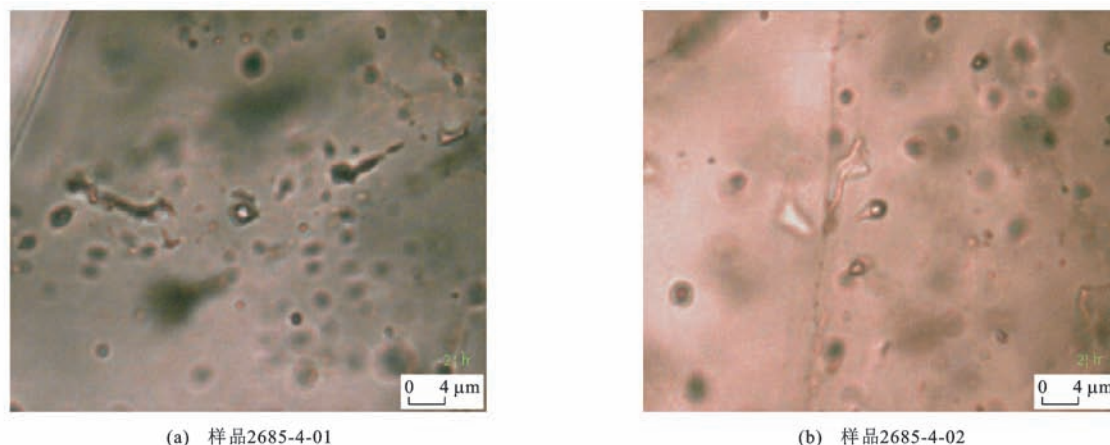


图 6 萨热克砂砾岩型铜矿床石英中气液两相包裹体镜下照片

Fig. 6 Microphotographs of Gas-liquid Inclusions from Quartz in Sareke Glutenite-type Cu Deposit

形成了辉铜矿沉淀。这种两类盆地流体之间存在显著的、氧化-还原作用形成的地球化学岩相学界面,辉铜矿是萨热克砂砾岩型铜矿床的主要矿石矿物。这种地球化学岩相学界面相互作用在辉铜矿和其他铜硫化物矿物成分中具有矿物地球化学岩相学记录。

(1)经人工重砂分析表明,该类富铜矿石矿物主要有辉铜矿、黄铜矿和斑铜矿,辉铜矿约占重矿物的 70.48%,黄铜矿占 12.15%,斑铜矿占 7.75%。辉铜矿-斑铜矿-黄铜矿是铜硫化物相主要组成矿物;辉铜矿是主要矿石矿物,占铜硫化物总量的 70%,揭示其成矿环境为高铜低硫环境。辉铜矿硫同位素组成( $\delta^{34}\text{S}$  值)为  $-24.0\text{‰} \sim -19.0\text{‰}$ ,指示 S 来自地层中大量硫酸盐的生物还原作用<sup>[32]</sup>。

(2)电子探针分析揭示,辉铜矿具有 3 个不同亚种(表 2):①银辉铜矿,Ag 含量(质量分数,下同)为 5.18%~7.44%,Cu 为 70.58%~74.23%,S 为 20.11%~23.09%,Fe 不高于 1.08%,银辉铜矿具有富铜银和高铁硫特征;②辉铜矿,Ag 含量为 0.39%~3.31%,Cu 为 74.82%~76.79%,S 为 20.68%~22.98%,Fe 不高于 0.27%,辉铜矿具有富铜银和高铁硫特征;③铁辉铜矿,Ag 含量为 0.75%~3.67%,Cu 为 60.00%~63.67%,S 为 25.18%~26.37%,Fe 为 8.89%~11.50%,铁辉铜矿具有低铜银和高铁硫特征。本区辉铜矿 Ag 含量均较高(0.39%~7.44%),并形成了银辉铜矿。本区共伴生银资源主要富集在辉铜矿中;辉铜矿含 As、Sb、Co 和 Ni 均较低,但含有微量 Mo、Pb 和 Zn 等。3 个辉铜矿亚种和含铜赤铁矿揭示了矿物地球化学岩相学分带特征为银辉铜矿(强还原相)→辉铜矿(还原相)→铁辉铜矿(氧化-还原相)→含铜赤铁矿(氧化相),也是两类流体混合的矿物地球化学岩

相学记录。萨热克砂砾岩型铜硫化物类矿物组合和辉铜矿成分特征,与紫金山高硫型金铜矿和二叠系玄武岩铜矿具有明显不同的特征<sup>[33-34]</sup>。

### 3 砂砾岩型铜铅锌矿床成矿机制

#### 3.1 含铜紫红色铁质杂砾岩类(初始成矿地质体)

萨热克大型砂砾岩型铜多金属矿床初始富集成矿地质体为库孜贡苏组旱地扇扇中亚相含铜紫红色铁质杂砾岩类。紫红色铁质杂砾岩初始富集成矿物质 Cu 含量为  $(77.3 \sim 1\,080.0) \times 10^{-6}$ , Pb 为  $(89.3 \sim 949.0) \times 10^{-6}$ , Zn 为  $(272 \sim 1\,049) \times 10^{-6}$ , 伴有 Ag 和 Mo, 而 Cu 和 Mo 以氧化相铜和钼为主。

在萨热克砂砾岩型铜多金属矿区采用校正硼含量恢复古盐度,库孜贡苏组古盐度相对较高,显示其为半咸水沉积环境,但尚未达到盆地卤水的盐度水平,且 Cu 含量为  $(35.19 \sim 124.30) \times 10^{-6}$ , 证明其沉积环境有利于铜成矿物质形成初始富集。古盐度值最低的是下白垩统克孜勒苏群,且 Cu 含量为  $(33.2 \sim 69.9) \times 10^{-6}$ , 相对其他地层来说较低,显示其为微咸水—淡水沉积环境;古盐度值最高的是中侏罗统塔尔杂组,显示其为咸水沉积环境。萨热克砂砾岩型铜多金属矿床上侏罗统库孜贡苏组为赋矿层位,且古盐度相对较高,因此,半咸水沉积环境更有利于初始富集,对富烃类还原性盆地流体改造富集和辉绿辉长岩叠加成矿提供了良好的初始成矿物质。

#### 3.2 富烃类还原性盆地流体活动历史与盆地演化之间的关系

本文选择辉铜矿和含铜沥青进行 Re-Os 同位素模式年龄、辉铜矿 Re-Os 同位素等时线年龄进行富烃类还原性盆地流体活动历史研究。



表 2 萨热克砂砾岩型铜矿床辉铜矿电子探针分析结果

Tab. 2 Electron Microprobe Analysis Results of Chalcocites in Sareke Glutenite-type Cu Deposit

矿石类型	$w(\text{S})/\%$	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Ag})/\%$	$w(\text{Mo})/\%$	$w(\text{As})/\%$	$w(\text{Se})/\%$	$w(\text{Sb})/\%$	$w(\text{Zn})/\%$	$w(\text{Ni})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	$w(\text{Co})/\%$	$w(\text{Pb})/\%$	$w_{\text{total}}/\%$
铁辉铜矿	25.18	8.91	63.57	1.49	0.02	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	99.31
铁辉铜矿	26.08	11.50	60.23	3.67	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	101.56
铁辉铜矿	26.07	11.50	61.42	0.75	0.02	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	99.82
铁辉铜矿	25.97	11.50	61.71	1.12	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	100.35
铁辉铜矿	26.37	11.40	61.10	1.89	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	100.89
铁辉铜矿	26.07	11.50	61.63	1.77	0.02	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	101.13
铁辉铜矿	25.40	11.30	60.00	3.50	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	100.25
银辉铜矿	20.86	0.03	73.89	5.65	0.01	0.00	0.00	0.01	0.12	0.00	0.00	0.00	0.01	100.60
银辉铜矿	22.98	1.08	70.58	5.88	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	100.59
银辉铜矿	20.68	0.00	72.09	7.44	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09	0.01	0.05	0.00	0.03	100.39
银辉铜矿	21.17	0.24	72.25	7.17	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.01	0.00	100.99
银辉铜矿	20.93	0.01	74.23	5.18	0.01	0.00	0.06	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	100.49
辉铜矿	22.78	0.27	74.82	1.16	0.02	0.00	0.02	0.00	0.06	0.00	0.03	0.01	0.02	99.18
辉铜矿	23.09	0.01	76.42	0.39	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	100.04
辉铜矿	21.24	0.23	75.67	2.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.02	0.01	0.00	99.82
辉铜矿	21.20	0.03	75.20	3.31	0.02	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	99.84
辉铜矿	21.11	0.02	76.79	2.61	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	100.60

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; $w_{\text{total}}$ 为元素总含量。

(1)含铜沥青全岩 Re-Os 同位素模式年龄为  $(220\pm 3)\text{Ma}$  和  $(180\pm 3)\text{Ma}$ ,其辉铜矿 Re-Os 同位素模式年龄为  $(183.4\pm 2.5)\text{Ma}$  和  $(512.3\pm 30.3)\text{Ma}$ ,可能揭示了富烃类还原性盆地流体第一次排泄运移期,其烃源岩源区形成年龄为上三叠世一下侏罗世和寒武纪烃源岩。这些辉铜矿和含沥青辉铜矿可能以微细辉铜矿颗粒(或纳米级微粒)形式随富烃类还原性盆地流体一起运移。

(2)初始成岩成矿期年龄以第二组辉铜矿 Re-Os 同位素模式年龄  $((157\pm 2)\sim(178\pm 4)\text{Ma})$  为代表,辉铜矿 Re-Os 同位素等时线年龄为  $(166.3\pm 2.8)\text{Ma}$ ,样品数为 6 个,平均标准权重偏差(MSWD)为 1.2,该组数据精度高,可能为辉铜矿初始成矿期年龄。该组年龄值与萨热克巴依次级盆地在中侏罗世末—晚侏罗世初期发生构造反转事件相一致,即富烃类还原性盆地流体初始成岩成矿期为中侏罗世末期土阿辛阶到晚侏罗世初期牛津阶  $((183\pm 1.5)\sim 155.6\text{Ma})$ ,萨热克巴依陆内拉分断陷盆地发生了构造反转,转变为陆内压陷体制下的尾间湖盆,东部基底不断抬升并将其围限和封闭,第一期辉铜矿形成年龄为  $(166.3\pm 2.8)\text{Ma}$ 。

(3)富烃类还原性盆地流体改造成矿期以第三

组辉铜矿 Re-Os 同位素模式年龄  $((116.4\pm 2.1)\sim(136.1\pm 2.6)\text{Ma})$  为代表,属于早白垩世,揭示了富烃类还原性盆地流体第二次排泄运移期发生在早白垩世期间,也是萨热克巴依陆内拉分断陷盆地萎缩期。早白垩世相邻山体抬升,该盆地沉积范围迅速缩小,盆地变形强烈,并于晚白垩世迅速抬升,萨热克巴依地区缺失上白垩统沉积。

(4)晚白垩世末期—古近纪深源热流体叠加成矿期。从下白垩统克孜勒苏群发育的似层状沥青化蚀变带来看,本区域在古近纪曾形成了富烃类还原性盆地流体大规模运移事件,可能与侵入在克孜勒苏群中碱性辉绿辉长岩脉群密切相关,幔源碱性辉绿辉长岩脉群侵位也形成了区域性褪色化(漂白化)蚀变带。晚白垩世末期—古近纪,萨热克巴依次级盆地内可能形成了深源热流体叠加成矿期,与区域上托云后陆盆地中晚白垩世—古近纪深源玄武岩和玄武质火山岩大规模喷发事件相吻合。

3.3 富烃类还原性盆地流体运移通道与构造岩相学标志(运储层)

(1)富烃类还原性盆地流体一次运移通道。富烃类还原性盆地流体从烃源岩中大量排烃后,向上侏罗统库孜苏组上段紫红色铁质杂砾岩类相层

(旱地扇扇中亚相)储集层运移,即为烃类-含烃盐水等组成的富烃类还原性盆地流体一次运移。早一中侏罗世末期 NE 向盆地边界切层同生断裂带以同生断陷沉降,中侏罗世末—晚侏罗世初期构造反转为挤压收缩体制下逆冲推覆作用,它们为富烃类还原性盆地流体运移构造通道。萨热克 NE 向盆地边界同生断裂带在压陷体制持续活动,导致萨热克巴依次级盆地中形成了富烃类还原性盆地流体并开始了大规模运移。萨热克同生断裂带主要为两条 NE 向边界同生断裂带,其次为 NNW 向基底隆起带和构造洼地之间的构造坡折带。两条 NE 向边界同生断裂带从构造断陷作用反转为逆冲推覆作用,不但造成了萨热克巴依陆内拉分断陷盆地发生构造反转,而且也对烃源岩大量排烃形成了构造驱动作用,同时逆冲推覆构造作用对富烃类还原性盆地流体形成了大尺度构造驱动和构造圈闭,驱使富烃类还原性盆地流体向圈闭构造和岩性岩相圈闭层大规模运移。侏罗系砾岩中大孔隙度和裂隙发育,揭示孔隙-裂隙为烃类流体运移的小型构造通道。

(2)富烃类还原性盆地流体二次运移通道。富烃类还原性盆地流体在进入萨热克巴依次级盆地后,被库孜贡苏组上段旱地扇扇中亚相含铜紫红色铁质杂砾岩类形成了岩性岩相圈闭层,发生了以侧向运移为主和以下渗运移为辅的富烃类还原性流体二次运移。①富烃类还原性盆地流体二次运移以顺层侧向运移为主,受层间滑动构造带-裂隙破碎带-杂砾岩等层间构造-岩性-岩相控制而发生运移,主要沿构造裂隙带-碎裂岩化相杂砾岩等高渗透率部位形成侧向运移。②以沥青化蚀变强度为地球化学岩相学标志,揭示富烃类还原性盆地流体改造富集作用的强度大小,并划分为 3 个沥青化蚀变带,即黑色强沥青化蚀变带→灰黑色中沥青化蚀变带→灰黑色沥青化-褪色化蚀变带。这种沥青化蚀变带在切层断裂和层间断裂交汇部位最为强烈,形成了侧向沥青化-褪色化蚀变分带,即黑色强沥青化蚀变带→灰黑色沥青化-褪色化蚀变带→褪色化蚀变带→褪色化含铜紫红色铁质杂砾岩类→含铜紫红色铁质杂砾岩类。这种侧向蚀变分带是富烃类还原性盆地流体侧向运移构造岩相学记录和流体-岩石氧化-还原耦合反应的地球化学岩相学记录。

(3)富烃类还原性盆地流体与含铜紫红色铁质杂砾岩(氧化铜富集层位)流体多重耦合结构、氧化-还原耦合反应的地球化学岩相学记录。萨热克砂砾岩型铜矿床的围岩蚀变主要有沥青化、褪色化、

绿泥石化、碳酸盐化、铁白云石化、硅化、绢云母化,局部发育重晶石化等。碳酸盐化蚀变作用与富烃类还原性盆地流体有密切关系。①碳酸盐化蚀变作用(褪色化蚀变)和矿物地球化学岩相学特征揭示了其两类盆地流体的化学耦合反应作用。在初始沉积成岩成矿期(( $157 \pm 2$ )~( $178 \pm 4$ )Ma),碳酸盐质胶结物以方解石为主,因方解石比较纯净,其他元素含量较低,其 FeO 和 MgO 含量也低于 1.0%,在沉积成岩期也形成了含有少量 FeO、MgO 和 MnO(0.18%~1.50%)的方解石,其主要与沉积成岩期为半咸水环境有密切关系。②在盆地流体改造成矿期(( $116.4 \pm 2.1$ )~( $136.1 \pm 2.6$ )Ma),碳酸盐化蚀变主要表现为含铁方解石化、含锰方解石化、含铁白云石化和铁白云石化,含铁方解石具有低钙高 MgO(含量为 3.10%)、FeO(8.74%)和 MnO(8.68%)的特征,尤其是含锰方解石以玫瑰红细脉状和网脉状锰方解石-含锰白云石分布在铜矿石和大理岩角砾中。这揭示了强还原环境中形成的低温热液型铁锰碳酸盐化蚀变与沉积成岩期碳酸盐化蚀变具有较大差异。③萨热克砂砾岩型铜矿床上盘围岩、矿体和下盘围岩的渗透率和孔隙度特征能够揭示两类盆地流体-岩石之间物理性耦合和对流体-岩石之间化学耦合反应的控制。铜矿体上盘围岩为下白垩统克孜勒苏群紫红色泥质粉砂岩类,其气测渗透率为( $0.00212 \sim 0.00311$ ) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 1.212%~1.555%,构成了富烃类还原性盆地流体的岩性岩相封闭层,形成了很好的岩性岩相圈闭构造。但穿层断裂仍然构成了富烃类还原性盆地流体向上运移的构造通道。④上侏罗统库孜贡苏组上段紫红色铁质杂砾岩气测渗透率在( $0.01010 \sim 0.09354$ ) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 1.798%~2.662%,明显高于上述岩相岩性封闭层,构成了富烃类还原性盆地流体的岩性岩相储集层,为其二次运移提供了良好的渗透率和孔隙度。含铜沥青化-褪色化蚀变杂砾岩气测渗透率为( $0.00353 \sim 0.06578$ ) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 1.331%~1.767%,明显高于上述岩相岩性封闭层,但低于库孜贡苏组中正常未蚀变的紫红色铁质杂砾岩,显示经过富烃类还原性盆地流体作用后,铜富集成矿和围岩蚀变作用导致了渗透率和孔隙度的降低。⑤矿体底盘围岩为上侏罗统库孜贡苏组下段灰绿色含砾砂岩和砂岩,其气测渗透率为( $0.01364 \sim 0.02514$ ) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 3.129%~4.819%,渗透率比库孜贡苏组上段有所降低,但孔隙度仍然很好,因此,其有利于富烃类还原性盆地流

体向下渗流。但富烃类还原性盆地流体将库孜贡苏组上段紫红色铁质杂砾岩大量还原,同时富烃类还原性盆地流体也不断发生氧化作用,形成了  $\text{CO}-\text{CO}_2-\text{CO}_3^{2-}$  型盆地流体,也导致了在该层位发育碳酸盐化-绿泥石化-黄铁矿化等组成的褪色化,即碳酸盐化-绿泥石化-黄铁矿化蚀变带。⑥温度场耦合结构与耦合作用特征为异常古地温场结构。萨热克砂砾岩型铜矿床古地温结构也是流体多重耦合结构与氧化-还原耦合反应的地球化学岩相学记录。铜硫化物组合类型可以直接揭示铜富集成矿规律,采用绿泥石矿物温度计可间接揭示其古地温场和绿泥石化蚀变温度(褪色化蚀变)。按照铜硫化物矿物组合和绿泥石共生关系,萨热克铜矿石可以划分为3种类型:辉铜矿型矿石带,绿泥石矿物温度计恢复古地温场为  $188\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 219\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;斑铜矿+辉铜矿型矿石带,绿泥石矿物温度计恢复古地温场为  $196\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 237\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;斑铜矿型矿石,绿泥石矿物温度计恢复古地温场为  $203\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 226\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。斑铜矿型矿石和斑铜矿+辉铜矿型矿石可能指示了富烃类还原性盆地流体的成矿中心部位,其绿泥石化形成温度为  $196\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 237\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而斑铜矿型矿石多分布在斑铜矿+辉铜矿型矿石带之内,绿泥石化形成温度为  $203\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 226\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4)通过对萨热克砂砾岩型铜矿体中不同Cu品位的矿石物相进行分析,采用地球化学岩相学记录恢复其成矿机制(图7)。①全铜(TCu)与全铁(TFe)含量呈现显著正相关关系(判定系数为0.939 9,样品数为26个),全铜与矿石中全铁含量之间的关系式为  $w(\text{TCu})=1.108\ 4w(\text{TFe})-2.514\ 5$ ,揭示了全铁对铜富集成矿具有明显的控制作用。②Cu品位与氧化相铁(OFe)含量呈现密切正相关关系(判定系数为0.838 3,样品数为26个),Cu品位与矿石中氧化相铁含量之间的关系式为  $w(\text{TCu})=1.226\ 6\cdot w(\text{OFe})-0.639\ 3$ ,揭示了氧化相铁对铜富集成矿具有明显的控制作用。③库孜贡苏组含铜紫红色铁质杂砾岩吸附Cu形成的初始富集成矿作用与富集铁质密切相关。碳酸盐相铁(CFe)和硫化物相铁(SFe)能够揭示盆地流体改造过程中,氧化相铁被富  $\text{CO}_2-\text{CO}$  型还原性流体和富S型还原性流体或者二者混合的还原性盆地流体的还原量和被还原的氧化相铁比例。铜矿化、铜矿石和高品位铜矿石的氧化相铁被还原量一般都在10%以上,集中分布在10%~55%之间,揭示还原性盆地流体具有一定规模,达到了可以将50%以上氧化相铁进行还原的能力,但由于杂砾岩中碎裂岩化相发育不均匀,裂隙密

度、杂砾岩渗透率和孔隙度、构造改造作用强度等多因素多重耦合作用,氧化相铁被还原量和已经还原的碳酸盐相铁和硫化物相铁分布极不均匀。④碳酸盐相铁为典型强还原地球化学岩相学类型<sup>[35]</sup>。碳酸盐相铁与全铜含量的相关关系,明显与氧化相铁含量的相关关系不同,呈现二项式密切正相关关系,相关系数为0.79,样品数为25个,这与实际观察两期以上方解石化蚀变现象相吻合,揭示铜富集成矿具有两期叠加成矿作用,因此,方解石-铁方解石化等碳酸盐化蚀变与铜叠加成矿作用有十分密切的关系。从地球化学岩相学的相态转换和平衡角度分析,含铜紫红色氧化相铁被还原为碳酸盐相铁和硫化相铁,是初始成矿相体(旱地扇扇中亚相含铜紫红色铁质杂砾岩类)经历了强还原地球化学作用之后,导致紫红色岩石褪色化的地球化学岩相学机制,为辉铜矿、斑铜矿和黄铜矿等铜硫化物形成提供了成矿地球化学环境条件。

### 3.4 富烃类还原性盆地流体圈闭构造与构造岩相学特征

由于两侧边界同生断裂带在晚侏罗世构造反转,萨热克巴依陆内拉分断陷盆地经后期构造变形,形成了萨热克南和萨热克北两个对冲厚皮式逆冲推覆构造系统,驱动了造山带流体大规模向萨热克裙边式复式向斜构造系统排泄聚集,富烃类还原性盆地流体运移带同生披覆褶皱和基底隆起带顶部形成了大型构造圈闭(图8)。

(1)库孜贡苏组除岩性岩相圈闭外,碎裂岩化相是重要的储矿构造岩相学特征,也是富烃类还原性盆地流体圈闭构造。构造岩相学特征可从肉眼识别、肉眼借助放大镜和显微镜下鉴定研究进行统计,以发育辉铜矿脉、沥青化脉、硅化脉、方解石化细脉和铁白云石细脉或者它们组成的网脉为富烃类还原性盆地流体圈闭构造的岩相学标志。

(2)小型圈闭构造尺度(裂隙和节理宽度大于0.1 cm)的碎裂岩化相可肉眼识别。根据节理-裂隙密度对其进行划分:①强碎裂岩化杂砾岩(裂隙密度大于每米5条),为强碎裂岩化相,一般多为富矿体和黑色强沥青化蚀变发育部位;②中碎裂岩化杂砾岩(裂隙密度为每米1~5条),为中碎裂岩化相,一般为铜矿体和灰黑色中沥青化-褪色化蚀变相;③弱碎裂岩化杂砾岩(裂隙密度低于每米1条),为弱碎裂岩化相,一般为褪色化杂砾岩和斑杂色杂砾岩,多为铜矿化体;④紫红色铁质杂砾岩(无碎裂岩化,裂隙密度低于每米0.01条),为正常未蚀变紫红色铁



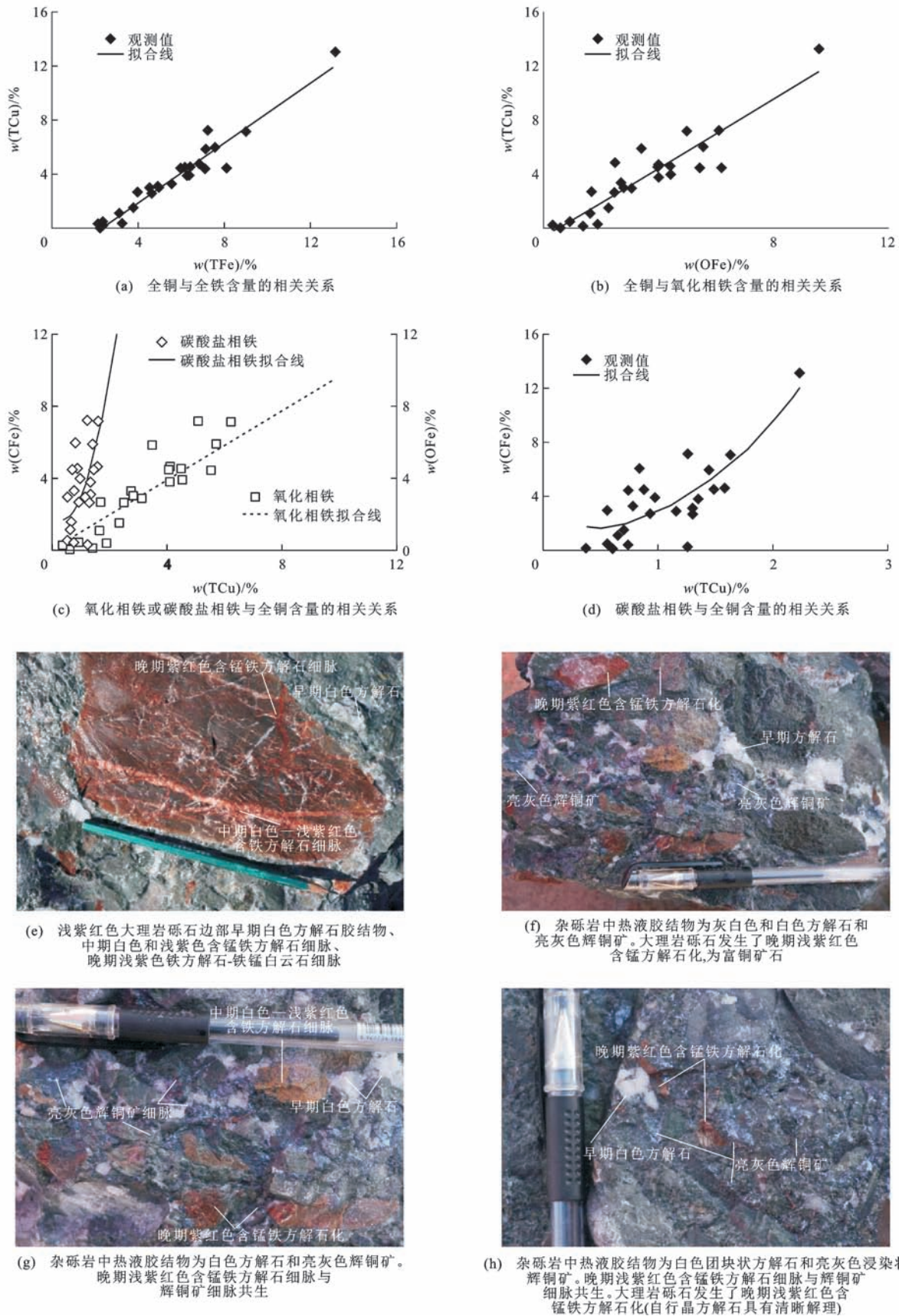
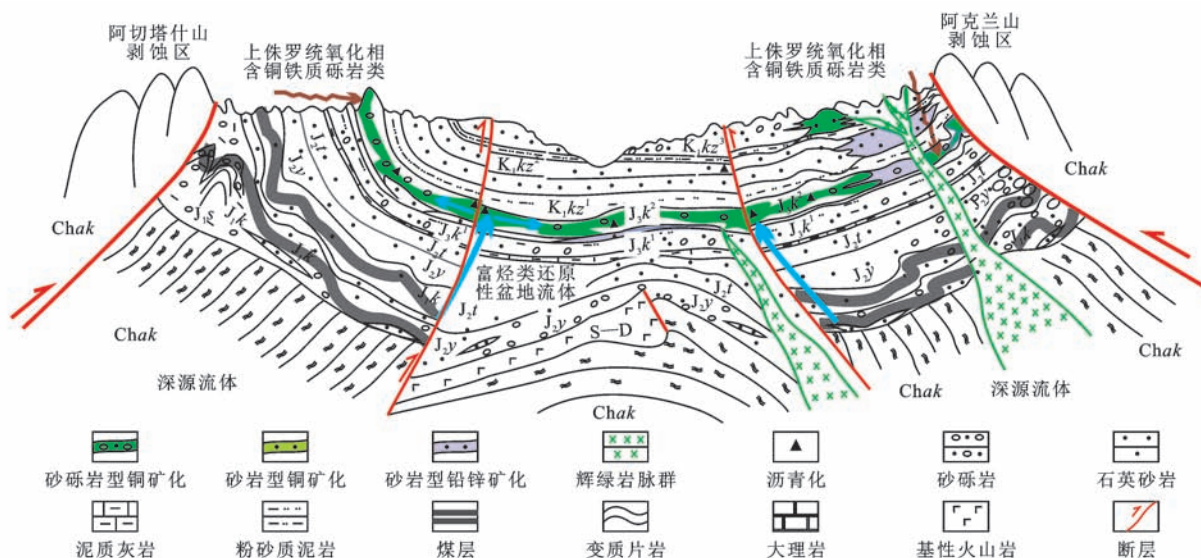


图7 萨热克砂砾岩型铜矿床地球化学岩相学相关关系与碳酸盐化照片

Fig. 7 Relationships Between Geochemical Lithofacies and Carbonatization Photos in Sareke Glutenite-type Cu Deposit



$K_1kz^3$  为下白垩统克孜勒苏群第三岩性段;  $K_1kz^2$  为下白垩统克孜勒苏群第二岩性段;  $K_1kz^1$  为下白垩统克孜勒苏群第一岩性段;

$J_3k^2$  为上侏罗统库孜贡苏组第二岩性段(赋矿层位为早地扇扇中亚相);  $J_3k^1$  为上侏罗统库孜贡苏组第一岩性段(湿地扇相);

$J_2y$  为中侏罗统杨叶组;  $J_2t$  为中侏罗统塔尔杂组;  $J_1k$  为下侏罗统康苏组;  $J_1s$  为下侏罗统萨里塔什组;

S—D 为志留系—泥盆系; Chak 为中元古界阿克苏岩群

图8 萨热克砂砾岩型铜矿床成矿模式

Fig. 8 Metallogenic Pattern of Sareke Glutenite-type Cu Deposit

质杂砾岩。

(3)显微圈闭构造尺度的碎裂岩化相和裂缝标志可以肉眼借助放大镜和显微镜下鉴定进行显微裂隙和裂缝(宽度不高于0.1 cm)统计,以发育辉铜矿细脉、沥青化细脉、绿泥石化细脉、方解石化细脉和铁白云石细脉或者它们组成的细网脉为富烃类还原性盆地流体圈闭构造的岩相学标志:①强碎裂岩化相,杂砾岩、含砾砂岩和砂岩等显微裂隙和裂缝密度高于每米150条;②中碎裂岩化相,杂砾岩、含砾砂岩和砂岩等显微裂隙和裂缝密度为每米100~150条;③弱碎裂岩化相,杂砾岩、含砾砂岩和砂岩等的显微裂隙和裂缝密度为每米50~100条;④显微裂隙和裂缝密度低于每米50条可暂作受碎裂岩化相影响的岩石,不作独立建相标志。

### 3.5 古地热事件与盆地热演化历史

采用绿泥石矿物温度计恢复萨热克砂砾岩型铜矿区4期古地热事件:第一期古地热事件DD为沉积成岩期((157±2)~(178±4) Ma),古地温场为163℃~217℃;第二期古地热事件DD3-DE1为盆地流体改造富集期((116.4±2.1)~(136.1±2.6) Ma),古地温场为188℃~219℃;第三期古地热事件DE2为辉绿辉长岩脉群侵入构造期,古地温场为236℃~238℃;第四期古地热事件DE3为辉绿岩遭受蚀变期,古地温场为121℃~185℃。这些古地热事件可能是本区形成异常古地温结构的原因。而异

常古地温梯度在萨热克巴依次级盆地因地层裂隙和热传导控制因素的不同,形成了异常古地温结构,其上侏罗统库孜贡苏组对于古地温热传导较为有利,也是形成萨热克砂砾岩型铜矿床的古地温因素。

### 3.6 富烃类还原性盆地流体成矿理论的验证与深化

根据富烃类还原性盆地流体改造叠加成矿的新观点,对萨热克砂砾岩型铜矿坑道进行构造岩相学编录和地球化学岩相学研究,以验证富烃类还原性盆地流体叠加改造成岩成矿作用。①对其含铜蚀变杂砾岩进行刻槽取样(表3),Cu品位(1.44%~5.89%)明显增高,铜-银(Ag含量为(10.4~48.7)×10<sup>-6</sup>)为同体共生-伴生,钼与铜矿体(Mo含量为0.013%~0.610%)为同体共生矿体,Ag、Mo、Cu品位具有同步富集趋势。Mo主要以硫铜钼矿和胶硫钼矿等独立硫化物相钼形式赋存。②该类型铜、钼、银同体共生矿体中,Pb含量均较低,但局部U含量(0.0187%)达到了铀矿化,因此,萨热克整装勘查区需要重视砂砾岩型Cu-Ag-Mo-U组合型铜矿体的寻找和研究,这是一个值得重视的新找矿方向。③沥青化断层角砾岩是最晚期构造-流体活动事件的构造岩相学记录,断层角砾岩呈明显的棱角状,沥青化蚀变呈胶结物形式胶结断层角砾,总有机碳(0.32%~0.97%)明显最高,U含量为(7.13~187.0)×10<sup>-6</sup>。④在挤压片理化沥青化破碎带中,早期沥青化蚀变已经发生了构造变形,形成了石墨



表 3 萨热克砂砾岩型铜矿山坑道刻槽取样分析结果

Tab. 3 Analysis Results of Channeling Samples in Sareke Glutenite-type Cu Mine-adits

样品编号	样长/m	$w(\text{Ag})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Mo})/\%$	$w(\text{Pb})/\%$	$w(\text{U})/10^{-6}$	总有机碳/ $\%$	地质产状
H4011-1	1.0	48.7	2.21	0.013	0.011	7.13	0.97	含铜沥青化断层角砾岩
H4012-1	1.0	23.5	3.06	0.160	0.016	187.00	0.32	含铜沥青化断层角砾岩
H4014-1	1.0	10.4	1.44	0.005	0.010	3.74	0.21	挤压片理化沥青化破碎带
H2685-4	1.0	24.7	3.48	0.190	0.019	1.39	0.16	挤压片理化沥青化破碎带
H2685-5	1.0	38.0	5.89	0.610	0.028	3.29	0.15	含铜沥青化-褪色化杂砾岩
Hw2685-5	1.0	39.4	4.89	0.026	0.023	3.54	0.17	含铜沥青化-褪色化杂砾岩

金属镜面构造和碳质拉伸线理,揭示其经历了后期走滑断裂作用,强烈构造应力作用造成了脱碳作用,总有机碳明显降低,暗示存在富烃类还原性盆地流体多期次运移作用。⑤含铜沥青化-褪色化杂砾岩中,Cu、Ag 和 Mo 品位均较高,揭示强还原—中还原环境对于 Cu、Ag 和 Mo 富集最为有利。

## 4 讨 论

### 4.1 富烃类还原性盆地流体与砂砾岩型铜铅锌矿床成矿机制

近年来,对于油气藏破坏和有机质与沉积岩型铜铅锌矿床的金属大规模成矿备受关注,有机质参与了铜铅锌富集成矿作用<sup>[7-10,36-38]</sup>。塔西地区砂砾岩型铜铅锌矿床明显受同生沉积成岩期构造岩相学和盆地改造期构造-流体多重耦合作用复合控制。其盆地流体的地球化学岩相学类型不同,对于砂砾岩型铜铅锌矿床具有不同的控制作用,其成矿机制也具有较大差异,但含铜铅锌氧化相盆地流体和富烃类还原性盆地流体混合是形成不同成矿系统的关键地球化学岩相学机制。富烃类还原性盆地流体系统是最终形成砂砾岩型铜铅锌矿床的关键因素。富烃类还原性盆地流体与盆地封存流体(岩石)之间的盆地流体混合作用导致矿质大规模沉淀;这些砂砾岩型铜铅锌矿床发育有机质、含烃盐水、气态烃-液态烃-气液态烃、轻质油和沥青等富烃类流体包裹体等,揭示曾存在富烃类还原性盆地流体活动。沥青化蚀变带也是富烃类还原性盆地流体直接可识别的构造岩相学标志,沥青化蚀变分带、沥青化-褪色化(漂白化)蚀变分带也是富烃类还原性盆地流体与围岩大规模水岩耦合反应的构造岩相学记录,揭示在后期构造变形和叠加改造过程中,沉积盆地流体与围岩之间存在大规模水岩耦合反应作用,这也是导致铜铅锌成矿物质大规模沉淀的主要机制。

### 4.2 后陆盆地系统与砂砾岩型铜矿床

在构造高原-造山带-沉积盆地耦合转换构造域

中,后陆盆地一般位于两个平行的造山带之间、多造山带和地块横向叠置耦合、或者构造高原与造山带之间。在后陆盆地沉积充填地层体中,下部多发育含煤碎屑岩系,中部发育金属矿床,上部蒸发岩系发育盐类矿床,同时也是多种能源矿产(石油-煤炭-天然气-铀矿等和金属矿产)同盆共存<sup>[12-14,39-43]</sup>,后陆盆地中煤炭-石油-天然气和烃源岩系的存在为富烃类还原性盆地流体提供了良好的烃源物质基础,为形成大型砂砾岩型铜矿床提供了大量烃源岩物质。

萨热克南和萨热克北两个 NE 向盆地边界同生断裂带在中侏罗世末期开始构造反转,形成了挤压收缩体系下压陷盆地叠加复合扇体,同时挤压收缩体制导致了侏罗系等烃源岩发生了大规模生烃-排烃作用,经过构造反转的 NE 向同生断裂带为富烃类还原性盆地流体运移构造通道。萨热克大型砂砾岩型铜铅锌矿床成矿机制、富烃类还原性盆地流体残留物(沥青化和总有机碳)与铜矿富集有密切关系,它们具有生物有机质成因特征。在富烃类还原性盆地流体中,沥青和碳质是盆地流体重要的还原剂,这种富烃类还原性盆地流体大规模运移到上侏罗统库孜贡苏组中,将早地扇中亚相含铜紫红色砂砾岩中以铁氧化物吸附的氧化相铜等成矿物质大量还原,形成了辉铜矿、斑铜矿和黄铜矿等铜硫化物相。

库孜贡苏运动期是区域性富烃类还原性盆地流体大规模运移期,在区域燕山早期(库孜贡苏运动)垂向构造抬升具有局域化特征,在库孜贡苏组与下伏塔尔杂组,克孜勒苏群与下伏塔尔杂组、盆地基底构造层之间形成了角度不整合面。而库孜贡苏组在康苏一带与下伏塔尔杂组呈假整合,在乌鲁—乌拉前陆盆地中心呈连续沉积。反修煤矿南局部抬升明显,使塔尔杂组遭受剥蚀而呈楔状。盐场北因垂向抬升强烈,塔尔杂组被剥蚀殆尽,库孜贡苏组直接超覆在阿克苏群之上。康苏—库克拜地区克孜勒苏群、塔尔杂组和其下地层普遍为角度不整合接触。



### 4.3 前陆盆地分段构造特征与区域成矿学特征

在塔西地区西南天山造山带南侧的中新生代前陆盆地系统中,构造-沉积相、盆地构造变形样式和构造组合、区域成矿学和成矿分带具有EW向分段特征。

(1)最西部乌鲁克恰其中一新生代前陆盆地为砂砾岩型铅锌矿床(如江格结尔铅锌矿)、砂砾岩型铜矿床(如炼铁厂铜矿)和石膏矿床等同盆共存(图1)。

①盆地基底构造层最为典型,其西侧盆地基底构造层为古生界,现今以NE向叠瓦式逆冲推覆构造系统和冲断褶皱带出露于该盆地西侧,局部逆冲推覆于中—新生代地层之上,盆地北侧为长城系阿克苏岩群,为西南天山造山带南侧高角度冲断褶皱带,也逆冲推覆于中—新生代地层之上,揭示不但盆地基底构造层发育齐全,而且也有来自NW—SE向和NE—SW向不对称挤压收缩和逆冲推覆构造作用。

②该前陆盆地于晚侏罗世开始发育,为半地堑断陷盆地。晚侏罗世—白垩纪沉积发育齐全,上白垩统与下白垩统为连续沉积,是塔西前陆盆地系统中最为典型的特征,也是古特提斯海通过阿莱依海峡侵入喀什地区海峡的通道,形成了由白垩系下部碎屑岩系和上部碳酸盐岩系组成的两个巨厚沉积旋回,白垩系沉积相垂向演化体现出海平面整体上升过程,上白垩统为标准的陆表海沉积<sup>[44]</sup>。

③炼铁厂砂砾岩型铜矿床产于克孜勒苏群上部河湖三角洲相砂砾岩中,沉积环境为乌鲁克恰其陆表海域中海湾盆地东北缘边部辫状河流域,与来自东北侧阿克苏岩群造山型铜金矿床和泥盆系中含铜赤铁矿床能够提供大量原始的铜成矿物质有十分密切的关系。

④江格结尔砂砾岩型铅锌矿赋存于克孜勒苏群上部,其蚀源岩区主要为盆地上基底构造层古生界,造山型铅锌矿床和火山热水沉积-改造型铅锌矿床被剥蚀后提供了大量原始的铅锌成矿物质。

⑤受帕米尔弧形构造结西侧和弧顶向北推进的影响,该前陆盆地在古近系海湾盆地(古特提斯海域北支阿莱因海峡)形成含膏泥岩和石膏后,向周缘前陆盆地演化;受帕米尔构造高原和西南天山造山带双重挤压收缩体制的影响,该前陆盆地发生了较大规模收缩变形,导致盆地流体大规模排泄和集聚,为富烃类还原性盆地流体集聚和构造圈闭-岩相岩性圈闭形成大型砂砾岩型铜铅锌矿床提供了优越的成矿条件。

(2)伽师中—新生代前陆盆地为砂砾岩型铀矿、煤矿、铜矿和石膏矿同盆共存。

①中侏罗统杨叶组、塔尔尕组(如KS铀矿点)和下白垩统克孜勒苏群

(如巴什布拉克大型砂岩型铀矿床)为砂岩型铀矿有利成矿层位。巴什布拉克大型砂岩型铀矿床赋存于克孜勒苏群下段褪色化蚀变砾岩和蚀变含砾粗砂岩中,围岩蚀变以沥青化、褪色化、碳酸盐化、黄铁矿化、黏土化等为主<sup>[45-48]</sup>。侏罗系和白垩系呈低角度超覆在阿克苏岩群之上,晚侏罗世和早白垩世北侧阿克苏岩群持续抬升,造成了盆地基底构造层中原始含铀岩性被抬升后遭受剥蚀,为前陆盆地提供原始铀成矿物质。

②西南天山造山带南侧冲断褶皱带在伽师前陆盆地北侧为巴什布拉克冲断褶皱带,在砂岩型铀成矿带内总体有上侏罗统和白垩系组成的单斜地层,局部发育掀斜构造,这种构造样式与砂砾岩铜铅锌矿床内复式褶皱构造系统差别较大。

③油气和有机质在铀富集成矿中具有很大作用<sup>[46-48]</sup>。含铀矿物主要呈浸染状分布于有机质内部和有机质边缘裂隙,铀矿物主要为沥青铀矿、含铀地沥青和铀黑,次生铀矿物主要有板菱铀矿、钒钙铀矿、矽铀矿和铜铀云母等。含铀矿物以黄铁矿最为常见,以及少量方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉钼矿和胶硫钼矿等。刘章月等认为早期油气有机质在白垩纪—古近纪沿着渗透性较好的岩性段、不整合面和泥岩破碎带,侵入到下白垩统克孜勒苏群砂砾岩中,在上白垩统和古近系巨厚膏岩和泥岩等形成了岩性圈闭,铀矿化主要受早期油气有机质地沥青分布范围控制,晚期油气有机质浸入较晚,对铀成矿影响不大<sup>[47]</sup>。

李盛富等基于含矿层中有机质含铀性分析和铀矿物学研究,认为油气还原过程有两期,早期有机质不含铀,晚期有机质富含铀,其有机质包裹有多种铀矿物和金属硫化物,包括黄铁矿和胶硫钼矿、沥青铀矿、铀石和含钍铀矿物等,胶硫钼矿本身就包裹了沥青铀矿和铀石,在砂岩粒间碎屑物中存在胶硫钼矿、沥青铀矿、铀石和含钍铀矿物<sup>[48]</sup>。

伽师中—新生代前陆盆地在新近纪演化为陆内湖泊盆地,杨叶铜矿和花园铜矿赋存在安居安组下段灰绿色岩屑砂岩中,为浅湖相沉积。杨叶铜矿带分布于确若布拉克短轴向背斜的两翼,赋矿层随地层褶皱而褶曲。由于帕米尔构造高原向北推进,塔西地区(喀什凹陷)形成了新近纪坳陷氧化宽浅湖泊盆地,经历了坳陷沉降期(渐新世—中新世克孜洛依期滨浅湖盆)→稳定沉降期(中新世安居安期滨湖—半深湖盆)→盆地反转期(中新世帕卡布拉克期冲积扇—滨浅湖—浅湖—半深湖相)→盆地萎缩期(上新世阿图什期冲积扇相)4个演化期。安居安组为乌鲁—乌拉前陆盆地系统中砂岩型铜成矿带主要赋

存层位。

喜马拉雅期造山运动形成了新近系渐新统一中新统克孜洛依组与古近系始新—渐新统巴什布拉克组及其下层位的局部不整合面,克孜洛依组与巴什布拉克组呈微角度不整合。在新疆乌恰县城附近及其以东地区(克孜洛依、库孜贡苏石膏矿等),克孜洛依组底部发育底砾岩,巴什布拉克组常缺失第四岩性段和第五岩性段。在帕米尔构造北侧前陆盆地中,古近系始新统一渐新统巴什布拉克组和新近系渐新统一中新统克孜洛依组为砂岩型铜成矿带主要赋存层位。砂岩型铜成矿带具有环形分布趋势,可能主要与乌鲁—乌拉周缘前陆盆地形成演化有密切关系。同时,伽师前陆盆地也是帕米尔高原北侧逆冲推覆构造系统的前锋带位置。

(3)燕山晚期构造运动在乌拉根前陆盆地中较为强烈,但在乌鲁克恰其前陆盆地和库孜贡苏拉分断陷盆地中表现不明显。①以古近系阿尔塔什组超覆在白垩系之上,并发育角度不整合面为典型构造岩相学特征,但区域上构造岩相学规律变化大,古近系阿尔塔什组与上白垩统吐依洛克组及下伏地层间呈角度不整合。②乌拉根前陆盆地康苏—库克拜地区,上白垩统缺失吐依洛克组和依格孜牙组,阿尔塔什组常超覆于乌依塔克组、库克拜组和克孜勒苏群之上,角度不整合构造发育。库克拜的阿尔塔什组超覆于乌依塔克组上;康苏镇及乌拉根一带阿尔塔什组超覆于克孜勒苏群之上,角度不整合面发育。③巴什布拉克的阿尔塔什组逐层超覆于乌依塔克组、库克拜组和克孜勒苏群之上。④乌鲁克恰提及库孜贡苏地区,阿尔塔什组与上白垩统吐依洛克组为整合接触。因克孜勒苏群顶部砂砾岩与古新统阿尔塔什组石膏岩类之间岩石性质差异大,喜马拉雅期形成了大规模区域滑脱构造带,叠加在区域角度不整合面之上,它们共同构成了油气资源(富烃类还原性盆地流体)大规模运移的构造通道。⑤燕山晚期在克孜勒苏群顶部与阿尔塔什组形成了区域角度不整合面,该构造岩相学界面在喜马拉雅期为区域滑脱构造带,形成了构造-热流体角砾岩构造系统<sup>[49]</sup>。该区域构造岩相学相变界面为有利于盆地流体运移和圈闭的高渗透率构造岩相带,为富烃类还原性盆地流体大规模运移构造通道。⑥阿尔塔什组底部为石膏矿和天青石矿床主要赋矿层位,这些石膏-天青石矿床为古近纪局限海湾盆地热卤水沉积所形成,与克孜勒苏群顶部接触部位以天青石白云质角砾岩相为主,侧向相变为天青石岩-石膏天青

石岩-石膏岩。在喜马拉雅期造山过程中,该构造岩相带可能为盆地-造山带流体的大规模运移通道和路径,也是岩性-岩相圈闭构造。乌拉根复式向斜构造系统是富烃类还原性盆地流体圈闭构造。

(4)在西南天山造山带南侧前陆盆地系统中,喜马拉雅期形成了前陆冲断褶皱带,不同地段具有不同构造变形样式和构造组合<sup>[50-52]</sup>。它们对新近系砂岩型铜矿床具有不同的控制规律,但总体上均以沥青化-褪色化为主要围岩蚀变特征。库车前陆盆地中新统康村组河湖相灰绿色钙质砂岩-砂质泥灰岩系为主要赋矿岩相。库车滴水铜矿床受秋立塔克复背斜的次级米斯坎塔格背斜控制,并叠加逆冲断层作用。复式冲断褶皱构造系统是富烃类还原性盆地流体的主要圈闭构造。

## 5 结 语

(1)以西南天山造山带为核心,塔西地区前陆盆地、山间盆地和后陆盆地对于砂砾岩型铜铅锌-铀矿床具有不同控制作用。萨热克式砂砾岩型铜矿赋存在其北侧托云中—新生代后陆盆地系统的次级盆地(萨热克巴依中生代山间拉分断陷盆地),含矿岩相为上侏罗统库孜贡苏组上段早地扇扇中亚相紫红色铁质杂砾岩。其南侧的前陆盆地系统具有EW向分段特征,乌拉根砂砾岩型铅锌矿赋存在乌拉根前陆盆地中下白垩统克孜勒苏群顶部与古近系底部,巴什布拉克大型砂岩型铀矿床赋存在克孜勒苏群中。在周缘前陆盆地系统中,古近系顶部和新近系渐新统一中新统为砂岩型铜矿床赋存层位。

(2)富烃类还原性盆地流体识别构造岩相学标志为沥青化蚀变相、沥青化-褪色化蚀变带、碎裂岩化相和沥青化蚀变相多重耦合结构。地球化学岩相学标志包括富含有机碳,矿物包裹体中含有含烃盐水、气态烃-液态烃-气液态烃、轻质油和沥青等有机质类包裹体,低盐度和中盐度成矿流体,Cu-Ag-Mo 同体共生矿体,氧化相铜、硫化相铜和钼硫化物等。

(3)砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制主要包括:①同生断裂带由走滑拉分断陷发生构造反转后,转变为挤压收缩体制,即烃源岩大规模生烃-排烃机制;②反转构造带、区域性不整合面、滑脱构造带、高孔隙度和渗透率砾岩等构造岩相带为富烃类还原性盆地流体大规模运移构造通道;③高孔隙度和渗透率砾岩类上、下围岩为低渗透率泥质粉砂岩和含膏泥岩,为岩相岩性圈闭构造岩相学标志;④富烃类还原性盆地流体大规模富烃类还原性盆地

流体与含铜紫红色铁质杂砾岩(氧化相铜)多相盆地流体混合可能是砂砾岩型铜铅锌矿床大规模富集成矿机制,油田卤水和富烃类还原性盆地流体多期次混合可能是形成砂砾岩型铅锌矿床和砂岩型铀矿富集成矿机制。

## 参考文献:

## References:

- [1] CAILTEUX J L H, KAMPUNZU A B, LEROUGE C, et al. Genesis of Sediment-hosted Stratiform Copper-cobalt deposits, Central African Copperbelt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 42(1/2/3/4/5): 134-158.
- [2] ABRAMOV B N. Petrochemistry of the Paleoproterozoic Udokan Copper-bearing Sedimentary Complex [J]. Lithology and Mineral Resources, 2008, 43(1): 37-43.
- [3] PASAVA J, OSZCZEPALSKI S, DU A D. Re-Os Age of Non-mineralized Black Shale from the Kupferschiefer, Poland, and Implications for Metal Enrichment [J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(2): 189-199.
- [4] 刘增仁, 漆树基, 田培仁, 等. 塔里木盆地西北缘新生代砂砾岩型铅锌铜矿赋矿层位的时代厘定及意义 [J]. 矿产勘查, 2014, 5(2): 149-158.  
LIU Zeng-ren, QI Shu-ji, TIAN Pei-ren, et al. Determination of Age and Its Significance of Ore-bearing Strata of the Meso-Cenozoic Glutenite Type Lead-zinc-copper Deposit in the Northwestern Edge of Tarim Basin, Xinjiang [J]. Mineral Exploration, 2014, 5(2): 149-158.
- [5] 祝新友, 王京彬, 王玉杰, 等. 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, 2011, 2(1): 28-35.  
ZHU Xin-you, WANG Jing-bin, WANG Yu-jie, et al. The Geologic Characteristics of Sareke Copper Deposit, Xinjiang, China: Ore Genesis Related to Basin Brines [J]. Mineral Exploration, 2011, 2(1): 28-35.
- [6] 方维萱, 贾润幸, 王磊, 等. 新疆萨热克大型砂砾岩型铜多金属矿床的成矿控制规律 [J]. 矿物学报, 2015, 35(增): 202-204.  
FANG Wei-xuan, JIA Run-xing, WANG Lei, et al. Ore-controlling Regularities for the Sareke Large-size Sandstone-conglomerate-type Copper Deposit in Xinjiang [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S): 202-204.
- [7] 刘增仁, 田培仁, 祝新友, 等. 新疆乌拉根铅锌矿成矿地质特征及成矿模式 [J]. 矿产勘查, 2011, 2(6): 669-680.  
LIU Zeng-ren, TIAN Pei-ren, ZHU Xin-you, et al. Ore-forming Geological Characteristics and Metallogenic Model on Wulagen Lead-zinc Deposit, Xinjiang [J]. Mineral Exploration, 2011, 2(6): 669-680.
- [8] 韩凤彬, 陈正乐, 刘增仁, 等. 西南天山乌拉根铅锌矿床有机地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2013, 32(3): 591-602.  
HAN Feng-bin, CHEN Zheng-le, LIU Zeng-ren, et al. Organic Geochemistry of Wulagen Pb-Zn Deposit in Southwest Tianshan Mountains and Its Implications [J]. Mineral Deposits, 2013, 32(3): 591-602.
- [9] 董新丰, 薛春纪, 李志丹, 等. 新疆喀什凹陷乌拉根铅锌矿床有机质特征及其地质意义 [J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 129-145.  
DONG Xin-feng, XUE Chun-ji, LI Zhi-dan, et al. Characteristics and Geological Significances of the Organic Matter in the Wulagen Zn-Pb, Kashi Sag, Xinjiang [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(1): 129-145.
- [10] 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 等. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因 [J]. 地质学报, 2010, 84(5): 694-702.  
ZHU Xin-you, WANG Jing-bin, LIU Zeng-ren, et al. Geologic Characteristics and the Genesis of the Wulagen Lead-zinc Deposit, Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(5): 694-702.
- [11] 谢世业, 莫江平, 杨建功, 等. 新疆乌恰县乌拉根新生代热卤水喷流沉积铅锌矿地质特征及成矿模式 [J]. 矿床地质, 2002, 21(增): 495-498.  
XIE Shi-ye, MO Jiang-ping, YANG Jian-gong, et al. Geological Characteristics and Ore Forming Mechanism of Wulagen Hot Brine Exhalogene Lead-zinc Deposit of Cenozoic Era, Wuqia, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S): 495-498.
- [12] 方维萱, 韩润生. 云贵高原-造山带-沉积盆地的构造演化与成岩成矿作用(代序) [J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 729-732.  
FANG Wei-xuan, HAN Run-sheng. The Geotectonic Evolutions of the Yungui Plateau-orogenic Belt-sedimentary Basin and Its Diagenesis-mineralization (An Article Used in Lieu of a Preface) [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(4): 729-732.
- [13] 吴海枝, 韩润生, 吴鹏, 等. 滇中郝家河砂岩型铜矿床成岩期与改造期热液蚀变作用: 来自组分迁移计算的证据 [J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 866-878.  
WU Hai-zhi, HAN Run-sheng, WU Peng, et al. Hydrothermal Alteration During Diagenesis and Reworked Periods in the Haojiahe Sandstone-type Copper De-



- posit, Yunnan, Southwest China: Evidence from Mass Balance Calculation of Migrated Components[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(4): 866-878.
- [14] 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(1): 1-23.
- LIU Chi-yang. Dynamics of Sedimentary Basin and Basin Reservoir (Ore) Forming System[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2008, 30(1): 1-23.
- [15] 李忠, 高剑, 郭春涛, 等. 塔里木块体北部泥盆—石炭纪陆缘构造演化: 盆地充填序列与物源体系约束[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 35-52.
- LI Zhong, GAO Jian, GUO Chun-tao, et al. Devonian-Carboniferous Tectonic Evolution of Continental Margins in Northern Tarim Block, Northwest China: Constrained by Basin-fill Sequences and Provenance Systems[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 35-52.
- [16] 王松, 李双应, 杨栋栋, 等. 天山南缘石炭系—三叠系碎屑岩成分及其对物源区大地构造属性的指示[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2453-2465.
- WANG Song, LI Shuang-ying, YANG Dong-dong, et al. Compositions of Carboniferous-Triassic Clastic Rocks in the Southern Margin of the Tianshan, Northwest China: Implications for the Evolution of the Provenance Tectonic Attributes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2453-2465.
- [17] 罗金海, 车自成, 李继亮. 中亚及中国西部侏罗纪沉积盆地的构造特征[J]. *地质科学*, 2000, 35(4): 404-413.
- LUO Jin-hai, CHE Zi-cheng, LI Ji-liang. Structural Features of the Jurassic Basins in Western China and Middle Asia[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(4): 404-413.
- [18] 李江海, 蔡振忠, 罗春树, 等. 塔拉斯—费尔干纳断裂带南端构造转换及其新生代区域构造响应[J]. *地质学报*, 2007, 81(1): 23-31.
- LI Jiang-hai, CAI Zhen-zhong, LUO Chun-shu, et al. The Structural Transfer at the Southern End of Talas-Ferghana Fault and Its Regional Tectonic Response in the Cenozoic[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(1): 23-31.
- [19] 乔秀夫, 李海兵, 王思恩, 等. 新疆境内塔拉斯—费尔干纳断裂早侏罗世走滑的古地震证据[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 721-730.
- QIAO Xiu-fu, LI Hai-bing, WANG Si-en, et al. Paleoseismic Evidence of the Talas-Ferghana Strike-slip Fault During Early Jurassic, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 721-730.
- [20] 邹华耀, 吴智勇. 镜质体反射率在重建盆地古地温中的应用: 中国东部、西部中、新生代沉积盆地古地温特征[J]. *沉积学报*, 1998, 16(1): 112-119.
- ZOU Hua-yao, WU Zhi-yong. Application of Vitrinite Reflectance in Reconstruction of Paleotemperature: Evolution of Paleotemperature in the Eastern and Western Mesozoic-Cenozoic Sedimentary Basins, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 112-119.
- [21] 李荣西, 张锡云, 金奎励. 用镜质体反射率重建沉积盆地构造演化特征[J]. *矿物学报*, 2001, 21(4): 705-709.
- LI Rong-xi, ZHANG Xi-yun, JIN Kui-li. Application of Vitrinite Reflectance to Reconstruction of the Tectonic Features of Bohai Gulf Basin[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(4): 705-709.
- [22] 任战利, 赵重远, 张军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. *沉积学报*, 1994, 12(1): 56-65.
- REN Zhan-li, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Jun, et al. Research on Paleotemperature in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(1): 56-65.
- [23] 任战利, 田涛, 李进步, 等. 沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地热演化史恢复研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(3): 1-20.
- REN Zhan-li, TIAN Tao, LI Jin-bu, et al. Review on Methods of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins and Thermal Evolution History Reconstruction of Superimposed Basins[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(3): 1-20.
- [24] 李成, 王良书, 郭随平, 等. 塔里木盆地热演化[J]. *石油学报*, 2000, 21(3): 13-17.
- LI Cheng, WANG Liang-shu, GUO Sui-ping, et al. Thermal Evolution in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(3): 13-17.
- [25] 胡国艺, 张水昌, 田华, 等. 不同母质类型烃源岩排气效率[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(1): 45-52.
- HU Guo-yi, ZHANG Shui-chang, TIAN Hua, et al. Gas Relative Expulsion Efficiency of Source Rocks with Different Types of Kerogen[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(1): 45-52.
- [26] 胡国艺, 李谨, 李志生, 等. 煤成气轻烃组分和碳同位素分布特征与天然气勘探[J]. *石油学报*, 2010, 31(1): 42-48.
- HU Guo-yi, LI Jin, LI Zhi-sheng, et al. Composition and Carbon Isotopic Distribution Characteristics of Light Hydrocarbon in Coal-derived Gas and Natural Gas Exploration[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 42-48.
- [27] 张中宁, 刘文汇, 郑建京, 等. 塔里木盆地深层烃源岩

- 可溶有机组分的碳同位素组成特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 769-773.
- ZHANG Zhong-ning, LIU Wen-hui, ZHENG Jian-jing, et al. Characteristics of Carbon Isotopic Composition of Soluble Organic Components of Deep Source Rocks in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 769-773.
- [28] 帅燕华, 邹艳荣, 彭平安. 塔里木盆地库车坳陷煤成气甲烷碳同位素动力学研究及其成藏意义[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 469-475.
- SHUAI Yan-hua, ZOU Yan-rong, PENG Ping-an. Kinetics Modeling of Stable Carbon Isotopes of Coal-generated Methane and Its Significance for Gas Accumulation in the Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geochimica, 2003, 32(5): 469-475.
- [29] 李 剑, 谢增业, 李志生, 等. 塔里木盆地库车坳陷天然气气源对比[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 29-41.
- LI Jian, XIE Zeng-ye, LI Zhi-sheng, et al. Comparisons on Sources of Nature Gas in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 29-41.
- [30] 张俊武, 邹华耀, 李平平, 等. 含烃盐水包裹体 PVT 模拟新方法及其在气藏古压力恢复中的应用[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 102-108.
- ZHANG Jun-wu, ZOU Hua-yao, LI Ping-ping, et al. A New PVT Simulation Method for Hydrocarbon-containing Inclusions and Its Application to Reconstructing Paleo-pressure of Gas Reservoirs[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(1): 102-108.
- [31] 李厚民, 毛景文, 张长青. 滇黔交界地区玄武岩铜矿流体包裹体地球化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 14-23.
- LI Hou-min, MAO Jing-wen, ZHANG Chang-qing. Geochemistry of Fluid Inclusions of the Basalt Copper Deposits in Adjacent Area of Northeastern Yunnan and Western Guizhou, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 14-23.
- [32] 李志丹, 薛春纪, 辛 江, 等. 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, 2011, 25(4): 720-729.
- LI Zhi-dan, XUE Chun-ji, XIN Jiang, et al. Geological Characteristics and S-, Pb-isotope Geochemistry of Sareke Copper Deposit in Wuqia County, Xinjiang[J]. Geoscience, 2011, 25(4): 720-729.
- [33] 崔晓琳, 刘文元, 刘 羽, 等. 紫金山高硫型金铜矿的矿床地质研究进展[J]. 矿物学报, 2015, 35(2): 167-177.
- CUI Xiao-lin, LIU Wen-yuan, LIU Yu, et al. Research Progress on Ore Geology of Zijinshan High-sulphidation Au-Cu Deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(2): 167-177.
- [34] 张 乾, 朱笑青, 张正伟, 等. 贵州威宁地区峨眉山玄武岩型自然铜-辉铜矿矿床的成矿前景[J]. 矿物学报, 2007, 21(3/4): 379-383.
- ZHANG Qian, ZHU Xiao-qing, ZHANG Zheng-wei, et al. Discussion on the Ore-forming Prospecting of the Emeishan Basalt-type Native-chalcocite Deposits in the Weining District of Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 21(3/4): 379-383.
- [35] 方维萱. 地球化学岩相学类型及其在沉积盆地分析中应用[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 996-1007.
- FANG Wei-xuan. Types of Geochemical Lithofacies and Their Applications in Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(5): 996-1007.
- [36] 薛春纪, 高永宝, CHI Guo-xiang, 等. 滇西北兰坪金顶可能的古油气藏及对铅锌大规模成矿的作用[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 221-229.
- XUE Chun-ji, GAO Yong-bao, CHI Guo-xiang, et al. Possible Former Oil-gas Reservoir in the Giant Jinding Pb-Zn Deposit, Lanping, NW-Yunnan: The Role in the Ore Accumulation[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(3): 221-229.
- [37] 高永宝, 薛春纪, 曾 荣. 兰坪金顶铅锌硫化物成矿中硫化氢成因[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(4): 367-372.
- GAO Yong-bao, XUE Chun-ji, ZENG Rong. Forming Mechanism of H<sub>2</sub>S in the Jinding Pb-Zn Deposit, Lanping Basin, Northwest Yunnan Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(4): 367-372.
- [38] 王新利, 杨树生, 庞艳春, 等. 云南金顶铅锌矿床成矿物质来源及有机成矿作用[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(4): 376-382.
- WANG Xin-li, YANG Shu-sheng, PANG Yan-chun, et al. Ore Sources and Organic Mineralization in the Jinding Lead-zinc Deposit, Yunnan Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(4): 376-382.
- [39] 王 丹, 吴柏林, 寸小妮, 等. 柴达木盆地多种能源矿产同盆共存及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 55-57.
- WANG Dan, WU Bai-lin, CUN Xiao-ni, et al. Coexistence of Multiple Energy Minerals in Qaidam Basin and Its Geological Significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(3): 55-57.

- [40] 刘池洋,王建强,赵红格,等. 沉积盆地类型划分及其相关问题讨论[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 1-26.  
LIU Chi-yang, WANG Jian-qiang, ZHAO Hong-ge, et al. The Classification of Sedimentary Basins and Discussion on Relevant Issues[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 1-26.
- [41] 方维萱,胡瑞忠,谢桂青. 云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(1): 28-36.  
FANG Wei-xuan, HU Rui-zhong, XIE Gui-qing, et al. Tectonolithostratigraphic Units of the Ailaoshan Area in Yunnan, China and Their Implications of Tectonic Evolution[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2002, 26(1): 28-36.
- [42] 方维萱,黄转盈,唐红峰,等. 东天山库姆塔格—沙泉子晚石炭世火山-沉积岩相学地质地球化学特征与构造环境[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 529-544.  
FANG Wei-xuan, HUANG Zhuan-ying, TANG Hong-feng, et al. Lithofacies, Geological and Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Late Carboniferous Volcanic-sedimentary Rocks in the Kumtag-Shaquanzi Area, East Tianshan[J]. Geology in China, 2006, 33(3): 529-544.
- [43] 贾承造. 环青藏高原巨型盆地体系构造与塔里木盆地油气分布规律[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 1-9.  
JIA Cheng-zao. The Structures of Basin and Range System Around the Tibetan Plateau and the Distribution of Oil and Gas in the Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 1-9.
- [44] 刘家铎,王峻,王易斌,等. 塔里木盆地喀什北地区白垩系层序岩相古地理特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(1): 1-14.  
LIU Jia-duo, WANG Jun, WANG Yi-bin, et al. Sequence-lithology Palaeogeography Characteristics of Cretaceous in Northern Kashi Area of Tarim Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(1): 1-14.
- [45] 阿种明,李清海,张广辉. 塔里木盆地喀什凹陷北缘铀成矿条件分析[J]. 新疆地质, 2008, 26(4): 391-395.  
A Zhong-ming, LI Qing-hai, ZHANG Guang-hui. Analysis of Uranium Metallogenic Condition in Northern Kashgar Sag, Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(4): 391-395.
- [46] 韩凤彬,陈正乐,陈柏林,等. 新疆喀什凹陷巴什布拉克铀矿流体包裹体及有机地球化学特征[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 985-998.  
HAN Feng-bin, CHEN Zheng-le, CHEN Bai-lin, et al. Fluid Inclusion and Organic Geochemistry Characteristics of the Bashibulake Uranium Deposit in Kashi Sag, Xinjiang[J]. Geology in China, 2012, 39(4): 985-998.
- [47] 刘章月,秦明宽,蔡根庆,等. 新疆巴什布拉克地区有机地球化学特征及其对铀成矿的控制[J]. 地学前缘, 2015, 22(4): 212-222.  
LIU Zhang-yue, QIN Ming-kuan, CAI Gen-qing, et al. The Organic Geochemical Characteristics and Its Controls on Uranium Mineralization in the Bashibulake Area, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(4): 212-222.
- [48] 李盛富,陈洪德,蔡根庆,等. 巴什布拉克铀矿床物质成分[J]. 矿物学报, 2015, 35(3): 365-372.  
LI Sheng-fu, CHEN Hong-de, CAI Gen-qing, et al. Material Composition in Bashibulake Uranium Deposit [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(3): 365-372.
- [49] 方维萱. 论热液角砾岩构造系统及研究内容、研究方法和岩相学填图应用[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(2): 237-265.  
FANG Wei-xuan. On Tectonic System of Hydrothermal Breccia: Objective, Methodology and Lithofacies-mapping Applications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(2): 237-265.
- [50] 汤良杰,李萌,杨勇,等. 塔里木盆地主要前陆冲断带差异构造变形[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(1): 46-56.  
TANG Liang-jie, LI Meng, YANG Yong, et al. Differential Structural Deformation of Main Foreland Thrust Belts in Tarim Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(1): 46-56.
- [51] 卓勤功,李勇,宋岩,等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 42-47.  
ZHUO Qin-gong, LI Yong, SONG Yan, et al. Evolution of Paleogene Saline Deposits and Effectiveness of Traps in Kelasu Tectonic Zone, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(1): 42-47.
- [52] 周新源,苗继军. 塔里木盆地西北缘前陆冲断带构造分段特征及勘探方向[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 10-18.  
ZHOU Xin-yuan, MIAO Ji-jun. The Tectonics Segmentation and Hydrocarbon Exploration of the Forland Thrust Belt in the Northwest Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 10-18.