

文章编号 1258-7106(2009)05-0663-10

新疆东天山地区白山钼矿床的成因分析*

张达玉¹, 周涛发^{1,2}, 袁峰^{1,2}, 范裕¹, 刘帅¹, 屈文俊³

(1 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘 要 白山钼矿床位于东天山觉罗塔格构造带的东部, 赋矿围岩为下石炭统干墩组的黑云母长英质角岩, 矿化石英网脉发育。文章测得含矿石英脉中的石英流体包裹体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $9.1\text{‰} \sim 10.0\text{‰}$, 平均 9.425‰ , 与石英相平衡的水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $3.357\text{‰} \sim 4.257\text{‰}$, 平均为 3.682‰ ; $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 值为 $-105\text{‰} \sim -69\text{‰}$, 平均 -89.25‰ 。氢氧同位素组成显示白山钼矿床的成矿流体是岩浆水与发生了水-岩作用的大气降水的混合热液, 含矿流体以岩浆水为主, 演化大气降水的加入是成矿物质沉淀的重要因素。测得辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 $(227.7 \pm 4.3) \text{Ma}$ (MSWD = 0.32), 指示白山钼矿床形成于中三叠世。矿床地质特征和地球化学特征指示白山钼矿床是斑岩型矿床, 推测成矿物质主要来自于矿体下部的矿化花岗岩(斑)岩体。此外, 作者还探讨了白山钼矿床的成矿背景, 认为矿床形成于挤压的构造环境, 是受到同时代古特提斯洋闭合的陆内远程效应影响而产生的成岩成矿作用。

关键词 地质学; H、O 同位素; Re-Os 定年; 成矿背景; 白山钼矿床; 东天山

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

A genetic analysis of Baishan molybdenum deposit in East Tianshan area, Xinjiang

ZHANG DaYu¹, ZHOU TaoFa^{1,2}, YUAN Feng^{1,2}, FAN Yu¹, LIU Shuai¹ and QU WenJun³

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract

The Baishan molybdenum deposit is located in the eastern Jueluotag tectonic belt of the East Tianshan Mountains. The wall rocks are biotite-felsic hornstone with well-developed mineralized quartz veins, belonging to Lower Carboniferous Gandun Formation (C_{1g}). The H, O compositions of the hydrothermal fluids in the quartz veins are as follows: $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values are $9.1\text{‰} \sim 10.0\text{‰}$ with an average of 9.425‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ balanced with quartz are $3.357\text{‰} \sim 4.257\text{‰}$ with an average of 3.682‰ , and $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ are $-105\text{‰} \sim -69\text{‰}$, with an average of -89.25‰ . Characteristics of H, O isotopes indicate that the ore-forming hydrothermal fluid was dominated by magmatic water with the participation of some evolutionary meteoric water that had experienced the water-rock interaction. The magmatic water supplied the main metallogenic materials, and the evolutionary meteoric water served as an important factor for the precipitation of the metallogenic materials. The Re-Os isochronal age of molybdenites is $(227.7 \pm 4.3) \text{Ma}$ (MSWD = 0.32), suggesting that the mineralization of the ore deposit took place in Middle Triassic. These geological and geochemical charac-

* 本研究得到国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411304、2001CB409800)、国家自然科学基金项目(40772057)和安徽省优秀青年基金项目(08040106907)共同资助

第一作者简介 张达玉,男,1985年生,博士生,矿物学岩石学矿床学专业。Email: zhangdayu1985@126.com

通讯作者: 周涛发,男,1964年生,教授,博导,矿物学岩石学矿床学专业。Email: tfzhou@hfut.edu.cn

收稿日期 2009-07-10; 改回日期 2009-08-08。张绮玲编辑。

teristics imply that the Baishan Mo deposit is a porphyry deposit, and its metallogenic materials mainly came from deep granitic rock. This paper deals with metallogenic background, and the authors hold that the Baishan molybdenum deposit was formed in a compression environment after the post-collisional stage, and its mineralization was controlled by the distant effect of the Paleo-Tethys Ocean in Triassic. This paper has supplied a solid foundation for further researches on mineralization of granitoids which intruded into the same tectonic background in Jueluotag block as well as in East Tianshan area.

Key words: geology, H, O isotope, Re-Os isotopic dating, metallogenic background, Baishan molybdenum deposit, East Tianshan area

新疆东天山地区在晚古生代经历了后碰撞构造演化阶段(毛景文等, 2002; Mao et al., 2005; 王京彬等, 2006; Zhu, 2007; Han et al., 2006; 姜峰等, 2007; Zhou et al., 2008), 三叠纪时进入了板内演化阶段(顾连兴等, 2006; 王京彬等, 2006; 周涛发等, 待刊)。有研究认为北疆地区三叠纪的构造热事件及地壳变动与古特提斯洋的闭合产生的陆内远程效应有关(李锦轶等, 2000; 郭召杰等, 2002; 陈正乐等, 2006; 许志琴等, 2006)。白山钼矿床位于东天山地区的觉罗塔格构造带内, 自1988年被发现以来, 已进行了矿床地质特征(贺静等, 2002; 邓刚等, 2004)、蚀变分带、找矿标志(邓刚等, 2004)、成岩成矿地球化学(周济元等, 1996; Nie et al., 2003)和同位素年代学(周济元等, 1996; 李华芹等, 2005, 2006; Zhang et al., 2005)等方面的研究。关于白山钼矿床的成矿时代有石炭纪(周济元等, 1996)、中三叠世(Zhang et al., 2005)和中三叠世与早侏罗世两期成矿(李华芹等, 2005, 2006)等多种说法, 对白山钼矿床为斑岩型还是石英脉型矿床也存在争议(邓刚等, 2003; 2004)。因此, 该矿床确切的成矿时代及矿床成因等都有待进一步确定。开展白山钼矿成矿年代和矿床成因的研究将为东天山觉罗塔格地区构造演化及成岩成矿的格架的建立提供

重要依据。笔者对该矿床进行了详细的地质工作, 采集典型样品进行了岩矿鉴定、氢氧同位素分析和 Re-Os 精确成矿年代测试, 进一步确定该矿床的成矿年代和矿床成因。并结合区域演化特点, 对白山钼矿床的形成背景及其与觉罗塔格地区构造演化的关系进行了分析探讨。

1 地质特征

1.1 区域地质特征

白山钼矿床是康古尔-黄山成矿带的东延部分, 区域上隶属于塔里木板块北缘觉罗塔格石炭纪岛弧带(图1)。区内出露的地层有上古生界泥盆系大南湖组、下石炭统干墩组以及第四系冲积层。构造上具有多期性特征, 褶皱发育, 如白山北向斜(图2)。断裂以近东西向、北东东向为主, 自北向南主要有大草滩断裂、康古尔-黄山-镜儿泉深大断裂、雅满苏断裂等。岩浆岩出露广泛, 以酸性花岗岩类为主, 主要分布在康古尔-黄山深大断裂和干墩大断裂带; 次为基性-超基性岩体, 一般规模较小, 区内脉岩发育, 主要分布在韧性剪切带和侵入岩体的周围。

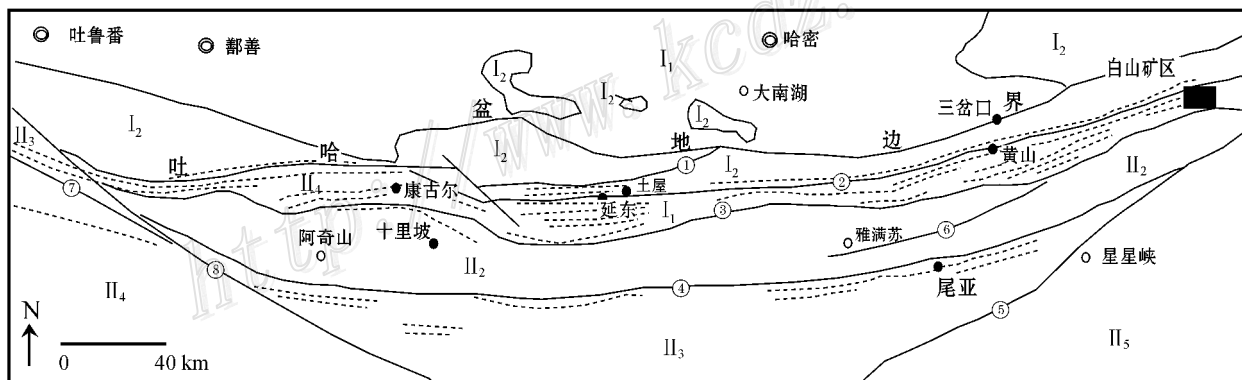


图1 觉罗塔格地区构造略图(据弓小平等, 2004 修改)

构造单元: I—哈萨克斯坦板块, I₁—吐哈地块, I₂—哈尔里克-大南湖岛弧带; II—塔里木板块, II₁—康古尔-黄山韧性剪切带, II₂—阿奇山-雅满苏岛弧带, II₃—中天山地块, II₄—南天山晚古生代弧后盆地, II₅—北山裂谷; 断裂: ①大草滩断裂, ②康古尔塔格-黄山深大断裂, ③雅满苏断裂, ④阿奇库都克-沙泉子断裂, ⑤星星峡断裂, ⑥托克逊-干沟断裂, ⑦中天山南缘断裂, ⑧白干湖断裂

Fig. 1 Sketch tectonic map of Jueluotag area (modified after Gong et al., 2004)

Tectonic units: I—Kazakhstan plate, I₁—Turpan-Kami basin, I₂—Harik-Dananhui island arc; II—Tarim plate, II₁—Kangur-Huangshan ductile shear zone, II₂—Aqishan-Yamansu island arc, II₃—Mid-Tianshan block, II₄—Mid-Tianshan Late Paleozoic back-arc basin, II₅—Beishan rift. **Fault:** ① Dacatan fault, ② Kangur-Huangshan fault, ③ Yamansu fault, ④ Aqikuduk-Shaquanzi fault, ⑤ Xingxingxia fault, ⑥ Tuokexun-Gangou fault, ⑦ South Mid-Tianshan fault, ⑧ Baiganhu fault

白山矿区内出露的地层主要为下石炭统干墩组(C_1g)，可分为南、北 2 部分(图 2)南部是深海-半深海相的碳硅质碎屑岩建造，主要岩性为含碳黑云母微晶片岩(C_{1g}^1)、绿帘石化片岩(C_{1g}^2)等；北部是海底喷溢相细碧岩-石英角斑岩建造，主要岩性有黑云斜长角岩(C_{1g}^3)、二云母石英微晶片岩(C_{1g}^4)等；另可见有少量绿帘石化长英质角岩、黑云母长英质角岩等出露于矿区中部。白山矿区构造格局总体上受北部 EW 向干墩大断裂控制，其派生的次级断裂发育，走向 NEE 向，是区内的主导构造。

白山矿区内岩浆岩发育，主要为花岗岩类。自西向东出露有白山西、狼井和红柳沟等岩体(图 2b)，且在矿区的南部和东部均发育有大量的花岗斑岩脉(图 2a)。白山西岩体为黑云母二长花岗岩，出露于矿床西南侧约 1.2 km 处，狼井岩体为中细粒结构的花岗岩，位于矿床南侧约 5 km 处，岩体中有基性岩脉穿插，红柳沟岩体为黑云母花岗岩，位于矿床东侧约 10 km 处。花岗斑岩脉或岩墙穿切干墩组下部地层，一般脉宽为 3~4 m，延伸数十米。这些岩体或岩脉均与石炭纪干

墩组(C_1g)地层侵入接触，界线清楚。值得注意的是，在矿区的钻孔(编号 ZK15-1)约 580 m 深度处见团斑状、巨斑状的钾化蚀变岩，为花岗(斑)岩的蚀变产物，指示了矿体深部存在花岗(斑)岩体(Zhang et al., 2005)。白山地区花岗岩中成矿元素 Mo 含量高于花岗岩的克拉克值 7~8 倍，显示了区内岩体富钼的特点(邓刚等, 2003)。矿区中的岩石蚀变类型复杂多样，与钼矿化关系比较密切的蚀变为硅化、钾化、黄铁矿化、碳酸盐化，其次为高岭石化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、沸石化等，其中以硅化蚀变最为强烈。围岩普遍具有热液接触变质现象，形成了黑云母长英质角岩。

1.2 矿床地质特征

矿床赋存于下石炭统干墩组第二岩性段黑云微晶片岩及黑云母长英质角岩内，呈近东西向展布，长约 3 km，宽 100~700 m(图 2)。矿化带内尤其在矿体产出部位石英网脉密集，多出现含辉钼矿的石英大脉，以钼矿体为中心向两侧，石英脉渐变稀疏以至消失。共圈出钼矿体 17 个，其中 P4、P5 为主矿体，总体走向为近东西向，倾向北，倾角 63~65°，其次为小矿

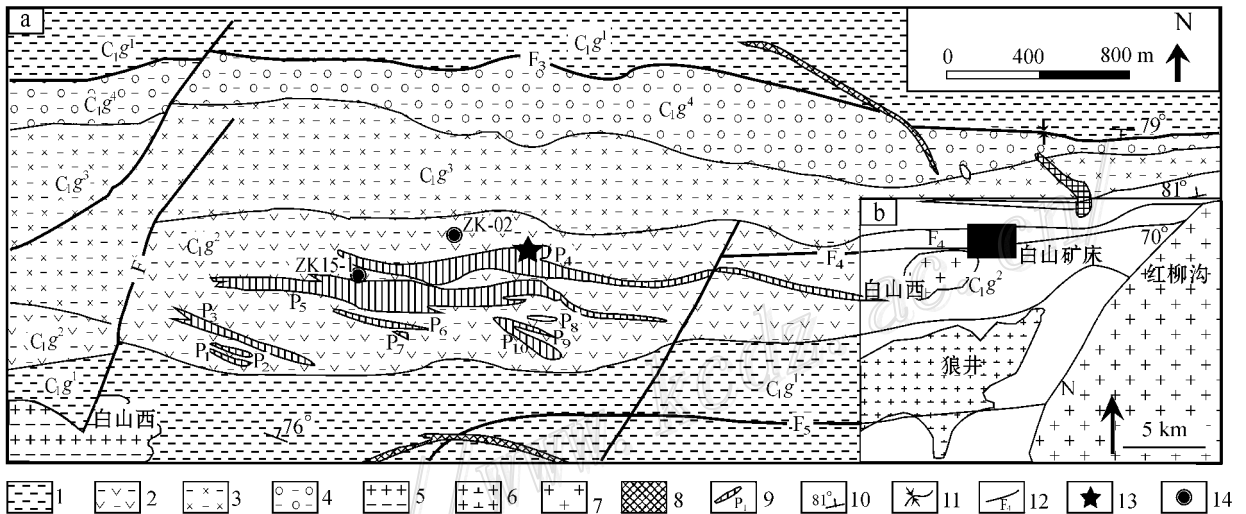


图 2 白山钼矿区地质略图(据李华芹等, 2006 修改)

a. 白山矿床地质图；b. 白山矿区岩体分布图

1—干墩组第一岩性段含碳黑云母微晶片岩；2—干墩组第二岩性段黑云母微晶片岩、绿帘石化片岩及少量黑云母长英质角岩；3—干墩组第三岩性段黑云斜长角岩、黝帘石化斜长角岩；4—干墩组第四岩性段碳质微晶片岩夹条带状黑云母变粒岩和二云母微晶片岩；5—黑云母二长花岗岩；6—花岗岩；7—黑云母花岗岩；8—花岗斑岩(脉)；9—矿体及编号；10—产状；11—向斜；12—断层；13—本文采样点位置；14—钻孔位置

Fig. 2 Geological sketch map of the Baishan molybdenum ore district(modified after Li et al., 2006)

a. Geological map of the Baishan molybdenum deposit ; b. Distribution of granitoid rocks in the Baishan ore district

1—1st lithologic section of Gandun Formation(carbon-bearing biotite microcrystalline schist), 2—2nd lithologic section of Gandun Formation(biotite microcrystalline schist , actinolite schist and biotite felsic hornstone), 3—3rd lithologic section of Gandun Formation(actinolite schist , biotite-plagioclase hornstone , zoisitized plagioclase hornstone), 4—4th lithologic section of Gandun Formation(carbonaceous microcrystalline schist intercalated with banded biotite leptynite and two-mica microcrystalline schist); 5—Biotite adamellite ; 6—Granite ; 7—Biotite plagioclase granite ; 8—Granite porphyry ; 9—Ore body and its serial number ; 10—Attitude ; 11—Syncline ; 12—Fault ; 13—Sampling location ; 14—Drill hole

体,走向 NWW,倾向 NNE,倾角 $55 \sim 70^\circ$,矿体形态简单,主要呈透镜状,产状与围岩基本一致或者小角度相交,延伸稳定,最大厚度为 123.9 m。钻探资料表明,矿化和蚀变的强度随深度增加而增强,而且在其深部发现了黄铜矿。

矿区内矿化脉的矿物组合类型包括:黄铜矿-辉钼矿-石英脉(图 3a、3b)、辉钼矿-黄铁矿-斜长石-石英脉(图 3c)、辉钼矿-黄铁矿-石英脉(图 3e)等,可见少量细小(宽度 $< 5\text{ mm}$)的辉钼矿单矿物脉体。各种矿化脉相互交切穿插呈网脉状,

普遍被后期发育的碳酸盐脉穿切(图 3d)。矿石结构有叶片状结构、他形粒状结构、自形-半自形粒状结构、共结边结构、穿插交代结构、包含结构等,矿石构造以脉状构造、浸染状构造为主,可见斑杂状构造、角砾状构造等,根据结构构造特征可将其归为细脉-浸染状矿石。矿石矿物主要赋存于石英脉中,有辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿及少量的钛铁矿、磁铁矿、方铅矿和白铁矿。脉石矿物有长石、石英、黑云母、绿泥石、绿帘石、绢云母、方解石及少量楣

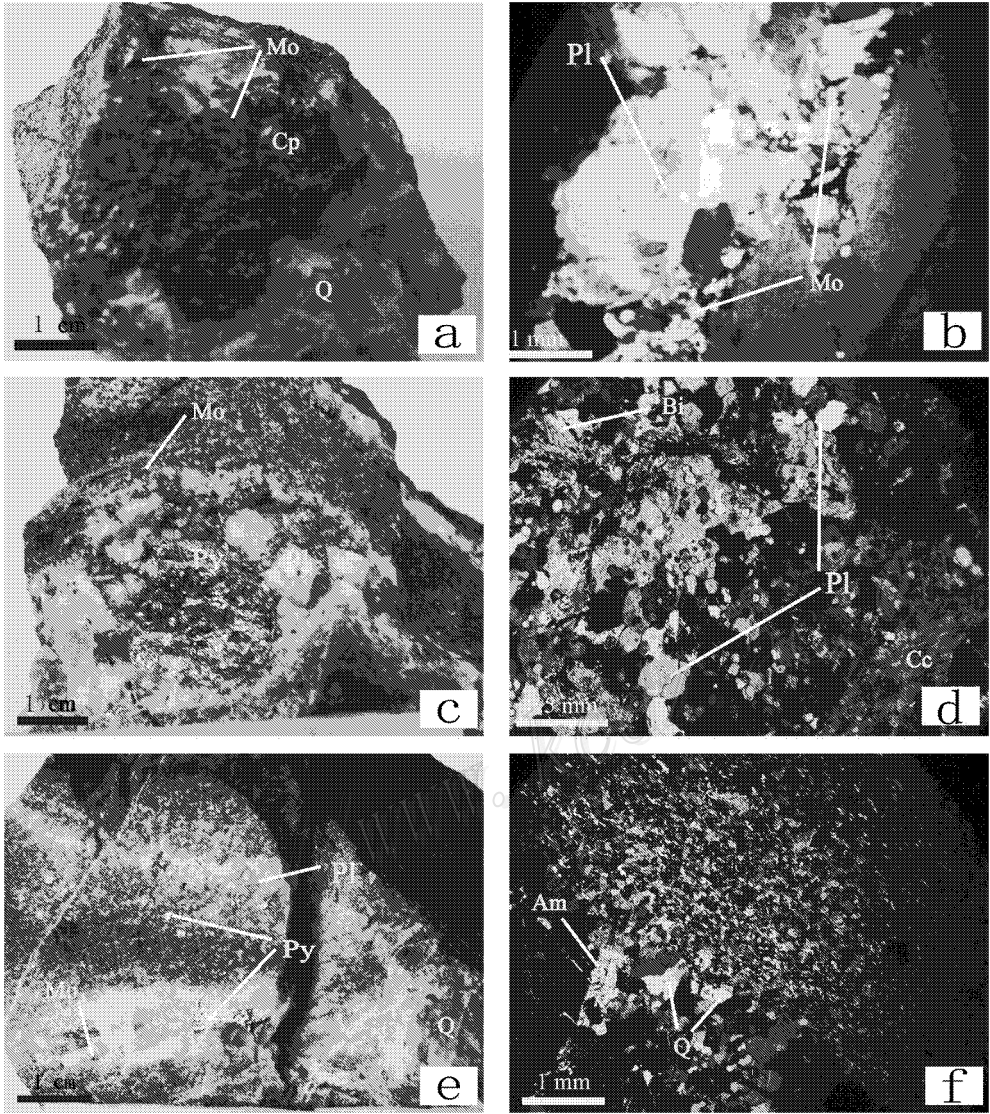


图 3 白山钼矿含矿石英脉特征照片

a. 黄铜矿-辉钼矿-石英脉; b. 石英脉中的辉钼矿与斜长石; c. 辉钼矿-黄铁矿-斜长石-石英脉; d. 碳酸盐化、碳酸盐脉穿切石英脉; e. 辉钼矿-黄铁矿-石英脉; f. 定向构造,岩石的硅化与绢云母化。矿物代号:Am—角闪石;Bi—黑云母;Cc—方解石;Cp—黄铜矿;Mo—辉钼矿;Pl—斜长石;Py—黄铁矿;Q—石英

Fig. 3 Photographs of typical ore-bearing quartz veins from the Baishan molybdenite deposit

a. Chalcopyrite-molybdenite-quartz vein; b. Molybdenite and plagioclase in quartz vein; c. Molybdenite-pyrite-plagioclase-quartz vein; d. Carbonate veins cutting through quartz vein and carbonation; e. Molybdenite-pyrite-quartz vein; f. Oriented structure, silicification and sericitization.

Am—Hornblende, Bi—Biotite, Cc—Calcite, Cp—Chalcopyrite, Mo—Molybdenite, Pl—Plagioclase, Py—Pyrite, Q—Quartz

表 1 白山钼矿床氢氧同位素组成

Table 1 H and O isotope compositions of the Baishan molybdenum deposit

样品编号	矿物组合类型	分析矿物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
BSMK-01	辉钼矿-黄铁矿-黄铜矿-石英	石英	9.4	-83	3.657
BSMK-02	辉钼矿-黄铜矿-石英	石英	9.1	-105	3.357
BSMK-03	黄铁矿-辉钼矿-斜长石-石英脉脉	石英	9.2	-100	3.457
BSMK-04	辉钼矿-黄铁矿-石英	石英	10.0	-69	4.257

测试单位：中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室。

石、锆石、磷灰石等。矿石主要有用组分为 Mo，品位变化范围为 0.030%~0.106%，平均品位 0.06%（邓刚等，2004），伴生元素组分中硫、铼含量较高，其中，铼品位在 $0.7\times10^{-6}\sim1.9\times10^{-6}$ ，平均 1.4×10^{-6} （Zhang et al.，2005）。

矿床的成矿元素具有内带为 Mo、Cu、Zn，中间为 W、Sn，外带为 Pb、Bi、Ag 等的分带富集特征（贺静等，2002）。矿化蚀变以钾长石-石英网脉带为中心，向外依次为黑云母-钾长石化带、石英-绢云母-黄铁矿化带、青磐岩化带，其中，硅化和钾化蚀变作用与成矿关系密切，具有斑岩型矿床蚀变分带特征。后期的碳酸盐化（图 3d）广泛发育，地表风化作用强烈。

2 矿床氢、氧同位素地球化学特征

为了探讨白山钼矿床的成矿流体来源，笔者进行了氢、氧同位素测试，测试样品采自白山钼矿床北部（图 2）。含石英英脉的类型有：石英-辉钼矿-黄铁矿-黄铜矿脉、石英-辉钼矿-黄铜矿脉、黄铁矿-石英-辉钼矿-斜长石脉、石英-辉钼矿-黄铁矿脉等，地质特征表明这 4 种矿物组合的含石英英脉是同一个热液成矿阶段的产物。H、O 同位素测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成，分析方法为：包裹体中的 H 用爆裂法取水，锌法制氢，氧同位素的分析方法采用 BrF_5 法，采用的国际标准为 SMOW，质谱计是 MAT253 EM， δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度分别为 2‰ 和 0.2‰。白山钼矿床的氢、氧同位素的分析结果见表 1。测得石英包裹体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 9.1‰~10.0‰，平均为 9.425‰； $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 为 -105‰~-69‰，平均为 -89.25‰。

周济元等（1996）测得白山钼矿床含石英英脉的成矿温度为 330~340℃ 左右，本文取 335℃ 作为石英-水分馏方程的测算温度。根据石英-水同位素的分馏方程（Taylor，1979），计算得到与石英相平衡的水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 3.357‰~4.257‰，平均为 3.682‰。在氢、氧同位素组成图（图 4）上，所测得样品数据点均落在岩浆水与大气降水的氢、氧同位素组成的范围之间，偏向于岩浆水一侧。

3 矿床成矿年代学特征

选取含辉钼矿的石英脉样品（图 3a、3c、3e）送至河北省

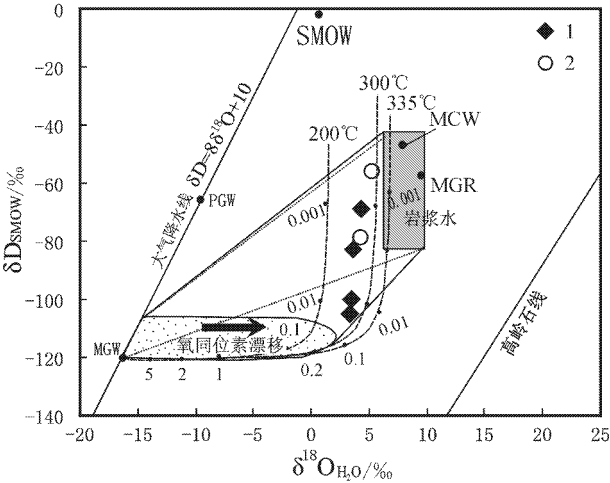


图 4 白山钼矿床的氢氧同位素组成图

（底图据 Scheppard，1986 和郑永飞等，2000 修改）

数据来源：1—本文；2—据周济元等（1996）；MGW—中生代大气降水，PGW—现代局部大气降水，MCW—初始岩浆水（据 Scheppard，1986）；MGR—花岗岩体（据魏春生等，1996）；SMOW—现代平均海水

Fig. 4 $\delta^{18}\text{O}$ water and δD diagram of the Baishan deposit
（base map modified after Scheppard，1986，
and Zheng et al.，2000）

Data source：1—This paper；2—Zhou et al.，1996；MGW—Mesozoic meteoric water，PGW—Local modern meteoric water，MCW—Primary magmatic water（from Scheppard，1986），MGR—Granite pluton（from Wei and Tu，1996），SMOW—Standard mean ocean water

廊坊市调研究所实验室进行辉钼矿单矿物分选提纯，再在双目镜下对分选出的辉钼矿单矿物手工进一步提纯，获得了 7 件足量用于 Re-Os 同位素测年分析的辉钼矿单矿物（ $\geq 0.1\text{g}$ ）样品，测年工作在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。

分析方法采用杜安道等（2001，2004）和屈文俊等（2003）所报道的方法，简述如下：首先分解样品，蒸馏分离出 OsO_4 ，再对蒸馏残液萃取分离 Re，然后对分离出的样品用 ICP-MS（等离子体质谱仪）进行同位素比值测定。采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICPMS 测定同位素比值。对于 Re 选择质量数 185、187，用 190 监测 Os。对于 Os 选择质量数为 186、187、188、189、190、192，用 185 监测 Re。本次实验标准

表 2 白山钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测试结果
Table 2 Re-Os isochronal age of molybdenum from the Baishan molybdenum deposit

样号	Re/($\mu\text{g/g}$)		d 普 Os)/(ng/g)		$^{187}\text{Re}/(\mu\text{g/g})$		$^{187}\text{Os}/(\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
	测值	σ	测值	σ	测值	σ	测值	σ	测值	σ
BSMK-01	303.3	5.7	0.007	0.016	190.6	3.6	605.3	4.8	190.3	4.2
BSMK-01	250.6	2.1	0.302	0.160	157.5	1.3	597.0	5.1	227.1	3.3
BSMK-02	222.2	2.2	0.606	0.311	139.7	1.4	526.6	4.5	225.9	3.4
BSMK-03	200.2	1.7	0.686	0.561	125.8	1.0	474.4	3.8	225.9	3.2
BSMK-04	176.0	1.6	0.302	0.479	110.6	1.0	416.3	3.3	225.5	3.2
BSMK-05	276.1	2.3	0.458	0.316	173.5	1.4	656.6	5.3	226.7	3.2
BSMK-06	139.3	1.1	0.300	0.318	87.56	0.66	329.0	2.7	225.1	3.1
BSMK-07	245.9	2.5	0.447	0.309	154.6	1.6	579.6	4.6	224.7	3.4

物质 GBW04435 (HLP) 测定结果 $\text{Re } 283.8 \pm 6.2$ 证书标准值 283.6 ± 6.2 , $^{187}\text{Os } 659.0 \pm 14$ (证书标准值 659.0 ± 14) , 同时测定 Re 与 Os 全流程空白水平分别为 0.0275 ng 和 0.0001ng 。

7 件辉钼矿样品的 Re-Os 数据及等时线年龄如表 2 和图 5 所示。所测样品均具有较高的 Re 浓度 ($139 \sim 303 \mu\text{g/g}$) 和较低的普 Os 浓度 ($0.007 \sim 0.686 \text{ ng/g}$) , ^{187}Re 在 $87.56 \sim 190.6 \mu\text{g/g}$, ^{187}Os 在 $329.0 \sim 656.6 \text{ ng/g}$ 之间。7 件样品数据所拟的等时线具有很好的线性关系 , 并测定其年龄为 $(227.7 \pm 4.3) \text{ Ma}$ (MSWD=0.32) , 初始 Os 比值为 $^{187}\text{Os}(\text{ng/g}) - 4.0 \pm 8.8$; Re-Os 模式年龄加权平均值年龄为 $(225.8 \pm 1.2) \text{ Ma}$ (MSWD=0.27) , 置信度为 95%。

4 讨论

4.1 成矿流体

成矿流体的氢、氧同位素组成既取决于原始介质水的氢、

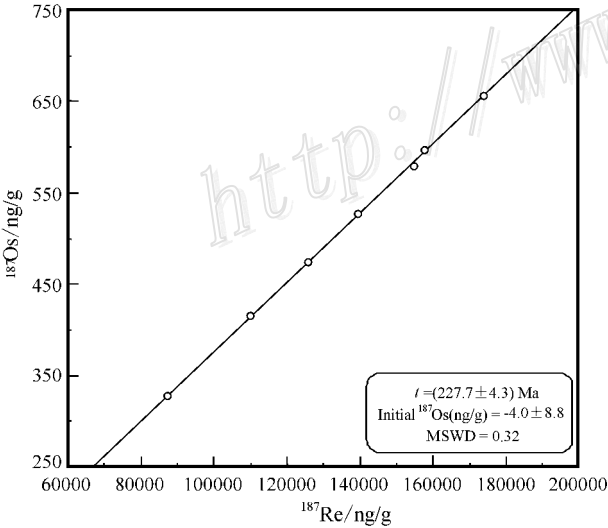


图 5 白山钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图
Fig. 5 Re-Os isochronal diagram of molybdenum from the Baishan molybdenum deposit

氧同位素组成和不同介质水的混合比例 , 又受介质水演化过程中与流经岩石间的氢、氧同位素交换作用的温度及水-岩比值 (W/R) 的影响 (周涛发等 2005) 。水-岩交换同位素理论模型能有效地提供有关成矿流体可能来源、水-岩相互作用的温度范围及水/岩比高低等重要的成矿信息 (魏春生等 1996) 。

依据本文对矿床含矿石英脉的石英流体包裹体氢、氧同位素分析结果 (表 1) 以及周济元等 (1996) 测得的 2 个数据 (图 4) , 获得白山钼矿床的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 在 $3.36\text{‰} \sim 5.33\text{‰}$ 之间 , 平均为 4.05‰ ; $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 在 $-105\text{‰} \sim -69\text{‰}$ 之间 , 平均为 -89.25‰ 。根据中生代大气降水、岩浆水及花岗岩类岩石的 H₂O 同位素特征 , 新疆地区大气降水的 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值可分别取为 -120‰ 和 -16.2‰ (张理刚等 1985) 。岩体的氢、氧同位素数据近似地以邻区的阿尔泰多拉纳萨依金矿地区同时代的未蚀变花岗岩的氢、氧同位素代替 , 其 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 59‰ 和 10.0‰ (魏春生等 1996) 。根据上述数据 , 分别取 $t = 200^\circ\text{C}$ 、 300°C 和 335°C 时 , 算得不同水岩比值 (W/R) 的大气降水的氢氧同位素的交换曲线 , 如图 4 中虚线所示。白山钼矿床的氢氧同位素数据点落在 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 的范围之内 , 完全偏离该矿床在成矿温度为 335°C 时的演化曲线 (图 4) , 因而认为 , 矿床成矿流体不是发生水岩反应的大气降水 (演化大气降水) 应为岩浆水和大气降水混合的产物。

从图 4 可以看出 , 岩浆水的 H₂O 同位素值 (MGR) 与初始岩浆水值 (MCW) 在岩浆水组成范围内一致 , 表明岩浆水受水岩反应影响较小 , 可不考虑演化岩浆水的存在。故结合成矿地质背景 , 白山钼矿床的成矿流体的组成应为以下 2 种方式 : ① 岩浆水与大气降水简单混合 ; ② 岩浆水与演化的大气降水混合。其中 , 岩浆水与大气降水简单混合的 H₂O 同位素组成区间如图 4 中虚线区域所示 , 据 H₂O 同位素测试数据分析 , 有 2 个样品 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 值明显较低 (分别为 -100‰ 和 -105‰) , 不在该区域之内 , 表明成矿流体不完全由岩浆水与大气降水简单混合而成 , 白山钼矿床的成矿流体不符合演化方式 ① , 岩浆水和演化大气降水的混合热液 H₂O 同位素组成如图 4 中粗实线区域所示 , 同位素数据全部落于该区域之内 , 指示了白山钼矿床的成矿流体符合方式 ② , 是岩浆水与演化的大气降水不同比例混合的成矿热液。

白山钼矿虽然赋存在下石炭统干墩组地层中 , 但据报道

表 3 白山钼矿区花岗岩年代学数据

Table 3 Isotopic chronological data of the granitoids near the Baishan molybdenum deposit

岩体名称	岩性	测年方法	年龄/Ma	资料来源
狼井	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS	284.5 ± 4.5	周涛发等 待刊
白山西	黑云母二长花岗岩	锆石 SHRIMP	181 ± 3	李华芹等 2005
红柳沟	黑云母花岗岩	锆石 SHRIMP	239 ± 8	李华芹等 2006
矿床南部的花岗岩脉	花岗斑岩	锆石 TIMS U-Pb	235~245	李华芹等 2006

(Zhang et al. 2005) 生产单位钻探时在白山钼矿床的矿体深部约 580 m 处发现花岗(斑)岩体。上述氢、氧同位素特征指示了白山钼矿床的成矿流体是岩浆水和演化大气降水的混合流体,有明显的岩浆水贡献,这些岩浆水应来自深部的花岗(斑)岩体。

4.2 成矿年代

前人也曾对白山钼矿床的成矿年代开展了研究工作(周济元等,1996;李华芹等,2005,2006;Zhang et al.,2005)。周济元等(1996)根据含矿石英脉样品中的 Pb 同位素,用内插法得其成矿年龄为 314~326 Ma,认为矿床形成于石炭纪,成矿时代属于晚古生代;Zhang 等(2005)测得了矿石中黄铁矿和辉钼矿的 Re-Os 年龄分别为(225 ± 12) Ma 和(224.8 ± 4.5) Ma,认为白山钼矿床形成于三叠世;李华芹等(2005;2006)对白山钼矿床含矿石英脉中石英进行了 Rb-Sr 等时线、⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄 Re-Os 等时线年龄测定,认为该钼矿床具有两期成矿作用的特点,分别对应于中三叠世[(229 ± 2) Ma]和早侏罗世(180~194 Ma)。可见,已有研究资料认为白山钼矿床的成矿年龄数据在石炭纪—侏罗纪之间,差异很大,成矿期次也有一期成矿(周济元等,1996;Zhang et al.,2005)和两期成矿(李华芹等,2006)的争议,因而,白山钼矿床的成矿年龄有待进一步确定。

本文对白山钼矿床含矿脉体中辉钼矿进行的 Re-Os 年代学分析数据显示,7 件辉钼矿样品等时线年龄为(227.7 ± 4.3) Ma,MSWD=0.32,初始 Os 比值为¹⁸⁷Os(ng/g)-4.0 ± 8.8,Re-Os 模式年龄加权平均值为(225.8 ± 1.2) Ma(MSWD=0.27),置信度为 95%,等时线的线性关系很好。本文测试结果不同于周济元等(1996)的测试结果;与 Zhang 等(2005)测得的黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 等时线年龄值相比,本文 7 个辉钼矿测年样品数多于前者,等时线性关系也更好,所得年龄值更为可信。另外,李华芹等(2005,2006)提出的两期成矿作用暂无地质证据的支持。因此,本次测得的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(227.7 ± 4.3) Ma 可代表该矿床的成矿年龄,指示了白山钼矿床形成于中三叠世。

限于无法采得样品的原因,白山钼矿床深部与矿化直接相关的花岗(斑)岩体的年龄尚未测得,但也可以通过矿区周围发育的花岗岩体(脉)来探索成岩与成矿的关系。白山矿区内发育有白山西、狼井和红柳沟等花岗岩体,另有大量花岗岩脉分布在矿床附近(图 2),这些花岗岩体(脉)年代学的分析如表 3 所示。周涛发等(待刊)以锆石 LA-ICP-MS 法测得位

于白山矿区南侧的狼井花岗岩体成岩年龄为(284.5 ± 4.5) Ma,李华芹等(2005,2006)用锆石 SHRIMP 法测得白山西岩体和红柳沟岩体的年龄值分别为(181 ± 3) Ma 和(239 ± 8) Ma,并以 TIMS 锆石 U-Pb 法测得矿区南侧的花岗斑岩脉的年龄为 235~245 Ma。上述花岗岩体(脉)的年代学特征表明,白山矿区内中酸性岩浆活动分布于早二叠世—早侏罗世之间,指示了白山地区在二叠纪—侏罗纪时中酸性岩浆活动频繁。白山钼矿床周围的红柳沟岩体及矿床南部的花岗岩脉年龄值显示了白山地区存在有与钼矿化同期的岩浆活动,很可能与矿床深部的花岗(斑)岩体形成时代相近,当然,这有待下一步勘探和测年工作的进一步证实。

4.3 矿床成因及成矿背景

白山钼矿床的地质特征显示,矿床中含矿石英脉发育,矿化特征及围岩蚀变特征与斑岩型钼矿床(王志良等,2006)很相似,虽然矿床赋存于干墩组地层中,矿床附近却无与矿化直接相关的花岗岩体,但钻探资料表明矿床底部存在花岗斑岩体。白山钼矿床的氢、氧同位素特征(表 1 和图 4)显示含矿流体是岩浆水和演化大气降水的混合流体,因此,白山钼矿床的成矿应与矿床深部的花岗(斑)岩体有关。矿床地质和流体特征都指示了白山钼矿床是一个斑岩型钼矿床,成岩成矿年龄的测试结果也间接支持了这一结论。矿床深部应有较好的找矿前景。

综上,白山钼矿床的形成应是深源富 Mo 的酸性岩浆沿通道上升形成浅成花岗(斑)岩体演化的结果。含矿花岗岩岩在分离结晶的过程中,使得残留的硅酸盐熔浆中成矿物质与挥发分在岩体顶部聚集,形成富含挥发分的含矿气液,含矿的岩浆热液在沿着各种裂隙通道向上运移中,与发生了水-岩作用的深循环大气降水(演化大气降水)混合,成矿热液温度、压力的下降和 f(O₂)、pH 值的升高,导致铜、钼等络合物变得很不稳定而解体和沉淀(牟保磊,1999),形成矿床。上述过程可由图 6 简化表达。

白山钼矿床位于北疆东天山觉罗塔格构造带内,该矿床形成于中三叠世,应为板内演化阶段的产物(顾连兴等,2006;王京彬等,2006;周涛发等,待刊)。然而,有学者研究认为,东天山地区在三叠纪时构造背景由中亚构造体制向特提斯构造体制转换(郭召杰等,2002),古特提斯洋俯冲和碰撞所产生的挤压力引起了天山隆升(陈正乐等,2006),大陆地壳明显缩短增厚(肖序常等,1992),研究区三叠纪的构造热事件及地壳变动与古特提斯洋的闭合的陆内远程效应有关(李锦轶等,

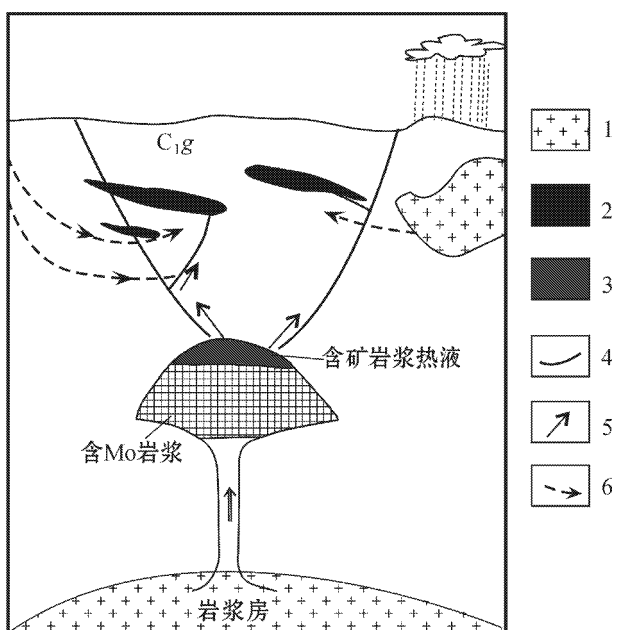


图 6 白山钼矿床成矿模式示意图

C_{1g}—干墩组地层; 1—水-岩作用的花岗岩体(脉); 2—矿体; 3—含矿岩浆热液; 4—断层; 5—岩浆水运移方向; 6—演化的大气降水及流向

Fig. 6 Sketch model of the Baishan molybdenum deposit
C_{1g}—Gandun Formation; 1—Granite body that experienced water-rock interaction; 2—Ore body; 3—Mo-bearing magmatic hydrothermal solution; 4—Fault; 5—Magma water transport direction; 6—Evolutionary meteoric water and its direction

2000, 许志琴等, 2006)。白山矿区同时代岩浆岩的微量元素和 Pb 同位素等地球化学特征也指示了矿床形成于挤压环境(周济元等, 1996; 卫管一等, 1997)。因此, 成矿于中三叠世的白山钼矿床可能是特提斯陆内远程效应影响下的板内花岗岩岩浆活动的产物, 同时期成矿的还有邻近的北山地区金窝子金矿床(陈富文等, 1999)。白山斑岩型钼矿床的成岩成矿研究对东天山觉罗塔格地区同类矿床勘查具有指导意义。

5 结 论

(1) 白山钼矿床的成矿流体是岩浆水与演化大气降水的混合热液, 热液混合导致的温度、压力的下降和 $f(\text{O}_2)$ 、pH 值的升高是成矿物质沉淀成矿的主要因素。

(2) 白山钼矿床形成于 227 Ma 左右, 对应于三叠世中期, 成矿物质可能来自于矿床深部的花岗斑岩, 推测矿床为斑岩型矿床, 有较好的找矿前景。

(3) 白山钼矿床是受三叠纪古特提斯洋闭合的陆内远程效应影响而产生的成矿作用的产物。

志 谢 本文的研究工作得到了新疆“305”项目办公室、新疆地质调查院的支持, 得到了王京彬、肖文交、马映军、王宝

林、王煜、王玉往等专家的指导, 野外工作得到了哈密第六地质大队的支持, 氢、氧同位素测试工作得到了中国地质科学院罗续荣老师和万德芳老师的帮助, 两位审稿人提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示诚挚的谢意。

References

- Chen F W, Li H Q, Cai H and Liu H Q. 1999. The Origin of the Jinwozi Gold Deposit in Eastern Xinjiang: Evidence from Isotope Geochronology[J]. Geological Review, 45(3): 248-254 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z L, Wan J L, Liu J, Li S X, Zheng E J, Han X Z, Li X G and Gong H L. 2006. Multi-stage uplift and exhumation of the west Tianshan Mountain: Evidence from the apatite fission-track dating[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(2): 97-106 (in Chinese with English abstract).
- Deng G, Wu H and Lu Q M. 2004. Geological characteristics and prospecting mark of the Baishan porphyry Mo deposit, East Tianshan[J]. Regional Geology of China, 11: 1132-1138 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Zhao D M, Wang S X, Sun D Z and Liu D Y. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation[J]. Rock and Mineral Analysis, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Richard M H S, John M and Dmitry M. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geo-standard and Geoanalytical Research, 28(1): 41-52.
- Gong X P, Yang X K, Chen Q and Li Z C. 2004. Structure deformation and metallogenic prognosis of gold ore zone in Jueluotage of Eastern Tianshan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 26(2): 6-10 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, Wang Y X, Tang J H, Wang C S, Xi A H and Zheng Y C. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1103-1120 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z J, Zhang Z C, Liao G H and Fang S H. 2002. Uplifting processes of eastern Tianshan Mountains: Evidence from fission-track age and its tectonic significance[J]. Xinjiang Geology, 20(4): 331-334 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Ji J Q, Song B, Chen L H and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1077-1086 (in Chinese).
- Li H Q, Wu H, Chen F W, Deng G, Yang H M, Yang Z F, Mei Y P and Guo J. 2005. Isotopic chronological evidence for Yanshanian Diagenetic mineralization in Baishan rhenium-molybdenum mine, E. Tianshan Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 249-255 (in Chinese with English abstract).

- Li H Q, Chen F W, Li J Y, Qu W J, Wang D H, Wu Hua, Deng G and Mei Y P. 2006. Age of mineralization and host rocks in the Baishan rhenium-molybdenum district, East Tianshan, Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 8: 916-922 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Xiao X C, Chen W, Zhang S H and Li W D. 2000. Late Carboniferous to Late Triassic thermal evolution of the crust of Northern Xinjiang, NW China- ^{40}Ar - ^{39}Ar dating to Huangcaopo Group in the Kaokesai 'ergai Mountain of East Junggar [J]. Acta Geologica Sinica, 11(4): 303-312 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yang J M, Han C M and Wang Z L. 2002. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in eastern Tianshan, Xinjiang [J]. Earth Science, 27(4): 413-424 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Goldfarb R J, Wang Y T, Hart C J, Wang Z L and Yang J M. 2005. Late Paleozoic and precious metal deposit, East Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting [J]. Episodes, 28(1): 23-36.
- Nie F J, Jiang S H, Zhao S M and Bai D M. 2001. The discovery of two new precious metal deposits in the Inner Mongolia-Gansu Xinjiang juncture (Beishan) area and its geological significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 22: 397-402 (in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius tube sample digestion [J]. Rock and Mineral Analysis, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Scheppard S M F. 1986. Characterization and isotope variation in natural waters [A]. In: Valley J W, Taylor H P Jr, O Neil J R, eds. Stable isotopes in high temperature geological processes [J]. Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America, 16: 165-184.
- Taylor H P. 1979. Oxygen isotope relationships [A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [M]. 2nd edition. New York: Wiley. 236-277.
- Wang J B and Xu X. 2006a. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in Northern Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 80(1): 23-31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z L, Mao J W, Zhang Z H, Zuo G C and Wang L S. 2006. Geology, time-space distribution and metallogenic geodynamic evolution of porphyry copper (molybdenum) deposits in the Tianshan Mountain [J]. 80(7): 943-955 (in Chinese with English abstract).
- Wei G Y and Xu G L. 1997. Geochemical characteristics of the granites in collision belt from the Baishan region of Xinjiang [J]. Mineral Petrol., 12: 33-38 (in Chinese with English abstract).
- Xiao X C, Tang Y Q and Li J Y. 1992. Tectonic evolution of northern Xinjiang and its adjacent regions [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-169 (in Chinese).
- Xu Z Q, Yang J S, Qi X X, Cui J W, Li H B and Chen F Y. 2006. India-Asia collision: A further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas [J]. Regional Geology of China, 25(1-2): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z, Qu W J and Du A D. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance [J]. Mineralium Deposita, 39: 960-969.
- Zheng Y F, Xu B L and Zhou G T. 2000. Geochemical studies of stable isotopes in mineral [J]. Earth Science Frontier, (2): 298-320 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J Y, Zhang B, Zhang C W, Wei G Y, Lu Y and Xia J. 1996. Geology of the silver, rhenium-molybdenum, gold and copper deposits in the eastern Tianshan and its adjacent regions [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 105-133 (in Chinese).
- Zhou T F, Yue S C and Yuan F. 2005. Lithogenesis of diorites and copper, gold mineralization in Yueshan orefield, Anhui Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 77-83 (in Chinese).
- Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Zhang D Y, David Cooke and Zhao G C. 2008. Granites in the Sawuer region of the west Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance [J]. Lithos, 106: 191-206.
- Zhou T F, Yuan F, Zhang D Y, Fan Y and Liu S. 2009. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, Eastern Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica (in press).
- Zhu Y F. 2007. Indosinian movement and metallogeny in Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 26(5): 510-519 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈富文, 李华芹, 蔡红, 刘娟群. 1999. 新疆东部金窝子矿成因讨论——同位素地质年代学证据 [J]. 地质论评, 45(3): 248-254.
- 陈正乐, 万景林, 刘健, 李胜祥, 郑恩玖, 韩效忠, 李细根, 宫红良. 2006. 西天山山脉多期次隆升-剥露的裂变径迹证据 [J]. 地球学报, 27(2): 97-106.
- 邓刚, 杨再峰, 卢鸿飞, 代育才, 赵献丽. 2003. 东天山发现并探明白山大型燕山期石英网脉-斑岩型钼矿床 [J]. 矿床地质, 22(3): 317-317.
- 邓刚, 吴华, 卢全敏. 2004. 东天山白山斑岩型钼矿床的地质特征及找矿标志 [J]. 地质通报, 11: 1132-1138.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 弓小平, 杨兴科, 陈强, 李佐臣. 2004. 东天山觉罗塔格金矿带构造变形与成矿预测 [J]. 地球科学与环境学报, 26(2): 6-10.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜, 郝爱华, 郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识 [J]. 岩石学报, 22(5): 1103-1122.
- 郭召杰, 张志诚, 廖国辉, 方世虎. 2002. 天山东段隆升过程的裂变径迹年龄证据及其构造意义 [J]. 新疆地质, 20(04): 331-334.
- 贺静, 莫新华, 彭明兴, 单金忠. 2002. 白山钼矿地质特征及成因探讨 [J]. 西部探矿工程, (5): 163-165.
- 李华芹, 吴华, 陈富文, 邓刚, 杨红梅, 杨再峰, 梅玉萍, 郭敬.

2005. 东天山白山铼钼矿区燕山期成岩成矿作用同位素年代学证据[J]. 地质学报, 79(2): 249-255.
- 李华芹, 陈富文, 李锦轶, 屈文俊, 王登红, 吴华, 邓刚, 梅玉萍. 2006. 再论东天山白山铼钼矿区成岩成矿时代[J]. 地质通报, 8: 916-922.
- 李锦轶, 肖序常, 陈文, 张思红, 李卫东. 2000. 新疆北部晚石炭世至晚三叠世地壳热演化-东准噶尔考克塞尔盖山荒草坡群的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年[J]. 地质学报, 11(4): 303-312.
- 娄峰, 喻亨祥. 2007. 新疆北部后碰撞构造环境特征初析[J]. 中国科技信息, 22: 19-20.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社. 1-227.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-锱地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-257.
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 80(1): 23-31.
- 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 2006. 新疆天山斑岩铜钼矿地质特征、时空分布及其成矿地球动力学演化[J]. 地质学报, 80(7): 943-955.
- 魏春生, 涂光炽. 1996. 成矿流体来源占 δD - $\delta^{18}\text{O}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 理论模型研究[J]. 中国科学(D辑), 26(4): 373-377.
- 卫管一, 许国琳. 1997. 新疆白山地区碰撞带花岗岩的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 12: 33-38.
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社. 1-169.
- 许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 崔军文, 李海兵, 陈方远. 2006. 印度/亚洲碰撞-南北向和东西向拆离构造与现代喜马拉雅造山机制再讨论[J]. 地质通报, 25(1-2): 1-14.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社. 1-267.
- 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 2000. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘(2): 298-320.
- 周济元, 张斌, 张朝文. 1996. 东天山古大陆及其边缘银、铼、钼、金和铜矿地质特征[M]. 北京: 地质出版社. 105-133.
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰. 2005. 安徽月山矿田成岩成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 77-83.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅. 2009. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报(待刊).
- 朱永峰. 2007. 新疆的印支运动与成矿[J]. 地质通报, 26(5): 510-519.