

薛春纪, 赵晓波, 张国震, 等. 西天山金铜多金属重要成矿类型、成矿环境及找矿潜力[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 381–410.

Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Zhang Guozhen, et al. Metallogenic environments, ore-forming types and prospecting potential of Au–Cu–Zn–Pb resources in Western Tianshan Mountains[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 381–410(in Chinese with English abstract).

西天山金铜多金属重要成矿类型、成矿环境 及找矿潜力

薛春纪¹ 赵晓波¹ 张国震¹ 莫宣学¹ 顾雪祥¹ 董连慧² 赵树铭³ 米登江⁴
Bakhtiar Nurtaev⁵ Nikolay Pak⁶ 李志丹⁷ 王新利¹ 俎波¹ 亚夏尔亚力坤¹ 冯博¹

(1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 新疆地质矿产勘查开发局, 新疆乌鲁木齐 830000; 3. 新疆地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队, 新疆乌鲁木齐 830011; 4. 中国冶金地质总局新疆地质勘查院, 新疆乌鲁木齐 830006; 5. 乌兹别克斯坦科学院地质与地球物理研究所, 乌兹别克斯坦塔什干 100041; 6. 吉尔吉斯斯坦科学院地质与地球物理研究所, 乌兹别克斯坦比什凯克 720481; 7. 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 西天山跨乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦南部和中国新疆西天山, 东西绵延 2500 km, 是“亚洲金腰带”核心地带, 金铜铅锌矿产优势明显, 中国新疆西天山金铜铅锌重大找矿发现令人期待。通过广泛深入的文献调研和较全面的地质矿产调查, 论文针对重要成矿类型、成矿环境和找矿潜力的研究表明, 西天山金铜铅锌成矿重要类型是造山型金矿、斑岩型金铜矿、SEDEX 型和砂岩型铅锌矿等。造山型金矿形成于古生代俯冲增生和碰撞造山两类地质环境, 斑岩型金铜矿形成于古生代不同时期的成熟岛弧环境, SEDEX 型铅锌矿在新元古代陆缘盆地富集, 砂岩型铅锌矿形成于中—新生代山前盆地。西天山金铜铅锌成矿类型和环境优越, 找矿潜力巨大, 新疆西天山有望实现金铜铅锌找矿持续重大突破。本文为西天山区域成矿研究和金铜铅锌找矿勘查提供了新的参考和引导。

关键词: 区域金铜铅锌成矿; 矿床类型; 成矿环境; 找矿潜力; 西天山

中图分类号: P618.41; P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0381-30

Metallogenic environments, ore-forming types and prospecting potential of Au–Cu–Zn–Pb resources in Western Tianshan Mountains

XUE Chun-ji¹, ZHAO Xiao-bo¹, ZHANG Guo-zhen¹, MO Xuan-xue¹, GU Xue-xiang¹,
DONG Lian-hui², ZHAO Shu-ming³, MI Deng-jiang⁴, Bakhtiar Nurtaev⁵, Nikolay Pak⁶,

收稿日期: 2015-03-31; 改回日期: 2015-04-13

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAB06B02)、国家自然科学基金(U1303292)和中国地质调查项目(1212011085069)联合资助。

作者简介: 薛春纪, 男, 1962年生, 博士, 教授, 从事矿床学和矿产预测教学与研究; E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn。

LI Zhi-dan⁷, WANG Xin-li¹, ZU Bo¹, YAXIAER Yalikusun¹, FENG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Xinjiang Exploration and Development Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. No. 1 Regional Geological Survey Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Geological Survey, China Bureau of Geology and Metallurgy, Urumqi 830006, Xinjiang, China; 5. Institute of Geology and Geophysics, Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent 100041; 6. Institute of Geology and Geophysics, Gyrkzstan Academy of Sciences, Bishkek 720481; 7. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: Western Tianshan Mountains extend from Uzbekistan through Tajikistan, Kyrgyzstan, southern Kazakhstan to Xinjiang Western Tianshan, with a length of 2500 km from west to east. This belt is the core zone of the “Asian Gold Belt” and shows evident potential of Au–Cu–Zn–Pb mineral resources. Large Au–Cu–Zn–Pb ore deposits are expected to be found in Western Tianshan of Xinjiang. Based on consulting various references and thoroughly investigating the regional geology and mineral resources in western Tianshan, the authors hold that the important mineralizations of Au–Cu–Zn–Pb ore deposits include such types as orogenic Au, porphyry Au–Cu, SEDEX and sandstone Zn–Pb. The orogenic Au deposits formed in two geological environments in the Paleozoic, the porphyry Cu deposits formed in the mature island arc environments of various periods in the Paleozoic, the SEDEX Zn–Pb deposits occurred in the continental margin basin of the Neoproterozoic, and the sandstone Zn–Pb deposits occurred in the foreland basin of Mesozoic–Cenozoic period. The metallogenic environment and the ore-forming types are all favorable for the Au–Cu–Zn–Pb mineralization in Western Tianshan and show promising potential for ore prospecting. The large Au–Cu–Zn–Pb ore deposits could be found continuously in Xinjiang Western Tianshan, China. The results obtained by the authors provide reference and indication for regional metallogenic understanding and Au–Cu–Zn–Pb ore exploration.

Key words: Au–Cu–Zn–Pb metallogeny; metallogenic environment; ore-forming type; prospecting potential

About the first author: XUE Chun-ji, male, born in 1962, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of ore geology and exploration; E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn.

1 引 言

西天山地处威海以东至中国新疆托克逊(E66°~E88°)、喀什以北至巴尔喀什湖南岸(N39°~N45°),是天山山脉的主体,从西到东跨乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦南部和中国新疆西天山(含西南天山,下同)。区域地壳演化造就出西天山巨型金铜多金属成矿带^[1],形成了乌兹别克斯坦 Muruntau(金储量 6137 t^[2])、吉尔吉斯斯坦 Kumtor(金储量 1100 t^[3])等巨型金矿床和乌兹别克斯坦 Almalyk(金储量 2000 t、铜储量 2500 万 t^[4])等巨型金铜矿床和数十个世界级、大型–超大型金铜多金属矿床^[5-59],构成西天山“亚洲金腰带”^[44](图 1-b)。但到目前为止,境内外西天山矿产资源/储量不对称性明显,中国新疆西天山勘查和研究程度相对较低,世界级和大型–超大型金铜多金属找矿重大突破令人期待^[1, 12, 22, 44, 60-63];最近在新源县发现卡特巴

阿苏大型金铜矿床^[1, 44, 47, 59],乌恰县萨瓦亚尔顿金矿的最新勘探新增金储量 100 t^[44](达 130 t),表现出巨大找矿潜力^[44]。把境内外西天山作为整体,不断明确金铜多金属重要成矿环境和矿床类型,有助于新疆西天山金铜多金属找矿持续突破。

成矿/矿床类型是地球演化不同地质环境中地质作用的产物,是成矿环境、成矿控制和找矿标志的集中体现,是找矿潜力分析的基础,不同类型矿床的勘查找矿准则各异^[64]。本文在西天山境内外地质矿产广泛调查基础上,结合对前人勘查和研究成果的学习理解,试图梳理西天山典型金铜多金属成矿地质环境,进一步明确重要成矿类型,分析成矿潜力,为中国新疆西天山金铜铅锌找矿持续突破提供新的参考和引导。

2 区域背景

西天山位于中亚造山带西南部(图 1-a)。中亚

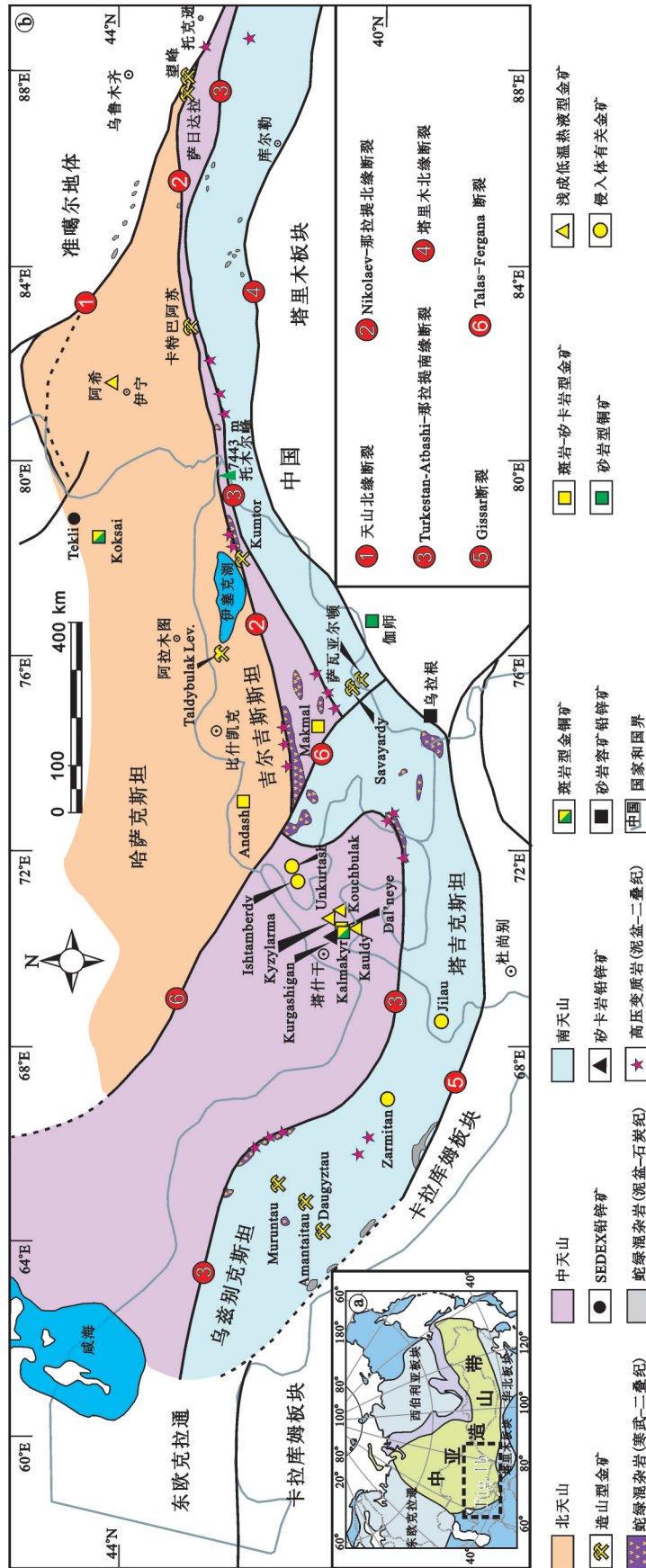


图1 西天山区域构造矿产简图(据[1]修改)
Fig.1 Sketch map of tectonics and deposits in Western Tianshan region (modified after reference [1])

造山带介于西伯利亚板块、东欧克拉通、卡拉库姆板块、塔里木-华北板块之间,经历了增生和碰撞不同时期和不同性质的造山过程^[1, 44, 54, 57, 65-71]。

在区域地质研究中,西天山通常被划分为北天山、中天山、南天山3大构造单元^[1, 44, 18, 71-73](图1-b)。北天山主体为哈萨克斯坦—伊犁板块及其南、北活动大陆边缘,发育前寒武纪变质基底之上的双盖层地壳结构;下古生界盖层主体由深海槽复理石、滨浅海碳酸盐岩和上部少量活动陆缘中性火山建造构成,上古生界盖层由泥盆—石炭系活动陆缘安山岩建造和二叠系火山磨拉石及陆相碎屑沉积建造组成^[1]。中天山主体为中天山地块及其南、北活动大陆边缘,在中国新疆西天山出露相对较窄,向西在吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦明显变宽(图1-b);在吉尔吉斯斯坦和中国新疆西天山,前寒武纪变质基底多有出露,盖层仅发育下古生界浅变质海相细碎屑岩、碳酸盐岩和中—基性火山岩及相应火山碎屑岩;在乌兹别克斯坦,鲜见基底出露,盖层具有双层结构,下古生界出露奥陶—志留系浅变质细碎屑岩和中性火山岩,上古生界广泛出露泥盆—石炭系中性火山建造夹浅海碎屑—碳酸盐沉积建造和二叠系火山磨拉石及陆相碎屑沉积建造^[1]。南天山主体是卷入天山造山带的卡拉库姆—塔里木板块北部被动大陆边缘(图1-b),发育前寒武纪变质基底之上的双盖层地壳结构,下古生界为浅变质含碳复理石,泥盆—石炭系为残余浅海碎屑岩—碳酸盐岩建造。

西天山是古亚洲洋区域若干大洋或洋盆发生、发展和演化的结果,分割西天山3大构造单元的主干断裂从北到南分别为天山北缘、Nikolaev—那拉提北缘、Turkestan—Atbash—那拉提南缘等3条板块缝合带^[1, 18, 44, 71, 73](图1-b)。北天山北缘断裂带内多处出露古生代蛇绿岩/套等典型洋壳岩石,大体代表了新元古—古生代北天山大洋的存在^[74-75]。Nikolaev—那拉提北缘断裂带中多见早古生代、尤其寒武纪典型洋壳岩石,是区域内新元古代—早古生代早期 Terskey 洋盆的指示^[76-77]。Turkestan—Atbash—那拉提南缘断裂带西段在乌兹别克斯坦境内代表了新元古—古生代 Turkestan 大洋关闭后的缝合带^[78-80],东段在吉尔吉斯斯坦和中国新疆西天山则大体指示古生代南天山大洋缝合带^[70, 81-82]。区域内其他断裂,如塔里木北缘断裂分割了西天山造

山带与塔里木盆地, Gissar 断裂是古特提斯洋关闭后的缝合带, Talas-Fergana 断裂是造山晚/后期右型走滑断裂。

3 重要成矿环境

西天山造山带是 Turkestan 大洋(Pt₃-C)、Terskey 洋盆(Pt₃-O)、南天山大洋(O-C)、北天山大洋(Pz₁-C)等开合时间不同、寿命长短各异的古亚洲大洋或洋盆发生、发展、演化、消亡及其之后改造的综合产物,大致经历了古陆形成、增生造山、碰撞造山和陆内成盆等地球动力学过程^[1, 18, 44, 70-71, 73, 83],先后出现陆缘盆地、增生岛弧、碰撞造山和山前盆地4类重要成矿环境。表1中简列出西天山储量在大型及以上金、金铜、铜、铅锌矿床的成矿环境。

3.1 陆缘盆地

陆缘盆地是指在前寒武纪变质基底陆块边缘形成的中—新元古代裂陷盆地成矿环境,可能与 Rodinia 超大陆裂解事件相关。西天山最大最醒目的古陆块为哈萨克斯坦—伊犁板块,生成于太古宙—古元古代,哈萨克斯坦东南部 Anrakhai 地区 Uzunbulak 花岗片麻岩锆石 U-Pb 年龄为 2791 Ma, Serektas 河地区花岗片麻岩锆石 U-Pb 年龄为 1789 Ma^[84], 吉尔吉斯斯坦下元古界为 Aktyuz 群和 Kemin 群角闪云母片岩、花岗片麻岩和混合岩^[85], 中国新疆西天山出露古元古界温泉群片麻岩,阿吾拉勒西段片麻岩锆石 U-Pb 年龄为 1609 Ma^[86], 哈萨克斯坦—伊犁古陆块确切存在。

围绕古陆块边缘,中—新元古代出现早期被动大陆边缘盖层沉积^[1],如哈萨克斯坦—伊犁板块东北缘 Tekeli 群、哈尔达坂群、开尔塔斯群、库松木切克群和东南缘特克斯群、科克苏群等。这些盖层的沉积韵律、岩石组合与岩石化学研究表明,它们属于被动陆缘裂陷盆地中的次稳定型沉积建造^[87-88],指示边缘盆地的裂陷性质;可能正是伸展背景下的边缘盆地裂陷过程,导致显著的海底热液活动和热水沉积,形成重要 SEDEX 型铅锌矿床,典型矿床如与中国新疆温泉地区接壤的哈萨克斯坦东南部 Tekeli 超大型铅锌矿床。最近中国新疆西天山新发现哈尔达坂、托克赛、四台等铅锌矿,与 Tekeli 铅锌矿床同属哈萨克斯坦—伊犁板块北缘铅锌矿带,找矿潜力大^[1]。

表 1 西天山大型-超大型金铜铅锌矿床成矿环境和类型简表
Table 1 Metallogenic environment and type of large and superlarge Au-Cu-Zn-Pb deposits in Western Tianshan region

序号	矿床	国家	品位	储量	成矿环境	成矿类型	文献
1	Takdybulak 金矿	吉尔吉斯斯坦	Au 6.9g/t	Au 130t	增生岛弧	造山型	[11, 25, 44, 53]
2	Muruntau 金矿	乌兹别克斯坦	Au 3.5g/t	Au 6137t	碰撞造山	造山型	[2, 20, 49]
3	Kumtor 金矿	乌兹别克斯坦	Au 4.4g/t	Au 1100t	碰撞造山	造山型	[3, 19]
4	Daugyztau 金矿	乌兹别克斯坦	Au 4.0g/t	Au 186t	碰撞造山	造山型	[9, 54]
5	Amantaitau 金矿	乌兹别克斯坦	Au 1.5g/t	Au 120t	碰撞造山	造山型	[54]
6	萨瓦亚尔 金矿	中国	Au 2.0g/t	Au 130t	碰撞造山	造山型	[7, 13, 16]
7	卡特巴阿苏 金矿	中国	Au 3.8g/t	Au 87t	碰撞造山	造山型	[44, 47, 123]
8	Kalmakyr 金铜矿	乌兹别克斯坦	Au 0.5g/t, Cu 0.7%	Au 1400t, Cu 13Mt	增生岛弧	斑岩型	[4, 26, 5, 57]
9	Dal'neye 金铜矿	乌兹别克斯坦	Au 0.5g/t, Cu 0.3%	Au 400t, Cu 13Mt	增生岛弧	斑岩型	[4, 55, 57]
10	Sart-cheku 铜矿	乌兹别克斯坦	Cu 0.8%	Cu 1.3Mt	增生岛弧	斑岩型	[36, 42]
11	Kyzata 铜矿	乌兹别克斯坦	Cu 0.92%	Cu 1.3Mt	增生岛弧	斑岩型	[36]
12	Andash 金铜矿	吉尔吉斯斯坦	Au 1.1g/t, Cu 0.4%	Au 210t, Cu 1.92Mt	增生岛弧	斑岩型	[5, 57]
13	Taldy Bulak 金铜矿	吉尔吉斯斯坦	Au 0.5g/t, Cu 0.2%	Au 196t, Cu 0.7Mt	增生岛弧	斑岩型	[19, 57]
14	Koksat 金铜矿	哈萨克	Au 0.1g/t, Cu 0.52%	Au 37t, Cu 1.6Mt	增生岛弧	斑岩型	[6, 21, 57]
15	Zarmitan 金矿	乌兹别克斯坦	Au 9.8g/t	Au 314t	碰撞造山	侵入体	[10, 18, 54]
16	Jilau 金矿	塔吉克斯坦	Au 1.1g/t	Au 110t	碰撞造山	侵入体	[8, 12]
17	Ishtamberdy 金矿	吉尔吉斯斯坦	Au 7.5g/t	Au 110t	增生岛弧	侵入体	[19]
18	Unkertash 金矿	吉尔吉斯斯坦	Au 2.0g/t	Au 125t	增生岛弧	侵入体	[19]
19	Kochbulak 金矿	乌兹别克斯坦	Au 13.4g/t	Au 600t	增生岛弧	侵入体	[19]
20	Kairagach 金矿	乌兹别克斯坦	Au 5.0g/t	Au 60t	增生岛弧	浅成低温热液型	[14, 15, 56]
21	Kyzylarmasa 金矿	乌兹别克斯坦	Au 6.7g/t	Au 470t	增生岛弧	浅成低温热液型	[15, 37]
22	Kauldy 金矿	乌兹别克斯坦	Au 5.4g/t	Au 400t	增生岛弧	浅成低温热液型	[27, 57]
23	Arhaly 金矿	乌兹别克斯坦	Au 6g/t	Au 41t	增生岛弧	浅成低温热液型	[37]
24	阿希 金矿	哈萨克	Au 6g/t	Au 55t	增生岛弧	浅成低温热液型	[29]
25	京希-伊尔曼德 金矿	中国	Au 1g/t	Au 50t	增生岛弧	浅成低温热液型	[28, 51-52]
26	Makmal 金矿	中国	Au 7.2g/t	Au 58t	增生岛弧	浅成低温热液型	[23-24, 51-52]
27	喇嘛苏 铜矿	吉尔吉斯斯坦	Cu 0.7%, Zn 1.8%	Cu 0.67Mt, Zn 0.34Mt	增生岛弧	砂卡岩型	[19, 134]
28	Kurgashinka 铅锌矿	乌兹别克斯坦	Zn+Pb 10%	Zn+Pb 1.5Mt	增生岛弧	砂卡岩型	[135]
29	Tekeli 铅锌矿	乌兹别克斯坦	Zn+Pb 6.99%	Zn+Pb 7Mt	增生岛弧	砂卡岩型	[36]
30	哈尔达坂 铅锌矿	哈萨克	Zn+Pb 9.84%	Zn+Pb 0.61Mt	陆缘盆地	SEDEX型	① [136-137]
31	四台 铅锌矿	中国	Zn+Pb 2.61%	Zn+Pb 0.68Mt	陆缘盆地	SEDEX型	②
32	乌拉根 铅锌矿	中国	Zn+Pb 3.11%	Zn+Pb 3Mt	山前盆地	砂岩型	[30, 34, 50]

① Satpaev Institute of Geological Sciences. Tekeli lead-zinc deposit //Baukuev, et al(eds.) atlas of Mineral Deposit Models, Republic of Kazakhstan. 2004.

② 新疆地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队. 新疆西天山科古尔琴山地区矿产地质调查项目总体设计. 2014.

3.2 增生岛弧

增生岛弧是指开合时代不一、寿命不同、大小有别、性质各异的大洋或洋盆地壳俯冲形成的古生代活动大陆边缘成矿环境,与古亚洲洋海底扩张和俯冲增生过程密切相关,是西天山构造-岩浆-热液活动最为强烈最为突出的金铜多金属成矿环境之一。主体分布在乌兹别克斯坦境内的Turkestan大洋在新元古代打开^[1, 44, 78-80],沿Bukantau—Nuratau一带多处出露的蛇绿岩/套代表了Turkestan洋的存在,其中蚀变辉长岩中锆石U-Pb法测得757 Ma成岩年龄,并获得一系列洋盆持续扩张不同阶段和位置的相应洋壳岩石和地球物理记录^[78-80];该大洋在早、晚古生代持续向北向中天山—哈萨克斯坦陆块之下俯冲形成了从寒武纪到石炭纪不同时期、不同成熟度的增生岛弧环境^[1, 44, 78],乌兹别克斯坦东南部Kurama山脉出露石炭纪安山岩代表了典型成熟岛弧地质环境;正是在这种长期发展的成熟岛弧环境中,形成了世界著名的Almalyk巨型金铜铅锌矿集区,发育斑岩型-矽卡岩型-高硫-低硫浅成低温热液型金铜多金属成矿系统^[1, 26, 42, 44, 57],以及吉尔吉斯斯坦西部Chatkal山脉岛弧岩浆侵入体有关的大型金矿床^[1, 44](如Unkurtash、Ishtamberdy等)。

Terskey洋盆可能于新元古代打开,早古生代海底扩张明显,吉尔吉斯斯坦沿Nikolaev线出露大量寒武—奥陶纪蛇绿岩^[77],中国新疆那拉提山北坡夏特南发现516 Ma的T型洋中脊玄武岩^[76],在冰达坂—乌斯特沟—米什沟—干沟蛇绿混杂岩大理岩块中含奥陶纪牙形石化石^[89]。Terskey洋向北向哈萨克斯坦—伊犁板块之下俯冲,在吉尔吉斯斯坦北天山形成了寒武—早奥陶纪Arenigian单元洋壳-岛弧杂岩^[77],吉尔吉斯斯坦中天山向东延伸到中国新疆夏特地区均发育470~460 Ma钙碱性花岗岩^[90-91],新疆中天山发育479 Ma钙碱性花岗岩^[70],反映Terskey洋当时向北、向南均有俯冲并出现明显的增生岛弧环境。吉尔吉斯斯坦西部Andash—Taldybulak大型金铜矿集区即为这种增生岛弧环境斑岩型矿化的产物^[1],东部Taldybulak Levoberezhny大型金矿床则可能是Terskey洋在寒武纪向北向哈萨克斯坦板块俯冲导致的增生楔中形成的增生造山型金矿床^[1, 44, 53]。

中国新疆南天山大洋可能伴随着Terskey洋在早奥陶世的关闭而打开^[70],榆树沟蛇绿岩地体中麻

粒岩锆石核部年龄452 Ma^[92],巴雷公洋岛玄武岩锆石年龄450 Ma^[93],库勒湖蛇绿混杂岩辉长岩锆石年龄425 Ma^[94];中天山大量分布436~276 Ma的花岗岩类和火山岩,可能指示南天山洋自早志留世晚期开始向北俯冲^[70, 81-82],在中天山微陆块南缘出现增生岛弧重要成矿环境。北天山大洋可能是巴尔喀什—准噶尔古生代大洋的一部分,古生代长期存在,西准噶尔克拉玛依蛇绿杂岩中蚀变辉长岩锆石U-Pb年龄414 Ma和332 Ma,闪长岩脉锆石U-Pb年龄423 Ma和325 Ma^[75],巴音沟和芦苇沟蛇绿岩中堆晶辉长岩锆石U-Pb年龄344 Ma,侵位于辉长岩中的斜长花岗岩锆石U-Pb年龄325 Ma^[74],硅质岩、灰岩中产有大量晚泥盆世—早石炭世放射虫和牙形石化石^[95-96];北天山大洋地壳向南向哈萨克斯坦—伊犁板块之下俯冲,形成了从哈萨克斯坦Taldykurgan向东延伸到中国新疆西天山博罗霍洛十分壮观的增生岛弧带^[1, 6, 21, 44, 54-55, 57],哈萨克斯坦Koksai大型斑岩铜矿床和中国新疆西天山阿希、京希—伊尔曼德的大型浅成低温热液型金矿床、喇嘛苏和哈勒尕提矽卡岩型铜矿床等即是这种增生岛弧中构造-岩浆-热液的产物^[1, 40-41, 43, 46, 54, 58, 62, 97]。

3.3 碰撞造山

碰撞造山是指伴随西天山区域大洋或洋盆关闭而发生陆陆、弧陆或弧弧等不同性质碰撞出现以构造变形变质为主要特点的碰撞造山成矿环境,在西天山地壳内形成多级脆-韧性变形带及碰撞不同阶段相关的花岗质侵入体,是西天山最为重要的金成矿环境。Turkestan大洋大致在石炭纪末关闭^[78-80],Terskey洋盆于奥陶纪关闭^[98-100],南天山大洋在石炭纪末关闭^[3, 70, 81-82, 93, 101-112],北天山大洋关闭于晚石炭世^[113]。伴随这些大洋或洋盆的先后关闭,Karakum、塔里木、中天山、哈萨克斯坦—伊犁、西伯利亚—阿尔泰等陆块相互碰撞,褶皱、逆冲推覆和剪切走滑等造山过程使地壳内以板块缝合带为中心形成多级脆-韧性变形带,并伴随出现碰撞不同阶段岩浆侵入体。

沿乌兹别克斯坦Turkestan缝合带,向东到吉尔吉斯斯坦Atbash,再到中国新疆那拉提山南缘南天山缝合带表现为一条大型复合变形带,分割了中天山与南天山(图1-b),卷入变形变质带的岩石既有前寒武纪片麻岩、海西期花岗岩,也有南侧增生楔内

绿片岩相变质复理石。西天山高压增生楔中蓝闪石 Ar-Ar 坪年龄 350~345 Ma, 蓝片岩中白云母 Ar-Ar 坪年龄 334~310 Ma^[81, 96, 114-115], 吉尔吉斯 Atbash 蓝片岩—榴辉岩带中白云母 Ar-Ar 坪年龄 327~324 Ma^[116]。糜棱岩显微构造研究表明早期为自南而北的逆冲变形, 晚期为平移走滑^[117-118], 拉尔敦达坂黑云长英质糜棱岩黑云母 Ar-Ar 坪年龄 250 Ma^[119], 长阿吾子沟糜棱岩化斜长角闪岩角闪石 Ar-Ar 坪年龄 229.6 Ma^[120]。乌兹别克斯坦 Muruntau 巨型金矿床^[2]、吉尔吉斯斯坦 Kumtor 巨型金矿床^[3]、中国新疆萨瓦亚尔顿^[121]以及新发现的卡特巴阿苏大型金矿床^[1, 44, 47, 59, 122]均为形成于这种地质环境的碰撞造山型金矿床^[1, 44]。

沿吉尔吉斯斯坦 Nikolaev 线向东延伸到中国新疆那拉提山北缘断裂是 Terskey 洋盆缝合带(图 1-b), 分隔北天山与中天山, 除岩石建造记录外, 奥陶纪两个陆块碰撞造山的确切构造形迹已较难辨认, 相关成矿作用有待勘查发现与研究。北天山北缘断裂带主体是北天山大洋缝合带, 分隔了哈萨克斯坦—伊犁与西伯利亚—阿尔泰板块(图 1-b), 晚石炭世及以后的碰撞造山过程使其表现为一条规模可观的右行韧性剪切带, 天格尔右行韧性剪切的时间被确定为 266 Ma^[123], 哈希勒根达坂右行韧性剪切的时间为早二叠世^[124]。新疆西天山萨日达拉、望峰、查汗萨拉等碰撞造山型金矿即形成于这种碰撞造山环境^[44, 125-127]。

3.4 山前盆地

山前盆地是指分布于西天山造山带山前或山间的中—新生代磨拉石沉积盆地成矿环境, 与西天山中—新生代陆内构造调整或改造以及喜马拉雅运动远程效应密切相关, 是西天山砂岩型铅锌铜铀成矿重要地质环境。西天山造山带中分布有大小、形态和充填物各异的山前和山间沉积盆地, 占造山带面积约 50%, 其中充填物包括中—新生界河/湖相红色碎屑岩和少量深湖相碳酸盐岩, 沉积厚度可达数千千米^[1]; 伴随中—新生代陆内构造调整和天山的持续隆升, 盆地流体广泛运动, 是形成沉积岩容矿多金属矿床的重要地质环境^[1, 128-130]。

主体晚古生代晚期的碰撞造山过程使西天山造山带基本格架初步形成^[1, 44, 65, 67, 70, 71, 83]。从吉尔吉斯斯坦到中国新疆, 西天山多地可见下二叠统火山

磨拉石^[1, 44, 131]。三叠纪西天山遭受剥蚀, 沉积盆地面积扩大, 侏罗纪—古近纪主体受陆内伸展作用控制, 在西天山形成众多山间、山前沉积盆地^[132]; 新近纪以来, 可能受到南面印度—欧亚陆陆碰撞的影响, 西天山地区发生以逆冲推覆和褶皱堆叠为特征的陆内变形^[132-133]。正是中—新生代陆内构造调整过程, 在大面积沉积盆地中充填了侏罗系—古近系碎屑岩—泥岩—蒸发岩以及封存其中的盆地流体; 新近纪以来的陆内变形和隆升可能引起盆地流体失稳并大规模、长距离流动, 从而在碎屑岩层内的氧化—还原界面发生金属沉淀形成铅锌、铜、铀等砂岩型矿床^[50, 129-130]。乌拉根超大型铅锌矿床、伽师和萨热克铜矿床以及中亚西天山地区众多砂岩铀矿床正是这种盆地流体成矿的产物。

4 重要成矿类型

4类重要成矿环境和相关成矿作用研究以及区域内重要金铜多金属矿床实地调查表明, 西天山重要矿床类型包括造山型金矿、斑岩型金铜矿、侵入体有关金矿、浅成低温热液型金矿、矽卡岩型金铜铅锌矿、砂岩型(SST)铅锌铜矿、喷流沉积(SEDEX)型铅锌铜矿等7类。表1简列出西天山储量在大型及以上金、金铜、铜、铅锌重要矿床的成矿类型。

4.1 造山型金矿床

区域内较多金矿床的形成与西天山造山过程密切相关^[44]。西天山造山过程包括古生代洋陆俯冲有关的增生型造山和晚古生代晚期陆陆碰撞中的碰撞型造山, 与之相对应, 先后分别形成增生造山型金矿和碰撞造山型金矿。前者主要形成于洋陆俯冲期增生楔中不同成分和性质的变形变质混杂岩内, 如吉尔吉斯斯坦北天山 Taldybulak Levoberezhny 超大型金矿床^[11, 24, 44, 53, 55], 后者主要形成于陆陆碰撞造山环境中的变形变质带内, 如乌兹别克斯坦南天山 Muruntau 巨型金矿床^[2, 20, 56, 138-144]、吉尔吉斯斯坦中天山 Kumtor 巨型金矿床^[3, 19, 56, 145-146]、中国新疆南天山萨瓦亚尔顿超大型金矿床^[121]、中国新疆中天山卡特巴阿苏大型金矿床^[1, 44, 47, 59, 122]等。

吉尔吉斯斯坦 Taldybulak Levoberezhny 超大型造山型金矿床:

探明金储量 130 t, 平均品位 6.9 g/t^[55]; 位于比什凯克东 120 km。在区域构造中, 矿床处在北天山南

部边缘(图1-b),可能形成于早古生代 Terskey 洋向北向哈萨克斯坦—伊犁板块之下俯冲形成的增生楔中^[25]。矿区出露下元古界 Kuperlisay 群绿片岩、角闪岩、蛇绿岩套(蛇纹石化角闪岩、辉长岩和局部枕状玄武岩)和中元古界 Tegermenty 群云母片岩及花岗片麻岩、大理岩透镜体等前寒武系基底(图2),下泥盆统 Barkol 组中基性火山熔岩—碎屑岩零星出露,第四系覆盖有限。矿区自东向西发育 Taldybulak 和中、上 Taldybulak 3 条 NW 走向脆韧性变形带,分别由未变形的 Kuperlisay 群绿片岩、角闪岩隔开(图2)。金矿化主要发生在 Taldybulak 变形带,其中强变形片岩、绿片岩经受了显著硅化、碳酸盐化、铬云母化、电气石化和金矿化。泥盆纪—晚石炭世闪长岩、二长闪

长岩脉和古近纪辉绿岩脉常见穿过矿区前寒武系基底和脆韧性变形带及金矿体^[11](图2)。

古元古界 Kuperlisay 群强变形片岩中的矿化蚀变形成了石英—碳酸盐—绿帘石、石英—方解石—铬云母和石英—电气石—黄铁矿等矿物组合。早阶段石英—碳酸盐—绿帘石和石英—方解石—铬云母化蚀变与金矿化关系不大,石英—电气石—黄铁矿蚀变岩表现为浸染状、团斑状石英—电气石—黄铁矿和石英—电气石(网)脉,与金矿体空间上密切相关;金矿体中金属矿物包括黄铁矿、黄铜矿、毒砂、方铅矿、自然金、银金矿;自然金和银金矿常见于黄铁矿晶格内或沿晶体裂隙充填,金品位与黄铁矿含量呈正相关^[11,53]。脉石矿物包括石英、电气石和碳酸盐,少

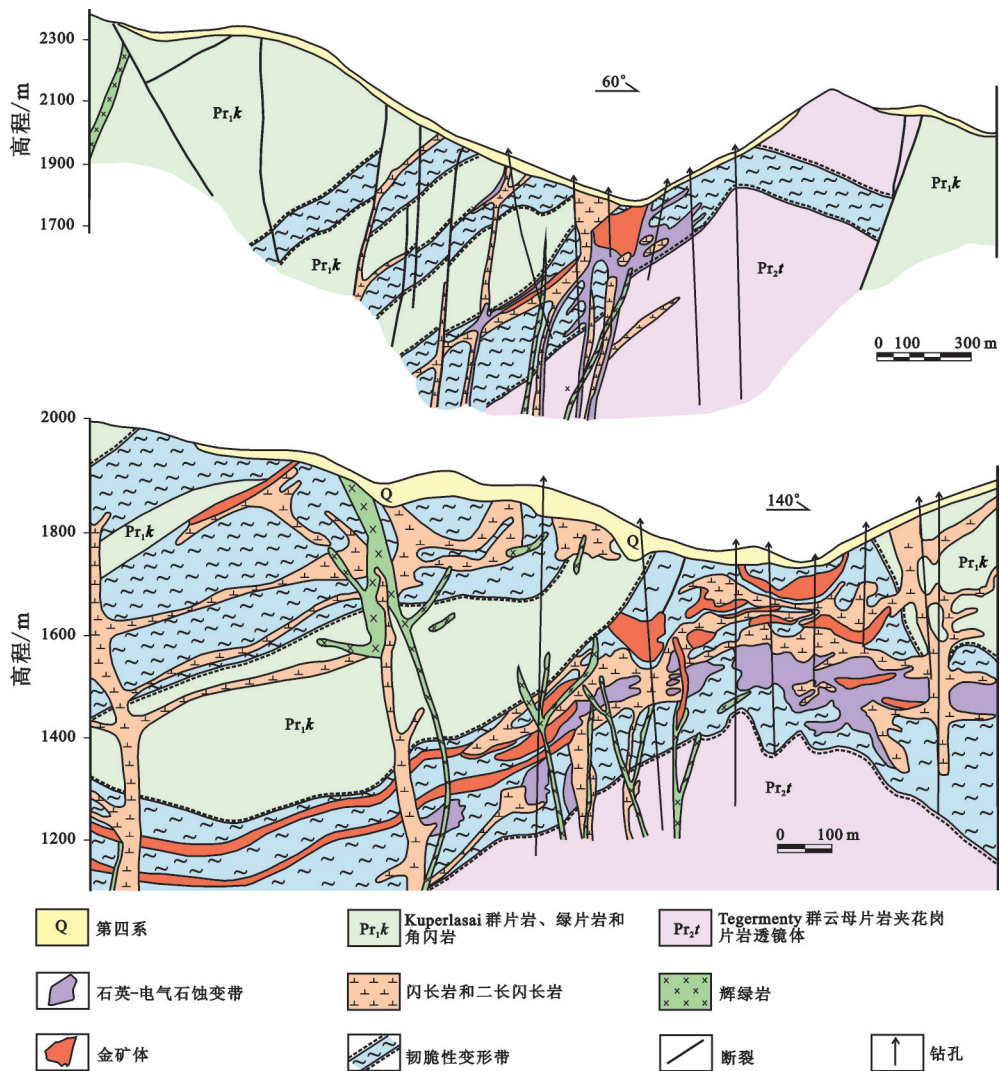


图2 吉尔吉斯斯坦 Taldybulak Levoberezhny 金矿床剖面图(据[1, 25, 57]改编)
 Fig.2 Sections of the Taldybulak Levoberezhny gold deposit, Kyrgyzstan (modified after references [1, 25, 57])

量铬云母和绿帘石。考虑到金矿体均赋存于元古界脆韧性变形带中,金矿体与变形带明显被闪长岩、二长闪长岩切穿,以及最近从金矿石中含金黄铁矿的Re-Os同位素体系测得(511±18) Ma的成矿年龄^[53],推测Taldybulak Levoberezhny金矿床是寒武纪Terskey洋向哈萨克斯坦—伊犁板块之下俯冲环境中,增生楔脆韧性变形带容矿的增生造山型金矿床。

乌兹别克斯坦Muruntau巨型造山型金矿床:

是世界最大金矿床,金储量6137 t,平均金品位3.5 g/t^[2]。矿床位于乌兹别克斯坦西北部克孜尔库姆沙漠中,处在区域构造中的南天山北缘(图1-b)海西期褶皱冲断带中。金矿的容矿地层是奥陶—志留系别索潘组,厚度约5 km,由变粉砂岩、变砂岩和变泥岩组成,由上至下可分为4个岩性段^[139],即绿色别索潘(Bs4)、杂色别索潘(Bs3)、灰色别索潘(Bs2)、黑色别索潘(Bs1)(图3);Bs3是金赋矿层位,背景金含量(483×10⁻⁹)高出Bs4、Bs2、Bs1和矿区外围页岩(11.2×10⁻⁹~25.8×10⁻⁹)一个数量级^[44],金的初始沉积富集是成矿的基础。矿区先后经历4期变形变质作用^[142]:D1表现为南北向至北北东向的挤压变形,并且影响到区域尺度上逆冲推覆构造的发展,变质程

度为低绿片岩相;D2表现为南北向的强烈挤压,并叠加在D1之上;D3表现为在NE向Muruntau-Daugyztau剪切带中出现NE向褶皱和小位移断层;D4表现为弱的EW向挤压缩短并伴随SN向断层;D2、D3两期变形伴随了金的富集,主导了穆龙套“Z”字形矿田构造格局的形成^[44]。矿区东南约7 km处出露萨尔达林斑状花岗闪长岩Rb-Sr等时线年龄为(286.2±1.8) Ma^[138],斑岩岩脉锆石U-Pb年龄(236±2) Ma^[56];矿区北Tamdinsky含角闪石花岗岩和淡色花岗岩年龄分别为(287.5±1.4) Ma和(293.3±2.1) Ma^[56];矿区4005 m深度钻孔揭示出花岗岩体(图3),全岩Rb-Sr等时线年龄为(287.1±4.6) Ma^[138]。

金矿体呈一个规模巨大、构造复杂的“矿楼”,为向东侧伏的陡立柱体,产在剪切带与断层交汇处^[144]。金矿化为细/网脉状和脉状,细/网脉状是主要自然类型,由含金石英细脉、石英-硫化物细脉、石英-方解石细脉、石英-电气石脉交错发育构成,先出现早期水平石英脉(Q1)、网状脉(Q2)、中部矿脉(Q3)和晚期富银矿脉(Q4)^[140]。伴随金矿化,先后形成石英+钠长石+金云母+更长石、绿泥石+绢云母+钠长石+石英、石英+钾长石+绢云母+白云石+硫化

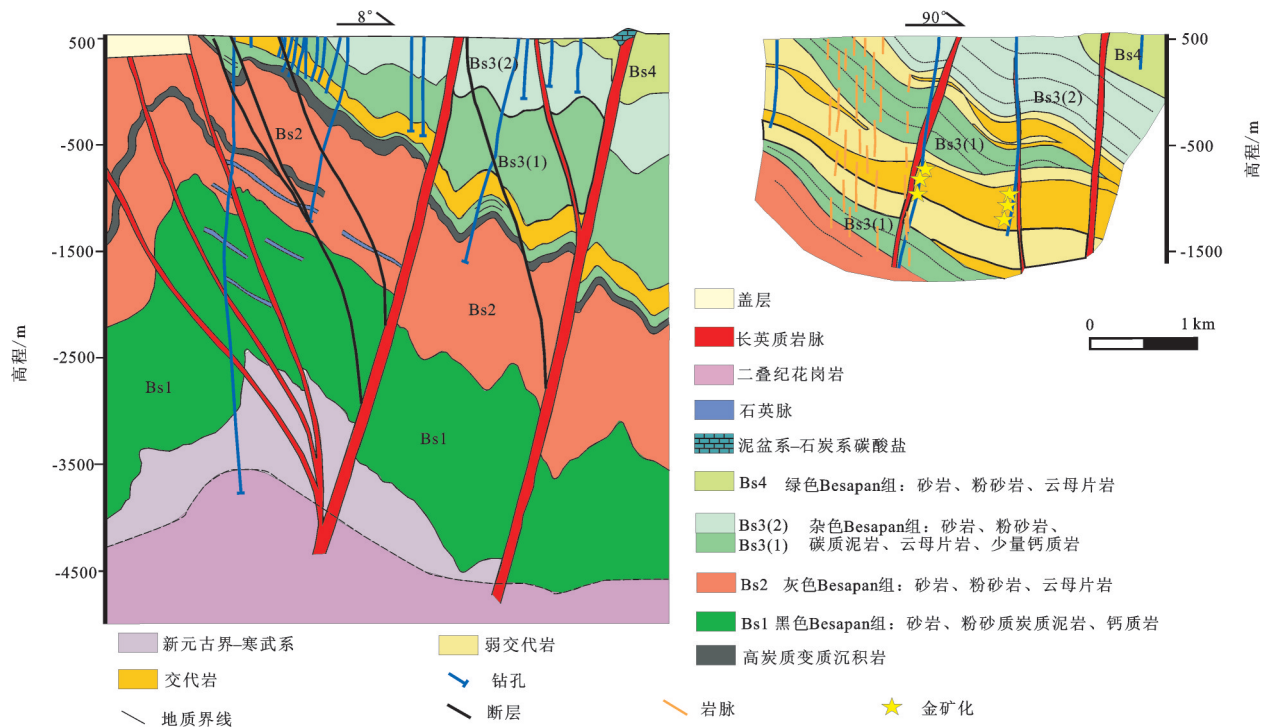


图3 乌兹别克斯坦穆龙套矿区剖面图(转引自[44])

Fig.3 Geological sections of the Muruntau deposit, Uzbekistan (after reference [44])

物、钾长石+白云石质碳酸盐+黄铁矿+电气石、石英+绢云母等五种蚀变矿物组合^[20, 139]。矿石中主要金属矿物包括黄铁矿、毒砂、白钨矿和自然金, 次要金属矿物有磁黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿; 脉石矿物主要为石英、长石和黑云母, 还有少量电气石、阳起石、透闪石、白云母、磷灰石和方解石^[44]。露天矿井 3 组毒砂样品的 Re-Os 等时线年龄为 $(287.5 \pm 1.7) \text{ Ma}$ ^[20], 金矿石中白钨矿 Sm-Nd 等时线测年获得 280 Ma 成矿年龄^[138]。

可见, 下古生界别索潘组被动大陆边缘浊流沉积是金成矿的矿源层, 海西中晚期伴随 Turkestan 大洋关闭和陆陆碰撞过程中的多期变形导致金第二次富集, 二叠纪早期的岩浆热液使金矿体最后就位^[44]。高品位矿石中 Pt 和 Pd 的品位分别为 0.10 g/t 和 0.13 g/t, 认为有地幔物质加入成矿^[140], 矿石中毒砂的 Os 同位素初始比值和流体包裹体 He 同位素分析表明, 非放射成因 Os 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值都比地壳储库相应值高, 很可能岩浆热液从地幔深处也带来了金成矿物质^[20, 143]。为了与增生型造山金矿区别, 将 Muruntau 巨型金矿床列为碰撞造山型金矿。

4.2 斑岩型金铜矿床

西天山重要斑岩型金铜矿床主要形成于古亚洲洋演化中晚期在大陆边缘出现的成熟岛弧环境^[1, 44]。Terskey 洋盆($\text{Pt}_3\text{-O}$)早古生代向北向哈萨克斯坦—伊犁板块之下俯冲, 早奥陶纪在板块南缘演化出 Kipchak 成熟岛弧带, 伴随岛弧岩浆—热液活动形成吉尔吉斯斯坦 TaldyBulak—Andash 大型斑岩型金铜矿集区(图 1-b)^[1, 5, 19, 44, 57, 147]; 北天山大洋($\text{Pz}_1\text{-C}$)古生代向南向哈萨克斯坦—伊犁板块之下俯冲, 石炭纪在板块北缘演化出成熟岛弧环境, 伴随岛弧岩浆—热液活动形成哈萨克斯坦 Koksai 大型斑岩型金铜矿床(图 1-b)^[1, 6, 21, 55, 57]。

Turkestan 大洋($\text{Pt}_3\text{-C}$)在几乎整个古生代向南北两侧陆块之下均明显俯冲并形成相应岛弧带, 向北向中天山地块之下俯冲, 石炭纪在中天山南缘演化出 Kurama 成熟岛弧带, 伴随岛弧岩浆—热液活动形成乌兹别克斯坦 Almalyk 巨型斑岩型金铜矿集区(图 1-b), 发育斑岩型—矽卡岩型—高硫—低硫浅成低温热液型金铜多金属成矿系统^[1, 26, 42, 44, 57]。Almalyk 矿集区未见前寒武纪基底出露, 志留系浅变质碎屑岩和下泥盆统中酸性火山熔岩—碎屑岩建造零星出露于矿集

区西南部, 不整合覆于加里东构造层之上的海西构造层包括中泥盆统一石炭统灰岩、白云岩, 上石炭统中酸性火山—沉积岩层, 二叠系陆相火山岩夹碎屑岩建造^[42]。矿集区大量出露岩浆侵入体(图 4), 加里东期侵入岩主要包括中志留—下泥盆统花岗岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩, 零星出露; 华力西期大致三幕岩浆侵入形成复式岩体, 早—中泥盆世第一幕侵入形成石英斑岩($(416 \pm 9) \text{ Ma}$, U-Pb 法)^[56]; 早—中石炭世第二幕侵入表现为正长闪长岩、闪长岩($321 \sim 330 \text{ Ma}$, K-Ar 法)和花岗闪长岩(339 Ma , K-Ar 法)^[1, 42, 44]; 晚石炭—早二叠世第三次侵入形成花岗闪长岩($(306 \pm 3) \text{ Ma}$, U-Pb 法)、石英二长闪长岩($(308 \pm 1) \text{ Ma}$, U-Pb 法)、花岗斑岩($(315 \pm 1) \text{ Ma}$, U-Pb 法)、花岗岩($(317 \pm 8) \text{ Ma}$, U-Pb 法)和酸性岩脉($(297 \pm 3) \text{ Ma}$, U-Pb 法)^[56](图 4)。Almalyk 金铜矿集区内产有 Kalmakyr、Dal' neye、Sari—Cheku 和 Kyzada 等 5 个大型—超大型斑岩金铜矿床、21 个大型—超大型浅成低温热液型金矿床和 Kurgashinkan 大型矽卡岩铅锌矿床(图 4), 其中 Kalmakyr 斑岩铜金(含 PGE)矿床储量 Cu 13 Mt(平均铜品位 0.4%)、Au 1400 t(平均金品位 0.5 g/t)、并伴生 Pd(17 t, 平均品位 0.06 g/t)和 Pt(1.7 t, 平均品位 0.006 g/t), 在全球最大的 25 个斑岩型金铜矿床中, 金储量排第 3 位, 铜储量排第 23 位^[4, 26]。

乌兹别克斯坦 Kalmakyr 巨型斑岩型金铜矿床:

矿区主要出露海西期侵入体, 泥盆系碳酸盐岩和砂岩零星出露。金铜矿体产于早—中石炭世正长闪长岩和闪长岩体内, 晚石炭世花岗闪长斑岩顶部也发生矿化(图 5)。金铜矿体呈巨大的网脉集合体, 椭球状或平卧状, 也见少量透镜状、脉状矿体(图 5)。原生矿体厚度大($>250 \text{ m}$), 占总矿石量的 93.4%, 氧化带(平均厚 20 m)、淋滤带(平均厚 19 m)和次生硫化物富集带(平均厚 19 m)较发育^[42]。热液蚀变从岩体中心向外依次出现石英—钾长石—黑云母化带、石英—绢云母—绿泥石化带、石英—伊利石—水白云母化带和青磐岩化带, 金矿化与黄铁矿化和硅化关系密切、铜矿化与绿泥石化、黄铁矿化关系密切。原生金铜矿石呈细脉浸染状、网脉状和浸染状, 矿石矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿、斑铜矿、磁黄铁矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿、自然金、银金矿、硫砷铜矿、碲化物等, 金主要呈自然

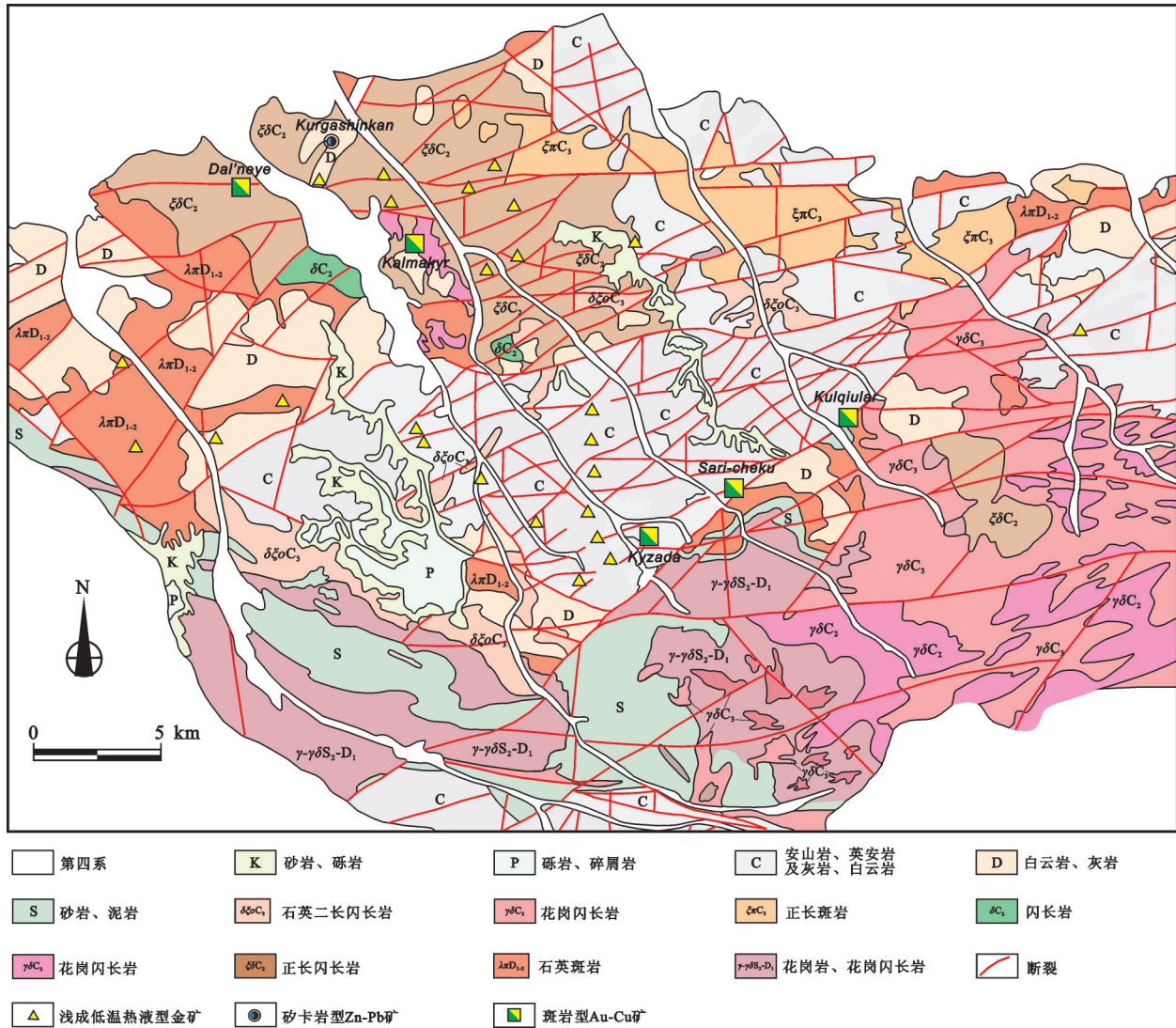


图4 乌兹别克斯坦Almalyk金铜矿集区地质矿产图(据[1])

Fig.4 Map of geology and mineral resources in the Almalyk Au-Cu ore concentration area, Uzbekistan (modified after reference [1])

金形式出现在黄铁矿晶体缺陷中,未见PGE独立矿物,LA-ICP-MS分析表明黄铜矿和黝铜矿分别具有高达110 g/t和20 g/t的Pd,是PGE主要载体矿物^[26]。脉石矿物主要有石英、钾长石、黑云母、绿泥石、绢云母、硬石膏、方解石等。矿化中心在正长闪长岩中,从矿体中心到边部,金铜矿石品位依次降低,从富矿变为贫矿再到弱矿化岩石,矿体与围岩的界线不清楚,需要化验圈定^[42]。原生矿石铜金品位呈正相关,铜钼品位趋负相关^[1]。

4.3 侵入体有关金矿床

西天山古生代俯冲增生岛弧环境中,形成与岛弧

岩浆、尤其石炭纪中晚期成熟岛弧岩浆侵入体时空和成生关系密切的重要金矿床,如吉尔吉斯斯坦西部中天山Chatkal地区与石炭纪Andagul岩体密切有关的Unkurtash超大型金矿床^[19,44]和Ishtamberdy超大型金矿床^[44](图1-b)。西天山晚古生代中晚期陆陆碰撞造山环境中,形成于碰撞不同时期、尤其碰撞晚/后期花岗闪长质侵入体时空和成生关系密切的重要金矿床,如乌兹别克斯坦中部南天山Nuratau地区Zarmitan超大型金矿床^[10,18,44,54,148-150]、塔吉克斯坦北部南天山Jilau超大型金矿床^[1,44,54](图1-b)。

乌兹别克斯坦Zarmitan侵入体有关超大型金矿

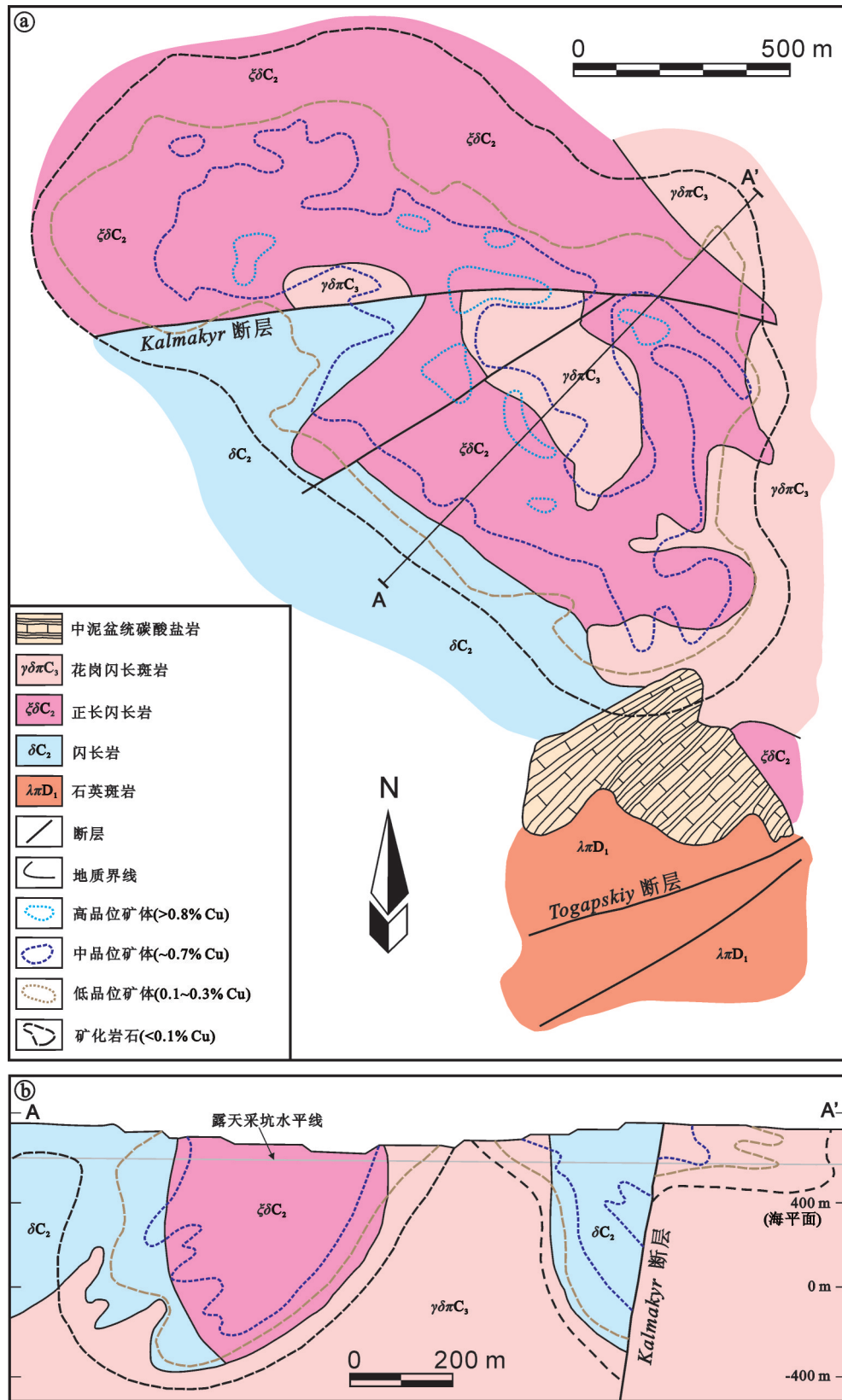


图5 乌兹别克斯坦 Kalmakyr 斑岩型金铜矿床地质图(a)和剖面图(b) (据[57]修编)

Fig.5 Geological map (a) and geological section (b) of the Kalmakyr porphyry Au-Cu deposit, Uzbekistan (modified after reference [57])

床探明金储量314 t, 金品位9.8 g/t^[18]。矿床所在区域, 基底为元古宙变质岩, 主要出露下古生界浅变质复理石, 泥盆系一下石炭统多为残余海碳酸盐岩夹少量基性火山岩及火山碎屑岩, 上石炭统变为磨拉石建造; 区域岩浆活动主体表现为Koshrabad石英二长斑岩基(图6-a), 其中发育辉长岩、辉长正长岩、石英正长闪长岩、石英二长岩等岩株、岩脉(图6-a), 锆石U-Pb法测得石英二长斑岩成岩于(286±2) Ma^[56], 属碰撞后伸展背景下的A型花岗岩^[150]。Zarmitan金矿床产在Koshrabad岩基东南与Karaulkhana-Zarmitan断裂交汇部位(图6-a)。

矿区出露志留系Dzhasbulaksk群石英云母片岩、碳质云母片岩、砂岩和粉砂岩夹凝灰岩和碳酸盐岩, Koshrabad岩体的侵入在接触带形成角岩和含石榴石砂卡岩, 角岩中裂隙系统对金矿化具有某些控制作用^[18]。金矿体呈脉状、细脉矿化带和线性网脉状产在Koshrabad侵入体和Dzhasbulaksk群地层中, 构成EW向长约7 km、宽300~1000 m石英脉

型金矿化带(图6-b)。金成矿先后经历了: ①石英-钾长石-白钨矿、②石英-黄铁矿-毒砂-金(碲化物)、③石英-闪锌矿-方铅矿-硫酸盐-黄铁矿-金、④石英-碳酸盐-萤石-黄铁矿4个阶段, 伴随矿化发生了硅化、钾长石化、碳酸盐化、萤石化等热液蚀变^[10]。金矿化集中在前3个阶段, 第①阶段伴随少量金矿化, 自然金呈孤立他形产于石英、白钨矿边部; 第②阶段是金矿化主阶段, 自然金与毒砂共生、或与黄铁矿、碲化铋共同充填在他形毒砂裂隙; 第③阶段自然金主要为银金矿, 与闪锌矿、方铅矿、辉铋银矿、辉铋铅银矿和脆硫铋银矿共生^[10]。

He同位素组成表明成矿流体(³He/⁴He=0.2~0.4 Ra)中有幔源组分加入^[10], Koshrabad岩体中角闪石、黑云母和钛铁矿金含量达0.002~0.03 g/t^[148], 侵入于Koshrabad岩体中的伟晶-细晶岩脉金含量达0.3 g/t^[151], Re-Os法测得金矿石中含金黄铁矿年龄286 Ma^[54], 与岩体成岩时代一致, 表明金成矿与Koshrabad岩体侵入关系密切。Zarmitan金矿床为

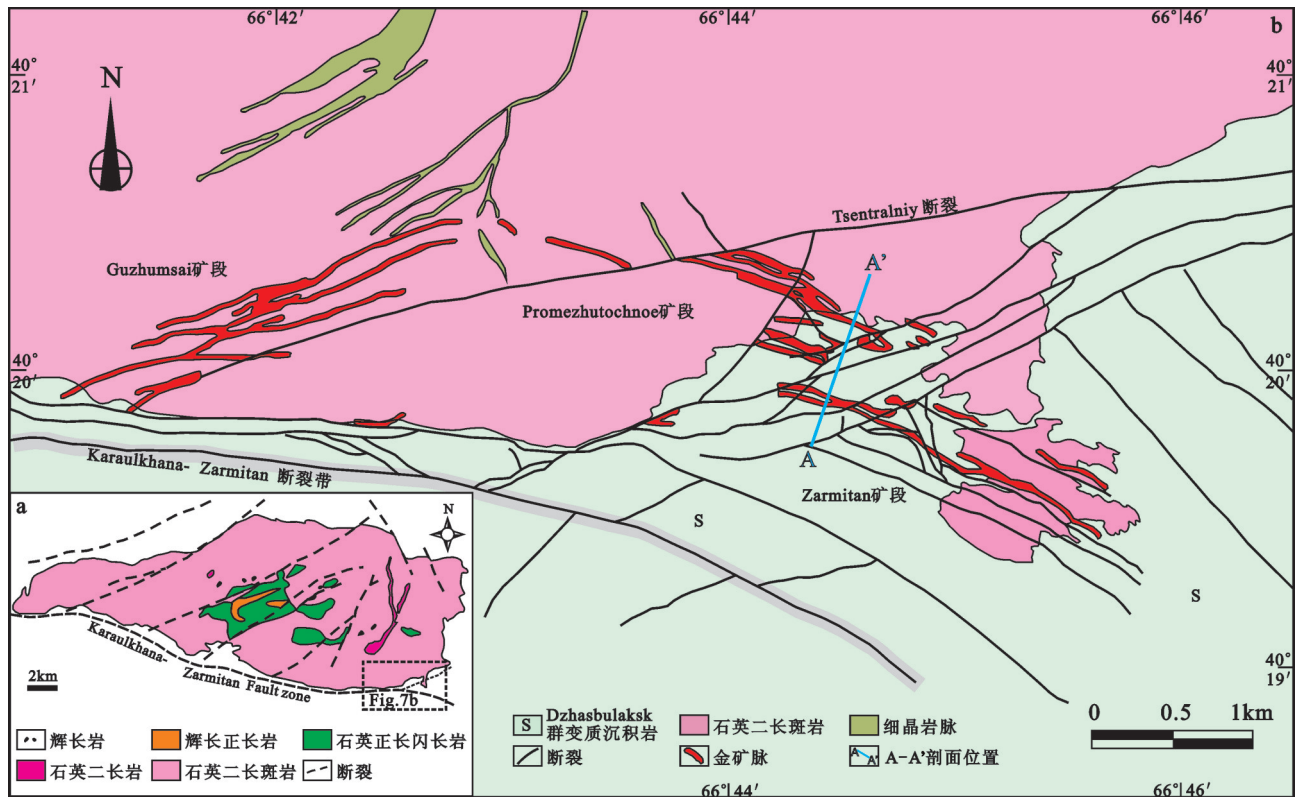


图6 乌兹别克斯坦Koshrabad侵入体地质图(a)和Zarmitan金矿床地质图(b)

(据文献[18, 44, 149]修改)

Fig.6 Geological maps of Koshrabad intrusion (a) and the Zarmitan gold deposit (b), Uzbekistan

(modified after references [18, 44, 149])

与侵入体有关金矿床。

4.4 浅成低温热液型金矿床

是西天山第4个重要金成矿类型,常与斑岩型、矽卡岩型共生构成斑岩金铜铅锌铁成矿系统^[1,40-42,44,52-53,97],形成于晚古生代中晚期海陆交互相或陆相火山-沉积盆地中。西天山这种重要火山-沉积盆地如乌兹别克斯坦东南部 Almalik^[42-44,53,57]、中国新疆西天山吐拉苏^[53]、哈萨克斯坦东南部 Arhaly 以及 Charkura 等, Almalik 盆地产有包括 Kochbulak、Kyzylarma、Kauldy 等21个浅成低温热液型金矿床^[1,53](图4),吐拉苏盆地产有包括阿希、京希-伊尔曼德等多个浅成低温热液型金矿床^[53],它们于石炭纪成矿^[1,44]; Arhaly 浅成低温热液型金矿床则形成于二叠纪陆相火山岩中。

乌兹别克斯坦 Kochbulak 超大型浅成低温热液型金矿床:

探明储量金 600 t、银 400 t^[15]。矿床处在 Kurama 山脉北坡 Almalik 矿集区内(图4),与前述 Kyrmakr 等矿床同产于乌兹别克斯坦中天山南缘(图1-b)。成矿与古生代 Turkestan 洋向北向哈萨克斯坦板块俯冲形成的成熟岛弧环境有关,区域内石炭纪一早二叠世陆相火山岩和相关侵入体发育。金矿床受 Karatash 破火山口控制(图7)。矿区出露石炭系粗面安山岩、安山岩、英安岩及其火山碎屑岩,南部见上石炭一下二叠统流纹岩,安山岩锆石 U-Pb 法年龄为(301±4) Ma^[56]。矿区浅成侵入体包括花岗闪长斑岩、辉绿岩、花岗正长斑岩及霏细岩等岩脉。在破火山口基础上,矿区叠加了NE向及NW向2组断裂,使矿区整体呈现出断块构造(图7)。

金成矿地质体是充填于破火山口内的石炭纪火山岩,金矿体表现为硅化、绢云母化、明矾石化等含金低温蚀变岩,受不同性质和产状断裂构造控制呈脉状、筒状产出。主要发育3种矿化式样^[1],高角度陡倾金矿脉受破火山口环状、放射状断裂-裂隙构造控制,低角度平卧金矿脉受火山岩-凝灰岩不同岩性过渡层和层间构造控制,筒状金矿体受破火山口内环状断裂与放射状断裂交汇、或它们与晚期构造断裂交汇控制。金矿石中矿石矿物主要为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黝铜矿、砷黝铜矿等,它们几乎均可作为载金矿物;可见较粗粒自然碲、碲金矿、针碲金铁矿、碲金银矿、碲化银、碲铅矿。金矿石平

均品位:金 13.4 g/t、银 120 g/t、铜 0.2%、硒 4 g/t、碲 101.6 g/t。金矿石中蚀变绢云母的 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄分别为(280±8) Ma 和(270±8) Ma^[15]。金成矿流体盐度低,成矿过程中伴随着酸性(pH=3~4)Cl⁻-Na⁺-K⁺流体周期性沸腾,金-银碲化物以及硫化物沉淀成矿主要与温度在 250~200°C、*f*_{S₂} 逐渐减少、富集 F⁻-Cl⁻-Te²⁺ 流体有关^[14],属高硫型浅成低温热液金矿床。

4.5 矽卡岩型金铜铅锌矿床

西天山矽卡岩型金铜铅锌成矿多与泥盆纪或石炭纪岛弧花岗岩类侵入体密切相关,如中国新疆北天山哈勒尕提中型矽卡岩型铜矿床形成于晚泥盆世二长花岗岩与上奥陶统灰岩接触带,受北天山洋向南向哈萨克斯坦-伊犁板块之下俯冲的岛弧岩浆-热液过程控制^[1,58,97,152];再如乌兹别克斯坦中天山 Almalik 矿集区 Kurgashinkan 大型矽卡岩型铅锌矿床(图4),在晚石炭世成熟岛弧正长闪长岩侵入体与泥盆系白云岩接触带形成工业铅锌矿体^[1,36,56]。但矽卡岩型金成矿多与碰撞造山晚期花岗质侵入体关系密切,如吉尔吉斯斯坦中天山 Markmal 矽卡岩型金矿床^[1]。

吉尔吉斯斯坦 Makmal 矽卡岩型大型金矿床:

探明金储量 58 t,矿石 Au 平均品位 7.2 g/t^[134]。矿床位于吉尔吉斯斯坦中天山 Akshirak 地区,靠近 Fergana 断裂(图1-b),成矿可能与 Atbash-南天山洋关闭、碰撞造山晚期的花岗岩浆热液活动密切相关。矿区出露地层为近EW走向的下石炭统碳酸盐岩(图8),其中侵入了 Chartash 花岗岩体。该侵入体主要是具有粗粒结构、斑状构造的淡色花岗岩,形成时代为 277~290 Ma^[134],少量为细粒淡色花岗岩及花岗斑岩脉;矿区外围还出露中石炭世闪长斑岩、长石斑岩和煌斑岩等岩脉。矿区发育近EW向和NW向2组断裂构造。

金矿体不规则产在花岗岩与碳酸盐岩接触带附近近东西向断裂破碎带中(图8)。矿石自然类型包括:①含金铜磁铁矿矽卡岩,金属矿物有磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,非金属矿物有石榴子石、透辉石、蛇纹石等;②含金块状硫化物,金属矿物有闪锌矿、辉铅铋矿、黄铁矿、黄铜矿、自然金、自然银、赤铁矿、黝铜矿、毒砂、辉铋矿,非金属矿物有石英、石榴子石、绿帘石、阳起石、透闪

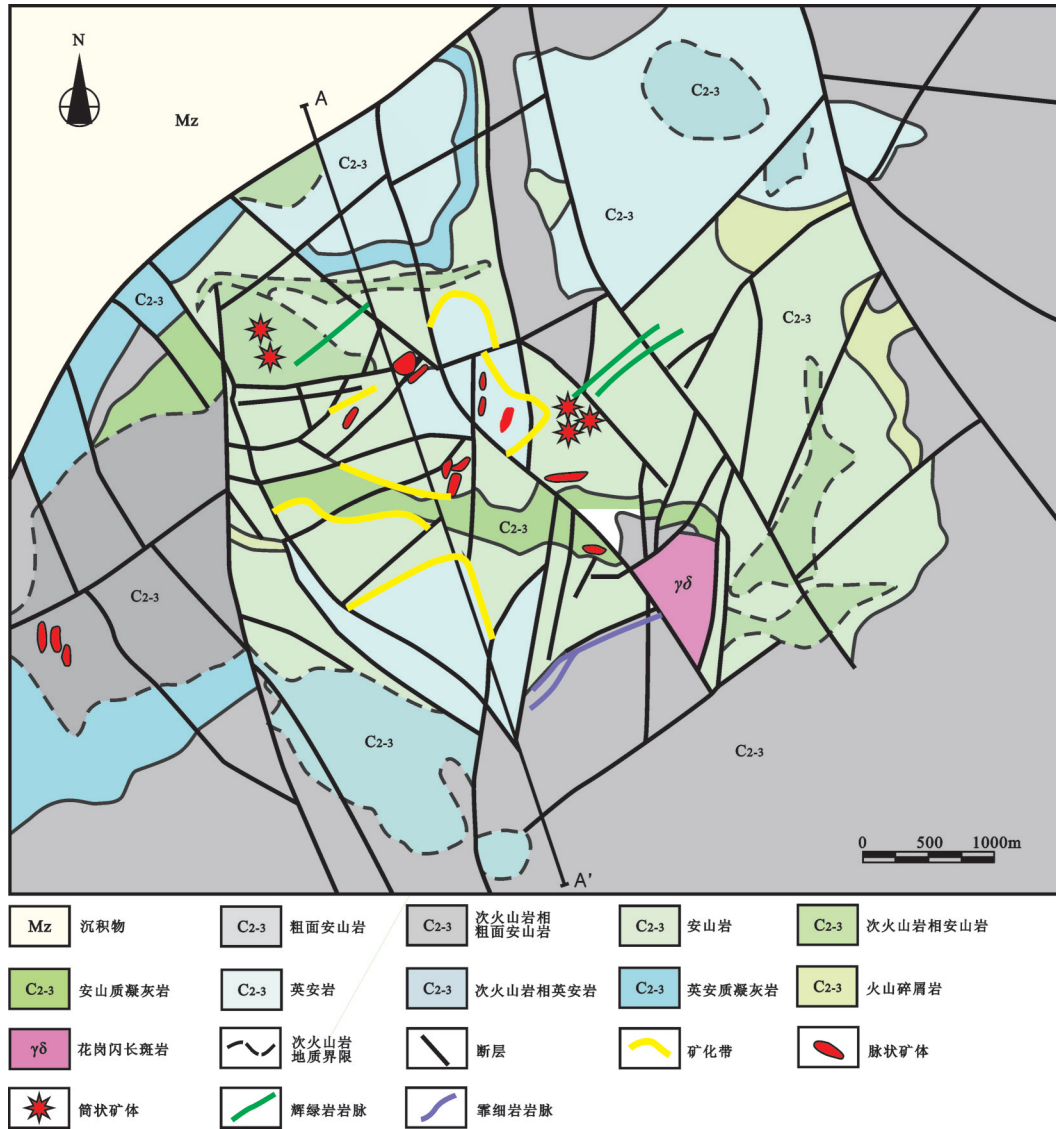


图7 乌兹别克斯坦Kochbulak金矿区地质图(据[1, 36]修编)

Fig.7 Geological map of the Kochbulak Au deposit, Uzbekistan (modified after references [1, 36])

石、重晶石; ③含金锡石云英岩, 金属矿物有锡石、磁铁矿、黑钨矿、辉钼矿, 非金属矿物有黄玉、石英、白云母; ④含金硫化物脉石英, 金属矿物有自然金、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉铋矿、自然铋, 非金属矿物主要为石英。从岩体向地层出现闪长岩→石榴石方柱石矽卡岩→石榴石硅灰石矽卡岩→硅灰石矽卡岩→硅灰石化灰岩→大理岩→灰岩的蚀变分带。

4.6 喷流沉积(SEDEX)型铅锌铜矿床

西天山哈萨克斯坦—伊犁古陆中—新元古代发育被动大陆边缘^[1]。与陆缘裂陷盆地流体活动相

关形成重要SEDEX型铅锌矿床, 哈萨克斯坦Tekeli超大型铅锌矿床是典型实例; 中国新疆赛里木地块最近发现哈尔达坂、托克塞、四台等铅锌矿床, 是重要的SEDEX型铅锌矿找矿方向^[1]。

哈萨克斯坦Tekeli超大型SEDEX型铅锌矿床:

Zn+Pb 储量 7 Mt, Zn: Pb = 1.2: 1^[153], 平均品位 Pb 2.8%、Zn 4.19%、Ag 42.6 g/t。矿床位于哈萨克斯坦东南部, 处在区域构造中的哈萨克斯坦—伊犁古陆块东北缘Tekeli, 属Tekeli—赛里木地块。区域内前寒武纪变质基底多有出露, 盖层包括里霍系海相碎屑岩—碳酸盐岩、泥盆系碳酸盐岩和中性火山岩、

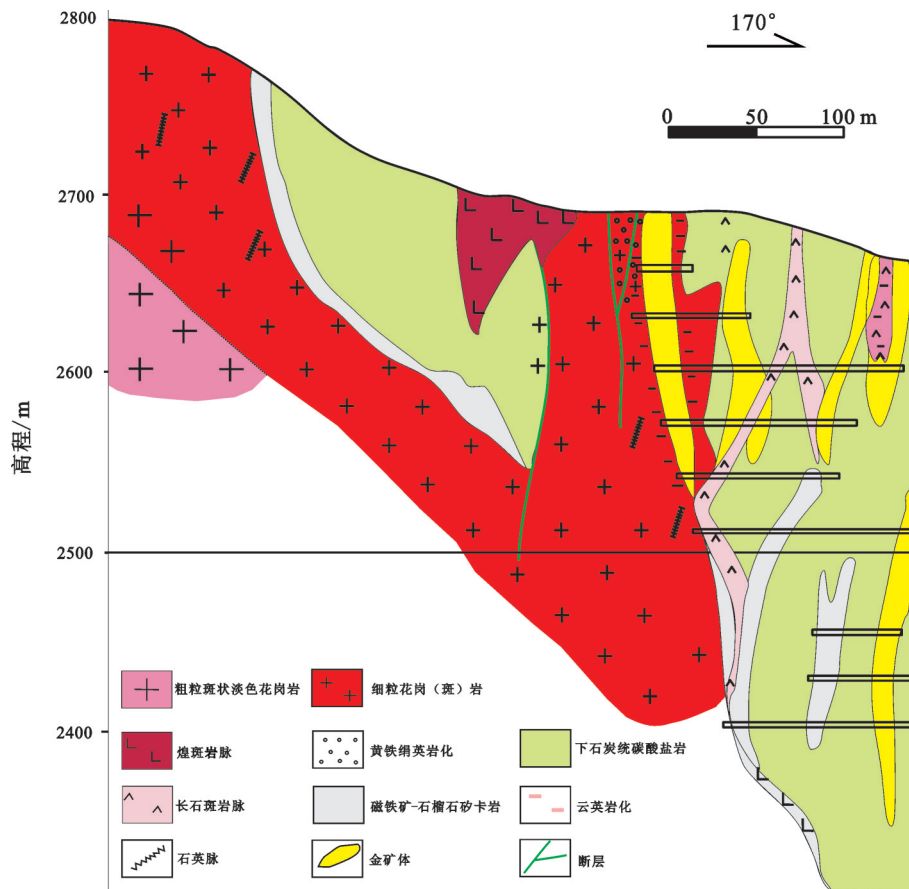


图8 吉尔吉斯斯坦 Makmal 金矿床剖面图 (据[134]修编)

Fig.8 Geological section of the Makmal Au deposit, Kyrgyzstan (modified after reference [134])

二叠纪玄武岩。里霍系 Tekeli 群下部是主要容矿地层, 由碳质、粘土、硅质页岩、灰岩和白云岩的水平韵律层组成, 有机质含量高(6%~15%), 普遍见浸染状黄铁矿、闪锌矿、方铅矿。Tekeli 群 Pb、Zn、Ag、Sb、As、Cd、Tl、Pt、Pd、V、P、Ba、Mo、Bi 等多种元素背景值高。泥盆系灰岩和安山岩不整合于里霍系之上。二叠系海相灰岩、石英砂岩、板岩和玄武岩不整合于泥盆系之上。

铅锌硫化物矿体呈透镜状、似层状, 产在里霍系 Tekeli 群底部黑色炭硅质灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、白云岩和页岩中, 矿体与地层彼此整合(图9)。矿区见成矿后花岗斑岩、辉绿岩、闪长玢岩等小型侵入体, 它们对矿体有破坏。矿区地层为向北倾的单斜, 成矿后断裂对地层和矿体均有错动(图9)。矿石中金属矿物有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿, 次要金属矿物为硫锑铅矿和车轮矿, 少量黄铜矿、黝铜矿、砷

黄铁矿、磁黄铁矿、斜辉锑铅矿、红锑镍矿; 脉石矿物主要为石英、方解石。铅锌硫化物矿石呈致密层状、层状和纹层状构造, 黄铁矿矿石多呈致密块状构造, 矿石中硫化物矿物均为微晶结构。矿石后期热液叠加使矿石稍有变化。

4.7 砂岩型(SST)铅锌铜矿床

与山前山间盆地流体流动有关, 受砂岩地层中氧化-还原界面控制, 在西天山中—新生界陆相碎屑岩层中形成重要铅锌铜矿床, 如中国新疆西天山乌拉根砂岩型铅锌矿床(Pb+Zn 储量仅次于金顶, 排中国第二^[1, 30, 34, 50])和伽师、萨热克等砂岩型铜矿床(金属储量均已达中型^[1, 33, 39])。

中国新疆乌拉根超大型砂岩型铅锌矿床:

矿体呈大型板状体或透镜体产在一个中—新生界构成的向斜南、北两翼(图10、11), 分别称为南、北矿带。仅南矿带西部已探明铅锌储量 3 Mt, 平均

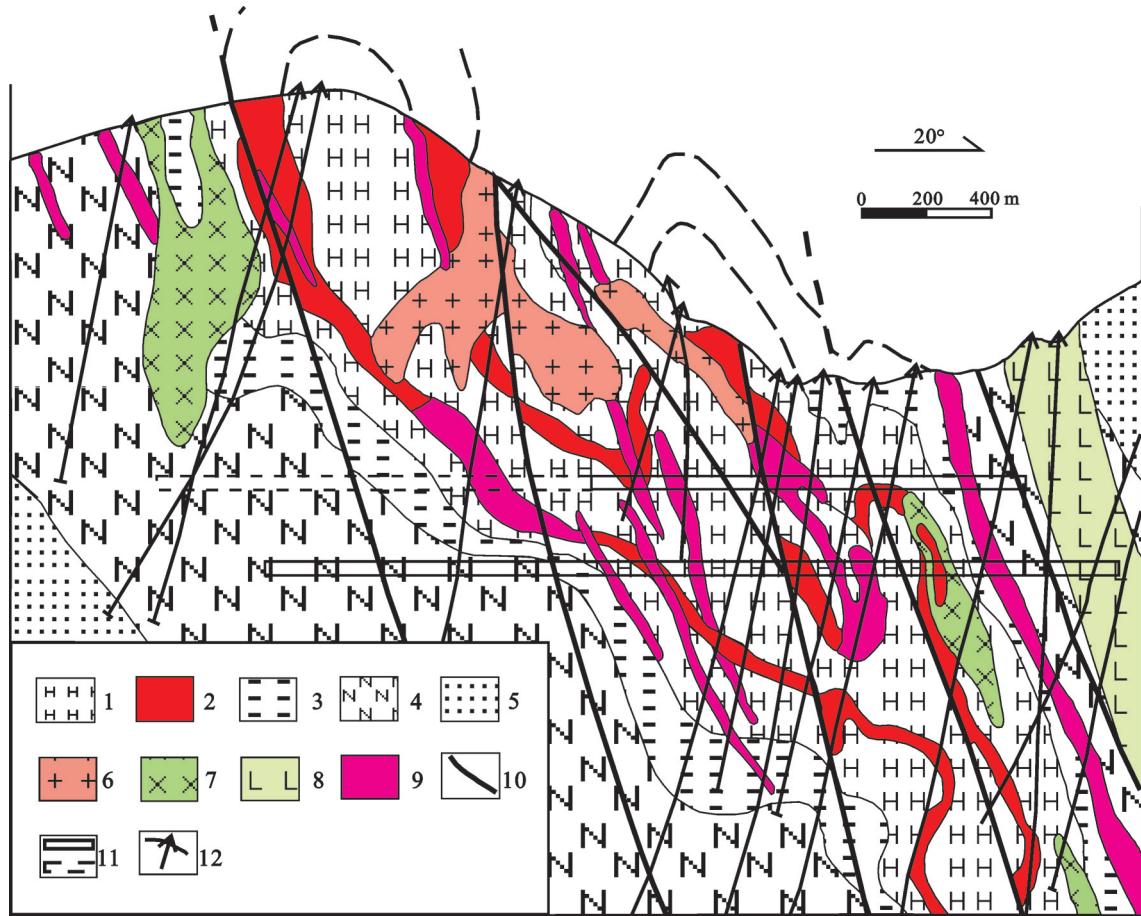


图9 哈萨克斯坦Tekeli铅锌矿床剖面图(据①修改)

1—炭质含黄铁矿灰岩、泥灰岩和白云岩(黄铁矿少于50%); 2—黄铁矿矿层(黄铁矿含量大于50%); 3—白云质灰岩; 4—白云岩;
5—韵律状碳酸盐岩—碎屑岩; 6—花岗斑岩; 7—闪长玢岩; 8—辉绿岩; 9—铅锌矿体; 10—成矿后断裂; 11—坑道; 12—钻孔

Fig.9 Geological section of the Tekeli Zn-Pb deposit, Kazakhstan (modified after ①)

1—Carbonaceous pyrite-bearing limestone, marlstone and dolomite (pyrite < 50%); 2—Pyrite orebody (pyrite > 50%); 3—Dolomite limestone;
4—Limestone; 5—Rhythmic carbonate-clastic rock; 6—Granite porphyry; 7—Dioritic porphyrite;
8—Diabase; 9—Pb-Zn orebody; 10—Fracture; 11—Adit; 12—Drill hole

品位Pb 0.45%、Zn 2.61%，矿床远景铅锌资源量有望突破10 Mt^[30, 50]。矿床位于塔里木盆地西北部喀什山间盆地，该盆地夹持于南天山与西昆仑山两大山系之间^[34, 48, 50]。矿区出露中元古界长城系阿克苏群(Chak)基底，盖层为中—新生界(图10)。铅锌矿体主要产在下白垩统克孜勒苏群第五岩性段(K₁k₅)褪色灰白色砂砾岩层内，少部分产于古新统阿尔塔什组(E₁a)泥质白云岩层中。中—新生界在矿区呈现乌拉根向斜(图10、11)，中新统帕卡布拉克组(N₁p)为向斜核部，向斜轴向为NEE。向斜南翼黑孜威断裂(F₁)切穿侏罗系和元古界，为逆冲断层；北翼近

EW向吾合沙鲁断裂(F₂)为阿尔塔什组(E₁a)与克孜勒苏群(K₁k₂)的层间逆断裂；EW向F₃逆断裂使白垩系及侏罗系地层错开；矿区东部杨叶地区发育2条相交逆断裂，使地层错动及局部抬升^[50]。

板状、透镜状铅锌矿体整合于地层产出，并随地层一起变形，从两翼到转折端连成一体(图11)。原生矿石金属矿物为闪锌矿、方铅矿、白铁矿、黄铁矿等，以铅锌硫化物交代碎屑岩钙质胶结物形成的微细浸染状构造为主，局部发育块状构造、脉状、细脉状构造等。矿体围岩蚀变弱且简单，见碳酸盐化、天青石化、石膏化，区域还原引起的褪色蚀变广

①武广, 莫江平, 陈根文, 等. 楚伊犁—西天山成矿带整体研究与勘查技术集成[R]. 中国科学院广州地球化学研究所, 2011.

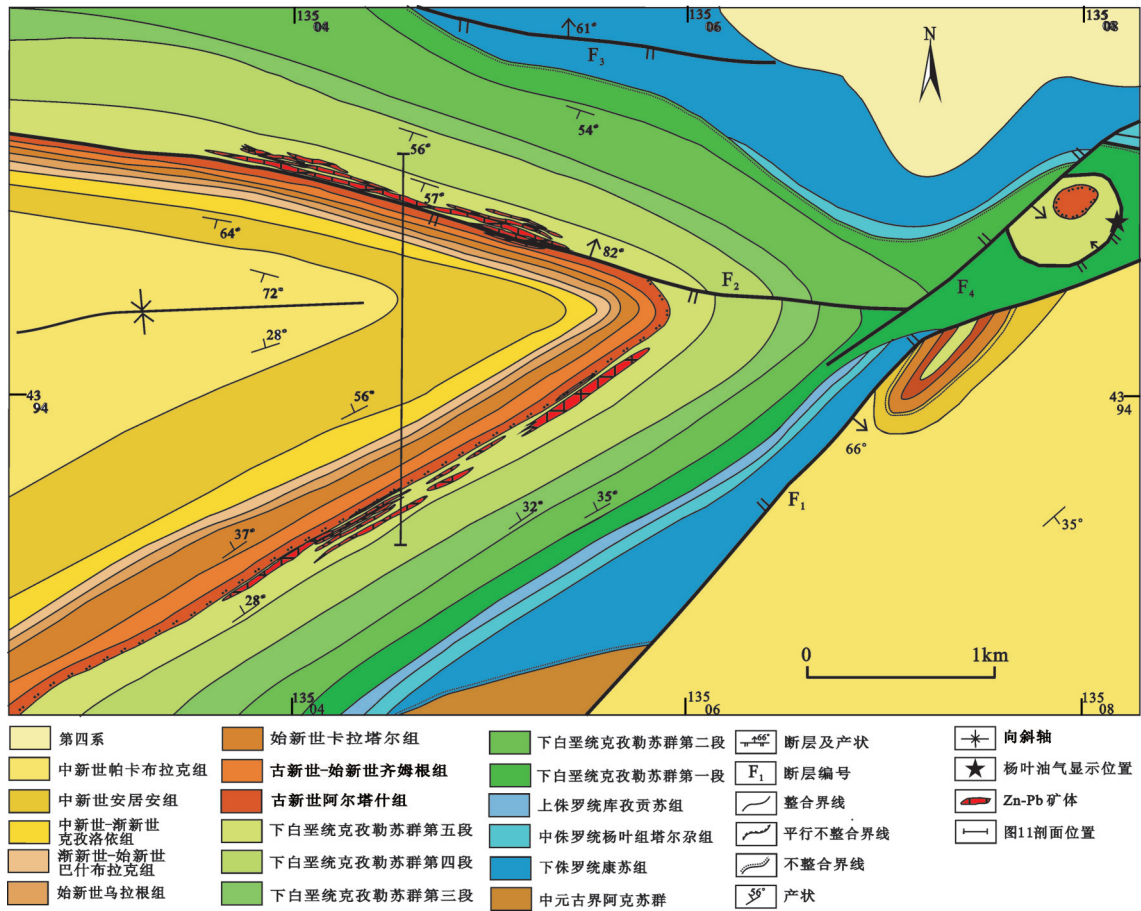


图 10 中国新疆乌拉根铅锌矿区地质图(据[50]修改)

Fig.10 Geological map of the Uragen Zn-Pb deposit, Xinjiang, China (modified after reference [50])

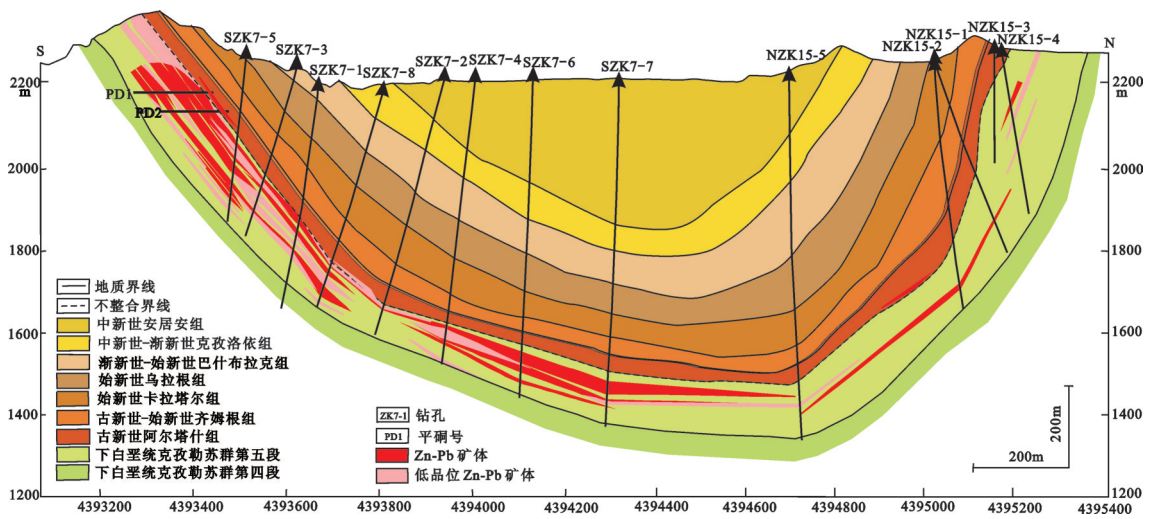


图 11 中国新疆乌拉根铅锌矿床剖面图(据[50]修改)

Fig.11 Geological section of the Uragen Zn-Pb deposit, Xinjiang, China (modified after reference [50])

泛发育于容矿含砾砂岩层中。矿石 $\delta^{34}\text{S}$ (-27.9‰~-14.6‰^[34, 50, 154-156])指示相邻层位中石膏、天青石等硫酸盐提供硫;矿石中常见有机质,在铅锌硫化沉淀成矿中发挥了硫酸盐还原剂作用^[48, 50]。矿石铅同位素组成指示造山带剥蚀区提供了成矿金属^[34, 50, 156]。乌拉根铅锌矿床是与盆地流体流动相关的砂岩型(SST)铅锌矿床^[34, 50]。

5 讨论

5.1 成矿类型

不完全统计,西天山大型及以上规模的金铜铅锌矿床共计32个,其中金矿床19个,金铜矿床5个,铜矿床3个,铅锌矿床5个(表1)。金铜矿是西天山的优势矿产,铅锌也构成重要工业富集。西天山大型-超大型和巨型金铜铅锌矿主要通过7类成矿作用达到重要工业富集,即造山型、斑岩型、浅成低温热液型、侵入体有关、矽卡岩型、SEDEX型和砂岩型;32个大型及以上规模金铜铅锌矿床中,造山型金矿床、斑岩型金铜矿床、浅成低温热液型金矿床各7个、侵入体有关金矿床4个、矽卡岩型金铜铅锌矿床3个、SEDEX型铅锌矿床3个、砂岩型铅锌矿床1个(表1)。从矿床数量看,西天山造山型、斑岩型、浅成低温热液型是最为重要的金铜成矿类型,其次是侵入体有关金矿和矽卡岩型金铜铅锌矿,SEDEX型和砂岩型应为铅锌成矿最为重要的类型。表1中32个大型-超大型矿床金铜铅锌储量也能明显看出相似的特点。西天山金储量约63%来自造山型金矿床,18%来自斑岩型金铜矿床,13%来自浅成低温热液型金矿床,而侵入体有关金矿床和矽卡岩型金矿床仅仅拥有6%的金储量;铜储量约98%来自斑岩型铜矿床或金铜矿床,剩余2%来自矽卡岩型铜矿床;铅锌储量的65%来自SEDEX型,24%来自砂岩型,其余11%来自矽卡岩型。

除兰德型金矿外,全球常规超大型金矿床(储量 $\text{Au} \geq 100 \text{ t}$)共计约149个,其中造山型63个,斑岩型38个,浅成低温热液型26个,卡林型14个,其他8个;在它们的储量分布中,造山型金矿床金储量(48210 t)约占全球金总储量(102575 t)的47%;而在西天山,造山型金矿床拥有的金储量远高于世界相应水平,约占63%;造山型金矿床应为西天山最重要的金成矿类型。对于铜矿而言,斑岩型是最为重

要的工业类型,世界60%左右的铜储量来自斑岩型^[157];而在西天山,斑岩型铜矿床拥有的铜储量远远高于世界相应水平,约占98%;斑岩型铜矿床应是西天山最重要的铜成矿类型。全球80%左右的铅锌储量来自沉积岩容矿铅锌矿床^[158],西天山约89%的铅锌储量源于沉积岩容矿的SEDEX型和砂岩型铅锌矿床,反映SEDEX型和砂岩型对铅锌成矿的重要作用。

5.2 成矿环境

造山型金矿最初是指变质地体中的石英脉型金矿床^[159]。事实上,造山型金矿是威尔逊旋回从俯冲增生到碰撞造山不同构造演化时期不同地壳深度(中/下地壳为主)变质变形地体中的脉型/蚀变岩型金矿床^[54, 61-63],成矿多与造山中晚期的绿片岩相变质变形及花岗岩类岩浆侵入过程关系密切,常在地壳不同深度出现彼此关联的多种矿化样式,形成造山金矿床系列(oro-genic gold system)。西天山在俯冲增生和碰撞造山2个时期具有重要造山型金矿床形成,前者如Taldybulak Levoberezhny超大型金矿床等,后者如Muruntau巨型金矿床、Kumtor巨型金矿床等^[1, 44](表1)。Taldybulak Levoberezhny金矿床产在吉尔吉斯斯坦北天山南缘(图2),金矿体产在含蛇绿岩片的混杂岩带中,成矿地质体为其中的下元古界片岩,矿石中含金黄铁矿的Re-Os等时线指示成矿时代为(511±18) Ma^[53];寒武纪Terskey洋盆海底扩张强烈并在其南、北缘均发生洋壳俯冲,形成增生岛弧环境^[1, 70, 76-77, 90-91],金成矿是Terskey洋北缘俯冲增生作用的产物^[53]。Muruntau金矿床产在乌兹别克斯坦Turkestan缝合带南侧、南天山北缘褶皱冲断带^[1, 44],大规模金成矿与下古生界含金炭质复理石在石炭纪末期Turkestan大洋关闭、碰撞造山过程的强烈脆韧性变形变质^[2, 42]和在早二叠纪造山晚期花岗质岩浆侵入、热液叠加^[20, 51, 56]密切相关,是碰撞造山过程的产物^[1, 44]。包括西天山在内的中亚造山带被认为是增生造山最为突出的区域^[54, 57, 65-67, 69, 70],世界各地造山型金矿也多产在增生地体内^[54, 160-162],但西天山造山型金矿床更多形成于碰撞造山环境,仅少量形成于俯冲增生环境(表1)。这种成矿环境与类型不对称的动力学机制尚不清楚。全球金储量大于500 t的造山型金矿床共计22个,其中30%产于包括西天山在内的中亚造山带,西天山Muruntau

金矿是世界上单矿床金储量最大金矿,中亚造山型金成矿这种鲜明的特色是否说明存在俯冲增生与碰撞造山两种环境中成矿作用的叠加还需进一步研究。

西天山斑岩型铜或金铜矿床形成于洋陆俯冲的增生岛弧环境(表1),这与环太平洋区域斑岩型铜矿的形成环境十分相似。但西天山斑岩型铜矿明显形成于洋盆演化晚期或末期即将关闭时出现的成熟岛弧环境^[44]。Andash和Taldy Bulak是产在吉尔吉斯斯坦北天山南缘同一个矿集区内的2个超大型斑岩型金铜矿床^[1, 5, 57](表1),金铜矿化主要发生于闪长玢岩内(约75%)和其中的围岩捕掳体中(约20%),Taldy Bulak矿区含矿闪长玢岩形成时代为中奥陶世^[147](475~455 Ma),研究认为金铜矿床形成于Terskey洋向北向哈萨克斯坦—伊犁板块俯冲增生岛弧环境^[1, 57];Terskey洋可能在新元古代打开^[1, 44, 70, 76~77, 90~91, 163],于奥陶纪关闭^[98~100],Andash和Taldy Bulak金铜矿的构造位置和中奥陶世成矿时代反映它们形成于Terskey洋演化末期的成熟岛弧环境。世界著名的乌兹别克斯坦中天山南缘Almalyk斑岩型金铜矿集区产在Turkestan洋向北向中天山俯冲形成的Kurama石炭纪增生岛弧环境,成矿时代为晚石炭世^[1, 42, 44, 57];而Turkestan洋新元古代打开,石炭纪末关闭^[1, 44, 78~80],晚石炭世成矿的Almalyk斑岩型金铜矿集区无疑形成于Turkestan洋长期演化末期的成熟岛弧环境。哈萨克斯坦东南部Koksai大型斑岩型金铜矿床中石炭世成矿,是北天山洋向南向哈萨克斯坦—伊犁板块俯冲形成的成熟岛弧构造—岩浆—热液作用的产物^[1, 21, 44, 54~55, 57]。

西天山SEDEX型和砂岩型铅锌矿床均以沉积岩为主岩。SEDEX型铅锌成矿于陆缘盆地^[1](表1),与元古宙边缘裂陷和海底热水沉积过程有关,如哈萨克斯坦东南部Tekeli超大型铅锌矿床、中国新疆西天山哈尔达坂和四台等大型铅锌矿床(图9)。砂岩型铅锌在山前盆地富集,与中—新生代盆地流体流动相关^[1](表1),如中国新疆西天山乌拉根超大型铅锌矿床^[50](图10~11)。

5.3 找矿潜力

内生金矿床常在勘查和研究中理解为造山型、斑岩型、浅成低温热液型、卡林型和其他(如侵入体有关、IOCG、矽卡岩型、VMS)等主要成矿类型^[162];

而兰德型金矿床主要产于南非Witwatersrand盆地的特殊地质环境,世界其他地区鲜见,常作特例处理。兰德型除外的所有金成矿类型中,造山型最为重要,它提供了世界47%的金储量,远高于其他成矿类型拥有的金储量。相对于其他金成矿类型,造山型因受变形变质地体的地壳连续成矿作用控制而常形成超大型、巨型金矿床^[160~162];在全球金储量大于100 t的149个超大型金矿床中,造山型就有63个,占42%;在全球金储量大于500 t的36个金矿床中,就有22个是造山型,占61%;在全球金储量大于1000 t的11个巨型金矿床中,就有6个为造山型,占55%。西天山最重要金成矿类型是造山型,指示出巨大的成矿和找矿潜力。

造山型金矿是俯冲增生和碰撞造山不同构造演化时期地壳不同深度变质变形地体中形成的脉型/蚀变岩型金矿床^[159~162]。西天山区域内包括Turkestan、Terskey、北天山、南天山等在内的古亚洲洋先后于新元古代打开,经历了整个古生代长期演化,晚古生代晚期关闭,派生出从俯冲增生到碰撞造山的一系列有利于造山型金成矿的地质环境^[1, 44, 54, 57, 65~67, 69~70]。相对于环太平洋和特提斯—喜马拉雅2个构造成矿域,包括西天山在内的中亚构造成矿域俯冲增生和碰撞造山两类有利造山型金成矿的地质环境兼而有之,使西天山成为世界造山型金成矿作用最典型的代表地区,金成矿和找矿潜力巨大。

西天山不仅探明Muruntau(Au 6137 t)、Kumtor(Au 1100 t)、Almalyk(Au 2000 t)等世界著名的巨型金矿床,而且产有众多大型—超大型金矿床(表1)和中—小型金矿床,它们共同构成东西绵延约2500 km的“亚洲金腰带”^[44]。区域地质与成矿研究表明,西天山“亚洲金腰带”从乌兹别克斯坦经吉尔吉斯斯坦向东延伸,并确切进入中国新疆西天山那拉提山—额尔宾山一带^[1, 44]。最近,在该带发现卡特巴阿苏大型金矿床^[47],萨瓦亚尔顿金矿储量增加显著而成为目前新疆最大的金矿床(表1),阿腊斯托、尼牙孜铁克协、卡拉盖雷、布合塔等地金矿找矿勘查出现重要进展和线索,那拉提山—额尔宾山这个“亚洲金腰带”延入地带有希望持续实现大型—超大型金矿找矿突破。

众所周知,铜成矿最重要类型是斑岩型,它提供了人类约60%的铜储量,而且易形成大型—超大

型铜或金铜矿床^[4, 157]。西天山98%的铜储量来自斑岩型, 区域内Turkestan、Terskey、北天山、南天山等古亚洲洋长期演化, 与洋壳俯冲增生过程有关形成了十分利于该区域斑岩型铜成矿的成熟岛弧环境^[1]。所以, 从成矿环境和矿床类型看, 西天山铜成矿找矿潜力巨大。中国境外西天山发现有重要斑岩型金铜矿床(表1), 如乌兹别克斯坦东南部Kurama石炭纪岛弧带Almalyk金铜矿集区^[1, 4, 56]、吉尔吉斯斯坦西北部Kipchak奥陶纪岛弧带Andash-Taldy Bulak金铜矿集区^[1, 57, 134]、哈萨克斯坦东南部Taldykurgan石炭纪岛弧带Koksai金铜矿床^[1, 6, 57], 但令人费解的是中国境内西天山到目前为止还没有重要斑岩型铜矿发现。西天山区域地壳组成及结构、古生代俯冲增生岛弧形成及演化, 构造带延伸、成矿带展布、成矿系统结构等在境内外具可比性或可对接性^[1, 44, 70], 如在乌兹别克斯坦Almalyk矿集区出现的斑岩铜成矿系统^[57, 157](porphyry copper system), 即斑岩型金铜矿床-矽卡岩型铅锌矿床-浅成低温热液型金矿床构成的成矿系统在境内吐拉苏盆地也有明显的表现^[51-52], 类似于Almalyk矿集区所在的中天山南缘岛弧带, 在境内巴音布鲁克群分布区也有典型发育。中国新疆西天山找到重要斑岩型铜或金铜矿潜力很大。

SEDEX型是世界高品位、大吨位铅锌矿床重要类型, 主要在伸展、尤其陆块边缘裂陷盆地中通过海底热液喷流沉积成矿^[158, 164], 澳大利亚Mount Isa、McArthur River、Hilton等大型-超大型铅锌矿床^[165-167]、加拿大Sullivan、Tom、Tyna等大型-超大型铅锌矿床^[168]、德国Meggen、Rammelsberge等超大型铅锌矿床^[169-170]、中国华北陆块北缘东升庙、炭窑口、甲生盘、霍各乞^[171]以及扬子陆块北缘厂坝、铅硐山、银洞子等大型-超大型铅锌矿床^[172-174]等均被理解为陆缘盆地中形成的SEDEX型矿床。西天山65%的铅锌储量来自SEDEX型, 成矿于陆缘盆地(表1), 哈萨克斯坦—伊犁板块南、北部均发育元古宙边缘盆地, 找矿潜力很大。砂岩型是世界大吨位、低品位铅锌矿床的重要类型, 主要在内陆盆地、尤其山前盆地砂体中通过盆地流体流动成矿^[50, 175-176], 泥-砂-泥剖面结构中砂体、盆地流体失稳流动、氧化-还原界面是找矿勘查准则^[64]。西天山中—新生代山前盆地发育, 面积在造山带50%以上, 盆地充填厚度大,

伴随西天山的不断隆升和喜马拉雅运动影响, 砂体中盆地流体普遍大规模流动, 反映出良好找矿潜力。

6 结 论

(1)西天山金铜铅锌成矿重要类型是造山型金矿、斑岩型金铜矿、SEDEX型和砂岩型铅锌矿等。

(2)造山型金矿形成于古生代俯冲增生和碰撞造山两个构造演化时期两类地质环境, 斑岩型金铜矿形成于古生代不同时期的成熟岛弧环境, SEDEX型铅锌矿在新元古代陆缘盆地富集, 砂岩型铅锌矿形成于中—新生代山前盆地。

(3)西天山金铜铅锌成矿类型和环境优越, 找矿潜力巨大, 新疆西天山有望实现金铜铅锌找矿持续重大发现。

致谢:本工作以新疆政府国家305项目办公室建设的中吉、中乌、中哈3个合作研究工作站为基地, 得到新疆地矿、冶金、有色、核工业等勘查单位和领导专家以及有关矿企大力支持与帮助。审稿专家和责任编辑杨艳对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造演化及找矿方向[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2490-2531.
Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Mo Xuanxue, et al. Tectonic-metallogenic evolution of western Tianshan giant Au-Cu-Zn-Pb metallogenic belt and prospecting orientation[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2490-2531 (in Chinese with English abstract).
- [2] Frimmel H E. Earth's continental crustal gold endowment[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267(1): 45-55.
- [3] Mao J W, Konopelko D, Seltmann R, et al. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. Economic Geology, 2004, 99(8): 1771-1780.
- [4] Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. Economic Geology, 2005, 100(5): 801-818.
- [5] Jenchuraeva R J. Tectonic settings of porphyry-type mineralization and hydrothermal alteration in Paleozoic island arcs and active continental margins, Kyrghyz Range, (Tien Shan) Kyrgyzstan[J]. Mineralium Deposita, 1997, 32(5): 434-440.
- [6] Zhukov N M, Kolesnikov V V, Miroshnichenko L M, et al. Copper Deposits of Kazakhstan[M]. Alma-Ata, 1997, 1-149(in Russian).
- [7] 郑明华, 刘家军, 龙训荣, 等. 西南天山萨瓦亚尔顿金矿床成矿地

- 球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 226–227.
- Zheng Minghua, Liu Jiajun, Long Xunrong, et al. Geochemical characteristics of Sawayaerdun gold deposit, southwest Tien Shan[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2000, 19(4): 226–227(in Chinese).
- [8] Cole A, Wilkinson J J, Halls C, et al. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary investigations of the Jilau gold–quartz vein deposit, Tajikistan[J]. Mineralium Deposita, 2000, 35: 600–618.
- [9] Graupner T, Götze J, Kempe U, et al. CL for characterizing quartz and trapped fluid inclusions in mesothermal quartz veins: Muruntau Au ore deposit, Uzbekistan[J]. Mineralogical Magazine, 2000, 64: 1007–1016.
- [10] Graupner T, Niedermann S, Rhede D, et al. Multiple sources for mineralizing fluids in the Charmitan gold (– tungsten) mineralization (Uzbekistan)[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45: 667–682.
- [11] Malyukova N. The Taldybulak Levoberezhny gold deposit. Paleozoic geodynamics and gold deposits in the Kyrgyz Tien Shan.//Seltmann R, Jenchuraeva R, eds, Excursion Guidebook Series 9 and Annual Newsletter of IGCP–373, 2001: 97–109.
- [12] 戴自希, 白治, 吴初国, 等. 中国西部和毗邻国家铜金找矿潜力对比研究[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1–196.
- Dai Zixi, Bai Ye, Wu Chuguo, et al. Comparative Study on Ore Potentials between West China and Adjacent Countries[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2001: 1–196(in Chinese).
- [13] 刘家军, 龙训荣, 郑明华, 等. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化年龄及其意义[J]. 矿物岩石, 2002, 22(3): 19–23.
- Liu Jiajun, Long Xunrong, Zheng Ming hua, et al. The metallogenic age of Sawayaerdun gold deposit in southwestern Tien Shan mountains, Xinjiang[J]. Journey of Mineralogy and Petrology, 2002, 22(3): 19–23 (in Chinese with English abstract).
- [14] Ivan K B, Rumen P, Nigel J C, et al. Ciobanu Kostovite and its argentinian varieties: Deposits and mineral associations[J]. Bulgarian Academy of Sciences, 2005, 42: 1–22.
- [15] Plotinskaya O Y, Kovalenker V A, Seltmann R, et al. Te and Se mineralogy of the high– sulfidation Kochbulak and Kairagach epithermal gold telluride deposits (Kurama Ridge, Middle Tien Shan, Uzbekistan)[J]. Mineralogy and Petrology, 2006, 87(3–4): 187–207.
- [16] 杨富全, 毛景文, 王义天, 等. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床年代学、氦氩碳氧同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2006, 52(3): 341–351.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Wang Yitian, et al. Chronology and geochemical characteristics of helium, argon, carbon and oxygen isotope in fluid inclusion of the Sawayaerdun gold deposit, Xinjiang, Northwestern China and their significance[J]. Geological Reviews, 2006, 52(3): 341– 351(in Chinese with English abstract).
- [17] 年武强, 罗卫东, 石玉君, 等. 新疆伽师砂岩型铜矿地质特征及找矿标志[J]. 甘肃地质, 2007, 16(1–2): 28–33.
- Nian Wuqiang, Luo Weidong, Shi Yujun, et al. Geological characteristics and prospecting indications of sandstone copper deposit in Jiashi of Xinjiang Province[J]. Gansu Geology, 2007, 16 (1/2): 28–33(in Chinese with English abstract).
- [18] Abzalov M. Zarmitan granitoid–hosted gold deposit, Tian Shan belt Uzbekistan[J]. Economic Geology, 2007, 102(3): 519–532.
- [19] Nikonorov V V, Karaev Yu V, Borisov F I, et al. Gold Resources of Kyrgyzstan[M]. Bishkek: State Enterprise Scientific–Research Institute of Mineral Resources, 2007: 1–500.
- [20] Morelli R, Creaser R A, Seltmann R, et al. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re–Os–He isotopes in arsenopyrite[J]. Geology, 2007, 35 (9): 795–798.
- [21] 李光明, 秦克章, 李金祥. 哈萨克斯坦环巴尔喀什斑岩铜矿地质与成矿背景研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2679–2700.
- Li Guangming, Qin Kezhang, Li Jinxiang. Geological features and tectonic setting of porphyry copper deposits rounding the Balkhash region, Central Kazakhstan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(12): 2679–2700(in Chinese with English abstract).
- [22] 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–467.
- Chen Yuchuan, Liu Dequan, Tang Yanling, et al. Mineral Products and Metallogenic Systems of Tian Shan, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–467(in Chinese).
- [23] 安芳, 朱永峰. 西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2741–2748.
- An Fang, Zhu Yongfeng. Study on trace elements geochemistry and SHRIMP chronology of volcanic rocks in Tulasu Basin, Northwest Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(12): 2741–2748(in Chinese with English abstract).
- [24] 安芳, 朱永峰. 新疆吐拉苏盆地京希–伊尔曼德金矿地质和地球化学特征研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2275–2286.
- An Fang, Zhu Yongfeng. Geology and geochemistry of Jingxi–Yelmand gold deposit in Tulasu basin, North Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2275–2286(in Chinese with English abstract).
- [25] Djenchuraeva R D, Borisov F I, Pak N T, et al. Metallogeny and geodynamics of the Aktiuz–Boordu mining district, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(2): 280–299.
- [26] Pašava J, Vymazalová A, Košler J, et al. Platinum–group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu–Au–Mo deposit, Uzbekistan: Bulk geochemical and Laser Ablation ICP–MS data[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45: 411–418.
- [27] Naumov V B, Kovalenker V A, Rusinov V L. Chemical composition, volatile components, and trace elements in the

- magmatic melt of the Kurama mining district, Middle Tien Shan: Evidence from the investigation of inclusions in quartz[J]. *Geochemistry International*, 2010, 48(6): 555–568.
- [28] 翟伟, 孙晓明, 苏丽微, 等. 新疆阿希金矿: 古生代的低硫型浅成低温热液金矿床[J]. *地学前缘*, 2010, 12(2): 266–285.
Zhai Wei, Sun Xiaoming, Su Liwei, et al. Axi gold deposit: A Paleozoic low-sulfidation type of epithermal gold deposit in Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 12(2): 266–285 (in Chinese with English abstract).
- [29] 武广, 陈毓川, 陈衍景. 哈萨克斯坦北东天山浅成低温热液型金矿床成矿时代及构造背景[J]. *岩石学报*, 2010, 26(12): 3683–3695.
Wu Guang, Chen Yuchuan, Chen Yanjing. Metallogenic epoch and tectonic setting of epithermal gold deposits in the northeastern Kazakhstan Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(12): 3683–3695(in Chinese with English abstract).
- [30] 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 Xinyou, Wang Jingbin, Liu Zengren, et al. Geologic characteristics and the genesis of the Wulagen lead-zinc deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(5): 694–702 (in Chinese with English abstract).
- [31] 刘增仁, 陈正乐, 韩凤彬, 等. 新疆喀什乌拉根铅锌矿油气还原迹象与成矿作用关系初析[J]. *矿床地质*, 2010, S1: 1049–1050.
Liu Zengren, Chen Zhengle, Han Fengbin, et al. Relationship between oil reducing indication and mineralization in Wulagen Pb-Zn deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2010, S1: 1049–1050(in Chinese).
- [32] 李志丹, 薛春纪, 张舒, 等. 新疆西南天山霍什布拉克铅锌矿床地质、地球化学及成因[J]. *矿床地质*, 2010, 29(6): 983–998.
Li Zhidan, Xue Chunji, Zhang Shu, et al. Geology, geochemistry and genesis of Huoshibulake Zn-Pb deposit in southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(6): 983–998(in Chinese with English abstract).
- [33] 李志丹, 薛春纪, 辛江, 等. 新疆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 Zhidan, Xue Chunji, 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(in Chinese with English abstract).
- [34] 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 等. 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿床地质特征S-Pb同位素组成[J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 40–54.
Li Zhidan, Xue Chunji, Dong Xinfeng, et al. Ore geology, S- and Pb-isotopic compositions of the Wulagen Zn-Pb deposit, Wuqia County, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 40–54 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 等. 新疆霍什布拉克铅锌矿床微量元素地球化学[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(3): 540–550.
Li Zhidan, Xue Chunji, Dong Xinfeng, et al. Trace element geochemistry of the Huoshibulake zinc-lead deposit, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33(3): 540–550(in Chinese with English abstract).
- [36] Turamutratov I B, Isokov M U, Hodjaev N T, et al. Atlas of ore deposits models of Uzbekistan[R]. State Committee of Republic of Uzbekistan on Geology and Mineral Resources: Scientific Research Institute of Mineral Resources, Tashkent, 2011.
- [37] Chernyshev I V, Kovalenker V A, Goltsman Y V, et al. Rb-Sr isochron dating of late Paleozoic epithermal ore forming processes: A case study of the Kairagach gold deposit, Kurama ore district, Central Tien Shan[J]. *Geochemistry International*, 2011, 49: 107–119.
- [38] 贾志业, 薛春纪, 屈文俊, 等. 新疆肯登高尔铜铅矿地质和S、Pb、O、H同位素组成及Re-Os测年[J]. *矿床地质*, 2011, 30(1): 74–86.
Jia Zhiye, Xue Chunji, Qun Wenjun, et al. Geology, S, Pb, O and H isotopic compositions and Re-Os chronology of Kendengaoer Cu-Mo deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(1): 74–86(in Chinese with English abstract).
- [39] 王思程, 薛春纪, 李志丹. 新疆伽师砂岩型铜矿床地质及S-Pb同位素地球化学[J]. *现代地质*, 2011, 25(2): 219–227.
Wang Sicheng, Xue Chunji, Li Zhidan. Geology and S-, Pb-isotopic geochemistry of the Jiashi sandstone-type copper deposit, Xinjiang, China[J]. *Geoscience*, 2011, 25(2): 219–227(in Chinese with English abstract).
- [40] 薛春纪, 陈波, 贾志业, 等. 新疆西天山莱历斯高尔-3571斑岩铜铅矿田地质地球化学和成矿年代[J]. *地学前缘*, 2011, 18(1): 149–165.
Xue Chunji, Chen Bo, Jia Zhiye, et al. Geology, geochemistry and chronology of Lailisigao'er-3571 porphyry Cu-Mo ore-field, western Tianshan, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(1): 149–165(in Chinese with English abstract).
- [41] 薛春纪, 张权, 冯京, 等. 新疆西天山七兴铅锌成矿特征、时代和地质意义[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(5): 794–808.
Xue Chunji, Zhang Quan, Feng Jing, et al. Metallogenic features and ages of the Qixing Zn-Pb deposit in the West Tian Shan of Xinjiang and geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(5): 794–808(in Chinese with English abstract).
- [42] 薛春纪, 段士刚, 柴凤梅, 等. 乌兹别克斯坦Almalyk斑岩铜矿田矿时代及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 197–204.
Xue Chunji, Duan Shigang, Chai Fengmei, et al. Metallogenic epoch of the Almalyk porphyry copper ore field, Uzbekistan, and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 197–204(in Chinese with English abstract).
- [43] 薛春纪, 王洪刚, 赵晓波, 等. 新疆西天山吐拉苏金矿集区克峡希小岩体群及其铜找矿前景[J]. *地学前缘*, 2013, 20(6): 180–194.
Xue Chunji, Wang Honggang, Zhao Xiaobo, et al. Kexiayi cluster

- of small intrusions in the Tulasu gold mineralization district, western Tianshan, Xinjiang, and its copper exploration prospect[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 180–194(in Chinese with English abstract).
- [44] 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. *地学前缘*, 2014b, 21(5): 128–155.
Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Mo Xuan Xue, et al. Asian Gold Belt in western Tianshan and its dynamic setting, metallogenic control and exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 128–155 (in Chinese with English abstract).
- [45] 赵晓波, 薛春纪, 张招崇, 等. 西天山吐拉苏盆地安山岩中发现岩石包体及地质找矿意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1781–1791.
Zhao Xiaobo, Xue Chunji, Zhang Zhaochong, et al. Rock enclaves discovered in andesite in the Tulasu basin, western Tianshan, and its geological prospecting significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(11): 1781–1791(in Chinese with English abstract).
- [46] 赵晓波, 薛春纪, 门启浩, 等. 西天山塔乌尔别克金成矿作用: Re–Os 年龄和 S–Pb 同位素示踪[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 177–186.
Zhao Xiaobo, Xue Chunji, Men Qihao, et al. Origin and metallogenesis of the Tawuerbieke gold deposit, western Tianshan: Insight from Re–Os geochronology and S–Pb isotopic compositions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 177–186 (in Chinese with English abstract).
- [47] 杨维忠, 薛春纪, 赵晓波, 等. 新疆西天山新发现新源县卡特巴阿苏大型金铜矿床[J]. *地质通报*, 2013, 32(10): 1613–1620.
Yang Weizhong, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, et al. The discovery of the Kateba’ asu large Au–Cu deposit in Xinyuan County, western Tianshan, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(10): 1613–1620(in Chinese with English abstract).
- [48] 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 Xinfeng, Xue Chunji, Li Zhidan, et al. Characteristics and geological significances of the organic matter in the Wulagen Zn–Pb deposit, Kashi sag, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 129–145(in Chinese with English abstract).
- [49] 孟广路, 王斌, 李宝强, 等. 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床研究进展[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(5): 160–166.
Meng Guanglu, Wang Bin, Li Baoqiang, et al. Research progress of the Murantau gold deposit in Uzbekistan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(5): 160–166(in Chinese with English abstract).
- [50] Xue C J, Chi G X, Li Z D, et al. Geology, geochemistry and genesis of the Cretaceous and Paleocene sandstone– and conglomerate–hosted Urogen Zn–Pb deposit, Xinjiang, China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 63: 328–342.
- [51] Zhao X B, Xue C J, Chi G X, et al. Epithermal Au and polymetallic mineralization in the Tulasu Basin, western Tianshan, NW China: Potential for the discovery of porphyry Cu–Au deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 60: 76–96.
- [52] Zhao X B, Xue C J, David T A, et al. Microgranular enclaves in island–arc andesties: A possible link between known epithermal Au and potential porphyry Cu–Au deposits in the Tulasu ore cluster, western Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 85: 210–223.
- [53] Zhao X B, Xue C J, Chi G X, et al. Re–Os pyrite and U–Pb zircon geochronology from the Taldybulak Levoberezhny gold deposit: Insight for Cambrian metallogeny of the Kyrgyz northern Tien Shan[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 67: 78–89.
- [54] Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, et al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 48–102.
- [55] Seltmann R, Porter T M. The porphyry Cu–Au/Mo deposits of Central Eurasia: 1. Tectonic, geologic and metallogenic setting and significant deposits[C]//Porter T M(ed.). *Super Porphyry Copper and Gold Deposits. A Global Perspective*, vol 2. PGC Publishing, 2005, Adelaide: 467–512.
- [56] Seltmann R, Konopelko D, Biske G, et al. Hercynian post–collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tien Shan orogenic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 821–838.
- [57] Seltmann R, Porter T M, Pirajno F. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 810–841.
- [58] 高景刚, 李文渊, 薛春纪, 等. 新疆哈勒尕提铜铁矿床的成矿年代学研究[J]. *矿床地质*, 2014, 33(2): 386–396.
Gao Jinggang, Li Wenyuan, Xue Chunji, et al. Zircon SHRIMP U–Pb and molybdenite Re–Os dating of Halegati Cu–Fe polymetallic deposit in West Tianshan Mountains and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(2): 386–396(in Chinese with English abstract).
- [59] 冯博, 薛春纪, 赵晓波, 等. 西天山卡特巴阿苏金铜矿赋矿二长花岗岩岩石学、元素组成和时代[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 187–195.
Feng Bo, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, et al. Petrology, geochemistry and zircon U–Pb isotope chronology of monzogranite of the Katbasu Au–Cu deposit, western Tianshan, Xinjiang Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 187–195(in Chinese with English abstract).
- [60] 吴淦国, 董连慧, 薛春纪, 等. 新疆北部主要斑岩铜矿带[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–345.
Wu Ganguo, Dong Lianhui, Xue Chunji, et al. The Main Porphyry Copper Ore Belts in Northern Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–345(in Chinese).
- [61] 杨建民, 张玉君, 邓刚, 等. 中国天山铜矿带找矿靶区优选[M].

- 北京:地质出版社,2008,1-225.
- Yang Jianmin, Zhang Yujun, Deng Gang, et al. The Target Region of Copper Belt in Western Tianshan, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008, 1-225(in Chinese).
- [62] 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 等. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化: 以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 53-82.
- Xue Chunji, Zhao Zhanfeng, Wu Ganguo, et al. The multiperiodic superimposed porphyry copper mineralization in Central Asian Tectonic Region: A case study of geology, geochemistry and chronology of Halasu copper deposit, Southeastern Altai, China[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 53-82(in Chinese with English abstract).
- [63] 冯京, 薛春纪, 吴淦国. 西天山莱历斯高尔—达巴特一带与斑岩相关的铜钼金矿产预测[M]. 北京:地质出版社, 2011: 1-317.
- Feng Jing, Xue Chunji, Wu Ganguo. Prognosis of Porphyry-related Cu-Mo-Au Deposit in Lailisigaer-Dabate Belt, Western Tianshan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1-317(in Chinese).
- [64] 薛春纪, 祁思敬, 隗合明. 基础矿床学[M]. 北京:地质出版社, 2006: 1-230.
- Xue Chunji, Qi Sijing, Wei Heming. Mineral Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-230(in Chinese).
- [65] Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaids collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364: 299-307.
- [66] Windley B F. The Evolving Continent[M]. 3rd edition, 1995: 1-526.
- [67] Jahn B M, Griffin W L, Windley B. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1): vii-x.
- [68] Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence: Part I. Isotopic characterization of basement rocks[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1): 15-51.
- [69] Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia[J]. American Journal of Science, 2004, 304: 370-395.
- [70] Gao J, Long L L, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1221-1238.
- [71] Biske Y S, Seltmann R. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans[J]. Gondwana Research, 2010, 17(2-3): 602-613.
- [72] 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 451-460.
- He Guoqi, Zhu Yongfeng. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions[J]. Geology in China, 2006, 33(3): 451-460(in Chinese with English abstract).
- [73] Gao J, John T, Klemd R, et al. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2007, 71(20): 4974-4996.
- [74] 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 83-93.
- Xu Xueyi, Xia Linqi, Ma Zhongpin, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite[J]. Acta petrologica Sinica, 2006, 22(1): 83-93(in Chinese with English abstract).
- [75] 徐新, 何国琦, 李华芹, 等. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 470-475.
- Xu Xin, He Guoqi, Li Huaqin, et al. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating[J]. Geology in China, 2006, 33(3): 470-475(in Chinese with English abstract).
- [76] Qian Q, Gao J, Klemd R, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98: 551-569.
- [77] Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E et al. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan(Central Asia)as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism[J]. Tectonophysics, 2003, 366(1): 113-141.
- [78] Mirkamalov R K, Isokov M U, Chirikin V V, et al. New results of U-Pb (SHRIMP) dating of granitoid and metamorphic complexes of Tien Shan folded belt[J]. Geosciences in Uzbekistan, 2012, Special Vol. of 34th IGC: 114-125.
- [79] Nurtaev B, Kharin V, McCann T, et al. The North Nuratau Fault Zone, Uzbekistan-Structure and evolution of a Palaeozoic Suture Zone[J]. Journal of Geodynamics, 2013, 64: 1-14.
- [80] McCann T, Nurtaev B, Kharin V, et al. Ordovician-Carboniferous tectono-sedimentary evolution of the North Nuratau region, Uzbekistan (Westernmost Tien Shan) [J]. Tectonophysics, 2013, 590: 196-213.
- [81] Gao J, Klemd R. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints[J]. Lithos, 2003, 66(1/2): 1-22.
- [82] Li Q L, Lin W, Su W, et al. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China[J]. Lithos, 2011, 122: 76-86.
- [83] Xiao W J, Windley B F, Allen M, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan

- orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1316–1341.
- [84] Kröner A, Windley B F, Badarch G, et al. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian Nubian shield[J]. *Geological Society of America Memoirs*, 2007, 200: 181–209.
- [85] Kröner A, Alexeiev D V, Hegner E, et al. Zircon and muscovite ages, geochemistry, and Nd–Hf isotopes for the Aktyuz metamorphic terrane: Evidence for an Early Ordovician collisional belt in the northern Tianshan of Kyrgyzstan[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 901–927.
- [86] 李继磊, 苏文, 张喜, 等. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1852–1862.
- Li Jilei, Su Wen, Zhang Xi, et al. Zircon cameca U–Pb dating and its significance for granulite–facies gneisses from the western Awulale Mountain, West Tianshan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1852–1862(in Chinese with English abstract).
- [87] 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 等. 西南天山构造地层学初步研究[J]. *地层学杂志*, 1995, 2(19): 122–129.
- Gao Jun, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, et al. Preliminary research on the tectonostratigraphy in the Southwestern Tianshan mountains[J]. *Journey of Stratigraphy*, 1995, 2(19): 122–129(in Chinese with English abstract).
- [88] 李曰俊, 宋文杰, 买光荣, 等. 库车和北塔里木前陆盆地与南天山造山带的耦合关系[J]. *新疆石油地质*, 2001, 5(22): 376–381.
- Li Yuejun, Song Wenjie, Mai Guangrong, et al. Characteristics of Kuqa and Northern Tarim Foreland Basins and their coupling relation to South Tianshan orogeny[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2001, 5(22): 376–381(in Chinese with English abstract).
- [89] 郭召杰, 马瑞士, 郭令智, 等. 新疆东部三条蛇绿混杂岩的比较研究[J]. *地质论评*, 1993, 39(3): 236–247.
- Guo Zhaojie, Ma Ruishi, Guo Lingzhi, et al. A comparative study on three ophiolitic mélangé belts in eastern Xinjiang[J]. *Geological Review*, 1993, 39(3): 236–247(in Chinese with English abstract).
- [90] Kiselev V. U–Pb zircon geochronology of magmatic occurrences of the Northern Tien Shan: Problems of geology and geography in Kyrgyzstan[J]. *Izvestiya Natsional' noy Akademii. Nauk Kyrgyzskay Respublica*, 1999, 21–33.
- [91] Konopelko D, Biske G, Seltmann R, et al. Deciphering Caledonian events: Timing and geochemistry of the Caledonian magmatic arc in the Kyrgyz Tien Shan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 131–141.
- [92] 周鼎武, 苏犁, 简平, 等. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及构造意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1411–1415.
- Zhou Dingwu, Su Li, Jiang Ping, et al. SHRIMP zircon U–Pb age and tectonic significance of HP granulite in Yushugou ophiolite, southern Tianshan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(14): 1411–1415(in Chinese).
- [93] 王超, 刘良, 车自成, 等. 西南天山阔克萨彦岭巴雷公镁铁质岩石的地球化学特征、LA–ICP–MS U–Pb 年龄及其大地构造意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(6): 743–754.
- Wang Chao, Liu Liang, Che Zicheng, et al. Geochronology, petrogenesis and significance of Baleigong mafic rocks in Kokshal segment, Southwestern Tianshan Mountains[J]. *Geological Review*, 2007, 53(6): 743–754(in Chinese with English abstract).
- [94] 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 65–73.
- Long Lingli, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. The geochemical characteristics and the age of the Kule Lake ophiolite in the southern Tianshan[J]. *Acta Petrologia Sinica*, 2006, 22(1): 65–73(in Chinese with English abstract).
- [95] 王作勋, 郭继易, 吕喜朝, 等. 天山多旋回构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1–217.
- Wang Zuoxun, Guo Jiayi, Lv Xichao, et al. Tianshan Multiple Cycles Evolution and Mineralization[M]. Beijing: Science Press, 1990: 1–217(in Chinese).
- [96] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1–169.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic Setting of Northern Xinjiang and Adjacent Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1–169(in Chinese).
- [97] 顾雪祥, 章永梅, 彭义伟, 等. 西天山博罗科努成矿带与侵入岩有关的铁铜钨多金属成矿系统: 成岩成矿地球化学与构造–岩浆演化[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 156–175.
- Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Peng Yiwei, et al. The Fe–Cu–Mo polymetallic mineralization system related to intermediate acid intrusions in the Boluokenu metallogenic belt of the west Tianshan, Xinjiang: Rock– and ore–forming geochemistry and tectonomagmatic evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 156–175(in Chinese with English abstract).
- [98] Mikolaichuk A V, Kurenkov S A, Degtyarev K E, et al. Main stages of geodynamic evolution of the North Tien Shan in the late Precambrian and early Paleozoic[J]. *Geotectonics*, 1997, 31(6): 16–34.
- [99] 朱宝清, 冯益民, 杨军录, 等. 新疆中天山干沟一带蛇绿混杂岩和志留纪前陆盆地的发现及其意义[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 326–330.
- Zhu Baoqing, Feng Yimin, Yang Junlu, et al. Discovery of ophiolitic mélangé and Silurian foreland basin at Gangou of Tokxun, Xinjiang and their tectonic significance[J]. *Xinjiang Geology*, 2002, 20(4): 326–330(in Chinese with English abstract).
- [100] 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 等. 天山早古生代花岗岩锆石 U–Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. *新疆地质*, 2004, 22(1): 4–11.

- Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implication for tectonic evolution[J]. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(1): 4-11(in Chinese with English abstract).
- [101] 周宗良, 高树海, 刘志忠. 西南天山造山带与前陆盆地系统[J]. *现代地质*, 1999, 13(3): 275-280.
- Zhou Zongliang, Gao Shuhai, Liu Zhizhong. West/South Tianshan mountain orogenic belt and foreland basin systems[J]. *Geoscience*, 1999, 13(3): 275-280(in Chinese with English abstract).
- [102] 卢华复, 贾承造, 贾东, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(3): 257-271.
- Lu Huaifu, Jia Chengzai, Jia Dong, et al. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa rejuvenation foreland basin[J]. *Geological Journey of China Universities*, 2001, 7(3): 257-271(in Chinese with English abstract).
- [103] Solomovich L I, Trifonov B A. Postcollisional granites in the South Tien Shan Variscan collisional belt, Kyrgyzstan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21: 7-21.
- [104] Solomovich L I. Postcollisional magmatism in the South Tien Shan Variscan orogenic belt, Kyrgyzstan: Evidence for high-temperature and high-pressure collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 30: 142-153.
- [105] Gao J, Klemd R, Qian Q, et al. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen[J]. *Tectonophysics*, 2011, 499: 118-131.
- [106] 刘楚雄, 许保良, 邹天人, 等. 塔里木北缘及邻区海西期碱性岩石化学特征及其大地构造意义[J]. *新疆地质*, 2004, 22(1): 43-49.
- Liu Chuxiong, Xu Baoliang, Zou Tianren, et al. Petrochemistry and tectonic significance of Hercynian alkaline rocks along the northern margin of the Tarim platform and its adjacent area[J]. *2004, 22(1): 43-49(in Chinese with English abstract).*
- [107] 姜常义, 穆艳梅, 白开寅, 等. 南天山花岗岩类的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J]. *岩石学报*, 2005, 15(2): 298-308.
- Jiang Changyi, Mu Yanmei, Bai Kaiyan, et al. Chronology, petrology, geochemistry and tectonic environment of granitoids in the southern Tianshan Mountain, western China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 15(2): 298-308(in Chinese with English abstract).
- [108] Klemd R, Brocker M, Hacker B R, et al. New age constraints on the metamorphic evolution of the high-pressure/low-temperature belt in the western Tianshan Mountains, NW China[J]. *The Journal of Geology*, 2005, 113: 157-168.
- [109] Konopelko D, Biske G, Seltman R, et al. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, Southern Tien Shan[J]. *Lithos*, 2007, 97: 140-160.
- [110] Long L L, Gao J, Qian Q, et al. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb age of post-collisional granites in the Southwest Tianshan orogenic belt of China: Examples from the Heiyingshan and Laohutai plutons[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 415-424.
- [111] 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 西天山的增生造山过程[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1805-1816.
- Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli, et al. Accretionary orogenic process of western Tianshan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1805-1816(in Chinese with English abstract).
- [112] Wang B, Shu L S, Faure M, et al. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China)[J]. *Tectonophysics*, 2011, 479 (1-4): 85-104.
- [113] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和地下水塌构造[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 25-36.
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, et al. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21 (1): 25-36(in Chinese with English abstract).
- [114] 汤耀庆, 高俊, 赵民, 等. 西南天山蛇绿岩与蓝片岩[J]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-133.
- Tang Yaoqing, Gao Jun, Zhao Min, et al. Ophiolite and Blueschist of Southwest Tianshan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1-133(in Chinese).
- [115] 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1049-1061.
- Gao Jun, Long Linli, Qian Qing, et al. South Tianshan: A late Paleozoic or a Triassic orogeny?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1049-1061(in Chinese with English abstract).
- [116] Simonov V A, Sakiev K S, Volkova N I, et al. Conditions of formation of the Atbashi Ridge eclogites South Tien Shan[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2008, 49: 803-815.
- [117] Gao J, He G, Li M, et al. The mineralogy, petrology, metamorphic P-T-t trajectory and exhumation mechanism of blueschists, south Tianshan, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 1995, 250: 151-168.
- [118] Lin W, Faure M, Shi Y H, et al. Palaeozoic tectonics of the south-western Chinese Tianshan: new insights from a structural study of the high-pressure/low-temperature metamorphic belt[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1259-1274.
- [119] 蔡东升, 卢华复, 贾东. 南天山蛇绿混杂岩和中天山南缘糜棱岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其大地构造意义[J]. *地质科学*, 1996, 31 (4): 384-390.
- Cai Dongsheng, Lu Huaifu, Jia Dong. ⁴⁰Ar dating of the

- ophiolite mélangé in southern Tianshan and the mylonite in the southern rim of center Tianshan and their tectonic significance[J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 31(4): 384–390(in Chinese with English abstract).
- [120] 王宝瑜, 郎智君, 李向东, 等. 中国天山西段地质剖面综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–202.
Wang Baoyu, Lang Zhijun, Li Xiangdong, et al. Comprehensive Research of Geological Sections in Western Part of Tianshan, China[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1–202(in Chinese).
- [121] Liu J J, Zheng M H, Cook N J, et al. Geological and geochemical characteristics of the Sawaya'erdun gold deposit, southwestern Chinese Tianshan[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 32(1): 125–156.
- [122] 张祺, 薛春纪, 赵晓波, 等. 新疆西天山卡特巴阿苏大型金矿床地质地球化学和成岩成矿年代[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 411–437.
Zhang Qi, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, et al. Geology, geochemistry and metallogenic epoch of Katebasu large gold deposit, Western Tianshan, Xinjiang[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 411–437(in Chinese with English abstract).
- [123] Yang S H, Zhou M F. Geochemistry of the ~430 Ma Jingbulake mafic–ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: Implications for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt[J]. Lithos, 2009, 113: 259–273.
- [124] Wang B, Cluzel D, Shu L S, et al. Evolution of calc–alkaline to alkaline magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1275–1298.
- [125] 王居里, 刘养杰, 周鼎武, 等. 新疆萨日达拉金矿地质特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 385–393.
Wang Juli, Liu Yangjie, Liu Dingwu, et al. Geological features and origin of Saridala gold deposit, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(4): 385–393(in Chinese with English abstract).
- [126] 罗小平, 薛春纪, 李怀祥, 等. 新疆西天山查汗萨拉金矿地质、金赋存状态及同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 558–568.
Luo Xiaoping, Xue Chunji, Li Huaixiang, et al. Geology, mode of occurrence of gold and isotopic geochemistry of Chahansala gold deposit in West Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 558–568(in Chinese with English abstract).
- [127] 罗小平, 薛春纪, 李健全, 等. 新疆西天山查汗萨拉金矿床流体包裹体特征及稳定同位素研究[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 505–516.
Luo Xiaoping, Xue Chunji, Li Jianquan, et al. Fluid inclusion characteristics and stable isotope composition of the Chahansala gold deposit, western Tianshan, Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 505–516(in Chinese with English abstract).
- [128] Garven, G. The role of regional fluid flow in the genesis of the Pine Point deposit, western Canadian Sedimentary basin[J]. Economic Geology, 1985, 80: 307–324.
- [129] Xue C J, Chi G X, Xue W. Interaction of two fluid systems in the formation of sandstone–hosted uranium deposits in the Ordos Basin: Geochemical evidence and hydrodynamic modeling[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 106: 226–235.
- [130] Xue C J, Chi G X, Xue W. Effects of hydrocarbon generation on fluid flow in the Ordos basin and its relationship to uranium mineralization[J]. Geoscience Frontiers, 2011, 2(3): 439–448.
- [131] 丁振信, 薛春纪, 赵晓波, 等. 新疆阿吾拉勒西段流纹岩及其对岩石圈深部过程的约束[J]. 地质前缘, 2014, 21(5): 196–210.
Ding Zhenxin, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Permian rhyolite and its constraints on the lithosphere deep process of the western Awulale, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 196–210(in Chinese with English abstract).
- [132] 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 等. 天山地区碰撞后构造与盆地演化[J]. 高校地质学报, 2004, 10: 393–404.
Shu Liangshu, Gao Zhaojie, Zhu Wenbin, et al. Post–collision tectonism and basin–range evolution in the Tianshan Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10: 393–404(in Chinese with English abstract).
- [133] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger Françoise. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671–1677.
- [134] Jenchuraeva R J, Pak N T, Usmanov I A. The Makmal gold deposit[C]//Seltmann R, Jenchuraeva R (eds.). Excursion 5 Guidebook Series 9 and Annual Newsletter of IGCP–373, 2001, 82–96.
- [135] 石海岗. 新疆西天山喇嘛苏铜矿床成矿流体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 硕士论文, 2011: 70.
Shi Haigang. Study on the Ore–forming Fluid of the Lamasu Copper Deposit in West Tianshan, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), Master's Thesis. 2011: 70 (in Chinese with English abstract).
- [136] 段士刚. 新疆西天山赛里木微地块区域成矿规律与找矿方向[D]. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2011.
Duan Shigang. Regional Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Sailimu Micro–massif, Western Tianshan, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), PhD Thesis, 2011.
- [137] 成勇, 闫存兴, 朱生善, 等. 新疆温泉县哈尔达坂层控型铅锌矿床的发现及其找矿意义[J]. 西北地质, 2012, 45(3): 116–122.
Cheng Yong, Yan Cunxing, Zhu Shengshan, et al. Discovery of Haerdaban stratabound lead–zinc deposit and its prospecting significance, Wenquan, Xinjiang[J]. Northwestern Geology. 2012, 45(3): 116–122(in Chinese with English abstract).
- [138] Kostitsyn Y A. Rb–Sr isotope study of Muruntau deposit. 1. Ore

- veins dating by isochrone technique[J]. *Geokhimiya*, 1993, 9: 1308–1319.
- [139] Drew L J, Berger B R, Kurbanov N K. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkum Desert, Uzbekistan[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 11(4): 175–196.
- [140] Wilde A R, Layer P, Mernagh T, et al. The giant Muruntau gold deposit: Geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(3): 633–644.
- [141] Kempe U, Belyatsky B V, Krymsky R S. Sm–Nd and Sr isotope systematics of scheelite from the giant Au (– W) deposit Muruntau (Uzbekistan): Implications for the age and sources of Au mineralization[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(5): 379–392.
- [142] Wall V J, Yantzen V, Graupner T, et al. Muruntau. spring hill: Uzbekistan report on CERCAMS research project[J]. 2004: 1–69
- [143] Graupner T, Niedermann S, Kempe U, et al. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: Constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(21): 5356–5370.
- [144] Bagdasaryan A G, Fedyanin A S, Shemetov P A. Estimate of the formation time and other parameters of a disruption structure in open pit walls in terms of Muruntau open pit[J]. *Journal of Mining Science*, 2009, 45(2): 146–151.
- [145] Ansdell K M, Abeleira A, Ivanov S. Structural evolution and vein paragenesis at the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan[J]. *Mineral deposits: Processes to processing*: Rotterdam, Balkema, 1999, 2: 1375–1378.
- [146] Ivanov S M, Ansdell K M, Melrose D. Ore texture and stable isotope constraints on ore deposition mechanisms at the Kumtor lode gold deposit[C]//Bucci L A, Mair J L(eds.). *Gold in 2000: Littleton, Society of Economic Geologists, Poster Session Extended Abstracts Volume*. 2000: 47–52.
- [147] Yakubchuk A, Schloderer J, Woodcock J, et al. Taldybulak Au–Cu–Mo deposit: a new >5 Moz Au (11.7 Moz Au eq) Ordovician porphyry hosted gold system in Kyrgyzstan, Central Asia[J]. *Appl. Earth Sci. Trans. Inst. Min. Metall*, 2010, B 119(2): 84.
- [148] Dautov A I. Distribution of gold in mafic minerals from the Koshrabad intrusion[J]. *Doklady Akademii Nauk UzSSR*, 1973, no. 3: 58–60(in Russian).
- [149] Graupner T, Niedermann S, Rhede D, et al. Multiple sources for mineralizing fluids in the Charmitan gold(– tungsten) mineralization (Uzbekistan)[J]. *Mineralium Deposita*, 2010, 45: 667–682.
- [150] Konopelko D L, Biske Y S, Kullerud K, et al. The Koshrabad granite massif in Uzbekistan: Petrogenesis, metallogeny, and geodynamic setting[J]. *Russian Geology and Geophysics*. 2011, 52: 1563–1573.
- [151] Teslenko G S, Polykovskiy V S. Temperature of origin of the gold-bearing pegmatites in the Koshranbad intrusion[J]. *Zapiski Uzbekskogo Otdeleniia Vsesouznogo Mineralogicheskogo Obschestva*, 1988, no. 41: 101–103(in Russian).
- [152] 王新利, 顾雪祥, 彭义伟, 等. 新疆西天山哈勒尕提铁铜矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(3): 279–288.
- Wang Xinli, Gu Xuexiang, Peng Yiwei, et al. Isotopic geochemistry characteristics and sources of metallogenic elements of the Halegati Fe–Cu deposit in the Western Tianshan area, Xinjiang, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(3): 279–288(in Chinese with English abstract).
- [153] 彭守晋. 对苏联捷克利等矿床的考察[J]. *新疆有色金属*, 1990, 3: 51–58.
- Peng Shoujin. Investigation of the Tekili deposit, the Soviet Union[J]. *Xinjiang Youse Jinshu*, 1990, 3: 51–58(in Chinese).
- [154] 蔡宏渊, 邓贵安, 郑跃鹏. 新疆乌拉根铅锌矿床成因探讨[J]. *矿产与地质*, 2002, 16(1): 1–5.
- Cai Hongyuan, Deng Guian, Zheng Yuepeng. Genetic discussion on Wulagen Lead–zinc deposit of Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2002, 16(1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- [155] 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成因研究[J]. *矿产与地质*, 2003, 17(1): 11–16.
- Xie Shiye, Mo Jiangping, Yang Jianguo, et al. The geological characteristic and genesis of Wulagen hot brine exhalogenic Lead–zinc deposit of Cenozoic era, Wuqia country, Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17(1): 11–16(in Chinese with English abstract).
- [156] 张舒, 张招崇, 黄河, 等. 南天山沙里塔什铅锌矿床地质特征及 S、Pb 同位素特征研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(5): 856–865.
- Zhang Shu, Zhang Zhaochong, Huang He, et al. Geologic characteristics, sulfur and Lead isotope study of the Shalitashi Lead–zinc deposit, Southern Tianshan[J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 856–865(in Chinese with English abstract).
- [157] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 3–41.
- [158] Leach D L, Bradley D C, Huston D. Sediment-hosted lead–zinc deposits in earth history[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 593–625.
- [159] Bohlke J K. Orogenic (Metamorphic–Hosted) Gold–Quartz Veins[R]. U.S. Geological Survey Open–file Report 82–795, 1982: 70–76.
- [160] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre–Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 7–27.
- [161] Groves D I, Goldfarb R J, Robert F I, et al. Gold deposits in

- metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(1): 1-29.
- [162] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geological time: a global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1-2): 1-175.
- [163] Kiselev V. U- Pb zircon geochronology of magmatic occurrences of the Northern Tien Shan: Problems of geology and geography in Kyrgyzstan[J]. *Izvestiya Natsional' noy Akademii. Nauk Kyrgyzskay Respublica*, 1999, 21-33.
- [164] Large D. Evolution of a sedimentary basin for massive sulfide mineralization.//Base Metal Sulfide Deposits in Sedimentary and Volcanic Environments[M]. Berlin: Springer, 1998, 3-11.
- [165] Goodfellow W D, Lydon J W, Turner R J W. Geology and genesis of stratiform sediment- hosted (SEDEX) zinc- lead- silver sulphide deposits. Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada[J]. *Special Paper*, 1993, 40: 201-251.
- [166] Perkins W G, Bell T H. Stratiform replacement lead- zinc deposits: a comparison between Mount Isa, Hilton, and McArthur River[J]. *Economic Geology*, 1998, 93(8): 1190-1212.
- [167] Williams P J. An introduction to the metallogeny of the McArthur River- Mount Isa- Cloncurry minerals province[J]. *Economic Geology*, 1998, 93(8): 1120-1131.
- [168] Lydon J W, Paakki J J, Anderson H E, et al. An overview of the geology and geochemistry of the Sullivan deposit[J]//Lydon J W, Höy T, Slack J F, et al. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2000, 1: 505-522.
- [169] Werner D G D W. Contribution to the genesis of the SEDEX- type mineralizations of the Rhenish Massif (Germany) — implications for future Pb- Zn exploration[J]. *Geologische Rundschau*, 1989, 78(2): 571-598.
- [170] Muecher P, Stassen P. Multiple origin of the 'Kniest feeder zone' of the stratiform Zn- Pb- Cu ore deposit of Rammelsberg, Germany[J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(1): 46-51.
- [171] 彭润民, 翟裕生, 王志刚, 等. 内蒙古狼山炭窑口热水喷流沉积矿床钾质“双峰式”火山岩层的发现及其示踪意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(12): 1135-1144.
- Peng Runmin, Zhai Yunsheng, Wang Zhigang, et al. Discovery and its tracing significance of K- bimodal volcanic rock in Lanshang Tanjiaokou exhalative sedimentation deposit, Inner Mongolia[J]. *Science in China (Ser.D) Earth Sciences*, 2004, 34(12): 1135-1144(in Chinese).
- [172] 薛春纪. 秦岭泥盆纪热水沉积[M]. 西安: 西安地图出版社, 1997: 1-134.
- Xue Chunji. Devonian Hot Water Sedimentation, Qinling[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1997: 1-134(in Chinese).
- [173] 祁思敬, 李英. 南秦岭晚古生代海底喷气-沉积成矿系统[J]. *地学前缘*, 1999, 6(1): 171-1179.
- Qi Sijing, Li Ying. The upper Paleozoic submarine exhalative sedimentary metallogenic system in South Qinling[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(1): 171- 1179(in Chinese with English abstract).
- [174] Ma G L, Beaudoin G, Qi S J, et al. Geology and geochemistry of the Changba SEDEX Pb- Zn deposit, Qinling orogenic belt, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39(3): 380-395.
- [175] Rickard D T, Willden M Y, Marinder N E, et al. Studies on the genesis of the Laisvall sandstone lead- zinc deposit, Sweden[J]. *Economic Geology*, 1979, 74: 1255-1285.
- [176] BJORLYKKE A, SANGSTER D F. An overview of sandstone lead deposits and their relation to red- bed copper and carbonate- hosted lead- zinc deposits[J]. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, 1981, 178-213.