

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.3.23

中—哈—吉—乌天山变形带容矿金矿床: 成矿环境和控矿要素与找矿标志

薛春纪¹, 赵晓波¹, 赵伟策¹, 赵云¹, 张国震², Bakhtiar NURTAEV³,
Nikolay PAK⁴, 莫宣学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. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170

3. 乌兹别克斯坦地质与矿产资源委员会 地质与地球物理研究所, 塔什干 100041

4. 吉尔吉斯斯坦科学院 地质研究所, 比什凯克 720040

XUE Chunji¹, ZHAO Xiaobo¹, ZHAO Weice¹, ZHAO Yun¹, ZHANG Guozhen², Bakhtiar
NURTAEV³, Nikolay PAK⁴, MO Xuanxue¹

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

2. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*

3. *Institute of Geology and Geophysics, State Committee of the Republic of Uzbekistan on Geology and Mineral Resources, Tashkent 100041, Uzbekistan*

4. *Institute of Geology, National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek 720040, Kyrgyzstan*

XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, ZHAO Weice, et al. Deformed zone hosted gold deposits in the China-Kazakhstan-Kyrgyzstan-Uzbekistan Tian Shan: metallogenic environment, controlling parameters, and prospecting criteria. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27 (2): 294-319

Abstract: Tian Shan is the world's second largest gold ore cluster and hosts an array of world-class and large/superlarge gold deposits. It constitutes a giant cross-border gold metallogenic belt that extends westward from Central Xingjiang, China to Uzbekistan, via southeastern Kazakhstan and Kyrgyzstan. What metallogenic settings have been responsible for the large-scale gold mineralization of the Tian Shan giant gold belt? What are the key factors controlling gold mineralization? What are the criteria for gold prospecting in Tian Shan giant gold belt? All of these are crucial geological and prospecting problems that have become the focus of the academics and mining industry. Based on an extensive and thorough literature review, along with comprehensive field investigations on the geology and gold deposits of Tian Shan orogen, this paper suggests that the large-scale gold mineralization of Tian Shan had formed during a terrane assembling deformation subsequent to the final closure of the paleo-Asian Ocean in the Late Carboniferous – Early Permian. On the other hand, minor gold mineralization had formed during intracontinental strike-slip deformation in the Middle – Late Permian. The large brittle/ductile-brittle deformation zones, situated near the tectonic sutures of the northern and southern margins of the Middle Tian Shan, are the key factors controlling the large-scale gold mineralization of Tian Shan. Multistage overprinting mineralization is a significant feature of the Tian Shan deformed zone-hosted gold deposits. The crustal initial enrichment, structural deformation activation, and magmatic-hydrothermal overprinting are the main factors controlling the Tian Shan deformed zone-hosted gold deposits. Fine-grained carbonaceous clastic rocks, ductile-brittle

收稿日期: 2019-12-18; 修回日期: 2020-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”重点专项(2017YFC0601202)

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

deformed zones, and late Hercynian granitic intrusions are the key prospecting criteria for the deformed zone-hosted gold deposits in the China-Kazakhstan-Kyrgyzstan-Uzbekistan Tian Shan gold ore belt.

Keywords: large gold deposit; large-scale deformed zone; terrane assembling deformation; intracontinental strike-slip deformation; China-Kazakhstan-Kyrgyzstan-Uzbekistan Tian Shan

摘要:天山是全球第二大金矿富集区,世界级和大型-超大型金矿床东西成带横贯中国新疆中部—哈萨克斯坦东南部—吉尔吉斯斯坦—乌兹别克斯坦,构成巨型跨境金成矿带。天山巨型跨境金成矿带和重要金矿床形成的地质环境、成矿的控制要素、找矿勘查的标志都是学术界和工业界高度关注的重大地质和找矿问题。通过广泛、深入地文献调研和境内外天山较全面野外地质矿产调查与研究,本文认为中-哈-吉-乌天山大规模金成矿主体形成于晚石炭世—早二叠世古亚洲洋闭合后的陆块拼贴变形过程,部分形成于中—晚二叠世陆内走滑变形过程。中天山南、北缘古缝合带及其附近的大型脆性/韧-脆性变形带是巨量金成矿的关键控制因素,多期叠加复合成矿是天山变形带容矿金矿床的显著特征。地壳初始富集、构造变形活化、岩浆热液叠加是天山变形带容矿金矿床的主控因素。“碳质细碎屑岩+脆韧性变形带+海西末期岩体”是中-哈-吉-乌天山变形带容矿大型-超大型金矿的找矿标志组合。

关键词:大型金矿床;大型变形带;陆块拼贴变形;陆内走滑变形;中-哈-吉-乌天山

中图分类号:P618.51;P611 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2020)02-0294-26

0 引言

从中国新疆天山向西经哈萨克斯坦东南部、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦至咸海的天山山脉,是中亚增生型造山最典型发育区^[1-3]。分布在古亚洲洋中的多个微陆块“多期次、多方向、多重增生-拼贴-碰撞”演化^[1,4-9],在天山造山带孕育出穆龙套^[10](6 137 t Au @ 3.5 g/t)、库姆托尔^[11](1 100 t Au @ 4.4 g/t)、扎尔米坦^[12](314 t Au @ 9.8 g/t)、道吉兹套^[13](186 t Au @ 4.0 g/t)、阿曼泰套^[13](125 t Au

@ 9.0 g/t)、科克巴塔斯^[13](150 t Au @ 3.0 g/t)、查尔库拉^[14](100 t Au @ 10~15 g/t)、萨瓦亚尔顿^[15](127 t Au @ 2.0 g/t)、卡特巴阿苏^[16](87 t Au @ 3.8 g/t)等众多世界级和大型-超大型金矿床(图1),构成欧亚大陆腹地东西向绵延3 000 km的中-哈-吉-乌天山跨境金成矿带,成为仅次于南非兰德盆地的全球第二大金富集区^[17]。这些金矿床普遍赋存于元古宇或古生界浅变质含碳复理石建造或侵入其中的石炭纪—二叠纪同碰撞/碰撞后花岗岩类中,受大型韧-脆性变形带或剪切带控制明显^[15,17-18]。基于矿床地质和地球化学某些特征,以往研究将它们解释为黑色岩系型、克孜尔库姆型、穆龙套型金矿

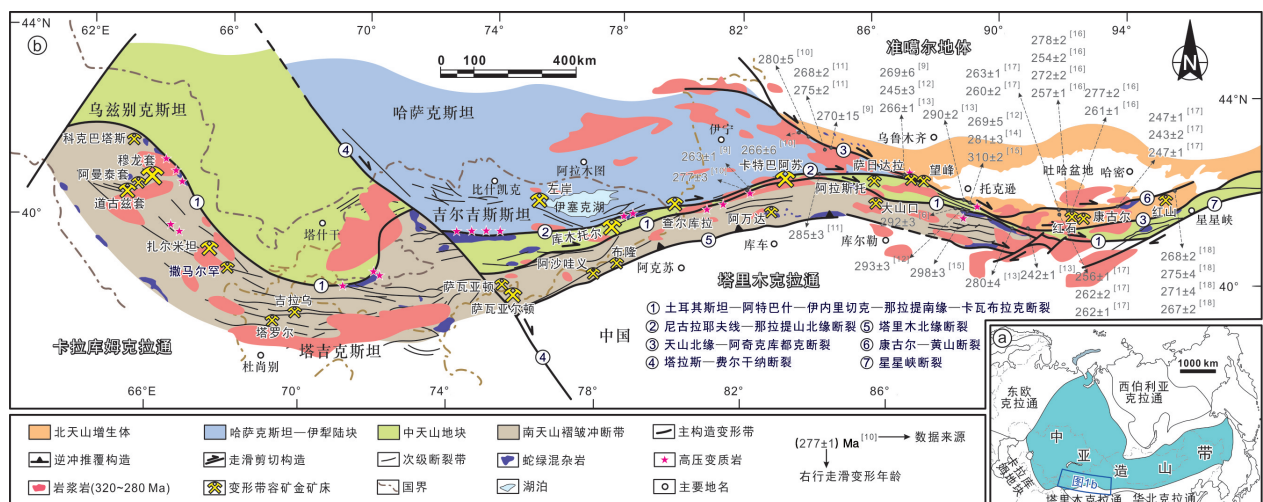


图1 中亚造山带构造简图(a)、中-哈-吉-乌天山成矿带构造格架与变形带容矿金矿床分布图(b)
(据文献[2,8,15,19-20]修编)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Central Asian Orogenic Belt (a), Tectonic framework and deformation zone hosted gold deposits in the China-Kazakhstan-Kyrgyzstan-Uzbekistan Tian Shan Belt (b). Modified from [2,8,15,19-20].

床^[21-24]、侵入体有关金矿床^[25-26]、韧性剪切带型金矿床^[27]、造山型金矿床^[15, 17-18, 19, 28-34]等不同类型的。虽然产在天山典型增生造山带,但这些金矿床的诸多成矿特征不同于西方学者普遍认同的造山型金矿床。本文以前人大量勘查和研究成果为基础,结合境内外天山区域地质和金矿床进行广泛调查与研究,进一步明确中-哈-吉-乌天山大规模金成矿的地质环境和基本地质特征,揭示控矿要素和找矿标志,丰富和发展大陆增生成矿理论,服务和引导中国天山金矿找矿勘查与持续突破。

1 区域成矿背景

中亚造山带被夹持于西伯利亚克拉通、东欧克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间(图 1a),是由众多微陆块、岩浆弧、俯冲-增生体、弧相关盆地及蛇绿岩等构成的巨型拼贴体^[20, 35-37]。作为世界上最大和最典型的增生型造山带^[38],中亚造山带在显生宙期间经历了强烈的陆壳增生与改造,伴随着多期次壳幔相互作用和极为多样的成矿过程,成为全球最大的增生成矿域^[36-38],与环太平洋俯冲成矿域和特提斯-喜马拉雅碰撞成矿域并称为全球三大成矿域^[39-41]。中-哈-吉-乌天山位于中亚造山带西南部(图 1a),为中亚增生成矿域的核心区^[42],是古亚洲多岛洋区域若干个分支大洋或洋盆俯冲消减、多个微陆块碰撞拼贴和陆内变形、改造的综合结果^[4, 6-9]。

天山造山带通常被划分为北天山、中天山和南天山 3 个构造单元^[43-46]。但由于苏联与中国学者早期提出的划分方案,都只针对各自境内天山,没有充分考虑构造带的境外延伸,境内外天山构造带延伸和对接一直是中亚地学研究争论的焦点,尤其关于境内和境外中天山构造带能否对接长期存在认识分歧^[46-47];西方学者多认为吉尔吉斯斯坦-乌兹别克斯坦中天山在吉-中边界尖灭,中国中天山是吉尔吉斯斯坦北天山南缘的东延部分^[2, 7, 48-50],或与中国南天山一起对应于吉尔吉斯南天山^[9];但也有学者认为中国中天山向西延伸到吉尔吉斯斯坦中天山的纳伦一带^[6, 15, 51]。本文综合最新大地构造学和区域地质研究成果^[6-8, 43-44],认为天山造山带从北到南,主体由北天山增生体、哈萨克斯坦-伊犁陆块、中天山地块、南天山褶皱冲断带等 4 个主要构造单元组成;自北向南,它们分别被天山北缘-阿奇克库都克、尼古拉耶夫线-那拉提山北缘、土耳其斯坦-阿特巴

什-伊内里切克-那拉提山南缘-卡瓦布拉克等 3 条古缝合带相互分隔;3 条古缝合带分别代表了北天山洋向南、帖尔斯科依洋向北、土耳其斯坦-南天山洋向北俯冲消减并最终闭合的缝合带^[6, 8, 15, 51]。更晚期的塔拉斯-费尔干纳北西向右行走滑断裂斜切天山上构造单元(图 1b)。

1.1 构造单元属性与演化

北天山增生体是北天山洋向南向哈萨克斯坦-伊犁陆块之下俯冲形成的增生杂岩系^[4],在伊犁陆块以北主要由泥盆纪-石炭纪弧前及洋底沉积物和石炭纪蛇绿混杂岩组成^[52-53],向东在吐哈盆地南北两侧发育奥陶纪-石炭纪的活动陆缘建造^[54],早二叠世发育碰撞后陆内裂谷型火山岩和陆相碎屑沉积岩^[55]。

哈萨克斯坦-伊犁陆块是由南哈萨克斯坦(Anrakhai)、吉尔吉斯斯坦北天山和伊犁陆块等微陆块群于晚寒武世-早奥陶世拼贴联合形成^[56]。南哈萨克斯坦发现太古宙和古元古代花岗片麻岩^[57]。中元古代结晶基底呈碎片状广泛出露于吉尔吉斯斯坦北天山,其上发育早古生代活动陆缘中性火山建造并与寒武纪-奥陶纪蛇绿岩伴生,被认为与帖尔斯科依洋北向俯冲有关^[58]。伊犁陆块的结晶基底以新元古代浅变质碳酸盐岩和陆源碎屑岩为主,但最近在温泉群碎屑岩中报道有 2.5~1.6 Ga 碎屑锆石^[59-60],暗示伊犁陆块可能存在古元古代基底;古生代主体以活动陆缘火山-沉积建造为主,尤其泥盆纪-石炭纪大哈拉军山组遍布整个伊犁陆块南北缘;二叠纪发育火山磨拉石和陆相碎屑沉积建造。

吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦境内的中天山,南以土耳其斯坦-阿特巴什-伊内里切克缝合带与南天山褶皱冲断带相邻,北以尼古拉耶夫线-那拉提山北缘缝合带与吉尔吉斯斯坦北天山相望。乌兹别克斯坦中天山在新元古代基底之上,盖层由奥陶纪-志留纪浅变质碎屑岩-碳酸盐岩夹少量火山岩-火山碎屑岩和泥盆纪-石炭纪中酸性火山岩-火山碎屑岩构成,二叠纪转为陆相火山-沉积建造;吉尔吉斯斯坦中天山 Kuilyu 地区发现 2.3~1.8 Ga 古元古代变质基底^[61],新元古代花岗岩和长英质火山岩遍布整个构造带^[61],基底之上依次堆积了寒武纪-志留纪陆源碎屑岩夹中基性火山岩和泥盆纪浅海相碎屑岩;中国新疆中天山元古宙变质结晶基底之上主要为奥陶纪-志留纪中基性火山岩夹碳酸盐

碎屑岩建造^[62-63],但基底时代尚不明确,区域广泛出露的花岗片麻岩、混合岩和角闪岩形成时代为新元古代(~ 0.74 Ga)^[64-66],结合基底岩石古元古代($2.2\sim 1.6$ Ga)^[66]两阶段 Hf 模式年龄,较多学者认为新疆中天山古老基底主要形成于中元古代;但由于碎屑沉积岩中存在太古宙碎屑锆石,也有学者认为中天山地块存在太古宙结晶基底^[67-68]。最近在中天山南缘乌瓦门蛇绿混杂岩中新发现 $2.53\sim 2.47$ Ga 黑云母斜长角闪片麻岩^[69],表明新疆中天山很可能存在与吉尔吉斯斯坦中天山类似的古元古代结晶基底。

南天山褶皱冲断带以往多被认为是卡拉库姆—塔里木克拉通北部被动陆缘^[6]或南天山洋北向俯冲形成的宽阔增生杂岩^[8]。卡拉库姆克拉通北缘在乌兹别克斯坦南天山,古元古代花岗片麻岩基底之上的新元古界(里霍系—文德系)为一套浅海相变沉积岩系,奥陶纪—泥盆纪厚层状碳酸盐岩—含碳碎屑岩被晚石炭世陆相磨拉石角度不整合覆盖;塔里木克拉通北缘在中国南天山,奥陶系—石炭系主体为一套强变形的浅变质含碳复理石和碎屑岩建造,晚石炭世为残余海盆陆缘碎屑沉积,早二叠世发育陆相双峰式火山岩建造^[70]。

1.2 大型变形带及其变形特征

中—哈—吉—乌天山大型构造变形带以重要构造边界为主体,包括天山北缘—阿奇克库都克、尼古拉耶夫线—那拉提山北缘、土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克 3 条古缝合带,以及康古尔—黄山韧性—脆性构造变形带(图 1b)。

1.2.1 古缝合带及洋盆闭合时限

天山北缘—阿奇克库都克缝合带所代表的北天山洋是巴尔喀什—准噶尔大洋的分支,新元古代就已经打开^[2,7]。早古生代蛇绿混杂岩在西准噶尔和主缝合带东段干沟—米什沟一带多有分布,晚古生代蛇绿混杂岩残片分布在缝合带中段哈希勒根达坂地区,巴音沟蛇绿混杂岩中堆晶辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 344 Ma^[52],侵位于辉长岩中的斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 325 Ma^[53];侵入于该巴音沟蛇绿混杂岩中四棵树“钉合岩体”花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 316 Ma^[71],限定北天山洋关闭时间在晚石炭世($325\sim 316$ Ma)。

尼古拉耶夫线—那拉提山北缘缝合带所代表的帖尔斯科依洋可能在新元古代已经打开。在吉尔吉

斯斯坦北天山南缘广泛出露早寒武世—早奥陶世蛇绿岩,向东在中国那拉提山北坡夏特发现 516 Ma 的 T 型洋中脊玄武岩^[51];再向东,最近的区域地质调查在中国巴伦台地区发现 929 Ma 乌兰莫仁蛇绿混杂岩带,可能是帖尔斯科依洋残片在我国境内的又一重要记录^[72]。尼古拉耶夫线西端 Makbal 榴辉岩中白云母变质峰期年龄为 482 Ma^[73],指示帖尔斯科依洋盆在奥陶纪关闭。

土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克缝合带所代表的土耳其斯坦—南天山洋在新元古代(约 757 Ma)已经打开^[74],寒武纪—石炭纪洋盆持续扩张形成了卡拉库姆—塔里木陆块北缘从乌兹别克斯坦布坎套—努拉套—扎拉夫尚,到吉尔吉斯斯坦阿特巴什再到中国南天山北部分布的蛇绿岩带和洋壳岩石记录^[6-7,48,75]。沿中国南天山北部断续出露 $450\sim 392$ Ma 的巴雷公、库勒湖、黑英山、库米什蛇绿混杂岩^[6,76-78]是该大洋在中国南天山存在的岩石学记录。土耳其斯坦—南天山洋在石炭纪末关闭,卡拉库姆—塔里木陆块与中天山碰撞拼贴形成了我国中天山南缘科克苏—阿克牙子一带的 $319\sim 313$ Ma 高压—超高压变质带及与之相连的吉尔吉斯斯坦阿特巴什蓝片岩—榴辉岩带^[79-80]。

1.2.2 大型变形带特征与属性

伴随帖尔斯科依洋奥陶纪、北天山洋和土耳其斯坦—南天山洋石炭纪末相继关闭和随后多陆块的碰撞拼贴过程,天山造山带经历了多期次构造变形,前期的变形样式可能被后期构造变形改造甚至置换^[46,81]。尽管还存在部分争议,但多数研究都发现,这些大型变形带均发育石炭纪末—早二叠世逆冲推覆和中—晚二叠世右行走滑韧性剪切这两期变形^[9,46,82],分别与大洋俯冲消减及伴随哈萨克斯坦—伊犁、中天山、塔里木、卡拉库姆、准噶尔等陆块碰撞拼贴过程和碰撞后陆内走滑过程相关联,相应形成两类变形带,即“陆块拼贴变形带”和“陆内走滑变形带”。

天山北缘—阿奇克库都克缝合带在西天山区域呈近 NWW-SEE(北西西—南东东)向延伸,进入东天山转为近 E-W(东西)走向。该变形带经历两期大规模韧—脆性变形过程,包括早期自南向北逆冲推覆韧性剪切与晚期近东西向右行走滑剪切韧性变形。早期逆冲推覆韧性剪切变形主要表现为韧—脆性构造,普遍发育糜棱岩带,倾向南的构造面理指示

自南向北逆冲的运动学性质^[83-84]。该期变形主要发生于石炭纪末期,是北天山洋洋壳向南向哈萨克斯坦—伊犁陆块俯冲消减过程的继续^[85]。晚期右行走滑剪切韧性变形的时代为中晚二叠世(图 1b),沿天山北缘—阿奇克库都克构造带发生了大规模右行走滑过程,以韧性变形为主要特征,属于碰撞造山后的陆内走滑变形带^[46,86-92]。

尼古拉耶夫线—那拉提山北缘缝合带近 E-W(东—西)向展布,晚古生代南天山洋的俯冲消减活动,导致那拉提北缘构造带复活,引起了它自南向北的逆冲作用,沿该构造变形带广泛发育韧—脆性构造,其中脆性构造以断层面南倾的次级逆冲断层及相关节理构造为主,韧性构造则主要表现为紧邻主断裂南侧并与之平行展布的韧性剪切带,普遍发育倾向南的构造面理,宏观与微观构造标志均指示近 N-S(北—南)向挤压变形^[9,83-84]。前人基于野外地质事实分析^[9,46],认为该期自南向北的逆冲发生在石炭纪末,对应于南天山洋关闭并伴随伊犁—中天山地块与塔里木克拉通之间碰撞拼贴过程,属陆块拼贴变形带。中—晚二叠世,沿那拉提北缘断裂也发生了显著的右行走滑变形构造,在早期断层面上可以观察到指示右行走滑的擦痕线理、阶步等运动学标志,韧性剪切带内发育旋转碎斑系、云母鱼、石英压力影、S 型石英脉等构造现象,指示右行走滑韧性变形^[93-96]。

土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克缝合带历经复杂长期的构造变形,变形历史也颇有争议。沿那拉提山南缘构造带,自南向北逆冲变形普遍存在,尤其是新疆昭苏—特克斯一线以南、变形带南侧的(超)高压变质带、逆冲断层、褶皱、构造面理等现象指示自南向北逆冲的韧性剪切作用,被认为是南天山洋向南俯冲的地质证据^[9,95-96]。但也有研究表明,中天山南缘发育有自北向南的剪切作用,可能发生于晚石炭世或早二叠世,与塔里木、中天山、哈萨克斯坦—伊犁及准噶尔地体最终拼贴过程有关^[96],属陆块拼贴变形带。沿该构造带也发生了二叠纪右行走滑变形,指示右行走滑剪切作用的宏观与显微构造普遍见于(超)高压变质带、那拉提构造带等地区,另外,沿早期近 E-W(东—西)向断层发生了显著的右行走滑活动,并伴随有共轭的近 NW-SE(北西—南东)向左行走滑断层的形成^[86-87,96]。晚第四纪时期,那拉提山南缘构造带再次发生活化,发生了显著的左行平移活动,主要表现

为断层陡坎及冲沟水系、地貌面的左行位移,该期变形作用被认为形成于塔里木盆地以 NNE(北北南)向俯冲到天山造山带之下的动力学背景^[97]。

康古尔—黄山韧性—脆性构造变形带西段走向 NWW(北西西),东段走向 NEE(北东东),总体向南倾斜。目前对于康古尔—黄山断裂构造属性存在较大争议,包括对古生代板块碰撞/缝合带^[98-99]和弧相关盆地闭合形成的韧性挤压带^[99-100]等的不同认识。尽管在构造属性方面存在争议,但学者们普遍认同康古尔—黄山构造带经历多期韧—脆性变形过程^[85,98,101]。杨兴科等^[98]基于康古尔—黄山断裂带中构造形迹(线理、面理和旋转碎斑系构造)研究,将变形过程划分为 4 期:第 1 期为中深构造层次紧闭同斜褶皱变形;第 2 期为中深构造层次顺层(片)韧性剪切变形;第 3 期为中部构造层次走滑脆—韧性剪切变形作用;第 4 期为中浅构造层次(韧)脆性弯滑、逆冲、膝折作用。第 1、2 期以塑性流变和韧性剪切为主,第 3 期为脆—韧性变形,具有一定过渡转换性质,第 4 期以韧—脆性变形为主。变质岩石的全岩 Ar/Ar 同位素年代学研究表明:康古尔—黄山构造带剪切过程可划分为早期(300~283.7 Ma)韧性推覆剪切和晚期(262.9~242.8 Ma)右行走滑剪切变形,且在晚期变形阶段发生明显的差异抬升作用,剪切带中西段康古尔一带有更快的抬升速率,东段土屋—延东一带隆升速率较慢^[102]。对变形带内侵入岩的含钾蚀变矿物⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素测年结果显示,康古尔—黄山构造带在早二叠世(约 276 Ma)前表现为南北向挤压变形,中—晚二叠世(270~245 Ma)表现为右行走滑剪切变形,三叠纪(约 230 Ma)前剪切变形结束^[102-103],主体属陆内走滑形成的大型变形带^[104]。

1.3 花岗岩类时空分布与特征

中—哈—吉—乌天山造山带古生代岩浆活动强烈,不同时期的花岗岩类出露约占整个造山带面积的 30%^[105],集中分布于北天山、北伊犁、南伊犁、中天山和南天山 5 个构造—岩浆带(图 1b)。古生代花岗质侵入体类型多样,侵位时代贯穿整个古生代^[106-107](图 2);Long 等^[105]综合天山区域古亚洲洋最终关闭时限(约 320 Ma),提出年龄大于 320 Ma 的花岗岩类形成于(帖尔斯科依洋、北天山洋和土耳其斯坦—南天山洋)洋壳俯冲增生环境,而年龄小于 320 Ma 的花岗岩类形成于大洋关闭后的同碰撞/后碰撞伸展地球动力学背景(图 2)。与俯冲期有关的

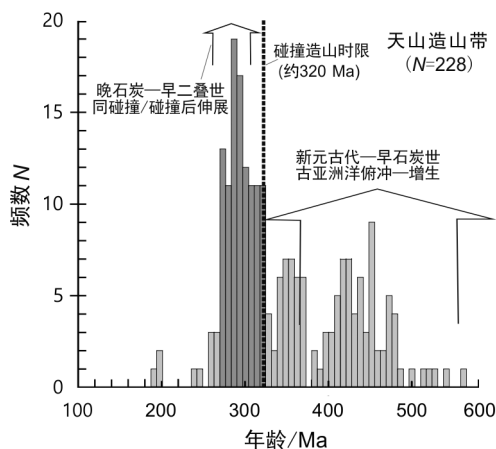


图2 天山造山带古生代花岗岩类锆石 U-Pb 年龄直方图 (据文献[8,105-106]修编)

Fig.2 Histogram of U-Pb zircon ages of Paleozoic granitoids of the Tianshan Orogenic Belt. Modified from [8,105-106].

花岗岩类主要为钙碱性英云闪长岩-花岗闪长岩-石英闪长岩组合,具有显著富集重稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)而强烈亏损高场强元素(HFSE)的特征,显示弧岩浆地球化学特征和相对富集的 Sr-Nd 同位素组成($\epsilon_{Nd}(t) = -11.6 \sim +4.8$),钕地壳指数(NCI)计算表明幔源组分的贡献率为 53%~57%^[105];同碰撞/碰撞后背景的花岗岩类主体为富碱的 A 型花岗岩和埃达克岩,具有弱亏损的高场强元素特征,显著亏损 Sr-Nd 同位素($\epsilon_{Nd}(t) = -3.4 \sim -1.5$)和更为丰富的幔源组分贡献(NCI = 49%~85%)^[105]。

2 陆块拼贴变形带容矿金矿床

2.1 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床

穆龙套是全球黄金储量最大的金矿床,地处乌兹别克斯坦克孜尔库姆沙漠腹地,探明金储量为 6 137 t,平均金品位为 3.5 g/t(表 1^[108-135])。在区域构造中,穆龙套金矿产于卡拉库姆克拉通北缘的南天山褶皱冲断带,隶属土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克大型构造变形带(图 1a),矿床就位于北北西向桑格龙套—塔姆德套左行韧性变形带和北东向穆龙套—道吉兹套左行韧—脆性变形带相互作用形成的 Dzhanbulak 背斜枢纽部位^[136]。

区域地层主要为寒武系—奥陶系塔斯卡斯干组与奥陶系—志留系别萨潘组含碳复理石建造,后者在区域造山过程中发生绿片岩相浅变质,是穆龙套矿床的主要赋矿地层^[13,137](图 3)。别萨潘组主要由一套浅变质的粉砂岩、砂岩和泥岩组成,厚度超过

5 km,从老到新划分为 4 个岩性段,即黑色别萨潘(Bs1)、灰色别萨潘(Bs2)、杂色别萨潘(Bs3)和绿色别萨潘(Bs4);其中杂色别萨潘(Bs3)厚度超过 1 km,主要由碳质片岩夹中薄层变粉砂岩、含绢云母片岩组成,具有显著高于外围和其他岩层的金背景值,是穆龙套矿床主要含金层位^[136-137]。

矿区先后经历 4 期构造变形(即 D₁、D₂、D₃、D₄)(图 4)。伴随 4 期构造变形,地层发生褶皱、断裂和碎裂;成矿流体充填交代形成纵横交错的石英脉并发育强烈硅化、钾长石化、黑云母化等热液蚀变^[108-109,138-139]。D₁ 表现为南北向至北北东向的挤压变形,地层发育平行于层理(S₀)的片理(S₁),以形成顺层且强烈揉皱的石英脉及低品位金矿化为特征^[139]。D₂ 表现为南北向的强烈挤压,并叠加于 D₁ 之上,伴随 D₂ 形成的片理(S₂)斜切 S₁(S₀),片理走向近东西向,充填 S₂ 形成主体矿脉及其周围大量网状脉^[139]。D₃ 主体为北东向的褶皱和小位移量断层,表现为北东向的穆龙套—道吉兹套剪切带^[139]。D₄ 可能为中生代北北东走滑断层,对先期形成的褶皱、断裂具有一定改造作用。D₂、D₃ 主导了穆龙套矿区“Z 字形”褶皱构造格局的形成^[17](图 4)。

穆龙套矿区及外围出露海西末期侵入体,包括东西向展布碱性辉绿岩、煌斑岩及碱性花岗岩和北东向出露的花岗闪长岩—花岗岩,以及少量切穿褶皱枢纽和金矿体的花岗岩脉^[137,139]。矿区外围正长岩及煌斑岩的 Rb-Sr 年龄约为 273 Ma^[140]。深部钻探工程在 4 005 m 深处揭露出隐伏花岗岩体(Murun 花岗岩),Rb-Sr 等时线年龄为(287.1 ± 4.6) Ma^[110]。最近,Kempe 等^[111]对 6 件 Murun 花岗岩样品进行详细锆石矿物学和年代学研究,发现该岩体中锆石均为高 U 锆石,尽管样品中锆石测得较为一致的 SHRIMP U-Pb 谐和年龄(290~294 Ma)且与热液独居石 U-Pb SHRIMP 年龄一致(292 ± 8) Ma,但高 U 锆石所测年龄可能只代表钠长石化的时代而非花岗岩的侵位年龄。

穆龙套矿床金矿体规模巨大,产状严格受控于一系列次级韧性—韧脆性变形带和断裂系统,由石英大脉、网脉及含大量石英细脉的蚀变围岩组成。金矿脉($w(\text{Au}) > 3.5 \text{ g/t}$)主体呈向东倾斜的陡立柱状,走向近 E-W,长度可达 600 m,倾角为 60°~70°,垂直厚度可达 700 m,小于金矿化总体积的 30%,却含有超过 70% 金储量^[108,139]。早期含金石英脉(占总体积的 3%~5%)顺片理近平行产出,

表 1 中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床基本地质特征

金矿床	国家	储量/t	品位/(g·t ⁻¹)	成矿环境	控矿构造样式与性质	容矿岩石	岩浆岩时代及方法	金属矿物	成矿时代	文献
穆龙套	乌	6 137	3.5	陆块拼贴变形带	D ₂ 期南北向强烈挤压与缩短和D ₃ 期左行韧性剪切变形	奥陶—志留系别萨潘组含碳浊积岩系	(287.1 ± 4.6) Ma (Rb-Sr), (292 ± 8) Ma (U-Pb)	黄铁矿、毒砂、自然金、白钨矿	(287.5 ± 1.7) Ma (毒砂, Re-Os)	[10, 108-111]
科克巴塔斯	乌	150	7.5	陆块拼贴变形带	D ₃ 期北东向左行韧性剪切变形	奥陶—志留系别萨潘组含碳浊积岩系		黄铁矿、毒砂、辉钨矿	早二叠世(?)	[17, 33-34]
阿曼泰套	乌	120	1.3	陆块拼贴变形带	D ₃ 期北东向左行韧性剪切变形	奥陶—志留系别萨潘组含碳浊积岩系		黄铁矿、毒砂、辉钨矿	早二叠世(?)	[17, 33-34, 112]
道吉兹套	乌	180	4.0	陆块拼贴变形带	D ₃ 期北东向左行韧性剪切变形	奥陶—志留系别萨潘组含碳浊积岩系		黄铁矿、毒砂、黄铜矿	早二叠世(?)	[17, 34]
扎尔米坦	乌	314	9.8	陆块拼贴变形带	北西西向高角度左行走滑断裂	志留系变沉积岩系及侵入其中的石英二长斑岩	(286 ± 2) Ma (U-Pb)	黄铁矿、毒砂、碲化铋	约 286 Ma (黄铁矿, Re-Os)	[12, 33-34, 106]
库姆托尔	吉	1 100	4.4	陆块拼贴变形带	北东走向逆冲推覆构造及构造混杂岩带	新元古界文德系含碳浊积岩系	(296.7 ± 4.2) Ma (U-Pb)	黄铁矿、白钨矿、自然金	288 ~ 284 Ma (绢云母, Ar/Ar)	[11, 34, 113]
查尔库拉	哈	100	10~15	陆块拼贴变形带	北东走向逆冲推覆构造及构造混杂岩带	新元古界文德系含碳浊积岩系		黄铁矿、白钨矿、自然金	早二叠世(?)	[14]
萨瓦亚尔顿	中	127	2.0	陆块拼贴变形带	北东向初-脆性剪切带, 南西走向, 倾向北西	泥盆—石炭系含碳浊积岩系	(207.5 ± 4.2) Ma (K/Ar)	黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿	(323.9 ± 4.8) Ma (282 ± 12) Ma (黄铁矿, Re-Os)	[114-116]
阿万达	中	11.6	1.8	陆块拼贴变形带	东西向初-脆性剪切带, 倾向北西	泥盆—石炭系含碳浊积岩系	(298 ± 15) Ma (U-Pb)	黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿	早二叠世(?)	[117-119]
卡特巴阿苏	中	87	3.8	陆块拼贴变形带	D ₁ 南北向缩短导致的次级北东向逆冲断层系及相关张性-张扭性裂隙系统	石炭纪二长花岗岩、花岗岩和闪长岩	(345.5 ± 2.6) Ma (U-Pb), (340.1 ± 1.8) Ma (U-Pb), (342.4 ± 3.6) Ma (U-Pb)	黄铁矿、黄铜矿、自然金	(310.9 ± 4.2) Ma (黄铁矿, Re-Os) (322.5 ± 6.8) Ma (黄铁矿, Rb-Sr)	[16, 120-123]
阿拉斯托	中	9.4	3.0	陆块拼贴变形带	北东向脆-韧性断层	石炭纪花岗岩闪长岩	(350.3 ± 3.0) Ma (U-Pb)	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿	(327.7 ± 2.9) Ma (黄铁矿, Re-Os)	[124-125]
萨日达拉	中	10	2.8	陆块拼贴变形带	北西西向韧性剪切带	新元古代变沉积岩及侵入其中的志留纪花岗岩	(441.6 ± 3.8) Ma (U-Pb)	黄铁矿、自然金、磁黄铁矿	(337.6 ± 1.7) Ma (绢云母, Ar/Ar)	[126-127]
望峰	中	3	9.0	陆块拼贴变形带	北西西向韧性剪切带	志留纪二长花岗岩	(439.9 ± 2.2) Ma (U-Pb)	黄铁矿、自然金、磁黄铁矿	早石炭世(?)	[128]
康古尔	中	40	9.9	陆内走滑变形带	北东向右行走滑剪切	石炭纪雅满苏组中酸性火山岩及碎屑岩	(282 ± 16) Ma (Rb-Sr)	黄铁矿、黄铜矿、自然金	(261.0 ± 1.0) Ma (绢云母, Ar/Ar)	[129-131]
红石	中	5.4	5.0	陆内走滑变形带	北东向右行走滑剪切	石炭纪干敦组海相沉积夹少量火山建造	(337.6 ± 4.5) Ma (U-Pb)	黄铁矿、黄铜矿、自然金	(257.0 ± 4.0) Ma (包裹体 Rb-Sr)	[132-133]
左岸	吉	130	6.9	俯冲增生变形带	北北西向塔尔迪布拉克初-脆性剪切带, 倾向南西	新元古代片岩和绿片岩	(435.3 ± 3.8) Ma (U-Pb), (427.7 ± 1.9) Ma (U-Pb)	黄铁矿、黄铜矿、自然金、银矿	(511 ± 18) Ma (黄铁矿, Re-Os)	[134-135]

注: 乌—乌兹别克斯坦; 吉—吉尔吉斯斯坦; 哈—哈萨克斯坦; 中—中国。

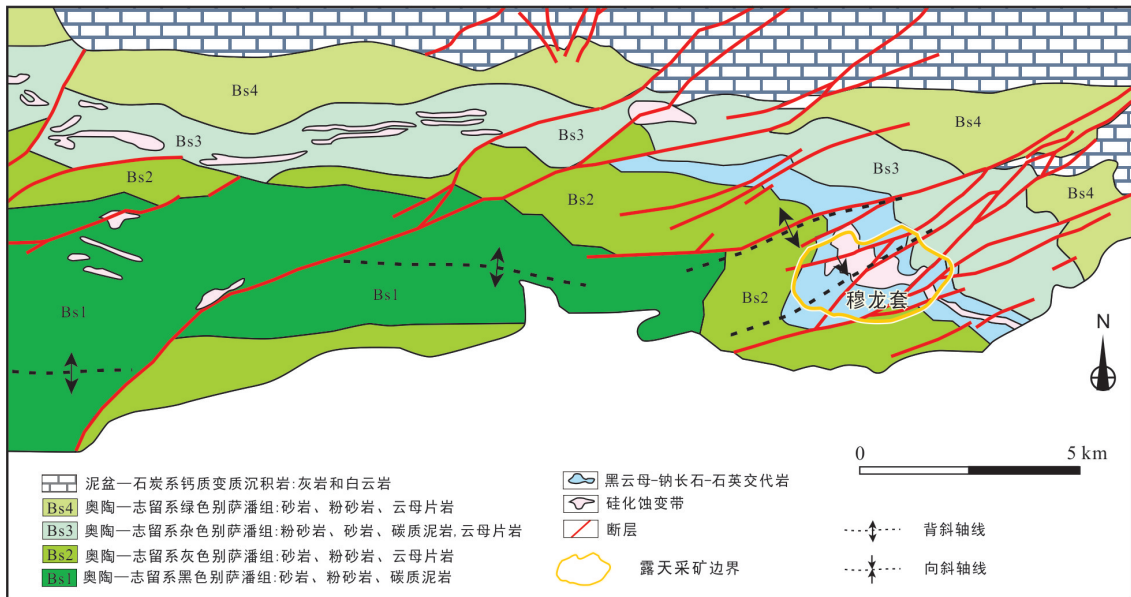


图3 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床区域地质图
(据文献[13,137]修改)

Fig.3 Simplified regional geological map of Muruntau gold deposit in Uzbekistan. Modified from [13,109].

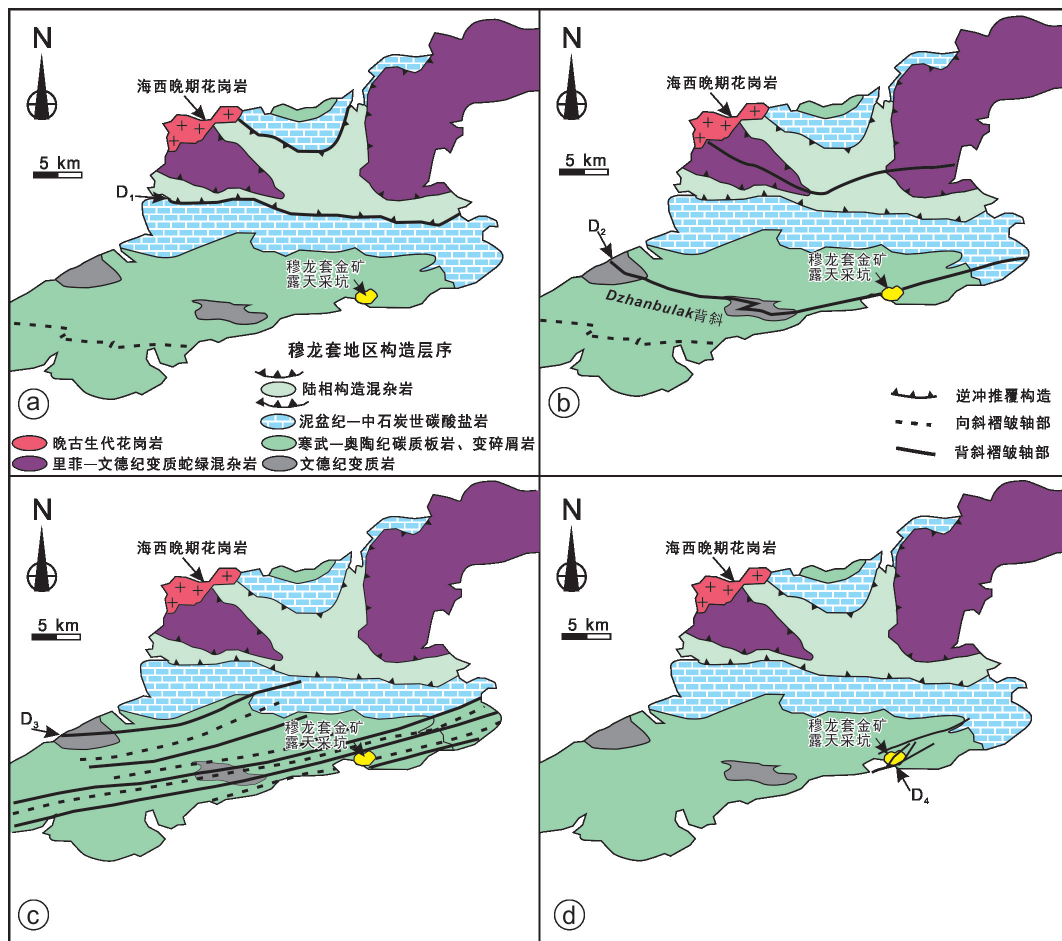


图4 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床区域构造简图,显示 D₁ - D₄ 期构造变形对区域的影响
(据文献[17]修改)

Fig.4 Structural scheme showing the effect to D₁ - D₄ of Muruntau gold deposit, Uzbekistan. Modified from [17].

受后期构造应力作用发生揉皱变形; 晚期发育切穿片理的主体矿脉及围绕主体矿脉发育的大量交错的网脉(占总金储量的 90% 以上); 早期矿脉中矿石矿物主要为黄铁矿、毒砂、自然金、磁黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、白钨矿等; 晚期矿脉中出现大量电气石、方解石、冰长石等脉石矿物^[108]。金矿化伴随强烈热液蚀变, 蚀变带范围和展布受区域构造线控制。从早到晚包括 5 阶段蚀变矿物组合: (1) 石英-钠长石-金云母-更长石, 对应早期矿化^[109], 并伴有黄铁矿、毒砂等沉淀; (2) 绿泥石-绢云母-钠长石-石英; (3) 石英-钾长石-绢云母-白云石-硫化物, 与金矿化关系最为密切, 矿化的主体矿脉及网状脉均发育在石英-钾长石蚀变带内; (4) 钾长石-碳酸盐-黄铁矿-电气石, 主要发育于与主体矿脉近平行或斜交的脆性断裂之中, 切穿主矿脉; (5) 石英-方解石, 伴随稀少的黄铁矿、毒砂出现于整个矿区。金矿石中白钨矿 Sm-Nd 等时线测年获得(279±18) Ma 成矿年龄^[136], 含金毒砂样品的 Re-Os 等时线年龄为(287.5±1.7) Ma^[141], 指示大规模金成矿发生在早二叠世。

综合分析可见, 别萨潘组被动陆缘含碳复理石是金的初始矿源层; 海西中晚期伴随土耳其斯坦-南天山洋关闭及陆-陆碰撞过程中形成的卡拉库姆克拉通北缘大型韧性变形带及 Dzhanbulak 背斜是圈闭流体的有利部位, 同时构造变形带多期变形过程为成矿流体运移提供通道, 导致金再次富集; 二叠纪早期的岩浆热液可能部分参与成矿^[139]。高品位金矿石中 Pt 和 Pd 的品位分别为 0.10 g/t 和 0.13 g/t, 指示有地幔物质加入成矿^[137]; 通过研究含金毒砂 Os_i 和毒砂内流体包裹体 He 同位素组成显示地壳及幔源物质的加入对于金成矿具有重要作用, 并提出幔源物质可能源自早二叠世的花岗岩体^[141-142], 矿石硫化物及含矿别萨潘组地层 S、Pb 同位素研究表明地层为主要的硫源, 成矿物质与赋矿黑色岩系及造山期变质流体均具有密切成因联系^[143]。

2.2 吉尔吉斯斯坦库姆托尔金矿床

库姆托尔金矿床位于吉尔吉斯斯坦伊塞克湖南侧的高寒山区, 拥有黄金储量约 1 100 t, 矿石平均金品位为 4.4 g/t(表 1)。在区域构造中, 库姆托尔金矿床产在中天山北缘, 处于尼古拉耶夫线-那拉提山北缘大型构造变形带内(图 1a), 受北东走向的库姆托尔逆冲推覆构造控制。

矿区出露的最老地层为元古宇里霍系中深变质岩系, 主要岩性包括变砂岩、变酸性火山岩及片麻岩和少量混合岩; 地层厚度为 400~500 m, 碳质含量高(部分已石墨化), 尤其在推覆构造带内表现为强石墨化的碳质千枚岩、砾岩、粉砂岩和大理岩夹层^[113]。新元古界文德系复理石建造被推覆于里霍系之上, 主要岩性为下部的深灰色、黑色碳质千枚岩与上部的灰绿色片岩, 具绿片岩相变质特征, 金矿化主要发生于黑色碳质千枚岩中^[144]。矿区未见侵入岩出露, 区域磁力和重力测量结果表明^[144], 在矿区西北部的地表以下约 5 km 深处, 可能存在隐伏花岗岩体。

矿区主要构造形迹为多条北东走向逆冲断层, 组成库木托尔构造混杂岩带^[145](图 5), 呈近 NE-SW(北东-南西)向延伸, 倾向 SE(南东), 倾角为 40°~70°, 显示自 SE(南东)向 NW(北西)逆冲的运动学特征, 被认为是尼古拉耶夫线缝合带的组成部分^[146]。矿区经历 4 期变形变质作用^[145]: D₁ 期发生于前石炭纪, 表现为变沉积岩的 S₁ 片理, 发生低-中绿片岩相变质作用; D₂ 期也发生于前石炭纪, S₁ 片理发生褶皱, 形成近 NE-SW(北东-南西)向 F₂ 褶皱并伴随发育轴面劈理 S₂; D₃ 期时代为晚石炭世-早二叠世, 区域近 N-S(北-南)向缩短导致形成南倾或北倾的近 E-W(东-西)向逆冲断层, 并伴随形成近 N-S(北-南)向走滑断层、侧向断坡、小规模膝折带; D₄ 期时代为新生代, 表现为先期(尤其 D₂ 期)构造的活化。D₃ 期构造变形控制了大规模金矿化的发生, 导致沿库姆托尔构造混杂岩带内北东延伸超过 10 km 的大型金矿化带^[145](图 5)。

金矿化带包括南矿段、北矿段和 Stockwork 矿段。矿体的产状与断层带近一致, 呈板状、透镜状、脉状产出(图 5)。矿石类型主要有两类, 一类是具变余结构、纹层/条带状构造的千枚岩型矿石, 金品位低; 另一类是切穿黑色碳质千枚岩片理的石英(-方解石)脉型矿石, 具脉状、网脉状构造, 含有微粒自然金, 金品位高。矿区围岩蚀变以硅化为主, 其次为黄铁矿化、碳酸盐化、绢云母化等。热液成矿包括 4 个主要阶段: (1) 石英-碳酸盐矿物-钠长石-绢云母-黄铁矿阶段, 发育细脉状矿石, 品位较低; (2) 以发育强烈的脉状、网脉状和热液角砾建造为主要特征, 矿物组合为碳酸盐岩(白云岩、铁白云石、菱铁矿)、石英、黄铁矿、钾长石、绢云母和绿泥石; (3) 发育相似的脉状、网脉状和热液角砾矿化及相关的蚀变, 但是矿物组合以碳酸盐矿物和黄铁矿为主, 而缺

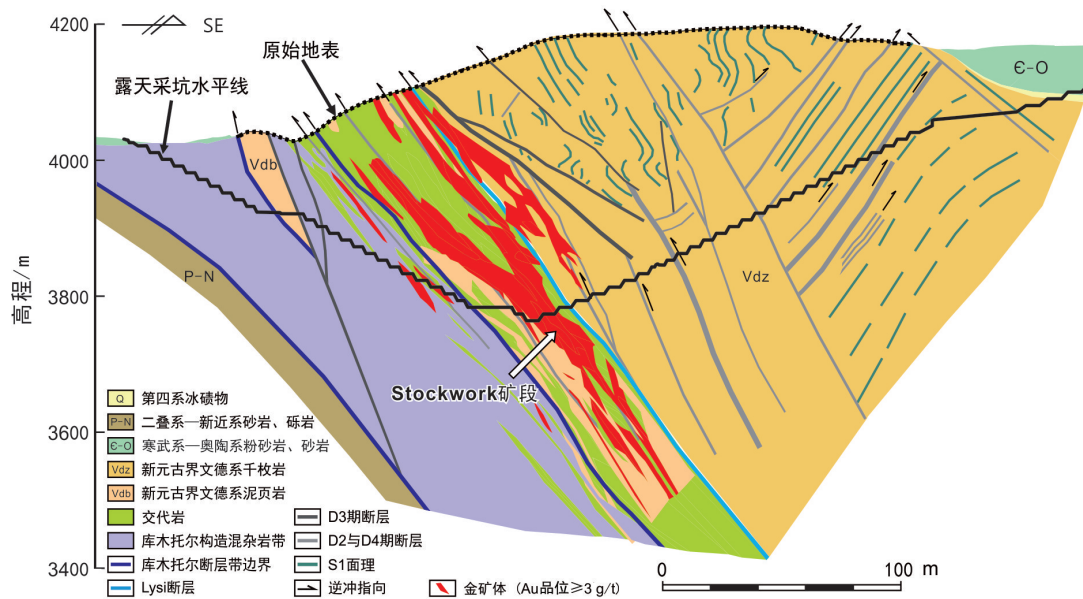


图5 吉尔吉斯斯坦库姆托尔金矿床剖面地质图
(据文献[145]修改)

Fig. 5 Geological section of Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan. Modified from [145].

少钾长石;(4)碳酸盐矿物-黄铁矿脉,切穿早期网脉状和热液角砾状矿石,并在蚀变千枚岩发生强烈变形的部位形成单向延长的金矿体^[147]。Mao等^[11]对蚀变围岩绢英岩、含绢云母金矿石分别开展全岩和绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年,获得成矿年龄在约290~280 Ma,为早二叠世。

库姆托尔金矿床经历4期演化过程:文德纪黑色岩系沉积期、前石炭纪构造变形期、晚石炭世—早二叠世构造变形与岩浆热液叠加期、新生代推覆构造期^[145]。金矿化赋存于新元古界文德系黑色碳质千枚岩中,这套黑色含碳岩系具有较高的金含量,很可能成为早期的金矿源层^[113]。含金黑色岩系发生了前石炭纪D₁与D₂期变形变质作用,尽管在D₂期变形期间伴随发生有一期热液事件(表现为硅化),但是并没有导致金的大规模富集^[145-146]。大规模金矿化发生于早二叠世,稍早于矿区西部约10 km的碰撞后花岗岩年龄((268.1±1.0)Ma、(280±9)Ma),稍晚于矿区东南部约80 km碰撞后岩体的年龄((296.7±4.2)Ma)^[11]。

2.3 中国卡特巴阿苏金矿床

卡特巴阿苏金矿床是近年来在我国新疆西天山新发现的一座大型铜金矿床,金储量为87 t,预测资源量为200 t,平均金品位为3.8 g/t(表1),铜约5万t。在区域构造中,矿床位于中天山北部,产在尼古拉耶夫线—那拉提山北缘大型构造变形带内,

金矿体与一系列近NEE-SWW(北东东—南西西)走向的逆冲断层系密切相关^[16,120]。

矿区出露地层自下而上包括下志留统巴音布鲁克组、下石炭统大哈拉军山组及第四系。巴音布鲁克组分布于矿区南部和西北部^[16,120](图6a),由下部的灰岩和上部的中-酸性凝灰岩组成,部分地段灰岩发生大理岩化。大哈拉军山组与巴音布鲁克组呈断层接触,仅在矿区西北部零星出露(图6a),为一套中-酸性陆相火山岩建造。野外观测表明,矿区先后侵入了钾长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩(脉)、闪长玢岩(脉)等多种岩浆岩,主体呈岩株、岩枝状产出,锆石U-Pb年代学研究显示,卡特巴阿苏铜金矿区岩浆侵位发生于早石炭世^[121-123]。

矿区构造以一系列近平行排列的NEE-SWW向逆冲断层(F₃, F₄, F₅, F₆, F₇)为主(图6a),是尼古拉耶夫线—那拉提山北缘大型构造变形带上盘的次级断层,断层面总体向南倾,倾角为50°~75°,共同构成了逆冲叠瓦扇的构造型式(图6b^[120])。另外,矿区南部的近NE-SW向右行走滑断层(F₈, F₉;图6c)、西部的近NNW-SSE(北北西—南南东)向左行走滑断层(F₁₁, F₁₂;图6c)与近NNE-SSW(北北东—南南西)向右行走滑断层(F₁₃;图6c)、东部的近N-S向左行走滑断层(F₀;图6d)与近NNW-SSE向逆断层(F₁₀;图6d)等,均是之后构造活动的产物,对该组逆冲断层系统产生了叠加与改造^[120]。矿区发育节理

构造,尤其是 F₅ 与 F₆ 断层之间的一组节理系统,包括 NNE-SSW 向与 NNW-SSE 向的共轭剪节理及近 E-W 向张节理,是重要的容矿构造^[148-149]。

金矿化受近 NEE-SWW 向逆冲断层系控制,在 F₅ 与 F₆ 断层之间的构造变形带内形成了广泛金矿化蚀变体,包括金矿体 45 条,规模较大的有 I₁、I₂、I₃、I₄、I₅ 等 5 条。金矿体多呈透镜状、厚板状产出,近 NEE-SWW 向延伸,长度超过 3 km,宽 20~200 m,总体倾向南,倾角为 30°~75°,表现出与 F₅、F₆ 断层产状的一致性。矿体在矿区东部规模大,因后期构造活动的影响,形态较为弯曲,具有分支、复合、膨大、尖灭等特征;在西部规模小,延伸较为平直(图 6a)。

矿石类型以原生金属硫化物为主,矿石矿物组合相对简单,以黄铁矿为主,次为黄铜矿、自然金、银金矿,形成团斑状、细脉浸染状和网脉状矿石。黄铁矿、黄铜矿和石英是主要的载金矿物,在黄铁矿中,自然金和银金矿多呈包体金出现;而在黄铜矿、石英

中,自然金和银金矿多以裂隙金、粒间金、包体金等形式出现。脉石矿物包括钾长石、斜长石、石英、黑云母、绢云母、绿泥石、方解石等。热液蚀变包括斜长石的钾长石化与绢云母化、黑云母和角闪石等矿物的绿泥石化与绿帘石化,以及广泛存在的黄铁矿化、硅化与碳酸盐化。热液蚀变组合受韧性断裂构造明显,矿体中心发育硅化,向边部依次出现绢云母化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化。含金石英脉中流体包裹体和 H-O 同位素组成研究显示^[16],成矿流体为中高温(270~390 °C)、中低盐度($\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 7%~16%)、富 CO₂ 的深部/变质流体($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}(\text{CV-SMOW})} = 1.6\text{‰} \sim 6.4\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}(\text{CV-SMOW})} = -107\text{‰} \sim -64\text{‰}$)。含金硫化物矿物硫同位素($\delta^{34}\text{S} = 6.92\text{‰} \sim 12.15\text{‰}$),指示成矿过程中硫来自海相地层中硫酸盐热化学还原^[16],金矿石中黄铁矿 Os-Pb 同位素和稀土元素组成研究显示,成矿金属为中天山地壳来源^[16]。最近获得含金黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为(310.9±4.2) Ma,指示卡特巴阿苏金成矿于晚石炭世的陆块拼贴变形过程^[16]。

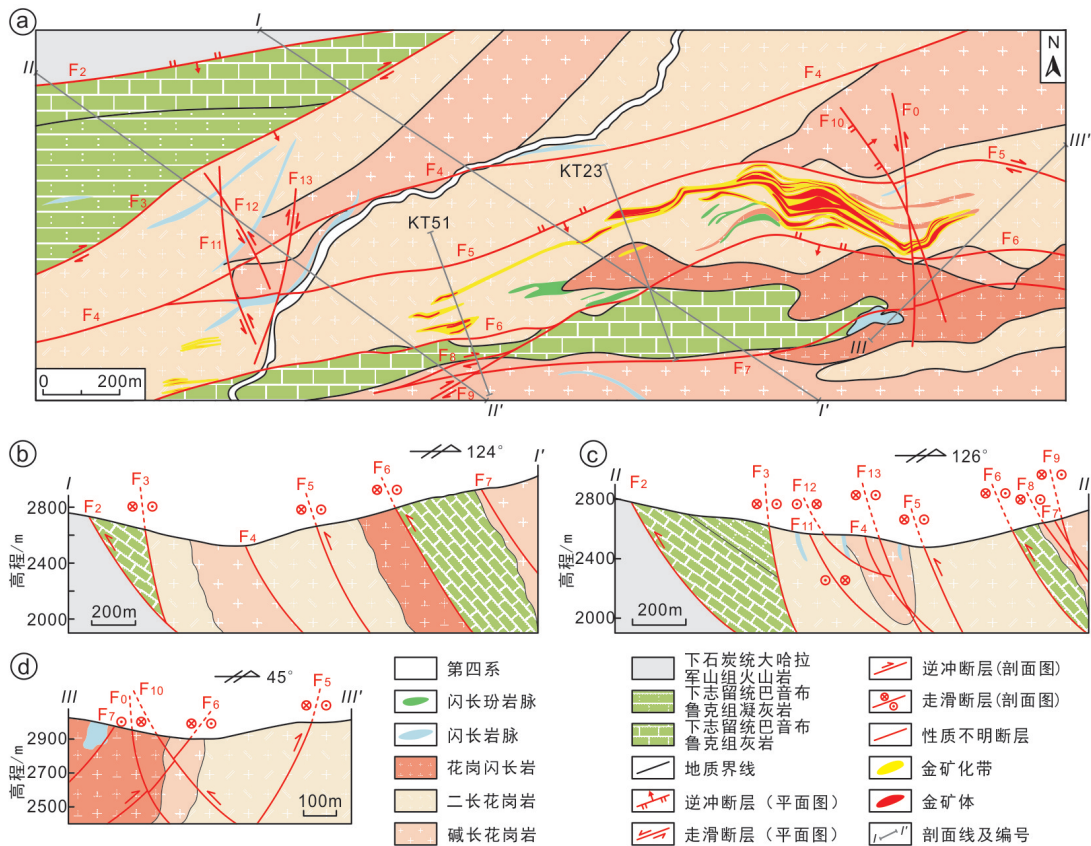


图 6 中国新疆西天山卡特巴阿苏金矿床地质平面图(a)与剖面图(b-d)

(据文献[16,120]修改)

Fig. 6 Geological (a) map and cross-sections (b-d) of Katebasu gold deposit, western Tianshan, Xinjiang, China. Modified from [16,120].

2.4 中国萨瓦亚尔顿金矿床

萨瓦亚尔顿金矿床位于中国新疆与吉尔吉斯斯坦边境线附近的中方一侧,近期已探明金储量为127 t,平均金品位为2.0 g/t(表1),预测金资源量为350 t。在区域构造中,萨瓦亚尔顿金矿位于塔里木克拉通北缘的南天山褶皱冲断带,隶属土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克大型构造变形带(图1a),受控于大型变形带南部阿热克托如克与伊尔库什坦两条走向北东、倾向北西的逆冲走滑断层。

金矿床赋矿地层为一套古生代发生绿片岩相变质作用的浊积岩系^[114-115]。最新碎屑锆石 U-Pb 年代学研究限定^[116],矿区西北部 F₂ 断层上盘地层沉积时代不早于397Ma(中泥盆世),F₂ 断层下盘地

层被限定为不早于355 Ma(早石炭世)(图7a^[116])。矿区西北部中泥盆统主体为一套灰色中-薄层粉砂质板岩夹黑色碳质板岩,中部下石炭统主体岩性为碳质板岩与粉砂质板岩互层,与东南部中泥盆统碳酸盐岩地层断裂接触(图7a)。金矿化主要赋存于下石炭统地层中。矿区发育大量走向北东、倾向北西的逆冲推覆构造,并被少量北西走向的断裂截切(图7a)。矿区构造变形十分强烈,岩石发生强烈褶皱,主期面理走向为220°~230°,倾向为310°~320°,倾角为60°~80°^[115],广泛发育糜棱岩化、构造透镜体、拉伸线理、A型小褶皱等构造,赋矿地层中板岩和千枚岩由于动力变质作用形成碎斑结构,岩石变形的强弱带交替出现^[115]。矿区没有大型岩浆侵入体出露,只在西南部零星出露北东向或南北向的辉

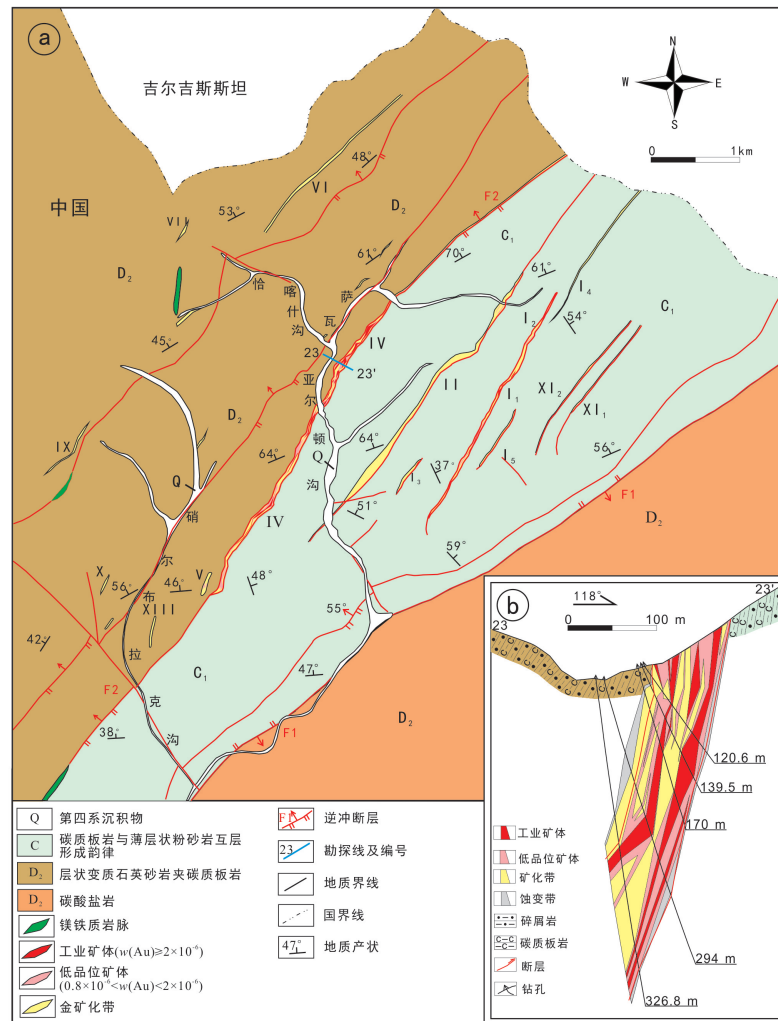


图7 中国新疆萨瓦亚尔顿金矿床地质简图(a)和IV号矿带23勘探线剖面图(b)
(据文献^[116],有修改)

Fig.7 Geological map (a) and cross-section of the No. 23 exploration line of the IV mineralized belt (b) from the Sawayaerdun gold deposit, Xinjiang, China. Modified from ^[116].

绿岩岩脉(图 7a), K-Ar 同位素测年显示印支期((207.5 ± 4.2) ~ (187 ± 18) Ma) 和燕山期((164.4 ± 2.6) ~ (137.9 ± 3.8) Ma) 两期岩浆侵位事件^[114]。

金矿体主要产于一系列北东走向韧性变形带内, 被后期北东走向脆性断裂所横切(图 7a), 容矿断裂带明显切穿地层, 尤其在矿区北段, 二者走向交角可达 50°; 剖面上, 以含矿构造带产状陡倾为基本特点^[22]。矿区已发现 24 条金矿化体, 其中 I、II、IV、XI 号矿体具有工业开采价值, IV 号矿带规模最大, 长度超过 4 000 m, 宽度变化于 20~100 m, 单个矿体具有超过 75 t 的金资源量, 品位变化于 1.4~5.9 g/t^[114-115]。金矿体由大量石英细/网脉及发育浸染状、团块状的蚀变围岩组成, 呈板状、透镜状或脉状产出, 走向南西, 倾向北西, 倾角介于 60°~70°(图 7b)。碳质板岩局部发育浸染状黄铁矿, 可能是沉积成岩期产物, 电子探针分析黄铁矿显示其含金量颇高^[116]。

根据野外产状及穿插关系, 金矿化可分为两期: 第 1 期为平行于片理产出且发育强烈揉皱变形或者石香肠化的石英-硫化物细脉, 黄铁矿通常显示它形晶结构, 发育大量裂纹与孔洞, 与自形-半自形毒砂共生, 毒砂也显示破裂纹结构, 在局部可见黄铁矿因变形作用拉伸的现象; 第 2 期表现为脆性断裂充填的石英-黄铁矿细/网脉, 该期黄铁矿多呈自形-半自形晶形且具有保存完好的晶体形态, 较第 1 期黄铁矿表面相对干净, 无裂纹, 可包裹前期黄铁矿、毒砂, 局部与毒砂、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿共生。矿石中硫化物主要包括黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等, 其中黄铁矿及毒砂为主要载金矿物^[114]。金主要以自然金及银金矿形式存在于黄铁矿、毒砂及石英的裂隙及边部, 还有不可见金呈固溶体(Au⁺)形式存在于黄铁矿及毒砂中。Re-Os 法测得早、晚两期含金黄铁矿(毒砂)的形成年龄分别为(323.9 ± 4.8) Ma、(282 ± 12) Ma^[116]。

萨瓦亚尔顿金矿的赋矿地层为塔里木板块北缘古生界含碳碎屑岩, 碎屑锆石限定的沉积地层时代为 355 Ma(早石炭世)或更晚^[116], 含矿层为处于塔里木克拉通北部被动大陆边缘沉积岩^[6]。第 1 期含金黄铁矿 Re-Os 年龄((323.9 ± 4.8) Ma)代表了晚石炭世的一期成矿事件, 这个年龄与塔里木克拉通与中天山地块在晚石炭世碰撞拼贴的时间相一致, 导致了萨瓦亚尔顿区域逆冲推覆构造及韧性变形构造带的形成, 为成矿流体的运移及沉淀提供了通

道及容矿空间。成矿流体可能来源于早古生代沉积地层的变质脱水作用。黄铁矿初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os (0.747 ± 0.020) 指示金属主要来自地壳^[116]。第 2 期黄铁矿测得的 Re-Os 年龄((282 ± 12) Ma)代表早二叠世的成矿事件^[116]。这个年龄落在天山碰撞后花岗岩年龄范围(290~260 Ma)内^[105-106]。区域上相当程度的抬升剥蚀作用引起了同碰撞期逆冲断层的再活化, 可能导致了这期成矿作用的发生。不同于前一时期的韧性断层, 这一时期断层主要表现为脆性特征, 断层阀模式及剪切走滑断层引起的容矿空间导致了流体压力波动可能是流体运移的主要机制。与前期成矿相似, 初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os (0.697 ± 0.057) 也指示成矿金属来源于地壳^[116]。

2.5 中国阿万达金矿床

阿万达金矿床是新近在中国新疆拜城县发现的中型金矿床, 近期勘探估算金资源量为 11.6 t, 平均金品位为 1.8 g/t(表 1)。在区域构造中, 阿万达金矿位于塔里木克拉通以北的南天山褶皱冲断带, 隶属土耳其斯坦-阿特巴什-伊内里切克-那拉提山南缘-卡瓦布拉克大型构造变形带(图 1a), 受克尔阿万达和阿尔腾柯斯两条近东西走向的逆冲推覆构造及其次级断裂控制^[117, 118]。

矿区出露地层为一套奥陶系-石炭系浅变质碎屑岩组合(图 8^[119])。赋矿地层主体为一套片岩夹大理岩组合, 下段以灰色条带状细粒大理岩为主, 上段以片岩为主, 夹少量条带状大理岩, 岩性包括灰黑色红柱石黑云母片岩、灰色黑云母石英片岩、灰色石英片岩是主要的赋矿层位。石英片岩碎屑锆石 U-Pb 年龄显示其不早于 405 Ma^[119]。矿区发育多条近平行的逆断层, 总体构造线呈近东西向-北东向, 断裂性质以逆断层为主(图 8), 表现为由北向南的逆冲推覆。断裂带发育 3 期构造活动, 早期为逆冲推覆, 形成向北倾斜的片理; 中期发育左行走滑, 可以看到旋转方向具有左行走滑特点的石英布丁体; 晚期作用在其上叠加了右行斜冲, 有较为强烈的脆性改造, 糜棱岩大都已经发生碎裂。矿区未见大型侵入体, 在矿区边部石英片岩地层中发现一条切穿地层的花岗岩脉, 锆石 U-Pb 年定显示其侵位时代为 298 Ma^[118]。

矿区内共圈定 3 条金矿化蚀变带, 由北往南分别为 I、II、III 号矿脉, 其中 I 号金矿化蚀变带是矿区主要矿化带, 位于克尔阿万达沟北部, 总长约 20 km^[119](图 8)。围岩主要为石英片岩、黑云母片

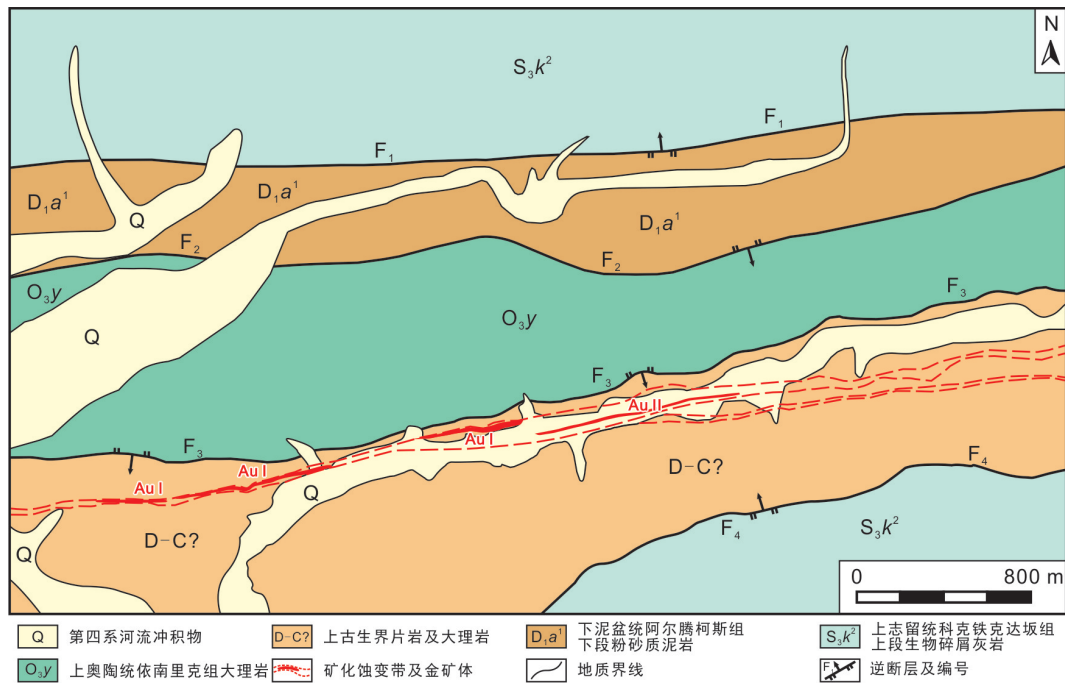


图8 中国新疆阿万达金矿床地质图
(据文献[119]修改)

Fig. 8 Geological map of the Awanda gold deposit, Xinjiang, China. Modified from [119].

岩和二云母石英片岩。走向北东东向,倾向 350° ,倾角介于 $56^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。矿化表现为石英细/网脉型及其附近围岩的蚀变体,硫化物呈稠密浸染状顺片理分布于蚀变岩石中,后被大量石英-硫化物细/网脉切穿,金属矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂,微量为闪锌矿、黄铜矿,电子探针分析显示细粒浸染状毒砂是主要载金矿物^[118]。

野外产状观测结合剪切变形带不同部位石英EBSD分析^[118]显示,阿万达金矿经历了3期变形变质作用,晚石炭世南天山洋闭合及随后塔里木克拉通北缘与中天山碰撞拼贴,形成片理(S_1)北倾的逆冲推覆构造,为成矿流体的运移及沉淀提供了通道及容矿空间,导致了第一期顺层产出的金矿化;随后韧性剪切带发生左行走滑及之后的右行斜冲作用,伴随糜棱岩化及碎裂岩化作用,导致先期片理(S_1)破坏,热液充填形成切穿 S_1 片理的含金石英-黄铁矿细脉。阿万达金矿成矿流体经历了中温及低温两个阶段,中温阶段成矿流体温度介于 $270\sim 380^{\circ}\text{C}$,以中低盐度 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 流体为主;低温阶段均一温度为 $188\sim 270^{\circ}\text{C}$,流体向中低盐度 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系转变^[119]。含金石英脉H-O同位素及载金硫化物S、Pb同位素联合示踪表明,成矿流体主要为变质流体,成矿过程中硫主要来源于地壳,金沉淀是围岩和

变质流体交代反应的结果^[117]。

3 陆内走滑变形带容矿金矿床

3.1 中国康古尔金矿床

康古尔金矿床位于中国新疆鄯善县,探明黄金储量为40 t,平均品位为 9.9 g/t (表1)。在区域构造中,康古尔金矿床产在康古尔-黄山韧性-脆性构造变形带西段南部(图1a),具体形成于该变形带南部的次级脆-韧性剪切带内。

区域主要出露下石炭统雅满苏组和干墩组(图9a)。雅满苏组在矿区主要由下段安山岩、英安岩、流纹岩、安山质凝灰岩、英安质凝灰岩和上段砂岩、灰岩组成,是矿床主要赋矿层位。Wang等^[129]测得雅满苏组安山岩锆石SHRIMP U-Pb年龄为 $(339.3 \pm 5.7)\text{ Ma}$ 。矿区范围内未见大规模侵入岩,但广泛发育次火山岩和脉岩,前者以闪长玢岩、石英闪长玢岩、斜长花岗斑岩为主,后者主要为正长斑岩、钠长斑岩和石英斑岩。矿床东南部小面积出露二叠纪石英正长斑岩及流纹斑岩^[130]。

矿区的主要构造形迹表现为韧性挤压片理带、NNE向脆-韧性剪切带和NE、NW向脆性断裂带(图9a^[129])。金矿化范围与NNE向脆-韧性剪切带

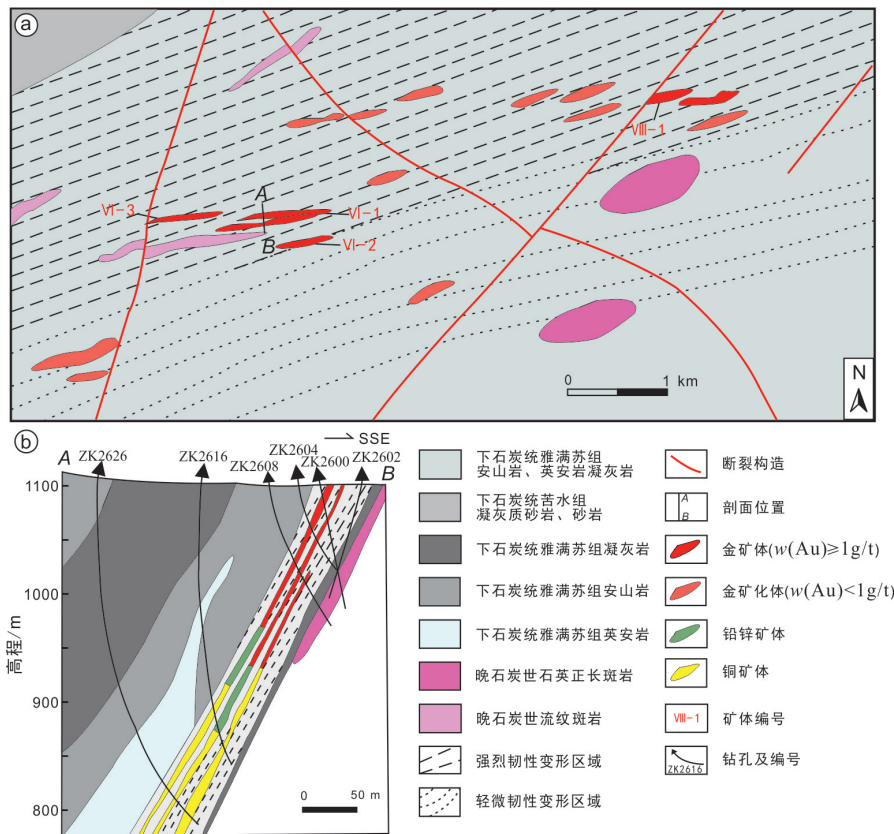


图9 中国新疆康古尔金矿床地质平面(a)和勘探线剖面图(b)
(据文献[129]修改)

Fig. 9 Geological map (a) and cross-section map (b) of the Kanggur gold deposit, Xinjiang, China. Modified from [129].

一致(图 9a), 金矿体受一系列雁列式张裂系控制。矿体呈板状、透镜状, 走向 $255^{\circ} \sim 260^{\circ}$, 倾向北北西, 倾角为 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。矿体在垂向上表现出上部富金、下部富铜, 整体伴生铅锌的规律(图 9b)。矿石中主要金属矿物包括黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿及银金矿, 非金属矿物主要包括石英、方解石、绿泥石等。发育绿泥石化、硅化、黄铁绢英岩化、磁铁矿化等蚀变类型。根据蚀变矿物组合和蚀变强度将热液蚀变带分为 3 个区域, 包括: (1) 硅化-绿泥石化-黄铁矿-磁铁矿化区域; (2) 黄铁绢英岩化-绢云母化区域; (3) 绢云母-绿泥石化区域。其中第 (2) 个区域控制了金矿化的范围^[150]。根据矿物共生组合及矿脉穿插关系将热液成矿过程划分为 5 个阶段, 包括: (1) 自然金-黄铁矿-石英-绢云母阶段; (2) 自然金-石英-黄铁矿-磁铁矿-绿泥石阶段; (3) 自然金-石英-黄铁矿阶段; (4) 自然金-黄铁矿-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿-石英阶段; (5) 硫化物-石英-碳酸盐阶段^[129]。前 2 个阶段主要与康古尔-黄山大型变形带早二叠世(300~283.7 Ma)的韧性-韧脆性变形过程有关, 含石英脉 H-O 同位素组成显示

成矿流体为变质热液; 后 3 个阶段是康古尔矿床主要成矿期, 与康古尔-黄山大型变形带晚二叠世(263~243 Ma)陆内走滑变形过程及矿区东南部石英正长斑岩侵入相关, 成矿流体为变质热液和岩浆热液混合流体^[103, 129, 131]。

陈文等^[102]通过矿石中绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 和金矿石 K/Ar 测年, 限定康古尔金矿床主成矿期年龄为 261~253 Ma。综合分析认为, 康古尔-黄山大型变形带多序次多阶段的变形过程为成矿流体的产生和运移提供了有利的构造条件, 金成矿主体发生在该变形带晚二叠世(263~243 Ma)的陆内走滑变形过程中。

3.2 中国红石金矿床

红石金矿位于中国新疆鄯善县南部, 拥有金储量 5.4 t, 金品位为 5.0 g/t(表 1)。在区域构造中, 红石金矿床产在康古尔-黄山韧性-韧脆性构造变形带西段南部(图 1a), 东南距康古尔金矿 10 km, 受一系列韧性、脆-韧性变形带及次级构造破碎带控制。

区域主要出露下石炭统雅满苏组和干墩组, 岩性主要为凝灰质砂岩、安山岩及英安岩等(图 10a)。矿床西侧发育早石炭世石英正长斑岩, 锆石 U-Pb

年龄为(337.6±4.5) Ma^[132]。东侧及深部发育早石炭世石英钠长斑岩,锆石 U-Pb 年龄为(334±3.7) Ma;岩石为钾玄岩系列,富集轻稀土元素而亏损高场强元素,岩石地球化学特征指示岩浆起源于下地壳并混有少量幔源物质^[132];矿区北侧出露大面积二叠纪花岗闪长岩和二长花岗岩,锆石 U-Pb 年龄为(282.7±4.2) Ma^[133]。

红石金矿包括 L₁ 和 L₂ 两个含金石英脉群(图 10a),矿脉主体北倾而局部直立,倾角一致,均受矿区地层或地层与岩体接触带中的韧性、脆-韧性剪切带及次级构造破碎带控制^[151]。矿石主要表现为蚀变岩和石英脉、细/网脉,为先期形成的黄铁绢英岩化千糜岩经后期硅化及绢云母化交代作用而成^[151-152]。矿石中的金属矿物主要包括自然金、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等;非金属矿物主要

有石英、绿泥石、方解石、绢云母、长石等。通过矿物共生组合和矿脉穿插关系观测,热液成矿可划分为 3 个阶段,(1)石英-黄铁矿阶段;(2)石英-黄铁矿-黄铜矿阶段;(3)石英-黄铁矿-碳酸盐阶段,其中第 2 个阶段为金主成矿阶段。

红石金矿石中黄铁矿的 S-Pb 同位素组成指示,成矿物质主要来源于围岩地层并混入了少量岩浆来源物质;成矿相关脉石英 H-O 同位素指示成矿流体主体为变质热液^[132]。含金石英脉中发育气液两相及富 CO₂ 的包裹体,均一温度分别为 219~247 °C 和 250~257 °C,平均盐度为 6.18%,显示中低温、中低盐度的流体特点^[150]。陈文等^[102]测得红石金矿床主成矿期年龄为 246.9~246.5 Ma,与康古尔-黄山大型变形带晚二叠世(263~243 Ma)陆内走滑变形过程相一致^[129,131]。

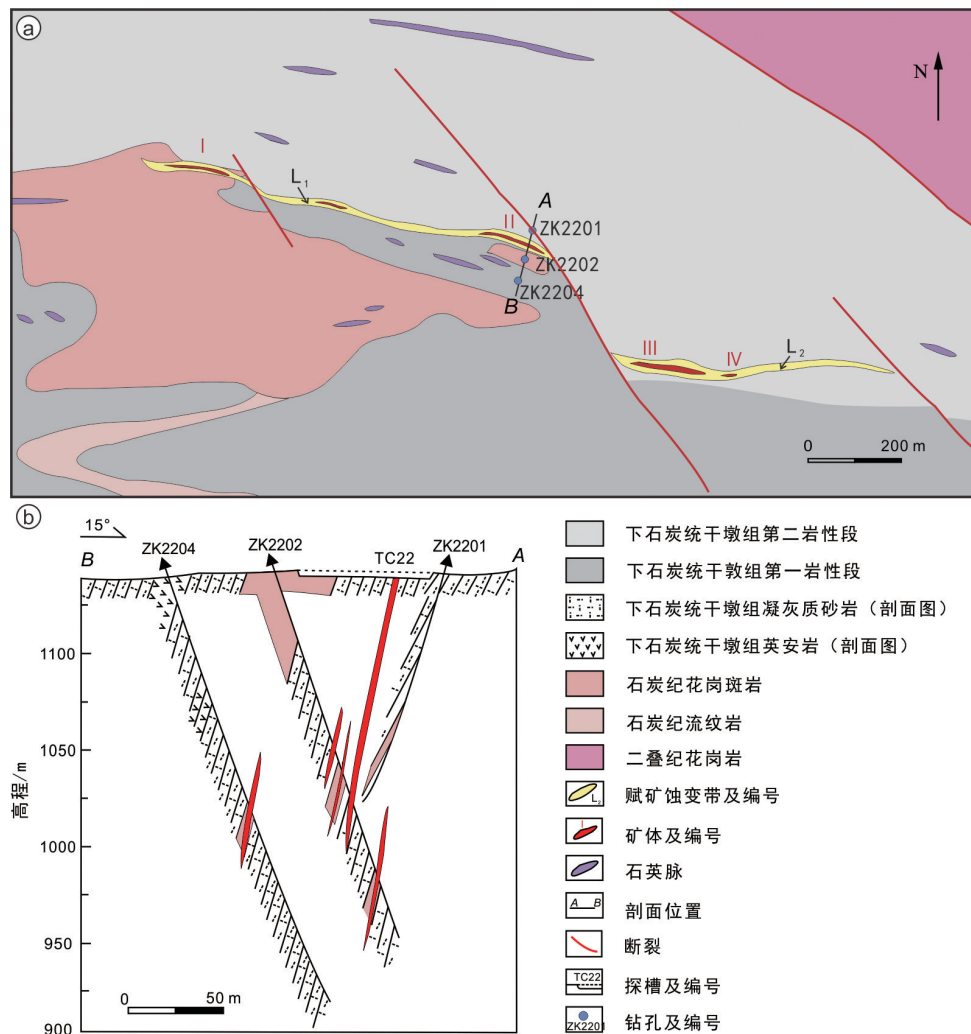


图 10 中国新疆红石金矿床地质平面(a)和勘探线剖面图(b)
(据文献[139]修改)

Fig. 10 Geological map (a) and cross-section map (b) of the Hongshi gold deposit, Xinjiang, China. Modified from [139].

4 讨论

4.1 大规模金成矿的地质环境

伴随帖尔斯科依洋奥陶纪^[6,51,73-74]、北天山洋^[6,46,52-53,55,71]和土耳其斯坦—南天山洋^[6,15,75-80,87]晚石炭世先后关闭,卡拉库姆、塔里木、中天山、哈萨克斯坦—伊犁、准噶尔等多个陆块主要在石炭纪末期(320~310 Ma^[46,81,153])发生碰撞拼贴。中—哈—吉—乌天山沿土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克、尼古拉耶夫线—那拉提北缘、天山北缘—阿奇克库都克等缝合带及其附近区域,经历了石炭纪末—早二叠世逆冲推覆和中—晚二叠世大规模右行走滑韧性剪切等变形变质作用^[9,46,82],在区域地壳内形成以缝合带为中心的多级脆—韧性变形带和次级断裂—裂隙系统;这些变形带内产出众多世界级和大型—超大型金矿床(表1),它们以中天山为核心,集中产在土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克、尼古拉耶夫线—那拉提北缘和康古尔—黄山3条大型脆—韧性构造变形带,构成东西向绵延3 000 km的天山巨型跨境金成矿带(图1b)。

中天山南缘土耳其斯坦—阿特巴什—伊内里切克—那拉提山南缘—卡瓦布拉克和中天山北缘尼古拉耶夫线—那拉提山北缘两个构造变形带是天山金成矿带最重要的控矿构造,中天山南缘变形带产出全球最大的穆龙套金矿床和阿曼泰套、科克巴塔斯、道吉兹套、扎尔米坦、吉拉乌、塔罗尔、萨瓦亚尔顿、阿沙哇义、布隆、阿万达、大山口等超大型和大—中型金矿床,中天山北缘变形带发现库姆托尔巨型金矿床和查尔库拉、卡特巴阿苏、阿拉斯托、萨日达拉、望峰等重要金矿床(图1b)。卡特巴阿苏大型金矿床含金黄铁矿 Re-Os 测年获得晚石炭世((310.9±4.2) Ma^[16])的成矿年龄,穆龙套金矿床含金毒砂 Re-Os 法测得早二叠世((286±5) Ma)成矿时代^[141],库姆托尔金矿床(绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄,288~285 Ma^[11])和扎尔米坦金矿床(载金黄铁矿 Re-Os 年龄,约286 Ma^[34])也均成矿于早二叠世,变形带内其他重要金矿床尽管缺乏可靠的同位素测年结果,但从岩石建造、构造变形样式及金矿化的空间—时间联系等地质观察分析,可以推断它们多为二叠纪早期成矿^[15,34]。不难看出,天山跨境金成矿

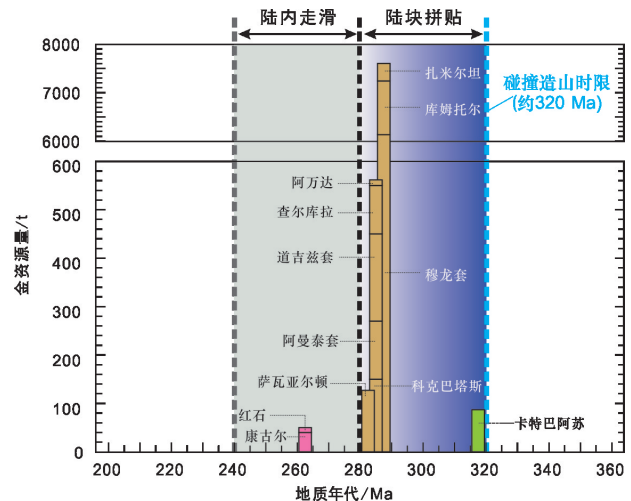


图11 天山变形带容矿金矿床资源量直方图(数据来源见表1)
Fig. 11 Histogram of mineral resources showing major deformed zone hosted gold deposits in the Tian Shan and their metallogenic environment (data from Table 1)

带大规模金成矿集中发生于晚石炭世—早二叠世(表1),主要与天山区域古亚洲洋关闭后的陆块碰撞拼贴和逆冲推覆构造等地质过程密切相关,碰撞造山过程中陆块拼贴变形带应是这一时期大规模金成矿的重要地质环境(图11)。

康古尔—黄山大型脆—韧性构造变形带产有康古尔大型、红石和红山小型金矿床(图1b)。该变形带经历多期脆—韧性变形事件,晚石炭世—早二叠世以南北向的逆冲推覆挤压变形为主,中—晚二叠世发育强烈右行走滑剪切运动和岩石变形变质过程,主体发育于碰撞后陆内环境^[99-100,104]。金矿石 K-Ar 测年和矿石中绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年^[102]显示康古尔、红石和红山金矿床的主成矿作用发生在中—晚二叠世(261~253 Ma),与康古尔—黄山变形带右行走滑剪切变形的主活动期(262~243 Ma)一致,碰撞造山后的陆内走滑变形带是这一时期金成矿的重要地质环境(图11)。

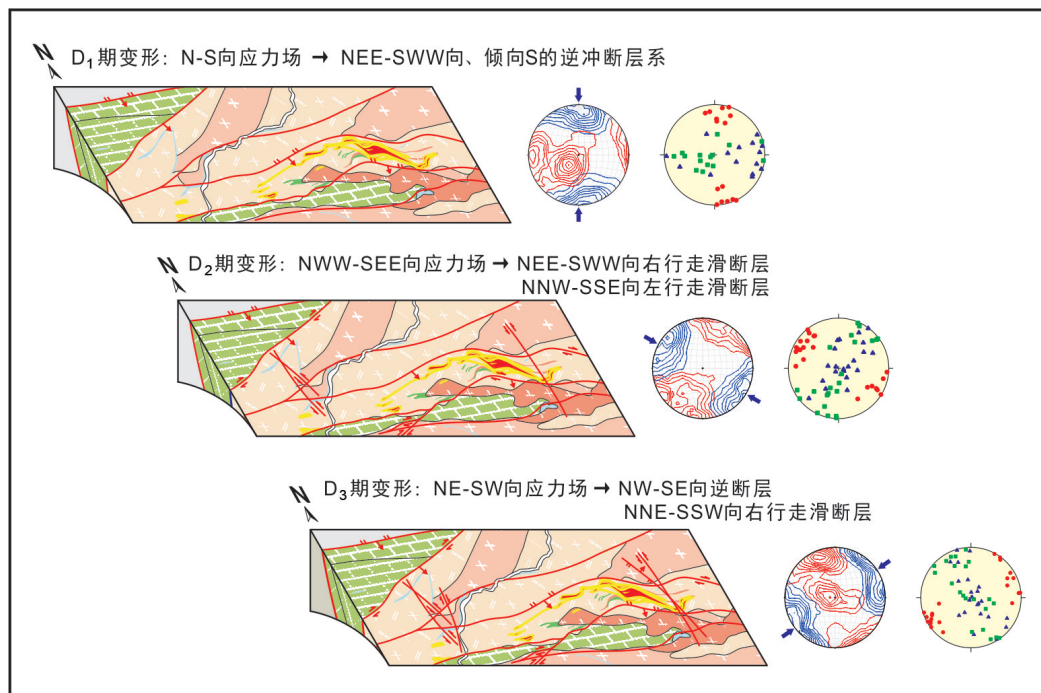
4.2 变形带构造样式与控矿特征

区域陆块碰撞拼贴造山晚期/期后,天山古缝合带及附近多期次变形过程是中—哈—吉—乌天山大规模金成矿的关键控制因素,世界级和大型—超大型金矿床直接就位于脆/韧性构造变形带及其次级断裂—裂隙系统^[15,17,34]。基于赋矿建造及与金矿化关系,早期研究者将天山区域,尤其乌兹别克斯坦克孜尔库姆一带的众多金矿床,理解为黑色岩系型、克孜尔库姆型、穆龙套型金矿床^[21-24]、侵入体有关金矿床^[25-26],或按照控矿构造命名为韧性剪切带型金矿

床。事实上,天山跨境成矿带金矿床既产于元古宇/古生界浅变质含碳复理石建造内(如穆龙套、库姆托尔、科克巴塔斯、阿曼泰套、道吉兹套、查尔库拉、萨瓦亚尔顿;表1),也产于石炭纪—二叠纪同碰撞花岗岩类中(卡特巴阿苏、阿拉斯托;表1),还有同时产于浅变质含碳复理石建造及侵入其中的二叠纪碰撞后花岗岩内(如扎尔米坦;表1)。赋存于含碳复理石建造金矿床,控矿构造表现为韧—脆性剪切带,但赋存于花岗岩类的金矿床主体受脆性—脆韧性断裂—裂隙系统控制^[15](表1)。自20世纪末 Groves 等^[28]提出造山型金矿床概念以来,部分学者将天山区域绝大多数金矿床理解为“造山型”^[17-19,29-34]。然而,天山造山带,除吉尔吉斯斯坦左岸金矿床的形成可能与寒武纪俯冲增生过程有关^[134]外,大规模金成矿主体发生在碰撞造山晚期/期后的陆块拼贴和陆内走滑两类变形带环境(图11),与西方造山型金成矿理论的诞生地,如澳大利亚 Yilgarn、加拿大 Abitibi 和美国阿拉斯加 Juneau 等地体,金成矿发生在太古宙或中生代陆缘增生环境^[28,30-31]显著不同。矿床成因类型的提出,旨在方便开展找矿勘查。基于天山巨型跨境金成矿带绝大多数金矿床集中形成于碰撞造山晚期/期后(而非增生造山环境)和受大型构造变形

带控制的基本地质事实,本文建议将它们统一称为变形带容矿金矿床(deformed zone hosted gold deposit)。

多期次构造变形是中—哈—吉—乌天山变形带容矿金矿床的普遍特征,但构造控矿样式和特征在各矿床不尽相同。穆龙套金矿床产于桑格龙套—塔姆德套与穆龙套—道吉兹套两个剪切带交汇处的“Z”字形褶皱中,矿田在海西期经历4期构造变形过程,但大规模成矿与D₂期南北向强烈挤压缩短和D₃期左行韧性剪切变形过程密切相关,与这两期变形相伴生的片理、褶皱相关劈理、成矿期破裂相关的活动剪切作用及低角度剪切带是关键控矿构造^[139]。库姆托尔金矿床同样经历了4期构造变形过程,D₃期南北向挤压缩短造就了E-W向逆冲断裂带及位于断裂带上盘沿构造混杂岩带延伸超过10 km的金矿化带,D₄期变形将含矿构造混杂岩(文德系含金碳质复理石建造)推覆至新生界沉积盖层之上^[145],导致矿体最终就位。卡特巴阿苏金矿床NE走向金矿化带被F₅、F₆两条逆冲断带所夹持(图6),最近矿田构造解析^[120]揭示出3期构造变形:D₁期晚石炭世自南向北逆冲作用、D₂期二叠纪右行走滑活动、D₃期新生代变形(图12)。D₁期变形与



图例同图6;断层面产状数据的等值线投影图中,蓝色等值线代表断层收缩轴,红色等值线代表断层伸展轴;利用断层滑动数据获得的应力场反演结果图中,红色圆形代表 σ_1 轴方位,蓝色三角形代表 σ_2 轴方位,绿色方形代表 σ_3 轴方位。

图12 中国新疆卡特巴阿苏金矿床构造地质模型简图

(据文献^[120]修改)

Fig. 12 Simplified model for the structural evolution of the Katebasu gold deposit, Xinjiang, China. Modified from ^[120].

金矿化关系最为密切,而 D_2 、 D_3 期变形仅在金矿体形成后有一定的改造作用; D_1 期变形是晚石炭世陆块拼贴过程的构造响应,与之伴随的近 N-S 向缩短导致自南向北的一系列逆冲活动,那拉提山北缘断裂(F_2)被激活,成为一级(导矿)构造,在其南侧/上盘形成一系列与之近平行排列的叠瓦状次级逆冲断层带(即近 NEE-SWW 向的 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 、 F_7 断层)及相关张性-张扭性裂隙系统,控制了矿化带的展布和金矿体的就位。

4.3 叠加成矿作用

叠加成矿作用是许多世界级矿床形成的重要因素^[155]。中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床均常显示出多期叠加复合的成矿特点。世界上最大的穆龙套金矿床的形成,被认为经历了 3 期叠加,即:早古生代别萨潘组沉积-成岩金预富集;在 D_2 期南北向挤压缩短和 D_3 期左行韧性剪切变形过程中经历了多次金活化、富集和叠加过程^[108,139],导致形成含金石英大脉(宽为 0.5~20 m,长为 100~700 m,平均 Au 品位大于 10 g/t^[137])和多期石英-硫化物细脉与网脉、构造热液角砾岩和蚀变岩;早二叠世岩浆热液叠加。库姆托尔巨型金矿床发育纹层/条带状含碳千枚岩型和切穿碳质千枚岩片理的石英-方解石脉型两类金矿石。Large 等^[156]对两类金矿石中载金矿物黄铁矿进行 LA-ICP-MS 微量元素分析显示,石英-方解石脉型矿石中热液期半自形-自形黄铁矿(Au: $(0.01 \sim 1\ 100) \times 10^{-6}$)含金性显著高于含碳千枚岩型矿石中沉积期草莓状黄铁矿(Au: $(0.001 \sim 3) \times 10^{-6}$)。最近的精细矿相学研究^[116]在萨瓦亚尔顿金矿床揭示出 3 期载金黄铁矿,包括:(1)球丛状黄铁矿(Py_0),呈稀疏浸染状分布于碳质板岩内;(2)它形黄铁矿(Py_1),浸染状产于石英脉及蚀变岩石中,与它形毒砂(Apy_1)和围岩共同发生硅化及强烈的揉皱变形;(3)自形-半自形黄铁矿(Py_2),产于未变形石英脉中,伴生自形毒砂(Apy_2)。通过对含矿岩系碎屑锆石 U-Pb 和后两期载金黄铁矿 Re-Os 同位素测年^[116],识别出早石炭世((355 ± 7) Ma)、晚石炭世((324 ± 5) Ma)和早二叠世((282 ± 12) Ma)等 3 个时期的金成矿事件(图 13),指示在被动陆缘同沉积期、同碰撞期和碰撞后均伴随金矿化。

4.4 控矿因素和找矿标志

中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床赋矿岩石主要为元古宇、下古生界和泥盆系-石炭系浅变质含碳细碎屑岩及侵入其中的石炭纪-二叠纪同碰

撞/碰撞后花岗岩类(表 1)。这些不同时期的黑色岩系沉积于卡拉库姆克拉通或塔里木克拉通北缘被动陆缘环境,常显示较高的金背景值,被认为是重要的初始矿源层^[15,17,21-24,134,156]。穆龙套金矿床赋矿岩系奥陶-志留系别萨潘组 3 段(Bs3)浅变质浊积岩系金含量(约 483×10^{-9})显著高于其他 3 个岩性段和矿区外围岩石(Au: $(11 \sim 26) \times 10^{-9}$)^[136-137];萨瓦亚尔顿金矿床赋矿岩系泥盆系-石炭系含碳细碎屑岩金平均背景值为 41×10^{-9} ,高出区域地层平均值 40 倍以上^[24];库姆托尔金矿床文德系碳质千枚岩中的沉积期草莓状黄铁矿显示高的金含量($(0.001 \sim 3) \times 10^{-6}$)^[155]。另一个清楚的事实是,天山变形带容矿金矿床高背景金的赋矿岩系普遍具有较高的有机碳含量,乌兹别克斯坦别萨潘组岩石有机碳含量为 2%~7%^[24],吉尔吉斯斯坦文德系基底岩石有机碳含量高达 5%~10%^[157]。这些浊积岩系中的碳质可能是还原条件下厌氧细菌分解早期腐殖质形成,在表生条件下广泛吸附周围地层中的金^[158],并在中-低级变质环境黄铁矿重结晶为磁黄铁矿过程中释放成矿元素^[159-160]。多期构造变形是天山众多变形带容矿金矿床的另一个普遍特征,金矿床的形成和就位受大型脆韧性构造变形带及其次级断裂-裂隙系统控制,这些重要构造空间为含矿流体上升和区域流体流动提供了通道,是能量会聚带、高渗透区和流体汇集区。在多期次的变形变质过程中,金元素活化、迁移、富集沉淀成矿,在脆韧性变形带中的剪切裂隙、脆性变形带的断裂-裂隙系统中沉淀形成含金石英脉和含金蚀变岩。同碰撞/碰撞后岩浆侵入体广泛出露于天山变形带金矿床外围或隐伏于赋矿岩系之下,有的直接是重要的赋矿地质体(如扎尔米坦、卡特巴阿苏)(表 1);它们与金成矿显示出密切的时空和成因关联,穆龙套^[111,136-141]、库姆托尔^[11,157]、萨瓦亚尔顿^[116]、卡特巴阿苏^[15-16]等多个重要金矿床均揭示出金成矿过程中岩浆流体显著贡献。岩浆侵入过程常伴随应力释放,促进断裂、裂隙的形成和剪切带再活化,同时也能促进周围热变质围岩中金的萃取与活化再富集。

天山绝大多数变形带容矿金矿床的形成,常常大致经历了古老地壳中金的初始富集、增生/碰撞过程中多期变形变质活化及同碰撞/碰撞后岩浆热液叠加 3 个地质过程(图 14),金矿床在不同的地壳深度、与岩浆侵入体的空间关系等不同配置下表现出多种矿化样式^[15]。可见,“地壳初始富集+构造变

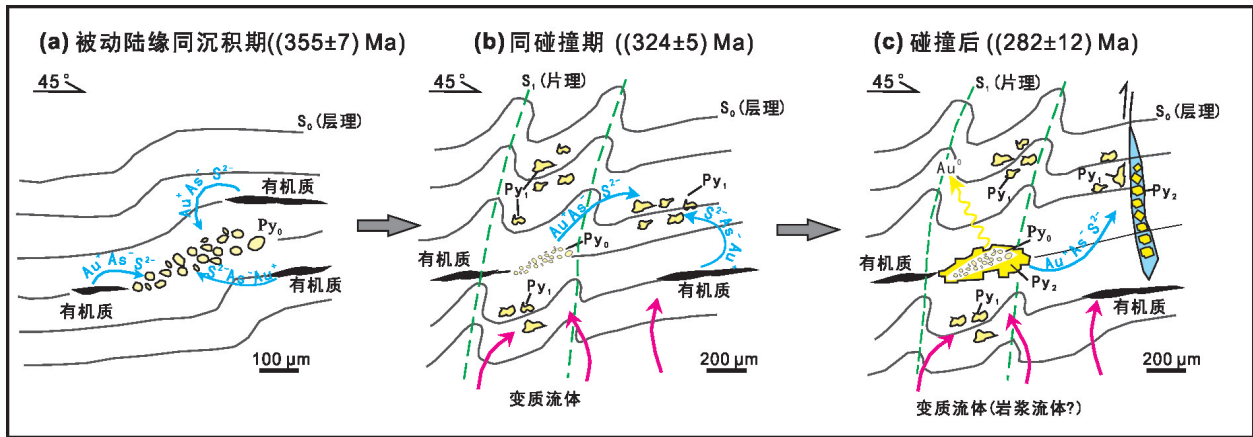
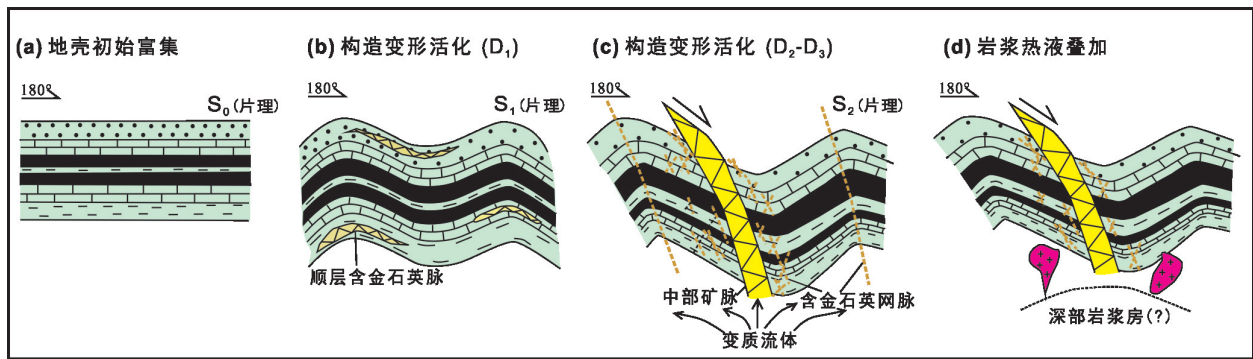


图 13 中国新疆萨瓦亚尔顿金矿床不同成矿期黄铁矿晶体特征及流体成矿演化示意图

Fig. 13 Cartoon showing the characteristics and evolution of pyrite during multi-stage gold mineralization events of the Sawayaerdun gold deposit, Xinjiang, China



(a) 海西早期,卡拉库姆克拉通北部被动陆缘别萨潘组含碳复理石沉积,初始含金含量高;(b) 海西中—晚期, D₁ 期构造变形造成 S₁ 片理,以发育顺层石英脉为特征,金品位低;(c) D₂-D₃ 期构造变形造成切穿地层的 S₂ 片理和其中充填的脉状高品位矿体,以及周围次级断裂中大量含金石英网脉;(d) 海西末期,碰撞后花岗岩体侵入于别萨潘组复理石建造,造成围岩热变质并提供部分成矿物质。

图 14 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床控矿要素和成矿过程示意图

Fig. 14 Cartoon showing the key ore-controlling factor and ore-forming processes of the Muruntaugold deposit, Uzbekistan

形活化+岩浆热液叠加”是中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床的主控因素;与之对应,“碳质细碎屑岩+脆韧性变形带+海西末期岩体”应是天山大型-超大型变形带容矿金矿床的找矿标志组合。

5 结论

(1) 天山巨型金成矿带以中天山为核心,东西向横贯中国新疆中部—哈萨克斯坦东南部—吉尔吉斯斯坦—乌兹别克斯坦,世界级和大型-超大型金矿床集中产于古缝合带附近大型脆韧性变形带。

(2) 中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床主体形成于古亚洲洋关闭后晚石炭世—早二叠世陆块拼贴变形带,部分形成于中—晚二叠世陆内走滑变形带;多期叠加复合成矿是天山变形带容矿金矿床的显著特征。

(3) “地壳初始富集+构造变形活化+岩浆热液叠加”是中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床的主控因素;“碳质细碎屑岩+脆韧性变形带+海西末期岩体”是大型-超大型金矿的找矿标志组合。

值此翟裕生院士 90 华诞暨从事地质工作 70 周年之际,谨以此文感谢先生的谆谆教诲和关心指导。衷心祝愿先生健康长寿,学术长青! 本文的撰写得到国家“305”项目办公室中乌、中吉、中哈 3 个境外合作研究工作站以及新疆地矿、有色、冶金等勘查单位和有关矿企大力支持与配合,特约主编、审稿人和编辑提出了建设性修改意见,在此一并谨致谢忱!

参考文献

[1] XIAO W J, ZHANG L C, QIN K Z, et al. 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(4): 370-395.

- [2] WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO W J, et al. Tectonic models for accretion of the central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31-47.
- [3] 肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造—成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1062-1076.
- [4] 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 895-909.
- [5] 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: 1-1063.
- [6] 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): 1804-1816.
- [7] 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.
- [8] XIAO W J, WINDLEY B F, ALLEN M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1316-1341.
- [9] CHARVET J, SHU L S, LAURENT-CHARVET S, et al. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan Belt, NW China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(2): 166-184.
- [10] FRIMMEL H E. Earth's continental crustal gold endowment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1/2): 45-55.
- [11] MAO J, KONOPELKO D, SELTMANN R, et al. Post collisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Economic Geology*, 2004, 99(8): 1771-1780.
- [12] ABZALOV M. Zarmitan granitoid-hosted gold deposit, Tian Shan Belt, Uzbekistan[J]. *Economic Geology*, 2007, 102(3): 519-532.
- [13] BIERLEIN F P, WILDE A R. New constraints on the polychromous nature of the giant Muruntau gold deposit from wall-rock alteration and ore paragenetic studies[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, 57(6): 839-854.
- [14] 刘春涌. 周边国家矿产资源现状对比研究报告(中亚地区) [R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质调查院, 2003.
- [15] 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 西天山“亚洲金腰带”及其动力学背景和成矿控制与找矿[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 128-155.
- [16] 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.
- [17] YAKUBCHUK A, COLE A, SELTMANN R, et al. Tectonic setting, characteristics, and regional exploration criteria for gold mineralization in the Altaid orogenic collage: the Tien Shan province as a key example[J]. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 2002, 9: 177-202.
- [18] 毛景文, 韩春明, 王义天, 等. 中亚地区南天山大型金矿带的地质特征、成矿模型和勘查准则[J]. *地质通报*, 2002, 21(12): 858-868.
- [19] 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.
- [20] ŞENGÖR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [21] GAR'KOVETS V G. On the definition of the Kyzylkum-Type syngenetic-epigenetic deposits[J]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1973, 208(1): 163-165.
- [22] 郑明华, 张寿庭, 刘家军, 等. 西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-131.
- [23] 杨富全, 王义天, 李蒙文, 等. 新疆天山黑色岩系型矿床的地质特征及找矿方向[J]. *地质通报*, 2005, 24(5): 462-469.
- [24] 刘春涌, 王永江. 初论中亚黑色岩系型金矿床的基本特征: 兼论新疆黑色岩系型金矿找矿方向[J]. *新疆地质*, 2007, 25(1): 34-39.
- [25] COLE A. Genesis of granitoid-hosted gold-tungsten mineralization, Jilau, Tajikistan[D]. London: University of London, 2001: 1-240.
- [26] COLE A. Gold mineralization in the southern Tien Shan, Central Asia: tectonic setting, characteristics, exploration criteria[M] // SELTMANN R, JENCHURAEVA R. Paleozoic geodynamics and gold deposits in the Kyrgyz Tien Shan. IGCP-373 Field Conference in Bishkek and Kyrgyz Tien Shan: Excursion Guidebook. Krakow, Poland: IGCP-373, 2001: 71-80.
- [27] 朱永峰. 克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿: 金矿成矿条件与成矿环境分析[J]. *矿床地质*, 2004, 23(4): 509-519.
- [28] 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(1/2/3/4/5): 7-27.
- [29] ZHOU T H, GOLDFARB R J, PHILLIPS N G. Tectonics and distribution of gold deposits in China: an overview[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3): 249-282.
- [30] GROVES D I, GOLDFARB R J, ROBERT F, 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.
- [31] GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1/2): 1-75.
- [32] BIERLEIN F P, GROVES D I, GOLDFARB R J, et al. Lithospheric controls on the formation of provinces hosting giant orogenic gold deposits [J]. *Mineralium Deposita*,

- 2006, 40(8): 874-886.
- [33] DE BOORDER H. Spatial and temporal distribution of the orogenic gold deposits in the Late Palaeozoic Variscides and Southern Tianshan: how orogenic are they? [J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 46: 1-31.
- [34] 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.
- [35] WILHEM C, WINDLEY B F, STAMPFLI G M. The Altaids of Central Asia: a tectonic and evolutionary innovative review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113: 303-341.
- [36] XIAO W J, WINDLEY B F, YUAN C M, et al. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids[J]. *American Journal of Science*, 2009, 309(3): 221-270.
- [37] XIAO W J, WINDLEY B F, SUN S, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in central Asia: oroclinal sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43(1): 477-507.
- [38] JAHN B M, WU F, CHEN B. Granitoids of the Central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2000, 350: 181-193.
- [39] 涂光炽. 初议中亚成矿域[J]. *地质科学*, 1999, 34(4): 397-404.
- [40] YAKUBCHUK A S, SHATOV V V, KIRWIN D, et al. Gold and base metal metallogeny of the central Asian orogenic supercollage[J]. *Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary Volume: 1035-1068.
- [41] 肖文交, 舒良树, 高俊, 等. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. *新疆地质*, 2008, 26(1): 4-8.
- [42] PORTER T M. The Tien Shan belt: golden heart of Central Asia[J]. *The Ganges*, 2006, 88(1): 4-5.
- [43] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-140.
- [44] 王作勋, 邬继易, 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.
- [45] NIKOLAEV V A. About principal structural line of Tianshan [J]. *Proceedings of All-Russian Mineralogical Society Series*, 1933, 62(2): 347-354.
- [46] HAN Y G, ZHAO G C. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian orogenic belt: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*. 2018, 186: 129-152.
- [47] 王宗秀, 李春麟, NIKOLAI P, 等. 西天山造山带构造单元划分及古生代洋陆转换过程[J]. *中国地质*, 2017, 44(4): 623-641.
- [48] BURTMAN B S. The Tien Shan Early Paleozoic tectonics and geodynamics[J]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2006, 8(3): 1-23.
- [49] ROJAS-AGRAMONTE Y, KRÖNER A, ALEXEIEV D V, et al. Detrital and igneous zircon ages for supracrustal rocks of the Kyrgyz Tianshan and palaeo geographic implications [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(3/4): 957-974.
- [50] ALEXEIEV D V, KRÖNER A, HEGNER E, et al. Middle to Late Ordovician arc system in the Kyrgyz Middle Tianshan: from arc-continent collision to subsequent evolution of a Palaeozoic continental margin[J]. *Gondwana Research*, 2016, 39: 261-291.
- [51] 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(3): 551-569.
- [52] 徐学义, 李向民, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1168-1176.
- [53] 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 83-94.
- [54] ZHANG Y Y, SUN M, YUAN C, et al. Alternating trench advance and retreat: insights from Paleozoic magmatism in the Eastern Tianshan, Central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2018, 37(7): 2142-2164.
- [55] 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滑塌构造[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 25-36.
- [56] 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(4): 901-927.
- [57] 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.
- [58] KRÖNER A, ALEXEIEV D V, ROJAS-AGRAMONTE Y, et al. Mesoproterozoic (Grenville-age) terranes in the Kyrgyz North Tianshan: zircon ages and Nd-Hf isotopic constraints on the origin and evolution of basement blocks in the southern Central Asian orogen [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 272-295.
- [59] LIU H S, WANG B, SHU L S, et al. Detrital zircon ages of Proterozoic meta-sedimentary rocks and paleozoic sedimentary cover of the Northern Yili block: implications for the tectonics of microcontinents in the Central Asian orogenic belt[J]. *Precambrian Research*, 2014, 252: 209-222.
- [60] 龙晓平, 黄宗莹. 中亚造山带内微陆块的起源: 以中国天山造山带研究为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(5):

- 771-785, 696.
- [61] KRÖNER A, ALEXEIEV D V, KOVACH V P, et al. Zircon ages, geochemistry and Nd isotopic systematics for the Palaeoproterozoic 2.3–1.8 Ga Kuilyu Complex, East Kyrgyzstan: the oldest continental basement fragment in the Tianshan orogenic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 122-135.
- [62] 胡霭琴, 张国新, 陈义兵, 等. 中国新疆地壳演化主要地质事件年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-427.
- [63] HE Z Y, KLEMD R, ZHANG Z M, et al. Mesoproterozoic continental arc magmatism and crustal growth in the eastern Central Tianshan arc terrane of the southern Central Asian orogenic belt: geochronological and geochemical evidence[J]. *Lithos*, 2015, 236: 74-89.
- [64] 胡霭琴, 韦刚健, 江博明, 等. 天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球化学*, 2010, 39(3): 197-212.
- [65] HUANG Z Y, LONG X P, KRÖNER A, et al. Neoproterozoic granitic gneisses in the Chinese Central Tianshan block: implications for tectonic affinity and Precambrian crustal evolution[J]. *Precambrian Research*, 2015, 269: 73-89.
- [66] GAO J, WANG X S, KLEMD R, et al. Record of assembly and breakup of Rodinia in the Southwestern Altaids: evidence from Neoproterozoic magmatism in the Chinese Western Tianshan orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 173-193.
- [67] MA X X, SHU L S, JAHN B M, et al. Precambrian tectonic evolution of Central Tianshan, NW China: constraints from U-Pb dating and *in-situ* Hf isotopic analysis of detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222-223: 450-473.
- [68] MA X X, SHU L S, SANTOSH M, et al. Paleoproterozoic collisional orogeny in Central Tianshan: assembling the Tarim Block within the Columbia supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 2013, 228: 1-19.
- [69] WANG X S, GAO J, KLEMD R, et al. The Central Tianshan Block: a microcontinent with a Neoproterozoic basement in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Precambrian Research*, 2017, 295: 130-150.
- [70] HUANG H, ZHANG Z C, SANTOSH M, et al. Petrogenesis of the Early Permian volcanic rocks in the Chinese South Tianshan: implications for crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2015, 228/229: 23-42.
- [71] HAN B F, GUO Z J, ZHANG Z C, et al. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122 (3/4): 627-640.
- [72] 穆利修, 李平, 王哲, 等. 中天山乌兰莫仁构造混杂岩带的初步确立及构造意义[J]. *新疆地质*, 2016, 34(1): 34-39.
- [73] TAGIRI M, TAKIGUCHI S, ISHIDA C, et al. Intrusion of UHP metamorphic rocks into the upper crust of Kyrgyzstan Tien Shan: *p-T* path and metamorphic age of the Makbal Complex[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2010, 105(5): 233-250.
- [74] MIRKAMALOV R K, ISOKOV M U, CHIRIKIN V V, et al. New results of U-Pb (SHRIMP) dating of granitoid and metamorphic complexes of the Tien Shan Folded Belt[M]// KBAROV K A A, NURTAEV B S. *Geosciences in Uzbekistan*. Tashkent: State Enterprise Scientific-research Institute of Mineral Resources, 2012: 114-125.
- [75] 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.
- [76] HAN B F, HE G Q, WANG X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, Western China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109(3/4): 74-93.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] HEGNER E, KLEMD R, KRÖNER A, et al. Mineral ages and *p-T* conditions of Late Paleozoic high-pressure eclogite and provenance of mélangé sediments from Atbashi in the south Tianshan orogen of Kyrgyzstan[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(9): 916-950.
- [81] 董连慧, 王克卓, 朱志新, 等. 新疆大型变形构造特征与成矿关系研究[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1552-1568.
- [82] 万天丰, 赵庆乐. 天山—阿尔泰地区古生代构造成矿作用[J]. *中国地质*, 2015, 42(2): 365-378.
- [83] 杨天南, 李锦轶, 文中田, 等. 中天山地块南北两缘的韧性剪切带[J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 311-321, 437-438.
- [84] 唐哲民, 蔡志慧, 王宗秀, 等. 中天山东部南北两缘韧性剪切带变形特征[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 970-979.
- [85] WANG B, FAURE M, CLUZEL D, et al. Late Paleozoic tectonic evolution of the Northern West Chinese Tianshan Belt[J]. *Geodinamica Acta*, 2006, 19(3/4): 237-247.
- [86] DE JONG K, WANG B, FAURE M, et al. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the Western Tianshan (Xinjiang, Northwestern China), with emphasis on Permian fluid ingress[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1239-1258.
- [87] 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.
- [88] ZHOU D, GRAHAM S A, CHANG E Z, et al. Paleozoic tectonic amalgamation of the Chinese Tian Shan: evidence from a transect along the Dushanzi-Kuqa Highway [M]// HENDRIX M S, DAVIS G A. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central Asia: from continental assembly to intracontinental deformation. Boulder, Colorado: Geological Society of America Memoir, 2001: 23-46.
- [89] LAURENT-CHARVET S, CHARVET J, MONIÉ P, et al. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): new structural and geochronological data[J]. Tectonics, 2003, 22(2): 1099-1101.
- [90] YANG T N, LI J Y, WANG Y, et al. Late Early Permian (266 Ma) N-S compressional deformation of the Turfan basin, NW China: the cause of the change in basin pattern[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1311-1324.
- [91] 蔡志慧, 许志琴, 何碧竹, 等. 东天山—北山造山带中大型韧性剪切带属性及形成演化时限与过程[J]. 岩石学报, 2012, 28(6): 1875-1895.
- [92] SHU L S, CHARVET J, LU H F, et al. Paleozoic accretion-collision events and kinematics of ductile deformation in the eastern part of the Southern-central Tianshan Belt, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3): 308-323.
- [93] WANG B, CHEN Y, ZHAN S, et al. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 263(3/4): 288-308.
- [94] 于海峰, 王福君, 潘明臣, 等. 西天山造山带区域构造演化及其大陆动力学解析[J]. 西北地质, 2011, 44(2): 25-40.
- [95] WANG B, FAURE M, SHU L S, et al. Structural and geochronological study of high-pressure metamorphic rocks in the Kekesu section (Northwestern China): implications for the Late Paleozoic tectonics of the Southern Tianshan [J]. Journal of Geology, 2010, 118(1): 59-77.
- [96] 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.
- [97] 吴传勇, 吴国栋, 沈军, 等. 那拉提断裂晚第四纪活动及其反映的天山内部构造变形[J]. 第四纪研究, 2014, 34(2): 269-280.
- [98] 杨兴科, 姬金生, 张连昌, 等. 东天山大型韧性剪切带基本特征与金矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(3): 209-218.
- [99] 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变 [J]. 地质论评, 2004, 50(3): 304-322.
- [100] WANG B, CLUZEL D, JAHN B, et al. Late Paleozoic pre-and syn-kinematic plutons of the Kangguer-Huangshan Shear zone: inference on the tectonic evolution of the Eastern Chinese North Tianshan [J]. American Journal of Science, 2014, 314(1): 43-79.
- [101] 王瑜, 李锦轶, 李文铅. 东天山造山带右行剪切变形及构造演化的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学证据[J]. 新疆地质, 2002, 20(4): 315-319.
- [102] 陈文, 孙枢, 张彦, 等. 新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 790-804.
- [103] WANG Y, LI J Y, SUN G H. Post collisional eastward extrusion and tectonic exhumation along the Eastern Tianshan Orogen, Central Asia: constraints from dextral strike-slip motion and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological evidence [J]. The Journal of Geology, 2008, 116(6): 599-618.
- [104] 王凯, 计文化, 孟勇, 等. 天山造山带东段构造变形对增生造山末期的响应[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(5): 894-910.
- [105] LONG L L, GAO J, KLEMD R, et al. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen; implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt [J]. Lithos, 2011, 126(3/4): 321-340.
- [106] 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(5): 821-838.
- [107] TANG G J, CHUNG S L, WANG Q, et al. Petrogenesis of a Late Carboniferous mafic dike-granitoid association in the Western Tianshan: response to the geodynamics of oceanic subduction [J]. Lithos, 2014, 202/203: 85-99.
- [108] KEMPE U, GRAUPNER T, SELTMANN R, et al. The Muruntau gold deposit (Uzbekistan): a unique ancient hydrothermal system in the Southern Tien Shan [J]. Geoscience Frontiers, 2016, 7(3): 495-528.
- [109] 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.
- [110] KOSTITSYN Y A. Rb-Sr isotope study of Muruntau deposit. 1. Ore veins dating by isochrone technique [J]. Geokhimiya, 1993, 9: 1308-1319.
- [111] KEMPE U, SELTMANN R, GRAUPNER T, et al. Concordant U-Pb SHRIMP ages of U-rich zircon in granitoids from the Muruntau gold district (Uzbekistan): timing of intrusion, alteration ages, or meaningless numbers [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 308-326.
- [112] PASAVA J, FRIMMEL H, VYMAZALOVÁ A, et al. A two-stage evolution model for the Amantaytau orogenic-type gold deposit in Uzbekistan [J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(7): 825-840.

- [113] NIKONOROV V V, KARAEV Y V, BORISOV F I, et al. Gold resources of Kyrgyzstan[M]. Bishkek; State Enterprise Scientific-Research Institute of Mineral Resources, 2007: 1-500.
- [114] 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(1/2): 125-156.
- [115] YANG F Q, MAO J W, WANG Y T, et al. Geology and metallogenesis of the Sawayaerdun gold deposit in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Resource Geology, 2007, 57(1): 57-75.
- [116] ZHANG G Z, XUE C J, CHI G X, et al. Multiple-stage mineralization in the Sawayaerdun orogenic gold deposit, Western Tianshan, Xinjiang: constraints from paragenesis, EMPA analyses, Re-Os dating of pyrite (arsenopyrite) and U-Pb dating of zircon from the host rocks[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81: 326-341.
- [117] DING Q F, WU C Z, SANTOSH M, et al. H-O, S and Pb isotope geochemistry of the Awanda gold deposit in Southern Tianshan, Central Asian orogenic belt: implications for fluid regime and metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 62: 40-53.
- [118] 武翔. 新疆阿万达金矿床构造变形特征与成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [119] 丁清峰, 付宇, 吴昌志, 等. 新疆西南天山阿万达金矿床成矿流体演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(1): 142-155.
- [120] ZHAO W C, ZHAO X B, XUE C J, et al. Structural characterization of the Katebasu gold deposit, Xinjiang, China: tectonic correlation with the amalgamation of the Western Tianshan[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 107: 888-902.
- [121] 冯博, 薛春纪, 赵晓波, 等. 西天山卡特巴阿苏大型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.
- [122] 邢令, 杨维忠, 藏梅, 等. 新疆卡特巴阿苏金铜矿区二长花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质, 2015, 33(1): 1-6.
- [123] DONG L L, WAN B, YANG W Z, et al. Rb-Sr geochronology of single gold-bearing pyrite grains from the Katbasu gold deposit in the South Tianshan, China and its geological significance[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 100: 99-110.
- [124] 俎波. 西天山“亚洲金腰带”金成矿作用及找矿潜力[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 1-236.
- [125] HAN Y X, LIU Y H, ZHOU S F, et al. Geochemistry and chronology of the granites in Alasituo, west Tianshan Orogen: implications for a magma mixing origin[J]. Geological Journal, 2018, 53: 44-59.
- [126] ZHANG L, CHEN H Y, LIU C F, et al. Ore genesis of the Saridala gold deposit, Western Tianshan, NW China: constraints from fluid inclusion, S-Pb isotopes and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 100: 63-76.
- [127] 朱永峰, 宋彪. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 135-144.
- [128] 杨猛, 王居里, 王建其, 等. 新疆中天山北缘望峰地区花岗岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2121-2131.
- [129] WANG Y H, XUE C J, ZHANG F F, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, geochemistry and H-O-Si-S-Pb isotope systematics of the Kanggur gold deposit in Eastern Tianshan, NW China: implication for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 68: 1-13.
- [130] 张连昌, 姬金生, 李华芹, 等. 东天山康古尔金矿区潜火山岩同位素年代学及其意义[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊 1): 1095-1098.
- [131] 陈文, 张彦, 秦克章, 等. 新疆东天山剪切带型金矿床时代研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 2007-2016.
- [132] WANG Y H, XUE C J, GAO J B, et al. The genesis of the ores and granitic rocks at the Hongshi Au deposit in Eastern Tianshan, China: constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 74: 122-138.
- [133] 张达玉. 新疆东天山觉罗塔格地区成岩成矿作用及地球动力学过程[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 59-71.
- [134] ZHAO X B, XUE C J, CHI G X, et al. Re-O sphyrite 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.
- [135] ZHAO X B, XUE C J, CHI G X, et al. Multi-stage gold mineralization in the Taldybulak Levoberezhny deposit, Tien Shan, Kyrgyzstan: reply to comment by Boris Trifonov on 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, 2017, 82: 217-231.
- [136] KEMPE U, BELYATSKY B, KRYMSKY R, et al. 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.
- [137] 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.
- [138] ZONENSHAIN L P. Geology of the USSR: a plate-tectonic synthesis[J]. Geodynamic Monograph, 1990, 21: 242.
- [139] WALL V J, YANTZEN V, GRAUPNER T, et al. Muruntau[R]. Uzbekistan Report on CERCAMS Research Project. Spring Hill: Taylor Wall & Associate, 2004.
- [140] KOSTITSYN Y A. Rb-Sr isotopic study of the Muruntau de-

- posit: magmatism, metamorphism and mineralization [J]. *Geochemistry International*, 1996, 34: 1009-1023.
- [141] 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.
- [142] 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(7), 667-682.
- [143] 张国震,李志丹,董新丰,等. 西天山 Muruntau 金矿床地质和 S-Pb 同位素示踪 [J]. *岩石学报*, 2016, 32(5): 1333-1345.
- [144] JENCHURAEVA R J, NIKONOROV V V, LITVINOV P. The Kumtor gold deposit[M] // SELTMANN R, JENCHURAEVA R J. *Excursion 5 Guidebook: Series 9. Annual Newsletter of IGCP-373*, 2001: 139-152.
- [145] Telluris. Field structural review of the Kumtor mine and district, Kyrgyzstan[R]. UK: Telluris Consulting Ltd, 2006.
- [146] ANSDELL K M, ABELEIRA A, IVANOV S. Structural evolution and vein regeneration at the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan [M] // *Mineral deposits: processes to processing*. Rotterdam; Balkema, 1999: 1375-1378.
- [147] IVANOV S, ANSDELL K M, MELROSE D. Ore textures and stable isotope constraints on ore deposition mechanisms at the Kumtor gold deposit[M] // BUCCI L A, MAIR J L. *Gold in 2000. Poster session extended abstracts volume*. Littleton; Society of Economic Geologists, 2000: 47-52.
- [148] 李云涛,刘云华,李真,等. 新疆西天山卡特巴阿苏金铜矿区构造特征研究[J]. *黄金*, 2016, 37(4): 7-12.
- [149] 杨维忠,林泽华,韩继全,等. 浅论断裂构造对新疆卡特巴阿苏金矿床的控制作用[J]. *新疆有色金属*, 2017, 40(4): 68-70, 72.
- [150] 王义天,毛景文,陈文,等. 新疆东天山康古尔塔格金矿带成矿作用的构造制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 236-244.
- [151] 曹洁. 新疆鄯善县红石金矿床控矿条件分析及隐伏矿预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2007: 27-28.
- [152] 孙敬博,张立明,陈文,等. 东天山红石金矿床石英 Rb-Sr 同位素定年[J]. *地质论评*, 2013, 59(2): 382-388.
- [153] WANG X S, KLEMD R, GAO J, et al. Final assembly of the southwestern Central Asian Orogenic Belt as constrained by the evolution of the South Tianshan Orogen: links with Gondwana and Pangea [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(9): 7361-7388.
- [154] GOLDFARB R, BAKER T, DUBÉ B, et al. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes [J]. *Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary Volume: 407-450.
- [155] 翟裕生,邓军,彭润民,等. *成矿系统论* [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-312.
- [156] LARGE R R, MASLENNIKOV V. Pyrite textures, composition and isotopic features at the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan; new data to improve the genetic model [R]. Antofagasta, Chile; Society for Geology of Ore Deposits, 2011.
- [157] 陈喜峰,彭润民,刘家军,等. 吉尔吉斯斯坦库姆托尔超大型金矿床地质特征 [J]. *黄金*, 2010, 31(12): 15-19.
- [158] SOUTHAM G, SAUNDERS J A. The geomicrobiology of ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(6): 1067-1084.
- [159] TOMKINS A G. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(11): 3246-3259.
- [160] THOMAS H V, LARGE R R, BULL S W, et al. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo Gold Mine, Australia: insights for ore genesis [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(1): 1-31.