

内蒙古图古日格金矿床绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及其地质意义

丁成武¹⁾, 戴盼¹⁾, 聂凤军²⁾, 张照录¹⁾, 彭云彪³⁾, 张更信³⁾, 亓辉¹⁾, 申颖⁴⁾

1) 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东淄博 255000; 2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3) 核工业 208 大队, 内蒙古包头 014010; 4) 山东省地质科学研究院, 山东济南 250013

摘 要: 图古日格金矿床是位于兴蒙造山带西端的一个大型金矿床, 矿床的矿石主要有石英脉型和蚀变岩型两种, 矿床的成矿年龄尚存在争议。本文对矿床蚀变岩型矿石中热液成矿阶段的绢云母进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素定年研究, 获得坪年龄为 (258.9 ± 1.6) Ma (MSWD=0.69), 等时线年龄为 (259.2 ± 2.9) Ma (MSWD=5.4), 与前人获得的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄 $((268 \pm 15)$ Ma) 在误差范围内完全一致。结合矿区地质事实及前人研究结果, 认为该矿床的成矿年龄可以限定在 268~259 Ma。图古日格金矿床与矿区内的似斑状花岗岩 (265 Ma) 具有紧密的成因关系, 属于与花岗质岩浆活动有关的石英脉型金矿床。兴蒙造山带乃至整个中亚造山带, 可能在二叠纪时期发育有一次与伸展背景下花岗质岩浆活动有关的金成矿事件, 找矿潜力巨大。

关键词: 图古日格金矿; ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年; 绢云母; 兴蒙造山带; 二叠纪

中图分类号: P618.51; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.110701

^{40}Ar - ^{39}Ar Age of Sericite from the Tugurige Gold Deposit in Inner Mongolia and Its Geological Significance

DING Cheng-wu¹⁾, DAI Pan¹⁾, NIE Feng-jun²⁾, ZHANG Zhao-lu¹⁾, PENG Yun-biao³⁾,
ZHANG Geng-xin³⁾, QI Hui¹⁾, SHEN Ying⁴⁾

1) School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000;

2) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) 208 Geological Party, China National Nuclear Corporation, Baotou, Inner Mongolia 014010;

4) Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan, Shandong 250013

Abstract: The Tugurige gold deposit, which is located in the western part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt (XMOB), is a large tonnage gold deposit. The gold mineralization of this deposit can be divided into sulfide quartz-vein and altered host rock types. However, the age of the gold mineralization remains controversial. In this paper, ^{40}Ar - ^{39}Ar dating was carried out on the sericite from altered ores of the main mineralization stage, yielding a plateau age of (258.9 ± 1.6) Ma (MSWD=0.69) and a isochronal age of (259.2 ± 2.9) Ma (MSWD=5.4), which are consistent with the pyrite Re-Os age $((268 \pm 15)$ Ma) reported by other geologists. Combined with regional geological background and previous studies on Tugurige gold deposit, we suggest that the metallogenic age of the Tugurige gold deposit is (268–259) Ma. The syenogranite (265 Ma) and gold mineralization of the Tugurige gold deposit were found to have very close genetic relationships, indicating that this deposit is a magmatic hydrothermal gold deposit. The Permian is an important period in which economic gold mineralization associated with granitic magmatism was deposited in the XMOB.

Key words: Tugurige gold deposit; ^{40}Ar - ^{39}Ar dating; sericite; Xing'an-Mongolia Orogenic Belt; Permian

本文由国家自然科学基金青年基金项目(编号: 42002099)、山东省自然科学基金青年基金项目(编号: ZR2018QD002; ZR2020QD031)、山东省重点研发计划项目(编号: 2019GSF109101)和山东省地质勘查项目(编号: SDGP370000202002001782)联合资助。

收稿日期: 2021-06-12; 改回日期: 2021-11-05; 网络首发日期: 2021-12-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 丁成武, 男, 1987 年生。讲师。主要从事岩浆活动与金属成矿作用研究。E-mail: dingchengwude@163.com。

图古日格金矿床位于内蒙古自治区乌拉特中旗巴音杭盖苏木境内, 地理坐标为 $107^{\circ}20'\text{E}$ 、 $42^{\circ}05'\text{N}$ (Ding et al., 2016a)。该矿床是兴蒙造山带内的一处大型石英脉型金矿床, 已探明金金属量 30 t, 平均品位为 4 g/t(丁成武等, 2021)。兴蒙造山带位于中亚造山带东段, 是世界上目前已知的构造-岩浆活动最复杂、发展历史最长的一条增生造山带(Xiao et al., 2009), 同时也是中蒙边境巨型成矿带的重要组成部分, 造山带内发育有多期大规模成矿作用, 资源潜力巨大(聂凤军等, 2011; Mao et al., 2011)。

图古日格金矿床自 1995 年被核工业二〇八大队发现以来, 众多学者对其开展了大量的研究工作, 基本查明了矿床的地质特征、地球化学特征、成矿流体特征及成岩时代(邵国钰等, 2015; 丁成武, 2016; Ding et al., 2016a; 王英德, 2016; 王键等, 2016; 李永等, 2019; 丁成武等, 2021)。但是对于该矿床的成矿时代, 目前仍存在较大的争议, Ding et al.(2016a)根据黄铁矿 Re-Os 法, 认为该矿床的成矿年龄为 (268 ± 15) Ma, 形成于二叠纪; 张锋等(2016)利用辉钼矿 Re-Os 法, 测得该矿床的成矿年龄为 (305.6 ± 4.5) Ma, 属于石炭纪。成矿年龄的不确定, 阻碍了对该矿床的成矿地质背景和矿床成因的研究。

绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年方法是以 K-Ar 同位素定年方法为基础发展起来的, ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年方法只需要测定 Ar 同位素比值, 避免了测定样品 K 含量时带来的误差, 而且对于存在过剩 Ar 和 Ar 丢失现象的样品, 如果扰动作用只发生在矿物颗粒边缘, K-Ar 法只能给出一个混合的没有实际意义的表观年龄, 而 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法则能给出绢云母的形成年龄(邱华宁等, 1997; 张万益等, 2008; 吴玉峰等, 2015)。同时, 绢云母 Ar 同位素体系的封闭温度 $((350 \pm 50)^{\circ}\text{C})$ 与许多金矿床主成矿阶段的温度基本一致(邱华宁等, 1997; 陈文等, 2006; 陈绍聪等, 2019), 因此, 绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年方法被广泛应用于金矿床成矿年龄的研究中(袁霞等, 2017; 刘协鲁等, 2018; 陈绍聪等, 2019; 卫晓锋等, 2019)。本文对图古日格金矿床蚀变岩型矿石中, 与黄铁矿和石英共生的绢云母进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年, 进一步厘定了该矿床的成矿时代, 研究成果有助于探讨图古日格金矿床的成矿背景和矿床成因, 也有助于深化对兴蒙造山带金成矿作用的认识。

1 区域地质

兴蒙造山带属中亚巨型造山带的东段, 位于华北板块和西伯利亚板块之间, 是由两大板块之间的许多古老微地块组成的构造拼合带(李双林和欧阳

自远, 1998; 童英等, 2010; Li et al., 2015; 孔令杰等, 2017; Zhang et al., 2018), 随着古亚洲洋的不断收缩, 这些微陆块之间以及他们与华北板块和西伯利亚板块之间, 先后互相碰撞拼合, 最终形成一个整体(Sengor et al., 1993; Jahn, 2004; Li, 2006; Jian et al., 2010; Zhang et al., 2019; 宋博等, 2021)。兴蒙造山带被西拉木伦断裂、索伦—林西断裂、锡林浩特断裂、二连浩特断裂和查干鄂博—鄂伦春断裂, 由南向北划分为白乃庙弧、温都尔庙俯冲增生带、二道井增生杂岩带、宝力道弧增生杂岩带、贺根山蛇绿岩-弧增生杂岩带和乌里雅苏台活动大陆边缘六部分(图 1a, Xiao et al., 2003, 2009; 李亚东等, 2021)。复杂的构造演化历史使得兴蒙造山带内构造活动强烈, 岩浆活动频繁, 诱发了多期大规模成矿作用, 使其成为世界上最重要的 Cu、Fe、Sn、Ag、Au 和稀有金属(Li、Be、Nb、Ta、REE)的成矿区域之一(聂凤军等, 2011; Mao et al., 2011; 周建等, 2020)。图古日格金矿位于西拉木伦断裂和索伦—林西断裂之间的温都尔庙俯冲增生带西侧的宝音图隆起中(图 1a), 伴随兴蒙造山带的构造演化, 该地区经历了多次构造活动, 成矿地质条件优越, 产出有许多大中型矿床及一大批小型矿床(点), 如: 乌拉特中旗金矿床、伊很查汗金矿床、图古日格金矿床、额尔登温布拉克铜矿床、查干花钼矿床、查干德尔斯钼矿床、巴音查干铬铁矿床、哈达呼舒铬铁矿床和特颇格日图铁镍矿床等(马娟和彭斌, 2009; 蔡明海等, 2011a, b; 杨锐等, 2012; 刘翼飞等, 2012)。

区域范围内的地层主要有下元古界宝音图群石英云母片岩、大理岩和石英岩, 中元古界温都尔庙群绿片岩和变质砂岩, 新元古界艾勒格庙组白云岩, 志留系中统徐尼乌苏组灰岩, 白垩系上统巴音戈壁组砖红色砂岩, 古近系砂岩、粉砂岩和第四系风成砂。区域内褶皱和断层构造都较为发育, 褶皱轴走向以北东向为主, 次为北北东和北东东向, 图古日格金矿就位于一个北东向复式向斜的翼部。区域内断层性质多为逆断层, 展布方向多为北东向、近东西向和北西向(丁成武, 2016; 王英德, 2016; Ding et al., 2021)。此外, 区域范围内岩浆活动频繁, 侵入岩广泛分布, 从酸性岩至超基性岩均有发育, 主要包括志留纪黑云母花岗岩、二叠纪蚀变闪长岩、似斑状花岗岩以及零星出露的元古代片麻状花岗岩。区内脉岩广泛发育, 主要有石英脉、花岗闪长斑岩脉、闪长玢岩脉和石英斑岩脉等(图 1b)(邵国钰等, 2015; 丁成武, 2016; Ding et al., 2016a; 王英德, 2016; 王键等, 2016; 李永等, 2019; 丁成武等, 2021)。

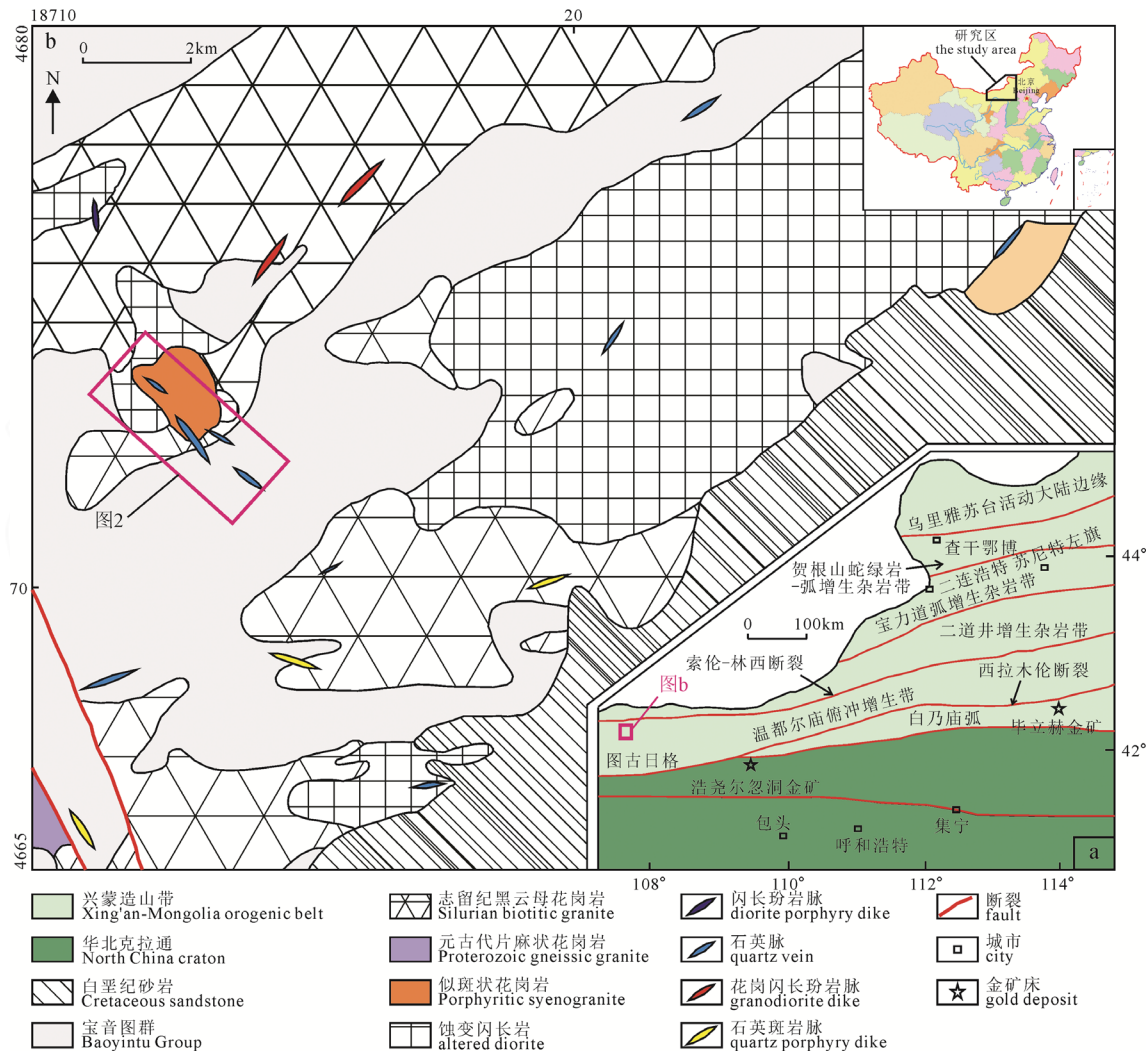


图1 图古日格金矿床区域地质图(据 Xiao et al., 2009; Ding et al., 2016a 改编)

Fig. 1 Simplified regional geological map of the Tugurige gold deposit (after Xiao et al., 2009; Ding et al., 2016a)

2 矿床地质

图古日格金矿床矿区内出露的地层比较简单, 仅出露下元古界宝音图群第三岩段和第四系冲积层(图2)。其中, 下元古界宝音图群第三岩段的岩性组合以浅灰色、灰白色石英岩和大理岩为主, 其次为二云片岩和云母石英片岩夹层。在矿区范围内未见大的断裂构造, 主要发育北西向次级小断裂, 是该矿床主要的控矿构造和容矿空间, 这些断裂多为张性断裂, 按走向可以大致分两组: 第一组走向为 117° 左右, 倾角较陡, 倾向南西, 局部反倾, 深部延伸较大; 第二组走向为 140° 左右, 倾角较缓, 在 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 之间, 倾向北东, 深部延伸较浅。这两组断裂在平面上呈“入”字型展布(邵国钰等, 2015; 丁成武, 2016; 王英德, 2016)。

矿区内出露的侵入岩主要有二叠纪似斑状花岗岩($276\sim 265$ Ma)、花岗岩((278.7 ± 1) Ma)、蚀变闪长岩((288 ± 2.6) Ma)、角闪石岩((280.6 ± 1.3) Ma)以及

志留纪黑云母花岗岩(王键等, 2016; 丁成武等, 2021)。其中, 似斑状花岗岩出露面积最大, 主要分布在矿区的中部, 是该矿床主要的赋矿围岩; 花岗岩主要分布于似斑状花岗岩的边部和深部; 蚀变闪长岩主要分布在矿区的西南部 and 北部, 出露面积仅次于似斑状花岗岩。角闪石岩在矿区内的出露面积较小, 主要分布在矿区西部, 不连续的产出于蚀变闪长岩中(图2)。另外, 矿区范围内的岩脉主要为含石英脉, 多数发育在北西向断裂中, 受后期构造、岩体破坏的影响程度较小(图2)。

该矿床的矿体主要为石英脉型矿体(图3a), 次为夹石英细脉的蚀变岩型矿体(图3b), 主要赋存于北西向次级断裂中。矿体基本上切穿了矿区内的所有岩层, 但是主要产出在似斑状花岗岩中及附近(图2, 曹海清等, 2008; 王键等, 2016; 丁成武, 2016; 赵旭东, 2018)。其中, 2-1-1、2-1-2和2-1-3为隐伏矿体, 2、2-2、2-1、2-3、125、33和7号矿体为石英脉型矿体, 2-1-1、2-1-2、2-1-3、7-21、7-22、2-6

和 18-1 号矿体为夹石英细脉的蚀变岩型矿体。7 号矿体主要赋存在角闪岩中, 2-3 号矿体赋存在下元古界宝音图群第三岩组中, 其余矿体均产出在似斑状花岗岩中(Ding et al., 2016a)。图古日格金矿床的矿石可分为石英脉型矿石和蚀变岩型矿石两种, 前者是该矿床最主要的矿石类型, 后者为矿区内新发现的矿石类型, 多位于深部, 主要为蚀变的似斑状花岗岩(丁成武, 2016)。

矿石中的金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿和自然金。脉石矿物主要为石英、铁白云石、绢云母、绿泥石及黏土矿物等(图 3)。硫化物常呈浸染状或脉状分布在石英脉中(图 3f, g, h)。矿石中的金主要以自然金、碲金矿和金银矿等形式存在, 常与黄铁矿、黄铜矿等矿物共生。围岩蚀变主要有黄铁矿化、硅化、钾长石化、绢云母化和绿帘石化等(丁成武, 2016)。

根据矿物共生组合及相互穿插关系, 该矿床的热液成矿作用可划分为钾长石-石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。在钾长石-石英-黄铁矿阶段形成的矿物主要为石英和钾长石, 黄铁矿少量发育; 石英-硫化物阶段为硫化物发育和金矿化形成的主要阶段, 伴随的围岩蚀变主要包括硅化、绢英岩化和黄铁矿化; 石英-碳酸盐阶段是热液成矿作用的晚期, 矿化一般不发育, 常呈石英或碳酸盐细脉充填于早期裂隙之中(丁成武, 2016)。

3 样品、分析方法和结果

3.1 样品特征

本次工作用于测年研究的样品(TG-02)采自于图古日格金矿床二号矿体, 采样点在二号斜井附近, 地理坐标为 $107^{\circ}34'13''\text{E}$ 、 $42^{\circ}9'54''\text{N}$ 。样品是石英脉两侧的蚀变似斑状花岗岩, 属于主成矿阶段矿石, 该矿石呈块状构造, 自形-半自形粒状结构, 金属矿物主要为半自形浸染状黄铁矿, 脉石矿物有粗粒钾长石和石英、片状绢云母等, 围岩蚀变以硅化、绢云母化和黄铁矿化为主, 还发育有弱绿帘石化和绿帘石化(图 3b, c, d)。样品中的绢云母与石英和黄铁矿共生, 呈浅绿色鳞片状集合体产出于似斑状花岗岩与石英脉的接触位置。

3.2 分析方法

样品的绢云母挑选工作由河北省廊坊市尚艺岩矿检测有限公司完成, 绢云母 Ar-Ar 测年在中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 同位素地质实验室进行。首先从矿石样品中挑选出绢云母单矿物(纯度 $>99\%$), 然后利用超声波对绢云母进行清洗。之后将清洗后的绢云母(13.24 mg)封进石英瓶中, 在中国原子能科学研究院的“游泳池堆”核反应堆中接受中子照射。照射过程中, 选用黑云母标样(ZBH-25)作为监控的标准样。

照射完成后, 对样品进行阶段升温加热, 同时利用多接收稀有气体质谱仪(Helix MC)进行质谱分析。

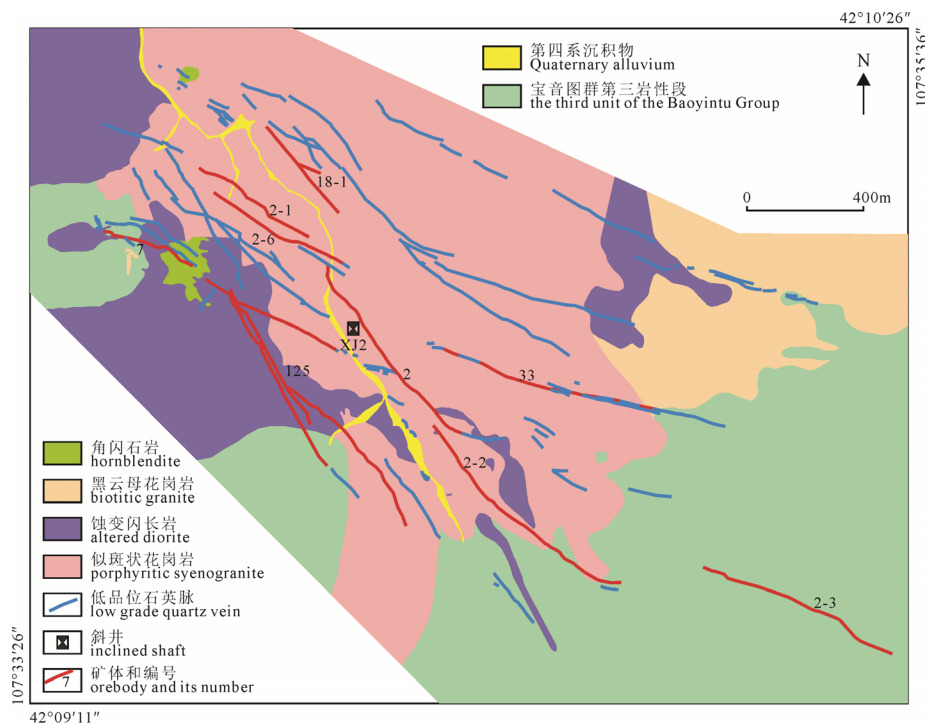
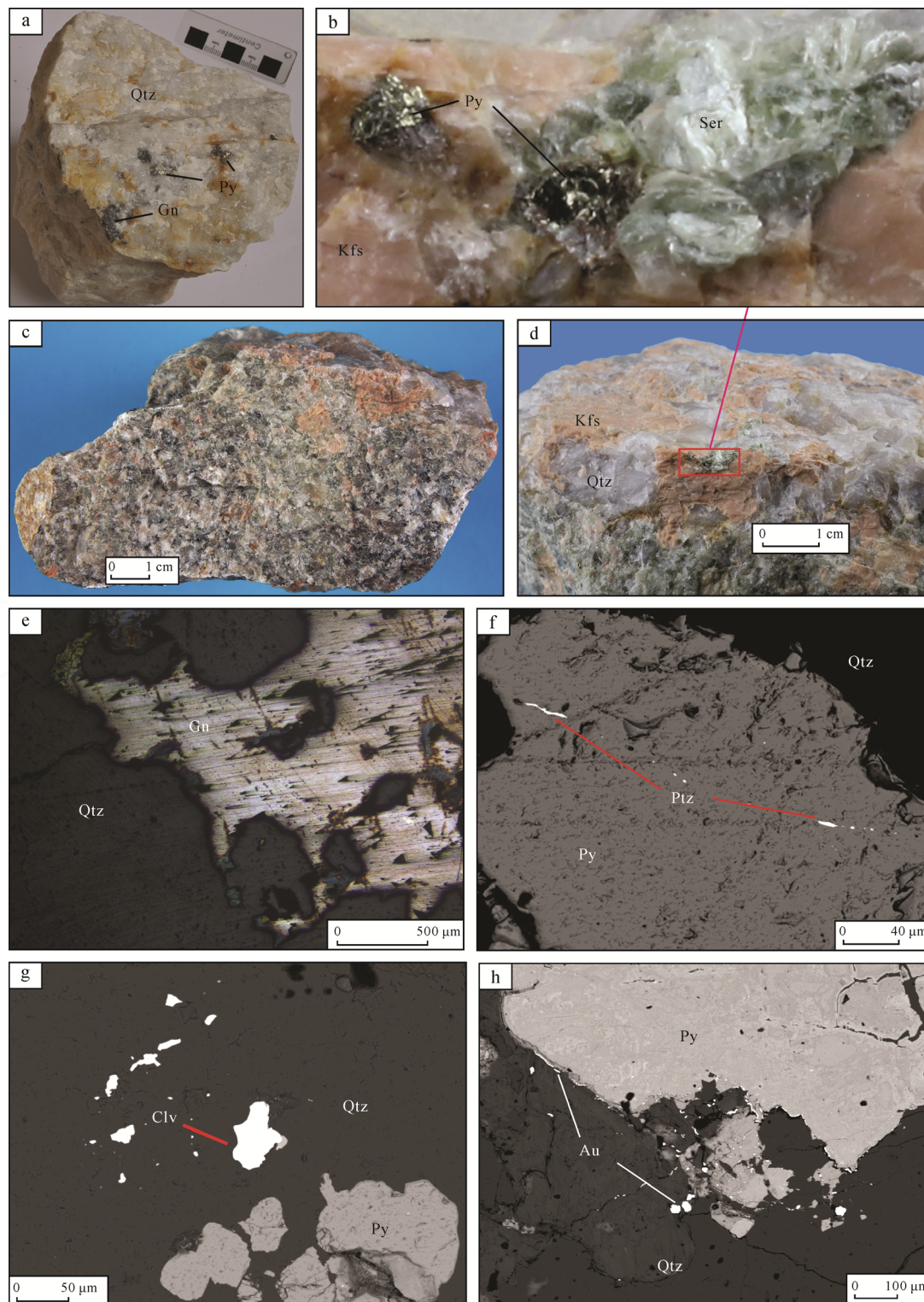


图 2 图古日格金矿床地质简图(据丁成武, 2016 改编)

Fig. 2 Simplified geological map of the Tugurige gold deposit (modified form DING, 2016)



a—石英脉型矿石; b, c, d—蚀变岩型矿石, 绢云母、黄铁矿和石英共生; e—石英和方铅矿共生; f—碲金银矿产于黄铁矿中; g—碲金矿产于石英中; h—自然金产于石英和黄铁矿接触部位;

Qtz—石英; Py—黄铁矿; Au—自然金; Gn—方铅矿; Kfs—钾长石; Clv—碲金矿; Ptz—碲金银矿。

a—quartz-vein type ore; b, c, d—altered host-rock type ore, the association of quartz, calcite, and sericite; e—the association of quartz and galena; f—petzite in pyrite; g—calaverite in quartz; h—gold in the contact zone between quartz and pyrite; Qtz—quartz; Py—pyrite; Au—gold; Gn—galena; Kfs—K-feldspar; Clv—calaverite; Ptz—petzite.

图 3 图古日格金矿床矿石手标本(a, b, c, d)、镜下(e)和 BSE 照片(f, g, h)

Fig. 3 Hand specimen images (a, b, c, d), photomicrograph (e), and BSE images (f, g, h) of ores from the Tugurige gold deposit

分析所得的数据经过校正后, 利用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及等时线年龄(Ludwig, 2001)。详细实验操作和数据处理流程见有关文献(张彦等, 2006; 陈

文等, 2006)。

3.3 测试结果

分析结果见表 1。本次测试从 600℃升温到

1400℃, 共进行了 13 个阶段的加热分析, 分析结果组成了一个基本没有扰动的年龄谱图(图 4a)。在年龄谱图上, 除了分析初期 4 个阶段的视年龄值偏小外, 其余 830~1400℃ 的 9 个温度阶段的视年龄之间的差异极小, 计算其坪年龄为 (258.9 ± 1.6) Ma (MSWD=0.69), 对应的 ^{39}Ar 析出量为 93.8%。在 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图中, 9 个加热阶段的结果拟合出一条很好的等时线, 获得的等时线年龄为 (259.2 ± 2.9) Ma (MSWD=5.4), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 292 ± 17 (图 4b)。坪年龄和等时线年龄在误差范围内完全一致。

4 讨论

4.1 成矿时代

绢云母形成后若遭受后期地质作用叠加改造, 通常会形成扩散丢失型年龄图谱(Hanson et al., 1975); 未受扰动时则表现为平坦型年龄图谱(邱华宁等, 1997; 陈文等, 2011)。本次测定的绢云母, 在

阶段加热的高温区, 视年龄较稳定, 不同温度区间的年龄差异较小, 构成了平坦的年龄谱, 这表明所测的绢云母在 259 Ma 左右形成之后, 内部的 Ar 同位素组成保持稳定, 没有再经受高于其封闭温度的热扰动。等时线计算获得的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的初始值 (292 ± 17) 与现代大气氩的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值(295.5)基本一致, 表明坪区氩同位素不含过剩氩或氩丢失。同时, 等时线年龄和坪年龄的测试结果具有很好的一致性, 这些都表明本次测试的数据是可靠的, 因此获得的坪年龄 $((258.9 \pm 1.6)$ Ma, MSWD = 0.69)可以代表绢云母的结晶年龄。

绢云母的 Ar 同位素体系封闭温度为 $(350 \pm 50)^\circ\text{C}$ (邱华宁等, 1997; 陈文等, 2006), 本次测试的绢云母样品来自图古日格金矿床主成矿阶段的矿石, 前人测得该阶段石英中 CO_2 - H_2O 包裹体的均一温度范围主要为 230~330℃(丁成武, 2016; 李永等, 2019), 即在误差范围内, 主成矿阶段的成矿温度与绢云母的 Ar 同位素封闭温度基本一致。此外, 野外

表 1 图古日格金矿床绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素测试结果
Table 1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic analyses of sericites from the Tugurige gold deposit

$T/^\circ\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{40}\text{Ar}/\%$	F	$^{39}\text{Ar}/(\times 10^{-14} \text{ mol})$	$^{39}\text{Ar}(\text{Cum.})/\%$	Age/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
600	209.866 1	0.588 4	0.000 0	0.119 8	17.15	35.983 8	0.01	0.08	195	21
700	57.420 1	0.069 8	0.789 8	0.028 5	64.15	36.856 6	0.02	1.23	199.0	2.6
750	54.443 5	0.037 3	2.945 2	0.023 0	80.13	43.732 0	0.18	2.24	233.9	3.2
800	51.943 3	0.019 3	1.687 4	0.016 6	89.26	46.428 7	0.70	6.20	247.3	2.3
830	50.248 5	0.007 5	0.116 9	0.013 9	95.59	48.036 7	0.80	10.74	255.3	2.4
860	50.199 1	0.005 3	0.026 9	0.013 2	96.89	48.637 7	1.39	18.55	258.3	2.4
890	49.623 9	0.003 6	0.076 4	0.013 3	97.86	48.566 3	1.73	28.30	257.9	2.4
920	49.353 6	0.002 0	0.000 0	0.012 7	98.78	48.753 1	2.29	41.19	258.9	2.4
970	49.427 8	0.001 9	0.020 2	0.012 9	98.87	48.870 3	5.28	70.92	259.4	2.4
1020	49.857 7	0.002 8	0.028 4	0.013 0	98.34	49.032 8	2.76	86.49	260.3	2.4
1080	51.018 3	0.006 5	0.009 8	0.013 9	96.24	49.099 0	1.34	94.03	260.6	2.4
1200	53.292 0	0.013 0	0.092 7	0.015 0	92.79	49.453 8	0.83	98.68	262.3	2.5
1400	74.298 0	0.087 5	0.434 3	0.028 6	65.22	48.474 3	0.23	100.00	257.5	2.6

注: 表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; $F=^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; 样品质量 $W=13.21$ mg; 照射参数 $J=0.003$ 165; 全年龄=257.8 Ma。

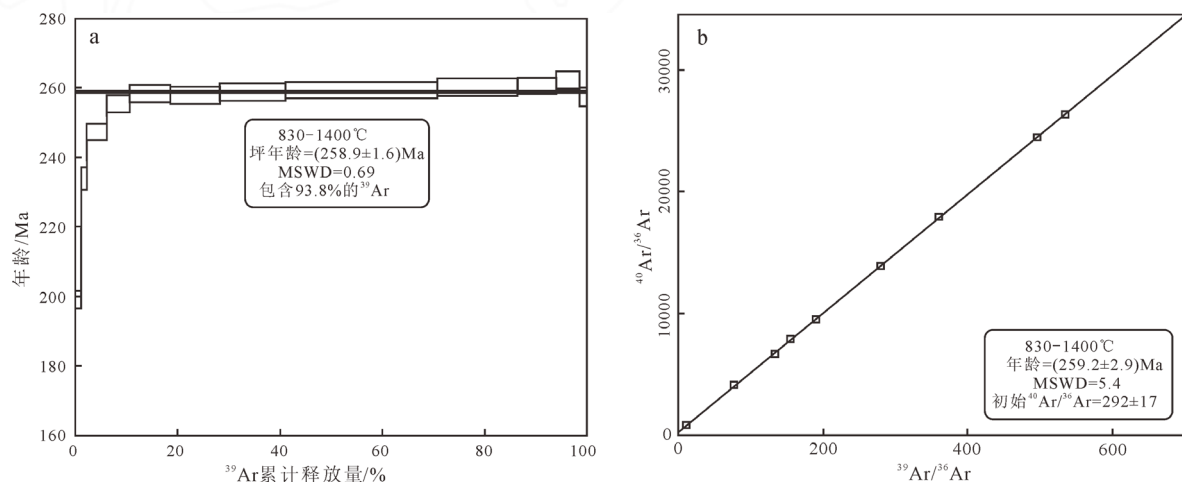


图 4 图古日格金矿床绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄图(a)和等时线年龄(b)

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectrum (a) and isochron (b) age diagrams of sericites from the Tugurige gold deposit

和镜下观察显示,图古日格金矿床中的绢云母化主要出现在石英脉两侧与围岩的接触部位,而且常与硅化、黄铁矿化相互叠加,是主要的矿化标志之一,本次测试所用绢云母与石英和黄铁矿密切共生(图3b, c, d),指示其是热液成矿阶段的产物。因此,本次工作所获得的绢云母形成年龄可以指示图古日格金矿床的成矿年龄。

在成矿时代方面,前人对图古日格金矿床进行了辉钼矿 Re-Os 同位素测年分析,获得其等时线年龄为 (305.6 ± 4.5) Ma, 并认为该矿床是晚石炭世构造-岩浆活动的产物(张锋等, 2016)。但是,野外地质观察显示,图古日格金矿床的矿体几乎切穿了矿区内所有的二叠纪侵入岩,因此矿床的成矿年龄应当小于赋矿似斑状花岗岩的成岩年龄(264.5 Ma, 丁成武等, 2021)。此外,辉钼矿 Re-Os 同位素体系封闭温度($>500^{\circ}\text{C}$, Suzuki et al., 1996; Mao et al., 2006, 2008)明显高于图古日格金矿床的成矿温度(丁成武, 2016; 李永等, 2019),因此前人获得的辉钼矿 Re-Os 年龄可能不能用来代表图古日格金矿床的成矿时代。图古日格金矿的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 (268 ± 15) Ma (Ding et al., 2016a), 与本文获得的绢云母 Ar-Ar 年龄在误差范围内完全一致,且符合地质事实,所以黄铁矿 Re-Os 年龄与绢云母 Ar-Ar 年龄可以用来限定图古日格金矿床的成矿时代。综合前人的研究,本文将图古日格金矿床的成矿年龄限定在 268~259 Ma, 为二叠纪。

4.2 矿床成因

图古日格金矿的矿体与矿区内的似斑状花岗岩具有紧密的时空关系,矿体均产出在似斑状花岗岩中或附近(图2),矿床的成矿年龄(268~259 Ma)与似斑状花岗岩的成岩年龄(264.5 Ma, 丁成武等, 2021)相吻合,暗示它们之间可能存在密切的成因联系。同位素研究结果表明,图古日格金矿床矿石中的 Pb 和 S 元素主要为岩浆成因,并且与区内二叠纪侵入岩的 Pb 和 S 同位素特征相近(丁成武, 2016);此外,流体包裹体研究结果表明,金的气相偏在性和蒸汽冷却收缩模式,是该矿床富 Au、中低盐度和富 CO_2 成矿流体的形成机制(丁成武, 2016),该矿床成矿流体的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-108.8\text{‰} \sim -87.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $1.1\text{‰} \sim 6.9\text{‰}$,指示其成矿流体主要为岩浆水(丁成武, 2016; 李永等, 2019);该金矿床的蚀变类型以及金矿物组合等与其他岩浆热液型金矿床相类似(Robert et al., 2007; Dill, 2010);该金矿床的矿体在浅部主要是厚(1.21~3.66 m)石英脉型,在深部则主要是蚀变岩型,蚀变岩型矿石主要为蚀变似斑状花岗岩(丁成武, 2016);侵入岩组合特征和岩石地球化学特征表明,图古日格金矿床及

矿区内的二叠纪侵入岩形成的构造背景是碰撞后伸展环境(丁成武等, 2021)。因此,结合前人与本次研究结果,认为图古日格金矿床是与花岗质岩浆活动有关的金矿床。

4.3 区域地质意义

近年来,在中亚造山带内发现了多个二叠纪大型金矿床,其中具有代表性的有图古日格、毕立赫、朱拉扎嘎、浩尧尔忽洞(又名长山壕)、穆龙套(Muruntau)、米坦(Zarmitan)和库姆托尔(kumtor)金矿床等(图5; Mao et al., 2004; Morelli et al., 2007; Abzalov, 2007; 李俊建等, 2010; 卿敏等, 2011; Wang et al., 2014; Ding et al., 2016a, b)。乌兹别克斯坦穆龙套超大型金矿床(5400 t, 3.4 g/t)主要产出在黑色片岩中,并受断裂带控制(Morelli et al., 2007)。Kotov and Poritskaya(1992)提出该矿床是世界上最大的岩浆热液型金矿床。该矿床的成矿年龄 $((287.5 \pm 1.7)$ Ma)与后碰撞花岗岩类岩浆活动的时间相吻合(Morelli et al., 2007),而且 Re-Os 和 Sm-Nd 同位素的研究也指示了地幔组分的参与(Graupner et al., 2006; Morelli et al., 2007)。库姆托尔金矿床(550 t, 2~6 g/t)产出在变质沉积岩中,矿区内的花岗岩侵入体的成岩年龄为 274~287 Ma(Kempe et al., 2001),Mao et al.(2004)指出该矿床的矿化与二叠纪后碰撞花岗岩类侵入活动密切相关,该矿床的成矿年龄约为 280 Ma。米坦(280 t, 9.8~14.6 g/t)金矿床的矿化与花岗岩类密切相关,主要分布在花岗岩内的石英窄脉中,部分分布在被花岗岩侵入的沉积岩中(Abzalov, 2007),该矿床的成矿年龄约为 269 Ma(Mao et al., 2004)。

浩尧尔忽洞金矿床是华北地台北缘的一个大型金矿床,产出在黑色片岩中,区内花岗岩类的成岩年龄为 268~290 Ma(肖伟, 2012),黑云二长花岗岩的成岩年龄为 (277 ± 3) Ma(罗红玲等, 2009),该矿床矿石的黑云母 Ar-Ar 年龄为 (270.1 ± 2.5) Ma(王建平等, 2011),Wang et al.(2014)认为浩尧尔忽洞金矿床的形成与二叠纪构造岩浆活动以及随后的热液活动事件密切相关。毕立赫金矿床是一个斑岩型金矿床,矿化多赋存在花岗闪长斑岩及其与上覆火山碎屑岩的接触带中,该矿床花岗闪长斑岩的成岩年龄为 $((283.8 \pm 4.2) \sim (279.9 \pm 6.8))$ Ma(路彦明等, 2012; 卿敏等, 2012),矿石的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 (272.7 ± 1.6) Ma(卿敏等, 2011)。朱拉扎嘎金矿床产出在变质沉积岩中,Ding et al.(2016b)认为该矿床是一个与后碰撞岩浆活动有关的二叠纪金矿床。该矿床硫和铅的来源都主要与岩浆活动有关(江思宏等, 2001),流体包裹体的测温和氢氧同位素数据指示其含矿流体主要为岩浆起源,且具有天水和

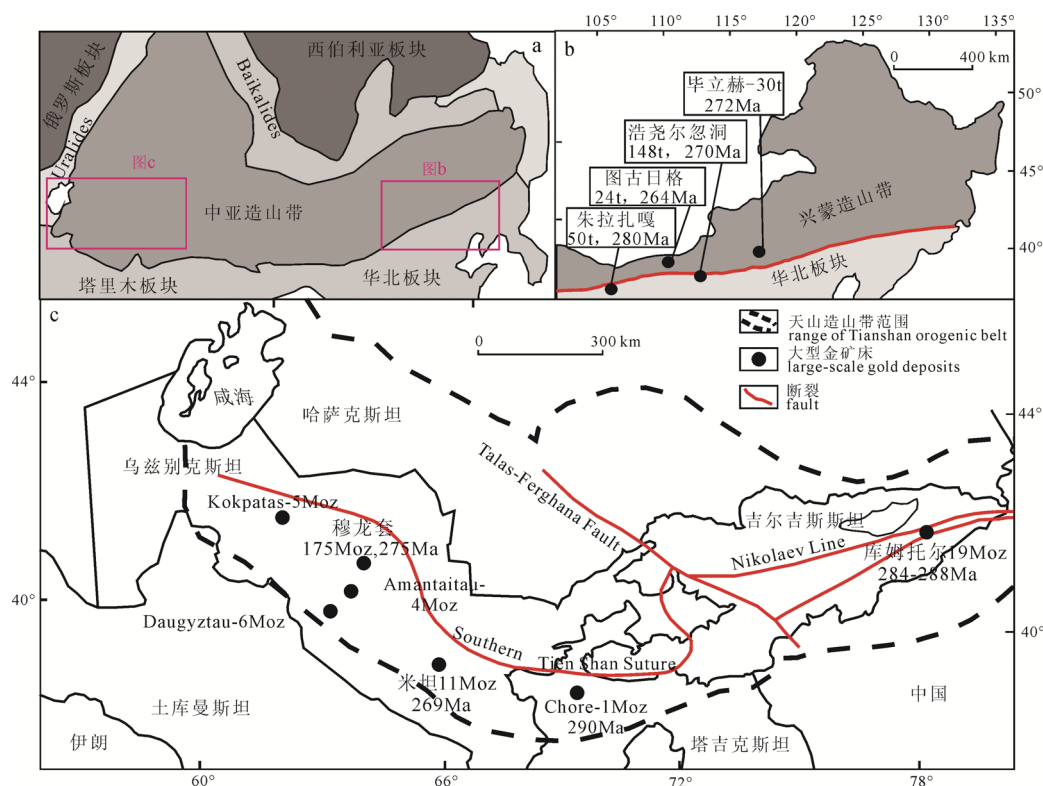


图 5 中亚造山带二叠纪大型金矿分布图(Ding et al., 2016a)

Fig. 5 Regional map showing the distribution of Permian gold deposits in the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (Ding et al., 2016a)

岩浆水混合的特征(Jiang et al., 2005)。该矿床的成矿年龄为 275~280 Ma, 矿床中花岗斑岩的成岩年龄为 (280 ± 6) Ma(杨岳清等, 2001; 李俊建等, 2004)。

这些产出在中亚造山带上的二叠纪金矿床, 尽管产出位置和赋存形式存在明显的差异, 但是他们都和二叠纪花岗岩类岩浆侵入活动以及伴随的热液活动存在明显的成因联系, 即使是产出变质岩或沉积岩中, 也可以被认作是岩浆热液活动远端的产物(Goldfarb et al., 2001; Mao et al., 2004; Abzalov, 2007)。所以兴蒙造山带乃至整个中亚造山带, 可能在二叠纪时期发育有一次与伸展背景下花岗质岩浆活动相关的金成矿事件, 找矿潜力巨大。

5 结论

(1)图古日格金矿床主成矿阶段蚀变绢云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 (258.9 ± 1.6) Ma(MSWD=0.69), 等时线年龄为 (259.2 ± 2.9) Ma(MSWD=5.4), 结合前人的研究, 将图古日格金矿床的成矿年龄限定在 268~259 Ma。

(2)图古日格金矿床与矿区内的似斑状花岗岩具有紧密的成因关系, 是与花岗质岩浆活动有关的金矿床。

(3)兴蒙造山带乃至整个中亚造山带, 可能在二叠纪时期发育有一次与伸展背景下花岗质岩浆活动

相关的金成矿事件, 找矿潜力巨大。

致谢: 野外工作得到了核工业二零八大队图古日格金矿邵国钰、赵宇川等地质同行的大力支持和帮助; 绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测试工作得到了中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 同位素地质实验室相关工作人员的帮助; 论文修改过程中编辑和匿名审稿专家提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42002099), Natural Science Foundation of Shandong Province (Nos. ZR2018QD002, and ZR2020QD031), Key Technology Research and Development Program of Shandong Province (No. 2019GSF109101), and Geological Exploration Project of the Shandong Province (No. SDGP370000202002001782).

参考文献:

- 蔡明海, 彭振安, 屈文俊, 贺钟银, 冯昱, 张诗启, 徐明, 陈艳. 2011a. 内蒙古乌拉特后旗查干德尔斯钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 30(3): 377-384.
- 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 彭振安, 张诗启, 徐明, 陈艳, 王显彬. 2011b. 内蒙古乌拉特后旗查干花钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 地球学报, 32(1): 64-68.
- 曹海清, 翁立猛, 夏庆贺, 耿继华. 2008. 巴音杭盖金矿成因分析[J]. 矿业工程, 6(1): 11-13.

- 陈绍聪, 叶会寿, 王义天, 贺文, 张兴康, 王宁宇. 2019. 冀东峪耳崖金矿床蚀变绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 38(03): 557-570.
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 张宗清, 戴樟漠, 施泽恩, 孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. 地质学报, 85(11): 1917-1947.
- 陈文, 张彦, 赵海滨, 韩丹, 王成玉. 2006. 新疆东天山红山金矿成矿时代研究[J]. 中国地质, 33(03): 632-640.
- 丁成武, 戴盼, 聂凤军, 张照录, 彭云彪, 张更信, 李大鹏, 申颖. 2021. 内蒙古图古日格金矿床二叠纪侵入岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 40(02): 236-256.
- 丁成武. 2016. 内蒙古图古日格金矿地质特征与成因及其区域成矿意义研究(博士学位论文)[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉): 175.
- 江思宏, 杨岳清, 聂凤军, 张建华, 刘妍. 2001. 内蒙古朱拉扎嘎金矿床地质特征[J]. 矿床地质, 20(3): 234-242.
- 孔令杰, 韩宝福, 郑波, 冯丽霞, 王增振, 苏犁. 2017. 内蒙古二连浩特东北部花岗岩的年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(04): 433-457.
- 李俊建, 骆辉, 周红英, 桑海清, 覃志安, 王守光, 孙政平. 2004. 内蒙古阿拉善地区朱拉扎嘎金矿的成矿时代[J]. 地球化学, 33(6): 663-669.
- 李俊建, 翟裕生, 杨永强, 王彦斌, 李承东, 崔来旺, 周红英, 刘晓阳, 刘晓雪, 李生. 2010. 再论内蒙古阿拉善朱拉扎嘎金矿的成矿时代: 来自锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄的新证据[J]. 地学前缘, 17(2): 178-184.
- 李双林, 欧阳自远. 1998. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 18(3): 45-54.
- 李亚东, 江小均, 柳永清, 李超, 孙会一, 芦磊. 2021. 内蒙古正蓝旗钱家营子黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地球学报, 42(1): 85-79.
- 李永, 熊伊曲, 邵国钰, 刘忠仁, 孙诤, 祁程. 2019. 内蒙古图古日格金矿床流体包裹体研究: 对矿床成因的约束[J]. 矿床地质, 38(02): 319-330.
- 刘协鲁, 王义天, 胡乔青, 王瑞廷, 彭洛宏, 张革利, 刘敏, 欧阳升. 2018. 陕西凤太矿集区柴峪金矿床成矿时代的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄证据[J]. 矿床地质, 37(1): 163-174.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 席忠, 张志刚, 肖伟, 张可, 刘勇. 2012. 内蒙古查干花钼矿区成矿花岗岩地球化学、年代学及成岩作用[J]. 岩石学报, 28(2): 409-420.
- 路彦明, 潘懋, 卿敏, 张玉杰, 韩先菊, 朝银银. 2012. 内蒙古毕力赫含金花岗岩类侵入岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 28(3): 993-1004.
- 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 2009. 华北板块北缘乌梁素太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义[J]. 岩石学报, 25(3): 515-526.
- 马娟, 彭斌. 2009. 内蒙古特颇格日图超基性岩体特征及成矿潜力研究[J]. 地质调查与研究, 32(3): 175-180.
- 聂凤军, 张可, 刘翼飞, 江思宏, 刘勇, 刘妍. 2011. 华北克拉通北缘及邻区印支期岩浆活动与钼和金成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(06): 1651-1666.
- 卿敏, 葛良胜, 唐明国, 屈文俊, 袁士松, 赵玉锁. 2011. 内蒙古苏尼特右旗毕力赫大型斑岩型金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(1): 11-20.
- 卿敏, 唐明国, 葛良胜, 韩先菊, 冯建兵, 袁士松, 赵玉锁. 2012. 内蒙古苏右旗毕力赫金矿区安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 元素地球化学特征及其形成的构造环境[J]. 岩石学报, 28(2): 514-524.
- 邱华宁, 彭良. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学与流体包裹体定年[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社: 54-65.
- 邵国钰, 唐大伟, 赵宇川. 2015. 内蒙古图古日格金矿床地质特征与主要控矿因素[J]. 矿物学报, 35(S1): 496.
- 宋博, 张慧元, 魏东涛, 李渭, 赵飞, 李文明. 2021. 中亚造山带南缘中一新元古代地壳的揭示—来自北山—阿拉善北部钻遇碱性花岗岩的年代学和 Hf 同位素示踪研究[J]. 地球学报, 42(1): 9-20.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(06): 619-641.
- 王建平, 刘家军, 江向东, 王彬, 姜胜梅. 2011. 内蒙古浩尧尔忽洞金矿床黑云母氩氦年龄及其地质意义[J]. 矿物学报, 31(S1): 643-644.
- 王键, 孙丰月, 李碧乐, 王英德, 李睿华. 2016. 内蒙古乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪岩年龄、岩石成因及构造背景[J]. 地球科学, 41(05): 792-808.
- 王英德. 2016. 内蒙古乌拉特中旗图古日格一带金矿成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 长春: 吉林大学: 184.
- 卫晓锋, 潘东, 阴元军, 廖震, 吕晓强, 单立华, 丁汝福. 2019. 新疆阿克塔斯金矿床黑云母花岗岩锆石 U-Pb 和绢云母 ^{39}Ar / ^{40}Ar 测年及地质意义[J]. 矿床地质, 38(2): 251-260.
- 吴玉峰, 杨富全, 刘锋, 周明, 陈红琦. 2015. 新疆阿舍勒铜钼矿区脆韧性剪切带中绢云母 ^{40}Ar / ^{39}Ar 年代学及其地质意义[J]. 地球学报, 36(1): 121-126.
- 肖伟, 聂凤军, 刘翼飞, 刘研. 2012. 内蒙古长山壕金矿区花岗岩同位素年代学研究及地质意义[J]. 岩石学报, 28(2): 535-543.
- 杨锐, 张善明, 冯罡, 张建, 刘雅峰, 张水桃. 2012. 内蒙古宝音图隆起区成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 地质与资源, 21(4): 341-349.
- 杨岳清, 江思宏, 聂凤军, 张建华, 刘妍, 李福喜, 王剑民, 贾林柱. 2001. 朱拉扎嘎金矿地质特征及成因研究[J]. 地质与资源, 10(3): 146-152.
- 袁霞, 陈文, 张斌, 孙敬博, 喻顺, 尹继元, 张彦, 刘新宇, 杨莉, 张岩. 2017. 西天山望峰金矿床绢云母 ^{40}Ar / ^{39}Ar 年龄及矿床成因研究[J]. 矿床地质, 36(1): 57-67.
- 张锋, 李志丹, 王佳营, 陈军强, 文思博, 李超, 邵国钰, 赵宇川, 俞弼安. 2016. 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 中国地质, 43(05): 1771-1779.

张万益, 聂凤军, 刘妍, 江思宏, 许东青, 郭灵俊. 2008. 内蒙古奥尤特铜-锌矿床绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报, 29(5): 592-598.

张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层 (I/S) Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556-561.

赵旭东. 2018. 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿地质特征及矿化富集规律研究[D]. 长春: 吉林大学.

周建, 徐善法, 聂兰仕, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青, 张必敏, 刘汉粮, 迟清华. 2020. 内蒙古自治区大型金矿地球化学标志与预测[J]. 地球学报, 41(6): 818-826.

References:

- ABZALOV M. 2007. Zarmitan granitoid-hosted gold deposit, Tian Shan belt, Uzbekistan[J]. *Economic Geology*, 102(3): 519-532.
- CAI Ming-hai, PENG Zhen-an, QU Wen-jun, HE Zhong-yin, FENG Gang, ZHANG Shi-qi, XU Ming, CHEN Yan. 2011a. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Chagandeersi molybdenum deposit, western Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 377-384(in Chinese with English abstract).
- CAI Ming-hai, ZHANG Zhi-gang, QU Wen-jun, PENG Zhen-an, ZHANG Shi-qi, XU Ming, CHEN Yan, WANG Xian-bin. 2011b. Geological Characteristics and Re-Os Dating of the Chaganhua Molybdenum Deposit in Urad Rear Banner, Western Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(1): 64-68(in Chinese with English abstract).
- CAO Hai-qing, WENG Li-meng, XIA Qing-he, GENG Ji-hua. 2008. Analysis of genesis of Bayinhanggai Gold Ore Deposit[J]. *Mining Engineering*, 6(1): 11-13(in Chinese with English abstract).
- CHEN Shao-cong, YE Hui-shou, WANG Yi-tian, HE Wen, ZHANG Xing-kang, WANG Ning-yu. 2019. ^{40}Ar - ^{39}Ar age and geological significance of altered sericite in Eerya gold deposit, Jidong[J]. *Mineral Deposits*, 38(03): 557-570(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wen, WAN Yu-sheng, LI Hua-qin, ZHANG Zong-qing, DAI Tong-mo, SHI Ze-en, SUN Jing-bo. 2011. Lsotope Geochronology: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1917-1947(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wen, ZHANG Yan, ZHAO Hai-bin, HAN Dan, WANG Cheng-yu. 2006. Mineralization age of the Hongshan gold deposit, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 33(03): 632-640(in Chinese with English abstract).
- DILL H G. 2010. The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. *Earth-Science Reviews*, 100(1): 1-420.
- DING C W, LIU Y F, DAI P, JIANG S H, DING C Z. 2021. Zircon U-Pb geochronology of Baoyintu Group in the northwestern margin of the North China Craton and its geological significance[J]. *Journal of Earth Science*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.p.20211021.1604.010.html>.
- DING C W, NIE F J, BAGAS L, DAI P, JIANG S H, DING C Z, LIU C H, PENG Y B, ZHANG G X, SHAO G Y. 2016a. Pyrite Re-Os and zircon U-Pb dating of the Tugurige gold deposit in the western part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, China and its geological significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 669-681.
- DING C W, NIE F J, JIANG S H, LIU Y F, CAO Y. 2016b. Characteristics and origin of the Zhulazhaga gold deposit in Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 211-221.
- DING Cheng-wu, DAI Pan, NIE Feng-jun, ZHANG Zhao-lu, PENG Yun-biao, ZHANG Geng-xin, LI Da-peng, SHEN Ying. 2021. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Permian intrusive rocks in the Tugurige gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(02): 236-256(in Chinese with English abstract).
- DING Cheng-wu. 2016. Study on Geological Characteristics and Genesis of Tugurige Gold Deposit in Inner Mongolia and Its Regional Metallogenic Significance(dissertation for doctor degree)[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan): 175(in Chinese with English abstract).
- GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 18(1): 1-75.
- GRAUPNER T, NIEDERMANN S, KEMPE U, KLEMD R, BECHTEL A. 2006. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(21): 5356-5370.
- HANSON G N, SMIMONS K P, BENCE A E. 1975. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectrum ages for biotite, hornblende and muscovite in a contact metamorphic zone[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(9): 1269-1278.
- JAHN B. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73-100.
- JIAN P, LIU D Y, KRONER A, WINDLEY B F, SHI Y R, ZHANG W, ZHANG F Q, MIAO L C, ZHANG L Q, TOMURHUU D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 118(1): 169-190.
- JIANG S H, NIE F J. 2005. Geological and geochemical characteristics of the Zhulazhaga gold deposit in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79(1): 87-97.
- JIANG Si-hong, YANG Yue-qing, NIE Feng-jun, ZHANG Jian-hua, LIU Yan. 2001. Geological Characteristics of the Zhulazhaga Gold Deposit in Inner Mongolia, China[J]. *Mineral Deposits*,

- 20(3): 234-242(in Chinese with English abstract).
- KEMPE U, BELYATSKY B V, KRYMSKY R S, KREMENETSKY A A, IVANOV P A. 2001. 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*, 36(5): 379-392.
- KONG Ling-jie, HAN Bao-fu, ZHENG Bo, FENG Li-xia, WANG Zeng-zhen, SU Li. 2017. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the granites to the northeast of Er-enhot, Inner Monglia[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 36(04): 433-457(in Chinese with English abstract).
- KOTOV N V, PORITSKAYA L G. 1992. The Muruntau gold deposit: its geologic structure, metasomatic mineral associations and origin[J]. *International Geology Review*, 34(1): 77-87.
- LI D P, JIN Y, HOU K J, CHEN Y L, LU Z. 2015. Late Paleozoic final closure of the Paleo-Asian Ocean in the eastern part of the Xing-Meng Orogenic Belt: Constrains from Carboniferous-Permian (meta-) sedimentary strata and (meta-) igneous rocks[J]. *Tectonophysics*, 665: 251-262.
- LI J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3): 207-224.
- LI Jun-jian, LUO Hui, ZHOU Hong-ying, SANG Hai-qing, TAN Zhi-an, WANG Shou-guang, SUN Zheng-ping. 2004. Metallogenic epoch of Zhulazaga gold deposit in Alxa area, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Geochimica*, 33(6): 663-669(in Chinese with English abstract).
- LI Jun-jian, ZHAI Yu-sheng, YANG Yong-qiang, WANG Yan-bin, LI Cheng-dong, CUI Lai-wang, ZHOU Hong-ying, LIU Xiao-yang, LIU Xiao-xue, LI Sheng. 2010. Re discussion on the metallogenic age of Zhulazaga gold deposit in Alashan Area, Inner Mongolia: Evidence from zircon U-Pb SHRIMP age[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 178-184 (in Chinese with English abstract).
- LI Shuang-lin, OUYANG Zi-yuan. 1998. Tectonic framework and evolution of xing anling-mongolian orogenic belt (xmob) and its adjacent region[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 18(3): 45-54(in Chinese with English abstract).
- LI Ya-dong, JIANG Xiao-jun, LIU Yong-qing, LI Chao, SUN Hui-yi, LU Lei. 2021. Geochronology and Hf Isotopic Composition of the Biotite Monzogranite from the Qianjiayingzi Area in Zhenglan Banner of Inner Mongolia and Its Geological Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(1): 85-97(in Chinese with English abstract).
- LI Yong, XIONG Yi-qu, SHAO Guo-yu, LIU Zhong-ren, SUN Nuo, QI Cheng. 2019. Fluid inclusions in the Tugurige gold deposit, Inner Mongolia: Constraints on the genesis of the deposit[J]. *Mineral Deposits*, 38(02): 319-330(in Chinese with English abstract).
- LIU Xie-lu, WANG Yi-tian, HU Qiao-qing, WANG Rui-ting, PENG Luo-hong, ZHANG Ge-li, LIU Min, OUYANG Sheng. 2018. Evidence of $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ age data for ore-forming time of Chaimagold deposit in Fengtai ore concentration area, Shanxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 37(1): 163-174(in Chinese with English abstract).
- LIU Yi-fei, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, XI Zhong, ZHANG Zhi-gang, XIAO Wei, ZHANG Ke, LIU Yong. 2012. Ore-forming granites from Chaganhua molybdenum deposit, Central Inner Mongolia, China: Geochemistry, geochronology and petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 409-420(in Chinese with English abstract).
- LU Yan-ming, PAN Mao, QING Min, ZHANG Yu-jie, HAN Xian-ju, CHAO Yin-yin. 2012. Zircon U-Pb age of gold-bearing granitic intrusive rocks in Bilihe gold deposit of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 993-1004(in Chinese with English abstract).
- LUDWIG K R. 2001. ISOPLOT /EX v2.49, A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication No. 1a.
- LUO Hong-ling, WU Tai-ran, ZHAO Lei. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuliangsitai A-type granite on the northern margin of the North China Plate and tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 515-526(in Chinese with English abstract).
- MA Juan, PENG Bin. 2009. Characteristics of the Tepogeri Ultrabasic Rock Bodies and Its Metallogenic Potentiality in Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 32(3): 175-180(in Chinese with English abstract).
- MAO J W, KONOPELKO D, SELTMANN R, LEHMANN B, CHEN W, WANG Y T, EKLUND O, USUBALIEV T. 2004. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Economic Geology*, 99(8): 1771-1780.
- MAO J W, PIRAJNO F, COOK N. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings—an introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 1-7.
- MAO J W, WANG Y T, LEHMANN B, YU J J, DU A D, MEI Y X, LI Y F, ZANG W S, STEINH J, ZHOU T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 29(3-4): 307-324.
- MAO J W, XIE G Q, BIERLEIN F, QU W J, DUA D, YEH S, PIRAJNO F, LIH M, GUOB J, LIE Y F, YANGZ Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607-4626.

- MORELLI R, CREASER R A, SELTMANN R, STUART F M, SELBY D, GRAUPNER T. 2007. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite[J]. *Geology*, 35(9): 795-798.
- NIE Feng-jun, ZHANG Ke, LIU Yi-fei, JIANG Si-hong, LIU Yong, LIU Yan. 2011. Indosinian Magmatic Activity and Molybdenum, Gold Mineralization Along the Northern Margin of North China Craton and Adjacent Area[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 41(06): 1651-1666(in Chinese with English abstract).
- QING Min, GE Liang-sheng, TANG Ming-guo, QU Wen-jun, YUAN Shi-song, ZHAO Yu-suo. 2011. Molybdenite Re Os isotope age of Bilihe large-size porphyry gold deposit in Sunid Right Banner of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(1): 11-20(in Chinese with English abstract).
- QING Min, TANG Ming-guo, GE Liang-sheng, HAN Xian-ju, FENG Jian-bin, YUAN Shi-song, ZHAO Yu-suo. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry of andesite in Bilihe gold field, Suniteyouqi, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 514-524(in Chinese with English abstract).
- QIU Hua-ning, PENG Liang. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar chronology and fluid inclusions dating[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press: 54-65(in Chinese with English abstract).
- ROBERT F, BROMMECKER R, BOURNE B T, DOBAK P J, MCEWAN C J, ROWE R R, ZHOU X. 2007. Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types[J]. *Ore Deposits and Exploration Technology*, 7: 691-711.
- SENGOR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299-307.
- SHAO Guo-yu, TANG Da-wei, ZHAO Yu-chuan. 2015. Geological characteristics and main ore-controlling factors of Tugurige gold deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 496(in Chinese with English abstract).
- SONG Bo, ZHANG Hui-yuan, WEI Dong-tao, LI Wei, ZHAO Fei, LI Wen-ming. 2021. Revelation of the Meso-Neoproterozoic Crust on the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt: Chronology and Hf Isotope Tracer from Drilling-intersected Alkaline Granites, Northern Beishan-Alxa[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(1): 9-20(in Chinese with English abstract).
- SUZUKI K, MASUDA A, SHIMIZU H. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(16): 3151-3159.
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Da-wei, HAN Bao-fu, ZHANG Jian-jun, SHI Xing-jun, WANG Chao. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 29(06): 619-641(in Chinese with English abstract).
- WANG J P, LIU J J, PENG R M, LIU Z J, ZHAO B S, LI Z, WANG Y F, LIU C H. 2014. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 150-159.
- WANG Jian, SUN Feng-yue, LI Bi-yue, WANG Ying-de, LI Rui-hua. 2016. Age, petrogenesis and tectonic setting of Permian amphibolite in Tugurige, Wulat middle banner, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 41(05): 792-808(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-ping, LIU Jia-jun, JIANG Xiang-dong, WANG Bin, JIANG Sheng-mei. 2011. Argon-argon age of biotite in Haoyaoerhudong gold deposit, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Journal of Minerals*, 31(S1): 643-644(in Chinese with English abstract).
- WANG Ying-de. 2016. Study on the Mineralization of Gold Deposit in Tugurige Area, Wulatezhong Banner, Inner Mongolia(dissertation for doctor degree)[D]. Changchun: Jilin University: 184(in Chinese with English abstract).
- WEI Xiao-feng, PAN Dong, YIN Yuan-jun, LIAO Zhen, LÜ Xiao-qiang, SHAN Li-hua, DING Ru-fu. 2019. Zircon U-Pb age of biotite granite and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ age of sericite from Aketasi gold deposit in Xinjiang, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 38(2): 251-260(in Chinese with English abstract).
- WU Yu-feng, YANG Fu-quan, LIU Feng, ZHOU Ming, CHEN Hong-qi. 2015. ^{40}Ar - ^{39}Ar Dating of Sericite from the Brittle Ductile Shear Zone in the Ashele Cu-Zn Ore District, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(1): 121-126(in Chinese with English abstract).
- XIAO W J, WINDLEY B F, HAO J, ZHAI M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1484-1505.
- XIAO W J, WINDLEY B F, HUANG B C, HAN C M, YUAN C, CHEN H L, SUN M, SUN S, LI J L. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189-1217.
- XIAO Wei, NIE Feng-jun, LIU Yi-fei, LIU Yan. 2012. Isotope geochronology study of the granitoid intrusions in the Changshanhaog gold deposit and its geological implications[J].

- Acta Petrologica, 28(2): 535-543(in Chinese with English abstract).
- YANG Rui, ZHANG Shan-ming, FENG Gang, ZHANG Jian, LIU Ya-feng, ZHANG Shui-tao. 2012. Analysis of Metallogenic characteristics and exploration potentiality in the Buyant uplift, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 21(4): 341-349(in Chinese with English abstract).
- YANG Yue-qing, JIANG Si-hong, NIE Feng-jun, ZHANG Jian-hua, LIU Yan, LI Fu-xi, WANG Jian-min, JIA Lin-zhu. 2001. Geology and genesis of Zhulazhaga gold deposit, inner mongolia, China[J]. Geology and resources, 10(3): 146-152(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xia, CHEN Wen, ZHANG Bin, SUN Jing-bo, YU Shun, YIN Ji-yuan, ZHANG Yan, LIU Xin-yu, YANG Li, ZHANG Yan. 2017. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of sericite and genetic study of Wangfeng gold deposit, West Tianshan Mountains[J]. Mineal Deposits, 36(1): 57-67(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Feng, LI Zhi-dan, WANG Jia-ying, CHEN Jun-qiang, WEN Si-bo, LI Chao, SHAO Guo-yu, ZHAO Yu-chuan, YU Reng-an. 2016. Re-Os isotope age and its significance of molybdenite in Tugurige gold deposit, Wulat middle banner, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 43(05): 1771-1779(in Chinese with English abstract).
- ZHANG J R, WEI C J, CHU H. 2018. Multiple metamorphic events recorded in the metamorphic terranes in central Inner Mongolia, Northern China: Implication for the tectonic evolution of the Xing'an-Inner Mongolia Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 167: 52-67.
- ZHANG Wan-yi, NIE Feng-jun, LIU Yan, JIANG Si-hong, XU Dong-qing, GUO Ling-jun. 2008. ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology of the Aououte Cu-Zn Deposit in Inner Mongolia and Its Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(5): 592-598(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Y L, GE W C, SUN J, YANG H, LIU Z C, LIU J G. 2019. Age and composition of the subcontinental lithospheric mantle beneath the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt: Implications for the construction of microcontinents during accretionary orogenesis[J]. Lithos, 326-327: 556-571.
- ZHANG Yan, CHEN Wen, CHEN Ke-long, LIU Xin-Yu. 2006. Study on the Ar-Ar Age Spectrum of Diagenetic I/S and the Mechanism of ^{39}Ar Recoil Loss-Examples from the Clay Minerals of P-T Boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. Geological review, 52(4): 556-561(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xu-dong. 2018. The geological characteristics and enrichment regularities of mineralization research of Tugurige gold deposit in Urad Zhongqi, Inner Mongolia[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian, XU Shan-fa, NIE Lan-shi, LIU Dong-sheng, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing, ZHANG Bi-min, LIU Han-liang, CHI Qing-hua. 2020. The Geochemical Indicator and Prognosis of Large Gold Ore Districts in Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 818-826(in Chinese with English abstract).