

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.292>



辽东三股流岩体是否为五龙金矿 成矿提供必要的能量？

刘向冲^{1,2,3}, 肖昌浩^{1,2,3}, 张拴宏^{1,3}, 胡国辉^{1,3}, 李建锋^{1,3}, 王晨光⁴

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
2. 中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室, 北京 100081
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081
4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 辽东地区五龙金矿是华北克拉通东部一个典型的石英脉型金矿床, 其成矿过程尚存争议. 多种证据表明五龙金矿成矿流体属于岩浆热液, 成矿时代又与距离较近的三股流岩体的侵位年龄接近, 因而有一种观点认为二者密切相关. 目前尚未有充足的地质证据表明三股流岩体释放了五龙金矿成矿所需要的含金岩浆热液, 那么三股流岩体是否为其提供必要的能量呢? 利用现有的地球化学和地球物理数据, 建立三股流岩体仅作为热源驱动大气降水和释放岩浆热液的对流数值模型, 模拟三股流岩体周边的流场和温度场. 数值模拟结果表明, 三股流岩体自侵位后可在其周边 1 km 范围内形成 300 °C 以上的热场, 并维持数十万年, 因而有利于形成岩浆热液型矿床. 然而, 五龙金矿所在的位置受三股流岩体侵位后的热场影响不显著. 如果三股流岩体释放了充足的岩浆热液, 岩浆热液可在岩体边缘和接触带形成热液蚀变和金矿化, 这与现有的地质证据不符. 故五龙金矿可能与三股流岩体没有直接成因关系, 而金成矿热液来源仍需深入研究.

关键词: 三股流岩体; 五龙金矿; 流体对流; 数值模拟; 岩浆热液; 矿床学.

中图分类号: P542

文章编号: 1000—2383(2020)11—3998—16

收稿日期: 2020—05—18

Whether Sanguliu Granite Provided Energy Required for Forming Wulong Gold Deposit, Liaoning Province, China?

Liu Xiangchong^{1,2,3}, Xiao Changhao^{1,2,3}, Zhang Shuanhong^{1,3}, Hu Guohui^{1,3}, Li Jianfeng^{1,3}, Wang Chenguang⁴

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
2. Laboratory of Dynamic Diagenesis and Metallogenesis, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China
3. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China
4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The Wulong gold deposit located in Liaoning Province is a typical vein-type gold deposit in the eastern part of the North China craton, but how this large-scale gold deposit formed remains controversial. This deposit was interpreted to be genetically related to the Sanguliu granite because they are spatially close and have close chronological ages and the mineralizing fluids have a magmatic-hydrothermal origin. There is no sufficient evidence supporting that the Sanguliu granite provided the gold-bearing magmatic-hydrothermal fluids required for forming the Wulong deposit, so did the former provide sufficient energy for the latter?

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFC0603802); 中国地质科学院基本科研业务费 (No.JYYWF20180602); 中国地质调查项目 (No.DD20190161).

作者简介: 刘向冲 (1987—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事成矿作用动力学和数学地质等研究. ORCID:0000-0002-6872-3008.

E-mail: liuxiangchong@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 刘向冲, 肖昌浩, 张拴宏, 等, 2020. 辽东三股流岩体是否为五龙金矿成矿提供必要的能量? . 地球科学, 45(11):3998—4013.

In order to answer this question, numerical modeling of heat-driven convection of meteoric water and magmatic-hydrothermal fluids released by the Sanguliu granite was built based on its geochemical and geophysical characteristics to simulate the evolution of fluid flow and temperature after emplacement of the granite. Numerical results indicate that the temperatures within 1 km of the Sanguliu granite were elevated to over 300 °C for hundreds of thousands of years. This long high temperature filed favors formation of magmatic-hydrothermal deposits. In contrast, the position of the Wulong deposit received insignificant energy from the Sanguliu granite. If magmatic-hydrothermal fluids were released from the Sanguliu granite, those magmatic-hydrothermal fluids should have caused alteration and mineralization at the granite margin and the contact between the granite and its wallrock. However, these phenomena have not been identified in the field. Therefore, there is probably no genetic relationship between the large-scale Wulong deposit and the Sanguliu granite, and further investigations are needed to identify the source for Au-mineralizing fluids.

Key words: Sanguliu granite; Wulong gold deposit; fluid convection; numerical simulation; magmatic-hydrothermal fluid; mineral deposits.

0 引言

矿床成因的基本问题归根结底是成矿作用的动力学问题(於崇文等, 1998). 热液矿床成矿作用动力学过程的多个环节(金属元素的萃取、运移和沉淀等)都需要能量, 因而充足的能量是热液矿床形成的必要条件之一. 由于岩浆携带大量的热并运移至上地壳, 研究岩浆热场的分布与演化对于热液矿床的成因、矿床分带、找矿预测等方面具有重要意义(崔彬和李忠, 1998; 张德会等, 2011; 岑况和田兆雪, 2012; 张旗等, 2014). 辽东地区五龙金矿是华北克拉通东部一个大型石英脉型金矿. 流体包裹体测温、硫同位素、氧同位素等方面证据指示, 该矿床属于岩浆热液型金矿(Yu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020). 由于成岩与成矿在空间和时间上较为接近(魏俊浩等, 2001; 肖世椰等, 2018; Liu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020), 多位学者认为五龙金矿与三股流岩体密切相关(吕贻峰等, 1993; 魏俊浩等, 2003; 杨凤超等, 2018). 能量是成矿的必要条件之一, 那么三股流岩体是否为五龙金矿成矿提供必要的能量呢? 热液流动数值模拟能再现岩浆热液、盆地卤水等热液成矿系统的时空演化过程, 并在揭示热液型矿床的成矿动力学过程和找矿预测等方面发挥重要作用(Yang *et al.*, 2006; Weis *et al.*, 2012). 本文利用现有的地球化学和地球物理数据, 建立岩浆热驱动对流模型, 模拟三股流岩体周边的流场和温度场, 约束三股流岩体有利成矿的空间范围, 从能量的角度评价三股流岩体与五龙金矿的成因联系.

1 背景

华北克拉通是我国最重要的金成矿省, 其产出

的金矿床主要形成于早白垩世, 该时代与克拉通东部(太行山以东)破坏峰期一致(朱日祥等, 2015). 作为华北克拉通东部的代表性矿床(图 1), 五龙金矿位于辽宁省丹东市西约 15 km, 是辽东地区最大的石英脉型金矿床(王可勇等, 2010). 金矿石类型以陡倾石英脉为主, 少量为蚀变岩型. 金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、辉钼矿等(图 2), 脉石矿物以石英、云母为主, 金主要以自然金形式产出. 王冬丽等(2019)分析了黄铁矿的标型特征. 金成矿过程划分为早、中、晚 3 个阶段; 其中, 成矿早阶段和晚阶段金矿化较弱, 成矿中阶段为主要的金矿化阶段(Yu *et al.*, 2018). 金矿体石英流体包裹体 Rb-Sr 年龄为 120 ± 3 Ma 和 112 ± 1 Ma(魏俊浩等, 2001), 绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 122.8 ± 0.8 Ma, 黄铁矿 Rb-Sr 年龄为 119 ± 1 Ma(Zhang *et al.*, 2020), 因而成矿年龄集中于早白垩世.

该金矿赋矿围岩为黑云母花岗岩(即五龙岩体), 以岩基形式产出, 其锆石 U-Pb 年龄分别为 163 ± 7 Ma(Wu *et al.*, 2005a)、 155.4 ± 0.9 Ma(Liu *et al.*, 2019)、 159.2 ± 1.9 Ma 和 160.0 ± 1.4 Ma(杨凤超等, 2019)、 159.2 ± 1.8 Ma、 160.2 ± 1.8 Ma 和 156.1 ± 1.2 Ma(胡国辉等, 2020; 肖昌浩等, 2020), 独居石 U-Pb 年龄分别为 158.1 ± 1.9 Ma、 157.5 ± 1.4 Ma 和 153.5 ± 1.4 Ma(胡国辉等, 2020), 为中侏罗世侵入体. 五龙岩体广泛发育片麻状构造, 这期韧性变形与辽东半岛晚侏罗世—早白垩世 NW 向挤压推覆事件有关(李三忠等, 2004; 杨进辉等, 2004). 三股流岩体出露在五龙金矿南约 3 km(图 3), 未卷入五龙岩体经历的韧性变形事件, 已报道的锆石 U-Pb 年龄分别为 129 ± 2.9 Ma(魏俊浩等, 2003)、 125 ± 3 Ma(Wu *et al.*, 2005b)、 123.8 ± 1.2 Ma(胡国辉等, 2020)、 121 ± 4 Ma(Zhang *et*

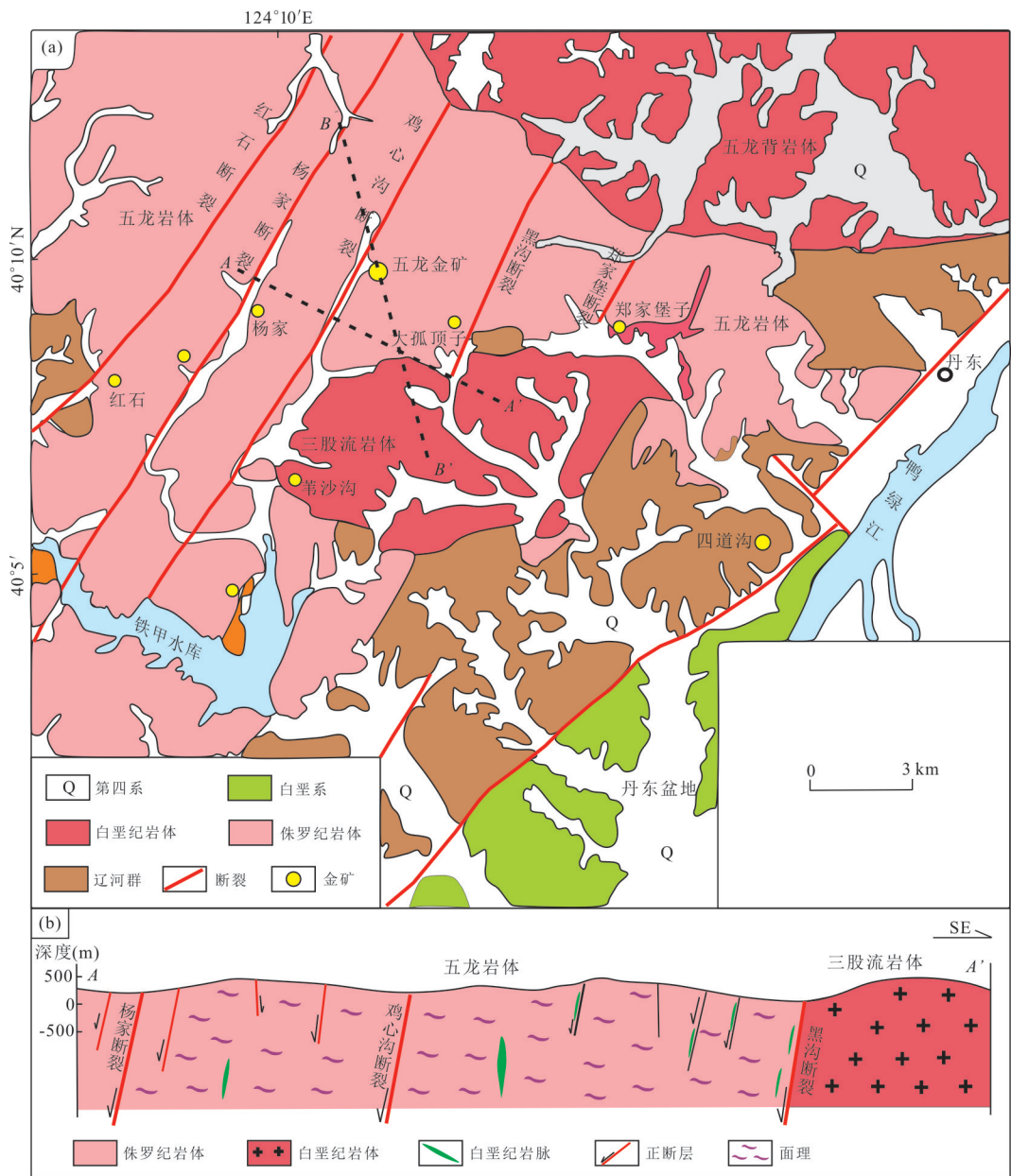


图1 辽宁五龙金矿所在的区域地质图(a)及其剖面图(b)

Fig. 1 The tectonic position (a) and the profile (b) of the Wulong gold deposit, Liaoning Province
据肖世椰等(2018)修改;图中B-B'为图6的剖面线

al., 2020),独居石 U-Pb 年龄为 123.4 ± 1.5 Ma (胡国辉等, 2020). 总体而言,三股流岩体的锆石 U-Pb 年龄略早于五龙金矿成矿年龄,与矿脉切穿岩体的地质证据一致(吕贻峰等, 1993; 魏俊浩等, 2003). 由于上述等时线年龄的误差(1~4 Ma)与等时线年龄反映的成岩成矿时差(2~17 Ma)较为接近,因而更为精确的成岩成矿时差还有待进一步研究.

五龙矿区内还发育多种岩脉,包括闪长岩、花岗斑岩、煌斑岩、辉绿岩等岩脉(肖世椰等, 2018). 闪长岩脉和花岗斑岩脉形成于成矿前,而煌斑岩脉和

辉绿岩脉则为成矿后的岩脉(杨春福, 1997). 闪长岩脉最为发育, 其次为花岗斑岩脉, 而煌斑岩脉与辉绿岩脉相对较少. 这些岩脉规模较小, 走向以南北向和北西向为主, 宽度一般为几十厘米至几米, 最长者可被追踪达 3 km (见肖世椰等(2018)图 2). 三股流岩体、上述岩脉和五龙金矿石的稀土配分曲线较为一致(杨春福, 1997). 魏俊浩等(2003)通过分析三股流岩体、闪长岩脉、和花岗斑岩脉的微量元素和同位素数据, 认为这些侵入岩(脉)的成岩物质主体来自下地壳, 岩浆在侵位过程中未明显受到围岩

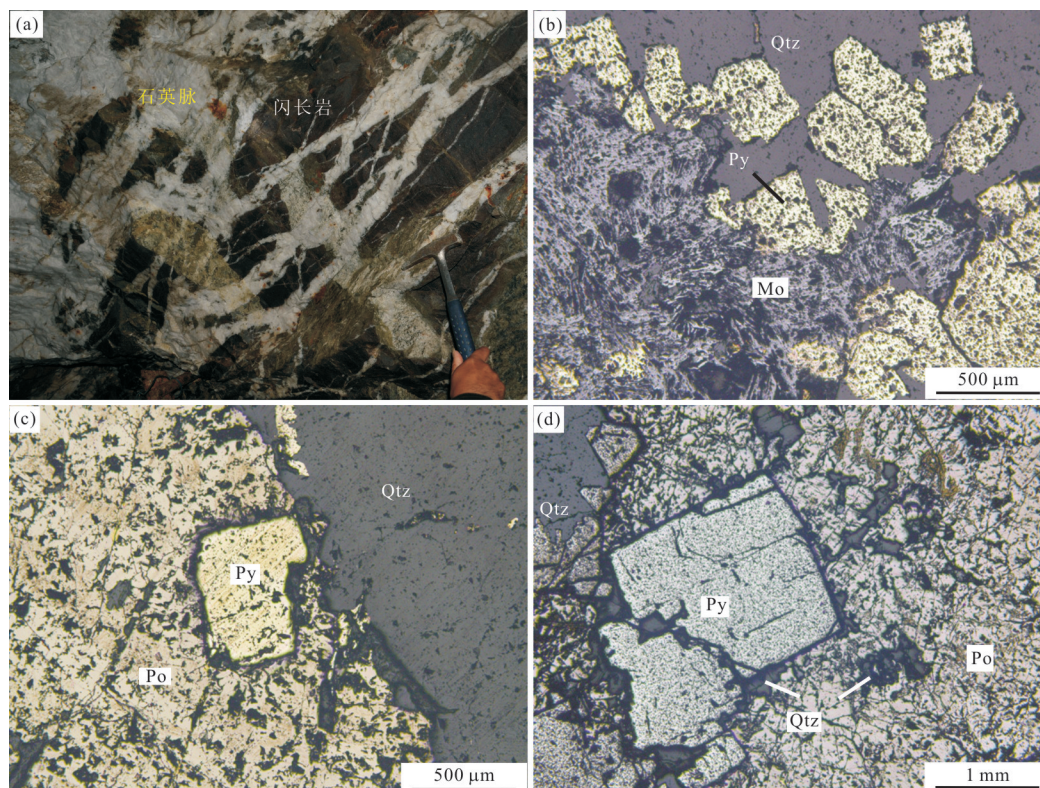


图 2 五龙金矿典型矿脉和显微照片

Fig. 2 Typical ore veins of the Wulong gold deposit and their microscopic pictures

a. 石英大脉切穿早期形成的细粒闪长岩; b. 辉钼矿 (Mo) 交代早期形成的自形黄铁矿 (Py), 样品采自耗金沟矿区; c. 晚期磁黄铁矿 (Po) 包裹早期自形黄铁矿 (Py), 样品采自二分矿 10 中段 4-2[#]脉; d. 磁黄铁矿 (Po) 包裹早期自形黄铁矿 (Py), 黄铜矿 (Ccp) 沿磁黄铁矿的微裂隙交代, 样品采自 20 中段 163[#]脉

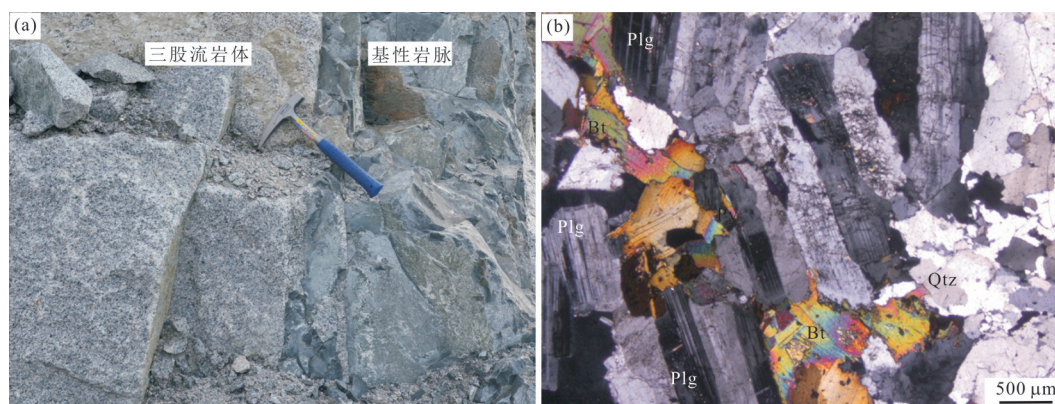


图 3 三股流岩体露头(a)和显微(b)照片

Fig. 3 The outcrop (a) and microscopic (b) pictures of the Sanguliu granite

a. 三股流采石场中见基性岩脉切穿三股流岩体(坐标: 40°6'12.57"N, 124°15'34.30"E), 向东拍摄; b. 三股流岩体在正交偏光下的显微照片; Bt. 黑云母; Plg. 斜长石; Qtz. 石英

混染. 广泛发育的细粒闪长岩脉被认为与金矿有密切关系: (1) 含金石英脉切穿或包裹细粒闪长岩(图 2a; 杨春福, 1997; Yu *et al.*, 2018); (2) 细粒闪长岩的锆石 U-Pb 年龄 121 ± 4 Ma 和 117 ± 7 Ma (Wu *et al.*, 2005b)、 123.1 ± 0.9 Ma (Liu *et al.*, 2019)、

120 ± 1 Ma (Zhang *et al.*, 2020), 其侵位时代与五龙金矿成矿年龄接近, 但成岩成矿时差目前难以确定. 现有的证据表明, 含金成矿流体可能利用了闪长岩脉侵位的构造通道(杨春福, 1997), 但二者的直接成因联系还有待进一步研究.

三股流岩体呈岩株状,出露面积约为 40 km²,其中心相为二长花岗岩,中间相和边缘相为花岗闪长岩和石英闪长岩、中细粒和粗粒似斑状花岗岩组成(刘义德,1987;顾玉超,2019).岩石成分数据表明,三股流岩体属于准铝质~弱过铝质的钙碱性花岗岩,其物质源自地壳(刘义德,1987;顾玉超,2019).该岩体被认为可能与五龙金矿关系密切的地质证据至少包括:(1)除五龙金矿外,三股流岩体周边还发育四道沟(杨帅师等,2010)、杨家等多个金矿床(点);(2)硫同位素和氧同位素数据表明成矿流体来源为岩浆热液(Yu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020);(3)五龙金矿脉向 S 或 SE 方向(即三股流岩体方向)侧伏(杨春福,1997;曾庆栋等,2019).然而,三股流岩体的接触交代现象不明显,很少见到蚀变矿物(刘义德,1987),也不发育指示岩浆挥发分饱和的似伟晶岩壳或晶洞花岗岩等现象(Candela and Blevin, 1995).因而,三股流岩体是否释放岩浆热液以及释放多少岩浆热液有待进一步研究.三股流岩体内和边部有少量金矿点,但与五龙金矿和四道沟金矿床的平面直线距离约 3~5 km,那么三股流岩体是否为五龙金矿的成矿提供了所需的能量?该科学问题可从以下两种可能性展开分析:(1)三股流岩体未释放岩浆热液,岩体驱动围岩中的大气降水能为五龙金矿成矿提供多少能量?(2)三股流岩体释放岩浆热液,该岩浆热液向岩体外运移 3 km 是否依然能维持五龙金矿主成矿期的温度?本文将根据前人发表的地球化学和地球物理数据作为约束条件,建立该岩体侵位后的热对流模型,利用数值模拟探讨这些科学问题.

2 岩浆热驱动流体对流数值模拟

2.1 热驱动流体对流原理与进展

热液在相互连通的岩石孔隙或裂隙内流动时,还传输着热量,这一物理过程被称为热质输运,是成矿作用动力学的一个重要分支(於崇文等,1998).耦合热液流动和热传输的主要变量是流速.地壳流体流动通常较慢,故热场的变化滞后于流体压力场的扩散(Xing, 2014).在上地壳范围内,热液可在多种机制驱动下发生大范围的流动(Chi and Xue, 2011).与岩浆有关驱动机制通常包括重力驱动和流体超压.重力驱动的触发机制是热液密度发生改变,温度是影响水密度的主控变量(图 4).流体超压的原因之一是岩浆释放热液.

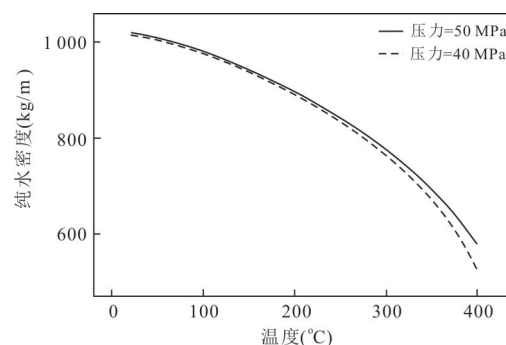


图 4 水密度随温度和压力变化的曲线

Fig.4 Water density against temperature and pressure

根据 IAPWS-95 公式计算 (Wagner and Pruss, 2002)

岩浆热驱动流体对流的先驱性工作由 Cathles (1977) 和 Norton and Knight (1977) 完成.他们通过数值模拟发现,正在冷凝但不释放岩浆水的侵入体作为热引擎使周围流体密度减小而上升,流体上升至一定位置因降温而变重下降,从而形成对流循环(图 5).对流循环会加速岩浆冷却进程,从而影响热液矿床的演化过程和“寿命”.这种对流循环对于热液矿床的形成有重要意义:热液循环可萃取围岩内的金属元素,并在适当的物理化学环境下沉淀成矿(Hanson, 1995).在这一领域,国内於崇文院士及其团队成员较早地开展系统性理论和应用研究工作(鲍征宇,1992;於崇文等,1998;张德会等,1998).任启江等(1994)利用热质输运模拟再现陕西金堆城斑岩钼矿成矿过程中的流速场和温度场.杨瑞琰等(2005)通过一系列盆地卤水的热质输运模拟工作定量解释了湖南锡矿山锑矿床的成矿过程.Zhao *et al.* (2008) 从理论和数值模拟的角度系统论述了地质系统存在的对流热质输运现象.近年来,由于商业化软件的推广应用(如 FLAC3D)和大规模计算程序的开发,国内外学者可再现研究更为精细和复杂的成矿物理化学过程(包括热质输运),并在斑岩型铜矿(Weis *et al.*, 2012)、与侵入体相关的金矿(Eldursi *et al.*, 2009)、Pb-Zn 矿(Yang *et al.*, 2006)等类型矿床的成矿理论和找矿预测取得许多重要成果.

2.2 三股流岩体热驱动流体对流模型

Zhao *et al.* (2012) 总结了成矿计算水动力学研究的一般建模方法.三股流岩体热驱动流体对流模型建模过程如下:

(1) 根据研究的科学问题和对应的物理化学过程,确定将要求解的偏微分方程组.热驱动流体对流包括多孔介质流体流动和热传输两个耦合的物

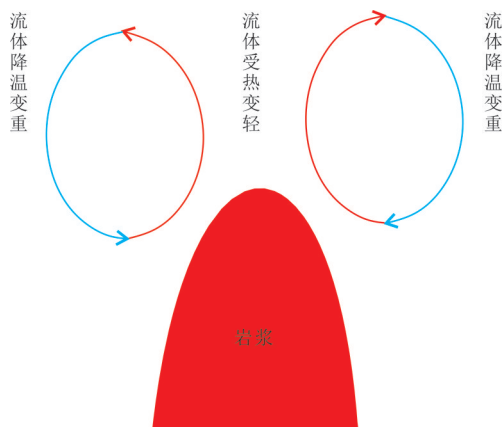


图5 由高温侵入体触发的密度驱动地下水对流循环示意图
Fig. 5 The density-driven groundwater convection triggered by emplacement of a hot magma

理过程,可分别用达西定律和热传输方程(包括热传导和热对流)定量描述(Xing, 2014):

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu}(\nabla P - \rho \mathbf{g}), \quad (1)$$

$$(\rho C)_m \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda_m \nabla T) - (\rho C)_f \mathbf{v} \cdot \nabla T + Q_e, \quad (2)$$

其中, \mathbf{v} 是流体速度, k 是多孔介质的渗透率张量, \mathbf{g} 是重力加速度, μ 是流体动力粘度, ∇ 是向量的梯度 $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$, D 是深度, $(\rho C)_m = (1 - \phi)(\rho C)_r + \phi(\rho C)_f$, ρ 是密度, C 是比热容, 下标 r, f, m 分别表示岩石, 流体, 岩石与流体组成的等效介

质; 热传导系数 $\lambda_m = \phi \lambda_f + (1 - \phi) \lambda_r$; T 代表温度, Q_e 是能量项. 粗体符号代表该参数为向量、张量或者矩阵.

(2) 根据研究区的地质、地球化学特征和地球物理解译结果, 建立几何模型, 约束模型求解的空间范围. 花岗岩通常是通过多次岩浆累积侵位形成的(马昌前和李艳青, 2017). 顾玉超(2019)的实测剖面显示, 三股流岩体以中心相二长花岗岩为主, 其他岩相占比较小. 模型中假设三股流岩体是一次侵位而形成现在的规模. 岩体侵位后向四周释放能量, 故二维模型只需要考虑某一方向的半空间即可. 三股流岩体在南北向的宽度约 5~6 km, 数值模型沿图 1a 的剖面线 $B-B'$, 只考虑岩体北半侧 3 km 及其以北的部分(图 6). Yu *et al.* (2018) 使用流体包裹体压力计约束的成矿深度约为 4~6 km. Wang *et al.* (2018) 利用锆石和磷灰石(U-Th)/He 热年代学反演五龙矿区剥蚀深度约 4.7 km. 故图 6 所示的二维数值模型设置成矿时古地表据现今地表有 4 km. 五龙金矿与三股流岩体在地表最短距离仅 3 km, 三股流岩体的顶部据古地表 2 km. 五龙矿区重力数据解译结果表明, 三股流岩体向深部缩小成 3 个较小岩体, 在约 5 km 深基本无重力异常信息(Zhang *et al.*, 2019). 为便于建模和计算, 二维剖面模型中三股流岩体与容纳五龙金矿的断裂带保持 3 km 的间距, 自现今地表向深部延伸 4 km, 因而模型中的三股流岩体比实际的尺寸大, 以此得到的热演化过程可看作

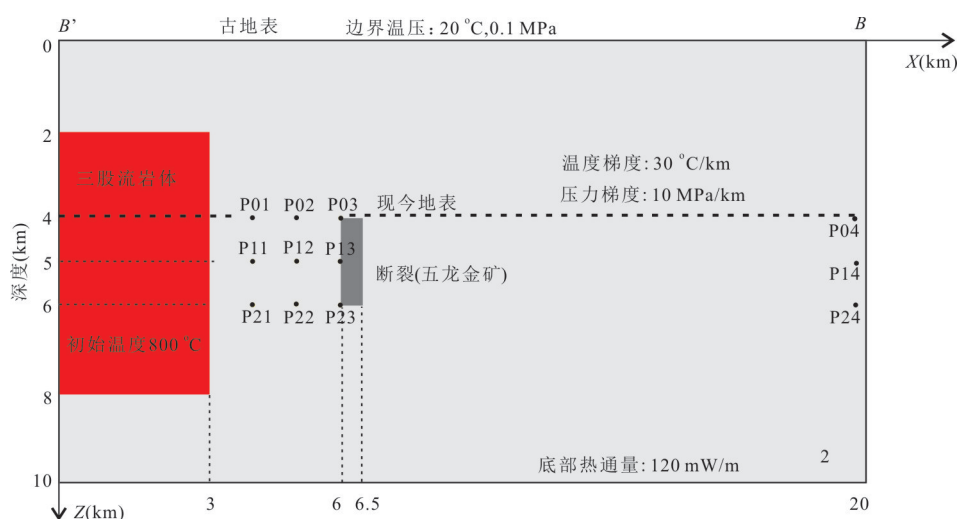


图6 三股流岩体热驱动流体对流二维半空间数值模型

Fig. 6 The two-dimension half-space heat-driven fluid convection triggered by the Sanguliu granite

剖面线 $B-B'$ 对应的位置见图 1b. 图中所给的初始条件和边界条件见 3.2 节. 实际模型为三维模型, 另一水平方向只有 1 km, 含两层六面体网格

实际热对流过程的上限. 根据目前坑道和钻孔揭露, 五龙金矿体深度可达 2 km, 故设置五龙金矿所在的高渗透率断裂在垂向上延伸 2 km. 需要说明的是, 模型中岩石单元是一种等效连续介质模型, 即任一点的物性参数都是岩石骨架和孔隙中流体的混合参数(见方程 3-2), 五龙金矿所在的岩石单元由于裂隙在成矿期张开应该具有较高的渗透率.

(3) 从地质模型到数值模型还需将现有地质、地球物理、地球化学等现象和证据换成相应模型的初始和边界条件. 模型顶部为古地表, 设为固定的常温 20 °C 和大气压 0.1 MPa. 成矿时期丹东地区的地温梯度未知. 三股流岩体侵位后必然导致围岩产生热异常, 而远离岩体的位置会逐渐恢复至正常的地温梯度, 故同一深度按正常地温梯度计算的背景温度(相对于岩体导致热异常温度)应低于五龙金矿成矿最低温度. 五龙金矿成矿晚阶段的流体包裹体均一温度最低, 范围是 144~255 °C, 主体在 200 °C 左右(Yu *et al.*, 2018), 因此设定地温梯度为 30 °C/km, 五龙金矿所在的断裂带的初始温度为 140~200 °C, 其最低值略低于流体包裹体均一温度的最低值. 古地表的边界温度和压力是模型对应变量的最低边界值, 因而古地表相当于一个能量耗散的窗口. 为了维持该地温梯度, 模型底部的热通量为 120 mW/m². 三股流岩体初始温度为 800 °C, 并假设该岩体快速侵位至模型所示的位置.

热液粘度为 10⁻³ Pa·s, 热液密度 ρ 只考虑温度 T 的影响: $\rho = \rho_r(1 - \beta(T - T_r))$, 其中 $T_r = 20^\circ\text{C}$ 是参照温度, $\rho_r = 1000 \text{ kg/m}^3$ 是参照温度下热液的密度, $\beta = 1.534 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 为热液的体积膨胀系数. 热液的热传导系数是 0.6 W/(m·K); 五龙金矿的围岩主要是花岗岩, 该类型岩石的热传导系数取值范围是 2.3~3.6 W/(m·K), 平均值为 3.4 W/(m·K)(Schön, 2015), 考虑到岩石热传导系数随温度升高而减小(Vosteen and Schellschmidt, 2003), 模型中取其平均值 3.4 W/(m·K).

模型并未直接考虑岩浆结晶潜热的影响, 因为岩浆结晶潜热作为热源是时间、岩浆温度、成分、晶体的比例等参数的非线性方程(Lange *et al.*, 1994). 如何处理岩浆结晶潜热是岩浆热演化定量研究的难题之一(Ghiorso, 1991). 一个比较常见的处理方式是提高岩石的比热容以反映岩浆结晶潜热的影响(Nabelek *et al.*, 2012). 岩浆结晶潜热为 $2.5 \times$

10^5 J/kg (Nabelek *et al.*, 2012), 其作用的温度范围介于岩浆的液相线与固相线. 为方便计算, 假设岩浆结晶潜热的影响范围是自初始温度至 200 °C, 那么结晶潜热对比热容的贡献是 417 J/(kg·°C). 通常岩石的比热容为 800 J/(kg·°C); 本文模型中, 三股流岩体的比热容为 1 217 J/(kg·°C), 围岩的比热容是 800 J/(kg·°C), 热液的比热容是 4 200 J/(kg·°C).

上地壳岩石渗透率是一个受构造变形、化学反应等物理化学过程显著影响的动态变量. 多方面的数据显示, 上地壳平均渗透率与深度呈反比例变化趋势(Ingebritsen and Manning, 2010). 因而, 模型中围岩(包括五龙岩体及其他更古老的地层)渗透率和孔隙度随深度线性递减, 地表渗透率为 $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 孔隙度为 0.1, 模型底部渗透率为 $1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 孔隙度为 0.005. 围岩渗透率从深至浅跨越 3 个数量级. 在 4~6 km 深, 围岩的渗透率为 $4 \times 10^{-15} \sim 6 \times 10^{-15} \text{ m}^2$. 五龙金矿所在断裂带渗透率为 $9 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 孔隙度为 0.09. 三股流岩体保持固定的渗透率为 $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 孔隙度为 0.006.

(4) 求解达西定律和热传输方程等偏微分方程组.

前人对各个阶段的流体包裹体测温结果表明, 五龙金矿成矿温度的下限约 300 °C(王可勇等, 2010; Yu *et al.*, 2018). 该温度值将用于评价三股流岩体是否为五龙金矿形成提供必要的能量. 由于只有三股流岩体和围岩的渗透率可能与真实值存在数量级上的差距, 数值模拟实验考虑了三股流岩体和围岩的渗透率、岩体释放流体对岩体周边温度场的影响. 选择距离三股流岩体不同距离(15 km、3 km、2 km、1 km)、不同深度(2 km、1 km、0 km)的观察点, 并显示这些观察点的温度演化曲线.

3 模拟结果

3.1 数值实验 1: 三股流岩体未释放岩浆热液

计算结果表明, 由于三股流岩体渗透率较低, 流体流动主要集中三股流岩体右侧围岩内(即早于三股流岩体的地层和岩体, 如五龙岩体), 尤其三股流岩体与围岩接触带附近(图 7). 热液对流自远离三股流岩体约 10 km 的围岩开始, 逐渐向岩体运移, 至三股流岩体与围岩的接触带转向上运移. 热对流将三股流岩体携带的能量传输至围岩, 因而岩体逐渐降温, 围岩逐渐升温. 五龙金矿所在的断裂带由

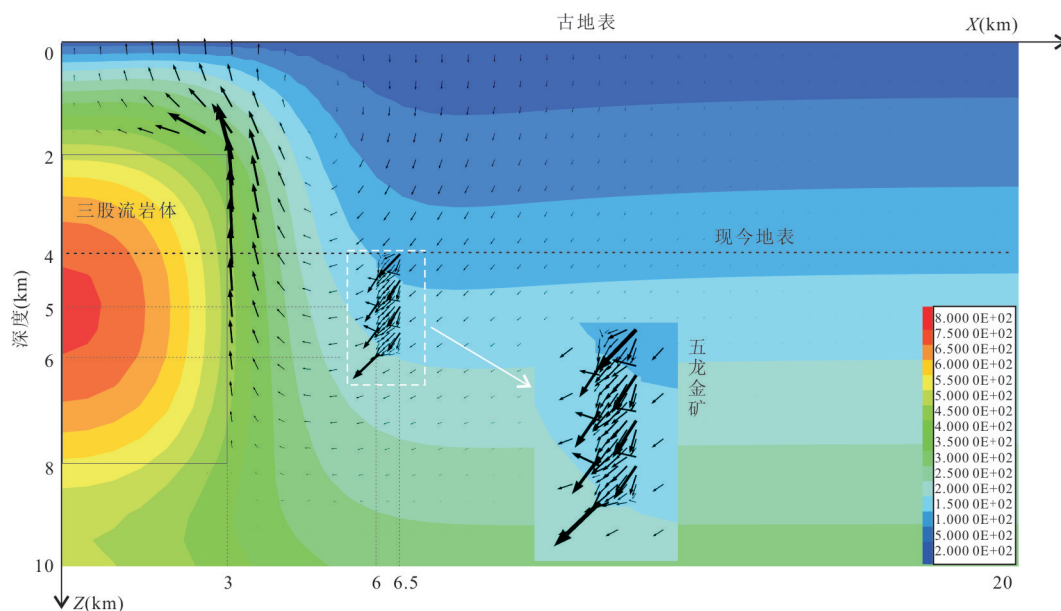


图 7 数值实验 1 中 3 万年后三股流岩体周边的温度场和流速场

Fig. 7 The distribution of temperature and flow velocity around the Sanguli granite after 30 000 a in the first numerical experiment

箭头指示流速,箭头方向代表流体流动方向,箭头长度代表流速大小,最大流速为 1.2×10^{-9} m/s;标尺代表温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$

于渗透率较高,其内的流速也较大,流动方向指向三股流岩体深部。

远离岩体的位置未见显著的热对流(图 7)。距离三股流岩体 17 km 的 3 个观察点(P04、P14、P24)的温度基本维持在按 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 地温梯度的计算值(图 8)。由此可见,这 3 个观察点的温度在底部热通量的能量输入与古地表能量耗散之间达到了动态平衡,不受三股流岩体热场的影响。故以此 3 个观察点的温度曲线作为参照,距离岩体较近的观察点温度变化则反映了三股流岩体热场的影响。

随着三股流岩体逐渐冷却,距离该岩体 3 km 的 3 个观察点(P03、P13、P23)先快速升温,后逐渐趋于稳定(图 8);在 40 万年后分别升温约 34°C 、 35°C 、 32°C ,比五龙金矿成矿温度的下限低 $66\sim 128^{\circ}\text{C}$ 。距离三股流岩体 2 km 的 3 个观察点(P02、P12、P22)在 40 万年后分别升温约 72°C 、 74°C 、 77°C ,比五龙金矿成矿温度的下限低 $28\sim 83^{\circ}\text{C}$ 。距离三股流岩体 1 km 的 3 个观察点(P01、P11、P21)在 1~2 万年后相继超过 300°C ,在约 4~5 万年后温度达到峰值,而后缓慢降温。

3.2 数值实验 2:三股流岩体渗透率的影响

与数值实验 1 相比,数值实验 2 将三股流岩体的渗透率提高 3 倍,升至 $6 \times 10^{-17} \text{m}^2$,孔隙度为 0.008,其他参数不变。由图 9 可知,代表五龙金矿的

3 个观察点(P03、P13、P23)的温度变化趋势与数值实验 1 相似,但温度值比数值实验 1 低约 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 数值实验 3:围岩渗透率的影响

三股流岩体与五龙金矿之间发育许多早于成矿的岩脉(如南北向的闪长岩脉,见肖世柳等, 2018,图 2),容纳岩脉的节理或断裂可能成为热液运移的高渗透率通道。故数值实验 3 将围岩底部的渗透率提高至 $2 \times 10^{-17} \text{m}^2$,孔隙度为 0.006,围岩顶部的渗透率保持不变,围岩渗透率和孔隙度随深度线性递减,其他参数与数值实验 1 保持一致。由图 10 可知,代表五龙金矿的 3 个观察点(P03、P13、P23)的温度曲线变化趋势与数值实验 1 相似,但温度值比数值实验 1 低约 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 数值实验 4:连通岩体和金矿的高渗透断层

本次实验中假设三股流岩体与五龙金矿之间存在一近南北向的断裂(带),以评价三股流岩体是否通过这样一个高渗透率的构造通道为五龙金矿成矿提供能量。故将三股流岩体与五龙金矿之间 3 km 长、2 km 深的渗透率整体提升至 $8 \times 10^{-15} \text{m}^2$,孔隙度为 0.08,略低于五龙金矿所在的断裂带。模拟结果显示(图 11),代表五龙金矿的 3 个观察点(P03、P13、P23)的温度值比数值实验 1 低约 $9\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

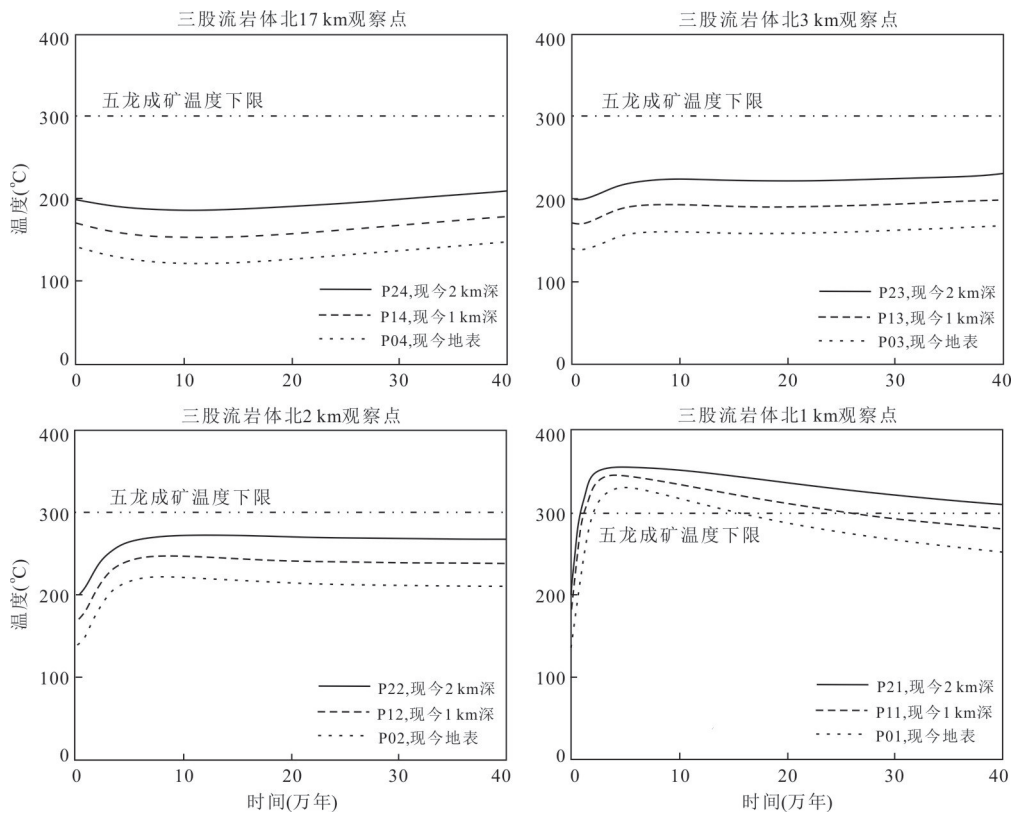


图 8 数值实验 1 中距离三股流岩 17 km、3 km、2 km、1 km 观察点的温度变化曲线

Fig. 8 The trends of temperature at the observation points 17 km, 3 km, 2 km, and 1 km away from the Sanguliu granite in the first numerical experiment

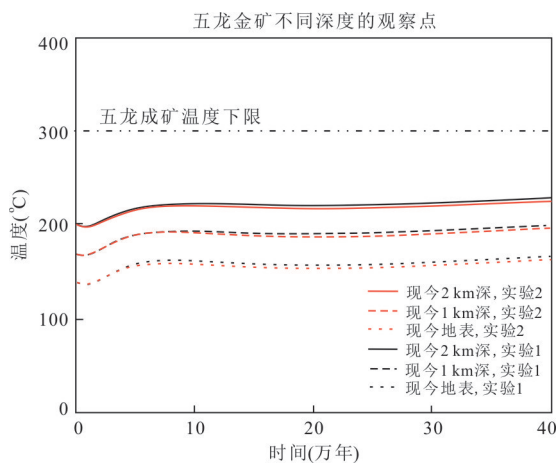


图 9 数值实验 2 中代表五龙金矿的 3 个观察点的温度曲线变化趋势

Fig. 9 The trend of temperature at the three observation points of the Wulong deposit in the second numerical experiment

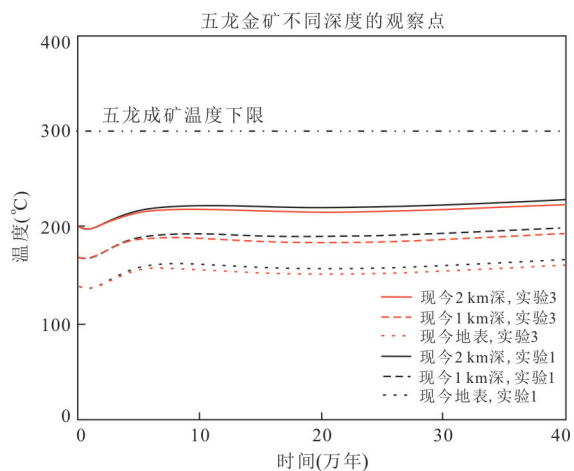


图 10 数值实验 3 中代表五龙金矿的 3 个观察点的温度曲线变化趋势

Fig. 10 The trend of temperature at the three observation points of the Wulong deposit in the third numerical experiment

3.5 数值实验 5:三股流岩体释放岩浆热液

第 5 个数值模拟实验用于评价三股流岩体释放岩浆热液后对五龙金矿所在位置的热贡献.岩体释放流体涉及岩浆热力学演化、质量守恒等物理化学

问题,本质上是一种高度复杂的非线性问题.例如,越来越多的证据表明,岩浆热液成矿在整个岩浆热液演化历程是脉冲式完成,而相邻两个脉冲成矿可间隔数十万年 (Li *et al.*, 2017; Spencer *et al.*,

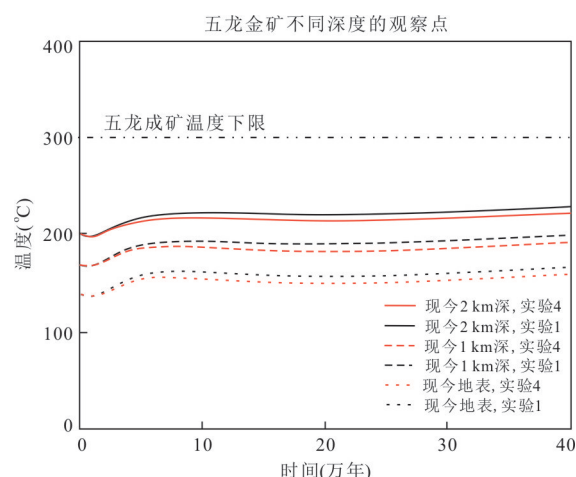


图 11 数值实验 4 中代表五龙金矿的 3 个观察点的温度曲线变化趋势

Fig. 11 The trend of temperature at the three observation points of the Wulong deposit in the fourth numerical experiment

2015). 因而, 如何在程序中定量实现这种非线性过程需要作出必要的假设. 首先, 含水岩浆所能释放的岩浆热液与岩体体积、初始含水量有关. 目前尚未有约束三股流岩体初始含水量的工作, 能产生强烈热液活动的岩浆初始含水

量通常能达到 2.5%~6.5%, 平均值为 3% (Burnham, 1985, 1997); 斑岩型矿床母岩浆的初始含水量通常达到 >4% (Sillitoe, 2010). 本节数值模型假设三股流岩体初始含水量为 3%. 模型中岩体体积 $6 \text{ km} \times 3 \text{ km} \times 1 \text{ km} = 1.8 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (另一水平方向为 1 km), 密度为 2700 kg/m^3 , 则总质量为 $4.86 \times 10^{13} \text{ kg}$. 故假设岩体核部以 $6.75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 速率匀速释放岩浆热液 (假设流体密度为 600 kg/m^3 , 见图 4), 40 万年后释放的岩浆热液约占岩体总质量的 1% 和 2%. 需要说明的是, 高精度测年等方法将岩浆热液成矿的时限基本约束在 0.1~1 Ma 这一时间尺度 (Spencer *et al.*, 2015; Buret *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017), 模拟时长 40 万年也在这一时限范围内. 由于岩体渗透率较低, 岩浆热液在岩体内的流速较低, 并在岩体与围岩接触带附近与大气降水发生混合 (图 12). 释放的岩浆热液使得五龙金矿所在断裂带温度相对实验 1 有所提升 (图 13a), 且岩浆热液释放速率越快温度提升的幅度越大 (图 13b), 但距五龙金矿成矿温度的下限仍有 44~100 °C 的差距.

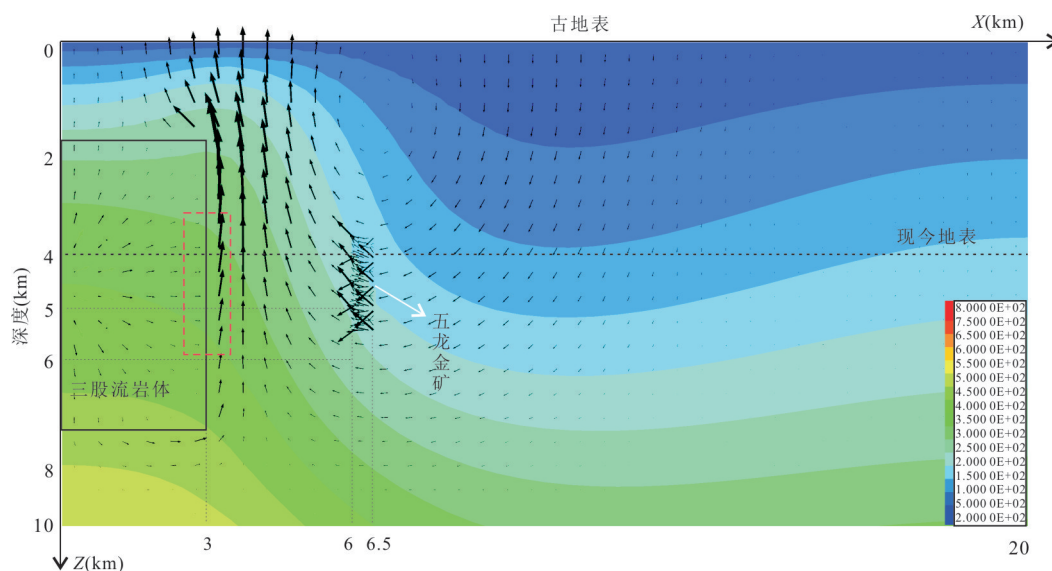


图 12 数值实验 5 中岩浆热液以 $1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 速率释放 40 万年后热场和流速场的分布

Fig. 12 The distribution of temperature and fluid velocity after releasing magmatic-hydrothermal fluids at a rate of $1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ by 0.4 Ma in the fifth numerical experiment

箭头指示流速, 箭头方向代表流体流动方向, 箭头长度代表流速大小, 最大流速为 $2.2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$; 标尺代表温度, 单位为 °C. 红色框指示大气降水与岩浆热液交汇的区域

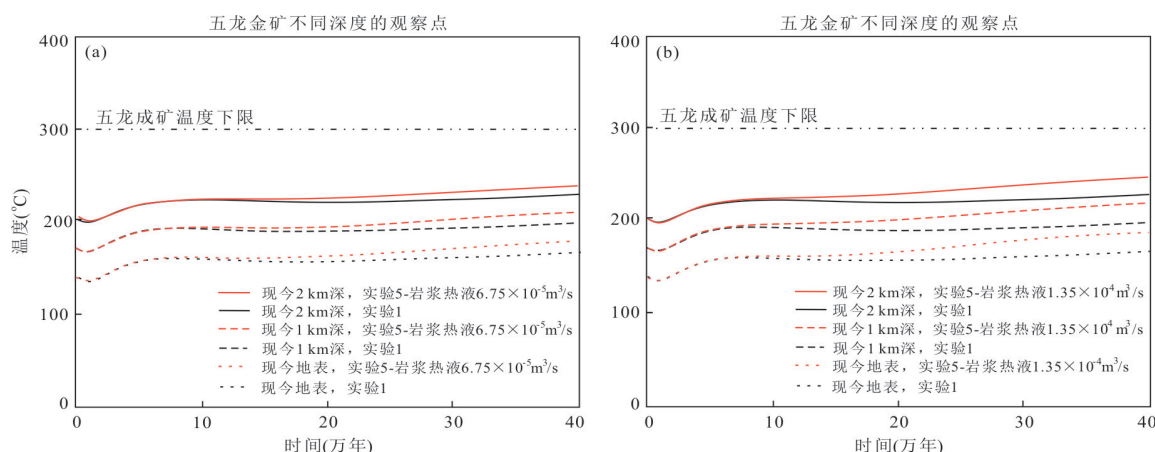


图 13 数值实验 5 中岩浆热液以 $6.75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (a) 和 $1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) 速率释放时五龙金矿的 3 个观察点的温度曲线变化趋势

Fig. 13 The evolution of temperature at the three observation points of the Wulong deposit after releasing magmatic-hydrothermal fluids at a rate of $6.75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (a) and $1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) in the fifth numerical experiment

4 讨论

自地球深部侵位至上地壳的岩浆携带了巨大的能量,在一定时间和空间范围内形成热场;这种岩浆热场对于金属矿床和油气藏的形成、地热资源开发利用等有重要意义 (Ingebritsen *et al.*, 2010; 张德会等, 2011; 马野牧等, 2013; 张旗等, 2016). 定量评价岩浆热场的影响范围和持续时间离不开热质输运数值模拟 (Dutrow *et al.*, 2001; Eldursi *et al.*, 2009; Wang, 2013). 单纯依赖热传导散热时,岩浆冷却较为缓慢;而当发生流体对流时,岩浆冷却速率显著加快,通常冷却时限为数万年至数十万年 (Cathles, 1977; Gerdes *et al.*, 1998). 本文的热液对流模式与前人的模拟结果类似:自远离岩体的围岩开始,逐渐向岩体运移,至岩体与围岩的接触带转向上运移。

前人主要通过地质和地球化学特征分析三股流岩体与五龙金矿的关系,本文从能量的角度评价三股流岩体是否为五龙金矿成矿提供必要的能量. 从数值模拟结果可知,三股流岩体侵位后热对流可驱动热液淋滤岩体外 10 km 范围内围岩的金、硫等成矿物质,并将其向岩体方向搬运. 然而,该岩体在侵位后只能在 1 km 范围内形成的 $\geq 300^\circ\text{C}$ 的异常热场,且能维持数十万年. 各个成矿阶段的流体包裹体均一温度的峰值说明形成五龙金矿需要使流体温度自背景温度 (按正常地温梯度计算) 至少提升 100°C (Yu *et al.*, 2018). 对于三股流岩体未释放岩浆热液的情形 (数值实验 1-4),

三股流岩体只能使五龙金矿所在的断裂带提升约 40°C ,与五龙金矿成矿温度的下限相差至少 60°C . 三股流岩体的热场还受岩体和围岩渗透率的影响. 岩体和围岩渗透率越高,五龙金矿所在的断裂带温度提升的幅度越小. 从能量守恒的角度分析,三股流岩体和围岩渗透率越高,其能量向周边 (尤其是岩体上覆岩层) 耗散地越快,但五龙金矿与热源相距较远,其所能接收的能量会变少. 模型中三股流岩体的尺寸大于重力数据约束的尺寸 (Zhang *et al.*, 2019),因而三股流岩体引起的热异常可能比本文模拟还要低. 故三股流岩体在冷却结晶阶段对岩体 1 km 范围内的热液成矿有显著贡献,但对五龙金矿成矿的热贡献不显著.

对于三股流岩体释放岩浆热液的情形 (数值实验 5),三股流岩体只能使五龙金矿所在的断裂带提升约 60°C ,距离五龙金矿成矿温度的下限仍差 40°C . 岩浆释放热液的数值模型建立在许多简化和假设的基础上,而且忽略了部分关键的物理化学过程. 例如,岩浆热液可能通过水力破裂提升已固结岩体的渗透率. 然而,从目前的模拟结果来看,如果三股流岩体释放了足以形成五龙金矿这种规模矿床的岩浆热液,岩体边缘和接触带很可能形成热液蚀变甚至通过流体混合机制发生金矿化,但是目前的地质证据似乎并不支持推论,大规模的金矿化反而位于三股流岩体 3 km 以外的区域 (如五龙金矿床和四道沟金矿床). 因而,本文的数值模拟不支持三股流岩体释放了足以形成五龙金矿和其他金矿的岩浆热液这一假设,五龙金矿成矿的热液来源可能

来自深部.魏俊浩等(2003)根据五龙地区岩体、岩脉和金矿石的微量元素和同位素特征,认为三股流岩体不太可能是五龙金矿直接的矿质提供者,推测成矿物质与成岩物质主体来自深部的同一岩浆源区,金矿成矿是同一岩浆源区岩浆演化不同阶段的产物.地球物理资料表明深部存在隐伏岩体(曾庆栋等,2019),但该隐伏岩体是否为五龙金矿成矿热液来源仍需进一步研究.由于五龙金矿向三股流岩体侧伏,且成岩成矿年龄较为相近,成矿热液可能来自三股流岩体下部,热液运移利用了三股流岩体侵位的构造通道或其他构造弱面.

尽管岩脉(尤其是闪长岩脉)与五龙金矿有密切的空间联系(见第2章),本文并未模拟岩脉对五龙金矿成矿的热影响.闪长岩脉数量最多,但岩脉的规模尚缺乏统计数据,其冷却时长、影响范围及其与五龙金矿成矿的关系仍需数值模拟实验加以约束.

在岩浆热液型矿床中,简单降温通常被认为是矿石矿物沉淀的重要机制之一(Ni *et al.*, 2015).在本文数值模拟中,三股流岩体在侵位后驱动大气降水对流循环可使其3 km范围内达到200~300℃,并维持数十万年,且距离岩体越近,温度越高.虽然岩浆热场影响的范围与岩体的规模、渗透率等参数相关,但总体趋势是:越靠近成矿岩体,围岩温度越高,岩浆热液与围岩的温差越小,仅靠简单降温使矿石沉淀的效率越低;只有存在高渗透率断裂使成矿热液运移至远离岩浆的情况下,简单降温才有可能成为矿石沉淀的有效机制.

5 结论

根据五龙金矿区地质、地球化学特征和地球物理资料,建立了三股流岩体热驱动大气降水和三股流岩体释放岩浆热液的对流数值模型,利用5个数值模拟实验定量评价了三股流岩体对五龙金矿成矿的能量贡献.主要结论如下:

(1)三股流岩体作为热机触发的热对流可驱动热液淋滤岩体外10 km范围内围岩的金、硫等成矿物质,并将其向岩体方向搬运;岩体周边1 km范围内可形成300℃以上的热场,并维持数十万年,因而有利于形成热液矿床.

(2)五龙金矿所在的位置受三股流岩体侵位后的热场影响不显著,与五龙金矿形成温度的下限尚有较大差距.如果三股流岩体释放了岩浆热

液,岩体的热贡献仍达不到五龙金矿成矿最低温度,但在岩体边缘和接触带可形成热液蚀变和金矿化,因而三股流岩体是否释放了足以形成五龙金矿和其他金矿的岩浆热液值得商榷.三股流岩体可能不是五龙金矿的热液来源.

(3)岩浆热场影响的范围和持续时间可能影响矿石矿物的有效沉淀机制(如简单降温),岩浆热驱动对流数值模拟可在揭示成矿动力学过程和找矿预测等方面发挥积极作用.

致谢:纯水密度利用R语言开源程序包CHNOSZ计算.感谢辽宁省有色地质局一〇三队在野外调查提供的帮助和2位审稿人的评审意见!

References

- Bao, Z.Y., 1992. Onset and Stability of Thermally-Driven Fluid Convection in a Vertical Rock Crack and Their Implication for Hydrothermal Ore-Forming Processes. *Earth Science*, 17(Suppl.1): 57—67 (in Chinese with English abstract).
- Buret, Y., von Quadt, A., Heinrich, C., et al., 2016. From a Long-Lived Upper-Crustal Magma Chamber to Rapid Porphyry Copper Emplacement: Reading the Geochemistry of Zircon Crystals at Bajo de La Alumbrera (NW Argentina). *Earth and Planetary Science Letters*, 450: 120—131. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.017>
- Burnham, C. W., 1985. Energy Release in Subvolcanic Environments; Implications for Breccia Formation. *Economic Geology*, 80(6): 1515—1522. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1515>
- Burnham, C. W., 1997. Magmas and Hydrothermal Fluids. In: Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (3rd Edition). John Wiley & Sons, New York, 63—123.
- Candela, P. A., Blevin, P. L., 1995. Do Some Miagmatic Granites Preserve Evidence of Magmatic Volatile Phase Permeability. *Economic Geology*, 90(8): 2310—2316. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.8.2310>
- Cathles, L. M., 1977. An Analysis of the Cooling of Intrusives by Ground-Water Convection Which Includes Boiling. *Economic Geology*, 72(5): 804—826. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.5.804>
- Cen, K., Tian, Z. X., 2012. Ore-Forming System around Magma: Model of Spatial Zonation for Magmatic Rock and Deposit Set. *Geoscience*, 26(5): 1051—1057 (in Chinese with English abstract).
- Chi, G. X., Xue, C. J., 2011. An Overview of Hydrodynamic Studies of Mineralization. *Geoscience Frontiers*, 2(3):

- 423—438.
- Cui, B., Li, Z., 1998. Synthetic Metallogenic Prediction in the Material Field-Energy Field-Spatial Field. *Geoscience*, 12(4): 501—505 (in Chinese with English abstract).
- Dutrow, B. L., Travis, B. J., Gable, C. W., et al., 2001. Coupled Heat and Silica Transport Associated with Dike Intrusion into Sedimentary Rock: Effects on Isotherm Location and Permeability Evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(21): 3749—3767. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00704-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00704-9)
- Eldursi, K., Branquet, Y., Guillou - Frottier, L., et al., 2009. Numerical Investigation of Transient Hydrothermal Processes around Intrusions: Heat-Transfer and Fluid-Circulation Controlled Mineralization Patterns. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1/2): 70—83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.009>
- Gerdas, M. L., Baumgartner, L. P., Person, M., 1998. Convective Fluid Flow through Heterogeneous Country Rocks during Contact Metamorphism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 23983—24003. <https://doi.org/10.1029/98jb02049>
- Ghiorso, M. S., 1991. Temperatures in and around Cooling Magma Bodies. In: Perchuk, L. L., ed., *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology*. Cambridge University Press, New York, 387—410.
- Gu, Y. C., 2019. The Mesozoic Tectonic-Magmatic Constraints on the Gold Mineralization in Wulong Gold Mining Area, Eastern Liaoning (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 156 (in Chinese with English abstract).
- Hanson, R. B., 1995. The Hydrodynamics of Contact Metamorphism. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5): 595—611.
- Hu, G. H., Zhang, Q. Q., Li, J. F., et al., 2020. Emplacement Ages of Mesozoic Granites in the Liaodong Area: Constraints from Zircon and Monazite U-Pb Dating. *Earth Science*, 45(11): 3962—3981 (in Chinese with English abstract).
- Ingebritsen, S. E., Geiger, S., Hurwitz, S., et al., 2010. Numerical Simulation of Magmatic Hydrothermal Systems. *Reviews of Geophysics*, 48(1): 1—33. <https://doi.org/10.1029/2009rg000287>
- Lange, R. A., Cashman, K. V., Navrotsky, A., 1994. Direct Measurements of Latent Heat during Crystallization and Melting of a Ugandite and an Olivine Basalt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118(2): 169—181. <https://doi.org/10.1007/bf01052867>
- Li, S. Z., Liu, J. Z., Zhao, G. C., et al., 2004. Key Geochronology of Mesozoic Deformation in the Eastern Block of the North China Craton and Its Constraints on Regional Tectonics: A Case of Jiaodong and Liaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 633—646 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Selby, D., Condon, D., et al., 2017. Cyclic Magmatic-Hydrothermal Evolution in Porphyry Systems: High-Precision U-Pb and Re-Os Geochronology Constraints on the Tibetan Qulong Porphyry Cu-Mo Deposit. *Economic Geology*, 112(6): 1419—1440. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4515>
- Liu, J., Zhang, L. J., Wang, S. L., et al., 2019. Formation of the Wulong Gold Deposit, Liaodong Gold Province, NE China: Constraints from Zircon U-Pb Age, Sericite Ar-Ar Age, and H-O-S-He Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 109: 130—143. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.013>
- Liu, Y. D., 1987. Discussion on the Geological Characteristics and Genesis of Granite in Sanguliu of Liaoning. *Liaoning Geology*, 3: 245—260 (in Chinese with English abstract).
- Ly, Y. F., Li, J. F., Zhang, M., 1993. The Structural Character of Syntectonic Granite Body with Forceful Emplacement and Its Relationship with the Gold Deposit: The Example of Sanguliu Granite Body, Dandong. *Land & Resources*, 1(2): 120—128 (in Chinese).
- Ma, C. Q., Li, Y. Q., 2017. Incremental Growth of Granitoid Plutons and Highly Crystalline Magmatic Differentiation. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1479—1488 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. M., Lu, X. C., Zhang, X. F., et al., 2013. A Numerical Simulation of the Heat Transfer in Granite Intrusion-Mudstone Contact Zone and Its Geological Implication: A Case Study from Eastern Guangdong Province, China. *Geological Journal of China Universities*, 19(2): 307—315 (in Chinese with English abstract).
- Nabelek, P. I., Hofmeister, A. M., Whittington, A. G., 2012. The Influence of Temperature-Dependent Thermal Diffusivity on the Conductive Cooling Rates of Plutons and Temperature-Time Paths in Contact Aureoles. *Earth and Planetary Science Letters*, 317/318: 157—164. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.009>
- Ni, P., Wang, X. D., Wang, G. G., et al., 2015. An Infra-red Microthermometric Study of Fluid Inclusions in Coexisting Quartz and Wolframite from Late Mesozoic Tungsten Deposits in the Gannan Metallogenic Belt, South China. *Ore Geology Reviews*, 65(4): 1062—1077.
- Norton, D., Knight, J. E., 1977. Transport Phenomena in

- Hydrothermal Systems; Cooling Plutons. *American Journal of Science*, 277(8): 937—981. <https://doi.org/10.2475/ajs.277.8.937>
- Ren, Q.J., Guo, G.Z., Feng, Z.J., et al., 1994. Computer Simulation of Heat and Fluid Transport in the Ore-Forming Process of the Jinduicheng Porphyry Molybdenum Deposit, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 13(1): 88—959 (in Chinese with English abstract).
- Schön, J.H., 2015. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Elsevier, Amsterdam, 378—380. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-03002-x>
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3—41. <https://doi.org/10.2113/gsec-ongoe.105.1.3>
- Spencer, E. T., Wilkinson, J. J., Creaser, R. A., et al., 2015. The Distribution and Timing of Molybdenite Mineralization at the El Teniente Cu-Mo Porphyry Deposit, Chile. *Economic Geology*, 110(2): 387—421. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.2.387>
- Vosteen, H. D., Schellschmidt, R., 2003. Influence of Temperature on Thermal Conductivity, Thermal Capacity and Thermal Diffusivity for Different Types of Rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(9/10/11): 499—509. [https://doi.org/10.1016/s1474-7065\(03\)00069-x](https://doi.org/10.1016/s1474-7065(03)00069-x)
- Wagner, W., Pruss, A., 2002. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31(2): 387—535. <https://doi.org/10.1063/1.1461829>
- Wang, D.L., Shen, J.F., Qiu, H.C., et al., 2019. Study on Typomorphic Characteristics of Pyrite and Prediction of Deep Prospecting of Wulong Gold Deposit in Liaoning Province. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 55(6): 898—915 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Y., 2013. Magma Heat NS1D: One-Dimensional Visualization Numerical Simulator for Computing Thermal Evolution in a Contact Metamorphic Aureole. *Computers & Geosciences*, 54: 21—27. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.006>
- Wang, K.Y., Qing, M., Bian, H.Y., et al., 2010. The Geological Features and Geochemistry of Ore-Forming Fluids of Wulong Gold Deposit in Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 557—564 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Z., Wang, F., Wu, L., et al., 2018. (U-Th)/He Thermochronology of Metallic Ore Deposits in the Liaodong Peninsula: Implications for Orefield Evolution in Northeast China. *Ore Geology Reviews*, 92: 348—365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.025>
- Wei, J.H., Liu, C.Q., Tang, H.F., 2003. Metallogeny of Gold Deposits and Evidence of Isotopes and Trace Elements for the Comagmatic Evolution of the Yan-shanian Intrusive Rocks in the Wulong Area, Eastern Liaoning. *Geological Review*, 49(3): 265—271 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J.H., Liu, C.Q., Zhao, Y.X., et al., 2001. Time Span of the Major Ore-Forming Stages of the Wulong Gold Deposit, Liaoning. *Geological Review*, 47(4): 433—437 (in Chinese with English abstract).
- Weis, P., Driesner, T., Heinrich, C. A., 2012. Porphyry-Copper Ore Shells Form at Stable Pressure-Temperature Fronts within Dynamic Fluid Plumes. *Science*, 338(6114): 1613—1616. <https://doi.org/10.1126/science.1225009>
- Wu, F., Lin, J., Wilde, S., et al., 2005a. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1/2): 103—119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Wilde, S. A., et al., 2005b. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Jurassic Granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1/2): 127—156. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.04.010>
- Xiao, C.H., Liu, X.C., Zhao, Y., et al., 2020. Structural Controls and Re-Os Dating of Molybdenite of the Wulong Gold Deposit, NE China. *Earth Science*, 45(11): 3982—3997 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. Y., Zhu, G., Zhang, S., et al., 2018. Structural Processes and Dike Emplacement Mechanism in the Wulong Gold Field, Eastern Liaoning. *Chinese Science Bulletin*, 63(28): 3022—3036 (in Chinese).
- Xing, H. L., 2014. Finite Element Simulation of Transient Geothermal Flow in Extremely Heterogeneous Fractured Porous Media. *Journal of Geochemical Exploration*, 144: 168—178. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.002>
- Yang, C. F., 1997. The Characteristics of the Ore Bearing Fracture Tectonics and the Gold Orebody's Spatial Occurrence of Wulong Gold Deposit. *Gold*, 18(3): 3—8 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. C., Song, Y. H., Yang, J. L., et al., 2018. SHRIMP U-Pb Age and Geochemical Characteristics of

- Granites in Wulong-Sidaogou Gold Deposit, East Liaoning. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 940—954 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F.C., Yang, J.L., Gu, Y.C., et al., 2019. Emplacement and Deformation Age of Surrounding Gneissic Granite in Wulong Gold Deposit, Eastern Liaoning Province: SHRIMP U-Pb Age. *Journal of Geomechanics*, 25(Suppl.1): 44—48 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Large, R. R., Bull, S., et al., 2006. Basin-Scale Numerical Modeling to Test the Role of Buoyancy-Driven Fluid Flow and Heat Transfer in the Formation of Stratiform Zn-Pb-Ag Deposits in the Northern Mount Isa Basin. *Economic Geology*, 101(6): 1275—1292. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.6.1275>
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Luo, Q.H., et al., 2004. Deformation Age of Jurassic Granites in the Dandong Area, Eastern China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1205—1214 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R.Y., Ma, D.S., Pan, J.Y., 2005. Effect of Annual Precipitation to Geotherm of Ore-Forming Fluid: A Case of Antimony Deposits in Xikuangshan. *Earth Science*, 30(3): 366—370 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S.S., Wang, K.Y., Hao, T.S., et al., 2010. Characteristics of Fluid Inclusions and Genesis of Sidaogou Gold Deposit in Dandong Area, Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 773—780 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B., Zeng, Q. D., Frimmel, H. E., et al., 2018. Genesis of the Wulong Gold Deposit, Northeastern North China Craton: Constraints from Fluid Inclusions, H-O-S-Pb Isotopes, and Pyrite Trace Element Concentrations. *Ore Geology Reviews*, 102: 313—337. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.016>
- Yu, C.W., Cen, K., Bao, Z. Y., et al., 1997. Dynamics of Ore-Forming Processes. Geological Publishing House, Beijing, 224 (in Chinese).
- Zeng, Q.D., Chen, R.Y., Yang, J.H., et al., 2019. The Metallogenic Characteristics and Exploring Ore Potential of the Gold Deposits in Eastern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1939—1963 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, D.H., Jin, X.D., Mao, S.D., et al., 2011. The Classification of Ore-Forming Fluid and the Efficiency of Ore Formation of Magmatic Hydrothermal Solution. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 90—102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.H., Yu, C.W., Bao, Z.Y., et al., 1998. Fluid Dynamics and Numerical Simulation of Ore Zoning of Yinshan Polymetallic Deposit in Dexing, Jiangxi Province. *Earth Science*, 23(3): 267—271 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Kou, L. L., Zhao, Y., et al., 2020. Genesis of the Wulong Gold Deposit, Liaoning Province, NE China: Constrains from Noble Gases, Radiogenic and Stable Isotope Studies. *Geoscience Frontiers*, 11(2): 547—563. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.05.012>
- Zhang, Q., Jin, W.J., Li, C.D., et al., 2014. Magma-Thermal Field: Its Basic Characteristics, and Differences with Geothermal Field. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 341—349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Jin, W.J., Wang, J.R., et al., 2016. Relationship between Magma-Thermal Field and Hydrocarbon Accumulation. *Progress in Geophysics*, 31(4): 1525—1541 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., Wang, G. W., Carranza, E. J. M., et al., 2019. Metallogenic Model of the Wulong Gold District, China, and Associated Assessment of Exploration Criteria Based on Multi-Scale Geoscience Datasets. *Ore Geology Reviews*, 114: 103138. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103138>
- Zhao, C., Hobbs, B.E., Ord, A., 2008. Convective and Advective Heat Transfer in Geological Systems. Springer, Berlin, 229.
- Zhao, C. B., Reid, L. B., Regenauer-Lieb, K., 2012. Some Fundamental Issues in Computational Hydrodynamics of Mineralization: A Review. *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 21—34. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2011.10.005>
- Zhu, R.X., Fan, H.R., Li, J.W., et al., 2015. Decratonic Gold Deposits. *Scientia Sinica (Terrae)*, 45(8): 1153—1168 (in Chinese).

附中文参考文献

- 鲍征宇, 1992. 垂直裂隙中热驱动流体对流的发生和稳定性及其热液成矿作用意义. *地球科学*, 17(S1): 57—67.
- 岑况, 田兆雪, 2012. 岩浆中心成矿系: 岩浆岩体和矿床组合的空间分带理想模式. *现代地质*, 26(5): 1051—1057.
- 崔彬, 李忠, 1998. 物质场—能量场—空间场综合成矿预测. *现代地质*, 12(4): 501—505.
- 顾玉超, 2019. 辽东五龙金矿区中生代构造—岩浆作用对金成矿制约(博士学位论文). 北京: 中国地质大学, 156.
- 胡国辉, 张琪琪, 李建锋, 等, 2020. 辽东地区中生代花岗岩的侵位时代: 锆石和独居石 U-Pb 年代学. *地球科学*, 45(11): 3962—3981.

- 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等, 2004. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约: 以胶辽地区为例. 岩石学报, 20(3): 633—646.
- 刘义德, 1987. 辽宁省三股流花岗岩地质特征及成因探讨. 辽宁地质, 3: 245—260.
- 吕贻峰, 李江风, 张鸣, 1993. 强力侵位花岗岩体与金矿的关系: 以丹东三股流岩体为例. 国土资源, 1(2): 120—128.
- 马昌前, 李艳青, 2017. 花岗岩体的累积生长与高结晶度岩浆的分异. 岩石学报, 33(5): 1479—1488.
- 马野牧, 陆现彩, 张雪芬, 等, 2013. 花岗岩侵入体—泥质围岩热传输过程的数值模拟及其地质意义: 以粤东典型接触带剖面为例. 高校地质学报, 19(2): 307—315.
- 任启江, 郭国章, 冯祖钧, 等, 1994. 陕西金堆城斑岩钼矿成矿过程中热及流体传输的计算模拟. 矿床地质, 13(1): 88—95.
- 王冬丽, 申俊峰, 邱海成, 等, 2019. 辽宁五龙金矿黄铁矿标型特征研究及深部找矿预测. 南京大学学报(自然科学版), 55(6): 898—915.
- 王可勇, 卿敏, 边红业, 等, 2010. 辽宁五龙金矿床地质特征及成矿流体地球化学性质. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 557—564.
- 魏俊浩, 刘丛强, 唐红峰, 2003. 辽东五龙地区燕山期侵入岩类同源岩浆演化微量元素、同位素证据与金矿成矿. 地质论评, 49(3): 265—271.
- 魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 等, 2001. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限. 地质论评, 47(4): 433—437.
- 肖昌浩, 刘向冲, 赵岩, 等, 2020. 辽东五龙金矿床构造控矿特征和辉钼矿 Re—Os 年龄, 地球科学, 45(11): 3982—3997.
- 肖世柳, 朱光, 张帅, 等, 2018. 辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制. 科学通报, 63(28): 3022—3036.
- 杨春福, 1997. 辽宁五龙金矿容矿断裂构造与金矿体空间赋存特征. 黄金, 18(3): 3—8.
- 杨凤超, 宋运红, 杨佳林, 等, 2018. 辽东五龙—四道沟金矿集区花岗杂岩 SHRIMP U—Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. 大地构造与成矿学, 42(5): 940—954.
- 杨凤超, 杨佳林, 顾玉超, 等, 2019. 辽东五龙金矿围岩片麻状花岗岩的侵位和变形时代: SHRIMP U—Pb 年代学制约. 地质力学学报, 25(S1): 44—48.
- 杨进辉, 吴福元, 罗清华, 等, 2004. 辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约. 岩石学报, 20(5): 1205—1214.
- 杨瑞琰, 马东升, 潘家永, 2005. 大气降水量对成矿流体热场的影响: 以锡矿山锡矿床成矿流体为例. 地球科学, 30(3): 366—370.
- 杨帅师, 王可勇, 郝通顺, 等, 2010. 辽宁丹东四道沟金矿床流体包裹体特征及矿床成因. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 773—780.
- 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等, 1998. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社, 224.
- 曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 等, 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力. 岩石学报, 35(7): 1939—1963.
- 张德会, 金旭东, 毛世德, 等, 2011. 成矿热液分类兼论岩浆热液的成矿效率. 地学前缘, 18(5): 90—102.
- 张德会, 於崇文, 鲍征宇, 等, 1998. 银山多金属矿床成矿分带的流体动力学计算模拟. 地球科学, 23(3): 267—271.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等, 2014. 岩浆热场: 它的基本特征及其与地热场的区别. 岩石学报, 30(2): 341—349.
- 张旗, 金维浚, 王金荣, 等, 2016. 岩浆热场对油气成藏的影响. 地球物理学进展, 31(4): 1525—1541.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等, 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学(D辑: 地球科学), 45(8): 1153—1168.