

doi: [10.12097/gbc.2022.08.016](https://doi.org/10.12097/gbc.2022.08.016)

塞尔维亚蒂莫克铜金矿集区典型矿床地质特征

周小深^{1,2}, 刘文元^{1*}, 单思齐¹, 陈娟¹, 张安顺¹, 谢桂青^{1,3}, 林新仁², 饶东平²,
王虎², 林健²

ZHOU Xiaoshen^{1,2}, LIU Wenyuan^{1*}, SHAN Siqi¹, CHEN Juan¹, ZHANG Anshun¹,
XIE Guiqing^{1,3}, LIN Xinren², RAO Dongping², WANG Hu², LIN Jian²

1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350000;

2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200;

3. 中国地质大学科学研究院, 北京 100083

1. *Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350000, Fujian, China;*

2. *Zijin Mining Group Company Limited, Shanghang 364200, Fujian, China;*

3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要: 特提斯成矿带是全球三大成矿带之一, 阿普塞尼 (Apuseni)–巴纳特 (Banat)–蒂莫克 (Timok)–斯雷德诺戈里斯基 (Srednogie) 岩浆成矿带 (ABTS 多金属成矿带) 位于特提斯成矿带西缘, 由阿普塞尼–巴纳特铁铜铅锌矿集区、蒂莫克铜金矿集区和斯雷德诺戈里斯基铜金矿集区组成, 成矿作用主要与晚白垩世钙碱性岩浆活动有关。塞尔维亚蒂莫克铜金矿集区作为 ABTS 多金属成矿带经济意义巨大的矿集区之一, 总结该地区矿床地质特征及成矿规律对下一步的找矿勘查具有重要指导意义。综述了蒂莫克铜金矿集区及其典型矿床的地质特征, 总结了矿集区成矿规律与动力学背景。蒂莫克铜金矿集区典型矿床形成时代集中在 88~78 Ma 之间, 成矿作用历时 10 Ma 左右, 矿集区内成矿作用时代呈现出由东向西逐渐年轻的趋势。矿集区中典型矿床类型主要为斑岩型 (如马伊丹佩克矿床、克里韦利矿床和瓦利亚斯特尔茨矿床) 和高硫化浅成低温热液–斑岩型 (如博尔矿床和丘卡卢佩吉矿床), 这些矿床以铜金矿化为主。矿床类型、矿化特征及矿体埋深存在的差异可能与区域上新世代右旋构造在矿集区形成的逆冲推覆构造及成矿后不均匀剥蚀有关。根据矿集区典型矿床的矿化类型及矿体埋深海拔标高的变化趋势, 认为矿集区北部—西北部和丘卡卢佩吉矿床东南部仍具有一定的找矿潜力。

关键词: 特提斯成矿带; 塞尔维亚; 蒂莫克铜金矿集区; 浅成低温热液型铜金矿床; 斑岩型铜金矿床; 矿床地质特征

中图分类号: P618.41; P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0270-19

Zhou X S, Liu W Y, Shan S Q, Chen J, Zhang A S, Xie G Q, Lin X R, Rao D P, Wang H, Lin J. Ore geology of typical deposits in the Timok Cu-Au ore field, Serbia. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 270–288

Abstract: The Tethys metallogenic belt is one of the three major metallogenic belts in the world. Porphyry deposits, epithermal deposits and skarn deposits are widely developed in this belt. The ABTS metallogenic belt is composed of Apuseni-Banat, Timok and Srednogie ore concentration in the western part of the Tethys metallogenic belt. The mineralization is mainly related to calc-alkaline magmatic activity in the Late Cretaceous. Timok ore field is one of the ore fields with great economic significance in the ABTS metallogenic belt. It is of great significance to summarize the geological characteristics and metallogenic regularity of the deposit in this area for prospecting and exploration. Based on an overview of the geological characteristics of typical deposits in the Timok ore field,

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-12-30

资助项目: 紫金矿业集团股份有限公司委托重大横向课题 (编号: 01612012)、国家自然科学基金重点项目《氧化性富金斑岩–矽卡岩矿床碲、硒富集机制——以长江中下游九瑞、鄂东南矿集区为例》(批准号: 92162217)

作者简介: 周小深 (1997–), 男, 硕士, 资源与环境专业。E-mail: ZX997youxiang@163.com

* 通信作者: 刘文元 (1982–), 男, 教授, 从事矿床矿物学研究。E-mail: 15146@163.com

the metallogenic regularity and dynamic background of the ore field are discussed in this paper. The results show that the typical ore deposit in Timok ore field was formed between 88 Ma and 78 Ma, and the mineralization lasted only about 10 Ma. The mineralization age in Timok ore field also shows a trend of becoming younger from east to west. The typical deposit types in the ore field are mainly porphyry deposits (such as Majdanpek deposit, Veliki Krivelj deposit and Valja Strz deposit) and high sulfidation epithermal-porphyry deposits (such as Bor deposit and Cukaru Peki deposit), which are mainly Cu-Au mineralization. The differences in deposit types, mineralization characteristics and burial depth of ore bodies are caused by thrusting nappe structure and uneven denudation after mineralization. At the same time, the mineralization types of typical deposits and the change trend of depth of ore bodies in the ore field indicate that there are still great prospecting potential in the north-northwest of the ore field, the southeast of the Cukaru Peki deposit.

Key words: Tethys metallogenic belt; Serbia; Timok ore field; epithermal copper-gold deposit; porphyry copper-gold deposit; geological characteristics of deposit

斑岩型矿床和浅成低温热液型矿床是时空上和成因上有密切联系的岩浆-热液型矿床, 这 2 类矿床是全球铜、钼、金的主要来源, 主要产于环太平洋成矿带、特提斯-喜马拉雅和古亚洲成矿带 (Sillitoe, 2010)。特提斯成矿带是全球三大成矿带之一, 广泛发育斑岩型矿床和浅成低温热液型矿床, 矿产资源丰富 (Sillitoe, 2010)。特提斯成矿带西部发育一条长约 1500 km 的晚白垩世钙碱性岩浆弧——ABTS (阿普塞尼-巴纳特-蒂莫克-斯雷德诺戈里斯基) 多金属成矿带 (Quadt et al., 2005; Baker, 2019)。该成矿带经过罗马尼亚、塞尔维亚、保加利亚等地, 与瓦尔达尔 (Vardar) 大洋板块俯冲作用密切相关, 成矿作用历时 20 Ma (Wortel et al., 2000; Zimmerman et al., 2008)。

ABTS 多金属成矿带发育一系列世界级的金属矿床, 它们主要分布在阿普塞尼铜铅锌矿集区、巴纳特铁铜铅锌矿集区、蒂莫克铜金矿集区和斯雷德诺戈里斯基铜金矿集区 (Ciobanu et al., 2002), 每个矿集区都具有丰富的矿产资源。例如, 保加利亚斯雷德诺戈里斯基铜金矿集区的埃拉奇特 (Elatsite) 斑岩型铜矿床 (铜金属量 1.1 Mt, 平均品位为 0.35%) (Strashimirov et al., 2002), 切洛佩奇 (Chelopech) 浅成低温热液型铜金矿床 (铜金属量 0.5 Mt; 平均品位为 1.20%, 金金属量 138 t, 平均品位为 3.25 g/t) (Strashimirov et al., 2002) 和罗马尼亚西南部巴纳特铁铜铅锌矿集区的奥克纳德菲尔 (Ocna de Fier) 矽卡岩型铁铜矿床 (铁金属量 4.5 Mt, 平均品位 30%, 铜金属量 75000 t, 平均品位 0.5%) (Cook et al., 2001), 这些矿床都是世界级的大矿。塞尔维亚蒂莫克铜金矿集区作为 ABTS 多金属成矿带中经济价值巨大的矿集区之一, 矿床类型多样、矿产资源丰富。例如马伊丹佩克 (Majdanpek) 斑岩型铜金矿床 (铜金属量

2.02 Mt, 平均品位为 0.32%, 金金属量 83 t, 平均品位为 0.16 g/t) (Jelenković et al., 2016), 丘卡卢佩吉 (Cukaru Peki) 斑岩型-浅成低温热液型铜金矿床 (上部带铜金属量 1.54 Mt, 平均品位为 2.45%, 金金属量 86 t, 平均品位为 1.37 g/t, 下部带铜金属量 14.28 Mt, 平均品位为 0.83%, 金金属量 295 t, 平均品位 0.17 g/t; 紫金矿业集团股份有限公司官网) 及新发现的兹拉蒂博尔 (Zlatno Brdo) 浅成低温热液型金矿床 (金金属量 16.70 t, 平均品位为 2.69 g/t) 等。Jelenkovic et al. (2016) 对塞尔维亚蒂莫克铜金矿集区的矿产资源特征、矿床地质背景进行了系统的总结, 但目前国内对该地区的文献资料缺乏, 因此加强对蒂莫克铜金矿集区的找矿勘查研究愈发重要。本文在前人研究的基础上, 对蒂莫克铜金矿集区典型矿床的矿床特征、成矿规律及成矿动力学背景进行综述, 为深化研究塞尔维亚蒂莫克铜金矿集区地质特征和找矿工作提供理论依据, 同时也有助于深入了解塞尔维亚蒂莫克铜金矿集区的成矿特征。

1 ABTS 多金属成矿带地质背景

阿普塞尼-巴纳特-蒂莫克-斯雷德诺戈里斯基多金属成矿带 (ABTS 成矿带) (Popov, 1987; Strashimirov et al., 2002) 位于特提斯成矿带西缘, 全长 1500 km、宽 30 ~ 70 km, 主要由阿普塞尼铜铅锌矿集区、巴纳特铁铜铅锌矿集区、蒂莫克铜金矿集区、斯雷德诺戈里斯基铜金矿集区 4 个矿集区组成 (Ciobanu et al., 2002)。ABTS 多金属成矿带经历了多期次构造活动, 特别是在新生代构造运动期间, 成矿带围绕默西亚 (Moesia) 地块弯曲, 形成了位移距离超过 100 km 的大规模走滑断层 (右旋构造) (Zimmerman et al., 2008; Knaak et al., 2016)。在空间上, 该构造活动导致了阿普塞尼铜铅锌和巴纳特铁铜铅锌矿集区

顺时针旋转了约 80°, 蒂莫克铜金矿集区顺时针旋转 30°, 形成现今的“L”形展布格局(图 1)(Ciobanu et al., 2002; Zimmerman et al., 2008)。

ABTS 多金属成矿带广泛发育晚白垩世岩浆岩, 其中最古老的岩浆岩是位于波丽纳-鲁斯卡(Poiana-Rusca)地区的辉长岩(年龄为 110 ± 5.5 Ma)(Cioflica, 1994), 而最年轻的岩浆岩侵位时间, 多数人认为发生在 65~60 Ma(Ciobanu et al., 2002; Handler et al., 2004)。ABTS 多金属成矿带上岩浆岩岩石类型变化较大, 从辉长岩(玄武岩)到花岗岩(流纹岩)均有出露(韩宁等, 2019), 以中性到高钾-钙碱性的岩浆和火山岩为主, 具有碱性至粗玄质过渡的趋势(Berza et al., 1998; Dupont et al., 2002)。ABTS 多金属成矿带岩浆岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数据表明, 各矿集区岩浆岩主要来

源于上地幔, 局部有地壳物质混染(Ciobanu et al., 2002)。

ABTS 多金属成矿带大约有 50 个矿床和找矿远景区(包括斑岩型铜金矿床、浅成低温热液-斑岩型铜金矿床、矽卡岩型铁锌铅矿床等), 在成矿时间和空间上与晚白垩世岩浆作用密切相关(Ciobanu et al., 2002)。该带岩浆活动与成矿作用由南向北呈现出逐渐年轻的趋势, 依次为斯雷德诺戈里斯基铜金矿集区(82~92 Ma)(Handler et al., 2004)、蒂莫克铜金矿集区(78~88 Ma)(Pačevski et al., 2016)、阿普塞尼-巴纳特铁铜铅锌矿集区(72~83 Ma)(Ciobanu et al., 2002), 这可能是瓦尔达尔大洋板块后撤所致(Zimmerman et al., 2008)。ABTS 多金属成矿带矿床同样具有明显的分带性, 阿普塞尼-巴纳特铁铜铅锌

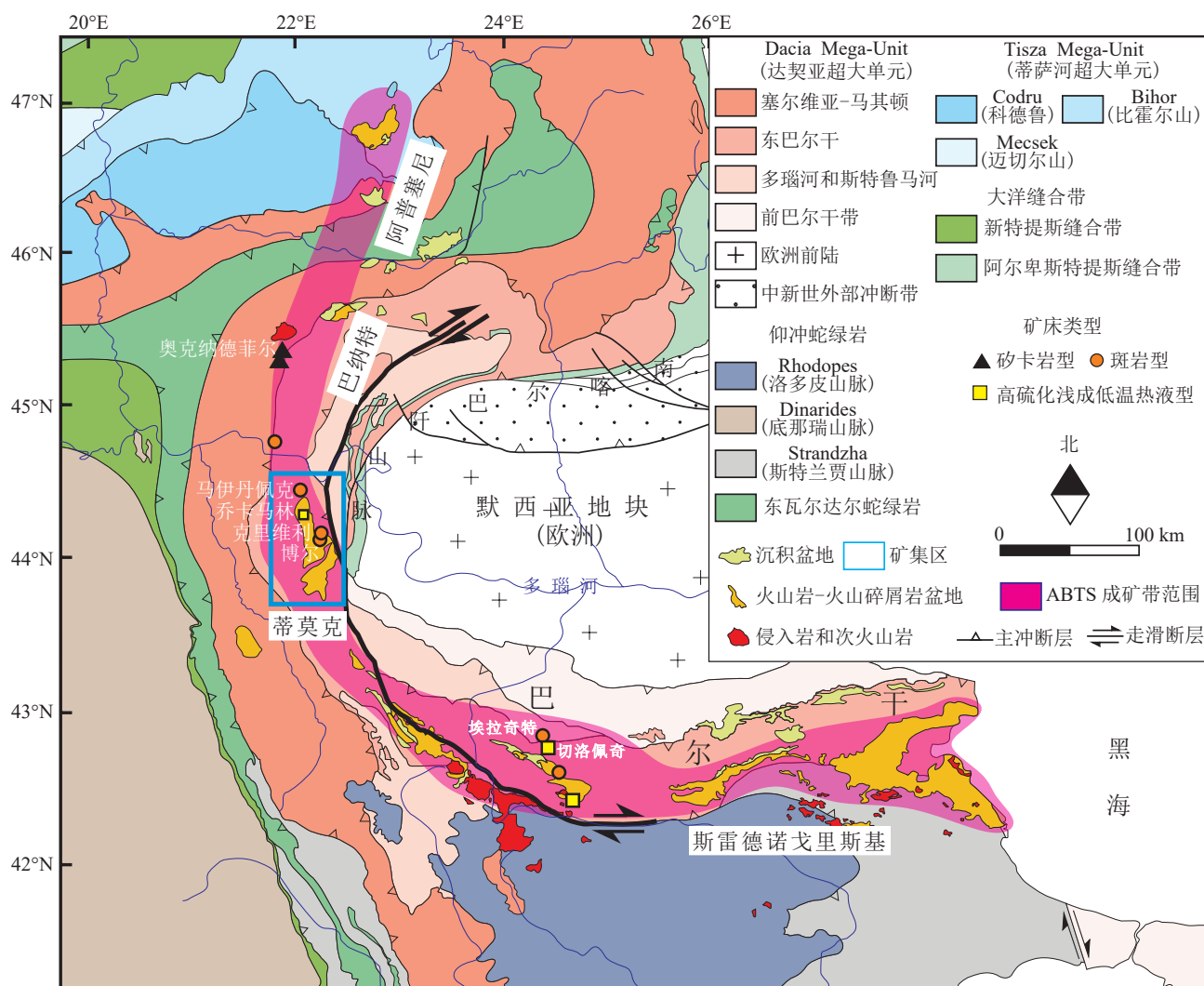


图 1 ABTS 多金属成矿带所在区域简要地质图(据 Gallhofer et al., 2015 修改)

Fig. 1 Brief geological and tectonic map of ABTS metallogenic belt

矿集区以矽卡岩型铜铁铅锌和斑岩型铜矿化为主, 蒂莫克铜金矿集区由北部的马伊丹佩克矿床(主体为斑岩型铜金矿化、少量矽卡岩型多金属矿化)(Jankovic et al., 1998) 过渡到克里韦利(Veliki Krivelj)斑岩型铜金化和博尔(Bor)高硫化浅成低温热液-斑岩型铜金矿化, 斯雷德诺戈里斯基矿集区为斑岩型和浅成低温热液型铜矿化(图 1)。另外, 阿普塞尼-巴纳特矿集区构造以逆冲推覆为主, 矿化集中在主要推覆体边界; 斯雷德诺戈里斯基铜金矿集区以伸展构造为主, 矿化呈南北向展布(图 1); 蒂莫克铜金矿集区位于二者之间的过渡地带, 早期可能以伸展构造为主, 后期经新生代的挤压构造活动形成逆冲推覆构造(图 1)(Kolb et al., 2013)。

2 蒂莫克铜金矿集区地质背景

蒂莫克铜金矿集区位于 ABTS 多金属成矿带中段(塞尔维亚的东部)、默西亚地块西缘(图 1)。蒂莫克铜金矿集区由 22 个金属矿床和 96 个矿点组成, 从塞尔维亚北部的马伊丹佩克镇一直延伸到南部的布杰(Bucje)村(Ciobanu et al., 2002)。矿集区的形成与一套长约 85 km、宽 25 km 的岩浆杂岩(包括火山岩、次火山岩、沉积岩及深-浅成侵入岩等)密切相关, 该套杂岩被称为蒂莫克岩浆杂岩(简称 TMC)(Schmid et al., 2008)。

蒂莫克铜金矿集区构造活动十分强烈, 在晚白垩世—渐新世期间, 经历了多期次复杂的构造挤压和拉张事件, 形成一系列北北西—北向的断裂系统(如 Bor-Brestovac-Tupiznica 断裂)及矿集区东缘的中新世右旋走滑断层, 即切尔纳(Cerna)断层和蒂莫克断层(图 2-b)(Knaak et al., 2016)。对于蒂莫克铜金矿集区的构造背景, 前人提出了若干不同的观点: 有学者认为形成于大型裂谷带中, 该裂谷带由晚古生代基底和巴尔干-喀尔巴阡山脉中生代盖层组成(Popov, 1987; Jankovic, 1990); 也有学者认为可能是晚白垩世俯冲期间形成的拉分盆地或弧后盆地(Banješević et al., 2014); 还有学者(Lips et al., 2004; Zimmerman et al., 2008)根据矿集区矿床的年龄变化趋势, 提出了板块俯冲—后撤的动力学模型, 并进一步认为形成于伸展或张扭体系。TMC 呈现的菱形几何体形状及矿集区内发育切割杂岩的平行断裂, 都进一步解释了晚白垩世大规模的右旋转换和拉分盆地的打开控制着矿集区的形成(Drew, 2006;

Gallhofer et al., 2015)。近期, Krstekanić et al. (2021) 通过实验模拟发现, ABTS 多金属成矿带在蒂莫克铜金矿集区的斜向弯曲不仅形成了切尔纳走滑断层和蒂莫克走滑断层, 还导致一系列褶皱和冲断带的形成。Krstekanić et al.(2021) 发现, 矿集区南部的断层右旋偏移量低于北部的断层, 是因为南部断层的一部分偏移量转换成了逆冲推覆量, 从而形成一系列逆冲推覆构造。

蒂莫克铜金矿集区出露地层相对简单, 主要由 TMC 基底、勒诺瓦克(Lenovac)碎屑岩、奥斯特勒(Ostrelj)沉积岩、梅托夫尼卡(Metovnica)碎屑岩、奥斯尼奇(Osnić)玄武质安山岩-耶泽维卡(Jezevica)安山岩、博尔(Bor)碎屑岩和弗尔瓦克(Vrbovac)礁灰岩组成(图 2-a)(Banješević, 2010)。基底是晚古生代或早古生代变质杂岩的一部分, 由片岩、片麻岩等一系列不均匀的中—高级变质岩构成, 晚侏罗世—早白垩世碳酸盐岩序列不整合覆盖在基底之上, 它们共同构成了 TMC 基底(Knaak et al., 2016)。勒诺瓦克碎屑岩又称为 S1 单元(非正式地层单元)(Van et al., 2013), 主要由硅质碎屑岩组成, 在阿尔布期海侵作用中形成。勒诺瓦克碎屑岩的形成代表蒂莫克铜金矿集区在经历了早侏罗世以来连续的碳酸盐岩沉积后, 发生了新一轮沉积旋回, 即阿尔布期—塞诺曼期沉积旋回(Banješević, 2010)。新的沉积旋回之后, 蒂莫克铜金矿集区的沉积演化有了较大差异, 主要可细分为东、西两部分(图 2-a)。梅托夫尼卡碎屑岩(主要由安山质火山碎屑岩组成)出露于蒂莫克铜金矿集区的东部, 覆盖在勒诺瓦克碎屑岩之上, 由不同结构和构造的火山碎屑岩构成, 常与沉积物交错分布, 局部地层中可发现康尼亚克期—坎潘期的古微生物群(Dordević, 2005)。同时, 矿集区的早期岩浆活动开始(早土仑期)(Banješević et al., 2019), 一系列安山质火山岩喷出与梅托夫尼卡碎屑岩呈现互层产状, 而次火山岩和深成岩体则侵入到上述岩层之中。反观矿集区西部, 奥斯特勒沉积岩(以凝灰岩、砂岩和砾岩为主)较早形成, 覆盖在勒诺瓦克碎屑岩之上(Knaak et al., 2016)。随后蒂莫克铜金矿集区西部的火山作用开始, 矿集区中—西部出露大量辉石-角闪石安山岩和玄武质安山岩, 它们成为矿集区特殊的地层(奥斯尼奇玄武质安山岩和耶泽维卡安山岩)(Banješević, 2010)。博尔碎屑岩、弗尔瓦克礁灰岩及第四纪沉积物覆盖在上述地层之上。

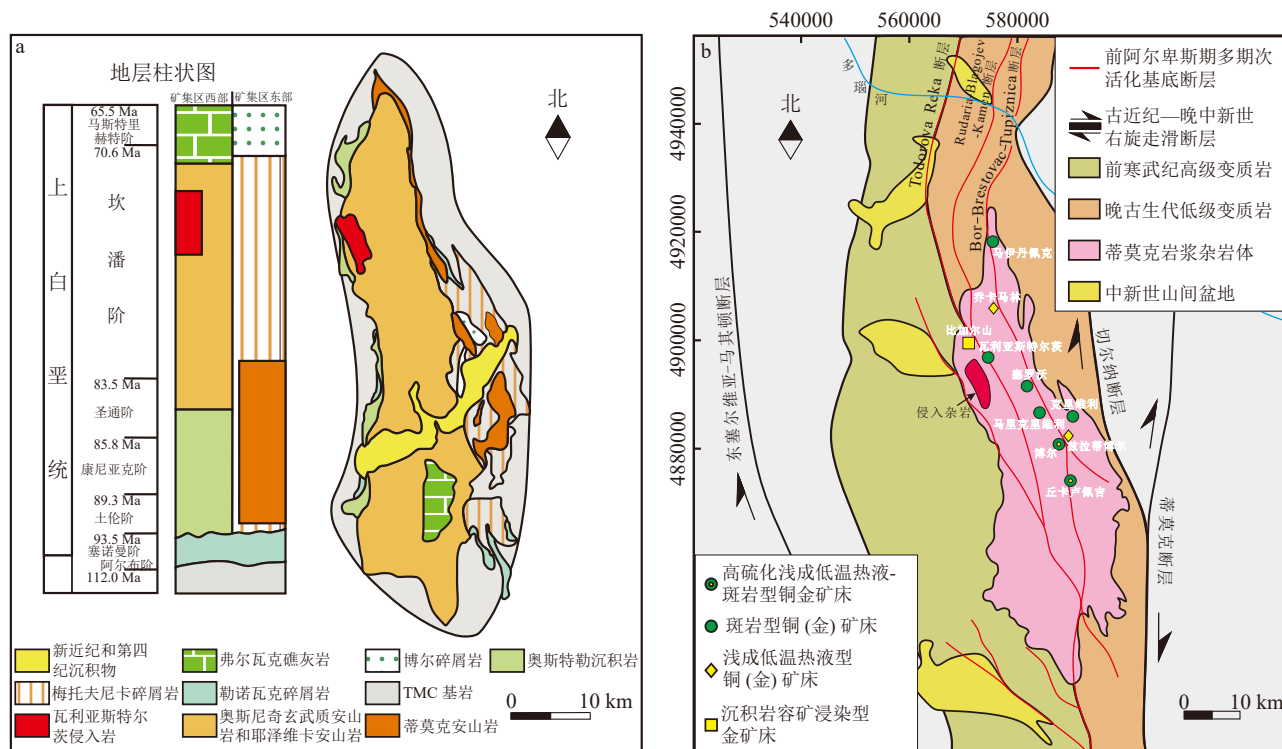


图2 蒂莫克铜金矿集区简要地质图(a, 据 Jelenković et al., 2016 修改)和构造图(b, 据 Knaak et al., 2016 修改)

Fig. 2 Brief geological map of Timok ore field and simplified tectonic map of Timok ore field

蒂莫克铜金矿集区的岩浆岩由一系列安山质火山岩、次火山岩和深-浅成侵入岩(二长岩和闪长岩等)组成,可进一步划分为东部岩浆岩带和西部岩浆岩带。东部岩浆岩主要分布在矿集区东部,以斑晶为斜长石-角闪石±黑云母的安山质火山岩、次火山岩为代表,前人称其为“蒂莫克安山岩”(形成年龄为 89 ~ 83 Ma)(Clark et al., 2004; Zimmerman et al., 2008; Banješević, 2010)。“蒂莫克安山岩”是矿集区第一阶段岩浆活动的产物,其与矿集区内主要的斑岩成矿作用密切相关。研究表明,“蒂莫克安山岩”具有埃达克岩的地球化学特征,表现出高 Sr/Y 值和低 Y、HREE 含量特征(Kolb et al., 2013)。Banješević et al.(2019)将矿集区东部与成矿密切相关的岩体进一步分为两相(安山岩-I 和安山岩-II):安山岩-I 的斑晶以斜长石为主、角闪石次之(年龄为 90 ~ 89 Ma);安山岩-II 的斑晶以角闪石为主、斜长石次之(年龄为 86 ~ 85 Ma)。研究表明,安山岩-I 与矿集区东部矿床(如马伊丹佩克、克里韦利和博尔矿床)的形成密切相关(Banješević et al., 2019)。西部岩浆岩主要分布在蒂莫克铜金矿集区的中—西部,主体为辉石-角闪安山岩、玄武质安山岩(形成年龄 83 ~ 80 Ma)(Banješević et al., 2010)。在蒂莫克铜金

矿集区的西北部,出现了少量的深—浅成侵入岩,其中以瓦利亚斯特尔茨(Valja Strz)侵入杂岩体(由二长岩、闪长岩、正长岩等组成)为代表(Banješević, 2010)。瓦利亚斯特尔茨杂岩体侵入的时间在 82 ~ 78 Ma 之间(Knaak et al., 2016)。因此,矿集区第二阶段的岩浆活动时间可能在 82 ~ 78 Ma 之间。此外,有学者认为(Quadt et al., 2007),瓦利亚斯特尔茨深成杂岩体的侵入可能代表了蒂莫克铜金矿集区的第三阶段岩浆活动,但也有学者认为(Zimmerman et al., 2008),蒂莫克矿集区最西端出现的浅成岩体(以安粗岩为主)代表着第三阶段的岩浆活动,只是其与矿化并不相关。总之,蒂莫克铜金矿集区岩浆活动呈现出自东向西逐渐年轻的趋势。

蒂莫克铜金矿集区的矿床主要分布在东部、北部和西北部,与晚白垩世大规模的岩浆活动有关(Jelenković et al., 2016)。蒂莫克铜金矿集区典型矿床类型(表 1)包括斑岩型铜金矿床(如马伊丹佩克矿床、克利韦利矿床和瓦利亚斯特尔茨矿床)、浅成低温热液型铜金矿床(兹拉蒂博尔矿床)(林明钟, 2021)、高硫化浅成低温热液-斑岩型铜金矿床(如博尔矿床和丘卡卢佩吉矿床)、沉积岩容矿浸染型金矿床(如比加尔山(Bigar Hill)矿床)及一些小型矿床(如

表 1 蒂莫克铜金矿集区典型矿床统计表

Table 1 Statistical table of typical ore deposits in Timok ore field

矿床名称	矿床类型	金属量(品位)	成矿元素	赋矿围岩	蚀变类型	主要金属矿物	成岩-成矿时代/Ma	参考文献
丘卡卢佩吉	高硫化浅成	Cu 1.54 Mt(2.45 %)+	Cu, Au	安山岩	钾化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、高级泥化	黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、辉钼矿、黝铜矿、铜蓝、辉铜矿、硫砷铜矿、金红石	白云母Ar-Ar年龄86.3 ± 1~86.9 ± 1.1; 辉钼矿Re-Os年龄88±0.4	Banješević et al., 2014 Jelenković et al., 2016; Banješević et al., 2019; 紫金Timok项目组, 2019
	低温热液-斑岩型	Au 86 t(1.37 g/t)+ 295 t(0.17 g/t)						
博尔	高硫化浅成	Cu 0.15 Mt(0.80 %)+	Cu, Au	安山岩	钾化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、高级泥化	黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、辉钼矿、铜蓝、硫砷铜矿、金红石	白云母Ar-Ar年龄86.3 ± 1~86.9 ± 1.1; 辉钼矿Re-Os年龄85.94 ± 0.4~86.24 ± 0.5	Lips et al., 2004; Zimmerman et al., 2008; Jelenković et al., 2016; Klimentyeva et al., 2021
	低温热液-斑岩型	3.17 Mt(0.57 %); Au 3.60 t(0.20 g/t)+ 111.40 t(0.20 g/t)						
马伊丹佩克	斑岩型	Cu 0.68 Mt(0.30 %)+	Cu, Au	安山岩、石灰岩、片麻岩	钾化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、砂卡岩化	黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、辉钼矿、磁黄铁矿、赤铁矿、闪锌矿、方铅矿、铜蓝、硫砷铜矿、斑铜矿、褐铁矿	锆石U-Pb年龄82.73 ± 0.03; 辉钼矿Re-Os年龄83.37 ± 0.4~83.77 ± 0.5	Zimmerman et al., 2008; Vaskovic et al., 2010; Pačevski et al., 2016
		1.34 Mt(0.33 %); Au 58.39 t(0.26 g/t)+ 24.55 t(0.06 g/t)						
克里韦利	斑岩型	Cu 1.86 Mt(0.37 %);	Cu, Au	安山岩、石英闪长斑岩	钾化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、泥化	黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、自然铜、孔雀石	锆石U-Pb年龄86.17 ± 0.15~86.29 ± 0.32; 辉钼矿Re-Os年龄87.88 ± 0.5	Zimmerman et al., 2008; Vaskovic et al., 2010; Antonijević et al., 2014; Pačevski et al., 2016
		Au 35.45 t(0.07 g/t)						
瓦利亚斯特尔茨	斑岩型	Cu 0.28 Mt(0.26 %);	Cu, Au	安山岩、安山质火山碎屑岩	钾化、青磐岩化	黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、斑铜矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿	锆石U-Pb年龄82.5 ± 0.6, 78.62 ± 0.44	Knaak et al., 2016; Pačevski et al., 2016
		Au 20.56 t(0.19 g/t)						
兹拉蒂博尔	浅成低温热液型	Au 16.70 t(2.69 g/t);	Au, Ag	安山岩	硅化、重晶石化、黄铁绢英岩化、绿泥石化	黄铁矿、自然金、银金矿、毒砂、白铁矿、黝铜矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、金红石		林明钟, 2021 游富华等, 2020
		Ag 47 t(7.54 g/t)						
比加尔斯山	沉积岩容矿浸染型	Au 28.35 t(1.19 g/t)	Au	硅质碎屑岩、火山碎屑岩、灰岩	去碳酸盐化、硅化、泥化	黄铁矿、自然金	伊利石K-Ar年龄79 ± 2.78	Knaak et al., 2016; Zivanovic, 2019

马里克里韦利(Mali Krivelj)斑岩型铜矿床、乔卡马林(Coka Marin)浅成低温热液型铜矿床和塞罗沃(Cerovo)斑岩型铜矿床)、热液脉型铅锌矿床和矽卡岩型矿床等(Jelenković et al., 2016)。

3 典型矿床地质特征

3.1 马伊丹佩克(Majdanpek)矿床

马伊丹佩克斑岩型铜金矿床位于蒂莫克铜金矿集区最北端,波尔州往北约80 km。因矿床包含多种矿体类型(斑岩型铜矿体、状硫化物矿体、矽卡岩型矿体和一些热液脉型矿体等),富含丰富的铜金资源而闻名(Jankovic, 1990),早期以开采褐铁矿和黄铁矿为主。马伊丹佩克矿床形态上比较“狭长”,长约5 km,宽仅为300 m,由南部矿区和北部矿区组成(图3)(Starostin, 1970)。北矿区铜金属量为 68.4×10^4 t (Cu 平均品位0.3%),南矿区铜金属量为 134×10^4 t (Cu 平均品位0.33%)(Jelenković et al., 2016)。

矿区内出露的地层与矿集区变质基底和碳酸盐岩地层岩性一致,主要有元古宙、古生界、侏罗系、白垩系和新生界(Starostin, 1970)。基底由元古宙以

来的变质岩组成,地层主要由古生界角闪石-黑云母片麻岩(图3-d)、千枚岩、石英-绢云母和石英-绿泥石片岩、花岗质片麻岩等组成。角闪石-黑云母片麻岩和片岩主要在矿区东部发育,千枚岩、石英-绢云母和石英-绿泥石片岩在矿区西部发育。上侏罗统和下白垩统以一套提塘阶-瓦兰今阶碳酸盐岩地层为代表(图3-e),主要发育于矿区的中部。森诺统沉积岩(主要由砾岩,砂岩和泥灰岩组成)不整合覆盖在碳酸盐岩之上(Starostin, 1970)。上述所有地层都被钙碱性火山岩、次火山岩所侵入(Vaskovic et al., 2010)。矿区内发育少量的石英闪长斑岩脉,可能代表更大的深成岩体的存在(Jelenković et al., 2016)。矿区西部的古生界片麻岩位错较大,呈南东倾向。矿区矿化与南北走向的安山质岩脉(包括安山岩和安山质次火山岩)和南北向的断层密切相关。安山质岩脉穿切元古宙、古生代变质岩(片麻岩和千枚岩)和侏罗纪灰岩地层,分别形成了斑岩型矿化、矽卡岩型矿化等(Starostin, 1970; Vaskovic et al., 2010)。

北矿区矿体主要由Tenka多金属矿体、Dolovi-1斑岩型矿体、Central网脉-浸染状矿体、Dolovi-2块

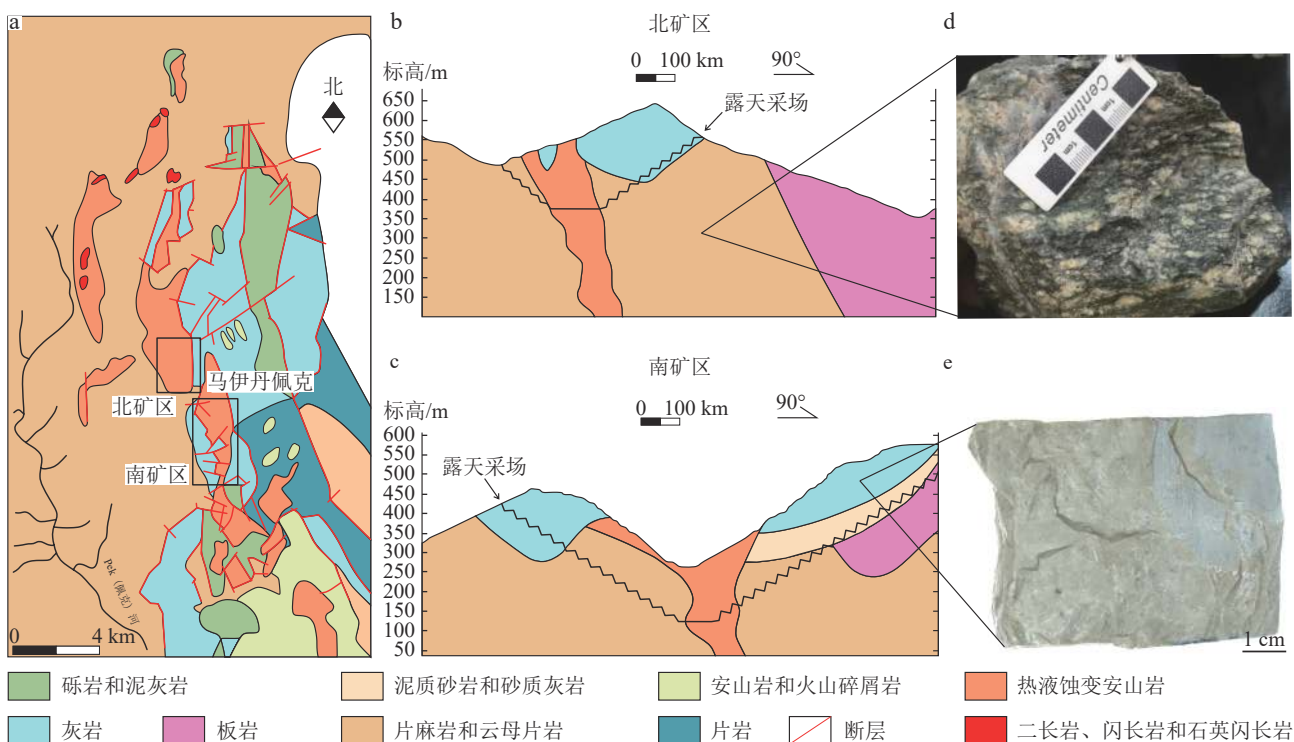


图3 马伊丹佩克矿床地质简图和典型照片

Fig. 3 Simplified geological map and photographs of the Majdanpek deposit

a—平面地质图(据 Vaskovic et al., 2010 修改); b,c—北、南矿区地质剖面图; d—矿区变质基底片麻岩; e—侏罗系灰岩

状硫化物矿体、Stari Dusan 黄铁矿矿体和 Blansard 褐铁矿组成。矿体整体呈北北西走向。Tenka 多金属矿体位于北矿区最北端, 主要赋存于构造角砾岩和热液蚀变安山岩中。矿石构造主要为块状构造, 其次为网脉-浸染状构造。金属矿物主要为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、硫砷铜矿和斑铜矿, 少量白铁矿、磁黄铁矿、蓝辉铜矿、黝铜矿、自然金、辉铋铜铅矿等 (Vaskovic et al., 2010)。Dolovi-1 斑岩型矿体位于北矿区西部, 赋存于热液蚀变安山岩和片麻岩中。矿石构造主要为脉状和浸染状。矿物组合主要为黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿和硅酸盐矿物等 (黄腾骁等, 2019)。Central 矿体位于北矿区中部, 是北矿区的主矿体。矿体呈椭圆形, 主要为铜矿化, 赋存于片麻岩、安山岩和石英闪长斑岩中。矿石构造主要为脉状和网脉状。矿物组合主要为黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、斑铜矿、黑云母、绢云母、钾长石、绿泥石、绿帘石等。Dolovi-2 矿体位于 Dolovi-1 矿体的东南方向, 主要为富铜的黄铁矿体, 赋存于片麻岩、石灰岩和安山岩中。石灰岩与安山质岩脉接触带一侧发现块状 Stari Dusan 黄铁矿矿体和矽卡岩型铁矿体。Blansard 矿体位于北矿区东部地表, 因其铜含量较高而被开采。

南矿区矿体主要由斑岩型矿体(主矿体)和矽卡岩型 Coka Muskal 矿体组成。斑岩型矿体位于南矿区中部狭窄长带中, 呈漏斗状, 形态狭长, 主要为铜金矿化, 赋存于蚀变安山岩和片麻岩中, 与安山质岩浆多期次的侵入作用有密切的联系 (Vaskovic et al., 2010)。矿石构造以脉状和网脉状构造为主。金属矿物主要为黄铜矿、磁铁矿, 其次为辉钼矿、磁黄铁矿、赤铁矿等; 非金属矿物由石英、绢云母、钾长石、高岭石、绿泥石、黑云母、角闪石等组成。岩石主要发生钾化、(黄铁)绢英岩化、高岭石化、绿泥石化等, 铜矿化与钾化、(黄铁)绢英岩化密切相关 (黄腾骁等, 2019)。Coka Muskal 矿体位于南矿区狭窄的长带南端, 呈不规则状, 主要为矽卡岩型多金属矿化, 赋存于安山质岩脉与石灰岩的接触带中 (Vaskovic et al., 2010)。金属矿物由黄铜矿、铜蓝、磁铁矿、闪锌矿、方铅矿等组成; 非金属矿物主要有黄铁矿、石英、绢云母、方解石、高岭石等。另外, 在 Coka Muskal 矿体的南部还发育一个含铜金银黄铁矿体(称为 Knez-Lazar) (Vaskovic et al., 2010), 呈不规则透镜状, 赋存于热液蚀变角闪石-黑云母安山

岩与构造大理岩接触带中。马伊丹佩克矿床整体的成矿作用可分为 7 个阶段: ①石榴子石-磁铁矿阶段, ②石英-辉钼矿阶段, ③石英-黄铁矿阶段, ④石英-黄铜矿阶段, 该阶段形成了矿床的主要矿体, ⑤石英-闪锌矿阶段, ⑥石英阶段, ⑦辉铜矿-铜蓝阶段, 该阶段主要由斑铜矿和原生铜次生富集而成。

3.2 克里韦利 (Veliki Krivelj) 矿床

克里韦利斑岩型铜金矿床位于蒂莫克铜金矿集区东部, 波尔洲以北 3 km。与博尔矿床十分接近, 位于其北东方向。早在 1965 年人们开始对克里韦利矿床进行勘探 (Antonijević et al., 2014), 矿床铜金属量可达 186×10^4 t (Cu 平均品位为 0.36%) (Jelenković et al., 2016), 是蒂莫克铜金矿集区的典型斑岩型矿床之一。

矿区出露一套晚白垩世沉积物和火山-沉积系列地层, 岩性包括砂岩、粉砂岩、灰岩、安山岩、安山质火山碎屑岩等 (Vaskovic et al., 2010; Antonijević et al., 2014)。矿区东部发育一套阿尔布—赛诺曼期形成的地层 (Krivelj 地层) (Antonijević et al., 2014), 由海绿石铁质沉积物、砾岩和含化石泥质沉积岩组成, 与勒诺瓦克地层相对应。Krivelj 地层位于矿区深部, 被一些石英闪长岩侵入接触后形成矽卡岩。矿区内主要发育 Krivelj 断裂及其次级断裂等 (图 4-a)。矿区内除发育安山岩、安山质次火山岩 (图 4-d) 外, 还发育闪长岩和石英闪长斑岩, 是矿集区出露小型岩体较多的矿区。矿区内主要矿化与 Krivelj 断裂和安山质次火山岩脉密切相关, 但目前未证实主要矿化与石英闪长斑岩脉有直接关系 (Jelenković et al., 2016)。

矿体在平面上为呈北西走向的椭圆形, 横截面上几乎呈等轴形状倾向西南 (图 4-b), 主要为斑岩型铜矿化, 赋存于热液蚀变安山岩和部分闪长岩、石英闪长斑岩脉中 (Vaskovic et al., 2010)。矿石构造以典型斑岩型构造-网脉状构造为主 (图 4-c)。金属矿物主要为黄铜矿、磁黄铁矿, 其次为磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、闪锌矿和方铅矿, 少量为辉钼矿、白铁矿和硫砷铜矿等; 非金属矿物主要为石英、黄铁矿, 其次为重晶石、长石、绢云母和绿泥石, 少量为方解石和萤石等。在浅部还发育一些氧化带 (30 ~ 50 m), 含有孔雀石、蓝铜矿、黑铜矿、赤铜矿和自然铜 (Vaskovic et al., 2010)。矿区围岩蚀变具有一定的分带性, 自矿化中心到边部发育钾化蚀变(主要为黑云

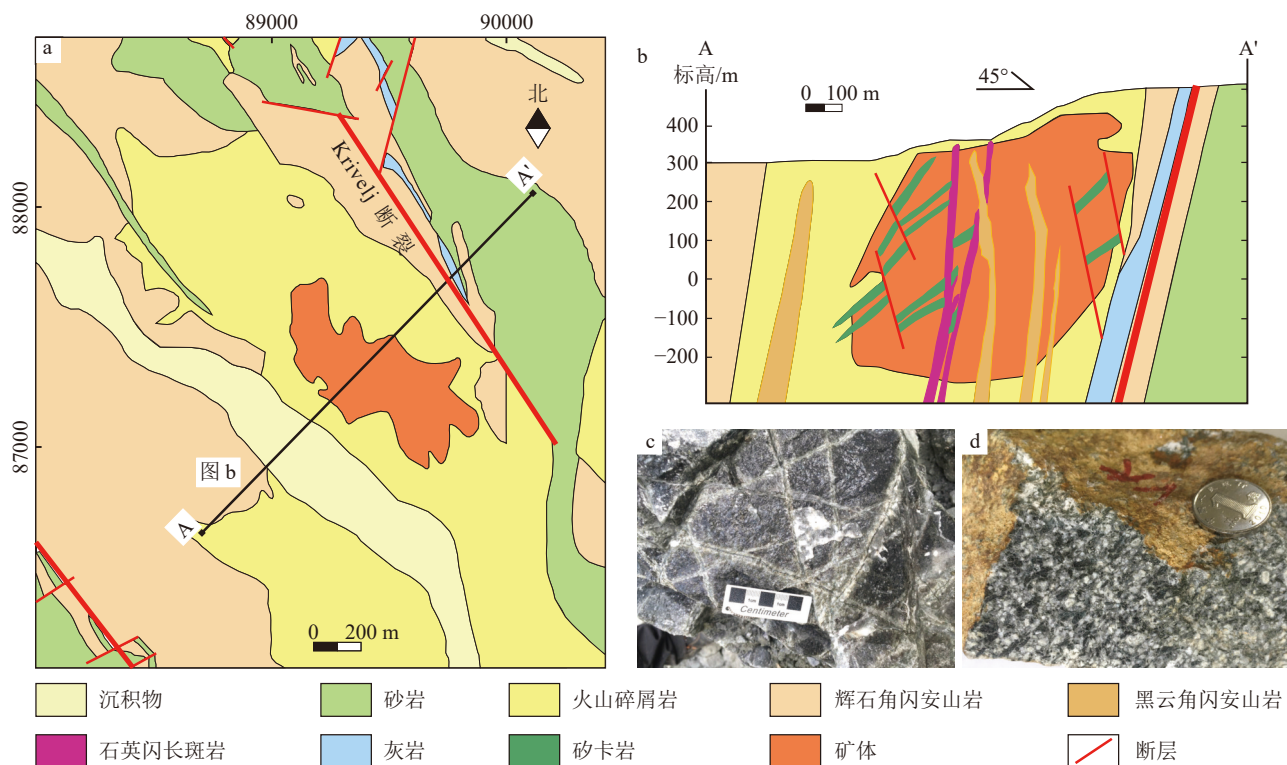


图4 克里韦利矿床地质简图及典型照片

Fig. 4 Simplified geological maps and representative photographs of the Veliki Krivelj deposit

a—平面地质图; b—地质剖面图(闫宝文等, 2019); c—网脉状构造黄铜黄铁矿石; d—角闪安山岩

母和石英, 叠加一些绢云母)→绢云母化蚀变(主要为绢云母和石英, 叠加一些粘土矿物)→少量青磐岩化蚀变(主要为绿泥石、方解石和少量绿帘石), 顶部还发育一些高级泥化蚀变(主要为明矾石和叶腊石), 此外还有后期形成的沸石、硬石膏脉叠加在早期的蚀变之上 (Vaskovic et al., 2010; Jelenković et al., 2016)。

3.3 博尔 (Bor) 矿床

博尔矿床位于蒂莫克铜金矿集区东部的波尔州, 矿区长约 5 km、宽 1.2 km, 整体呈北西—南东向延伸, 该矿床在 19 世纪末就被发现并开发 (Starostin, 1970), 是矿集区中开采历史最悠久的矿床之一。博尔矿床是典型的高硫化浅成低温热液-斑岩型铜金矿床, 早期露天采矿场(主体为 Tilva-Ros 高硫化型铜金矿体)铜金属量 14.6×10^4 t (Cu 平均品位 0.8%)、金金属量 3.6 t (Au 平均品位 0.2 g/t), 下部为 Borska-reka 斑岩型矿体(现被单独称为 JM 矿床), 铜金属量 317×10^4 t (Cu 平均品位 0.57%)、金金属量 111.4 t (Au 平均品位 0.2 g/t) (Jelenković et al., 2016)。

矿区地表出露一套坎潘阶火山-沉积岩组合(凝

灰岩和泥质岩), 它们与安山质火山碎屑岩呈互层产状分布, 并覆盖在白垩系塞诺曼阶勒诺瓦克碎屑岩层之上 (Antonijević et al., 2014)。矿区构造以线性构造为主, 其中主要发育博尔断裂及其次级断裂构造 (图 5-a)。矿区还发育一套白垩系马斯特里赫特阶砾岩地层单元, 被称为博尔砾岩 (Antonijević et al., 2014) (图 6-a), 该砾岩可能是在白垩系森诺统海退期间形成的, 是一套复成分砾岩(主要由变质岩、碳酸盐岩、安山岩等组成)。博尔砾岩受博尔断裂控制, 部分砾岩单元中发现白垩系马斯特里赫特阶有孔虫动物群 (Antonijević et al., 2014)。矿区深部还发育石英闪长斑岩, 呈岩株分布于矿区深部, 但目前无证据表明其为成矿斑岩。

博尔矿床矿产资源丰富, 由于后期的构造运动, 较大的矿体被肢解, 而较小的矿体推覆于博尔砾岩之上, 导致早期在矿区范围发现了 30 个矿体 (Koželj, 2002; Vaskovic et al., 2010)。主要矿体以高品位 Tilva-Ros 高硫化型矿体和 Borska-reka 斑岩型矿体为主, 还有一些小型块状硫化物矿体包括 A、B、C、D、E、F、G 矿体和 Brezanik 高硫化矿脉等, 它们位

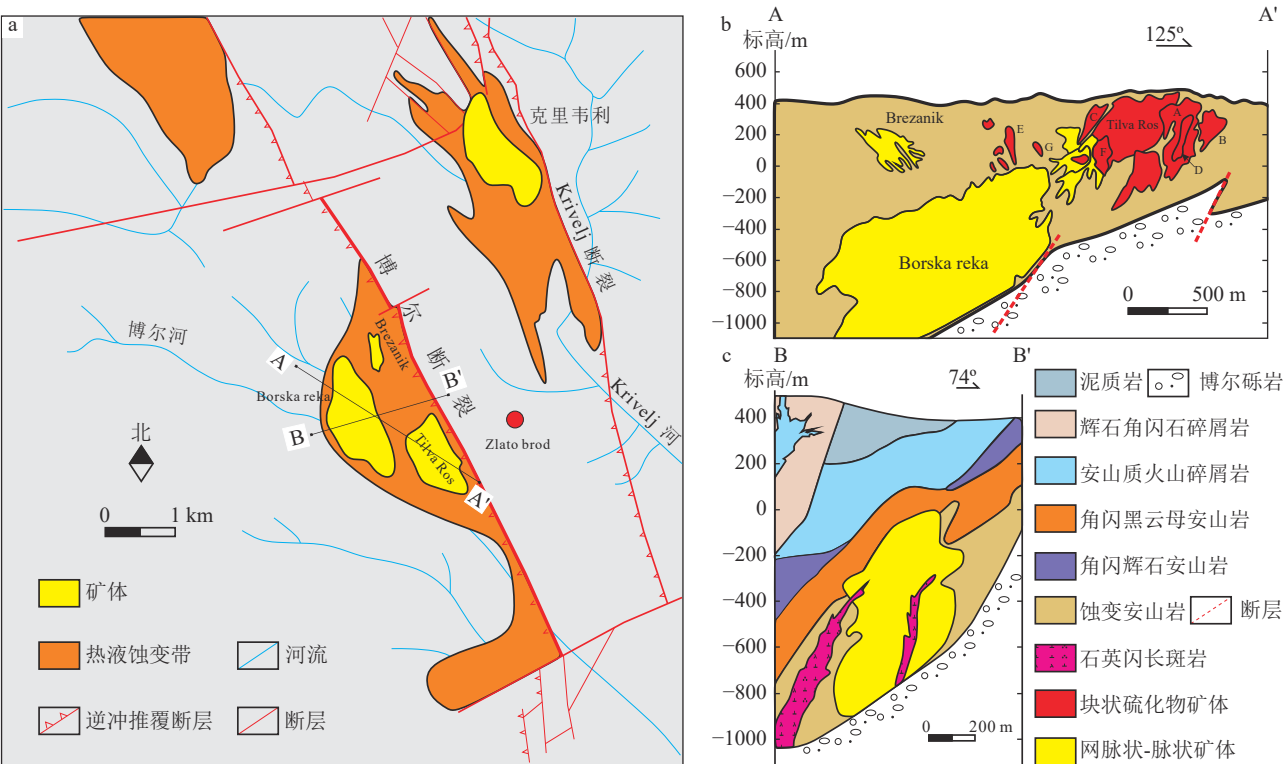


图 5 博尔矿区简要构造要素图(a, 据 Antonijević et al., 2014 修改)和 AA'(b)和 BB'(c)地质剖面图 (据 Jelenković et al., 2016 修改)
Fig. 5 Simplified tectonic map of Bor mining area (a) and AA' (b) and BB' (c) geological sections of Bor deposit

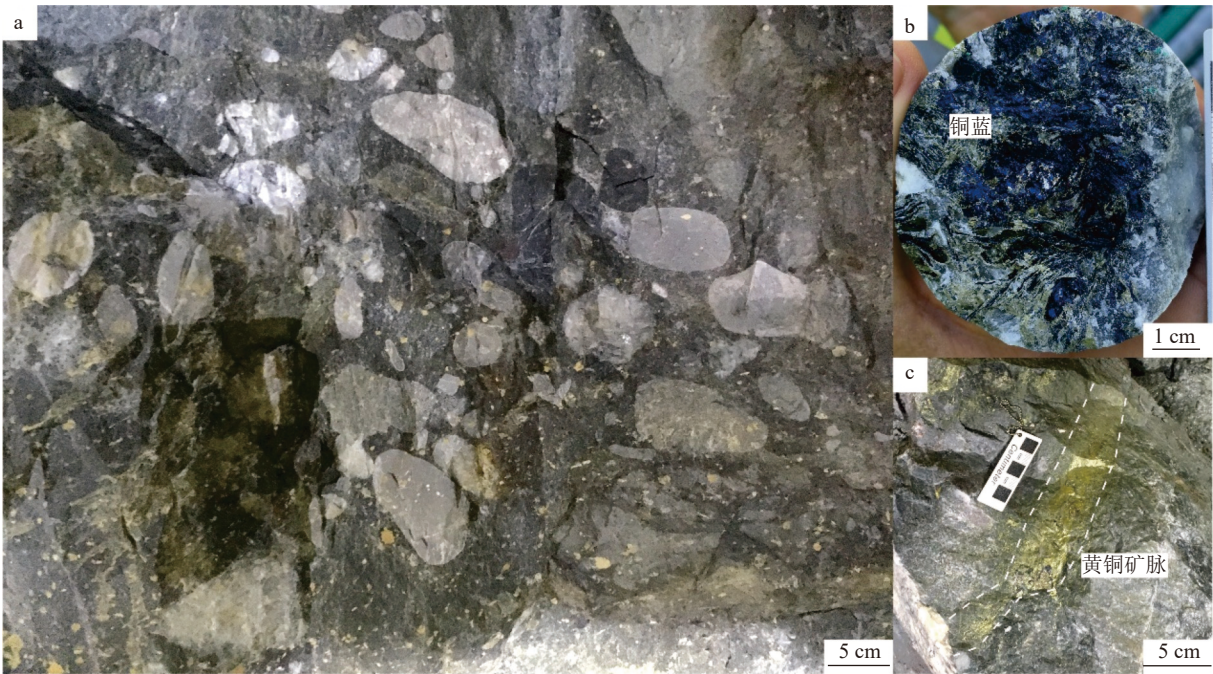


图 6 博尔矿床典型照片
Fig. 6 Representative photographs of Bor deposit
a—Bor 砾岩; b—铜蓝矿石; c—脉状铜矿石
于矿床的上边缘和东南边缘(图 5-b)(Jelenković et al., 2016)。Tilva-Ros 矿体是矿床中最大的高硫化型矿体, 位于斑岩矿体东南向。矿石构造由浅到深逐渐从块状-浸染状构造过渡到网脉状构造。金属矿物

主要为铜蓝和黄铁矿(图 6-b),其次为硫砷铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿等;非金属矿物主要为石英,其次为明矾石、高岭石、叶腊石、水铝石等。Borska-reka 矿体位于矿区西北部,呈北西—南东走向,向西南倾 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。矿石构造以网脉状和脉状为主(图 6-c)。金属矿物主要为黄铜矿和黄铁矿,其次为磁铁矿、赤铁矿、辉铜矿、黝铜矿、金红石和斑铜矿,少量闪锌矿和方铅矿;非金属矿物主要为石英和绢云母,其次为金红石、绿泥石、方解石、硬石膏和粘土矿物等。

Klimentyeva et al.(2021) 基于博尔矿床矿脉切割关系、蚀变叠加特征及微观证据,将该矿床蚀变依次分为绿泥石-绢云母化带→石英-绢云母化带→硬石膏-高岭石化带→块状硫化物带,表明博尔矿床由早期斑岩成矿逐渐过渡到晚期硫化物成矿阶段,是典型的高硫化浅成低温热液-斑岩型铜金矿床。此外,随着笔者对该矿床研究的深入,目前在矿区的北西向深部发现青磐岩化蚀变带特征,但还未在矿区中发现钾化蚀变带的特征,深边部仍具有较大的找矿潜力。

3.4 丘卡卢佩吉 (Cukaru Peki) 矿床

丘卡卢佩吉矿床位于蒂莫克铜金矿集区东缘(图 3-b),博尔矿业镇以南 5 km 处。该矿床是 Rakita 勘探公司于 2012 年新发现的一个铜金矿床,矿床类型为高硫化浅成低温热液-斑岩型(Banješević et al., 2014)。近年来随着紫金矿业集团股份有限公司的收购与勘探,丘卡卢佩吉矿床的资源储量日益增长。截至 2021 年 12 月,矿床资源量上部带铜金属量为 154×10^4 t(Cu 平均品位 2.45%)、金金属量 86 t(Au 平均品位 1.37 g/t,下部带铜金属量 1428×10^4 t(Cu 平均品位 0.83%)、金金属量 295 t(Au 平均品位 0.17 g/t),表明该矿床是一个世界级的铜金矿床。

Rakita 勘探公司将早期蚀变强烈的安山岩和火山碎屑岩命名为下部安山岩,将覆盖在下部安山岩之上未发生强烈蚀变的安山岩称为上部安山岩(Banješević et al., 2019),中新世砾岩、砂岩和泥岩不整合覆盖在火山-沉积序列之上。区内发育断裂构造有北西向、北东向及东西向,以北西向断裂为主。北西向断裂为区域性断裂,该组构造具长期活动特点,控制了区内火山岩的分布,博尔断裂带也是区内最发育的一组断裂。矿体分为上部矿带(包括 UZ-1、UZ-2)高硫化铜金矿体和下部矿带(LZ-1)斑岩型铜

金矿体(饶东平, 2021)。上部带高硫化矿体走向北西,倾向南西,倾角较陡(80°),呈不规则的椭球状形态赋存在下部安山岩中(图 7-b, c; 2019 年塞尔维亚生产勘探设计)。矿石呈块状和浸染状构造。金属矿物主要为铜蓝和黄铁矿,少量硫砷铜矿、微量金矿等;非金属矿物主要为明矾石,少量地开石、高岭石、重晶石等。金主要赋存在铜蓝矿石中,与铜蓝和黄铁矿交生。下部带斑岩型矿体走向南东,倾向西,倾角较缓(30°),呈不规则椭球状形态赋存于下部安山岩中(图 7-b, c)。矿石呈细脉状、脉状构造。金属矿物主要为黄铜矿和黄铁矿,其次为磁铁矿、斑铜矿,少量辉钼矿、黝铜矿和微量银金矿;非金属矿物主要为石英,其次为斜长石、金红石、绢云母、硬石膏和方解石,少量绿泥石、重晶石等。金赋存在黄铜矿矿石中,与黄铜矿紧密交生出现在黄铁矿裂隙中。

丘卡卢佩吉矿床的矿化类型具有明显的分带特征,整体可划分为 3 个矿化带(Jelenković et al., 2016; Velojić et al., 2020): ①高硫化矿化带,在地表以下 400 ~ 1000 m 范围内,主要硫化物矿物为铜蓝、黄铁矿和硫砷铜矿,蚀变类型主要为高级泥化(包括石英、明矾石、地开石和高岭石等矿物),该带的金大部分以不可见金的形式沉淀在含铜黄铁矿中。②斑岩-浅成热液过渡矿化带,位于斑岩与高硫化矿化带之间,可见铜蓝和硫砷铜矿交代了早期斑岩矿化中的原生硫化物(如黄铜矿),蚀变以泥化蚀变(高岭石和/或蒙脱石等矿物)为主,并常见硬石膏-方解石脉。③斑岩型矿化带,深度在地表以下 1000 ~ 2000 m 范围内(未终孔),该带主要含铜矿物为黄铜矿,金主要以自然金和银金矿的小颗粒形式沉淀在石英脉中。丘卡卢佩吉矿床整体蚀变分带特征以斑岩体为中心,自下而上表现为钾化→青磐岩化(边部发育)→绿泥石-绢云母化(叠加钾化)→黄铁绢英岩化(高级泥化叠加)→高级泥化(紫金 Timok 项目组, 2019)。Velojic et al.(2020) 通过丘卡卢佩吉矿床的脉体类型研究发现,该矿床深部符合典型斑岩型矿床特征,并将丘卡卢佩吉矿床的脉体划分为 7 种不同类型的脉体。通过脉体中石英的流体包裹体研究发现,矿床深部脉体含盐流体与斑岩矿化密切相关,成矿作用在 $350 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 温度和 100 ~ 500 bars 压力条件下发生,而浅部与浅成热液矿化阶段有关的流体是较低温低盐度的,温度在 $150 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 之间,盐度在 0 ~ 7% NaCl eqv. 之间(Velojic et al., 2020)。

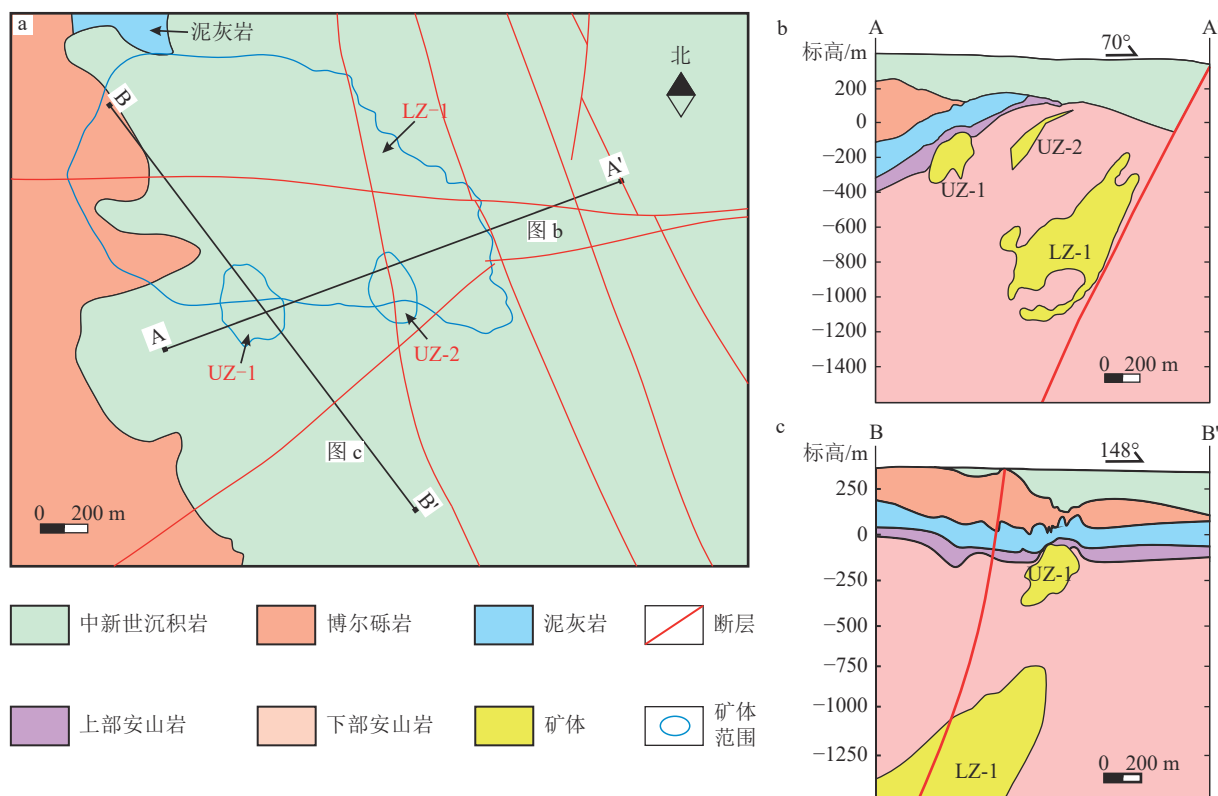


图 7 丘卡卢佩吉矿床平面地质图(a)和剖面图(b, c; b 据饶东平, 2021 修改)

Fig. 7 Geological map (a) and section (b, c) of the Cukaru Peki deposit

3.5 兹拉蒂博尔 (Zlatno Brdo) 矿床

兹拉蒂博尔矿床位于克里韦利矿床西南部约 3.2 km 处, 是在博尔矿床与克里韦利矿床之间新发现的矿床(图 5)。该矿床是一个以金为主, 伴生银的浅成低温热液型矿床。金金属量约为 16.7 t (Au 平均品位为 2.69 g/t), 银金属量为 47 t (Ag 平均品位为 7.54 g/t)。目前该矿床地质资料十分有限, 以下认识主要根据(游富华等, 2020)和林明钟(2021)得出。

矿区出露的地层主要为晚白垩世火山碎屑-陆源碎屑沉积组合, 岩性主要为角闪石安山岩、角闪石-黑云母安山岩及其火山碎屑岩, 其次为玄武质安山岩、砂岩、砂卡岩、大理岩、泥岩等, 少量为早白垩世沉积岩等。矿区构造以北西向断裂构造为主, 其中兹拉蒂博尔断裂是矿床中重要的控矿导矿构造。矿区的岩浆岩主要由辉绿岩、黑云母-角闪石安山岩、角闪石安山岩、辉石-角闪石安山岩等组成。角闪石安山岩及辉石-角闪石安山岩主要在该矿床的北部分布。

金矿体主要受兹拉蒂博尔断裂控制, 呈厚板状,

北西走向, 倾向南西, 赋存于构造蚀变带内。矿石中的 Au 元素主要赋存于自然金和银金矿中, 即碲金银矿和碲金矿中, 载金硫化物主要为黄铁矿, 其次为毒砂。金矿物主要以包裹金及裂隙金形式出现, 其中包裹金主要赋存于石英、重晶石颗粒内, 另可见少量金分布于黝铜矿、黄铁矿晶体内部, 裂隙金主要赋存于黄铁矿、石英晶体附近的裂隙内。矿石中主要金属矿物有自然金、银金矿、黄铁矿、毒砂、白铁矿、胶状黄铁矿、菱铁矿, 其次为黝铜矿-砷黝铜矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、金红石和辰砂; 非金属矿物主要为石英、绢云母、重晶石、玉髓、绿泥石、方解石、绿帘石、粘土矿物等。自矿体中心向两侧依次发育重晶石化-硅化-高岭石化→黄铁绢英岩化→绿泥石化(外围构造带)。前人根据兹拉蒂博尔矿床的矿区构造及矿物组合特征, 初步判断该矿床可能为低硫化浅成低温热液型矿床(林明钟, 2021); 但矿区发育大量绢云母蚀变矿物, 还出现黝铜矿-砷黝铜矿、黄铜矿及富锰碳酸盐矿物, 表明兹拉蒂博尔矿床为中硫化型浅成低温热液矿床(宋国学等, 2018)。另外, 兹拉蒂博尔矿床位于克里韦利和博尔矿床之间, 与

这些斑岩型矿床是否属于同一成矿系统也有待进一步研究。

3.6 瓦利亚斯特尔茨 (Valja Strz) 矿床

瓦利亚斯特尔茨矿床位于蒂莫克铜金矿集区西北部矿化富集区域的中心,是该区域主要的斑岩型铜金矿床之一 (Jelenković et al., 2016)。瓦利亚斯特尔茨矿床的铜金属量可达 30×10^4 t (Cu 平均品位为 0.26%)、金金属量为 21 t (Au 平均品位为 0.19 g/t) (Jelenković et al., 2016)。

瓦利亚斯特尔茨矿床的形成与瓦利亚斯特尔茨深成杂岩体密切相关 (图 8-a,b), 该杂岩体由二长闪长岩、二长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、正长岩、辉长岩等组成 (Banješević, 2010)。矿区主要发育北西向断层, 将矿床向南截断。矿床在平面上呈南北走向, 延伸约 700 m。矿体呈北西向和北东走向, 南东倾向, 主要为斑岩型铜矿化, 赋存于蚀变角闪石-辉石安山质火山岩及衍生的火山碎屑岩中。

矿化与多期次闪长斑岩侵入有关。矿石构造以网脉状为主。金属矿物主要为黄铜矿、磁铁矿、斑铜矿、辉钼矿, 少量闪锌矿、方铅矿等。非金属矿物有黄铁矿、石英、黑云母、硬石膏、钾长石、绿泥石、绿帘石、方解石等 (Knaak et al., 2016)。

矿床中心主要发育钾硅酸盐蚀变组合 (黑云母-磁铁矿-硬石膏-钾长石), 外围蚀变主要为青磐岩化带 (绿泥石-方解石-黄铁矿和少量绿帘石)。黄铁绢英岩化蚀变在矿区内较少出现, 推测已因侵蚀而消失 (Knaak et al., 2016)。瓦利亚斯特尔茨矿床的闪长岩和二长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 82.5 ± 0.6 Ma 和 78.62 ± 0.44 Ma (Pačevski et al., 2016)。

3.7 比加尔山 (Bigar Hill) 矿床

比加尔山矿床位于蒂莫克铜金矿集区的西北部, 是矿集区发现的第一个沉积岩容矿型金矿床。比加尔山矿床位于矿集区西北部矿化富集区域, 该地区至少长 25 km、宽 10 km, 其中以比加尔山金矿

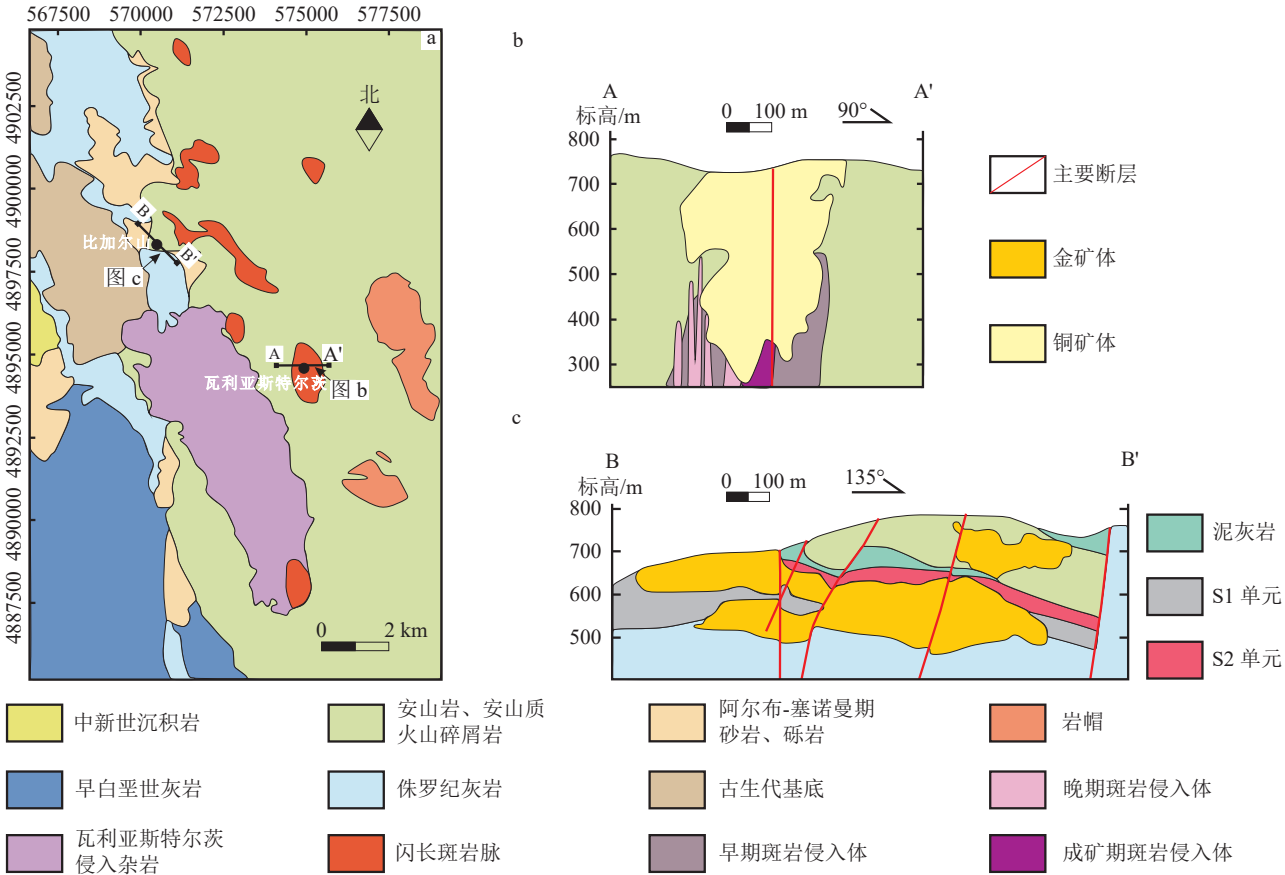


图 8 蒂莫克铜金矿集区西北部平面地质图(a)、瓦利亚斯特尔茨矿床剖面图(b)和比加尔山矿床剖面图(c)(据 Knaak et al., 2016 修改)

Fig. 8 Geologic map of the northwestern area of Timok ore field(a), section maps of Valja Strz deposit(b) and Bigar Hill deposit(c)

床和瓦利亚斯特尔茨矿床最为突出 (Jelenković et al., 2016)。比加尔山矿床是一个赋存于钙质沉积岩的沉积岩容矿浸染型金矿床, 金金属量为 28.35 t (Au 平均品位为 1.19 g/t) (Zivanovic, 2019)。

矿区地层主要由晚侏罗世—早白垩世石灰岩层和早白垩世—晚白垩世钙质碎屑岩层组成, 二者不整合覆盖在变质岩基底上 (图 8-c)。钙质碎屑岩层主要由 S1 硅质碎屑单元、S2 火山碎屑单元和泥灰岩组成。前人将由灰色的钙质硅质碎屑砂岩、砾岩、较小的粉砂岩和基底角砾岩组成的地层, 称为 S1 单元; 将覆盖在 S1 单元之上含丰富安山质火山岩的地层称为 S2 单元; 将薄层铁质泥灰岩称为泥灰岩单元 (Van et al., 2013)。矿区北西向高角度断裂和北东向次级断裂是主要的含金流体通道。这些断层系统使含金流体渗入并随后横向扩展到有利的层位富集成矿, 矿区内最年轻的岩性是侵入泥灰岩层的次火山安山岩 (Zivanovic, 2019)。

矿化主要发育于火山岩和火山碎屑岩之下的碎屑沉积岩序列 (即 S1 单元与 S2 单元) 的 2 个地层接触面。黄铁矿是矿床中主要的硫化矿物。金主要为不可见金, 产出在黄铁矿晶格中, 局部呈包裹体和自然金的形式出现。矿区内 Au 元素是低温金属元素组合的一部分, 此外还包括 Sb、Tl、Hg、Te、As 等元素。矿区内的低温金属元素也存在一定规律性: 微量金属元素也沿北西向和北东向富集。石灰岩中 Bi、W、Pb、Zn、In、Cr、Se 和 Te 元素明显呈北西走向逐渐增加。在上部火山碎屑单元中, 沿北东方向, 低温元素组合 As、Hg、Tl、Sb 和 Te 含量也逐渐升高。在火山岩中, As、Sb、Te 和 Ag 的异常浓度与东南部北西走向的金矿化一起出现 (Zivanovic, 2019)。矿区热液蚀变强烈, 主要蚀变类型包括去碳酸盐化、硅化、粘土化等。碳酸盐溶解或脱碳是卡林型矿床的典型蚀变特征 (Radtke et al., 1972; Cail et al., 2001)。碳酸盐溶解导致围岩体积减小, 并形成次生孔隙和渗透率, 从而导致石英、粘土矿物和有机质等不溶性矿物的次生富集。硅化在矿区分布较少, 主要出现在低金矿化带。粘土蚀变是矿区的主要蚀变, 蚀变矿物有伊利石、蒙脱石、高岭石等, 伊利石与金矿化十分密切, 伊利石的 K-Ar 定年研究表明, 比加尔山金矿床形成于 79 ± 2.78 Ma (Zivanovic, 2019)。

目前关于比加尔山沉积岩容矿浸染型金矿床的

成因仍不确定 (Knaak et al., 2016), 但根据目前研究可知其具有卡林型金矿床的典型特征 (Cline et al., 2005): ①具有 Au、As、Hg、Tl、S 和 Te 低温金属元素组合; ②发育典型的去碳酸盐化、硅化和以伊利石、蒙脱石和高岭石为主的泥化蚀变组合; ③矿体受层控断层/断裂控制、赋存于砂岩和灰岩中; ④硫化反应等。

4 蒂莫克铜金矿集区典型矿床成矿规律

结合前人资料可得 (表 1), 丘卡卢佩吉矿床形成时代为 88 Ma, 博尔矿床形成时代为 86 Ma, 克里韦利矿床形成时代在 87 ~ 86 Ma 之间, 马伊丹佩克矿床形成时代在 84 ~ 82 Ma 之间, 瓦利亚斯特尔茨矿床形成时代在 82 ~ 78 Ma 之间。蒂莫克铜金矿集区典型矿床形成时代为 88 ~ 78 Ma, 成矿作用历时仅 10 Ma, 并且矿集区矿床形成时代明显呈现出由东向西逐渐年轻的趋势。

上述矿床与典型斑岩型矿床成矿特征相似 (Sillitoe, 2010)。矿床具有斑岩型矿床的典型矿物组合, 如金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、辉钼矿等, 非金属矿物为石英、斜长石、钾长石、绢云母、绿泥石、硬石膏、方解石、金红石等。发育典型的蚀变类型, 如钾化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、泥化等, 并呈现出从矿体中心向外围的规律性变化。但瓦利亚斯特尔茨矿床中未发现黄铁绢英岩蚀变矿物组合, 这可能是后期泥化叠加交代的原因。丘卡卢佩吉矿床和博尔矿床早期矿化、蚀变与上述矿床类似, 但二者还发育以明矾石、硫砷铜矿和铜蓝为代表的高硫化矿物组合及高级泥化蚀变。但矿床整体青磐岩化蚀变发育不普遍, 可能是该蚀变带离矿体中心较远的原因 (Cooke et al., 2014)。在蒂莫克铜金矿集区的博尔矿床和克里韦利矿床中间新发现了一个浅成低温热液型金矿床——兹拉蒂博尔矿床 (Koželj, 2002), 其与比加尔山沉积岩容矿浸染型金矿床形成了鲜明对比。比加尔山矿床发育典型的卡林型金矿床的矿化蚀变特征, 如去碳酸盐化、硅化和泥化。矿床中硫化物以黄铁矿为主, 很少见其他类型的硫化物。兹拉蒂博尔矿床则发育典型的浅成低温热液型矿物组合, 如黄铁矿、自然金、毒砂和玉髓及强烈的重晶石化和硅化等蚀变类型。比加尔山矿床发育 Sb、Tl、Hg、Te、As 等低温金属元素组合并沿北西向和北东向逐渐富集, 表

明该矿床位于较浅水平或高温流体源的远端。兹拉蒂博尔矿床与附近斑岩型矿床空间上十分接近,可能与博尔矿床属于同一成矿系统,但也不排除兹拉蒂博尔矿床深部存在隐伏的斑岩型矿床,这些还有待进一步研究。

蒂莫克铜金矿集区中斑岩型矿床广泛发育,但完整保存高硫化浅成低温热液矿化和-斑岩型矿化 2 套系统的只有丘卡卢佩吉矿床和博尔矿床,结合本文的总结表明,这与该区的矿床经历构造运动抬升后遭受剥蚀有关,理由如下:①蒂莫克铜金矿集区整体成矿时间相近,成矿作用仅历时 10 Ma (Banješević et al., 2019)。矿集区岩浆岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数据表明,岩浆岩主要来源于上地幔,局部有地壳物质混染 (Ciobanu et al., 2002)。这些矿床的成矿作用主要与第一阶段岩浆活动相关,且瓦利亚斯特尔茨矿床的整体金属量最低,表明第二阶段岩浆活动成矿能力较差。②由于后期的构造运动,较大的矿体被肢解,而较小的矿体被推覆在博尔砾岩之上,导致早期在矿区范围发现了 30 个矿体,博尔砾岩的形成与该构造相关 (Antonijević, 2011; Klimentyeva et al., 2021)。③前人通过实验模拟发现,蒂莫克铜金矿集区断层中南部右旋偏移量相对北部较少的原因是,一部分南部的走滑变形量转为默西亚前缘的逆冲推覆量 (Krstekanić et al., 2021)。④蒂莫克铜金矿集区矿化类型整体从北到东南依次为矽卡岩型矿化-斑岩型矿化→浅成低温热液型矿化→斑岩型矿化→浅成低温热液-斑岩型矿化。蒂莫克铜金矿集区矿床的矿体埋深海拔标高也存在系统性的规律 (Jelenković et al., 2016),从西北到东南矿体的埋深越来越深(图 9)。前人研究表明,矿化类型的分带性和矿体埋深与构造剥蚀有关 (Sillitoe, 2000, 2010; Cooke et al., 2005)。蒂莫克铜金矿集区经历过强烈的右旋构造运动 (Zimmerman et al., 2008; Knaak et al., 2016),可能导致矿集区北部和西北部的矿床被抬升,经历了剥蚀作用,而没有浅成低温热液型矿体的存在,但靠近东南部矿床的浅成低温热液型矿体被很好地保存下来。

蒂莫克铜金矿集区矿化类型具有明显的分带性,并主要沿 Bor-Brestovac-Tupiznica 断裂分布 (图 3),最北部的马伊丹佩克矿床具有矽卡岩型铁矿化和斑岩型铜金矿化 (Jelenković et al., 2016),北部的乔卡马林矿床具有浅成低温热液型金矿化,塞罗沃

矿床具有斑岩型铜矿化,中部的克里韦利矿床和马里克里韦利矿床具有斑岩型铜矿化 (Vaskovic et al., 2010),而在克里韦利矿床南部的博尔矿床和丘卡卢佩吉矿床则具有高硫化铜金矿化和斑岩型铜金矿化。马伊丹佩克矿床的矽卡岩型矿化及类卡林型金矿化与矿集区北部—西北部出露的侏罗纪—早白垩世碳酸盐岩地层相关,该地层主要发育于矿集区的东西部,并且近期在矿集区北部的“绿地”区域中 Yanko 靶区揭露了接触交代型矿化。由此推测,矿集区北部—西北部地区仍存在寻找矽卡岩型矿化和类卡林型矿化的潜力。另外,高硫化型浅成低温热液矿床往往具有与斑岩矿化密切相关的空间亲缘性 (Einaudi et al., 2003)。蒂莫克铜金矿集区北部的乔卡马林高硫化型浅成低温热液金矿床的周边深部可能存在斑岩型矿化的潜力。蒂莫克铜金矿集区因为经历了后期逆冲推覆构造运动,其东南部整体盖层较厚。现今已发现的丘卡卢佩吉矿床,其深部斑岩矿化已延伸至-2000 m 标高且未完全控制,该矿床周边深部寻找斑岩型矿化的潜力巨大。当前紫金集团在丘卡卢佩吉矿区东南部的钻探工程发现了良好的矿化现象,佐证了这一观点。据此规律,沿北北西—北向断裂系统,蒂莫克铜金矿集区北部—西北部和丘卡卢佩吉矿床东南部仍具有一定找矿潜力。

前人研究表明,蒂莫克铜金矿集区的形成可能与非洲-欧洲大陆板块汇聚导致的瓦尔达尔大洋板块俯冲-后撤的构造演化密切相关 (Lips et al., 2004; Zimmerman et al., 2008)。笔者在前人研究的基础上,将矿集区的构造演化过程总结为瓦尔达尔大洋板块的俯冲与后撤过程及大陆碰撞过程。①瓦尔达尔大洋板块俯冲阶段:在 100 ~ 110 Ma 期间,瓦尔达尔大洋板块开始向北部的欧洲大陆板块俯冲 (Minkovska et al., 2002; Lips et al., 2004),该俯冲过程导致欧洲大陆板块上部发生强烈挤压,形成了相对连续的巴尔干-南喀尔巴阡山脉 (Fügenshuh et al., 2005) 和早期的辉长岩侵入体(年龄为 110 ± 5.5 Ma) (Cioflica, 1994),在蒂莫克铜金矿集区还未发现这一时期的岩浆活动或矿床的形成 (Lips et al., 2004; Zimmerman et al., 2008; Knaak et al., 2016; Zivanovic, 2019),表明第一期岩浆活动与成矿作用并不相关。②瓦尔达尔大洋板块后撤阶段:瓦尔达尔大洋板块快速俯冲侵入欧洲大陆板块后,在深处形成了次大陆地幔岩石圈熔融体 (Zimmerman et al., 2008),由于

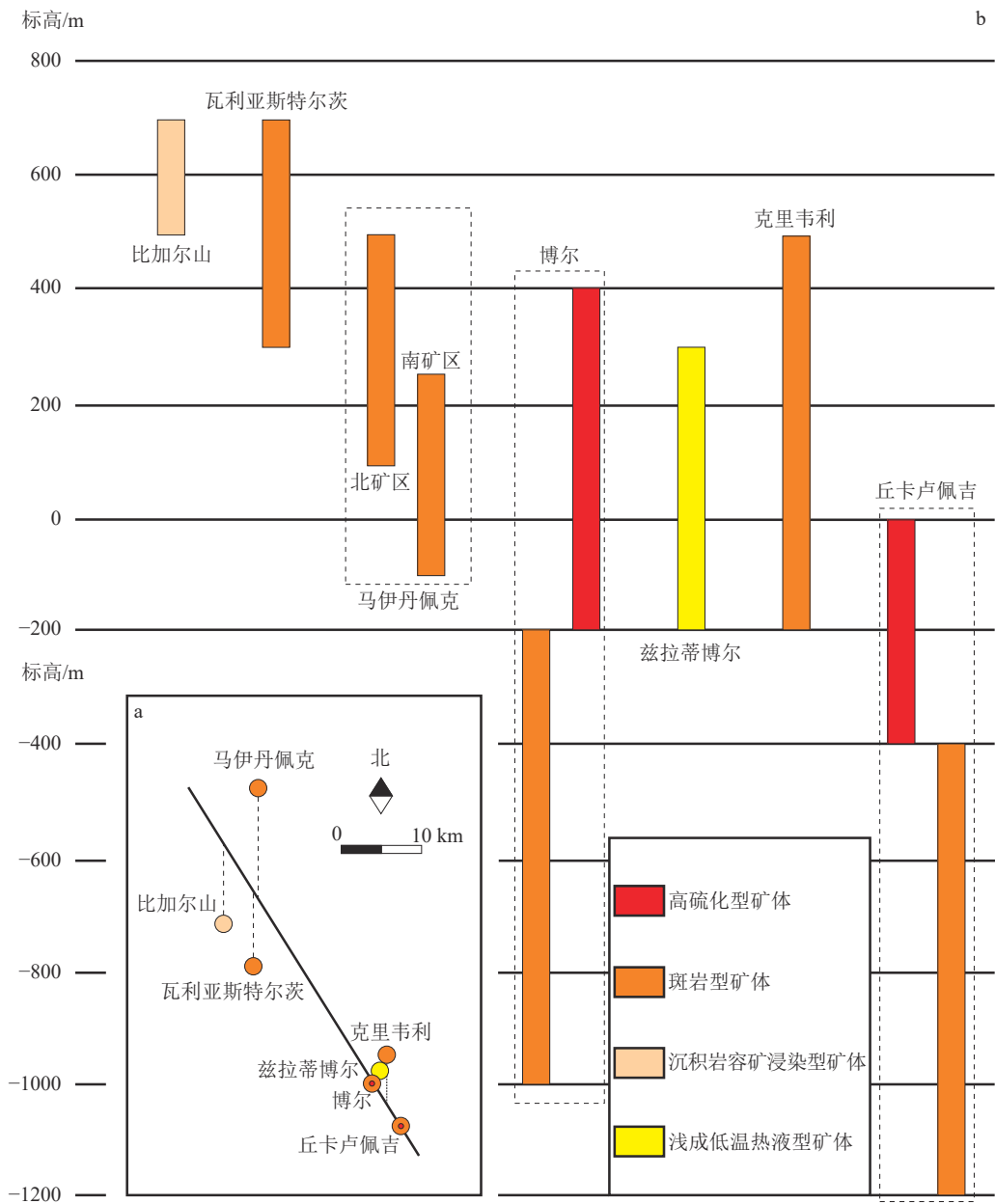


图 9 蒂莫克铜金矿集区典型矿床平面南北向投线图(a)及其矿体埋深海拔标高图(b)(据 Jelenković et al., 2016 修改)

Fig. 9 North-south projection diagram (a) and orebody burial depth map (b) of typical deposits in Timok ore field

板块突然变陡,垂向的重力大于横向的俯冲应力,大洋板块逐渐向南后撤(在 100 ~ 94 Ma 期间开始) (Ciobanu et al., 2002),并伴随着造山带塌陷 (Selverstone, 2005)。为了满足质量平衡的必要条件 (Kincaid et al., 2003),大量的熔融体逐渐上涌到达大陆地壳上部,在蒂莫克矿集区中形成了一系列具有明显时间序列趋势的岩浆-热液型矿床(如丘卡卢佩吉矿床形成时代为 88 Ma,博尔矿床形成时代为 86 Ma,克里韦利矿床形成时代在 87 ~ 86 Ma 之间等)。③大陆碰撞阶段:随着瓦尔达尔大洋板块后撤

的停止,大洋板块继续俯冲,最终非洲板块与欧洲板块碰撞,在默西亚地块边缘形成了右旋构造(图 1),导致原本呈东西向的蒂莫克铜金矿集区顺时针旋转了 30° (Zimmerman et al., 2008),并在矿集区形成一系列正断层、逆断层和走滑断层 (Knaak et al., 2016),特别是新生代逆冲推覆构造的形成 (Zimmerman et al., 2008; Knaak et al., 2016; Krstekanić et al., 2021) 及不同程度的剥蚀作用导致矿床的保存程度不同,形成了当前具有多样矿床类型、不同矿化特征的矿集区。关于蒂莫克铜金矿集区的成矿动力学背

景还存在不同的看法 (Wortel et al., 2000; Neubauer, 2002), 前人认为在板块俯冲后, 高浮力的大陆板块被撕裂下来形成窗口, 软流圈物质上涌造成岩石圈单元的分离, 熔体上升到浅部层位, 形成相关矿床, 但对蒂莫克铜金矿集区成矿作用时代的规律性变化、矿化类型的变化趋势及矿床形成后的保存都没有较好的解释。

5 结 论

(1) 蒂莫克铜金矿集区典型矿床以斑岩型铜金矿床、浅成低温热液型铜-金矿床和浅成低温热液-斑岩型铜金矿床为主, 局部发育有类卡林型金矿床, 矿床形成时代主要集中在 88 ~ 78 Ma 之间, 并表现出由东向西矿床形成时代逐渐年轻的趋势。

(2) 蒂莫克铜金矿集区主要发育 3 期安山岩浆作用, 时间集中在 90 ~ 78 Ma 之间。矿集区东部马伊丹佩克、克里韦利、博尔、丘卡卢佩吉矿床的形成主要与第一期岩浆作用的蒂莫克安山岩有关, 西部比加尔山、瓦利亚斯特尔茨矿床则与第二、三期岩浆作用的辉石-角闪石安山岩、玄武质安山岩和深浅成侵入杂岩体有关。

(3) 蒂莫克铜金矿集区典型矿床的矿化类型从西北至东南依次为矽卡岩型矿化-斑岩型矿化→浅成低温热液型矿化→斑岩型矿化→浅成低温热液-斑岩型矿化。矿体埋深从西北到东南越来越深, 显示矿集区西北处和丘卡卢佩吉矿床东南处仍具有一定的找矿潜力。

(4) 蒂莫克铜金矿集区内主要成矿作用与阿尔布期瓦达尔大洋板块俯冲欧洲大陆板块的构造运动有关, 而矿床自西北向东南的分布特征及其矿体埋深则可能与区域上新生代右旋构造在矿集区中形成逆冲推覆构造及成矿后不均匀剥蚀有关。

致谢: 本文在基础地质资料收集和野外工作中得到了紫金矿业集团的支持与帮助; 在成文过程中得到吴晓林师兄、赵骏峰同门的指导与帮助; 在图件编绘中得到肖政、邱建欢、王新然、陈镜文师弟的帮助; 同时审稿专家给予了很好的指导和修改建议, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

Antonićević I. 2011. The Novo Okno copper deposit of olistostrome origin (Bor, eastern Serbia)[J]. *Geoloski anali Balkanskoga*

poluostrva, 72: 101–109.

Antonićević I, Mijatović P. 2014. The copper deposits of Bor, eastern Serbia: geology and origin of the deposits[J]. *Geoloski anali Balkanskoga poluostrva*, 75: 59–74.

Banješević M. 2010. Upper cretaceous magmatic suites of the Timok magmatic complex[J]. *Geoloski Anal Balkanskoga poluostrva*, 71: 13–22.

Banješević M, Ingram S, Large D. 2014. Copper–gold exploration and discovery in the Timok Magmatic Complex, Serbia[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts: 16450.

Banješević M, Large D. 2014. Geology and mineralization of the new copper and gold discovery south of Bor Timok magmatic complex[C]//Proceedings of the XVI Serbian Geological Congress, Serbian Geological Society, Donji Milanovac: 739–741.

Banješević M, Cvetković V, von Quadt A, et al. 2019. New constraints on the main mineralization event inferred from the latest discoveries in the Bor Metallogenetic Zone (BMZ, East Serbia)[J]. *Minerals*, 9(11): 672.

Baker T. 2019. Gold copper endowment and deposit diversity in the Western Tethyan magmatic belt, southeast Europe: Implications for exploration[J]. *Economic Geology*, 114(7): 1237–1250.

Berza T, Constantinescu E, Vlad S L N. 1998. Upper Cretaceous magmatic series and associated mineralisation in the Carpathian–Balkan Orogen[J]. *Resource Geology*, 48(4): 291–306.

Cail T L, Cline J S. 2001. Alteration associated with gold deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, north-central Nevada[J]. *Economic Geology*, 96(6): 1343–1359.

Ciobanu C L, Cook N J, Stein H. 2002. Regional setting and geochronology of the Late Cretaceous Banatitic magmatic and metallogenetic belt[J]. *Mineralium Deposita*, 37(6): 541–567.

Cioflica G. 1994. K–Ar ages of Alpine granitoids in the Hauzești–Drinova area (Poiana Rusca Mountains, Romania)[J]. *Rev. Roum. Geol.*, 38: 3–8.

Clark A H, Ullrich T D. 2004. ^{40}Ar – ^{39}Ar age data for andesitic magmatism and hydrothermal activity in the Timok Massif, eastern Serbia: implications for metallogenetic relationships in the Bor copper–gold subprovince[J]. *Mineralium Deposita*, 39(2): 256–262.

Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L, et al. 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models[J]. *Economic Geology*, 100: 451–484.

Cook N J, Ciobanu C L. 2001. Paragenesis of Cu–Fe ores from Ocna de Fier–Dognecea (Romania), typifying fluid plume mineralization in a proximal skarn setting[J]. *Mineralogical Magazine*, 65(3): 351–372.

Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 100(5): 801–818.

Cooke D R, Hollings P, Wilkinson J J, et al. 2014. Geochemistry of porphyry deposits[J]. *Treatise on Geochemistry*, 13: 357–381.

Đorđević M. 2005. Volcanogenic Turonian and epiclastics of senonian in the Timok magmatic complex between Bor and the Tupižnica mountain, eastern Serbia[J]. *Geoloski Anal Balkanskoga Poluostrva*, (66): 63–71.

- Drew L J. 2006. A tectonic model for the spatial occurrence of porphyry copper and polymetallic vein deposits: Applications to central Europe[R]. US Department of the Interior, US Geological Survey: 2005-5272.
- Dupont A, Vander Auwera J, Pin C, et al. 2002. Trace element and isotope (Sr, Nd) geochemistry of porphyry- and skarn-mineralising Late Cretaceous intrusions from Banat, western South Carpathians, Romania[J]. *Mineralium Deposita*, 37(6): 568-586.
- Einaudi M T, Hedenquist J W, Inan E E. 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments[J]. *Society of Economic Geologists*, 10: 285-313.
- Fügenshuh B, Schmid S M. 2005. Age and significance of core complex formation in a very curved orogen: Evidence from fission track studies in the South Carpathians (Romania)[J]. *Tectonophysics*, 404(1/2): 33-53.
- Gallhofer D, Quadt A, Peytcheva I, et al. 2015. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Late Cretaceous arc in the Carpathian - Balkan orogen[J]. *Tectonics*, 34(9): 1813-1836.
- Handler R, Neubauer F, Velichkova S H, et al. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the timing of magmatism and post-magmatic cooling in the Panagyurishte region, Bulgaria[J]. *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology*, 84(1): 119-132.
- Jankovic S. 1990. Types of copper deposits related to volcanic environment in the Bor district, Yugoslavia[J]. *Geologische Rundschau*, 79(2): 467-478.
- Jankovic S, Herrington R J, Kozelj D. 1998. The Bor and Madjanpek copper-gold deposits in the context of the Bor metallogenic zone (Serbia, Yugoslavia)[C]// *Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits*: 169-178.
- Jelenković R, Milovanović D, Koželj D, et al. 2016. The mineral resources of the Bor metallogenic zone: a review[J]. *Geologia Croatica*, 69(1): 143-155.
- Kincaid C, Griffiths R W. 2003. Laboratory models of the thermal evolution of the mantle during rollback subduction[J]. *Nature*, 425(6953): 58-62.
- Klimentyeva D, Driesner T, von Quadt A, et al. 2021. Silicate-replacive high sulfidation massive sulfide orebodies in a porphyry Cu-Au system: Bor, Serbia[J]. *Mineralium Deposita*, 56(8): 1423-1448.
- Knaak M, Márton I, Tosdal R M, et al. 2016. Geologic setting and tectonic evolution of porphyry Cu-Au, polymetallic replacement, and sedimentary rock-hosted Au deposits in the northwestern area of the Timok magmatic complex, Serbia[J]. *Economic Geology*, 19: 1-28.
- Kolb M, Von Quadt A, Peytcheva I, et al. 2013. Adakite-like and normal arc magmas: distinct fractionation paths in the East Serbian segment of the Balkan-Carpathian arc[J]. *Journal of Petrology*, 54(3): 421-451.
- Koželj D I. 2002. Epithermal gold mineralization in the Bor metallogenic zone — morphogenetic types, structural-texture varieties and potentiality[C]// Koželj. Proceedings of the international symposium. Bor: Institut za Bakar Bor: 57-70.
- Krstekanić N, Willingshofer E, Broerse T, et al. 2021. Analogue modelling of strain partitioning along a curved strike-slip fault system during backarc-convex orocline formation: Implications for the Cerna-Timok fault system of the Carpatho-Balkanides[J]. *Journal of Structural Geology*, 149: 104386.
- Lips A L W, Herrington R J, Stein G, et al. 2004. Refined timing of porphyry copper formation in the Serbian and Bulgarian portions of the Cretaceous Carpatho-Balkan Belt[J]. *Economic Geology*, 99(3): 601-609.
- Minkovska V, Peybernès B, Nikolov T. 2002. Palaeogeography and geodynamic evolution of the Balkanides and Moesian 'microplate' (Bulgaria) during the earliest Cretaceous[J]. *Cretaceous Research*, 23(1): 37-48.
- Neubauer F. 2002. Contrasting late cretaceous with neogene ore provinces in the Alpine-Balkan-Carpathian-Dinaride collision belt[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 204(1): 81-102.
- Popov P N. 1987. Tectonics of the Banat-Srednogie rift[J]. *Tectonophysics*, 143(1/3): 209-216.
- Pačevski A, Cvetković V, Šarić K, et al. 2016. Manganese mineralization in andesites of Brestovačka Banja, Serbia: evidence of sea-floor exhalations in the Timok Magmatic Complex[J]. *Mineralogy and Petrology*, 110(4): 491-502.
- Quadt von A, Moritz R, Peytcheva I, et al. 2005. Geochronology and geodynamics of Late Cretaceous magmatism and Cu-Au mineralization in the Panagyurishte region of the Apuseni-Banat-Timok-Srednogie belt, Bulgaria[J]. *Ore Geology Reviews*, 27(1/4): 95-126.
- Quadt von A, Peytcheva I, Heinrich C, et al. 2007. Upper Cretaceous magmatic evolution and related Cu-Au mineralization in Bulgaria and Serbia[C]// Ninth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits SGA, Dublin. Dublin: Irish Association for Economic Geology: 861-864.
- Radtke A S, Heropoulos C, Fabbi B P, et al. 1972. Data on major and minor elements in host rocks and ores, Carlin gold deposit, Nevada[J]. *Economic Geology*, 67(7): 975-978.
- Schmid S M, Bernoulli D, Fügenshuh B, et al. 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units[J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(1): 139-183.
- Selverstone J. 2005. Are the Alps collapsing?[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1): 113-132.
- Sillitoe R H. 2000. Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 315-345.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic geology*, 105(1): 3-41.
- Starostin V I. 1970. Bor and Maidanpek copper deposits in Yugoslavia[J]. *International Geology Review*, 12(4): 370-380.
- Strashimirov S, Petrunov R, Kanazirski M. 2002. Porphyry-copper mineralisation in the central Srednogie zone, Bulgaria[J]. *Mineralium Deposita*, 37(6): 587-598.

- Vaskovic N, Jovic V, Matovic V. 2010. Early Cretaceous glauconite formation and Late Cretaceous magmatism and metallogeny of the East Serbian part of the Carpathoe Balkanides[C]//Acta Mineralogica-Petrographica, Field Guide Series, 25: 1–32.
- Van der Toorn J, Davidovic D, Hadjieva N, et al. 2013. A new sedimentary rock-hosted gold belt in eastern Serbia[C]// 12th Biennial SGA Meeting: Mineral deposit research for a high-tech world: 691–694.
- Velojić M, Jelenkovic R, Cvetkovic V. 2020. Fluid Evolution of the Čukaru Peki Cu–Au Porphyry System (East Serbia) inferred from a fluid inclusion study[J]. *Geologia Croatica*, 73(3): 197–209.
- Wortel M J R, Spakman W. 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean–Carpathian region[J]. *Science*, 290(5498): 1910–1917.
- Zimmerman A, Stein H J, Hannah J L, et al. 2008. Tectonic configuration of the Apuseni–Banat —Timok–Srednogie belt, Balkans–South Carpathians, constrained by high precision Re–Os molybdenite ages[J]. *Mineralium Deposita*, 43(1): 1–21.
- Zivanovic J. 2019. Structural, stratigraphic and temporal constraints of gold mineralization in the Bigar Hill deposit, Timok region, Serbia[D]. University of British Columbia: 1–207.
- 韩宁, 江思宏, 白大明, 等. 2019. 东欧南部阿普塞尼-巴纳特-蒂莫克-斯雷德诺戈里斯基 (ABTS) 铜-金成矿带地质特征[J]. *地质通报*, 38(11): 1920–1937.
- 黄腾骁, 王勤, 王亮亮. 2019. 塞尔维亚博尔州 Majdanpek 矿区 2019 年生产勘探设计[R]. 紫金矿业集团股份有限公司.
- 林明钟. 2021. 塞尔维亚东部 Z. Brdo 金矿床地质特征及矿床成因分析[J]. *矿产勘查*, 12(12): 2341–2348.
- 饶东平. 2021. 多元素分析在岩性及含矿性判别的应用——以塞尔维亚佩吉铜金矿床为例[J]. *矿产勘查*, 12(4): 980–988.
- 宋国学, 秦克章, 李光明, 等. 2018. 中硫型浅成低温热液金多金属矿床基本特征、研究进展与展望[J]. *岩石学报*, 34(3): 748–762.
- 闫宝文, 苏金健, 郭红乐. 2019. 塞尔维亚博尔州 VK 矿区斑岩型铜矿床 2019 年生产勘探设计[R]. 紫金矿业集团股份有限公司.
- 游富华, 王国平, 王勤. 2020. 塞尔维亚博尔地区 Bor-Veliki Krivelj 铜矿区 Zlatno Brdo 金矿床 2020 年度勘探地质设计[R]. 紫金矿业集团股份有限公司.
- 紫金 Timok 项目组. 2019. 塞尔维亚 2019 年生产勘探设计[R]. 紫金矿业集团股份有限公司.