

小兴安岭-张广才岭成矿带汪兴 Mo 多金属矿区 花岗岩成因及其对成矿的指示

易陈龙^{1,2}, 史冬岩³, 张兴春¹, 蓝江波¹, 王洪超⁴, 荣学谦^{1,2}, 邓聚庭^{1,2}, 汪殿钟¹,
杨宗永¹, 朱经经¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学地球与行星
科学学院, 北京 100049; 3. 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150036; 4. 黑龙江省第五地质勘察院,
黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 汪兴 Mo 多金属矿床位于小兴安岭-张广才岭成矿带中段, 是区域内新发现、正在勘探的斑岩型矿床。矿区内发育多期岩浆活动, 锆石 U-Pb 定年结果表明, 二长花岗岩(MG)、花岗闪长岩(GD)和黑云母二长花岗岩(BMG)的侵位年龄分别为 177 ± 1.9 Ma~ 174 ± 1.2 Ma、 170 ± 1.9 Ma~ 169 ± 2.1 Ma 和 172 ± 1.5 Ma~ 172 ± 1.4 Ma。三类花岗岩均以富硅(64.41%~77.77%)、富集大离子亲石元素、亏损 P($P_2O_5 = 0.02\% \sim 0.21\%$) 和 Nb、Ta 等高场强元素为特征。其铝饱和指数(A/CNK)在 0.99~1.21 之间, 为准铝-弱过铝质、高钾钙碱性 I 型花岗岩。全岩 Nb/Ta 值(7~13)与地壳可类比, 三类花岗岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 3.9~18.8, 表明其可能主要来源于新生地壳的部分熔融, 暗色微粒包体(MMEs)的广泛发育暗示可能有一定的地幔物质加入。综合区域构造演化史, 认为研究区花岗岩可能形成于佳木斯和松嫩地块碰撞晚期-碰撞后的构造背景。矿区花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩分别与 Cu-W、Mo-W 矿化具有较好的空间耦合关系, 且二者的侵位年龄与辉钼矿 Re-Os 加权平均年龄(169.0 ± 2.2 Ma; MSWD=0.042)在误差范围内一致, 暗示二者可能为成矿岩体, 而二长花岗岩则为成矿前贫矿岩体。结合锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征和岩相学特征综合分析认为, 黑云母二长花岗岩与花岗闪长岩可能为同期岩浆不同演化程度的产物, 更高的演化程度可能有利于岩浆中 Mo 的富集。矿区成矿期花岗岩 $(La/Yb)_N$ 值较成矿前花岗岩显著降低, 表明该地区在此期间发生了挤压-伸展的构造转换, 此种转换可能有利于大规模岩浆-流体的累积和集中释放, 从而有利于 Mo 矿化的形成。

关键词: I 型花岗岩; 全岩地球化学; 年代学; 壳幔混合; 构造背景转换; Mo 矿床

中图分类号: P588.12⁺1; P618.65

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)01-0087-26

Petrogenesis of the granites in the Waxing Mo-polymetallic deposit, Lesser Xing'an Range-Zhangguangcailing metallogenic belt and its metallogenic implication

YI Chen-long^{1,2}, SHI Dong-yan³, ZHANG Xing-chun¹, LAN Jiang-bo¹, WANG Hong-chao⁴,
RONG Xue-qian^{1,2}, DENG Ju-ting^{1,2}, WANG Dian-zhong¹, YANG Zong-yong¹ and ZHU Jing-jing¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Heilongjiang Mining Group Corporation Ltd., Harbin 150036, China; 4. The Fifth Geological Prospecting Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China)

收稿日期: 2024-02-01; 接受日期: 2024-05-30; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222206); 中国科学院王宽诚教育基金项目(GJTD-2020-13); BR 计划青年项目

作者简介: 易陈龙(1999-), 男, 硕士研究生, 地球化学专业, E-mail: yichenlong@mail.gyg.ac.cn; 通讯作者: 朱经经(1985-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事斑岩成矿系统成矿作用与预测研究, E-mail: zhujingjing@vip.gyg.ac.cn。

网络首发时间: 2024-09-26; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240925.1444.002.html>

Abstract: The Waxing Mo polymetallic deposit is a newly discovered porphyry type deposit in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcailing metallogenic belt. There are several periods of magmatic activity in the mine area. Zircon U-Pb dating results show that the emplacement ages of monzonite granite, granodiorite and biotite monzonite are 177 ± 1.9 Ma ~ 174 ± 1.2 Ma, 170 ± 1.9 Ma ~ 169 ± 2.1 Ma, and 172 ± 1.5 Ma ~ 172 ± 1.4 Ma, respectively. The three types of granites are all characterized by high SiO_2 (64.41% ~ 77.77%) contents, and are enriched in large ion lithophile elements, depleted P_2O_5 (0.02% ~ 0.21%) and high field strength elements such as Nb and Ta. The A/CNK [molecular $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] values are between 0.99 and 1.21, suggesting they belong to high-K calc-alkaline metaluminous-slight peraluminous type I granite. The whole rock Nb/Ta ratio (7 ~ 13) is comparable to that of the crust. Zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values range from 3.9 to 18.8, indicative of juvenile crustal origin. A number of mafic microgranular enclaves (MMEs) are observed in these granitoids, suggesting that mantle-driven magma was involved in the source region. Combined with the regional tectonic evolution history, we believe that the granite in the Waxing ore field was formed in the late collision-post-collisional setting. We found that granodiorite and biotite monzonitic granite have good spatial relationship with Cu-W and Mo-W mineralization, respectively, and their emplacement ages are correlated with the weighted average age of molybdenite Re-Os (169.0 ± 2.2 Ma; MSWD=0.042). These support the granodiorite and biotite monzonitic granite are syn-mineral intrusion, while the monzonite is pre-mineral pluton. Combined with zircon U-Pb chronology and Hf isotope characteristics, the biotite monzonite granite and granodiorite may be the products of different magmatic evolution degrees at the same time, and higher evolution degrees may be conducive to Mo enrichment in magmas. Ratios of granite $(\text{La}/\text{Yb})_N$ decrease abruptly from pre-mineral to syn-mineral intrusions, probably indicating a transition from compression to extension, which may be conducive to Mo formation.

Key words: I-granite; whole rock geochemistry; chronology; crust-mantle mixing; tectonic transformation; molybdenum deposit

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42222206); K. C. Wong Education Foundation (GJTD-2020-13); "Hundred Talents Program" of the Chinese Academy of Sciences

小兴安岭-张广才岭地区在中生代期间发育了大量钙碱性花岗岩、火山岩(图1, 吴福元等, 1999; Wu *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2012; 徐美君等, 2013; 许文良等, 2013; Li *et al.*, 2023), 并形成了包括鹿鸣、大黑山等超大型矿床在内的众多斑岩-矽卡岩型 Mo 矿床(葛文春等, 2007; 孙景贵等, 2012; 杨言辰等, 2012; Hu *et al.*, 2014a; Shu *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017; 卢志强, 2017; Chen and Zhang, 2018; 王琳琳等, 2018; Shu and Chiaradia, 2021)。这些 Mo 矿床成因上均与相对高演化的高钾钙碱性 I 型花岗岩具有密切联系(Shu *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017; Shu and Chiaradia, 2021; Ouyang and Caulfield, 2023)。前人根据锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 定年的数据, 发现这些矿床主要形成于侏罗纪-早白垩世(200 ~ 145 Ma; 孙景贵等, 2012; Shu *et al.*, 2016; Ouyang and Caulfield, 2023)。有研究者进一步利用成熟的岩石地球化学指标[如 Sr/Y、

$(\text{La}/\text{Yb})_N$] 结合区域演化历史, 认为该地区中生代斑岩型 Mo 矿床形成于挤压-伸展转换的动力学背景[Sr/Y、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值随时代变年轻而逐渐降低; Shu and Chiaradia, 2021; Ouyang and Caulfield, 2023]。

汪兴 Mo-W-Cu 多金属矿床位于小兴安岭-张广才岭中段, 是区域内新发现的斑岩型 Mo 多金属矿床, 但其成岩成矿时代和构造背景以及与区域上已知斑岩型 Mo 多金属矿床的关系目前尚不清楚, 极大地阻碍了矿区找矿勘探工作。因此, 本文通过对矿区不同期次的岩浆岩开展详细的岩相学、全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究, 明确了不同期次岩浆岩的侵位时代和先后关系, 探讨其岩石成因和源区特征, 明确成矿岩体, 同时结合地壳厚度重建指标与区域构造演化史综合分析, 判别矿区岩浆岩形成的动力学背景, 以期对矿区找矿勘探提供启示。

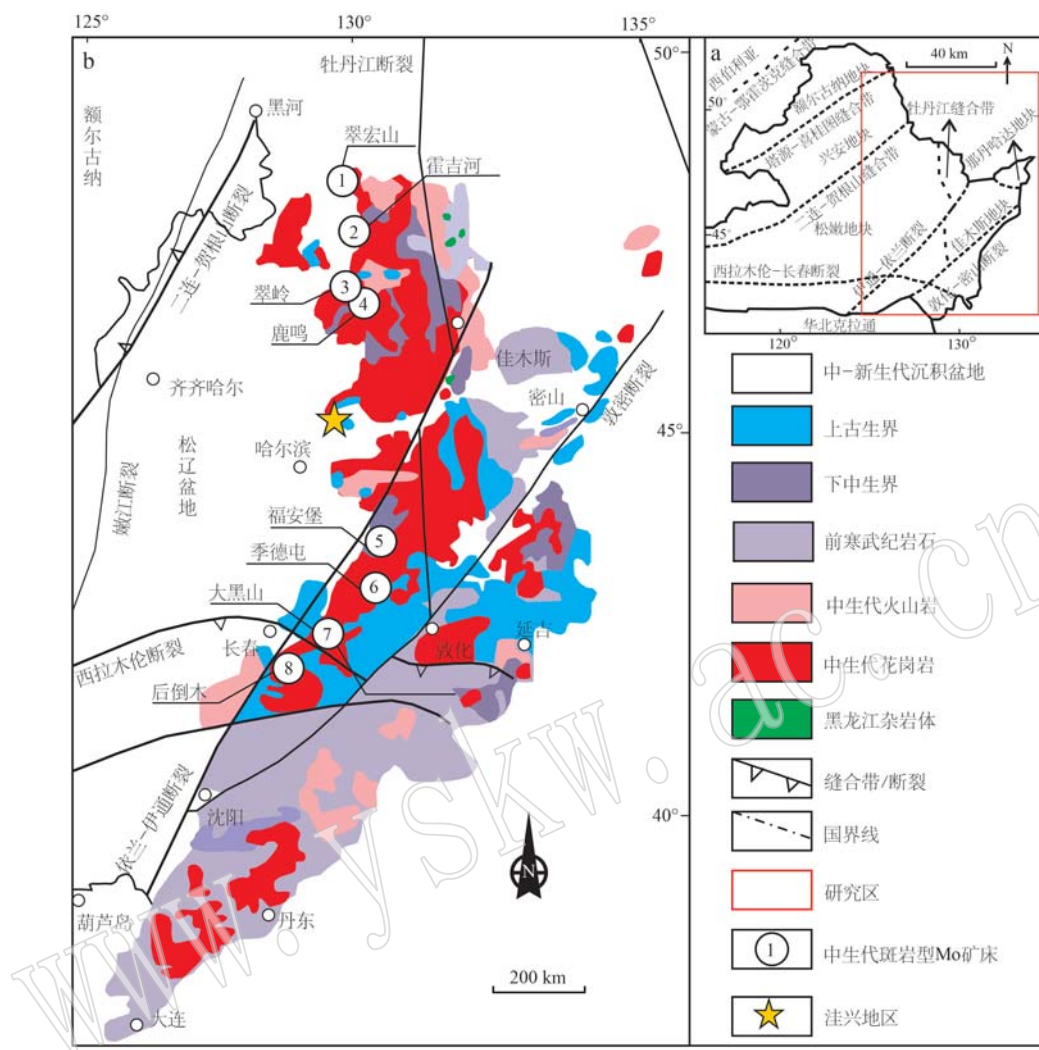


图 1 中国东北地区构造单元划分示意图(a, 据 Wu *et al.*, 2011)和小兴安岭-张广才岭地区岩浆岩分布简图(b, 据许文良等, 2013 修改)

Fig. 1 Schematic map of tectonic unit division in Northeast China (a, after Wu *et al.*, 2011) and a schematic map of magmatic rock distribution in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcailing area (b, modified from Xu Wenliang *et al.*, 2013)

1 区域地质背景

中国东北地区位于兴蒙造山带东缘,自西向东依次由额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块组成,各地块之间分别以塔源-喜桂图缝合带、二连-贺根山缝合带、牡丹江缝合带相分割,其中塔源-喜桂图缝合带和二连-贺根山缝合带代表古亚洲洋在古生代期间两阶段(~ 500 Ma、 ~ 300 Ma)的消减过程,牡丹江缝合带则代表中生代期间牡丹江洋的闭合(葛文春等, 2007; 周建波等, 2009; Wu *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2023; Chen *et al.*,

2023; 图 1)。研究区位于松嫩地块和佳木斯地块之间的小兴安岭-张广才岭地区,处于依兰-伊通断裂、西拉木伦-长春断裂、二连-贺根山断裂所夹持的区域内(图 1b; Wu *et al.*, 2007; 周建波等, 2009; 许文良等, 2013)。区域内出露大量花岗岩,除部分侵位于早古生代,大面积的花岗岩类侵位时间为晚三叠世-中侏罗世,岩石类型包括花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗斑岩、碱长花岗岩等(Wu *et al.*, 2003a, 2003b, 2011)。该区域还发育大量与中生代花岗岩有关的 Mo 多金属矿床,如鹿鸣、大黑山、翠宏山等,构成了重要的小兴安岭-张广才岭成矿带(图 1, 杨言辰等, 2012; Hu *et al.*, 2014a; Shu *et al.*, 2016;

Chen *et al.*, 2017; Ouyang *et al.*, 2021)。

2 矿区地质特征

洼兴矿区出露地层从老到新依次为下白垩统建兴组(K_{1jn})及第四系上更新统哈尔滨组(Q_3^2h)、全新统(Q_4^2)。建兴组出露于矿区北西部,面积约2 km²,覆盖于二长花岗岩之上。岩性主要以砾岩、中粗粒砂岩为主;哈尔滨组遍布矿区边缘,厚度随地势起伏而变化,除西北部外均有出露,面积约4 km²,岩性主要为黄土状亚黏土;全新世现代河床冲积层在矿区水系发育处均有分布,面积约1 km²。经槽探钻揭露,矿区内仅见很多次生的小断裂,宽度在0.1~1 m之间,部分断裂有明显的擦痕,断裂两侧可见岩石比较破碎,形成断层泥,部分裂隙被不同岩性的岩脉充填。依据1:5 000高精度磁测,推测区内发育断裂构造9条(图2)。

矿区岩浆活动具有多期次的特点,侵入岩以中、浅成相为主,多呈岩株状产出,主要为二长花岗岩($\eta\gamma$)、花岗闪长岩($\pi\gamma\delta$)、黑云母二长花岗岩($\pi\eta\gamma$)、正长花岗岩($\xi\gamma$)及流纹斑岩($\lambda\pi$),其中二长花岗岩在矿区出露面积最大,约6 km²。矿区发育I、II号两个矿体群,其中I号矿体群以Cu-W矿化为主,II号矿体群则主要发育Mo-W矿化(图2、图3;黑龙江省第五地质勘查院,2020^①)。根据初步钻探结果推断,矿区Cu金属量超过4万吨,平均品位0.473%;W金属量超过0.5万吨,平均品位0.278%;Mo金属量有望达到大型规模,平均品位0.101%。其中,花岗闪长岩($\pi\gamma\delta$)、黑云母二长花岗岩($\pi\eta\gamma$)分别为I和II号矿体群的赋矿岩体。

3 岩石学特征

本文花岗岩类样品采自野外露头 and 钻孔,共37件,包含二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩。

3.1 二长花岗岩(MG)

中细粒结构,主要由石英、斜长石、钾长石及少量黑云母组成(图4c)。斜长石呈半自形-自形板状,发育聚片双晶,部分斜长石表面见弱绢云母化蚀变(图4i),粒度2~5 mm,含量30%~35%;钾长石呈半自形-自形板状(图4i),见卡氏双晶,粒度1~4 mm,含量30%~35%;石英呈他形粒状,粒度0.2~

5 mm,含量20%~25%;黑云母呈片状,发育一组极完全解理,粒度1~5 mm,含量<5%;黑云母中可见自形程度较好的磷灰石(图4i),未见矿化。

3.2 花岗闪长岩(GD)

具似斑状-等粒结构。斑晶由石英、斜长石、钾长石、黑云母以及少量的角闪石等组成,基质主要为已结晶的石英和长石(图4a、4g)。其中,斜长石呈半自形-自形板状,聚片双晶发育,粒度2~5 mm,含量~30%;钾长石呈半自形-自形板状,见卡氏双晶发育,粒度1~4 mm,含量15%,此外也见一些微斜长石发育,格子双晶,手标本上呈灰白色;石英呈他形粒状,干涉色为一级灰白,粒度0.2~5 mm,含量20%~25%;黑云母斑晶呈片状,发育一组极完全解理,粒度1~5 mm,含量15%~20%。角闪石斑晶呈菱形,发育两组完全解理,解理夹角为56°(124°),粒度约1~5 mm,含量10%左右(图4g)。

3.3 黑云母二长花岗岩(BMG)

具似斑状-等粒结构,主要斑晶由石英、斜长石、钾长石以及黑云母组成。斜长石呈半自形-自形板状,聚片双晶发育,表面见弱绢云母化蚀变(图4h),粒度2~5 mm,含量30%~35%;钾长石呈半自形-自形板状(图4h),卡氏双晶发育,粒度1~4 mm,含量~30%,手标本中见钾长石巨斑晶发育,包裹早期形成的暗色矿物(角闪石、黑云母)(图4d);石英呈他形粒状,干涉色为一级灰白,粒度0.2~5 mm,含量20%~25%,手标本中亦见粗大石英脉发育(图4b);黑云母斑晶呈片状,镜下晶型较好,发育一组极完全解理,其中见自形度较好的磷灰石,粒度1~5 mm,含量约10%。角闪石斑晶镜下呈菱形,多被后期形成的钾长石巨斑晶包裹(图4d、4j),粒度约1~5 mm,含量~5%。

3.4 暗色微粒包体(MMEs)

在花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩中见浑圆状暗色微粒包体,颜色为深黑色至灰黑色,与寄主岩体关系截然,无冷凝边、烘烤边,未见明显穿插关系,表明镁铁质岩浆与长英质岩浆曾发生岩浆混合作用(图4e、4f)。其中发育在寄主岩中的钾长石反向脉(图4e),包裹早期形成的暗色矿物(图4e、4k)。镜下观察见大量暗色矿物(角闪石、黑云母)发育,部分黑云母中见绿泥石化(图4k)。此外,见针状磷灰石和刀刃状黑云母发育,其长宽比变化大,一般为1:5~1:10(图4k、4l)。

① 黑龙江省第五地质勘查院. 2020. 黑龙江省巴彦县黑瞎沟-洼兴地区铜多金属矿普查报告(未公开发表)。

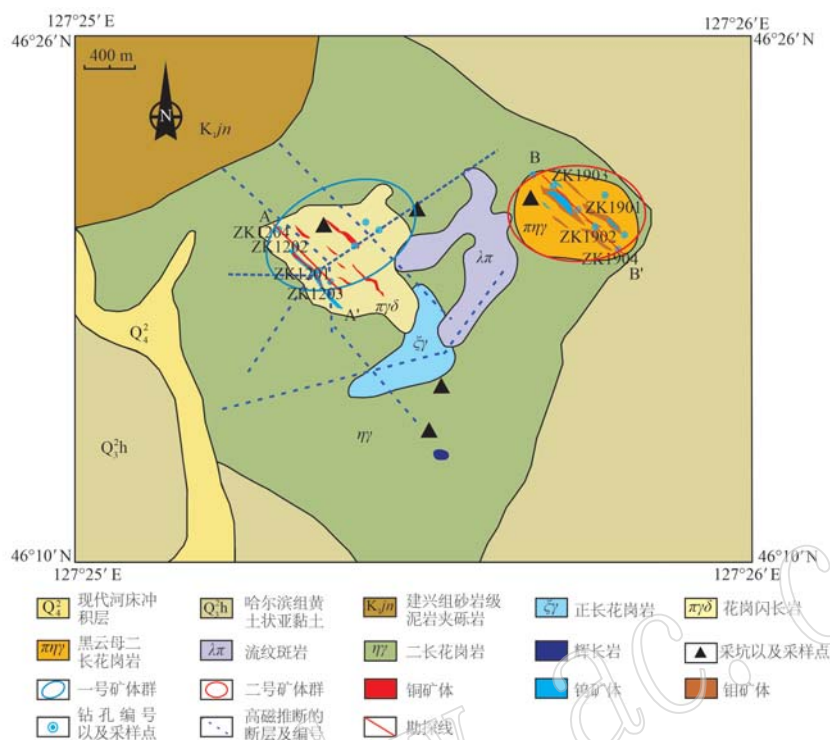
图 2 汪兴矿区地质简图(据黑龙江省第五地质勘查院, 2020^①)

Fig. 2 Geologic schematic map of Waxing mining area (modified after Heilongjiang Province The Fifth Geological Exploration Institute, 2020^①)

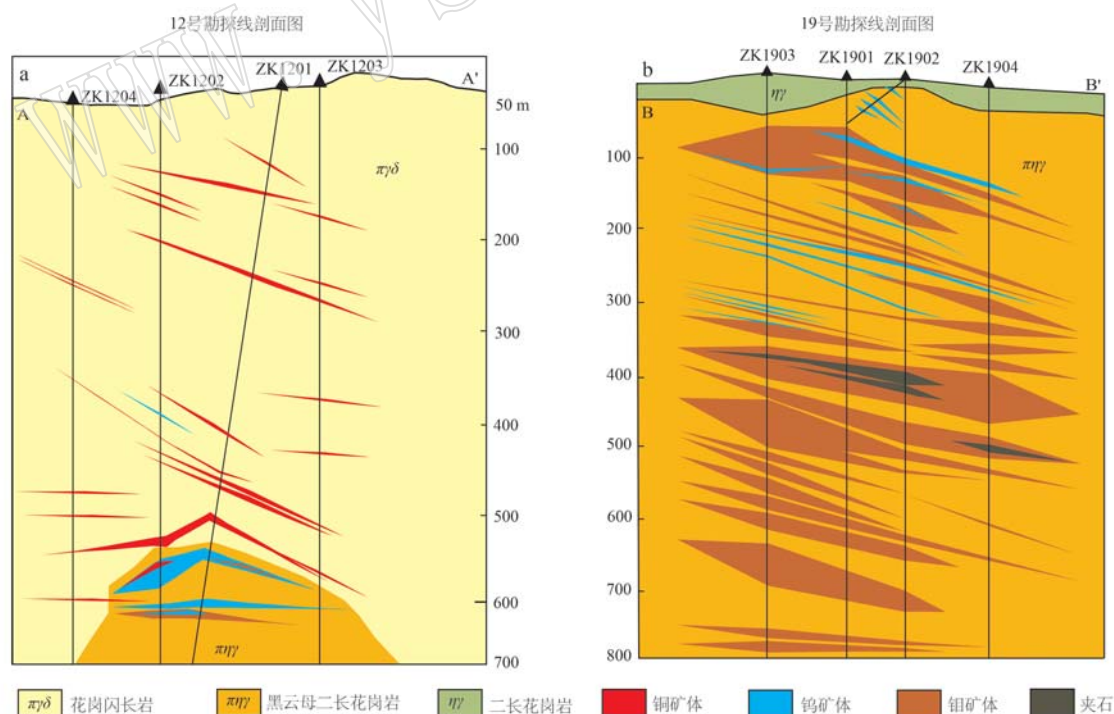
图 3 汪兴矿区 12 号勘探线剖面图(a)和 19 号勘探线剖面图(b, 黑龙江省第五地质勘查院, 2020^①)

Fig. 3 Cross sections of exploration line 12 (a) and exploration line 19 (b, modified after Heilongjiang Province The Fifth Geological Exploration Institute, 2020^①) of Waxing mining area

① 黑龙江省第五地质勘查院. 2020. 黑龙江省巴彦县黑瞎沟-汪兴地区铜多金属矿普查报告(未公开发表).

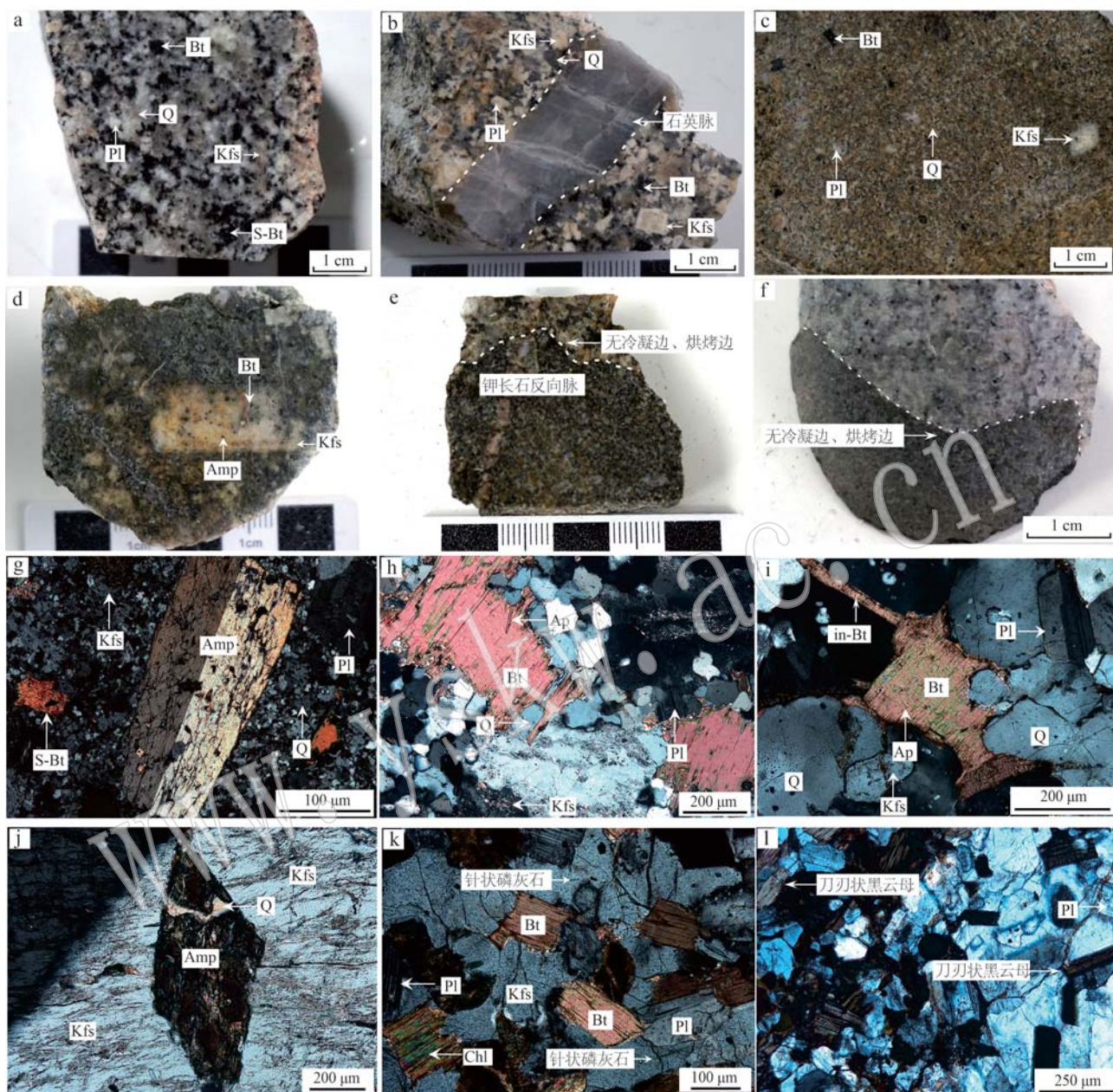


图4 矿区花岗岩及暗色微粒包体(MMEs)手标本和正交偏光镜下特征

Fig. 4 Hand specimens and microscopic (cross-polarized light) characteristics of granitoids and mafic microgranular enclaves (MMEs) in mining area

a—花岗闪长岩含有新鲜的黑云母、长石、石英等；b—黑云母二长花岗岩，斑晶主要由黑云母、长石等组成；c—二长花岗岩，由石英、长石和少量的黑云母组成；d—黑云母二长花岗岩，早期形成的暗色矿物被晚期形成的钾长石巨斑晶所包裹；e、f—花岗闪长岩中包裹有椭圆形暗色包体(MMEs)，二者关系截然，无明显的冷凝边、烘烤边，包体中见寄主岩体的钾长石反向脉；g—花岗闪长岩中的角闪石斑晶；h—黑云母二长花岗岩中的黑云母和钾长石斑晶，钾长石表面见弱绢英岩化蚀变；i—二长花岗岩中黑云母、长石、石英共生组合，矿物颗粒间隙见次生黑云母；j—黑云母二长花岗岩中被钾长石巨斑晶包裹的角闪石，角闪石蚀变严重，钾长石表面见微弱绢英岩化；k、l—暗色包体镜下照片，见大量黑云母和长石发育，同时见细长的针状磷灰石和刀刃状黑云母发育；Amp—角闪石；Bt—黑云母；Chl—绿泥石；Kfs—钾长石；Pl—斜长石；Q—石英；S-Bt—次生黑云母；in-Bt—间隙黑云母；Ap—磷灰石

a—granodiorite composed of abundant fresh biotite, feldspar and quartz; b—biotite monzonitic granite, mainly composed of biotite, feldspar; c—monzonitic granite, consisting of quartz, feldspar and a little biotite; d—biotite monzonitic granite, with early dark minerals surrounded by late giant potassium feldspar phenocryst; e, f—MMEs is surrounded by granodiorite, and MMEs reverse potassic feldspar veins of the host rock, cutting through granodiorite; g—hornblende phenocryst in porphyritic granite diorite; h—biotite and potassium feldspar porphyry in biotite monzonitic granite, and potassium feldspar shows weak sericitization; i—biotite, feldspar and quartz and secondary biotite in monzonitic granite; j—hornblende with in serious alteration porphyritic biotite monzonitic granite, which is surrounded by late giant potassium feldspar phenocryst, and potassium feldspar shows weak sericitization; k, l—a large amount of biotite and feldspar can be seen in MMEs, along with elongated acicular apatite and blade-like biotite; Amp—hornblende; Bt—biotite; Chl—chlorite; Kfs—potassium feldspar; Pl—plagioclase; Q—quartz; S-Bt—secondary biotite; in-Bt—interstitial biotite; Ap—apatite

4 洼兴 Mo 多金属矿床蚀变矿化特征

4.1 蚀变特征

洼兴 Mo 多金属矿床的蚀变发育强烈,分布范围较大且普遍具叠加现象。花岗岩侵入体的蚀变类型主要为钾长石化、次生黑云母化、云英岩化、绢英岩化和青磐岩化(图 5)。钾化蚀变以早期的次生钾长石和晚期的次生黑云母发育为特征。钾长石化在花

岗闪长岩和黑云母二长花岗岩中呈弥漫状发育,主要表现为基质中长石类矿物的钾长石化而使岩石手标本呈现肉红色(图 5a、5b)。黑云母化蚀变主要发育在黑云母二长花岗岩中,其表现形式多样,例如次生黑云母聚集呈椭球状(图 5b)、黑云母交代角闪石斑晶(图 5d)等。此外,镜下可见呈脉状分布的次生黑云母,干涉色呈黄褐色,自形程度差,解理不发育,单个颗粒表现出单向延长的特征,以明显的塑性变形显著区别于岩浆黑云母(图 5e),与矿化的相关性

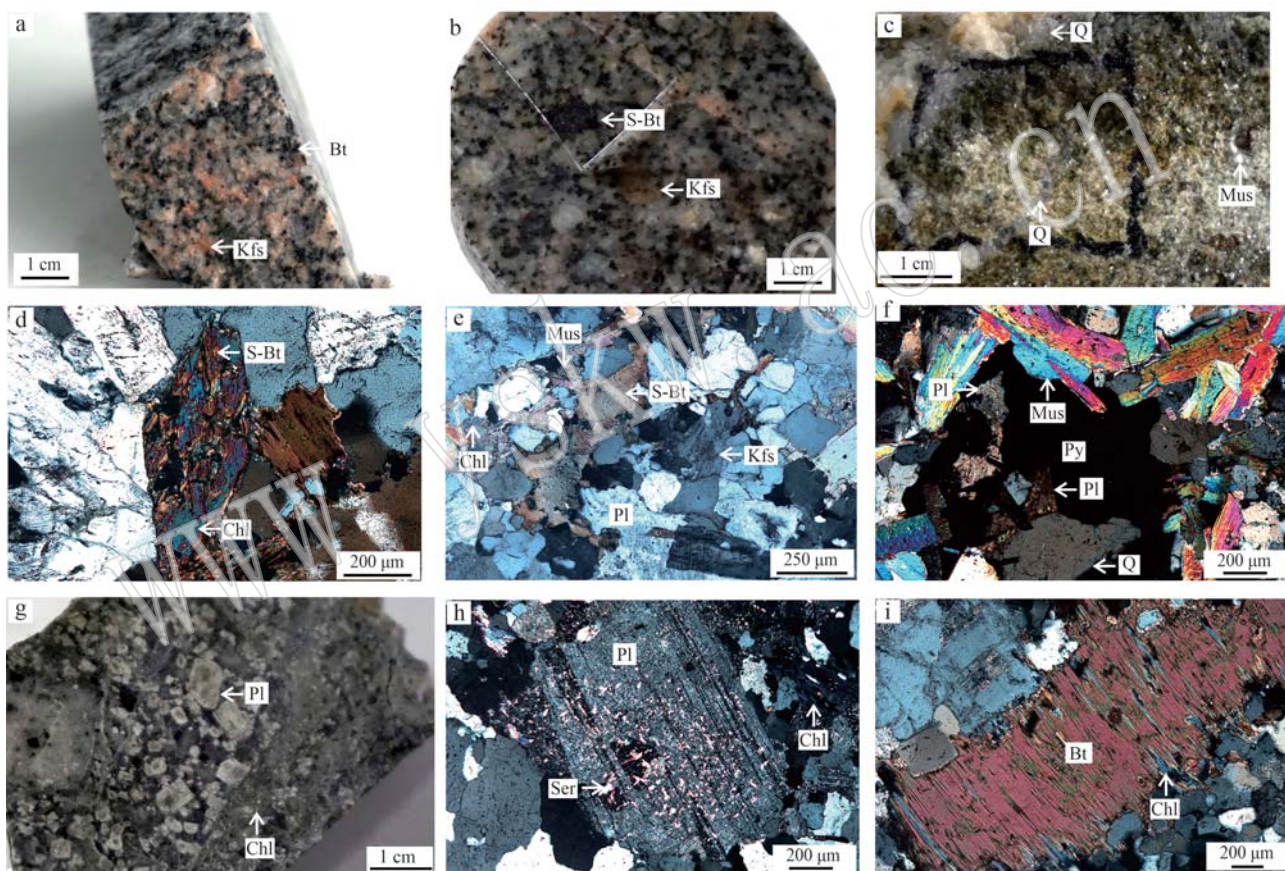


图 5 洼兴 Mo 多金属矿床蚀变类型

Fig. 5 Alteration types of the Waxing Mo polymetallic deposit

a—花岗闪长岩中发育的钾长石化蚀变; b—黑云母二长花岗岩中发育的钾长石化、黑云母化蚀变,其中黑云母呈团块状; c—黑云母二长花岗岩中发育的云英岩化蚀变; d—角闪石斑晶蚀变为黑云母,后又被绿泥石交代(正交偏光); e—次生黑云母呈脉状展布(正交偏光); f—黑云母二长花岗岩云英岩化(正交偏光); g—黑云母二长花岗岩发生绢英岩化蚀变和青磐岩化蚀变呈灰绿色; h—斜长石斑晶蚀变为绢云母(正交偏光); i—黑云母部分蚀变为绿泥石(正交偏光); Chl—绿泥石; Kfs—钾长石; Mus—白云母; Pl—斜长石; Q—石英; Ser—绢云母; S-Bt—次生黑云母

a—potassic alteration developed in granodiorite; b—K-feldspar and biotite alterations developed in biotite monzonitic granite, where biotite shows a spherical shape; c—greisenization alteration developed in biotite monzonitic granite; d—hornblende phenocrysts were altered into biotite and then partially metasomatized by chlorite (cross-polarized light); e—secondary biotite spreads in veins (cross-polarized light); f—greisenization alteration developed in biotite monzonitic granite (cross-polarized light); g—biotite monzonitic granites undergo sericite alteration and propylitic alteration to grayish green; h—plagioclase phenocryst overprinted by sericite (cross-polarized light); i—biotite phenocrysts were partially transformed into chlorite (cross-polarized light); Chl—chlorite; Kfs—potassium feldspar; Mus—muscovite; Pl—plagioclase; Q—quartz; Ser—sericite; S-Bt—secondary biotite

相对较弱。云英岩化也主要发育在黑云母二长花岗岩中,以弥漫状蚀变为主(图 5c)。岩石蚀变较强,原有的矿物颗粒全部或大部分被白云母和石英替代,岩体的结构因蚀变而变得模糊不清。镜下可见早期形成的含铁、镁硅酸盐和铝硅酸盐矿物(如黑云母、长石等)被石英和白云母等矿物交代,形成白云母-黄铁矿-石英共生组合,其中交代黑云母斑晶形成的白云母仍保留原矿物的晶形和解理特征(图 5f)。绢英岩化蚀变在花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩中均有分布,其蚀变特征与云英岩化蚀变相似,但蚀变强度较弱,表现形式主要为绢云母交代斜长石斑晶而使岩石手标本呈现灰白色(图 5g、5h),与矿化关系弱。青磐岩化为矿区内分布最广的蚀变类型,以弥漫状绿泥石化蚀变为主,基质中长石矿物多发生弱绿泥石化而使手标本呈灰绿色(图 5g)。此外,部分绿泥石为沿黑云母解理方向或颗粒边部经交代作用形成(图 5i)。

4.2 矿化特征

洼兴为斑岩型 Mo-W-Cu 多金属矿床,主要矿石矿物和硫化物包括辉钼矿、白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂等。辉钼矿是洼兴 Mo 多金属矿床最主要的矿石矿物,呈铅灰色,具金属光泽,手标本中或以片状集合体独立产出(图 6i),或赋存于白钨矿中呈浸染状产出(图 6c),二者均与钾长石化密切相关(图 6f、6i)。其中,赋存于白钨矿中的辉钼矿呈自形-半自形板状(图 6l),且与白钨矿表现出相互穿插的特征,推测二者应为同期热液活动的产物。白钨矿也是矿区内重要的矿石矿物,以其中是否含辉钼矿划分为两种类型。不含辉钼矿的白钨矿呈稀疏浸染状构造(5%~25%),在紫光灯下呈蓝白色荧光(图 6b),对应的手标本中见强烈云英岩化蚀变和黑云母化蚀变发育(图 6c),镜下见白钨矿-黑钨矿-黄铜矿-黄铁矿共生组合(图 6h),而辉钼矿发育较少;含辉钼矿的白钨矿紫光灯下表现为黄白色荧光(图 6d),与钾长石化密切相关。黄铜矿是矿区常见的含铜硫化物(图 6a),主要呈不规则粒状形成于次生钾长石和石英颗粒的间隙中,形成黄铜矿-钾长石-绿泥石-石英共生组合(图 6f)。此外,镜下可见黄铜矿包裹早期云英岩化蚀变形成的白云母,同时伴生黄铁矿,二者相互穿插(图 6j),接触关系截然。毒砂为柱状晶体,镜下见毒砂-金红石-白云母-石英共生组合(图 6k)。综上,洼兴矿区 Cu、Mo 矿化主要与钾化有关,而 W 矿化与云英岩化蚀变关系更密切。

5 分析方法

5.1 锆石 U-Pb 定年

选取二长花岗岩(MG-CK4、MG-CK5)、花岗闪长岩(GD-ZK2、GD-XZK10)和黑云母二长花岗岩岩体(BMG-CK6、BMG-CK7)中的6个样品开展锆石 U-Pb 定年。锆石单矿物分选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。分析之前,对锆石颗粒进行透射、反射光照片和阴极发光(CL)图像的拍摄,选择无包裹体区域进行分析。锆石 U-Pb 同位素和微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱上完成。激光系统为 GeoLas Pro 193 nm ArF 准分子激光,质谱仪为 Agilent 7500x ICP-MS。激光束斑为 32 μm ,脉冲频率为 5 Hz,能量密度约为 10 J/cm²。He 气被用作载气,在进入 ICP-MS 之前通过 T-connector 与氦气混合。每次分析包括 60 s 的样本数据采集和大约 20 s 的背景采集(气体空白)。以锆石 91500 为外标,校正质量歧视与元素分馏;以 QH 和 PL 为质控样,监控质量数据。采用 ICPMS-Datacal 软件程序对原始数据进行处理(Liu *et al.*, 2010),年龄计算及制图采用 Isoplot(ver4.15)程序完成。

5.2 全岩主微量元素

全岩主量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成,采用 ME-XRF06 化验分析(偏硼酸锂溶解,X 荧光光谱分析),各氧化物检测范围为 0.01%~100%。

全岩微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。称取已烘干的岩石样品粉末 50 mg,放置于特氟龙溶样杯中,再加入 HF+HNO₃ 混合酸,加盖后置于不锈钢套内,在 185℃ 条件下加热 32 h 使样品溶解。开盖蒸至近干再加入 HNO₃ 溶液,加盖后置于 140℃ 加热板上进行溶解。随后在溶液中加入 Rh 内标溶液来进行基体效应和仪器漂移校正。稀释所得澄清溶液,然后用 Pasma Quant MS Elite 型等离子质谱仪进行分析,详细分析流程见 Qi 等(2000)。

5.3 锆石 Hf 同位素

锆石进行 U-Pb 年龄测定后,在相同位置采用 LA-MC-ICP-MS 测定锆石的 Lu-Hf 同位素比值,相关测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国

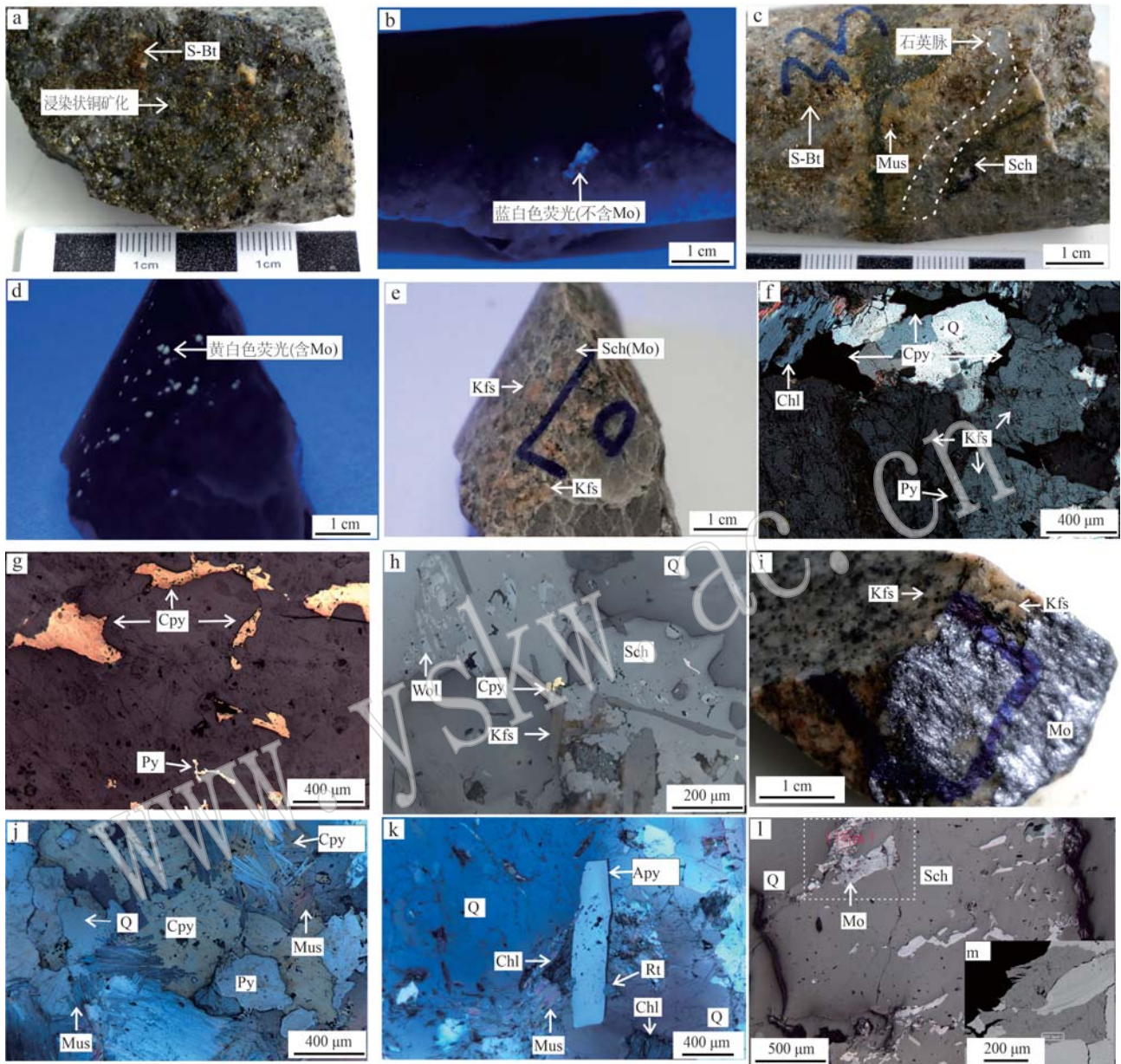


图6 矿石手标本和显微镜下特征

Fig. 6 Hand specimens and microscopic characteristics of ore-bearing rocks

a—花岗闪长岩中浸染状黄铜矿化; b、c—白钨矿手标本照片, 紫外灯下白钨矿呈蓝白色荧光, 与次生的黑云母、白云母共生; d、e—白钨矿手标本照片, 紫外灯下白钨矿呈黄白色荧光, 表明其中发育辉钼矿, 与次生钾长石共生; f、g—见黄铜矿、黄铁矿、钾长石、绿泥石蚀变矿物组合(正交偏光及反射光); h—白钨矿-黑钨矿-黄铜矿-黄铁矿共生组合, 其中黄铜矿、黄铁矿仅少量发育(反射光); i—呈片状集合体的辉钼矿; j—黄铁矿、黄铜矿共生(反射光); k—毒砂-金红石-白云母-绿泥石矿物组合(反射光); l、m—辉钼矿和白钨矿相互穿插(反射光和背散射图像); Apy—毒砂; Cpy—黄铜矿; Chl—绿泥石; Kfs—钾长石; Mo—辉钼矿; Mus—白云母; Pl—斜长石; Py—黄铁矿; Q—石英; Rt—金红石; Sch—白钨矿; S-Bt—次生黑云母; Wol—黑钨矿

a—disseminated chalcopyrite in granodiorite; b, c—scheelite is blue-white fluorescence under the purple lamp, and the secondary biotite, muscovite symbiosis; d, e—scheelite under the purple lamp is yellow-white fluorescence, indicating that molybdenite is developed, and secondary potassium feldspar symbiosis; f, g—the altered mineral assemblage of chalcopyrite, pyrite, potassium feldspar, chlorite (cross-polarized light and reflected light); h—scheelite-wolframite-chalcopyrite-pyrite symbiosis, the formation of chalcopyrite and pyrite are only observed insignificantly (reflected light); i—molybdenite as a lamellar aggregate; j—pyrite and chalcopyrite symbiosis (reflected light); k—the altered mineral assemblage of arsenopyrite, rutile, muscovite, chlorite (reflected light); l, m—molybdenite and scheelite are interspersed (reflected light and BSE image); Apy—arsenopyrite; Cpy—chalcopyrite; Chl—chlorite; Kfs—potassium feldspar; Mo—molybdenite; Mus—muscovite; Pl—plagioclase; Py—pyrite; Q—quartz; Rt—rutile; Sch—scheelite; S-Bt—secondary biotite; Wol—wolframite

家重点实验室完成。使用澳大利亚科学仪器公司的 RESOLUTION-LR 激光烧蚀系统联合 Nu Instruments 公司的 Nu Plasma III MC-ICP-MS 进行实验。193 nm 准分子激光经一组光束输送系统均匀化后,以 6.0 J/cm^2 的通量聚焦在锆石表面。剥蚀方案使用直径为 $40 \text{ }\mu\text{m}$ 的束斑,以 6 Hz 的重复频率持续 40 s (相当于 240 个脉冲)。He 气作为载气,有效地将气溶胶输送到 MC-ICP-MS。分析过程中,锆石 91500、Plešovice 作为质控样,以 PENGLAI 锆石 (Li *et al.*, 2010) 为标样进行同位素校正。初始 Hf 同位素计算中,地壳平均 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值采用 0.015,现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.283 25 和 0.038 4 (Griffin, 2000),球粒陨石对应值为 0.282 772 和 0.033 2。衰变常数采用 1.867×10^{-11} (Söderlund *et al.*, 2004)。

6 实验结果

6.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石 U-Pb 定年结果列于表 1。所选颗粒均为自形晶,长度为 $150 \sim 300 \text{ }\mu\text{m}$,长宽比一般为 $1:2 \sim 1:3$ 。所有锆石均显示振荡环带 (图 7),Th/U 值位于 $0.1 \sim 1$ 之间 (表 1),表明其均为典型岩浆锆石,其结晶年龄应能够代表岩体的侵位年龄。

6.1.1 二长花岗岩

样品 MG-CK4 采自二长花岗岩。20 个分析点显示出两个年龄群:其中一组锆石 T-W 交点年龄为 $174 \pm 1.2 \text{ Ma}$ (MSWD=0.31),另一组为 $181 \pm 1.6 \text{ Ma}$ (MSWD=1.01, $n=7$; 图 7a),较老的一组可能代表继承的锆石年龄。相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $175 \pm 1.2 \text{ Ma}$ (MSWD=0.40, $n=11$),与较年轻一组一致,代表岩体的结晶年龄。

样品 MG-CK5 也采自二长花岗岩,共获得 18 个分析点的锆石 U-Pb 年龄。其中 3 个分析点平均年龄为 $189 \pm 3.2 \text{ Ma}$,可能代表继承锆石;另外 6 个分析点具有显著较高的 $^{238}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$,暗示可能发生了显著 Pb 丢失的锆石。剩余 9 颗锆石的下交点年龄为 $177 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (MSWD=0.31; 图 7b),与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $177 \pm 1.8 \text{ Ma}$ (MSWD=0.43, $n=10$) 基本一致。上述结果表明,二长花岗岩岩浆活动时间为 $177 \pm 1.9 \text{ Ma} \sim 174 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 。

6.1.2 花岗闪长岩

样品 GD-ZK2 和 GD-XZK10 取自花岗闪长岩。分析的 2 个样品的锆石的普通铅含量均较低 (图 7c、7d)。样品 GD-ZK2 共分析 22 个点,其中 11 个点的 T-W 年龄为 $169 \pm 2.1 \text{ Ma}$ (MSWD=1.6, 图 7c),与加

权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $169 \pm 3.3 \text{ Ma}$ (MSWD=0.65, $n=17$) 一致。被排除在外的 13 个颗粒中有 4 个年龄较大 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄均大于 180 Ma),可能为继承锆石。另 7 个锆石颗粒可能遭受了 Pb 丢失,导致 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄低于 160 Ma (图 7c)。对样品 GD-XZK10 的 16 颗锆石进行分析,其中一组为 $178 \pm 2.6 \text{ Ma}$ (MSWD=0.062, $n=5$; 图 7d),可能代表继承锆石;另外 3 颗可能是由于铅丢失,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $163 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (图 7d)。另一个分析点谐和度小于 90%。剩余 8 粒锆石的交点年龄为 $170 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (MSWD=1.08; 图 7d),其加权 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $171 \pm 2.9 \text{ Ma}$ (MSWD=0.57, $n=8$)。上述结果表明,花岗闪长岩侵位时间为 $170 \pm 1.9 \text{ Ma} \sim 169 \pm 2.1 \text{ Ma}$ 。

6.1.3 黑云母二长花岗岩

样品 BMG-CK6 和 BMG-CK7 采自于黑云母二长花岗岩。对样品 BMG-CK6 共开展 25 个点的分析测试,扣除 4 颗 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较老 ($>180 \text{ Ma}$) 的继承锆石 (图 7e) 和 5 颗铅丢失的锆石年龄点后,剩余 16 颗锆石晶体获得交点年龄为 $172 \pm 1.4 \text{ Ma}$ (MSWD=1.4; 图 7e),与加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相近 ($172.1 \pm 1.5 \text{ Ma}$; MSWD=0.89, $n=16$),应为岩体的侵位年龄。

对于样品 BMG-CK7,排除 2 颗 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较老 ($>178 \text{ Ma}$) 的继承锆石 (图 7f) 和 3 颗铅丢失的锆石年龄点 (图 7f)。剩余 14 颗锆石交点年龄为 $172 \pm 1.5 \text{ Ma}$ (MSWD=3.1; 图 7f),与加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相近 ($172 \pm 1.0 \text{ Ma}$; MSWD=1.4, $n=14$)。上述结果表明,黑云母二长花岗岩岩浆活动时间为 $172 \pm 1.5 \text{ Ma} \sim 172 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 。

综上所述,二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩的年龄分别集中在 $177 \pm 1.9 \text{ Ma} \sim 174 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 、 $170 \pm 1.9 \text{ Ma} \sim 169 \pm 2.1 \text{ Ma}$ 和 $172 \pm 1.5 \text{ Ma} \sim 172 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 。

6.2 岩石主微量元素组成

6.2.1 主量元素

选取矿区二长花岗岩 (2 个样品)、花岗闪长岩 (23 个样品) 和黑云母二长花岗岩 (8 个样品) 进行全岩分析,主量元素组成见表 2。结合岩石学特征和岩相学观察,3 个岩体的特征可以归纳如下: ① $\text{SiO}_2 = 64.41\% \sim 77.77\%$,均值为 68.97% ,其中二长花岗岩 ($70.45\% \sim 71.80\%$) 和黑云母二长花岗岩 ($70.31\% \sim 77.77\%$) 的二氧化硅值相对较高,与其岩石学特征相吻合; ② $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.02\% \sim 8.72\%$,均值为 7.70% ,在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图解中 (图 8a),分布在花岗闪长岩至花岗岩区域; ③ $\text{K}_2\text{O} = 1.55\% \sim 5.37\%$,均值为 3.92% ,含量总体较高,

表 1 汪兴矿区岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis results of igneous rocks in the Waxing deposit

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma								
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$						
					$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$					
花岗岩类长岩 (GD)																	
GD-ZK2-3	44.4	289	948	0.31	0.053 4	0.001 5	0.193 8	0.005 7	0.025 8	0.000 4	180	5	164	3	177	5	
GD-ZK2-6	33.3	324	1 066	0.30	0.048 3	0.001 2	0.184 1	0.004 7	0.027 1	0.000 4	172	4	172	3	167	4	
GD-ZK2-7	22.9	274	707	0.39	0.050 1	0.001 4	0.197 1	0.006 1	0.027 9	0.000 5	183	5	177	3	181	5	
GD-ZK2-9	27.9	250	925	0.27	0.050 1	0.001 4	0.187 5	0.005 7	0.026 6	0.000 5	175	5	169	3	181	6	
GD-ZK2-11	16.2	20.8	1 010	0.02	0.049 6	0.001 8	0.186 6	0.008 2	0.027 3	0.001 0	174	7	173	7	222	18	
GD-ZK2-16	9.4	191	521	0.37	0.056 8	0.002 1	0.210 8	0.008 7	0.026 2	0.000 6	194	7	167	4	189	6	
GD-ZK2-17	12.9	109	298	0.37	0.050 8	0.002 3	0.192 2	0.009 5	0.026 7	0.000 7	178	8	170	4	174	7	
GD-ZK2-18	10.9	150	404	0.37	0.051 0	0.002 0	0.195 8	0.008 0	0.027 3	0.000 6	182	7	173	4	177	5	
GD-ZK2-20	27.3	198	313	0.63	0.050 5	0.001 9	0.193 0	0.007 7	0.027 1	0.000 5	179	7	172	3	177	4	
GD-ZK2-21	36.2	367	889	0.41	0.051 8	0.001 6	0.191 1	0.007 3	0.027 0	0.001 0	178	6	172	6	173	4	
GD-ZK2-24	34.1	343	1 199	0.29	0.052 2	0.001 5	0.189 2	0.006 1	0.025 7	0.000 6	176	5	163	4	186	5	
GD-ZK2-25	13.7	381	1 154	0.33	0.047 4	0.001 3	0.173 0	0.005 8	0.025 6	0.000 5	162	5	163	3	172	4	
GD-XZK10-4	17.8	141	550	0.26	0.051 2	0.001 6	0.191 7	0.006 4	0.027 1	0.000 3	178	5	172	2	173	5	
GD-XZK10-6	35.5	389	639	0.61	0.050 4	0.001 8	0.189 5	0.006 3	0.027 5	0.000 3	176	5	175	2	168	4	
GD-XZK10-7	34.9	513	1 414	0.36	0.047 5	0.001 1	0.174 9	0.004 6	0.026 6	0.000 3	164	4	169	2	169	4	
GD-XZK10-9	3.6	428	1 434	0.30	0.048 4	0.001 2	0.175 5	0.004 9	0.026 2	0.000 4	164	4	167	2	166	4	
GD-XZK10-11	44.2	118	117	1.01	0.045 3	0.003 6	0.167 3	0.014 0	0.026 8	0.000 5	157	12	170	3	171	7	
GD-XZK10-12	11.5	1 040	1 665	0.62	0.049 7	0.001 3	0.179 0	0.005 2	0.026 4	0.000 6	167	4	168	4	160	3	
GD-XZK10-13	39.9	252	398	0.63	0.050 7	0.001 8	0.193 5	0.007 2	0.027 8	0.000 5	180	6	177	3	176	4	
GD-XZK10-17	44.4	571	1 556	0.37	0.049 0	0.001 1	0.181 4	0.004 7	0.027 0	0.000 6	169	4	172	4	168	4	
二长花岗岩 (MG)																	
MG-CK4-1	30.0	660	946	0.70	0.048 5	0.001 2	0.183 5	0.004 6	0.027 3	0.000 3	171	4	174	2	164	3	
MG-CK4-6	4.5	61.3	149	0.41	0.050 8	0.002 6	0.189 8	0.009 1	0.027 5	0.000 4	176	8	175	2	160	6	
MG-CK4-7	21.4	455	671	0.68	0.046 7	0.001 4	0.175 9	0.005 2	0.027 3	0.000 3	165	5	173	2	166	3	
MG-CK4-8	10.3	97.5	363	0.27	0.052 7	0.001 8	0.197 4	0.006 7	0.027 3	0.000 3	183	6	174	2	176	6	
MG-CK4-9	12.3	124	432	0.29	0.050 9	0.001 8	0.189 4	0.006 7	0.027 1	0.000 4	176	6	173	2	171	5	
MG-CK4-10	5.5	66.6	187	0.36	0.051 0	0.002 2	0.189 5	0.007 6	0.027 3	0.000 3	176	6	174	2	173	7	
MG-CK4-13	4.4	44.8	148	0.30	0.052 6	0.002 7	0.201 4	0.009 7	0.027 9	0.000 4	186	8	177	3	188	9	
MG-CK4-16	25.2	216	895	0.24	0.048 6	0.001 2	0.183 9	0.004 9	0.027 4	0.000 3	171	4	175	2	174	4	
MG-CK4-18	3.9	57.8	129	0.45	0.054 7	0.003 0	0.204 6	0.010 4	0.027 6	0.000 4	189	9	175	2	170	4	
MG-CK4-19	4.3	55.9	144	0.39	0.052 5	0.003 1	0.195 7	0.009 6	0.027 7	0.000 4	181	8	176	2	170	7	
MG-CK4-20	10.9	66.1	388	0.17	0.050 7	0.001 7	0.193 5	0.006 6	0.027 7	0.000 3	180	6	176	2	177	7	
MG-CK5-2	26.1	225	921	0.24	0.053 6	0.001 5	0.224 6	0.006 2	0.030 4	0.000 3	206	5	193	2	233	6	
MG-CK5-3	23.5	302	841	0.36	0.054 3	0.001 3	0.219 4	0.005 5	0.029 2	0.000 3	201	5	186	2	199	5	
MG-CK5-4	3.2	34.1	124	0.27	0.046 5	0.003 0	0.181 7	0.011 0	0.028 1	0.000 4	170	9	179	3	173	8	
MG-CK5-5	6.0	110	221	0.50	0.046 0	0.002 3	0.173 8	0.008 8	0.027 6	0.000 3	163	8	175	2	185	6	
MG-CK5-7	2.1	53.2	73.8	0.72	0.048 1	0.004 2	0.179 8	0.013 9	0.027 7	0.000 5	168	12	176	3	167	9	
MG-CK5-14	8.1	44.4	328	0.14	0.050 5	0.002 1	0.198 2	0.008 3	0.028 5	0.000 5	184	7	181	3	192	9	
MG-CK5-15	6.4	70.3	253	0.28	0.053 0	0.002 5	0.197 6	0.009 0	0.027 5	0.000 5	183	8	175	3	192	8	
MG-CK5-16	5.2	85.2	198	0.43	0.046 6	0.002 9	0.178 0	0.010 9	0.027 8	0.000 5	166	9	177	3	183	8	

续表 1
Continued Table 1

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma							
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$				
二长花岗岩(MG)																
MG-CK5-17	2.5	33.1	95.1	0.35	0.050 9	0.004 1	0.194 2	0.013 7	0.028 1	0.000 6	180	12	179	4	185	13
MG-CK5-19	10.7	103	435	0.24	0.050 1	0.002 1	0.190 7	0.007 7	0.027 8	0.000 4	177	7	176	3	161	7
MG-CK5-20	6.3	101	322	0.31	0.048 6	0.002 3	0.187 4	0.009 4	0.027 9	0.000 4	174	8	177	2	171	6
黑云母二长花岗岩(BMG)																
BMG-CK6-1	12.5	132	410	0.32	0.048 7	0.002 2	0.185 1	0.008 1	0.027 2	0.000 4	172	7	173	2	173	5
BMG-CK6-2	16.9	216	543	0.40	0.047 3	0.001 5	0.181 5	0.005 5	0.027 4	0.000 4	169	5	174	2	160	4
BMG-CK6-4	27.3	282	877	0.32	0.048 1	0.001 4	0.185 8	0.005 5	0.027 4	0.000 4	173	5	174	2	175	4
BMG-CK6-5	20.8	237	660	0.36	0.048 4	0.001 5	0.187 6	0.005 9	0.027 5	0.000 5	175	5	175	3	168	4
BMG-CK6-6	27.4	280	902	0.31	0.050 3	0.001 5	0.190 3	0.005 7	0.026 7	0.000 4	177	5	170	2	163	4
BMG-CK6-7	11.0	116	366	0.32	0.049 2	0.002 7	0.181 3	0.009 1	0.026 4	0.000 5	169	8	168	3	164	7
BMG-CK6-8	23.9	249	778	0.32	0.049 5	0.001 4	0.187 8	0.005 3	0.026 8	0.000 4	175	5	170	3	170	4
BMG-CK6-9	5.0	59.3	158	0.38	0.051 8	0.002 9	0.197 2	0.010 5	0.027 2	0.000 5	183	9	173	3	174	8
BMG-CK6-10	30.1	323	966	0.33	0.048 7	0.001 5	0.186 5	0.005 7	0.026 9	0.000 5	174	5	171	3	168	5
BMG-CK6-18	37.2	448	1 281	0.35	0.050 2	0.001 9	0.181 1	0.008 1	0.026 4	0.001 3	169	7	168	8	163	4
BMG-CK6-19	8.6	79.1	273	0.29	0.049 9	0.002 5	0.191 2	0.009 1	0.028 2	0.001 1	178	8	179	7	198	9
BMG-CK6-20	5.1	82.6	155	0.53	0.050 3	0.002 8	0.189 6	0.010 6	0.027 0	0.000 6	176	9	172	4	171	7
BMG-CK6-21	14.2	249	424	0.59	0.044 6	0.001 7	0.173 9	0.006 7	0.027 6	0.000 5	163	6	176	3	170	5
BMG-CK6-22	20.7	206	622	0.33	0.057 5	0.002 0	0.228 6	0.008 5	0.028 1	0.000 6	209	7	179	4	197	6
BMG-CK6-23	16.4	201	519	0.39	0.050 0	0.001 7	0.188 9	0.006 5	0.026 7	0.000 4	176	6	170	3	171	5
BMG-CK6-24	16.8	191	538	0.36	0.051 7	0.001 5	0.194 5	0.006 1	0.026 6	0.000 4	180	5	169	3	165	5
BMG-CK7-2	8.4	125	309	0.40	0.051 9	0.002 0	0.190 5	0.007 4	0.026 7	0.000 3	177	6	170	2	177	6
BMG-CK7-4	31.9	467	1 180	0.40	0.050 2	0.001 3	0.186 3	0.004 5	0.026 8	0.000 2	173	4	171	1	172	4
BMG-CK7-7	22.4	221	861	0.26	0.050 7	0.001 3	0.190 3	0.004 8	0.027 2	0.000 3	177	4	173	2	167	4
BMG-CK7-8	20.8	200	792	0.25	0.049 9	0.001 5	0.187 9	0.005 3	0.027 3	0.000 2	175	5	174	1	165	5
BMG-CK7-9	7.5	101	280	0.36	0.050 9	0.002 7	0.188 3	0.009 7	0.026 9	0.000 3	175	8	171	2	171	8
BMG-CK7-10	19.3	294	700	0.42	0.046 9	0.001 3	0.177 5	0.005 1	0.027 3	0.000 3	166	4	174	2	166	4
BMG-CK7-11	21.0	232	798	0.29	0.044 5	0.001 4	0.166 3	0.005 1	0.027 1	0.000 2	156	4	172	2	168	4
BMG-CK7-12	15.6	176	592	0.30	0.048 4	0.001 4	0.180 3	0.005 3	0.026 9	0.000 2	168	5	171	2	177	5
BMG-CK7-13	16.8	177	639	0.28	0.051 4	0.001 5	0.193 5	0.005 9	0.027 3	0.000 3	180	5	173	2	178	5
BMG-CK7-14	26.4	272	1 019	0.27	0.049 6	0.001 2	0.184 5	0.004 2	0.026 9	0.000 2	172	4	171	2	173	4
BMG-CK7-16	28.6	463	1 045	0.44	0.049 6	0.001 0	0.185 9	0.003 6	0.027 2	0.000 2	173	3	173	1	159	3
BMG-CK7-17	5.8	87.1	209	0.42	0.049 7	0.002 7	0.189 4	0.010 5	0.027 6	0.000 5	176	9	176	3	168	6
BMG-CK7-18	18.3	210	735	0.29	0.046 3	0.001 5	0.167 2	0.005 6	0.026 8	0.000 8	157	5	171	5	164	5
BMG-CK7-20	6.3	86.7	233	0.37	0.050 5	0.002 3	0.189 1	0.008 3	0.027 6	0.000 5	176	7	173	3	174	7

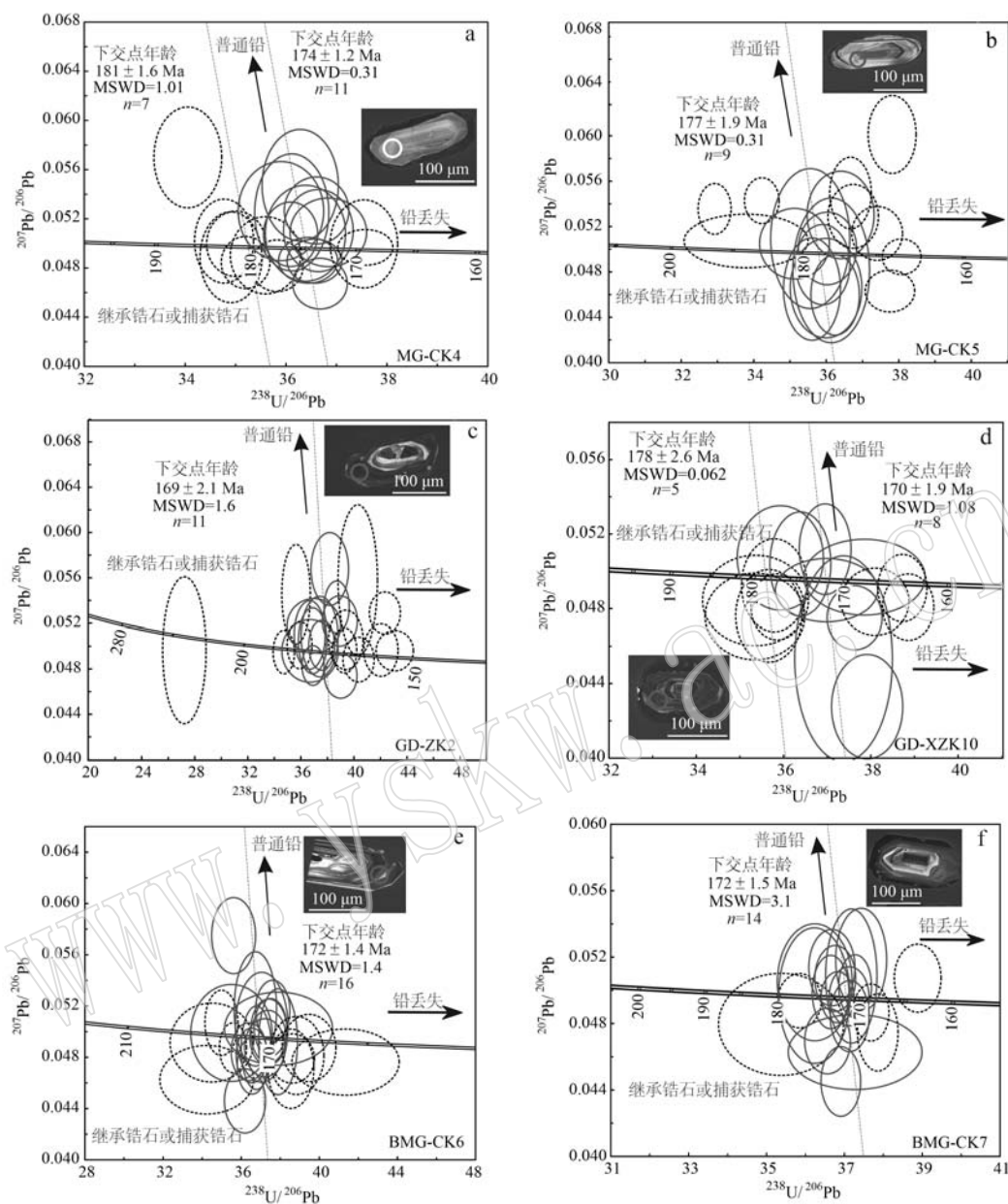


图 7 矿区岩体 Tera-Wasserburg 谐和年龄图 (Tera and Wasserburg, 1972)

Fig. 7 Concordance age diagram of Tera-Wasserburg rock mass in mining area (Tera and Wasserburg, 1972)

黑色虚线椭圆是在年龄计算中排除的分析点 (详情见正文)

the black and dashed ellipse is the analysis excluded in the age calculation (see text for details)

K_2O/Na_2O 平均值为 1.06, K_2O-SiO_2 图解中 (图 8b) 显示样品主要为高钾钙碱性系列; ④ 铝饱和指数 (A/CNK) = 0.98~1.21, 显示准铝质-弱过铝质花岗岩特征 (图 8c); ⑤ P_2O_5 含量变化较大 (0.02%~0.22%); ⑥ 在 SiO_2 和主要氧化物含量关系图解中 (图 9), SiO_2 与 P_2O_5 、 Al_2O_3 、 $TiFe_2O_3$ 、 MgO 、 TiO_2 呈现负相关关系, 表明可能存在 Fe-Ti 氧化物、长石和磷灰石等矿物的分离结晶 (Wu *et al.*, 2003a, 2003b;

Zhong *et al.*, 2009; 朱弟成等, 2009)。

6.2.2 微量元素

分析样品的稀土元素、微量元素分析结果见表 2。在球粒陨石标准化模式图 (图 10a) 和原始地幔标准化蛛网图 (图 10b) 中, 所有花岗岩类岩石表现出相似的模式, 富集大离子亲石元素 (Ba、Rb、U、Th、K) 和轻稀土元素 (LREE), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti) (图 10b)。中重稀土元素 (MREE, HREE) 相

表2 汪兴矿区岩浆岩主量($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) analysis results of igneous rocks in the Waxing deposit

样号	GD-1	GD-2	GD-3	GD-4	GD-5	GD-6	GD-7	GD-8	GD-9	GD-10	GD-11	GD-12	GD-13	GD-14	GD-15	GD-16	GD-17
SiO ₂	64.41	66.48	67.26	67.27	67.42	67.47	67.47	67.59	67.60	67.65	67.69	67.78	67.87	68.00	68.15	68.21	68.24
TiO ₂	0.58	0.54	0.61	0.54	0.57	0.54	0.58	0.55	0.55	0.55	0.52	0.54	0.59	0.58	0.55	0.58	0.55
Al ₂ O ₃	17.94	15.42	15.58	15.69	15.76	15.51	15.53	15.80	15.65	15.88	14.96	15.37	15.48	15.40	15.68	15.82	15.61
TFe ₂ O ₃	3.21	4.24	3.70	3.21	3.39	3.35	3.61	3.41	3.25	3.21	3.48	3.32	3.19	3.54	3.06	3.36	3.31
MnO	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.05	0.06
MgO	1.21	0.93	1.10	0.94	0.94	0.81	1.06	0.92	0.92	0.79	0.94	0.85	0.92	1.01	0.80	0.95	0.87
CaO	3.36	2.86	2.64	2.69	2.68	2.34	2.79	2.58	2.69	2.61	2.44	2.50	2.45	2.61	2.45	2.53	2.46
Na ₂ O	5.78	3.98	4.03	4.02	3.97	3.95	3.97	4.05	4.03	4.08	3.76	3.69	4.08	3.92	3.97	4.02	4.10
K ₂ O	1.55	3.70	3.49	3.88	3.84	3.95	3.58	3.61	3.95	3.54	3.74	3.96	3.39	3.79	3.82	3.58	3.52
P ₂ O ₅	0.22	0.18	0.19	0.18	0.21	0.18	0.18	0.18	0.16	0.19	0.17	0.18	0.19	0.19	0.19	0.20	0.18
A/NK	1.60	1.46	1.50	1.45	1.47	1.44	1.49	1.49	1.43	1.50	1.46	1.48	1.49	1.46	1.47	1.51	1.48
A/CNK	1.04	0.98	1.02	1.00	1.01	1.03	1.00	1.03	0.99	1.04	1.02	1.03	1.04	1.01	1.04	1.05	1.04
Mg [#]	0.39	0.25	0.32	0.32	0.31	0.27	0.31	0.29	0.31	0.26	0.28	0.28	0.30	0.30	0.28	0.30	0.29
Li	34.1	33.9	22.7	20.2	12.0	16.6	18.9	19.1	17.3	18.6	20.8	14.1	27.2	25.3	25.2	22.9	22.3
Be	9.75	1.91	2.49	2.33	2.26	2.33	2.26	2.22	2.26	2.39	2.18	2.20	3.06	2.20	2.46	2.45	2.32
Sc	6.68	5.95	5.68	6.99	6.37	6.12	7.06	5.99	6.05	6.14	6.52	5.78	2.47	6.11	6.21	6.13	6.21
V	51.3	37.8	42.6	39.4	43.5	38.3	45.5	42.0	38.2	42.5	37.5	38.4	32.0	41.0	39.5	40.3	40.5
Cr	14.1	12.6	18.8	27.6	16.4	14.3	30.8	19.4	19.1	15.7	17.3	20.9	18.3	16.6	22.2	15.7	18.9
Co	4.57	4.67	5.74	5.12	5.88	4.73	5.77	5.82	4.87	4.96	5.49	5.50	4.72	5.24	4.74	5.60	5.32
Ni	5.39	2.35	2.60	3.30	3.21	1.53	2.94	2.92	2.15	5.63	2.62	2.24	2.59	2.14	2.87	2.22	3.18
Ga	12.1	16.0	35.8	9.9	249.0	8.4	54.3	314.0	11.7	51.0	867.0	65.5	29.7	8.9	31.1	20.4	61.6
Rb	146	157	185	185	152	180	182	192	179	168	209	193	120	142	177	186	150
Sr	616	523	580	588	563	526	596	558	541	561	580	507	569	574	522	535	552
Y	17.8	12.8	15.1	14.8	14.3	13.2	15.5	12.6	13.8	13.7	12.6	13.8	11.3	13.3	13.2	13.7	13.1
Zr	221	187	194	218	182	196	210	184	193	184	161	183	193	190	191	188	198
Nb	16.0	10.6	12.8	11.9	11.9	11.2	12.5	10.8	11.4	11.3	10.8	11.7	11.5	11.6	11.8	12.2	11.9
Cs	9.68	7.71	9.11	7.22	8.85	5.86	8.22	9.41	6.79	10.40	9.59	9.04	6.29	7.21	6.50	9.03	7.76
Ba	199	801	736	1034	1042	914	832	829	949	815	808	1018	843	812	905	734	814
La	13.6	30.1	33.6	39.8	31.9	33.0	38.7	44.6	35.6	30.9	33.2	46.9	29.3	36.2	38.4	33.9	30.2
Ce	27.0	62.3	75.0	83.1	65.0	68.8	82.9	90.2	71.2	69.7	68.5	87.5	57.8	73.9	77.4	71.5	67.2
Pr	3.53	6.66	7.64	8.07	7.29	7.18	8.04	8.22	7.72	6.76	6.99	8.84	6.67	7.84	8.19	7.33	6.52
Nd	15.9	26.0	30.4	31.8	28.7	27.5	32.8	31.0	29.5	26.7	26.6	33.6	26.3	28.8	30.6	28.6	25.5
Sm	4.18	4.57	5.23	5.16	5.02	4.44	5.46	4.90	4.86	4.58	4.46	5.18	4.66	4.96	4.80	4.76	4.54
Eu	1.31	1.13	1.20	1.19	1.27	1.14	1.21	1.11	1.14	1.13	1.02	1.15	1.11	1.10	1.17	1.15	1.12
Gd	3.72	3.60	4.13	4.04	3.84	3.49	4.23	3.42	3.70	3.50	3.28	3.87	3.37	3.59	3.64	3.66	3.42
Tb	0.54	0.48	0.56	0.54	0.53	0.48	0.57	0.47	0.51	0.47	0.45	0.53	0.44	0.51	0.50	0.49	0.46
Dy	2.94	2.23	2.61	2.51	2.59	2.28	2.71	2.23	2.38	2.41	2.16	2.35	2.08	2.41	2.35	2.30	2.26
Ho	0.57	0.39	0.46	0.45	0.47	0.40	0.47	0.38	0.41	0.42	0.38	0.42	0.38	0.44	0.41	0.41	0.40
Er	1.54	1.01	1.21	1.18	1.24	1.07	1.23	1.01	1.11	1.11	1.01	1.12	0.98	1.16	1.12	1.07	1.06
Tm	0.23	0.15	0.18	0.17	0.18	0.16	0.18	0.15	0.17	0.17	0.15	0.16	0.14	0.17	0.16	0.15	0.16
Yb	1.49	0.98	1.20	1.16	1.23	1.09	1.22	1.02	1.10	1.09	1.03	1.07	0.93	1.15	1.08	1.03	1.04
Lu	0.22	0.15	0.18	0.17	0.18	0.16	0.18	0.15	0.17	0.16	0.15	0.16	0.14	0.17	0.16	0.15	0.15
Hf	5.43	4.33	4.61	5.24	4.73	4.56	5.05	4.46	4.70	4.46	4.05	4.48	4.90	4.84	4.56	4.46	4.72
Ta	1.23	0.98	1.50	1.24	1.28	1.14	1.21	1.08	1.22	1.20	1.13	1.23	1.04	1.29	1.22	1.27	1.21
Th	10.5	14.1	14.7	14.1	14.2	14.2	13.4	14.0	16.8	15.6	13.2	15.1	9.3	13.3	15.3	13.3	14.8
U	4.43	3.55	6.49	5.92	5.14	4.81	4.43	4.41	5.36	5.19	5.76	4.89	4.04	4.82	5.01	4.47	4.17
ΣREE	312	473	546	590	514	506	594	608	537	495	497	635	460	544	565	521	479
LREE	223	404	465	511	434	435	510	540	462	422	429	560	394	469	492	449	409
HREE	89.8	69.2	81.7	79.2	80.0	71.2	83.7	68.6	74.5	72.6	67.2	75.4	65.4	75.2	73.3	71.8	69.6
LREE/HREE	2.48	5.84	5.69	6.45	5.42	6.11	6.10	7.86	6.21	5.82	6.38	7.42	6.03	6.24	6.71	6.26	5.88
δEu	1.02	0.85	0.79	0.80	0.88	0.89	0.77	0.83	0.82	0.86	0.82	0.79	0.86	0.80	0.86	0.84	0.87
(La/Yb) _N	6.55	22.12	20.08	24.61	18.60	21.72	22.75	31.36	23.21	20.33	23.12	31.44	22.55	22.58	25.50	23.61	20.83
(La/Sm) _N	2.10	4.25	4.15	4.98	4.10	4.80	4.58	5.88	4.73	4.36	4.81	5.85	4.06	4.71	5.16	4.60	4.29
(Gd/Yb) _N	2.07	3.05	2.85	2.88	2.58	2.65	2.87	2.77	2.78	2.66	2.63	2.99	2.99	2.58	2.79	2.94	2.72

续表 2-1

Continued Table 2-1

样号	GD-18	GD-19	GD-20	GD-21	GD-22	GD-23	BMG-1	BMG-2	BMG-3	BMG-4	BMG-5	BMG-6	BMG-7	BMG-8	MG-1	MG-2	MMEs
SiO ₂	68.41	68.51	68.78	69.10	69.70	66.27	70.31	71.82	72.14	72.27	77.77	70.57	70.57	71.04	70.45	71.80	57.39
TiO ₂	0.54	0.56	0.56	0.40	0.39	0.53	0.43	0.30	0.26	0.54	0.09	0.41	0.42	0.35	0.45	0.25	1.03
Al ₂ O ₃	15.82	15.82	15.24	15.53	15.56	15.90	14.82	14.64	14.41	13.72	11.56	15.26	15.19	14.42	15.14	14.19	17.03
TFe ₂ O ₃	3.26	3.13	3.54	3.19	2.53	4.55	2.83	2.01	1.80	2.52	1.48	2.23	2.41	2.67	2.79	1.92	7.24
MnO	0.05	0.04	0.06	0.11	0.09	0.07	0.04	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.14
MgO	0.94	0.90	0.94	0.70	0.61	1.59	0.67	0.41	0.35	0.78	0.16	0.58	0.58	0.64	0.63	0.33	2.72
CaO	2.63	2.49	2.33	1.21	1.56	3.04	1.84	1.32	1.38	1.62	0.73	1.38	1.68	1.60	2.15	1.40	3.32
Na ₂ O	4.00	3.68	3.67	2.89	3.57	4.00	3.64	3.66	3.57	3.22	2.80	3.19	3.39	3.71	3.76	3.55	3.53
K ₂ O	3.42	3.75	4.01	5.37	4.51	2.70	4.10	5.05	5.15	3.80	4.75	4.91	4.41	4.04	3.90	4.95	4.65
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.18	0.16	0.17	0.17	0.15	0.08	0.07	0.19	0.02	0.11	0.10	0.13	0.14	0.07	0.29
A/NK	1.54	1.56	1.47	1.47	1.45	1.67	1.42	1.27	1.26	1.46	1.18	1.44	1.47	1.37	1.45	1.27	1.22
A/CNK	1.05	1.08	1.04	1.21	1.14	1.06	1.07	1.05	1.03	1.11	1.04	1.17	1.13	1.08	1.06	1.03	1.18
Mg [#]	0.31	0.31	0.28	0.24	0.25	0.53	0.29	0.21	0.20	0.40	0.14	0.30	0.27	0.26	0.27	0.20	0.47
Li	15.0	18.4	21.8	66.2	57.0	53.7	28.7	21.1	18.2	30.8	21.7	39.6	36.4	24.4	50.7	37.2	93.1
Be	2.32	2.06	2.30	4.13	2.88	2.46	2.74	3.34	3.72	3.35	2.49	2.10	2.18	3.07	4.58	3.42	3.16
Sc	6.28	5.90	5.70	6.03	5.47	13.40	5.52	5.43	4.84	5.78	3.65	5.72	5.51	5.57	5.36	4.88	18.3
V	43.2	41.0	37.7	21.6	19.7	47.6	27.5	13.4	10.8	37.4	5.8	28.0	26.6	25.5	24.7	11.2	126
Cr	23.1	17.2	19.1	9.2	8.5	24.4	15.7	17.7	21.1	16.4	17.9	13.4	15.2	16.9	11.7	12.3	51.7
Co	5.30	3.89	5.05	2.36	2.55	8.35	3.39	2.60	2.20	3.07	1.19	1.43	2.43	3.36	3.66	2.19	16
Ni	3.41	2.36	1.99	1.07	0.53	4.00	1.83	1.25	0.73	1.70	0.31	1.74	1.33	1.07	1.29	0.37	9.69
Ga	23.5	471.0	610.0	184.0	123.0	6.8	44.4	5.26	8.76	35.60	1.66	115.00	66.90	21.30	5.48	3.79	24.4
Rb	158	153	165	289	216	144	163	209	233	207	177	198	178	197	211	227	231
Sr	562	513	505	632	656	510	420	322	284	411	107	386	408	359	389	239	371
Y	13.1	13.2	12.4	10.3	9.5	19.4	12.1	7.26	6.81	12.80	11.80	15.80	13.40	14.50	12.00	7.61	37.8
Zr	179	177	170	195	189	183	176	192	189	183	90	184	166	145	177	177	219
Nb	11.2	11.2	11.2	9.2	9.1	10.1	12.8	14.7	14.6	11.8	6.8	11.2	11.9	11.8	15.7	14.4	20.4
Cs	7.05	8.23	8.22	5.56	3.94	8.75	5.79	7.50	6.67	9.79	7.65	6.63	7.64	9.98	13.60	8.47	12.6
Ba	715	738	907	1493	1363	645	806	844	731	643	349	1227	1037	562	624	691	1228
La	34.7	33.6	25.2	38.5	36.8	39.8	30.5	55.7	56.6	38.0	14.4	32.0	31.2	30.4	40.1	57.2	27.2
Ce	75.0	67.6	50.4	84.7	79.1	76.0	57.8	101	104	82	24	70	64	64	78	103	63.1
Pr	7.09	7.81	5.83	7.86	7.56	8.08	6.78	10.3	10.5	8.8	2.9	7.5	7.0	6.3	8.8	11.0	8.24
Nd	26.9	30.4	22.6	30.1	28.6	31.1	24.9	36.9	36.5	33.5	10.1	29.3	26.2	23.2	31.9	38.9	35.1
Sm	4.56	5.13	4.27	4.75	4.36	5.35	4.51	5.81	5.70	5.70	1.87	5.19	4.29	3.99	5.76	6.05	7.69
Eu	1.07	1.17	1.06	1.12	1.08	1.28	0.94	0.79	0.74	1.04	0.33	1.16	1.09	0.79	0.89	0.78	1.21
Gd	3.30	3.81	3.22	3.05	2.81	4.46	3.26	3.57	3.68	3.95	1.63	4.27	3.23	3.08	3.98	3.70	6.91
Tb	0.46	0.53	0.45	0.40	0.38	0.67	0.45	0.42	0.41	0.54	0.27	0.61	0.46	0.45	0.51	0.45	1.12
Dy	2.29	2.46	2.21	1.85	1.74	3.46	2.17	1.59	1.52	2.45	1.65	3.00	2.22	2.37	2.35	1.66	6.49
Ho	0.40	0.44	0.41	0.33	0.29	0.68	0.40	0.25	0.24	0.43	0.35	0.55	0.41	0.43	0.38	0.27	1.34
Er	1.07	1.13	1.09	0.87	0.75	1.91	1.04	0.61	0.55	1.11	1.04	1.44	1.12	1.16	0.97	0.61	3.71
Tm	0.16	0.16	0.16	0.13	0.11	0.29	0.15	0.08	0.07	0.16	0.17	0.21	0.17	0.17	0.14	0.08	0.55
Yb	1.06	1.05	1.08	0.86	0.68	1.97	1.02	0.51	0.47	1.05	1.17	1.35	1.12	1.17	0.88	0.53	3.67
Lu	0.16	0.16	0.16	0.13	0.09	0.30	0.15	0.07	0.07	0.15	0.18	0.19	0.16	0.18	0.12	0.08	0.54
Hf	4.54	4.42	4.39	4.59	4.42	4.82	4.68	5.17	5.31	4.59	2.94	4.67	4.41	3.99	4.96	5.08	5.66
Ta	1.20	1.07	1.23	0.82	0.76	1.10	1.29	1.61	1.69	1.13	1.21	1.11	1.21	1.34	2.24	1.65	2.25
Th	16.7	11.3	13.8	7.7	7.3	17.9	15.9	27.6	29.7	12.1	20.9	11.6	12.8	19.1	18.1	29.6	9.40
U	5.31	3.98	5.16	2.35	2.28	1.71	4.80	6.10	6.83	4.84	2.14	5.76	6.46	8.96	2.87	3.48	2.62
ΣREE	519	529	414	557	525	464	461	691	698	588	225	536	482	460	581	716	650
ΣLREE	449	453	345	498	472	379	394	639	648	513	170	445	412	389	511	662	451
ΣHREE	69.6	75.7	69.2	58.8	52.2	84.5	67.5	52.0	50.5	75.7	54.6	91.0	70.2	71.7	70.1	54.2	200
ΣLREE/ΣHREE	6.46	5.99	4.98	8.47	9.05	4.49	5.83	12.3	12.8	6.8	3.1	4.9	5.9	5.4	7.3	12.2	2.3
δEu	0.84	0.81	0.87	0.90	0.94	0.80	0.75	0.53	0.50	0.67	0.58	0.75	0.90	0.69	0.57	0.50	0.51
(La/Yb) _N	23.5	23.0	16.7	32.3	38.9	15.4	21.4	78.0	86.6	26.0	8.8	17.0	20.0	18.6	32.8	77.0	5.32
(La/Sm) _N	4.91	4.23	3.81	5.23	5.45	4.91	4.37	6.19	6.41	4.30	4.97	3.98	4.70	4.92	4.49	6.10	2.28
(Gd/Yb) _N	2.58	3.00	2.47	2.95	3.43	2.01	2.64	5.77	6.49	3.11	1.15	2.62	2.39	2.18	3.75	5.74	1.56

注: ^TFe₂O₃表示全铁; Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); δEu = Eu_N / (Sm_N + Gd_N)^{1/2}; 比值中的下标 N 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Sun and McDonough, 1989; 表中和正文中的数据为去除烧失量后重新计算百分比数据。

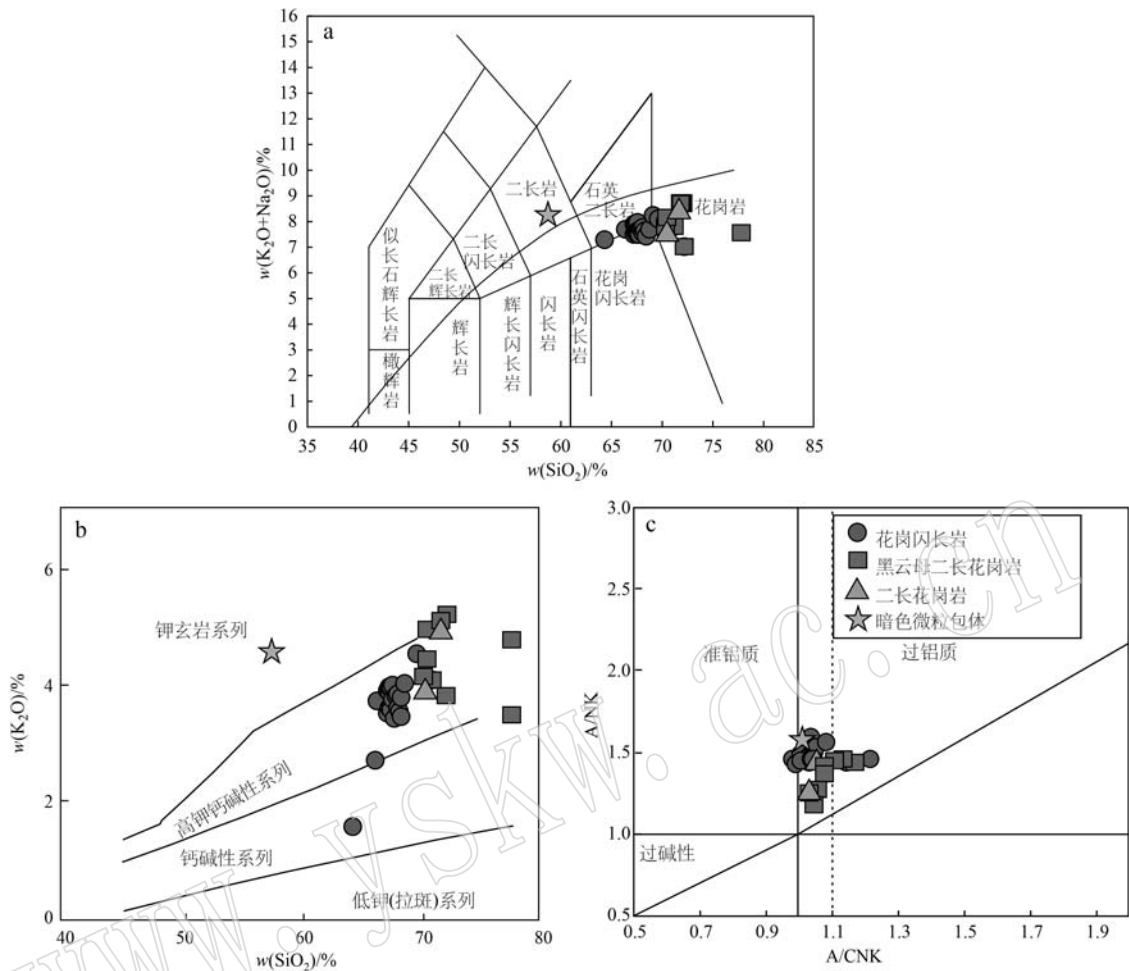


图8 TAS岩性判别图解(a, 据 Middlemost, 1994)、 K_2O-SiO_2 岩浆系列判别图解(b, 据 Rollinson, 1993)

和矿区岩体 A/NK-A/CNK 判别图解(c, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 8 TAS lithology discrimination diagram (a, after Middlemost, 1994), identification diagram of K_2O-SiO_2 magma series (b, after Rollinson, 1993) and A/NK-A/CNK identification diagram of mining rock mass (c, after Maniar and Piccoli, 1989)

对亏损,呈扁平状。其中,二长花岗岩($Eu/Eu^* = 0.50 \sim 0.57$)和黑云母二长花岗岩($Eu/Eu^* = 0.50 \sim 0.90$)相对于花岗闪长岩($Eu/Eu^* = 0.77 \sim 1.02$)具有更为明显的Eu负异常,可能是由于长石的分离结晶作用。

总体而言,二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩具有相似的主微量元素组成。

6.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素结果见表3。二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩的 $\varepsilon Hf(t)$ 值均为正值(3.9~18.8)且较为接近,相应二阶段 Hf 模式年龄分别为 474 ± 251 Ma (36.5 Ma~781.4 Ma, $n=23$)、 417 ± 184 Ma (54.5 Ma~835 Ma, $n=20$) 和 394 ± 202 Ma (9.4 Ma~770.7 Ma, $n=26$)。

7 讨论

7.1 岩石成因

7.1.1 花岗岩成因类型

根据不同的源区特征,花岗岩成因类型主要可分为 I、S、A 和 M 型 (Chappell and White, 1974; Whalen *et al.*, 1987; 吴福元等, 2007),花岗岩的岩石类型确定需要综合岩相学和地球化学证据(吴福元等, 2007)。据岩相学观察,研究区三类花岗岩均大量发育石英、长石等矿物,但是相较于花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩,二长花岗岩中暗色矿物发育较少,且未见角闪石。上述三类花岗岩均未见碱性暗色矿物的出现,此外,在 Zr-10 000 Ga/Al 及 Nb-

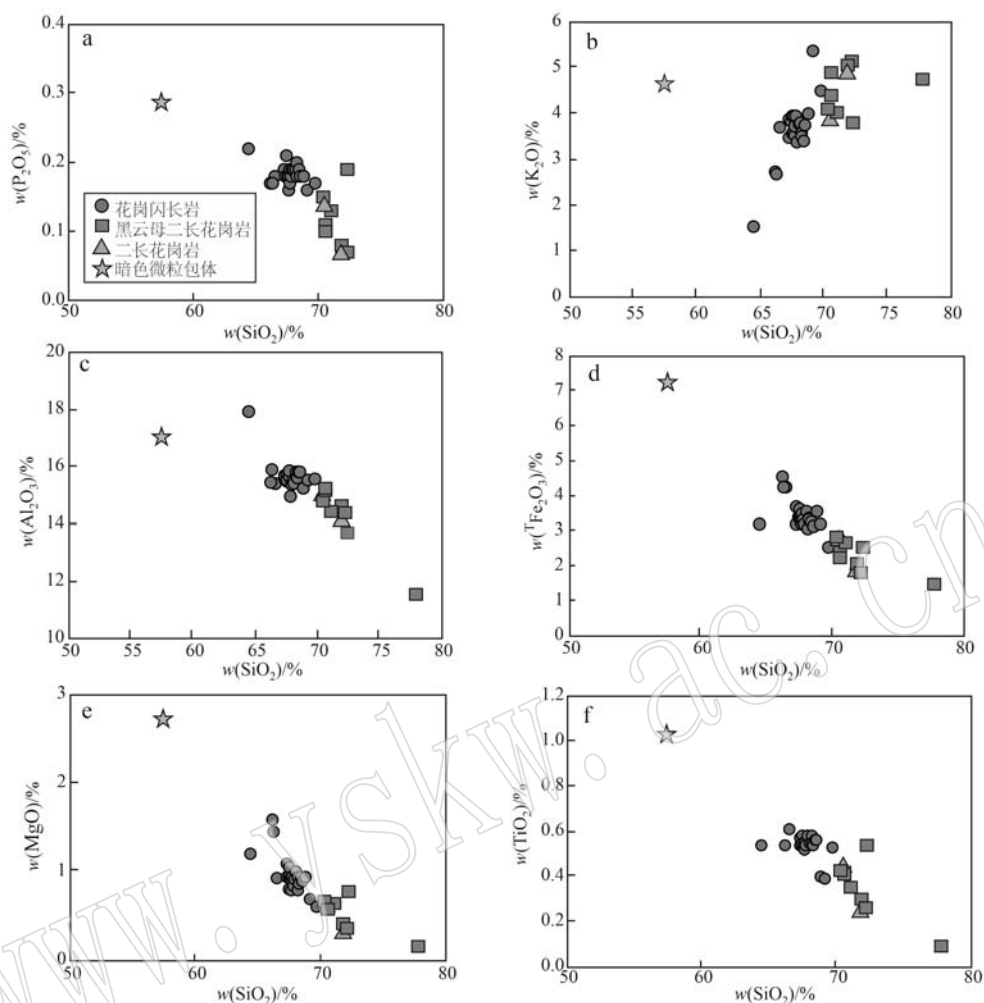


图 9 汪兴地区二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩 Harker 图解

Fig. 9 Harker diagram of monzonitic granite, granodiorite and biotite monzonitic granite in Waxing area

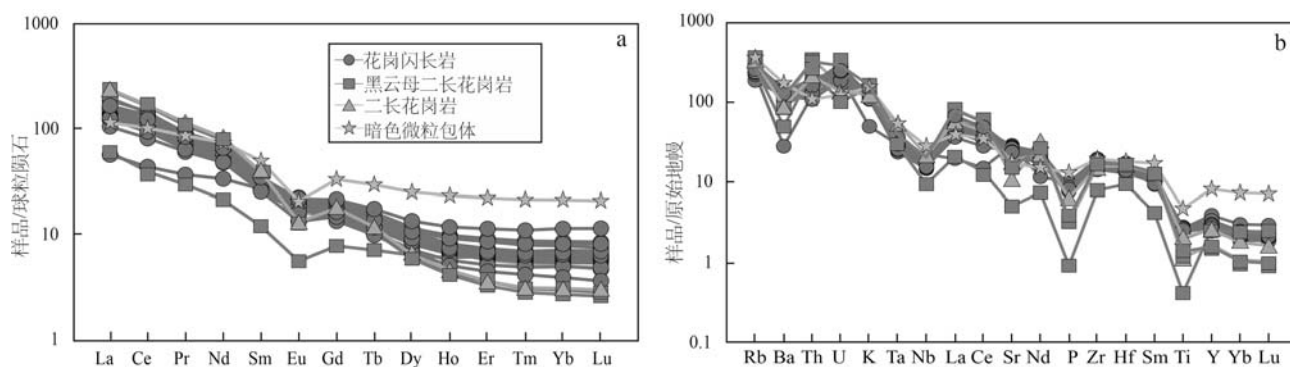


图 10 汪兴地区花岗岩稀土模式图(a)和微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element concentrations (b) of the Waxing granitoids (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

10 000 Ga/Al 图解中,样品均落在 I 型和 S 型花岗岩区(图 11),排除 A 型花岗岩特征。M 型花岗岩可由

玄武质岩浆高度分离结晶形成(White, 1979),本文花岗岩 MnO 含量(0.03%~0.06%)远低于 M 型花

表 3 汪兴矿区岩浆岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Results of Lu-Hf isotope analysis of zircon from igneous rocks in the Waxing deposit

测试点	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{2\text{DM}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
花岗闪长岩 (GD)										
GD-ZK2-3	168	0.028 778	0.000 975	0.283 049	0.000 012 0	9.78	13.4	288	359	0.001 337
GD-ZK2-6	172	0.019 485	0.000 633	0.282 925	0.000 009 9	5.39	9.11	460	635	0.000 911
GD-ZK2-7	177	0.037 956	0.001 113	0.283 129	0.000 010 0	12.6	16.4	173	171	0.001 639
GD-ZK2-9	169	0.028 441	0.000 886	0.283 032	0.000 010 0	9.21	12.8	310	394	0.001 283
GD-ZK2-11	173	0.034 075	0.001 010	0.283 050	0.000 008 9	9.84	13.5	285	352	0.001 354
GD-ZK2-16	167	0.020 739	0.000 604	0.282 964	0.000 009 4	6.80	10.4	403	549	0.001 039
GD-ZK2-17	170	0.035 994	0.001 007	0.283 093	0.000 011 0	11.3	15.0	225	257	0.001 497
GD-ZK2-18	173	0.026 139	0.000 749	0.282 943	0.000 008 9	6.06	9.78	435	593	0.000 978
GD-ZK2-20	172	0.048 211	0.001 509	0.283 183	0.000 010 0	14.5	18.1	97.6	54.5	0.001 814
GD-ZK2-21	172	0.023 503	0.000 732	0.282 960	0.000 009 2	6.63	10.3	411	557	0.001 033
GD-ZK2-24	163	0.043 063	0.001 289	0.283 117	0.000 013 0	12.2	15.7	192	208	0.001 565
GD-ZK2-25	163	0.031 422	0.000 932	0.283 013	0.000 012 0	8.53	12.0	337	442	0.001 202
GD-XZK10-4	172	0.018 769	0.000 576	0.282 882	0.000 011 0	3.90	3.90	518	835	0.000 390
GD-XZK10-6	175	0.034 366	0.000 986	0.283 007	0.000 011 0	8.30	12.0	347	450	0.001 203
GD-XZK10-7	169	0.037 621	0.001 281	0.283 039	0.000 011 0	9.44	13.0	304	382	0.001 302
GD-XZK10-9	167	0.036 330	0.001 163	0.283 051	0.000 012 0	9.86	13.4	286	356	0.001 341
GD-XZK10-11	170	0.045 098	0.001 423	0.283 009	0.000 014 0	8.37	11.9	349	452	0.001 195
GD-XZK10-12	168	0.041 340	0.001 355	0.283 070	0.000 012 0	10.5	14.1	260	314	0.001 407
GD-XZK10-13	177	0.045 049	0.001 412	0.283 063	0.000 011 0	10.3	14.0	270	324	0.001 402
GD-XZK10-17	172	0.026 516	0.000 764	0.282 915	0.000 009 9	5.06	8.76	474	657	0.000 876
二长花岗岩 (MG)										
MG-CK4-1	174	0.026 935	0.000 888	0.282 997	0.000 013	7.95	11.7	360	473	0.001 167
MG-CK4-6	175	0.036 052	0.001 053	0.283 080	0.000 011	10.9	14.6	244	284	0.001 461
MG-CK4-7	173	0.043 203	0.001 141	0.283 156	0.000 014	13.6	17.2	136	113	0.001 725
MG-CK4-8	174	0.035 168	0.001 044	0.283 103	0.000 010	11.7	15.4	211	233	0.001 539
MG-CK4-9	173	0.045 881	0.001 197	0.283 164	0.000 023	13.9	17.5	124	94.5	0.001 753
MG-CK4-10	174	0.026 833	0.000 717	0.283 015	0.000 011	8.59	12.3	333	430	0.001 233
MG-CK4-13	177	0.051 362	0.001 461	0.283 189	0.000 016	14.8	18.5	88.1	36.5	0.001 848
MG-CK4-16	175	0.028 811	0.000 881	0.283 002	0.000 009	8.14	11.9	352	460	0.001 188
MG-CK4-18	175	0.015 038	0.000 420	0.282 941	0.000 009	5.98	9.79	434	594	0.000 979
MG-CK4-19	176	0.013 717	0.000 397	0.282 879	0.000 009	3.77	7.60	521	735	0.000 760
MG-CK4-20	176	0.013 263	0.000 390	0.282 897	0.000 008	4.42	8.24	495	694	0.000 824
MG-CK5-2	193	0.026 204	0.000 843	0.282 896	0.000 009	4.39	8.52	502	689	0.000 852
MG-CK5-3	186	0.038 490	0.001 141	0.283 089	0.000 014	11.2	15.2	230	254	0.001 517
MG-CK5-4	179	0.015 755	0.000 462	0.282 858	0.000 010	3.03	6.90	551	781	0.000 690
MG-CK5-5	175	0.021 680	0.000 611	0.282 922	0.000 008	5.29	9.07	464	640	0.000 907
MG-CK5-7	176	0.016 576	0.000 483	0.282 862	0.000 011	3.19	7.00	545	773	0.000 700
MG-CK5-14	181	0.028 750	0.000 843	0.282 958	0.000 009	6.58	10.5	415	556	0.001 046
MG-CK5-15	175	0.017 127	0.000 468	0.282 871	0.000 010	3.49	7.28	533	754	0.000 728
MG-CK5-16	177	0.050 462	0.001 407	0.283 183	0.000 010	14.5	18.3	96.3	49.6	0.001 827
MG-CK5-17	179	0.013 354	0.000 376	0.282 878	0.000 010	3.73	7.62	522	736	0.000 762
MG-CK5-18	188	0.026 119	0.000 737	0.282 896	0.000 014	4.37	8.41	502	692	0.000 841
MG-CK5-19	176	0.033 600	0.001 026	0.283 028	0.000 009	9.04	12.8	318	402	0.001 300
MG-CK5-20	177	0.029 535	0.000 837	0.283 014	0.000 011	8.55	12.3	336	432	0.001 200

续表 3

Continued Table 3

测试点	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	εHf(0)	εHf(<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} /Ma	<i>t</i> _{2DM} /Ma	<i>f</i> _{Lu/Hf}
黑云母二长花岗岩 (BMG)										
BMG-CK6-1	173	0.021 690	0.000 689	0.282 941	0.000 009	5.98	9.75	437	598	0.000 970
BMG-CK6-2	174	0.027 490	0.000 884	0.282 971	0.000 010	7.05	10.8	396	530	0.001 077
BMG-CK6-5	175	0.032 589	0.000 919	0.283 036	0.000 009	9.33	13.1	305	384	0.001 306
BMG-CK6-6	170	0.022 742	0.000 693	0.282 970	0.000 010	7.00	10.6	397	535	0.001 065
BMG-CK6-7	168	0.044 684	0.001 215	0.283 158	0.000 009	13.6	17.2	133	112	0.001 720
BMG-CK6-8	170	0.050 055	0.001 422	0.283 203	0.000 010	15.2	18.8	68.5	9.35	0.001 882
BMG-CK6-9	173	0.028 724	0.000 844	0.283 031	0.000 011	9.17	12.9	311	394	0.001 288
BMG-CK6-18	168	0.028 323	0.000 888	0.283 029	0.000 010	9.10	12.7	314	402	0.001 269
BMG-CK6-19	179	0.022 274	0.000 687	0.282 982	0.000 011	7.44	11.3	379	501	0.001 129
BMG-CK6-20	172	0.020 917	0.000 634	0.282 961	0.000 013	6.69	10.4	408	553	0.001 039
BMG-CK6-21	176	0.026 156	0.000 782	0.283 005	0.000 011	8.24	12.0	348	452	0.001 201
BMG-CK6-22	179	0.027 832	0.000 870	0.283 033	0.000 009	9.22	13.0	309	388	0.001 304
BMG-CK6-23	170	0.019 832	0.000 640	0.282 947	0.000 010	6.19	9.86	428	586	0.000 986
BMG-CK7-2	170	0.032 918	0.000 965	0.283 040	0.000 014	9.46	13.1	300	378	0.001 309
BMG-CK7-4	171	0.053 348	0.001 562	0.283 197	0.000 012	15.0	18.6	76.6	22.5	0.001 862
BMG-CK7-7	173	0.029 957	0.000 898	0.282 979	0.000 008	7.33	11.0	385	513	0.001 103
BMG-CK7-8	174	0.050 735	0.001 474	0.283 170	0.000 010	14.1	17.7	116	83	0.001 772
BMG-CK7-9	171	0.015 446	0.000 452	0.282 864	0.000 012	3.26	6.97	542	771	0.000 697
BMG-CK7-11	172	0.032 193	0.000 943	0.282 990	0.000 010	7.71	11.4	371	489	0.001 139
BMG-CK7-12	171	0.054 023	0.001 618	0.283 144	0.000 011	13.2	16.7	154	144	0.001 675
BMG-CK7-13	173	0.033 222	0.000 989	0.282 968	0.000 012	6.92	10.6	403	539	0.001 062
BMG-CK7-14	171	0.036 177	0.001 054	0.283 024	0.000 009	8.90	12.6	323	414	0.001 255
BMG-CK7-16	173	0.060 804	0.001 564	0.283 191	0.000 021	14.8	18.4	86.3	36.6	0.001 842
BMG-CK7-17	176	0.036 176	0.001 005	0.283 026	0.000 010	8.97	12.7	320	407	0.001 271

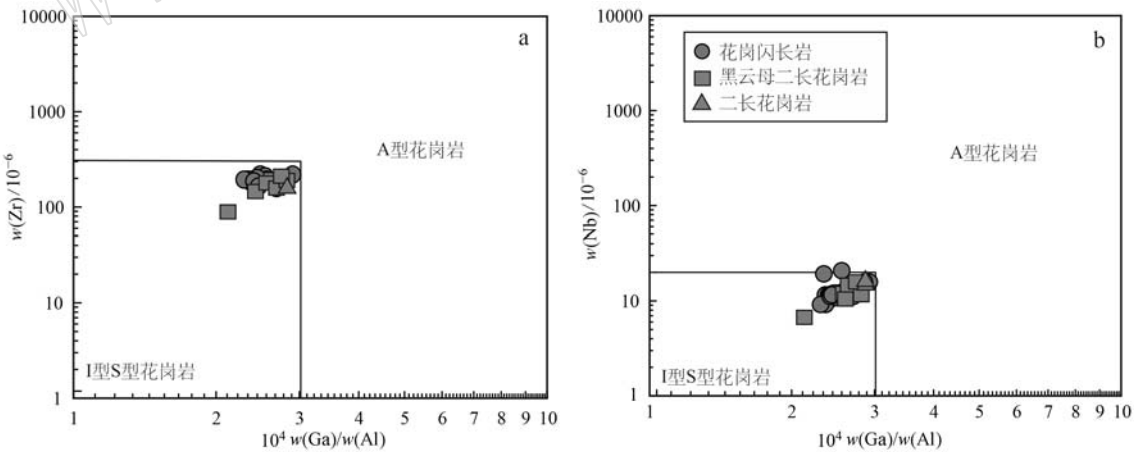


图 11 Zr-10 000 Ga/Al (a) 及 Nb-10 000 Ga/Al 分类图解 (b, 据 Whalen *et al.*, 1987)
Fig. 11 Classification diagrams for Zr-10 000 Ga/Al (a) and Nb-10 000 Ga/Al (b, after Whalen *et al.*, 1987)

岗岩的平均值(0.11%, Whalen *et al.*, 1987), 并且玄武质岩浆分离结晶通常产生基性和超基性堆晶, 不相容元素(如 LREE)含量会随着结晶分异程度的增加而逐渐增加, 而闪长质包体和寄主花岗岩的

LREE 元素含量比较接近(图 10a), 区域内也很少有大规模出露的基性岩浆, 因此三岩体不太可能是玄武质岩浆分离结晶的产物。此外, 根据前人研究成果, 典型的 S 型花岗岩是发育堇青石、白云母的强过

铝质岩石,其 A/CNK 远大于 1.1 (Sylvester, 1998),与之相比,洼兴花岗岩类 $A/CNK = 0.98 \sim 1.21$,属于准铝质-弱过铝质岩石(图 8c),暗色矿物主要为黑云母和角闪石,明显不同于 S 型花岗岩的特征。Harker 图解中, SiO_2 与 P_2O_5 呈负相关关系(图 9a),具有 I 型花岗岩特征 (Chappell, 1999),同时在似斑状花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩薄片均见原生的角闪石斑晶(图 4g、4j),综上,岩相学和地球化学的共同特征均表明洼兴地区岩体为准铝质至弱过铝质的 I 型花岗岩。

7.1.2 分离结晶过程

随着 SiO_2 含量的增加,矿区花岗岩中 MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量均呈系统性下降,表明其变化趋势可能与暗色矿物(如辉石、角闪石)、Fe-Ti 氧化物、长石和磷灰石的分离结晶作用有关 (Wu *et al.*,

2003a, 2003b; Zhong *et al.*, 2009; 朱弟成等, 2009)。Nb、Ta、Ti 的负异常被认为与含 Ti 相分离结晶有关(钛铁矿、榍石等)。磷灰石分离结晶可能导致 P 负异常。低 MgO 含量(0.16%~1.21%)与富镁矿物(辉石、角闪石)的分离结晶一致。岩浆演化过程中,Ba、Sr 及 Eu 的亏损常被认为与钾长石和斜长石的分离结晶作用有关 (Arth, 1976)。在 Ba-Eu/Eu* 和与 Sr-Eu/Eu* 的关系图(图 12)中,Ba 负异常主要受控于钾长石的分离结晶,而 Sr 含量的降低则与少量斜长石分离结晶有关。此外,相较于花岗闪长岩体 ($Eu/Eu^* = 0.77 \sim 1.02$),二长花岗岩 ($Eu/Eu^* = 0.50 \sim 0.57$) 和黑云母二长花岗岩 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.50 \sim 0.90$) 和 Sr 负异常更为显著(图 12)。上述表明二长花岗岩和黑云母二长花岗岩中钾长石和斜长石的分离结晶程度更高。

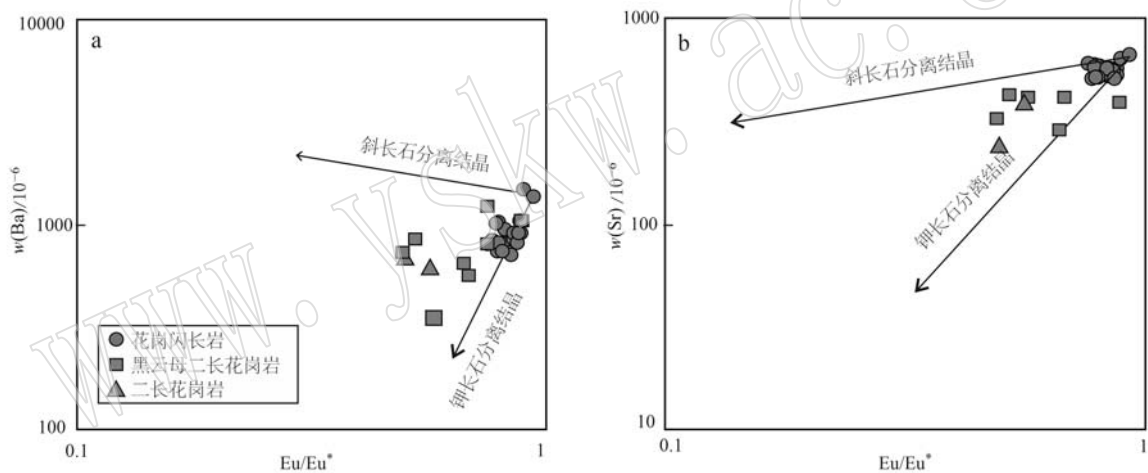


图 12 洼兴岩体 Ba-Eu/Eu* (a) 和 Sr-Eu/Eu* (b) 图解

Fig. 12 Ba-Eu/Eu* (a) and Sr-Eu/Eu* (b) diagrams of the Waxing pluton

各分配系数引自 Arth (1976); 以分异指数最低的样品 (GD-2) 代表原始岩浆, 岩浆的分异程度随箭头方向逐渐增加
the mineral fractionation vectors, calculated using partition coefficients derive from Arth (1976), the sample with the lowest DI (GD-2) is supposed to be parent melt; the degree of differentiation of magma increases gradually with the direction of the arrow

7.1.3 岩浆源区特征

一般认为,花岗岩是地壳物质部分熔融的产物 (Wu *et al.*, 2003b)。洼兴地区二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩相似的主微量元素以及同位素组成,表明三者可能具有相同的源区和成岩方式。此外,三者亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, Nb/Ta 值(7.6~13)类似于地壳 (Nb/Ta = 11~12; Sun and McDonough, 1989),但变化区间较大,显示源区可能以壳源为主但存在少量幔源物质加入 (Rudnick and Fountain, 1995; 图 13b)。

前人研究表明,在花岗岩成岩过程中,幔源物质可能存在以下两种参与方式:第一种为幔源岩浆上涌底垫地壳底部,促使上覆地壳发生部分熔融形成长英质岩浆,两者在深部岩浆房发生混合,形成壳幔混合岩浆;第二种为幔源岩浆首先发生底侵作用,在基底岩石下部形成新生地壳,在后期热事件的作用下,由新生地壳发生部分熔融 (邱检生等, 2008)。针对本研究的花岗岩而言, Hf 同位素二阶段模式年龄较为年轻,且 Hf 同位素组成落入兴蒙造山带东段岩浆岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分布范围 (Yang *et al.*, 2006; 图 13a)。

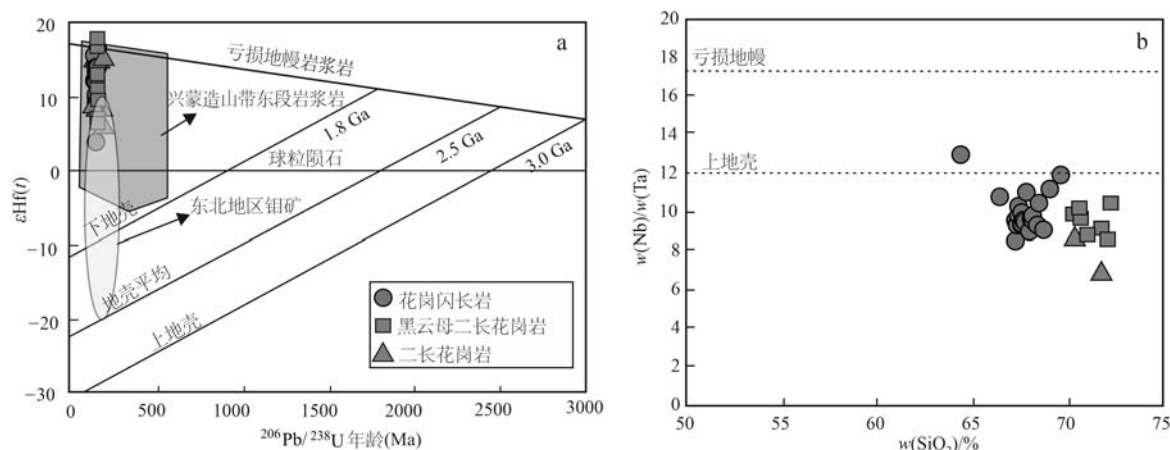


图 13 小兴安岭-张广才岭地区中生代 Mo 矿侵入体 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -锆石年龄图解(a, 据 Yang *et al.*, 2006; 东北地区钼矿数据来自: Zhou *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2014a; Zhou *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017b; Zheng and Yu, 2017; Zeng *et al.*, 2018; Nie *et al.*, 2019; Xing *et al.*, 2020)和矿区岩体 Nb/Ta-SiO₂ 图解(b, 据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 13 Diagram of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -zircon age (a, after Yang *et al.*, 2006; northeast molybdenum deposits data collected in Zhou *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2014a; Zhou *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017b; Zheng and Yu, 2017; Zeng *et al.*, 2018; Nie *et al.*, 2019; Xing *et al.*, 2020) and Nb/Ta-SiO₂ diagram (b, after Sun and McDonough, 1989) of Mesozoic intrusions of Mo deposits in Lesser Xing'an Range-Zhangguangcailing area

因此推测矿区花岗岩类的岩浆源区更可能经历了第二种壳幔混合模式。综上所述,汪兴矿区二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩应是由幔源岩浆底侵、加热新生地壳发生部分熔融形成。

7.2 成岩时代与大地构造背景

矿区二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果分别为 177 ± 1.9 Ma ~ 174 ± 1.2 Ma、 170 ± 1.9 Ma ~ 169 ± 2.1 Ma 和 172 ± 1.5 Ma ~ 172 ± 1.4 Ma。结合与铜钨矿化共生的辉钼矿 Re-Os 定年结果(加权平均年龄: 169.0 ± 2.2 Ma, MSWD=0.042; $n=5$; 作者未发表数据)和前文判断的岩体与蚀变-矿化的空间关系,笔者认为矿区花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩分别与 Cu-W 矿化 Mo-W 矿化有关,即后两者为成矿期岩体,而二长花岗岩中未见明显的蚀变-矿化关系,且形成时代略早于成矿时代,为成矿前岩体。

前人对小兴安岭-张广才岭地区构造演化历史开展了深入研究。Dong 等(2019)通过对佳木斯与松嫩地块挤压接触部位的角闪岩相变质岩开展金红石 U-Pb 定年研究,将牡丹江洋的闭合时代限定在中侏罗世(177 ~ 172 Ma)。该闭合时代与汪兴地区花岗岩的形成时代相近或略早,暗示后者可能形成于牡丹江闭合之后的晚碰撞-后碰撞背景。在构造背景判别图解中(图 14),汪兴的岩浆岩样品也主要落在碰撞晚期-碰撞后花岗岩范围内。综合区域已有

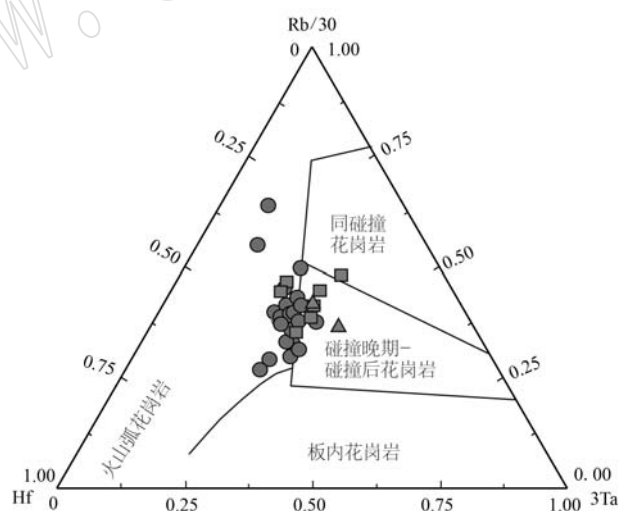


图 14 汪兴二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩构造环境判别图解(据 Harris *et al.*, 1986)

Fig. 14 Diagram of tectonic environment discrimination of the monzonite, granodiorite and biotite monzonite of the Waxing area (after Harris *et al.*, 1986)

研究成果,本研究提出汪兴花岗岩类形成于佳木斯和松嫩地块碰撞晚期-碰撞后的背景。

中酸性岩的全岩 Sr/Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值常用来判断古地壳厚度和构造背景的变化,这是因为岩浆演化过程中某些矿物相的稳定性受压力的影响(石榴子石、斜长石、角闪石等),而 La、Yb、Sr、Y 等元素在这些矿物间的分配系数显著不同,因而可通过上述

元素的比值特征及其变化反演分离结晶矿物种类、进而推测其形成的地壳厚度和岩浆演化压力 (Chiaradia, 2014, 2015, 2021; Chapman *et al.*, 2015; Dhuime *et al.*, 2015; DePaolo *et al.*, 2019; Balica *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2020; Sundell *et al.*, 2021; Loucks, 2021; Luffi and Ducea, 2022; Ouyang and Caulfield, 2023; Huang *et al.*, 2023)。汪兴矿区花

岗岩类从成矿前到成矿期, $(La/Yb)_N$ 值发生显著降低 (图 15b), 可能指示该地区在此期间发生了挤压-伸展的构造转换并伴随地壳减薄。在仅考虑地壳厚度的情况下, $(La/Yb)_N$ 值和 Sr/Y 值通常具有较好的相关性, 而本文中花岗岩 Sr/Y 值却没有表现出相同的规律 (图 15a), 这可能是由于矿区成矿期花岗岩较高的分异程度 ($MgO < 1\%$) 和长石强烈的分离结

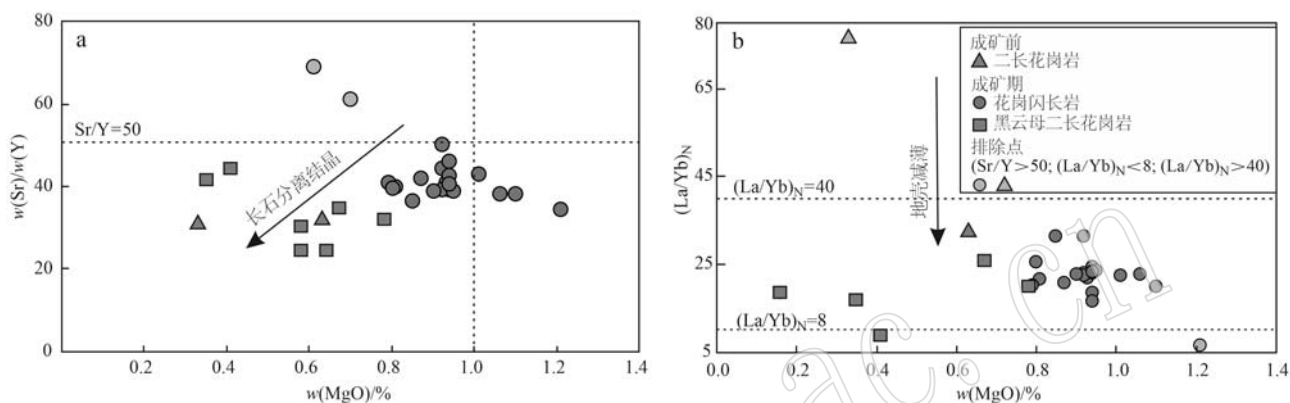


图 15 汪兴二长花岗岩、花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩 Sr/Y - MgO (a) 和 $(La/Yb)_N$ - MgO (b) 判别图解

Fig. 15 Sr/Y - MgO (a) and $(La/Yb)_N$ - MgO (b) discrimination diagram of the monzonitic granite, granodiorite and biotite monzonitic granite from Wuxing area

灰色点 MgO - Sr/Y - D (海拔高度) 和 MgO - $(La/Yb)_N$ - D (海拔高度) 模型统计之外的数据 [排除 $Sr/Y > 50$ 、 $(La/Yb)_N < 8$ 及 $(La/Yb)_N > 40$ 的数据点; Luffi and Ducea, 2022; 王楠, 2023]

the gray points MgO - Sr/Y - D (altitude) and MgO - $(La/Yb)_N$ - D (altitude) model are not statistical data [excluding $Sr/Y > 50$, $(La/Yb)_N < 8$ and $(La/Yb)_N > 40$; Luffi and Ducea, 2022; Wang Nan, 2023]

晶作用 (图 12) 导致的。

综上, 汪兴 Mo 多金属矿床成矿岩体成岩模式可能为: 在佳木斯和松嫩地块碰撞挤压向碰撞后伸展的转换背景下, 幔源岩浆上涌底垫地壳底部, 导致早期形成的新生地壳发生部分熔融并混合少量幔源岩浆, 混合岩浆上侵并经历一定程度的分异演化形成汪兴地区花岗岩类。

7.3 对 Mo 矿床形成的指示意义

东北地区在侏罗纪-白垩纪发生大规模斑岩-矽卡岩型 Mo 成矿作用, 但关于该地区是否存在一个富集 Mo 的岩浆源区, 一直存在较大争议。近期研究显示, 东北地区与 Mo 成矿相关的中酸性侵入岩具有非常宽泛的 Sr - Nd - Hf 同位素组成, 且上述同位素组成与矿化规模间并无相关性。这一现象表明东北地区大规模 Mo 成矿作用并不要求存在一个富 Mo 的岩浆源区。成矿岩浆既可以起源于古老下地壳, 也可

起源于新生的下地壳, 还可能起源于幔源岩浆与壳源岩浆的混合 (Shu and Chiaradia, 2021)。本文中汪兴地区的花岗岩具有非常亏损的锆石 Hf 同位素组成 (图 13a), 可能起源于新生下地壳的部分熔融, 但同样形成了规模可观的 Mo 矿化。这一特征为前人研究提供了新的证据, 表明岩浆源区并不是控制东北地区大规模 Mo 成矿作用的主要因素。

本研究中成矿期花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩分别以 Cu 、 Mo 矿化为主, 二者锆石 U - Pb 定年结果及 Hf 同位素组成基本相似 (图 7; 图 13a), 且未见明显的穿插关系 (黑龙江省第五地质勘查院, 2020^①), 此外, 结合岩相学和 Ba - Eu/Eu^* 和 Sr - Eu/Eu^* 判别图解 (图 4d、图 12), 黑云母二长花岗岩中长石大量分离结晶, 相较于富含暗色矿物 (角闪石、黑云母) 的花岗闪长岩, 其矿物组合逐渐以石英、长石为主, 表明其相对于花岗闪长岩具有更高的分异

① 黑龙江省第五地质勘查院. 2020. 黑龙江省巴彦县黑瞎沟-汪兴地区铜多金属矿普查报告 (未公开发表).

程度。综上,笔者认为二者可能是同期岩浆不同演化程度的产物。金属 Mo 由于其强不相容性,往往倾向于在高分异岩浆中逐渐富集(Candela and Holland, 1986; Carten *et al.*, 1993),如前文所述,黑云母二长花岗岩中的 Mo 矿化可能是 Mo 在岩浆中高度富集的结果。相比之下,矿区二长花岗岩分异程度与黑云母二长花岗岩相近(图 12),但其中未见 Mo 矿化,根据岩相学特征,二长花岗岩中缺乏角闪石的发育(图 4c, 4i),表明其可能形成于一个贫水体系,这可能影响了其 Mo 矿化的形成。上述分析表明,岩浆的演化程度可能是影响 Mo 成矿的关键因素之一。

洼兴矿区 Mo 矿化主要出现在黑云母二长花岗岩中,Cu 矿化则集中在花岗闪长岩中,相较于成矿前的二长花岗岩,成矿期花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩的(La/Yb)_N值发生显著降低,表明岩浆源区的压力减小,结合上文提到了小兴安岭-张广才岭地区中侏罗世挤压-伸展转换的构造动力学背景,推测成矿期花岗岩可能经历了局部的伸展作用,使岩浆发生了大规模的流体出溶,从而形成了洼兴矿区的 Mo 矿化。笔者认为此种挤压-伸展转换的背景可能是洼兴矿区 Mo 矿化形成的关键控制因素。正如 Shu 等(2016)和 Ouyang 等(2023)指出,东北地区中生代大规模的 Mo 矿化可能与同时期该区域挤压-伸展转换的构造背景有关,即早期挤压背景有利于深部大型岩浆房的形成和岩浆的高程度演化,随后伸展作用导致的压力释放则利于岩浆流体的大规模出溶和 Mo 成矿。

8 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果表明洼兴花岗岩类的成岩成矿时代为中侏罗世。岩体和蚀变-矿化的空间关系表明,Cu-W 矿化和 Mo-W 矿化分别与花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩有关。

(2) 洼兴花岗岩类属于高钾钙碱性、准铝质-弱过铝质的 I 型花岗岩,亏损的 Hf 同位素组成表明岩浆源区可能为新生地壳,有幔源物质的加入。结合区域构造演化历史,认为其可能形成于牡丹江洋闭合之后的晚碰撞-后碰撞背景。

(3) 矿区花岗岩(La/Yb)_N值由成矿前向成矿期显著降低,与区域构造背景由挤压-伸展的转换相吻合。早期挤压背景有利于深部大型岩浆房的形成

和岩浆的高程度演化,随后伸展作用导致的压力释放则利于岩浆流体的大规模出溶,构造体制转换和岩浆高演化程度共同促进了 Mo 矿化的形成。

References

- Arth J G. 1976. Behavior of trace elements during magmatic progresses: A summary of theoretical models and their applications[J]. Journal of Research US Geological Survey, 4: 41~47.
- Balica C, Ducea M N, Gehrels G E, *et al.* 2020. A zircon petrochronologic view on granitoids and continental evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 531: 116005.
- Candela P A and Holland H D. 1986. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type ore deposits[J]. Economic Geology, 81: 1~19.
- Carten R B, White W H and Stein H J. 1993. High-grade granite-related molybdenum systems: High-grade granite-related molybdenum systems: classification and origin[J]. Geological Association of Canada—Special Paper, 40: 521~554.
- Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, *et al.* 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera[J]. Geology, 43(10): 919~922.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 46(3): 535~551.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 8: 173~174.
- Chen L and Zhang Y. 2018. In situ major-, trace-elements and Sr-Nd isotopic compositions of apatite from the Luming porphyry Mo deposit, NE China: Constraints on the petrogenetic-metallogenic features[J]. Ore Geology Reviews, 94: 93~103.
- Chen Y J, Wang P, Li N, *et al.* 2017. The collision-type porphyry Mo deposits in Dabie Shan, China[J]. Ore Geology Reviews, 81: 405~430.
- Chen Z, Zhou J B, Li G Y, *et al.* 2023. The nature and spatial-temporal evolution of suture zones in Northeast China[J]. Earth-Science Reviews, 241: 104437.
- Chiaradia M. 2014. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness[J]. Nature Geoscience, 7(1): 43~46.
- Chiaradia M. 2015. Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: An Earth scale perspective[J]. Scientific Reports, 5:

- 8115.
- Chiaradia M. 2021. Zinc systematics quantify crustal thickness control on fractionating assemblages of arc magmas[J]. *Scientific Reports*, 11(1): 14667.
- DePaolo D J, Harrison T M, Wielicki M, *et al.* 2019. Geochemical evidence for thin syn-collision crust and major crustal thickening between 45 and 32 Ma at the southern margin of Tibet[J]. *Gondwana Research*, 73: 123~135.
- Dhuime B, Wuestefeld A and Hawkesworth C J. 2015. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago[J]. *Nature Geoscience*, 8: 552~555.
- Dong Y, Ge W C, Yang H, *et al.* 2019. Geochemical and SIMS U-Pb rutile and LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronological evidence of the tectonic evolution of the Mudangjiang Ocean from amphibolites of the Heilongjiang complex, NE China[J]. *Gondwana Res.*, 69: 25~44.
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, *et al.* 2007. Metallogenic age and geodynamic significance of porphyry Cu and Mo deposits in the eastern part of Xingmeng orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(20): 2 407~2 417(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICP MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Harris N B, Pearce J A, Tindle A C, *et al.* 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 67~81.
- Hu F, Wu F, Chapman J B, *et al.* 2020. Quantitatively tracking the elevation of the Tibetan Plateau since the Cretaceous: Insights from whole-rock Sr/Y and La/Yb ratios[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: e2020GL089202.
- Hu X L, Ding Z J, He M C, *et al.* 2014a. A porphyry-skarn metallogenic system in the Lesser Xing'an Range, NE China: Implications from U-Pb and Re-Os geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes of the Luming Mo and Xulaojiugou Pb-Zn deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 88~100.
- Huang M L, Zhu J J, Chiaradia M, *et al.* 2023. Apatite volatile contents of porphyry Cu deposits controlled by depth-related fluid exsolution processes[J]. *Economic Geology*, 118: 1 201~1 217.
- Li H, Han J, Zhao Z, *et al.* 2023. Magma-mixing origin for the early Jurassic intrusive rocks in the eastern Songnen-Zhangguangcai range massif, NE China: Evidence from geochronology, geochemistry and Hf-O-Sr-Nd isotopes[J]. *Gondwana Research; International Geoscience Journal*, 121.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2010. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Loucks. 2021. Deep entrapment of buoyant magmas by orogenic tectonic stress: Its role in producing continental crust, adakites, and porphyry copper deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 220: 103744.
- Lu Zhiqiang. 2017. *Geology, Geochemistry and Genesis of Daheishan Molybdenum Deposit in the Central Jilin Province*[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Luffi P and Ducea M N. 2022. Chemical Mohometry: Assessing crustal thickness of ancient orogens using geochemical and isotopic data[J]. *Reviews of Geophysics*, 60: e2021RG000753.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Nie X T, Sun J-G, Sun F Y, *et al.* 2019. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating and geological implications of the Shimadong porphyry molybdenum deposit in eastern Yanbian, Northeastern China [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 999: 1~17.
- Ouyang H and Caulfield J. 2023. Understanding Cu deficiency and Mo enrichment in the Jurassic Zhangguangcai-Lesser Xing'an continental-arc (NE China): Insights from the Luming porphyry Mo deposit[J]. *Economic Geology*, 118(4): 857~881.
- Ouyang H, Mao J, Hu R, *et al.* 2021. Controls on the metal endowment of porphyry Mo deposits: Insights from the Luming porphyry Mo deposit, Northeastern China [J]. *Economic Geology*, 116: 1 711 ~ 1 735.
- Qi L, Hu J and Conrad GD. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 51: 507~513.
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, *et al.* 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coasta area of Northeast Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2 468~2 484 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. New York: Longman Group UK Ltd., 1~352.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267~310.
- Shu Q, Chang Z, Lai Y, *et al.* 2016. Regional metallogeny of Mo-bearing deposits in northeastern China, with new Re-Os dates in the northern

- Xilamulun district[J]. *Economic Geology*, 111: 1 783~1 798.
- Shu Q and Chiaradia M. 2021. Mesozoic Mo mineralization in northeastern China did not require regional-scale pre-enrichment[J]. *Economic Geology*, 116(5): 1 227~1 237.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3~4): 311~324.
- Sun Jinggui, Zhang Yong, Xing Shuwen, *et al.* 2012. Genetic types, ore-forming age and geodynamic setting of endogenic molybdenum deposits in the eastern edge of Xing-Meng orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 317~1 332 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes, in magmatism in the ocean basins[J]. *Geological Society London Special Publications*, 423: 13~345.
- Sundell K E, Laskowski A K, Kapp P, *et al.* 2021. Jurassic to Neogene quantitative crustal thickness estimates in southern Tibet[J]. *GSA Today*, 31: 4~10.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1~4): 29~44.
- Tera F and Wasserburg G J. 1972. U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 14(3): 281~304.
- Wang Linlin. 2018. Study on Metallogenesis of Porphyry Deposits in Lesser Xing'an Range and its Adjacent Areas, NE China[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Wang Nan. 2023. Late Mesozoic Tectono-topographic Evolution of the Northeastern Asia: Constrained by Geo-thermochronology Analysis and Geochemical Mohometers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- White A J R. 1979. Sources of granite magmas[J]. *Geological Society of America Abstract with Programs*, 11: 539.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66: 241~273.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. *Lithos*, 67: 191~204.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1~30.
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, *et al.* 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China[J]. *The Island Arc*, 16: 156~172.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Lin Qiang, *et al.* 1999. Petrogenesis of the phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181~189 (in Chinese with English abstract).
- Xing K, Shu Q H, Lentz D R, *et al.* 2020. Zircon and apatite geochemical constraints on the formation of the Huojilhe porphyry Mo deposit in NE China[J]. *Am. Mineral*, 105: 382~396.
- Xu Meijun, Xu Wenliang, Wang Feng, *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354~368 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, *et al.* 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339~353 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Shao J, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3~4): 336~352.
- Yang Yanchen, Han Shijiong, Sun Deyou, *et al.* 2012. Geological and geochemical features and geochronology of porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 379~390 (in Chinese with English abstract).
- Yu G, Yang H, Jing J, *et al.* 2023. Tectonic nature, subduction, and closure of the mudanjiang ocean: Insights from newly discovered oceanic fragments in the Luobei Heilongjiang complex[J]. *Lithos*, 446: 107141.
- Yu J J, Wang F, Xu W L, *et al.* 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry[J]. *Lithos*, 142: 256~266.
- Zeng Q, Wang R, Cheng G, *et al.* 2018. Zircon U-Pb ages and Hf iso-

- tope of the granitoids from the Xingwen porphyry molybdenum deposit in the Xiaoxing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt, NE China[J]. *Geol. J.*, 53: 304~315.
- Zhang Y, Xing S, Zhang Z, *et al.* 2017b. Genesis of the Tianbaoshan polymetallic ore district, Yanbian, NE China: Constraints from geochronology and isotopic analysis[J]. *Resour. Geol.*, 67: 300~315.
- Zheng W and Yu X F. 2017. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis and geodynamic setting of the Daheishan porphyry Mo deposit, Northeast China[J]. *Resour. Geol.*, 68: 1~21.
- Zhong H, Zhu W G, Hu R Z, *et al.* 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, southwest China and implications for growth of juvenile crust[J]. *Lithos*, 110(1~4): 109~128.
- Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Simon A, *et al.* 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt[J]. *Tectonophysics*, 478(3~4): 230~246 (in Chinese with English abstract).
- Zhou L L, Zeng Q D, Liu J M, *et al.* 2013. Geochronology of the Xingwen molybdenum deposit, Jilin Province, NE China, and its Hf isotope significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75: 58~70.
- Zhou Y, Song Q, Zhang Y, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages and Hf isotope composition of the ore-bearing intrusion from the Chang'anpu Mo-Cu deposit, Jilin Province[J]. *Gold*, 37: 25~29.
- Zhu Dichen, Mo Xuanxue, Wang Liquan, *et al.* 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Sci. China Ser. D—Earth Sci.*, 39(7): 833~848 (in Chinese with English abstract).
- 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. *科学通报*, 52(20): 2 407~2 417.
- 卢志强. 2017. 吉林中部大黑山钼矿床地质地球化学特征及其成因[D]. 长春: 吉林大学.
- 邱检生, 肖 娥, 胡 建, 等. 2008. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 24(11): 2 468~2 484.
- 孙景贵, 张 勇, 邢树文, 等. 2012. 兴蒙造山带东缘内生钼矿床的成因类型、成矿年代及成矿动力学背景[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 317~1 332.
- 王琳琳. 2018. 中国东北小兴安岭及邻区斑岩型矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 王 楠. 2023. 中生代晚期亚洲东北部构造-地貌演化分析: 来自地质(热)年代学分析和地球化学古地壳厚度计的约束[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 217~1 238.
- 吴福元, 孙德有, 林 强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 15(2): 181~189.
- 徐美君, 许文良, 王 枫, 等. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩岩石的年代学与地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29(2): 354~368.
- 许文良, 王 枫, 裴福萍, 等. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 29(2): 339~353.
- 杨言辰, 韩世炯, 孙德有, 等. 2012. 小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究[J]. *岩石学报*, 28(2): 379~390.
- 周建波, 张兴洲, Simon A, 等. 2009. 黑龙江杂岩的碎屑锆石年代及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 25(8): 1 924~1 936.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. *中国科学(D辑)*, 39(7): 833~848.

附中文参考文献

葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu, Mo