

胶东地区中生代花岗岩年代学、 地球化学特征及与金银多金属成矿的关系

赵立翔^{1,2}, 丁正江¹, 张琪彬¹, 范家盟¹, 滕嘉文¹, 孙金磊^{2,3}, 钱 烨^{1,2*}

(1. 山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室; 2. 吉林大学地球科学学院; 3. 中国科学院地球化学研究所)

摘要:胶东地区不仅是中国东部中生代大规模矿产形成的关键区域之一,同时也是中国东部岩浆岩带的一个重要组成部分。中生代花岗岩主要划分为晚侏罗世玲珑期(147~162 Ma)、早白垩世早期郭家岭期(125~133 Ma)、早白垩世晚期伟德山期(110~123 Ma)和崂山期(110~118 Ma)。玲珑期花岗岩为地壳重熔S型岩石,源区物质主要为古元古代荆山群、粉子山群和太古代TTG片麻岩系;郭家岭期花岗岩为高 $w(\text{Ba})/w(\text{Sr})$ 值花岗岩,伟德山期花岗岩为I型花岗岩,二者均为壳幔混合成因;崂山期花岗岩为地壳重熔A型花岗岩。金银多金属矿成矿时代主要为早白垩世,接近伟德山期花岗岩;在空间上,金矿床主要赋存在玲珑期花岗岩和郭家岭期花岗岩内;金银多金属矿成矿物质均具明显地幔来源特征,与伟德山期花岗岩具有密切联系,上地幔在胶东地区中生代成岩成矿作用的贡献主要通过幔源C-H-O流体活动实现。含金幔源C-H-O流体在进入地壳后发生分异作用,分异后的流体在上升到一定高度后,随着温度的不断降低和大气水的不断加入而发生成矿作用,在岩体内适当部位形成金银多金属矿,在岩体外部适当部位形成蚀变岩型、脉型等金矿。

关键词:中生代;花岗岩;岩石成因;成岩成矿关系;构造背景;胶东地区

中图分类号:TD11 P618.51

文章编号:1001-1277(2024)04-0057-08

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240413

引言

胶东地区是中国东部中生代大规模成矿的重要地区之一,也是中国东部岩浆岩带的一个重要组成部分。中生代花岗岩在该地区分布广泛,覆盖了2/3以上基岩出露区^[1],与金银多金属矿化具有密切的联系,因此受到了国内外地质专家的高度关注。然而,这一地区的研究主要聚焦于特定的岩体或关键的成矿带。例如,该地区有关金矿床的研究主要集中在胶西北和牟乳成矿区,而蓬莱—栖霞成矿区研究相对较少^[2],这导致了各个地区在研究程度上存在显著的不均衡性。此外,该地区的研究更多集中在金矿床上,银多金属矿床方面的研究相对薄弱,在各矿种成矿物质来源及成矿深度方面尚未有较为明确的认识^[3]。本文系统收集了胶东地区中生代各个时期花岗岩年代学、地球化学和Lu-Hf、Sr-Nd同位素数据,并对这些岩石成因、成岩成矿关系及构造演化进行了系统阐述;通过对胶东地区不同岩体内挑选的磷灰石进行裂变径迹试验及银矿床内石英原位分析,认为该地区西部剥蚀程度更加严重,提出了银的深源成

因与金矿物来源一致,为上地幔来源,但形成深度较金矿稍浅,以期对后期找矿勘查工作具有一定的指导意义。

1 研究区地质概况

胶东地区位于华北板块东南缘和扬子板块北缘交会部位,以牟平—即墨—五莲断裂为界,可分为胶辽隆起区和胶南—威海隆起区(见图1-A)。该地区的地质构造极为复杂,还表现出强烈的岩浆活动,在壳幔混合过程中形成了大量花岗岩,并伴随金银多金属矿的形成。

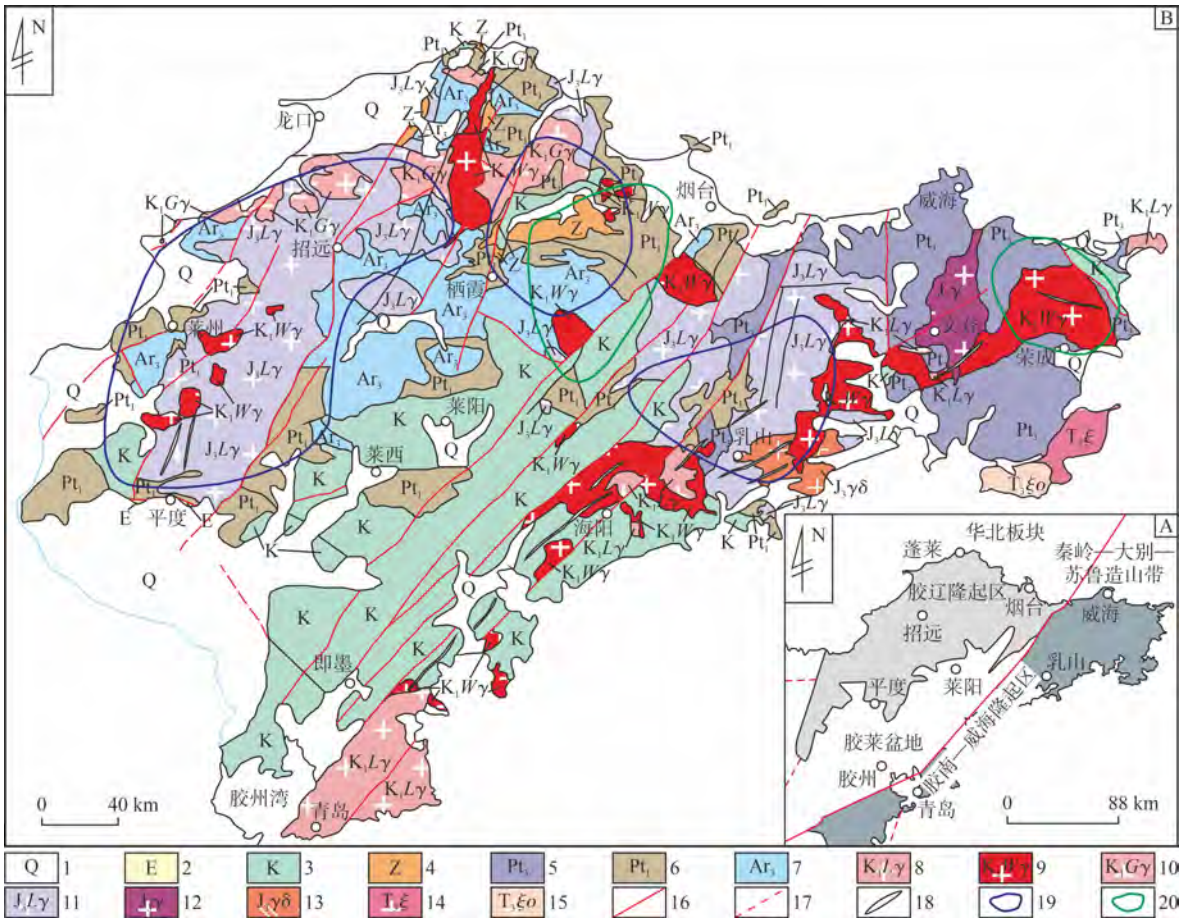
胶东地区结晶基底主要包括新太古界胶东岩群、古元古界粉子山群和荆山群,以及同时代的深成岩。在蓬莱、长山岛、福山等地区,这些基底上方还覆盖着新元古界蓬莱群盖层沉积,而古生界和中生界的三叠系和侏罗系地层在该地区缺失(见图1-B)。该地区的岩浆活动异常频繁,延续了从太古代到新生代的时间跨度,且以中生代岩浆活动表现最为强烈,主要集中在晚三叠世、晚侏罗世及早白垩世。

收稿日期:2023-12-01;修回日期:2024-02-15

基金项目:山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室开放课题(SDK202203);国家重点研发计划项目(2018YFC0603800)

作者简介:赵立翔(1999—),男,硕士研究生,研究方向为矿产普查与勘探;E-mail:zhaolx21@mails.jlu.edu.cn

*通信作者:钱 烨(1979—),男,教授,博士,研究方向为矿床地质;E-mail:qianye@jlu.edu.cn



1—第四系 2—古近系 3—白垩系 4—震旦系 5—新元古界 6—古元古界 7—新太古界 8—崂山期花岗岩
9—伟德山期花岗岩 10—郭家岭期花岗岩 11—玲珑期花岗岩 12—晚侏罗世花岗岩 13—晚侏罗世花岗岩闪长岩
14—晚三叠世正长岩 15—晚三叠世石英正长岩 16—断裂 17—推断断裂 18—脉岩 19—金矿集区 20—有色金属矿集区

图1 胶东地区大地构造位置图(A)、地质矿产图(B)

Fig. 1 Geotectonic location map (A), geology and mineral resources (B) of Jiaodong area

胶东地区脆性和韧性构造均十分发育,主要脆性断裂走向以北东向和北北东向为主,其次是东西向和北西向。其中,北北东向和北东向断裂与金成矿关系最为密切^[4],包括招平断裂、焦家断裂和三山岛断裂等重要断裂^[5-7]。胶东地区矿床集中分布,构成胶西北、栖霞福、牟乳3个金矿集区和栖霞—福山、荣成2个有色金属矿集区,这种构造格局与中生代岩石圈减薄和地幔上隆有关^[8]。

2 中生代侵入岩活动时间

本文系统收集了近20年来在该地区获得的单颗粒锆石年代数据,统计结果见图2。由图2可知,中生代岩浆事件起源于晚三叠世,中间时段包括早期和中期侏罗世数据缺失,随后在晚侏罗世一直延续到早白垩世,这段时期的岩浆活动基本是连续不断的。其中,147~162 Ma、125~133 Ma、110~123 Ma、110~118 Ma为4个年龄峰值区间,分别对应晚侏罗世玲珑期、早白垩世早期郭家岭期、早白垩世晚期伟德山

期和崂山期。伟德山期和崂山期的形成时代相近,但二者存在明显差异。在野外勘查中,经常可以看到伟德山期花岗岩被崂山期花岗岩侵入,并且崂山期花岗岩的锆石年龄略晚于伟德山期花岗岩,因此可以单独划分这2个时期^[9]。

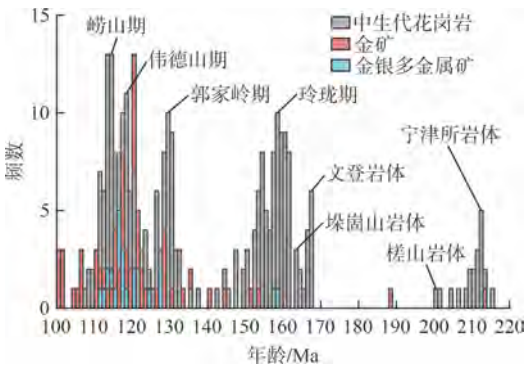


图2 胶东地区中生代花岗岩锆石U-Pb年龄及成矿年龄频数统计直方图

Fig. 2 Frequency histogram of zircon U-Pb age of Mesozoic granites and mineralization age in Jiaodong area

3 中生代侵入岩地球化学特征

胶东地区中生代花岗岩岩石类型主要包括石英二长岩、花岗闪长岩和花岗岩(见图3-a)),属于准铝质—弱过铝质的高钾钙碱性岩系(见图3-b)、c)),玲珑期花岗岩和崂山期花岗岩大多数属于铁质花岗岩,而郭家岭期花岗岩和伟德山期花岗岩则多数为镁质花岗岩(见图3-d))。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(见图4-a))上,表现

出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(见图4-b))上,这些岩石富集Rb、K、Ba等大离子亲石元素及U、Th等高场强元素,而Nb、P、Ti元素则呈现亏损特征。此外,玲珑期花岗岩和崂山期花岗岩富集Zr、Hf元素,反映了地壳物质的再循环过程,留下了明显的“痕迹”。其中,玲珑期花岗岩Sr元素多数呈现正异常,这可能指示了斜长石的堆晶或源区没有斜长石存在。

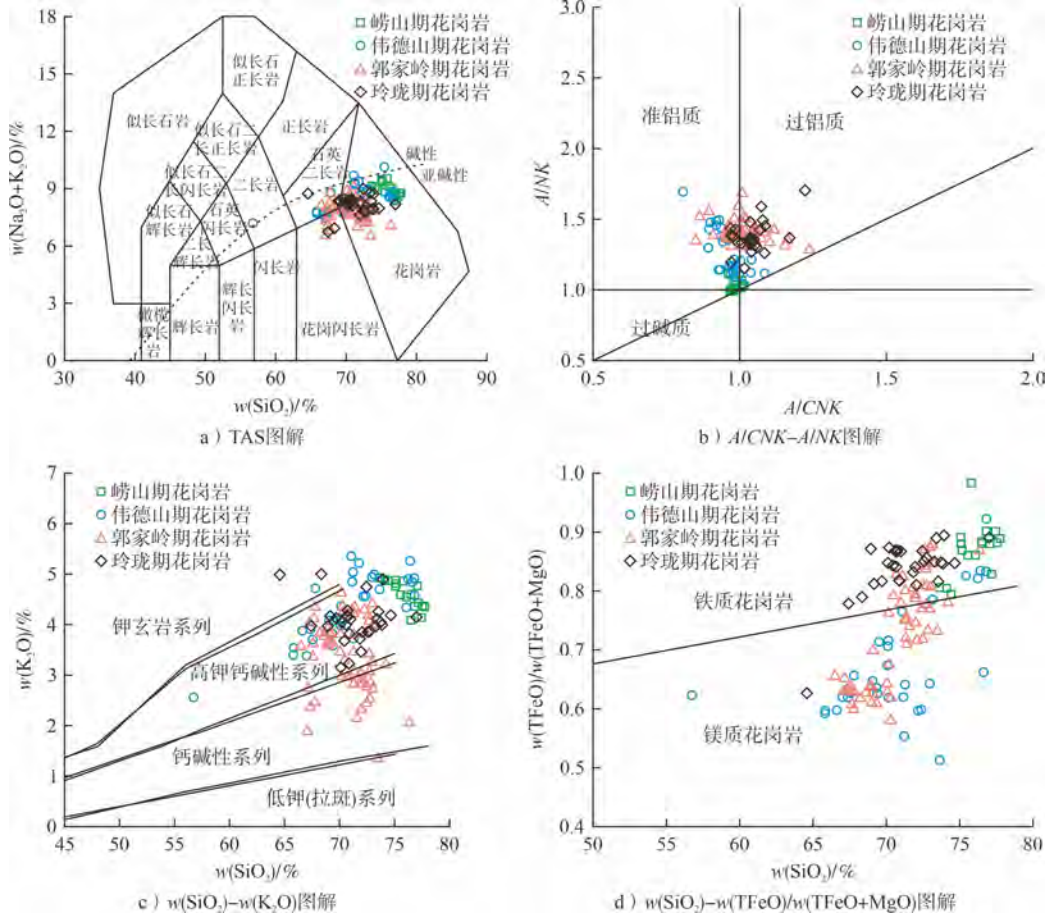


图3 中生代花岗岩地球化学图解
Fig. 3 Geochemical diagrams of Mesozoic granites

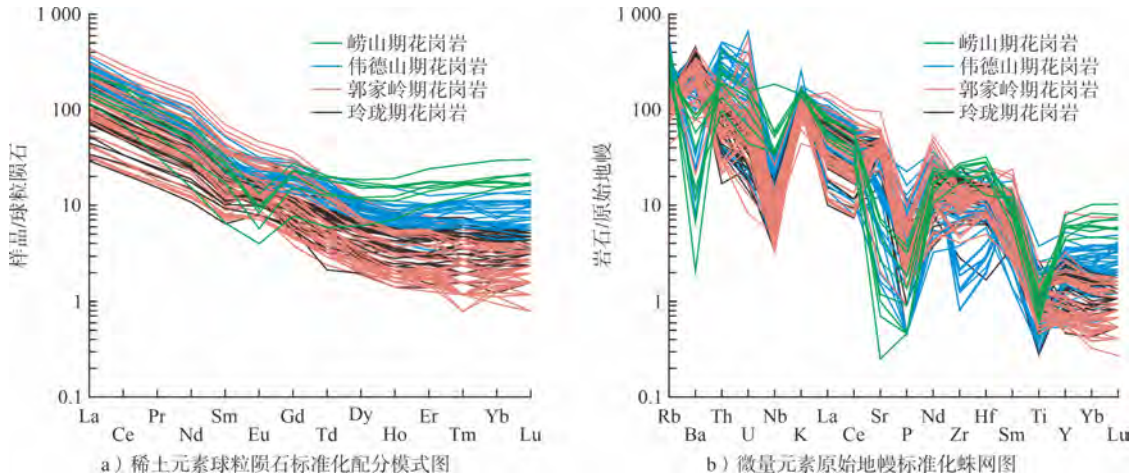


图4 中生代花岗岩稀土元素和微量元素模式图

Fig. 4 Rare earth element and micro element patterns of Mesozoic granites

4 讨论

4.1 岩石成因

4.1.1 玲珑期花岗岩

玲珑期花岗岩具有高铝、低镁,富集低场强元素,亏损高场强元素,以及高 Sr、低 Y 和 Yb,高 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值和 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 值,亏损重稀土元素等特征,类似埃达克质岩的地球化学特征^[10-12]。岩石普遍含有石榴子石,其中存在变质岩包裹体,

通过其宏观结构特征和矿物组合,可以判断这是一种形成于地壳重熔过程中的 S 型花岗岩体^[1,8,13-14]。Hf 二阶段模式年龄主要为 2.1 ~ 2.9 Ga (见图 5),位于华北上地壳和扬子下地壳附近,样品高 $w(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值及低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (见图 6) 显示古老下地壳特征,代表其主要物源为古元古代荆山群、粉子山群和太古代 TTG 片麻岩系^[10,15-16],被认为是加厚下地壳部分熔融的产物,没有地幔成分加入^[11,17-20]。

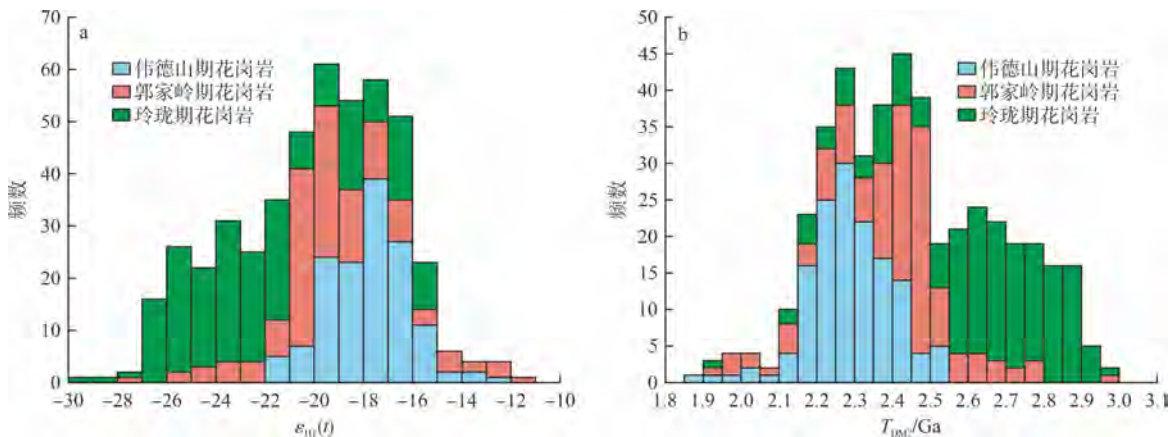


图 5 胶东地区中生代花岗岩锆石 Hf 同位素直方图

Fig. 5 Histogram of zircon Hf isotope of Mesozoic granites in Jiaodong area

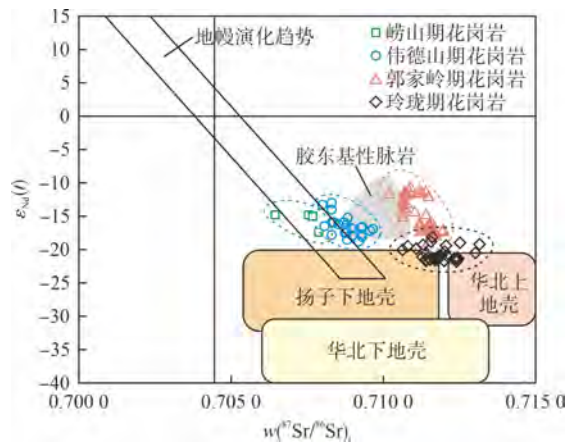


图 6 胶东地区中生代花岗岩 $w(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

Fig. 6 $w(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for Mesozoic granites in Jiaodong area

4.1.2 郭家岭期花岗岩

郭家岭期花岗岩含有钾长石斑晶的似斑状结构和数量不等的角闪石^[8],部分学者将其归为埃达克质岩石^[18,20],然而其高全碱、低 Al_2O_3 和 MgO ,以及相对平坦的稀土元素球粒陨石标准化配分模式,与典型的埃达克质岩石明显不同,而高 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值、明显的 Nb、Ta、Ti 等元素亏损,表现出了高 $w(\text{Ba})/w(\text{Sr})$ 值花岗岩典型的地球化学特征^[8,21-24]。

Hf 二阶段模式年龄主要为 2.3 ~ 2.7 Ga^[21,23],表

明其地壳来源主要为古元古代荆山群和粉子山群变质岩系^[22]。此外,可能部分来自于太古宙胶东岩群、TTG 片麻岩系及玲珑期花岗岩。在 $w(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (见图 6) 中,郭家岭期花岗岩同位素特征与典型扬子板块下地壳具有高度相似性,部分位于胶东基性岩范围内,表明主要起源于地壳,局部有幔源岩浆混合作用^[8,11,16,25-27]。岩体中多见闪长质包裹体和少量胶东岩群斜长角闪岩捕虏体^[28],其中部分包裹体内部包含了与周围岩石具有相似性质的似斑状闪长岩质成分和钾长石斑晶^[22,27],表明郭家岭期花岗岩为岩浆混合成因^[8,21]。

4.1.3 伟德山期花岗岩

伟德山期花岗岩普遍富含角闪石、黑云母等暗色矿物,并且全岩 Al_2O_3 、 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量增加而减少,指示该期岩石为传统 I 型花岗岩^[29-31]。伟德山期花岗岩中含有较多微粒闪长质包裹体^[25],地球化学特征指示其岩浆来源为壳幔混合成因^[14,25,29,32-33]。来源于下地壳的酸性岩浆岩与来源于上地幔的中—基性岩浆岩同位素年龄的一致性,也暗示了早白垩世下地壳拆沉及壳幔相互作用的存在^[34]。2.1 ~ 2.5 Ga 的 Hf 二阶段模式年龄也表明其源区主要是古元古代陆壳物质^[32]。一些学者认为,这些岩体可能是构造拼合或岩石圈拆沉后的碰撞产物^[35-36],其岩浆源于华

南陆壳部分熔融,这发生在挤压逐渐演化为伸展的后碰撞阶段,通过碰撞形成了减薄造山带下的大陆裂谷^[37]。

4.1.4 崂山期花岗岩

崂山期花岗岩具有弧花岗岩的特点,该期岩石内观察到钠闪石、镁钠闪石和霓石等碱性暗色矿物^[38],以及显著 Eu 负异常和右倾“海鸥型”稀土元素配分模式,具有典型 A 型花岗岩特征。王栋等^[38]研究表明,其源区特征与苏鲁造山带内三叠纪富 K 碱性岩体具有相似的地球化学特征,认为是三叠纪碱性岩浆

岩受到软流圈地幔上涌加热的影响而发生重熔形成该岩体。

4.1.5 中生代 4 期花岗岩体演化特征

胶东地区中生代 4 期花岗岩从早到晚在地球化学特征方面呈现出规律性变化:从玲珑期花岗岩到崂山期花岗岩, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值先减小后增大,在郭家岭期花岗岩处于拐点为最小值,而 $w(\text{Sr})/w(\text{Yb})$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值则呈现出完全相反的变化;郭家岭期花岗岩似乎分成 2 部分, SiO_2 含量较低的部分较为接近玲珑期花岗岩,可能为早期阶段(见图 7)。

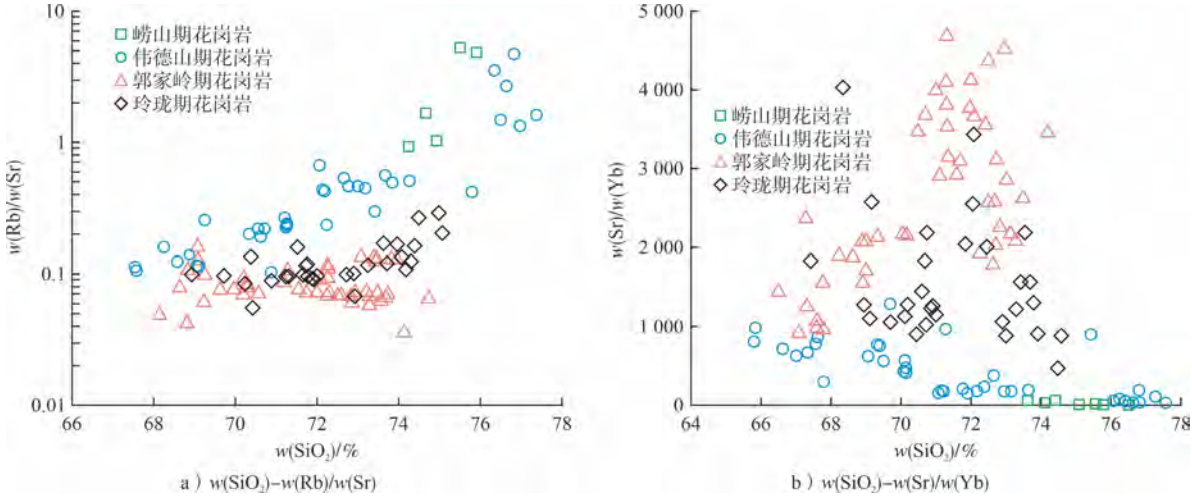


图 7 胶东地区中生代花岗岩分类判别图解

Fig. 7 Classification diagrams of Mesozoic granites in Jiaodong area

对伟德山期花岗岩和崂山期花岗岩进行了锆石 U - Pb 定年和地球化学分析,结果显示,二者均属于伟德山期岩浆活动产物,且 2 组样品的 MgO、Cr、Ni 等含量明显偏高,而与钼矿床有成因联系的一组样品中这些元素含量偏低,认为伟德山期岩浆在 116 Ma 和 117 Ma 存在 2 期基性岩浆的注入,而与钼成矿有关的岩浆经历了高演化、高分异过程,造成这些元素亏损。

4.2 成岩成矿关系

4.2.1 形成时代

关于胶东金矿的成矿时代,研究者们具有不同观点^[1,39-46]。于晓卫等^[47]认为,胶东地区金成矿至少可以分为 3 个成矿期,即 146 ~ 162 Ma、120 ~ 133 Ma、105 ~ 120 Ma,这 3 个成矿期与胶东地区的区域性岩浆活动一致,被称为玲珑成矿期、郭家岭成矿期及伟德山成矿期。此外,还存在一个崂山矿化蚀变期(105 ~ 110 Ma)。胶东地区同时存在晚中生代铜、钼、铅、锌等有色金属矿床,成矿年龄主要集中在 111 ~ 118 Ma^[48]。

对以往有关成矿年龄数据进行收集统计,结果表明,金成矿年龄为 100 ~ 213 Ma,主要集中在 100 ~ 112 Ma、115 ~ 123 Ma 和 125 ~ 135 Ma,分别对应崂山

期、伟德山期和郭家岭期,其中大规模成矿与伟德山期花岗岩同时代形成。金银多金属矿床多数形成于 111 ~ 121 Ma,也与伟德山期花岗岩同时代,此外在郭家岭期和崂山期也有少量矿床形成。

综合来看,胶东地区金银多金属矿与伟德山期花岗岩具有密切联系,形成于相同的地质时代并具有相似的空间分布,虽然其在具体成矿条件方面有所不同,但与伟德山期花岗质岩浆作用密切相关,一起构成了一个岩浆热液成矿系列^[49]。

4.2.2 空间分布

胶东地区的金银多金属矿呈现出一定的空间分布格局,其中金矿主要分布于中部和西部,且主要赋存在玲珑期和郭家岭期花岗岩内,二者储存了胶东地区 95 % 以上的金资源储量^[50-52];伟德山期和崂山期花岗岩中仅含少部分金资源储量,并严格受断裂控制^[47]。

有色金属矿主要位于胶东地区的东部和中部,且多围绕伟德山期花岗岩分布。这些矿产围绕伟德山期花岗岩大致形成了外部铅锌多金属矿、中部铜银矿和内部钼矿的分布环带。在围岩中,出现了与多金属矿共生的金矿和独立金矿。总体来看,由东向西,剥

蚀程度增加,金矿床数量增加而多金属矿床数量减少^[49]。

4.2.3 成矿物质来源

尽管玲珑期花岗岩和郭家岭期花岗岩是金矿床的直接围岩,然而其形成时间却早于大规模金成矿时代,且成矿流体的温度($200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$)低于岩浆的形成温度($>573\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[7,39,53],因此其不可能为金矿形成提供主要物质来源。而大规模成矿时代与伟德山期花岗岩一致,且胶东地区东部的金银多金属矿均围绕伟德山期花岗岩分布,说明成矿物质来源于该期岩体。胶东地区西部的伟德山期花岗岩出露较少,可能是因为剥蚀程度较大。研究表明,胶东群和荆山群含金较高或具有含金高的层位^[54]。有学者认为,金矿床的成矿物质主要来自结晶基底胶东岩群和围岩花岗岩,有壳幔相互作用的地幔物质加入^[47]。对伟德山期花岗岩、荣成岩体和老横山银矿挑选的石英颗粒进行了微量元素分析,结果显示,石英微量配分模式与伟德山期花岗岩一致,也证明伟德山期花岗岩对成矿物质的直接贡献大;石英中 Au、Ag 与 Bi、Te 等元素具有良好的正相关性,推测金银多金属矿与金矿同样为深源成因,但形成深度较金矿来说相对浅一些。

由于胶东地区伟德山期花岗岩及金矿形成过程中有幔源物质参与,同时,该地区金矿与煌斑岩关系密切,更显示出上地幔在成矿作用中的影响;孙丰月等^[54]认为,上地幔在胶东地区中生代成岩成矿作用的贡献主要通过幔源 C-H-O 流体活动实现。金矿石与这些煌斑岩在同位素(Pb、S)和微量元素特征上接近,表明二者存在成因联系,都属于幔源 C-H-O 流体演化过程中的产物。煌斑岩中金的高含量特征证明了金来源于上地幔。

4.3 成岩成矿构造背景

晚二叠世到晚三叠世($200\sim 300\text{ Ma}$),扬子板块持续向华北板块俯冲,随着古太平洋闭合,二者沿秦岭—大别—苏鲁造山带发生碰撞。三叠纪末到早侏罗世($180\sim 220\text{ Ma}$),在华北板块南缘,后碰撞引发了伸展环境,部分岩石圈地幔出现低程度熔融,在苏鲁造山带内产生了碱性岩体^[3]。

古太平洋板块向亚洲大陆俯冲可能为中侏罗世晚期($170\sim 180\text{ Ma}$)^[55-56],在最初的俯冲阶段,古太平洋板块以较快速度低角度俯冲,导致古太平洋板块被嵌入亚洲大陆之下,这进一步引发了华北克拉通东侧地壳的持续增厚及地壳的重熔作用。中晚侏罗世($135\sim 170\text{ Ma}$)进一步引发后续板块的断离或/和俯冲地壳的拆沉,发生了地壳重熔,产生了 S 型花岗质岩浆^[19,57],这些岩浆不断上升,从而形成玲珑期花岗岩。

早白垩世早期($125\sim 135\text{ Ma}$),郯庐断裂经历了从左旋挤压逐渐向右旋拉伸的过程^[1],使上地幔上涌,中国东部岩石圈开始大规模拆沉,伊泽奈奇板块俯冲加速^[55],导致了地幔物质对流,引起岩石圈拆沉、垮塌,软流圈上涌,下地壳与地幔岩浆混合,形成郭家岭期花岗岩。早白垩世晚期,伊泽奈奇板块运动方向发生转变,受到了上升幔流柱的影响,富集的岩石圈地幔部分熔融及地幔橄榄岩与消减洋壳板片部分熔融产生基性岩浆,壳幔重熔岩浆与幔源物质上升,结晶分异形成了伟德山期花岗岩。

胶东早白垩世广泛的岩浆热隆和伸展构造构成了热隆—伸展构造体系^[58],在这一体系形成过程中,壳幔物质大比例交换和混合、流体作用异常活跃^[59],产生岩浆流体成矿系统,为金、银及有色金属等热液矿床提供了有利成矿条件,由此产生了 115 Ma 的胶东大规模爆发式成矿作用。含金幔源 C-H-O 流体在进入地壳后发生分异作用,分异后的流体上升到一定高度后,发生侧向运移和富集,使构造带附近的胶东群和荆山群发生重熔而形成花岗质岩石。岩浆活动后期,随着温度不断降低和大气水不断加入而发生成矿作用^[54],其中在岩体内外适当部位形成金银多金属矿,而在岩体外部则形成了金矿。因此,其空间分布具有一定规律性,形成了从中心到边缘、再到距早白垩世侵入体一定距离的钼(钨)、铜铅锌银、金(银)矿^[49]。

5 结 论

1) 胶东地区中生代花岗岩主要划分为晚侏罗世玲珑期($147\sim 162\text{ Ma}$)、早白垩世早期郭家岭期($125\sim 133\text{ Ma}$)、早白垩世晚期伟德山期($110\sim 123\text{ Ma}$)和崂山期($110\sim 118\text{ Ma}$)。

2) 玲珑期花岗岩为埃达克质岩石,形成于增厚地壳的部分熔融,源区物质主要为古元古代荆山群、粉子山群和太古代 TTG 片麻岩系;郭家岭期花岗岩为高 $w(\text{Ba})/w(\text{Sr})$ 值花岗岩,为壳幔混合成因;伟德山期花岗岩为 I 型花岗岩,形成于壳幔混合;崂山期花岗岩为地壳重熔 A 型花岗岩,多与伟德山期花岗岩构成 I-A 型复式岩体。伟德山期岩浆经历了 116 Ma 和 117 Ma 2 期基性岩浆的注入,从玲珑期到崂山期基性岩浆物质逐渐增多。

3) 胶东地区金银多金属矿成矿时代主要为早白垩世,与伟德山期花岗岩和崂山期花岗岩较为一致;空间上,金矿主要赋存在玲珑期花岗岩和郭家岭期花岗岩体内,自东向西,随着剥蚀程度的增加,金矿逐渐增多,而金银多金属矿逐渐减少;金银多金属矿成矿物质均具明显地幔来源的特征,均为深源成因,与伟

德山期花岗岩具有密切联系,上地幔在胶东地区中生代成岩成矿作用的贡献主要通过幔源 C-H-O 流体活动实现。

4) 胶东地区中生代构造岩浆演化反映了中国东部中生代构造体制转换的过程。在演化过程中,早期挤压阶段形成了玲珑期的地壳重熔型花岗岩,而转换初期则形成了郭家岭期壳幔混合型花岗岩,峰期则对应伟德山期花岗岩,崂山期花岗岩是转换结束期的产物。含金幔源 C-H-O 流体在进入地壳后发生分异作用,分异后的流体在上升到一定高度后,随着温度不断降低和大气水不断加入而发生成矿作用,在岩体内外适当部位形成金银多金属矿,在岩体外部适当部位形成蚀变岩型、脉型等金矿。

[参考文献]

- [1] 李俊建,罗镇宽,刘晓阳,等. 胶东中生代花岗岩及大型-超大型金矿床形成的地球动力学环境[J]. 矿床地质,2005,24(4): 361-372.
- [2] 阿卜杜萨拉木·喀迪尔,陆继龙,范玉超,等. 胶东地区笏山金矿床黄铁矿微量元素特征及其成矿指示意义[J]. 黄金,2023,44(4): 57-62.
- [3] 杜泽忠,程志中,姚晓峰,等. 胶东谢家沟金矿床蚀变钾长石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(5): 1570-1581.
- [4] 朱兴明,周鑫,杨斌,等. 胶东金矿床蚀变岩岩石地球化学特征与水岩反应机理分析[J]. 黄金,2021,42(9): 12-17.
- [5] 王兴刚,孙涛,向胤合,等. 胶西北大尹格庄金矿床与夏甸金矿床差异性研究[J]. 黄金,2023,44(2): 67-72.
- [6] 牛兴国,许志河,孙丰月,等. 胶东招平断裂南段山后金矿区深部地球物理特征及找矿效果[J]. 黄金,2022,43(6): 12-16.
- [7] 智云宝,孙海瑞,李风华. 山东栖霞笏山金矿床成因——元素地球化学与流体包裹体证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(5): 1552-1569.
- [8] 李洪奎,李大鹏,耿科,等. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录[J]. 地质学报,2017,91(1): 163-179.
- [9] 王来明,任天龙,刘汉栋,等. 胶东地区中生代花岗岩划分[J]. 山东国土资源,2021,37(8): 1-14.
- [10] 刘晓阳,谭俊,王怀洪,等. 胶东范家庄地区晚侏罗世低镁埃达克质花岗岩成因及构造背景[J]. 地球科学,2020,45(2): 451-466.
- [11] YANG K F, FAN H R, SANTOSH M, et al. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton[J]. Lithos, 2012, 146/147: 112-127.
- [12] 郭敬辉,陈福坤,张晓曼,等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. 岩石学报,2005,21(4): 1281-1301.
- [13] 张田,张岳桥. 胶东半岛中生代侵入岩岩浆活动序列及其构造制约[J]. 高校地质学报,2007,13(2): 323-336.
- [14] 张田,张岳桥. 胶北隆起晚中生代构造—岩浆演化历史[J]. 地质学报,2008,82(9): 1210-1228.
- [15] 苗来成,罗镇宽,关康,等. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义[J]. 岩石学报,1998,14(2): 198-206.
- [16] 罗贤冬,杨晓勇,段留安,等. 胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究[J]. 地质学报,2014,88(10): 1874-1888.
- [17] JIANG N, CHEN J Z, GUO J H, et al. In situ zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China craton: Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ¹⁸O depletion[J]. Lithos, 2012, 142/143: 84-94.
- [18] ZHANG J, ZHAO Z F, ZHENG Y F, et al. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China[J]. Lithos, 2010, 119(3/4): 512-536.
- [19] 张娟. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [20] HOU M L, JIANG Y H, JIANG S Y, et al. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination[J]. Geological Magazine, 2007, 144(4): 619-631.
- [21] 王中亮,赵荣新,张庆,等. 胶西北高 Ba-Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报,2014,30(9): 2595-2608.
- [22] 王立功,祝德成,郭瑞朋,等. 胶西北仓上、三山岛岩体二长花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究[J]. 地质学报,2018,92(10): 2081-2095.
- [23] 刘跃,邓军,王中亮,等. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报,2014,30(9): 2559-2573.
- [24] 陈广俊,孙丰月,李玉春,等. 胶东郭家岭花岗闪长岩 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 世界地质,2014,33(1): 39-47.
- [25] GOSS S C, WILDE S A, WU F Y, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. Lithos, 2010, 120(3/4): 309-326.
- [26] WANG L G, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13(1/2/3/4/5): 275-291.
- [27] 杨进辉,朱美妃,刘伟,等. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报,2003,19(4): 692-700.
- [28] 王德洪,王立功,刘永贵,等. 胶东地区西石棚单元似斑状二长花岗岩的地球化学特征及其重建[J]. 山东国土资源,2019,35(9): 1-7.
- [29] 任天龙,王来明,朱学强,等. 胶东地区早白垩世伟德山期花岗岩[J]. 山东国土资源,2021,37(10): 1-12.
- [30] 李洪奎,李逸凡,耿科,等. 山东鲁东碰撞造山型金矿成矿作用探讨[J]. 大地构造与成矿学,2011,35(4): 533-542.
- [31] 李增达,于晓飞,王全明,等. 胶东三佛山花岗岩的成因: 成岩物理化学条件、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报,2018,34(2): 447-468.
- [32] LI X H, FAN H R, ZHANG Y W, et al. Rapid exhumation of the northern Jiaobei Terrane, North China Craton in the Early Cretaceous: Insights from Al-in-hornblende barometry and U-Pb geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 160: 365-379.
- [33] 张华锋,翟明国,童英,等. 胶东半岛三佛山高 Ba-Sr 花岗岩成因[J]. 地质论评,2006,52(1): 43-53.
- [34] 宋明春,李杰,周建波,等. 胶东早白垩世高镁闪长岩类的发现及其构造背景[J]. 岩石学报,2020,36(1): 279-296.
- [35] GUO F, FAN W M, LI C W. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China: Magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens[J]. Geological Magazine, 2007, 143(1): 1-13.
- [36] XU H J, MA C Q, YE K. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. Chemical

- Geology, 2007, 240(3/4): 238–259.
- [37] ZHAO Z F, LIU Z B, CHEN Q. Melting of subducted continental crust: Geochemical evidence from Mesozoic granitoids in the Dabie – Sulu orogenic belt, east-central China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 145: 260–277.
- [38] 王栋, 王天齐, 李红艳. 胶东崂山早白垩世 A 型花岗岩成因及对区域构造演化的意义 [J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 317–339.
- [39] SONG M C, LI S Z, SANTOSH M, et al. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 612–625.
- [40] 李洪奎, 时文革, 李逸凡, 等. 山东胶东地区金矿成矿时代研究 [J]. 黄金科学技术, 2013, 21(3): 1–9.
- [41] 李洪奎, 嵯传源, 耿科, 等. 胶东地区构造热事件对金矿成矿的约束与响应 [C] // 山东省地质学会. 地质调查 环境保障 实现找矿新突破——2012 年华东六省一市地学科技论坛文集. 济南: 山东省地图出版社, 2012: 107–115.
- [42] 罗镇宽, 苗来成. 胶东招徕地区花岗岩和金矿床 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [43] 于学峰, 李洪奎, 单伟. 山东胶东矿集区燕山期构造热事件与金矿成矿耦合探讨 [J]. 地质学报, 2012, 86(12): 1 946–1 956.
- [44] 李逸凡, 李洪奎, 陈国栋, 等. 论山东胶东金矿形成的挤压 – 伸展构造环境 [J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(6): 1 117–1 132.
- [45] 宋英昕, 宋明春, 李世勇, 等. 胶东晚中生代三期成矿岩体和 3.5 Ga 锆石的发现及成矿动力学背景 [J]. 地质学报, 2019, 93(2): 440–458.
- [46] 王立功, 李秀章, 于晓卫, 等. 胶东大泽山、天柱山花岗岩岩石成因和构造背景: 地球化学、锆石 U – Pb 年代学及 Lu – Hf 同位素约束 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2022, 52(3): 879–898.
- [47] 于晓卫, 王来明, 刘汉栋, 等. 胶东中生代花岗岩与金矿关系及成矿期划分 [J]. 地质学报, 2023, 97(6): 1 848–1 873.
- [48] SONG M C, WANG S S, YANG L X, et al. Metallogenic epoch of nonferrous metallic and silver deposits in the Jiaodong Peninsula, China and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2017, 91(4): 1 305–1 325.
- [49] 宋明春, 宋英昕, 李杰, 等. 胶东与白垩纪花岗岩有关的金及有色金属矿床成矿系列 [J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(5): 828–843.
- [50] YANG L Q, DENG J, WANG Z L, et al. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2 447–2 467.
- [51] DENG J, YANG L Q, GE L S, et al. Research advances in the Mesozoic tectonic regimes during the formation of Jiaodong ore cluster area [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2006, 16(8): 777–784.
- [52] DENG J, WANG Q F, YANG L Q, et al. The structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang Gold Deposit in Shandong Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(4): 769–780.
- [53] 王勇军, 刘颜, 黄鑫, 等. 胶东牟乳成矿带范家庄金矿床成矿流体特征及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2020, 50(4): 1 012–1 028.
- [54] 孙丰月, 石准立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C – H – O 流体分异成岩成矿 [M]. 长春: 吉林人民出版社, 1995.
- [55] MARUYAMA S, ISOZAKI Y, KIMURA G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. Island Arc, 1997, 6(1): 121–142.
- [56] ISOZAKI Y. Jurassic accretion tectonics of Japan [J]. Island Arc, 1997, 6(1): 25–51.
- [57] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山 – 侵入杂岩成因与地壳演化 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [58] 宋明春, 李杰, 李世勇, 等. 鲁东晚中生代热隆 – 伸展构造及其动力学背景 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2018, 48(4): 941–964.
- [59] 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用 [J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 85–98.

Chronology and geochemical characteristics of Mesozoic granites in Jiaodong area and their relationship with gold silver polymetallic mineralization

Zhao Lixiang^{1,2}, Ding Zhengjiang¹, Zhang Qibin¹, Fan Jiameng¹, Teng Jiawen¹, Sun Jinlei^{2,3}, Qian Ye^{1,2}

(1. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Application and Development of Big Data for Deep Gold Exploration;

2. College of Earth Sciences, Jilin University; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Jiaodong area is one of the important regions of Mesozoic large-scale mineralization and an important part of the magmatic belt in eastern China. The Mesozoic granites are mainly divided into the Late Jurassic Linglong Stage (147–162 Ma), Early Cretaceous Guojialing Stage (125–133 Ma), Late Early Cretaceous Weideshan Stage (110–123 Ma) and Laoshan Stage (110–118 Ma). Linglong granite is crustal remelting S-type rock, and the source of materials is mainly Paleoproterozoic Jingshan Group, Fenzishan Group and Neoproterozoic TTG gneiss; Guojialing granite is high $w(\text{Ba})/w(\text{Sr})$ granite and Weideshan granite is I-type granite, both of which are derived from crust-mantle mixing; Laoshan granite is crustal remelting A-type granite. The gold and polymetallic mineralization is mainly formed in the Early Cretaceous, which is consistent with the Weideshan granite; spatially, the Linglong granite and Guojialing granite are the most important enclosing rocks of the gold deposits; the metallogenic materials of the gold silver polymetallic deposits are characterized by obvious mantle origin, which is closely related to the Weideshan granite, and the upper mantle's contribution to Mesozoic petrogenesis and metallogeny of the Jiaodong area is mainly realized through the mantle source C – H – O fluid activity. Differentiation occurs after the gold-bearing mantle source C – H – O fluid enters into the crust. When the fluid after the differentiation rises to a certain height, with the continuous lowering of the temperature and the continuous addition of atmospheric water, mineralization occurs and gold silver polymetallic deposits in the rock body or the appropriate parts outside and altered rock-type, vein-type and other gold deposits in appropriate parts outside of the rock body.

Keywords: Mesozoic; granite; petrogenesis; relationship between petrogenesis and mineralization; tectonic setting; Jiaodong area