

胶东型金矿:与壳源重熔层状花岗岩和壳幔混合花岗闪长岩有关的金矿

田杰鹏^{1,3)}, 田京祥²⁾, 郭瑞朋²⁾, 韦昌山³⁾, 王立功²⁾, 于晓卫²⁾,
李秀章²⁾, 黄永波²⁾, 张春池²⁾, 刘汉栋²⁾, 祝培刚²⁾

1) 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

2) 山东省地质调查院, 济南, 250013;

3) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

内容提要:胶东型金矿是与壳源重熔形成的层状岩浆活动和壳幔混合岩浆活动有关的金矿床, 由于成矿时所处构造位置和容矿构造不同而表现为不同的类型, 涵盖破碎带蚀变岩型、石英脉型等胶东地区所有金矿床类型。玲珑花岗岩是壳源物质长期处于高温高压下且熔融形成的多物质来源层状岩体, 其析出的高温碱性热液溶解金等成矿物质形成初始含矿热液。岩体抬升过程中在其边部往往容易形成拆离带, 在岩体中形成脆性断裂构造, 均为成矿结构面。后期壳幔混合成因的郭家岭花岗闪长岩, 侵入于玲珑层状花岗岩中并一起隆升, 使郭家岭花岗闪长岩附近区域的成矿结构面进一步扩大, 矿液浓度进一步增大, 当上升到特定深度时形成金矿体。玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩共同构成成矿地质体, 重熔的玲珑层状岩体是成矿基础地质体, 郭家岭花岗闪长岩加强了金矿的成矿作用。该认识对开辟胶东新的找矿思路和找矿靶区有很好的指导作用, 据此初步预测新的大型拆离带是金矿集中成矿区域, 可能成为将来有望取得重大突破的矿集区。

关键词:胶东成矿区; 胶东型金矿; 玲珑花岗岩; 郭家岭花岗闪长岩; 层状花岗岩

胶东成矿区金矿十分发育, 举世瞩目, 找矿突破战略行动实施 5 年来, 探获(333)及以上备案金资源储量 1800 余吨, 新发现大型及以上金矿产地 14 处、中型金矿产地 55 处, 小型金矿产地 42 处, 仅胶东成矿区累计探明金矿资源量在 4500 吨左右。莱州-招远金矿整装勘查区已经跃居世界第三大金矿矿集区, 是我国最重要的金矿资源基地。随着找矿工作的进一步深入, 莱州-招远金矿整装勘查区找矿深度逐步增大, 已经达到 2000 m 以下, 揭示了胶东成矿区深部具有巨大的找矿潜力。今后胶东地区金矿找矿重点应当调整, 需要在整装勘查区外围寻找新的 2000 m 以浅的大中型矿床聚集区。

胶东地区是地学研究的热点地区之一, 有大量的地质工作成果报告、专著和上千篇科研论文, 有海量的地质数据。研究面广、程度深, 涉及到与胶东金矿有关的方方面面。特别是近十几年来随着测试技术的提高, 胶东地区形成了大量测试精度和准确度

很高的地质数据。为我们重新认识胶东金矿的有关问题提供了依据。

对于胶东金矿的成因, 已经有很多学者(Zhai Mingguo et al., 2004; Yang Liqiang et al., 2014; Song Mingchun et al., 2015a)认为不同于世界上众多类型金矿, 提出了胶东型金矿的概念。本文赞同胶东型金矿的提法, 同时认为壳源重熔的玲珑层状花岗岩和壳幔混合的郭家岭花岗闪长岩的形成演化与金矿成矿密切相关。玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩是胶东金矿的主要赋矿地质体, 前人对这 2 种花岗岩进行了很多研究, 但对其与金矿的成生关系仍众说纷纭。有人认为胶东金矿是与玲珑型花岗岩有关的混合岩化岩浆热液矿床(Zhu Feisan et al., 1980), 也有人指出地幔来源的煌斑岩与金矿化有成因联系(Liu Fuchen et al., 1984; Luo Zhenkuan et al., 2001; Shen Yuke et al., 2005)或为金矿成矿提供了部分成矿物质(Ji Haizhang et

注: 本文为国土资源部公益行业科研专项(编号 201411024)、中国地质调查局项目(编号 1212010813014、12120114034901)和山东省地质勘查项目(编号[2014]-7)资助的成果。

收稿日期: 2016-04-12; 改回日期: 2016-04-20; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 田杰鹏, 男, 1992 年生。硕士研究生。矿田构造专业。Email: typ0208@163.com。

al., 1992), 还有人提出伟德山型花岗岩是分凝富金流体和驱动大规模流体循环的主要原因 (Song Mingchun et al., 2013, 2014), 更多人则支持郭家岭型花岗岩岩浆期后热液作用引起了金矿成矿 (Guan Kang et al., 1997; Sun Huashan et al., 2007; Li Shixian et al., 2007)。

本文旨在通过对前人研究成果的深入总结研究, 结合作者近几年野外工作的认识和对胶东地区宏观地质特征的分析, 探讨玲珑花岗岩 (本文指玲珑序列岩浆事件花岗岩, 时代 140~160 Ma)、郭家岭花岗闪长岩 (本文指郭家岭序列岩浆事件花岗闪长岩, 时代 125~130 Ma) 与金矿的成生关系, 进而确定成矿地质体和成矿结构面, 提出区域成矿预测标志和找矿的重点区域, 推动胶东型金矿找矿取得更大突破。

1 区域地质背景

研究区位于胶东半岛, 大地构造位置属华北板块 (Ⅰ级)、胶辽隆起区 (Ⅱ级)、胶北隆起 (Ⅲ) 和秦岭-大别-苏鲁造山带 (Ⅰ级)、胶南-威海隆起区 (Ⅱ级)、威海隆起 (Ⅲ) (图 1)。新太古代基底变质岩系、中生代多期次多成因岩浆活动以及 NE 向断裂构造, 构成本区金矿的基本成矿地质背景 (图 2)。

区内地层主要发育新太古代胶东岩群、古元古代荆山群、粉子山群, 白垩纪莱阳群、青山群、王氏群, 以及第四纪松散沉积物。岩浆侵入活动剧烈而频繁, 总体呈近东西或北东向展布的岩基、岩株、岩瘤状产出, 常群居聚集形成复式岩体。岩石类型齐全, 从超基性-酸性者均有, 尤以中酸性、酸性者规

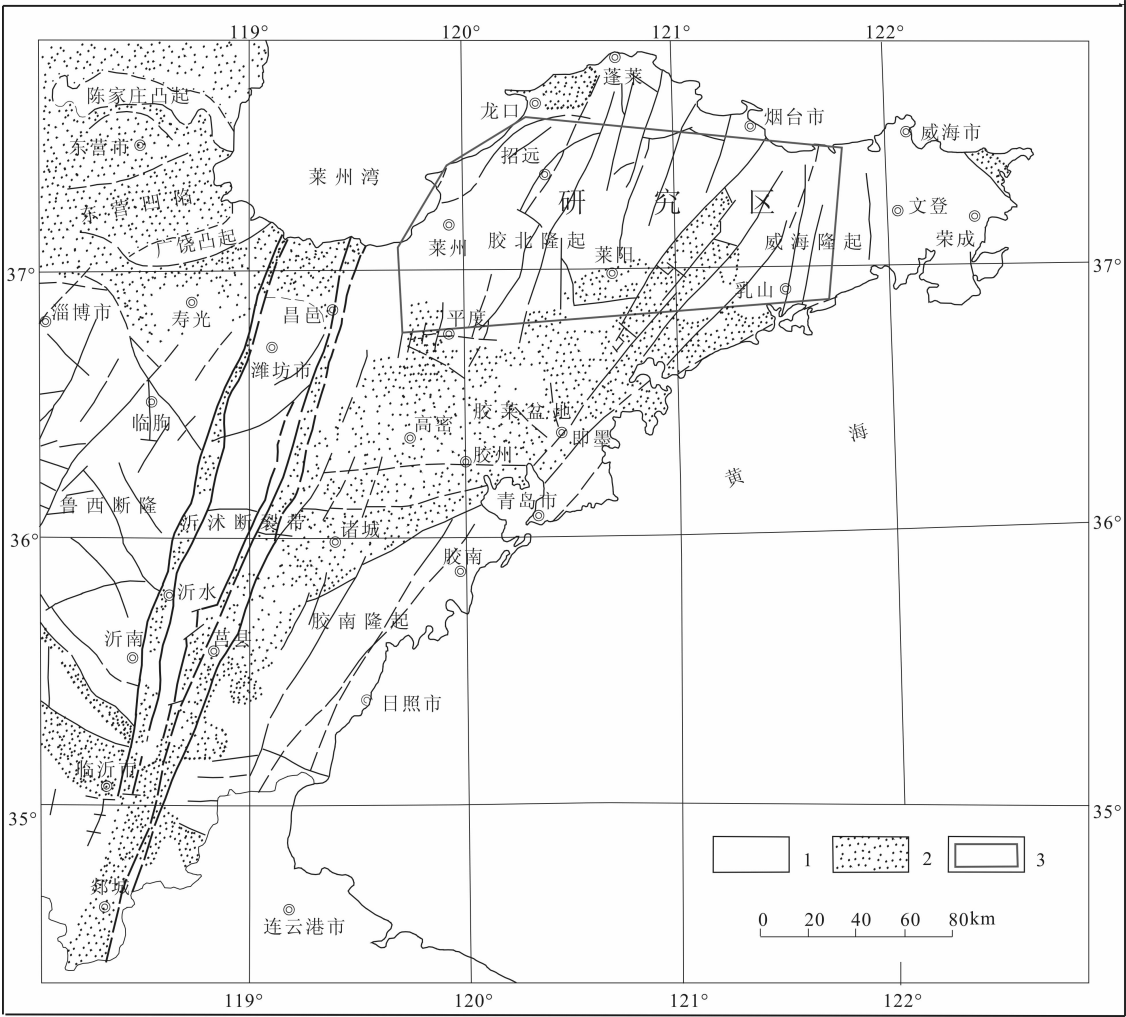


图 1 研究区大地构造位置图

Fig. 1 Tectonic location map of the study area

1—隆起区; 2—凹陷区; 3—研究区范围

1—Uplift area; 2—depressed area; 3—research area

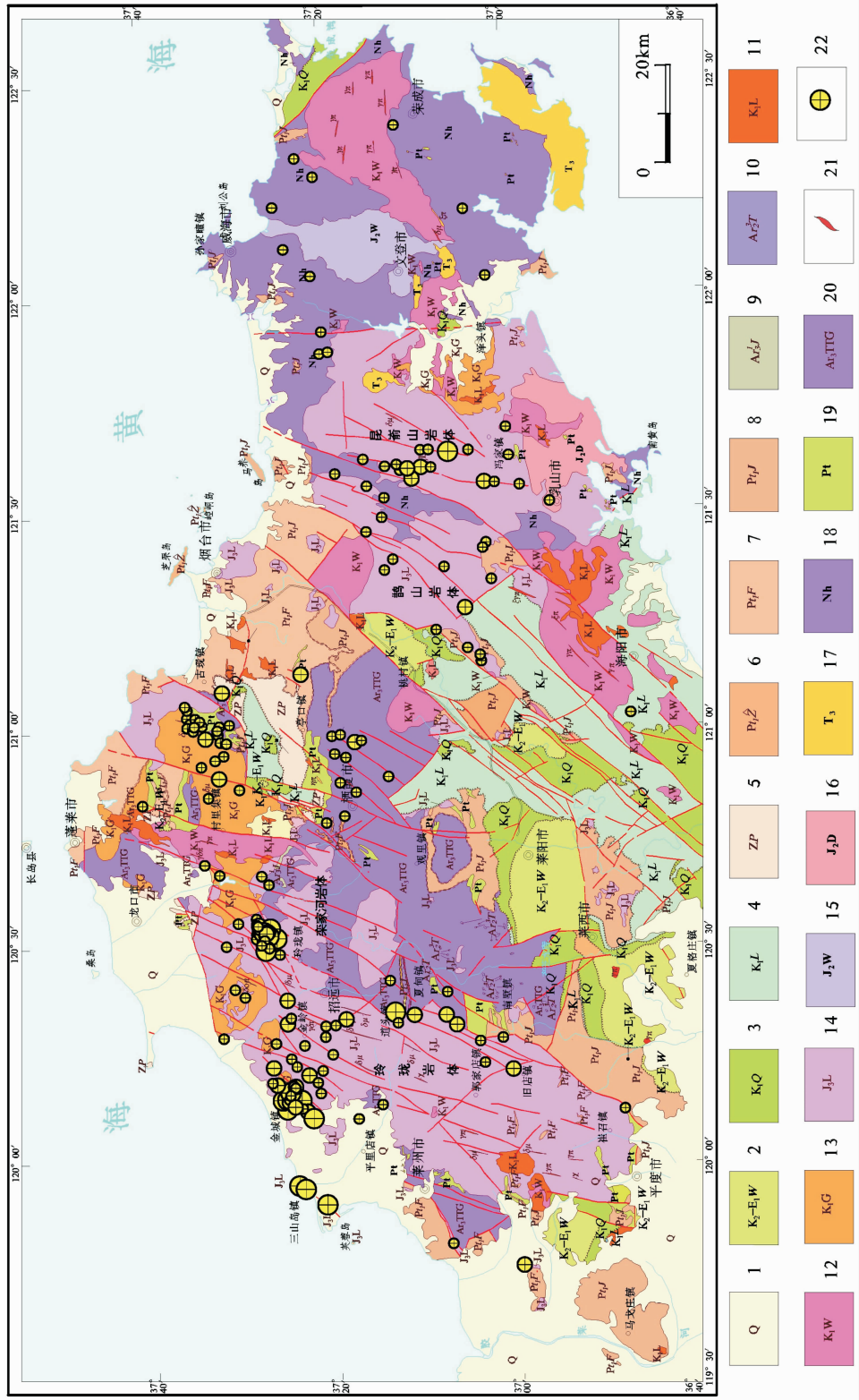


图 2 胶东地区地质矿产简图

Fig. 2 Geology and mineral sketch map of Jiaodong area

- 1—第四系;2—王氏群;3—青山群;4—莱阳群;5—蓬莱群;6—芝罘群;7—粉子山群;8—荆山群;9—胶东岩群;10—唐家山岩群;11—崂山花岗岩;12—伟德山花岗岩;13—郭家岭花岗闪长岩;14—玲珑花岗岩;15—文登花岗岩;16—株固山花岗岩;17—三叠纪花岗岩;18—南华纪花岗岩片麻岩;19—中元古代变辉长岩;20—新太古代 TTG;21—中生代脉岩;22—金矿床
- 1—Quaternary;2—Wangshi Group;3—Qingshan Group;4—Laiyang Group;5—Penglai Group;6—Zhifu Group;7—fenzishan Group;8—Jingshan Group;9—Jiaodong Group;10—Tangjiazhuang rock group;11—Laoshan granites;12—Weideshan granites;13—Guojialing granodiorites;14—Linglong granites;15—Wendeng granites;16—Duogushan granites;17—Triassic granites;18—Nanhuan granitic gneiss;19—mesoproterozoic metagabbro;20—Neoproterozoic TTG;21—dike rock of mesozoic;22—gold deposit

模大、分布广。形成时代自中太古代至中生代均见及,以中生代侵入岩最发育。前寒武纪侵入岩均遭受不同程度的变质变形改造,片麻理、糜棱面理发育。中生代以来的侵入岩受近东西、北东和北北东向断裂制约。区内变质基底岩系广泛发育有不同构造相的韧性变形和多期褶皱,基底构造线和褶皱轴向以近 EW 向展布为主。区内断裂构造发育,其中北北东向和北东向断裂构造是与金成矿体戚相关的线性构造,北西和东西向断裂零散的夹杂其间。这些不同方位的断裂均具多期活动特点,力学性质各异,其形成、活动时间及控(容)矿性能亦不尽相同。

NNE 向—NE 向控矿断裂直接控制了该区特大型、大型金矿床及大部分中小型金矿床,三山岛断裂、焦家断裂、招(远)—平(度)断裂、西林—陡崖断裂、牟(平)—即(墨)断裂和金牛山断裂等 6 条大断裂构造带共同构成了胶东金矿控矿断裂构造系统(见图 2)。

2 玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩及其对金矿的控制作用

2.1 玲珑花岗岩的基本特征

玲珑花岗岩是晚侏罗世壳源重熔钙碱性花岗岩,在胶东地区广泛分布(见图 2),总体呈面状花岗岩岩基。在胶北地区主要包括玲珑岩体和栾家河岩体,在东部地区主要包括昆崙山岩体、鹊山岩体等。其中,玲珑岩体为一复式岩体,整体呈北东向分布在胶西北地区,包括双顶、罗山、欧家乔、磨山、栾家河、郭家店、崔召、云山等侵入体,主要岩性为粒状黑云母花岗岩和片麻状黑云母花岗岩。栾家河岩体侵入到玲珑岩体之中,显示栾家河岩体略晚于玲珑岩体。昆崙山岩体出露于牟平—乳山一带,呈北北东向分布,主要由片麻状黑云母二长花岗岩、变斑片麻状二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩组成。

近年来岩石学和岩石地球化学的系统研究表明,该期岩体属于壳源重熔花岗岩,为中生代扬子板块与华北板块陆陆碰撞造山后,加厚下地壳部分熔融的产物(Lin Wenwei et al., 1997; 1998; Li Huaikun et al., 1998; Zeng Hualin et al., 1999; Li Junjian et al., 2005)。通过锆石 SHRIMP U-Pb 和⁴⁰Ar-³⁹Ar 等高精度年代学测试分析(Xu Honglin et al., 1997; Miao Laicheng et al., 1998; Guo Jinghui et al., 2005),确认其同位素年龄集中于晚侏罗世 150~160 Ma,少部分 142~150 Ma。

2.2 玲珑花岗岩的成因及其在金成矿中的作用

胶西北招远—平度一带出露的玲珑花岗岩体经重力计算,认为是一个南部厚(8 km)、北部薄(<1 km)的板状体(Zeng Hualin et al., 1999; Wang Jijun, 2000)。玲珑花岗岩在胶东地区是断续连为一体的,从莱州—乳山东西长约 200 km,从龙口南—平度南北宽约 100 km。在区域重力成果图上,表现为大片的区域重力低值区,在重力低值区的低值中心区域对应于伟德山和崂山序列侵入岩,为“点状”区,郭家岭花岗闪长岩也是点状体,其他大片区域是玲珑花岗岩。根据重力成果和地质综合推断玲珑花岗岩是层状体。大量前人研究表明,玲珑花岗岩属于壳源重熔成因(Wan Tianfeng et al., 2000; Wang Jijun, 2000; Zhai Mingguo et al., 2004; Zhang et al., 2010; Lin Bolei et al., 2013; Ma et al., 2013; Chen Jun et al., 2015),结合其产状特征,笔者推断其为壳源层状重熔形成的层状体(图 3)。岩体形成后缓慢上升,上升过程中塑性的熔融体首先向压力相对较低的方向运移,在岩体与上层围岩接触处就会形成波状起伏的形态。由于岩体的温度高,密度低,在其抬升运动过程中与上覆围岩产生速率差,同时受水平方向构造运动的影响,层状岩基之上的变质岩层则发生大幅度拆离滑脱,形成大致沿玲珑岩基顶部发育的拆离断层(Song Mingchun et al., 2015b),为大中型矿床提供了有利的成矿空间。

据研究,玲珑花岗岩发育大量继承锆石(Miao

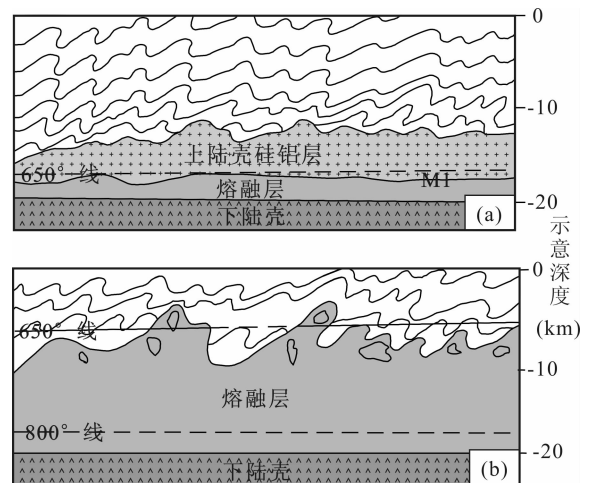


图 3 玲珑花岗岩层状重熔模型(据陈国能,2001,有修改)

Fig 3 Layered remelting model of the Linglong granite (modified from Chen Guoneng, 2001)

(a)—熔融早期;(b)—熔融后期;M1—重熔界面

(a)—Early melting;(a)—later melting;

M1—the remelting interface

Laicheng et al., 1997), 其年龄范围为 180~3446 Ma, 其中 200~300 Ma 的继承锆石年龄较常见, 还有大量 700~800 Ma (Wang Shijin et al., 2011) 的锆石年龄。这一方面指示了玲珑花岗岩物质来源的复杂性, 既有华北板块新太古代结晶基底部分熔融的产物, 也有苏鲁超高压变质带深俯冲物质的残留。另一方面, 也为金矿成矿物质来源的复杂性提供了合理的解释, 多物质来源熔融形成的玲珑花岗岩富集了各种来源的金元素, 被后期的流体萃取, 在有利构造部位成矿。尤其需要注意的是, 除了许多地质工作者认为的胶东新太古代变质岩系为金矿的重要物质来源(初始矿源岩)外, 苏鲁造山带深俯冲物质可能也为胶东金矿成矿提供了部分物质来源。

2.3 郭家岭花岗闪长岩与成矿的关系

郭家岭花岗闪长岩的地球化学组成显示为壳幔混合成因 (Qu Xiaoming et al., 2000; Yang Jinhui et al., 2000, 2003; Zhao Zhenhua et al., 2002), 与中生代古太平洋板块对华北板块的俯冲作用有关 (Zhao Zhenhua et al., 2002), 该区金矿的成矿作用受制于这种岩浆作用 (Luo Xiandong et al., 2014), 为岩石圈减薄过程中, 断裂深切割引发拆沉下地壳部分熔融的产物, 形成于 126~130 Ma (Guan Kang et al., 1998; Yang Jinhui et al., 2000; Geng Ke et al., 2015)。

郭家岭花岗闪长岩主要分布于莱州-招远北部地区, 从西到东依次划分为三山岛、上庄、北截、丛家、曲家、郭家岭、大柳行等岩体, 其分布与三山岛-仓上、焦家-金城、玲珑和大柳行 4 个金矿聚集区相吻合 (图 2), 说明金矿与郭家岭花岗闪长岩存在较为密切的关系。2015 年招金集团在大尹格庄-夏甸金矿聚集区深部见到郭家岭隐伏岩体。纵观胶东地区金矿的分布, 在仅有玲珑花岗岩的区域多是中小型金矿, 在叠加郭家岭花岗闪长岩的地区, 出现大型金矿床的集中分布, 充分说明郭家岭花岗闪长岩对成矿有很重要的作用。郭家岭花岗闪长岩与玲珑花岗岩共同控矿, 郭家岭花岗闪长岩进一步助推成矿作用, 二者叠加的地方往往形成大型矿床集中区。二期岩浆作用叠加是造成胶东金矿物质聚集、缓慢隆升成矿的重要基础和形成如此巨量金矿的重要原因, 也是胶东型金矿不同于其他金矿的特别之处。

对胶东地区 174 个金矿床统计表明, 集中于玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩及其边界断裂中的金矿床占 94.25%, 这充分说明金矿成矿与玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩有非常密切的关系。

2.4 岩浆作用对金成矿的贡献

大面积的塑性状态的层状玲珑岩浆上升会形成波状起伏的顶界面, 在界面接触带附近会形成塑性流动韧性构造, 即岩体边缘韧性剪切带。在花岗岩成岩后缓慢隆升过程中, 会和围岩产生差异运动, 沿波状接触带形成脆性断裂构造带, 即现今的大型拆离构造带的雏形, 这是热液最好的聚集空间。

饱和水 (其重量百分比为 6%~9%) 的铝硅酸盐熔体的存在是金矿床形成的必需条件, 水是熔体中金的主要萃取剂, 分散在熔体中的金被过热的水流体萃取并被富集在与熔体相平衡的汽相中, 高温水流体的萃取能力主要取决于温度 (E. H. Ji Mai et al., 1990)。而据王海芹等 (2008) 对栾家河岩体的研究, 岩浆演化早期含水量较低 (2.5%±), 随着温度的降低和结晶作用不断进行, 残余岩浆的含水量不断增加, 到 855℃ 时, 形成了流体熔融包裹体, 岩浆含水量达到 5.8% 左右, 粘度降低, 表现出湿花岗岩浆的结晶作用特点。说明玲珑花岗岩属于饱和水铝硅酸盐熔体, 具备金矿床形成的必需条件。矿物中大量发育 H_2O-CO_2 三相包裹体, 并且 CO_2 含量高, 说明该岩体是富 CO_2 的, 随着岩浆的分异演化, 流体中 H_2O 含量不断增加。玲珑花岗岩中 SiO_2 及 K_2O 、 Na_2O 碱性组份均较一般花岗岩高, 铁、镁及钙的氧化物则较一般花岗岩低, 反映出钾、钠碱性交代在岩石成岩演化过程中起着积极作用 (Xue Jinsheng et al., 1980)。花岗岩中 93% 以上的金赋存在硫化物中, 在花岗质岩浆演化过程中, 硅酸盐矿物的结晶或溶解不影响金的状态 (朱永峰等, 2010)。可以说重熔形成玲珑花岗岩过程中, 有大量富含 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 和 CO_2 的热水溶液。这正是壳源物质重熔形成玲珑花岗岩过程中能够从中萃取富集金质的高温热水溶液, 是对金质的初步富集。

矿物溶解度和溶液相化学物质的热力学性质在不同温度条件下差异明显, 金-硫化物在高温下有较高的溶解度, 即高温热流体中可以含有较高浓度的金-硫化物而不沉淀, 这种流体沿温度梯度带流动时, 将导致固相金-硫化物沉淀 (Deng Jun et al., 2001)。

在花岗岩化进变过程中金能够被活化、浸出和转移, 如果重熔前后花岗岩的含金量平均相差 1×10^{-9} , 即有 1×10^{-9} 的金被活化浸出, 则 1 km^3 的岩石可释放出 3 吨金。整个胶东地区推测层状玲珑花岗岩的面积达 20000 km^2 , 假设厚度平均 5 km, 那么浸出金的总量将达 3×10^5 吨, 即使能有十分之一能够成矿, 也能达到 3 万吨。

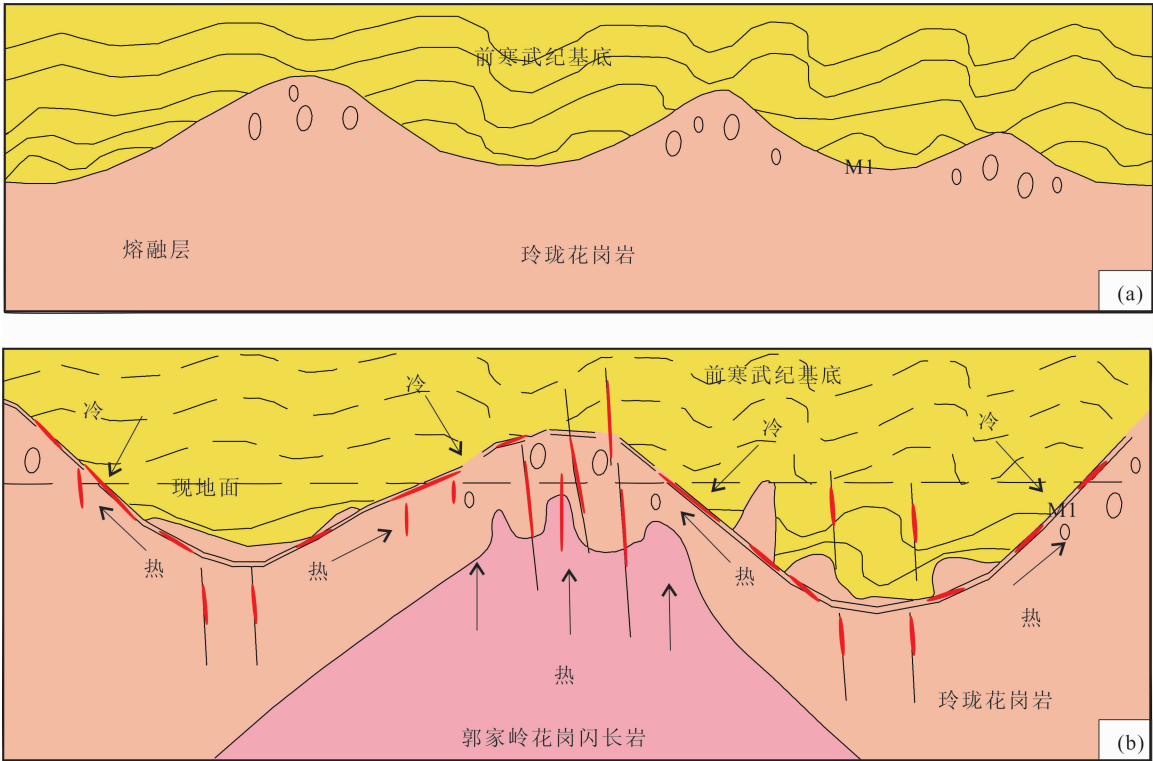


图 4 胶东金矿成矿模式

Fig 4 The metallogenic model of gold deposit in Jiaodong)

(a)—熔融体完全固结期;(b)—成矿期;M1—岩体界面(拆离带)

(a)— Full consolidation period of molten body;(b)—metallogenic period;M1—the rock interface (detachment zone)

据胡晓燕等(2012)的实验结果,金在花岗质熔体中的溶解度变化范围为 $1.87 \times 10^{-6} \sim 156.62 \times 10^{-6}$,流体相中金的溶解度为 $0.31 \times 10^{-6} \sim 6.92 \times 10^{-6}$ 。在富含 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 和 CO_2 的热溶液中溶解度会更高。这些含矿热液充填在大型拆离构造带和其他断裂带中,当这种含金很高的热液随着玲珑花岗岩缓慢上升,郭家岭花岗闪长岩的侵入,使得周围区域又一次升温,是热液又一次对成矿物质的再富集,同时也使得其周围围岩张性断裂构造增多,附近拆离构造带的规模也会进一步扩大,为热液提供了更大的良好储存空间。当岩体隆升到较浅深度时,岩体温度降低,含矿热液温度也随之降低,在与围岩接触带附近的拆离构造带温度降低最快,含矿热液的地球化学环境发生变化,金质结晶析出成矿(见图 4)。

3 问题讨论

3.1 玲珑花岗岩为壳源重熔层状岩体

玲珑花岗岩在胶东分布广泛,是出露面积最大的侵入岩,为一壳源重熔形成的层状岩体,其上界面原为波状起伏形态,在岩体隆升过程中被叠加改造

成拆离构造带,有利于矿液汇聚成矿。玲珑花岗岩中大龄继承锆石存在,指示了其物质来源的复杂性,同时也为金成矿物质来源的多元性提供了合理的解释,除胶东新太古代基底岩系是金矿的重要物质来源外,苏鲁超高压变质带深俯冲物质可能为金成矿提供了部分物质来源。

3.2 胶东地区金矿类型

虽然前人已提出胶东金矿是一种独特的金矿类型,但对其成因或成矿作用尚有不同认识。如: Yang Liqiang et al. (2014)认为,胶东中生代金成矿系统特征明显区别于典型的“与侵入岩有关的金矿”和“造山型金矿”,也不同于全球其它已知的金矿床类型;Zhai Mingguo et al. (2004)认为,胶东型金矿的成矿作用是一种陆内非造山带成矿作用,在华北的基底和地幔的控制下,形成基本是单一金矿和少量其他矿种的成矿体系;Zhu Rixiang et al. (2015)则提出了华北克拉通破坏型金矿的概念,认为华北克拉通金矿的成矿流体来源主要与来自克拉通破坏相关的岩浆活动有关,强烈交代富集的岩石圈地幔熔融产生的熔/流体与地壳的相互作用造成金元素短期巨量聚集成矿。

本文通过综合分析认为,胶东型金矿是与壳源重熔形成的层状玲珑花岗岩和壳幔混溶的郭家岭花岗闪长岩有关的金矿床,具有独特的成矿条件和成矿作用。胶东型金矿涵盖破碎带蚀变岩型、石英脉型等胶东所有金矿床类型,由于成矿时所处构造位置和容矿构造不同而表现为不同的类型。

4 结论

4.1 玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩共同构成胶东型金矿的成矿地质体

壳源物质在层状重熔、结晶形成层状玲珑花岗岩及其缓慢上升过程中,热水溶液溶解了大量金质,赋存于构造裂隙及其岩石孔隙中,形成了富含成矿热液的层状地质体。郭家岭花岗闪长岩侵入到玲珑花岗岩中时,使得周围区域又一次升温,热液对成矿物质再富集,同时也使得其周围围岩断裂构造增多,玲珑花岗岩顶部的拆离构造带的规模进一步增大,为热液提供了良好的储存空间。当热液流体运移至近地表(3~5 km)时,由于温度降低、地表水的大量下渗,地球化学环境改变,在岩体与前寒武纪结晶基底接触带附近的拆离构造带中,含矿热液中金等发生沉淀成矿。这说明,玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩共同构成了胶东型金矿的成矿地质体,层状玲珑花岗岩为胶东金矿成矿提供了良好的赋存空间的主要的物质来源,而郭家岭花岗闪长岩对成矿提供了足够的热源和流体来源。受层状玲珑花岗岩控制的胶东型金矿具有类似“层控型”矿床的成矿特征。

4.2 胶东型金矿新认识对找矿的启示

莱州-招远金矿整装勘查区重点矿区勘查深度已经达到 2000m 以下,胶东金矿以后的重点找矿区域在哪里?需要开辟新的找矿思路和新的找矿靶区,根据本文关于胶东型金矿的认识,新的找矿靶区的选择要重点考虑以下几方面因素:

- (1)玲珑花岗岩及其周围为成矿有利区域;
- (2)玲珑花岗岩内有郭家岭花岗闪长岩侵入的地区成矿规模会更大;
- (3)玲珑花岗岩与围岩边界的大型拆离带是形成大型矿床集中区的最佳成矿结构面;
- (4)产状较陡的成矿期张性断裂构造也是较有利的容矿空间。

根据上述 4 个条件分析,除传统的三山岛带、焦家带和招平带三条大型拆离带均为大中型金矿集中区外,我们认为,西林-陡崖断裂北段,牟即断裂带西缘,莱州南部等区域均能形成大型拆离带,山东省地

质调查院在三山岛断裂西侧海域新发现的重力梯级带,推断为拆离带构造,这 4 个区域是形成大中型金矿床集中区的最佳区域,应作为以后找矿的重点区域。

致谢:审稿专家对稿件提出了很好的建设性的修改意见,对提高文章质量起了重要作用,在此表示衷心的感谢。

References

Chen Guoneng, Zhang Ke, Shao Rongsong, Li Liufen, Lin Xiaoming. 2001. The In_situ_melting Model of granite origin and its geological evidence. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 40(3):95~99.

Chen Jun, Sun Fengyue, Wang Li, Wang Shuo, Li Ruihua. 2015. Zircon U-Pb geochronology and petrogeo chemistry of Luanjiahe granite in Jiaodong region and their geological significance. *Global Geology*, 34(2):283~295.

Deng Jun, Yang Liqiang, Liu Wei, Sun Zhongshi, Li Xinjun, Wang Qingfei. 2001. Gold origin and fluid ore-forming effect of Zhao-Ye ore deposits concentrating area in Jiaodong, Shandong, China. *Chinese Journal of Geology*, 36(3):257~268.

E. H. Ji M. 1990. Harness of the alkali arsenic wastewater from gold mine. *Gold*, 11(3):45~47.

Geng Ke, Wang Ruijiang, Li Hongkui, Shan Wei, Li Dapeng. 2015. Zircon SHRIMP age of diorite-porphyrite in Beijie gold deposit from the Northwest Jiaodong area and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 89(6):1099~1107 (in Chinese with English abstract).

Guan Kang, Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Huang Jiazhan. 1997. Petrochemical and geochemical characteristics of Guojialing suite granite in ZhaoYe district and the genetic relation of gold mineralization to the granite. *Contributions to geology and mineral resources Research*, 12(4):1~8.

Guan Kang, Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Huang jiazhan. 1998. SHRIMP in zircon chronology for Guojialing suite granite in Zhao-Ye district, Jiaodong. *Scientia Geological Sinica*, 33(3):318~328. (in Chinese with English abstract)

Guo Jinghui, Chen Fukun, Zhang Xiaoman, Slebel W and Zhai Mingguo. 2005. Evolution of syn-to post-collisional magmatism from North Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1281~1301 (in Chinese with English abstract).

Hu Shiling, Wang Songshan, Sang Haiqing, Qiu Ji, Zhang Renyou. 1987. Isotopic ages of Linglong and Guojialing batholiths in Shandong Province and their geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 3: 83 ~ 89 (in Chinese with English abstract).

Hu Xiaoyan, Bi Xianwu, Cai Guosheng, Chen Youwei, Dong Shaohua. 2012. A Preliminary Experimental Study on the Solubility of Gold in Granitic Silicate Melts. *Aata Mineralogica Sinica*, 32(1):22~27.

Ji Haizhang, Zhao Yiying, Lu Bing and Chen Dianzhao. 1992. On the relation of lamprophyre to gold ore in the Jiaodong area. *Geology and Prospecting*, 2:15~18(in Chinese with English abstract).

- Li Huaikun, Li Huimin, Lu Songnian, Yang Chunliang. 1998. Single grain zircon U-Pb ages for the granitoids from the Zhao-Ye gold mineralization belt (ShanDong province) and their geological implications, 21(1):11~18.
- Li Junjian, Luo Zhenkuan, Liu Xiaoyang, Xu Weidong, Luo Hui. 2005. Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area. Mineral Deposits, 24 (4) : 361 ~ 372 (in Chinese with English abstract).
- Li Shixian, Liu Changchun, An Yuhong, Wang Weicong, Huang Tailing and Yang Chenghai. 2007. Geology of Gold Deposits in Jiaodong. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 101 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bolei, Li Biye. 2013. Geochemistry, U-Pb dating, Lu-Hf isotopic analysis and geological significance of linglong granite in jiaodong peninsula, 40(2):147~160.
- Lin Wenwei, Zhao Yiming, Zhao Guohong, Peng Cong, Zhao Weigang. 1997. Ages, spatial forms, source rocks and mathematical modeling of Linglong granitic complex. Acta Petrologica et Mineralogica, 16 (2): 97~111 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei, Yin Xiulan. 1998. The Forming Physicochemical Conditions of Linglong Granitic Complex and Its Geological Significance, 19(1):40~49.
- Liu Fuchen, Lu Zuoxiang, Fan Yongxiang, Kong Qingcun, Gong Runtian. 1984. Research on the relationship between the basic intrusive dykes and the gold mineralization in Linglong gold deposit. Earth Science in China, 4:37~46 (in Chinese).
- Luo XianDong, Yang XiaoYong, Duan LiuAn, Sun WeiDong. 2014. Geochemical and geochronological study of the gold-related Guojialing pluton and Shangzhuang pluton in Jiaobei block. Acta Geologica Sinica, 88(10):1874~1888 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuan, Guan Kang and Miao Laicheng. 2001. Discussion on relationship between lamprophyre veins and mineralization in the Linglong gold field, eastern Shandong. Gold Geology, 7 (4):15~21 (in Chinese with English abstract).
- Ma L., Jiang SY, Dai BZ, Jiang YH, Hou ML, Pu W and Xu B. 2013. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula. Eastern China; Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. Lithos, 162:251~263.
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Huang Jiazhan, Guan Kang. 1997. Study on zircons from granitoid intrusives of ZhaoYe gold belt, Shandong Province. Science in China (Series D), 27(3): 207 ~ 213 (in Chinese).
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Guan Kang, Huang Jiazhan. 1998. The implication Of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the petrogenesis of the Linglong granite, Shandong Province. Acta Petrologica Sinica, 14(2):198~206.
- Qu Xiaoming, Wang Henian, Rao Bing. 2000. Partial melting experiments of Jiaodong Group and their implication for the origin of the Grantsies. Geochim, 29(2):153~161 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yueke, Deng Jun, Xu Yebing. 2005. Geological significance of lamprophyre during gold mineralization in the Linglong ore field. Geology and Exploration, 43(3):45~49.
- Song Mingchun, Song Yingxin, Shen Kun, Jiang Hongli and Li Shiyong. 2013. Geochemical features of deep-seated gold deposit and discussions on some associated problems in Jiaojia gold ore field, Shandong Peninsula, China. Geochimica, 42 (3):274~289 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Li Sanzhong, Yi Pihou, Cui Shuxue, Xu Junxiang, Lu Guxian, Song Yingxin, Jiang Hongli, Zhou Mingling, Zhang Pijian, Huang Tailing, Liu Changchun and Liu Dianhao. 2014. The types of Jiaojia style gold deposit and metallogenic theory in the Jiaodong Peninsula, China. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 44(1):87~104 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun. 2015a. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. Geological Bulletin of China, 34(9):1758~1771.
- Song Mingchun, Zhang Junjin, Zhang Pijian, Yang Liqiang, Liu Dianhao, Ding Zhengjiang, Song Yingxin. 2015b. Discovery and tectonic-Magmatic background of superlarge gold deposit in offshore of northern Sanshandao, Shandong Peninsula, China. Acta Geologica Sinica, 89 (2): 365 ~ 383 (in Chinese with English abstract).
- Sun Huashan, Sun Lin, Zhao Xianhui, Yang Kaichun, Cao Xinzh, Liu Wensheng, Wang Chao. 2007. Ore-controlling evidence and ore prospecting significance of Guojialing granodiorite in northwest Jiaodong peninsula. Gold, 28(4):14~18 (in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng, Teyssier C, Zeng Hualin, Zhou Weixin, Tikoff B. 2000. Emplacement mechanism of Linglong granitoid complex, Shandong Peninsula, China. Science in China (Series D), 30(4):337~344.
- Wang Haiqin, Huo Guanghui. 2008. Characteristics of mineral inclusions in granites closely related with gold forming in eastern shandong province. Journal of Geomechanics, 14(3): 263~273.
- Wang Jijun. 2000. Discussion on genesis of linglong granite. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 15 (4):289~297.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Guo Ruipeng, Song Zhiyong, Wang Lifa. 2011. SHRIMP Zircon Dating of Linglong Type (Superunit) Granite in Eastern Shandong Province. Shandong Land and Resources, 27(4):1~7.
- Xu Honglin, Zhang Dequan, Sun Guiying. 1997. Characteristics and Genesis of Kunyushan Granite and Its Relation with Gold Deposits in Jiaodong. Acta Petrologica et Mineralogica, 16(2): 131~143.
- Xue Jinsheng. 1980. a preliminary study on the genesis and evolution of linglong granite in shandong province. Journal of Shandong College of Oceanology, 10(4):78~90.
- Yang Jinhui. 2000. Age and metallogenic dynamics of gold mineralization in Jiaodong Peninsula, eastern China-Constraints on the interaction of mantle/crust and metallogenesis/lithospheric evolution. Beijing Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences; 1 ~ 133 (in Chinese with English abstract)
- Yang Jinhui, Zhu Meifei, Liu Wei, Zhai Mingguo. 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 19(4):692~700.

Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China, *Acta Petrologica Sinica*, 30(9):2447~2467.

Zhai Mingguo, Fan Hongrui, Yang Jinhui, Miao Laicheng. 2004. Large-scale cluster of gold deposits in East Shandong: Anorogenic metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 11(1):85~98(in Chinese with English abstract).

Zhang J, Zhao ZF, Zheng YF and Dai MN. 2010. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China. *Lithos*, 119(3~4):512~536.

Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, Bao Zhiwei, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Ren Shuangkui. 2002. Alkali-rich igneous rocks and the mineralization of related large and super-large gold-copper deposits in China. *Science in China (Series D)*, 32: 1~10(in Chinese).

Zhu Yongfeng, An Fang. 2010. Geochemistry of hydrothermal mineralization: Taking gold deposit as an example. *Earth Science Frontiers- Journal of China University of Geosciences*, 17(2):45~52.

Zhu Fengsan. 1980. The preliminary study of mineralization of migmatization hydrothermal gold deposits. *Geology and Exploration*, (7):1~10 (in Chinese with English abstract).

Zhu Rixiang, Fan Hongrui, Li Jianwei, Meng Qingren, Li Shengrong, Zeng Qingdong. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China: Earth Sciences*, 58: 1523~1537.

Zeng Hualin, Wan Tianfeng, Teyssier C, Yao Changli, Tikoff B. 1999. Gravity modeling for 3-D geometry of Linglong granitic complex. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences*, 24(6): 607~612.

探.地质与勘探,(2):15~18.

李怀坤,李惠民,陆松年,杨春亮. 1998. 山东招掖金矿带花岗岩类单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究及其意义. 前寒武纪研究进展, 21(1):11~18.

李俊建,罗镇宽,刘晓阳,徐卫东,骆辉. 2005. 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. 矿床地质, 24(4):361~372.

李士先,刘长春,安郁宏,王为聪,黄太岭,杨承海. 2007. 胶东金矿地质,北京:地质出版社,1~101.

林博磊,李碧乐. 2013. 胶东玲珑花岗岩的地球化学、U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(2): 147~160.

林文蔚,赵一鸣,赵国红,彭聪,赵维刚. 1997. 玲珑花岗质杂岩的时代、空间形态、源岩及其数学模拟. 岩石矿物杂志, 16(2):97~111.

林文蔚,殷秀兰. 1998. 玲珑花岗质杂岩体形成的物理化学条件及其地质意义. 地球学报, 19(1):40~49.

刘辅臣,卢作祥,范永香,孔庆存,宫润潭. 1984. 玲珑金矿中基性岩脉与矿化的关系探讨. 地球科学, 27(4): 37~46.

罗贤冬,杨晓勇,段留安,孙卫东. 2014. 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. 地质学报, 88(10):1874~1888.

罗镇宽,关康,苗来成. 2001. 胶东玲珑金矿田煌斑岩脉与成矿关系的讨论. 黄金地质, 7(4):15~21.

苗来成,罗镇宽,黄佳展,关康. 1997. 山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及其意义. 中国科学(D 辑), 27(3): 207~213.

苗来成,罗镇宽,关康,黄佳展. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义. 岩石学报, 14(2):198~206.

曲晓明,王鹤年,饶冰. 2000. 胶东群部分熔化实验及其对花岗岩成因的指示. 地球化学, 29(2):153~161.

申玉科,邓军,徐叶兵. 2005. 煌斑岩在玲珑金矿田形成过程中的地质意义. 地质与勘探, 43(3):45~49

宋明春,宋英昕,沈昆,姜洪利,李世勇. 2013. 胶东焦家深部金矿矿床地球化学特征及有关问题讨论. 地球化学, 42(3):274~289.

宋明春,李三忠,伊丕厚,崔书学,徐军祥,吕古贤,宋英昕,姜洪利,周明岭,张丕建,黄太岭,刘长春,刘殿浩. 2014. 中国胶东焦家式金矿类型及其成矿理论. 吉林大学学报(地球科学版), 44(1):87~104.

宋明春. 2015a. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展. 地质通报, 34(9):1758~1771.

宋明春,张军进,张丕建,杨立强,刘殿浩,丁正江,宋英昕. 2015b. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景. 地质学报, 89(2):365~383.

孙华山,孙林,赵显辉,杨开春,曹新志,刘文胜,王超. 2007. 招掖地区郭家岭花岗闪长岩控矿的几点证据及找矿指示意义. 黄金, 28(4): 14~18.

万天丰, C. Teyssier, 曾华霖, 周伟新, B. Tikoff. 2000. 山东玲珑花岗质岩体侵位机制. 中国科学(D 辑:地球科学), 30(4):337~344.

王海芹,霍光辉. 2008. 胶东地区与金矿成矿有关的花岗岩体中的流体包裹体研究. 地质力学学报, 14(3):263~273.

王吉珺. 2000. 玲珑花岗岩成因探讨. 地质找矿论丛, 15(4):289~

陈国能,张珂,邵荣松,李榴芬,林小明. 2001. 原地重熔及其地质效应. 中山大学学报(自然科学版), 40(3):95~99.

陈俊,孙丰月,王力,王硕,李睿华. 2015. 胶东招掖地区滦家河花岗岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其地质意义. 世界地质, 34(2):283~295.

邓军,杨立强,刘伟,孙忠实,李新俊,王庆飞. 2001. 胶东招掖矿集区巨量金质来源和流体成矿效应. 地质科学, 36(3):257~268.

耿科,王瑞江,李洪奎,单伟,李大鹏. 2015. 胶西北地区北截金矿闪长玢岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. 地质学报, 89(6):1099~1107.

关康,罗镇宽,苗来成,黄佳展. 1997. 郭家岭型花岗岩地球化学特征与金矿化的关系. 地质找矿论丛, 12(4):1~8.

关康,罗镇宽,苗来成,黄佳展. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究. 地质科学, 33(3):318~328.

郭敬辉,陈福坤,张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 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. 岩石学报, 21(4):1281~1301.

胡世玲,王松山,桑海清,裴冀,张任祜. 1987. 山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 3:83~89.

胡晓燕,毕献武,蔡国盛,陈佑纬,董少花. 2012. 金在花岗质熔体中溶解度的初步实验研究. 矿物学报, 32(1):22~27.

季海章,赵懿英,卢冰,陈殿照. 1992. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初

297.

徐洪林,张德全,孙桂英. 1997. 胶东崑崙山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系. 岩石矿物杂志, 16(2): 131~143.

薛金声. 1980. 试论山东玲珑花岗岩的成因与演化. 山东海洋学院学报, 10(4): 78~90.

杨进辉. 2000. 胶东地区金矿床成矿时代及其成矿地球动力学背景—兼论壳幔相互作用与成岩成矿. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所[博士学位论文], 1~133.

杨进辉,朱美妃,刘伟,翟明国. 2003. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因. 岩石学报, 19(4): 692~700.

杨立强,邓军,王中亮,张良,郭林楠,宋明春,郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30(9): 2447~2467.

翟明国,范宏瑞,杨进辉,苗来成. 2004. 非造山带型金矿—胶东型金矿的陆内成矿作用. 地学前缘(中国地质大学,北京), 1(1): 85~98.

赵振华,熊小林,王强,包志伟,张玉泉,谢应雯,任双奎. 2002. 我国富碱火成岩及有关的大型—超大型金铜矿床成矿作用. 中国科学(D辑:地球科学), 32(增刊): 1~10.

朱永峰,安芳. 2010. 热液成矿作用地球化学: 以金矿为例. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学), 17(2): 45~52.

朱奉三. 1980. 混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究. 地质与勘探, (7): 1~10.

朱日祥,范宏瑞,李建威,孟庆任,李胜荣,曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153~1168.

曾华霖,万天丰, Teyssier Christian, 姚长利, Tikoff Basil. 1999. 山东玲珑花岗岩杂岩体三维形态的重力模拟. 地球科学—中国地质大学学报, 24(6): 607~612.

E. H. 季迈,张教五. 1990. 金在水中的高温溶解和金矿床的成因. 黄金, 11(3): 45~47.

Jiaodong-Type Gold Deposit Related to Crust Source Remelting Layered Granite and Crust-Mantle Mixed Granodiorite

TIAN Jiepeng^{1,3)}, TIAN Jingxiang²⁾, GUO Ruipeng²⁾, WEI Changshan³⁾, WANG Ligong²⁾, YU Xiaowei²⁾, LI Xiuzhang²⁾, HUANG Yongbo²⁾, ZHANG Chunchi²⁾, LIU Handong²⁾, ZHU Peigang²⁾

1) China University of Geosciences, Beijing, 100083;
2) Institute of Geological Survey, Shandong Province, Jinan, 250013;
3) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

Abstract

Jiaodong-type gold deposit refer to the gold deposits related to the layered magmatic activities of the crust remelting and crustal-mantle mixing magma, which show different deposit types in response to their structural positions and ore hosting structure. The gold deposits of this kind contain altered tectonite-type and quartz vein type, etc. The Linglong granite was multiple sourced layered rock mass resulting from melting of crustal magma source under the long-term high temperature and high pressure. High-temperature alkaline hydrothermal fluid contained gold to constitute early gold-bearing metallogenic fluid. During the consistent uplifting process of the rock mass after diagenesis, the detachment belt tended to form along the edge of rock mass, therefore leading to formation of brittle fractures and metallogenic structural plane in rock mass. The Guojialing granodiorite, which formed from the late-stage crust-mantle mixed magma, intrudes into the Linglong granite and then uplifted. This resulted in further expansion of the metallogenic structural plane in the vicinity of the Guojialing granodiorites and increasing of fluid concentration, finally leading to the formation of gold ore bodies when the granodiorite reached a specific depth. Layered Linglong granite and Guojialing granodiorite jointly constitute the metallogenic geological body, with the former being the fundamental host rock and the latter increasing gold mineralization. The understanding provides good guidance for thinking and targeting of deposit exploration in the Jiaodong area. On the basis of this study, it can be predicted that the new large detachment belt is gold mineralization clustered zone, which could be major breakthrough in the future.

Key words: Jiaodong metallogenic zone; Jiaodong type; gold mine; Linglong granite; Guojialing granodiorite; layered granite