

文章编号:0258-7106(2005)04-0361-12

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*

李俊建^{1,2}, 罗镇宽², 刘晓阳², 徐卫东¹, 骆 辉²

(1 中国地质大学, 北京 100083; 2 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘 要 文章通过对大量前人构造地质学、同位素年代学等多元信息资料的分析,认为胶东中生代花岗岩和大型-超大型金矿床形成于华南-华北克拉通后碰撞挤压和伊泽奈崎板块快速斜冲剪切的双重构造环境及其后的拉张构造环境。胶东大型-超大型金矿床受控于经历了韧-脆性剪切、挤压-拉张复杂变形叠加的大型构造岩带,同时也受控于被断裂叠加的花岗岩接触带。根据铅、硫等同位素组成特征及地质构造环境的综合分析,认为成矿物质主要来自以太古宙胶东岩群绿岩和深成岩组成的结晶基底,不排除煌斑岩浆带来部分深源物质;根据流体包裹体的氢、氧、碳同位素组成,判断成矿流体为大气水和岩浆水的混合流体;成矿条件为中低温(380~100℃),低压(86~5.4 MPa);成矿时代为燕山晚期(125~100 Ma),成矿与燕山晚期拉张环境下的岩浆活动有成因联系,属环太平洋成矿带中温热液金矿床。

关键词 地质学;地球动力学环境;后碰撞;花岗岩;大型-超大型金矿床;胶东地区

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

胶东半岛是中国最大的金矿产地,金矿产量和储量均占全国的1/4,产有玲珑、焦家超大型金矿床(涂光炽等,2000),以及三山岛、仓上、大尹格庄、夏甸、金青顶、邓格庄等众多的大型金矿床。区内花岗岩、脉岩异常发育,覆盖了2/3以上的基岩露头,它们与金矿床时空关系密切,同形成于燕山期。为什么胶东地区中生代花岗岩和脉岩如此发育?为什么胶东地区会形成如此多的大型-超大型金矿床?胶东地区的成岩、成矿地球动力学环境是什么?本文试图对此作一些探讨。

1 胶东地区地质概况

胶东地区位于华北克拉通东缘,传统构造将其划为胶辽台隆(任纪舜等,1981),板块-地体构造将其划为胶北地体(曹国权,1990;胡受奚,1998)。胶北地体的西界为郯庐断裂带,这是一条规模巨大的左旋平移走滑断裂带(徐嘉炜,1984;1992;Xu et al., 1987;Xu, 1993);地体的南东界为五莲—荣成断裂

带,是华北克拉通与苏鲁造山带的分界断裂(曹国权等,1990;胡受奚,1998);该地体北邻渤海湾,东依黄海(图1)。胶北地体的结晶基底由新太古界胶东岩群、古元古界粉子山群、荆山群和同时代的深成岩组成,蓬莱、长山岛、福山等局部地区的基底上覆有新元古界蓬莱群盖层沉积,缺失古生界和中生界三叠系—侏罗系,白垩系莱阳组陆相碎屑岩、青山组火山岩、王氏组碎屑岩则堆积在隆起区两侧的胶莱盆地和黄县盆地内(山东省地质矿产局,1991)。区内断裂构造发育,以NE-NNE向断裂为主。招莱地区的招平、焦家-新城、三山岛-仓上3条主要控矿断裂均为NE走向;玲珑矿区控制含金石英脉和岩脉的次级断裂也为NE向;牟平-乳山成矿带金矿床的控矿断裂为NNE向;仅有少数断裂为NW向。区内中生代花岗岩异常发育,占出露基岩面积的2/3。

2 郯庐断裂带和五莲—荣成断裂带

郯庐断裂带和五莲—荣成断裂带构成胶北地体

* 本文受中国地质调查局地质大调查项目(编号:19991020218003和200110200038)和科技部专项资金项目(编号:2001DIB10056)资助
第一作者简介 李俊建,男,1962年生,研究员,在职博士生,主要从事矿床学研究工作。E-mail:tljunjian@cgs.gov.cn。
收稿日期 2004-08-19; 改回日期 2005-01-26。许德煊编辑。

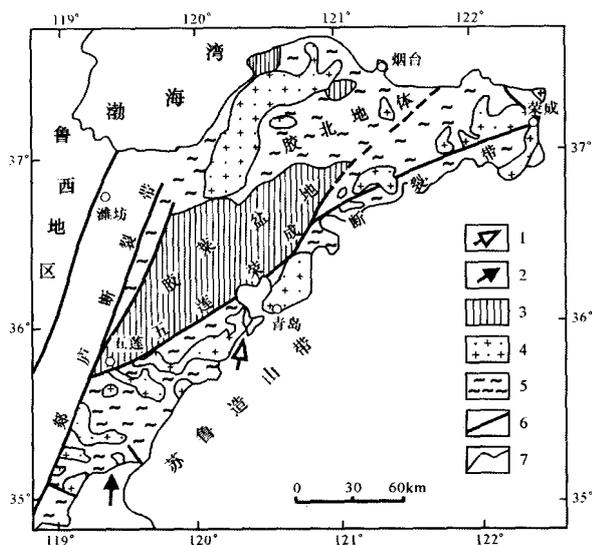


图1 胶北地体构造略图(据罗镇宽等,2002修改)

1—斜冲剪切力;2—碰撞挤压压力;3—中生代盆地区;4—中生代花岗岩区;5—前寒武纪地块;6—主断裂;7—地质界线

Fig.1 Sketch tectonic map of Jiaobei terrane

1—Strike direction of oblique shear force;2—Strike direction of collided and compressed force;3—Mid-Cenozoic basin;

4—Mesozoic granite;5—Precambrian block;6—Major fault;7—Geological boundary

的西界和南东界,制约着胶北地体中生代以来的构造演化和成岩、成矿作用。

2.1 郯庐断裂带

“郯庐断裂带”是纵贯中国东部的规模巨大的左旋平移走滑断裂带,自1957年地质部航测大队发现并命名以来,前人对其生成时代、形成机制、切割深度、平移距离、控岩、控矿作用等进行了广泛深入的研究,发表了大量的论文和专著(徐嘉炜,1984;1992;陈丕基,1988;万天丰等,1996;王小凤等,2001),目前虽然还存在一些争议,但随着研究的深入,对重要问题的认识有趋同一致之势。关于该断裂的最大平移距离,徐嘉炜(1992)和陈丕基(1998)认为可达740 km。多数研究者认同该断裂带存在大距离的左旋平移,依据大别—苏鲁造山带高压变质带和五莲—荣成断裂的平移距离,万天丰等(1996)推断郯庐断裂的平移距离为400~500 km;王小凤等(2001)认为平移距离可达560 km,考虑到旋转作用的影响,实际平移距离应小于560 km;其他多数研究者也认同400~500 km的平移距离。关于断裂切割的深度,王小凤等(2001)认为,该断裂是一条多层次的走滑断裂,可划分为浅、中、深3个层

次,浅层次的深度为10~15 km,中层次的深度为15~25 km,深层次的切割深度达80~100 km。根据该断裂带中发育有偏碱性的中基性火山岩,而且地球物理场上也有明显的显示,判断其最大切割深度达到下地壳或上地幔。

多数研究者(万天丰等,1996;王小凤等,2001;朱光等,2004a;2004b)认为,郯庐断裂带的形成与华南、华北克拉通的碰撞有关。但对最大左旋平移发生的时代有不同认识,万天丰等(1996)认为,该断裂带巨大的左旋平移(压扭性变形)发生于三叠纪中晚期(250~208 Ma);王小凤等(2001)根据糜棱岩的年龄范围(150~140 Ma),认为最大的平移发生于侏罗纪;朱光等(2004a)认为,最大平移发生在早白垩世(140~110 Ma);Maruyama等(1997)认为与太平洋区伊泽奈崎(Izanaqi)板块北向快速俯冲有关。

综上,笔者认为:郯庐断裂带可能起源于秦岭古海洋的转换断层;晚三叠世华南、华北板块发生碰撞时,该断裂由转换断层转变为左行平移断层;晚三叠世到早侏罗世(200~160 Ma),由于后碰撞(post-collision)的强大挤压作用(陆内俯冲),导致华北克拉通南缘地壳增厚,形成了玲珑片麻状黑云母花岗岩和蚌埠荆山“混合”花岗岩(许文良等,2004),两者之间各方面的特征都很相似,应具有相似的形成环境,这表明大幅度左旋平移发生在玲珑花岗岩侵位(160 Ma)后的侏罗纪中-晚期(160~135 Ma),动力来源于后碰撞挤压作用和伊泽奈崎板块北向斜冲所导致的剪切作用;早白垩世早期(135~120 Ma)是该断裂由大规模左旋平移向右旋拉伸的转变时期,形成了郭家岭花岗闪长岩(罗镇宽等,2002);早白垩世晚期到晚白垩世早期,发生强烈的右旋拉伸,导致沂沭裂谷(许志琴,1984)及其分支裂谷如胶莱盆地的生成、胶莱盆地内青山组火山岩的喷发[Rb-Sr等时线年龄为119.6~111.4 Ma(邱检生,1996)],胶北地体内大量金矿床的形成(骆万成等,1987;Simon et al.,2002)以及该地体隆起区的脉岩[同位素年龄135~80 Ma(李兆龙等,1993)]的侵入,其动力来源于太平洋板块正向俯冲所导致的弧后软流圈上升、岩石圈折沉(朱光等,2004)。因此可以说,郯庐断裂带巨大的左旋平移是后碰撞的挤压和伊泽奈崎板块北向快速斜冲(Maruyama et al.,1997)所导致的剪切共同作用的结果。

2.2 五莲—荣成断裂带

五莲—荣成断裂带南起山东莒县招贤一带,并

被郯庐断裂斜切,向东北方向经五莲、海阳、荣成延入海洋,有可能延到朝鲜的临津江一带(万天丰等,1996)。该断裂带在中国大陆上的部分长约 350 km,走向 NE60°,倾向 NW,倾角 60~70°。在海阳附近,被即墨—牟平断裂左行平移了 60 km。

20 世纪 80 年代以来的地球物理场研究显示,该断裂带为一航磁异常和重力梯度带,经计算,其切割深度达上地幔,超过了郯庐断裂带(山东省地质矿产局,1991)。通过对该断裂带两侧地层差异性的研究,与其伴生的超镁铁质岩带和榴辉岩带年代学的研究(李曙光等,1996;刘福来等,2003)、与其伴生的韧性剪切带及双变质带的研究,逐渐认识到它的重要地质构造意义(曹国权,1990)。五莲-荣成断裂带不仅是胶北地体的南界,也是华北克拉通与苏鲁造山带的分界线。胶北地块本应位于现在的蚌埠-五河的东部,由于郯庐断裂带巨大的左旋平移,才将其平移到现在的位置。在挤压和平移过程中,还伴有逆冲推覆和 A 型(陆内)俯冲,形成胶北地体内广泛分布的花岗岩,在稍后的拉伸环境下形成了沿该断裂带分布的青岛崂山花岗岩、海阳花岗岩、三佛山花岗岩等 A 型花岗岩和石岛碱性花岗岩等。

3 中生代花岗岩类

在胶北地体内,中生代花岗岩特别发育,其形成的动力学环境与上述两条断裂带的形成和演化密不可分。可将这些花岗岩划分为两大系列:①以玲珑花岗岩为代表的片麻状黑云母花岗岩系列,包括玲珑、滦家河、磁山、昆崙山、鹊山、文登等大花岗岩基,

其成因被认为属重熔型花岗岩系列;②以郭家岭花岗岩闪长岩为代表的花岗岩系列,包括郭家岭、艾山等花岗岩,其成因被认为属同熔型花岗岩系列。此外,沿五莲-荣成断裂带还分布有海阳、三佛山、崂山等 A 型花岗岩和石岛碱性花岗岩,其成因被认为属幔源型花岗岩系列,因其与金成矿关系不大,故不在此赘述。

3.1 重熔型花岗岩系列

重熔型花岗岩系列的岩性以片麻状黑云母二长花岗岩(玲珑、昆崙山岩体)和中粒黑云母二长花岗岩(滦家河、毕郭、郭家店岩体)为主。岩体沿断裂带均发生了强烈的韧性剪切变形,片麻状构造发育,尤其是玲珑花岗岩,整个岩体都有不同程度的韧性剪切变形,石英的流变现象常见,故称其为塑变花岗岩^①。岩体内含有较多的变质岩残留体,与围岩呈渐变过渡关系,界线不清。岩石内钾长石一般多于斜长石,条纹长石发育,暗色矿物以黑云母为主。岩石化学成分(以玲珑花岗岩为例): $w(\text{SiO}_2) = 66\% \sim 76\%$,平均 72.44%;铝指数 A/CNK 为 0.9~1.1,属准铝质到轻度过铝质; MgO 和 CaO 含量相对较低; Na_2O 和 K_2O 的含量较高, $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}) = 7.95\% \sim 8.37\%$, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O}) = 0.87 \sim 1.07$,表明两者接近相等(罗镇宽等,2002)。岩石的稀土元素含量见表 1(杨敏之等,1996),轻重稀土元素分馏明显,以富集轻稀土元素为特征。其微量元素以 Sr ($w_{\text{Sr}} = 571 \times 10^{-6}$) 和 Ba ($w_{\text{Ba}} = 1581 \times 10^{-6}$) 含量较高为特征,张旗等(2001)将其归类为埃达克岩,本文仍将其归为重熔型花岗岩。

关于重熔型花岗岩的形成时代,早期测得的大

表 1 胶东地区花岗岩稀土元素含量 ($\mu\text{g}/10^{-6}$)

Table 1 Rare earth element contents of granites in Jiaodong area ($\mu\text{g}/10^{-6}$)

类型及产地	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
重熔型花岗岩																
玲珑(37)	24.25	41.51	4.26	16.28	3.27	0.66	1.89	0.39	1.17	0.38	0.90	0.25	0.83	0.14	8.44	104.62
滦家河(10)	20.30	36.24	3.71	13.28	2.63	0.67	1.90	0.30	1.15	0.30	0.64	0.19	0.53	0.14	8.36	90.34
磁山(1)	40.88	85.79	9.15	31.48	4.96	0.97	3.38	0.36	2.16	0.58	1.64	0.26	1.81	0.46	14.82	198.70
昆崙山(14)	30.13	53.61	5.63	16.37	3.32	0.77	2.13	0.48	1.71	0.40	1.13	0.20	1.27	0.21	10.14	127.50
鹊山(5)	47.94	83.14	8.92	24.67	4.13	0.96	2.58	0.56	1.52	0.38	0.83	0.22	0.75	0.12	8.25	184.97
同熔型花岗岩																
郭家岭	39.40	75.58	7.82	28.07	4.82	1.38	3.05	0.85	1.69	0.85	1.04	0.56	0.86	0.07	9.28	175.32

括号内数字为样品数。资料来源:杨敏之等,1996。

① 马志红,1991. 玲珑塑变花岗岩与金矿. 见:胶东金矿地质科技研讨会论文选编,105~110(内部资料).

量 K-Ar 年龄和 Rb-Sr 等时线年龄多为燕山期(180~80 Ma)(杨敏之等,1996),但精度不高。罗镇宽等(2002)与西澳大学合作,采用 SHRIMP 测年技术对岩体进行了 6 组锆石 U-Pb 年龄测定(图 2),平均年龄分别为(153±4) Ma、(157±4) Ma、(160±3) Ma、(158±3) Ma、(154±4) Ma 和(152±10) Ma,都在 160~150 Ma 之间(图 2),表明岩体形成于燕山早-中期。用 SHRIMP 定年技术,在该类岩体中还测得大量印支期的继承锆石年龄及部分太古宙和古元古代的继承锆石年龄(罗镇宽等,2002)。印支期的锆石年龄范围为 312~170 Ma,平均 220 Ma,中值为 250 Ma,与苏鲁造山带高压变质带的年龄一致,表明重熔型花岗岩的原岩可能主要来自苏鲁造山带的高压变质岩,其次是太古宙-古元古代的结晶基底(胶东岩群及 TTG 质深成岩)(罗镇宽等,2002)。

3.2 同熔型花岗岩系列

同熔型花岗岩系列也可称壳幔混熔花岗岩系列,包括郭家岭、艾山等花岗岩。岩体的 $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})$ 为 7.89%~10.58%,平均 8.74%(罗镇宽等,2002)。同熔型岩体的稀土元素含量同样具有轻重稀土元素分馏明显的特征,大部分岩体的 ΣREE 与重熔型岩体相差不大(175×10^{-6} ~ 146×10^{-6})(表 1)。郭家岭花岗闪长岩具有异常高的 Sr、

Ba 含量, Sr 的平均含量高达 994×10^{-6} ,高于玲珑花岗岩(571×10^{-6}),也高于冀北-辽西地区的高锆花岗岩(740×10^{-6})(刘红涛等,2002),与高锆花岗岩相似,其 Ba 的平均含量高达 2387×10^{-6} ,但该岩体具有较高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7094~0.7114)及负的 ϵ_{Nd} 值(-11.2~-17.5),表明郭家岭岩体与埃达克岩(adakite)和高 Sr、Ba 花岗岩的成因不同,而类似于钠质花岗岩和 TTG 岩系,是由下部地壳的镁铁质岩脱水部分熔融作用形成的(杨进辉等,2003)。

对同熔型花岗岩,前人曾作过大量的测年工作。20 世纪 80 年代,胡世玲等(1987)采用角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法对郭家岭岩体进行了测定,测得其年龄为(133.8±2.2) Ma、(129.2±2.7) Ma、(131.9±2.7) Ma、(129.6±2.7) Ma 和(134.8±1.7) Ma。罗镇宽等(2002)采用 SHRIMP 测年技术对郭家岭岩体进行了 5 组锆石 U-Pb 年龄测定,平均年龄分别为(128±2) Ma、(126±2) Ma、(130±3) Ma、(129±3) Ma 和(128±6) Ma(图 2)。角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄基本一致,表明 135~126 Ma 可作为郭家岭岩体侵位的年龄。艾山花岗岩侵入于郭家岭花岗岩中,其 K-Ar 年龄为 117 Ma,晚于郭家岭花岗闪长岩。崂山 A 型花岗岩的 K-Ar 测年结果为 132~101 Ma(山东省地质矿局,1991)。上述结果表明,同熔型花岗岩主要形成于燕山晚期。SHRIMP 定年结果(罗镇宽等,2002)表明,郭家岭花岗闪长岩的源岩有燕山早期的玲珑花岗岩、印支期苏鲁造山带的高压变质岩、早前寒武纪的胶东岩群和深成岩。与玲珑花岗岩的区别是,在郭家岭岩体内,印支期高压变质岩的源岩明显减少,早前寒武纪的源岩比例有所增加,还出现了年龄相当于燕山早期玲珑花岗岩的源岩。在郭家岭花岗闪长岩中,发现有暗色包体,显示有地幔物质加入,是壳(胶东岩群变质岩和变质深成岩)、幔同熔或壳、幔岩浆混合形成的(曲晓明等,1997)。据上述 Sr、Nd 同位素特征,此时华北克拉通的地幔是富集型地幔。

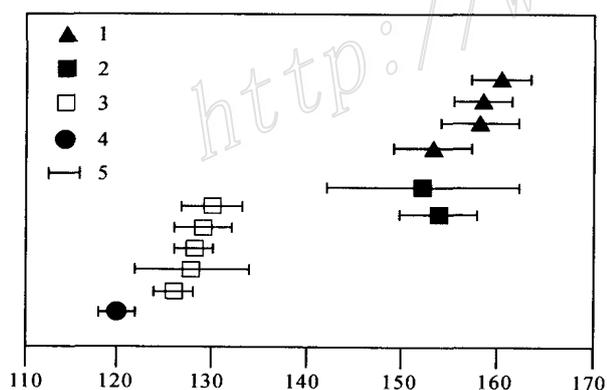


图 2 胶东花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄图
(据罗镇宽等,2002)

- 1—玲珑花岗岩锆石平均年龄;2—莱家河花岗岩锆石平均年龄;
3—郭家岭花岗岩锆石平均年龄;4—成矿后脉岩锆石平均年龄;
5—年龄值范围

Fig.2 SHRIMP U-Pb zircon ages of granites
in Jiaodong area

- 1—Average zircon age of Linglong granite;2—Average zircon age of
Luanjiahe granite;3—Average zircon age of Guojialing granite;4—
Average zircon age of post-metallogenic vein rock;5—Range of zircon
ages

4 大型-超大型金矿床形成的主要控制因素

通过郯庐断裂带和五莲-荣成断裂带形成的地球动力学环境的分析,可知胶东金矿床是形成于华南、华北克拉通后碰撞环境下,这是胶东地区形成大型-超大型金矿床最主要的控矿因素。世界上有许

多大型-超大型金、铜矿床就是形成于这种后碰撞环境的(Müller et al., 1997)。下面将进一步探讨其他主要控矿因素。

4.1 复杂变形的大规模构造岩带

胶北地体内的金矿床主要产在该地体西北部的招莱地区和东部的牟平-乳山地区。招莱地区的大

型-超大型金矿床几乎都产在招平、焦家-新城(焦新)和三山岛-仓上(三仓)3条主控断裂带内(图3)。这3条断裂带都经历了早期(成矿前)左旋韧-脆性剪切变形、中期(成矿期)右旋脆性拉张变形以及晚期(成矿后)再次脆性剪切变形作用,形成了宽度为几十米到几百米甚至千余米的构造岩带(包括糜棱

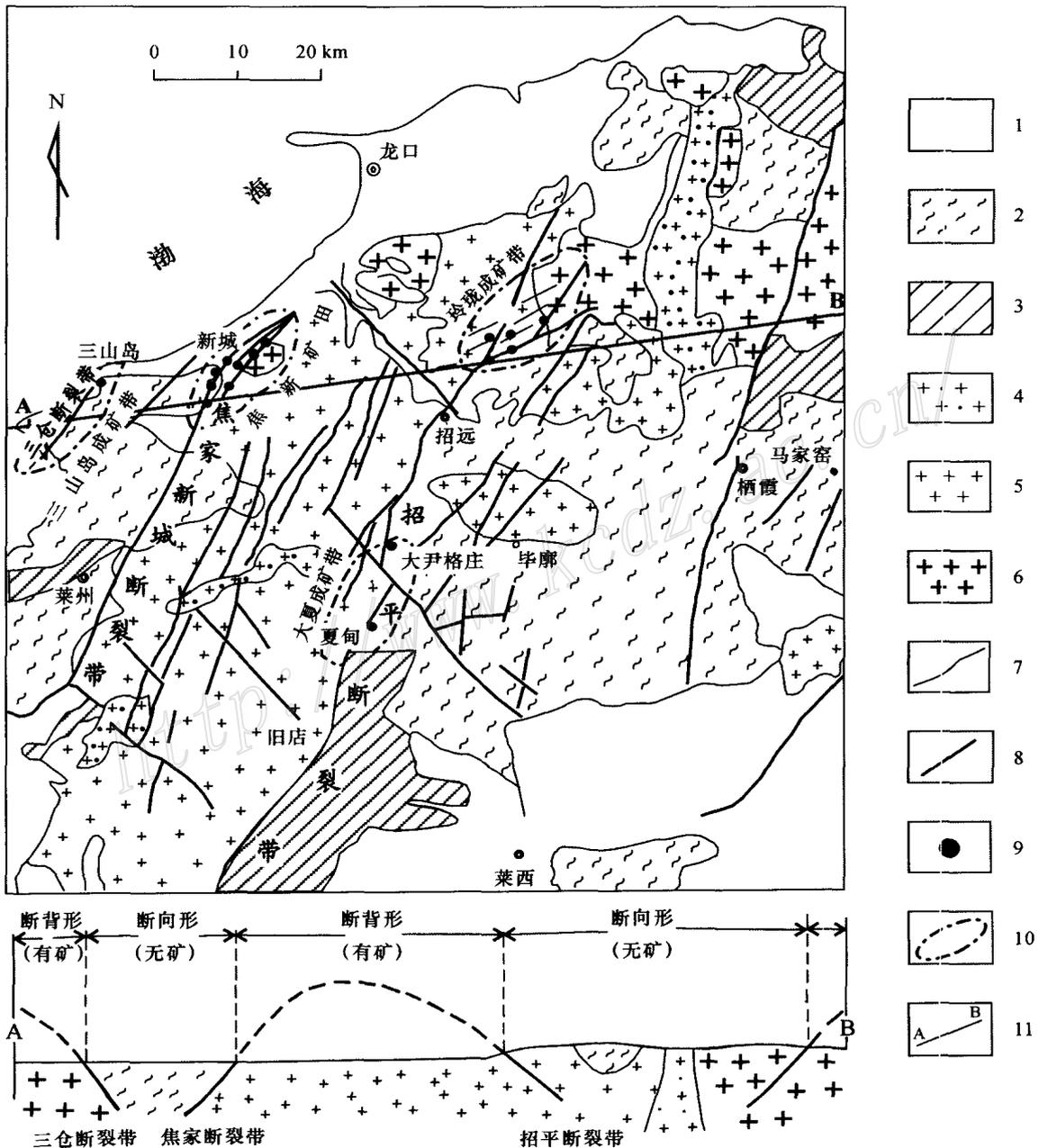


图 3 胶东招莱地区地质矿产略图(据罗镇宽等,2002 修改)

1—中生界;2—新太古界胶东岩群;3—古元古界粉子山群和荆山群;4—艾山花岗岩;5—郭家岭花岗岩闪长岩;6—玲珑花岗岩(含滦家河);7—地质界线;8—断裂;9—金矿床;10—矿区范围;11—剖面线

Fig.3 Geological sketch map showing distribution of mineral resources in Jiaodong area

1—Mid-Cenozoic;2—Neoproterozoic Jiaodong Group;3—Paleoproterozoic Fenzishan and Jinshan Group;4—Aishan granite;5—Guojialing granodiorite;6—Linglong granite (including Luanjiahe granite);7—Geological boundary;8—Fault;9—Gold deposit;10—Ore district;11—Section line

岩、角砾岩、碎裂岩等)。断裂带长几十千米至上百千米,沿断裂带分布有大量的煌斑岩脉,表明断裂切割深度达上地幔。这3条断裂带与郯庐断裂带呈锐角斜交,经历了相似的变形过程,推测是郯庐断裂带的次级断裂。它们不仅为成矿流体提供了通道,也是矿体的主要赋存部位,这是形成大型-超大型矿床的关键性因素(翟裕生等,2000)。牟乳地区的大型金矿床主要产在NNE向的断裂中,虽然这些断裂的规模相对小一些,但同样经历了类似的复杂变形过程。

4.2 断裂叠加的花岗岩接触带

招莱地区的3条主控矿断裂,其走向、倾角相近,但相邻两断裂的倾向相反,形成“断背形”和“断向形”(图3)。笔者推测,早期断裂面可能是花岗岩体的侵入接触面,后经北西-南东向挤压、上隆,侵入接触面被改造成为剖面上呈“X”形的断裂面,因此也可以说,大型-超大型金矿床主要受断裂叠加的接触带的控制。例如:玲珑(台上)金矿床产在破头青断裂叠加的玲珑型花岗岩与滦家河花岗岩的接触带上;大尹格庄、夏甸、曹家洼金矿床产在招平断裂带(南段)叠加的郭家店花岗岩与胶东岩群的接触带上;焦家、新城金矿床则产在焦家断裂带叠加的玲珑型花岗岩(部分郭家岭型花岗岩)与胶东岩群的接触带上;河东、上庄、望儿山金矿床产在上庄、望儿山断裂叠加的玲珑型花岗岩与郭家岭型花岗岩(上庄岩体)的接触带上;三山岛、仓上金矿床则产在三仓断裂叠加的玲珑花岗岩(郭家岭花岗岩)与胶东岩群的接触带上。断裂叠加的接触带是岩浆和流体活动最活跃的地段(孙希贤等,1986),这是形成超大型金矿床的又一有利因素。金矿床主要产在两条断裂带构成的“断背形”(图3),即相邻两断裂之下盘的花岗岩中。在由胶东岩群组成的“断向形”范围内,则几乎没有金矿床。从单个矿床讲,矿体主要产在断裂下盘的花岗岩中,只有少数产于上盘,因为主断裂面上的断层泥对成矿流体有明显的隔挡作用,使得矿液很少进入到上盘。东部牟平-乳山金矿带的金青顶和邓格庄金矿床产在昆嵛山花岗岩内部的北北东向断裂带内。

4.3 胶东岩群斜长角闪质岩石

胶东地区的大型-超大型金矿床虽然主要产在花岗岩中,但其产出的构造背景为太古宙花岗岩-绿岩地体。在矿区附近总可以见到胶东岩群变镁铁质火山岩-斜长角闪(片麻)岩的“身影”。如焦家、三山

岛、大尹格庄矿床,在矿体上盘常见胶东岩群的斜长角闪质岩石。胶东岩群、围岩花岗岩、金矿床的矿石有相似的硫、铅同位素组成(见后面的讨论),说明它们的硫、铅源是一致的。结合国外大多数产在绿岩带的金矿床都有类似的环境,推测胶东地区金矿床的成矿物质部分或大部分来自以胶东岩群绿岩为主体的太古宙结晶基底,当然也不排除有部分深源物质参与成矿。

4.4 岩脉

在胶北地体,几乎所有大型以上的金矿床都与岩脉存在密切的时空关系,尤其是与煌斑岩脉的关系更为密切。在玲珑矿区,煌斑岩最为发育,与金矿脉的关系也最密切,这一现象早就引起中国研究者的注意。据刘连登等(1984)统计,在玲珑-九曲-大开头一带,有各种大小岩脉300余条,平均密度达到10条/ km^2 ,并认为金矿脉与中基性岩脉存在成因联系。又据刘辅臣(1984)统计,走向为 $\text{NE}30\sim 60^\circ$ 的断裂控制了68.14%的岩脉和91.88%的矿脉,并认为区内的中基性岩脉(主体是煌斑岩脉)与含金石英脉有同源、同时、同构造空间的三同关系,强调金矿床与中基性岩脉的成因联系。

笔者也曾对玲珑东山206中段、90中段和西山230中段运输巷道内矿脉与岩脉的关系进行了统计,发现成矿与橄辉煌斑岩的关系最为密切,岩脉常常产在矿脉上、下盘,有时切入到矿脉中,几乎达到了“形影不离”的程度。采用K-Ar法测得煌斑岩脉的K-Ar年龄多数在145~77 Ma之间(李兆龙等,1993),这个年龄范围涵盖了成矿年龄范围(135~105 Ma)(骆万成等,1987;张振海等,1994)。同时,大多数橄辉煌斑岩都发生了碳酸盐化,这种碳酸盐化代表金矿化晚期的热液蚀变,表明煌斑岩脉侵位与金矿化基本同期或稍晚,都形成于燕山晚期。

全球重要的太古宙地盾区的金矿床也有类似的现象。Rock等(1988a;1988b;1988c)研究了西澳耶尔岗地块的中温热液金矿床与煌斑岩的成因模式和两者的成因联系,其观点颇具影响,因为世界上许多金矿床密集区,如加拿大地盾的苏比利尔省,华北克拉通的夹皮沟、海沟、五龙、小秦岭等,几乎都是岩脉的密集区,特别是煌斑岩脉的发育更令人瞩目。因此,许多研究者较易于接受Rock的观点。胶东金矿床与煌斑岩的成因关系亦得到许多研究者的认同。

Taylor等(1993)对Rock的成因模式提出了批评,认为Rock等分析的岩脉大多发生了碳酸盐化,

其高金含量很可能是碳酸盐化带入的。Taylor 等 (1993) 认为, 煌斑岩之所以常常与金矿床伴生, 是因为它们形成于相同的构造环境, 即大陆边缘俯冲板块的上方, 利用了相同的侵位通道。Müller 等 (1997) 也持相似的观点。近期研究表明, 胶东地区的金矿床与煌斑岩有完全相似的碳和钨同位素组成 (刘建明等, 2003a; 2003b), 表明矿体中和煌斑岩中的碳酸盐都同为深源, 成矿流体中的 CO_2 也主要来自深源, 因此, 不排除煌斑岩浆带来成矿物质的可能性, 下文中碳同位素的研究有助于说明这一认识。

5 金矿床成因讨论

5.1 铅、硫同位素组成和成矿物质来源

5.1.1 铅同位素示源

胶东岩群、中生代花岗岩、金矿床的 Pb 同位素组成 (杨敏之等, 1996; 李兆龙等, 1993; 王义文, 1988; 黄德业, 1994) 有以下特征:

(1) 金矿床矿石的铅、花岗岩类长石的铅、胶东岩群斜长角闪岩全岩的铅, 其铅同位素组成基本一致, 据此推测, 矿石铅的铅源可能是区内太古宙结晶基底胶东岩群绿岩和深成花岗岩类, 显生宙以来幔源铅的加入不明显。

(2) 单个矿床的铅同位素组成虽然存在一定的差别, 但总体较为一致。单个矿床的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别稳定在 17.00~18.00、15.00~16.00 和 37.00~38.00, 只

有少数矿床低于或高于这一范围。

(3) 单阶段模式年龄一般为 600~800 Ma, 多数集中在 700 Ma 左右。这个年龄既不代表胶东岩群的年龄, 也不反映花岗岩类侵入体的年龄和矿化年龄, 表明矿石铅不属于单阶段演化普通铅, 模式年龄不具有计时意义。

(4) 根据模式年龄计算的 μ 值一般在 8.0~9.0 之间, 只有极个别的矿床超出这一范围, 显示出胶东地区早前寒武纪基底铀亏损的特征。

根据上述铅同位素组成特征, 结合地质环境, 笔者推测, 胶东地区金矿床的铅是区内太古宙结晶基底的铅与年轻花岗岩的铅混合而成的, 显生宙以来地幔铅的加入不明显。

5.1.2 硫同位素示源

胶东地区主要金矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成 (表 2) 有以下特征:

(1) 据 14 个矿床统计, 所有单个矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值, 范围为 5.34‰~11.4‰, 与围岩花岗岩和胶东岩群的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近 (表 2), 推测其硫源主要是容矿的花岗岩类和胶东岩群。

(2) 对单个矿床来说, $\delta^{34}\text{S}$ 值具有相对集中的特征, 极差为 1.4‰~8.6‰, 趋向于均一化。

(3) 各矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值的平均值呈现一定的变化规律, 从西向东, $\delta^{34}\text{S}$ 值的平均值逐渐降低, 西部的仓上和三山岛金矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值分别为 10.8‰和 11.4‰; 往东, 焦家和新城金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值分别为 10.06‰和 9.73‰; 再往东到玲珑矿田, 含金石英

表 2 胶东金矿床硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic components of gold ores in Jiaodong area

矿床(田)名称	样品数	$\delta^{34}\text{S}$ 均值/‰	变化范围/‰	极差/‰	均方差	测定矿物
玲珑金矿田	85	6.76	3.3~10.4	7.1	1.08	Py + Pyr
台上金矿床	25	7.33	5.3~9.5	4.2	1.19	Py + Pyr
大尹格庄金矿床	17	7.04	5.9~8.9	3.0	0.68	Py + Gn + Sp + Pyr
黄埠岭金矿床	22	7.57	3.0~8.8	5.8	1.12	Py + Cp
灵山沟金矿床	8	7.44	6.4~8.8	2.4	0.78	Py + Cp
前孙家金矿床	9	5.78	1.0~9.6	8.6	2.50	Py + Cp
洼孙家金矿床	7	5.34	0.2~6.8	6.6	2.72	Py + Cp + Gn
夏甸金矿床	8	7.76	7.4~8.0	1.4	0.27	Py
望儿山金矿床	5	8.9	6.7~10.0	3.3	1.56	Py
焦家金矿床	28	10.06	8.7~11.8	3.1	0.75	Py + Cp
新城金矿床	21	9.73	7.9~10.5	2.6	1.24	Py + Cp
红布金矿床	4	8.9	4.8~10.9	6.1	2.78	Py + Cp
三山岛金矿床	15	11.4	7.9~12.6	4.7	1.46	Py + Cp + Sp + Gn
仓上金矿床	13	10.8	9.23~12.0	2.77	0.82	Py + Gn + Sp

注: 据王义文 (1989), 李兆龙等 (1993), 黄德业等 (1995) 等资料综合; Py—黄铁矿; Pyr—磁黄铁矿; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Cp—黄铜矿。

脉型矿床和台上蚀变岩型金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值则分别为 6.76‰ 和 7.33‰。黄德业(1994)认为,这与海水中表生生物硫的参与程度有关,三山岛和仓上金矿靠近渤海莱州湾,可能有较多的生物硫加入;焦新矿田离海岸相对较远,生物硫相对较少;玲珑矿田离海洋更远,生物硫的比例更小。

根据上述铅和硫同位素组成特征,笔者推测,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,不排除有幔源物质参与成矿。

5.2 氢、氧、碳同位素组成和成矿流体性质

根据流体包裹体氢、氧、碳同位素的研究,胶东地区的成矿流体有以下特征:

(1) 流体包裹体的氢、氧同位素组成显示,成矿流体是大气水和岩浆水的混合物(张理刚等,1994)。蚀变岩型矿床,大气水占优势;玲珑矿田的石英脉型矿床,岩浆水占优势(罗镇宽等,2004)。

(2) 矿石中碳酸盐的碳同位素组成显示出深源碳(罗镇宽等,2002;王义文,1988)的特征,而且与区内幔源岩的碳同位素组成(姚凤良,1990)是一致的,表明成矿流体中的二氧化碳、部分水及其他挥发分可能来自深源,最可能是来自于同时代的煌斑岩浆。

(3) 据流体包裹体均一温度、盐度及成分等的测定和计算(徐九华等,1997;卢焕章等,1999),成矿流体的成分以 CO_2 和 H_2O 为主;成矿温度为 $380 \sim 100^\circ\text{C}$,集中于 $310 \sim 240^\circ\text{C}$;成矿流体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 19%~4.1%,一般不大于 10%;成矿压力为 $86 \sim 5.4 \text{ MPa}$;自地表以下,按正常压力梯度为 29 MPa/km 推算,该区金矿的形成深度应小于 3 km。

上述结果表明,成矿流体是大气水和岩浆水的混合物,玲珑石英脉型矿床中以岩浆水占优势,焦家等蚀变岩型矿床中则以大气水占优势(罗镇宽等,2002),成矿流体富含 CO_2 ,盐度中到低。

5.3 金矿床的成矿时代

胶东金矿床蚀变矿物的同位素年龄见表 3,剔除 4 个小于 100 Ma 和 1 个较大的年龄值[灵山沟金矿, $(188.94 \pm 4.29) \text{ Ma}$],其余都集中在 $135 \sim 100 \text{ Ma}$,表明金矿化主要发生在燕山晚期。经花岗岩锆石 SHRIMP 年龄测定,将矿化年龄限制在 $126 \sim 120 \text{ Ma}$ (罗镇宽等,2002)。

5.4 矿床成因讨论

金矿床受控于经历了韧-脆性剪切、挤压-拉张复杂变形叠加的大型构造岩带。根据铅、硫同位素组成特征,成矿物质主要来自以太古宙胶东岩群绿岩

表 3 胶东地区金矿床的成矿年龄

Table 3 Gold ore forming ages in Jiaodong area

序号	矿床名称	测定矿物	测定方法	t/ Ma
1	玲珑西山 108 脉	绢云母	Rb-Sr 等时线	100.74 ± 3.58
2	玲珑九曲金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	111.38 ± 2.81
3	界河金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	46.52 ± 2.29
4	灵山沟金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	188.94 ± 4.24
5	马家窑金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	106.14 ± 4.92
6	乳山金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	113.31 ± 4.43
7	乳山金矿	微斜长石	Rb-Sr 等时线	121.30 ± 5.87
8	乳山金矿	蚀变岩石	Rb-Sr 等时线	101.78 ± 3.40
9	乳山金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	112.31 ± 3.31
10	玲珑西山	水白云母	Rb-Sr 等时线	115.0 ± 3.7
11	玲珑西山	水白云母	K-Ar 法	110.0 ± 2.0
12	焦家金矿	水白云母	Rb-Sr 等时线	105.0 ± 7.0
13	焦家金矿	水白云母	Rb-Sr 等时线	88.1 ± 1.0
14	焦家金矿	水白云母	K-Ar 法	106.0 ± 2.0
15	灵山沟金矿	水白云母	Rb-Sr 等时线	115.0 ± 5.0
16	马家窑金矿	水白云母	Rb-Sr 等时线	135.1 ± 5.2
17	马家窑金矿	水白云母	K-Ar 法	120.0 ± 2.0
18	东风金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	71.86 ± 9.6
19	玲珑西山 108 脉	绢云母	Rb-Sr 等时线	100.28 ± 3.75
20	玲珑破头青	绢云母	Rb-Sr 等时线	80.67 ± 0.23
21	大庄子金矿	绢云母	Ar-Ar 法	117.39
22	蓬家夼金矿	石英	Ar-Ar 法	$117.3 \sim 118.4$
23	发云夼金矿	黄铁矿	Rb-Sr 等时线	128.49 ± 7.2
24	三山岛金矿	绢云母	Ar-Ar 法	121.0 ± 2.0
25	邓格庄	绢云母	Rb-Sr 等时线	118 ± 9
26	东季金矿	钾长石	Ar-Ar 法	116.34 ± 0.81

资料来源:1~9—骆万成等,1987;10~17—李兆龙等,1993;18~20—吕古贤等,1993;21~23—杨进辉等,2000;24—李厚民等,2003;25—张德全等,1995;26—张连昌等,2002。

为主的结晶基底和重熔型花岗岩,同时,煌斑岩浆可能带来部分深源物质。根据流体包裹体的氢、氧、碳同位素特征,成矿流体为大气水和岩浆水的混合物,其盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 19%~5.4%,一般低于 10%;成矿温度不高($380 \sim 100^\circ\text{C}$);成矿压力不大($86 \sim 5.4 \text{ MPa}$),推测成矿深度不大。成矿时代为燕山晚期($125 \sim 100 \text{ Ma}$),与拉张环境下的岩浆活动存在成因联系,属环太平洋成矿带中温热液金矿床。

6 成岩成矿的地球动力学条件

综上所述,可将胶北地体成岩、成矿过程总结如下:

(1) 晚二叠世到晚三叠世($300 \sim 200 \text{ Ma}$),华南、华北克拉通碰撞,形成大别-苏鲁碰撞造山带和高压-超高压变质带,郯庐断裂由转换断层转化为平

移断层。

(2) 三叠纪末到早侏罗世(200 ~ 160 Ma), 华北克拉通南缘进入后碰撞环境, 发生了陆内俯冲, 部分高压变质岩被推挤到深部, 导致华北克拉通南缘地壳增厚, 高压变质岩和深部下地壳结晶基底一起发生重熔, 形成了玲珑等片麻状黑云母花岗岩和蚌埠荆山“混合”花岗岩。

(3) 中-晚侏罗世(160 ~ 135 Ma), 胶北地体一方面受到后碰撞的强大挤压作用, 另一方面, 由于太平洋伊泽奈崎板块北向快速斜冲所产生的左旋剪切分力, 推挤和拖曳着郯庐断裂带的东盘也即胶北地体向北平移, 两种作用力的结果造成郯庐断裂带东盘发生巨大的左旋平移。

(4) 早白垩世早期(135 ~ 125 Ma), 郯庐断裂从左旋挤压逐步转向右旋拉伸, 导致上地幔上涌, 岩石圈折沉, 使得深部下地壳发生重熔, 与幔源岩浆混合, 形成郭家岭型花岗岩。此后, 又有一次较大的左旋剪切, 使郭家岭岩体与胶东岩群的接触带发生韧性剪切变形, 招莱地区的3条主控矿断裂形成, 并发展成“断向形”和“断背形”(图3)。

(5) 早白垩世晚期到晚白垩世(125 ~ 80 Ma), 郯庐断裂带全面转入右旋拉伸。招莱地区早先形成的3条断裂带叠加了右旋拉伸, 大气水沿张开的断裂下渗并被深部岩浆加热, 与深部(煌斑岩析出的)岩浆水汇聚在一起, 沿断裂及裂隙反复循环, 将围岩中的成矿元素萃取出来, 形成含矿流体; 与此同时, 煌斑岩脉形成, 也可能提供部分成矿物质。在一次较大的右旋拉张过程中, 沿主断裂带形成了较大的负压空间, 具有强烈的抽吸作用, 将含矿流体抽吸到断裂破碎带沉淀成矿。在这次较大的拉张过程中, 还形成了胶北隆起区的脉岩、胶莱盆地中的青山组火山岩及崂山等A型花岗岩等。

总之, 胶东地区的花岗岩和大型-超大型金矿床形成于华南-华北克拉通后碰撞挤压环境和伊泽奈崎板块的快速斜冲所导致的剪切环境及其后的拉张构造环境。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. 1991. Regional geology of Shandong[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 6 ~ 224(in Chinese with English abstract).
- Cao G Q. 1990. On Jiaonan terrain in Shandong Province[J]. Geology of Shandong, 6(2): 1 ~ 9 (in Chinese).
- Cao G Q, Wang Z B and Zhang C J. 1990. Jiaonan terrain in Shandong Province and tectonics significance of the Wulian-Rongchen fracture [J]. Geology of Shandong, 6(1): 1 ~ 14(in Chinese).
- Cheng P J. 1988. Huge wrench displacement timing and framework of Tan-Lu fault zone[J]. Chinese Bulletin Science, 33(4): 289 ~ 293 (in Chinese).
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, et al. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of understanding and outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. Econ. Geol., 98: 1 ~ 29.
- Hu S L, Wang S S, Sang H Q, et al. 1987. Isotopic ages of Linglong and Guojialing batholiths in Shandong Province and their geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, (3): 83 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Hu S X, Wang H N, Wang D Z, et al. 1994. Geology and geochemistry of gold deposits in East China[M]. Beijing: Science Press. 27 ~ 49 (in Chinese).
- Huang D Y. 1994. Sulfur isotope studies of the metallogenic series of gold deposits in Jiaodong area[J]. Mineral Deposits, 13(1): 75 ~ 87 (in Chinese with English abstract).
- Li H M, Miao J W, Shen Y C, et al. 2003. Ar-Ar ages of K-feldspar and quartz from Dongji gold deposit, Northwest Jiaodong and their significance[J]. Mineral Deposits, 22(1): 72 ~ 77(in Chinese with English abstract).
- Li S G, Jagoutz E, Xiao Y L, et al. 1996. Ultrahigh metamorphic chronology of Dabieshan-Sulu terrane: Sm-Nd isotopic system[J]. Science in China (Series D), 26(3): 249 ~ 256(in Chinese).
- Li Z L and Yang M Z. 1993. The geology-geochemistry of gold deposits in Jiaodong Region[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).
- Liu F C, Lu Z X, Fan Y X, et al. 1984. On the relation between intermediate-basic dykes and mineralization in Linglong gold ore field[J]. Earth Science, (4): 37 ~ 46(in Chinese with English abstract).
- Liu F L, Xu Z Q and Song B. 2003. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu Terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb dating on zircon of gneiss rocks[J]. Acta geologica Sinica, 77(2): 227 ~ 237 (in Chinese with English abstract).
- Liu H T, Sun S H, Liu J M, et al. 2002. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Geochemistry and source region[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 257 ~ 274 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Ye J, Xu J H, et al. 2003a. C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in east Shandong, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(4): 775 [J]784 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhang H F, Sun J G, et al. 2003b. Geochemical research on C-O and Sr-Nd isotopes of mantle-derived rocks from Shandong Province[J]. Science in China (Series D), 33: 921 Series 930 (in Chinese).
- Liu L D, Yao F L, Kong Q C, et al. 1984. The significance about the vein in the studying the genesis of hydrothermal ore deposits[J]. Journal of Changchun College of Geology, (4): 13 ~ 27 (in Chinese with English abstract).

- English abstract) .
- Lu G X and Kong Q C. 1993. Geology on the Linglong-Jiaojia type gold deposits in the Jiaodong area, China[M]. Beijing: Science Press. 170 ~ 179 (in Chinese) .
- Lu H Z, J Guha and Fang G B. 1999. Characteristics of ore-formation fluid in Linglong gold mine, Shandong, China[J]. *Geochemica*, 28 (5) : 421 ~ 437 (in Chinese with English abstract) .
- Luo W C and Wu Q S. 1987. Application of alteration minerals to gold ore formation dating of Jiaodong, Shandong Province[J]. *Chinese Bulletin Science*, 32(6) : 1245 ~ 1248 (in Chinese) .
- Luo Z K and Miao L C. 2002. Granites and gold deposits in the Zhaolai area, Eastern Shandong Province[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese) .
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Island: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. *Island Arc*, 6 : 121 ~ 142 .
- Müller D and Groves D I. 1997. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization[M]. London: Springer. 85 ~ 133 .
- Qiu J S, Wang D Z, Zhou J C, et al. 1996. Geology, geochemistry and genesis of the Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shandong Province[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 21(5) : 546 ~ 552 (in Chinese with English abstract) .
- Qu X M and Wang H N. 1997. Dynamic study on the crust-mantle magma mixing and emplacement mechanism of Guojialing granite [J]. *Scientific Geology Sinica*, 32(2) : 443 ~ 454 (in Chinese with English abstract) .
- Ren J S, Jiang C F, Zhang Z K, et al. 1981. The tectonics of China and its evolution-illustration of 1: 4000,000 tectonic map of China[M]. Beijing: Science Press. 29 ~ 98 (in Chinese) .
- Rock N M S, Groves D I, Perring C S, et al. 1988a. Gold, lamprophyres and porphyries: What does their association mean? [A]. In: Keays R R, Ramsay W R H, Groves D I, eds. *The geology of gold deposits: the perspective in 1988* [C]. El Paso: The Economic Geology Publishing Company. 1989. 609 ~ 625 .
- Rock N M S and Groves D I. 1988b. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds[J]? *Nature*, 332 : 253 ~ 255 .
- Rock N M S and Groves D I. 1988c. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits[J]? *Geology*, 16 : 538 ~ 541 .
- Simon A W and Zhang X O. 2002. Fundamention control on the timing and genesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, North China Craton[A]. In: *International Symposium on gold geology and exploration in Zhaoyuan, the gold city of China* [C]. Beijing: Seismological Press. 13 ~ 18 .
- Sun X X, Yi S X, Zeng Z X, et al. 1986. The fracture overlapping-compounding contact zone and its control on the formation of hydrothermal fluid filling deposits[J]. *Regional Geology of China*, (3) : 249 ~ 255 (in Chinese with English abstract) .
- Taylor W R, Rock N M S and Groves D I. 1993. Geochemistry of Archaean shoshonitic lamprophyres from the Yilgarn Block, Western Australia: Au abundance and association with gold mineralization[J]. *Applied geochemistry*, (9) : 197 ~ 222 .
- Tu G C. 2000. The superlarge deposits in China[M]. Beijing: Science Press. 91 ~ 94 (in Chinese) .
- Wan T F, Zhu H, Zhao L, et al. 1996. Formation and evolution of Tancheng-Lujiang fault zone: a review[J]. *Geoscience*, 10(2) : 159 ~ 168 (in Chinese with English abstract) .
- Wang X F, Li Z J, Chen B L, et al. 2001. Tan-Lu fault zone[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract) .
- Wang Y W. 1988. Lead isotope composition of gold deposits, North-western Jiaodong, Shandong, and its geological significance[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 18(3) : 277 ~ 286 (in Chinese with English abstract) .
- Xu J W. 1984. Tancheng-Lujiang wrench fault system[J]. *Collection of Structural of Geology*, (3) : 18 ~ 22 (in Chinese) .
- Xu J W. 1992. Review of the ten years (1981 ~ 1991) of the Tancheng-Lujiang Fault Zone[J]. *Geological Review*, 38(4) : 316 ~ 325 (in Chinese with English abstract) .
- Xu J W. 1993. Tancheng-Lujiang wrench fault system[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 17 ~ 149 .
- Xu J W, Zhu G and Tong W X. 1987. Formation and evolution of Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the norther of the Pacific Ocean[J]. *Tectonophysics*, 134 : 273 ~ 310 .
- Xu J H, Xie Y L and Shen S L. 1997. A comparison of ore-formation fluids between gold deposits in Xiaoqingling Mountain and those deposits in Jiaodong Peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 16(2) : 149 ~ 162 (in Chinese with English abstract) .
- Xu W L, Wang Q H, Yang D B, et al. 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Jingshan " migmatized " granite, Bengbu, Anhui Province and their geological significance[J]. *Science in China (Series D)*, 34(5) : 423 ~ 428 (in Chinese) .
- Xu Z Q. 1984. Outline of Tan-Lu rift valley system[J]. *Collection of Structural Geology*, (3) : 18 ~ 22 (in Chinese) .
- Yang J H, Zhou X H and Chen L H. 2000. Dating of gold mineralization for superlarge altered tectonite type gold deposits in the north western Jiaodong Peninsula and its implication for gold metallogeny [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3) : 454 ~ 458 (in Chinese with English abstract) .
- Yang J H, Zhu M F, Liu W, et al. 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the north western Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4) : 692 ~ 700 (in Chinese with English abstract) .
- Yang M Z and Lu G X. 1996. The geology-geochemistry of gold deposits of the greeston belt in the Jiaodong district, China[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract) .
- Yao F L, Liu L D, Kong Q C, et al. 1990. Vein gold deposits in north-western Shandong Province [M]. Changchun: Jilin Science and Technongy Press (in Chinese) .
- Zhai M G, Fan H R, Yang J H, et al. 2004. Large-scale cluster of gold deposits in east Shandong: An orogenic metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1) : 85 ~ 98 (in Chinese with English abstract) .
- Zhai Y S, Zhang H, Song H L, et al. 2000. Large structures and super-

- large deposits[A]. In: Tu G C, eds. The superlarge deposits in China [M]. Beijing: Science Press. 91 ~ 94 (in Chinese).
- Zhang D Q, Xu H L and Sun G Y. 1995. Emplacement ages of the Denggezhuang gold deposit and the Kunyushan granite and their geological implication[J]. Geological Review, 41(5): 415 ~ 425 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Shen Y C, Liu T B, et al. 2002. Ar-Ar and Rb-Sr isochron ages and ore-forming time for gold deposits in northern margin of Zhaolai basin, Shandong Province [J]. Science in China (Series D), 32(9): 727 ~ 734 (in Chinese).
- Zhang L G and Wang B C. 1994. Water-rock exchange in the Jiaojia type gold deposits, a study of hydrogen and oxygen isotopic composition of ore-forming fluids[J]. Mineral Deposits, 13(4): 193 ~ 200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, et al. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significance of the edakites in the Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(2): 236 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Zhang J X and Ye S Z. 1994. Isotopic dating of gold deposits in East Shandong Province[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Zhu G, Liu G S, Dunlap W J, et al. 2004a. ^{40}Ar - ^{39}Ar thermochronology evidence on synorogenic strike-slip motion of Tan-Lu fault zone[J]. Chinese Science Bulletin, 49(2): 190 ~ 198 (in Chinese).
- Zhu G, Wang D X, Liu G S, et al. 2004b. Evolution of the Tan-Lu fault zone and its responses to plate movements in West Pacific Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 39(1): 36 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- 曹国权. 1990. 试论胶南地体[J]. 山东地质, 6(2): 1 ~ 9.
- 曹国权, 王致本, 张成基. 1990. 山东胶南地体及其边界断层五莲-荣成断裂的构造意义[J]. 山东地质, 6(1): 1 ~ 14.
- 陈丕基. 1988. 郯庐断裂巨大平移的时代与格局[J]. 科学通报, 33(4): 289 ~ 293.
- 胡世玲, 王松山, 桑海清, 等. 1987. 山东玲珑和郭家岭岩体同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, (3): 83 ~ 89.
- 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 等. 1998. 中国东部金矿地质学及地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 27 ~ 49.
- 黄德业. 1994. 胶东金矿成矿系列硫同位素研究[J]. 矿床地质, 13(1): 75 ~ 87.
- 李厚民, 毛景文, 沈远超, 等. 2003. 胶西北东季金矿床钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. 矿床地质, 22(1): 72 ~ 77.
- 李曙光, Jagoutz E, 肖益林, 等. 1996. 苏鲁-大别高压地体变质年代学——Sm-Nd 同位素体系[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 249 ~ 257.
- 李兆龙, 杨敏之. 1993. 胶东金矿床地质地球化学[M]. 天津: 天津科学技术出版社.
- 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 等. 1984. 玲珑金矿中基性岩脉与矿化的关系探讨[J]. 地球科学, (4): 37 ~ 46.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪. 2003. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年证据[J]. 地质学报, 77(2): 227 ~ 237.
- 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 2002. 华北克拉通北缘中生代高锆花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 18(3): 257 ~ 274.
- 刘建明, 叶杰, 徐九华, 等. 2003a. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 19(4): 775 ~ 784.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 2003b. 山东幔源岩的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 33: 921 ~ 930.
- 刘连登, 姚凤良, 孔庆存, 等. 1984. 岩脉在热液矿床成因中的意义——以胶东西北部金矿床为例[J]. 长春地质学院院报, (4): 13 ~ 28.
- 吕古贤, 孔庆存. 1993. 胶东玲珑-焦家式金矿地质[M]. 北京: 科学出版社.
- 卢焕章, J Guha, 方根保. 1999. 山东玲珑金矿的成矿流体特征[J]. 地球化学, 28(5): 421 ~ 437.
- 骆万成, 伍勤生. 1987. 应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄[J]. 科学通报, 33(6): 1245 ~ 1248.
- 罗镇宽, 苗来成. 2002. 胶东招徕地区花岗岩和金矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 邱检生, 王德滋, 周金城, 等. 1996. 山东中生代橄榄安粗岩系火山岩的地质地球化学特征及岩石成因[J]. 地球科学, 21(5): 546 ~ 552.
- 曲晓明, 王鹤年. 1997. 郭家岭岩体壳幔岩浆混合作用与侵位机制的动力学研究[J]. 地质科学, 32(4): 443 ~ 454.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1981. 中国大地构造及其演化——1:400万中国大地构造图说明书[M]. 北京: 科学出版社. 29 ~ 37.
- 山东省地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 6 ~ 224.
- Simon A W, 张小鸥. 2002. 胶东金矿的成因和时代的基本控制[A]. 见: 山东招远金矿集团有限公司编. 中国金都招远国际金矿地质与勘查学术论坛论文集[C]. 北京: 地震出版社. 42 ~ 44.
- 孙希贤, 易顺华, 曾佐勋, 等. 1986. 断裂叠加-复合接触带及其对充填热液矿床成矿的控制作用[J]. 中国区域地质, (3): 249 ~ 255.
- 涂光炽. 2000. 中国超大型矿床(1)[M]. 北京: 科学出版社. 1 ~ 7, 91 ~ 94.
- 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 等. 1996. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 10(2): 159 ~ 168.
- 王小凤, 李中坚, 陈伯林, 等. 2001. 郯庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社.
- 王义文. 1988. 胶东西北部地区金矿床铅同位素特征及其地质意义[J]. 长春地质学院学报, 18(3): 277 ~ 286.
- 徐嘉炜. 1992. 郯庐断裂带研究的十年回顾[J]. 地质论评, 38(4): 316 ~ 325.
- 徐嘉炜. 1984. 郯城-庐江平移断裂系统[J]. 构造地质论丛, (3): 18 ~ 22.
- 徐九华, 谢玉玲, 申世亮. 1997. 小秦岭与胶东金矿床的成矿流体特

附中文参考文献

- 征对比[J]. 矿床地质, 16(2): 149~162.
- 许文良, 王清海, 杨德彬, 等. 2004. 蚌埠荆山“混合花岗岩”SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国科学(D辑), 34(5): 423~428.
- 许志琴. 1984. 郯庐裂谷概述[J]. 构造地质论丛: (3): 39~46.
- 杨进辉, 周新华, 陈立辉. 2000. 胶东地区破碎蚀变岩型金矿时代的确定及其地质意义[J]. 岩石学报, 16(3): 454~458.
- 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 2003. 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, 19(4): 692~700.
- 杨敏之, 吕古贤. 1996. 胶东地区绿岩型金矿床地质地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 姚凤良, 刘连登, 孔庆存, 等. 1990. 胶西北部脉状金矿[M]. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 2004. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 11(1): 85~98.
- 翟裕生, 张湖, 宋鸿林, 等. 2000. 大型构造与超大型矿床[A]. 见: 涂光炽等著. 中国超大型矿床(1)[M]. 北京: 科学出版社. 136~152.
- 张德全, 徐洪林, 孙桂英. 1995. 山东邓格庄金矿与昆崙山花岗岩的定位时代及其地质意义[J]. 地质论评, 41(5): 415~425.
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 等. 2002. 山东招莱盆地北缘金矿床 Ar-Ar 法和 Rb-Sr 法等时线年龄与成矿时代[J]. 中国科学(D辑): 32(9): 727~734.
- 张理刚, 王炳成. 1994. 焦家式金矿水-岩交换作用[J]. 矿床地质, 13(3): 193~200.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236~244.
- 张振海, 张景鑫, 叶素芝. 1994. 胶东金矿同位素年龄厘定[M]. 北京: 地震出版社.
- 朱光, 刘国生, Dunlap W J, 等. 2004a. 郯庐断裂带同造山走滑的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学证据[J]. 科学通报, 49(2): 190~198.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 2004b. 郯庐断裂带的演化及对西太平洋板块运动的响应[J]. 地质科学, 39(1): 36~49.

Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area

LI Jun-jian^{1,2}, LUO Zhen-kuan², LIU Xiao-yang², XU Wei-dong¹ and LUO Hui²

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract

Based on tectonic and geochronologic analyses, the authors hold that large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area are generated in both the compressional setting of post-collision between South China craton and North China craton and the shear setting of IZANAQI plate high-speed and oblique subduction as well as in late extension setting. Gold deposits are controlled by a large-size tectonic rock zone which has experienced superimposition of complex ductile-brittle shear and compression-extension deformation, and also by a fractural overlapping-compounding contact zone. Sulfur and lead isotopic compositions and geotectonic setting for gold mineralization suggest that gold ore-forming materials are derived mainly from the crystalline basement consisting of Jiaodong Archaean greenstone belt and plutonic rocks, and possibly partly from deep-seated lamprophyre magma. Hydrogen, oxygen and carbon isotopic components show that gold-bearing fluids are mixture of meteoric water and magmatic water. P-T conditions for gold mineralization are 380~100 °C and 86~5.4 MPa. The gold ore-forming epoch should be Late Yanshanian stage (125~100 Ma). The ore-forming process in Jiaodong area is related to Late Yanshanian magmatic activity in an extension setting. The gold deposits are of mesothermal type in Circum-Pacific region.

Key words: geology, geodynamic setting, post-collision, granite, large-superlarge gold deposits, Jiaodong area