

# 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境\*

陈衍景<sup>1,2</sup> Franco PIRAJNO<sup>3</sup> 赖勇<sup>2</sup> 李超<sup>4</sup>  
CHEN YanJing<sup>1,2</sup>, Franco PIRAJNO<sup>3</sup>, LAI Yong<sup>2</sup> and LI Chao<sup>4</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002
  2. 北京大学造山带与地壳演化实验室, 北京 100871
  1. *Geochemistry Institute, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*
  2. *Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China*
  3. *Geological Survey of Western Australia, 100 Plain Street, Perth, WA 6004, Australia*
  4. *Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721-0077, USA*
- 2003-11-05 收稿, 2004-07-05 改回。

Chen YJ, Pirajno F, Lai Y and Li C. 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4):907-922

**Abstract** In this paper we use published isotopic ages for gold deposits and related rocks in the Jiaodong peninsula (East Shandong Province) to investigate the time and tectonic setting of the large scale gold metallogeny in the region, which contains world-class lode gold deposits. According to this database, metallogenic processes in this area occurred in the Mesozoic, with peak activities between 110 Ma and 130 Ma. In the Jiaodong gold province the mineralising events are coeval with or postdates Mesozoic granitoid intrusions. Both the Rb-Sr isochron ages and zircon SHRIMP dating results suggest that Mesozoic granitoids were emplaced during several thermal events. The identification of inherited zircons coupled with  $I_{Sr}$  ratios ( $>0.709$ ) indicate that these granitoids were mainly sourced from the continental crust by remelting or partial melting. The  $I_{Sr}$  values obtained from ores and fluid inclusions are generally higher than 0.709, and slightly higher than those for Mesozoic granitoids. This also indicates that both ore fluids and metals were mainly sourced from the crust. A synthesis of the available data suggests that collision between the South and North China continents was probably the dominant factor responsible for the gold metallogeny in the Jiaodong gold province. Granitoid emplacement and large-scale gold metallogenesis can be related to three important stages in the geodynamic evolution of a collisional orogen (compression-crustal thickening-uplift, lithospheric delamination and transition to extension and a final extension phase). The most important metallogenic phase occurred at the transition from collisional compression to extension tectonics. A previously developed model for collisional orogeny, metallogeny and fluid flow (CMF) can be used to interpret the key characteristics of ore deposits and igneous rocks in the Jiaodong gold province.

**Key words** Jiaodong gold province, Gold deposit, Granite, Isotopic ages,  $I_{Sr}$ , Continental collision

**摘要** 本文全面收集了胶东矿集区矿床和相关岩石的同位素年龄, 讨论了该区金矿床大规模成矿的时间和构造背景。数据显示成矿作用发生于中生代, 以 110~130Ma 为高峰; 成矿事件同步或略滞后于中生代花岗岩浆活动。铷锶和锆石 SHRIMP 年龄表明中生代花岗岩类形成于多次热事件, 大量继承锆石的存在和较高的  $I_{Sr}$  值 ( $>0.709$ ) 指示花岗岩浆主要源于地壳物质的部分熔融或重熔。矿石和成矿流体的  $I_{Sr}$  值普遍高于 0.709, 并略高于中生代花岗岩类, 指示成矿流体和物质主要来自地壳内部。讨论显示, 中生代华北与华南古板块的碰撞造山作用是导致胶东矿集区形成的主导因素; 花岗岩类侵入和大规模成矿作用耦合于碰撞造山带的 3 阶段地球动力学演化, 即早阶段挤压-地壳缩短-隆升, 中阶段岩石圈拆沉并转向伸展构造体制, 晚阶段伸展; 最强烈的成矿作用发生在碰撞造山过程的挤压向伸展转变期; 已建立的碰撞造山成岩成矿和流体作用模式可以较好解释胶东矿集区的矿床、花岗岩类的特征。

**关键词** 胶东矿集区; 金矿床; 花岗岩; 同位素年龄;  $I_{Sr}$ ; 陆陆碰撞

**中图法分类号** P618.51; P588.121; P597.3

\* 本文得到自然科学基金(Nos. 49972035, 40352003), 科学院百人计划, 教育部跨世纪人才基金和科技部九五攀登(96-预-39-04)的资助。  
第一作者简介: 陈衍景, 男, 1962年生, 博士, 研究员, 矿床及地球化学专业, E-mail: yjchen@pku.edu.cn

# 1 前言

胶东是我国最重要的金矿集中区(图1),拥有玲珑等世界级的超大型金矿,储量占我国的25%左右(Zhou and Liu, 2000)。胶东矿集区西界为郯庐断裂,东界为青岛-荣城断裂,南为胶莱盆地,北为龙口-蓬莱断裂和黄海盆地(图1)。矿集区主要出露太古宙的胶东群,古元古代的荆山群和粉子

山群,中生代花岗岩类,白垩纪钾玄质中酸性火山岩,中生代早期的超高压变质岩,以及零星的新生代玄武岩。其中,超高压变质岩仅出露于五莲-即墨断裂以东,并被燕山期花岗岩侵入;新生代玄武岩主要沿龙口-蓬莱断裂发育;中生代花岗岩类、胶东群和荆山群是主要赋矿岩石。中生代以来,胶东矿集区经历了两个最显著的构造热事件,分别是扬子与华北克拉通的碰撞造山作用,古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲及其相关地质作用。

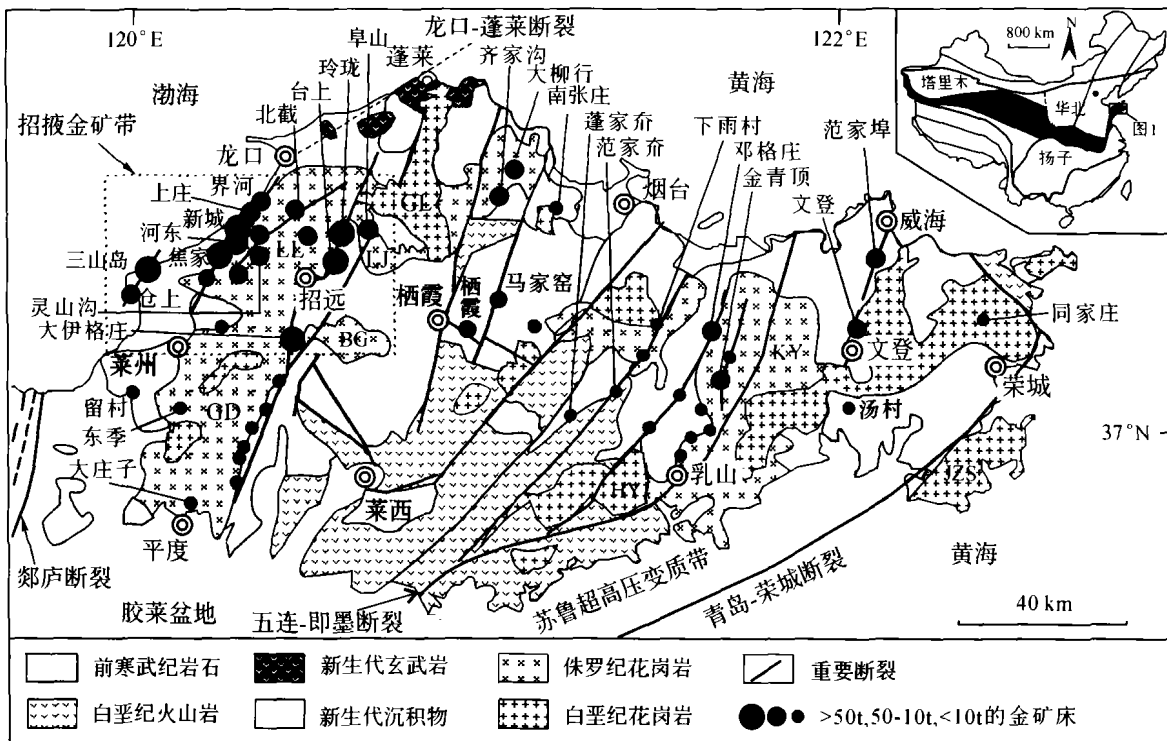


图1 胶东矿集区地质和金矿分布简图

(据寸珪和陈纪明(1992)、胡受奚等(1997)、马丽芳(2002)、Fan et al. (2003)等资料编制)。BG, 毕郭岩体; GD, 郭家店岩体; GL, 郭家岭岩体; HY, 海阳岩体; KY, 昆嵛山岩体; LJ, 莱家河岩体; LL, 玲珑岩体。

Fig. 1 Geology and distribution of gold deposits in the Jiaodong metallogenic province

(data from Cun and Chen, 1992; Hu et al., 1997; Ma, 2002; Fan et al., 2003)

Abbreviations for granitoid intrusions: BG, Biguo; GD, Guojadian; GL, Guojialing; HY, Haiyang; KY, Kunyushan; LJ, Luanjiahe; LL, Linglong.

胶东矿集区的矿床产出受断裂构造控制,矿床地质地球化学特征与与造山型金矿(Groves et al., 1998)基本一致,被 Kerrich 等(2000)和 Goldfarb 等(2001)作为造山型金矿省,并得到很多学者的支持(如 Zhou et al., 2002; Qiu et al., 2002; Mao et al., 2003)。但是,翟明国等(2004)却提出了相反的观点,认为胶东金矿属于“非造山带型”。事实上,胶东矿集区与国外造山型金矿省确有差异,例如:(1)国外造山型金矿多产于中低级变质地体,而胶东金矿床产于中高级变质地体甚至超高压榴辉岩相地质体中,与 Groves 等(1998)归纳的经验性模式出入较大;(2)按照 Groves 等

(1998)和 Goldfarb 等(2001)的观点,金矿成矿发生在赋矿地体遭受造山变质的峰期或稍后,但胶东金矿的就位时间(中生代)远晚于胶东群和荆山群的变质作用,时间间隔达2.0Ga以上(陈衍景,1994; Chen et al., 1998)。

关于金矿成矿时间,除个别学者(沈保丰等,1994; 王义文,1996)坚持早前寒武纪成矿重要性外,基本共识于燕山期成矿。张振海等(1994)主张存在早侏罗世和早白垩世两次重要成矿事件, Mao 等(2003)主张存在3次成矿事件,但多数学者(Yang and Zhou, 2000, 2001; Wang et al., 1998; Qiu et al., 2002)主张成矿发生在130~110Ma之间。

绝大多数学者强调了成矿物质来源多元性和复杂性,至于何者为主,则分歧较大,代表性观点有:(1)地壳(张振海等,1994)或花岗绿岩地体和孔达岩系(陈衍景,1994; Qiu *et al.*, 2002); (2)地幔(孙丰月等,1995; Yang *et al.*, 2003); (3)燕山期花岗岩(李华芹等,1993); (4)壳幔混合作用(邱捡生等,1998; Qiu *et al.*, 2000); (5)煌斑岩(季海章等,1992; 翟建平等,1996; 胡受奚等,2001)。

关于成矿流体来源,主要观点有:(1)地幔流体(孙丰月等,1995; Yang *et al.*, 2003; 杜乐天,1996); (2)岩浆流体(李华芹等,1993); (3)大气降水(张理刚,1989); (4)以变质水为主体同碰撞流体系统(陈衍景,1994; 鲁安怀等,1998; Fan *et al.*, 2003)。

关于矿集区形成的构造背景,主要观点有:(1)中生代陆陆碰撞造山过程的挤压向伸展转变体制(陈衍景和富士谷,1992; 陈衍景,1994; 王德滋等,1998; 胡受奚等,1997; Chen *et al.*, 1998; Zhai *et al.*, 2001, 2002; Yang *et al.*, 2003; Mao *et al.*, 2003; Zhou and Lu, 2000; Zhou *et al.*, 2002); (2)古太平洋板块俯冲体制或其远距离效应(Sillitoe, 1989; 陈衍景,1986; Qiu *et al.*, 2002); (3)地幔柱活动(Wang *et al.*, 1998; 孙景贵等,2000); (4)郯庐断裂多期活动(Xu *et al.*,

1987; 杜乐天,1996); (5)早前寒武纪克拉通化作用(沈保丰等,1994; 王义文,1996)。

鉴于存在上述分歧,本文较全面列举了最近10多年获得的成矿同位素年龄,厘定胶东矿集区大规模成矿作用发生在130~110Ma之间,构造背景属于陆陆碰撞作用的挤压向伸展转变体制。根据铷同位素特征,认为胶东矿集区的成矿物质和流体主要为壳源,与同碰撞的陆壳俯冲密切相关。

## 2 大规模成矿时间

表1列出了胶东矿集区的成矿和相关岩石的同位素测年,报道这些数据的作者均认为自己获得的数据准确,地质意义清楚,因此,本文不再具体评述每件数据的可靠性及其地质意义。从图2可以看出,胶东大规模成矿作用发生在110~130Ma,并且有130Ma以前成矿作用的零星记录;成矿年龄分布的范围基本没有超出200~100Ma,限定在侏罗纪和早白垩世。这与前人(涂光炽和赵振华,1983; Hu, 1991; Zhai *et al.*, 2001; 陈衍景,1994; Chen *et al.*, 1998)的认识一致,尤其与成矿主要发生在侏罗纪-白垩纪之交的结论(陈衍景和富士谷,1992)吻合。

表1 胶东矿集区金矿床和相关地质体同位素年龄

Table 1 Isotope ages for ore deposits and related rocks in the Jiaodong gold province, East China

矿床/带	测试对象	方法	年龄* (Ma) 和 $I_{Sr}$	数据出处
篷家夼	中期石英(BP99-65)	氩氩	118.42 ± 0.25 (P), 117.03 ± 0.13 (1)	张连昌等, 2002
篷家夼	中期石英(BP99-07)	氩氩	120.53 ± 0.49 (P), 117.33 ± 0.15 (1)	张连昌等, 2002
篷家夼	底板煌斑岩黑云母	氩氩	117.49 ± 0.25 (P), 116.83 ± 0.36(1)	张连昌等, 2002
篷家夼	矿石绢云母	钾氩	100.59 ± 1.96	孙丰月等, 1995
大庄子	中期石英(DZ004)	氩氩	117.39 ± 0.64 (P), 115.62 ± 1.01(1)	张连昌等, 2002
大庄子	3个煌斑岩脉	钾氩	106 ± 1 ~ 127 ± 1 (n=?)	朱大岗, 张振江, 1998
发云夼	早白垩世火山岩黑云母	钾氩	118.6 ~ 127.5 (n=?)	李守军, 1998
发云夼	矿石黄铁矿	铷锶	128.2 ± 7.2; $I_{Sr} = 0.7128 ± 0.0001$	张连昌等, 2002
东季	蚀变岩钾长石	氩氩	116.1 ± 0.3 (P), 116.3 ± 0.8 (1)	李厚民等, 2003
东季	矿脉石英	氩氩	115.2 ± 0.2 (P), 114.4 ± 0.2 (1)	李厚民等, 2003
招掖带	玲珑花岗岩	铷锶	156; $I_{Sr} = 0.7095$	李华芹等, 1993
招掖带	玲珑花岗岩	钾氩	153 ± n = 14, 1)	李华芹等, 1993
招掖带	玲珑片麻状花岗岩	铷锶	1330 ± 350; $I_{Sr} = 0.706$	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	玲珑片麻状花岗岩	铷锶	161 (1; $I_{Sr} = 0.7122$	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	玲珑片麻状花岗岩	钾氩	148, 144, 141, 141, 132, 131, 128, 127, 127, 121, 119, 112	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	玲珑花岗伟晶岩	钾氩	132, 124, 117, 102	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	玲珑花岗岩	氩氩	164 ± 1 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2002
招掖带	郭家岭花岗岩	铷锶	154; $I_{Sr} = 0.7103$	李华芹等, 1993
招掖带	郭家岭花岗岩	钾氩	150 (n = 12, 1)	李华芹等, 1993
招掖带	郭家岭花岗岩	钾氩	165, 149, 135, 128, 118, 116	Wang <i>et al.</i> 1992
招掖带	郭家岭花岗岩	氩氩	135 ± 2 (P)	Qiu <i>et al.</i> 2002
招掖带	滦家河花岗岩	氩氩	155 ± 2 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2002
招掖带	滦家河花岗岩	铷锶	152.47 ± 7.15; $I_{Sr} = 0.7125$	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	香沓次火山岩体	钾氩	128, 121	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	花岗闪长岩脉	钾氩	101, 94, 82	Wang <i>et al.</i> , 1992

续表 1

Continued Table 1

矿床/带	测试对象	方法	年龄 <sup>*</sup> (Ma) 和 $I_{Sr}$	数据出处
招掖带	闪长玢岩	钾氩	101, 100	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	煌斑岩脉	钾氩	122	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	钾长石脉	钾氩	101	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	细晶岩脉	钾氩	110, 98	Wang <i>et al.</i> , 1992
招掖带	中酸性火山岩	钾氩	123, 116	Wang <i>et al.</i> , 1992
玲珑	黄铁矿	铷锶	123 ± 4, 123 ± 3, 122 ± 11	Yang, Zhou, 2001
玲珑	98JQ07 黄铁矿	铷锶	121.6 ± 8.1; $I_{Sr} = 0.7094 ± 19$	Yang, Zhou, 2000
玲珑	98LL06 矿石和黄铁矿	铷锶	121.8 ± 3.5; $I_{Sr} = 0.7102 ± 1$	Yang, Zhou, 2000
玲珑	98DK07 矿石和黄铁矿	铷锶	120 ± 29; $I_{Sr} = 0.7113 ± 48$	Yang, Zhou, 2000
玲珑	5 件 JQ 矿石样品	铷锶	110.6 ± 2.4; $I_{Sr} = 0.7121 ± 2$	Yang, Zhou 2000
玲珑	108 脉绢英岩之绢云母	铷锶	101 ± 4; $I_{Sr} = 0.7120 ± 2$	张振海等, 1994
玲珑	绿泥石等蚀变矿物和绢英岩	铷锶	111.4 ± 2.8; $I_{Sr} = 0.7121 ± 1$	张振海等, 1994
玲珑	石英包裹体	铷锶	126.6 ± 7.5; $I_{Sr} = 0.7111 ± 2$	李华芹等, 1993
玲珑	蚀变岩	铷锶	112 ± 2 (未报道 $I_{Sr}$ )	骆万成, 伍勤生, 1987
玲珑	蚀变岩	钾氩	111 ± 2	骆万成, 伍勤生, 1987
界河, 焦新	蚀变岩, 钾长石, 粘土矿物	铷锶	46.5 ± 2.3; $I_{Sr} = 0.7120 ± 1$	张振海等, 1994
焦新矿田	上庄花岗岩体	铷锶	119.8 ± 1.6; $I_{Sr} = 0.7116 ± 3$	张振海等, 1994
焦家	石英包裹体	铷锶	134 ± 8; $I_{Sr} = 0.7104 ± 1$	李华芹等, 1993
焦家	晚期矿化水白云母	铷锶	88.1 ± 0.1; $I_{Sr} = 0.7116 ± 2$	骆万成, 伍勤生, 1987
焦家/新城	蚀变岩白云母	铷锶	105 ± 7 (未报道 $I_{Sr}$ )	骆万成, 伍勤生, 1987
焦家/新城	蚀变岩白云母	钾氩	106 ± 2	骆万成, 伍勤生, 1987
仓上	石英脉包裹体	铷锶	113.5 ± 0.6 (未报道 $I_{Sr}$ )	徐贵忠等, 2002
仓上	石英脉包裹体	氩氩	121.3 ± 0.2 (P); 121.1 ± 0.5 (I)	Zhang <i>et al.</i> , 2003
灵山沟	矿石钾长石和铬云母	铷锶	188.9 ± 4.2; $I_{Sr} = 0.7111$	张振海等, 1994
灵山沟	蚀变岩	铷锶	115 ± 5 (未报道 $I_{Sr}$ )	骆万成, 伍勤生, 1987
马家窑/栖霞	黄铁绢英岩	铷锶	125.8 ± 1.7; $I_{Sr} = 0.7168 ± 2$	翟建平, 1998
马家窑/栖霞	石英包裹体	铷锶	137.6 ± 7.1; $I_{Sr} = 0.7163 ± 1$	李华芹等, 1993
马家窑/栖霞	矿石水白云母	铷锶	135.1 ± 5.2	李华芹等, 1993
马家窑/栖霞	绿泥石, 菱铁矿和绢英岩	铷锶	106 ± 5; $I_{Sr} = 0.7152 ± 1$	张振海等, 1994
马家窑	水白云母	铷锶	135.1 ± 5.2; $I_{Sr} = 0.7215 ± 25$	骆万成, 伍勤生, 1987
马家窑	水白云母	钾氩	120 ± 2	骆万成, 伍勤生, 1987
大尹格庄	含矿花岗岩	铀铅	145 ± 1 (单锆石)	李怀坤等, 1998
南张庄	石英斑岩	铷锶	113 ± 7	刘连登等, 1998
邓格庄	绢英岩	铷锶	118 ± 9; $I_{Sr} = 0.71015 ± 19$	张德全等, 1995
邓格庄	容矿花岗岩黑云母(91-34-4)	氩氩	129.01 ± 0.58 (P), 130.68 ± 2.73 (I)	张德全等, 1995
邓格庄	容矿花岗岩黑云母(91-34-4)	钾氩	126.39	张德全等, 1995
邓格庄	昆嵛山早期花岗岩黑云母	钾氩	147.30 ± 2.13, 135.17 ± 3.48	张德全等, 1995
邓格庄	昆嵛山中期花岗岩黑云母	钾氩	131.03 ± 2.42, 126.39 ± 2.04	张德全等, 1995
邓格庄	昆嵛山晚期花岗岩黑云母	钾氩	123.92 ± 2.53, 120.03 ± 1.77	张德全等, 1995
金青顶	昆嵛山岩体钾长石	铷锶	145.5	张振海等, 1994
金青顶	赋矿昆嵛山花岗岩	铷锶	134.3; $I_{Sr} = 0.7096$	翟建平, 1996
金青顶	成矿昆嵛山花岗岩	钾氩	134.4 ± 3.8	杨敏之, 1998
金青顶	昆嵛山岩体黑云母	钾氩	124.5 ~ 132.1 (N = ?)	张振海等, 1994
金青顶	昆嵛山岩体黑云母, 全岩	钾氩	157, 143 ± 3, 126 ± 3, 113 ± 3, 217, 200, 180, 172, 134 ± 4, 132, 132, 129, 125	Qiu <i>et al.</i> , 2002
金青顶	成矿昆嵛山花岗岩	氩氩	131 (P), 129 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2002
金青顶	钾化花岗岩钾长石和绢云母	铷锶	121.3 ± 0.6; $I_{Sr} = 0.7105 ± 1$	张振海等, 1994
金青顶	绢英岩	铷锶	113.3 ± 4.4; $I_{Sr} = 0.7103 ± 1$	张振海等, 1994
金青顶	蚀变岩和蚀变矿物	铷锶	112.3 ± 3.3; $I_{Sr} = 0.7105 ± 3$	张振海等, 1994
金青顶	黄铁绢英岩	铷锶	104.8 ± 1.5; $I_{Sr} = 0.7131 ± 1$	翟建平, 1996
金青顶	热液蚀变矿物和蚀变岩	铷锶	101.8 ± 3.4; $I_{Sr} = 0.7106 ± 4$	张振海等, 1994
下雨村	绢云母	钾氩	124.6 ± 2.5	孙丰月等, 1995

注: \* 括号内的 P 和 I 分别表示坪年龄和等时线年龄, 数字表示样品数; 个别数据进行了四舍五入处理。

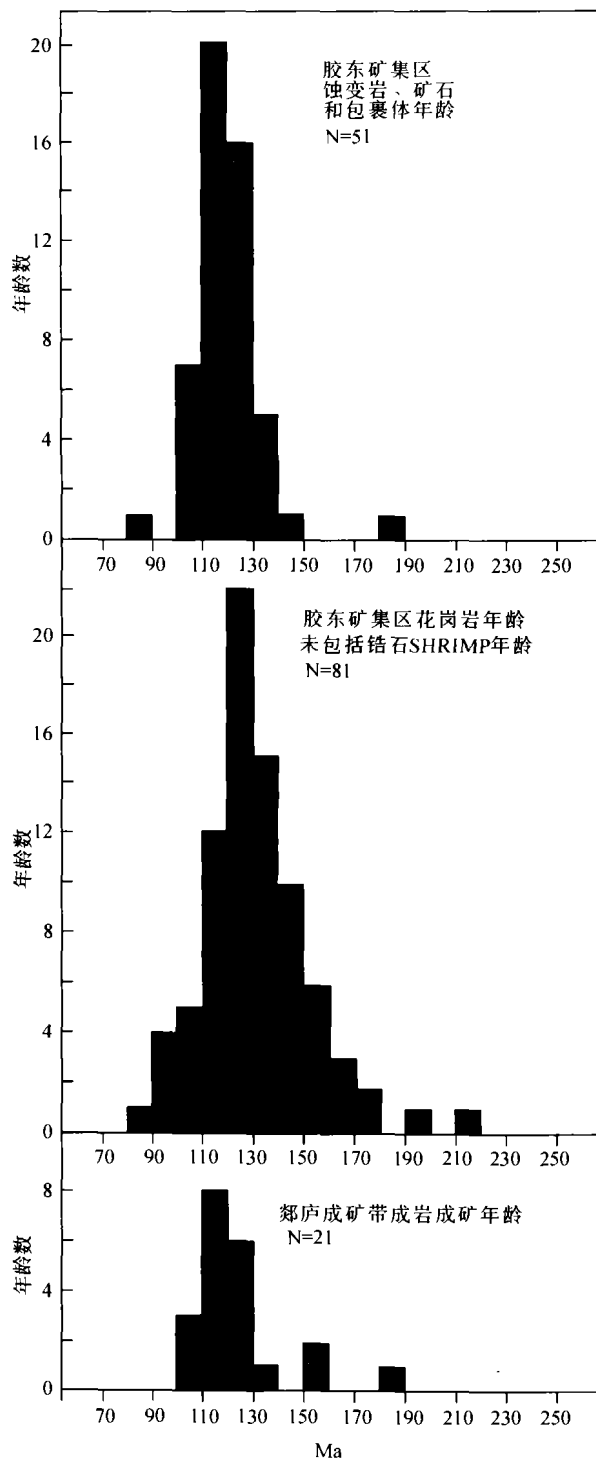


图2 胶东矿集区和郑庐成矿带的成矿年龄和成岩年龄直方图(数据来自表1和表4)

Fig. 2 Histograms of ages for the Jiaodong gold province and Tan-Lu belt (data from Table 1 and 4)

中生代花岗岩类广泛出现于胶东矿集区,被认为与成矿有关,因而同位素测年和地质地球化学研究较详细。例如,招掖成矿带的玲珑花岗岩体和牟乳成矿带的昆崮山岩体等,

地质填图和同位素测年均证实其为多期多阶段形成的复式杂岩(详见徐金方, 1989; 胡受奚等, 1997; Wang *et al.*, 1992, 1998), 同位素测年(表1)也显示了相同信息。关于玲珑花岗岩带, 最新获得的锆石 SHRIMP 铀铅年龄(表2)更清楚地给出了不同期次岩浆作用的继承、演化关系: (1) 玲珑和漆家河形成于 150 ~ 170 Ma, 而郭家岭岩体形成于 126 ~ 130 Ma, 成矿后的脉岩侵位于 120 Ma。(2) 花岗岩类侵入时间与大规模成矿时间基本一致, 似显花岗岩类略早的特征, 这可能与花岗岩类冷凝封闭温度(一般 > 600°C) 高于成矿温度(一般 350 ~ 200°C) 有关。(3) 年轻花岗岩中总含有与较老花岗岩年龄一致的继承锆石, 例如, 郭家岭岩体和成矿后脉岩均有 150 ~ 160 Ma 的继承锆石, 而仓上金矿体内强蚀变花岗岩角砾的主体锆石年龄也为 154 Ma, 底板花岗岩闪长岩锆石年龄为 166 Ma。(4) 所测燕山期花岗岩体中均有大量年龄为 180 ~ 300 Ma 和 > 1800 Ma 的继承锆石, 个别继承锆石的年龄为 180 ~ 1800 Ma; 由于中酸性岩浆岩的锆石含量远高于基性-超基性岩, 因此胶东地区在 180 Ma 之前曾发生多期的中酸性岩浆事件, 尤以 180 ~ 300 Ma 和 > 1800 Ma 的两次成岩事件为重要。

对于 180 ~ 300 Ma 的成岩事件, 似可解释为古秦岭-大别-苏鲁洋盆的俯冲闭合及其随后的华北与华南海板块的碰撞作用。对于 > 1800 Ma 的成岩事件, 恰恰与 1850 Ma 左右华北克拉通不同块体的碰撞拼贴事件(陈衍景和富士谷, 1992; 胡受奚和郭继春, 1989; Zhao *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2003) 相吻合。至于 1800 ~ 180 Ma 期间的成岩作用, 似可用华北古板块南缘的多期次构造演化模式(详见陈衍景等, 2003) 解释。

### 3 成矿物质来源

前述年轻花岗岩类中保留继承锆石的事实表明, 早期成岩事件形成的中酸性岩石或地壳参与了后期花岗岩浆作用, 并且为后期花岗岩浆形成提供了部分成岩物质, 也就是说, 后期岩浆是由早期地壳或花岗岩类经部分熔融或重熔而形成(Tu and Zhao, 1992; Wang *et al.*, 1992, 1998; 徐金方, 1989), 或者后期岩浆侵位时与先成地壳或花岗岩类发生了强烈的同化混染。无论如何, 胶东地区中生代花岗岩类不可能单由初生地幔岩浆演化而来, 也不可能单由俯冲大洋板片部分熔融或者俯冲引起的富集地幔楔的部分熔融形成, 最大可能是地壳物质经部分熔融或重熔而成。

由于金矿成矿流体系统的温度(集中在 200 ~ 350°C) 远低于岩浆温度(> 573°C), 因此, 就同一区域而言, 无论成矿流体系统是否与岩浆系统有成因联系, 成矿流体系统的发育深度都应浅于岩浆系统; 同时, 成矿流体的密度远低于岩浆, 也决定了成矿流体系统发育深度浅于岩浆系统。如果锆石 SHRIMP 定年揭示的信息准确, 即花岗岩浆可能源于地壳物质的部分熔融或重熔, 那么, 主体成矿流体系统更应源于

壳内。如果接受铷锶等时线年龄的可靠性,就没有理由不承认铷同位素初始值( $I_{Sr}$ )的可靠性。 $I_{Sr}$ 值是判别物源区性质的有效指标,一般认为, $I_{Sr}$ 值小于0.705代表幔源特征,大于0.709为地壳物质,介于0.705~0.709之间为壳幔混源

(表3)(Tu *et al.*, 1982;王德滋和周新民,2002)。当然,各地的地质背景不同也会造成指标的变化。例如,华北克拉通的壳源花岗岩类常常具有<0.710的 $I_{Sr}$ 值(胡受奚等,1988,1997;Chen *et al.*, 2000)。

表2 胶东矿集区花岗岩类和胶东群的锆石 SHRIMP 定年结果

Table 2 Zircon SHRIMP dating results for the granitoids and the Jiaodong Group in the Jiaodong gold province

样品	地质体	主年龄 (Ma)	继承锆石和铅丢失锆石年龄 (Ma)
LD-20	玲珑斑状花岗闪长岩	153 ± 4 (19)	继承锆石: 206 ± 7 ~ 294 ± 9 (5); Pb 丢失锆石: 131 ± 3 (2)
LX-13	玲珑崂山石榴石花岗岩	158 ± 4 (13)	175 ± 4 - 305 ± 9 (4); 1 粒锆石核心 3446 ± 2 (1), 增生边 152 ± 2 (1); 2 粒 Pb 丢失锆石
JMS-1	Jiumoushan, 玲珑式花岗岩	160 ± 3 (23)	1 粒锆石核 658 ± 11, 边 154 ± 3; 1 粒核 783 ± 13, 边 201 ± 3, 165 ± 3; 1 粒核 210 ± 4, 边 162 ± 3
MS-1	Moushan, 玲珑花岗岩	158 ± 3 (7)	176 ± 4 - 239 ± 7 (4); 1 粒无核边结构锆石: 核心 226 ± 6, 边 146 ± 3
GJD-1	郭家店粗粒花岗岩, 栾家河岩体	-	439 ~ 2875 (26), 主要集中范围: 200 ~ 300
LJH-1	栾家河, 栾家河花岗岩	157 ± 5 (12)	181 ± 5 - 386 ± 9 (6)
BG-1	毕郭二云母花岗岩, 栾家河岩体	152 ± 10 (5)	188 ± 5 ~ 224 ± 6 (9), 其中 1 粒光学性质均匀的锆石核心 224 ± 6, 边缘 142 ± 4
SSD-15	三山岛, 郭家岭斑状花岗闪长岩	128 ± 2 (19)	155 ± 3 (1); 1 粒近一致年龄 1934 ± 48; 1 粒近一致年龄 2708 ± 65
JH-8	界河, 郭家岭斑状花岗闪长岩	126 ± 2 (19)	1 粒自形锆石核心 2530 ± 11, 边缘 2483 ± 21; 1 粒自形环带锆石核心 225 ± 4, 边缘 159 ± 3
TJ-1	郭家岭花岗岩	130 ± 3 (14)	1860 ± 15 (1); 230 ± 5 (1)
MZS-1	郭家岭花岗岩	129 ± 3 (5)	116 ± 3 (1); 155 ± 5 (1)
NM-1	郭家岭花岗岩	128 ± 6 (9)	
LX-53	玲珑金矿, 切矿钾长斑岩脉	120 ± 2 (21)	Pb 丢失锆石: 110 (2); 继承锆石: 150 ~ 3100 (31), 主要集中于 150 ~ 300, 次为 2300 ~ 3100
C1	仓上金矿底板花岗闪长岩	166 ± 4 (10)	181 ± 5, 188 ± 4, 202 ± 4, 244 ± 11 (6) (232 ~ 254), 378 ~ 805 (4), 1800 ~ 2105 (10), 2542 ± 8
C3	矿体内部强蚀变花岗岩角砾	154 ± 5 (6)	291 ± 4, 598 ± 13, 771 ± 10, 2158 ± 61, 2292 ± 21, 2517 ± 8
C4	顶板斜长角闪岩	2530 ± 17 (7)	变质锆石: 2391 ~ 2482 (5), 2013 ~ 2321 (7), 1852 ± 37 (6), 1125 ± 809, 1336 ± 638

除 C1, C2, C3 样品资料取自 Zhang *et al.* (2003) 外, 其余资料根据 Wang *et al.* (1998) 和 Qiu *et al.* (2002), 括号内数据表示数据数。

表3 重要花岗岩类分类方案的  $I_{Sr}$  指标

Table 3 The  $I_{Sr}$  criteria dividing different genetic types of granitoids suggested in various classifications.

作者	Xu <i>et al.</i> (1982)		Chappell & White (1984)		Barbarin (1999)		Chen <i>et al.</i> (2000)	
分类	改造型	同熔型	S 型	I 型	MPG, CPG	KCG, ACG	深成碰撞型	浅成碰撞型
$I_{Sr}$	0.709 ~ 0.741	0.705 ~ 0.710	0.709 ~ 0.718	0.704 ~ 0.712	0.706 ~ 0.760	0.706 ~ 0.712	0.705 ~ 0.710	0.705 ~ 0.714
地区	华南造山带中生代花岗岩类		Lachlan 造山带古生代花岗岩类		全球花岗岩类 (海西造山带为主)		秦岭造山带中生代花岗岩类	

MPG, 白云母过铝花岗岩; CPG, 堇青石过铝花岗岩; KCG, 钾长石钙碱性花岗岩; ACG, 角闪石钙碱性花岗岩。

陈衍景等: 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境

在胶东地区,中生代花岗岩  $I_{Sr}$  值均大于 0.7095(表 1 和图 3),高于构造背景相似的华北克拉通南缘的中生代碰撞型(Chen *et al.*, 2000)或改造型(胡受奚等, 1988)花岗岩类,表明成岩物质主要为壳源。最近, Yang 等(2003)根据 Sr-Nd-Pb 等同位素(图 4)也得出了类似认识。值得说明,胶东中生代花岗岩类主要源于地壳内部的观点已被很多学者论证,并且多认为与胶东群和荆山群的部分熔融有关(徐金方, 1989; Wang *et al.*, 1992; 胡受奚等, 1997; Zhou and Lu, 2000; Qiu *et al.*, 2002)。

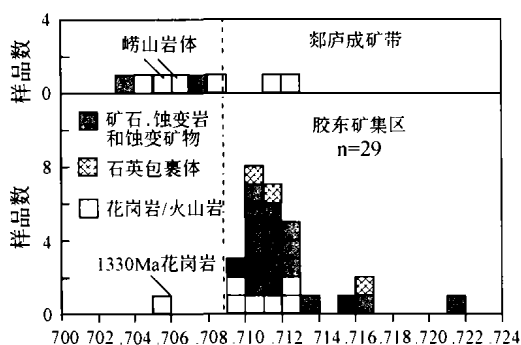


图 3 胶东矿集区和郯庐成矿带矿床和花岗岩类  $I_{Sr}$  值分布(数据来自表 1 和表 4)

Fig. 3 Histograms of  $I_{Sr}$  values for ore deposits and granitoids in the Jiaodong Au province and the Tan-Lu metallogenic belt (data from Tables 1 and 4)

矿集区金矿石、矿化蚀变岩、矿石矿物、蚀变矿物及其流体包裹体的  $I_{Sr}$  值大于 0.710,表明成矿物质和流体应属壳源或者以壳源为主;而且,它们的  $I_{Sr}$  值略高于中生代花岗岩类(图 3),表明成矿物质和流体的来源比花岗岩类还要浅。

#### 4 成矿构造背景

目前,中生代“挤压-伸展转变期大规模成矿”(陈衍景, 1994;陈衍景和富士谷, 1992; Chen *et al.*, 1998)的观点已基本成为国内外学者的共识(王德滋等, 1998; 胡受奚等, 1997; 翟裕生等, 1999; Mao *et al.*, 2003; Zhai *et al.*, 2001, 2002; Yang *et al.*, 2003; Zhou and Lu, 2000; Zhou *et al.*, 2002; Qiu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 1998; Deng *et al.*, 1999; Kerrich *et al.*, 2000),分歧的焦点已经转向引发挤压向伸展转变的原因上,属于更高层次的研究和争论。由于胶东矿集区东面太平洋,西界郯庐断裂,南邻由大陆碰撞-深俯冲形成的苏鲁超高压榴辉岩带,下伏地幔,因此学者们总能把它们与矿集区形成联系起来,自然提出了 4 种端元性的诱因观点,即:(1) 陆陆碰撞,(2) 太平洋板块俯冲,(3) 地幔柱活动,(4) 郯庐断裂活动。显然,4 种端元观点的可能性在

逻辑上是无法排除的,但对于其主次,则需要研究和讨论,下面谈谈作者的认识。

#### 4.1 郯庐断裂不是主导因素

如果郯庐断裂带是矿集区形成的主导因素,则需要:(1) 郯庐断裂带应为矿床和岩浆岩发育的中心,由断裂向两侧逐渐变弱,但事实是,胶东的岩浆活动和成矿作用远远强于郯庐断裂带及其西侧的鲁西地区;(2) 胶东矿集区的岩浆活动和成矿作用与郯庐成矿带应具有多方面的可比性,而不应存在岩浆岩类型和  $I_{Sr}$  值(表 1.4,图 3)的显著差异;(3) 岩浆活动和成矿作用似应沿断裂带连续或断续发育,在苏北、胶南、皖北和鲁西地区也应出现类似于胶东的矿集区,但事实并非如此(图 5);(4) 郯庐断裂带活动历史较长,至少始于三叠纪,因此沿断裂应存在三叠纪至今的强烈成岩成矿作用,而不应集中在 110~130Ma,缺乏新生代矿床。

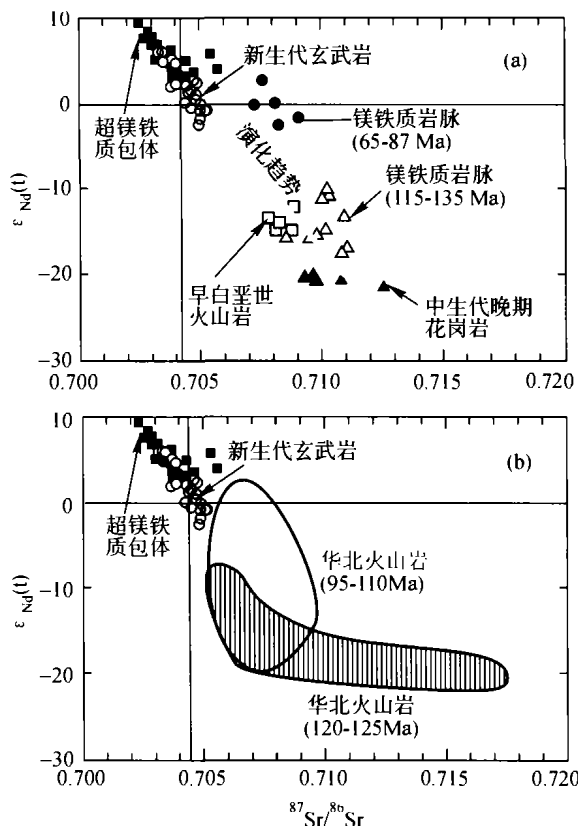


图 4 胶东和北克拉通不同类型岩浆岩锶钕同位素组成随时间变化(引自 Yang *et al.*, 2003)

Fig. 4 Temporal variation of Sr-Nd isotope systematics of igneous rocks from the North China craton including the Jiaodong metallogenic province (from Yang *et al.*, 2003)

由于存在上述矛盾,我们认为郯庐断裂不是胶东矿集区大规模成矿的主导因素。

表 4 郯庐成矿带矿床和岩浆岩的同位素年龄  
Table 4 Isotope ages for ore deposits and igneous rocks in the Tan-Lu fault-controlled metallogenic belt

矿床	矿种	成因类型	地点	测试对象	方法	年龄(Ma)和 $I_{sr}$	文献
七宝山	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东五莲	闪长玢岩黑云母	钾氩	124.1	陈克荣等, 1993
七宝山	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东五莲	辉石二长岩黑云母	钾氩	124.9	王德滋等, 1998
七宝山	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东五莲	胶莱盆地火山岩	铷锶	111.4 ± 2.1; $I_{sr} = 0.70842 ± 4$	Qiu <i>et al.</i> , 2000
七宝山	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东五莲	安粗岩(latite)	钷钷	109.9 ± 0.6 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2000
七宝山	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东五莲	粗面岩(Trachyte)	钷钷	108.2 ± 0.9 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2000
蒙阴	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东蒙阴	橄辉安粗岩	铷锶	119.6 ± 3.7; $I_{sr} = 0.71245 ± 7$	Qiu <i>et al.</i> , 2000
蒙阴	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东蒙阴	橄辉安粗岩	钷钷	114.7 ± 0.6 (P), 124.3 ± 0.6 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2000
蒙阴	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东蒙阴	粗玄岩 trachybasalt	钷钷	114.9 ± 0.6 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2000
蒙阴	Au-Cu	斑岩角砾岩	山东蒙阴	粗面岩 Trachyte	钷钷	118.2 ± 0.6 (P)	Qiu <i>et al.</i> , 2000
金场	Au-Cu	砂卡岩	山东沂南	霏细斑岩	钾氩	121.6	邱检生等, 1998
金场	Au-Cu	砂卡岩	山东沂南	霏细斑岩	铷锶	154.8 ± 0.3; $I_{sr} = 0.7112 ± 1$	邱检生等, 1996
金场	Au-Cu	砂卡岩	山东沂南	含矿角闪:长斑岩	铷锶	126.6 ± 0.3; $I_{sr} = 0.7049$	赵一鸣等, 1992
归来庄	Au-Cu	砂卡岩	山东平邑	斑岩之角闪石	钷钷	189.8 ± 0.2 (P); 188.4 ± 1.6 (I)	林景仁等, 1997
大乳山	Au	石英脉型	安徽五河	矿区中酸性脉岩:钾长石	钾氩	137	刘建民等, 1998
大乳山	Au	石英脉型	安徽五河	蚀变矿物绢云母,绿泥石	铷锶	154 ± 1; $I_{sr} = 0.7037 ± 2$	董法先等, 1995
荣渡	Au	石英脉型	安徽五河	蚀变矿物	铷锶	109 ± 4.4; $I_{sr} = 0.7077 ± 1$	董法先等, 1995
朱顶	Au	石英脉型	安徽五河	石英	钷钷	113.4 ± 0.4 (I); 116.1 ± 0.6 (P)	应汉龙,刘秉光,2002
毛山	Au	石英脉型	安徽凤阳	石英	钷钷	115 ± 0 (I), 117.4 ± 0.5 (P)	应汉龙,刘秉光,2002
上成	Au	石英脉型	安徽张八岭	石英	钷钷	116.5 ± 0.3 (I); 118.3 ± 0.3 (P)	应汉龙,刘秉光,2002
上成	Au	石英脉型	安徽张八岭	管店含矿花岗岩锆石	铷铅	128	董法先等,1995
三浦	Au-Ag-Cu	砂卡岩	安徽	含矿岩体	钾氩	180 ~ 128	Zhao <i>et al.</i> , 1999
			青岛崂山	晶洞花岗岩	铷锶	134.0 ± 2.2; $I_{sr} = 0.7064 ± 13$	Gui <i>et al.</i> , 1992
			青岛崂山	石英正长岩和花岗岩	铷锶	146.1 ± 6.0; $I_{sr} = 0.7050 ± 2$	Gui <i>et al.</i> , 1992
			青岛崂山	花岗岩	钾氩	99.7, 92.3	Wang <i>et al.</i> , 1992



#### 4.2 地幔柱活动不是主导因素

虽然对于地幔柱性质、地质表现和成矿特征的认识还不很清楚,但地幔柱活动与成岩成矿关系研究受到许多学者重视(Pirajno, 2000; 牛树银等, 2001), 胶东矿集区也被解释为地幔柱活动的产物(Wang *et al.*, 1998, 牛树银等, 2001)。但该观点需要回答如下问题:(1) 地幔柱活动强烈的地区往往大量发育玄武岩类等基性-超基性岩浆岩, 如夏威夷和二叠纪的峨嵋山地区; 但是, 胶东不但没有大量中生代玄武岩发育, 反而缺乏同成矿期的玄武岩类, 甚至缺乏中基性岩浆活动。(2) 当地幔柱活动强烈并且影响到岩石圈浅层时, 应该有大量幔源物质运移到岩石圈表层, 否则, 无法识别地史时期的地幔柱活动; 但是, 胶东地区成矿物质和流体以及相关花岗岩类的  $I_s$  值并没有给出幔源物质显著加入的信息。(3) 玄武岩源于地幔已被公认, 玄武岩发育的多寡似可指示地幔柱活动对岩石圈表层地质作用影响的强弱, 因此, 洋中脊和典型大陆裂谷带均以大量玄武岩发育为标志; 然而, 自三叠纪以来, 胶东乃至整个中国东部的玄武岩类主要出现于新生代, 似应表明该区新生代地幔柱作用强于中生代, 新生代的成矿作用也应强于中生代, 但事实是, 金大规模成矿作用并没有发生在新生代, 而是中生代。

鉴于上述, 我们暂不接受地幔柱作用是导致胶东矿集区形成的主导因素。

#### 4.3 大洋俯冲亦非主导因素

环太平洋地区的成岩成矿作用与太平洋板块俯冲的密切关系是显而易见的。作为环太平洋成矿带的一部分, 中国东部的成矿作用也曾被多数学者解释为太平洋板块俯冲的产物, 因此胶东矿集区形成于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲, 是1990年之前的倾向性认识。由于中国东部的主要成矿带距离太平洋板块的古俯冲缝合带和现代海沟均较远, 无法借助岩浆弧区的成岩成矿模型(Sillitoe, 1989)解释, 一些学者强调了板缘作用的远距离效应对中国东部构造演化和成岩成矿的影响(例如: 陈衍景, 1986; 胡受奚等, 1997, 1998; 王德滋等, 1998; Mao *et al.*, 2003; Pirajno and Bagas, 2002; Yang *et al.*, 2003)。无论是岩浆弧, 还是远距离效应, 都必须回答如下问题:(1) 为什么胶东矿集区  $I_s$  值没有清楚地显示幔源信息, 而距离更远的庐成矿带反而幔源信息(表4, 图3)更强?(2) 为什么中国东部的成矿带不平行于俯冲带, 反而近乎垂直于俯冲带?(3) 为什么胶东有大量金矿, 而胶南和江苏缺乏同期同类矿床(图5)? (4) 为什么中国东部大规模成岩成矿发生在侏罗纪和白垩纪, 而环太平洋的其它成矿带主要形成于新生代?(5) 为何中国东部与成矿同期的花岗岩类多为壳源S型或改造型, 而其它环太平洋成矿带则为壳幔混源I型或同熔型? 等等。

由于这些问题长期不能得到合理解释, 本文认为太平洋板块向欧亚大陆俯冲亦非导致胶东矿集区形成的主导诱因。

正如王德滋等(1998)所强调, 中国东部中生代岩浆活动与成矿作用“不能用太平洋板块俯冲这一简单模式来解释, 而是两大动力体系联合作用的结果, 其一为库拉-古太平洋板块与欧亚板块的碰撞俯冲作用, 其二为华北与扬子板块的碰撞、拼贴及其后续的伸展、引张作用”

#### 4.4 陆陆碰撞: 主导性因素

鉴于:(1) 前述导致胶东矿集区形成的4种可能性主导因素的3种已被排除, 只剩陆陆碰撞可以考虑;(2) 苏鲁超高压榴辉岩带地质研究的深入, 彻底改变了胶东地质的传统观念, 普遍认识到胶东是中生代碰撞造山带(Liou *et al.*, 1996; Sengor and Natal'in, 1996); (3) 同碰撞花岗岩浆活动和流体成矿作用在世界各碰撞带被证明非常强烈(Kerrick *et al.*, 2000; Goldfarb *et al.*, 2001), 同碰撞流体成矿作用理论(陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景等, 2003)日趋成熟。本文认为华南与华北板块的碰撞造山作用是导致胶东矿集区形成的主导性因素, 并借助造山带尺度的CMF模式(图6)进一步论证和解释(见下)。

### 5 碰撞构造演化与成矿作用的耦合关系

#### 5.1 时间一致性

按照普适的碰撞造山带PTt轨迹, 任一碰撞造山作用均可以  $P_{max}$  和  $T_{max}$  为界线划分为挤压期、挤压向伸展转变期和伸展期等3个不同动力学阶段, 其中, 挤压向伸展转变期一定是减压增温过程; 再按照物理化学理论, 减压和增温均可促发物质熔融和流体产生, 因此挤压向伸展转变体制的花岗岩浆活动和流体作用一定强于其前的挤压期和其后的伸展期(Chen, 1998; 陈衍景和富士谷, 1992; 图6)。

中央造山带是“晚三叠世到早白垩世的印支-燕山造山带”(Yuan, 1996)。大地构造学(张国伟等, 2001)、古生物地层学(张复新等, 1997)、区域地球化学(张本仁等, 2002)、花岗岩岩石学(胡受奚等, 1988, 1998; Zhang *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2001)、变质地质学(Liu *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1996)、构造地质学(许志琴等, 1986)、造山带年代学(Li *et al.*, 1993)、盆地演化分析(陈衍景和富士谷, 1992)、古地磁学(Zhu *et al.*, 1998)、反射地震探测(Yuan, 1996)等多学科的研究已证明华南与华北古板块的全面碰撞始于三叠纪晚期(李春昱等, 1978; 涂光炽和丁抗, 1986; 张国伟等, 2001), 约210~220Ma(Yin and Nie, 1996; Sun *et al.*, 2002; 陈衍景等, 2004); 造山带地壳和岩石圈的挤压、拆离、俯冲、缩短、增厚、隆升等构造作用在侏罗纪达到高潮(图6B1); 造山带岩石圈伸展减薄作用在早白垩世达到高潮(图6B2); 造山作用在晚白垩世最终结束, 并以A型花岗岩和玄武岩类发育为结束标志(图6B3)(Tu *et al.*, 1982; 张增杰等, 2003)。

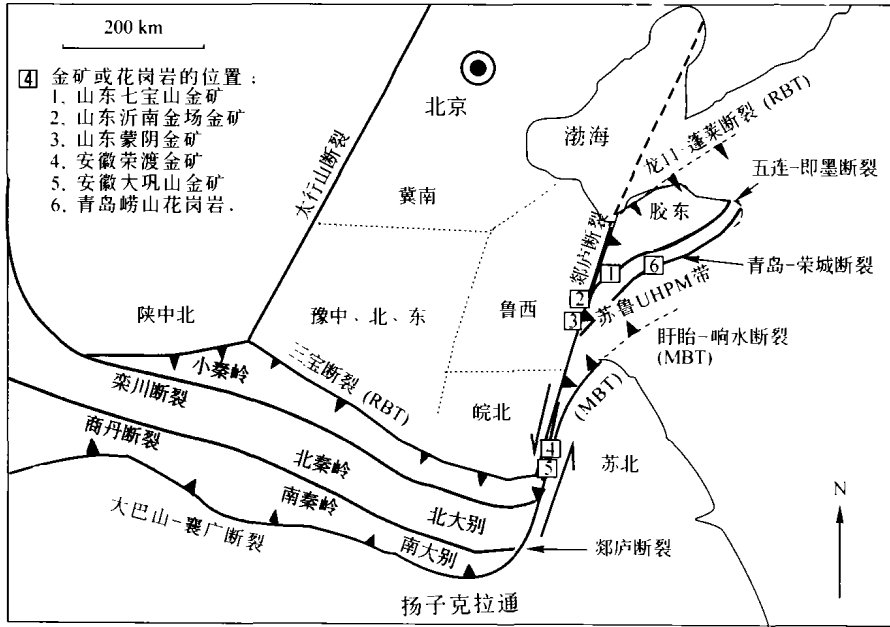


图5 中央造山带东段及其邻区的碰撞作用与成岩成矿作用的空间耦合示意 (据胡受奚等,1997; 张国伟等,2001; 马丽芳,2002; Chen *et al.*, 1998; 等资料编制)。MBT 和 RBT 分别代表主边界逆冲断裂和反向边界逆冲断裂。  
 Fig. 5 Spatial coupling of Mesozoic collision and metallogenesis and magmatism in the eastern portion of the Central China Orogen and its adjacent areas. MBT and RBT are main boundary thrust and reverse boundary thrust, respectively (data from Hu *et al.*, 1997a; Ma, 2002; Chen *et al.*, 1998)

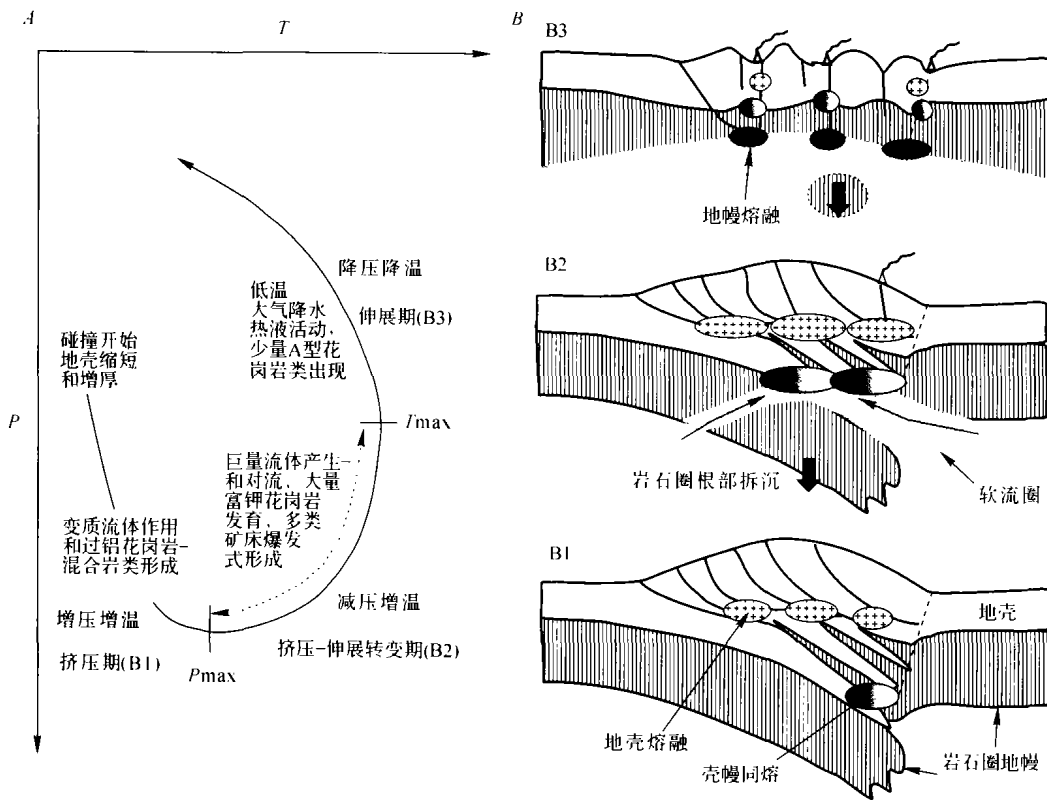


图6 碰撞造山带 P-T-t 轨迹与矿集区流体成矿的岩浆-构造背景演化关系示意图  
 Fig. 6 Model showing relationship of P-T-t path, magmas, large scale hydrothermal fluid flow and related tectonic settings. See text for details

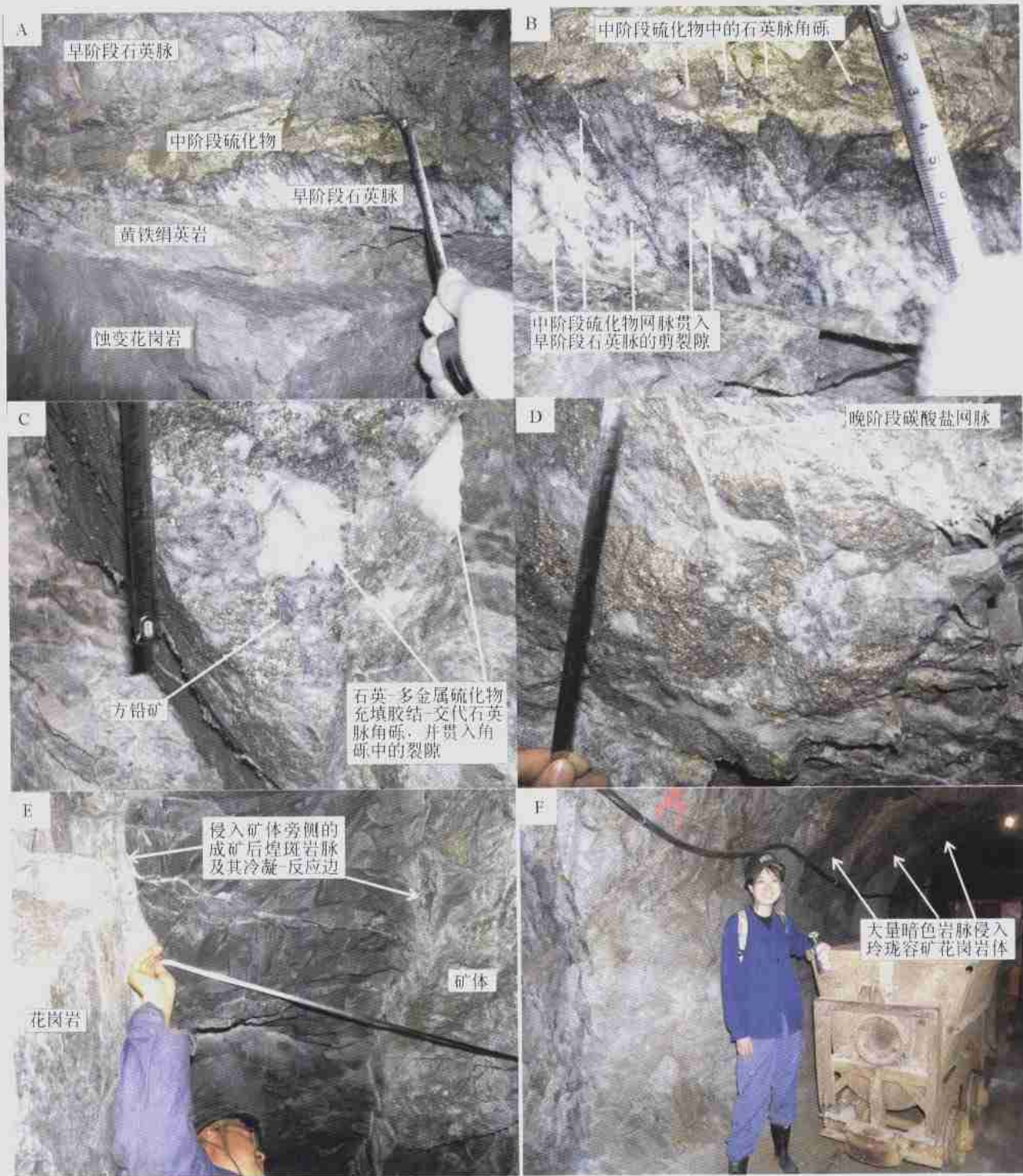


图7 玲珑金矿55号脉30m中段观察结果。A-D 指示成矿作用发生在挤压-剪切-伸展的构造演化过程；E-F 指示幔源岩浆侵入发生在成矿后。

Fig.7 Field observations on Vein 55 at level 30 m in the Linglong orefield. Photos A to D show that metallogeny occurred in a tectonic setting from compression, through to transition and to final extension; photos E and F show the postore intrusion of mantle-derived lamprophyre dikes.

按照上述,胶东矿集区大规模成岩成矿应发生在侏罗纪末和早白垩世,即陆陆碰撞的挤压向伸展转变期。表1和图2显示,胶东矿集区成矿时间没有超出陆陆碰撞作用的起止时间范围,并集中在100~140 Ma,表明碰撞与成矿的时间一致。

## 5.2 空间一致性

按照碰撞造山成岩成矿和流体作用模式(Chen, 1998),同碰撞花岗岩类和热液矿床总是倾向发育在仰冲板片,而非俯冲板片,并且局限于造山带主边界逆冲断裂和反向边界逆冲断裂之间。如此以来,胶东为矿集区,而鲁西、皖北、冀南、豫北、豫东和苏北等地燕山期成矿作用较弱的现象也可得到较好理解。理由是:苏北属于俯冲板片,且位于主边界逆冲断裂(盱眙-响水断裂)以南(图5);豫北、豫东和皖北虽属于仰冲板片,但位于反向边界断裂(三宝断裂)以北(图5);考虑到郯庐断裂的左行走滑作用(Xu *et al.*, 1987),冀南和鲁西也属于反向边界断裂以外的区域(图5)。总之,碰撞造山作用与成矿作用的空间相吻合。

## 5.3 矿床特征、岩浆演化与碰撞构造演化的一致性

秦岭、天山等典型碰撞带的实际研究(Chen, 1998; Chen *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2002b; 张增杰等, 2003; Li *et al.*, 2001; Gu *et al.*, 1999, 2000, 2001; 胡受奚等, 1998; 邓晋福等, 1994)表明,陆陆碰撞体制的成矿流体和物质主要来自地壳,花岗岩浆主要源于造山带地壳的部分熔融和重熔;碰撞造山带岩石圈伸展由浅至深发展,花岗岩类演化序列为富铝改造型→富碱改造型→富碱同熔型或A型(图6B);A型花岗岩类形成于拉张构造环境(Tu *et al.*, 1982),且常被玄武岩浆活动尾随,标志着造山带岩石圈动力学性质的改变,碰撞造山作用结束。胶东矿集区中生代花岗岩类和矿床的 $I_{Sr} > 0.709$ (图3),主要源于壳内,岩浆岩Sr-Nd同位素演化(图4)与造山带尺度的CMF模式(图6)吻合,表明胶东矿集区形成于中生代的陆陆碰撞过程及其后续的地质作用中。

举例来说,玲珑金矿55号脉赋存于切穿玲珑花岗岩的断层中,成矿早阶段的石英脉遭受了挤压-剪切而破碎,并发育剪切裂隙(图7A-C);中阶段硫化物呈网脉状贯入早阶段石英脉裂隙,或呈团块状集合体充填于伸展膨大的裂隙带(图7A-D);晚阶段碳酸盐细脉切穿早、中阶段矿物组合(图7D)。成矿后,未变形的煌斑岩等暗色岩脉沿多种断裂、裂隙侵入(图7E-F),并显示冷凝反应边(图7E)。以上地质特征和切割、变形关系充分表明:(1)玲珑矿床形成于由早阶段挤压变形,经中阶段剪切变形,向晚阶段伸展演化的构造体制,符合造山型金矿的特征;(2)成矿前发育壳源花岗岩,成矿后发育幔源暗色岩脉(图7E-F;图1),成矿时间相当于造山带尺度的CMF模式的中阶段(图6B2)。

## 5.4 郯庐成矿带与陆陆碰撞的关系

在华南与华北板块的碰撞过程中,郯庐断裂带左行走滑,并具有转换断层的特点,因此郯庐成矿带的成岩成矿时间与胶东矿集区相同(图2,表4)。由于郯庐断裂带切割深度超过莫霍面,可作为岩石圈不同深度岩浆和流体向上迁移的通道,因此中生代岩浆作用和成矿作用复杂。在郯庐成矿带,燕山期高钾钙碱性的酸性花岗岩、中基性的辉石闪长岩和橄榄安粗质的火山岩均有发育,矽卡岩型铜铁金矿床、斑岩型-爆破角砾岩型-浅成低温热液型铜金矿床、脉状金矿床等均有发现,山东沂南金场铜金矿床中还发现了自然铍等自然元素(赵一鸣等,1992),岩石和矿床的 $I_{Sr}$ 值出现 $< 0.705$ ,  $0.705 \sim 0.710$ 之间和 $> 0.710$ 等3种情况(图3),表明成岩成矿物质既有壳源,也有幔源,还有壳幔混源。总之,郯庐成矿带伴随中生代陆陆碰撞作用而形成,较大的切割深度和“转换断层”的性质导致其成岩成矿作用比胶东矿集区复杂,后者成岩成矿较为单一,分别以形成花岗岩类和金矿床为特征。

郯庐断裂带作为古板块边界,其成岩成矿动力学机制和特点,尤其是岩浆来源,与青岛-荣城断裂带(如崂山花岗岩)、长乐-南澳断裂带和哀牢山-金沙江断裂带(Tu *et al.*, 1982)等板块边界断裂带相似,某种程度上反映了板块边界的成岩成矿特征。

## 6 结论

胶东矿集区大规模成矿作用发生在100~140Ma,以110~130Ma为高峰,大规模成矿的时间略微滞后于大规模花岗岩浆形成时间。大规模成矿作用发生在华南与华北古板块碰撞过程的挤压向伸展转变期的减压增温体制,成岩成矿物质以壳源为主,符合CMF模式。郯庐成矿带也伴随中生代的陆陆碰撞作用发育,成岩成矿作用和物质来源较为复杂,兼有幔源、壳源、壳幔混源的特征。

致谢 涂光炽院士、胡受奚教授和范宏瑞博士、杨进辉博士、孙景贵博士提出了宝贵的修改建议,特此致谢。

## References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 - 626
- Chappell B W, White A J R. 1984. I-type and S-type granite of Lachlan folded belt in the southeastern Australia. In: Xu K Q, Tu G Z (eds.). *Geology of Granites and Their Metallogenic Relations*. Nanjing: Jiangsu Sci. Tech. Press, 58 - 68 (in Chinese)
- Chen K R, Pan Y W, Chen X M. 1993. Characteristics and genesis of the Qibaoshan Early Cretaceous volcanic crater and volcanic-intrusive complex, Wulian county, Shandong province. *J. Nanjing Univ.*

- (Natural Sci.), 29:92-103. (in Chinese with English abstract)
- Chen Y J. 1986. Types and examples of far-field impacts of plate convergence. In: Graduate's Contributions to 65<sup>th</sup> Anniversary of Geology Department, Nanjing University. Nanjing, 12-15 (in Chinese)
- Chen Y J. 1994. Greenstone-type gold deposits in China. In: Progress in Studies of Gold Deposits in China, Vol. 1, No. 1. Beijing: Seismological Press, 4-29 (in Chinese)
- Chen Y J. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study on ore-forming fluid of gold deposits in the eastern Qinling Mountains, China. Prog. Nat. Sci., 8: 385-393
- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K *et al.* 2004. The geodynamic setting of large-scale metallogenesis in mainland China, exemplified by skarn type gold deposits. Earth Science Frontiers, 11: 57-83 (in Chinese with English abstract)
- Chen Y J, Fu S G. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Seismological Press, 234 (in Chinese)
- Chen Y J, Guo G J, Li X. 1998. Metallogenic geodynamic background of gold deposits in granite-greenstone terrains of North China craton. Sci. China Ser. D, 41:113-120
- Chen Y J, Li C, Zhang J *et al.* 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. Sci. China Ser. D, 43 (Supp.), 82-94
- Chen Y J, Sui Y H, Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tielping silver deposit, East Qinling Orogen. Acta Petrologica Sinica, 19: 551-568 (in Chinese with English abstract)
- Cun G, Chen J M (eds.). 1992. Atlas of Gold Deposits in China. Langfang: Institute of Gold Geology, Metallurgical Ministry of China, 62 (in Chinese)
- Deng J F, Mo X X, Zhao H L *et al.* 1999. Yanshanian magma-tectonic-metallogenic belt in east China of circum-Pacific domain (1); igneous rocks and orogenic process. J. China Univ. Geosci., 10: 21-24
- Deng J F, Zhao H L, Lai S C. 1994. Generation of muscovite / two-mica granite and intracontinental subduction. J. Earth Sci., 19: 139-147 (in Chinese with English abstract)
- Dong F X, Li Z J, Chen B L. 1995. Structural Control and Exploration Guide of Gold Deposits in Dagongshan-Rongdu Area, Wuhe County, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 176 (in Chinese)
- Du L T. 1996. Geochemistry of HACONS. Beijing: Science Press, 552 (in Chinese)
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H *et al.* 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. Miner. Dep., 38: 739-750
- Goldfarb R J, Groves D I, Cardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. Ore Geol. Rev., 18:1-75
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M *et al.* 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geol. Rev., 13: 7-27
- Gu L X, Hu S X, Chu Q, *et al.* 1999. Pre-collision granites and post-collision intrusive assemblage of the Kelameili-Harlik orogenic belt. Acta Geol. Sin., 73: 316-329
- Gu L X, Hu S X, Yu C S *et al.* 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan; their tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 16: 305-316 (in Chinese with English abstract)
- Gu L X, Hu S X, Yu C S *et al.* 2001. Intrusive activities during compression-extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen. Acta Petrologica Sinica, 17: 187-198 (in Chinese with English abstract)
- Gui X T, Cheng Z L, Yu F J *et al.* 1992. Isotopic geochemistry of Laoshan miarolitic alkaline granite. In: Tu G Z, Xu K Q, Qiu Y Z (eds.). Petrogenesis and Mineralization of Granitoids. Beijing: Science Press, 383-390
- Hacker B R, Wang X, Eide E A *et al.* 1996. The Qinling-Dabie ultra-high-pressure collisional orogen. In: Yin A, Harrison T M (eds.). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 345-370
- Hu S X, Guo J C. 1989. 1850 ± 150 Ma B. P. — An important period of transition in the evolution of the earth. Geol. Rev., 35: 556-573 (in Chinese with English abstract)
- Hu S X, Lin Q L, Chen Z M *et al.* 1988. Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between the South China and North China Plates. Nanjing: Nanjing Univ. Press, 558 (in Chinese)
- Hu S X, Sun J G, Ling H F *et al.* 2001. Genetic relationship of eclogite, lamprophyres, gold deposits and enriched mantle at the SuLu Mesozoic active continent margin. Acta Petrologica Sinica, 17: 425-435. (in Chinese with English abstract)
- Hu S X, Wang H N, Wang D Z *et al.* 1998. Geology and Geochemistry of Gold Deposits in East China. Beijing: Science Press, 343 (in Chinese)
- Hu S X, Zhao Y Y, Xu J F *et al.* 1997. Geology of Gold Deposits in North China Platform. Beijing: Science Press, Beijing, 220 (in Chinese)
- Hu S X. 1991. Skarn deposits in eastern China. In: Skarns - Their Genesis and Metallogeny. S A Greece; Theophrastus Publications, 423-433
- Ji H Z, Zhao Y Y, Lu B *et al.* 1992. Study of relationship between lamprophyres and gold deposits. Geology and Prospecting, (2):15-18 (in Chinese with English abstract)
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D *et al.* 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. Sci. China Ser. D, 43(supp): 1-68
- Li C Y, Liu Y W, Zhu B Q *et al.* 1978. Tectonic evolution of Qinling and Qilian Mountains. In: Contributions to 26<sup>th</sup> International Geological Congress (1). Beijing: Geological Publishing House, 174-187 (in Chinese)
- Li C, Chen Y J, He S D. 2001. East Qinling-Dabieshan lithosphere delaminating age, mechanism and direction (petrological evidences and stipulation. Chinese J. Geochem., 20: 59-72
- Li H K, Li H M, Lu S N. 1998. U-Pb dating for single-grain zircons of granitoids in the Zhao-Ye gold belt, Shandong and its implication. Prog. Precambrian Res., 21:11-18 (in Chinese)
- Li H M, Mao 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. Mineral Deposit, 22: 72-77 (in Chinese with English abstract)
- Li H Q, Liu J Q, Wei L. 1993. Geochronology of Fluid Inclusions of Hydrothermal Deposits and Its Geological Applications. Beijing: Geological Publishing House, 126 (in Chinese)
- Li S J. 1998. Division and correlation of Jurassic-Cretaceous strata in Shandong province. J. China Univ. Petroleum, 22: 37-43 (in Chinese with English abstract)
- Li S, Chen Y, Cong B *et al.* 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites; timing and processes. Chem. Geol., 109: 70-89
- Lin J Q, Tan D J, Yu X F *et al.* 1997. Metallogeny of the Guilaizhuang Gold Deposit, West Shandong. Jinan: Shandong Sci. Tech. Press,



- 160 (in Chinese)
- Liou J G, Zhang R Y, Wang X *et al.* 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In: Yin A, Harrison T M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 300 - 344
- Liu J M, Chen B L, Meng X G *et al.* 1998. The geological-geochemical characteristics and minerogenesis of the Dagongshan gold deposit, Wuhe County, Anhui Province. *Mineral Deposit*, 17(supp): 303 - 306 (in Chinese)
- Liu L D, Chen G H, Liu Q T *et al.* 1998. The characteristics of the Yantai gold deposit and its implications. *Mineral Deposit*, 17(supp): 295 - 298 (in Chinese)
- Lu A H, Lu G X, Wang W Z *et al.* 1998. Continent-Continent collision and fluid mineralization in southern Wendeng. *Acta Geoscientia Sinica*, 19: 187 - 194 (in Chinese with English abstract)
- Luo W C, Wu Q S. 1987. Timing metallogenesis of gold deposit in Jiaodong area using alteration minerals. *Chin. Sci. Bull.*, 32: 1245 - 1248 (in Chinese)
- Ma L F (ed.). 2002. *Geological Atlas of China*. Beijing: Geological Publishing House, 348 (in Chinese)
- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H *et al.* 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas (Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits). *Sci. China Ser. D*, 46: 838 - 851
- Niu S Y, Sun A Q, Shao Z G *et al.* 2001. The Multiple Evolution of Mantle Plume and Its Mineralization. Beijing: Seismological Press, 225 (in Chinese)
- Pirajno F, Bagas L. 2002. Gold and silver metallogeny of the South China Fold Belt: a consequence of multiple mineralizing events? *Ore Geol. Rev.*, 20: 109 - 126
- Pirajno F. 2000. *Ore Deposits and Mantle Plumes*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 556
- Qiu J S, Lo C H, McInnes B I A *et al.* 2000. Potash-rich magmatism and associated gold-copper mineralization in the Yishu deep fault zone and its vicinity, Eastern China. *Resource Geol.*, 50: 269 - 280
- Qiu J S, Wang D Z, Ren Q J. 1996. The geological-geochemical characteristics and minerogenesis of the Jinchang skarn-type Au-Cu deposit, Yanan County, Shandong Province. *Mineral Deposit*, 15: 330 - 340 (in Chinese with English abstract)
- Qiu J S, Wang Y H, Wang D Z *et al.* 1998. Metallogenic regularities and constraints of gold (copper) deposits associated with Mesozoic volcanism-subvolcanism in the central-southern area of the Tan-Lu fault belts. *Mineral Deposit*, 17 (Supp): 119 - 122 (in Chinese)
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J *et al.* 2002. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Miner. Dep.*, 37: 283 - 305
- Sengor A M C, Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia: fragments of synthesis. In: Yin A, Harrison T M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 486 - 640
- Shen B F, Peng X L, Luo H *et al.* 1994. Archean greenstone belts and related ore deposits in the North China Platform. In: Zhang YX, Liu LD (eds.). *Precambrian Ore Deposits and Tectonics in China*. Beijing: Seismological Press, 1 - 39 (in Chinese)
- Sillitoe R H. 1989. Gold deposits in western Pacific island arcs: the magmatic connection. *Econ. Geol.*, Monograph 6: 274 - 291
- Sun F Y, Shi Z L, Feng B Z. 1995. *The Geology of Gold Deposits in Jiaodong and the Petrogenesis and Metallogenesis of Mantle-derived C-H-O Fluids*. Changchun: People's Publishing House of Jilin, 170 (in Chinese)
- Sun J G, Hu S X, Yao F L *et al.* 2000. Genetic model for gold deposits in Jiaodong area. *Mineral Deposit*, 19: 26 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Sun W D, Li S G, Chen Y D, Li Y J. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *J. Geol.*, 110: 457 - 468
- Tu G Z, Ding K. 1986. The Qinling-Central Asia Sb-Hg belt - the third Sb-Hg belt of global significance. In: *Collections of Geochemistry*. Beijing: Science Press, 8 - 13 (in Chinese)
- Tu G Z, Zhang Y Q, Zhao Z H. 1982. Preliminary studies on two alkali-rich intrusive belts in South China. In: Xu K Q, Tu G Z (eds.). *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Beijing: Science Press, 33 - 54
- Tu G Z, Zhao Z H. 1983. On the diversity of minerogenetic processes of the Yanshanian period. *Geol. Rev.*, 29(1): 57 - 65 (in Chinese with English abstract)
- Tu G Z, Zhao Z H. 1992. Granitoids as a mobilizing agency in ore formation. In: Tu G Z, Xu K Q, Qiu Y Z (eds.). *Petrogenesis and Mineralization of Granitoids*. Beijing: Science Press, 713 - 720
- Wang D Z, Ren Q J, Qiu J S. 1998. Geology and geochemistry of gold deposits associated with Mesozoic continental volcanism in East China. In: Hu S X, Wang H N, Wang D Z, Zhang J R (eds.). *Geology and Geochemistry of Gold Deposits in East China*. Beijing: Science Press, 267 - 338 (in Chinese)
- Wang D Z, Zhou X M. 2002. Origin of Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes in Southeast China and Crustal Evolution. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang H N, Xu K Q, Chen Y A *et al.* 1992. The middle Proterozoic Linglong gneissic granite and the geological and geochemical evidence of its late transformation effects. In: Tu G Z, Xu K Q, Qiu Y Z (eds.). *Petrogenesis and Mineralization of Granitoids*. Beijing: Science Press, 464 - 473
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J *et al.* 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geol. Rev.*, 13: 275 - 291
- Wang Y W. 1996. Chronology of China's gold deposits. In: Zhang Y X, Cun G, Liu L D (eds.). *Gold Deposits in China: Advances and Considerations*. Beijing: Geological Publishing House, 137 - 153 (in Chinese)
- Xu G Z, Ying H L, Zhou R *et al.* 2002. Genesis and dynamic conditions of Hexi gold deposit in Northwest Jiaodong area. *Mineral Deposit*, 21: 246 - 254 (in Chinese)
- Xu J F. 1989. Study of granitoids related to gold deposits in Jiaodong block. *Shandong*, (2): 1 - 122 (in Chinese)
- Xu J W, Zhu G, Tong W X *et al.* 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system; a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics* 134: 273 - 310
- Xu K Q, Sun N, Wang D Z *et al.* 1982. Petrogenesis of the granitoids and their metallogenetic relations in South China. In: Xu K Q, Tu G Z (eds.). *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Beijing: Science Press, 1 - 31
- Xu Z Q, Lu Y L, Tang Y Q *et al.* 1986. Deformation characteristics and tectonic evolution of the eastern Qinling orogenic belt. *Acta Geol. Sin.*, 60: 237 - 247 (in Chinese)
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning. *Ore Geol. Rev.*, 23: 123 - 152
- Yang J H, Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits.

- Geology, 29: 711 - 714
- Yang J H, Zhou X H. 2000. The Rb-Sr isochron of ore and pyrite sub-samples from Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China and their geological significance. Chinese Sci. Bull., 45: 2272 - 2276
- Yang M Z. 1998. Geochemistry of Alteration Zones Associated with Gold Deposits-Exemplified by Jiaodong Metallogenic Province. Beijing: Geological Publishing House, Beijing (in Chinese)
- Yin A, Nie S Y. 1996. A Phanerozoic palaeospastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin A, Harrison T M (eds.). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 442 - 485
- Ying H L, Liu B G. 2002.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of gold-bearing quartz veins in Fengyang and Zhangbaling areas, Anhui Province and its geological significance. Mineral Deposit, 21: 240 - 245 (in Chinese with English abstract)
- Yuan X C. 1996. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model. Sci. China Ser. D, 39: 235 - 243
- Zhai J P, Hu K, Lu J J. 1996. D, O and Sr isotope study of ore-fluids and lamprophyres of the Rushan gold deposit. Mineral Deposit, 15: 358 - 364 (in Chinese with English abstract)
- Zhai J P, Xu G P, Hu K. 1998. Characteristics of isotopes, ore-fluids and minerals of the Qixia gold deposit and their implications. Mineral Deposit, 17: 307 - 313 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Fan H R, Yang J H *et al.* 2004. Large-scale cluster of gold deposits in East Shandong; Anorogenic metallogenesis. Earth Science Frontiers, 11: 85 - 98 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Yang J H, Fan H R *et al.* 2002. A large-scale cluster of gold deposits and metallogenesis in the eastern China craton. International Geol. Rev., 44: 458 - 476
- Zhai M G, Yang J H, Liu W J. 2001. Large clusters of gold deposits and large-scale metallogenesis in the Jiaodong Peninsula, eastern China. Sci. China Ser. D, 44: 758 - 768
- Zhai Y S, Deng J, Li X B. 1999. Regional Metallogeny. Beijing: Geological Publishing House, 287 (in Chinese)
- Zhang B R, Gao S, Zhang H F. 2002. Geochemistry of Qinling Orogen. Beijing: Science Press, 187 (in Chinese)
- Zhang D Q, Xu H L, Sun G Y. 1995. Emplacement ages of the Denggezhuang gold deposit and the Kunyushan granite and their geological implications. Geol. Rev., 41: 415 - 425 (in Chinese with English abstract)
- Zhang F X, Wei K Y, Ma J Q. 1997. Geology and Exploration of Fine-grain Disseminated Gold Deposits in South Qinling Orogen. Xi'an: Northwest University Press, 190 (in Chinese)
- Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, Xiao Q H. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 855 (in Chinese)
- Zhang J, Chen Y J, Shu G M *et al.* 2002. Compositional study of minerals within the Qinlingiang granite, Southwestern Shaanxi and discussions on the related problems. Sci. China Ser. D, 45: 662 - 672
- Zhang L C, Shen Y C, Liu T B *et al.* 2002. Ar-Ar and Rb-Sr isochron ages and metallogenic time of gold deposits at the northern margin of Jiao-Lai basin, Shandong Province. Sci. China Ser. D, 32: 727 - 734 (in Chinese)
- Zhang L G. 1989. Petrogenic and Minerogenic Theories and Prospecting. Beijing: Beijing Univ. Tech. Press, 200 (in Chinese with English abstract)
- Zhang X O, Cawood P A, Wilde S A *et al.* 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. Miner. Dep., 38: 141 - 153
- Zhang Z H, Zhang J X, Ye S Z. 1994. Isotope Ages of Gold deposits in Jiaodong. Beijing: Seismological Press, 56 (in Chinese)
- Zhang Z J, Chen Y J, Chen H Y *et al.* 2003. The petrochemical characteristics of the Hercynian granitoids in Tianshan and its geodynamic implications. J. Miner. Petrol., 23(1): 15 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A. 2002. Reconstruction of a pre-Rodinia supercontinent: new advances and perspectives. Chinese Sci. Bull., 47: 1585 - 1588
- Zhao Y M, Lin W W, Zhang D Q *et al.* 1992. Metasomatic Mineralization and Its Prospecting Significance. Beijing: Beijing Sci. Tech. Press, 156 (in Chinese)
- Zhao Y M, Zhang Y N, Bi C S. 1999. Geology of gold-bearing skarn deposits in the middle and lower Yangtze River Valley and adjacent regions. Ore Geol. Rev., 14: 227 - 249
- Zhou T H, Goldfarb R J, Phillips G N. 2002. Tectonics and distribution of gold deposits in China - an overview. Miner. Dep., 37: 249 - 282
- Zhou T H, Lu G X. 2000. Tectonics, granitoids and Mesozoic gold deposits in East Shandong, China. Ore Geol. Rev., 16: 71 - 90
- Zhu D G, Zhang Z J. 1998. Geological characteristics of the Dazhuangzi gold deposit, Jiandong. Bull. Miner. Petrol. Geochem., 17: 9 - 12 (in Chinese with English abstract)
- Zhu R X, Yang Z Y, Wu H N *et al.* 1998. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic. Sci. China Ser. D, 41(supp.): 1 - 19

#### 附中文参考文献

- 陈克荣, 潘永伟, 陈小明. 1993. 山东五莲七宝山早白垩世破火山口与火山-侵入杂岩特征和成因. 南京大学学报(自然科学), 29: 92 - 103
- 陈衍景. 1986. 板块敛合远距离效应的类型和实例. 南京大学地质系建系 60 周年研究生论文集, 12 - 15
- 陈衍景. 1994. 中国绿岩带型金矿. 见: 中国金矿研究新进展第 1 卷上册. 北京: 地震出版社, 4 - 29
- 陈衍景, 陈华勇, Zaw K 等. 2004. 中国陆区大规模成矿的地球动力学: 以砭卡岩型金矿为例. 地学前缘, 11: 57 - 83
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF 模式的排他性证据和造山型银矿实例: 铁炉坪银矿同位素地球化学. 岩石学报, 19: 551 - 568
- 寸珪, 陈纪明. 1992. 中华人民共和国黄金矿产图集. 廊坊: 国家黄金管理局黄金地质研究所, 65
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. 地球科学, 19: 139 - 147
- 董法先, 李中坚, 陈柏林. 1995. 安徽五河县大巩山-荣渡地区金矿控矿构造和找矿方向. 地质出版社, 北京, 176
- 杜乐天. 1996. 烃碱流体地球化学. 科学出版社, 北京, 552
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水等. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. 岩石学报, 16: 305 - 316
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水等. 2001. 东天山博格达造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动. 岩石学报, 17: 187 - 198
- 胡受奚, 郭继春. 1989. 距今 1850 ± 150 Ma——地球发展演化的重要转折时期. 地质论评, 35: 556 - 573

- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭等. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿. 南京大学出版社, 南京, 558
- 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. 北京: 科学出版社, 343
- 胡受奚, 赵懿英, 徐金方等. 1997. 华北地台金矿地质. 北京: 科学出版社, 220
- 胡受奚, 孙景贵, 凌宏飞等. 2001. 中生代苏-鲁活动大陆边缘榴辉岩、煌斑岩、金矿及富集地幔间的成因联系. 岩石学报, 17: 425-435
- 季海章, 赵懿英, 卢冰等. 1992. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探. 地质与勘探, (2), 15-18
- 李春昱, 刘仰文, 朱宝清等. 1978. 秦岭及祁连山的构造发展史. 见: 国际交流地质学术论文集(1). 北京: 地质出版社, 174-187
- 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. 矿床地质, 22: 72-77
- 李华芹, 刘家齐, 魏琳. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 北京: 地质出版社, 126
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 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: 11-18
- 李守军. 1998. 山东侏罗纪-白垩纪地层划分对比. 石油大学学报, 22: 37-43
- 林景仔, 谭东娟, 于学峰等. 1997. 鲁西归来庄金矿成因. 济南: 山东科学技术出版社, 160
- 刘建民, 陈柏林, 孟宪刚等. 1998. 安徽五河大巩山金矿床地质地球化学特征及矿床成因. 矿床地质, 17(增刊): 303-306
- 刘连登, 陈国华, 刘青廷等. 1998. 烟台金矿本质特征描述及其意义. 矿床地质, 17(增刊): 295-298
- 鲁安怀, 吕古贤, 王文正等. 1998. 文登南部陆陆碰撞与流体成矿. 地球学报, 19: 187-194
- 骆万成, 伍勤生. 1987. 应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄. 科学通报, 32: 1245-1248
- 马丽芳(主编). 2002. 中国地质图集. 北京: 地质出版社, 348
- 牛树银, 孙爱群, 邵振国等. 2001. 地幔热柱多级演化及其成矿作用. 地震出版社, 北京, 225
- 邱检生, 王德滋, 任启江. 1996. 山东沂南金场砂卡岩型金铜矿床地质地球化学特征及矿床成因. 矿床地质, 15: 330-340
- 邱检生, 王玉华, 王德滋等. 1998. 郯庐中南段与中生代火山-次火山作用有关金(铜)矿床的成矿控制因素及其成矿规律. 矿床地质, 17(增刊): 119-122
- 沈保丰, 彭晓亮, 骆辉等. 1994. 华北陆台太古宙绿岩带及矿床. 刊: 张贻侠, 刘连登(主编), 中国前寒武纪矿床和构造. 北京: 地震出版社, 1-39
- 孙丰月, 石准立, 冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿. 长春: 吉林人民出版社, 170
- 孙景贵, 胡受奚, 姚凤良等. 2000. 初论胶东地区金矿成矿模式. 矿床地质, 19: 26-36
- 涂光炽, 丁抗. 1986. 全球第三条汞锑矿带-秦岭-中亚西亚汞锑成矿带. 见: 地球化学文集. 北京: 科学出版社, 8-13
- 涂光炽, 赵振华. 1983. 燕山期成矿作用的多样性. 地质论评, 29(1): 57-65
- 王德滋, 任启江, 邱检生. 1998. 中国东部与中生代陆相火山作用及其有关金成矿的地质学和地球化学. 见: 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 张景荣(主编). 中国东部金矿地质学及地球化学. 北京: 科学出版社, 267-338
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社
- 王义文. 1996. 中国金矿床成矿时代. 见: 张贻侠, 寸珪, 刘连登(主编). 中国金矿床进展与思考. 北京: 地质出版社, 137-153
- 徐贵忠, 应汉龙, 周瑞等. 2002. 论胶西北河西金矿床成因及其动力学条件. 矿床地质, 21: 246-254
- 徐金方. 1989. 胶东地块与金矿有关的花岗岩类研究. 山东地质, (2): 1-122
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆等. 1986. 东秦岭造山带的变形特征及其构造演化. 地质学报, 60: 237-247
- 杨敏之. 1998. 金矿床围岩蚀变带地球化学-以胶东金矿床为例. 北京: 地质出版社
- 应汉龙, 刘秉光. 2002. 安徽凤阳-张八岭地区含金石英脉的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义. 矿床地质, 21: 240-245
- 翟建平, 胡凯, 陆建军. 1996. 乳山金矿煌斑岩及流体和氢, 氧, 锶同位素研究. 矿床地质, 15: 358-364
- 翟建平, 徐光平, 胡凯. 1998. 栖霞金矿矿物, 流体和同位素特征及意义. 矿床地质, 17: 307-313
- 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. 地学前缘, 11(1): 85-98
- 翟裕生, 邓军, 李晓波. 1999. 区域成矿学. 北京: 地质出版社, 287
- 张本仁, 高山, 张宏飞. 2002. 秦岭造山带区域地球化学. 北京: 科学出版社, 北京, 187
- 张德全, 徐洪林, 孙桂英. 1995. 山东邓格庄金矿与崑崙山花岗岩定位时代及其地质意义. 地质论评, 41: 415-425
- 张复新, 魏宽义, 马建秦. 1997. 南秦岭微细浸染型金矿床地质和找矿. 西安: 西北大学出版社, 190
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 855
- 张理刚. 1989. 成岩成矿理论与勘探. 北京: 北京科技大学出版社, 200
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵等. 2002. 山东胶莱盆地北缘金矿 Ar-Ar 法和 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代. 中国科学 D 辑, 32: 727-734
- 张增杰, 陈衍景, 陈华勇等. 2003. 天山海西期不同类型花岗岩类岩石化学特征及其地球动力学意义. 矿物岩石, 23(1): 15-24
- 张振海, 张景鑫, 叶素芝. 1994. 胶东金矿同位素年龄的厘定. 北京: 地震出版社, 56
- 赵一鸣, 林文蔚, 张德全等. 1992. 交代成矿作用及其找矿意义. 北京: 北京科学技术出版社, 156
- 朱大岗, 张振江. 1998. 胶东大庄子金矿地质特征. 矿物岩石地球化学通报, 17: 9-12