

夏甸金矿床主、微量元素特征及其地质意义

于 昆¹, 刘国生¹, 陈皓龙¹, 周庆卫¹, 闵祥吉²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 中国冶金地质总局 山东正元地质勘查院, 济南 250101)

摘 要: 夏甸金矿是胶东地区典型的蚀变岩型金矿床, 该矿床沿走向 NNE、倾向 SE 的招平断裂带展布, 控矿断裂上盘主要为胶东群变质岩, 下盘为中粗粒二长花岗岩, 矿体主要产于断裂带下盘的黄铁绢英岩中。对取自夏甸金矿井下的岩和矿石进行了主、微量元素地球化学特征分析, 夏甸金矿床岩石具有 LREE 及 LILE 富集、HREE 及 HFSE 亏损、壳幔混合的特征, 且黄铁绢英岩 Eu 负异常明显。从岩石构造环境判别图解可以看出, 断裂带下盘岩体是在古元古代挤压造山环境下或由挤压向伸展转化时期形成。结合文献综合对比分析可知, 夏甸金矿床可能是早白垩世华北克拉通伸展背景下形成的产物, 作为郯庐断裂带的次级断裂——招平断裂在该时期发生伸展活动, 不仅为含矿热液的上升提供通道, 而且为金矿床的形成提供有利条件。

关键词: 夏甸金矿; 微量元素; 招平断裂; 华北克拉通; 壳幔混合

中图分类号: P611; P618.51

文献标志码: A

Major and trace elements characteristics of Xiadian gold deposit and its implications

YU Kun¹, LIU Guo-sheng¹, CHEN Hao-long¹, ZHOU Qing-wei¹, MIN Xiang-ji²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Shandong Zhengyuan Geological Engineering Survey, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250101, China)

Abstract: Xiadian gold deposit in Eastern Shandong Province is a characteristic alteration-rock type gold deposit along the Zhaoping fault zone which strike in NNE and dip in SE. The hanging wall of the ore-controlling fault is Jiaodong rock group and the footwall is medium- and coarse-grained monzogranite. Ore bodies formed mainly in the fault's footwall containing pyrite-beresite. The major and trace elements of the rocks were investigated. The results show that they are characterized by enrichment of LREE and LILE, depletion of HREE and HFSE, crust-mantle mixing, and obvious Eu negative anomaly. The tectonic discrimination diagrams show that the batholiths in the footwall formed in the compressive orogenic background or in the stage when the compressive orogenic environment transformed into extensional environment. Based on the research data of forefathers, the Xiadian gold deposit maybe formed in the extensional environment of the North China craton in early Cretaceous. Zhaoping fault which is the secondary fault of Tan-lu fault belts was in the stretch-faulted environment during this period. It provided not only the passage of ore-bearing hydrothermal solution but also the favorable conditions of the gold deposit formation.

Key Words: Xiadian gold deposit; trace element; Zhaoping fault; North China craton; crust-mantle mixing

胶东地区是我国最重要的金矿集中区以及黄金产地, 焦家式破碎带蚀变岩型金矿及玲珑式石英脉型金矿闻名海内外, 其已经探明的金矿储量约占全国 1/4。从太古代到新生代, 胶东地区的岩浆活动较为频繁,

其中尤以燕山期岩浆活动最为剧烈, 既发育有火山岩, 也赋存有侵入岩(包括浅成、超浅成侵入岩及深成侵入岩)。在漫长的岩浆演化过程中, 胶东地区的构造活动亦十分活跃, 其中最主要的为扬子克拉通与华北克拉

通的碰撞造山作用和古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲及其相关地质作用^[1]。由于岩浆演化及构造活动叠加的多期性和复杂性,胶东金矿区一直备受国内外地质学者的关注。然而,该区花岗岩形成时代、金矿成矿时间、成矿物质来源等问题尚存在争议。

随着地球化学测试手段的不断发展及精度的日益提高,许多学者对胶东地区富含金矿的岩石做了大量测试及研究,得到许多有意义的数据。根据同位素年代学结果,玲珑岩体形成时代为 150~160 Ma^[2-4];郭家岭岩体年龄主要集中在 120~130 Ma^[2, 5],表明这些岩体形成于晚侏罗世至早白垩世。对于金矿成矿时间,有些学者^[6-7]认为成矿时期为前寒武纪,属于变质热液成因。大多数学者^[8-11]认为是在燕山期成矿,成矿发生在 130~110 Ma 之间。

成矿物质来源目前存在较大的争议,但绝大多数学者都认识到成矿物质来源的复杂性及多元性,主要观点有主张壳源^[12]或花岗绿岩地体和孔达岩系来源^[11, 13]、幔源^[14-15]、壳幔混合作用^[16-18],也有部分学者^[19-20]认为煌斑岩在金矿化中也提供了部分成矿流体。

而位于该矿集区招平断裂带上的夏甸金矿床,属于蚀变岩型金矿床。臧维生等^[21]通过对比不同阶段黄铁矿特征,建立找矿标型,肯定了矿体的深部远景,但未做进一步研究工作。穆太升等^[22]和 DENG 等^[23]通过对夏甸金矿石英中流体包裹体和矿石微量元素研究,认为含金流体为幔源—岩浆和变质的复合成因,提出复合含金流体主动就位机制。徐庆鸿等^[24]通过对

夏甸金矿组分特征研究,揭示夏甸金矿床中流体发生了不同程度的壳幔混合,其成矿作用与胶东群变质岩和深源中—基性脉岩关系密切。但也有学者^[25]认为其成矿流体主要来源于大气降水,并通过对比其他地区角闪石中金的含量,认为胶东群变质岩与成矿物质来源具有相关联系。李楠等^[26]通过对夏甸金矿床围岩、蚀变岩岩石学及地球化学的研究指出,蚀变岩稀土元素轻重分异相对原岩更加明显,具有较高的 Si、Al、Fe 等及明显的 Eu 异常。以上研究表明,研究者虽然在夏甸成矿物质来源方面做了一定的研究工作,但对其具体成因,尤其与构造之间的关系缺乏系统深入的分析,需要做进一步的研究工作。综上所述,本文作者选取夏甸金矿井下围岩及矿石为研究对象,对其进行主量元素、稀土元素和微量元素测试分析,深入剖析岩石的地球化学特征,并结合区内控矿构造特征,对金矿的成因进行了探讨,为进一步研究胶东地区金矿床的形成提供丰富的信息。

1 地质背景及样品特征

1.1 地质背景

夏甸金矿矿区位于华北板块东南缘胶北隆起带,西侧为沂沭深大断裂,北部为栖霞复背斜,南接胶莱盆地(见图 1)。

区内出露地层较为简单,主要为太古代的胶东群

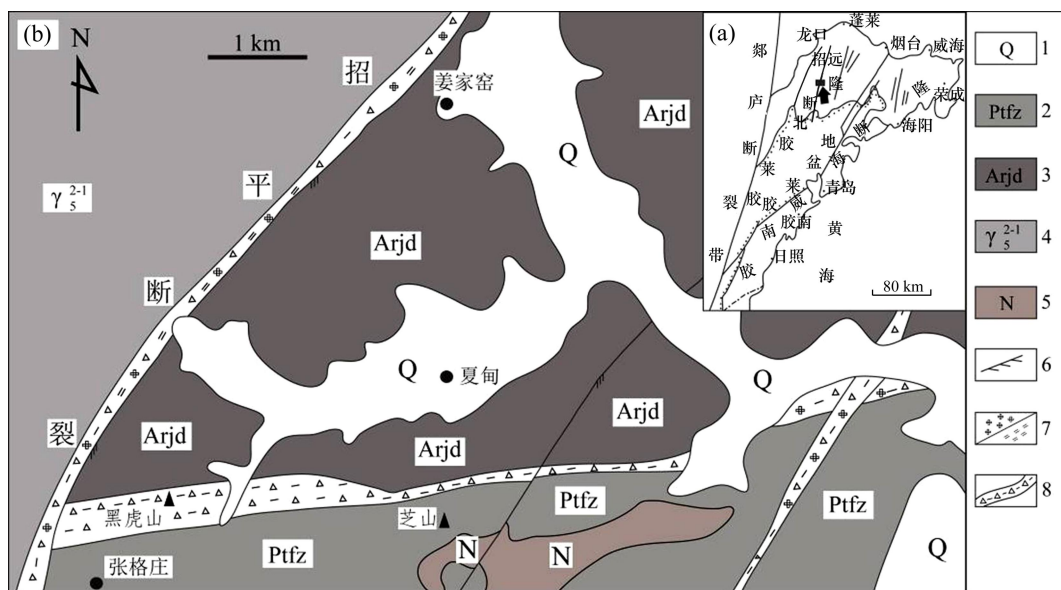


图 1 夏甸金矿大地构造位置^[27]及矿区地质图

1—第四系; 2—粉子山群; 3—胶东群; 4—玲珑型花岗岩; 5—基性岩; 6—压扭性断层; 7—硅化及绢英岩化; 8—构造破碎带
Fig. 1 Tectonic location of Xiadian Gold Deposit (a) and its geological sketch (b)
1—Quaternary system; 2—Fenzishan group; 3—Jiaodong group; 4—Linglong granite; 5—Basic rock; 6—Compressive shear faults; 7—Silicification and sericitic alteration; 8—Altered fracture zone

及元古代的粉子山群。胶东群的主要岩性为一套黑云变粒岩、斜长角闪岩、角闪黑云变粒岩夹磁铁石英岩等的岩石组合, 而粉子山群主要由变粒岩、片岩、浅粒岩、长石石英岩等构成的一套复杂的岩石组合。区内岩浆岩广泛发育, 主要为玲珑中粗粒二长花岗岩及黑云母花岗岩; 区内脉岩较为发育, 主要为闪长玢岩及煌斑岩。

区内断裂构造主要, 招平断裂带中段芝下—姜家窑断裂贯穿矿区, 断裂总体走向为 45° , 倾向 SE, 倾角 $35^\circ\sim 50^\circ$, 断裂上盘为胶东群变质岩, 下盘为郭家店岩体, 岩性为中粗粒二长花岗岩。该断裂走向及倾向均呈舒缓波状, 为压扭性构造, 带内发育碎裂岩、糜棱岩、断层泥等^[28], 为本区主要控矿断裂。

夏甸金矿床为典型的蚀变岩型金矿床, 受构造控制十分明显。矿体主要赋存于断裂带下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩及蚀变岩带中, 蚀变类型主要有钾长石化、碳酸盐化、绢云母化、硅化及黄铁矿化, 其中与金矿化密切的为绢云母化、硅化及黄铁矿化。矿体形态复杂, 主要呈脉状、透镜状、似层状等, 具有分支复合、尖灭再现的特征^[29]。

1.2 样品特征

本样品采自夏甸金矿床井下(招平断裂带下盘蚀变带内), 按照距离招平断裂带由近及远的顺序, 共采集 4 件样品(依次为 XD1-1、XD1-3、XD2-1、XD2-5,

其中 XD1-3 采自矿体内), 均十分新鲜, 未受风化影响。通过野外观测及室内显微镜岩石学鉴定(见图 2), 各样品均受到不同程度的蚀变, 其中 XD1-1 为花岗闪长岩, XD1-3 为黄铁绢英岩, XD2-1 绢云母化碎裂岩, XD2-5 为钾长花岗岩。XD1-1(见图 2(a))主要矿物为石英(含量约为 50%)及斜长石(含量约为 30%), 含少量云母及其他矿物, 发育一条宽约 0.5 mm 的方解石脉, 岩石发生绢云母化及碳酸盐化; XD1-3(见图 2(b)和(c))主要矿物为石英(含量约为 35%)及斜长石(含量约为 40%), 含少量云母及其它矿物, 副矿物为黄铁矿, 发生绢云母化、硅化及黄铁矿化; XD2-1(见图 2(d))主要矿物为石英(含量约为 30%)及微斜长石(含量约为 50%), 副矿物为黄铁矿, 发生绢云母化及钾长石化。

2 分析方法

本次样品的主量元素、微量元素分析是在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行的。主量元素分析使用的分析仪器为日本理学 RIX2100 系列 X 射线荧光光谱仪(XRF), 分析精度 $\leq \pm 4\%$ 。微量元素采用 ICP-MS(Perkin Elmer 公司具动态反应池的 Elan 6100 DRC)法完成。

样品的处理首先挑选新鲜的样本, 利用岩石切片刀切除岩石表面部分并用清水冲洗干净后低温烘干,

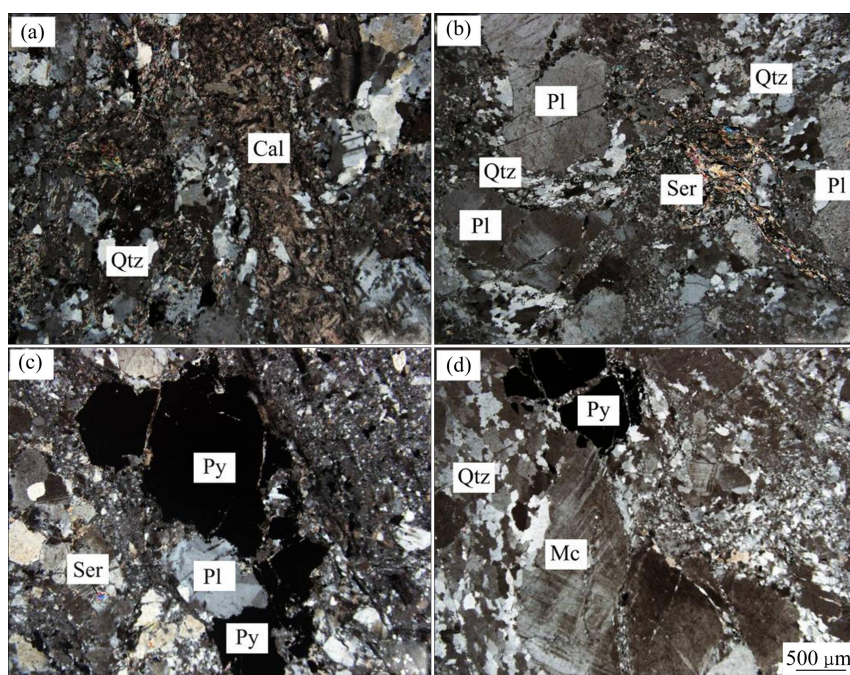


图 2 夏甸金矿床样品显微照片(+) (矿物代号, Qtz—石英; Pl—斜长石; Cal—方解石; Ser—绢云母; Mc—微斜长石; Py—黄铁矿): (a) XD1-1; (b) XD1-3; (c) XD1-3; (d) XD2-1

Fig. 2 Microstructures of the Xiadian Gold Deposit(+) (Mineral abbreviation: Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Cal—Calcite; Ser—Sericite; Mc—Microcline; Py—Pyrite): (a) XD1-1; (b) XD1-3; (c) XD1-3; (d) XD2-1

接着对挑选的样品进行粗碎、缩分。之后再在研磨机上细磨到 74 μm 以下, 在 105 ℃ 的条件下烘干 2~4 h, 最后置于无尘干燥器皿中冷却至室温后备用。

主量元素分析采用碱熔玻璃片法在 X 荧光光谱仪上测定。其中, 烧失量(LOI)和 FeO 采用标准湿法化学分析法。样本用无水硼酸锂熔融, 配以氧化剂-硝酸铵、助溶剂-氟化锂、脱模剂-溴化锂。样品按质量比 1:8 的标准配比。在温度 1150~1250 ℃ 的熔样机上熔融, 制成玻璃片后准备测试。测试仪器采用日本理学公司的 RIX2100 型光谱仪, X 射线管为对轻重元素有很好激发效应的 Rh 靶端窗管, 设定 X 射线管额定功率为 3.0 kW, 管电压 50 kV, 管电流 50 mA。测定时经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控, 并用 USGS 标准确定工作曲线。主量元素的测试精度达到 0.01%, 实验分析误差小于 5%。

测定微量元素之前首先对样品进行分解。利用

HNO₃+HF+HCl 敞开容器分析法与 HNO₃+HF 密闭容器消解法共同分解样品, 从而保证样品充分被溶解。该方法污染小, 不带入任何的金属离子, 同时 HF 和 HNO₃ 更易于纯化的特点。样品配置好后, 在 ICP-MS 上测定。该实验仪器为美国 Elan 6100 DRC 型电感耦合等离子质谱仪。样品经过 BHVO1、AVG1、GSR1 和 BIR1 国际标样监控, Ga、Rb、Zn、Co、Ni、Y、Zr、Ta、Hf 和 REE 等元素测定精度优于 5%, 极少数低浓度元素的测量精度为 5%至 10%。

3 分析结果

3.1 主量元素

夏甸金矿床侵入岩全岩主量元素分析结果见表 1, SiO₂ 含量变化于 52.86~73.63 之间。XD1-1 和 XD2-1

表 1 夏甸金矿床样品主量元素、微量及稀土元素分析结果

Table 1 Major and trace elements contents of samples of Xiadian Gold Deposit

Sample	Mass fraction/%													δ
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg [#]	
XD1-1	70.37	0.16	13.52	1.80	0.05	0.97	2.02	4.95	2.06	0.04	3.78	99.72	55.67	1.76
XD1-3	57.65	0.70	15.61	5.02	0.08	3.07	2.54	3.46	4.16	0.14	7.90	100.33	58.77	3.51
XD2-1	52.86	0.50	14.10	6.52	0.09	2.95	5.60	2.65	2.42	0.07	11.79	99.55	51.33	1.94
XD2-5	73.63	0.04	14.41	0.15	0.01	0.12	0.28	3.15	7.53	0.02	0.65	99.99	65.09	3.71
Sample	Mass fraction/10 ⁻⁶													
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	
XD1-1	6.55	1.53	5.34	31.27	10.32	2.19	7.56	8.60	7.73	15.78	1.03	60.48	267.14	
XD1-3	12.85	2.48	18.90	109.49	77.67	7.24	14.66	48.70	26.13	29.38	1.42	120.63	331.39	
XD2-1	24.45	2.13	19.82	132.77	103.17	26.16	51.24	43.19	36.70	15.87	1.07	93.56	468.22	
XD2-5	1.34	0.97	0.94	2.55	1.22	0.50	0.88	1.56	406.61	12.54	1.33	131.30	235.62	
Sample	Mass fraction/10 ⁻⁶													
	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd		
XD1-1	8.32	67.09	4.89	0.53	345.80	7.62	15.02	1.79	7.01	1.56	0.37	1.46		
XD1-3	21.52	168.64	18.10	1.25	321.68	27.23	54.91	6.30	24.39	4.84	0.63	4.15		
XD2-1	12.33	64.28	3.17	1.37	723.44	12.11	22.99	2.64	10.31	2.07	0.85	2.12		
XD2-5	3.97	43.93	3.77	0.44	1010.54	0.68	1.23	0.16	0.67	0.23	0.22	0.33		
Sample	Mass fraction/10 ⁻⁶													
	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U		
XD1-1	0.22	1.31	0.26	0.79	0.12	0.83	0.13	1.74	0.33	6.86	1.90	0.80		
XD1-3	0.60	3.47	0.68	1.95	0.30	1.92	0.30	4.17	0.96	6.94	1.76	0.92		
XD2-1	0.32	2.02	0.42	1.22	0.19	1.23	0.19	1.96	0.21	8.05	2.39	0.77		
XD2-5	0.07	0.50	0.12	0.41	0.07	0.51	0.09	1.40	0.14	30.70	0.36	0.45		
Sample	Mass fraction/10 ⁻⁶			LREE/HREE		(La/Yb) _N		δEu		δCe				
	LREE	HREE	ΣREE											
XD1-1	33.35	5.12	38.47		6.51		6.20		0.74		0.93			
XD1-3	118.27	13.37	131.64		8.85		9.57		0.42		0.96			
XD2-1	50.96	7.71	58.67		6.61		6.65		1.23		0.92			
XD2-5	3.19	2.10	5.29		1.52		0.90		2.44		0.85			

$Mg^{\#}=[n(Mg)/n(Mg+Fe)] \times 100\%$.

的里特曼指数(δ)分别为 1.76 和 1.94, 均小于 3.3, 属于钙碱性系列; XD1-3(金矿石样品)和 XD2-5 的里特曼指数(δ)分别为 3.51 和 3.71, 均大于 3.3, 而小于 9, 属于碱性系列。通过计算, 所取样品 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 的比值均大于 1, 说明夏甸金矿床采集的岩石样品均为过铝质岩石。

将夏甸全部岩石样品的主要氧化物含量(无 CO_2 、 H_2O 及烧失量)重新换算成 100%, 投在侵入岩 TAS 分类图解(见图 3)。由图 3 可以看出, XD1-1、XD2-5 均投在花岗岩区域内, XD1-3(金矿石样品)落在石英二长岩与二长岩界线附近, XD2-1 则在闪长岩区域内。

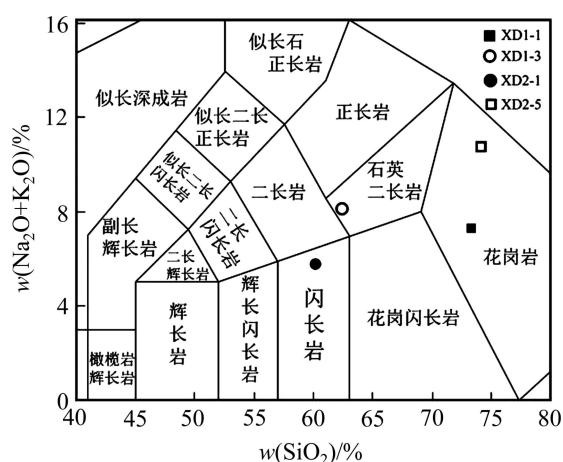


图3 夏甸金矿床样品 TAS 图解

Fig. 3 TAS diagrams of samples of Xiadian Gold Deposit

3.2 微量元素

夏甸金矿床岩石样品全岩微量元素和稀土元素分

析结果见表1。在微量元素蛛网图(见图4)中可以看出,除XD2-5之外,其他样品具有相似的曲线配分型式,具有富集大离子亲石元素(LILE,如K),相对亏损高场强元素(HFSE,如Th、P、Nb、Ta、Ti),Pb正异常,具有弧微量元素的特征,表明其源区含有弧来源陆壳物质或弧来源陆壳物质的再造^[30-31]。XD2-5则相对富集K、Pb等大离子亲石元素,亏损Th、Ce、Nd、Sm、Ti等高场强元素。

在稀土元素配分图解(见图 5)中可以看出,除 XD2-5 表现为左倾重稀土富集、轻稀土相对亏损外,其他均表现为右倾轻稀土富集、重稀土相对亏损的特征。除 XD2-5 外,其他 3 个岩石样品的稀土元素配分曲线具有相似性,说明三者之间可能具有同源性,而 XD2-5 则可能与上述三者具有不同的物源区或者具有不同的演化方向。

夏甸金矿的 XD1-3(黄铁绢英岩)的 ΣREE 值相对最大, 为 131.64×10^{-6} , LREE/HREE 值为 9.57, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 5.62, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.16, 说明其轻稀土元素的分馏程度较强而重稀土分馏较弱; 其次为 XD2-1(绢云母化碎裂岩), ΣREE 值为 58.67×10^{-6} , LREE/HREE 值为 6.65, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 5.85, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值 1.72, 表明其轻稀土富集程度较大, 重稀土富集程度相对变弱。XD1-3(黄铁绢英岩)的 δEu 值为 0.42, 与李楠等^[26]所测结果(δEu 值为 0.41)相近, 具有明显的铕负异常, 表明在成矿过程中斜长石发生了明显的结晶分异作用, 同时这可能也暗示了明显的铕负异常与金矿化之间具有一定联系。 δCe 值为 0.96, 具有弱的铈负异常, 且所测样品的 δCe 变化不大, δCe 在

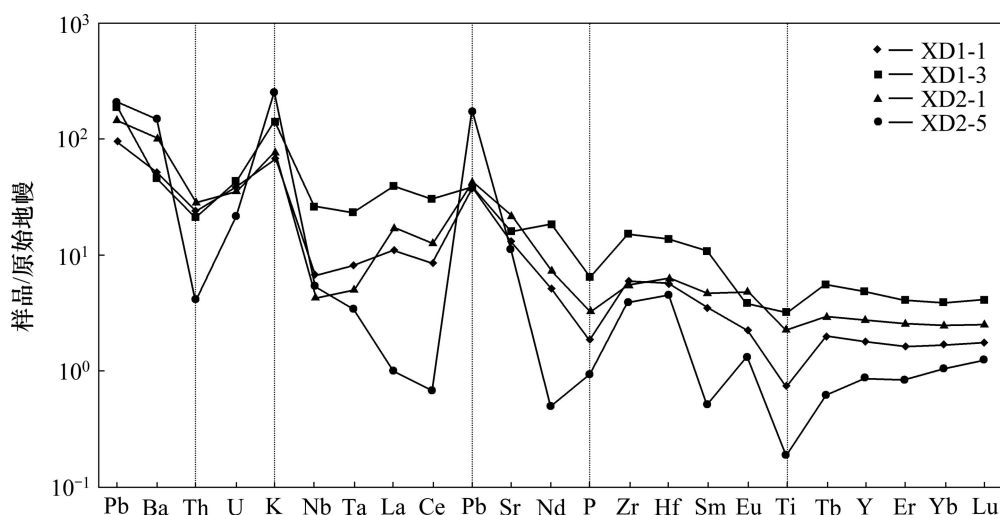


图 4 夏甸金矿床样品微量元素蛛网图(原始地幔标准化数值据 SUN 等^[32])

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of samples of Xiadian Gold Deposit (Normal primitive mantle data after SUN et al^[32])

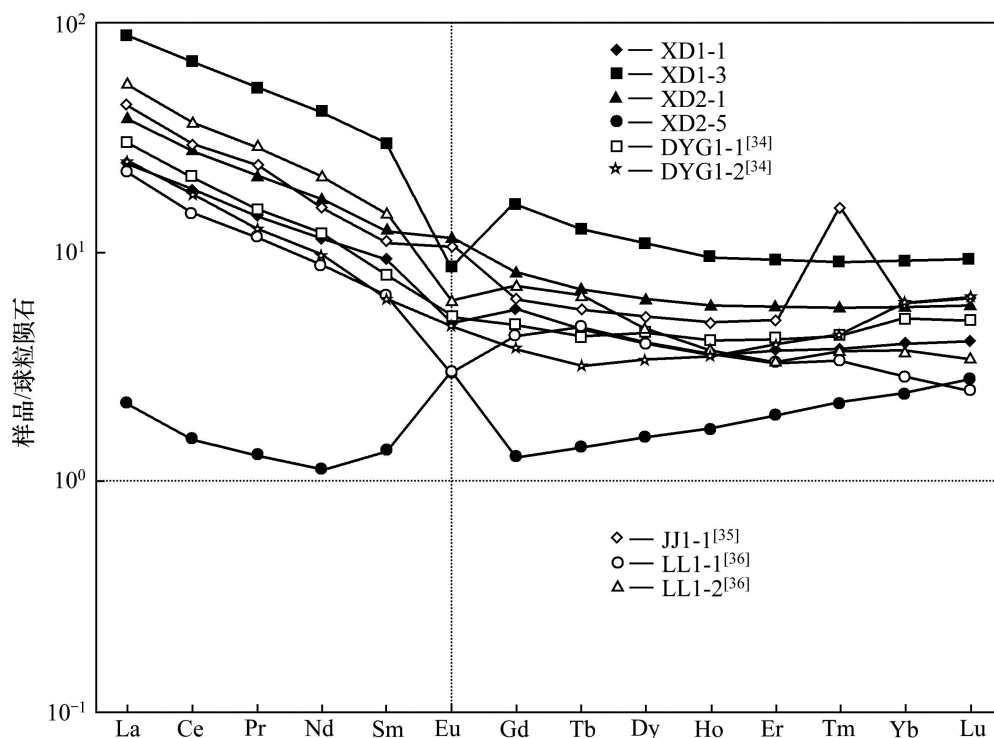


图5 招远地区部分金矿床稀土元素配分型式图(C1 球粒陨石标准化数值^[33])

数据来源: DYG1-1、DYG1-2(刘庚寅等^[34]); JJ1-1(庞绪成等^[35]); LL1-1、LL1-2(王超凡等^[36])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of some Gold Deposits in Zhaoyuan (C1 normal chondrite data after BOYNTON^[33], 1984)

Data sources: DYG1-1, DYG1-2(LIU Geng-yin, et al^[34]); JJ1-1(PANG Xu-cheng, et al^[35]); LL1-1, LL1-2(WANG Chao-fan, et al^[36])

0.85~0.96 之间, 均显示铈负异常, 表明金矿成矿的物理化学条件为氧化环境。

XD2-5 稀土元素分配型式相对平缓, 具有明显的 Eu 正异常, LREE/HREE 值为 1.52, (La/Sm)_N 值为 2.96, (Gd/Yb)_N 值为 0.65, 轻稀土与重稀土分馏程度均比较弱。

此外, 通过对比大尹格庄金矿床黄铁绢英岩(DYG1-1)、黄铁绢英岩化碎裂岩(DYG1-2)、焦家金矿床黄铁绢英岩(JJ1-1)、玲珑金矿床黄铁绢英岩(LL1-1、LL1-2), 可以看出玲珑金矿床黄铁绢英岩(LL1-2)与夏甸金矿床的金矿石(XD1-3)的稀土元素具有相似的分配型式, 暗示其可能与玲珑岩体的演化相关。

4 讨论

4.1 岩石物质来源

将夏甸岩石样品投于(La/Yb)-ΣREE 图解(见图6^[37])中, 由图6可以看到, XD1-1 和 XD2-1 均落在沉积岩(钙质泥质)区域中, XD1-3 处在花岗岩区域附近并落于沉积岩(钙质泥质)区域内。翟明国等^[38]对胶辽

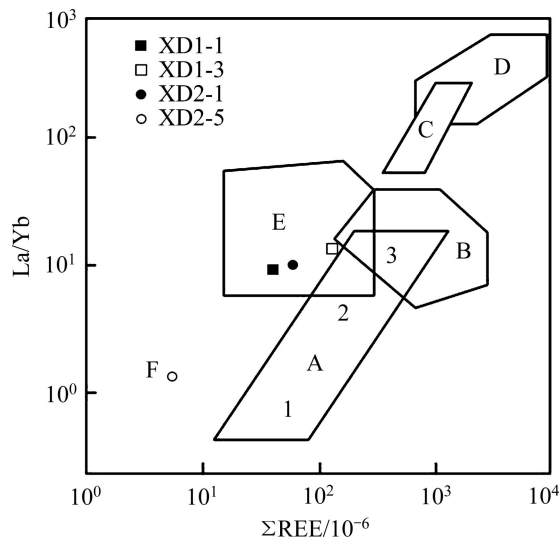


图6 夏甸金矿床岩石样品源岩判别图解^[37](底图据 ALLÈGRE 等): A—玄武岩; B—花岗岩; C—金伯利岩; D—碳酸盐岩; E—沉积岩(钙质泥质); F—球粒陨石; 1—大洋拉斑玄武岩; 2—大陆拉斑玄武岩; 3—碱性玄武岩

Fig. 6 La/Yb-ΣREE discrimination diagram of samples of Xiadian Gold Deposit^[37] (Base map after ALLÈGRE, et al): A—Basalt; B—Granite; C—Kimberlite; D—Carbonatite; E—Sedimentary rock (calcic or pelitic); F—Chondrite; 1—Oceanic tholeiite; 2—Continental tholeiite; 3—Alkali basalt

地块研究后认为, 以辽河群为代表, 其原岩可能代表了陆内裂谷盆地的沉积建造, 局部可能已形成小的洋盆, 并有深水沉积的岩石出现, 其后经历了裂陷盆地的闭合及花岗岩(或岩墙)的侵入, 可以推测上述 3 个岩石样品的原岩可能与沉积岩(钙质泥质)有关, 并与后期花岗岩的侵入具有一定联系; XD2-5 则位于球粒陨石区域中, 说明其可能有地幔物质的加入, 这可能与 1850~1650 Ma 的大陆裂解事件群有关^[39](包括华北陆块整体抬升、基性岩墙群侵入、斜长岩-奥长环斑花岗岩非造山岩浆活动等一系列地质事件)。本文作者对夏甸金矿床岩石样品进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试分析, 得到招平断裂下盘岩体的加权平均年龄为(1840±20) Ma(数据另文发表), 为古元古代时期, 在此期间胶东地区经历了复杂的古元古代构造岩浆热事件^[38, 40]。可以推测, 夏甸金矿床的岩石样品原岩既有地壳物质来源, 又有地幔物质来源; 夏甸金矿在构造运动、岩浆演化过程中可能受到地球深部壳幔演化动力学机制的控制。

夏甸金矿床样品具有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常(见图 4), 表明地壳物质在成岩过程中具有重要作用, 可能参与了岩浆过程。黄铁绢英岩(XD1-3)具有明显的 Eu 负异常(见图 4), 表明岩浆上升过程中发生了强烈的长石分离结晶作用或者在部分熔融过程中斜长石呈残留相保存, 即岩浆在地壳深部有一段时间的停留或来源于地壳。通过表 1 可以看出, 夏甸金矿床岩石样品均具有较高 $Mg^\#$ 值(51.33%~65.09%), 明显高于玄武岩部分熔融形成的熔体, 表明源区中存在幔源物质的参与, 可能经历过基性岩浆与酸性岩浆的混合。

此外, 夏甸金矿床岩石样品的 Nb/Ta 值在 14.82~26.93 之间, 明显高于苏鲁造山带内典型的壳源花岗岩^[41](11.2~13.6)及大陆地壳^[42](12~13)。这表明地壳原岩的部分熔融无法解释夏甸金矿床岩浆岩的形成, 从另一方面说明其源区应存在幔源物质的参与。

毛景文等^[43-44]通过对胶东地区几个典型金矿进行碳氢氧同位素研究, 论证了地幔流体参与了胶东金矿成矿作用, 为同一深部流体库中的流体上涌, 并与围岩发生强烈水岩反应和地壳流体混合。也有部分学者^[22-24]从深大断裂、矿脉与岩脉之间的关系、流体包裹体地质、地球化学及年代学、烃类组分特征等方面进行研究, 均认为夏甸金矿成矿过程中有幔源流体的加入并发挥重要作用。ZHOU 等^[45]和刘建明等^[46]通过对胶东地区岩石的 Sr-Nd 同位素研究表明, 金矿体内矿物 Sr-Nd 同位素组成与同时代的胶东幔源岩浆岩

和镁铁质岩墙的 Sr-Nd 同位素组成相近, 且与胶东地壳基地老变质岩以及同时代的花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成具有一定联系^[47]。

综上所述, 夏甸金矿床岩石物质来源具有多元性及复杂性的特点, 既来自于壳源物质, 又有幔源物质参与, 具有壳幔混合的特征。

4.2 构造环境分析

本文作者将夏甸金矿床岩石样品投入 $\lg \delta$ - $\lg \tau$ 图解(见图 7)中, 由图 7 可以看出, XD1-1、XD1-3、XD2-1 均投在造山带区域, XD2-5 处于造山带与派生区之间, 说明夏甸金矿床所取的岩石样品可能形成于造山带环境。

在 Rb-(Y+Nb)图解(见图 8)中, 夏甸金矿床岩石样品均落在 VAG(火山弧花岗岩)区域, 而大陆边缘的火成岩弧总体区域背景属于造山带, 反映了一个挤压构造环境, 或者从三维空间角度来说, 它是岩石圈或地壳的汇聚带, 但是在汇聚带的局部地段可以处于挤压环境亦可以处于伸展环境, 或者随时间推移, 汇聚带的构造演化中挤压与伸展环境多次交替^[48], 因此, Rb-(Y+Nb)图解与 $\lg \delta$ - $\lg \tau$ 图解所反映的构造环境具有一致性。

此外, 胶东地区处于华北克拉通东南部, 为大陆边缘活动带, 其构造位置亦具有特殊性, 翟明国等^[38]通过对华北克拉通古元古代壳岩系、高压麻粒岩和孔兹岩系研究后认为, 在 1850 Ma 左右, 华北克拉通

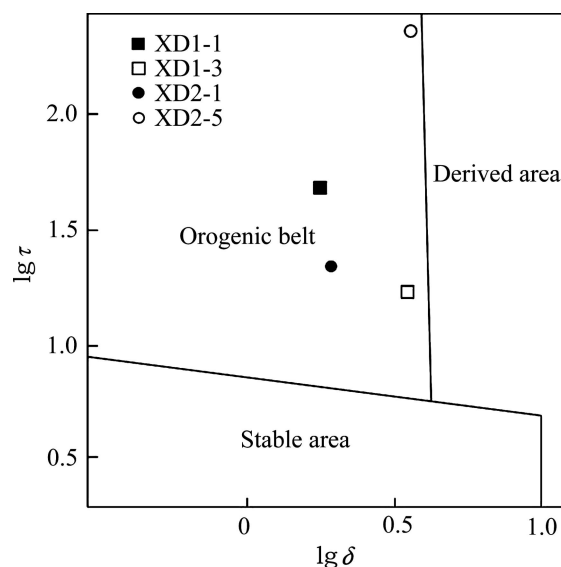


图7 夏甸金矿床岩石样品 $\lg \delta$ - $\lg \tau$ 图解

Fig.7 $\lg \delta$ - $\lg \tau$ discrimination diagram of samples in Xiadian Gold Deposit

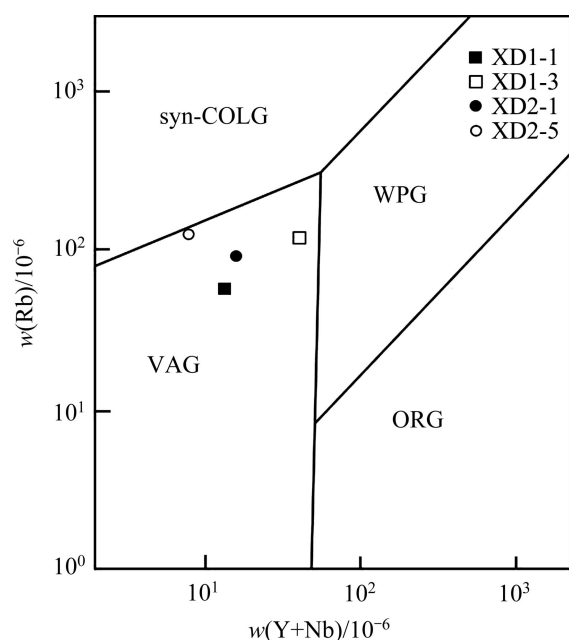


图 8 夏甸金矿床岩石样品 Rb-(Y+Nb)判别图解(VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩)

Fig.8 Rb-(Y+Nb)discrimination diagrams of samples of Xiadian Gold Deposit (VAG — Volcanic arc granite; syn-COLG—Syn-collision granite; WPG—Within plate granite; ORG—Ocean ridge granite)

经历了一次挤压构造事件,导致裂陷盆地的闭合和焊接,形成了胶辽活动带,类似于现代的陆-陆碰撞型造山带。另有研究认为,在古元古代时期,华北克拉通经历了从挤压体制向伸展体制转化的过程,但具体转化时间仍不清楚,具有代表性的时间有 1.9 Ga^[49]、1.85 Ga^[38]、1.92~1.85 Ga^[50-51],本次所测年龄((1840±20)Ma)与上述研究得出的年龄基本一致,说明该时期处于挤压造山时期或由挤压向伸展转化的初期,由此可以推断,夏甸金矿床所在的郭家店岩体应该形成于挤压造山环境。

4.3 地质意义

构造与成矿的关系是密不可分的。夏甸金矿床受北北东向断裂控制十分明显,其中招平剪切带是重要的导矿和容矿主干构造^[24],说明其含矿热液是在招平断裂形成之后,沿断裂及裂隙上涌与围岩交代蚀变形成矿体。而招平断裂作为郯庐断裂带所产生的次级断裂,其在形成时间上应与郯庐断裂带同期或者稍晚,在构造演化上具有一致性。因此,夏甸金矿床中岩、

矿石稀土元素的含量及其变化深受构造运动和物理化学环境的影响,为进一步探讨矿床成因及演化提供了一定的参考价值。

而目前对于胶东金矿成矿动力学背景主要存在以下观点:胡受奚等^[52]、孙景贵等^[53]指出胶东金矿矿集区处于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲的弧后拉张的背景下;刘建明等^[46,54]、翟明国等^[55-56]认为形成于华北东部中生代动力学体制转折期;陈衍景等^[57]认为与扬子和华北克拉通碰撞造山过程中由挤压向伸展环境转变有关;WANG 等^[58]、罗镇宽等^[59]提出其成矿出现于华南与华北克拉通后碰撞弧构造环境;毛景文等^[60-63]则提出三大成矿事件所对应的相关动力学背景(华南与华北克拉通后碰撞伸展、构造体制大转折晚期的伸展、近东西向岩石圈大规模快速减薄)。以上研究均强调了伸展或岩石圈减薄的环境对胶东地区大规模成矿作用的重要性。朱日祥等^[64]研究发现,在早白垩世华北克拉通东部进入破坏峰期,而此时期郯庐断裂带也转变为伸展活动,在深部则发生岩石圈转型、减薄(主要表现为岩浆活动)。中生代火成岩的广泛分布,指示了华北克拉通岩石圈减薄伴随着岩石圈地幔性质的改变,而华北克拉通古老岩石圈地幔则经历过再循环地壳物质的强烈改造^[65]。地球物理资料显示,郯庐断裂带切穿整个地壳并深达岩石圈地幔^[66],为岩石圈内的强烈减薄带,在华北克拉通破坏中起到重要作用^[67-68],对后期流体进入岩石圈地幔和岩石圈地幔发生部分熔融提供了有利条件。可以推断,作为与郯庐断裂带的演化一致的次级断裂(招平断裂),受到华北克拉通破坏的影响,发生伸展活动,从而为含矿热液的运移及就位提供通道,进而与围岩发生交代蚀变形成矿体。因此,夏甸金矿床应该是在华北克拉通处于伸展环境下形成的。

5 结论

1) 夏甸金矿床岩石具有富集大离子亲石元素及轻稀土元素,相对亏损高场强元素及重稀土元素的特征;黄铁绢英岩(金矿石)Eu 负异常明显,这可能与金矿化具有一定联系。

2) 夏甸金矿床所在的郭家店岩体是在古元古代挤压造山环境下或由挤压环境向伸展环境转化时形成的,具有壳幔混合的特征。

3) 夏甸金矿床是早白垩世华北克拉通处于伸展

背景下形成的产物, 该时期作为郯庐断裂带的次级断裂——招平断裂发生了伸展活动, 不仅为含矿热液的上升提供了通道, 而且为金矿床的形成提供了有利条件。

REFERENCES

- [1] 陈衍景, PIRAJNO F, 赖 勇, 李 超. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 907–922.
CHEN Yan-jing, PIRAJNO F, LAI Yong, LI Chao. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, Eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(4): 907–922.
- [2] 胡世玲, 王松山, 桑海清, 裘 冀, 张任祐. 山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 1987, 3(1): 83–89.
HU Shi-ling, WANG Song-shan, SANG Hai-qing, QIU Ji, ZHANG Ren-gu. Isotopic ages of Linglong and Guojialing batholiths in Shandong province and their geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 1987, 3(1): 83–89.
- [3] 林文蔚, 赵一鸣, 赵国红, 彭 聪, 赵维刚. 玲珑花岗质杂岩的时代、空间形态、源岩及其数学模拟[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(2): 97–111.
LIN Wen-wei, ZHAO Yi-Ming, ZHAO Guo-hong, PENG Cong, ZHAO Wei-gang. Ages, spatial forms, source rocks and mathematical modeling of Linglong Granitic Complex[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 1997, 16(2): 97–111.
- [4] 苗来成, 罗镇宽, 关 康, 黄佳展. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 198–206.
MIAO Lai-cheng, LUO Zhen-kuan, GUAN Kang, HUANG Jia-zhan. The implication of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the petrogenesis of the Linglong Granite, east Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14(2): 198–206.
- [5] 关 康, 罗镇宽, 苗来成, 黄佳展. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地质科学, 1998, 33(3): 318–328.
GUAN Kang, LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, HUANG Jia-zhan. SHRIMP in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(3): 318–328.
- [6] 沈保丰, 彭晓亮, 骆 辉, 胡小蝶, 李双保, 毛德宝, 李俊健, 梁若馨. 华北陆台太古宙绿岩带及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1–38.
SHEN Bao-feng, PENG Xiao-liang, LUO Hui, HU Xiao-die, LI Shuang-bao, MAO De-bao, LI Jun-jian, LIANG Ruo-xin. The Archean greenstone belts in North China platform and deposit[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 1994: 1–38.
- [7] 王义文. 中国金矿床成矿时代[C]// 张贻侠, 寸 珪, 刘连登. 中国金矿床: 进展与思考. 北京: 地质出版社, 1996: 137–153.
WANG Yi-wen. The metallogenic time of gold deposit in China[C]// ZHANG Yi-xia, CUN Gui, LIU Lian-deng. The Gold Deposit in China: Development and Thought. Beijing: Geological Press, 1996: 137–153.
- [8] 王德滋, 任启江, 邱检生. 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[C]// 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 张景荣. 中国东部金矿地质学及地球化学. 北京: 科学出版社, 1998: 267–338.
WANG De-zi, REN Qi-jiang, QIU Jian-sheng. Geology and geochemistry of gold deposits associated with Mesozoic continental volcanism in East China[C]// HU Shou-xi, WANG He-nian, WANG De-zi, ZHANG Jing-rong. Geology and Geochemistry of Gold Deposits in East China. Beijing: Science Press, 1998: 267–338.
- [9] YANG Jin-hui, ZHOU Xin-hua. The Rb-Sr isochron of ore and pyrite sub-samples from Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China and their geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(24): 2272–2277.
- [10] YANG Jin-hui, ZHOU Xin-hua. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits[J]. Geology, 2001, 29(8): 711–714.
- [11] QIU Yu-min, GROVES D I, MCNAUGHTON N J, WANG Liang-gen, ZHOU Tai-he. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton, China[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37(3/4): 283–305.
- [12] 张振海, 张景鑫, 叶素芝. 胶东金矿同位素年龄的厘定[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 56.
ZHANG Zhen-hai, ZHANG Jing-xin, YE Su-zhi. Isotope ages of gold deposits in Jiaodong[M]. Beijing: Seismological Press, 1994: 56.
- [13] 陈衍景. 中国绿岩带型金矿[C]// 中国科学院黄金科技工作领导小组办公室. 中国金矿研究新进展(第1卷上册). 北京: 地震出版社, 1994: 4–29.
CHEN Yan-jing. Greenstone-type gold deposits in China[C]// The Office of Gold Science Group of Chinese Academy of Sciences. Progress in Studies of Gold Deposits in China (Vol. 1). Beijing: Seismological Press, 1994: 4–29.
- [14] 孙丰月, 石淮立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[J]. 长春: 吉林人民出版社, 1995: 170.
SUN Feng-yue, SHI Zhun-li, FENG Ben-zhi. The geology of gold deposits in Jiaodong and the petrogenesis and metallogenesis of mantle-derived C-H-O fluids[J]. Changchun: Jilin People's Publishing House, 1995: 170.
- [15] YANG Jin-hui, WU Fu-yuan, WILDE S A. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning[J]. Ore Geology Reviews, 2003, 23(3): 267–288.

- 125-152.
- [16] 邱检生, 王玉华, 王德滋, 徐兆文. 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成矿规律[J]. 矿床地质, 1998, 17(S): 119-122.
- QIU Jian-sheng, WANG Yu-hua, WANG De-zi, XU Zhao-wen. Metallogenic regularities and constraints of gold (copper) deposits associated with Mesozoic volcanism-subvolcanism in the central-southern area of the Tan-lu fault belts[J]. Mineral Deposit, 1998, 17(S): 119-122.
- [17] QIU Jian-sheng, LO Ching-hua, MCINNIS B I A, ZHOU Jin-cheng. Potash-rich magmatism and associated gold-copper mineralization in the Yishu Deep Fault Zone and its vicinity, Eastern China [J]. Resource Geology, 2000, 50(4): 269-280.
- [18] 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32: 11-20.
- ZHOU Xin-hua, YANG Jin-hui, ZHANG Liang-chang. The formation of large gold mines in Jiaodong and deep progress of Mesozoic lithosphere in North China[J]. Science in China: Series D, 2002, 32: 11-20.
- [19] 季海章, 赵懿英, 卢冰, 陈殿照. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[J]. 地质与勘探, 1992, 28(2): 15-18.
- JI Hai-zhang, ZHAO Yi-ying, LU Bing, CHEN Dian-zhao. On the relation of lamprophyre to gold ore in the Jiaodong Area[J]. Geology and Prospecting, 1992, 28(2): 15-18.
- [20] 罗镇宽, 关康, 苗天成. 胶东玲珑金矿田煌斑岩脉与成矿关系的讨论[J]. 黄金地质, 2001, 7(4): 15-21.
- LUO Zhen-kuan, GUAN Kang, MIAO Lai-cheng. Discussion on relationship between lamprophyre veins and mineralization in the Linglong Gold Field, Eastern Shandong[J]. Gold Geology, 2001, 7(4): 15-21.
- [21] 臧维生, 陈光远. 夏甸金矿床黄铁矿标型特征研究及矿区远景评价[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1987, 2: 54-56.
- ZANG Wei-sheng, CHEN Guang-yuan. Evaluation of the characteristic of pyrite in Xiadian gold deposit and the estimate of deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1987, 2: 54-56.
- [22] 穆太升, 董鑫, 曲延波, 许洪泉, 孙忠实. 招远市夏甸金矿含金流体成因及就位机制的研究[J]. 山东地质, 2001, 17(3): 25-29.
- MU Tai-sheng, DONG Xin, QU Yan-bo, XU Hong-quan, SUN Zhong-shi. Origin of gold-bearing fluid and study on its emplacement mechanism of Xiadian Gold Deposit in Zhaoyuan City[J]. Geology of Shandong, 2001, 17(3): 25-29.
- [23] DENG Jun, WANG Qing-feng, SUN Zhong-shi. Origin of gold-bearing fluid and its initiative localization mechanism in Xiadian Gold Deposit, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2002, 21(3): 282-288.
- [24] 徐庆鸿, 陈远荣, 贾国相, 李晓峰, 李厚民, 刘耀辉. 山东夏甸金矿烃类组分特征与幔源流体成矿作用探讨[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2639-2646.
- XU Qing-hong, CHEN Yuan-rong, JIA Guo-xiang, LI Xiao-feng, LI Hou-min, LIU Yao-hui. Characteristics of hydrocarbon components in the Xiadian Gold Deposit, Shandong, and mantle-derived fluid mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2639-2646.
- [25] 乔延校. 夏甸金矿地质特征与矿床成因[J]. 西部资源, 2012(6): 125-126.
- QIAO Yan-xiao. The geological characteristic and reason of Xiadian Gold Deposit[J]. Western Resource, 2012(6): 125-126.
- [26] 李楠, 邓军, 杨立强, 龚庆杰, 郭春影. 胶东夏甸金矿床围岩蚀变的岩石学与地球化学特征[C]// 陈毓川, 薛春纪, 张长青. 主攻深部挺进西部放眼世界——第九届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2008: 142-143.
- LI Nan, DENG Jun, YANG Li-qiang, GONG Qing-jie, GUO Chun-ying. The characteristic of petrology and geochemistry of wall rock alteration in Xiadian Gold Deposit[C]// CHEN Yu-chuan, XUE Chun-ji, ZHANG Chang-qing. The Symposium of Ninth Ore Deposit Conference. Beijing: Geological Publishing Press, 2008: 142-143.
- [27] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 王为聪, 黄太岭, 杨承海. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 8.
- LI Shi-xian, LIU Chang-chun, AN Yu-hong, WANG Wei-cong, HUANG Tai-ling, YANG Cheng-hai. Gold geology in Jiaodong[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2007: 8.
- [28] 王慧, 丛培章. 夏甸金矿床控矿规律及找矿效果[J]. 黄金科学技术, 2002, 10(5): 21-25.
- WANG Hui, CONG Pei-zhang. Hosting rule of ore bodies and ore-searching result of Xiadian Gold Deposit[J]. Gold Science and Technology, 2002, 10(5): 21-25.
- [29] 杨立强, 邓军, 翟裕生, 王建平. 胶东夏甸金矿地球化学场结构[J]. 现代地质, 2001, 15(4): 409-413.
- YANG Li-qiang, DENG Jun, ZHAI Yu-sheng, WANG Jian-ping. Structure of geochemical field of Xiadian Gold Ore Deposit, Jiaodong Area[J]. Geoscience, 2001, 15(4): 409-413.
- [30] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its compositions and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 27-72.
- [31] RUDNICK R L, FOUNTAIN D M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective[J]. Review Geophysics, 1995, 33: 267-309.
- [32] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and the oceanic basins[J]. Special Publications of Geological Society of London, 1989, 42: 313-346.
- [33] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth

- elements: meteorite studies[C]// HENDERSON P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 1984: 63-114.
- [34] 刘庚寅, 杨 斌, 彭省临, 刘海刚, 陈 艳, 梁琴琴, 陈 燕, 刘贤红, 李守生, 王 慧, 窦源东, 杨玉泉. 胶西北大尹格庄金矿岩石化学与成矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 743-749.
- LIU Geng-yin, YANG Bin, PENG Sheng-lin, LIU Hai-gang, CHEN Yan, LIANG Qin-qin, CHEN Yan, LIU Xian-hong, LI Shou-sheng, WANG Hui, DOU Yuan-dong, YANG Yu-quan. Petrogeochemistry and metallization in Dayingezhuang gold deposit, northwest Jiaodong peninsula[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 743-749.
- [35] 庞绪成, 王宇平, 郑广玉, 张华东, 许道学, 孙宝晶. 焦家金矿床成矿元素富集及成因分析[J]. 黄金科学技术, 2003, 11(2): 15-19.
- PANG Xu-cheng, WANG Yu-ping, ZHENG Guang-yu, ZHANG Hua-dong, XU Dao-xue, SUN Bao-jing. Analysis of ore-formation and elements concentration in Jiaojia gold deposit[J]. Gold Science and Technology, 2003, 11(2): 15-19.
- [36] 王超凡, 吕古贤, 郭 涛, 申玉科, 周国发, 刘维民, 徐增田, 刘 正. 玲珑金矿田破头青断裂带稀土和矿化元素特征分析[J]. 吉林地质, 2010, 29(1): 99-104.
- WANG Chao-fan, LÜ Gu-xian, GUO Tao, SHEN Yu-ke, ZHOU Guo-fa, LIU Wei-min, XU Zeng-tian, LIU Zheng. Analysis on REE and elements related to mineralization of Potouqing fault in Linglong gold deposit[J]. Jinlin Geology, 2010, 29(1): 99-104.
- [37] ALLEGRE C J, MINSTER J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38(1): 1-25.
- [38] 翟明国, 彭 澎. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2665-2682.
- ZHAI Ming-guo, PENG Peng. Paleoproterozoic events in the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2665-2682.
- [39] 翟明国. 华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1343-1354.
- ZHAI Ming-guo. 2.1~1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(6): 1343-1354.
- [40] 董春艳, 王世进, 刘敦一, 王金光, 颜颂强, 王 伟, 宋志勇, 万渝生. 华北克拉通古元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中-基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2010, 27(6): 1699-1706.
- DONG Chun-yang, WANG Shi-jin, LIU Dun-yi, WANG Jin-guang, XIE Hang-qiang, WANG Wei, SONG Zhi-yong, WAN Yu-sheng. Late Palaeoproterozoic crustal evolution of the North China Craton and formation time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon dating of meta-intermediate-basic intrusive rocks in eastern Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 27(6): 1699-1706.
- [41] YANG Jin-hui, WU Fu-yuan, CHUNG Sun-lin, SIMON A W, CHU Mei-fei, LO Ching-hua, SONG Biao. Petrogenesis of early cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning[J]. Chemical Geology, 2005, 222(3): 200-231.
- [42] BARTH M G, MCDONOUGH W F, RUDNICK R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. Chemical Geology, 2000, 165(3): 197-213.
- [43] 毛景文, 赫 英, 丁悌平. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 121-128.
- MAO Jing-wen, HE Ying, DING Ti-ping. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) gold district: Evidence of C, O and H isotopes[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2): 121-128.
- [44] 毛景文, 李厚民, 王义天, 张长青, 王瑞廷. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 839-857.
- MAO Jing-wen, LI Hou-min, WANG Yi-tian, ZHANG Chang-qing, WANG Rui-ting. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the Eastern Shandong Peninsula: Evidences from D-O-C-S isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 839-857.
- [45] ZHOU Xin-hua, YANG Jin-hui, ZHANG Lian-chang. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(1): 14-25.
- [46] 刘建明, 叶 杰, 徐九华, 孙景贵, 沈 昆. 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, 2003, 19(4): 775-784.
- LIU Jian-ming, YE Jie, XU Jiu-hua, SUN Jing-gui, SHEN Kun. C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in East Shandong, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(4): 775-784.
- [47] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1317-1328.
- FAN Hong-rui, HU Fang-fang, YANG Jin-hui, SHEN Kun, ZHAI Ming-guo. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(5): 1317-1328.
- [48] 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 赵海玲, 赵国春, 曹永清, 于学政. 火成岩构造组合与壳幔成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(2):

- 259–270.
- DENG Jin-fu, MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, ZHAO Hai-ling, ZHAO Guo-chun, CAO Yong-qing, YU Xue-zheng. Igneous petroectonic assemblage and crust-mantle metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(2): 259–270.
- [49] 李江海, 钱祥麟, 侯贵廷, 刘树文, 陈晶. “吕梁运动”新认识[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2000, 25(1): 16–20.
- LI Jiang-hai, QIAN Xiang-lin, HOU Gui-ting, LIU Shu-wen, CHEN Jing. Late palaeoproterozoic to early mesoproterozoic tectonic framework and major tectono-thermal episodes of North China: New interpretation of “Lüliang Orogeny”[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(1): 16–20.
- [50] HOU Gui-ting, SANTOSH M, QIAN Xiang-lin, GORDON S L, LI Jiang-hai. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(3): 395–409.
- [51] YIN Chang-qing, ZHAO Guo-chun, SUN Min, XIA Xiao-ping, WEI Chun-jing, ZHOU Xi-wen, LEUNG Winghang. LA-ICP-MS U–Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174(1): 78–94.
- [52] 胡受奚, 王鹤年, 王德滋. 中国东部金矿地质学及地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1–168.
- HU Shou-xi, WANG He-nian, WANG De-zi. Gold geology and geochemistry in East China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1–168.
- [53] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞. 胶东金矿区高钾–钾质脉岩地球化学与俯冲–壳幔作用研究[J]. *岩石学报*, 2000, 16(3): 401–412.
- SUN Jing-gui, HU Shou-xi, LING Hong-fei. Study on the geochemistry and subduction-crust mantle interaction of the high potassium-potassium dike rocks in gold deposits concentration zone of east Shandong, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(3): 401–412.
- [54] 刘建明, 叶杰, 徐九华, 姜能, 应汉龙. 初论华北东部中生代金成矿的地球动力学背景[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(1): 39–46.
- LIU Jian-ming, YE Jie, XU Jiu-hua, JIANG Neng, YING Han-long. Preliminary discussion on geodynamic background of Mesozoic gold metallogeny in eastern North China—With examples from eastern Shandong Province[J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(1): 39–46.
- [55] 翟明国, 杨进辉, 刘文军. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. *中国科学 D 辑*, 2001, 31(7): 545–552.
- ZHAI Ming-guo, YANG Jin-hui, LIU Wen-jun. Large clusters of mineral deposits and large-scale metallogenesis in Jiaodong districts Science in China[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(7): 545–552.
- [56] 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 非造山带型金矿—胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 85–98.
- ZHAI Ming-guo, FAN Hong-rui, YANG Jin-hui, MIAO Lai-cheng. Large-scale cluster of gold deposits in East Shandong: Anorogenic metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 85–98.
- [57] 陈衍景, 郭光军, 李欣. 华北克拉通花岗绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(1): 35–40.
- CHEN Yan-jing, GUO Guang-jun, LI Xin. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite greenstone terrains of North China Craton[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(1): 35–40.
- [58] WANG L G, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I, LUO Z K, HUANG J Z, MIAO L C, LIU Y. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U–Pb zircon studies of granitoids[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1): 275–291.
- [59] 罗镇宽, 关康, 余和勇, 李永明. 胶东招莱地区大一超大型金矿床形成的几个关键因素[J]. *地质找矿论丛*, 2003, 18(2): 95–102.
- LUO Zhen-kuan, GUAN Kang, YU He-yong, LI Yong-ming. The key factors for formation of large-superlarge Au deposits in Zhaolai area, Jiaodong region[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2003, 18(2): 95–102.
- [60] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. *中国科学 D 辑*, 2003, 33(4): 289–299.
- MAO Jing-wen, ZHANG Zuo-heng, YU Jin-jie, WANG Yi-tian, NIU Bao-gui. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas—Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4): 289–299.
- [61] 毛景文, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 李厚民, 胡华斌. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 620–637.
- MAO Jing-wen, LI Xiao-feng, ZHANG Zuo-heng, WANG Yi-tian, LI Hou-min, HU Hua-bin. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic Epithermal Gold Deposits in East China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(4): 620–637.
- [62] 毛景文, STEIN H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 长江中下游地区铜金矿 Re–Os 年龄精测及其对成矿作用的指示[J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 121–131.
- MAO Jing-wen, STEIN H, DU An-dao, ZHOU Tao-fa, MEI Yan-xiong, LI Yong-feng, ZANG Wen-shuan, LI Jin-wen. Molybdenite Re–Os precise dating for molybdenite from

- Cu-Au-Mo deposits in the middle-lower reaches of Yangtze River Belt and its implications for Mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 121–131.
- [63] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 45–55.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, LI Xiao-feng, ZHANG Chang-qing, MEI Yan-xiong. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 45–55.
- [64] 朱日祥, 徐义刚, 朱 光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1135–1159.
- ZHU Ri-xiang, XU Yi-gang, ZHU Guang, ZHANG Hong-fu, XIA Qun-ke, ZHENG Tian-yu. Destruction of the North China Craton[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2012, 42(8): 1135–1159.
- [65] 张宏福. 橄榄岩-熔体相互作用: 克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键[J]. *科学通报*, 2009(14): 2008–2026.
- ZHANG Hong-fu. Peridotite-melt interaction: A key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009(14): 2008–2026.
- [66] 朱 光, 宋传中, 牛漫兰, 刘国生, 王勇生. 郯庐断裂带的岩石圈结构及其成因分析[J]. *高校地质学报*, 2002, 8(3): 248–256.
- ZHU Guang, SONG Chuan-zhong, NIU Man-lan, LIU Guo-sheng, WANG Yong-sheng. Lithospheric textures of the Tan-Lu Fault Zone and their genetic analysis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(3): 248–256.
- [67] 牛漫兰, 朱 光, 谢成龙, 柳小明, 曹 洋, 谢文雅. 郯庐断裂带张八岭隆起南段花岗岩 LA-LCP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1839–1847.
- NIU Man-lan, ZHU Guang, XIE Cheng-long, LIU Xiao-ming, CAO Yang, XIE Wen-ya. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the granites from the southern segment of the Zhangbaling uplift along the Tan-Lu Fault Zone and their tectonic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8): 1839–1847.
- [68] ZHU Guang, NIU Man-lan, XIE Cheng-long, WANG Yong-sheng. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu fault zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin[J]. *The Journal of Geology*, 2010, 118(3): 277–293.

(编辑 李艳红)