胶东乳山英格庄金矿碲化物的发现及其意义*

周起凤[1,2,3] 李胜荣[1**] 陈海燕[1] 宋玉波[4] 张运强[1] 张秀宝[1] 崔举超[1]

ZHOU QiFeng[1,2,3], LI ShengRong[1**], CHEN HaiYan[1], SONG YuBo[4], ZHANG YunQiang[1], ZHANG XiuBao[1] and CUI JuChao[1]

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学,北京 100083
2. 中国科学院矿产资源研究重点实验室,中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029
3. 中国科学院研究生院,北京 100049
4. 山东金洲矿业集团,乳山 264501

1. *State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
3. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
4. *Shandong Jinzhou Mining Industry Group, Rushan* 264501, *China*

2010-03-10 收稿, 2011-05-30 改回.

Zhou QF, Li SR, Chen HY, Song YB, Zhang YQ, Zhang XB and Cui JC. 2011. Discovery and geological significance of telluride minerals in the Yinggezhuang gold deposit, Rushan, Jiaodong. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1847 – 1856

Abstract Based on electron probe micro-analysis (EPMA), hessite and tetradymite are found in the Yinggezhuang gold deposit, and tsumoite found the first time in Jiaodong district also occurs in the Yinggezhuang gold deposit, one part of the Mouping-Rushan ore belt, Jiaodong. These telluride minerals intergrowing with each other in fine flakes occur in the inter-crystal poroses of dolomite and quartz. The lower contents of tellurium in the telluride minerals studied are revealed by the results of EPMA. The precipitation sequence of telluride minerals and their paragenetic minerals is pyrite→pentlandite→tetradymite→tsumoite→hessite according to the occurrence and component of the mineral association. When telluride minerals precipitated, the range of $\log f_{Te_2}$ is from −19.5 to −11.2 and the upper limit of $\log f_{S_2}$ is −16.8, confined by the mineral assemblages. The origin of tellurium discussed implies that the occurrence of telluride minerals in gold deposits may show the information of mantle origin. According to the geochemical relation of tellurium and gold, the wall rocks of the Yinggezhuang gold deposit, including Jingshan Group and Kunyushan complex, are not likely to supply ore substance and the gold metallogenesis is involved in the tectonic-magmatic activity of the Early Cretaceous stage, especially the exchange process of crust-mantle material.

Key words Hessite; Tsumoite; Tetradymite; Yinggezhuang; Gold deposit; Jiaodong

摘 要 本文通过电子探针微束分析,在胶东牟平-乳山成矿带内的英格庄金矿发现碲银矿、辉碲铋矿,并在胶东地区首次发现楚碲铋矿,该矿物系列以复杂的连生关系呈细小片状产出于白云石及石英矿物颗粒间。碲化物电子探针化学成分结果显示本区碲化物普遍贫碲。依据碲化物及其共生矿物的产出关系和矿物化学成分,推测其形成顺序为黄铁矿→镍黄铁矿→辉碲铋矿→楚碲铋矿→碲银矿。依据碲化物矿物共生组合对体系中碲化物形成时的f_{Te_2}和f_{S_2}进行了限定,$\log f_{Te_2}$范围为−19.5 ~ −11.2,$\log f_{S_2}$上限为−16.8;并试图对碲的来源及其地质意义进行探讨,认为英格庄金矿中碲化物的发现揭示了深成幔源的信息,鉴于碲与金相近的地球化学特征和密切关系,认为金矿赋矿围岩荆山群和昆嵛山杂岩体提供成矿物质来源的可能性不大,而早白垩世的构造-岩浆活动特别是壳幔物质的交换过程与金成矿关系更为密切。

* 本文受国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(90914002)、全国危机矿山接替资源找矿项目(20089937)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B07011)联合资助.

第一作者简介: 周起凤,女,1985 年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail:zhouqifeng85@163.com

** **通讯作者**:李胜荣,男,1956 年生,博士,教授,主要从事矿物学和矿床学研究,E-mail:lisr@cugb.edu.cn

关键词 碲银矿;楚碲铋矿;辉碲铋矿;英格庄;金矿;胶东
中图法分类号 P618.51; P618.83

1 引言

碲化物在许多金矿中都有发现,如菲律宾 Acupan、美国科罗拉多 Cripple Creek、斐济的 Emperor、西澳大利亚卡尔古利 Golden Mile(Callow and Worley, 1965; Thompson *et al.*, 1985; Ahmad *et al.*, 1987; Shackleton *et al.*, 2003),以及我国胶东的部分金矿(如金青顶)(李兆龙和杨敏之,1993;胡文瑄等,2005)。部分地区甚至出现碲化物型金矿,如鲁南归来庄、河北东坪、鲁西平邑磨坊沟和大兴安岭北端三道湾子(谢家东等,2000;张佩华等,2002;胡华斌等,2004;陈美勇等,2008)。四川大水沟是我国罕见的独立典型碲矿床,一些学者对其进行了比较系统的研究,包括碲化物的矿物学特征、矿物共生组合、矿物成分分析、碲化物形成时的碲逸度和硫逸度条件以及碲的来源及其地质意义等方面(毛景文等,1995a,b;王汝成等,1997;张佩华等,2000a,b;李保华等,1999;毛景文和魏家秀,2000;温春齐等,2002)。然而,产出于金矿中的碲化物的矿物学研究及其意义,讨论尚不多。本文应用电子探针微区分析技术对胶东牟乳成矿带内英格庄金矿的碲化物的化学组成进行了分析,确定了碲化物及其共生矿物的形成顺序,并就英格庄金矿对上述问题进行了探讨。

2 区域与矿床地质

英格庄金矿位于胶东牟平-乳山金成矿带南部,为黄铁矿石英脉型金矿。金矿赋存于昆嵛山二长花岗岩体与下元古界荆山群接触带内,受 NNE 向金牛山主断裂构造控制(图1)。

区内主要出露地层为下元古界荆山群,呈大小不等的捕虏体分布于昆嵛山二长花岗岩体内(图2),岩性包括黑云斜长片麻岩、透辉石岩、大理岩、斜长角闪岩,夹含石墨黑云变粒岩,为一套含碳质的粉砂岩、砂岩、粘土岩、灰岩及少量基性火山岩经中温中压变质形成。

区内岩浆活动频繁,分布最为广泛的为昆嵛山二长花岗岩岩基,物质组成以壳源为主(陈光远等,1996),包括五爪山弱片麻状含石榴石二长花岗岩、瓦善弱片麻状中粒二长花岗岩和垛崮山二长花岗岩3个岩体;其次为侵入昆嵛山岩体的三佛山斑状中粗粒二长花岗岩,该岩体是幔源基性岩浆与地壳熔融的酸性端元混合的产物(张华锋等,2006)。郭敬辉等(2005)对上述部分岩体进行了锆石 SHRIMP U-Pb 测年,其中昆嵛山含石榴石淡色花岗岩年龄为 142 ± 3Ma,垛崮山花岗闪长岩体年龄为 161 ± 1Ma,三佛山岩体年龄为 113 ± 1Ma。最近,范宏瑞等(未刊资料)也对上述岩体进行了锆石

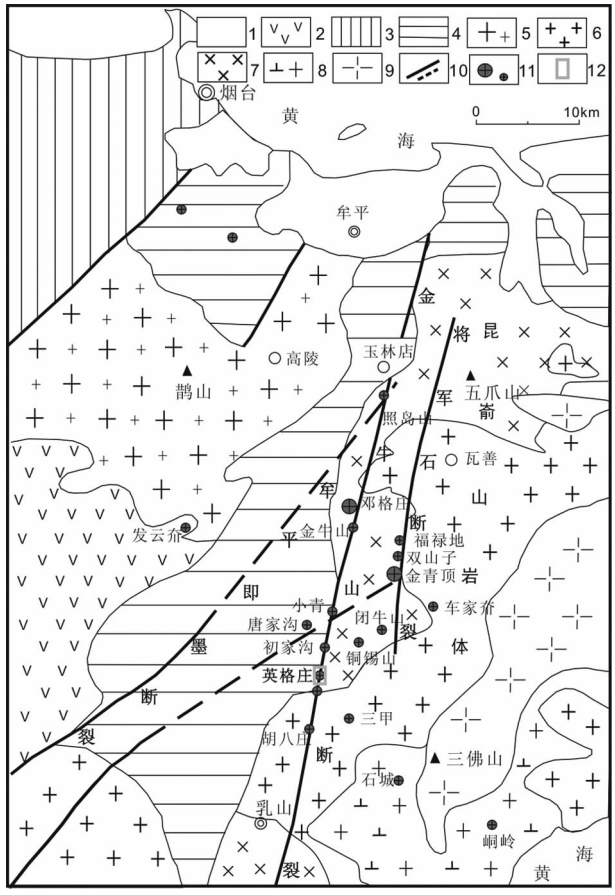


图1 山东牟乳地区区域地质略图(据李胜荣等,1996;张华锋等,2004;胡芳芳等,2007 改绘)

1-第四系;2-白垩系砂砾岩和火山岩;3-下元古界粉子山群;4-太古-下元古界荆山群;5-中生代鹊山岩体;6-8-中生代昆嵛山杂岩体:6-瓦善弱片麻状二长花岗岩;7-五爪山弱片麻状含榴二长花岗岩;8-垛崮山二长花岗岩;9-中生代晚期三佛山斑状二长花岗岩;10-断层;11-金矿床及矿点;12-图2区

Fig. 1 A sketch regional geological map of the Mouping-Rushan district (modified after Li *et al.*, 1996, Zhang *et al.*, 2004, Hu *et al.*, 2007)

1-Quaternary sediments; 2-Cretaceous sandy conglomerate and volcanic rocks; 3-Lower Proterozoic Fenzishan Group; 4-Archean-Lower Proterozoic Jingshan Group; 5-Mesozoic Queshan granite pluton; 6-8-Mesozoic Kunyushan complex: 6-Washan weak-gneissic monzogranite; 7-Wuzhaoshan weak-gneissic garnet-bearing monzogranite; 8-Duogushan monzogranite; 9-Late Mesozoic Sanfoshan porphyraceous monzogranite; 10-fault; 11-gold deposit and ore spot; 12-the region of Fig. 2 (studied area)

SHRIMP U-Pb 测年,其中属于昆嵛山杂岩体的3个岩体(垛崮山岩体、瓦善岩体、五爪山岩体)年龄为 161 ~ 150Ma,三佛

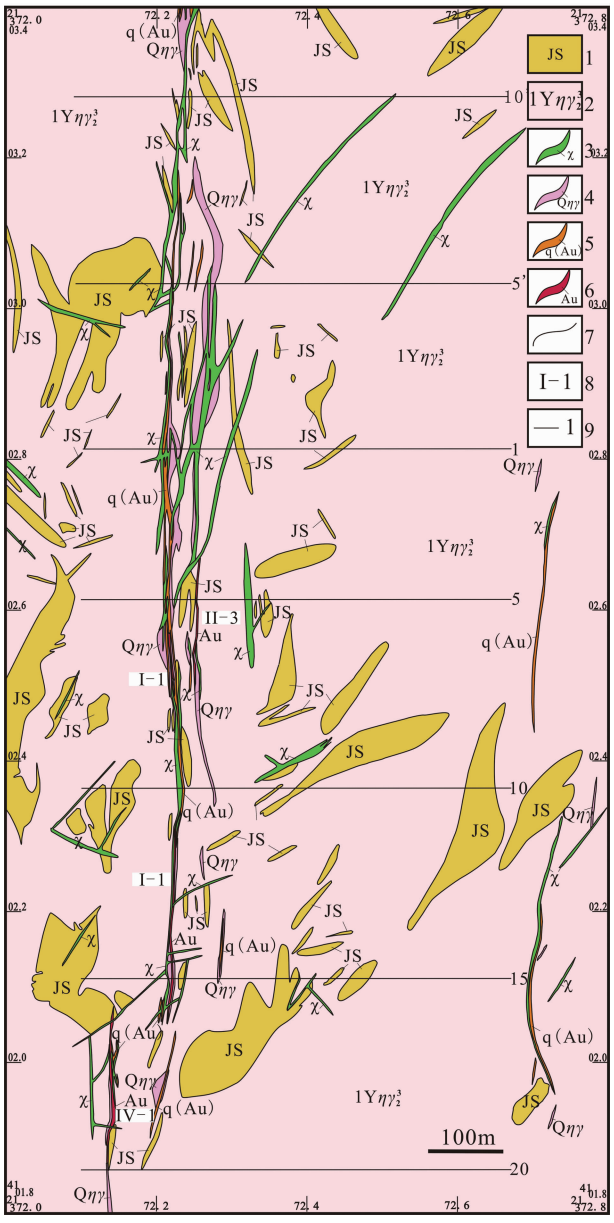


图 2 山东乳山英格庄金矿地质图(据山东金洲矿业集团,2008①;贺振和张学仁,2006 改绘)

1-荆山群;2-昆嵛山杂岩体;3-煌斑岩脉;4-硅化二长花岗岩;5-含金石英脉;6-金矿脉;7-地质界线;8-矿体编号;9-勘探线及其编号

Fig. 2 Geological map of Yinggezhuang gold deposit (modified after He and Zhang, 2006)

1-Jingshan Group (including biotite plagiogneiss, migmatized biotite plagiogneiss, plagioclase amphibolite, graphite biotite leptynite, marble and feldspar quartzite); 2-Kunyushan complex dominated by gneissic monzogranite; 3-lamprophyre vein; 4-silicified monzogranite; 5-auriferous quartz vein; 6-gold vein; 7-lines of geological limitation; 8-the number of gold orebody; 9-exploration line and its number

山岩体年龄为 114 ~ 111Ma。由此,昆嵛山杂岩体形成时代为中生代晚侏罗世 160 ~ 140Ma, 三佛山岩体形成时代为中

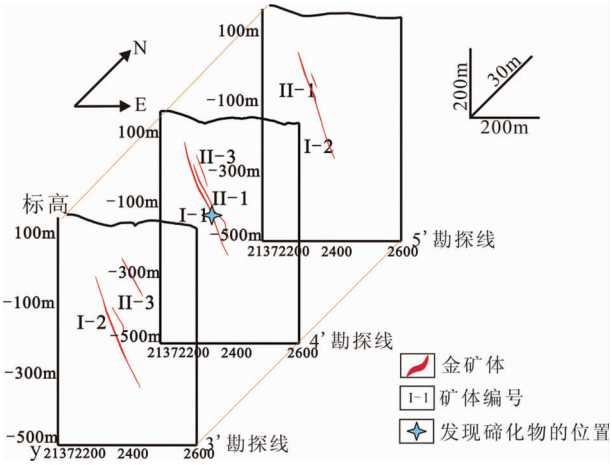


图 3 山东乳山英格庄金矿 3′ - 5′勘探线矿体联合剖面图(据山东金洲矿业集团,2009② 资料改绘)

Fig. 3 Unified section of gold orebodies of Yinggezhuang gold deposit

生代早白垩世晚期 ~ 110Ma,与牟乳成矿带金矿成矿年龄(~117Ma)(胡芳芳等 2004,2006)较为接近。脉岩较为发育,主要为基性脉岩煌斑岩,其次为闪长玢岩和长英质伟晶岩,其中煌斑岩与金矿脉具有密切的时空联系(图 2)。

区内构造主要为 NNE 和 NE 向断裂构造,其中主要的 NNE 向断裂为金牛山主断裂南段,与金矿关系密切,为本区的主控矿构造。

矿区内出露 4 条矿脉(I、II、III、IV),受控于金牛山主断裂,呈平行斜列式产出,总体走向近南北,倾向东,倾角 49° ~ 73°(图 3)。矿体呈脉状、透镜状、囊状,局部具有分支复合现象,沿走向和倾向上呈舒缓波状,局部呈 S 型延伸,严格受断裂构造控制。贺振和张学仁(2006)认为英格庄金矿浅部左行压扭性活动在断裂走向左拐方向和倾向较缓部位形成扩容,为矿体定位提供了空间,之后的右行张扭性活动为富大矿体(烟灰色石英和含金黄铁矿)的形成提供了有利条件。赵国春等(未刊资料)认为英格庄金矿的赋矿断裂在成矿早期的运动方式为左行压扭,成矿晚期为右行正断。I-1、I-2、II-1 矿体是矿区内的主要矿体,矿体厚度变化较大,单工程中最小厚度 0.23m,最大厚度 5.66m,平均厚度 2.16m,单样品最高品位 27.25×10^{-6},平均金品位 4.32×10^{-6}。

围岩蚀变类型包括钾长石化、钠长石化、绢云母化、绢英岩化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化和绿泥石化。

矿石类型以石英黄铁矿和多金属硫化物矿石为主。矿石矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等。脉石矿物主要为石英和方解石,其次为绢云母、白云石、菱铁矿、绿泥石、钾长石、钠长石等。矿石结构以粒状结构和碎裂结构为主,矿石构造以块状构造、浸染状构造和脉状构造

① 山东金洲矿业集团. 2008. 英格庄金矿编录资料(内部资料)

② 山东金洲矿业集团. 2009. 英格庄金矿编录资料(内部资料)

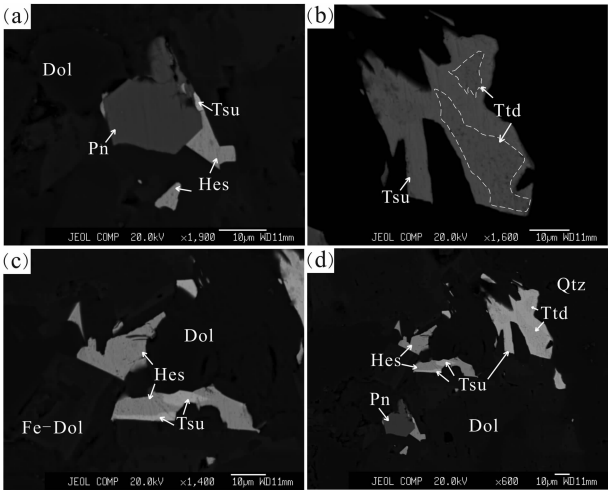


图4 碲化物的产状及其共生关系(电子探针背散射图像)

(a)-碲化物(碲银矿和楚碲铋矿)浮生于镍黄铁矿;(b)-辉碲铋矿与楚碲铋矿的连生关系;(c)-碲化物(碲银矿和楚碲铋矿)与碳酸盐矿物(白云石和铁白云石)的共生关系;(d)-碲化物、镍黄铁矿、白云石和石英的共生关系. 矿物缩写:Pn-镍黄铁矿;Hes-碲银矿;Tsu-楚碲铋矿;Ttd-辉碲铋矿;Dol-白云石;Fe-Dol-铁白云石;Qtz-石英

Fig. 4 Occurrence and paragenetic relationship of telluride minerals and pentlandite(electron microprobe backscattering image)

(a)-tellerides (hessite and tsumoite) overgrow on pentlandite; (b)-tetradymite and tsumoite showing the intergrowth relationship; (c)-paragenetic relationship of tellerides(hessite and tsumoite) and carbonate minerals (dolomite and ferrodolomite); (d)-paragenetic relationship of tellerides(hessite and tsumoite), pentlandite, dolomite and quartz. Abbreviations: Pn- pentlandite; Hes- hessite; Tsu- tsumoite; Ttd- tetradymite; Dol- dolomite; Fe-Dol- ferrodolomite; Qtz- quartz

为主。

金矿物主要以银金矿和金银矿产出,其赋存状态主要为包裹金和粒间金,其次为裂隙金。

根据野外脉体穿插关系、矿物共生组合和结构构造特点,英格庄金矿成矿作用分为4个阶段:(I)黄铁矿石英阶段,矿物组合为乳白色石英和少量浸染状粗粒黄铁矿;(II)石英黄铁矿阶段,矿物组合为块状黄铁矿和少量灰白色石英;(III)多金属硫化物阶段,矿物组合以黄铁矿为主,含有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属硫化物矿物及灰色石英;(IV)石英碳酸盐阶段,矿物组合为白色石英和方解石、菱铁矿、白云石、铁白云石等碳酸盐矿物及少量黄铁矿(周起凤,2010)。其中,II和III阶段为主要的金成矿阶段。

3 矿物产状和特征

本次研究在英格庄矿区-115m中段产出的石英-碳酸盐阶段矿石中发现多种碲化物矿物,采样位置见图3。碲化物矿物包括碲银矿、辉碲铋矿和楚碲铋矿,多呈不规则细小叶片状产出于白云石(铁白云石和含锰白云石)粒间或白云石与石英的缝隙中,如图4。该系列矿物一般都很细小,其中,碲银矿3~15μm,多变化于5~10μm,辉碲铋矿10~30μm,楚碲铋矿1~50μm,多变化于20~30μm,镍黄铁矿25μm。该系列矿物具有复杂的交生、连生关系,楚碲铋矿和碲银矿沿镍黄铁矿浮生,楚碲铋矿包裹辉碲铋矿形成连生集合体,楚碲铋矿与碲银矿连生,具有不规则连生边。

4 碲化物的成分特征

本次研究在核工业北京地质研究院分析测试研究中心JXA-8100电子探针分析仪上完成,对碲化物及其共生矿物进行了电子探针化学成分分析,测试条件为:加速电压20kV,电流1×10^{-8}A,电子束直径1μm,ZAF修正法,主要采用美国SPI标样(As-GaAs; Se-Be_2Se_3; Fe-FeS_2; S-MoS_2; Zn-ZnS; Mo-MoS_2; Cu-Cu_2O; Au-Au; Pb-PbS; Sb-Sb_2S_3; Ag-Ag; Bi-Be_2Se_3; Ni-$(Fe,Ni)_9S_8$; Co-$CoAs_3$; Te-Sb_2Te_3)对测定的元素含量进行标定。结果见表1和表2。

4.1 碲银矿

由表1、表2可看出,本次研究测得碲银矿中主元素银含量为61.37%~63.22%,平均62.30%;碲含量为36.17%~37.98%,平均37.38%,还含有微量的铁、硫,部分样品含金、镍、硒、锌和钼,其中金高达0.22%。计算的矿物化学分子式分别为:$(Ag_{1.99}Fe_{0.01})_{2.00}(Te_{1.02}S_{0.02})_{1.04}$、$(Ag_{1.98}Fe_{0.01})_{1.99}(Te_{0.96}Se_{0.02})_{0.98}$、$(Ag_{1.98}Fe_{0.01})_{1.99}(Te_{1.02}S_{0.03})_{1.05}$、$(Ag_{1.99}Fe_{0.01})_{2.00}(Te_{1.03}S_{0.02}Se_{0.01})_{1.06}$,与标准碲银矿($Ag_2Te$: Ag, 62.80%; Te, 37.14%)化学成分(王濮,1987)基本一致。

与金青顶金矿中产出的碲银矿(Ag: 57.96%, Te: 38.18%, Au: 2.98%)(胡文瑄等,2005)对比,英格庄金矿的碲银矿相对富银贫金,略贫碲。

4.2 辉碲铋矿

由表1、表2可看出,本次研究测得辉碲铋矿中主元素铋含量为59.81%~61.04%,平均60.43%;碲含量为32.70%~33.92%,平均33.31%,硫含量为4.55%~4.62%,平均4.59%,还含有微量的银、硒、铁,其中银达0.20%、硒达0.18%、铁达0.10%,部分样品含钼和镍。计算的矿物化学分子式分别为:$(Bi_{1.98}Ag_{0.01}Fe_{0.01})_{2.00}Te_{1.81}(S_{0.98}Se_{0.01})_{0.99}$和$(Bi_{1.97}Ag_{0.01}Fe_{0.01})_{1.99}Te_{1.76}(S_{0.98}Se_{0.02})_{1.00}$,与标准辉碲铋矿($Bi_2Te_2S$: Bi, 59.27%; Te, 36.18%; S, 4.55%)(王濮,1987)相比相对贫碲。

据前人资料,陕西黄龙金矿产出的辉碲铋矿化学成分为Bi: 59.96%, Te: 33.58%, S: 4.45%(邱士东等,2008),四川大水沟碲多金属矿床产出的辉碲铋矿化学成分为Bi: 58.31%,

表 1 英格庄金矿碲化物及其共生矿物电子探针分析结果(wt%)

Table 1 The composition of telluride minerals and paragenetic mineral from the Yinggezhuang gold deposit revealed by EPMA (wt%)

矿物名称	样品号	测点号	As	Se	Fe	S	Zn	Mo	Cu	Au	Pb	Ag	Bi	Ni	Co	Te	总量
碲银矿	YGZ115-N7	1	–	–	0.18	0.17	–	0.03	–	0.16	–	62.02	–	–	–	37.59	100.17
		2	–	–	0.17	0.22	0.06	–	–	0.08	–	63.22	–	0.03	–	36.17	99.95
		3	–	–	0.22	0.29	–	–	–	0.22	–	62.60	–	–	–	37.98	101.35
		4	–	0.11	0.19	0.22	–	–	–	–	–	61.37	–	0.03	–	37.77	99.80
		平均值		0.028	0.19	0.225	0.015			0.115		62.303		0.03		37.378	
辉碲铋矿	YGZ115-N7	5	–	0.12	0.04	4.45	–	–	–	–	–	0.18	58.77	–	–	32.66	96.28
		6	–	0.18	0.10	4.55	–	0.05	–	–	–	0.20	59.81	0.03	–	32.70	97.64
		平均值		0.15	0.07	4.585		0.025				0.195	60.425	0.015		33.31	
楚碲铋矿	YGZ115-N7	7	–	0.09	0.03	–	–	–	–	–	–	0.04	61.05	0.04	–	36.34	97.66
		8	–	0.15	0.13	–	–	–	–	–	–	0.10	61.57	0.03	–	36.07	98.08
		平均值		0.12	0.08							0.07	61.31	0.035		36.205	
镍黄铁矿	YGZ115-N7	9	0.04	–	26.39	31.37	–	0.37	–	–	–	0.02	–	37.87	1.57	0.45	98.04
		10	0.03	–	26.43	32.37	–	0.29	0.03	–	0.05	–	–	37.69	1.40	0.46	98.75
		平均值	0.035		26.41	31.87		0.33	0.015		0.025	0.01		37.78	1.485	0.455	

注：测试单位：核工业北京地质研究院；“–”表示在检出限以下

Te：36.00%，S：4.77%（毛景文等，1995a）。英格庄金矿的辉碲铋矿与黄龙金矿的辉碲铋矿成分更为接近，相对富铋贫碲。

4.3 楚碲铋矿

本次研究在胶东地区首次发现了楚碲铋矿，楚碲铋矿于1978年在日本Tsumo矽卡岩矿床中首次被发现（Shimazaki and Ozawa，1978），其后在前苏联的Madagan地区（Zav'yalov and Beginov，1982）、前苏联的东北地区（Gamyanin *et al.*，1982）、以及瑞典Tunaberg地区的一个Pb-Zb矿床（Dobbe，1993）也报道了该矿物的存在，在国内四川大水沟中-深成热液充填型独立碲矿床中，楚碲铋矿成为了该矿床重要的碲矿物之一（王汝成等，1997），在广东官田热液充填型脉状黄铁矿矿床中（黄富荣，2001）也有该矿物的相应报道。

在日本Tsumo矿床中，楚碲铋矿被辉碲铋矿（Bi_2Te_2S）条带所包围，两者构成集合体（Shimazaki and Ozawa，1978）；在前苏联Magadan地区，楚碲铋矿被1mm宽的硫楚碲铋矿（Bi_3Te_2S）边所包围（Zav'yalov and Beginov，1982）。在四川大水沟，楚碲铋矿或产出于辉碲铋矿和磁黄铁矿晶粒之间，或包裹在辉碲铋矿中（王汝成等，1997）；在广东官田，楚碲铋矿则呈细小的嵌晶包裹在黄铁矿晶体中，粒径0.05～0.15mm（黄富荣，2001）。与上述产地的产状不同，英格庄金矿的楚碲铋矿或包裹辉碲铋矿生长，或独立存在于白云石颗粒之间，反映了其生长环境与上述诸地的不同。

本次测得楚碲铋矿中主元素铋含量为61.05%～61.57%，平均61.31%；碲含量为36.07%～36.34%，平均36.21%，还含有微量的银、硒、铁和镍，其中银达0.10%、硒达0.15%、铁达0.13%，部分样品含钼。计算的矿物化学分子式分别为：$Bi_{1.00}Te_{0.96}$和$(Bi_{1.00}Fe_{0.01})_{1.01}(Te_{0.96}Se_{0.01})_{0.97}$，与标准楚碲铋矿（BiTe：Bi，60.9%；Pb，1.1%；Te，37.8%；S，0.1%）（王濮，1987）相比贫碲富铋，不含铅和硫。

与官田黄铁矿矿床内产出的楚碲铋矿（Bi：56.08%，Te：37.48%）（黄富荣，2001）和四川大水沟独立碲矿床产出的楚碲铋矿（Bi：61.37%，Te：37.84%）（王汝成等，1997）相比，英格庄的楚碲铋矿与大水沟碲矿床的楚碲铋矿成分上更为接近，相对贫碲。

由表1可以看出，本次研究的辉碲铋矿与楚碲铋矿在成分上都含有银、硒、铁、镍，部分辉碲铋矿样品含钼，辉碲铋矿与楚碲铋矿相比，铁和镍的含量基本一致，更加富集硒和银，亏损碲和铋。在产出形式上，本次研究的辉碲铋矿与楚碲铋矿呈集合体共生在一起，呈片状产出于白云石与石英的裂隙中，楚碲铋矿包裹辉碲铋矿生长，表明楚碲铋矿形成于辉碲铋矿之后。

4.4 镍黄铁矿

由表1、表2可看出，本次研究测得镍黄铁矿中主元素镍含量为37.69%～38.71%，平均38.09%；硫含量为31.37%

表 2 英格庄金矿碲化物及其共生矿物原子比

Table 2 The atom ratio of telluride minerals and paragenetic mineral from the Yinggezhuang gold deposit

矿物名称	样品号	测点号	As	Se	Fe	S	Zn	Mo	Cu	Au	Pb	Ag	Bi	Ni	Co	Te
碲银矿	YGZ115-N7	1			0.0032	0.0053		0.0003		0.0008		0.574				0.2941
		2			0.003	0.0069	0.0009			0.0004		0.5864		0.0005		0.2836
		3			0.0039	0.0089				0.0011		0.5726				0.2937
		4		0.0014	0.0034	0.0069						0.5701		0.0005		0.2966
辉碲铋矿	YGZ115-N7	5		0.0016	0.0007	0.1442						0.0017	0.2921			0.2658
		6		0.0023	0.0018	0.1454		0.0005				0.0019	0.2931	0.0005		0.2625
楚碲铋矿	YGZ115-N7	7		0.0012	0.0006							0.0004	0.2991	0.0007		0.2882
		8		0.0019	0.0024							0.0009	0.3004	0.0005		0.2882
镍黄铁矿	YGZ115-N7	9	0.0005		0.482	0.998		0.0039				0.0002		0.6582	0.0272	0.0036
		10	0.0004		0.4792	1.0224		0.0031	0.0005		0.0002			0.6503	0.0241	0.0037

~33.40%,平均 32.38%,铁含量为 26.39% ~26.43%,平均 26.42%,还含有少量的钴、碲、钼及微量的砷,其中钴高达 1.57%、碲高达 0.46%、钼高达 0.37%,部分样品含铅、铜和银。计算的矿物化学分子式分别为:$(Ni_{5.06}Fe_{3.70}Co_{0.21}Mo_{0.03})_{9.00}(S_{7.67}Te_{0.03})_{7.70}$ 和 $(Ni_{5.06}Fe_{3.73}Co_{0.19}Mo_{0.02})_{9.00}(S_{7.95}Te_{0.03})_{7.98}$,与标准镍黄铁矿($(Fe,Ni)_9S_8$)(王濮,1987)相比明显富镍贫硫。

5 讨论

5.1 矿物形成顺序

根据矿物共生组合、矿物的产状以及矿物中主要元素含量的变化(图 4、表 1),推测矿物的形成顺序为:黄铁矿→镍黄铁矿→辉碲铋矿→楚碲铋矿→碲银矿,细述如下。

温度较高时,成矿流体首先沉淀出黄铁矿,导致流体中大量消耗铁和硫,在贫硫的条件下形成镍黄铁矿。随着温度降低,硫逸度降低,碲逸度相对升高,f_{Te_2}/f_{S_2} 增大,碲化物开始沉淀(图 5)。Au→Bi→Ag 形成碲化物所需的 f_{Te_2} 依次降低(图 6)。铋形成碲化物所需的 f_{Te_2} 高于银形成碲化物所需的 f_{Te_2},即铋的碲化物需在体系内 f_{Te_2} 相对高的时候沉淀,因此根据体系内 f_{Te_2} 的变化趋势,铋的碲化物应早于银的碲化物形成。另外,由于温度降低,碲银矿的稳定范围变大(Zhang and Spry, 1994),所以碲银矿可以在最晚形成。由于与楚碲铋矿相比辉碲铋矿富硫,它的形成需要相对高的硫逸度,应在体系内 f_{S_2} 相对高的时候沉淀,加之产出形式上楚碲铋矿包裹辉碲铋矿生长,所以辉碲铋矿早于楚碲铋矿沉淀。由此,碲化物中首先沉淀的是辉碲铋矿,之后是楚碲铋矿和碲银矿。碲金矿所需的 f_{Te_2} 最高(图 6),本区碲化物普遍贫碲,体系的 f_{Te_2} 不高,可能未达到碲金矿的形成条件,但金与银的地球化学性质相似,金可类质同象替代银,与碲银矿一同沉淀。

5.2 碲化物形成时的碲逸度和硫逸度

Afifi *et al.* (1988a)获得利用碲银矿和与其共生的银金矿计算碲逸度的公式,其条件为体系中不能出现其它金和银的碲化物,公式如下:

$$\log f_{Te_2} = (1/4.576T)\{\triangle G^\circ_T(Ag_2Te) - 18.302T\log X_{Ag} + 4(1-X_{Ag})^2[5650 - 1600(1-X_{Ag}) - 1.375T]\}$$

其中,$\triangle G^\circ_T(Ag_2Te) = -50197 + 16.32T$ ($T = 148 \sim 527$℃)

本文利用英格庄金矿石英-碳酸盐阶段的银金矿(Au: 65.48%,Ag:30.67%)与碲银矿在 200℃的形成温度下获得其 $\log f_{Te_2}$ 为 -18.08。

由于适于计算的银金矿有限,利用上式计算碲逸度的数量有限,因此根据本区石英-碳酸盐阶段石英流体包裹体均一温度变化范围(140 ~300℃,主要集中在 180 ~230℃)(周起凤,2010)和矿物共生组合,采用 Afifi *et al.* (1988b)的 200℃碲化物和硫化物的稳定性图解,对本区硫逸度和碲逸度变化范围进行限定和讨论。

本区矿物共生组合主要为镍黄铁矿、辉碲铋矿、楚碲铋矿以及碲银矿,未出现自然银但产出碲银矿,据图 7,$\log f_{Te_2}$ 下限为 -19.5,又据本区产出铋的碲化物,所以 $\log f_{Te_2}$ 上限应大于 -15.2。本区碲化物与镍黄铁矿共生,其氧化还原条件低于 Ni-NiO 缓冲剂的氧化还原条件,属还原环境。由于还原条件下 HTe^- 是主要的 Te 水合物形式,且碲金矿相对于富 HTe^- 或 Te^{2-} 成矿流体更倾向于在富 H_2TeO^{3-}、$HTeO^{3-}$、

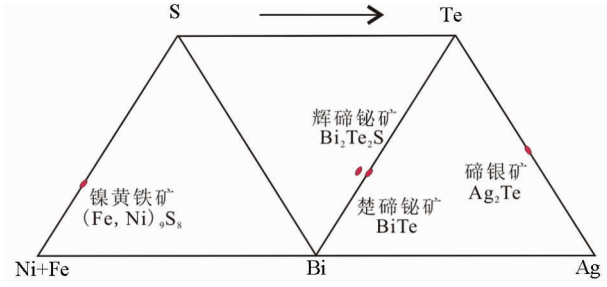


图 5 碲化物与镍黄铁矿的形成顺序图解

Fig. 5 Triangular plots of Ni + Fe-Bi-S, Bi-Te-S, Bi-Ag-Te systems showing the paragenetic sequence of telluride minerals and pentlandite

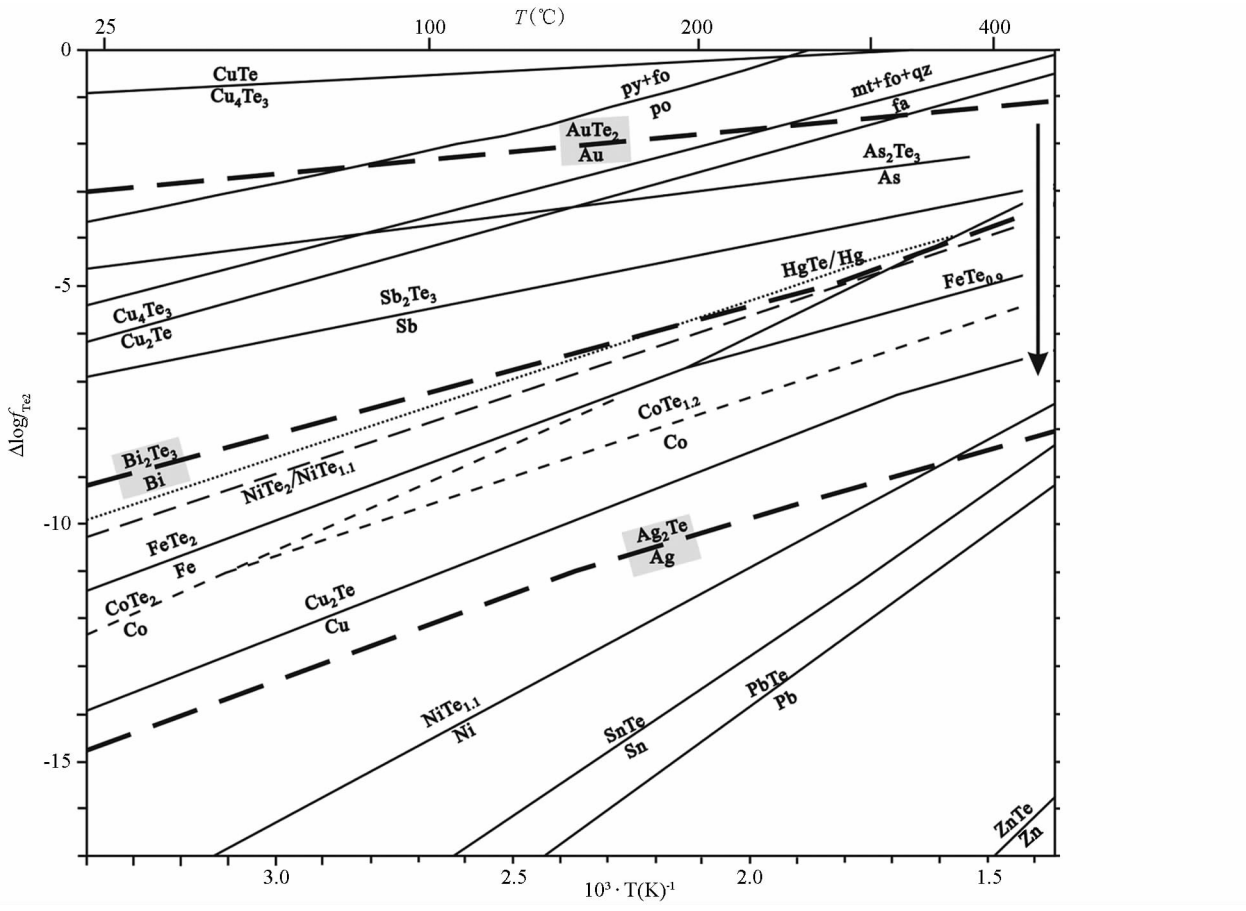


图 6 不同金属元素的碲化物 f_{Te_2}-T 图解(据 Afifi *et al.*, 1988a)

Fig. 6 Diagram showing various reactions as a function of the difference in the fugacity of Te_2 from saturation and temperature. (after Afifi *et al.*, 1988a)

Te_2^{2-} 成矿流体中沉淀(Zhang and Spry,1994),本次研究也未发现碲金矿,因此 $\log f_{Te_2}$ 上限低于碲金矿形成所需的 $\log f_{Te_2}$ 即 -11.2。

本区碲化物形成于黄铁矿之后的贫硫环境,碲化物沉淀时的硫逸度 $\log f_{S_2}$ 上限为 -16.8。与多数学者认为碲化物的形成显示贫硫环境(涂光炽等,2004)的观点一致,据以上讨论,本区碲化物形成时的 $\log f_{Te_2}$ 范围为 -19.5 ~ -11.2,$\log f_{S_2}$ 上限为 -16.8。

5.3 碲的来源及其意义

由于碲是亲地幔地核,高挥发,水溶性差,易富集于硫化物的元素(Afifi *et al.*, 1988b;杜乐天等,1996),碲含量高是岩体源岩中含有幔源组分的标志(陈光远等,1993),多数与碲相关的矿床其成因也与深部岩浆活动或地幔有着密切联系,如四川大水沟碲矿床,为壳幔混源深成岩浆活动形成,碲来自深源气液流体(毛景文和魏家秀,2000;温春齐等,2002);河北东坪金矿,碲主要来自深部岩浆活动及其脱气流体(涂光炽等,2004),因此碲化物的出现在一定程度上反映

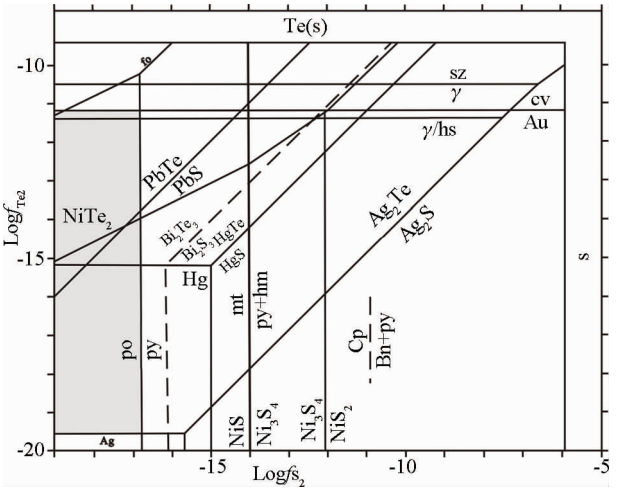


图 7 200℃ 条件下不同金属元素的碲化物-硫化物的 f_{Te_2}-f_{S_2} 图解(据 Afifi *et al.*, 1988b)

阴影区为本区碲化物形成时的 Te_2-S_2 逸度范围

Fig. 7 The stabilities of some sulfides and tellurides as function of the fugacities of S_2 and Te_2 at 200℃ (after Afifi *et al.*, 1988b)

The shadow region shows the condition of telluride minerals formation

了幔源的贡献。尽管英格庄金矿产出的碲化物的量不大,碲化物化学成分普遍贫碲,碲逸度不够高,不是富碲碲化物的地幔射气机制形成的(杜乐天等,1996),但英格庄金矿碲化物的发现表明其成矿流体含有一定量的碲元素,成矿源区具有较高的碲元素地球化学背景值,成矿物质来源与地幔具有密切关系,即本区碲化物的产出显示了深成幔源成因的信息。

Te 在元素周期表中处于 VI A 族,与 Au 具有相近的化学性质,并且可与 Au 形成化合物矿物(刘英俊和马东升,1991)。基于碲与金的密切关系,笔者认为可以通过碲元素的来源及其揭示的深成幔源信息探讨金的物质来源,主要有以下几种情况:

英格庄金矿赋矿围岩中含有荆山群中的变基性火山岩构成的捕虏体。由于胶东地区在太古代和早元古代发育多次的玄武质岩浆活动(孙丰月等,1995),多数玄武岩中的碲含量较低(Hattori *et al.*, 2002),导致碲等成矿元素不断浓集于胶东残留地幔,所以推测荆山群为本区成矿提供足量的碲元素可能性不大,对金成矿的贡献也不大。

英格庄金矿的赋矿围岩是昆嵛山杂岩体,岩浆物质来源为胶东群部分重熔,物质组成以壳源为主(陈光远等,1996),形成时代为晚侏罗世。由于其成岩年龄(160 ~ 140Ma)与牟乳成矿带成矿年龄(~ 117Ma)(胡芳芳等,2004,2006)相差较大,并且此时胶东地区地壳较厚(张华锋等,2006),不利于幔源金属物质上升,所以昆嵛山杂岩体提供碲和金等成矿元素可能性不大。

值得注意的是本区产出的早白垩世晚期的岩浆岩(包括三佛山岩体和基性脉岩)。笔者认为该期岩浆活动与本区金成矿事件关系较为密切。首先,物质来源上,早白垩世晚期岩浆岩显示了幔源物质特征。其中,三佛山岩体是幔源基性岩浆与地壳熔融的酸性端元混合的产物(张华锋等,2006),基性脉岩也显示了深源特征,这与英格庄金矿碲化物揭示的深成幔源信息一致。再者,形成时代上,该期岩浆岩的成岩年龄(114 ~ 111Ma)与牟乳成矿带金矿的成矿年龄(~ 117Ma)(胡芳芳等,2004,2006)较接近,可能为同一构造岩浆热事件的产物。另外,构造-岩浆活动背景上,胶东地区在中生代发生大规模地幔上涌,岩石圈减薄(郑建平,1999;Gao *et al.*,2004),在早白垩世岩石圈减薄至最大,地壳厚度恢复至正常(30km ±)(张华锋等,2006),并发生强烈的壳幔相互作用(Zhang *et al.*,2002),壳幔物质大比例的交换和混合(翟明国等,2003)导致胶东残留地幔中已富集的碲和金等亲地幔成矿元素得以上升迁移。即中生代岩石圈减薄事件在早白垩世达高峰,为已富集的幔源金属物质的再聚集、迁移和最终成矿提供了有利条件(包括成矿物质来源、动力来源、迁移通道和沉淀场所)。

综上,英格庄金矿床的碲化物的发现揭示了深成幔源的信息。鉴于碲与金相近的地球化学特征和密切关系,认为金矿赋矿围岩荆山群和昆嵛山杂岩体提供成矿物质的可能性不大,而白垩纪早期的构造-岩浆活动特别是壳幔物质的交换过程与金成矿关系更为密切。

致谢 山东金洲矿业集团李振江总经理、于虎副总经理、柳玉明经理、刘振豪工程师和其他同行在野外工作中提供了大力协助。核工业北京地质研究院分析测试研究中心范光高级工程师和葛祥坤工程师在电子探针分析测试过程中给予了帮助。审稿人提出宝贵意见和建议。在此一并表示衷心的感谢。

References

Afifi AM, Kelly WC and Esene EJ. 1988a. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria. Economic Geology, 83: 377 – 394

Afifi AM, Kelly WC and Esene EJ. 1988b. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: II. Applications to telluride-bearing Ore Deposits. Economic Geology, 83: 395 – 404

Ahmad M, Solomon M and Walshe JL. 1987. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji. Economic Geology, 82: 345 – 370

Callow KJ and Worley BW JR. 1965. The occurrence of telluride minerals at the Acupan gold mine, Mountain Province, Philippines. Economic Geology, 60: 251 – 268

Chen GY, Sun DS, Zhou XR, Shao W, Gong RT and Shao Y. 1993. Genetic Mineralogy and Gold Mineralization of Guojialing Granodiorite in Jiaodong Region. Beijing: China University of Geosciences Press, 84 (in Chinese with English abstract)

Chen GY, Sun DS and Shao Y. 1996. Typomorphic significance of accessory minerals of gold-hosting Kunyushan monzonitic granite in Jiaodong, China. Geoscience, 10 (2): 75 – 186 (in Chinese with English abstract)

Chen MY, Liu JL, Hu JJ, Zou YX and Zhang HY. 2008. Discovery and geological significance of Sandaowanzi telluride type gold deposit in the northern Daxing'anling, Heilongjiang, China. Geological Bulletin of China, 27(4): 584 – 587 (in Chinese with English abstract)

Dobbe R. 1993. Bismuth telluride (joseite-B, bismuthian tsumoite) in a Pb-Zn deposit from Tunaberg, Sweden. European Journal of Mineralogy, 5: 165 – 170

Du LT, Liu RX and Deng JF. 1996. Geochemistry of Mantle Fluids and Asthenosphere (Asthenoliths). Beijing: Geological Publishing House, 456 – 457 (in Chinese with English abstract)

Gamyanin GN, Leskova NV, Vyal'sov LN and Laputina IP. 1982. Bismuth tellurides Bi_2Te and BiTe-in deposits of northeast USSR. International Geology Review, 24(4): 451 – 456

Gao S, Rudnick RL and Yuan HL. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432: 892 – 896

Guo JH, Chen FK, Zhang XM, Siebel W and Zhai MG. 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1281 – 1301 (in Chinese with English abstract)

Hattori KH, Arai S and Clarke DB. 2002. Selenium, tellurium, arsenic and antimony contents of primary mantle sulfides. The Canadian Mineralogist, 40: 637 – 650

He Z and Zhang XR. 2006. Ore-controlling features and deep-seated metallogenic prognosis of Yinggezhuang gold belt, Shandong Province. Mineral Deposits, 25 (2): 175 – 182 (in Chinese with English abstract)

Hu FF, Fan HR, Yang JH, Wan YS, Liu DY, Zhai MG and Jin CW. 2004. Metallogenic age of Rushan gold deposit of auriferous-quartz type, Jiaodong: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon. Chinese Science Bulletin, 49(12): 1191 – 1198 (in Chinese)

Hu FF, Fan HR, Yang JH, Wang F and Zhai MG. 2006. The $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating age of sericite from altered rocks in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong peninsula and its constraints on the gold mineralization. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 25(2):109 – 114(in Chinese with English abstract)

Hu FF, Fan HR, Yang KF, Shen K, Zhai MG and Jin CW. 2007. Fluid inclusions in the Denggezhuang lode gold deposit at Muping, Jiaodong Peninsula. Acta Petrologica Sinica, 23(9):2155 – 2164(in Chinese with English abstract)

Hu HB, Niu SY, Mao JW, Sun AQ and Xu CQ. 2004. Geological features and formation mechanism of the Mofanggou tellurium-gold deposit in Pinyi Area, western Shandong. Acta Geoscientia Sinica, 25(5):523 – 528(in Chinese with English abstract)

Hu WX, Sun GX, Zhang WL and Wang ZK. 2005. Au-Ag telluride minerals and their precipitation mechanism in the Rushan gold deposit, Shandong. Acta Mineralogica Sinica, 25(2):177 – 182(in Chinese with English abstract)

Huang FR. 2001. Genesis of tsumoite and hedleyite of Guantian pyrite deposit. Geology of Chemical Minerals, 23(1):8 – 18(in Chinese with English abstract)

Li BH, Cao ZM, Jin JF and Wen CQ. 1999. Physicochemical conditions of the tellurium deposit in Dashuigou. Scientia Geologica Sinica, 34(4):463 – 472(in Chinese with English abstract)

Li SR, Chen GY, Sao W and Sun DS. 1996. Genetic Mineralogy of Rushan Gold Field, Jiaodong, China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 24(in Chinese with English abstract)

Li ZL and Yang MZ. 1993. Geology-Geochemistry of Gold Deposits in Jiaodong Region. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 81 – 91(in Chinese with English abstract)

Liu YJ and Ma DS. 1991. Geochemistry of Gold. Beijing: Science Press, 48(in Chinese)

Mao JW, Chen YC, Yang BC, Lei YF and Zhou JX. 1995a. Tetradymite from the Dashuigou tellurium deposit, Sichuan, Southwest, China. Scientia Geologica Sinica, 30(1):47 – 52(in Chinese with English abstract)

Mao JW, Chen YC, Zhou JX and Yang BC. 1995b. Geology, mineralogy and geochemistry of the Dashuigou tellurium deposit in Shimian County, Sichuan. Acta Geoscientia Sinica, 3:276 – 290(in Chinese with English abstract)

Mao JW and Wei JX. 2000. Helium and argon isotopic components of fluid inclusions and tracing to the source of metallogenic fluids in the Dashuigou tellurium deposit of Sichuan Province. Acta Geoscientia Sinica, 21(1):58 – 61(in Chinese with English abstract)

Qiu SD, Wang BH, Xu JH and XieYL. 2008. Ingodite found for the first time in China. Acta Mineralogica Sinica, 28(4):357 – 359 (in Chinese with English abstract)

Shackleton JM, Spry PG and Bateman R. 2003. Telluride mineralogy of the golden mile deposit, Kalgoorile, western Australia. The Canadian Mineralogist, 41:1503 – 1524

Shimazaki H and Ozawa T. 1978. Tsumoite, BiTe, a new mineral from the Tsumo mine-Japan. American Mineralogist, 63:1162 – 1165

Sun FY, Shi ZL and Feng BZ. 1995. Gold Ore Geology, Lithogenesis and Metallogenesis Related to the Differentiation of Mantle-Derived C-H-O Fluids in Jiaodong Peninsula, Eastern China. Changchun: Jilin People's Publishing House, 9 – 17(in Chinese)

Thompson TB, Trippel AD and Dwelley PC. 1985. Mineralized veins and breccias of the Cripple Creek district, Colorado. Economic Geology, 80:1669 – 1688

Tu GC, Gao ZM, Hu RZ, Zhang Q, Li ZY, Zhao ZH and Zhang BG. 2004. Geochemistry and Metallogenic Mechanism of Dispersed Elements. Beijing: Geological Publishing House, 268 – 317(in Chinese with English abstract)

Wang P. 1987. Systematic Mineralogy. Beijing: Geological Publishing House, 231 – 501(in Chinese)

Wang RC, Xu SJ, Chen XM, Lu JJ, Shen WZ, Luo YN and Cao ZM. 1997. Tsumoite from the Dashuigou independent Te deposit, Sichuan Province. Acta Mineralogica Sinica, 17(3):280 – 284(in Chinese with English abstract)

Wen CQ, Cao ZM, Li BH and Luo XJ. 2002. Sources of ore-forming elements and fluid of the Dashuigou tellurium deposit, Sichuan Province. Journal of Chengdu Univeristy of Technology, 29(5):526 – 532(in Chinese with English abstract)

Xie JD and Qian HD, Li YH. 2000. Geochemical characteristics of tellurium and minerogenic mechanism of the Guilaizhuang tellurium-type gold deposit, Shandong Province. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 15(2):133 – 141 (in Chinese with English abstract)

Zav'yalov EN and Beginov VD. 1982. Sulphotsumoite, Bi_3Te_2S, a new bismuth mineral. Zapiski Vses. Mineral. Obshch, 111: 316 – 320(in Russian)

Zhai MG, Zhu RX, Liu JM, Meng QR, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF and Liu W. 2003. Time range of Mesozoic tectonic region inversion in eastern North China Block. Science in China(Series D), 33(10): 913 – 920(in Chinese)

Zhang HF, Sun M and Zhou XH. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Cration: Evidence from major- trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144:241 – 254

Zhang HF, Zhai MG, He ZF, Peng P and Xu BL. 2004. Petrogenesis and implications of sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong Province. Acta Petrologica Sinica, 20(3):369 – 380(in Chinese with English abstract)

Zhang HF, Zhai MG, Tong Y, Peng P, Xu BL and Guo JH. 2006. Petrogenesis of the Sanfoshan high-Ba-Sr granite, Jiaodong peninsula, eastern China. Geological Review, 52(1):43 – 53(in Chinese with English abstract)

Zhang PH, Zhao ZH, Wang YX, Cao ZM and Lai MY. 2000a. New evidence for the metasomatism of graphic-myrmekitic textures of tsumoite in the Dashuigou tellurium deposit. Geological Review, 46(3):318 – 323(in Chinese with English abstract)

Zhang PH, Zhao ZH, Zhao WX, Lai MY and Cao ZM. 2000b. Two types of micrographic textures in the tsumoite of Dashuigou independent tellurium deposit, Sichuan Province. Geological Journal of China Universities, 6(2):188 – 193(in Chinese with English abstract)

Zhang PH, Zhao ZH, Zhu JC, Zhang WL, Bao ZW and Zhang YH. 2002. Tellurides of gold and silver and their capacity of carryinggoldin ores from the Dongping type gold deposits, Hebei Province, China. Acta Mineralogica Sinica, 22(4):321 – 328 (in Chinese with English abstract)

Zhang XM and Spry PG. 1994. Calculated stability of aqueous tellurium species, calaverite, and hessite at elevated temperatures. Economic Geology, 89:1152 – 1166

Zheng JP. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithosphere Thinning beneath the Eastern China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 110 – 112(in Chinese with English abstract)

Zhou QF. 2010. Genetic mineralogy and deep prospects of the Yinggezhuang gold deposit in Rushan County, Jiaodon. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1 – 97(in Chinese with English summary)

附中文参考文献

陈光远，孙岱生，周珣若，邵伟，宫润潭，邵岳. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化. 北京：中国地质大学出版社，84

陈光远，孙岱生，邵岳. 1996. 胶东昆嵛山二长花岗岩副矿物成因矿物学研究. 现代地质，10(2)：175 – 186

陈美勇，刘俊来，胡建江，邹运鑫，张宏远. 2008. 大兴安岭北段三道湾子碲化物型金矿床的发现及意义. 地质通报，27(4)：584 – 587

杜乐天，刘若新，邓晋福. 1996. 地幔流体与软流层(体)地球化学. 北京：地质出版社，456 – 457

郭敬辉，陈福坤，张晓曼，Siebel W，翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程：锆石 U-Pb 年

代学. 岩石学报,21(4):1281 – 1301
贺振,张学仁. 2006. 山东英格庄金矿床构造控矿特征及深部预测. 矿床地质,25(2):175 – 182
胡芳芳,范宏瑞,杨进辉,万渝生,刘敦一,翟明国,金成伟. 2004. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄:热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定. 科学通报,49(12):1191 – 1198
胡芳芳,范宏瑞,杨进辉,王非,翟明国. 2006. 胶东乳山金矿蚀变岩中绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄及其对金矿成矿事件的制约. 矿物岩石地球化学通报,25(2):109 – 114
胡芳芳,范宏瑞,杨奎峰,沈坤,翟明国,金成伟. 2007. 胶东牟平邓格庄金矿床流体包裹体研究. 岩石学报,23(9):2155 – 2164
胡华斌,牛树银,毛景文,孙爱群,许传奇. 2004. 鲁西平邑磨坊沟碲金型金矿的地质特征及成因机制. 地球学报,25(5):523 – 528
胡文瑄,孙国曦,张文兰,王昭坤. 2005. 山东乳山金矿中金-银碲化物的矿物学特征与沉淀机理. 矿物学报,25(2):177 – 182
黄富荣. 2001. 官田黄铁矿矿床中楚碲铋矿、赫碲铋矿的成因及找矿意义. 化学矿产地质,23(1):8 – 18
李保华,曹志敏,金景福,温春齐. 1999. 大水沟碲矿床成矿物理化学条件研究. 地质科学,34(4):463 – 472
李胜荣,陈光远,邵伟,孙岱生. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学. 北京:地质出版社,1 – 24
李兆龙,杨敏之. 1993. 胶东金矿床地质地球化学. 天津:天津科学技术出版社,81 – 91
刘英俊,马东升. 1991. 金的地球化学. 北京:科学出版社,48
毛景文,陈毓川,杨百川,雷蕴芬,周剑雄. 1995a. 四川石棉县大水沟碲多金属矿床辉碲铋矿研究. 地质科学,30(1):47 – 52
毛景文,陈毓川,周剑雄,杨百川. 1995b. 四川省石棉县大水沟碲矿床地质、矿物学和地球化学. 地球学报,3:276 – 290
毛景文,魏家秀. 2000. 大水沟碲矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及其示踪成矿流体的来源. 地球学报,21(1):58 – 61
邱士东,王葆华,徐九华,谢玉玲. 2008. 因硫碲铋矿在中国的首次发现. 矿物学报,28(4):357 – 359
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,9 – 17
涂光炽,高振敏,胡瑞忠,张乾,李朝阳,赵振华,张宝贵. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京:地质出版社,268 – 317
王濮. 1987. 系统矿物学. 北京:地质出版社,231 – 501
王汝成,徐士进,陈小明,陆建军,沈渭洲,骆耀南,曹志敏. 1997. 四川大水沟独立碲矿床中的楚碲铋矿. 矿物学报,17(3): 280 – 284
温春齐,曹志敏,李保华,罗小军. 2002. 四川大水沟碲矿床成矿物质来源研究. 成都理工学院学报,29(5):526 – 532
谢家东,钱汉东,李永徽. 2000. 山东省平邑归来庄碲型金矿床碲元素地球化学特征及成矿机制探讨. 地质找矿论丛,15(2):133 – 141
翟明国,朱日祥,刘建明,孟庆任,侯泉林,胡圣标,李忠,张宏福,刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D 辑),33(10):913 – 920
张华锋,翟明国,何中甫,彭澎,许保良. 2004. 胶东昆嵛山杂岩中高锶花岗岩地球化学成因及其意义. 岩石学报,20(3):369 – 380
张华锋,翟明国,童英,彭澎,许保良,郭敬辉. 2006. 胶东半岛三佛山高 Ba-Sr 花岗岩成因. 地质论评,52(1):43 – 53
张佩华,赵振华,王一先,曹志敏,赖鸣远. 2000a. 大水沟碲矿中楚碲铋矿显微文像结构-交代成因新证据. 地质论评,46(3):318 – 323
张佩华,赵振华,赵文霞,赖鸣远,曹志敏. 2000b. 四川大水沟楚碲铋矿的两类显微文像结构. 高校地质学报,6(2):188 – 193
张佩华,赵振华,朱金初,张文兰,包志伟,张玉虎. 2002. 东坪式金矿的金银碲化物及其载金性. 矿物学报,22(4):321 – 328
郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄. 武汉:中国地质大学出版社,110 – 112
周起凤. 2010. 胶东乳山英格庄金矿成因矿物学与深部远景研究. 硕士学位论文. 北京:中国地质大学,1 – 97