

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.10.009

赣西七宝山钴铅锌矿床碧玉岩的发现及对矿床成因的制约

孙建东¹, 李海立¹, 张雪辉^{1*}, 陆凡², 徐敏成¹, 卢致慧³

SUN Jiandong¹, LI Haili¹, ZHANG Xuehui^{1*}, LU Fan², XU Mincheng¹, LU Zhihui³

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
 2. 江西省核工业局 265 大队, 江西 鹰潭 335001;
 3. 江西铜业集团有限公司七宝山矿业有限公司, 江西 宜春 336400
1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;
2. 265 Brigade of Jiangxi Province Nuclear Geology, Yingtan 335001, Jiangxi, China;
3. Jiangxi Copper Group Co.Ltd. Qibaoshan Mining Co.Ltd., Yichun 336400, Jiangxi, China

摘要:对赣西七宝山钴铅锌矿中的碧玉岩进行岩石学、地球化学研究,可为矿床成因及区域海底火山活动成矿作用提供地质证据。赣西七宝山钴铅锌矿床为中型钴矿床,主矿体产于石炭系黄龙组铁白云岩中,矿石结构以粒状、胶状结构为主,块状、层纹状硫化物矿体与新发现的碧玉岩空间相依,同地产出,密切相伴,互相包夹,表明其与成矿具有密切的共生关系,属同期沉积产物;碧玉岩主量、微量、稀土数据表明,其具有高硅贫铝富铁、锰特征,Al/(Al+Fe+Mn)值为0.13~0.16,与热水成因的硅质岩相当;富集Rb、Ba、U、La、Zr、Hf元素,亏损K、Nd、P、Ti元素,U/Th值为185.83~373.85,Y/Ho值为26.88~50.00,稀土元素总量低,为 $0.88 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6}$,LREE/HREE值介于0.07~0.36之间,轻、重稀土元素分馏程度不高,Ce无异常, δEu 中等负异常,显示碧玉岩物质来源于深部海底热水,少量同生海水混合形成,形成于晚古生代陆缘裂谷海槽环境。研究成果为矿床属于海底火山喷流沉积成因提供了直接有利的证据。

关键词:七宝山;钴;碧玉岩;发现;矿床成因;矿产勘查工程

中图分类号:P618.42;P618.43;P618.62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)10-1718-10

Sun J D, Li H L, Zhang X H, Lu F, Xu M C, Lu Z H. The discovery of jasper rocks in the Qibaoshan cobalt-lead-zinc deposit in western Jiangxi Province and its restriction on the genesis of the deposit. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(10): 1718-1727

Abstract: Qibaoshan Co-Pb-Zn deposit is a medium-sized cobalt ore deposit, the main ore body in carboniferous Huanglong Formation dolomite, ore structure is given priority to with granular, colloidal structure, block, layer striate sulfide ore bodies and newly discovered jasper rock spatial dependency, with output, close companions, sandwiched between each other, that with the mineralization has a close symbiosis, belong to the same period deposits; The main trace and rare earth data of the jasper rock show that it is characterized by high silicon, poor aluminum and rich in iron and manganese. The Al/(Al+Fe+Mn) ratio is 0.13~0.16, which is similar to the siliceous rocks of hydrothermal origin. Enrichment of Rb, Ba, U, La, Zr, Hf, depletion of K, Nd, P, Ti, U/Th ratio of 185.83~373.85, Y/Ho ratio of 26.88~50.00, ΣREE is low, ranging from $0.88 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6}$. The LREE/HREE values range from 0.07 to

收稿日期:2021-07-22;修订日期:2021-08-08

资助项目:国家重点研发项目《武夷德化-尤溪-永泰矿集区三维综合探测与深部成矿预测》(编号:2016YFC0600210)和中国地质调查局项目《钦杭成矿带武宁-平江地区钨铜多金属矿地质调查》(编号:DD20190153)、《江南陆块南缘成矿带(东段)战略性矿产调查》(编号:DD20240066)

作者简介:孙建东(1987-),男,硕士,高级工程师,从事矿床地质研究工作。E-mail:njsunjiandong@163.com

* **通信作者:**张雪辉(1983-),男,正高级工程师,从事矿床地质研究工作。E-mail:185077008@qq.com

0.36, and the fractionation degree of light and light rare earth is not high. The Ce anomaly is not found, and the δEu moderate negative anomaly indicates that the jade rocks material originated from deep seabed hot water, and a small amount of syngenetic seawater was mixed and formed in the Late Paleozoic continental margin rift trough environment. Therefore, it provides direct and favorable evidence that the deposit belongs to the sedimentary origin of submarine volcanic effluents.

Key words: Qibaoshan; Cobalt; jasper rocks; discovery; genesis; mineral exploration engineering

七宝山钴铅锌矿床行政区划属于江西宜春市上高县,为以含钴为特色的中型矿床,处于钦杭成矿带东段西侧,位于七宝山-赋春深断裂带中西段。长期以来,前人从赋矿岩石、矿物特征、稳定同位素、钴赋存状态等方面提供了较丰富的资料和成因依据,其矿床成因有同生成矿(沉积岩容矿的 SEDEX 型)、后生成矿(燕山期岩浆成矿)(丁少辉等,2014)、层控-叠加成矿的争论(杨明桂等,2004;王学平等,2011)。

20 世纪 60 年代,红海海渊规模巨大的多金属矿床和含金属卤水的发现(Degens et al., 1969; Bischoff, 1991; Bogdanov, 1997),揭开了现代海底热液活动调查研究的序幕,包括深海钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)、国际大洋发现计划(IODP)及多国的海洋科考工作,使科学家能够更直观地了解现代海底金属矿床的形成、热液区硅质沉淀及生物活动(Adachi et al., 1986; Murray, 1994; 侯增谦等,2003;李红阳等,2006)。碧玉岩是一种含铁的致密块状硅质岩石,被认为是典型的热水喷流岩石(陈先沛等,1992;李红阳等,2006;卢宗柳等,2006;王小红等,2008),其多与火山成因的块状硫化物体系(VMS)、蛇绿岩套、前寒武纪硅铁质建造共生,是一种火山-热液成因的 Si-Fe 化学沉积物,具有重要的成因指示意义(华明弟,1985;Hesse, 1989; Hekinian et al., 1993; Grenne et al., 2005; 孙治雷等,2010;孙剑等,2014)。七宝山矿区的碧玉岩与原生钴铅锌矿体空间相依,同地产出,系首次野外识别,未有相关报道,其发育表明七宝山矿床的形成可能与海底火山热液活动有关。因此,研究七宝山矿床中碧玉岩的岩石学特征、分布特点及地球化学特征,对解决矿床成因具有重要的指示意义,也可作为一种重要的找矿标志,指导下一步矿产勘查工作。

1 矿区地质概况

区内由老至新分布有南华系、泥盆系、石炭系

及二叠系,未有岩浆岩分布(图 1)。其中,南华纪下坊组为变质凝灰质粉砂岩、板状绢云母千枚岩,区域上以赋含“新余式铁矿”为特征,是区内变质基底,与上覆地层为角度不整合接触;泥盆系棋子桥组-余田桥组为砂质灰岩夹钙质粉砂岩、粉砂岩,该层上部局部夹菱铁矿、钴、铅锌矿体;泥盆纪-石炭纪华山岭组为深灰色石英砂岩夹砂砾岩,局部含黄铁矿、铅锌矿结核,为下矿体脉状矿体主要赋存层位,与黄龙组呈平行不整合接触,上下 2 个矿体之间属于同期成矿;石炭系黄龙组为中-细晶铁白云岩,是上矿体层状矿体赋存层位,该层产出大量碧玉岩条带和团块,呈串珠状顺层分布;另外矿区南东侧分布有二叠系茅口组中厚层状碳酸盐岩建造、乐平组薄-中厚层状长石石英粗砂岩、砂质页岩、泥页岩,与成矿无关。

区内褶皱构造主体为高崇山斜歪复背斜,轴部为泥盆系棋子桥组-余田桥组,翼部为华山岭组和黄龙组,南北两翼受北东东向断裂 F_1 和 F_2 逆冲推覆破坏,表现为矿体在北盘上升,南盘下降,垂直断距 10~15 m,水平位移 5~10 m,断距小,对矿体的完整性影响不大,为成矿后构造。 F_1 断裂使矿区北部南华系下坊组逆覆于七宝山背斜北翼泥盆系-石炭系之上, F_2 逆冲断层使背斜北翼泥盆系-石炭系逆覆于南翼二叠纪茅口组之上,南翼泥盆系-石炭系断失伏于 F_2 之下深处。

矿体整合于泥盆系-石炭系中,随围岩地层的褶皱形态同步起伏,同步褶皱,各矿层形态相似,曲率相同,层厚在转折端大于翼部,总体走向北东东,倾向北西,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$,具“上层下脉”特征。全区以黄龙组与华山岭组之间不整合面为界,由上至下分上、下 2 个矿体。黄龙组中为上矿体,为块状、层纹状硫化物矿体;下矿体位于华山岭组、棋子桥组-余田桥组,为细脉状-网脉状构造矿体。矿区主矿体为上矿体底部和下矿体上部的铅锌(铜、钴)矿体,位于黄龙组、华山岭组不整合面两侧,上下重叠,紧密相连,占全区铅锌和钴资源储量的 99.06%

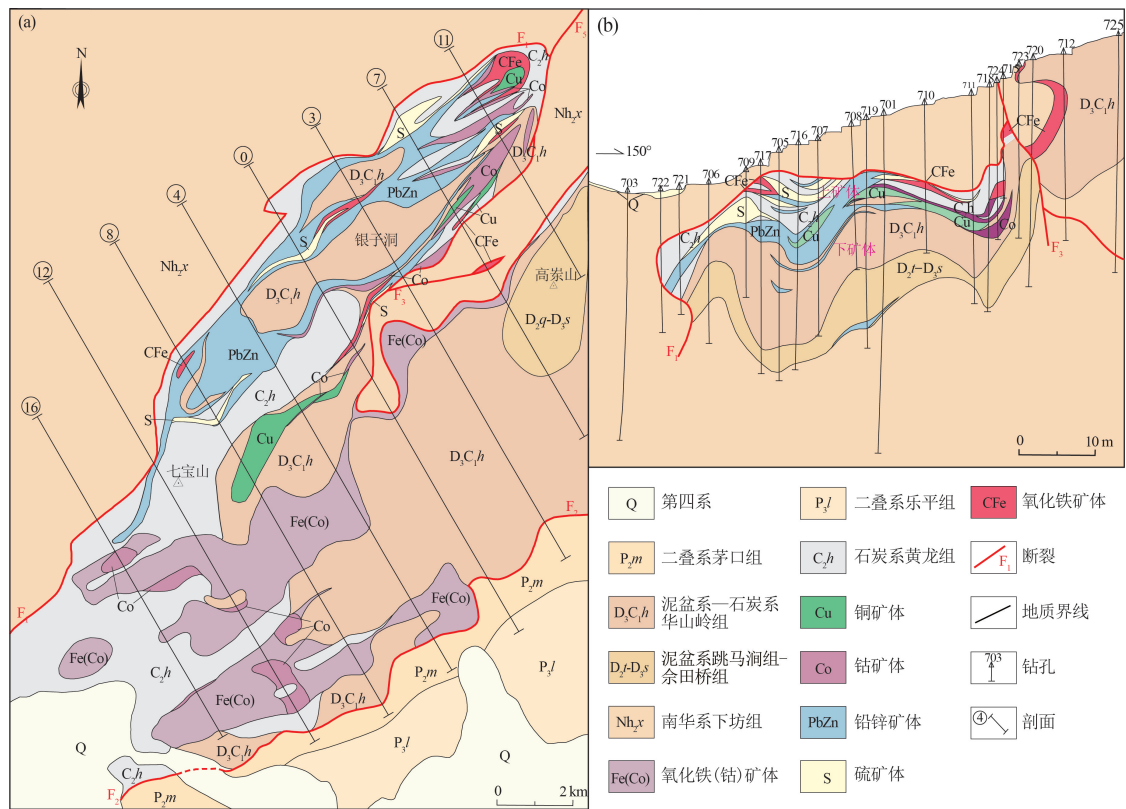


图1 七宝山钴铅锌矿区地质图(a)及剖面图(b)

Fig. 1 Geological map (a) and geological profile map (b) of Qibaoshan Co-Pb-Zn deposit filed

和100%。上矿体底部铅锌(铜、钴)矿体呈似层状,形态简单。走向长1275 m,矿体一般厚4~15 m,平均厚11.51 m,厚度变化系数82%,属较稳定型,构造影响小,在褶皱轴部厚度增大,Cu、Co品位分布较均匀,铅锌有明显的富集。下矿体铜铅锌(钴)矿体呈似层状,形态较简单,走向长925 m,倾向斜长269.30 m,厚度较稳定,一般厚4~20 m,平均12.81 m,变化系数86%,与上3矿体在向斜轴部厚度较大不同,是矿区最大的铜矿体。

矿石类型可分为氧化型铁(钴)矿石和原生硫化物(铅锌、铜、钴、硫)型矿石,前者系原生硫化物型矿石氧化而成,原生硫化物型(铅锌、铜、钴、硫)矿石中主要矿石矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、铁硫砷钴矿、辉钴矿、镍辉钴矿,次为菱铁矿,脉石矿物主要有白云石、方解石。

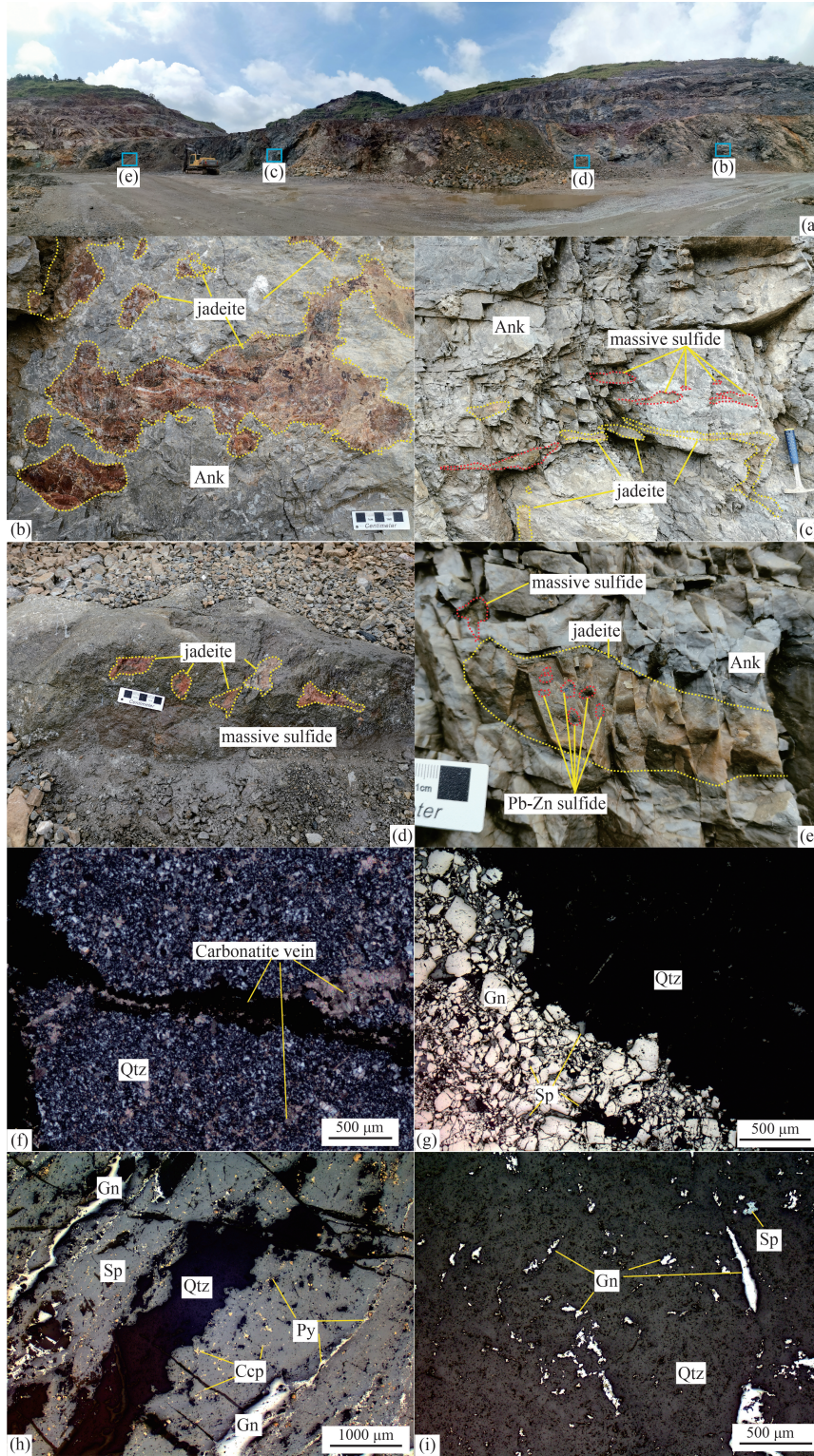
区内围岩蚀变微弱,蚀变类型简单,主要为硅化、绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化,偶见重晶石化和蛇纹石化。其中,绿泥石化、碳酸盐化与矿化较密切。矿石结构主要有他形、半自形晶粒状结构,其次有胶状结构、残余结构。矿石构造以块状、层

纹状、细脉状-网脉状、浸染状构造为主,次为角砾状、条带状构造。

2 碧玉岩特征及与矿体之间的关系

在矿区+175 m露头采掘平台(图版I-a),出露有石炭系黄龙组铁白云岩及主矿体上3类原生硫化物(铅锌、铜、钴)型矿石,为块状、层状硫化物矿体。黄龙组铁白云岩、主矿体多产出碧玉岩条带(团块)(图版I-c、d),浅肉红色、肉红色(图版I-b),显微镜下由微晶石英(>93%)、黄铁矿、方铅矿金属矿物(<1%)及粘土矿物、碳酸盐矿物等组成(图版I-f),微晶结构,粒径0.05~0.8 mm,石英微晶内部混浊,颗粒棱边清晰,没有胶质硅质连接,未见生物或微生物纹理。宏观上它们彼此间距数十厘米至数米,多与块状铅锌(钴、铜)条带、团块分层聚集(图版I-c),空间相依,同地产出,近距离顺层相伴分布,产状一致。条带形态多变,呈纺锤状、长椭圆状、月牙状、不规则状,长一般0.5~2 m,宽5~20 cm,最大可达40 cm,团块普遍不规则,大小一般10×20~20×30 cm,与铁白云岩、主矿体边界清晰、截然(图版I-d、

图版 I Plate I



a. 矿区+175 m 露头采掘平台及调查点位; b. 铁白云岩中不规则状碧玉岩透镜体、团块; c. 块状铅锌(钴、铜)条带、团块与碧玉岩透镜体、团块分层聚集; d. 块状铅锌(钴、铜)中纺锤状、透镜状碧玉岩, 两者之间界线清晰、截然; e. 透镜状碧玉岩中铅锌金属矿物集合体; f. 碧玉岩镜下微观特征; g. 碧玉岩与块状铅锌矿体之间界线清晰、截然; h. 碧玉岩与块状铅锌铜矿体相伴分布; i. 碧玉岩中他形脉状方铅矿、闪锌矿物。Carbonatite vein—碳酸盐脉体; jadeite—碧玉岩; massive sulfide—块状硫化物; Pb-Zn sulfide—Pb-Zn 硫化物; Ank—铁白云石; Qtz—石英; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿

g,h),无明显热液流体蚀变、穿插现象。在碧玉岩内可见有方铅矿、闪锌矿金属矿物集合体暗色斑点(图版 I -e),金属矿物呈自形—他形特征,与石英之间整合镶嵌,界线截然清晰(图版 I -i),说明金属元素与组成石英属同期沉积物。

综上所述,矿区的主矿体块状、层状硫化物矿体与碧玉岩同产于黄龙组铁白云岩、白云质灰岩、菱铁矿层中,同层共存,密切相伴,甚至互相包夹,说明二者具有相同成因。

3 分析方法及结果

3.1 分析方法

本次分析的碧玉岩样品采自矿区+175 m 露头采掘平台。主量、微量、稀土元素分析在自然资源部华东矿产资源监督检测中心完成,主量元素分析仪器为帕纳科公司的 Axios 4.0 型波长色散 X 射线荧光光谱仪,分析精度一般优于 2%~3%;微量及稀土元素分析仪器为电感耦合等离子体质谱仪,型号为美国 Thermo Fisher 公司的 ICAP Q,检测限优于 0.5×10^{-9} ,相对标准偏差小于 5%。

3.2 测试结果

表 1 列出了本次研究的 5 件碧玉岩样品主量、微量、稀土元素分析结果。其中 SiO_2 含量为 90.71%~98.62%,平均值 94.97%,属于纯硅质岩范围(91.00%~99.80%)(Murray et al., 1992a), Al_2O_3 含量为 0.09%~0.18%,平均值 0.14%, Si/Al 质量比为 915.57~1849.61,与纯硅质岩 Si/Al 质量比相当(80~1400)(Murray et al., 1992b)。 FeO 和 Fe_2O_3 含量高,分别为 0.04%~0.60%和 0.35%~0.58%, TiO_2 含量为 0.01%~0.03%,平均值 0.02%, MnO 含量为 0.02%~0.12%,平均值 0.05%。显示高硅贫铝富铁、锰特征。

碧玉岩的微量元素 U 含量为 17.30×10^{-6} ~ 30.60×10^{-6} ,平均值 23.82×10^{-6} ,Th 含量为 0.06×10^{-6} ~ 0.12×10^{-6} ,平均值 0.08×10^{-6} ,Ba 含量为 2.70×10^{-6} ~ 4.20×10^{-6} ,平均值 3.16×10^{-6} ,V 含量为 1.40×10^{-6} ~ 9.20×10^{-6} ,平均值 4.54×10^{-6} ,Cr 含量为 2.00×10^{-6} ~ 21.30×10^{-6} ,平均值 12.86×10^{-6} ,Ni 含量为 0.67×10^{-6} ~ 32.90×10^{-6} ,平均值 29.45×10^{-6} ,Sr 含量为 3.00×10^{-6} ~ 6.20×10^{-6} ,平均值 4.28×10^{-6} ,显示高 V、Cr、Ni、Sr 特征。原始地幔标准化蛛网图(图 2-a)显示,富集 Rb、Ba、U、La、Zr、Hf 元素,亏损 K、Nd、P、Ti 元素。稀土元素特征显示, ΣREE (稀土元素)总量低,为 0.88×10^{-6} ~ 2.16×10^{-6} ,平均值 1.37×10^{-6} ,LREE/HREE 值介于 0.07~0.36 之间,平均值 0.18,(La/Yb)_N 值为 5.84~14.67,平均值 9.84,轻、重稀土元素分馏程度不高,且轻稀土元素富集, δEu 值为 0.42~0.63,平均值 0.52,显示中等负异常, δCe 值为 0.87~1.15,平均值 1.00,Ce 无异常,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图 2-b)呈平坦型。

4 讨论

4.1 岩石成因

Adachi et al. (1986)、Yamamoto (1987)、Murray et al. (1992a; 1994) 等通过对各种成因硅质岩的研究,表明硅质岩中的 Fe 和 Mn 的富集主要与热液的参与有关,而 Al 和 Ti 元素是陆源物质的输入标志, $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值可以用来衡量成岩时陆源物质与热液组分的相对贡献,如东太平洋洋脊热水沉积物为 0.01, Galapagos 裂谷热液喷口沉积物接近于 0 (Bostrom et al., 1969),深海钻探计划(DSDP)发现热液硅质岩的比值平均为 0.12 (Murray et al., 1992b),而非热水成因的页岩和层状硅质岩分别为 0.62、0.60 (Yamamoto, 1987),并构建了 Al-Fe-Mn 图解

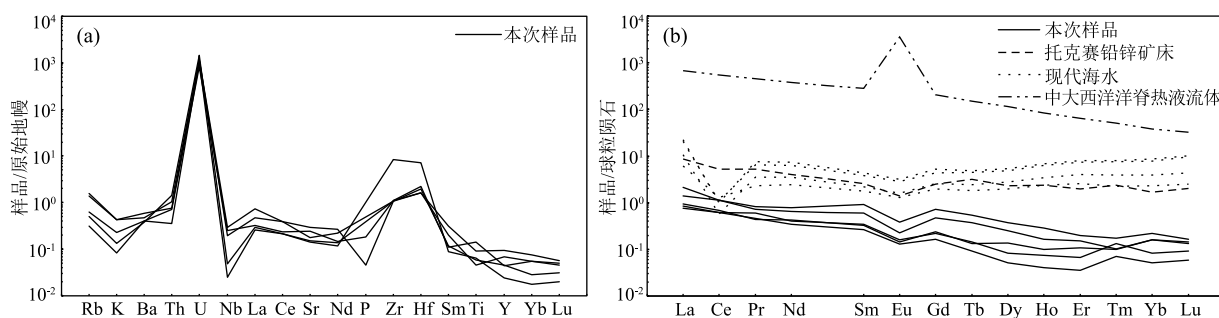


图 2 标准化微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分图(b)(标准化数值据 Sun et al., 1989)

Fig. 2 Normalized trace element spider diagrams(a) and REE patterns(b)

表 1 碧玉岩主量、微量及稀土元素分析结果

Table 1 The main, trace and rare earth element analysis results of jadeite rocks

送样号	QBS-YQ1	QBS-YQ2	QBS-YQ3	QBS-YQ4	QBS-YQ5	QBS-YQ1	QBS-YQ2	QBS-YQ3	QBS-YQ4	QBS-YQ5	
SiO ₂	95.21	98.62	90.71	93.48	96.83	Cu	58.30	2.00	2.20	106.00	32.10
Al ₂ O ₃	0.14	0.09	0.09	0.18	0.17	Pb	99.20	83.10	63.60	33.10	18.40
FeO	0.13	0.04	0.07	0.60	0.60	Zn	23.40	23.50	22.00	463.00	90.70
Fe ₂ O ₃	0.55	0.45	0.35	0.58	0.47	Cr	21.30	2.00	3.90	20.60	16.50
CaO	1.18	0.34	0.39	1.71	0.73	Ni	2.30	0.67	0.76	32.90	20.30
MgO	0.75	0.22	0.24	0.85	0.35	Co	1.10	0.62	0.42	94.30	50.80
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	Rb	0.40	0.32	0.20	1.00	0.88
Na ₂ O	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	Cs	0.42	0.39	0.39	0.52	0.51
TiO ₂	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	Bi	0.81	0.08	0.08	<0.05	0.05
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Hg	0.09	0.03	0.01	0.04	0.02
MnO	0.03	0.02	0.02	0.12	0.08	Sr	5.20	3.20	3.00	6.20	3.80
烧失量	1.87	0.53	8.48	2.41	1.00	Ba	2.80	2.70	2.80	3.30	4.20
SO ₂	0.02	0.01	0.02	0.23	0.09	V	3.20	1.40	1.40	9.20	7.50
Si	444313.33	460226.67	423313.33	436240.00	451873.33	Nb	0.18	0.04	0.02	0.21	0.14
Al	370.59	248.82	243.53	476.47	450.00	Ta	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Fe	1909.36	1575.00	1225.00	2041.27	1656.27	Zr	12.30	11.90	92.70	12.10	12.30
Mn	216.90	123.94	131.69	929.58	627.46	Hf	0.70	0.60	2.20	0.50	0.50
Si/Al	1198.94	1849.61	1738.24	915.57	1004.16	Be	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04
Fe ₂ O ₃ /SiO ₂	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	Ga	0.22	0.15	0.14	0.33	0.25
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Sn	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
Fe ₂ O ₃ /100-SiO ₂	0.11	0.33	0.04	0.09	0.15	Au	<3.00	<3.00	<3.00	<3.00	<3.00
Al ₂ O ₃ /100-SiO ₂	0.03	0.07	0.01	0.03	0.05	Ag	0.42	0.07	0.09	0.09	0.05
Fe ₂ O ₃ /TiO ₂	17.60	34.62	25.00	29.16	47.32	U	17.30	30.60	22.30	24.60	24.30
Al ₂ O ₃ /(Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃)	0.20	0.17	0.21	0.24	0.26	Th	0.06	0.12	0.12	0.09	0.07
Al/(Al+Fe+Mn)	0.15	0.13	0.15	0.14	0.16	U/Th	283.61	255.00	185.83	276.40	373.85
送样号	QBS-YQ1	QBS-YQ2	QBS-YQ3	QBS-YQ4	QBS-YQ5	TSK	SW-1 (150 m)	SW-2 (400 m)	SW-3 (1502 m)	SW-4 (2500 m)	HW (热水)
La	0.22	0.20	0.18	0.50	0.33	2.07	1.44	2.54	4.96	5.37	161.88
Ce	0.42	0.38	0.38	0.70	0.70	3.17	0.79	0.35	0.65	0.61	336.82
Pr	0.04	0.06	0.04	0.08	0.07	0.50	0.22	0.33	0.62	0.72	43.35
Nd	0.20	0.19	0.16	0.36	0.30	1.89	1.14	1.65	2.98	3.41	177.22
Sm	0.05	0.05	0.04	0.14	0.09	0.40	0.27	0.33	0.59	0.66	43.00
Eu	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08	0.07	0.09	0.16	0.19	210.06
Gd	0.05	0.05	0.03	0.15	0.10	0.51	0.40	0.53	0.90	1.06	42.48
Tb	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.12	0.07	0.09	0.17	0.18	5.60
Dy	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.58	0.50	0.71	1.22	1.37	29.03
Ho	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.13	0.14	0.20	0.35	0.38	4.70
Er	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.33	0.42	0.67	1.23	1.33	10.60

续表 1

送样号	QBS-YQ1	QBS-YQ2	QBS-YQ3	QBS-YQ4	QBS-YQ5	TSK	SW-1 (150 m)	SW-2 (400 m)	SW-3 (1502 m)	SW-4 (2500 m)	HW (热水)
Tm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.10	0.19	0.21	1.29
Yb	0.03	0.01	0.01	0.04	0.03	0.29	0.39	0.66	1.33	1.45	6.43
Lu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.11	0.24	0.26	0.82
Y	0.20	0.21	0.11	0.43	0.31	4.61	7.84	10.77	19.20	21.14	141.98
Y/Ho	35.71	50.00	47.83	26.88	33.33	34.69	57.99	54.87	54.17	55.03	30.19
ΣREE	1.09	0.99	0.88	2.16	1.74	10.18	5.98	8.37	15.59	17.20	1073.28
LREE	0.94	0.89	0.81	1.80	1.50	8.11	3.94	5.30	9.96	10.96	972.33
HREE	0.15	0.11	0.07	0.36	0.24	2.07	2.04	3.07	5.63	6.24	100.95
LREE/HREE	6.45	8.36	11.50	5.01	6.20	3.92	1.94	1.73	1.77	1.76	9.63
(La/Yb) _N	5.84	10.25	14.67	9.69	8.77	5.19	2.67	2.76	2.69	2.65	18.06
δEu	0.51	0.58	0.63	0.46	0.42	0.55	0.69	0.68	0.69	0.67	15.03
δCe	1.07	0.87	1.05	0.87	1.15	0.76	0.34	0.09	0.09	0.08	0.99

注:主量元素含量单位为%;微量、稀土元素含量单位为 10^{-6} 。其中 TSK 数据为 11 个样品加权平均值,据参考文献 Man et al.,2020;SW-1 (150 m)、SW-2(400 m)、SW-3(1502 m)、SW-4(2500 m)数据据参考文献 Alibo et al.,1999 不同深度现代海水数据;HW(热水)数据据参考文献(Bau et al.,1999)中大西洋洋脊热液流体数据。 $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_N/0.5(\text{Sm}_N+\text{Gd}_N)$; $\delta\text{Ce}=\text{Ce}_N/0.5(\text{La}_N+\text{Pr}_N)$

(Adachi et al.,1986)。七宝山的碧玉岩 Al/(Al+Fe+Mn) 值为 0.13~0.16,平均值 0.15,与热水成因的硅质岩相当。在热水成因与非热水成因的 Al-Fe-Mn 图解(图 3)中,数据点均投于热水成因区域,显示碧玉岩属于热水成因。

一般认为,V、Cr、Ni、As、Sr、Mo、Ag、Cd、Sb、Ba、U 等元素的高度富集可能与热液活动有关,而 Zr、

Hf、Ta、Nb、Th、Ti 等元素的高度富集主要与同生海水、陆源物质的输入有关(黎彤,1984),U 在大多数沉积岩或其他地质体中质量分数均高于 Th,但在热水沉积中 U/Th>1,而海水沉积岩中 U/Th<1(Girty et al.,1996)。碧玉岩 Cr、Ni 低于陆壳(88、71)、洋壳(190、160)丰度,Co 与洋壳(44)丰度相当(黎彤,1984;1994),富集 Rb、Ba、U、La、Zr、Hf 元素,亏损 K、Nd、P、Ti 元素,U/Th(185.83~373.85)远大于 1,显示碧玉岩物质来源为热水沉积的特征。

稀土元素总量、分馏程度也是研究硅质岩重要的方法手段。碧玉岩的稀土元素总量(均值 1.37)与典型的热液成因硅质岩(均值 10.18)(Yamamoto,1986)、现代正常海水(均值 11.79)(Alibo et al.,1999)、中大西洋洋脊热液流体(1073.28)(Bau et al.,1999)低,但与洋壳丰度(1.8)(黎彤,1994)相当;海底流体 Y/Ho 值与流体上升过程中与海水混合形成的铁氧化物对 Ho 的吸附能力强于 Y(Nozaki et al.,1997),Ho 元素优先从流体中被消除,导致海水中 Y/Ho 值高(约 105),相比之下,典型的海底热液具有较低的 Y/Ho 值(27~28)(Bau et al.,1999)。碧玉岩 Y/Ho 值介于 26.88~50.00(均值 38.75),低于海水 Y/Ho 值,但高于典型海底热液的 Y/Ho 值,表明分馏作用较海水弱,但较热液强,与典型热水成

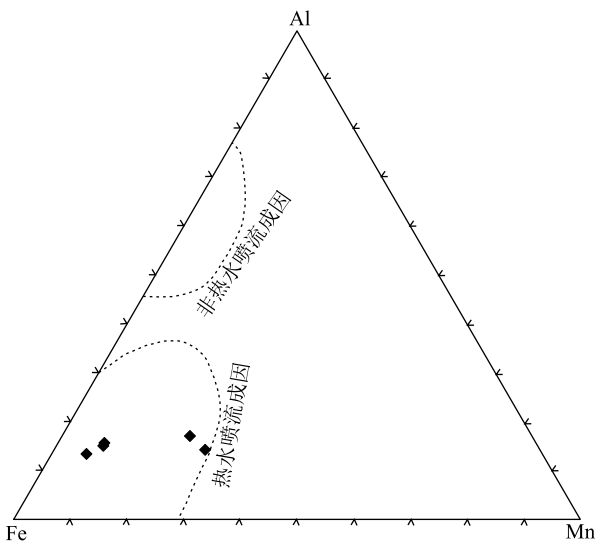


图 3 Al-Fe-Mn 图解(底图据 Adachi et al.,1986)

Fig. 3 Al-Fe-Mn diagram

因(34.69)、中大西洋洋脊热液流体(30.19)(Bau et al., 1999)相当,低于现代海水(55.52)(Alibo et al., 1999)。虽然陆源碎屑的带入也会导致低 Y/Ho 值(约 50)(Wen et al., 2016),但在碧玉岩中未发现碎屑特征,表明碧玉岩的来源为热水-海水混合源。此外, Eu 富集可以反映热液的流入(Murray et al., 1991; Bolhar et al., 2005),在稀土元素配分图及数据上, Eu 的中等负异常,有别于大西洋洋脊热液流体 Eu 异常特征,说明碧玉岩沉积过程中以硅质热水为主,没有大量热液的加入。

4.2 构造背景

Murray(1994)通过不同构造背景下显生宙硅质岩的研究,提出了区分洋中脊、大洋盆地和大陆边缘硅质岩的指标及判别图, $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 、 δCe 和 $(La/Yb)_N$ 的值被认为是判别硅质岩形成构造背景的有效指标。其中,大陆边缘硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值为 0.5~0.9; 远洋盆地硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值为 0.4~0.7; 洋中脊硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值 <0.4 (Murray, 1994); 洋中脊富集的硅质岩 δCe 值为 0.30 ± 0.13 , $(La/Yb)_N \geq 3.5$, 开阔洋盆的硅质岩 δCe 值为 0.60 ± 0.11 , $(La/Yb)_N = 2.0 \sim 3.0$, 大陆边缘的硅质岩 δCe 值为 1.09 ± 0.25 , $(La/Yb)_N$ 值接近 1.0。碧玉岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值介于 0.17~0.26 之间, $(La/Yb)_N$ 值介于 5.84~14.67 之间,与洋中脊硅质岩相近,在 $Al_2O_3/100-SiO_2-Fe_2O_3/100-SiO_2$ 、 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)-Fe_2O_3/TiO_2$ 图解(图 4)中,数值投于洋中脊边界线及下部。但 δCe 值介于

0.87~1.15 之间,与大陆边缘硅质岩相近。而 δCe 值的变化主要受海水中陆源输入量、金属物质及埋藏速率的控制, δCe 值与大陆边缘硅质岩相近数值,可能与陆源沉积物的输入有关(Alibo et al., 1999)。

进一步来说,由于硅质岩主量、稀土元素之间本身存在一定的内在定量关系,同时热水流体可以产生于海底深大断裂、弧后盆地、洋脊、裂谷、热泉等多种环境,对于硅质岩形成构造环境的准确判定,必须结合与硅质岩同期岩石组合的特征进行综合分析(Adachi et al., 1986; Yamamoto, 1987)。七宝山的碧玉岩空间上,主要的同期岩石是黄龙组铁白云岩、块状硫化物矿体。笔者对白云石碳氧同位素进行了测试(未公开发表),其中白云石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值为 1.68‰~3.71‰, 平均值 2.85‰, $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为 16.47‰~23.14‰, 平均值 19.89‰, 均属于海相碳酸盐岩成因。

区域上,晚石炭世发展成广阔的碳酸盐陆表浅海,处于构造环境相对稳定的陆内伸展阶段,发育于华南陆壳上的深大断裂控制了海西期-印支期断裂拗陷,还控制了拗陷带内的火山-热液活动及块状硫化物矿床的形成(翟裕生, 2008; 舒良树, 2012)。七宝山钴铅锌矿床受控于竹亭-七宝山-赋春深断裂带,起源于加里东期,一直延续至白垩纪之后,沿断裂带分布有二叠纪热水沉积黑色薄层状硅质岩、燕山期 I 型花岗质岩体、始新世 44 Ma 橄榄玄武岩,深切地壳、沟通壳幔、纵贯萍乐拗陷轴部的区域性断裂,与新疆托克赛铅锌矿床(Man et al., 2020)、大厂锡-多金属矿床、内蒙古狼山成矿带等

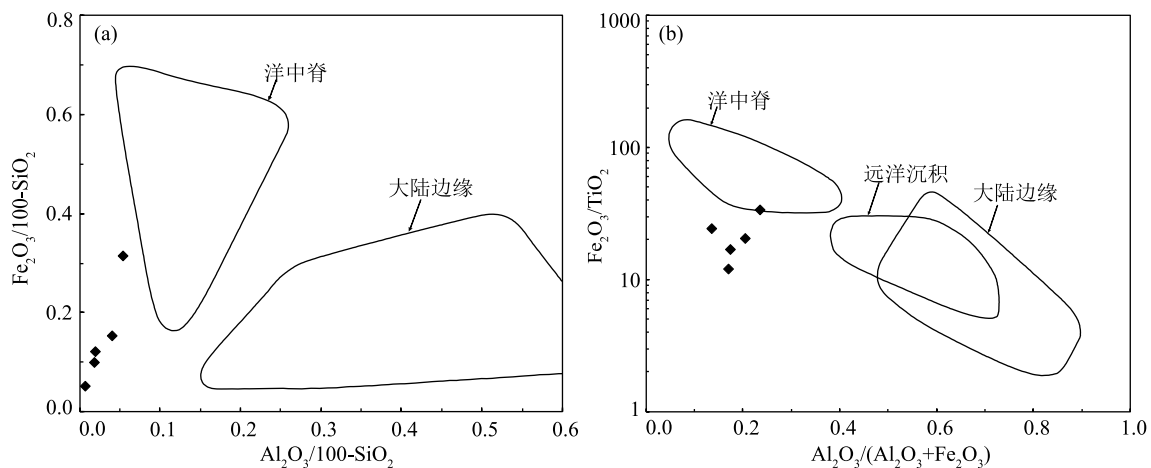


图 4 $Al_2O_3/100-SiO_2-Fe_2O_3/100-SiO_2$ (a) 和 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)-Fe_2O_3/TiO_2$ (b) 图解(底图据 Adachi et al., 1986)

Fig. 4 $Al_2O_3/100-SiO_2-Fe_2O_3/100-SiO_2$ (a) and $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)-Fe_2O_3/TiO_2$ (b) diagrams

产出类似的硅质岩石(汪明等,2014),显示地下热水活动沿构造薄弱地带发生了海底火山热液喷流上涌,并伴随成矿元素的初始富集,处于陆缘裂谷海槽环境。

5 结 论

(1)赣西七宝山钴铅锌矿床主矿体块状、层状硫化物矿体与碧玉岩空间相依,同地产出,密切相关,互相包夹,金属元素与组成石英属同期沉积物。

(2)碧玉岩主量元素显示高硅贫铝富铁、锰特征,富集 Rb、Ba、U、La、Zr、Hf 元素,亏损 K、Nd、P、Ti 元素,Ce 无异常, δEu 中等负异常、 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值、 Y/Ho 值及相关图解显示,碧玉岩成岩以深部海底热水来源为主,是少量同生海水混合的产物,形成于晚古生代陆缘裂谷海槽环境。

(3)碧玉岩的来源及成因研究表明,七宝山钴铅锌矿床成因属于海底火山喷流沉积,为沉积岩容矿的 SEDEX 型矿床。

致谢:衷心感谢文章撰写过程中中国地质调查局南京地质调查中心骆学全教授级高工给予的帮助,感谢审稿专家提出的建设性修改意见。

参考文献

Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary Geology*, 1986, 47(1/2): 125-148.

Alibo D S, Nozaki Y. Rare earth elements in seawater: particle association, shale normalization, and Ce oxidation[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1999, 63: 363-372.

Bau M, Dulski P. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chem. Geol.*, 1999, 155: 77-90.

Bischoff J L. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H₂O solutions—A PVTX Summary from 300°C to 500°C[J]. *Am. J.*, 1991, 291(4): 309-338.

Bogdanov Y A. Low-temperature hydrothermal deposits of Franklin seamout, Woodlark Basin, Papua New Guinea[J]. *Marine Geology*, 1997, 142(1/4): 99-117.

Bostrom K, Peterson M N A. The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise[J]. *Marine Geology*, 1969, 7(5): 427-447.

Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 107-118.

Grenne T. Geochemistry of jasper beds from the Ordovician Lokken Ophiolite, Norway: Origin of Proximal and Distal Siliceous Exhalites[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(8): 1511-1527.

Hekinian R, Hoffert M, Larque P, et al. Hydrothermal Fe and Si oxyhydroxide deposits from South Pacific intraplate volcanoes and East Pacific Rise axial and off-axial regions[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 2099-2121.

Man R H, Xue C J, Zhao X B, et al. Genesis of the Tuokesai Zn-Pb deposit in the Sayram Massif, Xinjiang, NW China: Constraints from geology, jasperite geochemistry and Si-S-Pb isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 121: 1-11.

Mero J L. Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea[J]. *Chem. Geol.*, 1971, 7(2): 149-150.

Murray R W, Buchholtz M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.

Murray R W, Buchholtz M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1992a, 56(7): 2657-2671.

Murray R W, Buchholtz M R B T, Gerlach D C, et al. Inter-oceanic variation in the rare earth, major, and trace element depositional chemistry of chert: Perspectives gained from the DSDP and ODP record[J]. *Geochim. Et Cosmochim. Acta.*, 1992b, 56(5): 1897-1913.

Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 213-232.

Nozaki Y, Zhang, Amakawa H. The fractionation between Y and Ho in the marine environment[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, 148: 329-340.

Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. *Magnetism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.

Wen H J, Fan H F, Tian S H, et al. The formation conditions of the early Ediacaran cherts, South China[J]. *Chem. Geol.*, 2016, 430: 45-69.

Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan Shimanto Terranes[J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 52(1/2): 65-108.

陈先沛,高计元,陈多福,等.热水沉积作用的概念和几个岩石学标志[J]. *沉积学报*, 1992, 10(3): 124-130.

丁少辉,王昆,惠军,等.江西省成矿规律图说明书[M].北京:地质出版社,2014.

郭云峰,安芳.别子型火山成因块状硫化物矿床的地质和地球化学特征[J]. *世界地质*, 2018, 37(2): 113-123.

侯增谦,韩发,夏林圻,等.现代与古代海底热水成矿作用——以若干火山成因块状硫化物矿床为例[M].北京:地质出版社,2003.

华明弟.论莫托沙拉碧玉铁锰矿床的火山-沉积成因[J]. *新疆地质*, 1985, (1): 14-23.

江西铜业集团公司七宝山矿业有限公司[R].江西省上高县江西铜业集团公司七宝山铅锌矿资源储量核实报告.2013.

黎彤.大洋地壳和大陆地壳的元素丰度[J].大地构造与成矿学,1984,8(1): 19-27.

黎彤.中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J].地球化学,1994,23(2): 140-145.

李红阳,杨秋荣,李英杰.现代成矿理论[M].北京:地震出版社,2006.

卢宗柳,莫江平.新疆阿吾拉勒富铁矿地质特征和矿床成因[J].地质与勘探,2006,42(5): 8-11.

舒良树.华南构造演化的基本特征[J].地质通报,2012,31(7): 1035-1053.

孙剑,朱祥坤,李志红,等.海南石碌铁矿碧玉及其对矿床成因的制约[J].岩石学报,2014,30(5): 1269-1278.

孙治雷,李军,孙致学,等.热液喷口系统中 Fe-Si 氧化物沉淀体的形成及微生物的作用[J].地球科学进展,2010,25(12): 1325-1336.

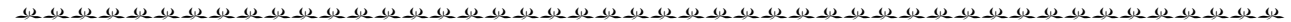
汪明,左慧,石富文,等.广西大厂锡多金属矿床研究综述[J].西部探矿工程,2014,26(1): 167-170.

王小红,杨合群,孙南一,等.额济纳旗碧玉岭铜矿田成矿特征及找矿标志[J].西北地质,2008,(4): 69-76.

王学平,周建廷,范爱春.江西省上高县七宝山铅锌铁钴矿床成矿模式[J].东华理工大学学报(自然科学版),2011,34(3): 248-256.

杨明桂,王发宁,曾勇,等.江西北部金属成矿地质[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.

翟裕生.中国重要成矿系列的形成机制和结构特征[M].北京:地质出版社,2008.



《地质通报》第 42 卷第 11 期要目预告

广西金秀寒武系黑色岩系中的热液脉状镍钴矿床超常富集规律与成矿条件初步研究	张宝林等
三塘湖盆地石头梅地区芦草沟组油页岩测井响应特征及识别模型	徐银波等
滇西北红牛-红山砂卡岩型铜矿床石榴子石原位 LA-SF-ICP-MS U-Pb 定年及地球化学特征	李守奎等
基于三维地震精细解译成果的砂岩型铀矿控矿因素分析——以松辽盆地大庆长垣南端为例	刘晓文等
大兴安岭西坡二道河子铅锌矿床硫化物 Rb-Sr、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义	刘艳荣等
内蒙古北山造山带北部园包山—希热哈达地区石炭纪白山组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征 及对古亚洲洋俯冲作用的启示	杜庆祥等
阿尔金喀腊大湾地区拉配泉组流纹岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及岩石成因	武彬等
阿尔金且末-若羌地区新元古代花岗岩岩石成因及其对 Rodinia 超大陆汇聚时限的约束	新胜凯等
大兴安岭北段洛古河地区晚寒武世花岗岩的岩石成因及其地质意义	周传芳等
抚州盆地南西段白垩系构造变形特征及其动力学背景	曾广乾等
新疆西天山备战铁矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其构造成因	徐胜利
老挝西北部班康姆金矿火山岩地质年代及地球化学特征	胡家博等
白洋淀表层沉积物氮磷分布、储量及污染评价	尹德超等
渭河盆地新近系热储层特征研究	张莹等
南京汤泉地下热水补给来源与成因模式	于丹丹等