

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2021.7.15

黑龙江多宝山地区晚三叠世岩浆活动对蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲的响应

刘宝山¹, 程招勋², 寇林林^{1,*}, 邓昌州³, 杨晓平¹, 张春鹏¹, 李成禄², 韩仁萍¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

2. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036

3. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081

LIU Baoshan¹, CHENG Zhaoxun², KOU Linlin^{1,*}, DENG Changzhou³, YANG Xiaoping¹, ZHANG Chunpeng¹, LI Chenglu², HAN Renping¹

1. *Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, China*

2. *Natural Resources Survey Institute of Heilongjiang Province, Haerbin 150036, China*

3. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*

LIU Baoshan, CHENG Zhaoxun, KOU Linlin, et al. Late Triassic magmatic activity in Duobaoshan area, Heilongjiang Province: Response to the southward subduction of the Mongol – Okhotsk Ocean. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(2): 132-145

Abstract: Late-Triassic magmatic rocks have been discovered in recent years in the Duobaoshan area of Nenjiang. So far, the tectonic setting, genesis and metallogeny of the magmatic activity have not been well understood, which significantly hindered our understanding of the regional tectonic evolution and prospecting for polymetallic deposits in this area. In this paper, we conducted systematic petrological, geochemical and geochronological studies of tonalite in the Duobaoshan deposit and diorite in the Zhengguang deposit. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded an age of (226.3 ± 2.3) Ma for the Duobaoshan tonalite and (229.3 ± 3.1) Ma for the Zhengguang diorite, indicating the two minerals, with similar formation age, are probably derived from the same magma chamber. The tonalite had elevated SiO_2 (64.25%–66.44%), Al_2O_3 (16.54%–17.21%), $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (8.15%–8.50%) and low CaO (2.27%–2.95%), MgO (0.99%–1.16%), TiO_2 (0.31%–0.36%) and P_2O_5 (0.16%–0.17%) contents comparable with the diorite whose major element contents were SiO_2 (57.12%–58.5%), Al_2O_3 (14.59%–15.26%), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (5.34%–6.16%), TiO_2 (0.83%–0.97%), and P_2O_5 (0.15%–0.27%), with similar FeO/MgO (1.12–1.25) ratio. The Duobaoshan tonalite is characterized by depletions of Rb, Nb, and Sm, enrichments of Ba, U, Zr and Sr, and obvious positive Eu anomaly (δEu , 1.21–1.57). The Zhengguang diorite is characterized by depletion of Rb, Nb and Sm, enrichment of Ba, Th, Sr, Hf, and weak positive Eu anomaly (δEu , 0.93–1.22). Both tonalite and diorite are rich in light rare earth elements (LREE) and depleted in heavy rare earth elements (HREE), and have similar curve pattern on REE or trace element diagrams suggesting a common magmatic source. The magma probably derived from the partial melting of the mantle wedge metasomatized by the subduction fluid dehydrated from the downward moving Mongol-Okhotsk plate. The confirmation of the calc-alkaline magmatism in the Duobaoshan district indicates the subduction of the

收稿日期: 2021-05-22; 修回日期: 2021-07-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601305); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190156); 中国地质调查局“全国陆域及海区地质图件更新与共享项目(DD20190372)”

作者简介: 刘宝山(1970—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地质矿产调查工作。E-mail: liubaoshan1111@163.com

* 通信作者简介: 寇林林(1983—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事矿产地质调查、成矿规律与成矿预测工作。E-mail: koulinlin@126.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2022, 29(2)

Mongol-Okhotsk oceanic plate can have remote influence, reaching as far as the eastern margin of the Xing'an Block. By compiling the metallogenic ages and background of the Late Triassic deposits in the study area, we can show that the Late Triassic magmatic activity in Duobaoshan area has great Ag-Cu-Mo mineralization ability and the study area has high exploration potential.

Keywords: Duobaoshan area; Late Triassic; magmatism; mineralization; Mongol-Okhotsk ocean

摘要:近年来相继在嫩江多宝山区发现了一系列晚三叠世岩浆岩。但该期岩浆活动的构造背景、成因机制及成矿作用迄今尚未得到很好的解读,这些问题对深入理解该地区构造演化、寻找多金属矿产具有重要意义。本文以多宝山矿区英云闪长岩、争光矿区闪长岩为研究对象进行系统的岩石学、地球化学及同位素年代学研究。锆石的 LA-ICP-MS 定年结果表明,多宝山英云闪长岩形成时代为 (226.3 ± 2.3) Ma, 争光闪长岩形成时代为 (229.3 ± 3.1) Ma, 两者在误差范围内一致,可能是同一岩浆房演化的产物。地球化学特征显示,多宝山英云闪长岩以高 SiO_2 (64.25%~66.44%)、 Al_2O_3 (16.54%~17.21%)、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (8.16%~8.49%), 低 CaO (2.27%~2.95%)、 MgO (0.99%~1.16%)、 TiO_2 (0.31%~0.36%)、 P_2O_5 (0.16%~0.17%) 为特征;争光闪长岩以 SiO_2 (57.12%~58.5%)、 Al_2O_3 (14.59%~15.26%)、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (5.34%~6.16%)、 TiO_2 (0.83%~0.97%)、 P_2O_5 (0.15%~0.27%) 及 TFeO/MgO (1.12~1.25) 相近为特征;多宝山英云闪长岩亏损 Rb、Nb、Sm, 富集 Ba、U、Zr 和 Sr, Eu 正异常明显 ($\delta\text{Eu}=1.21\sim 1.57$), 争光闪长岩 Rb、Nb、Sm 亏损, Ba、Th、Sr、Hf 富集, Eu 弱正异常 ($\delta\text{Eu}=0.93\sim 1.22$)。二者富集轻稀土元素 (LREE), 亏损重稀土元素 (HREE), 稀土及微量曲线形态近似, 显示同一源区的特征, 原始岩浆起源于受俯冲流体交代的地幔楔的部分熔融, 形成于与蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲有关的活动大陆边缘环境。多宝山矿集区晚三叠世钙碱性岩浆岩的确定指示蒙古—鄂霍茨克洋俯冲作用可影响到兴安地块东缘。综合区域晚三叠世矿床成矿时代及成矿背景, 证实多宝山区晚三叠世岩浆活动具有较强的银铜钼成矿能力, 成矿潜力巨大。

关键词: 多宝山区; 晚三叠世; 岩浆活动; 成矿作用; 蒙古—鄂霍茨克洋

中图分类号: P588.12+2; P597; P595; P6612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2022)02-0132-0014

0 引言

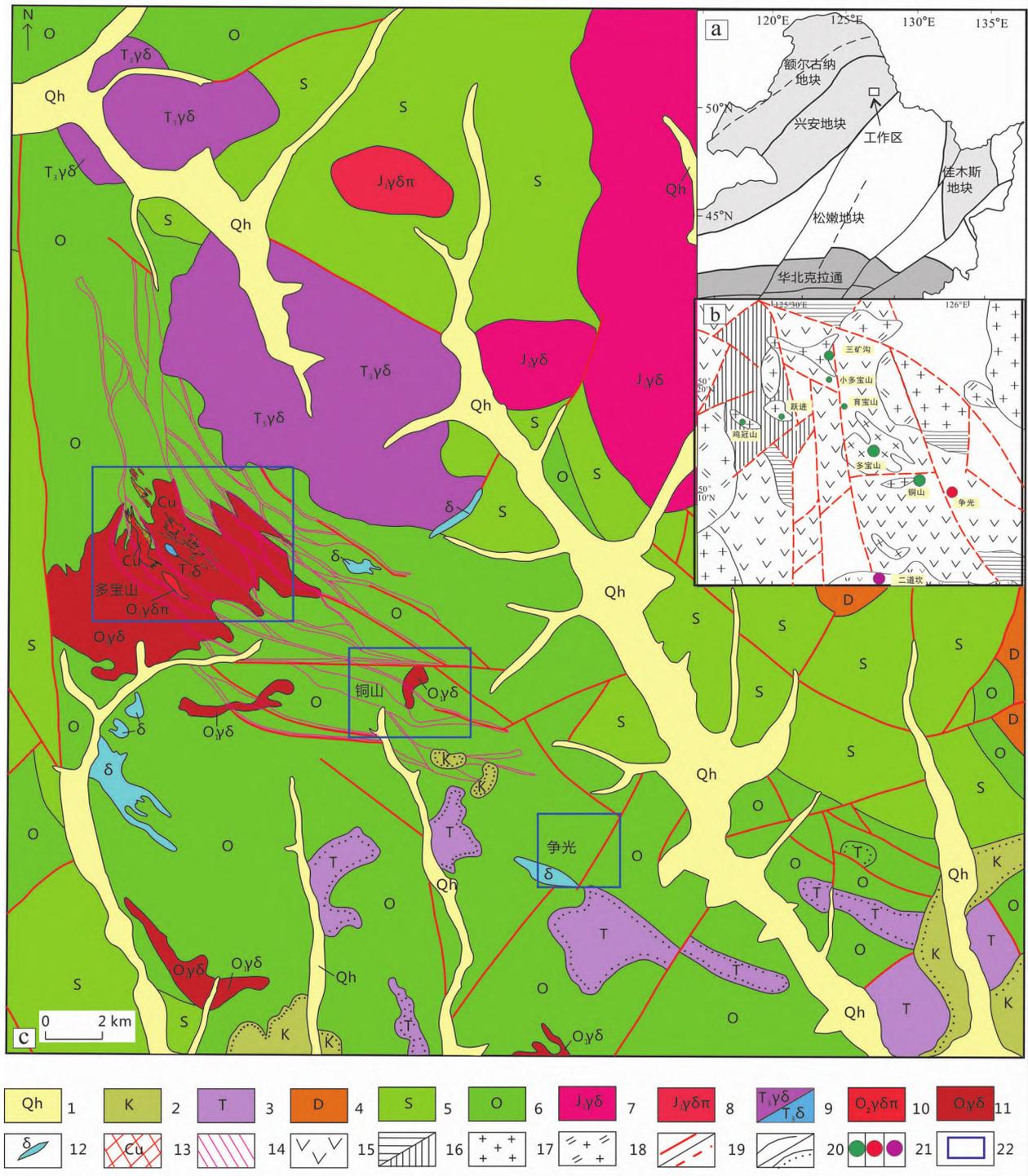
多宝山矿集区位于中亚—兴蒙造山带北东段兴安地块东缘, 是我国东北地区重要的金铜多金属矿产地^[1]。矿集区晚古生代至早中生代经历了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋的闭合及多块体拼合的过程, 在中生代晚期又叠加了环太平洋构造体系的影响^[2]。然而, 不同构造体系的演化时限及构造背景一直存在争议, 其中, 蒙古—鄂霍茨克洋对兴安地块的影响时间是三叠纪还是侏罗纪, 影响范围到哪里, 也是学者一直讨论的问题^[3]。有的学者认为兴安地块多宝山区晚三叠世侵入岩体形成于蒙古—鄂霍茨克洋俯冲挤压背景^[4-5], 也有人认为大兴安岭地区晚三叠世岩浆活动处于蒙古—鄂霍茨克洋俯冲回撤的伸展背景^[6]。早侏罗世之前该区域主要受古亚洲洋构造域的影响^[7]。位于额尔古纳地块西缘的晚三叠世八大关、太平川等矿床与蒙古—鄂霍茨克洋构造域背景有关^[8], 兴安地块东缘是否存在该构造背景下的三叠纪矿床, 也是诸多地质学家思考的科学问题。

多宝山矿集区发育奥陶纪多宝山、铜山大型斑岩铜矿床、争光浅成低温热液金矿床, 中生代早侏罗世小多宝山夕卡岩型铜矿床、三矿沟夕卡岩型铁矿床等^[9]。随着近几年找矿勘查工作的深入, 又发现了晚三叠世二道坎大型浅成低温热液银矿床^[10-11], 外围发现了早白垩世永新大型金矿床^[12], 综合显示矿集区具有多期的岩浆活动及成矿作用, 这也表明区内存在大型、超大型矿床的潜力。

本文通过对多宝山英云闪长岩、争光闪长岩等晚三叠世岩体的年代学与岩石地球化学特征进行研究, 查明了岩体的形成时代、岩石成因、构造背景和成矿意义, 为了解兴安地块东缘的构造演化历史, 确定蒙古—鄂霍茨克洋构造域的演化时限及寻找相关的金铜多金属矿床提供依据。

1 区域地质背景

中国东北地区构造演化复杂, 经历了多次微陆块的裂解、俯冲和碰撞。该地区自西北向东南可依次划分为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块^[7]。矿集区位于兴安地块东缘 (图 1a)。



1—第四系;2—白垩系;3—三叠系;4—泥盆系;5—志留系;6—奥陶系;7—早侏罗世花岗闪长岩;8—早侏罗世花岗闪长斑岩;9—晚三叠世花岗闪长岩/闪长岩;10—中奥陶世花岗闪长斑岩;11—早奥陶世花岗闪长岩;12—闪长岩;13—铜矿体;14—韧性剪切带;15—火山岩;16—古生界/新生界地层;17—花岗岩;18—二长花岗岩;19—断层;20—地质界线;21—铜/金/银矿床;22—矿区。

图1 多宝山地区地质简图
(据文献[7,13-14]修改)

Fig.1 Simplified geological map of the Duobaoshan area. Modified after [7, 13-14].

区内出露的地层主要有奥陶系和志留系地层,另有少量的泥盆系、石炭系、三叠系和白垩系地层(图1^[13-14])。

奥陶系主要包括铜山组(O_1t)和多宝山组(O_1d),前者是一套陆源碎屑岩建造,后者则为滨海相—浅海相火山岩—火山碎屑岩建造。志留系主要是一套陆源碎屑岩建造,局部夹中基性火山岩。泥盆系岩性以粉砂岩、绿泥板岩、长石石英砂岩、含砾砂岩为主,夹有部分灰岩、凝灰岩、英安岩等。三叠系为清水河组辉石安山岩、角闪安山岩等。白垩系九峰山组为一套陆相含煤建造。区内构造以北西向三矿沟—多宝山—裸河压扭性断裂为基础,与北西向的多宝山复式褶皱轴部复合,控制了多宝山、铜山、争光等矿床的分布。侵入岩分布广泛,按侵位时代有加里东期的花岗闪长岩、花岗闪长斑岩,印支期的花岗闪长岩、英云闪长岩,燕山期的花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、安山玢岩脉、闪长岩脉^[4]。

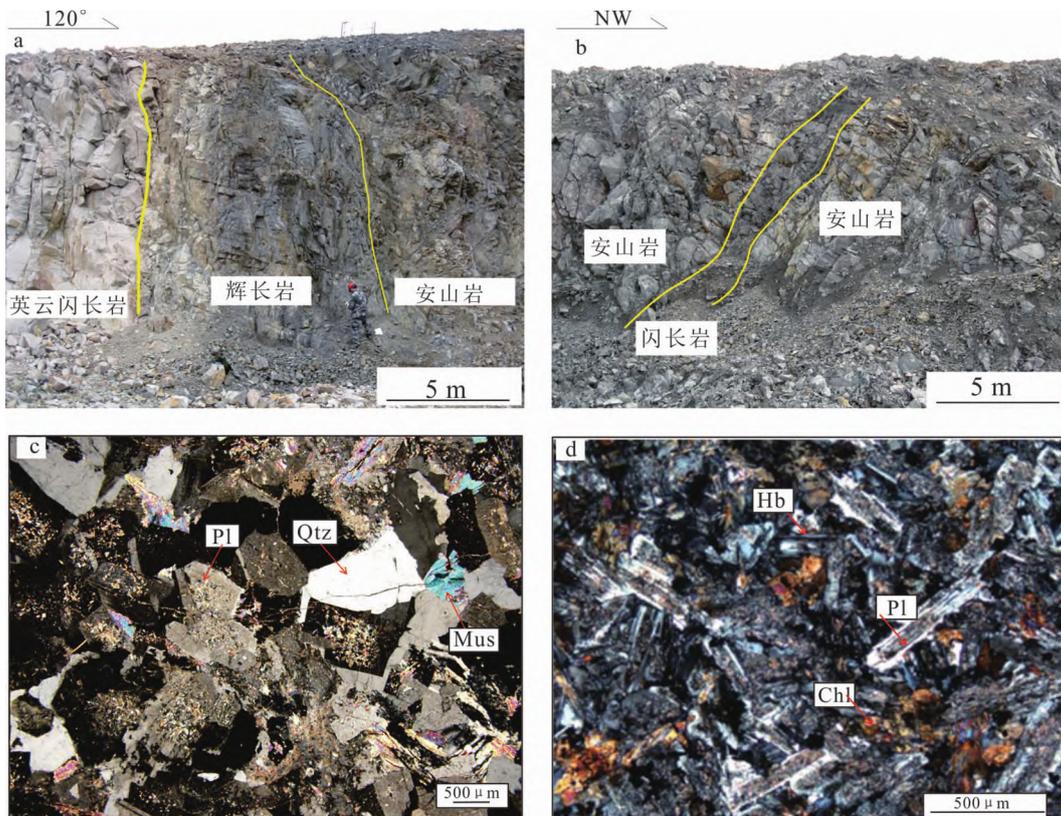
2 岩石学特征

2.1 多宝山英云闪长岩

多宝山Ⅲ号矿坑南东壁断面英云闪长岩呈岩枝状侵入奥陶纪多宝山组及花岗闪长岩(图2a),倾向北东,倾角 $60^\circ\sim 65^\circ$,宽 $80\sim 120$ m。岩石主要由斜长石53%、石英30%、碱性长石2%、黑云母15%组成,矿物粒径较均匀,大小 $0.8\sim 2.0$ mm。斜长石呈自形—半自形宽板状、板柱状,聚片双晶纹宽窄不一;碱性长石他形粒状为条纹长石,少量条纹长石沿斜长石边缘交代;石英呈他形粒状,充填于长石之间;黑云母,片状或集合体产出(图2c)。

2.2 争光闪长岩

争光Ⅱ号矿坑南西断面的闪长岩呈岩枝产出,宽约3 m,侵入奥陶纪多宝山组安山质凝灰岩中(图2b)。岩石由斜长石和角闪石组成,斜长石多呈自形—半自形柱状,粒径 $0.2\sim 1.5$ mm,聚片双晶发育,含量约75%;角闪石,呈半自形—他形分布于斜长石的间隙中,粒径



a—多宝山英云闪长岩;b—争光闪长岩;c—英云闪长岩镜下照片(正交偏光);d—闪长岩镜下照片(正交偏光)。Qtz—石英;Pl—斜长石;Mus—白云母;Chl—绿泥石;Hb—角闪石。

图2 多宝山英云闪长岩及争光闪长岩宏观及显微照片

Fig.2 Photos and photomicrographs of the Duobaoshan tonalite and Zhengguang diorite

0.1~0.4 mm,含量约 25%(图 2d)。

3 测试方法及锆石 U-Pb 定年结果

3.1 测试方法

本次样品的锆石 U-Pb 定年、全岩主量及微量元素含量测试均由武汉上谱分析科技有限责任公司分析完成。锆石定年利用 LA-ICP-MS 分析完成,

分析的激光束斑直径和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。U-Pb 同位素定年处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素分馏校正,其具体的测试方法见文献[15],分析结果见表 1。全岩主量元素测试利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成;微量元素含量利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,详细的分析方法流程见文献[16],分析结果见表 2。

表 1 英云闪长岩及闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 1 Zircon U-Pb dating results for the tonalite and diorite

岩石名称	分析点号	分析元素		Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
		$\omega_B/10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			
		Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
多宝山	DBS01-1	67.7	98.5	0.7	0.055 5	0.003 5	0.260 8	0.015 7	0.034 2	0.000 5	217.1	2.9	431.5	140.7		
英云	DBS01-2	112	142	0.8	0.052 6	0.002 8	0.253 6	0.013 2	0.035 5	0.000 5	224.7	2.8	309.3	122.2		
闪长岩	DBS01-3	55.4	78.5	0.7	0.052 5	0.003 4	0.265 6	0.016 1	0.037 1	0.000 6	235.0	3.6	309.3	148.1		
(DBS01)	DBS01-4	65.6	110	0.6	0.055 7	0.002 7	0.267 4	0.013 0	0.034 9	0.000 4	221.1	2.8	442.6	109.2		
	DBS01-5	118	145	0.8	0.056 0	0.002 8	0.270 4	0.013 0	0.035 3	0.000 4	223.4	2.4	450.0	111.1		
	DBS01-6	125	152	0.8	0.053 3	0.002 5	0.264 7	0.012 8	0.036 2	0.000 5	229.1	2.9	342.7	112.0		
	DBS01-7	109	156	0.7	0.050 4	0.002 6	0.247 8	0.012 0	0.036 2	0.000 5	229.4	3.0	213.0	120.4		
	DBS01-8	94.2	136	0.7	0.056 0	0.002 7	0.273 7	0.013 5	0.035 6	0.000 5	225.4	2.9	453.8	113.9		
	DBS01-9	75.0	122	0.6	0.052 7	0.002 5	0.259 5	0.011 8	0.035 9	0.000 4	227.1	2.7	322.3	102.8		
	DBS01-10	77.5	122	0.6	0.050 8	0.002 8	0.244 9	0.012 4	0.035 0	0.000 4	222.0	2.4	235.3	134.2		
	DBS01-11	239	248	1.0	0.051 2	0.001 9	0.259 6	0.009 8	0.036 7	0.000 4	232.2	2.5	250.1	83.3		
	DBS01-12	80.6	117	0.7	0.055 9	0.003 5	0.262 7	0.016 8	0.034 4	0.000 5	218.0	2.9	450.0	138.9		
	DBS01-13	107	139	0.8	0.050 3	0.002 5	0.246 1	0.012 1	0.035 6	0.000 4	225.6	2.7	209.3	110.2		
	DBS01-14	93.2	121	0.8	0.051 5	0.002 6	0.249 5	0.013 4	0.034 9	0.000 4	221.1	2.5	264.9	116.7		
	DBS01-15	100.0	147	0.7	0.052 4	0.002 4	0.260 6	0.011 9	0.036 1	0.000 4	228.4	2.8	301.9	137.9		
	DBS01-16	64.5	106	0.6	0.053 5	0.002 6	0.272 9	0.012 8	0.037 1	0.000 5	235.0	3.1	350.1	109.2		
	DBS01-17	80.0	119	0.7	0.053 1	0.002 8	0.262 9	0.012 5	0.036 3	0.000 5	230.0	2.9	344.5	118.5		
	DBS01-18	96.6	135	0.7	0.054 6	0.002 6	0.269 5	0.012 1	0.036 1	0.000 4	228.7	2.7	394.5	105.5		
	DBS01-19	89.6	116	0.8	0.050 3	0.003 4	0.243 0	0.016 2	0.035 3	0.000 4	223.7	2.8	209.3	155.5		
	DBS01-20	88.3	145	0.6	0.050 9	0.002 6	0.261 1	0.013 1	0.037 3	0.000 4	235.8	2.5	235.3	113.9		
	DBS01-21	107	153	0.7	0.055 4	0.002 3	0.283 3	0.011 3	0.037 3	0.000 4	236.2	2.7	427.8	94.4		
	DBS01-22	266	242	1.1	0.052 1	0.0022	0.249 4	0.010 0	0.034 9	0.000 3	220.9	2.1	287.1	99.1		
	DBS01-23	128	149	0.9	0.055 0	0.002 4	0.263 9	0.011 8	0.034 9	0.000 4	221.2	2.6	409.3	98.1		
	DBS01-24	50.1	89.3	0.6	0.051 3	0.003 3	0.252 6	0.015 5	0.035 7	0.000 5	226.1	3.0	253.8	151.8		
	DBS01-25	74.5	139	0.5	0.050 3	0.002 6	0.249 4	0.012 5	0.036 4	0.000 5	230.5	3.1	209.3	122.2		
争光	ZG01-01	1 289	902	1.4	0.056 9	0.002 0	0.299 0	0.010 3	0.038 1	0.000 4	241	2.737 28	487	79.622 5		
闪长岩	ZG01-02	1 921	1 010	1.9	0.050 7	0.001 5	0.251 5	0.007 5	0.035 9	0.000 3	227	2.164 81	233	70.357 5		
(ZG01)	ZG01-03	1 962	1 019	1.9	0.051 8	0.001 5	0.255 9	0.007 4	0.035 8	0.000 4	227	2.340 53	276	68.51		
	ZG01-04	767	758	1.0	0.050 8	0.001 6	0.265 7	0.008 9	0.037 8	0.000 5	239	3.020 16	232	67.58		
	ZG01-05	2 070	1 045	2.0	0.051 9	0.001 6	0.256 8	0.007 8	0.035 8	0.000 4	227	2.284 59	283	68.51		
	ZG01-06	1 774	939	1.9	0.050 9	0.001 8	0.249 0	0.008 7	0.035 5	0.000 4	225	2.428	239	81.467 5		
	ZG01-07	1 904	1 114	1.7	0.050 7	0.001 6	0.244 8	0.007 7	0.035 1	0.000 4	222	2.294 65	233	74.062 5		
	ZG01-08	1 712	935	1.8	0.050 7	0.001 6	0.247 8	0.007 7	0.035 4	0.000 4	224	2.193 36	228	72.21		
	ZG01-09	2 254	1 263	1.8	0.050 3	0.001 3	0.262 0	0.007 3	0.037 6	0.000 5	238	2.828 32	209	93.505		
	ZG01-10	2 673	1 278	2.1	0.054 2	0.001 6	0.282 0	0.008 3	0.037 5	0.000 4	237	2.463 02	389	60.18		
	ZG01-11	2 246	1 120	2.0	0.053 3	0.001 7	0.263 3	0.008 6	0.035 6	0.000 4	225	2.405 73	343	39.81		
	ZG01-12	1 915	965	2.0	0.053 6	0.001 8	0.265 6	0.009 1	0.035 7	0.000 4	226	2.553 19	367	75.92		
	ZG01-13	1 002	741	1.4	0.046 5	0.004 3	0.231 8	0.026 0	0.034 3	0.000 5	218	2.908 19	33.4	198.12		
	ZG01-14	1 810	972	1.9	0.052 1	0.001 7	0.269 1	0.008 5	0.037 3	0.000 5	236	2.81508	300	74.065		
	ZG01-15	902	643	1.4	0.052 9	0.002 1	0.268 8	0.010 5	0.036 7	0.000 4	232	2.602 88	324	90.73		
	ZG01-16	2 560	1 289	2.0	0.050 9	0.001 4	0.252 7	0.006 9	0.035 8	0.000 4	227	2.340 81	235	62.952 5		
	ZG01-17	2 883	1 634	1.8	0.051 0	0.001 3	0.263 0	0.006 8	0.037 1	0.000 4	235	2.235 85	243	54.62		
	ZG01-18	1 642	1 207	1.4	0.051 7	0.001 5	0.240 2	0.006 6	0.033 4	0.000 3	212	1.922 73	272	66.657 5		
	ZG01-19	2 178	1 152	1.9	0.050 0	0.001 5	0.253 3	0.007 5	0.036 5	0.000 4	231	2.604 17	195	70.357 5		

表 2 英云闪长岩及闪长岩主量元素、微量元素分析结果及参数

Table 2 Major and trace element contents of the tonalite and the diorite

岩性 样号	主量元素 $w_B/\%$														微量元素 $w_B/10^{-6}$																
	SO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO ₄	MgO	CaO	Nb ₂ O	K ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Total	Li	Sc	V	Cr	Co	Cu	Zn	Ca	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	NI	Be	Sn	Cs
英云闪长岩	01-1	57.34	14.59	2.25	3.79	4.81	5.5	4.09	1.25	0.12	0.26	0.97	5	99.97	15.8	14.4	109	174	21.4	55.8	94.6	19.1	22.1	653	16.6	94.6	7.66	120	1.4	1.86	0.11
闪长岩	01-2	57.12	15.1	2.08	3.8	4.78	5.06	4.35	1.33	0.1	0.27	0.92	4.69	99.6	14.9	14.3	106	170	20.7	148	108	18.9	22.5	647	15.7	108	8.68	120	1.41	3.1	0.099
(ZG01)	01-3	58	15.26	1.66	3.96	4.9	4.25	4.1	2	0.11	0.15	0.83	4.66	99.88	16.9	12.2	90.6	176	21.6	54.5	77.8	18.8	36	604	13.5	77.8	7.66	129	1.62	1.74	0.19
	01-4	58.5	14.83	1.39	4.05	4.81	4.32	4.22	1.94	0.1	0.26	0.84	4.67	99.93	14.7	14.4	87.9	178	21.4	110	139	17.5	31.7	548	15.1	139	8.24	122	1.72	1.94	0.17
英云闪长岩	01-1	64.29	17.03	1.54	1.39	0.99	2.95	5.61	2.88	0.1	0.17	0.36	2.18	99.48	8.13	2.99	23.7	19.8	5.12	19.8	99.9	21.1	34.9	964	11.5	216	7.52	6.29	2.2	1.58	1.09
(DBS01)	01-2	64.51	17.21	1.86	1	1.14	2.75	5.53	2.96	0.099	0.17	0.33	2.38	99.95	3.99	2.35	23.8	13.7	4.87	53.3	72.9	19.6	37	726	10.2	210	6.94	4.76	2.12	1.7	1.39
	01-3	66.44	16.54	1.29	1.16	1.03	2.27	5.54	2.62	0.085	0.16	0.31	2.44	99.86	8.26	2.22	20.7	11.7	3.42	14.7	73.5	20.1	82.3	798	9.91	205	6.36	3.26	1.93	1.65	1.19
	01-4	64.25	16.74	1.56	1.32	1.16	2.73	5.42	2.84	0.097	0.17	0.33	2.76	99.37	3.71	2.26	20.8	4.81	4.13	34.1	71.2	19.3	37.7	744	10.7	223	6.71	2.44	2.17	2.29	1.32
岩性 样号	微量元素 $w_B/10^{-6}$														I/H δCe δEu (La/Yb) _N Rb/Sr Th/La Nb/La																
	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	ΣREE	$\Sigma LREE$	$\Sigma HREE$	δEu	(La/Yb) _N	Rb/Sr	Th/La	Nb/La			
英云闪长岩	01-1	431	26.4	57.4	7	27.2	5.08	1.54	3.41	0.64	1.76	0.28	1.84	0.23	8.19	0.48	18.6	6.55	1.48	137.56	124.62	12.94	9.63	0.99	0.99	9.67	0.034	0.25	16		
(ZG01)	01-2	429	23.6	53.4	6.39	24.7	4.78	1.32	3.16	0.61	1.65	0.26	1.74	0.24	6.54	0.35	17.8	5.75	1.45	126.05	114.19	11.86	9.63	1.03	0.93	9.14	0.035	0.24	24.8		
	01-3	624	24.9	51.5	6.02	23.2	4.11	1.49	2.94	0.48	1.41	0.24	1.65	0.22	7.11	0.47	19.7	6.42	1.37	121.84	111.22	10.62	10.47	0.98	1.22	10.17	0.06	0.26	16.3		
	01-4	558	24.8	57.1	6.82	26	4.52	1.53	3.24	0.58	1.62	0.28	1.72	0.25	7.75	0.42	21.2	5.82	1.46	132.81	120.77	12.04	10.03	1.04	1.1	9.72	0.058	0.23	19.6		
英云闪长岩	01-1	934	35.7	73	8.97	33	4.72	1.9	2.17	0.39	1.05	0.18	1.13	0.15	3.14	0.58	60.3	4.68	1.44	166.8	157.36	9.44	16.67	0.13	1.31	21.29	0.036	0.13	13		
(DBS01)	01-2	1000	31.8	65.3	8	29.2	4.23	2.02	3.44	0.41	1.95	0.34	0.95	0.17	1	0.13	3.02	0.55	35	4.77	1.33	148.86	140.46	8.4	16.72	0.1	1.57	21.44	0.051	0.15	12.6
	01-3	767	28.5	62.6	7.57	26.5	4.12	1.49	3.19	0.38	1.9	0.32	0.91	0.15	0.94	0.12	2.77	0.6	40.3	1.06	138.66	130.76	7.9	16.55	0.13	1.21	20.44	0.04	0.16	10.6	
	01-4	905	33.2	67.3	8.16	29.8	4.37	1.87	3.61	0.44	1.99	0.35	0.97	0.17	1	0.13	3.06	0.95	29.1	5.38	1.31	153.33	144.69	8.65	16.73	0.13	1.4	22.38	0.051	0.16	7.1

3.2 锆石 U-Pb 定年结果

英云闪长岩(DBS01)的锆石颗粒较大,长 50~100 μm,多为椭圆状,长宽比 2:1~3:1,生长环带明显(图 3a),25 颗锆石测点分析结果 Th/U 为 0.50~1.10,具典型岩浆锆石特征^[17]。测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄 236~217 Ma,变化范围小,数据点集中投影在谐和曲线上(图 4a)。其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为(226.3±2.3) Ma(MSWD=4.0, n=25),代表了英云闪长岩的形成年龄。闪长岩(ZG01)锆石

较自形(图 3b),柱状,长 30~120 μm,长宽比 2:1~4:1,锆石的 Th 和 U 含量分别为(767~2 883)×10⁻⁶和(643~1 634)×10⁻⁶,19 个锆石测点的分析结果 Th/U 为 1.0~2.1,与岩浆锆石属性一致。其中 18 个测点曲线位置集中(图 4b),²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 241~218 Ma,加权平均年龄为(229.3±3.1) Ma(MSWD=6.3, n=18),表明闪长岩形成于晚三叠世。

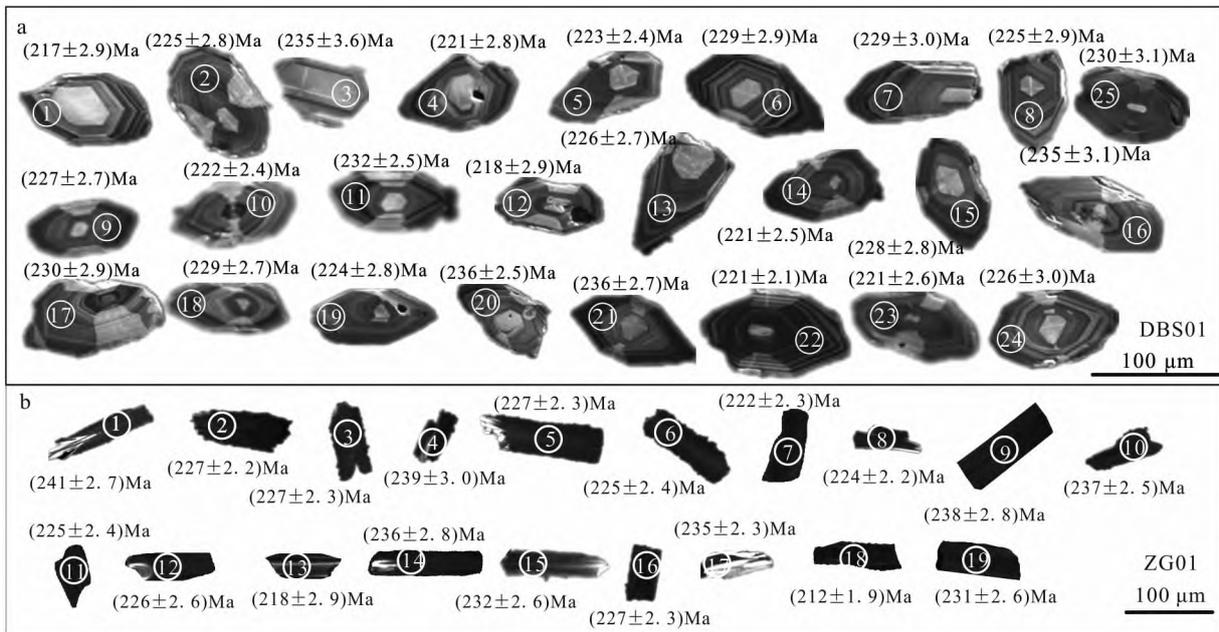


图 3 多宝山英云闪长岩(a)与争光闪长岩(b)代表性锆石阴极发光图像

Fig.3 Cathodoluminescence images of zircons from the Duobaoshan tonalite (a) and Zhengguang diorite (b)

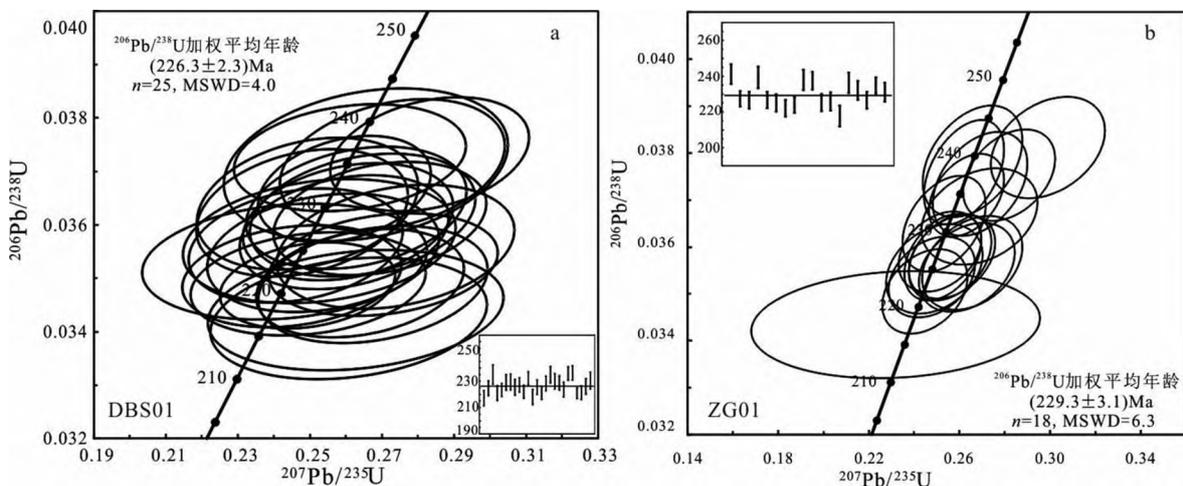


图 4 多宝山英云闪长岩(DBS01)(a)及争光闪长岩(ZG01)锆石年龄谐和图(b)

Fig.4 Concordia U-Pb plots of zircons from the (a) Duobaoshan tonalite (DBS01) and (b) Zhengguang diorite (ZG01)

4 地球化学特征

4.1 主量元素特征

多宝山英云闪长岩及争光闪长岩的主量元素分析结果列于表 2。英云闪长岩 SiO_2 含量较高 (64.25%~66.44%), CaO 和 MgO 含量较低, 分别为 2.27%~2.95% 和 0.99%~1.16%, $\text{Mg}^\#$ 值分别为 39, 43, 44, 43, 平均值 42, $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 含量较高 (8.16%~8.49%), Na_2O 含量 5.42%~5.61%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.47~0.53, Al_2O_3 含量 16.54%~17.21%, TiO_2 含量 0.31%~0.36%, P_2O_5 含量 0.16%~0.17%, 显示出岩石相对富硅铝、贫钙镁特征。铝饱和指数 A/CNK 为 0.96~1.02, 为准铝-过铝质 (图 5a^[18]), 里特曼指数 (σ) 2.8~3.3, 为钙碱性。在 SiO_2 - K_2O 图解上, 岩石落入高钾钙碱性系列 (图 5b^[19])。

争光闪长岩 SiO_2 含量为 57.12%~58.5%, Al_2O_3 含量为 14.59%~15.26%, 全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 5.34%~6.16%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.31~0.49, 岩石相对富钠; 岩石具有中 K_2O (1.25%~2.0%)、低 TiO_2 (0.83%~0.97%) 和 P_2O_5 (0.15%~0.27%) 以及 TFeO/MgO (1.12~1.25) 相近的特征。闪长岩落入亚铝质钙碱性系列 (图 5a, b)。其 $A/$

CNK 值为 0.81~0.92, 属于准铝质, A/NK 值为 1.64~1.80, 里特曼指数 (σ) 为 0.99~2.48, 钙碱性, 略贫碱, 次铝质钙碱性-高钾钙碱性岩石。

在火成岩 TAS 分类图解 (图 6)^[20] 上, 多宝山英云闪长岩与争光闪长岩样品分别落入石英二长岩和闪长岩区域。

从主量元素的特征分析, 多宝山英云闪长岩与争光闪长岩均具有准铝-过铝质钙碱性 I 型花岗岩的特征。

英云闪长岩 REE 总量 ($138.66\sim 166.80$) $\times 10^{-6}$, 平均 151.91×10^{-6} , LREE/HREE (轻稀土/重稀土) 为 16.72~16.73, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值 (20.44~22.38), 轻、重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素富集, 具明显正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=1.21\sim 1.57$), 表明源区几乎无斜长石的残留, REE 配分曲线呈现出一致平缓右倾的模式 (图 7a)。在微量元素蛛网图上 (图 7b) 以明显亏损 Rb、Nb、Sm, 富集 Ba、U、Zr 和 Sr 为特征。争光闪长岩 ΣREE 为 ($121.84\sim 137.56$) $\times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 9.63~10.47, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值 (9.14~10.17), 轻、重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素富集, 球粒陨石标准化配分曲线整体右倾 (图 7a), Eu 具弱正异常, $\delta\text{Eu}=0.93\sim 1.22$; 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上 (图 7b), Rb、Nb、Sm 出现较大的亏损, Ba、Th、Sr、Hf 具有明显的富集。

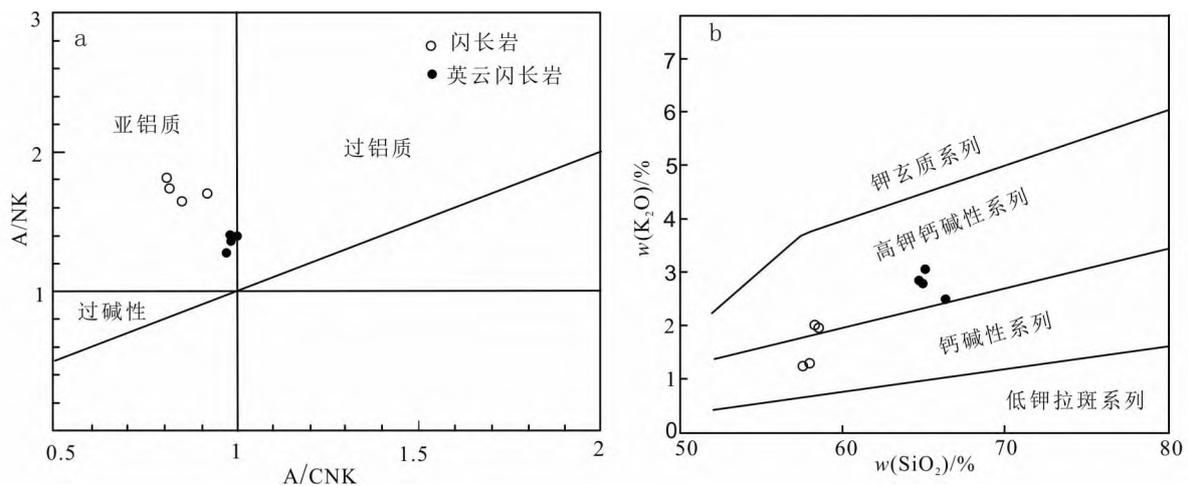


图 5 英云闪长岩及闪长岩 A/CNK - A/NK 图解 (a) 和 SiO_2 - K_2O 图解 (b)

(根据文献[18-19]修改)

Fig.5 A/CNK - A/NK and SiO_2 - K_2O plots for the tonalite (a1, a2) and diorite (b1, b2). Modified after [18-19].

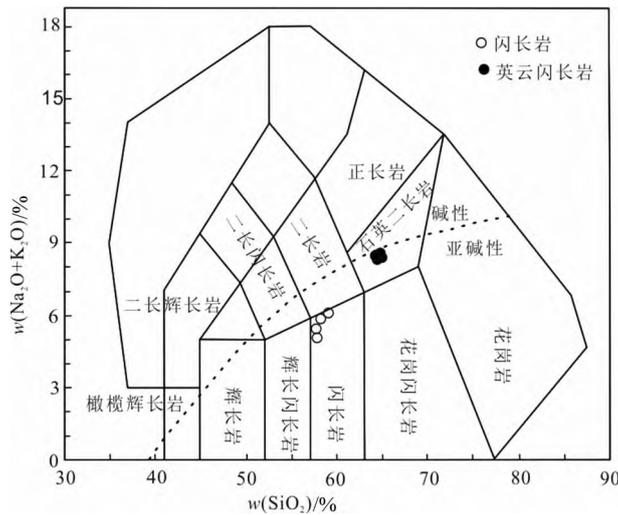


图6 英云闪长岩及闪长岩 TAS 图解
(根据文献[20]修改)

Fig.6 TAS diagram showing the chemical data for the tonalite and diorite. Modified after [20].

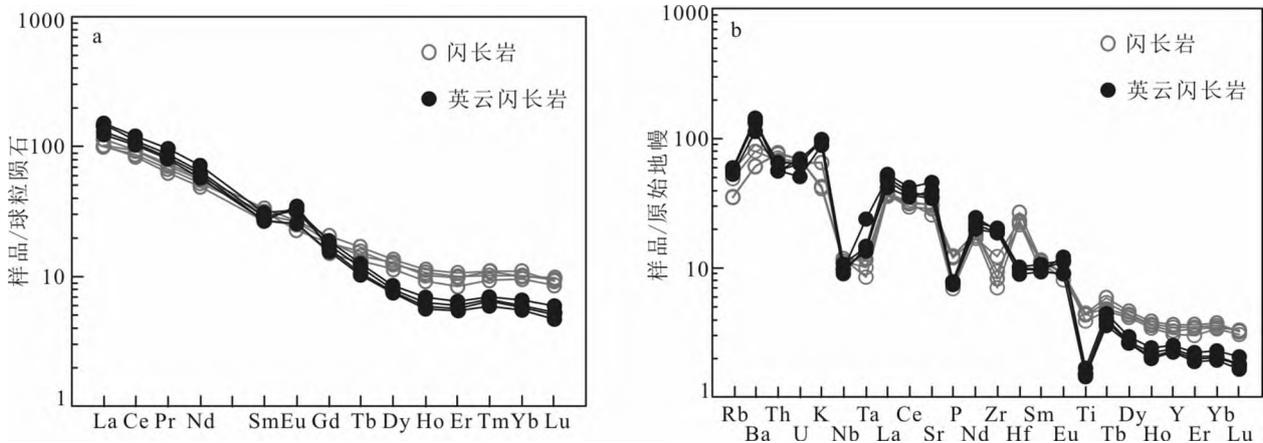


图7 英云闪长岩、闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.7 The chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized incompatible elements spider diagram (b) for the tonalite and diorite

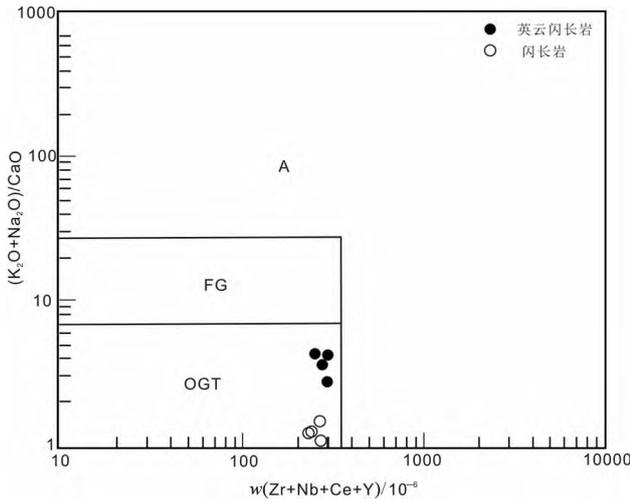
5 讨论

5.1 岩浆源区特征与岩石成因

5.1.1 多宝山英云闪长岩

岩石具有高硅,富碱,准铝-过铝,贫铁、镁、钨的特征, A/CNK 为 0.96~1.02,符合 I 型花岗岩特征。另外,Zr+Nd+Ce+Y 含量(304.01~333.5)×10⁻⁶,低于 A 型花岗岩的下限值(350×10⁻⁶)^[21],在(Na₂O+K₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)判别图上,样品点均落在 I 型花岗岩区域(图 8)^[22]。岩石具有富集轻稀土元素、大离子亲石元素(Ba、Sr)和

不相容元素(U),相对亏损高场强元素(Nb)的特征,表明其岩浆具有弧岩浆的地球化学属性,同时反映其岩浆源区相对富水,或表明岩浆源区遭受过俯冲带流体的交代作用^[23]。而大离子亲石元素相对富集,也反映其具有壳源成因特点^[24];高场强元素 Nb 等的亏损暗示岩浆源区曾受到地壳物质或俯冲残留洋壳流体的混染和交代^[25]。微量元素比值 Rb/Sr(0.036~0.051,平均值 0.044)、Th/La(0.13~0.16,平均值 0.15),与原始地幔(0.034,0.13)^[26-27]一致,Nb/Ta(7.06~12.96;平均值 10.81)也靠近地幔平均值 17.5,这些特征参数显示其具有亲地幔端员性质,暗示了幔源的特点^[28]。



A—A型花岗岩;FG—分异的I型和S型花岗岩;OGT—未分异的I型、S型和M型花岗岩。

图8 (K₂O+Na₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)判别图解 (据文献[22]修改)

Fig.8 (K₂O+Na₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) diagram. Modified after [22].

5.1.2 争光闪长岩

岩石 SiO₂ 含量较低,显示贫碱、准铝质钙碱性及具有较高的 Mg[#] 值(59.6~61.8)和富钠(K₂O/Na₂O= 0.31~0.49)的特点,显示岩浆源区为岩石圈地幔的属性。微量元素比值 Nb/Ta (15.96~24.8,平均值 19.17)、Th/La(0.23~0.26,平均值 0.25)、Rb/Sr 比值(0.034~0.060,平均值 0.046),与地幔平均值(17.5,0.13,0.034)^[26-27]一致,而 Rb/Sr 比值远低于

地壳值(0.35),显示了幔源的特点^[28]。

两类岩石均表现出富集轻稀土元素、亏损重稀土元素和 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的特征,形成这一地球化学特征的主要原因可能是:(1)强烈的地壳混染;(2)俯冲带流体/熔体交代作用形成的富集地幔部分熔融^[29]。在 Ba/Nb-La/Nb 图解中,样品全部落入弧火山岩的范围内(图 9a)^[30],位于大陆地壳平均组成的上方,介于陆壳组成与幔源岩浆组成之间,而简单的陆壳混染产物应该落在平均陆壳组成的下方;这表明不是简单陆壳混染所引起的。综合以上几点,可以推断出争光闪长岩和多宝山英云闪长岩源区岩浆在上升过程中并没有经历强烈的地壳混染,其所表现出来的地壳混染特征可能与来自俯冲板片的流体/熔体交代作用有关。经熔体交代作用形成的岩石具有富 Nb 及较高的 P₂O₅、TiO₂ 含量,并在原始地幔标准化蛛网图中一般表现为 Nb 的正异常或微弱的负异常^[29]。这与本区英云闪长岩、闪长岩 Nb 的低含量((6.36~8.68)×10⁻⁶)以及亏损存在着明显差异,表明不太可能是熔体交代作用形成。综上所述,认为研究区两类岩石主要来源于受俯冲流体交代的地幔楔的部分熔融。

5.2 构造环境

中生代时期东北地区的构造演化不仅受到古亚洲洋最终闭合后的影响,同时也叠加了蒙古—鄂霍次克洋和环太平洋构造体系的影响。在石炭世晚期,兴安地块与松辽地块拼合^[31],晚二叠世—早三

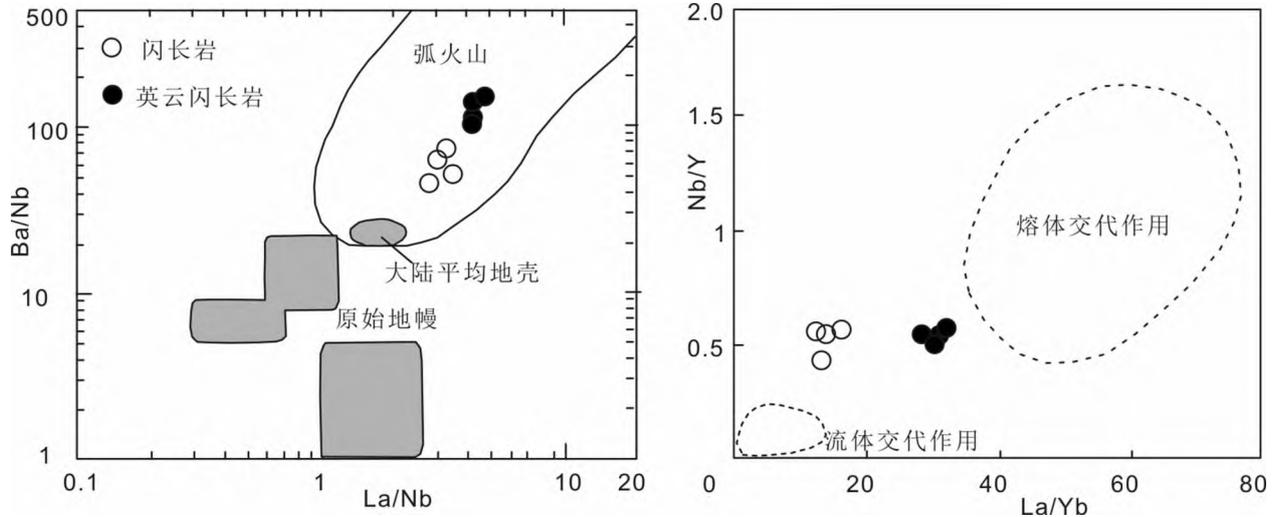


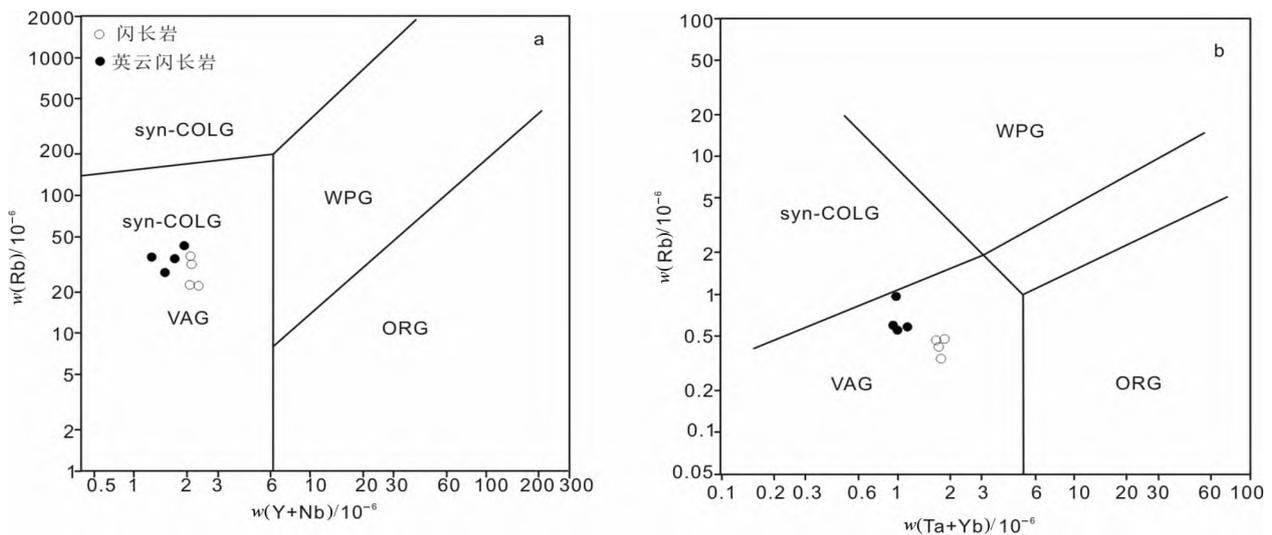
图9 英云闪长岩及闪长岩的 La/Nb-Ba/Nb (根据文献[30]修改)

Fig.9 La/Nb-Ba/Nb diagram for the tonalite and diorite. Modified after [30].

叠世,松辽地块与华北地块北缘拼贴,古亚洲洋完成最终闭合^[32],显然研究区晚三叠世岩浆活动与古亚洲洋闭合无关。吉黑东部岩浆岩以及东北构造格局研究显示,古太平洋板块向欧亚板块的俯冲作用始于早—中侏罗世^[33-34],因此,研究区晚三叠世岩浆活动并非古太平洋构造域背景下的产物。有学者推测蒙古—鄂霍茨克洋板块三叠纪开始向额尔古纳地块俯冲,在兴蒙造山带北部地区闭合于晚侏罗世^[35-36],但也有学者认为晚三叠世已经闭合^[37]。

多宝山英云闪长岩、争光闪长岩具有钙碱性火成岩组合特征,2017—2018年黑龙江地质调查研究

总院通过1:50 000地质调查填图^[13],在矿集内发现了晚三叠世中基性—中酸性火成岩,如清水河组辉石安山岩、角闪安山岩(215 Ma)、花岗闪长岩(238 Ma)等,这些岩石也具有钙碱性特征,这反映出多宝山地区晚三叠世火成岩岩石组合具有活动大陆边缘火成岩的特征^[38]。在Rb-(Y+Nb)(图10a)和Rb-(Ta+Yb)图解(图10b)^[39-40]上,多宝山英云闪长岩、争光闪长岩样品均落在火山弧花岗岩区域。在Ta/Yb-Th/Yb图解(图11a)^[39]上样品全部落入活动大陆边缘区域。微量元素Sr/Nd-Th/Yb图解(图11b)^[39]显示,多宝山英云闪长岩及争光闪长岩

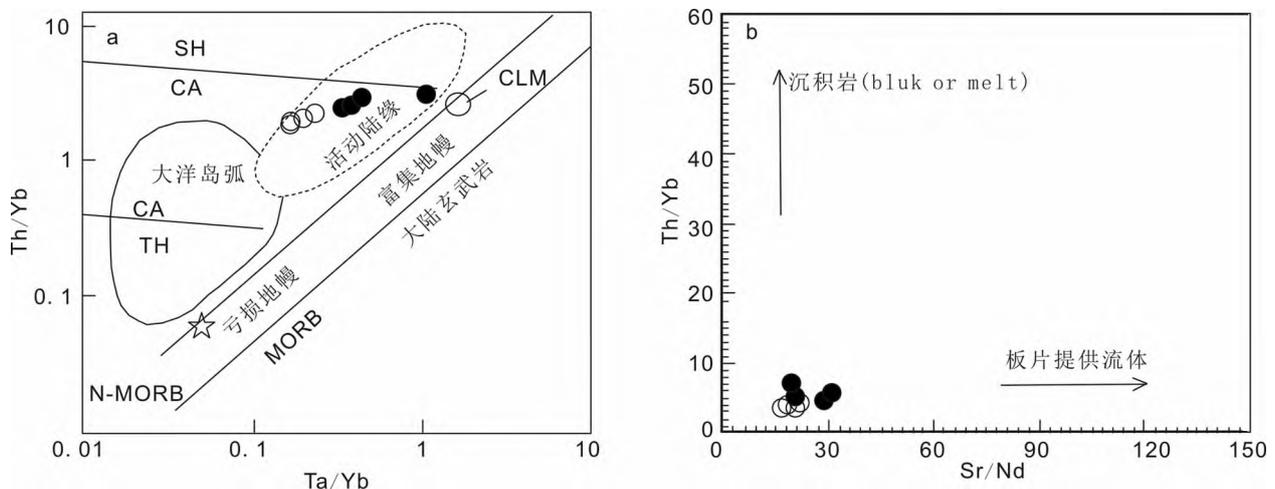


VAG—火山弧花岗岩;ORG—洋脊花岗岩;WPG—板内花岗岩;syn—COLG—碰撞花岗岩。

图10 英云闪长岩、闪长岩的Rb-(Y+Nb)(a)、Rb-(Ta+Yb)(b)图解

(据文献^[39-40]修改)

Fig.10 Rb-(Y+Nb) (a) and Rb-(Ta+Yb) (b) diagrams for the tonalite and diorite. Modified after ^[39-40].



CA—钙碱性;SH—橄榄玄粗岩;TH—拉斑玄武岩;CLM—大陆岩石圈地幔;N-MORB—正常洋中脊玄武岩。

图11 英云闪长岩及闪长岩的Ta/Yb(a)和Sr/Nd-Th/Yb(b)图解

(据文献^[39]修改)

Fig.11 Ta/Yb (a) and Sr/Nd-Th/Yb (b) diagrams for the tonalite and diorite. Modified after ^[39].

的形成与板片流体有关。另有研究表明,额尔古纳地块及兴安地块上产有晚三叠世 I 型花岗岩,这些花岗岩的形成与蒙古—鄂霍茨克洋构造背景有关^[41-42]。

综上所述,多宝山地区的晚三叠世岩浆作用的形成与蒙古—鄂霍茨克构造体系相关,形成于蒙古—鄂霍茨克大洋板片持续俯冲于额尔古纳—兴安地块之下的活动大陆边缘环境。

6 成矿作用及潜力

多宝山矿集区主成矿作用发生在早奥陶世,如产出多宝山、铜山斑岩型铜矿床及争光浅成低温热液金矿床^[4-5]。而近几年的地质调查不仅在矿集区内发现大量晚三叠世侵入岩体,而且有的岩体与铜钼矿化关系密切,如:铜山矿区斑状花岗岩内铜钼矿化发育,辉钼矿 Re-Os 年龄为 (229.4 ± 3.5) Ma^[4];小多宝山铜矿区成矿地质体花岗闪长岩年龄 (232.8 ± 1.7) Ma^[4],成因上与辉绿岩有关的二道坎大型银矿床(Rb-Sr 等时线年龄 232 Ma)相近^[10]。这些都表明晚三叠世的岩浆活动及复杂的构造背景与铜钼银等多金属成矿作用关系十分密切。

矿集区晚三叠世成岩成矿作用过程可概括为:在晚三叠世蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲背景下,随着洋壳不断地向深部俯冲,温度、压力逐渐加大,导致蚀变洋壳及俯冲沉积物脱水。俯冲流体不断地进入地幔楔,促使地幔楔发生部分熔融,形成携带有 Cu、Mo、Ag 等大量成矿元素的钙碱性岩浆。而在地壳浅部,由于温度、压力、pH 等物理化学条件的

变化,含金属元素络合物的流体在构造有利地段沉淀,并且形成含金银铜的矿脉。

铜山矿床斑状花岗岩脉 (235.4 ± 2.7) Ma 中浸染状辉钼矿 Re-Os 模式年龄 (229.4 ± 2.9) Ma^[4],争光矿床脉状黄铁矿 Re-Os 等时线年龄 (240.6 ± 2.9) Ma^[40],多宝山矿床英云闪长岩钻孔中发现铜钼矿化^[43],表明矿集区古生代奥陶世多宝山铜矿床、铜山铜矿床、争光金矿床在晚三叠世后期发生了矿化作用,晚三叠世小多宝山铜矿床及二道坎大型银矿床的发现更加证明了矿集区晚三叠世成矿作用较为强烈。位于同一成矿带上的孟德河大型金矿床也形成于晚三叠世(黄铁矿 Rb-Sr 年龄 (209.6 ± 3.1) Ma)^[44],由此显示,晚三叠世岩浆活动成矿潜力大。

区域上晚三叠世与蒙古—鄂霍茨克洋构造体系有关的矿床有额尔古纳地块上的八大关 Cu-Mo 矿床、八八一 Cu-Mo 矿床、太平川 Mo-Cu 矿床。兴安地块大兴安岭北部晚三叠世与蒙古—鄂霍茨克洋构造体系有关的矿床少之又少,而多宝山矿地区晚三叠世二道坎银矿床的发现及同期铜山与小多宝山铜矿化的厘定,不仅有利于深入理解蒙古—鄂霍茨克洋构造体系的演化,而且对区域上寻找该晚三叠世岩浆热液矿床、总结成矿规律都具有十分重要的意义(图 12^[45])。

7 结论

(1)多宝山英云闪长岩及争光闪长岩锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 (226.3 ± 2.3) Ma、 (229.3 ± 3.1) Ma,成岩时代为晚三叠世;

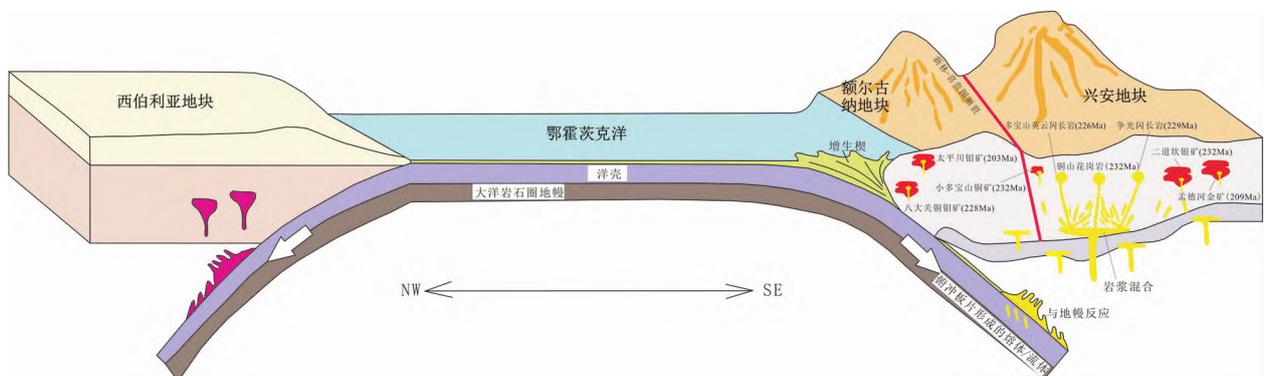


图 12 晚三叠世岩浆活动及成矿模式图
(据文献^[45]修改)

Fig.12 Schematic diagram explaining the Late Triassic magmatic activity and illustration of a metallogenic model. Modified after ^[45].

(2)多宝山英云闪长岩及争光闪长岩为钙碱性系列的I型花岗岩,岩浆来源于受俯冲流体交代的地幔楔的部分熔融,形成于大陆边缘弧构造环境,暗示蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲作用在晚三叠世已影响至兴安地块东缘;

(3)根据本文对多宝山英云闪长岩及争光闪长岩成岩时代的厘定,结合区域多金属矿床的形成时代,认为晚三叠世是大兴安岭地区一次重要的铜金银多金属成矿期,应加强该期岩浆岩的含矿性评价。

感谢紫金集团黑龙江多宝山铜业有限公司赵俊康同志野外工作时给予的大力帮助,感谢沈阳地质调查中心朱群总工程师、矿产室邵军研究员的指导,感谢审稿人提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 刘军,武广,钟伟,等. 黑龙江省多宝山斑岩型铜(钼)矿床成矿流体特征及演化[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1450-1464.
- [2] 王喜臣,王训练,王琳,等. 黑龙江多宝山超大型斑岩铜矿的成矿作用和后期改造[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 124-133.
- [3] 唐杰,许文良,王枫. 东北亚早中生代火成岩组合的时空变异:对古太平洋板块俯冲开始时间的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1181-1194, 1347.
- [4] 郝宇杰. 黑龙江省多宝山矿集区成矿作用与成矿规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [5] WANG L, QIN K Z, SONG G X, et al. Geology and genesis of the Early Paleozoic Zhengguang intermediate-sulfidation epithermal Au-Zn deposit, northeast China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 124: 103602.
- [6] ZHAO C, QIN K Z, SONG G X, et al. Switch of geodynamic setting from the Paleo-Asian Ocean to the Mongol-Okhotsk Ocean: evidence from granitoids in the Duobaoshan ore field, Heilongjiang Province, Northeast China[J]. Lithos, 2019, 336/337: 202-220.
- [7] 葛文春,吴福元,周长勇,等. 兴蒙造山带东段斑岩型Cu、Mo矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 2007, 52(20): 2407-2417.
- [8] 陈志广,张连昌,卢百志,等. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1437-1449.
- [9] 阮诗昆. 黑龙江嫩江三矿沟—多宝山—争光成矿带地质特征与成矿规律[J]. 地质学刊, 2019, 43(1): 50-56.
- [10] 李成禄. 黑龙江省嫩江—黑河构造混杂岩带金矿成矿作用及找矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [11] 徐文喜,李成禄,鲍希波,等. 大兴安岭东北部首个三叠纪银矿床地质特征及矿床成因分析[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 434-441.
- [12] LI C L, LI L, YUAN M W, et al. Study on pyrite thermoelectricity, ore-forming fluids and H-O-Rb-Sr isotopes of the Yongxin gold deposit, Central Asian Orogenic Belt: implications for ore genesis and exploration[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 121: 103568.
- [13] 石国明,符安宗,万太平. 一六九幅、多宝山铜矿幅,星火公社幅、一五三幅区域地质矿产调查报告[R]. 沈阳: 沈阳地质调查研究中心, 2018.
- [14] 武广,刘军,钟伟,等. 黑龙江省铜山斑岩铜矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2995-3006.
- [15] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. *In-situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [16] ZHOU K, CHEN Y X, ZHANG S B, et al. Zircon evidence for the Eoarchean (~3.7 Ga) crustal remnant in the Sulu Orogen, Eastern China[J]. Precambrian Research, 2020, 337: 105529.
- [17] 吴荣新. 锆石阴极发光和 U-Pb 年龄特征研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2008, 28(4): 1-7.
- [18] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [19] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [20] IRVINE T N, BARAGAR W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8(5): 523-548.
- [21] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [22] EBY G N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26(1/2): 115-134.
- [23] 侯增谦,孟祥金,曲晓明,等. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克质斑岩含矿性:源岩相变及深部过程约束[J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 108-121.
- [24] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [25] FITTON J G, JAMES D, LEEMAN W P. Basic magmatism associated with late Cenozoic extension in the western United States: compositional variations in space and time [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1991, 96(B8): 13693-13711.
- [26] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [27] WEAVER B L. The origin of ocean island basalt end-

- member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(2/3/4): 381-397.
- [28] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [29] YAN J, CHEN J F, XU X S. Geochemistry of Cretaceous mafic rocks from the Lower Yangtze region, Eastern China: characteristics and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33(3/4): 177-193.
- [30] HOFFER G, EISSEN J P, BEATE B, et al. Geochemical and petrological constraints on rear-arc magma genesis processes in Ecuador: the Puyo cones and Mera lavas volcanic formations[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 176(1): 107-118.
- [31] CHEN B, JAHN B M, TIAN W. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 245-257.
- [32] 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 943-951.
- [33] WU F Y, YANG J H, LO C H. The Jiamusi Massif: a Jurassic accretionary terrane along the western Pacific margin of NE China[J]. *Island Arc*, 2007, 16: 156-172.
- [34] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339-353.
- [35] 黄始琪, 董树文, 胡健民, 等. 蒙古-鄂霍次克构造带的形成与演化[J]. *地质学报*, 2016, 90(9): 2192-2205.
- [36] 赵院冬, 车继英, 许逢明, 等. 兴安地块东北部晚侏罗世 C 型埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及构造环境意义[J]. *地学前缘*, 2018, 25(6): 240-253.
- [37] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 571-594.
- [38] PITCHER W S. The nature and origin of granite[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1993: 1-377.
- [39] ROTTURA A, BARGOSSO G M, CAGGIANELLI A, et al. Origin and significance of the Permian high-K calc-alkaline magmatism in the central-eastern Southern Alps, Italy[J]. *Lithos*, 1988, 45(1/2/3/4): 329-348.
- [40] 蔡文艳. 黑龙江省多宝山矿集区铜-钼-金多金属成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [41] TANG J, XU W L, WANG F, et al. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. *Lithos*, 2014, 184/185/186/187: 1-16.
- [42] WANG F, XU W L, XU Y G, et al. Late Triassic bimodal igneous rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: implications for the initiation of subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath Eurasia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 406-423.
- [43] 刘宝山, 张春鹏, 宋万兵, 等. 黑龙江多宝山斑岩铜矿床叠加改造地质特征及成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(6): 1076-1095.
- [44] 刘东园. 黑龙江省黑河市孟德河金矿黄铁矿标型特征及成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [45] CAI W Y, WANG K, LI J, et al. Geology, geochronology and geochemistry of large Duobaoshan Cu-Mo-Au orefield in NE China: magma genesis and regional tectonic implications[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1): 265-292.