维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:0258-7106 (2008) 03-0319-10

延边小西南岔富金铜矿田燕山晚期花岗杂岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义*

孙景贵,陈 雷,赵俊康,门兰静,逄 伟,陈 东,梁树能
(吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要 首次对延边小西南岔富金铜矿床矿田内产出的燕山晚期花岗杂岩进行了系统的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定,获得中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母花岗闪长岩和似斑状角闪花岗闪长岩的 3 组锆石谐和年龄数据,分别为 98.4~109.0 Ma〔加权平均值为(104.6 ±2.5)Ma, $n=10$, MSWD=0.71,置信度 0.70〕、98.3~108.3 Ma〔加权平均值为(106.7±1.6)Ma, $n=12$〕和 104.4~118.8 Ma〔加权平均值为(111.7 ±2.8) Ma, $n=12$〕,指示它们的岩浆侵位时限在 112~104 Ma 之间,相对侵位时序为似斑状角闪花岗闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩到中细粒黑云母二长花岗岩;考虑到它们在成矿元素和地质上与矿化的密切程度以及控(容)矿断裂的张扭性特征,进而确定大规模的金铜矿化应发生在似斑状角闪花岗闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩、中细粒黑云母二长花岗岩形成之后,闪长玢岩之前,或在 104.6~102.1 Ma 之间,成矿环境应处于早白垩世晚期伊泽奈崎板块向古亚洲大陆边缘俯冲消亡、中国东部大陆边缘燕山造山期末的走滑、伸展构造转换过程。

关键词 地球化学;锆石 SHRIMP U-Pb 年龄;花岗杂岩;燕山期;小西南岔富金铜矿田;延边
中图分类号: P618.41; P618.51 **文献标志码**:A

SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Yanshanian granitic complex in Xiaoxinancha gold-rich copper orefield of Yanbian and its geological implications

SUN JingGui, CHEN Lei, ZHAO JunKang, MEN LanJing, PANG Wei, CHEN Dong and LIANG ShuNeng
(Collage of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract

The SHRIMP U-Pb dating of zircons from the granitic complex in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield was conducted for the first time and, as a result, three concordant ages of zircons were obtained from medium-fine grained biotite monzonitic granite, medium-fine grained biotite granodiorite and porphyraceous hornblende granodiorite respectively, i.e., 98.4~109.0 Ma(weighted average value being(104.6 ±2.5) Ma, Nequal to 10, MSWD equal to 0.71, confidence level being 0.70), 98.3~108.3 Ma(weighted average value 106.7± 1.6 Ma, $n=12$)and 104.4~118.8 Ma(weighted average value 111.7 ± 2.8 Ma, $n=12$), suggesting that magmatic emplacement took place in 112~104 Ma in order of porphyraceous hornblende granodiorite, medium-fine grained biotite granodiorite and medium-fine grained biotite monzonitic granite. Taking into account their relationships with mineralization in ore-forming elements and geological characteristics and the extensional-

* 本研究得到国家自然科学基金(批准号:40472050;40772052)和南京大学内生金属成矿机制国家重点实验室基金(2006-2005,2006-2008)资助
第一作者简介 孙景贵,男,1961 年生,博士,教授,长期从事矿床学教学和内生矿床的成矿作用研究。
收稿日期 2007-11-26; 改回日期 2008-01-16。张绮玲编辑。

维普资讯 http://www.cqvip.com

torsional features of the ore-controlling fractures, the authors hold that large-scale gold-copper mineralization must have occurred after the formation of porphyraceous hornblende granodiorite, medium-fine grained biotite granodiorite and medium-fine grained biotite monzonitic granite but before the emplacement of the associated dioritic porphyrite, i.e., between 104.6 and 102.1 Ma, and the metallogenic environment was the subduction and extinction of Izanaqi plate towards the ancient Asian continent in late Early Cretaceous and the conversion process of slip or extension structures in eastern China continental margin during the Late Yanshanian orogenic movement.

Key words: geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb dating, granitic complex, Yanshanian period, Xiaoxinancha gold-rich copper orefield, Yanbian

小西南岔富金铜矿床是延边内生金铜成矿区中重要的矿床,自20世纪70年代末发现该矿床以来,倍受国内外地质学家关注,围绕其金铜成矿与岩浆作用关系的地质、地球化学方面已有深入的研究(芮宗瑶等,1995a;1995b;孟庆丽等,2001),但在其成岩成矿年代学方面还显得薄弱。目前,获得的几组相关年龄数据有:①赋矿围岩闪长岩的全岩K-Ar法年龄205 Ma(郑斗范等,1983);②矿区花岗斑岩的全岩K-Ar法年龄107 Ma;③与矿体伴生的闪长玢岩全岩K-Ar法年龄130 Ma。上述年龄差别较大,无法精细限定成矿动力学环境。近期,笔者对该矿田中与成矿有关的岩浆热事件展了开精细的年代学工作,本文将报道矿田内花岗杂岩的锆石年代学研究成果,并结合区域构造特征,对岩浆作用和成岩成矿环境做了深入的讨论。

1 花岗杂岩的特征及样品简介

小西南岔富金铜矿床产在延边东部、烟筒砬子-小西南岔近南北向断隆带上。该区地处中国东北部陆缘、天山-兴蒙造山带东端,夹于佳木斯地块、兴凯地块、龙岗地体(华北板块部分)之间(图1a),是一个经历过古亚洲洋演化和兴蒙造山对接、中生代古太平洋板块俯冲以及新生代超壳断裂作用的叠加复合构造区(彭玉鲸等,2002)。区域出露的地层有晚古生代海相火山-沉积岩或变质变形片岩、中生代陆相火山-沉积岩和新生代陆相碎屑岩;侵入岩主要是海西晚期的辉长岩、闪长岩和燕山期花岗闪长岩、二长花岗岩以及不同时代的各类脉岩(芮宗瑶等,1995a;1995b;孟庆丽等,2001)。矿田内出露的地质体有晚古生代浅变质岩、晚二叠世闪长岩(孟庆丽等,2001)、晚三叠世花岗岩(203～198 Ma,张艳斌,2002)和燕山期花岗质杂岩等(图1b)。燕山期花岗杂岩呈岩柱状产出,岩性为中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母花岗闪长岩和似斑状角闪花岗闪长岩以及花岗斑岩等。中细粒黑云母二长花岗岩分布在矿区的北端,侵位于古生代浅变质岩系(五道沟群),出露面积约0.9 km^2;中细粒黑云母花岗闪长岩在矿区的西侧、北侧产出,出露面积约5 km^2;似斑状角闪花岗闪长岩有2处产出,总体面积达4 km^2(图1b)。

本次实验样品的岩性为中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母花岗闪长岩和似斑状角闪花岗闪长岩,其采样位置、坐标、岩相学基本特征见表1,岩石化学成分含量是:SiO_2(质量分数,下同)为64.94%～76.48%、Al_2O_3为11.13%～16.12%、TiO_2为0.18%～0.52%、Fe_2O_3为0.29%～2.36%、FeO为1.05%～3.22%、CaO为0.82%～3.89%、MgO为0.43%～2.48%、K_2O为1.0%～5.7%、Na_2O为1.86～4.38%、MnO为0.05%～0.08%、P_2O_5为0.04%～0.13%,具中钾、钙碱性岩浆岩系列特征(图略)。

2 测年方法和分析结果

锆石单矿物分离采用常规方法,即首先进行碎样和分选,在双目镜下挑纯;然后将分选后的锆石和标准锆石参考样(TEM)放在玻璃板上,用环氧树脂固定、抛光(Williams,1992;宋彪等,2002),然后进行反射光和透射光照相,并用阴极发光扫描电镜进行图像分析,检查锆石的内部结构。样品分离在河北省区域矿产地质调查院实验中心完成,实验样品制备(靶)、反射光、透射光照相在中国地质科学院地质研究所测试中心完成,阴极发光在中国科学院地质与地球物理所离电子探针室完成,SHRIMP U-Pb单颗粒锆石年龄测试在中国地质科学院地质研究所SHRIMP测试中心完成,其实验原理和流程详见参考文献(Compston et al.,1992;Williams et al.,1987;

维普资讯 http://www.cqvip.com

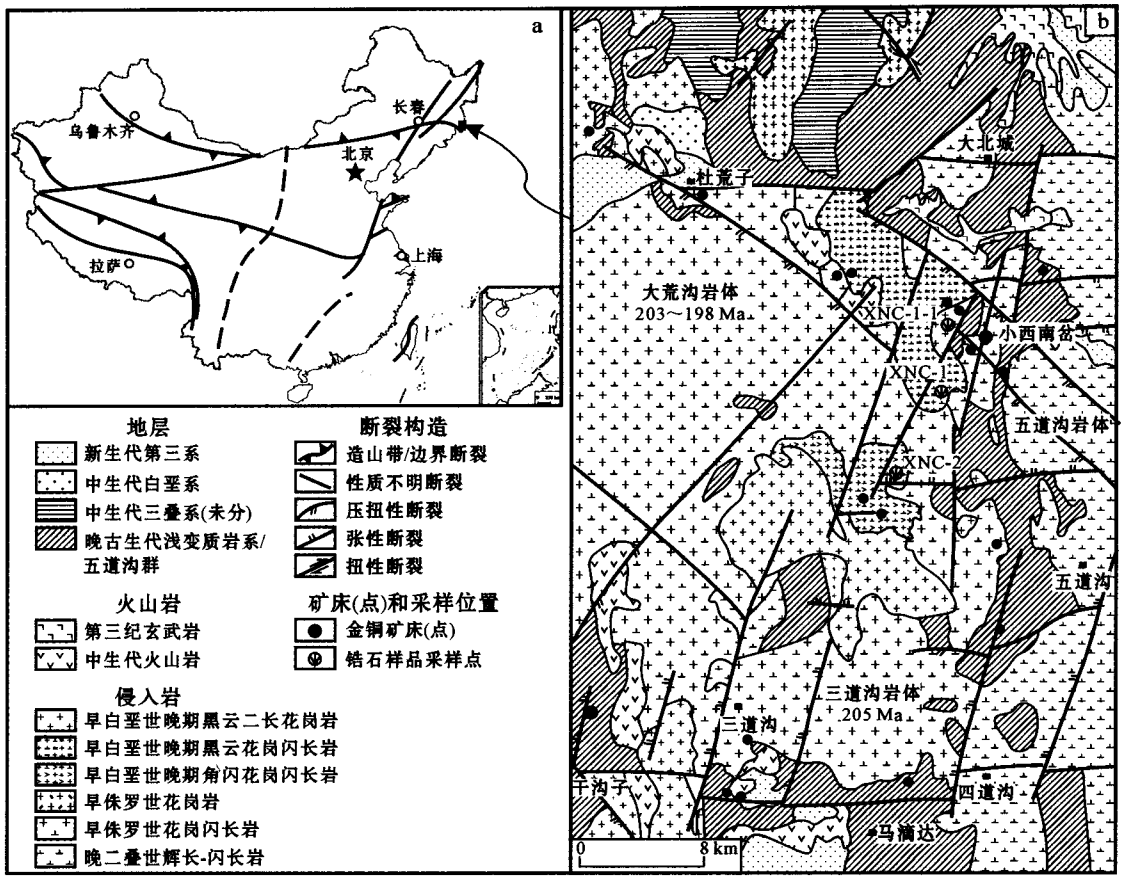


图 1　延边小西南岔富金铜矿床产出大地构造位置(a)和矿区地质简图(b)〔据郑斗范等(1983)修改编制〕

Fig. 1　Tectonic setting (b) and geological sketch map of the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield (b) in Yanbian (modified after Zheng et al., 1983)

表 1　矿田内花岗杂岩的岩相学基本特征

Table 1　Petrographic features of granitoid complex in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield, Yanbian

采集位置	组构和矿物组成
中细粒黑云母二长花岗岩(JXNC-I-1)	
北山矿段的北侧人工露头，637m 台阶；N34°12′986″，E130°52′982″	花岗结构，块状构造，粒度为 1～1.5 mm；主要矿物为钾长石(35%)、斜长石(An=28,30%±)、石英(25%±)，少量黑云母(<10%)，副矿物有磷灰石、锆石、磁铁矿等
中细粒黑云母花岗闪长岩(JXNC-1)	
小西南岔矿区西南约 3km 处路边采石场；N34°11′663″；E130°51′983″；607 m 标高	花岗结构，块状构造，粒度一般 1.4～1.9 mm，少数 2～2.5 mm；主要矿物为斜长石(An=45,45%±)、石英(20%±)、钾长石(15%±)和黑云母(10%～15%)、角闪石(7%～12%)。副矿物有磷灰石、锆石、磁铁矿、榍石等
似斑状角闪花岗闪长岩(JXNC-2)	
小西南岔矿区西南约 16 km 处路边瞭望台附近天然露头；N34°07′884″；E130°49′735″；828 m 标高	不等粒半自形粒状结构，块状构造；粒度一般 0.4～0.6 mm，少量 0.8～1 mm，个别 2～3 mm 以上；主要矿物为斜长石(An=41,40%±)、石英(30%±)和钾长石(10%±)，少量角闪石(10%～15%)、黑云母(5%～10%)，副矿物为磷灰石、锆石、磁铁矿、榍石等

Williams, 1998)；实验过程应用参考样 TEM(417 Ma)进行分馏校正；数据处理采用 LudwigSQUID 1.0 及 ISOPLT 程序自动完成。

3　单矿物分离和测试分析结果

单矿物分离结果共获得中细粒黑云母二长花岗

维普资讯 http://www.cqvip.com

岩(1.8 kg)锆石约 80 粒、中细粒黑云母花岗闪长岩(2.3 kg)为 68 粒、不等粒或似斑状角闪花岗闪长岩(2.1 kg)70 余粒。其锆石多为自形长柱状或短柱状晶体,少数为半自行晶体;晶体长 100～200 μm,个别达 350 μm;绝大多数锆石的自形晶和内部成分环带结构发育或较发育,显示其为典型的岩浆锆石的特征(图 2、图 3 和图 5)。各类锆石的特征和部分锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果分别叙述如下。

3.1 中细粒黑云母二长花岗岩

从图 2 可知,该类岩石的锆石多以自形柱状或短柱状、且内部成分结构较发育为特征,仅有少数锆石为自形粒状、内部结构不发育。所测 13 个锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据显示(表 2):普通铅含量为 0.00%～3.76%,放射铅为 1.6%～9.9%,铀的含量为 78～483 $\mu g \cdot g^{-1}$,钍的含量为 60～405 $\mu g \cdot g^{-1}$,Th/U 比值在 0.41～0.92 之间,在酸性岩浆成因的锆石范畴内(Belousova et al., 2002; 吴元保等, 2004)。在 13 个单颗粒锆石中,除 3 个测年点或 3 个锆石(3.1、4.1 和 8.1)具有异常高的铀和放射铅,导致年龄偏高[(119.7±3.8) Ma、(130.9±4.2) Ma 和(105.6±4.0) Ma]或成分点略偏离谐和年龄曲线外,其余10个成分点均落在正常的谐和年龄曲线上

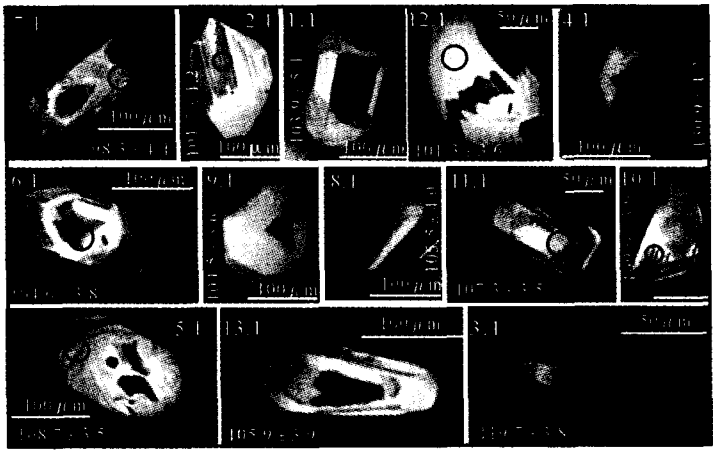


图 2 中细粒黑云母二长花岗岩(JXNC-I-1)锆石的 CL 图像、测点和年龄结果

1.1～13.1 为分析点号,105.9±3.9 类似标注为$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄

Fig. 2 Cathode luminescence photomicrographs (CL), measured points and age data ($^{206}Pb/^{238}U$) of zircons from the medium-fine grained monzonitic granite(JXNC-I-1)

1.1 to 13.1 represent analyzed spots, whereas 105.9±3.9 and similarly-marked data represent

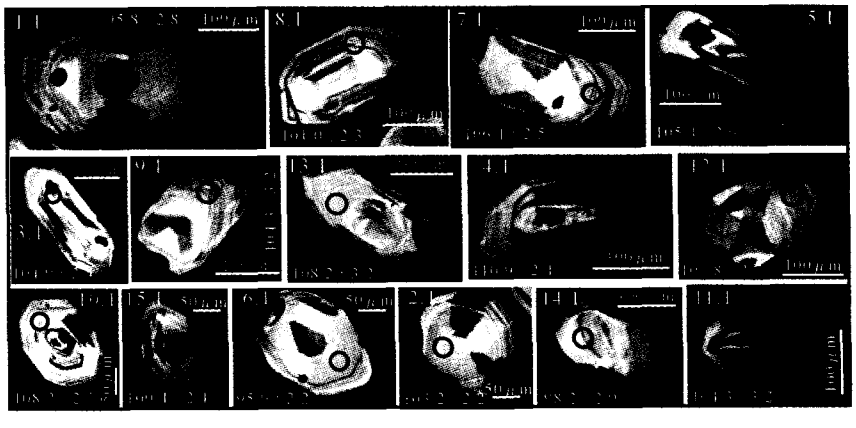


图 3 中细粒黑云母花岗闪长岩(JXNC-1)CL 图像、测年点和分析结果(标注同图 2)

Fig. 3 Cathode luminescence photomicrographs, measured points and age data ($^{206}Pb/^{238}U$) of zircons from the medium-fine grained biotite granodiorite(JXNC-1)(symbols as for Fig. 2)

维普资讯 http://www.cqvip.com

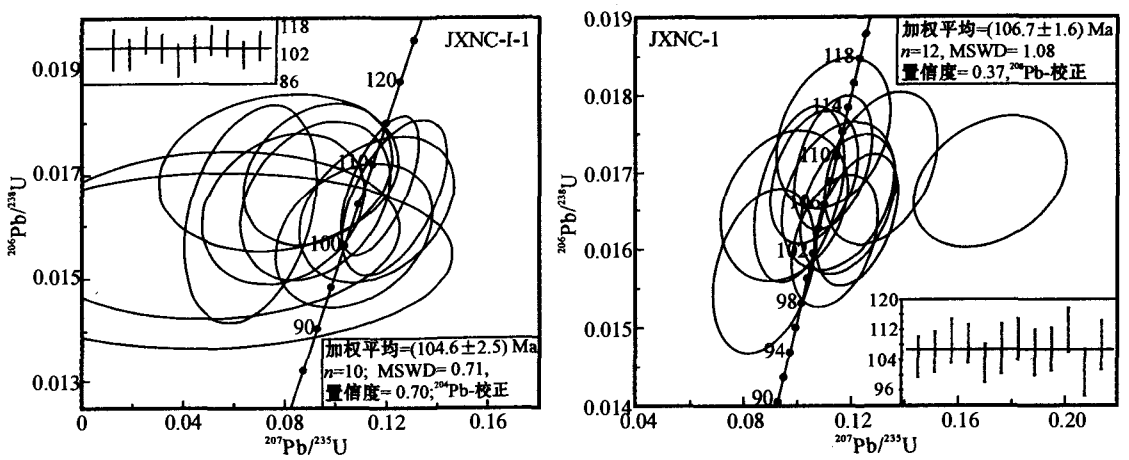


图 4 中细粒黑云母二长花岗岩(JXNC-I-1)和中细粒黑云母花岗闪长岩(JXNC-1)的 SHRIMP U-Pb 锆石年龄一致曲线图

Fig. 4 Concordia diagrams showing SHRIMP U-Pb dating of zircons from the medium-fine grained monzonitic granite (JXNC-I-1) and medium-grained biotite granodiorite (JXNC-1) in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield

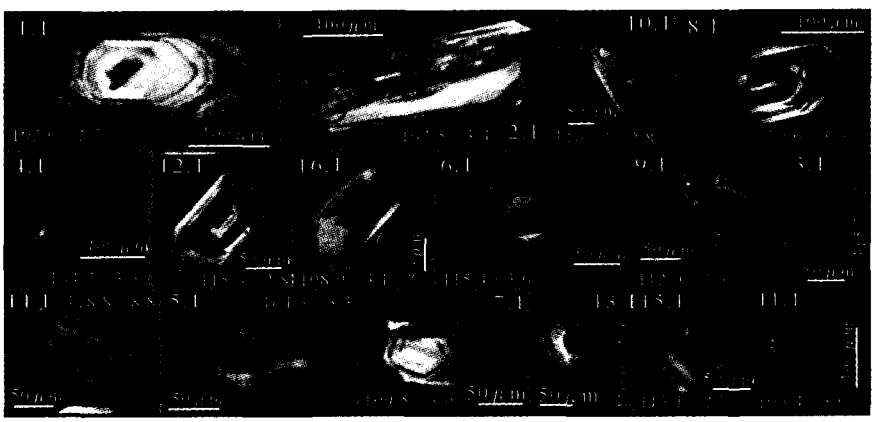


图 5 似斑状角闪花岗闪长岩(JXNC-2)的锆石 CL 图像、测点和年龄结果(标注与图 2 同)

Fig. 5 Cathode luminescence photomicrographs, measured points and age data ($^{206}Pb/^{238}U$) of zircons from the porphyritic hornblende granodiorite(JXNC-2)(symbols as for Fig. 2)

表 2 中细粒黑云母二长花岗岩(JXNC-I-1)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 2 SHRIMP U-Pb zircon data from medium-fine grained monzonitic granite(JXNC-I-1) in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield, Yanbian

分析点号	$^{206}Pb_c$/%	U/μg·g^{-1}	Th/μg·g^{-1}	Th/U	$^{206}Pb_R$/μg·g^{-1}	$^{204}Pb_c/^{206}Pb_c$		$^{207}Pb_R/^{206}Pb_R$		$^{206}Pb_R/^{238}U$		$^{207}Pb_R/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$
						比值*	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄/Ma
1.1	2.38	132	69	0.54	1.9	13	14	0.0297	15.1	0.0163	5.2	0.07	16.0	104.0±5.4
2.1	3.76	78	60	0.79	1.1	21	37	0.0241	55.9	0.0159	4.1	0.05	56.1	101.5±4.2
3.1	0.34	613	326	0.55	9.9	1.9	40	0.0463	4.3	0.0187	3.2	0.12	5.4	119.7±3.8
4.1	0.56	483	194	0.42	8.6	3.1	16	0.0439	3.8	0.0205	3.2	0.12	5.0	130.9±4.2
5.1	1.21	268	106	0.41	4.0	6.7	44	0.0397	12.4	0.0170	3.3	0.09	12.9	108.7±3.5
6.1	2.01	115	72	0.65	1.6	11	25	0.0352	16.0	0.0164	3.6	0.08	16.4	104.6±3.8
7.1	2.88	128	56	0.45	1.7	16	72	0.0240	76.2	0.0154	4.4	0.05	76.3	98.4±4.3
8.1	1.01	453	405	0.92	6.5	5.6	45	0.0404	12.5	0.0165	3.8	0.09	13.1	105.6±4.0
9.1	0.72	135	93	0.71	1.9	4.0	66	0.0516	10.1	0.0163	3.5	0.12	10.7	104.5±3.6
10.1	2.59	115	64	0.57	1.7	14	33	0.0330	24.6	0.0171	3.6	0.08	24.9	109.0±3.9
11.1	0.00	294	150	0.53	4.2	—	0	0.0507	4.2	0.0168	3.3	0.12	5.3	107.3±3.5
12.1	0.75	119	64	0.55	1.6	4.2	65	0.0491	11.2	0.0158	3.6	0.11	11.8	101.3±3.6
13.1	0.00	180	97	0.56	2.6	—	0	0.0539	5.8	0.0166	3.7	0.12	6.8	105.9±3.9

注：C 为普通铅；R 为放射成因铅；比值* 为 $\times 10^{-4}$；^{204}Pb 示校正；±1σ 为误差百分数。

维普资讯 http://www.cqvip.com

(图 4),$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在 98.4～109.0 Ma,变化范围较小,最大变化范围为 9.6 Ma,在 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图上(图 4),加权平均值为(104.6±2.5) Ma(n=10,MSWD=0.71,置信度 0.70)。

3.2 中细粒黑云母花岗闪长岩

该类岩石的锆石内部成分环带结构较发育、轮廓清晰,且自形程度较高(图 3);所测的 15 个锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据(表 3)显示,普通铅含量在 0.39%～4.09%,铀、钍的含量分别在 88～474 μg/g、63～496 μg/g 之间,Th/U 比值 0.54～1.08。其 Th/U 比值在典型中酸性岩浆锆石范畴(Belousova et al., 2002;吴元保等,2004)。在 15 个单颗粒锆石成分点中,有 3 个异常成分点:1 个点为高普通铅锆石(1.1)、1 个为高 U、Th 和低普通铅锆石(4.1)和 1 个普通铅锆石偏低(6.1),年龄分别为(95.9±2.8) Ma、(110.9±2.1) Ma、(95.9±2.2) Ma;其余 12 个成分点均在正常的普通铅、放射成因铅以及 U、Th 的含量与比值范围内,并落在 SHRIMP U-Pb 年龄谐和曲线上,$^{206}Pba/^{238}U$ 单点年龄在 98.3～108.3 Ma 之间,变化范围为 10 Ma,加权平均值为(106.7±1.6) Ma (n=12,MSWD= 1.08,置信度 0.37,用 ^{204}Pb-校正)。

3.3 不等粒或似斑状角闪花岗闪长岩

图 5 所示,不等粒或似斑状角闪花岗闪长岩的锆石晶形特征与中细粒黑云母花岗闪长岩的锆石特征基本相同,自形程度高,内部成分环带结构尤为发育清晰。共测 16 个锆石成分点(表 4),其普通铅含量在 0.00%～6.83%,铀、钍的含量分别在 44～270 μg/g、63～496 μg/g,Th/U 比值在 0.49～1.8。其晶形和 Th/U 比值显示其为典型中酸性岩浆锆石(Belousova et al.,2002;吴元保等,2004)。在这 16 个成分点中,除 2 件明显低 Th、U 和高普通铅(10.1 和 11.1),2 件大颗粒锆石(1.1 和 2.1)高 ^{204}Pb 或高 $^{204}Pb/^{206}Pb$ 比值和低年龄[(102.0±2.7) Ma 和 (102.5±3.4)Ma]外(图 5),其余 12 个测点均落在 SHRIMP U-Pb 年龄谐和曲线上,$^{206}Pb/^{238}U$ 单点年龄在 104.4～118.8 Ma 之间,变化范围较小,最大变化范围为 14.4 Ma,谐和年龄加权平均值为(111.7±2.8) Ma(n = 12, MSWD = 1.7, 置信度 0.057, ^{208}Pb校正)。

4 讨论与结论

4.1 花岗杂岩的形成时代和就位年龄

有关延边地区花岗质岩浆活动的年代学已有研究和论述(周永昶等,1992;方文昌,1992;姜开君等,1993;毛赛,1994;赵春荆等,1996;李之彤等,2001;苗来成,2000;彭玉鲸等,1997;2001;2002;吴福元等,1999a;1999b;2000;张炯飞等,2000;赵成弼等,2001;齐成栋等,2005),但限于当时测试手段的落

表 3 中粒黑云母花岗闪长岩(JXNC-1)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 3 SHRIMP U-Pb zircon data from medium-grained granodiorite(JXNC-1) in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield, Yanbian

分析点号	$^{206}Pb_c$/%	U/μg·g^{-1}	Th/μg·g^{-1}	Th/U	$^{206}Pb_R$/μg·g^{-1}	$^{204}Pb_c/^{206}Pb_c$ 比值*	±1σ	$^{207}Pb_R/^{206}Pb_R$ 比值	±1σ	$^{206}Pb_R/^{238}U$ 比值	±1σ	$^{207}Pb_R/^{235}U$ 比值	±1σ	$^{206}Pb_R/^{238}U$ 年龄/Ma
1.1	4.09	154	87	0.59	2.1	23	36	0.0215	63.6	0.0150	3.0	0.04	63.6	95.9±2.8
2.1	1.04	169	138	0.84	2.4	5.7	44	0.0421	10.9	0.0161	2.2	0.09	11.1	103.3±2.2
3.1	1.26	168	106	0.65	2.4	7.0	27	0.0427	9.7	0.0164	2.3	0.10	10.0	104.9±2.3
4.1	0.39	474	496	1.08	7.1	2.2	65	0.0481	5.7	0.0174	1.9	0.12	6.0	110.9±2.1
5.1	3.10	121	72	0.61	1.8	17	43	0.0289	42.2	0.0165	2.8	0.07	42.2	105.5±2.9
6.1	1.09	142	88	0.65	1.8	6.0	37	0.0387	11.8	0.0150	2.3	0.08	12.0	95.9±2.2
7.1	2.43	194	102	0.54	2.8	13	42	0.0292	31.2	0.0166	2.3	0.07	31.3	106.2±2.5
8.1	2.41	189	97	0.53	2.6	13	30	0.0346	19.8	0.0158	2.3	0.08	20.0	101.0±2.3
9.1	3.58	182	95	0.54	2.6	20	38	0.0234	52.1	0.0163	3.1	0.05	52.2	104.4±3.2
10.1	1.14	215	182	0.87	3.2	6.3	22	0.0391	8.1	0.0169	2.1	0.09	8.4	108.3±2.3
11.1	3.48	88	63	0.74	1.3	19	53	0.0276	60.5	0.0163	3.1	0.06	60.5	104.2±3.2
12.1	3.57	123	72	0.60	1.8	20	28	0.0278	34.2	0.0163	2.6	0.06	34.3	103.9±2.7
13.1	3.90	107	63	0.60	1.6	22	45	0.0202	78.3	0.0169	2.9	0.05	78.4	108.3±3.1
14.1	3.93	121	67	0.58	1.7	22	28	0.0205	50.5	0.0154	3.0	0.04	50.6	98.3±2.9
15.1	3.44	254	233	0.94	3.6	19	32	0.0153	71.3	0.0157	2.4	0.03	71.4	100.5±2.4

注:C 为普通铅;R 为放射成因铅;比值* 为×10^{-4}; ^{208}Pb 示校正;±1σ 为误差百分数。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 4 似斑状角闪花岗闪长岩(JXNC-2)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 4 SHRIMP U-Pb zircon data from porphyritic hornblende granodiorite in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield, Yanbian

分析点号	$^{206}Pb_c$/%	U/μg·g^{-1}	Th/μg·g^{-1}	Th/U	$^{206}Pb_R$/μg·g^{-1}	$^{204}Pb_c/^{206}Pb_c$		$^{207}Pb_R/^{206}Pb_R$		$^{206}Pb_R/^{238}U$		$^{207}Pb_R/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma
						比值*	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	
1.1	1.34	225	128	0.59	3.1	7.4	27	0.0401	9.9	0.0160	2.7	0.09	10.3	102.0±2.7
2.1	2.98	176	89	0.52	2.5	17	38	0.0220	46.5	0.0160	3.4	0.05	46.6	102.5±3.4
3.1	0.22	470	255	0.56	7.3	1.2	74	0.0440	4.7	0.0181	2.5	0.11	5.3	115.7±2.9
4.1	1.17	261	124	0.49	3.7	6.5	50	0.0390	13.9	0.0164	3.2	0.09	14.3	104.8±3.3
5.1	2.96	199	109	0.57	2.9	16	41	0.0256	42.5	0.0163	3.1	0.06	42.6	104.4±3.2
6.1	0.75	258	132	0.53	4.0	4.2	38	0.0465	7.1	0.0181	2.6	0.12	7.5	115.4±3.0
7.1	1.50	195	107	0.56	2.9	8.3	29	0.0376	12.0	0.0171	2.7	0.09	12.3	109.5±3.0
8.1	1.54	232	135	0.60	3.5	8.6	7	0.0390	6.6	0.0173	2.7	0.09	7.1	110.7±3.0
9.1	0.52	270	171	0.65	4.1	2.9	85	0.0475	8.7	0.0175	2.6	0.11	9.1	112.0±2.9
10.1	1.26	126	70	0.57	1.8	7.0	45	0.0399	14.1	0.0162	2.7	0.09	14.3	103.8±2.8
11.1	6.83	74	44	0.62	1.1	38	3	0.0104	50.4	0.0167	2.8	−0.02	50.5	106.6±3.0
12.1	0.18	385	191	0.51	6.0	0.99	65	0.0477	3.9	0.0181	2.4	0.12	4.6	115.9±2.8
13.1	1.31	222	151	0.70	3.3	7.3	35	0.0402	11.3	0.0172	2.6	0.10	11.6	110.1±2.8
14.1	0.00	437	270	0.64	7.0	–	0	0.0500	3.1	0.0186	2.4	0.13	3.9	118.8±2.8
15.1	0.37	466	246	0.55	7.1	2.0	52	0.0466	4.7	0.0177	2.4	0.11	5.3	113.2±2.7
16.1	2.27	122	110	1.8	0.93	13	39	0.0364	22.6	0.0171	2.9	0.09	22.8	109.0±3.1

注：C 为普通铅；R 为放射成因铅；比值* 为×10^{-4}；^{208}Pb 示校正；±1σ 为误差百分数。

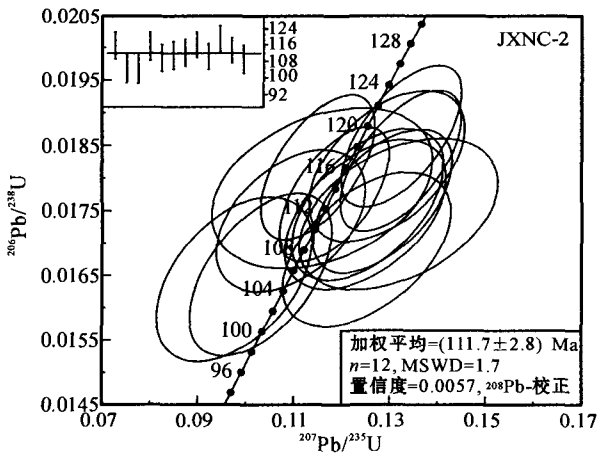


图 6 小西南查富金铜矿床矿区角闪花岗闪长岩(JXNC-2)的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄图解

Fig. 6 Concordia diagrams showing SHRIMP U-Pb dating of ircons from the porphyritic hornblende granodiorite (JXNC-2) in the Xiaoxinancha gold-rich copper orefield

后，研究者获得的精细年代学数据较少。

近年来随着精细的年代学测试技术的发展，在本区获得了一批精细的年龄数据(张艳斌，2002；张艳斌等，2002b)，将延边地区显生宙划分 5 期次，它们是晚二叠世(260～245 Ma)、三叠纪(225～200 Ma)、早侏罗世(190～180 Ma)、中侏罗世(170～150 Ma)和早白垩世(130 Ma)，并认为三叠纪、中侏罗世花岗岩为主体，晚二叠世、早侏罗世和早白垩世花岗岩出露面积相对少。

从本文获得延边小西南岔金铜矿田的花岗杂岩的 3 件年龄数据可知，全部锆石在晶形、内部结构以及成分等方面，均显示岩浆锆石的特征，并且没有捕获年龄较大的锆石(即大于 120 Ma 的锆石)(1 粒锆石年龄为 130 Ma，为高铀所致，表 2)，多数锆石的 Th/U 比值在 0.41～1.8 之间，表面剥蚀成分点均落在 SHRIMP U-Pb 年龄谐和曲线上，且所测样品形成时代较新(<1 000 Ma)，所以$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄统计权重平均值代表了岩体的侵位年龄(Krogh，1993；Williams，1992；Mezger et al.，1997)。显然，所测锆石的年龄完全可以代表它们的岩浆侵位结晶年龄，即：中细粒黑云母二长花岗岩的岩浆侵位结晶年龄为(104.6±2.5)Ma，中细粒黑云母花岗闪长岩的岩浆侵位结晶年龄为(106.7±1.6)Ma，而不等粒或似斑状角闪花岗闪长岩的岩浆侵位结晶年龄为(111.7±2.8)Ma，说明小西南岔金铜矿田的花岗杂岩的岩浆演化持续约 7 Ma，岩浆作用发生在早白垩世晚期。

4.2 花岗杂岩岩浆作用与金铜成矿的关系

有关小西南岔金铜矿的形成时代和矿床成因，前人已做过较详细的研究，并通过区域典型矿床的地质、地球化学、流体包裹体、稳定同位素和年代学等方面的研究(芮宗瑶等，1995a；1995b；孟庆丽等，2001)，提出小西南岔金铜矿属于斑岩型矿床，为早白垩世形成(123.4 Ma，孟庆丽等，2001)，与中酸性岩浆侵入活动有关。该成矿时代为早白垩世中期，

维普资讯 http://www.cqvip.com

矿床类型为斑岩型,并进一步确定成矿构造背景为中生代伊泽奈崎板块向古亚洲大陆俯冲的大陆边缘环境(孙景贵等,2007)。

本文获得矿田内的不等粒或似斑状角闪花岗闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩和中细粒黑云母二长花岗岩的岩浆侵位年龄分别为(111.7±2.8)Ma、(106.7±1.6)Ma 和(104.6±2.5) Ma,而笔者另文发表的伴生、切割矿脉的安山玢岩 SHRIMP U-Pb 单颗粒锆石年龄为(102.1±2.2) Ma;考虑到中细粒黑云母二长花岗岩的全岩具较高的铜含量,达(606.72~726)×10^{-6},且野外见到弱的黄铁矿、黄铜矿化以及绢云母化等矿化蚀变现象,而似斑状角闪花岗闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩的全岩不具有较高的铜含量,仅为(9.98~30.58)×10^{-6}(笔者未发表成果),暗示矿化发生在中细粒黑云母二长花岗岩的岩浆侵位之后,安山玢岩侵位之前,时限在104.6~102.1 Ma 之间。

4.3 花岗杂岩、矿床的形成地球动力学环境

大量的研究揭示中新生代大陆边缘、岛弧体系金铜成矿和浅成侵入岩的形成与俯冲大洋板块的部分熔融岩浆作用有关。就富金斑岩铜矿成矿而言,普遍认为是洋壳俯冲作用停止和汇聚边缘转换、转化引起的地幔楔发生部分熔融生成的高氧化岩浆以及不稳定地幔硫化物上涌而成矿(Sillitoe, 1997; 2000);且岩浆弧背景下高硫化型矿床形成的构造背景为"板块垂直俯冲,俯冲板块的倾角中等,区域应力场为弱挤压或扭压性质,板块聚合速度快(>100 mm/a)",而低硫化型矿床形成的构造背景为"板块斜向俯冲,俯冲板块的倾角较陡,区域应力场为中性,板块聚合速度较快"(Kojima, 1999)。从研究区的区域构造和控(容)矿构造角度分析,小西南岔富金铜矿床产在烟筒砬子-小西南岔近南北向走滑断裂体系内,控(容)矿构造为近南北向断裂(图 1),该断裂为左行张扭性性质(孟庆丽等,2001),与东侧中生代东锡霍特-阿林褶皱带形成的应力场基本一致(弗鲁布列夫斯基等,1995),因此,该矿床的就位构造环境应是燕山晚期伊泽奈崎板块向古亚洲大陆边缘俯冲,大陆边缘造山期末的走滑、伸展转换期;若认为200~160 Ma、140 Ma 和 120 Ma 左右为中国北方 3 大成矿期次(翟明国等,2003;毛景文等,2003;2005),那么,小西南岔富金铜矿床成矿的 104.6~102.1 Ma 之间最有可能代表中国北方第四大成矿期或吉黑东部晚中生代内生热液金铜的成矿期,同时也反映了延边地区金铜成矿的特殊性。

5 结 论

通过对延边小西南岔富金铜矿床矿田燕山期花岗杂岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄研究,得出以下几点结论。

(1)小西南岔金铜矿区内大面积分布中生代晚三叠世—早侏罗世花岗岩(以及古生代晚二叠世闪长岩类(260~250 Ma、203~198 Ma,张艳斌等,2002),对其内部呈岩柱状产出的中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母花岗闪长岩和似斑状角闪花岗闪长岩的单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析,获得其形成时代在 112~104 Ma 之间,岩浆侵位顺序从似斑状角闪花岗闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩到细粒黑云母二长花岗岩。

(2)考虑到小西南岔富金铜矿床矿田内的花岗杂岩在成矿元素、地质上与矿化的密切程度,笔者认为该矿床的金、铜矿化应发生在似斑状角闪花岗闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩、中细粒黑云母二长花岗岩侵位之后,或在 104.6~102.1 Ma 之间。

(3)从延边地区区域断裂性质和小西南岔富金铜矿床的容矿断裂的张扭性特征分析,该矿床成矿环境应是燕山晚期伊泽奈崎板块向古亚洲大陆边缘俯冲、大陆边缘造山期末的走滑、伸展转换期。

志 谢 陈军强研究生参加了野外和室内测试工作,锆石单矿物分离得到河北省区域地质矿产研究所李林庆高级工程师的帮助,SHRIMP U-Pb 年龄分析得到苗来成研究员、宋彪研究员、张巧大研究员的指导,在此一并表示衷心感谢!

References

Vrublevskij A A, Onukhov F S, Korchagin F G, Tuezov I K, Reinli B E L, Zhao C J and He G Q. 1995. Features of tectonics and inhomogeneity of deep lithosphere in fareast Russian and Northeast China [J]. Liaoning Geology, (4):241-255(in Chinese with English abstract).

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 143: 602-622.

Compston W, Williams I S, Kirschvinkj L and Zhang Z. 1992. Zircon U-Pb ages of early Cambrian Time-scale[J]. Journal of Geological Society, 149: 171-184.

维普资讯 http://www.cqvip.com

Fang W C. 1992. Granitoid rocks and mineralization in Jilin Provinces [M]. Changchun: Jilin Sci. & Techn. Pub. House. 1-271(in Chinese).

Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[A]. In: Hanchar J M, Hoskin P W O, eds. Zircon, reviews in mineralogy and geochemistry [C]. Mineralogical Society of America, 53: 27-62.

Jiang K J and Zhou Y C. 1993. Structure environment and magmatic evolution of granite batholith in DaHuanggou Jilin HuiChun region[J]. Geological Review, 39(50): 465-475(in Chinese with English abstract).

Krogh T E. 1993. High precision U-Pb ages for granulite metamorphism and deformation in the Archean Kapuskasing structual zone, Ontario: Implication for structure and development of the lower crust[J]. Earth Planet Sci. Let.,119: 1-18.

Kojima S. 1999. Some aspects regarding the tectonic setting of high- and low-suffixation epithermal gold deposits of Chile [J]. Resource Geology, 49 (3): 175-181.

Li Z T and Zhu Q. 2001. Stable isotope composition of granitoids in eastern Jilin and Heilongjiang Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(3): 353-358(in Chinese with English abstract).

Mezger K and Krogstad E J. 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation[J]. Journal of Metamorphic Geololgy, 15: 127-140.

Meng Q L, Zhou Y C and Chai S L. 2001. The porphyry and hydrothermal lode gold and copper deposits in the eastern Yanbian Region of China[M]. Changchun: Jilin Sci. & Techn. Pub. House. 1-163(in Chinese).

Miao L C. 2000. The Temporal-spatial evolution of granitoid rocks in northern marginal region of North China Craton and their relationship to gold mineralization(doctor candidate paper)[D]. Beijing: China University of Geosciences. 127p(in Chinese with English abstract).

Mao Q. 1994. Petrochemistry and the tectonic setting of MengShan pluton, eastern Jilin Province[J]. Journal of Hebei Collage of Geology, 17(6): 541-546(in Chinese with English abstract).

Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, Wang T Y and Niu B G. 2003. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in the North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposit[J]. Science in China(Series D), 33 (4): 289-299(in Chinese).

Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 170-188(in Chinese with English abstract).

Peng Y J and Su Y Z. 1997. The characteristic of geologic structure in middle Jilin area[A]. The institute of Shenyang geological mineral of the Chinese Academy of Gelolgy Science(5-6)[C]. Shenyang: Shenyang Pub. House. 335-376 (in Chinese with English abstract).

Peng Y J and Zhao C B. 2001. The evolution of the Paleo Jihei orogenic belt and accretion of the continental crust[J]. Jilin Geology, 20 (2): 1-9(in Chinese with English abstract).

Peng Y J, Ji C H and Xin Y L. 2002. Petrology and geochronology of the Paleo-Jilin-Heilongjiang organic belt in the adjacent areas of China, Russia and Korea[J]. Geology and Resources, 11(2): 65-75(in Chinese with English abstract).

Qi C D, Ji C H, Han J, Guo A C, Di X and Sun Y X. 2005. The genetic mechanism of the late granite from Jilin to Permian-early Triassic Hunchun[J]. Jilin Geology, 24(2): 10-14(in Chinese with English abstract).

Rui Z Y, Zhang H T, Wang L S, Chen R Y, Jin B L, Jin F Z, Wan Y S, Zhou Y C and Meng Q L. 1995a. Porphyry-epithermal copper-gold deposit in Yanbian area, Jilin Province[J]. Mineral Deposits, 14(2): 99-114(in Chinese with English abstract).

Rui Z Y, Zhang H T, Wang L S, Chen R Y, Jin B L, Jin F Z, Wang Y S, Zhou Y C and Meng Q L. 1995b. The multiple metallogenic model of the porphyry-epithermal copper-gold deposit in eastern Jilin and Heilongjiang[J]. Mineral Deposits, 14(2): 174-184(in Chinese with English abstract).

Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-pacific region [J]. Australian Journal of Earth Science, 44: 373-388.

Sillitoe R H. 2000. Gold-rich deposits: Descriptive and their role in exploration and discovery[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 315-345.

Song B, Zhang Y M and Wan Y S. 2002. The samples making, the radioactive dating of the zircon SHRIMP and the discussion of some phenomenon[J]. Geological Review, 48(Supp.): 26-30(in Chinese with English abstract).

Sun J G, Zhao J K, Chen J Q, Nagao K, Sumino H, Shen K, Men L J and Chen L. 2008. Ore-forming mechanism for the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian, Jilin Province, China: Evidence from noble gas isotope geochemistry of fluid inclusions in minerals [J]. Science in China (Series D), 51(2): 216-228 (in Chinese).

Williams I S and Claesson S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: Ⅱ. Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 97 (2): 205-217.

Williams I S. 1992. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology on the study of granitic rocks[J]. Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci., 83: 447-458.

Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe, applications of Microanalytical techniques to understanding Mineralizing processes[J]. McKibben M A, Shanks III W C, Ridley W I, eds. Econ. Geol.,7: 1-35.

Wu F Y, Sun D Y and Lin Q. 1999a. The Phanerozoic granite genesis and the crustal hyperplasia in Southeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 15 (2): 181-189(in Chinese with English abstract).

Wu F Y and Cao L. 1999b. Some important problems of geology in northeastern Asia[J]. World Geology, 18(2): 1-13(in Chinese with English abstract).

Wu F Y, Sun D Y, Zhang G L and Ren X W. 2000. Deep geodynamics of Yanshannia movement[J]. Geological Journal of China Universities, 6(3): 379-388(in Chinese with English abstract).

Wu Y B and Zhen Y F. 2004. The research of the genesis mineralogy of zircon and the restriction to the explanation of the U-Pb dating[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589-1604(in Chinese).

Zhang J F and Zhu H C. 2000. A Preliminary study on the genetic types

维普资讯 http://www.cqvip.com

and tectonic setting of granites in Yanbian area[J]. Liaoning Geology, 17(1): 25-33(in Chinese with English abstract).

Zhang Y B. 2002. Isotopic geochronology of the granitic magmatic activity in Yanbian area (doctor candidate paper)[D]. Supervisor: Wu F Y. Changchun: Jilin University. 132p(in Chinese with English abstract).

Zhang Y B, Wu F Y, Li H M, Lu X P, Sun D Y and Zhou H Y. 2002. Single grain zircon U-Pb ages of the Huangniling granite in Jilin Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 18 (4): 475-481(in Chinese with English abstract).

Zhao C J, Peng Y J, Tang Z X, Zhang Y P, Zhu F, Su Y Z, Wang Z F, Yi C B, Gu F, Zhang J F, Zheng C Z and Tang Y S. 1996. Structural framework and evolution of the east Jilin-Heilongjiang area[M]. Shenyang: Liaoning University Pub. House. 1-186(in Chinese).

Zhao C B, Jin K, Qi C D and Peng Y J. 2001. Characteristics of the early Indo-Chinese I-A type grantto series in the Hunchun area Jilin provinceicance and its geotectonic significance[J]. Jilin Geology, 20 (1): 1-11(in Chinese with English abstract).

Zhou Y C and Jiang K J. 1992. The Phanerozoic granite genesis series and the evolution sequence of the structure magma in Yanbian region[A]. The 40 years' scientific research symposium of the Changchun college of geology[C]. Changchun: Jilin Sci. & Techn. Pub. House. 204-212.

Zheng D F, Piao T C, Wan YS and Hu L S. 1983. The geological characteristics and mineralization laws of Xiaoxinancha gold-copper deposit[M]. 1-52(in Chinese).

Zhai M G, Zhu R X, Liu J M, Men Q R, Hou Q L, Hu S B, Li Z, Zhang H F and Liu W. 2003. The critical time limit of Mesozic tectonic regime transformation in eastern north China[J]. Science in China(Series D), 33(10): 913-929(in Chinese).

附中文参考文献

方文昌. 1992. 吉林省花岗岩类及成矿作用[M]. 长春:吉林科学技术出版社. 1-271.

弗鲁布列夫斯基 A A,奥努霍夫 Φ C, 柯察金 Φ Γ, 图也佐夫 M K, 连里甫 Э JI,赵春荆,何国琦. 1995. 俄远东、中国东北的构造特点及岩石圈深部的不均一性[J]. 辽宁地质, (4):241-255.

姜开君,周永昶. 1993. 吉林珲春地区大荒沟花岗岩岩基的岩浆演化和构造环境[J]. 地质论评,39(50):465-475.

李之彤,朱 群. 2001. 吉黑东部花岗岩类的稳定同位素组成[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 353-358.

孟庆丽, 周永昶, 柴社力. 2001. 中国延边东部斑岩-热液脉型铜金矿床[M]. 吉林:吉林科学技术出版社. 1-162.

苗来成. 2000. 华北克拉通北缘花岗岩类时空演化及与金矿关系(博士论文)[D]. 北京:中国地质大学. 127 页.

毛 骞. 1994. 吉林省东部孟山岩体岩石化学特征及其构造环境[J]. 河北地质学院学报,17(6): 541-546.

毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 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), 33(4): 289-299.

毛景文, 谢桂青,张作衡,李晓峰,王义天,张长青,李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报,21(1):170-188.

彭玉鲸,赵成弼. 2001. 古吉黑造山带的演化与陆壳的增生[J]. 吉林地质,20(2): 1-9.

彭玉鲸, 苏养正. 1997. 吉林中部地区地质构造特征[A]. 中国地质科学院沈阳地质矿产所集刊(第 5-6 号)[C]. 沈阳:沈阳出版社. 335-376.

彭玉鲸,纪春华,辛玉莲. 2002. 中俄朝毗邻地区古吉黑造山带岩石及年代记录[J]. 地质与资源, 11(2): 65-75.

齐成栋, 纪春华, 韩 江, 郭安臣, 邸 新, 孙元喜. 2005. 吉林至珲春地区晚二叠世-早三叠世花岗岩成因机制[J]. 吉林地质, 24 (2): 10-140.

芮宗瑶, 张洪涛, 王龙生, 陈仁义, 金伯禄, 金逢生,王玉胜,周永昶,孟庆丽. 1995a. 吉林延边地区斑岩型-浅成热液型铜金矿床[J]. 矿床地质, 14(2):99-114.

芮宗瑶, 张洪涛, 王龙生, 陈仁义, 金伯禄, 金逢生,王玉胜,周永昶,孟庆丽. 1995b. 吉黑东部斑岩型-浅成热液型铜金矿床多重成矿模型[J]. 矿床地质,14(2):174-184.

宋 彪,张玉海,万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 样品制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评,48(增刊):26-30.

孙景贵,赵俊康,陈军强,长尾敬介,角野浩史,门兰静,陈 雷. 2008. 延边小西南岔富金铜矿床的成矿机理研究——矿物流体包裹体的稀有气体同位素地球化学证据[J]. 中国科学(D 辑),37(12): 1588-2597.

吴福元, 孙德有, 林 强. 1999a. 东北地区显生宙花岗岩成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 15(2): 181-189

吴福元,曹 林. 1999b. 东北亚地区的若干重要基础地质问题[J]. 世界地质, 18(2): 1-13

吴福元,孙德有,张广良,任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 6(3): 379-388.

吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.

张炯飞,祝洪臣. 2000. 延边地区花岗岩的成因类型及其形成的大地构造环境[J]. 辽宁地质, 17(1): 25-33.

张艳斌. 2002. 延边地区花岗质岩浆活动的同位素地质年代学格架(博士论文)[D]. 导师:吴福元. 长春:吉林大学. 132 页.

张艳斌,吴福元,李惠民,路孝平,孙德有,周红英. 2002. 吉林黄泥岭花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报,18(4):475-481

赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 张允平, 朱 峰, 苏养正, 王占福, 邰成彬,谷 峰, 张炯飞, 郑春子, 党延松. 1996. 吉黑东部构造格架及地壳演化[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社. 1-186.

赵成弼,靳 克,齐成栋,彭玉鲸. 2001. 珲春地区早印支期 I-A 型花岗岩系的特征及其大地构造意义[J]. 吉林地质, 20(1): 1-11.

周永昶,姜开君. 1992. 延边地区显生宙花岗岩成因系列及其构造岩浆演化序列[A]. 长春地质学院 40 周年科学研究论文集[C]. 长春: 吉林科技出版社. 204-212.

郑斗范,朴淘允,万玉生,胡连胜. 1983. 小西南查金铜矿床地质特征及成矿规律[M]. 1-52.

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[J]. 中国科学(D 辑), 33(10): 913-929.