

木吉村斑岩铜矿成矿作用：华北克拉通中生代 岩石圈减薄的响应*

高永丰¹, 魏瑞华¹, 侯增谦², 马国玺³, 赵荣升⁴, 陈志宽³,
吴金乱³, 彭玉旋¹, 高明¹

(1 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3 河北省保定地质
工程勘察院, 河北 保定 071051; 4 河北省国土资源厅, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 木吉村铜(钼、金)矿位于华北克拉通太行山北段中生代岩浆岩带, 为大型隐伏斑岩型矿床。矿体赋存于侏罗纪髫髻山组与火山岩相关的闪长玢岩次火山岩相中。木吉村髫髻山组安山岩中岩浆锆石的两组 U-Pb 年龄分别为 (150.5 ± 3.0) Ma 和 (140.8 ± 3.0) Ma, 与北京西山髫髻山组火山岩锆石 U-Pb 年龄范围 $(156.6 \sim 137.1)$ Ma 基本一致。木吉村闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄为 (141.7 ± 1.6) Ma, 代表了髫髻山火山作用晚期次火山岩相的结晶年龄。木吉村斑岩铜矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (142.5 ± 1.4) Ma。结合发表的区内中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄 $(138 \sim 126)$ Ma, 新结果揭示木吉村斑岩型铜成矿作用与髫髻山火山作用相关, 而与后期花岗岩岩浆大规模的侵位无关。木吉村斑岩成矿年龄与华北克拉通东南缘长江中下游斑岩铜矿成矿年龄 $(144 \sim 139)$ Ma 相一致, 也与华北克拉通中生代动力学体制转折时间相吻合。这表明, 木吉村斑岩铜矿与长江中下游铜矿带形成于相似的地球动力学背景下, 即华北克拉通中生代大规模岩石圈减薄的构造背景。

关键词 地质学 斑岩铜矿 年代学 火山作用 华北克拉通

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Mujicun porphyry copper mineralization: Response to Mesozoic thinning of lithosphere in North China Craton

GAO YongFeng¹, WEI RuiHua¹, HOU ZengQian², MA GuoXi³, ZHAO RongSheng⁴, CHEN ZhiKuan³,
WU JinLuan³, PENG YuXuan¹ and GAO Ming¹

(1 Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Baoding Institute of Geological Engineering and Exploration of Hebei Province, Baoding 071051, Hebei, China; 4 Hebei Province Department Land & Resources, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract

The Mujicun porphyry copper deposit, a large-size concealed ore deposit, is located in northern Taihangshan (Taihang Mountains) Mesozoic magmatic belt of North China Craton (NCC). Ore bodies occur in subvolcanic diorite porphyrites of the Jurassic Tiaoishan Formation volcanic rocks. Two peak U-Pb ages of zircons from the Tiaoishan andesites are (150.5 ± 3.0) Ma and (140.8 ± 3.0) Ma, respectively. This age range is generally consistent with the U-Pb age range $(156.6 \sim 137.1)$ Ma of zircons from the Xishan Tiaoishan andesites in Beijing area. U-Pb age of zircons from Mujicun diorite porphyrites is (141.7 ± 1.6) Ma, representing

* 本文由河北省国土资源厅“河北省涞源县木吉村斑岩型铜矿成矿规律与找矿方向”项目资助

第一作者简介 高永丰, 男, 1955 年生, 教授, 长期从事岩浆作用与成矿效应研究。

收稿日期 2010-11-07; 改回日期 2011-06-24。张绮玲编辑。

a crystallization age of subvolcanic rocks in the late phase of the Tiaojiahsn volcanism. A Re-Os isochron age of molybdenites from the Mujicun porphyry copper deposit is (142.5 ± 1.4) Ma, similar to the zircon U-Pb age of the diorite porphyrites. In combination with available U-Pb ages ($138 \sim 126$ Ma) of zircons from Mesozoic granites in northern Taihangshan, the authors' new results reveal that the copper mineralization was well associated with the Tiaojishan volcanism rather than with the later emplacement of the large-size granitic batholiths in northern Taihangshan area. In addition, the mineralization age of the Mujicun porphyry copper deposit is similar to the ages of porphyry Cu deposits in the Yangtze River Metallogenic belt and southeastern NCC, and is roughly coeval with the geodynamic reversion of the NCC during Mesozoic. This coincidence probably indicates that the porphyry copper deposits in the NCC were formed in similar geodynamic settings characterized by large-scale thinning of the lithosphere beneath the NCC.

Keywords: geology, porphyry copper deposit, geochronology, volcanism, North China Craton

华北克拉通自中生代以来进入强烈的构造活跃阶段,表现为大规模岩浆活动和伸展盆地的形成(路凤香等,2000; Fan et al., 2000; 吴福元等,2008; 郑永飞等,2009),并伴随着大规模成矿作用的爆发(毛景文等,2005)。因此,对华北克拉通岩石圈减薄的研究近一个时期已经成为中国乃至世界地球科学研究的热点(郑永飞等,2009)。

太行山北段大规模分布着中生代花岗岩类侵入体和火山岩,该区也是华北克拉通重要的多金属矿集区。近年的地质勘查探明木吉村矿床是一个具有大型规模的隐伏斑岩型铜(钼)矿床(马国玺等,2010),显示了太行山北段斑岩型多金属矿的成矿潜力。中生代斑岩型铜矿床主要分布在华北克拉通东南缘,形成了长江中下游斑岩铜矿成矿带(毛景文等,2005)。而木吉村铜矿位于太行山北段多金属成矿带,是在华北克拉通腹地发现的大型斑岩型铜矿床。因此,木吉村斑岩铜矿床为研究克拉通内部中生代大规模成矿作用提供了难得的机遇。

以往的研究主要集中于与燕山期花岗岩岩浆活动有关的多金属成矿作用(石准立等,1999; 冯钟燕等,1999; 毛景文等,2005),而对太行山北段中生代火山作用与成矿的研究几乎是空白。木吉村斑岩型铜矿床赋存在呈岩株和岩枝产出的闪长玢岩中,它们是区内髻髻山火山作用的次火山岩相,并非与花岗岩浆的侵入有关。虽然已有的研究获得了太行山北段花岗岩浆作用的年代学数据(蔡剑辉等,2003; 陈斌等,2005; Davis et al., 1998),但髻髻山期火山作用缺乏同位素定年数据。同样,研究区内成矿作用时限也缺乏精细的年代学资料,目前只有大湾斑岩钼矿的 Re-Os 同位素定年数据(黄典豪等,

1996)。

精确地厘定木吉村斑岩型铜矿床的成岩成矿年龄是矿床成因研究的关键,也是深入研究华北克拉通活化与成矿作用关系的重要基础。本文在对木吉村斑岩型铜矿床赋矿闪长玢岩与安山岩之间相互关系分析的基础上,用锆石 U-Pb 方法对它们进行了年龄测定,也测定了斑岩铜矿中辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄。准确地限定了该区斑岩铜矿成岩成矿时代,并为探讨华北克拉通斑岩铜矿床的成矿地球动力学背景提供了约束。

1 区域地质背景

太行山北段中生代岩浆岩带在构造上处于华北克拉通东部燕辽地块和西部鄂尔多斯地块夹持的中部造山带(图 1a)。华北克拉通的东西两陆块约在 1.85 Ga 沿中部造山带发生拼合,并完成克拉通化(Zhao et al., 2001; 2005; 2009; Santosh, 2010)。此后,华北克拉通进入盖层发育阶段,大部分一直保持稳定到晚三叠纪。晚中生代以来,大规模的伸展作用形成了华北克拉通内部广泛发育的 NNE 向裂谷系统(Ren et al., 2002)。中生代,华北克拉通中部造山带发生强烈的构造岩浆活动,形成了 NNE 向展布的太行山构造岩浆岩带(图 1)。

太行山北段的中生代岩浆岩带主要由中生代火山岩、大河南岩体和涞源岩体组成,其展布受东、西两侧分布的 NNE 向紫荆关断裂和乌龙沟断裂带控制(图 1b)。涞源杂岩体是中生代岩浆岩带太行山北段最大的复式岩基,主要以中酸性侵入岩为主,伴有少量同期基性侵入体和侏罗纪火山岩。

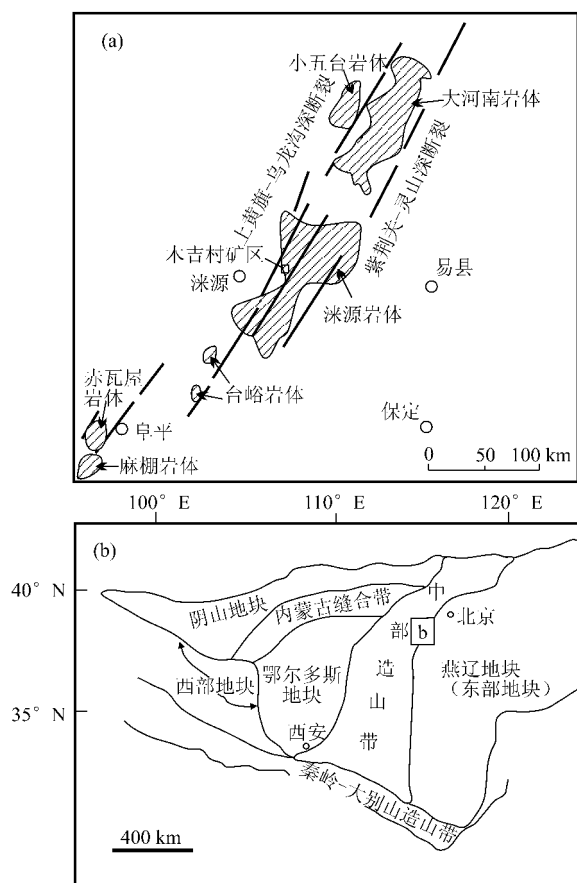


图 1 涑源地区中生代岩浆岩分布图(a)及其大地构造位置(b)

Fig. 1 Distribution (a) of Mesozoic igneous rocks in Laiyuan area and tectonic map (b)

2 含矿斑岩体地质特征

木吉村斑岩型铜矿位于涑源县城东北约 20 km, 哑铃形涑源岩体的腰部西缘, 构造上处于 NNE 向上黄旗-乌龙沟深断裂带(图 1b)。太古代片麻岩在矿区西缘出露, 而区内分布的克拉通盖层沉积主要包括元古界长城系和蓟县系、古生代寒武系—奥陶系。中生代岩浆岩以花岗闪长岩和斑状二长花岗岩为主, 侏罗纪髫髻山组和东岭台组火山岩沿拒马河呈 NE 向断续分布(图 2)。区内髫髻山组火山岩主要由火山碎屑岩、安山熔岩和英安岩组成, 它们不整合覆盖在古生代寒武纪—奥陶纪地层上, 其又被东岭台组火山岩不整合覆盖(图 2)。

详细的野外岩相学研究确定了本区绵胡坨古火山机构, 底部火山集块岩和火山角砾岩呈环带分布,

其被火山凝灰岩和溢流熔岩覆盖。沿拒马河南岸展布的舌状熔岩显示出明显的原生流动构造, 表明溢流相从破火山口向 NE 向漫流。含矿闪长玢岩岩株在绵胡坨安山质熔岩锥南侧形成了弧形分布, 多处出露的闪长玢岩与火山碎屑岩和熔岩呈侵入接触关系, 表明闪长玢岩岩株为髫髻山组火山作用的次火山岩相。木吉村斑岩铜矿体赋存在绵胡坨古火山机构西南侧的闪长玢岩岩株中(图 2)。在矿区内闪长玢岩露头显示出明显的青磐岩化和钾化蚀变分带, 但矿体在地表无露头, 为隐伏矿体。

露头与岩芯观察发现, 闪长玢岩岩株上部青磐岩化带内震碎、震裂熔结角砾岩发育。棱角-次棱角状闪长玢岩角砾由熔岩胶结, 相邻角砾可拼接。角砾岩带外侧的闪长玢岩岩株发育产状陡立的晚期熔浆灌入脉体。脉体最宽达 10 cm, 大多数脉体宽度小于 1 cm。较宽的灌入熔浆脉体具清楚的细晶或隐晶质冷凝边, 脉体中间部位为斑状结构, 而大多数细脉体显示出无斑细晶或隐晶结构。在露头上, 脉体基本上近于直立平行排列。在矿化斑岩体内, 石英和硫化物充填的脉体非常发育, 局部呈现清楚的闪长玢岩角砾化现象。角砾岩的熔岩胶结物和外侧的灌入脉体具有相同的岩性特征——流纹斑岩。与闪长玢岩相比, 熔岩胶结物和脉体的 SiO_2 含量增高, 大量石英斑晶出现。以上特征表明, 在闪长玢岩就位、冷凝之后, 演化晚期的深部岩浆房二次沸腾引发了强烈的隐爆作用。一般来说, 这种晚期隐爆过程产生的裂隙成为晚期成矿流体有利的输送通道和沉淀空间。

闪长玢岩呈斑状结构, 斑晶含量变化于 30% ~ 40%。自形-半自形奥长石为主要斑晶, 少量普通角闪石斑晶普遍被黑云母交代。闪长玢岩基质为全晶质结构, 主要由微晶中-更长石、石英及磷灰石和锆石组成。岩石化学数据(笔者未发表资料)表明闪长玢岩属于钙碱性系列, 具有与区内髫髻山安山岩一致的化学组成。它们都具有高 Sr、低 HREE 和 Y 含量、高 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 显示出埃达克岩的地球化学亲和性。

木吉村斑岩铜矿的蚀变类型和分带特征与典型斑岩铜矿的特征基本一致。自岩体中心向外可划分出 4 个蚀变带: 强硅化带(石英核)、钾化带、绢英岩化带、青磐岩化带。铜矿化主要出现在钾化带中。含矿斑岩全岩矿化, 矿石构造以细脉浸染状构造为主, 其次为脉状构造。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁

蚀 He 为剥蚀物质的载气,斑束直径 $44\text{ }\mu\text{m}$, 频率 10 Hz , 激光能量为 90 mJ , 每个分析点的气体背景采集时间 30 s , 集号采集时间 40 s 。LA-ICP-MS 激光剥蚀为单点剥蚀采样方式, ICP-MS 数据采集选用一个质量峰采集一点的跳峰方式。每测定 5 个样品数据点, 就测定一个锆石 91500 和一个 NIST610 标准。数据处理采用 GLITTER (4.0) 程序, 年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正; 元素浓度采用 NIST610 作外标, Si 作内标。锆石谐和图用 ISOPLOT (3.0) 获得。本次测定的样品均形成于侏罗纪, 其结果以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算, 单点分析的年龄误差为 1σ , 加权平均年龄结果用 2σ 表示。

用于测试的 5 个辉钼矿样品均采自含矿闪长玢岩的钻孔岩芯, 岩石具斑状结构和明显的钾质蚀变。辉钼矿与黄铜矿、黄铁矿等硫化物共生, 呈细脉浸染状构造。使用特制工具直接从岩石样品上获取辉钼矿单矿物, 并在双目镜下挑选出纯的辉钼矿单矿物用于测试。

Re-Os 同位素测试在国家地质测试中心, 采用 TJA 公司生产的 TJA PQ ExCell ICP2MS 仪器完成。采用 Carius 管封闭溶样分解样品。Re-Os 同位素分析的化学分离过程和分析方法与文献 (屈文俊等, 2003; 杜安道等, 2009) 所述方法一致。实验全流程空白 Re 约为 10 pg , Os 约为 1 pg , 远小于样品中的 Re 和 Os 的含量, 保证了样品 Re 和 Os 含量测定的准确。计算 Re-Os 同位素等时线年龄采用的衰变常数 $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

4 同位素测年结果

4.1 锆石 U-Pb 测年结果

本次研究对闪长玢岩样品 (MJC-3) 的 14 个锆石颗粒和安山岩的 10 个锆石颗粒进行了稀土元素含量和 U-Pb 同位素组成测定, 结果分别列于表 1 和表 2。闪长玢岩的锆石颗粒基本上无继承锆石核, 显示出清楚的振荡生长环带的岩浆锆石特点。锆石具有低 Th 和 U 含量 [$w(\text{Th}) = 62 \times 10^{-6} \sim 231 \times 10^{-6}$, $w(\text{U}) = 80 \times 10^{-6} \sim 229 \times 10^{-6}$], 大多数锆石颗粒具有高 Th/U 比值 (变化范围 $0.33 \sim 1.02$)。锆石具有一致的岩浆锆石稀土元素配分型式, 显示出 HREE 富集和 Ce 正异常与弱的 Eu 负异常 (图 3a)。

安山岩样品 (LMT-3) 的大多数锆石颗粒为岩浆振荡环带的无核锆石。与闪长玢岩中锆石一样, 安山岩的岩浆锆石具有低 Th、U 含量和高 Th/U 比值 (表 1)。闪长玢岩中与安山岩中的锆石具有相似的稀土元素组成 (表 1), 显示出 HREE 富集、明显的 Ce 正异常和弱的 Eu 负异常的稀土元素配分型式 (图 3b)。少数锆石颗粒具有明显的核边结构, 其核无环带, 边界清楚 (LMT-3-C11, LMT-3-C12)。锆石核呈不规则形态, 具有磨蚀边缘, 与再生长幔界线清楚, 显示出继承锆石的结构特点。锆石核与岩浆锆石的微量元素和稀土元素成分存在明显的不同。与无核岩浆锆石相比, 锆石核高 Pb、低 Th、U 含量 (表 2), 它们也具有相对低的 TREE 和 HREE 含量 (表 1)。

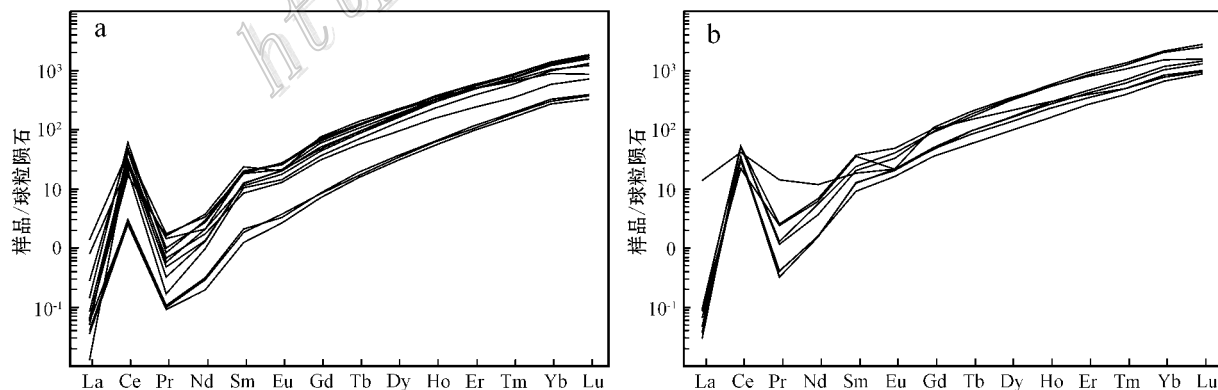


图 3 木吉村斑岩铜矿区闪长玢岩 (a) 和安山岩 (b) 中锆石稀土元素配分图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from dioritic porphyrites (a) and andesites (b) in the Mujicun porphyry deposit

表 1 木吉村髻髻山组火山岩稀土元素组成

Table 1 REE components of zircons from the Tiaojishan Formation volcanic rocks in the Mujincun porphyry deposit

样号	$w(B)/10^{-6}$														Eu/Eu*	Ce/Ce*	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			TREE
冈长玢岩(MJC-3)																	
MJC-3B04	0.452	37.36	0.195	2.01	3.25	1.924	15.81	5.49	64.37	26.67	119.7	28.23	274.9	61.39	641.7	0.83	27.5
MJC-3B05	0.02	23.51	0.036	0.79	2.22	1.412	11.69	4.4	54.53	23.03	111.7	27.37	278.3	62.86	601.9	0.85	193.6
MJC-3B06	0.263	20.56	0.160	1.25	2.06	1.226	10.85	3.99	49.02	21.24	102.4	25.01	259.5	57.87	555.4	0.80	21.9
MJC-3B07	0.09	42.23	0.112	1.63	3.25	1.445	14.76	4.95	56.71	23.4	105.7	24.62	245.4	53.63	578.0	0.64	91.9
MJC-3B08	0.028	27.96	0.076	1.05	1.53	0.876	7.64	2.63	28.62	11.47	50.56	11.51	115.2	24.72	283.9	0.79	132.4
MJC-3B09	0.021	17.82	0.019	0.58	1.89	0.982	8.94	3.22	40.07	17.08	80.4	19.2	198.0	45.03	433.2	0.74	196.8
MJC-3B12	0.047	53.27	0.093	1.78	3.63	1.761	16.7	5.46	65.14	26.94	122.5	27.79	271.4	58.91	655.4	0.70	176.0
MJC-3B13	0.004	26.8	0.053	0.81	2.27	1.396	12.41	4.33	50.95	21.37	101.3	24.21	245.0	53.48	544.4	0.81	392.4
MJC-3B14	0.016	38.12	0.065	1.27	3.58	1.851	17.47	5.74	64.35	24.14	103.7	22.28	207.8	41.79	532.1	0.72	256.0
MJC-3B15	11.73	54.86	3.020	13.09	3.85	1.455	10.45	3.17	35.76	14.31	64.83	14.89	147.4	32.33	411.1	0.71	2.0
MJC-3B16	1.121	67.04	0.397	2.74	4.67	2.84	21.5	7.26	77.57	29.75	132.6	29.2	278.5	59.22	714.4	0.87	22.0
MJC-3B17	0.012	23.32	0.038	0.93	2.09	1.443	11.6	4.41	50.74	20.81	97.76	22.83	231.5	50.63	518.1	0.90	234.4
MJC-3B20	0.019	17.67	0.035	0.527	1.43	0.947	7.72	2.74	32.51	13.29	63.11	14.68	147.5	32.37	334.5	0.88	147.7
MJC-3B21	0.077	38.09	0.100	1.56	2.51	1.359	11.84	3.92	43.5	16.72	76.13	16.9	167.4	36.03	416.1	0.77	94.8
安山岩(LMT-3)																	
LMT-3A04	4.24	33.97	1.466	6.55	3.11	1.368	10.82	4.18	46.7	20.04	92.56	22.14	224.7	47.78	519.6	0.73	3.0
LMT-3A05	0.014	28.11	0.033	0.844	2.14	1.315	10.87	3.72	39.64	15.56	68.07	15.43	158.1	32.43	376.3	0.84	292.7
LMT-3A06	0.011	28.13	0.041	0.87	2.08	1.38	11.53	4.22	45.66	18.23	83.13	19.3	196.8	42.07	453.4	0.87	289.3
LMT-3C05	0.025	42.88	0.259	3.82	6.34	3.15	24.43	6.59	60.8	20.15	77.4	15.72	148.2	31.34	441.1	0.78	115.5
LMT-3C06	0.009	43.62	0.118	1.99	3.47	2.10	21.84	8.23	95.34	39.69	185.4	42.51	416.5	90.30	951.1	0.74	300.9
LMT-3C07	0.025	18.21	0.244	3.39	6.02	1.378	25.82	9.18	101.9	37.56	159.4	33.77	293.7	51.41	742.0	0.34	50.7
LMT-3C08	0.027	42.94	0.132	3.03	3.99	2.59	21.27	7.35	90.38	36.18	166.6	39.56	390.9	81.2	886.1	0.87	157.1
LMT-3C13	0.019	24.83	0.041	0.87	1.53	1.03	8.25	2.543	27.61	10.93	52.16	12.17	124.9	28.78	295.6	0.89	193.8
LMT-3C11	6.160	26.38	1.150	4.88	1.11	0.391	3.33	1.07	14.23	6.04	29.44	7.52	82.31	18.92	202.9	0.63	2.2
LMT-3C12	0.010	12.67	0.029	0.436	0.692	0.219	4.88	1.555	18.53	7.43	37.43	9.82	108.3	24.63	226.6	0.37	163.6

表 2 木吉村髻髻山组火山岩锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 U-Pb isotopic results of zircons from the Tiaojishan Formation volcanic rocks in the Mujicum porphyry deposit

样品号及分析点号	$w(B)/\times 10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Pb	²³⁸ U	²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th			
冈长珩岩(MJC-3)																
MJC-3B04	19.5	168.3	97	0.58	0.05361	0.00487	0.0219	0.00046	0.1619	0.01431	152	13	140	3	138	2
MJC-3B05	18.7	174.3	67.9	0.39	0.0571	0.00371	0.02205	0.00045	0.17361	0.01082	163	9	141	3	151	7
MJC-3B06	15.8	144.1	47.2	0.33	0.05252	0.00355	0.02226	0.00046	0.16122	0.01048	152	9	142	3	178	8
MJC-3B07	16.0	132.1	90.7	0.69	0.05414	0.00398	0.02261	0.00048	0.16881	0.01198	158	10	144	3	148	6
MJC-3B08	11.4	80.1	61.6	0.77	0.05605	0.00571	0.02294	0.00057	0.17734	0.01762	166	15	146	4	171	8
MJC-3B09	16.0	136.4	46.9	0.34	0.05393	0.00393	0.02295	0.00049	0.17065	0.01198	160	10	146	3	169	8
MJC-3B12	14.6	126.1	100	0.79	0.0498	0.00412	0.02177	0.00050	0.14953	0.01197	141	11	139	3	137	6
MJC-3B13	21.3	206.0	102	0.49	0.05199	0.00367	0.02128	0.00046	0.15259	0.01031	144	9	136	3	130	6
MJC-3B14	22.1	178.7	175	0.98	0.05245	0.00349	0.02223	0.00046	0.16078	0.01023	151	9	142	3	127	5
MJC-3B15	11.4	95.3	63.7	0.67	0.05656	0.00503	0.02203	0.00051	0.17189	0.01483	161	13	140	3	145	7
MJC-3B16	27.4	225.9	231	1.02	0.05014	0.00346	0.02221	0.00046	0.15361	0.01015	145	9	142	3	142	5
MJC-3B17	26.2	229.0	118	0.51	0.04926	0.00315	0.02246	0.00047	0.15256	0.00928	144	8	143	3	151	6
MJC-3B20	17.1	152.5	62.2	0.41	0.05006	0.00361	0.0221	0.00049	0.15261	0.01049	144	9	141	3	155	8
MJC-3B21	13.0	101.8	84.9	0.83	0.04864	0.00440	0.02258	0.00054	0.15144	0.01321	143	12	144	3	140	7
安山岩(LMT-3)																
LMT-3A04	13.2	111.9	45.6	0.41	0.05224	0.00346	0.02389	0.00051	0.17225	0.01097	161	10	152	3	179	7
LMT-3A05	20.5	179.9	137.2	0.76	0.04726	0.00296	0.02350	0.00048	0.15329	0.00920	145	8	150	3	141	5
LMT-3A06	19.0	155.7	106.5	0.68	0.05549	0.00341	0.02337	0.00049	0.17900	0.01046	167	9	149	3	149	6
LMT-3C13	42.1	395.9	254.1	0.64	0.05277	0.00285	0.02365	0.00050	0.17208	0.00925	161	8	151	3	148	6
LMT-3C05	23.0	197.4	160.2	0.81	0.04904	0.00443	0.02185	0.00045	0.14773	0.01299	140	11	139	3	139	2
LMT-3C06	13.1	97.3	92.8	0.95	0.05512	0.00677	0.0223	0.00053	0.16943	0.02041	159	18	142	3	140	2
LMT-3C07	31.4	252.4	430.0	1.70	0.05405	0.00345	0.02266	0.00047	0.16881	0.01037	158	9	144	3	148	4
LMT-3C08	16.0	130.4	101.8	0.78	0.05113	0.00588	0.02171	0.00051	0.15309	0.01723	145	15	138	3	138	3
LMT-3C11	199.2	115.0	52.6	0.46	0.13526	0.00541	0.36644	0.00717	6.83128	0.26675	2090	35	2013	34	2140	70
LMT-3C12	174.4	114.1	40.6	0.36	0.12165	0.00498	0.33025	0.00652	5.53794	0.22411	1907	35	1840	32	1781	61

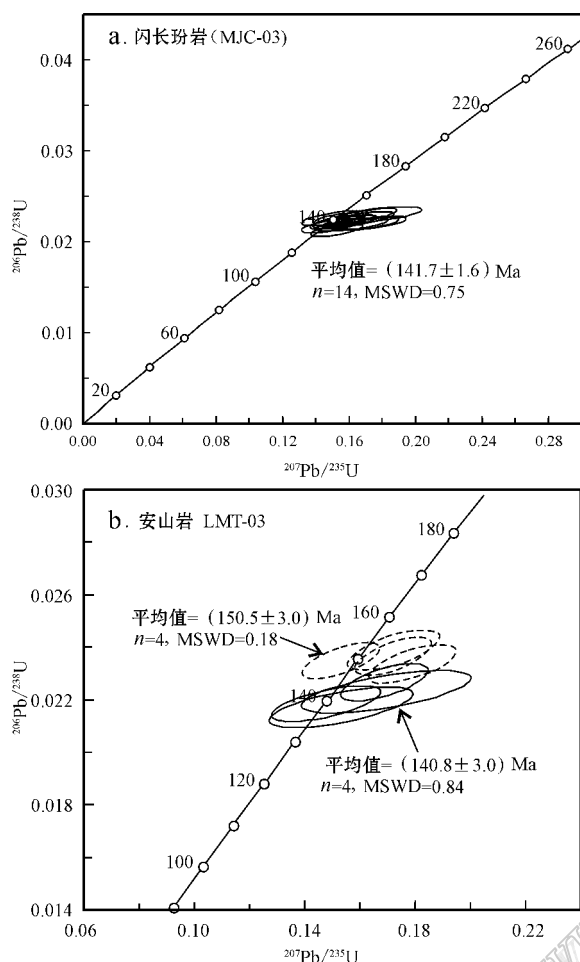


图4 木吉村髻髻山组火山岩锆石 U-Pb 年龄一致线图

Fig. 4 U-Pb age concordia diagrams of zircons in the Tiaojishan Formation from the Mujicun porphyry copper deposit

在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上,闪长玢岩 14 个锆石测试数据非常集中,均分布在谐和线上及其附近(图 4a)。它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 136~146 Ma, 加权平均值为 (141.7 ± 1.6) Ma (MSWD=0.75, $n=14$)。这一年龄结果代表了木吉村闪长玢岩的岩浆结晶年龄。

安山岩样品(LMT-3)的具振荡环带岩浆锆石具有较大的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围(138~152 Ma)(表 2)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上,安山岩的 8 个无核岩浆锆石测试数据集中于 2 组(图 4b)。其中 4 个锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 138~142 Ma, 加权平均值为 (140.8 ± 3.0) Ma (MSWD=0.84)。这个年龄值在误差范围内与闪长玢岩的年龄一致,代表了安山岩浆喷发年龄。另外一组锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 152~149 Ma, 加权平均值为

(150.5 ± 3.0) Ma (MSWD=0.18, $n=4$)。分析结果显示这些锆石具有低 ^{204}Pb 组成,排除了较高普通 Pb 导致异常高的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的可能性。由于锆石颗粒较小,无法分别测定这些锆石颗粒棱边之间的年龄差异。然而,所有测定锆石都显示出连续的振荡生长环带,反映了它们是同一岩浆作用过程形成的。因此,较大的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(150 Ma)可能代表了该区早期安山岩浆活动年龄。

安山岩中两粒锆石具有明显的核边结构,锆石核具有较高的 Pb 含量(174.4, 199.2)、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值(0.366 4, 0.330 2)、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值(6.831 2, 5.537 9)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(2 013 Ma, 1 840 Ma)(表 2)。可是,这 2 个样品具有低 ^{204}Pb (<1.85 , <1.58),排除了异常高普通 Pb 的可能。这些锆石的年龄结果表明它们是岩浆源区或上升过程中的捕获锆石或继承锆石。

4.2 辉钼矿 Re-Os 测年结果

5 个辉钼矿样品的 Re-Os 测年结果列于表 3。它们具有非常小的模式年龄变化范围(141.6~143.0 Ma),加权平均模式年龄为 (142.30 ± 0.97) Ma (MSWD=0.23, $n=5$)(图 5b)。在 ^{187}Re - ^{187}Os 图上(图 5a),这 5 个样品形成拟和很好的等时线,等时线年龄为 (142.5 ± 1.4) Ma (MSWD=0.39)。该年龄与加权平均年龄一致,可代表木吉村斑岩铜矿床的成矿年龄。

5 讨论

5.1 太行山北段髻髻山组火山作用

太行山北段是研究华北克拉通中生代构造岩浆活动的经典地区,许多与该区中生代岩浆作用时限的研究主要针对花岗岩体(Davis et al., 1998; 蔡剑辉等, 2003; 陈斌等, 2005),但缺乏火山岩的年代学数据。因此,本文报道的安山岩和闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄数据填补了该区中生代火山作用年限研究的空白,结合已发表的华北克拉通中生代髻髻山组火山岩锆石 U-Pb 年代学数据,将对太行山北段中生代火山作用时限提供有效的约束。

近年来,华北克拉通中部造山带燕山地区大规模出露的髻髻山组火山岩锆石 U-Pb 年代学资料得到迅速积累。综合的锆石 U-Pb 年代学数据表明,冀北和辽西地区髻髻山火山作用时限在 (158 ± 1) Ma 和 (153 ± 1) Ma 范围(刘键等, 2006)。然而,太行山北

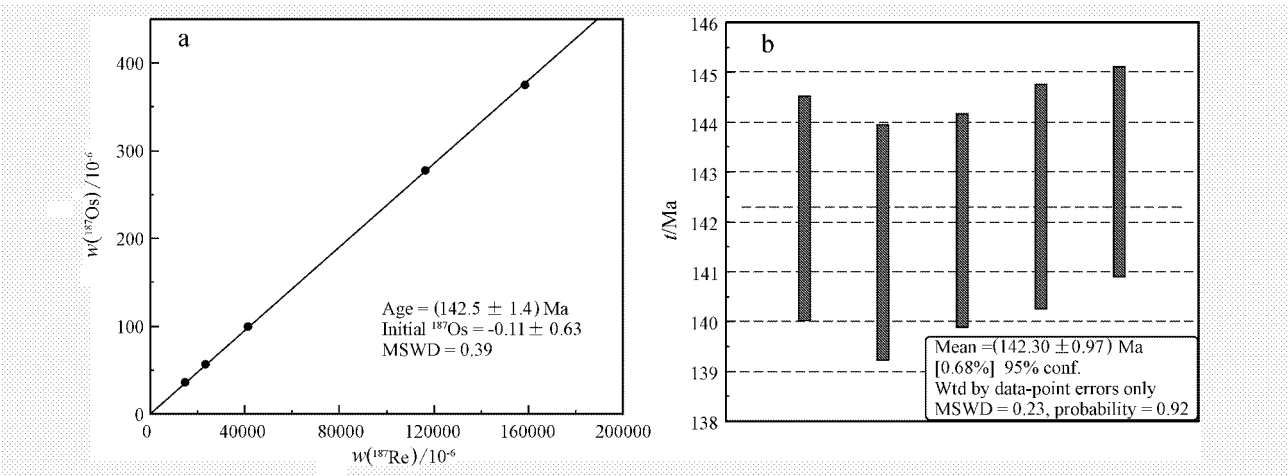


图 5 木吉村斑岩铜矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(a)和 Re-Os 模式年龄加权平均值(b)
Fig. 5 Re-Os isochron (a) and model ages (b) of molybdenites from the Mujicun porphyry copper deposit

表 3 木吉村斑岩铜矿中辉钼矿 Re-Os 同位素数据
Table 3 Re-Os isotopic data of molybdenites from the Mujicun porphyry deposit

样品号	m/g	$\text{Re} \pm 2\sigma/(\text{ng/g})$	$\text{Os} \pm 2\sigma/(\text{ng/g})$	$^{187}\text{Re} \pm 2\sigma/(\text{ng/g})$	$^{187}\text{Os} \pm 2\sigma/(\text{ng/g})$	模式年龄/Ma
PM0-15	0.02058	186002 ± 2006	0.0256 ± 0.041	116905 ± 1261	277.4 ± 2.3	142.3 ± 2.3
PM0-02	0.01040	23109 ± 236	0.0360 ± 0.0808	14524 ± 148	34.29 ± 0.36	141.6 ± 2.4
PM0-03	0.01041	66354 ± 563	0.0363 ± 0.1221	41705 ± 354	98.79 ± 0.94	142.0 ± 2.1
PM0-09	0.00455	251642 ± 2507	0.0382 ± 0.1716	158162 ± 1576	375.9 ± 3.5	142.5 ± 2.3
PM0-11	0.01060	37520 ± 310	0.0239 ± 0.0805	23582 ± 195	56.25 ± 0.51	143.0 ± 2.1

端的北京西山盆地髻髻山组火山岩剖面底部安山岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 (156.6 ± 3.1) Ma(赵越等,2004),剖面上部英安岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 (137.1 ± 4.5) Ma(Yuan et al., 2006)。另外,李伍平等(2001)曾获得北京西山地区髻髻山组火山岩斜长石 Ar-Ar 坪年龄为 (148 ± 3) Ma。这些资料表明华北克拉通中部造山带髻髻山火山作用时限存在区域变化(Yuan et al., 2006)。

本次研究获得的研究区髻髻山组锆石 U-Pb 年龄为 $150.5 \sim 140.8$ Ma,以及在北京西山髻髻山组火山岩的年代学数据范围 $(156.6 \sim 137.1)$ Ma,表明太行山北段经历了同期火山作用事件。

陈斌等(2005)获得了太行山北段王安镇和大河南岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $138 \sim 127$ Ma,与 Davis 等(1988)报道的房山岩体和大河南岩体的锆石 U-Pb 年龄范围 $(128 \sim 136)$ Ma 一致,也与太行山南段(邯郸、邢台地区)中生代闪长岩体锆石 U-Pb 年龄范围 $(135 \sim 123)$ Ma;彭头平等,2004;Chen et al., 2004 2008;许文良等,2009)相似。这些资料表明,继髻髻山组火山作用 $(156.6 \sim 137.1)$ Ma 之后,太行

山北段发生了大规模的花岗岩浆侵位活动 $(138 \sim 126)$ Ma)。因此,太行山北段中生代岩浆作用方式在约 138 Ma 时发生了重大转变。

5.2 成矿作用时限

本次研究获得的木吉村斑岩铜矿 5 个辉钼矿的 Re-Os 平均模式年龄 (142.30 ± 0.97) Ma 和等时线年龄 (142.5 ± 1.4) Ma 非常一致。该数据与成矿母岩闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄 (141.7 ± 1.6) Ma 在测试误差范围内基本相同。次火山岩相的闪长玢岩是侵位之后急速结晶状态下形成的,成岩与锆石年龄可近于一致。可是,闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄小于辉钼矿 Re-Os 年龄,明显与见到的斑岩矿化关系相悖。最可能的解释是所测锆石粒度较小,容易造成锆石 U-Pb 年龄值的较大误差。相比之下,辉钼矿的 Re-Os 年龄更可靠。因此,木吉村斑岩铜矿形成于 142 Ma 左右,这个年龄接近于其南侧 10 km 处的大湾斑岩钼矿单个辉钼矿 Re-Os 年龄 $[(144.4 \pm 7.4)$ Ma 黄典豪等,1996]。

黄典豪等(1996)获得的燕山地区北京大庄科爆发角砾岩型钼矿和冀北寿王坟斑岩型铜(钼)矿的辉

钼矿 Re-Os 模式年龄分别为 $144.7 \sim 146.4$ Ma 和 (148 ± 4) Ma。从更大范围看,木吉村斑岩铜矿成矿年龄与华北克拉通东南缘的长江中下游铜矿带的成矿年龄($137.9 \sim 144$ Ma,峰值为 140 Ma;毛景文等,2005)相一致。这无疑表明它们代表了华北克拉通 140 Ma 左右的大规模成矿事件(毛景文等,2005)。开展对比研究华北克拉通不同部位的斑岩铜矿特征,将促进认识华北克拉通破坏过程的成矿机制。

许多研究者(石准立等,1999;冯钟燕等,1999;毛景文等,2005;黄典豪等,1996)认为太行山北段中生代大规模成矿爆发与花岗岩浆侵入有关。如前所述,木吉村斑岩铜矿的成矿母岩是髫髻山组的次火山岩。斑岩锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 成矿年龄证明了木吉村斑岩铜矿与髫髻山组火山作用有关,而与后继的大规模花岗岩浆侵位($138 \sim 126$ Ma)无关。太行山北段髫髻山火山作用与斑岩铜矿成矿关系的厘定为华北克拉通中生代大规模成矿作用的研究开拓了新领域,也为克拉通破坏环境斑岩铜矿的成矿理论研究提供了基础。

5.3 对地球动力学背景等一些问题的讨论

太行山中生代大规模岩浆作用的成因及其动力学机制一直备受地学界关注(Davis et al., 1998;蔡剑辉等,2003;彭头平等,2004;陈斌等,2005;Yuan et al., 2006;陈智超等,2007;汤艳杰等,2006;许文良等,2009;Chen et al., 2004;2008)。已有研究表明,华北克拉通东部中生代构造体制发生了以挤压为主到伸展为主的转变(Zhai et al., 2004),并出现了大规模岩石圈减薄(吴福元等,2008;郑永飞等,2009)。华北东部中生代大规模岩浆作用与爆发成矿作用是构造体制转变与岩石圈减薄深部过程的响应(Zhai et al., 2004;翟明国等,2005)。大量研究成果表明,古太平洋板块的向西俯冲是中国东部大规模的中生代岩浆作用的主要原因,华北中生代岩浆岩形成于弧后伸展环境(吴福元等,1999;陈斌等,2005)。这与华北东部在中生代期间广泛分布的基性岩脉(邵济安等,2002)和伸展盆地的发育(Li et al., 2004)是一致的。Zhai 等(2004)根据构造体制、岩浆作用与爆发成矿,推测华北克拉通东部太平洋构造体制形成始于约 150 Ma。赵越等(2004)认为,髫髻山组火山岩代表了燕山期大规模火山喷发的开始,也反映了中国东部环太平洋构造域发展阶段的建立。冀北火山盆地处于燕山褶皱带中段,属于燕山褶皱带构造走向由东西向到北东向转折的部位。与

此相比,NNE 向展布的太行山中生代构造岩浆岩带的形成时间能够代表中国东部太平洋构造域发展阶段的开始。已有的太行山北段中生代岩浆岩年代学资料表明,髫髻山组火山岩具有该区大规模火山作用的记录($156.6 \sim 137.1$ Ma)。这个年龄范围的下限可能代表中国东部太平洋构造体系建立的开始。

太行山中生代岩浆作用的成因备受关注并存在争论。争论的焦点集中在中生代岩浆源区性质,主要有 2 种观点:① 下地壳熔体与岩石圈地幔反应(蔡剑辉等,2003;Yuan et al., 2006;许文良等,2009);② 岩浆起源于古消减作用富集的岩石圈地幔(彭头平等,2004;Wang et al., 2006;汤艳杰等,2006;陈斌等,2005;Chen et al., 2004;2008)。

太行山中生代髫髻山组火山岩和许多中酸性侵入岩具有高 Sr/Y 和 La/Yb 比值,显示出埃达克岩的地球化学亲和性(蔡剑辉等,2003;Yuan et al., 2006;许文良等,2009)。所以,这些岩石被认为是由加厚的大陆下地壳部分熔融形成的,而它们的高 Mg 地球化学特征反映了软流圈中拆沉陆壳的部分熔融体在上升过程与岩石圈橄榄岩有相互作用(Yuan et al., 2006)。但是,岩浆的高 Sr/Y 和 La/Yb 比值可以通过不同的岩浆过程获得,尤其是“陆埃达克”具有多种岩石学成因过程(Moyen,2009),并非确定的岩浆源区性质的指示(Richards et al., 2007)。研究表明,辽西中生代火山岩的埃达克质地球化学亲和性并非原生岩浆的本身特征,不能作为下地壳拆沉的证据(张宏福等,2008;邵济安等,2008)。Ling 等(2009)指出中国东部中生代岩浆岩的加厚下地壳模式与白垩纪伸展盆地发育不相吻合,Li 等(2010)也根据长江中下游斑岩矿床及其侵入体的年代学资料对该区埃达克岩的加厚下地壳成因模式提出质疑。

华北克拉通中生代岩石圈大幅减薄作用主要发生在华北克拉通东部(燕辽地块),而西部鄂尔多斯地块基本保留了太古代岩石圈地幔(吴福元等,2008)。事实上,太行山位于华北克拉通东、西部中生代岩石圈差异演化的过渡地带。综合地球物理资料(Zhao et al., 2001;Santosh, 2010)表明,太行山地区存在较厚的岩石圈地幔,而太行山地区地幔橄榄岩包体的研究,表明它们具有太古代岩石圈地幔性质(Zheng et al., 2001)。就太行山地区而言,在古老岩石圈地幔保留的情况下,难以想象加厚下地壳穿过巨厚的岩石圈地幔拆沉进入软流圈地幔。

太行山中生代岩浆岩共同具有与消减有关的岩

浆岩地球化学特征:高 LILE 和 LREE 富集及明显的 HFSE 亏损,高 Sr/Y 和 La/Yb 比值,EM1 型富集地幔的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素系统(陈斌等,2005; Chen et al., 2003; 2004; 2008; Zhang et al., 2004; Wang et al., 2006; 汤艳杰等,2006)。这些特征表明中生代岩浆岩来源于消减古老地壳物质的富硅熔体交代岩石圈地幔(Zhang et al., 2004; Wang et al., 2006; 汤艳杰等,2006)。考虑到太行山地区处于远离古太平洋板片俯冲带的弧后盆地,古太平洋板片的俯冲不可能是岩石圈地幔富集的主要机制。太行山地区古老岩石圈地幔的富集过程可能与华北克拉通东、西陆块在古元古代(大约 1.85 Ga)的俯冲、碰撞事件(Zhao et al., 2001; 2005)有关(Wang et al., 2006; 汤艳杰等,2006)。在中生代伸展构造环境,上涌热软流圈诱发华北克拉通古老的富集岩石圈地幔部分熔融形成原生熔体(Zhang et al., 2004; Wang et al., 2006),这些原生熔体在下地壳或上升过程中可以经历分离结晶作用或与地壳熔体的混合(Chen et al., 2004; 2008)。以上岩浆过程可以用来解释太行山中生代岩浆岩高 Sr/Y 和 La/Yb 比值(埃达克岩地球化学特征)的成因(Moyen, 2009)。尽管如此,木吉村含矿斑岩的埃达克岩地球化学亲和性的成因仍然是需要深入探索的科学问题。

References

Cai J H, Yan G H, Chang Z H, Wang X F, Shao H X and Chu Z Y. 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81-92 (in Chinese with English abstract).

Chen B, Jahn B M and Zhai M G. 2003. Sr-Nd isotopic characteristics of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, NCC, and implications for Archean lithosphere thinning [J]. *Journal of the Geological Society*, 160: 963-970.

Chen B, Jahn B M, Arakawa Y and Zhai M G. 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 489-501.

Chen B, Tian W, Zhai M G and Arakawa Y. 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 13-24 (in Chinese with English abstract).

Chen B, Tian W, Jahn B M and Chen Z C. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: Evidence for hybridization be-

tween mantle-derived magmas and crustal components [J]. *Lithos*, 102: 118-137.

Chen Z C, Chen B and Tian W. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: A case study of Mesozoic batholiths and mafic enclaves in North Taihang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 295-306 (in Chinese with English abstract).

Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H and Gehrels G. 1998. Geometry and geochronology of Yanshan belt tectonics [A]. In: Department of Geology, Peking University, ed. *Collected works of international symposium on geological science* [C]. Beijing: Peking University. 275-292.

Du A D, Qu W J, Li C and Yang G. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 288-304 (in Chinese with English abstract).

Fan W M, Zhang H F, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D and Menzies M A. 2000. On and off the North China Craton: Where is the Archean keel [J]? *Journal of Petrology*, 41(7): 933-950.

Feng Z Y and Chen T L. 1999. The evolution of metallization during Mesozoic era in the Northern Taihang mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 343-349 (in Chinese with English abstract).

Huang D H, Du A D, Wu C Y, Liu L S, Sun Y L and Zou X Q. 1996. Metallochronology of molybdenum (-copper) deposits in the North China platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 15(4): 365-373 (in Chinese with English abstract).

Ling M X, Wang Y F, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y and Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze River belt, eastern China [J]. *Econ. Geol.*, 104: 303-321.

Li W P, Li F X and Li X H. 2001. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan Formation in western Hills of Beijing [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(2): 123-133 (in Chinese with English abstract).

Li X H, Li W X, Wang X C, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, Gao Y Y and Wu F Y. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension [J]. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2010.07.018

Liu J, Zhao Y and Liu X M. 2006. Age of the Tiaojishan Formation volcanics in the Chende Basin, northern Hebei province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2617-2630 (in Chinese with English abstract).

Li Z, Liu S F, Zhang J F and Wang Q C. 2004. Typical basin-fill sequences and basin migration in Yanshan, North China-Response to Mesozoic tectonic transition [J]. *Science in China (Series D)*, 47(2): 181-192.

Lu F X, Zheng J P, Li W P, Chen M H and Cheng Z M. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the "mushroom cloud" model [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 97-107 (in Chinese with English abstract).

Ma G X, Chen Z K, Chen L J, Ma X F, Ma J H, Ti Y S and Du Y F.

2010. Geological characteristics of Mujicun copper (molybdenum) deposit [J]. *Mineral Deposits*, 29(6): 1043-1054 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q and Zhang Z H. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Moyen J F. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the "adakitic signature" [J]. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.001.
- Peng T P, Wang Y J, Fan W M, Guo F and Peng B X. 2004. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the diorites for southern Taihang Mountains in the North China Interior and its petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1253-1262 (in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254-257 (in Chinese with English abstract).
- Ren J, Tamaki K, Li S and Zhang J. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics*, 344: 175-205.
- Richards J P and Kerrich R. 2007. Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis [J]. *Econ. Geol.*, 102: 537-576.
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction [J]. *Precambrian Research*, 178: 149-167.
- Shao J A and Zhang L Q. 2002. Mesozoic dyke swarms in the north of North China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 312-318 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A and Lu F X. 2008. Re-discussion on the origin of volcanic rocks of the Xinglonggou Formation, North China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1313-1322 (in Chinese with English abstract).
- Shi Z L and Liu F S. 1999. Metallogenic systems about Mesozoic metaliferous deposits in North Taihang Shan-Yan Shan area [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 297-303 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F and Zhang J. 2006. Source characteristics and temporal-spatial evolution of Mesozoic and Cenozoic basaltic magmatism in the Taihang Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1657-1664 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Fan W M, Zhang H F and Peng T P. 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: Implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton [J]. *Lithos*, 86: 281-302.
- Wu F Y and Sun D Y. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in Eastern China [J]. *Journal of Changchun University of Science*, 29: 313-318 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Xu Y G, Gao S and Zheng J P. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Yang D B, Pei F P and Yu Y. 2009. Petrogenesis of Fushan high-Mg[#] diorites from the southern Taihang Mts. in the central North China Craton: Resulting from interaction of peridotite-melt derived from partial melting of delaminated lower continental crust [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1947-1961 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Liu X M and Liu Y S. 2006. Geochemistry and U-Pb zircon geochronology of Late-Mesozoic lavas from Xishan, Beijing [J]. *Science in China (Series D)*, 49(1): 50-67.
- Zhai M G, Zhu R X and Liu J M. 2004. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block [J]. *Science in China (Series D)*, 47(2): 151-159.
- Zhai M G, Fan Q C and Zhang H F. 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China: magma underplating, replacement and delamination [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1509-1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M and Zhai M G. 2004. Highly heterogeneous late Mesozoic lithospheric mantle beneath the north China craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks [J]. *Geological Magazine*, 141(1): 55-62.
- Zhang H F and Shao J A. 2008. Volcanic lavas of the Yixian Formation in western Liaoning province, China: Products of lower crust delamination or magma mixing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 37-48 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A and Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 136: 177-202.
- Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, Cawood P A, Sun M and Li X P. 2001. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 177: 266-276.
- Zhao G C, He Y and Sun M. 2009. The Xiong'er volcanic belt at the southern margin of the North China Craton: Petrographic and geochemical evidence for its outboard position in the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent [J]. *Gondwana Research*, 16: 170-181.
- Zhao Y, Zhang S H and Xu G. 2004. The Jurassic major tectonic events of the Yanshanian intraplate deformation belt [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 854-863 (in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M and Pearson N J. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution [J]. *Lithos*, 57: 43-66.
- Zheng Y F and Wu F Y. 2009. Growth and reworking of cratonic lithosphere [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3347-3353.

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 王晓芳, 邵宏翔, 储著银. 2003. 王安镇岩体地球化学特征及成因探讨 [J]. *岩石学报*, 19(1): 81-92.
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成

- 因和地球动力学意义[J]. 岩石学报, 21(1):13-24.
- 陈智超, 陈 斌, 田 伟. 2007. 太行山北段中生代岩基及其包体 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(2):295-306.
- 杜安道, 屈文俊, 李 超, 杨 刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 30(3):288-304.
- 冯钟燕, 陈廷礼. 1999. 太行山北段中生代成矿时间演化[J]. 地学前缘, 6(2):343-349.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰竺, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿-铼年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 15(4):365-373.
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 孙善平, 李家振, 章大港. 2001. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征及岩浆起源[J]. 岩石矿物学杂志, 20:123-133.
- 刘 键, 赵 越, 柳小明. 2006. 冀北承德盆地髻髻山组火山岩的时代[J]. 岩石学报, 22(11):2617-2630.
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 陈美华, 成中梅. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模型[J]. 地学前缘, 7(1):97-107.
- 马国玺, 陈志宽, 陈立景, 马晓凤, 马金虎, 提云生, 窦玉峰. 2010. 木吉村铜(钼)矿床地质特征[J]. 矿床地质, 29(6):1043-1054.
- 毛景文, 谢桂清, 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的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1):196-88.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚明, 郭 峰, 彭冰霞. 2004. 南太行闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 20:1253-1262.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿-铼地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4):254-257.
- 邵济安, 张履桥. 2002. 华北北部中生代岩墙群[J]. 岩石学报, 18:312-318.
- 邵济安, 路凤香. 2008. 再论兴隆沟组火山岩成因[J]. 岩石学报, 24(6):1313-1322.
- 石准立, 刘凤山. 1999. 北太行山-燕山区中生代金属矿床成矿系统[J]. 地学前缘, 6(2):297-303.
- 汤艳杰, 张洪福, 英基丰, 张 谨. 2006. 太行山地区中、新生代玄武质岩浆的源区特征与时空演化[J]. 岩石学报, 22(6):1657-1664.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 29:313-318.
- 吴福元, 徐义刚, 高 山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24:1145-1174.
- 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 于 洋. 2009. 太行山南段符山高镁闪长岩的成因——拆沉陆壳物质熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的结果[J]. 岩石学报, 25(8):1947-1961.
- 张宏福, 邵济安. 2008. 辽西义县组火山岩:拆沉作用还是岩浆混合作用的产物[J]. 岩石学报, 24(1):37-48.
- 赵 越, 张栓宏, 徐 刚, 杨振宇, 胡健民. 2004. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件[J]. 地质通报, 23:854-863.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 隋建立. 2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程岩浆底侵、置换与拆沉作用[J]. 岩石学报, 21(6):1509-24.
- 郑永飞, 吴福元. 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造[J]. 科学通报, 54(14):1945-1949.