

doi:10.3799/dqkx.2013.002

中条山上玉坡地区黑云母片岩成岩时代及成因

张 晗^{1,2}, 孙丰月¹, 胡安新¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘要: 中条山上玉坡背斜核部主要有北峪花岗岩、变富钾流纹岩及(角闪石/方柱石)黑云母片岩为主的变镁铁质杂岩出露。上玉坡的黑云母片岩类的归属及成因争论已久。空间上, 上玉坡黑云母片岩类岩石及地球化学特征形成了一个以背斜核部为中心的环形的递变带, 岩石的主要造岩矿物特征及 K、Ca、Na、Rr、Sr、Ba 受退变质韧性剪切带高盐度流体改造均发生系统变化, Ta 及 LREE 也显示有明显变化。上玉坡变富钾流纹岩 LA-MC-ICPMS 测年获得²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 $2\,164 \pm 8.9$ Ma, 与绛县群竖井沟组富钾流纹岩(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄 $2\,161.3 \pm 1.5$ Ma)同时代产出。上玉坡产出的变富钾流纹岩—黑云母片岩与铜矿峪分布的绛县群双峰式火山建造岩性组合类似, 推断上玉坡背斜核部产出的黑云母片岩产出于 $2.20 \sim 2.15$ Ga。使用在流体中保持相对稳定的高场强元素对图解, 判断中条山黑云母片岩的原岩更可能为亚碱性镁铁质火成岩, 并非前人认识的“超钾基性火山岩”, 综合中条山古元古代地质特征, 该地区古元古代可能处于与俯冲活动有关的张性构造环境。

关键词: 中条山; 黑云母片岩; 岩石地球化学; 流体; LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2013)01-0010-15

收稿日期: 2012-02-15

Geochemistry and Geochronology of Shangyupo Biotite Schist in the Zhongtiaoshan Mountains: Implications for Its Petrogenesis

ZHANG Han^{1,2}, SUN Feng-yue¹, HU An-xin¹

1. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Institute of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The primary compositions of the anticline core at Shangyupo are Beiyu meta-granitoid, meta-rhyolite and meta-mafic rocks. The age and petrogenesis of the biotite schist have been under debate for a very long time. The petrology features and geochemistry of Shangyupo amphibole/scapolite biotite schist are cricoid gradually distributed from the anticlinal core to its edge. The K, Ca, Na, Rr, Sr and Ba have been changed systematically by the high salinity fluid from the ductile shear belts, and Ta and LREE are also shown to have been dramatically changed in this event. LA-MC-ICPMS zircon U-Pb dating for the Shangyupo meta-rhyolite and the meta-ryholite of Jiangxian group yield the weighted mean ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age of $2\,160.5 \pm 7.8$ Ma and $2\,161.3 \pm 1.5$ Ma respectively. The Shangyupo meta-ryhorite and biotite schist may have been formed during the Jiangxian volcano event between $2.20 \sim 2.15$ Ga, based on the chronology and comparison to related rocks. The HFSE pairs show that the biotite schist is a subalkaline mafic rocks instead of the alkaline mafic rocks as previously suggested. The Jiangxian event may represent a tensional event related to the subduction, based on the comprehensive geological information of Zhongtiaoshan area.

Key words: Zhongtiaoshan Mountains; biotite schist; litho-geochemistry; fluid; LA-MC-ICPMS zircon U-Pb dating.

中条山位于华北克拉通南缘, 是华北克拉通中部造山带(Zhao *et al.*, 2001, 2004)重要组成部分。中条山上玉坡、铜矿峪地区分布岩性相似的富钾变镁铁质—酸性双峰式火成岩组合, 均以变富钾酸性火山

岩—黑云母片岩为主体, 铜矿峪出露的黑云母片岩由于保留了很明显的火山岩杏仁、气孔构造, 因此它的火山岩成因被广泛认可, 被前人称为“变超钾基性火山岩”。孙大中和胡维兴(1993)使用多种方法间接确

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目“辽宁红透山、山西胡家峪铜矿床成矿规律总结”(No. 20089940)。

作者简介: 张晗(1983—), 男, 博士, 主要从事矿床地质学研究。E-mail: zhanghan2003@gmail.com

定的 2.2~2.1 Ga 成岩时代也被普遍接受. 与此相比,上玉坡背斜核部出露的变镁铁质—酸性火成岩多年来在诸多地质问题上存有争论:其一,这套杂岩体在成岩时代及归属上存有争议,《中条山铜矿地质》编写组(1978)曾将其与绛县群对比,但有学者不认同这种划分方案(王春增等,1990;王春增,1991). 现有对这套杂岩直接测年结果仅有孙海田和张宗清(1994)获得的 Sm-Nd 同位素等时线年龄,它显示这套“双峰式火山岩”产出于晚太古代(2.73±0.27 Ga). 此外,尽管与铜矿峪黑云母片岩的岩石特征相似,但由于中条山上玉坡背斜核部产出的黑云母片岩没有保留比较明显的火山岩变余构造且后期受到了很强的构造形变,因此它的成因也广受争议,除了认为岩石原岩是火成成因外,另有变钾质内源沉积岩论点(孙大中和胡维兴,1993)及辉长岩类“构造变形分解”及“变质分异”的产物说法(王春增等,1990).

近年来,由于对华北克拉通前寒武纪演化的研究成为地学研究的一大热点,诸多的研究建立了华北克拉通的基本构造演化模型(Zhao *et al.*, 2004; Kusky, 2011; Zhai, 2011). 然而中条山地区的研究相对华北克拉通中部造山的其他地区相对较少,特别是年代学研究及多有争论的镁铁质火成岩的成因问题. 早年,学者多认为中条山铜矿峪及上玉坡地区分布的“富钾双峰式火山岩”是中条山裂谷产物,但对于裂谷构造动力性质并未给予解释. 因此,本文旨在通过对中条山上玉坡背斜核部出露的杂岩的地质特征研究,用 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测试方法,明确上玉坡核部杂岩体的归属及成岩时代,并通过黑云母片岩的地质特征、地球化学特征讨论其成因.

1 地质背景

中条山位于华北克拉通南缘,根据 Zhao *et al.* (2001)对华北克拉通的划分方案,中条山地区应归为华北克拉通中部造山带. 中条山前寒武地层的划分方案略有不同,但主体构架可以自下而上划分为:涑水杂岩、绛县群、中条群、担山石群和西阳河群 5 个岩性—构造单元,后 4 个依次以其间的不整合面相连,前人分别称之为绛县运动、中条运动 I 幕和中条运动 II 幕.

涑水杂岩为一套角闪—麻粒岩相变质岩系,大面积分布于中条山区的西坡和西北坡,虎坪等地亦有小面积出露,主要由多期侵入的变花岗岩类及表

壳岩组成. 古元古界绛县群呈 NE-SW 向展布,上被中条群变碎屑岩—碳酸盐岩建造角度不整合覆盖. 绛县群下部横岭关亚群主要分布在横岭关一带;上部铜矿峪亚群主要分布在铜矿峪附近,主要为双峰式火山岩建造,自下而上分为骆驼峰组、西井沟组和竖井沟组 3 个组. 骆驼峰组主要由变酸性火山岩和绢英岩组成;西井沟组主要由(方柱石)黑云/绿泥片岩组成,厚度约 800 m,以黑云片岩为主体岩性,黑云母片岩中的变余杏仁构造比较发育,因此,铜矿峪西井沟组黑云母片岩原岩为火山熔岩被广泛认可. 铜矿峪黑云母片岩以高 K₂O 含量为典型特征,《中条山铜矿地质》中称其为“变超钾质基性火山岩”. 竖井沟组由变富钾酸性火山岩组成,具有明显的变余火山岩结构. 出露在铜矿峪附近的绛县群火山岩获得的单颗粒锆石 U-Pb 年龄多集中在 2.2~2.1 Ga 之间(孙大中和胡维兴, 1993).

上玉坡地区位于铜矿峪铜矿的南西侧(图 1),主体构造格架为上玉坡背斜,并叠加有褶皱期后的伸展构造系统,形成背斜—变质核杂岩的复式构造样式,该复式构造平面上显示为近椭圆形,长轴脊线

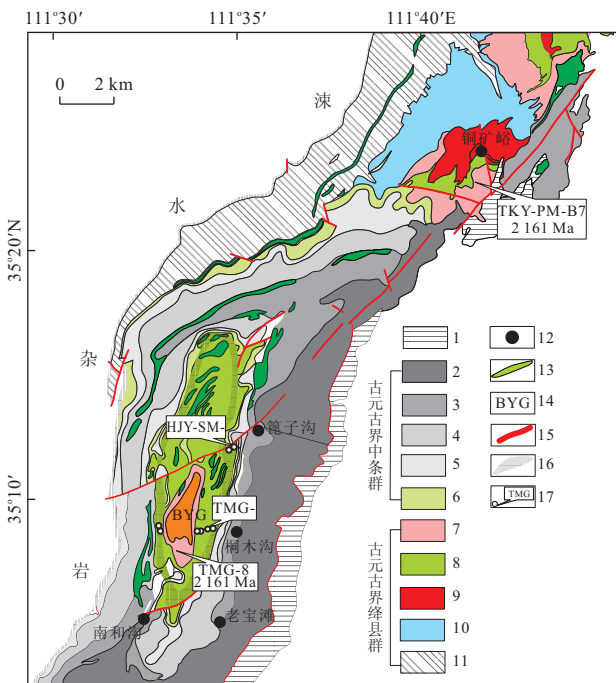


图 1 中条山上玉坡—铜矿峪地区地质图

Fig. 1 Geological map of Shangyupo-Tongkuangyu region, Zhongtiaoshan Mountains

1. 担山石群; 2. 余家山组; 3. 罐子沟组; 4. 余元下组; 5. 龙峪组; 6. 界牌梁组; 7. 竖井沟组; 8. 西井沟组; 9. 骆驼峰组; 10. 圆头山组; 11. 横岭关亚群 1~3 段; 12. 铜矿床; 13. 变绿辉/辉长岩; 14. 北峪花岗岩; 15. 断层; 16. 韧性剪切带; 17. 采样位置

S型,褶皱及后期伸展构造导致背斜地层序列复杂.背斜翼部主要出露中条群,且产有多个层控 Cu (Co)矿床(图 1).背斜核部出露岩性复杂,主要出露有北峪花岗岩、变富钾酸性火山岩及变镁铁质杂岩,(角闪石/方柱石)黑云母片岩是变镁铁质杂岩的主要组成部分,另有一些角闪石岩和多期侵入的变辉长/辉绿岩.由于强烈的构造形变,除部分变辉长辉绿岩与其他地质体明确为侵入关系外,其他各地质体之间的地质界线均被构造改造而不易确定其产出关系.

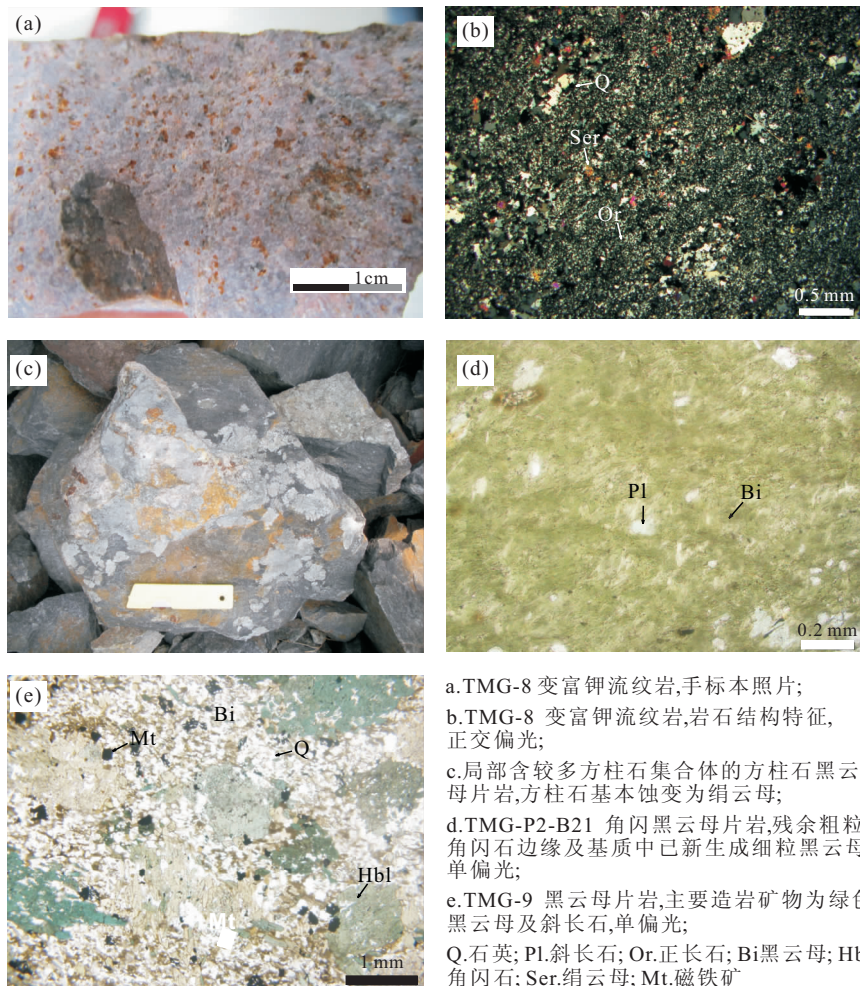
2 采样位置及样品描述

本次锆石测年样品变富钾酸性火山岩(TMG-8)取自上玉坡背斜核部秦家沟西坡,与其对比的绛县群竖井沟组变酸性火山岩的锆石测年样品(TKY-PM-B7)取自铜矿峪附近的竖井沟组地层中

(图 1).用于地球化学研究的黑云母片岩分别取自焦家沟隧道口(HJY-SM-)、篦子沟 339 中段主巷道中(BZG-)及焦家沟东坡和北峪花岗岩西側(TMG-).所采标本均尽量保持新鲜且无矿化.

样品 TMG-8 岩性为变酸性火山岩,手标本肉红色(图 2a),镜下鉴定岩石主要造岩矿物为细粒—霏细石英(占 60%左右)及钾长石(30%左右),并能见少量绢云母,样品常见一些石英集合体,可能为原岩气孔被硅质填充后重结晶的结果(图 2b).样品 TKY-PM-B7 岩石特征类似上玉坡产出的变酸性火山岩,可见变余流纹构造.

黑云母片岩(角闪石)手标本颜色暗绿色至黑色,含方柱石的黑云母片岩常见白色方柱石变斑晶假晶,方柱石均被绢云母交代.野外观察发现方柱石在黑云母片岩中分布并不均匀,有时呈密集簇状分布(图 2c),方柱石假晶多呈椭圆型,粒度不等,最大能达到 3cm.镜下观察显示,黑云母片岩主体为鳞片变



a. TMG-8 变富钾流纹岩,手标本照片;
b. TMG-8 变富钾流纹岩,岩石结构特征,正交偏光;
c. 局部含较多方柱石集合体的方柱石黑云母片岩,方柱石基本蚀变为绢云母;
d. TMG-P2-B21 角闪黑云母片岩,残余粗粒角闪石边缘及基质中已新生成细粒黑云母单偏光;
e. TMG-9 黑云母片岩,主要造岩矿物为绿色黑云母及斜长石,单偏光;
Q. 石英; Pl. 斜长石; Or. 正长石; Bi. 黑云母; Hbl. 角闪石; Ser. 绢云母; Mt. 磁铁矿

图 2 上玉坡部分标本手标本及镜下照片

Fig. 2 Microscopic photos of Shangyupo biotite schist and meta-rhyolite

晶结构,主体造岩矿物为黑云母(40%~70%, TMG-P1-B31 约为 85%)、石英及长石类矿物,镜下显示黑云母普遍粒度很细($>0.02\text{mm}$),均为淡绿到绿的多色性(图 2d),岩石手标本及镜下可见片理方向拉长疑似填充气孔(长径 $0.2\sim 0.4\text{mm}$),杏仁中填充的石英已重结晶.除主要造岩矿物黑云母外,正长石、更长石、角闪石族矿物及方柱石等也以不同比例出现,岩石普遍含有磁铁矿.一些片理化程度不高的角闪石黑云母片岩往往保留了比较明显的变余火成岩结构,岩石镜下能见呈 X 状的微裂隙及细粒黑云母对角闪石的交代(图 2e).

由于本区的方柱石黑云母片岩中的方柱石基本被绢云母交代,因此本次测试仅选择一个方柱石黑云母片岩(HJY-SM-JK3)样品作为参考.

3 测试方法

本次研究测试方法主要为 LA-MC-ICPMS 锆石微区 U-Pb 同位素测年及岩石地球化学成分全分析. 锆石分选由河北廊坊地质矿产调查研究所完成, LA-MC-ICPMS 锆石微区 U-Pb 测年在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,激光剥蚀系统为 New Wave UP213 激光剥蚀系统. 采样方式为单点剥蚀,数据采集采用所有信号同时静态方式接收,锆石 U-Pb 同位素测试采用 $20\ \mu\text{m}$ 光斑剥蚀,使用锆石 GJ1 作为外标,元素含量采用锆石 M127(Nasdala *et al.*, 2008)作为外标样. 歧视和漂移进行校正,样品的同位素比值和元素含量计算采用 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008)程序处理. 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 完成. 测试流程及后处理详情参见文献(侯可军等, 2009).

黑云母片岩主量元素分别由中国地质科学院矿产资源研究所(XRF 法)及吉林大学测试中心完成(原子吸收法),微量元素分别由中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学开放实验室和吉林大学测试中心完成(ICP-MS 法).

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 测年结果

TMG-8(上玉坡变富钾酸性火山岩) 锆石形态为自形长短柱状,长径约 $150\sim 200\ \mu\text{m}$,CL 图像显

示典型的岩浆锆石的振荡环带特征(图 3),Th/U 变化幅度较小,平均为 0.8(表 1),锆石各点位 U-Pb 年龄谐和度较高,锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄离散较小, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\ 164\pm 8.9\ \text{Ma}$ (图 4).

TKY-PM-B7(竖井沟组变富钾流纹岩)CL 图像显示它与 TMG-8 锆石形态及 CL 特征相似,也为自形长短柱状,长径约 $150\sim 200\ \mu\text{m}$,CL 图像显示典型的岩浆锆石的振荡环带特征(图 3),Th/U 变化幅度较小,平均为 0.66(表 1),锆石各点位 U-Pb 年龄谐和度较高, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\ 161.3\pm 1.5\ \text{Ma}$ (图 4).

4.2 全岩主、微量元素测试结果

中条山上玉坡背斜核部分布的黑云母片岩类以富钾且主量元素含量变化较大为主要特征, SiO_2 含量 $40\%\sim 51\%$,CaO 含量 $0.69\%\sim 7.44\%$, Na_2O 含量 $0.99\%\sim 5.13\%$, K_2O 含量 $2.60\%\sim 9.52\%$, MgO 含量 $6.4\%\sim 14.9\%$, TiO_2 含量比较稳定,平均为 1.31% (表 2). 所有样品 CIPW 标准矿物计算均出现霞石和橄榄石. 上玉坡黑云片岩在 TAS 图解分布较散,主要落入碱性基性-超基性岩区(图 5). 但与典型碱性火山岩不同,上玉坡分布的黑云母片

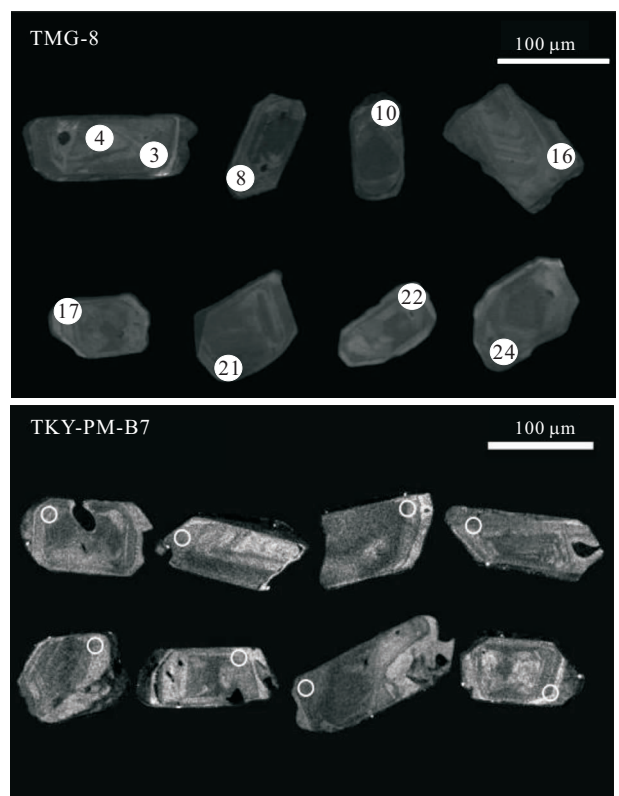


图 3 部分典型锆石 CL 图像及测试点位
Fig. 3 Cathodoluminescence images and the ablated point of typical zircons

表1 上玉坡变富钾流纹岩(TMG-8)及绛县群竖井沟组变富钾流纹岩(TKY-PM-B7) LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素测年结果
Table 1 Analyzed LA-MC-ICPMS zircon U-Pb isotopic results of Shangyupo meta-rhyolite (TMG-8) and Jiangxian group meta-rhyolite (TKY-PM-B7)

序号	点位	$\omega(\text{Th})$ (10^{-6})	$\omega(\text{U})$ (10^{-6})	Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)							
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
TMG-8																
1	TMG-8-1	26.2	28.1	0.93	0.13614	0.00094	7.25523	0.08443	0.38627	0.00359	2188.9	12.0	2143.3	10.4	2105.5	16.7
2	TMG-8-2	22.1	27.5	0.80	0.13464	0.00098	7.39139	0.09621	0.39825	0.00450	2161.1	12.7	2159.9	11.6	2161.0	20.8
3	TMG-8-3	32.7	35.9	0.91	0.13530	0.00073	7.20939	0.07124	0.38641	0.00328	2168.5	9.6	2137.7	8.8	2106.2	15.2
4	TMG-8-5	27.4	30.9	0.88	0.13576	0.00067	7.35741	0.08077	0.39314	0.00400	2173.8	9.1	2155.8	9.8	2137.4	18.5
5	TMG-8-6	20.9	23.4	0.89	0.13585	0.00288	7.17376	0.12721	0.38955	0.00600	2175.9	37.0	2133.2	15.8	2120.8	27.8
6	TMG-8-8	20.3	26.9	0.75	0.13547	0.00219	7.24507	0.16130	0.38148	0.00848	2170.1	27.6	2142.1	19.9	2083.2	39.6
7	TMG-8-9	40.0	55.2	0.72	0.13521	0.00200	6.89277	0.07083	0.37519	0.00375	2168.5	25.9	2097.7	9.1	2053.8	17.6
8	TMG-8-11	19.8	22.4	0.88	0.13545	0.00213	6.69578	0.10083	0.36567	0.00553	2170.1	27.9	2072.1	13.3	2009.0	26.1
9	TMG-8-12	29.1	30.8	0.94	0.13494	0.00099	7.15839	0.17955	0.38432	0.00822	2164.8	12.7	2131.3	22.4	2096.4	38.3
10	TMG-8-13	17.8	23.0	0.77	0.13280	0.00086	7.09655	0.11621	0.38800	0.00620	2135.5	11.4	2123.6	14.6	2113.5	28.8
11	TMG-8-14	10.3	17.4	0.59	0.13504	0.00292	6.80375	0.11754	0.36800	0.00721	2164.5	36.9	2086.2	15.3	2020.0	34.0
12	TMG-8-15	27.2	33.0	0.82	0.13402	0.00072	7.00315	0.18104	0.38141	0.00895	2151.5	9.1	2111.8	23.0	2082.9	41.8
13	TMG-8-16	239.4	30.2	7.93	0.13521	0.00157	7.08149	0.09331	0.38347	0.00512	2168.5	20.1	2121.7	11.7	2092.5	23.9
TKY-PM-B7																
1	TKY-PM-B7-1	25.5	38.2	0.67	0.13466	0.00076	7.23264	0.14201	0.38928	0.00723	2161.1	9.9	2140.5	17.5	2119.5	33.6
2	TKY-PM-B7-2	35.3	61.7	0.57	0.13500	0.00038	7.18817	0.06219	0.38641	0.00342	2164.8	4.9	2135.0	7.7	2106.2	15.9
3	TKY-PM-B7-3	30.9	54.9	0.56	0.13491	0.00041	7.26394	0.07616	0.39051	0.00398	2162.7	5.2	2144.4	9.4	2125.2	18.5
4	TKY-PM-B7-5	51.3	75.8	0.68	0.13469	0.00037	7.10321	0.07421	0.38265	0.00401	2161.1	4.9	2124.4	9.3	2088.6	18.7
5	TKY-PM-B7-6	58.4	89.5	0.65	0.13441	0.00035	7.31183	0.07575	0.39478	0.00419	2166.7	4.6	2150.3	9.3	2144.9	19.4
6	TKY-PM-B7-7	8.6	12.4	0.70	0.13534	0.00075	7.15985	0.11385	0.38378	0.00589	2168.2	15.0	2131.5	14.2	2093.9	27.4
7	TKY-PM-B7-8	87.3	115.3	0.76	0.13427	0.00037	7.36723	0.08103	0.39825	0.00453	2154.6	5.7	2157.0	9.8	2161.0	20.9
8	TKY-PM-B7-9	46.0	71.2	0.65	0.13458	0.00044	7.14538	0.08618	0.38500	0.00448	2158.3	5.4	2129.7	10.7	2099.6	20.9
9	TKY-PM-B7-10	45.9	72.6	0.63	0.13471	0.00047	6.97643	0.08237	0.37589	0.00454	2161.1	6.2	2108.4	10.5	2057.1	21.2
10	TKY-PM-B7-11	44.0	60.0	0.73	0.13532	0.00052	7.27595	0.08532	0.39013	0.00452	2168.2	7.3	2145.9	10.5	2123.4	21.0
11	TKY-PM-B7-12	66.9	86.4	0.77	0.13463	0.00058	7.27448	0.12107	0.39207	0.00657	2161.1	8.5	2145.7	14.9	2132.4	30.4
12	TKY-PM-B7-13	41.4	65.5	0.63	0.13390	0.00056	7.40977	0.07713	0.40138	0.00396	2149.7	7.4	2162.2	9.3	2175.4	18.2
13	TKY-PM-B7-14	31.8	51.1	0.62	0.13422	0.00048	7.28546	0.04846	0.39393	0.00263	2154.0	6.6	2147.0	5.9	2141.0	12.2
14	TKY-PM-B7-15	20.9	44.1	0.47	0.13475	0.00045	7.21730	0.05318	0.38841	0.00252	2160.8	5.6	2138.6	6.6	2115.5	11.7
15	TKY-PM-B7-16	93.4	135.4	0.69	0.13460	0.00043	7.30018	0.05121	0.39348	0.00268	2159.0	5.6	2148.8	6.3	2139.0	12.4
16	TKY-PM-B7-17	44.4	71.1	0.62	0.13490	0.00039	7.27971	0.04477	0.39148	0.00218	2162.7	5.4	2146.3	5.5	2129.7	10.1
17	TKY-PM-B7-18	76.1	119.2	0.64	0.13431	0.00044	7.45100	0.06753	0.40245	0.00346	2155.2	5.4	2167.1	8.1	2180.3	15.9
18	TKY-PM-B7-19	42.1	53.1	0.79	0.13479	0.00042	7.21816	0.05484	0.38851	0.00269	2161.4	0.9	2138.7	6.8	2115.9	12.5
19	TKY-PM-B7-20	48.7	70.5	0.69	0.13435	0.00046	7.24033	0.04205	0.39118	0.00210	2166.7	5.9	2141.5	5.2	2128.3	9.7

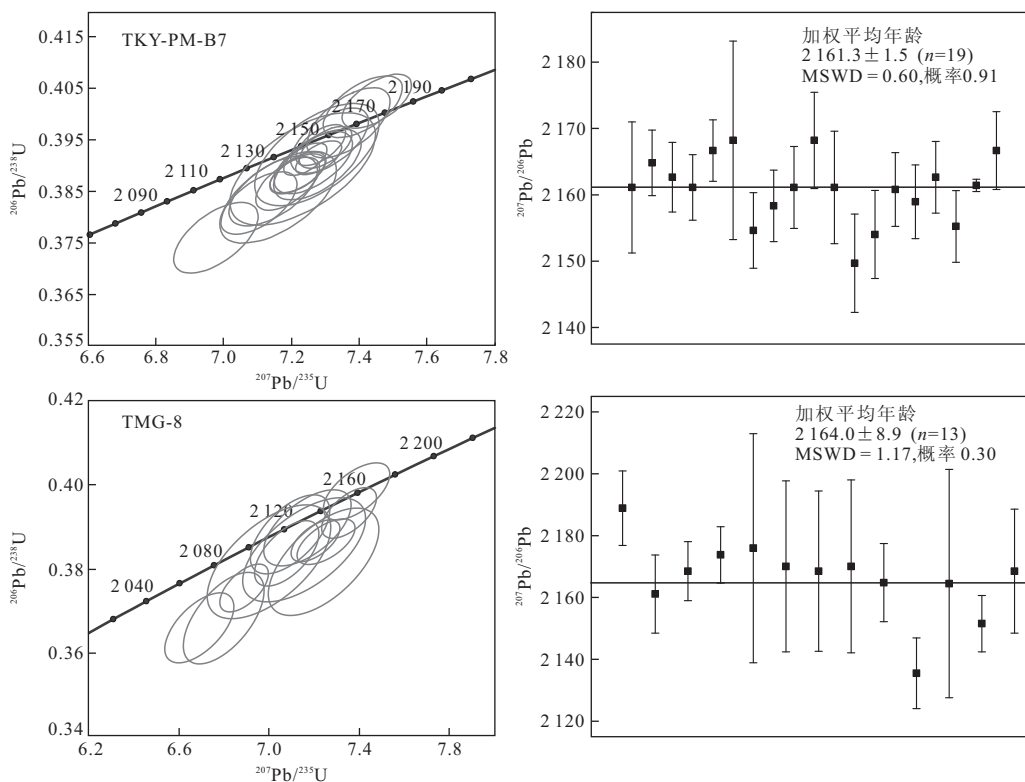


图 4 锆石 U-Pb 谐和线图及锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值

Fig. 4 Concordia diagram of zircon U-Pb isotopes and zircon weight mean ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age

岩类,岩石 K₂O 和 CaO 含量分布范围很大,一些样品中 K₂O 含量出现异常的高(9.5%),而同时 CaO 出现异常的(>1%)的特征.总体上,绛县群变镁铁质火山岩主量元素特点明显异于它在 TAS 图解中显示的碱性火山岩的主量元素特征,这在 Harker 图解上表现的十分明显(图 5).

岩石微量元素主要特征为大离子亲石元素(除 Sr)含量较高,Rb 平均 145×10^{-6} ,Ba 平均 383×10^{-6} .所有样品的 Eu 异常并不十分明显, δEu 为 0.78~1.56.样品球粒陨石标准化稀土分配模式变化很大,平坦型、右倾、左倾的分配模式兼而有之,平坦型、右倾分配样式渐变过渡(图 6).因此,(La/Yb)_N 变化很大,(La/Yb)_N 为 0.4~16.3,同时 ΣREE 分布在 5.6~188.2.黑云母片岩高场强元素(HFSE)总体变化相对较小,但 Nb/Ta 变化较大(4~16).所有数据稀土元素的较大变化与 HFSE 元素的含量稳定形成明显的差异,由此在原始地幔标准化蛛网图 REE 与 HFSE 组合形成了蛛网图波瓣状的特征(图 6).

值得一提的是样品 TMG-P1-B31,该样品主要造岩矿物为黑云母(约 85%),在本次测试样品中具有最高的 K₂O 含量及很低的 CaO 含量,REE 含量

也很低,但其他元素含量与其他样品相似.

从空间分布的特征来看,上玉坡黑云母片岩类地球化学特征形成了一个以背斜核部为中心的环形的递变带(图 7,图 8):在接近中条群,特别是由于构造原因与余元下组含方柱石大理岩接触的位置,岩石 K₂O 显著升高,而 CaO、Na₂O 明显降低;同时,大离子 Rr、Sr、Ba 均系统的变化;而高场强元素中除了 Ta 显著变化、Y 稍许变化以外,其他高场强元素及主量元素 TiO₂ 基本保持稳定;在接近中条群的位置,矿化元素 Cu 有一定的变化,而 Co 含量非常稳定(图 8).

5 讨论

5.1 上玉坡韧性剪切带与黑云母片岩关系

中条山地区绛县群西井沟组黑云母片岩由于具有很明显的火山岩的杏仁、气孔构造,显然说明它的原岩是火山岩,然而上玉坡分布的黑云母片岩缺乏上述明显的变余火山岩构造,且由于强烈构造导致的产状不明从而导致其成因的争论:《中条山铜矿地质》认为上玉坡背斜核部分布的黑云母片岩为火成成因;王春增等(1990)认为它们为辉长岩类变形形

表 2 上玉坡黑云母片岩全岩主量元素(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)含量Table 2 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) data of Shangyupo biotite schist

样品*	TMG-P1-B31	TMG-9	TMG-21	TMG-P2-B21	TMG-19	TMG-P2-B31	BZG-HY3	BZG-HY1	BZG-HY4	BZG-HY2	HJY-SM-JK1	HJY-SM-JK3
岩性	黑云母片岩	黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	方柱石 黑云母片岩
SiO ₂	41.86	48.02	46.90	46.20	47.78	45.22	49.85	44.98	42.27	40.47	40.04	51.14
TiO ₂	1.21	1.10	1.17	1.40	1.38	1.39	1.00	1.06	1.36	1.10	0.94	2.16
Al ₂ O ₃	16.51	15.76	14.03	13.98	13.92	14.68	14.56	16.41	16.91	17.73	17.72	15.69
Fe ₂ O ₃	5.90	7.24	4.74	8.85	3.96	1.75	7.61	7.73	1.50	9.80	10.26	11.59
FeO	7.37	6.30	7.69	8.10	6.26	7.06	6.84	6.95	1.35	8.82	9.23	11.59
MnO	0.24	0.24	0.21	0.43	0.30	0.37	0.14	0.16	0.13	0.09	0.08	0.18
MgO	12.26	7.18	9.36	6.49	7.07	10.44	11.10	9.60	11.28	14.28	14.89	6.41
CaO	0.79	0.83	7.45	5.59	4.44	7.07	3.45	4.75	2.66	0.74	0.69	2.58
Na ₂ O	2.39	2.58	3.62	3.44	5.13	3.86	3.31	3.15	2.03	1.32	0.99	2.62
K ₂ O	9.52	8.77	2.66	4.00	5.84	6.07	4.10	4.70	6.82	8.42	8.69	2.89
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.23	0.27	0.13	0.14	0.16	0.15	0.15	0.12	0.15	0.51
LOI	1.67	1.68	1.57	1.05	3.61	1.74	1.73	1.70	1.37	1.73	1.80	1.17
Total	99.84	99.82	99.63	99.80	99.81	99.79	103.85	101.33	87.82	104.62	105.48	108.53
Sr	20.11	15.73	67.18	146.20	91.96	133.20	62.76	53.71	28.29	89.75	23.71	37.67
Rb	203.20	208.30	63.07	57.71	187.30	107.90	118.27	215.13	184.10	141.06	199.02	80.12
Ba	352.90	461.30	230.40	634.30	264.30	291.10	255.25	534.25	448.07	336.69	427.51	270.00
Th	0.70	1.00	0.82	0.79	2.10	0.28	0.48	0.89	1.25	0.48	0.86	6.22
Ta	0.78	0.59	0.34	0.40	0.76	0.58	0.19	0.40	0.20	0.23	0.18	0.68
Nb	3.36	2.36	3.18	3.16	5.05	2.41	2.39	3.62	3.25	2.45	1.88	8.40
Zr	75.88	46.14	72.32	66.06	104.80	45.58	44.47	73.53	52.42	51.74	44.27	91.69
Hf	2.74	1.45	2.16	1.94	2.98	1.53	1.21	1.98	1.50	1.47	1.23	1.83
Y	4.01	8.56	16.62	26.44	17.67	19.88	14.43	8.90	21.41	11.11	14.59	19.39
Sc	27.85	22.43	13.59	28.70	32.51	35.83	37.68	30.08	38.43	30.92	37.76	37.67
V	254.10	276.90	271.90	282.10	264.60	300.60	263.53	284.99	269.61	247.95	284.23	297.70
Cr	358.50	291.00	144.20	102.50	162.80	883.50	452.99	248.38	335.44	251.48	301.79	22.26
Co	58.05	63.93	67.15	92.95	62.56	67.72	50.69	54.10	59.33	47.48	61.82	31.83

续表 2

样品*	TMG-P1-B31	TMG-9	TMG-Z1	TMG-P2-B21	TMG-19	TMG-P2-B31	BZG-HY3	BZG-HY1	BZG-HY4	BZG-HY2	HJY-SM-JK1	HJY-SM-JK3
岩性	黑云母片岩	黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	角闪石 黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	黑云母片岩	方柱石 黑云母片岩
Ni	228.60	217.80	149.20	96.22	164.40	340.30	186.89	194.74	143.76	194.10	151.85	28.74
Cu	2.38	7.19	13.62	13.62	645.70	17.69	13.03	11.64	20.09	9.06	7.01	7.11
Pb	0.92	1.03	2.09	1.49	2.99	0.72	1.27	2.92	1.20	2.02	3.03	1.97
U	0.68	0.08	0.12	0.14	0.29	0.16	0.18	1.62	0.60	0.67	0.42	0.73
La	0.38	2.48	5.04	10.27	12.17	3.52	4.77	18.01	34.24	8.96	22.13	26.37
Ce	0.58	5.22	11.70	21.35	27.10	8.61	11.07	36.21	73.68	18.96	48.63	61.51
Pr	0.14	0.95	1.91	3.00	3.52	1.30	1.52	4.27	9.24	2.41	6.19	6.94
Nd	0.78	4.85	10.23	13.43	15.61	6.48	7.41	17.82	41.77	10.96	27.57	29.06
Sm	0.34	1.41	2.74	3.47	3.35	1.98	1.70	3.42	7.91	2.38	5.49	6.40
Eu	0.18	0.57	1.46	1.66	1.05	1.04	0.78	1.03	2.12	0.94	1.39	1.64
Gd	0.59	1.84	2.96	4.69	3.80	2.71	2.20	3.49	7.35	2.62	5.21	6.26
Tb	0.12	0.34	0.49	0.81	0.62	0.52	0.39	0.45	0.98	0.37	0.72	0.91
Dy	0.78	1.89	3.08	4.83	3.65	3.49	2.66	2.13	5.06	2.16	3.54	4.85
Ho	0.17	0.41	0.76	0.98	0.79	0.74	0.53	0.36	0.88	0.41	0.60	0.82
Er	0.56	1.02	2.45	2.85	2.17	2.27	1.61	0.89	2.47	1.19	1.64	1.87
Tm	0.09	0.18	0.44	0.41	0.34	0.34	0.23	0.12	0.31	0.17	0.21	0.27
Yb	0.73	0.94	3.00	2.59	2.04	2.15	1.49	0.79	1.89	1.02	1.29	1.76
Lu	0.14	0.16	0.48	0.38	0.32	0.33	0.21	0.14	0.29	0.18	0.19	0.23
Zr/TiO ₂	62.71	42.13	62.02	47.19	76.12	32.79	44.29	69.17	38.43	47.08	46.94	42.45
Nb/Y	0.84	0.28	0.19	0.12	0.29	0.12	0.17	0.41	0.15	0.22	0.13	0.43
ΣREE	5.58	22.26	46.74	70.71	76.55	35.47	36.58	89.11	188.17	52.72	124.80	148.89
LRREE/HREE	0.75	2.28	2.42	3.03	4.57	1.83	2.92	9.66	8.78	5.50	8.30	7.77
(La/Yb) _N	0.38	1.89	1.20	2.84	4.28	1.18	2.30	16.40	12.97	6.32	12.29	10.75
δEu	1.20	1.08	1.56	1.26	0.90	1.36	1.23	0.90	0.83	1.14	0.78	0.78
δCe	0.61	0.83	0.92	0.93	1.00	0.99	1.00	0.98	1.00	0.98	1.00	1.09

* 样品顺序按图 7 剖面图自西向东排列。

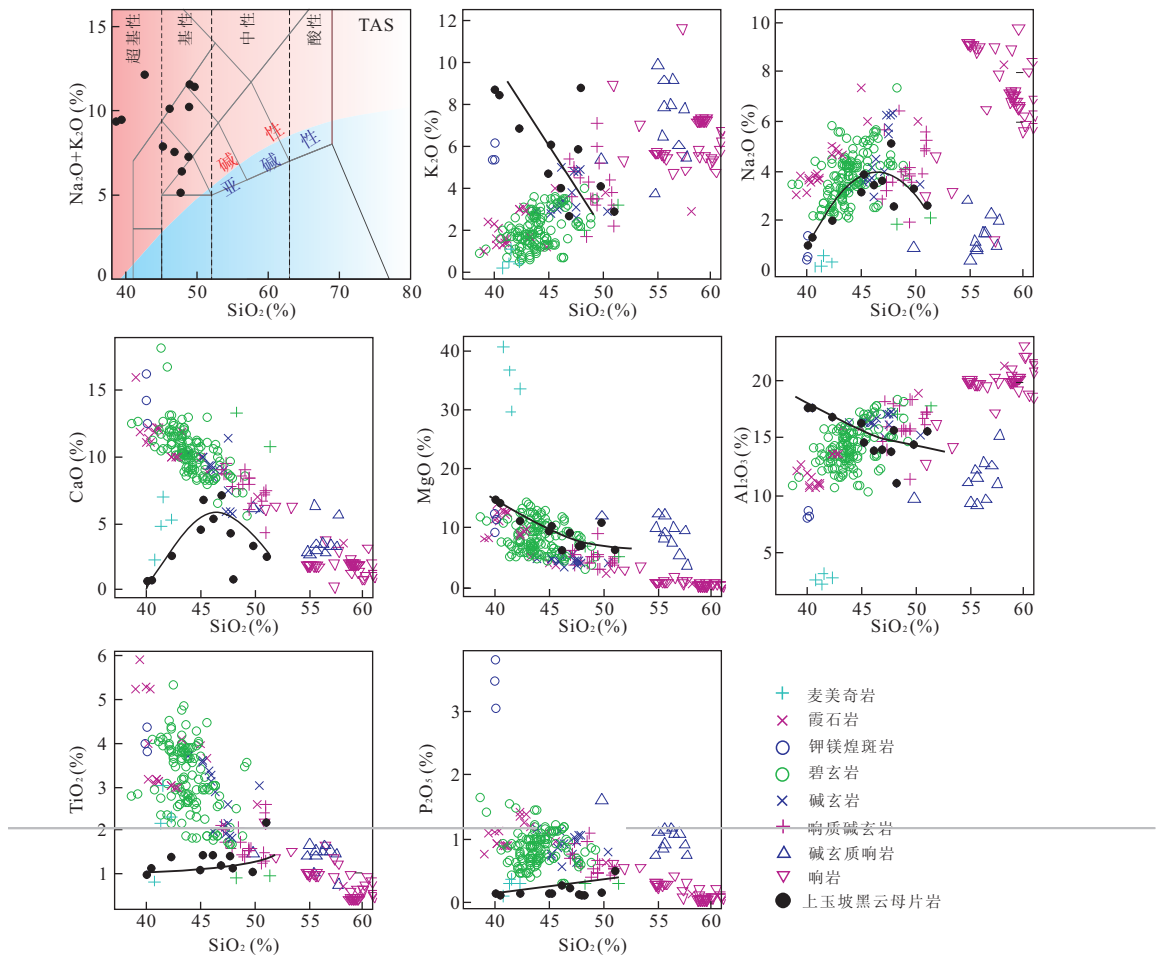


图 5 上玉坡黑云母片岩 TAS 及 Harker 图解(碱性岩数据来自 GEOROC 数据库)

Fig. 5 TAS figure and oxides vs. SiO₂ plots showing major element variations of Shangyupo biotite schist comparison with typical alkaline rocks

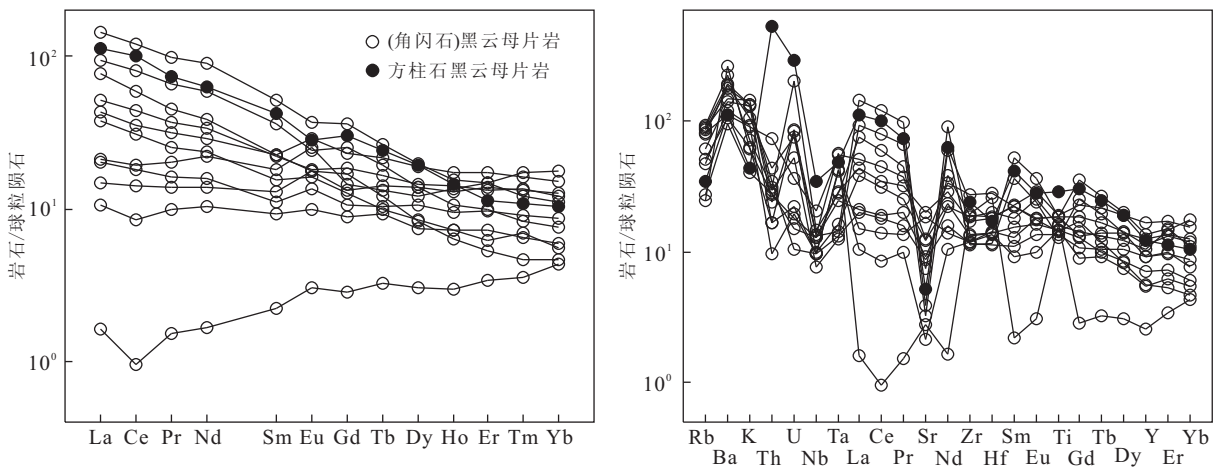


图 6 黑云母片岩原始地幔标准化稀土分配及蛛网图

Fig. 6 Chondrite normalized rare-earth element distributions and spidergram for the Shangyupo biotite schist

解的产物,而孙大中和胡维兴(1993)认为方柱石具有高盐度流体改造指示意义,而认定黑云母片岩是

在高盐度环境下沉积的含镁铁质火山岩成分的“变钾质内源沉积岩”。

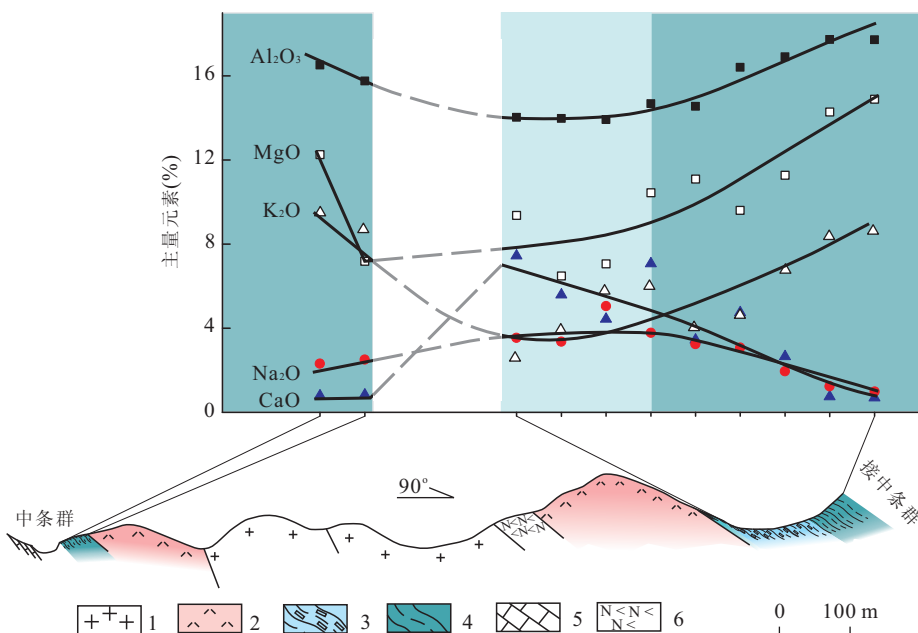


图 7 上玉坡背斜核部(角闪石)黑云母片岩一些主量元素空间变化

Fig. 7 Modification of some major elements of amphibole biotite schist and biotite schist in the Shangyupo anticlinal core

1. 北峪花岗岩; 2. 变富钾流纹岩; 3. 角闪石黑云母片岩; 4. 强片理化黑云母片岩; 5. 余家山组大理岩; 6. 斜长角闪岩

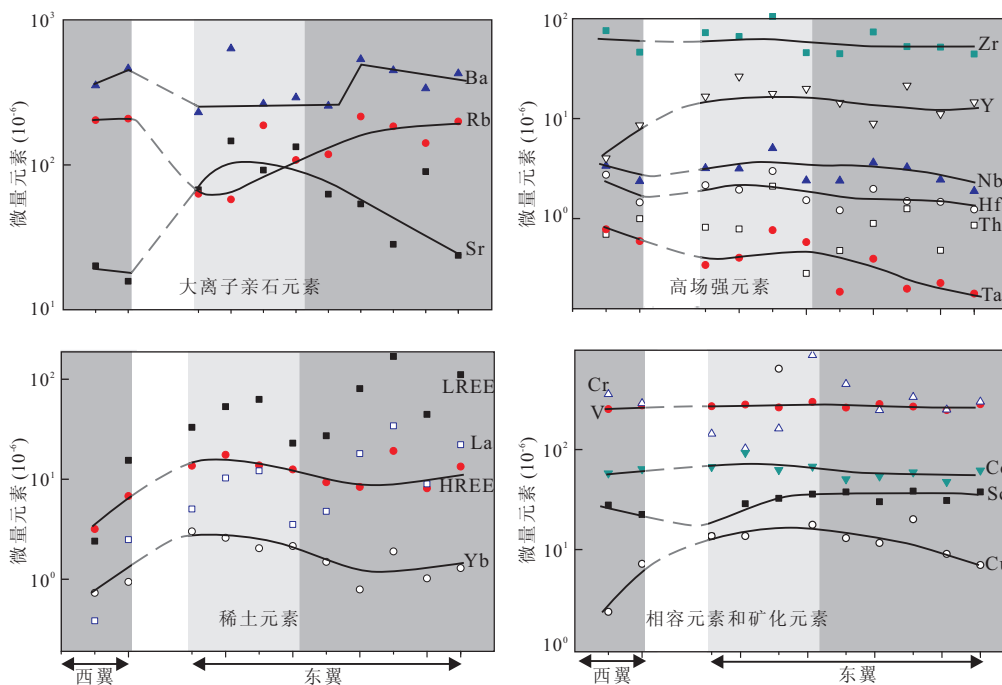


图 8 上玉坡背斜核部(角闪石)黑云母片岩微量元素空间变化

Fig. 8 Modification of some trace elements of amphibole biotite schist and biotite schist in the Shangyupo anticlinal core

样品空间位置与图 7 一致

事实上,在中条山并不是仅有上玉坡存在这种以黑云母—金云母为主要造岩矿物的富钾岩系,此类岩系在中条山广泛分布,且没有特定的产出时限及产状规律,但原岩均为镁铁质岩浆岩.这些变镁铁

质岩石“黑云母化”的主要机制有:(1)原岩受韧性剪切作用,如西冷口山的钻天岭铜矿的黑云母片岩及横岭关铜矿的镁铁质脉岩;(2)与大型矿化流体场活动有关的黑云母片岩,如含变余杏仁构造变斑岩型

铜矿围岩—绛县群变镁铁质火山岩。

傅昭仁等(1992)曾对中条山伸展构造系统进行了详细的研究,讨论了上玉坡地区中条群底部界牌梁组石英岩中发育的韧性剪切带。根据本次研究,发现上玉坡核部岩石中同样发育了多条韧性剪切带,其中上玉坡变镁铁质岩石发育的韧性剪切带使得变镁铁质岩石的岩石学及地球化学特征形成了一个以背斜核部为中心的环形的递变带,靠近背斜核部的位置,岩石主要为角闪石黑云母片岩,镜下能明显观察到粗粒角闪石解体及细粒黑云母对角闪石的交代作用(图 2e);靠近中条群的外环,岩石主要造岩矿物为细粒的绿色黑云母(图 2d),在与中条群特别是篦子沟井下与余家山组大理岩相邻区域,这套变镁铁质岩石中还发育有大量的方柱石变斑晶。与此对应,岩石的地球化学特征发生了明显的系统的变化(图 7)。

方柱石类矿物的出现往往与高盐度流体活动有关(Oliver *et al.*, 1994; Frietsch *et al.*, 1997; Pollard, 2001; Hunt *et al.*, 2005; Moore, 2010),上玉坡背斜核部出露的黑云母片岩的方柱石电子探针分析结果显示它含有 2.5%~3% Cl(孙大中和胡维兴,1993),含 Cl 方柱石也常出现在韧性剪切带中(Kullerud, 1999),代表了韧性剪切带中高盐度流体活动。鉴于上玉坡能见到片理化程度不高的岩石仍保留镁铁质岩浆岩的变余构造,黑云母片岩应该被认定为韧性剪切带中受高盐度流体改造的变镁铁质岩浆岩。

5.2 流体作用导致岩石地球化学成分的变化

很多学者对韧性剪切带中的流体对岩石作用进行过详细研究(Hubbard, 1996; Glassley *et al.*, 2010),由于上玉坡背斜翼部赋存有数个 Cu(Co)矿床,因此上玉坡背斜核部变镁铁质岩石所发生的流体活动的细节研究更显重要。

通常来说,低场强元素如 Ba、Rb、Cs、Sr 是溶于热液的(Lentz, 1999),而 REE 在如上玉坡地区绿片岩相的变质过程可以认为其是不可溶的(Whitford *et al.*, 1988),但 REE 元素中 Eu 作为一个特例,不能忽略其在流体中的溶解度(Whitford *et al.*, 1988; Lottermoser, 1989; Wood and Williams-Jones, 1994)。而 HFSE 在绿片岩相的变质级别在流体中的活性很差(Whitford *et al.*, 1989; Lentz, 1999),典型的流体作用特征在板片俯冲流体交代地幔形成的岛弧玄武岩亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 高场强元素特点地球特征上表现的最为明显(Cer-

vantes and Wallace, 2003; Manning, 2004; Wang *et al.*, 2007)。

上玉坡黑云母片岩 HFSE 基本保持流体中惰性的特征,但上玉坡黑云母片岩的 LREE 发生了显著变化,然而被认为在流体中溶解度更大的 Eu (Lottermoser, 1989; Whitford *et al.*, 1989; Grenne and Slack, 2005)并没有显示出较其他 LREE 更大的活性,除了流体特征原因,这种现象可能与流体作用的“蚀变产物”的特征有关,即黑云母对各种元素的“选择性接受”有关。在“黑云母化”过程中,LREE 元素黑云母/角闪石分配系数均很低(约 0.01~0.001)(Marocchi *et al.*, 2010),导致黑云母片岩中 LREE 元素的均未保留而转移至流体相中。这种情况同样也适用于大离子亲石元素,如 Ba、Rb 黑云母/角闪石分配系数很高而 Sr 相对具有低的分配系数(Marocchi *et al.*, 2010),导致 LILS 在黑云母片岩中的选择性保留。

上玉坡背斜两翼的中条群地层中分布着数个 Cu(Co)矿床,流体活动中 Co 含量基本没有变化,而 Cu 有少许变化(图 8),考虑到韧性剪切带中的黑云母片岩并没有明显的矿化,且除了篦子沟铜矿与黑云母片岩类在局部接触外,其他铜矿床与黑云母片岩并未直接接触,因此,这次流体活动可能并非这些 Cu(Co)矿床成矿物质的主要提供者。

5.3 中条山上玉坡变双峰式火山岩的产出时代

上玉坡“双峰式火山岩”的归属问题争论许久,多数学者认可这套火成岩原岩为火山岩,但王春增(1991)认为他们不能和铜矿峪附近分布的竖井沟—西井沟组双峰火山岩对比,并论述了变酸性火成岩实为浅成侵入体产出特征,而镁铁质岩石为构造伸展期沿剥离断层侵入的大型镁铁质脉岩。而直接定年(Sm-Nd 同位素等时线年龄)获得这套“双峰式火山岩”晚太古代(孙海田和张宗清,1994)的产出年龄也并未解决以上争论。

上玉坡产出变酸性火山岩和镁铁质杂岩与铜矿峪附近分布的西井沟—竖井沟组岩性组合类似,本次研究的镜下岩性鉴定及 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 测年获得的年龄数据显示:上玉坡出露的变酸性火山岩(2164 ± 8.9 Ma)与铜矿峪的变酸性火山岩(2161.3 ± 1.5 Ma)产出时代相近,且岩石特征类似。由于上玉坡地区的地层受到了多期强烈的构造形变,使得确定各地质体的野外接触关系十分困难,但从变酸性火成岩的地质产状上来看,上玉坡背斜核部的变富钾酸性岩应该为层状产出特征。它覆盖

于北峪花岗岩(2 477. 1 ± 8 Ma; Yu *et al.*, 2006)上,并在主褶皱期后的伸展过程中出露,形成同斜褶皱叠加变质核杂岩的复杂构造样式。

总体上,上玉坡黑云母片岩的层位位于中条群界牌梁之下,出露产状也显示层状产出的特征,虽然在篦子沟井下能见黑云母片岩与余家山组大理岩直接接触,但主要是因为后期剥离断层所致,考虑到上玉坡产出变酸性火山岩和黑云母片岩的组合可以与绛县群双峰式火山岩类比,本文认为将上玉坡黑云母片岩视为绛县群西井沟组比较合适。根据近期使用 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 法获得的绛县群火山岩年龄,我们确定绛县群双峰式火山岩产出时代约为 2. 20~2. 15 Ga. 因此,上玉坡背斜核部产出的黑云母片岩原岩应产出于 2. 20~2. 15 Ga 之间。

5. 4 中条山绛县群黑云母片岩构造产出背景

中条山绛县群黑云母片岩曾被称为“变超钾质碱性火山岩”,与竖井沟组变富钾流纹岩的组合——“碱性双峰式火山岩”常被认为是早元古裂谷产物。如前文所述,由于强烈的流体作用,黑云母片岩中富钾的特征并不能作为其原岩为碱性镁铁质火山岩的判别标准。另外,“裂谷”本身是一个比较模糊的概念,广义上的裂谷包括了大陆裂谷,弧后盆地裂谷,碰撞后的伸展形成的陆壳减薄也具有裂谷的一些特征,他们反映的构造动力机制完全不同,如红海裂谷、东非裂谷,学者多认为与地幔柱活动有关(White and McKenzie, 1989; Furman, 2007; Chakrabarti *et al.*, 2009; Rooney, 2010; Shinjo *et al.*, 2010),代表着威尔逊旋回的开始;而如西太平洋沟—弧—盆体系,由于高角度俯冲导致(Sibuet *et al.*, 1987; Taylor and Martinez, 2003),代表俯冲环境下局部的拉张事件。

前文讨论了上玉坡黑云母片岩受到流体强烈作用,很多地球化学特征反映的构造产出信息也已丢失,但使用上文中所描述的在流体中保持相对稳定的高场强元素对图解及上玉坡流体作用导致地球化学特征变化特征,判断中条山黑云母片岩的原岩更可能为亚碱性镁铁质火成岩(图 9),并非前人认识的碱性玄武岩。宏观地质特征上显示:中条山地区横岭关变复理石建造的沉积开始,至绛县群双峰式火山岩的喷发(2. 2~2. 16 Ga)确实代表该时段中条山的张性特性,但考虑到 2. 14 Ga 的铜矿峪斑岩型铜钼矿床形成及 1. 85 Ga 的 A-型俯冲事件,这次事件应定性为与俯冲活动有关的张性构造应该更为合理。

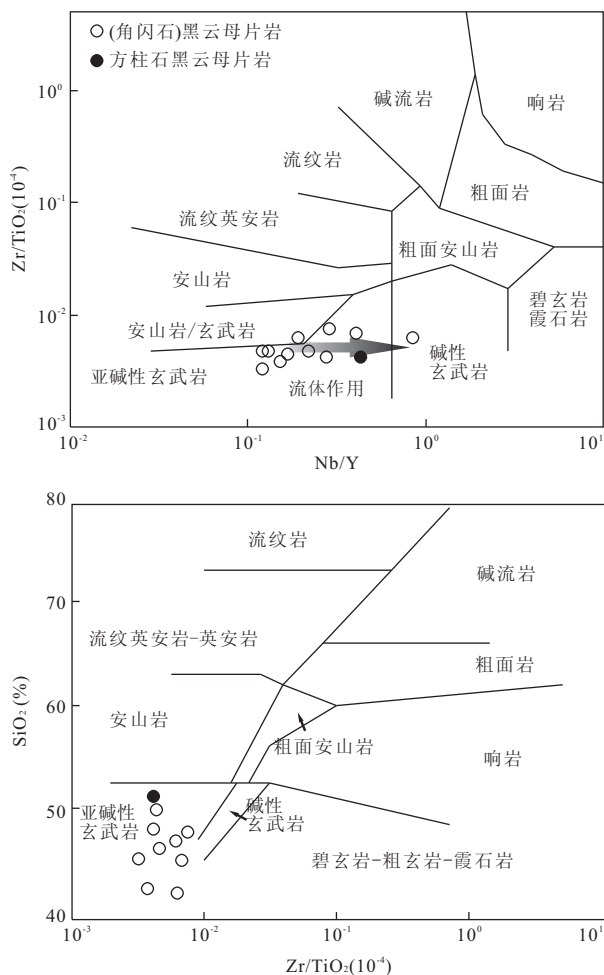


图 9 高场强元素对显示上玉坡黑云母片岩原岩地球化学特征

Fig. 9 HFSE pairs determined original geochemistry characteristic of the Shangyupo biotite schist

6 结论

(1)上玉坡变镁铁质火成岩空间上岩石及地球化学特征形成了一个以背斜核部为中心的环形岩石及地球化学变化递变带,这种变化与上玉坡褶皱—伸展构造空间上密切相关,黑云母片岩应认识为韧性剪切带中受高盐度流体改造的变镁铁质岩浆岩。

(2)除流体本身物理化学特征受流体形成的黑云母控制,岩石的 K₂O、CaO、Na₂O 均发生系统变化。同时,Rr、Sr、Ba、Ta 及 LREE 发生变化,此次流体活动可能并非胡篦型 Cu(Co)矿床成矿物质的主要提供者。

(3)上玉坡出露的变酸性火山岩(2 160. 5 ± 7. 8 Ma)与铜矿峪竖井沟组的变酸性火山岩(2 160. 5 ± 7. 8 Ma)同时代产出,且岩石特征类似。

推断上玉坡地区的黑云母片岩产出于 2.2 ~ 2.15 Ga.

(4)中条山黑云母片岩的原岩可能为亚碱性镁铁质火成岩,综合中条山古元古代地质特征,中条山地区古元古代可能为俯冲活动有关的张性构造环境.

References

- Cervantes, P., Wallace, P. J., 2003. Role of H₂O in Subduction-Zone Magmatism: New Insights from Melt Inclusions in High-Mg Basalts from Central Mexico. *Geology*, 31(3): 235–238. doi: 10.1130/0091-7613(2003)031<0235:rohois>2.0.co;2
- Chakrabarti, R., Basu, A. R., Santo, A. P., et al., 2009. Isotopic and Geochemical Evidence for a Heterogeneous Mantle Plume Origin of the Virunga Volcanics, Western Rift, East African Rift System. *Chemical Geology*, 259(3–4): 273–289. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.11.010
- Co-edited, 1978. *Geology of Copper Deposits in Zhongtiaoshan Mountains*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Frietsch, R., Tuisku, P., Martinsson, O., et al., 1997. Early Proterozoic Cu(-Au) and Fe Ore Deposits Associated with Regional Na-Cl Metasomatism in Northern Fennoscandia. *Ore Geology Reviews*, 12(1): 1–34. doi: 10.1016/S0169-1368(96)00013-3
- Fu, Z. R., Li, D. W., Li, X. F., et al., 1992. *Structural Analysis on Ore-controlling of Metamorphic Core Complexes and Denudational Faults*. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Furman, T., 2007. Geochemistry of East African Rift Basalts: An Overview. *Journal of African Earth Sciences*, 48(2–3): 147–160. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2006.06.009
- Glassley, W. E., Korstgård, J. A., Sørensen, K., 2010. K-Rich Brine and Chemical Modification of the Crust during Continent-Continent Collision, Nagsugtoqidian Orogen, West Greenland. *Precambrian Research*, 180(1–2): 47–62. doi: 10.1016/j.precamres.2010.02.020
- Grenne, T., Slack, J. F., 2005. Geochemistry of Jasper Beds from the Ordovician Løkken Ophiolite, Norway: Origin of Proximal and Distal Siliceous Exhalites. *Economic Geology*, 100(8): 1511–1527. doi: 10.2113/gsecongeo.100.8.1511
- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract).
- Hubbard, M. S., 1996. Ductile Shear as A Cause of Inverted Metamorphism: Example from the Nepal Himalaya. *Journal of Geology*, 104(4): 493–499. doi: 10.1086/629842
- Hunt, J., Baker, T., Thorkelson, D., 2005. Regional-Scale Proterozoic IOCG-Mineralized Breccia Systems: Examples from the Wernecke Mountains, Yukon, Canada. *Mineralium Deposita*, 40(5): 492–514. doi: 10.1007/s00126-005-0019-5
- Kullerød, K., 1999. Cl-Scapolite, Cl-Amphibole, and Plagioclase Equilibria in Ductile Shear Zones at Nusfjord, Lofoten, Norway: Implications for Fluid Compositional Evolution during Fluid-Mineral Interaction in the Deep Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22): 3829–3844. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00150-7
- Kusky, T. M., 2011. Geophysical and Geological Tests of Tectonic Models of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 26–35. doi: 10.1016/j.gr.2011.01.004
- Lentz, D. R., 1999. Petrology, Geochemistry, and Oxygen Isotope Interpretation of Felsic Volcanic and Related Rocks Hosting the Brunswick 6 and 12 Massive Sulfide Deposits (Brunswick Belt), Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada. *Economic Geology*, 94(1): 57–86. doi: 10.2113/gsecongeo.94.1.57
- Liu, Y. S., Hu Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Lottermoser, B. G., 1989. Rare Earth Element Study of Exhalites within the Willyama Supergroup, Broken Hill Block, Australia. *Mineralium Deposita*, 24(2): 92–99. doi: 10.1007/BF00206309
- Manning, C. E., 2004. The Chemistry of Subduction-Zone Fluids. *Earth and Planetary Science Letters*, 223(1–2): 1–16. doi: 10.1016/j.epsl.2004.04.030
- Marocchi, M., Hermann, J., Tropper, P., et al., 2010. Amphibole and Phlogopite in “Hybrid” Metasomatic Bands Monitor Trace Element Transfer at the Interface Between Felsic and Ultramafic Rocks (Eastern Alps, Italy). *Lithos*, 117(1–4): 135–148. doi: 10.1016/j.lithos.2010.02.011
- Moore, J. M., 2010. Comparative Study of the Onganja Copper Mine, Namibia: A Link Between Neoproterozoic Mesothermal Cu(-Au) Mineralization in Namibia and Zambia. *South African Journal of Geology*, 113(4): 445–460. doi: 10.2113/gssajg.113.4.445

- Nasdala, L., Hofmeister, W., Norberg, N., et al., 2008. Zircon M257-A Homogeneous Natural Reference Material for the Ion Microprobe U-Pb Analysis of Zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32 (3): 247—265. doi: 10.1111/j.1751-908X.2008.00914.x
- Oliver, N. H. S., Rawling, T. J., Cartwright, I., et al., 1994. High-Temperature Fluid-Rock Interaction and Scapolitization in an Extension-Related Hydrothermal System, Mary Kathleen, Australia. *Journal of Petrology*, 35(6): 1455—1491. doi: 10.1093/petrology/35.6.1455
- Pollard, P. J., 2001. Sodic (-Calcic) Alteration in Fe-Oxide-Cu-Au Districts: An Origin Via Unmixing of Magmatic $H_2O-CO_2-NaCl \pm CaCl_2-KCl$ Fluids. *Mineralium Deposita*, 36(1): 93—100. doi: 10.1007/s001260050289
- Rooney, T. O., 2010. Geochemical Evidence of Lithospheric Thinning in the Southern Main Ethiopian Rift. *Lithos*, 117 (1—4): 33—48. doi: 10.1016/j.lithos.2010.02.002
- Shinjo, R., Chekol, T., Meshesha, D., et al., 2010. Geochemistry and Geochronology of the Mafic Lavas from the Southeastern Ethiopian Rift (the East African Rift System): Assessment of Models on Magma Sources, Plume-Lithosphere Interaction and Plume Evolution. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(1): 209—230. doi: 10.1007/s00410-010-0591-2
- Sibuett, J. C., Letouzey, J., Barbier, F., et al., 1987. Back Arc Extension in the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research*, 92 (B13): 14041—14063. doi: 10.1029/JB092iB13p14041
- Sun, D. Z., Hu, W. X., 1993. Precambrian Chronological-Tectonic Frame and Crustal Texture in Zhongtiaoshan Mountains. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sun, H. T., Zhang, Z. Q., 1994. Sm-Nd Isotopic Age of Bimodal K-Rich Meta-Volcanic Rocks in Zhongtiaoshan Mountains and Its Implications. *Chinese Science Bulletin*, 39(14): 1343—1344 (in Chinese).
- Taylor, B., Martinez, F., 2003. Back-arc Basin Basalt Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3—4): 481—497. doi: 10.1016/s0012-821x(03)00167-5
- Wang, C. Z., 1991. New Recognition on the “Meta-Acid Volcanic Rocks of the Jiangxian Group” in the Core Region of the Hujiayu-Shangyupo Anticline of the Zhongtiaoshan Mountains. *Regional Geology of China*, (2): 176—179, 181 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Z., Song, H. L., Fu, Z. R., 1990. Deformation Partitioning and Determination of Shangyupo Meta-Basic Intrusive Sheet, Zhongtiaoshan Mountain. *Geoscience Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 4(4): 35—45 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Hattori, K. H., Kilian, R., et al., 2007. Metasomatism of Sub-Arc Mantle Peridotites Below Southernmost South America: Reduction of f_{O_2} by Slab-Melt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(5): 607—624. doi: 10.1007/s00410-006-0166-4
- White, R., McKenzie, D., 1989. Magmatism at Rift Zones: The Generation of Volcanic Continental Margins and Flood Basalts. *Journal of Geophysical Research*, 94 (B6): 7685—7729. doi: 10.1029/JB094iB06p07685
- Whitford, D. J., Korsch, M. J., Porritt, P. M., et al., 1988. Rare-Earth Element Mobility Around the Volcanogenic Polymetallic Massive Sulfide Deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68 (1—2): 105—119. doi: 10.1016/0009-2541(88)90090-3
- Whitford, D. J., McPherson, W. P. A., Wallace, D. B., 1989. Geochemistry of the Host Rocks of the Volcanogenic Massive Sulfide Deposit at Que River, Tasmania. *Economic Geology*, 84 (1): 1—21. doi: 10.2113/gsecongeo.84.1.1
- Wood, S. A., Williams-Jones, A. E., 1994. The Aqueous Geochemistry of the Rare-Earth Elements and Yttrium 4. Monazite Solubility and REE Mobility in Exhalative Massive Sulfide-Depositing Environments. *Chemical Geology*, 115 (1—2): 47—60. doi: 10.1016/0009-2541(94)90144-9
- Yu, S. Q., Liu, S. W., Tian, W., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of the Henglingguan and Beiyu Granitoids in the Zhongtiaoshan Mountains, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 80 (6): 912—924. doi: 10.1111/j.1755-6724.2006.tb00312.x
- Zhai, M. G., 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A Summary and Review. *Science China-Earth Sciences*, 54 (8): 1110—1120. doi: 10.1007/s11430-011-4250-x
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2004. A Paleo-Mesoproterozoic Supercontinent: Assembly, Growth and Breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1—2): 91—123. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.02.003
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107(1—2): 45—73. doi: 10.1016/S0301-9268(00)00154-6

附中文参考文献

《中条山铜矿地质》编写组,1978. 中条山铜矿地质. 北京:地质出版社.

傅昭仁,李德威,李先福,等,1992. 变质核杂岩及剥离断层的控矿构造解析. 武汉:中国地质大学出版社.

侯可军,李延河,田有荣,2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质,28(4):481-492.

孙大中,胡维兴,1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京:地质出版社.

孙海田,张宗清,1994. 中条山地区双峰态钾质火山岩系 Sm-Nd 同位素年龄及意义. 科学通报,39(14):1343-1344.

王春增,1991. 中条山胡家峪—上玉坡背斜核部“绛县群变酸性火山岩”的新认识. 中国区域地质,(2):176-179,181.

王春增,宋鸿林,傅昭仁,1990. 变形分解作用与中条山上玉坡变基性侵入岩席的厘定. 现代地质,4(4):35-45.

《地球科学——中国地质大学学报》
2013 年 第 38 卷 第 2 期 要目预告

晶面腐蚀像与晶面对称及晶面结构的关系	赵珊茸等
海南石碌地区早三叠世闪长玢岩脉 U-Pb 年代学及构造意义	李艳军等
川西若尔盖地区中—新生代构造—热事件及其年代学框架	邓 宾等
闽北上房钨矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义	陈润生等
吉林红旗岭镍矿田茶尖岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其意义	郝立波等
新疆库米什地区晚石炭世—早二叠世花岗岩年代学、地球化学及其地质意义	陈 超等
吉林省兰家金矿南泉眼闪长岩 U-Pb 年代学和地球化学特征	闻 爽等
广西那坡裂陷盆地晚古生代硅质岩地球化学特征及其地质意义	黄志强等
海平面变化在湖南西部桑植地区栖霞组富有机碳沉积物形成中的作用	韦恒叶等