

勉略带关帝坪角闪岩岩石地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

秦臻¹, 廖时理², 魏小红³, 余朋涛¹

(1. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710016; 2. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430074;
3. 陕西省地质矿产勘查开发局区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 关帝坪蛇绿岩位于勉县关帝坪地区, 具典型的堆晶结构, 是勉略蛇绿岩带的重要组成部分。对其中的角闪岩进行了岩石地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析。结果表明角闪岩具高 MgO、CaO, 低 K₂O 的特征, 为钙碱性系列, TiO₂ 含量与活动大陆边缘及岛弧区火山岩相似, 富集大离子亲石元素 Ba、Th、U, 显著亏损 Nb、Ta, 略微富集轻稀土元素, 轻重稀土元素分馏不明显, 具有岛弧玄武岩的地球化学特征, 与勉略带印支期花岗岩可能具有一定的同源性, 可能是印支期勉略洋盆向北俯冲的产物, 并受到了大陆壳的混染。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果, 表明角闪岩的成岩年龄为 (222.5 ± 2.1) Ma, 表明其形成于晚三叠世。该年龄略早于研究区花岗岩的成岩年龄, 二者的成对性关系说明在勉略古洋壳向北的俯冲一直持续到晚三叠世岛弧火山岩的形成或者更晚时期, 之后才进入了碰撞造山阶段。

关键词: 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; 角闪岩; 关帝坪; 勉略带

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2014)02-0073-10

Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Guandiping Amphibolite in the Mian-Lue Structure Zone

QIN Zhen¹, LIAO Shi-li², WEI Xiao-hong³, SHE Peng-tao¹

(1. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710054, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Shaanxi Institute of Regional Survey, Xianyang 712000, China)

Abstract: Located in Mianxian County and with a typical heap crystal structure, the Guandiping ophiolite is an important part of the Mian-lue ophiolite structure zone. In this study, rock geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating are applied to analyze the intrusive environment and period of the amphibolite. The result shows that the amphibolite belongs to Calc-alkaline series with typically high content of MgO and CaO but low K₂O. The TiO₂ content is similar to that of active continental margin and island arc volcanic rocks. Besides, it is rich in LILE such as Ba, Th, U and LREE, while low in HFSE of Nb and Ta. Moreover, the fractionation of light and heavy REE is not obvious. These features indicate that it is probably the product of the northward subduction of the Mian-lue oceanic basin under island arc environment. Its geochemistry characteristics are similar to the Indosinian granites, suggesting that they may derive from the

收稿日期: 2014-02-18; **修回日期:** 2014-04-16

基金项目: 陕西 1:5 万贾旗寨、褒城、勉县、新集四幅区域地质调查(1212011120565)

作者简介: 秦臻(1988-), 男, 陕西咸阳乾县人, 助理工程师, 学士学位, 主要从事区域地质矿产调查。E-mail: qz05105135@163.com

same source, and are contaminated by the continental crust. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result shows that the diagenetic age of the amphibolite is 222.5 ± 2.1 Ma, which indicates that it was formed in the Late Triassic Epoch. This age is a bit earlier than the granites in the study area, implying that the ancient Mian-lue was formed in the Late Triassic Epoch. This age is a bit earlier than the granites in the study area, implying that the ancient Mian-lue oceanic crust continued northward subduction until the forming of island arc volcanic rocks in Late Triassic or later, and then entered the collision orogenic stage.

Key words: geochemistry; Zircon U-Pb dating; amphibolite; Guandiping; Mian-lue structure Zone

勉略缝合带位于秦岭造山带南缘,是秦岭造山带中除商丹古缝合带外的另一条具重要意义的印支期板块缝合带。它的形成标志着扬子和华北陆块的最终拼合,对研究中国大陆的构造演化具有重要的大地构造意义(赖绍聪,1997;赖绍聪等,2003;张国伟等,2004)。前人对该缝合带的蛇绿构造混杂岩进行了大量的岩石地球化学、同位素定年等分析,表明其演化历史十分复杂,可能由2个不同时期的镁铁质岩块或蛇绿岩块组成。李瑞宝等(2009)获得勉略带琵琶寺基性火山岩锆石 U-Pb 年龄为 $783 \sim 754$ Ma,闫全人等(2012)系统测定了康县—勉县段的铁镁质岩块或蛇绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,认为勉略混杂岩带中的蛇绿岩块所代表的是新元古代古洋壳残片。而晚古生代蛇绿岩的年龄主要是通过变质火山岩的变质年龄(李曙光等,1996)、麻粒岩矿物的变质年龄(张宗清等,2002;杨崇辉等,2012)以及中酸性花岗岩的成岩年龄(吴峰辉等,2009;吴美玲等,2009)等方法间接获得的,缺乏能直接证明其原岩形成时代的同位素年龄证据(李曙光等,2003)。因此,对勉略蛇绿岩带的精确年代学研究依然是一个重要课题。赖绍聪等(2010)研究认为,勉县关帝坪地区出露的基性、超基性岩块是勉略蛇绿构造混杂岩带中蛇绿岩块的重要组成部分。笔者在1:5万贾旗寨、勉县、褒城、新集等4幅区域地质调查项目工作过程中对关帝坪一带出露的基性、超基性岩块做了详细地质调查,对其中产出的角闪岩进行了岩石地球化学及 U-Pb 锆石年代学研究,并讨论了其地质意义。

1 地质背景及岩石学特征

关帝坪蛇绿岩块位于勉县朱家河乡关帝坪一带

(图1),呈不规则的烟斗状出露,出露面积约为 1.8 km^2 ,南北宽 $1.5 \sim 2 \text{ km}$,东西长 $1 \sim 1.5 \text{ km}$,北东方向大面积出露光头山复式花岗岩体,南西方向与古元古界长角坝岩群低庄沟岩组($\text{Pt}_1 d$)相间出露,呈构造面理接触,北侧与留坝地层小区的志留系迭部岩组呈韧性剪切断层相接。关帝坪蛇绿岩块岩性主要为辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、中细粒角闪石岩、辉长岩等(图2);辉长岩具典型的堆晶结构(赖绍聪,2005)。由于受构造剪切作用,岩石普遍具叶理化,造成片状新生矿物及部分粒状矿物拉长变形,定向排列。伴随蛇纹石化、透闪石化、透辉石化、绿帘石化、角闪石化等,在岩体边部形成蛇纹岩、透辉石岩、角闪岩等。

本次研究主要采集了其中的中细粒角闪岩。样品颜色为墨绿色,中细粒自形粒状变晶结构,块状构造。主要矿物为角闪石、黑云母,其中角闪石 $> 99\%$,黑云母 $< 1\%$,个别黑云母有时为角闪石包裹体;结晶颗粒细到中粒,有长英质细脉穿插其中。角闪石呈自形柱状,板状晶体形态,粒径大小可分: $2.5 \sim 3 \text{ mm}$ 及 $1.5 \sim 2 \text{ mm}$,中-细粒级,多色性 Ng 为浅绿色, N_p 为浅黄色, N_m 为浅色,最大消光角 $(C \wedge Ng) 18^\circ \sim 20^\circ$ 。采样处角闪石颗粒较小,但受剪切变形影响,呈现显著的定向排列。副矿物主要为锆石、榍石、磷灰石等。岩石经历变质作用,角闪石等发生变质重结晶,形成变晶粒、柱状晶体,从变质后的矿物特点分析原岩为正变质基性侵入岩类。在变质岩原岩恢复图解 $\text{TiO}_2 - (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 、 $(\text{Ca} + \text{Mg}) - (\text{Al} + \text{Fe} + \text{Ti})$ (邱家骧等,1991)以及 $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ 图解中也都落入正变质岩的范围内,表明原岩为岩浆岩。

2 样品采集及分析方法

角闪岩年龄样品采自关帝坪蛇绿岩块,采样位

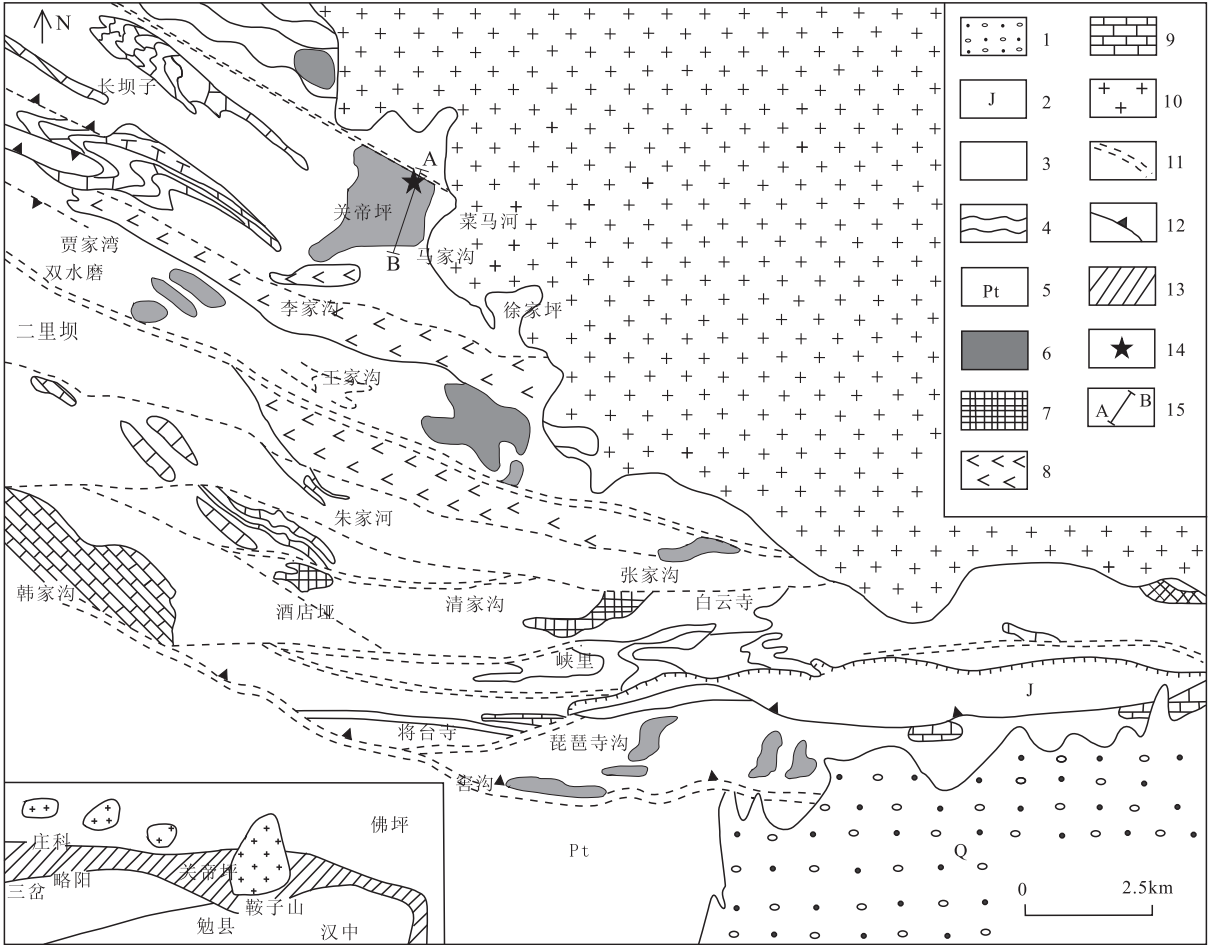


图 1 南秦岭勉县安子山一带地质略图(据张宗清等, 2002 修改)

Fig. 1 Geological sketch of Anzishan area in the northern Qinling (after Zhang Zongqing, et al., 2002)

1. 第四纪; 2. 侏罗系; 3. 元古宙低庄沟岩组; 4. 志留-泥盆系片岩; 5. 元古宙碧口群火山岩; 6. 基性-超基性岩块; 7. 二变质拉斑玄武岩(角闪绢云绿泥片岩); 8. 角闪岩; 9. 大理岩; 10. 光头山岩体; 11. 韧性剪切带; 12. 逆冲断层; 13. 勉略蛇绿构造混杂岩带; 14. 年龄样采样位置; 15. 剖面位置

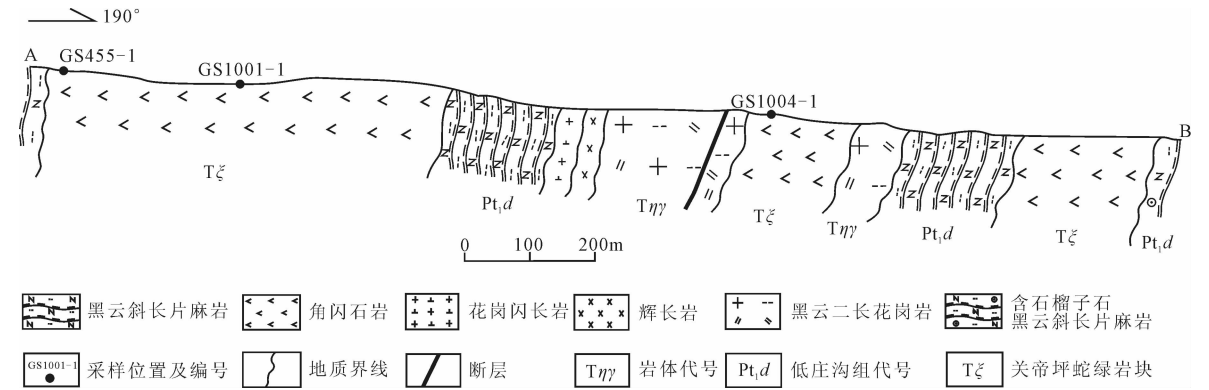


图 2 关帝坪蛇绿岩块实测地质剖面图

Fig. 2 Measured geological profile of the Guandiping ophiolitic

置见图 1,同时分析了其常量和微量元素数据。另外 2 个角闪岩岩石地球化学样品采样位置见图 2。主量元素和微量元素均在西北大学大陆动力学重点实验室完成,选择新鲜的岩块作为测试对象,样品加工前先切掉氧化或蚀变膜。主量元素用 XRF 光谱测定,分析精度一般优于 2%。微量元素用 XRF 玻璃饼熔样,以保证样品中的副矿物全部溶解,然后在 ICP-MS 上测定,分析精度一般优于 2%~5%。所有分析结果见表 1。

锆石单矿物分离在廊坊所完成,将大约 5 kg 重的新鲜未蚀变角闪岩样品破碎到 60~80 目,经浮选和磁选后,在双目显微镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将挑选后的锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛磨至粒径的二分之一左右,使锆石内部充分暴露,然后进行显微照相(反射光,透射光和 CL 图像)和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素组成分析。锆石的阴极发光(CL)图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。

锆石 U-Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成。分析仪器为配备 193nm ArF-excimer 激光器的 Geo-Las 200M 型激光剥蚀系统和 Elan 6100 DRC 型四极杆质谱仪。测试中以国际标准锆石 91500 为外标校正,为确保标样和样品的仪器条件完全一致,每测定 5 个分析

点后插入一次标样测定。以²⁹Si 作为内标进行锆石的元素含量校正。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学特征

3.1.1 常量元素

角闪岩成分落于玄武岩区域内,SiO₂ 含量低(48.28%~48.71%),Al₂O₃ 质量分数为 8.43%~8.88%;MgO 质量分数为 13.98%~15.57%,含量高,Mg[#] 为 0.77~0.79;CaO 质量分数为 13.73%~14.96%,普遍高于勉略带中其他玄武岩类。TFe₂O₃ 为 9.03%~9.90%,FeO 的含量明显大于 Fe₂O₃,与三岔子岛弧玄武岩类似,而低于文家沟-庄科洋脊玄武岩(赖绍聪等,1998)。K₂O 含量较低,为 0.46%~0.52%;K₂O+Na₂O 质量分数为 1.63%~1.99%,为钙碱性系列;K₂O/Na₂O 为 0.35~0.39。TiO₂ 含量低,介于 0.80%~0.96%,与活动大陆边缘及岛弧区火山岩(0.83%,0.58~0.85)相当,而明显低于洋脊拉斑玄武岩(1.5%)。

3.1.2 微量及稀土元素

角闪岩微量元素的原始地幔标准化曲线(图 3a)表现出明显富集大离子亲石元素 Ba、Th、U,显著亏损 Nb、Ta 的特征。Th/Ta 为 3.36~6.62,略高于原始地幔的 2.3,显示受到了大陆地壳的混染;(Th/Yb)_N 为 0.94~1.49,(Nb/La)_N 为 0.23~0.54,与勉略带西段的三岔子岛弧玄武岩较为相似

表 1 关帝坪角闪岩常量、微量组分分析结果表
Tab. 1 Major, trace and rare earth elements compositions of the Guandiping amphibolite

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	H ₂ O ⁺	CO ₂	LIO	Total	Mg [#]
GS1001-1	48.28	8.43	5.92	3.00	15.57	13.73	1.47	0.52	0.16	0.13	0.96	0.61	0.14	0.63	99.55	0.79
GS1004-2	48.46	8.80	6.62	2.54	14.12	14.59	1.44	0.52	0.17	0.16	0.80	0.46	0.25	0.70	99.63	0.77
GS455-1	48.71	8.88	6.94	1.32	13.98	14.96	1.17	0.46	0.05	0.15	0.89	0.57	0.51	1.50	100.09	0.78
样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Rb
GS1001-1	8.14	26.00	4.78	23.20	5.60	1.61	5.67	0.82	4.99	0.96	2.60	0.34	2.09	0.30	20.90	5.05
GS1004-2	15.80	37.90	6.29	27.10	5.82	1.66	5.76	0.80	4.78	0.91	2.51	0.34	2.05	0.29	20.00	3.82
GS455-1	7.58	20.90	2.76	13.20	3.33	0.99	3.94	0.62	4.15	0.80	2.13	0.28	1.80	0.27	19.60	8.57
样号	Ba	Th	U	Nb	Ta	Pb	Sr	Zr	Hf	Cr	Ni	Co	Sc	V	Cu	Zn
GS1001-1	82.60	2.35	0.45	3.51	0.70	8.66	167.00	117.00	2.95	1256.00	208.00	52.50	61.60	346.00	48.50	70.50
GS1004-2	126.00	1.92	0.33	3.69	0.29	3.31	185.00	114.00	2.50	1676.00	251.00	56.40	58.80	284.00	30.00	68.70
GS455-1	194.30	2.68	0.74	4.07	0.44	7.10	182.20	63.70	1.48	757.6	132.90	45.80	38.40	188.30	65.00	72.10

注:常量元素为质量分数百分含量,微量元素单位为 10⁻⁶。

(李曙光等, 2003), 具典型的岛弧火山岩地球化学特征。Pb 元素较为富集, 显示可能受到了陆壳物质的混染; Ti 元素相对微弱亏损, 说明岩浆体系中存在较弱的钛铁氧化物分离结晶现象; 高场强元素 P 存在一定的亏损, 说明源区可能经历了磷灰石的分离结晶。稀土总量相对较低, 为 $82.35 \times 10^{-6} \sim 132.01 \times 10^{-6}$, 其配分模式略微右倾(图 3b), 具轻稀土略微富集的特征, 明显不同于附近鞍子山地区出露的洋壳碎片镁铁质火山岩块, 而与三岔子岛弧型玄武岩类似(张宗清等, 2005)。LREE/HREE 为 1.45~2.53, 轻稀土和重稀土的分馏不明显; $(La/Yb)_N$ 为 2.63~5.61; $(Gd/Yb)_N$ 为 1.77~2.28; $(La/Sm)_N$ 为 0.91~1.73。Ce 异常不明显, δCe 为 0.89~1.07, 具弱的 Eu 负异常, δEu 为 0.83~0.87, 说明岩浆演化过程中存在弱的斜长石分离结晶作用。

由于岩石经历了一定的变质和蚀变作用, 而 Ca, K, Rb, Ba, Sr 等元素较为活泼。因此, 选择在变质过程中相对稳定的高场强元素、稀土元素及 Th、Y 等元素来反映其原岩的组成特征。利用 Hf/3-Th-Ta 判别图解进行投点(图 4), 3 个样品均落入岛弧钙碱性玄武岩(CAB)的范围内, 在 2Nb-Zr/4-Y 图解中也落入火山弧玄武岩的范围内, 而在 Ta/Yb-Th/Yb 图解(图 5)中则落在大陆边缘弧的范围内, 反映其与消减带的岛弧环境相关。高场强元素中的 Sm/Yb 值与三岔子玄武岩相当, 而大于勉略带鞍子山玄武岩, 在 Sm/Yb-La/Sm 图解(图 6)中, 三者均落在由石榴子石二辉橄榄岩组成的原始地幔熔融线上, 表明它们都是在厚的岩石圈下由异常热的地幔经过低程度部分熔融形成的, 与赖绍聪等(2005)对关帝坪蛇绿岩带中辉长岩地球化学特征的研究所获得的结论相同。

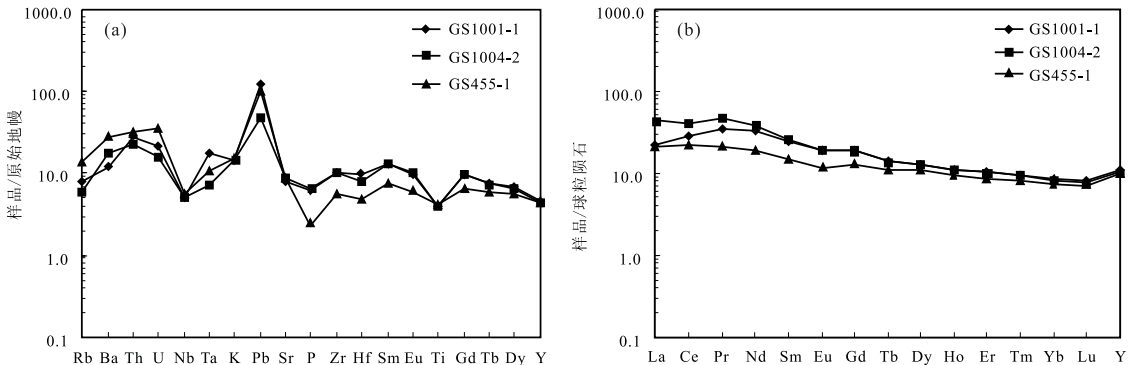


图 3 角闪岩微量元素及稀土元素标准化曲线图

Fig. 3 Normalized distribution pattern of REE and trace elements of the Guandiping amphibolite

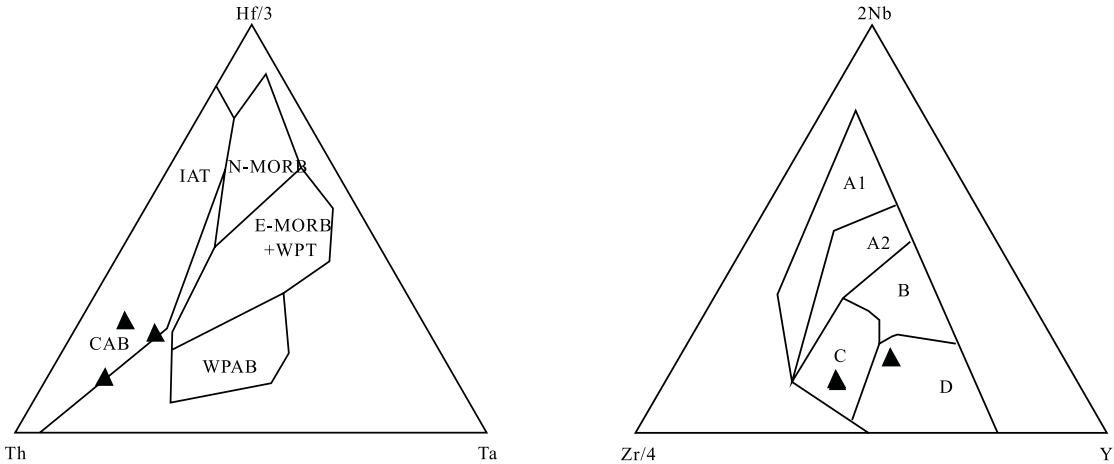


图 4 角闪岩的 Hf/3-Th-Ta 和 2Nb-Zr/4-Y 图解

Fig. 4 Hf/3-Th-Ta and 2Nb-Zr/4-Y diagram of the Guandiping amphibolite

MORB. 洋中脊玄武岩; OIT. 洋岛拉斑玄武岩; IAT. 岛弧拉斑玄武岩; CAB. 岛弧钙碱性玄武岩; OIA. 洋岛钙碱性玄武岩; A1 和 A2 区. 板内碱性玄武岩; A2 和 C 区. 板内拉斑玄武岩; B 区. P-type MORB; D 区. N-type MORB; C 和 D 区. 火山弧玄武岩

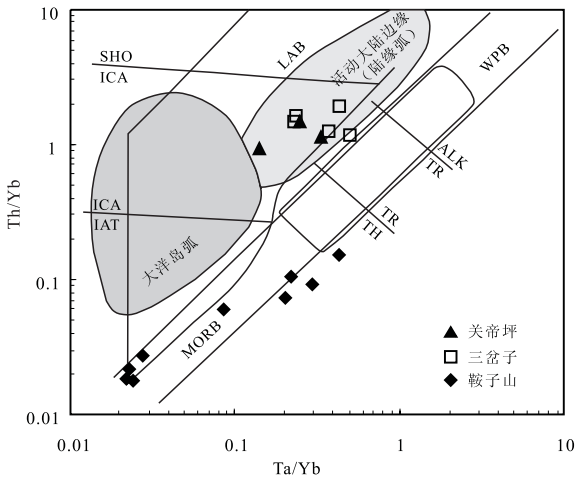


图 5 关帝坪角闪岩 Ta/Yb-Th/Yb 判别图解
(底图据 Pearce, 1982, 鞍子山和三岔子数据来源于李曙光等, 2003 和赖绍聪, 2005)
Fig. 5 Ta/Yb-Th/Yb diagram of the Guandiping amphibolite
IAB. 岛弧玄武岩; IAT. 岛弧拉斑系列; ICA. 岛弧钙碱系列; SHO. 岛弧橄榄玄武岩系列; WPB. 板内玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; TH. 拉斑玄武岩; TR. 过渡玄武岩; ALK. 碱性玄武岩

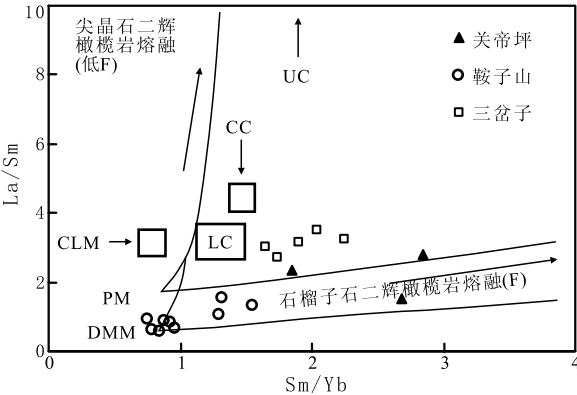


图 6 角闪岩 Sm/Yb-La/Sm 图解
Fig. 6 Sm/Yb-La/Sm diagram of the Guandiping amphibolite
PM. 原始地幔; DMM. 亏损地幔; CLM. 大陆岩石圈地幔; CC. 整个地壳; LC. 下地壳; UC. 上地壳

3.2 锆石 U-Pb 年代学

本次试验采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法对勉县关帝坪地区出露的一个角闪岩样品(GS455-1)进行了年龄测定。所获得的锆石大小不等,自形程

度较好,按照晶型和透明度可分为长柱状(长短轴比约 3:1~4:1)、短柱状或扁平状和双锥状 3 种。其中,长柱状和双锥状锆石晶型好,透明度高。大部分锆石颗粒呈灰白色、淡棕色,粒径为 50~250 μm ,其阴极发光(CL)图像(图 7)显示大部分锆石发育明显的密集振荡环带,具典型的岩浆锆石的特征(吴元保等, 2004)。部分锆石具残留的继承核或捕获核,为避免继承锆石对测年的干扰,所选择的测点均位于环带上,以保证定年的准确性。

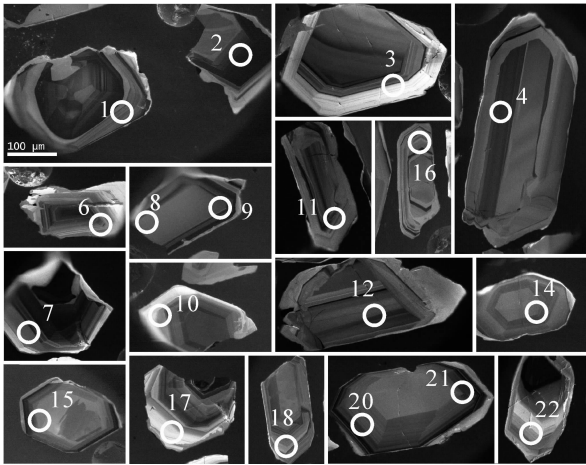


图 7 角闪岩(GS 455-1)锆石阴极发光图
Fig. 7 CL images of the analyzed zircon from Guandiping amphibolite (GS 455-1)

对 16 个锆石颗粒中的 22 个点进行了测定,测试结果见表 2。锆石具有较高的 Th、U 含量,22 个测点的 Th 含量变化为 $0.168 \times 10^{-6} \sim 552.31 \times 10^{-6}$, U 含量变化为 $27.98 \times 10^{-6} \sim 969.39 \times 10^{-6}$,二者具较好的正相关性关系,Th/U 值变化范围为 0.01~0.89,平均值为 0.42,多数大于 0.3,符合岩浆成因锆石的特征(吴元保等, 2004)。其中 5、13、19 号点所获得年龄值明显偏大或偏小,不参与加权年龄的计算。其余分析结果大部分在谐和图上呈密集分布(图 8),表明锆石形成以后 U-Pb 同位素体系保持了封闭,基本上没有发生 U 或 Pb 的丢失或加入,所以测定的年龄值是可信的。剔除 3 个离群年龄之后的 19 个点的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 的加权平均年龄为 $(222.5 \pm 2.1) \text{ Ma}$, MSWD=0.065,代表了角闪岩的成岩年龄,表明形成于晚三叠世。

表 2 陕西勉略宁地区关帝坪角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果表
Tab. 2 LA-ICP-MS U-Pb isotope data for zircons from the Guandiping amphibolite of Mianluening area

点号	元素含量($\times 10^{-6}$)及比值			同 位 素 比 值						年 龄 (Ma)					
	Th ²³²	U ²³⁸	Th/U	²⁰⁷ Pb/ Pb ²⁰⁶	1 σ	²⁰⁷ Pb/ U ²³⁵	1 σ	²⁰⁷ Pb/ U ²³⁸	1 σ	²⁰⁷ Pb/ Pb ²⁰⁶	1 σ	²⁰⁷ Pb/ U ²³⁵	1 σ	²⁰⁶ Pb/ U ²³⁸	1 σ
01	121.30	244.67	0.50	0.05117	0.00373	0.24804	0.01760	0.03518	0.00062	248.60	159.67	225.00	14.32	222.90	3.83
02	552.31	969.39	0.57	0.05259	0.00102	0.25228	0.00433	0.03481	0.00023	311.30	43.60	228.40	3.51	220.60	1.43
03	1.29	40.04	0.03	0.05043	0.00637	0.24674	0.03053	0.03550	0.00098	215.10	268.08	223.90	24.86	224.90	6.07
04	240.54	270.12	0.89	0.05078	0.00161	0.24581	0.00737	0.03513	0.00031	230.70	71.72	223.20	6.01	222.60	1.92
05	159.38	182.61	0.87	0.08597	0.00243	0.45773	0.01194	0.03864	0.00037	1337.50	53.70	382.70	8.31	244.40	2.28
06	110.84	231.90	0.48	0.05046	0.00184	0.24462	0.00853	0.03518	0.00034	216.30	82.53	222.20	6.96	222.90	2.11
07	24.99	174.90	0.14	0.05097	0.00173	0.24661	0.00793	0.03510	0.00032	239.60	76.24	223.80	6.46	222.40	1.96
08	112.43	157.14	0.72	0.05099	0.00194	0.24681	0.00898	0.03512	0.00035	240.30	85.40	224.00	7.31	222.50	2.15
09	181.52	250.88	0.72	0.04943	0.00125	0.24051	0.00564	0.03530	0.00026	168.50	58.18	218.80	4.62	223.60	1.64
10	85.40	223.44	0.38	0.05346	0.00223	0.26036	0.01038	0.03534	0.00039	348.20	91.24	235.00	8.37	223.90	2.41
11	287.55	391.87	0.73	0.05279	0.00189	0.25524	0.00867	0.03508	0.00034	319.60	79.23	230.80	7.01	222.20	2.11
12	57.34	98.47	0.58	0.04962	0.00199	0.24139	0.00930	0.03529	0.00036	177.30	91.09	219.60	7.61	223.60	2.23
13	77.37	182.48	0.42	0.05475	0.00636	0.25562	0.02895	0.03386	0.00096	402.00	241.05	231.10	23.41	214.70	5.96
14	215.87	353.70	0.61	0.05162	0.00170	0.24733	0.00773	0.03475	0.00031	268.60	73.92	224.40	6.29	220.20	1.95
15	278.01	576.20	0.48	0.05158	0.00099	0.24958	0.00422	0.03509	0.00023	266.60	43.44	226.20	3.43	222.40	1.40
16	49.73	155.73	0.32	0.05144	0.00201	0.25080	0.00938	0.03535	0.00036	260.80	87.35	227.20	7.62	224.00	2.23
17	0.60	30.37	0.02	0.05264	0.00743	0.25582	0.03541	0.03524	0.00110	313.10	292.98	231.30	28.63	223.30	6.84
18	45.50	194.22	0.23	0.05076	0.00143	0.24710	0.00650	0.03529	0.00028	230.10	63.69	224.20	5.29	223.60	1.74
19	43.22	228.63	0.19	0.05779	0.00319	0.26238	0.01399	0.03292	0.00047	521.60	117.02	236.60	11.25	208.80	2.96
20	36.77	131.80	0.28	0.05253	0.00216	0.25271	0.00996	0.03487	0.00037	308.60	91.50	228.80	8.07	221.00	2.33
21	66.32	192.02	0.35	0.04954	0.00184	0.24020	0.00853	0.03514	0.00034	173.30	84.52	218.60	6.98	222.60	2.12
22	0.17	27.98	0.01	0.06358	0.00486	0.30984	0.02303	0.03531	0.00066	727.70	154.18	274.10	17.85	223.70	4.11

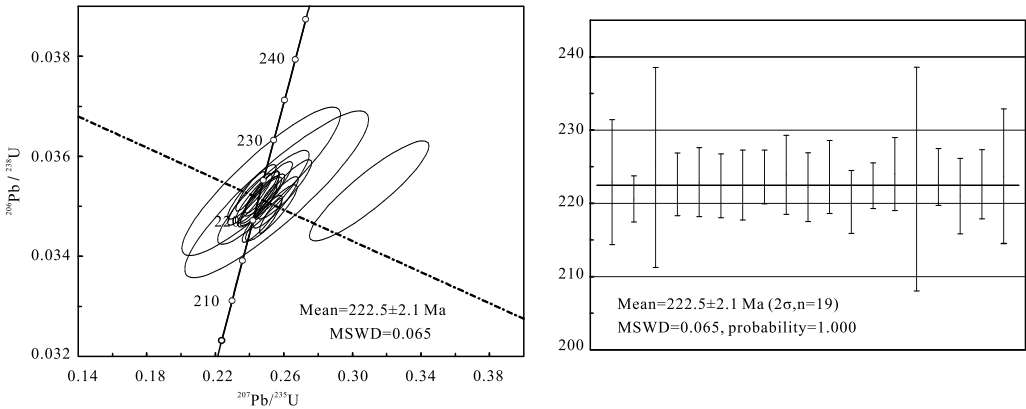


图 8 角闪岩(GS 455-1)锆石 U-Pb 年龄谐和图和²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄谱图
Fig. 8 U-Pb concordia diagram and weighted average age of the zircon
from Guandiping amphibolite (GS 455-1)

4 讨论

前人研究表明,勉略蛇绿岩带可能包含有 2 个不同时期的镁铁质岩块或蛇绿岩块。代表晚古生代的蛇绿岩主体形成于 350~245 Ma,与泥盆纪勉略洋盆打开、石炭纪一二叠纪主体扩张、三叠纪闭合消失的演化路径相对应(赖绍聪等, 2003; 张国伟等, 2003, 2004),而这一结果主要是通过各种间接方法所获得的。例如,略阳三岔子火山岩硅质岩夹层中存在大量的早石炭世化石,代表了三岔子蛇绿岩的形成时代(冯庆来等, 1996);三岔子镁铁-超镁铁杂岩中斜长花岗岩的形成年龄为(300±61) Ma,表明勉略古洋盆的洋壳在石炭纪时已开始消减(李曙光等, 2003);黑沟峡变质火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为(242±21) Ma,Rb-Sr 全岩等时线年龄为(221±13) Ma,代表了其经历变质作用的年龄,暗示勉略洋盆在三叠纪已闭合(李曙光等, 1996);勉县安子山基性麻粒岩矿物样品的变质年龄为 206~199.7 Ma(张宗清等, 2002),佛坪地区麻粒岩相岩石的 U-Pb 锆石变质年龄为 220~270 Ma(杨崇辉等, 2012)。代表了勉略有限洋盆闭合过程中退变质作用发生的时间。另一方面,沿该构造带大量分布的印支期花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩等主要形成于 220~200 Ma(孙卫东等, 2000; 吴峰辉等, 2009; 吴美玲等, 2009),也代表勉略洋盆碰撞闭合的时间。本次研究获得的关帝坪角闪岩的锆石 U-Pb 年龄为(222.5±2.1) Ma,代表了蛇绿岩原岩的成岩年龄。研究表明,在晚古生代一早中生代勉略洋发育及演化期间,秦岭已成为独立的岩石圈微板块,其南缘具有活动大陆边缘的构造属性,勉略洋古洋壳自南向北的俯冲消减,产生了一套与洋壳俯冲有关的陆缘弧火山岩组合(赖绍聪等, 1998)。因此,该角闪岩可能是勉略有限洋盆于印支期俯冲的产物。另一方面,关帝坪超基性岩块由辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、玻安岩、中细粒角闪石岩、辉长岩等岩性组成,而目前普遍认为玻安岩形成于俯冲带的前弧环境。因此也可以肯定关帝坪超基性岩块是俯冲型蛇绿岩(SSZ)的组成部分。

依据岩石地球化学特征,表明角闪岩常量组分中的 MgO 和 CaO 含量高(分别为 13.98%~15.57%和 13.73%~14.96%),TiO₂ 含量与活动大陆

边缘及岛弧区火山岩相似,富集大离子亲石元素 Ba、Th、U,显著亏损 Nb、Ta,在 Hf/3-Th-Ta 和 2Nb-Zr/4-Y 判别图解中均落入岛弧玄武岩的范围内,在 Ta/Yb-Th/Yb 图解中也落在大陆边缘弧的范围内,表明其产于岛弧环境。对勉略带晚古生代花岗岩的研究,表明其微量元素显示了活动陆缘火山弧花岗岩相对富集 LILE,HSFE 贫化,稀土总量明显偏高,高场强元素 Nb、Ta 在微量元素标准化图谱上明显亏损成谷的特征(张成立等, 2005),与角闪岩具有一定的相似性,说明二者在成因上可能存在一定的同源性。秦江峰等认为(秦江峰等, 2007)光头山花岗岩群具埃达克岩的地球化学性质,由于只有年轻的(<25 Ma)、较热的洋壳俯冲才能发生部分熔融(李曙光等, 2003),光头山埃达克质花岗岩的存在说明当时勉略带的俯冲洋壳是新生的热洋壳。同时,对花岗岩的年代学研究,表明其成岩年龄约为 221~199 Ma(吴峰辉等, 2009)。本次研究所获得的关帝坪蛇绿岩带中的角闪岩的年龄为(222.5±2.1) Ma,略早于光头山花岗岩群,二者在成因、时间、空间上的相关性,说明在勉略古洋壳向北的俯冲一直持续到晚三叠世岛弧火山岩的形成或者更晚,之后才进入了碰撞造山阶段。

5 结论

(1)勉略带关帝坪角闪岩常量组分具高 Mg、高 Ca、低 K 的特点,TiO₂ 含量低,为钙碱性系列,微量元素中的大离子亲石元素 Ba、Th、U 富集,显著亏损 Nb、Ta,轻稀土元素略微富集,轻重稀土元素分馏不明显,发育弱的负 Eu 异常,具岛弧玄武岩的岩石地球化学特征,可能是勉略有限洋盆于印支期俯冲的产物。

(2)关帝坪角闪岩的锆石 U-Pb 年龄为(222.5±2.1) Ma,代表了蛇绿岩原岩的成岩年龄,表明勉略古洋壳向北的俯冲一直持续到晚三叠世岛弧火山岩的形成或者更晚,之后才进入了碰撞造山阶段。

致谢:感谢西安地质调查中心李文明研究员提供了许多建设性的意见。

参考文献(References):

冯庆来,杜远生,殷鸿福,等. 南秦岭勉略蛇绿混杂岩带中放

- 射虫的发现及其意义[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1996,26(S1): 78-82.
- Feng Qinglai, Du Yuansheng, Yin Hongfu, et al. Carboniferous radiolaria fauna firstly discovered in Mian—Lue ophiolitic melange belt of South Qinling Mountains[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1996, 26 (S1): 78-82.
- 赖绍聪. 秦岭造山带勉略缝合带超镁铁质岩的地球化学特征[J]. 西北地质, 1997,18(03): 36-45.
- Lai Shaocong. Geochemical features of the ultramafic rocks in Mianlue suture zone, Qingling orogenic belt. Northwest Geology, 1997,18(03): 36-45.
- 赖绍聪. 南秦岭勉略蛇绿构造混杂带辉长辉绿岩类微量—稀土元素地球化学. 地球科学与环境学报, 2005, 27 (3): 5-9.
- Lai Shaocong. Geochemical features of trace and rare earth elements of gabbro-diorite in Mianlue ophiolitic melange zone, South Qinling[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005,27(3): 5-9.
- 赖绍聪,秦江锋. 南秦岭勉略缝合带蛇绿岩与火山岩[M]. 北京: 科学出版社: 2010.
- Lai Shaocong, Qin Jiangfeng. Ophiolite and volcanic rocks in Mianlue suture zone, South Qinling [M]. Science press: Beijing,2010.
- 赖绍聪,张国伟,董云鹏,等. 秦岭—大别勉略构造带蛇绿岩与相关火山岩性质及其时空分布[J]. 中国科学 D 辑, 2003,33(12): 1174-1183.
- Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng, et al. The character and space time distribution of the ophiolite and volcanic rock in the Qinling-Dabie and Mian-Lue tectonic belt. Science in China[J]. Science in China (Series D), 2003,33(12): 1174-1183.
- 赖绍聪,张国伟,杨永成,等. 南秦岭勉县—略阳结合带蛇绿岩与岛弧火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地球化学, 1998,27(03): 283-293.
- Lai Shaocong, Zhang Guowei, Yang Yongcheng, et al. Geochemistry of the ophiolite and island arc volcanic rock in the Mianxian-Lueyang suture zone, southern Qinling and their tectonic significances [J]. Geochimica, 1998, 27 (03): 283-293.
- 李瑞保,裴先治,丁仁平,等. 西秦岭南缘勉略带琵琶寺基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质学报, 2009. 83(11): 1612-1623.
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Pipasi Basic Volcanic Rocks Within the Mian-Lue Tectonic Zone in the Southern Margin of West Qinlin and its Geological Implication [J]. Acta Geologica Sinica, 2009,83(11): 1612-1623.
- 李曙光,侯振辉,杨永成,等. 南秦岭勉略构造带三岔子古岩浆弧的地球化学特征及形成时代[J]. 中国科学 D 辑, 2003,33(12): 1163-1173.
- Li Shuguang, Hou Zhenghui, Yang Yongcheng, et al. Geochemical features and forming age of the Sanchazi palaeo magmaarc in the Mian-Lue tectonic zone[J]. Science in China (Series D), 2003,33(12): 1163-1173.
- 李曙光,孙卫东,张国伟,等. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1996, 26 (03): 223-230.
- Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guowei, et al. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in Mianlue tectonic zone, South Qinling: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time [J]. Science in China (Series D), 1996, 26 (03): 223-230.
- 秦江锋,赖绍聪,李永飞. 南秦岭勉县—略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 2007,26(4): 466-471.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications[J]. Geological Bulletin of China, 2007,26(4): 466-471.
- 邱家骧,林景仟. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社: 1991.
- Qiu Jia-xiang, Lin Jingqian. Petrochemistry[M]. Geological publishing house: Beijing,1991.
- 孙卫东,李曙光,Chen Ya dong,等. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球化学, 2000, 29 (3): 209-216.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Chen Yadong, et al. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance [J]. Geochimica, 2000,29(3): 209-216.
- 吴峰辉,刘树文,李秋根,等. 西秦岭光头山花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009,45(5): 811-818.
- Wu Fenghui, Liu Shuwen, Li Qiugen, et al. Zircon U-Pb Geochronology and Geological Significance of Guangtoushan Granitoids from Western Qinling, Central China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009,45(5): 811-818.
- 吴美玲,郭永峰,李学军. 陕西勉县地区关帝坪闪长岩体的

- LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 西北地质, 2009, 42(1): 73-78.
- Wu Meiling, Guo Yongfeng, Li Xuejun. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of the Guandiping Diorite Pluton from Mianxian, South Qinling, Central China[J]. Northwestern Geology, 2009, 42(1): 73-78.
- 吴元保, 郑永飞. 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, 2004, 49(16): 1589-1604.
- Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭勉略构造混杂带康县—勉县段蛇绿岩块—铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质论评, 2012, 53(6): 755-764.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, et al. SHRIMP Analyses for Ophiolitic-Mafic Blocks in the Kangxian-Mianxian Section of the Mianxian-Lueyang elange: Their Geological Implications[J]. Geological Review, 2012, 53(6): 755-764.
- 杨崇辉, 魏春景, 张寿广, 等. 南秦岭佛坪地区麻粒岩相岩石锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质论评, 2012, 45(2): 173-179.
- Yang Chonghui, Wei Chunjing, Zhang Shouguang, et al. U-Pb Zircon Dating of Granulite Facies Rocks from the Foping Area in the Southern Qinling Mountains. Geological Review, 2012, 45(2): 173-179.
- 张成立, 张国伟, 晏云翔, 等. 南秦岭勉略带北光头山花岗岩体群的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 711-720.
- Zhang Chengli, Zhang Guowei, Yan Yunxiang, et al. Origin and dynamic significance of Guangtoushan granitic plutons to the north of Mianlue zone in southern Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 711-720.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 846-853.
- Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, et al. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9): 846-853.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(12): 1121-1135.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, et al. The Mian-Lue suture zone in the South Qinling-Dabie Orogenic Belt[J]. Science In China (Series D), 2003, 33(12): 1121-1135.
- 张宗清, 唐索寒, 张国伟, 等. 勉县—略阳蛇绿混杂岩带镁铁质—安山质火山岩块年龄和该带构造演化的复杂性[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 531-539.
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Zhang Guowei, et al. Ages of Metamorphic Mafic-Andesitic Volcanic Rock Blocks and Tectonic Evolution Complexity of Mianxian-Lueyang Ophiolitic Melange Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(4): 531-539.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 秦岭勉略带中安子山麻粒岩的年龄[J]. 科学通报, 2002, 47(22): 1751-1755.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, et al. Age of the Anzishan granulites in the Mianxian-Lueyang suture zone of the Qingling orogen[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(22): 1751-1755.