

桐柏地区北秦岭地体中片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义

李运冬, 张盼, 何孝良, 张洒

(河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院, 河南 郑州 450008)

摘要:对桐柏地区北秦岭地体中侵入秦岭岩群的2个片麻状花岗岩体进行了锆石年代学和岩石地球化学研究。新庄岩体的主要岩性为片麻状白云母二长花岗岩, 保水寺岩体的主要岩性为片麻状二长花岗岩, 两者均具糜棱岩化。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果(429 ± 3) Ma (MSWD=0.12, $n=9$) 和 (445 ± 3) Ma (MSWD=1.02, $n=16$) 分别代表其形成年龄, 均形成于志留纪。两者均具有高硅、高铝、低镁、低铁的特点, 属于高钾钙碱性系列; 稀土元素总量较低, LREE 相对富集, HREE 相对亏损, Eu 负异常中等; 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、U, 亏损高场强元素 Nb、Ta 及 P、Ti。新庄片麻状花岗岩为强过铝质 S 型花岗岩; 保水寺片麻状花岗岩为弱过铝质 I 型花岗岩, 重稀土元素 Y、Yb、Lu 明显亏损。根据有关岩体的形成年龄及与围岩的接触关系, 限定了桐柏地区秦岭岩群麻粒岩相变质时限为 498~488 Ma, 角闪岩相退变质时限在 488~428 Ma, 区域糜棱岩化作用发生在 428 Ma 之后。保水寺岩体形成于岛弧环境, 其形成与古特提斯洋(商丹洋)的向北俯冲有关; 新庄岩体形成于碰撞环境, 其形成与桐柏地区早古生代末发生的弧陆碰撞事件有关。

关键词:桐柏地区; 北秦岭地体; 片麻状花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 大洋俯冲

中图分类号: P597; P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)04-0082-15

Zircon U-Pb Dating, Geochemical Characteristics of the Gneissic Granite from North Qinling Terrain in Tongbai Area and their Geological Significance

LI Yundong, ZHANG Pan, HE Xiaoliang, ZHANG Sa

(No. 3 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan Geological Bureau,
Zhengzhou 450008, Henan, China)

Abstract: The zircon geochronology and geochemistry of two gneissic granite masses intruded into Qinling group-complex in North Qinling terrain, Tongbai area have been studied in this paper. The main lithology of Xinzhuang granite mass is gneissic talc monzonitic granite, while the ones of Baoshuisi granite mass is monzonitic granite. Both of them have experienced mylonitization. The LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb dating has obtained the ages of (429 ± 3) Ma (MSWD=0.12, $n=9$) and (445 ± 3) Ma (MSWD=1.02, $n=16$), which represent the emplacement ages of these two rock mass, that is they were formed in Silurian period. The geochemistry analysis

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-05-26

基金项目: 中国地质调查局“河南 1:5 万官庄(I49E019022)、泌阳县(I49E020022)、平氏(I49E021021)、马道幅(I49E021022)区域地质矿产调查”(1212011220499)、“河南省围山城地区深部资源调查”(DD2016005237), 河南省国土资源厅“河南桐柏地区北秦岭加里东造山带沟-弧-盆体系及成矿作用研究”(豫国土资发[2016]54 号)

作者简介: 李运冬(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作。E-mail: 184264846lyd@163.com

show that both granites are characterized by high Si and Al, low Mg and Fe, and they belong to high-K calc-alkaline series. Their REEs are relatively low, with relatively enriched LREE, depleted HREE and medium-negative Eu anomaly. In addition, these rocks are enriched in LILE (such as Rb, Ba, U), but depleted in HFSE (such as Nb, Ta), P and Ti. The Xinzhuang gneissic granite belongs to strongly peraluminous S-type granite, while the Baoshuisi gneissic granite belongs to weak peraluminous I type granite, with obviously depleted HREE (Y, Yb, Lu). Based on the formation age of related rock mass and the contact relation with wall rock, it's limited that the granulite-facies metamorphism in Qinling group-complex took place at ca. 498~488 Ma, the amphibolite-facies retrogressive metamorphism occurred at ca. 488~428 Ma, and the regional mylonitization take place after 428 Ma. The Baoshuisi granite mass was formed in island arc environment, which is related to the northward subduction of Paleo-Tethys Ocean (Shangdan Ocean). The Xinzhuang granite mass was formed in impact environment, which is related to the arc-continent collision event at the end of the Early Paleozoic in Tongbai area.

Keywords: Tongbai area; North Qinling terrain; gneissic granite; zircon U - Pb dating; oceanic subduction

夹持于华北陆块与扬子陆块之间的秦岭造山带为一典型的复合型大陆造山带,在中国大陆形成与演化史中占有突出的地位(张国伟等,2001)。该造山带至少经历了新元古代、古生代和中生代3次重要的构造岩浆事件和造山作用,特别是早古生代存在的大洋俯冲、岛弧岩浆作用及弧-陆碰撞等事件(吴元保等,2013;刘晓春等,2015;DONG Y P et al.,2011),使得对于该时期的研究尤为重要。在秦岭造山带中变质级别最高的地层——秦岭岩群中发育有较多的花岗质岩石。其中,早古生代花岗岩占重要地位,前人已做了大量的研究,取得了一批精细年代学及地球化学资料,其主要形成于400~500 Ma,以I型花岗岩为主,部分为S型花岗岩,少量具埃达克质岩石特征(王涛等,2009;LIU X C et al.,2011;刘丙祥,2014)。但这些研究大多集中于南襄盆地以西的东秦岭地区,对桐柏地区侵入秦岭岩群的花岗质岩石研究则相对较少。笔者将桐柏地区原秦岭岩群的花岗质岩石解体出来,选取2个代表性的岩体进行LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb测年,结合其地球化学特征,探讨其对秦岭岩群变质事件年龄的限定及构造意义,为进一步研究秦岭造山带加里东期构造岩浆演化提供了新的依据。

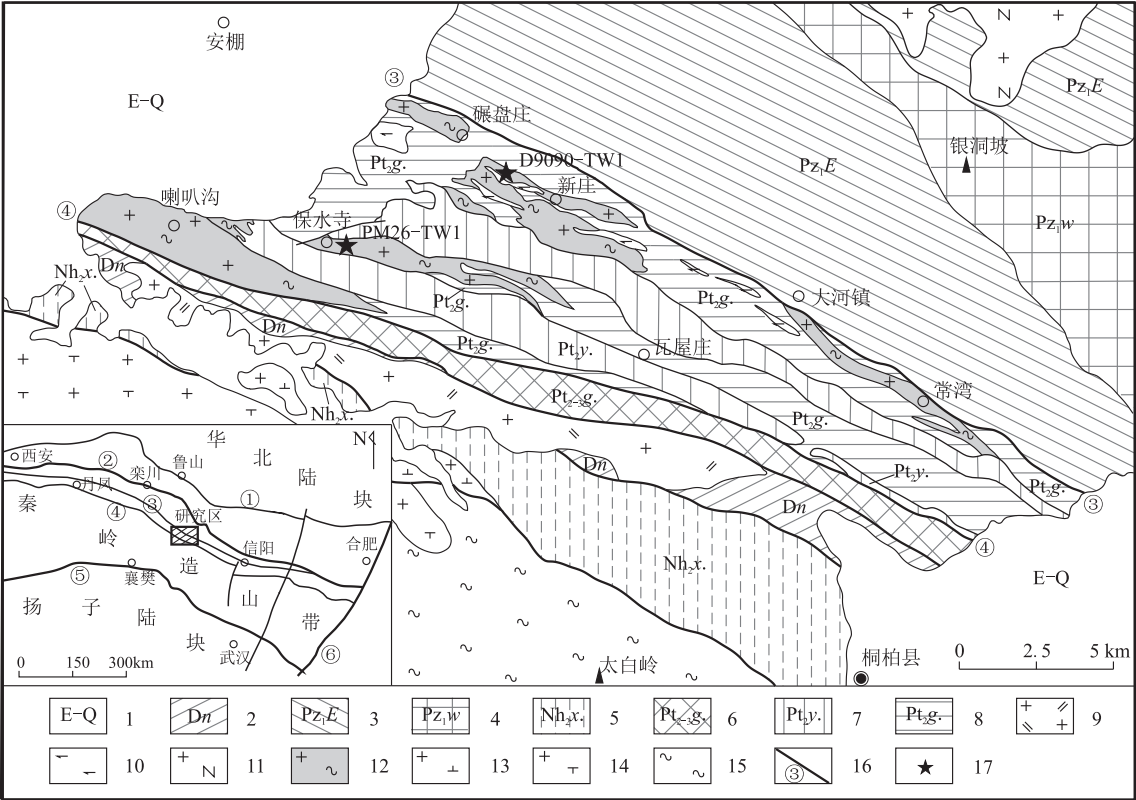
1 区域地质概况

秦岭造山带以镇坪-松扒断裂(商南-丹凤断裂)

为界划分为北秦岭、南秦岭构造带。桐柏地区北秦岭地体宽约为3~5 km,是一个被断裂围限的狭长区域,秦岭岩群为该变质地体的主体组成部分(图1)。以朱阳关-大河断裂为界,其北侧发育早古生代岛弧或弧后盆地成因的二郎坪群(陆松年等,2003;赵姣等,2012);以松扒断裂为界,其南侧产出中新元古代龟山增生杂岩。秦岭岩群为一套中深变质岩系,分为郭庄岩组和雁岭沟岩组:郭庄岩组由黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩、(石墨)矽线石片麻岩、铁镁质麻粒岩组成;雁岭沟岩组以石墨大理岩、白云质大理岩为主。这些岩石经历了高角闪岩相-麻粒岩相变质作用,并在晚期经历了强烈变形作用的改造和退变质作用。虽然对秦岭岩群的构造环境认识仍存争议,但除张国伟等(2001)认为其来源于华北板块外,一般认为它是从扬子板块分离出的一个微陆块,在早古生代转变成一个大陆岛弧(张本仁等,1996,1998;陆松年等,2003;HACKER B R et al.,2004;向华等,2014)。

2 岩体地质及岩石学特征

桐柏地区北秦岭地体中的片麻状花岗岩呈北西—南东向带状展布,单个岩体宽300~500 m,最宽达2 km,长1~5 km不等,总出露面积约为20 km²,出露面积较大的有新庄片麻状花岗岩体、保水寺片麻状花岗岩体和喇叭沟片麻状花岗岩体。



1. 新生界;2. 泥盆系南湾组;3. 下古生界二郎坪群;4. 下古生界歪头山组;5. 南华系肖家庙岩组;6. 中新元古界龟山岩组;7. 中元古界秦岭岩群雁岭沟岩组;8. 中元古界秦岭岩群郢庄岩组;9. 中生代二长花岗岩;10. 北秦岭早泥盆世基性-超基性岩;11. 北秦岭早志留世花岗岩;12. 北秦岭早古生代片麻状花岗岩;13. 南秦岭晚古生代花岗岩;14. 南秦岭新元古代花岗岩;15. 元古代桐柏片麻岩;16. 断裂及编号:①三门峡-鲁山断裂;②栾川断裂;③朱阳关-大河断裂;④镇平-松扒断裂;⑤襄樊-广济断裂;⑥郟庐断裂;17. 锆石 U-Pb 年龄样品采样位置

图 1 桐柏地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Tongbai area

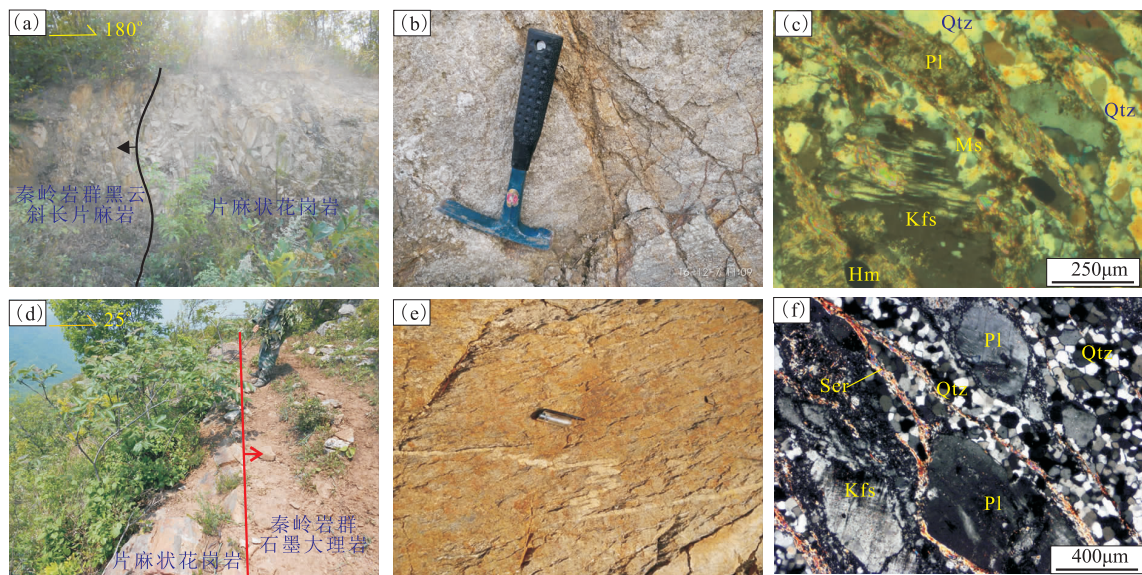
新庄片麻状花岗岩体位于北秦岭地体北部,岩体侵入秦岭岩群(图 2a),主要岩性为片麻状白云母二长花岗岩,细粒花岗结构,片麻状构造,普遍具糜棱岩化(图 2b)。矿物成分主要由钾长石、斜长石、石英和白云母组成(图 2c)。其中钾长石为 30%~35%,粒径为 0.1~1.6 mm,格子状双晶发育,有一定的磨圆度,呈眼球状、透镜体状,强烈波状消光,可见书斜现象。斜长石为 25%~30%,粒径为 0.1~1.5 mm,强烈绢云母化,有一定的磨圆度,呈眼球状、透镜体状,定向分布。石英为 30%~35%,塑性变形强烈,流动现象明显,具强烈波状消光、亚晶粒现象、粒化重结晶现象。白云母为 2%~5%,片径为 0.05~0.9 mm,围绕长石定向排列。副矿物为锆石、磷灰石,次生矿物为绢云母和赤铁矿。

保水寺片麻状花岗岩体位于北秦岭地体中南

部,岩体侵入岩群岩群,但目前大多表现为与秦岭岩群韧性剪切带接触(图 2d)。主要岩性为片麻状二长花岗岩,细粒花岗结构,片麻状构造,大多具有糜棱岩化,局部能见到变形的肠状浅色脉体(图 2e)。矿物成分主要由钾长石、斜长石、石英和少量黑云母组成(图 2f)。石英约为 25%~30%,粒度为 0.5~1 mm,碎裂粒状,多压扁拉长,无解理干净明亮,波状消光。斜长石约为 25%,粒度为 0.5~2 mm,碎裂粒状、透镜状,绢云母化及土化较强,聚片双晶模糊或无,见解理,定向排列,可能为钠长石。钾长石含量约为 35%,粒度为 0.5~2 mm,碎裂粒状、透镜状,绢云母化及土化较弱,见格子双晶及条纹,微斜长石、条纹长石为主,定向排列。黑云母含量约为 1%~3%,细鳞片状变晶,小于 0.2 mm。副矿物为榍石、锆石、磷灰石和金属矿物。次生矿物为绢云母和黏土矿物。变形、变质弱的地段可见岩石具似斑

状结构,斑晶为钾长石,粒径为 1~15 mm,含量为 1%左右。在糜棱岩化较强的地段,岩石中常见少许

石榴子石,呈他形粒状,粒径为 0.1~1.3 mm,浅紫红色,高正突起,均质性。



a. 新庄片麻状花岗岩体侵入秦岭岩群; b. 新庄片麻状花岗岩野外露头; c. 新庄片麻状花岗岩镜下照片(正交偏光); d. 保水寺片麻状花岗岩体与秦岭岩群断层接触; e. 保水寺片麻状花岗岩野外露头; f. 保水寺片麻状花岗岩镜下照片(正交偏光); Kfs. 钾长石; Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Ser. 绢云母; Ms. 白云母; Hm. 赤铁矿

图 2 北秦岭地体中片麻状花岗岩的宏观及微观特征图

Fig. 2 Macroscopic and microscopic characteristics of the gneissic granite in North Qinling terrain

3 样品采集与分析方法

锆石 U-Pb 年龄样品 D9090-TW1 采集于新庄片麻状花岗岩体内,采样位置为 N:32°32'2.1", E:113°16'33.3", 样品岩性为片麻状白云母二长花岗岩。PM26-TW1 采集于保水寺片麻状花岗岩内,采样位置 N:32°30'50.1", E:113°12'54.3", 样品岩性为花岗质初糜棱岩。另外,8 个岩石地球化学样品采集于上述年龄样位置和相关剖面中,尽量选择未-弱糜棱岩化的岩石。

锆石分选在河北区调所实验室完成。将原岩粉碎至所有粉末都能通过 80 目筛网后进行淘洗,再用电磁选、重液分选等分选出锆石单矿物。挑选裂纹少、透明度较好、干净的锆石颗粒制靶。样品靶打磨抛光后,拍摄反射光、透射光和阴极发光(CL)图像,将其作为测定时选取颗粒及其测定位置的依据。锆石 U-Pb 分析在天津地质矿产研究所进行,采用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)进行微区原位 U-Pb 同位素测定。仪器配置

和实验流程见李怀坤等(2009)。用标准锆石 GJ-1 进行 U-Pb 同位素分馏校正(JACKSON S E et al., 2004),采用 ICPMSDataCal 程序(LIU Y S et al., 2009)和 Isoplot 程序(LUDWIG K R, 2003)进行数据处理和谐和图绘制,应用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正(ANDERSON T, 2002),利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。所有测点的误差均为 1σ,因样品较年轻,故采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,其加权平均值具 95%的置信度。

常量元素、稀土元素和微量元素在国土资源部郑州矿产资源监督检测中心进行测试。常量元素采用四硼酸锂熔片-XRF 法测定,在实验室将样品进行破碎、缩分,最后过 160 目,将 1g 岩石粉末与四硼酸锂熔融按 1:10 混合,在 1300℃的坩埚中熔融制成玻璃片,最后利用 X 射线荧光(XRF)仪器测定各种氧化物含量,分析误差小于 2%。其中,二价 Fe 含量采用湿化学方法测定;微量元素和稀土元素采用等离子光谱质谱法(ICP-MS)进行测试,采用的检测仪器为 XSERIES2 电感耦合等离子体质谱仪。将所测样的岩石粉末约 0.1 g,与适量的氢氟酸(HF)和硝酸

(HNO₃)溶液混合后,置于高压钢套内,在保温箱中静置 24 h 以上保证粉末充分溶解,最后再进行质谱分析,并采用 SY-4 及 BHVO-1 作为标样参考,稀土、微量元素分析相对误差小于 5%。各元素的具体分析方法严格遵照 GB/T 14506-2010 执行。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

新庄片麻状花岗岩体 D9090-TW1 样品挑选的锆石呈柱状、长柱状,个别可见四方双锥状,颜色为无色、灰褐色,长度为 80~150 μm,宽度约为 50~100 μm,长宽比在 1~1.5。阴极发光图像(CL)显示,所有锆石振荡环带结构较为明显(图 3),没有明显的变质增生边。25 个测点数据显示(表 1),其 Tu、U 含量变化分别为 $237\times10^{-6}\sim2\,508\times10^{-6}$ 和 $550\times10^{-6}\sim1\,355\times10^{-6}$, Th/U 值为 0.27~2.13,绝大部分大于 0.4,显示为岩浆成因的锆石特

征(BELOUSOVA E A et al., 2002; RUBATTO D, 2002)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上(图 4),25 个测试数据明显分为 2 组,其中第一组(1~8、12、14、18~19、21~22、24~25)共 16 个点次的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄范围在 469~473 Ma,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均值为(471±2)Ma(MSWD=0.05);第二组(9~11、13、15~17、20、23)9 个点次的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄范围在 425~430 Ma,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均值为(429±3)Ma(MSWD=0.12)。笔者认为第一组锆石应该为捕获锆石,该组年龄与北秦岭存在的岩浆活动时间基本一致[(二郎坪群基性火山岩年龄为 463~475 Ma(赵姣等, 2012);桐柏地区侵入秦岭岩群的瓦屋庄花岗质岩石年龄为(476±3)Ma(LIU X C et al., 2011)];第二组锆石的年龄,即(429±3)Ma(MSWD=0.12)代表了新庄片麻状花岗岩的形成年龄,该年龄与 LIU X C et al. (2011)测得桐柏地区侵入秦岭岩群的含石榴子石片麻状花岗岩侵位年龄(428±3)Ma 基本一致,应该属于同期岩浆活动所形成。

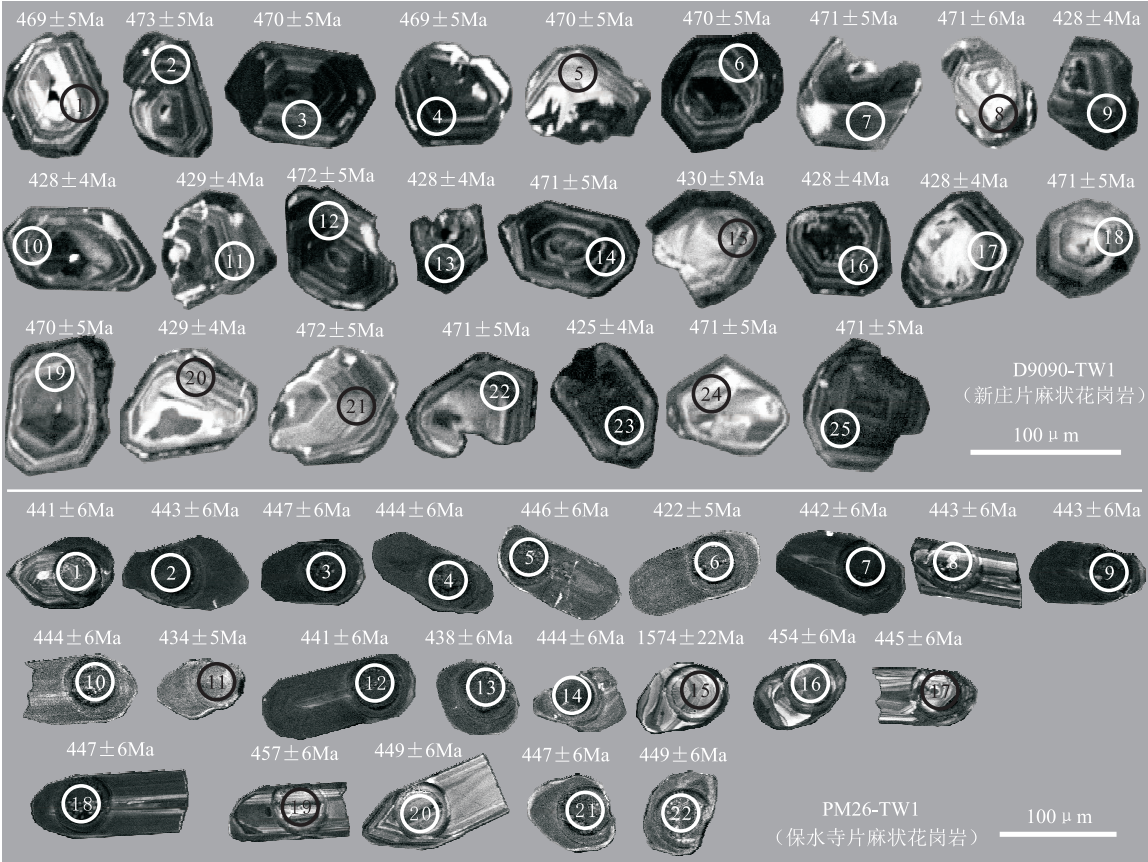


图 3 北秦岭地体中片麻状花岗岩的锆石 CL 图像及测点年龄图

Fig. 3 CL images and dating spots of zircons from the gneissic granite in North Qinling terrain

表 1 北秦岭地体中片麻状花岗岩 LA - MC - ICP - MS 锆石 U - Pb 同位素分析结果表
Tab. 1 LA - MC - ICP - MS ziron U - Pb data for the gneissic granite in North Qinling terrain

测点	Th(10 ⁻⁶)	U(10 ⁻⁶)	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
				²⁰⁶ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁶ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ
				²³⁸ U		²³⁵ U		²⁰⁶ Pb		²³⁸ U		²³⁵ U		²⁰⁶ Pb	
D9090 - TW1(新庄片麻状花岗岩)															
1	1 271	705	1.80	0.075 5	0.000 8	0.588 9	0.008 1	0.056 5	0.000 7	469	5	470	6	474	28
2	829	1 072	0.77	0.076 2	0.000 7	0.592 5	0.007 7	0.056 4	0.000 7	473	5	472	6	469	26
3	1 494	807	1.85	0.075 6	0.000 7	0.592 3	0.007 7	0.056 8	0.000 7	470	5	472	6	484	25
4	2 508	1 355	1.85	0.075 5	0.000 7	0.590 3	0.007 6	0.056 7	0.000 6	469	5	471	6	481	25
5	662	550	1.20	0.075 6	0.000 8	0.586 4	0.007 9	0.056 2	0.000 7	470	5	469	6	461	26
6	652	648	1.01	0.075 7	0.000 7	0.589 6	0.008 6	0.056 5	0.000 7	470	5	471	7	471	29
7	1 245	623	2.00	0.075 8	0.000 7	0.590 7	0.008 6	0.056 5	0.000 7	471	5	471	7	472	29
8	1 720	808	2.13	0.075 7	0.001 0	0.589 8	0.008 3	0.056 5	0.000 7	471	6	471	7	472	27
9	237	888	0.27	0.068 6	0.000 7	0.525 6	0.006 9	0.055 5	0.000 6	428	4	429	6	434	26
10	426	1 138	0.37	0.068 6	0.000 7	0.525 2	0.007 0	0.055 5	0.000 7	428	4	429	6	433	26
11	1 740	1 005	1.73	0.068 7	0.000 7	0.526 7	0.007 8	0.055 6	0.000 7	429	4	430	6	435	29
12	598	589	1.02	0.076 0	0.000 7	0.591 4	0.008 4	0.056 5	0.000 7	472	5	472	7	471	28
13	1 835	947	1.94	0.068 7	0.000 7	0.524 2	0.006 8	0.055 4	0.000 6	428	4	428	6	427	26
14	1 234	851	1.45	0.075 8	0.000 7	0.591 6	0.007 7	0.056 6	0.000 6	471	5	472	6	477	25
15	894	958	0.93	0.069 0	0.000 7	0.525 6	0.006 8	0.055 2	0.000 7	430	5	429	6	422	27
16	1 068	842	1.27	0.068 7	0.000 7	0.526 4	0.007 2	0.055 6	0.000 6	428	4	429	6	435	26
17	588	773	0.76	0.068 7	0.000 7	0.524 7	0.007 0	0.055 4	0.000 7	428	4	428	6	429	27
18	615	766	0.80	0.075 7	0.000 7	0.588 8	0.007 9	0.056 4	0.000 7	471	5	470	6	467	26
19	956	643	1.49	0.075 6	0.000 8	0.589 8	0.008 1	0.056 5	0.000 7	470	5	471	6	474	26
20	1 180	766	1.54	0.068 8	0.000 7	0.527 4	0.007 0	0.055 6	0.000 6	429	4	430	6	438	26
21	747	601	1.24	0.075 9	0.000 7	0.590 7	0.008 2	0.056 4	0.000 7	472	5	471	7	469	27
22	1 077	839	1.28	0.075 8	0.000 7	0.588 5	0.007 7	0.056 3	0.000 6	471	5	470	6	465	26
23	913	1 089	0.84	0.068 1	0.000 7	0.524 8	0.007 2	0.055 9	0.000 6	425	4	428	6	449	25
24	408	600	0.68	0.075 8	0.000 7	0.590 5	0.008 0	0.056 5	0.000 7	471	5	471	6	471	27
25	1 618	845	1.92	0.075 7	0.000 7	0.589 6	0.007 8	0.056 5	0.000 7	471	5	471	6	471	26
PM26 - TW1(保水寺片麻状花岗岩)															
1	406	2 043	0.20	0.070 9	0.000 9	0.666 3	0.008 5	0.068 2	0.000 8	441	6	518	7	874	23
2	132	4 775	0.03	0.071 1	0.000 9	0.569 4	0.007 3	0.058 1	0.000 7	443	6	458	6	533	25
3	191	4 006	0.05	0.071 8	0.000 9	0.653 9	0.008 4	0.066 0	0.000 7	447	6	511	7	807	24
4	150	3 307	0.05	0.071 3	0.000 9	0.611 3	0.007 8	0.062 2	0.000 7	444	6	484	6	680	24
5	461	4 280	0.11	0.071 6	0.000 9	0.763 0	0.010 0	0.077 2	0.000 9	446	6	576	8	1 128	23
6	31	2 768	0.01	0.067 6	0.000 9	0.513 4	0.006 5	0.055 1	0.000 6	422	5	421	5	416	25
7	74	4 305	0.02	0.071 0	0.000 9	0.540 1	0.007 1	0.055 1	0.000 6	442	6	439	6	418	26
8	740	2 234	0.33	0.071 2	0.000 9	0.779 9	0.011 3	0.079 4	0.001 0	443	6	585	9	1 183	26
9	233	4 048	0.06	0.071 1	0.000 9	0.633 6	0.008 1	0.064 6	0.000 7	443	6	498	6	761	24
10	243	4 024	0.06	0.071 2	0.000 9	0.719 3	0.009 2	0.073 2	0.000 8	444	6	550	7	1 020	23

续表 1

测点	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
					1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ
11	101	3 492	0.03	0.069 6	0.000 9	0.545 4	0.007 1	0.056 8	0.000 7	434	5	442	6	485	25
12	155	4 196	0.04	0.070 8	0.000 9	0.540 2	0.006 9	0.055 3	0.000 6	441	6	439	6	426	25
13	233	5 278	0.04	0.070 3	0.000 9	0.634 9	0.008 1	0.065 5	0.000 7	438	6	499	6	790	24
14	64	3 079	0.02	0.071 3	0.000 9	0.550 1	0.007 4	0.055 9	0.000 7	444	6	445	6	450	27
15	210	363	0.58	0.269 0	0.003 4	3.611 0	0.048 2	0.097 3	0.001 2	1 536	19	1 552	21	1 574	22
16	98	1 248	0.08	0.072 9	0.000 9	0.575 1	0.008 5	0.057 2	0.000 8	454	6	461	7	499	29
17	325	1 275	0.25	0.071 5	0.000 9	0.804 6	0.010 2	0.081 7	0.000 9	445	6	599	8	1 237	22
18	160	3 189	0.05	0.071 9	0.000 9	0.578 5	0.007 4	0.058 4	0.000 7	447	6	463	6	544	25
19	91	1 446	0.06	0.073 5	0.000 9	0.570 3	0.007 9	0.056 3	0.000 7	457	6	458	6	462	28
20	124	1 051	0.12	0.072 1	0.000 9	0.557 3	0.007 2	0.056 1	0.000 6	449	6	450	6	456	25
21	87	3 012	0.03	0.071 8	0.000 9	0.597 7	0.007 7	0.060 4	0.000 7	447	6	476	6	617	24
22	79	2 419	0.03	0.072 1	0.000 9	0.565 4	0.008 4	0.056 9	0.000 8	449	6	455	7	487	30

注:测试单位:天津地质矿产研究所实验室。

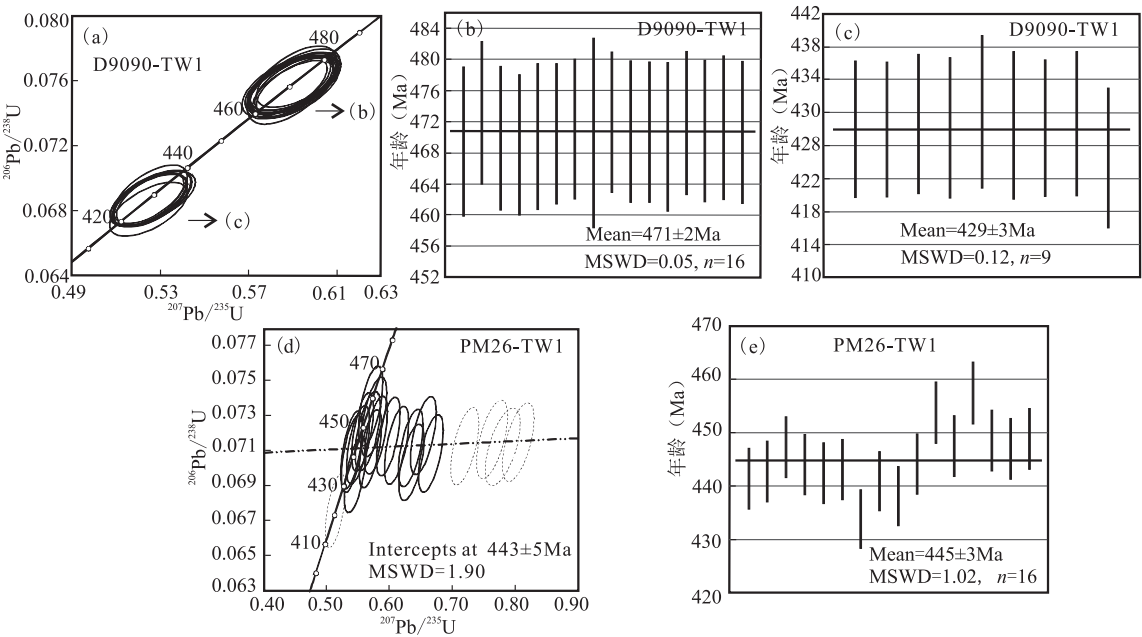


图 4 北秦岭地体中片麻状花岗岩的锆石 U - Pb 谐和图

Fig. 4 U - Pb concordia diagram of the zircon from the gneissic granite in North Qinling terrain

保水寺片麻状花岗岩体 PM26 - TW1 样品挑选的锆石呈柱状、长柱状,颜色多呈灰褐色,长度为 80~150 μm ,宽度约为 50~100 μm ,长宽比在 1~2。阴极发光(CL)图像显示,大多锆石振荡环带结构比较清晰(图 3),其中 6、15 测点锆石具明显的变质生长边,为变质锆石。6 号测点的 422 Ma 年龄应该为变质年龄,15 号测点的 1 574 Ma 年龄应该为

继承性锆石年龄。其余 20 个测点结果的显示(表 1),其 Th 含量为 $74\times 10^{-6}\sim 406\times 10^{-6}$;U 含量比较高,在 $1\,051\times 10^{-6}\sim 4\,775\times 10^{-6}$;Th/U 值大多小于 0.1,部分在 0.11~0.58。20 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测年结果在 434~457 Ma。综合锆石形态判断,应均为岩浆锆石。在谐和图上,下交点为(443 $\pm$ 5)Ma (MSWD=1.90),扣除偏离谐和线较远的 5、8、10、

17 外,其余 16 个点的加权平均值为 (445 ± 3) Ma (MSWD=1.02),该值与下交点年龄在误差范围内,代表了保水寺片麻状花岗岩的形成年龄。新庄和保水寺片麻状花岗岩体均形成于志留纪。

4.2 岩石地球化学特征

4.2.1 常量元素

新庄和保水寺片麻状花岗岩体的常量元素、稀土及微量元素分析结果见表 2。新庄片麻状花岗岩具有较高的 SiO_2 (73.12%~76.06%) 和 Al_2O_3 含量 (13.71%~15.24%), 较低的 MgO (0.25%~0.60%) 和 TFe_2O_3 含量 (0.90%~2.29%), $\text{Mg}^\#$ 在 30.11~46.92, 在 TAS 图解中落入花岗岩区域 (图 5); 铝饱和指数 A/CNK 为 1.09~1.43, 通过 CIPW 计算的 C (刚玉) 含量为 1.21%~4.69%, 属于强过铝质花岗岩 (图 6a); $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 6.24%~7.58%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.90~1.76, 相对富钾贫钠; 里特曼指数 σ 为 1.17~1.89, 均小于 2。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 判别图解中 (图 6b), 样点投于钙碱性和高钾钙碱性区域内。结合其主要岩性为片麻状白云母二长花岗岩, 故认为新庄片麻状花岗岩为强过铝质 S 型花岗岩, 属于高钾钙碱性系列。

保水寺片麻状花岗岩也具有较高的 SiO_2 (70.82%~74.00%) 和 Al_2O_3 含量 (14.18%~15.30%), 较低的 MgO (0.27%~0.50%) 和 TFe_2O_3 含量 (0.53%~1.15%)。在 TAS 图解中落入花岗岩区域 (图 5)。 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.13%~

8.97%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.96~1.56, 相对富钾贫钠。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 判别图解中 (图 6b), 样点投于高钾钙碱性和钾玄岩区域内。相对于新庄片麻状花岗岩, 保水寺片麻状花岗岩具更低的 $\text{Mg}^\#$ (42.66~56.17)、更高的里特曼指数 σ (2.24~2.86), 相对较低的铝饱和指数 A/CNK (1.03~1.19), 为弱过铝质 I 型花岗岩, 属于高钾钙碱性系列 (图 6a)。部分样品 $A/\text{CNK} > 1.1$ 可能与糜棱岩化后产生的少许石榴子石有关。

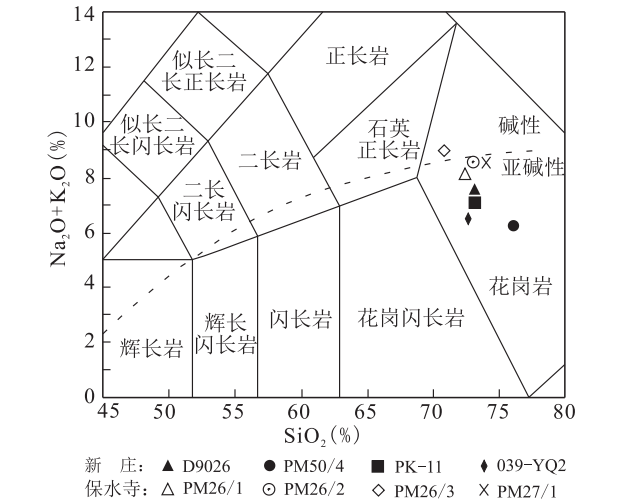
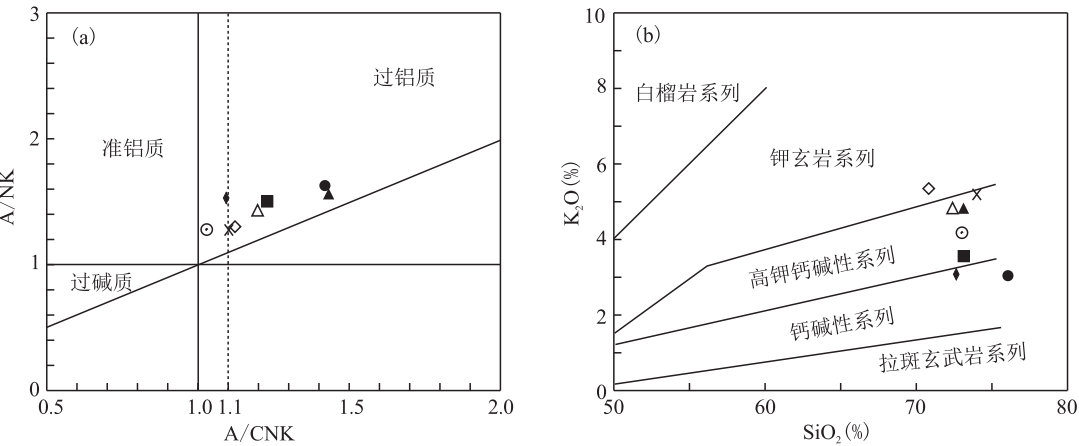


图 5 北秦岭地体中片麻状花岗岩的 TAS 图解 (底图据 MAITRE R W L, 1989)

Fig. 5 TAS classification diagram for the gneissic granite in North Qinling terrain



(图例同图 5)

图 6 (a)北秦岭地体中片麻状花岗岩的 $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ 图解 (底图据 MANIAR P et al. ,1989) 和 (b) $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解 (底图据 PECCERILLO A et al. ,1976)

Fig. 6 (a) $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ diagram and (b) $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ diagram for the gneissic granite in North Qinling terrain

表 2 北秦岭地体中片麻状花岗岩的常量元素(%)、稀土元素(10^{-6})及微量元素(10^{-6})分析结果表

Tab. 2 Major(%), rare earth(10^{-6}) and trace (10^{-6}) element concentrations of the gneissic granite in North Qinling terrain

样号	新庄片麻状花岗岩				保水寺片麻状花岗岩			
	D9026	PM50/4	PK-11 *	039-YQ2 *	PM26/1	PM26/2	PM26/3	PM27/1
SiO ₂	73.12	76.06	73.14	72.64	72.40	73.02	70.82	74.00
TiO ₂	0.15	0.15	0.20	0.15	0.20	0.15	0.24	0.13
Al ₂ O ₃	15.24	13.94	14.49	13.71	15.26	15.00	15.30	14.18
Fe ₂ O ₃	0.71	0.79	0.99	0.89	0.86	0.26	0.67	0.10
FeO	0.40	0.10	0.32	1.26	0.26	0.39	0.26	0.39
MnO	0.03	0.05	0.02	0.10	0.00	0.02	0.01	0.01
MgO	0.25	0.33	0.60	0.50	0.43	0.27	0.50	0.34
CaO	0.49	0.69	1.18	1.97	1.15	1.57	1.03	0.96
Na ₂ O	2.75	3.20	3.52	3.42	3.30	4.38	3.62	3.34
K ₂ O	4.83	3.04	3.56	3.08	4.83	4.18	5.35	5.20
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.08	0.05
H ₂ O ⁺	1.65	1.02	—	—	1.22	0.19	1.09	0.78
LOSS	1.58	1.11	1.31	1.65	1.32	0.21	1.45	1.09
Σ	99.65	99.38	99.36	99.42	99.95	99.46	98.97	99.46
A/CNK	1.43	1.42	1.23	1.09	1.19	1.03	1.12	1.10
A/NK	1.56	1.63	1.50	1.53	1.43	1.28	1.30	1.28
σ	1.89	1.17	1.66	1.42	2.24	2.43	2.86	2.34
Mg [#]	30.11	42.28	46.92	30.20	42.66	43.47	51.14	56.17
R1	2 787	3 246	2 806	2 906	2 519	2 325	2 197	2 542
R2	371	370	449	516	449	479	445	403
Rb	199.00	91.60	58.00		147.30	138.30	151.80	87.35
Ba	986.00	1 533.00	1 170.00		924.10	644.20	1 261.50	906.80
Th	16.90	18.90	21.50		25.93	10.33	31.73	32.92
U	3.28	9.16	1.58		4.21	1.79	3.26	1.40
Ta	1.21	0.49	0.80		0.34	0.20	0.57	0.15
Nb	8.99	4.39	5.90		7.70	7.65	11.55	4.38
Sr	237.00	95.10	150.00		322.40	368.00	357.70	306.90
Zr	102.00	64.70	98.00		125.90	70.90	158.40	157.80
Hf	3.27	0.99	2.80		3.48	2.04	4.12	4.31
Ga	20.20	21.00	—		21.46	22.58	22.03	13.13
Cr	3.64	13.70	2.00		13.39	8.39	33.34	7.06
La	25.90	37.50	36.00		40.42	15.37	60.52	47.12
Ce	42.10	64.50	62.00		72.50	29.24	88.34	75.76
Pr	4.72	6.64	8.10		7.52	3.22	12.08	8.24
Nd	15.40	21.90	31.00		24.47	11.24	40.25	25.81
Sm	2.47	3.39	5.00		3.84	1.99	6.49	3.21
Eu	0.47	0.79	0.71		0.71	0.47	1.42	0.52

续表 2

样号	新庄片麻状花岗岩				保水寺片麻状花岗岩			
	D9026	PM50/4	PK-11 *	039-YQ2 *	PM26/1	PM26/2	PM26/3	PM27/1
Gd	2.05	3.79	3.70		3.38	1.58	5.72	3.25
Tb	0.27	0.50	0.55		0.31	0.15	0.62	0.25
Dy	1.17	2.84	3.10		0.89	0.44	2.38	0.62
Ho	0.21	0.63	0.40		0.12	0.06	0.40	0.09
Er	0.57	2.01	1.20		0.38	0.21	1.20	0.34
Tm	0.09	0.38	0.17		0.04	0.02	0.16	0.03
Yb	0.63	2.78	1.10		0.23	0.13	0.99	0.20
Lu	0.10	0.48	0.17		0.04	0.02	0.15	0.03
Y	5.70	17.70	6.33		3.10	1.79	10.63	2.42
ΣREE	101.90	165.80	159.50		157.90	65.92	231.30	167.90
LREE	91.06	134.70	142.80		149.50	61.52	209.10	160.70
HREE	5.09	13.41	10.39		5.38	2.61	11.61	4.81
LREE/HREE	17.89	10.05	13.74		27.80	23.57	18.01	33.42
(La/Yb) _N	29.49	9.68	23.48		127.70	88.20	43.98	169.00
(La/Sm) _N	6.77	7.14	4.65		6.79	5.00	6.02	9.48
(Gd/Yb) _N	2.69	1.13	2.78		12.27	10.46	4.78	13.42
δEu	0.62	0.67	0.48		0.59	0.78	0.70	0.49
δCe	0.87	0.92	0.85		0.95	0.97	0.76	0.87

注:测试单位:国土资源部郑州矿产资源监督检测中心。* 数据来源于桐柏县幅 1:5 万区调报告(张宗恒等,1994)。

4.2.2 稀土、微量元素

新庄片麻状花岗岩的稀土总量(含 Y)较低, $\Sigma\text{REE}=101.85\times10^{-6}\sim165.83\times10^{-6}$, $\text{LREE}=91.06\times10^{-6}\sim142.81\times10^{-6}$, $\text{HREE}=5.09\times10^{-6}\sim10.39\times10^{-6}$ 。LREE 相对富集,HREE 相对亏损, $\text{LREE}/\text{HREE}=10.05\sim17.89$ 。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=9.68\sim29.49$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=4.65\sim7.14$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.13\sim2.78$,表明轻稀土分馏较强,重稀土分馏程度较弱。Eu 负异常中等, $\delta\text{Eu}=0.48\sim0.67$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中(图 7),大体表现为向右倾斜较为平坦的曲线。岩石富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Th、U、K,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta 及 P、Ti。在微量元素蛛网图(图 8)中,各样品具有较为一致的配分模式,右侧 Y、Yb、Lu 三元素较平坦,具典型的上部大陆地壳的微量元素分布特征(赵如意等,2014)。稀土元素及微量元素的特点与北秦岭的加里东期安吉平、土岗 S 型花岗岩相似(刘丙祥,2014)。

保水寺片麻状花岗岩的稀土总量(含 Y)也较

低, $\Sigma\text{REE}=65.92\times10^{-6}\sim231.34\times10^{-6}$, $\text{LREE}=61.52\times10^{-6}\sim209.10\times10^{-6}$, $\text{HREE}=2.61\times10^{-6}\sim11.61\times10^{-6}$ 。LREE 强烈富集,HREE 强烈

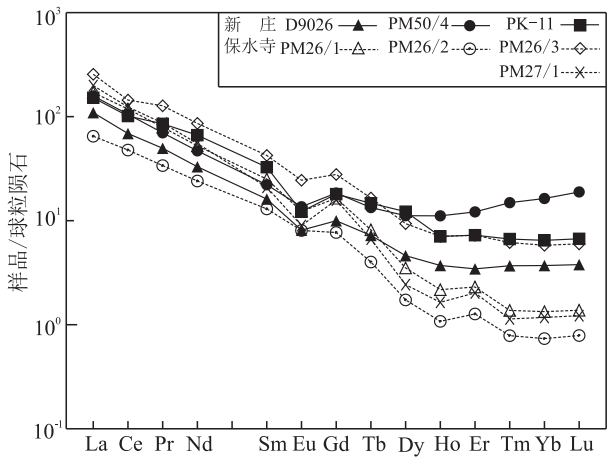


图 7 北秦岭地体中片麻状花岗岩的球粒陨石标准化 REE 配分模式图(标准化值据 SUN S S et al.,1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern of the gneissic granite in North Qinling terrain

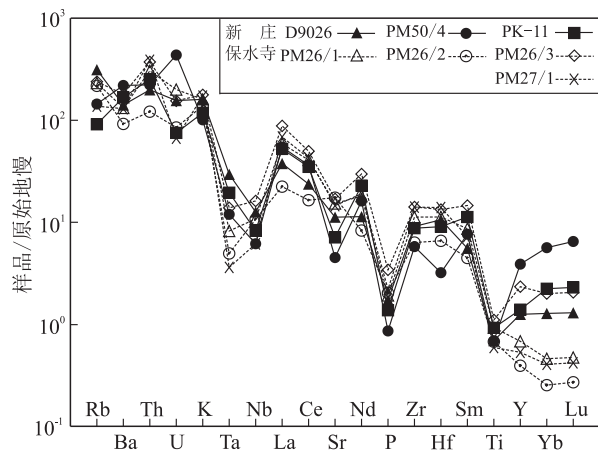


图8 北秦岭地体中片麻状花岗岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 SUN S S et al., 1989)

Fig. 8 PM-normalised incompatible element spider pattern of the gneissic granite in North Qinling terrain

亏损, $LREE/HREE = 18.01 \sim 33.42$ 。 $(La/Yb)_N = 43.98 \sim 127.72$, $(La/Sm)_N = 5.00 \sim 9.48$, $(Gd/Yb)_N = 4.78 \sim 13.42$, 表明轻重稀土发生了强烈的分馏较强。Eu 负异常中等, $\delta Eu = 0.49 \sim 0.78$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中(图7), 大体表现为向右陡倾的曲线, 同时表现出了高分异 I 型花岗岩的四组分特点, 个别样品则具 S 型花岗岩特征。

微量元素方面, 富集大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、Th、U、K, 亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta 及 P、Ti 的特点(图8)与新庄片麻状花岗岩大体相同, 但 Y、Yb、Lu 重稀土明显亏损的特点又不同于后者, 具岛弧花岗岩的特征更为明显。Sr 含量为 $322.40 \times 10^{-6} \sim 368.00 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $1.79 \times 10^{-6} \sim 10.63 \times 10^{-6}$, $Sr/Y = 33.65 \sim 206.05$, 表现出高 Sr 低 Y 的特点, 兼具有加厚下地壳成因的埃达克岩的特征(张旗等, 2006), 与北秦岭东部的枣园、黄柏盆岩体相似(刘丙祥, 2014)。

5 讨论

5.1 对秦岭岩群变质事件年龄的限定

桐柏地区秦岭岩群在加里东期先后发生了麻粒岩相变质作用和角闪岩相退变质作用。前人通过不同的测试方法测定秦岭岩群中的镁铁质(或长英质)麻粒岩形成时代来判断变质作用时限, 或通过侵入该岩群的未发生麻粒岩相变质的侵入岩体或岩脉来

限定变质作用发生的时间下限。多数学者认为秦岭岩群发生麻粒岩相变质作用在 445~424 Ma 左右, 个别学者认为麻粒岩相峰期变质作用在 ~498 Ma 左右, 而关于角闪岩相退变质作用则有 ~472 Ma、~432 Ma 两种认识(表3)。

20 世纪 90 年代研究主要采用单颗粒锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 蒸发法, 但由于缺少锆石内部结构的制约, 其数据可靠性有待增强。向华等(2009)对镁铁质麻粒岩变质锆石进行研究, 认为麻粒岩的峰期变质年龄在 445~430 Ma, 并进一步划分了麻粒岩相初始变质(443 Ma)—峰期变质(432 Ma)—角闪岩相变质(419 Ma)—绿片岩相变质(400 Ma) 4 个变质阶段(XIANG H et al., 2012)。WANG H et al. (2011)则认为在 424~438 Ma 同时发生了麻粒岩相变质和岩浆侵入作用。LIU X C et al. (2011)通过对含石榴子石镁铁质麻粒岩和副片麻岩的变质锆石 SHRIMP 定年研究, 认为麻粒岩相变质作用可能在 440~430 Ma, 约 420 Ma 的峰值为峰期变质之后的冷却年龄。

由于秦岭岩群遭受了多期构造-热事件影响, 其锆石很可能产生多次变质, 锆石同位素体系可能发生重启改造, 利用变质锆石的年龄来确定不同变质相的时间很可能产生误判。本次研究采用不同地质体的先后关系来研究相关变质时限。区内麻粒岩仅见于秦岭岩群的黑云斜长片麻岩(副变质)中, 在本次研究的片麻状花岗岩中并未见到麻粒岩, 且这些花岗岩的矿物组合也说明其均未经麻粒岩相变质作用, 形成于秦岭岩群发生麻粒岩相变质作用之后; 与区域构造一致的片麻理的存在及普遍具糜棱岩化则进一步说明岩石经历了角闪岩相变质及强烈剪切变形。本次测得保水寺岩体和新庄片麻状花岗岩体的侵入年龄分别为 445 Ma、429 Ma 左右, 说明麻粒岩相变质作用应早于 445 Ma。另外, 侵入秦岭岩群形成于 430 Ma 左右的碱性岩脉也未发生麻粒岩相变质(曲玮等, 2013), 瓦屋庄附近紧邻麻粒岩的花岗闪长质片麻岩形成于 476 Ma, 常湾附近侵入秦岭岩群的花岗质糜棱岩形成于 488 Ma, 其岩石也仅仅经历了角闪岩相变质作用(LIU X C et al. 2011)。也就说明, 桐柏地区秦岭岩群麻粒岩相变质作用应该发生于 488 Ma 之前。任留东等(2016)获得的长英质麻粒岩中较集中的锆石年龄(498.0 ± 4.8) Ma, 可能代表了麻粒岩相峰期变质年龄。据此, 笔者认为

桐柏地区秦岭岩群麻粒岩相变质时限为 498~488 Ma,角闪岩相退变质时限在 488~428 Ma,区域糜棱岩化作用很明显发生在 428 Ma 之后。当然,这些时间限定主要是通过有关岩体年龄及与围岩的接触关系来讨论的,更确切的时限应根据变质矿物组合来直接限定,需作进一步研究。

表 3 桐柏地区秦岭岩群变质作用研究情况表
Tab. 3 Metamorphism research of Qinling group-complex in Tongbai area

研究测试对象	测试方法	结果和结论	资料来源
镁铁质麻粒岩、侵入秦岭岩群的片麻状花岗闪长岩	单颗粒锆石 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb蒸发法	(470±14) Ma、(435±14) Ma,麻粒岩相变质年龄 470~435 Ma	KRÖNER A et al. ,1993
长英质麻粒岩	单颗粒锆石 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb蒸发法	(479±6) Ma,麻粒岩相变质年龄	ZHANG H F et al. ,1998
镁铁质麻粒岩	角闪石 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 法	(402±2) Ma,冷却年龄	ZHAI X M et al. ,1998
镁铁质麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	(418.7±3.2) Ma,冷却年龄;(404.7±6.5) Ma,退变质年龄;推测麻粒岩相峰期变质年龄 445~430 Ma	向华等,2009
镁铁质麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	(443.3±3.1) Ma,麻粒岩相初始变质(M1);(431.8±4.3) Ma,峰期变质(M2);419 Ma,角闪岩相变质(M3);400 Ma,绿片岩相变质(M4)	XIANG H et al. ,2012
镁铁质麻粒岩、副片麻岩、侵入秦岭岩群的辉长岩和花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	(424±4) Ma,麻粒岩相峰期变质年龄;(438±4) Ma,前进变质年龄;(432±4) Ma 和(424±4) Ma,侵位年龄	WANG H et al. ,2011
含石榴子石镁铁质麻粒岩、长英质麻粒岩、侵入秦岭岩群的含石榴子石片麻状花岗岩	SHRIMP	约 440~430 Ma 为麻粒岩相变质年龄,约 420 Ma 为冷却年龄	LIU X C et al. ,2011
侵入秦岭岩群的碱性岩脉	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	429.9~430.3 Ma,麻粒岩相变质后的岩浆侵入年龄	曲玮等,2013
含榴长英质麻粒岩、侵入秦岭岩群的伟晶岩脉	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	(498.0±4.8) Ma,麻粒岩相峰期变质年龄;(472.4±3.5) Ma,角闪岩相退变质年龄;458 Ma,晚期的热事件扰动年龄	任留东等,2016

5.2 构造意义

区域资料显示,秦岭造山带在早古生代时期发生了大洋俯冲、岛弧增生及弧陆碰撞事件(张国伟等,2001;刘晓春等,2015)。古特提斯洋(商丹洋)向北俯冲及其后的碰撞过程中,在北秦岭产生了数量众多的花岗岩,记录了相关事件过程。王涛等(2009)通过研究,对于北秦岭早古生代花岗岩的演化划分为 3 个阶段(分别为 505~470 Ma、450~422 Ma、415~400 Ma):第一阶段以 I 型花岗岩为主,形成于板块俯冲背景;第二阶段发育 I 型花岗岩(如板山坪、小王涧),显示出明显的火山弧花岗岩特征,部分花岗岩具有高 Sr 低 Y 的特点(灰池子岩体),形成于块体碰撞挤出略后的抬升环境;第三阶段以 I 型花岗岩为主,略偏中性,形成于碰撞晚期阶段。刘

丙祥(2014)将豫西地区北秦岭加里东期侵入岩划分了跟上述差不多的 3 个阶段(~487 Ma、~450 Ma、~417 Ma),分别对应区内高压-超高压峰期变质作用和两次地体抬升事件,并将第二阶段细分为 I 型(~460 Ma,加厚下地壳部分熔融)、I-S 型(~450 Ma,兼具俯冲和碰撞特点)、I 型(~440 Ma,消减源区部分熔融)和 S 型(~430 Ma,挤压碰撞)。

在桐柏地区北秦岭也存在与上述三阶段差不多的早古生代岩浆活动:瓦屋庄—新庄花岗闪长质—花岗质片麻岩 476~488 Ma(LIU X C et al. , 2011);本次花岗质片麻岩 445~428 Ma、桃园岩体 430 Ma 左右(江思宏等,2009)、柳树庄基性岩 405~414 Ma,说明桐柏地区加里东期岩浆活动与区域上东秦岭地区岩浆活动总体保持一致,但桐柏地区

并不存在 500 Ma 作用的高压/超高压变质事件(刘晓春等,2015),说明在加里东期桐柏地区北秦岭与豫西北秦岭的同期侵入岩的形成过程略有差异。本次研究的保水寺和新庄片麻状花岗岩体均处于前人总结的第二阶段岩浆活动。

形成于 445 Ma 的保水寺片麻状花岗岩体主要为弱过铝的 I 型花岗岩, Nb、Ta、P 和 Ti 的亏损, 总体显示其具火山弧花岗岩的特征, 高 Sr 低 Y 的特点显示其兼具有加厚下地壳成因的埃达克岩的特征, 说明其形成于岛弧环境, 与古特提斯洋(商丹洋)的向北俯冲有关。形成于 428 Ma 左右的新庄片麻状花岗岩体为高钾钙碱性的强过铝质 S 型花岗岩, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta 及 P、Ti, 重稀土相对平坦且分异不明显, 显示挤压碰撞成因的 S 型花岗岩特征(刘丙祥, 2014), 说明新庄岩体形成于碰撞环境, 与该时期发生的弧-陆碰撞事件有关, 即在古生代末秦岭大陆弧和二郎坪洋内弧与华北陆块南缘发生的碰撞事件。

根据现有资料, 笔者总结保水寺岩体和新庄岩体的形成过程大致如下: 古特提斯洋(商丹洋)向北俯冲引发大规模大陆-弧岩浆作用, 使北秦岭微陆块转变成大陆弧, 在华北陆块南缘与秦岭微陆块(弧)之间形成二郎坪弧后盆地或洋内弧(冯胜斌等, 2007; 王浩, 2014)。在俯冲的过程中, 秦岭微陆块(弧)地壳不断加厚, 从而造成了约 445 Ma 左右具岛弧特征的保水寺岩体侵位。随着俯冲作用的持续进行, 约 440~420 Ma(刘晓春等, 2015), 秦岭大陆弧和二郎坪洋内弧与华北陆块南缘发生碰撞, 北部大洋关闭, 引发新一轮的岩浆作用。约 428 Ma 具 S 型花岗岩特征的新庄岩体的形成, 则主要与这次弧-陆碰撞事件有关系。如此, 在增生的华北陆块南缘形成一个新的安第斯型活动大陆边缘(曲玮等, 2013; LIU X C et al., 2013)。

6 结论

(1) 桐柏地区北秦岭地体中新庄片麻状花岗岩体的主要岩性为片麻状白云母二长花岗岩, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值为 $(429 \pm 3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.12, n = 9$) 代表其的形成年龄; 保水寺片麻状花岗岩体的主要岩性为片麻状二长花岗岩, LA-MC-ICP-MS 锆石

U-Pb 测年的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值为 $(445 \pm 3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.02, n = 16$) 代表其形成年龄。两者均形成于志留纪。

(2) 新庄和保水寺片麻状花岗岩均具有高硅、高铝、低镁、低铁的特点; 稀土元素总量较低, LREE 相对富集, HREE 相对亏损, Eu 负异常中等; 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、U, 亏损高场强元素 Nb、Ta 及 P、Ti。新庄片麻状花岗岩为强过铝质 S 型花岗岩; 保水寺片麻状花岗岩为弱过铝质 I 型花岗岩, 重稀土元素 Y、Yb、Lu 明显亏损。

(3) 根据有关岩体的形成年龄及与围岩的接触关系, 限定了桐柏地区秦岭岩群麻粒岩相变质时限为 498~488 Ma, 角闪岩相退变质时限在 488~428 Ma, 区域糜棱岩化作用发生在 428 Ma 之后。

(4) 保水寺片麻状花岗岩体形成于岛弧环境, 其形成与古特提斯洋(商丹洋)的向北俯冲有关; 新庄片麻状花岗岩体形成于碰撞环境, 其形成与桐柏地区早古生代末发生的弧陆碰撞事件有关。

致谢: 本文在撰写的过程中得到中国地质科学院刘晓春研究员的指导, 锆石测试得到天津地质矿产研究所实验室王家松的帮助, 修改过程中得到审稿专家的指点, 在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- 冯胜斌, 周洪瑞, 燕长海, 等. 东秦岭二郎坪群硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 675-682.
- FENG Shengbin, ZHOU Hongrui, YAN Changhai, et al. The geochemical characteristics of cherts of Erlangping group in east Qingling and their sedimentary environment importance [J]. Geoscience, 2007, 21(4): 675-682.
- 江思宏, 聂凤军, 方东会, 等. 河南桐柏围山城地区侵入岩年代学与地球化学特征[J]. 地质学报, 2009, 83(7): 1011-1029.
- JIANG Sihong, NIE Fengjun, FANG Huidong, et al. Geochronology and geochemical features of the main intrusive rocks in the Weishancheng area, Tongbai County, Henan[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(7): 1011-1029.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接受器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 2009, 29(增刊): 600-601.
- LI Huaikun, GENG Jianzhen, HAO Shuang, et al. Study

- on zircon U-Pb dating by LA-ICP MS[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(sl): 600-601.
- 刘丙祥. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- LIU Bingxiang. Magmatism and crustal evolution in the eastern North Qinling Terrain[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- 刘晓春, 李三忠, 江博明. 桐柏-红安造山带的构造演化: 从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(8): 1088-1108.
- LIU Xiaochun, LI Sanzhong, JAHN B M. Tectonic evolution of the Tongbai-Hong'an orogen in central China: From oceanic subduction/accretion to continent-continent collision[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(9): 1477-1496.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 秦岭中一新元古代地质演化及对 Rodina 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- LU Songnian, LI Huaikun, CHEN Zhihong, et al. Meso-neoproterozoic geological evolution in the Qinling Orogeny and its response to the supercontinental events of Rodinia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- 曲玮, 刘晓春, 胡娟, 等. 桐柏地区秦岭岩群中碱性脉岩的锆石 U-Pb 年龄: 对麻粒岩相变质时代的约束[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3080-3086.
- QU Wei, LIU Xiaochun, HU Juan, et al. Zircon U-Pb ages of alkaline dykes from the Qinling Group in the Tongbai area, central China: Constraints on the timing of granulite-facies metamorphism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3080-3086.
- 任留东, 李崇, 王彦斌, 等. 桐柏秦岭岩群的两类变质作用[J]. *岩石学报*, 2016, 32(6): 1596-1610.
- REN Liudong, LI Cong, WANG Yanbin, et al. Two types of metamorphism in the Qinling Complex, Tongbai area, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(6): 1596-1610.
- 王浩. 东秦岭-桐柏造山带新元古代-早古生代不同阶段演化的变质和岩浆作用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- WANG Hao. Neoproterozoic-Early Paleozoic Metamorphism and Magmatism during the Multistage Evolution of the Eastern Qinling-Tongbai Orogenic Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2009, 39(7): 949-971.
- WANG Tao, WANG Xiaoxia, TIAN Wei, et al. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 39(7): 949-971.
- 吴元保, 郑永飞. 华北陆块古生代南向增生与秦岭-桐柏-红安造山带构造演化[J]. *科学通报*, 2013, 58(23): 2246-2250.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Southward accretion of the North China Block and the tectonic evolution of the Qinling-Tongbai-Hong'an orogenic belt[J]. *China Sci Bull*, 2013, 58(23): 2246-2250.
- 向华, 张利, 钟增球, 等. 北桐柏地区镁铁质麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及变质作用[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 348-358.
- XIANG Hua, ZHANG Li, ZHONG Zengqiu, et al. Zircon U-Pb geochronology and metamorphism of mafic granulite from north Tongbai, central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 348-358.
- 向华, 钟增球, 李晔, 等. 北秦岭造山带早古生代多期变质与深熔作用: 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2421-2434.
- XIANG Hua, ZHONG Zengqiu, LI Ye, et al. Early Paleozoic polymetamorphism and anatexis in the North Qinling orogen: Evidence from U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2421-2434.
- 张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 等. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及其大地构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(3): 201-208.
- ZHANG Benren, ZHANG Hongfei, ZHAO Zhidan, et al. Geochemical subdivision and evolution of the Lithosphere in East Qinling and adjacent regions: Implications for tectonics[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(3): 201-208.
- 张本仁, 韩吟文, 许继锋, 等. 北秦岭新元古代前属于扬子板块的地球化学证据[J]. *高校地质学报*, 1998, 4(4): 369-382.
- ZHANG Benren, HAN Yinwen, XU Jifeng et al. Geochemical evidence for north Qinling being a part of Yangtze plate prior to the Neoproterozoic[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1998, 4(4): 369-382.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LI Chengdong, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- 张宗恒, 曾宪友, 陈曾武, 等. 桐柏县幅(1:49-131-D)1:5万区域地质调查报告[R]. 郑州: 河南省地质矿产厅, 1994.

- 赵姣, 陈丹玲, 谭清海, 等. 北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 118-125.
- ZHANG Jiao, CHEN Danling, TAN Qinghai, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of basic volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, eastern Qinling Mountains and its geological implications[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4): 118-125.
- 赵如意, 李卫红, 姜常义, 等. 东秦岭丹凤地区黄龙庙二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2014, 60(5): 1123-1132.
- ZHAO Ruyi, LI Weihong, JIANG Changyi, et al. The LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating, petro-geochemical characteristics of Huanglongmiao monzogranite in Danfeng Area in Eastern Qinling Mountains and Their Geological Significance[J]. Geological Review, 2014, 60(5): 1123-1132.
- ANDERSON T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1-2): 59-79.
- BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- DONG Y P, ZHANG G W, Neubauer F, et al. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. Journal Asian Earth Sciences, 2011, 41(3): 213-237.
- HACKER B R, RATSCHBACHER L, LIOU J G. Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen[J]. Geological Society London Special Publications, 2004, 226(1): 157-175.
- JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. Chemical Geology, 2004, 211(1): 47-69.
- KRÖNER A, ZHANG G W, SUN Y. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia[J]. Tectonics, 1993, 12(1): 245-255.
- LIU X C, JAHN B M, HU J, et al. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbai orogen, central China: implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2011, 29(9): 979-1002.
- LIU X C, JAHN B M, LI S Z, et al. U-Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China[J]. Tectonophysics, 2013, 599(4): 67-88.
- LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2009, 51(1-2): 537-571.
- LUDWIG K R. Isoplot/Ex version 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- MAITRE R W L. A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks[M]. Blackwell Scientific Publications, 1989.
- MANIAR P, PICCOLI P. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- RUBATTO D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184(1): 123-138.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- WANG H, WU Y B, GAO S, et al. Silurian granulite facies metamorphism, and coeval magmatism and crustal growth in the Tongbai orogen, central China [J]. Lithos, 2011, 125(1-2): 249-271.
- XIANG H, ZHANG L, ZHONG Z Q, et al. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise P-T-t path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, central China [J]. Gondwana Research, 2012, 21(2-3): 559-576.
- ZHAI X M, DAY H W, Hacker B R, et al. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China[J]. Geology, 1998, 26(4): 371-374.
- ZHANG H F, GAO S, ZHANG L, et al. Granulite genesis and tectonic evolution in Tongbai area: Single zircon evaporation ages and Nd isotopic geochemistry[J]. Journal of China University of Geosciences, 1998, 9(3): 31-36.