

文章编号: 0258-7106 (2014) 01-0037-16

北秦岭太白花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义*

吕星球^{1,2}, 王晓霞^{2* * *}, 柯昌辉², 李金宝³, 杨 阳¹, 孟旭阳¹,
聂政融^{1,2}, 章培春^{1,4}

(1 中国地质大学, 北京 100083; 2 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, 北京 100037; 3 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要 北秦岭太白岩体位于商丹构造带北侧。野外侵入关系和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年显示, 该岩体由早志留世的五里峡岩体、晚三叠世的红崖河岩体和早白垩世的下板寺岩体组成。五里峡岩体的主要岩石类型为片麻状黑云母二长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 (431 ± 2) Ma; 红崖河岩体的主要岩石类型为黑云母二长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 (214 ± 2) Ma; 下板寺岩体为粗粒黑云母花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 (130 ± 1) Ma, 表明太白岩体是由 3 个不同时代岩体组成的侵入复合杂岩体。结合区域构造背景和前人的研究成果, 得出早志留世五里峡岩体可能与秦岭微板块沿商丹缝合带俯冲碰撞有关, 晚三叠世红崖河岩体与秦岭早中生代主期岩浆作用一致, 是华北地块与扬子地块碰撞的产物, 燕山期的下板寺花岗岩属于板内岩浆作用。研究显示, 今后应注意大岩体的解体, 其可能隐含着不可忽视的构造-岩浆作用信息。

关键词 地球化学 锆石 U-Pb 测年 花岗岩 商丹构造带 北秦岭

中图分类号: P697

文献标志码: A

LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Taibai pluton in North Qinling Mountains and its geological significance

LÜ XingQiu^{1,2}, WANG XiaoXia², KE ChangHui², LI JinBao³, YANG Yang¹, MENG XuYang¹,
NIE ZhengRong^{1,2} and ZHANG PeiChun^{1,4}

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4 Geological Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract

The Taibai pluton is located on the northern side of Shangdan suture in the North Qinling Mountains. Field relationship and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating suggest that this rock body consists of the early Silurian Wulixia pluton, the late Triassic Honyahe pluton and the early Cretaceous Xiabansi pluton. The main rock type of the Wulixia pluton is gneissic biotite monzogranite with an age of (431 ± 2) Ma, the Honyahe pluton is biotite monzogranite with an age of (214 ± 2) Ma and the Xiabansi pluton is coarse-grained biotite granite with an age of

* 本文得到地质调查项目(编号: 1212010012012、1212010811033 和 12120113090200)的资助

第一作者简介 吕星球, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 地质工程专业。Email: xingqiulv@163.com

** 通讯作者 王晓霞, 女, 1960 年生, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学和矿床学专业。Email: xiaoxiawang@hotmail.com

收稿日期 2013-12-20; 改回日期 2014-01-01。秦思婷编辑。

(130 ± 1) Ma. These ages suggest that Taibai pluton has experienced at least three tectonic-magmatic events. According to regional tectonic setting and previous researches, the Wulixia pluton was related to the subduction and collision of the micro plate of Qinling Mountains along Shandan suture, the Honyahe pluton was formed by the collision of the North China Block with the Yangtze Block, and the Xiabansi pluton belonged to intraplate magmatism. It is thus thought that big batholith might contain more information of tectono-magmatic activities.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb dating, granite, Shangdan suture, North Qinling

秦岭作为分隔中国南北大陆的著名大陆造山带,是华北板块和扬子板块的结合带,经历了长期的演化历史(Meng et al., 2000; 张国伟等, 2001; 2003)。该造山带岩浆作用广泛发育,至少发育新元古代、古生代和中生代构造岩浆事件。前人对这些岩浆事件进行了大量的研究,取得了丰硕成果(裴先治等, 1995a; 1995b; 1999; 邱家骧等, 1998; 姜常义等, 1998; 卢欣祥等, 1999; 校培喜等, 2000; 董云鹏等, 2003; 陆松年等, 2003; Sun et al., 2003; 王晓霞等, 2003; 2011; Wang et al., 2003; 2013; 张成立等, 2004; 2008; 王涛等, 2005; 2009; 王洪亮等, 2006a; 2006b; 2007; 2008; 温志亮等, 2008; 徐学义等, 2008; 董增产等, 2009; Dong et al., 2011; 赵姣等, 2012; 孟芳等, 2012; 孟旭阳等, 2013),为进一步研究奠定了坚实基础。但针对一些大岩体的解剖研究不够深入,这些岩体往往是杂岩体,包括了多期岩浆作用,甚至是不同时代岩体的组合体,如华北地台南缘的老牛山岩体就是一个由早中生代和晚中生代花岗岩组成的杂岩体(Ding et al., 2011; 齐秋菊等, 2012),它的解体为东秦岭印支期的岩浆作用提供了重要的证据,可见大的侵入体可能含有更丰富的岩浆作用信息。

太白岩体位于商丹构造带北侧,是北秦岭构造带西段最主要的复式侵入体之一,富含北秦岭造山带多期岩浆构造演化信息,对研究整个造山带的演化及大陆动力学机制意义重大(王洪亮等, 2007)。近年来,侯满堂等(2010)在该区 1:5 万区域地质调查中发现,太白岩体南缘中细粒黑云母二长花岗岩中发育有铜(钼)矿,铜钼矿化受岩体岩石、构造及蚀变带三重控制。因其特殊的自然地理位置和险峻的地形地貌,目前工作程度相对较低,可靠的同位素年龄资料比较匮乏。前人曾在太白岩体南部红崖河超单元(校培喜等 2000 年参照花岗岩类单元-超单元岩石谱系单位等级体制原则将岩体划分为五里峡和红崖河 2 个超单元,分别相当于岩体的北部和南部)的细粒黑云二长花岗岩中获得人工重砂单颗粒锆石

U-Pb 年龄[(216 ± 14) Ma, 校培喜等, 2000] 岩体北部片麻状花岗岩中获得 455 Ma 的 Rb-Sr 等时年龄(周鼎武等, 1994),以及片麻状二长花岗岩的锆石微区 U-Pb 年龄[(1741 ± 12) Ma] (王洪亮等, 2006a)。此外,张宗清等(2006)利用单颗粒锆石在太白岩体北部还获得了 100~116 Ma 的年龄数据。由此可见,太白岩体中花岗岩类岩石的年龄数据精度总体不高,差异较大,缺乏精确系统的年代学研究,限制了北秦岭造山带构造-岩浆热事件的深入研究及其时空格架的建立。为此,本文在前人工作基础上,通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对太白岩体进行了精确测年,结果显示所谓的太白岩体实为 3 个不同时代岩体构成的组合体。该研究对注意一些大岩基的解体具有启示意义,为研究北秦岭造山带的构造岩浆演化提供了新的依据,也为今后探讨产于其中的铜(钼)矿的成因提供了一定的帮助。

1 区域地质背景

中央造山带横贯中国中部,西起昆仑,经阿尔金和祁连山,东至秦岭-大别和苏鲁地区,全长超过 4000 km,成为分隔中国南北大地构造的重要界线(姜春发, 2002; 杨经绥等, 2002)。秦岭造山带是中央造山带的重要组成部分,由 2 个主缝合带(商丹和勉略缝合带)和 3 个块体(华北地块南缘及北秦岭、秦岭微地块、扬子地块北缘)组成(张国伟等, 2001; Meng et al., 2000)。以商南-丹凤断裂为界,可以将秦岭造山带分为北秦岭和南秦岭 2 部分(陈岳龙等, 1995)。北秦岭地区主要出露古元古界秦岭岩群或秦岭杂岩、中新元古界宽坪岩群,早古生界二郎坪群、丹凤岩群。秦岭群或秦岭杂岩主要由黑云斜长片麻岩、碳酸盐岩和石墨大理岩组成,夹少量斜长角闪岩,形成时代大约在 2.0 Ga(游振东, 1987; 张宗清等, 1994; 王涛等, 1997); 宽坪群主要由一套变质火山岩-陆源碎屑沉积岩组成,其下部以变质基性火山岩为主,由斜长角闪岩和绿片岩组成,中部以陆源碎

屑沉积岩为主,主要为石英片岩;上部以泥砂质-碳酸盐岩为主,主要为大理岩(张本仁等,1994;汪宗起等,2009),形成时代约 $1.85 \sim 1.0$ Ga(杨荣勇等,1993;张宗清等,1994);二郎坪群呈透镜状沿东西向展布,主要是一套低绿片岩相-低角闪岩相浅变质火山-沉积岩系。全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $0.70 \sim 0.82$ Ga(张宗清等,1994;孙勇等,1996);丹凤岩群主要为一套基性火山岩系,下部以碎屑岩为主,夹基性枕状熔岩;上部由超基性-基性、中酸性火山岩组成,夹大理岩(肖思云等,1988),形成时代约 $1000 \sim 800$ Ma(裴先治等,2001)。区内经历了多期、多相、多层次的构造变形,构造叠覆关系较为复杂。区域内侵入岩分布较广,以酸性、中酸性侵入岩居多,岩浆作用时限较长(卢欣祥等,1999;侯满堂等,2010;Wang et al., 2013)。太白岩体和宝鸡岩体是北秦岭西段最主要的2个复式侵入体。

2 岩体地质及岩相学

太白岩体位于陕西省宝鸡市太白县-周至县厚畛子一带,地处商丹带北侧,是北秦岭构造带中规模较大的复式深成岩体之一(严阵等,1985;尚瑞钧等,1988;李先梓等,1993;校培喜等,2000)。其出露面积约 1200 km^2 ,平面形态为东西向的长透镜状,长轴方向与区域构造线一致(图1)。根据变形特征可将太白岩体分为北部变形侵入体和南部无变形岩体2部分。

太白岩体的主要围岩是秦岭岩群和丹凤岩群,岩体北侧与古元古界秦岭岩群(P_{T1q})以脆韧性剪切带相接,南侧与新元古界—早古生界丹凤岩群($P_{T3-Pz1d}$)呈侵入接触关系,西段有糜棱岩化现象,岩体东、西两端均被北东向脆性断层破坏,西端局部被下白垩统东河群(K_1d)覆盖,岩体北部片麻理构造发育,片麻理与岩体接触面基本协调。岩体中围岩捕虏体发育,规模较大,与寄主岩石的边界清楚,主要岩性为斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩(图1)。

太白岩体北部主要由片麻状中细粒黑云母二长花岗岩、片麻状中粗粒黑云母二长花岗岩和片麻状似斑状黑云母二长花岗岩组成,在下板寺附近还出露有粗粒黑云母花岗岩;南部主要由中粒黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩、细粒黑云母二长花岗岩和细粒花岗闪长岩组成(图1)。

为了对该岩体的岩石组成特征进行系统的研

究,本次选择了太白岩体南侧南天门-厚畛子(A-B)和北侧南坪北-索道顶(C-D)两条路线进行野外考察(图1)。南天门到厚畛子剖面中,自北向南岩石的粒度由中粒向中细粒过渡,岩性也由黑云母二长花岗岩向花岗闪长岩过渡,但主体岩性为黑云母二长花岗岩。在南坪北到索道顶剖面中,出露的主要岩性为片麻状黑云母二长花岗岩、片麻状似斑状黑云母二长花岗岩和粗粒黑云母花岗岩(图2)。本文用于锆石 U-Pb 测年的3件样品分别采自太白岩体南面南天门-厚畛子剖面中的中粒黑云母二长花岗岩(TB04-1B)和北面南坪北-索道顶剖面中的粗粒黑云母花岗岩和片麻状似斑状黑云母二长花岗岩(TB14-1B和TB17-1B)(图2)。

中粒黑云母二长花岗岩(TB04-1B)样品采自陕西省西安市周至县太白山森林公园南天门东南约 1.9 km 处,地理坐标为东经 $107^\circ 48' 11.3''$,北纬 $33^\circ 54' 9.2''$ 。岩石呈灰白色,块状构造(图3a),半自形粒状结构,主要矿物为钾长石、斜长石、石英和黑云母(图3b)。钾长石呈半自形-他形板状,粒度 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 不等,含量 $35\% \sim 45\%$,发育卡氏双晶,偶见格子双晶,弱高岭石化。斜长石呈自形-半自形板状,粒度较钾长石小, $2 \sim 3.5 \text{ mm}$ 不等,含量 $30\% \sim 35\%$,聚片双晶发育,少数可见卡钠复合双晶,局部弱绢云母化。石英呈他形粒状,粒度多在 $2 \sim 2.5 \text{ mm}$,含量 $20\% \sim 25\%$ 。黑云母呈半自形片状,吸收性和多色性明显,弱绿泥石化,含量 $5\% \sim 10\%$ 。副矿物为榍石、磷灰石、锆石和磁铁矿等。

粗粒黑云母花岗岩(TB14-1B)样品采自陕西省宝鸡市眉县红河谷森林公园,地理坐标为东经 $107^\circ 47' 54.2''$,北纬 $34^\circ 01' 2.9''$ 。岩石呈肉红色,块状构造(图3c),半自形粒状结构,主要矿物为钾长石、斜长石、石英、黑云母和少量角闪石(图3d)。钾长石呈半自形-他形板状,粒度 $4 \sim 7 \text{ mm}$,含量 $40\% \sim 45\%$ 。斜长石呈自形-半自形板状,粒度较钾长石细,为 $3 \sim 6 \text{ mm}$,含量 $25\% \sim 30\%$ 。石英呈他形粒状,粒度多在 $1.5 \sim 3 \text{ mm}$,含量 $20\% \sim 25\%$ 。黑云母多呈半自形片状,吸收性和多色性明显,弱绿泥石化,含量约 5% 。副矿物为榍石、锆石和磁铁矿等。

片麻状似斑状黑云母二长花岗岩(TB17-1B)样品采自陕西省宝鸡市眉县红河谷森林公园,地理坐标为东经 $107^\circ 47' 52.1''$,北纬 $34^\circ 02' 32.6''$ 。样品呈肉红色,片麻状构造(图3e),似斑状结构,斑晶主

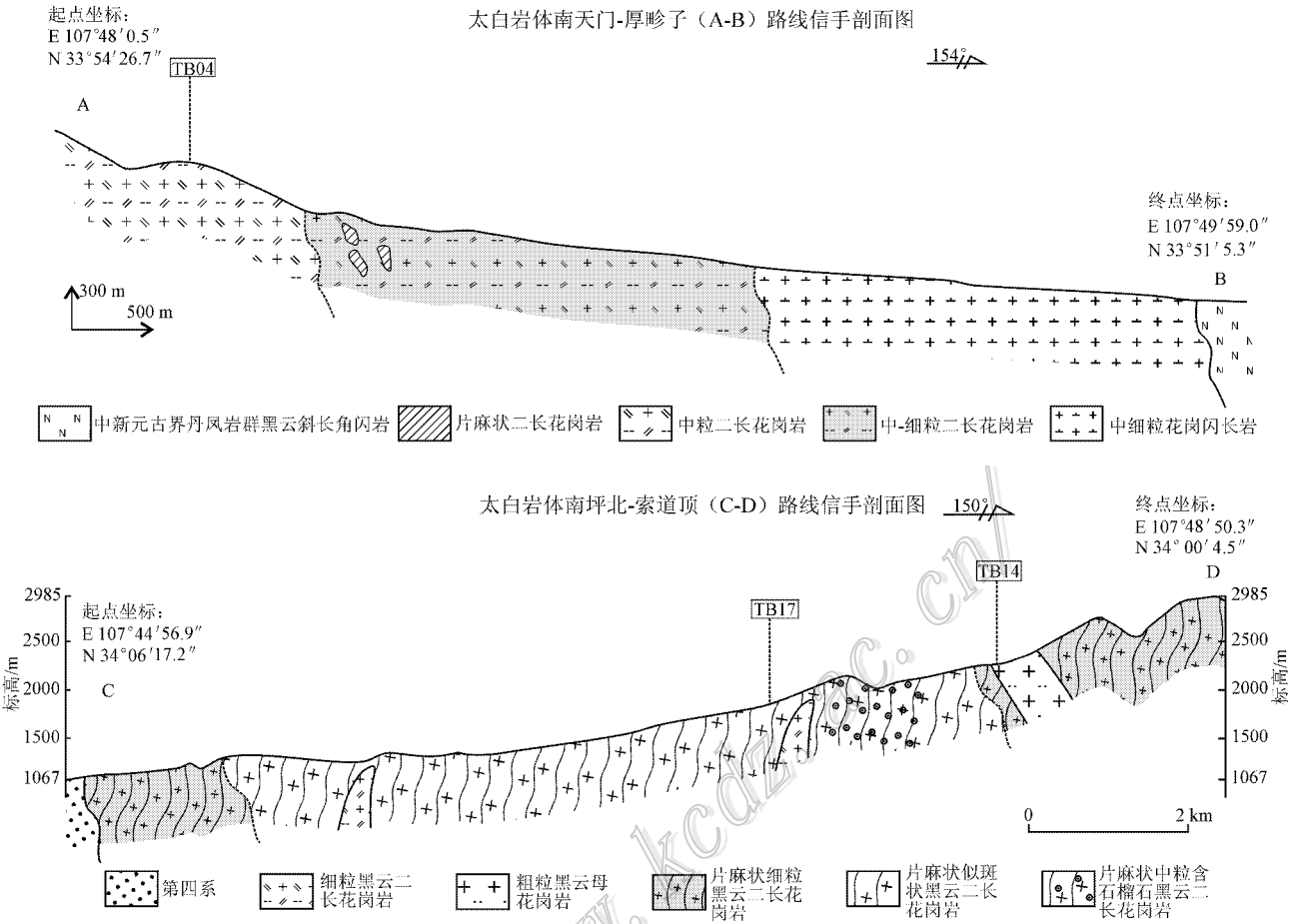


图 2 太白岩体信手剖面图
Fig. 2 Random profile of Taibai pluton

锆石作为测定对象。将锆石样品置于 DEVCON 环氧树脂中,待固结后抛磨至粒径的大约 $1/2$,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相、CL 显微图像分析及 LA-ICP-MS 测试。

锆石的阴极发光(CL)图像在中国地质科学院矿产资源研究所采用 JXA-8800R 电子探针完成。LA-ICP-MS 法单颗粒锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Agilent7500 型 ICPMS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NISTSRM610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4~5 个测点的样品

测定,加测标样一次。在所测锆石样品分析 15~20 个点前后各测 2 次 NISTSRM610。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NISTSRM610 作为外标。由于 SiO_2 在锆石中的含量较恒定,选择 ^{29}Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移,对于大多数元素单点分析的相对标准偏差为 5%~15%。详细分析步骤和数据处理方法参见相关文献(Horn et al., 2000; Ballard et al., 2001; Kosler et al., 2002; 袁洪林等,2003)。

3.2 锆石特征

中粒黑云母二长花岗岩(TB04-1B)中的锆石粒径较大($>100\ \mu\text{m}$),多呈柱状,自形程度较高,长宽比为 2:1~3:1,阴极发光图像(图 4a)显示,该类锆石多具有清楚的震荡环带,为典型的岩浆成因锆石。锆石中, $w(\text{Th})$ 为 $16\times 10^{-6}\sim 411\times 10^{-6}$, $w(\text{U})$ 为 $237\times 10^{-6}\sim 3511\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.01~1.02

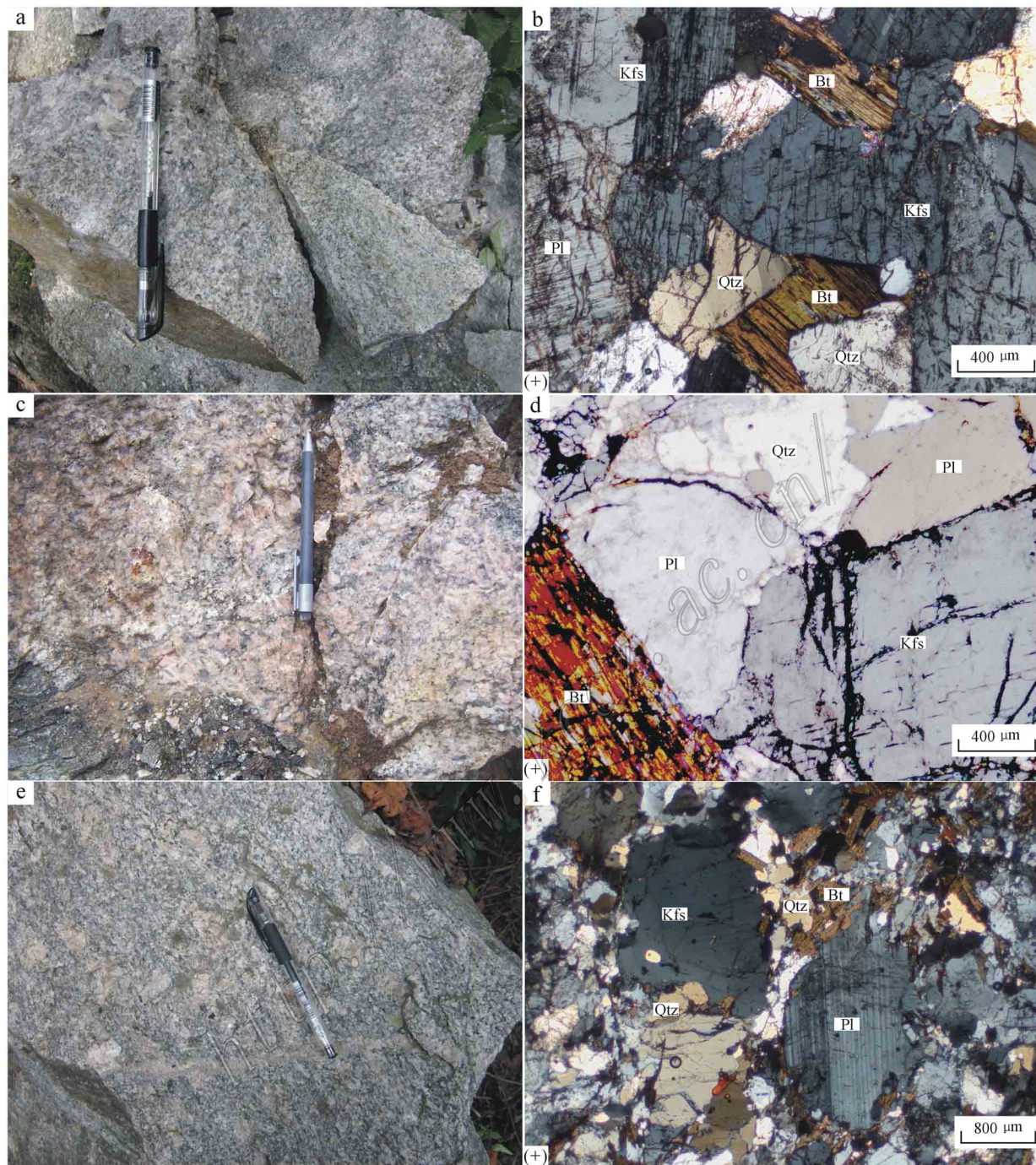


图 3 太白岩体花岗岩类的岩相学特征

a. 中粒黑云母二长花岗岩野外露头; b. 中粒黑云母二长花岗岩具半自形粒状结构; c. 粗粒黑云母花岗岩野外露头; d. 粗粒黑云母花岗岩具半自形粒状结构; e. 片麻状似斑状黑云母二长花岗岩野外露头; f. 片麻状似斑状黑云母二长花岗岩具似斑状结构

Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Bt—黑云母

Fig. 3 Petrography of Taibai pluton granites

a. Field outcrop of medium-grained biotite monzonitic granite; b. Medium-grained biotite monzonitic granite's hypidiomorphic granular texture; c. Field outcrop of coarse-grained biotite granite; d. Coarse-grained biotite granite's hypidiomorphic granular texture; e. Field outcrop of gneissic porphyritic biotite monzonitic granite; f. Porphyritic texture of gneissic porphyritic biotite monzonitic granite

Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz; Bt—Biotite

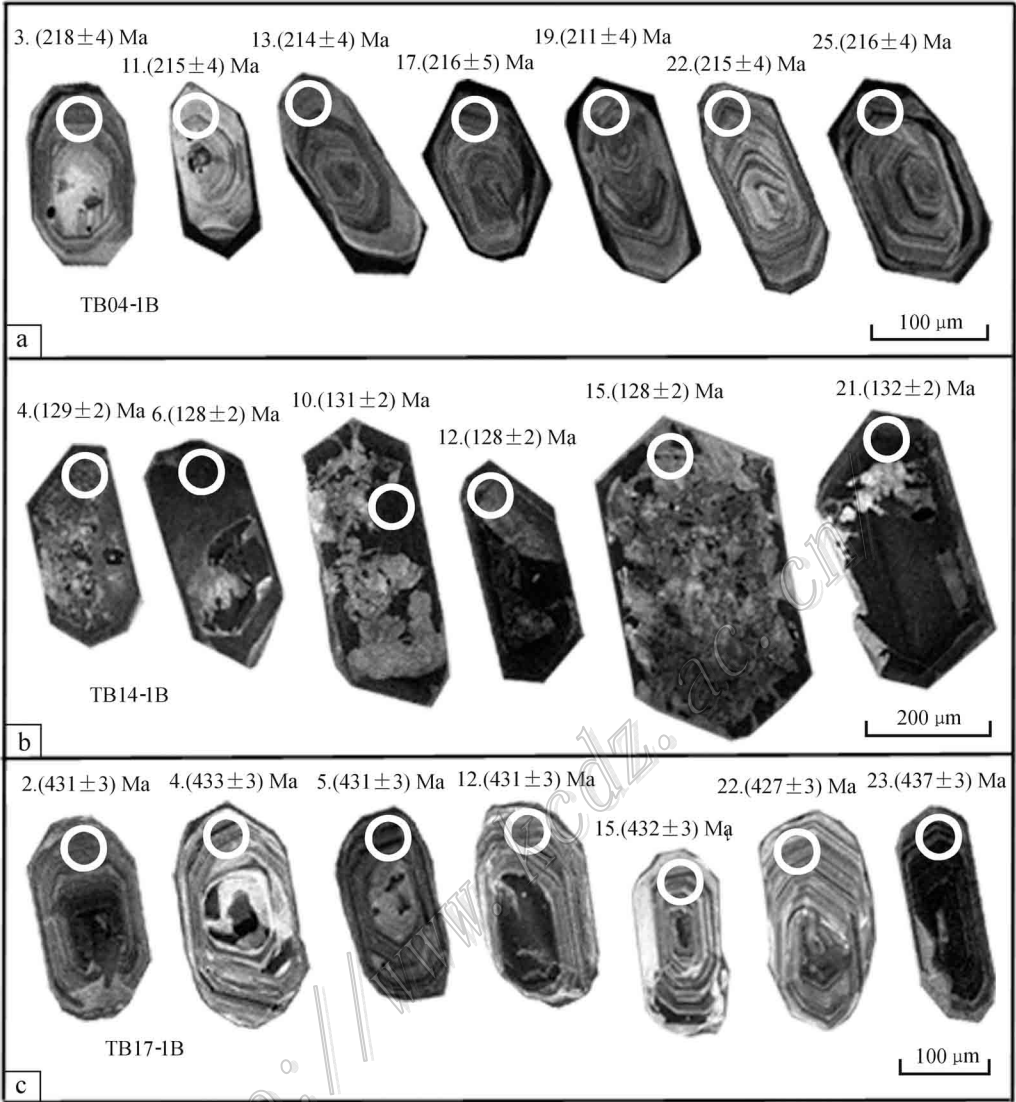


图 4 太白岩体锆石阴极发光图像
Fig. 4 Zircon CL images of Taibai pluton

(表 1), 平均值 0.64, 大于 0.4, 显示为岩浆锆石特征。锆石的稀土元素组成中, ΣREE 含量较高 ($\Sigma\text{REE}=470.69\times10^{-6}\sim1328.60\times10^{-6}$, 平均 774.47×10^{-6}) (表 2), HREE 富集, 其稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与岩浆锆石一致 (图 5a), 具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常。以上特征表明该样品中的锆石为岩浆锆石。

粗粒黑云母花岗岩 (TB14-1B) 中的锆石粒径较大 ($>200\text{ }\mu\text{m}$), 多呈柱状, 自形程度较高, 长宽比为 2:1~3:1, 由于 Th、U 含量较高导致 CL 图像 (图 4b) 普遍较暗, 并且表面有蛻晶化现象, 仅个别颗粒的震荡环带较清晰。锆石中, $w(\text{Th})$ 变化较大, 为

$98\times10^{-6}\sim4032\times10^{-6}$, $w(\text{U})$ 较高为 $2349\times10^{-6}\sim21\,981\times10^{-6}$ (表 1), 但并未导致严重的 Pb 丢失。Th/U 比值为 0.04~0.36, 平均值 0.14, 主要在 0.1~0.4 之间 (表 1), 介于变质锆石与岩浆锆石 Th/U 比值范围之间 (Rubatto et al., 2000; Moller et al., 2003)。但锆石的 Th/U 比值有时并不能有效地鉴别锆石成因 (吴元保等, 2004), 很多岩浆锆石的 Th/U 比值可以非常低, 甚至可以低于 0.1 (吴元保等, 2002; Gebauer, 1996; Hidaka et al., 2002)。锆石的稀土元素组成显示, ΣREE 含量较高 ($425.15\times10^{-6}\sim3469.50\times10^{-6}$, 平均 1918.14×10^{-6}) (表 2), HREE 富集, 具有与岩浆锆石一致的稀土元素球粒陨石标

表 1 太白岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb date of Taibai pluton

测试点	$w(B)/10^{-6}$			Th/U	同位素比值		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	Th	U		年龄/Ma	年龄/Ma		年龄/Ma	年龄/Ma		年龄/Ma	年龄/Ma	年龄/Ma	年龄/Ma		
TB04-1B(中粒黑云母二长花岗岩)																
TB04-1B-03	19	396	432	0.92	0.0489 ± 0.0023	0.2311 ± 0.0092	0.0343 ± 0.0007	141 ± 105	211 ± 8		218 ± 4					
TB04-1B-04	24	195	854	0.23	0.0485 ± 0.0024	0.2243 ± 0.0099	0.0335 ± 0.0007	125 ± 114	206 ± 8		213 ± 4					
TB04-1B-06	14	246	333	0.74	0.0500 ± 0.0019	0.2356 ± 0.0073	0.0342 ± 0.0007	194 ± 87	215 ± 6		217 ± 4					
TB04-1B-07	11	121	339	0.36	0.0482 ± 0.0035	0.2166 ± 0.0148	0.0326 ± 0.0008	106 ± 164	199 ± 12		207 ± 5					
TB04-1B-08	24	178	798	0.22	0.0516 ± 0.0029	0.2336 ± 0.0117	0.0328 ± 0.0007	270 ± 123	213 ± 10		208 ± 4					
TB04-1B-09	11	181	250	0.73	0.0516 ± 0.0035	0.2439 ± 0.0152	0.0343 ± 0.0008	266 ± 148	222 ± 12		217 ± 5					
TB04-1B-10	63	195	3511	0.06	0.0434 ± 0.0035	0.2009 ± 0.0155	0.0336 ± 0.0008	0 ± 48	186 ± 13		213 ± 5					
TB04-1B-11	10	214	238	0.90	0.0522 ± 0.0026	0.2438 ± 0.0105	0.0339 ± 0.0007	292 ± 108	222 ± 9		215 ± 4					
TB04-1B-12	9	178	237	0.75	0.0491 ± 0.0025	0.2307 ± 0.0104	0.0341 ± 0.0007	151 ± 116	211 ± 9		216 ± 5					
TB04-1B-13	15	370	364	1.02	0.0477 ± 0.0022	0.2221 ± 0.0087	0.0338 ± 0.0007	82 ± 106	204 ± 7		214 ± 4					
TB04-1B-15	14	245	350	0.70	0.0485 ± 0.0021	0.2270 ± 0.0082	0.0340 ± 0.0007	123 ± 99	208 ± 7		215 ± 4					
TB04-1B-16	18	402	497	0.81	0.0534 ± 0.0025	0.2485 ± 0.0098	0.0338 ± 0.0007	346 ± 100	225 ± 8		214 ± 4					
TB04-1B-17	13	292	311	0.94	0.0497 ± 0.0028	0.2330 ± 0.0118	0.0340 ± 0.0007	181 ± 126	213 ± 10		216 ± 5					
TB04-1B-18	17	383	394	0.97	0.0460 ± 0.0022	0.2144 ± 0.0088	0.0338 ± 0.0007	0 ± 108	197 ± 7		214 ± 4					
TB04-1B-19	59	16	1183	0.01	0.0562 ± 0.0022	0.2579 ± 0.0080	0.0333 ± 0.0007	459 ± 84	233 ± 6		211 ± 4					
TB04-1B-20	63	118	2372	0.05	0.0521 ± 0.0017	0.2424 ± 0.0060	0.0337 ± 0.0007	291 ± 74	220 ± 5		214 ± 4					
TB04-1B-21	16	295	391	0.75	0.0472 ± 0.0021	0.2208 ± 0.0082	0.0340 ± 0.0007	57 ± 101	203 ± 7		215 ± 4					
TB04-1B-22	17	319	392	0.81	0.0546 ± 0.0024	0.2555 ± 0.0094	0.0339 ± 0.0007	395 ± 94	231 ± 8		215 ± 4					
TB04-1B-23	18	411	416	0.99	0.0492 ± 0.0023	0.2312 ± 0.0091	0.0341 ± 0.0007	159 ± 103	211 ± 8		216 ± 4					
TB04-1B-25	16	356	383	0.93	0.0435 ± 0.0021	0.2046 ± 0.0084	0.0341 ± 0.0007	0 ± 0	189 ± 7		216 ± 4					
TB14-1B(粗粒黑云母花岗岩)																
TB14-1B-01	77	162	3599	0.05	0.0492 ± 0.0017	0.1370 ± 0.0034	0.0202 ± 0.0004	157 ± 79	130 ± 3		129 ± 2					
TB14-1B-02	419	4032	17907	0.23	0.0576 ± 0.0018	0.1645 ± 0.0032	0.0207 ± 0.0004	515 ± 67	155 ± 3		132 ± 2					
TB14-1B-03	511	3880	21981	0.18	0.0498 ± 0.0015	0.1424 ± 0.0028	0.0208 ± 0.0004	184 ± 71	135 ± 2		132 ± 2					
TB14-1B-04	185	2392	8247	0.29	0.0583 ± 0.0019	0.1621 ± 0.0033	0.0202 ± 0.0004	540 ± 69	153 ± 3		129 ± 2					
TB14-1B-05	335	2046	14752	0.14	0.0509 ± 0.0016	0.1429 ± 0.0028	0.0204 ± 0.0004	237 ± 71	136 ± 3		130 ± 2					
TB14-1B-06	106	221	4963	0.04	0.0489 ± 0.0016	0.1354 ± 0.0031	0.0201 ± 0.0004	145 ± 76	129 ± 3		128 ± 2					
TB14-1B-07	326	1634	14533	0.11	0.0486 ± 0.0015	0.1355 ± 0.0027	0.0202 ± 0.0004	127 ± 72	129 ± 2		129 ± 2					
TB14-1B-08	306	3859	13693	0.28	0.0562 ± 0.0018	0.1587 ± 0.0032	0.0205 ± 0.0004	460 ± 68	150 ± 3		131 ± 2					
TB14-1B-09	421	2783	18141	0.15	0.0490 ± 0.0015	0.1391 ± 0.0027	0.0206 ± 0.0004	148 ± 71	132 ± 2		131 ± 2					
TB14-1B-10	243	1082	10782	0.10	0.0494 ± 0.0016	0.1398 ± 0.0029	0.0205 ± 0.0004	166 ± 72	133 ± 3		131 ± 2					

续表 1
Cont. Table 1

测试点	$\omega(B)/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
TB14-1B-11	100	205	4688	0.04	0.0483 ± 0.0016	0.1344 ± 0.0031	0.0202 ± 0.0004	115±77	128±3	129 ± 2
TB14-1B-12	50	98	2349	0.04	0.0486 ± 0.0018	0.1347 ± 0.0036	0.0201 ± 0.0004	131±83	128±3	128 ± 2
TB14-1B-13	159	774	7222	0.11	0.0512 ± 0.0016	0.1417 ± 0.0030	0.0201 ± 0.0004	249±72	135±3	128 ± 2
TB14-1B-14	318	2763	13470	0.21	0.0565 ± 0.0018	0.1617 ± 0.0033	0.0208 ± 0.0004	472±68	152±3	132 ± 2
TB14-1B-15	60	262	2630	0.10	0.0525 ± 0.0018	0.1454 ± 0.0036	0.0201 ± 0.0004	306±77	138±3	128 ± 2
TB14-1B-16	312	1814	13746	0.13	0.0491 ± 0.0015	0.1393 ± 0.0028	0.0206 ± 0.0004	154±72	132±3	131 ± 2
TB14-1B-17	324	1900	14617	0.13	0.0489 ± 0.0015	0.1360 ± 0.0027	0.0202 ± 0.0004	143±72	130±2	129 ± 2
TB14-1B-18	228	859	10153	0.08	0.0501 ± 0.0016	0.1420 ± 0.0029	0.0206 ± 0.0004	198±72	135±3	131 ± 2
TB14-1B-19	132	2117	5876	0.36	0.0614 ± 0.0020	0.1713 ± 0.0037	0.0202 ± 0.0004	654±68	161±3	129 ± 2
TB14-1B-20	239	1291	9668	0.13	0.0519 ± 0.0016	0.1466 ± 0.0030	0.0205 ± 0.0004	279±71	139±3	131 ± 2
TB14-1B-21	306	1535	13365	0.11	0.0519 ± 0.0016	0.1479 ± 0.0030	0.0207 ± 0.0004	282±70	140±3	132 ± 2
TB14-1B-22	79	146	3714	0.04	0.0490 ± 0.0017	0.1354 ± 0.0032	0.0200 ± 0.0004	148±77	129±3	128 ± 2
TB14-1B-23	241	1443	9454	0.15	0.0548 ± 0.0018	0.1538 ± 0.0033	0.0203 ± 0.0004	405±69	145±3	130 ± 2
TB14-1B-24	222	980	9808	0.10	0.0488 ± 0.0015	0.1392 ± 0.0029	0.0207 ± 0.0004	137±73	132±3	132 ± 2
TB14-1B-25	236	1166	10239	0.11	0.0613 ± 0.0019	0.1732 ± 0.0035	0.0205 ± 0.0004	651±66	162±3	131 ± 2
TB17-1B(片麻状似斑状黑云母二长花岗岩)										
TB17-1B-01	78	681	936	0.73	0.0535 ± 0.0008	0.5111 ± 0.0063	0.0693 ± 0.0005	351±33	419±4	432 ± 3
TB17-1B-02	66	527	821	0.64	0.0540 ± 0.0008	0.5146 ± 0.0066	0.0691 ± 0.0005	372±34	422±4	431 ± 3
TB17-1B-04	84	701	1043	0.67	0.0551 ± 0.0008	0.5269 ± 0.0065	0.0694 ± 0.0005	415±32	430±4	433 ± 3
TB17-1B-05	72	570	894	0.64	0.0558 ± 0.0009	0.5313 ± 0.0069	0.0691 ± 0.0005	442±33	433±5	431 ± 3
TB17-1B-06	58	524	710	0.74	0.0574 ± 0.0011	0.5477 ± 0.0091	0.0692 ± 0.0005	506±41	444±6	431 ± 3
TB17-1B-08	38	501	535	0.94	0.0546 ± 0.0012	0.5198 ± 0.0109	0.0691 ± 0.0006	396±50	425±7	430 ± 3
TB17-1B-09	70	604	806	0.75	0.0537 ± 0.0009	0.5134 ± 0.0072	0.0693 ± 0.0005	360±36	421±5	432 ± 3
TB17-1B-10	116	458	1700	0.27	0.0546 ± 0.0009	0.5207 ± 0.0080	0.0691 ± 0.0005	397±38	426±5	431 ± 3
TB17-1B-11	94	449	1269	0.35	0.0556 ± 0.0008	0.5293 ± 0.0065	0.0691 ± 0.0005	434±32	431±4	431 ± 3
TB17-1B-12	75	684	904	0.76	0.0545 ± 0.0008	0.5189 ± 0.0066	0.0691 ± 0.0005	391±33	424±4	431 ± 3
TB17-1B-13	70	507	880	0.58	0.0551 ± 0.0008	0.5259 ± 0.0068	0.0692 ± 0.0005	416±33	429±5	432 ± 3
TB17-1B-15	92	849	1102	0.77	0.0551 ± 0.0008	0.5267 ± 0.0067	0.0694 ± 0.0005	414±33	430±4	432 ± 3
TB17-1B-16	31	188	400	0.47	0.0528 ± 0.0012	0.5030 ± 0.0106	0.0692 ± 0.0006	320±51	414±7	431 ± 3
TB17-1B-17	62	388	772	0.50	0.0538 ± 0.0010	0.5147 ± 0.0081	0.0695 ± 0.0005	361±39	422±5	433 ± 3
TB17-1B-21	73	779	867	0.90	0.0545 ± 0.0010	0.5095 ± 0.0079	0.0678 ± 0.0005	393±39	418±5	423 ± 3
TB17-1B-22	71	584	883	0.66	0.0562 ± 0.0010	0.5297 ± 0.0081	0.0684 ± 0.0005	459±38	432±5	427 ± 3
TB17-1B-23	200	1094	2604	0.42	0.0560 ± 0.0007	0.5417 ± 0.0057	0.0702 ± 0.0005	451±28	440±4	437 ± 3
TB17-1B-24	69	513	836	0.61	0.0555 ± 0.0010	0.5375 ± 0.0084	0.0703 ± 0.0005	430±38	437±6	438 ± 3

注：误差为 1 σ 。

续表 2
Count. Table 2

分析号	$w(B)/10^{-6}$															δEu	δCe
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE		
TB14-1B-16	0.03	51.05	0.05	1.55	3.49	1.12	27.96	13.24	185.15	79.57	402.27	100.48	1078.22	206.46	2150.64	0.24	256.51
TB14-1B-17	0.26	61.24	0.11	1.64	4.88	1.25	33.24	15.77	216.29	93.26	471.90	117.06	1270.07	241.13	2528.10	0.22	89.17
TB14-1B-18	0.06	25.22	0.06	0.58	2.18	0.63	19.57	10.06	144.90	66.72	352.03	90.13	1003.91	200.67	1916.72	0.20	99.05
TB14-1B-19	21.81	132.14	17.77	92.45	23.48	2.76	28.79	8.27	102.43	47.67	276.04	78.58	937.91	197.37	1967.47	0.32	1.55
TB14-1B-20	6.49	56.34	3.59	15.79	7.91	1.17	26.57	11.79	164.66	75.44	393.30	102.06	1139.29	225.47	2229.87	0.22	2.83
TB14-1B-21	1.38	54.38	0.74	4.51	5.18	1.19	33.63	15.26	209.60	88.90	456.76	112.83	1230.28	239.13	2453.76	0.21	13.13
TB14-1B-22	0.03	7.37	0.02	0.17	0.63	0.09	6.36	3.45	51.88	25.83	146.21	38.99	462.91	97.55	841.48	0.08	81.36
TB14-1B-23	24.16	104.77	12.95	64.13	22.45	2.67	41.12	15.40	187.94	79.26	414.29	104.83	1187.19	241.75	2502.91	0.27	1.44
TB14-1B-24	0.01	35.10	0.05	0.91	2.79	0.56	20.65	10.05	146.14	64.31	327.55	81.88	896.42	177.34	1763.76	0.16	203.48
TB14-1B-25	23.89	95.66	7.41	33.68	10.01	3.37	28.46	10.82	148.92	63.43	323.00	81.13	877.84	170.60	1878.22	0.57	1.75
TB17-1B(片麻状似斑状黑云母二长花岗岩)																	
TB17-1B-01	15.56	83.71	4.13	17.50	4.35	0.80	11.68	4.02	47.74	20.51	103.85	25.71	291.97	63.51	695.04	0.32	2.51
TB17-1B-02	2.44	49.77	0.78	3.68	2.20	0.60	9.08	3.65	47.02	20.02	102.26	24.96	278.16	59.60	604.23	0.36	8.78
TB17-1B-04	3.32	62.50	1.11	5.74	3.37	0.85	13.17	4.95	60.78	25.48	127.14	31.29	346.73	75.19	761.62	0.34	7.95
TB17-1B-05	8.40	82.81	4.07	19.59	6.33	1.18	17.26	5.68	73.11	30.08	149.42	36.11	385.06	79.78	898.88	0.32	3.46
TB17-1B-06	34.26	167.62	19.14	101.92	28.70	4.18	37.45	8.61	79.56	28.51	127.30	29.20	304.77	61.85	1033.07	0.39	1.58
TB17-1B-08	0.02	18.00	0.04	0.35	0.53	0.19	3.14	1.22	16.63	7.43	40.37	10.87	130.58	31.21	260.58	0.35	112.98
TB17-1B-09	0.68	71.79	0.37	2.71	4.09	1.05	19.55	7.76	100.56	41.00	202.59	47.65	503.65	99.27	1102.71	0.30	34.85
TB17-1B-10	7.39	45.40	2.93	13.11	4.26	0.72	8.89	3.19	40.88	20.03	122.50	35.94	472.79	121.99	900.02	0.35	2.39
TB17-1B-11	0.33	39.89	0.21	1.63	1.53	0.43	7.78	3.05	41.14	18.52	101.63	27.15	337.79	80.98	662.06	0.31	35.93
TB17-1B-12	5.09	74.19	1.52	7.66	3.87	2.16	16.45	5.96	73.56	30.13	145.61	33.79	360.81	71.17	831.97	0.71	6.47
TB17-1B-13	1.80	49.25	0.84	4.71	2.50	0.58	9.32	3.62	45.69	20.19	105.02	27.38	310.96	69.94	651.80	0.32	9.79
TB17-1B-15	6.08	79.06	1.48	6.84	4.46	0.90	17.01	6.37	77.99	31.93	157.59	36.94	404.88	84.40	915.93	0.28	6.26
TB17-1B-16	0.01	21.91	0.01	0.18	0.43	0.15	3.08	1.25	17.48	8.37	48.41	13.09	167.02	41.05	322.44	0.29	498.53
TB17-1B-17	0.01	34.86	0.05	0.58	1.36	0.38	7.70	2.95	38.78	16.69	87.55	22.15	256.72	56.19	525.96	0.28	197.89
TB17-1B-21	1.10	74.36	0.39	3.09	3.87	0.99	18.70	7.42	90.13	35.72	169.04	38.37	393.36	76.15	912.69	0.29	27.94
TB17-1B-22	0.95	48.12	0.45	2.64	2.33	0.56	9.35	3.50	47.66	20.23	106.65	26.96	312.25	70.58	652.23	0.32	17.94
TB17-1B-23	3.98	51.80	1.65	7.91	3.56	0.65	10.47	3.59	43.90	19.39	109.80	29.77	379.60	96.72	762.79	0.30	4.95
TB17-1B-24	67.47	163.26	11.85	42.80	7.75	1.28	13.22	3.73	46.44	19.16	100.83	24.79	294.51	66.59	863.68	0.38	1.30

准化配分曲线(图 5b),Ce 正异常和 Eu 负异常明显,表明这种花岗岩中的锆石虽然具有一定的蜕晶化,但没有流体的参与,锆石还保持了岩浆锆石的特征,此外,锆石呈长柱状,自形程度较高,晶面简单,晶棱锋锐清晰。因此,粗粒黑云母花岗岩中的锆石为岩浆锆石。

片麻状似斑状黑云母二长花岗岩(TB17-1B)中的锆石粒径较大($>100\ \mu\text{m}$),大多呈柱状,自形程度较高,长宽比为 2:1~3:1,阴极发光图像(图 4c)显示,该类锆石多具有清楚的震荡环带,为典型的岩浆成因锆石。锆石中, $w(\text{Th})$ 为 $188 \times 10^{-6} \sim 1094 \times 10^{-6}$, $w(\text{U})$ 为 $400 \times 10^{-6} \sim 2604 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.27~0.94(表 1),平均值 0.63,大于 0.4,显示为岩浆锆石特征。锆石的稀土元素总量较高($\sum\text{REE}$ 为 $260.58 \times 10^{-6} \sim 1102.71 \times 10^{-6}$,平均 742.09×10^{-6}),HREE 富集,其稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与岩浆锆石一致(图 5c),具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常(表 2),以上特征表明该样品中的锆石为岩浆锆石。

3.3 锆石 U-Pb 测年结果

采用 Glitter(ver 4.0, Macquarie University)程序对锆石的同位素比值及元素含量进行计算,并按照 Andersen Tom 的方法(Andersen, 2002),用 LA-ICP-MS Common Lead Correction(ver 3.15)对其进行了普通铅校正,分析数据列于表 1,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver 3.15)(Ludwig, 1991)完成。

中粒黑云母二长花岗岩(TB04-1B)中,校正后的锆石有效数据点共 20 个,均落在谐和曲线及其附近(图 6a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 207~218 Ma 之间,在 95% 置信水平、误差为 1σ ,其加权平均值为 $(214 \pm 2)\text{ Ma}$ (MSWD=0.4),代表中粒黑云母二长花岗岩的侵位年龄,属于晚三叠世。

对粗粒黑云母花岗岩(TB14-1B)中 25 颗锆石进行了 25 个点的测试分析,所选的点基本避开蜕晶化现象,所有测点均落在谐和曲线及其附近(图 6b),由于高 U 和蜕晶化作用, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄变化较大,但 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄相对集中,变化于 128~132 Ma 之间,在 95% 置信水平、误差为 1σ ,其加权平均值为 $(130 \pm 1)\text{ Ma}$ (MSWD=0.4),基本可以代表粗粒黑云母花岗岩的侵位年龄,属于早白垩世。

片麻状似斑状黑云母二长花岗岩(TB17-1B)中校正后的锆石有效数据点共 18 个,均分布在谐和曲线及其附近(图 6c), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中于

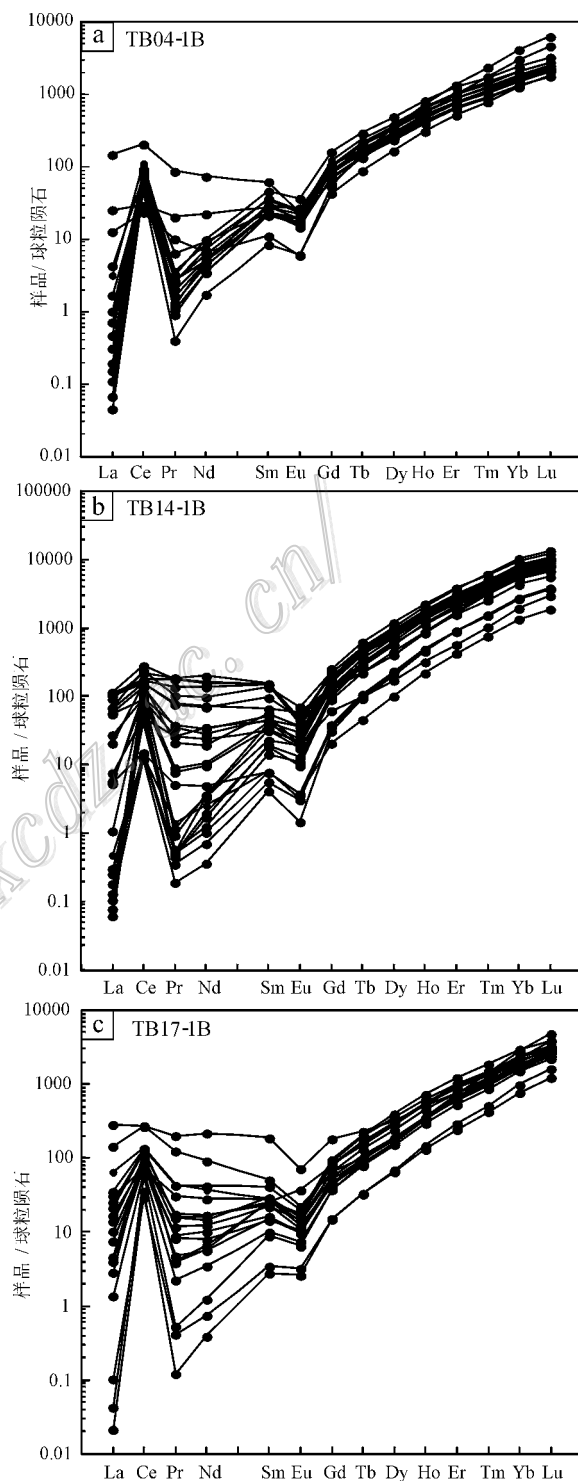


图 5 太白岩体锆石稀土元素对球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of zircon grains from Taibai pluton

427~438 Ma 之间,在 95% 置信水平、误差为 1σ ,其加权平均值 $(431 \pm 2)\text{ Ma}$ (MSWD=1.2),代表片麻状似斑状黑云母二长花岗岩的侵位年龄,属于早志留世。

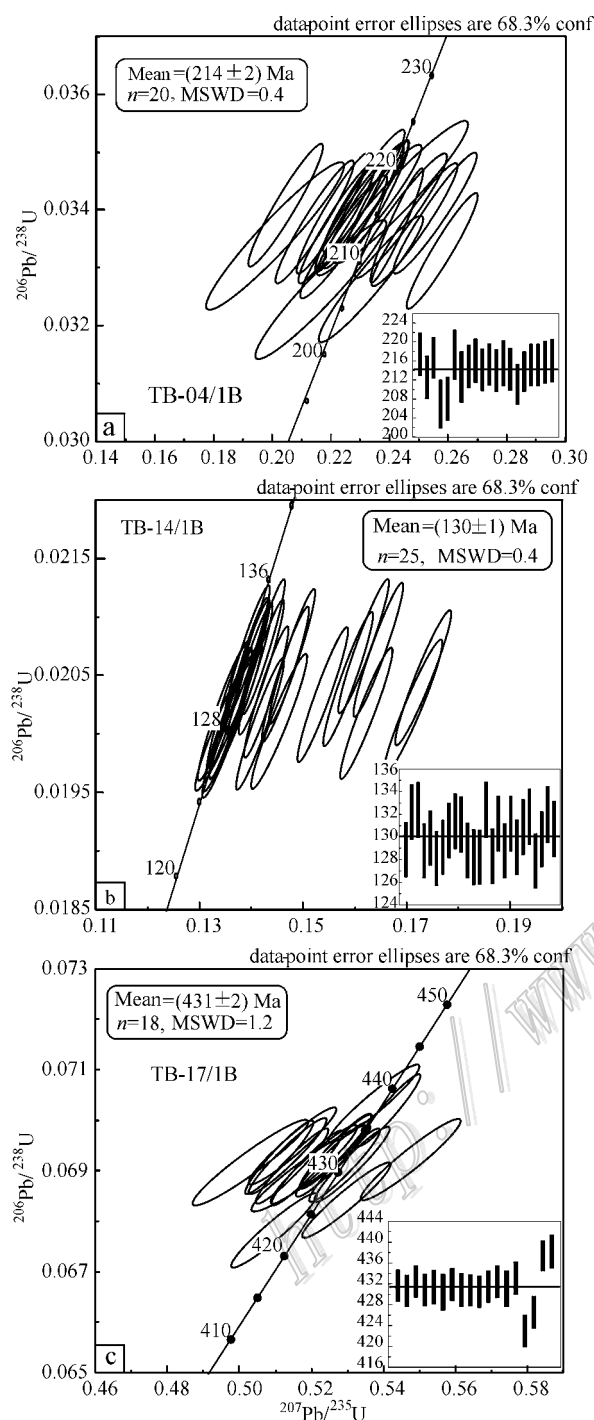


图 6 太白岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram of Taibai pluton

4 岩体年龄及其地质意义

4.1 太白岩体应解体为古生代、早中生代和晚中生代 3 个时代的岩体

本文获得的太白岩体中,中粒黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 $[(214 \pm 2) \text{ Ma}]$ 和片麻状似斑

状黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 $[(431 \pm 2) \text{ Ma}]$,分别与前人报道的细粒黑云母二长花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄 $[(216.4 \pm 14) \text{ Ma}]$,校培喜等,2000)、五里峡超单元片麻状花岗岩 455 Ma 的 Rb-Sr 等时年龄(周鼎武等,1994),在误差范围内基本一致。前人研究表明,五里峡超单元与红崖河超单元为清楚的超动型接触关系,露头上可见红崖河超单元不同单元呈脉状穿插于五里峡超单元中,反映五里峡超单元侵位在先(校培喜等,2000),这表明上述测年结果与地质事实一致。因此,可以确定太白复式岩体的红崖河超单元和五里峡超单元的主体侵位时代分别为晚三叠世和早志留世。建议以后称其为红崖河岩体和五里峡岩体,较为妥当。至于前人在五里峡超单元的片麻状二长花岗岩中获得的锆石微区 U-Pb 年龄 $[(1741 \pm 12) \text{ Ma}]$,王洪亮等,2006a),究竟是岩体的年龄还是围岩的年龄,还有待商榷。此外,笔者在岩体北部(前人所称的五里峡超单元)中获得的粗粒黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(130 \pm 1) \text{ Ma}$,这一年龄比张宗清等(2006)利用 Tims 获得的年龄(100~116 Ma)老,考虑到该花岗岩中锆石的 U 含量较高,出现了一定的蜕晶化现象,原位分析的结果应比单颗粒锆石更可靠,虽然有一定的蜕晶化,但可以反映出岩体的北部还存在一期早白垩世岩浆活动,这次岩浆作用形成的粗粒黑云母花岗岩出露于下板寺附近,因此可称其为下板寺岩体。可见太白岩体不是一个单独的岩体,也不是一般的复式岩体,而是由时代差异很大(古生代、早中生带、晚中生代)的不同岩石构成的岩体组合体(或称为杂岩体)。

严格地说,太白杂岩体应该解体为古生代、早中生代和晚中生代 3 个时代的岩体。古生代花岗岩的形成时代与北秦岭古生代岩浆作用中的第二阶段,即晚奥陶世—中志留世(455~422 Ma,王涛等,2009)的时限一致,可能是秦岭古生代造山中的碰撞阶段,即秦岭微板块的碰撞,或与小陆块(如陡岭块体)华北地块南缘的碰撞增生。早中生代花岗岩的形成时间与秦岭早中生代主体岩浆作用的时间(225~200 Ma,张成立等,2008;Wang et al.,2013)一致,可能是华北地块与扬子地块碰撞晚期或后碰撞的产物。而晚中生代花岗岩应属于秦岭晚中生代岩浆作用的第一个阶段(160~130 Ma,王晓霞等,2011;Wang et al.,2013),是板内岩浆作用的产物。由此可见,太白岩体是一个长期岩浆活动的杂岩体,包含

了古生代、早中生代和晚中生代的岩浆作用,目前是北秦岭构造带中较为复杂的岩体之一。

4.2 不同时代岩体复合产出的鉴别及意义

近年来的精细年代学研究发现,越来越多的岩体实为不同时代岩体的复合体。在秦岭造山带,也发育很多类似的岩体。例如华北地块南缘的老牛山岩体,以前认为是晚中生代岩体,近年的研究从中解体出早中生代花岗岩,表明早中生代的岩浆作用不仅发育在西秦岭和南秦岭,在东秦岭也有不同程度的表现(Ding et al., 2011; 齐秋菊等, 2012)。太白岩体包括 3 个时代岩浆作用的信息,目前在秦岭造山带中还为数不多。上述研究表明,一个大的岩体获得的精确年龄,不一定代表该岩体是同期或同时代的。今后要更加关注大岩体的系统年代学研究。

太白杂岩体的年代学特征提示我们,今后的研究要注意岩体可能被解体。这样的解体具有不可忽视的意义。首先,鉴别出的新岩浆事件,能为完整建立岩浆时空演化,丰富区域构造岩浆演化认识提供新的信息。如太白大岩体的解体可成为秦岭造山带侵入岩古生代、早中生代和晚中生代岩浆演化的一个缩影。其次,多种不同时代岩浆为何集中在一个地点侵入?揭示了什么样的构造动力学意义?是同一源区岩浆在同一空间定位?还是不同源区岩浆集中在同一地点定位?这些都可能包含着重要的构造动力学信息,值得深入探讨。

5 结 论

(1) 北秦岭发育于商丹缝合带北侧的太白大岩基应该解体为由早志留世[(431 ± 2) Ma]的五里峡岩体、晚三叠世[(214 ± 2) Ma]的红崖河岩体和早白垩世[(130 ± 1) Ma]的下板寺岩体构成的组合体。

(2) 早志留世五里峡岩体主要为片麻状黑云母二长花岗岩,是古生代俯冲碰撞环境的产物,早中生代红崖河岩体主要为黑云母二长花岗岩,与后碰撞环境有关,早白垩世下板寺岩体主要是粗粒黑云母花岗岩,为板内岩浆作用的产物。

(3) 太白岩体是秦岭造山带中为数不多的包括 3 个时代岩浆作用的杂岩体。提示我们在今后的研究中,要注意岩体的可能被解体。对这类岩体的深入研究能提供重要的构造动力学信息。

在锆石年龄测试、数据分析中给予了大力的帮助,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

参考文献/References

- 陈岳龙, 张本仁. 1995. 北秦岭丹凤地区早古生代花岗岩的 Pb-Sr-Nd 同位素地球化学特征[J]. 地质科学, 30(3): 247-257.
- 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 2003. 北秦岭构造属性与元古代构造演化[J]. 地球学报, 24(1): 3-10.
- 董增产, 王洪亮, 郭彩莲, 徐学义, 陈隽璐, 何世平. 2009. 北秦岭西段奥陶纪红花铺岩体岩石地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(2): 109-117.
- 侯满堂, 严 臻, 高怀雄. 2010. 太白岩体南缘铜(钼)矿化地质特征及找矿标志[J]. 西北地质, 43(1): 75-85.
- 姜常义, 苏生瑞, 赵太平. 1998. 北秦岭侵入岩带与晋宁运动[M]. 北京: 地质出版社. 1-91.
- 姜春发. 2002. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展(代序)[J]. 地质通报, 1(8): 453-455.
- 李先梓, 严 阵, 卢欣祥. 1993. 秦岭-大别山花岗岩[M]. 北京: 地质出版社. 1-216.
- 卢欣祥, 肖庆辉, 董 有, 常秋玲, 李晓波. 1999. 秦岭花岗岩大地构造图及说明书[M]. 西安: 地图出版社.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 郝国杰, 周红英, 郭进京, 牛广华, 相振群. 2003. 秦岭造山带中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社. 1-202.
- 孟 芳, 毛景文, 叶会寿, 周 珂, 高亚龙, 李永峰. 2012. 豫西老君山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 中国地质, 39(6): 1501-1524.
- 孟旭阳, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝, 杨 阳, 吕星球. 2013. 南秦岭华阳花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Hf 同位素组成——对五龙岩体群成因的约束[J]. 地质通报, 32(11): 1704-1719.
- 裴先治, 王 涛, 李伍平, 张维吉, 王全庆, 李国光. 1995a. 北秦岭商丹地区构造岩浆演化特征[J]. 西北地质, 16(4): 13-19.
- 裴先治, 王 涛, 张维吉, 王全庆, 李伍平, 李国光. 1995b. 北秦岭造山带的地质特征及其构造演化[J]. 西北地质, 16(4): 8-12.
- 裴先治, 王 涛, 王 洋, 李厚民, 李国光. 1999. 北秦岭晋宁期主要地质事件及其构造背景探讨[J]. 高校地质学报, 5(2): 137-147.
- 裴先治, 李厚民, 李国光. 2001. 东秦岭丹凤岩群的形成时代和构造属性[J]. 岩石矿物学杂志, 20(2): 180-188.
- 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 28(1): 279-301.
- 邱家骧, 曾广策, 朱云海, 苏尚国. 1998. 北秦岭-南祁连山早古生代裂

- 谷造山带火山岩与小洋盆蛇绿岩套特征及纬向对比[J]. 高校地质学报, 4(4):393-405.
- 陕西省十六分队. 1960. 1:20 万佛坪幅地质图[R]. 内部资料.
- 陕西省十四分队. 1960. 1:20 万宝鸡幅地质图[R]. 内部资料.
- 尚瑞钧, 严 阵. 1988. 秦巴花岗岩[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1-222.
- 孙 勇, 张国伟, 杨司祥, 卢欣祥, 韩 松. 1996. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 26(增刊):49-55.
- 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 徐学义, 孙 勇, 第五春荣. 2006a. 太白岩基坝岗变形侵入体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年及大地构造意义——吕梁运动在北秦岭造山带的表现初探[J]. 地质学报, 80(11):1660-1667.
- 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 徐学义, 孙 勇, 第五春荣. 2006b. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体 LA-CP-MS 定年及其地质意义[J]. 现代地质, 20(4):536-544.
- 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 徐学义, 孙 勇, 第五春荣, 李海平. 2007. 北秦岭西段胡店片麻状二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 现代地质, 34(1):17-25.
- 王洪亮, 绍 文, 徐学义, 李万忠, 何世平, 陈隽璐, 陈 亮. 2008. 北秦岭西段吕梁期构造岩浆事件的年代学及其构造意义[J]. 地质通报, 27(10):1728-1738.
- 王 涛, 胡能高, 裴先治, 杨家喜, 李伍平. 1997. 秦岭造山带核部杂岩的组成、构造格局及演化[J]. 地球学报, 18(4):345-351.
- 王 涛, 张宗清, 王晓霞, 王彦斌, 张成立. 2005. 秦岭造山带新元古代同碰撞花岗岩变形及其时代限定——强变形岩体与弱变形脉体的锆石 SHRIMP 年龄证据[J]. 地质学报, 79(2):220-231.
- 王 涛, 王晓霞, 田 伟, 张成立, 李伍平, 李 舫. 2009. 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), 39(7):949-971.
- 王晓霞, 王 涛, 卢欣祥, 肖庆辉. 2003. 北秦岭老君山和秦岭梁斑斑结构花岗岩及构造环境——一种可能的造山带型斑斑花岗岩[J]. 岩石学报, 19(4):650-660.
- 王晓霞, 王 涛, 齐秋菊, 李 舫. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 27(6):1573-1593.
- 王宗起, 闫 臻, 王 涛, 高联达, 闫全人, 陈隽璐, 李秋根, 姜春发, 刘 平, 张英利, 谢春林, 向忠军. 2009. 秦岭造山带主要疑难地层时代研究的新进展[J]. 地球学报, 30(5):561-570.
- 温志亮, 吴金刚, 郭周平, 杨鹏飞. 2008. 天水地区北秦岭造山带花岗岩地球化学及构造环境探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 27(6):505-518.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 涂湘林, 程 昊. 2002. 大别山黄镇榴辉岩锆石的微区微量元素分析:榴辉岩相变质锆石的微量元素特征[J]. 科学通报, 47(11):859-863.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16):1589-1604.
- 肖思云, 张维吉, 宋子季. 1988. 北秦岭变质地层[M]. 西安:西安交通大学出版社. 1-320.
- 校培喜, 张俊雅, 王洪亮, 雷鸿晏. 2000. 北秦岭太白岩体岩石谱系单位划分及就位时代确定[J]. 西北地质科学, 21(2):37-45.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 张二朋, 陈隽璐, 孙吉明. 2008. 早古生代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束[J]. 西北地质, 41(1):1-21.
- 严 阵, 许全成, 张海军. 1985. 陕西省花岗岩[M]. 西安:西安交通大学出版社. 1-317.
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 史仁灯, 吴才来, 张建新, 李海兵, 孟繁聪, 戎 合. 2002. 秦岭发现金刚石:横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. 地质学报, 76(4):484-495.
- 杨荣勇, 任启江, 胡受奚. 1993. 东秦岭地区宽坪群的时代及其意义[J]. 地层学杂志, 17(4):272-276.
- 游振东. 1987. 豫西秦岭群变质岩岩相学特征及早期地壳演化[J]. 地球科学, 12(3):321-328.
- 袁洪林, 吴福元, 高 山, 柳小明, 徐 平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(14):1511-1520.
- 张本仁, 骆庭川, 高 山, 欧阳建平, 陈德兴. 1994. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1-135.
- 张成立, 刘 良, 张国伟, 王 涛, 陈丹玲, 袁洪林, 柳小明, 晏云翔. 2004. 北秦岭新元古代碰撞花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地学前缘, 11(3):33-42.
- 张成立, 王 涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 14(3):304-316.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社. 1-806.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少峰, 程顺有, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 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), 33(12):121-1135.
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京:地质出版社. 1-161.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 王宗起, 唐素寒, 王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京:地质出版社. 1-339.
- 赵 姣, 陈丹玲, 谭清海, 陈 森, 朱小辉, 郭彩莲, 刘 良. 2012. 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, 19(4):118-125.
- 周鼎武, 赵重远, 李银德, 翦万筹, 叶 俭, 陈 刚. 1994. 鄂尔多斯盆地西南缘地质特征及其与秦岭造山带的关系[M]. 北京:地质出版社. 1-177.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 192(1-2):59-79.
- Ballard J R, Palin J M and Williams I S. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit

- of northern Chilc by ELA-ICPMS and SHRIMP[J]. *Geology*, 29 : 383-386.
- Ding L X, Ma C Q, Li W J, Paul T R, Deng X D, Zhang C and Xu W C. 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton : Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen[J]. *Lithos*, 126 : 212-232.
- Dong Y P, Liu X M, Zhang G W, Chen Q, Zhang X N, Li W and Yang C. 2011. Triassic diorites and granitoids in the Foping area : Constraint on the conversion from subduction to collision in the Qinling Orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47 : 123-142.
- Gebauer D A. 1996. *P-T-t* path for an (Ultra- β high-pressure ultramafic-Mafic rock-association and its felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of magmatic and metamorphic zircon domains. Example: Alpe Arami (Central Swiss Alps) [C]. *Earth Processes Reading the Isotopic Code, Geophysical Monograph*, 95 : 307-329.
- Hidaka H, Shimizu H and Adachi M. 2002. U-Pb geochronology and REE geochemistry of zircons from Palaeoproterozoic paragneiss clasts in the Mesozoic Kamiaso conglomerate, central Japan : Evidence for an Archean provenance[J]. *Chemical Geology*, 187 : 278-293.
- Horn I, Rudnick R L and McDonough W F. 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation-ICPMS : Application to U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 167 : 405-425.
- Kosler J, Fonneland H, Sylvester P, Tubrett M and Pedersen R B. 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies-a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques [J]. *Chemical Geology*, 182(2) : 605-618.
- Ludwig K R. 1991. Isoplot-A plotting and regression program for radiogenic-isotope data [R]. US Geological Survey Open-File Report, 39 : 91-445.
- Meng Q R and Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling Orogen, central China [J]. *Tectonophysics*, 323(3) : 183-196.
- Moller A, O'Brien P J, Kennedy A and Kroner A. 2003. Linking growth episodes of zircon metamorphic textures to zircon chemistry : An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway) [M]. London : Geological Society, Special Publications, 220 : 65-81.
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe : Some examples from the western Alps [A]. *Cathodoluminescence in geoscience* [M]. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 373-400.
- Sun W D, Li S G, Chen Y D and Li Y J. 2003. Timing of syn-orogenic granitoids in the South Qinling, Central China : Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie Orogenic belt [J]. *Geology*, 110 : 457-468.
- Wang T, Wang X X, Zhang G W, Pei X Z and Zhang C L. 2003. Remnants of a Neoproterozoic collisional Orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling Orogenic belt (China) [J]. *Gondwana Research*, 6(4) : 699-710.
- Wang X X, Wang T and Zhang C L. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China : Constraints on orogenic process [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72 : 129-151.