

南秦岭武当群锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义

刘仁燕, 牛宝贵, 李 崇

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 武当群是南秦岭基底岩系的重要组成部分, 对其时代及构造性质的研究, 对认识南秦岭早期地质演化历史及其与扬子板块新元古代的相互关系具有重要的意义。目前, 武当群的时代归属、划分对比还存在较大争议。本文对采自南秦岭西峡-内乡和陕西地区武当群 4 件变质酸性火山岩及 1 件侵入武当群的花岗斑岩样品进行了锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年, 其中采自西峡-内乡接近武当群底部的 1 件火山岩样品的年龄为 802 ± 13 Ma, 这一年龄可代表武当群底部地层的时代; 采自该群中上部的 3 件火山岩样品, 年龄分别为 725 ± 9 Ma、 732 ± 6 Ma 和 725 ± 7 Ma; 1 件侵入武当群的花岗斑岩样品的年龄为 703 ± 5 Ma。根据上述结果, 结合前人对武当群的研究资料, 确定武当群的形成时代为 810 ~ 720 Ma, 相当于扬子地台板溪群; 介于武当群与震旦系之间的耀岭河群可与南华系对比。

关键词: 武当群; 变质酸性火山岩; 锆石 U-Pb 定年; 南秦岭

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)06-0751-18

Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Wudang Group in South Qinling belt and its geological significance

LIU Ren-yan, NIU Bao-gui and LI Chong

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Wudang Group is an important part of the South Qinling basement, and therefore the study of its age and structural property is of great significance for understanding the early geological evolution history of the South Qinling belt and its relationship with the Yangtze plate in the Neoproterozoic. At present, the age, division and comparison of Wudang Group are still controversial. In this paper, zircon SHRIMP U-Pb isotope dating was performed on 4 metamorphic acid volcanic rocks from Wudang Group and 1 granite porphyry invading the group in the Xixia-Neixiang-Yunxi area. The age of a sample located at the bottom of Wudang Group in the Xixia-Neixiang area is 802 ± 13 Ma, which can represent the age of the bottom strata of Wudang Group. In addition, 3 volcanic samples collected from the middle-upper part of the group were formed at 725 ± 9 Ma, 732 ± 6 Ma and 725 ± 7 Ma respectively, and meanwhile the age of the granite porphyry is 703 ± 5 Ma. Based on the above results and combined with previous research data on Wudang Group, it is determined that the formation time of Wudang Group is 810 ~ 720 Ma, equivalent to the age of Banxi Group of the Yangtze plate, while the Yaolinghe Group between the Wudang Group and the Sinian could be compared with the Nanhua System.

Key words: Wudang Group; acid volcanic rock; zircon U-Pb dating; South Qinling belt

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20190358); Research Grant from Chinese Academy of Geological

收稿日期: 2020-07-09; 接受日期: 2020-10-13; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局资助项目(DD20190358); 中国地质科学院基本科研业务费资助项目(J2032)

作者简介: 刘仁燕(1984-), 女, 助理研究员, 构造地质学专业, E-mail: 02004133@163.com。

Sciences(J2032)

南秦岭中新元古代地层主要由两套岩石系列组成,即以武当群(郧西群)、耀岭河群为代表的浅变质火山-沉积岩系和以陡山沱组、灯影组为代表的沉积岩系。后者的形成时代认识统一,为震旦系(埃迪卡拉系),属稳定盖层沉积。前者构成南秦岭前震旦系基底,构造上属扬子板块的北缘。目前对武当群和耀岭河群,特别是武当群的时代归属、划分对比还存在较大争议。早期研究多采用 Rb-Sr、K-Ar 和 Sm-Nd 等同位素年代学方法,认为武当群的时代主体为中元古代或中元古代-新元古代早期(河南省地质矿产局,1989;秦正永等,1996;周鼎武等,1998;朱杰等,1998;凌文黎等,2002;张宗清等,2002),经历了晋宁(或扬子)造山作用。近年来,随着微区原位锆石 U-Pb 同位素定年方法的迅速发展,一批高精度的年龄数据为厘定武当群的形成时代提供了重要依据。Ling 等(2008)认为武当群的形成时代为 755 ± 3 Ma,对应于峡东剖面的莲沱组;其他一些学者则将其年龄限定于 780~675 Ma 之间,时代为南华系(蔡志勇等,2006;夏林圻等,2008;祝禧艳等,2008;张永清等,2013)。是 Rodinia 超大陆裂解在南秦岭的响应;任纪舜等(2013)^①将武当群划归为新元古代中期,并将其与扬子地台板溪群进行对比。

造成上述分歧的原因,可能是武当地区变形复杂,断裂广泛发育,具有多期岩浆活动,武当群及耀岭河群火山岩经历了复杂的构造演化过程,野外宏观上难以准确地划分。同时不同程度的变质变形作用不仅会引起 Rb-Sr、K-Ar 和 Sm-Nd 同位素体系不同程度的开放,而且也会导致锆石发生不同程度的放射性成因 Pb 丢失,加上多数岩浆岩中不同程度地含有捕获或继承锆石,导致武当群同位素年龄数据差异较大。即使是目前最普遍使用的、公认最为可靠的微区原位锆石 U-Pb 同位素测年方法,也可能由于对锆石的成因认识不同而造成对其地质意义的解释不同。因此,对武当群的时代问题仍需要开展进一步详细、系统地研究工作。

为此,本文选择南秦岭武当山北部陕西南化塘-

赵川地区的武当群、陡岭地区西峡-内乡一带的武当群(原毛堂群姚营寨组)不同层位变质酸性火山岩及侵入其中的花岗斑岩脉进行了锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学研究,结合前人资料对武当群的形成时代进行准确厘定,并对其所揭示的构造意义进行了讨论。

1 区域地质概况

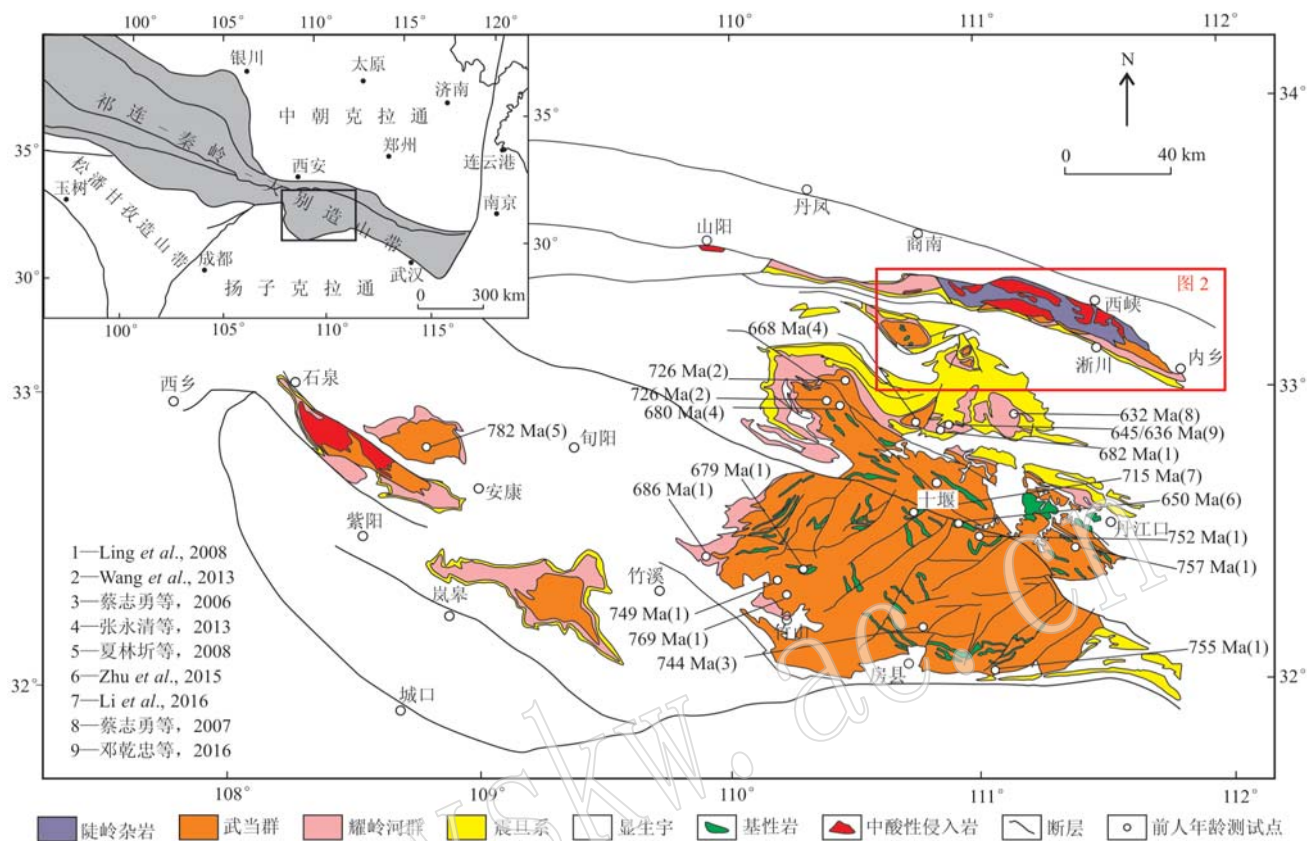
武当群和耀岭河群均为经浅变质的火山-沉积岩系,主要出露在湖北省武当山和两郧地区以及陕西安康、平利和豫西淅川、内乡一带(图1)。

分布于湖北省境内武当山地区的武当群,最初由李捷和朱森于1930年^②创名,后来陕西秦岭区测队将陕西地区分布的武当群改称为陕西群,因此,武当群和陕西群实为同物异名。耀岭河群指一套分布于商南耀岭河流域不整合于震旦系地层之下的变火山-沉积岩系。在南秦岭地区,武当群和耀岭河群构成3个较大规模的构造穹隆,即牛山穹隆、平利穹隆和武当山穹隆。穹隆核部为武当群,未见底,耀岭河群组成侧翼,两者之间多为断层接触,之上被震旦系不整合覆盖。湖北武当地区的武当群分布范围最广,地层发育好,厚度达逾万米,根据岩性组合特征,自下而上被划分为双台组和杨坪组。双台组为一套变质的火山-沉积岩组,以中酸性火山岩为主,基性岩次之,中酸性岩原岩主要为英安-流纹质岩和中酸性(晶屑、岩屑)凝灰岩,基性岩原岩主要为玄武-安山质熔岩、火山碎屑岩或凝灰岩。杨坪组变沉积岩组原岩以长石石英质砂岩为主、夹粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。

河南淅川、西峡、内乡三县交界地区的武当群和耀岭河群原统称为毛堂群(张宗清等,2002),主要分布于陡岭隆起东南侧。陡岭隆起区属荆紫关-师岗复向斜的北翼部分,地层发生倒转,倒转复式单斜自北向南、由老到新,由陡岭杂岩、毛堂群、震旦系及显生宇组成(图2a),毛堂群与下伏陡岭杂岩呈不整合接触,其上被震旦系陡山沱组不整合覆盖(河

① 任纪舜,牛宝贵,王 军,等. 2013. 1:500 万国际亚洲地质图.

② 李 捷,朱 森. 1930. 秦岭中段南部地质. 国立中央研究院地质研究所集刊,第九号.

图1 南秦岭前寒武纪地质简图(据张二朋等, 1992^①)Fig. 1 Precambrian geological sketch map of the South Qinling belt (modified after Zhang Erpeng *et al.*, 1992^①)

南省地质局, 1965, 1976^②; 河南省地质矿产局, 1989)。陡岭杂岩主要由长英质片麻岩、透辉变粒岩、斜长角闪岩和少量大理岩、石墨片岩、石墨大理岩及极少量的石英岩组成, 其中长英质片麻岩的原岩既有泥沙质沉积, 也有类似于 TTG 成分的深成岩(张寿广等, 2004)。对类似 TTG 成分的闪长质-花岗质片麻岩锆石 U-Pb 定年研究获得 ~2.5 Ga 的形成年龄(胡娟, 2013; Wu *et al.*, 2014; 聂虎, 2016); 张寿广等(2004)则认为陡岭杂岩形成时代应在 2 100 ~ 1 950 Ma 之间, 但其中透辉变粒岩的物源主要来自新太古代岩块; 另外, 在陡岭杂岩还发现有年龄为 841 Ma 的变质火山碎屑岩(祝禧艳, 2010)。这表明陡岭杂岩并不是一个简单的地层单位, 而是包括从太古宙到新元古代早期不同物质的变质杂岩。~840 ~ 800 Ma 陡岭杂岩经受了深达角闪岩相

的变质作用改造(沈洁等, 1997; Ratschbacher *et al.*, 2003; 张寿广等, 2004; Hu *et al.*, 2019)。之后于 750 ~ 690 Ma 发育大量中酸性岩浆岩侵入事件(Zhang *et al.*, 2004; 胡娟, 2013; 聂虎, 2016; Zhang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019)。

毛堂群自下而上分为姚营寨组和马头山组。姚营寨组为一套以绿片岩相变质的酸性火山岩为主的火山-沉积岩系, 马头山组主要为以变质的基性火山岩为主的火山-沉积岩系, 两个岩组之间为平行不整合或整合接触(河南省地质矿产局, 1989; 刘征华, 2009)。过去长期将毛堂群置于武当群之上, 时代属于中元古代、新元古代早期或震旦系(河南省地质局, 1976^②; 河南省地质矿产局, 1989; 梁传茂, 1990)。但随着近年区调工作的深入, 河南省地质矿产厅第四地质调查队(1995)^③在 1:5 万荆紫关等 5

① 张二朋, 牛道楹, 霍有光, 等. 1992. 秦岭-大巴山及邻区 1:100 万地质图.

② 河南省地质局. 1976. 河南省西峡-浙川-内乡一带 1:5 万区域地质调查报告.

③ 河南省地质矿产厅第四地质调查队. 1995. 1:5 万荆紫关幅、西峡县幅、浙川县幅、七裕幅、袁店幅地质图.

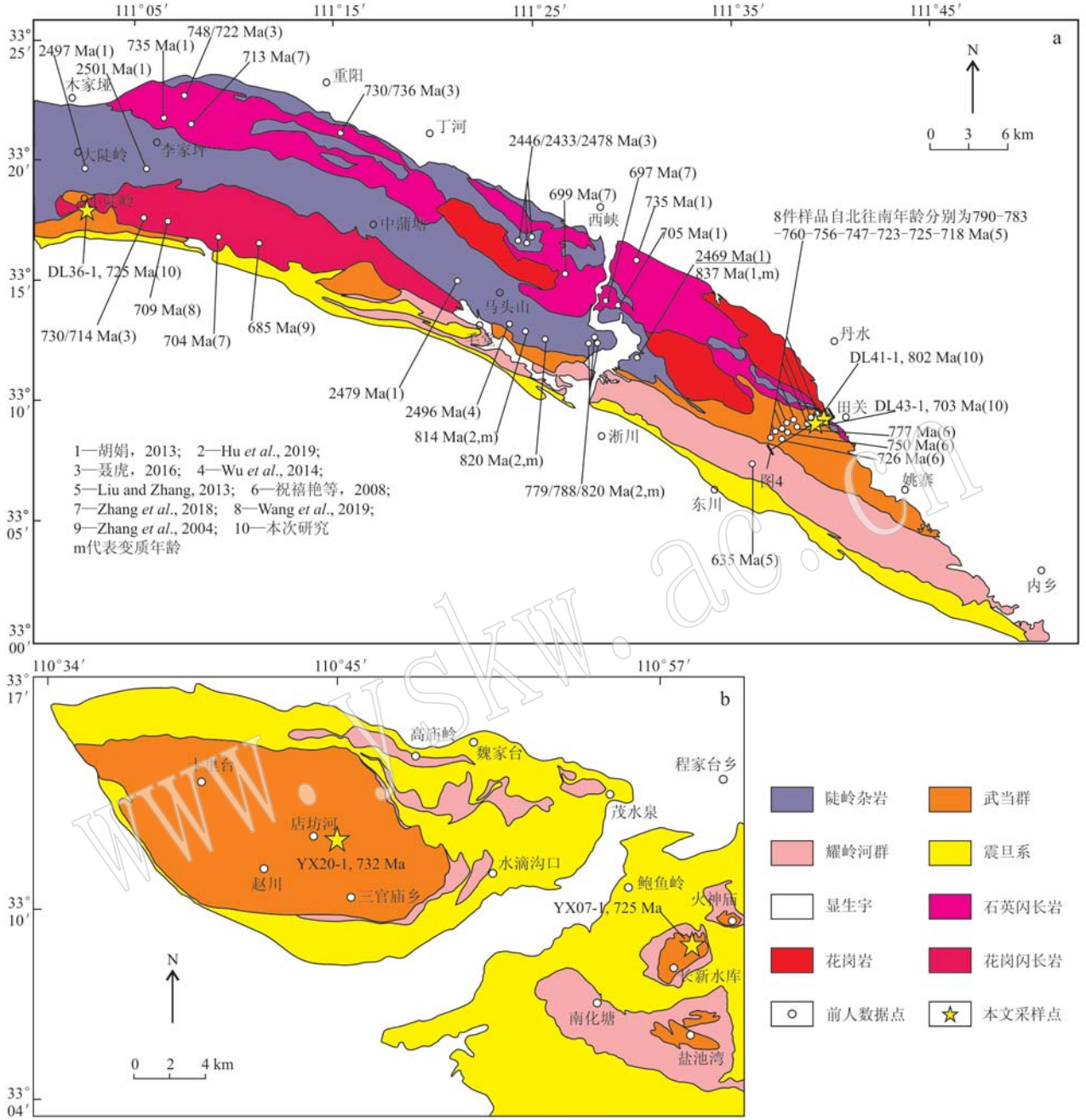


图 2 西峡-内乡地区地质简图(a, 据河南省地质局, 1976^①)和南化塘-赵川地区地质简图(b, 据西安地质学院, 1995^②)
Fig. 2 Geological sketch maps of Xixia-Neixiang area (a, modified after Henan Geological Bureau, 1976^①) and Nanhuatang-Zhaochuan area (b, modified after Xi'an Institute of Geology, 1995^②)

幅联测中,将毛堂群姚营寨组和马头山组分别划归为武当群和耀岭河群。最近,高精度年代学研究揭示毛堂群姚营寨组的年龄集中在~791~719 Ma之间(祝禧艳等, 2008; Liu and Zhang, 2013),这与武当山、郧西及安康地区武当群所获得的年龄基本一

致,表明两者应属同一地层。
鉴于武当山、郧西及安康地区的武当群均未见底,而西峡-内乡陡岭隆起南侧的武当群(毛堂群姚营寨组)其下部发育大套砂砾岩层并覆于经中深变质的陡岭杂岩之上,显示这里出露有代表武当群最

① 河南省地质局. 1976. 1:5 万河南省西峡-淅川-内乡一带地质图.
② 西安地质学院. 1995. 1:5 万赵川幅及南化塘幅地质图.

底部的层位。因此, 本文将以该区武当群为重点, 结合武当山北部郧西南化塘、赵川的武当群(图 2b)进行对比研究。

2 样品与分析方法

2.1 样品野外和岩石学特征

武当山地区的武当群, 前人已有较多工作, 本次仅对武当山北部郧县南化塘及赵川地区的武当群进行研究, 在河南西峡-内乡地区, 选择西峡西坪小陡岭及田关武当群出露较好的剖面, 并尽量寻找最下

部层位火山岩进行样品采集和测年研究, 以便更准确厘定武当群的形成时代。

YX07-1: 变流纹岩(坐标: $N33^{\circ}8.54'$, $E110^{\circ}58.19'$), 采自南化塘长新水库, 岩石细粒斑状结构, 块状构造(图 3a)。斑晶约占 5%~8%, 大小 0.5~1.2 mm, 主要矿物为斜长石、钾长石、石英(图 3e)。斜长石呈近自形-半自形板状-粒状, 杂乱分布, 钠长双晶和卡钠复合双晶发育; 钾长石(主要为条纹长石)自形-半自形结构, 次生变化轻微; 石英半自形-自形粒状结构。基质为显微晶质, 颗粒大小 0.002~0.005 mm, 主要成分为石英、钾长石和斜长石, 少量绢云母。

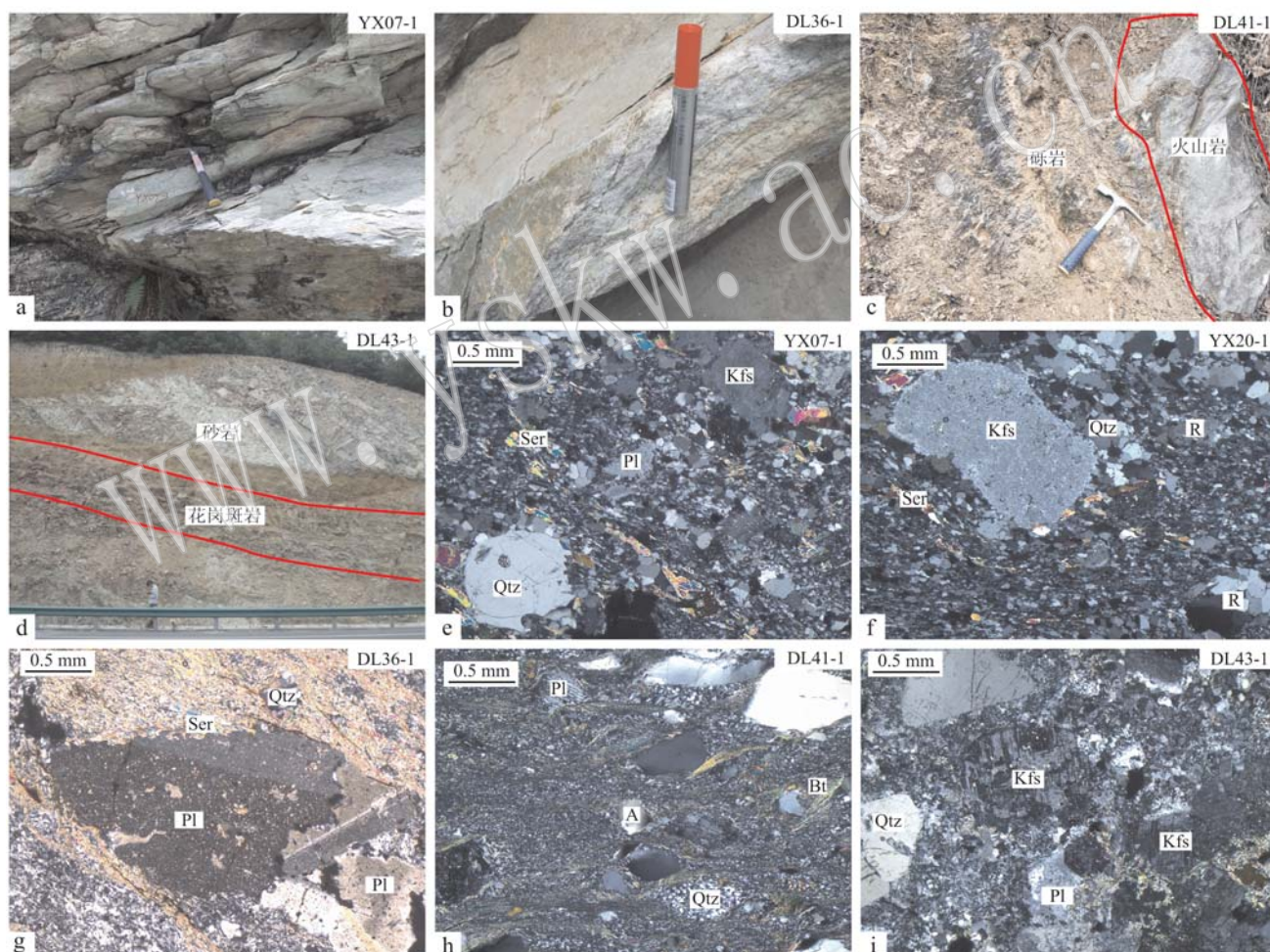


图 3 武当群火山岩及花岗斑岩野外和显微镜下照片(+)

Fig. 3 Outcrop photographs and microphotographs (+) of the volcanic rocks and granite porphyry from Wudang Group

Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Ser—绢云母; Bt—黑云母; R—岩屑; A—杏仁

Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz; Ser—sericite; Bt—biotite; R—rock debris; A—almond

YX20-1: 变晶屑凝灰岩(坐标: $N33^{\circ}12.32'$, $E110^{\circ}44.74'$), 采自商南赵川, 岩石碎屑结构(具凝灰结构), 似流纹构造。主要由岩屑、晶屑、少量玻屑、火山灰组成(图 3f)。岩屑杂乱分布, 含量约占

15%, 呈不规则状、次棱角状、团块状等外形, 主要由花岗岩岩屑、酸性火山岩岩屑组成。晶屑约 70%, 由斜长石、钾长石、石英构成, 杂乱分布; 石英呈棱角状-尖棱角状外形, 个别可见变质重结晶的次生加大现

象;斜长石轻微绢云母化,边角圆滑;钾长石高岭土化。火山灰约15%,脱玻化。

DL36-1: 变英安质流纹岩(坐标: N33°17.97', E111°02.65'), 采自西峡西坪小陡岭,斑状结构,气孔-杏仁构造(图3b)。斑晶约占8%~10%,主要为斜长石、钾长石及少量石英和黑云母(图3g)。斜长石呈自形板状-半自形粒状,粒度一般为0.8~3 mm,镶嵌状分布,钠长双晶和卡钠复合双晶发育,具不同程度高岭土化、绢云母化现象;钾长石自形-半自形结构,大小1 mm左右,主要发育卡斯巴双晶;石英半自形粒状结构;黑云母呈锈褐色,次生变化严重。基质发生脱玻化,主要成分为绢云母、石英、钾长石和斜长石。

DL41-1: 变流纹岩(坐标: N33°09.42', E111°39.37'), DL43-1: 花岗斑岩(坐标: N33°09.00', E111°39.01'), 采自西峡田关老坟沟-谢庄毛堂群姚营寨组剖面(图4), 据前文所述,研究区属荆紫关-师岗复向斜的北翼部分,地层发生倒转,岩层总的走向呈北西西-南东东向,倾向北东,倾角40°~60°。姚营寨组下段倒转韵律发育,自北向南、由老到新、由上到下依次出现砾岩、含砾长石砂岩、长石砂岩、绢云千枚岩等由粗到细的规律变化。样品 DL41-1 为姚营寨组下段底部砂砾岩中的火山岩夹层(图3c),在该剖面北端由于石英闪长岩的侵入,姚营寨组与下伏陡岭杂岩未直接接触,但在该剖面往东2 km 石岭水库附近,姚营寨组下段底部的变质长石砂岩夹变质砾岩与陡岭杂岩斜长角闪片麻岩不整合接触(图4中辅助剖面)。DL41-1 变火山岩距不整合接触界线西北直线距离约1 km,样品北部主要为含

砾长石砂岩和砾岩层,砾石主要为石英质砾石,成熟度相对较高,含量可达30%,其南侧亦为砂砾岩层,砾岩中砾石成分相对复杂,除石英质砾石外,还有长石砂岩及酸性火山岩砾石等。因此,DL41-1 样品为该剖面最下部层位的火山岩层,且距离其底部仅有约数百米的粗碎屑沉积,其年龄可大致作为武当群底部的时限。DL41-1 变流纹岩具斑状结构,气孔-杏仁构造,气孔主要充填它形粒状石英(图3h)。斑晶约占20%,主要为斜长石、钾长石及石英。石英它形粒状结构,约占18%,长轴定向分布,粒内可见波状消光;钾长石主要为条纹长石,呈半自形板状-粒状,具不均匀绢云母化现象;斜长石自形-半自形粒状,发育钠长双晶;黑云母呈锈褐色,次生变化严重。基质发生脱玻化,主要成分为绢云母、石英、钾长石和斜长石。DL43-1 为侵入姚营寨组下部砂岩层中的花岗斑岩脉(图3d),岩石具细粒斑状结构,块状构造。斑晶约占15%,大小0.5~2.2 mm,主要矿物成分为斜长石、钾长石、石英和少量黑云母(图3i)。斜长石约占4%,呈近自形-半自形板状-粒状,杂乱分布,钠长双晶和卡钠复合双晶发育,具不均匀高岭土化、绢云母化现象,个别矿物绢云母化严重,仅在边缘部分残留斜长石的假像;钾长石自形-半自形结构,约占5%,以条纹长石为主;石英半自形-自形粒状结构,约占4%;黑云母呈锈褐色,次生变化严重,含量约占1%。基质为显微晶质,主要成分为石英、钾长石和斜长石,少量绢云母。

2.2 分析方法

5 件样品锆石 SHRIMP U-Pb 测年在北京离子探针中心完成。测年方法和原理见 Williams(1998)。

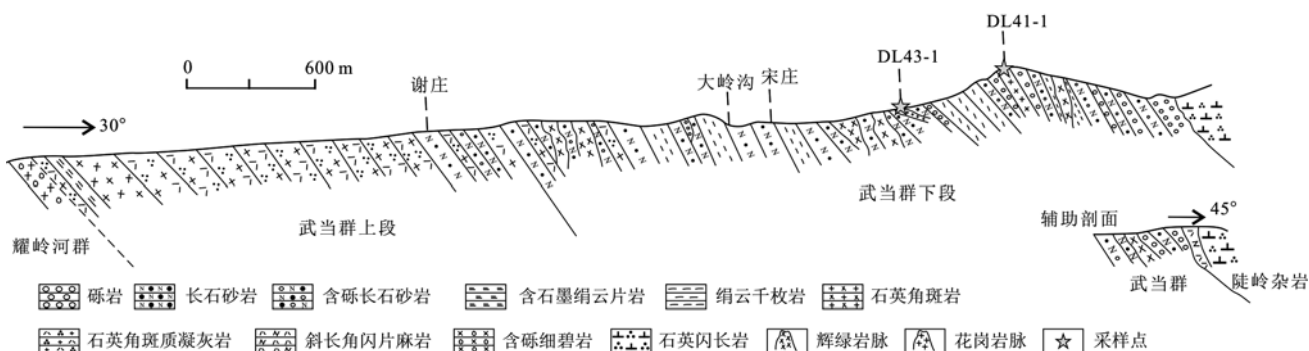


图4 西峡田关老坟沟-谢庄姚营寨组剖面(据河南省地质局,1976^①)

Fig. 4 Profile of Yaoyingzhai Formation located at Laofengou-Xiezhuang in Tianguan, Xixia (modified after Henan Geological Bureau, 1976^①)

① 河南省地质局. 1976. 河南省西峡-浙川-内乡一带1:5万区域地质调查报告.

锆石测年为5组扫描,一次离子流强度为3~4 nA,束斑大约为25~30 μm 。未知样品U含量标定和年龄校正的标准锆石为SL13(U含量为 238×10^{-6} ; Williams, 1998)和TEMORA(年龄为417 Ma; Black *et al.*, 2003)。TEMORA和未知样品测定的比例为1:3~1:4。数据处理采用SQUID和ISOPLLOT程序(Ludwig, 2001)。根据实测 ^{204}Pb 进行普通铅扣除。锆石年龄使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,单个数据点误差为 1σ ,加权平均年龄误差为95%置信度。

3 测年结果

样品YX07-1选出的锆石呈长柱状-短柱状不等,晶体长轴与短轴之比多数为3:1~2:1,晶体长轴一般为100~200 μm ,锆石阴极发光图像显示锆石发育明显的震荡环带或板状分带,为典型的岩浆锆石(图5)。此样品共测定了15颗锆石的15个点,

$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 为0.30~0.77(表1)。15个分析点中2、3和14号点存在不同程度的Pb丢失,剩余12个数据点均位于谐和线上,谐和锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 725 ± 9 Ma(MSWD=1.60)(图6)。

样品YX20-1的锆石晶形完整,呈长柱状-短柱状,长轴与短轴之比多数为3:1~1.5:1,晶体长轴一般为50~200 μm ,锆石阴极发光图像显示其结构均一,可见清晰的震荡环带或板状分带,为典型的岩浆锆石,此样品共测定了13颗锆石的13个点, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为0.27~0.97。13个分析点全部位于谐和线上,但10号点普通铅含量过高,应予以剔除,剩余12个点年龄较集中,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 732 ± 6 Ma(MSWD=0.57)。

样品DL36-1锆石晶形较完整,多呈短柱状,晶体长轴一般为50~150 μm ,锆石阴极发光图像显示锆石发育明显的震荡环带或扇形分带,为典型的岩浆锆石。此样品共测定了22颗锆石的22个点,

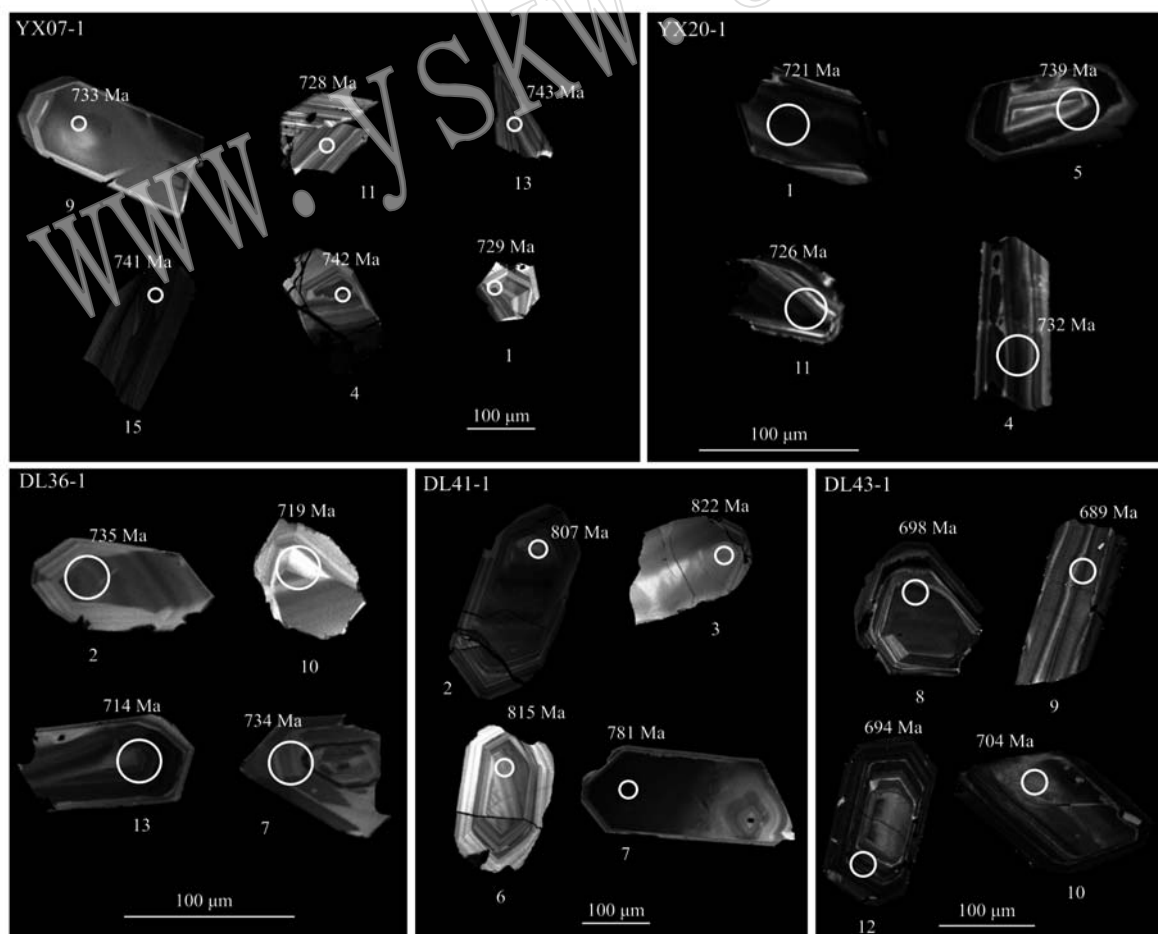


图5 武当群火山岩及花岗斑岩锆石阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the volcanic rocks and granite porphyry of Wudang Group

表 1 武当群火山岩及花岗岩斑岩锆石 U-Pb 同位素测试数据
Table 1 Zircon U-Pb isotopic data of the volcanic rocks and granite porphyry from Wudang Group

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma		不谐和度/%	
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
YX07-1												
1	123	77	12.70	0.64	0.064 1	2.3	1.058	2.8	0.119 8	1.6	744 ± 49	2
2	82	50	7.92	0.64	0.064 3	4.2	0.995	4.5	0.112 1	1.7	753 ± 88	9
3	38	18	3.72	0.49	0.063 9	7.9	1.004	8.2	0.114 0	2.1	737 ± 170	6
4	137	100	14.50	0.75	0.061 0	4.1	1.027	4.4	0.122 0	1.6	641 ± 88	-16
5	106	75	10.70	0.73	0.062 0	4.2	0.996	4.5	0.116 4	1.7	675 ± 91	-5
6	98	73	9.90	0.77	0.058 1	3.9	0.935	4.3	0.116 8	1.7	533 ± 86	-34
7	131	75	13.10	0.59	0.058 0	4.2	0.924	4.5	0.115 5	1.6	531 ± 92	-33
8	77	37	7.66	0.50	0.069 1	2.3	1.113	2.9	0.116 8	1.7	901 ± 48	21
9	123	85	12.70	0.72	0.070 1	3.0	1.165	3.4	0.120 5	1.6	932 ± 62	21
10	102	71	10.30	0.71	0.063 0	2.4	1.019	2.9	0.117 2	1.6	709 ± 52	-1
11	126	89	13.00	0.73	0.065 6	1.8	1.081	2.4	0.119 6	1.6	792 ± 38	8
12	111	77	11.50	0.72	0.059 0	3.5	0.978	3.9	0.120 1	1.6	569 ± 77	-29
13	133	92	13.90	0.72	0.065 7	1.7	1.107	2.4	0.122 1	1.7	798 ± 36	7
14	88	60	8.39	0.70	0.066 8	5.1	1.019	5.6	0.110 6	2.3	831 ± 110	19
15	269	77	28.30	0.30	0.063 0	2.4	1.059	2.8	0.121 9	1.5	709 ± 51	-5
YX20-1												
1	391	103	39.90	0.27	0.062 8	1.4	1.024	2.0	0.118 3	1.4	701 ± 30	-3
2	328	309	33.50	0.97	0.064 0	2.0	1.041	2.4	0.118 0	1.4	741 ± 41	3
3	463	189	48.20	0.42	0.063 8	1.0	1.065	1.7	0.121 2	1.4	733 ± 20	-1
4	400	111	41.40	0.29	0.062 5	1.3	1.035	1.9	0.120 2	1.4	690 ± 28	-6
5	242	170	25.30	0.73	0.066 3	1.4	1.110	2.0	0.121 5	1.5	815 ± 29	9
6	680	264	70.90	0.40	0.063 1	1.0	1.055	1.7	0.121 2	1.4	713 ± 20	-3
7	253	194	25.90	0.79	0.062 6	1.7	1.031	2.2	0.119 4	1.5	695 ± 36	-5
8	223	130	23.30	0.60	0.063 3	2.1	1.057	2.6	0.121 1	1.5	717 ± 44	-3
9	431	131	44.90	0.31	0.062 7	1.3	1.044	1.9	0.120 8	1.4	697 ± 27	-6
10	207	160	20.20	0.80	0.052 0	50.0	0.580	50.0	0.080 8	3.3	300 ± 1 100	-69
11	463	189	47.60	0.42	0.062 2	1.4	1.023	2.0	0.119 3	1.4	682 ± 30	-7
12	473	273	50.90	0.60	0.065 8	3.5	1.107	3.8	0.121 9	1.4	801 ± 73	7
13	409	124	42.40	0.31	0.061 3	2.3	1.009	2.7	0.119 3	1.4	651 ± 49	-12

续表 1-1
Continued Table 1-1

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma			不谐和度/%		
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	± %	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	± %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$			
DL36-1														
1	506	409	45.00	0.84	0.063 1	1.8	0.897	2.3	0.103 1	1.4	633 ± 9	711 ± 39	553 ± 11	11
2	47	61	5.00	1.33	0.057 8	12.0	0.960	12.0	0.120 8	2.0	735 ± 14	523 ± 260	677 ± 41	-40
3	59	76	6.03	1.34	0.067 3	4.1	1.114	4.4	0.120 1	1.8	731 ± 12	847 ± 84	709 ± 20	14
4	46	63	4.51	1.41	0.066 0	6.9	1.036	7.7	0.113 9	3.4	695 ± 23	806 ± 140	694 ± 31	14
5	56	72	5.72	1.33	0.065 1	3.0	1.060	3.5	0.118 1	1.8	720 ± 12	777 ± 63	694 ± 18	7
6	50	64	4.89	1.32	0.051 0	13.0	0.770	13.0	0.110 1	2.0	674 ± 13	241 ± 290	623 ± 32	-179
7	59	68	6.17	1.19	0.065 2	5.4	1.084	5.7	0.120 6	1.8	734 ± 13	780 ± 110	723 ± 24	6
8	50	54	6.99	1.11	0.061 0	43.0	1.150	43.0	0.137 1	2.8	828 ± 22	641 ± 920	817 ± 140	-29
9	58	61	5.67	1.10	0.048 9	12.0	0.750	13.0	0.111 2	2.5	680 ± 16	142 ± 290	636 ± 37	-378
10	53	48	5.43	0.94	0.056 8	12.0	0.920	12.0	0.118 0	2.0	719 ± 13	484 ± 260	693 ± 45	-49
11	70	62	7.15	0.91	0.062 0	3.6	1.009	4.2	0.118 1	2.2	720 ± 15	674 ± 77	694 ± 22	-7
12	98	84	9.39	0.88	0.058 9	12.0	0.880	12.0	0.108 3	2.2	663 ± 14	564 ± 250	640 ± 42	-18
14	66	51	7.02	0.80	0.059 7	11.0	1.000	11.0	0.121 4	2.4	739 ± 17	591 ± 230	697 ± 47	-25
15	45	53	4.86	1.21	0.054 0	26.0	0.880	26.0	0.117 7	2.4	717 ± 16	387 ± 590	645 ± 67	-85
17	74	74	7.57	1.03	0.068 9	3.0	1.129	3.5	0.118 9	1.7	724 ± 12	896 ± 63	740 ± 26	19
18	70	53	6.34	0.79	0.057 0	24.0	0.790	24.0	0.101 7	2.4	624 ± 14	475 ± 530	702 ± 91	-31
19	54	62	5.34	1.19	0.066 9	6.0	1.062	6.3	0.115 1	1.9	702 ± 13	835 ± 130	710 ± 25	16
20	61	68	6.22	1.16	0.063 6	6.1	1.035	6.3	0.118 0	1.7	719 ± 12	730 ± 130	694 ± 24	1
21	67	60	6.87	0.92	0.058 2	5.7	0.944	6.0	0.117 5	1.7	716 ± 12	539 ± 120	677 ± 25	-33
22	63	56	6.53	0.92	0.063 7	5.0	1.055	5.3	0.120 1	1.8	731 ± 13	731 ± 100	726 ± 26	0
23	65	89	6.82	1.42	0.060 2	5.9	1.002	6.2	0.120 7	1.7	735 ± 12	611 ± 130	702 ± 21	-20
24	58	76	6.01	1.34	0.066 5	2.6	1.099	3.1	0.119 9	1.8	730 ± 12	823 ± 54	713 ± 19	11
DL41-1														
1	86	45	28.30	0.54	0.122 5	1.0	6.460	2.5	0.382 5	2.4	2 088 ± 42	1 993 ± 17	1 903 ± 59	-5
2	63	44	7.21	0.72	0.066 4	4.6	1.222	5.1	0.133 4	2.2	807 ± 17	820 ± 96	727 ± 51	1
3	88	81	10.30	0.95	0.067 0	2.6	1.258	3.8	0.136 1	2.7	823 ± 21	839 ± 54	738 ± 47	2
4	111	145	12.50	1.36	0.065 4	2.4	1.182	3.2	0.131 2	2.1	795 ± 15	786 ± 51	703 ± 17	-1
5	62	74	7.25	1.23	0.066 1	2.4	1.239	3.2	0.135 9	2.2	822 ± 17	809 ± 50	735 ± 20	-2
6	135	159	15.60	1.22	0.066 1	2.5	1.228	3.2	0.134 7	2.0	815 ± 16	811 ± 53	729 ± 20	0
7	353	327	39.10	0.96	0.064 7	1.2	1.149	2.3	0.128 8	1.9	781 ± 14	765 ± 26	726 ± 18	-2
8	184	45	22.00	0.25	0.067 6	1.3	1.299	3.1	0.139 4	2.8	841 ± 22	856 ± 27	780 ± 26	2

续表 1-2
Continued Table 1-2

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			不谐和度/%
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
					$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$	$\pm\%$				
9	105	110	12.10	1.08	0.065 2	2.0	1.205	2.9	0.134 0	2.1	810 \pm 16	782 \pm 42	740 \pm 30	-4
10	59	43	17.60	0.75	0.108 9	1.7	5.220	3.2	0.347 4	2.7	1 922 \pm 45	1 781 \pm 31	1 722 \pm 64	-8
11	111	76	12.70	0.71	0.062 2	2.7	1.137	3.4	0.132 5	2.1	802 \pm 16	682 \pm 57	776 \pm 24	-18
12	171	191	18.60	1.16	0.065 5	2.1	1.139	3.3	0.126 1	2.5	766 \pm 18	791 \pm 45	753 \pm 23	3
13	109	75	31.60	0.71	0.111 6	1.1	5.180	2.3	0.336 7	2.0	1 871 \pm 33	1 826 \pm 20	1 833 \pm 44	-2
14	81	126	28.90	1.60	0.136 2	1.1	7.740	2.3	0.412 0	2.1	2 224 \pm 39	2 180 \pm 19	2 208 \pm 50	-2
15	69	39	7.79	0.58	0.063 4	4.0	1.141	4.5	0.130 5	2.2	791 \pm 16	721 \pm 85	766 \pm 34	-10
DL43-1														
1	310	178	30.60	0.59	0.062 8	1.8	0.995	2.4	0.114 8	1.5	701 \pm 10	703 \pm 39	667 \pm 15	0
2	339	280	33.90	0.85	0.062 3	1.3	0.997	1.9	0.116 1	1.4	708 \pm 10	683 \pm 27	688 \pm 12	-4
3	281	169	29.40	0.62	0.062 1	1.7	1.041	2.2	0.121 6	1.5	740 \pm 10	676 \pm 36	706 \pm 15	-9
4	338	157	34.80	0.48	0.064 6	1.5	1.068	2.1	0.120 0	1.5	731 \pm 10	760 \pm 32	719 \pm 15	4
5	408	253	41.40	0.64	0.063 2	1.2	1.029	1.9	0.118 0	1.4	719 \pm 10	715 \pm 25	713 \pm 12	-1
6	463	280	47.80	0.63	0.062 2	1.4	1.029	2.0	0.120 0	1.4	731 \pm 10	681 \pm 29	684 \pm 13	-7
7	458	221	41.00	0.50	0.062 9	2.7	0.893	3.1	0.103 0	1.4	632 \pm 9	704 \pm 58	432 \pm 18	10
8	351	213	34.60	0.63	0.063 2	1.3	0.996	1.9	0.114 4	1.4	698 \pm 10	713 \pm 27	675 \pm 13	2
9	357	166	34.70	0.48	0.061 8	1.7	0.962	2.3	0.112 9	1.4	690 \pm 9	668 \pm 37	542 \pm 14	-3
10	242	81	24.10	0.35	0.060 6	3.0	0.965	3.6	0.115 4	2.0	704 \pm 13	627 \pm 64	684 \pm 24	-12
11	373	134	37.30	0.37	0.065 1	1.4	1.044	2.0	0.116 2	1.4	709 \pm 10	779 \pm 30	711 \pm 16	9
12	355	146	34.80	0.43	0.063 7	1.9	0.998	2.4	0.113 6	1.5	694 \pm 10	733 \pm 41	616 \pm 17	5
13	422	177	41.50	0.43	0.061 0	1.7	0.962	2.2	0.114 3	1.5	698 \pm 10	641 \pm 36	653 \pm 16	-9
14	442	235	44.00	0.55	0.062 7	1.1	1.000	1.8	0.115 8	1.4	706 \pm 10	697 \pm 24	697 \pm 12	-1
15	283	236	28.00	0.86	0.062 2	1.7	0.985	2.2	0.114 9	1.5	701 \pm 10	680 \pm 35	683 \pm 13	-3
16	94	54	9.47	0.60	0.064 9	4.2	1.047	4.5	0.117 0	1.7	713 \pm 11	771 \pm 88	625 \pm 28	7
17	224	174	22.50	0.80	0.062 0	1.8	0.997	2.4	0.116 7	1.5	711 \pm 10	673 \pm 39	691 \pm 14	-6
18	336	214	33.20	0.66	0.063 7	1.6	1.007	2.1	0.114 7	1.5	700 \pm 10	730 \pm 33	693 \pm 13	4
19	483	257	47.30	0.55	0.063 1	1.4	0.990	2.0	0.113 7	1.4	694 \pm 9	712 \pm 30	587 \pm 12	2

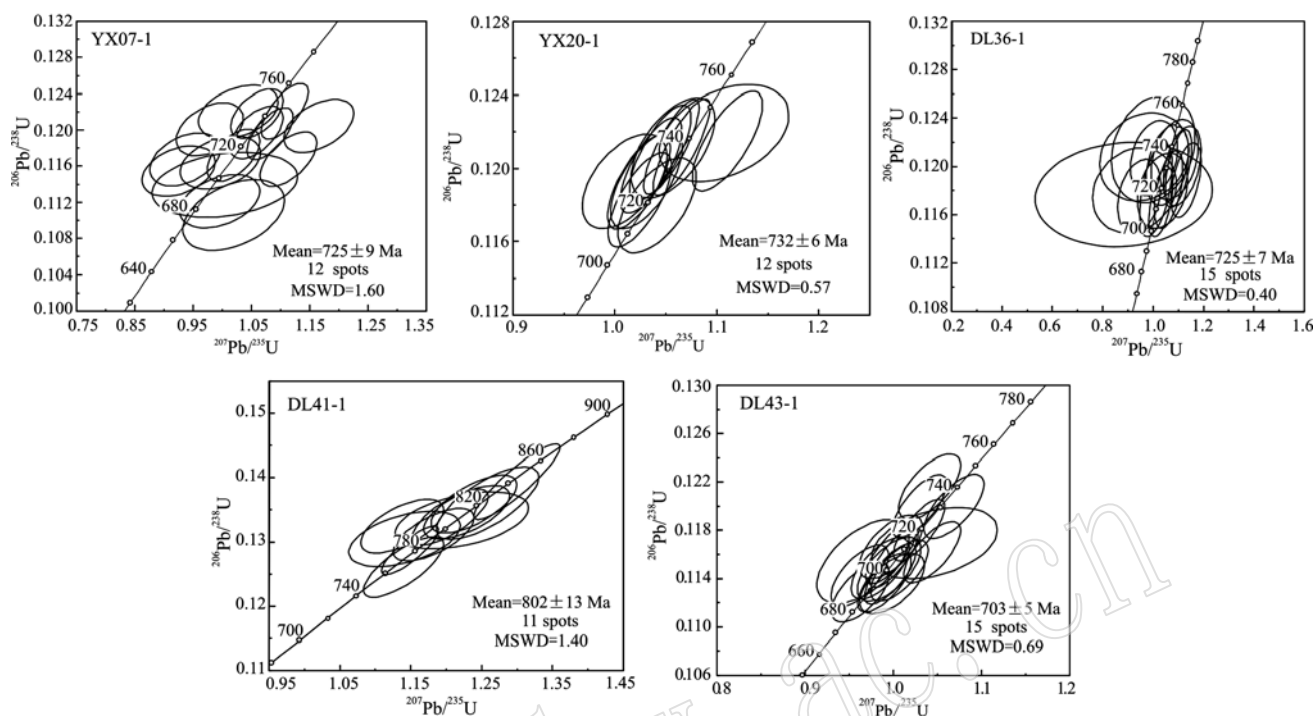


图6 武当群火山岩及花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 SHRIMP U-Pb concordia age diagrams of zircons from the volcanic rocks and granite porphyry of Wudang Group

$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为 0.79 ~ 1.42。22 个分析点中 1 和 12 号测点 U 含量过高, 8 和 18 号测点普通铅含量过高, 均予以剔除, 另 4、6 和 9 号测点锆石具 Pb 丢失现象, 年龄偏小, 剩余 15 个点年龄较集中, 获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $725 \pm 7 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.40)。

样品 DL41-1 锆石较自形, 多为长柱状, 晶体长轴与短轴之比多数为 3:1 ~ 2:1, 锆石阴极发光图像显示锆石发育明显的震荡环带, 为典型的岩浆锆石。此样品共测定了 15 颗锆石的 15 个点, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为 0.25 ~ 1.60。15 个分析点中 1、10、13 和 14 号点的年龄为 2 224 ~ 1 871 Ma (其中 1、10 号测点偏离谐和线), 可能为捕获锆石, 剩余 11 个点均位于谐和线上, 谐和锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $802 \pm 13 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.40)。

样品 DL43-1 锆石较自形, 多为长柱状, 晶体长轴与短轴之比多数为 3:1 ~ 2:1, 锆石阴极发光图像显示锆石发育明显的震荡环带, 为典型的岩浆锆石。此样品共测定了 19 颗锆石的 19 个点, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为 0.35 ~ 0.86。19 个分析点中 7 号点普通铅含量过高, 应予以剔除, 3、4、6 号点年龄为 740 ~ 731 Ma, 可能为来源于武当群的捕获锆石, 剩余 15 个点均位

于谐和线上, 且年龄集中, 谐和锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $703 \pm 5 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.69)。

4 讨论

4.1 武当群形成时代及区域地层对比

在上述测年样品中, 采自西峡-内乡的武当群 (毛堂群姚营寨组) 下部和上部的变质酸性火山岩, 分别获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $802 \pm 13 \text{ Ma}$ (DL41-1) 和 $725 \pm 7 \text{ Ma}$ (DL36-1), 并获得侵入该岩群的花岗斑岩脉锆石 U-Pb 年龄为 $703 \pm 5 \text{ Ma}$ (DL43-1)。这一结果与 Liu 等 (2013) 和祝禧艳等 (2008) 在该区同一套地层所获得的年龄可以很好的相互印证 (图 2a)。Liu 等 (2013) 对采自河南内乡县城西北姚营-黄营剖面的同一套地层 (作者称为耀岭河群下部单元) 的酸性火山岩获得 SIMS 锆石 U-Pb 年龄在 790 ~ 719 Ma 之间, 8 件样品由北到南自下而上年龄依次为 $791 \pm 8 \text{ Ma}$ 、 $784 \pm 5 \text{ Ma}$ 、 $760 \pm 5 \text{ Ma}$ 、 $757 \pm 9 \text{ Ma}$ 、 $747 \pm 5 \text{ Ma}$ 、 $723 \pm 18 \text{ Ma}$ 、 $726 \pm 5 \text{ Ma}$ 和 $719 \pm 6 \text{ Ma}$, 并获得侵入该套地层的花岗岩年龄介于 721 ~ 714 Ma 之间。祝禧艳等 (2008) 于淅川县东北该套地层中获得 4 件变质酸性火山岩的 LA-ICP-MS

锆石 U-Pb 年龄分别为 777 ± 6 Ma、 760 ± 9 Ma、 747 ± 5 Ma 和 726 ± 17 Ma。另外, Liu 等(2013)还在剖面最北端获得经强烈糜棱岩化的变闪长岩锆石 U-Pb 年龄 827 ± 8 Ma。本次工作所获得的变质酸性火山岩 802 ± 13 Ma 的年龄,是目前采用 SHRIMP、LA-ICP-MS 和 SIMS 所测得的武当群最下部的火山岩年龄,该样品距武当群底部不整合接触界线西北直线距离约 1 km,其下部还有数百米的砂砾岩层,而 Liu 等(2013)所获得的 827 ± 8 Ma 糜棱岩化的变闪长岩,则位于姚营-黄营剖面的最北端,与武当群(毛堂群姚营寨组)下部砂砾岩层紧邻。结合不整合于武当群(毛堂群姚营寨组)之下的陡岭杂岩其深达角闪岩-麻粒岩相的变质作用年龄为约 840 ~ 800 Ma(沈洁等, 1997; Ratschbacher *et al.*, 2003; 张寿广等, 2004; 胡娟, 2013; 聂虎, 2016; Hu *et al.*, 2019),可基本确定本区武当群(毛堂群姚营寨组)的下限年龄为约 810 Ma。另据 Liu 等(2013)所获得的该群最上部火山岩 719 ± 6 Ma 年龄,以及侵入该群花岗岩年龄为 721 ~ 705 Ma(Liu and Zhang, 2013; 本次工作),可基本确定西峡-内乡地区的武当群(毛堂群姚营寨组)的时代应介于 810 ~ 720 Ma 之间。

本文采自南化塘长新水库和南赵川武当群火山岩样品 YX07-1 和 YX20-1 分别获得谐和锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 725 ± 9 Ma 和 732 ± 6 Ma。这与近些年一些学者获得的武当和郧西地区武当群变质火山岩 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄也完全吻合(图 1)。这些年龄包括:蔡志勇等(2006)于房山县北五谷庙武当群上部杨坪组变沉积岩组凝灰岩夹层获得锆石 U-Pb 年龄 744 ± 36 Ma; Wang 等(2013)于郧西地区武当群(陕西群)获得的变质火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 726 ± 8 Ma; Ling 等(2008)采自房县榔口、八仙观、丹江口新河镇、竹山县三台和南口等不同地区武当群 5 件变火山岩样品,分别获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 755 ± 3 Ma、 752 ± 3 Ma、 757 ± 2 Ma、 769 ± 3 Ma 和 749 ± 8 Ma,并将 5 件样品谐和锆石年龄加权平均,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 755 ± 3 Ma。另外,侵入武当群的小规模花岗岩和闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 722 ~ 705 Ma(石先滨等, 2014; Wang *et al.*, 2017);侵入武当群基性岩脉的年龄为 715 ~ 650 Ma(Ling *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2015; Li and Zhao, 2016)。从目前所获得的武当和陕西地区武当群变火山岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 769 ~ 720 Ma 来看,武当和陕西地区所

出露的武当群大致相当于西峡-内乡陡岭地区武当群(毛堂群姚营寨组)的中上部层位。这样,就基本确定武当群的形成时代应介于 810 ~ 720 Ma 之间。

近年来对扬子地台新元古代地层已有较详细地研究,通过大量 SHRIMP、LA-ICP-MS 及 SIMS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究,对该区 4 套新元古代地层时限已有很好的界定,其顶界年龄分别为:冷家溪群(包括四堡群、梵净山群、双桥山群和双溪乌群等)为 820 Ma(Li *et al.*, 1999; 王剑等, 2006; 陈文西等, 2007; Wang *et al.*, 2007; 高林志等, 2008, 2010, 2011a, 2011b, 2012, 2014a, 2014b; 马铁球等, 2009; Zhou *et al.*, 2009; 王敏等, 2011, 2012; 孙海清等, 2012; 孟庆秀等, 2013; 张传恒等, 2014);板溪群(包括桂北丹洲群和黔东下江群等)为 720 Ma(Wang *et al.*, 2012; 汪正江等, 2013; Lan *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016; 张启锐等, 2016; 周传明, 2016; 蔡娟娟等, 2018);南华系为 635 Ma(Condon *et al.*, 2005; Yin *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005);震旦系(埃迪卡拉系)时限为 635 ~ 542 Ma。因此,南秦岭武当群的时代并不属于南华系而是板溪群。

这里值得说明的是,张永清等(2013)对采自郧西县城关镇石梯子和郧县桃花沟口 3 件被认为武当群的变质酸性火山岩获得了很好的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据,分别为 679 ± 4 Ma、 668 ± 6 Ma 和 677 ± 4 Ma,并将 3 件变火山岩谐和锆石年龄加权平均,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 675 ± 3 Ma。这一年龄与近年来耀岭河群火山岩所获得的年龄一致:Ling 等(2008)采自陨县桂花乡小学附近和竹山县德胜铺坛山村口耀岭河群变流纹质火山岩所获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 682 ± 6 Ma 和 686 ± 3 Ma;蔡志勇等(2007)对采自檀山、双掌及高庙地区耀岭河群变细碧岩与变流纹岩获得单颗粒锆石 U-Pb 年龄 632 ± 1 Ma;Liu 等(2013)获得作者划归耀岭河群上部单元(实为毛堂群马头山组)流纹质凝灰岩锆石 SIMS 年龄 635 ± 6 Ma。这似乎说明张永清等(2013)所获得的 675 ± 3 Ma 的变质酸性火山岩很可能并不属于武当群的地层。鉴于该区断裂构造发育,武当群与耀岭河群之间也多为断层接触,不排除部分地区的武当群中夹杂有耀岭河群的构造岩块,这些较年轻的变质酸性火山岩很可能为由断裂作用而夹杂于武当群中的耀岭河群地层。

最近,邓乾忠等(2016)对武当-随枣地区原耀岭

河群进行了较为详细地研究,认为它是一套裂谷系双峰式火山岩系与冰成岩组合的岩石地层系统,按其岩性组合分为:下部高庙组,为含砾的碎屑岩(含冰成岩)和火山岩(主要为基性火山岩);中部木渣沟组,为变拉斑玄武岩夹酸性火山岩;上部前院组,为双峰式火山碎屑岩组合,并获得高庙组和前院组变酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄为 645 ± 9 Ma 和 636 ± 6 Ma。关于耀岭河群存在冰水沉积,刘鸿允(1991)指出耀岭河群底部砾岩具有冰成岩包括“落石”构造特征,当属冰海相沉积层;王寿琼等(1989)提出耀岭河群下部含砾层是大陆冰盖运移向海洋,并在海面上浮的冰筏携带的冰碛物成为落石与海底火山喷发物及其它海水沉积物混生而成的冰海相沉积;夏竹(1995)认为耀岭河群含砾岩系应为冰筏-海相火山沉积物。因此,位于武当群与震旦系之间的耀岭河群无论从地层时代和沉积环境都可与南华系对比。

4.2 地质意义

武当群时代的确定,证实武当群与下伏陡岭杂岩之间的不整合面,与莲沱组与下伏崆岭群之间和板溪群(下江群、丹洲群)与下伏冷家溪群(梵净山群、四堡群)之间的不整合面所代表的构造运动实属同一期运动——晋宁运动,其发生时限大致在 830 ~ 820 Ma 之间。

一般认为经晋宁构造运动之后,扬子地台开始了海相盖层的沉积,但是从整体看仍具有很强的活动性,在扬子地台发育了板溪期和南华期不同阶段的裂解(裂谷)盆地沉积(王剑等, 2006, 2009),其中无论是板溪群(下江群、丹洲群)还是武当群都表现为一套巨厚的类复理石特征的火山-沉积岩系。南秦岭耀岭河群变质火山岩-沉积岩系,其火山岩以变中基性火山岩为主,含少量酸性火山岩,被认为属双峰式组合,其基性火山岩为板内拉斑玄武岩-偏碱性玄武岩组合,形成于很强的板内拉张裂谷环境(苏春乾等, 2006)。此外,尽管耀岭河群与下伏武当群之间接触关系目前存在着断层(苏春乾等, 2006)、平行不整合(夏林圻等, 2008)或角度不整合(胡建民等, 1998)等多种不同认识,但其两者所经受的变质基本相似,岩石普遍遭受绿片岩相变质,而与其上覆基本未变质的以碳酸盐岩为主的震旦系稳定盖层沉积具有明显的差异,可能属于不同的构造层。这里值得注意的是,以往多认为震旦系陡山沱组碎屑岩与下伏耀岭河群之间为平行不整合接触,但是笔者在南秦岭北缘小茅岭地区见到陡山沱组含砾长石

石英砂岩不整合覆盖在小茅岭火山岩(880 Ma)之上(刘仁燕, 2011),这说明,至少在南秦岭地区震旦系陡山沱组与下伏地层之间,可能为区域性不整合接触。因此,认为南秦岭地区的基底最终形成于震旦系之前,这也是扬子地台最终统一基底的形成时间。

5 结论

(1) 武当群的时代为新元古代中晚期,年龄介于 810 ~ 720 Ma 之间;耀岭河群形成时代为 690 ~ 635 Ma,分别相当于扬子地台板溪群和南华系。

(2) 武当群与耀岭河群变质特征相近,而与震旦系地层具有明显差异,表明南秦岭基底最终固结发生在震旦纪之前,这可能也是扬子地台最终形成的时代。

致谢 感谢中国地质科学院地质力学研究所胡建民研究员在野外工作期间的大力指导和帮助,感谢评审人对稿件提出的宝贵修改意见。

References

- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1~2): 155~170.
- Cai Juanjuan, Cui Xiaozhuang, Lan Zhongwu, *et al.* 2018. Onset time and global correlation of the Cryogenian glaciations in Yangtze Block, South China[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(1): 65~86(in Chinese with English abstract).
- Cai Zhiyong, Luo Hong, Xiong Xiaolin, *et al.* 2006. A discussion on the age of the meta-sedimentary rocks in the upper part of the Wudang Group: Constrained by the grain-zircon U-Pb dating[J]. *Journal of Stratigraphy*, 30(1): 60~63(in Chinese with English abstract).
- Cai Zhiyong, Xiong Xiaolin, Luo Hong, *et al.* 2007. Forming age of the volcanic rocks of the Yaolinghe Group from Wudang block, southern Qinling Mountain: Constraint from grain-zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 620~625(in Chinese with English abstract).
- Chen Wenxi, Wang Jian, Fu Xiugen, *et al.* 2007. Sedimentary characteristics of the Jialu Formation and its underlying granite's U-Pb zircon age in southeast Guizhou, China[J]. *Geological Review*, 53(1): 126~131(in Chinese with English abstract).

- Condon D, Zhu Maoyan, Bowring S, *et al.* 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. *Science*, 308: 95 ~ 98.
- Deng Qianzhong, Yang Qingxiong, Mao Xinwu, *et al.* 2016. Study of lithostratigraphic sequences and chronology of middle-late Nanhua in Wudang-Suizhou area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 30(2): 132 ~ 142(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Chen Jianshu, Dai Chuangu, *et al.* 2014a. SHRIMP zircon U-Pb dating of tuff in Fanjingshan Group and Xiajiang Group from Guizhou and Hunan Provinces and its stratigraphic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(7): 949 ~ 959(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Chen Jun, Ding Xiaozhong, *et al.* 2011b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed of Lengjiaxi and Banxi groups, northeastern Hunan: Constraints on the Wuling Movement[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1 001 ~ 1 008(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Dai Chuangu, Liu Yanxue, *et al.* 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of tuff bed of the Sibao Group in southeastern Guizhou-northern Guangxi area, China and its stratigraphic implication[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(9): 1 259 ~ 1 267(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, *et al.* 2011a. SHRIMP zircon U-Pb dating of metamorphic tuff from the Precambrian Cangxi Complex Group in northeastern Hunan[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1 479 ~ 1 484(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Huang Zhizhong, Ding Xiaozhong, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Xiushui and Majianqiao Formations in northwestern Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1 086 ~ 1 093(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China—Constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1 744 ~ 1 751(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Heng, Ding Xiaozhong, *et al.* 2014b. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Jiangshan-Shaoxing faulted zone in Zhejiang and Jiangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(6): 763 ~ 775(in Chinese with English abstract).
- Henan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional Geology of Henan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 698(in Chinese).
- Henan Geological Bureau. 1965. Geological Map Manual for Neixiang Sheet, Scale 1:200 000[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 348(in Chinese).
- Hu Jianmin, Song Zixin and Guo Liyu. 1998. Geotectonic evolution in Nanhuatang area, northern Wudangshan[J]. *Hubei Geology and Mineral Resources*, 12(1): 13 ~ 21(in Chinese with English abstract).
- Hu Juan. 2013. Study on Metamorphism and Geochronology of the Douling Complex, South Qinling Orogen[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Hu Juan, Liu Xiaochun, Qu Wei, *et al.* 2019. Mid-Neoproterozoic amphibolite facies metamorphism at the northern margin of the Yangtze craton[J]. *Precambrian Research*, 326: 333 ~ 343.
- Lan Zhongwu, Li Xianhua, Zhu Maoyan, *et al.* 2014. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations[J]. *Precambrian Research*, 255: 401 ~ 411.
- Li Qiwei and Zhao Junhong. 2016. Petrogenesis of the Wudang mafic dikes: implications for changing tectonic settings in the South China during the Neoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 272: 101 ~ 114.
- Li Xianhua. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly[J]. *Precambrian Research*, 97(1 ~ 2): 43 ~ 57.
- Liang Chuanmao. 1990. Stratigraphic division and correlation of the middle and upper Proterozoic in the middle section of the northern margin of the Yangtze platform[J]. *Regional Geology of China*, 1: 60 ~ 68(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Cheng Jianping, Wang Xinhua, *et al.* 2002. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 25 ~ 36(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Ren Bangfang, Duan Ruichun, *et al.* 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 2 191 ~ 2 199.
- Liu Hongyun. 1991. Tectonic, paleogeographic and sedimentary evolution of late Precambrian in China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 309 ~ 316(in Chinese with English abstract).
- Liu Jingbo and Zhang Lingmin. 2013. Neoproterozoic low to negative ^{18}O volcanic and intrusive rocks in the Qinling Mountains and their geologic

- ical significance[J]. *Precambrian Research*, 230: 138 ~ 167.
- Liu Renyan. 2011. The Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Implication of the Xiaomaoling Composite Intrusives in Zhashui, Shaanxi[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenghua. 2009. SHRIMP Dating and Geotectonic Features of Maotang Group in West Henan and Their Constraints on the Breakup of Yangtze block[D]. Beijing: Chinese University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Squid 1. 02: A User's Manual[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre Special Publication.
- Ma Tieqiu, Chen Lixin, Bai Daoyuan, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP dating and geochemical characteristics of Neoproterozoic granites in southeastern Hunan[J]. *Geology in China*, 36(1): 65 ~ 73(in Chinese with English abstract).
- Meng Qingxiu, Zhang Jian, Geng Jianzhen, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age and Hf isotope compositions of Lengjiaxi and Baxi Groups in middle Hunan Province: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution in South China[J]. *Geology in China*, 40(1): 191 ~ 216(in Chinese with English abstract).
- Nie Hu. 2016. Tectonothermal Events and Crustal Evolution in the Eastern South Qinling block[D]. Anhui: University of Science and Technology of China(in Chinese with English abstract).
- Qin Zhengyong and Lei Shihe. 1996. New information on the ages of the Wudang Group-with a discussion[J]. *Regional Geology of China*, 2: 176 ~ 185(in Chinese with English abstract).
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, *et al.* 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history[J]. *Tectonophysics*, 366: 1 ~ 53.
- Shen Jie, Zhang Zongqing and Liu Dunyi. 1997. Sm-Nd, Rb-Sr, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of the Douling metamorphic complex from eastern Qinling orogenic belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 248 ~ 254(in Chinese with English abstract).
- Shi Xianbin and Deng Qianzhong. 2014. The formation age of the granite-porphyry and its geological significance in Shiyazi of Fang county[J]. *Resources Environment & Engineering*, 28(6): 835 ~ 840(in Chinese with English abstract).
- Su Chunqian, Hu Jianmin, Li Yong, *et al.* 2006. The existence of two different tectonic attributes in Yaolinghe Group in South Qinling region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 287 ~ 298(in Chinese with English abstract).
- Sun Haiqing, Huang Jianzhong, Guo Lequn, *et al.* 2012. Subdivision and isotopic age of Lengjiaxi Group in Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(1): 21 ~ 26(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian and Pan Guitang. 2009. Neoproterozoic South China paleocontinents: An overview[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 818 ~ 825(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Zeng Shaoguang, Chen Wenxi, *et al.* 2006. The Neoproterozoic rift systems in southern China: New evidence for the sedimentary onlap and its initial age[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(4): 1 ~ 7(in Chinese with English abstract).
- Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, *et al.* 2013. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution[J]. *Gondwana Research*, 23: 1261 ~ 1272.
- Wang Min, Dai Chuangu, Wang Xuehua, *et al.* 2011. In-situ zircon geochronology and Hf isotope of muscovite-bearing leucogranites from Fanjingshan, Guizhou Province, and constraints on continental growth of the Southern China block[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 213 ~ 223(in Chinese with English abstract).
- Wang Min, Dai Chuangu, Wang Xuehua, *et al.* 2012. Sedimentation age of the Fanjingshan Group in east Guizhou Province: evidence from in-situ zircon LA-ICP-MS U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(6): 843 ~ 857(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruirui, Xu Zhiqin and Santosh M. 2019. Neoproterozoic magmatism in the northern margin of the Yangtze Block, China: Implications for slab rollback in a subduction-related setting[J]. *Precambrian Research*, 327: 176 ~ 195.
- Wang Ruirui, Xu Zhiqin, Santosh M, *et al.* 2017. Middle Neoproterozoic (ca. 705 ~ 716 Ma) arc to rift transitional magmatism in the northern margin of the Yangtze Block: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Journal of Geodynamics*, 109: 59 ~ 74.
- Wang Shouqiong, Zhou Junhua and Hu Wenhui. 1989. Volcano-glacier deposits and their stratigraphic significance of Yaolinghe Group in Wudang area, Hubei Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 13(1): 14 ~ 22(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Griffin W L, *et al.* 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 159(1 ~ 2): 117 ~ 131.
- Wang Xuance, Li Xianhua, Li Zhengxiang, *et al.* 2012. Episodic Precambrian crust growth: Evidence from U-Pb ages and Hf-O isotopes of

- zircon in the Nanhua Basin, central South China[J]. *Precambrian Research*, 222 ~ 223: 386 ~ 403.
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Du Qiuding, *et al.* 2016. Geochronological and geochemical evidence for the sedimentary transformation from the Banxi period to Nanhua glacial period[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(5): 1 915 ~ 1 916.
- Wang Zhengjiang, Xu Xiaosong, Du Qiuding, *et al.* 2013. Discussion on the bottom of Nanhua System: Evidences from sedimentology and isotopic geochronology[J]. *Advances in Earth Science*, 28(4): 477 ~ 489(in Chinese with English abstract).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. *Applications of Micro-Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [C]. Colorado: Review in *Economical Geology*, 7: 1 ~ 35.
- Wu Yuanbao, Zhou Guangyan, Gao Shan, *et al.* 2014. Petrogenesis of Neoproterozoic TTG rocks in the Yangtze Craton and its implication for the formation of Archean TTGs[J]. *Precambrian Research*, 254: 73 ~ 86.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, *et al.* 2008. Petrogenesis of the Yaolinghe Group, Yunxi Group, Wudangshan Group volcanic rocks and basic dyke swarms from eastern part of the South Qinling mountains[J]. *Northwestern Geology*, 41(3): 1 ~ 29(in Chinese with English abstract).
- Xia Zhu. 1995. A discussion on sedimentary characteristics and stratigraphic time of Yaolinghe Group in Gucheng, Hubei[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 22(1): 89 ~ 95(in Chinese with English abstract).
- Yin Chongyu, Tang Feng, Liu Yongqing, *et al.* 2005. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China: Constraints on the age of Marinoan glaciations[J]. *Episodes*, 28(1): 48 ~ 49.
- Zhang Chengli, Li Miao, Wang Tao, *et al.* 2004. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of granitoids in the Douling group in the eastern Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 83 ~ 95.
- Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Shi Xiaoying, *et al.* 2014. SHRIMP age of the volcanic rocks from the Fanjingshan Group and its chronostratigraphic significances[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 139 ~ 143(in Chinese with English abstract).
- Zhang Juan, Zhang Hongfu and Li Long. 2018. Neoproterozoic tectonic transition in the South Qinling Belt: New constraints from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of diorites from the Douling Complex[J]. *Precambrian Research*, 306: 112 ~ 128.
- Zhang Qirui and Lan Zhongwu. 2016. An update on the chronostratigraphy of the Nanhuan System[J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(3): 297 ~ 301(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Zhang Junming, *et al.* 2005. U-Pb sensitive high resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in South China: Constraints on late Neoproterozoic glaciations[J]. *Geology*, 33(6): 473 ~ 476.
- Zhang Shouguang, Zhang Zongqing, Song Biao, *et al.* 2004. On the existence of Neoproterozoic materials in the Douling Complex, eastern Qinling—Evidence from U-Pb SHRIMP and Sm-Nd geochronology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 800 ~ 806(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqing, Zhang Jian, Li Huaikun, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology of the meta-acid volcanic rocks from the Wudang Group, southern Qinling Mountains, central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 922 ~ 930(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei and Tang Suohan. 2002. *Geochronology of Metamorphic Strata in the South Qinling Mountains*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 256(in Chinese).
- Zhou Chuanming. 2016. Neoproterozoic lithostratigraphy and correlation across the Yangtze block, South China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(2): 120 ~ 135(in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingwu, Zhang Chengli, Liu Liang, *et al.* 1998. Sm-Nd dating of basic dykes from Wudang block and a discussion of related questions[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(1): 25 ~ 29(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei and Qiu Jiansheng. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation[J]. *Precambrian Research*, 170: 27 ~ 42.
- Zhu Jie, Liu Zaoxue and Yang Meihua. 1998. Division and structural characteristics of Wudangshan Group Complex in northwestern Hubei[J]. *Hubei Geology and Mineral Resources*, 12(3): 9 ~ 15(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyan. 2010. *Evolution and Provenance of the Basement in the Eastern Qinlin Orogen, China: Evidence from Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology*[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyan, Chen Fukun, Liu Bingxiang, *et al.* 2015. Geochemistry and zircon ages of mafic dikes in South Qinling, central China: Evidence for late Neoproterozoic continental rifting in northern Yangtze block

[J]. International Journal of Earth Science, 104: 27~44.

Zhu Xiyun, Chen Fukun, Wang Wei, *et al.* 2008. Zircon U-Pb ages of volcanic and sedimentary rocks of the Wudang Group in the Qinling Orogenic Belt within western Henan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(6): 817~829(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡娟娟, 崔晓庄, 兰中伍, 等. 2018. 华南扬子陆块成冰纪冰川作用的启动时限及其全球对比[J]. 古地理学报, 20(1): 65~86.

蔡志勇, 罗洪, 熊小林, 等. 2006. 武当群上部变沉积岩组时代归属问题: 单锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地层学杂志, 30(1): 60~63.

蔡志勇, 熊小林, 罗洪, 等. 2007. 武当地块耀岭河群火山岩的时代归属: 单锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地质学报, 81(5): 620~625.

陈文西, 王剑, 付修根, 等. 2007. 黔东南新元古界下江群甲路组沉积特征及其下伏岩体的锆石 U-Pb 年龄意义[J]. 地质论评, 53(1): 126~131.

邓乾忠, 杨青雄, 毛新武, 等. 2016. 湖北武当-随枣地区中-晚南华世岩石地层序列与年代学研究[J]. 资源环境与工程, 30(2): 132~142.

高林志, 陈建书, 戴传固, 等. 2014a. 黔东南梵净山群与下江群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 33(7): 949~959.

高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 2011b. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄——对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 30(7): 1 001~1 008.

高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 2010. 黔东南-桂北地区四堡群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质通报, 29(9): 1 259~1 267.

高林志, 丁孝忠, 庞维华, 等. 2011a. 湘东北前寒武纪沅溪群变凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 30(10): 1~6.

高林志, 黄志忠, 丁孝忠, 等. 2012. 赣西北新元古代修水组和马洞桥组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 31(7): 1 086~1 093.

高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 2008. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约[J]. 地质通报, 27(10): 1 744~1 751.

高林志, 张恒, 丁孝忠, 等. 2014b. 江山-绍兴断裂带构造格局的新元古代 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 地质通报, 33(6): 763~775.

河南省地质局. 1965. 内乡幅(149-28)1: 20 万地质图说明书[M].

北京: 地质出版社, 1~348.

河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~698.

胡建民, 宋子新, 郭力宇. 1998. 武当山北部南化塘地区地质构造演化过程[J]. 湖北地矿, 12(1): 13~21.

胡娟. 2013. 南秦岭陡岭杂岩的变质作用及年代学研究[D]. 北京: 中国地质科学院.

梁传茂. 1990. 扬子地台北缘中段中、晚元古代地层划分与对比[J]. 中国区域地质, 1: 60~68.

凌文黎, 程建萍, 王歆华, 等. 2002. 武当地区新元古代岩体地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示[J]. 岩石学报, 18(1): 25~36.

刘鸿允. 1991. 中国晚前寒武纪构造、古地理与沉积演化[J]. 地质科学, 4: 309~316.

刘仁燕. 2011. 陕西柞水小茅岭复式岩体年代学、地球化学及构造意义研究[D]. 北京: 中国地质科学院.

刘征华. 2009. 豫西毛堂群 SHRIMP 定年、大地构造属性及其对扬子地块裂解的约束[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

马铁球, 陈立新, 柏道远, 等. 2009. 湘东北新元古代花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国地质, 36(1): 65~73.

孟庆秀, 张健, 耿建珍, 等. 2013. 湘中地区冷家溪群和板溪群锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及对华南新元古代构造演化的意义[J]. 中国地质, 40(1): 191~216.

聂虎. 2016. 南秦岭东段构造热事件与地壳演化[D]. 安徽: 中国科学技术大学.

秦正永, 雷世和. 1996. 武当群成岩年龄新资料兼讨论[J]. 中国区域地质, 2: 176~185.

沈洁, 张宗清, 刘敦一. 1997. 东秦岭陡岭群变质杂岩 Sm-Nd、Rb-Sr、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄[J]. 地球学报, 18(3): 248~254.

石先滨, 邓乾忠. 2014. 房县石垭子花岗斑岩的形成时代及其地质意义[J]. 资源环境与工程, 28(6): 835~840.

苏春乾, 胡建民, 李勇, 等. 2006. 南秦岭地区存在两种不同构造属性的耀岭河群[J]. 岩石矿物学杂志, 25(4): 287~298.

孙海清, 黄健中, 郭乐群, 等. 2012. 湖南冷家溪群划分及同位素年龄约束[J]. 华南地质与矿产, 28(1): 21~26.

汪正江, 许效松, 杜秋定, 等. 2013. 南华冰期的底界讨论: 来自沉积学与同位素年代学证据[J]. 地球科学进展, 28(4): 477~489.

王剑, 潘桂堂. 2009. 中国南方古大陆研究进展与问题评述[J]. 沉积学报, 27(5): 818~825.

- 王 剑, 曾昭光, 陈文西, 等. 2006. 华南新元古代裂谷系沉积超覆作用及其开启年龄新证据[J]. 沉积与特提斯地质, 26(4): 1~7.
- 王 敏, 戴传固, 王雪华, 等. 2011. 贵州梵净山白云母花岗岩锆石年代、铅同位素及对华南地壳生长的制约[J]. 地学前缘, 18(5): 213~223.
- 王 敏, 戴传固, 王雪华, 等. 2012. 贵州梵净山群沉积时代——来自原位锆石 U-Pb 测年证据[J]. 岩石矿物学杂志, 31(6): 843~857.
- 王寿琼, 周骏华, 胡文虎. 1989. 湖北武当地区耀岭河群火山-冰川沉积及其地层意义[J]. 地层学杂志, 13(1): 14~22.
- 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 2008. 南秦岭东段耀岭河群、陨西群、武当山群火山岩和基性岩墙群岩石成因[J]. 西北地质, 41(3): 1~29.
- 夏 竹. 1995. 湖北谷城耀岭河群沉积特征与地层时代探讨[J]. 成都理工学院学报, 22(1): 89~95.
- 张传恒, 高林志, 史晓颖, 等. 2014. 梵净山群火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其年代地层学意义[J]. 地学前缘, 21(2): 139~143.
- 张启锐, 兰中伍. 2016. 南华系、莲沱组年龄问题的讨论[J]. 地层学杂志, 40(3): 297~301.
- 张寿广, 张宗清, 宋 彪, 等. 2004. 东秦岭陡岭杂岩中存在新太古代物质组成——SHRIMP 锆石 U-Pb 和 Sm-Nd 年代学证据[J]. 地质学报, 78(6): 800~806.
- 张永清, 张 健, 李怀坤, 等. 2013. 南秦岭武当群变质酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质学报, 87(7): 922~930.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京: 地质出版社, 1~256.
- 周传明. 2016. 扬子区新元古代前震旦系地层对比[J]. 地层学杂志, 40(2): 120~135.
- 周鼎武, 张成立, 刘 良, 等. 1998. 武当地块基性岩墙群的 Sm-Nd 定年及其相关问题讨论[J]. 地球学报, 19(1): 25~29.
- 朱 杰, 刘早学, 杨美华. 1998. 鄂西北武当山岩群的划分及构造特征[J]. 湖北地矿, 12(3): 9~15.
- 祝禧艳. 2010. 东秦岭造山带基底演化与属性: 地球化学和年代学证据[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 祝禧艳, 陈福坤, 王 伟, 等. 2008. 豫西地区秦岭造山带武当群火山岩和沉积岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 地球学报, 29(6): 817~829.